

PERMANENT OCEAN-BOTTOM SEISMOGRAPH
OBSERVATION SYSTEM

By
SEISMOLOGY AND VOLCANOLOGY
RESEARCH DIVISION, MRI

気象研究所技術報告

第4号

海底地震常時観測システムの開発

気象研究所地震火山研究部

気象研究所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN

MARCH 1980

Meteorological Research Institute

Established in 1946

Director : Dr. J. Kobayashi

Forecast Research Division	Head : Dr. E. Uchida
Typhoon Research Division	Head : Mr. S. Fujiwhara
Physical Meteorology Research Division	Head : Mr. J. Kubo
Applied Meteorology Research Division	Head : Dr. Y. Kikuchi
Meteorological Satellite Research Division	Head : Dr. K. Naito
Seismology and Volcanology Research Division	Head : Dr. N. Den
Oceanography Research Division	Head : Dr. T. Nan'niti
Upper Atmosphere Physics Research Division	Head : Dr. M. Misaki
Geochemistry Research Division	Head : Dr. K. Saruhashi

1-1, Nagamine, Yatabe-machi, Tsukuba-gun, Ibaraki-ken, 305, Japan

Technical Reports of the Meteorological Research Institute

Editor-in-chief : Dr. E. Uchida

Editors : Dr. T. Tokioka Mr. T. Furukawa Mr. S. Ōtsuka
 Dr. N. Yasuda Dr. T. Takashima Dr. M. Katsumata
 Dr. I. Isozaki Dr. K. Murai Dr. Y. Sugimura

Managing Editors : Mr. Y. Kojima Mr. M. Matsushita

Technical Reports of the Meteorological Research Institute

has been issued at irregular intervals by the Meteorological Research Institute since 1978 as a medium for the publication of survey articles, technical reports, data reports and review articles on meteorology, oceanography, seismology and related geosciences, contributed by the members of the MRI.

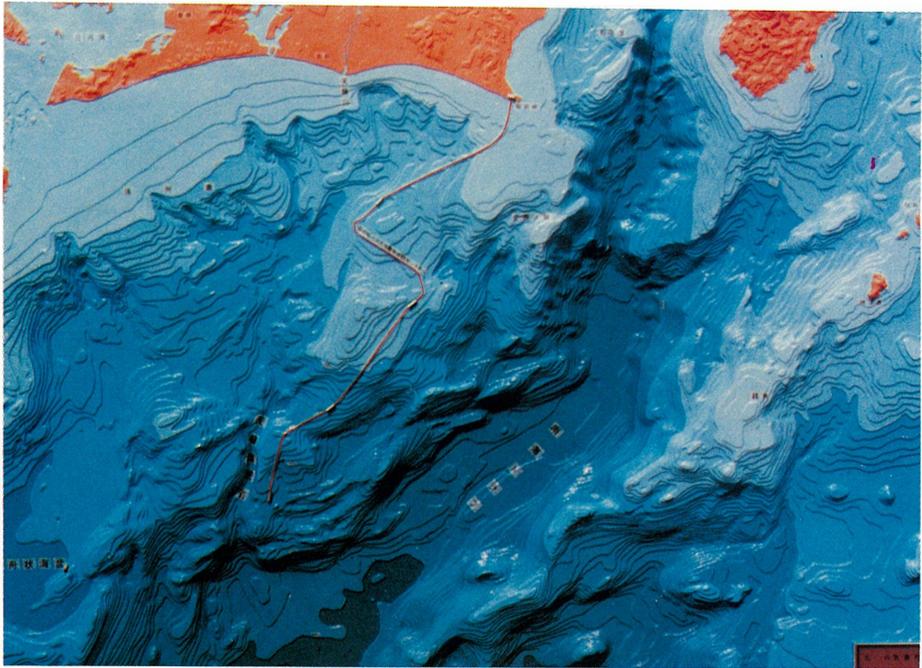


写真1 東海沖の海底地形と海底地震常時観測システム
Photo.1 Topography off the Tokai District and the System



写真2 海岸中継所局舎
Photo.2 Shore station

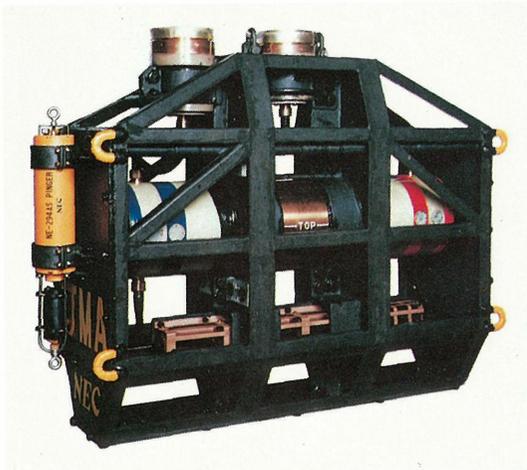


写真 3 先端装置
Photo. 3 Terminal apparatus

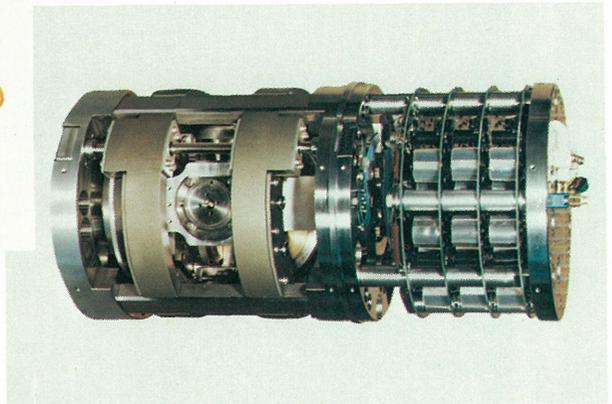


写真 4 先端装置用地震計
Photo. 4 Seismograph for the terminal apparatus



写真 5 海底ケーブル陸揚げ工事
Photo. 5 Landing of the submarine cable



写真 6 海岸中継所内の機器
Photo. 6 Apparatus in the shore station

序

過日東北地方を襲った1978年宮城県沖地震に見られるごとく、近年の都市の過密化や社会機構の複雑化に伴い、地震による災害は国民の生命財産の保全に深刻な影響を与えるものとなってきた。このため、関係諸機関は、地震防災に、或いは地震予知に鋭意努力を傾けており、気象庁においても、地震および地殻変動の観測網を整備し、それらの資料伝送および処理解析等の体制の強化に努めている。

大規模地震の多くは、周辺海域で発生するので、海底で地震を観測しその活動を監視することは、地震を予知し地震災害の防止・軽減をはかる上で極めて重要なことであるが、従来技術的困難さからその実現は遠い将来のことと思われていた。しかし年と共に国民の地震予知に対する要望も強まり、これに応えるために測地学審議会は、第3次地震予知計画の建議において、気象庁が海底地震計の開発とそれによる業務的観測への努力をなすよう要請することとなった。これを受けて気象庁は、この難問解決にあたることを決定し、気象研究所地震火山研究部において、特別研究「海底地震常時観測システムの研究」として昭和49年度より研究開始することとなった。この研究の重要性から、その発足に当たって気象庁は、研究会議に海底地震計開発部会を設けて研究推進の指導に当たり、また本庁および東京管区気象台の関係部課が協力するなどの全庁的な支援体制を整えた。

この特別研究の遂行に当たって、地震火山研究部では諏訪彰研究部長が主任研究者となり、また53年度には田望研究部長がこれを引継いで、強力な研究陣を擁して作業を進めた。海底ケーブルによる群列方式の海底地震常時観測システムは世界でも初めての試みであり、その仕事はすべて未経験の領域の開拓であった。したがって、道のりは決して平坦なものではなかったが、関係者の並々ならぬ努力により、54年3月には全システムの完成を迎えることができた。そしてこのシステムは同年4月より気象庁が実施している地震観測業務の一環に組み入れられた。

この5ヶ年計画の研究を遂行している間、53年には大規模地震対策特別措置法が制定、公布され、気象庁は地震予知に重い責任を負うこととなった。この法律に基き、強化地域に指定された東海地域では、現在陸上に多数設置された地震計および歪計などと共に、この海底地震常時観測システムが地震活動の観測・監視に活躍している。

本報告を発刊するに当たって、システムの研究開発に献身的努力をばらわられた関係者の方々に深甚なる謝意を表すると共に、このシステムによる観測成果と、この報告が国民の強い要望である地震予知の実現に多大の寄与をするものと期待している。大方の御批判を仰ぐことができれば幸いである。

昭和54年11月

気象研究所長 小林 壽太郎

海底地震常時観測システムの開発

目 次

序		
概 要(和文)	.....	1
アブストラクト(英文)	.....	5
第 1 章 ま え が き	.....	11
1. 東海地域の地震予知について	.....	11
2. プロジェクト発足まで	.....	13
3. 開発研究遂行の体制	.....	14
4. システムの完成とその役割	.....	15
第 2 章 機器の開発・製作	.....	18
1. 方式設計	.....	18
2. 海底部機器	.....	38
3. 陸上部機器	.....	59
第 3 章 布 設	.....	71
1. 布設ルート	.....	71
2. 沿岸海底地形調査	.....	80
3. 布設工事施工法開発とそのリハーサル	.....	87
4. 本布設工事	.....	97
第 4 章 陸上施設	.....	121
1. 海岸中継所	.....	121
2. 管 路	.....	129
3. 海岸アース	.....	132
第 5 章 試験観測	.....	139
1. 地震計成分の試験観測	.....	139
2. 津波計の試験観測	.....	150
3. 給電電圧変化の監視観測	.....	153
第 6 章 システム開発に関連する調査・研究	.....	158
1. 関 連 研 究	.....	158
2. 設計確認に関するメーカーとの協同作業	.....	202
3. センサー部の開発に関連した部分	.....	207

第7章	あとがき	223
1.	本特別研究の終了に当って	223
2.	謝 辞	223
3.	技術報告書をまとめるにあたって	226
付 記		228
付 1.	海底地震計開発部会	228
付 2.	海底地震常時観測システムに関する調査と工事報告書	233

海底地震常時観測システムの開発

気象研究所地震火山研究部

概 要

有史以来、広域にわたり大災害をもたらしてきたマグニチュード8クラスの巨大地震は、太平洋岸と日本海溝・南海トラフ等の中の、プレートの境界に発生してきた。これらの巨大地震はこれからもこの海域で、くりかえして発生するものと考えられる。従って、これらを予知するためにはその海域における小地震の活動度を監視してゆくことが必要である。気象庁をはじめ各大学では数百ヶ所で地震の常時観測を行っているが、その地震計はすべて陸上に設置されているものばかりで、海域に発生する小地震については、震源の決定精度、検知力とも、必ずしも充分とは言えない。

碇置きあるいは自己浮上式の海底地震計を用いれば海域における観測を行うことは可能である。しかし、仮にこの海底地震計が大地震直前の前兆的地震活動をとらえることができたとしても、われわれはそのことをただちに知ることはできないので、地震警報を発表する上では、場合によっては役に立たない。このような情勢下で、海域におけるリアルタイムの常時観測システムの開発が切望されていた。

気象庁は、そのようなシステムを開発し、海域での小地震の活動度を監視しようと計画した。本誌で述べるシステムは第3次地震予知5ヶ年計画（1974-78年度）の主要な柱のひとつとして気象研究所により開発されたものである。システムを布設する海域には東海沖が選ばれた。

日本の地震学者の多くは東海沖に大地震がおきるものと考えている。それゆえ、東海地方とその周辺（静岡県、山梨県の大部分、神奈川県西部、長野・愛知・岐阜3県の一部）は大規模地震対策特別措置法により地震防災対策強化地域に指定された（1979年8月）。

全システムは完成後、気象庁に移管され定常的に運用されている。地震の常時観測と地震予知情報の報告に責任のある気象庁は、同様のシステムを三陸沖、相模湾から房総沖、四国沖に布設することを計画している。これらの地域は東海沖と同様に、くりかえし巨大地震が発生している地域である。

本誌はシステム開発の技術報告書である。他の海域に布設するためにシステムの改良を行う時の助けとなるであろう。

第1章では予知計画の中においてこのシステムの占める位置について述べる。

第2章ではシステムデザインと新たに開発された機器とについて述べる。システムは陸上部システムと海底部システムとで構成されているが、後者の信頼性は非常に高く、1成分当りの平均故障間隔は100年と見積られている。後者は海底同軸ケーブルの末端にとりつけられた先端装置と、そのケーブルで直列に、陸上に至るまでつながれた3台の中間点装置で構成される。前者は海岸中継所（御前崎測候所）に設置された受信・中継装置、陸上電話回線、観測中枢（気象庁地震課）に設置された受信・処理装置で構成され

る。

地震計の周波数範囲と振幅範囲はそれぞれ2~20Hz, $0.01 \sim 400 \mu\text{m}^{\text{P-P}}$ であるが先端装置については0.2~20Hzの成分も用意されている。先端装置にとりつけられた水晶圧力計が津波計であり、その分解能は約1 mm H₂O, 長期安定度は0.3 mm H₂O/dayより良い。

地震計と津波計のすべての信号は、海底ではFM-FDM方式により72 dBのS/Nで伝送され、海岸中継所で復調される。そこで再び、1成分当り10ビットのデジタルデータに変換され、電話回線により観測中継までPCM方式により伝送される。海底部システムへの電力は直流定電流方式で海底同軸ケーブルを通じて供給される。電流は先端装置近くの電極から放出され海水および大地を経て海岸アース電極に戻ってくる。

第3章ではケーブルルートの調査および布設作業について述べる。ケーブルの断線を避けるために海底の地形・地質をたねねんに調べあげ、ルートを慎重に決定した。海底部システムの実際の布設は日本電信電話公社の最新鋭ケーブル敷設船・黒潮丸によって1978年8月に行われ、成功した。先端装置の重量は水中でも1トンを越えるので、その布設には新たに開発された高抗張力海底同軸ケーブルが用いられた。実際の布設に先立ち布設実験を含む数多くの実験が行われた。

第4章では陸上設備工事、すなわち海岸アース工事、附帯設備を含む海岸中継所の建設、海岸ケーブルの防護工事について述べる。水深500mより浅い海域に布設されるケーブル35 kmには一重ないし二重の外装を施こし、底引き網操業によるケーブルの損傷を避けた。更に水深50m以浅の極浅海部では、波浪や潮流によるさまざまな障害を経験しているので、二重外装ケーブルを防護管で保護し、更に海底に埋設した。

このシステムの気象庁への移管に先立ち、半年間にわたる試験観測が行われた。第5章では試験観測によって得られた興味深い観測事実を速報する。

このシステムなしでは検知されなかったであろうし、震源も決められなかったであろう地震が数個ある。従って、予想されたように、このシステムで得られたデータを用いることによりこの海域の詳しいサイスミシティが明らかになる。

津波計に関する興味ある事実は津波計が一種の長周期上下動地震計として働くということである。1978年12月6日にエトロフ島近海で発生した地震($M_J = 7.7$)による地震波が津波記録上に見られる。もうひとつの興味的是、先にも述べたように津波計の分解能と安定性が良いので、地殻変動の水準器としても使えるということである。破壊直前のプリサイスミックな地殻変動によるレベル変動をとらえるかもしれない。現在まで、この海域に津波はまだ発生していないが、津波記録上には外洋潮位が常に記録されている。津波計によって観測された潮位と沿岸で観測された潮位との間には、密接な相関が認められる。すなわち両者の振幅はほぼ等しく、位相は理論から期待できるとおりのずれを示している。

海底部システムへ供給する電力の電源電圧は常に監視されている。電源電流が充分安定しているにもかかわらず、電圧はわずかに日変化を示している。その変化は地磁気全磁力の時間微分に比例していること

がわかった。それゆえ電源電圧の観測により地電位、導電率等の新種の観測データが得られるものと期待できる。何らかの地球電磁気学的現象の前兆があらわれれば、それも検知されよう。

第6章にはシステムの開発に関連したさまざまな論文を載せる。開発の過程においていくつかのワーキンググループが何回も開かれた。その時の重要な議論も収められている。

第7章にはまとめ、謝辞等を載せる。

最後に付記として、このシステム開発のために気象庁研究会議内に設けられた、部外学識経験者をも含む開発部会における議事等を載せる。

Permanent Ocean-Bottom Seismograph Observation System

by

Seismology and Volcanology Research Division, M.R.I.

Abstract

The interplate great earthquakes with a magnitude greater than eight, which have caused huge damage over a wide area since the dawn of history in Japan, have occurred under the sea bottom between the Pacific coast and the Japan Trench, Nankai Trough, etc. These earthquakes are considered to be repeated in these areas in future. Consequently, for the prediction of them, it is indispensable to monitor the seismicity in those sea areas. While the Japan Meteorological Agency (JMA) and a number of university laboratories are performing permanent seismic observations at hundreds of stations, the seismographs used are all land-based ones, which results in insufficient accuracy of location and detection capability for small earthquakes in the sea areas.

The anchored buoy ocean-bottom seismograph (OBS) or the pop-up OBS could be used for observation in the sea areas. However, even if the OBSs might catch precursory activities just prior to a big event, they are in some cases of no use in issuing an earthquake warning because nobody is immediately informed of it by them. Under these circumstances, the development of a permanent real-time observation system in the sea areas had been ardently desired.

The JMA had plans to develop the real-time system and to monitor the seismicity in those sea areas. The development of the System was implemented by the Meteorological Research Institute of the JMA as one of the major items of the third Five-Year Plan of the National Program of Earthquake Prediction Research in Japan (1974 - 78). The area off the coast of Tokai District was selected for the area where the System was to be laid.

A number of Japanese seismologists have been afraid that a

great earthquake may occur in the area. Therefore, the Tokai District and the surrounding regions (Shizuoka Prefecture, most of Yamanashi Prefecture, the western part of Kanagawa Prefecture, a part respectively of Nagano, Aichi and Gifu Prefectures) have been designated as "Areas under Intensified Measures against Earthquake Disaster" by the "Large-Scale Earthquake Countermeasures Act" (August 1979).

After its completion, the whole system was transferred to the JMA and has been operated routinely. The JMA, which is responsible for the routine seismic observations and for the issuing an "Earthquake Prediction Information", has plans to lay the same system in the following three areas off Sanriku, from Sagami Bay to off the Boso Peninsula, and off Shikoku. No less than the area off Tokai, these are areas of repeated great earthquakes.

The present paper is a technical report of the development of the System and will be helpful in constructing an improved one when it is required for another sea area.

Chapter 1 is the introduction, in which the position of the System in the National Program is described.

In Chapter 2, the system design and newly developed instruments are described. The System is composed of a land system and a submarine system with a very high reliability (MTBF is estimated to be 100 years per component). The latter system consists of the terminal apparatus set at the far end of a submarine co-axial cable, and three intermediate apparatus linked to the shore by the cable. The former system consists of receiving and repeating apparatus in the shore station (Omaezaki Weather Station), land telephone lines and receiving and processing apparatus in the observation center (Seismological Division, JMA, Tokyo).

The frequency range and the dynamic range of the seismographs are 2 - 20 Hz and 0.01 - 400 μm peak to peak respectively. The frequency range of 0.2 - 20 Hz is also available at the terminal station. A quartz pressure gage attached to the terminal apparatus

is a tsunami-meter, with a resolution of nearly 1 mm H₂O and a long term stability better than 0.3 mm H₂O per day.

All signals of the seismographs and the tsunami-meter are transmitted by an FM-FDM with S/N of 72 dB in the sea, and they are demodulated at the shore station, where they are transformed to digital data of 10 bits per component. By the use of the PCM communication method, all the digital data are transmitted to the center via land telephone lines.

Electric power for the submarine system is supplied through the submarine co-axial cable by a DC constant current. It is released from the electrode attached near the terminal apparatus, and sent back to the electrode of the shore earth through the sea-water and the ground.

In Chapter 3 are described the cable route survey and laying work. After elaborate investigation on the topography and geology of the sea bottom, the route was carefully determined so as to avoid cable breaks. The actual laying of the submarine system was successfully carried out in August 1978 by the Kuroshio-Maru, the newest cable ship of the Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation. Since the terminal apparatus weighs more than one ton in the water, the newly developed high tensile strength submarine co-axial cable was employed in laying the apparatus. Prior to the laying, a number of experiments including trial laying were carried out.

In Chapter 4 are described the construction of the shore facilities: shore earth work, shore station building including appurtenant facilities and the protection work of the shore cable. For the 35 km segment which lies on seabeds less than 500 m below the surface, a single or double armored cable was used in order to avoid trouble caused by dragnet fishing. Furthermore, for seabeds less than 50 m below the surface, various kinds of trouble due to waves and currents have been experienced. Therefore, the double armored cable guarded by a steel protector was buried in the sea

bottom mud.

A half year's test observation was carried out in advance of the transference of the System to the JMA. Chapter 5 includes preliminary reports of some interesting facts observed in the course of the test operation.

There are several earthquakes which would not have been detected and located without the System. Therefore, as has been expected, the details of the seismicity in the area will become clear by use of the data obtained by the System.

One of the interesting facts about the tsunami-meter is that it can work as a kind of long-period vertical seismometer. Seismic waves generated by the earthquake near Etorofu, December 6, 1978 ($M_J = 7.7$), were recorded on the tsunami records. Another interesting fact is that it is available as a level meter to detect crustal movements, because its resolution and stability are good as mentioned above. It may be able to catch the change of the level due to the pre-seismic movement just prior to a break. There has not yet occurred any tsunami in our sea area until now, but the ocean tide level of the open sea is always recorded on the tsunami records. A close correlation is recognized between the tide level recorded by the tsunami-meter and that by the tide gages at shore stations; that is, the amplitudes of the two are almost equal and the phases show systematical lags, as is expected by theory.

The source voltage of the electric power for the submarine system is continuously monitored. In spite of the high stability of the source current, the source voltage shows a slight daily change. It is found that the change is proportional to the time differential of the total force of the terrestrial magnetism. Thus, the observation of the voltage is expected to give new kinds of observational data such as those for geopotential, conductivity and so on. If any precursory change related to geoelectromagnetic phenomena occurred, it might also be detected by observation.

Chapter 6 contains various papers dealing with the development

of the System. In the course of the development, meetings of the working groups were frequently held. Important discussions at the meetings also appear in this Chapter.

Chapter 7 comprises reviews, acknowledgements and so on.

The proceedings in the Congress to establish the fundamental policy of research for the JMA are described in the Appendix.

第1章 ま え が き*

昭和49年度より5ヶ年計画で地震火山研究部が開発を行ってきた海底地震常時観測システムは同54年3月に完成し、翌4月より本庁地震課および東京管区气象台に移管され、東海沖海域の地震活動等の監視に活躍している。このシステムは海底同軸ケーブルを用いた世界でも最初の群列方式の海底地震観測装置であり、その設計、製作、布設などの各段階においては、海底ケーブル伝送その他の分野の最新の技術を広範に利用したし、また多くの新しい技術を開発して困難を克服してきた。それらの詳細について記述しておくことは、今後このシステムによって得られる観測データを利用する人々のためにも、また今後海底における地震観測のみならず各種の観測のための装置を作るであろう人々のためにも必要なことであり、また私どもの責任でもあると考え、気象研究所技術報告の一冊にまとめて報告する次第である。

本章においては、このシステムの開発研究の背景をなす東海地域の地震予知の問題、プロジェクト発足の経緯、及び研究遂行の体制などについて述べる。

1. 東海地域の地震予知について

昭和40年度より開始された地震予知計画は第1次(昭和40~43年度)、第2次(昭和44~48年度)、第3次(昭和49~53年度)の計画が終わり、現在第4次計画(昭和54~58年度)の各種観測、測量および研究が実施されている。これらの観測などを重点的に行う地域として、特別観測地域、観測強化地域及び集中観測地域の3段階の地域指定をすることが定められていた。東海地域は当初より特別観測地域として扱われていたが、第5回地震予知連絡会(昭和44年11月28日)において再確認され、更に第24回地震予知連絡会(昭和49年2月28日)において、同地域での過去の巨大地震の発生の歴史、および地震活動と地殻変動の観測結果が考慮されて、観測強化地域に指定された。

この地震予知計画による観測等、およびこの期間におけるプレートテクトニクス説や断層モデルに関する理論などを含む近代地震学全般の急速な発展により、地震予知の諸課題に関しても目覚ましい進展が見られた。1923年関東地震や、1944年東南海地震および1946年南海地震(Kanamori, 1972, Ando, 1975その他)の断層モデルに関する研究およびフィリピン海周辺部における地震の発震機構の研究(Katsumata and Sykes, 1969)などから、フィリピン海プレートの運動の様相や南海トラフの性格が解明されてきた。それとともに地殻変動観測データなどを用いて将来発生すると考えられる大地震の震源の諸要素を定量的に推定する研究がなされるようになった。南海トラフ北側の海域では、昔からマグニチュード8クラスの巨大地震が相連なって約120年の平均再来期間をもって繰返して起っている。1854年に2回起った安政地震IおよびIIの震源域を合わせると、南海トラフ沿いの全海域を覆うが、それ以後この海域の中西部を震源域とする1944年東南海地震及び1946年南海地震が起ったものの、その

*執筆担当 田 望

東部は取り残されたままであり、また明治以来の三角測量及び水準測量の結果を見ても、東海地方には大きな歪エネルギーが蓄積されていることは明瞭である。このような事情から、前述のように東海地域が観測強化地域に指定されたのであるが、将来発生が危惧されている巨大地震の震源域の推定に関しては、学界でも多くの議論が戦わされてきた。その震源域を推定するには、それに隣接する東南海地震の震源域の決定が大きな影響を与える。Kanamori (1972), および図 1.1 に示した Ando (1975a) による東南海地震の断層モデルの研究などにおいては、震源域は熊野灘と考えられており、したがって東海沖に予想される地震の震源域は、図 1.2 に示した Ando (1975b) の断層モデルに見られるように、御前崎と渥美半島間の沖合いの遠州灘の全海域と考えられていた。その後津波や地殻変動の研究から、東南海地震の震源域は熊野灘だけでなく、東は天竜海底谷に及ぶ広い範囲にわたっていたという考えが強くなった(例えば Inouchi and Sato, 1976)。

そして石橋(1977)は1854年安政地震Iについての調査研究から、その地震の震源域が熊野灘から駿河湾奥まで達していたことを明らかにし、また1944年東南海地震の震源域は図1.1に示したように、熊野灘から天竜海底谷付近に至る海域であると結論した。したがって遠州灘東半から駿河湾奥までの地域では安政地震以来120年以上にわたって大地震空白域であり、図1.2に示したような断層モデルを持つ地震が将来起ると考えて地殻変動を計算すると、実測されたものを定量的に説明できることを示した。これにより「東海地震」あるいは「駿河湾地震」と言われる将来この地域に起こるであろう大地震のイメージが具体的になってきた。

地震予知計画の進行とともに、社会の地震に対する関心も次第に強くなり、特に1974年伊豆半島沖地

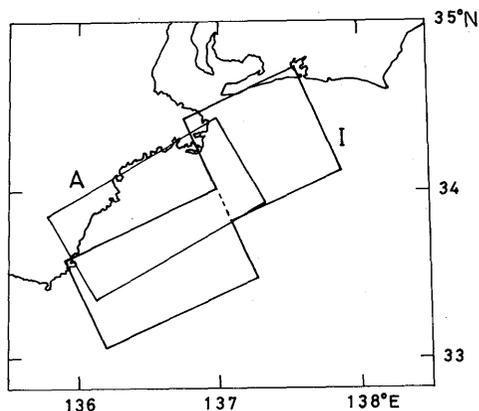


図 1.1 (A)Ando (1975a) および (I) 石橋 (1977) による 1944 年東南海地震の断層面の地表投影

Fig.1.1 Surface projection of the fault planes inferred by (A) Ando (1975a) and by (I) Ishibashi (1977) of the 1944 Tonankai earthquake.

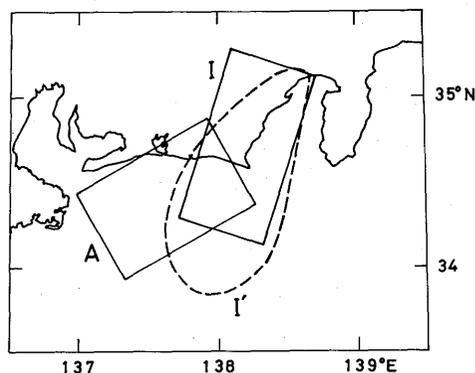


図 1.2 (A)Ando および (I および I') 石橋により推定された東海地震の予想断層面の地表投影

Fig.1.2 Surface projection of the hypothetical fault planes inferred by (A) Ando (1975b) and by (I and I') Ishibashi (1977) of a future Tokai earthquake.

震以後はその傾向は加速された。さらに上述の石橋の研究成果の発表が新聞その他に大きく報道されたことも手伝って、社会の地震予知に対する要望は極めて強くなった。そして昭和53年には大規模地震対策特別措置法が公布・施行され、また気象業務法も改正されて、気象庁長官は地震予知情報を報告する責任を負うこととなった。そして昭和54年8月には静岡県全部、神奈川県西半、山梨県の大部分、長野、愛知、岐阜3県の一部が地震防災対策強化地域に指定されるなど、地震の予知と防災のための施策が着々と進められている現状である。この強化地域の指定の根拠となる将来の大規模地震の推定には上述の石橋の説が大きく貢献していた模様である。

海底地震常時観測システムの開発のプロジェクトを立案した当時、海底地震計を設置すべき地域について研究部内で種々討議を行ったが、将来巨大地震の発生する可能性が最も高いと考えられる東海沖を選定した。その後上に述べたように、学界における東海地震についての考えに進展があったが、私どもは開発の各段階でそれを考慮に入れつつ作業を進めてきたのである。

2. プロジェクト発足まで

海底に地震計を置き自然地震あるいは人工地震を観測しようという研究の歴史はかなり昔に遡るが、初期の頃は試験的なものであった。海底地震計が米国、ソ連、日本などで盛んに用いられるようになったのは1960年代半ば頃からであり、浅田教授（東京大学）、島村助教授（北海道大学）のグループや、南雲教授（東京大学）のグループなどが研究を続けており、興味深い成果が報告されている。

気象庁においても、1968年十勝沖地震の後運輸大臣の指示によって気象協会が実施した海底地震計の試作とそれを用いての観測の技術指導を、当時地震課に在勤した飯沼現第3研究室長らが行った（飯沼・吉田1970）。これらの観測に用いられた装置は、海底に置かれた地震計類および錨と海面にあるブイの間をロープで繋いだアンカード・ブイ方式の装置や、海底の地震計類に繋がれた錘をタイマーあるいは観測船からの超音波指令信号により作動するレリナーで切り離して地震計類を浮上させる自己浮上方式の装置である。これらの観測方式は、遠洋においても比較的簡単に観測できるなどの長所を持つ半面、1回の海底地震計の設置によって普通は10日間程度、長期用のものでも1ヶ月程度の期間記録し得るだけであり、また地震計類を回収してデータを処理解析するまでに相当の日数を要するなどの短所を持っている。したがって短期地震予知のため、予想震源域付近の地震活動の監視に用いるには、これらの方式の装置は適当とは言い難い。

ところで米国コロンビア大学のラモント・ドハーティ地質学研究所は、1960年代後半に海底ケーブル方式の海底地震計を開発し、カリフォルニア沖約100海里の海底に設置し、観測研究することを試みた。この装置は海底ケーブルの先端にのみ付けられた耐圧容器群の中に長・短周期地震計や重力計その他のセンサーを入れたものである。1966年5月布設されて以来、6年余観測に用いられたが、ケーブルの破断により廃棄された。

このラモント・ドハーティ地質学研究所の意欲的な試みは日本にも大きな影響を及ぼした。地震の2/3

以上が周辺海域で起こる我が国では、陸上観測点のみの資料では地震の震源位置やその他の諸性質の決定の精度に限界があり、海底ケーブル方式海底地震計の開発およびその実用化を望む地震研究者も多かった。このような背景のもとに昭和44年秋に、南雲教授の呼びかけにより、この方面に関心を持つ研究者や海底ケーブルおよびそれによる伝送技術の専門家の主導的立場にある人々などが集まって、「海底ケーブル方式海底地震計研究会」が開かれた。この研究会はその後毎年1回程度の割合で開かれ、装置に備えるべきセンサーの種類、ケーブルの種類、群列方式の接続の可能性とその場合の伝送方式、耐圧容器、布設方法その他につき検討を行った。この研究会は出席者の専門分野における知識や経験を話し合っ、システムの理想像を画くというような性格のものであり、実際に試作や実験を進めるということとはしなかった。したがって現実の「海底地震常時観測システム」の開発に際して、この研究会での討議が直接に役立ったとは必ずしも言い難い。重要なことはこの研究会が存在したことが、今回のプロジェクトの発足と遂行に大きな役割を果たしたことである。地震火山研究部において、その立案や遂行を担当した人々もこの研究会に参加していた。また研究会の討論の結果は、第3次地震予知計画を立案する準備として昭和47年12月に地震学会により開催されたシンポジウムに報告された(南雲, 1973)。

このようにして海底ケーブル方式海底地震計は公式の場で議論されることとなり、昭和48年6月29日測地学審議会より出された第3次地震予知計画の建議に盛りられることとなった。その建議には「海底地震活動監視のため、テレメタリング方式の海底地震計を気象庁が開発し、速かに業務的観測を開始できるように努める。」と述べられている。

昭和48年春地震火山研究部では海底ケーブル方式海底地震計を開発するための予備実験的な小規模な研究計画の立案作業を進めていた。その年の6月17日に起った根室半島沖地震(M=7.4)をも配慮されたことと思われるが、6月下旬に運輸大臣より防災に役立つプロジェクトを作成せよとの命令が気象庁に下された。

これに応じて地震火山研究部では開発する機器をそのまま業務的観測に実用することを目的とした海底ケーブル方式海底地震計の開発研究を行うことを決意し、提案した。この提案は気象庁の計画として採択され、前記命令への答申とされた。この「海底地震常時観測システムの研究」の特別研究は昭和49年度より別枠で予算も認められ、発足することとなった。このプロジェクトのように、未知の領域を多く含む開発を行うには、基礎的なものから実験を積み重ねて段階的に進めるのが常道であるが、地震予知のために海底地震計を必要とする度合いが逼迫していたことと、前記研究会の討論を通じ或る程度の見通しを持てたこともあって、いわばぶっつけ本番の仕事に踏み切った次第である。

3. 開発研究遂行の体制

プロジェクトの発足に当たり気象庁としては昭和49年2月21日の研究会議で、気象研究所長を部長とする「海底地震計開発部会」を設けて開発計画の技術的事項その他を審議することを、また開発部会内に専門技術的な事項を審議するワーキンググループを設けることを決定した。開発部会は研究の各段階

において9回にわたり開催され、指導的な役割を果たしたが、その詳細は巻末の付記にゆずる。

地震火山研究部では昭和49年度より諏訪彰研究部長（現地震観測所長）を主任研究者としてこの「海底地震常時観測システムの研究」を開始した。当時地震火山研究部は、2研究室制であったが、第2研究室がこの研究を担当した。研究開始に当って山川宜男研究室長（現大阪管区气象台技術部長）の下に観測部地震課よりアンカードブイ方式海底地震計の経験者である飯沼龍門現第3研究室長を、また東京大学地震研究所より地震計測全般に経験の深い松本英照現主任研究官を迎えるなどして、強力な体制を整えた。この特別研究のため新規に増員も認められ、昭和52年度より研究室の増設が認められて、研究部は3研究室制となり、第3研究室が飯沼第3研究室長の下にシステム開発を担当することとなった。昭和53年4月には諏訪研究部長は地震観測所長に転出され、田望が研究部長と主任研究者の役を引継いだ。研究発足より完了までの5年間にその遂行に当たった研究者を表1.1に掲げておく。

表 1.1 海底地震常時観測システムの研究の担当者一覧

a テーマ：海底地震常時観測システムの開発

b テーマ：地震予知理論および解析的研究

研究室名等	氏名	研究担当年度（昭和）	
		a テーマ担当	b テーマ担当
地震火山研究部長 （主任研究者）	諏訪 彰	49～52	49～52
	田 望	53	53
第2研究室（49～51年度）	山川 宜男	49～51	49～52
第1研究室（52～53年度）	長宗 留男		53
	吉田 明夫	50～51	50～53
第2研究室（49～51年度）	飯沼 龍門	49～53	49～53
第3研究室（52～53年度）	松本 英照	49～53	49～53
	高橋 道夫	49～53	49～53
	塚越 利光	51～53	51～53
	長山 靖夫	49～51	49～51

4. システムの完成とその役割

このような体制によって開発研究を進めたが、このシステムが完成後に地震予知のため東海沖地震活動監視に用いられることを考慮し、長期間故障せずに良好に動作することに最大の重点をおいて作業を行った。特に機械的に弱く、かつ信頼性の試験方法の確立されていない地震計センサー部の設計や試験には苦心した。衝撃試験、振動試験、温度試験などを繰り返し実施し、またその結果の検査方法を案出するなどの努力を続けた。昭和53年8月に海底部装置を布設して以来今日まで1年以上経過したが、現在その全機器は良好に動作しており、今後の見通しも明るいものと考えている。また海底部装置からの信号伝送およ

び陸上の諸装置の設計・製作にも最新の技術を多く取り入れてあり、例えばそのシステム管理機構なども今後の地震観測装置の一つのモデルとなるであろう。

構成や機能についての記述は後章にゆずるが、今回完成を迎えた本システムは当初計画を上廻る性能を持っている。この使命達成は研究部において仕事にたずさわった人々の努力によるところが多いとは言うものの、気象研究所だけでなく気象庁内の多くの部課の方々の協力によってなされたものであり、その意味で本研究は気象庁の一大プロジェクトであったと言えよう。それだけでなく、第7章に述べるように、官・学・公・民の多くの機関の方々の御尽力によりなし得たチームワークの成果と言うべきものである。

本年4月より観測部地震課で開始された本システムによる東海沖の海底地震の観測成果はすでに地震防災対策強化地域判定会に提供されつつある。一方、試験観測によって得られた資料を解析した結果、津波計の記録から海底地殻上下変動を検出し得る可能性が、また海底部装置への給電電圧の変動値から海底地電位差を検出し得る可能性が見出された。これらが有効に利用できれば、地震予知のための新しい観測手段となるので、それらについての研究を地震火山研究部で計画している。これらを通じ、私どもは本システムが地震予知と地震災害の軽減に役立つことを期待し、念願している。

昭和53年7月12日に測地学審議会より出された第4次地震予知計画の建議に「気象庁は、御前崎沖にケーブル方式の海底地震計の設置を進めているが、この完成は東海沖の海底地震の監視能力を格段に向上させるものとして、強い期待がもたれている。本計画においては、その成果を踏まえて更に他の予知上重要な海域に設置して常時監視を進めることとする。」と述べられている。巨大地震のほとんどすべてが周辺海域で起こる我が国において、今回開発したものと同様のシステムが、他の海域にも展開され、地震予知のために貢献するであろうことが予想される。

参 考 文 献

- Ando, M., 1975a: Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquake along the Nankai trough, Japan. *Tectonophysics*, **27**, 119-140.
- Ando, M., 1975b: Possibility of a major earthquake in the Tokai district, Japan and its pre-estimated seismotectonic effects. *Tectonophysics*, **25**, 69-85.
- 飯沼龍門, 吉田 弘, 1970: 定浮標方式海底地震計の装置と海上作業について. うみ(日仏海洋学会), **8**, 121-126.
- Inouchi, N and H. Sato, 1976: Vertical crustal deformation accompanied with the Tonankai earthquake of 1944. *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, **21**, 10-18.
- 石橋克彦, 1977: 東海地方に予想される大地震の再検討—駿河湾地震の可能性. 地震予知連絡会会報, **17**, 126-133.
- Kanamori, H., 1972: Tectonic implications of the 1944 Tonankai and the 1946

Nankaido earthquakes. Phys. Earth Planet. Inter., 5, 129-139.

Katsumata, M. and L.R.Sykes, 1969 : Seismicity and tectonics of the Western Pacific : Izu-Mariana -Caroline and Ryukyu-Taiwan Regions. Jour. Geophys. Res., 74, 5923-5948.

南雲昭三郎, 1973 : 地震予知研究における海底地震観測の役割. 地震予知シンポジウム(地震学会), 61-65.

Sutton, G.H., W.G.McDonald, D.D.Prentiss and S.N.Thanos, 1965 : Ocean-Bottom Seismic Observatories. Proc. IEEE, 53, 1909-1921.

第2章 機器の開発・製作*

1. 方式設計

1.1 概要

この観測システム全体の概念を図2.1に示す。この図のように、先端点には地震計と津波計が設置され、

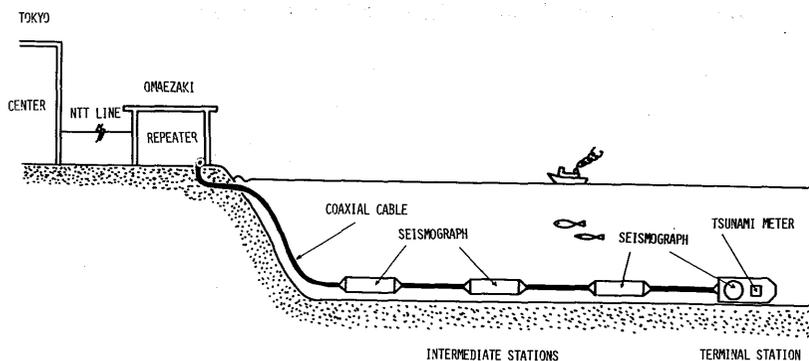


図 2.1 システムの概念

Fig. 2.1 Concept of the System

3ヶ所の中間点には地震計が設置されている。これらの出力は、地震計と共に耐圧筐体内に封入された伝送部により、周波数変調—周波数分割多重され、海岸中継所まで、一本の同軸ケーブルを経由して伝送される。中継所では海底部機器への電力供給（直流定電流）、供給電流を変化させることによる地震計の姿勢制御を行い、また伝送されてきた信号を復調し、一部の信号をモニター記録器に出力するとともに更に観測中樞に伝送するため全信号をデジタル変調し、電電公社の専用回線に送り出す。観測中樞ではリアルタイムの連続可視記録の他に、処理に必要な遅延—トリガー記録を採る。コンピューターによる地震一覧表の作成、津波計による外洋潮汐記録の毎時値の読みとり、陸上機器・回線の障害履歴の記録・管理も行う。本システムの特徴は海底部機器の高信頼性・高安定性という点と海岸中継所から観測中樞に到る伝送系においてD-1回線を用いた9600bit/secという高速の伝送速度により、高品質のデータを高密度で伝送している点にある。

地震計の特性は気象庁観測網で言う、76型に相当する短周期高倍率の成分が、全観測点にある他、先端点には59型に相当する5秒100倍の成分もくみこまれている。このシステムを用いた観測は観測部により行われるが、観測データは、既に全国（陸上）に展開されている小地震観測網に組み入れられて、小地震の震源決定にデータを提供する他、陸上における東海地域の地震観測網とあいまって、予想される震源域

*執筆担当 高橋道夫

近傍における地震活動の監視のためにも用いられる。

1 cm 以下の分解能をもつ津波計の記録は、外洋でいちやく津波を捕えることにより、津波予警報の精度向上に寄与することができる。津波計は分解能がすぐれているため、この他にも、地殻変動の連続観測器として新しい観測分野を産みだす可能性がある。

1.2 海底ケーブル

海底の観測点から陸上までの伝送の方法は、海底ケーブル方式とした。信号伝送の方法は、海底ケーブルの他に、係留したブイから無線で伝送する方法も考えられる。しかし、これはブイの保守に船舶を必要とする等、運用経費が少くない上に実績も乏しく信頼性も低い。一方、海底ケーブル方式は大陸間電話回線の例のように、実績もあり、信頼性が高い方式と評価できる。

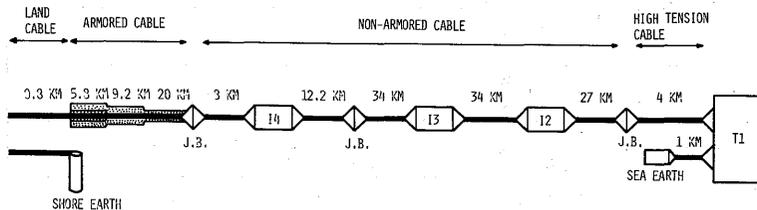


図 2.2 ケーブルシステム。T1, T2~4 はそれぞれ先端、中間点装置。
J.B. はジョイントボックスと呼ばれるケーブル接続器。

Fig. 2.2 Submarine cable system

ケーブルシステムを図 2.2 に示し、表 2.1 および表 2.2 には、これらのケーブルの機械的諸元、電気的特性（測定の一例）を示す。一般に水深 500m 以浅では海底に到るまでの漁労が予想されるので漁網による損傷をさけるためケーブルに外装が施されている。海底地震計の今回のケーブルシステムにおいてもこれに倣った。極浅海部は外装を二重にした上、波打際は保護管でおおって、波浪、潮流による損傷にも対処した。先端点付近の高抗張力ケーブル（以下では単に高張力ケーブルと記す）は、重量のある先端装置の布設工法上、必要となり新たに開発したものである。ケーブルの構造を図 2.3 に示す。

同軸ケーブルと耐圧筐体との接合部（カップリング）は、水密性と同時に抗張力性を要求されるが、この機構は電電公社の海底通信システムで確立した技術がある。この部分の構造を図 2.4 に示す。カップリングはジンバル構造をしていて、筐体の軸とケーブルの軸とは 54° までの範囲内で自由に曲げることができる（図 2.5）。先端装置の布設の際には、 54° では不十分なことがリハーサル時に判明し、新たに図 2.4 の下側に示した 110° までふれるジンバル機構を開発して用いた（関連研究 7 参照）。

表 2.1 海底同軸ケーブルの機械的諸元

項目 材料 寸法 ケーブルの種類	内部 導 体	絶 縁 体		外 部 導 体	外 被 被 (1)		し ゃ へ い					外 被 被 (2)		布 テ ー ブ	座 床	外 装 線 (内 層)		中 間 座 床		外 装 線 (外 層)		外 部 被 覆	仕 上 外 径 (mm)	概 算 重 量		破 断 荷 重 (トン)
	(注)	絶 縁 用 ポリエチレン		銅 テープ	外 被 用 ポリエチレン		コルク付 スズメッキ 鉄テープ	スズメッキ 鉄テープ	ラバー・ ポリエ ステル テープ	ナイロ ン糸	ポリエ ステル テープ	外 被 用 ポリエチレン		布	PP ヤーン	防食鉄線		PP ヤーン	防食鉄線		PP ヤーン	径		空 中 ($\frac{t}{km}$)	水 中 ($\frac{t}{km}$)	
	外径 (mm)	厚さ (mm)	外径 (mm)	厚さ (mm)	厚さ (mm)	外径 (mm)	厚さ (mm)	厚さ (mm) × 層数	厚さ (mm) × 層数	本数 (本)	厚さ (mm)	厚さ (mm)	外径 (mm)	厚さ (mm)	厚さ (mm) × 層数	直径 (mm)	本数 (本)	厚さ (mm)	直径 (mm)	本数 (本)	厚さ (mm)		径			
高張力 海底同軸ケーブル	12.14*	12.98	38.10	0.254	2.92	44.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	44.5	2.4	0.9	18	
無外装 海底同軸ケーブル	8.382*	8.51	25.40	0.254	2.92	31.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31.8	1.3	0.5	8	
6.0mm一重外装 海底同軸ケーブル	8.382	8.51	25.40	0.254	2.92	31.75	-	-	-	-	-	-	0.25	1×2	6.6	19	-	-	-	-	1.5	53	6.2	4.5	15	
8.0mm一重外装 海底同軸ケーブル	8.382	8.51	25.40	0.254	2.92	31.75	-	-	-	-	-	-	0.25	1×2	8.6	15	-	-	-	-	1.5	57	8.0	6.1	21	
6.0mm/8.0mmしゃへい付 二重外装海底同軸ケーブル	8.382	8.51	25.40	0.254	2.92	31.75	0.305	0.152 ×2	0.41 ×3	2	0.1	3.78	44.45	0.25	1×2	6.6	25	1.5	8.6	25	1.5	86	19.8	15.4	54	
陸上ケーブル	8.382	8.51	25.40	0.254	2.92	31.75	0.305	0.152 ×2	0.41 ×3	2	0.1	3.78	44.45	-	-	-	-	-	-	-	-	44.5	-	-	-	
海中アースケーブル	8.382*	8.51	25.40	0.254	2.92	31.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31.8	1.3	0.5	8	
陸上アースケーブル	8.382	8.51	25.40	0.254	2.92	31.75	0.305	0.152 ×2	0.41 ×3	2	0.1	3.78	44.45	-	-	-	-	-	-	-	-	44.5	-	-	-	

(注) *は複合内部導体
*以外は銅の単線

表 2.2 ケーブルの電気的特性 (測定結果の一例)

ケーブルの種類		高張力38mm 無外装	無外装 25mm	外装 25mm	
項目	単位	測定結果	測定結果	測定結果	
直流導体抵抗	内部導体	Ω/km	0.5479	0.9544	0.2943
	外部導体		0.5072	0.7422	0.7403
静電容量	nF/km	112.0	115.0	115.1	
絶縁抵抗	内部-外部 導体間	GΩ/km	10,604	4,490	4,410
	外部-大地間		407	472	220
絶縁耐力		DC 35kV 5分間で異常なし			
減衰量	100kHz	dB/km	0.267	0.399	0.3983
	300kHz		0.463	0.695	0.6924
遅延量 (400kHz)	μsec/km	5.081	5.086	5.086	
特性インピーダンス (400kHz)	Ω	45.37	44.20	44.17	

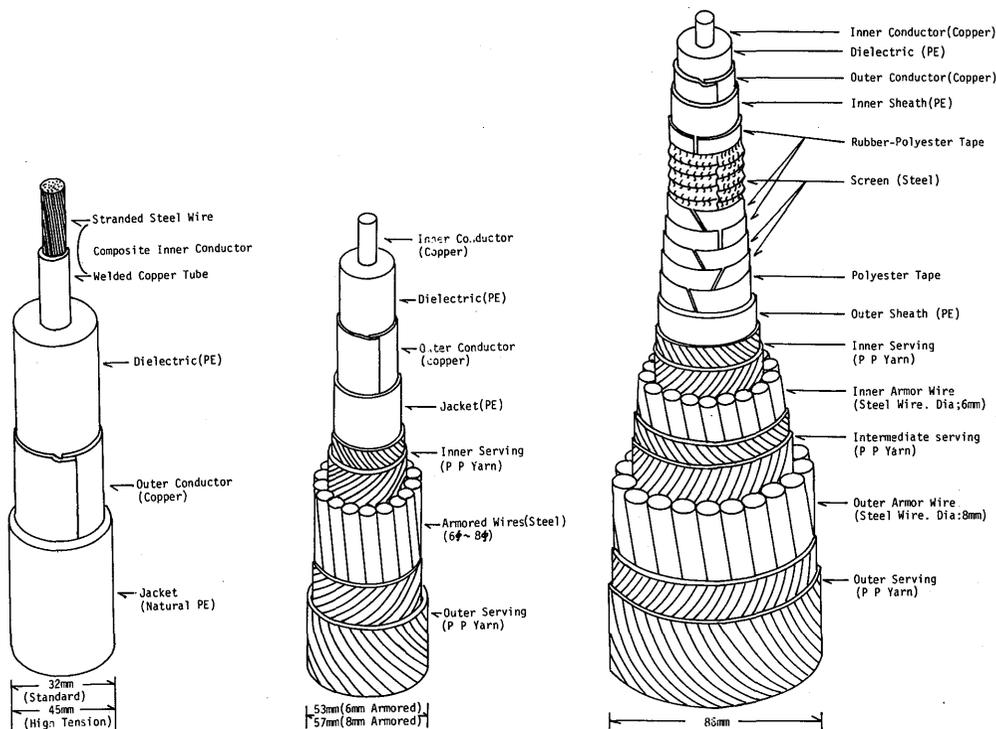


図 2.3 ケーブルの構造模式図。無外装および高抗張力(左), 一重外装(中), 二重外装(右)の構造。

Fig. 2.3 Submarine co-axial cables.

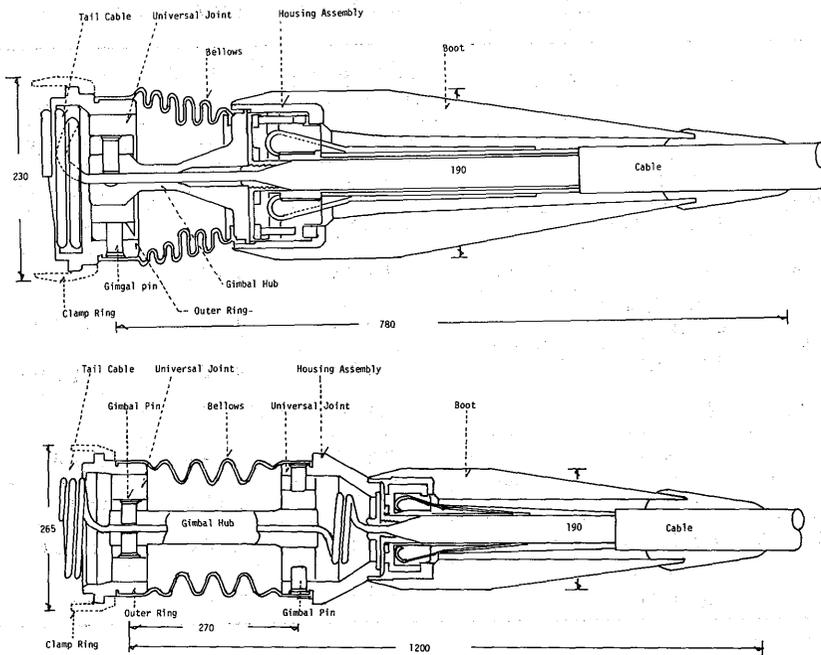


図 2.4 カップリングの構造。通常のカップリング(上)と先端装置用として開発した110°まで曲げられるカップリング(下)の構造。

Fig. 2.4 Couplings : connectors of the cable and the vessel.

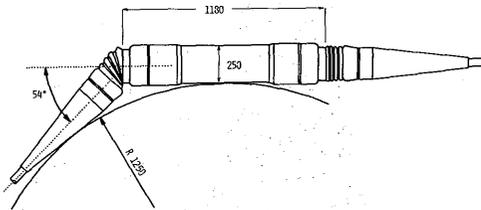


図 2.5 カップリング部の曲げ。通常のカップリングは54°までなら自由に曲げられる。従って半径1.25 m以上の円筒形に密着することができ、ケーブルに無理な曲げによる応力集中が生じない。

Fig. 2.5 Bending of the coupling.

1.3 耐圧筐体

耐圧筐体は、ケーブルとの接合の技術も確立しているし耐水圧性能も実績がある海底通信に用いられている中継器筐体と同等のものを採用した。この筐体は外形も敷設船の作業形態に適合していて、布設作業が(先端装置以外は)通常海底中継器の場合と同様に行える。たゞ、中継器筐体は近年、統一型と呼ばれる内径170mm程度の円筒が用いられているが、部品の実装上の有利さのために、統一型誕生以前に使

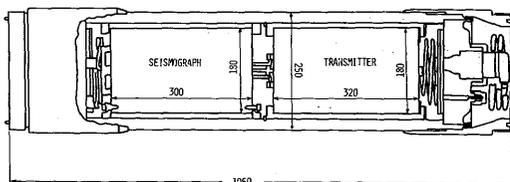


図 2.6 中間点装置筐体。地震計と伝送部を実装したところ

Fig. 2.6 Pressure vessel.

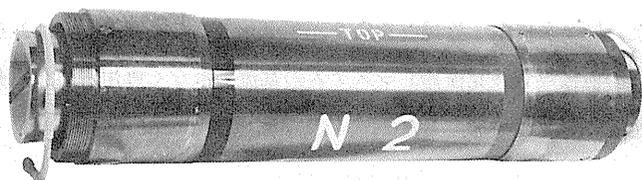


写真2.1 中間点装置耐圧筐体

Photo 2.1 Pressure vessel for the intermediate apparatus.

われていた内径204mmの大きいものを用いることにした(図2.6, 写真2.1)。先端装置の耐圧筐体は布設工法の違いから更に大型の筐体も用いる。このため内径300mmの大型筐体を開発して使用した。これらはいずれも4000mの海底で10年以上の海水浸漬による腐食に耐え、しかも筐体内の相対湿度上昇は20%/10年以下である。

筐体シリンダー部および端面板部には母材に銅を使用し、ベリリウムを1.6~1.8%(重量比)添加したベリリウム銅の高強度合金を使用している。この合金は非磁性で耐食性、耐摩耗性、耐疲れ性に優れ、析出効果型なので成形加工後、硬化処理を施すことにより抗張力性、靱性、電導性が增大する。シリンダー部と端面板部は溶接される。このとき溶融部とその外側の熱影響をうけ溶体化された部分の間が最も硬度が低くなるが、ヘリウムガスを用いた耐圧・リーク試験により強度および水密性に問題がないことを確認し

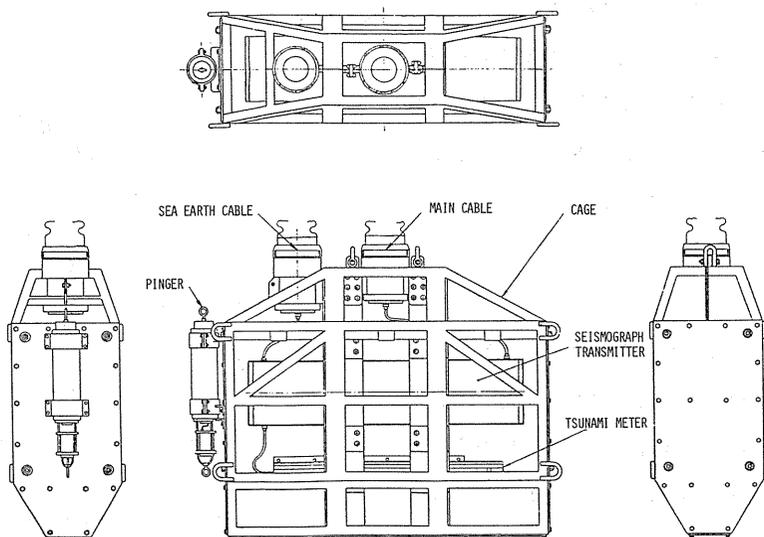


図2.7 先端装置ケージの構造。上部の2個のフランジには本ケーブルと海底アースケーブルがつながれる。地震計と伝送部が封入された耐圧筐体および津波計筐体は図のようにくみこまれる。

Fig. 2.7 Terminal apparatus.

である。透湿経路の主なものはポリエチレンと金属間を通過する系統であるが、金属表面の特殊な酸化処理とポリエチレン樹脂の成形条件との適当な組合せにより解決した。

先端装置の地震計筐体と津波計筐体は一体化していないと布設工法上問題がある。このため耐海水鋼の表面にゴムを焼きつけた、図2.7に示す枠組みを作り、ケージとした(口絵写真3参照)。ケージには地震計筐体、津波計筐体の他に超音波発振器(システムの電流ではなく専用電池で駆動する)をとりつけ、先端点の設置場所の測定において精確を期した。

1.4 伝送

海底から陸上までの同軸ケーブルによる伝送はFM-FDM(周波数変調—周波数分割多重)方式を採用し、陸上間の伝送には電電公社のD-1回線を6回線用いた9600 bit/sec PCM(パルス符号変調)方式を採用した。

海底伝送においてもPCM方式が検討されたが設計当所における技術水準からみて、実装スペース及び信頼性管理に問題が残存していた反面、FM-FDM方式には他の高信頼度を要求される分野における実績もあり信頼性管理法も確立されていた。この方式により最終的に達成できた信号のダイナミックレンジ(検出可能な最大振幅と最小振幅の比)は約72 dBである。これはデジタル信号に換算すると12 bitに相当するもので充分満足のゆくものといえる。

(1) 周波数配置

周波数の割りあてには、ケーブル損失の周波数特性(図2.8)、中継増幅器の帯域有効利用(御前崎系の場合には、距離が短いため中継増幅器を必要としない)、使用部品の実装上の大きさ等の関係を考慮にいて、先端装置の津波計に最低周波数を割りあて、地震計の信号については、伝送距離の長くなる陸からの距離が遠い装置ほど、損失の少ない低周波を割りあてた。

各観測点に含まれる地震計出力3方向、高・低倍率の計6成分は最小の部品数でS/Nの大きい信号をとりだすため一次変調(周波数変調)をうける。この時、周波数変換段を少なくし、部品数の増加による信頼性の低下を招かないように考慮して、直接、一次変調の最終周波数へ変換した。信号の質を直接

左右する中心周波数の短期安定度は、トランジスタを使用した非安定マルチバイブレーターの過去の実績から30 kHz付近で±1 Hzは達成できると考えた。このため当初目標をS/N 56 dBとしてこれを得るための最大周波数偏移を片側600 Hzと設定した。S/Nを劣化させる要因としてはこの他に、FDM二

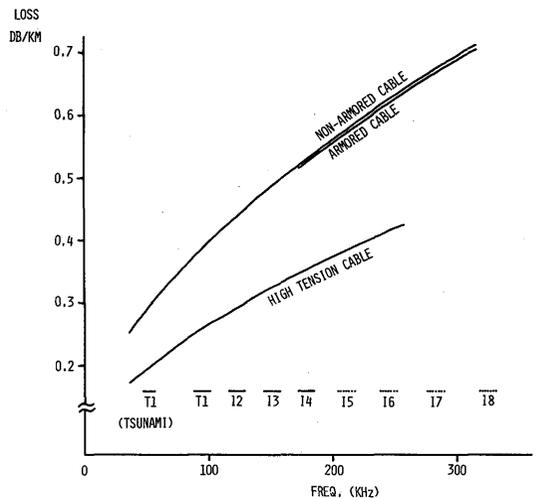


図2.8 ケーブル損失の周波数特性
Fig. 2.8 Loss of the co-axial cable.

次変換系，FM復調系があるが，いずれも70～100 dB以上が実現可能と考えられるので，総合S/NはほぼこのFM変調時に決まる。56 dBという当初目標にもかかわらず，試作品を経て作られた実際の製品については後に述べるように70 dB以上のS/Nが得られ，総合で約72 dB程度は確保できていると判断できる（関連研究3参照）。

一次変調部の所要帯域幅を決める大きな要因はFM変調器中心周波数の長期安定度である。これは大略，容量と抵抗の長期安定度の和に一致するから±0.4%/10年と推定される。その他にも筐体内予想温度の見積値の誤差5℃に対する±0.1%，初期設定誤差±0.1%，電源変動による±0.05%等が見込まれる。これらの変動を最大周波数偏移±600 Hzに対して考慮し，更に余裕をみて±1 kHzを所要帯域とした。地震信号は6成分なので，一次変調部の所要帯域幅は12 kHz（以上）必要となる。この帯域としては14～28 kHzを選んだ。これにより

- i) 帯域上限の周波数（28 kHz）が下限の周波数（14 kHz）の2倍以下なので，二次歪波が一次群内の他のチャンネルに及ぼす影響がない。
- ii) FDM二次変換後の伝送路周波数の下限よりは低周波側に位置しているので，一次群が伝送路にもれても影響は少ない。
- iii) FDM多重化が容易な周波数帯である。
- iv) フィルターの設計が難しくない周波数帯である。

等の特徴がある。

二次変調においては周波数帯域の有効利用の面から有利なように片側帯波のみを送る方式（SSB）を採った。不要側帯波抑圧用のフィルターは部品数を少なくするように十分検討のうえ，構成した。図2.9に周波数配置を示す。この図からわかるように，将来別の海域にこのシステムを展開するときには観測点数は最大9点まで増やすことができる。この場合，ケーブルによる損失を補う中継増幅器を4機用意する

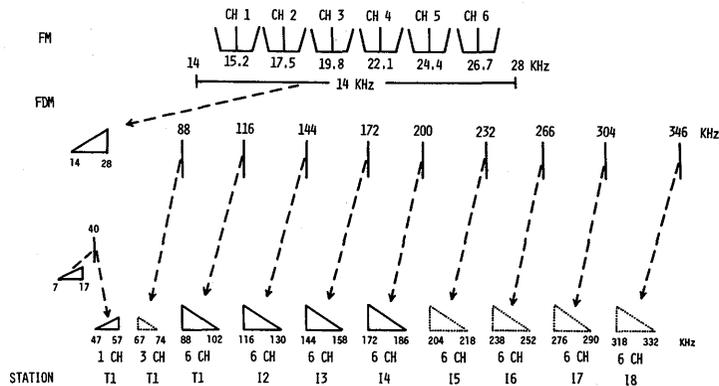


図 2.9 周波数配置。最下段の三角形を実線で書いてある帯域が，今回の御前崎系で使用したもの。

Fig. 2.9 Frequency allocation.

ことにより 400 km 程度の長さのケーブルまで使用可能である。図 2.10 に御前崎系のレベルダイヤグラムを示す。海岸中継所における受信レベルが -70dBm となるように、各点の送出レベルを調整してある。図 2.11 は 400 km のケーブルに 8 個の観測点(と 4 個の中継増幅器)を設けた場合のモデルケースのレベルダイヤグラムである。

(2) 海底部制御

地震計の変換器は姿勢を制御して鉛直および水平の正規の方向に向ける必要があるが、耐圧筐体そのものの姿勢を布設時に制御することは不可能である。このため、地震計変換器は重力の作用により自然に鉛直、水平となるいわゆるジンバル機構上に搭載した。ジンバルが自由に運動できる状態のままでは変換器振子の地震計測には適さないだけでなく、布設工法上の仕様から筐体は船上において 50G に到る大加速度を受け(関連研究 1 参照)たとき、破壊する可能性がある。このため、ジンバルおよび振子を機械的に保護する必要がある。この 2 項目の制御は海岸中継所から遠隔制御せざるをえない。このシステムでは

信頼性向上の観点から最小限必要なジンバルおよび振子の制御のみを、給電電流を変化させることにより行う方式を採った。この方式には伝送路が片方向ですむという大きな特徴があり、信頼性、確実性が高い。

その他の制御の対象となる 3 項目としては、観測中に振子を振動させて出力を観測し特性を監視する等の機能も望まれる。多種類の制御のためにはパイロット信号による方式が適しているが、これは、伝送系が双方向になるため実装スペースの増大、信頼性の低下という欠点が生じるので、この方式は採用しなかった。

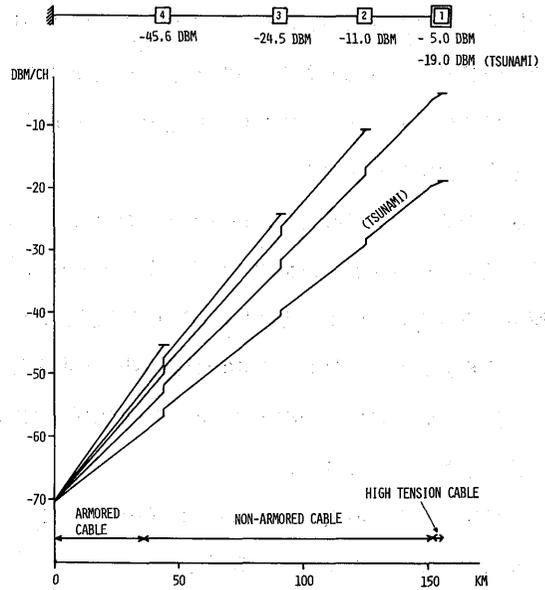


図 2.10 伝送レベル図。御前崎系のもの。

Fig. 2.10 Level diagram of the System.

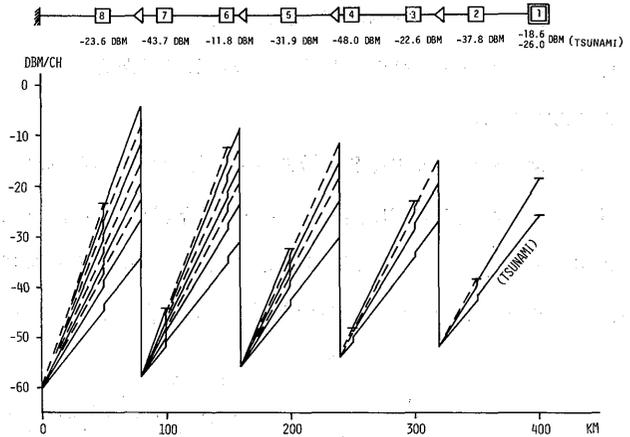


図 2.11 伝送レベル図。将来、他の海域にて 8 観測点を 400 km のケーブルを用いて展開した場合のレベル図。中継増幅器を 4 台必要とする。

Fig. 2.11 Level diagram for a future system.

シンバルは布設が完了するまではまさつ力だけでなくピン—穴系によっても固定されていて輸送、布設時の衝撃から保護される。観測に入る前に海岸中継所からの指令（給電電流の+10%）によりシンバルは一旦、フリーの状態にされ、重力の作用で上下・水平の正確な設定が得られる。次に二度目の指令（給電電流をもとにもどす）によってそのままの状態固定される。三度目の指令（給電電流の極性を逆にする）で振子が自由になり、その後、正規の給電を行うことにより観測が開始される。振子の固定方法は、電氣的に振子を過減衰にして半固定する方法とした。機械的な固定方法は、機構が微細になり、かえって、耐衝撃性に問題がある。この方法でも予想される衝撃に耐えうることが確認されている（関連研究1参照）。

(3) 復調方式

地震計、津波計による観測・記録は観測中継所で行われる。海底から中継所まで伝送された信号の質をそこなわず、かつ低コストで中継所まで伝送する方法として、中継所で全ての信号を復調し、それをデジタル化した後、電電公社の回線にのせる方式が採用された。また海底から中継所までのシステム監視のため、一部の信号（6成分）は中継所において並行して記録される。

復調回路のブロック図を図2.12に、周波数配置を図2.13に示す。海底からの信号はまず、復調器が必

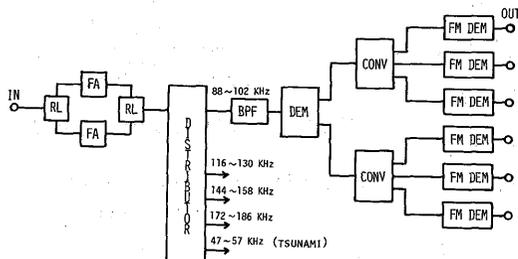


図 2.12 復調ブロック図。FAは平坦増幅器で常用、予備の2器が用意されていてリレーRLで切替えられる。信号は分配器を経由して各観測点毎の地震信号4組と津波信号1組に分割される。地震信号4組はそれぞれに対応する復調器により二次、一次復調され原信号となる。津波信号は周波数を計数することにより復調される。

Fig. 2.12 Block diagram of the demodulator.

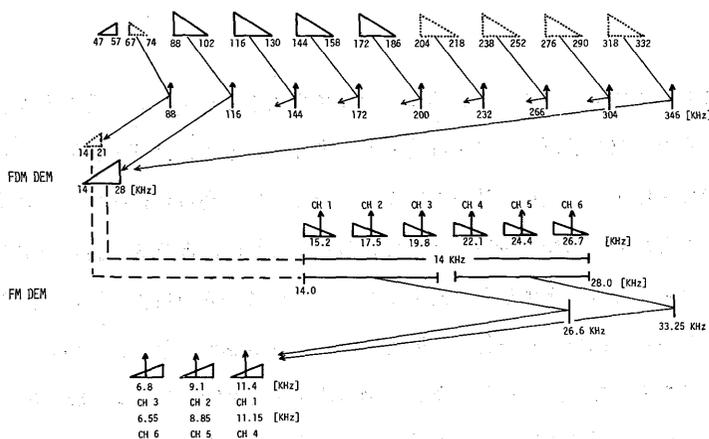


図 2.13 復調周波数配置。CH1とCH4のFM復調器は中心周波数がほぼ等しい(11.40 kHzと11.15 kHz)ので全く同一の回路にしてある。CH2と5, 3と6も同様。

Fig. 2.13 Frequency allocation of the demodulation.

要とするレベルまで増幅された後、バンドパスフィルターにより各観測点毎の信号に分けられる。片側帯波のみが伝送されてきているので、変調時に用いた搬送波と等しい周波数を加えると、もとの一次変調後の周波数帯に変換される（二次復調部）。この信号を直接復調するのは、そのためのバンドパスフィルターの実現に困難がある。低周波側の3成分と高周波側の3成分とを異なる周波数でほぼ同じ帯域に変換し、最後にFM復調をして原信号を再生する方式を採った。FM復調方式は、直線性、S/Nにすぐれる単安定マルチプレクサー回路を採用して、海底から伝送されてくるS/Nを劣化させることなく復調している（関連研究3参照）。

津波信号の復調ブロック図を図2.14に示す。地震計と同様に、変調時に用いた搬送波と等しい周波数を加えて、もともと津波計が有していた帯域に変換された後、てい倍（40倍）することにより感度を上げ（50 cm/Hzから1.25 cm/Hzへ）0.5秒のゲート時間内のパルス数を1秒毎に計数することにより復調を行っている。津波波高の値は海岸中継所においてその値が装置前面に表示され、また、アナログ連続可視記録をも行っている。復調において、ゲート時間を長くすれば分解能の良い記録となるし、また、海底部の津波計自体もそれに耐える能力を持っているが、後に述べるように、分解能を上げることよりもサンプリング時間隔を短くすることの方を重視して、このような復調方式とした。というのは、津波計は、一種の長周期上下動地震計としても使えるからである。

(4) 陸上伝送

海岸中継所において受信・復調した信号は中継まで陸上を伝送される。その方式としては、公社回線を専用した有線方式と自営の装置による無線方式とが考えられるが、保守・運用上の制約から有線方式を採用した。回線の種類はI-1規格が望ましいが、公社において海岸中継所のある御前崎町までこの回線を敷く予定のないことが早い時期に判明したので、D-1規格の回線を6回線利用することとした。

変調方式はアナログ方式が実績も多く確実であるが、海底からの良質の信号を、その質を劣化させずに送ろうと考えると多数の回線を必要とし、運用上のコストが莫大となる欠点がある。このため高速のデジタル方式の検討を重ねていた。そして実際に御前崎—東京間のD-1回線を専用で借り、PCM9600 bit/sec デジタル伝送の実験を行った結果（気象研究所地震火山研究部、1978）、有効な方式であることが明らかになったのでこの方式の採用に踏みきった。

使用した回線は通常のD-1回線であるが、変調方式がすぐれていて限られた帯域を有効に利用した結果、高速の伝送が可能になっているものである。この変調方式はQAM（直交振幅変調）と呼ばれる方式

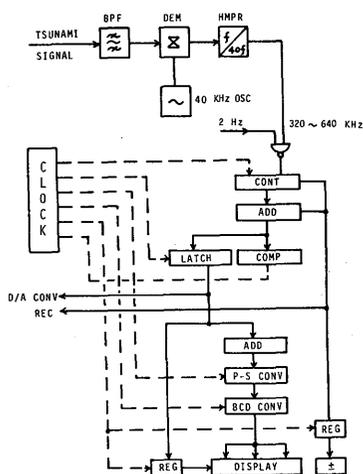


図2.14 津波信号復調ブロック図

Fig. 2.14 Demodulation of the tsunami signal.

で、標準方式としてCCITT(国際電信電話諮問委員会)が1976年に勧告(V29)したものである。

QAMモデムは入力するデジタルデータをスクランブルして1と0の並びをランダム化した後、4ビット毎にひとまとめにしてその一組のとり16とおりの状態(値)に応じて搬送波の振幅、位相を変化させるものであるが、スクランブルしてあることにより、回線に送出される波のスペクトルが0.5~2.9 kHzの帯域で白色化している。これにより情報密度(伝送速度)を向上させている。また受信・復調においては自動等化器を装備して回線特性の変動を時々刻々補償して安定に受信できる。この2つの大きな特徴により 10^{-6} のビット誤り率を得るための回線のS/N(Nは白色雑音)は25 dBで充分である。QAM方式モデムの概要を表2.3に示す。本システムでは、10ビットのデータを約113Hzのサンプリング周波数にて、1回線当り6成分伝送している。

表 2.3 QAM方式モデムの概要

方 式	概 要
適 用 回 線	公社 D-1 規格 4 線式専用回線
変 調 方 式	QAM(直交振幅変調)方式
データ伝送速度	9600, 7200, 4800 bit/s 切り替え可能
キャリア周波数	1700 Hz
変 調 速 度	2400 baud
伝 送 帯 域	500~2900 Hz
復 調 方 式	同期検波方式
等 化 方 式	適応型自動等化方式

陸上伝送における特徴は回線の不安定性に配慮を払った点にある。6つの回線には完全な互換性があり、もし一部の回線に障害が発生しても伝送路を切替えることにより、当面必要な成分の伝送を容易に確保できる構成にしてある。

(5) 雑 音

海岸中継所および観測中樞において復調された信号の内には、真の地動を表現しているもの以外に雑音も含まれている。雑音の出所は地震計等化増幅器、一次・二次変調器、送信増幅器、復調器等があり、また中樞においてはA/D変換による量子化雑音も含まれる。量子化雑音の評価は容易であるが、それ以外の雑音の評価は3段階にわけて行なった。第1段階はまず机上で過去の実績により、あるいは簡単な試作により行い、設計に反映させるためのものである。第2段階では実装試作品により雑音を測定し、設計上期待した数値が満足されたかどうか調べ、満足されていない場合は、原因を調査し本製品に反映させる段階である。第3段階は、本製品についてその実力を評価するものである。第1段階において最も大きな、従ってシステム全体のS/Nを支配すると考えられる雑音源はFM変調器で、周波数短期不安定性に起因するものであると予想された。当初、この雑音により、S/Nは56 dBと評価した(逆に言うと、S/N 56 dBが確保できるように考えてシステムを設計したということの意味する)。この数値自体は最良の

値とは言えないが、システム全体の実装上、信頼性上の均衡から最終的に得られたもので、また、最悪の場合の値であり充分向上の余地が見込まれていた。事実、第2段階において70dB以上確保できる見通しがつき(関連研究3参照)、この時点で地震計等化増幅器の初段増幅回路から出る雑音も問題として表にあらわれることとなった。後に述べるように地震計

は4.5Hzの固有振動数をもつ振子で微小な2Hzの地動まで抽出しているのでS/Nに対しては条件が厳しい。

入力換算雑音の小さな種類のIC(演算増幅器)を選定した上、更に初段にはその種類内、とくに雑音の小さなものを個別にあたって選択し、使用した(関連研究2参照)。この結果、第3段階の雑音の評価として最も悪い成分でも図2.15、2.16に示すとおり70dBが確保されていると考えうる。図2.15はFM変調器を含む伝送系全部の雑音を、図2.16が地震計等化増幅器の雑音を示す。いずれも2V^{P-P}がダイナミックレンジの上限なので、雑音が0.5mV^{P-P}のときS/N72dBに相当する。

陸上伝送前のデジタル化は10ビットでA/D変換を行った。この10ビット60dBのダイナミックレンジは地震動の振幅に換算して0.02~20 μ m^{P-P}(高倍率成分)、0.4~400 μ m^{P-P}(低倍率成分)、0.02~20mkine^{P-P}(中間点上下動の速度型成分)、0.004~4mkine^{P-P}(先端点上下動の速度型成分)に割付けた。

以上に述べた雑音は電気的な雑音で、システムの良さを示すパラメーターと考えられるが、実際、観測を制限する自然発生の地動雑音(いわゆる脈動でその卓越周期は2Hz以下で、帯域外である)は、気象条件によって大きく変化するが、穏やかな日には、高倍率成分の陸上

伝送のダイナミックレンジの下限いっぱいまで下がる。このことは地震波的なバックグラウンド雑音と電気的な雑音とが調和して均衡がとれたシステムが構成されていることを示す。雑音が上のとおりであるから観測中枢においては1万倍ないしは1cm/mkine程度の高倍率観測が可能である。

なお電気的な雑音はケーブル長を400kmに延長した図2.11のモデルケースにおいても、適切な中継増幅器を用意することにより上の72dBという値に劣らないものを達成可能である。



図2.15 伝送系の総合雑音。伝送部入力を短絡した状態で測定したものだから伝送部総合の雑音と考えられる。測定は装置の製作されたクリーンルーム内で行なわれたので(海底ケーブルの代りに抵抗減衰器を用いて)、誘導による雑音をも、ひろっていると考えられ、海底という環境下では、もっと少くなるものと期待できる。

Fig. 2.15 Typical overall noise of the transmitter.

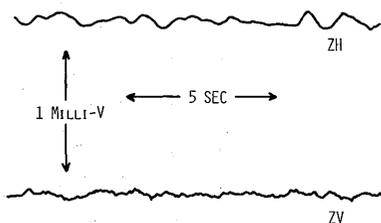


図2.16 地震計の総合雑音。変換器の代わりにコイル抵抗に等しい固定抵抗をつないで地震計の出力を見たもの。図2.15と同様の注釈がつく。図2.15と図2.16の和が復調後に中継所において見られる雑音のすべてである。中枢においてはこの他に量子化雑音(1または2mV^{P-P})も含まれる。

Fig. 2.16 Typical overall noise of the seismograph.

1.5 海底部給電

海底部への電力は海岸中継所に設置した給電装置により供給される。給電方式は同軸ケーブルの中心導体と大地間に給電電圧を印加し、先端点近く(0.5~1 km はなれている)の海底陽極アースから海水および大地を經由して海岸の海浜陰極アースに至る直流定電流方式である。直流定電流であるから、海底部機器は、容易にかつ信頼性の高い直流の定電圧を得ることができるし、信号と電力の分離・結合も容易である。給電装置はジンバルおよび振子の制御機能も有する他に、観測時には長期間安定に高信頼で稼動することが必要である。この装置の稼動の信頼性にかかわる回路は、単一でも充分機能する回路をすべて二重化して冗長性を持たせている。それと同時に、海底部装置を破壊するような過電圧、雷サージに対しては、過渡的な異常電圧の発生を防止するためのサージアブソーバーを設け、比較的変動のおそい過電圧に対して有効な電流垂下機能、給電電圧・電流が正常時の5~10%以上に達した時にこのレベルを検出して給電機能を停止させる遮断機能、雷サージ圧縮機能等の保護回路を設けてある。

給電装置への入力商用電源および発動発電機により二重にバックアップされた二次電池からの-21 Vの直流入力であり、これをインバーターを用いて20kHzの方形波に変換後、昇圧、直流変換し、観測時には210mAの定電流を供給する。定電流方式であるため、観測装置が増えるほど、またケーブルが長くなるほど高電圧を必要とするが、所要電圧は中間点装置1台当り66V、先端装置は津波計を含めて84V、無外装ケーブル100kmあたり20V、外装ケーブル100kmあたり6V、中継増幅器20Vの他に海底アース点から海浜アース点までのいわゆる地電位、両アースの接地抵抗による電位等の和となる。今回の御前崎系の給電電圧は約360Vで $0.1V^{P-P}$ 程度の振幅をもつ日変化をくりかえしている。この変動の原因は地磁気変動あるいはその他に起因する地電位の変動によるもの以外には考えられず、地球電磁気学的な観点からも興味ある変動である。このようなことから、給電電圧も重要な観測項目のひとつとして海岸中継所に連続可視記録をとどめるとともに中継まで伝送している。

1.6 地震計

地震計は地震動を電気信号に変換する変換器、それを搭載して水平・鉛直を保つジンバル、および変換器出力を地震計的に好ましい特性に処理する等化増幅器等で構成される。

変換器は動電コイル型を採用した。従来から用いられてきた変換器には、動電コイル型、圧電素子型、容量型、差動トランス型等があり、また海底地震計としてよく用いられるものに hidroフォンがある。これらはいずれをとっても信頼性を評価・向上させる手法の確立したものはなく、開発の当初からシステム全体の信頼性の均衡という点で問題があった。また布設工法上、耐衝撃性が要求されるが、これもまた従来、経験のない仕様である。この2点に関して、これらを克服する手法を確立する必要がある。そのため最も近道と考えられる変換器として構造が簡単で最も多くの使用実績のある動電コイル型を採用した。振子は実装スペースが小さくてすむダイヤフラムバネ2枚によって支持された直動型とした。そして開発の結果、固有振動数は中間点装置用は4.5 Hz、先端装置用は3 Hz が得られた。両者の差は布設時にこ

うむる衝撃の大きさの違いによる。すなわち先端装置は衝撃が小さいので固有周期の長い振子でも衝撃に耐えうるわけである。固有周期は、対象とする周波数帯域を広くとるためには長い方が望ましいが、試作品による耐衝撃試験（関連研究1参照）によれば、上記の値がこのような使用条件下では限界である。なお、上下動変換器においては、直動型の場合に従来一般的に使用されてきた補助バネによる支持は行わず、ダイヤフラムバネに与えた初期変形のみで振子の重量を支持して、部品数を減じている。

ジンバルには耐衝撃性能とともに、高い起立精度が要求される。後者については、振子の固有振動数との関連で 1° 以内におさめる必要がある。ジンバル可動部の軸受として、衝撃に強くかつ低摩擦トルクの高精度ベアリングを用いた結果、 0.1° 以上の精度で起立させることができた。可動部のクランプは輸送・布設中は摩擦板およびピン—穴系の両方で行われていて、大きな振動・衝撃に対して保護される。しかし一旦、海中に設置し正規の位置に設定された後はピン—穴系による固定は必ずしも行われず、摩擦板のみによる固定となるが、それでも大地震時の振動によってジンバルの可動部が動くことは全くありえないことを確かめてある。なお変換器の水平直交方向の2台は設置の方向によっては必ずしも南北・東西には向かない。これは、そのようにしてジンバル構造を複雑にして信頼性を低下させるほどの地震計測上の必要性が認められないからである。

等化増幅器は変換器の出力を変位もしくは速度に比例した出力に等化し、かつ適正なレベルに増幅しその出力をFM変調器にわたす機能を有している。陸上において受信した信号を等化したのでは伝送系のダイナミックレンジ72dBが有効に使えないので、海底において、変調する前に等化を行う。固有振動数が帯域下限周波数より大きいと等化方式は単純な積分回路のみでは達成できない。このため、動電コイルの他に帰還コイルを設け負帰還して等化する方式と、増加積分器による補正回路方式とを検討したが、総合的に、大きな制動をかけた振子を用いてその動電コイル出力を増加積分する補正回路方式を採用した。これにより、表2.4の成分を有する地震計が構成されている。なお表2.4において先端装置の短周期成分と長周期成分とは中周期成分から海岸中継所において等化されている。短周期成分の等化において、ダイナミックレンジは全く狭くならないが、長周期成分は、60dB程度に狭くなっている。先端装置において短周期成分、長周期成分も、海底で等化して伝送してくるのが理想ではあるが、そうできなかったのは等化増幅器において使える信頼性部品、実装空間および伝送チャンネル数により制限されているためである。

気象庁76型地震観測網に用いられている地震計の帯域の下限は1Hzであり、当面その観測網の一環となるこのシステムも1Hzまでを帯域とするのが望ましいが、変換器の固有振動数の制限のみならず、海底におけるバックグラウンド雑微動は1秒以上の長周期側で陸上に比較して非常に大きく（関連研究4参照）、帯域を1Hzまでのばすと倍率が上げられないという制限から、帯域の下限は2Hzとなっている。しかし、このことはこのシステムを設置した大きな目的である平常時の地震活動を監視しつつ来るべき大地震の前兆的地震活動をとらえるという点からは、ほとんど問題ではなからう。

表 2.4 地震計成分一覧表。周期の欄で、短：2~20Hz，中：0.8~20Hz，長：0.2~12Hz，海底伝送の振幅範囲の欄の△印の成分は中継所において等化されて得られるもの。

観測点	方向	極性	出力型式	感度	周期	海底伝送の振幅範囲	陸上伝送の振幅範囲	
先端点 33°45.90' N 137°35.38' E -2202m	X	+X : ESE	変位	高	短	△	0.02 ~ 20 μm ^{P-P}	
			"	"	中	0.01 ~ 40 μm ^{P-P}	0.04 ~ 40 "	
			"	低	長	△	0.4 ~ 400 "	
			"	"	短	△	" "	
	Y	+Y : SSW	"	"	中	0.1 ~ 400 μm ^{P-P}	" "	
			"	高	短	△	0.02 ~ 20 "	
			"	"	中	0.01 ~ 40 μm ^{P-P}	0.04 ~ 40 "	
			"	低	長	△	0.4 ~ 400 "	
	Z	+Z : up	"	"	短	△	" "	
			"	"	中	0.1 ~ 400 μm ^{P-P}	" "	
			"	高	短	△	0.02 ~ 20 "	
			"	"	中	0.01 ~ 40 μm ^{P-P}	0.04 ~ 40 "	
			速度 (超高)	短	0.001 ~ 4 m _{kine} ^{P-P}	0.004 ~ 4 m _{kine} ^{P-P}		
No. 2 中間点 33°56.8' N 137°45.4' E -1542m	X	+X : ENE	変位	高	"	0.01 ~ 40 μm ^{P-P}	0.02 ~ 20 μm ^{P-P}	
			"	低	"	0.1 ~ 400 "	0.4 ~ 400 "	
	Y	+Y : SSE	"	高	"	0.01 ~ 40 "	0.02 ~ 20 "	
			"	低	"	0.1 ~ 400 "	0.4 ~ 400 "	
	Z	+Z : up	"	高	"	0.01 ~ 40 "	0.02 ~ 20 "	
			速度 (高)	"	"	0.01 ~ 40 m _{kine} ^{P-P}	0.02 ~ 20 m _{kine} ^{P-P}	
	No. 3 中間点 34°09.90' N 137°57.90' E -817m	X	+X : NE	変位	高	"	0.01 ~ 40 μm ^{P-P}	0.02 ~ 20 μm ^{P-P}
				"	低	"	0.1 ~ 400 "	0.4 ~ 400 "
Y		+Y : SE	"	高	"	0.01 ~ 40 "	0.02 ~ 20 "	
			"	低	"	0.1 ~ 400 "	0.4 ~ 400 "	
Z		+Z : up	"	高	"	0.01 ~ 40 "	0.02 ~ 20 "	
			速度 (高)	"	"	0.01 ~ 40 m _{kine} ^{P-P}	0.02 ~ 20 m _{kine} ^{P-P}	
No. 4 中間点 34°23.05' N 137°52.50' E -722m		X	+X : ENE	変位	高	"	0.01 ~ 40 μm ^{P-P}	0.02 ~ 20 μm ^{P-P}
				"	低	"	0.1 ~ 400 "	0.4 ~ 400 "
	Y	+Y : SSE	"	高	"	0.01 ~ 40 "	0.02 ~ 20 "	
			"	低	"	0.1 ~ 400 "	0.4 ~ 400 "	
	Z	+Z : up	"	高	"	0.01 ~ 40 "	0.02 ~ 20 "	
			速度 (高)	"	"	0.01 ~ 40 m _{kine} ^{P-P}	0.02 ~ 20 m _{kine} ^{P-P}	

1.7 津波計

この観測システムに地震計以外に津波計も設置しようという試みがあったことは充分理解できる。海底の地殻変動に伴う津波をその発生域で直接、連続観測することにより断層生成過程とも言うべき震源過程の詳細の研究のためのデータが得られることが期待できるし、また、沿岸におしよせる津波を外洋にて、いち早くとらえることができる点でも有意義である。ただ、津波計においては開発当初から地震計の場合と同様に、変換器の信頼性という点で問題があった。地震計変換器の場合には、非高信頼の使い方であっても経験が豊富であり、高信頼性を達成する手法を、限られた開発期間内において確立できる見通しは立てられたが、津波計変換器の場合は、必ずしもそうではなかった。このためやむをえず、津波計変換器に限ってはシステムの他の部分と同等レベルの高信頼化はあきらめ、単なる津波計の障害がシステムの他の部分に障害を与えないよう配慮し、直列電気系列から分岐するという方針をたて、既成の実績のある製品の選択を開始した。

海底において水深を測定する方式としては超音波を用いて、直接「水深」を測る方式と、「水圧」を測る方式が考えられるが、超音波を用いることには消費電力その他の点で問題が多い。津波の周期帯域では海底にまで「水圧」は伝わってくる(図 2.17)ので、圧力センサーを用いた水圧計を津波計として採用す

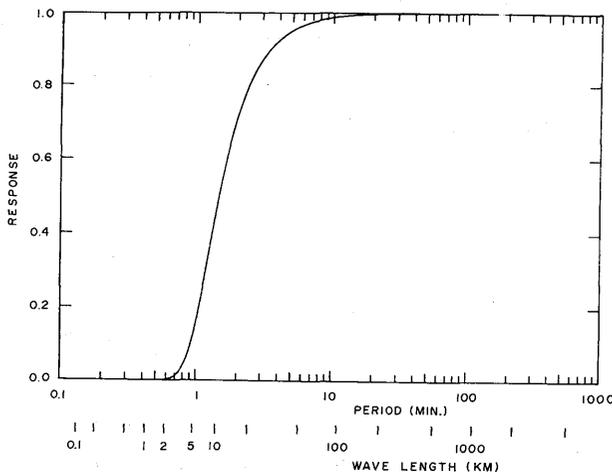


図 2.17 津波計の応答。水深 2200 m の海底における水圧は、波の周期(波長)に応じて図のような応答を示す。津波や潮汐の周期は 20 分以上だから、ほぼ完全に応答する。

Fig. 2.17 Frequency response of the tsunami-meter.

ることとした。水圧計として検討の対象として採りあげたものは水圧により振動する弦の張力を変化させその共振周波数を測るパイロトロン、差圧力型磁歪式水圧計、水晶振動子の発振周波数を圧力に比例して変化させる水晶圧力計等があるが、分解能、温度安定性、経年安定性、使用実績、システムへの組み込み易さを考慮に入れると水晶圧力計が圧倒的に優るという検討結果になった。具体的な機種は米国ヒューレットパッカード社が石油油井用に開発してハワイ等でも海底用として用いられたこともあるモデル 2813 B をとりあげ、これに信頼性の評価を与えた後、防振、防食加工を施してシステムに組み入れた。2813 B の出力周波数は大気圧下の 8 kHz から水深 4000m 下の 16 kHz まで直線性よく変化する。この発振周波数は長期安定性にすぐれ、試験観測結果によれば水深換算で 0.3 mm/day 以下を示している(この値に

は変・復調の水晶発振器の安定度も含まれている)。もっともこの数値は海況の変化も含んでいる可能性もあるので確かなことは今後の調査が待たれる。温度変化に起因する雑音は水晶振動子に常に伴うものであるが温度補償を行って水深換算で10 cm/℃以下に抑圧されている(関連研究5参照)。海底という観測環境を考えるとある程度満足のゆくものといえよう。分解能は復調の方式にもよるが2813B自体としては2000mの水深下で1 mmの分解能があると考えうるデータが得られている。以上の性能は外洋津波計として使われる水圧計としては満足のゆくものであり、耐振動・衝撃性のチェックおよび電子回路の信頼性の評価(単に推定したにとどまる)を行って津波計として採用した。伝送においては8~16 kHzの信号をそのまま伝送したのでは伝送帯域が広がって不利であるから、一度振幅変調して周波数帯を48~56 kHzに移動させて伝送する(図2.9等で47~57 kHzとあるのは、余裕をみた値)。

1.8 記録方式

地震、津波、地電位の記録は海岸中継所と観測中核とで同時に採られるが、これらの記録の処理・解析は気象研究所の手をはなれて気象庁観測部により、従来からの業務に合致した形態で行われる。従って、このシステムの構成や仕様において、観測部の業務的要望が強くていいる面があることは否定できない。記録方式に関してはそれが従来からの処理・解析業務と密接に結びつく関係上、特にこの色彩が強い。このように多くのコストを必要とするシステムを開発する者の立場からすると、海底部については、観測の項目も少なく、地震の信号にしても帯域、作動域とも決して広いとはいえない点や、陸上部については、海底という特殊な観測環境においてしかも大地震の発生が懸念されている地域における観測・処理システムにしては不十分な事が多い点に、必ずしも全面的に満足のゆくものではない。

海岸中継所においては地震信号6成分と津波、給電電圧各1成分の連続可視記録器が用意されている。これらの記録は海底部機器の作動状況を監視するためのものであるが、電話回線の障害時には以下に述べる中核における処理の一部は代行が可能である。観測中核では海岸中継所と同じく、地震信号6成分と津波、給電電圧各1成分の連続可視記録を採る他、地震発生時にはアナログ磁気テープ3成分×5台、早おくり可視記録12成分の記録も採る。磁気テープは気象庁76型地震計全国観測網に組み込まれ震源その他の計算に用いられ、一方早おくり可視記録は東海地域観測網に組み込まれ、東海地域に発生した小地震の震源緊急計算に用いられる。

1.9 信頼性

この観測システムの海底部については、障害が発生すると修復までに長期の欠測期間と多くのコストを必要とすることから、高い信頼性を仕様に盛り込んだ。信頼度水準として、地震1成分当りの平均故障間隔を100年(1000 Fit)と設定して装置の設計に着手した。システム内の各部門の信頼度水準設定にあたっては、その故障が観測点1点以上の故障の原因となる部門と、それ以下の部門とに分け、前者については電電公社等の海底中継方式で使用実績のある部品と同一系列の水準を設定し、また後者については陸

上幹線方式と同等に管理され、且つ十分実績のある部品を更に故障率1/2を目標に管理するという水準を設定した。これにより表2.5に示す信頼度の部品の使用が可能となり、その結果、目標とした信頼度がほぼ達成できた。

表 2.5 使用部品の推定信頼度。1 Fitとは1時間作動させたときの故障する確率が 10^{-9} の場合の信頼度

	6CH以上共通部	1~2CH部
トランジスタ	25 Fit	25 Fit
IC	—	50
ダイオード (浅海)	1	1
(その他)	2	2
バリスタ (浅海)	2	—
(その他)	—	4
コンデンサー VQ (浅海)	1	—
(その他)	2	2
" マイカ (浅海)	0.5	0.5
(その他)	1	1
" BL (浅海)	2	2
(その他)	—	4
" SF	1	1
" MF	1	1
" ST (浅海)	1	—
(その他)	2	2
抵抗器金属被膜 (浅海)	0.5	0.5
" カーボン	1	1
トランス (浅海)	3	—
(その他)	5	—
コイル (浅海)	1	—
(その他)	2	2
水晶振動子	10	—
半田付	0.1	0.1

高信頼ということが、どれほど大変なことか、理解の助けとするために信頼性を必要とする部品の製造に対する考え方をコンデンサーを例に述べる。まず、コンデンサー一般の製造における基本方針は以下のとおりである。

i) 従来からのフィールドデータを分析し、主要な故障因子を明らかにすることにより、材料、製造法、構造などに関し必要と認められる設計改善を行う。

ii) この設計に基いて試作を行った部品について、高いストレスレベルを含む各種悪条件下で信頼性評価試験を行い設計上の確認を行う。

iii) 製造にあたっては特別に訓練された作業者が定められた工程と作業基準を確実に守ることによって、

設計上期待した信頼性を製品に盛り込む。作業条件、材料製造、検査などの作業の内容は、詳細な記録が残されミスを防ぎ止るとともに、不良を生じた時の原因追求を可能なようにする。

iv) 品質保証試験として全製品に高温負荷エージングを実施し、初期故障を出しつくす。

以上の一般的方針のもとで、P S F（電力分離用波器）に用いられる高耐圧・大容量を条件とする紙コンデンサーを例にとり、その具体的設計方針について、以下に述べる。

- i) 絶縁油は耐電圧、絶縁抵抗、誘電率の温度特性等から最もすぐれたシリコン油を用いる。
- ii) 素子は無誘導巻により自己共振周波数を高くする。
- iii) 外装は金属ケースのハーメチックシールとする。
- iv) 製造中の含浸、塞口の主要2工程の作業には熟練者をあてる。

製造工程のフローチャートを図2.18に示す。

高い信頼性を達成するための信頼性技術について、コンデンサーを例にとり上に述べたが、信頼性工学の立場からすると、高信頼を達成するためのもう一つの要因として、設計者・作業者ひとりひとりの高信頼性意識の高揚があげられる。この意識の高揚については一朝一夕ででき上るものではなく、長年の作業、故障モードの検討により製造社内にノウハウとして受け継がれてゆくものである。このシステムの開発に当り、まず信頼性を管理しうる製造者を選定することが必要条件であったが幸にも、電電公社等の指導により実績のある製造者（複数）が育成されていた。その意味では、このシステムの信頼性の高い設計・製造については、公社、製造者に負うところが大きい。

この結果、目標とした信頼性は達成されたが、故障の発生は統計的に見るとランダムな確率現象であるから、このシステムの中で正常に作動している成分の数が年月を経るとともに実際にどのように減ってゆくかは不明であり、単に1成分当り100年の平均故障間隔という割合で減ってゆくことが確率的に期待されるにすぎない。言いかえるならば、信頼性を上述の如く厳しく管理したので平均故障間隔は1成分当り100年であると、自信をもって言える。

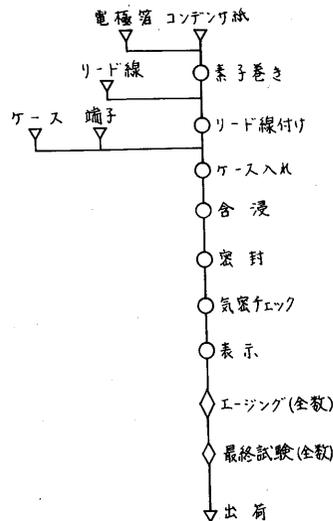


図2.18 紙コンデンサーの製造工程。エージングにおいては温度80℃において定格電圧の1倍および1.4倍の電圧を印加し1500時間の高温負荷を行う。

Fig. 2.18 Manufacturing process of the paper capacitors with high reliability.

2. 海底部機器

2.1 概 要

海底に設置される地震計、津波計、伝送部等の機器の設計・製造において一般品と異なる点は

- i) 実装空間が限られている。
- ii) 耐振動・衝撃性に優れている。
- iii) 信頼性が高い。

の3点に集約される。この3点を考慮して設計・製造された海底部機器について以下に述べる。

2.2 地 震 計

地震計の周波数帯域、振幅作動域、出力比例型を決定する要因としては、以下の項目があげられる。

i) 観測の目的

大地震の発生が懸念されている海域において、平常時の微小地震活動状態を監視して、前兆的異常地震活動を検出することが主な目的である。観測の積み上げにより各方面の地震学的知見が増すことも当然期待できる。

ii) 観測環境

人間活動に起因すると考えられる高周波雑微動は、海域においては非常に小さい反面、1 Hz 以下の低周波帯域では海象起源と考えられる雑微動が意外に大きく（関連研究4参照）、短周期地震計の帯域を1 Hz 以下まで広げることは得策ではない。

iii) 製作の限界

前節で述べた、実装空間、耐振動・衝撃性、高信頼性の3条件は、特に変換器の製作を制限するものであり、一般的に大型で振動・衝撃に弱い長周期変換器は使用が困難となる。

iv) 観測体制

このシステム完成後は気象庁観測部により従来からの体制のもとで処理・運用される。このため各観測点は陸上の観測点と同様の扱いをうけるので特性は地上の地震計と合致していることが望ましい。

以上の項目を勘案のうえ地震計の特性は表2.4（前出）のように決定された。

このシステムで言う地震計とは、変換器、等化増幅器、ジンプル、制御部で構成され、地動を電気信号に変換した後、その電気信号に積分等の処理を施して最終的な特性に等化し、その信号をFM変調器にわたすまでを含む（口絵写真4参照）。

(1) 変換器

変換器の構造およびダイヤフラムパネの形状を図2.19に示す。写真2.2は変換器の外観である。出力は2枚のダイヤフラムパネに支えられた振子と、それに巻きつけられた動電コイルが地動によって振動し永久磁石による磁場を横切ることにより発生する。コイルの線材は導体径0.1 mm ϕ のポリウレタン銅線

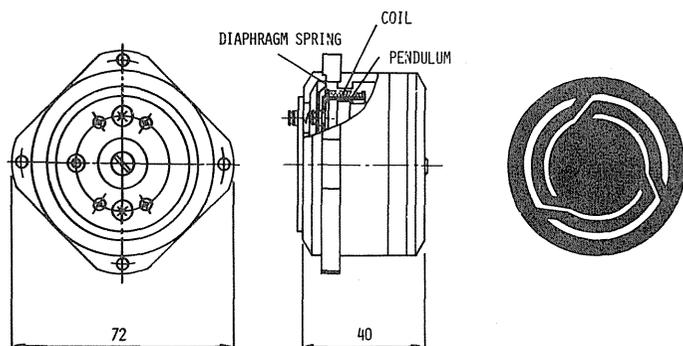


図 2.19 変換器の構造とダイヤフラムバネの模式的形状

Fig. 2.19 Transducer for the seismograph and its diaphragm spring.

で約 4000 ガウス（有効な磁場）の磁場に 200m の長さを巻くことにより約 0.8 V/kine の感度が得られている。コイルポビンには特殊表面処理を施したアルミニウムを用いることにより約 1 の減衰定数をもっている（コイル開放時）。これにより等化の際に S/N が有利となる。バネ材としては非磁性で高応力がとれるベリリウム銅合金を使用して振子の質量もそのバネ材で支える直動型とした。固有振動数は中間点装置用が 4.5 Hz，先端装置用が 3 Hz であるが、これはバネ（復元力）のみの違いであって構造、外観は両者とも図 2.19，写真 2.2 に示すとおりである。上下動と水平動にも外観の差はなく、上下動

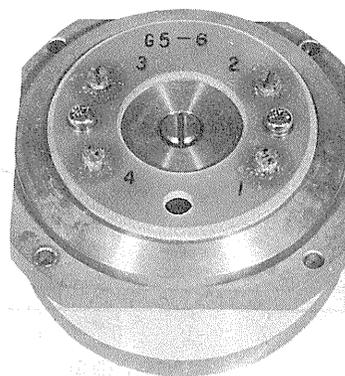


写真 2.2 地震計変換器の外観

Photo. 2.2 Transducer for the seismograph.

変換器についてはダイヤフラムバネの初期変形により振子を支えている。動電コイルは 2 本巻いてあって、1 本は 0.8 V/kine の感度を有する検出用コイル，他の 1 本はその $1/10$ 以下の感度の試験用コイルである。試験用コイルは製造時において、変換器の信頼性，性能を確認するために活用される。

変換器の開発においては種々の克服しなければならない問題があった。布設時における衝撃はそのひとつである。通常、変換器は長周期になればなるほど、厳重にクランプした上、衝撃を与えないように取扱われる装置である。ところが海底ケーブルの中継器布設においては、10 msec のパルス幅をもつ 50 G の衝撃が加わる可能性があり、実際の中間点装置布設時にも、この衝撃を軽減すべく努力はしても、万一にそなえて衝撃に耐えるように製作しておく必要があった。事実、本布設において中間点装置 1 台がやむをえず相当大的な衝撃を受けた。変換器を初めとしてジンバル，等化増幅器も含めた地震計の実装試作品を作り破壊に至る振動衝撃試験を実施し，その結果を評価して製品にフィードバックさせて，上記の衝撃に耐えうる製品を完成してあった（関連研究 1 参照）ので，うえの中間点装置もなんら異常なく作動している。

変換器の特性の長期安定性の評価という問題も、得られるデータの信頼性に直接はねかえってくる重要な問題であるにもかかわらず、従来から未経験の分野であった。手のとどく場所にある変換器の特性が疑わしければ検定を行なえばすんでいたわけである。陸上からの指令によりチェックパルスを振子に与える等の制御が可能な方式ならばこの問題も少しは軽減されようが本システムでは不可能であることは先に述べた。このことから、変換器の諸特性は長期にわたって全く安定したものであらねばならないが、この安定性の評価方法およびその結果についても別に記す（関連研究1参照）。

変換器はジンバルに搭載されるので、特に水平動変換器についてはジンバル固定時の傾斜による特性の変化、特に固有振動数の変化が心配されるが、変換器の傾斜角と固有振動数とは図2.20（典型的な場合）の関係にあるから、全く問題になる量ではない。また、後にのべるジンバルの起立再現角度が最悪 0.1° の場合でも、振子の中立位置の移動量は $50\mu\text{m}$ （先端装置3 Hzの場合）にすぎない。

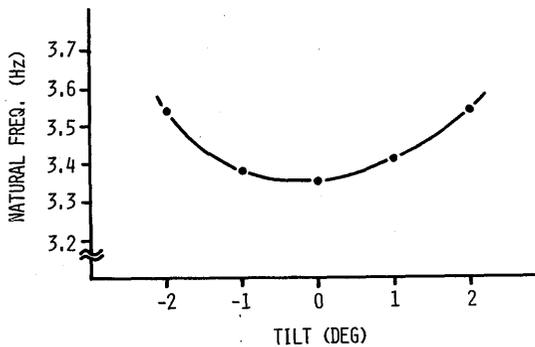


図2.20 固有振動数の傾斜特性。水平動変換器試作品についての一例、傾斜させることにより、振子の中立点がシフトし固有振動数の変化もたらされる。上下動変換器の場合は $\pm 2^\circ$ 程度の傾斜では中立点のシフトがなく固有振動数も全く変化しない。

Fig. 2.20 Typical relation between the tilt and the natural frequency of the transducer.

先端装置用の変換器は予想される衝撃が中間点の場合に比べて小さいので、固有振動数は3 Hz（中間点装置用は4.5 Hz）としてある。このため長周期側で S/N がよくなり0.2 Hz までの帯域をもつ長周期成分が海岸中継所における等化により作られている。これは観測の帯域を広げるうえで貢献している。

変換器の信頼性を評価する際にまず基礎となるのは定数の確かな測定である。この変換器はコイルボビンを金属で製造したためコイルを開放しても約1の減衰定数を持ち、固有振動数、減衰定数、感度の測定において従来の測定法では高い精度が得られない。このため新しい測定法が開発された（松本・高橋，1976）。これにより信頼性の評価が正しく行われたのみならず、等化補正も正確になされている。

(2) 等化増幅器

変換器の出力は振子の地面に対する速度に比例しており、要求される出力型式は地面の相対変位（上下動のうち1成分のみについては速度）に比例する型である。伝送系のダイナミックレンジは72 dB前後に限られているからこれを有効に利用するためにはFM変調の前の段階で等化する必要がある。先端装置の長周期成分および短周期成分は伝送路の周波数帯域の有効利用、実装空間の節約、使用部品の信頼性を勘案して陸上において等化を行ったが、これ以外は海底において変調器入力以前に等化処理を施した。先端装置地震計は中周期成分を出力する。長周期成分はそれから、 S/N の許す限り低周波域のみを増幅して作りだして、そのダイナミックレンジは60 dB程度である。短周期成分を中周期成分から作りだすこと

にはS/N的の上では何ら問題はない。

変換器の固有振動数(先端3 Hz, 中間点4.5 Hz)が対象とする帯域の下限(先端0.8 Hz, 中間点2 Hz)よりも高いため, 通常よく用いられるように減衰定数を0.7位にすると, 対象帯域内の全域で地動の変位比例(あるいは速度比例)出力となるように等化するためには, 固有振動数以上の周波数帯では1階積分, それ以下では3階積分を行わなければならない, この場合等化回路は固有振動数付近の周波数において2つの極をもつ必要がある。これでも勿論製作は可能であるが, 等化残差を少なくするためには各 부품の許容変動幅が小さくなり, 温度安定性, 長期安定性から不利である。一般に, 固有振動数 f_0 の振子に大きな減衰(減衰定数 h)をかけると, 振子の速度に比例した出力の得られる変換器の場合には, 地動の周波数 f に対して

$$2hf_0 < f \quad \text{のとき 速度比例}$$

$$f_0/2h < f < 2hf_0 \quad \text{のとき 加速度比例}$$

$$f < f_0/2h \quad \text{のとき 加速度の時間微分比例}$$

となる。このことから低周波側の極 $f_0/2h$ を帯域からはずすならば, 極は $2hf_0$ にひとつあれば足りる。すなわち h を大きくすれば等化回路の製作上有利である。 h の大きさは, 中間点装置の場合, $f_0 = 4.5 \text{ Hz}$, 帯域下限 2 Hz だから2程度以上となる。このような方式の等化回路を図2.21, 2.22に示す。

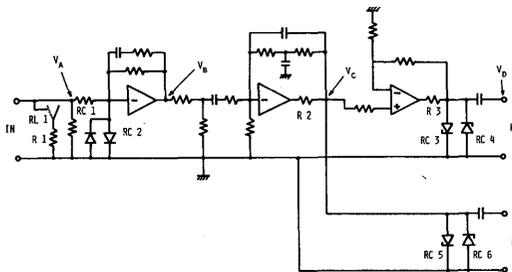


図 2.21 中間点地震計の等化回路図(水平動)。H, Lはそれぞれ高, 低感度出力。

Fig. 2.21 Equalization amplifier for the horizontal components.

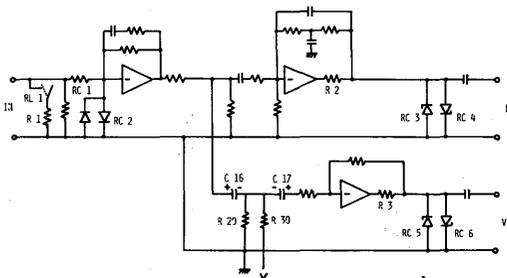


図 2.22 中間点地震計の等化回路図(上下動)。H, Vはそれぞれ変位比例, 速度比例出力, 出力Hは水平動のHと等しい感度である。

Fig. 2.22 Equalization amplifier for the vertical component.

図は中間点装置の場合であるが先端装置についてもほぼ同様である。変換器の出力は初段の増加積分により対象全帯域 $f_L \sim f_H$ において速度比例となる。つまり, $f_L \sim 2hf_0$ の帯域では1階積分され, 速度比例に, $2hf_0 \sim f_H$ では平坦増幅され速度比例のままである。水平動成分では, 2段目で $f_L \sim f_H$ で1階積分され低感度変位比例出力が得られる一方, 3段目で更に20dBだけ平坦増幅され高感度変位比例出力

となる。上下動成分では、初段の出力が1階積分・増幅され高感度変位比例出力となる一方、初段出力を平坦増幅して速度比例出力を得る。図2.21の回路の各増幅段の利得を図2.23に示す。図2.24、2.25にレベルダイヤグラムを示す。

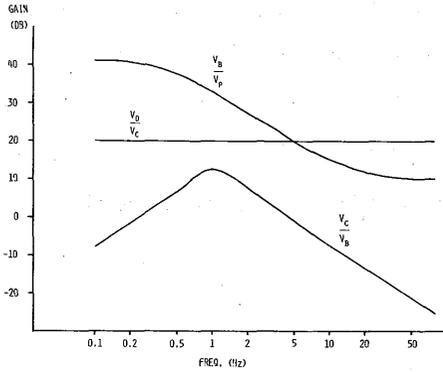


図2.23 水平動等化増幅器各増幅段の利得。 V_P は変換器の発電電圧、 $V_B \sim V_D$ は図2.21参照。

Fig. 2.23 Gain of the equalization amplifier in each stage (cf. Fig. 2.21).

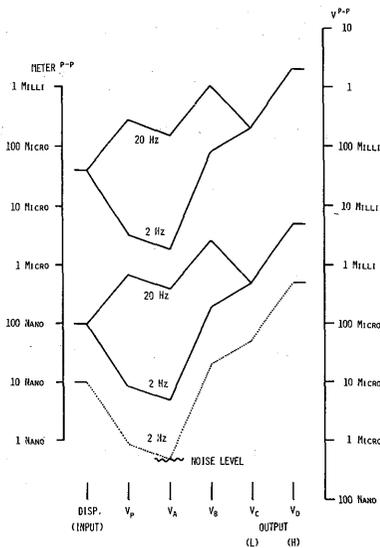


図2.24 水平動等化増幅回路各点のレベル(図2.21参照)

Fig. 2.24 Level diagram of the equalization amplifier (cf. Fig. 2.21).

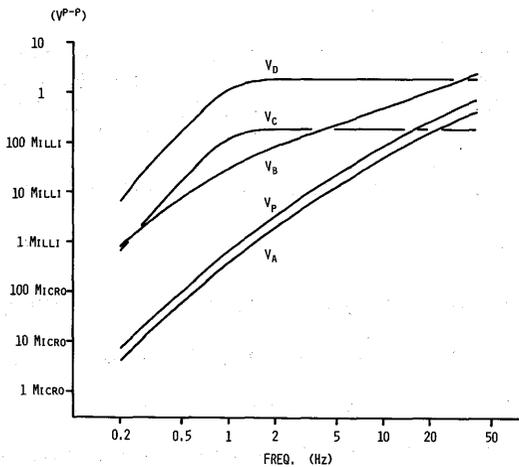


図2.25 $40 \mu m^{P-P}$ 入力時の水平動等化増幅回路各点電圧の周波数特性(図2.21参照)

Fig. 2.25 Output level of the equalization amplifier (Input level: 40 micrometers peak to peak, cf. Fig. 2.21).

図 2.21, 2.22 からわかるように等化増幅器においては 2 成分当り 3 個 (先端装置は水平 4 個, 上下 5 個) の IC を使用している。IC はその信頼性管理において, 海底中継システムでも用いられたことがないのでトランジスタと比べると管理の経験が少いことは事実だが, しかし, この等化方式をトランジスタだけで実現しようとしてもその数の増大により信頼性が向上しない。この事情を勘案のうえ, IC の採用にふみきった。その機種を選定にあたって, 信頼性以外で特に課した条件は雑音が小さいということである。変換器の感度, および大減衰を得るための外付け抵抗による出力の分割とから, 初段 IC への入力, 最低周波数・最小振幅の時最も小さくなり約 $5 \mu V^{P-P}$ となる (図 2.24 参照)。最小検出地動振幅は初段 IC の入力換算雑音により左右される。信頼性が管理でき, かつ入力換算雑音の最小の IC として $\mu PC 154A$ を選定した。 $\mu PC 154A$ の入力換算雑音はカタログ値として $2 \mu V^{P-P}$ (信号源抵抗 $10 k\Omega$, $0.1 \sim 10 Hz$ の典型値) があるが, 雑音の小さな製品を選択して初段に用いることにより, また増幅回路方式により見かけは $2 \mu V$ よりは改善され, 最終的に $0.5 \mu V^{P-P}$ (地動に換算して $0.01 \mu m^{P-P}$) 以下のレベルになっている (図 2.24)。

等化増幅回路には長期にわたり安定に作動するための配慮が払ってある。例えば, 衝撃をこうむった時の変換器からの大出力の保護のためのダイオード (RC1, 2) 電解コンデンサの容量が経年的に減少しないための DC 電圧の印加 (図 2.22 の V-) IC のラッチアップの防止抵抗 (R2, 3) 等である。またこの回路の実装はプリント基板上で行われるが, その実装基準, 作業基準は海底中継器の場合について積み上げられたノウハウにもとづいて, 高信頼が得られるように定められた。等化増幅器に関する詳細は別に述べる (関連研究 2 参照)。

(3) ジンバル

ジンバルは陸上からの指令をうけて変換器の姿勢を水平・上下に向ける他, 変換器出力信号を等化増幅器にわたすという機能をもったものである。この機能を, ジンバルの無限回転が可能ないようにスプリング接点で構成すると材質, 形状について信頼性に関するデータが不足しているし微弱信号を伝達する上で雑音の発生も心配である。このため信号線にはリード線を用いた。リード線はジンバルの起立再現角度に影響を与えるので充分しなやかな, いわゆるフラットケーブルとした。このためジンバルの回転角にはある程度の機械的制限を設けてケーブルを切断しないようにしなければならない。布設において耐圧筐体の軸は, ある程度水平になることが期待できるので, この方向の水平をとる内側ジンバルの回転角は $\pm 45^\circ$ にストッパーを設けてケーブルを充分短くした。一方筐体の軸まわりの回転は布設において全く任意になるので, この方向の水平をとる外側ジンバルの回転角は $\pm 180^\circ$ 以上を必要とし, それゆえストッパーは設けられない。このため外側ジンバルはピン— 穴系による固定を行いケーブルの長さは $\pm 270^\circ$ 以上の回転まで可能な長さとした。外側ジンバルはピンの他に摩擦力によっても固定される。内側ジンバルは摩擦力のみにより固定される。この摩擦力は 2 G 以上の振動・衝撃には耐え得ない場合もあるが, これはジンバルその他を破壊に至らしめるものではない。ピン— 穴系による固定は予想される 50 G の衝撃に充分耐えることができる。

このようにしてジンバルの起立再現性は 0.1° より良い値を得た。これは、塔載されている変換器からみて全く問題のない値である。図 2.26 にジンバルの構造を示す。

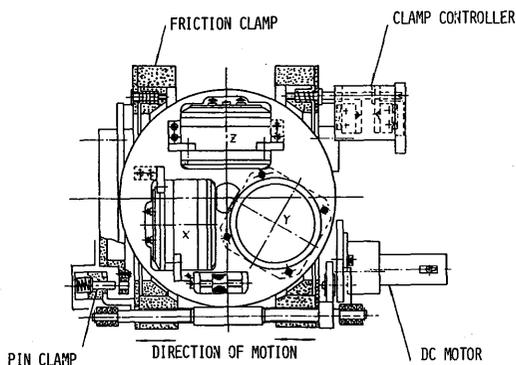


図 2.26 ジンバルの構造。DCモーターの回転により FRICTION CLAMP が図の状態から前進して円板に接触し摩擦力でクランプされる。

Fig. 2.26 Transducers set in a gimbal.

(4) 制御部

ジンバルの自由/固定、および振子の自由/固定の2とおりの制御は海底部装置に対して給電電圧を変化させることにより行う。この制御指令は伝送部で受信して接点のON/OFFにおきかえられ、地震計制御部にわたされる。ジンバルを自由にする指令がくるとモーターが回転し、摩擦板およびピンが後退する。固定の指令のときはモーターが逆回転して、摩擦板が前進して固定する。振子の自由の指令は、図 2.2 1 ~ 2.22 の回路図に示したリレー(RL1)が開放され、振子は大きな減衰をもった状態から、適正な減衰の状態となる。

使用したモーターはDCモーターで、衛星にも使用実績のある高信頼マイクロモーターであるオリンパス精機製のCL-2A-2Pに耐衝撃に関する仕様を追加し使用した。マイクロスイッチについては長期間の欠動作に適した分割金接点が接点として用いられている山武ハネウエル製12SW4を用いた。これにより耐衝撃性、信頼性の仕様が満足されると考える。リレーには同様な考え方でテレデザイン製トランジスタケースリレー424A-18(DCモーター逆回転切換用)および412-18(振子固定用)を採用した。

2.3 津波計

津波計による観測は給電電圧の観測とともに、地震観測に優るとも劣らないデータを提供するものと期待できる。津波計のデータの用途は本来の外洋津波計として用いる他、次のような用途にも耐えられる性能がある。今後の研究を待ちたい。

第一の用途は外洋潮位計としての海洋学的なものである。津波計のデータを調和解析して御前崎港の検潮記録の調和解析結果と比較すると両者の間に非常に調和的な関係が見られる。しかもこの津波計のデータは気圧・風等の気象条件の変化や湾の副振動による雑音がほとんど認められず、立派な「検潮所」といえる。

第二の用途は津波計記録にあらわれるノイズを利用する海洋学的なものである。このノイズは津波計の

周囲水温の変動に起因するものである（関連研究5参照）。海底の固定点で長期にわたり温度変化を記録することにより、海底での流れに対して知見の増すことが期待できる。現在までのところ、黒潮の流軸が津波計設置点を横切る時、温度雑音が発現する傾向があることが調べられている。

第三の用途は地震学的なもので、津波計は上下動地震計と考えることができる。試験観測期間中の1978年12月6日にエトロフ島近海で稍深発地震（M7.7）が発生した。津波計は、この地震による表面波と思われる記録を書いている。記録方式から、それ以上の解析に耐えられる記録ではないが、適切な記録器を用意すれば、興味あるデータが得られるものと期待できる。またこの地震計は周期数十分以上においては海面を基準とした変位型なので、地殻変動の上下成分の変位にも応答する。この場合、水晶振動子の発振周波数の長期不安定性と海象変化とがノイズになるが、それらのレベルは10cm/year以下と考えうるデータがある。長期地殻変動観測からみれば大きな雑音であるが、調和分解結果による予想値と観測値を比較して潮汐成分を除去することにより、大地震の破壊直前の大きな地殻変動をつかまえられるのに十分な能力を有していると言えよう。

津波計は先端点のみにしか設置できなかった。その主な理由は布設作業の困難性からである。すなわち津波計の形態から船上のケーブルドラムを通過できない。先端装置においては地震計筐体と津波計をひとつのケージに組みこみ、高張力ケーブルで吊り下げるといふ布設工法上の違いから設置することが可能である。

津波計はヒューレットパッカート社モデル2813Bそのものの水晶圧力計部、それ全体をおおう電食防止部、更に外側の保護緩衝部から構成される。この津波計を用いて野外実験観測を、静岡県伊東の港内（水深20m）で約半年間行った。これにより津波計の動作を確認し信頼性を評価した。また温度雑音の性質も調べられた。これについては関連研究5において述べる。

(1) 水晶圧力計部

感圧水晶振動子の構造と外観を図2.27、写真2.3に示す。振動する部分は中のレンズ状の箇所である。この振動子に圧力が印加される際に振動子に静水圧が直接加わると、振動部分と圧力を伝達する液体とが直接接触することになり、周波数安定度を悪くする原因となる。このため図のように水晶の中空円筒で振動子の周辺をおおい、あたかも竹の節の如き構造となっている。圧力は竹を握るように加わり節の部分に伝達される。この構造は次の特徴がある。

- i) 圧力変換時の感度が大きい。

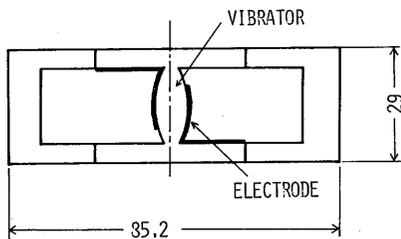


図 2.27 感圧水晶振動子の構造。竹を横に割ったような構造をしていて、竹の節に相当するレンズ状の部分が振動子である。

Fig. 2.27 Quartz pressure transducer for the tsunami-meter.

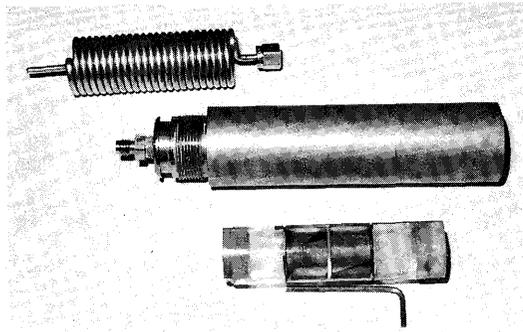


写真 2.3 津波計感圧水晶振動子の外観(最下部)。中段は筐体。上段は導圧管。

Photo. 2.3 Quartz pressure transducer for the tsunami-meter (the lowest).

- ii) 水晶は引張応力に弱い、外圧により水晶のすべての部分で圧縮応力となる。
- iii) エンドキャップと円筒の接合部の薄層の密閉剤により生じる非弾性応力によるヒステリシスが小さい。

以上の特徴をもつ構造の水晶振動子の電気的特性は、振動モードがサードオーバートン、共振周波数は約 5 MHz, Q は 10^6 以上である。なおカットは B T カットの一種であるダブルローテイテッド Y カットである。一般に B T カットの水晶振動子の周波数温度特性は截出角によって図 2.28 のごとくなるが、広い温度範囲でより良い特性を得るために温度補償を行う。そのために感圧振動子と(理想的には)全く同一の周波数温度特性を有する非感圧振動子を用意し、両者の差周波数を出力として得ることとした(図 2.29)。

ヒューレットパッカード社の 2813 B について信頼性評価のために電気部品調査、機構部品調査、電食調査を行い、また性能評価のために周波数圧力特性測定、周波数温度特性測定、耐振動・衝撃特性測定、エージング特性測定を行った。購入した製品を分解して調査した結果、電気部品の故障率は約 5000 Fit と評価(推定)できた。この数値は平均故障間隔 20 年を意味するものであり、このシステムに組みこむことに大きな抵抗を感じるほどの値ではない。圧力周波数特性の測定は耐水圧試験も兼ねて水深 4000m 以上に相当する圧力までを行い図 2.30 に示す良好な直線性と再現性が得られた。もっとも、こ

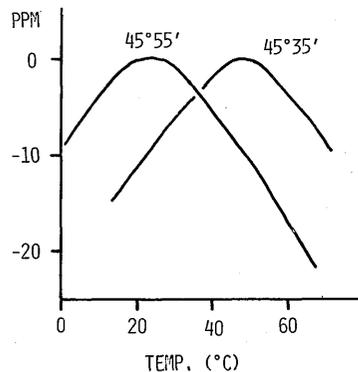


図 2.28 水晶振動子の振動数温度特性。截出角の微妙な違いによって温度特性が変化する。

Fig. 2.28 Relation between the cut angle and temperature characteristics of the BT cut quartz.

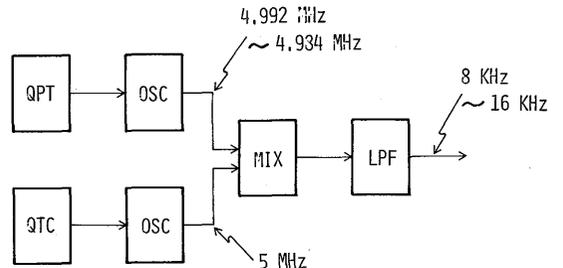


図 2.29 津波計ブロック図。Q P T は感圧水晶振動子、Q T C は非感圧温度補償用水晶振動子、O S C はそれらの振動子を発振させる回路、M I X は両発振波形のミキサー、L P F は低域濾波器

Fig. 2.29 Block diagram of the tsunami-meter.

の加圧装置の圧力は厳密に更正されたものではないので、図 2.30 から得られる圧力感度の値の精度には若干の問題が残る。周波数温度特性（温度補償後）の測定結果は図 2.31 に示す。使用予定温度の 0～5℃において 0.1℃の変化が水深 1 cm の変化に相当する雑音としてあらわれることが簡単な計算から導かれる。ただしこれは後に示すように、充分ゆっくりした温度変化の場合に言えることであり、急激なステップ状に温度が変化した場合にはステップの高さ 1℃につき、水深に換算して約 1 m ものパルス状の雑音が発生する。これは急激な温度変化の場合には、非感圧振動子と感圧振動子の間に、距離があるため両者の熱応答が異り、温度補償が無効となることが原因であると考えられる（関連研究 5 参照）。このパルス状の雑音の継続時間は約 20 分である。これらは、設置した海底の温度条件からすれば、津波や外洋潮汐の観測のためには充分な安定性を有していると言える。

振動・衝撃や温度環境の急変等のショックによる発振周波数の変化も充分小さい。振動については 5～55 Hz, 1 mm^{P-P} の 1～2 分周期（周波数変化の周期）で 3 方向、各 10 分間加えた時の発振周波数変化は 1×10^{-7} 以下であり、また、約 10 msec 幅の 50 G の衝撃印加時と同様で（図 2.32）、耐振動・衝撃特性は問題ない。周囲温度 0℃と 40℃ をかわるがわる印加する熱衝撃試験による発振周波数変化も 1×10^{-7} 以下である。エージング特性として、空气中に電源 ON の状態で約半年間放置し、適当な時間間隔で周波数を測定した。これによる発

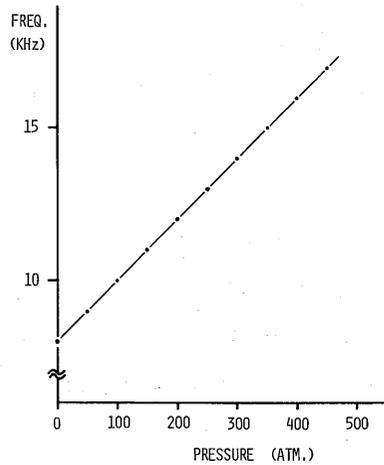


図 2.30 津波計出力周波数の直線性

Fig. 2.30 Output frequency of the tsunami-meter.

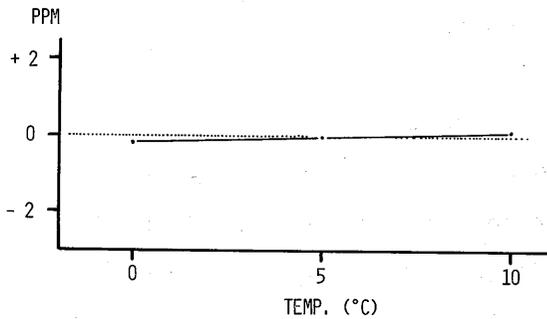


図 2.31 津波計の周波数温度特性、周波数の測定精度は 0.01 ppm

Fig. 2.31 Temperature characteristics of the tsunami-meter.

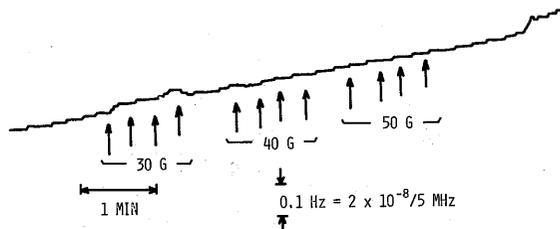


図 2.32 津波計の衝撃試験。矢印が衝撃を与えた時刻。細かい段差は測定の分解能による。右上がりのトレンドは周囲温度の変化による。

Fig. 2.32 The output of the tsunami-meter subjected to the strong shocks.

振周波数変化は 5×10^{-7} / 6ヶ月という測定値が得られている。この数値から得られる周波数のドリフト量は、水深換算で 2.5 m/year と決して小さいものではないが、周波数測定時の周囲温度の制御が厳しいものではないため、この数値には温度変化の効果が大きく入ってきている。津波計の実力として、この数値の10倍以上は向上すると期待できるし、先に述べたように海底における実際の観測結果もそのことを示している。

(2) 電食防止部・保護緩衝部

水晶圧力計部に供給された電流は、加工しなければ筐体を通じて海水中へ放出される機構となっている。従って電流の流出に伴い筐体(ステンレス)の表面はイオン化され、厚みが薄くなってきて(あるいはピンホールができて)長期間の海底での観測に耐えられるものではない。このため 2813 B 全体をゴムでおおい、電流帰路を別に設けた。ゴムと筐体の間にはシリコンオイルを充填し、外圧が正確に伝わるよう考慮してある。上に述べた各種の試験は、この状態のものについて行っている。更に機械的ショックから守るためにその外側をベリリウム銅の籠でおおった。後に述べるように、急激な周囲温度の変化は津波計の大きな雑音の原因となるが、ゴム製の電食防止部は熱的な緩衝材として、津波計の温度雑音を軽減する役目ももっている。

2.4 伝送部

伝送部は地震計および津波計の良質の出力を、その S/N をそこなわないように、かつ安定、高信頼に海岸中継所まで送りだすとともに、給電電流変化による制御指令を、地震計部に正確に伝達する役目をもつ重要な部分である(写真 2.4)。図 2.33 に一中間点装置の伝送部ブロックダイヤグラムを示し、図 2.34 には、システムの伝送系のブロックダイヤグラムを示す。伝送部の機能別構成は、一次変調部、二次変調部、搬送電流発振部、送信増幅器、帯域濾波器、電力分離器、制御指令受信部等である。先端装置については津波信号の変調部も含まれる。

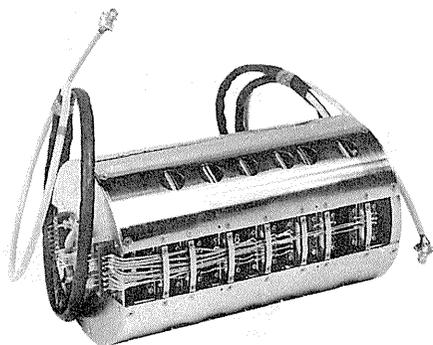


写真 2.4 伝送部の外観

Photo. 2.4 Transmitter for the intermediate apparatus.

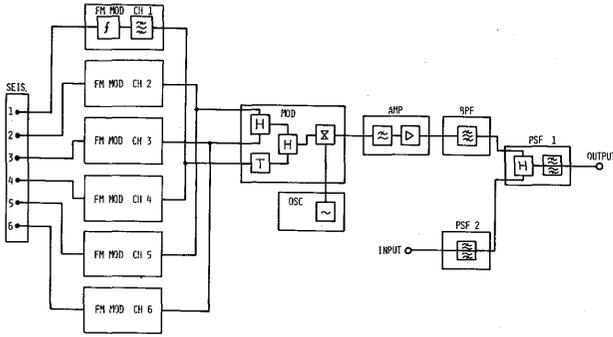


図 2.33 中間点装置伝送部ブロック図。
SEIS. に地震計出力がつながれ、INPUT から沖側の装置の信号が入力する。Tは減衰器。Hはハイブリッドコイル。fはFM変調器。電源電流はOUTPUTから流入し装置各部に電力を供給後、INPUT から沖側の装置へと流出してゆく。

Fig.2.33 Block diagram of the transmitter for the intermediate apparatus.

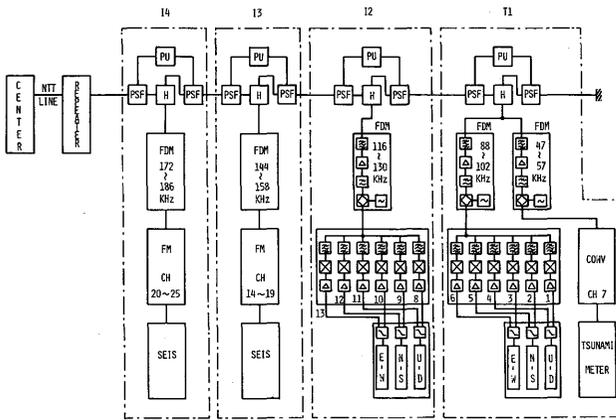


図 2.34 システム全体の伝送系ブロック図。PSFは電力分離濾波器、PUは電源ユニット。

Fig.2.34 Block diagram of the transmission.

(1) 一次変調部

一次変調器のブロック図を図 2.35 に、回路図を図 2.36 に示す。プリアンプは、地震計等化増幅器の

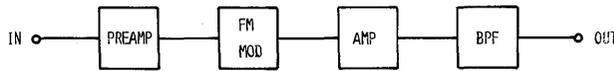


図 2.35 一次変調器ブロック図

Fig.2.35 Block diagram of the frequency modulator.

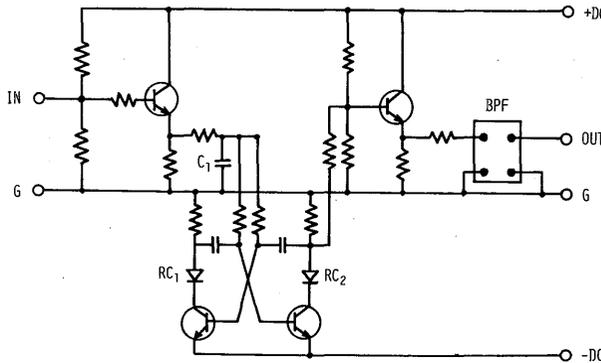


図 2.36 一次変調器回路図

Fig.2.36 Frequency modulator (in FM MOD of Fig.2.33).

出力インピーダンスが容量性であるので15kΩ以上の高い入力インピーダンスを持つことが必要である。またその容量であるタンタルコンデンサーを長期安定に保つため、3～4Vのバイアス電圧を与えるようにすることも必要である。利得は、次段のFM変調器の感度との関連で0dBで充分である。これらの条件で設計されたプリアンプは電源電圧に対する安定性の高い図2.36に示したような、二段のエミター接地型である。図中、C1により約80Hzにカットオフ周波数を有する一次低域濾波器を構成し、地震信号の不要な高周波を除去している。

FM変調回路は信頼性の高いトランジスターを用いた非安定マルチバイブレーターが用いられていて地震計出力±1Vに対して±600Hzの周波数変化が生じる。入力0Vの時の中心周波数は第1チャンネルから順に、15.2, 17.5, 19.8, 22.1, 24.4, 26.7kHzである。この周波数は前の周波数配置の項で述べたように、発振周波数の長期安定性、温度安定性、初期設定誤差等を考慮して決められたものである。温度安定性を増すためにダイオードRC₁, RC₂がとりつけられている。これはトランジスターのベースエミター間電圧の温度変化による発振周波数変化(約380ppm/°C)を補償するものでシリコンダイオードが用いられている。これにより温度安定性は1/3近くの140ppm/°Cに改善される。これとプリアンプの利得の温度特性、その他が相殺して、一次変調部総合としての温度安定性は最終的に50ppm/°C(1Hz/°C)以下の値が達成された。これは当初(周波数配置設計時)目標とした200ppm/°Cを充分上まわるもので満足できる値である。図2.37に、温度による周波数変化の一例を示す。初期設定の誤差を小さくするために感度と独立に中心周波数が微調整でき、初期設定誤差を±0.1%におさめることが容易である。

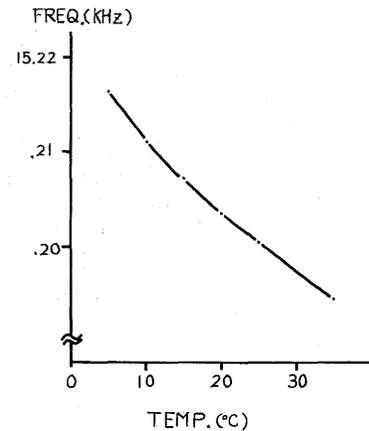


図2.37 一次変調器出力周波数温度特性の典型例

Fig.2.37 Typical temperature characteristics of the frequency modulator.

出力アンプは次段の帯域濾波器と整合をとることに重点をおいて設けられるもので、利得も必要なく、簡単な回路構成とした。帯域濾波器は、FM変調器の周波数が設定値から著しく変化した時、他の正常なチャンネルへの妨害を阻止するため設けたものである。主に実装上の制約から、両隣のチャンネルは完全な減衰域とはされていない。また減衰量は当初のS/Nの目標値56dB以上と規定した。図2.38にはこの帯域濾波器の特性を示す。

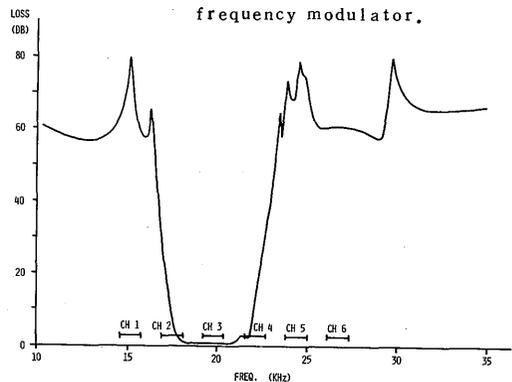


図2.38 一次変調器第3チャンネルの帯域濾波器減衰特性。他のチャンネルもほぼ同様である。

Fig.2.38 Loss of the band pass filter (in FM MOD of Fig.2.33, an example for CH 3).

(2) 二次変調部

二次変調部以降の部門の障害は1観測点6成分すべての障害につながるので、一段高いレベルの信頼性管理のもとで設計・製作されている。二次変調部は一次変調部でFM変調された地震信号6成分を、次項で述べる搬送電流発振部から供給される搬送波を用いて、伝送路帯域に周波数変換する機能を有する。図2.39にその回路図を示す。

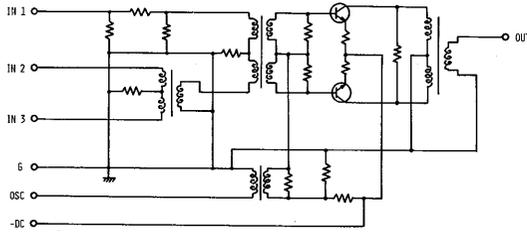


図2.39 二次変調器回路図。IN 1, 2, 3にはそれぞれ一次変調器出力の1, 4チャンネル, 2, 5チャンネル, 3, 6チャンネルの信号が合成されて入力する。

Fig.2.39 Amplitude modulator (in MOD of Fig.2.33).

一次変調部の出力6成分は2成分毎に束にして3組として、入力する。これら3組の入力はハイブリッドトランスで結合され、変調器入力時には -20 dBm/CH のレベルとなる。一方、搬送波電流は各中間点・先端装置毎に独自に有している高安定な水晶発振器から 75Ω 系 0 dBm の正弦波で供給される(この発振周波数は当然、各装置により異なる)。

振幅変調器の回路構成は種々考えられるが能動型トランジスタ平衡変調器と能動型トランジスタ二重平衡変調器の二種をとりあげ、検討を行った(表2.6)。両者の大きな違いは比較的信頼性の低い能動

表2.6 二次変調部回路構成の検討

項 目	能 動 型 トランジスタ平衡変調器	能 動 型 トランジスタ二重平衡変調器
トランジスタの数	2 個	4 個
消 費 電 力	小	大
搬 送 波 の 漏 洩	少	少
信 号 波 の 漏 洩	多	少
変 調 利 得	小	大
部 品 点 数	少	多
回 路 の 動 作	安 定	安 定
	プッシュプル増幅器断続	プッシュプル増幅器の転極
搬 送 波 の 電 力	小	小
インピーダンス整合	良	良

素子トランジスタの必要数の差で、前者が2個、後者は4個である。たゞ前者では搬送波周波数成分のもれが比較的大きくなるのがさげられず、これを抑圧するためにコイル3個、コンデンサー3個程度の濾波器が必要である。このトランジスタの数の差2個の信頼性と濾波器の信頼性とを比較すると、表2.5からもわかるようにトランジスタ2個の方がおちる。このことから振幅変調器は能動型トランジスタ平衡変調回路を採用した。この回路で取扱う周波数帯は製造者においてすでに実績のある高信頼性回路を

ベースに設計・製造された。

図 2.39 に回路図を示した振幅変調回路の動作の概略を述べる。変調器は信号に対してエミター接地で構成されていて、搬送波電流の半周期においては能動領域にバイアスされて、A級プッシュプル増幅器として働く。このとき入出力のインピーダンスに対する他端の終端インピーダンスの影響はほとんどない。他の半周期においては遮断領域に励振されるのでインピーダンスは各端子で容易に整合される。特にエミッタに直列抵抗をそうし帰還をかけると同時に、トランジスターの入出力インピーダンスを高くしてある。出力側の整合はコレクター間の終端抵抗で行っている。変調器利得は大きくすることは可能であるが、インピーダンス整合、歪の改善、バラツキの補償、過負荷点の向上のために相当量の負帰還をかけ、利得は 1 dB 程度としてある。

(3) 搬送電流発振部

発振周波数は各観測点毎に異り、今回の御前崎系に用いた周波数は先端点に 116 kHz, 中間点に沖から順に 144, 172, 200 kHz である。観測点数の拡張(別の海域で)を考慮に入れて更に 232, 266, 304, 346 kHz まで用意できるように設計されている。また先端点の地震信号成分の成分数拡大のために 88 kHz も設計上入っている。これは地震信号 3 成分を送ることができるものである。またこれらとは別に津波信号用として 80 kHz も用いられている。津波信号の変調時には、この 80 kHz を 40 kHz に分周して搬送波とされる。

発振部は、一般に広く使用されて実績のあるコルピッツ型の発振回路を設計の基礎とした。回路方式としては、Xカットの水晶振動子を使用して発振周波数を直接出力する方式と、ATカットの振動子を使用して数 MHz の発振をさせてそれを分周し、出力する方式が考えられる。後者は周波数安定度において約 1 桁優るが部品点数が多く、従って信頼性が 1 桁近く下る。信頼性を重視して前者を採用したが、10 年間で ±100 ppm 程度の周波数変化でおさまることが期待でき、FM 変調器の変動 (0.4%/10年) を充分下まわるものであり、充分安定している。試作品に対する評価実験により、温度安定性(図 2.40)、電源変動安定性(図 2.41)も充分高いというデータが得られている。回路図を図 2.42 に示す。

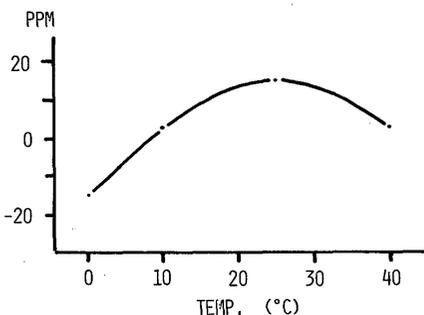


図 2.40 搬送波発振器の周波数温度特性

Fig. 2.40 Temperature characteristics of the carrier oscillator.

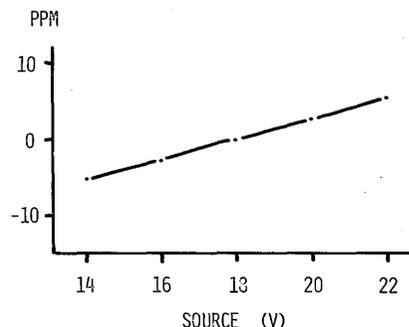


図 2.41 搬送波発振器の周波数電源電圧特性

Fig. 2.41 Source voltage characteristics of the carrier oscillator.

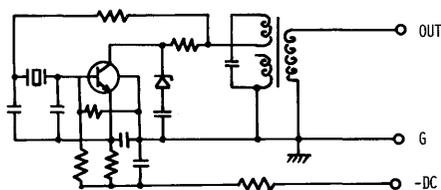


図 2.42 搬送波発振器回路図

Fig. 2.42 Carrier oscillator (OSC of Fig. 2.33).

(4) 送信増幅部

送信増幅部は低域濾波器と、その後段の増幅器で構成される。低域濾波器は次項で述べる帯域濾波器と共同して搬送波、不用側帯波を抑圧するものである。低域濾波器の詳細は次項で述べる。

送信増幅器の回路図を図 2.43 に示す。増幅回路はエミッタ接地二段の負帰還型で出力ハイブリッド帰

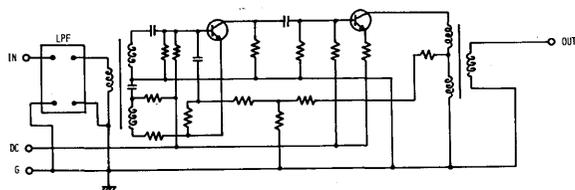


図 2.43 送信増幅器回路図

Fig. 2.43 Carrier amplifier (AMP of Fig. 2.33).

還である。一般の搬送システムでは増幅器のすぐあとに伝送路がくるのが普通であるが、このシステムでは、増幅器と伝送路の間に帯域濾波器、インピーダンス変換トランス、ハイブリッドトランス、電力分離濾波器などの損失回路（合計 13dB）が必要であり、この損失分をあらかじめ補って増幅するものである。今後、別の海域に展開するシステムも考慮にいたれた設計を行ない、中間点装置の出力レベルを最大でも -20 dBm/CH (-12.2 dBm/6 CH) と規定して、このレベルに対応させて各部の過負荷点を設計した。信頼性への配慮もあって、御前崎系で中継増幅器の使用を、とりやめたのは、この送信増幅器の増幅部を含めて過負荷点および過負荷点近くの高調波歪の問題が解決でき、今回のケーブル長であれば、中継器を必要としない大きなレベルで信号を送出できることが判明したこともひとつの理由である。

この増幅器の過負荷点は出力レベルで見て約 $+20 \text{ dBm}$ であるから、前述の最小限必要な損失回路の 13 dB を差し引いて $+7 \text{ dBm/6 CH}$ 、即ち -1 dBm/CH まで上げることはできる。ただし、歪は多少は悪化する。御前崎系においては、これを応用して、先端装置の出力レベルを -5 dBm/CH （津波は周波数が低いため -19 dBm で充分である）、最も遠い中間点装置を -11 dBm/CH としてある。このレベルでは、悪化した歪はシステム的には問題ない。その手前の中間点装置は -25 dBm/CH 、最も陸に近い点で -46 dBm/CH である（図 2.10 参照）。

(5) 濾波器

送信増幅器の前段の低域濾波器（図 2.43 の LPF）と本項の帯域濾波器（図 2.45）とで共同で搬送波周波数および不要側帯波の抑圧、変調歪の抑圧を行うだけでなく周波数が著しく変化し始めた時、他の正常な観測点の妨害とならないために設けるものである。図 2.44 上図のごとく、変調器の後にのみ設けたのでは増幅器に異常発振が発生した場合には対処できない。図の中段のごとく増幅器の後にのみ設けたので

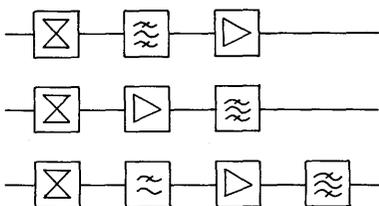


図 2.44 濾波器設置場所の検討

Fig.2.44 Examination of the location of the filters.

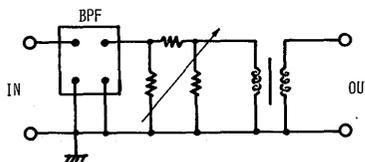


図 2.45 帯域濾波器回路図。 π 型抵抗減衰器(可変)を含む。

Fig.2.45 Band pass filter (BPF of Fig.2.33).

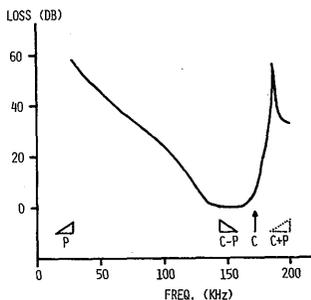


図 2.46 低域濾波器(図 2.43 の LPF)の減衰特性。No.3 中間点装置の場合を例示したもの。

Fig.2.46 Loss of the low pass filter (cf. LPF of Fig. 2.43).

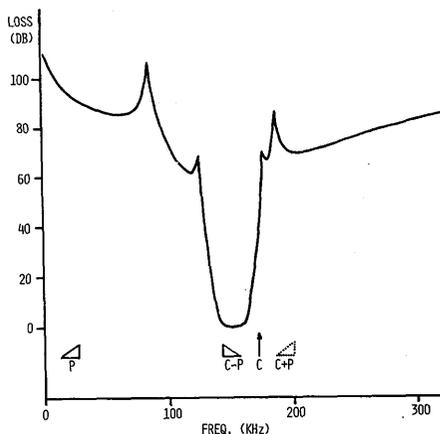


図 2.47 帯域濾波器(図 2.45 の BPF)の減衰特性。No.3 中間点装置の場合を例示したもの。

Fig.2.47 Loss of the band pass filter (cf. Fig. 2.45).

は、不用な成分まで増幅することになり、増幅器の過負荷レベルを考えると不利である。このため下図のように、まず、変調器出力の中で特にレベルの大きな不用な成分をある程度抑圧し、増幅した後、最終的に必要なだけの抑圧を行うこととした。帯域濾波器の回路図を図 2.45 に示す。

図 2.46, 2.47 にそれぞれ低域濾波器、帯域濾波器の特性を陸から 2 番目の中間点装置を例にとり、示す。最初の低域濾波器においては、14~28 kHz の一次変調器出力の帯域 (P) において 20 dB 以上の減衰を、二次搬送波周波数 (C) と P の和の帯域 (C+P) で 25 dB 以上の減衰をとっている (実は帯域濾波器である)。これにより送信増幅器の過負荷点が実質的に 3 dB 以上、下っている。帯域濾波器では C+P, C+2P, C+3P の帯域を 55 dB 以上の減衰域とし、特に C+P は両者をあわせて 80 dB 以上減衰する。

(6) 電力分離濾波器

各中間点・先端装置の電気的両端に位置して、直流の電力と交流の信号とを分離・再結合するもので、回路図を図 2.48, 2.49 に示す。濾波器(1) (図 2.48) が海岸側に位置し、(2) (図 2.49) が先端装置側に位

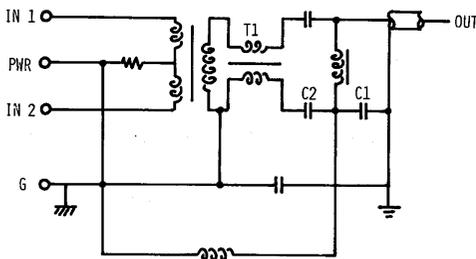


図 2.48 電力分離濾波器(1)の回路図。IN1 は電力分離濾波器(2)のOUT (図 2.49)につながれ沖側の装置からの信号が入力する。IN2は自局の信号が入力し、両者は合成されOUT から陸側の中間点装置に向う。

Fig.2.48 Power separation filter 1 (PSF 1 of Fig. 2.33).

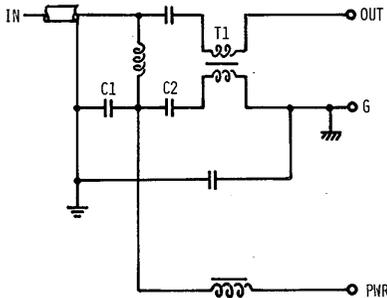


図 2.49 電力分離濾波器(2)の回路図。IN には沖側の装置の信号が入力しOUTから電力分離濾波器(1)のIN1が入力する。電流は電力分離濾波器(1)のOUTから流入しコイルを経由してPWRから出力される。更に電源ユニット(図 2.34 のPU)を経てこの図のPWRに入力しコイルを経てINから沖側の装置に流出する。

Fig.2.49 Power separation filter 2 (PSF 2 of Fig. 2.33).

置する。両図において、C1とC2により電気回路のアースを海水アースから浮かして各電気回路を高電圧から保護している。この二重アース構造の結果、縦電流が発生して伝送特性を乱すことを防止するためT1を設けてある。電気部品はプリント配線基板の上に堅固に固定・配線される。このプリント基板は円筒状の金属ケース内に実装される。耐圧筐体の同軸貫通部との接続は同軸状の気密端子を介して、アセンブリケーブルと呼ばれる同軸ケーブルにより行われる。この濾波器の直流耐電圧は1000Vで、400kmのケーブルに8個の観測点を設けたときのモデルケースでも、充分耐えられるようにしてある。

(7) 制御指令受信部

制御指令受信部は給電電流の大きさ、極性を変化させることによるジンプルおよび振子の固定/自由の制御指令を受信し、その指令を地震計部に伝える機能を果すものである。中間点装置の電流供給系統図を図 2.50 に、制御指令受信回路を図 2.51 に示す。観測時の給電電流は+210mAであるが、振子制御指令

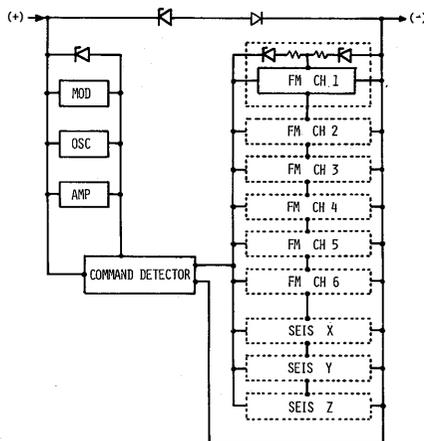


図 2.50 中間点装置電流供給系統図。観測状態においては(+)から(-)へ210mAが流れている。これが231mAになるとコマンド検出器がこれを検出し、ジンプルをフリーにする。また(-)から(+)へ150mAを流すと、同様に、振子が制御される。

Fig.2.50 Power supply for the intermediate apparatus.

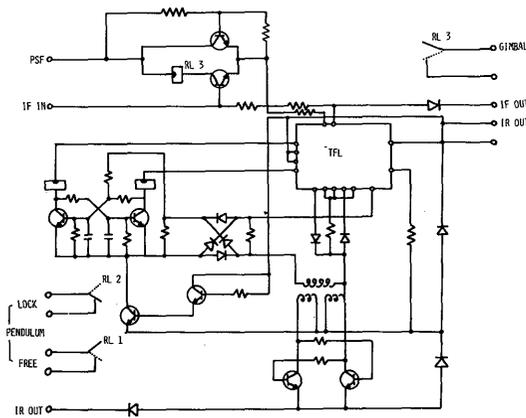


図 2.51 制御指令受信回路図(図 2.50 および図 2.56 の COMMAND DETECTOR)。TFL はトランスフラクサー。

Fig. 2.51 Command detector (cf. Fig. 2.50 & 2.56).

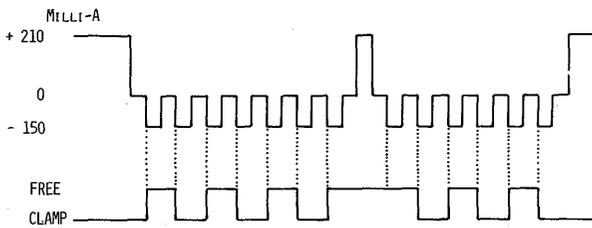


図 2.52 振り制御論理。+210 mA を流すことによって記憶状態がリセットされ、その後の最初の -150 mA により振子はフリーになる。以下、-150 mA を流す毎に振子の状態は反転する。

Fig. 2.52 Pendulum control.

としては -150mA が用いられる。振子の状態と給電電流の関係を図 2.52 に示す。この図に示すように、+210 mA を供給した後の最初の -150 mA では、振子は自由の状態になる。そののち -150 mA が供給されるたびに固定・自由の状態が反転する。+210 mA を供給することにより記憶素子の状態がリセットされるので、なんらかの理由により他の観測点と異なる記憶状態の観測点も出現しても記憶状態を揃えることは可能である。記憶素子の選定にあたっては機械的な素子、電気的な素子、磁気的な素子が検討されたが(表 2.7)、信頼性を重視して、トランスフラクサーと呼ばれる磁気式の素子を選定した(内田・本郷, 1968)。

表 2.7 記憶素子方式の検討

	磁気式メモリー	機械的メモリー	コンデンサ・メモリー
記憶時間	半永久	半永久	24時間程度
記憶回路として用いる場合使用する他の部品	トランジスタ トランス等	モータ又は リレー等	FET リレー等
機械的接点	なし	有	有
信頼度の上げやすさ	比較的 上げやすい	保証が むずかしい	保証が むずかしい

ジンバルの制御指令は、給電電流を +210mA から 10% 増大の +231mA とすることにより行われる。10% の増大を受信回路が検出すると RL 3 のマーク接点が地震計部に送出され(図 2.51)、地震計部のモーターが回転し始め、約 1 分後にジンバルは完全に自由となる。こののち給電電流を +210mA にもど

してやると、モーターが逆回転し、固定される。この関係を図 2.53 に示す。図 2.54 は布設終了後、観測状態に至りしめるまでの作業を示す。

振子の制御回路は図 2.51 の下半分である。これからわかるようにトランジスタよりなるフリップフロップと、その状態によりいずれかが働くリレー RL1, RL2 とから構成されている。

フリップフロップの状態は給電電流 -150 mA がくるたびにトランスフラクサーによる制御で反転させられる。RL1, RL2 の状態が地震計部に伝わり、振子の制御が行える。トランスフラクサーの記憶状態に対応した出力は -150 mA の給電が装置に達してから数 m sec 以内にとりだし、トランジスタスイッチが動作することにより実現される。

図 2.51 の上側がジンバルの制御回路である。
 $+231\text{ mA}$ が供給されるとトランジスタのベースの電圧が上り、比較回路によりリレー RL3 が動きメーク接点の信号が地震計部に伝達され、ジンバルのモーターが回転する。電流が $+210\text{ mA}$ に戻るとモーターは逆回転する。モーターを止めるのは地震計部のマイクロスイッチによる。動作の確実を期すため、比較回路の動作点は電流が $+5\%$ 増加する点に設定した。

(8) 先端装置伝送部

先端装置の伝送部が中間点装置のそれと異なる点は津波計の伝送部を有している点であり、地震計の伝送部は中間点装置と同様の構成である。この項では先端装置伝送部の内、津波計について述べる。図 2.55 にブロック図を示し、図 2.56 に電流供給系統図を示す。

津波計の出力周波数は水深 0 m における 8 kHz から 4000 m における 16 kHz まで変化するが、この周波数帯は伝送上不利であるから、一度振幅変調をして周波数変換を行い、周波数配置の項で述べたように $48\sim 56\text{ kHz}$ の帯域に移動させる。この帯域の高周波側に地震成分が配置されているので下側帯波を抑圧し、上側帯波のみを伝送する方が、浜波器の設計上有利である。従って搬送波周波数は 40 kHz となるが、この数値は、搬送波電流発振器としては低すぎるので、 80 kHz の発振器を分周して搬送波として用いた。

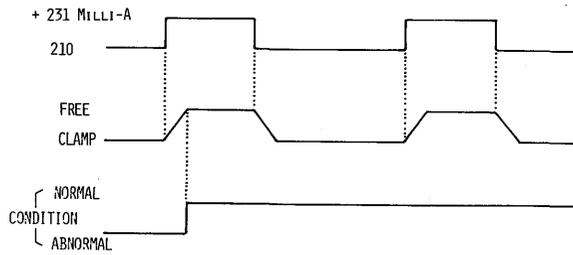


図 2.53 ジンバル制御論理。 210 mA から 231 mA に増すことによりジンバルがフリーになり重力の作用で姿勢が正規の方向となる。再び 210 mA にもどすことによりジンバルは固定される。

Fig.2.53 Gimbal control.

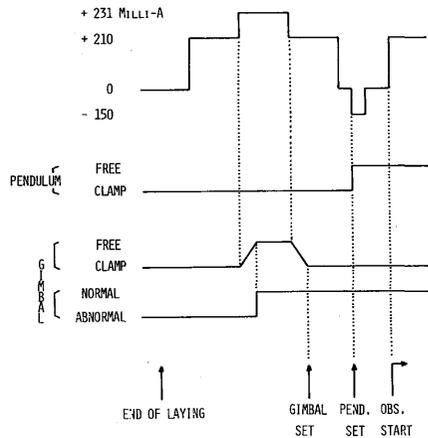


図 2.54 制御作業図。布設終了後、観測開始までに必要な制御のための作業。

Fig.2.54 Flow chart of the control.

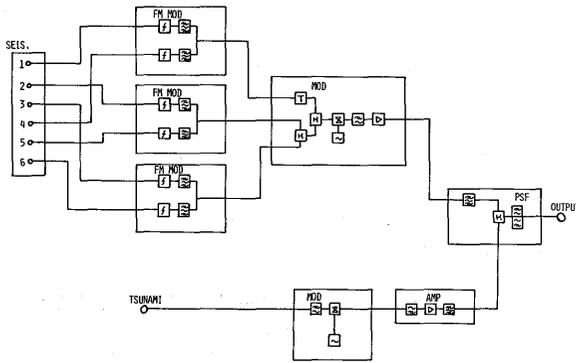


図 2.55 先端装置伝送部ブロック図

Fig. 2.55 Block diagram of the transmitter for the terminal apparatus.

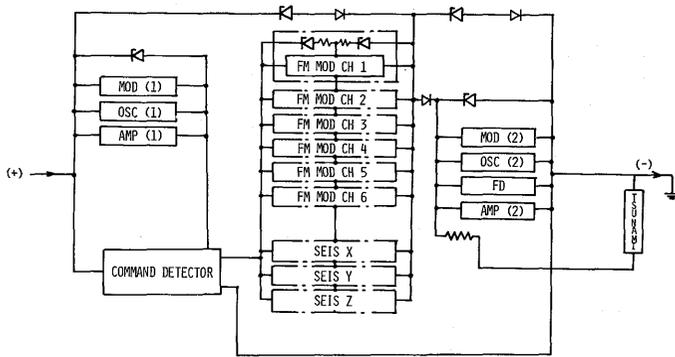


図 2.56 先端装置電流供給系統図。津波計が導通あるいは断となる障害が発生してもその他の部門は影響をうけない。

Fig. 2.56 Power supply for the terminal apparatus.

変調部の構成は地震成分の二次変調部以降と同様の方式である。

2.5 海底アース

同軸ケーブルの中心導体を通じて供給された電流は先端装置各部を通過後、陽極アースを經由して海水中および地中に放出され海岸中継所近くの海浜陰極アースで再びとりこまれる。海底陽極アースは長期間安定に作動するためには、電流の流出による電極の消耗を最小限におさえる必要がある。このための材料として、他と比較して圧倒的に消耗量の少い白金を選んだ。白金は、経済性を考慮して直径 30mm、長さ 500 mm のチタン棒の上に 3 μm の厚さにメッキして、これを電極とした。寿命としては白金の消耗量を 20 mg/A・year として単純計算すると 200 年以上となるが、現実的にはその 1/10 程度は耐用できると考えられる。図 2.57 に海底アースの構造を示す。写真 2.5 にはその外観を示す。海水に露出している部分には電極を除いて金属は全くなく、FRP（強化プラスチック）で作られていて、また、チタン棒そ



写真 2.5 海底アースの外観

Photo. 2.5 Sea earth.

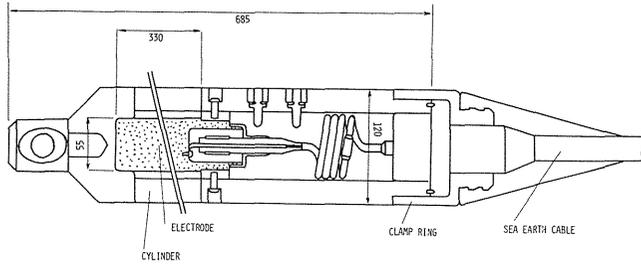


図2.57 海底アースの構造

Fig.2.57 Sea earth.

のものも航空機材料に用いられるほどの高強度のものなので、耐衝撃性にもすぐれている。接水抵抗は初期で約 1Ω 、20年後でも 10Ω 程度は確保できると考えられる。

海底アースは先端装置に近接して設置すると、それから流出する電流には、耐圧筐体を貫通して流れる成分が多くなり、筐体の電食を促進する原因となる。この対策として耐圧筐体に電食防止加工を施すか、あるいは海底アースを充分遠くに離すか、が考えられる。後者の対策をとるため「充分遠い」距離とはどれだけなのか、解析的あるいは模擬実験により調査した結果、 0.5 km とれば影響はほとんどないことが判明した。問題は先端装置と海底アースとを離して布設する工法であるが、これについては可能と思われる工法が考えだされ、布設リハーサルにより確認して解決した(関連研究6参照)。

3. 陸上部機器

3.1 概要

海底の4観測点から 150 km 余りの同軸ケーブルを經由して伝わってきた信号は、まず海岸中継所の御

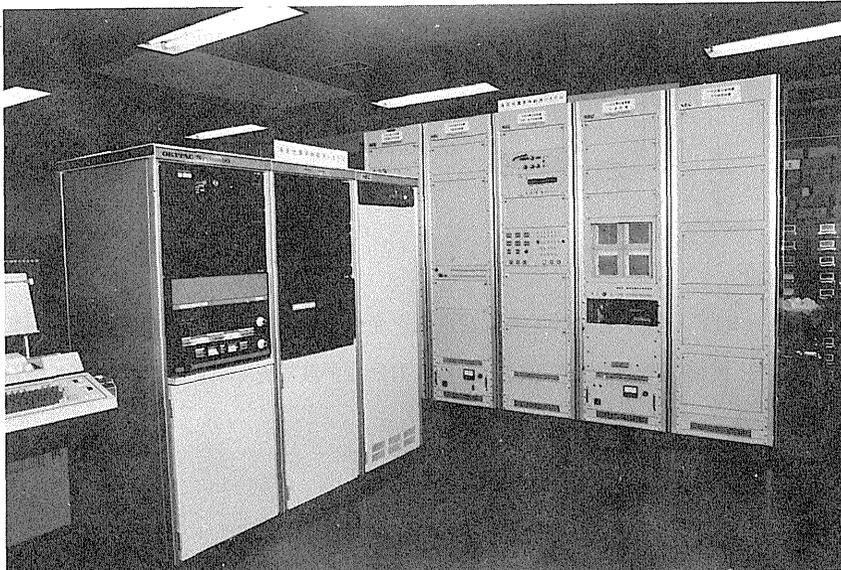


写真2.6 中枢内に設置された各装置

Photo.2.6 Receiving and processing apparatus in the observation center (Seismological Division, JMA).

前崎測候所に到達する。そこにおいて信号は復調され可視記録でモニターされるだけでなく、更に、観測中樞への伝送のために再度変調される。海底部機器への電力供給も海岸中継所から行われる（口絵写真6参照）。観測中樞には、陸上観測網による地震テレメーターの場合と同様に、受信した信号の記録・処理のための機器が備えられている（写真2.6）。

陸上部機器の信頼性については、海底部機器の信頼性と直接かかわりをもつ給電系統以外においては、通信機器並に設計されているが、例えば、その障害が全観測点の欠測に至る機器については、可能な限り二重にバックアップをする等の冗長性をもたせてある。陸上部機器のその他の特徴は、海底から到達する信号の、高い品質を劣化させることなく観測中樞まで伝送している点と、観測中樞において海岸中継所内の機器を含めた全陸上部機器の集中管理を行っている点である。

図2.58に陸上部のブロック図を示し電力および信号の流れに従って、各部について述べる。なお陸上部装置は海底部装置と異り、一般の通信機器と同様の部分が多くあるので記述は概略にとどめた。

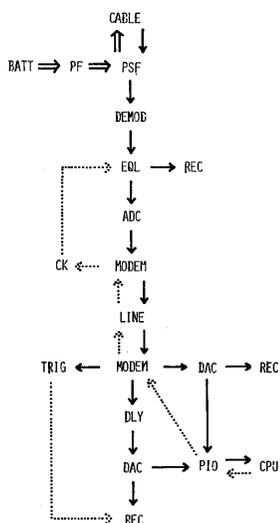


図2.58 陸上部における信号、供給電力、制御の流れ。→：信号の流れ。⇒：電力の流れ。-->：制御の流れ。BATT：局電源（電池）。PF：海底部高圧給電装置。PSF：海底ケーブル終端装置。DEMOD：復調受信装置。EQ：等化分配制御装置。REC：記録器。ADC：AD変換器。MODEM：陸上伝送受信装置。CK：検定信号発生器。LINE：公社回線。TRIG：地震判別装置。DAC：DA変換器。DLY：遅延装置。PIO：計算機周辺入出力装置。CPU：計算機中央処理装置。

Fig.2.58 Flow of signals, controls and power supply on land.

3.2 給電部

給電部は局電源(-21V DC)をうけて高圧定電流を発生する海底部高圧給電装置と、海底ケーブル、海底部高圧給電装置、復調等化部の三者を結合する電力分離濾波器としての海底ケーブル終端装置とから構成される。

(1) 海底部高圧給電装置

図2.59にこの装置のブロック図を示す。写真2.7はその外観である。インバータ(PF INV)はトランジスタコンバータにより入力電圧DC-21Vを約20kHzで最大400Vの方形波交流に変換する。この方形波は更にトランスにより昇圧した後、整流されて直流高圧出力を得る(PF HV)。定電流の制御は電流出力の規定値からの誤差を増幅してインバータの可飽和リアクターに流す電流を制御することにより

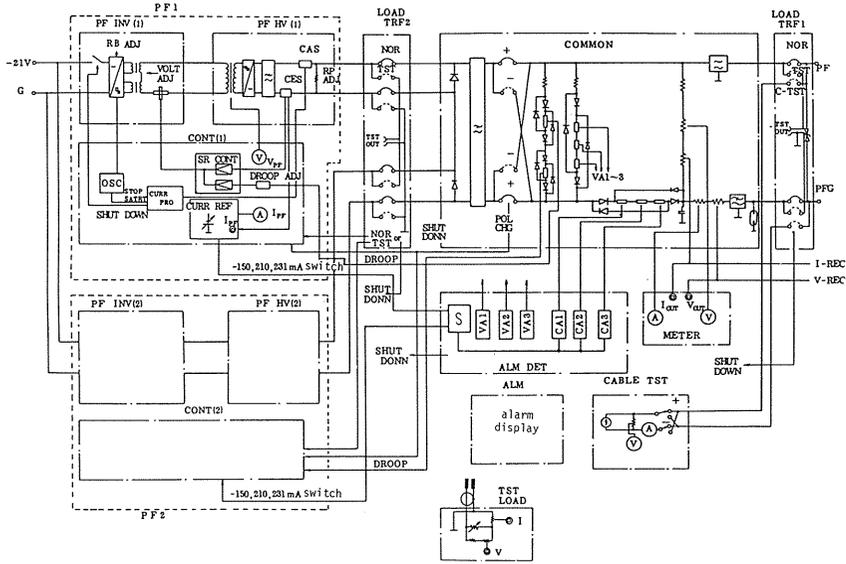


図 2.59 海底部高压給電装置ブロック図

Fig. 2.59 Power supplier for the submarine system in the shore station.

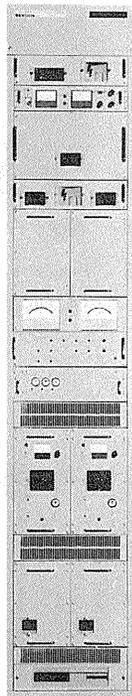


写真 2.7 海底部高压給電装置

Photo.2.7 Power supplier for the submarine system in the shore station (Omaezaki Weather Station).

行っている (CONT)。ここまでは図 2.59 に示すように、並列に装備されていて、常時は 2 台とも運転されている。1 台が障害に至った時でも残りの 1 台が充分早い時間内に単独で負荷をまかなうので海底部への電力は瞬断もなく確実に供給できる。供給電流の安定度は海底部装置の定電圧回路の電流 — 電圧特性と関連して、海底部装置の電源電圧変動が性能にひびいてくるが、装置仕様によれば周囲温度 10~40℃、単独系統による運転等による供給電流の安定度は±1%以下、また入力電圧±10%に対しては±0.02%以下で充分安定している。

図 2.59 の PF HV の出力電流は出力先の切換部 (LOAD TRF)、低域濾波器、メーター回路、装置自身の異状を知らせる警報回路等 (COMMON) を経て出力され、更に次項の海底ケーブル終端装置からケーブル (または擬似負荷) に供給される。

(2) 海底ケーブル終端装置

図2.60にこの装置のブロック図を示す。写真2.8はその外観である。海底ケーブルからの信号は電力分離濾波器(PSF)の高域濾波器を損失0.22dB(47kHz)~0.16dB(200kHz)で通過しSIG端子から出力され、次項で述べる復調受信装置に入力する。PF端子から入力する供給電流は低域濾波器(LPF)で、雑音の原因となるAC成分を100dB以上抑圧されケーブルに送り込まれる。海浜アースで拾い上げた電流はS.E端子からメーター回路、警報回路を通り給電装置の接地端子PPFGに流れ込む。海浜アースケーブル切断時には帰路電流は自動的に海岸中継所の局内アース(ST.E)に切替る。

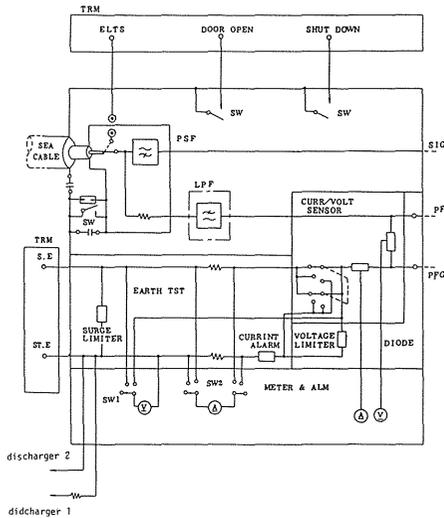


図 2.60 海底ケーブル終端装置ブロック図

Fig.2.60 Power separation filter in the shore station.

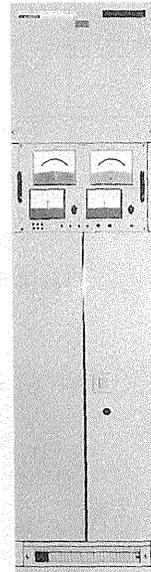


写真2.8 海底ケーブル終端装置

Photo.2.8 Power separation filter in the shore station.

3.3 復調等化部

復調等化部は伝送されてきた信号をもとの地震・津波の信号に復調する復調受信装置と、復調された信号の一部を等化しその出力を陸上伝送のための送信装置へフレキシビリティをもって分配する等化分配制御装置とで構成される。

(1) 復調受信装置

この装置の外観を写真2.9に示す。

地震信号および津波信号の復調については復調方式の項で述べた(図2.12, 14)。片側帯域伝送のため、二次復調においては変調時に用いた搬送波の発振周波数と同一の周波数が必要となる。このために40, 116, 144, 172, 200kHzの発振器を用意した。これらは2.5MHzの主発振器の周波数を分周した2kHzのパルスにより同期をとって周波数を安定化している。また二次復調後の14~28kHzの帯域

を更に 5.6~12.6 kHzあるいは 5.25~12.25 kHz に変換するための発振周波数 26.6 kHz, 33.25 kHz は 266 kHz の発振器を用意し $\frac{1}{10}$ および $\frac{1}{8}$ に分周して得ている。この 226 kHz というのは観測点を（他の海域で）増設した時の搬送周波数のひとつである。主発振器の周波数長期安定度は $1 \times 10^{-7}/\text{year}$ あるいは $4 \times 10^{-7}/10 \text{ years}$ と評価されている。

(2) 等化分配制御装置

この装置の外観を写真 2.10 に示す。

表 2.4 (1.6 節) に示したように、地震計の帯域は中間点が短周期 (2~20 Hz), 先端が中周期 (0.8~20 Hz) である (先端の上下動速度型のみは短周期)。システムとして一貫した周波数特性を得るために先端の中周期成分の内、0.8~2 Hz の帯域の感度を抑圧して中間点の短周期成分と同等の特性を有する成分を作りだした。また中周期成分の 0.2~0.8 Hz の帯域の信号を特に増幅して 0.2~1.2 Hz の帯域で平坦な特性となる成分を作り、長周期成分とした。長周期成分のダイナミックレンジは当然狭くなるが 60 dB 近くとれていると考えられる。

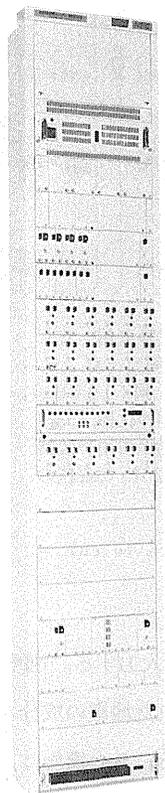


写真 2.9 復調受信装置

Photo. 2.9 Receiving and demodulating apparatus in the shore station.

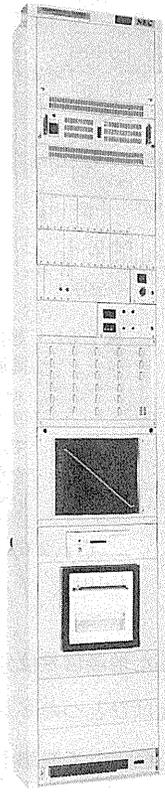


写真 2.10 等化分配制御装置

Photo. 2.10 Distributor in the shore station.

等化されたものも含めて、すべての短周期成分は、長周期の脈動除去用の高域濾波器が用意されている。高域濾波器は2種類あり、1 Hz および 2 Hz を遮断周波数として低域は 6 dB/oct. の割合で抑圧するものであるが、観測者は、濾波器なし、1 Hz のみ、2 Hz のみ、1 Hz と 2 Hz の縦続接続の4とおりの中から希望する特性を選択でき、また変更も容易にできる。脈動は日々変化していることは勿論であるが、平均的に振幅の大きい季節とそうでない季節とがあることはよく知られている。この濾波器は、季節変化程度は吸収して高感度の地震観測を遂行できるようにと設けられたものである。この装置の前面にある操作盤を図 2.61 に示す。

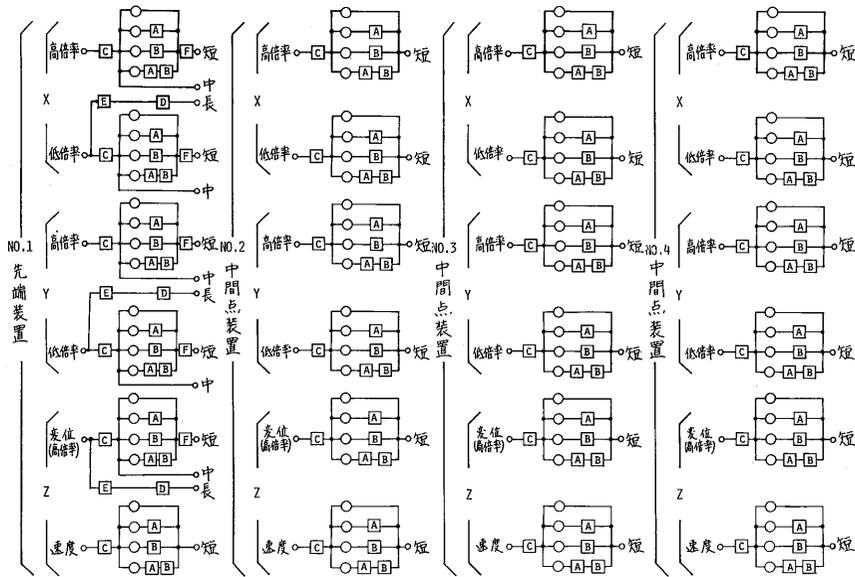


図 2.61 等化分配制御装置の等化部操作盤。A：脈動除去用 1 Hz 高域濾波器 (6 dB/oct)，B：同 2 Hz (同)，C：aliasing 防止用低域濾波器 (25 Hz)，D：同 (12.5 Hz)，E：長周期信号用等化器，F：短周期信号用等化器。丸印で示した穴にピンをさしこむことにより脈動除去用濾波器をなし、1 Hz のみ、2 Hz のみ、1 Hz と 2 Hz の縦続のいずれかの状態が選択できる。

Fig. 2.61 Equalizers and filter selectors to cut microseisms.

以上を経て出力した地震信号は分配部 (操作盤を図 2.62 に示す) に入力する。操作盤には多数のピン用の穴があり、例えばひとつのピンに着目して、その行の左側に記された地震の成分が、上側に記された回線、チャンネルを経由して観測中樞に伝送されていることを意味する。この機能は、観測者の管理下のない回線の障害に、早期に対応できるように、との配慮で設けられたものである。

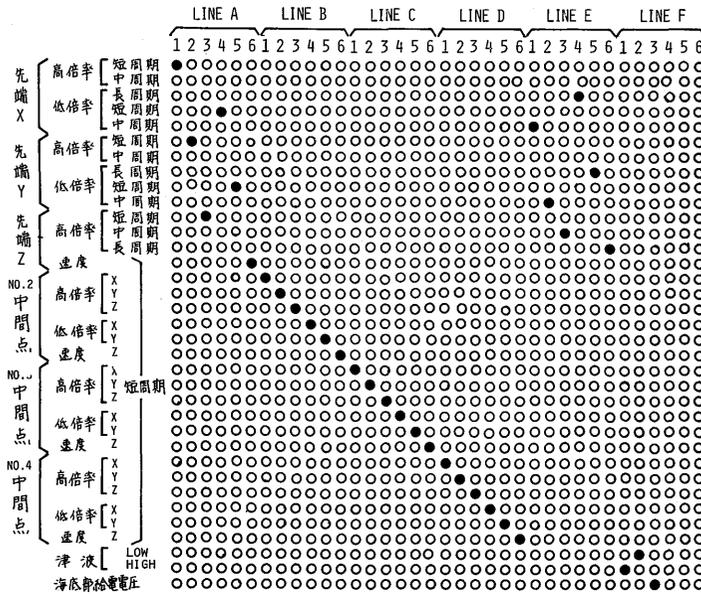


図 2.62 等化分配制御装置の分配部操作盤。ぬりつぶした丸印はピンを差し込んだことを示し、伝送の一例を示す。F回線の4～6チャンネルには、このシステム外の長周期信号をのせることも可能である。

Fig.2.62 Distributor.

3.4 陸上送受信部

陸上送受信部は海岸中継所に設置された陸上送信部、観測中樞に設置された陸上受信部、両者を結ぶ回線とから構成される。陸上送受信部のブロック図を図 2.63 に示す。

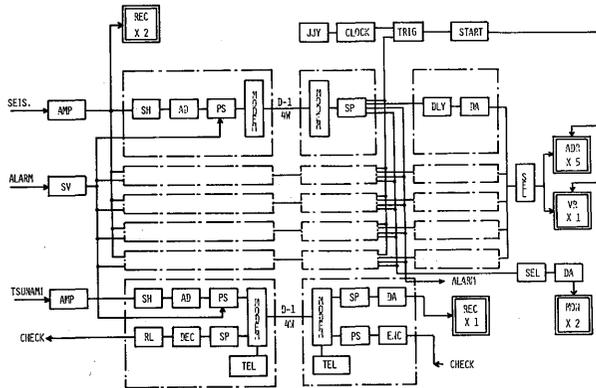


図 2.63 陸上送受信部ブロック図。SEI S.: 地震信号, ALARM: 警報信号, CHECK: 検定信号, SV: 警報信号の変調部, SH: サンプルホールド回路, PS: 並列変換回路, RL: リレー, DEC: 復号回路, SP: 直列変換回路, TEL: 電話, ENC: 符号化回路, J J Y: J J Y 受信器, S E L: 記録成分選択器, MON: モニター記録器, A D R: アナログデータレコーダー, V R: 12成分可視記録器。

Fig.2.63 Transmission on land and recording system.

(1) 送信部周辺

等化分配制御装置のアナログ出力35成分(地震32, 津波2, 給電電圧1)は6成分毎にA/D変換され汎用のモデムでQAM変調(1.4節(4)参照)された後、回線に送出される。A/D変換において、アナログ信号のダイナミックレンジが72dBだから12ビットの高精度変換が妥当であるとも考えられるが、観測中樞における処理が要求する精度およびA/D変換器の周辺まで含めたコストを考慮して、10ビットとした。伝送フォーマットを図 2.64 に示す。1フレームを85ビットとし その内15ビットを用いてやや強めの同期をかけている。データ符号は10ビットのデータに1ビットのパリティを付加し、6成分で66ビット

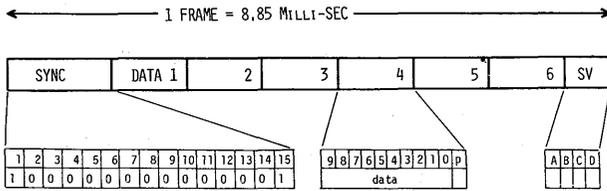


図 2.64 伝送フォーマット。同期に15ビット、データに11ビット(内、1ビットはパリティビット)×6、警報等の監視信号に4ビットをわりふっている。

Fig. 2.64 Format of PCM transmission.

だけ含まれる。装置の管理に用いられる監視信号も4ビット設けられている。1秒間に9600ビットだけ伝送できるから1成分当りのサンプリング周波数は約113Hzとなる。回線の特性劣化や不安定性により9600bit/secの高速では安定な送受信が難しくなった時の対策として、その場合には4800bit/secに切替えられるようにした。この場合にはサンプリング周波数が $\frac{1}{2}$ の約56Hzになるが、この時でも対象帯域の上限が20Hzなので、サンプリングは1周期当り、3点近くとれていて現実的にも aliasing は生じない。

津波2成分と給電電圧1成分も地震成分と同様に約113Hzのサンプリング周波数で伝送している。この理由は、前述の長周期地震計としての津波計の有用性を活かすということの他に、送受信部周辺の規格を統一して、装置障害時の保守を容易ならしめるためである。

(2) 公社回線

陸上伝送回線として、0.3~3.4kHzの帯域をもつD-1規格を6回線、専用で借りている。図2.65に路線の概略を示し、図2.66には電電公社の工事設計書による伝送路の構成と、送受信レベルを示す。

図2.67には上り回線の減衰歪特性を6回線の内の代表的な回線について実測例を示す。9600bit/secの高速通信が可能であるのは、変調方式がすぐれているからであることは前に述べたとおりであるが、回線の側から見て9600bit/secを可能にする条件としては次の2項目があげられる。第一はリンク数が少ないことである。一般にリンク数が増

してくると漏話防止濾波器の影響で帯域の両端における減衰歪、遅延歪が増加し、ついにはモデムが等化しきれなくなる。今回用いたQAMモデムは固定・自動等化を含めて5リンクまで受信再生可能とされている。第二は装荷ケーブルの問題である。最近設置される装荷ケーブルはB型と呼ばれる新型で帯域が3.3kHzまでのびているものであるが、旧型のJ型と呼ばれるものは2.7kHzどまりである。この方式は帯域として0.5~2.9

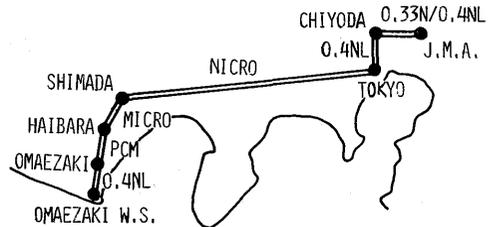


図 2.65 回線経路の概略

Fig. 2.65 Path of the NTT land lines.

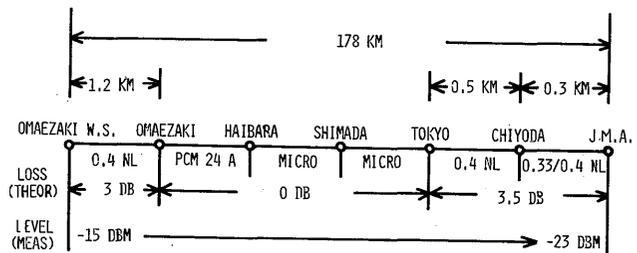


図 2.66 回線の伝送路構成

Fig. 2.66 Details of the lines.

kHz を必要とするのでJ型装荷ケーブルが長すぎると好ましくないと言える。

(3) 受信部周辺

観測中枢の受信部では到達したQAM変調波をデジタルのデータに復調し、デジタル型式のままトリガー回路、遅延回路等に出力する機能を果たす。海岸中継所等化分配制御装置の分配部に対応して、受信部の最終出力段（または遅延回路の出力段）に分配部が設けられていて、特定のデータが経由する伝送路を入れ替えることが容易である。

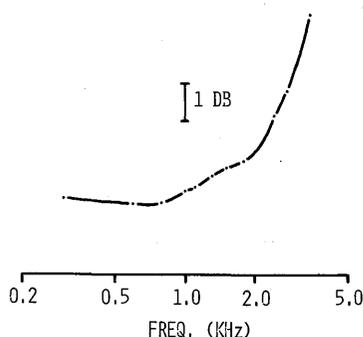


図 2.67 回線の減衰歪特性の測定例

Fig.2.67 Example of loss of the lines.

3.5 記録部

記録器には海岸中継所と観測中枢との両方に設置されている地震3成分（実時間，連続，可視）×2台，津波高，低感度2成分（実時間，連続，可視），給電電圧1成分（実時間，連続，可視）と，観測中枢のみに設置された地震12成分（30秒遅延，トリガー起動，可視），地震3成分（30秒遅延，トリガー起動，アナログ磁気テープ）×5台がある。記録部はこれらの記録を採るための遅延回路，トリガー回路，D/A変換回路，時刻符号発生回路等で構成される。

(1) 遅延部周辺

遅延回路は6回線の内，地震成分を伝送してくる5回線について，各回線に1台対応させて計5台装備されている。1回線当り6成分伝送されてくるから，遅延回路1台で6成分および観測点コード入りの時刻符号2成分の遅延を行う。最近，技術の進歩の著しいマイクロプロセッサを用いた方式で，1台当り1個のプロセッサMP-80Eと48Kバイトのメモリーを有していて，6成分の信号を，陸上伝送におけるサンプリング周波数，ビット数に等しい約113Hz，10ビットで，最大30秒遅延する。これに要するプログラムの長さは約2Kバイトである。

(2) 地震判別部周辺

地震判別回路は5台設けられていて，各々，1個の入力に対して2個のレベルを基準として，その各々のレベルに対して地震の発生を検出しトリガー信号を発生する。一方のトリガー信号はアナログ磁気テープ記録器（地震3成分を集録）を起動させるのに用い，他方のトリガー信号は12成分可視記録器を起動させるのに用いられる。磁気テープ記録器1台あたりに1観測点の3成分が対応していて，各々単独でも起動するが一定数（その数は外部から設定可能）以上の磁気テープ記録器が各々単独で起動すれば残りも一斉に起動させることもできる。12成分可視記録器は5成分のトリガー信号の内，設定した成分数以上のトリガー信号が出力されたら起動する。

遅延回路と同様に1地震判別回路当りプロセッサMP-80E1個を用いた方式でメモリー4Kバイト、プログラムの長さ3Kバイトである。

地震の発生を検出する論理は次の如くである。地震データの絶対値の約22秒間の移動平均値(約2.2秒毎に更新)を計算し、これを「ノイズレベル」とする。「ノイズレベル」に定数(外部から0.0~99.9に設定可能)を乗算した値を「トリガーレベル」とする。トリガー信号を外部に出力する条件は、一定時間(外部から1~15秒に設定可能)内に①データの絶対値が「トリガーレベル」を越えた時間の累計が一定時間(外部から1/113~255/113秒に設定可能)以上であり、かつ、②データの絶対値の「トリガーレベル」を越える波形としての山の数が一定個数(外部から1~255個に設定可能)以上であること、というものである。なお、データには、通常の場合、オフセットが含まれているので、これの除去もソフトウェアで行っている。

(3) 記録器

中継所から中樞に伝送される信号は60dBのダイナミックレンジをもっている。この信号をダイナミックレンジが48dBしかないFMデータレコーダーに記録することは信号のS/Nを劣化させ、このましい方法とは言い難い。最終的には計算機で自動処理されるのであるからデジタルテープへ記録する方式が最善であると考えられるが、運用を担当する観測部の強い要望があり、FMデータレコーダーへ記録する方式を採用した。

観測中樞および海岸中継所の両方に設置した地震信号の実時間連続可視記録器は沖電気工業製の長期間レコーダWX1009型である。この記録器は地震観測によく用いられるペン書きドラム式記録器であるが、特別な機構により紙交換が自動的に行われるもので、1巻の記録紙により1~2ヶ月間、無人で運転できる。これによる記象は地震現象のみならず回線を含む観測システムそのものの稼動状況のモニターの役目をする。観測中樞のみに設置された、遅延されたデータをトリガー信号により地震時のみ集録する12成分可視記録器およびアナログ磁気テープ記録器は、それぞれ渡辺測器製リアコーダマークV、WR3001型およびTEAC製ポータブルデータレコーダR-210ASである。前者は特殊な感熱記録紙に充分早い熱応答の発熱体をもつペンで記録するもので、発熱量はペンと記録紙の相対運動に応じて電子回路で制御されているので、記録紙が地震待ちで停止している状態から起動させるような使い方に対しては、インク式のペンに比べて大きな特徴がある。これによる記象は東海地域に発生した小地震の緊急震源計算のために用いられる。後者は1/4インチのアナログ磁気テープにFM変調により書き込まれるもので、この記録は気象庁の全国観測網の一環として、小地震の震源、その他の計算に用いられる。

海岸中継所に設置された津波信号の記録器は横河電機製の打点記録器ER-4035型である。津波計の記録は図2.14にブロック図を示した復調回路から出力される11ビット(極性を含む)の内、高位から8ビットおよび下位から8ビットをD/A変換して低・高感度のアナログ電圧を出力している。高感度成分は2.5cmの分解能で±3.2mの振幅範囲を記録し、低感度成分は20cmの分解能で±25.6mの範囲を記録する。なお、記録の基準とする深さ(記録ペンが記録紙の中央に位置する深さ)は任意に設定できる。

給電電圧変化を記録するために海岸中継所に設置された記録器は千野製作所製のインク書き記録器 EH-800-01型である。給電電圧の変動分が地震学的にも興味があるので、給電電圧とある設定値の差をアナログ電圧に変換している。しかもその変換の感度は、記録できる電圧範囲が $\pm 5 \sim \pm 320$ Vの間を7段階に可変設定できるようになっている。

津波計および給電電圧の記録器に出力されたアナログ電圧は、同時にA/D変換されて陸上伝送される。観測中樞においては、これを受信して渡辺測器製マルチコーダMC 6600型に記録される。

3.6 処理管理部

データの処理の一部と陸上装置および回線の保守・管理を行うために、観測中樞にシステム自動管理処理装置として小型計算機を設置した。そのハードウェアの構成は沖電気工業製OKITACシステム50/40 CPU (メモリー64 kW内蔵, 16 kW増設) 554 AA, PTR 713 BA, DISK 486 B (10Mバイト), CET 427 AA, LP 434 DA およびPIO各1台である。ソフトウェアでは以下に述べる記録の処理と陸上部機器の管理を行うが、具体的にはパーティションを2つに分けて、パーティション1で装置の障害管理を1秒毎のリアルタイム処理により行いながら、ある決められた時刻になるとパーティション2で日報、その他の印字を行う。このためパーティション2は作業に使われている時間が少ないので、その空き時間を利用して集録されたデータを用いる解析を行うことが可能である。

(1) 記録の処理

地震の発生によるトリガー信号がPIO経由で計算機に入力すると、計算機は各観測点毎にトリガー信号の発生時刻を即時に印字するとともに最大振幅を読みとる作業を開始する。この結果をまとめて1日1回、日報の形で印字し、その際同時に各観測点が検出した1時間毎の地震発生件数をも印字する。

津波計と給電電圧の毎正時の値も読みとられ日報に印字されるとともにディスクに2ヶ月間記憶される。このデータは上に述べたようにパーティション2を用いて、自らが作成したプログラムにより、解析を行うことができる。

(2) 陸上部機器の管理

海岸中継所および観測中樞に設置された各装置は、自らの障害を外部に知らせる警報機能を有している。これらの警報は海岸中継所内の装置はテレメーターにより(図2.64の監視ビット)、中樞内の装置は直接、PIO経由で計算機に入力され、障害発生およびその復旧の場合には印字されると同時に、ディスクに障害項目、発生・復旧時刻等が(3800件まで)記憶される。

陸上伝送は、回線の不安定性に配慮を払った結果、フレキシブルな構成となっているので、やゝもすると、この記録器のこのチャンネルは何の成分が出力されているのか、非常にまぎらわしくなる危険がある。この結線の管理も計算機で行っている。すなわち下り回線を利用して海岸中継所に指令を与え、ある一定の順序で信号にパルスを重畳させることにより、成分を判別して管理している。この時同時に、脈動除去用の高域濾波器がどこに設定されているのかによって、パルスの応答波形が異なるので、これを利用してそ

の設定の確認をも行っている。

参 考 文 献

気象研究所地震火山研究部，1978：公社D-1回線によるPCM9600bps地震波波形伝送．気象庁測候時報，45，91-106．

松本英照・高橋道夫，1976：地震計電磁変換器の検定方法とその精度について．気象研究所研究報告，27，129-140．

内田裕之・本郷馨，1968：トランスフラクサーの制御特性について．通信用磁性材料研究会会報，16．

第3章 布設*

1. 布設ルート

1.1 基本ルートの選定

本システムは昭和49年度より開発に着手し、地震空白域である東海道沖合に向って布設されることが予定されていたが、これに必要な調査とその検討はその時点から発足した。

基本ルートの選定等については、昭和49年度発足した開発部会の部外専門委員のメンバーの内、主として、当時の日本電信電話公社（以下電電公社という）技術局海底線部門担当調査役福富秀夫氏及び現海上保安庁水路部測量課長茂木昭夫氏とその関係部門の方々の協力を得て行った。

事前の机上のプランとして、予定ルート近傍の海図・地質図・漁労の状況・海流と海気象データ・海洋学者の意見等を参照の上、下記の条件を満すことが検討された。

- (1) 地震の空白域を縦断すること。
- (2) 震源のロケーションがある程度可能なこと。
- (3) 傾斜が原則として 12° 以下であること。
- (4) 海底谷の横断又は底部でないこと。
- (5) 火山脈や岩盤地帯を横断しないこと。
- (6) ケーブル陸揚地とのつながりが良好であること。
- (7) ルートの折れ曲り角度が 45° 以下であること。
- (8) 高価な外装ケーブルを少なくするためと水温変動の影響を避けるため、水深500mまで早く到達するルートとすること。

この机上調査には、海上保安庁水路部が昭和49年度末に測量し完成した東海地方の海底地形・地質調査図とその生データの特別提供を受けると共に助言を受けて作業は進められた。

ケーブルの陸揚げ場所は、海岸中継所の保守運用を考慮して既設の測候所のある場所として御前崎と浜松を候補として検討した結果、ケーブル陸揚げ後、陸上ルートの難易度からすると、御前崎が海岸に近く市街地を通過しないため、御前崎をケーブル陸揚げ地点の第1候補地とした。

御前崎を基点として海図上からルートを検討した結果、東側には駿河トラフに沿った急崖があり、西側には更に狭谷である天竜海底谷が南につらなっている。この範囲から外に出ようとすると、ケーブルのブリッジ又は海底地送りによる障害発生危険度が高くなる。特に地震発生時に海底地送りを起こしてケーブルが切断したとすれば、次に来る津波観測は全く不可能となる。これらのリスクを最も少なくした上で、地震の発生が多いと目される海域内で図3.1に示すような複数の海底地形調査ルートをまず選定した。

*執筆担当 飯沼龍門

1.2 沖合海底地形調査の依頼

調査は沖合海底地形調査と沿岸（ケーブル陸揚げ
汀部）海底地形調査に分けて実施することになった。
沖合海底地形調査は、本布設の依頼を希望している
電電公社海底ケーブル敷設船黒潮丸（3344トン）
とする計画が進められた。昭和50年6月電電公社施
設局・技術局・海底線施設事務所及び気象研究所の
担当者が電電公社施設局会議室に会して、システム

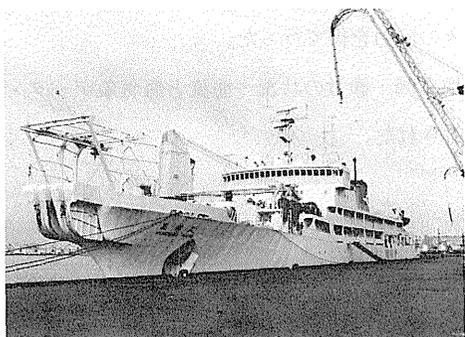


写真3.1 海底ケーブル敷設船・黒潮丸
Photo. 3.1 Cable ship Kuroshio Maru of the NTT.

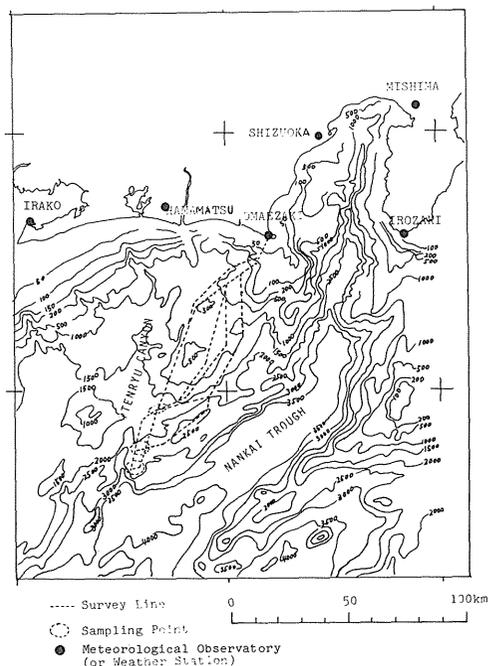


図3.1 東海沖の海底地形図（口絵写真1も参照）
点線で沖合海底地形調査ルートを示して
ある。

Fig. 3.1 Topography off the Tokai
District (cf. Photo. 1).

の今後の開発に対する具体的方針とこれに伴う受託業務について基本的な協議が持たれ、その一項として布設ルートの海底地形調査は試走を兼ねて黒潮丸（写真3.1・表3.1）に依頼することになった。

表3.1 黒潮丸 要目表

全長	119.28 m	マルチビーム測深機	1基
幅	16.20 m	測位ソナー	1基
深さ	5.90 m	レーダー	10 cm波, 3 cm波 16吋 50 kW 2基
満載喫水	5.60 m	自動化システム	中央コンピュータシステム, 共通データ設定システム, 船位, 船速測定システム, 敷設自動化システム, 航法計算システム, 自動操船システム, 工事記録システム。
航行区域	近海区域	主機械	三菱MANV8V40/54型8900PS×430 rpm 1基
航続距離	約6,300 浬	発電機	1000PSディーゼル機関812.5KVAAC450V 4基 450PSディーゼル機関375.0KVAAC450V 1基
総トン数	3344.90 トン	プロペラ	三菱K _A M _E W _A 4翼可変ピッチプロペラ 1軸
最大とう載人員	80名	ケーブルエンジン	電動油圧式 3.8 m (直径) ドラム型 2基 30 t×15 m/min ~ 8 t×225 m/min
航海速度	16.5 ノット	バウシープ	3.00 m V型, 1.00 m 平型 計3基
埋設機揚降クレーン	20 t×20 m/min 電動油圧	スタンシープ	2.00 m V型 2基
ケーブルとう載量	1,200 トン	とう載艇	作業艇1隻, 上陸用舟艇1隻, 交通艇1隻
バウスラスター	三菱K _A M _E W _A 4翼可変ピッチ800 PS		
スタンスラスター	三菱K _A M _E W _A 4翼可変ピッチ500 PS		
ドブラーソナー	NU30 A		
N N S S	HX702		
精密測位装置	APIX-ME-100		

1.3 敷設船黒潮丸の性能

黒潮丸は、コンピューターを搭載し、これを介して布設及び海底調査システム共に自動化されている。この一環として装備しているマルチビーム測深器は、船の動揺に対する傾斜計とコンピューターシステムを介してオンライン結合されて自動補正が加えられ、より精度の高い測深が可能である。また、マルチビームの測深器の性能として左右 15° の広がり範囲の海底の傾斜を測定することが可能である。また、データはアナログ記録の他にデジタルプリントアウトされる。

船位の測定は、NNSS（米海軍航行衛星システム・Navy Navigation Satellite System）とAPIX（精密電波測位測定装置・Accurate Positioning Fix）を装備している。APIXは陸上の2つの従局と船上の主局からなり、3GHz帯の電波を用いて陸上局を基準として船位を2点間の距離として測定し、データは本装置でスムージングされ、コンピューターに送られ自動的に位置が決定される。適用可能範囲は、約50kmで精度は ± 10 m以内が期待できる。

航跡は、コンピューターで処理されXYプロッターで海図上に直接記録が採れる機構となっている。

1.4 第1次沖合海底地形調査

この調査は昭和50年11月21日～11月23日と、荒天のため測深調査が困難になった海域については、昭和50年12月18日～12月19日の2回にわたり実施した。

調査項目としては、予定ルートに沿って測深を行い海底地形を探索すると共に先端装置の軟着底を図る一つの要素として底質を調べるため、その予定される海底3地点で採泥を実施した。調査ルートは、図3.2の6ルートで陸側から沖へ向って4ルートを、沖から陸へ向ってのコースは風浪を正面から受けて測深が不可能となり、2ルート（No. 12, No. 13）のみとなった。サーベイの船速は約10ノットで行った。

調査結果の概要

調査した測深記録と航跡とを合わせて解析した結果、概要下記のようなことが判明した。

(1) ルートNo. 3

一般的には平坦であるが、No. 11 ルートの一部にも見られる天竜海谷の支谷に約2kmの距離しかなく、本予定ルートからはずれた場合は支谷にかかる危険がある。採泥地点No. 2（本布設された先端装置の北側約4km）の付近の6-2km

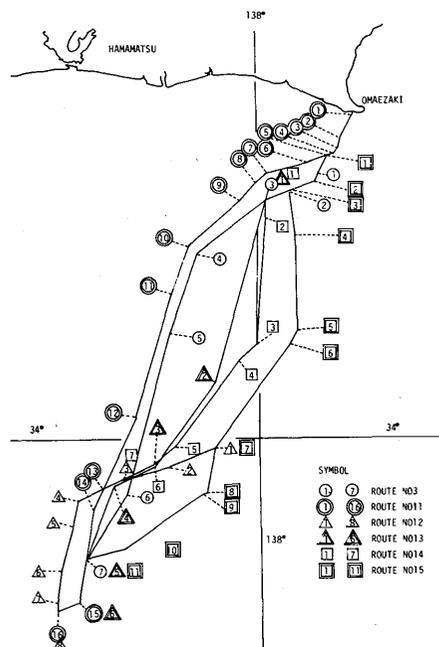


図3.2 沖合海底地形調査ルート
Fig. 3.2 Topography survey routes.

表3.2 調査日程

(1) 第1回目

月 日	曜日	調 査 項 目	
昭和50年 11月21日	金	8:00	静岡県清水沖にて調査関係者乗船
		11:55	ルート№.11 海底地形調査開始
		18:42	" " 終了
22日	土	7:02	ルート№.13 海底地形調査開始
		11:58	" " 終了
		13:40	ポイント№.1において採泥
		15:40	" 2において採泥
		17:48	" 3において採泥
		20:59	ルート№.15 海底地形調査開始
23日	日	4:24	ルート№.15 海底地形調査終了 悪天候のため、館山沖仮泊
24日	月	6:00	館山沖出航
		9:00	横浜着岸

(2) 第2回目

月 日	曜日	調 査 項 目	
昭和50年 12月18日	木	2:20	和歌山沖より回航、御前崎沖に向う。
		12:00	御前崎沖着 ルート№.12 海底地形調査開始
		14:35	ルート№.12 海底地形調査終了
		15:32	ルート№.14 海底地形調査
		19:15	
		19:45	ルート№.3 海底地形調査
12月19日	金	0:12	
		11:00	横浜着岸

表 3.3 海底地形調査航跡表および採泥調査位置表

(1) 海底地形調査航跡表 (ポイント№を直線で結んだ線上)

a) ルート№.3

ポイント№.	実 航 路		SSP.№.	予 定 航 路	
	N	E		N	E
①	34°28.35'	138° 7.00'	1	34°28.644'	138° 7.362'
②	27.20'	4.00'	2	26.985'	3.935'
③	26.20'	1.00'	3	25.978'	0.946'
④	20.10'	137° 51.75'	4	19.932'	137° 51.987'
⑤	11.15'	48.00'	5	10.952'	47.980'
⑥	33°54.00'	42.45'	6	33° 54.956'	40.977'
⑦	46.80'	37.10'	INTE	46.951'	36.997'

b) ルート№.11

実 航 路			予 定 航 路		
ポイント№.	N	E	SSP. №.	N	E
①	34° 35. 25'	138°12. 40'	1	34° 36. 200'	138°12. 200
②	32. 85'	11. 00'	2	31. 200'	9. 150
③	31. 70'	10. 65'	3	29. 250'	1. 050
④	31. 20'	10. 30'	4	21. 024'	137°50. 600
⑤	30. 88'	9. 30'	5	10. 882'	47. 715
⑥	30. 00'	6. 25'	6	33° 55. 089'	39. 404
⑦	29. 20'	1. 00'	7	46. 970'	36. 964
⑧	28. 20'	137°59. 65'	8	41. 957'	35. 950
⑨	25. 90'	57. 40'	I N T E	40. 982'	32. 955
⑩	21. 10'	50. 77'			
⑪	16. 10'	48. 70'			
⑫	2. 30'	43. 65'			
⑬	33° 54. 50'	39. 25'			
⑭	52. 25'	38. 10'			
⑮	42. 00'	36. 15'			
⑯	41. 00'	33. 05'			

c) ルート№.12

実 航 路			予 定 航 路		
ポイント№.	N	E	SSP. №.	N	E
△1	33° 59. 20'	137° 54. 00'	1	33° 41. 099'	137° 33. 048'
△2	57. 25'	48. 25'	2	46. 048'	34. 011'
△3	55. 20'	41. 10'	3	53. 041'	36. 020'
△4	53. 00'	36. 00'	4	55. 016'	41. 064'
△5	50. 70'	35. 40'	I N T E	59. 040'	54. 061'
△6	45. 75'	33. 75'			
△7	42. 00'	33. 15'			
△8	41. 05'	33. 05'			

d) ルート№.13

実 航 路			予 定 航 路		
ポイント№.	N	E	SSP. №.	N	E
①	34° 26. 20'	138° 1. 00'	1	34° 25. 049'	137° 45. 789'
②	6. 00'	137° 53. 00'	2	5. 965'	53. 862'
③	33° 57. 00'	46. 00'	3	33° 56. 867'	45. 420'
④	54. 75'	40. 60'	4	54. 965'	40. 405'
⑤	46. 80'	37. 10'	5	46. 973'	36. 951'
⑥	42. 00'	36. 15'	I N T E	41. 954'	35. 985'

e) ルート№.14

実 航 路			予 定 航 路		
ポイント№.	N	E	SSP. №.	N	E
①	34° 26. 20'	138° 1. 00'	1	33° 55. 296'	137° 40. 823'
②	23. 40'	0. 90'	2	57. 039'	45. 698'
③	9. 20'	137° 59. 90'	3	59. 047'	48. 488'
④	8. 60'	57. 50'	4	34° 10. 123'	138° 59. 856'
⑤	33° 59. 20'	48. 60'	I N T E	26. 03'	00. 984'
⑥	57. 10'	45. 60'			
⑦	55. 20'	41. 10'			

f) ルート№.15

実 航 路			予 定 航 路		
ポイント№.	N	E	SSP. №.	N	E
①	34° 30. 88'	138° 9. 30'	1	34° 30. 88'	138° 9. 30'
②	28. 25'	7. 40'	2	28. 25'	7. 40'
③	27. 50'	4. 05'	3	27. 50'	4. 05'
④	22. 50'	4. 90'	4	12. 053'	5. 866'
⑤	12. 00'	5. 00'	5	33° 59. 047'	137° 53. 926'
⑥	10. 20'	3. 90'	6	54. 230'	53. 030'
⑦	33° 59. 20'	137° 54. 00'	7	48. 042'	41. 896'
⑧	54. 00'	53. 10'	8	46. 997'	36. 957'
⑨	53. 60'	52. 00'	I N T E	47. 025'	36. 083'
⑩	47. 90'	42. 00'			
⑪	46. 80'	37. 10'			

(2) 採泥調査位置表

ポイントNo.		採泥開始位置	着底位置	終了位置
1	N	33° 42. 2'	33° 41. 9'	33° 41. 4'
	E	137° 35. 5'	137° 33. 5'	137° 31. 6'
2	N	33° 48. 0'	33° 47. 1'	33° 46. 4'
	E	137° 35. 9'	137° 35. 4'	137° 34. 8'
3	N	33° 55. 8'	33° 55. 2'	33° 54. 8'
	E	137° 40. 0'	137° 40. 1'	137° 40. 1'

～6～12kmの間(点6から2～12kmの場所の意)に最大11°比高120mにおよぶ起伏がある。

(2) ルートNo. 11

4～6kmに傾斜角39°で比高200mの落ち込みがあり、その先の4～10kmに傾斜角45°比高200mの立ち上がりがあり、天竜海谷の支谷を横断している。6～3km～10kmの間には4～7°の3山の起伏がある。11～15kmに約1kmの間の記録は不明瞭であるが、比高200m位の崖が認められ注意を要する。また、8～2kmには傾斜角45°比高100mの急崖が認められた。

(3) ルートNo. 12

本ルートは、沖より陸へ向って調査した。1～4kmに傾斜9.5°比高100mの落ち込みがある。また、2～1km～4km間に傾斜6°位の起伏がある。

(4) ルートNo. 13

4～1kmまでは比較的平坦な地形である。

4～3kmに傾斜27°比高50mの谷があり、その先の4～10kmに傾斜29°比高100mの落ち込みがあり、5～5kmに傾斜30°比高100mの立ち上がりが見られる。

(5) ルートNo. 14

本ルートは、沖より陸へ向って調査した。2～19km～20kmに12°～11°比高で20～30mの起伏が認められた。その他は起伏は多いが急崖はない。

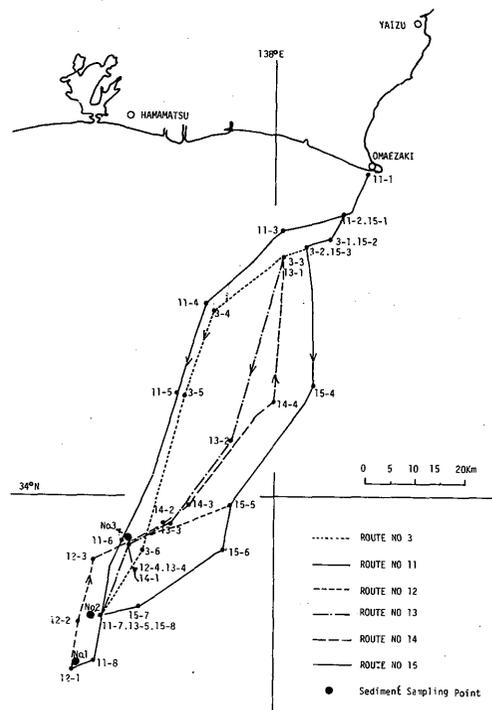


図3.3 沖合海底地形調査の航跡と採泥点(表3.3参照)

Fig. 3.3 Wakes of the survey ship and the sediment sampling points.

(6) ルートNo. 15

4-8 kmに傾斜 15° 比高100 m, 4-12 kmに傾斜 28° 比高100 m, 4-16 kmに傾斜 41° 比高200 mの落ち込み, 続いて4-19 kmに傾斜 27° 比高150 mの立ち上がりが見られる。5-0 kmから4 kmにわたり比高で1,000 mを一気に下り, 平均傾斜角で 14° , 最大で 45° の急崖となっている。

(7) 採泥調査

3ポイント共に火山灰の細砂である。次年度のリハーサルのマッシュルームアンカーで採集された多量の底質からは, 細砂の中に直径5~10mmの円形の軽石粒が少量混入していた。砂のメッシュは細かいが, 比較的締った堆積物であった(海底地震常時観測システム海底ルート沖合調査報告書, 昭51年2月参照)。

1.5 基本ルートの選定

第1次沖合海底地形調査のデータを検討した結果, 大きく分けると3ルート(図3.4, 図3.5)になる。この図のルートNo. 1は調査結果は比較的平坦であるが, 2~3 kmで急崖を伴う天竜海谷があり, その支谷と思われる落ち込みを横断している。

また, 水深500 mまでの距離が長く高価な外装ケーブルを最も多く必要とするコースである。ルートNo. 2は真中のコースで, 全般になだらかに下向して, 先端付近以外は 12° を越える崖がない。ルートNo. 3は, 東側で1番凹凸があり 12° を越える崖が多く, ケーブル長が長くなる。

以上総合すると, 真中の第2ルートが最適であるが, ポイント8~13の間の傾斜が強く, 一部に崖が存在を認められ, 先端装置をポイント8以南に延長するとすれば, 再調査と検討を必要とすることになった。

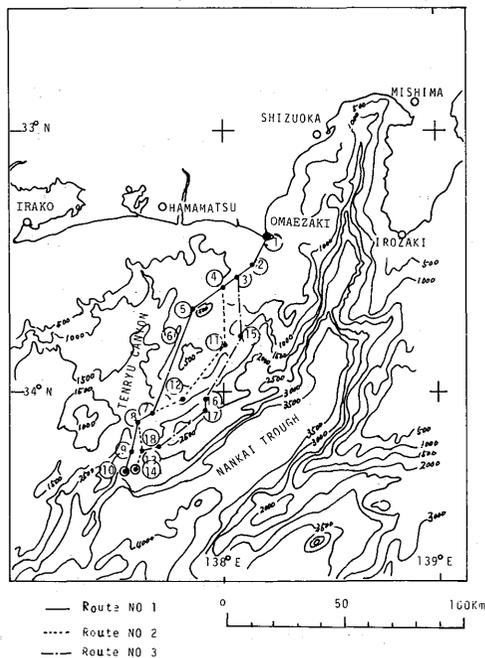


図3.4 候補ルート

Fig. 3.4 Proposed routes.

1.6 第2次沖合海底地形調査

最終ケーブルルートと総ケーブル長の決定の段階となった昭和52年度には, 東海沖での巨大地震発生の危険度が高くなっているとの諸説が多くなる等の背景もあり, 海底ケーブルの保線機構を全く持っていない気象庁ではあったが, 多少のリスクを犯しても先端装置は可能な限り沖合へ延長するようとの要望が強くなった。

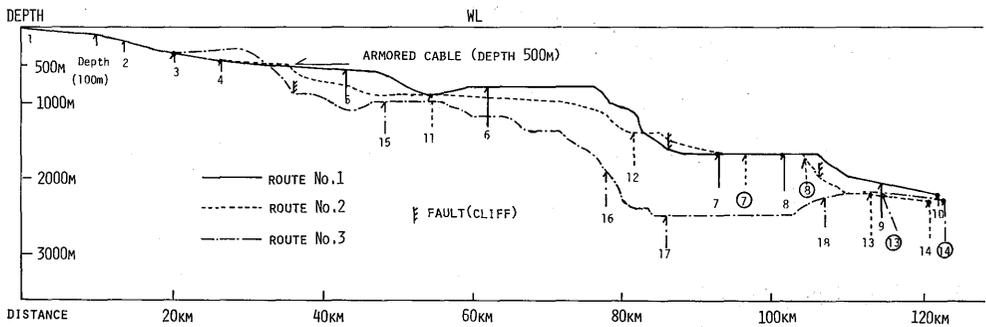


図 3.5 候補ルートの断面図

Fig. 3.5 Cross section of the routes in Fig. 3.4.

このため 1.5 項の基本ルートの選定で述べた No. 2 ルートのポイント 8～13 間の測深記録の不明瞭であった急傾斜を確認すると共に予定ルートの範囲で最も良いルートを探し、リスクを最少限にすることが必要となった。そこで、この海域での第 2 次沖合海底地形調査を電電公社の黒潮丸によって実施することになった。

この調査は、黒潮丸をこの調査のためにわざわざこの海域に回航せず、黒潮丸が作業で西日本海域への回航の途路の航路すじにあたるので、この機会に実施してもらうことになった。

昭和52年 9 月 13 日黒潮丸が西日本の作業からの帰路、調査を実施した。調査開始前にまず位置を NNS S で決定して調査を始め、途中では位置確認が不能のまま航行し、調査完了後に入った NNS S による位置の確認をした結果、最終的に約 6 km 東へ流されていて本精密調査の目的には合わなかった。

以上により、沖合での位置決定方式を根本的に再検討した。この結果、まずこの海域 2 地点にレーダーブイ 2 基を投入してこの位置を NNS S で確認の上、これを目標に航行することにより再調査を実施することになった。

昭和52年 11 月 12 日上記準備作業の上、図 3.6 の実線コースに沿って測深機による海底地形調査を実施することができた。このコースは、第 1 次調査で実施した 4～5 km 幅の菱形の中間とその東外側のコースである。この結果問題点となっている図 3.6 の中央の崖 (cliff) は 18° (基準は 12° 以下) 以上あることが判明した。

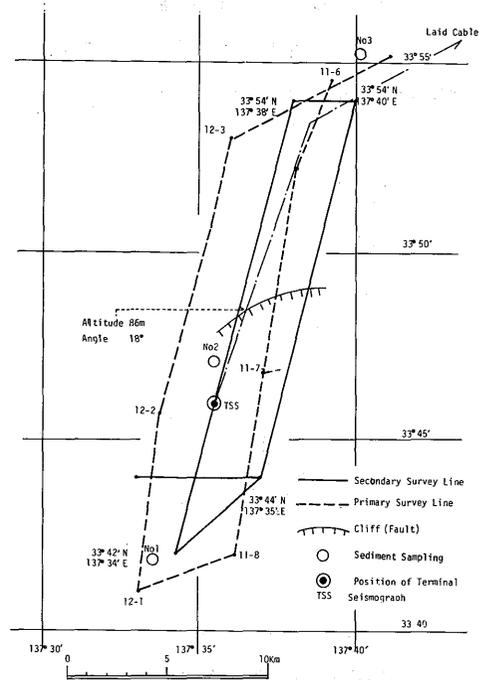


図 3.6 第 2 次沖合海底地形調査ルート

Fig. 3.6 Secondary topography survey routes.

調査の結果を電電公社の担当者の意見を参考の上、本布設はケーブルのスラック（余裕長）を多く取ることによってこのルートを通ることに決定した。

参考までに、図 3.6 に先端装置が本布設された位置（TSS）とケーブルルート（長短破線）を示した。本布設時の測深機の記録によると、この崖は平均傾斜角 18° 、比高が86mの崖で本システムのケーブルルート中最大の傾斜となっている。

2. 沿岸海底地形調査

海底ケーブルの損傷は波浪の影響を直接受ける海岸の水深50m付近までが非常に多いとされている。このため、ケーブル陸揚げ予定海岸から最良ルートを探すのとケーブルの防護工事の方法を確立するための資料としてこの調査を実施することが必要となった。

ケーブル陸揚げ地点の選定は、御前崎測候所と海岸までの陸上ルートを考慮の上、海上保安庁の海図“御前崎付近（第1077号）”を参考とし、御前崎灯台（標高53m）から海の濁りと波の砕け位置を見極めることにより、浅瀬と岩礁の位置を総観的に確認し、更に遠州灘側の沿岸を歩いて調査して最終机上プランを決定した。

沿岸海底地形調査は第1次を昭和50年度、第2次を昭和51年度、第3次の潜水調査を昭和52年度にと、3年度にわたり3回に分割して芙蓉海洋開発株式会社により一連の調査を実施した。

2.1 第1次沿岸海底地形調査

この調査の現地調査は、昭和50年10月8～22日の15日間にわたって実施された。調査ルートは図 3.7 に示す。主な調査範囲は汀部 0.5 km、沖合 1.5 km、長さ 2 km の扇状の範囲に、南北に測線17本、東

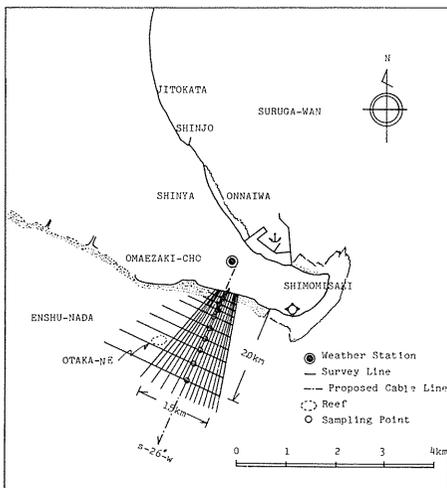


図 3.7 沿岸海底地形調査ルート
Fig. 3.7 Topography survey routes near the shore.



写真 3.2 沿岸海底地形調査
Photo. 3.2 Topography survey near the shore.

西に測線9本を設定した。この扇状の範囲外にある尾高根岩礁の状況を知るため東北側線のみ西側へ延長した。測量船は5トン程度の漁船に音響測深機と沿岸からの距離測定員(写真3.2)を乗船させ、方向はトランシットで陸上より誘導(関連研究9参照)して深淺測量を行った。更に、図3.7に示す10点のサンプリングポイントでは底質をエクマンバージサンプラーで採集し、目視観察をして保存した。そのうち5地点について海底同軸ケーブルの外部被覆及び絶縁に使用しているポリエチレンを浸透して内部の銅を腐食する硫化水素(H_2S)ガスの有無をガス発生管と検地管(201L)を使用して調査した。

2.2 調査結果

調査結果の海底地形図は、図3.8に、南北測線の両端のNo. 2, No. 16と中心であるNo.9測線の断面図を図3.9に示す。

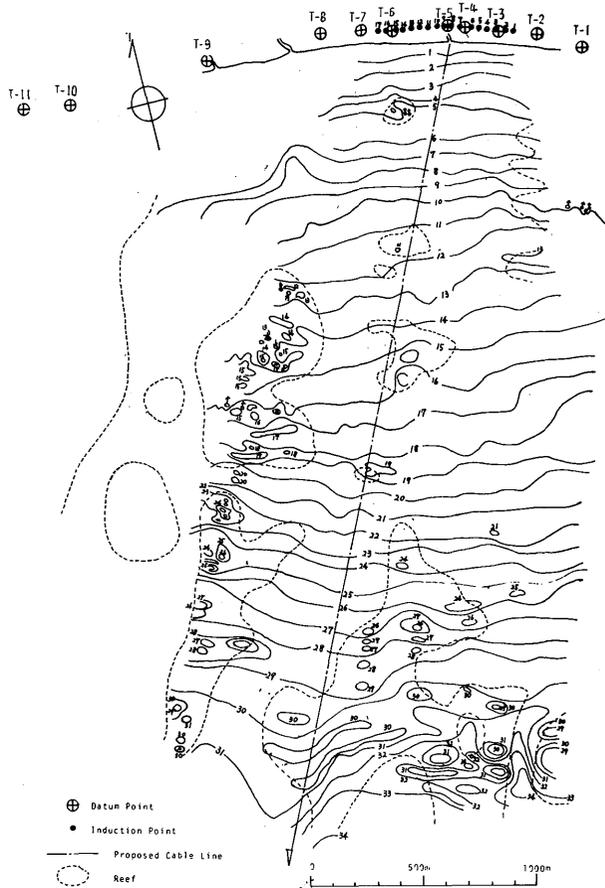


図3.8 沿岸海底地形
Fig. 3.8 Surveyed topography.

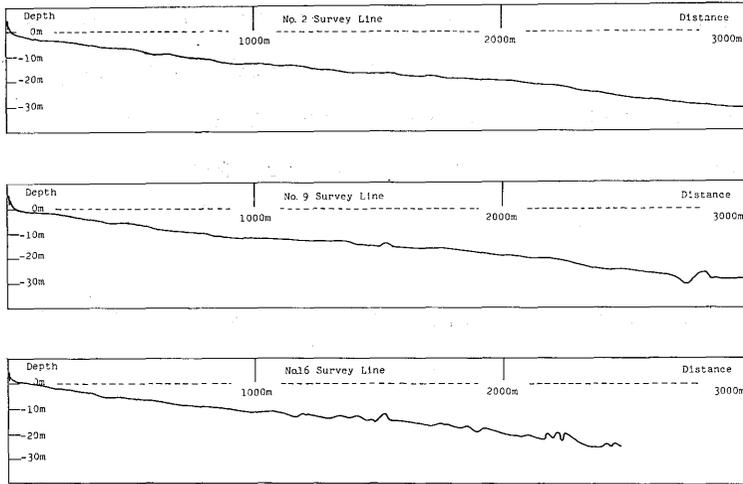


図 3.9 沿岸海底地形の断面図

Fig. 3.9 Cross sections near shore.

この海域の勾配は海岸より 250 m までは 1/50 の傾斜であり、距岸 250 m ~ 2 km 付近までは、1/100 程度で全般に緩斜面であった。測深記録から岩盤あるいは岩質の海底と推定される地域は予定ルート東方（測線 No. 1 ~ No. 7）の距岸 2.8 km 付近から沖合の海域と予定ルート西方（測線 No. 15 ~ No. 17）の距岸 1.1 km 付近から沖合に顕著に認められた。また、測線 No. 12 ~ No. 13 の距岸 200 ~ 300 m で水深 5 m 付近に岩礁が認められた。なお測線 No. 4・No. 6・No. 15 の汀線付近において露出した岩盤が見られた。ケーブル布設予定ルート（測線 No. 9）では距岸 1.5 km 付近に 2ヶ所の凸地形が見られ、距岸 2.6 km を過ぎたあたりから海底の起伏が激しくなっている。ケーブル予定ルート（測線 No. 9）に沿って行った底質調査の結果は表 3.4 に示したように、底質の表面は細砂に貝殻片が混入している。

表 3.4 底質調査及び硫化物濃度測定結果

測点	月/日	時間	水深	採泥器	検知湿泥重量	検知結果	湿泥重量	乾泥重量	乾泥率	硫化物濃度	底質	備考
		h m	m		g	mg	g	g		mg/g		
1	10/19	11:15	23.2	E. B	2	0	5	3.8	0.76	0	円礫	貝殻片
2	10/19	11:36	23.3	E. B							細砂	貝殻片
3	10/19	11:45	16.9	E. B							細砂	貝殻片
4	10/19	11:50	15.6	E. B	2	0	5	3.7	0.74	0	細砂	貝殻片
5	10/19	11:55	13.3	E. B							細砂	貝殻片
6	10/19	12:00	11.6	E. B	2	0	5	3.7	0.74	0	細砂	貝殻片
7	10/19	12:05	9.0	E. B							細砂	貝殻片
8	10/19	12:10	7.8	E. B	2	0	5	3.8	0.76	0	細砂 円礫	貝殻片
9	10/19	12:20	5.6	E. B							細砂	貝殻片
10	10/19	12:30	3.2	E. B	2	0	5	3.9	0.78	0※	細砂	貝殻片

(注) ○採泥器“E. B”はエクマン・ページサンプラーを示す。

○検知結果“0※”は定量的には読み取ることができなかつたが反応があつたことを示す。

硫化水素については、1地点反応があった程度で、外洋に面しておりガスに対するケーブルへの特別仕様（アルミニウム片の一層シース）をする必要のないことが確認された（御前崎沿岸海底地形底質調査報告書，昭50年10月参照）。

2.3 第2次沿岸海底地形調査

第1次調査の結果，距岸2.6 km（第1次は2 kmまで）あたりから先で海底の起伏が激しくなり，岩盤が露出しているおそれがあるので第1次調査海域より先で幅1 km，長さ4 km（総計距岸6 km，予定水深50 m）まで延長することにした。この調査の現地調査は，52年3月11～20日の10日間にわたって実施され，調査ルートは図3.10に示す。

測線は南北で21本（約50 m間隔），東西で5本（約1 km間隔），総測線長89 kmにわたり，音響測深機により深浅測量を実施した。今回の調査での測量船の位置の決定は第1次と異り，電波測位機（E. O. P. Y. M-100）の従局を陸上の基準点2個所に設置し，距離交会法により船位が10秒間隔で自動的に印字される方法をとった。更に，図3.10の10点で底質の採集を，20点で底質判別を行った。

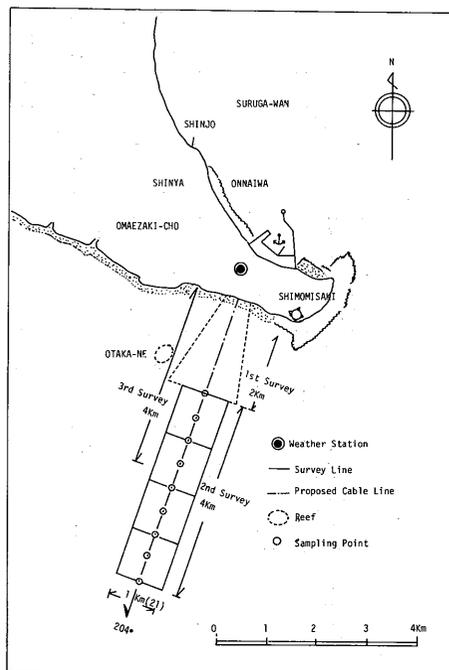


図3.10 第2次沿岸海底地形調査ルート
Fig. 3.10 Secondary topography survey routes near shore.

2.4 調査結果

調査結果の深浅図は省略する。概要としては，全般になだらかな傾斜を示しており，距岸2 kmで水深20 m，同6 kmで45 mとなっている。距岸5.4 km（水深40 m）で予定ルートの西側に顕著な凹凸地形で岩盤と推定される。距岸と水深との関係は2 kmで20 m，3 kmで31 m，4 kmで35 m，5 kmで40 m，6 kmで45 mとなっていて，沖合4 kmからは1,000 mにつき5 m，即ち1/200の勾配となっている。底質は距岸3.5 km（水深約35 m）までは砂または礫混りで，それ以遠は礫が変わって砂が堆積しない状態である。予定ルートの東側と距岸5.4 km以遠の西側には岩礁が認められた。第2次調査海域は，全般的に岩質で構成されており，その谷地及び皿状地形に砂または礫が堆積している。底質調査の結果は，表3.5に示す（御前崎沖合海底地形底質調査報告書，昭52年3月参照）。

表 3.5 底質調査結果一覧表

測点	年月日	水深	底質	記事
採集1	52.3.19	18 ^m	f. s	濁汰良
" 2	"	29	f. s	"
" 3	"	34	m. s~f. s	"
" 4	"	36	G	円または重円礫
" 5	"	41	G. S	濁汰悪, 貝殻混り
" 6	"	44	G. S	" "
" 7	"	39	G	重円礫5 mm以下
" 8	"	32	G	円礫5 m~10 mm
" 9	"	27	f. s	濁汰良
" 10	"	21	f. s	"
判別1	52.3.19	20	f. s	
" 2	"	20	R	レッドには砂が附着していたが, レッドのあたりは岩である。
" 3	"	25	f. s	
" 4	"	26	R	砂が附着していたがレッドのあたりは岩である。
" 5	"	33	R	" "
" 6	"	32	m. s	
" 7	"	29	R	砂が附着していたがレッドのあたりは岩である。
" 8	"	33	R	砂及び礫が附着していたが, レッドのあたりは岩である。
" 9	"	35	R	" "
" 10	"	36	G	やや固い感じがする。砂もわずかに附着していた。
" 11	"	37	G	" "
" 12	"	39	G	
" 13	"	38	G	やや固い感じがする。貝殻が附着していた。
" 14	"	40	R	レッドのあたりが大きかった。わずかに礫が附着。
" 15	"	40	R	
" 16	"	40	G	貝殻が附着していた。円礫
" 17	"	42	G. S	"
" 18	"	43	G. S	"
" 19	"	42	R	礫, 砂, 貝殻が附着していた。
" 20	"	45	G. S	貝殻が附着していた。

2.5 第3次沿岸海底地形調査

この調査は、第1次・第2次で調査した結果、距岸1.5 km位までは砂で、ケーブルの埋設防護が可能であるが、その先は岩盤が露出しているか、または堆積物が浅いと考えられ、ケーブルの防護工法を確立するために必要な調査である。

調査ルートは、第1次・第2次で調査のほぼ中心に沿った1本(図3.10参照)で長さ4 kmに約100 m毎に潜水して調査を行った。

(a) 水中写真撮影又はスケッチ 37点

- (b) 貫入テスト 37点
- (c) 底質採取 37点

調査船及び測点の位置決定法は、第1次調査と同様に船を陸上よりトランシットとトランシーバーで誘導し、岸からの距離は六分儀を使用して船の位置をまず決定する。決定された位置にストックアンカーの付いたブイを投入して設標点とした。設標点のロープに沿って潜水し、このまわり半径15mの間の海底地形・障害物等の状況を目視で調査すると共に水中カラー写真の撮影を行い、図3.11のようなスケッチ図を各調査点について製作した。

貫入テストは、アンカーの付近で5cm毎に色分けした(赤白)長さ1.5mの鉄筋棒を潜水土によりハンマーで貫入させて調査した(写真3.3参照)。

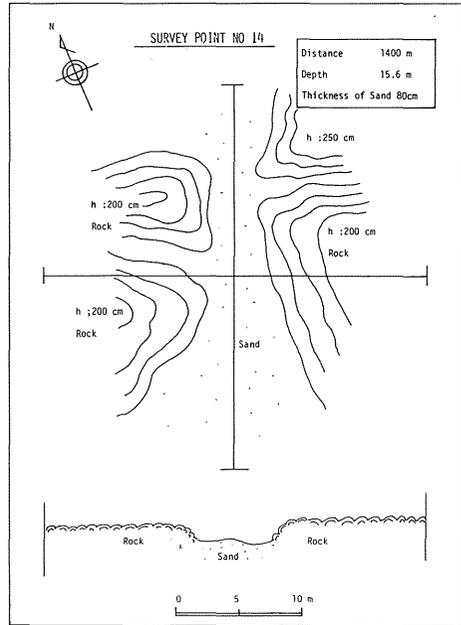


図3.11 海底のスケッチ(一例)
Fig. 3.11 Sketch map of the seabed near the shore (an example).

2.6 調査結果

(1) 海底状況

汀部は1m以上の砂が堆積しているが、700m付近よりテーブル状の岩盤が現われるようになる。沖合2.9kmより礫が多くなって岩盤と岩盤の間に広がっている。3kmから3.4kmの海底には、幅40cm、高さ20cm位、走向南北の大きな砂紋(リップルマーク)が確認された。この辺は水深30m以上もあり、海底にこれほど大きな砂紋が多数確認できることは珍しい。このことは、外洋に面しているため非常に大きなうねりが海底に伝わり、大砂紋を作ったものと推定される。

10m以浅は砂が巻き上げ、水中写真は写らなかった。

(2) 貫入テスト

700m付近から岩盤が露出し始めるが、汀部より2km位までは0.5~1.2mの砂が存在している。2kmより沖合は砂層が薄くなり0~0.5mになっている。

(3) 底質採取

礫は汀部と沖合2.9km付近より分布していて、この付近からは貝殻片が多く混入している。岩盤

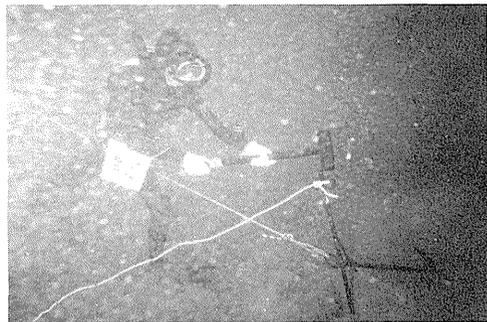


写真3.3 貫入テスト
Photo. 3.3 Investigation of firmness of the seabed near the shore.

は、相良層（新第三紀）と言われ通常土タン岩又はシルト岩と呼ばれ、軟岩（N値50以上）であるが、水中では粘性が強く掘削には非常に手を焼く岩である。調査結果は表3.6に示す。

表3.6 潜水調査結果一覧表

測点	年月日	距離 (km)	カ ッ ト 角	底 質	貫入 (m)	水 深 (m)	記 事
1	s 52.9.22	0.1	測 距	f . s , G	1.0	0.7	しまった砂
2	22	0.2	測 距	f . s	1.1	2.5	
3	22	0.3	測 距	f . s	1.2	4.0	
4	24	0.4	Tp 7-赤白Tr 71-40	f . s	0.9	5.0	下部しまっている
5	23	0.5	Tp 7- アンテナ 96-00	f . s	1.0	6.5	流向 流速 貫入しやすい 西北西(約20 cm/sec) 0.4Kt
6	23	0.6	86-20	f . s	1.0	8.0	しまった砂
7	23	0.7	78-35	f . s , R	0.75	9.5	しまった砂
8	24	0.8	71-55	f . s , R	0.9	10.7	下部しまっている
9	24	0.9	66-25	f . s , R	0.9	11.5	
10	24	1.0	61-40	f . s , R	0.6	12.8	流向 流速 西(約10 cm/sec) 0.2Kt
11	27	1.1	57-25	f . s , R	0.6	12.5	
12	27	1.2	53-40	f . s , R	0.6	18.8	
13	24	1.3	50-25	f . s , R	0.8	14.0	
14	24	1.4	47-35	f . s , R	0.8	15.6	
15	24	1.5	Tp 4- 燈台 100-50	f . s , R	0.9	16.3	流向 流速 西(約20 cm/sec) 0.4Kt
16	23	1.6	96-40	f . s	1.2	17.0	
17	23	1.7	92-50	f . s , R	1.0	17.0	硬い
18	23	1.8	89-00	f . s	0.9	18.7	硬い
19	14	1.9	85-30	f . s	0.5	19.0	やわらかい
20	14	2.0	82-15	f . s	0.5	20.0	しまっている砂
21	27	2.1	79-15	f . s , R	0.2	19.7	流向 流速 西(約20 cm/sec) 0.4Kt
22	27	2.2	76-25	f . s	1.0	20.7	
23	28	2.3	Tp 4- 燈台 73-40	f . s , R	0.0	22.7	
24	28	2.4	71-05	f . s , R	0.2	24.7	流向 流速 西(約30 cm/sec) 0.6Kt
25	28	2.5	68-40	f . s , R	0.6	26.2	
26	27	2.6	66-25	f . s , R	0.1	26.2	流向 流速 東南東(約10 cm/sec) 0.2Kt
27	27	2.7	64-15	f . s , R	0.1	28.5	
28	26	2.8	62-10	f . s , R	0.1	28.4	
29	26	2.9	60-17	Gr , R	0.2	28.8	(貝殻まじり)
30	25	3.0	58-30	G , R	0.1	29.9	流向 流速 東南東(約10 cm/sec) 0.2Kt
31	25	3.1	56-45	G	0.5	30.9	
32	25	3.2	55-05	Cy , R	0.3	31.2	海底に大きな波紋
33	24	3.3	53-35	G , R	0.3	31.0	海底に大きな波紋
34	24	3.4	52-05	G	0.5	32.5	海底に大きな波紋
35	24	3.5	50-40	G , R	0.5	33.8	
36	14	3.6	49-25	M , R	0.6	32.5	
37	14	3.7	48-10	M , R	0.0	33.0	流向 流速 東南東(約20 cm/sec) 0.4Kt 岩盤上

但し底質記号は下記の通りである。

粘土... Cy 泥... M 細砂... f.s 中砂... S 細礫... Gr 中礫... G 岩... R

(4) その他

この海岸は潮流が速く遊泳禁止区域となっている。表層は1ノット程度の流れがあったが、底層流を簡易測定をした結果、東西の両方向に0.2～0.6ノット程度の流れが認められた。

約6km西の中部電力浜岡原子力発電所の冷却水の取り入れ口(沖合600m)及び沖合2,000mでの3点における海面下2mの流れと方向の調査結果によると、夏季は沿岸に平行にほぼ東西両方向に流速0.8ノット位が卓越している。冬季は西風の影響ももろに受け、ほぼ東方向(浜岡より御前崎方向)に流速1ノット前後の流れが卓越している。このことは上記の独自調査結果と対応している(海底ケーブル布設ルートの潜水調査報告書、昭52年10月参照)。

3. 布設工事施工法開発とそのリハーサル

本システムの布設は規模が大きいため海底ケーブル敷設船によることは既に述べた通りであるが、精密なメカニカル計測器を挿入した装置を投入布設することは初めての試みである。特に先端装置のような大型計測装置を測位と定位置保持の困難な沖合で正確に予定位置に軟着底沈下布設することは、電電公社としても全く経験のない作業であった。

また中間点装置も電電公社が扱っている海底中継器よりひとまわり大きな筐体である為に、通常の作業に適合しない部分があり、さらに、ショックの軽減をはかる必要があった。そこでリハーサルにより布設施工作业とシステム自体に関する問題点を解明して最終目的の完遂を期することになった。

3.1 敷設船上での作業中の衝撃と振動の調査

本システムの布設についての電電公社の基本条件として、既設の装置と既に実施している工法を基本的には大きく変えないことが提示されていた。この条件の中に最大ショックは布設全工程を含めて50G(Gは重力の加速度)と規定されていたが、果してそれで良いのか、またそのショックがどの時点で発生するのかを調査する必要があった。

たまたま電電公社の黒潮丸が昭和49年度末に完成し、布設試験を同年3月宮崎県沖で実施する際、ダミー中継器3台を製作その内に純メカニカルのショックメーターを挿入してテストすることを聞いた。本船の布設システムの基本設計を担当した電電公社本社施設局海底線部門専門調査役鈴木欽也氏(現在NEC)の特別なるはからいで、当研究部が希望しているショックのモードの解析が可能なショックメーターを電電公社のダミー中継器筐体に挿入することを許可して戴き調査を実施することができた。この測定に使用した測定器は既に完成しているダミー中継器に挿入して操作ができることが条件となった。測定器は適当なものがなく、圧電式の小型ショックメーターセンサー2成分とソニーの小型カセットオーディオテープレコーダー(TP-1000)2台の一部を改造して使用した。概要は図3.12に示す。

解析の結果、中継器がケーブルタンクから発射してタンクのあるセンターコーンに衝突する際に最大を示し、その値は60Hz(規格は55Hz)で70Gを示した。この値は周波数が高いので装置の破壊

とどう結びつくか不明であるが、やはり精密なメカを持つ地震計も50Gの衝撃は受けるものとしてシステムの設計をすることになった。調査の解析結果は関連研究1で述べる。

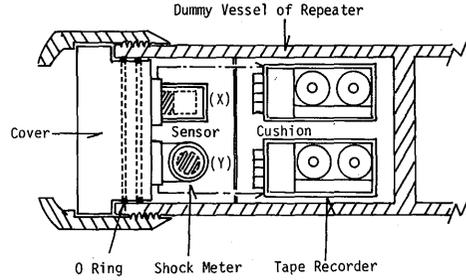


図3.12 衝撃測定のための装置

Fig. 3.12 Instruments for measuring the shocks on the cable ship.

3.2 第1次布設リハーサル

(1) マスタープラン

先端装置の布設工法は同装置の形状・重量と使用するケーブル等によっても異なるものである。

先端装置の布設工法は大別すると図3.13に示す、敷設船1隻のみと敷設船と作業船の2隻による連携作業工法が考えられていた。机上プランとしては、2隻(いわゆるケンカ捲)による工法はケーブルに過大な荷重を受けることなく既存の無外装同軸ケーブル(破断力7トン)で布設可能である。しかし、2隻の船が各潮流や風で流される海上での長時間作業とケーブルとロープのからみ合い等不測の事態が発生した場合、その収拾と中途の位置修正が困難である。更に、電電公社としてもこの方式での布設施工に経験がないので、基本としては1隻で全作業を施工する方式を採用することになった。

既存の無外装同軸の中心導体(内径8mm)の心にはピアノ線41本が入っていて破断力約7トンの能力を持っているがこのケーブルで吊り上げた場合、水深3,000mで静荷重のみで3.5 tonに達し、位置修正航行や波による船のシャクリ等の動荷重を加えると、これだけで破断力限度に達し安全係数(土木作業では一般的に静加重の3~6倍)がなくなる恐れがあった。

たまたま昭和50年度公社の電気通信研究所が主体となり、高張力無外装同軸ケーブル(破断力15ト

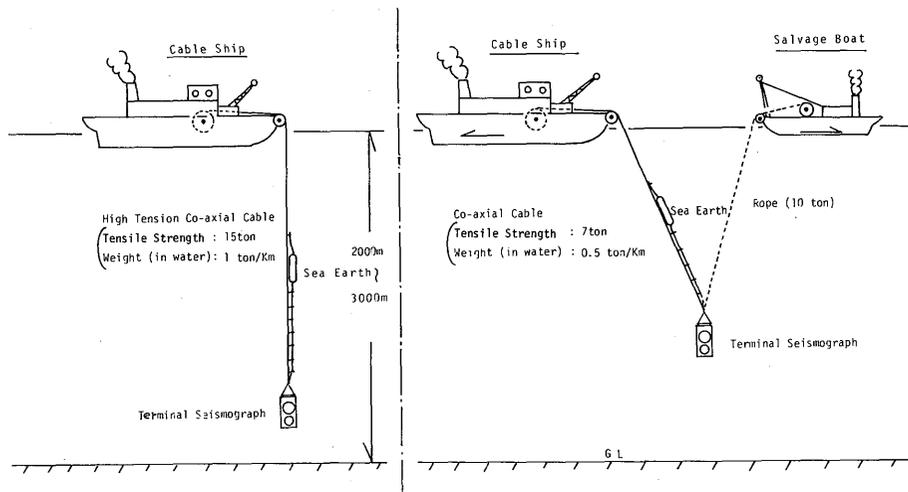


図3.13 先端装置布設工法の検討

Fig. 3.13 Examination of the laying work of the terminal apparatus.

ン)を開発中であった。電電公社技術局の前述鈴木欽也氏よりこのケーブルの中心導体に既存の38mm同軸ケーブルの外部導体を被覆すれば、本システムに使用を予定している25mm同軸ケーブルのインピーダンス(44Ω)が同等となり、相互のマッチングがそのまま取れた上で張力が2倍になり、これを採用するよう助言された。そこでこの新同軸ケーブルの採用を決定し、急ぎ、海底同軸ケーブルメーカーである日本大洋海底電線KK(以下OCCと呼ぶ)に4kmの高張力無外装同軸ケーブルを発注し、リハーサルに間に合うように納入させることにした。

(2) 準備

本布設リハーサルにあたって、下記の通り打合せを行い準備をすすめた。

- 51年6月3日
布設リハーサル実施予定時期・先端装置へのシーアース取付工法・御前崎陸上ルート等の検討
(気象研・公社)
- 6月9日
先端装置概略構造・接地電極の構造・設置工法の概要の検討(気象研・海施・NEC)
- 7月7日
気象研実施要領(案)の下検討(気象研・公社・NEC)
- 7月8日
気象研実施要領(案)・実施時期・仕様書・乗船人員等の打合せ(気象研・公社)
- 7月23日
布設リハーサル実施概要について部内説明(海施・横浜海工)
- 7月29日
先端布設用高張力ケーブル採用及び布設工法の打合せ(気象研・海施)
- 8月4日
公社側実施要領(案)説明及び検討(気象研・海施)
- 8月11日
気象研仕様書(案)の細部検討(気象研・海施)
- 9月17日
リハーサル実施前の横浜における総合打合せ(気象研・公社・NEC・OCC)

以上の打合せの結果、概要図3.14に示す方法で実施することになった。

先端装置にはNECが新たに開発した内径30cmのベリリウム銅製大型耐圧筐体の中に中間点装置用の地震計センサー・カセットテープ型のダイレクト磁気テープレコーダー(340時間用)・地震計のクランプ操作回路と電池を挿入して海底での雑微動(主として波浪が原因)記録を記録するようにした(写真3.4)。更に2方向のショックメーターを取り付けた。

ケイジには、採泥用のパイプを4本、海底面を引きずった場合の姿勢を調べる約5cm突出したア

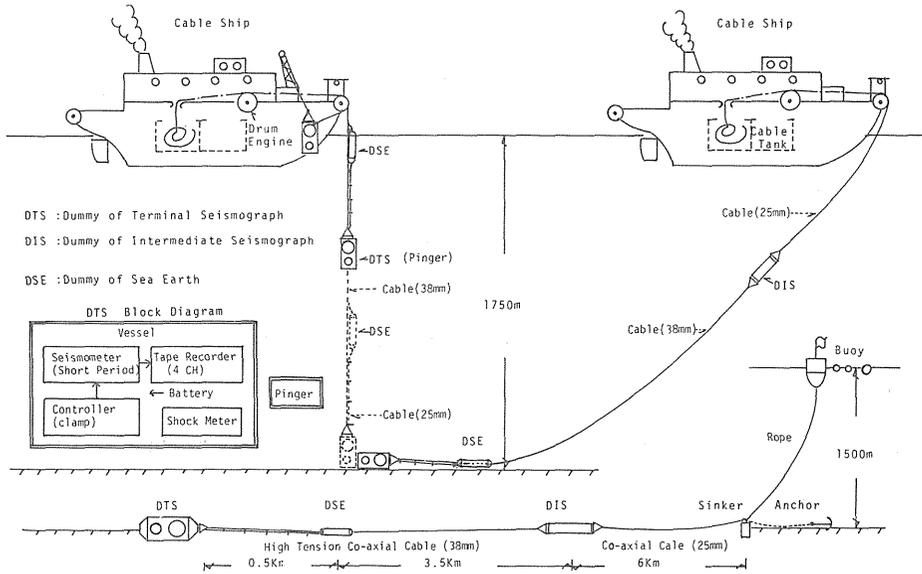


図 3.14 先端装置の布設実験

Fig. 3.14 Trial laying work of the terminal apparatus.



写真 3.4 地震計および記録装置

Photo. 3.4 Seismograph and long-term recorder for trial laying.

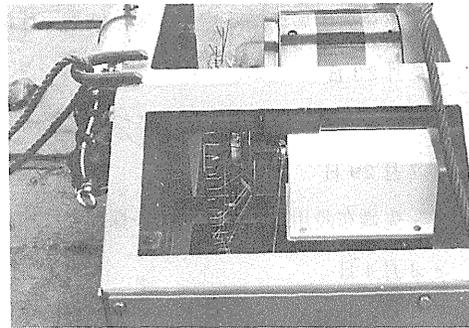


写真 3.5 簡易移動測定計

Photo. 3.5 Simple meter to measure the shift of the cage.

ルミ製触針をケージの外側・両面に各4本、引きずった距離を測定する簡易移動測定計（写真 3.5）をケージ内側にそれぞれセットした。

軟着底作業をするのに必要な先端装置と海底との距離を連続的に監視可能なピンガーをケージの側面に装着し、船の測深器で受信記録できるような受信機の一部を一時的に改造を行った。

昭和51年10月7日ダミー先端装置・ダミー海底アース・ダミー中間点装置（公社ダミー中継器）と高張力ケーブル4 km と無外装同軸ケーブル（公社用）6 km とその他の機材を含め黒潮丸に積み込んだ。

10月12日気象研究所6名・地震課1名・NEC3名も乗船して横浜港を出発し、リハーサル実施予定海域である御前崎南南西約100kmの沖合へ向い表3.7の日程でリハーサルを実施した(写真3.6参照)。

表3.7 実施線表

月 日	曜日	天候	作業内容		記 事
			午 前	午 後	
10 7	木	晴	ケーブル、機材積込み	"	
" 12	火	曇	出 港 準 備	横 浜 出 港	
" 13	水	晴	先 端 装 置 設 置 ケ ー ブ ル 布 設	ケ ー ブ ル 布 設, プ イ 設 置 ピ ン ガ ー 確 認	
" 14	木	"	海 気 象 悪 く 待 機	"	伊豆半島西岸の妻良沖にて仮泊
" 15	金	"	プ イ 回 取 ケ ー ブ ル 撤 去	先 端 装 置 回 取 実 施 結 果 検 討	
" 16	土	雨	横 浜 入 港		
" 17	日	晴	週 休	"	
" 18	月	"	機 材 積 卸 し	"	
" 19	火	曇			
" 20	水	雨	ケ ー ブ ル 積 卸 し	"	

(3) 海上作業 (図3.14参照)

先端装置の測定器の電源リード線(筐体のガス置換孔より引き出す)を結線し、筐体内の空気をN₂ガスと置換し、この孔をOリング付栓で密閉した。

船位はNNSで確認の上予定海域に停泊し、先端装置を船首舷側へクレーンでふり出し、船首シーブを通したケーブルとケンカ巻きして船首直下へ移動させた。布設および揚収時のケーブルの繰り出し距離、船上でのケーブルへの平均荷重および内蔵した地震計の振動状況を図3.15に示した。



写真3.6 先端装置布設リハーサル
Photo. 3.6 Trial laying work of the terminal apparatus.

アース用ケーブル約500mは、プレフォームド・ストッパーで4点固定し、その中間は約5mおきに麻縄でメインケーブルに結束した。この間の速度は0.5~0.7ノット、アース電極がシーブを通過した時点で繰り出しを中止、船位修正を行った後約3.5ノットで一気に繰り出した。

先端装置が海底から約40m(ケーブル長1,750m)で0.9ノットに落とし着底時は0.3ノットで軟着底させた。ケーブルの張力はピッチングで1.5~2.0トンの変動があったが平均張力を表3.8に示す。

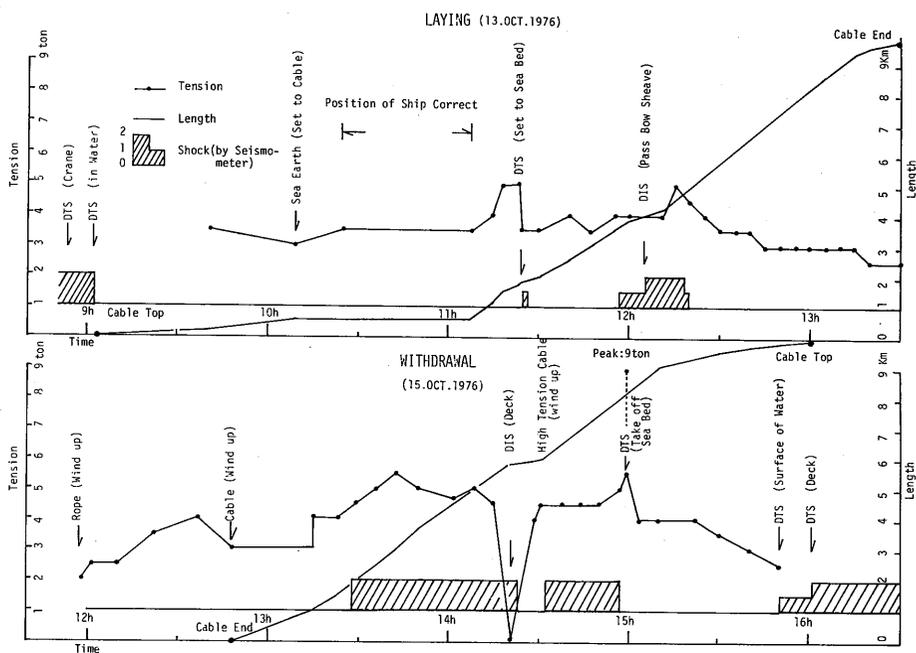


図 3.15 布設実験中の張力その他

Fig. 3.15 Tension, vibration etc. in the trial laying.

表 3.8 ケーブルの平均張力と変化

ケーブル繰出し長(m)	200	500	1,200	1,500	1,700	1,791
ケーブル張力(トン)	3.5	3.5	4.0	5.0	5.0	3.5

着底した装置が垂直に近い状態か横になるかを確認するためにピンガー内に45°以上傾斜すると発信パルスの長さが変わるように設計しておいた。この結果、横倒しとなり安定した状態であることが確認できた。

先端装置着底後はケーブル布設に移り、ケーブル繰出し速度と船速(対地船速)を一致(スラック0)させ、速度3ノットで布設した。中間点装置100m手前で船速を1ノットに落とし、ドラムエンジンとシーブを通過(ショックは関連研究1参照)させ再び3.5ノットで残りのケーブル6kmを布設し、マッシュルームアンカ等を付して沈下し、揚収のためにロープとブイを付け、その末端にレーダーブイを取り付けて回収作業をやり易くした。布設後ピンガーによる着定位置の確認航行を行って布設作業を終了した。

回収は悪天候のため1日伊豆西海岸で天気待ちをしたのち回収した。撤収時のケーブルの入水角はほぼ90度で行われ、張力は平均3.5~5.5トンで、先端装置を起こした時(ピンガーの傾斜角で確認)、ピーク値で最大9トンを示し、その後5トンで安定しケーブルが捲き上るに従い減少し、最終置は2.5トンになった。

先端装置を甲板に取り込み検査した結果、四隅に取り付けた片側のアイの塗装が取れ地金が光っている一方、この面に取り付けたアルミ製の触針4本のうち1本が曲ってかろうじて残っていたが、他の3本はもぎ取られていた。ケイジの内側に取り付けた簡易移動測定計は、約250m引きずられたことを示す記録が得られた。

(4) 船首布設と船尾布設の検討

先端装置の船首布設と船尾布設は、布設計画の段階から問題点となっていた。船尾から布設すると先端装置を船外に振り出すのと着底後のケーブル布設作業が容易（ケーブルを船首から船尾へ回す作業を必要としない）であり、この面からは望ましい。しかし、沈下中ケーブルの入水角が船底に近よった場合は、スクリーンに巻き込む危険があったため、第1回リハーサルは船首から実施した。

先端装置の吊り下げ沈下中に入水角はほぼ直角で、中途に実施した位置修正航行の場合は前進であったためスクリーンに巻き込む危険の少ないことが判明した（布設リハーサル実施報告書、昭51年12月参照）。

(5) 布設中の衝撃

リハーサル完了後、先端装置をNEC玉川工場へ搬入して開封、各装置を点検すると共に地震計のテープ記録は気象研で再生し解析した。この記録から、着底時のショックは非常に小さいことが確かめられた。この結果、ピンガーによる海底までの距離の測定・監視とドラムエンジン操作し先端装置を軟着底させる工法が確かめられた。また、その後の通常布設に移る際のケーブルのスラックに関するデータも得られた。

先端装置をメーカー工場で作成し、再びメーカーの工場に搬入するまでの全行程でのショックの最大値はX軸で4G、Y軸で3Gであった。中間点装置の布設時のショックは、中間点装置が作業甲板から台車に乗ってケーブルトラフに入る際に、X軸で3G、Y軸で2.5G、Z軸で2.5Gのショックを記録している。その後トラフ通過の時ドラムエンジンで1.8Gの周期の長い（5分）記録が見られたが、これはショックメーターの方向（90°で1G）とドラムエンジンの回転による遠心力（3ノットで0.1G）によるもので問題はない。中間点装置の着底時のショックは、ショックメーターの記録には全く見られなかった。

(6) 布設位置の確認

布設完了後に先端装置の設置位置確認のため、設置予想位置を航行し先端装置から発信されているピンガーからの信号を受信記録し、そのコースで最も接近した時の船位とピンガーまでの直距離を測定し水深（1,750m）により水平距離を算出する方法を3コースとり、その交会法により位置を確定する方法を試みた結果、有効な位置決定方法であることが確かめられた。

(7) 海底の雑微動

今回試作開発した地震計によって約40時間にわたって集録した記録を解析した結果、海底の雑微動は2Hzを境として周波数の低い方に応じて大きくなっていった。詳細は関連研究4で述べるが、この結

果によりS/Nを向上させるためには陸上受信の段階で1~2 Hz のフィルターを挿入することにより、季節によっても異なるが、10,000倍(変位倍率)程度まで倍率が上げられる可能性もあることが確かめられた。

(8) ケーブルの損傷

高張力ケーブルは、揚収後黒潮丸から輸送船へ移す際、全長にわたって目視検査を実施した結果、ジャケットの表面に多少のすり傷がある程度で特に問題はなかった。

ケーブルメーカーであるOCCのタンクに収納後、ケーブル端末とカップリングの接合部に相当の角度のバンドがかかった恐れもあるので、メーカーにその部分を切り取って解体試験をすることを依頼した。この結果、ケーブルがカップリングの端末のリングの端に相当する部分(ブーツの中)でジャケットにわずかな外傷を発見した。ケーブルのこの部分を解体した結果、外部導体(銅テープ製)に鋭角の曲りが繰り返し加えられ、リングカットを起こしその末端が触れ合って外側に立ち

上がりそのエッジで内側から防水用のポリエチレン製のジャケットを傷つけ、外部導体とジャケットの間に浸水していることが判明した。ジャケットの外部導体の間のみ浸水した場合、電気特性に多少の変化はあるが、通信には直には大きな障害にはならない。しかし長い間には外部導体に腐食を起こし障害となる恐れがある。このためケーブルの浸水状況を検査した結果は図3.16に示す通り、外部導体の銅テープ合わせ目の隙間に沿って海水が走り、まず内側にひろがり外側はジャケットが密着しているため次第に少なくなっている。

400 m(50~100 m間隔)までジャケットを全面はく離して検査を実施し、更に500 mは一部はく離で検査した結果、銅テープの合わせ目の隙間に沿って海水が走っていることが推定されたので、全長検査を中止し根本的な対策を立てることにした。

3.3 第2次布設リハーサル

昭和51年度実施した第1次布設リハーサルの結果、先端装置のカップリングとケーブルの結合部でシャープバンドによるケーブルの外部導体のリングカットを起こし、これによる浸水事故を起こしたので、この問題点を完全にクリアーすること、第2点として先端装置を船尾から布設する工法の確立をすることが必要となり、第2次布設リハーサルを実施することになった。

(1) 二重首振りカップリング等の開発

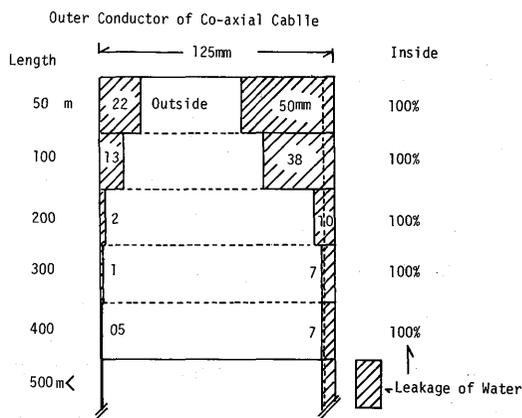


図3.16 ケーブルへの浸水状況

Fig. 3.16 Water leak along the outer conductor.

上記の事故を防止する方法について、ケーブルメーカーであるOCCと布設を担当する電電公社を交えて協議の結果、カップリングの首振り角度を大きくすることと取付部のケーブルを一部外装して補強する方針が決定した。

従来のカップリングは、ドラムエンジン等に巻きつけばよいので、図2.5からもわかるように、1個のカップリングで54°まで曲げられるようになっている。この54°の全方向屈曲はジンバルを図2.4上図に示すように1段で行っていた。この1段ジンバルを2段にして最大110°まで全方向に対して屈曲可能な図2.4下図に示す二重首振りカップリングをまず試作した。更に第1次に使用した高張力ケーブルに部分外装をして、接続部のシャープベンドを防ぐと共に、この外装線によりケーブルをカップリングに引き留める方式を採用した試作セットを2式製作した。

1式は海上での布設リハーサルに先立ち、OCCの上三川（栃木県）工場のグラウンドを利用してあらゆる想定での曲げと引張り実験を行った（関連研究7参照）。この結果、屈曲部を保護するゴム製ベローズへ仮に注入した水（本番はポリブデンオイル）が漏水したことにより二重ジンバルにより噛まれて損傷したことが確かめられた。この試験での外見上の問題点はこれ以外になく、ベローズの内部にセパレータを取り付ける改良を加えて海上布設リハーサルに備えた。

(2) 準備および海上作業

第2次海上布設リハーサルは、第1次と同様黒潮丸によって実施されることになり、電電公社およびOCCも交え、協議を重ねた上52年11月18日、まず実施要領を決定した。

試験項目

- (a) 先端装置の船尾布設工法の確立
- (b) 先端装置に接続する二重首振りカップリングおよびケーブルの保護加工の確認
- (c) 先端装置布設・着底時の衝撃の確認
- (d) シーアースケープル（25mm無外装）の取付けおよび繰り出し方法の確認

実施日程

月 日	曜日	天気	作業内容
11 22	火	晴	先端装置・ケーブル積込み
11 24	木	晴	横浜出航（伊東沖仮泊）
11 25	金	晴	先端装置布設リハーサル
11 30	水	晴	先端装置・ケーブル積おろし

実験海域は初島付近の水位200～300mのところで行うことになった。作業に先立ち、耐圧筐体に封入した自記ショックメーターの電源スイッチを入れて、筐体の空気孔を密封し、アースケープル50mはメイン（高張力）ケーブルにあらかじめジュート縄で結束しておいた。先端装置を船尾のシーフトクレーンで吊り上げ、船尾シーブの舷外にふり出し、一気に海水に投入して振りを止め、メインケーブルをドラムエンジンで少しずつ捲き戻し張力をケーブルに移し、布設態勢に入った（写

真3.7)。

(a) 沈下速度は約0.3ノットの速さで約20分間で、水深183m(メインケーブル長1,500m)の海底に着底した。沈下中の張力は1.0~1.1トン程度であった。

(b) 着底時の衝撃テスト

本テストにはショックメーター以外の計測器を封入していないので、ハンドリングミスをした場合に備えて水中落下に準ずる試験をした。

着底した先端装置を離底し70m捲き揚げ、一旦停止して1.5ノットと2.0ノットで繰り出し、投下着底試験を2回実施した。この着底の際は急にケーブル張力がなくなるため、ケーブルトラフの中でケーブルが踊り大きな音がした。

先端装置を揚収後、クレーンで吊り上げたところの所見では、投下の際1m近く泥の中に入ったと考えられる泥がケイジのアンクルにぎっしりと付着していた。

(3) リハーサルの結果

船尾からの布設は、先端装置を連続布設作業に入る前作業が船首布設に比較すると非常に容易で時間も短く、当初より問題となっていた入水角も鉛直に対して 10° 以内の変動でスクリー等への障害の危険度は非常に少ないことも確かめられた。新たに開発した二重首振りカップリングとケーブルの取付部の曲りをほとんど認められなかった。

リハーサル完了後、ショックメーターの記録値を検査した結果、2ノット(60m/分)で着底した時が最大であったが、底質が泥であったことも原因か約2Gであった。一番問題であったカップリングとケーブルの接続部の検査は、OCCの工場でカップリングとケーブルを解体して検査した結果、写真3.8に示すように外部導体に対する屈曲はほとんど認められず、本番もこの方式で布設すればリスクが少ないことが確かめられた(先端装置布設リハーサル作業報告書・昭52年12月参照)。

(4) ドラムエンジンへの付帯工事と中間点装置の通り試験

中間点装置の外形は海底ケーブル通信用中継器(統一筐体)より直径(265φ)、長さ(1,160)共に大きいため、既設のドラムエンジンでの落下防止用のカバー(フリーティングリング)の中を通

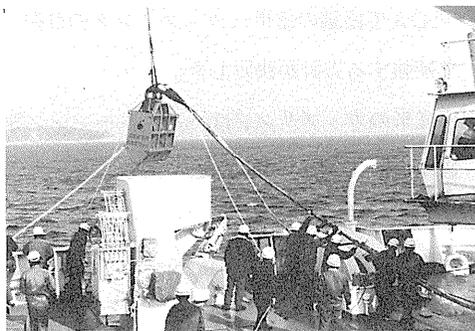


写真3.7 第2次先端装置布設リハーサル

Photo. 3.7 Second trial laying work of the terminal apparatus.



写真3.8 ケーブルの解体

Photo. 3.8 Taking to pieces of the cable

過することができないので取りはずした。このため、中間点装置がドラムエンジンに巻きついた時、自重と遠心力でデッキに落下する危険があると電電公社より指摘された。そこで、黒潮丸が定期検査でドック入りした昭和52年12月気象研での改装としてドラムエンジンの下側のみに落下防止用のボードを装備した。

この効果テストと本番中間点装置（リハーサルは統一筐体を使用）の敷設船の布設装置の通り試験を昭和53年2月に実施した。この結果、トラフ・ドラムエンジンもぎりぎり一杯であるが通過をして、新たに装備したカバーも有効であることが確かめられた。本布設に万全を期すために、都合沖合海底地形調査を2回、布設リハーサルを3回、3年度にわたって実施してきたが、以上により一連の海底地形調査と布設工法の開発は所期の成果を得て完了した。

4. 本布設工事

本布設工事の施工を担当した電電公社は、本社(契約)・海底線施設事務所(設計・監督)・横浜海底線工事事務所(工事施工)と海底部装置のメーカーであるNEC、ケーブルとカップリングのメーカーであるOCC及び関係工事担当者を含め関連ある部門について、協議および連絡を持ち、お互いの歯車が噛み合うように進めた。時期としては、初めての難工事であるためと電電公社の好意により、一年中最も海況の良い日とされる梅雨明けの7月下旬に実施することを目標として準備を進めた。

4.1 布設工事の概要

本工事は御前崎の南南西約110km、水深2,200m付近の海域に先端装置を布設し、中途に中間点装置3個・海底同軸ケーブル155km・ジョイントボックス3個で構成されるシステムを第1回沖側布設(100km)と第2回陸側布設(55km)に分けて布設し、ジョイントボックス(J-2)で洋上最終接続を行い工事を完了させた。予定ルートとケーブルの概要を図3.17に、布設工事の概要を図3.18に示す。工事日程および担当は表3.9に示す。

4.2 工事出港前の準備

本工事の実施にあたっては、関係者による数次の打ち合わせを行って、万全の準備を進めた。昭和53年7月13日、電電公社横浜海底線工事事務所の専用岸壁に接岸中の黒潮丸へ、NECの工場でランニングテストをしていた中間点装置3台と先端装置1台を搬入し、黒潮丸の乗員により中間点装置はケーブルタンク内の4角の接続台に、また先端装置はBデッキの船尾シーリフトクレーンの近くに納められた。これと同時にOCCがケーブルの搬入を始め、ケーブルは布設の一番遅いものから下積みすることと、その方向(カップリングが装置により異なる)を確かめる等、周到な準備と計画のもとに実施された。8月13日、2番タンクへ図3.19に示すよう総長123km(アイドル4km)、7ピースのケーブルを布設の逆の順位で積み込みを開始した。ケーブルは人手によりタンク内へ巻き取るため、無外装ケーブルで

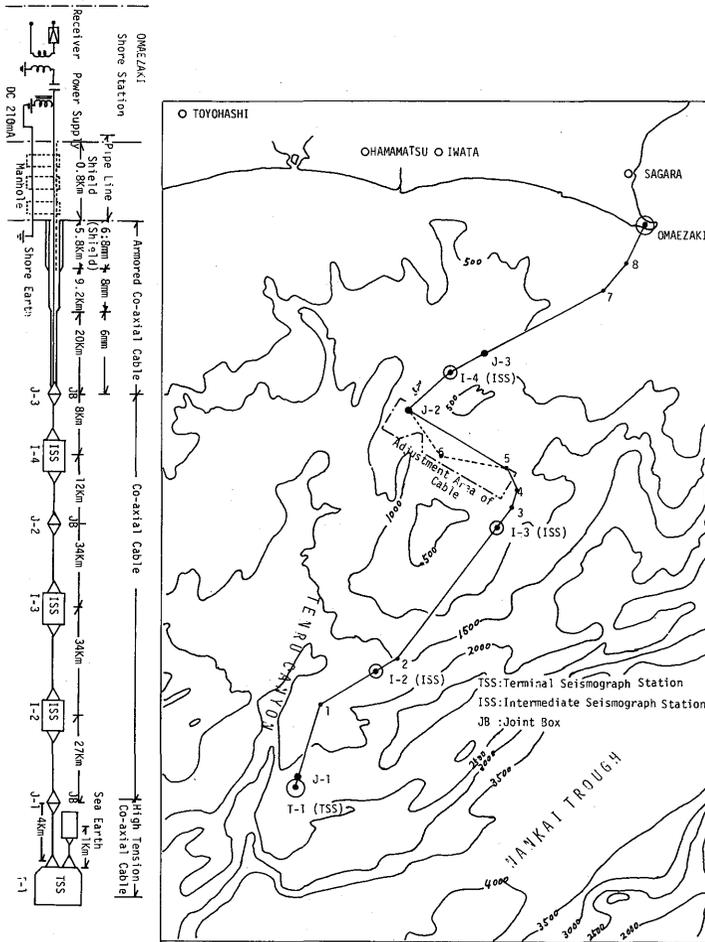


図 3.17 布設予定ルート

Fig. 3.17 Planned route of the cable and the cable system to be laid

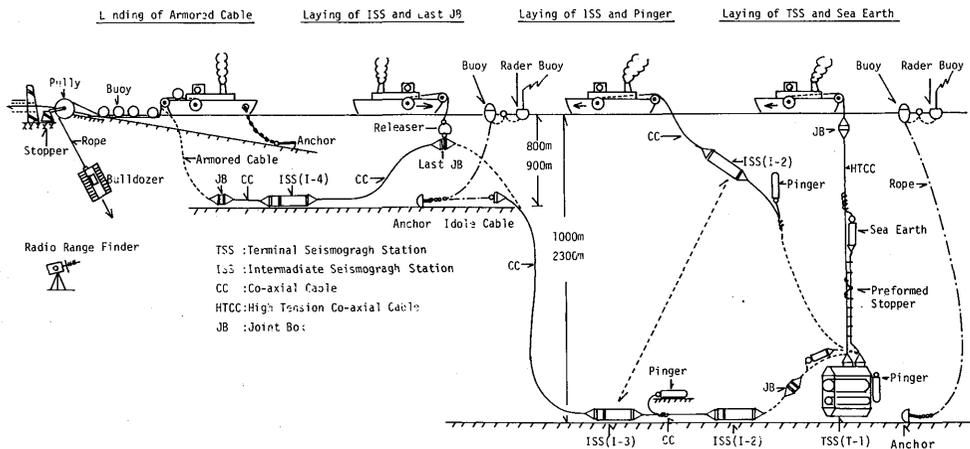


図 3.18 布設工法

Fig. 3.18 Laying work.

表3.9 工事の実施

1. 実施期間
自 昭和53年7月13日(木)
至 昭和53年8月7日(月) } 22日間(部内工事の4日間を除く)
2. 実施場所
(1) 接続, 積込: 横浜海底線工事事務所
(2) 布 設: 静岡県榛原郡御前崎町御前崎3663-1番地地先
及び遠州灘御前崎南方沖
3. 実施担当
日本電信電話公社 横浜海底線工事事務所
敷設船黒潮丸船長 蓮尾文武
工 事 長 平 沢 勝
外 職 員 一 同
協 力 日本電気株式会社(NEC)
日本大洋海底電線株式会社(OCC)
4. 監 督
気象庁気象研究所 地震火山研究部長 田 望
地震火山研究部第3研究室長 飯沼龍門
5. 使用船舶
日本電信電話公社 敷設船黒潮丸(3,344トン)
6. 実 施 日 程

月	日	曜日	天候	主 な 作 業 内 容	
7	13	木	晴	ケーブル積込み立会	
"	14	金	曇り	ケーブル積込み及び接続立会	
"	15	土	晴	"	
"	16	日	"	週 休	
"	17	月	"	ケーブル積込み及び接続立会	
"	18	火	曇り	"	
"	19	水	"	" 器材積込み	
"	20	木	晴	器材積込み	
"	25	火	晴	名古屋出港, №1ブイ設置(ブイのみ)	
"	26	水	"	№1~3レーダブイ設置, ルート試走	
"	27	木	"	先端装置の設置及びケーブル布設100km (№2~3中間点装置の設置を含む)	
"	28	金	"	T-1, I-3設置位置確認, №1~3レーダブイ撤去	
"	29	土	"	海気象悪く待機, 清水港にて清水補給	
"	30	日	"	布設端末の浮標確認, 海気象悪く待機	
"	31	月	"	台風のため津沖に避難	台風のため避難
8	1	火	"	台風のため四日市沖に避難, 食料補給	
"	2	水	曇り	台風のため答志島沖に避難	
"	3	木	"	"	
"	4	金	"	答志島沖を出航したが波浪高く御前崎へ避難	
"	5	土	晴	布設端末約2kmルート修正	
"	6	日	"	陸揚げ, ケーブル布設55km	
"	7	月	"	最終接続及び沈下, 横浜入港	

(注) 7/21~7/24は名古屋港にて一般施設公開

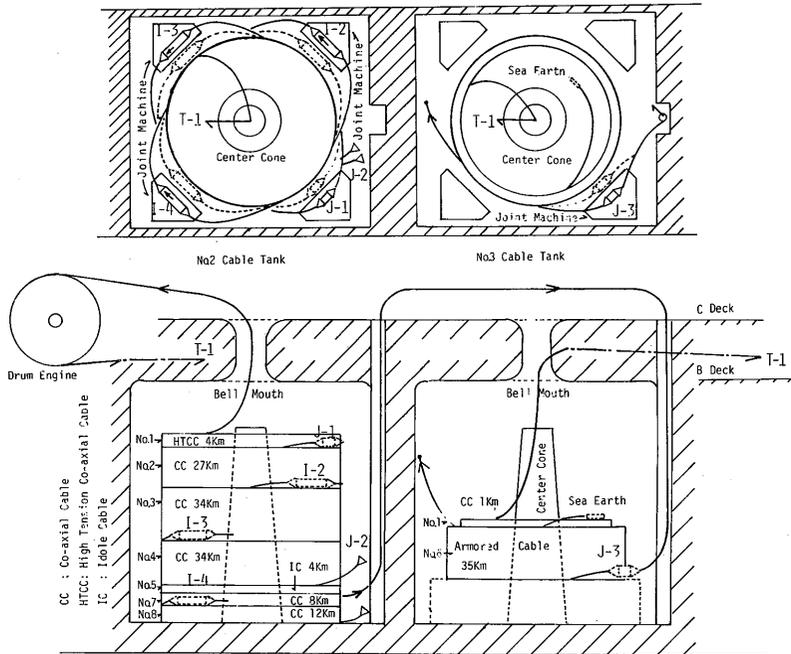


図 3.19 ケーブルの船積

Fig. 3.19 Shipping of the cable.

3 km / 時が最大で、1日平均 30 km が限度である。ケーブルの積み込みの翌日、7月14日からケーブルエンドのカップリングと中間点装置のテールケーブル相互の溶接接続とその絶縁体モールドのレントゲン線写真検査等の検査を行った後、その空間へのポリブデンオイルの注入を行った。この作業は片端末で少なくとも4時間を必要とするので、中間点装置1台は両端末があるため約8時間を要した。この様

表 3.10 ケーブルの船積みとT-T接続作業 (a km/bのbはピース長をあらわす)

件名	13日	14日	15日	16日	17日	18日	19日	20日
無外装ケーブル (No.2タンク)	12km/12 4km/8	4km/8 4km/4 10km/34	24km/34 6km/34	予備日	28km/34	27km/27	4km/4	
外装ケーブル (No.3タンク)		15km/35	15km/35	予備日	5km/35 1km/1 (アース用)			
T-T接続		I-4	I-3 J-3	予備日	T-1 (アース側)	I-2	J-1 T-1 (メイン側)	
端末処理								総合テスト後外装の端末シールアップ

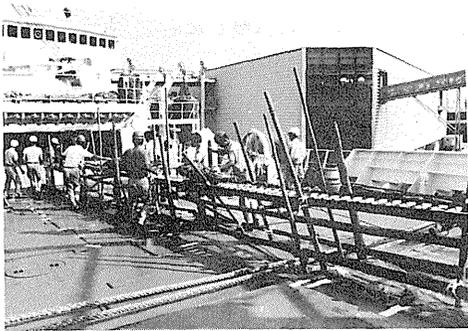


写真 3.9 ケーブルの船積

Photo. 3.9 Shipping of the cable.



写真 3.10 ケーブルの船積

Photo. 3.10 Shipping of the cable.

な作業を 7 月 13～19 日までに完了するよう計画を立て、表 3.10 の日程で進めた。3 番タンクへは直径 9 cm、重さ 15 kg / m もある 2 重外装ケーブル (5.2 km) を含む総長 35 km の外装ケーブル (写真 3.9, 写真 3.10) とアース用無外装ケーブル 1 km を最後に積み込み、7 月 19 日全ケーブルの積載を完了した。更に、7 月 19 日予定通り接続作業も完了し、7 月 20 日午前中ケーブル 155 km に接続された全システムを NEC が船内に設置した受信復調装置と気象研が持ち込んだ電源装置を用いて通電して、主として伝送波の総合試験を実施した。この結果、これまで擬似回路による試験と計算によって行ってきた予定レベルで S / N も予定通り受信できることが確認され、布設への出港準備はすべて完了した。

4.3 試走・無線標識等の開設

7 月 21 日黒潮丸は電電公社のスケジュールで名古屋港へ向け横浜を出港した。7 月 25 日早朝研究所立会者および NEC の調整者も乗船の上、名古屋港を出港し、先端装置の布設予定地点へ回航した。図 3.20 に示す位置に沖合での布設ルートに対する船位測定精度向上の目的のレーダーブイ 3 個を布設し、米国海軍衛星航法システム (NNSS) で位置確定作業をした。次に全予定ルートに沿って布設自動化システムの動作確認と船内連絡体制のリハーサルと、海域の流向・流速と測深を行い、本布設工事の安全確実をはかるルート試走を行った。一方、陸上では図 3.20 に示す電電公社の無線中継所の 2 ケ所に精密電波測定装置 (A P I X) の従局を開設し、保守要員も登山させて期間中ワッチ態勢をとり、陸岸 (50 km 以内) の船位測定精度向上を図った。

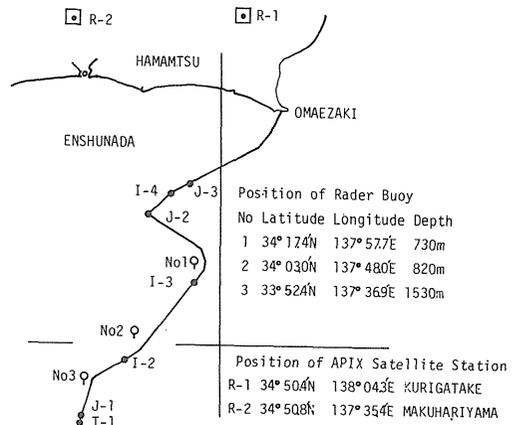


図 3.20 レーダーブイおよび APIX 従局の位置
Fig. 3.20 Positions of radar buoys and APIX stations.

御前崎中継所(測候所)にはSSB無線電話移動局を開設して、作業の連絡を密にしその円滑化を図った。また、ケーブル陸揚げに必要な陸上工事班も7月27日より御前崎に待機した。

4.4 沖側(第1回)布設作業

(1) 先端装置の布設

7月27日早朝5時15分より先端装置の布設作業を開始(写真3.11, 3.12)し、作業経過は表3.11のように実施された。先端装置は、作業時間22分で水深15mまで沈下させて一旦中止して、船位修正

表 3.11 作業経過状況

(1) 第1回布設

昭和53年7月27日(木)晴

05:00	作業準備開始(前日より先端装置設置付近に漂泊)
05:15	先端装置、移動用フックで船尾に移動
05:21	先端装置吊り上げ開始
05:30	" 船尾シーブ下に吊り下げ完了
05:34	" 着水
05:37	" 15m沈下後設置位置調整のため沈下一時中止
06:02	" 沈下開始(沈下速度1ノット)
06:28	" 500m沈下(")
06:34	" 650m沈下本ケーブルとシーアースケーブルをブリフォームドストッパーで固定
06:56	シーアースを船尾甲板にて本ケーブルに固定
07:01	シーアース着水、設置位置確認のためNNS待ち、沈下一時中止
09:17	ケーブルくり出し長1,006m水深2,092m
09:34	2kmマークシーブ通過
09:36	沈下速度1ノットにダウン
09:37	ケーブルエンジンストップギヤ切替
09:40	ギヤ切替完了
09:45	スローで沈下開始 入水角55°
09:50	あと30mで着底
09:51	あと15mで着底
09:52	着底 水深2,202mケーブル繰出し長2,245m
09:53	布設開始
13:23	中間点装置(I-2)シーブ通過
14:04	I-2着底
17:22	ピンガーレック
17:24	I-3シーブ通過
17:48	I-3着底
21:27	第1回布設端末シーブ通過、アイドルケーブル布設開始
22:03	アイドルケーブル布設完了
22:54	ブイ設置

(2) 第2回布設

昭和53年8月6日(日)晴

- 05:40 陸揚沖抜錨
- 06:15 陸揚沖到着 目標ブイ設置待ち
- 06:38 船固め投錨
- 06:46 船固め完了(水深10m)
- 06:55 陸揚準備完了(朝食)
- 07:35 陸揚開始
- 08:45 500mマークシーブ通過
- 08:57 ケーブル海浜の金車まで到着(ケーブル繰出し長605m)
- 09:35 ケーブル陸揚マンホールに到着(" 687m)
- 09:55 陸揚完了(ケーブル繰出し長710m)
- 10:41 永久ストッパー取付完了 ルート修正開始
- 11:06 ルート修正完了(ケーブル繰出し長681m)
- 11:32 パルンブイ撤去完了
- 12:30 布設準備開始
- 12:42 布設開始(回頭)
- 21:16 I-4着底
- 22:05 レーダブイ収容(内火艇)
- 22:48 ブイ, アンカー収容, アイドルケーブル捲揚開始
- 23:14 給電停止
- 23:36 第1回布設のケーブル端末船首甲板に上る
- 24:00 ケーブル端末接続室へ
- 7日 00:45 最終接続前テスト開始
- 01:34 最終接続前テスト完了
- 01:40 最終接続開始
- 04:05 最終接続完了
- 04:35 ポリブデン注入完了
- 04:59 最終接続点シーブ通過
- 05:36 最終レッコケーブルシーブ通過
- 06:36 最終レッコ(水深740m)

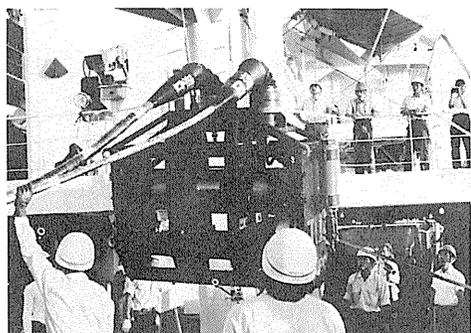


写真3.11 先端装置の本布設

Photo. 3.11 Laying of the terminal apparatus.



写真3.12 先端装置の本布設

Photo. 3.12 Laying of the terminal apparatus

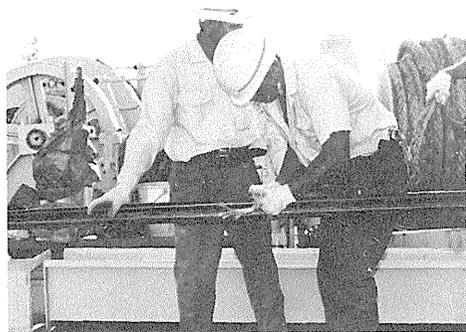


写真3.13 シーアースケーブルの布設
Photo. 3.13 Laying of the sea earth cable.



写真3.14 シーアースの布設
Photo. 3.14 Laying of the sea earth.

航行を行った。6時02分より再び沈下を再開してアースケーブル1 kmをメイン(高張力)ケーブルに麻縄で約5 m間隔(写真3.13)で捕縛しながら沈下し、330 mと660 mに図3.21に示すようなプレフォームド・ストッパーによる固定を2箇所行った。アースケーブル末端は同じく図3.21のように固定した。この場合、アース電極(写真3.14)とストッ

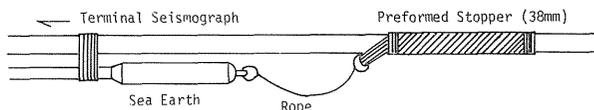
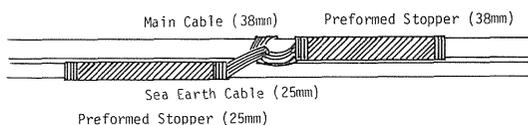


図3.21 シーアースケーブルの捕縛(上)とシーアースの取付け(下)
Fig. 3.21 Seizing of the sea earth cable (upper) and of the sea earth (lower).

パーの間を結ぶロープにはシーフ通過の際無理な力が電極に加わらないように充分ゆるみをつけた。アース電極入水時点(ケーブル長1,006 m)で更に位置を確認後ケーブル長2,100 mまで約2ノットの繰り出し速度(20分間)で一気に沈下させ、ピンガーにより海底までの位置を監視し、80 mの位置でドラムエンジンのギヤをスローに切換えて繰り出し9時52分無事水深2,202 mの予定した海底へ布設した(写真3.15参照)。

(2) 海底部装置の船上監視

船上ではアース電極が海水に入った時点から船内の仮設電源装置から送電を開始し、受信復調装置で受信して伝送波を、選択レベルメータとスペクトラムアナライザ(写真3.16)を用いて監視すると共に、地震波形は復調して記録器(写真3.17)で監視(ジンバルおよび振子クランプがされている)した。この結果、着底

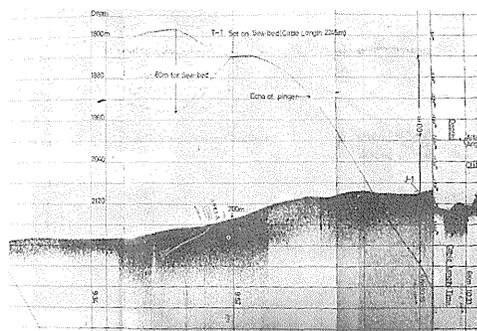


写真3.15 先端装置着底時のピンガー記録
Photo. 3.15 Echo of pinger of the terminal apparatus at the moment of reaching the sea bottom.

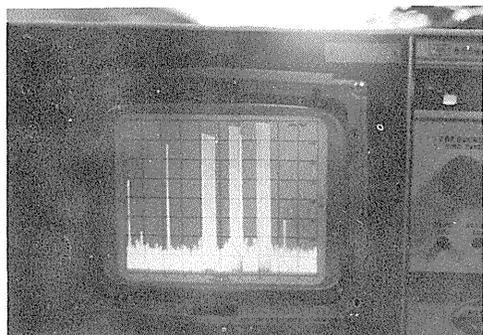


写真 3.16 スペクトラムアナライザーで見た FM-FDM信号
Photo. 3.16 FM-FDM signals observed with the spectrum analyzer.

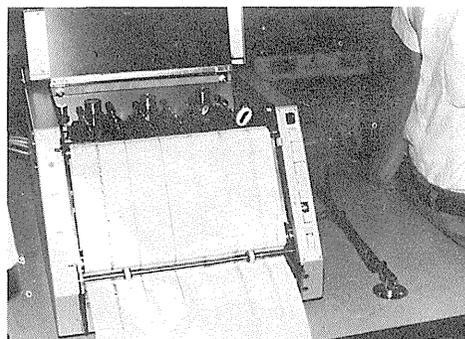


写真 3.17 布設中の地震計出力
Photo. 3.17 Output of the seismograph in the laying work.

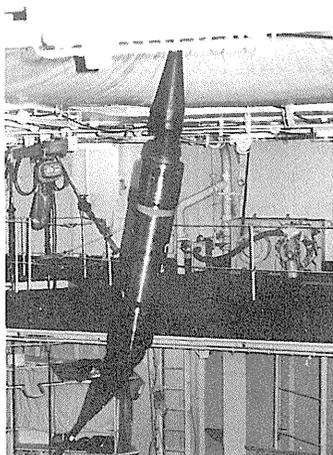


写真 3.18 中間点装置の布設
Photo. 3.18 Laying of the intermediate apparatus.

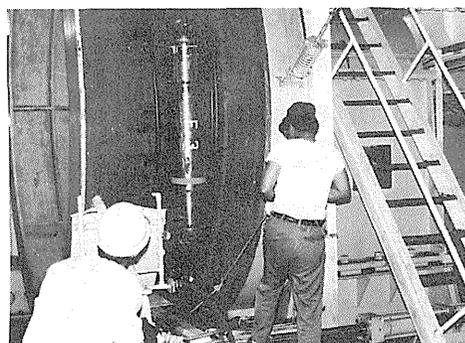


写真 3.19 中間点装置の布設
Photo. 3.19 Laying of the intermediate apparatus.

時の軽いショックが確認されると共に、着底後は非常に静かになった。これ以降は、中間点装置が船内布設装置を通過(写真 3.18・写真 3.19)する際、衝撃で地震計センサーがサージ起電力(リミッターは入力回路に入れてある)を発生し生きている増幅器に入力して、予期しない障害とならないよう、念のため電源を切った。入水後はまた、直ちに送電を再開して最終レッコ用カップリングが布設される2時間前まで続けた。このカップリング内のテールケーブルはシールして、カップリングにはキャップをしてポリブデンオイルを注入して海水の侵入を防止した。

(3) 中間点装置の布設

先端装置着底後ケーブルを約30m繰り出し引きずりの防止をはかった。その後は、船速とケーブル繰り出し速度をほぼ同じ2.7ノットで布設した。高張力ケーブル4kmの終端のジョイントボックス(写真 3.20) J-1が入水した時点までをピンガーの記録から算出すると、図 3.22 に示すように

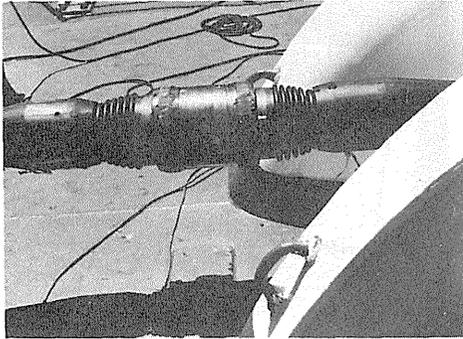


写真 3.20 ジョイントボックス
Photo. 3.20 Joint box to joint another kind of cable.

直距離 2,600 m に対してケーブルが 4,000 m 繰り出されていることになり、スラックが十分入り第 1 回りハーサルの時の様なケーブルを張ったと考えられる振動が地震記録に現れ

なかった。それ以降は、4 ノット前後でルートに沿って布設を続け、中間点装置がケーブルタンクを発射してドラムエンジンとシーブを通過するまでは 1 ノット程度に落とした。特に中間点装置がドラムエンジンで落下しないよう、ドラムエンジンの上部からケーブルが 1 回巻きつくまで、ケーブルタンク内で人力によりバックテンションを加えた。沖から 3 番目に布設した中間点装置には、図 3.23 に示すように位置確定のためのピンガーを取り付け布設した。

沖側布設は、本ケーブル端末カップリングの先にアイドルケーブル 3 km とマシュルームアンカーとブイローブとブイにレーダーブイをつけて、7 月 27 日 22 時 54 分布設を完了した。

4.5 着底位置の確認とレーダーブイの揚収

7 月 28 日、先端装置 (T-1) と中間点装置 (I-3) に付設したピンガーによる着底位置の確認走航を行った。設置付近を図 3.24 に示すように船位を測定しながら 3 方向から走航 (図の点線) し、最も接近した時の船位を測定し、その垂直線 (図の実線) に T-1 および I

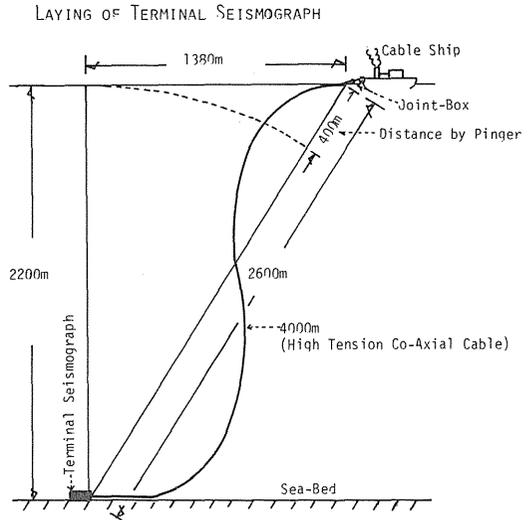


図 3.22 先端装置近くのケーブルスラック
Fig. 3.22 Slack of the cable near the terminal apparatus.

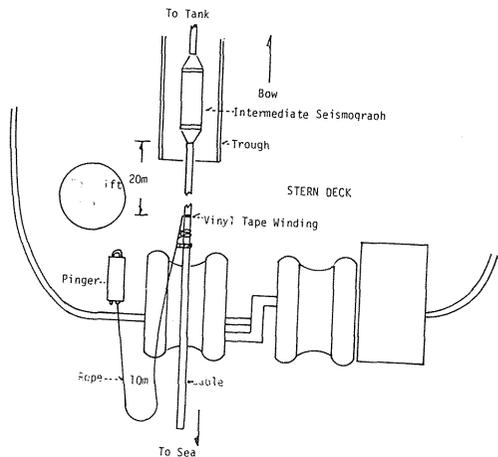


図 3.23 中間点装置へのピンガーの取付け
Fig. 3.23 Pinger to determine the precise location of the intermediate seismograph.

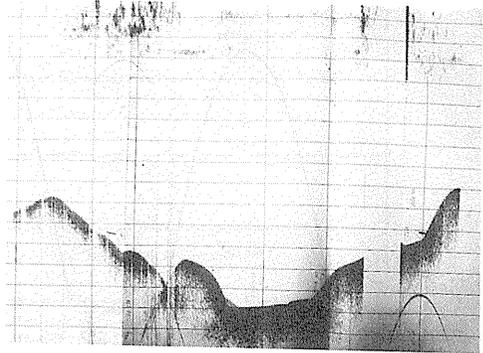
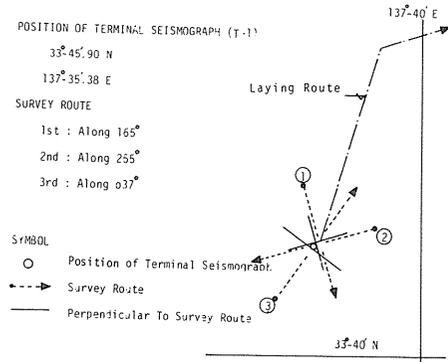


写真 3.21 地震計位置測定時のピンガー記録

Photo. 3.21 Echo of pinger during the measurement of the location of the seismograph.

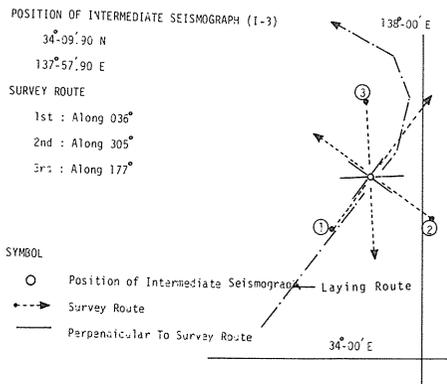


図 3.24 地震計位置の測定

Fig. 3.24 Measurements of the precise locations of the seismographs.

- 3 があるとして 3 方向からの交会法により着底位置を決定した。この時の船位はレーダーブイ・APIX・NNS S・ロランを併用して決定した。この時の T-1 ピンガーからの発信記録は写真 3.21 に示す。また、記録を整理したものを図 3.25 および図 3.26 に示す。音波が屈折経路を取らない（実際は温度分布で曲る）と仮定すると、T-1 は No. 2 コースに対して No.

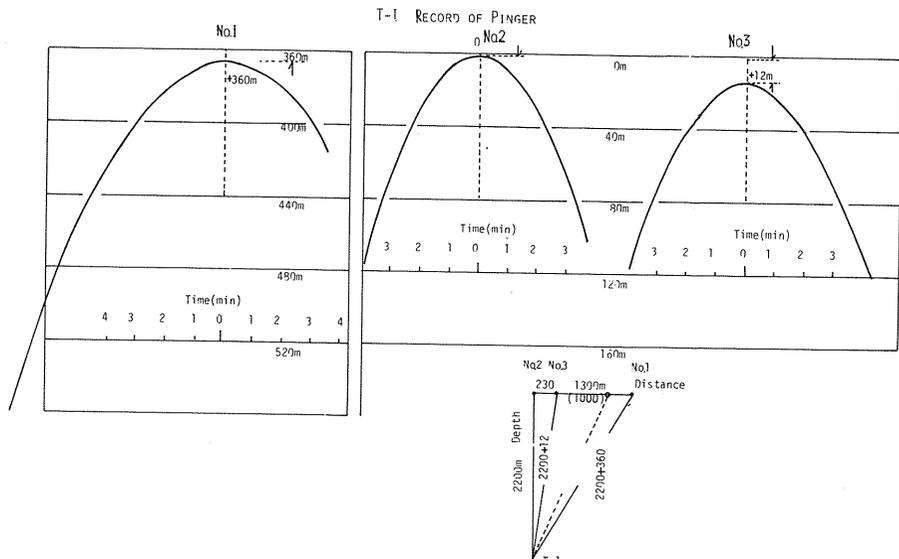


図 3.25 先端点地震計位置測定時のピンガー記録

Fig. 3.25 Echoes of pinger when the location of the terminal seismograph was measured.

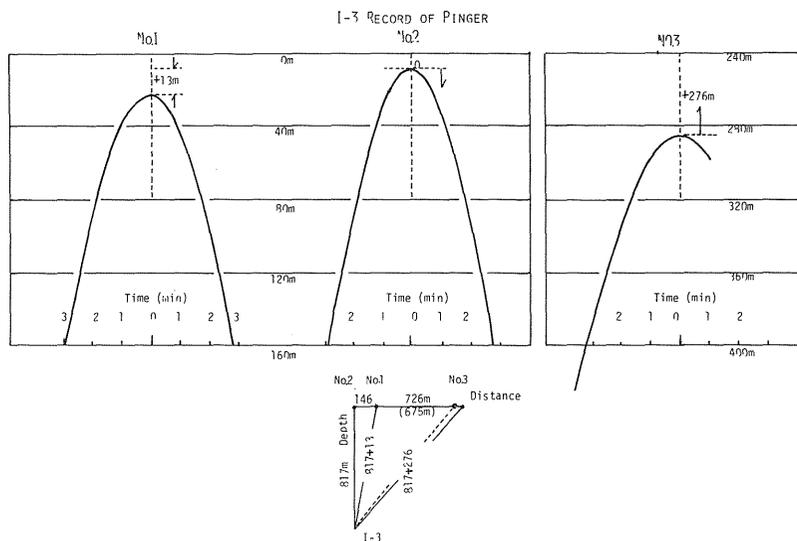


図 3.26 中間点地震計位置測定時のピンガー記録

Fig. 3.26 Echoes of pinger when the location of the intermediate seismograph was measured.

3が水平距離で230m, No. 1が1,300m離れていたことになる。また, I-3はNo. 2コースに対してNo. 1が水平距離で146m, No.1コースが726m離れていたことになる。両方式の誤差は100~300mの範囲で実際に海底に設置されている位置が確認され, 震源決定にも精度が期待される。位置決定走航後, レーダーブイの撤収を行った(写真3.22)。布設開始より期間中神戸海洋気象台の春風丸(373トン)には航路警戒等の援助を受け全庁的な作業として実施された。

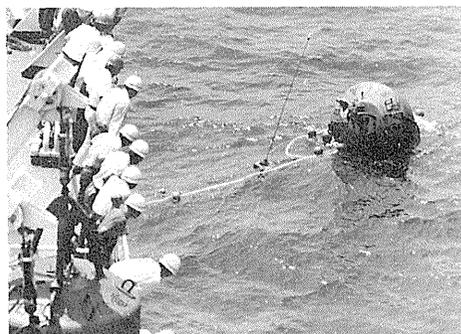


写真 3.22 レーダーブイの撤収
Photo. 3.22 Radar buoy.

4.6 陸側(第2回)布設作業

(1) ケーブルの陸揚げ

7月29日より御前崎の遠州灘側の予定海岸からケーブルの陸揚げを実施しようとして接岸したが, 台風7号によるうねりが海岸に押し寄せていて, 接岸作業が困難で作業を断念した。その後, 台風7号の南方沖からの北上, 台風8号の東支那海から日本海側通過と重なり, 全く作業ができないばかりでなく, 7月31日から8月4日まで伊勢湾内へ台風避難をした。

8月5日より作業を再開し, 第1回布設端末のブイの確認(台風による流出を懸念した)とケーブ

ル端末を捲き上げ位置の修正を行った。8月6日早朝、陸揚沖合600m(電電公社として最大距離)、水深10mに船首と船尾のアンカーで船固めを行った。潮流による船の移動防止や回頭支援をするため、大型タグボートを近くに待機させた。7時35分船首から先端に俵ブイ3個(写真3.23)をつけたケーブルを繰り出し、以後バルンブイを約10m間隔に取り付け、その先を作業艇(写真3.24)でけん



写真3.23 ケーブルの陸揚

Photo. 3.23 Landing of the cable.

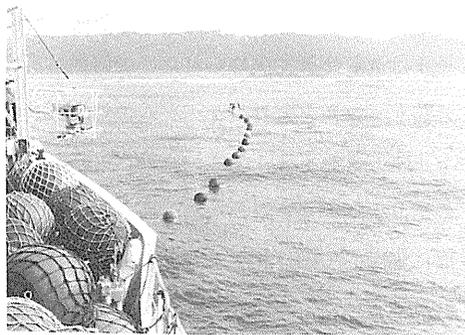


写真3.24 ケーブルの陸揚

Photo. 3.24 Landing of the cable.

引した。作業艇はうねりのくだける手前、岸から150m位まで接近した。先はダイバー2人がメッセージ・ロープを持って岸に泳ぎ着き、そのロープを海浜部のストッパーに取り付けた金車を介してブルドーザーでけん引し、海浜まで重い2重外装ケーブルを引き揚げた。

海からマンホールまでは、道路下のヒューム管を通し、マンホールの横に設置したウィンチで引き上げ、余長をマンホールの周囲で取り、端末をマンホールに入れ海岸中継所からマンホールまできているケーブルと仮接続を行った。仮接続完了後は海岸中継所の給電装置から送電を開始し、中間点装置I-4のテストを開始した。

ケーブル陸揚げの概要は、図3.27と写真3.25に示す。

陸揚げされたケーブルは、ケーブルにステンレスのプレフォームド・ストッパーを取り付け、チェーンで海岸に構築したコンクリート・ストッパー台に固定した時点で船のドラムエンジンで捲き戻し(最大張力15トン)、潮流で岬先端方向に大きく円弧していたケーブルをほぼ直線に張り、ルート修正をした後直ちにダイバーによりバルンブイの紐を切り、水底に布設した。

汀部のケーブルは、別の業者により埋没しないうちに防護工事が開始された(別項で述べる)。

バルンブイを船上に回収し11時32分、一つの山であるケーブルの陸揚げ工事を完了した。

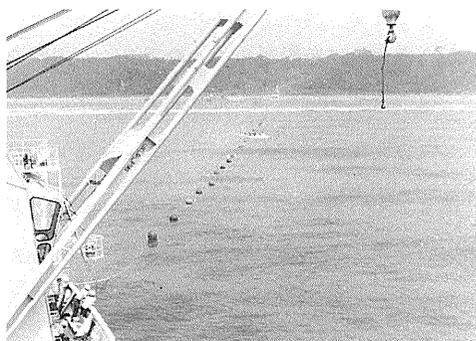


写真3.25 ケーブルの陸揚

Photo. 3.25 Landing of the cable.

(2) 陸側布設

アンカーを揚収し、船首・船尾のスラスタとタグボートの支援を受けて船首を180°回転して、船首から外装ケーブル(35km)の布設を開始した。

外装ケーブルは2~3ノットで布設され、ルートはAPIXで決められたので精度は高い。外装ケーブルと無外装ケーブルの接続はジョイントボックス(J-3)で行い、外装ケーブルの燃りがシーブを離れた無外装ケーブルの接続部に集中して無外装ケーブルを振りきらぬよう、耐燃回ロープ工法が取られた。

この工法は、ジョイントボックスの手前100mから別のドラムエンジンで操作されたロープに外装ケーブルを捕縛し、張力を移しジョイントボックスへ燃回力がかからぬようにして、ジョイントボックスを船外に出し、更に無外装ケーブルを無張力のまま100m程繰り出し、徐々に張力をケーブルに戻し、最後にロープを船上で切断した。

無外装ケーブル8kmを3~4ノットで布設後、中間点装置(I-4)を第1回布設の場合と同様の手順で21時16分に着底(水深722m)させた。

(3) ケーブルの洋上最終接続

最終ピースの無外装ケーブル12kmの布設の途中で沖側布設の端末に設置したブイを収容し、引き続きブイロープとアイドルケーブル(3km)の巻き取りを行った。この作業と同時にケーブル末端が合うように布設ケーブルの Slack 調整を行った。

8月6日23時36分、沖側布設されていたケーブル末端のカップリングを船上の接続室に収容し、キャップを開き高粘度のポリブデンオイルを抜き取り、船上の給電装置でT₁~I₃の間に150mAの電流を流し、導通と絶縁試験をした。更に、ジョイントボックスのテールケーブルどうしの仮接続を行い、海岸局から全システムに給電(150mA)して絶縁試験を手始めに、伝送波のレベルと周波数の測定をして確認を行い、給電を切った。以上の試験が良好であったので、本格的なT-T接続を専門技術者によって行い、テールケーブルが接続された時点で海岸局から給電し、レベルと周波数を確かめ、その良好なことの報告を受けた上でジョイントボックスにカップリングをセットしてポリブデン

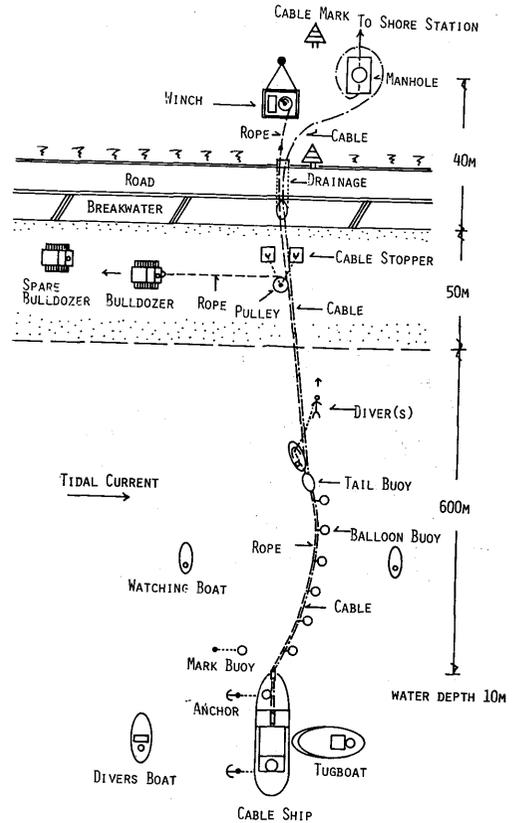


図 3.27 ケーブルの陸揚げ工法
Fig. 3.27 Landing work of the cable.

オイルを注入し、接続を7日04時35分に完了した。

洋上最終接続の概要は、図3.28に示す。接続の完了した両端末ケーブルは、プレフォームドストッパーで固定されたロープに張力を移し、両端末ケーブルをドラムエンジンからはずし、両方のロープを徐々に繰り出しケーブルが輪に近くなるまで繰り出した。ここで先取りロープを両ケーブルに固定し、そのセンターにロープをかけてドラムエンジンにセットした。ドラムエンジンを少々巻き戻し、ケーブルの張力をこの1本のロープに移し、ケーブルを船外に繰り出し両スリップロープは斧で同時にカットした。ドラムエンジンでロープを300 m (水深519 m) 繰り出したところで

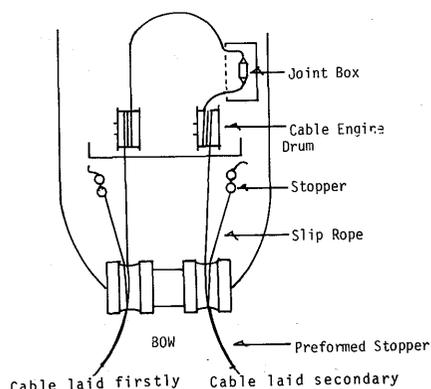


図3.28 両ケーブルの洋上最終接続およびその布設
Fig. 3.28 Connecting and laying of both cables.

ロープをカットして、最終接続用ジョイントボックスの布設を終わり、8月7日6時36分で半月に及んだ布設工事を無事完了し、7日の15時30分に横浜海工の岸壁に帰港した。

(4) 汀部のケーブルの本接続

陸揚げされたケーブルは布設過程での試験で仮接続を行っていたが、海側工事完了の時点で給電を中止して仮接続を一度切り離した。ケーブルを移動する汀部のストッパーとマンホールの間の外装ケーブルの完全埋設工事の完了を待って、陸上管路部のシールド付同軸ケーブルと海底部からの外装シールド付同軸ケーブルとの本接続を行った。

8月10～12日にかけOCCが機材を持ち込み、導体部2層、シールド部3層の溶接と絶縁部5層のモールドを行い、必要なレントゲン写真検査等も行って、ケーブルは海岸局から海底まで完全に通しとなった。

4.7 ケーブル防護工事

御前崎の遠州灘側の海岸は前述の通り距岸2 kmまでは1/70～1/100，2 km～3.5 kmまで1/100，3.5 km～6 kmまで1/250程度の遠浅で1 kmまでは砂に掩われているがその先は砂が薄く軟岩(第3紀頁岩)が露出していて、潮流も1ノットを越えることの多い海岸で、特に台風時の大波では一夜にして海岸の様相が変わると言われる荒磯で、汀部のケーブルの防護には可能なかぎりの防護施工をした。

一般には汀部水深50 m (波浪による水の動きが生ずる限界)までは何等かの防護が必要であると言われ、簡単で有効な工法は1 m程度の埋設である。しかし、この汀部は全般に砂が薄く、流失する危険があり、埋設の効果は余り期待できなかった。そこで、この方面でのノウハウの多い国際電信電話株式会社(以下KDD)の海底線建設本部の技術者の協力を得て、砕波帯には第3.29図に示すような鍍鋼(S

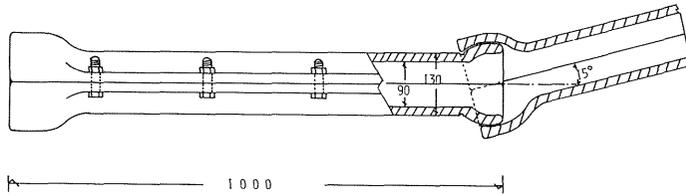


図 3.29 ケーブル保護管

Fig. 3.29 Protectors for armored cable near the shore.

C-42) 製で長さ 1 m 内径 9 cm 重さ 33kg (半分) の組み合わせ防護鋼管をセットすることにした。防護管は 300 組、長さにして 270 m (相互咬部 10 cm) を用意して海底の状況に応じて装着することにした。

ケーブルストッパーから水深約 2 m になる 126 m の間はケーブルの自重沈下の進まないケーブル陸揚げ直後から防護管 140 組の装着を 2 日間で行った。施工は引き潮時とユンボの海中作業能力範囲を活用し、この間ダイバーを多く投入して行った (写真 3.26 参照)。8 月 8 日以降は、まずケーブルの布設状況を潜水して目視調査すると同時に、写真又は、8 mm 映画に収め、その状況により工事を進めた。ケーブルがブリッジ状になっていて、作業船で引き揚げてルート修正の可能なところはルート修正を、不可能な場合は防護鋼管のセットかサドルによる固定工事を行うこととした。突出した岩でブリッジ状になっている箇所のルート修正を試みたが、キンクを起し易い外装ケーブルはスラックなしで布設しているため、引き揚げても元に戻り実効がなかった。この工事は 8 月 6 日から荒天による一時中止を含め 9 月 27 日に終了した。

防護の状況は図 3.30 に示す。ケーブル 1,000 m までの海底は砂であるが、層が薄いため大型埋設機の導入は困難であった。そこで小型なハンドジェット (高圧水流) 埋設機 (写真 3.27) による埋設を行い、50 cm 程度のケーブル埋設がされた。1,000 m ~ 2,200 m の間の岩露出部には主として防



写真 3.26 ケーブルの防護工事

Photo. 3.26 Protection work for the cable near the shore.



写真 3.27 ケーブルの防護工事

Photo. 3.27 Protection work for the cable near the shore.

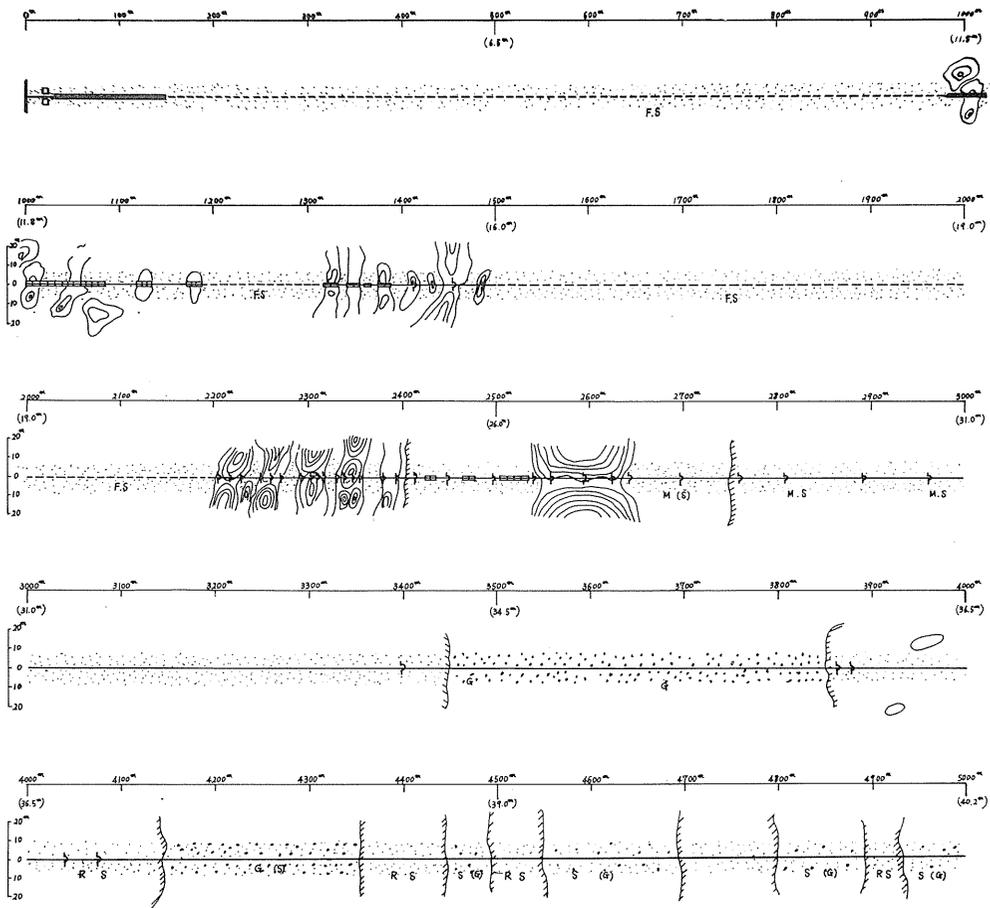


図 3.30 ケーブルの防護区間

Fig. 3.30 Protection and fixation of the cable near the shore.



写真 3.28 ケーブルの固定

Photo. 3.28 Fixation of the cable near the shore.

護鋼管で防護し、埋設可能な部分はハンドジェット埋設をした 2,200 m から 2,700 m (水深 28 m) の間は露岩が多く、高い部分はサドルで固定 (写真 3.28)、低い部分には防護鋼管をセットして防護鋼管 300 本を装着し尽した。2,700 m ~ 3,500 m の間はテーブル状の岩で砂が薄く乗っている程度で、岩がもろくサドルの取付けが困難となった。一方、水深も 30 m を越え、潮流も早く、作業現場は一般船の航路に直行し大型船を含め船が多く、これによる危険も多くなり作業は困難となってきた。ケーブル長約 4,100 m (水深 37 m) のサドル留めを最後に防護工事は終わった。工事完成後の状況として 100 m 毎に水中写

真を撮り、更に8mmカラーで全般の状況が把握できるよう撮影を行って、今後の状況変化が判別できる資料を作成した。

4.8 海底部装置本布設ルート状況

海底部装置が布設された位置および付近の海底地形の平面図(図3.31)と、このルートを横切る海上保安庁水路部によって測量されたプロファイラー測深機による記録(水路部より提供を受ける)を図3.32~3.35に示す。

平面図測線と断面図の番号は対応して、断面図の番号の下の矢印がケーブルの位置を示す。平面図の破線区間と断面図の黒三角マークの区間がこれに対応している。測線No. 3~No. 9の西側に天竜海谷の支谷に相当する海谷の一部が見られる。測線No. 18~No. 27にかけては東側に傾斜面がある。測線No. 27~No. 33の間は全般に起伏が激しくなり、No. 29の一部に堆積層が見られる。

この結果、地震計の設置位置はI-4(測線No. 10)、I-3(測線No. 19)、I-2(測線No. 27)、T-1(測線No.

33)共に地形的に厚い堆積層は認められず、海底観測点としては適地と考えられる。布設作業時の海底部装置の布設状況は表3.12に示す。各海底部装置の入水時間と地震計の記録(写真3.29)に現われた着底時間との差と、この時間内に走航した水平距離と深さから算出した斜辺長(図3.36)をケーブル相当長(実長はスラックがある)とすると、中間点装置が布設船のシーブを離れた時点の位置から着底までに移動する距離は、I-2は223m、I-3は112m(着底位置はピンガーで実測)、I-4は148m前方に落下着底したことが推定される。着底時のケーブルの入水角の実測平均値と着底時の推算平均値との差I-2で4.2°、I-3で2.5°であった。本海底地震観測システムは、観測点I-2、I-3、I-4の3点は海底地形と布設上の困難さの許す範囲で三角形に配置して地震のロケーションも可能なように配置した。このためケーブルが90度以上曲っている地点を2箇所取ったことと、

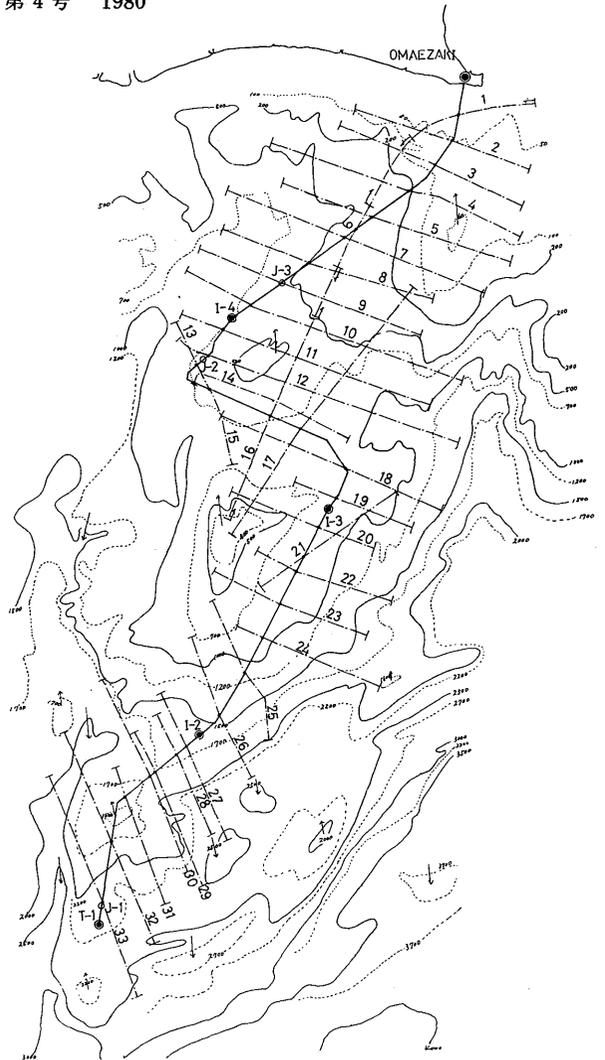


図3.31 ケーブル周辺の海底地形(水路部提供)

Fig. 3.31 Topography around the submarine cable.

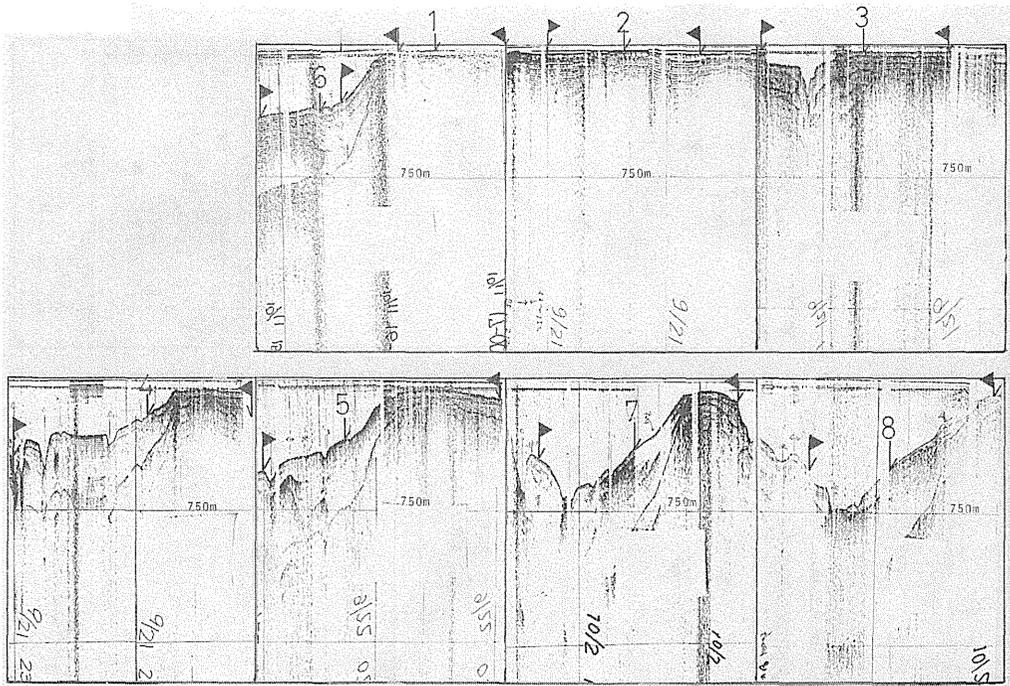


図 3.32 図 3.31 に示した調査ルート of 断面図 (水路部提供, 図3.35 まで)
 Fig. 3.32 Cross sections along the survey routes in Fig. 3.31.

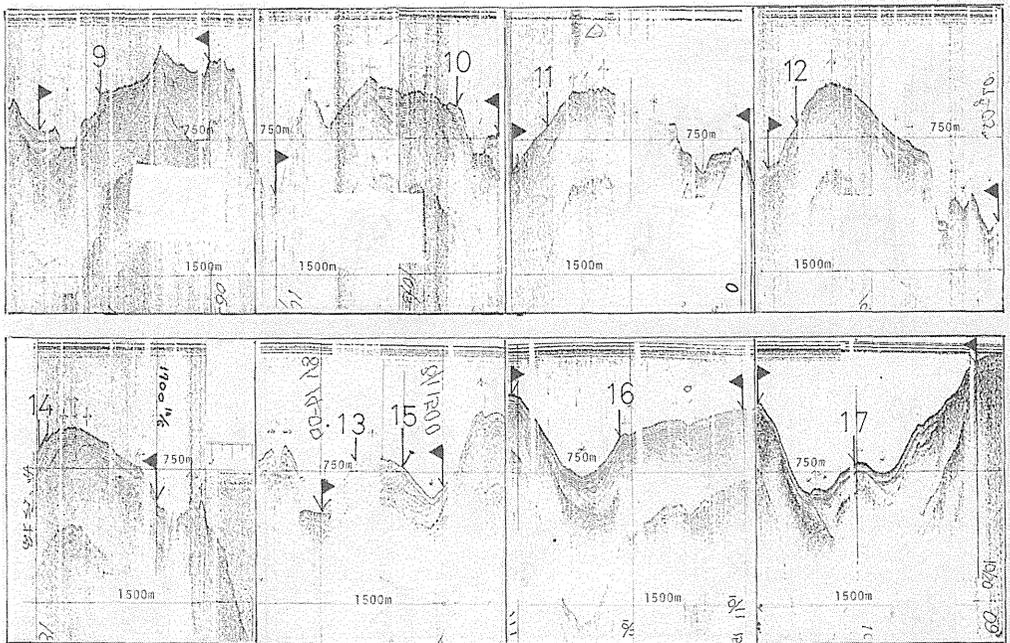


図 3.33 図 3.31 に示した調査ルート of 断面図
 Fig. 3.33 Cross sections along the survey routes in Fig. 3.31.

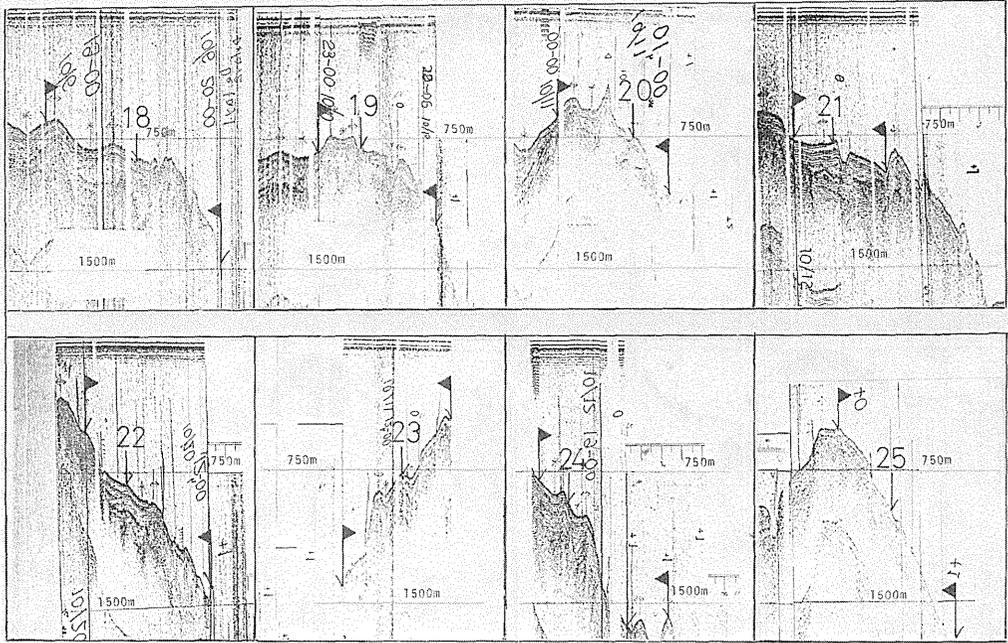


図 3.34 図 3.31 に示した調査ルート断面図(水路部提供, 図 3.35まで)
 Fig. 3.34 Cross sections along the survey routes in Fig.3.31.

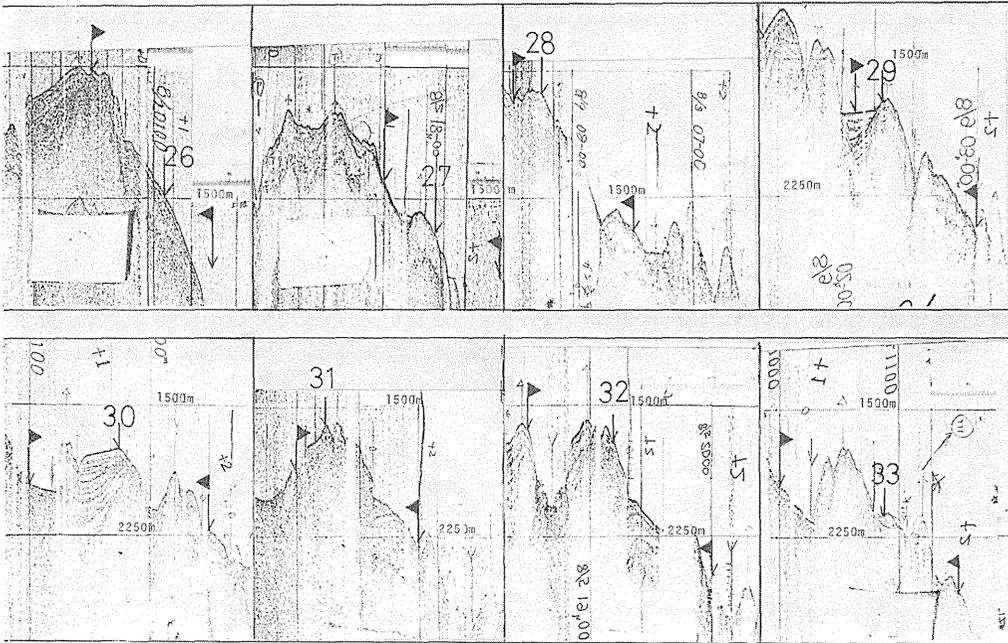


図 3.35 図 3.31 に示した調査ルート断面図
 Fig. 3.35 Cross sections along the survey routes in Fig. 3.31.

表 3.12 海底部装置の布設状況

	入水(シープ通過)時刻	着底時刻	入水～着底時間	水深	筐体の落下速度	布設方式	測定平均入水角	着底時の推算入水角
T-1	7月27日 05:32	09:52	min 292	m 2,202	m/min 着底前30mより 10 (0.32ノット)	船尾より つり下げ 沈下布設	-	78.8°
I-2	7月27日 13:23	14:06	43	1,542	平均 35.9 (1.16ノット)	船尾 航行布設	12.5° (差4.6°)	16.9°
I-3	7月27日 17:24	17:48	24	817	平均 34.0 (1.10ノット)	船尾 航行布設	13.5° (差2.5°)	16.0°
I-4	8月6日 21:02	21:16	14	722	平均 51.6 (1.67ノット)	船首 航行布設	船首布設 で測定なし	23.2°

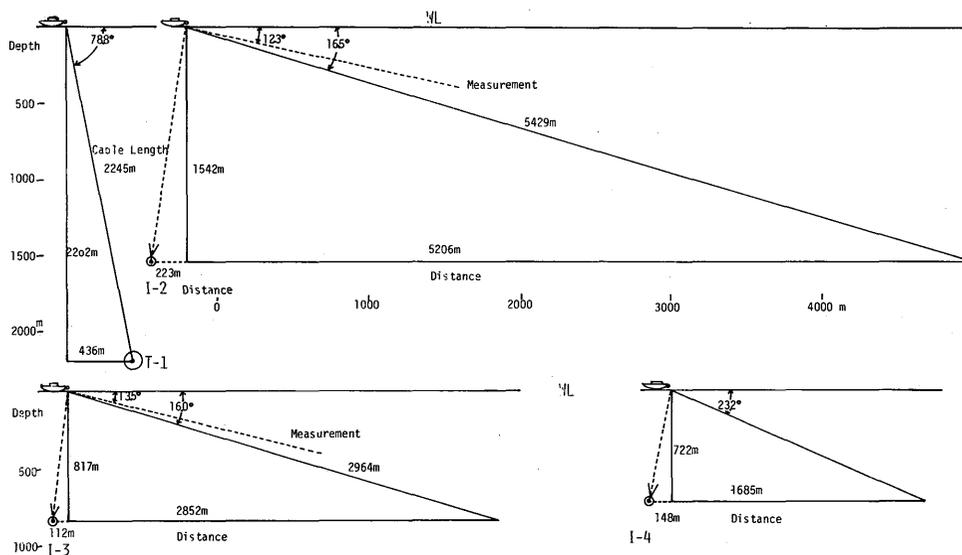


図 3.36 各装置の着底位置

Fig. 3.36 Seabed positions of the apparatus.

布設工事の行程の段階でケーブルの割込み直接接続による長さ調整が困難(黒潮丸は無外装ケーブルの中心導体を圧着接続する等の装備がない)なため、当初からケーブルスラックは多目に取り替えていたこともあり、布設後の全ルート平均スラックは13%(最終接続のスラック2.5km×2を含む)となった。この詳細は布設ルート変針点と共に表3.13に示す。

布設ルートに沿って実測された測深機の沖側(第1回)布設の測深図は写真3.30に示す。これに

よると、T-1からI-2に至るルートで急傾斜が予想され、黒潮丸で再調査した海域のケーブル通過ルートの最大傾斜は18°以上、比高86mであることが確認された。その他は大きな傾斜はなく、平均的に浅くなり、大地震時の海底地罫り等による事故は少ないものと考えられる。陸側布設のI-4付近の測深図は写真3.31に示す。

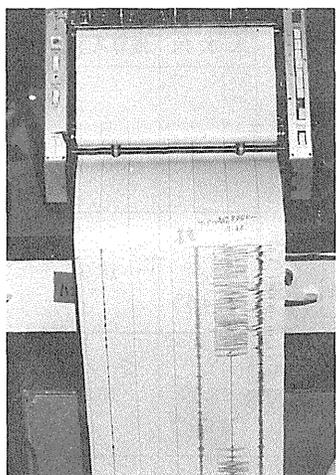


写真3.29 装置着底時の地震計出力
Photo. 3.29 Output of the seismograph at the moment of reaching the sea bottom.

布設された先端装置(T-1)1台、中間点装置(I-2, I-3, I-4)3台、ジョイントボックス(J-1, J-2, J-3)3台の位置、水深および方向は表3.14に示す。

表3.13 布設ルート変針点等

変針点等	位 置		設計変針点等の偏位
T-1	33° - 45.90' N	137° - 35.38' E	386 m
1	" - 53.40' N	" - 38.40' E	185
2	" - 57.60' N	" - 46.80' E	0
3	34° - 11.00' N	" - 58.90' E	185
4	" - 12.30' N	" - 59.80' E	590
5	" - 14.50' N	" - 58.60' E	459
J-2	" - 20.76' N	" - 49.50' E	2,905
I-4	" - 23.05' N	" - 52.50' E	93
7	" - 30.00' N	138° - 08.85' E	76
8	" - 32.40' N	" - 11.50' E	153
S	" - 35.75' N	" - 12.80' E	0
9	" - 19.70' N	" - 48.30' E	
10	" - 20.00' N	" - 48.50' E	
11	" - 21.20' N	" - 50.60' E	
12	" - 21.80' N	" - 50.85' E	
13	" - 24.60' N	" - 55.80' E	
14	" - 24.70' N	" - 56.50' E	

布 設 ス ラ ッ ク

区 間	距離 (km)		布設ケーブル長 (km)	スラック (%)	
	設 計	実 行		設 計	実 行
第1回布設 (T-1 ~ J-2)	86.7	89.1	99.0	14	11
第2回布設 (Jマンホール ~ J-2)	49.4	47.3	55.0	11	16
全 区 間	136.1	136.4	154.0	13	13

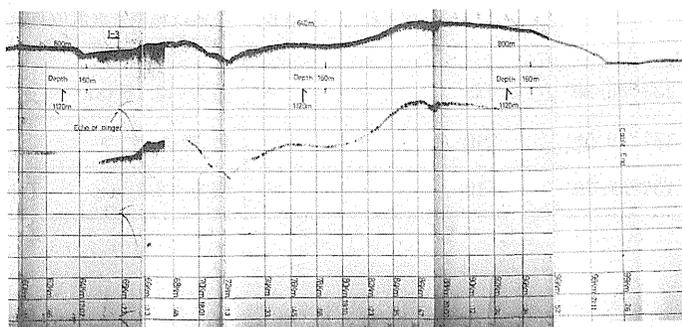
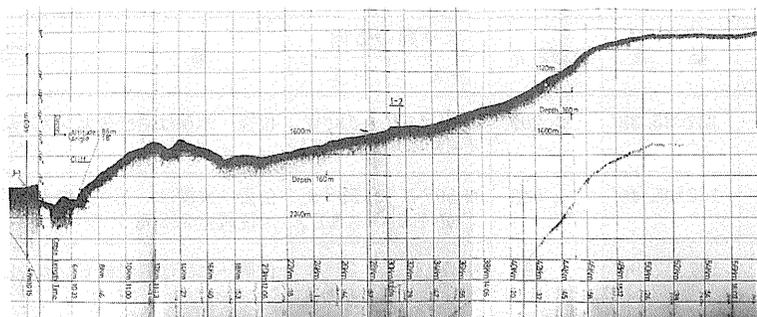


写真 3.30 布設ルートの断面図（沖側）

Photo. 3.30 Cross section of the cable route.

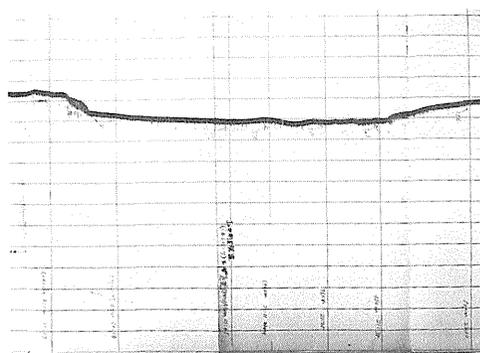


写真 3.31 布設ルートの断面図（陸側）

Photo. 3.31 Cross section of the cable route.

表 3.14 海底地震計の布設位置

装置名	緯 度	経 度	水 深 m	水 平 動 の 方 向		備 考
				+X	+Y	
T-1	33° 45.90'	137°35.38'	2,202	E 18° S (E S E)	S 18° W (S S W)	位置・水深は着底後ピンガーにより確認
I-2	33° 56.80'	137°45.40'	1,542	N 59° E (E N E)	E 59° S (S S E)	位置・水深は、I-2の入水時 (位置差223 m)
I-3	34° 09.90'	137°57.90'	817	N 37° E (N E)	E 37° S (S E)	位置・水深は着底後ピンガーにより確認
I-4	34° 23.05'	137°52.50'	722	N 63° E (E N E)	E 63° S (S S E)	位置・水深は入水時の位置 位置は精密電波測位装置による (位置差148 m)
J-1	33° 46.90'	137°35.80'	2,012	—	—	張力 2.15 ton.
J-2	34° 20.76'	137°49.50'	740	—	—	最 終 レ ッ コ
J-3	34° 24.90'	137°56.70'	519	—	—	張力 3.3 ton (外装)

第4章 陸上施設*

1. 海岸中継所

海岸中継所はケーブルの陸揚げ海岸に設置して、下記のような目的の設備と装置を収めた本テレメータシステムの海底部テレメータの受信と陸上テレメータの送信をする中継所である。また、非常の場合陸上テレメータが不通になっても、現地で監視するのに必要な最低のデータ記録が常時モニタされている。

1.1 中継所の主なる機能とその装置

- 海底部装置が稼動するのに必要な高圧（常時約 360 V）定電流直流の給電装置。
- 海底部装置から同軸ケーブルを通して送られて来る高周波電気信号を受信増幅し、地震等のデータ電気信号に復調する受信復調装置。
- 陸上テレメータで中継所から東京中樞へ、36成分のデータ信号を電電公社D-1回線を通して9,600ビット/秒のPCM信号で送り出す陸上テレメータの送信装置。
- 地震、津波、給電の監視用モニタ記録器。
- 非常の場合でも全システムが完全に働くような無停電電源となる発動発電機と蓄電池を持った直流（21 V）給電装置。
- 海底部装置の給電帰線回路に必要な給電用海岸アース。
- 陸揚げされた信号ケーブルと給電用海岸アースケーブルを通す2条の管路。

1.2 工作物設置に関する折衝・申請・許可

1.1項の目的の装置を設備するために局舎とその用地、ケーブルを通す管路とその用地が必要となった。局舎は御前崎測候所の老朽庁舎の一部の建替を含めて新築することになったが、管路のルート約700 mはすべて部外者の用地を通すことになるため、用地確保の難易とその工事経費等を総合的に検討した。更に、技術的にも海底同軸ケーブルを長い区間陸上ルートを通した例が日本ではほとんどなく、特に用地確保の容易な架空工事については、技術的な保障がないため管路を主体として設計した。気象研究所にはこれ等に関する経験者は皆無であったが、関連の機関とメーカーから種々意見を求めてルートを選定し工事設計は第3研究室（51年まで第2研究室）で行った。

これとは別に、海底と海岸に設備とその工事をするために漁業権に対する了解が必要となり、この問題を解決するため、昭和50年度より企画室が主体となり地元御前崎測候所の協力を得て接触と交渉が行われた。

*執筆担当 飯沼龍門

(1) 漁業権

漁業権に関する了解を受けることが本計画の実施可能かどうかの分かれ目となるため、昭和50年度より所長・企画室が中心となり、静岡气象台・御前崎測候所の強い協力のもとに、まず静岡県庁・御前崎町当局者の支援を受けて本計画の主旨を関係漁業協同組合に説明して協力を依頼した。関係漁業協同組合の特に幹部の方々の理解により、覚書形式の協定が51年7月から8月にかけてケーブル陸揚げ海岸沖に關係ある榛原地区（5漁業協同組合）漁業協同組合・浜名漁業協同組合・福田漁業協同組合の各代表と気象研究所長の間に交わされた。

この協定の内容にある布設工事方法・日程等細部については、事前に漁協に対して詳細説明を行うことになっていた。このため布設工事直前の昭和53年7月11日関係漁協の代表に御前崎漁協に集って戴き、気象研究所長と企画室の関係者と共に印刷した工事概要説明資料を配布して詳細説明を行い、最終的な協力を得た。この協定は、海岸保全域内占用協議と有線電気通信設備本邦外設置許可を受ける前提条件でもあった。

(2) 借地許可と手続

地上のケーブル管路ルートは、海岸の防波堤の貫通とこれに沿った県道の横断が一つの難関であったが、幸い現況では重要でない暗渠があり、これを利用してもらうことから始めた。このルートはその先が民地の田畑であるが、現況は休耕地で荒地又は湿地である上、公図が不備と現況が合っていないのと、所有者とその筆数が多くその境界の確認には非常な手数を必要とした。まず第3研究室の職員により総体的な測量（平板測量）図を製作し、これに基づき、予定ルートを決定して地主に予備交渉と正式な立入調査協定を結び、地元の測量士による境界確認と公式測量が実施され、これに基づき管路敷2m幅を地上権は設定しない条件での借地交渉（会計課担当）が成立し、2つ目の峠を越えた。このルートのうち測候所近くの最短コースにある民地は経済価値の非常に高い地域であったが、地主である当時の御前崎測候所長大沢友栄氏（昭和52年11月現職で急逝）の特別な理解と計らいによるものである。

以上の他は町道関連の敷地内で、舗装完成間もない道路を掘りかえすことは経費もかさみ、地元にも迷惑をかけることもあり、大部分は道路に沿ってあった大きな排水溝を利用し、この側壁に沿わせることで町当局者と関係住民の了解を得た上で、道路専用協議書を提出してその許可を得た。

(3) 有線電気通信設備本邦外設置許可

海底地震常時観測システムは、海底ケーブルを日本の領海の外にわたって布設し、それに測器とその有線電気通信設備をすることになる。従来の気象業務用の設備については、特に許可を必要としない（有線電気通信法第三条）が、このシステムは有線電気通信法第八条“本邦外にわたる有線電気通信設備”に該当するため、郵政大臣の許可が必要となった。

この条文に該当する許可申請は郵政省としても初めてのケースで、郵政大臣官房電気通信監理官室の担当官の指導を受けて書類を準備した上で、気象庁長官名で許可申請をした結果、昭和53年3月23

日許可を受けた。

以上で、工事と設備に必要な手続きは完了した。全項目を第4.1表に示す。

表4.1 許認可・借地等に関すること

件名	申請者名	管理責任者名	期間	備考
漁業権に対する覚書 (沿岸)	研究所長	榛原地区漁協	設定なし	操業制限海域なし、ケーブルルートは標柱2 本で標示 (51.7.1)
"	"	浜名漁協	"	" (51.7.13)
"	"	福田漁協	"	" (51.8.6)
道路占用協議書	研究所長	静岡県知事	~昭55.3.31	県道敷の暗渠の専用、御土管第10-38号(52. 11.12)無料3年毎更新
海岸保全区域内占用 協議書	"	"	~昭72.3.31	海岸アース・陸揚げケーブル敷、御土管第2- 7号(52.11.12)、無料20年間
特別区域内工作物新 築許可書	"	"	設定なし	県立自然公園特別地域、自然第6-117号(52. 9.2)
道路占用並に土木工 事施行協議書	研究所長	御前崎町長	~昭62.8.31	測候所南線・芹沢広沢南線・長山線・御建第 352号(52.9.8) 管路・マンホール敷、無料10年間
借地(民地)	研究所長	森田松一	~昭54.3.31	172.22m ² (有料) 管路敷 1年毎
"	"	沢入市夫	"	136.44m ² (") ""
"	"	大沢慧	"	55.20m ² (") ""
"	"	釜下藤吉	"	25.40m ² (") ""
"	"	伊藤吉十	"	8.80m ² (") ""
有線電気通信設備本 邦外設置許可	気象庁長官	郵政大臣	設定なし	機器4台、ケーブル156km、郵電監第200号 (53.3.23)
公社回線専用契約と 用品認定	気象庁長官	東京電気通信局 長	—	東京-御前崎D ₁ -4W 6回線(内1回線 混合使用) 中枢受信記録装置・海岸中継所送信装置
消防法関連	御前崎測候所長	相良消防署長	—	自家発と油貯蔵300ℓまで
"	"	"	—	直流電源装置の蓄電池防爆処置

1.3 海岸中継所局舎

海岸中継所局舎のレイアウトは第3研究室が担当した。

局舎の特別仕様

- ・局舎は電磁シールドと避雷効果を高めるため、KDDの指導を受け、二階の機器室を掩う壁とスラブの補強鉄筋を約2m間隔で張りめぐらせた銅線へ銅テルミット溶接をして1点で1種アースに落とす。
- ・天井高は機器の高さが275cmを予定して梁下330cm以上とする。

- ・空調は24時間運用とし、保守の容易と安全を図るため冷暖房はヒートポンプ（熱交換器を切り換える）方式を使用して一式で冷暖房を行い、寒冷時の不足熱量は電熱を使用することにする。
- ・窓は数を少なくして、耐震と電磁シールド効果を高めるため、鋼線入りガラスを使用する。
- ・曲率半径が大きい同軸ケーブルの局舎内引き込み工事を考慮して、引き込み用の管路と配線用の天井ラックを設置する。
- ・既設の磁気テープ式（67）地震計・傾斜計・歪計等を一括して運用するようにする。
- ・屋外からの引き込みをするケーブル・屋内のケーブル等の配線に必要な配管をする。

以上の特別仕様のもとに、昭和52年度の建設省中部地方建設局が設計・監督・管理を行う支出委任工事として進められた。当初は、管路工事については経験がないとの理由で気象研の直営を希望されたが、特に依頼した結果、一括してこれも引き受けて施工してくれることになった。

この計画を実行する段階で、東京管区気象台を含め御前崎測候所として、一般的な要望事項をできるだけ取り入れるため、打ち合せ会と連絡を取りながらレイアウトを固めた。一方、中部地方建設局とは52年3月の時点から予備折衝を始め、4月下旬には御前崎の現地に両者の担当官が集まり、打合せを行った。5月末で基本設計を完了、その後詳細設計は、主として東京—名古屋間の電話連絡と図面等の交換で設計を固めた。9月上旬、中部地方建設局におもむき、最終設計を確認し9月中旬に入札が行われ、直ちに着工となった。

局舎の概要の配置は図4.1に示す。

局舎は、システムの保守運用の面に重点をおき、御前崎測候所の敷地内に建設することになったが、敷地が狭隘のため一部の老朽庁舎の用途廃止（東管）手続きをとり、とりこわしてから始まった。このため現地官署にはこの間多くの不便をかけた。発電発電機室は既設の発電機と増設の2系統を同時に使用すると、ハンドリングミス等によるトラブルが予想されたので、一般気象観測にも必要な容量を含めて発電機容量は15kVAとし、建物はこの装置が収容できる面積とした。概要は表4.2に示す。

表4.2 中継所建物の概要

建物名	構造・床荷重等	面積	備考
中継所	R C - 2	181 m ²	
(1階)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 700 kg / m² ・ 空調機械 冷 凍 力 20,000 kcal / h 暖 房 力 22,000 kcal / h 	(90.5 m ²)	電源室・空調機械室・ 暗室・宿直室・浴室・ 便所・湯沸室 200 ルックス
(2階)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 500 kg / m² ・ 室温・湿度 26 ~ 22 °C, 50 % ・ 電磁シールド 	(90.5 m ²)	機械室（一部会議室） 300 ルックス
発電発電機室	C B - 1 コンクリートベッド	21 m ²	油タンクを含む

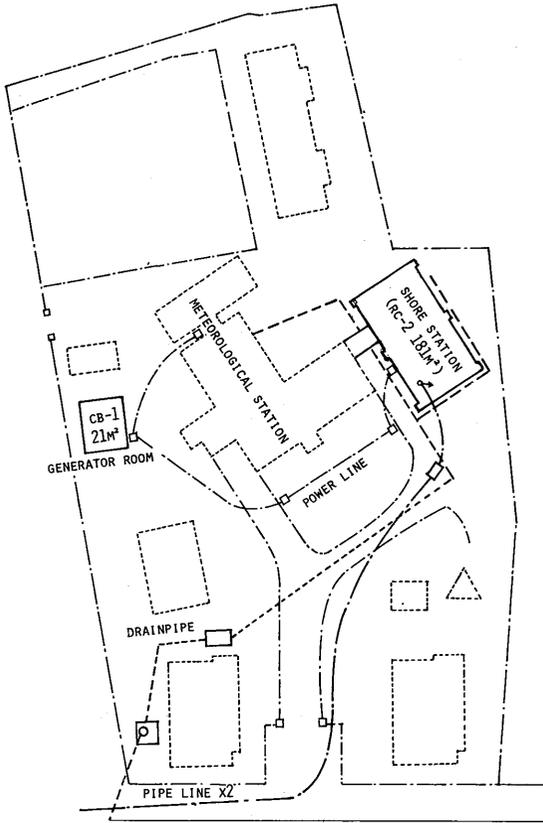


図4.1 御前崎測候所内の海岸中継所の位置
Fig. 4.1 Shore station in the Omazaki Weather Station.

中継所の平面図および機器の配置図は、1階を図4.2、2階を図4.3に、全景を口絵写真2に示す。

1階の電源室には、単相100V-10kVAの避雷用の遮蔽トランスと21V-60Aのサイリスタ整流器2台(単独又は並列使用)・シリコン自動電圧調整機1台・600Ahの鉛蓄電池11個を組み合わせた無停電電源装置(SID-21-60型)が収容された。また、信号用と海岸アース用の同軸ケーブル2本が屋外より床下を通して立ち上り、天井(2階の床)から2階の天井配線ラックに至る通路にもなっている。

空調機械室にはラジエーター・送風機・ヒーターのみを収容し、エネルギー源となる空気熱源ヒートポンプの主要ユニットは屋外に設置した。この他に写真暗室・便所・宿直室・浴室・湯沸室を取った。旧庁舎との出入口は渡り廊下で接続した。

2階には、海底地震常時観測システムの海岸中継所装置の機械室として、ケーブル終端装置

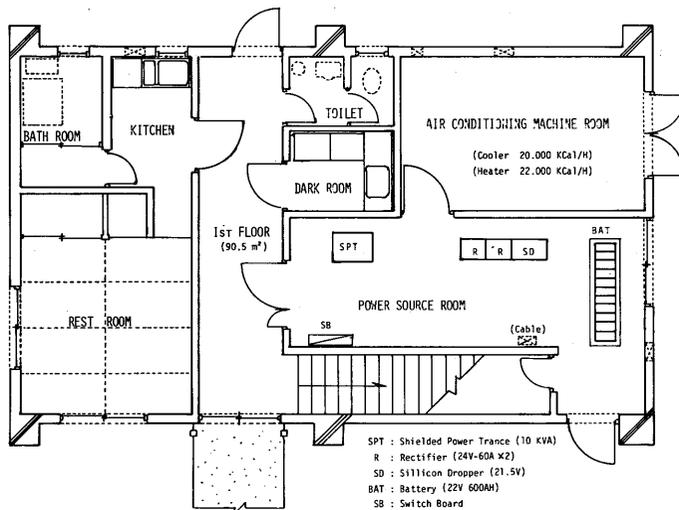


図4.2 海岸中継所(1階)
Fig. 4.2 Shore station (First floor).

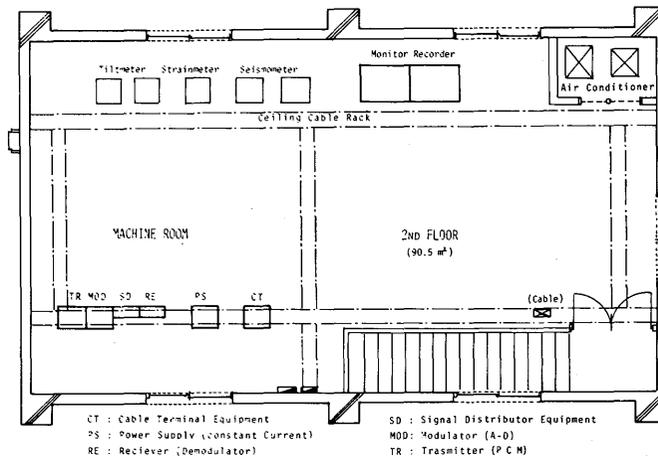


図 4.3 海岸中継所 (2階)

Fig. 4.3 Shore station (Second floor).

1架、海底部給電装置1架・受信復調装置1架・分配制御装置1架・陸上送信装置の増幅論理装置1架・変復調送信装置(PCM 9600bit/sec 6台)1架と地震モニタ記録器(3成分全自動用紙交換式ドラム型インク書き記録器)2台を収容した。この他、旧地震計室に設置してあった歪計およびこの有線テレメータ送信器・67型電磁地震計・傾斜計・検潮儀の分岐盤を移設し、この3式の有線テレメータ送信器を新設収容して、総合的に保守管理が効率よくできるようにした。全面積には余裕を取り、保守管理の作業場と会議室とを兼ねた。

天井高は事務所建物より高く、梁下330cmにし、天井には配線用ケーブルを通す天井ラックを図4.3(別途工事)に示すように設置した。このシステムの伝送波は低周波(40kHz~200kHz)帯を使用し、中継所の受信装置の入力レベルは各チャンネルあたり-70dBmと非常に低いため、外来電波等による混信を極力避けたいと、予定のS/Nが取れないので、電磁シールドには最大級の方策をとった。即ち、信号用同軸ケーブルは水深約50mになる海底で、長さ5.2kmと陸上0.8kmの合計6kmの間は、鉄片2重と鉄片のコルゲート1重の電磁シールドをしたケーブルとした。更に管路は鋼管とした。建物のシールドについては、電電公社は伝送波帯が高く(36MHz)電磁シールドの必要性が全くなく、その経験も少なかった。そこで前述の通り、KDDのノウハウを受けて施工し、当初電磁シールドのアースに落とす方法(当初コンデンサーを介したが、後直接落とした)で多少問題が生じたが、結果的には所期のS/Nが取れ、この方策が非常に有効であったことが確かめられた。

発動発電機室は図4.4に示す。

この建物はコンクリートブロックでスラブは鉄筋コンクリート造りである。建物には、15kVAのディーゼルエンジンによる発動発電機本体と全自動制御をする制御盤1架・自動切換え等の配電盤1架と300ℓのオイルタンクが収容された。この建物および装置は所管の消防署(相良)と連絡を取り、

消防法と関連地方条令に基く設計をすると共に、
完成後は屈出をして検査も受けた。

1.4 電源装置

商用電源は一般用（中部電力としては復旧グレードは高くしてある）の配電系統から単相 100 V で受電している。このシステムは非常の場合でも常時安定して稼動することが前提とされているため、電源装置については経費の許す範囲で万全を期した。概要と系統は図 4.5 に示す。

(1) 自家発電装置

自家発電設備は、全自動方式とし、停電を検知 1 分後にセルモータによる起動がかかる。起動しない場合は 20 秒間隔で合計 3 回起動がかかる。これ以上は故障表示となる。正規の電圧となれば、自動的に商用から自家発電に切り換わる。

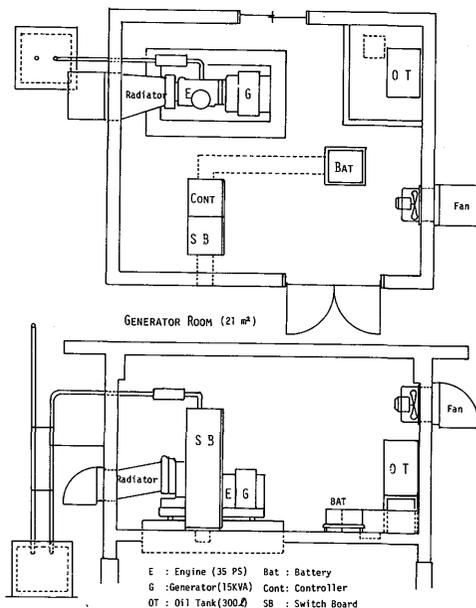


図 4.4 発電発電気室
Fig. 4.4 Generator room.

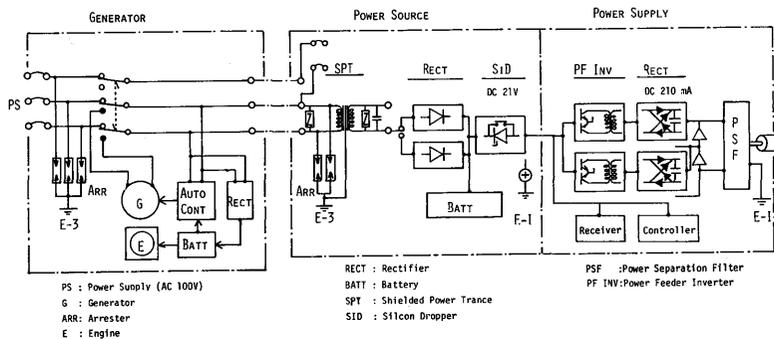


図 4.5 電源供給系統図
Fig. 4.5 Power supplier for the submarine system.

商用が回復した場合は、これを検知して 2 分後に自動的に商用に切り換わり、3 分後にエンジンが止る。冬季も起動が容易になるようエンジンオイルパンにヒーターが入っていて予熱している。また、エンジン起動とモニタ用電源電池はフローティング充電されている。故障および作動の状況は現業室のリモート監視表示盤でモニタができる。定格は表 4.3 に示す。

表 4.3 自家発電設備

名称	定 格	数 量
ディーゼル エンジン	形 式 水冷4サイクル・4気筒 回 転 数 1800 r. p. m. 出 力 35 PS / 1800 r. p. m. 燃 焼 方 式 予燃焼室式 起 動 DC 24 Vセルモータ	1台
発 電 機	形 式 横軸, 防滴保護 出 力 単相 100 V・15 kVA 周 波 数 60 Hz 励 磁 自 励	1台
配 電 盤 自動制御盤	開 閉 器 商用~自家発は自動, その他はブレーカー付 避 雷 器 PV-TF形 メ ー タ ー 電圧・電流・周波数 手動切り換え 制 御 方 式 時間はタイマーによる, 調整可能	各1台
そ の 他	オイルタンク 300 ℓ 防 振 ゴムクッション4点支持	

(2) 無停電電源装置

発動発電機による電源では、瞬断に対しては対応できないので、電池を介在させた無停電電源装置を必要とした。海底同軸ケーブル通信システムも雷災に対して例外ではない事例があるので、避雷対策にも可能な範囲で対策をした。庁舎の建物自体については、前に述べた通りのシールドとアースを施工した商用電源から入って来る雷サージを減衰させるため図 4.5 に示すような静電遮蔽形トランスと ZNR 型のサージアブソーバ・放電型避雷器を組み合わせた 10 kVA の耐雷トランスを挿入した。これにより誘導雷のサージを 1 / 100 程度に落とすことが期待できた。

直流電源装置は、電電公社が電話局等で使用実績の確かな SID シリーズのうち電圧と容量の適合した SID-21-60 型 (21V・60A) を採用することにした。整流器は全自動サイリスタ整流器 2 台を単独又は並列に使用し、単独使用中でも一方が故障すれば自動的に他の一方に切り換えられる。この直流電源により CS 型 (ファイバークラッド式) 600 Ah の鉛蓄電池 11 個 1 組を浮動充電する。整流器はフィードバック制御回路で最適電圧が保持され、電池の過充電が防止され、更に電槽には触媒栓を取り付けたので、防爆効果があると共に電液の減少を防止しているので補水の必要がほとんどない (使用 1.5 年で減少が認められていない) 等の、電池の長期安定化が図られている。出力電圧の安定化は、図 4.5 の SID が機能する。この主体は、大容量シリコンドロップパーと出力電圧を検知して、これが一定になるような制御装置と組み合わせ装置である。AC 電源が停電して電池から電力が供給される場合は、ドロップパーの一部を短絡して効率を上げるようにしてある。給電は⊕極をアースした。また平常の負荷は 30 A 以下である。

この直流電源 (21V) で海底部給電装置 (詳細は 2 章) 2 台を直列駆動し、その定電流電源 (210

mA)はPSFを通して海底部全システムに給電されている。陸上テレメータ部の送信装置は耐雷トランスを通した電源を供給しているが、商用電源が停電して発動発電機が作動するまでの間2分程度の停電がある。これは一般の地震テレメータと同じグレードである。

1.5 局舎アース

局舎敷地内に海岸アースとは別に下表に示す局舎アースを合計4式設置した。

表4.4 局舎アース一覧表

アース名	目的	仕様	接地抵抗	図4.6
自家発電機	避雷	5mパラアース 3本	35 Ω	No.1
耐雷トランス	避雷	5mパラアース 3本	18 Ω	No.2
局舎アース(補強)	電磁シールド (海底部用)	5mパラアース 4本	(総合) 1.2 Ω	No.3
通信用アース	陸上テレメータ用	5mパラアース 8本	11.3 Ω	No.4

これらのアースは、避雷用アースは避雷器毎に設置し、信号用とは別にした。局舎アースの設計にあたっては、比抵抗を測定した結果地下10m以浅(地下水位約10m)に比抵抗(160 Ω・m)の比較的低い層があったので、可能な限り長いアース棒を用いることとし、5mのパラアース棒を打ち込み更に低減剤を注入した。

配置図とパラアースの概要は図4.6に、接地抵抗は表4.4に示す。

2. 管路

2.1 管路に対する検討

KDDの海岸中継所は一般に汀近くに建設され、同軸ケーブルを陸上ルートで長い区間を通しているところはない。このためKDDからは管路に対する指導は特に受けられなかった。同軸ケーブル

メーカーであるOCCからは、信号用の二重電磁シールド付25mm同軸ケーブルの中心導体の銅棒(8.4mm)の耐抗張力は400kg以内、曲率内径は3m以上を保つこと。架空工事等による繰り返しの変形はリングカットを起こす危険があり、長い間の特性保証は困難であると提言された。また、架空工事はこの他、台風・火災等の災害にも弱いことと、温度が変化すると同軸ケーブルの高周波伝導特性にも変化をきたす等のデメリットがあるため、前述の通り架空は陸上ルートの工法からは除外した。

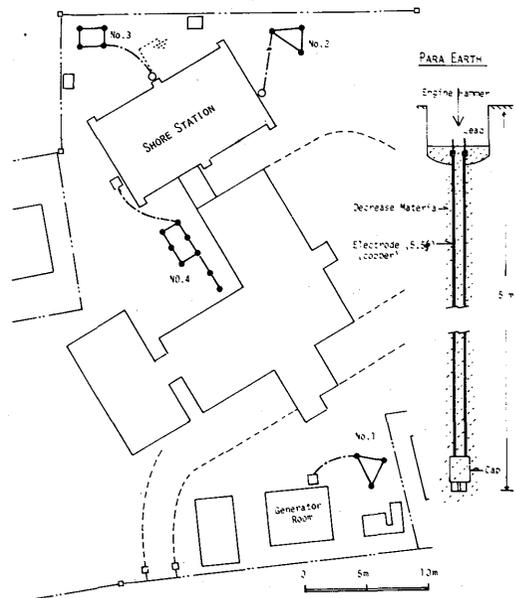


図4.6 局舎アース
Fig. 4.6 Station earths.

使用するパイプについては、鋼管とポリエチレン製のコルゲイト管について検討したが、電磁シールド効果の高い鋼管とすることにした。鋼管のうちでも一般的な亜鉛メッキ鋼管（白ガス管）を使用することにして、上記の条件を参考の上一応の基準を作った。

2.2 管路の設計仕様の基準

- (1) ルートはできるだけ屈曲を避ける。
- (2) ケーブルの1区間は300 m以内とする。
- (3) ケーブル接続用マンホールの大きさは、接続用の機器の搬入とその作業を考慮して4号型とする。
- (4) 急カーブや屈曲の多い所には中継用として2号型マンホールを設置する。
- (5) 舗装道路は可能な限り掘り起こさない。
- (6) 使用パイプは白ガス管としてケーブルの堅さを考慮して、内径はケーブルの外径の1.5倍以上とする。
- (7) パイプの曲げ半径は、3 m以上とする。
- (8) パイプとマンホールの接続部には、ベルマウスを使用してケーブルを保護する。引き込み位置は一定とする。

以上の基準により設計施工した。

管路ルート及びマンホール等の配置図は図4.7に、断面図は図4.8に示す。マンホールは軽量のレジン（合成樹脂）コンクリート製を使用した。配置図のロードの部分には道路下に埋設、トレンチの部分は道路横の排水溝の壁面に二段に吊り下げ布設、無印の部分は私有地の畑又は現況原野への埋設である。海岸のM-4とM-2の間は湧水地帯で重機械の導入が困難で工事事も難航した。また、施工の段階でパイプの曲げ角度やマンホールの位置が適当でなく、中部地建を通じて一部手直し工事を実施してもらった。

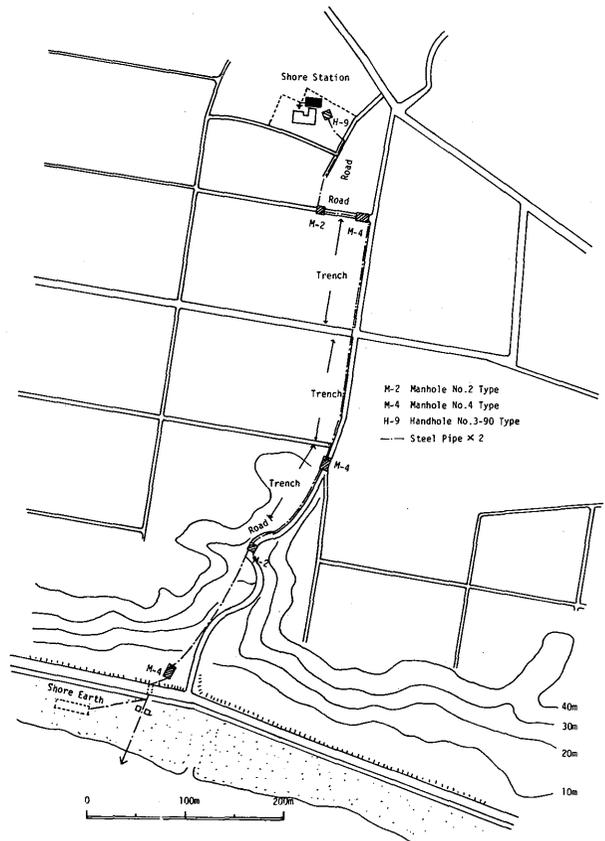


図4.7 陸上ケーブルのルート
Fig. 4.7 Land cable route.

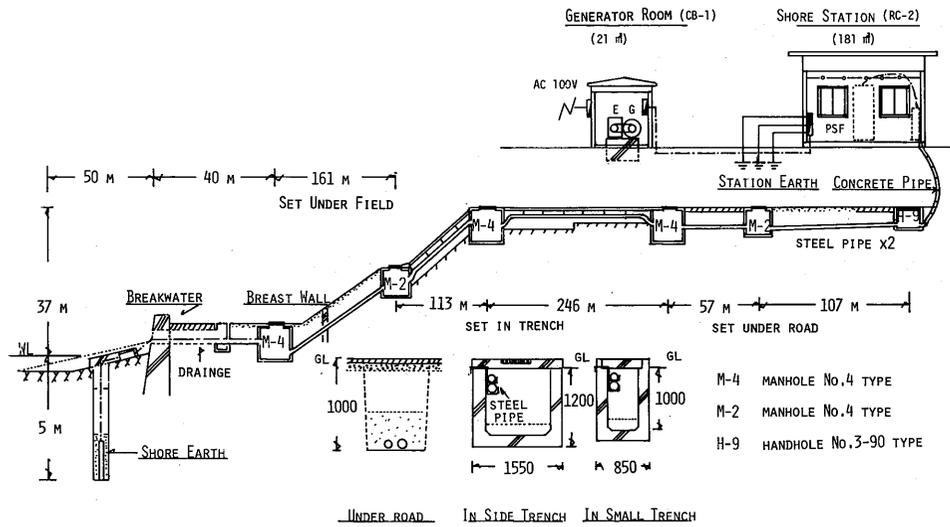


図 4.8 陸上ケーブルルートの断面図

Fig. 4.8 Cross section of the land cable route.

2.3 ケーブルの通線と接続

管路完成後ケーブルの通線と4号マンホール内での接続はケーブルメーカーが担当した。海底同軸ケーブルを管路に通線した経験が少ないのと管路の状況を調べるため、まず通線リハーサルを実施した。通線は工事時に挿入した8番鉄線をメッセンジャーとしてワイヤーを1区間通線し、その先にリハーサル用高張力38mm同軸ケーブルを各区間毎に通線試験をして、この時ウインチの張力を調べて問題はないか、また管路の一部手直し等が必要であるかを含めてテストをした。この結果ウインチの荷重が1トンを超える時があったが、途中管路内でのワイヤーの摩擦も加わっているため問題はないと判断された。本番通線工事は、ケーブルは1ピース長約300mの3ピースに分割してリハーサルの結果を活用して実施した。海岸に近い4号マンホールと坂上の4号マンホールの間の湿地帯の区間のパイプに、泥による目詰りがリハーサル時に認められていたが、本ケーブルの通線では特に障害にはならなかった。通線で最も力がかかったのは、局舎に近いピースで張力1トンを越えたがワイヤーを調べた結果、途中の摩擦によるものと推定され、ケーブルには無理な荷重は加えていない。

局舎内への通線は機械力を使用できないため人力のみで行い、研究所の立会者も手伝う一幕もあった。ケーブルの挿入後、4号マンホール内2ヶ所で、電磁シールド付同軸ケーブルの接続(写真4.1, 4.2)を行った。

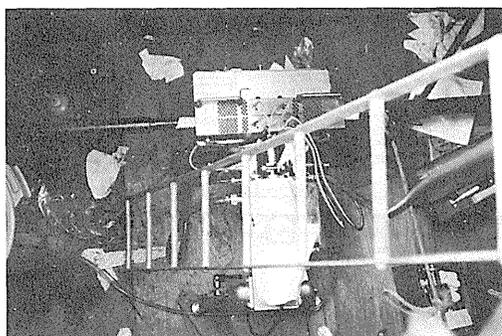


写真4.1 マンホール内でのケーブルの接続作業
Photo. 4.1 Connection work in the manhole.

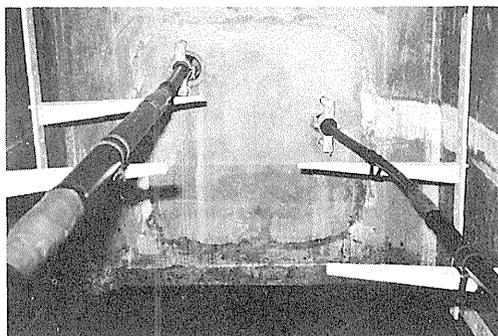


写真4.2 マンホール内のケーブル
Photo. 4.2 Land cable in the manhole.

3. 海岸アース

3.1 海岸アースの働き

海岸アースは、海底部装置の給電帰線回路と避雷用のアースで接地抵抗を低くし安定化すると共に雷サージに対するインピーダンスを低くするため、局舎からの800 mのアース線には同軸ケーブルを使用した。

本システムの給電システムの概要は図4.9に示す。海岸局の給電装置から同軸ケーブルを通り、海底部装置のツェナーダイオード（白三角）の働きで、必要な電圧の電源が装置に給電される。先端装置からケーブル長で1 km（電食防止）離れた海底アース（チタン棒白金渡金の電極）から海水中に拡がり、海岸の汀部の海岸アースで集める方法の回路として構成されている。図4.9の斜線の入ったダイオードは、振子クランプのコマンドとして逆向の電流（ -150mA ）を流した時の回路と逆流防止用のものである。黒のツェナーダイオードは、常用の白系統のダイオードが断線した場合でも全システムのループが断線状態にならないためのバイパス用の働きをする。伝送波はコンデンサーと高周波トランスで同軸ケーブル

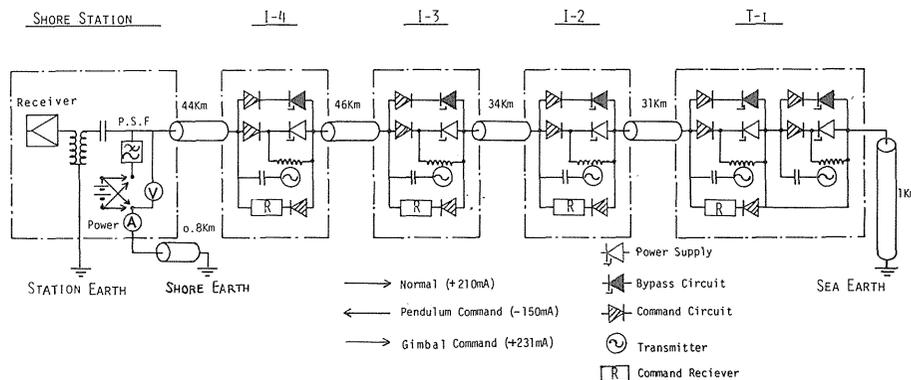


図4.9 海底部給電の概要

Fig. 4.9 Power supply for the submarine cable.

ルにカップルして海岸局に送られ、P. S. Fにより信号と給電に分離され、信号は受信器に入る。

3.2 海岸アースの基礎調査

海岸アース工事の仕様についても、ノウハウの多いKDDから技術指導を受けた。KDDの海岸アース方法にも表4.5のように、形式はその都度で多少変わっているが、汀部に設置していることは一貫している。本システムのアースは日本の技術のみで開発した日中海底ケーブル通信システムの九州の南端の

表 4.5 海岸アースの比較表

中継所 項目	二 宮	直 江 津	沖 縄	苓 北	御 前 崎
回 線 名	TPC-1	J A S C	TPC-2	日 - 中	O B S
所 属	K D D	K D D	K D D	K D D	J M A
電極の大きさ	60φ×1,500	318φ×7,000	75φ×2,000	50φ×2,000	50φ×2,000
電極の材質	銅 棒	銅 管	シリコンアイアン	銅 棒	銅 棒
電 極 数	6 本	7 本	6 本	6 本	6 本
深 さ	4 m	11 m	10 m	5 m	6 m
地 層	砂 礫	砂	珊瑚礁	砂 礫	第3紀頁岩
電極の間隔	4 m	8 m	3 m	5 m	5 m
電 源 極 性	⊕	⊖	⊖	⊖	⊕
電 流 量	370 mA	170 mA	136 mA	100 mA	210 mA
接 地 抵 抗	1 Ω 以下	0.5 Ω 以下	0.4 Ω	0.5 Ω	1.5 Ω

苓北海底線中継所で使用した仕様と業者によって施工した（昭和54年度に日本が受注して製作施工した海外の同様システムも同じ方式のアースを使用している）。

アース抵抗は1Ω以下を目標として、まず昭和52年3月、KDDの技術者による予定海岸内で比抵抗を測定してから始めた。この結果は、図4.10に示す。これによると、塩水の含んでいる表層2～3mの間は2～4Ωm（乾燥地域は高い）と低いが、その下の岩盤の平均測定比抵抗は14Ωmであった。

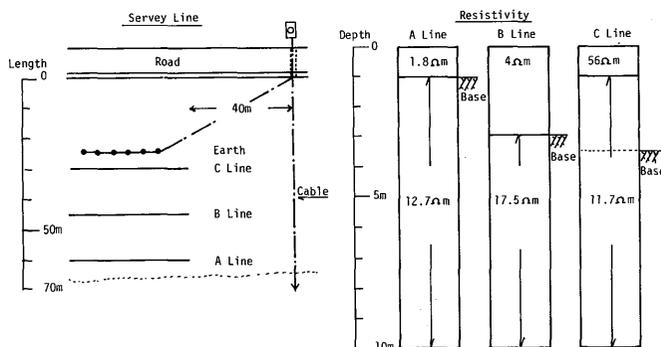


図 4.10 比抵抗の測定結果

Fig. 4.10 Resistivity distribution on shore.

・アースの接地抵抗 $R_1(a)$ は、

$$R_1(a) = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$$

ρ : 大地比抵抗 (Ωm) = 14 Ωm

L : アース棒の長さ (m) = 2 m ($L \gg a$)

a : アース棒の半径 (m) = 2.5×10^{-2} m

・アース棒直列 n 本の合成接地抵抗 R_n は、

$$R_n = \frac{1}{n} \left[R_1(a) + \frac{\rho}{\pi s} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \right) \right]$$

n : アース棒の本数 (本) = 6 本

s : アース間の距離 (m) = 5 m

で与えられる。

上記2式に数値を入れると、

$$R_1 = 5.32 \Omega$$

(直径 5 cm 長さ 2 m の電極体)

$$R_6 = 1.10 \Omega$$

(6本の 5 m 直列の合成)

即ち、この仕様で約 1 Ω の接地抵抗が期待される。この他参考までに、電極の電食量を陽極（この場合は陰極である）と考えて 20 年間 300 mA を流したとすると、最大溶出量 x を試算してみると、

$$x \doteq 60 \text{ kg}$$

電極 1 本の重さは約 35 kg で 6 本では 360 kg あり、約 1/6 が溶出することになり、直径 5 cm の電極が約 4 cm に細ることになる。しかし、この電極は陰極として使用しているため、溶出は極く少量で問題は起こさないと推定される。

3.3 海岸アース工事

この海岸の砂は 2~4 m の深さで、その下は第 3 紀の頁岩で、台風等ひと荒れするとこの砂は移動してなくなる恐れがある。また、KDD の技術者より海岸の岩盤内は地下水が陸上から入ってきて、意外に塩水が入らないと注意された。

調査と注意事項を考慮して、アース電極数は 6 本として電極はできるだけ海水に近づける一方、砂が流失しても損傷を受けない設計とした。アース（ケーブルストッパー）概要とその配置図は図 4.11 に示す。

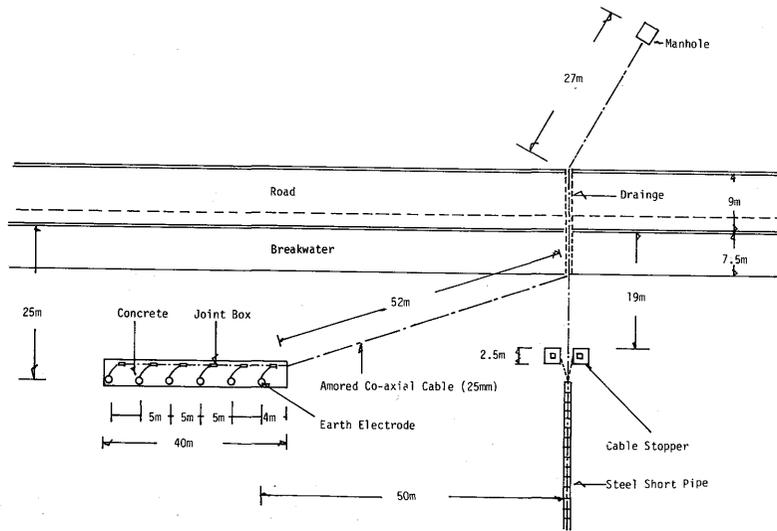


図 4.11 海岸アースとケーブルストッパー
Fig. 4.11 Shore earth.

アースには電流が流れ込むため、近くの導体特に外装ケーブルの電食腐食を防止するため、信号用ケーブルからは50m離れた。この工事は昭和53年3月末に施工したが、まだ西風が強く波も荒く、波打ち際の工事が困難なため位置も陸側に少し寄せた。また、この海岸特有のめくら砂が飛び工事関係者は水中眼鏡をかけて作業する等の苦勞をした。

電極およびこの端末に固定したリードケーブルは図 4.12と図 4.13に示す。図 4.12の①は直径 5 cm、長さ 2 m の銅棒でこの先 25 cm が図 4.12の構造のリードケーブルとの接合部である。この電極を図 4.14の右図に示すよう汀部に直径 116mm、長さ 6 m (岩盤は 4 m) のボーリングをしてこの孔に電極を挿入して海水 (NaCl) でねったベントナイトを注入して、岩盤との接触抵抗の低下をはかった (写真 4

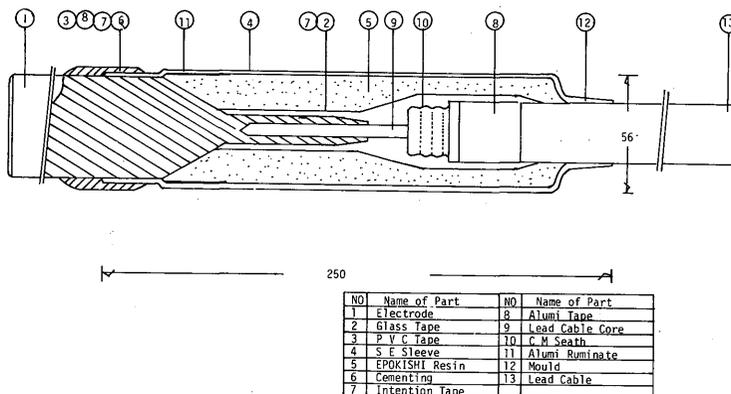


図 4.12 アース電極とリードケーブルの接続部
Fig. 4.12 Connector of the electrode and the lead cable.

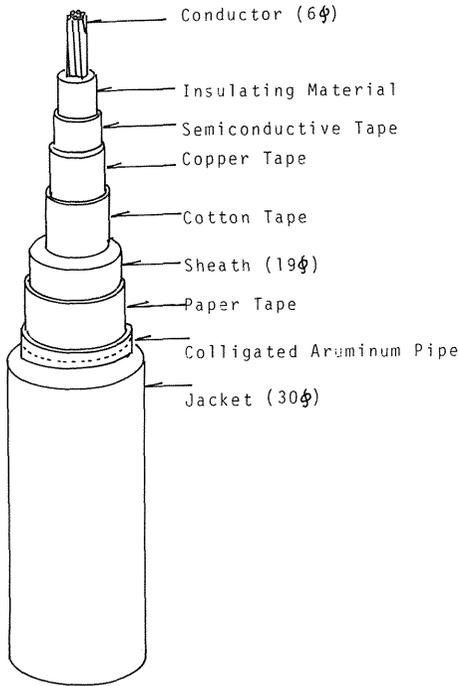


図 4.13 海岸アースのリードケーブル
 Fig. 4.13 Lead cable.



写真 4.3 ベントナイトの注入
 Photo. 4.3 Shore earth work.

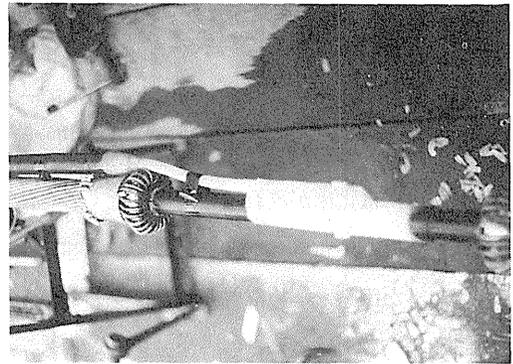


写真 4.4 海岸アースケーブルとリードケーブル
 の接続部 (図 4.15 参照)
 Photo. 4.4 Connector of the lead cable
 and the shore earth cable
 (cf. Fig. 4.15).

3)。

電極 6 本を挿入セット後この周囲に防砂用の
 テントをすっぽり張り巡らせて、リードケーブ
 ルとメイン同軸ケーブル (5φ一重外装 25mm

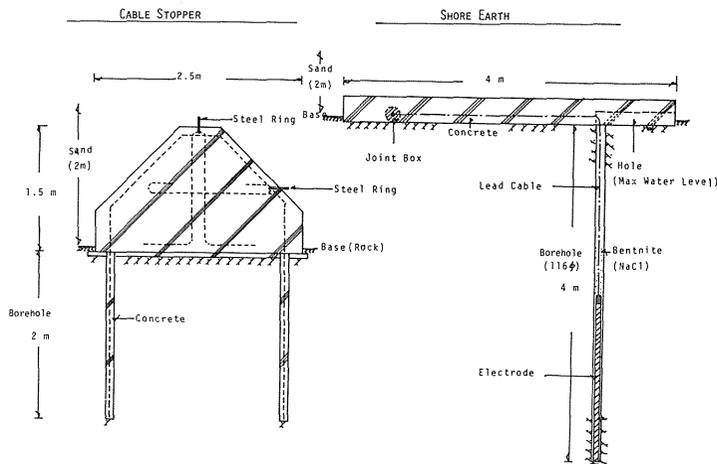


図 4.14 ケーブルストッパーと海岸アース
 Fig. 4.14 Cable stopper and shore earth.

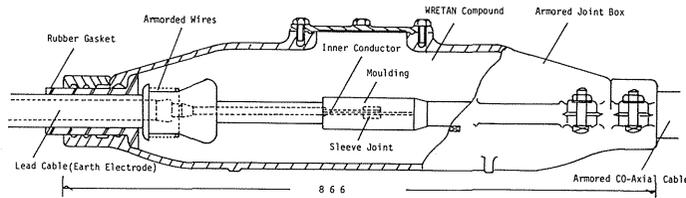


図 4.15 海岸アースケーブルとリードケーブルの接続部 (写真 4.4 参照)

Fig. 4.15 Connector of the lead cable and the shore earth cable (cf. Photo. 4.4).

同軸ケーブル)を図 4.15 に示す構造と工法のジョイントボックスで6本の電極を電気的にも機械的にも完全に接続した(写真 4.4)。

接続は1箇所1日を必要として、これだけで6日間かけた。接続工事完了後、周囲の砂をブルドーザーで基盤が露出するまで取り除き、図 4.11 と図 4.14 に示すように(写真 4.5)厚さ 30cm のコンクリートを打ち込み砂が流れ去った場合の防護をした(電極には海水が入るようコンクリートに穴をつけた)。メイン外装ケーブルは岩盤

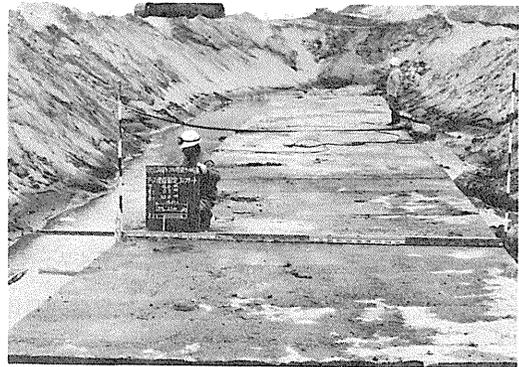


写真 4.5 海岸アース(図 4.11, 4.14 参照)

Photo. 4.5 Shore earth (cf. Figs. 4.11 & 14).

まで掘削して、アース電極部と共に砂で埋め戻しアース工事を完了した。完成後のアース抵抗は下表に示す。

各電極の接地抵抗値

電 極 番 号	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
抵 抗 値	4.0Ω	3.6	3.8	4.2	4.0	3.9

総合接地抵抗値 1.5Ω

総合接地抵抗は、予定の1Ωよりわずかに高くなったが、別項で述べる先端装置間(約110km)との地電位変化の測定が可能となったことからすると、非常に安定したアースであることが確かめられた。

3.4 ケーブルストッパー

ケーブル陸揚げ海岸には、ケーブルを陸揚げする時の大滑車を支えるものと陸揚げ後のケーブルを支持するものは皆無であったので、汀部にこのストッパー用の台2基を構築した。位置は図 4.11 に、概要は図 4.14 の左に示す。これも周囲の砂が流出した場合を考慮して設計し、岩盤に長さ2mのボーリングを4本掘り、これに22mmの鉄筋を挿入してアンカーとした。このアンカーだけで30トン以上の

耐力がある。上部は波に対して強くするため角錐形とし、そのトップと横の間に38φの鋳鋼のリングを各2本ずつ取り付け付けた。トップのリングはケーブル陸揚げ時に、中間のリングは永久ストッパーの支持用とした。

3.5 ケーブルの陸標

ケーブルの陸揚げルートの方を陸上標識で一般に表示して、海上で漁船のアンカー等による事故の防止を図った。海岸の接続用マンホールをはさんだ民地に、図4.16と写真4.6に示す高さ8mのコンクリート柱に1.5mの白色三角標識板を付けた標識柱2本をケーブルの布設ルートの見通し線上(N 204°E)に設置して、沖合3kmからも認められるようにした。更に、この陸標の国道に面するところに、ケーブルの埋設に対する一般的な注意板を掲示した。また、海浜内のケーブルの埋設とアースの埋設位置を表示する30cm4角のステンレス板にエッチングした表示板(写真4.7~4.8)を防波堤の内側に取り付けて、一般に注意してもらおうと、管理の目印とした。

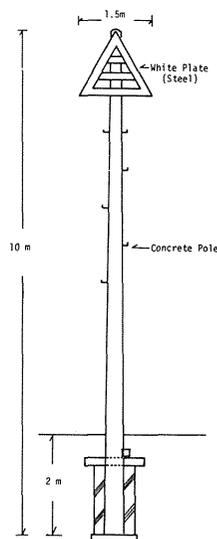


図4.16 ケーブル標識柱
Fig. 4.16 Land mark for the submarine cable.



写真4.6 ケーブル標識柱

Photo. 4.6 Land marks for the submarine cable.

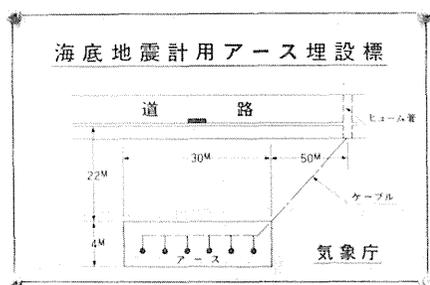


写真4.7 海岸アースの表示板

Photo. 4.7 Indicator for the shore earth.

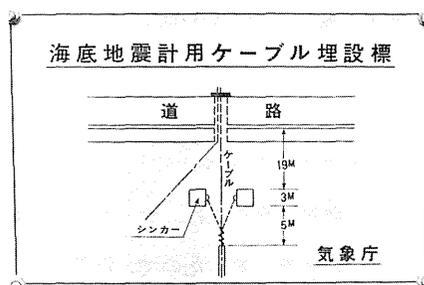


写真4.8 ケーブルストッパーの表示板

Photo. 4.8 Indicator for the cable stopper.

第5章 試験観測*

海底地震常時観測システムの開発計画は、開発作業が完了すれば直ちに業務使用に移行させるという前提で昭和49年度に発足し、昭和50・51・52年度には装置の開発、昭和53年8月には布設が完了し、海岸中継施設（御前崎測候所）で一部の観測が可能となった。

気象研究所では、このシステムの業務運用に先立ち、必要な各種の情報（例えば観測によって確認する装置の実質性能或は各種観測量の評価等）を調査し、その結果を装置のソフトウェアとして付加して本庁に移管するために約半年間の試験観測を実施した。

海岸中継施設では監視用に可視記録（地震計6成分・津波計2成分・給電電圧変化計1成分）が得られるのみで、高度な資料の入手並びに詳細な解析は、全システムの完成を待たなければならないといった事情があったが、とりあえず上記可視記録のみを使用して、今後のシステム運用に多少なりと役立て得ると思われる若干の成果を得たので報告する。

1. 地震計成分の試験観測

1.1 地震の検知能力について

地震観測の成果として算定できる情報は、観測の目的に応じていろいろとあげられる。その中でいずれの観測にとっても欠くことのできない情報とされている震源の位置を決定するには、最小限3地点以上の観測点でP波並びにS波の到着時刻を捉えることが必要である。

一方、各観測点が対象とする地震動を正確に捉えるためには感度あるいは周波数特性等必要な性能（例えば短周期地震計・長周期地震計或は高感度地震計・低感度地震計等の感度或は周波数帯域に関する性能）を設定して観測に臨まなければならない。

従って、海底地震常時観測システムのように地震の定常観測業務にとっては未知のフィールドと考えるべき海底で、新開発の装置による業務観測を予定するならば、当然その環境下で稼働させる場合のシステムの能力を事前に調査・把握しておかなければならない。

このシステムは、気象庁の陸上の観測網の延長として、布設海域に発生する小規模（ $M \geq 3$ ）地震の情報を正確に捉えて蓄積することにより、その海域で発生が予想される大規模地震の発生過程の追跡或は調査に役立てることを目的として計画したものである。このため、陸上観測点とのデータの互換性も当然必要であり、従って装置の特性は気象庁が陸上で使用している地震計に準拠させることが要求されていた。

この開発がスタートした時点（昭和49年度）では、気象庁の地震観測網で使用されている主要地震計

* 執筆担当 松本英照

は、59型（5秒－100倍）、67型（短周期高倍率）、強震計（5秒－1倍）の3種類であったが、このシステムには強震計を除いた2機種の性能を具備させるのみで良いという条件で設計製作が進められた。

従って、試験観測による装置の能力調査に際しては、システムの各機能の適否を主として上記2種の地震計の能力と比較することによって判定する手法をとった。

一般に地震のシグナルが正確な情報として使用できるかどうかは、そのシグナルが定常的に存在する地震以外の要因による信号（雑音）よりも大きいかどうか、また雑音が無視できる程小さな場合（例えば強震計の記録）には、信号が観測者が容易に認識しうる大きさに達しているかどうかによって決定される。

このような信号検出の原理から、陸上観測点の場合、観測可能な信号レベルは主として、工場動力・輸送機関等による人工的な雑振動の大小によって左右されているが、海底地震計の場合には多少事情が異なる。

即ち、海底地震計では小型で堅牢なセンサーの使用が必要条件となるので、数Hz以下の低周波域ではセンサーの出力が不足し、電気回路で発生する雑音も無視できない。一方、地震計が設置される海底の雑音（脈動及び船舶通過による雑振動）は量的によく推定する方法が確立していないので、装置及び現象双方を同等な雑音要素として均衡させたシステムを完成させる為に必要な事項の調査も、この開発作業の重要な項目であった。

そこで気象研究所では昭和51年10月に布設作業のリハーサルと試作耐圧容器・試作地震計の実用テストを行うに際して、約48時間の地震観測を試み、その資料を使用して海底の雑音予備調査と地震活動度の調査を行い、装置特性の設計条件を決定するための手がかりを得た。

この資料解析結果については関連研究4に記載してあるので、その結論のみを引用すれば「周期2～3秒の脈動の振幅は海底では陸上の10倍にも及ぶ。しかし数Hzより短周期成分は陸上の観測点と差異はない」という結論が得られている。

この結論をもとに49年度の仕様書で規定した地震計の周波数特性を変更し、更に海岸中継施設にシグナルコンディショニング（脈動除去特性と感度設定双方の選択機能）回路を追加して、システムの運用上の諸性能を試験観測後に決定できるよう陸上設備を設計した。従ってこの試験観測では最適な諸特性の選定とその特性によって得られる能力評価との双方が重要な作業となった。

このような事情から、試験観測の初期には限られた記録成分を有効に使用するためにフィルターの特性あるいは感度について、いろいろと設定を変更し、できる限り多くの条件での記録を収集して記録内容を分析することをもくろみ、結果として

- (1) 一貫した周波数特性で5,000～10,000倍程度の高感度観測を維持する方針ならば、信号は無処理で使用するよりも2Hzのハイパスフィルターによる脈動除去処理を施すことが望ましい。
- (2) 0.8Hzを遮断周波数とする広帯域成分では最高1,000倍以下の感度で運用することが望ましい。
- (3) 脈動の時間的変化は陸上よりも急激で、しかも最小時、最大時の振幅比は容易に10倍を越える。従

って、大振幅脈動の発生頻度について調査を続行しなければ、システムを有効に活用するための最終性能は設定できない。

等の判断を得た。

これらの判断に従い昭和53年10月から同年12月までの3ヶ月間、2 Hz のハイパスフィルターを付加した倍率1万倍の短周期地震計成分の連続観測を行い、本庁地震課の協力を得て、4地点に設置した各装置の地震検知力を調査した。

その結果を図5.1から図5.4に示す。この図から、4地点で作動しているそれぞれの地震計の検知

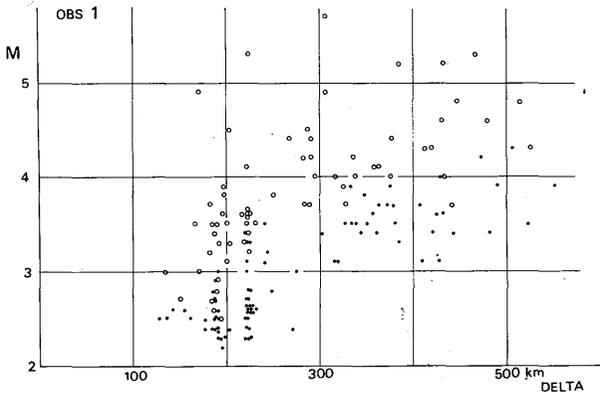


図 5.1

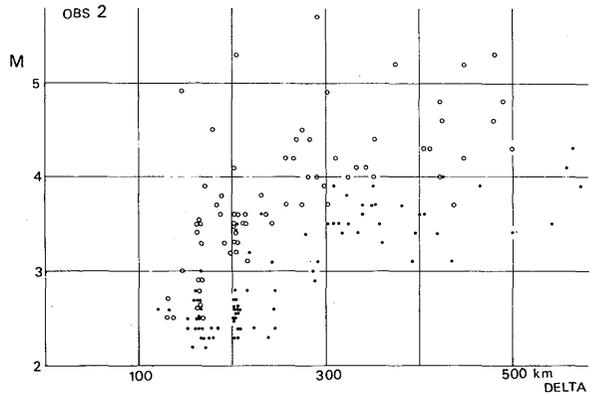


図 5.2

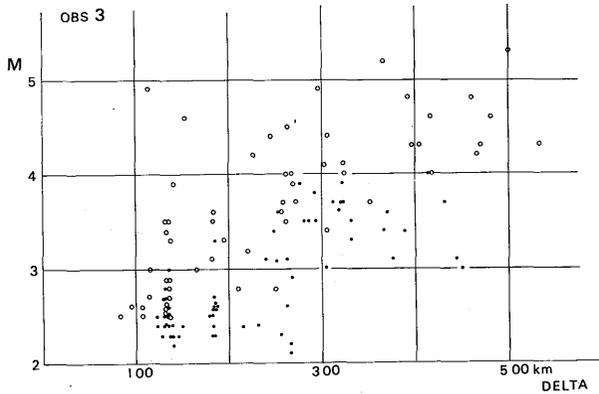


図 5.3

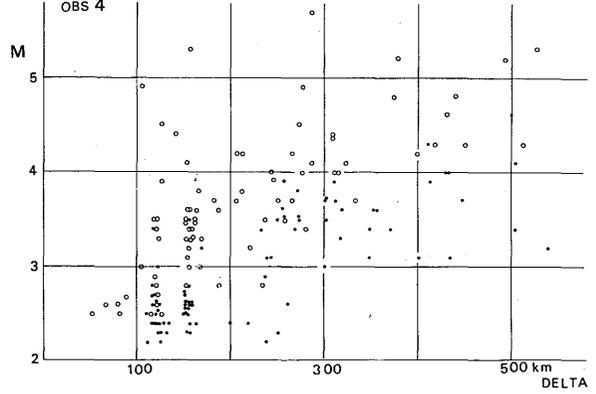


図 5.4

図 5.1～5.4 海底地震計のP波検知能力の評価に使用した地震のマグニチュードと震央距離との関係。
 図中白丸は各海底地震計が検知した地震、黒丸は検知できなかった地震を示す。

Figs. 5.1～5.4 Relation between the magnitude and the epicentral distance of all earthquakes that occurred around each site of the OBS, by which the detection capability for the P wave arrival was evaluated. Open circles show earthquakes which were detected with certain accuracy, and close circles those that were not.

能力相互にはほとんど差がなく、しかもそれぞれの検知能力は陸上における67型地震計よりもかなり高いことが見られる。このように観測点相互の検知力に殆んど差のない高感度地震観測網の展開が容易なことは海底地震計の一面の特長であり、この海域の小地震活動をほぼ均一に検知できることを示す証拠として、地震活動の均質な調査を可能ならしめるといった面からこのシステムの地震活動監視能力を評価することができる。

一方、前掲の図から各観測点の平均的な検知能力は $M \geq 3$ の地震を捉える限界は180 km程度と読み取れる。

地震検知力に関する市川(1969)の研究によれば、ある地震観測点が正確に初動を捉え得る地震の規模と震源距離との関係は次の経験式で与えられる。

$$\log \Delta = \frac{1}{258} (M + 1.38 - \log A)$$

ここに $A = P$ 波振幅 (単位ミクロン)

$\Delta =$ 震央距離 (単位 km)

$M =$ マグニチュード

ここで、記録紙上0.5 mm, 0.3 mm, 0.1 mmまでを読み取り可能な信号と仮定し、海底地震計の倍率を1万倍に設定したならば、上式から $M \geq 3$ の地震初動を捉えることのできる震央距離は、各読み取り限界の設定値に対応して、それぞれ約160 km, 200 km, 300 kmと算定される。

ところが、前出の図5.1~5.4からはこのシステムに組込まれたそれぞれの地震計が $M \geq 3$ の地震を捉える限界が180 km程度と判断されるので、もしも市川の式がこのシステムにも適用できるものならば、験測者は読み取りの最低値を0.3~0.5 mmとした場合の能力に相当する。ところが、この調査結果は験測作業者が可能な限り小振幅をも読み取る努力をして得た験測値を使用しているもので、0.3 mm以下の震動をも利用した調査結果に相当しなければならないはずである。従って、上記の180 kmというこの検知能力の評価結果は、この装置が陸上で稼働したと仮定した場合の期待値には達していないものと判断するべきであろう。

勿論、この判断は単数の験測者による結果をもとに調査した結果の検討であるから、統計的な裏付の薄弱な判断と評価されてもやむを得ない面はある。しかし4点の観測点からそれぞれ200個を越える験測結果を得て、それらを処理した結果を検討したのであるから、この判断結果に根拠があるかないかは考察しておく価値はある。

前記のように、装置本来の性能と観測点の地震検出能力との関係にずれが生じる現象は陸上観測点でもよく見られるが、それらの原因は主として観測点の地質或は地殻構造面からみたマクロな立地条件によることが多い。

このような観測点の立地条件は海底でも同様と判断しても問題はないと思われるが、この影響が上記の現象の原因のすべてとは思われない。むしろ海底地震計の場合には海底堆積層の影響が無視できない

のではないかと思わせる状況証拠が二、三挙げられる。

即ち、海洋底で特に平坦な地形を選んで、そこに布設された海底地震計はほとんどの場合に軟弱な厚い堆積層上に設置されているものと想像される。

軟弱な地盤は短周期の振動成分の伝播を阻害する一方、特定の入射面、周期のSH波を増幅する作用があることはよく知られている。従って、S波に比べ相対的に短周期成分の卓越したP波部分の振幅が期待値よりも小さくなる現象を、S波によって地震はピックアップできてもP波の読み取り精度が悪いといった験測が多い原因としてとりあげて、理解しても不合理ではない。

今後、この観測システムの中ではこの種の検討に最も適した特性を持つ中周期成分を磁気テープに収録して、この現象をスペクトラム面から分析調査し、海底地震計の地震検知力について問題点を整理していくべきであろう。

一方、この観測システムでは前述の現象とは別個に、特定の地域（例えば長野県南西部あるいは伊豆東海岸）の浅発地震は特に初動が小さいといった現象もあるが、他方では特定の地域に発生する地震に対しては、期待以上に大きな振幅で振動を捉えているといった全く逆の現象も確認されている。また、真南に近い方位から到来する地震波の振幅は、震央距離の相違による影響を考慮しても陸上観測点より大きく、又逆に北方から到来する地震波は平均して振幅が小さいといった傾向も確認されている。

これらは、前にも述べたように地質あるいは地殻構造の影響として陸上の観測点にもよく現われる現象の一つと思われるが、この影響で震源決定能力の均一性は多少失なわれる可能性があり、地震の空間分布が変形されて認識されるおそれがある。このことは地震活動度のデータを発表する場合、特に遠州灘に存在すると言われる地震空白域に関連した議論には注意する必要があることを意味する。

以上、短周期高感度成分に期待される能力について観測結果を紹介したが、中周期あるいは長周期成分については特別とりあげるような観測結果は得られていない。しかし、双方の成分とも脈動が急激に増加する帯域（0.5 Hz）をカバーしているので、脈動の振幅が大きな時期には、それぞれの成分は最低感度による可視記録でさえも、読み取りは困難となることを経験している。従って、次期計画に際しては感度設定条件については再考を要するという結論をこれらの成分に対する試験観測の成果として報告しておく。

1.2 特異な記録について

その1) 水平動地震計の記録紙上で初期微動に比べS波の振幅が平均以上に大きな地震数が多いこと。

特殊な地震を除き、S波がP波に比べて振幅が大きいことは、理論的にも、また観測事実としても周知されている現象であり、その振幅比は特殊な地震計を使用しなければ、通常6～7以下の場合が多い。

ところが、このシステムで得られる高感度短周期水平動地震計による記録を験測していると、S波は数mm以上振れているが、初期微動は0.3mm以下でほとんど追跡できない地震が頻度高

く記録されていることに気付く。

通常このような記録を得た場合には、発震機構に関連した方位性によるものと判断する 경우가多いが、このシステムではその発生頻度の面から他の原因が存在している可能性が強い。

即ち、海底地震計の設置点では厚い堆積層の影響で短周期振動成分の伝播が悪くなっているのではないかと思われる前出の考察結果の延長として、同じく厚い堆積層の影響として解釈することができる。

地震波伝播速度の低い堆積層上に設置された地震計が捉える短周期の地震動は、大きな入射角で 20° 以下、小さな場合では 10° 程度となり、P波の水平成分は入射成分の $1/3$ 以下、場合によっては $1/10$ 以下の振幅となる。一方、S波の水平成分は入射角が上記の条件ならば、入射成分の95%以上が水平振動となり、もともと入射の量で差のあるP波とS波の水平振幅比は、この部分で更に拡大されている可能性が強い。

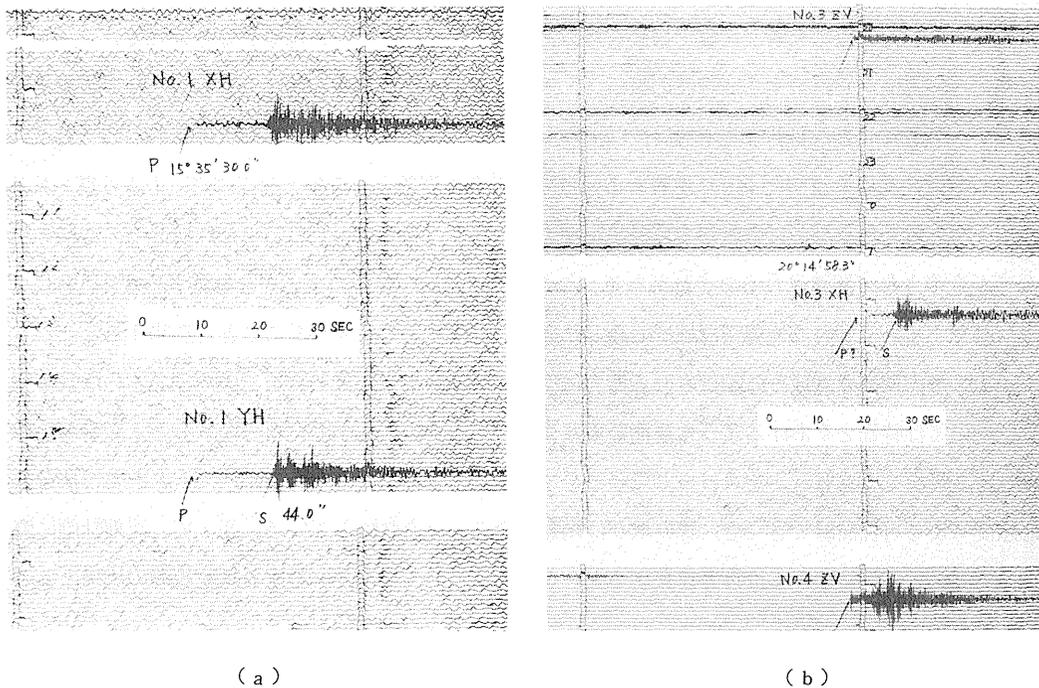


図5.5 P波とS波の振幅比が異常に高い地震波形の例。この種の記録が多発すれば、地震が存在することは確認できてもP波が検知できない地震の数が増加する可能性を示す。

Fig. 5.5 Records of earthquakes which show an anomalous amplitude ratio between P and S waves. Such earthquakes appeared occasionally.

しかし今回の試験観測では、解析に使用した資料並びに解析過程から、上記の解釈を裏付けうる決定的な材料は得られなかった。従って、なるべく早期に本庁で得られる充実した観測資料を用いて、スペクトル面での解析あるいは走時残差の解析等を行い、この特異な記録に対する評価の確立をはかるべきであろう。なお、参考のためここで採りあげた地震の典型的な記録例を図5.

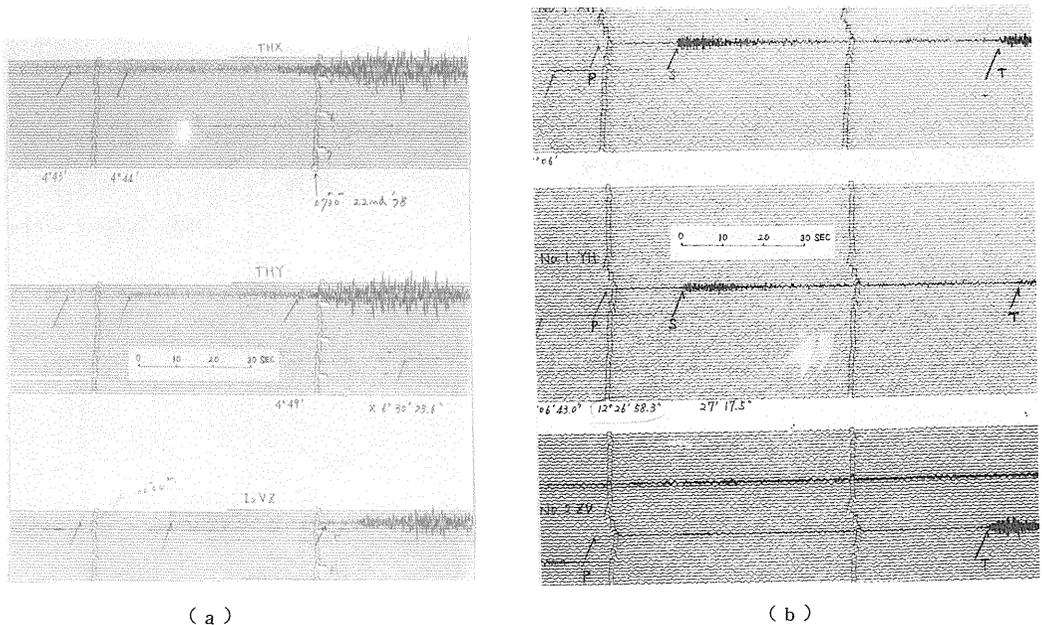
5に示す。

その2) 水中音速で伝播して海底地震計のみに捉えられている独特な雑音

海底地震計で得られる地震記録の一部(主として海域の浅発地震)にP波, S波あるいはそれらの副次振動よりもはるかに遅れて到達する音速伝播波(Tフェイズと呼ばれ, 特定の周波帯で優勢な振動成分)が発現することはよく知られている。

この波動に関しては, その詳細な伝播特性あるいは発生のメカニズムが解明されていないから, 地震が発生してもT波が現われるかどうか, また現われる場合にはその振幅並びに周期はどうか等を正確に予測することはできない。更にこの波形は, 遠震の初動と類似して、地震の識別あるいは検測作業の妨げとなるので, 海底地震の常時観測を業務として実施するには, 検測上の雑音として除去するためにこの波の特性を整理して識別法を確立しておく必要がある。幸い, このシステムは一種のアレイ観測の効果を併せ発揮することのできるシステムとして構成してあるので, 4地点に到来する時間差を容易に検知することができる。T相は, 伝播速度がS波の半分以下なので, 4地点に到来する時刻の差もS波の場合に比べ2倍以上となり, 3地点以上の記録を同一紙上で記録すれば, T相はその時刻差の大きさから容易に識別できる。

また, T相は地震の震源位置によって波形にも特長があるので, 観測例の蓄積を待って波形の標本作成をはかり, 波形の比較対象によりT相を識別し, 地震の検測から除外する手段の一助とすることを考慮すべきであろう。図5.6に観測されたT相の一例を示す。



(a)

(b)

図5.6 典型的なT波の記録例

a図は種子島付近に発生した群発地震に際して得られた記録。この地域に発生した地震に対してはP波振幅に比べかなり優勢なT波が出現することを示す。

b図は震央距離が200km以下の海域で発生した地震(震源不明)に対して得られた記録。海域に発生した地震ではP波・S波に続いてT波が観測される可能性があることを示す。

Fig. 5.6 Examples of seismograms with typical T waves.

図のように、地震発生に付随して伝播するT相の外に、この観測期間中の特定の時期には、その波群をT相と断定して良いか否かを判断しかねる振動群が頻繁に記録された。それらは発生の様相に規則性が見られるので、人工的な現象である可能性が高い。

今後この発生源が何なのかを考察し、T相について解明されていない性質、例えばT相がどのような条件で、どのようなメカニズムで、また振動源とどのような位置関係で発生するか等についての研究のための資料の一部として役立つであろう。図5.7にこの振動の記録例を示す。

一方、海底地震計で得られる特定の地震の記録の初動の直後には、海面からの反射波が、初動と類似の振動として出現する。

この波動も、陸上の観測点の記録の検測のみを扱ってきた観測者から見ればなじみの深い陸上の観測記録には原理的に発生しえない波動であるから、雑音の増加と評価せざるを得ない。しかし、試験観測期間中の観測例から判断するに、地震波の入射角にかなり敏感な性質を示すので、震央距離を反映する信号として震源要素の決定に際して補助的に使用することができるものと思

われる。今後、資料の蓄積を待って調査すべき事項の一つと思われる。図5.8にこの振動の記録例を示す。

最後に、主として沿岸に布設される海底地

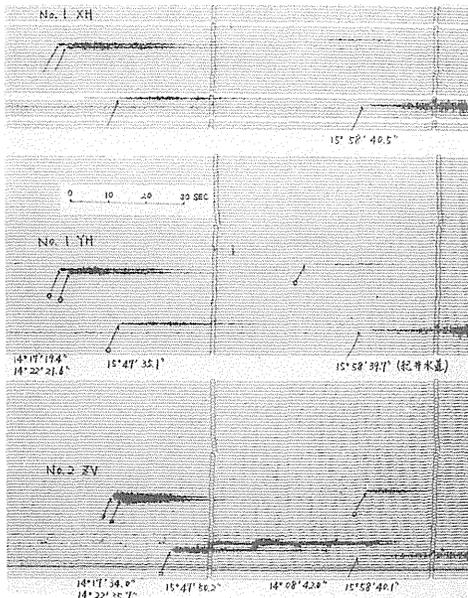


図5.7 S波の伝播速度に比べかなり遅い速度で伝播する正体不明の波群の記録例。この時間帯この付近では、この現象に関連すると思われるような地震・火山活動についての報告は得られていない。

Fig. 5.7 Examples of records with strange waves which show fairly slow propagation and whose origin cannot be identified, no relevant report being available in spite of their certain appearance.

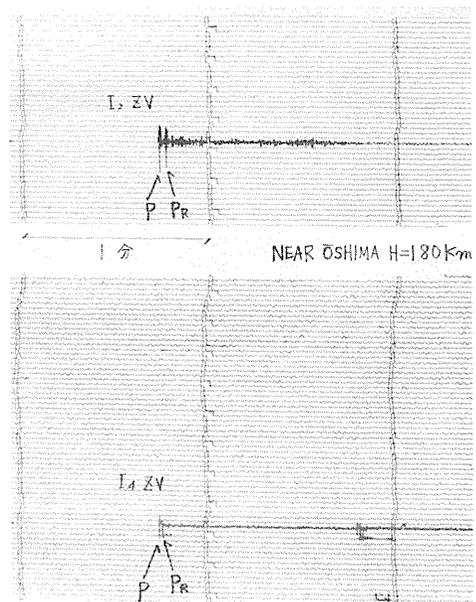


図5.8 海面から反射したP波が出現した地震記録の一例。水深に比例した時間を経たP波の後部にP波と相似の反射波が見られる。

Fig. 5.8 Example of the record with reflected P wave at the sea surface.

震計にとって最も有害な雑音として、船舶通過に伴う発生雑音についての考察結果を述べる。

計画当初には、大型船が付近を航行する場合には時間単位で雑音が持続し、その間の観測は不能となるといった情報があった。この情報は船舶が海底地震計から10～20 kmの範囲を航行すれば、観測が不可能となるおそれがあることを意味し、御前崎の沖合のように船舶の航行の頻繁な海域では、その影響で観測資料が有効に使用できない観測点が出現するのではないかと懸念された。

しかしながら、前述の情報は研究観測として短周期の超高感度地震計を使用した場合の状況であり、設置点の水深あるいは測器の特性によってはその結論が変化することも期待できた。このような観点から、試験観測では速度計成分で観測する場合と変位計で観測する場合について船舶航行の影響を比較し、次のような結果を得た。

- 上下動速度計成分（感度1 cm / 1 m kine）の記録に対する船舶航行による影響は、最大記録振幅で2 cm、振動継続時間が最大20分といったかなり大規模な雑音に限定しても、各観測点に1日平均1～2回の頻度で出現する。
- 上下動変位計成分（倍率1万倍）の記録に対する船舶航行による影響は、最大記録振幅で1 cm、振動継続時間を最大で5分といった大きめの雑音に限定すると、各観測点に月に1～2回程度出現するにすぎない。
- 最も船舶航行の頻繁な第3中間点でも、その影響でP波の検測が困難となる期間は、上下動速度計成分で1日平均約1.5時間、上下動変位計成分では1日に20～30分程度と評価できる。

以上の結果をまとめると、船舶航行による雑音の大きさ並びに観測を妨害する振幅の継続時間は、予想を下まわり観測の大きな障害とはならないものと評価できる。

なお、船舶航行に伴い発生する雑音の波形はいずれの観測点にも共通した特長が認められるので、可視記録の検測では自然地震と判別を誤るおそれはまずないと言える。しかしながら、簡易なトリガー装置では、やや遠方で発生した地震との判別が困難であり、不必要な信号の収録の原因となることが懸念される。従って、トリガー回路を起動させるための信号としては、この雑音発生が少ない変位計成分を使用することが望ましいと言える。

なお、図5.9にこの雑音が最も頻度高く記録される速度計成分の記録とそれに対応する変位計成分の記録を、同一点で速度計成分には出現しているが、変位計成分には記録されていない例として示す。

その3) 海底下における脈動

定常的に存在する雑音の振幅が、システムの地震検知力を左右することは言うまでもない。一方、日本近海での海底下で観測される脈動の特性については、海底地震計による数多くの観測が行われているにもかかわらず、十分に把握されているとは言えない状況である。従ってこのシステムの検知力を高め、しかも信号のダイナミックレンジをより有効に使用するためには、試験観

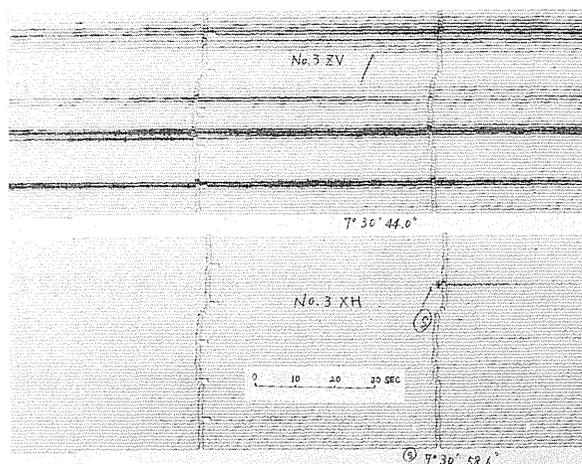


図 5.9 装置の直上を通過する船舶によって発生された雑音の記録例。この記録では、高周波域で感度が相対的に高い速度計成分に、かなりの振幅と継続時間で雑音が見られる。一方、低周波域で速度計と感度を同じく設定された変位計成分の記録には、ほとんど雑音が見取れない状況もこの記録から読み取れる。

Fig. 5.9 Response of two types of the seismometers to the most frequently appearing seismic noises which are generated by vessels passing over the OBS. The velocity seismometer seems to be sensitive to them, but the displacement seismometer hardly records them, which should be caused by the spectrum of them.

この図では、各観測点の記録振幅に類似が見られるので、沖合から到来する風波と海岸で反射してくる風波の干渉により、ごく限られた領域で脈動が発生するという、三東（1960, 1963）が主張するメカニズムを否定する資料となりうる。また、どの観測点の記録にも気象状況によって急激に増減する短周期成分が含まれていることも見られるので、海底の脈動は陸上の脈動とは異なり、かなり沖合の不特定の場所で従来の研究による結論とは異なったメカニズムにより発生していると解釈した方が良いように見える。

一方、脈動の消長は陸上と同様、直接的に気象状況に対応するように見える。しかし、その対応の様相には大別して2通りあり、布設海域に限定された擾乱期と、地域的にもっと大規模な広がりを持つ擾乱期とでは脈動の様相が若干異なるように見える。

図 5.1 1 に、御前崎測候所における風力・波浪の観測データと先端装置で記録した脈動の振幅変化との対比の一例を示す。御前崎測候所では、地形的に東・西・南の3方向には風の運動に対する障害がないので、この風向・風力の資料は遠州灘洋上の風向風力をかなり正確に表現しているものと考えられる。従って、この図は海底の雑音と直上の海面の風力との直接の関係を示すも

測により海底雑音の状況を見極めて、システムの常用感度及び周波数特性の決定に反映させる必要があった。また、脈動の発生源の研究は古くから採り上げられ、評価の高い2～3の研究成果も既に存在するが、それらはすべて陸上観測による定性的な検討にとどまった内容と言える。

このシステムは、海岸から100 kmの沖合までほぼ等間隔に展開した4地点の海底地震計から構成されているから、従来の研究で脈動の発生源と想定されているいわゆる「海岸近くの特定の場所」にいずれの地震計かは接近するはずである。従ってこのシステムは、その立地条件の有利さによって発生源の定量的な検討に必要な資料を提供し、従来の研究成果を再評価するのに役立つものと思われる。

このような観点から脈動の成因を視覚によって確かめるために、各観測点の脈動振幅の同時比較を示したのが図 5.10である。

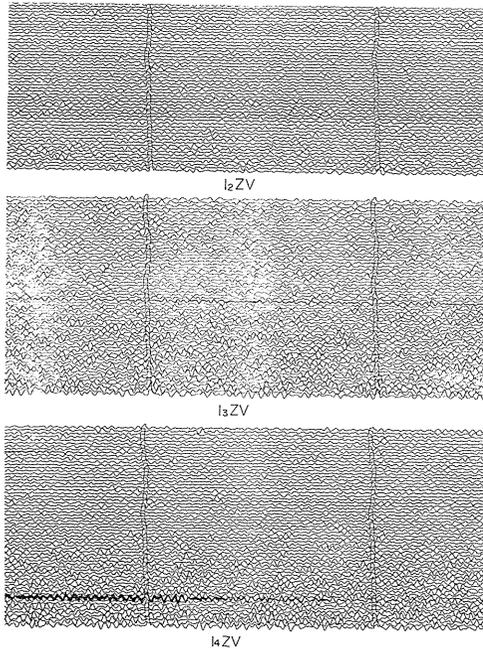


図 5.10 3地点に設置された中間点装置感度成分による脈動の同時記録例。この記録から観測点相互の脈動の振幅に類似が見られる時間帯と、相互の脈動振幅に大差が認められる時間帯の存在がはっきりと読み取れる。この現象は脈動の発生源に関して重要な情報を提供している。

Fig. 5.10 Simultaneous record of the intermediate apparatus installed in three different sites, in which different characteristics of microseisms can be seen. Upper part of each record shows homogeneous microseisms, but not the lower part. This perhaps means that their origin moves according to the sea condition.

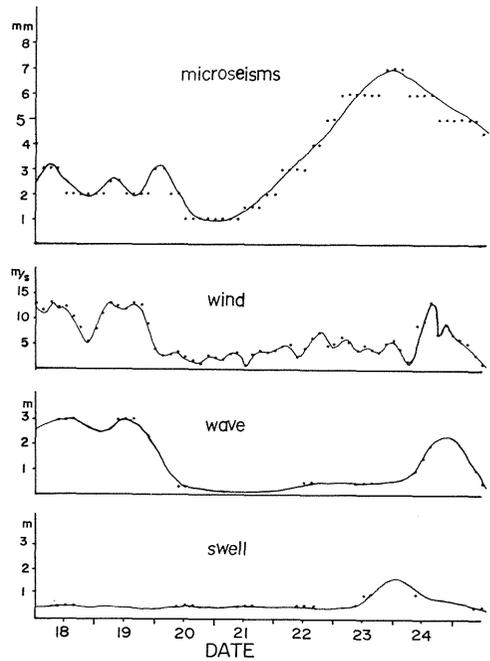


図 5.11 脈動の発生に影響を持つと思われる3つの観測量(風速・波高・うねり)と脈動振幅の変化との比較図。この図から、観測される脈動には風速・波高と関係の深い成分と、主にうねりに関係する成分との2種類の成分が混合していることがうかがえる。

Fig. 5.11 Comparison of three kinds of phenomena observed at Omaezaki Weather Station and the corresponding microseisms.

のといえる。図から、動脈の消長のパターンは風を介とする海況の変動との相関が見られるが、その振幅の大小は直接風力と関係のない様相も同時に判読できる。

このような現象は、脈動の消長が地震計直上の気象のみによって左右されるのではなく、例えば 1,000 km 単位の気圧配置或は低気圧の移動等、地域的に大規模な気象条件によって脈動振幅が変化するという、従来の脈動に関する研究結果と調和的である。しかし、4観測点で振幅に大きな相違がないという現象を併せ考慮すれば、発生の場所或はメカニズムについての従来の研究結果を完全に支持できる現象ではない。今後もっと詳細に現象の特性を分別整理して、脈動発生のメカニズムを正確に解明し、海底における地震観測の効率向上に役立てる必要がある。

以上まとめると、システム設計の時点では脈動の成因に関する従来の研究成果を参照して、脈動あるいはそれに類似した雑音の振幅は、海岸線からの距離にほぼ比例して小さくなるということを期待して先端装置を他の中間点装置よりも高感度で稼働させるという方針を決定し、装置を設計製作している。

ところが試験観測の結果からは、脈動及びそれに類似した雑音は予想に反して、どの地点でも同振幅で記録されることが確認されている。この事実は先端装置を他に比べて高感度で稼働させることが不可能であることを意味し、更に装置の製作に際して先端装置の特性を他に比べて高くする根拠は全くないことを明らかにしたことになる。

2. 津波計の試験観測

津波計として、長周期の海面昇降運動を捉えるには、海面に測器を浮かべて直接水の運動を捉える方法と、海面以外に不動点を設定し海面との相対運動を捉える方法の2つの方法がある。このシステムでは、海面にセンサーを浮上させる方式では信頼性が保証できないので、検討から除外された。一方、海底から海面の昇降を観測するには、測距方式と感圧方式とがあるが、これも信頼性への配慮から測距方式は検討から除外された。

設計に先行して、感圧型で長周期海面変動を捉える測器の方式として、水晶式・弦振動方式・磁歪式・ペロースを使用した差圧式の4方式が提案され検討された。当時は、検討の対象となったこれらの方式のいずれにも、長期間連続で200気圧を越える環境下で稼働させた使用例がなかったので、特性の優劣と類似使用実績の有無の両面から評価して、最も難点の少ない水晶式の採用が決定された。しかし、このセンサー部の入手は輸入に依らざるを得なかったため、他のパーツとは異なり製造の管理まで介入することは不可能となり、入手後に特に綿密な特性の測定を課すことが必要となり、それは忠実に実行された。しかしながら、200気圧の加圧が可能でしかも温度を0.1℃以内に安定に保持して長時間の試験を行うことのできる試験槽は国内には存在しないので、このセンサーは特性に未知の部分（例えば分解能或は安定性）を残したまま布設されてしまった。従って、2～3の未確認特性については試験観測による評価を行い、実績として確認を得ることが必要であった。

現在このセンサーは水深約2,200mの海底に設置され稼働しているが、このような深海底では、周期1分以下（波長にして500m以下）の海面の上下運動には原理的に感応できない。一方、深海底で海床が昇降運動を行えば、わずかな変位量でもかなりの水圧の変化としてセンサーが感応するので、変位量としては比較的微小な地震の波動を捉えることも期待し観測を実施した。

観測出力は25mm/hourの打点記録により実施し、下記の成果を得た。

1) 津波計が地震波動を効率よく捉えること。

昭和53年12月6日択捉島付近を震源とするM_s7.7の地震は、津波を発生しなかった。しかし津波計の記録には地震波の到来時刻に水深10cmの変化に相当する振動が記録された。もしも津波計が海床の上下変位を記録したと仮定すれば、この量は陸上の地震計あるいは歪計で得られた地盤の振動量に比べて桁は

ずれに大きい。このことから津波計は、地震による海床の運動を水圧の変化として捉えたものと判断される。

2) 津波計が地殻変動観測器としても使用できること。

津波計の記録に発現する環境雑音は理論通りに低いことが確認された。即ち、潮汐による水位の昇降分を平均処理で除去した後のデータには、安定した長期1方向の偏傾成分が見られるが、それ以外の変動成分は陸上における検潮観測に比べて1桁低いことが、データ処理によって明確となった。図 5.12 に御前崎測候所の検潮記録と、この津波計のバックグラウンドノイズの比較図を示す。最近2地点間の検潮記録の差をとることによって雑音を消去し、2地点間で相対的に発生している地殻上下変動を捉える観測法が実用化されているが、津波計が現在の安定な稼動を持続できるならば、単独の観測点で2地点での検潮観測と同等の観測を分担する能力を発揮することが期待できる。

3) 津波計の分解能

測器の分解能は装置自体から発生する本質的な雑音によって規定される。従って、本装置では感圧変換器として使用する水晶発振子と、それを回路素子として構成される発振回路の短期安定度によって、分解能が定まる。センサーに使用した水晶のカットの種類及び発振回路の構成に対する検討により、発振周波数の短期安定度は 10^{-9} 程度と評価された。一方この発振回路では、水晶の周囲の圧力が 50mb (水深変化 50 cm 相当) 変化すると、5 MHz の発振周波数が 1 Hz 変化するという試験結果が得られているので、 10^{-9} の安定度を換算すると 0.25mb の圧力変化を捉え得る事が期待できる。しかしながら、気圧変化を 0.25mb 以下、温度変化を $1/100$ °C 以下に長時間保持することのできる試験槽が得られなければ、この分解能は確認することはできない。

このような事情から、この津波計の分解能は海底に布設した装置によってはじめて確認されるはこびとなった。

正規の観測用復調器の回路は、最小分解能が 2.5 cm となるように構成してあるので、この性能を確認するには能力が不足した。そこで個別の高性能カウンターと D-A コンバーターを海岸中継所に持ち込み、試験観測を実施した。

図 5.13 にこの臨時観測で得られた記録例を示す。

この結果、5 mm の海面変動を正確に記録する能力が直接の目視でも確認され、1 mm の分解能を期待

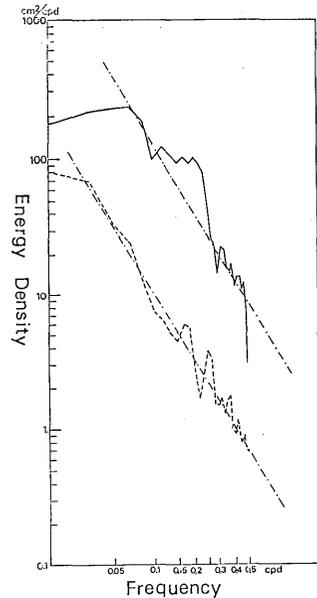


図 5.12 海岸の検潮儀で得られた海面の上下変動（潮汐成分を除く）と、その地点から約 110 km の沖合水深 2,200 m の海底下の津波計によって得られた海面の上下変動（潮汐成分を除く）のスペクトラムの比較図。この図から、海面変動の観測を利用し、かなり短期（10~50日単位）の地殻変動を調査する場合には、津波計の観測量の雑音レベルが海岸における観測量に比べ約 1 桁低いことがうかがえる。

Fig. 5.12 Spectra of the sea levels observed with the tsunami-meter in the deep sea (broken line), and with the tide gage at the coast (solid line).

しても良い証拠がえられた。

この事実は、装置単体の分解能に関するメーカー仕様がかなり控え目の性能を提示していたことを意味する。このことから、センサーメーカー仕様に安全係数を配慮して最小分解能を能力以下に評価して一連の装置を設計してしまった今回の回路構成は次期計画では再考すべき事項の一つと思われる。

図 5.14 に津波計の平常時の記録と、海底にまで温度の擾乱が発生した時の記録を対比させて示す。図から津波計が安定に潮汐を記録すると同時に、深海底でも海水の運動が存在することが読み取れる。

なお、記録に現れるこの種の現象の判定には、50年度に伊東で行った海上実験の成果（関連研究5）が有効に役立てられた。

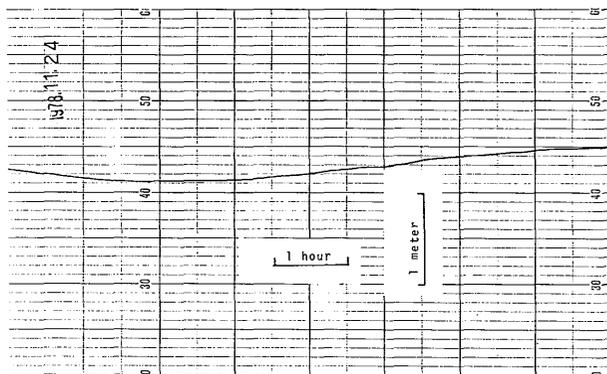


図 5.13 分解能確認のための試験観測による記録例。
この記録は最小ディジットを5mmに設定してD-A変換したもので、この記録上に5mmを超える階段状の不規則波形が見られないことで、津波計の分解能が明白に5mmよりも微細であることが示された。

Fig. 5.13 Example of the record to examine the resolution of the tsunami-meter. By this it has been ascertained that the practical resolution of the tsunami-meter is better than five millimeters.

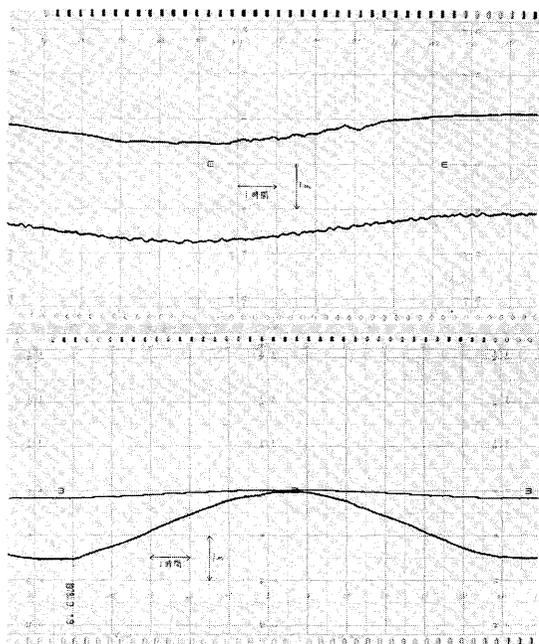


図 5.14 試験観測期間に得た御前崎測候所における津波計監視記録の一例。上段は津波計の周辺温度の変化による擾乱を捉えた特殊な記録例を示す。2段目は御前崎の検潮記録を示すが、これには短周期の変動が見られる。3段目は1/8に感度を低下せしめた海面位の長期監視用の記録、最下段に定常的に安定して得られている典型的な津波計の監視記録例を示す。

Fig. 5.14 Example of monitor records at Omaezaki Weather Station. The top trace is due to the standard tsunami-monitor to show the typical noise which was caused by the temperature change around the tsunami-meter. The second trace is the signal of the tide gage at Point Omaezaki to show directly similarity with tide and difference from noise of the tsunami-meter. The third shows the low-magnification component of the tsunami-meter for long-term monitoring, and the lowest is a typically stable record of the standard tsunami-monitor.

3. 給電電圧変化の監視観測

このシステムは、完成された技術と実績を尊重し、可能なかぎり利用する方針で開発された。

従ってこの給電系には、最新の海底中継器の方式を踏襲する事が決定され、直流定電流の供給方式による給電が行われている。

直距離 110 km (ケーブル長 158 km) に及ぶ広大な海域に、ケーブルで連絡して展開された 4 地点の装置に対し、直流の給電を行う場合には、その給電電圧は種々の地球電磁気学的或は海洋学的な現象による擾乱を受けることは避けられない。

即ち、海底中継器に関連した文献 (Axe 1968) によれば、海洋潮汐・潮流・磁気嵐を含む地磁気の変化に対応してケーブルに誘起電圧が発生するので、給電装置はその電圧を補償できるように構成しなければならないことが記述されており、その誘起電圧についていくつかの例が報告されている。

このような理由から、このシステムの給電装置は、それらの擾乱による誘起電圧を補償して定電流を保つことができるよう、平常時の供給電圧と同量即ち規定電圧の 2 倍の電圧までは、自動的に変化させることによって供給電流を一定に保つことができるように設計されている。

一方、このシステムの海底部の電気回路の一部は、 $1 \mu\text{V}$ 以下という低レベルの超低周波信号を対象として送出信号が作成できるように動作しなければならない。従って、その回路に電源を供給する装置は、出力電圧に含まれる雑音の影響による主回路の機能低下が発生しないように、高精度な制御機能と強力な雑音の抑圧を必要とする。

一方海底部装置は、受電した給電を内部で更にツェナーダイオードにより定電圧に変換して回路に供給しているが、この方式によれば装置に流入する電流の大小によって、ツェナーダイオードによる制御電圧が微妙に変化し、その変化はその電源を使用した電気回路の信号に変換されてしまう。従って、このシステムに使用した給電装置には、高度な制御回路を採用し、特に厳密に出力電流の制御を行なわしめている。

試験観測では、地震計成分の信号に現れる雑音を評価する為にこの給電回路の制御状況と発生雑音への影響を調査する必要があった。

給電電流の日単位での変動量は、給電装置に付加された監視出力をデジタルマルチメーターで精度良く測定することにより検定され、期待以上に精度良く制御され $\pm 0.005 \text{ mA}$ 以下の変動にとどまっていることが確認された。このことは動作抵抗が約 10Ω のツェナーダイオードによる安定化電源に $\pm 50 \mu\text{V}$ 程度の変動をもたらすことを意味するが、地震観測成分の回路雑音の評価の結果、この変動による影響は海底部装置に使用した増幅器の発生雑音と同程度か或はそれ以下であり、雑音設計にほとんど影響のないことが確認された。

一方、海底ケーブルを含む海底部装置は、海岸近くの数 km の区間を除く大部分が温度の安定した環境下に設置されているものと予想される。従って、接地抵抗の変化を除いては、印加電圧を変動させる要因はこの給電ルートには存在しないものと考えられる。ところが試験観測期間の給電電圧の監視記録に、 0.1 V 程度ではあるがかなり規則的な変動が発見された。

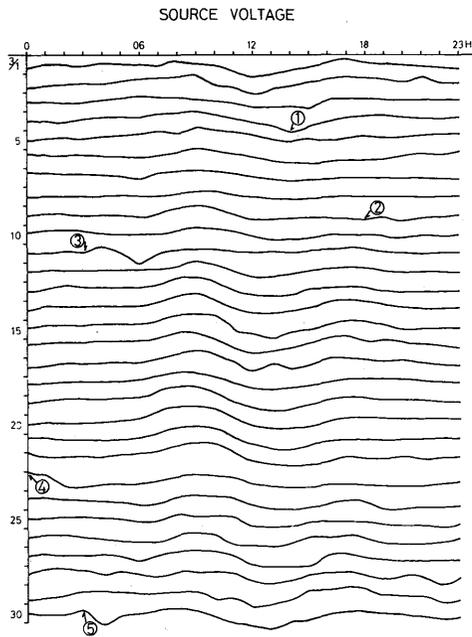


図 5.15 試験観測期間の任意の1ヶ月間の給電電圧変化の状況。図中に数字を記入した点は、それぞれ柿岡の地磁気観測所で検出した磁気嵐の発生時刻に対応する。

Fig. 5.15 Daily change of the supply voltage for one month. Marks in the figure correspond to the marks in the following figures, which show the onset time of the magnetic storms.

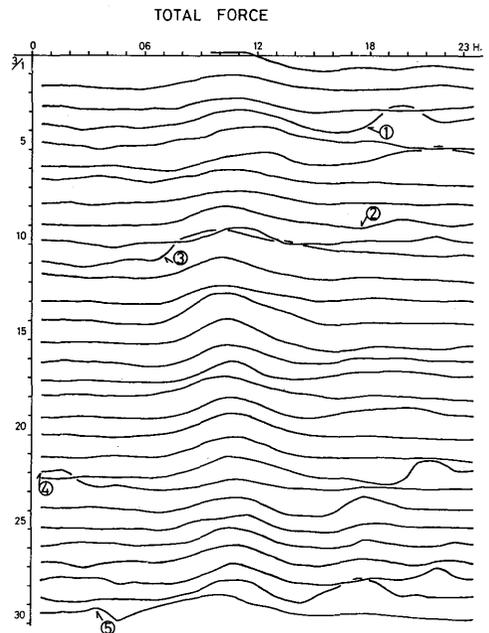


図 5.16 試験観測期間の任意の1ヶ月間柿岡で観測された地磁気全磁力の日変化の観測結果。図中に数字を記入した点は、磁気嵐の発生を示す。

Fig. 5.16 Daily change of the total force of terrestrial magnetism for one month.

図 5.15 ~ 5.17 に、給電電圧の変化の一例として、昭和54年3月のデータを柿岡における地磁気総磁力・地磁気偏角の観測結果と並べて示す。図 5.15 と図 5.17 には、毎日8時から10時にかけて給電電圧と偏角の観測量に極大が現れることが読み取れる。このデータを使用して自己相関係数を計算したところ、24時間の周期性がはっきりと検出された。図 5.18 にこの相関図を示す。

このことから、この変動の主要因が半日周期或はイレギュラーな変動を行う潮汐及び潮流によるものではないとは言える。

しかし、図 5.15 から気付くように、日周期の振幅はかなり不規則であり、この図からだけでは給電電圧の変化が地磁気の変化のみに対応しているとは断定できない。

しかしながらこの毎時のデータを1ヶ月間加算或は平均して24時間周期の成分を強調すると同時に、他の雑音成分を減殺すれば、図 5.19 のように地磁気の変化と給電電圧の変化は、微細まで一致していることがわかる。また、1ヶ月の毎時のデータの最大・最小値の分布状況も非常に酷似していることが見られる。このことから、給電電圧を変化させている主要因は地磁気の変化であることが想像できる。今後、こ

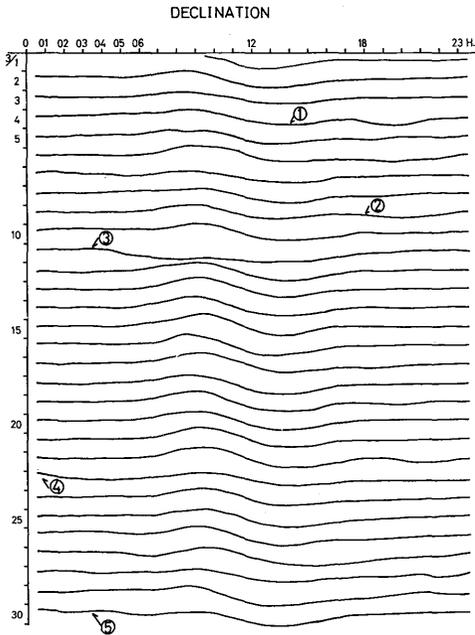


図 5.17 試験観測期間の任意の1ヶ月間柿岡で観測された地磁気偏角の日変化の観測結果。図中に数字を記入した点は、磁気嵐の発生を示す。

Fig. 5.17 Daily change of the declination of terrestrial magnetism for one month.

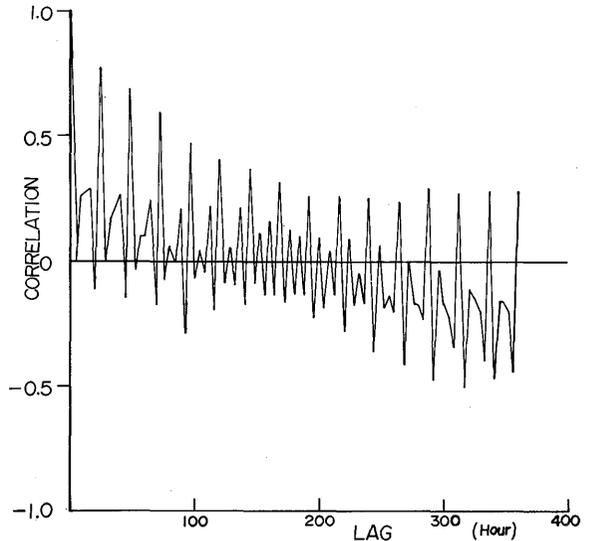


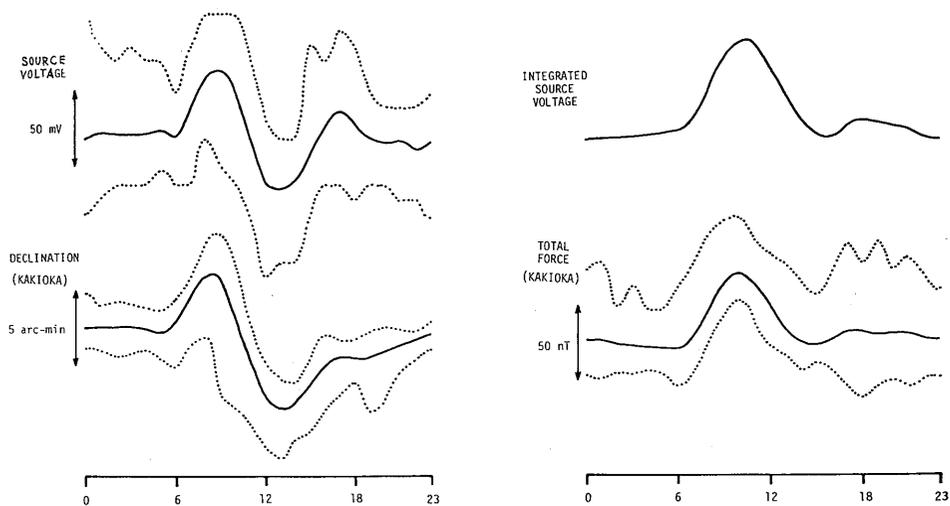
図 5.18 給電電圧変化のオートコリレーションの計算結果。図から24時間周期の現象のみに有意な相関を認めることができた。

Fig. 5.18 Auto-correlation analysis for the supply voltage change, in which no significant periodicity can be seen except the daily one.

の種の観測の補強を行って、この変動を含む給電電圧のそれぞれの変動が何にどう対応しているかを見極める必要がある。

ついで図 5.20 に、この監視記録に現れる短周期変動の観測例を示す。ここで、図 5.20 a は御前崎測候所で雷の発生が確認された時に得られた記録であるが、雷の影響がひげ状に見られる。ごく最近の研究によれば、海底中継器等長距離を隔てた2点にアースを設置するシステム（このシステムを含む）では、落雷に際して一方のアースの電位が瞬間的に上昇し、他方のアースに電流を流入させることによって装置が破壊すると思われる現象が発見されている。このことは、従来の誘導雷による被害防止とは異った対策を必要とすることを意味する。今後被害の有無にかかわらず、この記録を整理し、システム全体の雷被害防止策の研究の一環として調査を進めるべきであろう。

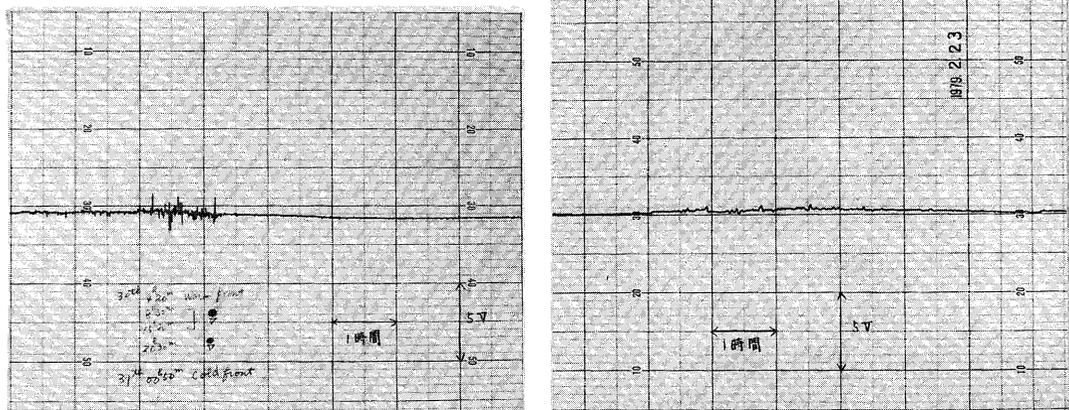
一方図 5.20 b は、月に1~2度の頻度で記録に見られる現象の一例である。まだ何を反映した変動なのかは見極められていない。しかし、この現象が記録された場合に、地震計記録には特別な異常は認められていない。従ってこの現象は、給電装置系の異常とは考えられない。このような理由から、今後資料の蓄積或は他の観測量との比較対象を積極的に進め、この変動が何を反映した現象なのかを見極めておけば、



Mar. 1~31, 1979 (JST)

図 5.19 毎時の観測値の1ヶ月平均値を使用した給電電圧及び地磁気の日変化パターンの比較図。この波形の類似から、給電電圧の変動の主要因が地磁気の変化にあることが確認された。なお、図中の破線は各時の最大・最小観測値を示し、給電電圧積分値は観測値の数値積分を示す。

Fig. 5.19 Comparison of the daily pattern of supply voltage change and that of terrestrial magnetism. Left part shows similarity with the averaged voltage change and the declination component, and the right part similarity with the integrated voltage change and the averaged total force. Dotted lines show maximum and minimum data at each hour in the month, in order to show the cause of the data fluctuation indirectly.



(a)

(b)

図 5.20 給電電圧の監視記録に出現した特異な現象の例。a 図で示す現象は雷の発生に関連して出現することが確認されているが、波形・波高等についての解析が残されている。b 図で示す現象は原因もまだ捉えられていない。

Fig. 5.20 Curious phenomena in the supply voltage change. Phenomena in Fig. a. can be observed to occur in connection with regional thunder, but those in Fig. b. cannot be explained at all.

この海域に発生する地震に先行して地磁気・地電流の異常あるいは給電電流経路の状態変化等が発生した場合に、それらを正確に解析することに役立てるであろう。

参 考 文 献

- 浅田 敏, 1971: 海底地震観測の問題点. うみ, 9, 35-45.
- 浅田 敏, 1974: 海底地震計と新しい地球物理学. 科学, 44, 278-285.
- Axe, G. A., 1968: The effect of the earth's magnetism on submarine cable. P. O. E. E. J., 51, 37-43.
- 市川政治, 1969: 気象庁地震観測網の震源決定精度・能力. 研究時報, 21, 279-308.
- Irish, J. P. and F. E. Snodgrass, 1972: Quartz crystal as multipurpose oceanographic sensors (1). Pressure Deep Sea Research, 19, 165-169.
- Karrer, H. E. and J. Leach, 1969: A quartz resonator pressure transducer P. I. E. C. I, 16, 44-50.
- 力武常次, 1972: 地球電磁気学. 岩波書店.
- 三東哲夫, 1960: 波浪はどこで脈動に変わるか?(1). 地震2, 13, 150-152.
- 三東哲夫, 1963: 波浪はどこで脈動に変わるか?(2) 地震2, 16, 165-180.
- Science Council of Japan, 1958: Report of microseisms and sea wave observation in Japan during the IGY. 1957/8, No. 1, No. 2.
- Shimamura, H. and T. Asada, 1975: T wave from deep sea earthquakes generated exactly at the bottom of deep-sea trenches. Earth and Planetary Science Letter, 27, 137-142.
- Snodgrass, F. E. et al., 1975: MODD, IGPP Measurement of bottom pressure and temperature. Journal of Physical Oceanography, 5, 63-74.
- Snodgrass, F. E. et al., 1975: MODD, Bottom experiment. Journal of physical Oceanography, 5, 75-85.
- Wadati, K. and W. Inoue, 1954: On the T-phase of seismic waves observed in Japan. Geophy. Mag., 25, 159-165.
- 行武 毅, 1976: 地震と地殻電気抵抗変化. 地震予知シンポジウム, 156-164.

第6章 システム開発に関連する調査・研究*

1. 関連研究

本節ではシステムの開発途上において調査・研究が必要となり実施された関連研究の内、未だ発表されていないものを載せる。既に発表されたものは、各章末尾の参考文献に載せた以外に、このシステムの開発を理論的にサポートする次の論文が掲げられる。

「1978年伊豆大島近海の地震」の前震・余震の時空間分布 — 伊豆半島周辺のテクトニクスに関連させて —。山川宜男・吉田明夫・岸尾政弘，地震，第32巻(1979)，89-101。

1975年以来、地震学会の席上でシステム開発に関連した講演を行ってきた。これらについては次の予稿集を参考にされたい。

海底地震常時観測システムの開発。地震火山研究部，1975春，173。

耐衝撃実験について。飯沼龍門・松本英照・高橋道夫，1975春，174。

海底地震常時観測システムの開発(Ⅱ) — システム・デザインの検討等 —。地震火山研究部，1976春，135。

電磁型地震計の検定法とその精度について。松本英照・長山靖夫・高橋道夫，1976春，346。

海底地震常時観測システムの開発(Ⅲ) — 振動・衝撃実験について —。地震火山研究部，1976春，348。

海底地震常時観測システムの開発(Ⅳ) — 津波計の開発 —。地震火山研究部，1976春，349。

海底地震常時観測システムの開発(Ⅴ) — 布設工法・補助装置の設計及び海底雑微動の調査 —。地震火山研究部，1977春，203。

公社専用回線使用による高速PCM地震波データ伝送について。飯沼龍門・松本英照・高橋道夫・塚越利光，1977秋，105。

海底地震常時観測システムの開発(Ⅵ) — 本布設・試験観測 —。地震火山研究部，1978秋，C07。

海底地震常時観測システムの開発(Ⅶ) — 試験観測結果について —。田望・飯沼龍門・松本英照・高橋道夫，塚越利光・内池浩正，1979春，C10。

海底地震常時観測システムの開発(Ⅷ) — 試験観測結果について・その2 —。田望・飯沼龍門・松本英照・高橋道夫・塚越利光，1979秋，B55。

* 執筆担当 第1節 高橋道夫(関連研究は除く)，第2，3節 松本英照

海底地震常時観測システムの開発 (Ⅸ) — 開発のまとめ —。田 望・飯沼龍門・松本英照・高橋道夫・塚越利光, 1980 春, (予定)。

全システムの完成の後は、津波計の動作解析を行い、次の講演を海洋学会の席上で行った。

深海洋津波計による潮汐観測。磯崎一郎・飯沼龍門・松本英照・高橋道夫, 1979 春。

深海洋津波計記録に現れた諸現象について。磯崎一郎・飯沼龍門・松本英照・高橋道夫・塚越利光, 1979 秋。

気象庁地震課における地震火山談話会でも以下の講演を行っている。

変換部研究報告 (1)。第 69 回, 1975.12.17. 変換器の感度測定, 黒潮丸の振動測定結果。

変換部研究報告 (2)。第 70 回, 1976.1.29. 変換器の周期および減衰定数の測定。

変換部研究報告 (3)。第 71 回, 1976.2.25. 等化増幅部。

変換部研究報告 (4)。第 74 回, 1976.5.27. 津波計。

伝送部研究報告 (1)。第 73 回, 1976.4.15. 周波数配置。

伝送部研究報告 (2)。第 75 回, 1976.6.24. S/N 設計。

布設技術調査報告。第 70 回, 1976.1.29. 沿岸および沖合の予備調査。

また東京大学地震研究所の談話会において次の講演を行った。

電磁地震計の検定法とその精度について。松本英照・長山靖夫・高橋道夫, 第 508 回, 1976.4.27.

以下に記したものは、短編の研究報告としてまとめて、手もとに残っているものである。それらの一部は、既に出版ないしは講演されたものであるが、そうでないもので、かつ重要なものも多く含まれている。

- | | |
|----------------------------|------------|
| (1) 短周期センサー周波数特性改善回路 | 1974.12.3 |
| (2) 短周期センサーの回路 (S/N の計算) | 1974.12.3 |
| (3) 一次復調回路の S/N の計算 | 1974.12.3 |
| (4) 衝撃試験 (1) | 1974.12.18 |
| (5) " (2) | 1974.12.18 |
| (6) 短周期センサーの周波数特性改善回路の位相特性 | 1974.12.27 |
| (7) IC の選定 | 1975.2.1 |

(8) 試験成績書について	1975. 3.22
(9) 検定コイルに流す電流と地動の対応について	1975. 7.18
(10) 電圧感度Gの測定方法(検定コイルを用いて)	1975. 7.18
(11) 換振器の相互インダクタンス	1975. 7.21
(12) センサー部の改良の試み	1975. 8.14
(13) 等化方式について	1975. 9. 1
(14) 基準とする換振器について(1)	1975. 9. 5
(15) 発振法による固有周期測定について	1975. 9. 5
(16) 電氣的振子クランプ方式について	1975. 9. 9
(17) 容量倍率器について	1975. 9.10
(18) 電氣的振子クランプ用リレーの方式について	1975. 9.16
(19) μ PC154の差動入力耐電圧について	1975. 9.18
(20) 電圧感度の基準とする換振器	1975.10.17
(21) 2方式の短周期地震計の特性の相違について	1975.10.24
(22) 等化増幅器の周波数特性について	1975.10.24
(23) 等化増幅部の特性	1975.10.31
(24) 変換器の振子位置による感度の変化(1)	1975.11.17
(25) " (2)	1975.11.18
(26) 黒潮丸船上の振動(1)	1975.11.28
" (2)	1975.12.10
(27) D-Aコンバーターの動作確認	1976. 2.27
(28) 発振法回路の解析	1976. 3.10
(29) μ PC154 負荷特性試験データ	1976. 4.30
(30) 出力保護抵抗 R_o の影響	1976. 5.28
(31) 津波計記録の解析(1)	1976. 6.15
(32) " (2)	1976. 6.22
(33) クランプピンの強度	1976. 6.17
(34) 布設時にケーブルにかかる加重の見積り	1976. 6.21
(35) 大型筐体の耐水圧解析	1976. 6.29
(36) 先端装置を2本吊りにした時の加重について	1976. 7. 5
(37) 終端速度	1976. 7.10
(38) 海底地動雑微動調査(1)(2)	1976.12.23
(39) リハーサル時のケージの振舞について	(1977. 1. 6改訂) 1976.11.29

(40)	リハーサル時のジンバルの動作について	1976.12.1
(41)	” (訂正)	1976.12.10
(42)	埋設鋼管の受荷重の計算	1977.2.14
(43)	布設ルートを選定理由	1977.3.17
(44)	無外装ケーブルがタンク内で受ける荷重について	1977.7.4
(45)	陰極接地電極の外装ケーブルへの影響	1977.7.4
(46)	ケーブルストッパーにかかる荷重について	1977.7.4
(47)	再ルート調査について	1977.8.4
(48)	海底に置かれた津波計の周期特性	1977.10.25
(49)	ジンバルの動揺により上下動振子が受ける加速度	1978.11.1
(50)	地震計出力のスペクトル解析	1978.11.13
(51)	電源変動による雑音	1978.11.14
(52)	振子の挙動	1978.12.14

関連研究の内、未発表のもの9編を以下に掲載する。これらの研究は開発途上において遂行されたもので、システムの開発に特に大きな貢献があったものである。

(関連研究 1)

地震計の耐振性，安定性

山川宜男・飯沼龍門・松本英照

吉田明夫・高橋道夫・塚越利光

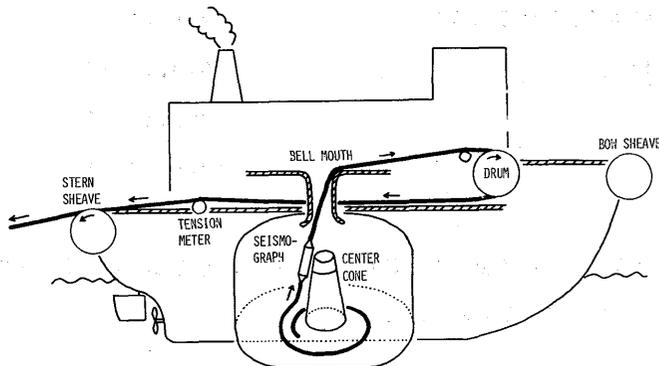
要旨

地震計の内、機械的機能をもつ部分である変換器およびジンバル等について実施した耐振性と安定性に関する評価試験の報告である。評価の基礎となる、布設時に地震計がこうむる衝撃加速度も実測結果をもとに調べられた。評価試験におけるストレスレベルは破壊試験レベルに至るものも含まれている。これらの評価結果を製品の設計および製作工程上の品質管理に反映させることにより地震計の高信頼性が達成された。

1. はじめに

地震計変換器の通常の手扱いにおいては、振動・衝撃を与えることは極力避けるのが常識であり、その製作仕様において耐振性が盛り込まれているものは、筆者らの知る限りにおいては、例がない。ところが

この観測システムでは、布設工事の工法上の条件から、幅10msec程度、大きさ50Gのパルス状加速度をこうむる可能性がある。これは、布設を受託した電電公社のケーブル敷設船（黒潮丸、3,344トン）の構造によるもので、船底のタンクにケーブルと接続されて収納されている筐体が甲板上にひきだされる時、センターコーンと呼ばれる構造物（図研1.1）に衝突する際、および筐体がケーブルドラムに巻きつけられた時、バックテンションの不足により甲板上に落下する際にこうむる可能性のある衝撃である。また船首に近いケーブルドラムを通過後、船尾のシープに至る間は甲板上の鉄製のトラフ内をガタガタとひきずられ、この時、大きな振動をうける可能性がある（振動の周波数、振幅については特に規定されていない）。



図研 1.1 中間点装置の布設

Fig. R 1.1 Laying of the intermediate apparatus.

この観測システムに用いる地震計は、これらの振動・衝撃をうけた後も正常に機能することが必要であり、本論で述べるような各種の評価実験が行われた。なお、この敷設船は、なぜそのような振動・衝撃が筐体に加わる構造をしているのか、という点に疑問が残るかもしれない。敷設船の本来の業務は海底通信の中継器の入った筐体の布設であり、中継器とは、電気的には単なる増幅器であってバネ等の機械部分は全く含まれず、ケーブル長約6km毎に1個、そう入されているものである。完全な海底通信システムを完成するために、中継器に耐振性という厳しい製作条件を盛り込んで工事条件をゆるやかにすると、中継器の製作条件はゆるやかにして、船上という悪条件下で行われる工事に厳しい作業条件を課すのと、いずれがシステム設計上優るかと言えば、当然前者ということになる。敷設船は、このような海底通信のトータルシステムの考え方によって設計されているものであり、布設される装置は、最悪の場合を想定して、耐振性を要求される。地震計といえども、勿論工事に慎重を期すにしても、例外ではない。

地震計を構成する各部の内、耐振性で問題となる箇所は変換器のバネと動電コイルの引き出し部分（リード線）、およびジンの回転軸受けのベアリングとクランプピンである。特にバネについては、もしも振子をクランプしなくても振動・衝撃に耐えうるならば振子のクランプの制御も不必要となり、システムの信頼性は大きく向上する。これらの箇所について重点的に評価を行った。その結果は3節で述べる。

なお、上記以外の箇所、例えば電子部品のプリント基板上への実装の問題等は、海底通信システムの実装基準に準拠することにより問題なく解決できた。

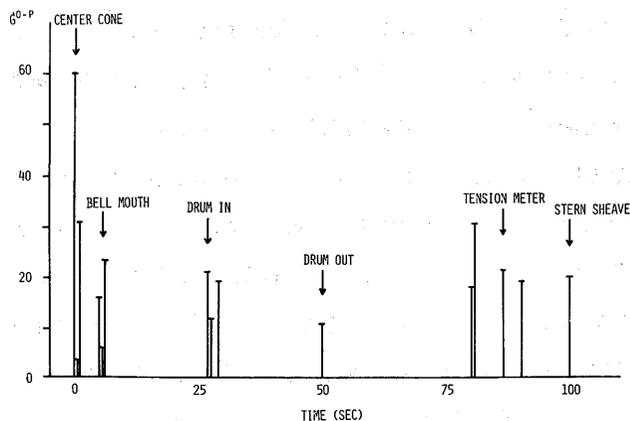
2節では地震計の耐振性評価の基礎資料とすべく、実際の敷設船による布設実験時に測定した衝撃条件、振動条件について述べる。

地震計諸特性の安定性は、どんな観測システムでも要求されるのは当然である。しかし通常の場合は定期的な検定・校正により特性の監視を行っていて、地震計製作の段階から安定性を評価することはしない。だがこの観測システムの場合には全システムの信頼性向上のために検定・校正の機能を放棄したことは本文中で述べた。このためこれに代る手段として、諸特性、特に変換器の特性に重点をおいて安定性の評価を行った。これについては4節で述べる。

2. 振動・衝撃の大きさ

振動はともかく50Gという衝撃の大きさは経験がなければ実感としてとらえるのが難しいものである。まずその実感をつかむため、簡単な実験を行った。それは、小型の直動型変換器を受感方向を上下にしてコンクリートの上に自由落下させるという実験である。この時の加速度として自由落下距離が1.4cm, 6.6cm, 7.2cmと増えるに従って衝撃加速度としてそれぞれ35G, 80G, 110Gという値が得られた。ただしそのパルス幅は2~3msecと短い。この実験により、50Gの加速度といっても、そんなにおどろくほどのものではなく、それに耐えうる変換器の製作は可能であると判断できた。

この判断をもとに実際の敷設船を用いて模擬布設を行い、筐体のうける衝撃を測定した(1975年4月)。測定にあたっては筐体をセンターコーンに故意に強く衝突させることにより、最悪の衝撃条件を設定した。筐体がケーブルタンクからケーブルドラムを経て船尾シーブに至る約150m(100秒間で通過する)の間



図研 1.2 中間点装置のこうむる衝撃の大きさ

Fig. R 1.2 Shocks which the intermediate apparatus receives on the cable ship.

にうけた衝撃の大きさを図研 1.2 に示す。この図からわかるようにセンターコーンに衝突した時の衝撃がやはり最大で $60 G^{0-P}$ に達していて、その他の箇所では大きくても $30 G^{0-P}$ 程度である。また得られた加速度記録を周波数分析すると加速度の最大は $50 \sim 60$ Hz 付近に見られる。これらの事実にもとづき中間点地震計が耐えるべき衝撃を幅 10 msec, 大きさ 50 G のパルス状加速度と規定した。また先端点地震計については工法上の違いにより、こうむる加速度はずっと小さいが、一応 20 G と規定した。なお、この衝撃を製品に与えて評価試験を行う方法は、コンクリートの上に落下させるのではパルス幅が短くなりすぎるので、荒い砂の上に落下させる方法とした。これによりパルスの幅が 10 msec 程度になる。約 1 m の落下距離を設定すれば 50 G の衝撃となる。

地震計の耐えるべき振動条件は、うへの模擬布設時には、用いた加速度センサーのダイナミックレンジの不足により明確にはできないほど小さかった ($1 G^{0-P}$ 以下)。いささか定性的で主観の入る議論となるが、地震計が主に振動をうける、ケーブルドラムから船尾シーブの間を通過する時の振動を目と耳とで感じたところによると、通常の振動試験条件 ($5 \sim 55$ Hz, 1 mm^{P-P}) の方がずっと厳しいと感じられた。このため地震計が耐えるべき振動を、1 周期を $5 \sim 55$ Hz, 1.5 mm^{P-P} とするスイープ加振 (周期 1 ~ 2 分) とし、これを 3 方向とも 5 分間だけ与える振動と規定した。

3. 耐振性の評価

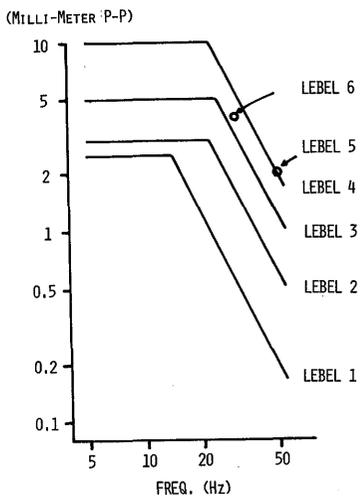
振子のクランプは主として振動・衝撃からバネを保護するために行われるものであるが、もしも振子をクランプしなくてもバネに損傷が生じないならばクランプは不必要となる。この場合、例えば本文図 2.51 の内、トランスフラクサーを含む振子制御回路は要らなくなる等、システム全体の信頼性向上への波及効果は大きいものがある (信頼性は 1 チャンネル当たり約 25 Fit 向上し、実装空間も円筒筐体の軸方向に 30 mm 程度狭くてすむ)。このため、まずクランプされていない振子 (変換器) の耐振性の評価を行ったが、クランプしないでもよい、ということを経験的に支持するデータは得られなかった。この評価実験の一例を紹介する。水平動変換器 2 台 (H1, H2), 上下動変換器 2 台 (V1, V2) に対して表研 1.1 の手順で振動・衝撃をくりかえし加えた。そしてバネの耐振性を評価するために表研 1.1 の各試験段階が終了する都度に固有振動数を測定した。この結果を図研 1.4 に示す。H1, V1 の 2 台については、振子をクランプした状態 (試験段階 No. 14 まで) でレベル 3, 4 の振動に耐えたのに、クランプをしていないと (No. 15 以降) これらと同等のレベル以下の振動にも耐えられていないことがわかる。この実験例は、振子クランプがバネの損傷防止に有効であることを示す例である。しかしまた逆の結論を導く例もあり、例えば振子をクランプしない状態で $200 G$ 余りの衝撃を 9 回与えてもバネの変形は目視による限り認められず、また固有振動数も 4.62 Hz から 4.75 Hz へと 3 % 足らずしか変化しなかった。いずれにしても、変換器はクランプして輸送するもの、という常識を完全にうちやぶるに十分なデータは得られず、振子制御回路を省略してシステム全体の信頼性を向上させるということは断念した。

このような基本的な検討を終えたのち、まず地震計として完全な形 (変換器, 等化増幅器, ジンバル,

表研 1.1 バネの耐振性評価試験方法

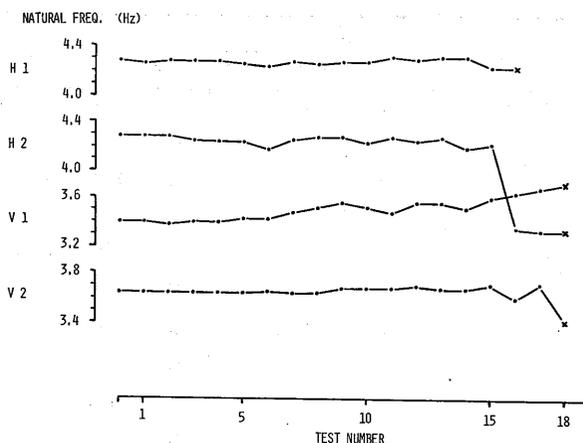
試験段階	種別	振子	変換器				レベル	
			H 1	H 2	V 1	V 2		
1	振動	クランプ	C	C	S	S	振動	レベル 1
2	"	"	S	S	C	C	"	"
3	衝撃	"	S	S	C	C	衝撃	レベル 1
4	"	"	C	C	S	S	"	"
5	振動	"	S	S	C	C	振動	レベル 2
6	"	"	C	C	S	S	"	"
7	"	"	C	C	S	S	振動	レベル 3
8	"	"	S	S	C	C	"	"
9	"	"	S	S	C	C	振動	レベル 4
10	"	"	C	C	S	S	"	"
11	衝撃	"	S	S	C	C	衝撃	レベル 2
12	"	"	C	C	S	S	"	"
13	"	"	C	C	S	S	衝撃	レベル 3
14	"	"	S	S	C	C	"	"
15	振動	フリー	C	C	S	S	振動	レベル 5
16	"	"	S	S	C	C	"	"
17	"	"	S	S	C	C	振動	レベル 6
18	"	"	C	—	S	S	"	"

- 振動レベルは、図研 1.3 を参照。
- 衝撃レベルは、レベル 1 : 20 ~ 25 G, レベル 2 : 50 ~ 60 G, レベル 3 : 75 ~ 100 G, いずれも 5 回。
- S は受感方向へ加振 (衝撃)
- C は受感方向と直交方向へ加振 (衝撃)



図研 1.3 表研 1.1 の振動試験レベル。レベル 1 ~ 4 : 5 ~ 55 Hz を 2 分間で往復するスイープ加振。スイープモードは Log, 加振時間は 1 時間。レベル 5 : 単一周波数加振。加振時間は 1 時間。レベル 6 : 同。30 分間。

Fig. R 1.3 Vibration test levels.



図研 1.4 バネの耐振性評価試験結果。表研 1.1 の試験段階が終了する毎に測定した固有振動数

Fig. R 1.4 Shock-proof test of the diaphragm springs (cf. Fig. R 1.3).

制御部すべてを含む)をなした評価用の試作機2方式(変換器の固有振動数は3Hz)を製作した。この2方式の地震計はAS型およびOS型と呼ばれた。AとOは両者の特徴をあらわす略号で、Sは短周期地震計であることを意味するSである。AS型とOS型は変換器や等化増幅器にも多少の差はあるが顕著な違いはジンバルにあり、AS型は構造が単純であるがジンバルクランプにおいてジンバルの可動部を一方から押えつける方式のため、一般にまさつくランプ力は劣る。OS型は両側から押えつけるためクランプ力は大きいと期待できるが、構造が複雑で、高精度の製造条件が必要である、等の長・短所がある。

これらの試作機の不良箇所(安全率不足の箇所)を抽出するため、あえて、要求される耐振仕様以上のストレスを与えてみた。表研 1.2 に振動試験条件を示す。加振時間は合計 4.5 時間に達し、最大加速度は 9

表研 1.2 振動試験条件

加振モード	スイープ
周波数	5 ~ 55 Hz
スイープ周期	2分
加振方向	直交3方向
加振時間	各方向とも30分間
振幅	0.5, 1.0, 1.5 mm P-P の3回

表研 1.3 衝撃試験条件

パルス幅	10 ~ 20 msec
方向	直交3方向
回数	各方向とも5回
振幅	10G から 100G まで 10G 毎

G^{0-P} を越えるという苛酷な条件である。表研 1.3には衝撃試験条件を示す。衝撃の回数は合計150回である。試験順序はまず表研 1.2の振動試験を行ったのち表研 1.3の衝撃試験を行った。この両試験の結果、地震計の機能上大切な箇所の内、バネ、リード線、ベアリング、クランプピンに損傷が発生し、仕様に対する安全率が不足していることがわかった。

まずバネについては両試験が終わった時点で一部の変換器（AS型、OS型とも）に、固有振動数の偏移に伴う地震計特性の歪が認められ、また分解調査の結果振子零位置の受感方向へのシフト（最大1.5mm）が発見された。この原因はダイヤフラムバネ（本文図2.19、直動型変換器用として従来から用いられていた型と同型）が、受感方向と直角方向の振動・衝撃をうけた時の応力集中によりへたりをきたしたためと考えられる。バネはシステムの中でも最も大事な箇所のひとつなので、このへたりに関する評価はその後も特に精力的に継続して行った。これについては後に述べるが、この時点で3 Hzの固有振動数を得ることは耐振性に問題が多いと判断し、4.5 Hzに仕様変更した。

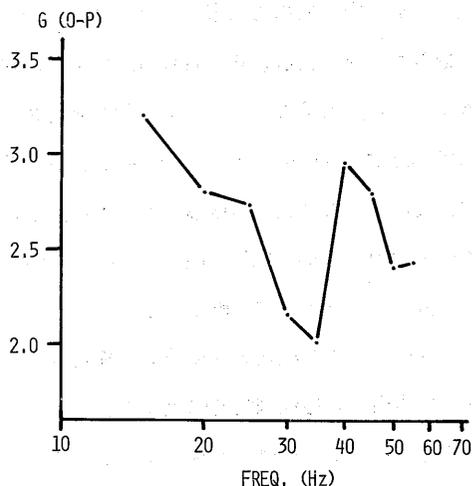
振動試験の結果、AS型の1台の変換器にリード線の切断事故が発生した。この断線はコイル巻線を変換器筐体外にひきだすのに、引出線としてリン青銅を使用していて、その引出線の中程の腐食による外傷が振動試験で進行したものとみられる。このため、両者間のハンダ付箇所をなくする意味も含めて、コイル巻線を直接筐体外に引出すこととした。また、断線とは別の箇所で、断線には至らないまでも巻線の被覆に外傷が生じていたのもあった。これは巻線がコイルボビンの外周より外に出ていたため振動を与えた時に振子が受感方向と直角方向にも振れ、磁極に衝突して損傷したものと考えられる。このため巻線のボビンからの引出口を改良して磁極その他に直接衝突しない構造に改めた。

シンバルのクランプピンについては、50 Gの衝撃時にも破断に対する安全率が10以上期待できるもので、うへの振動・衝撃試験でも損傷は認められなかった。ただAS型試作機は振動試験中にピンが穴から抜け出すという点が見出された。これはピンのガイドバネの抑え圧力の不足が原因であると考えられ、それを強化する対策を講じた。

表研 1.2, 1.3の振動・衝撃試験ののち、更に表研 1.4に示す振動試験を行った。これらの3回の試験のう

表研 1.4 振動試験条件

加振モード	スイープ
周波数	5 ~ 55 Hz
スイープ周期	2分
加振方向	直交2方向
加振時間	上下方向3時間、水平方向1時間
振幅	1 mm ^{P-P}



図研 1.5 摩擦クランプ力の強さ。摩擦力の一番弱い方向に加振し、シンバルが動き始める時の加速度を測定した結果。

Fig. R 1.5 Shock-proof test of the clamp force of the gimbal.

ち、いずれかの段階で（衝撃試験の可能性が高い）OS型のジンバル可動部の軸受ベアリングに玉割れが発生し、摩擦トルクの増加により、 0.2° 以内におさまっていたジンバルの起立再現性が 2° まで劣化していた。これは摩擦クランプ力の不足も一因と考えられるので、その強化とベアリングを大型にするという対策をとった。摩擦クランプ力は最終的には最悪の方向でも2G以上が確保できている（図研1.5）。

さて残った問題の、バネの耐振性の評価であるが、図研1.4に示したように相当の耐振性はあると考えられる。しかし、バネはシステムの内でも非常に重要な部分であるから更に評価を加えた。先にも述べたようにダイヤフラムバネの構造上、純粋に受感方向のみの成分をもつ振動に対しては十分な耐振性が期待できるが問題があるとすれば、横方向の振動・衝撃にさらされた時であろう。実際10台の変換器に対して、その受感方向に $2\text{mm}^{\text{P-P}}$ の正弦振動を200万回以上（20Hzで30時間）加えて、前後の固有振動数を測定し比較した（表研1.5）が、いずれにも有意な変化は認められていない。この試験結果もバネのヘタリは振動の横方向成分によってひきおこされたということをサポートしている。

振子の横方向の振動には電磁クランプも無効であるから共振周波数近くでは振幅も相当大きくなり、バネの損傷も加速されると考えられる。振子のこの種の運動を筆者らはヨーイング運動と呼び、次のような実験を行った。振子にヨーイング運動を発生させるために、振動台の振動方向と変換器の受感方向とが 45° の角度をなすようにセットし、振動の周波数を変えながら振子が振幅制限を受け始める（制限される方向は問わない）時の振動台の振幅をもとめた。この結果を図研1.6に示す（ $\times 1$ ）。この図における振幅制限のモードは約70Hz以下では受感方向への衝突、それ以上ではヨーイング運動による横方向への衝突である。振子のヨーイング運動によるバネのヘタリを防ぐ対策は次の二つが考えられる。

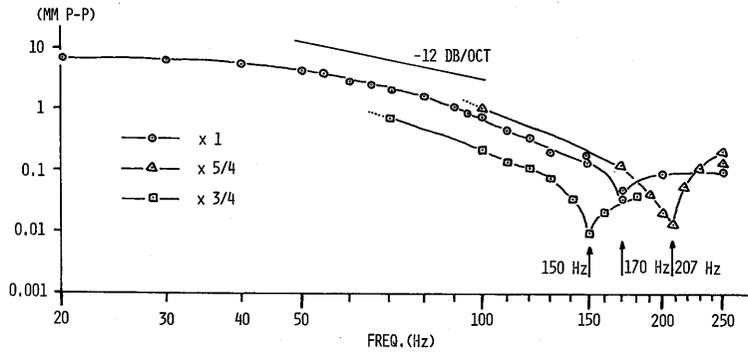
- i) ヨーイング共振点を高周波側へ移動させる。
- ii) 横方向への振幅制限を強化する。

まずi)はバネの板厚を大きくすることにより達成できる。図研1.6の $\times 5/4$ 、 $\times 3/4$ はバネの板厚がもとのそれぞれ $\frac{5}{4}$ 倍、 $\frac{3}{4}$ 倍のもののヨーイング共振点を同様の方法で測定した結果である。板厚の大きいほど共振点は高周波になることが認められる。しかしi)の対策は必ずしも得策とは言えない。というのは振子がヨーイング運動をした時、バネの内部応力は板厚が大きいほど大きいし、また、同一の固有振動数を取得するためのプリフォーミングの量も大きいからである。ii)の対策は有力である。図研1.6で用いた変換器の横方向への振幅制限は $\pm 0.25\text{mm}$ であったが、これを製作精度上許される限界内の ± 0.15

表研1.5 加振試験結果

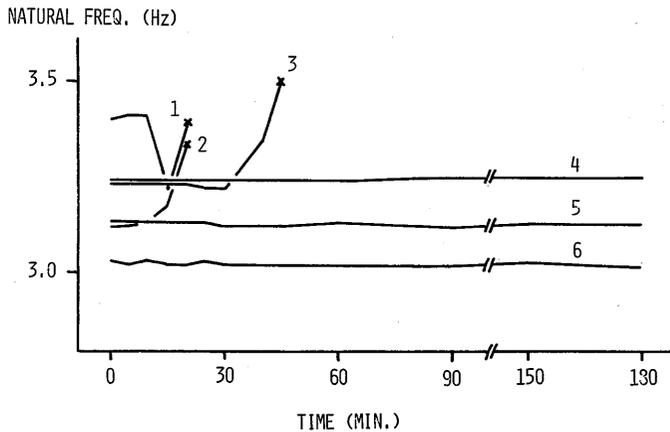
成分	番号	固有振動数 (Hz)	
		初期値	加振後
上	1	3.96	3.96
	2	4.48	4.52
	3	4.28	4.24
	4	4.08	4.12
下	5	4.04	4.08
	6	3.72	3.76
水	7	4.92	4.96
	8	4.76	4.80
平	9	4.44	4.44
	10	3.60	3.56

(注) 測定分解能 0.04 Hz



図研 1.6 変換器のヨーイング共振。この図のたて軸の逆数をとったものが、通常の周波数応答曲線となる。もとのバネ (×1) のヨーイング共振点は 170 Hzであったが、板厚を 1.25 倍 (図の×5/4) にすると 207 Hz に、0.75 倍 (図の×3/4) にすると 150 Hz に移動する。

Fig. R 1.6 Resonance frequency for the yawing motion of the pendulums, the diaphragm springs of which have different thicknesses.



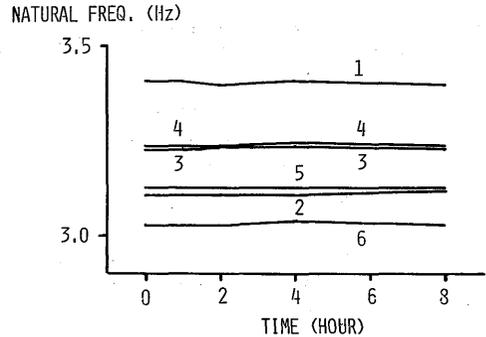
図研 1.7 加振試験結果。ヨーイング共振周波数で加振した時の固有振動数の変化。No.1~3 および 4~6 は、振子の横方向振幅制限がそれぞれ ±0.25mm, ±0.15mm。

Fig. R 1.7 Shock-proof test of the diaphragm springs for the yawing motion.

mmとした。そして前者の変換器 3 台、後者 3 台に 170 Hz (ヨーイング共振点), 0.02 mm^{P-P}の振動を受感直交方向に加え、5~30 分毎に固有振動数を測定し、バネのへたりを調べた。その結果を図研 1.7 に示す。±0.15 mmに振幅制限された変換器 (No.4~6) のバネは 3 時間後にも正常であり、この対策は非常に有効であることがわかり採用した。なおこれらの変換器 (No.1~6) は図研 1.7 の試験に先立ち 55 Hz 1 mm^{P-P}の横方向の振動を 8 時間与えても異常のなかったものである (図研 1.8)。

振子のヨーイング運動への対策は、うえのように講じられたが、その他にバネの評価方法として採用し

たもの内、代表的な方法として固有振動数の傾斜特性とバネの硬度がある。これらはいずれも開発段階に評価実験を重ねて経験的に得られたもので、傾斜特性というのは、変換器を受感方向に数度まで傾けて固有振動数を測定する(本文図 2.20)。その時の固有振動数の変化率の大きなものは耐振性に劣るというものである。またバネの硬度がビッカース硬度 400 以上のバネは耐振性が小さい、というものである。これらをバネの良品選択基準として採用した。



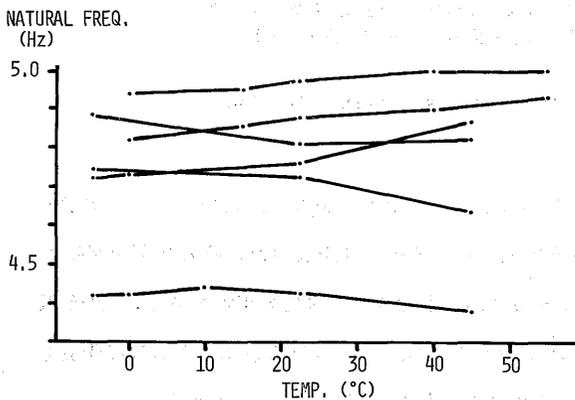
図研 1.8 予備加振試験。図研 1.7 の試験に先立って行った予備試験。変換器番号は図研 1.7 と対応している。

Fig. R.1.8 Test prior to the test of Fig.R 1.7, for shock-proof property against linear motion.

4. 安定性の評価

固有振動数の温度特性を 6 台の変換器について測定した実測例を図研 1.9 に示す。いずれも $0.3\% / ^\circ\text{C}$ 以内である。海底に設置された筐体内の各部分の温度はどの位になるのかを地震計および伝送部を筐体内に実装し通电して調べた結果、変換器の位置では周囲水温より 10°C ($\pm 5^\circ\text{C}$) 上昇するものと予想されているので、製品完成時に室温で測定した固有振動数の値を、現在、海底にある変換器の固有振動数の値とみなすことに問題はない。

経年変化は評価方法の難しい項目であり、検定・校正は主にこの経年変化をつかむために行いたかったものである。一応、通常の経年変化評価法の高温放置 (55°C , 48 時間) および 1 ヶ月間のヒートランを行い、いずれでも地震計特性の有意な変化は認められないことを確かめてある。



図研 1.9 変換器固有振動数の温度特性。6 台の変換器について実測例を示してある。

Fig. R.1.9 Examples of temperature characteristics of the natural frequency.

5. まとめ

伝送部については従来からの技術の蓄積（およびその延長上にある技術の開発）により高信頼性が達成されているが、その伝送部と肩を並べられるだけの高い信頼性をもつ地震計を製作することを目標として行った作業の内、変換器の耐振性および安定性について述べた。これにより地震計1台（6成分）当りの故障率を約1,300 Fit（平均故障間隔約75年）と推定した。この数値はある程度満足のゆくものである。

2節で述べた敷設船による模擬布設においては、日本電信電話公社の黒潮丸船長はじめ関係者の協力をあおいだ。また3, 4節で述べた評価実験の作業は、ほとんど日本電気㈱、沖電気工業㈱、明石製作所㈱が行ったものである。また3, 4節の評価実験は、うへの三社が行った地震計の信頼性向上のための作業の内、ほんの一部にすぎない。これらの協力に感謝する。

（関連研究 2）

地震計の等化増幅回路

山川宜男・飯沼龍門・松本英照
吉田明夫・高橋道夫・塚越利光

要旨

地震計等化増幅回路の設計に重点をおいた報告である。低雑音の、しかも信頼性管理された演算増幅器を用いることにより増幅回路の雑音レベルは地動に換算して $0.01 \mu\text{m}^{P-P}$ ないしは $0.1 (\mu\text{m}/\text{sec})^{P-P}$ 程度と小さい。また回路の各所には長期間安定に作動するための配慮が払われている。

1. はじめに

地震計等化増幅器を構成する各電子部品は直径17 cm, 厚さ1.6 mmの円形エポキシプリント板3枚に実装される。印刷配線, 部品のとりつけ, ハンダ付け等は海底通信の分野でつちかわれた信頼性を確保する技術, ノウハウにもとづき行われた。製品の品質も海底通信機器に与える型式試験にならった, 熱衝撃, 温度サイクル, 高温放置, 振動, 衝撃, ヒートラン等の試験を行うことにより保障された。本文でも述べたように, 製作時における信頼性の確保に関しては, 電電公社および公社に指導をうけた製造者に負うところが大きい。本報告ではこれらの製作上の信頼性に関する点にはふれず, むしろ, 回路の設計の段階で問題となり検討を行った点について述べる。

2節では地震信号のS/Nを支配する増幅器雑音について, それを減少させるために行ったICの機種選定作業等を述べる。布設時の衝撃により変換器が過大なサージ電圧を発生し, これが増幅器に入力する。

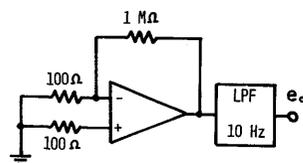
この入力から増幅器を保護するように対策を施した。また採用されたICの特徴として、出力電圧が正負いずれかの電源電圧まで上昇し、そこでクランプされて電源を切るまで復旧しないという、いわゆるラッチアップという問題がある。これを防止する対策も講じ、3節で述べる。4節では回路全体としての温度特性、電源変動特性等に関する測定データを紹介する。

2. 増幅器雑音

地震計の性能を論じる際に大きな比重を占めるパラメーターのひとつとして、検出する最小の地動振幅がある。この量は一般には変換器の感度と増幅器の雑音とで決ってくるものであるが、このシステムの地震計のように変換器の振子の固有振動数(約4.5 Hz)が対象とする周波数帯域(2~20 Hz)内にある場合には固有振動数の大小にも依存する。すなわち検出可能な最小地動振幅を小さくするためには、固有振動数を小さく、感度を大きく、そして雑音を小さくすることが必要である。前二者については変換器の耐振性実装空間の制限の面から検討を行い、それぞれ4.5 Hz, 80 V·sec/mという限界値を得ている。残る1項目の雑音についてもそれを減少すべく検討を行った。

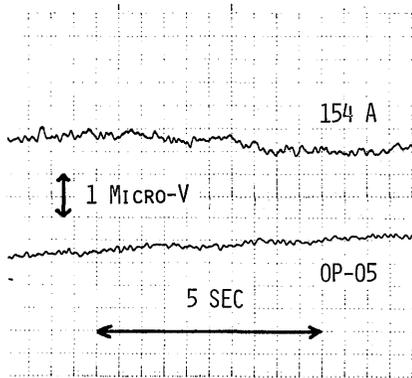
雑音のスペクトルは対象帯域内では白色と考えられるが、このとき地震信号のS/Nのうえで最も厳しい条件となるのは地動の周波数が最低周波数(2 Hz)の時である。すなわち固有振動数4.5 Hz, 感度80 V·sec/m, 減衰定数2.4(補正等化に便利のように、2.4の減衰がかかっている)の変換器が2 Hz, 0.1 $\mu\text{m}^{\text{P-P}}$ (目標とする検出可能な最小振幅)の地動により発生する電圧は約8 $\mu\text{V}^{\text{P-P}}$ しかなく、減衰を与えるための抵抗による電圧の分割を考えに入れると増幅器へ入力されるのは約5 $\mu\text{V}^{\text{P-P}}$ にすぎない。従って、最小振幅に対して更に例えば20 dBのS/Nを確保したいとするならば、増幅器の入力換算雑音は0.5 $\mu\text{V}^{\text{P-P}}$ におさえなければならぬことになる。各種の演算増幅器のカタログによれば、この条件は相当に厳しいもので、さらにそのICには信頼性管理がなされうるものでなくてはならないという大きな条件が加わる。

等化増幅回路は本文図2.21, 2.22に示されている。雑音の小さなICとして代表的なものに米国PMI(Precision Monolithics Incorporated)社のOP-05がある。そのカタログによると0.1~10 Hzの帯域における入力換算雑音は典型値で0.35 $\mu\text{V}^{\text{P-P}}$, 最大値で0.6 $\mu\text{V}^{\text{P-P}}$ となっている。一方、信頼性を管理しうるICとしては μPC シリーズがあるが、その中で低雑音のものとして $\mu\text{PC}154$ があげられる。このICの場合、同じ帯域で2 $\mu\text{V}^{\text{P-P}}$ という値が典型値としてカタログに記されている。カタログ上の値は、特に製造者の異なる場合には必ずしも数値自体を直接比較できるものではないので、上記2種のICを複数個用意して図研2.1の回路により両者の雑音を比較した。この回路は0~10 Hzの帯



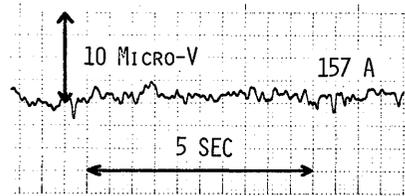
図研 2.1 入力換算雑音測定回路図

Fig. R 2.1 Measurement of noise generated by the IC.



図研 2.2 μ PC 154A および OP-05 の雑音。図研 2.1 の回路で測定したもので、入力に換算した目盛をつけてある。

Fig. R.2.2 Noises of 154A and OP-05 referred to the input.



図研 2.3 μ PC 157A の雑音。図研 2.1 の回路で測定したもので、入力に換算した目盛をつけてある。

Fig. R.2.3 Noise of 157A referred to the input.

域で 80 dB の平坦な利得を有するもので、入力は短絡されているから、その出力 e_0 は IC 自身の入力換算雑音が 1 万倍増幅されたものである。図研 2.2 が代表的な e_0 の例である。数 Hz の雑音成分は μ PC 154 が $0.3 \mu\text{V}^{\text{P-P}}$ 、OP-05 が $0.2 \mu\text{V}^{\text{P-P}}$ とよみとれる。ちなみに汎用の IC である μ PC 157 の雑音を図研 2.1 の回路で測定した記録を図研 2.3 に示す。 $2 \mu\text{V}^{\text{P-P}}$ と読みとれるのでこの IC は今回の用途には耐えられない。

雑音の大きさでは確かに OP-05 が小さいが、カタログ値ほどの差はない。 μ PC 154 でも $0.1 \mu\text{m}^{\text{P-P}}$ に対して 20 dB 以上の S/N は確保できる。IC の機種を選定にあたっては信頼性が管理できるという点に重きをおき、 μ PC 154 に決定した。そして IC の雑音を個別に調査し、その中から小さいものを初段に用いた。実際の等化増幅器の入力を短絡し、出力される雑音を記録したのが本文図 2.16 である。上図の雑音は $0.2 \text{mV}^{\text{P-P}}$ とよみとれるが、この成分は地動変位に対して $2 \text{V} / 40 \mu\text{m}$ の感度をもつものであるから、雑音を地動に換算すると $0.004 \mu\text{m}^{\text{P-P}}$ となる。目標とする最小信号 $0.1 \mu\text{m}^{\text{P-P}}$ に対して 20 dB の S/N は確保できていることを示している。なお、関連研究 4 で述べるように 2~20 Hz の帯域における Seismic noise の大きさは平均して $0.1 \mu\text{m}^{\text{P-P}}$ 程度であるから、この海域に設置する地震計としては、最高感度のものが製作されていると言える。

雑音の点から他に問題となる箇所があるとすれば本文図 2.22 の C16, C17, R29, R30 の部分であろう。電解コンデンサーを長期安定に使用するために R30 の一方の端子を負電源におとしてある。従って電源電圧の変動が地震信号の雑音となる。しかしその雑音の大きさは、電源変動のリップルが $10 \text{mV}^{\text{P-P}}$ 以上あるときはじめて初段の入力換算雑音をうわまわる量となるにすぎず、供給電流の高安定性 (2×10^{-5} 以上) および定電圧電源のツェナーダイオードの安定性から、全く問題となる量ではない。

3. 信頼性に対する配慮

μPC 154はロットによりラッチアップを発生するものがあることが判明した。ラッチアップの原因はIC出力段の電流が制限電流(標準で±25 mA)以上流れたとき、製品のばらつきにより、ICのPNPN接合が寄生SCR現象をおこすものがあるためと解釈できる。従って何らかの出力電流の制限を行ってやれば、これは防止できる。本文図2.21および図2.22のR2, R3(いずれも2 kΩ)はこのためにそう入されているもので、これにより最大出力電流は±5 mA以下におさえられている。

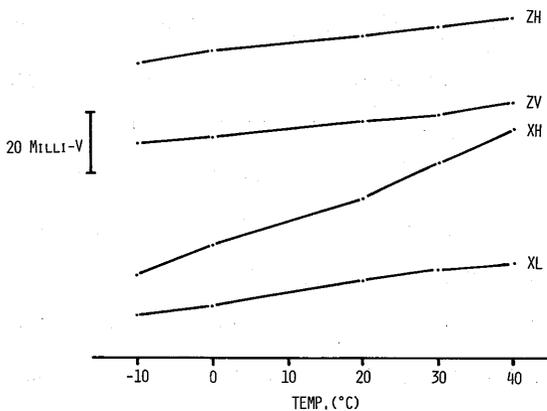
本文図2.21, 2.22のリレーRL1は振子クランプのためのもので図の左側の状態では変換器出力(INに入る)は低抵抗R1で終端され、大きな制動がかかる。振子クランプ状態で変換器出力を増幅器に入力させないようにしたり、あるいは図の回路でR1=0としたりするのは、振子制御回路が事故の場合には、地震信号が全く得られなくなるので具合が悪い。この図の回路の場合には、もしそのような事故が生じても約1/10の感度で出力が得られる。

布設時に変換器が衝撃をうけるとサージ電圧が発生する。その量は、衝撃の加速度を階段状の50Gと考えると約100Vに達する。サージ電圧からICを保護するために本文図2.21, 2.22のRC1, 2がそう入されている。これにより、DC400V, 1秒間以上の入力に耐えられることが確かめられている。

最終段のRC3~RC6による振幅制限はFM変調時の漏話を防止するために設けられている。

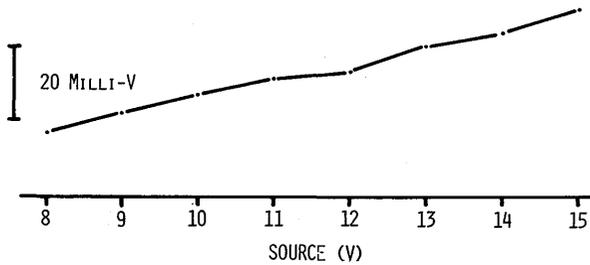
4. まとめ

地震計の内、電子回路部の設計の要点を述べた。この増幅器のおかれる環境温度条件、電源電圧条件は非常に安定してはいるが、参考のために増幅器出力(FM変調器とのカップリングコンデンサの前段)の零点の温度特性、電源変動特性の測定例を図研2.4, 2.5に示す。温度ドリフトは最大でも2 mV/°Cに達しないので、オフセット調整は室内で行うだけで充分と考えられる。



図研2.4 出力零点の温度特性。XH, XL, ZH, ZVはそれぞれX成分高感度出力, X成分低感度出力, Z成分変位型(高感度)出力, Z成分速度型出力

Fig. R 2.4 Drifts of the equalization amplifiers.



図研 2.5 出力零点の電源変動特性 (一例)

Fig. R 2.5 Example of source voltage characteristics of the equalization amplifier.

1節でも述べたように製品の信頼性の確保については日本電信電話公社および公社に指導をうけた日本電気㈱に負うところが大きい。また2, 3節で述べた事項に対する確認作業の一部は沖電気工業㈱, 明石製作所㈱により行われた。これらの協力に感謝する。

(関連研究 3)

F M 変復調系の S/N

松本英照・高橋道夫

要旨

システム設計の初期の検討において信号の S/N 向上のうで最大のネックとなっていた FM 変復調系の再検討を行った。それにより, 当初 56 dB と評価されていた S/N は実は 70 dB 以上が容易に得られることを確めた。このネックの解消により, 第2のネックであった地震計等化増幅器の雑音も下げる必要があると判断した。最終的に地震計の信号の総合 S/N を 72 dB にまで向上させた。

1. はじめに

この観測システム的设计にあたっては, 伝送上の性能のうで最も重要な要素である信号の S/N を 52 dB と規定した。この数値は, 信頼性を最優先に設計するという方針のもとに低目に決められたもので, 40 mm^{P-P} 程度の可視記録上で雑音が見えないための最低の, 仕様書上の値である。設計者側から見れば, 実際の信号の S/N は 52 dB よりも数段向上することを期待していたわけである。この数値を製造者に示し, システムの細部設計を行わしめたところ, 第2章 1.4 で述べたような周波数配置を行うと報告してきた。

その報告によると、一次変調のFM変調において最も変調度が小さく、従って高いS/Nを得ることが最も困難な第6チャンネルには 26.7 ± 0.6 kHzの帯域が割当てられている。製造者によればこの時のS/Nは56 dBということで、S/N 70~100 dB以上の部門があるにもかかわらず総合のS/NはFM変復調系がネックとなって56 dBにとどまっているとのことであった。

2. 再検討

26.7 ± 0.6 kHzのFM変調で56 dBのS/Nを得るための発振周波数の安定度は70 ppm (± 1 Hz/ 26.7 kHz)であると計算できる。この数値はCR発振器の短期(地震成分の帯域2~20 Hzに対応する50~500 msec程度の短期)安定度の常識的な値と比較して、悪すぎる。この点について独自の実験を行い、そのデータをもとに製造者と打合せた結果、先の70 ppmという数値は全くの測定上の問題であることが判明し、解決が見ついた。つまり測定系の精度不足により短期安定度の限界が追及できなかったわけである。

測定精度を上げる方法はいろいろあるが、いずれにしても変調器S/Nの評価のみでは不十分で、変復調ともに含めてS/Nを評価する必要がある。このため復調方式の検討も行った。一般的に復調方式として用いられているのは

- ① FM信号を単位高さのパルス列に変換して、周波数変化を単位時間当りのパルス数変化に変換し、積分回路によりもとの信号を復元する、いわゆるアナログカウンター方式。
- ② FM信号と電圧制御発振器の信号との同期をとり、その時発生する電圧をもとの信号とする、負帰還位相検波回路(PLL, フェイズロックループ)方式。
- ③ FM信号の周波数に同調した回路と位相検波器を使用して、周波数偏移に応じた信号をもとの信号とする方式。

の3方式である。この内、③の方式は直線性と温度特性に明らかに問題があることが経験的に知られているので、①と②の方式について実験的にS/Nの優劣を比較した。

その結果、②の方式はIC化された素子が利用できる便利な点は評価できても 26.7 ± 0.6 kHzというような変調度の小さい信号を復調する場合には60 dBのS/Nを安定して得る事が困難であるということが判明した(当時(1974年)手に入るICで)。一方①の方式が発生する雑音は充分小さく、この方式を用いればFM変復調系総合で70 dB以上のS/Nを確保できることを確めた。

3. 波及効果

以上の検討によりS/N設計上最大のネックと、誤まって評価されていたFM変復調系のS/Nが正しく評価された。更にこれによりS/Nの第2のネックとなっていた地震計等化増幅器のS/Nを再検討するきっかけをつくった。演算増幅器を雑音の小さなものとするによりS/Nが向上したことは関連研究2ですでに述べたとおりである。

信号の総合S/Nは、その信号の全経路の中でS/Nの最も悪い部門に依存する。FM変復調系のS/Nを過小評価していた時点においては他の部門のS/Nは問題とはならなかったが、この研究によりFM変復調系のS/Nが正しく評価されて、それを契機として他の部門のS/N設計にも厳密な再検討が必要であることを認識せしめた。この点において、この研究のシステム開発に対して貢献した価値が認められよう。本文でも述べたように、信号の総合S/Nは最終的に72dBに達している(本文図2.15参照)。

(関連研究 4)

海底における地動雑微動の特徴

松本英照・高橋道夫

要 旨

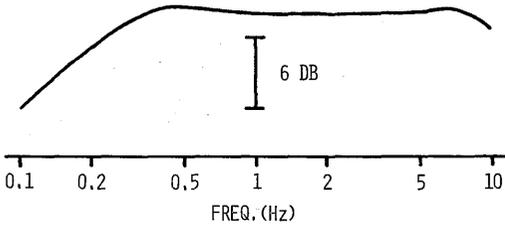
0.2~5Hzの帯域における地動雑微動が調べられている。陸上における雑微動と比較すると、約1Hzを境として長周期側の振幅は陸上より大きい、短周期側では小さいという点に特徴がある。この特徴はそれぞれの帯域の雑微動の起源を考えると妥当なものである。

1. はじめに

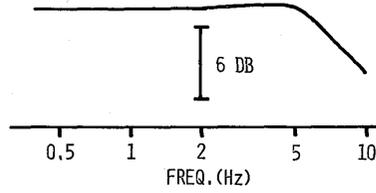
このシステム布設の約1年半程前に、先端装置の布設工法を確認することを主な目的として布設実験を行った。用いた機器は一部模造品も含まれるが、実際の敷設船により先端装置設置予定海域で行うという本格的な実験であった。この機会を利用して耐圧筐体内に地震計および記録器を封入し、この海域における地震活動度および地動雑微動を調べた。雑微動の大きさは適正な観測倍率を決定するためには、どうしても知る必要があるので、やや詳しく調べた。

2. 周波数解析

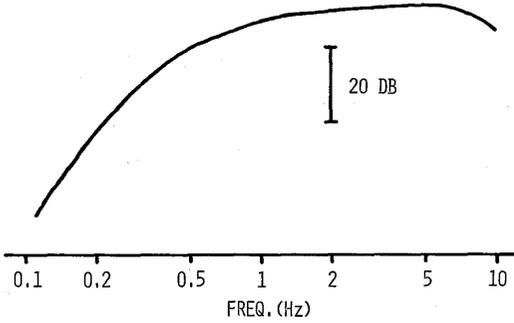
先端装置の布設実験は1976年10月12~16日に行われたが解析に用いた記録は14日正午頃の記録である。その時間的代表性は後に考察する。用いた地震計はこの観測システム用の試作器で3成分の記録のうち速度型上下動および変位型水平動1成分を解析した。記録器はカセット磁気テープを0.15mm/sec(通常の1/320の速さ)で送り、直接(無変調)録音する方式の長時間記録器である。これによる記録を通常のカセットデータレコーダーで再生し、電磁オシログラフに可視記録として出力させた。記録器および再生器の周波数特性を図研4.1, 4.2に示す。図研4.2において電磁オシログラフのガルバノメーターの固有振動数は2.2kHzなので、再生時の320倍という速度を考慮に入れると約7Hz以上で感度が低下する。地震計、記録器、再生系すべてを含めた周波数特性を図研4.3(上下動)、図研4.4(水平動)に示す。測定系の電気雑音の評価は次のようにして行った。すなわち、地震計の姿勢制御はタイマー回路に



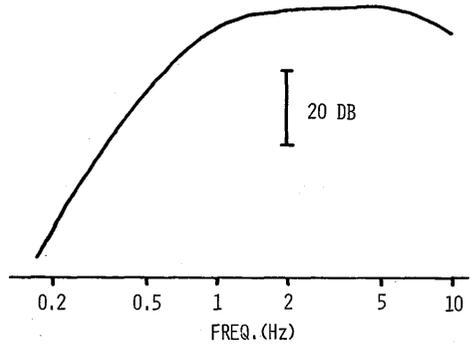
図研 4.1 記録器の周波数特性
Fig. R 4.1 Frequency response of the recorder.



図研 4.2 再生器の周波数特性
Fig. R 4.2 Frequency response of the playback equipment.



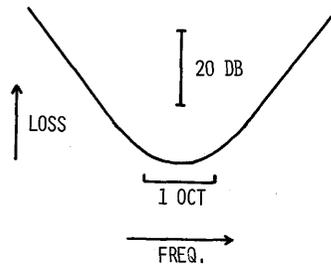
図研 4.3 総合の周波数特性(上下動)
Fig. R 4.3 Overall frequency response for the vertical component.



図研 4.4 総合の周波数特性(水平動)
Fig. R 4.4 Overall frequency response for the horizontal components.

より行う。そのタイマーが働いて地震計の姿勢が正規の方向となる以前においては、上下動変換器は逆立ちしていたと推定される。従って、その時には変換器出力は完全に0であり、得られている記録は地震計等化増幅器、磁気テープ記録器、再生器、その他すべての雑音を総合したものと言える。測定系の電気雑音をこのように評価して地動雑微動の周波数解析を行った。

再生器出力に0.1~0.2Hz, 0.2~0.4Hz, 0.4~0.8Hz というように1オクターブの通過帯域幅をもつバンドパスフィルター(図研4.5)をかけ、電磁オシログラフに入力し、得られた可視記録の振幅をよみとったのが図研4.6のOBである。



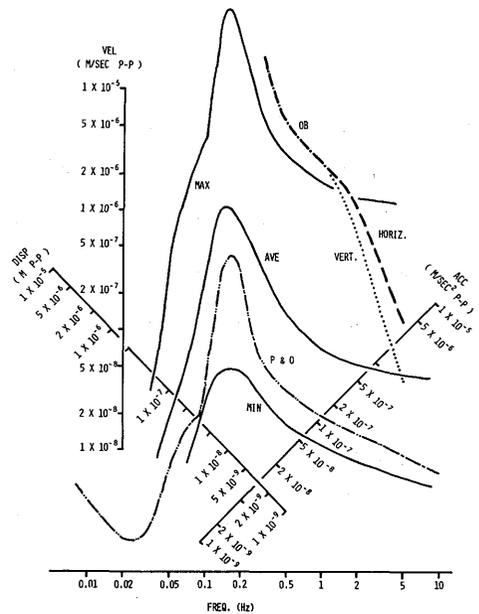
図研 4.5 帯域通過フィルターの周波数特性。
通過帯域幅は1 oct. とした。
Fig. R 4.5 Frequency response of the band pass filter.

3. 検討

Brune and Oliver (1959)は約100編の文献の中から陸上における雑微動が定量的に議論されているものを選びだして検討し、周期別の雑微動の大きさを得ている。彼らによる、最大の大きさの雑微動、平均的な大きさの雑微動、最小の大きさの雑微動を、それぞれMAX, AVE, MINとして図研4.6に示した(なお彼らの記述において振幅がo-pなのかp-pなのかrmsなのか、全くふれられてないので、ここではo-pであるものとみなした)。文献から集められたデータは1, 2の例外を除いて、場所、時間を問わず、この図のMAXとMINの間に入るということであるが、これは勿論、しっかりした基盤の上での観測結果にもとづくものと考えられる。

Peterson and Orsini (1976)も“quiet site”における“approximate”な地動雑微動の大きさということで、図研4.6のP&Oで示した大きさを報告している。図研4.6でOBで示される海底の雑微動の大きさは、Brune & OliverやPeterson and Orsiniによる結果と比較して、約1 Hz以下の帯域では相当(10 dB以上)大きい、それ以上の帯域ではMAXないしはAVE程度に下るといふ特徴がある。この結果は「周期2~3秒の脈動の振幅は海底では場合によっては陸上の10倍にもおよぶ。しかし、微小地震の帯域、つまり数Hzより短い周期では陸上よりノイズが高い理由はひとつもない」という浅田・島村(1974)も支持しているMonakhovの主張と調和する結果である。いずれにしても、周期にして1秒を越える雑微動、いわゆる脈動の起源については、海の波浪による定常波であるといわれていることからしてもこの結果はまちがいのないものであるといえる。

ここで得られた雑微動の大きさの時間的代表性については、観測を行った10月14日という日の海況を考へて、この海域の平均値よりやや大きめの値が得られているものと推察された。実際に観測の始まった後のデータから雑微動の平均的な大きさとして、2~20 Hzの帯域で $0.1 \mu\text{m}^{\text{P-P}}$ 、0.8~2.0 Hzで $0.5 \mu\text{m}^{\text{P-P}}$ 、0.2~12 Hzで $2 \mu\text{m}^{\text{P-P}}$ という値を得ている。特に0.2~12 Hzでは大きい時には平均値の10倍以上にも至る。



図研4.6 海底における雑微動のスペクトル(図のOB)。MAX, AVE, MINはBrune and Oliver (1959)による。P & OはPeterson and Orsini (1976)による。

Fig. R 4.6 OB shows the seismic noise spectrum observed with the OBS.

模造品を含む先端装置の準備には日本電気㈱の協力があつた。これらの協りに感謝する。

参 考 文 献

- 浅田敏, 島村英紀(1974): 海底地震計と新しい地球物理学. 科学, 44, 278~285.
- Brune, J. N. and J. Oliver(1959): The Seismic Noise of the Earth's Surface.
Bull. Seis. Soc. Ame., 49, 349~353.
- Peterson, J. and N. A. Orsini (1976): Seismic Research Observatories:
Upgrading the Worldwide Seismic Data Network. EOS, 548~556.

(関連研究 5)

津波計の温度ノイズと先端点海底の水温変動

高橋道夫

要 旨

津波計の記録にあらわれるノイズは、津波計の周囲水温の変動による温度ノイズであると判断される。熱伝導モデルにより、その温度ノイズ波形の特徴を再現することができた。このノイズを利用して先端点周辺の短周期水温変動に関するデータが得られる。

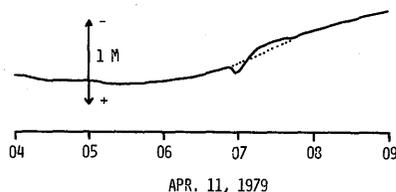
1. はじめに

水晶振動子の共振周波数は非常に安定しているので、その高安定性を利用して各種の精密な装置が製作されている。津波計もそれらの中のひとつである。一般に水晶発振器の発振周波数は温度の変化により、規則的に変化し、それが観測測器や測定器のノイズあるいは誤差となって現れる。より高度の精密さ、正確さが要求される装置においてはこのノイズを抑圧するために水晶を恒温槽に入れたり、あるいは電子回路により温度補償を行ったりする対策が一般的に行われている。前者が確実であるが、津波計の場合には水中において外圧を水晶に伝達しなければならないのでこの方法は用いることができない。従って温度補償方式(電子回路による)を採っている。温度補償の方法は感圧水晶発振器と温度特性が等しくなるようにカットして製作した非感圧の水晶発振器を別個に設けて、両者の信号のうなりを出力とする方法である(本文図2.29)。

次節において、津波計記録に実際に見られるノイズを紹介する。3節では津波計を用いてあらかじめ行ってあった野外実験観測のデータを用いて、温度ノイズを解明しその発生機構に関する妥当なモデルをたてる。4節ではこのノイズを手がかりとして得られた先端点付近の海底における短周期水温変動について述べる。

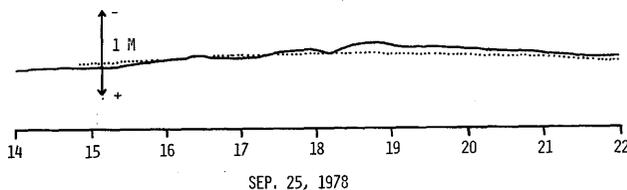
2. 津波計記録のノイズ

津波計は外洋潮汐による海底の水圧変化を常時記録しているが、その記録の中に時々図研5.1, 5.2のごときノイズが認められる。図研5.1の場合は片振幅が10 cm程度、継続時間は約1時間、またその波形は単純である。一方、図研5.2の場合には振幅はやや小さいが継続時間が図研5.1よりも長く波形も単純ではない。ノイズの波形は、これらの図ですべてが尽されるわけではなく、継続時間は最低1時間、長くても数時間、振幅は20 cmどまり、波形は図研5.1のような単純なものから図研5.2のような不規則なものまで、いろいろある。例えば図研5.3は1979年1月31日に現われた最大のノイズで片振幅も最大20 cmに達し、約7時間継続している。



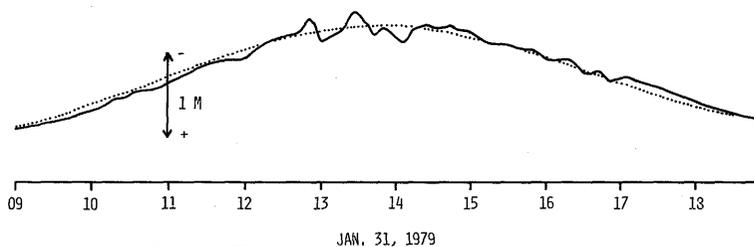
図研5.1 津波計記録に時々みられる温度ノイズの例。点線は調和解析による推算値。

Fig. R 5.1 Example of thermal noise on the tsunami records.



図研5.2 (図研5.1と同じ)

Fig. R 5.2 Same as Fig. R 5.1



図研5.3 (図研5.1と同じ)

Fig. R 5.3 Same as Fig. R 5.1

3. 温度ノイズの性質

津波計の感圧水晶発振器の発振周波数 f_s (Hz) は

$$f_s = 4.992,000 + 19.8 T_s - 2.0 D \quad (1)$$

であらわされる。ここに T_s は水晶の振動部分の平均温度 ($^{\circ}\text{C}$)、 D は水圧で密度 1 g/cm^3 の水柱の高さ

(m)で記してある。(1)によると T_S が 1°C 変化した時の f_S の変化は約 20 Hz で、これは D が -10 m 変化した時の f_S の変化にほぼ等しく、 D を観測する目的においては T_S の変化がノイズとなり、その大きさは $10\text{ m}/^\circ\text{C}$ と、相当に大きい。このノイズを抑圧するために非感圧の温度補償水晶発振器を用意してある。その発振周波数 f_R (Hz) は

$$f_R = 5,000,000 + 2.0 T_R \quad (2)$$

であらわされる。 T_R は水晶の振動部分の平均温度 ($^\circ\text{C}$) で、その係数 2.0 は(1)の T_S の係数 19.8 と等しくすべく設計されたが、製造上の誤差により 2.0 となっている。(1)も(2)も、ある温度範囲で近似された式である。津波計の出力周波数 f は f_R と f_S の差で

$$f = f_R - f_S = 8,000 + 2.0 (T_R - 0.99 T_S) + 2.0 D \quad (3)$$

とあらわされる。津波計の周囲温度を T ($^\circ\text{C}$) として、 T の変動が

$$T_R = T_S = T \quad (4)$$

の関係が常に満されるような、ゆっくりした変動ならば(3)は

$$f = 8,000 + 0.2 T + 2.0 D \quad (5)$$

と変形でき、 T の 1°C の変化が D の 0.1 m の変化に相当するにすぎない。従って温度ノイズは温度補償により、 $10\text{ m}/^\circ\text{C}$ から $0.1\text{ m}/^\circ\text{C}$ へと $1/100$ に抑圧されていると言える。

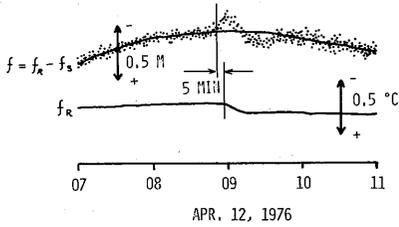
(4)が常に満されるような場合、すなわち T に短周期成分が含まれていない場合にはこの温度補償は確かに有効である。しかし、そうでない場合はどうであろうか。例えば T が階段状に変化した場合を考えてみると、 T_R と T_S は両水晶振動子のおかれた位置に応じてそれぞれ異なる応答をする。その応答のずれから T_R と T_S とに差が生じ、仮にその差が T の 1°C の階段状変化の場合に 0.1°C だけあるものとする(3)から、 D に 1 m のノイズが現われることになる。これはノイズの抑圧が $1/100$ から $1/10$ に劣化していることに相当する。勿論、この種のノイズは過渡的なもので、一定の時間が経過した後は(4)が満され、定常的な $0.1\text{ m}/^\circ\text{C}$ のノイズのみが残る。

この例のように T に短周期成分が含まれていると温度補償が、仮に、(5)の T の係数が完全に 0 となるように、なされていても過渡的なパルス状のノイズが発生するものと考えられる。そのノイズが大きいか、無視できるかは、実際の津波計の両水晶振動子の位置関係、津波計を構成する保護緩衝部・耐圧筐体等の熱伝導率の分布、それに海底の温度環境条件により決る。これらの内、前二者を調べることも、目的のひとつとして野外実験観測を行ってあった。

野外実験観測の期間は 1976 年 3 月から 8 月までで、場所は静岡県伊東湾内の水深 20 m の地点に設置されている当研究所の海洋観測塔である。現在の観測システムでは水圧に相当する(3)の f のみを伝送して

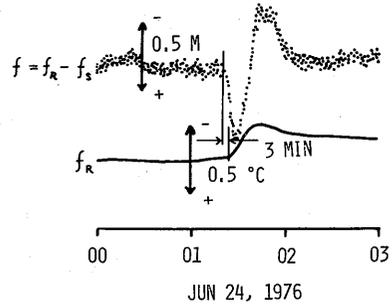
いて、水温に関する何らのデータもないが、野外実験観測中は f の他に水温に相当する(2)の f_R をも同時に記録した。

この観測期間中、4月上旬までは水温が安定していて短周期変動もほとんどなく、 f_R はほぼまっすぐに記録され、 f は純粋な潮汐運動を記録していた。その後は水温に短周期変動が時々見られ始め、それに伴って変動する f_R の記録と f の記録へのノイズが認められ始めた。5月中旬から観測終了までは水温変動の振幅も大きく頻度も多くなり、 f の記録はまさにノイズのみである。



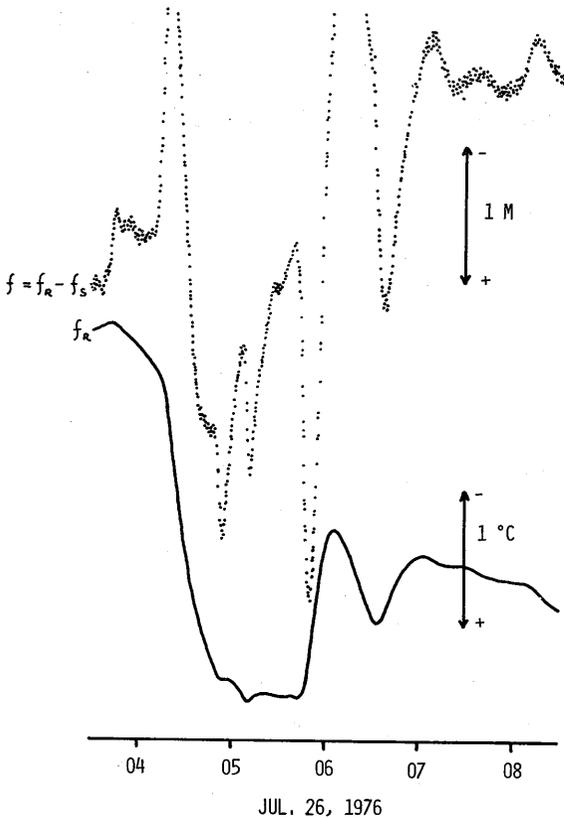
図研 5.4 津波計による野外実験観測時の温度ノイズ。水深が浅いため波浪も記録されている。

Fig. R 5.4 Example of thermal noise observed with the tsunami-meter by the field test.



図研 5.5 (図研 5.4 に同じ)

Fig. R 5.5 Same as Fig. R 5.4



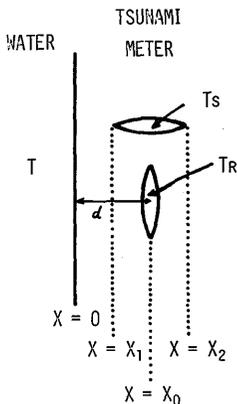
図研 5.6 (図研 5.4 に同じ)

Fig. R 5.6 Same as Fig. R 5.4

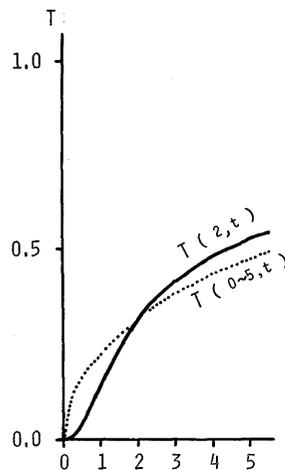
図研5.4~5.6にこの時の記録例を示す。fの記録線の太いのは水深が20mと浅かったため、風浪による短周期水圧変化が完全に減衰していないことによるものである。図研5.4は4月中旬の周囲水温が階段状に変化した時の典型的な記録である。約0.1°CのTの変化で、先に予想したようにパルス状のノイズが発生し、その片振幅は15cmに達している。このことから(3)より、 T_R と T_S との差は0.015°Cにまで大きくなったと考えられる。このことは、実際の津波計は短周期温度変化に対してはノイズを抑圧する働きが約1/7に劣化していることを示している。

ノイズの発生機構を説明するうえで、図研5.4において更に注目すべき点は次の点である。すなわち、Tの上昇によりまずfが負にふれ始め、その約5分あとから f_R が正にふれ始める。fは20分間で負側に振幅約15cmのパルス波形を形成した後、正側にもほぼ等しい振幅だけ振動して最初(Tの上昇)から約50~60分後に安定する。 f_R はふれ始めてから約30分後に最終的な値に到達して、安定する。fおよび f_R のデータから f_S のデータも再現できる。この f_S と f_R とを比較すると図研5.4に限らず図研5.5, 5.6の場合にも共通した特徴は、Tの急激な変化により f_S が f_R よりも約3~5分早く立上るが、その約20分後には f_R が f_S を超越す。そして更に30~40分後に両者はほぼ等しくなる(潮位変動による f_S の変動は除去して)という点である。この、 f_R が f_S を超越するという現象は熱伝導の性質から考えて非常に奇異に感じられるが、この点は両水晶振動子の位置のちがいを考慮に入れると、次のように説明できる。

温度 T_R は周囲からの熱的距離dの近傍の温度で代表できるが、温度 T_S はdの両側に分布する空間の平均温度で代表できるものとする(図研5.7)。この時、 T_R は T_S に比べて立上りは遅いが一旦立上ると T_S を超越して早く最終温度に達することがありうる。例えば $x \geq 0$ を占める半無限物質(熱伝導率1, 比熱1, 密度1)を津波計と考え、その周囲 $x < 0$ の温度が時刻 $t=0$ において0°Cから1°Cに階段状に上昇($t < 0$ においては $x \geq 0$, $x < 0$ とも $T=0$)し



図研5.7 津波計の熱伝導モデル
Fig. R.5.7 Model for thermal conduction.



図研5.8 水晶振動子温度の時間変化。 $T(2,t)$ が T_R に相当し $T(0\sim5,t)$ が T_S に相当する。
Fig. R.5.8 Temperature changes of the quartz vibrators (cf. Fig. R.5.7)

たまま一定に保たれる場合、 $x \geq 0, t \geq 0$ における温度分布 $T(x, t)$ は

$$T(x, t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{t}}} e^{-v^2} dv$$

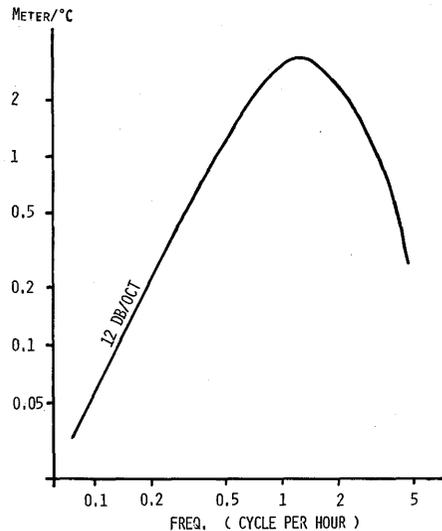
であらわされる。図研 5.8 に $x = x_0 = d$ における温度 $T(x_0, t)$ と $x = x_1$ から $x = x_2$ までの平均温度

$$T(x_1 \sim x_2, t) = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} T(x, t) dx$$

のグラフを $x_0 = 2, x_1 = 0, x_2 = 5$ の場合について示す。 $T(2, t)$ は $t < 2$ では $T(0 \sim 5, t)$ より小さいが $t > 2$ において大小関係が逆転している。 T_S を $T(0 \sim 5, t)$ に、 T_R を $T(2, t)$ に対応させて考えることにより図研 5.4~5.6 のパルス状、というよりもパルス微分状の過渡的な温度ノイズの波形にも説明がつけられる。従って図研 5.1~5.3 の現在観測記録にあらわれるノイズが、周囲温度変動によるものであることは間違いない。

以上のノイズの発生機構をまとめると以下のとおりである。周囲水温が階段状に a (°C) だけ上昇(下降)するとまず T_S が上昇(下降)を始める。その約 3~5 分後に T_R が T_S のあとを追って上昇(下降)を始めるが約 20 分を経過するまでは $T_S > T_R$ ($T_S < T_R$) で、その差は最大 $0.15a$ (°C) に達する。従って(3)からわかるように、 f は小さく(大きく)なる方向に $3a$ (Hz) ずれる。これは D の $-1.5a$ ($+1.5a$) (m) の変化に相当するノイズである。約 20 分後に $T_R = T_S$ となった後は、約 30~40 分間 $T_S < T_R$ ($T_S > T_R$) となる。このときのノイズの方向はさきほどと逆の極性で振幅はほぼ等しい。この後は $T_S = T_R$ となって過渡的なノイズは消滅し、定常的なノイズ $0.1a$ ($-0.1a$) (m) のみが残る。図研 5.4 の f が、 $a = +0.1$ の場合の典型的な例と考えられる。図研 5.1 のノイズは図研 5.4 とよく似ているので、この時周囲水温に階段状の変化があったものと考えることができる。その変化は、ノイズの立上りの振幅が $+0.1m$ なので -0.07 °C と考えられる。

このように T の階段状変化に対する f の応答が得られているので、 T が任意に変動する時の f の応答も計算可能である。図研 5.9 には T がある周期をもった単位振幅の正弦波形で変動する場合の f の応答 (T と等しい周期をもった正弦波)の振幅を計算し、



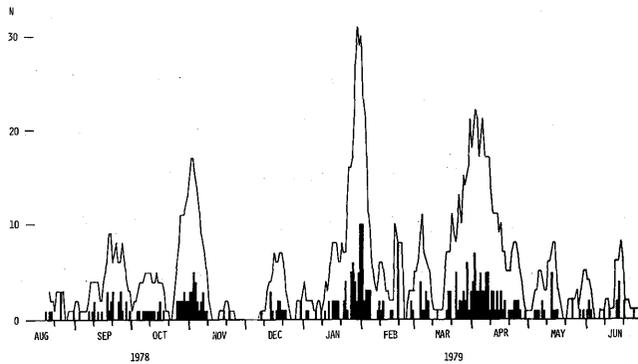
図研 5.9 温度ノイズ振幅の周波数応答。図研 5.4 が階段応答であるものと仮定して計算した。図研 5.7 のモデルの成否とは独立の、現象にもとづいた結果である。

Fig. R5.9 Frequency response of the tsunami-meter calculated from the step response of Fig R5.4.

水深に換算して示す。この図から読みとれるように周囲水温変化の周期が50分のときノイズが最大となり、その片振幅は3mをうわまわる。また50分より長周期の水温変化に対しては、ノイズは周期の二乗に反比例して小さくなるという性質が認められる。

4. 先端点海底の水温変動

津波計が海底で作動を始めた1978年8月16日から1979年6月までの記録から温度ノイズをさがしその日別発生頻度を図研5.10に示す。図研5.1～5.3の記録例からわかるように振幅5cm以上のノイズは必ず見つけうる。従って0.03℃以上の急激な水温変化はもれなく数えられていると考えてよい。頻度の計数において図研5.2, 5.3のように長時間継続している場合には、正確が期せないが、ここでは1回の階段状変化によるノイズの継続時間が約1時間であることから7時間継続したものは7回と計数してある。



図研5.10 温度ノイズの日別発生度数。折線は全体の傾向を見易くするため前後5日間の合計度数を示したもの。現在までの解析によると発生頻度の高い時期は黒潮の流軸が津波計の上を横切っている時期に相当している。

Fig. R 5.10 Daily frequency of the thermal noise.

ノイズの発生をもたらす水温変化は海底における水の流れを間接的にあらわしていると考えられるが、図研5.10によると、1978年10月下旬～11月上旬、1979年1月下旬～2月上旬、3月下旬～4月上旬の期間はノイズ発生頻度も多く、いわば「活動期」と呼べる期間である。

このデータを用いた海洋学的な解析は、外洋潮汐の調和解析結果等とともに、更に長期間のデータの蓄積を待って、別の機会に発表したい。

5. あとがき

伊東における野外実験観測の遂行にあたってその施設の利用に関しては、当研究所海洋研究部主任研究官・小泉宗三郎氏に、また、一部の観測器材使用に関しては日本電気(株)伝送通信事業部デバイス部技術課

長はじめ部員の方々に負うところが大きい。これらの協力に感謝する。

(関連研究 6)

電食の対策

飯 沼 龍 門

要 旨

このシステムは海水という電解液の中に金属を入れ、更に直流電流を流す装置である。これは、渡金槽に相当するものであり、電食の問題は避けては通れない。

電食には下記の原因が考えられる。

- (a) 電流を強制的に流すことによるもの
- (b) 海水の流れによって発生する電位によるもの
- (c) 電解度の異なる異種金属間で起こる電位によるもの

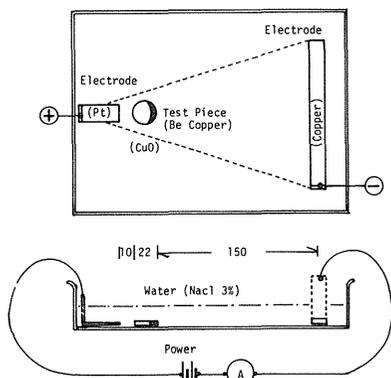
(a)項に該当するものは海底アースの近くで、(b)項に該当するものは海岸付近の外装ケーブルの外装線で、(c)項は先端装置の大型耐圧筐体とケイジの間で問題を起こすと考えられ、これについて検討と対策をした。

1. 海底給電用アース

海底同軸ケーブルを利用して海底で端末が終わり(海底アースが必要)、直流給電(アメリカのコロンビア大学のOBSは交流給電)をしているシステムの例は全く聞いていない。海底同軸通信システムは、相互の陸の海岸付近に給電用のアースを設けているので特に問題はないが、この方法は本システムには適用できない。

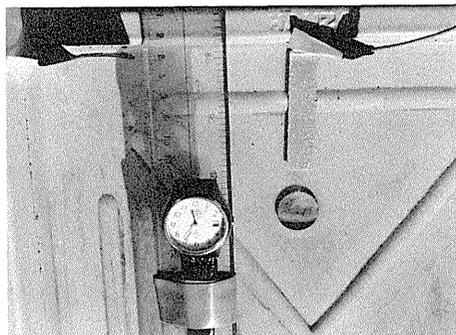
メーカーから出された昭和49年度のシステムデザインは、アース電極本体はチタン棒に白金メッキをした電食防止用として先端装置に組み込む(この方式は先端装置の布設が容易である)方式で提案された。筆者は、この方式だと防食電極から流れ出した電流が近くの導体(先端装置)を通った時は、電食を引き起こす懸念があり、これは重大事故に連なると考え、メーカーにも再検討をさせると共に、この方面の関係者にも照会したが、明確な答はなかった。このため、研究所で純白金片(9g)を購入してシミュレーション実験から試みた報告を以下にする。

実験としては、図研6.1に示すように、ポリバットの内に3%の食塩(NaCl)水を入れ電食の起こる陽極には白金(Pt)を、陰極には銅(Cu)とした。この陽極から10mm離してベリリウム銅片の試験片を入れて、1Aの電流を流した。写真研6.1に示すように陽陰から流れ出した電流の一部は、試験片に流れ込み、その反対側から流れ出すことを示す黒い酸化銅(CuO)が発生する。化学反応としては、



図研 6.1 電食の実験

Fig. R.6.1 Experiment of electrolytic corrosion.



写真研 6.1 電食の実験

Photo. R.6.1 Experiment of electrolytic corrosion.



即ち、電解液中に導体を入れて電流を流すと、その場の電流量に応じた電食が発生することが確かめられた。

銅陽極の場合

$$x(\text{g}) = \frac{A}{9.65 \times 10^4} \times T \times \frac{64}{2}$$

A : 電流 (A)
T : 時間 (s)

電流 : 1 A, 時間 : 1 時間

$$x(\text{g}) = \frac{1}{9.65 \times 10^4} \times 60 \times 60 \times \frac{64}{2} = 1.19 (\text{g}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

の銅が酸化してはく離し溶け出す。陽極に白金を使用して電流を流した場合、図研 6.1 の点線で囲む範囲の電流密度が均一で（実際は中心と良導体部に集まる）あると、試験片に流入する電流量は、試験片の断面積とこの面における総電流の場の面積との比に比例する。この実験での面積率は 9.5% である。(1)の量に面積率を乗ずると、試験片の銅の酸化する量が算出できる。

試験片の銅の溶出量：

$$1.19 \text{ g} \times 0.095 = 0.11 \text{ g} \quad (\text{時間あたり})$$

更に、海水の中で陰極を約 50 m 離して試験した。結果はバット内の場合と異なり、全面から電流が流れ込むため、電流密度が小さくなるため酸化銅 (CuO) の発生量は少ないが、同じ様な効果が認められたので、海底アース電極を先端装置ケージ内に収納することは、長期稼働に支障をきたすことが確かめられた。メーカーからも、その後同様の結論が出された。

2. 海底アースと先端装置の距離

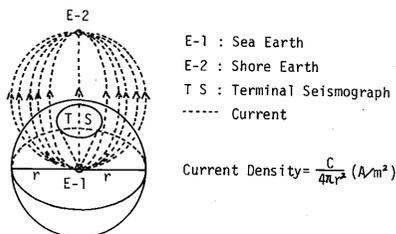
海面下2,000mの海底に設置された海底アース電極からは、図研6.2に示すように全方向に対してほとんど同じ電流密度で流れ出すものと推定される。

電流密度と距離の関係式は

$$\frac{C}{4\pi r^2} \quad (A/m^2) \quad \begin{array}{l} C : \text{電流 (A)} \\ r : \text{距離 (m)} \end{array}$$

で表わされる。先端装置の断面積を1m²、電流を210mAとして、20年間に先端装置から溶け出す銅相当の量を推算すると、表研6.1の通りとなる。

ケイジ内(50cm)にアースをセットすると、20年で14kg以上の銅が酸化して溶出することになる。これはシミュレーション実験に示したように耐圧筐体のアースの反対側が溶けて薄くなり、潰れてしまう。しかし、100m離すと350mg、500m離すと14mgと、全く問題がないことが推定されたので、海底アースと先端装置は500m以上離すことを目標に、アースケーブルは1,000mとした。



図研6.2 海底アースからの電流の流出
Fig. R6.2 Current path between the sea earth and the shore earth.

表研6.1 海底アース・先端装置の距離と20年間の電食による銅の溶出量

距離 r (m)	球面積 $4\pi r^2 (m^2)$	面積比 $1/4\pi r^2$	銅の溶解量 (kg) $43.9kg \times (1/4\pi r^2)$
0.5	3.14	0.32	14.0
1	12.6	7.96×10^{-2}	3.49
10	1.26×10^3	7.96×10^{-4}	3.49×10^{-2}
100	1.26×10^5	7.96×10^{-6}	3.49×10^{-4}
200	5.02×10^5	1.99×10^{-6}	8.73×10^{-5}
500	3.14×10^6	3.18×10^{-7}	1.39×10^{-5}

3. その他の電食

外装ケーブルを布設してある汀付近は潮流があり、これによる起電力が外装鉄線の流れるとやはり電食となり、断線事故を起こす例がある。これを防止するために、外装鉄線はプラスチック・ゾルの焼付塗装をした防食鉄線を用いた。この被覆が破れると部分電食が激しくなるので、破れないようにケーブルの埋設又はサドルで動かぬように固定してある。先端装置の大型耐圧筐体はベリリウム銅であるが、これを入れるケイジの材質によっては、この異種金属間での電食を起こす。ケイジの材料はベリリウム銅を希望したが、メーカーはベリリウム銅の長いアングル材が入手が困難なため、マリノイ(鉄材)を使用した。裸では使用できないので、全面にゴムの焼付被覆をして、更に万全を期すため亜鉛(Zn)の犠牲電極を取り付け、また大型耐圧筐体の取付部には絶縁体のセパレータを挿入した。

(関連研究 7)

高張力ケーブルと二重ジンバルの陸上実験

飯 沼 龍 門

要 旨

3章の3・3節で述べた通り、第2次布設リハーサルを実施するのに先立ち、新たに開発した二重首振り型のカップリング(写真研7.1, 従来型のカップリングは写真研7.2)の性能およびこのカップリングへのケーブルを引き留める方法と、先端装置の海の中での挙動を確かめるため、種々の陸上実験を52年11月OCCの上三川(栃木県)の工場のグラウンドで行った。行った実験の概要は図研7.1に示す。

実験項目

- (1) 引回し実験 正常方向・旋回・反対方向・吊り下げと着地
- (2) 曲げ実験
- (3) 引張り試験
- (4) 解体試験



写真研7.1 二重首振りカップリングのジンバル部

Photo. R.7.1 Gimbal of the newly developed coupling.

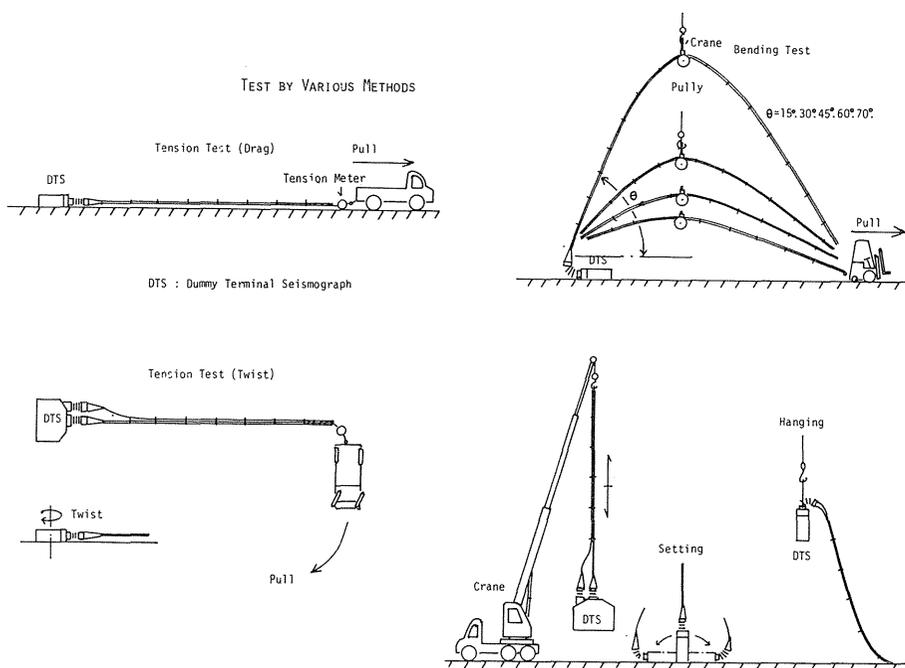


写真研7.2 従来型カップリングのジンバル部

Photo. R.7.2 Gimbal of the usual coupling.

1. 引回し実験

ダミー先端装置ケイジに土のうを組み込んで同等の重量にして、この先に二重首振り型カップリング2式と部分外装を施して、その外装線のカップリングにケーブルの張力を移す引き留め方式にしたケーブル20m2本(信号ケーブル・アースケーブル)を麻紐で束ねた。その末端をトラックで引き回してその挙動を目視検査すると同時に、8mm撮影をした。正常方向は全く問題はなかったが、旋回した場合はその方向の外側にあるカップリングに一度力がかかり、ケイジが回転することが確かめられた。アース側ケーブルにゆるみを多く取ると、ケイジの下に引き込む恐れのあることが判明した。また、屈曲を多くした時、ベ



図研 7.1 実験の概要

Fig. R 7.1 Outline of the experiment.

ローズのゴムがジンバルに咬まれ、仮に入れた水が漏れてしまった。

2. 曲げ実験

図研 7.1 の右側に示すように、ケーブルを滑車に通してクレーンで吊り上げ、その先端をフォークリフトで引張ってその挙動を目視検査した。これによると 30 度までは先端装置が地上で約 180° 旋回してから立ち上った。45 度以上は、そのまま引き起こされた状態で立ち上った。

ケーブルを吊り上げ着地した時のケイジとカップリングの挙動を検査した。布設開始の時に船のクレーンで吊り上げると同様の吊り上げ実験をした結果、カップリングの曲り角度の異常とケーブル取付部のシャープベンドは認められなかった。

以上の実験を繰り返した高張力用カップリングを地面に固定して、二重ジンバルが曲り切った位置を基準にして、曲げ角度 15 度・30 度・45 度・60 度および 70 度で張力 1.2~1.6 トンの力を加えて曲げた(写真研 7.3)。この結果、カップリングから 50 cm のところまで曲り癖がつき、元に戻らな



写真研 7.3 曲げ実験

Photo. R 7.3 Bending experiment.

かった。

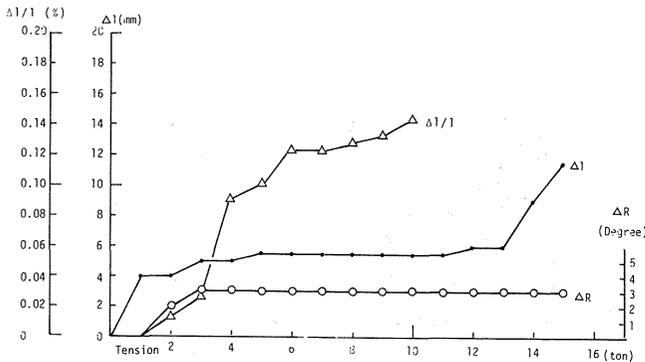
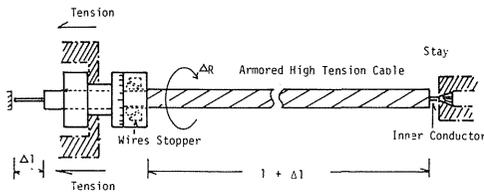
アースのカップリングに対しては、90度で力を加えた。この結果、ブーツの先でケーブルが曲げ半径33cmの弧になった。

3. 引張り試験

高張力ケーブルのカップリングへの引き留め方法は、通常を中心導体（ピアノ線41本が入っていて、これが抗張力となる）支持法でなく、ケーブルを部分（各端末50m）外装してその外装線の鉄線をカップリングのハウジングに引き留める方式（外装ケーブル用カップリング方式）を採用した。これは、破断張力までの力をかけた時、外装部と無外装部にスリップ等が起きないかの実験で確かめることが必要となった。

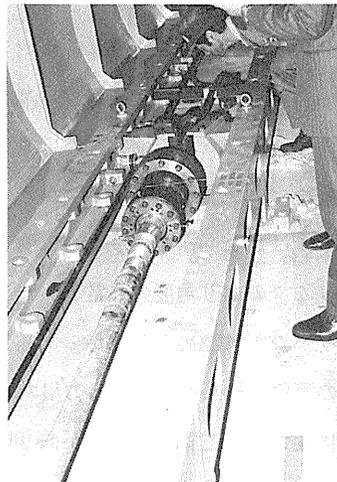
実験の方法および結果は図研7.2に示す。無外装ケーブルの端末を部分外装した20mのテストピースを外装線を折り曲げて固定し、この固定子と中心導体の固定子の間で引張り試験をした（写真研7.4）。図に示すように外装線と同軸心のずれは、4mmの初期ずれがあり、再び13トンから15トン（破断限界）の間で6mmずれた後、中心ピアノ線と銅パイプの間でスリップを始めた。ケーブルの伸びは10トンで0.14%となった。外装の回転（より戻し）はほとんどなかった。

以上の実験で、高張力ケーブルのカップリングへの引き留め方法が実験的に確かめられた。



図研7.2 引張り試験

Fig. R 7.2 Test for tensile strength.



写真研7.4 引張り試験

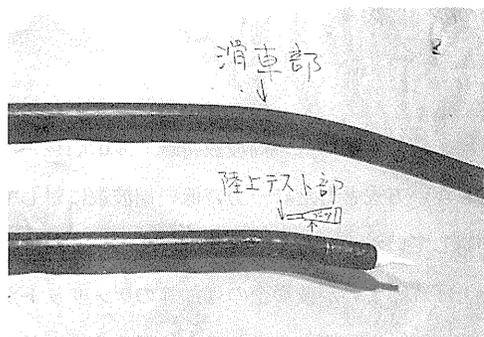
Photo. R 7.4 Test for tensile strength.

4. 解体試験

- 1.の引き直し実験と2.の曲げ試験を行ったカップリングを解体し、更に部分外装線を取り除き、38mm高張力ケーブルを取り出した(写真研7.5)。この外見は写真に示すように、曲り癖がついていた。

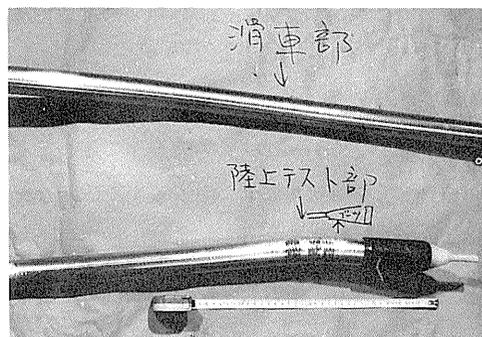
外被のポリエチレンを切り開いた(写真研7.6)結果は、カップリングの端末ソケット部分エッジにあたる所の外部導体に皺が見られたが、第1次リハーサルのようにリングカットまでに至るものでは全くなかった。

滑車にケーブルを通して引き上げた時のシャープバンドでついた曲り癖(写真研7.5~7.6)は、解体した結果、外部導体にわずかな皺が認められた程度で全く問題はなかった。またアース用ケーブルの取付部にも問題はなかった。



写真研7.5 解体試験

Photo. R.7.5 Taking the cable to pieces.



写真研7.6 解体試験

Photo. R.7.6 Taking the cable to pieces.

- 3.の引張り実験を行った38mm高張力無外装ケーブルは、最大荷重15トンを加えた時、複合内部導体のピアノ線とこれを捲く銅パイプ(銅片を捲きつけ溶接)の間に95mm(引留側)のずれが見出されたが、実際のもは長いので全く問題にはならない。
- 第2次海上リハーサルに使用した高張力無外装ケーブル(38mm)と海底アース用無外装ケーブル(25mm)のそれぞれのカップリングを解体して、カップリングの状態を検査すると共にケーブルの外被も開いて検査した。

この結果、外部導体に若干の皺が認められた以外は、浸水その他の異常は認められなかった。また陸上実験でベローズを咬んだ事故について、防止用のガード片を取り付け、この効用で全く問題はなかった。

以上により、二重首振りカップリングと高張力ケーブルの引き留め方式の方法が確定した。

この研究の遂行にあたっては日本大洋海底電線株式会社の協力を得た。

(関連研究 8)

伝送波のS/N確保とシステムの電磁シールド

飯沼龍門・松本英照・長山靖夫

要 旨

本プロジェクトは、海底部装置(ケーブル関連・布設を除く)の製作設計についてのみN E Cと契約したもので、総合発注方式ではない。このため、総合コンサルタント的な業務はすべて地震火山研究部が担当した。

この一環として、伝送波のS/Nと、当初計画のダイナミックレンジを確保する為に必要なシールドの工法については、一部、4章1.3の海岸中継所局舎の項で述べた通り、地震火山研究部の責任において調査、計画を実施した。

1. はじめに

本システムの基本設計は既に関連項で述べてあるように、伝送波には低い周波数帯域(40 kHz ~ 200 kHz)を割りあてて、中継器を可能なかぎり使用しない方式とした。一方、低い周波数に対しては外来電波等を含めて電磁シールドは困難であることが判明していた。総合S/Nを確保するためには、海底の送信機の出力を増かし海岸局における受信レベルを上げればよいが波形歪の増加等のデメリットが出現して必ずしもS/Nの改善にはならない。このような理由から送信機出力はなるべく低くする方針でレベル設計を決定した。この結果、

伝送波到達レベル(1 CHあたり)	— 70 dBm
海底部装置の発生基本雑音	— 138 dBm
陸上の環境雑音	— 120 dBm
F Mの改善度	30 dB
センサーのダイナミックレンジ	72 dB

とすればFM-FDM総合のS/Nは、 $(-70) - (-120) + 30 = 80$ となり、 $80 \text{ dB} > 72 \text{ dB}$ であるからセンサーの72 dBのダイナミックレンジはほぼ確保できることを意味する。このためには、陸上の環境雑音を-120dBm以下に抑えるように中継局舎を含めて工事することが必要となった。雑音の原因となる誘導現象については、静電誘導と電磁誘導があるが、静電誘導はコンデンサー効果による結合で起こるもので、距離の2乗に比例して減衰し、特に同軸ケーブルは構造上その遮蔽効果を持っているので、ほとんど問題はない。

電磁誘導はケーブルを切る磁界によって誘起するもので、この電磁界(電流・電波)を遮蔽すればよいが、同軸ケーブル自体は本システムに使用している周波数帯域の電磁界に対して、全く遮蔽効果を持っていない。

2. 電界強度の測定

ケーブルの電磁遮蔽を設計するにあたっては、長波の電波による電磁誘導が起るとされている海の水
深50 mから陸上にかけて対策を考慮した。陸上については、電界強度が大きい近くの無線通信施設の影
響を重視し、周波数とその出力の調査を行った。

この付近で電波を発射しているのは、ケーブルが通過する道路脇約100 mに直径10 m程の大きなパラ
ボラアンテナを持つ航空自衛隊の通信施設(1.7 GHz・200 MHz・5 MHz)と海上保安庁の御前崎の
無線標識局(A₁, 319 kHz, 260 W)が700 m程離れたところで常時電波を発射している。50年度
に本システムの使用帯域に近い無線標識局の電界強度を電界強度計(長山靖夫所有)と携帯用シンクロス
コープで測定した結果、100 mの距離で約0.1 V/m相当の実測値が得られた。

電界強度を理論式より算出すると、次の通りである。

電界強度計算式

$$E = 107.2 + 20 \log f (\text{MHz}) + 10 \log p_t (\text{W}) - L_d$$

f : 周波数

p_t : アンテナ出力

L : 自由空間損失

に海岸標識局の値を入れると、100 mの位置の電磁強度

$$E \doteq 114 \text{ dB} \mu\text{V/m} \doteq 0.5 \text{ V/m} \quad (\text{実測は } 0.1 \text{ V/m})$$

ケーブルの位置700 m離れたところでは

$$E' = 0.5 \text{ V/m} \times \frac{1}{7 \times 7} = 0.01 \text{ V/m}$$

となる。

1波長 $\doteq 1,000 \text{ m}$, $\frac{l}{4} = 250 \text{ m}$ とすると、最大起電力は

$$0.01 \text{ V/m} \times 250 \text{ m} = 2.5 \text{ V} \quad (\text{アンテナ効率 } 100\% \text{ と仮定})$$

この起電力はこの測定系のインピーダンス75 Ωに対しては+20 dBmの電力に相当する。

今、受信端の入力信号レベル : -70 dBm

ダイナミックレンジ : 60 dB

受信端の最大電磁誘導出力 : +20 dBm とすれば

ケーブルのシールド・地下埋設(管路)・局舎のシールド等により電波を減衰させる必要のある遮蔽量
は

$$70 \text{ dB} + 60 \text{ dB} + 20 \text{ dB} = 150 \text{ dB} \quad \text{となる。}$$

この150 dBは300 kHzに対する最大試算値で、実際に必要な遮蔽量はこれより小さくなるが、一応
考慮する必要のある値である。

今回のシステムの信号は200 kHzまでの周波帯で設計してあったので全く問題はなかったが、今後

間点装置又は先端装置等の成分数を増加させFDM搬送波を3波ふやせば、3番目の搬送波は300 kHzをこえるので、注意が必要となる帯域である。

3. ケーブルの電磁遮蔽

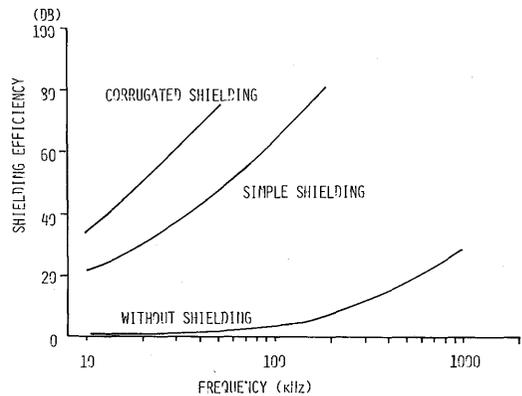
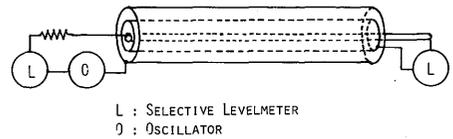
上述の通り、近くには直接妨害を与える電波はなかったが、現在日本付近では長距離航行援助施設としてロラン(long range navigation) Cの100 kHz, オメガ(OMEGA)の10 kHz~14 kHzの大電力の電波が発射されているので、可能なかぎりの遮蔽が必要と考えられる。そこで、ケーブルの電磁遮蔽について調査した。電磁遮蔽による効果については

$$K = \frac{V}{V'}$$

K : 遮蔽係数
 V : 遮蔽体のあるケーブルの誘導電圧
 V' : 遮蔽体のないケーブルの誘導電圧

という式が用いられるが、この式によれば、直流又は50 Hzと低い周波数に対しては相当の電磁遮蔽加工(アルミ遮蔽)等を施しても、20 dBの遮蔽係数を得るためには接地抵抗1Ω以下の低接地が必要となり、これは非常に高価な工事となる。

一方、高周波に対する電磁遮蔽係数についてOCCにシールド加工仕様とその効果について報告を求めた。25 mm海底同軸ケーブルの電磁遮蔽には、鉄帯による一重と二重の2つの仕様がある。その工場測定の方法と遮蔽係数を図研8.1に示す。ケーブルの二重遮蔽は、第2章2.3図に示すように第1層(内側)にコルゲートされた鉄テープをハンダ付けしてパイプ状とする。第2層は第1層の上にゴムテープを巻きつけ、この上に鉄テープ2層を互に反対方向に螺旋巻きする。図研8.1によると、二重遮蔽では40 kHz(津波計の伝送波)で70 dBの遮蔽係数が得られ測定値にはないが300 kHzでは120 dB程度の効果が期待されたので、電磁遮蔽として



図研8.1 遮蔽効果の測定
 Fig. R 8.1 Measurement of shielding efficiency.

は最高の二重遮蔽ケーブルを総長6.6km(内陸上0.8km)に採用することにした。

4. 局舎と管路の電磁遮蔽

局舎の電磁遮蔽については、KDDのJASC(日ソの海底通信システム)直江津中継所局舎で、

1968年8月に調査した妨害電波強度測定と結果が提供されているので参考に述べる。

- ・比較測定時間 24時間以上
- ・測定周波数帯域 50 kHz ~ 1.6 MHz
- ・室外~遮蔽施工室との電界強度差 $\begin{cases} 500 \text{ kHz} > 20 \sim 30 \text{ dB} \\ 500 \text{ kHz} < 30 \sim 40 \text{ dB} \end{cases}$
- ・室外~無遮蔽室との電界強度差 15 ~ 20 dB
- ・遮蔽施工の効果 $30 \pm 10 \text{ dB}$

の効果が実測されている。遮蔽の工法は、4章で述べた仕様で、KDDの厚意による技術指導を受けて施工した。

管路は、ケーブルを機械的外圧に対して防護することと、外来電波に対して電磁遮蔽効果を持たせることの2つの役目が必要となった。

鉄は磁性体で電磁遮蔽能力を持っているが、この効果を上げるには誘起した電気を早くアースに落とす必要があるため、分布接地に近い工法がよい。このため今回の管路は分布接地効果を上げるため、表面には絶縁性をもたないむき出しの白ガス管を直接地中に埋設する工法とした。電電公社の一般管路は、防食鋼管を使用し防食に重点をおき、接地からは絶縁する方式として電磁遮蔽効果は低い。

使用する鉄管の材料は軟鋼管と铸铁管がある。

表研 8.1 軟鋼と铸铁の導磁率及び電気抵抗

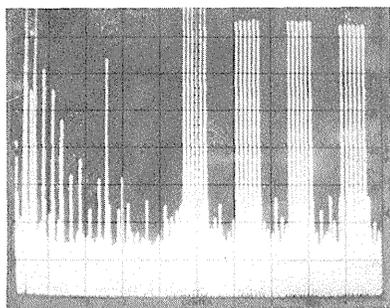
項 目	軟 鋼	铸 鉄
導 磁 率 : μ	4000 ~ 8000	500
電 気 抵 抗	10 ~ 20 $\mu\Omega$ cm	100 $\mu\Omega$ cm

表研 8.1 は、軟鋼と铸铁の電磁特性と電気抵抗を示したものであるが、铸铁管の方が管の肉厚が大きくなるので、電磁遮蔽効果にこの数値が直ちに適用できないが、铸铁管より鋼管の方が効率が良いことを示している。

以上により、白ガス管(軟鋼管)の直埋方式を採用した。

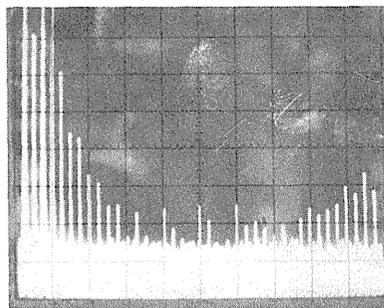
5. 遮蔽効果

昭和 53 年 8 月 7 日海底部装置が布設された時点から、中継所の受信装置を含めて総合調整を始めた。この時の総合 S/N をスペクトラムアナライザーで表わしたものが写真研 8.1 ~ 8.6 である。写真研 8.1 ~ 8.2 の横軸が周波数(約 0 ~ 190 kHz)、縦軸が信号レベル(0 ~ 80 dB)を表わしている。全装置出力(写真研 8.1)の 52 kHz の 1 本線は津波計の FDM 搬送波、88 ~ 102 kHz が先端装置の T-1 の搬送波(FM・FDM)、116 ~ 130 kHz・144 ~ 158 kHz・172 ~ 186 kHz がそれぞれ中間点装置の I-2・I-3・I-4 の FM(6 CH)-FDM の搬送波である。信号レベル 80 dB に対して、写真研 8.2 の無信号時は、雑音そのものを表示したもので、20 kHz までに 4 波のフルスケールに達する



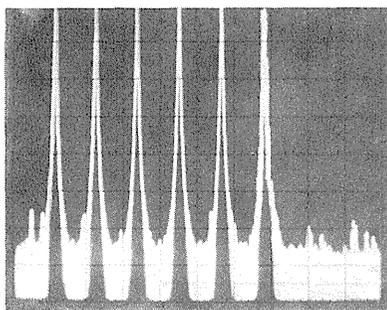
写真研 8.1 スペクトラムアナライザで見た全システムのFM-FDM信号(横軸: 20kHz/div., 縦軸: 10dB/div.)

Photo.R8.1 All the FM-FDM signals observed with the spectrum analyzer.



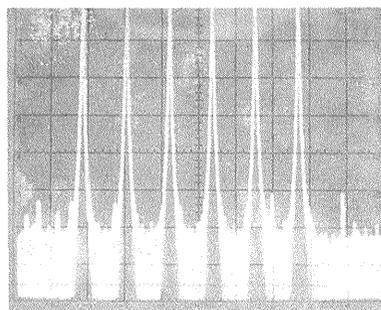
写真研 8.2 スペクトラムアナライザで見た背景雑音(横軸: 20kHz/div., 縦軸: 10dB/div.)

Photo. R.8.2 Background noise observed with the spectrum analyzer.



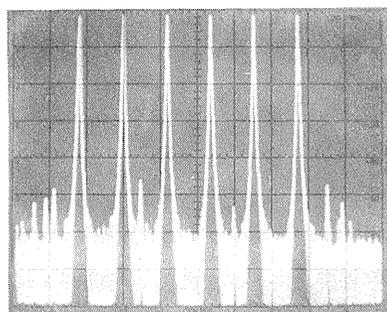
写真研 8.3 先端装置(地震成分)からの信号(横軸: 2kHz/div., 縦軸: 10dB/div.)

Photo. R8.3 Seismic signals from the terminal apparatus.



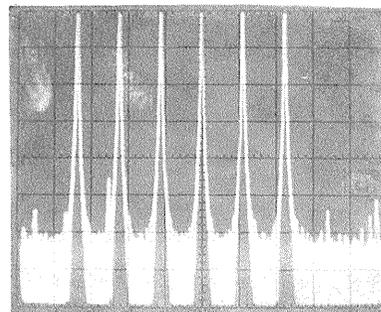
写真研 8.4 No.2中間点装置からの信号(写真研 8.3に同じ)

Photo. R.8.4 Seismic signals from the intermediate apparatus No. 2.



写真研 8.5 No.3中間点装置からの信号(写真研 8.3に同じ)

Photo. R8.5 Seismic signals from the intermediate apparatus No. 3.

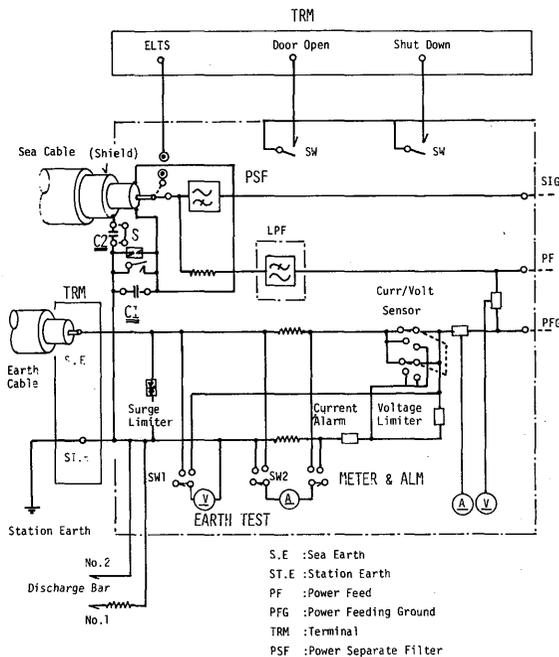


写真研 8.6 No.4中間点装置からの信号(写真研 8.3に同じ)

Photo. R8.6 Seismic signals from the intermediate apparatus No. 4.

雑音が見られる。40 kHz 以上でも 20 dB を超える成分が 24 波あり、搬送波と重った場合は目標とする S/N を取るのが困難となる。写真研 8.3~8.6 は、海底部各点の搬送波の S/N を拡大表示したものである。この時点で S/N がぎりぎりであったので、ケーブル終端装置のアースの取り方についても S/N がよくなるよう試みた。

写真研 8.1~8.6 は、図研 8.2 に示す終端装置でケーブルの電磁シールド端子をコンデンサー C2 を通して局舎アースに落とした時（海底通信システムの仕様）のものであるが、種々メーカーと調整の結果、C2 を図研 8.2 (S) のようにショートするとより遮蔽効果があることが判明した。



図研 8.2 海底ケーブル終端装置

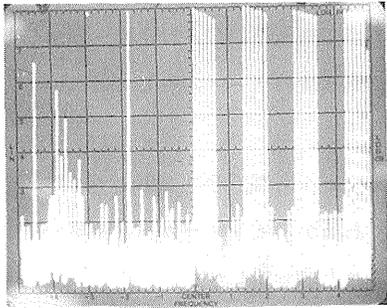
Fig. R 8.2 Terminal apparatus for the submarine cable.

写真研 8.7 は 8 月 17 日の全装置出力を示す。これによると 20 kHz までの帯域でフルスケールに達していた成分が上記の作業より 35 dB まで低下している。各海底部装置の搬送波の S/N 改善度については写真研 8.8~8.12 に示す。

これによると、FDM 系のみで S/N は 50 dB 以上確保され、FM の改善度 30 dB を加えると、総合 S/N は 80 dB が確保されることを示している。

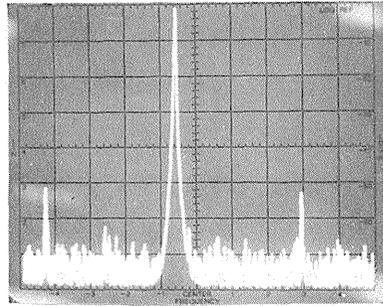
この他作業の進行に伴ない受信装置の DC-DC コンバータから発生する高周波雑音が発見されたので、このコンバータの設計変更と改修を実施し、室内照明器具のスイッチから出るパルス性雑音等を含む雑音の発生と廻り込みの防止改修もあわせて実施した。

この結果、パルス性の雑音を含めて雑音レベルが低下し、本システムの総合特性は向上し、ダイナミックレンジ 72 dB が確保された。地震計の特性面では、変位倍率で 10,000 倍に、津波計の最小分解能



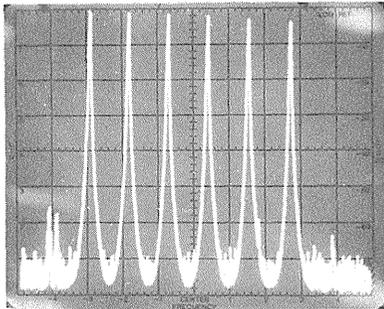
写真研 8.7 図研 8.2 の処置後の全信号

Photo. R.8.7 All the signals after the installment shown in Fig. R 8.2 .



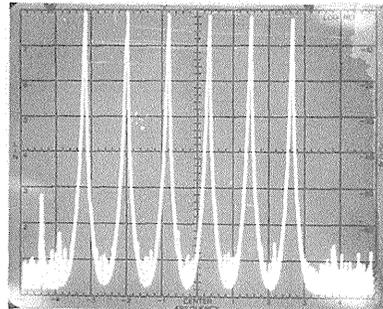
写真研 8.8 図研 8.2 の処置後の津波信号

Photo. R.8.8 Tsunami signal after the installment shown in Fig. R 8.2 .



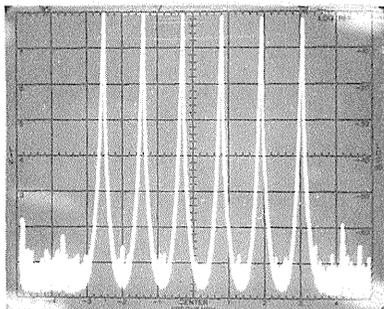
写真研 8.9 図研 8.2 の処理後の先端装置信号 (地震成分)

Photo. 8.9 Seismic signals from the terminal apparatus after the installment shown in Fig. R 8.2 .



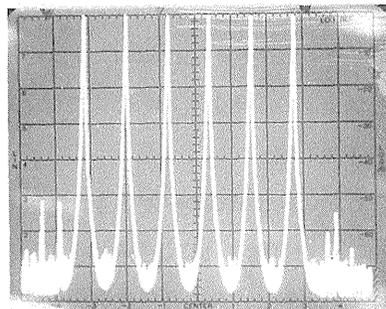
写真研 8.10 図研 8.2 の処置後のNo. 2 中間点装置からの信号

Photo. R.8.10 Seismic signals from the intermediate apparatus No.2 after the installment shown in Fig. R.8.2



写真研 8.11 図研 8.2 の処置後のNo.3 中間点装置からの信号

Photo. R.8.11 Seismic signals from the intermediate apparatus No.3 after the installment shown in Fig. R.8.2 .



写真研 8.12 図研 8.2 の処置後のNo.4 中間点装置からの信号

Photo. R.8.12 Seismic signals from the intermediate apparatus No.4 after the installment shown in Fig. R.8.2 .

は2,200 mの水深下でも5 mm以下の水深変化の検出が可能となった。この為津波計は津波の観測だけでなく海底地盤変位(上下成分のみ)測定装置としても使用可能の目途がつき、プレートの圧入による地盤変動が大きいと目される海溝の陸側海縁付近の地盤活動の観測も夢ではなくなった。このことは今後のデータの解析によっては、地震予知に必要な貴重なデータの提供ができる可能性のあることを示唆するものである。

(関連研究 9)

沿岸海底地形調査

飯 沼 龍 門

要 旨

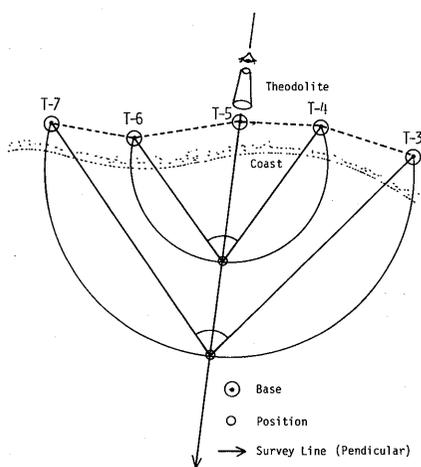
海底同軸ケーブルを陸揚げする海岸の海底地形とその底質の調査は、ケーブルの防護に必要な基礎的な調査資料である。

この調査の精度を良くするには、海上で常に動いている調査船の位置の測定とその誘導が重要であり、動かぬ陸上の測量とは異なるのでその方法の概要を述べる。

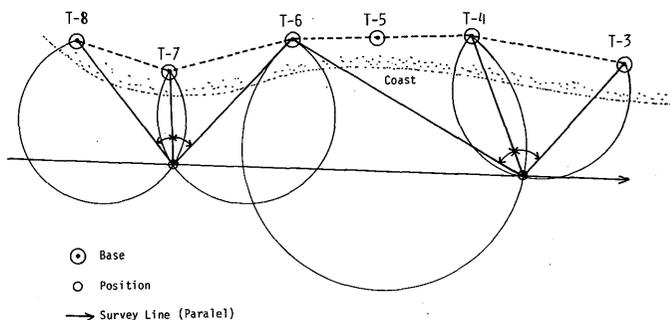
1. 調査法

海底地形調査は、3章で述べたように、海岸に対して垂直な縦測線と水平な横測線に沿って、音響測深機で深浅測量して、潮位の補正を加えて深さとする。海上測量に先立ち、3章図3.8に示す基準点(T-1~T-11)は、光波測距儀(マイクロレンジャー)と、10秒読トランシットを組合せた測器で測距離と測角を同時に行うトラバース測量を実施した。海上位置の縦測線は誘導基点にトランシットをセットして、陸上よりトランシーバーで線上に誘導し、船上で六分儀により精度のよくなる(30°~120°)2つの基準点を狙い測角する直角誘導一角法(図研9.1参照)により位置を決めた。横測線は、陸上からは誘導せず岸に平行に航行し、2点ずつの基点角の内角を2組測定し、その角度に入る円弧の交差点を位置する3点2角法(図研9.2)を採用した。

第2次沿岸調査は、最遠点が6kmに達し光学系の測定は不可能となったので、船位は電波測位機(E・O・



図研9.1 直線誘導一角法
Fig. R.9.1 Precise method to guide the survey boat perpendicular to the coast.



図研9.2 3点2角法

Fig. R9.2 Precise method to guide the survey boat parallel to the coast.

P YM-100) を使用した。従局を陸上基準点 T-6, T-3 の 2 地点へ設置し、主局を測深船へ搭載し、主局・従局間の距離を 10 秒間隔で自動的に印字させ、基準点からの距離の交会法により海上の位置を決め、測深機による深さと時間を合わせて位置とその深さを決める方法とした。

この研究の遂行にあたっては芙蓉海洋開発株式会社の協力を得た。

2. 設計確認に関するメーカーとの協同作業

2.1 システム全般

巨大なシステムの開発に際しては、その内容の難易度によって計画者のかかわり方が異なり、機器の製造に関連した作業のみをメーカーが分担し、計画・調査及びその分析・技術指導・検査等の主要な作業はすべて発注者が行うといった、かなり困難な開発の場合の形態と、すでに応用できる技術が確立しているので、計画・検査以外は全部メーカーが行うといった 2 通りの形態がある。

海底地震常時観測システムの開発計画は、既存の技術を応用するという前提で予算が要求されていたので、一見後者の形態での開発が可能な範疇にはいるように見える。ところが、既存の技術で得られた性能の限界値のみでシステムを設計したのでは、システムに要求されている機能の面で、到底開発の目的に合致した性能が得られないといった判断があり、更に国内メーカーの技術レベルが後者の形態の受注が可能な域に達していないとの評価も多かった。

従って、気象庁では開発の着手に先立ち、研究会議に開発部会を設けて、前者の開発形態によることを決定し、気象研究所の組織とスタッフの強化を行い、可能なかぎり有能なシステムづくりをめざす方針をとった。

このような経緯から気象研究所は、正式な開発の第 1 歩として、必要な条件をもれなく盛込んだ計画概

要の説明書の作成を行い、その内容が実現可能かどうか、またどのメーカーに最も高い受注能力があるかをまずチェックするといった手続を必要とした。そこで気象研究所は国内8社を対象に計画概要の説明を行って技術提案の提出を求め、提出された提案内容を分析することによって、計画の実行限界とメーカーの技術力の判定を同時に行う為の作業を行った。

この呼びかけに対しては、日本電気・富士通・沖電気・松下の4社が技術提案書を提出し、受注の意志を表示してきたが、松下の提出資料は当方の設問事項には全く応えていない内容であり、沖電気の提案は計画の一部についてのみ対応できる内容と評価されたので、この2社は指定入札対象から除外し、日本電気・富士通の2社の競争入札により、協同開発者を選定した。

このような経過で受注者を決定したので、気象研究所としてはメーカーに対して早くから自己の計画・調査結果等につき詳細な資料を提供し、開発に必要な説明を行うための接触を密に持っていたので、全く新しい開発にもかかわらず、受注者は開発の意義・内容をよく理解して、契約後はよき開発の協力者として直ちに機器の製造に関連ある内容について協同の検討を行うことができた。

このシステムの海底部装置には、伝送系としては海底中継器、地震計としては陸上で使用する地震計あるいは投込式海底地震計といった似かよったお手本はあるとはいっても、それらはその構成・特性・運用法等で意図するシステムとは全く異質のものである。即ち、意図する装置は故障が発生すれば容易に修復ができない環境下に設置され、更に前述のように開発後直ちに実用に移行させる予定で開発を進めるので、故障につながるような可能性に対する調査・検討の不足あるいは検査ミスは、絶対に許されないといった条件もあり、設計→製造→布設といった単純な過程のみで実用品としての装置をつくりあげることが、ほとんど不可能と判断された。

このような背景から、初年度には何をさしおいてもシステムデザインと試作品の製作を実施する方針をとった。そして得られた試作品を基に机上或は実験により丹念に装置製作上の問題点をしらべあげ、故障の要因の除去をはかった。この過程では、完全なシステムを作り上げるために必要な手段は1件の省略も許さない方針で検討を重ねたので、いろいろな問題点を摘出することができた。ここではまずシステムデザイン書の作成までの過程について整理しておく。

システムデザインの作成に際して、受注者側はシステムの構成要素あるいは布設工法に関連する事項それぞれに、社内の経験者を動員して開発プロジェクトチームを編成し、個別設計並びにそれらを集約した一連のシステム設計を手際よくとりまとめた。それに先がけ気象研究所では、類似装置のユーザーとしての従来の知見を基に、メーカーの検討が終了し設計が固まってきた部分から、その内容を積極的にチェックする作業を行った。

この作業により、49年度にメーカーが行った初期設計に軽微ではあるが、変更を必要とする事項がかなり指摘され、それらは再検討後に訂正されて、一部はシステムデザイン書に集約されている。

なおこの作業に際して、指摘事項はすべて設計変更されたのではなく、変更は気象研究所とメーカーの協議により決定する方針をとった。

2.2 システムデザイン書の検討

49年度に受領したシステムデザイン書の内容には、まだ気象研究所のチェックが十分に反映されていない部分もあり、更に記述された特性規格の質が完全に統一されない面もあった。即ち、このシステムデザイン書は完成した詳細設計を記載したのではなく、ある部分には目標値又は文献参照値、他の部分では工場実績値といったように、特性を未整理のまま記載し、製造・検査の過程を経た後に初めて設計を完了させるといった一連の開発作業に対し、基本資料を示す目的で作成されている。

従って気象研究所としては、この内容を出発点として検討を行い、各部の詳細設計を決定して行く作業を行い、50年度以降の製作に反映させる必要があった。

このシステムの開発では、高い性能よりも高い信頼性を得ることを基本方針としていることは再三言及してきたが、システムデザインのチェックを行う場合にも、この方針を最優先して設計の内容を評価した。

評価は主として試作と実験により、各部の特性を一つ一つ確認する方法によった。更にこの検討作業には、経時・温度・衝撃等、通常の装置製作では経験則で判断し、通常は作業を省略することの多い項目についても全数試験を行い、これらの試験後の性能劣化の有無も厳密に調査した。なおそのために地震計センサーの検査の精度の向上を必要としたので気象研究所で新しい検査法を開発した。

また、システムデザインで示された特性に達しない部分が発見された場合には、

- 回路の軽微な変更で改良が可能かどうか。
- 類似の回路に変更すべきかどうか。
- 特性規格の変更によって処理すべきかどうか。

等を協議により決定し開発を進めた。

以下、この種の作業によりシステムデザインの内容が大きく変更された主要な部分について、その変更がどうして行われたか、またその内容がどのように変更されているかについて整理しておく。

2.3 システム設計の変更

当初計画では200kmのケーブルを使用して5地点に地震計を設置し、更に信号のS/N確保のためにケーブル長の1/2の地点に中継器を挿入するというので、全体の構成を計画し、その構成を前提に周波数配置あるいは信号レベルの設計とそれに基づく回路常数の決定までを49年度に行った。しかし初年度に製作した実装試作品(1地点分の装置)を評価用に使用した結果、その装置は実使用を断念せざるを得なくなった。更に電電公社の協力を得て海底地形を詳細に検討した結果、急崖地形の南方へケーブルを延長できるルートが設定できないことが判明したので、1地点分の装置と約40kmのケーブルを布設計画から除外し、システム構成を変更する必要が生じた。そしてこの計画変更のためには、システムデザインの内容に対し以下の検討がなされ、各部の設計が大きく変更された。

1地点の装置と40kmのケーブルを省略することは、最も中継器を必要とする先端装置の伝送信号の減衰量に換算して、約24dB減少させることに相当する。従って、従来の設計に基けば、中継器を挿入す

るとしてもその利得はたかだか12 dB以下で充分となる。

ここでケーブル布設ルート of 海底地形の精密測量結果も整理できたので、ケーブルの種類を海底地形に对比させて割り付けて、使用するケーブルについてケーブル損失の正確な計算を行った。その結果、概算値に対し減衰が更に4.6 dB減少することが判明した。また途中装置を通過する時に生じる損失も、実測値は設計値より3台で約2.4 dB程度少なくなることも判明した。このようなことからケーブルを40 km短縮し、海底地震計を1台減らすという条件での最終的なシステム構成では、中継器として必要な増幅度はわずか5 dBでよいことになってしまった。そこで、この5 dBを増幅するために中継器を挿入すべきか或は何らかの方法でこの代替ができるかどうかについて協同の検討を行った。

中継器1台をシステムから除外すれば、先端装置及び沖合の中間装置の信頼性が1成分あたり約120フィット(1,000→880フィットに)向上するという大きなメリットが生じる。従って可能ならば中継器を挿入しない方がシステムの安全稼働面で望ましい面もある。

しかしながら、一般に厳密に設計された伝送系で送信出力を5 dB増加させてこの代替をはかれば、システム内の多方面の特性に影響を及ぼし、総合のS/N設計面に大きな混乱をもたらすことが予想される。実験の結果、予想通り送信回路出力を従来の+5dBmから5 dBm増力すれば、信号に第2或は第3高調波成分が急激に増加し、他の装置の信号へ妨害を与えることが明白になった。そこで結局、送信出力とケーブルとの整合のため挿入してある抵抗減衰器による信号の減衰の変更を行うことによって、装置出力の増加をはかることになった。このため、先端装置は伝送特性に若干の劣化をもたらす反響減衰量の変化あるいは被雷による故障の可能性の増加といった間接的性能面で若干の低下が生じた。しかしながら、中継器の挿入をとりやめたことに伴う信頼性の向上というメリットに比べれば、この性能劣化は無視できるものと断定された。従って、先端装置についてはケーブルとのインピーダンスマッチングに関連した不整合減衰量は、検査基準を変更して受け入れ試験を実施した。この変更は結果として伝送特性にほとんど悪影響はなく、さらに雷被害も受けずに良質な信号を受信することに成功している。このことは、これまでに述べた設計変更に関する検討と変更の内容が適切であったものと評価している。

2.4 雑音設計の変更

大規模なシステムの雑音設計に際しては、システムを構成する個々の回路に高性能を要求するよりも、むしろ平均した特性を割り付けることによって、個々の特性にふさわしい総合の特性を得るよう各部の設計を調整することが必要である。この海底地震常時観測システムは、信号の系列として地震計センサー部—FM復調部—記録器という機能別要素によって、海底で捉えた信号を陸上で再現させるまでのシステムが構成される。このような場合、これらのどの構成要素にも他に比べて特にS/Nが劣るような個所を残すようでは良い設計とは言えない。

即ち、地震計センサー部でダイナミックレンジが70 dB以上得られるならば、以降の信号系列はこの数値に見合うような高度なS/N特性を必要とするが、上記の仮定条件が例えば50 dBということになれば、

他の信号系列のS/Nも1桁低い特性で回路を設計し、回路要素の最小化とそれに伴う信頼性の向上をはかるべきであるということの意味する。

このような観点から、昭和49年度にメーカーが作成したシステムデザイン書の雑音詳細設計の内容を検討してみたが、その設計内容は必ずしも前記の主旨に照らして最適設計とは評価できない部分が見られた。

即ち、高いS/Nを得ることが最も困難と思われる地震計センサー部の特性に対して、FM変復調部のS/N値が不当に低い。またFDM送信・受信回路の雑音設計が、同一の設計書で示される総合S/N値から見て、冗長すぎる。といった2つの問題点が指摘できた。そこでこのような問題点につき、どう処理して、どうまとめるかについて検討したが、

- ① FM変復調部のS/N値として示された特性は、測定法による誤認であり、70dB以上の特性を得ることは容易である(関連研究3)。
- ② FM・FDMを総合した伝送系の総合S/Nは、既設計の回路構成でも70dB以上が得られることが確認されたので、地震計センサー部のダイナミックレンジさえ拡大できれば、システムの能力はその特性の改善を反映して向上する。

との結論を得て、その判断を開発の方針に反映させ、地震計センサーの感度(0.1V/kine→0.8V/kine)と増幅器の改良をはかり、地震計センサー部のダイナミックレンジの大幅な拡大に成功した(関連研究2)。

一方、装置は年度を追って逐次製作され、それらのS/N関連の特性は立会試験で厳密にチェックされた。この間装置単体としてのS/Nが設計値に達せず、問題が生じた製品は皆無で、開発作業はすべて順調に進行するかに見えた。ところが、開発の最終段階でこの雑音設計にとって思わぬ伏兵が出現した。

即ち、伝送のレベル設計が使用周波数帯域での環境雑音を過小評価して進められていたことが、陸上の給電装置の発生雑音の検討に付随して判明し、それまでのS/Nに関係した検討内容をすべて見直す必要が生じた。

このような懸念は、気象研究所としてはレベル設計の49年度検討に際して詳細設計の担当者に指摘していた事項ではあるが、従来の経験から問題とはならないとの回答を得ていた事項である。このことから、S/Nを評価する場合に、熱雑音と回路雑音のみで雑音を算定するという、机上設計には大きな落とし穴があるという教訓は得たものの、結果的には伝送系単体のS/Nは、システムデザインによる68.8dBという特性から、50dBという存外な特性へ低下することが判明した。

このことは、このシステムではシステムデザインで示された地震計センサー部のS/N 60dBという特性を得ることさえも容易ではないことを意味する。またS/N設計ですべてに優先する雑音は、環境雑音であることを意味し、同時に従来の雑音設計の内容は大幅の変更を必要とすることも意味する。しかし、システムデザインでは12dBと評価していたFM復調によるAM雑音の改善度は、FM復調回路として設計製作した装置では約30dB以上の検査実績が得られていたので、この30dBが加算され、今回のシステ

μではFM-FDM総合のS/Nは約80dBと評価してもよいことが確かめられた。

このことは、

$$(68.8 \text{ dB} + 12 \text{ dB}) \div (50 \text{ dB} + 30 \text{ dB})$$

ということで、結果的にはシステムデザインの総合S/N特性と、最終的に得られた総合S/N特性が数値的には一致し、意図した性能を得ることには問題は生じなかったことを示す。

しかしながら、この成功はシステム構成の最小化と、特性の限界値の選択に関して不整合部分を残存させて成立している事実は否定できない。

従って、将来は海岸局内の環境雑音に対する厳しい条件（雑音-120dBm以下）を緩和するために、今回のレベル設計は変更することが望ましい。しかし、この変更に伴いFDM系のS/Nが劣化することが判明しているので、今後の計画に際してはその都度最適のレベル設計を慎重に行わなければならない。

今回の開発研究では、海中の伝送系の雑音設計にこのような宿題を残したが、平均3%というかなり低目な変調度のFM変調方式にもかかわらず、総合のS/Nとして72dBというかなり良質な伝送実績を安定して得られたことは、専用の伝送路を使用した伝送方式とはいえ、高く評価できるものと判断している。

3. センサー部の開発に関連した部分

3.1 地震計センサー部

海底地震常時観測システム海底部装置の開発に際して、気象研究所の指示に従いメーカーが一つ一つの作業を丹念に、しかも死角のないようにチェックしていき、これだけ手を尽くせば安心して布設できるといった納得のいく状態にまで装置の信頼性を築き上げていった努力と手順は、今後の諸開発の規範とすべきものと判断される。なかんずく、地震計センサー部の開発作業は、このチェックの関門に抵触した件数も多く、伝送部に比べかなり困難な作業であったにもかかわらず、最終的にはほぼ同程度に信頼のおける装置に成長させることができた。

勿論、伝送部・筐体・ケーブル（含カップリング）・津波計センサー部等にもそれぞれに問題点がなかった訳ではない。メーカーが多数の専門家を動員し、しかも設計・試験・評価等に十分な時間と設備を投入して製作し、気象研究所がその作業及び途中経過を稠密にチェックするといった協同作業によって初めてシステムを完成させ得たものであるから、通常の装置とは全く異なった開発手続を経たものということではある。しかしながらこれらの部分は、地震計センサーに比べればまだまだかなりの比率で海底中継器の製造に関する蓄積技術の恩恵を受けて、大幅な変更なしに既存の工法が利用できたものと判断できる。

これに反し、地震計のセンサー部の開発に際しては、信頼性管理の面ではごく初歩的な内容から、製造態勢を整備しなければ他の部分と同じ評価が得られる装置の製造は不可能であると判断された。

このようなことから、遅ればせながら、昭和50年8月から海底地震計技術打合せ会（以下SWGと称す）を開催し、初年度製作の実装試作品の試験・評価・検討の作業を含め、回数にして26回、期間にして約1年間にわたり、品質向上（特に信頼性向上）のための協議と検討を行った。

この間、気象研究所及びメーカーが、検討資料としてこの会に提出した技術資料（大規模な実験結果のとりまとめを多数含む）は246編、分科会への提出を含むと約300編となり、これらを集約すれば地震計の信頼性管理に関するノウハウがすべて含まれるといった意味で、極めて技術的にレベルの高い資料ぞろいであった。しかし、これらをここですべて紹介することは不可能なので、本章ではその作業の概要の一部について報告し、センサー部の信頼性を向上させるための作業の片鱗を紹介するにとどめる。なお実験データ並びに細部の検討内容については、この報告では割愛する。従って、充分にこの開発作業の内容を伝え得ないと思われるが、これらに関し更に詳細な内容につき資料を必要とする向きに対しては公開する用意があるので、この開発に携わった気象研究所の職員に直接照会されたい。

3.2 SWGでの検討内容

第1回SWGには気象研究所からこの会での検討に必要な基本資料として、49年度物品の成績を参照して再決定したシステムの性能が示され、メーカーからはこの会の今後の作業方針の提案があった。

また、気象研究所並びにメーカーから49年度物品の評価と、それを今後の製作にどう反映させるかといった内容の検討資料が提出され、資料の説明と内容の討議が行われた（資料7編、所要時間5時間、参加人員20名）。

第2回SWGには気象研究所から49年度物品に対する評価に基づき、今後検討して改良すべき点をまとめた16項目にわたる検討の指示書（No.1）が提出され、メーカーから信頼性管理面から見た50年度以降の製品に対する試験法並びに試験項目につき提案があった。これらの資料を検討の結果、試験法につき一部に結論を得たが、メーカー側で更に綿密に社内検討してから最終結論を出すことを決定した（資料7編、所要時間6時間、参加人員15名）。

第3回SWGには気象研究所から9項目にわたる検討指示書（No.2）が提出され、メーカーからはNo.1検討指示書に対する報告書が多数提出された。また、気象研究所は前回の試験法に関するメーカー提案に対する助言的な内容を2つ、回路設計に関する提案として1つの合計3つの開発研究実験報告を提出し、メーカーからは社内検討の終了した試験項目と試験法並びにそれらを決定するに際して判断材料として使用したデータの提出があり、検討が行われた（資料11編、所要時間7時間、参加人員15名）。

第4回SWGには気象研究所から23項目にわたる検討書（No.3）が提出され、メーカーからも独自の検討事項の提起がなされた。また、気象研究所から自己の検討指示に対する検討内容と、新しい特性を得るために必要な回路構成に関連した検討の内容が提出され、メーカーからはNo.1及びNo.2の検討指示に対する結果の報告が多く項目につき提出され検討された（資料9編、所要時間4時間、参加人員15名）。

第5回SWGには気象研究所から自己の検討指示事項に対し、2件の検討結果を報告し、メーカーからは独自の検討対象に対する結果として使用部品の信頼性についての報告がなされ、更に検討指示No.1～3に対する検討結果の提出があり、討議が行われたが、懸案事項がかなり消化されないままに次の指示が追加され、相当数の検討事項が停滞してきているようなので、作業ペースを早めるよう気象研究所から指示

した(資料5編, 所要時間7時間, 参加人員16名)。

第6回SWGには気象研究所からは自己の検討指示事項に対し報告書1編を提出し, メーカーからは検討指示事項に対し多数の検討結果が提出された。主な検討テーマは, 振子クランプは安全性から見たマイナスの面とのかねあいを評価した上でなおかつ必要かどうか, またジンバルクランプが本当に有効に使用できるかどうかといった問題となった(資料9編, 所要時間4時間, 参加人員16名)。

第7回SWGには気象研究所から更に20項目の新しい検討指示書(No.4)が提出され, メーカーからは指示事項に対する報告と今後のスケジュールに対する提案があった。また, 気象研究所並びにメーカーの双方は, 第6回SWGの席上で提起された問題に対する振子クランプ及びジンバルクランプに対する検討資料を提出し討議し, 問題点を抽出して整理した(資料6編, 所要時間7時間, 参加人員16名)。

第8回SWGにはクランプに関連した前回検討に基き, メーカーが大幅な設計変更を含む構想を示してきた。また, 今後の作業の進め方を含み, 検討指示事項に対する検討結果も提出されたが, 討議は主として前者について行われ, 当面この検討に主力を注ぐことを決定した(資料7編, 所要時間7時間, 参加人員12名)。

第9回SWGには気象研究所は第7回及び第8回のSWGで討議を重ねてきたメーカー提出の3形式のジンバルの機構について評価意見をとりまとめて提出し, メーカーからはジンバルに関して更に新しい考案の提出と従来の各提案に対する評価意見が提出され討議された。また, 気象研究所から今後の試験データの評価に関連して, 必要になると予想される内容につき研究実験報告が提出され, メーカーから検討指示書に対する多数の結果の報告と, 今後の打合せ或は交換文書に使用する用語統一の問題につき提案がなされ討議された(資料24編, 所要時間8時間, 参加人員16名)。

第10回SWGには, 気象研究所はジンバル機構につき第9回SWGでの討議をふまえて, 今後の作業方針を示した。メーカー側はそれぞれの方式に対する実験を約束し, 一応この問題はこの実験の結果待ちとなった。なお, No.1~4までの検討指示書に対する検討結果がかなり多量に報告され, 懸案事項は一挙にかなり消化された(検討対象項目93件に対し, 報告・討議完了79件となる)。また気象研究所は発注者として今後の打合せ或は文書交換用に使用するための海底地震計用語集を提出し, これを討議した(資料17編, 所要時間9時間30分, 参加人員18名)。

第11回SWGには気象研究所から振動・衝撃試験の結果の評価のとりまとめを提出し, 装置製作に関する問題点を指摘して改良の検討を指示した。メーカーからは新設計の電気回路の披露及び品質管理法に関する資料の提出があり討議した。なお気象研究所から電気回路設計の詳細なチェック結果と第10回SWGでの討議を盛込んだ海底地震計用語集を提出し再討議した。また気象研究所から, この会での検討はかなり成果があがってきて信頼性評価も可能になったと判断されるので, そろそろ推定故障率の定量的な議論を行うための資料の作成作業にとりかかるよう指示した(資料17編, 所要時間8時間, 参加人員16名)。

第12回SWGには, メーカーよりこの会での討議を盛込んだジンバルの新しい設計原案が持込まれて

検討された。また検討指示事項に対しての報告と品質管理法に関する資料の提出があり討議された。なお気象研究所は、No.1～No.4で示した指示事項とは別個に会の席上で要請が出されている検討事項の回答が遅れ、懸案事項が24件に増加してきているので、早期に検討を完了させるよう指示した(資料6編, 所要時間6時間, 参加人員15名)。

第13回SWGには、シンバル部の改造に関する報告と品質管理に関するメーカーの内部態勢についての報告があり、残り時間は第11回SWGまでに会できり決めた作業内容の確認を行った。この時点までに決定した内容を参考のため表として示す(資料4編, 所要時間3時間, 参加人員9名)。

表6.1 SWGでの検討内容および決定事項

SWG回数	検 討 内 容
0	49年度物品に関する評価結果
1	(1) シンバル補正角度, ストッパー, 信号引出法 (2) 変換部試験方法(検定コイル, 加振台) (3) 傾斜特性 (4) 潤滑剤 (5) 今後の方針(50年度物品製造線表)
2	(1) 試験方法(固有振動数, 電圧感度) (2) 仕様 (3) 外観(外形寸法, アース, 検定コイル, 表示) (4) 変換部(固有振動数, 素子感度)
3	(1) アース系, 外形寸法, 使用有機材, コイル耐電圧 (2) 基準地震計 (3) 試験項目 (4) 検定コイル仕様 (5) 変換部特性(素子感度, 傾斜, 温度) (6) 変換部信頼性(バネ, 磁気回路, コイルボビン) (7) 振子クランプ
4	(1) 変換部(耐電圧, 特性, 他成分の影響) (2) 振子クランプ(制御回路, コマンド電流) (3) シンバル部(制御回路, 補正角度, 起立精度, バランサー, ストッパー)
5	(1) 振子クランプ(必要性, リレー) (2) シンバルクランプ用部品(リレー, マイクロスイッチ, モータ) (3) シンバル部(必要機能, 振動・衝撃試験, クランプ機構, 引出線, 潤滑剤)
6	(1) 振子クランプ(IC保護回路, 振子の機械的強度) (2) シンバルクランプ
7	(1) 潤滑剤 (2) 使用電気部品 (3) 地震計工事基準 (4) 振子クランプ (5) シンバル部(摩擦クランプ力, ベアリング, ピン, クランプ機構, 引出線ガイド)

SWG 回数	検 討 内 容
	(6) 固有振動数 4.5Hz 変換部の性能
8	(1) 振子クランプ(コマンド系, 必要性) (2) ジンバル部(クランプ機構) (3) 等化増幅部(回路の安定性, リミッター用ダイオード) (4) 地震計総合(振動・衝撃, デバッグ, 立会試験)
9	(1) ジンバル部 (2) 基準変換器 (3) 潤滑剤, リレー, マイクロスイッチ, モータ (4) 等化増幅部(特性, IC規格) (5) 振動・衝撃の条件
10	(1) 49年度物品振動・衝撃試験結果 (2) ジンバル部(試作線表, 信号引出法, ピン, クランプ力) (3) 等化増幅部(特性, IC規格) (4) 地震計用語 (5) 地震計総合性能(出力感度, 周波数特性, 直線性, S/N, 安定性)
11	(1) 等化増幅部 (2) 地震計総合性能(安定度) (3) 地震計試験項目 (4) デバッグ, 工程

項 目	決 定 事 項	備 考	
外 観	1 外形寸法	1 外形寸法は180φ×300mmとする。 但し, 長さ増加分(+25mm)は電子回路部の増加分とし, 過密実装をさけ, 信頼性を向上させる。 2 耐圧筐体への取付は両側面で行う。 156φ径にM8ネジ3本(片側)で固定する。	
	2 アース系	1 地震計筐体部のアースは取らない。 2 信号アースは各成分毎独立とするが, 外部アース端子は1本とする。	
	3 検定コイル用端子	検定コイル端子は内側ジンバル内上面に設置する。但し, 試験時の地震計筐体の開閉は最小限とする。	
	4 表示	1 品名, 製造年月, 製造者名の表示は捺印とする。 2 ジンバル中立位置の表示は刻印とする。	
	5 ねじの固定	固定用接着剤はロックタイト#262とする。	
変 換 部	1 固有振動数	1 固有振動数は4.5 ± 0.5 Hzとする。 パネの強度を考慮して従来3Hzより大きくした。 2 固有振動数の測定は発振法で行う。	
	2 電圧感度	1 電圧感度は0.8 ± 0.2 V/kineとする。 2 電圧感度の測定は加振台法と検定コイル法を併用する。	

項 目	決 定 事 項	備 考	
変 換 部	3 加振台法の基準変換器は気象研より指定する。 1 コイル線材はポリウレタン銅線、芯線径0.1φとする。 2 コイル線材とコイルボビンの耐電圧はDC 700Vとする。 変換部の試作後検討する。 温度特性、傾斜特性は変換部の試作後検討する。 バネ、磁気回路の信頼性データは変換部の試作後検討する。 固有振動数、電圧感度の経時特性は変換部の試作後検討する。 1 コイル線材は検出コイルと同一線材とする。 2 検出コイルとの捲線比は1:10~1:50とする。 3 電圧感度は0.01~0.1V/kineとする。 4 検出コイルとの相互誘導のデータを添附する。 9. 振子クランプ 1 機械的な振子クランプは行わない。 2 リレーによるコイル出力短絡クランプ方式とする。 3 コイル出力短絡用リレーは各成分毎に設置する。 4 クランプ短絡抵抗はコイル抵抗値の1/10とする。 5 リレーはテレダイン社製とし、機種を統一する。 6 振子クランプの必要性は今後共検討を継続する。 7 振子クランプコマンド電流は-150mAとする。		
	シ ン バ ル 部	1. クランプ用部品 1 モータはオリンパス精機製CL-2A型とする。 2 リレーはテレダイン社製とし、機種を統一する。 3 マイクロスイッチは山武ハネウエル製とし、機種を統一する。 2. 補正角度 1 外側シンバルは±270度とする。 2 内側シンバルは±45度とする。 3 外側シンバルが無限回転可能な方式は、今後共検討する。 3. ストッパー 1 内側シンバルに設置する。 2 衝突保護材を付ける。 4. 起立精度の再現性 起立精度の再現性は±1度以内とする。 5. バランス調整機構 1 バランス微調整機構を設置する。 2 調整機構は振動・衝撃に充分耐えるものとする。 6. 信号引出法 1 第1ルート用物品の信号引出法はケーブル方式とする。 2 耐圧筐体封入後のシンバルクランプ試験の可能性を残すために、 接点引出方式は今後も検討を継続する。 3 ケーブル信号引出方式にはケーブル保護のガイドを設ける。 4 保護用ガイドは絶縁材とする。 5 信号引出用フラットケーブルの信頼性評価は充分に行う。 シンバル内部配線材の固定は金属と絶縁物を併用する。 7. 配線材固定法 8. 構造 1 シンバルは可能な限り軽量化する。 2 構造部材は強度計算を行う。 3 使用するベアリングは振動・衝撃に充分耐え、かつ摩擦トルクの小さいものとする。 9. 潤滑剤 1 オリンパス精機のモータに使用しているもの、及び東L SH 510は	

項 目	決 定 事 項	備 考
シンバル部	<p>伝送部に悪影響はないので使用してよい。</p> <p>2 ベアリングの性能から判断して、使用潤滑剤を決定する。</p> <p>1 クランプ用ピンは外側シンバル回転防止用として設置する。</p> <p>2 摩擦クランプ力は目標を5 Gとし、仕様は2 Gとする。</p> <p>3 クランプ機構の駆動源モータは1ヶとする。</p>	
等化増幅部	<p>1 社の方式に統一する。</p> <p>初段ICの前に振幅制限型IC保護回路を設ける。</p> <p>出力の直流偏位電圧は50 mV以下とする。</p> <p>1 調整用端子は本実装用に並列に設け、信頼性の低下を防止する。</p> <p>2 可能な限り、成分毎に専用の回路パターンとし、接続点は極力少なくする。</p>	
総合性能	<p>1 出力信号の極性</p> <p>1 高・低倍率変位レンジの出力信号の極性は一致させる。</p> <p>2 Z成分速度・変位レンジの出力信号の極性は一致させる。</p> <p>3 地震動がX, Y, Zのプラス方向の時、出力信号はプラスとする。</p> <p>2 出力感度</p> <p>1 変位低倍率レンジの出力感度は2 V_{p-p}/400 μ_{p-p}とする。</p> <p>2 変位高倍率レンジの出力感度は2 V_{p-p}/40 μ_{p-p}とする。</p> <p>3 速度レンジの出力感度は2 V_{p-p}/40000 μ_{kine p-p}とする。</p> <p>4 出力感度の測定条件は、周波数8 Hz, 振幅200 μ_{p-p}とし、変位低倍率レンジの出力電圧を測定する。</p> <p>5 出力感度は(4)の条件下で1 V_{p-p} ± 3 dB (初期偏差) ± 2 dB (安定度)とする。</p> <p>6 出力感度の初期偏差及び測定誤差は数値で報告する。</p> <p>7 設置場所による出力感度の調整は行わない。</p> <p>3 周波数出力特性</p> <p>1 周波数出力特性は幅4 dB (初期等化偏差) ± 1 dB (安定度)とする。</p> <p>2 初期等化偏差は可能な限り小さくする。</p> <p>4 雑音特性</p> <p>1 観測最小振幅地震動時の出力電圧に対してS/Nを定義する。</p> <p>2 S/Nは12 dB以上とする。</p> <p>5 出力レベル特性</p> <p>1 直線性の定義は理想的な直線に対してある幅の中に入ることにする。</p> <p>2 直線性の判定は、地震計出力が1 V_{p-p}, 1.8 V_{p-p}の時測定して行う。</p> <p>3 直線性の規格は地震計の出力が1 V_{p-p}の時の入力条件を1.8倍した入力条件の時の出力と1.8 V_{p-p}の差が5%以内とする。</p>	
立会試験	<p>1 中間立会試験</p> <p>1 中間立会試験は、交換部がシンバルに搭載され、かつ等化増幅部が完成した時点で行う。</p> <p>2 試験項目は、資料SWG-9-81による。</p> <p>2 完成立会試験</p> <p>1 地震計として完成し、製造者の検査が終了した時点で行う。</p> <p>2 試験項目は資料SWG-9-81による。</p>	

項 目		決 定 事 項		備 考
そ の 他	1. 使用有機材料	使用可能有機材料は以下の如くする。		
		部 品 名	材 料 名	
	配線用チューブ, 絶縁物一般 プリント基板 端子板, リレー, スイッチ シリコンコンパウンド材	テフロン エポキシガラス積層板 エポキシ糸又は ジアリルフタレート樹脂 R T V 103		
	2. 試験成績書	1 社内試験及び立会試験の結果は, 数値で記入する。 2 試験で得られた全データを提出する。		
3. 推定故障率	地震計のMTBFを定量的に表わせるよう努力する。			

第14回SWGには気象研究所から, 第12回SWGでメーカーから提案された試験条件並びに製造工程に対し, 条件を付加し原則的に承認することが表明され, メーカーに対する次期製作に対する詳細な最終諸条件の打合せが開始された。なお, 懸案事項の内, 最も重要と目されていた検討事項(49年度物品の分解調査報告)がようやく提出され, それによりまた新たな問題が提起された。また, メーカーから装置環境に関する新しい資料として, 筐体内温度上昇試験結果が提出され, 検討の結果, 観測時の装置環境温度を $12 \pm 5^{\circ}\text{C}$ とすることが決定され, 気象研究所よりこの温度に対する各装置の特性に関する検討とこの会に対する報告が指示された(資料18編, 所要時間7時間, 参加人員17名)。

第15回SWGでは, 気象研究所から試験法決定の裏付けとした研究内容が紹介された。なおメーカーからは, 試験条件・品質管理・立会試験・部品・センサーの固有周期等についての資料の提出があり, その内容が検討された。その資料によれば, センサーの傾斜特性の良否が品質管理の手段として使用できそうなので, 試験項目にこの項を追加することが決定された。また, ジンバルあるいは増幅器の製作に関して詳細な内容に立入った説明があり, 気象研究所から指示並びに了承が出された(資料11編, 所要時間6時間, 参加人員15名)。

第16回SWGにはメーカーより新設計ジンバルに対する基礎実験並びに評価計算が紹介された。またセンサーの振動破壊試験等の結果及びその評価が報告された。さらに信頼性を確保するといった意味での立会試験の方法について詳細な打合せを開始した(資料8編, 所要時間3時間30分, 参加人員12名)。

第17回SWGには, 気象研究所から試験法並びに特性を決定するための裏付けとして行った検討の内容が提出され説明された。メーカーからは, 等化増幅器に関する資料が提出され協議の結果, オフセットの調整法が決定され, 経時特性については更に検討することが決定された。また製造に関連して, 工程管理・立会試験等が検討され, 製造はすべてクリーンルームで行うことが決定された。なお, この会までの全検討事項数は116件となり, そのうち結論の出されていないものは2件のみとなったので, この会の開催意義はほぼ達成されたようである(資料10編, 所要時間4時間, 参加人員15名)。

第18回SWGでは、50年度物品の評価とそれを51年以降の作業にどう反映させるかについて検討した。なお、今後はごく専門的な問題に関しては、分科会を開催し少人数で検討するという方針を決定した(資料2編, 所要時間2時間30分, 参加人員10名)。

第19回SWGには、メーカーから50年度物品の製作に関連して発生した製作上の問題点が整理して提出され検討された。また、50年度物品の経時特性の測定について協議し、信頼性管理の面からスクリーニング用の装置(メーカーの責任で納入品と並列に製作するバックアップ用の製品)について行うことを決定した(資料7編, 所要時間5時間30分, 参加人員11名)。

第20回SWGでは、51年度製作に反映させるための性能上の変更につき検討し、基本的には50年度物品の性能を凍結して製作を行うが、細部について若干の変更はおこなう必要があるという結論を得た。なお問題となったのは、1)摩擦のクランプ力、2)増幅器のS/N特性、3)ICのラッチ対策、4)変換部の耐電圧等であった。また、この会では試験中に発生したICのラッチ現象に対する問題を大きくとり上げ、気象研・メーカーの双方から検討資料が提出され検討したが、回路設計を変更する方向で今後も検討していくことを決定した(資料8編, 所要時間5時間30分, 参加人員14名)。

第21回SWGには布設に至るまでの環境条件に関する資料を気象研究所から提出し説明と検討を行った。更に、気象研・メーカーの双方からICのラッチアップに関連した資料を提出し、回路の設計一部変更につき検討した(資料10編, 所要時間6時間, 参加人員15名)。

第22回SWGには、前回の検討に対する気象研究所の決定として、51年度の装置に対する試験方法並びに立会検査項目に関する方針を示した。メーカー側も独自に案を提示したので、品質管理・試験法・立会試験等につき協議したが、製造スケジュール等との関連もあるので、実質的な決定は51年度後半に持ち越すこととした。なお、ジナルクランプ力或はピンクランプ力に関する検討は、計算だけでなく実験によりもう一度確認しておくことを決定した(資料17編, 所要時間6時間30分, 参加人員14名)。

第23回SWGには、50年度製作を終了した時点での地震計センサー部の信頼度の評価資料が提出された。これによると、信頼度指数は全体で約1,320フィットと推定され、初期の想定値を若干下まわっていることが確認された。また、ピンクランプ力とピンが必要とする強度の計算結果が提出され、それに関連して実験結果を評価する基準が検討された(資料7編, 所要時間6時間, 参加人員16名)。

第24回SWGには、気象研究所から装置製作に際して、特に何処に注意を払うべきかといった面の参考資料として、気象庁において5年間に発注した電磁地震計の故障原因についての報告が提出され検討された。この資料によれば、センサーのパネ或は振子部分等可動部に関する故障が比較的によく、この面の管理に一層の注意を払う必要があることが再確認され、分科会のテーマとしてパネの評価並びに品質管理をとり上げることが決定された。また継続の問題点として、ジナルピンクランプの穴の大きさについて検討が行われ、穴の横へのひろがりをも士10度とすることを決定した(資料7編, 所要時間5時間30分, 参加人員15名)。

第25回SWGには、メーカーからピンクランプに関する追加報告が行われ、これに関する前回の結論

に問題がないことが確認された。また、耐圧容器内に機器を封入すれば完全に調整は不可能となる上、長時間の通電も温度上昇により信頼性の低下をもたらすことが判明しているので、立会試験までにすべての確認を完全に終了させておくことが決定され、詳細にわたり立会試験の項目・方法につき検討を行った。なお、この結論は今回提出の資料を再検討の上、次回で決定することになった（資料4編，所要時間7時間，参加人員14名）。

第26回SWGには、最終的な立会試験項目と検査の基準について気象研究所から資料が提出され、メーカーからも懸案となっていた試験条件の細部につき、提案が出されて検討し、指定検討事項に対する報告並びに検討はすべて完了した（資料5編，所要時間5時間，参加人員15名）。

3.3 SWGの分科会

装置の信頼性を向上させるには、受注者が自社内の管理の行き届いた製造部門で、信頼性管理の手法にのっとって製造することが最も良い方法とされている。

しかしながら、海底地震常時観測システムの製造に際しては全システムをすべて自社内で製造しうる国内メーカーはなく、従って主要部の製造が可能で、不足部分の製造にも責任を持ちうるメーカーを受注者として選択せざるを得なかった。

このような理由で、気象研究所では指名競争入札によって決定した受注者ではあるけれど、日本電気が自社内で期限内に信頼性の高い地震計センサーを完成させることは期待できないものと判断し、日本電気の判断で国内の地震計メーカーを選ばせて、センサー部についてはそこと協同で開発するよう指導した。

このような趣旨に従い日本電気では、国内における代表的センサーメーカーとして、沖電気工業株式会社（以下沖電気と呼称する）と明石製作所（以下明石と呼称する）の2社を受注補助社として選択し、両社の技術力を総合することによって最良の地震計センサーを開発するといった方針をとったようである。

従って、これらセンサーメーカー2社は、形式的には受注者としての日本電気を通じて間接的に気象研究所の指示・監督・検査等を受けることになったが、このような形式を忠実に履行していたのでは、作業能率の面でも又意志の伝達スピードと正確さの面でも良い結果が期待できない。そこで、気象研究所では日本電気と協議して、前記のようなSWGの設定を行い、気象研⇄日本電気，気象研⇄センサーメーカー，センサーメーカー⇄センサーメーカーといった開発に関係のある検討の直接の会話が関係者全員の前で交換できるような形式での討議を行い、短い期間内に平均以上の開発成果をあげることをはかった。

SWGは、このような意図に基づいて開催したものであるから、関係者は開発に関連して公開できる資料はすべて持ち寄って相互に交換し、より良い装置を完成させる方向に総力が結集できるように会を運営した。

従って、それぞれのメーカーは一般市場においては競合する関係にあるにもかかわらず、相互に製造に関する高度なノウハウを提供し合った部分も多く、このような方法によってこのシステムの開発を進行させた事は、国内の地震計製造一般に関する技術、特に製品の信頼性管理の面での技術を飛躍させること

に大きく貢献したものと言えよう。

このような内容で、第18回SWGまでは毎回気象研究所にメーカー3社の関係者が集合して資料を交換し、気象研究所を中心に開発に関連した検討を行った結果、両センサーメーカー共通の問題点に対する検討ではほとんど結論を得るに至った。一方、個々の装置に特有な問題ではそれぞれのメーカーに出向いて製造の現場或は試験の現場で検討しなければならない問題が発生してきたので、個別の問題（例えば試験中に発生した障害とその内容の保全及びその対策等の検討）についてはそれぞれのメーカーに出向いて現場の人を含めて幅広く検討する形式の会を持つこととした。

この形式の検討会をSWGの分科会とし、沖電気に関連した会にはOSWG、明石に関連した会にはASWGとそれぞれの社のイニシャルをSWGの頭に付加して呼称名とした。

この分科会での検討の内容にはSWGと重複する部分もあったが、大部分は個々の会社が抱えた製造に関する問題で、OSWGは開催回数が5回、提出資料数34編、検討項目が94件、それらのすべてが合意を得て作業に盛込まれた。また、ASWGは開催回数3回、提出資料数20編、検討項目は80件となり、これもすべて検討を終えて製造へ反映された。

これらの会で検討された主な事項は、OSWGでは

- ① ジンバル部の動作と、それに関連した使用部品の信頼度の評価
- ② 51年度の製作に盛込むべき設計上の問題点について
- ③ 筐体に記入する垂直規準線の記入精度と用法
- ④ プリント基板の実装状況の評価と再設計について
- ⑤ 試験により発生した変換部事故の評価と対策
- ⑥ ICのラッチ防止について
- ⑦ ジンバルのクランプ力のテストとその評価
- ⑧ 変換部の安定度試験とその評価
- ⑨ 品質管理上の問題点とその対策について
- ⑩ プリント基板への部品実装法の再設計に対する評価
- ⑪ プリント基板の金メッキ指定の是非について
- ⑫ 各部品の固定法の評価
- ⑬ 使用するコンデンサーの型式について
- ⑭ 製造工程の一部見直しについて（温度サイクル）
- ⑮ 中間立会前の社内試験資料の作成法について
- ⑯ 社内の製造・管理のチェック態勢について
- ⑰ 部分の品質保証について
- ⑱ 変換器のヨーイング試験とその防止策について
- ⑲ クリーンルームについて

- ⑳ バネの折損事故の評価と対策
- ㉑ 過去における地震計センサーの故障状況について
- ㉒ ピンクランプ部の強度について
- ㉓ 中周期用センサーの仕様内容について
- ㉔ リハーサルに使用したセンサーの分解評価
- ㉕ スクリーニング法について
- ㉖ 工程管理について

A SWGでは、

- ① プリント基板及び部品実装法の評価
 - ② プリント基板製造上の問題点とその対策
 - ③ クランプ機構へのゴム材使用について
 - ④ 振動・衝撃・過負荷試験の結果とその評価
 - ⑤ ソフトクランプの方法の再検討
 - ⑥ 使用したバネの信頼性の評価
 - ⑦ プリント基板の作成基準について
 - ⑧ 電気部品の固定法について
 - ⑨ コイルの絶縁及び耐圧を保証する方法について
 - ⑩ ICのラッチ現象とその防止策について
 - ⑪ 地震計の特性改善法について
 - ⑫ 試験条件並に試験法について
 - ⑬ 評価用の試供品の数とデータの信頼度について
 - ⑭ 信頼性管理の為にチェック機構について
 - ⑮ 半田付作業について
 - ⑯ ジンバルクランプの設計変更とその評価
 - ⑰ ジンバルクランプピンの動きについて再評価
 - ⑱ 板バネのクリープの評価と設計への反映法
 - ⑲ 板バネの疲労試験結果の評価と設計への反映法
 - ㉑ 過去における製品の故障状況と設計への反映法
 - ㉒ 検査のフローチャートと工程管理について
- 等であった。

なお、これらに関する検討結果は納入に至るまでメーカーと連絡を密にとることにより確実に製造に反映させていることを確認したので、気象研究所では製品のすみずみに至るまで直接自己の点検がゆきとどいたという満足感と製品に対する強い信頼感を持って布設にのぞむことができた。

また、今回の開発の過程で、信頼性の管理という無形の技術についての十分な理解と経験を得ることができたので、今後の類似の開発の参考として、この作業過程を記しておくものである。

3.4 津波計センサー部

入札に先立ってメーカー3社から提出されたプロポーザルでは、気象研究所が調査による知見を所有していたパイプロトン方式に対してはどの社からも提案はなく、磁歪現象を利用した感圧素子、ベローズ利用の感圧素子、それに水晶感圧素子の3方式が提案されたが、気象研部内の机上の比較検討の結果では使用例があるか否かといった面から水晶感圧式が最有力視された。

入札の結果、津波計センサーとして水晶感圧素子を提案してきた日本電気が受注することとなり、受注後の話し合いの結果、スムーズに提案通り津波計の開発は水晶感圧素子によることを決定した。この決定は、結果としてこの提案によるセンサーが期待以上（多分パイプロトン方式に比べ1桁以上S/Nが良いと思われる）に安定して稼動していることにより最良の選択であったものと評価できよう。また気象研の予備説明で提示したパイプロトン方式に代えてこの案を提出してきたことは、水晶関連の装置を手広く開発している会社ならではの選択であり、未知の分野への挑戦にもかかわらずこのセンサーの本質をよく見きわめていた日本電気の総合技術力を高く評価すべきものと判断する。

このような経緯で水晶感圧方式の採用が決定したものの、日本電気としてはこのセンサーが材料も加工もかなり特殊な製品なので、地震計のセンサー同様自社で開発することをあきらめ、更に国内ではその製造を代行するメーカーを発掘することもできなかったため、止むを得ず既製の装置を輸入してシステムに組み込む方針をとった。

このため、このセンサー部の開発作業としては、まず試験的に輸入した2813B（ヒューレットパッカード社製の水晶感圧素子）の性能評価からスタートし、この製品が今回のシステムに使用できる装置であるか否かを確認してから更に複数の2813Bを輸入して、信頼性あるいは特性の評価を行い、何式かのセンサーの特性を比較対照して、最も性能の良いものを布設対象の装置として選び上げるといった方法を採用する方針を決定した。

従って、協同の作業の手初めとして、試験輸入された水晶感圧素子の添付特性とその信頼限界のチェック作業から開始し、まず

- ① 特定の温度下における出力周波数の加圧特性
- ② 得られた周波数から加圧力を推算するに必要な多項の計算式に用いる温度係数
- ③ 予定水圧までの装置の耐圧

等について実験を行うこととした。

ここで①については、大型圧力水槽を使用して装置全体を加圧するか、あるいは圧力を感圧部分だけに伝達して試験するかの2通りの方法があったが、測定精度の面で前者の方法が優れていることと③項の試験を兼ねることもできるので、前者の試験法の採用を決め、電力中央研究所の御厚意で同所の圧力水槽を

借用して試験を実施した。

この試験に使用した圧力水槽は、内径 80 cm、高さ 180 cm、加圧範囲は 0～550 気圧、測定端子が 10 本まで外部に引出せるもの（当時国内で利用できる装置としては最も優れた性能）であったので、センサー出力の他に熱電対を使用して装置温度の上昇を測定した。

測定は昇圧・降圧を 2 回繰り返して行った。加圧過程では圧力媒体（水）の断熱圧縮効果により、400 気圧下では槽内温度に約 0.5℃の温度上昇が観測されたが、測定精度を大幅に低下させることはなく、2 回の圧力～出力周波数特性は測定精度の範囲内でメーカーの添付データとよく一致し、加圧による装置の異常も発生しなかった。このことは、このセンサーを提供するヒューレットパッカード社の出荷に至るまでの諸管理の良否の判定とセンサー自体の性能との双方の評価を同時に行い得たものとして、以後の作業の方向づけに役立てることができた。

次いで、津波計として海中でどのような記録が得られるものかを調査し、併せて装置の安定性・分解能・温度変化の影響等を評価するために、海洋研究部の協力を得て気象研究所の海洋観測塔を使用した布設前の試験観測を行った。

この観測結果については開発研究報告(3)(32)の 2 編（第 6 章 1 参照）で、津波計センサーの温度特性あるいは、雑音解析の結果に関連した報告としてとりまとめているが、温度特性に関する結論は大規模な恒温槽を使用し、時間をかけて陸上で慎重に試験した結果と調和する。このように 2 種の実験による相互の測定結果にほとんど差異がないことを確認できたことは、布設前に装置雑音に対する的確な評価を得るために重要な作業であったと言える。また、雑音解析によって得られた結果は、布設後の試験観測期間中に得られたデータの雑音を評価する基準として有効に使用され、使用条件に近い試験観測がこのような形式の開発では非常に価値のある作業であったことを改めて評価しなおしている。

なお、開発形式上の不備を補足するために筆者の 1 人が米国へ調査出張した際には、このセンサーのメーカーであるヒューレットパッカード社と、このセンサーを海洋観測に應用しているスクリップス海洋研究所とを訪問し、日本電気からの調査依頼事項を含め、担当者にいろいろな質問を提出してセンサーに関する詳細な情報を得ることを試みたが、このセンサーの特殊性からすべての疑問を解決するには至らなかったものの、添付資料以上のデータ或は使用上の多くのノウハウを得ることはできた。

即ち、信頼性を評価するために調査を必要としていた事項が約 30 件にも達していたのでそれらを質問してみたが、的確な回答を得られた事項は 18 件、ノウハウとして部外には出せない事項が 4 件、未経験で情報がないといった類の回答が約 10 件といった調査成績を収めることができた。得られた回答は、その後の開発に重要な参考として盛込まれ、回答の得られなかった事項については、その後実験や調査によってほとんどの部分について自力で評価を確立している。

次の参考のために、この質問事項とその回答或は確認事項を表 6.2 に列記する。

表 6.2 水晶圧力計に関する調査項目

項 目	回 答
〔筐体に関するもの〕	
1. 振動・衝撃に対する設計保証はどの程度か。	輸送のみ保証する。
2. 長期間（2年以上）の加圧（200 kg/m ² 以上）に対する筐体の問題	短期使用のみ。
3. 長期加圧におけるパッキングの性能寿命	短期のデータしかない。
4. 海中における耐電食期間	経験なし。
5. 海水による電食に強い材料	考慮していない。
〔性能に関するもの〕	
1. 周波数エージング量はどの程度か。	ノウハウで返答できない。
2. 保存温度	常温なら可
3. HP-2813Bの震源電圧の上限・下限	仕様書による。
4. 水晶圧力計を油田に使用した場合の性能保証期間	1年（使用の有無にかかわらず）
5. 周波数温度特性の設計目標	補正による。
6. 加圧速度はどの程度まで許されるのか。	6気圧/分
〔水晶に関するもの〕	
1. 感圧水晶の破壊圧力	800気圧まで保証。
2. 封入oilと水晶との化学変化の有無	なし
3. 水晶材料は人工水晶か天然水晶か	天然
4. 感圧水晶において組立時、水晶共振子とエンドキャップの結晶軸精度は角度で表わして、どの程度か。	ノウハウで返答できない。
5. 水晶封入は真空かガス入りか（使用ガス名）	真空
6. ビロセラムという弾性セメントはどのようなものか。	詳細な資料はない。
7. 温度補償水晶の頂点の精度はどの程度か。	特に調査資料なし。
8. BT-cut Bi-convex 5MHz 水晶の短期安定度はどの程度か	特別ではない。
9. 水晶板の曲率半径はいくらか。	ノウハウで返答できない。
10. 温度補償水晶のマウント法（支持点数、導電接着使用の有無、導電接着材の品名）	ノウハウで返答できない。
11. 水晶電極膜の構成、厚み	1,000 オングストローム
〔水晶以外の部品に関するもの〕	
1. 部品の信頼度（故障率、品質）	標準工業規格級
〔全体製造に関するもの〕	
1. 品質管理状況	工場を見学
• 空調室内で製造しているか。	いる。
• 作業人数と作業状態	2～3人の受渡し作業。

項 目	回 答
2. 水晶製造, 検査状況 <ul style="list-style-type: none"> • 感圧水晶の製作状況 • 水晶 cut の確認法 • 感圧水晶, 温度補償水晶の周波数温度特性の合せ方 	大変困難な作業である。 偏光法による。 試験による。
[水晶圧力計の応用に関するもの]	
1. 各 user での海水電食防止法	短期使用なので特になし。
2. " 使用条件 (深さ, 設置)	約 6,000m まで, ポップアップ方式
3. " 故障内容 (台数)	2 件 (原因不明)
4. 納入実績と納入先	採油会社, 大学等。
5. 今後の需要予測	今後も製作続行する。

以上のような手順で津波計の予備的な開発を進めたが、これだけでは未解決な検討事項として、振動試験・衝撃試験・温度特性・電源特性・エージング特性・信頼性等の評価作業等まだまだ多くの検討項目が残っていた。従って、布設までの期間内に津波計についても他の装置同様に装置の安全性について完全に評価できるようにするため、地震計センサーに適用した方法と全く同様に検査と試験、それにその結果に対する検討を繰り返し行い、布設用の装置を完成させるといった方法をとった。

3.5 ま と め

地震火山研究部にとって、全く未経験でしかも最も複雑な信頼性の管理という作業を海外で主要部品が製造される装置の品質管理にまで拡張し、全体としての信頼性レベルをほとんど低下せしめることなく津波計のシステムへの組み込みも成功した。これら一連の管理システムを作り上げた気象研究所と日本電気との協同作業の過程と方法は、今後の類似開発の規範として、伝承するに足る作業であったと自負するのでこの章でこの作業経過を克明に報告した次第である。なお、この津波計は地震計成分の観測に比べて性能面の期待が低かったにもかかわらず、現在その観測資料は多角的に利用されている。これらの資料提供には前記の諸作業が大きく貢献しているものと評価できる。

第7章 あとがき*

1. 本特別研究の終了に当って

地震予知関係者の強い要望に応え、また多くの期待を担って、地震火山研究部が昭和49年度より開始した海底地震常時観測システムの開発は54年3月に成功裏に完了した。地震火山研究部が主体となり開発を進めたがその内容のほとんどすべてが新しい分野の開拓であり、新たに発生する諸問題を解決しながら次の過程に進むという困難な道程であった。特に本システムの最も重要な部分である海底に布設された後は手を触れることができず、故障修理等のため揚取することも物理的には不可能でないにしても、現実問題としてはそのための欠測、費用、労力等を考慮すると不可能に近い。したがってこれらの装置は「完全」なものを設計、製作する必要がある、このため厳しい試験等を繰返した。それらの試験結果等や布設その他の工事等に関する資料は膨大な量にのぼるが、今後類似のプロジェクトを行うであろう人々のためには必要な参考資料になると考え、研究部にそれらを保存してあるが、その一覧表を巻末の付記に掲げておく。

このようにして完成した本システムは、前章までに述べたように、当初の計画を超える性能をもっている。先端装置と3組の中間点装置の地震計は東海沖のいわゆる地震空白域で発生するマグニチュード2.5以下の地震をも記録しているが、これらの地震は陸上の観測所では捕えられていないものである。本システムは4地点ではあるが、群列方式の観測網を形成しているので、これら地震の震源要素をも決定し得る。現在極めて地震活動度の低いこの海域におけるこのような地震発生の消長を監視することは、地震予知のためにも重要な仕事と考えられる。

現在駿河湾および遠州灘沿岸を中心とし東海地方の各地には、地震、地殻変動、地下水等の観測施設が多数作られている。地震予知はこれら多くの観測結果を総合してなされるのは勿論であるが、今回完成した本システムはこれら諸観測施設の中でも極めて重要な役割を果たすことになるであろう。

2. 謝 辞

海底地震常時観測システムが完成するまでには、直接または間接に多くの方々の御指導と御協力を戴いた。

御指導と御協力を戴いた関係官公庁・地元関係者の方々には、紙面をかりて関係者の所屬を掲載して厚く御礼申し上げます。

* 執筆担当 飯沼龍門

所 属 又 は 社 名	協 力 件 名
郵政省大臣官房電気通信監理室	有線電気通信設備の許可
海上保安庁水路部	海底地形調査
第3管区海上保安本部	布設協力
建設省中部地方建設局	中継所局舎の建設管理
日本電信電話公社本社	システム技術指導・布設工事
電電公社海底線施設事務所	布設工事
電電公社海底線工事事務所	布設工事
国際電信電話KK	付帯設備技術指導
静岡県庁	地元全般的協力
静岡県御前崎土木事務所	県用地借用
御前崎町	町用地借用・地元全般的協力
榛原地区・福田・浜名 各漁業協同組合	漁業関係
電力中央研究所	高圧試験
民地所有者(5名)	管路用地借用

海底地震計開発部会として本プロジェクトの開発の方向に適切な御指導を戴いた方々には、関係職名と氏名を掲載して厚くお礼申し上げます。

- 部 会 長 気象研究所長
 副部会長 気象庁観測部長
 部 会 員 総務部企画課長
 予報部通信参事官・業務課長・有線通信課長
 観測部参事官・管理課長・測器課長・地震課長
 海洋気象部海務課長
 気象研究所企画室長・総務部長

部外の学識経験者委員名と所属

氏 名	職 名	所 属
浅 田 敏	東京大学教授	東京大学理学部地球物理学教室
南 雲 昭三郎	〃	東京大学地震研究所

福 富 秀 雄	} 技術局線路部門 担当調査役	日本電信電話公社
貝 淵 俊 二		"
辻 岡 健	総務部次長	電電公社データ通信本部
石 野 文 雄	"	"
宮 内 幸 治	"	"
茂 木 昭 夫	測量課長	海上保安庁水路部

また、この部会のワーキング・グループの構成員として参画して下さった方々は、付記1のワーキング・グループ構成員の表に掲載しました。厚くお礼申し上げます。

気象庁本庁としては、総務部長および総務課・経理課の課長以下担当者の方々、観測部長・参事官および管理課長・地震課長以下担当者の方々、予報部有線通信課長以下担当者の方々、海洋気象部海務課長および神戸海洋気象台長を始めとする春風丸の方々、又東京管区気象台・静岡地方気象台の台長を始めとする担当者の方々に、特に地元御前崎測候所には所長を始めとする所員の方々にも絶大なる御協力を戴き、心から敬意を表します。

最後に、最も多忙であった52年11月中途急逝された地元御前崎出身である故大沢友栄御前崎測候所前所長にも完成報告を霊前に捧げて、冥福を祈ります。

また所内にあって、気象研究所独自の大事業としてこの5年間組織をあげて取り組み、予算関連業務・部外折衝・実行経理業務に携った多くの方々の御尽力に、紙面をかりて主なる担当者氏名を掲載して心から敬意を表します。

気象研究所長	須 田 建	昭和49～51年度
	杉 浦 次郎	52年度
	関 原 彊	53年度
企画室長	伊 東 令 慈	昭和49～51年度
	増 田 武	52～53年度
総務部長	岩 田 唯 衛	昭和49～51年度
	吉 水 敏	52年度
	七 里 義 人	53年度
会計課長	関 博	昭和49～51年度
	石 川 一 弘	52～53年度

なお、直接に開発、製作、あるいは工事に当たった業者は何れも本プロジェクトの地震予知における重要性を認識して努力され、その成功の基となる仕事をされた。以下に社名を記し、謝意を表します。

日本電気KKとグループ	海底部装置・陸上テレメータ開発製作
日本大洋海底電線KK	ケーブル製作と陸上布設
河原建設KK	局舎建設工事
菊水設備KK	局舎空調・付帯工事
向笠電機工業KK	管路工事・標柱工事
芙蓉海洋開発KK	沿岸調査
日本海洋建設KK	ケーブル防護工事
藤倉電線KK	海岸アース製作
三菱建設KK	海岸アース工事
新電元工業KK	無停電電源装置製作
東京産業KK	発動発電機製作
昭和製鎖産業KK	ケーブル保護管製作
日本地工KK	局舎アース工事

3. 技術報告書をまとめるにあたって

この報告書は、システムの技術的内容の説明とその開発の過程、これに付随する作業と手続等、更に得られたデータの解析の一部、関係表等について述べ、報告した。今後このようなシステムの開発製作をする関係者の参考となれば幸いである。

巻頭には、小林壽太郎気象研究所長の序文を戴き、以下を地震火山研究部が担当した。

1 章	地震火山研究部長	田 望
3, 4, 7章, 付記	第3研究室長	飯 沼 龍 門
5 章	第3研究室主任研究官	松 本 英 照
2 章	第3研究室研究官	高 橋 道 夫
6 章 (関連研究)	第3研究室主任研究官	松 本 英 照
		各 担 当 者
資料の解析	第3研究室	塚 越 利 光
	第1研究室	吉 田 明 夫
資料の整理		安 藤 喜 代 美

直接執筆は戴けなかったが、当初から御尽力を戴いた諏訪彰前部長，山川宜男前第2研究室長ならびに資料の解析と指導を戴いた磯崎一郎・小泉宗三郎・勝又護・浜田信生・内池浩生・藤沢格の諸氏には心から御礼を申し上げます。

付 記*

付 1. 海底地震計開発部会

1.1 海底地震計開発部会の発足

気象庁研究会議では本プロジェクトが気象庁地象部門としては極めて大型の新規事業であることを配慮して、研究会議内に本庁および気象研究所の関係官からなる本件専門の部会を新設することに決定した。

なお、部会には必要に応じて部外の学識経験者の協力を求めることにもなった。更に、この部会にはワーキング・グループを設け、専門技術的な事項を検討することも必要とされた。

以上のような決定のもとに“海底地震計開発部会”(以下開発部会)を発足させることになり、庶務は気象研究所企画室があたることになった。

1.2 開発部会の内規(抄録)

(1) 気象庁研究会議規則第6条1項による部会

(2) 審議事項

開発計画の技術的事項・開発過程における成果の技術的評価・実用化に関する技術的調査

(3) 構 成

部 会 長 気象研究所長

副部会長 気象庁観測部長

部 会 員 総務部企画課長・予報部通信参事官・業務課長・有線通信課長・観測部参事官(52年度より)・管理課長・測器課長・地震課長・海洋気象部海務課長・気象研究所企画室長・総務部長・地震火山研究部長・地震火山研究部第2(3)研究室長

(4) 専門技術的な事項を審議するワーキング・グループを設けることができる。

(5) 学識経験者に対し意見の開陳・説明その他必要な協力を求めることができる。

1.3 第1回開発部会

昭和49年3月4日

(1) 海底地震計開発部会設置に関する内規が承認された。

(2) 部会今後の進め方およびワーキング・グループの設置について審議し、部外学識経験者として下記の専門家を委嘱することになった。

* 執筆担当 飯沼龍門

部外の開発部会委員

氏名	職名	所属
浅田 敏	東京大学教授	東京大学理学部地球物理学教室
南雲 昭三郎	東京大学教授	東京大学地震研究所
福富 秀雄	技術局線路部門 担当調査役	日本電信電話公社本社
※貝淵 俊二		
辻岡 健	総括部次長	電電公社データ通信本部
※石野 文雄		
※宮内 幸治		
茂木 昭夫	測量課長	海上保安庁水路部

※印は以後交替された方々

ワーキング・グループは、部会長の委任により地震研究部長が地震課長と協議し、下記の方々をお願いした。

ワーキング・グループ構成員

所属	氏名
グループ代表	諏訪地震研究部長
<部内>	
地震研究部	山川室長・飯沼・松本・高橋
気象大学校	田教授
企画室	坂井補佐官・堤・中村
総務部	関会計課長
観測部地震課	末広地震課長・望月・(浜田)
観測部測器課	宗像検定官・丸山
予報部有線通信課	福永主技専・印南・(山本)
<部外学識経験者>	
東京大学理学部	浅田教授
東京大学地震研究所	南雲教授
電電公社技術局	鈴木調査役
電電公社データ通信本部	東調査役・(藤沼調査役)

1.4 第1回ワーキング・グループ会議

昭和49年3月13日

- (1) データの伝送は中樞まで伝送して、内陸のデータを含めて処理を行う。
- (2) 海底ケーブルは信頼性を確保するため海底同軸ケーブルとする。
- (3) 布設の経験から事前に海底地形と潮流等の調査を行うこと。
- (4) 建造中のケーブル敷設船黒潮丸の性能について説明あり。

1.5 第2回ワーキング・グループ会議

昭和49年3月22日

- (1) 伝送方式はFM-FDMとし、給電は直流とすることが了承された。
- (2) 中間点装置は安全を図るため地震計のセンサーは短周期で高倍率、先端局は中周期で高倍率にする。
- (3) 装置のソフトランディングテストと、海底地形・地質調査を徹底的に行うこと。

1.6 第2回開発部会

昭和49年3月26日

- (1) 部外学識経験者が出席した。
- (2) 第2回ワーキング・グループの討議の内容について報告した。
- (3) 開発の後年度スケジュール案と49年度実行予算について審議した。

1.7 第3回ワーキング・グループ会議

昭和49年4月22日

- (1) 気研からの「海底地震計常時観測システムの開発・製作についての条件」を討議した。
- (2) 布設工事については、電電公社が受託することは可能であると報告。

1.8 第3回開発部会

昭和49年4月25日

- (1) 第3回ワーキング・グループの報告
- (2) メーカーの選定と契約法等に関連して
メーカーからのプロポーザルの提出をさせ、6月上旬にプロポーザルの審議を完了する。
- (3) 海底ケーブル布設作業の16mm映画上映

1.9 第4回ワーキング・グループ会議

昭和49年6月18日

- (1) 3グループのメーカーから提案書の提出があったが、仕様に合わない1社を除き、2社について報告し検討をした。

- (2) 海底アースを先端ケーシングに組み込むことによる電食については不明である。
- (3) 先端装置の布設は、リハーサルを行い確かめる。中間点装置の耐ショックは50Gとする。

1.10 第4回開発部会

昭和49年6月26日

- (1) 第4回ワーキング・グループの報告
- (2) 各メーカーから提出された提案書について
NECグループと富士通グループについて技術評価をした。方式等に多少の差はあるが、両者共にほぼ同等の開発能力をもつものと認められた。
- (3) 仕様書は地震火山研究部が地震課とも協議して作成する。

1.11 第5回開発部会

昭和49年7月8日

- (1) 海底地震計の研究年次計画について審議した。
- (2) 海底地震常時観測システムの開発および製作仕様書について了承された。

1.12 第5回ワーキング・グループ会議

昭和50年4月25日

- (1) 49年度の計画実施状況とシステムデザインと50年度の成立予算について説明・討議した。
- (2) 水路部より遠州灘沖海底地形について種々詳しい説明がなされ討議した。

1.13 第6回開発部会

昭和50年5月19日

- (1) 49年度の経過報告と第5回ワーキング・グループの報告
- (2) 50年度の予算成立に伴う開発計画について説明がなされ了承された。
- (3) 51年度以降の開発スケジュールとして本布設は53年度春を目標とすることで了承された。

1.14 第7回開発部会

昭和51年3月22日

- (1) 50年度の経過報告と布設に関する地元との漁業折衝について報告した。
- (2) 51年度の開発計画案について了承された。

1.15 第8回開発部会

昭和51年7月14日

- (1) 開発の進捗状況と布設ルートについて報告した。
- (2) 地元漁業協同組合との間の「覚書」交換について報告した。
- (3) 52年度開発計画(案)が説明され了承された。

1.16 第9回開発部会

昭和52年10月13日

- (1) 52年度の開発計画について報告
- (2) 本布設工事は、昭和53年の台風期前を予定して、電電公社と折衝することを了承された。

1.17 海底地震計開発部会の任務完了にあたり

昭和49年度～52年度にかけ、開発部会が9回、ワーキング・グループ会議が5回開催され、各委員の方々からは貴重なる御指導と御意見を戴いた。これ等を開発研究に直ちに反映することにより本システムが無事完成し、任務が完遂された。

なお、本部会は昭和54年4月17日で解散した。

付2 海底地震常時観測システムに関する調査と工事報告書

年度	報告書名	担当者名	種類	概要
49	海底地震常時観測システム	日本電気 K K	提案書	全システムに関する技術提案
	〃	富士通 K K・明石製作所	〃	〃
	〃	沖電気工業 K K	〃	システムの一部に関する技術提案
	〃	松下通信工業 K K	〃	アンカードブイ方式のアイデア
	〃 ・システムデザイン	日本電気 K K	報告書	全システムに関するシステムデザインとその技術的検討
50	御前崎沿岸海底地形底質調査	芙蓉海洋開発 K K	報告書	沿岸 2 km までの海底地形測量
	海底ルート沖合調査	電電公社海底線施設事務所	〃	沖合 120 km までの 6 ルートの海底地形調査
51	布設リハーサル実施報告書	電電公社海底線施設事務所	報告書	先端装置と中間点各 1 の布設リハーサル
	御前崎沖合海底地形底質調査	芙蓉海洋開発 K K	〃	沿岸 2 km - 6 km までの海底地形測量
52	海底ケーブル布設ルートの潜水調査	芙蓉海洋開発 K K	報告書	沿岸 3.7 km (深さ 33m) までの潜水による海底地形調査
	先端装置布設リハーサル作業報告書	電電公社海底線施設事務所	〃	先端装置のみの再布設リハーサル
	実験用先端装置カップリング等の陸上実験	日本大洋海底電線 K K	〃	先端装置の布設時の動きと二重首振りカップリングの陸上テスト
53	海底地震常時観測システムの布設工事	電電公社海底線施設事務所	報告書	海底部装置の本布設工事の機械的な作業
	海底ケーブル沿岸部防護工事	日本海洋建設 K K	〃	汀部の海底ケーブルの防護工事
	布設支援工事	日本電気 K K	〃	本布設工事時の電氣的試験作業

気象研究所

1946年(昭和21年)設立

所長：理博 小林 壽太郎

予報研究部	部長：理博	内田 英治
台風研究部	部長：	藤原 滋水
物理気象研究部	部長：	久保 次郎
応用気象研究部	部長：理博	菊池 幸雄
気象衛星研究部	部長：工博	内藤 恵吉
地震火山研究部	部長：理博	田 望
海洋研究部	部長：理博	南日 俊夫
高層物理研究部	部長：理博	三崎 方郎
地球化学研究部	部長：理博	猿橋 勝子

気象研究所技術報告

編集委員長：内田 英治

編集委員：時岡 達志 古川 武彦 大塚 伸
安田 延寿 高島 勉 勝又 護
磯崎 一郎 村井 潔三 杉村 行勇

事務局：小島 芳夫 松下 眞

気象研究所技術報告は気象学、海洋学、地震学、その他関連の地球科学の分野において、気象研究所職員が得た研究成果に関し、技術報告、資料報告及び総合報告を掲載する。

気象研究所技術報告は、1978年(昭和53年)以降、必要の都度、刊行される。

昭和55年3月29日発行 ISSN 0386-4049

編集兼発行所 気象研究所

茨城県筑波郡谷田部町長峰1-1

印刷所 東京プリント

東京都港区西新橋3-24-9