

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には, 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

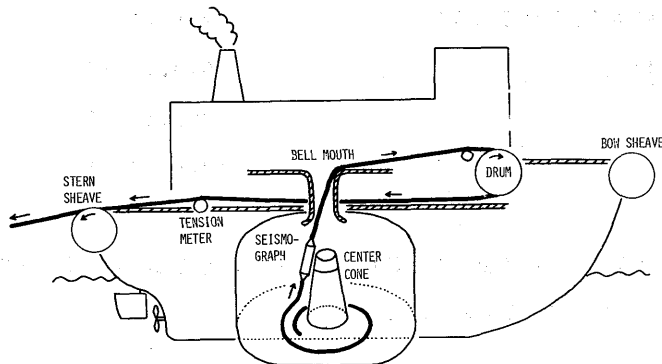
要 旨

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）、およびジンバル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。

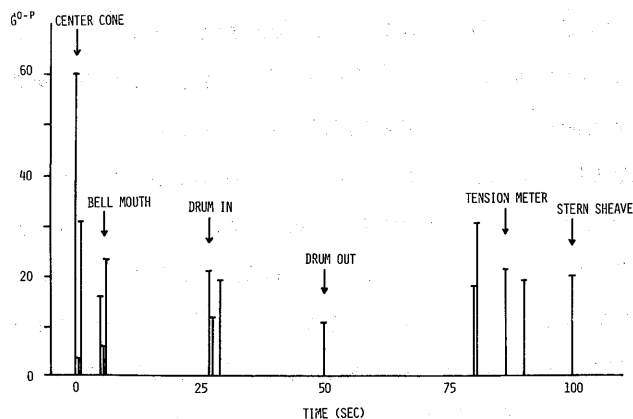
2節では地震計の耐振性評価の基礎資料とすべく、実際の敷設船による布設実験時に測定した衝撃条件、振動条件について述べる。

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 $50\sim 60\text{ Hz}$ 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 ($5\sim 55\text{ Hz}$, 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 $5\sim 55\text{ Hz}$, 1.5 mm^{P-P} とするスイープ加振 (周期 $1\sim 2$ 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

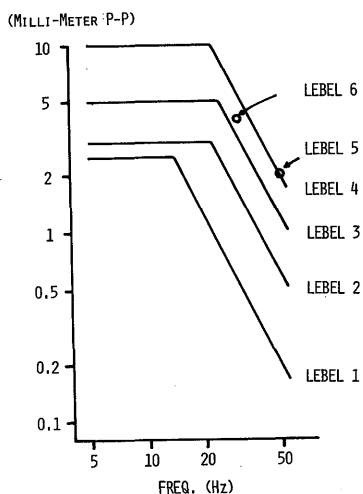
振子のクランプは主として振動・衝撃からバネを保護するために行われるものであるが、もしも振子をクランプしなくてもバネに損傷が生じないならばクランプは不必要となる。この場合、例えば本文図 2.51 の内、トランスフラクサーを含む振子制御回路は要らなくなる等、システム全体の信頼性向上への波及効果は大きいものがある (信頼性は 1 チャンネル当り約 25 Fit 向上し、実装空間も円筒筐体の軸方向に 30 mm 程度狭くてすむ)。このため、まずクランプされていない振子 (変換器) の耐振性の評価を行ったが、クランプしないでもよい、ということを積極的に支持するデータは得られなかった。この評価実験の一例を紹介する。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、ジンプル、

表研 1.1 バネの耐振性評価試験方法

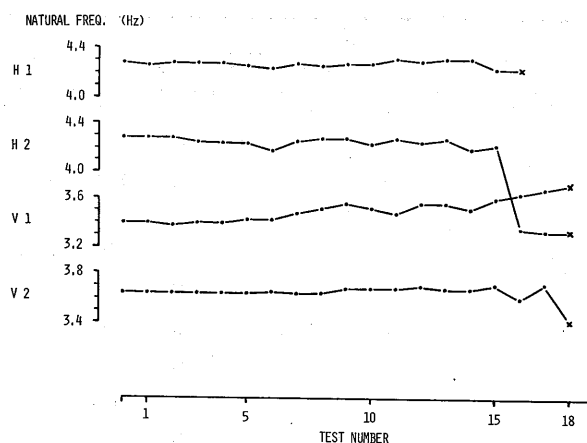
試験段階	種 別	振 子	変 換 器				レ ベ ル
			H 1	H 2	V 1	V 2	
1	振 動	クランプ	C	C	S	S	振動 レベル 1
2	"	"	S	S	C	C	"
3	衝 撃	"	S	S	C	C	衝撃 レベル 1
4	"	"	C	C	S	S	"
5	振 動	"	S	S	C	C	振動 レベル 2
6	"	"	C	C	S	S	"
7	"	"	C	C	S	S	振動 レベル 3
8	"	"	S	S	C	C	"
9	"	"	S	S	C	C	振動 レベル 4
10	"	"	C	C	S	S	"
11	衝 撃	"	S	S	C	C	衝撃 レベル 2
12	"	"	C	C	S	S	"
13	"	"	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ちが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	10 G から 100 G まで 10 G 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1.5 mm）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。

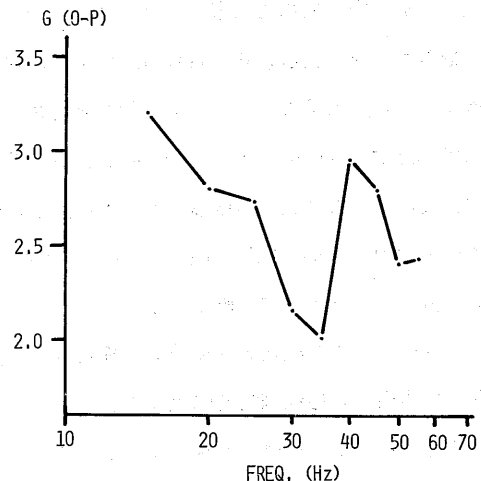
振動試験の結果、AS型の1台の変換器にリード線の切断事故が発生した。この断線はコイル巻線を変換器筐体外にひきだすのに、引出線としてリン青銅を使用していて、その引出線の中程の腐食による外傷が振動試験で進行したものと思われる。このため、両者間のハンダ付箇所をなくする意味も含めて、コイル巻線を直接筐体外に引出すこととした。また、断線とは別の箇所で、断線には至らないまでも巻線の被覆に外傷が生じていたのもあった。これは巻線がコイルボbinの外周より外に出ていたため振動を与えた時に振子が受感方向と直角方向にも振れ、磁極に衝突して損傷したものと考えられる。このため巻線のボbinからの引出口を改良して磁極その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るといふ点が見出された。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）

O S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2 G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 mm P-P の正弦振動を 200 万
回以上（20 Hz 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 70 Hz 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。

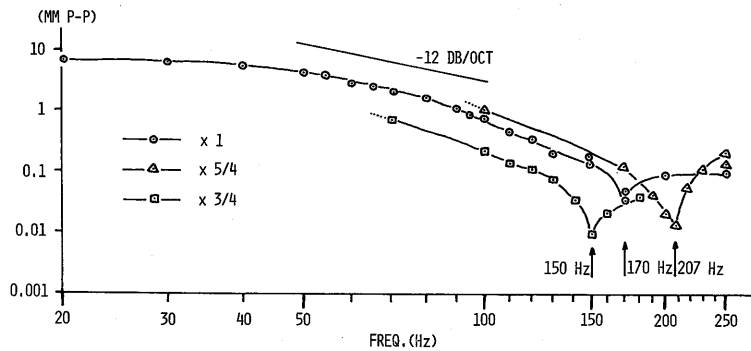
- i) ヨーイング共振点を高周波側へ移動させる。
- ii) 横方向への振幅制限を強化する。

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
振動数を得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

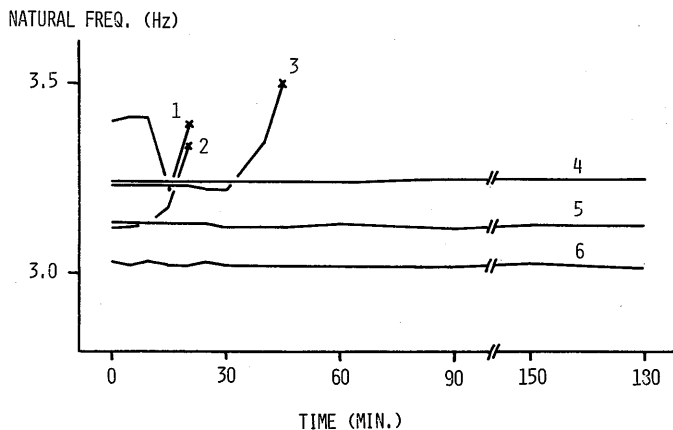
成 分	番 号	固有振動数 (Hz)	
		初 期 値	加 振 後
上	1	3.96	3.96
	2	4.48	4.52
	3	4.28	4.24
	4	4.08	4.12
下	5	4.04	4.08
	6	3.72	3.76
水	7	4.92	4.96
	8	4.76	4.80
平	9	4.44	4.44
	10	3.60	3.56

（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.



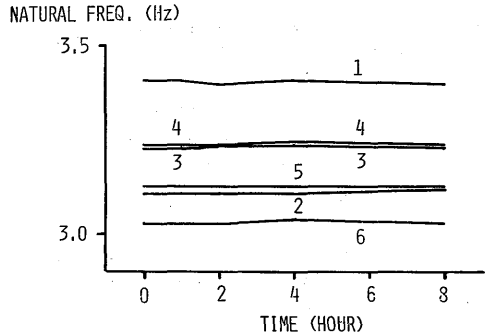
図研 1.7 加振試験結果。ヨーイング共振周波数で加振した時の固有振動数の変化。No.1～3および4～6は、振子の横方向振幅制限がそれぞれ±0.25mm, ±0.15mm。

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、バネのヘタリを調べた。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 1mm^{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。



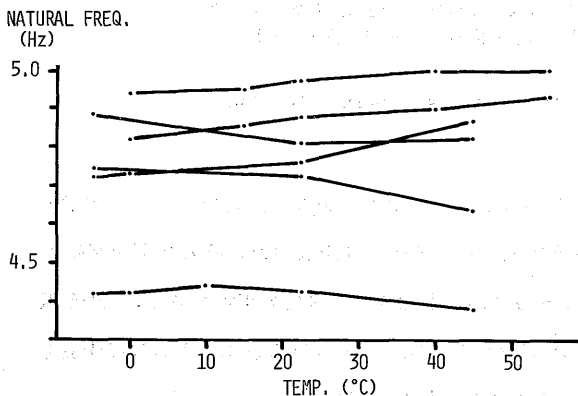
図研 1.8 予備加振試験。図研 1.7 の試験に先立って行った予備試験。変換器番号は図研 1.7 と対応している。

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電して調べた結果、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、うえの三社が行った地震計の信頼性向上のための作業の内の、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 $0.01 \mu\text{m}^{\text{P-P}}$ ないしは $0.1 (\mu\text{m}/\text{sec})^{\text{P-P}}$ 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。

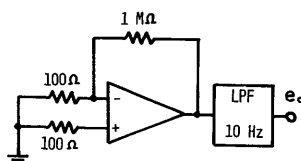
この入力から増幅器を保護するように対策を施した。また採用されたICの特徴として、出力電圧が正負いずれかの電源電圧まで上昇し、そこでクランプされて電源を切るまで復旧しないという、いわゆるラッチアップという問題がある。これを防止する対策も講じ、3節で述べる。4節では回路全体としての温度特性、電源変動特性等に関する測定データを紹介する。

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、検出しう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。

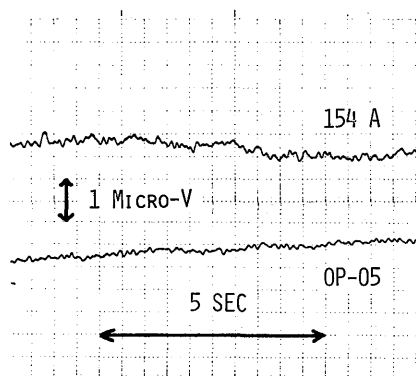
雑音のスペクトルは対象帯域内では白色と考えられるが、このとき地震信号のS/Nのうえで最も厳しい条件となるのは地動の周波数が最低周波数（2 Hz）の時である。すなわち固有振動数4.5 Hz、感度80 V・sec/m、減衰定数2.4（補正等化に便利のように、2.4の減衰がかかっている）の変換器が2 Hz、 $0.1 \mu\text{m}^{\text{P-P}}$ （目標とする検出可能な最小振幅）の地動により発生する電圧は約 $8 \mu\text{V}^{\text{P-P}}$ しかなく、減衰を与えるための抵抗による電圧の分割を考えに入れると増幅器へ入力されるのは約 $5 \mu\text{V}^{\text{P-P}}$ 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ないことになる。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



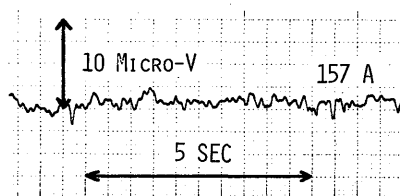
図研2.1 入力換算雑音測定回路図

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. R2.2 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. R2.3 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

μ PC 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 k Ω)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。

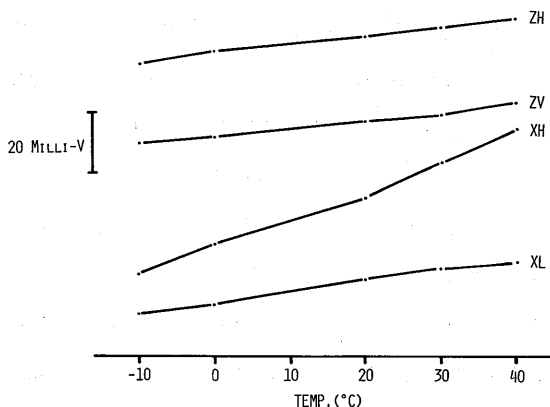
本文図2.21, 2.22のリレーRL1は振子クランプのためのもので図の左側の状態では変換器出力(INに入る)は低抵抗R1で終端され、大きな制動がかかる。振子クランプ状態で変換器出力を増幅器に入力させないようにしたり、あるいは図の回路でR1 = 0としたりするのは、振子制御回路が事故の場合には、地震信号が全く得られなくなるので具合が悪い。この図の回路の場合には、もしそのような事故が生じても約1/10の感度で出力が得られる。

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50 Gと考えると約100 V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、DC 400 V, 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。

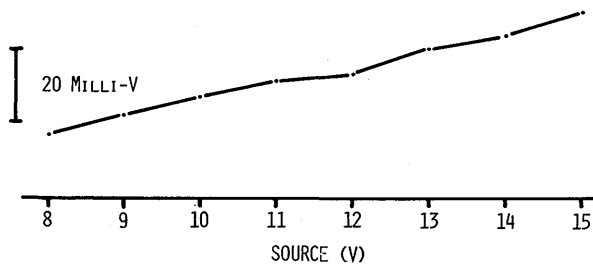
4. まとめ

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/ $^{\circ}$ 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 向上のうえ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

この観測システムの設計にあたっては、伝送上の性能のうえ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をも行った。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 72 dB 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

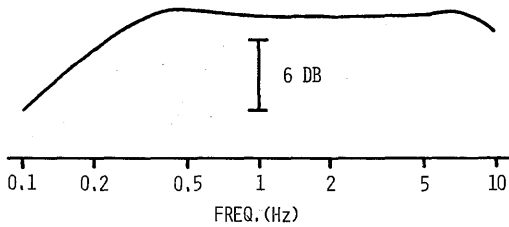
0.2～5 Hz の帯域における地動雑微動が調べられている。陸上における雑微動と比較すると、約 1 Hz を境として長周期側の振幅は陸上より大きい、短周期側では小さいという点に特徴がある。この特徴はそれぞれの帯域の雑微動の起源を考えると妥当なものである。

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。

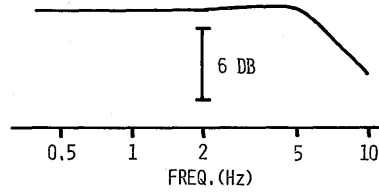
2. 周波数解析

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 0.15 mm/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 2.2 kHz なので、再生時の 320 倍という速度を考慮に入れると約 7 Hz 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



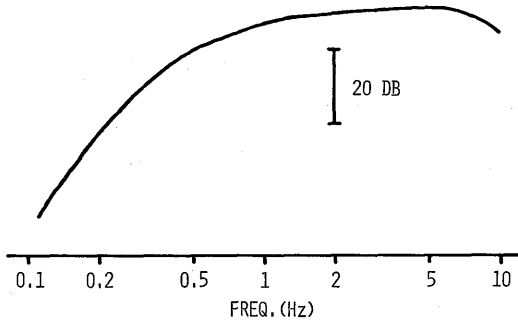
図研 4.1 記録器の周波数特性

Fig. R 4.1 Frequency response of the recorder.



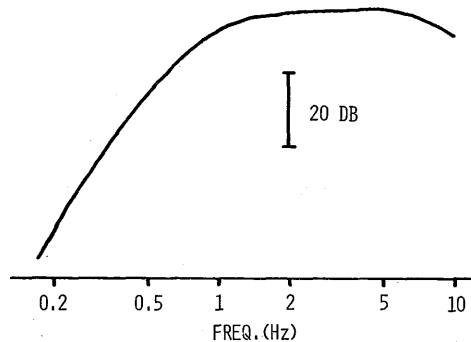
図研 4.2 再生器の周波数特性

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.

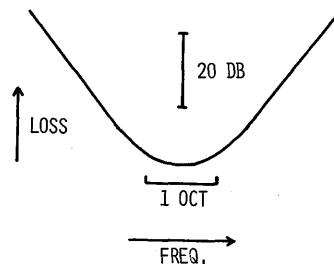


図研 4.4 総合の周波数特性(水平動)

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

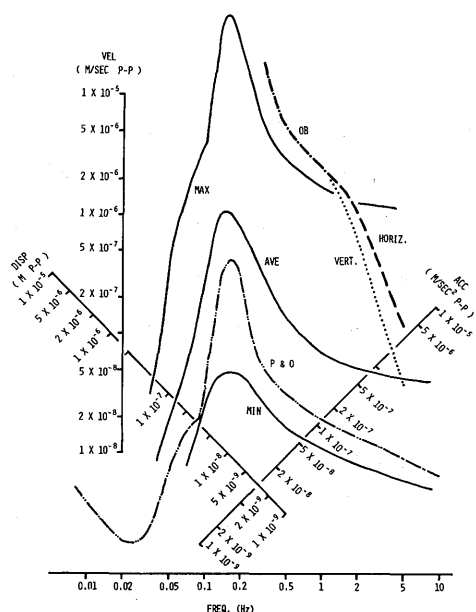
Brune and Oliver (1959)は約100編の文献の中から陸上における雑微動が定量的に議論されているものを選びだして検討し、周期別の雑微動の大きさを得ている。彼らによる、最大の大きさの雑微動、平均的な大きさの雑微動、最小の大きさの雑微動を、それぞれMAX, AVE, MINとして図研4.6に示した(なお彼らの記述において振幅がo-pなのかp-pなのかrmsなのか、全くふれられてないので、ここではo-pであるものとみなした)。文献から集められたデータは1, 2の例外を除いて、場所、時間を問わず、この図のMAXとMINの間に入るということであるが、これは勿論、しっかりした基盤の上での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えて、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。

布設実験においては日本電信電話公社の敷設船黒潮丸船長はじめ関係各位の協力をあおいだ。また一部



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。これらの協力に感謝する。

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。

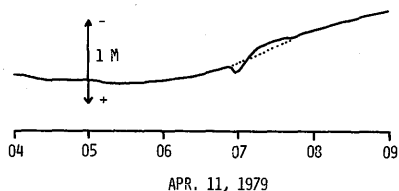
1. はじめに

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。

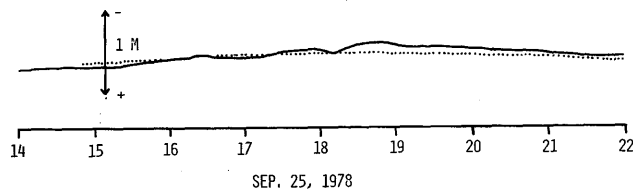
2. 津波計記録のノイズ

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。



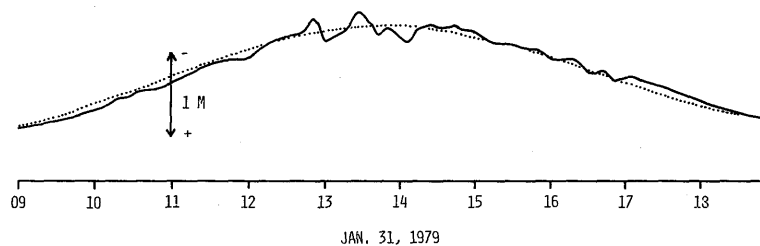
図研5.1 津波計記録に時々みられる温度ノイズの例。点線は調和解析による推算値。

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

$$f_R = 5,000,000 + 20.0 T_R \quad (2)$$

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 20.0 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 20.0 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

$$f = f_R - f_S = 8,000 + 20.0 (T_R - 0.99 T_S) + 2.0 D \quad (3)$$

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。

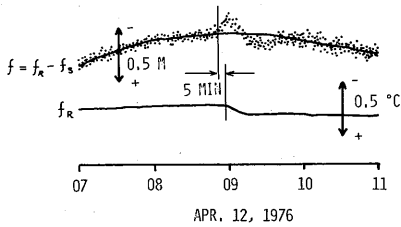
(4)が常に満されるような場合、すなわち T に短周期成分が含まれていない場合にはこの温度補償は確かに有効である。しかし、そうでない場合はどうであろうか。例えば T が階段状に変化した場合を考えてみると、 T_R と T_S は両水晶振動子のおかれた位置に応じてそれぞれ異なる応答をする。その応答のずれから T_R と T_S とに差が生じ、仮にその差が T の 1°C の階段状変化の場合に 0.1°C だけあるものとする(3)から、 D に 1 m のノイズが現われることになる。これはノイズの抑圧が $1/100$ から $1/10$ に劣化していることに相当する。勿論、この種のノイズは過渡的なもので、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

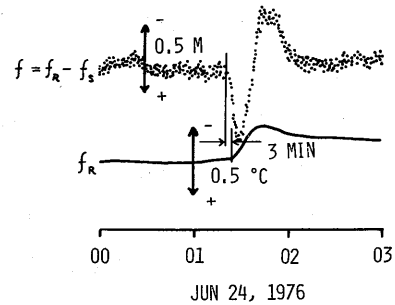
いて、水温に関する何らのデータもないが、野外実験観測中は f の他に水温に相当する(2)の f_R をも同時に記録した。

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。



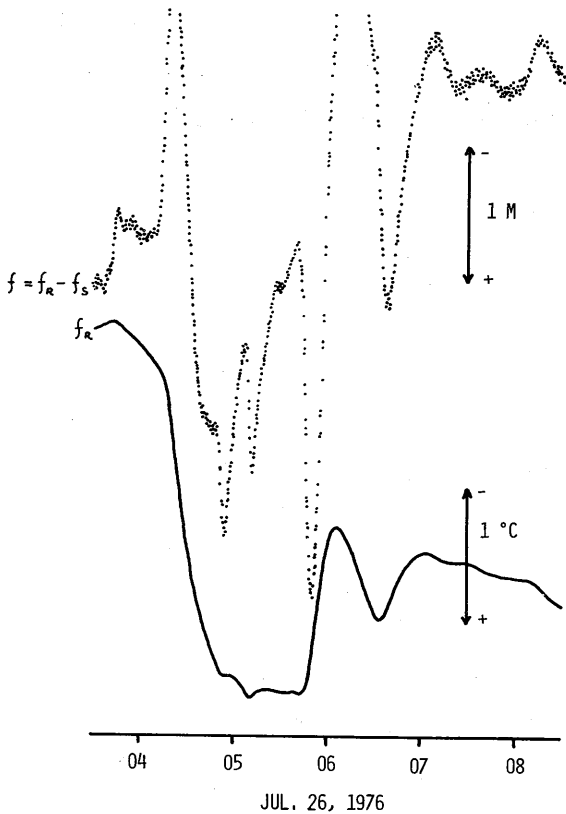
図研 5.4 津波計による野外実験観測時の温度ノイズ。
水深が浅いため波浪も記録されている。

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



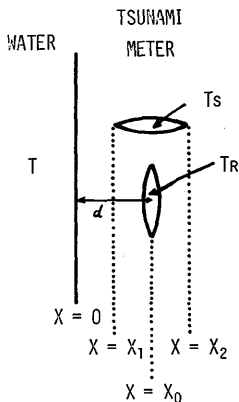
図研 5.6 (図研 5.4 に同じ)

Fig. R 5.6 Same as Fig. R 5.4

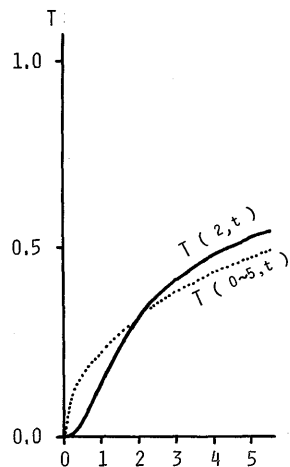
図研5.4～5.6にこの時の記録例を示す。 f の記録線の太いのは水深が20mと浅かったため、風浪による短周期水圧変化が完全に減衰していないことによるものである。図研5.4は4月中旬の周囲水温が階段状に変化した時の典型的な記録である。約 0.1°C の T の変化で、先に予想したようにパルス状のノイズが発生し、その片振幅は15cmに達している。このことから(3)より、 T_R と T_S との差は 0.015°C にまで大きくなったと考えられる。このことは、実際の津波計は短周期温度変化に対してはノイズを抑圧する働きが約 $1/7$ に劣化していることを示している。

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 を追越す。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 を追越す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 を追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

$$T(x, t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{t}}} e^{-v^2} dv$$

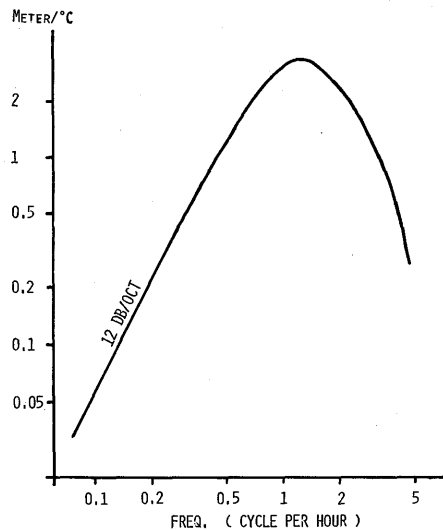
であらわされる。図研 5.8 に $x = x_0 = d$ における温度 $T(x_0, t)$ と $x = x_1$ から $x = x_2$ までの平均温度

$$T(x_1 \sim x_2, t) = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} T(x, t) dx$$

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 $a(^{\circ}\text{C})$ 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 $0.15a(^{\circ}\text{C})$ 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 $3a(\text{Hz})$ 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 $+0.1\text{m}$ 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、



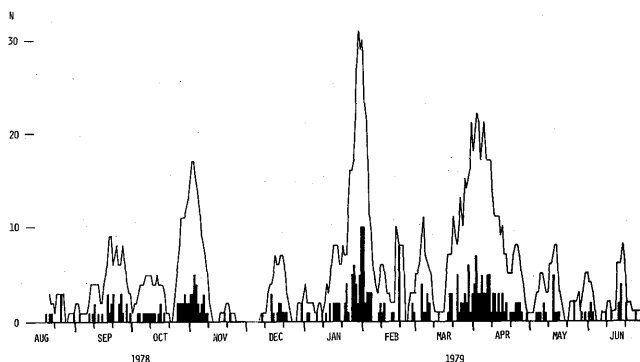
図研 5.9 温度ノイズ振幅の周波数応答。図研 5.4 が階段応答であるものと仮定して計算した。図研 5.7 のモデルの成否とは独立の、現象にもとづいた結果である。

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の頻度も多く、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㈱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

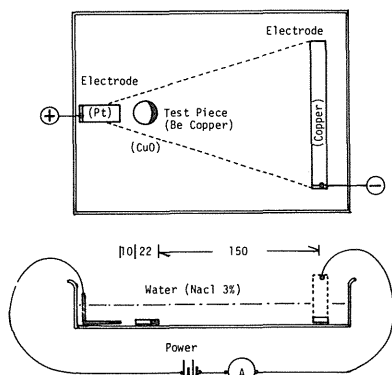
(a)項に該当するものは海底アースの近くで、(b)項に該当するものは海岸付近の外装ケーブルの外装線で、(c)項は先端装置の大型耐圧筐体とケイジの間で問題を起こすと考えられ、これについて検討と対策をした。

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、



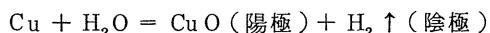
図研6.1 電食の実験

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50m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

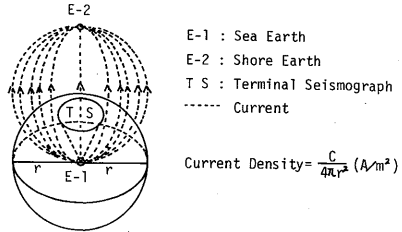
海面下2,000mの海底に設置された海底アース電極からは、図研6.2に示すように全方向に対してほとんど同じ電流密度で流れ出すものと推定される。

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. R 6.2 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) $43.9\text{kg} \times (1/4\pi r^2)$
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、マリノロイ(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認するため、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.

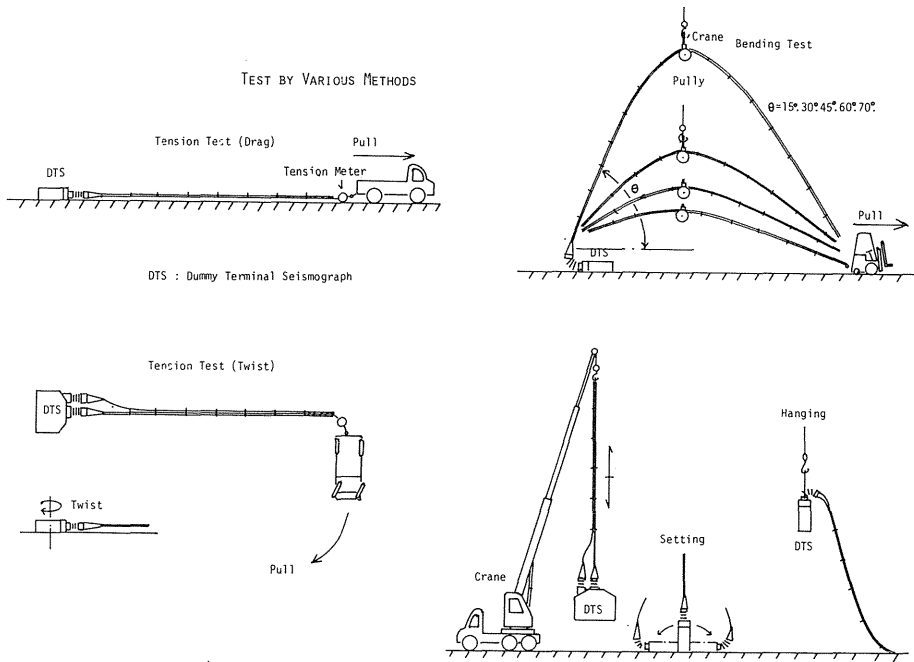


写真研7.2 従来型カップリングのジンバル部

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。その端末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.

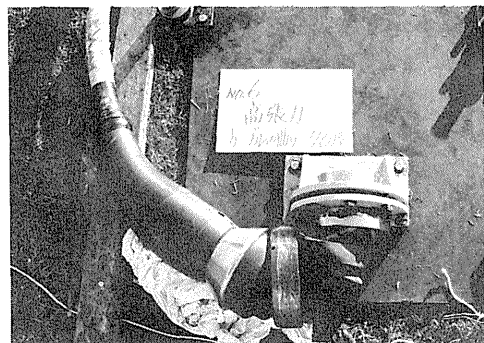
ローズのゴムがジンバルに咬まれ、仮に入れた水が漏れてしまった。

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50cm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。

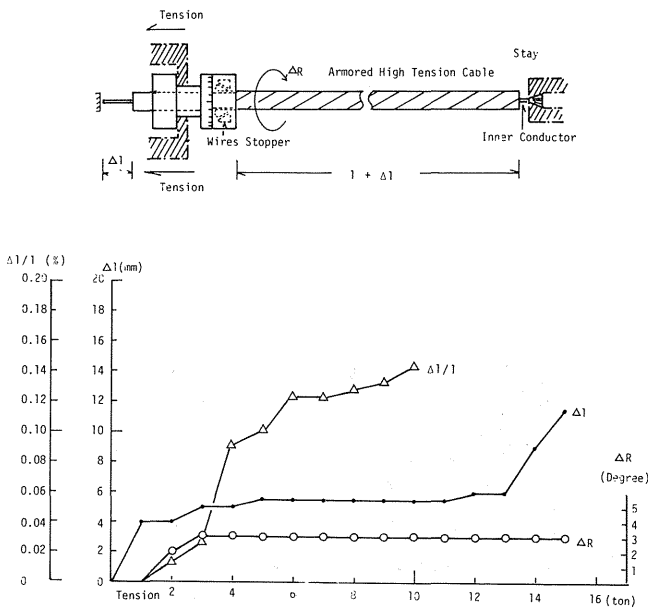
アースのカップリングに対しては、90度で力を加えた。この結果、ブーツの先でケーブルが曲げ半径33cmの弧になった。

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、通常の中心導体（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。

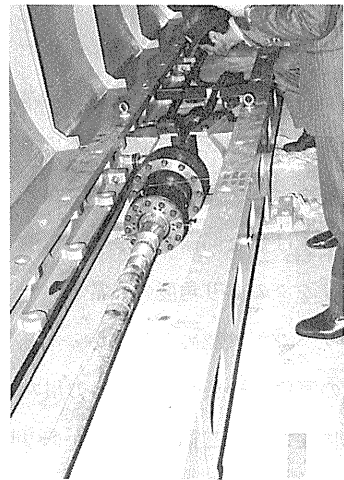
実験の方法および結果は図研7.2に示す。無外装ケーブルの端末を部分外装した20mのテストピースを外装線を折り曲げて固定し、この固定子と中心導体の固定子の間で引張り試験をした（写真研7.4）。図に示すように外装線と同軸心のずれは、4mmの初期ずれがあり、再び13トンから15トン（破断限界）の間で6mmずれた後、中心ピアノ線と銅パイプの間でスリップを始めた。ケーブルの伸びは10トンで0.14%となった。外装の回転（より戻し）はほとんどなかった。

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

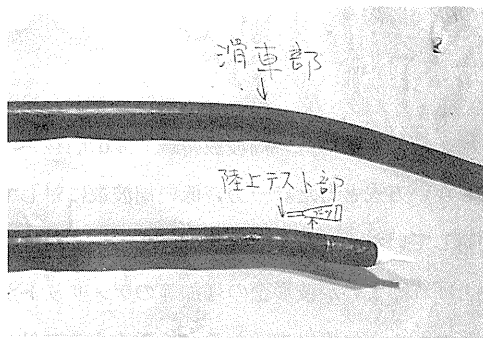
Photo. R 7.4 Test for tensile strength.

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。

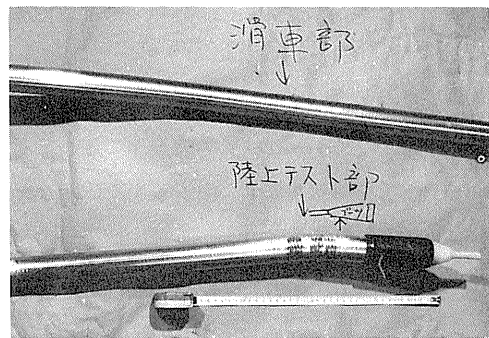
外被のポリエチレンを切り開いた(写真研7.6)結果は、カップリングの端末ソケット部分エッジにあたる所の外部導体に皺が見られたが、第1次リハーサルのようにリングカットまでに至るものでは全くなかった。

滑車にケーブルを通して引き上げた時のシャープベ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、実際のもの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F M-F D M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これ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

$$E \div 114 \text{ dB} \mu\text{V/m} \div 0.5 \text{ V/m (実測は } 0.1 \text{ V/m)}$$

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 $\div 1,000 \text{ m}$, $\frac{l}{4} = 250 \text{ m}$ とすると、最大起電力は

$$0.01 \text{ V/m} \times 250 \text{ m} = 2.5 \text{ V (アンテナ効率 } 100 \% \text{ と仮定)}$$

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、今後中

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

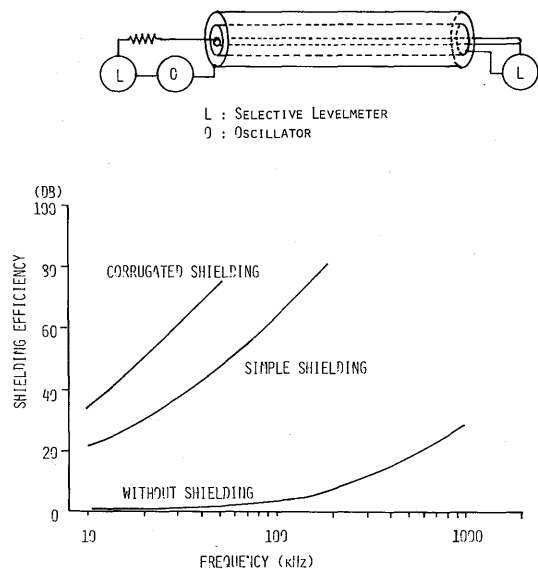
という式が用いられるが、この式によれば、直流又は50 Hzと低い周波数に対しては相当の電磁遮蔽加工 (アルミ遮蔽) 等を施しても、20 dBの遮蔽係数を得るためには接地抵抗1 Ω以下の低接地が必要となり、これは非常に高価な工事となる。

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

は最高の二重遮蔽ケーブルを総長6.6 km (内陸上0.8 km) 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、



図研8.1 遮蔽効果の測定
Fig. R 8.1 Measurement of shielding efficiency.

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。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

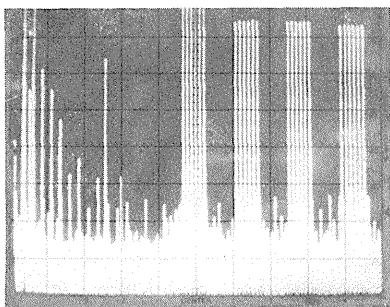
項 目	軟 鋼	铸 鉄
導 磁 率 : μ	4000～8000	500
電 気 抵 抗	10～20 $\mu\Omega$ cm	100 $\mu\Omega$ cm

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。

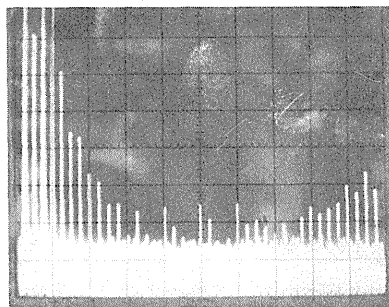
5. 遮蔽効果

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（6CH）-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



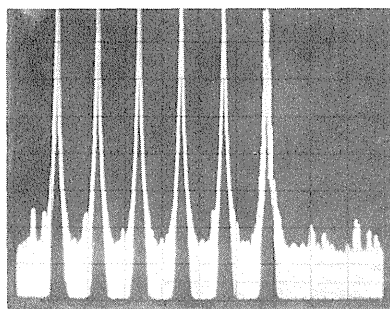
写真研 8.1 スペクトラムアナライザーで見た全システムのFM-FDM信号(横軸: 20kHz/div., 縦軸: 10dB/div.)

Photo.R8.1 All the FM-FDM signals observed with the spectrum analyzer.



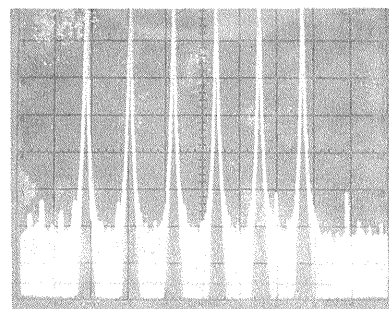
写真研 8.2 スペクトラムアナライザーで見た背景雑音(横軸: 20kHz/div., 縦軸: 10dB/div.)

Photo. R 8.2 Background noise observed with the spectrum analyzer.



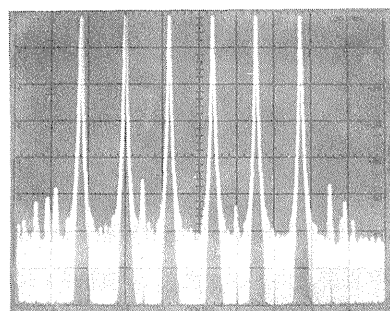
写真研 8.3 先端装置(地震成分)からの信号(横軸: 2kHz/div., 縦軸: 10dB/div.)

Photo. R8.3 Seismic signals from the terminal apparatus.



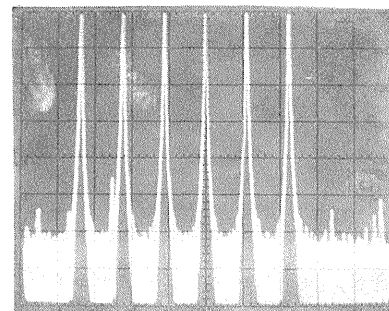
写真研 8.4 No. 2 中間点装置からの信号(写真研 8.3 に同じ)

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.

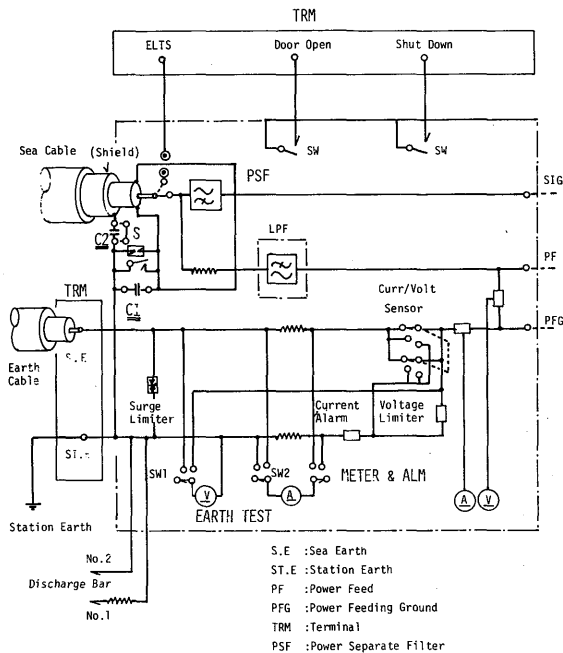


写真研 8.6 No. 4 中間点装置からの信号(写真研 8.3 に同じ)

Photo. R.8.6 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 C 2 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、C 2 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

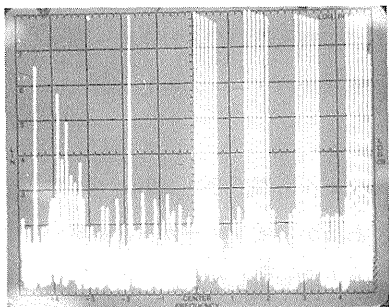
Fig. R 8.2 Terminal apparatus for the submarine cable.

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。

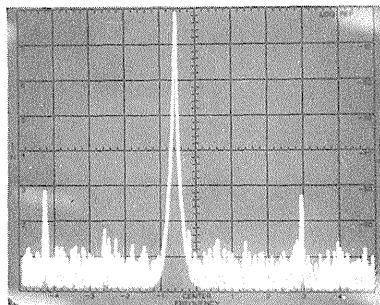
この他作業の進行に伴ない受信装置の DC-DC コンバータから発生する高周波雑音が発見されたので、このコンバータの設計変更と改修を実施し、室内照明器具のスイッチから出るパルス性雑音等を含む雑音の発生と廻り込みの防止改修もあわせて実施した。

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



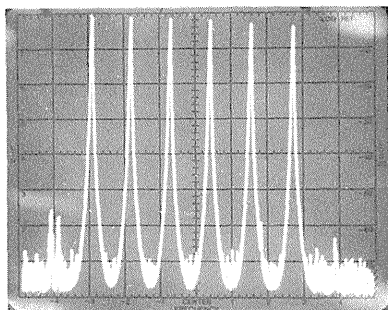
写真研 8.7 図研 8.2 の処置後の全信号

Photo. R8.7 All the signals after the installment shown in Fig. R 8.2 .



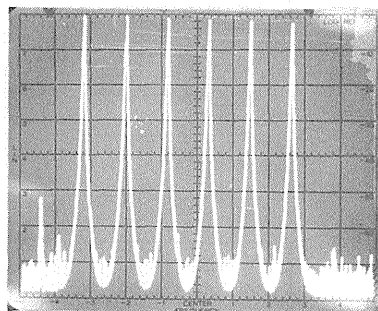
写真研 8.8 図研 8.2 の処置後の津波信号

Photo. R8.8 Tsunami signal after the installment shown in Fig. R 8.2 .



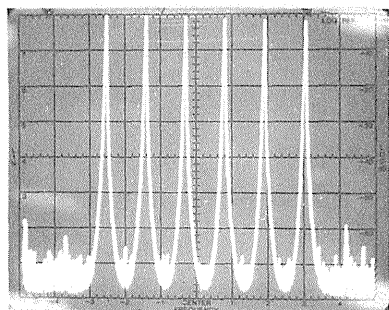
写真研 8.9 図研 8.2 の処理後の先端装置信号
(地震成分)

Photo. 8.9 Seismic signals from the terminal apparatus after the installment shown in Fig. R 8.2 .



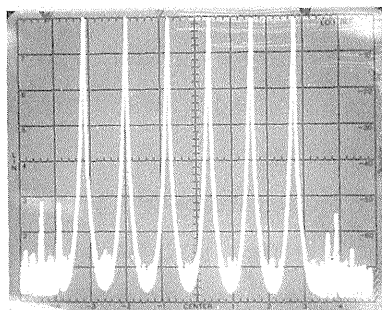
写真研 8.10 図研 8.2 の処置後のNo.2 中間点装置からの信号

Photo. R8.10 Seismic signals from the intermediate apparatus No. 2 after the installment shown in Fig. R8.2



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. R8.11 Seismic signals from the intermediate apparatus No.3 after the installment shown in Fig. R8.2 .



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. R8.12 Seismic signals from the intermediate apparatus No.4 after the installment shown in Fig. R8.2 .

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用途が付き、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

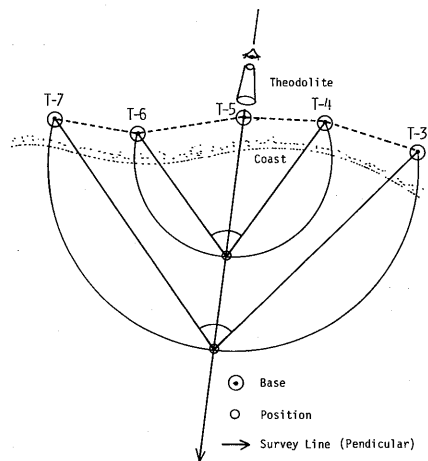
要 旨

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

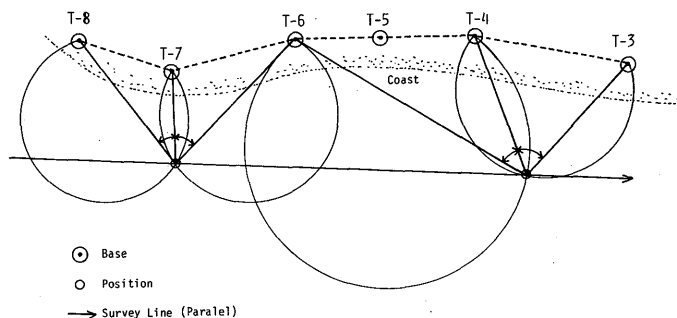
海底地形調査は、3章で述べたように、海岸に対して垂直な縦測線と水平な横測線に沿って、音響測深機で深浅測量して、潮位の補正を加えて深さとする。海上測量に先立ち、3章図3.8に示す基準点（T-1～T-11）は、光波測距儀（マイクロレンジャー）と、10秒読トランシットを組合せた測器で測距離と測角を同時に行うトラバース測量を実施した。海上位置の縦測線は誘導基点にトランシットをセットして、陸上よりトランシーバーで線上に誘導し、船上で六分儀により精度のよくなる（ $30^{\circ} \sim 120^{\circ}$ ）2つの基準点を狙い測角する直角誘導一角法（図研9.1参照）により位置を決めた。横測線は、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会点を位置する3点2角法（図研9.2）を採用した。



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.

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・P・



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

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を意味する。

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、70 dB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70 dB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（0.1 V/kine → 0.8 V/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68.8 dBという特性から、50 dB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 60 dB 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12 dB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30 dB以上の検査実績が得られていたので、この30 dBが加算され、今回のシステ

μではFM-FDM総合のS/Nは約80 dB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っ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72 dB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・評価等に充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是可以する。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までに会でと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) 外觀(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 4.5 Hz 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, I O 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, I O 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×300 mm とする。 但し, 長さ増加分 (+ 25 mm) 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。 156 φ 径に M 8 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 3 Hz 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. コイル線材	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。	
	4. 他成分の影響	温度特性、傾斜特性は変換部の試作後検討する。	
	5. 素子感度	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。	
	6. 信 頼 性	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。	
	7. 経時特性	1 コイル線材は検出コイルと同一線材とする。	
	8. 検定コイル仕様	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。	
	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。	
ジ ン バ ル 部	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	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。	
	8. 構 造	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 S H 510は	
	9. 潤 滑 剤		

項 目		決 定 事 項	備 考
ジ ン バ ル 部	10. クランプ機構	伝送部に悪影響はないので使用してよい。 2 ベ어링の性能から判断して、使用潤滑剤を決定する。 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。 2 摩擦クランプ力は目標を5 Gとし、仕様は2 Gとする。 3 クランプ機構の駆動源モータは1ヶとする。	
等 化 増 幅 部	1. 回路構成 2. ICの保護 3. 出力の直流偏差 4. 部品実装	1 社の方式に統一する。 初段ICの前に振幅制限型IC保護回路を設ける。 出力の直流偏位電圧は50 mV以下とする。 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。 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。	
総 合 性 能	1. 出力信号の極性 2. 出力感度 3. 周波数出力特性 4. 雑音特性 5. 出力レベル特性	1 高・低倍率変位レンジの出力信号の極性は一致させる。 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。 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。 1 変位低倍率レンジの出力感度は2 V_{p-p}/400 μp-pとする。 2 変位高倍率レンジの出力感度は2 V_{p-p}/40 μp-pとする。 3 速度レンジの出力感度は2 V_{p-p}/40000 μkine p-pとする。 4 出力感度の測定条件は、周波数8 Hz, 振幅200 μp-pとし、変位低倍率レンジの出力電圧を測定する。 5 出力感度は(4)の条件下で1 V_{p-p} $\pm$ 3 dB (初期偏差) $\pm$ 2 dB (安定度)とする。 6 出力感度の初期偏差及び測定誤差は数値で報告する。 7 設置場所による出力感度の調整は行わない。 1 周波数出力特性は幅4 dB (初期等化偏差) $\pm$ 1 dB (安定度)とする。 2 初期等化偏差は可能な限り小さくする。 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。 2 S/Nは12 dB以上とする。 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。 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。 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。	
立 会 試 験	1. 中間立会試験 2. 完成立会試験	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。 2 試験項目は、資料SWG-9-81による。 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。 2 試験項目は資料SWG-9-81による。	

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。	
	3. 推定故障率	2	試験で得られた全データを提出する。 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 ± 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の方針を決定した。

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 01032 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応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.	海水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.	ピ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。
	・作業者人数と作業状態	2～3人の受渡し作業。

項	目	回	答
2.	水晶製造, 検査状況		
	・感圧水晶の製作状況		大変困難な作業である。
	・水晶 cut の確認法		偏光法による。
	・感圧水晶, 温度補償水晶の周波数温度特性の合せ方		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。