

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、

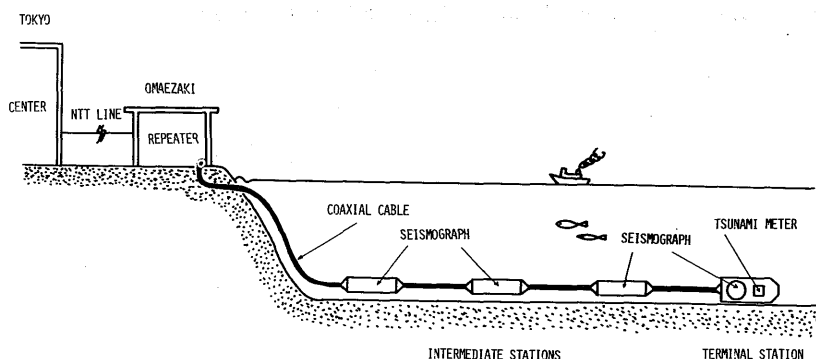


図 2.1 システムの概念

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。

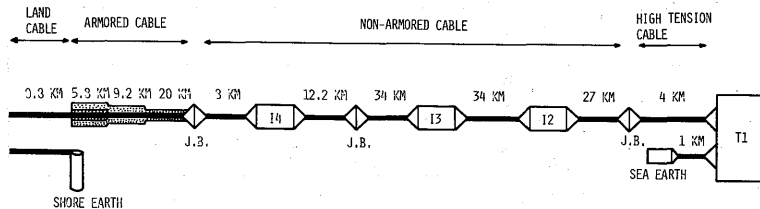


図 2.2 ケーブルシステム。T1, 12~4 はそれぞれ先端、中間点装置。
J.B. はジョイントボックスと呼ばれるケーブル接続器。

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、波打際で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		し ゃ へ い					外 被 被		布 テ ー プ	座 床	外 装 線 (内層)		中 間 座 床	外 装 線 (外層)		外 部 被 覆	仕 上 外	概 算 重 量		破 断 重 荷
	(注)	絶 縁 用 ポリエチレン		銅 テープ	外 被 用 ポリエチレン		コルゲート 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 テープ	PP ヤーン	防食鉄線 PP ヤーン		PP ヤーン	防食鉄線 PP ヤーン		PP ヤーン	径	空 中 ($\frac{\text{トン}}{\text{km}}$)	水 中 ($\frac{\text{トン}}{\text{km}}$)	(トン)
		外径 (mm)	厚さ (mm)	外径 (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)	(mm)			
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	内部一外部導体間	G Ω/km	10,604	4,490	4,410
	外部一大地間		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)		$\mu\text{sec}/\text{km}$	5.081	5.086	5.086
特性インピーダンス (400kHz)		Ω	45.37	44.20	44.17

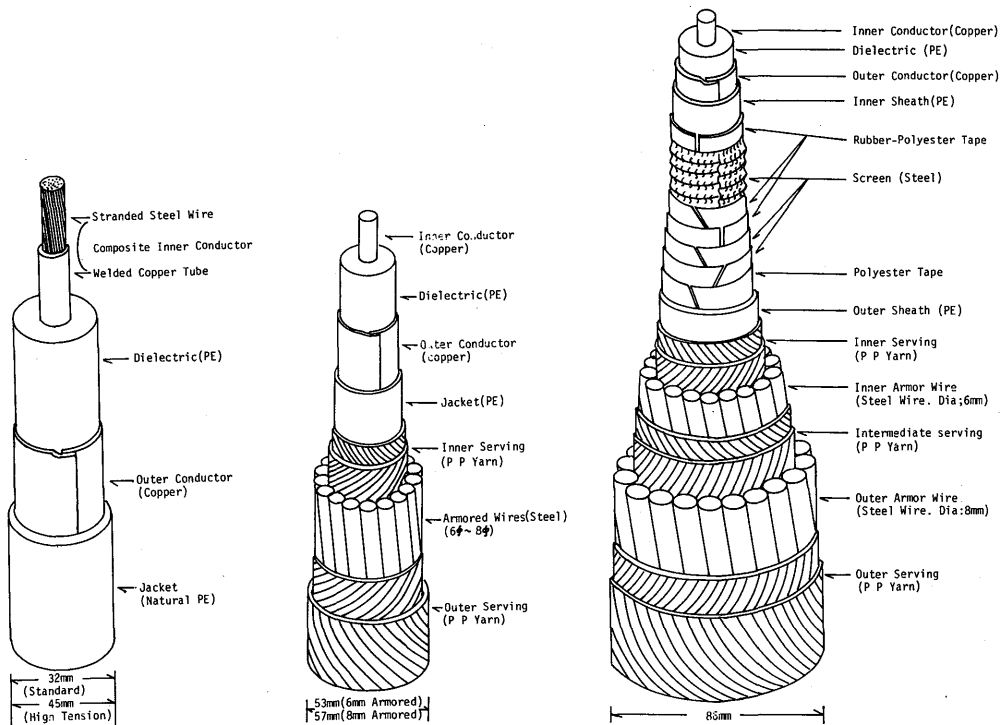


図 2.3 ケーブルの構造模式図。無外装および高抗張力(左), 一重外装(中), 二重外装(右)の構造。

Fig. 2.3 Submarine co-axial cables.

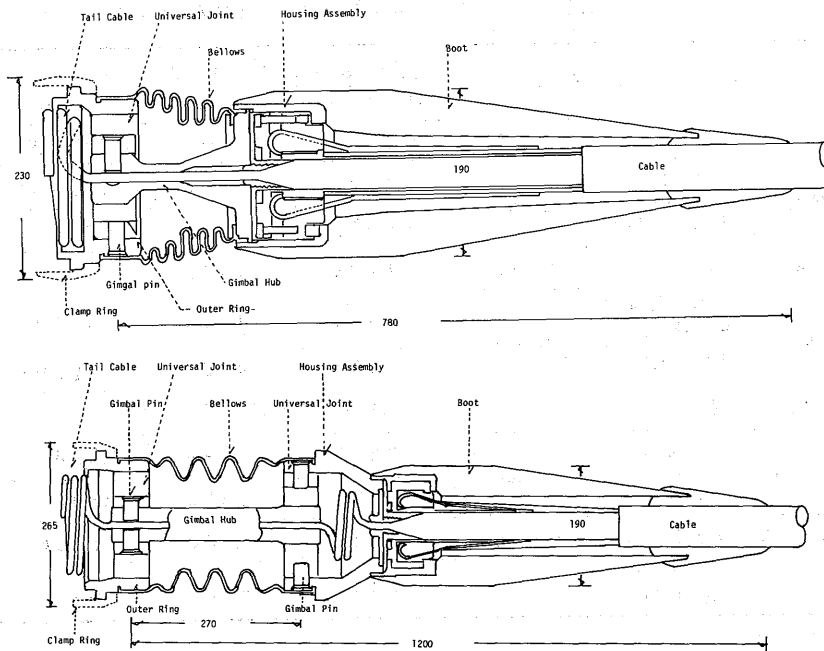


図 2.4 カップリングの構造。通常のカップリング(上)と先端装置用として開発した110°まで曲げられるカップリング(下)の構造。

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

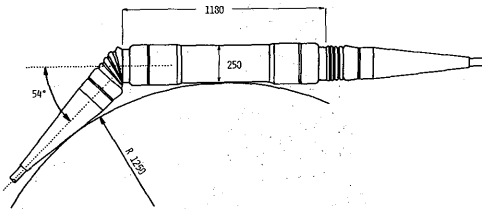


図 2.5 カップリング部の曲げ。通常のカップリングは54°までなら自由に曲げられる。従って半径1.25 m以上の円筒形に密着することができ、ケーブルに無理な曲げによる応力集中が生じない。

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)通常の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

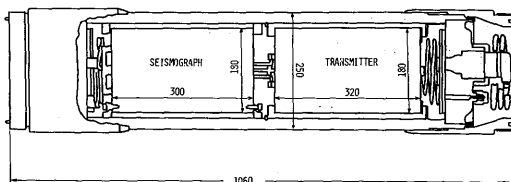


図 2.6 中間点装置筐体。地震計と伝送部を実装したところ

Fig. 2.6 Pressure vessel.

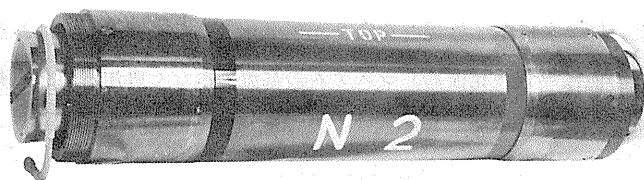


写真 2.1 中間点装置耐圧筐体

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, 電導性が増大する。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

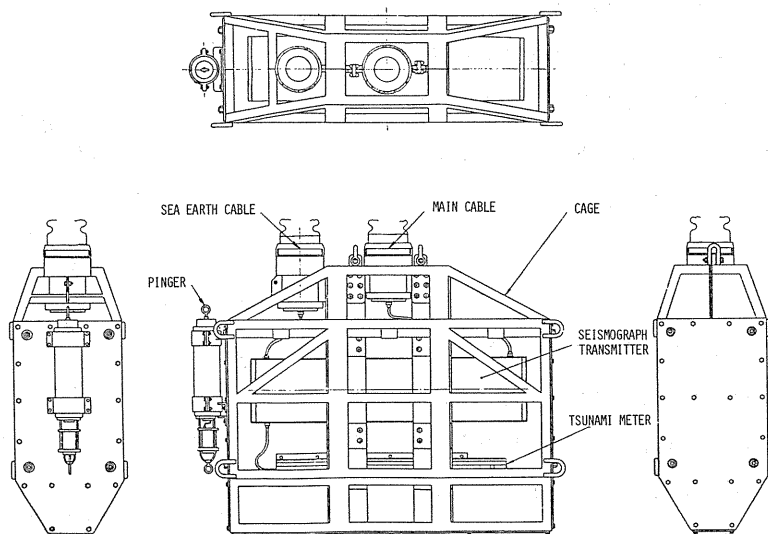


図 2.7 先端装置ケージの構造。上部の 2 個のフランジには本ケーブルと海底アースケーブルがつながれる。地震計と伝送部が封入された耐圧筐体および津波計筐体は図のようにくみこまれる。

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

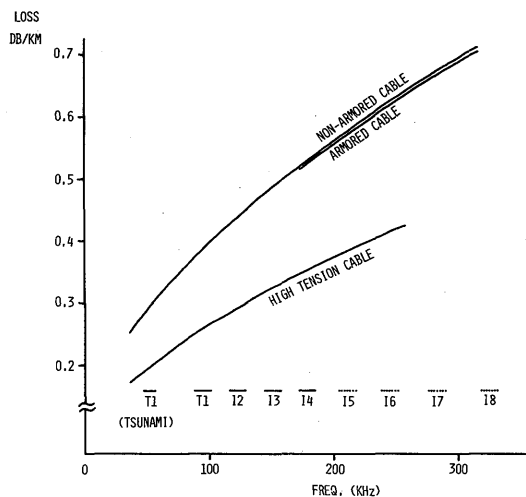


図 2.8 ケーブル損失の周波数特性
Fig. 2.8 Loss of the co-axial cable.

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 $\pm 0.4\%/10$ 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 $\pm 0.1\%$, 初期設定誤差 $\pm 0.1\%$, 電源変動による $\pm 0.05\%$ 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伝送する方式 (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

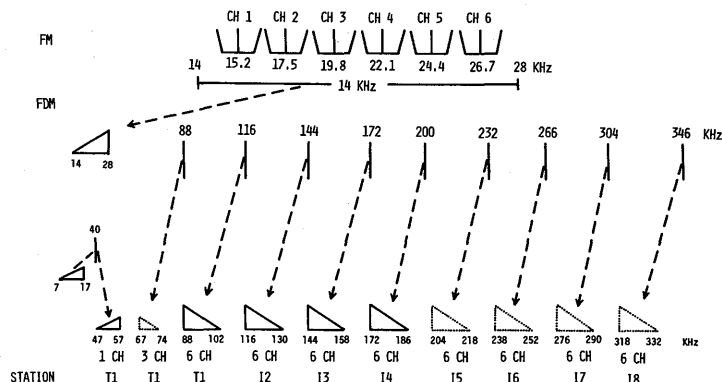


図 2.9 周波数配置。最下段の三角形を実線で書いてある帯域が, 今回の御前崎系で使用したもの。

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 -70 dBm 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動に対する応答は複雑で定量的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。

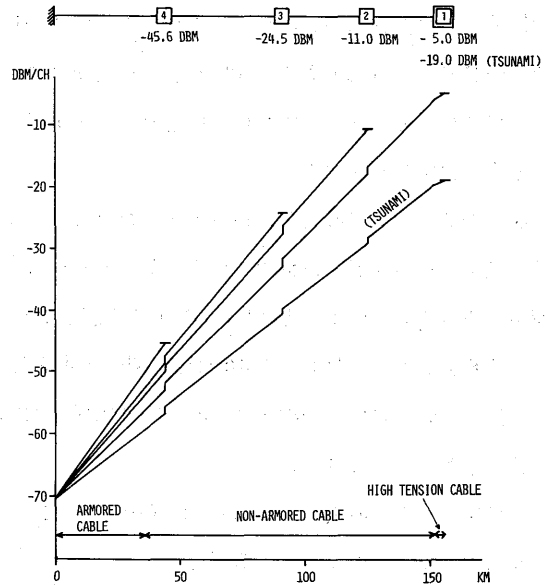


図 2.10 伝送レベル図。御前崎系のもの。

Fig. 2.10 Level diagram of the System.

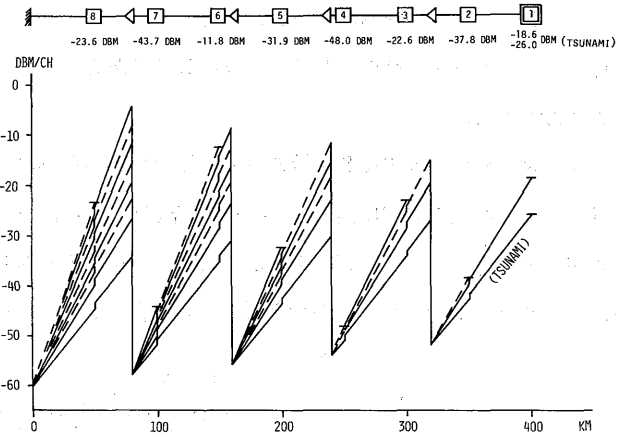


図 2.11 伝送レベル図。将来、他の海域にて 8 観測点を 400 km のケーブルを用いて展開した場合のレベル図。中継増幅器を 4 台必要とする。

Fig. 2.11 Level diagram for a future system.

ジ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%）によりジンバルは一旦、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で固定される。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、それをディジタル化した後、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

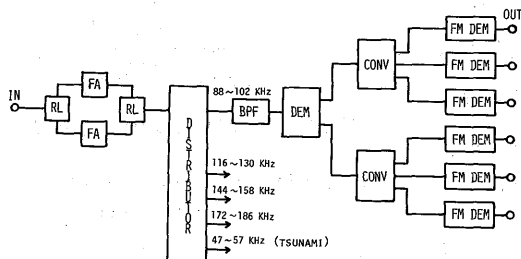


図 2.12 復調ブロック図。FAは平坦増幅器で常用、予備の2器が用意されていてリレーRLで切替えられる。信号は分配器を経由して各観測点毎の地震信号4組と津波信号1組に分割される。地震信号4組はそれぞれに対応する復調器により二次、一次復調され原信号となる。津波信号は周波数を計数することにより復調される。

Fig. 2.12 Block diagram of the demodulator.

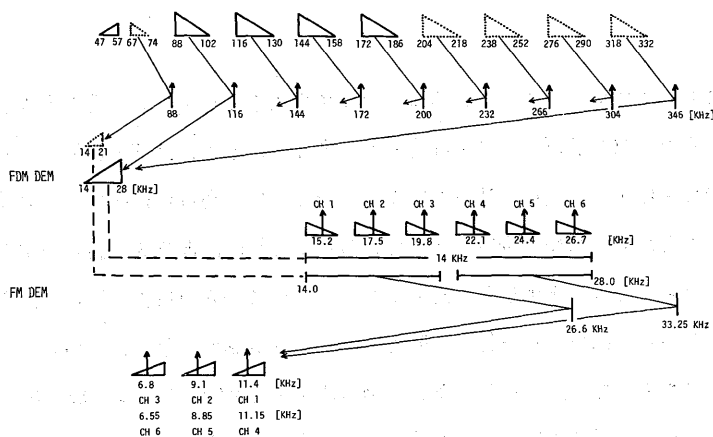


図 2.13 復調周波数配置。CH1とCH4のFM復調器は中心周波数がほぼ等しい（11.40 kHzと11.15 kHz）ので全く同一の回路にしてある。CH2と5, 3と6も同様。

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パイプレーター回路を採用して、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の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、PCM 9600 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

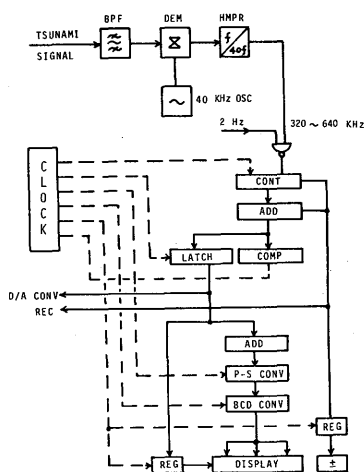


図2.14 津波信号復調ブロック図

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継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、また中継においては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を意味する)。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 $\mu\text{m}^{\text{P-P}}$ （高倍率成分）、0.4~400 $\mu\text{m}^{\text{P-P}}$ （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樞においては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。

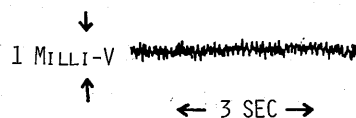


図2.15 伝送系の総合雑音。伝送部入力を短絡した状態で測定したものだから伝送部総合の雑音と考えられる。測定は装置の製作されたクリーンルーム内で行なわれたので（海底ケーブルの代りに抵抗減衰器を用いて）、誘導による雑音をも、ひろっていると考えられ、海底という環境下では、もっと少くなるものと期待できる。

Fig. 2.15 Typical overall noise of the transmitter.

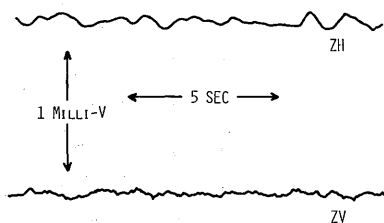


図2.16 地震計の総合雑音。変換器の代りにコイル抵抗に等しい固定抵抗をつないで地震計の出力を見たもの。図2.15と同様の注釈がつく。図2.15と図2.16の和が復調後に中継所において見られる雑音のすべてである。中樞においてはこの他に量子化雑音（1または2mV^{P-P}）も含まれる。

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経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。

給電装置への入力は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20 kHz の方形波に変換後、昇圧、直流変換し、観測時には210 mA 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66 V、先端装置は津波計を含めて84 V、無外装ケーブル100 km あたり20 V、外装ケーブル100 km あたり6 V、中継増幅器20 V 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360 Vで $0.1 V^{P-P}$ 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測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ハイドロフォンがある。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いため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 "
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 "
			"	高	"	0.01 ~ 40 "	0.02 ~ 20 "
			"	低	"	0.1 ~ 400 "	0.4 ~ 400 "
	Y	+Y : SSE	"	高	"	0.01 ~ 40 "	0.02 ~ 20 "
			"	低	"	0.1 ~ 400 "	0.4 ~ 400 "
			"	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 mkin P-P	0.02 ~ 20 mkin P-P
			"	高	"	0.01 ~ 40 μm P-P	0.02 ~ 20 μm P-P
			"	低	"	0.1 ~ 400 "	0.4 ~ 400 "
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 "
			"	高	"	0.01 ~ 40 "	0.02 ~ 20 "
			"	低	"	0.1 ~ 400 "	0.4 ~ 400 "
	Y	+Y : SE	"	高	"	0.01 ~ 40 "	0.02 ~ 20 "
			"	低	"	0.1 ~ 400 "	0.4 ~ 400 "
			"	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 mkin P-P	0.02 ~ 20 mkin P-P
			"	高	"	0.01 ~ 40 μm P-P	0.02 ~ 20 μm P-P
			"	低	"	0.1 ~ 400 "	0.4 ~ 400 "
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 "
			"	高	"	0.01 ~ 40 "	0.02 ~ 20 "
			"	低	"	0.1 ~ 400 "	0.4 ~ 400 "
	Y	+Y : SSE	"	高	"	0.01 ~ 40 "	0.02 ~ 20 "
			"	低	"	0.1 ~ 400 "	0.4 ~ 400 "
			"	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 mkin P-P	0.02 ~ 20 mkin P-P
			"	高	"	0.01 ~ 40 μm P-P	0.02 ~ 20 μm P-P
			"	低	"	0.1 ~ 400 "	0.4 ~ 400 "

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は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

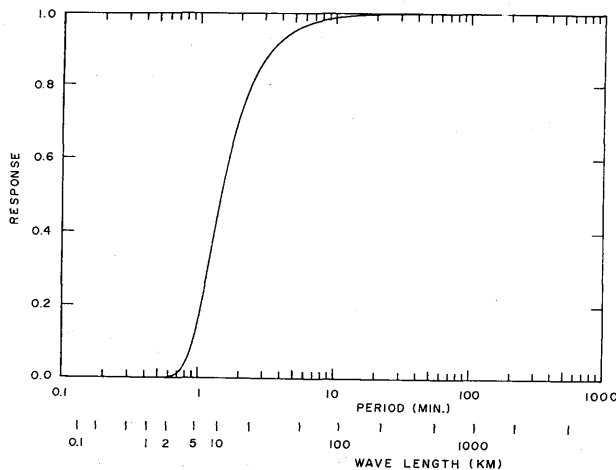


図 2.17 津波計の応答。水深 2200 m の海底における水圧は、波の周期(波長)に応じて図のような応答を示す。津波や潮汐の周期は 20 分以上だから、ほぼ完全に応答する。

Fig. 2.17 Frequency response of the tsunami-meter.

ることにした。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てその共振周波数を測るパイプロトン、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 4000 m 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 $10\text{ cm}/^{\circ}\text{C}$ 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1mm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8~16kHz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48~56kHzに移動させて伝送する(図2.9等で47~57kHz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枢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枢における処理の一部は代行が可能である。観測中枢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(1000Fit)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。1Fit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止するとともに、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（電力分離誘波器）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。

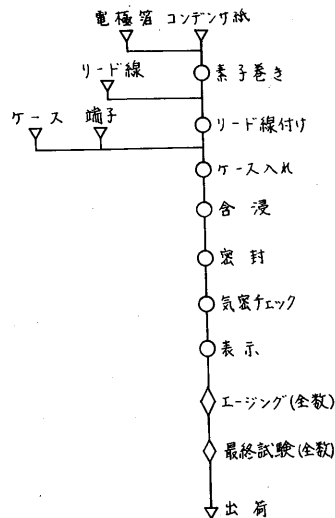


図2.18 紙コンデンサーの製造工程。エージングにおいては温度80℃において定格電圧の1倍および1.4倍の電圧を印加し1500時間の高温負荷を行う。

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

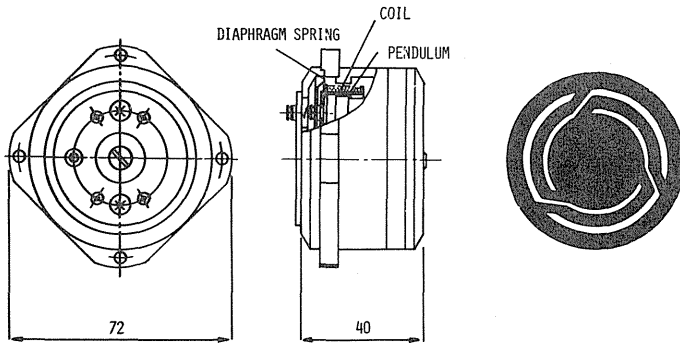


図 2.19 変換器の構造とダイヤフラムバネの模式的形状

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。コイルボ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

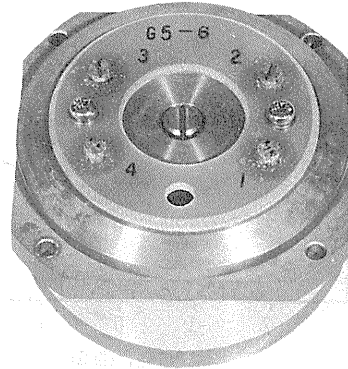


写真 2.2 地震計変換器の外観

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。

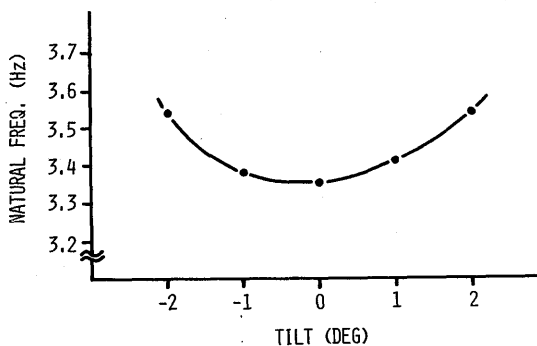


図2.20 固有振動数の傾斜特性。水平動変換器試作品についての一例、傾斜させることにより、振子の中立点がシフトし固有振動数の変化がもたらされる。上下動変換器の場合は $\pm 2^\circ$ 程度の傾斜では中立点のシフトがなく固有振動数も全く変化しない。

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部品品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。

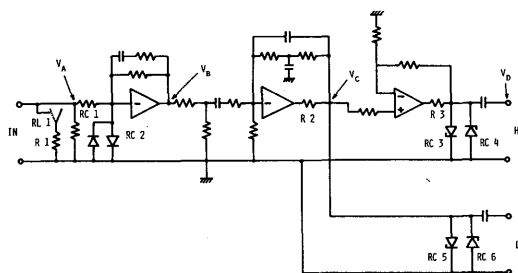


図2.21 中間点地震計の等化回路図（水平動）。H，Lはそれぞれ高，低感度出力。

Fig. 2.21 Equalization amplifier for the horizontal components.

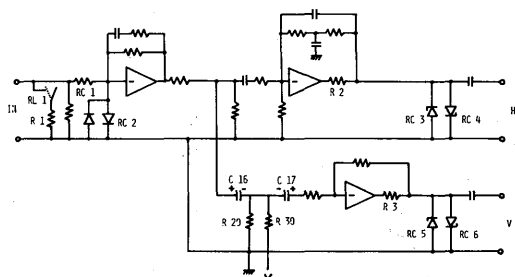


図2.22 中間点地震計の等化回路図（上下動）。H，Vはそれぞれ変位比例，速度比例出力，出力Hは水平動のHと等しい感度である。

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。

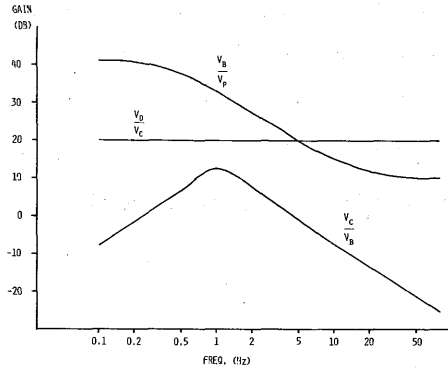


図2.23 水平動等化増幅器各増幅段の利得。 V_P は変換器の発電電圧, $V_B \sim V_D$ は図2.21参照。

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

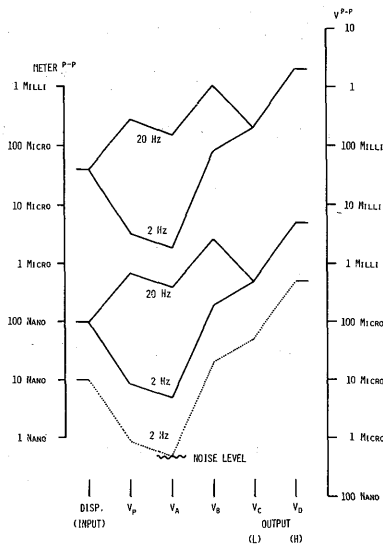


図2.24 水平動等化増幅回路各点のレベル(図2.21参照)

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

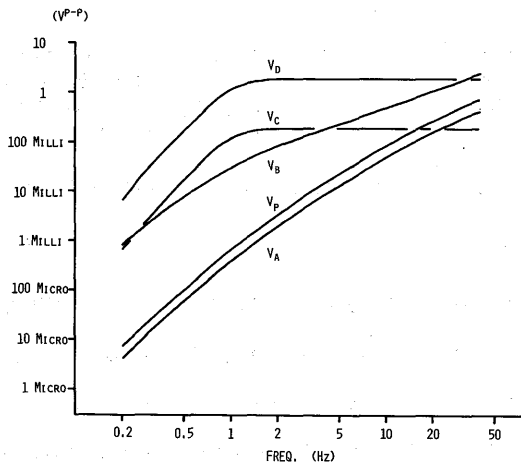


図2.25 $40\mu m P-P$ 入力時の水平動等化増幅回路各点電圧の周波数特性(図2.21参照)

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。

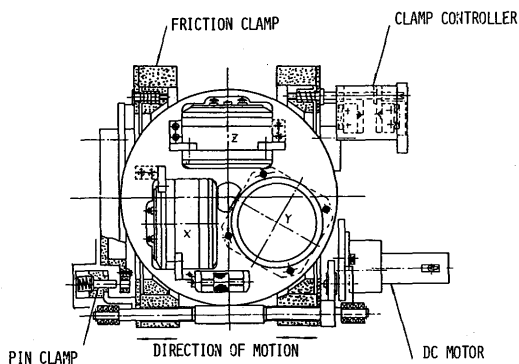


図 2.26 ジンバルの構造。DC モーターの回転により FRICTION CLAMP が図の状態から前進して円板に接触し摩擦力でクランプされる。

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通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の間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则认为する。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、温度雑音が発生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（M 7.7）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う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ド社モデル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。振動する部分の中は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。

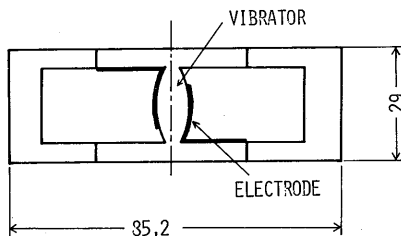


図 2.27 感圧水晶振動子の構造。竹を横に割ったような構造をしていて、竹の節に相当するレンズ状の部分が振動子である。

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

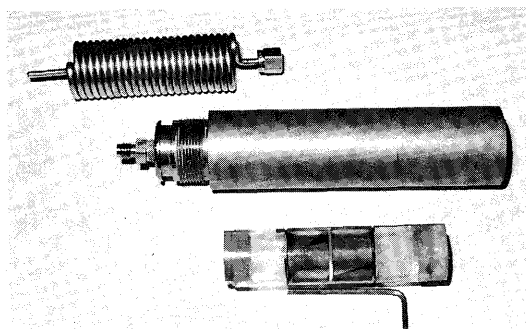


写真 2.3 津波計感圧水晶振動子の外観（最下部）。中段は筐体。上段は導圧管。

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ィテッド 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

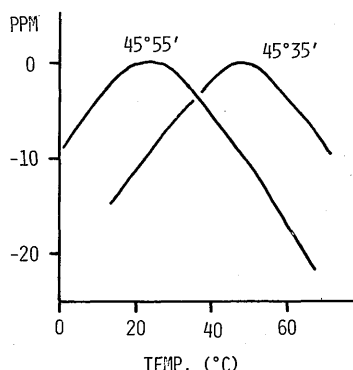


図 2.28 水晶振動子の振動数温度特性。截出角の微妙な違いによって温度特性が変化する。

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

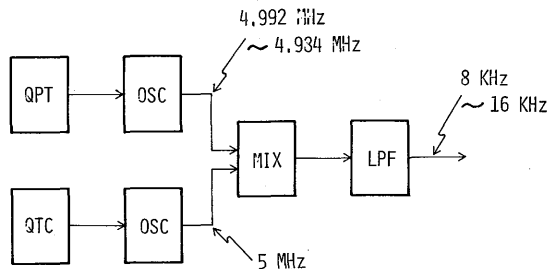


図 2.29 津波計ブロック図。Q P T は感圧水晶振動子、Q T C は非感圧温度補償用水晶振動子、O S C はそれらの振動子を発振させる回路、M I X は両発振波形のミキサー、L P F は低域濾波器

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、空気中に電源 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

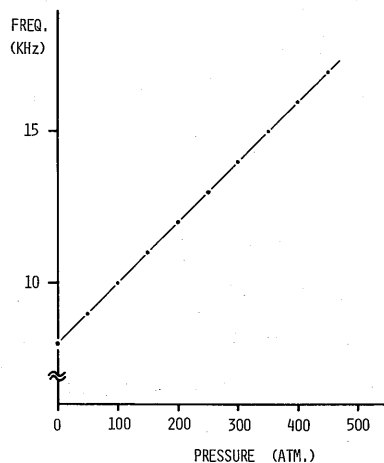


図 2.30 津波計出力周波数の直線性

Fig. 2.30 Output frequency of the tsunami-meter.

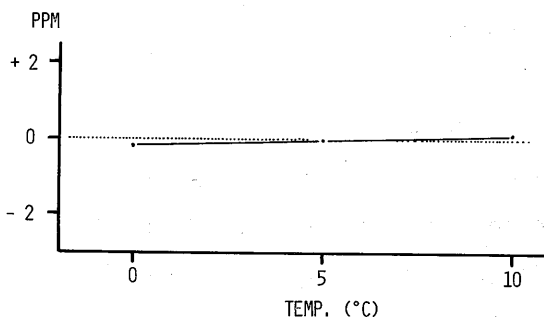


図 2.31 津波計の周波数温度特性、周波数の測定精度は 0.01 ppm

Fig. 2.31 Temperature characteristics of the tsunami-meter.

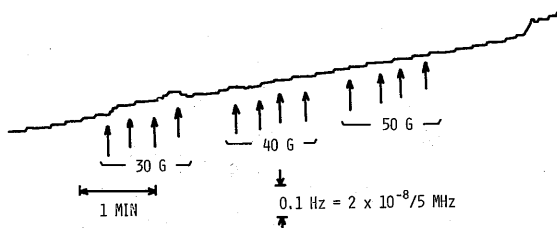


図 2.32 津波計の衝撃試験。矢印が衝撃を与えた時刻。細かい段差は測定の分解能による。右上がりのトレンドは周囲温度の変化による。

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

振周波数変化は $5 \times 10^{-7}/6$ 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 全体をゴムで囲い、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持っている。

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。

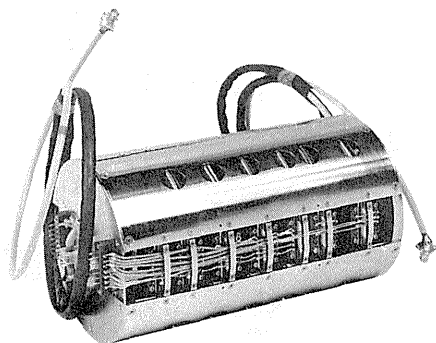


写真 2.4 伝送部の外観

Photo. 2.4 Transmitter for the intermediate apparatus.

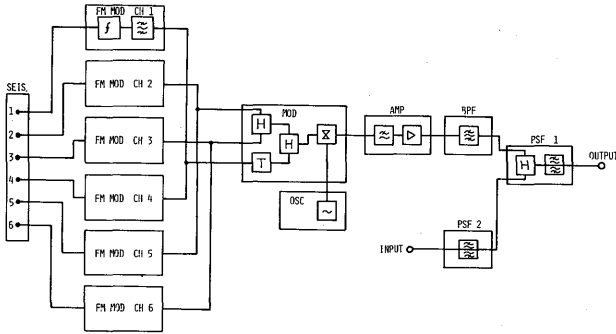


図 2.33 中間点装置伝送部ブロック図。
SEIS. に地震計出力が繋がれ、INPUT から沖側の装置の信号が入力する。Tは減衰器。Hはハイブリッドコイル。fはFM変調器。電源電流はOUTPUTから流入し装置各部に電力を供給後、INPUT から沖側の装置へと流出してゆく。

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

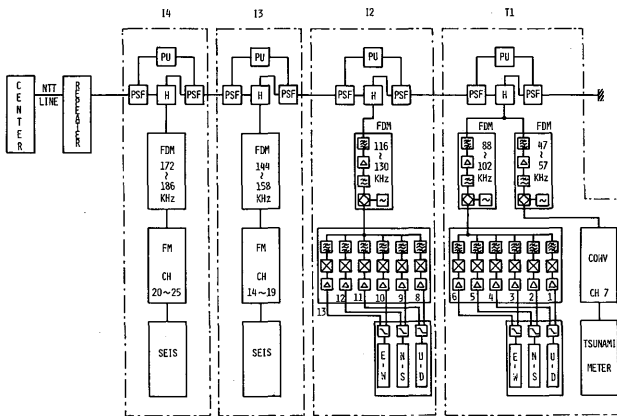


図 2.34 システム全体の伝送系ブロック図。PSFは電力分離濾波器，PUは電源ユニット。

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

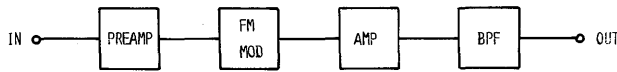


図 2.35 一次変調器ブロック図

Fig.2.35 Block diagram of the frequency modulator.

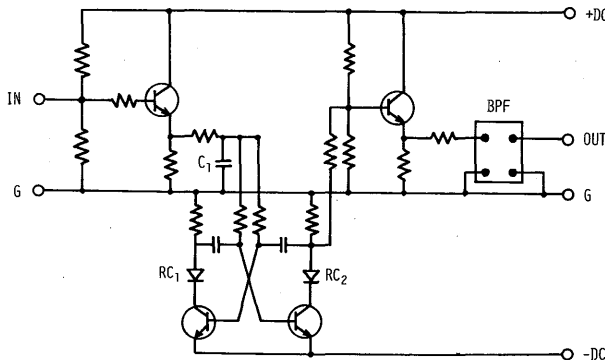


図 2.36 一次変調器回路図

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 $15\text{k}\Omega$ 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、 $3\sim 4\text{V}$ 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、 C_1 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 $\pm 1\text{V}$ に対して $\pm 600\text{Hz}$ 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、 $15.2, 17.5, 19.8, 22.1, 24.4, 26.7\text{kHz}$ 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 RC_1, RC_2 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 $380\text{ppm}/^\circ\text{C}$)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 $140\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 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 $50\text{ppm}/^\circ\text{C}$ ($1\text{Hz}/^\circ\text{C}$)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 $200\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 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 $\pm 0.1\%$ におさめることが容易である。

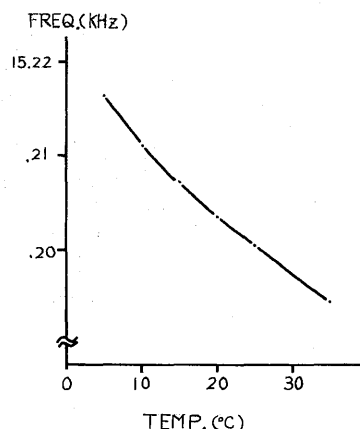


図2.37 一次変調器出力周波数温度特性の典型例

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。

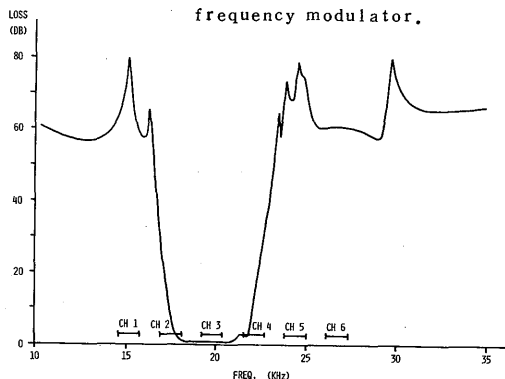


図2.38 一次変調器第3チャンネルの帯域濾波器減衰特性。他のチャンネルもほぼ同様である。

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もので、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。

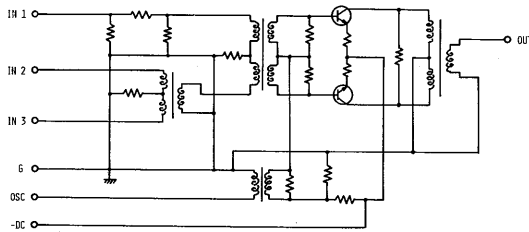


図2.39 二次変調器回路図。IN1,2,3にはそれぞれ一次変調器出力の1,4チャンネル,2,5チャンネル,3,6チャンネルの信号が合成されて入力する。

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ト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ー平衡変調器と能動型トランジスター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 トランジスター平衡変調器	能 動 型 トランジスター二重平衡変調器
トランジスターの数	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

素子トランジスターの必要数の差で、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けられず、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。このトランジスターの数の差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ー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ー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なり、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。

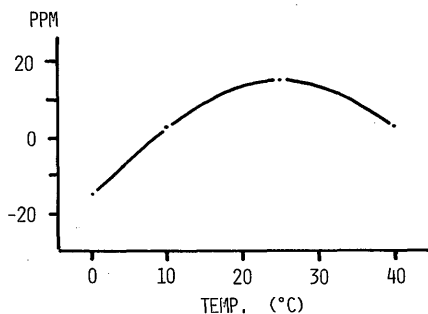


図 2.40 搬送波発振器の周波数温度特性

Fig. 2.40 Temperature characteristics of the carrier oscillator.

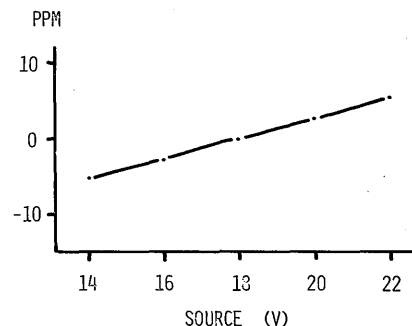


図 2.41 搬送波発振器の周波数電源電圧特性

Fig. 2.41 Source voltage characteristics of the carrier oscillator.

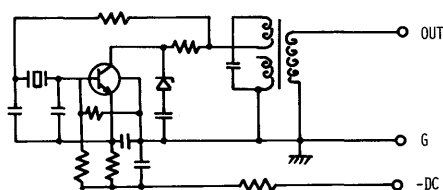


図 2.42 搬送波発振器回路図

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

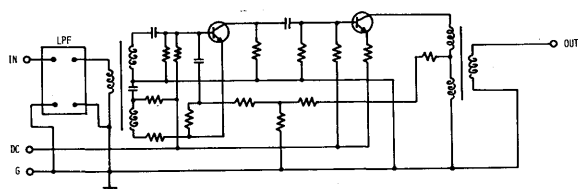


図 2.43 送信増幅器回路図

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

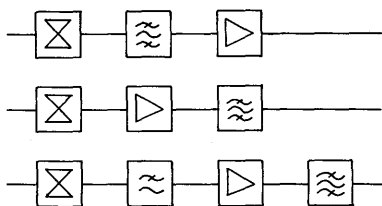


図 2.44 濾波器設置場所の検討

Fig.2.44 Examination of the location of the filters.

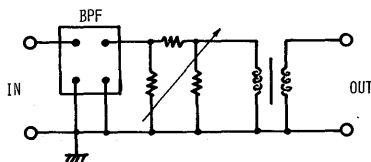


図 2.45 帯域濾波器回路図。 π 型抵抗減衰器(可変)を含む。

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

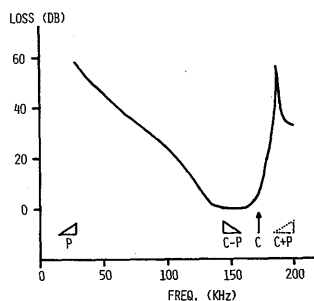


図 2.46 低域濾波器(図 2.43 の LPF)の減衰特性。No.3 中間点装置の場合を例示したもの。

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

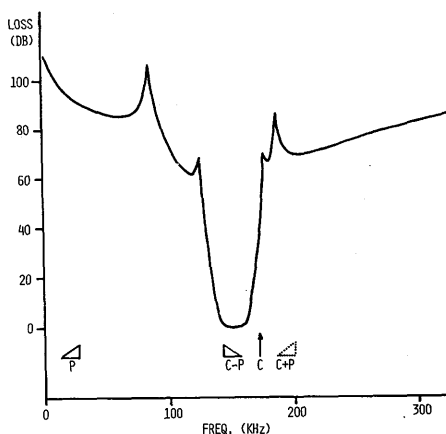


図 2.47 帯域濾波器(図 2.45 の BPF)の減衰特性。No.3 中間点装置の場合を例示したもの。

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

は、不要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要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

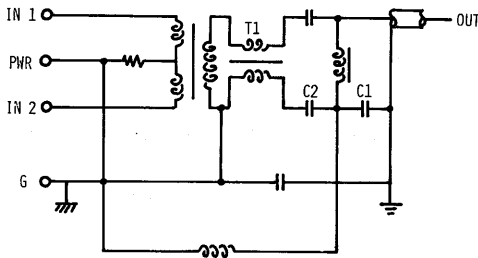


図 2.48 電力分離濾波器(1)の回路図。IN1は電力分離濾波器(2)のOUT (図 2.49)につながれ沖側の装置からの信号が入力する。IN2は自局の信号が入力し、両者は合成されOUTから陸側の中間点装置に向う。

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

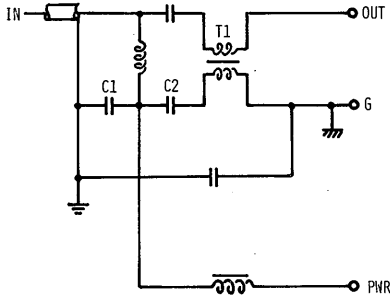


図 2.49 電力分離濾波器(2)の回路図。INには沖側の装置の信号が入力しOUTから電力分離濾波器(1)のIN1を入力する。電流は電力分離濾波器(1)のOUTから流入しコイルを経由してPWRから出力される。更に電源ユニット(図 2.34のPU)を経てこの図のPWRに入力しコイルを経てINから沖側の装置に流出する。

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、400 km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

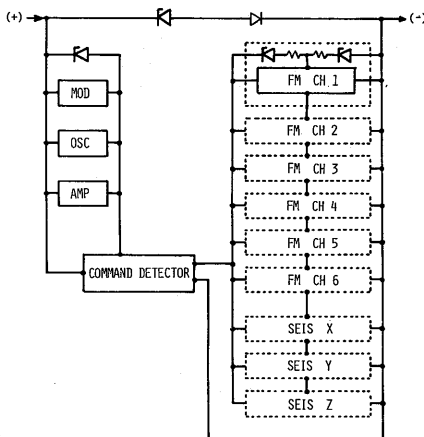


図 2.50 中間点装置電流供給系統図。観測状態においては(+)から(-)へ210mAが流れている。これが231mAになるとコマンド検出器がこれを検出し、ジンプルをフリーにする。また(-)から(+)へ150mAを流すと、同様に、振子が制御される。

Fig.2.50 Power supply for the intermediate apparatus.

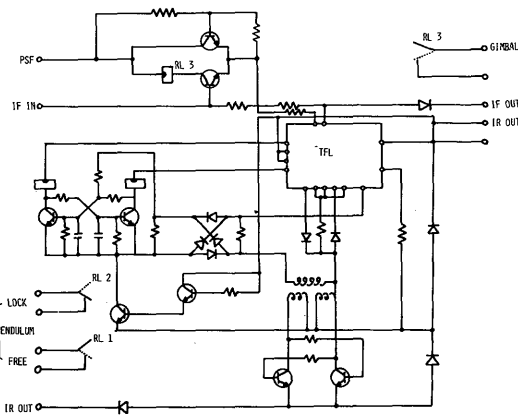


図 2.51 制御指令受信回路図(図 2.50 および図 2.56 の COMMAND DETECTOR)。TFL はトランスフラクサー。

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

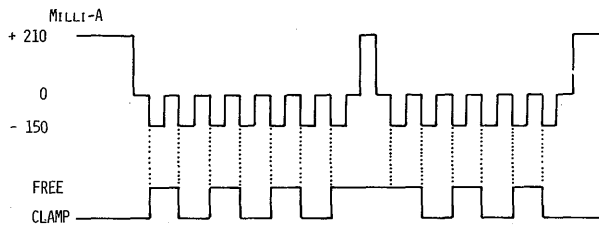


図 2.52 振子制御論理。+210 mA を流すことによって記憶状態がリセットされ、その後の最初の -150 mA により振子はフリーになる。以下、-150 mA を流す毎に振子の状態は反転する。

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が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 のメ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ー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、トランジスター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 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 が働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 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 48~56 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、伝送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。

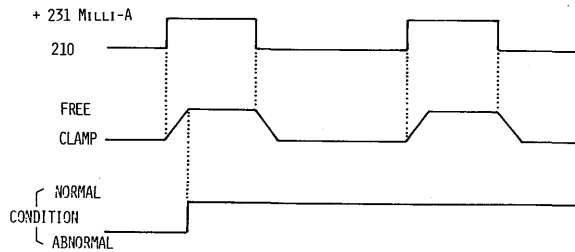


図 2.53 ジンバル制御論理。210 mA から 231 mA に増すことによりジンバルがフリーになり重力の作用で姿勢が正規の方向となる。再び 210 mA にもどすことによりジンバルは固定される。

Fig.2.53 Gimbal control.

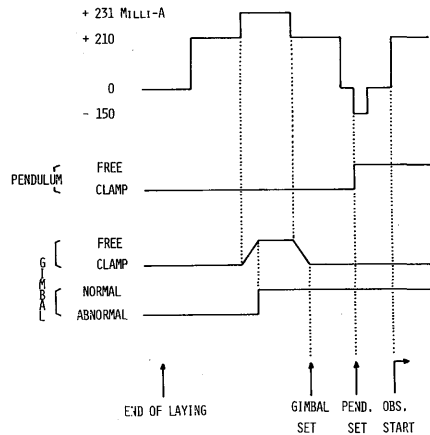


図 2.54 制御作業図。布設終了後、観測開始までに必要な制御のための作業。

Fig.2.54 Flow chart of the control.

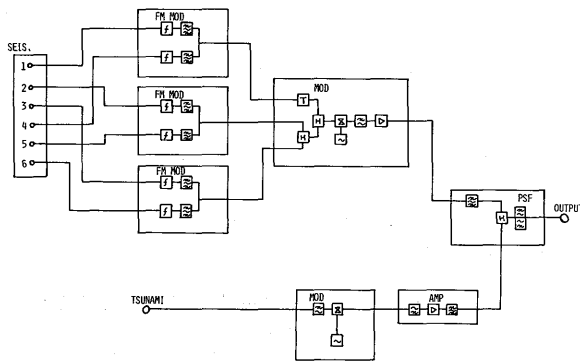


図 2.55 先端装置伝送部ブロック図

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

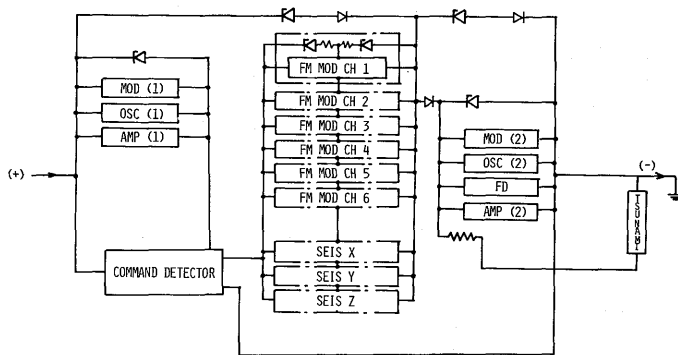


図 2.56 先端装置電流供給系統図。津波計が導通あるいは断となる障害が発生してもその他の部門は影響を受けない。

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、陽極アースを経由して海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 500mm 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 20mg/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.

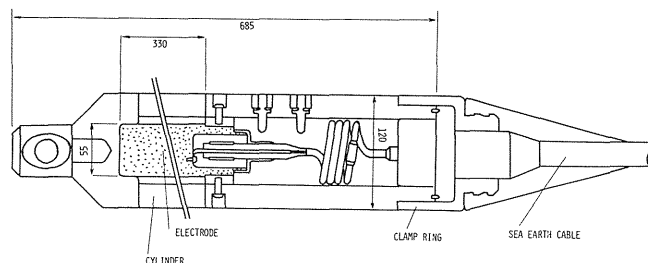


図2.57 海底アースの構造

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、解析的に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

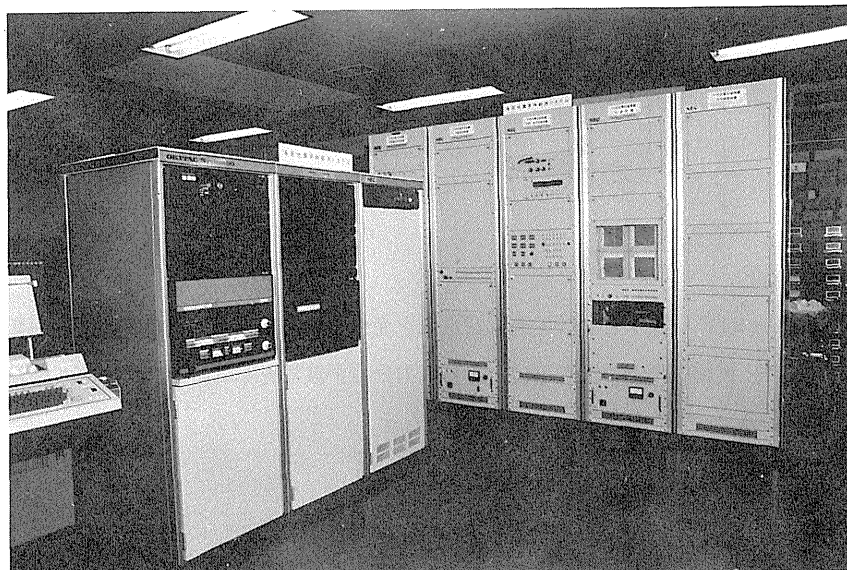


写真2.6 中枢内に設置された各装置

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。

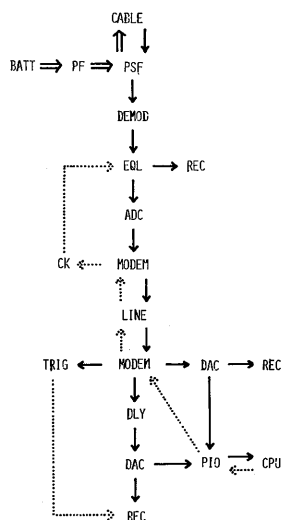


図2.58 陸上部における信号、供給電力、制御の流れ。→：信号の流れ。⇒：電力の流れ。-->：制御の流れ。BATT：局電源（電池）。PF：海底部高圧給電装置。PSF：海底ケーブル終端装置。DEMOD：復調受信装置。EQ：等化分配制御装置。REC：記録器。ADC：AD変換器。MODEM：陸上伝送送受信装置。CK：検定信号発生器。LINE：公社回線。TRIG：地震判別装置。DAC：DA変換器。DLY：遅延装置。PIO：計算機周辺入出力装置。CPU：計算機中央処理装置。

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

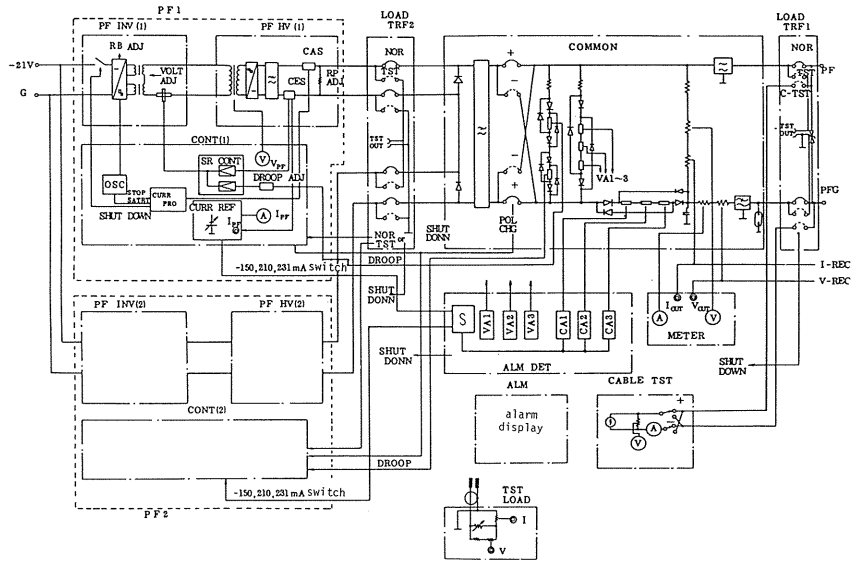


図 2.59 海底部高压給電装置ブロック図

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

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。

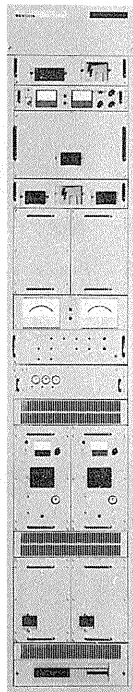


写真 2.7 海底部高压給電装置

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

(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) $\sim$ 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 PFG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。

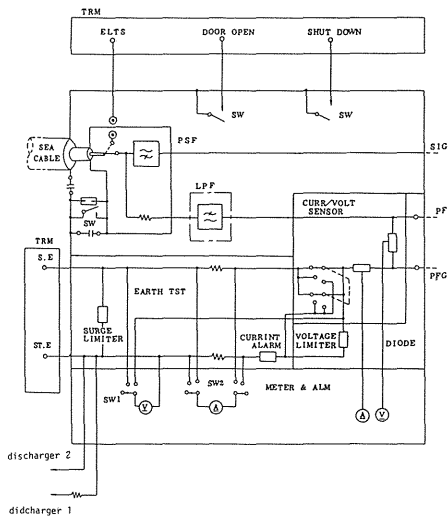


図 2.60 海底ケーブル終端装置ブロック図

Fig.2.60 Power separation filter in the shore station.

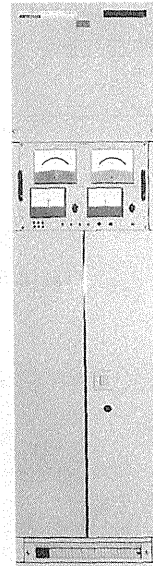


写真2.8 海底ケーブル終端装置

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 $40, 116, 144, 172, 200\text{kHz}$ 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 $14\sim 28\text{kHz}$ 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。

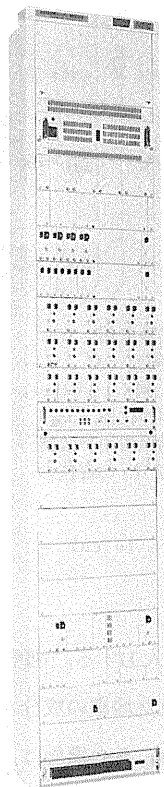


写真 2.9 復調受信装置

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

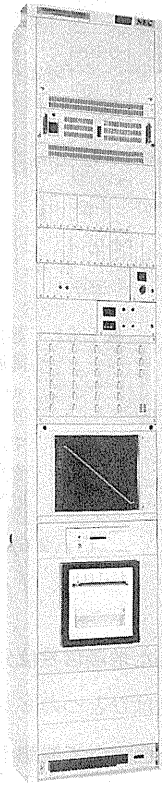


写真 2.10 等化分配制御装置

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。

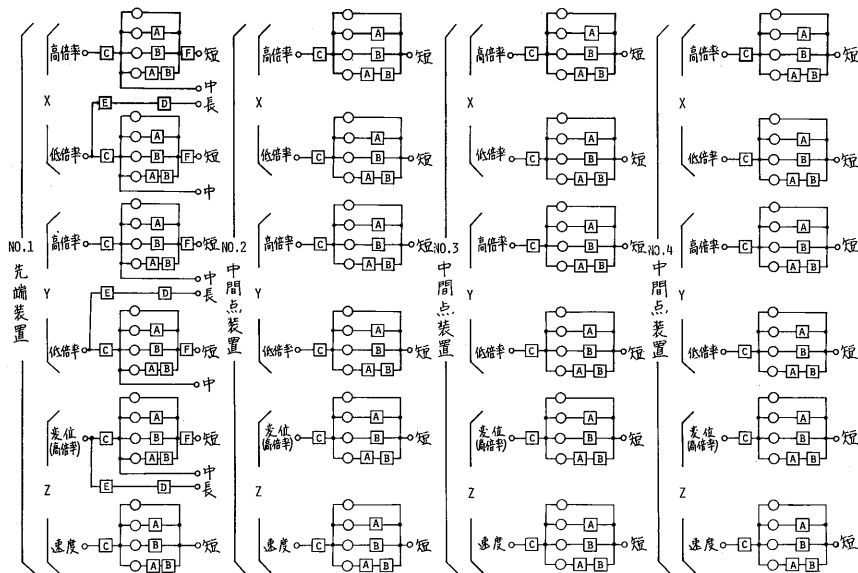


図 2.61 等化分配制御装置の等化部操作盤。A：脈動除去用 1 Hz 高域濾波器 (6 dB/oct)，B：同 2 Hz (同)，C：aliasing 防止用低域濾波器 (25 Hz)，D：同 (12.5 Hz)，E：長周期信号用等化器，F：短周期信号用等化器。丸印で示した穴にピンをさしこむことにより脈動除去用濾波器をなし、1 Hz のみ、2 Hz のみ、1 Hz と 2 Hz の縦続のいずれかの状態が選択できる。

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、観測者の管理下にならない回線の障害に、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。

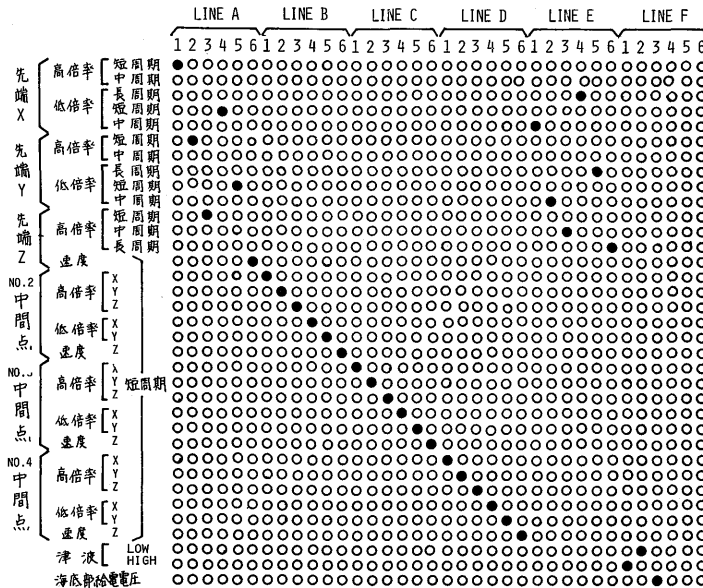


図 2.62 等化分配制御装置の分配部操作盤。ぬりつぶした丸印はピンを差し込んでいることを示し、伝送の一例を示す。F回線の4～6チャンネルには、このシステム外の長周期信号をのせることも可能である。

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、観測中継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。

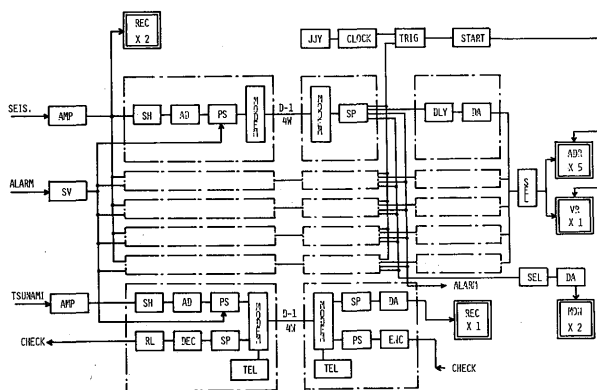


図 2.63 陸上送受信部ブロック図。SEIS: 地震信号, ALARM: 警報信号, CHECK: 検定信号, SV: 警報信号の変調部, SH: サンプルホールド回路, PS: 並直列変換回路, RL: リレー, DEC: 復号回路, SP: 直列変換回路, TEL: 電話, ENC: 符号化回路, J J Y: J J Y 受信器, SEL: 記録成分選択器, MON: モニター記録器, ADR: アナログデータレコーダー, VR: 12成分可視記録器。

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、観測中継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

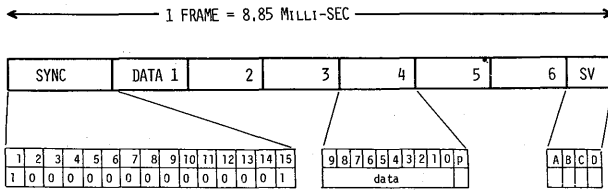


図 2.64 伝送フォーマット。同期に15ビット、データに11ビット(内、1ビットはパリティビット)×6、警報等の監視信号に4ビットをわりふっている。

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

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

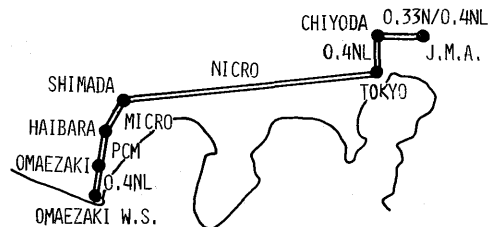


図 2.65 回線経路の概略

Fig. 2.65 Path of the NTT land lines.

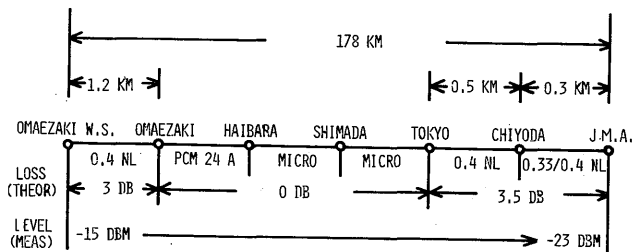


図 2.66 回線の伝送路構成

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。

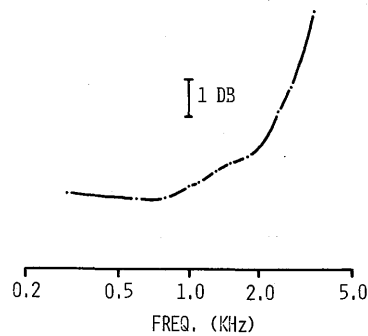


図 2.67 回線の減衰歪特性の測定例

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。観測中継所においては、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、観測中継所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継所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)、中継所内の装置は直接、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ねさせることにより、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．