岩槻深層観測井データ搬送装置とその信頼性

著者	高橋 末雄
雑誌名	国立防災科学技術センター 研究報告
巻	13
ページ	35-57
発行年	1976-03
URL	http://doi.org/10.24732/nied.00000714

国立防災科学技術センター研究報告　第13号　1976年3月

550.34.03:550.24:550.343(521.25)

岩槻深層観測井データ搬送装置とその信頼性

高　橋　末　雄

国立防災科学技術センター

A System for Telemetering the Deep-Well Data at Iwatsuki and Its Reliability

By

Matsuo Takahashi

National Research Center for Disaster Prevention, Tokyo

Abstract

In order to study the possibility of predicting the occurrence of earthquakes, the National Research Center for Disaster Prevention installed a set of seismic measurement devices at a depth of about 3.5 km in the Pre-Tertiary rock at the Iwatsuki Crustal Activity Observatory, 27 km north of Tokyo, and the observations of micro-earthquakes and crustal movement began from April 1973. The depth of the observation well is 3,510 m, and its diameter at the bottom is 15.9 cm. Since measurements at such a depth can detect seismic waves from micro-earthquakes because of the absence of hindering noises, much useful information will be gathered. The measuring apparatus was designed to function even at 86°C and 350 atm.

The seismic equipment is installed in a cylindrical capsule 9-m long and 14 cm in diameter, and the whole apparatus weighs 670 kg in water. The capsule contains a set of three-component velocity-typed seismometers for detecting micro-earthquakes, the forerunners of damaging earthquake, and a tiltmeter which can measure even an angle change of 0.02 sec. in the crustal movement. It also has the FM multitelemetering system of 24 channels for the signals which will be observed at the well bottom. The telemetering system must be small in volume, high in ability, and high in reliability, because its repair will not be possible for about one year at least.

The value of reliability of the system was confirmed to be 0.908. The observations at the well bottom have been successful for 8 months from the installation, and the deterioration in the ability was negligible.

1. はじめに

国立防災科学技術センターでは，地震予知計画の一環として，首都を地震災害から防衛するための基礎資料を得る目的で，東京の北 27 km の埼玉県岩槻市巻の上地区に，深さ 3.5

の深層観測井を作井し，その孔底に観測装置を設置し，1973年4月から微小地震等の観測を開始した．この観測施設の特徴は，人工的雑振動の激しい都会地において，ノイズに影響されずに微小地震の連続観測が行なえることである．しかしそのためには厳しい環境条件下で使用できる測器の開発研究が必要である．さて深層観測井の孔底に設置される検出器群——速度地震計3台，加速度地震計3台，傾斜計2台，温度計2台，深度検出器1台，方位検出器1台，着底検出器1台およびカプセル（耐圧容器）固定器4台，等——のデータ伝送と校正・制御のための心線数は約120本である．深層観測ではSN比の向上が第一の目的であるが，その上に長期連続観測に耐えられる信頼性を有していなければ新たに開発する意義はない．ところが高温高圧であるため簡単な問題ではない．たとえば検出器群からの出力線を，単純に地上に引上げるとすれば，そのケーブル重量は，3.5 km を鉛直に下げた場合の抗張力を考慮すると1 m 当たり2 kg ともなり，外径も60 mm 程度となる．しかも数十心のケーブルを，高温高圧下において，直径9 cm 程度の検出器カプセル内（1気圧）に，長期にわたり水密を保って封入することは，現在の技術水準では不可能である．また実際問題として，温度の点からケーブルの絶縁材料はテフロンを使用せねばならない．テフロンはポリエチレンにくらべ重量が倍程度となることから，ケーブル重量が非実用的なものとなるので，大幅にケーブル心線数を減らす必要が生じた．

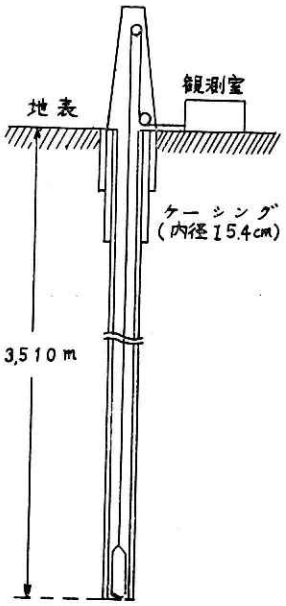


図1　岩槻地殻活動深層観測システムの概要

上述の理由および10 μV 程度の微小電圧を数 km にわたり直接伝送する場合のSNの悪化など，種々検討の結果，多重搬送装置の採用により，ケーブルについては心数を減らし，独立の19本のテフロン線と56本のステンレス外装線の集合構造とすることに決定した．この目的のための搬送装置は，環境条件（90°C，350気圧）の厳しいこと，1年間程度は保守修理をしたくないこと．当初の計画が変更されて搬送装置が付

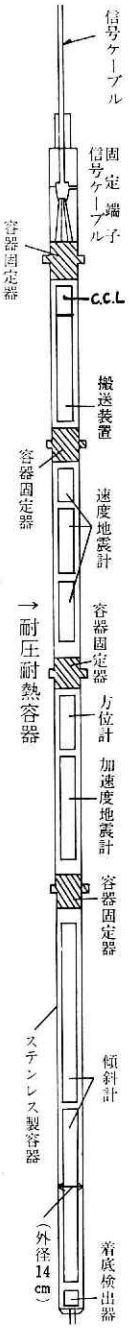


図2　計測・搬送装置地中部の構造

表 1 計測・搬送装置地中部の構成と性能

器種	成分	方式	性能	目的
速度地震計	上下1 水平2	動コイル型	固有周期：1秒 総合感度：5マイクロカイン/mm	極微小・微小地震の観測
加速度地震計	同上	サーボ型	5ミリガル～30ガル	微小地震・小地震の観測
傾斜計	水平2	鉛直振子型	感度：0.02秒角	地殻変動の観測
温度計	2組	白金抵抗線型	感度 0.1°C	孔底の温度測定
方位測定器	1台	磁針型	誤差5度以内	地震計・傾斜計の設置方位の測定
搬送装置	1式	多重FM	SN比：55 dB 出力：1V	データの伝送，制御・校正のコントロール
C. C. L.	1台	磁束型		ケーシングカラー検出器（昇降中深度を正確に知るため，ケーシングの継目を検出する）
信号ケーブル接続部	1台	モールド・ハーメチックシール型	100°Cで耐圧400気圧	信号ケーブルとカプセルの接続部
着底検出器	1台	3段接点型		カプセルが孔底に達したことの確認
カプセル固定器	4台	アーム突出し型		カプセルを孔底に固定するためのもの
耐圧・耐熱カプセル	1本			外径 140 mm，長さ9mの円筒で，計器等を外圧（350気圧）から保護する容器

加することになったため開発時間の制約があったことなど，製作にあたり困難な問題に直面したが，地上の高温高圧実験装置による2か月間のエージング期間，および1973年11月の第1回補修点検時までの8か月の実動期間中，若干の問題は生じたが，部品の故障というものもなく動作した．図1に岩槻地殻活動深層観測システムの概要を示す．

2. 搬送システムの概要

搬送システムの直接の目的は，地下3.5 kmにおける微小地震動，地殻傾斜，温度を地上局で記録するため，地中で得られた検出信号を変調・搬送するとともに，傾斜補正，カプセル固定，方位測定，校正等の制御動作を行なうことである．(図2，表1)．

搬送装置は地中部と地上部に分かれており，両者は信号ケーブルで結ばれる．地中部は3.5 kmの孔底に設置される検出器と同一カプセル内に収められ，搬送部本体は長さ1.5 m，直径86 mmの円筒型で，ステンレスの耐圧カプセルを含めた重量は165 kgである．

この地中部は，各検出器からの出力信号24成分を増幅処理してから2群に分けて混合合成し，それぞれ2心ずつのケーブルを用いて地上搬送部へ送信する変調送信部，地上搬送部から送信されてくる制御用および校正用信号を受信処理して，搬送・直送切換，測定・校正切換，降下時・設置時の臨時測定切換，各種制御切換などを行なう受信処理部，地中各部に電力を供給する電源部からなる．

一方地上搬送部には，地中搬送部からの混合合成された信号を分離・復調・増幅して，各測定項目別の検出信号に変換する受信復調部，地中搬送部に必要な制御校正を行なう信号を発生する信号発生部，地中部用電源と地上各部に電力を供給する電源部がある．搬送装置の機能ブロックを図3に示す．

さて搬送装置の製作の基礎となる環境条件と必要性能は表2のとおりである．このなかで特に重要視したのは信頼度であった．前述したごとく観測目的から，設置完了以後1年間程度は，引き上げ補修なしで使用可能でなければならないので，この信頼度が深層観測計画の成否を決定する一項となる．今回は環境条件，技術水準，観測項目数および宇宙開発計画など過去の資料も参考として，地中部の信頼度を0.908とした．

信号の伝送は有線とするが，限られたケーブル心数で多数のデータを伝送する方式として時分割多重，周波数多重等があり，本装置の場合どの方式が適しているか，表3のごとく評価比較を行なった．このなかでは本装置に対し有利なものを5点として採点した．AM（振幅変調）方式を除外したのは本質的に雑音に弱いためである．さて信頼度を高めるためには，系の単純化と部品数の低下についての配慮が必要である．この点からはFM（周波数変調）方式とPAM-FM（パルス振幅変調したものをさらに周波数変調する）方式が秀れているが，総合的にはFM方式が一番有利であるので，結局マルチキヤリアによるFM方式を採用することとした．地中搬送部は，各検出器からの出力信号24成分――速度地震計は1台を高・

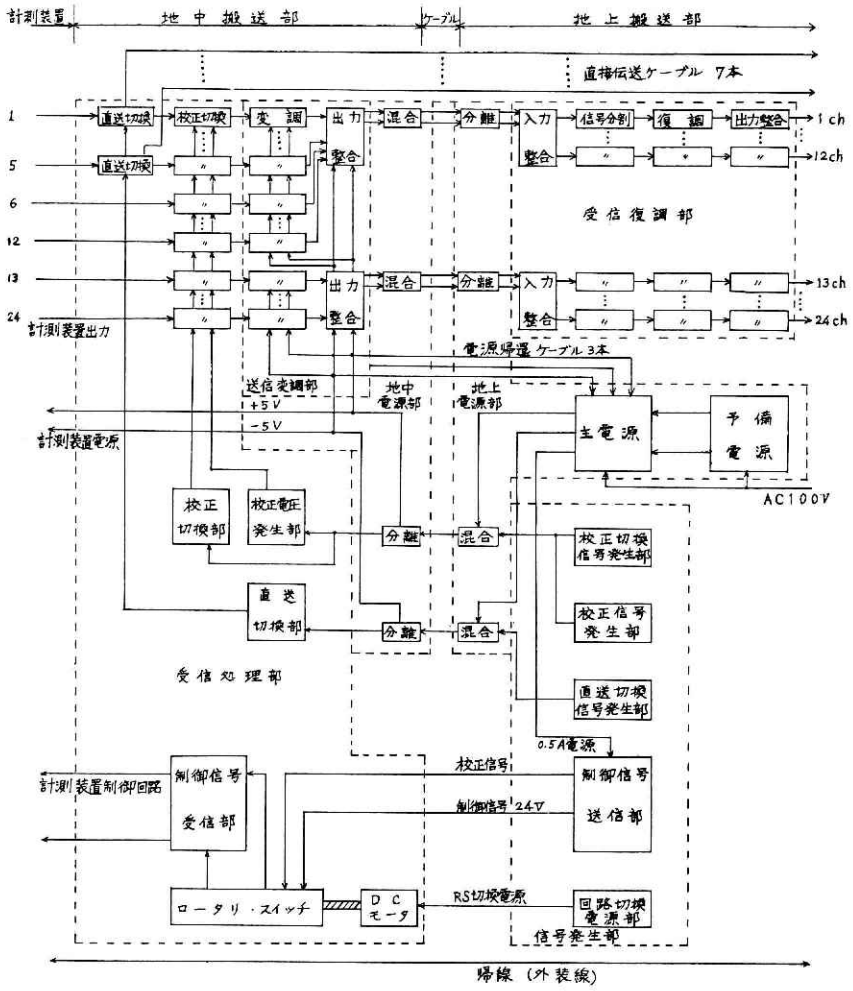


図 3 搬送装置機能ブロックダイヤグラム

中・低倍率に3分割して搬送するので9成分，加速度地震計は1台を高・低倍率に分割するので6成分，傾斜計は1台に冗長系1があるので4成分，温度計2成分，制御・校正確認用3成分——をFM伝送する．周波数変調幅は，入力電圧が±500 mVのとき±2.5 kHzである．搬送周波数としては，すでに衛星積載用として開発された高安定FM変調器が使用できること，信号ケーブルの特性上からも無理のないことなどから，40～128 kHzのIRIGバンドを用いている．

この周波数帯域を8 kHz間隔で分割した12成分のものを2群使用することにより24成分とした．FM変調器は1台ずつ独立で，6×2.3×1.8 cmの長方形容器内にモジュール化して収容してある．1群12成分の変調出力は混合整合器によりFM合成信号とされ2心のケーブルを用いて地上へ伝送する．信号搬送には2群で4心使用している．この4心につい

表 2　環境条件と必要とした性能

環境条件（地中部）	
項目	内容
使用場所	深さ3,510mの孔底
使用時の圧力・温度	350気圧（水圧）87±5°C
温度変動	0.5°C以内/年間
カプセル内圧	1気圧（アルゴンガス封入）
加速度	1G以下（観測時）
大きさ（許容体積）	直径86 mm，長さ1.5m以内円筒型
必要とした性能	
搬送データ	24成分
信号周波数帯域	DC–30 Hz
S/N比	40 dB以上（50 dB以上を目標）
クロストーク	−40 dB以下
入力信号レベル	±10 μV−±500 mV
出力信号レベル	最大入力のとき±1 V
出力ドリフト	±1%/H，±4%/Day（傾斜計出力は±1%/Dayを目標とする）
直線性誤差	±1%以内
チャネル間相互偏差	±2%以内
信頼度	1年後の残存確率0.908

速度地震計3成分，傾斜計2成分は地中部電源を使用せずとも直接伝送も可能な構造とすること．

表 3　搬送方式の評価比較（数値の高いものが有利）

比較項目＼方式	PCM–FM	PAM–FM	FM–FM	FM
所用周波数帯幅	2	5	1	4
対外乱雑音	5	2	3	2
複雑さ	1	2	4	5
ハード実現の容易さ	2	3	4	5
部品数	4	5	3	3
精度	4	3	5	5
計	18	20	20	24

ても，信号ケーブル19心中から線間漏話のもっとも少ない組合せを選んで使用している．(図4，表4)．

次に校正機能についてであるが，これは精度向上と動作チェックのため是非とも必要なものであり，検出器を含めたものと搬送装置のみのものの2種類ある．検出器を含めた校正は，ケーブル2心と地中部のロータリースイッチを操作することにより，地上から任意の検定信号を検出器のコイルに流すことにより行なう．ロータリスイッチは40回路の切換えができこれにより校正・検定のほか，制御用モーターも操作することができる．これに対し搬送装置の校正のために，その入力に零または既定の10ステップの自動切換校正電圧が入れられるようなっ

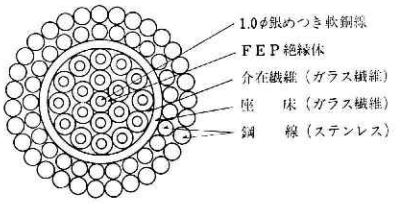


図4　信号ケーブルの断面

表4　信号ケーブルの概要

項目			数値
心線	導体：軟銅線	外径	1.0 mm
		厚さ	1.0 mm
	絶縁：FEP	外径	3.0 mm
ケーブル心	構成	中心層	1心
		第1層	6心
		第2層	12心
	座床：ガラス繊維	厚さ	1.0 mm
	外径		17 mm
外装	ステンレス線（素線径×本数）	内層	2.3 mm×25本
		外層	2.3 mm×31本
ケーブル外径			26 mm
概算重量（空中，水中）/km			2.4，2.6 ton
外装線抵抗			16.5 Ω/3.7 km
導体抵抗			24.6 Ω/km(20°C)
絶縁抵抗			1000 MΩ/km(500V，20°C)
絶縁耐圧			1000 VAC/60 sec
静電容量			53 m μF/km(20°C，1 kHz)
減衰量			3.2 dB/km(100 kHz)
特性インピーダンス			120 Ω/3.7 km(100 kHz)
漏話特性			50 dB/3.7 km

ていて，入力電圧のレベル判定は容易である．この校正電圧の自動切換えは，地中への電力給電用2心のケーブルに，交流信号を重畳させ制御する機構となっている．

さらに搬送装置には，もう一つの重要な切換機構がある．これが搬送と直送の切換えである．通常は搬送装置を介してFMによりデータ伝送を行なうのであるが，装置に異常が生じた場合は，速度計3成分，傾斜計2成分の検出信号は信号ケーブルにより直接地上に伝送する．そのため19心中10心（余備線7心と制御・校正用3心）を用意している，考えられる主な故障状態に対する機能は次のとおりである．

(1)　地中電源系の故障（短絡，開放）の場合．

フェイルセーフ機能により，自動的に直送ケーブルに切換えられる．

(2)　搬送装置内データ伝送系の故障の場合．

地上の操作により，人為的に直送ケーブルに切換えられる．

これは信頼性の向上に役立っている．

次に地中電源についてのべる．孔底の高温下に電源整流回路安定化回路を設けることは，地中部品数の増加と高温下における長期使用による性能劣化など信頼性の面から不利であるので，地中に必要な±5V直流電源は，地上から直接伝送することとしている．この電源は搬送装置のSN比，ドリフトの点から高安定でなければならないので，地中電位を地上に帰還して，地上からの伝送電力を制御し，地中の±5V電圧の変動を0.1%以下におさえている．地上電源は主電源装置と予備電源装置から構成され，後者は商用電源が停電した場合，瞬時に自動的に搬送装置へ電力を供給するものでニッケルカドミウム・アルカリ蓄電池を使用している．これは欠測をさけるためばかりでなく，装置の停電のための温度変化によるドリフト防止および電気的ストレスの除去による信頼性向上のためでもある．地中5V電源を地上から伝送する場合，電流とケーブル抵抗から，地上電圧は40Vを必要とするが，上記蓄電池の限定条件として，直列接続は20個までとなっているため，バッテリ個数を20個にとどめ（24V），コンバータにより40Vを得ている．なお地上搬送部電源は±12Vを必要とする．また常時使用するものではないが，地中の制御用モーター電源として，地上に別に0.5A定電流電源があり，18個のパルスモーターに対し，地中のロータリースイッチを操作することにより，1個ずつ動作させ，制御作業を行なうことができる．

最後に地上の受信復調についてであるが，地中より伝送された2群のFM合成信号は絶縁トランス，プリアンプを通り，復調器に入る．復調器では混合された周波数成分の中から，6kHz幅の帯域フィルターにより所定の帯域幅内の周波数を分離，復調しアナログ出力を得る．なお変調器・復調器の中心となるボルテージ・コントロール・オシレーターにはフェーズ・ロックド・ループ用の集積回路（IC）を用いているが，これにより回路構成が簡単となり，小型で信頼性が向上し，帰還発振器の特徴として高安定となっている．

3. 開発手法

この搬送装置の開発にあたり，特に重視したのは信頼性向上に関する作業である．信頼性とは“系，機器または部品などの機能の時間的安定性をあらわす度合，または性質(JIS Z 8115)”と定義されているが，今回の場合は，故障または不具合の発生件数の程度がどうか，またそれが起こった場合の修復が容易か困難かなどが主な項目と考えられる．

図5が今回行なった信頼性開発作業の流れである．

すなわち必要とする性能と環境条件の推定された段階から，作業は部品試験と性能試験とに大きく分けられる．部品試験は地中部用の部品について行なったが，なんといっても各単体の信頼性が重要であるので，後述するように慎重・綿密な検査を行なった．

一方性能試験は次のように行なった．今まで実績のないハードについては，各機能別にブレッドボードモデルを製作し，実験により性能の確認を行ない．その結果を詳細設計にフィードバックし，つぎに完成品に用いられる信頼性保証部品と同一規格，同一ロットの部品を用いてはいるが搬送チャネルが半数であるような技術モデルを製作し，これによる総合性能の測定，実装システムにおける相互干渉の検討，熱解析実験の結果などを最終設計に反映させ，完成品たる最終モデルの製造を行なった．すなわち2段階の試作実験が行なわれたわけである．

信頼性設計としては，次の3項目について考慮した．

(1) 故障の防止

(2) 故障からの保護

(3) 故障の除去

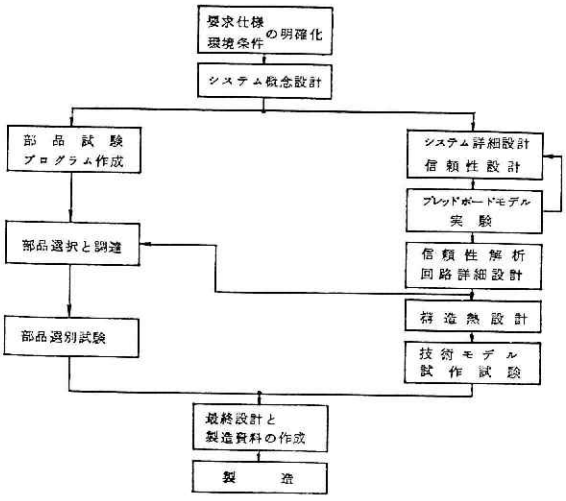


図5 搬送装置開発作業の流れ図

である．それの対策として，行なったのは，(1)については，すでに実績のあるハードウェアの応用と，高信頼性部品の使用であり，(2)については，冗長系と，フェイルセーフの採用である．(3)に対する対策として，部品の段階から，繰返して厳しい環境試験を実施し，初期故障の除去に努めた．

さらに搬送装置完成後全観測システムを結線し，地上の高温高圧実験装置を用いて，全システムの各種試験および初期故障除去のため，約2か月のエージングを行なった．

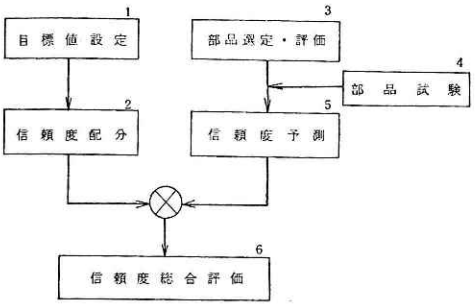


図 6　信頼性作業図

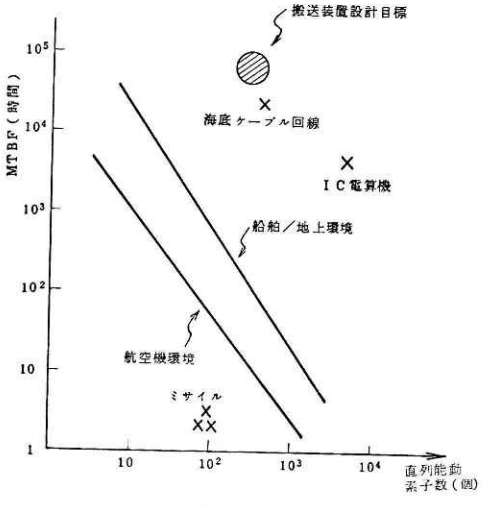


図 7　過去の経験を基礎とした信頼性予測
(MIL-STD-790 A)

なんといっても，開発の問題点は，1年間無保守で90°Cの環境に耐えうる部品が選定しうるのか，またその経年変化特性に対する対策をいかにするかの2点であった．

4.　信頼性に関する作業

信頼性に関する主な作業は，システムの信頼度の目標値決定，搬送装置各部の信頼性解析，使用部品の信頼度評価の三つである．実際の作業は図6に示す手順にしたがって行なった．

4.1　信頼度目標値の決定

1年間は無保守で動作することが必要であることから，差し当たり動作時間 (T) は1か年である．これに対し，搬送装置の構成規模，現状の技術水準および他のシステムの信頼水準の予測（図7）などから目標としておよそ

搬送装置全体の平均故障間隔（MTBF）$(1/\lambda_s)$：3.5年

同地中部のみの平均故障間隔（MTBF）$(1/\lambda_w)$：10年

を見込んだ．そして搬送部全体（地中・地上）の信頼度を R_s，地中部の信頼度を（R_w）とすれば

$R_s=0.750,\ \lambda_s=32,840\ \mathrm{FIT},$

$R_w=0.908,\ \lambda_w=11,010\ \mathrm{FIT}$

と設定した．ただし故障の分布は指数関数型 $R=\mathrm{e}^{-\lambda T}$ が成立するものとする．ここで λ は故障率である．

4.2　信頼度の配分

搬送装置を信頼度から見た構成を図8に示す．ここでは信頼性の評価は，保守の不可能な地中部のみについて行なった．搬送系の信頼度を R_c，直送系の信頼度を R_D とする．搬送系を構成する要素には，校正切換用リレー部，変調部，混合出力増幅部，校正切換部，校正信号発生部，分離フィルター，リレー駆動電源部の7部があり，これら各要素のいずれが故障しても搬送系は故障となるから，直列系を構成していることになる．したがって各要素の信

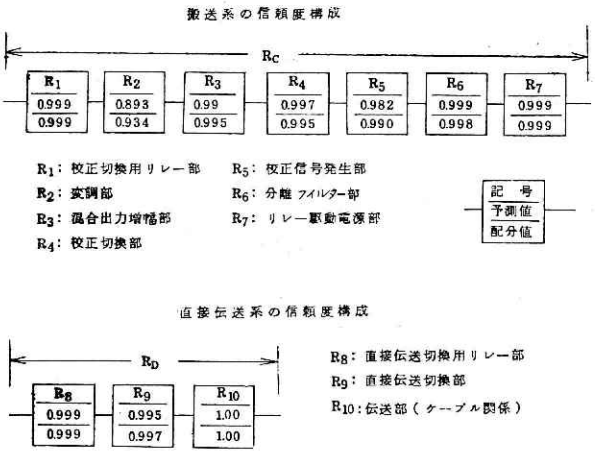


図 8　搬送システムの信頼度構成

表 5　信頼度の配分値と予測値

R	要素	配分値	第1次予測値	第2次予測値
Rc	1 校正切換リレー部	0.9990	0.9993	0.9993
	2 変調部	0.9340	0.8926	0.8926
	3 混合出力増幅部	0.9950	0.9885	0.9885
	4 校正切換部	0.9950	0.9967	0.9967
	5 校正信号発生部	0.9900	0.9821	0.9821
	6 分離フィルター部	0.9980	0.9994	0.9994
	7 リレー駆動部	0.9990	0.9994	0.9994
RD	8 直接伝送切換リレー部	—	—	0.9997
	9 直接伝送切換部	—	—	0.9941
	合計	0.9080	0.8620	0.9364

頼度の積が，搬送系の信頼度となるから，

$$R_C=\prod_{i=1}^{7} Ri$$

である．同様に直接伝送系についても要素は，直接伝送切換用リレー部，直接伝送切換部，伝送部（ケーブル）の3部からなるので，

$$R_D=\prod_{i=8}^{10} Ri$$

とあらわすことができる．

ここで各要素の技術上の複雑性，技術水準，使用ひん度などを総合的に評価した結果，地中搬送部の信頼度0.908を表5のように各要素に配分した．

4.3　部品選定と信頼度

部品については，明確な保証のある規格部品の中から，さらに厳格なスクリーニングによって良品の選別を行なった．これらの部品についての信頼度の評価は，MIL-HDBK-217Aにより求めた．また半導体部品，特殊部品については，RADC-REPORT-67-108や製造

表6　部品の故障率（90℃，25％ストレス，MIL-HDBK-217Aおよび東芝資料による）

部　　品	故障率 λ ($\times 10^{-9}$)
I　C	90
トランジスタ	59
ダイオード	12
金属被膜抵抗器	2.7
ソリッド抵抗器	5.0
可変巻線抵抗器	57
タンタルコンデンサー	1.0
セラミックコンデンサー	8.0
マイカコンデンサー	0.3
インダクター	11
ラッチングリレー	6.4

表7　搬　送　装　置　地　中

項　　目	トランジスタ	ダイオード	抵抗器	精密抵抗器	トリムポット
試　験　数					
・ブレッドボードモデル	196	52	716	14	50
・エンジニアリングモデル					
試　験　数					
・最　終　モ　デ　ル	171	46	937	6	60
・そ　の　他*	413	72	937	30	90
合　　計	780	170	2,590	50	200

*　試験後予備品として扱われる場合もある．

元の資料をもとに行なった.

各部品の信頼度 R は，故障率が一定のとき，すなわち初期故障期間が過ぎた偶発故障期間内では

$$R=e^{-\lambda T}$$

で求められるが，λ の値として上記の資料により表6の値を用いた．これは 90°C，25% ストレスの場合のものである.

4.4 信頼度予測と信頼性向上対策

前節での部品信頼度評価をもとに行なった第1次予測は表5に示す値となった．これは構成部品数の表7をもとに，部品レベルより積み上げた予測値である．だが第1次予測値は 0.862 であって必要値 0.908 におよばない．そのための信頼性向上対策として次の項目を検討した.

(1) 系レベルでの冗長方式の採用,

(2) 回路レベルでのシングル・フェイラー・ポイント (SFP そこ1か所の故障がシステム全体の機能を完全に停止させる回路) の除去,

(3) 部品レベルでの致命的な故障の防止

である.

まず直接伝送系を冗長系とみなした場合の予測値を求めてみよう．この系のみの信頼度 R_D は図8にある値を採用して，$R_D=0.9940$ と求まる．しかしここで考慮しなければならないのは，搬送系と直接伝送系を比較した場合，その有する“能力”は等しくないことである．すなわち完全な並列冗長系ではない．なんとなれば，搬送系では 24 チャネルのデータ伝送

部の構成部品数

コンデンサ			インタクタ	リレー	IC	プリント板	コネクタ	ケーブル
タンタル	セラミク	マイカ						
54	386	50	33	23	34	43	11	—
178	332	39	57	23	72	43	6	—
35	332	61	20	10	38	64	12	—
267	1,050	150	110	56	145	150	29	(m) 235

が，可能であるのに対し，直接伝送系では13チャネルの伝送が行なえるにすぎないからである．すなわち直接伝送系では，速度地震計3成分と傾斜計2成分であるが，搬送系においてダイナミックレンジの関係から前述のとおり，速度地震計1成分を高，中，低の三つの倍率に分けて伝送していることを考慮して，速度地震計では9チャネル，同様に傾斜計では，4チャネル，計13チャネルの伝送とみることができる．したがって直接伝送系を並列冗長と見なすには，この R_D に実効係数 K をかけなければならない，すなわち，

$$R_D = K\prod_{i=8}^{10} R_i$$

である．本システムでは，搬送系と直接伝送系の能力に“重み”の評価を行ない，これを伝送チャネルの数の比をもってあて，実効係数とした．

$$K = \frac{\text{直接伝送系のチャネル数}}{\text{搬送系のチャネル数}} = \frac{13}{24}$$

したがって，

$$R_D = 0.5386$$

となる．

さて並列冗長系の場合，地中部の信頼度 R_W は，

$$R_W = 1-(1-R_C)(1-R_D)$$

とあらわすことができる．ここに $R_C = 0.8620$ $R_D = 0.5386$ を代入すれば，

$$R_W = 0.9364$$

となり，直接伝送系を冗長系とすることにより，地中部の目標である信頼度0.908に対し，充分な余裕をもって到達できることがわかる．

次に回路レベルでのSFPの除去であるが，図3のブロックダイヤグラムからも分かるとおり，混合出力増幅部はSFPである．したがってこの部分は並列冗長方式を採用した．

また部品レベルでの致命的な故障としては，タンタルコンデンサの短絡故障がある．これはRADC-REPORT-67-108によれば，短絡故障80%，開放故障5%，ドリフト15%となっている．本システムではこれの短絡故障は，電源が接地される致命故障となるので，タンタルコンデンサはすべて2個直列接続して用いている．2個直列接続されたものを1個のタンタルコンデンサとみなせば，短絡故障は無視できるほど小さくなる．そして信頼度も若干向上するけれども，今回の信頼度の計算においては単体の値を用いている．

以上の処理により第2次予測値は0.9364となり，目標値以上の信頼度を有していることがわかった．

5. 部品の選定と選別

部品の選定にあたっては，次の原則にしたがった．

(1) 新たな開発を行なわず，既存の部品を使用する．

(2) 動作の周囲温度限界（公称値）が125°C以上のものを使用する．

こととした．この場合，公称125°Cとなっている規格認定品であっても，特性の余裕は明らかでなく，採用にあたり判断に苦しむことがあった．これらの点も考慮して部品の選定・選別は図9のように行なった．

同図の1までの一連の信頼性試験に合格した種類の部品は，2において良品選別のため全数について検査を行なう．実際の環境条件は，大部分の部品にとって限界に近いので，過負荷試験は行なえない．図10に金属被膜抵抗についての，スクリーニング実施例を示す．ここでは電力負荷率を100%とし，25°Cと100°Cの間で温度サイクル試験を行ない．その間で抵抗値の測定を行なった．良品の判定は，測定値の変化量をもととした．図11がその測定結果であって，試験後の偏差の分布を示したものである．ヒストグラムの斜線部が採用された部品であり，これらは変化量が測定誤差以下のもので，偏差値の小さい順に必要量のみ採用した．

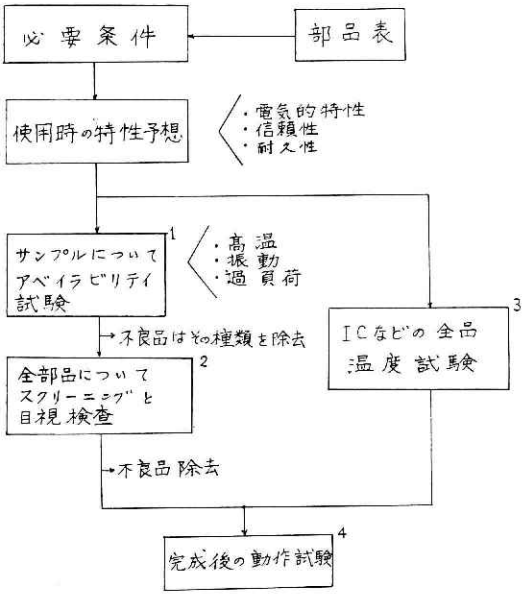


図9 部品選別作業図

一方半導体部品は，認定試験に合格したものに対し図12の左上に示したようなスクリーニングを，試験用回路に組み込んで実施したが，すでにデイラーにおいてスクリーニングを完了したMIL（米軍）規格品であるので，性能変化に有意な差はなかった．スクリーニング終了後FM変調器に組み込み，図12の工程に従って良品選別を

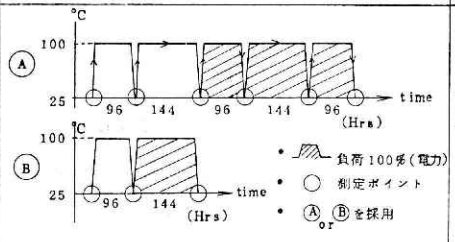
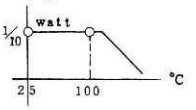
名称	試料	温度サイクル・負荷条件	測定	備考
金属皮膜抵抗（固定）	560~270kΩ 10~100個／各抵抗値につき．		• 抵抗値（ΔR） • 変化率 • $\frac{\Delta R}{R}$	• MF 1/10（ ）Ω-CF（DEAL製） 

図10 部品のスクリーニング実施例

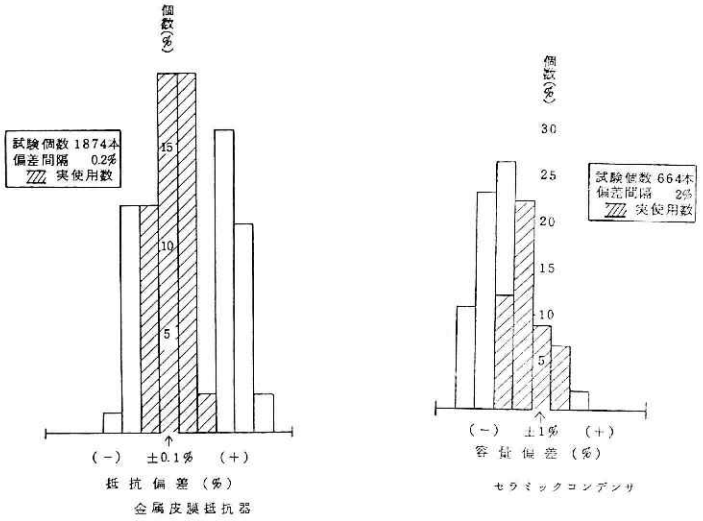


図 11　部品スクリーニングの結果例

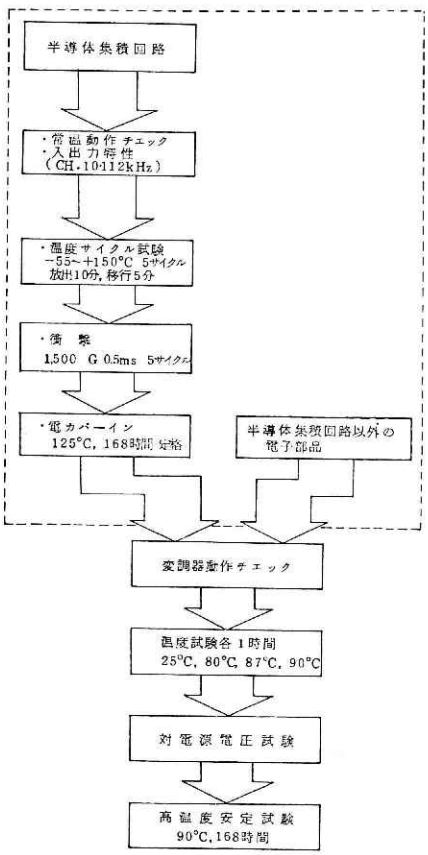


図 12　FM 変調器の試験工程．点線内は選別試験の一部を示す

行なった．

このようにして選別された部品は，すべて試験データと組込まれた回路を記録・保存されており，事後の修理・調整の資料とされる．

6.　完成後の地上試験

本装置は新たに開発されたものなので実動後の初期故障の除去と経時変化を知るために地上において，実動条件による本装置のみのならし運転（エージング）を行なった．

搬送装置のみの完成地上試験では，初期故障 (RADC-Reliability Notebook 方式によれば，本装置の値は 193 時間）の終了点は，本装置の動作状況を示す最良パラメータは，変調器の中心周波数の漂動状態にあると考え，それが許容範囲の 0.5% の変化内におさまる点とした．その状況を図 13 に示す．この図から初期故障時間は約 600 時間と考えればよいことがわかる．引き続き寿命予測のため試験を継続したが，40 日間故障なく動作したので，ここで試験を打切った．さらに地中部全体については，その完成時に，長さ 8 m，内径 15.4 cm の内寸法

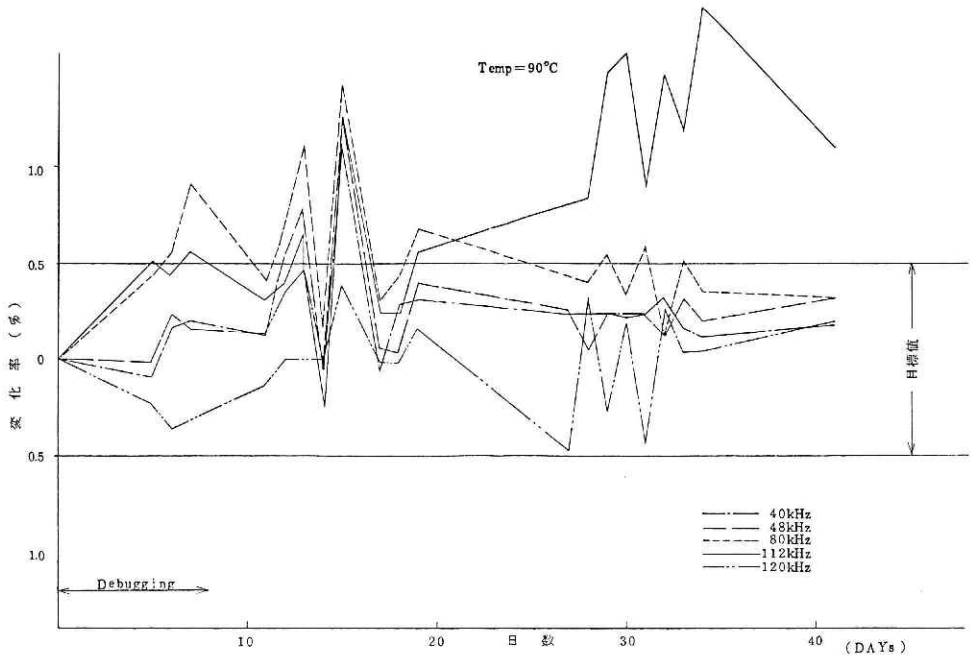


図 13 製作直後における変調器周波数の経時変化率特性

を有する100°C，400気圧の高温高圧試験装置を製作し，実動環境と類似の条件下で1か月半にわたる総合的なエージングを実施したが（地中搬送部のみは，90°C，1気圧の別の恒温槽内），検出器，信号ケーブルとの結合による若干の相互干渉除去のための調整を行なったのみで，正常に動作し，故障の発生はなかった．

7. 実動時の状況

搬送装置を含む，深層観測井の観測装置は，1973年4月に，地中カプセルが深さ3,500 mの孔底に設置され，4月中は設置条件を明らかとするための測定・調整を行ない．同年5月から連続観測を実施した．以後観測期間内は傾斜計が不安定であったが，その他の観測器は大体正常に動作し，観測を継続することができた．

当初からこのような長期連続観測は前例のないものであったことから，次の二つの目的のため10か月後ころに地上引き上げを予定していた．すなわち，観測装置の高温・高圧下における特性・性能の経年変化を明確にすることと，期間中に発生する不良部を修理・改造し，さらに今後の長期連続観測に耐えるものとすることである．このような計画に従って，1973年11月より観測を一応中止し，設置状況において各種検査を実施し，その後孔底より4日を要して地上に引上げた．なお本観測装置の補修点検を行なった後再設置された1974年3月までのうち，約3か月間は代替地震計を用いた直送方式により，孔底で地震観測を実施した．

さて搬送装置については，1973年4月から11月までの第1回実動期間中，部品およびシステムが故障したことはなく，当初の設計信頼度に対し，システム構成が妥当なものであったことを示した．しかし全く正常であったのではなく，今後改善すべき点も明らかとなった．その第1にあげられるものは，搬送周波数の1方向への偏移であって，これは地中から混合・伝送される24チャネルすべての搬送中心周波数が，周波数の高い側にのみ偏移していく現象で，24時間当たりの偏移量は，微量なのであるが，10か月では変調帯域を越えるものも予想される状況であった．これは地上復調器前段に組込まれた，分離用帯域フィルターの中心周波数を，設計時の値から，偏移した搬送周波数に合致するように変更して，24チャネルの分離が可能であるならば差し当たり観測に支障はない．しかし，相隣るチャネルの中心搬送周波数（設置時には8 kHz 間隔で 40 kHz より 128 kHz まで）の経時変化量が異なり，5 kHz 以内に相互が接近した場合には，最大信号入力時に，チャネル分離が不完全となり混信を生ずる．実動期間内の各チャネル中心搬送周波数の経時変化を図14に示す．この図より次のような傾向が見られる．

(i)　偏移量は搬送周波数に比例しており，1か月当たりの偏移量は，周波数のおおよそ 0.5% である．

(ii)　偏移量は日時の経過とともに減少を示すものもあるが，逆に増大の傾向を示しているものもある．

このため，特に偏移量の大きなチャネルについては，地上の分離用フィルターの交換と復調器の調整を必要とするものもあった．この現象は孔底設置後，問題となったものであるが，実は地上におけるエージングの際にもあらわれていたのである．しかし当時は試験用恒温槽の性能によるものであろうと考えていた．その判断はあやまりであった．なお孔底温度は上記の観測期間内は 85.6°C で変化は認められていない．

さてこの周波数偏移の原因は，部品の検査資料および経時変化資料から，抵抗器，コンデンサー，コイル等によるものではなく，発振用 IC によるものと推定され，後の調査でそれが確認された．したがって今後これを考慮した IC の選別方法を採用することにより，ある程度改善される見通しが得られている．

周波数偏移以外に，増幅率，SN 比，短時間ドリフト，直線性，周波数特性および電源電圧等について行なった数回の検定資料によると，初期データからの変化はほとんど認められず，実用上問題となるものはなかった．

ただ本装置のうち，搬送と直送の切換回路が1973年7月と8月に各1回無人時に誤動作した．この切換は前述のとおり，手動によるか，または地中部電源系の短絡または開放の場合フエイルセーフ機能により動作するものである．今回の誤動作は両回とも激しい雷雨時に発生している．そして雷が信号ケーブルと地中部に直接影響を与えたのではなく，手動の場合必要な地上の切換信号発振器が雷による電源系のノイズのため誤動作したものであること

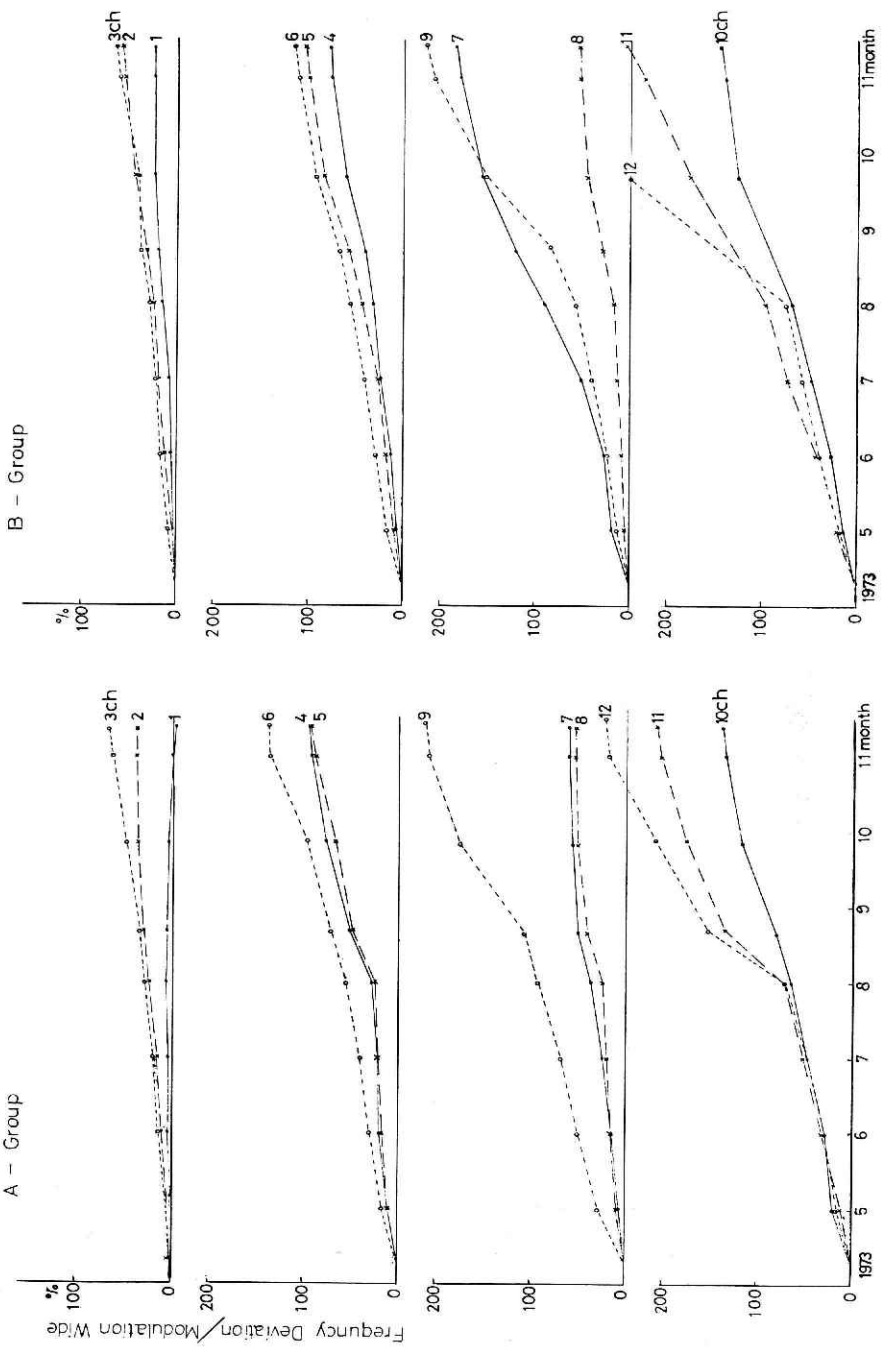


図 14 搬送中心周波数の経時変化率

がわかった．

観測装置の地中部には搬送装置以外にも，サーボ型検出器，増幅器，姿勢補正などのための各種制御部に電子部品が使用されている．このなかに故障が発生したものがあるが，検出器の一部ともいえるものなので，これらについては検出器の経時変化を含め計測装置の報告の際に記すこととする．

8. 第1回地上引き上げ時の状況とその対策

深さ3,500 mの孔底に設置された深層観測井の計測・搬送装置は，1973年11月中旬4日間にわたる各深度での点検データを収集しながら地上に引き上げられた．引き上げ作業開始前は，350気圧，86°Cの孔底で8か月間，固定状態にあった4台のカプセル固定器が，地上からの遠隔操作により解放状態となるかどうかに不安があった．しかし実際には，固定器4台中3台は解放作業が正常に行なわれ，引き上げ作業は極めて順調に完了した．

さて引き上げ期間中の搬送装置は作業開始4日目に異常を生じた．その有様は次のとおり．

(1)　異常発生前日の11月12日10時深度2,500 m(約50°C)より，毎時400 mで引き上げ作業を続け，同日16時深度500 mで停止し，各種点検を行なったが正常であったので，以後13日朝まで地震観測を続けた．

(2)　13日10時，引き上げ作業開始前の点検を実施した際異常発生に気付いた．すなわち

(i)　水漏れ検知器が動作し，カプセルの水密が破壊されたことを示した．

(ii)　信号ケーブル心線数19本中の3分の1に絶縁抵抗の低化があった．

(iii)　地中電源電圧の低下，および24チャネル中の2チャネルの搬送周波数の大幅な変動が発見された（64 kHzが20.5 kHz，104 kHzが26.8 kHzに変化）．

この異常の発生時刻は記録紙上から11月12日23時30分であり，発見後地上引き上げを急いだ．地表でのカプセルの解体結果では，カプセル内に水漏れは起こっておらず，信号ケーブルの下端接続部のモールド（19本のそれぞれ単体のテフロン線を水密保持のため，テフロン融着して一体としたもの）にクラックが発生したのが原因であることが判明した．なおこの時用いたモールドには導体に達するクラックの発生するおそれのあることが，使用後わかったので，その後開発されたそのようなおそれのないものに直ちに交換され，以後類似事故は発生していない．

今回の場合，クラックにより一部の心線が絶縁不良となり，たまたま水漏れ検知回路や電源線が不良線に含まれていたため，前記の異常が発生したものである．ただ搬送周波数の大幅変動の直接原因はクラックの発生では説明しにくい点があり，さらに調査を進めたところ次のことが判明した．

地中の変調器の構成は図15のとおりであるが，不良2チャネルとも，増幅器と低域フィルターは正常であったが，VCO（ボルテージ・コントロール・オッシレータ）に原因があ

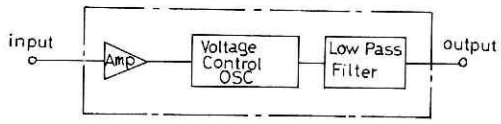


図 15　変調器の構成

り，それを構成しているICのSE 565の内部の発振器の出力がでていないことがわかった．その後の工場持帰り後の調整中にも，ふたたび他の2チャネルにこれと同様な故障が発生し，短期間内に同一故障が連続発生したことから，クラック発生による単純な電源変動によるものではないと考えられ，また偶発故障でもないので，さらに調査を進めている．したがって引き上げ補修の際の搬送装置の取扱いについては，故障原因が不明な現在では，可能な限りICにストレスを与えないよう注意することが必要で，実動時においても，地中電源の接・断操作は安易に行なわないようにしている．いずれにしても故障はICに集中しており，本装置の当初計画時にも，電子部品の専門家からICに弱点があることを知らされてはいたが，——検出器の電子部品においても同様——ICの信頼性向上が望まれる．

さてこれらの故障および周波数偏移の大きなチャネルについては，補修の際に，すでに技術モデルとして製作されていた変調器と交換したが，そのチャネル数は7である．残りの17チャネルについては，精密な点検調整を実施したのち再使用されている．これら変調器のは新品と交換していないので，今後とも周波数偏移が予想されるため補修期間中に次の改造を行なった．

8.1　搬送チャネルの割当変更

観測項目のなかで，特に重要な速度地震計のうち高倍率3成分，傾斜計2成分の計5チャネルは，新たにそれぞれ並列にデータ伝送ができるよう冗長系を設けた．さらに各種制御機構の安定性を高めるため，40回路の回転スイッチ（rotary switch）位置確認チャネルと，温度計のうち1チャネル計2チャネルについては，変調伝送を中止し，搬送2回線に1チャネずつ信号電圧を直接重ね合せて伝送するよう改造した．この2チャネルとも信号成分はほとんど直流であり，SN比をあまり問題にしなくともよい．これらの信号はFM信号に重ねてDC成分を地上に伝送し，地上において差動増幅器を用いて記録計に供給される．この方式の採用により変調成分は22チャネルとした．

8.2　変調中心周波数のオフセット

搬送各チャネルの中心周波数の偏移対策として，中心周波数が長期間それぞれの帯域フィルターの動作範囲内にあるようにするため，観測井孔底設置前に周波数を低い側にオフセットさせた．オフセットの幅は，直線性が保持される条件を考慮して，1 kHzとした．これにより39 kHzより127 kHzまでの11チャネル2群の22チャネルとした．この調整により第1回補修時前と同程度の周波数偏移があったとしても，フィルター帯域内に入っている期間の増加が7か月程度期待できる．またとくに偏移量が大きかったチャネルナンバー10，11，12については，SN比がわずか低下するけれども，変調感度を下げ，当初±500 mV入力で

±2.5 kHz 変調であったものを，±1.5 kHz 変調とした．これらの処置により，周波数偏移による影響を改造前2分の1程度に減ずることができた．しかしこれらの処置はあくまで応急的な手段であって，これらの処置なしで，長期安定な観測が可能となるよう，性能の向上をはからなければならないことはいうまでもない．

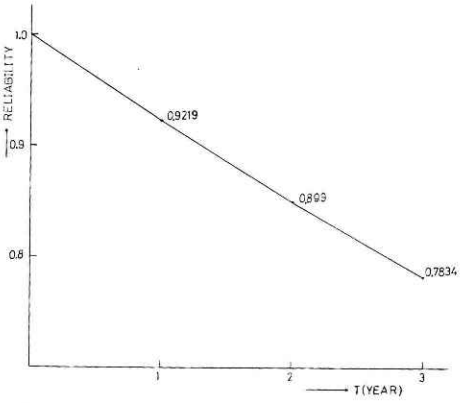


図 16　第1回補修点検以後無保守の場合の信頼度と動作時間の関係

8.3　改造後の信頼度

第1回補修工事の際の改造部分は

(1)　変調伝送チャネル数の減少（24チャネルから22チャネル），

(2)　無変調伝送チャネルの設置（2チャネル），

(3)　冗長チャネルの設置

(4)　混合出力増幅部の改造

である．これらの改造により信頼度がどうなったかについて再計算した結果，改造後のシステム信頼度 R_c は，動作時間を8,760時間（1年）として

$$R_c = 0.9219$$

となる．さらに動作時間を延長した場合の，動作時間と信頼度の関係を示したものが図16である．さらに改造システムの平均故障間隔を求めると，12.2年となり，前回より向上している．これらのことから，周波数偏移，引き上げ時の処置など，今後検討しなければならない問題もあるけれども，当初想定した実用性については，改造後も妥当なものであると考えている．

9.　おわりに

1973年4月以来，埼玉県岩槻市の深さ3.5 km の深層観測井孔底，86°C，350気圧の高温高圧の環境条件下に設置された．深層観測井搬送装置は，地震動，地殻傾斜，孔底温度等の検出器からのアナログ信号を周波数変調し，混合して地上に伝送するものであるが，実動1か年半以上経過した現在も，途中で1回引き上げて補修をしただけで，順調に動作している．この間搬送周波数の高い側への偏移や，地上引き上げの際の温度変化の大きな場合に対する処置など，更に改良や検討すべき点はあるが，本装置は孔底における長期連続使用に対して故障という事故もなく，今後とも充分実用に耐えるものであることが明らかとなった．

東京の直下で発生する地震の予知研究のためには，岩槻地殻活動観測施設と同様な深層観測施設が，さらに2か所東京周辺地区で必要とされている．これらの施設は検出器が関東平

野の基盤岩（先第三紀層）の中に設置されるため，基盤岩の深度により，それぞれの観測井の深さも異なる．1号井たる岩槻用に開発された搬送装置が今後もそのまま使用できるものではなく改造を必要とする点もあると考えているが，3号井（東京東部）用の搬送装置についても，地温が岩槻程度またはそれ以下であれば，技術的に大きな問題点はない．

かえりみると，搬送方式をいよいよ発注する段階になった時，高温下長寿命のシステムを引き受ける企業を探すのに実は大変な苦労をした．未知のことが多く，開発費とすぐれた技術者を多く投入しなければならない反面，売り上げは期待できないのであるから引き受け手のないのは当然である．長寿命の通信機器として良く知られているのは海底ケーブルの中継器である．これは長らく外国で生産されてきたものである，当センターが搬送装置を作らなければならなくなった時，わが国では電々公社がその開発に着手した所であった．ただその開発が進んでいたとしても高温という悪条件は独自に解決しなければならないし，システムもかなり違う，また，通産省を中心に海底下で行なう油田の大深度掘削装置の開発が始められていた．これには200°Cの高温下での検層などが含まれているが，時間的にはもちろん，内容的にも，当装置に直ちに適用できるものでなかった．このような中で，結果的には宇宙開発関係の部品の選別技術に基礎をおいて，ここに報告したようなシステムの開発ができることとなった．しかし，ここまでたどりつくことができたのは，多数の方々の御好意と親身の御心配を賜わったからである．これらの方々のなかでも，東京工業大学教授片山功蔵，現電々公社横須賀電気通信研究所基幹伝送研究部長重井芳治，同じく海洋通信研究室長田畑晴男，富士通信機KK中條俊彦，日本電気KK坂東正啓，現日立電子KK桜井久之の諸氏にはとりわけ助力を賜わりました．これらの方々に心底から謝意を表します．

本システムの計画と実現化にあたり，当センターの菅原正巳元所長には有益な助言や協力を頂いた．また本装置の設計試作を担当された東芝総合研究所電子機器研究所の菅沢幸雄，太田雅規，五十嵐正昭の諸氏，製造を担当された東芝府中工場計装システム部グループの高田敬輔氏，および制御器を担当された明石製作所の方々には絶大な尽力を頂いた．

また深層観測全般にわたり，地震予知連絡会会長萩原尊礼博士には適切な御指導を頂いた．これらの方々に報告を終わるに当たり心から御礼申しあげます．

参考文献

1) 宇宙開発ハンドブック，科学技術庁研究調整局監修，社団法人経済団体連合会宇宙開発推進会議，昭和46年，p. 338—355.
2) *MIL—HDBK—217 A*
3) *RADC—REPORT—***67**—108.

(1975年5月12日原稿受理)