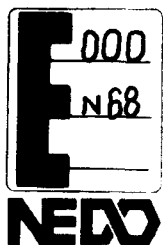


7
年度

G-019

精密制御震源による地下流体
高精度モニタリングの研究

名古屋大



010010701-0

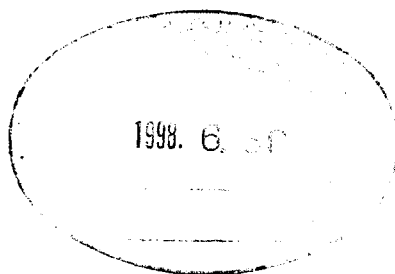
平成7年度

新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務

(提案公募型・最先端分野研究開発事業)

研究成果報告書

精密制御震源による地下流体高精度 モニタリングの研究



平成9年3月

名古屋大学

(様式－２)

平成 7 年度 新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務研究成果報告書概要

作成年月日	平成 9 年 3 月 3 1 日
分野／ プロジェクト番号	分野：資源技術 番号：G－019
研究機関名	名古屋大学理学部
代表者部署・役職	地球惑星科学科・教授
代表者氏名	小川克郎
プロジェクト名	精密制御震源による地下流体高精度モニタリングの研究
研究期間	平成 7 年 1 1 月 6 日～平成 9 年 3 月 3 1 日
研究目的	地下流体資源の微小変動を精密にモニタリングするために全く新しい原理に基づく回転型人工震源（アクロス）のハードウェア及びソフトウェアの実機開発を目指す。本研究では特に、地下資源探査にとって重要な要素である移動性を考慮したポータブルではあるが高いエネルギーの発震を可能とする車載型システムの開発に重点を置いて研究を進める。
成果の要旨	アクロス技術体系のなかで、近距離の地下状態を精密に探査、モニターするものという位置づけで可搬型震源（HIT）を用いた探査技術を開発した。精密な走時決定のために広い周波数範囲をカバーしていること、高い機動性を有することが特徴である。 本研究で開発に成功したHIT独自の主要な部分は以下の点である。 1) 100Hzという高周波発振のための高速回転に対応するために、偏心マスの回転軸受け部分、口、慣性一次モーメントの可変機構に新たな工夫を行った。 2) 軟弱地盤に置くだけで動作するために自重支持型の起震部-地表結合機構を開発した。 鹿児島県山川地熱地帯での2カ月にわたる実地試験の結果、本装置が当初の目的通りの性能を持つことを確認した。即ち、 1) 100Hzまでの広い周波数範囲でP波及びS波を長期間安定に発震させることが確認された。 2) 震源とGPS同期時計により制御された記録装置は地震波形の振幅及び位相を高い精度で記録出来ることが確認された。 3) 地震波形解析の結果、地下の極めて微小な地震は速度の時間変動が観測された。現在その詳細な解析を行っているが、地下流体の変動が原因となる微小な速度変動を観測できる可能性を示唆している。
成果発表・特許等の状況	地震学会、物理探査学会、国際地球物理連合会議などで40編以上の発表をおこなった。
今後の予定	技術の民間移転を試みる予定である。

(様式-3)

Summary of New Energy and Technology Development Organization
Entrusted R&D Report for FY 1995

Date of preparation	1997.3.31
Field/Project number	Resource Technology No. G-019
Research Organization	Nagoya University
Post of the re-search coordinator	Professor, Earth and Planetary Science, School of Science
Name of the re-search coordinator	Katsuro Ogawa
Title of the project	A Study of the Development of High Resolution Sub-surface Fluid Monitoring System using Accurately Controlled Routine Operated Seismic System.
Duration of the project	November 6, 1995 - March 31, 1997
Purpose of the project	The development of new seismic sounding system based on the new concept of ACROSS (Accurately Controlled Routine-Operated Signal System) are aimed. The system includes not only new seismic sources but also the analyzing software specialize for the monitoring of the change in subsurface velocity structure, especially in the area of fluid resources. Powerful sources with good portability are strongly required for the practical data acquisition.
Summary of the results	Portable ACROSS sources (HIT) are developed. The system is mainly used to obtain the high resolution structure with relatively short penetration distance. The principal specifications are as follows: (1) 100Hz in maximum. (2) Linearly oscillating single force. This is generated by the combined two rotator moving opposite directions. (3) Variable force with little work. (4) Very simple source-ground coupler just put even on the soft ground. The system was operated at Yamagawa geothermal plant for two months. The result of the experiments are: (1) We confirmed the stability of the source over wide frequency range up to 100Hz. (2) We confirmed that amplitude and phase of ACROSS signal can be obtained very precisely. (3) Very small change of signal which arise from subsurface velocity change are detected. This indicates that the system can detect the slight velocity change due to variation of subsurface fluid system.
Publication, patents	Over 40 papers are presented at the meetings of SSJ(Seismological Society of Japan), SEGJ(Society of Exploration Geophysicist of Japan) and AGU (American Geophysical Union).
Future plans	We try to transfer this technique to private companies.

3 まえがき

地下探査の目的は大きく

- (1) 地下構造の解析
- (2) 地下の状態変動の検出

に分けられる。通常、前者は地下構造探査、後者は地下モニタリングと呼ばれている。

本研究開発は後者、即ち地下モニタリング、を高精度で行う新しいシステムの開発を目指している。

陸域では30 km、海域では15 kmの平均的な厚さはもつ地殻は地球では最も活発に活動し変動している領域である。地震活動、火山活動はその分かりやすい象徴であるが、この他に水・熱水や石油・天然ガスといった液体や気体の動きや地滑りのような地層の動きも存在する。従って、地震予知、火山噴火予知、石油・天然ガスや地熱といった流体資源の探査・評価・モニタリング、地滑り予知等の多くの分野で高精度地下モニタリング技術の開発は極めて優先順位の高い重要な技術開発テーマとなっている。しかし、こうした目的に適う技術の殆どが従来型の地下構造探査技術を流用したものであり、より高い精度が要求される地下モニタリングには十分な精度を得るには至っておらず、新しい原理に基づく技術開発が要請されているのが現状である。

本研究が目指すのはこのような要請に応える為の全く新しい原理に基づく高精度地下モニタリング技術の開発である。これには地震波、電磁波など様々の地球物理学的原理が考えられるが、本研究では地震学的原理に基づく技術の開発を目指すことにした。地震学的手法の適用は上に述べた多くの分野で可能なはずである。このような広い適用分野を考える時、この地震学的手法には次の三つの条件が要請されると考えた。

- 1) 地下の微小変動を検出できる高い信号／雑音比を実現するシステム

2) 長期安定・安全運転を可能とする非破壊震源

3) 面的カバーを可能とする移動式震源

これらの条件を満たすものが精密制御定常運転震源ACROSS (Accurately Controlled Routine Operated Seismic Source) である。本研究はこのACROSSの開発研究を推進するものである。

ACROSSが本研究の目標に合致する理由をここでは概括しておこう。

地球の中を通ってくる弾性波は、地球内部の構造と物性とその変動について非常に多くの情報をもたらす。従来、弾性波による探査は、専ら、自然地震、発破等のパルス状の震源から放射された波が受信点に到達する時間(=走時)のデータにもとづいて行われた。これに対して、本研究で採用する新しい方法では、精密に周波数の制御された正弦波を放射し、受信点で観測される正弦波の位相と振幅(即ちスペクトルデータ)を直接取得して、これをケプストラムと呼ばれる手法により解析することで、走時、減衰、及びこれらの周波数への依存性を求めることになる。これにより、地下の微小な状態の変化を検出する。本研究グループではこの方法を「フーリエ地震学」の名で新たに提唱している。

原理的には、これは従来の時間領域での地震学と等価であるが、現実の制約の下では次の点で非常に有利である。

(1) 震源のエネルギーは周波数軸上で一点に集中して時間軸上には局在していないので、単位時間当たりのパワーでは小さい。つまり、非破壊的な震源で高いS/N比(信号対雑音比)のデータの取得可能。

(2) 震源は非破壊的なので定常的な長時間オペレーションが可能。スタッキング(地震波を多数重ね合わせてS/N比を高める方法)をがいくらでも可能でノイズに強く、波動経路の長い深部構造解析にも有利。

(3) 同じ理由で地下構造の時間的変化を常時モニターすることができる。

(4) 観測で直接、周波数領域上でのデータが得られるので、弾性波速度の分散

性、非弾性減衰といった地球の非弾性的性質を示す量を得るのが容易である。こ

れらの量は、地球物理学が未だ理解し得ず、且つ、人類の生活上重要な現象(地

震の発生、地下水の挙動、マクマの移動など)を直接に支配もしくは反映するも

のと期待される。フリー地震学には、様々の技術が必要である。

我々はこの技術体系全体をアクロア (ACROSS) と呼んでいる。本研究は、

理学としての新しい地震学の開拓と平行して、実用的な地下探査技術の開発を目

標としたものである。

本研究ではフリー地震学に基づく人工地震震源装置と解析システムACROSS

Sの開発を行った。とりわけ、ACROSS技術体系のなかで、近距離の地下状

態を精密に探査、モニターするものという位置づけで可搬型震源(HIT)を用

いた探査技術を開発した。HITは精密な走時決定のために広い周波数範囲を力

バーしていること、高い機動性を有することが特徴である。本研究で開発したH

IT独自の開発部分(工夫)は以下の点である。

(1) 100Hzという高周波発振のための高速回転に対応するための工夫

イ. 偏心マスの回転軸受け部分、

ロ. 慣性一次モータメントの可変機構

(2) 軟弱地盤にもたただ置くだけで動作するための工夫

ハ. 自重支持型の起震部-地表結合機構

(3) 純粋なSH波だけを励起すること、及び装置の破壊を防ぐための工夫

ニ. 水平起震時の回転モーメントを打ち消すソチロツク機構

(4) 容易な移動に実現のための

ホ. 山地も搬送可能な震源車、観測車

イ、ロ、に関しては、当面の目標スベックである6000rpm (100Hz) の

高速回転が達成された。ハ、二、ホに関しては鹿児島県山川地熱発電所における
実地試験での試行錯誤の結果、ほぼ当初の性能が確認されている。

また、観測システムに関しては、GPS時刻同期機能を有する多チャンネル時間
区間地震波蓄積記録装置（TSS : Time Segment stacker
）を完成させた。処理解析システムに関しては、現場における簡易処理解析シス
テム及び研究室における高精度処理解析システムを完成させた。

以上のように、研究開発は当初の目的をほぼ達成したものと考えている。

研究チーム名簿

名古屋大学理学部教授	小川克郎（研究代表者）
名古屋大学理学部教授	熊沢峰夫
名古屋大学理学部教授	藤井直之
名古屋大学理学部助教授	山岡耕春
名古屋大学理学部助手	熊谷博之
名古屋大学理学部 P D	武井康子
（現東京大学地震研究所 P D）	
N E D O 派遣研究員	石原 競
N E D O 派遣研究員	中谷正生

この他に次の研究者・学生等が本研究に参加した。

動力炉核燃料事業団	国友孝洋
（研究開始当時は名古屋大学理学部）	
名古屋大学理学部助教授	渡辺誠一郎
名古屋大学理学部技術主任	鈴木和司
名古屋大学理学部技術主任	奥田 隆
名古屋大学理学部大学院	中野 優
名古屋大学理学部大学院	羽佐田葉子
名古屋大学理学部大学院	宮川幸治
名古屋大学理学部大学院	池田典宏
名古屋大学理学部大学院	井上修一

5-1	ACROSS/HITの全体像
5-2	ハードウェア
5-2-1	回転震源システム
5-2-2	リニアシステム
5-2-3	カップラー
5-2-4	スタッカー
5-3	ソフトウェア
5-3-1	データの一次処理
5-3-2	セプストラム解析
5-4	ソフトウェア
5-4-1	技術的課題
5-4-2	山川地区における周波数領域弾性応答データの取得実験
5-4-2 A	大スパンアレイによる信号強度の評価 (予備的実験)
5-4-2 B	高密度アレイによるスベクトルデータの取得 (本実験)
5-4-3	アソチロッキングリニアシステム: 純粋SH波発生アクロス用アソチック機構
5-4-4	フイールドアストのまとめ
5-5	結論と今後の予定
5-5-1	アクロス研究全体の中に位置付けた本研究の結論
5-5-2	今後の研究開発の方向
5-5-3	今後の計画
5-6	成果発表の状況
5-7	購入機器一覧

5 本文

ACROSSとはAccurately Controlled Routine Operated Signal Source System（精密制御定常震源システム）の略であり、名古屋大学で開発した新しいコンセプトに基づく地下構造およびその時間変化を探るためのシステムである。ACROSSは精密に制御された正弦波を地下に送信するための震源装置と、地下から帰ってきた波を検知して記録をする時間区間蓄積型記録装置、それに得られた記録を解析するための解析法からなる（図-5-1-1）。

震源装置は岩盤にガタのないように固定するため、もともとは岩盤を掘って装置を固定する装置が開発されていた。しかしながらいちいち岩盤に固定するのでは可搬性に乏しく設置費用も手間も多くかかる難点があるため、設置の容易な装置が必要であると考えられていた。

本プロジェクトではACROSS震源装置として可搬型の装置を開発、製作した（図-5-1-2、図-5-1-3）。装置はHIT（Handy Illumination Tool）と称し、場所の制約の少ない震源装置にした。直接岩盤に固定しないため振動を地下にロスのないように伝える工夫が必要となる。上下方向の振動に対しては振動装置を重くして、発生力よりも自重を大きくして空中に飛び上がらないようにすればよい。水平方向の振動に対しては発生力よりも地面との接触面の接触抵抗を大きくすればよい。そのためには広い面積の板に振動装置を固定すればよい。

振動装置は2組の偏心した重りを回転させて力を発生させる。1台の回転震源では回転する力を発生するが、逆方向に同期して回転する2組みの震源により直線振動を発生させることができる。また回転型を用いることにより振動そのものの精密性が保たれる。振動はACサーボモータにより制御されるが、外

部から与えられるパルス列に同期して回転するように制御されている。正確に言うと、外部から与えられたパルス数に比例したモータの位置に制御される。このパルス列がGPS時計に同期されていて、地球上のどこへ持っていても正確な振動を発生することができる。

受信装置は同じGPSに同期してセンサーからの入力をAD変換するものになっている。一定時間（スタックング長）毎に足しあわせることにより、スタックング長の整数分の1の周期の波のみが残されていく。効果としてはすべての信号をフリーエ変換することと同じではあるが、記録装置の記憶長が大幅に節約される利点がある。

震源装置は一定の周波数で信号を発生するため、選られた記録は各周波数毎に振幅と位相の情報が得られる。すべての周波数を記録して、逆フーリエ変換を行えばインパルスレスが入得られる。ACROSSの場合には震源が正確に制御できるため、従来にない精度でのインパルスレスが入得原理的には得られる。その記録からP波、S波、表面波や後続波を同定することができる。しかしながらすべての周波数について記録をとることは現実的には困難であるため、限られた周波数区間の記録だけから各相を同定するための解析手法が発案された。それはスペクトル解析法の存否法を応用した存否セプストラム法である。

以降の章では震源装置、記録装置、解析法についての詳しい説明と、実地実験として行った鹿児島県の山川地熱発電所での実験の結果を示す。

5-2 ハードウェア

可搬型クロ入力震源装置の開発開始時点は、小型プロトタイプの試作実験がほぼ終わった段階にあり、20 tonf 固定型実用装置の設計試作中であつたの

で、その実績と経験を生かした設計、製作が行なわれた。

震源装置の駆動方式には次のような二つがある。

- (1) 偏心回転体のサーボモーター駆動による小質量大変位
- (2) 電磁線形加速機駆動による大質量小変位

可搬式の小型アクロス震源装置としては、一方向の力のサイン波を発生する電磁線形加速機駆動の方が簡便であろう、との予想はあったが、その制御性は全く未知であった。一方、小型プロトタイプの試作実験装置と 20 tonf 固定型実用装置で回転体のモーター駆動方式の経験があったので、限られた期間内の開発研究としては、回転体方式を採用することにした。電磁線形加速方式の将来性も考えて、回転体方式の設計製作と並行して電磁線形加速機駆動の方式の研究と設計も同時に行ない、もし間にあえば、それも試作テストまではもって行くという方針で対処した。結果的には、後に述べる回転体方式に用いるギヤが関わる技術的な問題点解決のため、回転体方式の持ち上げに時間を取り、電磁線形加速機駆動方式は設計のみに留まった。しかし、電磁線形加速機駆動方式の設計研究の途上で、当初は予想もしなかった「回転モーメント相殺によるアンチロッキング」「梃子による力増幅駆動」「力方向調整可変」など新しい有力な震源装置のメカニズムに気がついたので、これについても述べる。これは第2世代の装置としていずれ日の目を見ることになるだろう。

5-2-1 回転震源システム

偏心回転体のサーボモーター駆動方式には次のような利点がある。

- (1) 産業用に技術開発研究が進んで大量生産されているサーボモーターを使用するので制御性は保証されている。特に、偏心回転体のもつ角運動量が回転速度を一定に保つようにはたらくので、周波数の精度確保には最適と考えられる。

(2) 相対的に小さな装置で大きな力発生に適している。回転角周波数を ω 、偏心質量を M 、偏心距離を R としたとき (一次 (偏心) モーメントは MR)、発生力 F (ニュートン) は次式で与えられる。

$$F = MR \omega^2$$

この力は遠心力であって、ベアリングを介して地盤に固定した本体に伝えられ、弾性波を放射する。ベアリングには油膜切れの限界を与える DM 値 (直径と回転数の積) には限度があるが、何百トンという耐力の市販製品があり、回転数が大きくなければ実用的にはどのように大きな装置でも実現可能である。極めて大きい力を発生する機構としては、大きな半径 R の円形軌道上を大きな質量 M の物体が速度 ωR で周回するリニアモーターを想起すればよい。このような原理で設計製作した装置は、プロトタイプの実験装置 (図 5-1-4) と固定型 20 tonf 実用装置 (図 5-1-5, 図 5-1-6) である。これらの装置では、機構をできるだけ簡単にするため、サーボモーターと一個の偏心回転体 (装置の内部では、複数の偏心回転体を剛体的に結合している) とをユニバーサルジョイントだけを介して直接駆動する。これをわれわれは「シングルロータリーユニット」と呼称している。

このシングルロータリーユニット装置の設計と運転によって明かになった大きな問題点はベアリングの摩擦発熱である。摩擦発熱 W (ワット) は、次式で与えられる。

$$W = g F \omega R = g M R^2 \omega^3$$

ベアリングの摩擦係数 g は、通常 0.002~0.003 という小さい値であるが、それでも特に高速回転では発熱量がモーターの消費電力のほとんどを占め、その排熱が装置設計上の最も大きな課題である。これには適切な水または油冷却機構を付けることによって解決している。

固定型 20 tonf 装置における回転周波数の制御には、モーターの回転を外部

から入力する駆動信号として 1/2000 回転ごとのパルス列を用い、これからの同期のずれを 1/8000 回転ごとに読みだしてフイードバックすることによって精密制御する確立技術をそのまま使用した。入力パルス列は、GPS 信号同期の 10Mbps のパルスに同期させている。

回転速度と位相は、偏心質量の位置をこの 1/8000 ごとに読みだすパルスの計数によって行なう方法を用いている。この方法で計測した回転体の駆動信号パルスへの追従性は、回転周波数に依存する。一回転内の回転速度むらは、高々 1/1000 で、通常はこれよりかなり小さい。長周期の波数回転むらは極めて小さい。平均周波数の揺らぎで見ると、1 マイクロヘルツ以下である。

ここで、述べた一個の偏心回転体を用いたシングルロータリーユニット（

20tonf）は、岩盤内に設置した厚さ約 2 m、面積約 5 m × 7 m のコンクリートブロック（「岩盤カッブラー」と呼称している）に固定した。これは断層解剖計画の一環として淡路島の野島断層付近、および地下構造フロンティアプロジェクトの一環として岐阜県土岐市の東濃鉱山に設置され、初期調整の後には、特段の問題もなく運転されている。

5-2-2 リニアシステム

上の節で述べた固定型回転震源システムは、第一世代の実用装置であるにも関わらず、当初予定し想定した通りの性能を発揮している。したがって、それとして特段の問題はないが、次世代の装置としては、そのままでは多くの不満がある。例えば、一次モーメントが可変でないことは、広い周波数範囲をカバーするのに複数の装置を必要とする。これは、経費がかかるだけでなく、運転実務上でも不便である。特に可搬型の装置としては、地下の大きなコンクリートブロックを必要とせず、かつ軟弱な地面に簡単に設置できることが求められ

る。

簡便に軟弱地盤の地表面上でも有効に動作するアクロス震源装置（HIT）を設計製作するに際して、回転震源装置の経験と実績を生かすため、それとの比較において、HIT としての問題点を整理すると次のようになる。

（１）精密制御が可能な市販のサーボモーターの最高回転数は 3000 rpm であるから、直接駆動で発生できる周波数範囲は 50 ヘルツ以下である。（可搬型の装置が探査の対象とする地下構造は概して浅部の小さい構造であって、構造解明の解像力を上げるため短波長、高周波の波を発生送信したい）

（２）回転体方式では、発生力はその周波数で方向が変化するので、縦波だけ、あるいは横波だけの発生ができない。（取得データの解析にもちいるのに単純な波が便利である。また、横波だけを励起送信する手法としてのアクロスの特長を得るためには、これが求められる）

（３）プロトタイプの装置および 20 tonf の装置では、偏心モーメントが一定であるので、広い周波数範囲に亘って同じレベルの力を発生できなかった。

（発生力が周波数の 2 乗に比例するため、発生力の大きさの範囲が限られるのは困る。いろいろな波長の波動で地下構造を調べたい）

（４）大きな固定岩盤カップラー付きでは可搬型にできない。（小型トラックで輸送できる程度の装置で、軟弱な地表面に置いただけで、それが地上を滑ったり飛び上がったりしないで大きな力を地下に効率よく伝達できることが必要である）

そこで、上の 4 点を目的にあうように改善する次の工夫によって HIT 型装置の設計製作を企画した。

まず、モーターの回転数をギヤで何倍かに上げて、50 ヘルツ以上の発生を実現する。同じ回転体 2 個を対にして同期逆転させることによって、発生力の回転を相殺し、一定方向だけにサイン波の振動方向が向くりニアユニットにする

。偏心モーメント可変方式を採用し、広い周波数範囲の制御震源装置を実現する。また、分解して輸送し、現地で簡単に組み立てられる「地表面カップラー」と呼称する板を設計し、それに装置を設置する方式を開発する。

この装置の具体的な設計と仕様の決定と製作は、いわば無理難題に対峙する修羅場であったが、結局、別紙仕様書のリニアユニット（100 Hz まで 1 tonf 発生シングルロータリーユニット 2 個を対にして 2 tonf 発生 HIT 装置）に到着した。作成した装置は、V 型（鉛直方向の振動で真下に縦波を発生放射する。従って全方位に S V 波とレイリー波も発生する）と H 型（S H 波を発生する。力の方向にはレイリー波も発生する）の各々 1 台である。後に述べるように、この装置の設計は一応の成功を修め、種々の課題を残しながらも、第一世代の HIT 型装置開発研究としては目的を達することができた（図 5-1-7、図 5-1-8）と判断している。

われわれが起こりえる問題点と認識して事前評価と対応策を構じることで、簡単に通り抜けられた難しい問題もいくつかある。しかし、問題があると知りながら時間に追われて適切な技術対応策が事前にとれないまま現地実験で急遽暫定的解決をした問題もある。もちろん、予測できなくて課題を次期装置の設計製作に残した問題もある。それらの内、特にひっかかった問題など、将来の発展の肥になる課題について下記する。

発生力：震源装置の発生する力が大きければ地下構造探査能力は格段に上がる。しかし、地表面に加える応力は、その物質の疲労破壊強度よりも小さくなければならない。花崗岩などの疲労破壊強度は数 bar であることを考えると、軟弱な土の剪断疲労破壊強度（あるいは静止摩擦強度）は $0.01 \text{ bar} (= 10^3 \text{ N/m}^2)$ の程度であろう。後に述べる地表面カップラーの現実的な寸法は、小型トラックに搭載できる板の寸法（ $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ ）の小さい整数倍に限定する。仮に最大値として 3 倍とすると、地表面カップラーの面積は最大 20 m^2 程度

である。そうすると、これで扱える力は、 2×10^4 N、即ち 2 tonf 程度が限界になる。そこで、1 tonf 発生シングルロータリーユニットを 2 個対にするリニアユニットが現実的な上限を与えると考えた。もちろん、地表面物質の疲労破壊強度がもっと大きければ、もっと大きな力も扱える。

ただし、装置の発生力を大きくすることによってその有効性を拡大する方向と、地表面カップラーの寸法を小さくして扱やすくする方向とは一般には原理的に背反するものである。このような制約条件のもとで、同じ力を発生するのにも、装置の扱いやすさの改善の余地はまだかなり大きいと考えている。これは今後の技術開発の方向の一つである。

ギアによる回転速度の拡大と高速ベアリングの問題：小型装置でも高速回転になるとベアリングの DM 値の限界に近くなるのでベアリングの寿命が大きく制約を受ける。シングルロータリーユニットの発生力を最大 1 tonf と設定すると、そこで現実的なベアリング寿命を与えるとギヤ比は 2 が限界で、発生できる周波数は、3000 rpm のサーボモーターを使うので ~ 100 Hz 程度におさえるのが適当である。ギヤ比の 2 をもう少し大きくすることは、発生力を下げればよい。将来の高周波 HIT 型装置としては、発生力を下げ、周波数を 200 $\sim$ 300 Hz まで上げることは理論上可能ではある。ただしこの場合には、装置自体の共鳴など、深く検討すべき課題があることを記しておく。

また、本研究途上では、ギヤの支持方式に若干の設計ミスがあって摩擦がおきくなったので改造などに時間をとり装置の製作完了におくれがでる、という問題があった。

偏心モーメントの調整：偏心モーメントの可変機構は、偏心質量の位置をねじによって調整する簡単な方式を採用した。これ自体には大きな問題がないが、しかし現場で偏心モーメント変更の操作をしてみると、不便なことがあり、特に V 型装置では、本体を岩盤カップラーから取り外してクレーンで吊り上げ

ないと目的を果せない構造になってしまった、という失敗もあった。これは偏心モーメントを調整する窓の位置を少し変えるだけで解決するはずである。また、偏心モーメント調整を装置の窓を明けなくても、外部からその操作ができるように次世代装置では改善すべきである。

摩擦発熱の排熱：当初の計算から、強制空冷を必要とするとの考えがあったが、各部の設計の改善によって、計算上は自然放熱で充分と判断したのでこれを採用した。しかし野外での使用で降雨があり、シートでカバーをしたら放熱効率が下がり、本体が過熱したので、急遽強制空冷を調達して問題を通り抜けた。あらかじめ野外の現場での多様な条件での使用を考慮しておくべきであった。

制御システム：これは固定型装置と同じ方式のものを、車載用にして小型トラックに装備した。制御電源への給電は同じ車に搭載した発電機を用いる。発電機からのノイズが制御に影響をもつ場合もあったが、調整によって解決できた。

5-2-3 地表面カップラー

前節でも述べたが、地表面カップラーは小型トラックに搭載可能な寸法として、1.5 m x 1.5 m のカップラーユニット板を $3 \times 3 = 9$ 枚接続する方式とし、その中央のカップラー板に本体を固定する方式を採用した。またこのユニット板を素人でも扱えるように、電源トラックに小型クレーンを装備した。また、このカップラーのユニット板については、その結合方法が簡便であることと高い結合剛性を得ることが背反する要求に見えて、妥協の産物として簡便性の方に重点をおいたつもりの設計にした。したがって、予測される問題は、結合剛性の不足であろうと考えていた。しかし、現場でテスト実験をしてみると、問題点は別のところに何箇所もあることが判明した。これは後から考えると

設計上の配慮と検討不足に由来するミスであった。将来のために、このミスと対応方策について、以下に記す。

地表面とカップラー板間の接触：設計段階において、地表を構成する土壌の疲労せん断破壊強度のデータがなく、かなり低い値を想定していた。従って、カップラー板設置の地表面に堅いと想定される畑土をおき、それでも少々の凹凸があっても自然に平坦な全面接触になるだろうと期待した。しかし実際には、実接触面積は数パーセントにとどまり、どころどころ広い非接触領域が形成した。この部分ではカップラー板がたわみや曲げを生じて、カップラー板の異常な変形の原因の一つであった。これは実接触面では高い法線応力によって土壌が塑性変形して硬化し局所的に高い静的応力を支えてしまうことによる、と推定された。地面とカップラー間におくべき理想的材料は、静的応力に対しては低い強度をもち、かつ動的疲労破壊強度は高いことが求められる。この背反するように見える素材を探索することが、課題として残された。

そこで、現場の実験ではカップラー板の設置場所の土壌表面を出きるだけ平面に踏み固め、カップラー板との接触面積をほぼ 100 % に増加させるようにして問題を一応解決した。これは HIT 装置の使用についてのノウハウの一つであると言えよう。

岩盤カップラーユニット板の間の結合剛性：表面カップラーの振動に理解困難なモードが発生したので、現場で急遽結合剛性を上げる治具を製作し対応した。確かに変な振動モードはある程度減少したので、結合剛性が低かったことは事実である。しかし、予想に反して、問題は大きくは改善されなかった。実は、下記に記すように、表面カップラーユニット板それ自体の剛性不足が原因であったのである。少なくとも技術的に疑わしきは罰する必要があるが、設計段階ですでに別の見逃した点があったことはまぎれもない事実である。

V型本体取り付けのための中央カップラー板のたわみ剛性不足：カップラー

板が平面で地面と接触していても、また広い面積で接しているからこそ、そこに作用する法線応力は小さく、土壌の圧縮率は高くない。そのために、表面カップラー板のたわみはそれ自体のたわみ剛性だけで決まってしまう。これが小さすぎたために、本体が発生する周期的鉛直力によってたわみ振幅が大きくなり、加速度で規定の限界である 0.5 G を越えたものと推定された。

そこで、急遽、厚さ 200 mm の鋼板を追加して中央のカップラー板の剛性を上げることによって、当面の問題を解決して実験を行なうことができた。しかし、この補強鋼板の重量が大きく、可搬式装置としては別の困難を引き起こした。補強鋼板はハニカム構造にするなど、軽量高剛性のものにするべきであったろう。むしろ、V型装置の表面カップラー板は、最初からハニカム構造で設計するのがよい、と結論された。

H型本体取り付けのための中央カップラー板の曲げ剛性不足：本体の水平方向の振動振幅が上部ほど大きく、加速度が規定の 0.5 G を超過した。中央カップラー板の変形の計測によって、この原因はカップラー板の曲げ剛性不足と判断された。

そこで、本体とカップラー板の縁の間に、充分断面積の大きい鉄棒（直径 100 mm）を 8 本を挿入し、レベルブロックで隙間を殺し、いわばつかえ棒として用いて、カップラー板に曲げ応力が加わらない構造にした。これによって、問題点は実質的に解消した。

図 5-1-7 は山川実験で稼働している震源装置とカップラーである。

図 5-1-8 は同じく山川実験の風景である。カップラーの向こうに見えるのが震源制御装置、電源装置などを搭載した震源車である。

5-2-4 スタッカー

本研究では多くの地震計を用いて観測をする必要性から、多チャンネル（96チャンネル）入力に対応したTS-スタッカー（時間区間蓄積型記録装置：図5-1-9）を製作した。

TSスタッカーの原理は非常に単純である。入力された記録を一定時間間隔（スタッキング間隔）毎に足し合わせるだけである。その場合スタック回数を増やすに従ってスタッキング間隔の整数分の1の周期に対するゲイン以外がどんどん低下していく。例えば100秒毎にスタッキングをくり返せば0.01Hzの整数倍の周波数の波のみが生き残る。またその通過帯域も狭くなり、多チャンネル狭帯域フィルタとしての働きがある。この場合のS/N比はスタッキング回数の平方根に比例する。同様の効果は時間領域でスタッキングをせずにすべてのデータをフーリエ変換しても得られるが、記憶領域と処理時間が大幅に増えてしまう。サンプリングのタイミングを震源装置と同様にGPS時計に同期させればどんなにスタッキングを繰り返しても、震源と記録装置の同期がずれず、確実なスタッキング効果が得られる。

本研究で用いた多チャンネルTSスタッカーは96チャンネルの入力を持ち、2倍から1000倍までの6段階のアナログアンプ倍率を持つ。AD変換は16ビットであるが、入力倍率をうまく選択すればこのビット数で十分である。確かに24ビットのデルタシグマ型のAD変換器を用いる方法もあるが、現状のデルタシグマ型はサンプリングクロックとして非常に高い周波数を必要とし、サンプリングタイミングを完全にGPS時計に同期することは難しい。実際、我々が委託をして製作した24ビット型（3チャンネル）のTSスタッカーは100秒毎にGPSに同期させているが、サンプリングクロックは内蔵の水晶時計を用いている。今回製作したものはAD変換器が逐次比較型であるため比較的低い周期のパルスで良いためADのサンプリングタイミングをGPS時計に同期することができる。このことにより時刻の精度としてはより高精度の記録装置とな

っている。

本装置は電源のない野外で観測することを前提として、バンに車載可能となっている。同時に発電機をつないで動かすことができるように考えられている。そのため高さ110cmのラックにマウントされ無停電電源装置を使用している。これは発電機が万一燃料切れやその他のトラブルによって停止した場合でもコンピュータを安全に停止できるだけの時間的余裕を持たせることと、発電機の電圧安定性に配慮したためである。

以下にスペックを示す。

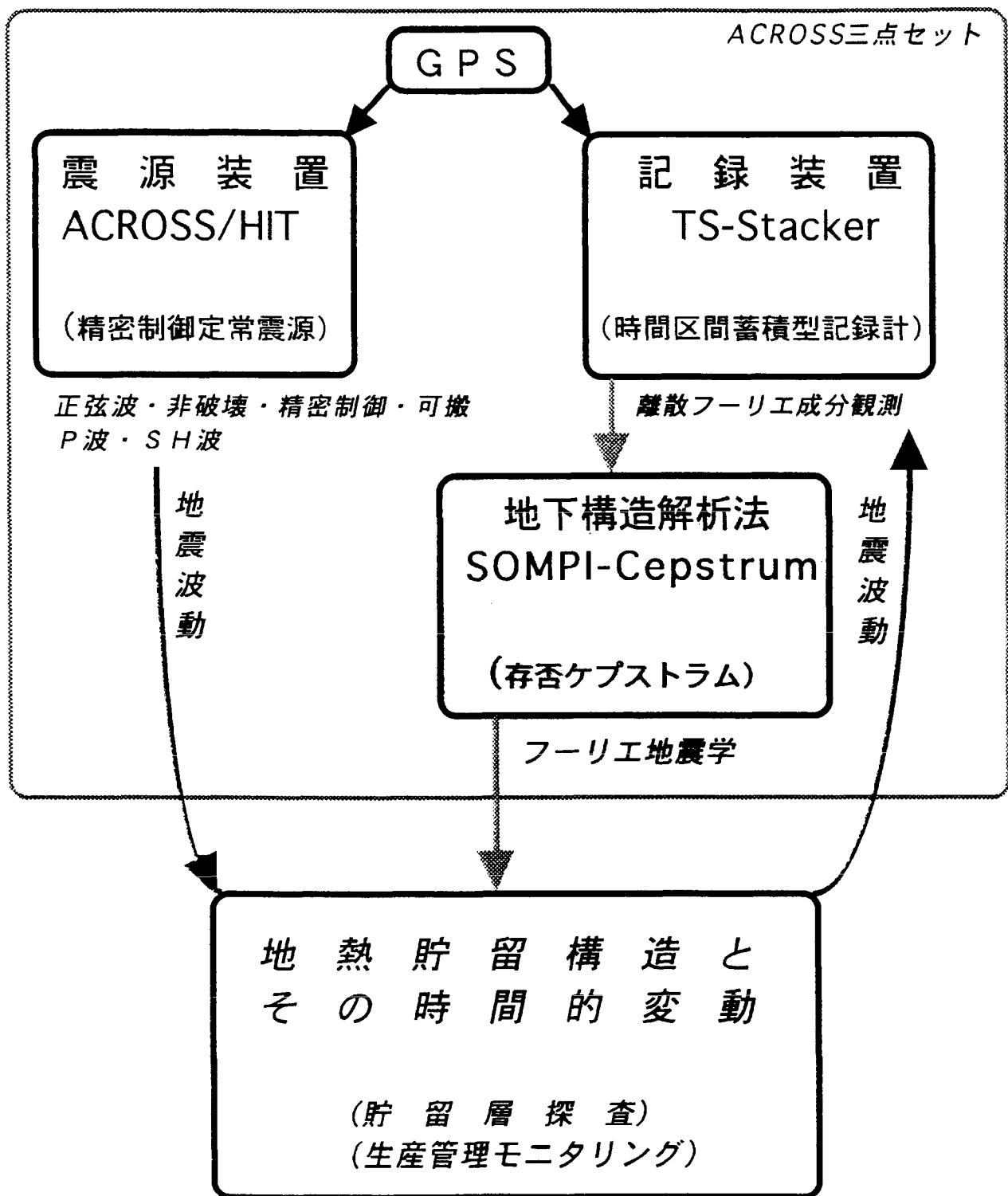
- (1) 入力チャンネル数 96
- (2) アンプ倍率 2, 10, 30, 100, 300, 1000倍
- (3) ローパスフィルター 500Hz, 2次バターワース
- (4) AD変換 16ビット逐次比較
- (5) 処理装置 NEC PC9821Xa13
- (6) サンプリングレート 96チャンネルの場合最大400Hz
- (7) 電源 AC100V (無停電電源)
- (8) GPS時計 TRUE TIME XL-DC

実際に使用した結果、多チャンネルである利点が十分に発揮され、効率的なデータ収録を行うことができた。使用したGPS時計の信頼性は抜群に良く、一度も時刻関連の失敗はなかった。山川の実験では最大40チャンネルで1kHzサンプリングの実績を得た。AD変換装置の最大スペックはこの3倍程度あるため、おそらくPCの処理能力の限界なのであろう。

この様に使い勝手の良い装置ではあるが、実用上はいくつかの問題点がある。車載にするためにラックの強度が必要であったが、そのためラックが重すぎて自動車に乗せるのに4人の大人の力が必要となった。また今回はアナログ入力を採用したためケーブルが重くなるという問題点が発生した。理想的には地

震計の近傍でGPSに同期したAD変換を行い、デジタル伝送をすることが望ましい。

一



ACROSS/HIT システム

車載形精密制御弾性波送信装置ブロック図

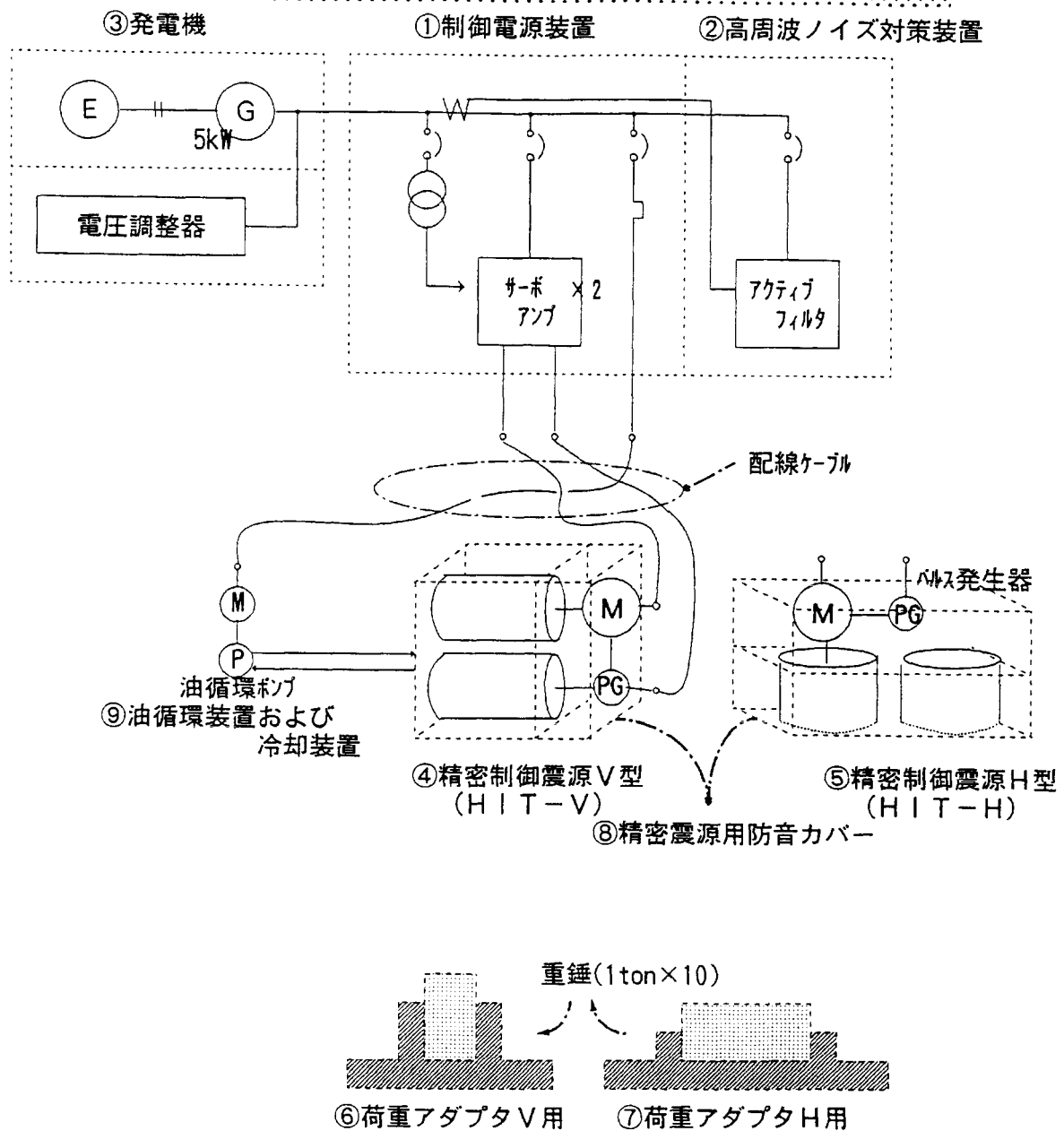


図5-1-2 震源装置のブロック図

①標準仕様

1.精密制御震源

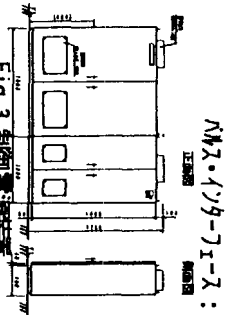
方式 : Linear-Across 方式
緒言 :

種別	偏心エ-クト	発 生 力	回 転 数
TYPE V	0.15kg-m	1.5 × 10 ⁴ N(at50Hz)	3000 r/min
TYPE H	0.15kg-m	1.5 × 10 ⁴ N(at Hz)	3000 r/min

潤滑油方式 : 強制給油方式
駆動エ-ク : GRH1500 0.5 kW

2.制御電源装置

形式 : 屋外自立形閉鎖配電盤
入力 : 220V 60Hz, 3φ 3線式
出力 : 2 回路-エ-ク用出力
1 回路-計測用電源



エ-ク・イン-エ-ク : 2 回路-位置・速度制御用エ-ク 入力力回路
ライブライア よりシグナルエ-ク をライブライア にて受信します。
加減速カーブは制御側にて制御下さい。
2 回路-計測用エ-ク (A+B相) 出力回路
エ-クより信号を絶縁して、ライブライア にて出力します。
2 回路-計測用エ-ク (2相) 出力回路
エ-クより信号を絶縁して、ライブライア にて出力します。

3.発電装置

形式 : 屋外テ-ゼル発電機
出力 : 220V 60Hz, 3φ 3線式 5 kW

4.高周波ノイズ対策装置

形式 : FUJIACT-MINI
出力 : 440V 60Hz, 3φ 3線式 10kVA

5.その他付属品

- (1)荷重アダプタ
- (2)精密制御震源用雨・騒音カバー
- (3)油潤滑装置および冷却装置

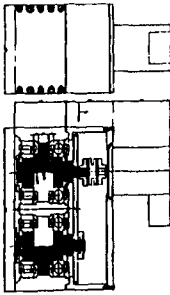
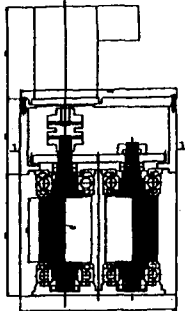


図 5-1-3 震源装置の基本スペック

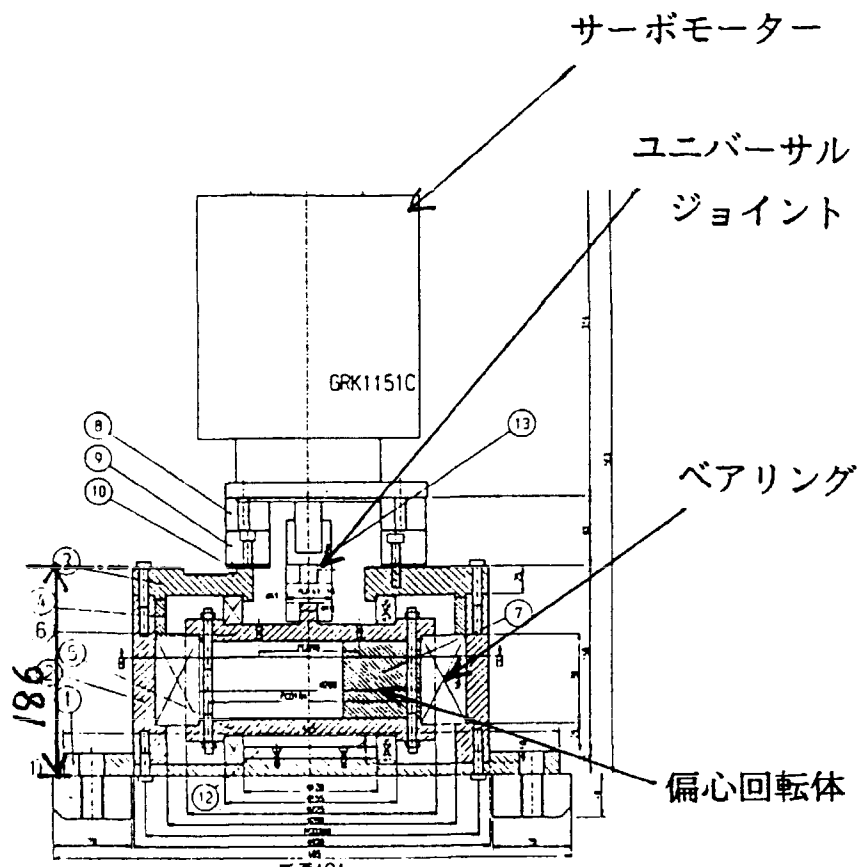


図 5-1-4 プロトタイプACROSS震源装置

偏心荷重をベアリングで受ける構造は、この装置ですでに取り入れられている

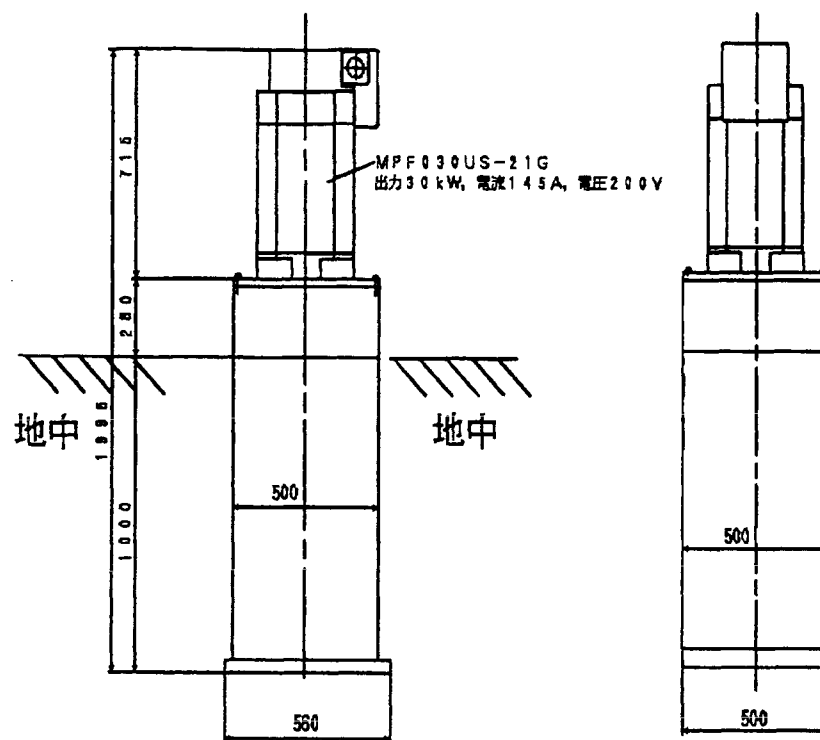


図5-1-5 固定型20t実用装置の外観図

本体を地中に固定し、上部に接続されたモーターで回転させる

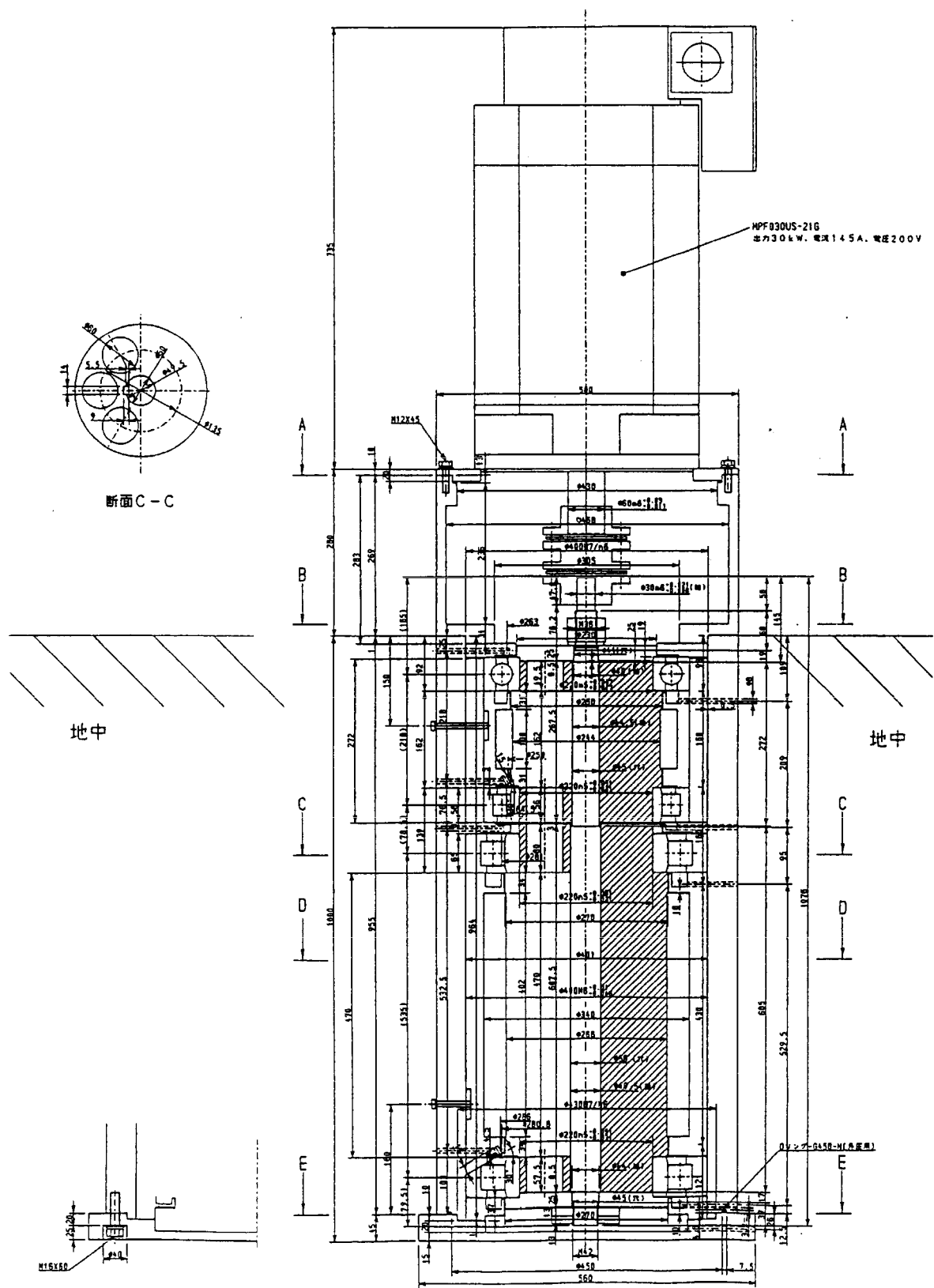


図5-1-6 固定型20t実用装置の設計図面

斜線部が偏心おもりで、偏心荷重はプロトタイプと同様ベアリングで受けるようになっている

5-3 ソフトウェア

5-3-1 データの一次処理

TS スタッカーは、入力データを時間区間 T ごとに区切ってスタッキングした結果を記録する。したがって取得するデータはデータ長 T の時系列データで、これが各周波数成分について得られる。これらの時系列データから、震源でのシングル・フォースの入力に対する観測点の地動変位の周波数応答関数の複素周波数系列データを取得するのが一次処理の目的である。

まずは TS スタッカーで得られた時系列データを DFT(離散的フーリエ変換)により複素周波数スペクトルに変換する。これは周波数間隔が $1/T$ の複素周波数系列である。ACROSS が送信する信号の周波数は $1/T$ の整数倍に設定するので、スペクトル上では 1 本の鋭いピークとして現れる。

このピークの複素フーリエ係数が ACROSS からの信号の振幅と位相の情報を持っているので、全てのデータからこの信号の複素フーリエ係数を求める。得られた複素フーリエ係数に以下の処理を行う。

1. 震源の発生力の大きさ (回転型なら慣性モーメント $\times$ 角速度²) で割る
2. 地震計の感度補正 (電圧値から地動速度または加速度へ)
3. 変位値に直す (積分 = $1/(i2\pi f)$)

これらの処理によって震源で 1 N の力を加えたときの観測点の地動変位 (m) の応答が得られる。

単独の回転型震源の場合、震源での発生力は一定面内で円運動するシングルフォースである。正逆両回転で計測を行い、両方のデータを合成することによって任意の方向で単振動するシングルフォースへの応答に変換できる。まず、全ての

データの初期位相 (スタッキングしたデータの最初の点で偏心マスが向いている方向=遠心力の方向) を任意の基準方向に合わせる。これは初期位相の方向と基準方向のなす角を θ とすると、正回転のデータに $e^{i\theta}$ 、逆回転のデータに $e^{-i\theta}$ をかけることによってなされる。このようにして基準方向に初期位相を合わせたデータにおいて、(正回転のデータ+逆回転のデータ)/2が基準方向の単振動に対する応答になる。これを直交する2方向について行う。

HIT のようなリニア・ユニットあるいはリニア・モーシヨンの震源の場合、任意の方向のシングル・フォースに対する応答を求めるには、直交する2方向に振動させたデータを取得する。

以上のようにして直交する2方向の単振動に対する周波数応答のデータが得られる。2方向のデータを合成すれば、任意の方向の単振動に対する応答が得られるので、普通は震源から観測点の radial 方向と tangential 方向に変換する。

これらの処理をした周波数成分データを周波数系列データとして表現すると、これは震源においてデルタ関数でシングルフォースが加えられた時の、観測点の地動変位の周波数応答関数がある周波数範囲で離散的にサンプリングしたものに相当する。これをセブストラム解析することにより、波の到着時刻を求める。

一次処理の手順

DFT によって信号の複素フーリエ係数を求める



震源の発生力の大きさの補正



地震計の感度の補正



変位値への変換



初期位相を合わせる *



正逆回転でのデータから単振動に対する応答を求める *



radial 方向と tangential 方向のシングルフォースへの応答に変換



震源でデルタ関数でシングルフォースを加えた時の観測点の地動変位の周波数応答関数

* : 単独の回転型震源の場合

5—3—2. セプストラム解析

震源でのデルタ関数の励起入力による観測点での周波数応答（時間波形のフーリエ変換）は一般に以下のように表せる,

$$e^{-iT\omega} = e^{-u\omega} [\cos(t\omega) - i \sin(t\omega)]. \quad (1)$$

ここで $T = t - iu$ を複素ケフレンシー (complex quefrenncy) とよび、 t が波の到着時刻を u が到着時刻の広がり（パルス幅の広がり）を表す。(1) 式は周波数軸上で減衰振動する複素系列を表している。セプストラム解析ではこの複素周波数系列のスペクトル解析により複素ケフレンシーを決定する。HIT システムで得られるデータは周波数応答の限られた周波数範囲での等間隔離散系列である。このようなデータを解析ための手法として複素存否セプストラム法を開発した。この手法は Kumazawa et al. [1990] により提案された斉次の自己回帰 (AR) 過程に基づいたスペクトル解析法である存否法を拡張したものである。以下にその原理を示す。

離散複素周波数系列の信号 $X_n = C_n - iS_n, (n = 1, \dots, N)$ が次の斉次の AR 方程式を満たすと考える,

$$A(z)X_n = 0. \quad (2)$$

ここで $A(z)$ は複素 AR オペレータ,

$$A(z) = \sum_{j=0}^m (a_j + ib_j)z^{-j}. \quad (3)$$

である。ここで a_j, b_j は AR 係数, z は unit-frequency-delay operator ($zX_n = X_{n+1}$) であり、これは複素ケフレンシー $T = t - iu$ と以下の関係にある,

$$z = e^{i2\pi T \Delta f}. \quad (4)$$

ここで Δf は周波数系列の離散間隔である。データの系列 D_n は X_n とノイズ系列

$e_n = e_n^c - ie_n^s$ (平均ゼロ、分散 σ^2) の線形和,

$$D_n = X_n + e_n, \quad (5)$$

で表されると考える。ここで

$$\Delta_n = A(z)D_n = A(z)e_n. \quad (6)$$

としその平均パワー密度 S ,

$$S = \frac{1}{N-2m} \sum_{n=1+m}^{N-m} \Delta_n \Delta_n^*. \quad (7)$$

と定義する (*は複素共役)。ベクトル $A(z)$ の長さ A は,

$$A^2 = A(z)A(z)^*. \quad (8)$$

で与えられる。 A を一定という条件で S を最小にする AR 係数が求めたい AR 係数である。これは Lagrange の未定係数法を用いて解くことができる,

$$\frac{\partial(S - \lambda A^2)}{\partial a_j} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial(S - \lambda A^2)}{\partial b_j} = 0 \quad (10)$$

ここで λ が未定係数である。 c が要素 a_j と b_j のベクトル,

$$c = (a_1, a_2, \dots, a_m, b_1, b_2, \dots, b_m)^T. \quad (11)$$

とすると次の固有値問題に帰着する,

$$Pc = \lambda c. \quad (12)$$

ここで P は修正 non-Toeplitz 自己共分散行列,

$$P = \begin{bmatrix} P_{j'j} & P_{j'k} \\ P_{j'k}^T & P_{k'k} \end{bmatrix}$$

である (T は転置を示す)。ここで

$$P_{j'j} = \frac{1}{N-2m} \sum_{n=1+m}^{N-m} (D_{n-j'}^c D_{n-j}^c + D_{n-j'}^s D_{n-j}^s),$$

$$P_{k'k} = \frac{1}{N-2m} \sum_{n=1+m}^{N-m} (D_{n-k'}^c D_{n-k}^c + D_{n-k'}^s D_{n-k}^s),$$

$$P_{j'k} = \frac{1}{N-2m} \sum_{n=1+m}^{N-m} (D_{n-j'}^c D_{n-k}^s - D_{n-k}^c D_{n-j'}^s),$$

$$D_n^c = C_n + \epsilon_n^c,$$

$$D_n^s = S_n + \epsilon_n^s.$$

X_n がゼロでないという条件から,

$$A(z) = \sum_{j=0}^m (a_j + ib_j) z^{-j} = 0. \quad (13)$$

を得る。これは m 個の独立した根, $z_s (1 \leq s \leq m)$ を持つ。よってこの根から m 個の複素ケフレンシー,

$$T_j = t_j - iu_j = -i(\ln z_j)/2\pi\Delta f, \quad (14)$$

を求めることができる。

X_n はよって複素ケフレンシー T_j と複素振幅 α_j を用いて

$$X_n = \sum_{j=0}^m \alpha_j \epsilon^{-iT_j \Delta f n} \quad (15)$$

と表せる。 α_j はデータ系列 D_n との残差二乗和,

$$\sum_{n=1}^N [(D_n - X_n)^2] \quad (16)$$

を最小にすることにより求められる。

最適な AR オーダー m とそこに含まれる波素の数 M を決定するためには two-parameter AIC (Matsuura et al., 1990) を用いる。まず m 個の波素を次式

で定義される平均パワー密度 MPD が大きい順に並び変える,

$$MPD = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\alpha_j e^{-iT_j \Delta f_n}|^2. \quad (17)$$

最初の $M(\leq m)$ 個の波素について複素振幅を最小二乗フィッティングにより求め、その平均二乗残差 σ_{mM}^2 ,

$$\sigma_{mM}^2 = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N [(D_n - X'_n)^2] \quad (18)$$

を求める。ここで X'_n は最計算された M 個の波素を含む信号成分である。two-parameter AIC はよって

$$AIC(m, M) = 2N \log \sigma_{mM}^2 + 2 \cdot 4M \quad (19)$$

となる。適当な (m, M) の範囲で $AIC(m, M)$ を計算しその最小値を見つけることにより最適な m と M を決定することができる。

コード化はワークステーション上で Fortran 言語を用いて行った。作成したプログラムとその主な機能を以下に示す。

- fgqor.f : 一次処理された複素周波数系列データを入力とし、固有値問題を解き複素ケフレンシーを求め、さらに two-parameter AIC を用いて最適な AR オーダーと波素の数を決定する。
- fgdgm_cepst.f : 求まった複素ケフレンシーを表示し PostScript ファイルに出力する。

5-4 フィールドテスト

● 実験の概要

HIT型アクロスシステムの実地テストを1996年12月-1997年1月にかけて名古屋大学構内で、1997年1月-3月にかけて九州電力山川地熱発電所（鹿児島県揖宿郡）敷地内及び周辺でおこなった。

名古屋大学構内での実験の主目的は、震源装置の試運転であった。起震装置の最大発生力である2tfに耐えられるような固定装置を工場内につくることが難しかったため、実際に地表面カップラーを展開することのできる屋外で試運転をすることにしたものである。しかし、起震装置本体の振動が予想したより大きく、装置を痛めてしまう危険があったので、名古屋大学構内での実験では最大加振力での運転はできなかった。

この問題の解決は、実際の地下構造のデータの取得を主目的とした山川での実験に持ち越され、最終的には、垂直、水平加振とも周波数100Hzにおいて2tf（tonf:以下同じ）という目標の出力を達成できた。これらは、装置の他の技術的問題とあわせて5-4-1節で論じる。

山川での実験の主な目的は、HIT型アクロスシステムがどの程度に地下の速度構造の情報を吸い上げられるかの見通しを付けることである。実験サイトの山川地区は、典型的な地熱地帯であり、また、活発な熱水の循環がおこっているところでもある。これらは、HIT型アクロスの典型的なターゲットとなるものであり、山川でのテストは予想されるひとつの典型的な使用条件でのテストとなる。

実験結果の検討を5-4-2節で行い、その纏めを5-4-3節で行う。

● 地表面カブラーの剛性増加（装置の保護）

地表面カブラーの剛性を十分高くするという要請は、一つには、起振装置本体の振動を押さえ、モーターを痛めないようにするためである。カブラーの実効剛性を K 、起振装置の発生力を F_0 とすると、カブラーの共振周波数以下の周波数では、起振装置本体の振動変位は F_0/K となる。本装置では、モーターに加わる振動加速度を $0.5G$ 以下に押さえるという制約があるので、最も大きな振動加速度が予想される 100Hz で 2tf 出力の使用条件でこれを実現するには、 $K=1.6 \times 10^9 \text{ N/m}$ の実効剛性が必要である。名古屋大学の当初テストでは、これが達成できなかったが、5-2節（ハードウェア）で述べた改造で何とかこの値を達成できた。なお、剛性値は、起振装置本体での振動振幅を測り、それを理論的に計算される発生力と比較することでもとめた。

● 振動伝達率とカブラーの共振周波数

地表面カブラーの剛性の一つの重要性は、装置の振動伝達率の問題である。カブラーの質量 M と実効剛性 K で決まる共振周波数/以上の周波数においては、地面に伝えられる力 F の F_0 に対する比（振動伝達率）は周波数とともに下がっていく、また位相も 90 度まで遅れていく。このことは、フクロ入の基本的なメソッドである「信号源の大きさ、位相を正確に知っている」ということを損なうので、共振周波数は、観測に使用する周波数より十分大きくしておく必要がある。ここで、 M として、カブラーの総重量である 1.4kg を用いると、最終的に達成できた $K=1.6 \times 10^9 \text{ N/m}$ の実効剛性にたいして F_0 が 63Hz となり、使用周波数の上限である 100Hz を割り込んでいる。このことは、今回の実験において

高周波領域での地球に対する加振力の位相と振幅が起振装置部の発生力から大きくずれている可能性を示唆しており、このことを考慮してデータを扱う必要がある。

5-4-2 山川地区における周波数領域弾性応答データ取得実験

5-4-2A 大スパンアレーによる信号強度の評価（予備的実験）

● 受信システム

各周波数帯での信号強度を知り、必要なスタッキング時間を概算するために、山川地熱発電所敷地内の北端に図5-4-2.1のように東西方向のアレーを張った。センサー間隔は40mで、最も遠い点（No.10）で、震源との距離が400m弱である。アレーの設置点は、全て切り土部分であるが、表面は柴土に覆われている。柴土を5cmほどほり、絶縁のために厚さ1cm,30cm角の亚克力板を置いて、その上に3点支持で地震計本体をおいた。センサーは、すべて3成分速度計のMarkrand1Hz（ムーヴィングコイル型）である。データはツイステッドペアの多芯同軸ケーブルをとおして、ユニットハウス内に設置したサンコー&サンテック製多チャンネル型TSSで収録した。TSS内でプリアンプ、アンチエイリアシングフィルターをとおして、1000HzでAD変換（16bit）されてのち、1セグメントを10秒としてスタッキングされる。スタッキング回数をn回とすれば、総データ取得時間Tは10n秒となる。

また、震源装置のほぼ真北約1000mの地点に九州地熱の微小地震観測用のボアホールがあり、3成分速度型地震計Mark Product L-22E（3Hz、ムーヴィングコイル型）がボアホール内深度50mに設置されている。遠地での信号レベルを調べるために、この地震計のアナログ出力を並列に分岐して、携帯型の

Markrand製TSSで収録した。データの1セグメントは100秒、サンプリング

は168Hz、分解能は16bitである。

● 信号強度及びノイズレベル

図5-4-2.2にNo.5のアレー点において350回（ $T=3500$ 秒）スタッキングした地動速度記録の各成分の振幅スペクトルの0-100Hzの部分を示す。セグメント長は100秒なので、周波数軸上でのサンプリング間隔は0.01Hzとなる。この時、2台の震源装置は、南北方向に40Hz、東西方向に41Hzで、それぞれ0.89tfと0.93tfで加振している。したがって図5-4-2.2にみえる40Hz、41Hzのピークがそれぞれ南北方向加振、上下方向加振にたいするNo.5のアレー点での信号強度となり、これは、スタッキングの時間によらない。一方、その他の周波数の信号は、自然の地動と考えられ、その位相は時間的にランダムに変動すると考えられるので、これは、総データ取得時間 T の平方根に逆比例して小さくなる。40Hz、41Hzのクロス信号にどれだけのノイズが入っているかは、その周辺のスタッキング後のノイズレベルの平均として推定され、ここでは、クロス信号周波数の上下5点（ ± 0.05 Hz）のスペクトル振幅の平均としてこれを求める。図5-4-2.2でみると、40Hz、41Hz周辺のノイズレベルは3500秒のスタッキングによって、信号レベルの1/100程度となり、図5-4-2.2の40Hz、41Hzのピークの高さから、No.5のアレー点におけるクロス信号強度が1%の誤差で推定できていることになる。

このようにしてもとめた20Hz, 40Hz, 65Hzでの南北加振にたいする各点のクロス信号の強度を図5-4-2.3(a)に、21Hz, 41Hz, 61Hzでの上下加振にたいする各点のクロス信号の強度を図5-4-2.3(b)にそれぞれしめした。また、対応する周波数でのノイズレベル（1時間スタッキング後）も示してある。1時間スタッキング後のノイズレベルから、自然ノイズの振幅スペクトル密度を求

めるにはデータ取得平方根を乗じればよい。信号強度を1時間スタッキング後のノイズレベルで除して、1時間スタッキングで得られるS/N比（振幅比）を求めたものが、図5-4-2.3(c)に示してある。ここから、逆に、各点、各周波数帯で必要なSNの振幅を得るのに必要な時間が予想できる。なお、この図には簡単のため、信号強度を3成分のベクトル和で示してある。また、1 km離れたポアホール内地震計のデータをStation No.25として示してある。

● 周波数による信号強度の違いからの示唆

この予備実験の最大の目的は、距離に伴う信号の減衰の様子と自然のノイズの大きさを知り、実験にかかる時間を知ることであるが、ノイズレベルは、開発者側でどうすることもできない問題であり、装置自体の性能の問題としては、信号がどの程度の強度で遠くまで伝播していくかが評価となる。加振装置自体の発生力は、理論的に間違いなく計算できるので、基礎データとしては、単位発生力当たりの信号強度の形でもっていることが望ましい。また、周波数によらず、ファーフールドでは、周波数によらず変位が震源での力の振幅に比例するので、図5-4-2.4には、観測された地動変位振幅（m）を理論的に計算された発生力（N）で割ったものを示してある。この値は、地下の速度及び減衰構造で規定される地球の応答関数、及び、カプラーの振動伝達率で決まる。図5-4-2.4をみると、20(21)Hzと40(41)Hzが、ほぼ同じレベルであるのに対して、65(66)Hzではその1/10-1/100となっている。その差は、震源-受信点間の距離が大きくなるほど大きくなっているため、非弾性減衰の寄与が大きいことは確かであるが、それだけでは説明しきれない。また、20Hzと40Hzでは差がないのに65Hzにおいては、急に信号強度が1/10になるということは、むしろ、カプラーの振動伝達率が40Hzから65Hzの間に低下している可能性を示唆している。

40Hzと65Hzの差が、40-100mの点に比べて、300-400mの点では10倍広がるという結果から推定されるQの値は、音速を1000m/sとして20程度となる。しかし、最も近い点であるNo.1(震源距離40m)において40Hzと65Hzの差が10倍あるというもうひとつの観察事実は、Qの値がもう一桁小さくないと説明できない。2つの観察結果を合理的に解釈するには、Qの値は20程度(正確には位相速度とQの積が20000m/s程度)で、65Hzにおいて単位震源力で励起される波の振幅が40Hz以下におけるよりもそもそも小さく1/10程度であると考えればよい。

● 予備実験からのその他の示唆

単純に一つの波だけが伝播することを想定すれば、幾何減衰と非弾性減衰によって、震源距離とともに信号の振幅は減少することが期待される。しかし、図5-4-2.4は、必ずしも距離と共に単調減少せず複雑な挙動を示している。しかも、そのパターンは、周波数によって異なっている。例えば、No.9は、40Hzにおいてだけ、周囲よりも振幅が低くなっている。

もう一つ意外なことは、加振力の方向と、それに対する地動変位の方向の関係が複雑であったことである。例えば、図5-4-2.1のソース-レシーバーの配置からするとNo.4以遠では、南北方向の加振に対しては、SH波もしくはラブ波として伝播するものが卓越し、南北方向の地動が卓越することが予想される。ところが、図5-4-2.3(a)の結果はそうっておらず、観測点ごとに卓越する振動方向は複雑に変わっている。逆に、上下方向の加振では、P-SV波が卓越するはずで、南北方向の振動はほとんどないかと予想されたが、図5-4-2.3(b)の結果はそうっていない。

これらの点を踏まえて、本実験では、アレー点の設置方法等を含めてより慎重な方法を取り、広い周波数領域で細かい周波数ステップのデータを取得した。

また、繰り返し実験によって再現性をチェックした。その結果、予備実験で見られた結果の複雑性は、地下構造の情報を反映しているものとして解釈できることが分かった。

5- 4- 2B 高密度アレーによるスペクトルデータの取得（本実験）

● 受信システム

予備実験での観測点の位置によるスペクトルデータの変化が複雑だったことを考慮して、本実験では、狭い範囲に観測点を集中した。図5- 4- 2.5にその配置を示す。メインのアレー（No.1- 10）は予備実験でのNo.3と4（図5- 4- 2.1参照）の間に4 m間隔で地震計を設置した。地震計は、ムーヴィングコイル型3成分速度計のmarkrand4.5Hzを使用した。設置時のガタ等を避けるため、まず、表層から30cm四方で、深さ20cm程度の穴をほった。この穴は、柴土の表層を掘り抜き、本来の切り土の地面に達している。次に穴にコンクリートを流し込んで厚み10- 15cm程度の台をつくり、ここに地震計を石膏止めした。

また、この設置方法のばらつきを評価するため、No.2の点のすぐ南側（1m）に、同じ地震計を同様の方法で設置し、この点をNo.11とした。さらに、設置方法の違い及び、地震計の種類による差をみるため、No.2の点のすぐ西側（2m）に、3成分速度計のMarkrand1Hz（ムーヴィングコイル型）と3成分加速度計のRION LS- 13（フィードバック型）をおき、それぞれNo.12,13とした。この2つの地震計は、柴土の地表においた1枚のコンクリートの板（30×70cm,厚み10cm）の上に載せた。

また、震源に近い点での地動をみるために、南北加振の震源の中心から南側16mの点にmarkrand4.5Hzをおいた。この地点の地面には土中に埋まったコンクリートの塊が上面を出しており、地震計はこの上面に石膏で固定した。この

コンクリート塊が地中にどれくらい埋まっているかは不明であるが、地表から見える上面の大きさは150x70 cm程度であった。

データは全て、ユニットハウス内に設置したサンコー&サンテック製多チャンネル型TSSで収録した。サンプリングは1kHz,セグメント長は10秒である。

● スペクトルデータの取得

データは、30-90Hzの範囲を0.4Hz間隔で取得したので合計151点である。南北加振と上下加振の震源を0.8Hzの周波数差で同時に運転し、低い周波数から順次走査していった。加振装置の慣性モーメントはこの間ずっと固定し、発生力は、30Hzにおいて0.18tfから、90Hzにおいて1.62tfまで周波数の2乗に比例して増えていく。

データ取得（スタッキング）時間は各周波数において5分とし、メインのアレーにおいて、どの周波数帯でもほぼ振幅比で100以上のSN比がえられた。このSN比は、図5-4-2.3(c)のデータから予想される程度である。スペクトルデータとノイズレベルを、図5-4-2.6に示す。ここでは、例として、上下加振に対するNo.6の点の応答を示した。1周波数ステップ毎に震源周波数の変更等に5分のインターバルをおいたので、一つの周波数のデータ取得操作に10分かかり、この図に示された30-90Hzの全範囲を一通り走査し終えるのに28時間かかっている。

一通りの走査が終わった後は、再現性を見るために、30-90Hzを2Hz間隔で走査した（図5-4-2.6）。これは、一回目の走査が終わったあともすぐにはじめ、5時間で完了している。また、このデータの時間変動の様子をみるもう一つの方法として、一回目の走査中ほぼ2時間置きに、南北加振64Hz,上下加振64.8Hzのデータを取得した（図5-4-2.7）。

● 振幅スペクトルに見られる干渉パターン

図5-4-2.6のスペクトルに見られる顕著な特徴は、各成分の振幅が、周波数軸上で波打っていることである。典型的には、周期が約5 Hz、振幅の変化が1桁弱というパターンが、全周波数領域にわたって、各成分に見られる。これが、共鳴によるものであれば、所々（共鳴点）に、特に振幅の大きいところがあるというパターンになると思われるが、この場合は、むしろ、所々に特に振幅の小さい周波数があるという形になっている。以上の特徴は、上下加振にたいしても南北加振にたいしても、全ての観測点で共通に見られた。

このパターンは、一つの観測点に対して、走時の違う複数の波が到達して、それが周波数によって強め合ったり、弱め合ったり、すなわち干渉していると考えれば説明できる。仮に、反射面等がなくても、伝播速度の違う波は違った走時で一つの観測点に到着するので、このようなことはむしろおこる方が普通であろう。

簡単のために走時が t_1 と t_2 の二つの波を考える。震源でこれらの波が同位相だとすれば、走時差 τ が波の周期 $T=1/f$ の整数倍であるような周波数 f では2つの波が同位相となり波は強め合い、半整数倍であるような周波数では弱め合う。周波数軸上での明点、暗点は、周波数周期 $1/f$ 毎に繰り返す。また、干渉パターンの振幅（明点と暗点の差）は、2つの波の振幅がどれだけ近いかで決まり、振幅比が $1:(1-x)$ であれば、明点と暗点での振幅比は $(2-x):x$ となり、 $x \ll 1$ の場合には、ほぼ $2:x$ となる。

図5-4-2.8に、走時が0.3秒で振幅が1の波と、走時が0.45秒で振幅が0.8の波の重ね合わせたものを周波数 f に対してプロットしてみた。図5-4-2.6に見られるような振幅の増減パターンが見られる。また、暗点周波数付近で、位相が周波数に対して停留しているが、にたようなことは図5-4-2.6にもみられる。（

例えば、上下動の48Hz,61.6Hz)。なお、ここでいう周波数軸上での干渉パターンというのは、違ったケフレンシーをもつフーリエ成分のうなりといっても同じことである。

予備実験では、各周波数帯で一つの周波数でしかデータを取っていなかったもので、干渉がおこっていることにきがつかなかったが、たまたま、その周波数で、その点で干渉がおこっているかどうかで振幅は1桁くらいは変わってしまうので、隣り合った観測点で振幅が1桁程度ばらついたとしても当然の結果であったといえる。また、各点における振動方向成分の相対的な大小関係に命脈がなかったことも同じように理解できよう。このことは、本実験における各点での振幅を示した図5-4-2.9からも確認できる。

● 干渉パターンの時間変化

図5-4-2.6を見ると、2回目の計測（繰り返し実験）においては、1回目の計測と2-3倍振幅が変化していることが珍しくない。信号振幅の特に小さい周波数においてさえ、数十倍のSN比が確保されているので、再現性のなさをノイズのせいにすることはできない。また、地震計の感度がこんなに変化することは考えにくい。

計測上の問題として一つ考えられるのは、振動方向の分解がくるった場合である。方向1の振動成分に対して、それに直交する方向2の成分の振動が非常に小さい場合を考えると、方向2の横感度がわずかに変わっただけで、方向2に現れる信号が、桁で変わることは容易である。例えば真の成分比が、 $1:10^{-4}$ であった場合に、横感度が1%しか補償されない地震計であれば、方向2の成分として出力される信号の振幅は 10^{-4} から 10^{-2} まで2桁変化する。しかし、これでは、図5-4-2.6の58.8Hzの南北動のように3成分のうちで相対的に大きな振幅をもつ成分においてさえも再現性が見られないことがあるという事実が説

明できない。

以上の考察から、今回の実験における再現性のなさは、計測上の問題ではなく本当に地面の振動が変化したのだと考えられる。既に述べたように、ある周波数が明点になるか暗点になるかは、干渉している波の走時差 $\Delta \tau$ で決まる。 $\Delta \tau$ が $2/f$ だけ変われば、暗点だった周波数が明点になる。また、図5-4-2.8からわかるように、暗点付近では干渉パターンが急峻であるため、さらに微小な走時差の変化が検出できるであろう。こう考えると、高周波ほど速度構造の変化に敏感なはずだが、図5-4-2.6からも分かるように、今回の実験ではむしろ逆の傾向が見られる。これは、高周波になるほど、1回目と2回目のデータ取得の間の時間間隔が小さくなっているせいかもしれない。（図5-4-2.7をみると時間変化は、比較的ゆっくりとおこっている。）他にも、高周波と低周波では、卓越する波の種類と従ってその時間変化のしやすさが違うなどの原因も考えられるが現段階では何とも言えない。スペクトルデータの時間変動についての本実験からの重要な結論は、この時間変動は、地下速度構造の時間変動を反映したものだと考えられ、走時差のある複数の波が干渉していれば、今回の結果のように振幅スペクトルは大きく変わるはずだということである。

● 非線形性

最も近い観測点であるNo.14では、震源周波数の2倍の周波数においても、十分なSNをもつ信号（2次高調波）が観測された（図5.2.10）。2次高調波の振幅はどの周波数帯でも基本波の約1/100程度である。2次高調波の振幅も基本波と同じく干渉パターンと思われる増減を示すが、基本波と2次高調波の振幅の間に特に相関はなさそうである。

さて、この高調波の発生は、送信点側か受信点側かどちらの非線形性によるものなのだろうか？ある非線形システムに基本波が入力され、出力として基本波

と2次高調波が出た時点では、出力の2次高調波の位相変化率は基本波の位相変化率の2倍になるという関係が成り立つ。従って、もし、受信点へ入る時点では基本波しかなく、記録された2次高調波は、地震計、アンプを含めた受信点の非線形ではじめて生じたとすると、この関係を満たすはずである。図5-4-2.11に観測された基本波の位相の2倍にたいして、2次高調波の位相をプロットしたが、そのような傾向は全く見られない。従って、ここで見られる2次高調波は、送信点、もしくは伝播経路の途中で発生してそこから伝播してきたものと考えられる。また、図5-4-2.10を見ると、2次高調波の位相も基本波と同じく、周波数とともにだいたい線形に位相が遅れていき、その周波数依存性は基本波と同程度である。したがって、2次高調波は送信点において発生し、基本波と同程度の走時遅れをもって受信点まで到達していると見て良さそうである。そうであれば、基本波と2次高調波の振幅比は送信点における非線形性を表していると考えることができる。

5-4-2C まとめ

5-4-5 フィールドテストのまとめ

フィールドでの開発的要素を含む作業は、九州地熱、九州電力、地科学研究所などの協力があって、何とか目的を達したものの、現地で発見された本装置の構造上の問題点、計測技術上の問題点などに資材や手直しなどの現地調達を含めた緊急対応を行なうことはかなり苛酷なものであった。しかし得られた貴重なデータは膨大で、その分析はまだ終わっていない。本報告では、これまでに分析した、あるいは分析途上の内容だけを記したが、それだけでも、その内容の意味するところには、地震学にとっても、地下構造の探査学、地下状態の監視技術の発展にとっても極めて重大なものがある。

それは、概括的には次のようにまとめられるであろう。

(1) アクロスシステムはこれまでのいかなる地下構造探査法よりも原理的に優れていることが、データによって示された。あとは、技術的水準の向上が課題になる。

(2) アクロスシステムの H/T 技術の基本はほぼ実現した。あとは愚直な積み上げを行なって、計測系までを含めた性能向上と使い易さの実用性の追及が課題になる。

(3) アクロスシステムではノイズフリーの伝達関数が得られた。これまで見えなかった地下の構造が見える可能性を示したので、地下構造のモデリングとデータ解析法をもっと開拓することが課題になる。

(4) 地下流体を含む地下構造の時間変動を反映すると解釈されるシグニチャーが見つかっている。その時間変動の合理的解釈には、上の(1)と(2)を必要とする。

ここで得たデータをちゃんとした解析しその結果と意義を関係者にわかる状態にまで持って行くには、現スタッフに更に新たに波動論の専門家を加えたチームを編成して全力集中しても、おそらく1～2年は要しよう。事柄によって波動力学の根本問題に触る課題への要請もあり、もっと長丁場の研究に波及するだろう。

また、本研究で浮かび上がってきた問題に振動観測システムの安定化への強いニーズもあるが、これも、根本的解決には数年を要しよう。さらに簡便な車載可搬型震源装置の開発も第一世代の装置を創ってテストした段階であり、おおくの改良点が示された。その改良にも、経費があっても数年の研究を必要としよう。

これらの諸問題を解決したら得られるであろう地下構造探査技術は、多少過大な表現をすれば、革新的なものである。本研究で行ったフィールドテストでは、この予測を具体的なデータに基づいて示すことができた。

山川地熱発電所敷地内に敷設した大スパンアーレー

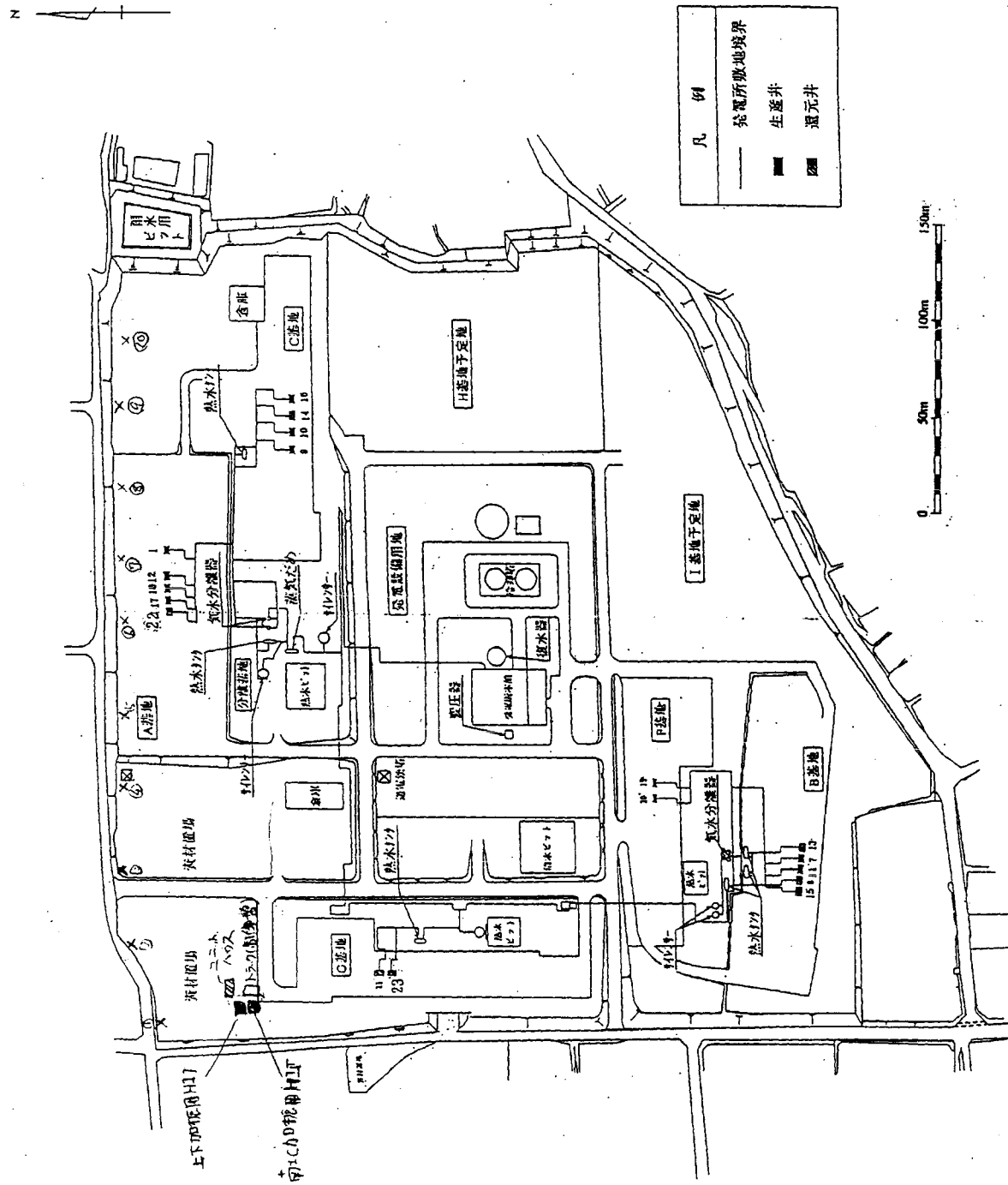
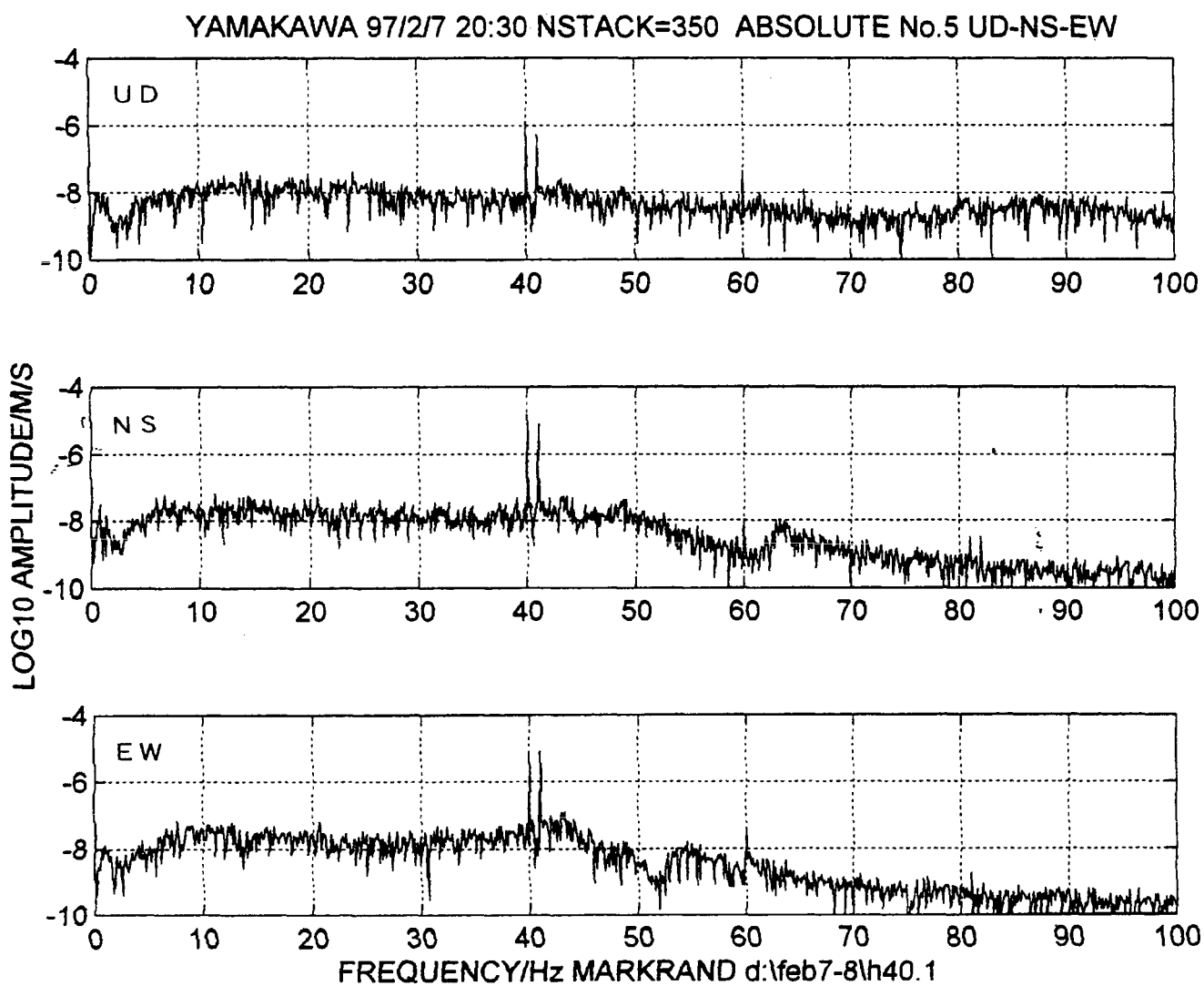


図5-4-2-1

3500秒スタッキングしたデータのスペクトル

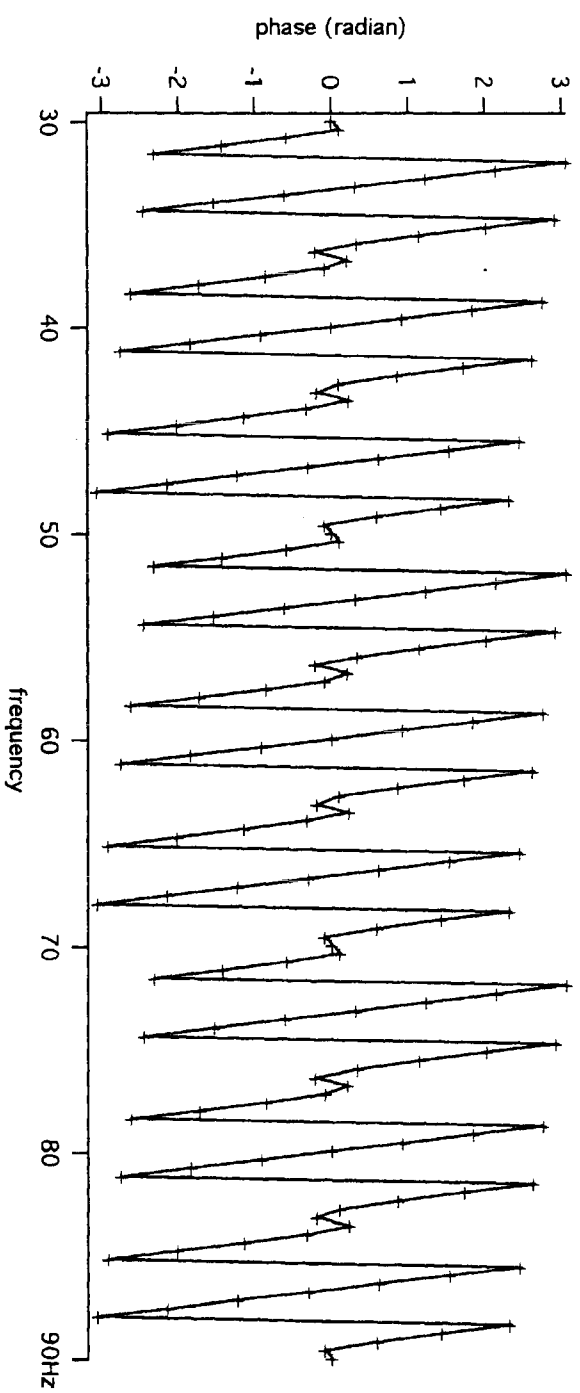
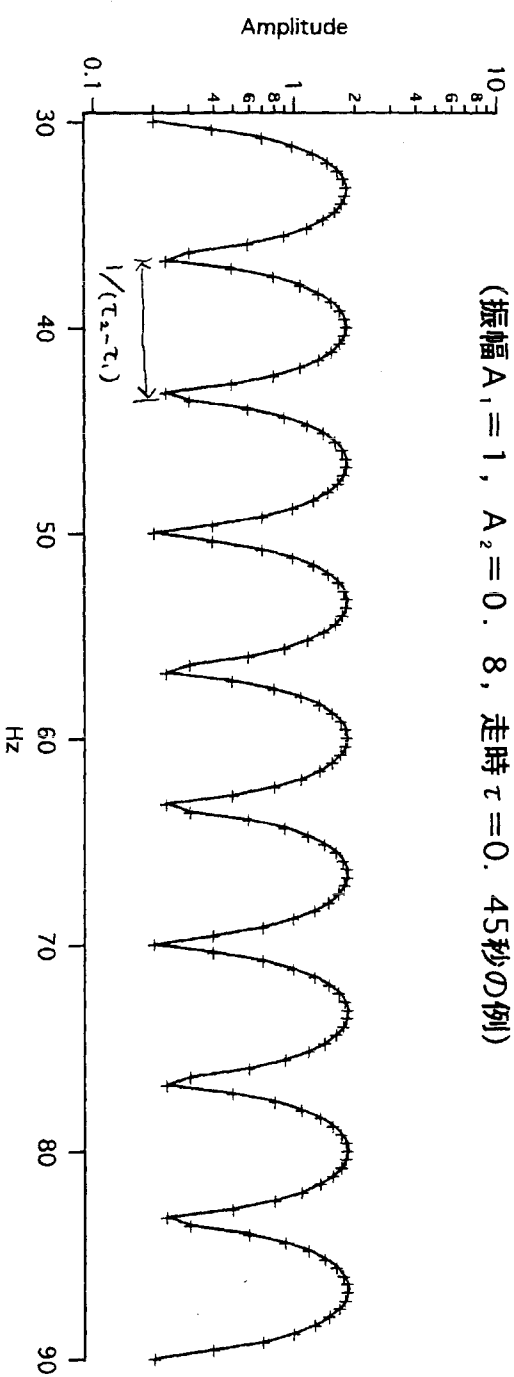
(No. 5地点)

(40Hzで南北加振、41Hzで上下加振)



走時の異なる2つの波による周波数軸上での干渉

(振幅 $A_1 = 1$, $A_2 = 0.8$, 走時 $\tau = 0.45$ 秒の例)



5-5 結論と今後の予定

5-5-1 アクロス研究全体の中に位置付けた本研究の結論

アクロスシステムはもともと地下の構造と状態を精密に遠隔観測しかつその時間変動までを明かにする汎用手法として案出されたものである。ただし、これはこれまでの地下探査法とはかなり異なる概念と手法に準拠しているために、その実用化には相当広範な個別技術の開発とそれらの組織化によって、一つの技術体系としてまとめ上げる必要がある。それには、相当の年月に亘る研究投資を必要とするであろう。

一方、アクロスシステムの適用目標は、浅部の地盤や構造建築物から超深部におよぶ地殻構造の解明一般まで、また、深部の地殻歪とその変動の測地学的遠隔観測から地震や火山発生の際の時間発展のモニターによる地震予知、噴火予知の基礎研究にまで及ぶであろうし、また現時点ではわれわれの思い付いていない応用目的も多数存在するであろう。とりわけ流体を含む多孔質岩石の物性は構造敏感性をもつから、アクロスシステムは、当然、地下流体とそれを含む媒体の状態や挙動の遠隔常時モニターには非常に向いていることは確かである。

上に述べたどのような分野がアクロスシステムの研究と開発実用化に投資しようとも、その成果は他のどの分野にも波及して役にたってしまう宿命の構造になっている。本研究は地下流体のモニターを目標に掲げたが、その具体的な成果として、地下流体のモニターを一つも行なっていない。それにもかかわらず、われわれは確信をもって、本研究は大成功であったと判断している。それは、上の諸節に見るように、本研究によって技術開発の決定的な部分をいくつも突破でき、どのような方向の実用化にも必須の基礎研究としての大きな蓄積がなされたからである。これによって アクロスシステムのもつ潜在力を具体的な形で示すことができた。また、アクロスの実用化に何が基本的に必要なのか、次への課題を極めて明白に示すことができたからである。それらの中には、アクロスアレイによるホログラフィーや、電磁アクロスなど本研究の枠を越えるものもあるので、本報告書には内容を記していないが、地球惑星科学関連合同学会で発表してある。成果発表状況の論文リスト

を参照して頂きたい。

もうひとつの何物にも替えがたい大きな成果は、本研究を通じて若手研究者が何人も育ったことである。

5-5-2 今後の研究開発の方向

そこで、ここでは5-2～5-4節で述べた内容を特にその意義において簡単にまとめ、それに基づいてこの分野の将来の研究方向を要請するという形で示しておこう。

●ノイズ評価とノイズフリーデータ取得の意義

=構造モデリングとデータ解析手法の刷新への要請

アクロシステムでは震源の特性がわかっているので、観測ノイズの確な評価ができることが実証された。したがって、必要な S/N を確保するのに、予備観測を用いて S/N を事前評価することができ、観測条件を適切な設定することができる。その結果、いわば実質的に「ノイズフリー」のデータ取得」が実現できる。本実験で実際に達した S/N はノミナルには 10^3 程度ではあるが、これはもっと上げられる。これは従来の探査方法にはなかった刷

新的な要素である。

従来は観測データを特定の適当な地下構造モデルで解析し、モデルとデータに「モデルがデータに合わないのはモデリングと解析が適切でない」と結論されてしまう。したがって、モデリングとデータ解析をちゃんとすれば、構造はもっと精密に解析できるはずであるということになるので、これまでのように「適当という良い加減」にはできなくなる。即ち、

このアクロシステムの実用化は、モデリングとデータ解析手法に新しい課題を要求したことになる。具体的な例（図5-4-2-6）では、振幅の周波数依存性のデータは、距離による波の幾何学的減衰と物理的エネルギー消

耗減衰のいずれを組み合わせても説明不可能である。本文で非常に詳しくは述べていないが、この原因には、（１）複数の波群の到着による、（２）地下に何らかの共鳴体が存在すること、（３）未知の極めて分散性の高い媒体（従って、減衰の周波数依存性の大きい媒体）が存在すること、などが原因ではなかろうか。これらのうちで（１）は従来の幾何光学的解析を緻密に行なえば解決するであろう（５-３-２節の複素存否セプストラム法がある）が、後の二つの可能性を単純明解に解析する手法は、われわれの知る限りまだ公表されていない。われわれは既にこの方向の研究に着手してはいるが、理論的に困難な問題もありこの分野全体の重要課題として研究推進が要請される。

●震源装置の安定性と精密観測データ取得の意義

＝忠実で安定な観測システムへの刷新要請

前節で詳しくは述べなかったが、同一地点でかなり性能が高いとされている複数の地震計の出力にさえも少なくとも数%以上（ $>10^2$ ）の違いがみられた。通常の地下探査法では、このような違いを地震計の設置場所の違いが地下構造の短波長不均質、すなわち場所による構造の違いなどを反映したものであるとして、無視、または平均操作をすることによって、これを回避することができた。また、同じ場所について観測システムで異なる時刻に得たデータにも数%以上（ $>10^2$ ）の違いがあることは普通のことであった。それは地震計の特性の経時変化、あるいは震源特性の経時変化だとして、これまではそれ以上の考察を放棄することができた。しかし、アクロスシステムのように非破壊的で精密に再現性のある震源装置からの信号を観測しているのだ、という制約があると、観測された時間変動の意味を検討する必要がでてくる。

観測データの変動に考えられる原因には次の二つしかない。即ち、（１）地震計などの観測装置の非忠実度と特性の時間変動、および（２）地下構造の時間変化、である。５-４-２節の観測データの整理でみられた時間変動（例えば、図５-２-４-９）を、われわれが目標としている地下の構造と状態の

変動として解析できるためには、地震計など観測システムの時間安定性（地面傾斜変動、気温変動などの環境変動に対する安定性）が保証されなければならない。本研究の開始時点において、地震計などの計測システムの経時不安定性が問題になるであろう、との予感があったが、それに的確な対応は間にあわなかった。というのは、一台が数百万円という極めて高価な地震計でないと、相応の忠実度がないことはすでに知られており、また、そのような地震計を地表においたのでは敏感すぎて温度変動などに対する環境安定性に欠けることも知られていたからである。本研究において、実際に観測現場で観測データを得た結果として、計測システムの忠実度と安定性への要求が具体的な形で示されたと考えてよい。アクロス震源装置のもつ精密度（時間に換算してマイクロ秒程度）を生かせるためには、われわれの理論評価によれば、振動計測システムには、振幅、位相ともに 10^{-4} 程度の精度を必要とする。このような計測システムの開発を並行して行なうことが求められる。

●波動放射／波動伝播における非線形現象の再発見とその意義

＝震源の物理過程と波動伝播過程における非線形特性研究への要請

すでに行なっていた固定型震源装置による単一サイン波の放射実験で、波動の観測において、高調波が検出されていたので、震源装置、媒体、観測機器のいずれかに非線形特性が存在するものと考えられていた。当然、地震計の利得特性が最も疑われた。5-4-2節で述べたように、本研究における山川の実験においても、この高調波が観測されたが（図5-2-4-10）、その現われ方を調べた結果、地震計など計測システムに存在するかも知れない非線形性だけでは絶対に説明不可能な特長が発見された。即ち、震源の波動放射か波動伝播か、あるいはその両方に非線形的特性が存在しなければならないことが、実験観測によって示されたのである。これまでの震源では媒体の破壊強度をはるかに越える水準の応力が働くので、震源近傍において非線形現象があることは常識である。仮に非線形的な現象が定量的に観測されたとしても、だからと言って何らかの新しい情報を抽出できる訳でもなく、ただそれだけで、われわれはそこで思考停止する以外はなかった。しかし、

アクロス震源装置において地表面カップラー板の挙動を悪い方に解釈し、地面に作用する応力レベルを高く見積っても 0.02 bar (= 20 ミリバール) であって、想定される表度の疲労強度よりも相当低い。したがって、これまでの常識に従うと、非線形的な特性は現われる筈がない、と考えられる。故に、われわれは、まだ知らない現象を発見したのだと判断している。

従来のパルス状震源の場合には応力レベルの推定は、原理的に非常に粗いものしか可能でない。しかし、アクロス震源では、相応の解析によって震源近傍の応力の大きさを厳密に知ることができる。すなわち、波動放射に及ぼす応力振幅の効果を周波数の関数として評価できるのである。このこと自体が、これまで地震学はもちろん物理探査学でも、体系的に研究されたことのなかった波動放射の物理過程研究になり、これらの研究に一つの新しい切り口を開くものである。震源近傍の非線形性を評価して差し引くと（地震計など計測システムのもつ非線形特性は改善または評価して差し引くことは当然のこととして必要である）、波動伝播の非線形性が見えてくるはずである。特に、地下の流体とそれを含む多孔質岩石の物性には、元来著しい非線形的な構造敏感特性があると予測されていながら、それを観測によって検出する精度を得る手立てがなかったのである。これまでは、物性の構造敏感物性の研究も線形化した理論を用い、かつそれを観測するのにも線形化した波動力学を用いてきたのである。それは「技術の水準がその程度にあったから物性理論もその水準に留めてきた」および「理論の水準がその程度だったから、観測技術水準もそれ以上を追及してこなかった」、あるいは「それらの両方より掛かりがあった」ものと見られる。本研究の結果は、次の飛躍への手掛かりを与えることによって、これまでのような妥協的より掛かりを許さず、困難だが重要な研究課題を研究者に突き付けたことになる。

●アクロスシステムが持つ高い潜在力の意義

＝多様な実用目標に対応する高性能で使い易い手法開発への要請

社会的に問題になっている地震予知研究や噴火予知研究などにも原理的に避けては通れない基本的手段であることに加えて、アクロスシステムには、実

に多様な用途が想定される。しかし現状は正に開発途上にあり、われわれア
クロススペシャリストしか扱えない。これが実用化して有用な成果を得るに
は、「馬鹿ちゃん」とまでは言わないが、安価で使い易いシステムにまでの
開発を必要とする。それには、理学だけでなく、工学の研究者や企業などの
協力が必要である。このような開発研究の体制をどのように編成し、どのよ
うに推進するかが、当面の大きな課題の一つである、と言ってもよい。
ここでは、アクロスの持つ潜在力を現実に発揮するために必要な積み上げ研
究と技術開発の課題を次に記しておく。

(1) 震源装置関係

A) 大出力の遠距離送信用震源装置：直径数メートルの円形軌道上を周回
するリニアモーターカー方式。波動の吸収が小さい数ヘルツから20ヘル
ツ程度までの周波数帯で、100トン以上の力を発生し、300キロメ
ートル以上の超遠距離まで地中音波を送信できる装置の開発。

B) 20トン程度の力を発生する標準型震源装置：固定型装置としてす
でに淡路島および東濃鉱山に設置されて試験運転中であるが、振動方向と
発生力の調整が簡便にできる普及型標準ユニットとして安価に供給できる
生産技術を確立必要がある。

C) 可搬型汎用震源装置：5-4-3節でのべたアンチロッキング機能を備
え、かつロッキング共鳴による構造解析にも、また遠地波送信にも、地表
に設置しただけで利用できるものは最も用途が多いであろう。発生力は0.
3トン～10トン程度を想定し、自重10トン程度までの車載型、あるいは
車の重量も利用する専用車両装備型（パイロサイスムの方式）など、
目的別にいくつかの方式が考えられる。

D) ボアホール内設置用震源装置：直径100ミリメートル程度のボーリ
ング孔内でアクロス信号を発信する装置も実用性が高い。電磁駆動方式で
実現可能であるが、震源装置からの排熱や孔内固定方法などに技術開発を
必要とするであろう。

E) アクロスアレイ：上に述べたB)あるいはC)を多数空間配置した
アレイは、指向性の音波ビームの発生震源として、地下構造の精密解析と

そのモニターに決定的な役割を果たすはずである。それは地下の特定領域からの情報密度を上げるホログラフィーを確立するための要素技術である。

(2) 計測装置関係

A) 高安定高忠実度高周波地震計とその設置方式：既存の地震計はアクロス用としては全て性能不足かまたは価格が高すぎて不適切である。アクロス用としては、5 ~ 200 Hz の周波数領域で安定性と忠実度が 10^{-4} またはそれ以上で、かつ非線形性が 10^{-4} FS 以下、自己ノイズが地動ノイズ ($\sim 10^{-6}$ m/s Hz^{1/2}) 以下、デジタル出力方式として、TSS と GPS とのインターフェイスを装備していなければならない。われわれの調査によれば、このような地震計の技術は存在するが、製品として安価に供給されてはいない。またこのような地震計を安定にかつ簡便に設置する手法も技術的にはできるにも関わらず確立されてはいない。これらの開発による供給体制を確立する必要がある。

B) 時間区間蓄積型記録装置：すでに開発した装置で原理的な諸問題はほとんど解決されているが、追加機能として、収録データを多様なメディアを介して転送するインターフェイスを必要とする。また安価に供給できるための標準化（チャンネル数が10程度のものから100、あるいは1000程度のものまで）と生産技術の確立をはかる必要がある。

C) 地震計アレイの確立：これは上の A) と B) の複合技術ではあるが、地下特定領域を走査してその遠隔可視化に決定的と考えられるホログラフィー開発のための基礎要素技術としてそのシステムを確立する必要がある。5 × 5 程度の2Dアレイから100 × 100 × 4程度の3Dアレイなどまで、様々なスケールのものをどのように設計して行くかが大きな研究課題である。

(3) システムとデータ解析技術の確立、その他

A) 一次データの自動取得自動処理システムの確立：アクロスの観測で取得されるデータはフーリエ領域における震源からの伝達関数である。これを自動的に計算機に取り込み、震源での送信位相と時刻のずれ、TSSでのデータ取得時刻の微小なずれ（例えば、マルチプレックサー起因）、地

震計などの特性の理想状態からのずれ、など多数の要素について適切な補正をする必要がある。また振動方向の換算なども必要である。アクロスで得る一次データ量は多いのでこのようなデータ処理は自動的にこなすルーチンプログラムを確立しておく必要がある。また複素存否セプストラム法による走時データへの変換については、最終的馬鹿ちゃんシステムのアルゴリズムは確立していない（誤差処理についてまだ研究課題がある）し、さらに進んだ励起型複素存否セプストラム解析法もまだ研究途上にある。しかしこの水準のデータ処理は自動化できるはずで、これを汎用自動プログラムパッケージまで開発しておく必要がある。

B) 構造解析手法：さらに進んだ地下構造解析については、まだ研究段階のものが多い。従って、最近著しくすすんだモデリング、順問題解析、逆問題解析の理論やアルゴリズムを総合して最適な方式を探る研究を一層推進する必要がある。

C) 地下構造と状態の物理学研究：地震波を用いる地下構造の解析を単に弾性波動力学と幾何光学の問題として捉えていたのでは、地下の物理状態の理解は成立し得ない。流体を含む多孔質多結晶体とその複合物体の物理学を理解し、それから波動で観測可能な諸物理量に変換できなければならない。まだその逆問題が解けなければならない。これに必要な基礎研究にも組織的な研究投資が必要である。

D) アクロススペシャリストの養成：アクロスはまだ開発途上の新手法であるから、常に進展して技術内容も変遷発展している。現時点でいくらルーチン化、汎用化しても本当の素人にはうまく活用できないであろう。原理と概念も従来の物理探査手法とはかなり異なるために、これまでの物理探査の専門家が扱うのにかえってなじみの悪い面もある。従って、いずれにしても新鮮な目をもったアクロスの専門家を育成する必要がある。

5-5-3 今後の計画

今後のアクロスシステムの研究開発方向の選択は極めてむずかしい。というのは、やれば成果の上がる明確な課題の展望があまりにも多数同時に設定で

きてしまったからである。今後の計画立案に困難な問題は、予算と人員の制約にある。限られた予算と人員をどちらの方向に向けるかは、発展性と可能性の幅があまりにも広く、その選択は、いわば、うれしい悩みといったところである。しかし、それを逆に言えば、苦悶する独創的先端技術開発の黎明期にあるということである。

本年度、アクロスシステムの研究に予算があるのは、名古屋大学の地震火山観測センターに数千万円程度、動燃の地下構造フロンティアプロジェクトにも同じ程度に過ぎない。名古屋大学の研究者の人員は他の研究や教育、管理業務との兼ね合いで実質的には極めて少ない。しかも当面の課題は淡路島の野島断層ぞいに設置した固定型アクロス装置を最大限に活用するとともに、地震断層近傍の構造解明のための研究に投資することになっている。地下構造フロンティアプロジェクトでは、ポスドク研究員が2名あるが、すでに設置した固定型アクロス装置の技術的性能向上と計測システムの開発、およびこれを用いた構造解析の研究だけで手いっぱいである。このような状況なので、せっかくここまできた可搬型アクロスシステムの活用による研究は、これまでに得たデータの吟味検討と解析法研究の材料として地道な積み上げ研究を発展させる以上には、停滞を余儀なくされるであろう。結論的に言えば、本研究の実行によって得た成果を地道に熟成させるのが、今後の計画の第一歩である。

今後の計画のうち、その次に来るべきものは、アクロスシステムの開発研究へのもっと組織的な取組である。本研究のチームメンバーの一人は、研究に専心でき指導力のある研究員数名を含む15名程度のアクロス研究組織と年間10億円程度の予算があれば、5年間でアクロスシステムをすべての関連分野の実用的汎用手法として確立でき、日本が世界の地下構造とその時間変動モニター研究の最先端に位置けられる、と公に豪語してはばからない。今後の計画は、研究者サイドだけで検討する枠を越えている、というのが一つの結論である。

5-6 成果発表の状況

本研究に関わる成果発表（46編）は以下のとおりである。

○日本地震学会講演要旨（平成6年10月21-23日、九州大学）

- 1 精密制御音波放射による能動的地下構造常時モニター手法の研究、その1 目的と原理：熊澤峰夫 武井康子（名大理）
- 2 精密制御音波放射による能動的地下構造常時モニター手法の研究、その2 精密制御回転震源設計試作とその評価：武井康子・熊澤峰夫・鈴木和司（名大理）
- 3 精密制御音波放射による能動的地下構造常時モニター手法の研究、その3 波の到達時刻を少数のフーリエ成分から決定する理論：熊澤峰夫・武井康子（名大理）

○地球惑星科学関連学会合同大会講演要旨（平成7年3月27-30日、日本大学）

- 4 弾性波速度構造決定手法の比較検討と精密制御定常震源の意義と展望評価：小川克郎・熊澤峰夫・藤井直之（名大理）
- 5 精密制御定常震源装置の開発：武井康子・難波弘道・熊澤峰夫・鈴木和司・圓尾等*・土屋忠弘*・奥山吉彦*（名大理・*富士電機KK）
- 6 精密制御定常震源装置の開発、その2 周波数と位相の制御：武井康子・難波弘道・熊澤峰夫・鈴木和司・圓尾等*・土屋忠弘*・奥山吉彦*（名大理・*富士電機KK）
- 7 狭帯域多チャンネルスペクトル観測記録装置としての時間区間蓄積記録装置 - TS stacker：熊澤峰夫・山岡耕春・武井康子・大島宏之*・立石博*（名大理・*マークランドKK）
- 8 ACROSS信号のイベント解析と存否ケプストラム理論：熊澤峰夫・武井康子（名大理）

9 想定地震の震源核近傍の状態変化検出の可能性-精密制御定常地震波による速度変化モニター：熊澤峰夫・山岡耕春・武井康子・藤井直之・小川克郎（名大理）

○物理探査学会講演要旨（平成7年6月、日本大学）

10 精密制御定常震源システムの開発（1）全体概念と物理探査への応用可能性：熊澤峰夫・小川克郎・藤井直之・山岡耕春・武井康子*（名大理・*東大震研）

11 精密制御定常震源システムの開発（2）システム：武井康子*・熊澤峰夫・小川克郎・山岡耕春・藤井直之（名大理・*東大震研）

○日本地震学会講演要旨（平成7年9月、静岡大学）

12 精密制御定常震源（ACROSS）の実証実験 1 概要：武井康子*・熊澤峰夫・山岡耕春・鈴木和司・東田進也*・山田守・石川秀蔵・中野優・羽佐田葉子・池田典宏・井上修一・宮川幸治（名大理・*東大震研）

13 精密制御定常震源（ACROSS）の実証実験 2 信号の複素フーリエ係数の決定：羽佐田葉子・武井康子*・中野優・熊澤峰夫・山岡耕春・東田進也*・池田典宏・井上修一・宮川幸治（名大理・*東大震研）

14 精密制御定常震源（ACROSS）の実証実験 3 周波数系列としての伝達関数とケプストラム解析：武井康子*・熊澤峰夫・熊谷博之・羽佐田葉子・山岡耕春・東田進也*・中野優・池田典宏・井上修一・宮川幸治（名大理・*東大震研）

15 複素存否ケプストラム理論とACROSSの観測データ解析のためのアルゴリズムの開発研究：熊澤峰夫・熊谷博之（名大理）

16 小型精密制御震源装置設計試作試験とその特性、および次期実用装置の設計：鈴木和司・石川秀蔵・熊澤峰夫・武井康子*・長谷吉二**・小金井義則**（名大理・*東大震研・**富士電気KK）

17 周波数変調により等間隔離散的な複数の周波数を励起するACROSS：熊澤

峰夫・渡辺誠一郎・山岡耕春（名大理）

18 周波数変調精密制御定常震源の制御方式、および時間区間蓄積型記録装置との同期方式：山岡耕春・羽佐田葉子・中野優・熊澤峰夫・圓尾等*・大島宏之**（名大理・富士電気*・マークランド**）

19 水パイプオルガン：海上反射探査法の精密制御震源：小川克郎・熊澤峰夫・島伸和*（名大理・千葉大理**）

20 ACROSS による野島断層解剖計画：藤井直之・山岡耕春・大井田徹・熊澤峰夫（名大理）

○物理探査学会講演要旨（平成7年10月、新潟会館）

21 水パイプオルガン：海上反射探査法の精密制御震源：小川克郎、熊澤峰夫（名大理）、島伸和（千葉大理）、武井康子（東大震研）

○地球惑星科学関連学会合同大会講演要旨（平成8年3月27-30日、大阪大学）

22 火山の地下構造をさぐるACROSSシステムの開発：山岡耕春・武井康子*・熊澤峰夫・藤井直之・小川克郎・熊谷博之・鈴木和司・渡辺誠一郎・東田進也*・中野優・羽佐田葉子・池田典宏・井上修一・宮川幸治（名大理・*東大震研）

アクロスシステム開発研究の現状報告：熊澤峰夫・藤井直之・小川克郎・山岡耕春・渡辺誠一郎・熊谷博之・鈴木和司・石川秀蔵・山田守・中野優・羽佐田葉子・西原真仁・池田典宏・井上修一・宮川幸治・福和伸夫・石原競・三浦和孝・山田聡・武井康子・東原紘道・島崎邦彦・新谷昌人・中谷正生・東田進也・安藤雅孝・西上欽也・山川稔・坪田浩二・長谷川健・花木達美・圓尾等・長谷吉二・小金井義則・大島宏之・立石博（名大理・名大工・三弘・東大震研・気象庁・京大防災研・動燃土岐・富士電気・マークランド）

○日本地震学会講演要旨（平成8年9月、茨城大学）

- 2 3 SH波発生用アクロスの地表面カップラー(I)：熊澤峰夫・石原競*・鈴木和司・小川克郎（名大・*NEDO）
- 2 4 SH波発生用アクロスの地表面カップラー(II)：石原競*・熊澤峰夫・武井康子**・鈴木和司・山岡耕春・小川克郎（名大・*NEDO・**東大震研）
- 2 5 SH波発生用アクロスの地表面カップラー(III)：石原競*・鈴木和司・熊澤峰夫・山岡耕春・小川克郎（名大、*NEDO）
- 2 6 音波と電磁波のアクロスによる地殻内の水と応力と物理的状態の常時リモートセンシングへむけて：小川克郎・熊澤峰夫（名大理）
- 2 7 精密制御定常震源と時間区間蓄積記録装置のGPS刻時による遠距離同期計測実験：山岡耕春・國友孝洋*・花木達美*・石原競**・池田典宏・羽佐田葉子・宮川幸治・中野優・熊澤峰夫（名大理・*動燃・**NEDO）
- 2 8 回転型ACROSSの周波数安定性：國友孝洋*・石原競**・池田典宏・山岡耕春・熊澤峰夫・小川克郎（名大理・*動燃・**NEDO）
- 2 9 8 精密制御定常震源(ACROSS)の実証実験 4.ケプストラム解析による走時決定：羽佐田葉子・熊澤峰夫・熊谷博之・武井康子*・ACROSSグループ（名大理・*東大震研）

○地球惑星科学関連学会合同大会講演要旨（平成9年3月25-28日、名古屋大学）

- 3 0 ACROSSによる地震波速度構造の時間変化の検出：宮川幸治・國友孝洋*・山岡耕春・熊澤峰夫（名大理・*動燃）
- 3 1 FM- ACROSSの実証実験と最適化：池田典宏・山岡耕春・熊澤峰夫・井上修一・渡辺誠一郎（名大理）
- 3 2 淡路島におけるACROSS探査実験 1.実験の概要：山岡耕春・國友孝洋*・熊谷博之・石原競**・中谷正生**・中野優・羽佐田葉子・池田典宏・宮川幸治

・奥田隆 (名大理・*動燃・**NEDO)

3 3 純粹SH波発生アクロス用ソッチ機構：石原競*・熊澤峰夫・中谷正生
*・鈴木和司・小川克郎 (名大・*NEDO)

3 4 東濃地科学センターにおけるアクロス研究—現状と展望—：熊澤峰夫*・國
友孝洋・山岡耕春*・小川克郎*・花木達美・湯佐康久・中司昇・何培明・青木和

弘 (動燃・*名大理)

3 5 HIT型アクロス(1)震源装置の設計と製作：熊澤峰夫・鈴木和司・石原競*・
中谷正生*・小川克郎・三浦和孝** (名大・*NEDO・**三弘)

3 6 HIT型アクロス(11)地表面カツプラーの力学特性：中谷正生・石原競・熊澤
峰夫*・小川克郎*・長谷吉二**・小金井義則**・圓尾等*・三浦和孝*** (

NEDO・*名大理・**富士電機KK・***三弘)

3 7 電磁アクロス：電気電動度構造解析の新技术：小川克郎・熊澤峰夫・熊谷博
之 (名大理)

3 8 地下構造ホログラフ用アクロスアレイ：熊澤峰夫・武井康子* (名大理、

*東大震研)

3 9 HIT：可搬型ACROSS：小川克郎・熊澤峰夫・石原競*・中谷正生*・國友
孝洋**・藤井直之・山岡耕春・熊谷博之・武井康子***・中野優・羽佐田葉子・

宮川幸治・池田典宏・鈴木和司 (名大理・*NEDO・**動燃・***東大震研)

4 0 回転型ACROSSの精密周波数変調制御：國友孝洋・熊澤峰夫*・山岡耕春*
・石原競** (動燃・*名大理・**NEDO)

4 1 回転型ACROSSの精密制御遠隔操作システム：國友孝洋・山岡耕春*・熊澤
峰夫*・小川克郎* (動燃・*名大理)

4 2 淡路島におけるACROSS探査実験 2.データ解析とその結果：羽佐田葉子・
池田典宏・山岡耕春・熊谷博之・國友孝洋*・石原競**・中谷正生**・中野優・

宮川幸治・奥田隆・熊澤峰夫・小川克郎 (名大理・*動燃・**NEDO)

4 3 地震計の不安定性と精密加速度計測系の開発 - アクロス信号の信頼できる
取得のために：熊澤峰夫・中野優・中谷正生・宮川幸治・山岡耕春・小村英智*・

関淳*・小白井敏明*・新谷正人** (名大理・*リオン・**東大震研)

4 4 分散性波動の解析手法としての複素存否テスト法：熊谷博之・熊澤峰

夫・羽佐田葉子（名大理）

4 5 地震計の常時校正に適した入力信号とそれを用いた校正実験：中野優・宮川
幸治・熊澤峰夫・中谷正生*・山岡耕春（名大理・*NEDO）

4 6 アクロス法による音波物性測定：米田明・羽佐田葉子・熊澤峰夫（名大理）

5-7 購入機材一覧表

移動式精密制御震源装置 一式

震源装置

クレーン付き 4 トン震源車両

発電機

制御電源装置

油冷装置及び給油タンク

高周波ノイズ対策装置

精密制御震源

V 型

S 型

磁気浮上型精密制御震源

地表面カップラー

V 型

S 型

雨・騒音電磁シールド装置

荷重アダプター及び荷重

時間区間蓄積型記録装置 一式

観測用 4 W D 車両

G P S 受信機

時間区間蓄積型多チャンネル記録装置（スタッカー）

小型電算機

テレメーター装置

地震計

計測器類（フィールド用ハンディー加速度計測器等）

6 あとがき

技術開発の一般的な形は

「理論的ブレークスルー」あるいは「偶然的発見」

→ 「基礎研究と開発研究を含む小規模実証実験」

→ 「実用技術への開発研究」

→ 「実用化（製品化）」

の順に進む。

本研究における開発は図6-1に示すような経緯を辿った。名古屋大学の熊澤教授等（本研究グループ員）による本システムの純理論的な着想（ブレークスルー）は平成5-6年度頃であり、平成6年度には大半の理論展開は終わり固定型試験機の製作に取りかかっていた（小規模実証実験）。平成7年度には本研究で開発した可搬型ACROSS/HITの概念設計は出来ていたが、これ具体化する大きな予算を大学では獲得できる可能性は存在していなかった。幸い、本研究が公募提案型最先端分野研究開発として認められ、平成7年11月から平成9年3月の1年半若の期間で実機装置製作、ソフトウェア作成、基本的な実地試験の総ての過程を一通り終了することが出来た（実用技術への開発研究）。今振り返ると、本研究のような装置開発を軸とする研究は、通常なら、少なくとも3年間は必要とするだろう。NEDO派遣研究員を筆頭として多数の優秀で、精力的な研究者、学生が参加することによって時間を短縮することが出来たのは幸いであった。

しかしながら、総てが順調に推移したわけではない。装置開発、実地試験の過程で、本報告書にも記述されているように、数多くの予想していなかった困難に遭遇したことも事実である。それらはある時は時間をかけて本質的に、ある時は対症療法的に対処してきた。現在、未だ本質的には解決されていない課題も残されている。本研究グループは今後もアクロスグループとして活動してゆ

く予定であるので、これらの課題は一つずつ克服して地下を可視化してモニターする一つの技術体系として完成させてゆきたい。

また、本研究で開発したシステムに興味を持つ企業も多いので、技術移転（実用化あるいは製品化）を考えてゆきたい。

最後に、本研究の機会を与えていただいた新エネルギー・産業技術総合開発機構に対して心より謝意を表したい。

更に本研究の実地試験の場所を提供していただき、その上実験に当たってはご協力をいただいた九州電力株式会社山川地熱発電所、並びに九州地熱株式会社にも心よりお礼を申し上げたい。

その他、本研究の実施に当たりご協力いただいた、株式会社三弘、富士電気株式会社、マークランド株式会社、株式会社明豊エンジニアリング、株式会社地球科学総合研究所にもお礼を申し上げたい。

精密制御震源による地下流体
高精度モニタリングシステムの開発

開発の経緯とまとめ

- 平成 6 年度 着想→地震学的理論展開
A C R O S S 装置基本設計
及び超小型試作機製作
(名大理学部装置開発室)
- 平成 7 年度 可搬型 H I T 基本設計
N E D O 公募 → 予算化
H I T 装置ユニット製作
処理解析ソフトウェア開発
- 平成 8 年度 H I T システムアセンブリー
及び鹿児島山川発電所実地試験
電磁リニアモーター型設計試作
及び名大構内試験

研究開発の特徴

- 理論展開→装置開発→実証試験
3 年間は少々きつかった！
- 世界的にも前例の無い研究であったの
でスベッタコロндаの連続であった。
しかし、ともかくも設計性能は達成！
- 真の実証にはまだまだ時間がかかる！
(モニタリングは長期間連続観測必要)
- 現在、企業化の可能性を探っている

7 付録

- 7－1 移動式精密制御回転震源装置の主要な図面類
- 7－2 磁気浮上型精密制御震源装置の主要な図面類
- 7－3 時間区間蓄積型多チャンネル記録装置の主要な図面類
- 7－4 研究発表のアブストラクト

備考：図面類は数が膨大であるのでここでは主な図面類のみを掲載する。

7 - 1 移動式精密制御回転震源装置の主要な図面類

-

契約先 名古屋大学 殿
 最終需要家 同上・理学部 殿
 設備名称 車載形精密制御弾性波送信装置
 (ACROSS-HIT)

O/S No. D42480
 発行日 1997年 2月 7日
 発行元 富士電機(株)
 産業システム事業部

完 成 図

目 次

1.	仕様書	
2.	回転震源装置	
	外形図	SU493271
	組立図	SU345494
3.	制御装置 (FALDIC-IM)	
	製作仕様書	HF5B5001 c
	ノイズ対策・特記事項	HF5A4331
	外形図	HF457840 b
	組立図	HF319244 c
	展開接続図	HF457841 e
	外線端子表	HF457842 a
4.	アクティブフィルタ (FUJIACT-MINI)	
	製作仕様書	HF5B4835 b
	外線端子表	HF5B2944 c
	展開接続図	HF5B4836 a
	外形図	HF457705 b
		HF457706
5.	発電装置	
	外形図	B2-70901-0021
	構造図	S2-70900-0011
	展開接続図	E2-70900-0071
	展開接続図 (発電機)	E2-70900-0051
6.	試験成績書	
	社内試験成績書	
	現地試験成績書	
7.	取扱説明書	
	回転震源装置	
	偏心位置による偏心モーメントと許容回転数の関係	ACROSS-HIT.xls
	電源の操作手順	ACROSS-HIT.pow
	富士サーボシステム FALDIC IM(標準仕様)	MHT238 b
	富士サーボシステム FALDIC IM(特殊仕様)	INR-HF50781 a
	アクティブフィルタ FUJIACT-MINI	INR-HF50934
	加減速演算器 MCA11-RA	INR-HF5820
	パルス絶縁ソック SHC 形	71798, 71790
	発電装置 YAG13S-4~25S-4	

車載形Linear-ACROSSシリーズ

①標準仕様

1.精密制御震源
方式 : Linear-ACROSS方式
緒言 :

数量	偏心モータ	発生力	回転数
2台	0.12kg-m	2.0×10 ⁴ N Max.	6000 r/min

駆動モータ : 3.7 kW 1500/3000 r/min, 4P
形式 MPF003US-21G

2.制御電源装置

形式 : 屋外自立形閉鎖配電盤
入力 : 220V 60Hz, 3φ 3線式
出力 : 2回路-モータ用出力

1回路-計測用電源
モータ・インバータ : 2回路-位置・速度制御用モータ 列入力回路
モータから 1つのインバータをモータに受信します。
加速減速カーブは制御側に制御下さい。

2回路-計測用モータ (A+B相) 出力回路
モータ・インバータからの信号を絶縁して、モータに出力します。
2回路-計測用モータ (Z相) 出力回路
モータ・インバータからの信号を絶縁して、モータに出力します。

3.発電装置

形式 : 屋外サイレール発電機
出力 : 220V 60Hz, 3φ 4線式 13 kVA

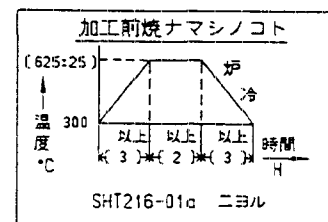
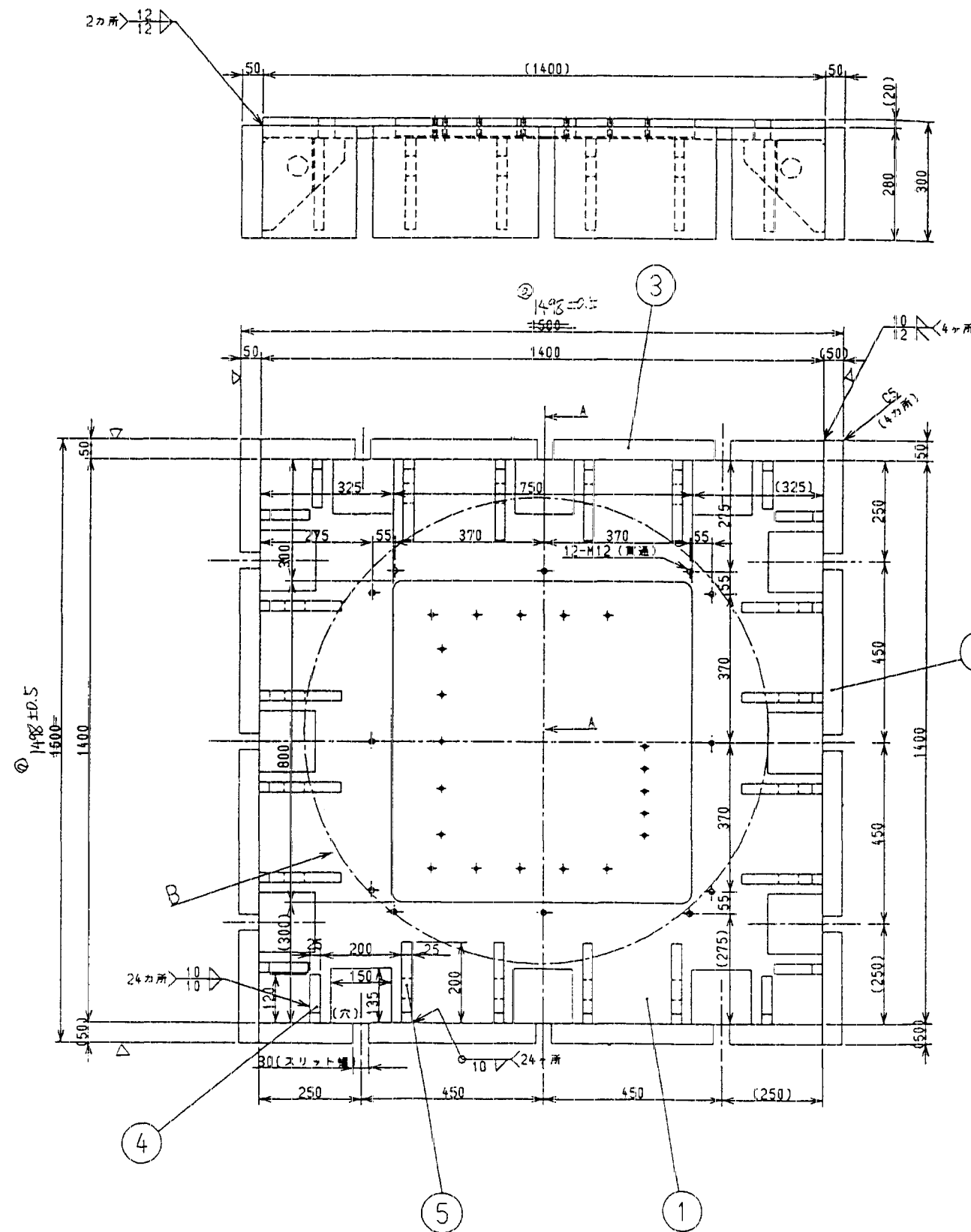
4.高調波対策装置

形式 : FUJIACT-MINI
出力 : 440V 60Hz, 3φ 3線式 10 kVA

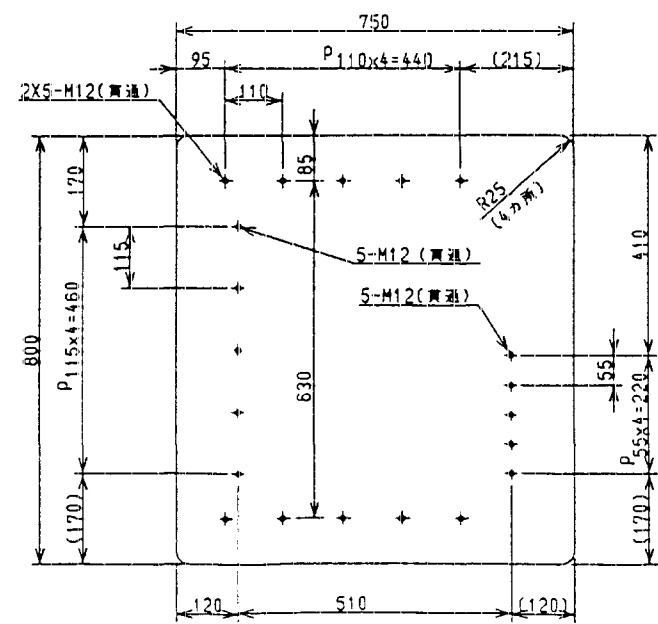
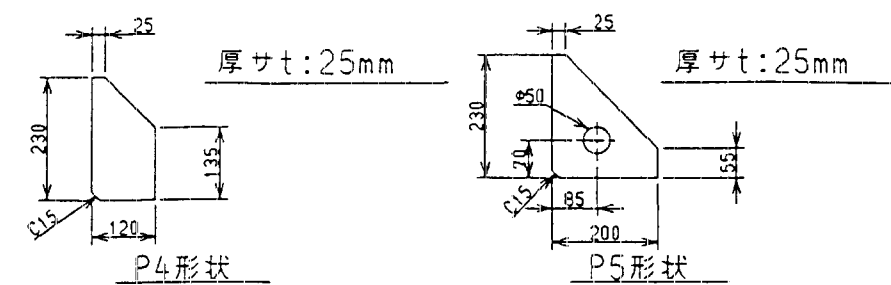
5.その他付属品

(1)荷重アダプタ
(2)精密制御震源用防雨・防音カバー

1	1.0
2	1.0
3	1.0
4	1.0
5	1.0
6	1.0
7	1.0
8	1.0
9	1.0
10	1.0
11	1.0
12	1.0
13	1.0
14	1.0
15	1.0
16	1.0
17	1.0
18	1.0
19	1.0
20	1.0
21	1.0
22	1.0
23	1.0
24	1.0
25	1.0
26	1.0
27	1.0
28	1.0
29	1.0
30	1.0
31	1.0
32	1.0
33	1.0
34	1.0
35	1.0
36	1.0
37	1.0
38	1.0
39	1.0
40	1.0
41	1.0
42	1.0
43	1.0
44	1.0
45	1.0
46	1.0
47	1.0
48	1.0
49	1.0
50	1.0
51	1.0
52	1.0
53	1.0
54	1.0
55	1.0
56	1.0
57	1.0
58	1.0
59	1.0
60	1.0
61	1.0
62	1.0
63	1.0
64	1.0
65	1.0
66	1.0
67	1.0
68	1.0
69	1.0
70	1.0
71	1.0
72	1.0
73	1.0
74	1.0
75	1.0
76	1.0
77	1.0
78	1.0
79	1.0
80	1.0
81	1.0
82	1.0
83	1.0
84	1.0
85	1.0
86	1.0
87	1.0
88	1.0
89	1.0
90	1.0
91	1.0
92	1.0
93	1.0
94	1.0
95	1.0
96	1.0
97	1.0
98	1.0
99	1.0
100	1.0



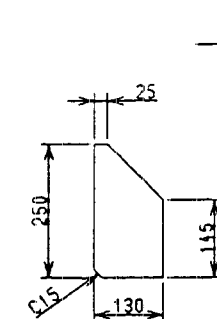
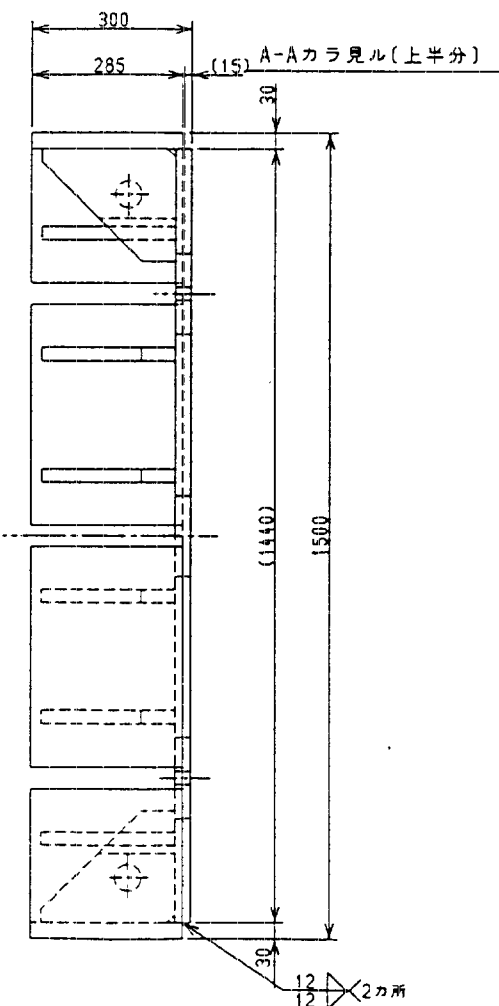
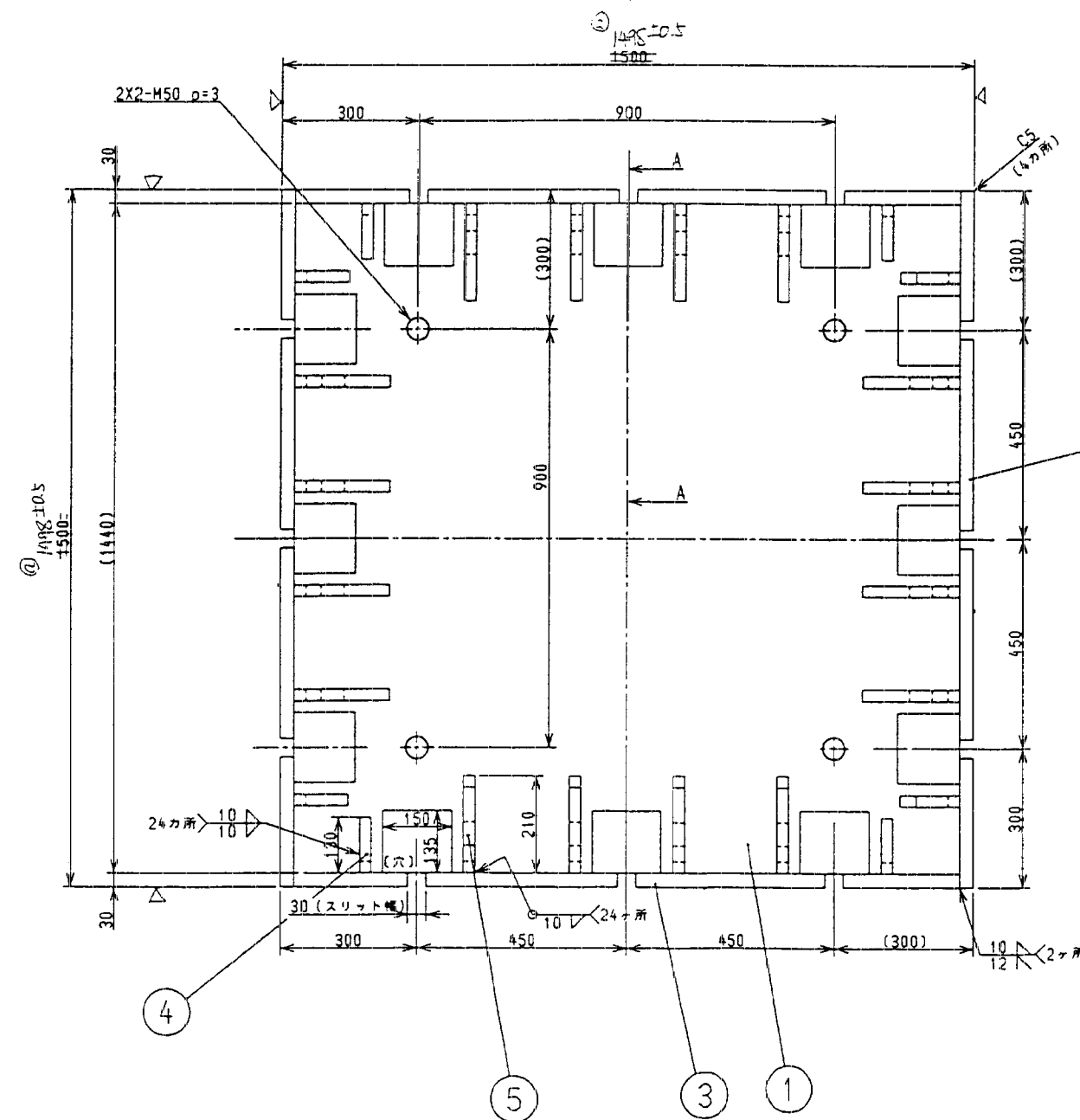
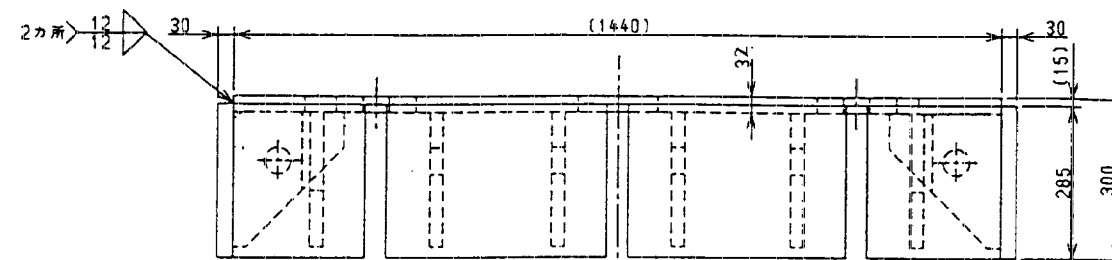
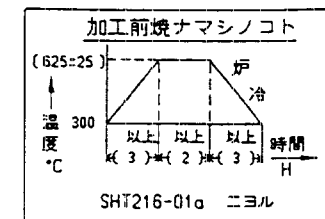
A-Aカラール(上半分)



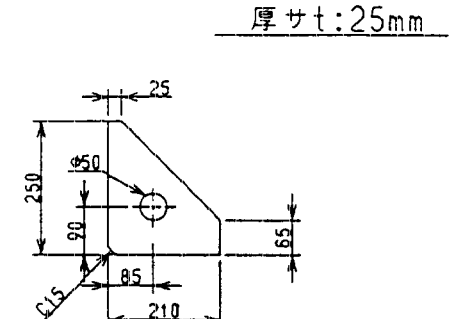
B部詳細

図	名	部	図面番号	材料	寸法又は型番	数量
1	底板	1	JIS	SS400P	50×1400×1400	
2	側板	2	JIS	SS400P	55×280×1500	
2	側板	3	JIS	SS400P	55×280×1400	
8	側板	4	JIS	SS400P	25×120×230	
16	側板	5	JIS	SS400P	25×200×230	

部	名	部	図面番号	材 料	寸法又は型番	質量
1	底板	1	JIS	SS400P	32×1440×1440	
2	側板	2	JIS	SS400P	36×285×1500	
2	側板	3	JIS	SS400P	36×285×1440	
8	側板	4	JIS	SS400P	25×130×250	
16	側板	5	JIS	SS400P	25×210×250	



P4形状



P5形状

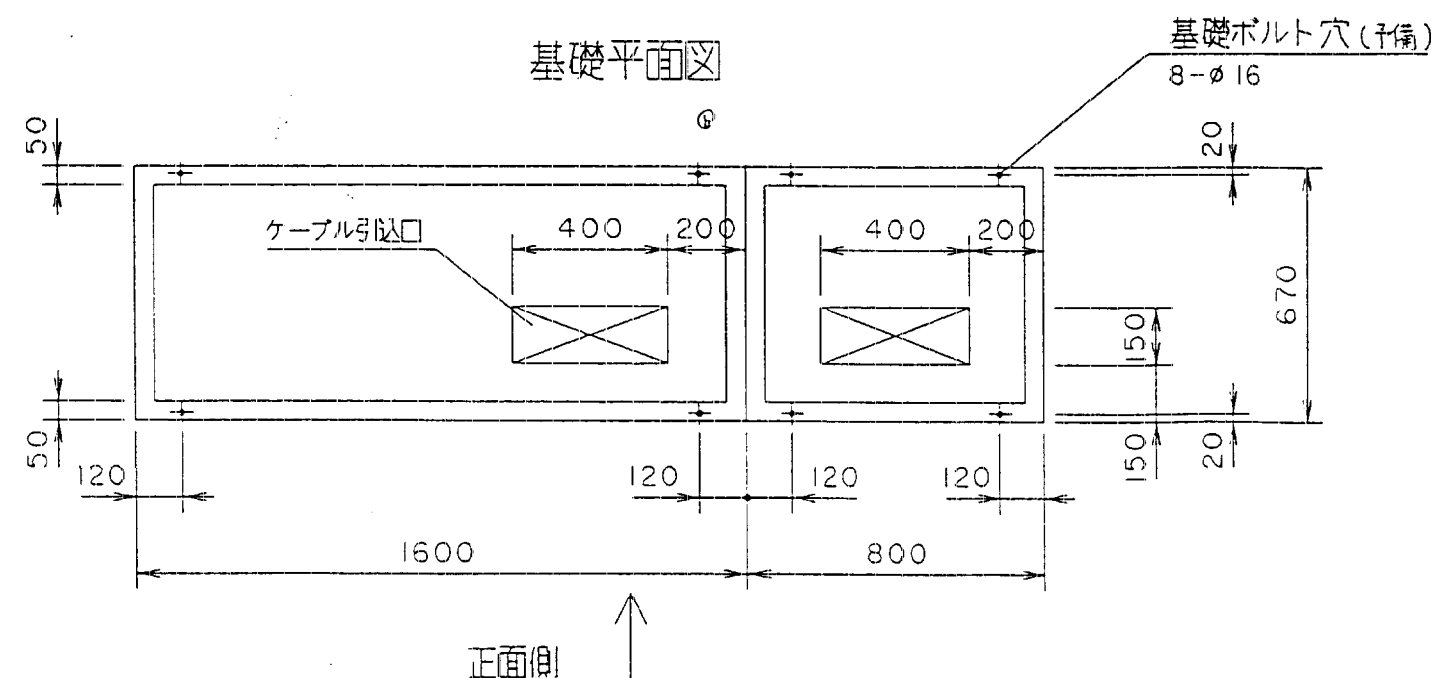
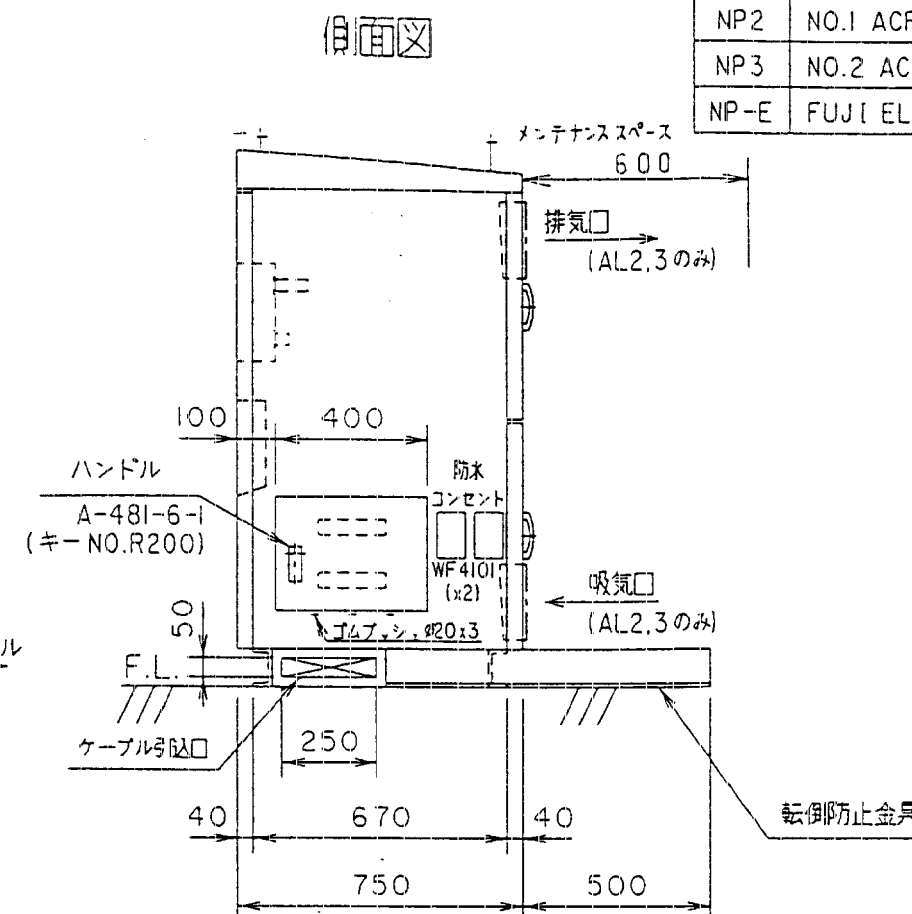
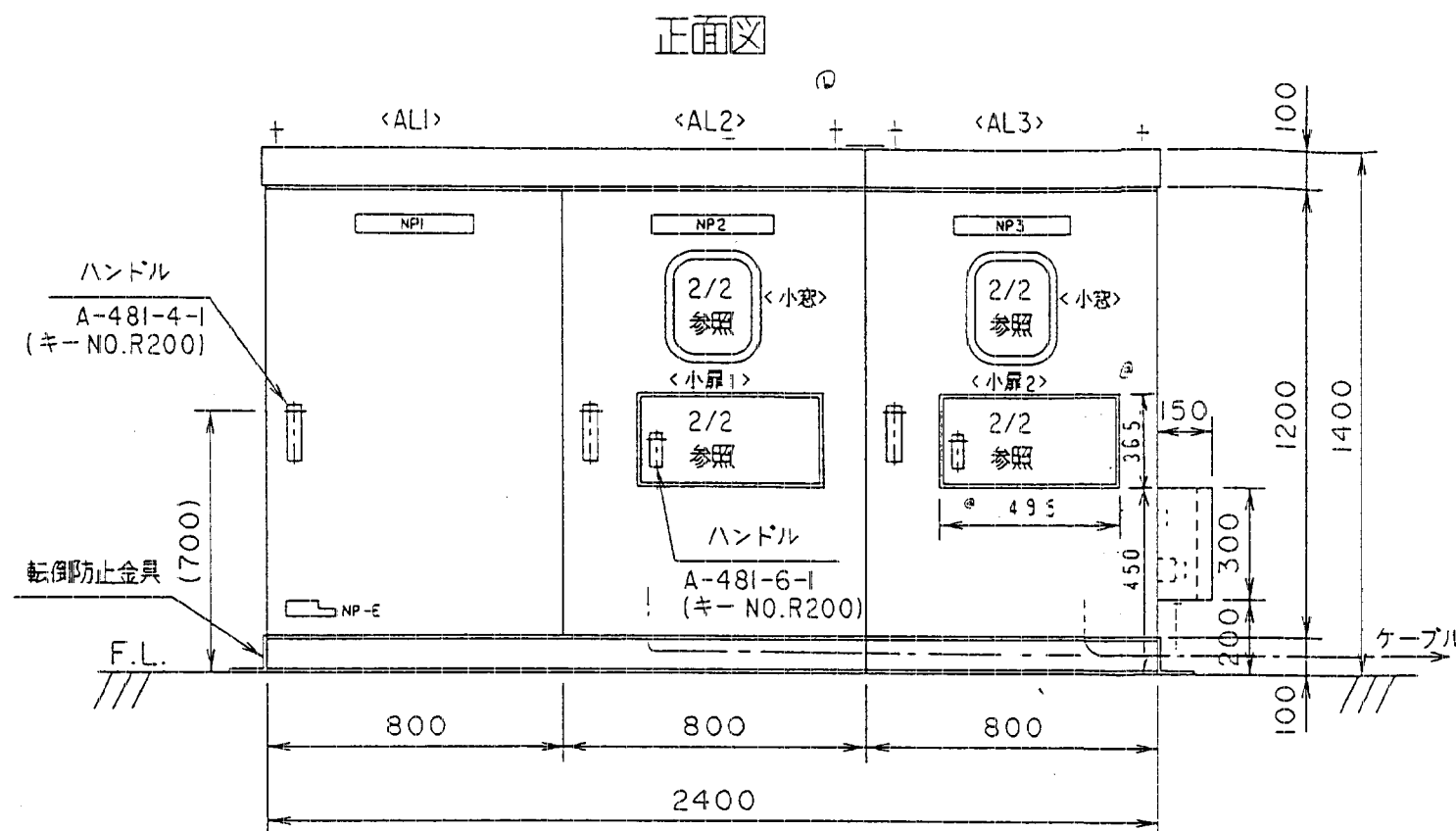
96038408B

093

②式変更	年月日	署名	承認	尺	1/10	名	カプラー(2)	0.2, 1, 3, 11
変更	96.6.23	小倉井	長谷	記				
富士電機株式会社							SU344738	2

This material and the information herein is the property of Fuji Electric Co., Ltd. They shall be neither reproduced, copied, lent, or disclosed in any way, nor used for the manufacturing purposes without the express written consent of Fuji Electric Co., Ltd.

NP.NO.	銘板記入文字	備考
NP1	アクティブフィルター盤	
NP2	NO.1 ACROSS	
NP3	NO.2 ACROSS	
NP-E	FUJII ELECTRIC	



- 記事

1. 形式 屋外銅板製開閉自立形
2. 構造 前面右開き扉 及び 背面吊掛式
3. 塗装色 外面 : マンセル 5Y7/1 半ツヤ
内面 : マンセル 5Y7/1 半ツヤ
4. 製作面数 1 面

Ⓔ

Ⓕ

W.NO.HHD42480 R001

名古屋大学 理学部 殿

確認 76-03-13 A E	REVISIONS	①小扉寸法変更, 996-03-14 永田 洋 田 辻田	DATE	NAME	APPROVED	SCALE 1:20
		②箱分割, ベース分割 削除, 996-04-25 永田 洋 田 辻田				
			DRAWN	1996-02-16	永田 洋 田	
			CHECKED	1996-02-16	辻田	
					辻田	
				</		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

ACROSS 制御盤外形図

車載形精密制御地震波送信装置

DRAWING NO.	DWG CODE
-------------	----------

HF457840 $1\frac{1}{2}$

094

3

3

発電機セツト要目

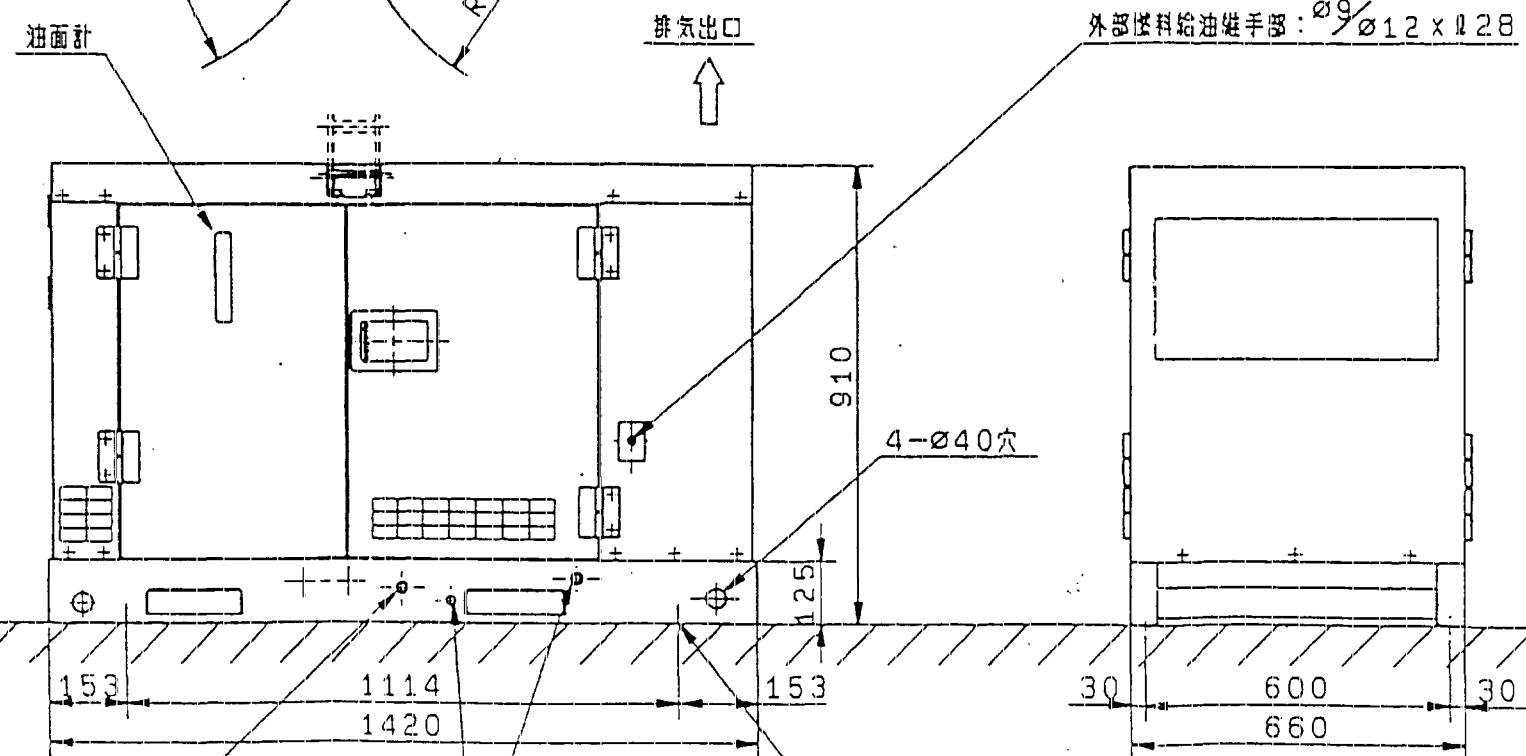
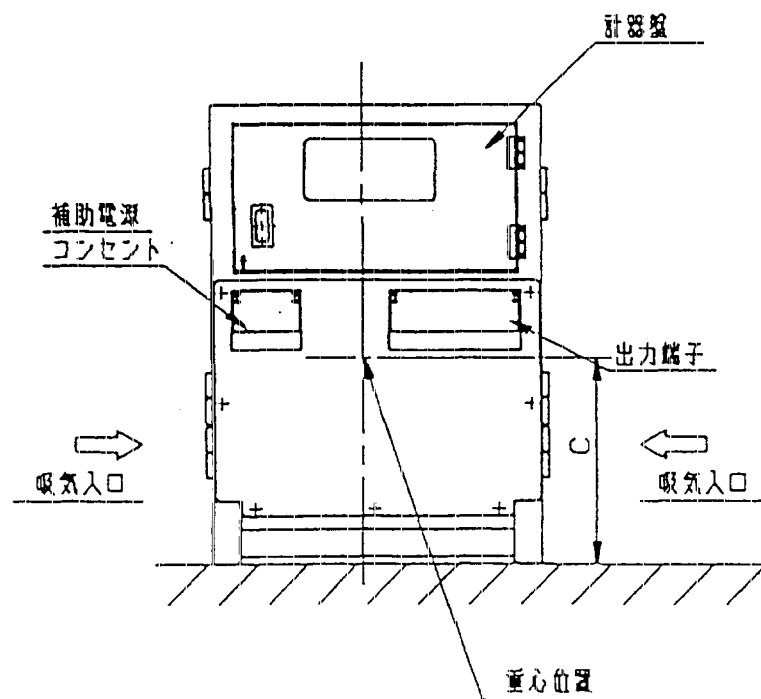
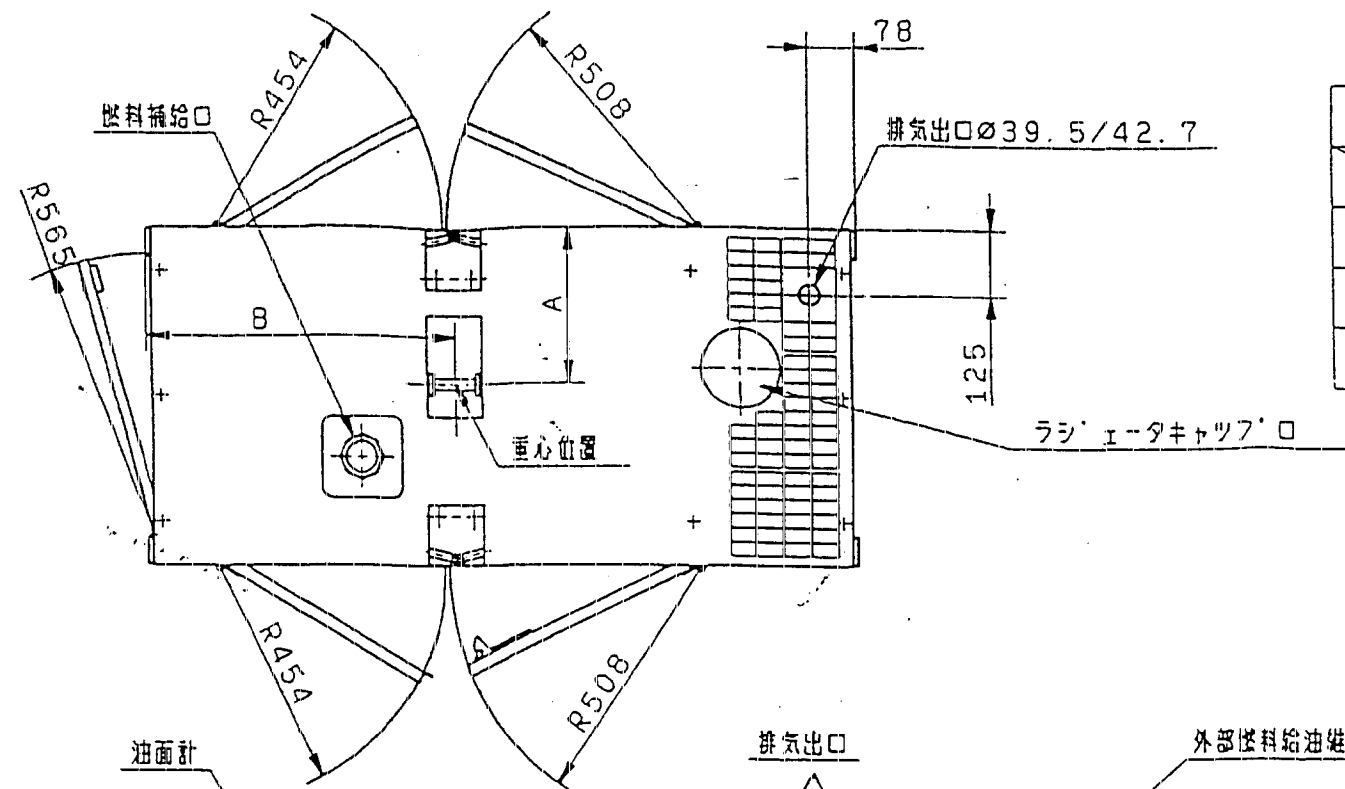
形式名		YAG13S-4	YAG15S-4
周波数	Hz	50/60	50/60
定格出力	KVA	10.5/13	12.5/15
電圧	V	200/220	200/220
電流	A	30.3/34.1	36.1/39.4
回転速度	RPM	1500/1800	1500/1800
力率	%	80	
相数		3 相 4 線	
搭載機関		3TNE84-AGD	3TNE88-AGD
乾燥重量	kg	540	550

形状寸法コード?

GT.CODEM?

真円度・円筒度A、半径法

重 心 位 置		
	YAG13S-4	YAG15S-4
A	305	305
B	610	600
C	410	410



图例		名称 / 比例尺代号	符号
名称	比例尺	代号	
真直线	—		
真曲线			
短			
平面度			
圆形度			
面形			
平行度	//		
垂直度			
倾斜度			
位置度			
同轴度			
对称度			
圆跳动			
全跳动			

素材質量 WEIGHT(RAW)	(土)
完成質量 WEIGHT(製造後)	(土)
其 SEC. MANAGER 仁持	青野
奥田 CHECKED	監査担当 SPECIALIST
設計 DESIGNED 徳留	製図 DRAWN 松田

水圧試験		MPa		エンジニア		部長		検査員	
HYDRAULIC TEST (		kg/cm ²)		ニシ		Q. MANAGER		MANAGER	
空圧試験		MPa		ンシ					
PNEUMATIC TEST (		kg/cm ²)		ンシ					
数量		YAG	YAG			尺数			
MODEL		13S	15S			SCALE		—	
		-4	-4			材質			
重量		—	—			MATERIAL		—	
QTY.		—	—						
名称		ハツテ・ンキカ・イケイス							
NAME		ディーゼルエンジン発電機外形図							
		OUTLINE							

DATE
1994
7

YANMAR DIESEL ENGINE CO., LTD.
ENGINE DEVELOPMENT DEPT.

CODE	B2-70901-0021
------	---------------

$\begin{matrix} \text{A} & \text{B} \\ \text{X} & \text{Y} \end{matrix}$

7 - 2 磁気浮上型精密制御震源装置の主要な図面類

1. システム概要

本装置は微細な地震動の発生を目的とした精密制御震源装置で、動電駆動方式の振動発生機において、可動部に大重量負荷を搭載したとき機器フレームに生じる反力によって、地盤等を励振するものである。振動の制御はすべて電氣的に行われ、広い周波数範囲の振動を安定に発生することができ、震動の大きさも微小地震領域より高震度階まで、任意の地震動を発生することが可能である。

1-1 システム構成

精密震源装置（動電駆動式）	M S E - 4 0 0	1 台
冷 却 装 置	B L W - 4 0 0	1 台
駆 動 電 源 装 置	D A - 4 0 0 0	1 台
励 磁 電 源 装 置	F P S - 4 0 0	1 台
標準付属品		1 式

1 - 2 総合性能と各部仕様

性能

正弦波

最大加振力	400 kgf (3,920 N)
振動数範囲	精密震源装置 5 ~ 500 Hz
最大変位	25.4 mm p-p
最大速度	120 cm/sec
最大加速度	精密震源装置単体
	無負荷時 約 90 G
	10 kg 負荷時 約 27 G
	25 kg 負荷時 約 13 G
	50 kg 負荷時 約 7 G
	80 kg 負荷時 約 4.7 G

$$\frac{F}{W_0 + W}$$

F : 加振力 (kgf)

W₀ : 可動部質量 (kg)

W : 負荷と取付治具 (kg)

ランダム波

最大加振力	280 kgf rms (2,740 N rms)
	(条件: 駆動入力波形 σ=3; 20 Hz ~ 2,000 Hz 周平均スペクトル)

機械的機能

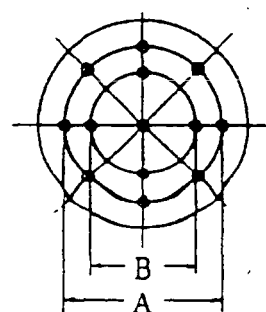
可動部重量	駆動コイル	約 4.4 kg
振動台寸法	駆動コイル	φ 150 mm
試料取付パターン図		

A 寸法 120 mm φ

B 寸法 60 mm φ

試料ねじ穴

12 - M8 - d22



可動部支持	U字ばね, 空気バネ, リニア・ベアリング
最大搭載質量	80 kg
冷却方式	冷却ブロワによる強制空冷

電気的機能

時刻歴	G P S時刻の同期
入力信号	16ビット精度の任意波形
冷却方式	10 μs

冷 却 装 置

3相誘導電動機 出力 1.5KW
静 圧 530mmHg
風 量 13m³/min

駆動電源装置

トランジスタによるスイッチング方式（D級アンプ）
駆 動 出 力 4KVA
結 合 方 式 D.C.（直接結合）
周 波 数 5～500Hz
定 格 出 力 4KVA

励磁電源装置

3相全波整流方式
直 流 出 力 1.5KW

保 護 装 置

○精密震源装置の冷却異常 ○駆動電源装置過電流
○精密震源装置の過振幅 ○駆動電源装置の異常過熱
○外部入力によるシステム停止

寸 法 ・ 重 量

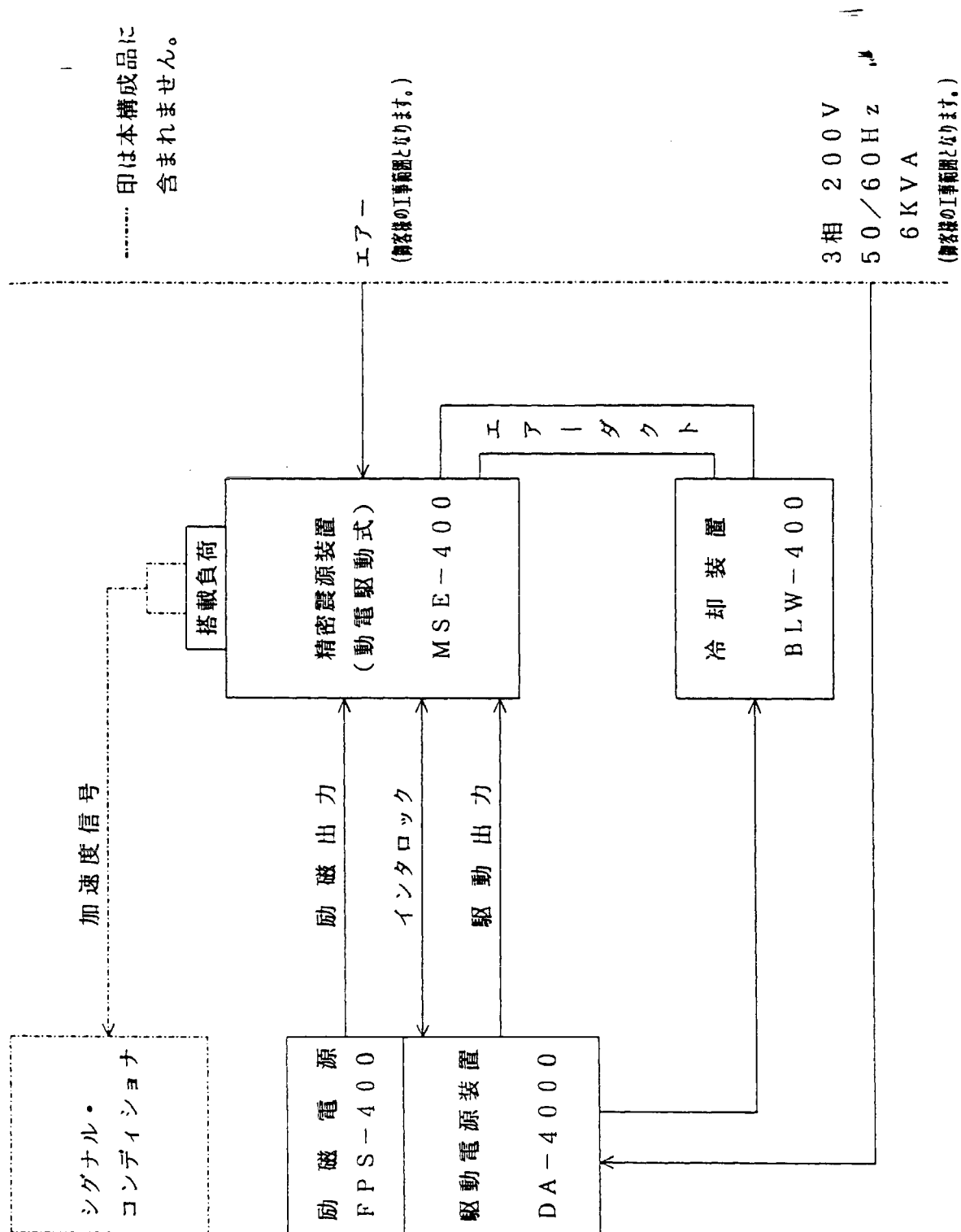
精密震源装置	616(W)×510(D)×665(H)mm	400kg
冷 却 装 置	420(W)×462(D)×480(H)mm	40kg
駆動電源装置	570(W)×750(D)×1,500(H)mm	215kg
励磁電源装置	550(W)×340(D)×450(H)mm	35kg
インテリジェントコントローラ	570(W)×630(D)×1,350(H)mm	90kg

所要電源電圧

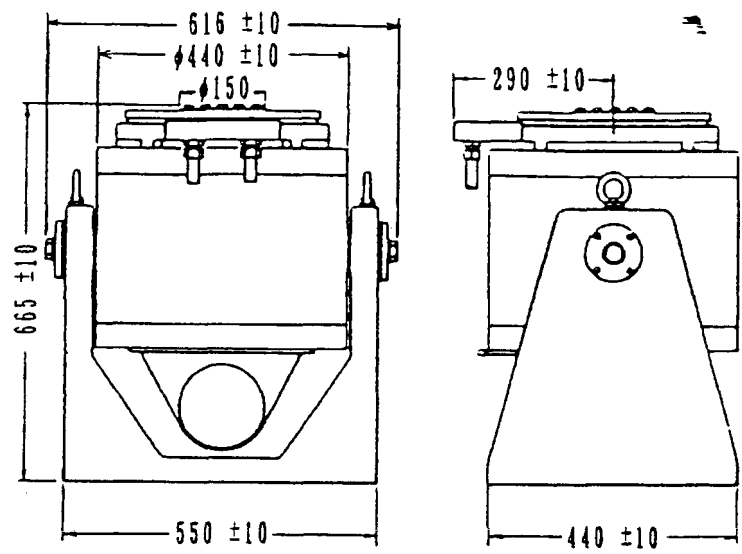
3相 200V

消 費 電 力

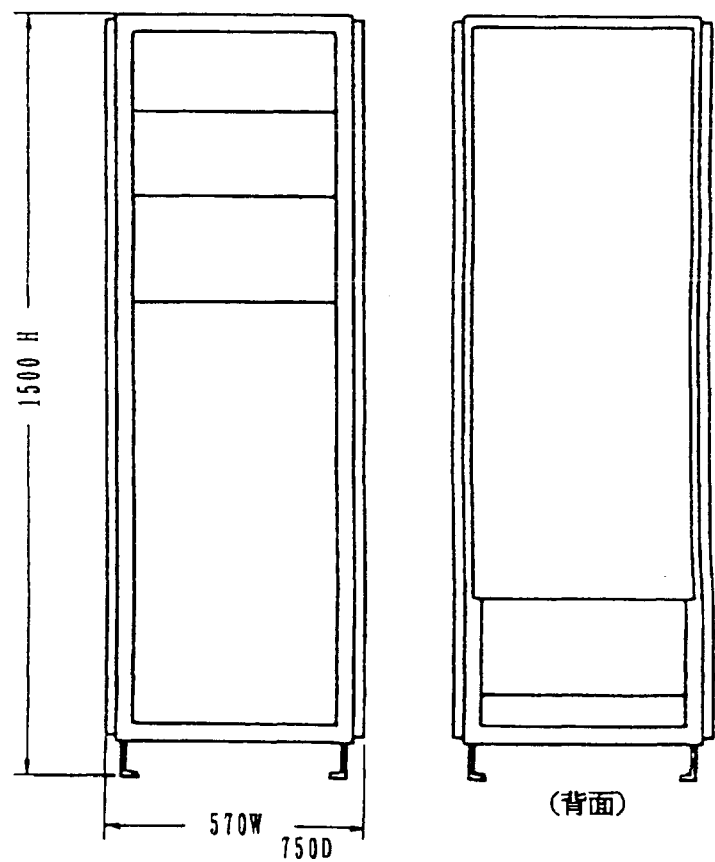
6KVA



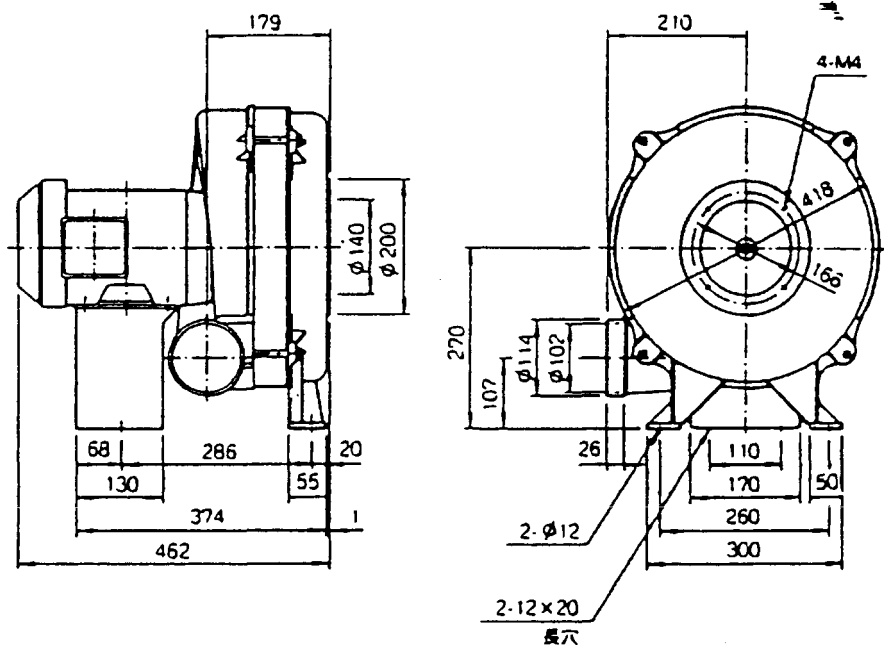
精密震源装置 (動電駆動式) MSE-400



駆動電源装置 DA-4000



冷却装置 BLW-400



MEIHO

磁気浮上型精密制御震源装置

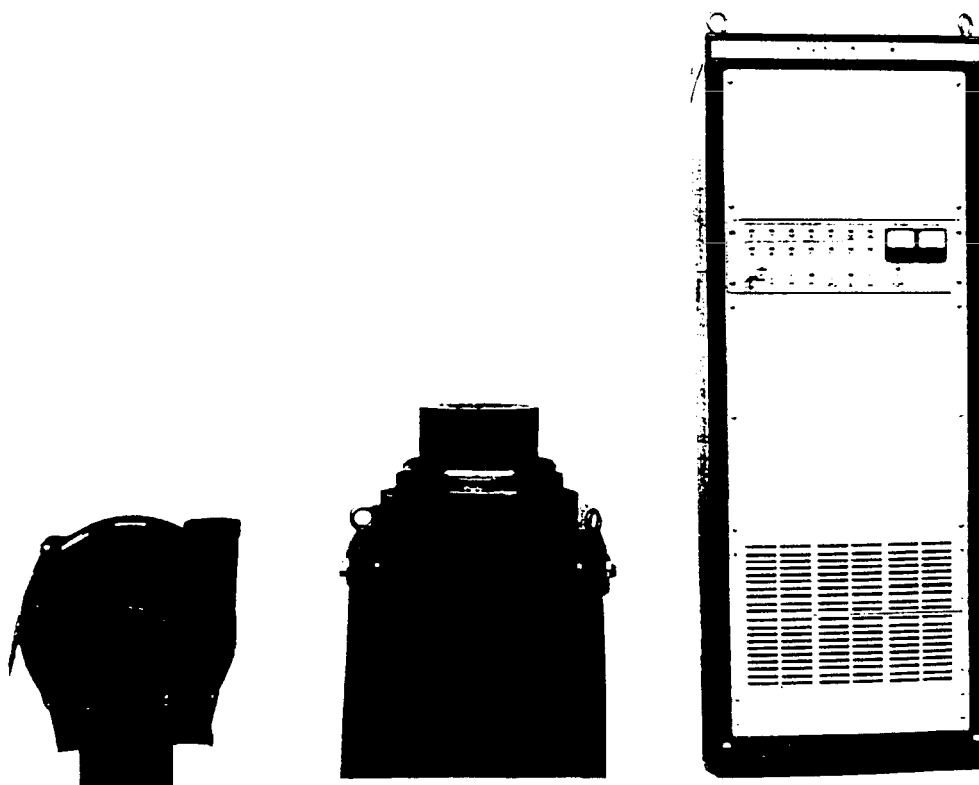
MODEL DVCS-401A

- 正弦波掃引試験等による振動特性把握試験。
- 精密に制御された正弦弾性波を地下に放射することにより地下構造の調査、試験等手軽に各種振動試験ができます。

精密震源装置（動電駆動式）は精密な地震動の発生を目的とした振動発生装置で、動電駆動方式の振動発生機において可動部に大重量負荷を搭載して作動させたとき発生する慣性力を利用して地盤等に振動を励起させることができます。

振動の制御はすべて電氣的に行われ、広い周波数範囲の振動を安定に発生させることができ、振動の大きさも広い範囲で変化させることが可能です。振動の制御は世界共通のGPS時計に同期して行われるよう考慮されています。

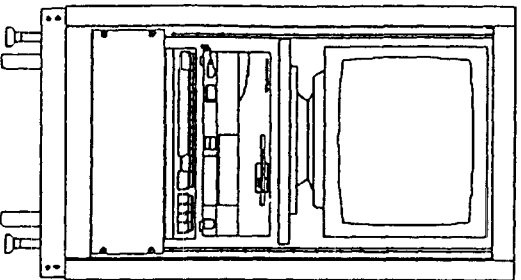
慣性負荷は加振条件にあわせて25kgと50kg 2段階で使用できるよう設計されています。



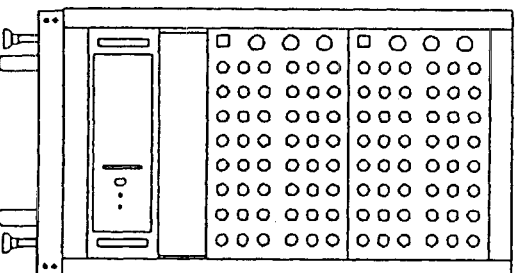
7 - 3 時間区間蓄積型多チャンネル記録装置の主要な図面類

時間区間蓄積型
多チャンネル記録装置

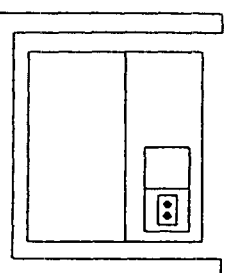
MODEL: SST-1



H:1100xW:570xD:620(85kg)



H:1100xW:570xD:620(90kg)



H:470xW:420xD:555(40kg)

株式会社 三 弘

【主な仕様】

1 : 型 式 S S T - 1

2 : 増幅装置

- ・チャンネル数……………48チャンネル(×2台)
- ・増幅率……………1, 2, 10, 100, 300, 1000倍
- ・入力インピーダンス…1
- ・フィルター……………ローパス
遮断周波数……………500Hz
減衰特性……………12dB/oct, 2次バターズ
- ・電源……………AC100V±10%

3 : A/D変換装置

- ・チャンネル数……………96チャンネル(シングルエンド)
- ・分解能……………16bit
- ・サンプリング周波数…100, 200, 300, 400, 500Hz
- ・絶対誤差……………±0.1%以下
- ・転送方法……………DMA
- ・システム同期方式…GPSクロック10MHz
- ・電源……………AC100V±10%

4 : データ処理計算機(NEC PC9821Xa13/K12)

- ・CPU……………Pentium 133MHz 16KB
- ・メモリ……………16MB
- ・電源……………AC100V±10%
- ・マルチディスプレイ…PC-KM174

5 : 無停電電源装置

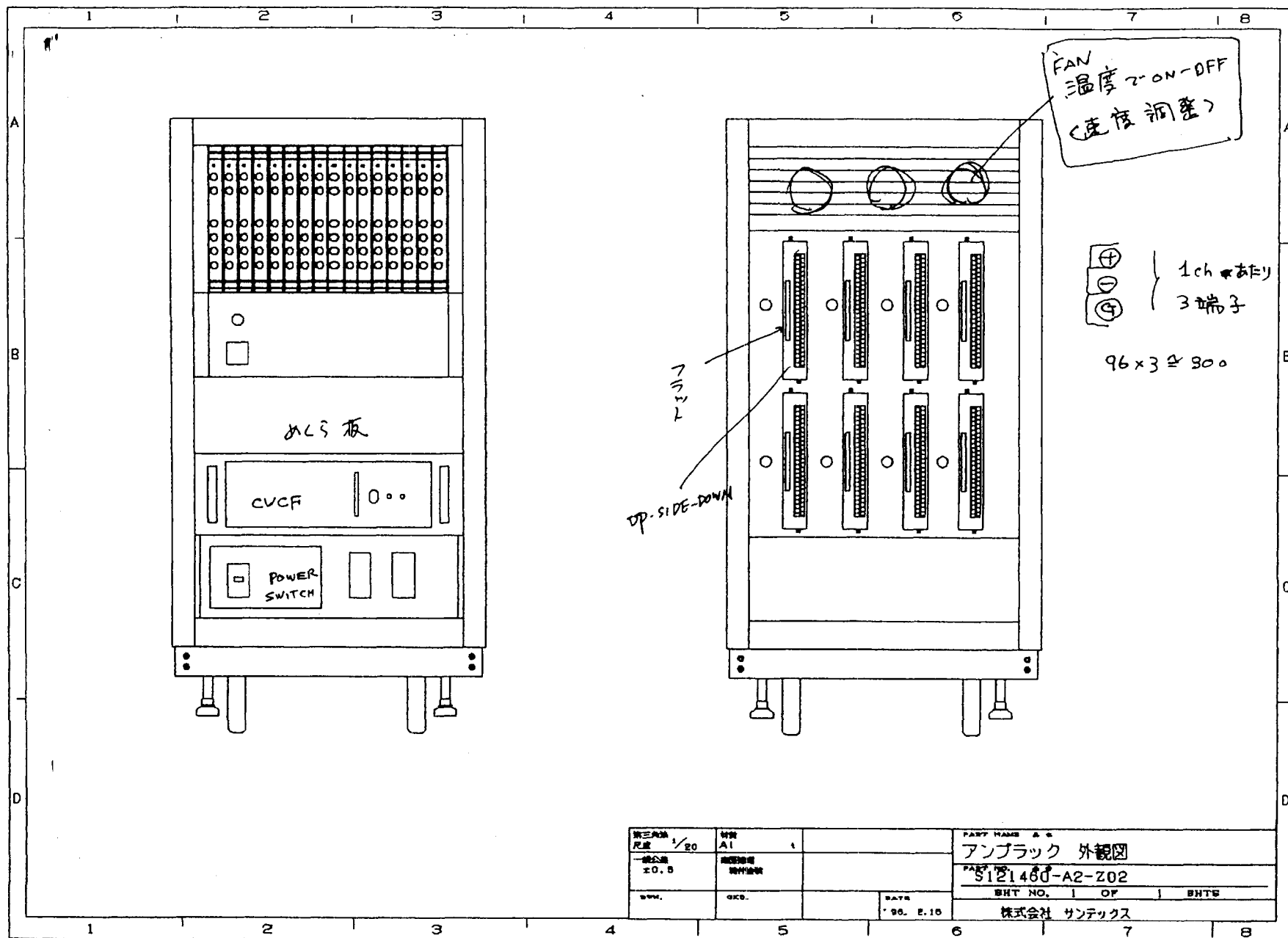
- ・給電方式……………商用同期常時インバータ方式
- ・入力電圧……………100V+15%-10%
- ・出力電圧……………100V+2%
- ・バックアップ時間…10分(20℃ 700Wにて)
- ・充電時間……………約12時間

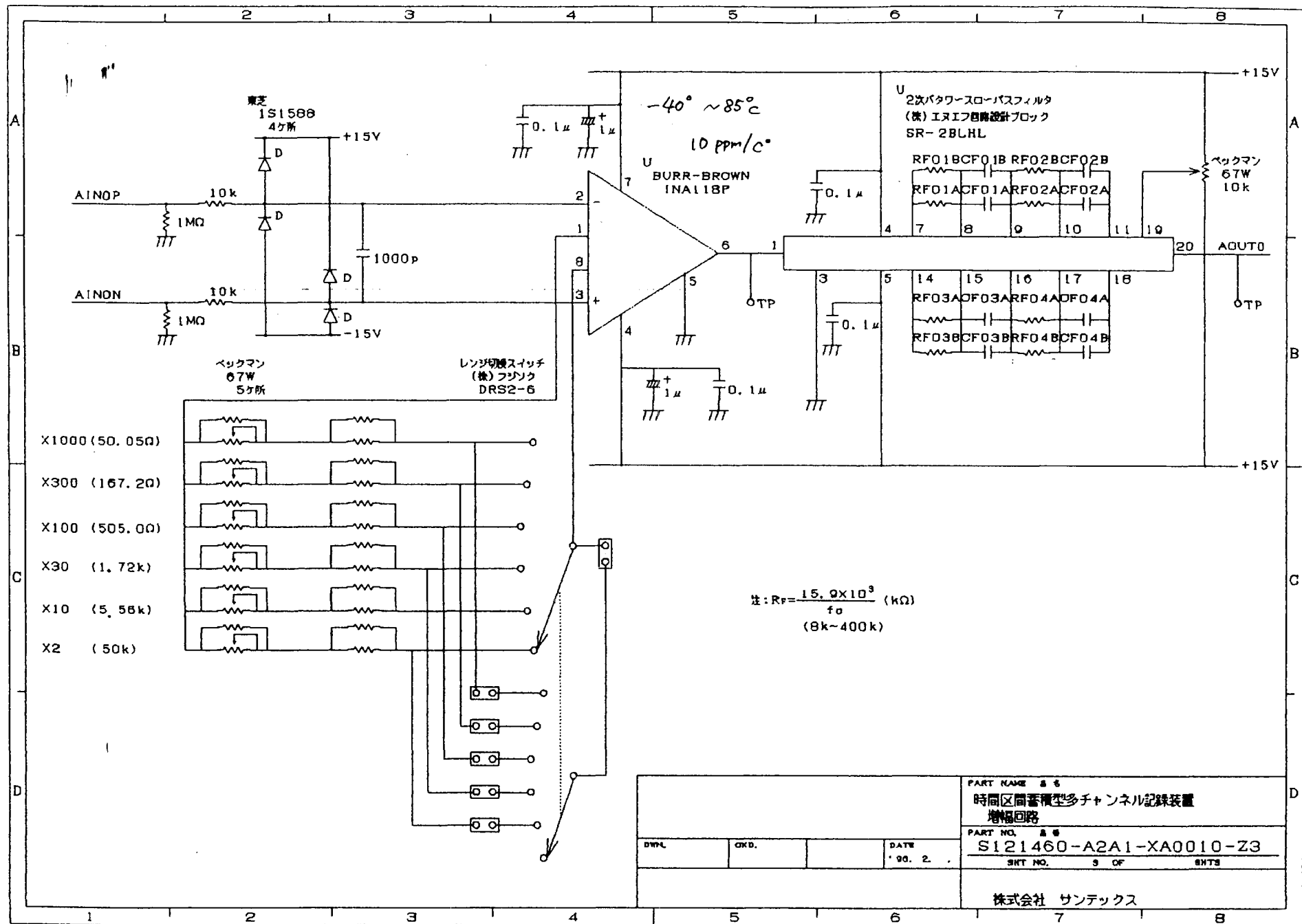
6 : 発電機

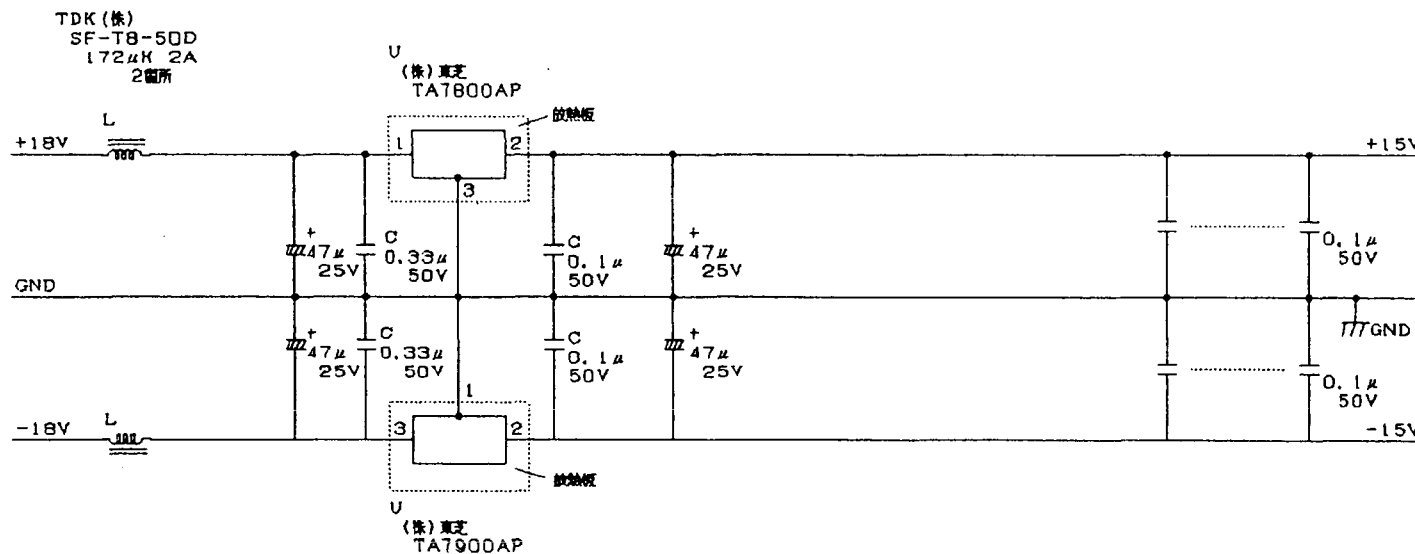
- ・出力電圧……………AC100V 1.5KVA(60Hz)
- ・連続運転可能時間…約6.2時間
- ・燃料タンク容量……………7.4[1]
- ・防震ゴム……………1000×100×15mm×3枚

7 : 重 量 約220Kg(装置一式)

※※本仕様は予告なく変更することがあります※※







				PART NAME 品名 時間区間蓄積型多チャネル記録装置 増幅回路	
				PART NO. 品番 S121460-A2A1-XA0010-Z3	
				SHT NO. 2 OF SHTS	
				株式会社 サンテックス	

J1
オムロン(株)
XG4M-1630

1	AINOP
2	GND
3	AINON
4	GND
5	AIN1P
6	GND
7	AIN1N
8	GND
9	AIN2P
10	GND
11	AIN2N
12	GND
13	AIN3P
14	GND
15	AIN3N
16	GND
17	AIN4P
18	GND
19	AIN4N
20	GND
21	AIN5P
22	GND
23	AIN5N
24	GND
25	(NC)
26	(NC)

-P1

J2
オムロン(株)
XG4M-1630

1	AOUT0
2	GND
3	AOUT1
4	GND
5	AOUT2
6	GND
7	AOUT3
8	GND
9	AOUT4
10	GND
11	AOUT5
12	GND
13	(NC)
14	(NC)
15	(NC)
16	(NC)

-P2

J3
日本モレックス(株)
5277-03A

1	-18V
2	GND
3	+18V

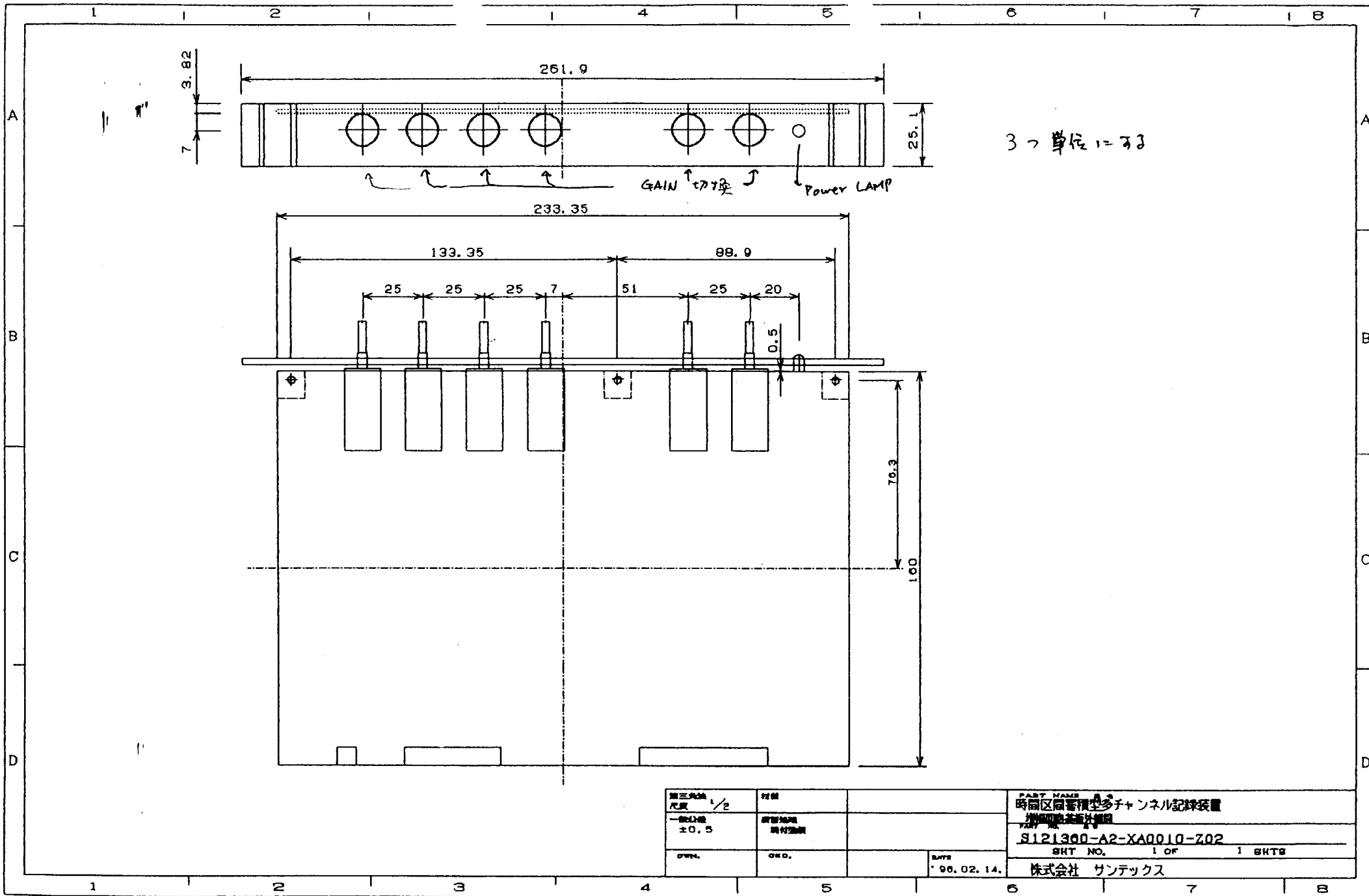
-P3

地震計539
2ネジ

1ch 4本 → 3本へ変更

				PART NAME 品名	
				時間区間蓄積型多チャンネル記録装置 増幅回路	
				PART NO. 品番	
				S121460-A2A1-XA0010-Z3	
				SHT NO. 1 OF 8	
				株式会社 サンテックス	

111



7-4 研究発表のアブストラクト

-

その1 目的と原理

熊澤峰夫 武井康子 (名大理)

Active method of monitoring underground structures by means of
Accurately Controlled Rotary Seismic Sources (ACROSS). 1. Purpose and principle

Mineo Kumazawa and Yasuko Takei (Nagoya Univ.)

地下の地震学的構造の解明は内部を伝播する弾性波の観測とそのデータ解析に基づく。そのための弾性波源として、精密制御回転震源を提案し、その原理と開発研究の現状を報告する。

1、主旨と目的

地震噴火予知研究において決して避けては通れない基礎は、イベント発生域とその周辺における地下3次元構造(様々な要因を含む)の精密な決定とその微細な経時間変動を観測的に常時把握することであろう。能動的な観測とは、人為的に制御した何らかの波動を対象に照射しその応答を観測することである。充分大きな爆破による人工地震が高い頻度で何処でもできれば問題はないが、人口稠密な地域では、時(予算やテクノロジーの進歩)を待ってもできるようになることはない。そこで、これまでとは発想を変えた別の新しい方法の開発が求められる。この要求を満たす一つの方法が、精密に制御した定常的な単色震源を組み合わせたアレイとそのネットワークから多チャンネルの弾性波を放射し、その振動を時間区間蓄積型地震記録方式によって観測するものである。この方法は、常時観測の継続によるデータの蓄積が、(1)地震学的地下構造の解明とその精密化に直接役立つ、および(2)構造の時間的(相対的)変動モニターになる、という実用的な特徴を持っている。

2、単色非破壊的震源とその組み合わせ

通常の制御震源(例えば、爆破、エアガン、パイロサイスムなど)のエネルギーを小さくすれば非破壊的になるから、人工密度の高い日本列島でも使えるが、地動ノイズ以上の信号の観測は難しい。そこでつぎの二つの要因; O/I =(音波の放射と投入のエネルギー比)及び S/N =(信号と雑音の振幅比)を同時に最大にする方法を検討した。理論的には「エネルギーを、時間座標上に局在させるパルス的なものでなく、周波数座標上に何点か局在させること」(人為構造物の共鳴は避ける)と結論される。従来方法では、トランジェントな震源からの伝播波形信号を観測するのに対して、この方法は、複数の定常的なサイン波を使って、フーリエ変換を直接観測するものである。

3-1、送信側:精密制御回転震源(ACROSS)

震源近傍で消費するエネルギーを最小にするため、(1)近距離でほとんど減衰してしまう50Hz以上の高

い周波数成分を除き、(2)波動放射のニアフィールドモードの励起効率を最小にする力源を選択する。高い周波数成分は単に役に立たないだけでなく、そのエネルギー吸収の結果、震源近傍の衝撃破壊と疲労破壊に使われ、震源の定常性を損なう。原理的に可能なすべての力源のうちで最も波の放射効率が高いのはシングルフォースであり、等方的震源(爆発)に比べて 10^3 以上(=波長/震源寸法)大きい。振動公害を起こさない水準の小振幅の単色振動を経常的に発生させることによって、エネルギーは時間的に分散希釈されている。

3-2、受信側:スタッキングによるS/Nの改善

フーリエ変換を観測するのであるから、観測量は振幅と位相だけである。今特定の周波数の波だけについて考える。信号周波数を精密に制御して狭帯域にすれば、地動雑音は帯域に比例した振幅をもつので、 S/N は上げられる。白色ノイズの変位振幅を N (m/Hz)とし、振幅が S (m)で周波数 f (Hz)の信号を周波数幅 Δf (Hz)で時間 T (s)のスタッキングをすると、実効的な S/N は $(S/N)(Tf)^{1/2}/\Delta f$ になる。 f を精密に制御して Δf を 10^3 Hz程度に小さくし、 T を長く10日間(=10⁶s)とすると、 S/N の改善は 10^6 になる。

3-3、全体の効果

送信受信両方の効果を総合すると、単発爆破にくらべて S/N は 10^9 大きい!このように、現在試作中の超小型装置でも、低周波領域の S/N は充分ではないが、数Hz以上では10km程度の距離まで確実に信号が観測できると予測される(その2参照)。

4、理論とその実用化

理論的には、この方法で仮にDCから0.1Hz間隔で51.2Hzまで512個のサイン波についてフーリエ成分を観測しそれをフーリエ変換すれば、パルス震源からの波形データを得たこと等価になるから、この方法はハードウェアと実務の面で非現実的にみえるかも知れない。しかし、本報告のその2以下の一連の発表で、(1)ここで提示した原理を実用化するのに必要と想定されるハードウェアの諸問題はほとんど現実的に解決され得ること、(2)地下構造が単純なら、わずかな数(10以下)のフーリエ成分の観測で地下構造解析に必要な精密な情報が得られること、および(3)ここで提案する方法の実用化は比較的容易で、将来への大きな展望があること、を示す。

その2 精密制御回転震源の設計試作とその評価

○武井康子 熊沢峰夫 鈴木和司 (名大理)

Active method of monitoring underground structures by means of accurately controlled rotary seismic source(ACROSS). 2. Designing and specification of the ACROSS.

Yasuko Takei, Mineo Kumazawa and Kazushi Suzuki (Nagoya Univ.)

日本列島の地下の状態を観測するための弾性波源で、非破壊的で常時何処でも使用できる音波送信源として精密制御回転震源装置 (ACROSS) を設計製作しそのテストを行なった結果を報告する。

1. 基本原理

一定の周波数を持ったシングルフォース源として原理的に最も単純明快容易な方法は、一定の軸の周りに質量 M を回転させるものである。この時、発生するシングルフォースの大きさは、

$$F = MR\omega^2 \quad (1)$$

で与えられる (R は回転半径、 ω は回転周波数)。小型なら普通のモーターの軸におもりを非軸対称に取付けられよい。大きな力を発生させるには、装置の材料と地盤の強度以下の応力で受けとめ、破壊が起こらないようにする必要がある。もし巨大なものが必要になれば、円形軌道上を重量物が高速で走る構造になるだろう。その両者の中間では、通常のモーターと逆に回転子 (重心が偏心) と軸受けが外側にあるモーターを作ればよい。

2. 設計の要点

本研究で開発した試作装置は、二人で持てる重量という制約のもとに上記のアイデアを具体化したものである (図1)。本装置の規模は、(1) 式に現われるファクター MR を用いて $MR \sim 1 \text{ kg m}$ と表せる (M は最大 20 kg 、 $R \sim 0.07 \text{ m}$)。

偏心による振動を極力避ける通常の機械設計と異なっており、本装置は振動させることを目的としており、設計に際してはモーター本体に加わる加速度を減少させるための工夫がなされている (モーターの軸と偏心質量の取付け、およびモーターと装置外枠の取付けにリニアステージを介した)。モーターはデジタル制御のパルスモーターを用いており、 $\Delta f \sim 10^{-3} \text{ Hz}$ の周波数制御は容易である。精密に制御された地震波を地下に送信するためには、装置と地盤のカップリングが重要である。本装置のテストでは、地盤に深く固定された杭に取付けて運転する。

3. 予測される波の到達距離

図2に震源からの距離 $r = 1, 10, 100 \text{ km}$ でのシグナルの大きさを S/N 比で示す (10日間スタッキングしたものを示す)。ACROSSの周波数は 10^{-3} Hz で制御されているとし、ノイズの振幅は 10^{-3} Hz の帯域幅で計算した。伝播経路の地震波の減衰は $Q = 100$ として計算した。本装置 ($MR \sim 1 \text{ Kg m}$) の S/N 比は実線で示した。低周波では震源としての力が弱く (

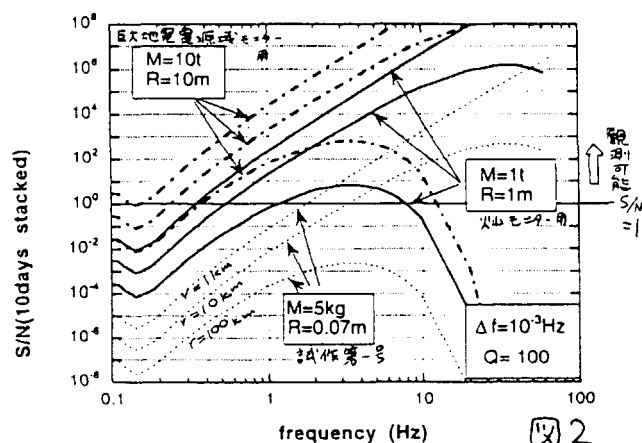
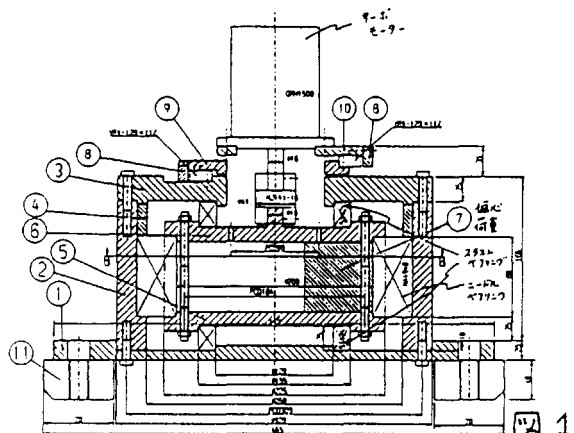
(1) 式)、高周波では減衰で遠くに波が届きにくい。

結果的に、 $0.5 \sim 50 \text{ Hz}$ を選択する。本装置は、 $r =$ 数 km の範囲で観測を行ない、ハードウェアおよび計測システムのテスト、理論的に予想されるシグナルが捕まえられるかどうかの確認を行なう。図2には、将来開発予定のさらに大きなACROSS ($MR \sim 10^3, 10^5 \text{ kg m}$) からのシグナルも示してある。

4. 複数のACROSSのアレイによる送信

一つのACROSSではシングルフォースの向きが回転面内で時間と共に変化するが、右回りと左回りの2つのACROSSを並置すると、一方向のみのシングルフォース源が得られる (これをリニアユニットと名付ける)。2つのリニアユニットの位相を π ずらして運転するとトルク型の震源になり SH 波を放射する (この場合、腕の長さを大きくするため2つを十分離して設置する)。また、複数のACROSSを空間的に配置したアレイを用いて、特定の波長の波を選択的に励起や抑制、あるいは平面波の発生放射など、用途に応じた様々な工夫が可能である。

なお、本装置の試作については、名古屋大学地震火山観測センターの援助を受けている。



Active method of monitoring underground structures by means of accurately controlled rotary seismic sources. 3. Event detection from a small number of Fourier components observed by ACROSS system.

Mineo Kumazawa and Yasuko Takei (Nagoya Univ.)

ACROSSによる地下構造の観測ではパルスの震源からの波形でなく、震源から観測点へのトランスファー関数のフーリエ成分を少数測定する。それだけで地下構造についてどのような情報が得られるかを示すために、spectrum analysisとevent analysisの相補対称性の理論を提示する。結論的には、P波、S波、それらの反射屈折波など特徴的な波の到達時刻、すなわち、走時曲線が得られる。

1、有限長離散時間系列と有限長離散周波数系列

長さ T 、離散時間 Δt の時系列 $f(t)=f(j)$ ($t=j\Delta t$; $j=0,1,2,\dots,N$; $N=T/\Delta t$)のフーリエ変換 $F(f)=F(k)$ ($f=k\Delta f$; $k=0,1,2,\dots,N$; $\Delta f=1/T$)は複素周波数系列である。 $f(j)$ が周期的変動をする場合、 $F(k)$ はデルタ関数的なスパイクとなる。 $F(k)$ のフーリエ変換は $f(j)$ であるから、 $F(k)$ が周期的な変動をすれば、 $f(j)$ はデルタ関数的なスパイクとなる。時間領域(j 座標)におけるデルタ関数的なスパイクをイベントと呼ぼう。パルスの震源からの波は減衰や散乱がなければパルスの振動であって、例えば、そのP波の到着は一つのイベントである。現実のP波の到着は減衰や散乱のためにイベントがフィルターで変形され、さらにノイズも重なっている。反射や屈折したP波やS波がいくつか到着しているはずの地震記録はイベントのシーケンスを示す時系列データとみられる。したがってその複素フーリエ変換は周期的変動をもたずである。

2、スペクトル解析とイベント解析

ノイズのある地震記録の離散時系列データから、周波数領域でスパイク的な固有振動のスペクトルのシーケンスを解析するのをスペクトル解析という。ノイズのある離散周波数系列からその周期的変動を抽出して、時間領域でスパイク的なイベントのシーケンスを解析するのをイベント解析と呼ぼう。1で述べた有限長離散時間系列と有限長離散周波数系列の関係が互いにフーリエ変換になっている対称性は、スペクトル解析とイベント解析の相補対称性を示すもので、イベント解析が成立することを保証すると同時に、これが、ACROSSの実用性を論証する。

3、存否法による離散周波数系列のイベント解析

存否法は比較的短い離散時系列データから周波数領域のスパイクシーケンスを複素周波数の組として求める方法である。求められるスパイクの数はARオーダーの1/2である。複素周波数の虚数部は、複数のスペクトル線が重なって分離できない場合はその広がり、波の減衰がある場合はQの値をしめす。前述の対称性より、存否法を離散周波数の複素系列データに適用すると、ARオーダーと等しい数の時間領域のスパイクのイベントを複素時間の組として求めることができる。複素時間の実数部はイベントの時刻を示し、複数のイベントが重なって分離できない場合は虚数部がその広がりを表す。デルタ関数的イベントが減衰のため時間幅が広がっている場合にはそれを虚数時間が表現記述する。狭い周波数範囲における少ないフーリエ成分(例えば、14.91から15.09 Hzまで15.00 Hzを挟んで0.03 Hzおきの7成分)からでも、複素存否法では 15.00 ± 0.09 Hzの波の到着時刻を最大6個とそれぞれの実効的なQの値(減衰によってデルタ関数を変形させるに必要な減衰の程度)が求められる。

使う周波数系列の離散周波数間隔が広いと、時間領域のエリエイジングが起こる。これはスペクトル解析の場合のalias foldingと同じように、心得て使えばイベント時刻の精密決定などにかえて有用である。ここで述べたイベント解析の理論は、極めて一般的なものであり、その応用は系列データを扱うすべての分野に有用である。

4、ACROSSシステムの設計と実験計画法の検討

ACROSSシステムでは、長期間に亘る観測によって、フーリエ成分の観測精度(時間の平方根に比例)はあげられるが、測定する成分の数は設置するACROSS装置の数に依存する。地下構造は複雑で、現実の観測データにはノイズがある。従って、この理論を実際に使うには、用いる周波数の選択、適切なARオーダー決定法など、いろいろな数値実験による研究を要するであろう。

弾性波速度構造決定手法の比較検討と 精密制御定常震源の意義と展望評価

○小川克郎、熊澤峰夫、藤井直之（名大、理）

Evaluation of accurately controlled routine-operated sinusoidal seismic sources in comparison with the other methods for exploration of seismic velocity structures

Katsuro Ogawa, Minco Kumazawa, Naoyuki Fujii (Nagoya Univ.)

精密制御定常震源で励起する定常サイン波をもちいた地下構造探査法の構想を、従来の火薬震源やバイプロサイスムなどと比較検討し、目標に応じた有用性と将来展望を論じる。これによって、次の研究開発方向策定の資料を提供したい。

各関連分野における対象の特徴と波長 地震波で地下を直接観測する諸分野には(1)資源、(2)土木建築、(3)環境・地質災害、(4)固体地球科学があり、それぞれ異なる周波数帯で異なる深さの異なる対象を扱う。探査は基本的には速度のマッピングでも、状況によって速度勾配（反射面）マッピングや減衰に焦点をさぼる。概して、低周波で山を、中間周波で森を、高周波で木をみる。例えば、貯溜層探査では500 Hzのtube waveで状態モニタリングさえ行われ、探査対象の特性と波長の範囲拡大という潮流がある。

これまでの方法との比較 構造探査の伝統的震源はパルス的な爆発、エアガン、インパクターである。これらは薬量の調整などで行う制御精度に限界があり、また、震源域を非破壊にすると励起が小さくなってS/Nが下がる。その後 VIBROSEISMという周波数スイープ式非破壊型震源が生まれたが、大型機器を要する困難がある。VIBROSEISMの周波数スイープは、同定しやすい特徴を孤立波波形に持たせたのであって、孤立波の伝播時間を測定するという原理面で、パルス波使用と同じ考えに立っている。

これに対して、精密制御定常震源は定常的サイン波の長時間観測によって震源観測点間の伝達関数のフーリエ成分を測定するので、これまでの方法と原理が基本的に異なる。名古屋大学で開発中の設計構想では、(1)放射エネルギー効率が最大の定常単力源の採用によって非破壊的、(2)制御したSH波の励起も可能、(3)震源のデジタルサーボ型精密回転駆動制御による高い励起位相精度の確保、(4)時間区間蓄積記録方式の開発による効率的な高精度データ取得法の確立、(5)GPSの時計信号利用によるマイクロ秒レベルでの絶対時間精度の確保、(6)それらの結果として観測位相精度が高く、スペクトル巾が狭いことによって従来との比較では 10^6 程度高いS/Nが得られる、などこれまでにない特徴と大きな利点を持っている。名大で開発中のシステムでは目標を10~50 Hzに設定しているが、同じ考え方で、下は1 Hzまで上は500 Hzまで周波数範囲を容易に拡張できよう。多数の震源装置と観測点からなるアレイやネットワークによって周波数を多数観測すると、より深部までの構造探査ができ、解析精度と分解能が格段に上がる。

結論 精密制御定常震源と観測システムの開発活用は、最初に述べたすべての関連分野の問題、すなわち、表層地盤の工学的評価や資源探査から、火山直下マグマのモニターによる噴火予知の基礎研究、地殻構造解明、巨大地震想定断層の状態のマッピングによる地震予知基礎研究にまで、刷新的な威力を発揮すると予測される。しかし、未経験技術を含む多要素の組合わせを総合して一つのシステムとして立ち上げて実用化するには、多くの開発研究と基礎研究を要する。

今後の方策 関連諸分野の協力で、分野固有の問題と共通課題を整理し、この刷新技術を共同開発することが望まれる。

精密制御定常震源装置の開発

○ 武井康子、鈴木和司、難波弘道、熊澤峰夫（名大理）

圓尾等、土谷忠弘、奥山吉彦（富士電機KK）

Development of Accurately Controlled Routine Operated
Seismic source (ACROSS)

Yasuko Takei, Kazuji Suzuki, Hiromichi Namba,

Minco Kumazawa, (Nagoya Univ.) Hitoshi Maruo,

Tadahiro Tsuchiya, Yoshihiko Okuyama (Fuji electric KK)

1 はじめに 精密制御定常震源(ACROSS)は定常サイン波を発生する人工震源であり、(1)あらゆる型の震源の中で波の放出効率が最も高いシングルフォース型震源（従来の爆発型よりエネルギー効率で約 10^6 倍よい）、(2)周波数が高い精度で安定に制御され狭帯域観測によってS/N比を上げられる($\sim 10^6$ 倍)、(3)位相が高い精度で安定に制御され微小な走時変化を検出可能、という特徴を持つ。前回（武井ら、94年秋の地震学会）はACROSSの小型試作機を紹介した。実用ACROSSとしては、50 km 程度までの観測で、0.1 msec の走時変化に相当する精度を確保できる長期安定非破壊震源の実現が可能であることが分かったので報告する。

2 実用ACROSS 固定した軸の周囲に偏心荷重を回転させる“シングルユニット”に対し、実用ACROSSとしては、逆位相で同期回転する二つのシングルユニットを組にした“リニアユニット”（図1）を考える。リニアユニットは、向きが一定で大きさが正弦的に変化する力を発生する。本研究では、偏心モーメント $MR = 10$ （Mは偏心荷重 ~ 100 kg, Rは腕の長さ ~ 0.1 m、現在試運転中の小型試作機は $MR \sim 0.1$ ）、50Hz以下の任意の周波数で運転可能な装置を開発する。発生する力の大きさは $F = MR(2\pi f)^2 \sim 10^6$ N (at 50Hz)。これを約 1m^2 の岩盤で受けると、その繰り返し疲労破壊応力（ $\sim 5 \times 10^6 \text{N/m}^2$ ）以下になり、非破壊震源が実現される。

2-1 放出される波の振幅 放出される波の振幅を図2に示す。震源から5m ($f = 30\text{Hz}$)で震度0（身体に感じる限界）であり、“人知れず”運転することが可能。定格3KWのサーボモーターを使用。消費電力の内訳は、遠地へ放出する波のエネルギーとして数W、近地での媒質のQ (~ 10) による消耗が数10W、装置本体のベアリング部の摩擦による消耗が数100Wと見積られる。

2-2 放出される波の周波数と位相の精度 モーターの駆動は、回転位相（位置）の変動をGPSパルス信号からのずれでフィードバック制御するので、回転数の揺らぎの平均値を0にでき、TS-stacker（熊澤ら、本学会）で多数回のスタッキングを行なう超狭帯域観測が可能。また、位相の揺らぎをモーターの位置検出分解能の10倍程度の0.5度以内におさえることにより、時間精度で0.1msecの走時変化に相当する震源精度を確保できる。

2-3 運転周波数 図2から、観測には10-50Hzを用いるのが実用的。探査に必要な周波数の種類と数は、存否ケプストラムの理論（熊澤ら、本学会）からの要請、実際の構造の複雑さ、及び、必要とする解像度で決まる。一つの送信所に各々担当する周波数範囲の決った複数台のACROSSの設置が必要になるだろう。

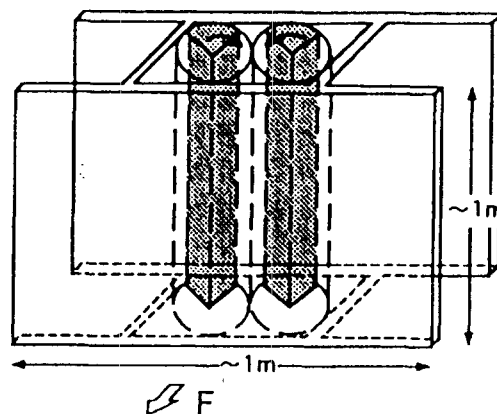


図1. リニアユニットとそのケーシング

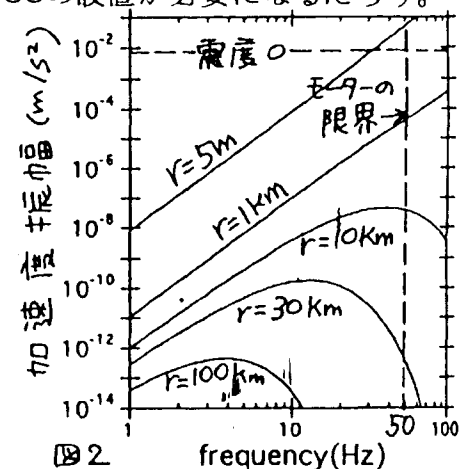


図2. シグナルの大きさ（スタッキングなし）

F31-12 精密制御定常震源装置の開発、その2 ～周波数と位相の制御～

武井康子、[○]難波弘道、鈴木和司、熊澤峰夫（名大、理）

圓尾等、土屋忠弘、奥山義彦（富士電機KK）

Feedback control of accurately controlled routine-operated seismic source

Yasuko Takei, Norimichi Namba, Kazuji Suzuki, Mineo Kumazawa

(Nagoya Univ.) Hitoshi Maruo, Tadahiro Tsutchiya,

Yoshihiko Okuyama (Fuji Electric Co., Ltd.)

精密制御定常震源(ACROSS)の放出する定常サイン波の周波数と位相の精度（武井ら、前講演）は、装置固有の特性として決まるものではなく、モーターも含めたACROSS本体が、一つの力学系として周囲の地盤と相互作用しながら運動する結果として決まるものである。このことを念頭において、周囲の地盤との相互作用も考慮した偏心回転体の運動方程式を立て、これを多面的に検討した結果、既存の技術の組み合わせだけで十分な周波数と位相の精度が実現可能であることが分かったのをそれを報告する。

回転体の運動と制御 モーターで駆動する偏心回転体の角速度 $\Omega(t)$ ($=d\theta/dt$) は運動方程式(1)で記述できる。トルク $T(t)$ はモーターの一定駆動力 T_0 , 速度制御ゲイン β , 位置（位相）制御ゲイン α , 回転体自体の振動（地震波を放射する）のため働くトルク成分 $T_x(t)$ に依存する。 $T_x(t)$ は回転体の一次モーメント(MR)と設置する地盤の弾性定数に依存する二つのパラメーター S_0 と S に依る。

$$\text{式: } I \dot{\Omega}(t) + b \Omega(t) = T(t) \dots \dots \dots (1)$$

$$T(t) = T_0 - \beta(\Omega(t) - \Omega_0) - \alpha(\theta(t) - \theta_0) + T_x(t) \dots \dots \dots (2)$$

$$T_x(t) = -(MR)^2 \Omega_0^4 (S_0 + S \exp(i2\Omega_0 t)) \dots \dots \dots (3)$$

$$D = (b + \beta)^2 - 4\alpha I \dots \dots \dots (4)$$

$$T_0 = b \Omega_0 + (MR)^2 \Omega_0^4 S_0 \dots \dots \dots (5)$$

118 検討 まず、回転1サイクルを丸めて(3)の周期項を消す。
トルクバランスの式(5)でみると、 $(MR)^2$ と Ω_0^4 に比例して波を放射

し、発生する力は $(MR)\Omega_0^2$ に比例するので、一つのACROSSで広い周波数範囲をカバーするよりは、大きい Ω_0 では小さい(MR)をもつ装置を使い、周波数範囲分担をするのがよいことがわかる。

フィードバックによって発生するシングルフォースの周波数と位相が安定に制御できる条件は、適切な近似のもとで、(1)の特性方程式の判別式(4) $D > 0$ で与えられる。大きいモーメント I の回転では α を小さくしてもよいが、そうすると位相制御が効かなくなる。そこで b と β を大きくしなければならない。 b はエネルギーの無駄な消費だからできるだけ小さくして β を大きくする。そのためには、消費電力より大きい定格のモーターを使う必要がある。制御信号はデジタルエンコーダーの読み $\Omega(t)$ と $\theta(t)$ と $\sim \mu\text{sec}$ 精度のGPS clock signalで設定する Ω_0 と θ_0 との差で与える。制御が正しく動作すれば、位相の変動はエンコーダーの読みの量子化単位の程度におさえられる。

回転1サイクル内の変動は、(3)の周期項が周波数 $2\Omega_0$ の強制振動の励起として働く。すなわち、 $(\Omega(t) - \Omega_0)$ と $(\theta(t) - \theta_0)$ は0の周りを振動をする。しかしそれらの平均値は0であるから問題はない。これによる位相のずれ $\delta\phi(t) = \theta(t) - \Omega_0 t$ は次の式で与えられる。

$$\delta\phi = -(MR)^2 \Omega_0^4 S \exp(i2\Omega_0 t) / [-I\Omega_0^2 + i(b + \beta)\Omega_0 + \alpha]$$

この効果によって周波数 $2\Omega_0$ のシングルフォースも発生するが、余程 s が大きいばかり無視できる。制御と力源の観点からは、 $\delta\phi$ は小さい程よい。予備的検討結果によると、 $\delta\phi$ の大きさに最も効くのは地盤の剛性（現実的には、岩盤へのACROSS設置の剛性）に依存する S （複素数）である。結論的には、ACROSSはできるだけ高い剛性で堅い岩盤への固定（ガタがない）が要求される。なお、厳密な S_0 と S の見積には近地波動場の計算を要する。

註 ACROSSは精密制御定常震源（装置）の短縮記号。[○]前回の学会でROをrotaryの略としたが、機構でなく機能でみて、定常＝常時 routine-operated の略の方がよい。SSはsinusoidal single-force seismic sourceの頭字のSも兼ねる。

F31-13 狭帯域多チャンネルスペクトル観測記録装置 としての時間区間蓄積記録装置 - TS stacker

熊澤峰夫、山岡耕春、武井康子（名大、理）

大島宏之、立石 博（マークランドKK）

TS stacker as a narrow band multichannel device to record Fourier components of transfer function between a source and a receiver

Mineo Kumazawa, Koshun Yamaoka, Yasuko Takei
(Nagoya Univ.)

Hiroyuki Oshima, Hiroshi Tateishi (MARK RAND Co., Ltd.)

精密制御定常震源 (ACROSS) が放射するサイン波を用いて震源・観測点間の伝達関数のフーリエ成分を観測記録する「時間区間蓄積記録装置」(time segment stacking recorder, 略称 TS stacker) を考案したので、その理論と試作装置について報告する。

原理 長時間にわたって入力する雑音を主とする振動の中から、多数の微弱な定常サイン波 (例えば、25.1, 25.2, 25.3, 25.4, ... Hz) だけを検出しその振幅と位相を同時記録したい。それには地震計で得る長い離散時系列データを記録し、フーリエ変換するのが普通である。しかし、もっと優れた方法がある。

有限長離散周波数系列の逆フーリエ変換は、有限長離散時系列である。この例のように得たいフーリエ成分が 0.1Hz おきならば、そのような周波数系列を設定し、その逆フーリエ変換に相当する有限長離散時系列（この場合には 10 秒長）だけを観測記録すればよい。すなわち、長時間の記録をとらなくても、それを 10 秒ごとに区切って直ちにスタッキングしていけば（図 1）記録媒体は常に 10 秒ぶんだけでよい。データのサンプリング周波数を 2^n Hz (n は整数) にしておけば、スタッキング途中の時系列を FFT の DSP に入力して、そのフーリエ成分を直ちに表示できる。S/N はスタッキング回数 N の平方根に比例して向上する（図 2）。

したがって、観測データを取りながら、フーリエ成分とその S/N の上昇をリアルタイムで常時モニターできる。

実用装置の特性 スタッキングの時間区間長 T を 100 秒、周波数範囲を 10-50 Hz とすれば、この stacker は 0.01Hz おき 4000 チャンネルのスペクトル直接観測記録装置として機能し、ACROSS 信号観測目的に合致する。各チャンネルのバンド巾は $\sim(1/NT)$ Hz である。NT = 1 時間なら、バンド巾 ~ 0.3 mHz という超狭帯域が実現する。この特性を安定に得るため、データ取得を GPS clock にマイクロ秒レベルで同期させる技術開発をおこなっている。

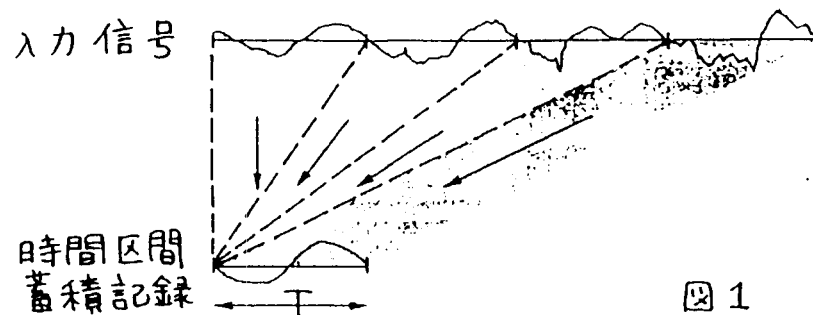


図 1

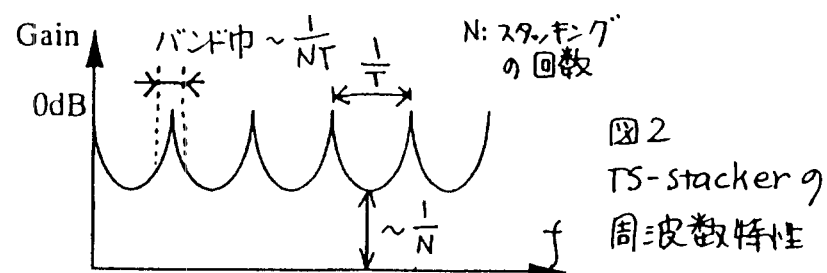


図 2
TS-stacker の
周波数特性

結論 ACROSS は TS stacker と組み合わせることによって実用性が現実的になった。なお TS stacker はこの目的以外に、いろいろな分野で多くの用途がある汎用装置の一つとなるだろう。

ACROSS信号のイベント解析と 存否ケプストラム理論

°熊澤峰夫、武井康子（名大、理）

Theory of 'SOMPI cepstrum alias event analysis' for across signal data
Minco Kumazawa, Yasuko Takei (Nagoya Univ.)

精密制御定常震源からのサイン波を観測し、データの解析で孤立波の走時が得られることを前回の地震学会（熊澤武井, 1994 秋）で報告した。その後、この理論はケプストラムとしてすでに知られている理論を存否型に一般化したものであることを知った。この理論は非齊次AR方程式の一般解法、すなはち、力学系の励起モデルによる時系列解析の手法として基本的な性格をもっている、その応用範囲は制御震源だけでなく、地震記象全般に及ぶ。

ケプストラムとは 地震学や物理探査における 'echo' の到着時刻を周波数系列データから決定する手法を提案した Bogert, Healy & Tukey (1963) は、spectrum の spectrum を、術語のスペルをひっくり返して cepstrum と名付けた (frequency 領域での frequency は quefrency と名付けた)。地震学会で報告した「イベント解析」の理論は、周波数系列データの spectrum をとって時間系列でのイベント的信号をとりだす、という意味において「ケプストラム解析」であった。

存否とは 線形力学系を記述する齊次微分方程式と等価の齊次AR方程式の解は、実周波数軸上では巾のあるラインスペクトルになるが、複素周波数を記述する z 平面上ではデルタ関数になる。この平面上でのラインスペクトルの存否を解析するスペクトル解析を存否法 (Kumazawa et al, 1989) と呼ぶ。これに対して、複素時間を記述する z 平面上で、デルタ関数（イベント）の存否を解析するのを「イベント解析」「存否ケプストラム」といったのである。非齊次AR方程式の解として非定常時系列データ (eg, 地震記象) を解析する際には存否法的イベント解析が有効である（横山由紀子ら, 1994）。

理論の構造と考え方 $x(t)$ を力学系の応答（地動）、右辺を励起項として非齊次AR方程式を式 (1) で表現する。時系列解析においてARMAとしてなじみのあるのが、励起項を式 (2) とした場合である。ここでは励起項のモデルとして式 (3) をとる。この場合、(1) の z 変換は (4) で与えられる。(4) 中の $X(z)$ は精密制御定常震源の観測で得られるフーリエ成分である。そこで、(4), または $X(z) = (4)/A(z)$ を観測方程式として、 $A(z)$ 、 b_{kj} 、 t_k を適当な拘束条件のもとで推定する。その推定アルゴリズムと拘束条件には、データの特徴と目的によって実にいろいろある。ケースバイケースについて実用的な方法を確立して行くのは今後の課題である。

$$\text{式: } A(z) x(t) = F(t) \dots \dots \dots (1)$$

$$F(t) = \sum c_k n(t-t_k) \{n(t): \text{ランダム系列, } t_k = k\Delta t\} \dots (2)$$

$$F(t) = \sum b_{kj} \delta(t-t_k - t_j) \{ \delta(t-t_k): t = t_k \text{ で } \delta \text{ 関数} \} \dots \dots (3)$$

$$A(z) X(z) = \sum b_{kj} \exp(i 2\pi t_k f) \exp(i 2\pi t_j f) \dots \dots \dots (4)$$

こうして得るであろう t_k （複素数）の実部が震源から放射された孤立波の到着時刻を与える。

(1) & (3) $\rightarrow$ (4) の意味：震源で δ 関数の励起があり、それが複数の孤立波として観測できるであろう場合、それをサイン波だけではどう見えるかを記述。(3) の意味： $t = t_k$ に δ 関数で与えた k 番目の励起イベント（MA型フィルター $\sum b_{kj} \delta((t-t_k)-t_j)$ でなまった孤立波の到着）がある。 t_k の虚部の意味： δ 関数のなまりの単純成分。

精密制御定常震源のデータ取得と解析 観測データ $X(z)$ は震源観測点間の伝達関数のフーリエ変換であるが、そのすべての成分 (e.g., 1024 個) を取得（した方がよい！）しなくても、上のモデルと観測周波数の選定で、極めて大きな手抜きができる。地震記象から抽出したい独立パラメーター数はもともと少ないから。

F31-15 想定地震の震源核近傍の状態変化検出の可能性 - 精密制御定常地震波による速度変化モニター

熊澤峰夫、山岡耕春、武井康子、
藤井直之、小川克郎（名大、理）

Possibility of detecting the evolving stress around the nuclei of
coming great earthquakes by means of ACROSS network
Minco Kumazawa, Koshun Yamaoka, Yasuko Takci,
Naoyuki Fujii, Katuru Ogawa (Nagoya Univ.)

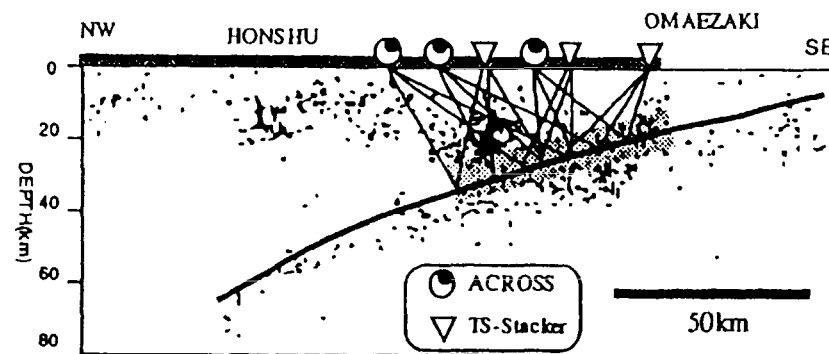
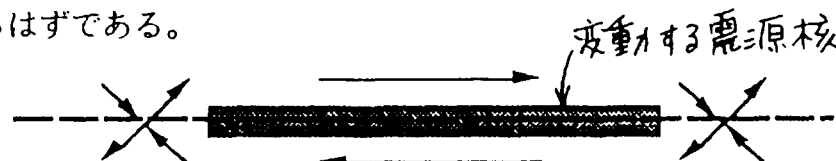
地震発生の前駆準備過程として震源核が発生成長する可能性が、岩石破壊実験と震源過程の数値モデル実験によって指摘されている。想定される巨大地震について、地震発生のはるか以前から余震が終息していく段階まで、断層面近傍の状態変化をマッピングできれば、地震発生の際の解明を通じて将来の地震予知にも役立つはずである。このようなマッピングを実現する可能性について、その具体的な方法を検討して提案する。

方法 精密制御定常震源 (ACROSS) と時間区間蓄積記録装置 (TS stacker) 付き高感度地震計との適切な配置で構成するネットワークは、地下の地震学的境界面からの反射波を連続的にとらえ、走時を数日程度の平均値として 0.1 ms 程度の誤差で決定できると予測される。ディラタンシーなどで速度変化が 1% 期待される場合、走時変化 0.1 ms は波の経路にそって波長の 1/100 (P で 70 m, S で 40 m 程度) の領域中の変化に相当する。ACROSS では分極方向を制御した S 波の放射もできるので、応力誘起の横波分極異方性とその変動までを観測できる。

プレート境界間の巨大地震では想定断層面の位置がほぼわかっている。そこで、上にのべたネットワークによりプレート上面からの反射波を観測・解析し、「地震波速度変動のトモグラフィー」を「地表とプレート境界の間の領域」で行うことによって、目的

のマッピングが実際に可能になるであろう。

震源核近傍のモデル 震源核の近傍における集中応力とそれに伴う地震波速度の変化をモデル化する。スリップベクトルをふくむ面では刃状転位（下図）が、それと直交する面内には螺旋転位がある。想定断層面上でみると、異なる型の転位が応力のある程度緩和した震源核を囲んでいる。その分布の時間変動は、応力と歪分布の変動を介して地震波速度分布の時間変動として観測されるはずである。



想定巨大地震の例と結論 東海地震の想定震源域の大部分は陸の下にあるので（上図）観測ネットワークは陸上の設置でよい。ACROSS 設置には堅い岩盤と大電力供給を要するので、震源域が海側にでる所では stacker の方を海底設置すればよい。

これで震源域マッピングができたとしても地震予知の保証はないが、こんな基礎的研究なしで地震を予知できるはずはない。

精密制御定常震源システムの開発
(1) 全体概念と物理探査への応用可能性

熊沢峰夫, 小川克郎, 藤井直之, 山岡耕春
(名古屋大学理学部)
武井康子(東京大学地震研究所)

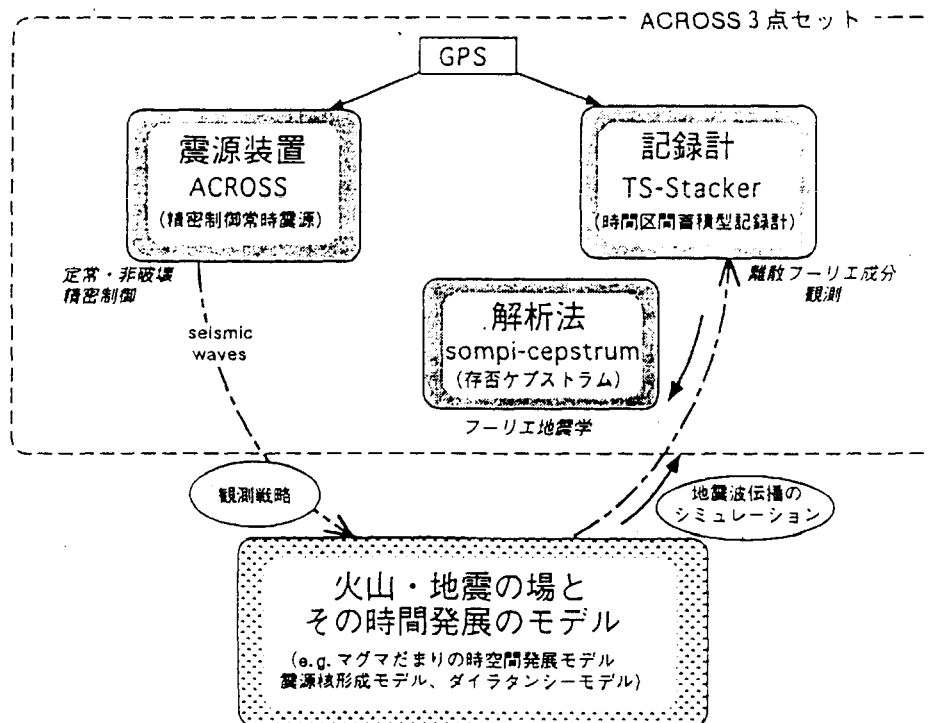
Development of ACROSS System :

(1) Design Concept and Evaluation of Application to
Geophysical Exploration

Mineo KUMAZAWA, Katsuro OGAWA, Naoyuki FUJII,
Koshun YAMAOKA (School of Science, Nagoya University)
Yasuko TAKEI(Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

1 はじめに

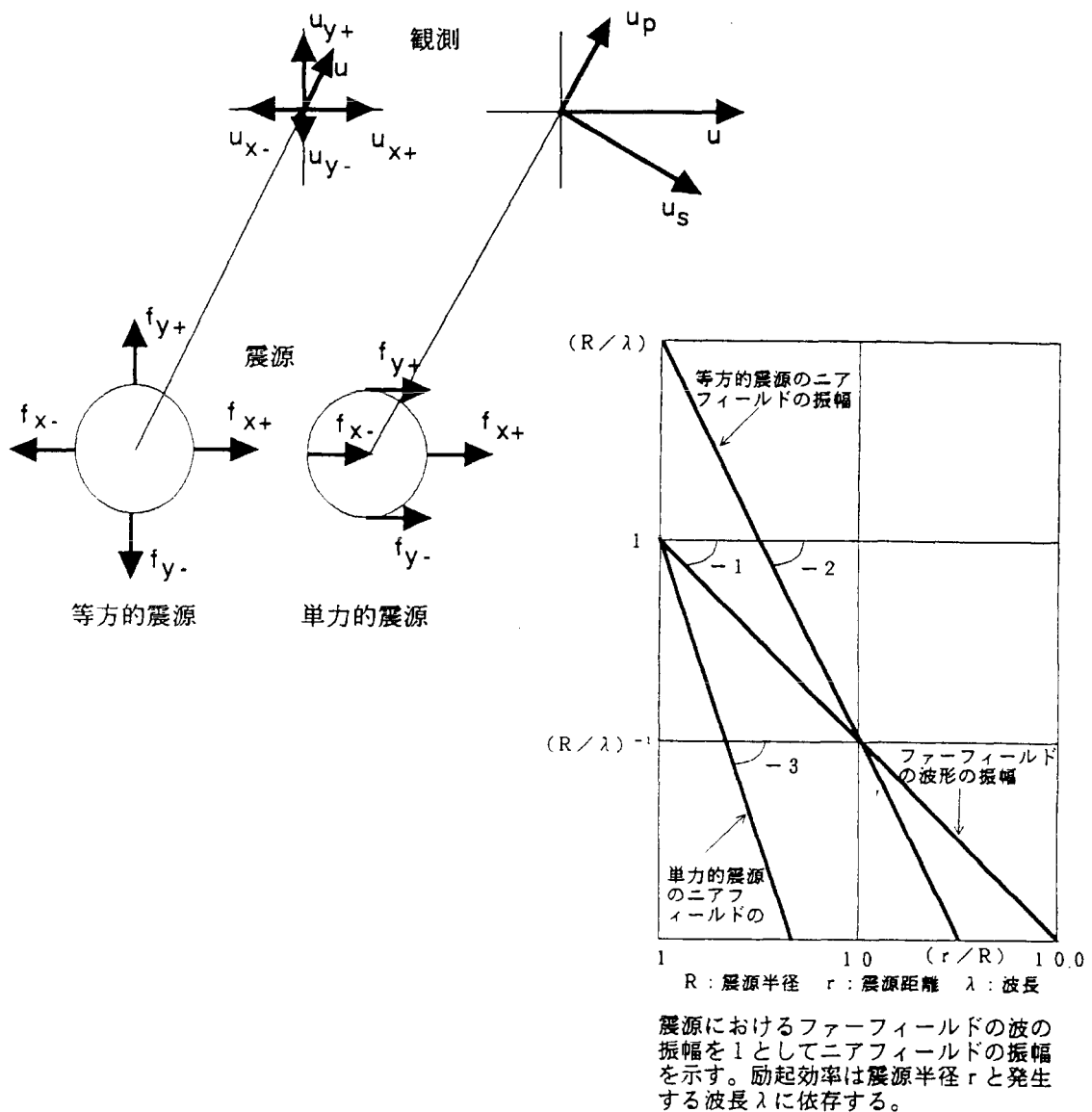
精密制御定常震源システムとは精密制御定常震源(ACROSS: Accurately Controlled Routine-Operated Seismic Source)、時間区間蓄積型記録計(TS-Stacker)及び存否ケプストラム(Sompi Cepstrum)データ解析システムの三点を合わせて地下構造解析を人工地震によって行う一つの技術体系である(第1図)。現在, 名古屋大学においてこのシステムを開発中であるのでその概要を報告する。



第1図 ACROSSシステムの構成

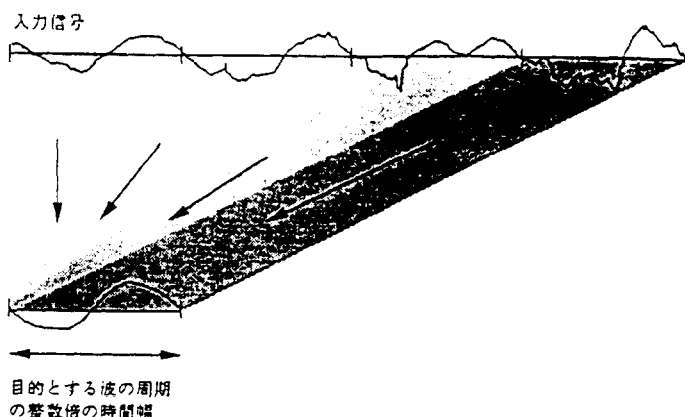
2 震源における波の放射パターンとエネルギー効率

ダイナマイトやエアガンのような爆発爆縮型の等方震源では、震源から外方向に向かう力が均等に作用するので、合力はゼロである。この震源を遠方で観察すると、振動方向が異なる波の重ね合わせが互いに相殺されるように働いて観測される波の振幅は小さくなる。その程度は震源の大きさ R と波長 λ の比に依存する。一方、震源に働く合力がゼロでないシングルフォース、すなわち単力震源では、同じ方向に振動する波の重ねあわせは加算する向きに働くので、遠方で観測される波の振幅は等方震源にくらべて、 λ/R 倍大きい。逆に言えば、遠くにとどくファーフィールドの波にくらべ



第2図 単力型震源と爆破型震源の地震波放出効率の比較

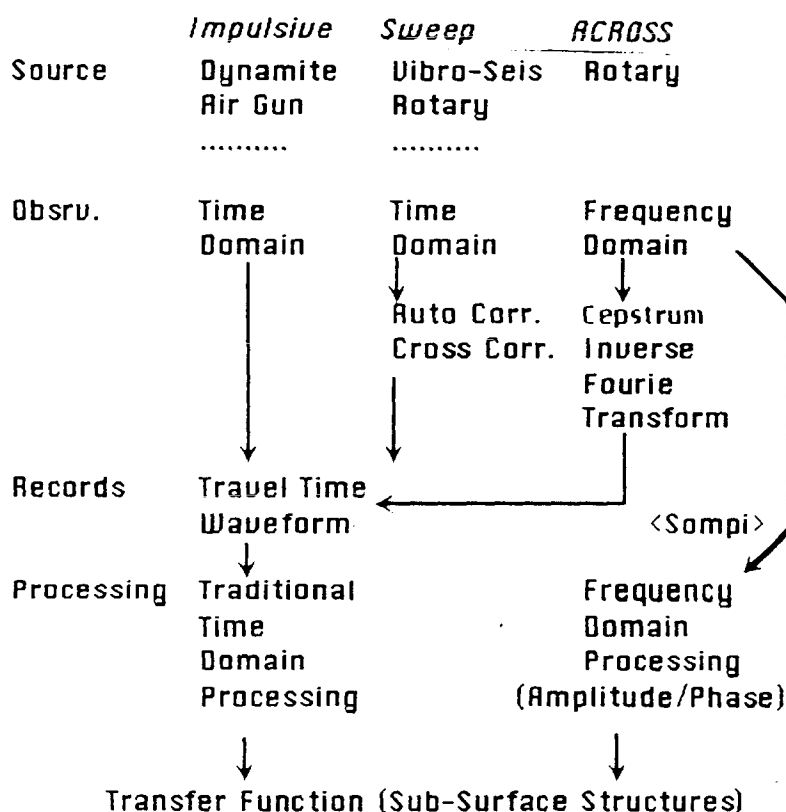
て震源近傍に局在するニアフィールドの波の振幅は、単力型では小さく、等方震源ではおおきい。この状況を、一定の強さの力源で発生するファーフィールドの波（震源からの距離 r の逆数に比例する振幅をもつ）の振幅を基準にして模式的に示したのが第2図である。震源近傍での局在の程度も単力震源では距離の -3 乗であるのに比べて等方震源は -2 乗の減衰しかない。通常 λ/R の値は現実的には 10^2 程度の大きさであるから等方震源のニアフィールドのエネルギーは単力的震源にくらべて 10^6 程度も大きい。震源近傍の Q^{-1}



（減衰）を0.01の程度とすると、等方的爆発震源の近傍で消耗して破壊に使われるエネルギーは、遠方に放射するエネルギーに比べて 10^6 倍に達し、衝撃破壊を含めて 10^6 倍以上のエネルギーが震源の破壊に消費され、震源の定常性保全ができなくなる。震源の非破壊と定常性を保つ条件のもとで、波動の放射効率の高い震源が単力型である。

加えるに、等方震源では縦波だけしか発生しないのに対して、単力震源では方向によって縦波だけ、横波だけ、あるいはその両方を発生する。また、データのス

第3図時間区間蓄積記録



APPLICATIONS

Earth Science
Natural Resources
Geological Hazards
Civil Engineering
.....

第4図 ACROSS 存否ケプストラム処理解析法

タッキングが有効にはたらいて S/N 比を格段に向上させるために、周波数を極めて精密に制御して長時間連続運転できるようにする点がもう一つの大きな特長である。

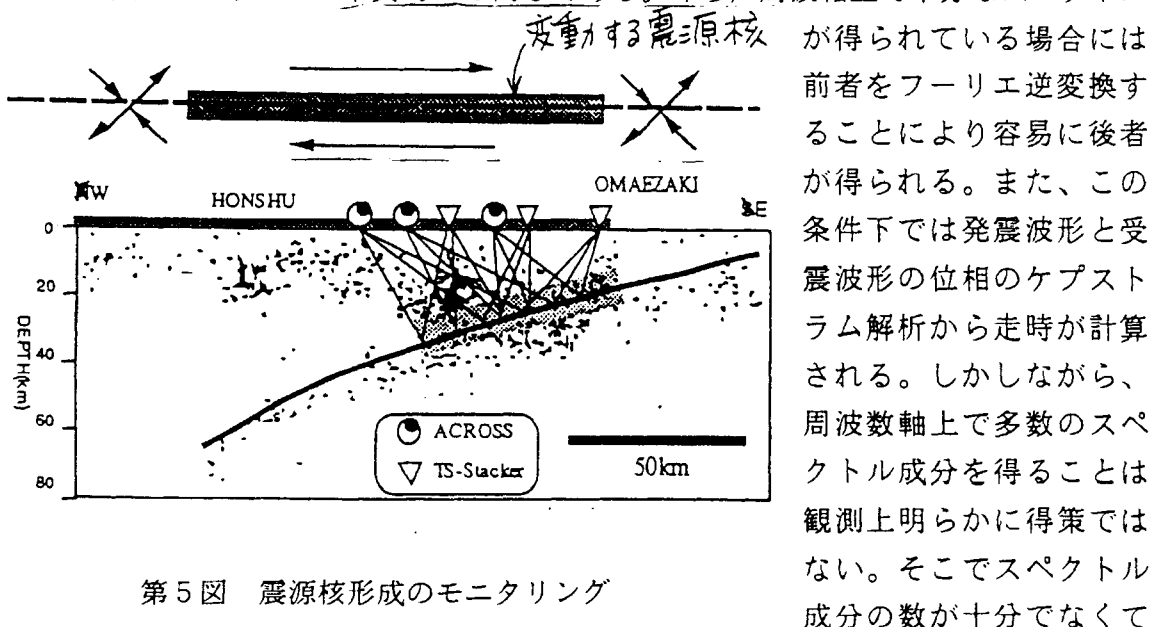
3 時間区間蓄積型記録計 (TS-Stacker)

Time Segment Stacker は放射される正弦波形を時間軸上で重合 (Stack) し、重合結果を記録するデジタル型多チャンネルの記録計である (第3図)。重ね合わせる時間区間の中に整数個の波がはいる周波数の振動だけが重合加算され、他の周波数の振動とノイズは自ら相殺されるので、結果的に離散フーリエの成分だけを記録する。 S/N の向上は重合回数の平方根に比例し、各離散周波数のバンド巾は、全重合時間の逆数と等しい。例えば、10秒の時間区間で1時間のデータをこれで記録して得られるのは、 $0.1\text{Hz}(=1/10\text{sec})$ おきに0からナイキスト周波数までの離散フーリエ成分で、各成分のバンド巾は $0.3\text{mHz}(=1/3600\text{sec})$ という狭帯域になる。狭帯域であるから、この場合、例えば 30Hz のバンド巾で取得するデータにくらべて、 S/N は $10^3(=0.3\text{mHz}/30\text{Hz})$ という大きな改善になる。

後で述べるように、複数の周波数で発震された正弦波から走時を求めるには震源波形と受震波形の相対位相差を極めて精密に測っておく必要がある。このため、ACROSSでは1マイクロ秒の絶対精度を有するGPSの時刻信号を利用する。

4 存否ケプストラム解析

第4図はACROSSの存否ケプストラムデータ処理解析法を従来の爆発型震源の処理解析法と比較したの概念図である。ACROSSにおける直接の受震波形は離散周波数上のフーリエスペクトルであり、爆破型震源における直接の受震波形が時間領域であることと大きく異なる。しかしながら、時間領域と周波数領域には等価互換性 (対象性) があるので本質的には同じである。即ち、周波数軸上で十分なスペクトル



も、これから精度のよいフーリエ逆変換とケプストラム解析を行うことが可能な「ソムピ(Sompi)」法の解析システムを開発し採用する。

また、受震正弦波形のフーリエスペクトルを時間領域の波形に変換しないでそのまま利用する方法もある。例えば、地下における何らかの微小な変動現象の時系列モニタリングを目的とする観測では正弦波の振幅と位相の変動を捕えること自体有意な情報となる。

5 物理探査／地殻探査への応用

周波数領域で観測を行う ACROSS は

- 一) 観測周波数範囲を自由に選択できること
- 二) 観測時間と重合時間区間幅の選択により必要な S/N 比の確保と周波数離間を設定できること
- 三) 非破壊震源であり定常的モニタリングに使えること
- 四) S 波を制御発震できること

等の特徴を生かして目的に応じた多様な地下探査法が実施可能であり、多方面での可能性がある。

1) 構造探査

物理探査で日常的に行われている人工地震による浅層反射から地殻深部反射まで様々なレベルの地下構造探査へ適用できる。

2) 地下変動現象モニタリング

地下の何らかの微小な変動現象のモニタリングに適用できる。例えば、火山体内のマグマの動きやこれに伴う地震波速度や減衰の変動（火山噴火予知）、震源核形成に伴う地震波速度変化（地震予知：第5図）、火攻法等の石油二次回収における地波速度変化（資源探査）などである。

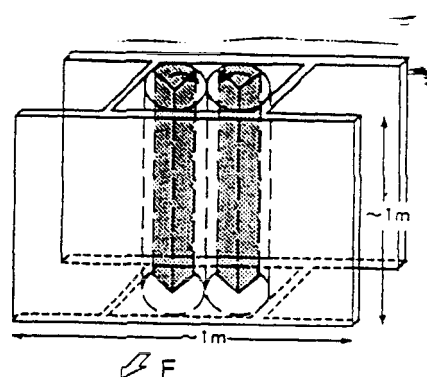
3) 坑井利用地震探査

坑井内震源として開発を行えば坑間トモグラフィー、VSP等の坑井利用地震探査へも適用可能である。

（文献）

熊沢峰夫，武井康子 1994 精密制御音波放射による能動的地下構造常時モニタリング手法の研究 その1 目的と原理，日地震学会講演予稿集1994年度秋季大会B66，p. 158.

回転ユニットからなる「リニアユニット」である。リニアユニットは一定方向に振幅が正弦的に変化する波を発震する。偏心モーメントMRは10 kg・m程度であり、 $f = 50 \text{ Hz}$ の場合には力の大きさFは 10^6 N 程度となる。当面の運転周波数10–50 Hzを考えると、位相揺らぎをモーターの位置検出分解能の10倍程度の0.5度以内におさえることにより、時間区間蓄積型記録計の出力として0.1 m秒の位相制御精度の確保は容易となる。



第2図 リニアユニット

時間区間蓄積型記録計はACROSSの波形を時間領域で重合してその結果を記録する。これは重合時間に逆比例した狭い帯域幅をもつ多チャンネルの記録計である。例えば、周波数50 Hzの波形に対して重合時間区間を100秒とすると、この波形の重合回数は5,000である。そうすれば、ノイズは $1 / (5000)^{1/2}$ に減少する。バンド幅は $1 / 100 = 10 \text{ mHz}$ と狭いので、ノイズはバンド幅50 Hzでの $0.01 / 50 = 1 / 5000$ に減少する。なお、走時決定には震源波形と記録波形の相対時間差を知っておく必要があるので、GPSの時計を用いてマイクロ秒の精度でデータ取得を同期させておく。

2 ソフトウェア

多数の周波数についてACROSS震源から正弦波を発震させれば時間区間蓄積型記録計で多数のフーリエスペクトルが記録される。少数のフーリエスペクトル成分でも存否ケプストラムで解析すれば孤立波の走時が得られることは熊沢・武井により既に報告されている(熊沢峰夫・武井康子, 1994, 1995)。ACROSSデータ解析に必要な基本的な理論についてはこの二つの文献に記述されているので、ここではACROSSのフーリエスペクトルから走時が解析できることの説明だけを簡単に述べておくに止める。

震源波形 $f(t)$ のフーリエ変換を $F(\omega)$ とする。

$$F(\omega) = \text{Re}(\omega) + i \text{Im}(\omega) = B(\omega) e^{i\theta(\omega)}$$

ここで、 $f(t)$ が時間局在のパルス的であれば $B(\omega)$ は ω に対して滑らかな関数である。なお、

$$|B(\omega)| = \text{SQRT}((\text{Re}(\omega))^2 + (\text{Im}(\omega))^2)$$

$$\theta(\omega) = \tan^{-1}(\text{Im}(\omega) / \text{Re}(\omega))$$

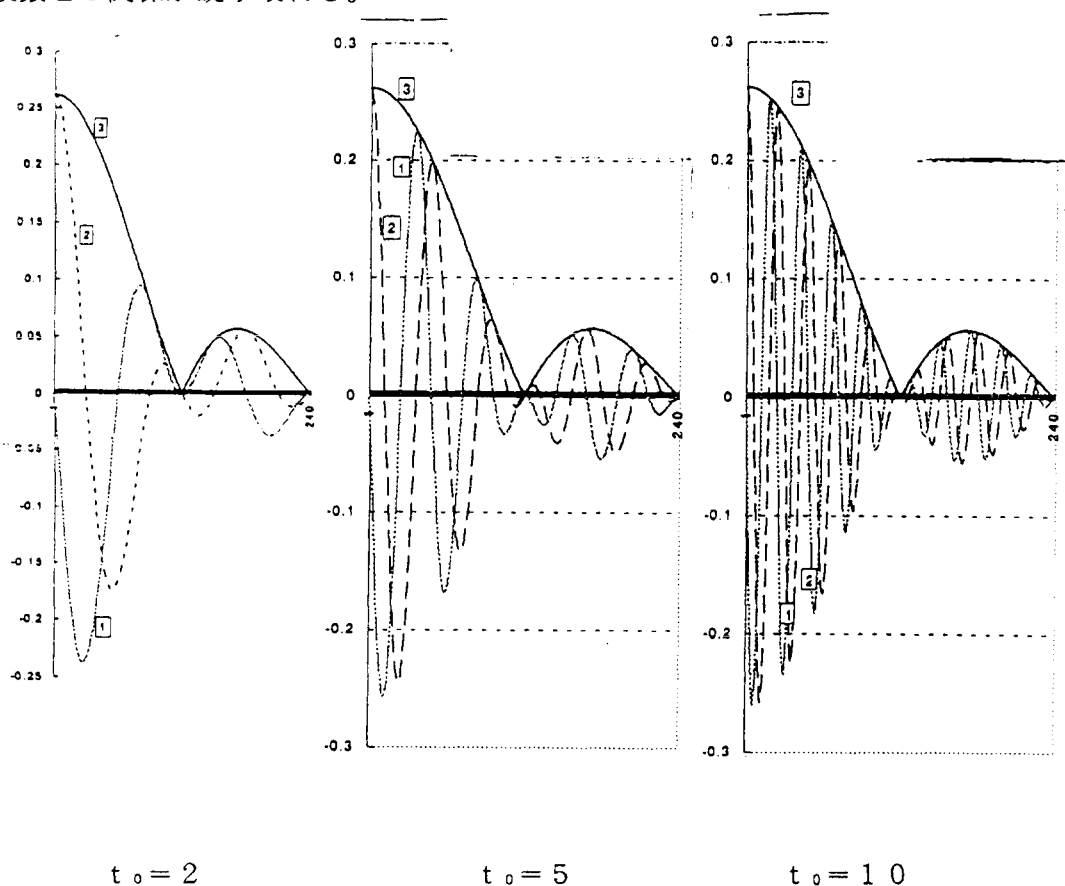
この波形に減衰がなく、走時 t_0 だけ遅れた場合の波形 $f(t - t_0)$ のフーリエ変換 $G(\omega)$ は

$$G(\omega) = F(\omega) e^{-i\omega t_0} = B(\omega) e^{i(\theta(\omega) - \omega t_0)}$$

で与えられる。

つまり元の波形の位相が $t_0 \cdot \omega$ だけシフトした波である。これは、 $G(\omega)$ の実部および虚部の周波数軸上の振動の波数が t_0 の増加とともに高い方向にシフトしてゆくことを意味している（ちなみに、パワーは不変である）。このことを利用すれば、ACROSS のフーリエスペクトルの位相（の傾き）或いは実部や虚部の周波数軸上での波数を解析（ケプストラム解析）することにより t_0 を算出できる。

第3図はパルス波形の場合の実部、虚部及びパワーと t_0 との関係を計算した一例である。先に述べた t_0 とフーリエスペクトルの実部及び虚部の周波数軸上での振動の波数との関係が読み取れる。



第3図 パルス波形のスペクトルの実部、虚部及びパワーと t_0 との関係
横軸は周波数 縦軸は振幅
1: 虚部 2: 実部 3: パワー

（文献）

熊沢峰夫, 武井康子 1994 精密制御音波放射による能動的地下構造常時モニタリング手法の研究 その3 波の到達時刻を少数のフーリエ成分から決定する理論, 日本地震学会講演予稿集 1994年秋季大会B68, p160.

熊沢峰夫, 武井康子 1995 ACROSS信号のイベント解析と存否ケプストラム理論, 地球惑星科学関連学会1995年合同大会予稿集F31-14, p374.

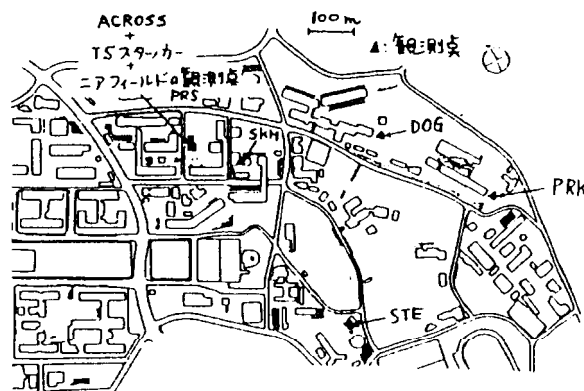
○武井康子*, 熊澤峰夫, 山岡耕春, 鈴木和司, 東田進也*, 山田守, 石川秀蔵
中野優, 羽佐田葉子, 池田典宏, 井上修一, 宮川幸治 (名大理, *東大震研)

ACROSS DOES WORK 1. Overview

Y.Takei*, M.Kumazawa, K.Yamaoka, K.Suzuki, S.Tsukada*, M.Yamada, S.Ishikawa
M.Nakano, Y.Hasada, N.Ikeda, S.Inoue, K.Miyakawa (Nagoya Univ., *ERI Univ.Tokyo)

はじめに 我々は地球内部の状態を音波によって常時モニターするために、精密制御定常震源(Accurately Controlled Routine Operated Seismic Source=ACROSS)と、これを用いた観測・解析法の開発を進めている。今回我々は名古屋大学構内に観測点を展開し、ACROSSの小型試作機を用いた実証実験を行い、超狭帯域シグナル取得や存否ケプストラム解析などの理論的予測を検証した。また、この過程で、ハードウェア・ソフトウェアについて問題点の洗い出しを行った。以下の一連3つの講演でこれらの結果を報告する。

観測 名古屋大学構内に5つの地震計(固有周期1sの速度型3成分計)を設置し、ACROSS小型試作機(偏心荷重7kgを7cm半径で回転)からのシグナルを観測した(図1)。震源から一番遠い観測点PRKまでの距離は約600mである。各観測点からのデータは有線または無線テレメータでACROSSの設置されている建物まで送り、TSスタッカーで記録する。



← 図1.
観測点の
西配置

データ取得 今回の観測で用いたTSスタッカーは、各観測点の地動データをモーターのz相(一回転の決まった位相で、1パルス出る)トリガーで10秒間取得し、これを次々に足し合わせていく。ACROSSを5Hzで運転した時のPRKの地動(スタッキングせず)を図2aに示す。ほとんど地動ノイズで、ACROSSの回転に同期したシグナル成分は見えない。これを多数回スタッキングするとz相に同期しないノイズの振幅が相対的に減少し、ノイズレベルの約1/100のシグナルが見えてきた!(図2b,c)

水平2成分の力に対する応答の分離 本実験で用いたACROSS小型試作機はシングルユニットタイプ(1つの偏心質量が回転)で、シングルフォースの向きが水平面内で回転する。今回の実験では、モーターを正逆両方向に回転したデータを個別に取り、それぞれのデータを足し算・引き算することによって、直交する二成分の力に対する応答への分離を行った。

データ 今回の観測ではACROSSを6Hzから15Hzまで0.2Hzおきに46個の回転数について、正・逆回転の両方で運転した。6~8Hzでは4時間ずつ、8Hz以上は2時間ずつスタッキングを行い、全観測点でACROSSからのシグナルを振幅の $S/N=3 \times 10^2 \sim 10^3$ で取得できた。

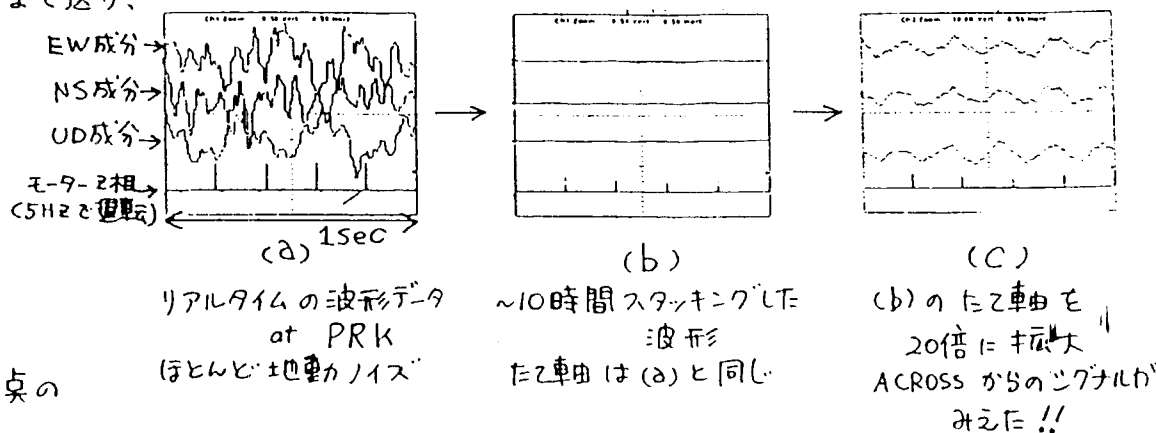


図2

A13 精密制御定常震源 (ACROSS) の実証実験

2 信号の複素フーリエ係数の決定

○羽佐田業子、武井康子*、中野優、熊澤峰夫、山岡耕春、東田進也*、池田典宏、井上修一、宮川幸治(名大理) (*東大震研)

ACROSS DOES WORK 2. Determination of complex Fourier components

Y. Hasada, Y. Takei*, M. Nakano, M. Kumazawa, K. Yamaoka, S. Tsukada*,

N. Ikeda, S. Inoue, K. Miyakawa (Nagoya Univ.) (*ERI, Univ. of Tokyo)

TSスタッカーによって得られた時系列データ(100Hzサンプリング、データ長10s)をDFTによって0.01Hzから50.01Hzまで0.1Hz間隔の複素周波数成分に変換し、ACROSSからのシグナル成分を抽出する。具体的には、ACROSSの回転と同じ周波数での複素フーリエ係数が、シグナルの振幅と位相の情報を持つ。これを用いた解析(次の講演)を行う前に、この中に含まれる誤差とその原因を以下のように評価した。

S/Nの評価 図1にACROSSを13.41Hzで運転した時の観測点SKMのEW成分の振幅スペクトルを示す。図の13.41Hzのピークの高さとバックグラウンドノイズの振幅との比がS/Nである。大学構内のノイズレベルは平日で数mkine程度、休日はその約1/10である。図には、スタッキング回数 n が少ない段階でのスペクトルも重ねてかいてある。 $n=1$ ではACROSSの回転に同期した信号はあまり見えていないが、 n が大きくなるにつれてピークが際立ってくる。 S/N は理論的に予想されるとおり、 $n^{1/2}$ で増大した。今回の実験ではどの観測点でも S/N が数100～数10程度になるようスタッキング時間を決めたが、さらにスタッキングを重ねれば S/N をより改善することができる。

上記の過程で、ACROSSからの信号を表すピークの両側に裾野が存在することに気付いた。周波数の揺らぎのない理想的な信号ならば、スペクトル上でただ1本のピークとして現れるはずであるので、これはACROSSのモーターのクロックと記録計のクロックの相

対的なずれや、モーターの回転あるいはサンプリング間隔の揺らぎなど、ハードウェアの精度についての定量的な情報を与えている。裾野の形状から、数値実験によって、周波数のずれや揺らぎの大きさを推定した。

データの再現性 データの再現性を評価するために、異なる日に全く同じ回転数でACROSSを運転して観測を行ない、同じ観測点におけるACROSSからの信号の振幅と位相を比較した(図2A,B)。1度めの観測と2度めの観測では、振幅で30%、位相で10deg程度の範囲で値が異なり、その差は地動ノイズによるエラーバーを大きく外れている。この系統誤差は主に地震計や増幅器などの機器の特性変動によるものと考えられる。ACROSSで地下の状態の微小な変化を検出するためには、この系統誤差をできる限り小さくしなければならない。特に、機器の振幅・位相特性の温度などによる変化を最小にする技術的改良の必要性を改めて認識した。

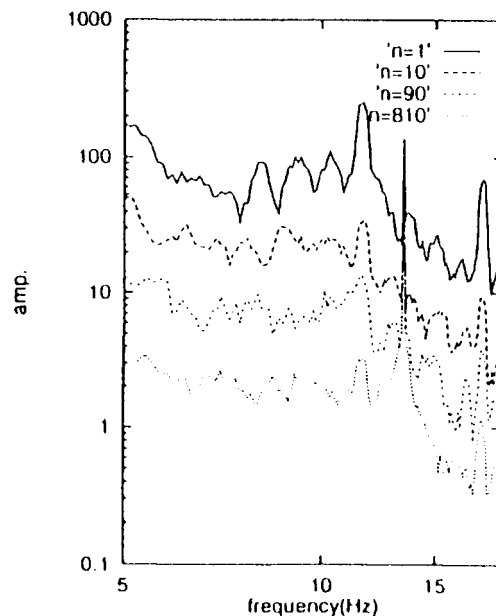


図1. 観測されたデータの振幅スペクトル

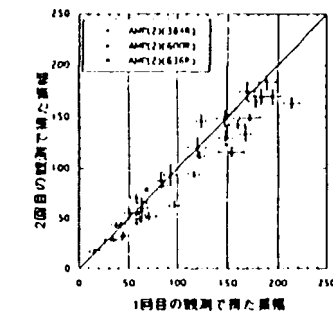


図2A. 振幅の再現性

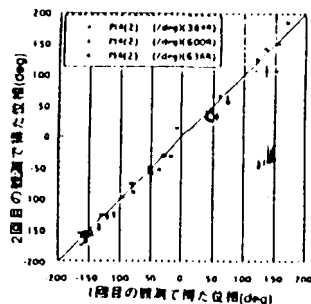


図2B. 位相の再現性

A14 精密制御定常震源 (ACROSS) の実証実験

3 周波数系列としての伝達関数とケブストラム解析

○ 武井康子*, 熊澤峰夫, 熊谷博之, 羽佐田葉子, 山岡耕春, 東田進也*, 中野優, 池田典宏, 井上修一, 宮川幸治 (名大理, *東大震研)

ACROSS DOES WORK

2. Transfer function as a frequency sequence and cepstrum analysis

Y. Takei*, M. Kumazawa, H. Kumagai, Y. Hasada, K. Yamaoka, S. Tsukada*, M. Nakano, N. Ikeda, S. Inoue, K. Miyakawa (Nagoya Univ., *ERI, Univ. of Tokyo)

2で得た複素フーリエ係数を周波数系列にて表現したものが震源から観測点までの伝達関数 $H(f)$ である^{注1}(図1,2)。今回の実験では、5つの観測点での地動各3成分ごとに、それぞれ正・逆回転に対する伝達関数を得た。この総計30本の伝達関数(複素数)をここでは $H_{j,i}^n(f)$ と書く (j は各観測点、 i は地動の各成分、 n は fwd = 正回転または rev = 逆回転)。

正・逆回転のデータから、直交する二成分のデータへ z 相の出る時刻の偏心荷重の重心の方向を $+x$ 方向、それから90度正回転した方向を $+y$ 方向とする。 x または y 方向のみへの加震に対する伝達関数 H^x と H^y は、 $H_{j,i}^{\text{fwd}}$ と $H_{j,i}^{\text{rev}}$ から、

$H_{j,i}^x = (H_{j,i}^{\text{fwd}} + H_{j,i}^{\text{rev}})/2$ と $H_{j,i}^y = -i(H_{j,i}^{\text{fwd}} - H_{j,i}^{\text{rev}})/2$ によって求められる。これに対応して、各観測点の地動の水平成分も、 x 方向と y 方向に分解して表す。 $H_{\text{SKM},x}$ と $H_{\text{SKM},y}$ の2つを図1a,bに示す。観測点SKMは震源から約120mの距離にある。

ケブストラム解析 図1に示した伝達関数の中には、P波、S波、表面波、層境界での反射波など、到着時刻の異なるいくつかの波の情報が重ね合わさっている。ケブストラム解析によりこれらの波を分離・同定する。周波数系列のサンプリング間隔 $\Delta f = 0.2\text{Hz}$ に対応する「ナイキスト時間 $T_n (=1/2\Delta f)$ 」は2.5secであり、これ以上遅く到着する波は周波数系列上でエリアシングを起こしている。

本学会の熊谷らの講演予稿(次頁)に $H_{\text{SKM},x}$ (図1a)を存否ケブ

ストラム解析した図を示す。卓越する約2Hzのケブレンシー成分は到着時刻0.5sec($= (2\text{Hz})^{-1}$)の波に相当する。ランドエアガンによる既存のデータと比べるとこれは表面波の到着時刻を表している。

より遠い観測点DOG(震源から約300m)までの伝達関数(図2)ではSKMより高いケブレンシー成分が卓越し、表面波がより遅く到着しているのが分かる。

結論 ACROSSの小型試作機を用いて、データの取得から解析までを一通り行い、大筋では当初の理論的予測に沿った結果が得られた。この過程で、ハードウェア及びソフトウェアに関わる様々な問題点の洗い出しができ、今後の研究開発の方向が明らかになった。

注1 「単位インパルスに対する変位応答」の意味での伝達関数(m/N)を求めるには、これをさらに13 (=周波数による震源の力の増大の効果 $12 \times$ 速度振幅を変位振幅に直すファクター)で割る必要がある。ここに示す図は全て13で割る前の図。

図1a

Transfer function for SKM

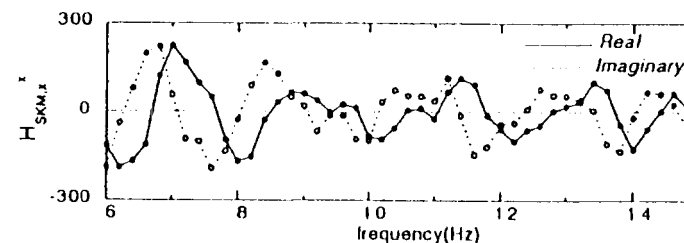


図1b

Transfer function for SKM

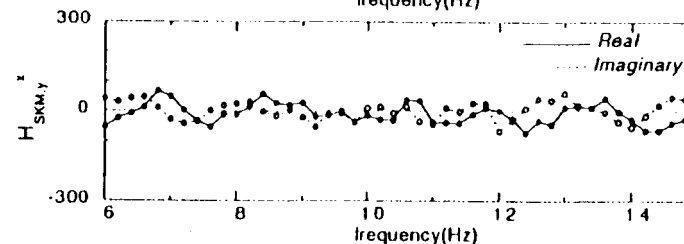
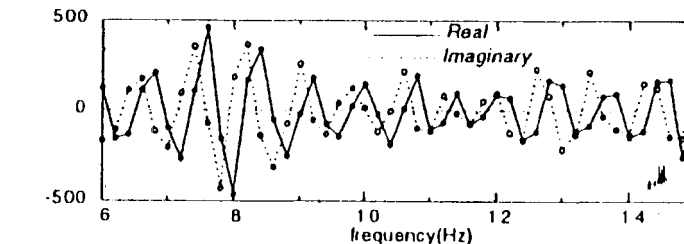


図2

Transfer function for DOG



A15 複素存否ケプストラム理論と ACROSSの観測データ解析のためのアルゴリズムの開発研究

熊澤峰夫、[○]熊谷博之（名大理）

THEORY OF COMPLEX SOMPI CEPSTRUM AND ALGORITHM
FOR ANALYSIS OF ACROSS DATA

Minco Kumazawa & Hiroyuki Kumagai (Nagoya Univ.)

ACROSS SYSTEMで得られるデータは、震源でのデルタ関数的励起入力に対する観測点での振動出力の伝達関数のフーリエ変換である。現時点で想定される実用的ACROSSによる観測で得られるのは、限られた周波数範囲の等間隔離散周波数系列である。例えば、今回行われた名大のキャンパス内での試験観測では、6 Hz から 15 Hz まで 0.2 Hz おきに 46 個の cos, sin 成分の大きさのデータである。周波数変調ACROSSができたとして得られるデータの仕様は、例えば、0.01 Hz おきに 24.95 Hz から 25.05 Hz までの 21 個の複素数系列、というものである。このようなデータから、孤立波として観測点に到着する波の走時を決定するには、複素存否ケプストラムが有用であることを、昨秋の地震学会で報告した。しかし、データもなかったので、アルゴリズム、解析例などを具体的に提示しなかった。

複素存否ケプストラム 周波数間隔 Δf の有限長等間隔離散複素系列データを、整数周波数 $j = (f(j) - f_0) / \Delta f$ によって

$$X(j) = C(j) - iS(j) + n(j) \quad (0 \leq j \leq N; f_0 \leq f(j) \leq f_0 + N\Delta f) \quad (1)$$

と与える。ただし、 $C(j)$ と $S(j)$ はそれぞれ、データの cos と sin 成分、 $n(j)$ はノイズである。ケプストラム解析とは、 $X(j)$ に含まれる周期性を次の形に分解することである。

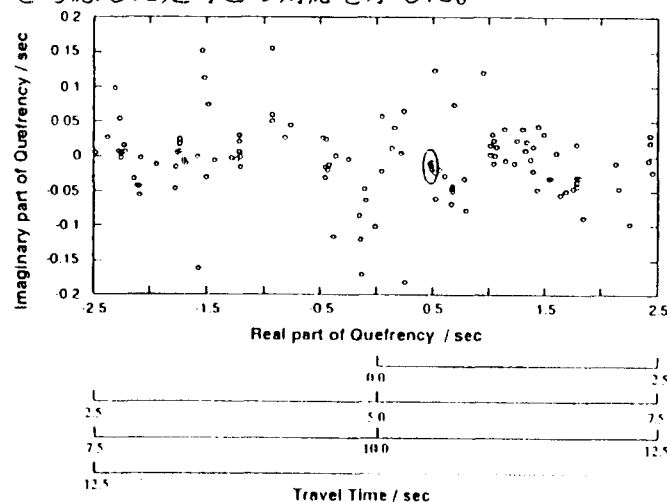
$$X(j) = \sum_k x_k \exp(-i 2\pi T_k j \Delta f) + n'(j) \quad (0 < k \leq N/2) \quad (2)$$

ただし、 T_k は複素ケフレンシー、 $n'(j)$ はノイズである。 T_k の実部が k 番目の波の到着時刻を、その虚部が到着時刻の広がり、 x_k が振幅を示す。(2)は(1)のフーリエ表現であるが、(1)の短いデータのFTをしても必要な分解能がない。しかし、ノイズを除けば、(2)は $a(s)$ を複素ARパラメータとした斎次AR方程式

$$\sum_k a(s) X(j-s) = 0 \quad (3)$$

を満たしているので、(1)の(2)への分解は存否法そのものである。これまでの存否法と異なる点は、データが複素数であることと、結果（例えば、ケフレンシーで与える複素時間、時間のエイリアシング）の理解に新しい観念を必要とすることである。

解析例 図1にはACROSSの観測データ（本学会）の存否ケプストラム解析から得られた複素ケフレンシーを存否法の f-g plot の形式で示した。横軸にはさらに、時間領域のエイリアシングを考慮した走時との対応を示した。



結論 複素存否ケプストラム解析が実際に有効であることを示した。AICの適用、誤差評価などは次の課題となる。

A16 小型精密制御震源装置設計試作試験と その特性、および次期実用装置の設計

° 鈴木和司、石川秀蔵、熊澤峰夫、武井康子（名古屋大、東大電研）

長谷吉二、小金井義則（富士電機KK）

Designing and testing of a small prototype ACROSS &
the desinging polycy decision for the routine machines

Kazuji Suzuki, Shuzo Ishikawa, Mineo Kumazawa (Nagoya Univ),

Yasuko Takei (Univ Tokyo), Yoshiji Hase, Yoshinori Koganai (Fuji Elec.KK)

小型ACROSS装置の設計試作試運転によってさまざまな技術的問題点が明らかになった。それらを分析して次期実用装置の設計に反映させ、将来の多様な使用目的に合う装置開発に投資すべき技術の検討を行う。この発表では、動力機械としてのACROSS装置の技術的課題を扱う。

装置の概要 現在試運転中の小型装置の設計図を図1Aに示す。基本的には、回転する偏心質量の遠心力を受けるラジアルニードルベアリングを収納する鋼鉄性容器の上部にデジタル制御のサーボモーターを取付けた構造である。

一次モーメントと二次モーメント サーボモーターの精密制御には、回転体の2次モーメント M_2 が大きい場合には、モーターの定格が大きくなるとハンチング現象（制御フィードバック力不足による振動）を生じる。 M_2 をできるだけ小さくする一方、大きな力を発生するために1次モーメント M_1 （＝偏心質量 M とその重心の偏心距離 R_m の積：回転周波数範囲によって適切な値に変更する必要あり）をできるだけ大きくする必要がある。この矛盾する要求を適切に折り合わせる。この小型装置では M_1 を0～0.5 kgm、発生力を25 Hzで $\sim 10^4$ Nとしてある。

ベアリングとその摩擦 発生する大きな力をできるだけ小さい摩擦で支持するベアリングがこの装置の実用性の成否を決める。通常のベアリングの摩擦係数 γ は ~ 0.003 で小さいとはいえ、摩擦発熱 W は非常に大きく、 $W = (F_o + F_c) \gamma \omega R_o$ (F_o : ベアリングの締めつけ力、

R_o : ベアリング半径、 ω : 回転角周波数、 F_c は遠心力で $F_c = M_1 \omega^2$) は、小型装置でも1 kWに近い値になる。したがって、この小型装置では容器外側に水冷機構をつけてある。実用装置では、数kWの発熱対策として、摩擦係数が格段に小さいエアベアリングを開発使用することが必要であろう。

岩盤への設置方法 ACROSS装置で発生する力は大きく、地表においた状態では、本体の振動の加速度が装置を破壊する。これを堅い岩盤に高剛性で固定することによって、本体が破損することなく、地下に弾性波を放射できるのである。岩盤に加える力をその疲労破壊応力 σ 以下にする。小型装置では大型建築物の基礎にボルト留めした。花崗岩岩盤について σ の安全値を $\sim 10^5$ N/m²と見積って適切な岩盤カップラーを設計した。

次期実用装置の設計に向けて 発生力は $\sim 2 \times 10^5$ N、回転周波数は最高 50 Hz までの次期実用装置の設計図を図1Bに示した。

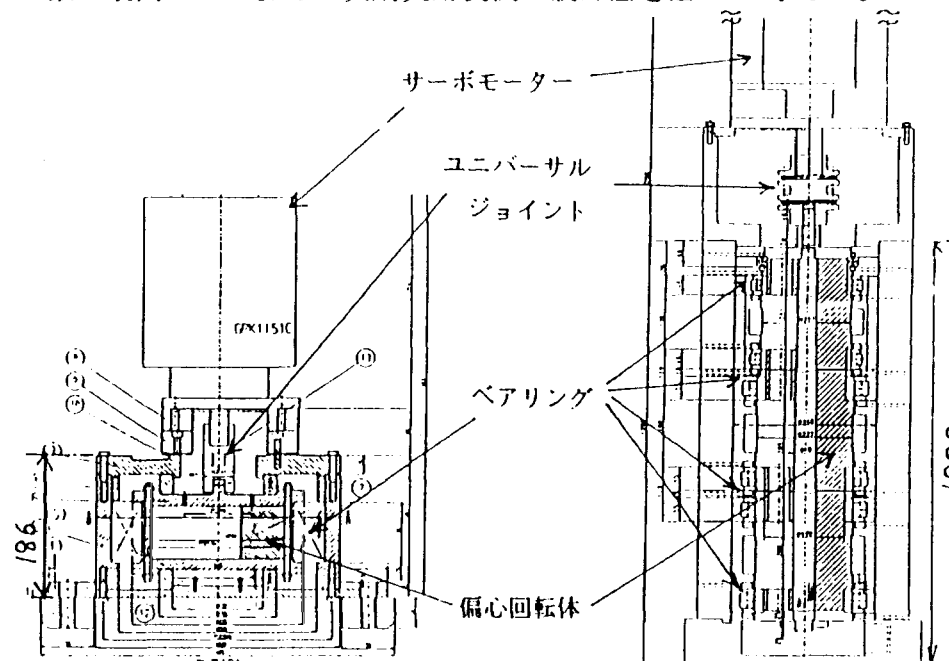


図1 A 小型プロトタイプ B 次期実用装置(本体=0.5x0.5x1.0m³; ca. 2 ton)

A17 周波数変調により等間隔離散的な 複数の周波数を励起する ACROSS

熊澤峰夫、渡辺誠一郎、山岡耕春（名古屋大）

FREQUENCY MODULATION OF ACROSS FOR SIMULTANEOUS EXCITATION OF A SET OF EQUALLY SPACED FREQUENCIES

Mineo Kumazawa, Sei-ichiro Watanabe, and Koshun Yamaoka (Nagoya Univ)

課題の主旨 ACROSS SYSTEMでは、定常的サイン波の弾性波を地下に放射し、離れた地点でその振動を時間区間蓄積型記録装置で収録することによってその周波数における位相振幅（伝達関数のフーリエ成分）を得る。もし等しい周波数間隔で非常に多数（例えば512個）の周波数でのデータが得られれば、そのフーリエ変換によって、インパルス応答に対する時間領域の波形が、したがってスパイク的な孤立波（例えば、反射p波）の到着時刻が得られる。観測できる周波数の数がFTを行うには少ない場合でも存否ケプストラム法を使えば、比較的少数の波の到着時刻は精密決定できる。しかし、データ取得には時間がかかるので、同時に観測できる周波数の数はACROSS装置の数で制約を受ける。したがって、例えば潮汐歪に対する地震波速度の応答を測定することは、一つの周波数の波しか発生しないACROSS装置では現実的な困難を伴うであろう。とりわけ潮汐歪効果の測定は地殻深部応力変動を遠隔観測する強力な新方法として、地下の状態の常時モニターに向けてACROSSの実用化に期待する重要課題である。そこで、1台のACROSS装置で多数のサイン波を同時発生させる方法として、高次モード、AM、FMなどを検討した。ハードウェアの技術上、FMが最も容易であるので、その理論的評価を行った。

周期的周波数変調 ACROSS装置で発生する励起力は $F(t) = M\omega^2 \exp(i\omega t)$ で与えられる。ただし、 M は一次モーメント（この制御はできるが装置が複雑になる）。ここで角周波数 ω を、 $\omega = \omega_0 + \Delta\omega \cos(\Omega t)$ のように周波数変調する。ただし、 ω_0 ：中心角周波数、 $\Delta\omega$ ：変調振幅、 Ω ：変調角周波数。偏心回転体による発生力は、周波数変調で振幅変調するが、この効果は実用範囲（ $\Delta\omega/\omega_0 \ll 1$ ）では小さく無視できる。 $F(t)$ のスペクトル構造は、 $\alpha = \Delta\omega/\Omega$ をパラメーターとして、次の特徴をもつ。

- (1) $\omega = \omega_0 \pm n\Omega$ ($n = 0, 1, 2, \dots, N; N = \sim \alpha$) の離散的ラインスペクトルである。従って、われわれの目的にあう。
- (2) その振幅はBessel関数 $J_n(\alpha)$ で与えられ、 $\sim (2-3)\Omega$ の周期的変動をする。必要なスペクトルラインの数が5以下ならば、 $\alpha \sim 1.5$ でほぼ実用目的にあう。しかし、多数のスペクトルラインを同時に得るために α を大きくすると、振幅の周期変動のため励起効率の小さいチャンネルができてしまう。

そこで、もっと多数のスペクトルラインを同じ程度に励起する最適変調方式を探索した。結論的には、周波数をゆっくり上げ短時間で下げるタイプの非対称三角波変調を基本にするとよいことが分かった。ただし、目標バンド内（ $n < N$ ）の振幅変動とバンド外へのエネルギーリークは多少ある。これを共に最小にするには、三角波の高周波成分を適切に除去することである。最適化への探索はまだ続くであろう。

結論 周波数変調によって1個のACROSS装置で多チャンネル同時送震ができるので、その地下常時モニターへの現実的展望が広がった。その実現には、各チャンネルへ配分する励起エネルギーを必要な水準に保つために、励起力の大きい装置が必要と結論される。今後の装置開発の方向に指針が得られた。

A18 周波数変調精密制御定常震源の制御方式

および時間区間蓄積型記録装置との同期方式

・ 山岡排春, 羽佐田葉子, 中野優, 熊澤峰夫 (名大理),
圓尾等 (富士電気株), 大島宏之 (マークランド株)

Control system of Frequency Modulated ACROSS to be linked with TS Stacking recorders.

Koshun YAMAOKA, Yoko HASADA, Masaru NAKANO, Mineo KUMAZAWA
(Nagoya Univ.)

Hitoshi MARUO (Fuji Electric Co.), Hiroyuki OSHIMA (Markrand Co.)

はじめに ACROSSの周波数変調 (FM-ACROSS) がきわめて有用であることが理論的には示された。そこで、その実用化に向けて次の諸問題を検討した。(1)動力装置であるACROSSの精密な周波数変調制御にはどのような方式が適切で、どの程度までの精密制御が可能か。(2)周波数変調されたACROSSと時間区間蓄積型記録装置との同期の現実的な方式は具体的にどのようなものが可能か。

ACROSSの周波数変調制御 ACROSSのモータの制御は実用機に用いる予定である位相制御方式 (位相 (回転角) を外部から与えるパルス数に比例させる) と、試作機を用いた回転数制御方式 (外部から与える電圧に比例した回転速度を出す) がある。その両方式に対する周波数変調制御法を検討する。要求されるのはモータの位相の時間に対する正確さ、及び回転速度のモータ位相に対する正確さである。つまり $\theta(t)$ と $\omega(\theta)$ の正確さが求められる。

熊澤ほか (本学会講演) によって得られたFM-ACROSSの信号は、 Ω を変調角周波数として、

$$F(t) = \sum_k A_k \exp[i(\omega_0 + k\Omega)t] \quad (k=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

と書くことができる。従って位相 $\theta(t) = \text{Arg}(F(t))$ (ただし、 θ は $0 \sim \infty$ まで積算されていくものとする) は容易に計算できる。

パルスによる位相制御の場合には2000パルスが1回転に対応するので $\Delta\theta = 2\pi/2000$ として $t(N) = \theta^{-1}(N\Delta\theta)$ ($N=0, 1, \dots$) の時刻にパルス

を与えればよい (図1)。この場合位相 $\theta(t)$ には誤差の蓄積は起こらない。結果として $\omega(\theta)$ にも誤差の蓄積がない。電圧による回転速度制御では $\omega(t) = d\theta/dt$ に比例した電圧を与える。この場合モータのロータリーエンコーダから一定回転角 ($\Delta\theta = 2\pi/2000$) ごとに出力されるパルス (A相) に同期させて電圧を変化させてやればよい。つまり $\omega(\theta) = \omega(N\Delta\theta)$ ($N=0, 1, \dots$) をあらかじめ計算しておいて、A相のパルスに同期して ω に比例した電圧を与えればよい (図2)。この場合には $\omega(\theta)$ には誤差の蓄積がないが、 $\theta(t) = \int \omega(\theta) d\theta$ の誤差は蓄積するので $\omega(\theta)$ の最適値を注意深く与える必要がある。

時間区間蓄積型記録装置との同期と精密時刻管理 パルスによる位相制御の場合には、同一パルスに同期させて記録装置のAD変換をコントロールすればよい。従って両方をGPS時計によって管理すればよく、遠隔地での同期も容易である。ACROSSは10MHz程度を発生するGPS時計が必要になるが、記録装置は1Hzのパルスが与えられれば十分である。

一方電圧による回転速度制御の場合にはモータのコントローラからタイミング信号をもらって記録計のAD変換をスタートさせればよいが、遠隔地での同期のためには同期信号を送る必要がある。

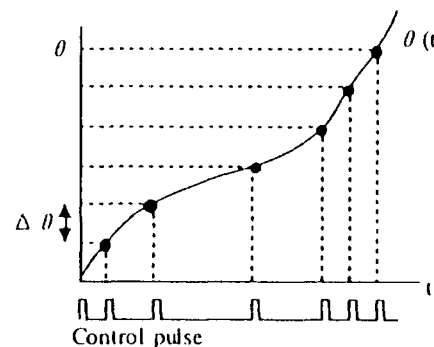


図1 位相制御

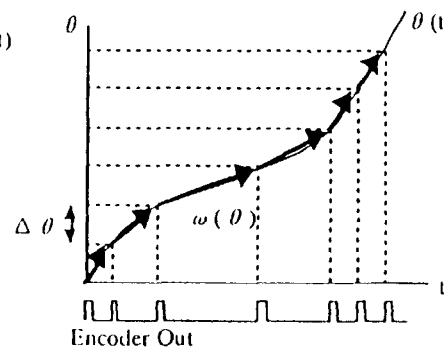


図2 回転速度制御

A19

水パイプオルガン：海上反射探査法の精密制御震源

°小川克郎、熊澤峰夫（名古屋大）、島 伸和（千葉大）

WATER-PIPE ORGAN: AN ACROSS FOR SEISMIC
EXPLORATION UNDER WATERS

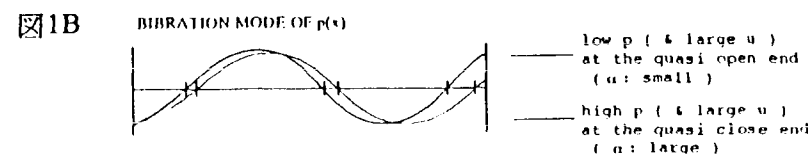
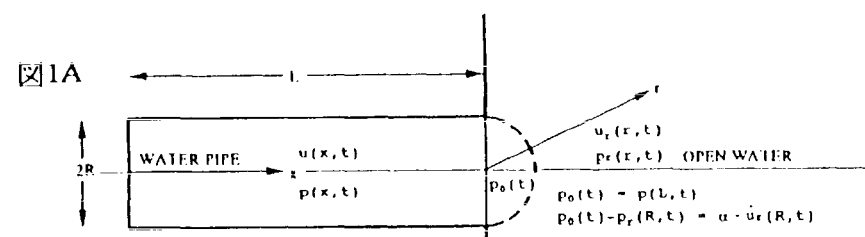
Katsuro Ogawa, Mineo Kumazawa (Nagoya Univ.)

& Nobukazu Seama (Chiba Univ.)

背景 精密に周波数制御した定常的サイン波を地下に放射することによる地下構造解析法として、ACROSS SYSTEMを提案した(前回)。これまでの震源装置の開発においては、どのように効率的にかつ非破壊的に地震動のエネルギーを堅い岩盤に励起放射するかが課題であって、海上でのACROSSの活用技術を考察してこなかった。エアガンなどのパルス的震源においては、エネルギーが時間局在しているために、ある限度より強い震源は、バブリング（一種の破壊現象）のため波形の制御が困難でエネルギー効率にも限界がある。それに対して、定常的震源では破壊現象がなく、振幅は小さくてもエネルギーが周波数軸上で局在しているので、もしこれが技術的に実現できれば、ACROSSを海上でも使えて、S/Nの高い反射波記録が得られる。

アプローチの方向 水中に周波数を精密に制御した音波を効率的に放射する新しい方法を探索する。流体中に定常的音波を放射する最も簡単でエネルギー効率の高い方法は、笛のように、その媒体の運動を適切に拘束して共鳴を直接励起することであろう。そこで、海中で動作するパイプオルガンの特性を理論的に調べ、これを具体的に実現する技術的な諸問題を検討する。ここでは、これまでに得られた結果を考察し、その実用性についての展望を報告する。

水パイプオルガンの共鳴と波の放射 図1Aのように、水中においたパイプの一端が閉じ、他端が半無限流体に対して半解放になっている共鳴システムの特性を調べる。半解放端における境界の圧力 $p_0(t)$ を流入流出する流体の収支と圧縮率によって与え、パイプ端と半無限媒体と間の流体の速度は圧力差に比例する浸透流で決まるとする。簡単な解析から、パイプ長さだけでなく有効浸透率 α によって、共鳴モードの周波数と Q が決まる。100-1,000 Hz の範囲で必要なパイプの長さは実用上現実的な範囲にある。周波数変調には、パイプの長さを変調周波数で変えればよい。図1Bには、準解放端と準閉端の条件における固有関数の特徴を概念的に示した。エネルギー放射効率、 Q などを望ましい値にする最適な α を選択する。



振動の励起源のエネルギーは、例えば、多穴円盤2枚の相對回転バルブによる高圧水の断続的放出で供給できる。

結論 海上ACROSSとしての水パイプオルガンは、ハードウェアも制御システムも簡単そうであり、小型プロトタイプ実証装置の技術開発、試作、試験は1年でできるであろう。

A20

ACROSSによる野島断層解剖計画

○藤井直之, 山岡耕春, 大井田徹, 山田守, 熊澤峰夫 (名大理)
安藤雅孝, 西上欽也 (京大防災研)

ACROSS project in Awaji

Naoyuki Fujii, Koshun Yamaoka, Toru Ooida, Mamoru Yamada,
Mineo Kumazawa (Nagoya Univ.)
Masataka Ando, Kin'ya Nishigami (DPRI, Kyoto Univ.)

観測目的 断層の地震発生予測を研究するためには地震発生サイクルを通じた断層状態のモニターを行うことが重要である。我々はACROSSシステムによって地震断層近傍における地震波速度変化モニターが可能であることを述べた(93年春期地震学会)。しかし現実には単一の断層で地震サイクル全体をモニターすることは不可能であるので、 $t=0 \sim L$ (L は地震発生周期、 $t=0$ が地震発生時刻)のいくつかの断層を調べて、地震発生サイクルを通じて共通する変化を手がかりとするのが正攻法である。したがってまず $t=0 \sim L$ の断層で震源核形成・治癒プロセスにともなう地震波速度変化や地震波速度の潮汐応答特性の変化を検出することが基本的な重要事項となる。野島断層は $t=+0$ の断層であり、内陸地震発生予測の研究には貴重なフィールドである。我々は $t=100$ 年の根尾谷断層との比較やその他の地震断層との比較も計画している。

観測方法 淡路島の北淡町小倉にACROSS送信装置を設置し、常時振動を発生させる。発生周波数帯の異なる3台のACROSSユニットを同時に稼働させFM変調した波を発生させるので、同時に30本以上の周波数成分を観測することができる。それらの信号を周辺に設置するフィードバック型の地震計や、深さ1000mおよび2000mのボアホールの底に設置された地震計で受信してTS-Stackerにより収録し、地震波速度の時間変化の様子を調べることを計画している。断層面近傍の力学的性質の変化、とくに、断層解剖計画により実施される予定の水の圧入実験などによる変化が検出できるか否かは、短期的には最も興味深い試みとなる。

ACROSS送信施設 実用型ACROSSを設置して観測をするために次のような施設を建設する(図1)。建設にあたってもっとも留意すべきことは地盤の強度、及びACROSSと地盤とのカップリングである。ACROSSは常時振動を発生するため、軟弱な地盤の場合には振動によってローカルな構造変化が起こり、地震波速度の変化が起きてしまう。小倉では堅固な花崗岩の岩盤を幅6m、奥行き7m、深さ1.8m掘り、鉄筋コンクリートで花崗岩と同程度もしくはそれ以上の剛性と強度を持った土台をつくる(この土台を地中音波送信ブロックと称する)。この地中音波送信ブロックにはACROSS送信装置を固定するための鋼鉄製の箱を埋め込む(これを岩盤カプラーボックスと称する)。岩盤カプラーボックスへはデライトブロック等によりACROSSを固定する。振動を発生すると約 10^4 Paの応力を発生するので、ガタのない用にプレストレスをかけて固定をする。

振動発生装置は電話回線を通じて遠隔コントロールするとともに回転数・加速度・温度・騒音などを遠隔モニターし、常時運転可能なものにする。TS-Stackerも同様に遠隔操作できるものにして名古屋大学にてデータ収録を行う予定である。

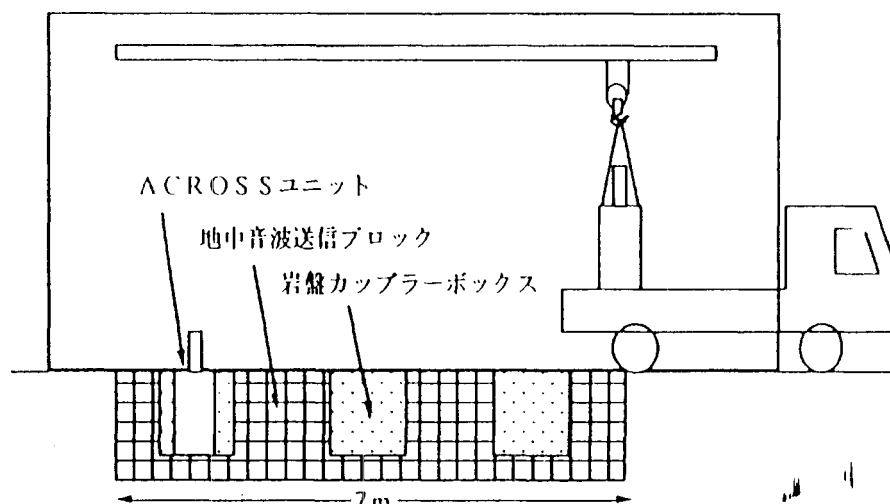


図1 淡路島のACROSS信号発信施設

水パイプオルガン：海上反射探査法の精密制御震源

熊沢峰夫・[○]小川克郎（名古屋大学理学部）

島 伸和（千葉大学理学部）・武井康子（東京大学地震研究所）

Water -Pipe Organ: An Accurately Controlled Sinusoidal Seismic Source for Marine Seismic Reflection

Mineo KUMAZAWA、Katsuro OGAWA

(School of Science, Nagoya University),

Nobukazu Shima (School of Science, Chiba University),

Yasuko TAKEI (Earthquake Research Institute, University of Tokyo),

1 始めに

名古屋大学が開発を進めている精密周波数制御定常正弦波震源による地下構造及びその変化の解析を行うACROSS SYSTEMの開発については既に報告した（文献1、2）。今回はその海上探査への適用についての予備的に検討した結果について報告する。

2 ACROSS SYSTEMの海上での利用

これまでのACROSS SYSTEMの開発ではどのように効率的かつ非破壊的に地震波エネルギーを震源周辺岩盤に励起放射するかを重要な課題としてきた。本システムは原理的には水中震源として利用できる所以そのメカニズムを考察してみる。エアガンなどのパルスの水中震源においては、エネルギーが時間的に局在しているため、ある程度以上に強い震源はバブリングのため波形制御が困難でエネルギー放射効率にも限界が存在している。ダイナマイト震源が周辺岩盤の破壊でエネルギーを消耗すると同じく、エアガンなどのパルスの水中震源のバブリングは一種の破壊現象と見做せる。それに対して、ACROSSは破壊現象がなく、振幅は小さくてもエネルギーが周波数軸上で局在しているので、これを水中で利用する技術が実現できればS/N比の高い反射記録が得られる。

3 アプローチの方向

水中で周波数を精密に制御した音波を効率的に放射する新しい方法を探索しよう。流体中に定常的な音波を放射する最も簡単でエネルギー効率の高い方法は「笛」のように、その媒体の運動を適当に拘束して共鳴振動を直接に励起することである。そこで、水中で作動するパイプオルガンの特性を音響学的理論で調べ、これを具体的に実現する技術的な諸問題を検討する。ここでは、これまでに得られた予備的検討結果を考察して、その実用性について展望を述べる。

4 水パイプオルガンの共鳴と波の放射

図1 Aのように、水中においたパイプの一端を閉じ、他端が半無限流体に対して半解放状態になっている共鳴システムの特性を調べる。半解放端における圧力 $p_o(t)$ を流入・流出する流体の収支と圧縮率によって与え、パイプ端と半無限媒体との間の流体の速度は圧力差に比例する浸透流で決まるとする。簡単な解析から、パイプの長さだけでなく有効浸透率 α によって共鳴モードの周波数と Q が決まる。100–1000 Hz の範囲でパイプの長さは実用上実現可能な範囲にある。周波数変調にはパイプの長さを変調周波数で変えればよい。図1 Bには準解放端と準閉端条件における固有関数の特徴を概念的に示した。エネルギー放射効率、 Q などを望ましい値にする α を選択する。

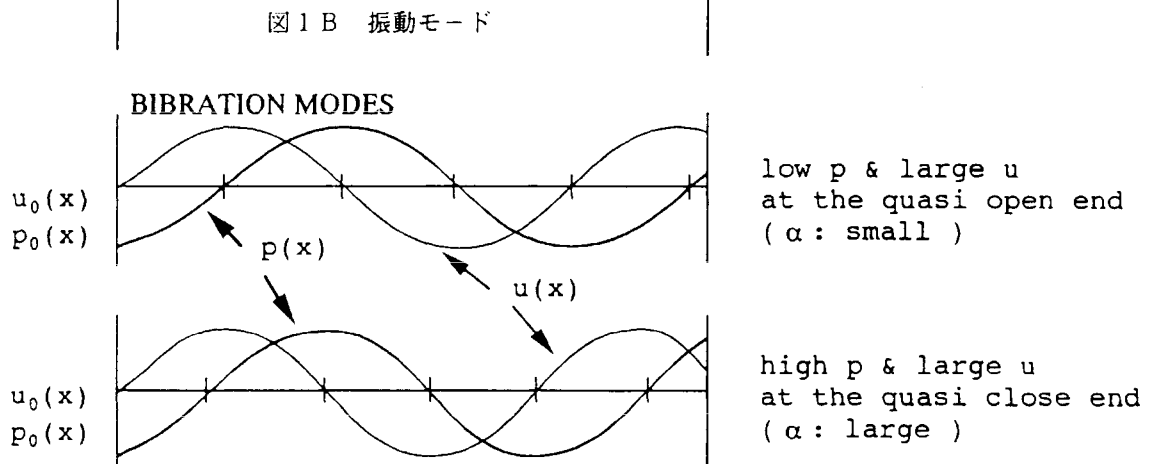
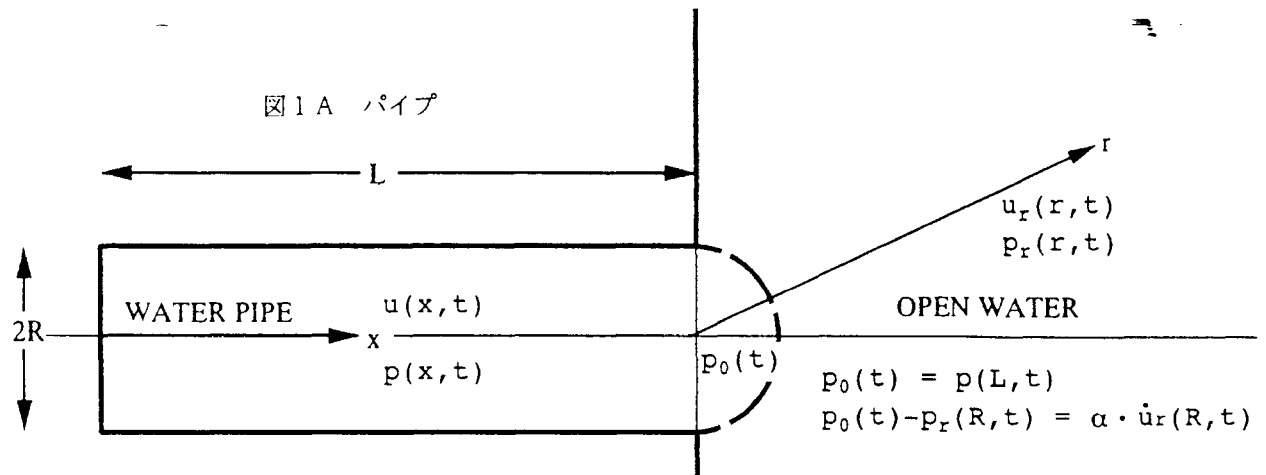
振動の励起源エネルギーは、例えば、二個の多穴円盤の相対回転バブルによる高圧水の断続的放出で供給する。この励起の周波数とパイプ長をマッチさせることは技術的には容易であろう。

5 結論

水中ACROSSとしての水パイプオルガンはハードウェアも制御システムも簡単であり、小型プロトタイプの技術開発、試作、試験は1年ほどでできると考えられる。

参考文献

- 1 熊沢峰夫, 小川克郎, 藤井直之, 山岡耕春, 武井康子 (1995) 精密制御定常震源システムの開発 (1) 全体概念と物理探査への応用可能性, 物理探査学会第92回 (平成7年度春季) 学術講演会講演論文集, 277–281.
- 2 武井康子, 熊沢峰夫, 小川克郎, 山岡耕春, 藤井直之 (1995) 精密制御定常震源システムの開発 (2) システム, 物理探査学会第92回 (平成7年度春季) 学術講演会講演論文集, 282–284.



第1図 水パイプオルガンの概念図

アクロスシステム開発研究の現状報告

熊澤峰夫・藤井直之・小川克郎・[○]山岡耕春・渡邊誠一郎・熊谷博之・鈴木和司・石川秀蔵・山田守・中野優・羽佐田葉子・西原真仁・池田典宏・井上修一・宮川幸治(名大理)・福和伸夫・石原 駿(名大工)・三浦和孝・山田 聡(三弘KK)・武井康子・東原祐道・島崎邦彦・新谷昌人・中谷正生(東大震研)・東田進也(気象庁)・安藤雅孝・西上欣也(京大防災研)・山川 聡・坪田浩二・長谷川健・花木達美(動燃)・圓尾 等・長谷吉二・小金井義則(富士電機)・大島宏之・立石博(マークランドKK)

ACROSS SYSTEM - State of the Art

M. Kumazawa, N. Fujii, K. Ogawa, K. Yamaoka, S. Watanabe, H. Kumagai, K. Suzuki, S. Ishikawa, M. Yamada, M. Nakano, Y. Hasada, M. Nishihara, N. Ikeda, S. Inoue, K. Miyakawa, N. Fukuwa, K. Ishihara (Nagoya Univ.), K. Miura, S. Yamada (Sanko), Y. Takei, H. Higashihara, K. Shimazaki, M. Araya, M. Nakatani (ERI, Univ. Tokyo), S. Tsukada (JMA), M. Ando, K. Nishigami (DPRI, Kyoto Univ.), M. Yamakawa, K. Tsubota, K. Hasegawa, T. Hanaki (PN C), H. Maruo, K. Hase, Y. Koganai (Fuji Electric), H. Oshima and H. Tateishi (Markrand).

アクロスシステムとは、周波数を精密に制御した単力定常サイン波源から放射される弾性波の観測によって、周波数領域の伝達関数を直接取得して、地下構造とその経時変化をマッピングする新しい方法である(地震学会、H6秋、H7春秋)。その実用化には多くの基礎研究を必要とするものの、これまでの方法と比べて劇的に高いポテンシャルをもつと予測される。そこで、上記のメンバーがそれぞれの役割を分担して、装置開発やデータ解析法の基礎から、プロトタイプと実用試験装置による実験へ、さらに地下構造の経時変化検出の実証実験へと組織的研究を着々と進めている。今回はその現状を報告する。

(1) 実用試験型定常震源装置 富士電機が製作を分担。

1. 定置式震源：振幅が10 tonf 程度、周波数範囲が10Hzから50 Hzまでの定常サイン波を 0.1 mHz以上の高精度で発信する装置で、3個の偏心質量回転装置とその制御駆動電源から構成されている。また、この震源装置を地盤に固定して振動エネルギーを効率的に、かつ地盤を破壊させないで地中に伝送する「岩盤カプラー」を開発しその基礎工事を行っている。この装置による試験観測は動燃との共同研究として岐阜県土岐市で行う。また淡路島にも同様の装置を設置し、ボアホール地震観測と合わせて断層面近傍の地震波速度変化検出をめざす。

2. 移動式震源：車搭載式の小型震源で、地面に押しつけて固定するだけで弾性波を効率よく地下に照射する装置(HIT: Handy Illumination Tool)を製作中である。振幅は1tonf 程度と小さいが、2個の偏心錘を同期逆回転させ直線偏向S波も発生する点に特徴がある。

(2) FMコントローラ 震源装置の駆動電源を制御して、発振周波数をFM変調するパルス列(最大 50 kHzの任意のパルス列)発生装置を試作した。これは、GPS信号に同期した回転震源の立ち上げと定常運転を制御するものであるが、最大の特徴は、複数の周波数の定常サイン波を同時発生させることができる。これによって、弾性波伝達関数の周波数範囲は限定されるけれども、多数のフーリエ成分を同時に観測するシステムが確保できると期待されている。

(3) 高精度時間区間蓄積型記録装置 マークランドが担当して製作中。定常地震観測点用 3 CH, 24 bit 分解能の記録装置で、スタッキングとサンプリングを $\sim 5 \mu s$ の精度でGPS絶対時刻に同期させる。

(4) 多チャンネル記録装置 三弘が製作を分担。HITからの信号を32台の3成分地震計で構成するアレイで観測し収録する。これによって波数領域でのデータ取得を行い、将来的には地下構造のホログラフィーを実現することを目指す。当面、大霧(霧島火山)で地熱地帯の地震波速度時間変化の検出実験を行う予定である。

(5) プロトタイプ装置の試験運転による問題点の洗いだしとデータ処理解析手法の開拓 さまざまな技術的問題の発生にたいして、比較的機敏に対応策を案出して問題解決を行っている。

(6) 開発研究体制の整備 従来の地震学とは全く異なる発想に基づいた新しいシステムの開発とそれを用いた地下構造解明手法確立には膨大な数の新鮮な研究課題がある。そこで、名大では、大学院+学部学生5名と研究者がともどもトレーニングを行っており、本年4月からの実用試験観測に向けて、他の研究機関も研究者(2+ α 名のポストドク参加も予定)が組織的研究推進の体制を作りつつある。

火山の地下構造を探る ACROSSシステムの開発

山岡耕春¹・武井康子²・熊澤峰夫¹・藤井直之¹・小川克郎¹・熊谷博之¹・鈴木和司¹・渡邊誠一郎¹・東田進也¹・中野優¹・羽佐田葉子¹・池田典宏¹・井上修一¹・宮川幸治¹ (1:名古屋大, 2:東大震研, 3:気象庁)

Development of ACROSS for Exploring Volcano Structure

K.Yamaoka¹, Y.Takei², M.Kumazawa¹, N.Fujii¹, K.Ogawa¹, S.Watanabe¹, H.Kumagai¹, K.Suzuki¹, S.Tsukada¹, M. Nakano¹, Y.Hasada¹, N. Ikeda¹, S. Inoue¹, K.Miyakawa¹
(1:Nagoya Univ., 2:ERI, 3:JMA)

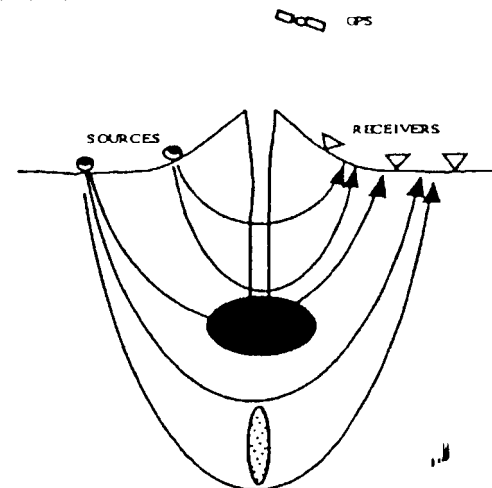
マグマの動きなどの火山活動は様々な観測量の変化として現れる。従来の手法の多くはその変化を受動的に捉えようとするものであった。我々は遠隔測定が可能で高い空間分解能を持つ地震波の特長に着目し、精密に制御された弾性波を地下に向かって能動的に放射し、地震波速度構造の変化を測定する方法を考案した。この方法は理論的には0.1ミリ秒の精度があり、従来の方法より格段に高い。

火山活動は地震波速度構造の変化としてとらえられる。比較的浅い領域では火道を満たしたマグマが地震波速度の増加をもたらす。歪の変化は微小割れ目の状態を変化させ地震波速度を変化させる。マグマだまりでは結晶分化や冷却・マグマの最注入が原因になる。深部ではマグマの浮力によりマグマ周辺の応力状態が変化する。これらの変化を高精度にモニターするために(1)定常的にサイン波を地下に向けて送信する震源、(2)震源に同期する事により地下から返ってきた微少な信号を記録できる装置、(3)効率的で高精度な解析法を考案し、ACROSS (Accurately Controlled Routinely Operated Seismic Source) システムと名付け、実用化に向けた開発研究を行っている。ACROSSシステムの特長は：(1)シングルフォールを発生するため波の発生効率がよいこと、(2)震源付近の

地盤を破壊しないため、連続測定ができること、(3)送信装置と受信装置を正確に制御できることである。送信する弾性波信号の周波数を正確に制御できればエネルギーが小さくてもS/N比がかせげる。そのため周辺の岩盤を破壊しないのである。

このような震源として偏心質量回転装置を製作した。10 tonf程度の力を10Hzから50 Hzまでの範囲で0.1 mHz以上の高精度で発信できる。試験観測は岐阜県土岐市と淡路島で行う予定である。また移動式の小型震源装置も開発中であり、大霧(霧島火山)で地熱地帯の地震波速度時間変化の検出実験を行う予定である。

受信装置としては信号を一定間隔で繰り返し足しあわせて(スタッキングして)ノイズを除去する装置を製作した。装置は多チャンネル狭帯域記録装置として働き地面の振動から送信周波数のみを拾い出す。送信装置と受信装置はともにGPS時計に同期させ、観測距離によらず相互に数 μ 秒の精度が得られる。現在、記録装置としては定常地震観測点に設置する高精度型と、移動観測に用いる多チャンネル型を製作している。特に多チャンネル型では地震計のアレイで観測し、周波数領域だけでなく波数領域でのデータ取得を行う。



ACROSSによる火山モニターの概念図

P42 SH波発生用アクロスの地表面カップラー (I)

熊澤峰夫、石原競、鈴木和司、小川克郎 (名大、NEDO)

Ground coupler for anti-rocking ACROSS to generate SH wave (I)

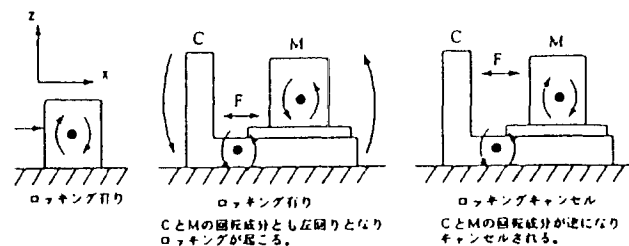
M. Kumazawa, K. Ishihara, K. Suzuki, and K. Ogawa (Nagoya Univ.)

人工震源装置でSH波を励起すると装置がロッキングするとされ、これまでSH波源はほとんど活用されていない。すでに淡路島と東濃に設置したアクロス装置では、大きな岩盤カップラー ($2 \times 5 \times 7 \text{ m}^3$ 程度) を埋設して力の作用点を地表面以下に設定してロッキングを制約している。地表面設置の可搬装置に予測される二つの困難は:

- (1) 地表面と震源装置の間がすべて力と変位が伝わらない。
 - (2) 力の作用点が地面より上にあり装置のロッキングが起こる。
- 本報告では、この2点についての理論的検討を行い、周波数や位相だけでなく、ロッキングも制御した「SH波用アンチロッキング精密制御定常震源装置」の概念を提示する。具体的な理論や設計については本報告に引き続く (II) と (III) で述べる。

1 地表面との剪断カップリング 水平方向の変位と剪断応力を地下に伝えるのには、直感的に、震源装置の底面に多数の釘をだす、地面に打ち込んだ杭に固定する、などの方法を思い付く。しかし軟弱な地表面とでも確実にカップリングを簡便にとる実用的な方法がある。軟弱な地表面物質を想定すると、その剪断強度 σ は圧力 P にほぼ比例してあがり、その係数は大体摩擦係数 γ とみてよい。そこで、 $\sigma = \sigma_0 + \gamma P$ とする。地面との接触面積を S 、垂直荷重力を Mg 、地下に伝達したい力を F とする。そうすると、 $F < \sigma S = (\sigma_0 + \gamma Mg/S)S$ を満たせばよい。例えば、 $\sigma_0 = 10^3 \text{ N/m}^2 (= 0.01 \text{ bar})$ 、 $\gamma = 0.2$ という軟弱な地盤でも、例えば、 $S = 5 \text{ m}^2$ 、 $M = 10^4 \text{ kg}$ とすれば、 $F = 2.5 \times 10^4 \text{ N}$ となり、接触面はすべることなく、2 tonf 以上の振幅の剪断力の振動を地面に伝えてSH波の励起が実現できる。

2 ロッキング現象の原因 半無限弾性体の表面に固定した物体に周期的な力を加えてみる。発生する物体のX方向とZ方向の並進運動は、弾性体にシングルフォース源として作用するので、エネルギーを波動として効率よく地下に放射して (振動の Q は小)、それぞれ $P+SV$ 波、 $P+SH$ 波の震源になる。しかし、同時に回転運動も発生する。この振動は半無限弾性体に対してトルク源として働くが、トルクモードのエネルギー放射効率は低く (武井 熊澤, 1995) 振動の Q が大きいので、回転共鳴、即ち、ロッキングが起こる。これは地面とのカップリングを障害し、無用の振動を励起するエネルギー損失だけでなく、震源装置の破壊さえもたらす可能性がある。



3 アンチロッキングチューナー 震源装置にはある程度以上の質量を必要とするから、それを地面に接するカップラー部と力を発生する慣性質量部の二つに分ける。震源装置内の両者の角運動量の和が常にゼロになるように装置を調整すればロッキングは発生しない。運動方程式を解いてみると、ロッキングレスの条件は各要素の重心と力の作用点の相対高さ、周波数、および地面と震源装置内の弾性率の比のような要因で決まる。そこで、地盤の剛性に震源装置の力学的特性を適切にチューニングする方法を工夫することによって、ロッキングが起こらないようにできる筈である。

4 展望 以上の結果は、初等力学的考察から導かれる当たり前のことであった。しかし、その帰結の意義は大きい。これまで使えなかったSH波を用いた構造探査が実現できるからである。

P43 SH波発生用アクロスの地表面カップラー(II)

°石原 競*, 熊澤峰夫、武井康子**, 鈴木和司、山岡耕春、小川克郎
(名大、*NEDO、**東大)

Ground coupler for anti-rocking ACROSS to generate SH wave (II)

K.Ishihara, M.Kumazawa, Y.Takei, K.Suzuki, K.Yamaoka & K.Ogawa
(Nagoya Univ., *NEDO, **Univ.Tokyo)

前報 (I) のアンチロッキングカップラーを実現する具体的な方法を理論的に検討する。図1はそのための力学モデルである。半無限の地面 (添字 g) に固定したカップラー台 (添字 c) と慣性質量 (添字 m または、なし) の間に周期的水平方向に働く力源 F をおく。三つの力学系の間の相互作用を考慮して、運動方程式を連立して解き、カップラーが回転振動しない条件を明らかにする。

運動方程式による解析 まず、図1のスライド機構がなく、単にカップラー台に周期的な力 F が与えられた場合の水平変位の振幅 u_g と回転角度 θ_g の振幅は、角周波数 ω の関数として次のように与えられる。

$$u_g = (F/H_g) / \{1 - i [R\omega/\beta] (\omega/\omega_g) - (\omega/\omega_g)^2\} \quad (1)$$

$$\sim -F/H_g \quad \text{for } \omega < \omega_g : \quad \omega_g^2 = H_g/m_c, \quad H_g = \sim 7R\mu$$

$$\theta_g = F(\Delta h_c/G_g) / \{1 - (\omega/\omega_g)^2 - i [R\omega/\beta] (\omega/\omega_g)^3\} \quad (2)$$

$$\sim F\Delta h_c/G_g \quad \text{for } \omega < \omega_g : \quad \omega_g^2 = G_g/I_c, \quad G_g = \sim 4R^3\mu$$

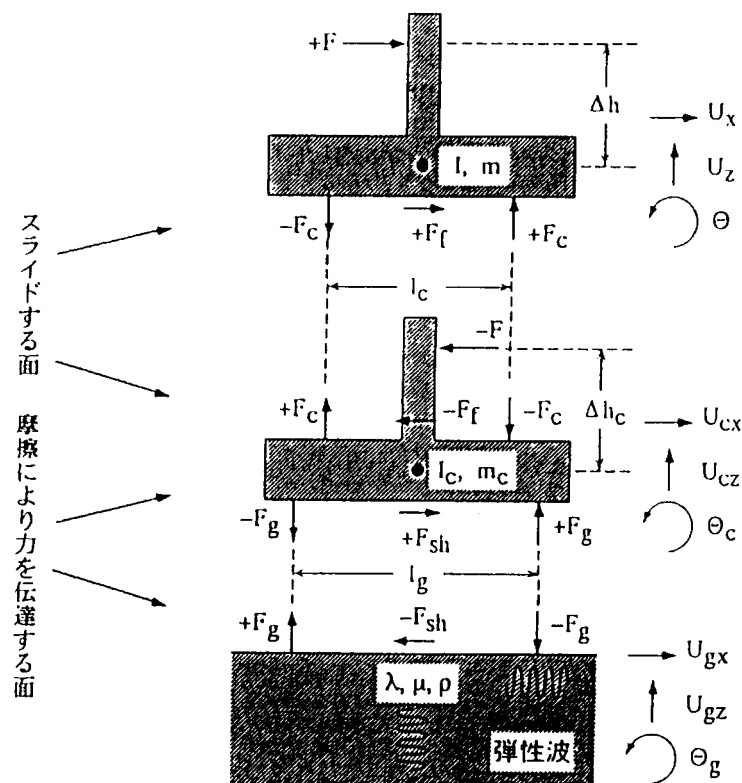
$$= \text{divergent at } \omega = \sim \omega_g$$

但し、 R : 地面との接触面の半径、 Δh_c : カップラー台の重心位置を基準にした F の作用点の高さ、 $\mu = \lambda$: 地面の弾性定数を代表する剛性率、 β : 横波速度で代表する地震波速度である。虚数部は波の放射によるエネルギー損失を意味する (表面波の効果は無視)。式(1)から、変位振幅 $\sim F/10R\mu$ 、剪断応力 $\sim F/\pi R^2$ のSH波の放射ができること、式(2)からロッキングが発生することがわかる。

次に、図に示した機構の場合を考える。この時、水平振動と回転振動とは、慣性マスとカップラー台の間の摩擦力 F_s を通じて相互作用するが、その効果は小さいので無視する。しかし両者の間の実効トルク剛性 C (Nm) は考慮してカップラー台に働くトルクを $T_c = -C(\theta - \theta_g)$ であらわす。 $\omega < \omega_g$ のもとでもっとも

らしい数値の範囲を考慮すると、 $\theta_g \sim -F[(\Delta h_c - \Delta h)G_g] + (\Delta h_c/C)$ となるので、
($\Delta h/\Delta h_c = 1 + (G_g/C)$) (3)

をアンチロッキングの条件とみてよい。ただし Δh は慣性質量の重心から力の作用点までの高さである。注意：式(3)は近似式である。



結論 地盤の弾性には大きな巾 ($G_g = (0.1 \sim 150) \times 10^9 \text{ Nm}$) があり、装置の剛性も $C = (1 \sim 10) \times 10^9 \text{ Nm}$ の程度にはどうしても設計製作上の不確定性がある。装置剛性を充分高く $G_g/C \sim 0$ にできるなら、 $\Delta h = \Delta h_c$ とすればよい。実現できる C の大きさには限界があるので、 C をできるだけ大きくしておき、 G_g の値によって $\Delta h/\Delta h_c$ の値をチューニングするのがよい、と結論される。

P44 SH波発生用アクロスの地表面カップラー(III)

°石原競°, 鈴木和司, 熊澤峰夫, 山岡耕春, 小川克郎 (名大, °NEDO)

Ground coupler for anti-rocking ACROSS to generate SH wave (III)

K.Ishihara, K.Suzuki, M.Kumazawa, K.Yamaoka & K.Ogawa

(Nagoya Univ., °NEDO)

前報 (I, II) までで、アンチロッキングに関する理論的背景を明かにしたので、本報ではこれを基礎に、発生力が 400 kgf のリニアモーター (Linear Motor) を用いた LM-ACROSS 装置の具体的設計を検討したのでそれを提示する。

装置の概要と機構の詳細 図 1 に LM-ACROSS の概要を示す。地表面カップラーとその上をスライドする慣性マスとの間に力を発生するリニアモーターをいれる。リニアモーターの可動部分の質量は慣性マスとその回転モーメントに、固定部分はカップラーの質量と回転モーメントに組み込む。前報で力の作用点と慣性質量の重心の相対的高さがアンチロッキングのチューニング機能をもつことを明かにしている。そこで、実用装置では力の作用点でなく、機構的機械的に調整のしやすい慣性マスの重心の位置を可変にした。慣性マスを最大 8 個の取り外しのできる鉄ブロック (@50 kg) の組み合わせとし、質量の絶対値を (慣性モーメントも) 調整できるとともに、質量を固定する高さを変えられる (50 mm おき) ねじ留め方式を採用した。

慣性マスと地表面カップラーの間のすべりには、有効なシングルフォースを損失しないための低摩擦 (摩擦発熱の減少にも必要) および、相対回転に対する高い剛性、の両方を必要とする。通常のリニアベアリングでは、剛性が低いだけでなく、本装置のようにストロークが小さい使用条件ではロール接点の応力集中部分が局在するために耐久性に欠ける。結局、剛性の高い (たわまない) 平板の間にモリブデン・グリス潤滑とし、その滑動面を減圧密封すれば、特別の抑さえ機構がなくても大気圧 (10 tonf/m²) で密着して平行度を保つと予測される。この場合、本装置に想定する諸元と使用条件の数値に対して発熱量は 300 W 以下と小さく力の損失は 20% 以下と推定される。

展望 このアンチロッキング機構は、リニアモーター駆動のリニアユニットと偏心マス回転によるロータリーユニットのどちらにでも使える。図 2 には、現在製作中の 400 kgf 発生可搬式小型アクロス装置の設計図を示した。可搬式の 2 tonf 発生用の装置も今秋には完成し、S 波構造探査の研究に用いる予定である。

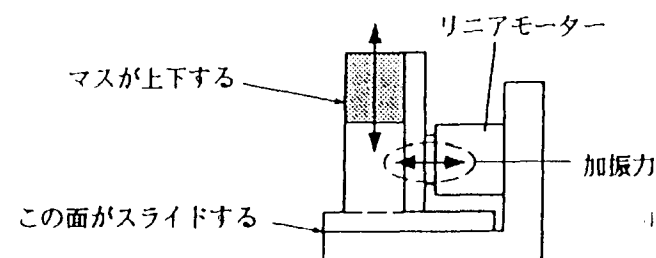


図 1: Anti-Rocking LM-ACROSS の 概要

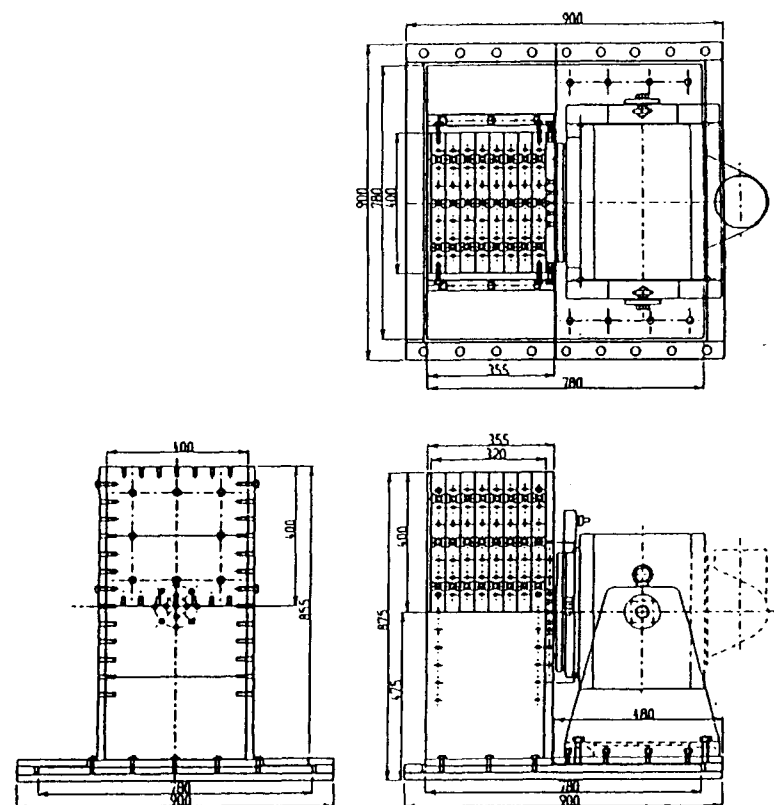


図 2: Anti-Rocking LM-ACROSS の 設計図

音波と電磁波のアクロスによる地殻内の水と応力と物理的状態の常時リモートセンシングへむけて

°小川克郎、熊澤峰夫（名大、理）

Towards the continuous remote sensing of H_2O , tectonic stress and physical states in the Earth's crust by means of acoustic and electromagnetic across

K.Ogawa & M.Kumazawa (Dept. EPS., Nagoya Univ.)

1 いろいろな ACROSS

ACROSS (Accurately Controlled Routine Operated Seismic Source)

は、地下にむけて定常的に放射する周期的な波動を観測して、波の速度（減衰特性を含む）構造とその微小な変化を検出できるものである。この原理と手法は、弾性波だけでなく地下を伝播する電磁波にも使える。要は、定常的サイン波がノイズに最も強い信号であることを徹底的活用する点にあるので、ACROSSの最後のSSをSignal Systemの頭字SSである、という変更をしたい。弾性波の場合には、ACoustic ACROSSだから単にACROSS、電磁波ではElectroMagneticの頭字をとってEM ACROSSと呼ぶことにする。

2 EM ACROSSによる H_2O のリモセン

電磁波の速度は $300 \text{ m}/\mu\text{s}$ であるが、地殻内では、珪酸塩酸化物と H_2O の誘電率が大きく、電磁波の伝播速度は $100 \text{ m}/\mu\text{s}$ 以下である。また、 H_2O の存在と高温の両方の効果によって電気伝導度も大きい。ため減衰が著しく、特に低い周波数では波動としての特性をもたない。しかし、このような場合でも（ $\kappa \gg \varepsilon\omega$ 、但し κ =電気伝導度、 ε =誘電率、 ω =角周波数）情報伝達速度としての位相速度 v は定義され、点源からの情報伝播は $\exp[i\omega(t-r/v)](1/r)\exp(-r/\lambda)$ と表される。ただし、 $v = (2\omega/\mu\kappa)^{1/2}$ （ μ =透磁率）、 $\lambda = (2/\mu\kappa\omega)^{1/2} = v/\omega$ は空間減衰係数である。 μ の値は岩石の状態でありあまり変わらないので、 v と λ の値はほとんど κ と周波数で決まる。 κ が大きくなると、 v は弾性波速度とあまり変わらない程度までも下がり得る。GPS 時計によっ

て $\sim 0.01\mu\text{s}$ の時間計測が行えるので、 λ が小さく送信源からの信号振幅は小さくはなるが、電磁アクロスによって v を走時として測定できる。これは経路にそった平均的電気伝導度の情報をもっており、電気伝導度とその時間変化の3Dマッピングを実現できよう。この方法はCS-MT法と似ているが、信号源・観測点間の伝達関数を使う点で異なり、オングストローム法による熱拡散率測定と相似である。

地殻浅部の電気伝導度は主に岩石組織中に含まれる H_2O の量できまる。岩石中の H_2O が方向性をもつ微小クラックを満たしているとすると、電気伝導度に異方性が存在し、それが v の分極ベクトル依存性として観測できる。すなわち、EMアクロスは、地殻中の水の量と分布状態を常時リモートセンシングする方法の一つである。

3 地殻応力のリモセン - 潮汐応答による較正の活用

地殻の浅部では、潮汐歪みによって地震波速度と減衰特性が変化する。振幅と周期のわかった潮汐歪みへの応答感度は、深部ほど小さくはなろうが、将来はアクロスで精密に観測できるであろう。特に異方性に関わる特性とその時間変動のトモグラフィーは、地殻内のテクトニックな歪みのリモートセンシングになる。しかし、弾性波アクロスだけでリモセン手法を確立するのは困難であろう。

4 地震波と電磁波を同時観測し統一的に解釈すること

地殻内の物理的状態を反映する観測量（弾性波、電磁波速度）は、歪みとそれに応答するクラックとそれを充填する水の挙動の総合的效果に依存する。観測量を知りたい物理量に翻訳できるために必要不可欠な要素として、次の二つの重要性を改めて認識する。

(1) 物性を支配する物理過程を明かにする実験的、理論的研究

(2) 弾性波と電磁波の両方の同時平行観測と統一的解析手法

地殻内の物理的状態の常時遠隔観測を実現することは、EislerやAkiらが夢に描いた固体地球科学の基礎である。その実現可能な手段として、アクロスの研究開発の位置付けと役割を明確にしておきたい。

P46

精密制御定常震源と時間区間蓄積記録装置のGPS刻時による遠隔同期計測実験

山岡耕春（名大理）・國友孝洋・花木達美（動燃）・石原競（NEDO）・池田典宏・羽佐田葉子・宮川幸治・中野優・熊澤峰夫（名大理）

Experiment on synchlonization between ACROSS and TS-Stacker refering to GPS time.

K.Yamaoka(Nagoya Univ.), T.Kunitomo,T.Hanaki(PNC),
K.Ishihara(NEDO), N.Ikeda, Y.Hasada, K.Miyakawa, M.Nakano,
M.Kumazawa(Nagoya Univ.)

正弦波を発生する震源装置と一定時間間隔で繰り返しスタッキングをする記録装置は、相互に精密に同期されてはじめて高いSN比で信号を伝達することが出来る。地球上どこでも1 μ 秒の精度が得られるGPS時計を同期に用いる発想は本システムを考案した段階からあった。その構想の元に関発中であった実用試験型精密制御震源装置(ACROSS)と24ビット分解能の時間区間蓄積型記録装置(TSS)が完成し、相互の同期観測試験に成功した。

ACROSS（富士電機製）の同期にはGPS刻時に同期した10MPPS（Pulse Per Second）を発生させることの出来るGPS時計（TrueTime社XL-DC）を用い、TSS（MARKRAND製）の同期には内蔵されているものを用いた。TrueTime社のGPS時計とTSSのGPS時計とは相互に5 μ 秒程度の刻時のばらつきがある。ACROSSはGPSの1MPPSに同期したDA変換装置により発生させるパルスで制御した。

実験は岐阜県土岐市のどうねん地科学センター東濃鉾山敷地内に設置されたACROSS震源を用いて行った。観測点は震源から約500mと約2400mの場所に設置した。信号は 1×10^5 Nの力の25.00Hzの信号を定常的に送信した。TSSのスタッキング周期は100秒、サンプリングは163.84Hz（100秒間で2 14 サンプル）とした。図1には2400mの地点で60分間スタッキングをした結果が示してある。この場所は国道21号線から200mの距離でノイズレベルが高く、またケーブルのシールド不足から電氣的な60Hzのノイズも盛

大に混入している。そのため時間領域の波形からは25Hzを認識することは出来ない。しかしながら周波数領域では明確に信号を認識することができる。25Hzのピーク付近を拡大し、10分間と60分間のスタッキングの結果を図2に示す。10分と60分を比較すると25.00Hzのピークの大きさに変化は見られない。またピークは25.00Hzのみに表れ、両隣の25.01と24.99Hzではノイズレベルになっている。これらは周波数制御と同期の正確さを表している。

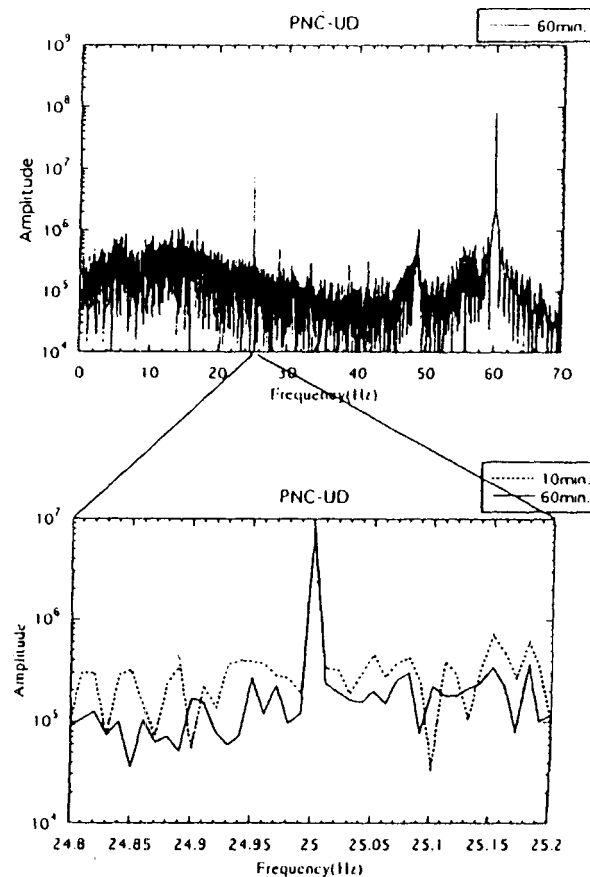


図1（上）2.4km離れた場所での観測結果

図2（下）そのうちの25.00Hz付近の拡大

P47 回転型 ACROSS の周波数安定性

○國友孝洋（動燃），石原競（NEDO）
池田典宏・山岡耕春・熊澤峰夫・小川克郎（名大理）

Frequency stability of the rotary-type ACROSS

T. Kunitomo(PNC), K. Ishihara(NEDO)
N. Ikeda, K. Yamaoka, M. Kumazawa, K. Ogawa(Nagoya Univ.)

ACROSSは、周波数を精密に制御した単力定常サイン波源から放射される弾性波の観測によって、周波数領域の伝達関数を直接取得して、地下構造とその経時変化をマッピングする新しい方法である。この目的のために、震源は厳密に周波数および位相が制御されている必要がある。ところが、回転周波数や位相の安定性に関しては、これまで定量的な議論ができるデータがなく、小型プロトタイプ ACROSSの信号を地震計で観測して得られた波形データから回転が揺らいでいるのではないかとこの可能性が指摘されていた（例えば、平成7年地震学会）。今回、実用型ACROSS（20tonf：東濃および淡路に設置）の回転安定性の測定を行って、 10^{-4} 程度の安定性が確認されたので報告する。

〔回転周期の測定〕

ACROSSのサーボモータ（富士電気）は、ロータリエンコーダと呼ばれる位置センサを持ち、回転の位相をモニタすることができる。本研究では、1回転毎に出力されるZ相パルスの周期を測定することで回転の安定性を調べた。測定にはPC98およびユニバーサル・カウンタボード（マイクロサイエンス, UCM-4398BPC）を用い、1～5時間の連続記録を取得した。

〔測定結果および議論〕

淡路島および東濃ACROSSでの回転周波数（Z相周期の逆数）を図1および2に示す。図1は速度をアナログ回路で設定したものであり、サーボ特性によると見られる短周期の揺らぎとドリフトとが認められる。図2はPC98およびGPS時計を基準クロックとしたD/A

変換ボード（カノーブス）によって発生させたパルス列で制御した場合の回転周波数である。図1に比べて周波数が極めて安定しており、1サイクル毎の周波数揺らぎは設定周波数のほぼ1/10,000以内に収まっている。ただし、現在のところノイズによると見られる回転異常が発生しており（図2のひげパルス）、GPSクロックに対して位相ずれを起こすことがある。位相ずれの量は1時間当たり（4～6） $\times 2\pi / 2000$ （ $=0.7 \sim 1.1^\circ$ ）と極めて小さい。この微小な位相ずれの復帰調整は簡単なもので、完全にGPS同期させるための対策を講じている。

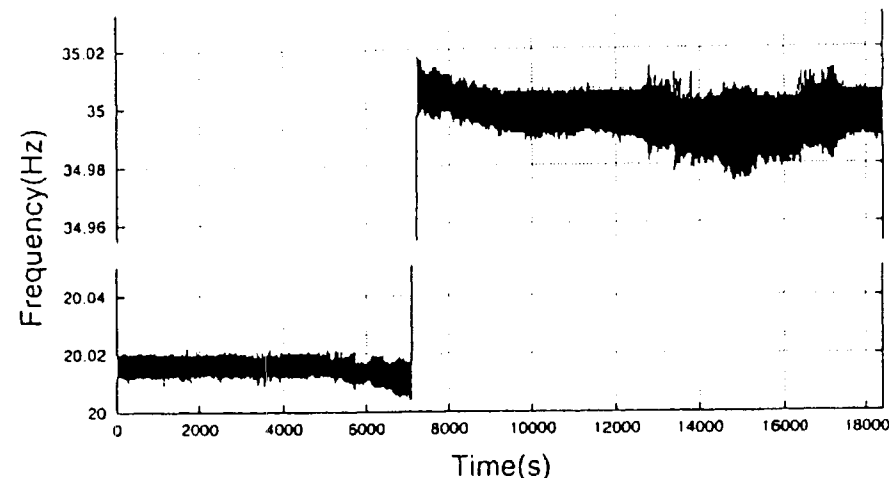


図1 アナログ回路により周波数制御を行った場合の周波数変動

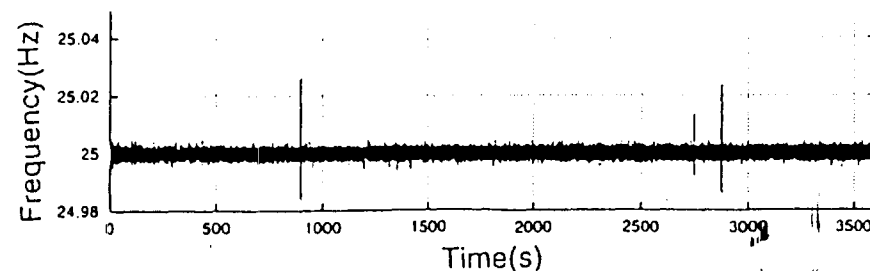


図2 パルス入力により周波数制御を行った場合の周波数変動

P48

精密制御定常震源 (ACROSS) の実証実験
4. ケプストラム解析による走時決定

○羽佐田葉子、熊澤峰夫、熊谷博之(名大理)、武井康子(東大震研)、
ACROSS グループ

ACROSS DOES WORK

4. Determination of travel times by cepstrum analysis

Yoko Hasada, Mineo Kumazawa, Hiroyuki Kumagai(Nagoya Univ.),
Yasuko Takei(ERI, Univ. of Tokyo) and ACROSS group

実験概要

昨年我々は名古屋大学構内に観測点を展開し、ACROSSの小型試作機を用いた実証実験を行なった(95年地震学会)。観測点は600mほどの範囲内に5点設置し、固有周期1Hzの3成分速度型地震計で観測したデータを有線または無線テレメータで送信して、TS-stackerで4~8時間スタッキングして記録した。ACROSS(偏心荷重7kgを7cm半径で回転)は、6Hz~15Hzまでの0.2Hzおきの46個の回転数について正・逆両回転で運転した。

取得データ

取得データは5観測点3成分の、6Hz~15Hzまでの0.2Hzおきの複素フーリエ係数である。正回転・逆回転のデータから直交する2成分のデータに分解し、震源から観測点方向のデータに変換した。次に、速度データを変位に変換するファクター $\frac{1}{2\pi f}$ をかけ、震源の力の周波数依存性を補正するファクター f^2 で割って震源から観測点までの伝達関数(変位/力)を求めた。

ケプストラム解析

このようにして得た伝達関数は、限られた周波数範囲の離散複素周波数系列である。このデータから複素存否ケプストラム解析によって観測点に到着する波の走時の決定した結果を図1に示す。また、図2にはフーリエ変換を用いたケプストラム解析の結果を示す。複素存否ケプストラム解析では、データに含まれる波の複素ケフレンシーが求められ、その実部が波の到着時刻を表し、虚部は吸収などによる到着した波の広がり

具合を表す。図1の各観測点の結果は横軸に実部、縦軸に虚部を取り、異なるARオーダーでの結果を重ねて表示してある。点の集中したところをシグナルと見なす。さらに各観測点の結果を震源からの距離に対応するように並べてある。図2のフーリエ変換による各観測点の結果の縦軸には各ケフレンシー成分のパワーをとってある。

議論

データには機器の特性変動などによる誤差が多く含まれているが、図1、2から表面波と思われる幾つかの波が伝播する様子が見てとれる。このことによりACROSSの周波数データから複素存否ケプストラムによって走時を決定できることが実証された。しかし、データには共鳴によると思われる変化が見られるが、今回の解析では考慮していない。震源・観測点間に共鳴体が存在する場合の解析手法開発が次の課題となる。

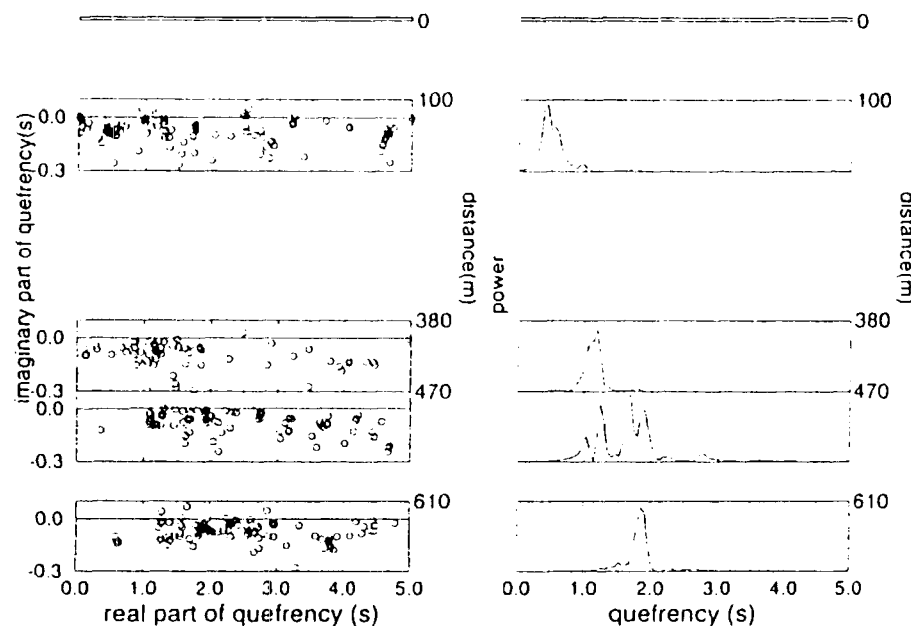


図1 複素存否ケプストラムの結果
(SH成分)

図2 フーリエ変換によるケプストラムの結果 (SH成分)

C22-P01s アクロス法による音波物性測定

○米田 明、羽佐田 葉子、熊澤 峰夫 (名大理)

The Across for laboratory acoustic measurements.

A. Yoneda, Y. Hasada, M. Kumazawa (Nagoya Univ.)

(1) 初めに

アクロス法は定常単色音源からの音波の振幅と位相を(すなわち伝達関数)を直接測定することにより波の伝播時間を求める方法である。新しい地下探査法として開発が進められているが、波動を扱う手法として一般的なものであるので音波物性測定にも適用できる。そこでアクロス法による物性測定実験の特徴を、従来の方法(パルス法・共振法)と比較検討した。また実証実験として水の音速測定実験の結果も報告する。アクロス法の詳細については関連講演を参照していただきたい。

(2) アクロス法による音速測定実験の実験技術的特徴

アクロス法では物体サイズより長波長の波でも測定可能である。従ってパルス法や共振法よりも、低周波領域までの広帯域測定ができる利点がある。

アクロス法では(単色)波の振幅と位相を正確に決定する必要があるので、信号源と測定系の振幅位相特性の校正が必須である。共振法では、信号源と測定系の振幅特性がほぼ平坦である限り、あまり問題にはならない。パルス法ではエコーパルス間の時間差を測定する事でこの問題を回避している。

(3) アクロス法による測定データ解析の特徴

単一の波だけを観測する場合は、音源と受信子間の距離を x 、受信シグナルの音源にたいする位相の遅れを ϕ とすると、波の位相速度は

$$v_p = \frac{\omega}{k} = \frac{x(\omega)}{2\pi n + \phi} \quad (\omega: \text{角周波数}; k: \text{波数}; n: \text{適当な整数})$$

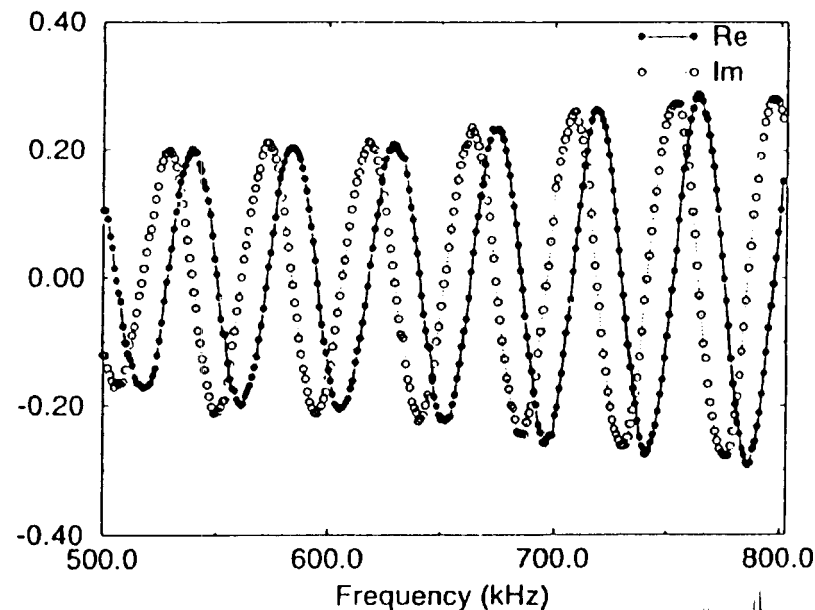
で与えられる。複数の波(直達波と反射波、またはP波とS波等)を同時に測定する場合は、複数の周波数で振幅(A)と位相を測定し、得られた複素ケプストラム($Z(\omega) = Ae^{i\phi}$)に対しケプストラム解析を行い各々のケフレンシー(トラベルタイム)を求める。この場合のケフレンシーは dv/dk すなわち群速度に対応する。速度分散がある場合でも、位相速度も各ケフレンシー成分の位相から求まる。

(4) 実証実験—水の音速測定

大きな水槽中に発信器と受信器をいれ、アクロス測定を行った。発信器と受信器の間隔は 32.0mm、測定周波数は 500-800 kHz である。まずパースト波によるパルス法測定を行い、反射波と直達波のトラベルタイムと振幅比を測定した(振幅比 $\sim 2\%$)。信号源と測定系の振幅位相特性の校正は今回は行っていない。電氣的ノイズは殆どなかった。今回の測定によるケプストラムを図に示す。図より約 45kHz の“周期”が読みとれる。これはトラベルタイムの逆数に対応する。存否ケフレンシー解析より、ケフレンシー(トラベルタイム)は 22.3 μsec ($v_p = 1.43 \text{ km/s}$)と求められた。また微弱な反射波のケフレンシー(約 67 μsec)も求まっている。

(5) まとめ

アクロス法は広い周波数帯で物性測定に使えることが分かった。アクロス法ではケプストラム解析により、単一の測定データから複数の波のトラベルタイムを独立に決定できる。従って試料構成や測定法を工夫することで、パルス法や共振法ではできない多様な測定が可能になる。



水の音速測定結果のケプストラム。横軸は周波数。実部と虚部の両方をプロットした。横軸に沿っての“周期”の逆数がケフレンシーを与える。

ACROSS による地震波速度構造 の時間変化の検出

○宮川幸治、國友孝洋*、山岡耕春、熊澤峰夫
(名大理、*動燃)

Detecting any change of seismic velocity by the
continuous observation

K.Miyakawa, T.Kunitom*, K.Yamaoka, M.Kumazawa
(Nagoya Univ., *PNC)

ACROSS は精密に周波数制御された波を地面に放射するため、その信号の振幅や位相の時間変化を連続的に観測することによって、震源-観測点間の地震波速度構造の時間変化が検出できると期待される。今回我々は定常観測点を設置し、震源からの信号の連続観測を開始したのでその予察的な結果について報告する。

実験概要 震源は岐阜県土岐市の東濃鉱山にある ACROSS を用いた。観測点は震源から約 2.5km 離れた瑞浪地殻変動観測点、及び約 17.5km 離れた犬山地震観測所とした。いずれの観測点でも観測機器は、温度変化を最小限にするために観測壕の中に置かれている(温度変化 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以下)。両観測点とも MARKRAND 1 Hz 速度型地震計を設置した。瑞浪には更に地震計同士の特性の比較を行うために GULARP CMG-3 と RION LA-50 を設置し、また地震波速度の時間変化には潮汐力が多分に関係していると考えられるので、潮汐変動を観測するために CG-3 重力計も設置した。

12月に行った観測では震源を 25Hz(10tF)で回転させた。震源及び観測点の時刻はすべて GPS 同期させており、信号に完全に同期した観測データを得ることが可能である。地震計からのデータは GPS に同期した 24bit A/D 変換器により PC に取り込まれる。サンプリング周波数は 163.84Hz で、データ長は 100 秒である。

結果及び考察 図 1 は瑞浪の MARKRAND 1 Hz による

1.5 時間毎(54 回スタック)のデータを用いたものであり、中段は震源の回転周波数である 25Hz のスペクトルの振幅の時間変化を示したもので、上段はその周辺のノイズレベルの平均を示したものである。下段及び図 2 はその位相変化及び観測点の重力の変動を示したものである。他の地震計においても位相や振幅が同様な変動を示していることは確認している。これらのグラフから、位相と潮汐とに若干の相関があるように見える。これまでの観測では得られたデータ量が少なく、また S/N 比も小さいため潮汐変動との相関の同定は困難であると考えられる。今後の観測によって、より高精度のデータが得られることは期待できる。

図 1

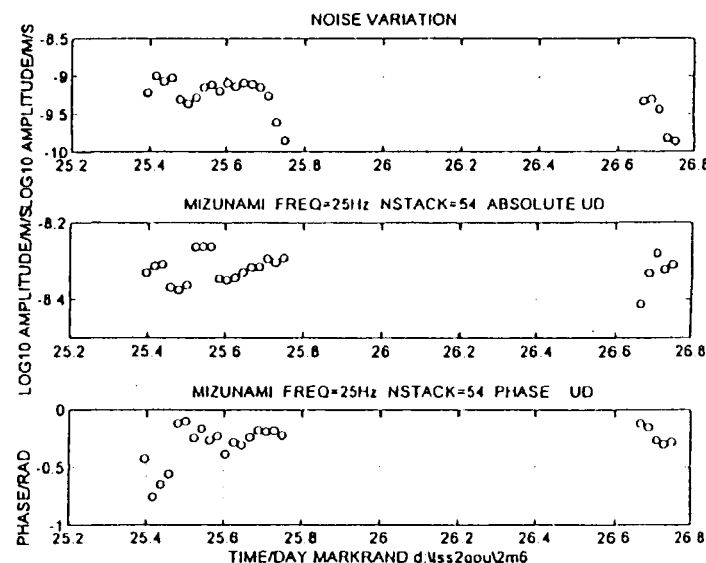
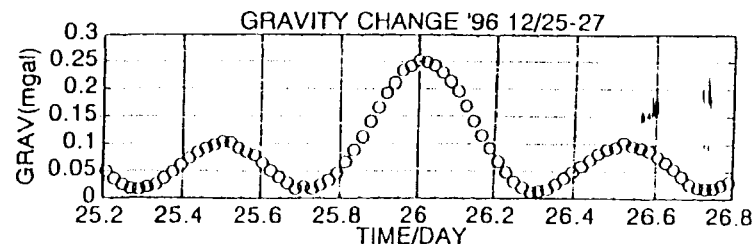


図 2



FM-ACROSSの 実証実験と最適化

○池田典宏・山岡耕春・熊澤峰夫・井上修一・渡邊誠一郎
(名大理)

Proof experiment and optimization of FM-ACROSS

N.Ikeda, K.Yamaoka, M.Kumazawa, S.Inoue, S.Watanabe
(Nagoya Univ)

《はじめに》 ACROSSは、震源装置から放射される精密に周波数制御された定常的サイン波を観測し、周波数領域の伝達関数を取得することで地下構造やその時間変化をもとめる探査法である。しかしながら伝達関数の時間変化を得るためには同時に多数の周波数成分の信号を出す必要があり、一つの周波数ずつしか出さない当初の方式では観測に時間がかかり、比較的速い時間変化を求めるのは困難になる。これを克服するために、ACROSSの回転周波数を変調させて複数の周波数成分を同時に含む波を出すFM-ACROSSが理論的に考えられていた。今回、従来のACROSS震源の回転周波数を変調できるように改良して、実際にFM-ACROSSの実証実験を行い、有効性を確認した。

《FM-ACROSS装置》 実験では、名古屋大学内に設置されているACROSS小型試作機を使った。この試作機のサーボモータはパルスによる位相制御方式であり、パルス間隔を連続的に変化させることにより周波数変調が可能になる。パルスをモータに送る装置としては、PCにD/Aボード(CANOPUS)を取り付けたものを使用した。

《実験内容》 変調のタイプとして、 $f = f_0 + f_a \cos(2\pi f_m t)$

(f_0 : 中心周波数、 f_a : 変調振幅、 f_m : 変調周波数)で記述されるcos変調を与え、それに対するACROSSの実際の回転速度と地動とを測定した。回転速度は、モータの回転速度に比例して出力される電圧出力をモニターし、地動は、震源から3mのところに置いた地震計で測定した。図1には $f_0=10\text{Hz}$ 、 $f_a=8\text{Hz}$ 、 $f_m=4\text{Hz}$ で変調した場合の計測結果を示す。周波数変調と同時に振幅も変調されているのは回転型の震源であるためである。

《結果と考察》 得られたデータのスペクトルは図2に示した

ようになり、理論通り $f=f_0 \pm n f_m$ ($n=0,1,2,\dots$)の位置に等間隔離散的にピークが現れる。実験ではcos変調を与えたためスペクトルピークが不揃いになる欠点がある。そこでより一様な振幅のピークを得るために最適な変調方法を数値的に調べた。その結果なめらかなのこぎり波が望ましいことがわかった(図3)。

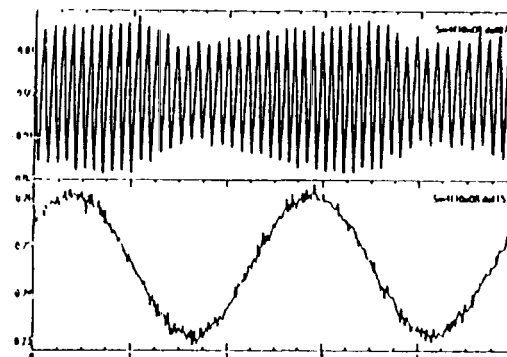


図1. 地震計の水平動記録(上)と回転震源の速度変化(下)

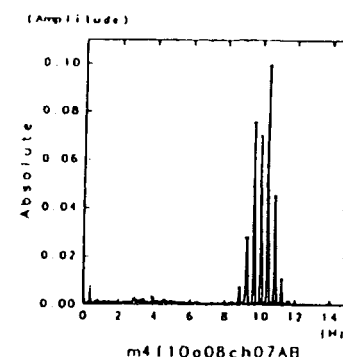


図2. 地震計記録のスペクトル

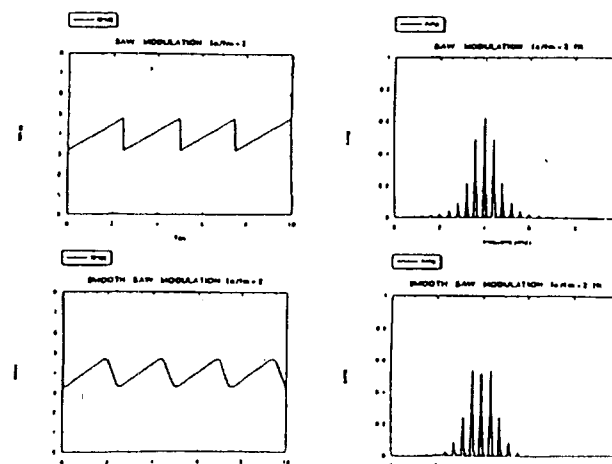


図3. 数値実験の変調タイプ(左)と対応するスペクトル

淡路島におけるACROSS探査実験

1. 実験の概要

○山岡耕春・*國友孝洋・熊谷博之・*石原競・*中谷正夫・
中野優・羽佐田葉子・池田典宏・宮川幸治・奥田隆
(名大・理, *動燃・*NEDO)

The First ACROSS experiment in Awaji Island (I)

○K.Yamaoka, *T.Kunitomo, H.Kumagai, K.Ishihara, M.Nakatani, M.
Nakano, Y.Hasada, N.Ikeda, T.Okuda
(Nagoya Univ., *PNC, *NEDO)

はじめに 平成7年度に実用試験型のACROSSが岐阜県土岐市(動燃による)と淡路島の北淡町(断層解剖計画による)に導入され、運転制御実験などの各種実験が繰り返されてきた。今回96年10月20日から24日にかけて淡路島北淡町のACROSS実験サイトで地下構造探査実験を行ったので報告する。

目的 実験は以下の2つの目的で行われた。(1)観測点を直線上に配置して記録を取り、より実用的な解析法の確立をめざす。その際、反射法によって地下構造の得られている測線上に地震計を配置してACROSSで得られた記録を比較する。(2)800mボアホールの地震計で記録することにより、今後の断層近傍の速度構造時間変化検知のための基礎データを得る。

概要 実験は淡路島ACROSS実験サイトに設置された高速用(最大35Hz)と低速用(最大25Hz)の2台の震源装置を同時に運転して行った。震源装置の制御は2台のPCとファンクションシンセサイザーにより行った。発生周波数と位相の制御はPCの助けにより迅速にできるようになっている。地震計は、固有周期1秒の3成分地震計を海側の反射法の測線にそって5点と、山側の花崗岩上に5点設置した(図1)。信号はPCを利用した多チャンネルのTSスタッカにより記録された。地震計のうち半数にはキャリブレーションを接続し、朝・昼・夕の3回キャリブレーションを行って、機器特性の時間変化を調べた。また800mのボアホールに設置された地震計にもTSスタッカを接続した。計測は、時間分解能をかせぐために5Hzから30Hzまでは0.5Hzおきに、またそのうち16Hzから26Hzまでは時間領域でのデータ長を

かせぐために0.2Hzおきにした。いずれも800秒の記録長で、40dB前後のSN比が達成されている。

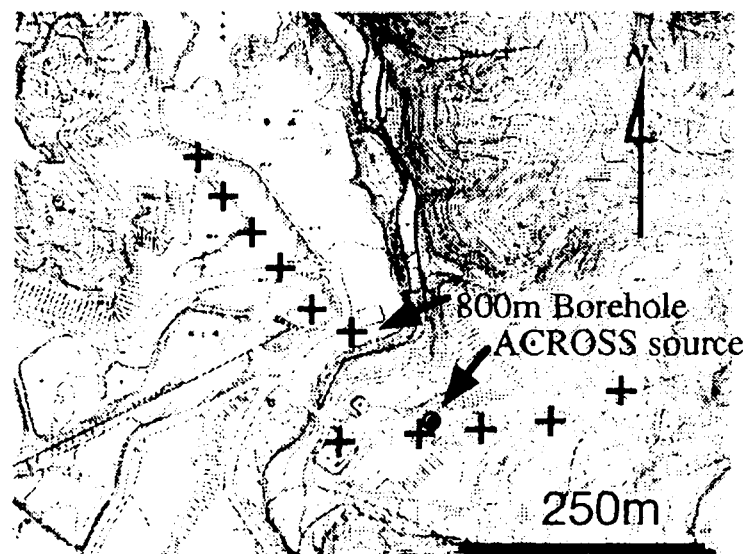


図1. 地震計(+)とACROSS震源の配置。

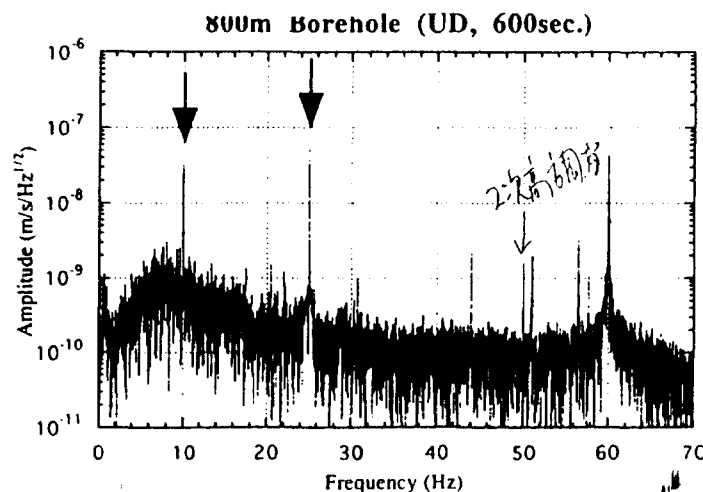


図2. 800mボアホール地震計の記録のスペクトル。(10Hzと25Hzの周波数で送信している)

純粋SH波発生アクロス用アンチロック機構

石原 競 熊澤峰夫 中谷正生 鈴木和司 小川克郎
(名大, NEDO)

Anti-rocking mechanism of ACROSS to generate pure SH wave

K.Ishihara, M.Kumazawa, M.Nakatani, K.Suzuki, K.Ogawa (Nagoya U., NEDO)

地表面に置いただけでSH波を励起放射するアクロス装置の理論と機構について昨秋の地震学会で報告した。その後具体化の検討を進めるうちに、もっとよい方式が見つかったので、その考え方と理論を提示する。

機構上の問題とその解決：これまでの考えは、地表面より上での加振によってカップラー板に生じる回転モーメントを相殺する（ロッキングをさせない）ために、慣性質量の運動と弾性ばねを用いて、ロッキング方向と逆向きのモーメントをカップラー板に加えるものであった。岩盤の剛性に装置をチューニングするための可変パラメーターには、力の作用点の位置、ばねの弾性、カップラーと慣性質量の慣性モーメント比や質量比など多数ある。しかしそれぞれが非線形的に関係しているだけでなく、チューニングを実現する実際の機構が意外に簡単ではなかった。（駆動源を1個を使うという制約のもとでは、簡単な機構を思い付けなかった）これらの問題点を解決する方法として、独立に制御できる駆動力発生装置（以下、駆動源：偏心回転体、または電磁線形加速器）2個を、一方を水平力発生用に、他方を回転モーメント相殺用に使う方式（図1）を案出した。

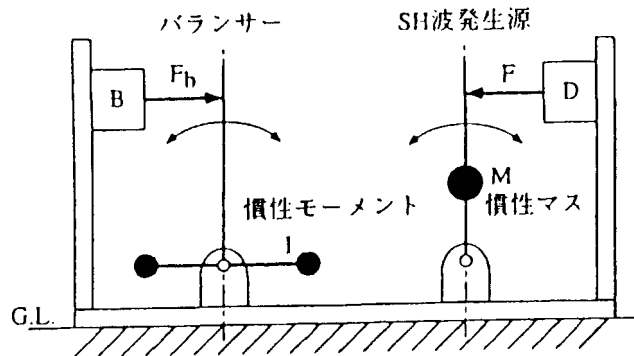


図1 アンチロッキングSH波発生装置(2自由度)の概念図
駆動源Dで慣性質量Mの並進運動と同期して別の駆動源Bで慣性モーメントIを回転振動させて、岩盤カップラー内の角運動量を保存する。

また、力発生に必要な慣性質量の運動を高い剛性で拘束し、かつ摩擦と磨耗を少なくする機構としてベ어링（ピボット）による小振幅回転運動が適切であることがわかった。以下その利点と特長を述べる。

制御性：機械的なチューニング操作がなく、二つの駆動源をそれぞれ独立に数値制御できるので、微妙な調整が簡単に実現できる。

振動方向の設定：慣性質量を回転する軸に取り付ける方式であるため、地表面に一旦設置した装置全体を回転して設置し直さなくても、震源装置内部で慣性質量取り付け方向（図2の θ ）を変えるだけで、任意の方向に加振力を発生できる。したがって、この機構の装置は、鉛直方向への縦波発生用も兼ねることができる。この方式は、固定式の大型装置にも適用できる。

梘子による力増幅：慣性質量の運動をベ어링を用いた小振幅回転運動としたことによって、梘子による力増幅が実現できる。その原理を図2に示す。力増幅率を欲張らない限り、装置の剛性を高くすれば、例えば、400 kgfの駆動源装置（最大変位量 ± 25 mm）で5倍の2 tonf程度の力を安定に発生することができる。したがって、このような機構の装置の実用性は高いと考えられる。

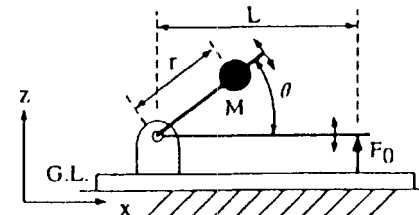


図2 梘子による力の増幅と
力の方角変換の原理

地盤に与える力は次の式で与えられる：

$$(F_x, F_z) = F_0 (L/r) (\sin \theta, -\cos \theta)$$

但し、 F_0 はカップラー板上の駆動源装置が梘子に与えるz方向の力

近地場波動への応用：モーメント相殺目的に駆動源をもう一個使用すると、装置のコスト高や大型化にはなるが、他の有用な機能が付加される利点がある。周波数をスweepし周期的モーメントだけを発生させてその振幅を測定すると、ロッキング共振の周波数 ω_r を決定できる。 ω_r の実部は、装置と地面との接触面の寸法、装置全体の回転モーメント、および地盤の装置近傍における平均的弾性率に、また虚部は地盤の減衰率に依存するので、地盤表層の実効弾性率を瞬時に決定する計測装置として使える。すなわち、主として近地場の波を発生するロッキングの周波数特性測定は、構造解明に遠地波を発生するアクロスと相補的機能をもつのである。純粋な遠地SH波動の発生放射には、地盤の局所的不均質性に起因するロッキング振動さえも、解析して相殺する機能が必要である。

東濃地科学センターにおける アクロス研究－現状と展望－

○熊澤峰夫・國友孝洋・山岡耕春・小川克郎・花木達美・何培明
(動燃、*名古屋大)

ACROSS Research at TONO Geoscience Center, PNC

○M. Kumazawa*, T. Kunitomo, K. Yamaoka*, K. Ogawa*, T. Hanaki and P. He
(PNC, * Nagoya Univ.)

動力炉・核燃料開発事業団／東濃地科学センターにおけるアクロス研究は「陸域地下構造フロンティア研究」の一部門である「地震発生に関する研究」の一環として平成7年度からスタートした。アクロスシステムとは、能動的に地下の状態を見る「光」と「目」を機能する新しい一つの技術体系を構成するものであり、地震波速度および電気伝導度の分布構造、さらにそれらの微小変動をリモートセンシングするための刷新的な地下探査手法である。その開発と研究は、地震発生が予測される地域の地下深部における地殻歪み・応力や地下水の状態などを常時モニターし、地震発生場の物理過程の時間発展解明を目標とするものである。

現状 本研究の第一段階として、岐阜県土岐市の東濃鉦山内に実用試験型の音波アクロスが平成8年7月に設置された。この東濃鉦山アクロスは、アクロス震源の試験および実用化に向けての技術開発を主たる目的としているが、将来は御前崎～土岐市に至る“東海地震”の震源域モニターのための「地中音波送信所」のアレイの一つへと移行することを念頭においている。

東濃鉦山アクロスサイトには、縦置き2台、横置き1台の合計3機の震源を設置した。偏心質量をサーボモータによって精密に位相制御して回転させる、いわゆる回転型アクロスである。3機はそれぞれ最大回転数を異にする(25, 35, 50 Hz)が、いずれも最大周波数回転時でほぼ20 tonfの出力になるように偏心モーメントが設定されている。縦置きはP波およびSH波、横置きはP波およびSV波の出力を主たる目的とする。現在、最大回転数50 Hzのアクロスが横置きにし

てあるが、すべて同じ構造であるため、配置替えも可能である。

平成8年8月からは、単一周波数信号送信実験を開始した。その結果としてアクロスの精密制御特性が実証され、17.5kmまでの距離での振幅データが得られている。更に現在では、周波数変調信号送信実験、送信波位相の時間変化検出実験、および遠隔精密制御操作システムの構築などを進めている。また、東濃鉦山周辺地域への定常的なテレメータ観測点設置、24時間以上の連続運転ならびに潮汐応力歪みに伴う地震波速度変化検出実験などの準備をしている。

展望 東濃鉦山アクロスサイトの完成から5カ月程であるが、アクロスシステムに関する実証的なデータは飛躍的に蓄積されつつある。これまでのアクロスの開発研究とその成果を展望してみると、当初予想していたよりもはるかに速い速度で種々の技術的問題点が解決され、現在懸案の問題についてもすでに見通しの立ったことが多い。またこのような研究の進展によって、未確認であったアクロスがもつ高いポテンシャルと実用的有用性も具体的に明かになりつつある。したがって、今後の研究と開発の方向も明確にしぼられてきており、今後の研究の進展も極めて速いものと予想している。

今後、アクロスを日本列島全体の地殻活動モニターの標準的な手法として確立するために、コストパフォーマンスに優れた標準震源ユニットの開発やアレイ送受信システム、ホログラフィー技術確立に向けた基礎研究を進めて行く。東海地震想定断層モニターについては、陸域の観測システムの現実的な方策を詰めると共に、それを補完する海域での観測に適切な提案ができるようにしたい。

また、上述の音波アクロスの実験が進む中で、地下水の挙動モニターのための新手法として期待される電磁アクロスの理論的な検討も同時に進めている。音波アクロスと電磁アクロスを結合して地下を組織的に観測できるようになった時には、地震発生場における物理過程や震源核など縮約構造の時間発展を直接追いかけて解明する道が開ける筈である。

アクロスは、上記の目的以外にも多様な研究に基礎的手段を提供する極めて広い応用範囲(例えば、いろいろな対象の物理探査)をもっており、そのような分野への波及効果にも多くの成果が期待される。

HIT 型アクロス (II) 震源装置の設計と製作

熊澤峰夫[○] 鈴木和司 石原 競 中谷正生 小川克郎

(名大, NEDO) 三浦和孝 (三弘)

長谷吉二 小金井義則 圓尾 等 (富士電気KK)

Designing policy and Manufacturing of HIT type ACROSS

M. Kumazawa, K. Suzuki, M. Nakatani, K. Ishihara, K. Ogawa (Nagoya U., NEDO)

K. Miura (Sanko), K. Hase, Y. Koganai, H. Maruo (Fuji Electric)

HIT とは、地中に構築した構造物に固定するアクロスを FIT (Fixed acoustic Illumination Tool) と呼ぶのに対して、可搬型で Handy な小型装置の呼称である。HIT 型アクロスの開発研究は、移動して行なう地下構造の物理探査にアクロスの特長を最大限活用しようとする目的に沿ってなされた。HIT 型アクロス装置の設計製作における考え方と技術的諸問題の解決について述べる。

(1) 最低 2 tonf 程度の大きさの力を発生できて、かつ軟弱な地表面でもその力を音波として地下に効率よく放射できること。

(2) 正確に同期して左回転と右回転させる 2 個の偏心質量を組みにして、1 次元の力を発生するリニアユニットであること。

(3) 一台で高い周波数から低い周波数まで、十分な大きさの振動を発生できるように、1 次モーメントの大きさを正確かつ簡単に調整できること。

(4) 浅部の微細構造探査を想定し、それに適する短波長の波を発生できるように 100 Hz までの周波数の加振ができること。

(5) 簡単に設置方向を変えて、鉛直方向の振動発生と水平方向の振動発生を一台の装置で兼ねられること。

(6) 特殊免許を要しないクレーン付き小型トラックで運搬し、素人が地表に置いただけで機能する Handy な小型装置であること。

(7) 電力供給電源、GPS 時計と同期する精密制御駆動電源とセットで操作性に優れていること。

(8) 機動性を損なわない構造 (重量、組み立てやすさ、設置可能条件の広さ) の機構で 2 tonf の加振力を地盤に確実に伝達できる分割構造大面積の自重支持方式地表面カップラー。

(9) 現存するサーボモーター (最高回転数最高 3000 rpm = 50 Hz) で 100 Hz までの振動を発生できる動力伝達システム。

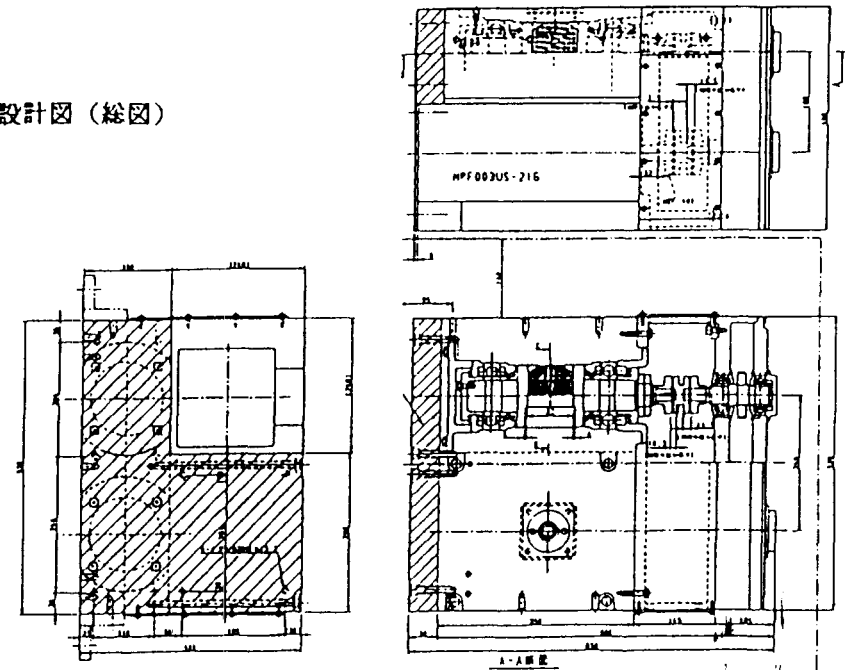
(10) 高周波では、ベアリングを BM 値の限界近くで使用せざる得ないので、交換容易なベアリング配置方式。

(11) 冷却装置を不要にした、発熱を抑さえ、自然放熱効率の高い構造。

(12) 回転中の振動でゆるまないマス位置の可変機構

そもそも、機械設計において避けるべきであるとされている「偏心質量の高速回転」を「華奢な」軽量小型装置で実現するというのが以上の要求の本質であるので、その解決には、相当の技術的工夫を要した。これらの技術開発を通して製作され、現在実機テスト中である HIT 型アクロス装置は、所期の要請をほぼ満たしていることが確認された。残された問題点については、別途 (中谷他、石原他、共に本学会) 報告する。

設計図 (総図)



Mechanical properties of a ground coupler of HIT type ACROSS

M. Nakatani¹, K. Ishihara¹, M. Kumazawa², K. Ogawa², K. Hase³,Y. Kogana³, H. Maruo³ and K. Miura⁴

1 NEDO, 2 Nagoya U., 3 Fuji Electric, 4 Sanko

1. 地表面カップラーに要求される性能

HITとFITの機構上の大きな違いは、地盤への取り付け方である。常設型のFITでは、楔、ボルト等で起振装置を固い岩盤にメカニカルに拘束するのに対して、機動性を重視するHITでは、起振装置を載せた鉄板を地表面に置くだけで、自重のみによって地盤への確実な力の伝達を確保する必要がある。この時に(鉄板+地盤)系に要求される性能は、次の2点である。

A) 地中に純粋な正弦波力が伝達できるよう非弾性な部分をつくらない。

B) 起振部の振動をおさえて起振装置の損傷を防ぐために高剛性を確保する。

現在、名大校内で実機によるテストを行ってこの2点の性能を評価しているが、ここでは、理論的な側面から問題点を整理することに努める。HITは、様々な場所での機動的観測を目標としているので、その場の状況に合わせた設置が要求される。これに対応するためには、経験と理論による問題点の事前把握が不可欠である。

A. 非弾性な部分をつくらない

非弾性なカップリングになりうる箇所は、水平加振の場合には、(い)カップラー(鉄板)下面と地表面の間の滑り、(ろ)鉄板の下の方の土のせん断降伏、垂直加振の場合には、(は)鉄板の地表面からの飛び上がり、(に)鉄板の下の方の土の圧縮降伏、である。いずれの場合にも、単純化すれば、ある限界以上の力、もしくは応力が地中に加えられないということである。余剰力は、結合されている2つのものの相対運動を起こすために使われる。したがって、こういったカップリングがおこれば、地中に伝わる力は、頂部の切り取られた正弦波になるはずである。

テストとしては、まず、遠方で振動を測りながら、起振装置の発生力を上げていき、振動変位が正弦波から外れたときには、非弾性カップリングになっていそうな箇所では振動振幅を計測し、不連続が見つければそこが犯人である。

上述のそれぞれの箇所の弾性限界をあげる処方箋は、以下のようになる。

(い) -> 鉄板の表面処理もしくは、土の種類を選んで表面摩擦係数を上げる。

(ろ) -> カップラーを重くする。カップラーと土の接触面積を広げる、せん断降伏強度の強い土を使う、

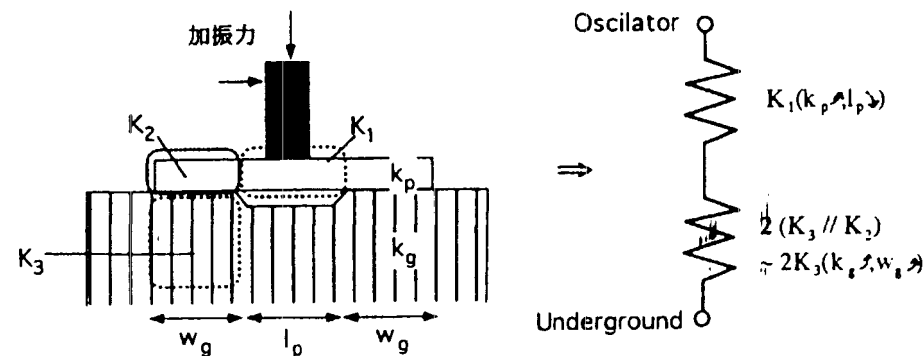
(は) -> カップラーを重くする、(に) -> 圧縮降伏強度の強い土を使う。

B. 剛性を大きくする

地盤に正確に力を加えるという点で見れば、カップラーの剛性は問題ではない。しかし、現実には、起振装置の耐振動性に限界があるので、(カップラー+地盤)系の剛性は十分高くしておく必要がある。実際、名大校内におけるテストでは、発生力に比例した(すなわち弾性変形による)大きな振動がおり、当初は目標の発生力を出すことができなかった。鉄板の剛性を大幅に増すことで、目標出力の発生は確保したが、その過程で、不整な地表に鉄板を置いたときの系全体としての剛性のモデル化について、以下の考察が得られた。

垂直加振にたいする鉄板のたわみでみても、水平加振時に生ずるトルクに対する鉄板のねじれでみても、現在使用している厚さ5cmの鉄板自体の剛性は、実地テストで得られた全系の剛性より桁で小さい。このことは、(鉄板+地盤)系の剛性にかんして、鉄板の果たす役割は、おもに地面の広い部分に起振装置からの力を分散させて、地盤を「太いバネ」として使用することにある。

従って、(鉄板+地盤)系の剛性は、図のようにモデル化される。図中の $f(x)$ は、 x の増加関数という意味である。従って、現実的かつ経済的な剛性増加の方針は、1) 鉄板の敷設作業を、地面がふかふかの状態で行い、鉄板と地面の間に長波長の隙間をつくらないようにし、さらに保険として、2) 鉄板単体の剛性を上げる、ということになる。



^o小川克郎 熊澤峰夫 熊谷博之（名大、理）

ELECTROMAGNETIC ACROSS: A NEW POTENTIAL METHOD
TO ANALYZE CONDUCTIVITY STRUCTURES

K. Ogawa, M. Kumazawa & H. Kumagai (Nagoya Univ.)

電磁波アクロス (EM ACROSS) が地下構造の動態解明にもつ意義の重要性、およびそれが原理的技術的に成立することを、前回の秋の地震学会で報告した：意義は、音波アクロスと同時に用いることによって、地殻内の応力や水の状態の変動の観測的決定に相互補完関係にある手法としての目標設定にある。原理的な新機軸としては、アクロスの考え方と方法を用いることによって、波の伝播としてソース-レシーバ間の走時を従来の方法よりも高精度で決定できるとの考えを示した。今回は、電気伝導度が高い地殻内の電磁波には著しい減衰と分散があるにも関わらず、波線にそった伝播波としてその分散と吸収を精密に決定できること、および、従来の方法との比較における EM ACROSS の特長を提示する。

分散性減衰波としての性質：地殻内では電気伝導度が高く、マックスウェルの波動式は拡散方程式に縮退する。

(1) 波数 k は $k = [-i\omega\mu(\sigma + i\epsilon\omega)]^{1/2} = -[i\omega\mu\sigma]^{1/2}$ (μ : 透磁率、 ϵ : 誘電率、 σ : 電気伝導度) である。位相速度 C ($1/C = (1-i)[\omega\mu\sigma/2]^{1/2}/\omega$) と群速度 U ($= 2C$) は共に周波数に大きく依存 (平方根に比例) し、減衰率 Q^{-1} は周波数に依存しない大きな定数 2 である。

(2) 電気伝導度の不連続面に媒質 1 から媒質 2 へ入射した場合、インピーダンス z ($= \sigma C = \sigma^{1/2}$) を使って波の反射係数 $R = (z_1 - z_2)/(z_1 + z_2)$ と透過係数 $T = 2z_2/(z_1 + z_2)$ が与えられる。これは減衰や分散の存在とは独立な性質である。

(3) 従って、拡散方程式で支配される領域でも、減衰と分散が大きいだけで、波動としての基本的性質は留めているので、レイパスとそれにそった反射、屈折や走時を考えることができ、それに基づいた解析が可能なのである。

複素存否セブストラム法：信号発信源から受信点への周波数領域の伝達関数が、観測によって複素離散系列データとして与えられているとしよう。その狭い周波数巾 $[\omega_0 - \Delta\omega/2, \omega_0 + \Delta\omega/2]$ の中だけに存否セブストラム法を適用すると一般には複数の複素ケフレンシーが求められる。そのおのおのの実部は $\omega = \omega_0$

における群速度の走時 ($= x/U(\omega_0)$, x は波の伝播距離) を与え、虚部がその走時の波の減衰係数 $Q(\omega_0)$ を与える。また、 $\omega = \omega_0$ における振幅と位相からは、位相速度の走時 ($= x/C(\omega_0)$) とその減衰も得られる。この操作を広い周波数に亘っておこなうと、異なる伝播時間をもつ複数の波群について、群速度と位相速度の分散曲線、および減衰の周波数依存性が同時に求められる。これは理論的に証明され、数値実験で確認されている (熊谷 他、本合同学会発表)。

EM ACROSS：ここで提案する EM ACROSS とは次のようなものである。

(A) CSMT法の使用を、精密制御定常信号源一観測点間、および複数の観測点間の周波数領域伝達関数のデータ取得、と位置付けて徹底的に精密に行なう。具体的には、例えば $1 \sim 0.01 \mu s$ の同期精度で、信号源の発信周波数を例えば $\sim 1 \mu Hz$ まで精密に制御して、例えば $10^3 \sim 10^7$ 秒という長時間同期スタッキングによって、伝達関数の高精度周波数離散複素系列データを取得する。

(B) 波の反射透過屈折伝播によるさまざまな波線にそった走時とスペクトル変化を周波数の関数として複素存否セブストラム法で解析する。

(C) 遠地波については (B) の結果と波線理論を用いた構造解析逆問題として時間領域で、また、近地波などでは地下構造の波数構造を直接逆問題として周波数領域で解く。前者は微細構造解析に、後者は大局的構造解析に向いている。

Levy et al (1988) が MT 法に導入した reflectivity 法は、基本的にはパルスの孤立波の伝播を想定し (仮想インパルスと称している) (2) で述べた反射係数を使った走時解析的な考え方に立つものである。reflectivity 法は理論的には健全であるが、(1) で述べた分散性が高く吸収の大きい地殻中の電磁波伝播の解析には、データ取得の問題も含めて現実的な困難があった。

EM ACROSS の特長：高い S/N のデータ取得というアクロスの特長は特に減衰の著しい電磁波に有効だから、これまでよりも深部まで、かつ、より高精度の電気伝導度構造解析ができて当然である。特筆することは次の通りである。

(1) 地下構造の不連続面における地震波の音響インピーダンスコントラストが $\sim 1\% \sim 10\%$ の程度でしかないのに比べて、電磁波の場合インピーダンスはオーダーで変化するので、反射係数は大きく (~ 1 or ~ -1) 反射法が有効である。

(2) 電磁波の実効的分散と減衰が周波数の関数として求められる。電気伝導度の不連続面がある幅がある場合、そこからの反射走時と振幅の周波数依存性は不連続層内の構造解明などにさえ有効である。

熊澤峰夫 武井康子 (名大理、東大 震研)

ACROSS ARRAY TO RADIATE COHERENT ACOUSTIC BEAM
WITH DIRECTIVITY FOR UNDERGROUND HOLOGRAPHY

M. Kumazawa & Y. Takei (Nagoya Univ. & ERI Univ. Tokyo)

サイン波の振動を定常的に発生するアクロスをアレイにすると地下構造の能動的解析のために有用ないろいろな手法が生みだされる。例えば、特定の波長の表面波放射の抑制、あるいは強調は簡単にできそうに見える。実現までにはかなりの理論的、技術的問題の解決が必要であろうが、アクロスアレイ実用の極め付けは、指向性弾性波のコヒーレントビームの発生と地震計アレイを組合わせた「多色音波ホログラフィーによる地下構造の実時間モニターシステム」ではなかろうか？ 先ず今回は、その考え方を提示して将来展望を検討する。

二個のアクロス装置の相互作用： 現在開発している震源装置は所定の力を発生させるものである。これを2個並べて運転するとき発生する波動場を考える。簡単のために、短い距離を離して設置した二つの震源、1と2、が同じ大きさの力 $F = F_0 \exp(i\omega t)$ を発生するとしよう。1がその位置で地球にもたらす変位を $u_{11} = U_{11} \exp(i\omega t + i\phi)$ 、2の地点にもたらす変位を $u_{21} = U_{21} \exp(i\omega t + i\phi + i\theta)$ とする。2から1へも同じ関係が成り立つとする。おのおのが独立ならば、1が放射する1サイクル当りのエネルギー E は、 $F_0 U_{11} \pi \phi \omega$ であり、1と2が地球に放射する全エネルギーはその2倍になる。波動場は1と2が放射する波の重ね合わせになるだけだが、その干渉によって波の振幅に空間パターンが現われる。

しかし、実際には震源装置間の相互作用のため、上に述べたような単純な加算にならない。まず全エネルギーには $F_0 U_{12} \pi (\phi + \theta) \omega$ が加わる。もし1と2が同じ場所にあれば $U_{21} = U_{11}$ 、 $\phi_c = 0$ だから放射エネルギーは $4E$ になる。このように N 個の震源装置があればエネルギーは N^2 倍になる。これを振幅が N 倍になるから、エネルギーは N^2 倍になると解釈してもよい。しかし、これは波動の励起の基本に関わる深い問題を含んでいる。現実には、震源近傍の振動は近地場であること、 F と U がベクトルであること、震源の空間配置、周期的力の位相などまで考慮すると、問題はかなり複雑になる。実用的には、波の放射にさまざまな場合の実現が可能で、有用な波の放射モードを選択する自由度が存在する。

多数のアクロス装置のアレイ： 特定の特長をもつ波（例えば、表面波）の発生を抑制する、あるいは放射効率を上げるなどの目的には、震源装置間の相互作用がなくても幾何学的な考察から実現可能であることが分かる。地下深部構造の解明のためにアクロスが励起する表面波を抑制する具体的な方法は他にもあるので、この問題はここでは深く立ち入らない。ここでは指向性のビームの励起について考える。簡単のために、半径 R の円の面内に震源装置が分布し、その定常振動の位相遅れに小さい空間勾配 $g = d\phi/dx$ を持たせ、震源要素間の相互作用がないとすると、その面の垂線から $\sin \theta = g/k$ (k は波数) で与えられる θ だけ x の方向へ振った指向性ビームになる。そのビーム内の強度分布はビーム中心からの距離 X と震源からの距離 D によって、 $-\sin(kRX/D)/(kRX/D)$ で与えられる。すなわち、ビーム半径は $-(\lambda/R)D$ (λ は波長) 程度となる。例えば、60 Hz で波長 100 m の波をスパン 1 km のアレイで放射すると、10 km 先でビーム直径は 4 km 程度に広がるが、これだけでも実用上かなり有用な機能をもつであろう。

現実にはアレイ内部における震源要素間の相互作用があるので、これを考慮する必要がある。相互作用のさせ方に自由度があるので、目的への最適化設計によって、上の例よりも高性能のコヒーレントビームの発生を期待できる。内部相互作用を考慮した震源アレイの一般理論は、われわれの知るかぎりまだ存在しない。そこで、制御震源の2次元、さらに進んで3次元アレイがもつ高い潜在力と広い可能性を考えると、これが地震学を含めて地下構造の研究分野における将来の重要課題になることは高い確度で予測される。

アクロスアレイの将来性： 観測装置のアレイが指向性の波動検出装置として機能することはよく知られ、広い分野ですでに使われている。地震計のアレイに指向性のビームを励起送信するアクロスアレイと組み合わせると音波ホログラフィーが実現できる。光ホログラフィーでは位相の検出を干渉を用いた強度分布としてフィルム上にアナログ記録する。地震計アレイでは個々の地震計は画像の1ピクセルとして位相と振幅だけでなく、走時、波の振動方向と到来方向までをデジタル情報として記録する。それを読み出す手法も必要になる。

このような能動的観測システムを実現して地震予知の研究に有用な成果を生むまでには、非常に多くの理論的、技術的、現実的課題がある。しかし、このような手法のもつ大きなポテンシャルを考慮すると、組織的開発研究に投資する価値は極めて高いと考える。地震学の指導的立場の方々の検討と判断を期待する。

小川克郎¹、熊沢峰夫¹、石原競¹、中谷正生¹、国友孝洋²、
藤井直之³、山岡耕春³、熊谷博之³、武井康子⁴、中野優¹、
羽佐田葉子¹、宮川幸治¹、池田典宏¹、鈴木和司¹

HIT: A Mobil ACROSS

Katsuro Ogawa, Mineo Kumazawa, Kei Ishihara, Masao Nakatani, Takayuki Kunitomo,
Naoyuki Fujii, Kohshun Yamanka, Hirofumi Kumagai, Yasuko Takei, Masaru Nakano,
Youko Iisada Kouji Miyagawa, Norikazu Ikeda, Kazushi Suzuki

¹名古屋大学理学部、²NEDO、

³動力炉核燃料事業団、⁴東京大学地震研究所

1 可搬型震源 (HIT) の開発

アクロス技術体系のなかで、近距離の地下状態を精密に探査、モニターするものという位置づけでP波、SH波用の可搬型震源 (HIT) を用いた探査技術をNEDOの支援を得て開発している。精密な走時決定のために広い周波数範囲をカバーしていること、高い機動性を有することが特徴である。図1にHITシステムの概要を示す。震源の周波数制御等の機構は、固定設置型 (FIT) で確立しつつある技術を応用した。

本研究で開発しているHIT独自の主要な開発部分は以下の点である。

(1) 100 Hz という高周波発振のための高速回転に対応するために

- イ. 偏心マスの回転軸受け部分
- ロ. 慣性一次モーメントの可変機構

(2) 軟弱地盤にもただ置くだけで動作するために

- ハ. 自重支持型の起震部-地表結合 (地面カプラー) 機構

(3) 純粋なSH波だけを励起すること並びに装置の破壊を防ぐために

- ニ. 水平起震時の回転モーメントを打ち消すアンチロック機構

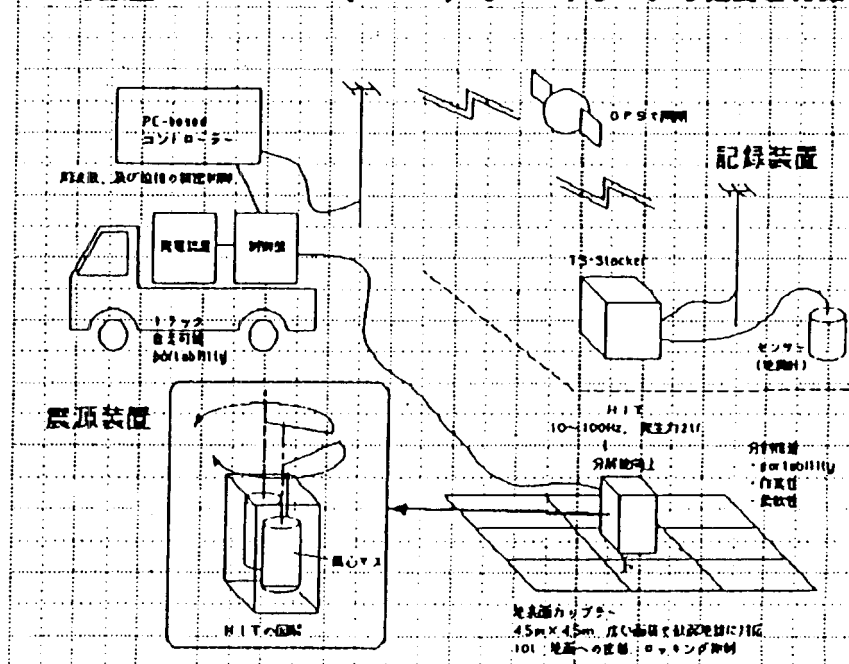
イ、ロ、に関しては当面の目標スペックである6000rpm (100 Hz) の高速回転に耐えられることが確認された。ハ、ニについては、名古屋大学構内で基礎実験を実施した後、本年1月から鹿児島県山川町の地熱地帯における実地テストでその機能テストを行う予定であり、講演ではその結果も併せて報告する。

2 適用分野

HITが目標とする対象として、次のものが挙げられる。

- イ. 浅部地下流体、特に熱水の存在とその挙動のモニター。
- ロ. マグマの挙動モニターによる噴火予知、防災。
- ハ. 構造敏感帯 (地殻応力の変化に敏感なところ、地震の前兆現象の出やすい所謂「つば」に関連する可能性アリ) の探査。
- ニ. 振動発生が制約される都市部での地盤調査、活断層探査。

可搬型ACROSS (HIT) のハードウェアの概要と特徴



回転型ACROSSの精密周波数変調制御

○國友孝洋(動燃), 熊澤峰夫・山岡耕春(名大理),
青木勝(DST), 石原競(NEDO)

Accurate Frequency-Modulation Control of the Rotary-type ACROSS

○T. Kunitomo(PNC), M. Kumazawa, K. Yamaoka(Nagoya Univ.),
M. Aoki(DST) and K. Ishihara(NEDO)

ACROSS震源の精密制御は、外部から制御パルス列を入力することにより行われる。単一周波数送信の場合はパルス間隔を一定とし、FM変調送信の場合はパルス間隔を時間変化させる。いずれの場合もパルス列の周波数精度が、ACROSS震源の精密制御において決定的に重要である。さらに、FM変調の場合は回転の加減速を行うため、モータの追従性能が精度を左右する。本発表では、東濃鉱山のACROSS震源（どうねん東濃地科学センター）を用いた追従性能試験の結果と精密FM変調送信のためのシステムについて報告する。

〔ACROSSの加減速制御追従性〕

追従性能を調べるための制御パルスの発生にはファンクション・ジェネレータ（HP33210A）のFM変調機能を用いた。Fig.1は、周期20秒で直線的な加減速を行った際の結果の一例である（ $\pm 6\text{Hz}$ の三角波変調を15周期分）。Fig.1aは変調波形を、Fig.1bはモータ制御盤に入力したパルスとモータの位相を示すエンコーダパルスの1秒間のカウント差である。カウント差は、加速時には制御パルスの変化に対してモータ側が遅れ、減速時にはモータ側が進むことを示している。この進みおよび遅れの量は、加速度が同じならばほぼ一定であり、 2Hz/s の加減速時でさえもその量は ± 0.5 度程度にしかすぎない（Fig.1では、 1.2Hz/s で ± 0.2 度程度）。このようにACROSSにおいては、変調幅の大きいFM変調もほとんど問題無く行える。ただし長時間の安定性についてはさらに試験を進める必要がある。

〔GPSクロック同期FM変調パルス発生〕

ACROSS震源の加減速制御追従性は非常に良いことが分かった。そこで、精密FM制御を行うためには、精度の良いFM変調パルス

生成が鍵となる。FM変調パルス発生器には以下の要件が備わっている必要がある。

- 1) 外部GPSクロックと同期できる
- 2) 周波数精度が高い
- 3) PCと独立に駆動できる

例えばDA変換ボードを用いたシステムでは、GPSクロックに同期したパルス列を発生することができるが、パルス間隔の設定が時間間隔となるため十分な周波数精度を得ることができない。また、PCにトラブルが発生するたびにモータを止めなければならないなど、安定的な運用に問題がある。PCは、偏心マスの位相測定、本体の異常検知、遠隔操作など多くの仕事をする必要があり、CPUに負荷がかかりすぎるのも問題である。結局のところ、これらの要件を満たす装置は、現在のところDDS(Direct Digital Synthesizer)を用いた機器以外には考えられない。現在、外部クロックと同期できる2個のDDSを用いたFM変調信号発生器を、メーカー（有限会社ディエステクノロジー）に依頼、製作中である。一つのDDSは、パルス列の基準周波数発生用であり、もう一つのDDSは周波数の切り替えを行うためのタイミング用である。FM変調信号発生器のCPUは、DDSのタイミングシグナルを基準として、周波数データを8192ポイントの変調信号データRAMから読み出し、もう一つのDDSの発振周波数を順次切り替えてゆく。この方式だと、変調波形は階段状に変化することになるが、ACROSS本体の回転揺らぎを考慮すると当面はこれで十分であると考えられる。

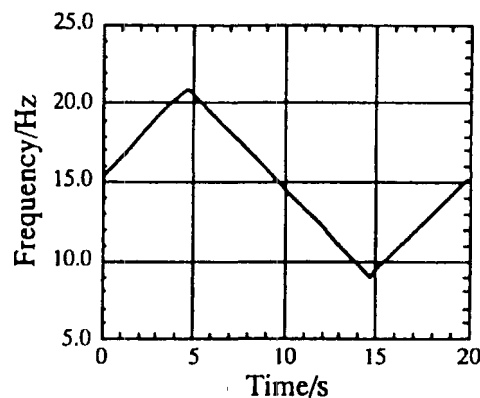


Fig.1a 変調波形

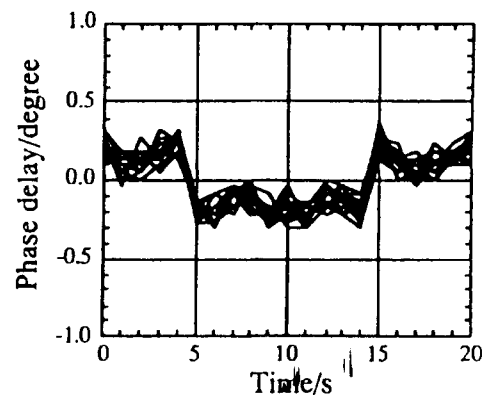


Fig.1b モータ位相の遅れ

回転型ACROSSの精密制御 遠隔操作システム

○國友孝洋（動燃），山岡耕春・熊澤峰夫・小川克郎（名大理）

Accurate and Remote Control System of the Rotary-type ACROSS

○T. Kunitomo(PNC)

K. Yamaoka, M. Kumazawa and K. Ogawa(Nagoya Univ.)

回転型ACROSS震源は，平成8年度の開発研究により実用的な段階に至りつつある。この間，震源制御に関する実験およびシステム開発は，主として東濃鉱山（どうねん東濃地科学センター）に設置されたACROSS震源を用いてなされてきた。本発表では，東濃鉱山ACROSS制御システム（一部構築中）についてその概要を紹介する。

〔ACROSS震源精密制御の要件〕

ACROSS（Accurately Controlled Routine-Operated Signal Source）の制御システムには，その名称が示すようにFM変調を含めた精密な周波数制御と24時間365日に渡って安定した連続運転とが行えることが要求される。さらに実用的な運用のためには，遠隔地においても震源の状態がモニターでき，かつ必要なパラメタの変更が行える必要がある。特に複数のACROSS震源が展開された場合には，遠隔モニター・遠隔操作は必要不可欠からざる機能となる。

〔ACROSS制御システム概要〕

ACROSS制御システムは，パルス発生部，震源モニター部，遠隔操作部およびそれらを制御するPCや時間基準のGPS時計からなる（Fig.1）。

パルス発生部はACROSS精密制御のための心臓部であり，GPSクロック同期したパルス列を回転制御盤に送り込む。本システムでは単一周波数用とFM用の2種類のパルスジェネレータを装備している。単一周波数回転時にFM用を用いることもできるが，周波数精度が圧倒的に良い単一周波数用を使用した方が賢明である。計算

上は，単一周波数回転の場合は1月に1回以下，FM回転の場合は1時間に1回以下PCにより微調整を行えば震源の系統的な位相ずれは回転揺らぎの範囲内（約5'）におさめることができる。

震源モニター部は，エンコーダ・カウンタボードとAD変換ボードおよび温度センサーとからなる。エンコーダ・カウンタは，サーボモータから出力される位相情報パルスをカウントする。GPSクロックと比較して一周の1/8000（2.7'）の分解能でモータの位相をモニターすることができる。AD変換ボードは震源の異常検知用であり，モータのトルクとベアリング潤滑油および冷却水の温度とをモニターするために用いる。

遠隔操作部には，近年発展の著しいPC用のLANおよびWANシステムを利用する。東濃鉱山内では10Base-Tにより接続されたPCから，遠隔地ではISDN回線によりLAN間接続されたPCにより遠隔モニター・遠隔操作を行う。PC自体は，遠隔地からの指令により電源投入することも可能である。現在スイッチ類は手動式であるが，近い将来には，電源ブレーカー以外はPCにより制御し，ほぼ完全な遠隔操作を可能にする予定である。

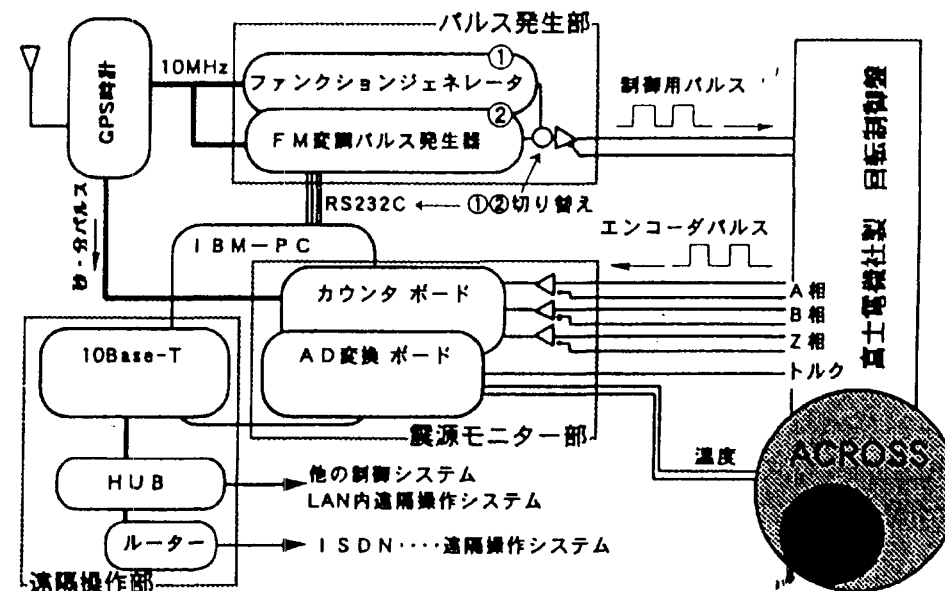


Fig.1 ACROSS制御システムの概要

C42-P09

淡路島における ACROSS 探査実験
2. データ解析とその結果

羽佐田 葉子、池田 典宏、山岡 耕春、熊谷 博之、國友 孝洋*、石原 競+、
中谷 正生+、中野 優、宮川 幸治、奥田 隆、熊澤 峰夫、小川 克郎
(名大理、*動燃、+NEDO)

The First ACROSS experiment in Awaji Island
2. Analysis and results

Y. Hasada, N. Ikeda, K. Yamaoka, H. Kumagai, T. Kunitomo,
K. Ishihara†, M. Nakatani†, M. Nakano, K. Miyakawa, T. Okuda,
M. Kumazawa, K. Ogawa (Nagoya Univ., *PNC, +NEDO)

95 年の名古屋大学構内における実証実験によって、ACROSS のデータを解析して観測点に到達する地震波の走時を決定できることを示した。今回の淡路島における実験では、GPS 同期位相制御によって、質の高いデータが短期間の実験で得られた。このデータを存否セブストラム法を用いて解析した結果を報告する。

解析の手順

取得した時系列データから DFT によって複素フーリエ係数を取り出し、発生力の大きさ ($1/\omega^2$) で割り、速度データを ω で割ることによって変位に直すと、震源での力に対する観測点の変位の周波数応答関数が得られる。さらに正・逆両回転のデータを合成して直交する水平 2 成分の力に対する応答に変換した。このようにして得た周波数応答関数を複素存否セブストラム法によって解析し、観測点に到達する波の走時を求めた。

解析結果

今回の実験では周波数幅 25Hz、周波数間隔 0.5Hz と、周波数幅 10Hz、周波数間隔 0.2Hz の 2 種類の周波数系列データを取得した。これらはそれぞれ時間領域でデータ長 2.0sec、時間分解能 $>0.04\text{sec}$ 、およびデータ長 5.0sec、分解能 $>0.1\text{sec}$ のデータに対応する。図 1 は取得した周波数応答関数の一例で、それを存否セブストラム解析した結果を図 2 に示す。5 つの観測点のデータを震源からの近い順に並べてある。各グラフの横軸が走時に相当し、縦軸は吸収などによる波の広がり具合を表す。点が集

中しているところをシグナルと見なすと、様々な相の走時が決定されている。これらは表面波や多重反射波を含んでいると考えられる。より高い分解能でこれらの相を同定する実用的な手段を開発中である。東大地震研などによるほぼ同じ測線での反射法探査によって付近の地下構造が調べられているので、その結果との対応も考察する。

データは震源から観測点を見た radial および tangential の 2 方向に震源で力を加えたときのそれぞれの場合について、観測点における変位の radial, tangential, vertical 成分に分解した。しかし、震源での力の方向の成分だけでなく、他の成分の変位も見られた。これは地下構造の側方不均質が原因であると思われる。

データ解析における今後の課題としては、共鳴が存在する場合を含む解析モデルの構築、機器の特性の厳密な補正、などが挙げられる。これらが解決すればさらに高精度の結果が得られることが期待される。

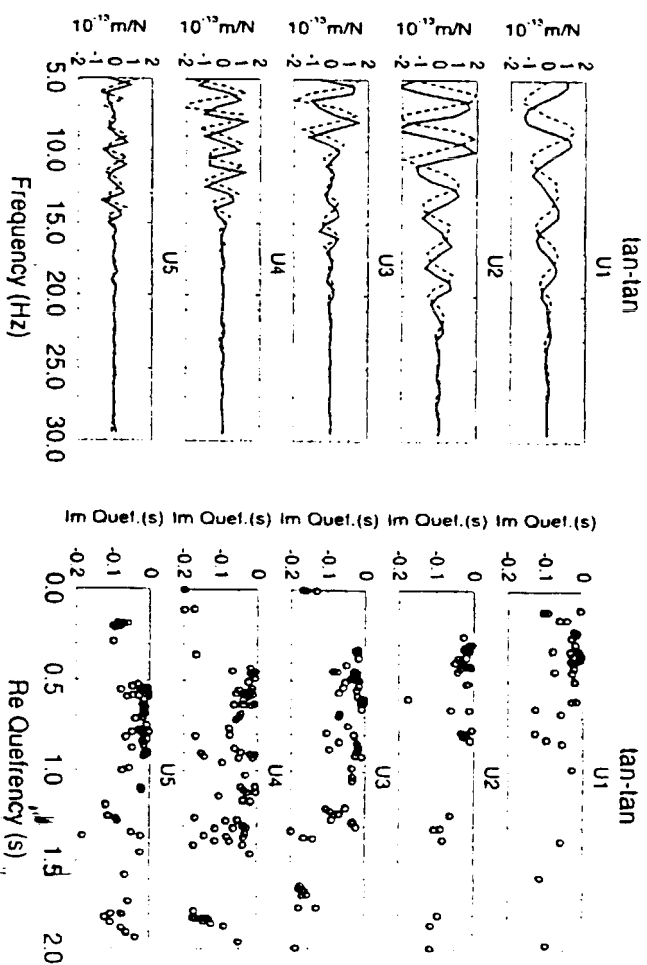


図 1: 周波数応答関数 (SH 成分)

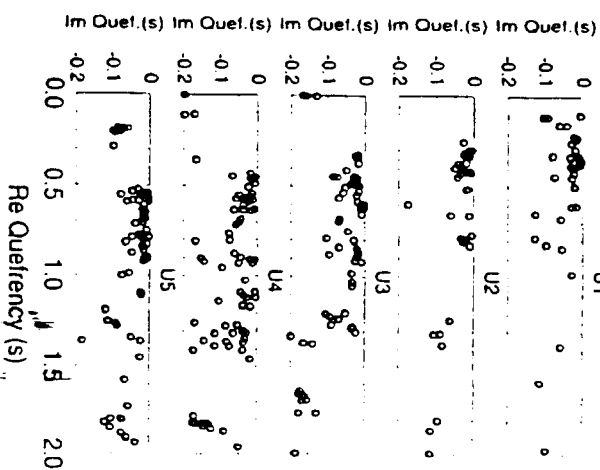


図 2: 存否セブストラム解析結果

地震計の不安定性と精密加速度計測系の開発 - アクロス信号の信頼できる取得のために

熊澤峰夫・中野優 中谷正生 宮川幸治 山岡耕春 (名古屋大)
小村英智 関 淳 小白井敏明 (リオン) 新谷正人 (東大震研)

Malfunction of existing seismometers and a proposal of developing a new type of
reliable accelerometry system for reliable acquisition of across signal

M. Kumazawa, M. Nakano, M. Nakatani, K. Miyagawa, T. Yamaoka (Nagoya U)

H. Komura, A. Seki, T. Koshirai (RION) & M. Araya (ERI Univ. Tokyo)

アクロスによって地震波速度の微小な時間変化 (例えば潮汐歪みに伴う) 検出を試みたところ、潮汐ではなく、日周変動が検出された。その原因を追及した結果、使用した可動コイル速度計の特性が気温変動と地面の傾斜によって大きく変動がすること、および、このような地震計は精度を必要とするアクロス信号観測には不十分であることがわかった。そこで、内部常時校正法 (中野 他: 本合同学会報告) を用いて、センサーへの地動入力からADCでデジタル信号に変換するまでのシステムを改めて総点検したところ、既存の装置には環境不安定性だけでなく、装置の原理や使い方にまで極めて多数の問題点があることが分かった。本報告では、アクロス信号取得に適した地震計測系を如何に確立するか検討を行ったので、その結果とこれに基づく将来の改善方策についての提案を行なう。

これまでの地震計測系における問題点

地動センサー自体の問題 通常の可動コイル速度計は傾斜変化によって動作点が移動し、感度と固有周期が変動する (これは次の環境不安定性に分類してもよい)。応答の非線形性も検出されており、FMアクロスの信号観測では周波数チャンネル間のクロストーク発生が予測される。また、片持ち振り子を使う方式では、高い周波数領域で回転加速度をも計測上問題になる程度の大きさで感じてしまうことが理論的に予測される。地震計の機種によっては、設置の水平性と方位設定が正確にできないものがある。

センサーの環境不安定性 可動コイル速度計の温度効果には地震計に個体差があり、かつ、振幅特性で $-0.1\%/^{\circ}\text{C}$ 程度と見積られた。これは一日に1%程度の感度変化をもたらす極めて大きい量である (中野 他: 本合同学会報告)。その原因には、熱膨張による各部の寸法変化、動作点移動、ばね定数変化、永久磁石

の磁力変化などが考えられる。従って、キャリブレーションコイルがついていても、その特性も温度変化する可能性があるから、校正にはもっと深い検討が必要である。気圧変動、鉛直重力の変化による特性変化も考えられる。

その他 アナログ電送ケーブル、マルチプレクサーなどにおいて異なるチャンネル間には、特に高い周波数成分のクロストークがあり、外部からの雑音もある。各種のアナログ回路とADCには機種 (価格) によって大きな温度依存性があり、それらの改善を必要とする。

高信頼度地震計への強いニーズと新規開発の提案

既存の地震計が高周波数領域の高い信頼性をもっていないのは、地震学分野でこのようなニーズがあまりなかったからであろう。地震計の設置方法についても、どちらかと言えば高周波数領域用の地震計ほど無頓着にしてきた、という歴史的状況があったのであろう。アクロスシステムは、地球内部の極めて微小な状態変化までを検出モニターすることも目標にしているので、極めて安定で精度の高い振動計測系を必要とする。しかも多数の地震計で構成するアレイが威力を発揮すると予測されるので、安価簡便な地震計測系へのニーズが大きい。既存の地震計の上記問題点を可能なかぎり改善する現実的な方策は次の通りである。

1) 動作点が移動しないで線形性が高いセンサーはフォースバランスのフィードバック加速度計である。10 mHz 以下の低周波数領域の高い安定性を求めなければ、音響分野で開発されている各種の小型サーボセンサーを適切に改造するのが实际的である。センサーの固有周波数を目的周波数領域内に設定することによって感度を上げ、自己ノイズを下げ、線形性を改善するとともに、センサーの極く近傍にADCをおいて短いアナログ電送経路でデジタル信号に変換する。

2) 環境安定性を上げるにはセンサーの改良に加えて、簡単なペネトレーター方式として、1~2 m の地下 (温度の日変化が 0.05°C 以下になる) に簡便に設置する方法とそのための治具を開発すればよい。ペネトレーター容器の最下端に校正用電圧標準ツェナーダイオードをおき、その上に加速度センサー、熱絶縁体を介してフィードバック回路とADCを、更に熱絶縁体を介して安定化電圧供給とコマンドと同期信号受信およびデータ発信のシステムをおく構成がよい。

まとめ: 既存の地震計の問題点を明かにし、アクロス信号観測の目的に合う地震計測系 (汎用の高精度短周期地震計でもある) の現実的な開発方針が明らかになったので、予算が確保されれば直ちに開発に着手できる段階に至っている。

分散性波動の解析手法としての複素存否
セプストラム法

。熊谷博之、熊澤峰夫、羽佐田葉子（名古屋大学理学部）

The Sompi cepstrum method as a potential method for
analyzing the dispersive wavesH. Kumagai, M. Kumazawa and Y. Hasada (School of Science, Nagoya
Univ.)

はじめに：熊澤・熊谷（1995、地震学会秋季大会）は、ACROSS システムによって得られるインパルス入力に対する有限離散周波数応答関数から走時を決定する手法（複素存否セプストラム法）の理論を示し、簡単な数値実験および実際のデータへの適用に基づきその有効性を示した（羽佐田・他、1996、地震学会春季大会）。本発表では分散性のある波動に複素存否セプストラム法を適用し、その分散（速度及び Q の周波数依存性）を解析する上での本手法の有効性を数値実験を基に示す。

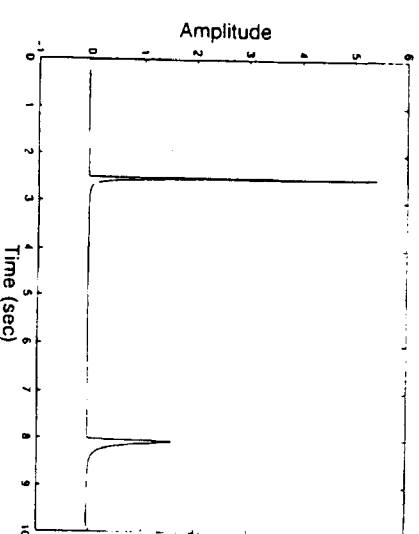
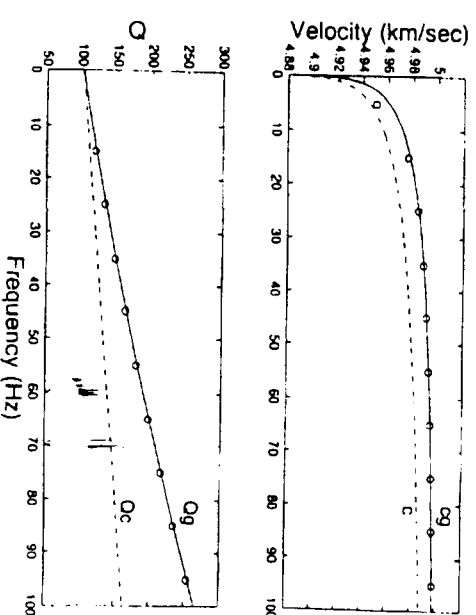
因果律を満たすパルス：非弾性が存在する場合、一般的に伝播するパルスが因果律を満たすためには物理分散を導入する必要がある（例えば Aki & Richards, 1980）。ACROSS システムでは現実的にはこのような分散性のあるパルスを観測し解析することになる。図 1 にはその一例として超音波実験の結果と合うとされる因果律を満たすパルス（震源距離を 12.5km と 40km と仮定した）を示した。その位相速度と Q の周波数依存性は図 2 の破線で示してある。このパルスのフーリエ変換に複素存否セプストラム法を適用した。

複素存否セプストラム解析：サンプリング周波数を 0.1Hz、最小と最大の周波数をそれぞれ 0 と 100Hz とした。まず理想的な場合としてノイズを加えず AR 次数は入力したパルスの数に対応する 2 に固定し、周波数バンド幅を 10Hz ごとにとり複素存否セプストラム法により走時を決定した。2.5 秒付近のパルスについてバンド幅毎に決まった走時を震源距離で割り速度を求め Q とともに図 2 にプロットした。求められた速度と Q の周波数依存性（丸）は群速度とその Q （実線）に対応していることがわかる。この事実と、位相速度がセプストラム解析により決

まる位相から制約されることは、理論的な考察から証明できる。ノイズを含み AR 次数について事前情報がない場合についても精度がおちるものの本質的には同等の結果が得られている。

議論・結論：本実験は分散性のある波動の走時およびその分散の解析について複素存否セプストラム法が有効であることを示した。このような解析は本手法のもつ高時間分解能性により可能になったといえる。地中の電磁波といった非常に分散性の高い波の解析等への応用が期待できる（小川・他、本合同学会発表）。

図 1 因果律を満たすパルス。

図 2 速度と Q の周波数依存性。破線：入力値、丸：セプストラム解析による決定値。

°中野 優、宮川 幸治、熊澤 峰夫、中谷 正生、山岡 耕春 (名大・理)

A calibration signal adapted for continuous calibration of seismometers

°M. Nakano, K. Miyakawa, M. Kumazawa, M. Nakatani
and K. Yamaoka (Nagoya Univ.)

はじめに: 名古屋大学東山キャンパス内で、アクロスシステムによって潮汐歪みや地下水汲み上げ量の変動(半日、一日周と週周の変動が期待される)に伴う地震波速度の微小な時間変化を検出する試みを行った。時間変動は記録されたが、それは天候に依存した変動であり、気温変化による地震計測系の特性変化によるものと解釈された。アクロスシステム、あるいはこれからの地震学では振動の絶対感度までを含めた計測系の安定性を必要とする。ここで提案する校正方法に使う入力信号は、アクロスによる離散周波数信号をTS-Stackerで記録する場合に適するように設計したものだが、いろいろな二端子システムの周波数応答を計測、校正するのににも有用であると考えられるので、実測例とともに示す。

二重反転矩形波校正信号: ここで提案する校正信号は、周波数 f_0/Hz 、電圧振幅 V_0/V (または A_0/A)、反転変調周期 T/s (単位: 周波数 $1/T = \Delta f/\text{Hz}$) で規定される二重反転矩形波である。図1に $f_0 = 20\text{Hz}$ 、 $A_0 = 2.2\text{mA}$ 、 $T = 1\text{s}$ の例を示す。この信号の特徴は、図2に示す振幅スペクトルの様に、 $f = (2n+1)\Delta f$ ($n = 0, 1, \dots$) だけに線スペクトルを持つ離散周波数系列になっている点にある。

FM アクロス (熊澤ほか、1995 年秋地震学会; 池田ほか、本学会) によって複数の周波数の信号を同時に励起し、震源と観測点間の周波数応答の系列データを同時に取得しようとする場合、周波数 f_0 の正弦波を周波数 $2\Delta f$ で変調すればよい。このアクロス信号に含まれる周波数成分は $2\Delta f$ 間隔であり、校正信号に含まれる周波数成分と重ならない。すなわち、データ信号と校正信号が Δf 間隔で交互に並んでいるので、校正信号としては理想的である。

常時校正の実測例: 矩形波信号の振幅を精密に一定に保つために、基準電圧源 (埋め込みツェナー: AD587, $5\text{ppm}/^\circ\text{C}$) による安定で正確

な電圧を、トランジスタスイッチなど on/off するだけの回路によって矩形波を発生した。地震計のキャリブレーションコイルへ入力する際には温度係数の小さい抵抗 ($25\text{ppm}/^\circ\text{C}$) を直列に接続して電圧を下げ、入力電流を 2.2mA とした。on/off のタイミングは GPS 時計の 10MHz パルスを基準クロックとした D/A 変換器によって 1kHz のサンプルで発生した (図1)。

固有周波数 1Hz の可動コイル型地震計 (マークランド、JC-V100) を温度約 15°C 及び約 50°C に置いたときの、上に述べた校正信号入力に対する出力を比較した。出力振幅を直接比較した場合を例に示す。 15°C のときの出力波形を図3に、 50°C での 15°C からの増加量 (50°C 出力 - 15°C 出力) を図4に示す。増加量が逆位相であることは、 50°C では振幅が小さくなったことを示している。すなわち、温度が高い方が地震計の感度が下がっている。変化量は個体差があるが、約 $-0.1\%/^\circ\text{C}$ であった。講演では、傾斜の効果の測定などについても報告する。

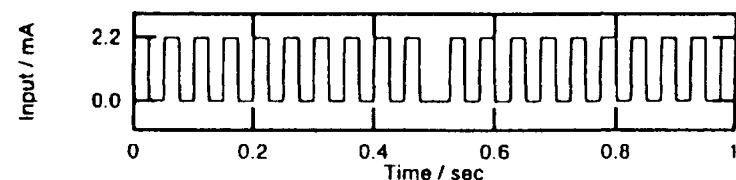


図 1

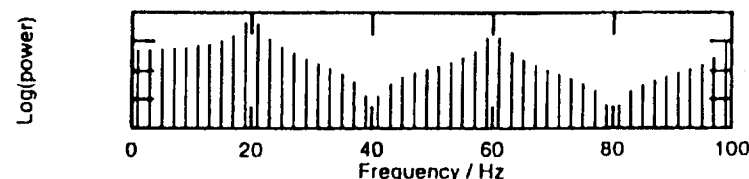


図 2

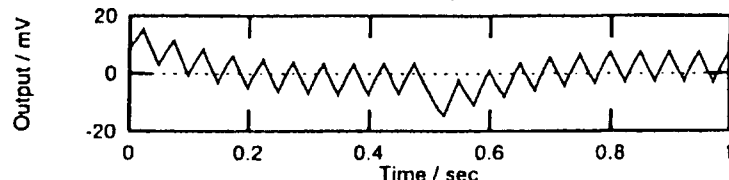


図 3

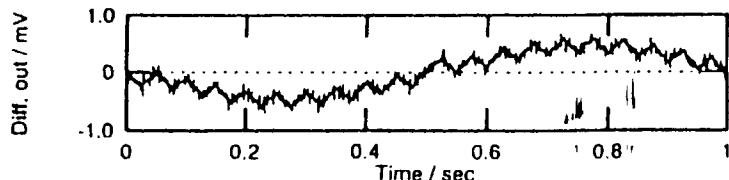


図 4