



# アクロス：理論と技術開発，及び 将来展望

熊澤 峰夫 國友 孝洋 横山由紀子  
中島 崇裕 鶴我佳代子

東濃地科学センター 陸域地下構造フロンティア研究プロジェクト

資料番号：9-13

ACROSS : Theoretical and Technical Developments and  
Prospect to Future Applications

Mineo KUMAZAWA Takahiro KUNITOMO  
Yukiko YOKOYAMA Takahiro NAKAJIMA  
Kayoko TSURUGA

Earthquake Frontier Research Project, Tono Geoscience Center

アクロスは精密制御した周波数変調連続波信号の弾性波，あるいは電磁波を使って，送受信点間の伝達関数を精密に測定し，それから地下の構造や状態を監視観測する新しい手法である。その開発研究の概要を「地下を観る原理と技術の解説」に重点をおいて紹介する。アクロスは従来とかなり異なる考え方に基づいたものであるから，まず基礎として，これまでの方法とその困難を日常的な事例になぞらえてアクロスの考え方を説明する。次に，原理面での説明をし，それを実現する技術のレベルの現状を簡単に述べた後，将来展望を明るく描いてみることにする。

*We report on a system of basic theory and technology, called ACROSS (Accurately Controlled Routinely Operated Signal System), which has been developed for the underground exploration and monitoring of structures and physical states under the Earthquake Frontier Program. This new technology uses stationary transmission of frequency-modulated signal of accurately controlled elastic and/or electromagnetic waves. The transfer function between a transmitter and a receiver is determined in frequency domain by means of accurate synchronization to a GPS clock. A strategy on the data analysis is also proposed for the inversion of frequency-dependent structures within the Earth crust. The current state of technology is reviewed and the expected high potentiality is discussed for future developments and applications.*

## キーワード

アクロス, 物理探査, 弾性波探査, 電磁波探査, 地下状態監視, 地下構造 地震研究  
*ACROSS, Geophysical Exploration, Seismic Exploration, Electromagnetic Exploration, Underground Monitoring, Underground Structures, Earthquake Research*



熊澤 峰夫



國友 孝洋



横山由紀子



中島 崇裕



鶴我佳代子

## 1. はじめに

アクロスACROSSは「精密制御定常信号システム」の英訳Accurately Controlled Routinely Operated Signal Systemの頭字をつないだ略語である<sup>1)</sup>。これは、見て直接調べることが困難な地球内部をこれまでよりもよく理解する手立てを模索して到達した一つの考え方に付けた名前である。その基礎理論と技術開発の研究は、名古屋大学において1994年4月に開始された<sup>2)</sup>。この技術を使えば地殻深部の構造や状態を詳しく観測監視できると考えられたので、地震発生場の監視観測研究への活用を最重要目標の一つに設定した。1995年1月の兵庫県南部地震の発生を機に、1996年度から科学技術庁は地震総合フロンティアを発足させた。それを受けて東濃地科学センターでは、陸域地下構造フロンティア研究の名の下で、東濃鉾山をテストフィールドとした「地震発生に関する研究(アクロス)」を開始した。

アクロスは位相と周波数を精密に制御した連続的な弾性波と電磁波を照射し、対象からの応答を計測してその構造や状態を監視観測する方法である。計測手法としては線形力学系評価の汎用技術といえる。構造物評価の立場では非破壊振動試験<sup>3)</sup>、地下の探査観測の立場では物理探査<sup>4)</sup>と呼ばれる領域の課題に相当する。

本報告は、その研究の一部を「地下を観る原理と技術の解説と展望」に重点をおいて紹介するものである。これは、アクロスがこれまでの手法と異なる考え方や理論に基づいているので、一般に理解されにくいことへの対応である。まず、従来手法における問題点を日常的な事例になぞらえて分析し、それに対処するアクロスの考え方を説明する。次に、アクロスの一つの計測理解システムとみなしたとき、それはどのような構造を持つのかを検討し、その構成要素と理論的背景を説明する。また、理論的に可能と考えられる技術を実現する取組について簡単に述べる。最後にアクロス技術の将来展望を明るく描いてみる。

## 2. 地下観測における困難の分析と対応

星は何億光年遠方にあっても光や電波などで見ることができるので、観測によって理解が進む。一方、地球内部は、わずかに数メートル地下でも見ることが難しい。そこで「地下は見えない」ということの内容を分析するために、まず、地下を「見る」という操作の物理的意味を分析的に考えてみる。それは観測したい対象からもたらされる何らかの波を定量的に検出することである。さら

に「観て理解する」という状態になるのは、そのデータに複数のモデルを当てはめてみて、その結果を解釈し判断する段階に至ることである。つまり波の観測、解析、解釈、という3段階が必要である。この章では、まず、この第1段階である波の観測について解説する。

### 2.1 波による観測

地下を見る波として地球内部を伝播できる弾性波と電磁波を考える。巨大地震で発生する数mHzの低周波数の弾性波は地球の中心を通過して反対側まで伝播し、観測できるレベルの振動が1週間も続く場合もある。しかし高周波数の弾性波はすぐ減衰して観測できなくなる。地中レーダの1~100MHzの電磁波は、条件が良くても100m程度までしか届かない。また、低い周波数の電磁場は遠方まで伝播するが、波動でなく拡散として伝わるのであまり役に立たないとされている。

これらの結論はもっともに見えるが、程度問題と原理問題の両方に再考察が必要である。程度問題は2.2節で述べる。本節の目的は、波とは何か、という原理問題を検討することである。結論を先にいえば、減衰が大きく波動でなく拡散であるとされる場合でも、波線にそって群速度で伝播する波動として扱えるのである。

波が原点から $x$ 方向に伝播するとき、波の振幅 $W$ の時間空間変化は、原点での値を $W_0$ として次の式で表せる。

$$W(t, x) = W_0 \exp[i\omega t - ikx] \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 $t$ は時間、 $x$ は空間座標、 $\omega$ は角周波数(= $2\pi f$ ,  $f$ は周波数)、 $k$ は波数である。

波の速度には位相が伝播する位相速度 $C(= \omega/k)$ とエネルギーが波線に沿って伝播する群 $U(= \partial\omega/\partial k)$ 速度がある。速度の逆数 $s$ は「遅度」を表すが、遅度は語呂が悪いためスロウネスと呼ばれる。波に減衰があると、スロウネスは次のように複素数で与えられる。

$$s = s_2 - is_1 \quad \dots\dots (2)$$

振幅が $1/e$ に減少する距離 $L$ と波長 $\lambda$ とは位相スロウネスで次のように与えられる。

$$L = 1/s_2 f, \lambda = 1/s_1 f \quad \dots\dots (3)$$

一般的な波動方程式は特殊な場合として拡散方程式を含んでいる。波の減衰が大きい典型例は電気伝導度が大きい媒質中の電磁波であるから、これを例として説明する。透磁率を $\mu$ 、誘電率を $\epsilon$ 、

電気伝導度を  $\sigma$  として、電磁波の位相スロウネスは、

$$s = \sqrt{\mu(\epsilon - i\sigma/\omega)} \quad \dots\dots(4)$$

で与えられる。この式中の  $\sigma/\omega$  と  $\epsilon$  の大小比較で見ると、周波数が高い領域 [ $\omega' = \sigma/(\epsilon\omega) \gg 1$ ] で波動方程式に、低い領域 ( $\omega' \ll 1$ ) で拡散方程式に対応している。地殻内部にはその両方と中間状態もごく普通に存在する。この3つの状態の関係は連続的に  $\sigma/\omega$  を変えて調べれば分かるが、ここでは、両極端の波動と拡散の特徴の違いを調べてみる。

・位相スロウネス

$$s_1 = \sqrt{\mu\epsilon}, s_2 = s_1/2\omega' \quad \text{(波動)} \dots (5a)$$

$$s_1 = \sqrt{2\mu\sigma/\omega}, s_2 = s_1(1 + \omega') \quad \text{(拡散)} \dots (5b)$$

・群スロウネス

$$s_1 = \sqrt{\mu\epsilon}, s_2 = s_1/8\omega'^3 \quad \text{(波動)} \dots (6a)$$

$$s_1 = \sqrt{\mu\sigma/2\omega}, s_2 = s_1/(1 + 4\omega') \quad \text{(拡散)} \dots (6b)$$

電磁場が波動で伝播する(5a)(6a)では、 $s_2$  は  $s_1$  に比べて小さい。拡散で伝わる(5b)と(6b)の場合でも  $s_1$  は有限、すなわち波の速度がゼロではないので波としての性質は失っていない。また、 $s_2$  は波動の場合より大きい、 $s_2 = s_1$  という上限があり、 $L = \sqrt{2\pi/f\mu\sigma} = \lambda$  となるために、周波数が低くなるほどその平方根に逆比例して遠方まで波がとどき、観測の対象になる。

波の観測では、群スロウネスによる波の遅延、すなわち伝播時間  $q$  を測定するのが普通である。

$$q = sx = \partial\kappa/\partial\omega x \quad \dots\dots(7)$$

ここで、 $s$  は複素数であるから群遅延も複素数である。複素数で表現した伝播時間の実部は普通の意味での伝播時間を、虚部は波の吸収減衰を示す。実在の地殻物質では、 $\epsilon$  と  $\alpha$  が周波数に依存するので、波の伝播速度と吸収の周波数依存性(分散)は上の式のように単純ではない。しかしその単純さからのずれが地殻内部の構造や物性の情報を持っているのである。したがって、一般的な複素群遅延の解析法(3.4節)さえあれば、拡散伝播は「もっと豊富な情報をもたらす波」であると結論できる<sup>5)</sup>。

図1には、波長と対象物の相対寸法によって、見え方が「幾何学的形状と構造」となったり、これとは異質の「物質の性質と状態」となったりするという状況を示してある。対象の寸法に比べて短い波長では、幾何学的な「形」すなわち「構造」が見える。波長と対象が同じ程度の寸法るとき、共鳴、あるいは波の干渉や散乱として観測でき

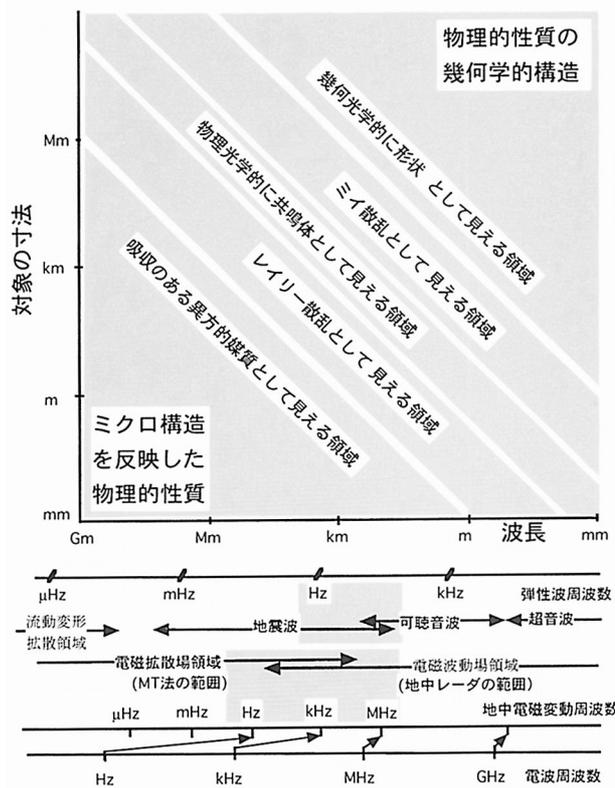


図1 波長と対象物の相対寸法、周波数の関係

対象物の寸法とそれを見る波の波長によって見え方が異なるので、可能なすべての波長で見ることで対象の多面的特性を把握できる。この図の下には、横軸の波長を与える周波数を伝統的に異なる名前のついた波、あるいは方法と共に示してある。低い周波数領域の電磁波には、波長と周波数の関係に未確定幅の上限が示してある。これを観測的に決めることも地下状態を見る重要な目標の一つである。ハッチで示した周波数範囲が、現在開発中のアクロスで現実的に扱える波長(周波数)の範囲である。

対象を構成する構造単位よりも十分長い波長では、そのバルク集合体のマクロな性質が、日常用語でいえば「色」等として物質の「性質や状態」が見える。具体的な例として周波数が低い電磁波の場合を考える。波長よりも十分小さい鉱物結晶粒子レベルの構造、その隙間に散在する水とその状態など、それ自体は見えないにもかかわらず、そこに起こるイオンの移動などミクロな動的物理過程を通じ電気伝導度や誘電率という物理的性質に反映する。したがって観測できる波の分散や吸収から、まだ解明されていない地殻中の水の量やその状態までが「波で見える」といってよいのである。また、地殻内部には地震や断層を発生させる応力のために、微小クラックや結晶の配列に方向性がある。それらは波長より小さい構造であるから直接見えないが、波の伝播の異方性として観測されるのである。このような色と方向性は物質の「性質と状態」を表すのであって、その観測に



である。

### 2.3 観測窓：空間、時間、周波数

対象を観るときは視野の広さと視力が重要だ。視野が広ければ大局が見え、狭ければ分解能という視力が上がる。もちろん窓の寸法だけでなく質も重要だ。我々の観測窓の考え方を概念的に示したのが図3である。

地表面全体、あるいは目標地域全体に波の検出装置を設置すれば、広大な窓になって地下への視野は広がる。これが広域観測ネットワークである。これは極めて有用だが、各観測点直下にある局所的構造の影響で視力には限界がある。これは、表層部付近の大きな不均質性に原因があり、いわば眼鏡の前面の水滴が実質視力を損なう空間的雑音に相当する。その水滴が何時でも同じなら1回その補正をすればよいが、地殻変動や気象条件などで変動するので対応策を要する。一つの方策は均質性の高い地下深部へのセンサ設置である。

もう一つの現実的な対応は、センサを稠密に配列したアレイを観測点の単位とすることである。センサの分布密度とスパンは、空間雑音になる不均質性の長波長成分は解像して補正でき、短波長成分は平均して相殺できる設計にする。加えてアレイには波の入射方向の識別という強力な機能がある。つまり目の瞳孔のように狭い窓からでも広い視野を持てるのだ。このような稠密アレイのアレイ(ネットワーク)をスーパーアレイと呼ぼう。動物は少なくとも2つの目から成るスーパーアレイを持って遠近までを識別できる。地下の3次元

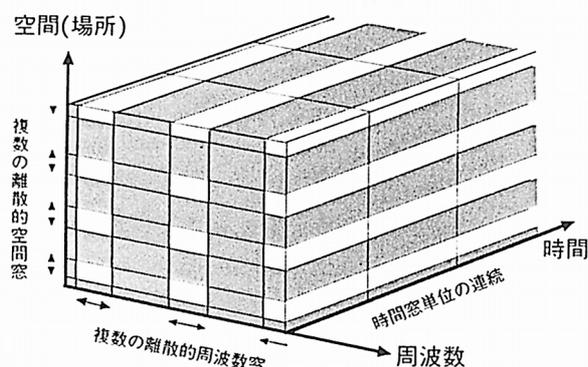


図3 空間、周波数、時間の観測窓の概念

時間窓は常時開くことによって、構造解析データの高精度化と時間変動監視ができる。空間窓は離散的に設置できる観測点または観測アレイだけで開ける。周波数窓は全面開くことが理想的だが、監視観測には、比較的狭い複数個の周波数帯域を離散的に開くのが実際的である。一つの周波数窓は離散的線スペクトルでできている。

の対象を見るには少なくとも3個の稠密アレイから成るスーパーアレイがよい。

次に時間窓という概念を説明する。観測を行うとき、その観測期間は自然を観るべく開いた時間窓である。自然地震の観測やそれを照明源とする地下観測では、窓は常時開いているにもかかわらず、自然を実際に見る時間は限られる。定常的人工照明は窓を最大限に広げることであり、時間という放っておけば自然に流れて消えてしまう貴重な資源を有効に活用する手立てになる。これがアクロスの「口」の最も重要な特徴の一つである。

時間窓の拡大を徹底的に追及すると、レーダなどで普通に使われる繰返しパルス信号のデューティファクタ $d$ (=パルス巾/パルス繰返し周期)で与えられる。図6参照)を最大値1にすることが望ましい。信号の遅延測定には、時間的に局在するパルスの信号は必要な条件だ、という考えもあった。しかし、 $d=1$ の連続的サイン波信号で群遅延を正確に決定する方法(3.4節)があり、それがアクロスの機能を格段に上げることになるのである。

幾何学的な意味の窓と時間窓に加えて、周波数、すなわち波長の窓の設計はアクロス開発の中心的課題の一つである。まず最も分かりやすく重要なことは、図1に示したとおり波長によって見える内容が質的に異なることで、対象の多面的理解には広い周波数窓が有用である。波の吸収や反射の周波数依存性までを観測する利点は、黒白とカラーの映像が持つ情報量の違いに例えられる。周波数窓が広いことは重要だが、幾何学的窓と同様、複数のサンプリング窓(例えばRGBの3つだけに限定)を適切に分布設定の方が現実的な場合もある。また、特定の波長が特別な意味を持つ場合、その周波数のデータの選択的取得、あるいは選択的排除が必要なこともある。その窓の最適設計には、

地殻構造と物性の周波数依存性の特徴

周波数窓の情報の特性

の両方の理解が必要である。本論では前者については2.1節で簡単に述べただけだが、後者については3.3節、3.4節でも説明する。

### 2.4 定常的人工照明と監視観測

蛍はその発光を観測して認識できる。蛍の傍の草は、近くに蛍がいて光っている間だけは見える。自ら波を放射する対象は、その放射を観測することによって調べられる。自ら発光しないものを調べるには、明るい素性の知れた照明を必要と

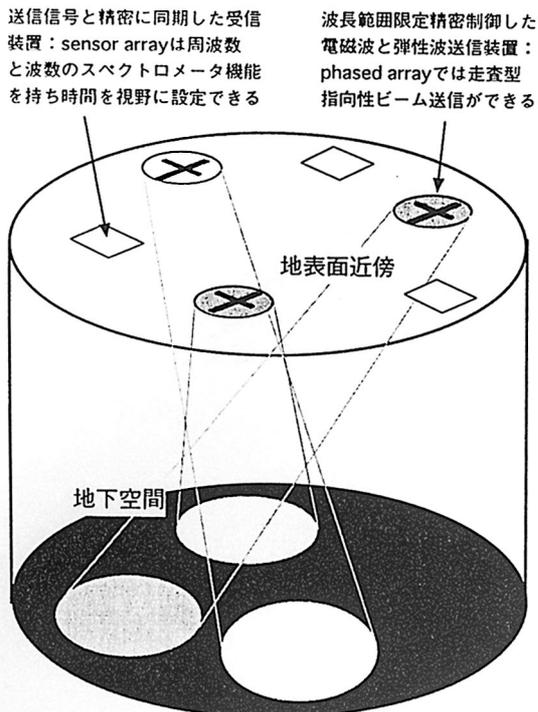


図4 3次元の地下構造と状態をレイパ斯的に監視観測する概念

動物は立体的にもものを見るために光センサを多数配列した網膜のある目を2つ持つ。同じように地下を見るには指向性をもつ複数の稠密センサアレイを必要とする。照明源と観測点の同期システム、及び取得データの演算処理をして地下の像を構成するシステム（動物では脳）は描いてない。短波長の照明源には指向性のビームを走査できる送信装置アレイは最も効果的であるが、長波長では困難だけでなく効用がない。

する。

地球内部も自発的に超長波長の光である電磁波を放射するが、その実体はまだ不明である。現在の観測技術と体制で検出できる強さの電磁放射はまれにしか発生しないからである。地震発生は地球内部で発生する音波放射であり、その放射波の観測によって地震現象が研究され、同時にこれを音波のフラッシュ照明として地球内部を観測してきた。

地球内部が見えにくいのは、十分強かつ素性の知れた照明源はあまりないからである。そこで物理探査分野では人工的な照明技術が開発されてきた。しかしこれまで普通の人工照明は、音波でも電磁波でもパルス的である（例外はある）ため環境を損なうおそれがあり、継続的使用に耐えない。そこでもっと適切な人工常時照明技術が求められる。アクロスでは、照明をジュールで測定するエネルギーの問題でなく、信号が運ぶ情報の問

題として扱い解決方向を示したのである。これがアクロスの「ス」すなわちSignal Systemの意義の一つである。

定常的信号の使用は、地下状態の時間変動の能動的監視を実現する点で、従来の地下観測法を大きく前進させる。しかし監視には、どこで何がどう時間変動するのか、その対象を特定する白地図が必要である。その白地図とは地下構造のマップである。地下構造の精密マッピングにはS/Nの高いデータが必要であり、それには長期間にわたるデータ蓄積が求められる。結局、監視目的の継続的観測が精密構造解明の資料になるので、構造解明と監視観測とは相互補完関係にある。

理想的な人工的信号は、複数の送信装置を配列したフェイズアレイで送信する指向性ビームである。これは監視観測の対象を限定する「対象窓」と見てよい（図4）。特に著しい散乱体が分布している活火山地下の状態監視では、照明対象を特定部分に限定して外からの散乱波を抑制することが重要と考えられる。また、送信ビームの走査技術は、地震発生が予測される想定断面の監視によって前駆現象の直接把握に役立つだろう。指向性ビーム送信技術は短波長では送信点近傍の地盤の不均質への対応が課題となる。また、より深部の探査に適した長波長では大きいスパンの確保が必要である。指向性送信の実現は理論的技術的には容易だが、現実問題への対処は簡単でない。そこで、これは将来の目標課題の一つとしておく。

### 3. アクロスの理論的基礎

#### 3.1 観測と解析の両システムの相互関係

動物の目の網膜に像（観測）ができたとして、それが捕食者なのか餌なのかは、あらかじめ学習した脳が解析と判断という演算をして初めて分かる。

我々の本来の目標は地下を見て理解することである。それに必要なのは、(a)バイアスが小さい伝達関数を決定できる観測システムと(b)取得したデータから、先験的制約条件の下で地下構造と状態の像を形成する理論解析システムの二つである。地球内部の解明では、(a)によるデータを取得した後、それを(b)によって地下の描像へ焼き直す、という手順になる。しかし開発研究では、この二段階を相互補完的に接続して一つの技術体系にするのにその全構造を理解しておく必要がある。研究開発を開始した段階では、原理的に重要で本質的な問題と小技に属する要素までが綾なしにいて、我々自身にも混乱があった。研究の進展とともにその全体の構造が明らかになってきた

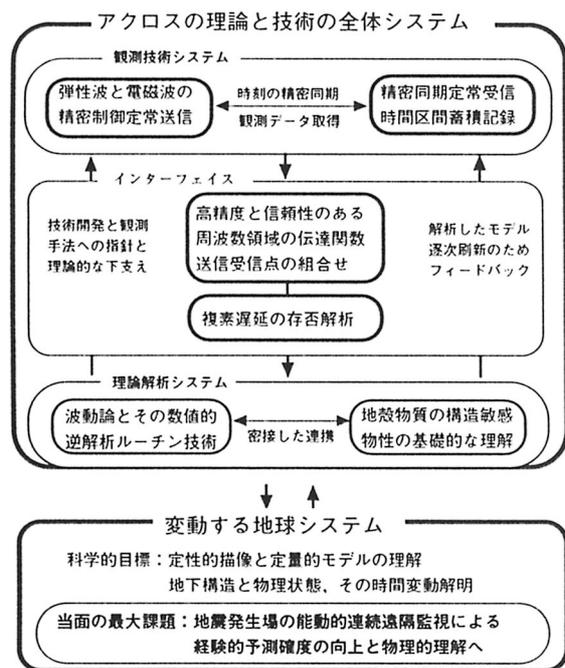


図5 地下を観測的に理解しようとするアクロスの構成要素と機能

アクロスの観測技術システムは、精密同期した送信と受信およびそのデータの記録によって、送信受信点間の伝達関数の精密データを得るものである。一方理論解析システムは、得られたデータから、先験情報と波動方程式で拘束される波動伝播の法則性の制約の下で、地下構造と状態のモデルを導くものである。その両者の適切なインターフェイスは、伝達関数を周波数と波数の領域で記述し、かつ存否解析法によって群遅延の集合としたものである。

(図5)もし誰かが、地下構造解析を目標に波動論だけの研究から出発したとしても、その帰結はここで提案しているアクロスの観測と解析手法を要請することになったはずである。

時間窓の全面解放や空間窓とその使い方はアクロスの有用性を格段に拡大する。しかし、もしアクロスの最重要ポイントの一つだけ述べるとすれば、観測と解析の両システムのインターフェイスを、「周波数領域における送受信点間の精密な伝達関数」に設定することであった。観測システム側では、信号の振幅を限定して送信特性の恒常性を確保すると同時に、式(8)の成立を保証して高い信号雑音比を得るように設計した周波数帯域限定定常FM波の最適使用技術の開拓が課題になる。解析システム側では、対象場を具体的に記述する波動方程式と観測量としての伝達関数の間を自在に往復できる数値解析手法の開拓が課題になる。

### 3.2 線形力学系の構造と伝達関数の順逆問題

地下の特定領域に励起信号 $X$ を入力すると応答 $Y$ がある。 $X$ と $Y$ は次の波動方程式で拘束されている。

$$DY = X \quad \dots\dots (10a)$$

$D(=p_1(\partial/\partial t)^2 + \nabla p_2 \nabla)$ は時間微分 $\partial/\partial t (=i\omega)$ と空間微分 $\nabla (=i\kappa)$ の演算子、及び二つの物性定数、 $p_1, p_2$ の空間分布をパラメータ $p$ として含む。その物性定数は、弾性波なら密度と弾性定数、電磁波では誘電率(複素数で表現すれば、虚部に電気伝導度を含む)と透磁率でこれらは周波数に依存する。離散系で $D$ を $T$ とで表すと、式(10a)は線形連立方程式になり、その解は

$$Y = AX \quad (A = D^{-1}) \quad \dots\dots (10b)$$

と表現される。 $A$ は $D$ の逆演算子で、 $p$ を含む $D$ の逆行列である。重要なことは、 $\det(A)$ が発散する極だけに $Y$ の解が存在し他は影に過ぎない(存在が否定できる)点だ。の関数として極の位置を $x$ で記述すると分散曲線と呼ばれモード解析に使われる。同じ関係を逆空間で $t$ の関数として $x$ を記述すると走時曲線と呼ばれてレイパス解析の基礎になる。

このように $D$ と $X$ を与えて $Y$ を(10b)として得ることを順問題を解くと呼ぶ。我々の課題は $X$ と $Y$ の一部分だけを観測したデータから $p$ のモデル $p^*$ を得ることである。これを逆問題を解く、あるいは逆解析と呼ぶ。ところが逆解析は、! 構造記述のパラメータ数がデータ数より多い、" ある範囲の $p$ の情報データに含まれていない、# 高度な非線形問題である、などの理由で必ずしも解けるとは限らない。しかし、この逆解析ができて初めて地下を「観て分かる段階」になるので、その戦略を検討する。

我々が使えるのは送信装置を設置できた場所における特定の励起 $E$ と、観測を行う限定された場所における特定の観測量 $R$ の組合せだけである。 $X$ と $Y$ の窓演算をそれぞれ $W_x, W_y$ として $R$ と $E$ を、

$$R = W_y Y, \quad E = W_x X \quad \dots\dots (11)$$

と表す。 $R$ は $E$ に比例するので観測データの記述を

$$HR = E \quad (H = T^{-1}) \quad \dots\dots (12a)$$

$$R = TE \quad \dots\dots (12b)$$

と書いたとき、 $T$ が伝達関数と呼ばれるアクロスの観測量である。逆解析では、 $p$ 全体のうちで知りたい部分、あるいは知りたい部分のために必要な部分を設定し、まず $p$ のモデル $p^*$ を仮定する。 $p^*$ を与えて $D$ のモデル $D^*$ 、 $A$ のモデル $A^*(=D^{*-1})$ を求め、 $T$ あるいは $H$ に最適するようにモデル $p^*$ を逐次刷新するのが常套手段である。

式(10a, 10b)で $D$ を $D^*$ に、 $A$ を $A^*$ に置き換え

て、式(11)を入れると、観測方程式に相当する次の関係が導かれる。

$$W_y A^* = T W_x \quad \dots\dots (13a)$$

$$W_x D^* = H W_y \quad \dots\dots (13b)$$

ここで式(13b)による逆解析には順問題を解いて  $A^*$  を観測的に制約する。一方、受信と送信の交換に相当する式(13a)では波動方程式の構造  $D^*$  を観測データが直接制約する形式になっている。

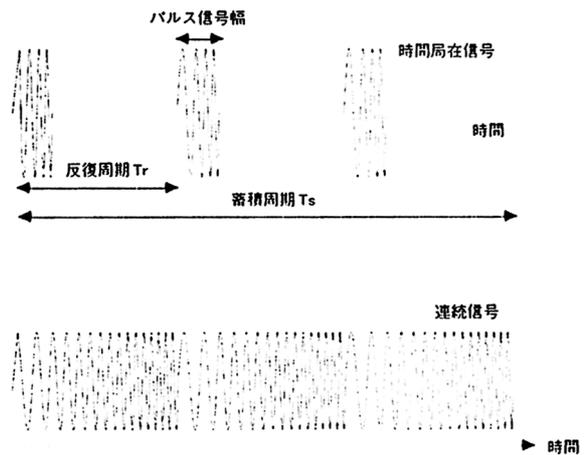
アクロス観測が与えるデータ  $T$  の具体的表現は、3.4節で述べる存否解析によって、モード解析とレイパス解析に共通の波数から単純に導かれる形式で与えられる。特に、 $p$  に周波数依存性がある場合、波動方程式を実数の関数として複素数の波数領域で扱うのが最も単純明快である。このような波動方程式の構造とアクロスで取得するデータとは非常になじみがよく、観測・順問題・逆問題のすべてに一貫性が保たれる。具体的な解析には計算量は膨大になるので、計算装置の性能向上を待つことにする。それは、我々が努力しなくても計算装置の機能は時代とともに急速に上がるからである。

### 3.3 アクロス信号論

ここでは「狭い周波数バンド内における精密な送受信点間の伝達関数」の観測的取得に最適な信号について検討する。アクロスで使う周波数窓、すなわち送信信号のスペクトル構造に二つの要請がある。第1は、図6に示すように、比較的狭い周波数帯に限定したラインスペクトル群とすることである。これは有限長の離散スペクトル系列と呼ばれる。この狭い周波数帯を窓の単位と考える。第2の条件は、そのフーリエ変換、すなわち時間軸上で見る波形はほぼ一定の振幅を持つ定常波であることだ。これはデューティファクタが1の周波数変調波（FM波）と呼ばれる。

これを実際に使用するためには、目的や条件に最適化する様々な変種を考える。例えば、広い周波数領域に複数の離散的周波数窓を分布して設定する（代表的な複数のカラーバンドでの観測に相当）、一つの周波数窓中に混信しない複数の異なる信号バンドを同時に設定する（同時多重観測）、一つの窓の中で周波数依存性雑音があっても各スペクトルラインの信号雑音比を高く均等に（解析の精度向上）などである。ハードウェアの制約の下でそれぞれの目的を達する信号の最適設計と評価にはかなり高度の理論と技術が必要である。したがって、あえていえば、アクロス信

### 信号波形



### スペクトル振幅

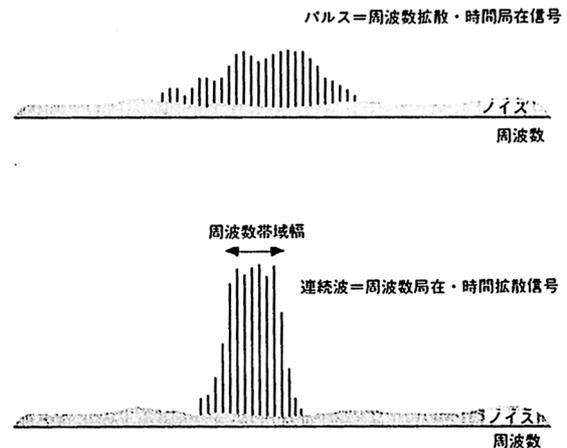


図6 アクロス信号とその特徴

時間局在のパルス信号の特徴はスペクトルは周波数領域で広く分布するのに対して、連続周波数変調波であるアクロス信号のスペクトルは狭い周波数バンド内に集中しているため、雑音に強い。アクロス信号の基本型は連続周波数変調波がある周期  $T_r$  を持ち、それが  $n$  個（整数、この図の例では3個）で構成する周期  $T_s = nT_r$  を連続的に繰り返すものである。様々な目的に合う変種を設計できる。

号論とでもいべき小分野を成すであろう<sup>6)</sup>。

高精度の計測では長時間の取得データをスタック（重ね合わせて平均）する。そのために、送信信号には正確な繰返し周期  $T_r$  を設定する。アクロスでは  $T_r$  の整数倍の時間区間をデータ蓄積周期  $T_s$  に設定する（4.2節）。仮に4倍なら、一つの周波数バンド（窓）の中に4つの異なるFM波信号を混信することなく設定できるので、その各々を信号バンドと呼ぶことにする。その信号バンドの一つに信号を入れないと、雑音の測定ができるので、3種の信号取得と同時に雑音レベル、つまり計測誤差が得られる、という著しい特徴がある。

アクロスで使う周波数局在連続波の対極にあるのが、通常使われる時間局在のパルス波であるからその比較をする。アクロス信号には、パルス波に固有のスペクトルの広がりやサイドローブがなく、信号のスペクトル線が設定帯域内に限定されている。これには情報取得の観点から二つの利点がある。一つは別の周波数バンドを隣接してクロストークがないように設定できることである。もう一つは必要な周波数バンド内の信号パワーが上がり、 $S/N$ も上がることである。時間軸上で見た送信信号の最大振幅に上限を設定すると、信号パワーはデューティファクタが1のアクロス信号で最大になる。その全パワーのほとんどが測定に使う周波数帯域に集中するのである。したがって、パルス波を扱ってきた従来の感覚からは非常識に見える程高い $S/N$ が達せられることになる。FMアクロス信号の全送信パワー $P$ を $n$ 本のスペクトル線に均等分配する場合、一本の信号振幅は $(2P/n)^{1/2}$ に比例する。したがって式(8)の信号雑音比は、受信と送信の振幅比を $a$ として

$$S/N = a(P^{1/2}/\sigma)(2T_o/n)^{1/2} \quad \dots\dots (14)$$

になる。ただし、離散スペクトル線の間隔は $1/T_r$ であるから、周波数変調幅 $f$ は $n/T_r$ となる。 $n$ を小さくすると $S/N$ は高くなる。しかし周波数幅がある限度より狭い少数のスペクトル信号から必要な情報を抽出するのは困難である。したがって、個別の目的と雑音の状況によって最適の周波数振幅が存在するはずである。その評価基準を作るのもアクロス信号論の課題である。

### 3.4 周波数領域の伝達関数の性質と存否解析

最も普通に使われる構造解析法は、パルスを送信してそれが伝播する波線経路に沿う伝播時間や吸収を使う「レイパス解析」である。周波数窓が狭い伝達関数に対応する時間領域信号は、時間軸上に広く分布しているので伝播時間は正確に決定できないとされている。ここでは、このような伝達関数の性質を明らかにし、それに準拠したモデルによって群遅延を決めて逆解析に適合する伝達関数に変換する存否解析法を紹介する。

式(1)で記述される波の特性を周波数領域で一般化する。送信点 $e$ と受信点 $r(=x+e)$ の間の周波数領域伝達関数 $T_{re}$ は、次のように多数の波の重ね合わせで記述できる。

$$T_{re} = \sum_j T_{rej} \exp[-i\kappa_{rej}x] \quad \dots\dots (15)$$

簡単にするために、まず、一つの波だけを考える。

$$T = T_o \exp[-i\kappa x] \quad \dots\dots (16)$$

これを $\omega_o$ を中心にした狭い角周波数 $\omega$ の範囲(周波数窓)内だけを考慮して、 $\omega = \omega_o$ の回りでテイラー展開した第1項だけをとると、(16)は

$$T = T_o \exp(-i\kappa_o x) \exp[-i(xs_o)(\omega - \omega_o)] \quad \dots\dots (17a)$$

と書ける。ただし、 $\omega_o$ と $s_o$ はそれぞれ $\omega = \omega_o$ における波数と群スロウネスである。観測点を固定したとき、 $\omega_o$ 近傍の周波数範囲内で変化するのは右辺最後の因子だけであるから、他の因子をまとめて $A_o$ と書き、次のように表現する。

$$T = A_o \exp[(iq_o)(\omega - \omega_o)] \quad \dots\dots (17b)$$

ただし、 $q_o$ は $s_o$ が複素数であるから次のように複素数の群遅延である。

$$q_o = s_o x = \tau_o - iV_o \quad \dots\dots (18)$$

$\tau_o$ がエネルギー伝播の遅延時間(走時)を、 $V_o$ が波の吸収を表す。これを式(17b)に入れてみると、周波数軸上の‘波数’ $q$ の減衰振動を示すことを簡単に確認できる。すなわち、2つの複素数の組 $(A_o, q_o)$ は1個の減衰サイン関数を指定するので、それを波の基本単位として波素と呼ぶ。つまり、式(15a)は $\omega = \omega_o$ の波群を周波数軸上の複素数の波素 $(A, q)_{orej}$ の集合を次のように表している。

$$T_{ore} = \sum_j A_{orej} \exp[(q_{orej})(\omega - \omega_o)] \quad \dots\dots (19)$$

ここで、下付きの $o$ は周波数窓の中心周波数を、 $r$ と $e$ は送受信点を指定し、 $j$ は一つの $(o, r, e)$ を指定したときの異なる複数の波素を指定している。すなわち、狭い周波数窓で見た周波数領域の伝達関数は常に式(19)の形に表現されるのである。もし、 $q$ をパルス的な孤立した波の遅延時間と解釈して構造のレイパス解析をする立場では、式(19)は、送信点 $e$ でデルタ関数で励起し、受信点 $r$ で観測される複数のパルス走時と振幅で記述した伝達関数に相当する。伝達関数がこのように単純な形(モデルといってもよい)で表現できるのは、狭い周波数窓だけで観る、という条件を課したからである。

時間軸上のサイン波の集合があつて、そのスペクトルピークの周波数軸上の位置を求める操作はスペクトル解析と呼ばれる。周波数軸上のサイン波の集合から時間軸上のピーク位置を求めることは、スペクトル解析と数学的には全く同じである。アクロスの観測データは、長さの限られた離散周波数データで式(19)に相当する。この式は周波数領域が狭い範囲でしか定義されないが、 $(A_o,$

$q_0$ の数值が与えられて、これが仮にすべての周波数範囲の表現だと仮定してフーリエ変換すると、時刻 $t=Re(q_0)$ にピークが立つ。こうして周波数領域のデータから遅延が得られるはずである。しかし狭い周波数範囲の伝達関数の観測データからそのピークの振幅と位置( $A_0, q_0$ )を解析するのは無理だというのが一般の常識である。我々は、このようなデータでも解析ができる自己回帰モデルによるスペクトル解析法を発展させて( $A_0, q_0$ )を決定できるようにした。これを「存否解析法」と呼ぶのである<sup>7)</sup>。その理論的基礎と具体的アルゴリズムについてここでは述べないが、 $S/N$ の高い適切なデータが与えられると、非常に高い分解能と精度で群遅延を決定できることが数値実験で示されている<sup>8)</sup>(図7)。

この存否法が成立するおかげで、アクロス信号は雑音に強く非破壊的だという特徴に加えて、対象の形だけでなく色の遠隔監視観測にまで使えるのである。したがって、従来の計測信号との比較においてアクロス信号には利点しか思いつかない。

伝達関数(19)は、逆解析の式(13b)における観測からの直接的拘束条件 $T$ を与える。これまで、 $q$ の意味を、解りやすさのためにレイパス解析における孤立波のレイパス走時として説明した。しかし実際は、 $\sim$ における送信源から観測点に伝達されるすべての情報(孤立波の伝播と見なさない共鳴モードを含む)を波素( $A, q$ )によって記述している。このことは、アクロス観測データの存否解析による表現式(19)が、観測データと逆解析とをつなぐ最も一般的で、かつ直截なインターフェイスであることを意味する(図5)。

#### 4. アクロスの技術システム

アクロスでは送信点と受信点間の伝達関数を測定するので、送信装置とその信号を受信記録装置とは精密に同期しなければならない。それには遠距離でもマイクロ秒よりも高い精度を長期間保てるGPS信号を使ったデジタル制御技術を要する。まだ改善の余地はあるとはいえ、我々はこれを実現する技術をほぼ確保できたと考えている。技術システムの構成に必須の重要性を持つ要素だけでも多岐広範にわたるので、それらを説明するのは容易ではない。ここでは、分かりやすい主な事項だけについて原理面の概略を述べるに留める。

##### 4.1 送信システム

電磁波の地下送信には、ループアンテナや電流ダイポールを用いればよい。ループアンテナ送信

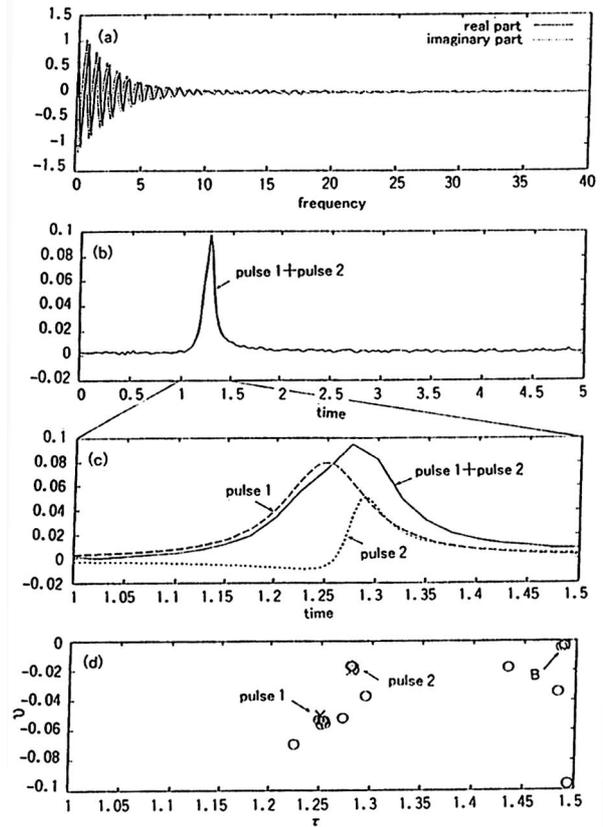


図7 群遅延の存否解析の数値実験例

二つの非常に接近して群遅延(パルス1とパルス2で表現)と雑音の重畳[(b)と(c)]は、周波数領域の減衰サイン波(a)として表現される。それが存否解析法によって、二つの複素遅延(d)として分離できる。(d)の横軸は群遅延の実部(伝播時間に相当)、縦軸は虚部(波の減衰、パルスでは幅に相当)を表わす。 $\times$ は与えた群遅延、複数の $\circ$ は解析結果で雑音の影響による解の揺らぎの程度を示す。

ではコイル電流が作る磁場による地中に誘導電流を発生させる。ダイポール送信では電流回路の一部を地盤内部に設定する。送信電源と地盤との結合には、高周波領域ではアンテナからの変位電流(地中レーダ)が、低周波領域では接地電極への直接通電が適切である。ダイポールでは送信の電圧と電流を測定すれば総合的な送信特性が分かる。

弾性波の送信では、膨張収縮などで発生する波は、近地場でエネルギーを消費するために送信効率が極めて低い。そこで遠地場への送信効率が最も高いシングルフォース $F$ を使う。それには、地盤に固定した装置内で錘に振動を発生させる力 $F$ を、地盤と錘の運動量交換として地盤に伝達する<sup>9)</sup>。質量 $m$ の錘の慣性系で見た変位振幅を $u$ とすれば、発生する力 $F$ は次の式で与えられる。

$$F = -m\omega^2 u \quad \dots\dots(20)$$

発信装置も振動するのでその変位を $u_g$ とすると送

信装置が地殻にする仕事は $Fdu_g$ である。したがって $F$ と $u_g$ を測定すれば全送信特性が分かる。

電磁波でも弾性波でも遠地場波動だけの送信特性は送信装置近傍の地盤の構造に依存するので、厳密にはその解析を必要とする。現在は送信波の位相をマイクロ秒レベルまで制御して、電圧が電流、力 $F$ が変位 $u_g$ のいずれかを送信信号としている。

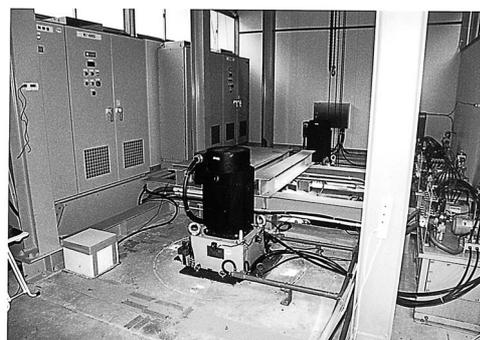
電磁アクロスの送信装置には市販の各種の電源装置を使用できる。弾性波送信装置の錘の駆動には、電磁的な線形駆動、モータによる偏心錘の回転駆動などいろいろな方式があるが、我々の目的に合致するものは市販にない。様々な方式を探索して当面の試験装置としてはデジタル制御サーボモータで偏心質量を回転させる方式の送信装置を開発した<sup>10)</sup>。この型の装置の発生力の大きさは、錘の遠心力の反作用で与えられるので、力の方向は回転する。左回転の送信信号と右回転送信信号の線形結合で、任意方向の励起力の送信と等価にできる。現在我々が主に使用しているのは、50 Hz までの信号の振幅が20 tonf(=  $2 \times 10^5$  N)で、分極方向が回転する装置(図8)である。また、それを4個組合せた加振方向制御型、及び力振幅が1 tonfのユニット2個を組合せて分極方向を固定した100 Hzまでの可搬型の開発も行った。こうして10 Hz程度以上の周波数領域では、エネルギー効率や使い勝手に多少の問題はあるとはいえ、いずれも実用装置としての安定性はほぼ確立できた。東濃鉱山に設置した送信装置の信号は100 km離れた岐阜県上宝でも検出できている。ただし、信号が小さすぎて必要なデータを効率よく取得するには困難がある。したがって次の課題は、地殻深部まで効率良く観測できる低周波遠距離送信を目的とする装置の開発である。

これらの送信信号の精密制御にはデジタルサーボ技術を使う。回転方式の送信装置では1/2,000回転ごとに、偏心質量の位置(位相)と速度と回転トルクを検出し、角運動量へのフィードバック制御によって、回転位相が設定値になるようにする。このような装置では、回転速度(=周波数)の周波数変調によって、3.3節で説明した「特定周波数範囲内で離散的周波数スペクトルを持つ定常的地中音波」を送信できるのである。送信周波数帯域内のスペクトル振幅をほぼ均質にし、かつ帯域の外側へのスペクトル漏えいを少なくするには、滑らかな鋸歯状波変調(回転周波数をゆっくり上げ、短い時間で下げる)を採用する。慣性力と使用できる制御トルクの限界というハードウエ

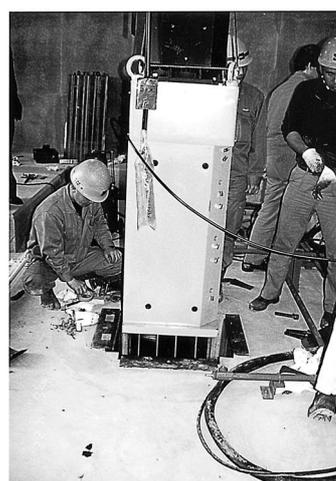
ア上の制約の下に最適変調方式を決めて具体化するのには困難な課題であった。それにもかかわらず、GPS時計に同期させた設定位相へ追従誤差を長時間平均でマイクロ秒以下にする精度を達している[式(19)]、これが式(8)の成立を保障するのである。その結果送受信できている信号とそのデータ解析の例を図9に示した。このような送信装置の地盤への設置にも注意深い技術的対応が必要だ。それは岩盤との接合、岩盤自体の健全性、周期的加振による岩盤の疲労破壊対策などである。

## 4.2 受信システム

受信システムは、センサとデータ収録装置で構成する。ここでは、まずセンサから説明する。



(a)



(b)

図8 地中音波送信装置

(a)は東濃鉱山に設置されている20 tonf級地中音波送信装置の地上部。見えているのはサーボモータ(中央)と制御回路操作盤。地盤と密着する厚さ2m、面積 $5 \times 7$ m<sup>2</sup>の岩盤カップラ(鉄筋コンクリートブロック)内に偏心回転体が装備されている。(b)は設置前の装置本体。

電磁場はダイポールアンテナによる電場、あるいは磁力計による磁場で計測する。弾性波では地震計によって加速度を計測する。アクロスの開発当初は、専門家が使っている市販の製品を使えばよいと考えていた。しかし、市販の加速度計には、相当高価なものでも我々の送信装置が達したレベルに見合う位相精度や安定性、線形性に不足があると分かった。そこで加速度センサとその検定法の研究も行った。その結果、現在では必要な性能を得る開発方向は見極められたと考えている。しかし、残念ながらそれに着手する研究経費待ちの段階に留まっている。現在は十分な性能を持つセンサとその数が限られているので、8個のセンサで東濃鉱山の地下130 mの坑道に水平L型アレイを設置して試験観測を開始した段階である。このアレイでは、地表のGPSアンテナと光ケーブルで接続し、信号伝達時間の遅れを補正している。UT同期地下観測ステーションとしては恐らく草分けのシステムではなからうか。

次にはアクロス信号用のデータロガーとその開発を説明する。これはセンサからのアナログ出力をデジタルデータとして蓄積するもの<sup>11)</sup>で、時間区間蓄積記録装置、Time Segment Stacking Recorder, 略してTS stacker, あるいは単にスタッカと呼んでいる。このスタッカは送信装置からの離散周波数信号のスペクトルに厳密に一致した周波数特性を持つ必要がある。原理としては簡単であるが、実用装置として確立するのはかなり困難な仕事で、アクロス技術開発の中心的課題の一つに設定してきた。

GPS時計に精密に同期して一定の時間間隔  $t$  (例えば音波アクロスでは5ミリ秒) で時系列として取得するデジタル系列データ  $x(j)$  を一定の時間間隔  $T_s$  (例えば100秒: 送信信号の変調周期  $T_c$  の整数倍) に区切ると、 $n = T_s / t$  の点数のデータが得られる。 $T_s$  ごとに逐次得られる  $n$  点の系列データを  $N$  個スタック (加算平均) する。これは  $T_0 (= NT_s = \text{式(8)の} T_0)$  の期間の観測データを取得蓄積することに相当する。この操作の周波数特性は次の式で与えられる。

$$R(f) = [1 - \exp(i 2 \pi f T_s N)] / [1 - \exp(i 2 \pi f T_s)] N$$

これを離散フーリエ変換で表現すると、離散周波数  $f = f_k (= f_k, f = 1/T_s, k = 0, 1, 2, \dots, n)$  だけにおいて値1をとる櫛型の周波数特性になる。

例えば、 $t = 5 \text{ ms}$ ,  $T_s = 100 \text{ s}$  とすると20,000点の時系列が得られる。これは、0.01 Hz間隔で0 Hzか

ら100 Hzまで10,000点の周波数系列と等価であるから、10,000チャンネルのスペクトル記録装置に相当する。

このスタッカの優れている点は、多数の異なる送信装置からの信号も同時記録できることで、送信装置と組み合わせて各種計測機器や周波数特性検定装置、あるいは、構造物の周波数応答特性測定装置としても機能できることである。アクロスの研究開発で問題になっている加速度計の検定や非線形性の測定にも威力を発揮できるものと考えている。

原理は簡単でもこのスタッカを具体化するのはいり勝手の問題等を含めて大変な仕事であった。例えば、最近の計測装置は内部の精密時計に同期して動作するが、実はこの時計の精度はUTと極めて微小だが「ずれ」がある。長期間にはそのずれが蓄積するので、長期安定性が損なわれるのである。アクロスの「口」のために、我々はスタッカの試作を既に5機種ほど行って時計のずれがないように改良を重ねてきた。現時点ではほぼ満足なものできているが、観測に必要な個数のスタッカの確保はまだできていない。

#### 4.3 解析システム

これまでの研究開発では、ハードウェアとその制御技術、及び基礎理論の積上げに重点を置いてきたので、ルーチンのデータ解析システムはまだできていない。提案している存否解析法は、数値実験と個別データへの適用では非常に高い性能をもつことが確認されている(図9)ので、そのルーチン化が本年度の重要課題の一つである。離散周波数系列データの解析に存否法は強力だが、構造の逆解析を行うための一次データ処理の段階に過ぎない。次はモード解析や散乱解析などを含めて、地殻内の多面的な特性の解析法を確立していく必要がある。

現実の地殻構造には著しい異方性とそれに伴う分散があり、その解析は地殻内部の動的な過程や状態を解読する重要な鍵である。これまでこのような認識はあったが、それに耐える質の観測データ取得に展望がなかったため、その解析理論もまだ確立していない。しかし、アクロスという新しい観測方法論がほぼ確立された現在、その技術向上と合わせて、解析理論の開拓に速やかな研究投資を行うべき段階に至ったと考えられる。

#### 5. 技術の現状と将来展望

アクロスの開拓では基礎研究と技術開発の両面で多くの模索的試行錯誤を繰り返してきた。よう

やく数km～数10 kmまでの小規模フィールドで通常の実用的物理探査ができる技術レベルに達したが、ルーチンとして実地に多数のセンサを用いて使い勝手までを磨き上げる機会はまだない。また、アクロスの持つ質的に高度な可能性を実現するには、まだ多くの基礎研究を必要とする。現在は少数の研究者しかいないので、残念ながら実用面の技術開発と原理的基礎研究の両者をバランスよく推進する体制にはない。当面の課題の一つはアクロスの専門家の育成確保にあると考えている。

基礎的な研究の積み上げは逐次実用技術に移行す

るので、基礎科学と社会的ニーズに対応する領域の境界は、時代の経過とともに次第に移動していくだろう。アクロスが持つ原理的なポテンシャルと実用ニーズを考慮し、アクロス技術の進展と実用対象の関係を描いてみたのが図10である。

アクロスの極めつけは、「地下の幾何学的構造と物理的状態」の「準実時間カラーホログラフィ」である。「カラーホログラフィ」の「カラー」は2.1節でも説明したように、物質のマイクロ過程の情報を持つ波の分散、すなわち波長依存性の可視化を意味する。また「実時間」に「準」を付けたの

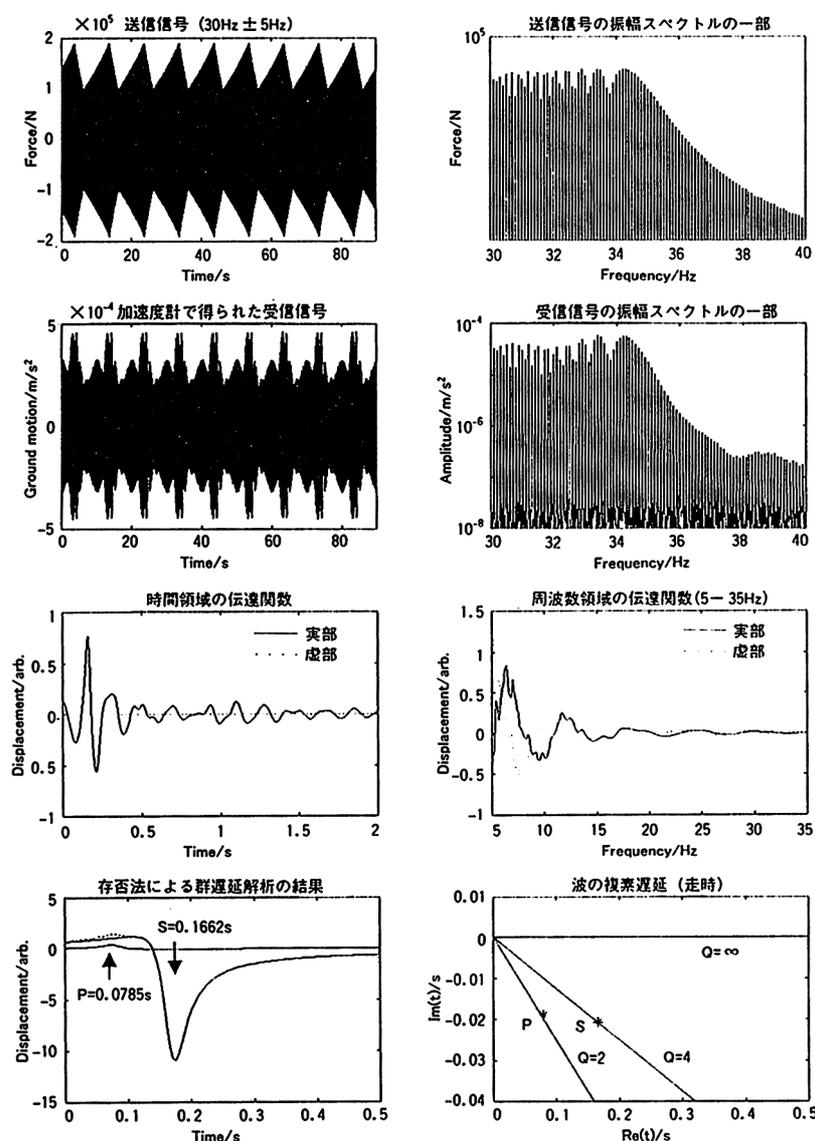


図9 弾性波アクロスの送信、受信信号と伝達関数

東濃鉱山で送信した弾性波を地下200mのボアホール中に設置した加速度計で受信した一例。受信信号は $S/N \sim 10^3$ を達していることが見てとれる。スペクトルは30Hzを中心にほぼ対称なので、30Hz以上だけを示してある。周波数領域の伝達関数をフーリエ交換によって時間領域で表現しても波の性質はよく分からない。しかし存否法による群遅延解析結果より、P波が0.0785秒、S波が0.1662秒で到達していることが解る。

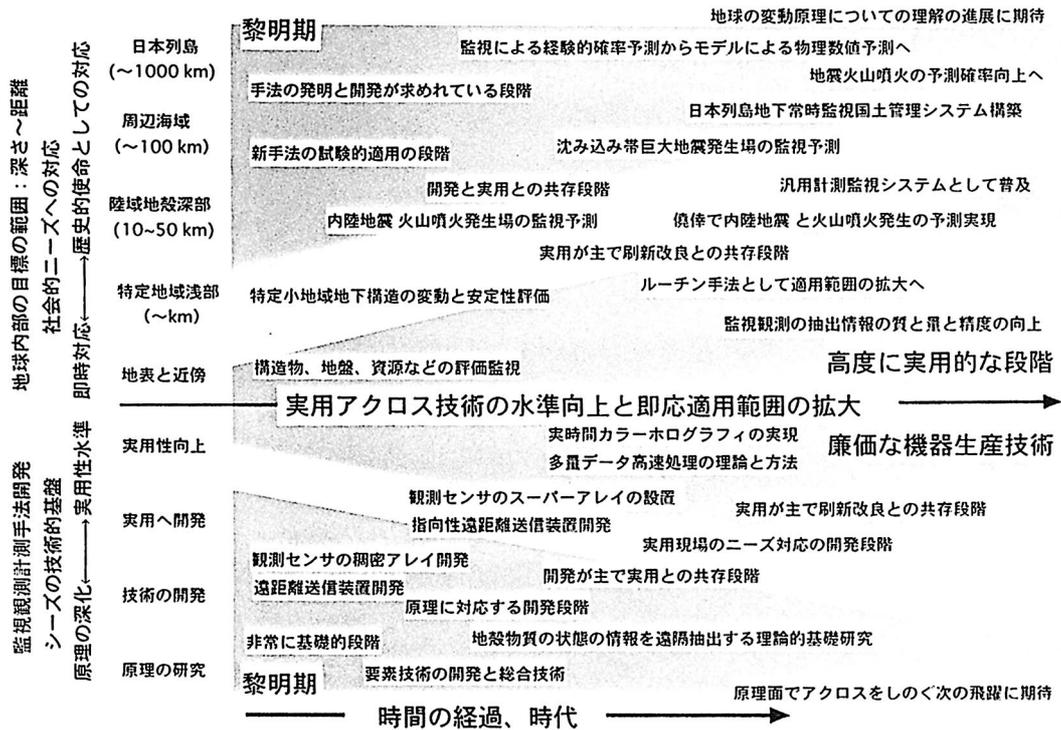


図10 アクロス技術の予想される進展とその応用についての展望

非常に基礎的な要素研究の積み上げ段階から始まり、実用技術としては維持費と操作性のよいルーチン装置の廉価生産技術までを目指している。分解能や解読できる内容の質的向上には、原理面に遡る基礎研究が必要だが、その適用可能な将来の対象はこの図のように広大であると予測される。

は、データ取得には原理的に時間を必要とするので、誤解のない表現にしたためである。ホログラフィでは「幾何学的構造」は分かりやすい対象であるが「物理的状態」については若干の説明を要しよう。図1に示したように、地下情報を持つ観測量の周波数依存性は物質のミクロな構造や状態とそこで生じるミクロな物理過程の反映である。例えば、遠隔観測によって得られる地層中の弾性波の分散は波の振動による間隙流体の振動的流動の結果であるから、石油産業ではそのデータから石油貯溜層の空隙率や液体の浸透率までを求める方法が既に使われている。電磁波の分散からは、地下深部の地震発生場に存在するH<sub>2</sub>O分子の状態や結合様式までを遠隔観測できると考えられる。このようなカラーホログラフィ技術を実現するためには、観測技術に加えて物質科学的な基礎研究の基盤を必要とする。

現実的な面から見ると、数km～数10 kmのフィールドにおいて実用化するのが容易であると考えられる。図4には、数km程度の地域を想定した地下監視システムのイメージを示した。アクロス技術の開発は現在東濃地科学センターにおいて東濃鉦

山とその周辺地域をテストフィールドにしているが、誠に残念ながら、ここは諸般の理由から適切なフィールドとは考えにくい。

アクロスの研究開発の当初の目標は、想定する地震場の構造解明と状態監視による地震発生予測、火山地下状態監視などであった。このような数10 kmから数100 kmの領域を対象とする仕事には、数km領域での経験とノウハウ蓄積が重要であるから、そのニーズに合う適切なテストフィールド確保が求められる。日本列島で発生する巨大地震の想定断面は主として太平洋沿岸の海域にある。したがって、テストフィールドとして海域を設定する可能性もあるとの想定で、海域用のアクロス技術の理論的検討も行ってきたが、それを具体化する機会にはまだ恵まれていない。

6. おわりに

本論ではアクロスの原理的な考え方と理論的基礎を重点的に説明した。これによって、アクロスがこれまでとは質的に異なる高度な地下観測監視技術に発展するとの展望や確信をもてる材料を示したつもりである。地震や火山噴火という突発災

害が頻発する日本が、将来必ずや行う国土地下の遠隔監視管理技術には、アクロス以上の方法を想像さえできないこともご理解いただければ幸いです。もとよりアクロスの基礎は広範な分野にまたがるので、それぞれの専門家以外には分かりにくい部分もあるが、事柄の性格上ご寛容にお願いしたい。

1996年度に5年計画で発足した陸域地下構造フロンティア研究のアクロス開発研究における模索黎明期は2000年度末で終了する。本年度はこれまでの成果を具体的な形として提示するつもりである。また、関係者諸氏には、アクロスの原理がもつ極めて高い潜在力と発展性を考慮して、さらに進んだ段階の研究体制の整備にご尽力をお願いしたいところである。我々の目算では、適切な体制があれば、精度や解像力のレベルは別として、地下30km程度までのカラーホログラフィの原形を5年以内に世界に先駆けて実現できる見込みである。

#### 謝辞

この開発研究は、多数の組織と個人の支援があって成立し、発展してきた。それらを列挙すると長大になる。主な研究経費は、NEDO（可搬型2 tonf 級送信システムと現地試験、代表：小川克郎名古屋大学教授）、東京大学と京都大学（地震予知研究、淡路島野島断層上の京都大学弾性波送信所）と地震総合フロンティア（核燃料サイクル開発機構）などでご支援いただいた。主な共同研究者は名古屋大学の地震火山研究センターの山岡耕春助教授を始め、地球惑星科学教室の多数の学生諸氏と装置開発室の技術者諸氏である。開発の模索段階では、地震計から送信装置の多様な要素技術まで、非常に多数の企業の多数の技術者の方々にお世話になった。また、アクロスの基礎理

論と最初の設計試作運転に、先行きの見えない模索段階で異常な熱意をもって協力していただいた武井康子、鈴木和司の両氏、及び、そのきっかけに試作経費を支出していただいた青木治三氏（当時、名古屋大学地震火山観測センター長）にお礼を申し上げる。なお、本稿の図の作成には羽佐田葉子氏にお世話になった。深くお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) M. Kumazawa : A new light and new eye to look into the solid Earth and a potential monitoring methodology of geodynamic states - Introduction to ACROSS. Abstract of International Workshop on Frontiers in Monitoring Science and Technology for Earthquake Environments at Tono Geoscience Center, JNC(TW7400 98-001), p.16 ~ 19 (1998) .
- 2) 熊澤峰夫、武井康子：“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”，日本地震学会講演要旨（1994）.
- 3) N. Hori & Y. Yamashita：“Proposal of health monitoring system using ACROSS technology”，J. Struct. Mech. Earthquake Eng., JSCE, 17, p.37 ~ 46 (2000).
- 4) 例えば、物理探査学会：“物理探査ハンドブック”（1998）.
- 5) 小川克郎、熊澤峰夫：“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状態の常時リモートセンシングへ向けて”，日本地震学会講演要旨（1998）.
- 6) 横山由紀子、熊澤峰夫、國友孝洋、中島崇裕：“精密に制御された電磁波を用いた3次元精密構造探査のためのデジタル信号波形の設計”，地震研究所彙報（投稿中,2000）.
- 7) M. Kumazawa, Y. Imanishi, Y. Fukao, Y. Furumoto, & A. Yamamoto：“A theory of spectral analysis based on the characteristic property of a linear dynamic system”，Geophys. J. Int., 101, p.613 ~ 630 (1990).
- 8) Y. Hasada, H. Kumagai, & M. Kumazawa：“Autoregressive modeling of transfer functions in frequency domain to determine complex travel times”，Earth Planet. Sci.(in press, 2000).
- 9) Y.Takei & M.Kumazawa：“Phenomonological representation and kinematics of general seismic sources including the seismic vector modes”，Geophysical J. Int. 121, p.641 ~ 662 (1995).
- 10) 國友孝洋、熊澤峰夫、山岡耕春、石原 競：“回転型ACROSSの精密周波数変調制御”，地球惑星科学関連学会合同大会講演要旨（1997）.
- 11) 山岡耕春、熊澤峰夫、武井康子、大島宏之、立石 博：“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”，地球惑星科学関連学会合同大会講演要旨（1994）.