

アクロスデータの構造逆解析法：モード解析法試論

Structure-inversion strategy for ACROSS data: A trial theory on mode approach

熊澤 峰夫 [1], 中島 崇裕 [2], 鶴我 佳代子 [3], 國友 孝洋 [3]

Mineo Kumazawa [1], Takahiro Nakajima [2], Kayoko Tsuruga [3], Takahiro Kunitomo [3]

[1] JNC・東濃, [2] サイクル機構・東濃地科学センター, [3] サイクル機構

[1] Tono, JNC, [2] Tono Geoscience Center, JNC, [3] JNC

アクロス（精密制御定常信号システム）によって得られる弾性波と電磁波観測データの特徴を最大限に活用する地下構造解析法として、モード解析法を検討した。解析対象領域をエネルギー散逸のある孤立波動力系に仕立て、その強制振動モードを使う「波数はざとり」と「近場はざとり」を行う手法を提案した。簡単のために1次元構造の順問題と逆問題解析の具体例を数値実験によって示し、この方法が実用性をもつであろうと予測した。

0. アクロスによって得られるデータの特徴を最大限に活用した地下構造解析法の開発に着手したので、その試論を述べ批判を得たい。ここでは一つの理論的考察を述べ、簡単な1次元構造の場合について、順問題と逆問題の具体例を数値実験によって示す。

1. 基本的な考えかた：ここで提案するのは、近距離構造からの「近場はざとり」と小波数構造からの「波数はざとり」を平行させる方法で、弾性波と電磁波の両方に同じ方式で使えることを目標にする基本戦略である。

相対的に高い周波数領域では幾何光学的な方法（レイパス）で構造解析が行われる。この場合、順問題は通常波動伝播の時間発展の計算に依る。観測データは信号源と観測点間の伝達関数を波の走時、あるいは波形として与えて、逆問題に持ち込む。アクロスでは、伝達関数を周波数の関数として複素数の走時として解析する存否セブストラム法が準備されている。

相対的に低い周波数領域の構造解析では、物理光学的な方法（モード）が適切であろうが、解析対象の空間を限定しないとモードを定義しにくい。そこで固有振動の場合のように、対象領域を孤立系に仕立て（その手法は、鶴我ら；本学会講演参照）エネルギー散逸系の強制振動の問題として扱うモード解析的アプローチを検討する。

2. 散逸孤立系の順問題：空間的に限定された線形孤立波動力系（電磁波でも基本的には同じ）を考え、基礎方程式を次のように表現する。

$$a(x, w) \quad u(x, w) = e(x, w) \quad (x \text{ は空間座標}) \quad (1)$$

u は変位（電場）、 a はconvolution、 e は励起を表わす非斉次項、 a は角周波数 w に依存する弾性定数（透磁率）と密度（誘電率）の関数で、境界条件までをいれた力学系の全ての特性を記述する。(1)の離散系は、 u の要素についての連立方程式であるから、それを解いて

$$u(x, w) = b(x, w) \quad e(x, w)$$

という形式で $u(x, w)$ を得る。この u が求められれば、順問題は解けたことになり、能動的に与えた e で観測される u と比較して逆問題にかかれる。

ここでは、アクロスデータ解析が目的なので、定常的強制振動を考え、(1)の空間フーリエ変換をとる。

$$A(k, w) \quad U(k, w) = E(k, w) \quad (2)$$

ただし、 k は波数である。ここで、

$$B(k, w) = A^{-1}(k, w) \quad (3)$$

として $A(k, w)$ と $B(k, w)$ の意味を考える。 $B(k, w)$ は複素 k - w 空間で自由度の数 n の極（即ち波のモード）をもつ分散関係を与える。したがって、極の位置と留数の組を与えれば確定する。それが決まれば、 n 個のゼロをもつ A 、すなわち構造 a が決まる。極の位置は一般に $w = v k$ あるいは $k = s w$ (v はそのモードの位相速度、 s はスロウネスで、散逸系なので共に複素数) で与えられる。自由振動の場合には、 k が実数なので w が複素数になる。強制振動のアクロスでは w を実数として与えるので、 k が複素数になる。また、 $B(k, w)$ の適当な線形変換によって、フーリエでない別の直交関数系（例えば、(1)の斉次解）で記述する方が見えやすい。これを $B(m, w)$ と表記しよう。アクロスにおける順問題とは、構造 a のモデルを与えて、その逆空間表現 $B(k, w)$ (or $B(m, w)$) を求めることである、と考えるのである。

3. 観測と逆問題：構造解析目的のアクロスの観測とは、精密な e (or E) を与えてバイアスとノイズのない u (or U) を観測し、 a のモデル、即ち B を

$$B = U(k, w) \quad E^{-1}(k, w) \quad (4)$$

で制約することである、と考える。アクロスデータからの構造解析戦略は、各々の極を一つの構造記述単位と

見て、 k すはわち w の小さい構造単位から逆問題を決めて行く「波数はぎとり」である。これは、アクロスの送信特性を決めるための、送信点近傍の構造解析など「近場はぎとり」にも使える。

ここで提案した方法はモード解析的であるが、大きい波数領域まで扱えるようになると、レイパスの順問題解法にも使える（簡単な1次元の場合はOK）。例えば、波数の大きいモード群が k - w 空間で連続的線分とみなせる場合には、レイパス解析に翻訳できる。