

学 位 論 文 題 名

Studies on Full-wave tomography

(フルウェーブ・トモグラフィの研究)

学位論文内容の要旨

フルウェーブ・トモグラフィ(以下 FWT と略記する)は、地下の地震学的物理量の分布を多情報、高分解能で推定するための新しい探査法である。FWT は「ボーリング孔を利用するトモグラフィ型の配置によって人工地震データを観測し、それを波形インバージョン法によって解析して、地下の物性情報を取得する探査法」と定義される。従って FWT においては、地震波形全体がデータとして用いられる。それに対してトモグラフィ型の人工地震データを扱う各種の既存手法においては、波形に含まれる種々の属性(例えば直達 P 波の走時、SS 反射波の振幅など)のうちの一部分が使われるに過ぎない。ところが地震波形は、地下のいろいろな物性情報をいろいろな異なった属性の中に含んでいる(例えば V_p のマクロな分布の情報は直達 P 波の走時に、S 波インピーダンスの変化率の情報は SS 反射波の振幅に、それぞれ多く含まれる)。従ってデータとして用いる属性を制限することは、取得される情報量を制限することにつながる。波形全体を用いる FWT は、既存の方法によって観測される地震波形からより多くの地下情報が抽出できる、新世代の探査法として期待される。

本研究は、FWT の一解析法を確立するとともに、FWT の有効性を検証することを目的として行なわれた。

FWT の発想は新しいものではない。しかしその解析法は、これまで明確には提案されて来なかった。この事情は FWT の定義自体が適切に行なわれて来なかったことに原因がある。FWT の基礎をなす波形インバージョン法は、例えば反射法における波形インバージョン法とほぼ同一である。しかし FWT を反射法型インバージョンの変形としてではなく、波形インバージョン法による新しい弾性波トモグラフィとしてとらえることによって、その必然的な性格が明らかとなり、自然な方向性が生まれる。

本研究では、FWT を前述のように明確に定義するところから出発し、Tarantola のインバージョン理論と波形インバージョン法を FWT の立場から復習することによって、不均質等方性弾性体における FWT の一解析法を考案した。そこでは、ボーリング孔内の爆発力によって発生する弾性波の変位を、ボーリング孔内の 3 成分受振器で観測することが想定されている。解析の対象となる物理量は、 V_p 、 V_s 、及び密度であり、振源パラメタとしてのモーメント密度テンソルも同時に推定される。

FWT の有効性を検証するために、考案された解析法に基づいて 3 種類の数値実験を行なった。以下実験 1、2、及び 3 と呼ぶ。

実験 1 においては、データがノイズを含まず、密度と振源パラメタが既知である理想的な条件の下で実験を行ない、 V_p 、 V_s 分布の高精度推定において FWT が有効であることを検証した。また解析において、プリコンディショニングや地下物性の空間的相関情報の導入が有効であること、及び観測において、解析領域における P 波及び S 波の照射エネルギーを均一化することが重要であ

ることなどを明らかにした。プリコンディショニングは、ガウス・ニュートン型のインバージョン法に現れる逆ヘシアン行列の作用を近似する操作であり、本研究では V_p 、 V_s の勾配に対して、それぞれ変位の発散と回転の二乗の逆数を対角要素に持つ行列で対処した。相関情報の導入と照射エネルギーの均一化は、解の一意性を損ねる零空間の成分を、局所平滑化と、そもそも零空間を極力生じさせない方法とによってそれぞれ減少させ、インバース問題としての劣決定性の緩和を図るものである。

実験2においては、断層構造を対象として、データがノイズを含む場合について実験を行ない、ノイズの影響とその対策を検討した。その結果、ノイズの影響は対象波動の波長程度の変動波長をもつ速度ゆらぎとして現れ、S/N 比が低下する程その変動が大きくなることが分かった。そしてその影響を回避するためには、地下物性の空間的相関情報を導入してモデルの自由度を下げることで効果的であることが明らかとなった。またモデル空間内に相関線群を適切に設定し、それらに沿う相関強度 (相関長) の候補を適切に選ぶことによって、AIC 最小化法の適用が可能となることを示し、ベイズ型推定に基づく相関情報の導入に客観性を持たせることが可能であることを明らかにした。近年地球物理学における様々なインバージョンにおいて、ベイズ型推定に立脚するとの意識の下で、ABIC 最小化法が盛んに利用されている。ところがこの方法は、相関強度を固定した上で、相関情報とデータ情報とのトレード・オフ・パラメタに関して最尤法を適用するものである。本研究においては、断層構造が事前に予想される地点において高精度探査法としての FWT を適用する場合には、相関強度の決定こそが統計学に裏付けされて客観的に行なわれるべきであるとの考えに立って、通常はベイズ型推定のための規準とは見なされていない AIC 最小化法を利用した。

実験3においては、振源パラメタが未知である場合について実験を行ない、振源パラメタの不確かさが V_p 、 V_s 分布の推定におよぼす影響と、振源パラメタを V_p 、 V_s 分布と同時に推定する方法について研究した。その結果、 V_p 、 V_s 分布を高精度に推定するためには、振源パラメタを精度良く知ることが重要であることが分かった。また振源パラメタのインバージョンが、等方性の誤差振源波形をもつ局所解に向かう性質を有していることも明らかとなった。このことから振源パラメタを、いきなり V_p 、 V_s 分布と同時にインバージョンすると良い結果には至らないという結論を得た。そこで先ず、 V_p 、 V_s 分布を平均的な振源パラメタと同時にインバージョンして V_p 、 V_s 分布の推定精度を高めた後、それらを固定して各振源パラメタを個別にインバージョンする方法を考案した。数値実験の結果、この方法が有効であることが明らかとなった。

本研究によって、密度分布の推定を除いて FWT の一解析法が確立されるとともに、FWT の有効性が検証された。また FWT を実フィールドに適用する際に拠り所となる、いくつかの指針が得られた。

今後は、FWT を実フィールドに適用する研究をまず進める必要がある。そして本研究で取り組めなかった実用上の諸問題、例えば密度分布の推定、受振器カップリングの評価、及び圧力センサであるハイドロフォンによるデータの解析などについても継続して研究を進める必要がある。

波形インバージョン法は、すでに理論的には、局所的な均質異方性が成立する不均質粘弾性体をも扱えるレベルに達している。従って FWT も本研究で扱った対象 (V_p 、 V_s 、及び可能性としての密度) をはるかに超えて、一般弾性定数や減衰定数をも推定できる技術に仕上がる可能性を秘めている。FWT をこのような一般化手法としてさらに追及してゆけば、将来においては、高精度な亀裂探査法というような技術にも結び付いてゆくかもしれない。

学位論文審査の要旨

主査	教授	岡田	廣
副査	教授	小山	順二
副査	助教授	笹谷	努
副査	助教授	森谷	武男

学位論文題名

Studies on Full-wave tomography

(フルウェーブ・トモグラフィの研究)

近年、深さ100～200mまでの比較的浅部の詳細な地下構造及びその物性情報が要求されるようになり、それに応える地下構造の一推定法として、1980年代になって「波線トモグラフィ」型の探査法が盛んに研究されるようになった。しかしこの探査法は、しばしば要求される詳細なP波速度(V_p)、S波速度(V_s)、密度、場合によっては局所的な異方性、減衰定数の空間分布などを精度良く推定することができない。できてもせいぜい V_p または V_s の空間分布だけである。それは、この探査法の備えているアルゴリズムが波形に含まれる種々の位相の中の一部、P波またはS波のどちらかしか扱えないからである。申請者は上記のような要求に応え得る新しい探査法として「フルウェーブ・トモグラフィ (略称: FWT)」の開発研究を行ってきた。

FWTは、データの取得法は従来の波線トモグラフィとほとんど同じであるが、解析のアルゴリズムは全く異なり、波形全体を解析対象のデータとする。したがって従来通りの方法で観測される地震波形でも、原理的には、それからより多くの地下情報を抽出することができる。

本研究は、主に1) FWTの一解析法の確立、2) FWTの有効性の検証、を目的としている。

解析法の基本原理は反射法のマイグレーションの原理と同じであり、理論的バックグラウンドはTarantolaのインバージョンの理論に基づいている。まず、解析法の確立に当たっては、FWTを反射法型インバージョンの変形としてではなく、波形インバージョン法による新しい弾性波トモグラフィとしてとらえ、不均質等方弾性体におけるFWTの一解析法を考案している。

解析の対象となる物理量は従来の波線トモグラフィになく多種類、P波速度、S波速度、密

度ならびに振源パラメータとしてのモーメント密度テンソル等である。データ取得には、ボーリング孔内の爆発源から発生する弾性波の変位を他のボーリング孔内に線状に配列した「3成分受振器」による観測を想定している。従来になく多様な物理量を抽出するためのFWTに、この「3成分受振器」による観測データが必要不可欠であり、本研究の重要なポイントである。ただし、実際のフィールドへ適用する際、高度の観測技術が要求されるだろう。

FWTの有効性の検証に当たっては、差分法を基本とする3種類の数値実験を行っている。

実験1では、データがノイズを含まず、密度と振源パラメータが既知という理想的な条件の下で、 V_p 、 V_s 分布の高精度推定においてFWTが有効であることを証明している。

実験2は、断層のある地下構造モデルを仮定し、データにノイズが含まれる場合にFWTはこの地下構造モデルをどの程度の精度でインバージョンできるかの検証である。データ中のノイズは対象とする波の波長程度の速度ゆらぎとしてモデルの推定に影響し、その度合いはS/N比の低下とともに大きくなることをつきとめる一方、それを回避する手段として、地下物性の空間的相関情報の導入により、モデルの自由度を下げる工夫をして一応の成果を出している。仮定したモデルは実際のフィールドに近いものであるが、その解析手法はかなり技巧的であり、またやや先験的情報に頼るところがあつて、普遍性をもつかどうかは今後の課題である。

実験3では、振源パラメータ未知の場合、振源パラメータの不確かさが V_p 、 V_s 分布の推定におよぼす影響と、振源パラメータおよび V_p 、 V_s 分布を同時に推定する方法について考察している。その結果、 V_p 、 V_s 分布を高精度に推定するためには、振源パラメータを精度良くインバージョンすることが重要であり、また振源パラメータのインバージョンは、等方性の誤差振源波形をもつ局所解に向かう性質を有することなどを明らかにしている。これより、振源パラメータを V_p 、 V_s 分布と同時にインバージョンすることは適切でないと結論し、それに代わる方法として、 V_p 、 V_s 分布を平均的な振源パラメータと同時にインバージョンして V_p 、 V_s 分布の推定精度を高めた後、それらを固定して各振源パラメータを個別にインバージョンする方法を考察している。FWTは、原理及び究明された解析法で判断する限り、実際のフィールドでの詳細な構造探査はもちろん、 V_p 、 V_s 以外の物理量推定にも使える応用性の広い探査法といえる。

本研究によって、浅部地下構造の高精度探査法として期待できるFWTの一解析法の確立と、まだ数値実験の域を出ないが、FWTの有効性が証明され、物理探査学の研究に新しい知見をもたらした。よって審査員一同は、申請者が博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。