

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成30年6月7日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13869

研究課題名(和文)新しい非線形インバージョン法：波形から2次元データまでの幅広い応用を目指して

研究課題名(英文)A new non-linear inversion approach: Applications for various research areas from waveforms and 2-D images

研究代表者

蓬田 清 (Yomogida, Kiyoshi)

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：70230844

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：波形の比較では、位相の周期性による任意性の困難が内在する。そこで、時間領域のWienerフィルタを介した指標を用いた新しい解析法を開発した。核・マントル境界での多重S波反射波を例とした短い記録長の場合、従来のスペクトル比に比べ、より安定した広帯域の推定が可能となった。また、水平2成分記録の相互相関を用いたS波スプリッティングの計測から地殻内での異方性の推定では、これまで十分な解像度がなかった時間差(異方性の強度)も方位と同様に、安定して精度よく求められることが示された。これらの結果は、地震波形記録に留まらず、2次元空間データも含めた広範囲な分野での多様な応用が可能である。

研究成果の概要(英文)：We have developed a new approach to compare waveform records with a criterion in the use of the time-domain Wiener filter, in order to remove the non-uniqueness originated from the periodicity in phase information. In the case of a short record length (e.g., multiple ScS phases on the core-mantle boundary of the earth), our approach can estimate broadband results accurately, compared with conventional spectral ratios. Another example in this study is the estimation of seismic anisotropy in the crust with the S-wave splitting of two horizontal-component records. In addition to the azimuth of splitting, our approach can estimate the time delay or the strength of anisotropy accurately, not resolved in a quantitative manner yet in previous studies. These results imply that our new approach is not only powerful for seismic waveform data, as shown in this study, but also any waveform records in a wide range of research areas, including two-dimensional image data in space.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：波形解析 相互相関 位相の周期性 ウィーナーフィルタ スペクトル比 S波偏向異方性 分散

1. 研究開始当初の背景

複数の地震波形記録（または合成波形）を比較として、その相関や誤差の定量化は、地震学のあらゆる分野で行われる解析手法の基本である。ここでは、時間領域での各点で差の総和や相互相関係数といった局所的な残差を指標として用いてきた（以下では $f(t), d(t)$ を比較する波形とし、 Δt 毎の離散データとする）：

$$\min. \sum_{i=0}^{N-1} (f(t_i) - d(t_i))^2 \quad (i = 0, \dots, N - 1)$$

しかし、波形の凹凸の性質（位相の 2π の周期性）より、局所的な極値が真の推定すべき値の周りに複雑、かつ多数存在する場合が一般的で、初期推定値が真の値に十分近くないと誤った推定となり、実際には主観的な試行錯誤の操作を組み込まないといけない。これは地震波形記録のような時系列の一次元データだけでなく、空間パターン認識などでも、例えば合成開口レーダーのイメージでは phase unwrapping という煩雑な操作が必須である事情と、原則的に同じである。

また、短い記録長のデータの場合、伝統的なフーリエ変換による解析では両端の切断（または離散化による繰り返し）から推定精度の劣化が生じ、解析できる帯域に大きな制限が課せられる。

比較する波形の一つを合成波形とすると、構造や震源過程など広く実践されている波形インバージョンに相当する。この場合でも位相の周期性から非線形性が極めて大きく、初期モデルに結果が大きく依存する問題点が内在してきた。膨大なデータを扱う物理探査の分野でも近年、従来の観測波形を逆伝播させるマイグレーションから、合成波形との比較に基づく波形インバージョンに大きくシフトしてきたが、上述の困難を解決する手法の開発は、ごく一部を除いて手付かずの状態である（Warner and Guasch, 2016）

2. 研究の目的

他の多くの研究分野と同様に、地震学においても膨大なデータが得られるようになり、リアルタイムでの自動処理が行われ始め、今後さらに広がることは間違いない。しかし、上述の波形の周期性という特徴から、結果の一貫性を保つことが困難で、自動処理では大きく異なる結果となる事例も多かった。

これに対して、比較する二つの波形を入力と出力とみなし、線形フィルタを通して関係付ける視点がある。最小二乗法としてフィルタ係数を求めることが自然である、Wiener ファイタとして通信・画像処理分野など広く用いられてきた(e.g., Robinson and Treitel, 1980)：

$$\min. \sigma^2(M) \equiv \sum_{i=0}^{N-1} (f(t_i) * w(t_i) - d(t_i))^2$$

*は畳み込みを示し、Wiener フィルタ $w(t)$ の M 個の係数を効率的に求められることがわかっており、大量データの高速度処理も可能である。2つの波形が一致する場合には、インパルス（ゼロで1、他は0）となる。この周期性のない基準を利用すれば、安定した波形間の比較が可能となることが期待できる。従来の解析法と比較して、その優位性を示し、広い分野への応用に供する手法を開発する。

3. 研究の方法

2つの波形の比較において、地震学で最も広く用いられている2例を、従来の手法と Wiener フィルタを用いての新しい手法による結果を検討する。単なる解析結果の優劣の比較だけでなく、新しい知見を得られるかという点にも着目する。一つはフーリエ変換によるスペクトル比で、記録長が短いができるだけ広帯域の結果が要求される核・マントル多重反射波 (ScS) である。二つの波形記録をつなぐ Wiener フィルタを求め、そのフーリエ変換をスペクトル比とする本研究の解析法は、原理的には従来の結果と同等だが、記録の有限性から短い長さのフィルタで表現できれば、広い周波数帯域で安定した結果が得られる。最小二乗法に基づく Wiener フィルタはその長さ、すなわち係数 M を増やせば、残差が小さく正確になるが、データ点間の区間で振動する成分が混入する。同じ問題を抱える maximum entropy 法などと同様に AIC を最小にする係数 M を最適と考えて、誤差とパラメータ数の trade-off を客観的に評価する：

$$\min. AIC \equiv N \log(2\pi\sigma^2(M)) + N + 2M$$

こうして客観的にフィルタ $w(t)$ を定めることができる。

別の応用例として、S波の水平二成分記録の相互相関係数より、地殻内の異方性構造を推定する。二記録の回転角（方位）毎に以下の相互相関 $CC(t)$ を計算し、それらの最大値を、異方性の方位と時間差・強度とする：

$$\max. CC(t) \equiv \int f(\tau)d(\tau+t)d\tau$$

綺麗なインパルス状の記録でなければ、波形インバージョンの場合と同様に、位相の周期性による極値が相互相関でも複数個現れ、安定した推定が困難となる。本研究では、二成分記録に対して回転角と時間差の二つのパラメータ毎に、それらを結びつける Wiener フィルタを計算する。求められた全てのフィルタの中から、二つが一致する場合に対応するインパルス状にできるだけ近い場合が、最適な推定値であると判定する。インパルスとは $t = 0$ 以外はゼロということなので、そこから

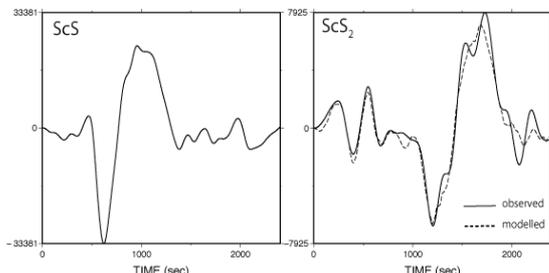
離れた値に対してはペナルティを課す以下の形を導入する：

$$\min. \sum_{i=-M/2}^{M/2} (t_i w(t_i))^2 / \sum_i w(t_i)^2$$

つまり、 $t = 0$ からの二乗を重みとして、分母のフィルタの大きさで規格化する。これは最小二乗法に代わり、分解能がデルタ関数により近い基準を提案した、Backus and Gilbert (1968)の原理と類似しており、任意性の大きい推定問題の場合の有効な指標であることが支持される。

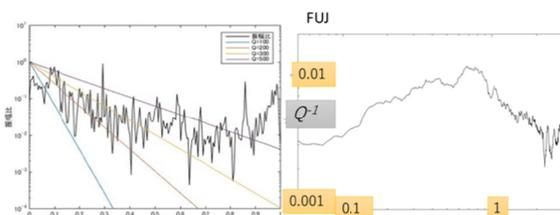
4. 研究成果

ScS多重反射波のスペクトル比を、日本列島のHi-net（広帯域応答にフィルタ変換した後の）とF-net地震観測点について解析した。下図は2015年5月30日に小笠原諸島西方沖での深さ680kmのM7.9深発地震におけるF-netの富士川（FUJ）観測点でのScS（左）とScS₂（右の実線）部分について、水平2成分からSH波に相当するTransverse成分として示す。2つ



の比較より、マンツルの平均的走時・減衰の分散性が推定できるが、4分弱の短いパルス状の波形なので、通常のスเปクトル解析ではその周波数帯域に限られてしまう（下左図、直線は減衰定数 Q が三つの値の場合の比較）。

これに対して、本研究では2つの波形を結ぶWienerフィルタをまず求める（上右図の破線が求めたフィルタからの予測値）。このフィルタのフーリエ変換がスペクトル比に対応するが、フィルタが時間軸上でコンパクトにまとまっているため、そのスペクトルは従来の波形記録そのもののスペクトル比よりも広帯域で安定で、かつ滑らかである（下右図はスペクトル比から減衰定数に変換した結果を示す）。通常のスเปクトル比では記録の両端の切断の影響もあり、この例（下右図）では高周波数側の誤差が目立ち、またスペクトル比の変動が激しく平滑化処理が必要で、そこで主観的な判断が入ってしまう。



ただし、この例ではWienerフィルタの幅がパルス幅以上、すなわちデータ長 N に近いフィルタ係数 M が安定した結果を得るためには必要である。デジタルフィルタ理論では、周波数領域において有理関数の形式で表現すると、少ない係数で良い近似を与えることが知られ、Pade approximatsと呼ばれる。多項式のFIRフィルタの形式であるWienerフィルタに対して、これはIIRフィルタに対応する。 z -変換 ($z \equiv \exp(i\omega\Delta t)$ とする)でのフィルタは以下の (M_1+M_2+1) 個の係数 a_n, b_n で表される：

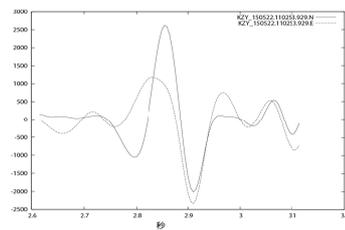
$$P(z) = \frac{\sum_{n=0}^{M_2} b_n z^n}{1 + \sum_{n=1}^{M_1} a_n z^n}$$

時間領域では以下の漸化式の形式となって、2つの波形の線形結合の表現となる：

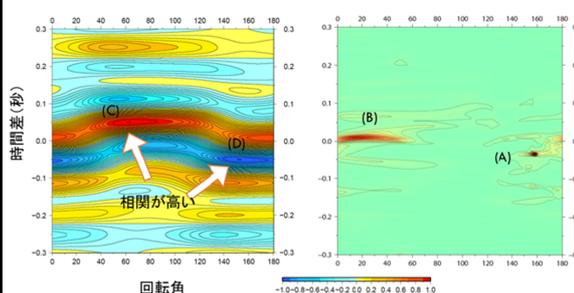
$$\sum_{n=0}^{M_2} f_{i-n} b_n = d_i + \sum_{n=1}^{M_1} d_{i-n} a_n \quad (i = 0, \dots, N-1)$$

Wienerフィルタと同様に、両辺の差の二乗を最小とする係数 a_n, b_n を求めればよく、大まかな周波数特性が安定して推定できる利点があり、広帯域の周波数特性をより少ない係数で表現できるので、この例のような解析には特に有効となる。

もう一つの解析例として、従来は相互相関を指標とした、地殻の異方性の推定の結果を示す。右図は箱根火山下を通る地震波形の水平2成分のS波スプリッティングの解析例である



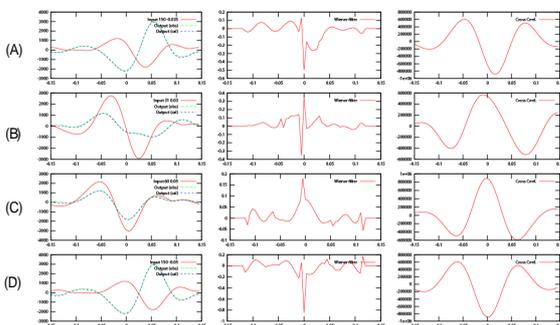
（小塚山観測点のNS（濃い）とNE成分の2-8Hzバンドパス波形）。この2つの波形について、回転角と時間差を2つの未知パラメータとして、従来の相関係数の値を2次元上でプロットしたものが下左図である。相関係数が最大となる（反対方向の）2つが推定値とし



て、伝搬中の異方性の向きと大きさを与える。回転角については安定して推定できるが、時間差については位相の周期性による極値がいくつも見られ、客観的な推定が困難であることが明らかである。これに対して、2パラメータ面上の各点で2波形を結ぶWienerフィルタ $w(t)$ を同様に求め、各点のフィルタについ

て、一致の指標として、前節に示したデルタ関数（インパルス応答）からのズレの大きさを、右に示す。両者の結果は一致しているだけでなく、Wienerフィルタによる指標のピークは非常に明瞭で、特に時間差方向でも単純な形状で、客観的で信頼性の高い推定が可能である。従来の異方性の研究は、回転角の推定による方位の計測については、時間変動までも言及した詳細な事例があるが、強度に関する時間差の推定は、今だ定性的議論に終わっている。本研究の解析法から、異方性の強度も新たに定量的な検証へ、今後発展できる可能性が示された。

ただし、2つの解析において微妙に異なるパラメタ値が得られる場合もいくつか見られた。そのような事例の一つを、下図に示す。相関係数より求まるCとD(互いに180度の反対方向)、およびWienerフィルタより求まるAとBのそれぞれの推定値に対応する、観測波形(赤・緑・青が入力成分、出力成分、 $w(t)$ からの予測波形)、対応するフィルタ $w(t)$ 、および相互相関を左から示す。対応す



る $w(t)$ は確かにどれもインパルス応答に近く、入力と出力の関係を適切に表現していることが確認される。相関係数が最大のC・Dではそれらに対応するフィルタ $w(t)$ は時間領域で常にほぼ対称であり、これは波形をある時間だけずらすという相互相関という指標の特徴を表す。この場合の二つの波形の位相差は周波数に比例するので(比例定数が時間差)、いわゆる直線位相フィルタとなって、時間領域では対称なフィルタの場合に対応する。一方、フィルタ $w(t)$ の時間軸上での広がりをもっとも最小とする指標より求めたA・Bは必然的により鋭いインパルス状となるが、時間領域で対称な形状ではなく位相がずれている。もし相互相関と一致する結果を得たければ、時間シフトという直線位相の対称フィルタという制限をかけて、フィルタを評価する必要がある。これは、時間反転したフィルタ $w(-t)$ と $w(t)$ の積が最小になる基準を新たに導入すれば良い。つまり、

$$w_s(t_i) \equiv (w(t_i - t_0) + w(-(t_i - t_0)))/2$$

というフィルタ $w(t - t_0)$ の反対称成分ができるだけ小さいという指標

$$\min. \sum_i (t_i w_s(t_i))^2 / \sum_i w_s(t_i)^2$$

のように、修正すれば良い。

従来の時間をずらした2つの波形が一致するという異方性モデルは、2つの異なった偏向面(振動面)のS波速度に周波数依存性がない場合に当たる。有限の大きさをもつ割れ目の選択配向に起因する地殻内の異方性の物性論的な視点では、この仮定はS波スプリングの観測では、波長が割れ目(不均質性)のサイズよりはるかに大きいという低い周波数帯域のみに正しく、それ以外の帯域では複雑な周波数依存性があることが知られている。異方性のメカニズムに起因する周波数依存性はこれまで観測ではほとんど無視されてきたが、高精度ボアホール観測点や、高密度観測網、不均質性の影響が比較的少ない海底観測など、最近の飛躍的な観測技術の向上により、観測記録での周波数依存性の検出が少しずつ試みられるようになってきた。本研究で提案する解析手法で得られる $w(t)$ の位相情報は、その解明のための強力な手段となるはずである。

ここでは地震波形記録について、Wienerフィルタを用いた解析手法の有効性を具体的に検証したが、全く同じ原理で2次元記録、すなわち画像記録にも計算量は増大するものの、そのまま適用できる。地震記録では、これまでとは比較にならない多点観測が開始されており、2次元波面としての伝搬様式を直接解析する必要があり、位相の周期性の困難がより複雑に現れるので、本研究の成果はいっそう重要になると考えられる。合成開口レーダーなど他分野への応用も始められている。

<引用文献>

M. Warner and L. Guasch, Adaptive waveform inversion: Theory, *Geophys.*, **81**, R429-R445, 2016.

E.A. Robinson and S. Treitel, *Geophysical Signal Processing*, Prentice-Hall, New Jersey, 1980.

G. Backus and F. Gilbert, The resolving power of gross Earth data, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, **16**, 169-205, 1968.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

都筑基博、小山順二、A.R. Gusman、蓬田清、1906年 Ecuador・Colombia 巨大地震の地震および津波規模の再評価、*地震*,

査読有、69, 87-98,
doi:10.4294/zisin.69.87, 2017.

A.Sato, K. Yomogida, Quick Estimation of Wavefield by Neumann-type Extrapolation for a New Earthquake Early Warning System, *Proc. ECGS & ESC/EAEF Joint Workshop*, 査読有、31, 59-73, 2016.

〔学会発表〕(計 7 件)

K. Yomogida, T. Saito, Ocean-bottom pressure changes above a fault area for tsunami excitation and propagation observed by a submarine dense network, American Geophysical Union, 2017 Fall Meeting (国際学会), 2017.

椎名高裕・勝俣 啓・蓬田 清, 東北日本下のスラブ内地震における高周波後続波とマントルウェッジの散乱・減衰, 日本地震学会 2017 年度秋季大会, 2017.

蓬田清, 時間領域フィルタによる波形相互関係の推定法の改善, 日本地震学会 2017 年度秋季大会, 2017.

K. Yomogida, C.Katagiri, T. Shiina, Spatial and temporal variations of seismic moment release before and after the 2011 Tohoku-Oki earthquake, JPGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会), 2017.

都筑基博、小山順二、A.R. Gusman, 蓬田清, 1906 年 Ecuador・Colombia 巨大地震の地震および津波規模の再評価, 日本地震学会 2016 年度秋季大会, 2016.

蓬田 清, 有限断層面上での破壊伝搬様式が津波発生に与える影響, 日本地震学会 2016 年度秋季大会, 2016.

武藤 未央梨, 蓬田 清, 核・マントル境界 S 波多重反射波の時間領域解析を用いたマントル構造の推定, 日本地球惑星科学連合連合 2016 年大会, 2016.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：

番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：

番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

蓬田 清 (KIYOSHI YOMOGIDA)
北海道大学・理学研究院・教授
研究者番号：70230844

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

高田 陽一郎 (YOICHIRO TAKADA)
北海道大学・理学研究院・教授
研究者番号：80466458

(4) 研究協力者

本多 亮 (RYOU HONDA)
神奈川県温泉地学研究所・研究員
研究者番号：80416081