

平成21年 5月27日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18740269

研究課題名 (和文) ABIC に基づく地震地殻変動データの非線形インバージョン解析

研究課題名 (英文) A non-linear inversion analysis of coseismic crustal displacement data based on ABIC

研究代表者

深畑 幸俊 (FUKAHATA YUKITOSHI)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：10313206

研究成果の概要：

ABIC (赤池のベイズ情報量規準) に基づいて、地震地殻変動データから断層面の位置と滑り分布を同時に推定する弱非線形インバージョン解析手法の定式化を行い、1995年トルコ・Dinar地震などのデータに適用してその有効性を示した。また、インバージョン解析においてデータの共分散成分の重要性に着目し、世界で初めてモデル誤差に起因する共分散成分を取り入れて震源波形インバージョンを行い、解析結果がサンプリング間隔に依存してしまう問題を解決した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,600,000	0	1,600,000
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	240,000	3,740,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：地震現象

1. 研究開始当初の背景

良質なデータが豊富にあれば、最小二乗法によりモデルパラメタを精度良く推定できる。しかし地球科学では、ほぼ常にデータが不十分かつ不正確なため、モデルパラメタを推定する際に、何らかの先験的拘束条件を課す必要がある。例えば、地震の滑り分布を求める問題では、断層面上の滑り分布は滑らかであるといった条件が通常課される。ここで

問題となるのは、先験的拘束条件と観測データとの相対的重みである。日本の赤池が提案した ABIC 最小の規準により、その重み (超パラメタと呼ばれる) を客観的に決めることができる。

ABIC は、Yabuki & Matsu'ura (1992) によって地球科学の分野に本格的に導入され、その後多くの研究で使用されその有効性が実証されてきた。しかし、それらの解析は全て線

形であった。断層面の位置が不確定な場合、地震の滑り分布を求めるインバース問題は非線形となる。地震波形データから断層の位置を求めることは可能なものの残念ながら誤差が大きく、地殻変動データをよく説明できない。実際に、地震波形データと InSAR(干渉合成開口レーダー)による地殻変動データから地震の滑り分布を求める joint inversion を行ったところ、得られた結果は、InSAR のみの結果とほぼ同じだった一方、波形データのみからの結果とは大きく乖離していた(Fukahata et al., 2005)。しかし一方、地殻変動データから地震の滑り分布を求める解析では、平面矩形断層上の一様滑りを仮定した上で、モンテカルロ的な方法により残差 2 乗最小等の条件からまず断層面の位置を求め、その上で得られた断層面上で線形のインバージョン解析を行い滑り分布を求める方法がこれまで通常採られてきた(Wright et al., 2003 など)。しかし、一様滑りの仮定の下で得られた断層面が最適の断層面である保証はない上、方法としても煩雑であるという問題があった。

2. 研究の目的

日本のように稠密な観測網が敷かれている所は世界的に見て極めて稀である。チベットやイランのように大陸の変形運動を理解する上で重要な所で地震が発生しても、余震分布などから地震の断層面を精度良く決めることは困難である。加えて、波形データから求められる断層面の位置は誤差が大きい。その一方で、InSAR のような衛星測地データは面的に密に得られる上、遠隔地でも取得可能である。そこで、ABIC の線形インバージョン解析法を拡張することにより、断層面の位置が未知の場合に、地殻変動データから断層面の位置と同時に断層面上の滑り分布を求める簡便かつ客観的な非線形インバージョン手法の開発を行った。

3. 研究の方法

初めに ABIC に基づく地震地殻変動データの非線形インバージョン解析を行う上で最も重要な定式化を行った。断層が一枚の平面で表せる場合、走行・傾斜等 3 つのパラメ

タにより断層面の位置を完全に確定することができる。特に、断層面の地表トレースが観測から良く決められる場合には、傾斜角のみが断層面の位置を決める上でのパラメタとなる。そこで、まず最も簡単な場合として、断層面の傾斜角のみが未知の場合について、非線形インバージョン解析の定式化を行った。ポイントは、非線形の観測方程式

$$\mathbf{d} = f(\mathbf{a}, \delta)$$

の代わりに、

$$\mathbf{d} = \mathbf{H}(\delta)\mathbf{a}$$

として、通常の線形の問題と同じ枠組みにし、断層の傾斜角 δ を先験的拘束条件の重みと共に ABIC で求めるというものである。ここで \mathbf{d} は観測データ、 \mathbf{a} は基底関数の重ね合わせ係数、 \mathbf{H} はグリーン関数や基底関数から計算される δ を含む行列、 f は \mathbf{a} と δ を積の形で含む関数である。この定式化を基に、コンピュータプログラムを作成し、トルコで 1995 年 10 月に起こった Dinar 地震の InSAR データの解析を行った。

上述の InSAR データの解析から、ABIC を用いたインバージョン解析では、データの持つ情報により注意深くなる必要があること、データの共分散成分を考慮することが本質的に重要であることが分かった。そこで、その知見を波形インバージョンによる震源過程を求める問題に応用した。具体的には、モデル誤差として離散化誤差を取り上げ、それによる誤差の共分散成分を考慮してインバージョン解析の定式化を行い、それを 2003 年アルジェリア・Boumerdes-Zemmouri 地震の遠地実体波データに適用した。

本来の目的である非線形インバージョンについても、明瞭な地表トレースが確認されない一般の平面断層の場合に対し、定式化の拡張を行った。対象とする地震としては、2007 年 3 月の能登半島地震の地殻変動データを解析する予定であったが、2008 年 6 月に岩手宮城内陸地震が発生したため、その InSAR データを解析することに変更した。

4. 研究成果

ABIC に基づいて、地震地殻変動データから断層面の位置と滑り分布を同時に推定する弱非線形インバージョン解析手法の定式

化を行い、1995年トルコ・Dinar地震などのデータに適用してその有効性を示した。

具体的には、1995年トルコ・Dinar地震について、断層面の傾斜角と同時に滑り分布を求め、最適な断層面の傾斜角が 34° と従来の方法で得られた結果(約 50°)と比べずっと浅い角度であることを明らかにした。2008年岩手宮城内陸地震については、傾斜角に加えて断層の走向と位置も断層面上の滑り分布と同時に求めた。その結果深さ4 km以浅に8 mを越える滑りが生じていたことが分かった。前者の結果は論文としてまとめ既に刊行された(Fukahata and Wright, 2008)。後者については、投稿準備中である。

また、本研究の結果、InSARデータの解析ではデータ間の共分散を考慮することが非常に重要なことも併せて明らかになった。そこで、その知見を波形インバージョンによる震源過程を求める問題に応用し、世界で初めてモデル誤差に起因する共分散成分を取り入れて震源波形インバージョンを行い、結果がサンプリング間隔に依存してしまう問題を解決した。この研究は海外を含む一連の学会で発表すると共に、論文としても既に刊行された(Yagi and Fukahata, 2008)。

なお、本研究の神髄は、共分散の重要性も含め定式化にある。より正確に言えば、断層パラメタを超パラメタとみなして解析すること、および共分散成分がインバージョン解析において本質的に重要であるという概念の提唱にある。これらはいずれも世界の研究に大きく先んじたものである。しかし、手法の開発や概念の創造は、研究において最も重要なものであるが、一般の研究者がそれを受容し、積極的に利用するようになるには、それなりに時間がかかることがむしろ普通である。例えば、現在インバージョン解析の標準的な手法となっている Yabuki and Matsu'ura (1992)についても国内で広く普及するまでに10年近くかかった。海外への普及はこれからである。本研究で開発した手法や概念も、これから何年もの時間をかけて徐々に浸透していくことになるだろう。

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)

1. Yuji Yagi and Yukitoshi Fukahata, Importance of covariance components in inversion analyses of densely sampled observed data: an application to waveform data inversion for seismic source processes, *Geophysical Journal International*, 査読有, 175, 2008, 215-221.
2. Yukitoshi Fukahata and Tim J. Wright, A non-linear geodetic data inversion using ABIC for slip distribution on a fault with an unknown dip angle, *Geophysical Journal International*, 査読有, 173, 2008, 353-364.

[学会発表] (計11件)

1. Yukitoshi Fukahata, Slip Distribution of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, Earthquake Inverted from PALSAR Data, American Geophysical Union Fall Meeting, 2008年12月16日, アメリカ合衆国サンフランシスコ.
2. Yukitoshi Fukahata, Crustal displacements obtained from PALSAR and inverted slip distribution of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission, 2008年11月25日, 茨城県つくば市.
3. 八木勇治, 地震波解析における共分散成分の重要性について(2): 非負の拘束条件を課さない震源インバージョン, 日本地球惑星科学連合2008年大会, 2008年5月30日, 千葉県千葉市.
4. Yuji Yagi, Importance of covariance components of waveform data with high sampling rate in seismic source inversion, American Geophysical Union Fall Meeting, 2007年12月14日, アメリカ合衆国サンフランシスコ.
5. Yukitoshi Fukahata, General importance of covariance components of densely sampled observed data in inversion analyses: implications for seismic source inversion, American Geophysical Union Fall Meeting, 2007年12月14日, アメリカ合衆国サンフランシスコ.
6. 八木勇治, 高サンプリングの地震波形データ解析における共分散成分の重要性について - 標準的な震源過程モデルの構築に向けて -, 日本地震学会秋季大会, 2007年10月25日, 宮城県仙台市.
7. 深畑幸俊, ABICを用いた地震滑り分布のインバージョン解析における最適断層面サイズの決定とその理論的背景, 日本

地震学会秋季大会, 2007年10月25日, 宮城県仙台市.

8. 八木勇治, 観測データはどれだけの情報量を持っているか?(2): 遠地実体波を使用した震源インバージョンにおける共分散の重要性, 日本地球惑星科学連合2007年大会, 2007年5月23日, 千葉県千葉市.
9. 深畑幸俊, 観測データはどれだけの情報量を持っているか?(1): InSAR及び一般のデータにおける共分散の重要性, 日本地球惑星科学連合2007年大会, 2007年5月23日, 千葉県千葉市.
10. 深畑幸俊, InSARによる地殻変動データのインバージョン手法の開発: ABICに基づく結合(joint)インバージョンと非線形インバージョン, 研究集会: 宇宙測地・リモートセンシング技術による地殻変動研究の発展, 2007年1月19日, 京都府宇治市.
11. 深畑幸俊, ABICに基づく地震地殻変動データの非線形インバージョン解析: 未知の傾斜角を持つ断層への適用, 2006年10月31日, 愛知県名古屋市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

深畑 幸俊 (Fukahata Yukitoshi)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号: 10313206

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし