

## - 7 地球内部構造と震源パラメタ推定の高精度化に関する研究 Improvement of accuracy of determination of 3-D Earth structure and earthquake source parameters

(研究期間 平成 13 年度)

国際地震工学センター

原 辰彦

International Institute of Seismology and Earthquake Engineering Tatsuhiko Hara

Synopsis - We perform simultaneous waveform inversion for three-dimensional Vs and Q structure in the depth range of 11-888 km. We have found that there is good correlation between high Vs and high Q in the transition zone under the western Pacific and South America. Correlation between low Vs and low Q in the transition zone is relatively weak, which may suggest the difference of their geophysical origins. We also perform multiple shock analysis of the March 25, 1998, Antarctic earthquake using low frequency spectra. We have found that the combination of the first subevent with a significant non-double couple component and the second subevent without a significant non-double couple component best explains the observed spectra when we put subevents around a depth of 30 km.

### [ 研究目的及び経過 ]

本研究では地球内部構造モデルと震源パラメタの推定精度の高精度化を図る。震源パラメタ(地震の発生時刻、場所、大きさなど)を正確に推定することは地震の発生メカニズムを理解する上で重要であるが、そのためには地球内部構造(地震波速度や密度などの分布)の正確なモデルが必要である。本研究ではこれまでに十分な研究が行われていない非弾性減衰構造及び異方性構造の推定を行うことにより、地球モデルの高精度化を図る。そして、得られた高精度地球モデルを震源パラメタの推定に用いることによって、推定精度の向上を図る。震源パラメタの推定においては精度よく求めることが難しいパラメタを正確に推定する手法の開発も行う。

平成 13 年度は非弾性減衰構造の推定と震源パラメタの新しい推定方法の開発を行った。本研究課題は平成 13~15 年度における実施を計画していたが、平成 14 年度からは「大地震発生直後の地震情報公開に関する研究開発」に統合することとなったので、平成 13 年度終了となった。これに伴い、計画した異方性構造を推定するための研究開発は統合した課題の中で進めることとした。

### [ 研究内容 ]

具体的な研究内容は以下の通りである。

これまでに開発した Direct Solution 法 (Hara et al., 1991<sup>(1)</sup>, 1993<sup>(2)</sup>) のコードを使って、上部マントルの非弾性減衰構造の推定を行った。解析に用いるデータとしては IRIS データセンターの長周期表面波データを用い (VHZ チャンネル)、解析周波数帯としては 2.00-4.10 mHz を選んだ。

線形波形インバージョン解析で深さ 11~888km の S 波速度と非弾性減衰の 3 次元構造を同時に推定した。3 次

元構造は水平方向には球面調和関数(最大次数 16、水平波長にして約 2500 km)で、深さ方向には層構造(11-216, 216-421, 421-671, 671-888 km の 4 層)でパラメタ化した。

本解析の計算量は、並列化していない Direct Solution 法のコードを使って長波長 S 波速度構造の推定を行った Hara and Geller (2000)<sup>(3)</sup> の約 30 倍である。インバージョン解析に必要な理論計算を並列化 Direct Solution 法のコードを用いてベクトル並列計算機上で行うことにより、大規模計算を実施できた (Hara, 2002<sup>(4)</sup>)。

長周期表面波データを用いて震源パラメタを推定した場合に推定が困難なパラメタを安定に推定するアルゴリズムを開発し、1998 年 3 月 25 日に起きた南極地震の解析に応用した。南極地震は観測史上最大級のプレート内地震であり、その震源過程は非常に複雑である。ハーバード大学の CMT 解は大きな非ダブルカップル成分を含む一方、実体波を用いた解析では非ダブルカップル成分を生じるような震源過程は最初得られなかった。

この非ダブルカップル成分の原因については複数の研究が行われている。Kuge et al. (1999)<sup>(5)</sup> は実体波の解析では求めることが難しい時定数の大きな正断層成分の存在を主張している。Henry et al. (2000)<sup>(6)</sup> は CMT 解の非ダブルカップル成分は解の不安定によるものであるとしている。Antolik et al. (2000)<sup>(7)</sup> は詳細な実体波の解析から正断層サブイベントの存在を指摘している。

本研究では、Henry et al. (2000)<sup>(6)</sup> が指摘した不安定性を克服し、安定な解が得られるかどうかについて検討した。

## 【研究結果】

上記の各項目について記す。

非弾性減衰構造の波形に対する影響は速度構造のそれと比べて小さいために解像度が劣る。フーリエスペクトルを使ったインバージョン解析では遷移層の次数 2, 4 の構造しか安定に推定できなかった。そこで非弾性減衰構造に対する解像度を向上するために、パワースペクトルをデータとして用いる新しい推定手法を考案し、データ解析を行ったところ、遷移層の偶数次数 2-8 の構造が得られた。

より浅い部分の構造が求められないのは解析周波数帯が低いためであり、今後高周波側を解析することにより求められると思われる。新しい推定法を用いても奇数次数の解像度は低く、今後さらに解析法を工夫する必要がある。

パワースペクトルを使う新しい手法では、速度構造への解像度も顕著に変化し、短波長構造に対する感度が向上するので、今後モデルの高解像度化のために使える可能性がある。しかしながら、問題の非線形性が増すので、解の収束性・信頼性を数値実験で今後検討する必要がある。

遷移層について得られた速度構造と非弾性減衰構造を比較したところ、以下の結果を得た。

- ・ マントル遷移層の西太平洋及び南米下の高速度に対応する低減衰域が認められた。これは両者が沈み込んだ海洋プレートの低温を反映していることを示唆する。
- ・ 海洋プレート内部の水が遷移層まで運ばれているならば、高減衰域の存在が予測されるが、今回の解析では水の存在を示唆する結果は得られなかった。これは本解析で見ているような長波長スケールでは水の還流が起きていないことを示唆する。
- ・ 速度構造については南太平洋ホットスポットと低速度の相関が認められたら、減衰構造については相関は顕著ではなく、ハワイや北米のホットスポット下に高減衰が認められる。これはホットスポットの成因の違いを反映している可能性がある。

サブイベント数を漸次増やす解析を行い、以下の結果を得た。

- ・ ポイント震源を仮定し、2~3mHz の帯域のデータを解析した場合、グリーン関数を計算する地球モデルとして 1次元モデルを用いても、3次元モデル (S12/WM13 もしくは Hara and Geller 2000<sup>(3)</sup>) を用いても互いに整合的な解が得られた。
- ・ 2つのサブイベントを仮定し、2~4mHz の帯域のデータを解析した場合、3次元モデルを用いた結果は実体波の解析結果と (非ダブルカップル成分を除いて、場

所、時刻、モーメントテンソルについて) 調和的であった。1次元モデルを用いた場合は調和的な解は得られなかった。

- ・ 2~3mHz の帯域の理論とデータの一致はサブイベント数を 2 にしてもほとんど変わらなかったが、3~4mHz の帯域では 88% から 94% に改善した。この結果は今後高周波側のデータを解析して地球モデルを推定する際に多重震源解析の導入がモデルの高精度化に有効であることを示している。
- ・ サブイベント数を 3 にした場合、解の初期値依存性が大きく、安定な解は得られなかった。
- ・ 表面波で求めることが難しいモーメントテンソルの  $r_t$  成分、 $r_f$  成分を決めるためにパラメータサーチを行ったところ、Antolik et al. (2000)<sup>(7)</sup> の結果に整合的な解が得られた。震源の深さをハーバード大学の解に基づいて 30km 程度にして解析したが、実体波の解析では 15km 程度と浅く求められているので、浅い震源を仮定した場合のパラメータサーチを今後行う必要がある。

## 【参考文献】

- 1) Hara, T., Tsuboi, S. and Geller, R. J., Inversion for laterally heterogeneous earth structure using a laterally heterogeneous starting model: preliminary results, *Geophys. J. Int.* 104, 523-540, 1991.
- 2) Hara, T., Tsuboi, S. and Geller, R. J., Inversion for laterally heterogeneous upper mantle S-wave velocity structure using iterative waveform inversion, *Geophys. J. Int.* 115, 667-698, 1993.
- 3) Hara, T. and Geller, R. J., Simultaneous waveform inversion for three-dimensional Earth structure and earthquake source parameters considering a wide range of modal coupling, *Geophys. J. Int.*, 142, 539-550, 2000.
- 4) Hara, T., Degree 16 model of S-wave heterogeneity in the upper and uppermost mantle determined by the Direct Solution Method, *Electronic Geosciences*, Vol. 7, <http://link.springer.de/link/service/journals/10069/free/conferen/sup erplu/inde>, 2002.
- 5) Kuge, K., Kikuchi, M., and Yamanaka, Y., Non-double couple moment tensor of the March 25, 1998, Antarctic earthquake: Composite rupture of strike-slip and normal faults, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 3401-3404, 1999.
- 6) Henry, C., Das, S., and Woodhouse, J. H., The great March 25, 1998, Antarctic Plate earthquake: Moment tensor and rupture history, *J. Geophys. Res.*, 105, 16097-16118, 2000.
- 7) Antolik, M., Kaverina, A., Dreger, D. S., Compound rupture of the great 1998 Antarctic plate earthquake, *J. Geophys. Res.*, 105, 23825-23838, 2000.