

## 解析初期値の推定にグリッドサーチを用いた自動 CMT 解析

### Centroid Moment Tensor Inversion Analysis with Grid-search to Obtain Appropriate Initial Values

山内崇彦<sup>1</sup>, 碓井勇二<sup>2</sup>

Takahiko YAMAUCHI<sup>1</sup> and Yuji USUI<sup>2</sup>

(Received May 16, 2012; Accepted April 2, 2013)

#### 1 はじめに

気象庁では「平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震」(Mw9.0, 以下, 東北地方太平洋沖地震)が発生した際, 国内のほぼ全ての広帯域地震計が振り切れて使用できなかったため, 自動による CMT 解析は行えなかった. このことを受け, 2011 年 5 月より速度型強震計を用いた自動 CMT 解析の運用を開始した(碓井・他, 2013). この手法では強い揺れでも振り切れることのない防災科学技術研究所の速度型強震計のデータ (F-net) を用いるが, 基本的な解析手法としては従来の CMT 解析と同じである. つまり, 解析の初期値は緊急作業で決定した震源(初期破壊開始点), データ長は地震発生時から 10 分間のデータを用いて Dziewonski et al. (1981), Kawakatsu (1989) が開発したインバージョン手法に基づいた CMT 解析(中村・他, 2003)を行っている.

一方, 地震の規模が大きくなると断層面積が広くなり, 初期破壊開始点とセントロイド位置が大きく離れることがある. 例えば, 2001 年 6 月 23 日に発生したペルーの地震 (Mw8.2) では大きな断層すべりは震源から南東約 150–200km 離れた場所に位置していた(菊池, 2003). このような地震ではこれまでの自動 CMT 解析では, 解析に用いるセントロイド初期値(以下, 解析初期値)が適切でないことが原因で解が不安定になる可能性がある. また, 津波地震のように破壊の継続時間が長くなるような地震でも同様に, 解析初期値のセントロイド時間が原因で解が不安定になる可能性が指摘されている(碓井・他, 2013. 中村・他, 2003).

今回, 東北地方太平洋沖地震で実際に観測したデ

ータを用い, 解析初期値が自動 CMT 解析の精度に与える影響について調査した. また, 初期破壊開始点とセントロイドとの差が大きくなったとしても精度よく解析できるように, 解析初期値の推定にグリッドサーチを用いた新たな自動 CMT 解析を開発した. 開発にあたっては, 津波警報のグレードアップ・グレードダウン・早期解除など, 続報の判断に資するため, 解析に要する時間がこれまでの自動 CMT 解析と同等以下の 15 分未満であることを重要な制約条件とし, 対象とするのは日本周辺の M7 程度以上の地震とした.

#### 2 東北地方太平洋沖地震の観測データを用いたシミュレーション

##### 2.1 解析初期値の位置が解析結果に与える影響

最終的なセントロイド位置と解析初期値の位置の距離が大きい場合でも CMT 解析が精度よく解析できるか調査するため, 東北地方太平洋沖地震の観測データを用い, 図 1 に示した各点を解析初期値の位置として CMT 解析を行った(気象庁 CMT 解析によるセントロイド位置は赤星). その結果, セントロイド位置と解析初期値の位置の距離が 100km 程度以上となると, 観測波形と理論波形の合致度が悪く解が求まらない場合や, 解の精度が低い結果となった.

東北地方太平洋沖地震は, 長さは約 450km, 幅は約 200km (Yoshida et al., 2011) と広い範囲で破壊が起こっているが, 初期破壊開始点とセントロイド位置の距離が約 40km (気象庁 CMT 解析による) と比較的近い地震であったため, これまでの手法でも精度のよい解析を行うことが可能と考えられる. しかし, 仮にセントロイド位置が大きく離れた場所に位

<sup>1</sup> 地震火山部地震予知情報課, Earthquake Prediction Information Division, Seismological and Volcanological Department

<sup>2</sup> 地震火山部地震予知情報課, Earthquake Prediction Information Division, Seismological and Volcanological Department

現所属: 札幌管区気象台火山監視・情報センター, Volcanic Observations Information Center, Sapporo District Meteorological Observatory

置した場合には精度のよい CMT 解析を行うことはできない可能性が高いことがわかった。現行のインバージョン手法に基づいた CMT 解析において、精度の良い CMT 解析を行うためには、ある程度セントロイド位置に近いところに解析初期値の位置を置く必要がある。

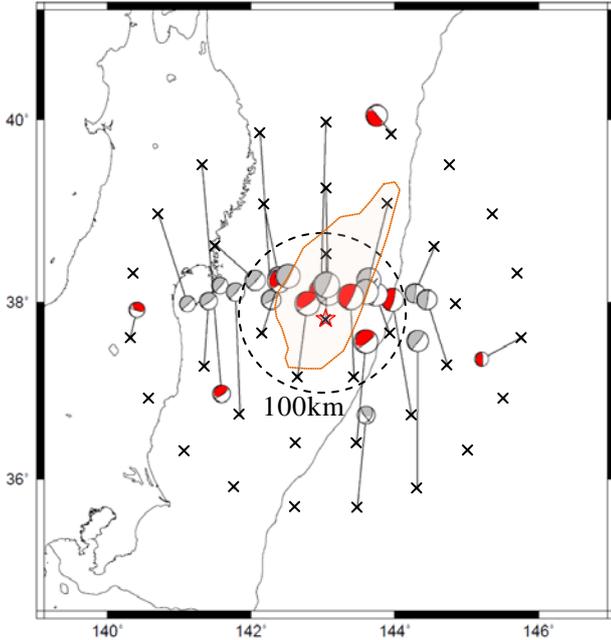


図 1 解析初期値の位置を変えて CMT 解析を行った結果。メカニズム解から伸びた線の先が解析初期値 (×印)。メカニズム解の評価が GOOD のものは赤色, SANKO は灰色で示した。精度よく求まらなかった解は描画していない (5.1 節参照)。メカニズム解のサイズは点数が高いものほど大きくした (5.2 節参照)。橙色の領域は Yoshida et al. (2011) から強震波形を用いたインバージョンによる 16m 以上の滑り域をトレースした。

## 2.2 解析初期値のセントロイド時間が解析結果に与える影響

次に、解析初期値のセントロイド時間が CMT 解析結果に与える影響について調査を行った。東北地方太平洋沖地震で解析初期値のセントロイド時間を 70 秒および 110 秒とした結果を図 2 に示す。東北地方太平洋沖地震のセントロイド時間は約 70 秒 (気象庁 CMT 解による) だったが、解析初期値のセントロイド時間を観測波形の卓越周期の 4 分の 1 波長程度 (今回の例では 30 秒程度) 以上ずらした 110 秒とするとモーメントテンソルが反転した結果となった。

これは、理論波形を卓越周期の半波長ずらして上下反転すると元の波形とよく一致することが原因と

考えられる (図 2 の緑線)。このように、解析初期値のセントロイド時間が観測波形の卓越周期の  $\pm 4$  分の 1 波長程度以上ずれるとメカニズム解が反転する可能性がある。これを防ぐため、気象庁ではセントロイド時間の推定に経験式 (中村・他, 2003) を用いている。図 3 に気象庁で用いている経験式と GlobalCMT カタログのセントロイド時間の関係を示した。図中ピンクの線が経験式、灰色の線で囲まれた範囲は解析に使用する周期帯 (83~333 秒, 後述) の下限の  $\pm 4$  分の 1 波長の範囲を示している。解析初期値のセントロイド時間がこの灰色の範囲内であれば

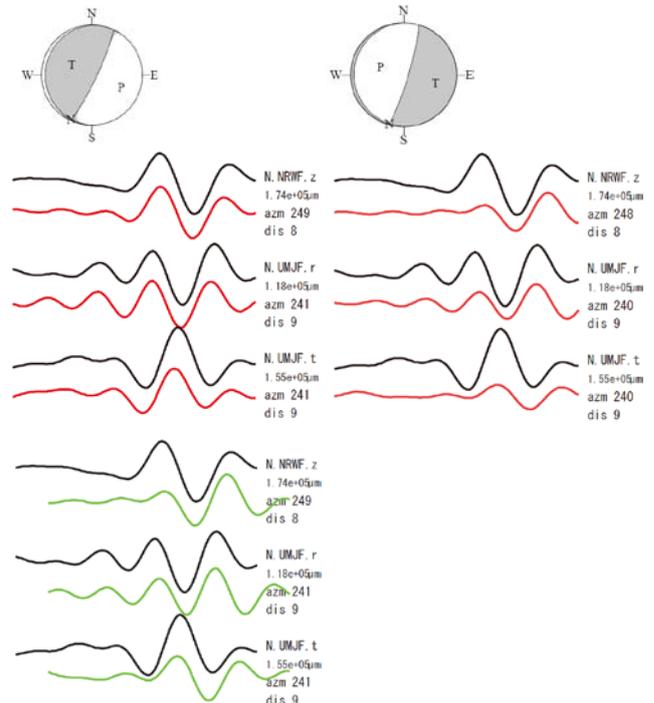


図 2 解析初期値のセントロイド時間を変えて CMT 解析を行った結果の CMT 解と波形例。左側が初期値 70 秒, 右側が 110 秒としたときの解析例。黒色が観測波形, 赤色が理論波形, 緑色は初期値 70 秒の理論波形を 60 秒後ろにずらして上下反転したもの。

メカニズム解が反転する可能性は低い。しかし、図 3 から明らかなように、特に Mw7.5 以上の地震においてはこの範囲を外れるものも少なからず存在する。したがって、セントロイド時間が経験式から大きく外れる地震についても対応するためには、セントロイド時間についても適切な初期値を用いる必要がある。

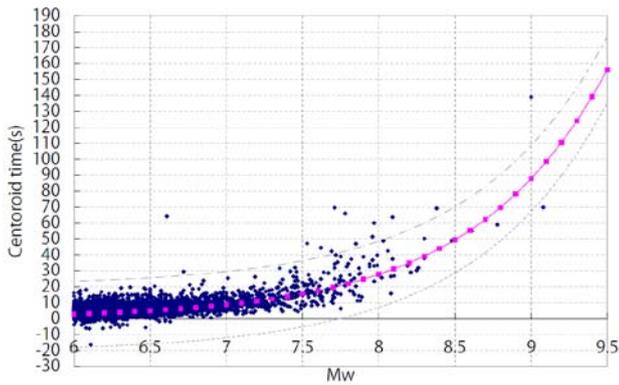


図3 Mw とセントロイド時間の関係。青色のプロットは GlobalCMT カタログ。ピンク色の線は中村他 (2003) の経験式、灰色の線は解析に使用する周期帯の下限の±4分の1波長の範囲を示す。

### 3 グリッドサーチを用いた新たな解析手法の検討

前章で指摘した問題点の解決のために、解析初期値のグリッドサーチを用いた CMT 解析を検討した。具体的な手法や解析パラメータを以下に記す。なお、グリッドサーチ以外の CMT 解析の手法は、中村・他 (2003)、碓井・他 (2013) による。

#### 3.1 解析に利用するデータ長

解析結果は津波警報に利用することを想定しているので、結果が出力されるまでの時間が 15 分未満であることを重要な制約条件とする。この条件を満たすように後述の使用する観測点、グリッド間隔とともに解析に使用するデータ長を調整し、オリジンタイムの前後 8 分間のデータを用いることとした。

#### 3.2 使用する周期帯域

解析にはできるだけ長周期の波形を用いたが、本手法では地震計の特性の補正及びバンドパスフィルターを波形データに適用する際に FFT を用いて周波数領域で処理していることから、解析に使用するデータ長を考慮し、周期帯域は 83~333 秒とした。

#### 3.3 使用する観測点

前述したように、解析には F-net の速度型強震計を用いた (32 観測点、図 4 の三角形)。

規模の大きな地震では断層面積が広がるため、近い観測点では遠方近似が成り立たないことに加え、永久変位の影響で地震計が傾く等の影響が考えられ

る。東北地方太平洋沖地震を解析した結果では、震源から震央距離が 500km 程度以上であれば観測波形をよく説明できることが分かった。このため、解析初期値の位置から震央距離で 500km 以上離れた観測点を使用する。また島嶼部など観測点の少ない地域でも、十分な観測点数が確保できるように、解析に使用するデータ長 (オリジンタイムから 8 分間) の範囲で地震の主なシグナルが到達する範囲、すなわち解析初期値から震央距離で 2000km までの観測点を用いる。ただし、使用する観測点数が多すぎると解析により多くの時間を要するため、あらかじめ使用する観測点は間引いている (図 4 の三角形)。これらの観測点を用いて碓井他 (2010) と同様の手法で SN 比による波形選別を行い、解析初期値から震央距離で 1200km までは全ての観測点を使うが、それ以上は近い観測点から、最大で 42 成分までを使用することとした。

図 4 に各グリッドで計算に使用できる観測点の成分数のコンターを示す。この観測点選別を行う本

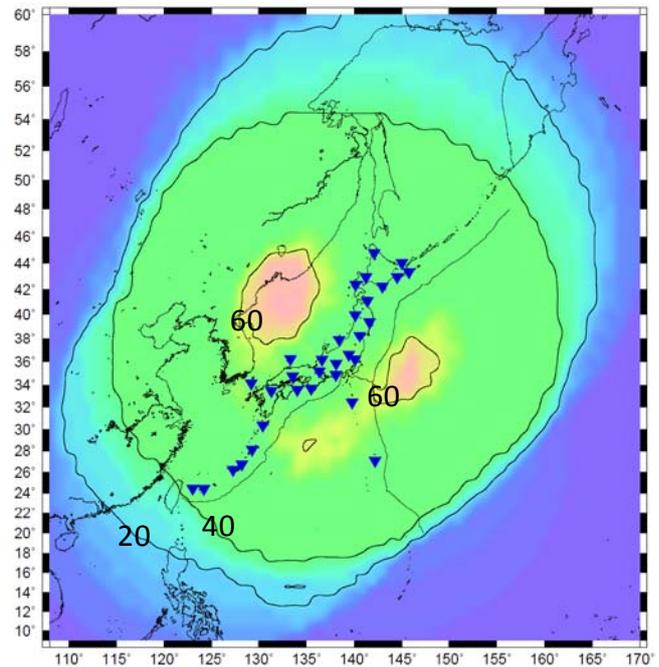


図4 観測点分布図。コンターはその位置におけるグリッドで計算に使用できる観測点の成分数。紫色は 20 成分以下、緑色は 40~60 成分、橙色は 60 成分以上を表す。

手法では、セントロイド位置が日本近海の図 4 の緑色の範囲 (約 40 成分以上) の地震に対応することが可能と考えている。図 5 に東北地方太平洋沖地震の

場合に使用する観測点の例を示す。

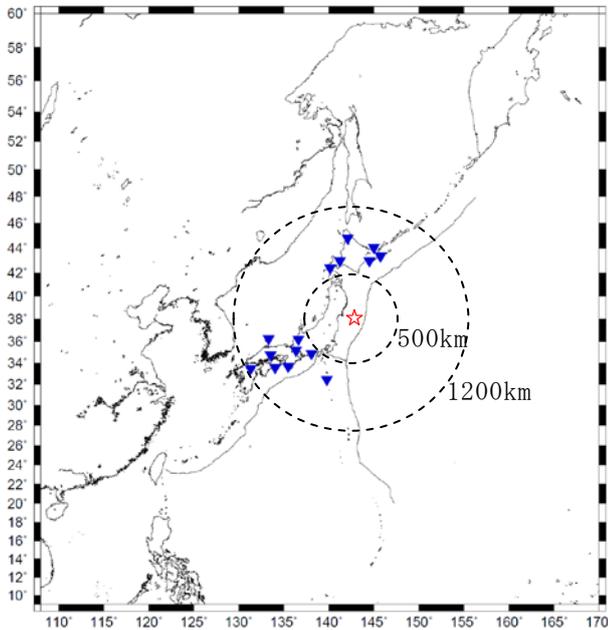


図 5 東北地方太平洋沖地震の場合に本解析で使用する観測点分布の例。

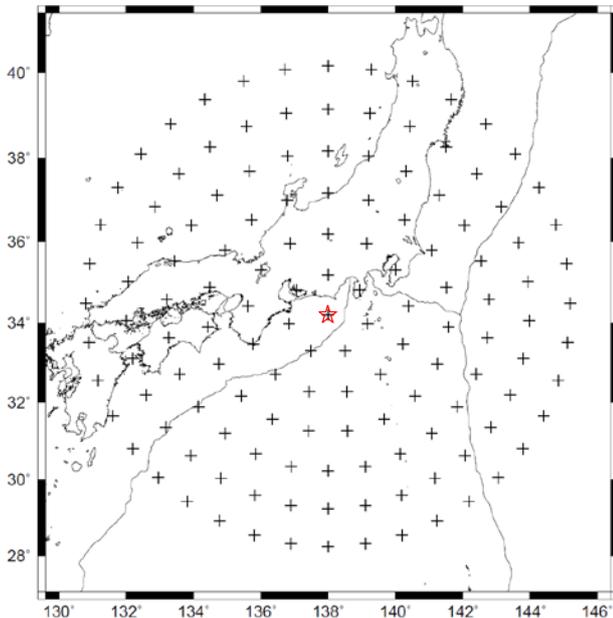


図 6 計算グリッドの分布図。十字が計算グリッド位置，中心の赤星は初期破壊開始点。

### 3.4 解析初期値の位置をグリッドサーチする範囲

2 節で述べたように，安定した解の推定には，セントロイド位置に近いところに解析初期値の位置を置く必要がある。このため本手法では解析初期値の位置についてグリッドサーチを用いることとした。解析初

期値の位置をグリッドサーチする範囲は，東海・東南海・南海地震が連動して発生した場合にも対応できるように，初期破壊開始点を中心とする半径約 660km の範囲とした。グリッド間隔は，セントロイド位置と解析初期値の位置の距離が最大でも 80km 程度となるようにグリッド間隔を 110km 程度と設定した。なお，計算時間短縮のため，深さ方向についてはグリッドサーチは行わないこととした。図 6 に遠州灘を震源とする場合の例を示す。

### 3.5 解析初期値のセントロイド時間をグリッドサーチする範囲

適切な解析初期値のセントロイド時間を求めるために，これまで使用してきた経験式は用いず，グリッドサーチを用いることとした。具体的には，各グリッド位置において，震源からの距離に最大破壊伝播速度 3.5km/s でかかる時間を震源時より遅らせた時点から，150 秒間の範囲内で，40 秒（解析周期帯（83~333 秒）の下限の半波長）ずつずらした値を解析初期値のセントロイド時間の候補とする。

## 4 解析の流れ

解析のフローチャートを図 7 に示す。本システムは，EPOS の緊急処理で決定された震源をメールで受信することをトリガとし，この震源を初期破壊開始点として 3.4 節で示した位置にグリッドを作成する。各グリッド位置ごとに 3.3 節で示したとおり使用する観測点を選択し，SN 比による波形選別を確井他（2010）と同様の手法で行う。計算するグリッド位置が広い範囲に及ぶため，各グリッド位置ごとに波形の水平成分をラディアル方向，トランスバース方向に合成する。各グリッド位置で 3.5 節で示したセントロイド時間の解析初期値で CMT 解析を行い，波形の合致度の最もよい解析結果を選択する。波形の合致度の指標には確井他（2010）と同様にバリエーションを用いる。さらに，選択した結果からバリエーションが 10%未満の成分を除外した上で（この時点で半数以上の成分が 10%未満のときはそのグリッドは計算終了とする），再び CMT 解析を行った結果を，そのグリッド位置における解析結果とする。最後に各グリッド位置における解析結果の中から次節で示す手法で最適な解を選択する。

5 最適な解析結果の自動選択

5.1 グリッド位置毎の解析結果の評価

各グリッド位置で計算された解はそれぞれ自動で 3 段階の評価, GOOD, SANKO, BAD に分類する.

i. 次の各条件に 1 項目でも当てはまれば BAD と評価する (4 番目の項目以外は碓井他 (2013) と同様の評価手法を用いる)

- 1) 使用した成分が 10 成分未満
- 2) 波形の合致度が 50% 未満
- 3) (オリジンタイム)-(セントロイド時間) $< -5$  秒の場合
- 4) 波形使用率 ((使用した成分数)  $\div$  (SN 比による波形選別で残った成分数)) が 50% 未満

4 節における波形選別で, 波形の合致度が 10% 未満で除外された観測点が半数以上となった解析結果は精度がないと考える.

ii. BAD に分類されず, 次の条件に 1 項目でも合

致する場合は SANKO とする

- 1) 非ダブルカップル成分比が 0.25 超過
- 2) (セントロイドの深さ)  $\leq 20$ km かつ(小さい方の傾斜角)  $\leq 10$  度

この傾斜角の条件に当てはまる場合は, Mw についても碓井他 (2013) と同様の手法を用いて補正する.

上記いずれにも当てはまらなかったものを (BAD または SANKO に分類されなかったものを) GOOD とする.

5.2 グリッド位置毎の解析結果の中からの最適な解の選択

各グリッド位置の解析結果の中から最適な解を選択する必要があるが, 本手法では非常に広範囲のグリッド位置で計算するため, 各グリッド位置で使用した観測点は異なる. そのため, 単純に波形の合致度が最も良いものを選択すればよいというわけではない. それは, 使用した成分数が少ない解析結果ほど波形の合致度は良くなると考えられるためである.

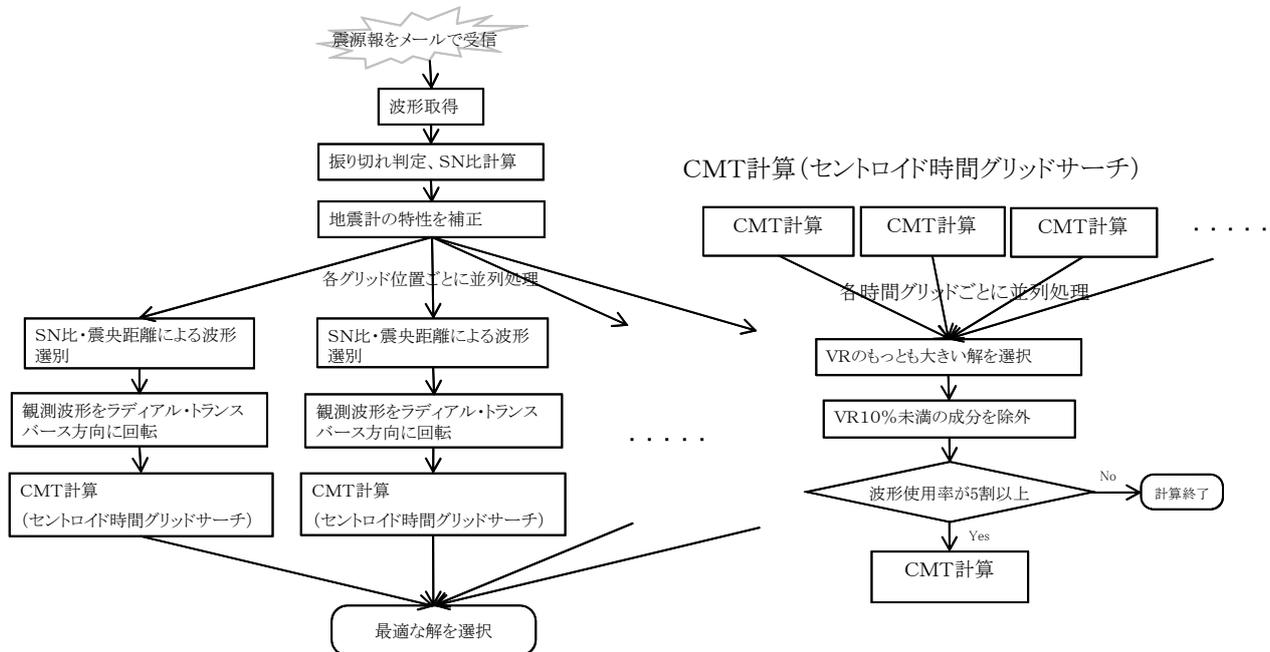


図 7 解析のフローチャート. 右側のフローは左側のフローの CMT 計算 (セントロイド時間グリッドサーチ) の部分の詳細.

また、使用した観測点数が多いほど解の信頼度が増すと考えられるが、グリッド位置ごとに使用できる観測点数に違いがあるため、単純に使用した観測点数が多い観測点を選択するわけにはいかない。そこで本手法では、各グリッド位置で GOOD, SANKO と評価された解の中から波形の合致度と 5.1 節における波形使用率の値を組み合わせで解析結果に点数を付け (100 点満点とする)、最も点数の高い解析結果を最適な解とする手法を採用した。

波形の合致度と波形使用率は線形結合とし、次式で定義する。

$$(\text{点数}) = ((\text{バリエーションリダクション}) + C * (\text{波形使用率}(\%))) / (1 + C)$$

係数  $C$  は定数で  $(1/(1+C))$  は 100 点満点にするための規格化定数、東北地方太平洋沖地震をモデルケースとして次のように設定した。

各グリッド位置における解析結果の集合を  $\Omega$ 、手動 CMT 解析結果との解の合致度を示すリゼンブラン

(Kuge and Kawakatsu, 1993) が 0.8 以下の解析結果の集合を  $\omega (\subseteq \Omega)$  とする。また、係数  $C$  を固定し  $\Omega$  を点数の高い順に並べたとき、集合  $\omega$  の最高の順位 (順位の値としては最小値) を  $\min(\Omega, \omega, C)$  と定義する。 $\min(\Omega, \omega, C)$  は係数  $C$  が変われば変化するが、係数  $C$  を変えたときの  $\omega$  の順位が最も低く、すなわち  $\min(\Omega, \omega, C)$  が最大となるように係数を決定することとした。係数  $C$  は 0.1~10 の範囲で調査した結果、0.8 とした。東北地方太平洋沖地震の場合、係数は 0.1~10 の範囲のいずれの値でも点数の最も高い解のリゼンブランは 0.8 以上であり、最適な解に選ばれる解に問題はないが、このように係数を決めることでバリエーションリダクションの値は良いがリゼンブランが低く適切でない解の点数を相対的に低くすることができ、よりロバストに最適な解を選択できるようになったと考えている。

発生日時	震央地名	本解析	Mw	手動解析	Mw
2011年03月09日11時45分	三陸沖		7.3 SANKO		7.3
2011年03月11日14時46分	東北地方太平洋沖地震		8.8 GOOD		9.0
2011年03月11日15時08分	岩手県沖		BAD		7.4
2011年03月11日15時15分	茨城県沖		7.9 SANKO		7.7
2011年03月11日15時25分	三陸沖		BAD		7.5
2011年04月07日23時32分	宮城県沖		7.1 GOOD		7.1
2011年07月10日09時57分	三陸沖		7.1 GOOD		7.0
2011年11月08日11時59分	沖縄本島北西沖		6.9 GOOD		6.8

図 8 解析結果。

## 6 解析結果

図 8 に 2011 年 3 月以降の M7 程度以上の解析結果を示す。東北地方太平洋沖地震の直後は長周期のノイズが卓越し、15 時 08 分と 15 時 25 分の余震は解析結果を得られなかったが、15 時 15 分の最大余震は解析結果を得ることができた。手動解析結果（気象庁による）と比較して Mw の誤差は ±0.2 程度であり、良好な結果が得られた。解析に要した時間（後から解析した結果であるが）は、オリジンタイムから 12~13 分程度であった。なお、解析には Hp xw9 400 Workstation(Quad-Core AMD Opteron™ Processor 2380×2)を使用した。

## 7 今後の課題

本手法では解析初期値の位置、セントロイド時間についてグリッドサーチを行うことで巨大地震や津波地震にも対応できるように開発を進めてきたが、本手法の CMT 解析は点震源（空間・時間とも）を仮定して解析を行っているため、主要な破壊の継続時間が使用している周期帯域以下で、主要な破壊が点震源として仮定できるような地震であれば解析可能と思われるが、そうでなければ解析できない可能性がある。日本周辺で発生した M7 程度以上の地震の速度型強震計での観測事例は限られおり、観測事例からのみでは、どのような地震が解析できて、どのような地震は解析できないのかは定かではない。今後、多様な地震のシミュレーション波形を用いてテストを行い、さらなる改善を行う必要があると考えている。なお、本手法は 2012 年 2 月より緊急作業に利用されている。

## 謝辞

本稿では、独立行政法人 防災科学技術研究所 F-net から取得したデータ、および GlobalCMT カタログを使用させて頂いた。

画の作成には GMT(the Generic Mapping tool [Wessel, P. and W. H. F. Smith, Free software helps map and display data, EOS Trans. AGU, 72, 441, 445-446, 1991]) を使用させていただいた。

本稿作成にあたり、吉田康宏博士（文部科学省）、気象研究所の青木重樹主任研究官、上野寛主任研究官、林元直樹研究官には貴重なご意見を頂いた。ここに記して感謝する。

## 文献

- 碓井勇二, 青木重樹, 林元直樹, 下山利浩, 野坂大輔, 吉田知央 (2010): CMT 解析の自動処理とその高度化, 験震時報, **73**, 69–184.
- 碓井勇二, 山内崇彦, 瀬戸博巳, 気象庁における CMT 解析の改良 (2013), 験震時報, **77**, 39–45.
- 菊池正幸 (2003): リアルタイム地震学, 東京大学出版会
- 中村浩二・青木重樹・吉田康宏 (2003): 気象庁広帯域地震観測網による CMT 解析, 験震時報, **66**, 1–15.
- Dziewonski, A., T.-A. Chou, and J. Woodhouse (1981): Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, *J. Geophys. Res.*, **86**, 2825-2852.
- Kawakatsu, H (1989): Centroid single force inversion of seismic waves generated by Landslides, *J. Geophys. Res.*, **94**, 12363-12374.
- Kuge, K. and H. Kawakatsu (1993): Significance of non-double couple components of deep and intermediate-depth earthquakes: implications from moment tensor inversions of long-period seismic waves, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **75**, 243-266.
- Yoshida, Y., H. Ueno, D. Muto, and S. Aoki (2011): Source process of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake with the combination of teleseismic and strong motion data, *Earth Planets Space*, **63**, 565–569.

(編集担当 大竹和生・本間直樹)