

## 気象庁における CMT 解析の改良

### Improvement of CMT Analysis in JMA

碓井勇二<sup>1</sup>, 山内崇彦<sup>2</sup>, 瀬戸博巳<sup>2</sup>

Yuji USUI<sup>1</sup>, Takahiko YAMAUCHI<sup>2</sup> and Hiromi SETO<sup>2</sup>

(Received May 16, 2012: Accepted May 18, 2012)

気象庁ではルーチン業務として手動による CMT 解析を行う他, 津波警報の更新に資するため自動処理によるリアルタイムの CMT 解析を行っている。これら CMT 解析の精度向上を目的として解析手法を改良した。特に自動 CMT 解析については, 「平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震」で明らかになった課題にも対応した。

#### 1 これまでの CMT 解析の課題

気象庁では 1993 年に広帯域地震計 (STS-2) を 20 観測点整備し, 1994 年からこのデータを用いた CMT 解析に着手した。対象とする地震は M5.0 以上, CMT 解析の初期値としては一元化震源 (1997 年 10 月以前は気象庁震源) の結果を用い, 解析に用いるデータ長は 10 分間, バンドパスフィルターの通過帯域は 45~100 秒を用いた。理論的な地震波形はノーマルモードの足し合わせで計算しており, 地球モデルは 1066A(Gilbert and Dziewonski, 1975)を用いた。この手法については中村他 (2003) に詳しく述べられている。

日々のルーチン解析を行う中で, これまでの CMT 解析手法について次の課題が明らかになった。

- ①理論計算で求める地震波形の基となる地球モデルのデータについて, 周期 45 秒から 70 秒までのデータが不十分であったため, 計算された理論的な地震波形の精度が悪く, 結果的に観測した波形との合致度が良くない場合が多い。
- ②海域で発生した地震の震源では特に深さの精度が悪く, それを初期値に用いたときに CMT 解析が精度良く解析できないことがある。
- ③バンドパスフィルターの通過帯域を常に固定して

いたが, 規模の大きな地震を解析する場合はより長周期のデータを用いないと Mw が過小評価になる場合がある。

④北海道地方や沖縄地方で発生した地震は, 観測点配置に偏りがあることが原因で解析精度が良くない場合がある。

#### 2 CMT 解析 (手動解析) の改良

##### 2.1 改良点

これら課題を克服するため, 次の改良を加えることとし, 2010 年 7 月から手動による CMT 解析のルーチン処理に新しい手法を導入した。

①地震の理論波形を計算するとき用いる地球モデルについて, 気象研究所の全面的な協力を得て, モデルを PREM (Dziewonski and Anderson, 1981) に変更するとともに, 理論波形を計算するためのデータを周期 30 秒からの完全なデータにした。これにより理論波形がより正確に計算できるようになり, CMT 解析の精度が格段に向上した。

②海域で発生した地震を解析する場合は, 深さのグリッドサーチで適切な初期値を求めてから解析を行うようにした。深さのグリッドサーチとは, 10~150km の間でセントロイドの深さを 10km 毎に固定

<sup>1</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

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

した CMT 解析を行い、波形の合致度が一番良い時の深さを求める手法である。

③M7.0 以上の地震には、長周期側を広げたバンドパスフィルターを用いた解析も行い、適切な解を検討することとした。また、より小さい地震も解析できるようにバンドパスフィルターの短周期側を 35 秒にした。特に、M5.0 未満の地震については震源近傍にある（独）防災科学技術研究所の F-net 観測点のデータを全点使用し小さな観測網で解析することとした。マグニチュードと解析に用いるバンドパスフィルター、観測網については表 1 の通り。

④北海道地方、沖縄地方については、（独）防災科学技術研究所の F-net データをできるだけ使用することとした。また、台湾に整備されている IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) 観測点のデータも利用することとした。

なお、当初 F-net のデータは、大きな地震が発生すると伝送回線の容量不足のためデータに抜けが発生して CMT 解析には使用できない状況だった。（独）防災科学技術研究所の協力により 2009 年 10 月から伝送回線の容量が拡張され、大地震時にも安定してデータが取得できるようになった。

表 1 CMT 解析で用いる周期と観測網

地震の規模	使用するデータ	
M4.5～M4.9	使用帯域	35 秒～100 秒
	使用観測網	気象庁, F-net, IRIS
	観測点の震央距離	0～800km
M5.0～M6.9	使用帯域	35 秒～100 秒
	使用観測網	気象庁, F-net 代表点, IRIS (台湾)
	観測点の震央距離	200～1600km
M7.0～	使用帯域	45～200 秒 など長周期データを用いた解析も行う
	使用観測網	気象庁+F-net 代表点, IRIS (台湾)
	観測点の震央距離	200～1600km

F-net 代表点：全国の F-net 観測点のうち約 30 点を用いて気象庁観測網の偏りを補完

## 2.2 改良の効果

上で述べた改良を施すことにより次の 2 点が顕著な効果として認められた。

①沖合で発生した地震のセントロイドの深さ精度向上

初期値の深さをグリッドサーチで求めるようになり、海域で発生した地震について CMT 解析の精度が向上した。例えば通常の震源計算では、三陸沖の概ね 143 度以東の地震は震源が深めに決まってしまうことがある。そのままの震源を初期値として解析を行うと CMT 解析はできないことが多い。深さをグリッドサーチで求めることにより、精度の良い初期値を用いることができ、海溝軸よりも離れたアウターライズの地震でも CMT 解が数多く求まるようになった。

②M4.5 以上の地震で CMT 解が決定可能

35 秒からのデータを利用するようになったこと、（独）防災科学技術研究所の F-net データを全点利用することで、M4.5 以上のイベントで CMT 解が求められるようになった。これにより決定数は格段に増加した。

①および②の成果の例として、「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」（以下、東北地方太平洋沖地震）の余震の CMT 解について図 1 に示す。気象庁の CMT 解では、次の 3 つの特徴的な地震についてセントロイドの深さも含め適正に解析することが出来ている。

- ・プレート境界付近の逆断層型地震
- ・陸側のプレートが大きく東にずれたことによりプレート境界よりも浅い場所で発生している正断層型地震
- ・岩手県沖から茨城県沖にかけて、海溝軸外側の浅い領域で発生しているアウターライズの正断層型地震

ここに示した全ての解析結果 659 個中 444 個が Mw4.5～4.9 の地震である。小さな地震の解析が精度よくできるようになり、余震活動をより詳しく把握することができた。

## 2.3 過去に登録された気象庁カタログの扱い

従来手法で解析され気象庁カタログに登録されている 2009 年 1 月～2010 年 6 月までの地震について、新しい手法を用いて再解析を行い、改良前後の

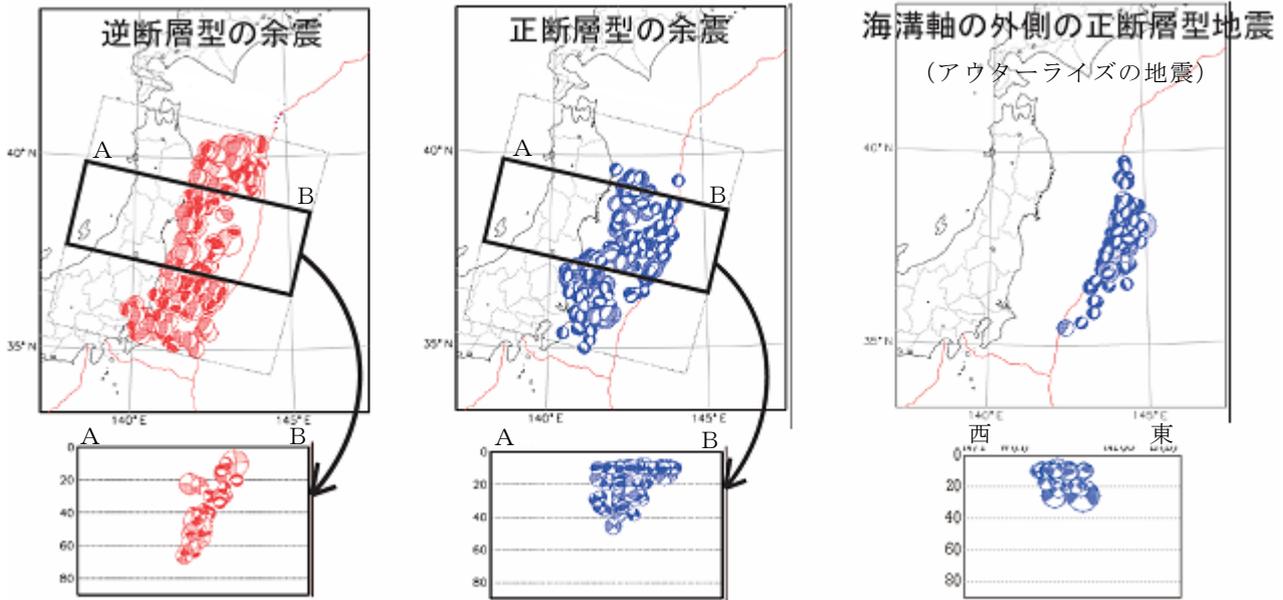


図 1 東北地方太平洋沖地震の余震の CMT 解 (2011 年 3 月 11 日～2011 年 12 月 31 日)

正断層型 (赤), 逆断層型 (青) を抽出し, CMT 解析で求めたセントロイド震源の位置でメカニズム解を描画した. 逆断層型, 正断層型については太枠内の地震について断面図を示した. 逆断層型は主にプレートの境界付近, 正断層型は陸側のプレート内で発生している. アウターライズの地震は岩手県沖から茨城県沖の浅い領域に分布している.

解析結果を比較した. これまで精度が悪くカタログに登録しなかった地震についても, 新たな手法を用いることにより精度の良い結果が得られたものはいくつかあった. 登録済みの地震についてはメカニズム解・ $M_w$  等に大きな変化はなかった. このことから 2008 年以前の結果も登録されている結果は十分に信頼できるものと推測できる.

なお, 再計算を行った期間の気象庁カタログは, 2011 年度発行の地震年報で改良後の手法を用いた再計算結果に置き換えた.

### 3 自動 CMT 解析の改良

#### 3.1 改良点

気象庁では自動 CMT 解析 (碓井他, 2010) の結果を津波警報の更新に利用している. 手動解析において CMT 解析精度の向上が確認できたので, 2010 年 10 月より EPOS における自動 CMT 解析についても改良を行った. 自動解析での改良は次の点である.

##### ①地球モデルのデータの改良

手動 CMT 解析と同様である.

##### ②波形の合致度を利用した波形選別

地球モデルの改良で観測波形と理論波形の合致度が飛躍的に向上した. これまでの S/N 比を用いた波形選別だけでもほぼ適切な CMT 解が得られるが, さらに観測波形と理論波形の合致度が悪い成分を除外して CMT の再解析を行うことで, 精度を高めることにした.

##### ③参考ランクの新設

これまで自動 CMT 解の精度評価は, GOOD/BAD の 2 区分で, メカニズム解・ $M_w$  両方の精度がよいときに GOOD 解と判定していた. しかし, 津波警報の更新としては  $M_w$  だけの利用でも有効なので, メカニズム解の精度は低いながら  $M_w$  の精度が良い場合,  $M_w$  に補正値を用いた場合 (後述) 等に「参考」というランクを新設して対応することとした.

以上の結果, これまで CMT 解析の GOOD の割合は 3 割程度しかなかったが, 今回の改良により GOOD:参考:BAD の比は概ね 6:2:2 となり,  $M_w$  だけであれば約 8 割の地震で求まるようになった.

以下 3.2 から 3.4 で, 新設した「参考」ランクの判断基準を詳しく述べる.

### 3.2 Mw の補正

これまでセントロイドの深さが浅く、かつメカニズム解が低角すぎた場合、手動解析と比較して Mw が過大評価されることがあるので BAD と判定していた。Kanamori et al. (1981) によると震源が浅く傾斜角が低角な地震では  $M_o$  と  $dip$  を同時に正確に求めることは難しいが、 $M_o \cdot \sin(2dip)$  の値は精度良く求めることができる。ここで  $M_o$  は地震のモーメント、 $dip$  はメカニズム解の傾斜角である。このことから、

$$M_o' = \frac{M_o \cdot \sin(2dip)}{\sin(2dip')} \quad (1)$$

を用いて  $M_o'$  および Mw の補正值を求めるようにした。ここで  $M_o'$  はモーメントの補正值、 $dip'$  は補正傾斜角である。具体的には、セントロイドの深さが 20km 以下、かつ 2 つの節面のうち小さい方の傾斜角が  $10^\circ$  以下のとき、傾斜角  $12^\circ$  (補正傾斜角) に固定して地震のモーメントを再計算し、Mw の補正值を求める。これにより 0.3~0.5 程度の過大評価が  $\pm 0.2$  の範囲に収まった (図 2)。このように求めた CMT 解の評価は「参考」とした。ここで用いた傾斜角の基準は経験的な値である。

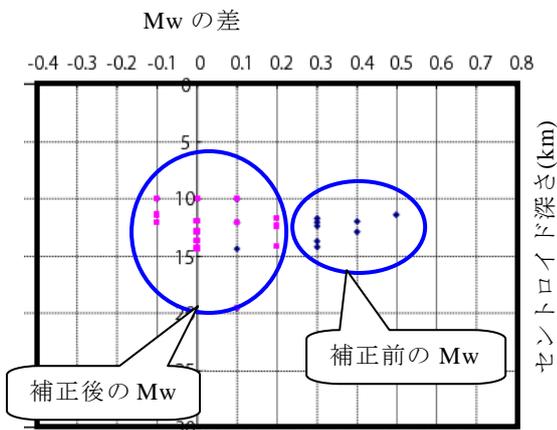


図 2 自動 CMT から手動 CMT の Mw を引いた値

2006 年 1 月 18 日~2010 年 2 月 22 日の期間で Mw の補正を行った地震の検証結果。縦軸はセントロイドの深さ、横軸は自動 CMT と手動 CMT の差。青 (◆) が補正前、赤 (■) が補正後の値。補正後の Mw は手動解析の結果とほぼ同等である。

### 3.3 参考領域

観測網から離れた地域で発生した地震については、たとえ波形の合致度が良くても、手動解析で得られるメカニズム解と異なる解になってしまうことがある。このような観測網から離れた地域の地震では、GOOD の条件を満たしても「参考」とすることにした。具体的な領域を図 3 に示す。

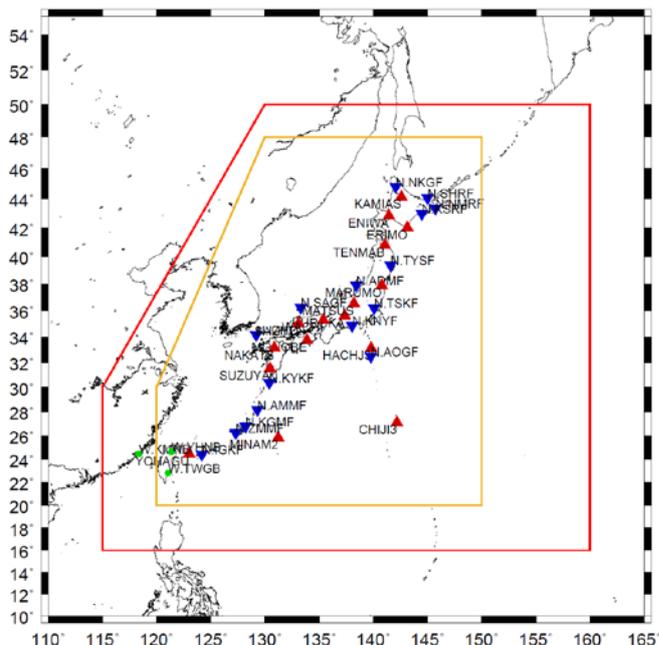


図 3 広帯域地震計の観測点配置と自動 CMT の対象領域、参考計算領域

赤色の枠内が自動 CMT の解析対象領域。黄色と赤色の間が参考計算領域で計算結果が良くても「参考」としている。▲は気象庁観測点、▼は F-net 代表点、●は IRIS (台湾) の観測点

### 3.4 非ダブルカップル成分

これまで非ダブルカップル成分が大きい CMT 解はメカニズム解の精度が低いとして BAD の判定にしていた。しかし、波形の合致度が良ければ Mw の精度は信頼に足るはずである。そのため、非ダブルカップル成分が大きいだけならば「参考」とすることにした。

その他の基準はこれまで通り (碓井・他, 2010) であり、表 2 に GOOD, 参考, BAD の基準をまとめる。

表 2 自動 CMT 解析の評価基準

評価	基準	
BAD	解析に使用した波形数	6 成分未満
	波形の合致度	50% 未満
	震源とセントロイド震源との距離	60km 以上※
	セントロイド時間－震源時	-5.0 秒より小さい
参考	Mw の補正	セントロイドの深さが 20km 以下で小さい方の傾斜角が 10° 以下
	非ダブルカップル成分	0.25 を超える
	解の信頼度が低い領域	図 3 参照
GOOD	上記以外	

※ただし M7.2 以上は宇津の式 (Utsu (1961)) による

#### 4 巨大な地震に対する自動 CMT 解析

東北地方太平洋沖地震の規模は緊急作業による気象庁マグニチュードが 7.9 であるのに対し、Mw は 9.0 であった。この地震では国内の広帯域地震計は父島・与那国島を除く全ての観測点で振り切れてしまい、自動 CMT 解析を行うことができなかった。このように広帯域地震計が振り切れてしまうような巨大な地震の場合でも早期に Mw を求めることが非常に重要な課題となった。

(独) 防災科学技術研究所の F-net には、全ての観測点で通常の広帯域地震計の他に速度型強震計が整備されている。この速度型強震計はカタログでは STS-2 地震計と同様の周波数特性となっており、東北地方太平洋沖地震でも振り切れることがなかった。この地震計のデータを用いて CMT 解析を行った結果、自動 CMT 解析でも Mw8.9 の結果が得られることがわかった。その結果を図 4 に示す。計算条件としては、地震断層の広がり方を考慮し解析に使用する観測点の震央距離を 500km~1600km とした。バンドパスフィルターの通過帯域は 83 秒~333 秒とした。

ただし、この地震計の長周期側のデータはふらつきが大きくノイズレベルが高い。そのためこの速度型強震計を用いて CMT 解析ができるのはシグナル

が十分に強い地震に限られる。東北地方太平洋沖地震の本震・余震を用いて調査した結果、M7 を超える規模の地震では通常の広帯域地震計を用いた場合より安定して CMT 解が得られることが解った。その結果を図 5 に示す。

この強震計を用いた自動 CMT 解析は、巨大な地震に対する Mw の推定として非常に有効であるので、2011 年 6 月から現業で運用することとした。

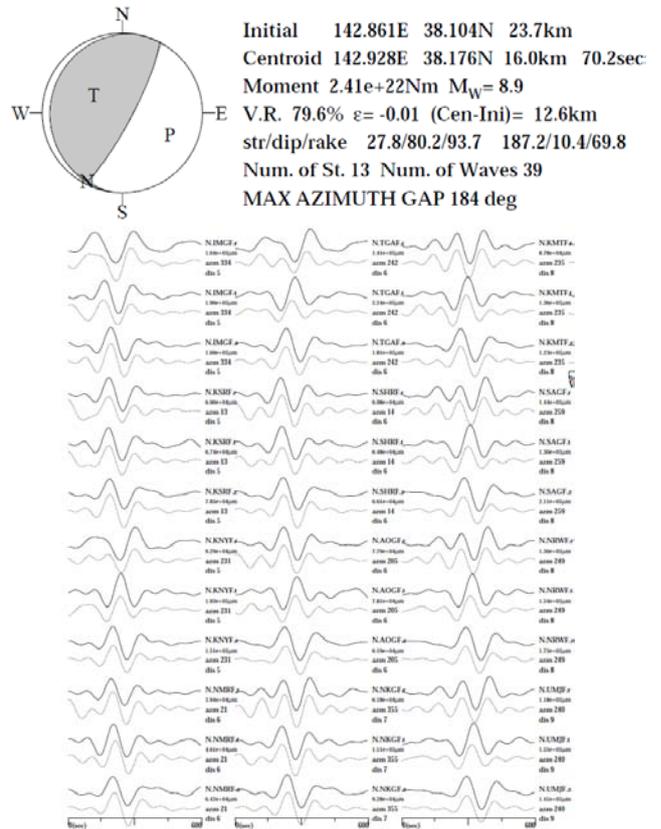


図 4 速度型強震計を用いた東北地方太平洋沖地震の CMT 解析結果

速度型強震計のデータを用いて、自動 CMT 解析と同じロジックで解析を行った。濃線は観測波形、薄線は理論波形。手動解析による Mw が 9.0 であるのに対し、自動で 8.9 の値が求まっている。また、メカニズム解も手動解析と同様である。精度評価は GOOD で解析精度は良い。

5 まとめ

気象庁でルーチン的に行う CMT 解析について、気象研究所の協力のもと大幅な改良を行った。これにより CMT 解析の決定精度（特に深さ精度）が向上するとともに、解析数も非常に多くなった。陸域から離れた海域での震源については、通常の震源決定よりもモーメントテンソル解析で求めた震源の方が深さの精度が良い。海域の地震活動を把握する際には CMT 解析で求めた震源も役に立つものと思われる。

自動 CMT 解析についても津波警報の更新を念頭に置いた改良を加えた。自動 CMT 解析は、規模の大きな地震ほど確実に解析ができることが重要であ

る。今回の手法では、CMT 解析の震源の初期値を緊急処理で求めた震源としている。また、セントロイド時刻差の初期値は地震規模から求める標準的な値となっている。地震規模に対してセントロイド時刻差が非常に長くなると予想される津波地震、震源とセントロイド震源との距離が非常に大きくなる（例えば 100km 以上）可能性がある巨大地震等については、今回の手法では解析結果が不安定になることが十分に予想できる。このような自動による解析が難しいであろう地震については、シミュレーション波形を用いて自動 CMT 解析の性能評価を行うなど、十分な点検を行うべきと考える。

イベント日時	緊急Mjma	強震CMT			現在の自動CMT			手動CMT	
		評価	Mw	CMT	評価	Mw	CMT	Mw	CMT
2011/3/9 11:45	7.2	参考	7.3(補正)		BAD (波形の合致度)	7.3		7.3	
2011/3/11 14:46	7.9	GOOD	8.9		失敗 (振り切れ)	—	—	9.0	
2011/3/11 15:08	7.0	失敗 (波形選別)	—	—	失敗 (波形選別)	—	—	7.4	
2011/3/11 15:15	7.4	GOOD	7.8		BAD (波形の合致度) (セントロイド時間)	7.7		7.7	
2011/3/11 15:25	7.2	失敗 (波形選別)	—	—	失敗 (波形選別)	—	—	7.5	
2011/4/7 23:32	7.4	GOOD	7.1		GOOD	7.1		7.1	
2011/4/11 17:16	7.1	参考	6.8		参考	6.7		6.7	
2011/7/10 9:57	7.1	GOOD	7.0		BAD (セントロイド位置)	6.9		7.0	

図 5 速度型強震計を用いた CMT 解析結果

速度型強震計のデータを用いて、自動 CMT 解析と同じロジックで解析を行った結果を「強震 CMT」、広帯域地震計 (STS-1・STS-2) を用いた自動 CMT を「現在の自動 CMT」、広帯域地震計 (STS-1・STS-2) を用いた手動解析を「手動 CMT」とした。

自動 CMT 解析の評価で BAD になったものは括弧内にその理由を記した。

波形選別：波形選別で使用するデータ数が基準に満たなかった

波形の合致度：波形の合致度が基準に満たなかった

セントロイド時間・位置：セントロイド時刻差やセントロイド距離が基準を超えた

## 謝辞

吉田康宏博士（文部科学省）には、CMT 解析に用いる地球モデルを改良して頂いた。今回の改良の本質はこの地球モデルの改良にある。

気象庁における CMT 解析については、（独）防災科学技術研究所の F-net のデータも使用している。

中村浩二氏（地震津波監視課）には、丁寧に査読して頂いた。また、複数の匿名の査読者によるコメントはとても有益であった。

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**, 169-184.

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.

Dzeiwonski, A.M. and D. L. Anderson (1981): Preliminary reference Earth model, Physics of the Earth and Planetary Int., **Vol25**, 297-356.

Gilbert, F. and A. M. Dziewonski (1975): An application of normal mode theory to the retrieval of structural parameters and source mechanisms from seismic spectra, Philos. Trans. R. Soc. London, Ser A, **278**, 187-269.

Kanamori, H. and J. W. Given (1981): Use of long-period surface waves for rapid determination of earthquake-source parameters, Physics of the Earth and Planetary Int., **27**, 8-31.

Utsu T. (1961): A statistical study on the occurrence of aftershocks, 気象庁欧文彙報, **30**, 523-605.

(編集担当 大竹和生・本間直樹)