

CMT 解析の自動処理とその高度化

Description of and Advances in Automatic CMT Inversion Analysis

碓井 勇二¹, 青木 重樹², 林元 直樹¹,

下山 利浩³, 野坂 大輔⁴, 吉田 知央³

Yuji USUI¹, Shigeki AOKI², Naoki HAYASHIMOTO¹,
Toshihiro SHIMOYAMA³, Daisuke NOZAKA⁴ and Tomohisa YOSHIDA³

(Received June 12, 2009; Accepted January 12, 2010)

ABSTRACT: The Japan Meteorological Agency (JMA) executes the automatic centroid moment tensor (CMT) inversion analysis immediately after the occurrence of an earthquake with M_j (JMA magnitude) of 5.0 or greater. Data from the JMA broadband seismograph network are used for this full-automatic process. Since July 2007, the results of these analyses are used in making official decisions regarding whether to raise or lower the level of a Tsunami Warning/Advisory or to cancel it in its early stages. This paper presents the method of the automatic CMT inversion analysis and its results, and discusses the application of data in lower-frequency for this analysis.

1 はじめに

気象庁では、1993年にSTS-2地震計（広帯域地震計）をFig. 1に示す全国20カ所に整備し、1994年から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]を試験的に開始した。その後は、地震予知情報課発震機構係のルーチン業務として手動による解析を継続し、1994年以降の解析結果は地震カタログとなっている。

CMT解析の自動処理については、全世界で発生した地震を対象としたものとしては、上述のCMTインバージョン法に基づくKawakatsu (1995)の手法などがある。また、ローカルな観測網を用いたものとして、関東地方を対象とした伊藤(1997)や、防災科学技術研究所のF-netを利用して日本国内で発生した地震を対象とした福山・他(1998), 松村・他(2006)の手法がある。また、Tsuruoka *et al.*(2009)は、モニタリング領域をグリッドに分割し、その全グリッド

上で常時MT解析を行うGRiD MTという手法を開発した。

気象庁においても、1999年から日本国内およびその周辺の地震を対象とした自動処理によるCMT解析のアルゴリズム開発に着手し、2001年から試験的に運用を開始した[青木・他(2001)]。2003年からは、地震予知情報課発震機構係・EPOS オフライン担当(2004)の手法により、地震発生時に震源決定等の緊急作業を行うシステム（以下、EPOSという。）に自動CMT解析の機能を搭載し、作業者にモーメントマグニチュード(M_w)を通知することとなった。さらに、2006年度には地震発生メカニズム推定システムが整備され、2007年7月から解析結果を津波警報・注意報のグレードアップ、グレードダウン、早期解除の判断に利用することとなった。

本稿では、2章で自動CMT解析のアルゴリズムについて述べる。このアルゴリズムの特徴は、CMT解析の結果が津波警報・注意報の切替の判断に利用さ

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

² 気象研究所地震火山研究部, Seismology and Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute

³ 地震火山部地震津波監視課, Earthquake and Tsunami Observations Division, Seismological and Volcanological Department

⁴ 地震火山部地震津波監視課精密地震観測室, Seismological Observatory, Earthquake and Tsunami Observations Division, Seismological and Volcanological Department

れることを前提としているため、得られた自動解が適切かどうかを自動的に判断するための評価手法に特に重点が置かれている点である。次に3章では、このアルゴリズムを利用した2007年7月から2008年8月までの自動解析の結果を評価し、その課題を検討する。さらに、4章では、海外観測点、防災科学技術研究所 F-net および気象庁観測点それぞれの STS-1 地震計のデータを用い、より長周期成分を使用して自動 CMT 解析をした場合の効果と解析結果について評価した。

なお、本稿では M5.0 未満の地震では CMT 解の決定精度が低いという中村・他(2003)の指摘に基づき、M5.0 以上の地震を対象としている。津波警報・注意報での利用として十分であると考えが、より小さなマグニチュードにも適用する場合は、より短周期のデータを利用した解析 [例えば、福山・他(1998)など] や自動初動解析 [例えば、中村(2002)] などを検討する必要があるであろう。



Fig. 1 Map of JMA STS-2 seismograph stations.

2 自動 CMT 解析のアルゴリズム

2.1 解析手法の標準化の必要性

気象庁の CMT 解析は、次の手順で解析が進められる。

- ① 波形データの取得
- ② フィルター処理等データセットの作成
- ③ 波形選別

④ インバージョン解析

⑤ 解析結果の評価

手動による CMT 解析は、少数の熟練した解析者により行なわれており、解析の中にあらわれる様々な任意性は、解析者それぞれの経験等からなる基準により解決されている。その中でも波形の選別および結果の評価の2点に関しては、任意性の中で特に大きく結果を左右する。そのため、自動で CMT 解析を行うためには、これら手法の標準化を行う必要がある。

2.2 では S/N 比に基づいた波形の選別手法を説明し、2.3 では本解析単独で解の評価を行うための数値基準について述べる。

2.2 解析使用波形の選別

解析に使用する波形の選別基準としては、

- ① 波形の S/N 比がよいものを使用する
- ② 震央からの距離が極端に離れた観測点の波形は使用しない

という2種類を組み合わせる。

まず、波形ごとの S/N 比を示す指標を導入する。各観測点について、それぞれの成分ごと（上下動、東西動、南北動）に CMT 解析対象地震の震源時の前後それぞれ10分間の速度波形を取得する。ここでは震源時前の10分間の波形をノイズ波形、震源時後の10分間の波形をシグナル波形と呼ぶこととする。シグナル波形、ノイズ波形それぞれにおいて、高速フーリエ変換をほどこし、大崎(1994)による手法で速度フーリエ振幅スペクトルを算出した後、積分を行い変位フーリエ振幅スペクトルに変換する。算出された周波数 f_i のシグナル波形、ノイズ波形の変位フーリエ振幅スペクトルそれぞれを $fft_{f_i}^{signal}$ 、 $fft_{f_i}^{noise}$ とする。その波形についての S/N 比を示す指標 SN を、

$$SN = \frac{\sum_{f_i=f_{low}}^{f_{high}} fft_{f_i}^{signal}}{\sum_{f_i=f_{low}}^{f_{high}} fft_{f_i}^{noise}} \quad (2-1)$$

と定義する。ただし、 f_{high} 、 f_{low} は、それぞれ CMT 解析使用周波数の上限と下限をあらわす。

Fig. 2-1 は、1999 年 10 月 3 日に三陸はるか沖で発生した $M_j5.7$ の地震の青森天間林観測点 (TENMAB) での上下動速度記録である。Fig. 2-2 は、この波形をノイズ波形とシグナル波形に分割して算出した変位フーリエ振幅スペクトルである。図中の灰色部は、われわれが CMT 解析に用いる周波数帯である $0.01\text{Hz}(f_{\text{low}}) - 0.022\text{Hz}(f_{\text{high}})$ を示している。この波形について(2-1)式に従い SN を算出すると 36.8 となる。

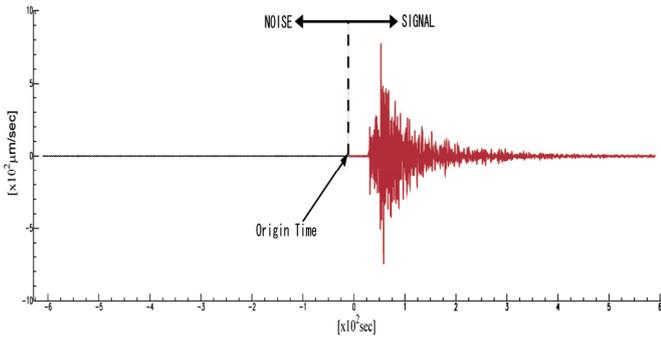


Fig. 2-1 Example of a seismic waveform observed at Aomori Tenmabayashi station (TENMAB).

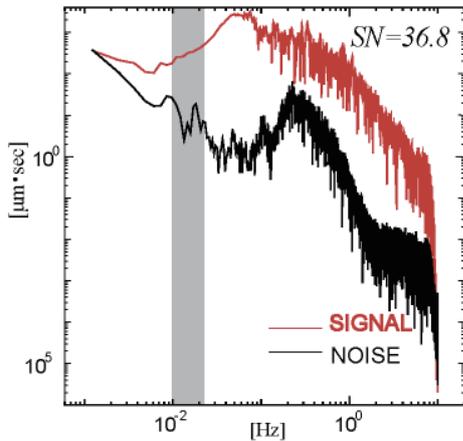


Fig. 2-2 Displacement Fourier amplitude spectrums of the signal and noise waveforms in Fig.2-1. The gray area indicates the frequency used for the CMT inversion analysis.

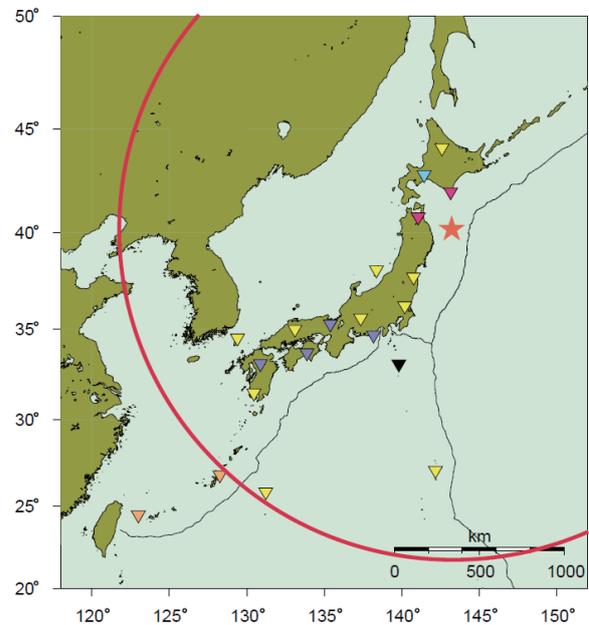
上下動成分に関しては、 SN がある値 α 以上となった場合に使用することとした。水平動成分に関しては、その観測点に属する水平 2 成分がともに α 以上となった場合に、radial 成分と transverse 成分に合成し、解析に使用することとした。ただし、 $M5.0$ 付近の規模が小さく S/N 比が悪い地震について、解析に

使用する観測点が少なくなりすぎることを防ぐために、震央距離に近い 3 点に関しては α よりも小さな値 β に置き換えて選別を行うこととした。ただし、

$$1.0 \leq \beta \leq \alpha \tag{2-2}$$

となるように設定した。

震央距離による波形選別については、震央距離が大きい観測点を解析に加えると結果に悪影響を与えるという経験に基づき、震央距離 2000km 以上の観測点は、 SN が高くても使用しないこととした。われわれは、この SN と各観測点までの震央距離によって、CMT 解析を行う波形を選択する。



- ★ epicenter
- ▼ stations whose epicentral distance are less than that of third nearest, 3 components data available
- ▲ station whose epicentral distance are less than that of third nearest, only vertical component data available
- ▼ stations, 3 components data available
- ▲ stations, only vertical component data available
- ▼ station not available due to small SN s
- ▲ stations not available due to large distances
- line indicating epicentral distance is 2000km

Fig. 3 Example of waveform selection for the far east off Sanriku earthquake on October 3, 1999.

Fig. 3 は、Fig. 2-1 と同一の地震に関して、波形の選別状況を示したものである。この図を作成する際の SN による選別基準 α , β は、後述する解析でわれ

われが実際に使用している 2.0, 1.2 を用いた. 図中の星印は震央を示し, 各観測点の表示色はそこでの波形の選別状況を示している. この地震の場合には, 17 観測点 29 成分を使用することとなった.

2.3 解の評価手法

CMT 解析は常に適切な解析結果が得られているとは限らないため, 津波警報・注意報の切替等の判断に使用するためには解析結果が適切かどうかの評価を行わなければならない. そのためには, 自動解析で得られる様々な要素を利用し定量的な基準を作成する必要がある.

CMT 解析は, 観測した地震波形と理論波形の残差を最小にするような震源の位置(セントロイド震源)とモーメントテンソル (MT) を求める手法である. そのため, 解析に使用した波形数, および波形の合致度 (バリアンスリダクション) は解の評価における重要な数値である. ある 1 つの波形の合致度は,

$$\left(1 - \frac{\int_0^T [o_i(t) - s_i(t)]^2 dt}{\int_0^T o_i(t)^2 dt} \right) \times 100 \quad (2-3)$$

と定義される. ただし, $o_i(t)$, $s_i(t)$ はそれぞれ, i 番目の観測波形, 理論波形, T は解析に用いる波形のデータ長である. 本稿では, 波形毎に求めた合致度を全波形に渡って平均したものを CMT 解析の波形の合致度としている.

青木・他(2001)は, 破壊開始点と考えられる初期震源とセントロイド震源の間の距離 (以下, セントロイド距離という.) が大きすぎる場合は解析精度が低いと考え, 波形の合致度とセントロイド距離の 2 つを指標として解の精度評価の検討を行った. その結果, 波形の合致度 15%以上, セントロイド距離

60km 以下を基準とした場合, 基準を満たすと判断された解 (以下, GOOD 解という. また, 基準を満たさない解を BAD 解という.) のうち 87%が他の手法や機関によって求められ公表されている解とのリゼンブランス (後述) が高く調和的な解 (以下, 適切な解という.) になっていることを示した.

青木・他(2001)のセントロイド距離の基準は, セントロイド震源に関する計算誤差を評価するための基準である. しかし, 一般的にマグニチュードが大きな地震ほど断層長は長くなるので, セントロイド距離の上限を一律 60km とするのは適切ではない. 1976 年から 2009 年 2 月までの Global CMT カタログのうち, セントロイド距離を固定せずに解析している 17537 個について M_w とセントロイド距離の関係を調べたところ M_w が 7.0 未満の 17283 個のセントロイド距離の平均は 36.6km, 7.0 以上 7.5 未満の 174 個は 35.3km, 7.5 以上 8.0 未満の 66 個は 52.8km, 8.0 以上の 14 個は 79.4km であった. この結果は, M_w が 7.5 を超えるあたりからセントロイド距離が誤差の範囲 (平均 35km 程度) を超え, 震源域の広がりにつれて大きくなる傾向があることを示している. Utsu(1961)による本震のマグニチュードと余震域の長径の関係式によれば, $M7.2$ の地震で余震域の長径が 60km となる. $M_w7.2$ 以上の地震についてはセントロイド距離の上限を, 求めた M_w に対する Utsu の式の長径で与えることにすれば, 大地震の際の震源域の広がりにも対応した基準となる. 例えば, 平成 6 年 (1994 年) 三陸はるか沖地震 (1994 年 12 月 28 日, $M_j7.6$) の手動 CMT 解析結果は $M_w7.8$ でセントロイド距離は 67.7km であった. この結果を一律 60km の基準で考えると BAD 解となるが, Utsu の式で上限を与えた場合は GOOD 解となる.

また, CMT 解析は, セントロイドが浅く, かつ極端に低角なメカニズム解の場合には, M_w を過大に

Table 1 List of the automatic CMT inversion analyses for earthquakes from October 2003 to April 2005 whose results show a difference of 0.3 or larger between the automatic and manual M_w . Gray cells indicate that the absolute value of $M_{r\theta}$ or $M_{r\phi}$ is five times larger than the maximum of the absolute values of the other four components.

	震源時	震央地名	Mj	Mw	自動 Mw	差	セントロイド深さ	dip 角	M_{rr}	$M_{\theta\theta}$	$M_{\phi\phi}$	$M_{r\theta}$	$M_{r\phi}$	$M_{\theta\phi}$	指数
1	2003/11/1 22:10	FAR E OFF FUKUSHIMA PREF	6.2	5.8	6.2	0.4	11km	4°	0.22	0.01	-0.23	1.02	1.89	-0.06	10 ⁻¹⁸ Nm
2	2003/12/3 23:11	SE OFF TOKACHI	5.6	5.8	6.2	0.4	13km	5°	0.35	-0.16	-0.19	1.23	2.40	-0.28	10 ⁻¹⁸ Nm
3	2003/12/29 10:30	SE OFF TOKACHI	6.0	6.1	6.4	0.3	13km	4°	0.55	-0.26	-0.28	2.38	4.43	-0.44	10 ⁻¹⁸ Nm
4	2004/7/21 9:11	E OFF AOMORI PREF	5.5	5.5	5.9	0.4	11km	2°	0.49	0.04	-0.52	3.30	7.51	-0.19	10 ⁻¹⁷ Nm
5	2004/9/1 11:49	E OFF FUKUSHIMA PREF	5.6	5.7	6.1	0.4	12km	3°	0.16	-0.01	-0.15	0.80	1.44	-0.07	10 ⁻¹⁸ Nm
6	2004/10/17 3:54	E OFF IBARAKI PREF	5.7	5.8	6.1	0.3	12km	4°	0.23	-0.03	-0.20	1.00	1.66	-0.14	10 ⁻¹⁸ Nm
7	2004/11/11 19:02	SE OFF TOKACHI	6.3	6.1	6.5	0.4	11km	3°	0.60	-0.36	-0.25	3.20	6.96	-0.47	10 ⁻¹⁸ Nm
8	2005/4/11 7:22	NEAR CHOSHI CITY	6.1	5.9	6.2	0.3	18km	6°	0.40	0.00	-0.40	-0.07	2.19	-0.10	10 ⁻¹⁸ Nm

評価してしまうおそれがある [例えば, 川勝(1991) など]. 2003 年 10 月から 2005 年 4 月までの緊急震源のマグニチュードが 5.5 を超える地震で, 地震予知情報課発震機構係・EPOS オフライン担当(2004) による自動 CMT 解析の結果が GOOD 解となった結果のうち, 自動による M_w が手動による M_w よりも 0.3 以上大きくなった地震のリストを Table1 に示す. Table1 ではいずれの地震も dip 角が小さく, 極端に低角なメカニズム解になっていることが確認できる. このような M_w の過大評価を避けるため, 「セントロイドの深さが 20km 以浅で, モーメントテンソルの 6 成分について, $M_{r\theta}, M_{r\phi}$ の少なくともどちらか一方の絶対値が, 他の 4 成分($M_{rr}, M_{\theta\theta}, M_{\phi\phi}, M_{\theta\phi}$)の絶対値のうち最大となるものの 5 倍以上の場合は BAD 解にする」という条件を導入することとした. Table1 の灰色の項目はこの基準に該当しており, M_w を過大評価した 8 例すべてを BAD 解と判定できることになる.

3 自動 CMT 解析結果の評価と今後の課題

3.1 気象庁における自動 CMT 解析の運用

気象庁では 2006 年度に地震発生メカニズム推定システムを整備し, 2007 年 7 月より運用を開始した. 本システムは, EPOS の緊急処理で決定された震源を初期震源として, EPOS から気象庁の STS-2 地震計の波形データを取得して CMT の自動解析を行う. 解析結果が出力されるまでの時間は, 地震発生後から概ね 15 分程度で, その内訳はデータ長確保のための待ち時間 10 分の他, 波形取得および解析に要する時間が 5 分程度である. 得られた解析結果は, 北西太平洋津波監視システム等に通知され, 既に発表されている津波警報・注意報のグレードアップ, グレードダウン, 早期解除の判断に利用される. 本章では, 2007 年 7 月 1 日から 2008 年 8 月 31 日の約 1 年間の自動 CMT 解析の結果を用いて, 現在の解析手法の評価を行い, 今後の課題について考察した.

3.2 自動解析の条件と解の評価基準

自動 CMT 解析処理は, EPOS の緊急処理において $M5.0$ 以上となった地震を対象とする. まず, 気象庁の STS-2 地震計の波形データを取得して, 2.2 で示した手法により, $\alpha=2.0$, $\beta=1.2$ のもとで波形選別を

行う. 解析に利用する波形数が 6 個未満であれば処理を中断し, それ以上であれば CMT 解析を実行する.

解析結果は解の評価を行った後, 一定基準を満たす解の解析結果 (CMT 解や M_w の値) が津波警報・注意報に反映されることとなる. 解の評価については, 2.3 で述べたように,

①波形の合致度が 30%以上である.

②セントロイド距離が 60km 以内である. 但し, $M_w7.2$ 以上の場合は Utsu(1961)の式による余震域の長径以内である.

③セントロイドの深さが 20km 以浅の場合は, 極端に低角なメカニズム解は利用しない. つまり, $M_{r\theta}, M_{r\phi}$ の絶対値が, 他の 4 成分($M_{rr}, M_{\theta\theta}, M_{\phi\phi}, M_{\theta\phi}$)の絶対値のうち最大となる値の 5 倍未満である. という 3 つの基準を利用し, これらすべてを満たすものを GOOD 解としている.

なお, 上記の具体的な数値は, 自動解と手動解を比較するなどして, 経験的に得られたものである.

3.3 自動 CMT 解析結果

2007 年 7 月 1 日から 2008 年 8 月 31 日までに, 緊急震源で $M5.0$ 以上と決定された地震は 105 個であった. そのうち自動 CMT 解析の結果が GOOD 解と判定された地震は 21 個 (20%), BAD 解と判定された地震は 84 個 (80%) である. なお, BAD 解の中には, 波形不足により解析を中断した 8 個の地震も含まれる. 105 個の地震のうち, 手動 CMT 解析の対象でもあった地震は 96 個あるが, 手動 CMT 解析では, そのうち 68 個 (71%) の地震について解が決定できており, 手動解析と比較すると自動解析の決定率は低い. 以下, 自動解析と手動解析の両方で解析対象となった 96 個の地震について自動解と手動解を比較し, 自動 CMT 解析の評価を行う.

3.4 自動 CMT 解と手動 CMT 解との比較

Fig. 4 は, 自動解析の結果と手動解析の結果を地図上で比較したものである. なお, 比較のためいずれの図も緊急震源を用いてプロットしているが, 実際には自動解析と手動解析では初期値となる震源は異なり, 手動解析は地域地震情報センターデータ処理システム (REDC) の一元化処理によって決定された暫定震源を初期震源としている. 手動解析結果

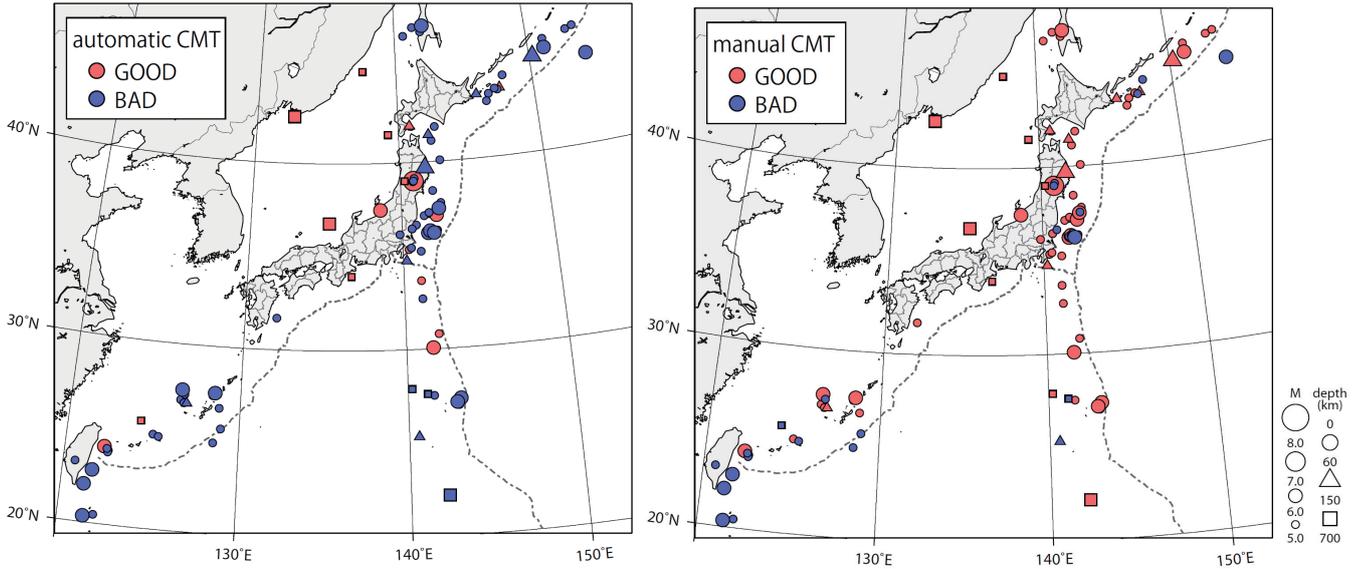


Fig. 4 Maps showing the results of the automatic (left) and manual (right) CMT inversion solutions, both executed by JMA. Red symbols indicate GOOD solutions, and blue symbols indicate BAD solutions.

では、島嶼部など震源決定精度の低い場所や、暫定震源が深く決まってしまう茨城沖のプレート間地震などを除けば、ほとんどのイベントで CMT 解が決定できている。対して、自動解析結果では、深発地震では GOOD 解が多く求まっているものの、それ以外では BAD 解と判定されてしまう地震が多い。

自動解の解析結果が正しいかどうかを判断するため、手動解析結果をリファレンスとして自動解析結果との比較を行った。CMT 解同士の比較は、Kuge and Kawakatsu (1993)によって提案されたリゼンブランス (Resemblance) という指標を用いて行うこととした。このリゼンブランスという値は P 波の放射パターンの相関係数であり、

と書き表される。ここで、 $M_{rr}, M_{\theta\theta}, M_{\phi\phi}, M_{r\theta}, M_{r\phi}, M_{\theta\phi}$ は各モーメントテンソル成分、 l, m は $l=0, 2$, $|m| \leq l$ を満たす整数、*印は複素共役を示す。また下付の $M1, M2$ は比較すべき 2 種の解のそれぞれを表す。リゼンブランスは -1.0 から 1.0 までの値を取り、放射パターンが両者で完全に同一な場合 1.0 となり、完全に反転している場合 -1.0 となるような指標である。

Fig. 5 はある比較元の解と比較した 4 個の解についてリゼンブランス値を表示した例であるが、これからもわかるようにリゼンブランスが大きいほど比較した 2 個の解は調和的であるということになる。

$$\begin{aligned}
 (\text{Resemblance}) &= \frac{\sum_{l,m} (A_{lm})_{M1}^* (A_{lm})_{M2}}{\left[\sum_{l,m} (A_{lm})_{M1} (A_{lm})_{M1}^* \right]^{1/2} \left[\sum_{l,m} (A_{lm})_{M2} (A_{lm})_{M2}^* \right]^{1/2}} \\
 A_{00} &= 2\sqrt{\pi} I \\
 A_{20} &= -\frac{2\sqrt{\pi}}{\sqrt{5}} C \\
 A_{2\pm 1} &= -\frac{2\sqrt{2\pi}}{\sqrt{15}} [\pm M_{r\theta} + iM_{r\phi}] & I &= (M_{rr} + M_{\theta\theta} + M_{\phi\phi})/3 \\
 A_{2\pm 2} &= \frac{2\sqrt{2\pi}}{\sqrt{15}} [D \pm iM_{\theta\phi}] & C &= (M_{\theta\theta} + M_{\phi\phi} - 2M_{rr})/3 \\
 & & D &= (M_{\theta\theta} - M_{\phi\phi})/2
 \end{aligned}
 \tag{3-1}$$

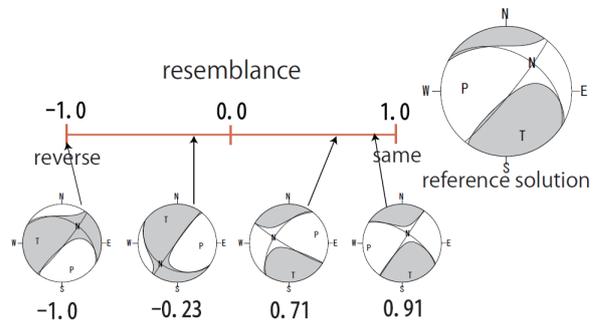


Fig. 5 Relations among CMT inversion solutions with different resemblances.

自動解が GOOD 解と判断された 21 個の地震のうち、手動 CMT 解が求まっているものは 19 個あり、うち 18 個についてリゼンブランスが 0.8 以上と高い相似性を示す結果となった。1 個については、リゼンブランスが 0.53 という値であったが、解を見る限りでは大きくかけ離れたものではない。なお、自動解が GOOD 解であるにもかかわらず、手動 CMT 解が決定できていなかった地震が 2 個存在する。1 つは茨城県沖の地震 (2008 年 5 月 9 日, $M_j5.0$) で、解析の初期値となる震源の深さが、自動解析では 7km であるのに対して手動解析では 71km と深くなっているために、信頼性のある解が決定できなかった地震である。USGS による震源の深さは 31km, Global CMT によるセントロイドの深さは 27.1km であることから、手動解析の初期値が深すぎるのがわかる。もう 1 つは宮古島北西沖の深発地震 (2007 年 12 月 5 日, $M_j5.1$) で、自動解析の SN による波形選別では利用波形数の条件を満たしていたが、手動解析では解析者により波形数が不足していると判断された地震であった。また、これら 2 つの地震の自動解と防災科学技術研究所が地震発生後にホームページに公開している F-net による MT 解 [福山・他(1998)] とを比較した結果、リゼンブランスは 0.86 および 0.78 であり、2 つの自動解の結果は妥当であったと考えられる。

次に、手動 CMT 解析の対象となった地震のうち、自動解析が BAD 解となったものについて検証する。自動解析が BAD 解となった 75 個のうち、26 個は手動解析においても解が求まらなかった。これらは茨城沖の地震 (2008 年 5 月 8 日の $M_j7.0$ が最大) と、岩手・宮城内陸地震 (2008 年 6 月 14 日, $M_j7.0$) 発生後に連続的に発生した余震や、沖縄・小笠原・千島などの島嶼部の地震である。残りの 49 個、すなわち手動解は登録されているものの自動解が BAD 解となった地震について、どの条件で BAD 解と判定されたかを地図上に示したものが Fig. 6 である。ここで複数の条件で BAD 解と判定された場合は、該当する理由 (3.2 の①~③) のうちより大きな丸数字を採用し、それに対応するシンボルで示した。条件③の極端に低角なメカニズム解で BAD 解となるものは、福島県沖から関東東方沖のやや海岸線から離れた場所に震央を持つ地震に多い。また、条件②のセントロイドが動きすぎることで BAD 解となる

解は、沖縄・小笠原・千島などの島嶼部に多くみられる。それぞれの地震について、波形の合致度と、自動解と手動解を比較したリゼンブランスの値を示したのが Fig. 7 である。条件①の波形の合致度の条件だけを満たさなかったために BAD 解となった解の中には、手動解とのリゼンブランスの値が 0.8 以上と相似性の高い解が多く含まれる。

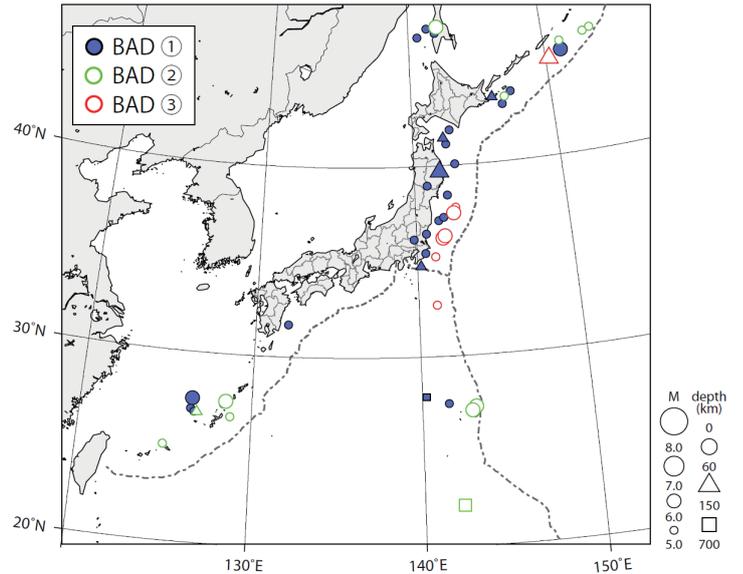


Fig. 6 Map showing the BAD solutions of the automatic CMT inversion analysis. The symbols are classified according to the reason why a solution was regarded as BAD. Blue indicates a BAD solution due to the low variance reduction (①); green indicates a BAD solution due to the great spatial distance between the centroid location and hypocenter (②); red indicates a BAD solution due to the low dip angle of the nodal plane (③).

最後に、CMT 解析におけるもうひとつの重要な情報である M_w について、自動解析と手動解析の比較を行った (Fig.8)。自動解析で GOOD 解と判断された地震は、手動解析の M_w とほぼ一致しているうえ、BAD 解と判断されたものをあわせても、自動解と手動解の M_w の差は約 9 割が ± 0.3 の中に含まれる。ただし、条件③のセントロイドが浅く、極端に低角なメカニズム解で BAD となる地震は、 M_w が平均して 0.3~0.4 ほど大きく見積もられている。

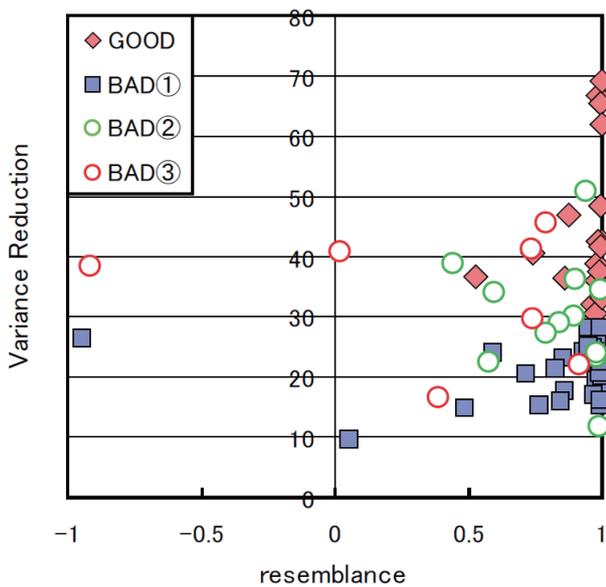


Fig. 7 Distribution of variance reductions against resemblances. The symbol colors indicate the same as in Fig. 6.

3.5 今後の課題

自動解析結果と手動解との比較を行い、自動解で GOOD 解と判断された解についてはすべての解が適切であることがわかった。自動解析の結果を津波警報・注意報の切替の判断に利用する上で、「嘘をつかない」ことは最も重要なことであり、本自動解析はこの条件を満たしているといえる。反面、GOOD 解として決定できた地震が全体の 2 割しかないこともまた事実である。波形の合致度の下限を下げることで適切な解を増やすことができるかもしれないが、不適切な解の混入は避けなければならない。また、それ以上に問題であるのが、津波警報・注意報に関わるであろう、海域の $M6$ クラスの地震の解が決定できていない点である。 $M6$ 以上の地震に限ってみても、自動解析が GOOD 解となる割合は 24 個中 7 個と、3 割程度である。また、Fig.6 からわかるように、特に条件③の極端に低角なメカニズム解になってしまう場合や、条件②のセントロイドが動きすぎることによって BAD 解になってしまう解が多く、それらを精度よく決定できるような工夫が必要であろう。

次により適切な評価を目指して、現在検討中の 2 項目を紹介することとする。

①セントロイドの時刻差について

手動による CMT 解析では、解析結果のうちセントロイド時刻から初期震源の震源時を引いた値（以

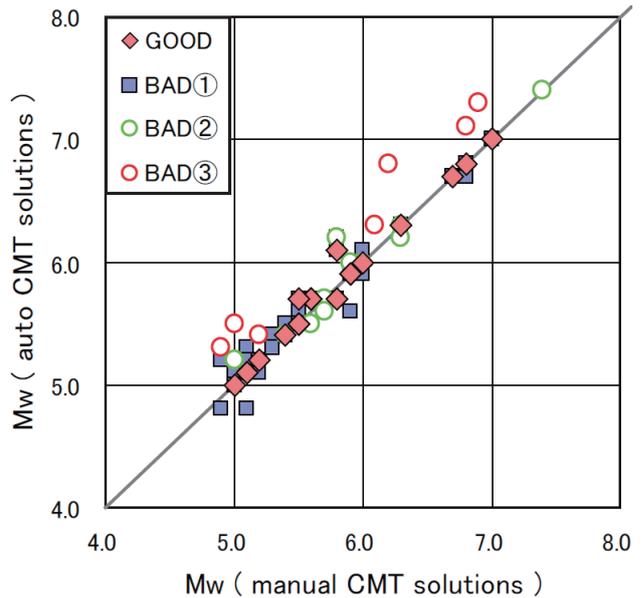


Fig. 8 Relation between the moment magnitude (M_w) of the automatic CMT inversion analysis and manual CMT inversion analysis. The symbol colors indicate the same as in Fig. 6.

下、セントロイド時刻差という.) が絶対値の大きな負になる場合 (例えば、-5 秒より小) は、計算誤差が大きく解の信頼度が低いという知見が経験的に得られている。この性質は自動 CMT 解析でも同様であろうと思われるので、今後適切な基準を調査し評価基準に加えるのが適切と考えている。

②非ダブルカップル成分について

CMT 解の非ダブルカップル成分は、そもそも通常の地震 (非ダブルカップル成分を持たない地震) とは異なる物理現象が起こっている場合のほか、仮定した構造モデルが実際と異なることによる誤差や異なるメカニズムをもった複数の地震がほぼ同時に発生することによっても現れる [川勝(1991)]。津波警報・注意報に自動 CMT 解を利用する場合は、得られたモーメントテンソルからベストダブルカップル解を導出し用いているが、以上のことを踏まえると、非ダブルカップル成分が大きい場合は、得られるベストダブルカップル解が津波を評価する上で適切でない場合もある。

津波警報・注意報の切替の判断に自動 CMT 解析の結果を使用する場合、逆断層型の地震を横ずれ断層型と誤って求めしまうような不適切な解を使うことは避けなければならない。一方、解の評価基準を

厳しくすると GOOD 解と判断される場合が極端に少なくなってしまう。解の評価基準については、自動 CMT 解析手法の高度化と併せて引き続き検討すべきものと考えている。

4 全世界観測網のより長周期成分を用いた自動 CMT 解析

4.1 全世界観測網のより長周期成分を用いる効果

ここまで STS-2 地震計を用いた CMT 解析について述べてきたが、解析に使用する周波数帯域 (45 秒 ~ 100 秒) や、国内観測点に限った観測網のため、次のような課題が明らかになっている。

- ① M8 クラスのより長周期成分が卓越してセントロイド時刻差が大きい地震の場合、メカニズム解の P 軸と T 軸が反転してしまうことがある。
- ② 日本付近で発生した M8 クラスの大地震では、地震計が振り切れてしまい解析に使用できない観測点が多い。
- ③ 観測網から離れた島嶼部等で発生する地震については、うまく解析できない場合が多い。

これらの課題を解決する手段として、本章では全世界に配置された STS-1 地震計の観測網 (以下、全世界観測網という) を使用して、より長周期成分を用いた解析について検討する。

STS-1 地震計は速度特性が周期 360 秒までフラットであり、M8 クラスのより長周期成分が卓越する地震にも対応可能である。また、全世界観測網のデ

ータは、IRIS-DMC や LISS (Live Internet Seismic Server) (Slad *et al.*, 1998) からインターネット経由でリアルタイムに受信することができる。日本付近で大きな地震が発生した場合でも、海外の観測点であれば振り切れる心配がなく、震源を囲むような観測網で解析することができる。Fig. 9 に EPOS に取り込まれている STS-1 地震計 (F-net を除く) の配置図を示す。これら気象庁観測点を含む全世界観測網と防災科学技術研究所 F-net の STS-1 地震計のデータを合わせて解析することにより、振り切れや観測点配置の課題を克服することができる。なお、IRIS-DMC や LISS の波形については 2005 年、F-net については 2002 年から EPOS に取り込まれるようになったため、これらを利用した自動 CMT 解析が可能となった。

Fig. 10 はある地震について、CMT 解析に使用した気象庁松代観測点 (MAJO) の STS-1 地震計と STS-2 地震計の波形である。黒い波形が観測波形、破線あるいは灰色の波形が理論波形である。解析に使用した帯域は、STS-1 地震計は 83 秒から 333 秒、STS-2 地震計は 45 秒から 100 秒である。STS-1 地震計のデータを用いた解析では、STS-2 地震計のデータを用いた解析よりも長周期成分まで使用しているため、山谷の数が少なくシグナルが明瞭になり、半波長ずらして波形を合わせてしまうために起こるメカニズム解の反転が起きにくい。また仮定した構造モデルと実際の構造の違いによる影響が小さいため、観測波形は理論波形とより良く合致している。

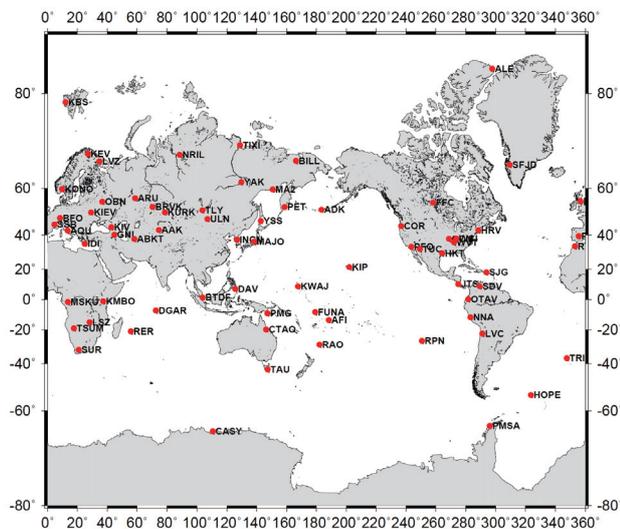


Fig. 9 Map of world STS-1 seismograph stations used for the global lower-frequency automatic CMT inversion analysis by JMA.

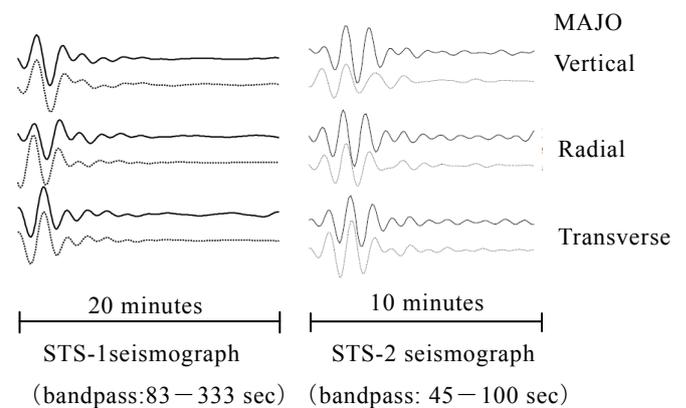


Fig. 10 Examples of seismograms at Matsushiro station (MAJO) recorded by STS-1 and STS-2 seismographs, respectively, used for the CMT inversion analyses.

全世界観測網のより長周期成分のデータを用いて CMT 解析 (以下, 世界長周期 CMT という.) をすることにより, 国内の STS-2 地震計を用いた場合 (以下, 国内 CMT という.) の課題を克服した 2 例を紹介する.

1 例目はメカニズム解の P 軸と T 軸の反転を防ぐことができた例である. 2007 年 1 月 13 日千島列島東方で発生した $M_j8.2$ の地震について, 自動 CMT 解と代表的な波形を Fig. 11 に示す. 国内 CMT では逆断層の解であるが, 世界長周期 CMT では正断層の解になっている. Global CMT 等の他機関の CMT 解も正断層であり, 世界長周期 CMT の解析結果の方が適切であることが分かる.

2 例目は震源を囲む観測網を用いることにより効果が現れた例である. 2007 年 10 月 25 日千島列島東方 $M_j6.2$ の地震について, F-net の STS-1 地震計のみを使用した場合と, それに松代 (MAJO), 韓国のインチョン (INCN), ロシアのペトロパブロフスク (PET) の 3 点を加えた場合の解析結果を比較した. 解析結果及び Global CMT の結果を Fig. 12 に示す. F-net だけの観測点では, 非ダブルカップル成分が大きくベストダブルカップルの解も Global CMT と異

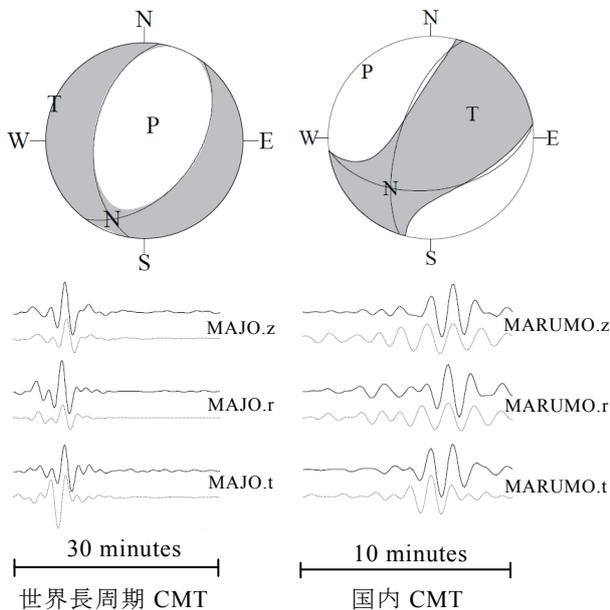


Fig. 11 Results of the global lower-frequency automatic CMT inversion analysis (left) and the regional automatic CMT inversion analysis (right) for the event near the Kuril Islands on January 13, 2007.

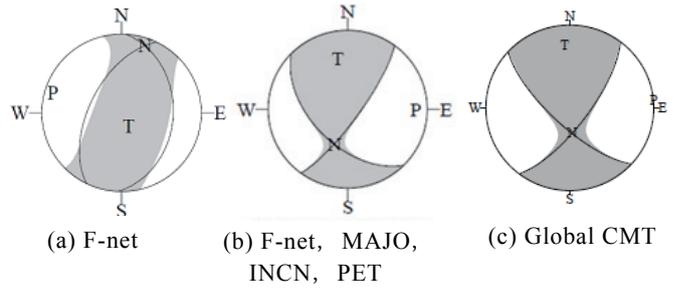


Fig. 12 Comparison between the CMT inversion solutions for the event near the Kuril Islands on October 25, 2007. (a) is analyzed using the F-net STS-1 network only, (b) is analyzed using the F-net STS-1 network and three LISS stations near Japan and (c) is a solution for the same event in the Global CMT catalogue.

なっている. 一方, 3 観測点を追加した場合の解は, Global CMT と同様の横ずれ断層型になっている.

4.2 全世界観測網のより長周期成分を用いた自動 CMT 解析の手法

世界長周期 CMT の解析に用いた波形選別と観測点選別の手法は, 基本的に 2.2 で紹介した手順で行った. 全世界のデータを利用する際には震央距離が大きくなるため地震のシグナルが到着するまでに時間を要する. 一方, 地震発生からできるだけ早期に解析結果が得られることも重要であり, 本調査ではシグナル波形のデータ長は 20 分間と 30 分間の 2 通りの場合で解析した. S/N 比を示す指標 SN は(2-1)式で求めたが, ノイズ波形はともに 10 分間とした. 解析に使用する SN の選別基準は, 20 分間データの解析では $\alpha=\beta=5.0$, 30 分間データの解析では $\alpha=\beta=10.0$ とした. また, 波形選別の対象は, 20 分間データの解析では震央距離 6000km 以内, 30 分間データの解析では 10000km 以内の観測点とした. 解析に使用した周波数帯域は, STS-1 地震計の速度周波数特性が平坦な 83 秒~333 秒とした.

4.3 全世界観測網のより長周期成分を用いた自動 CMT 解析の解析結果

4.2 で紹介した手法の有効性を検討するため, USGS による震源で $M6.0$ 以上かつ深さが 50km 以内の世界で発生した地震を対象として自動 CMT 解析を実施した. 調査期間は 2007 年 11 月 16 日から 2008 年 5 月 31 日で, 対象となる地震数は 66 個であった.

4.2 の手順で波形選別と観測点選別を行い、3.2 の手順同様、基準を満たす波形が 6 波形以上であった場合は解析を実行するとした結果、20 分間データの解析では 45 個、30 分間データの解析では 65 個解析することができた。これは 30 分間のデータがあれば、世界中どこで発生した地震でも解析のためのデータがほぼ揃うことを示している。日本周辺など観測点が多数あるような地域ではさらに短いデータ長でも解析が可能であると思われる。

本調査では、自動 CMT 解と Global CMT 解 (Quick CMT) を比較し、リゼンブランス 0.7 以上かつ M_w の差が ± 0.3 以下を基準として、これを満たす解を適切な解、満たさない解を不適切な解とした。その結果、Table 2 に示すとおり 30 分間データの解析で、約 7 割が適切な解であった。また、 M_w だけに注目した場合、20 分間データで 93%、30 分間データの場合 98%が ± 0.3 以下であった。

Table 4 は、これら解析結果のうち 30 分間データの解析結果一覧である。GCMT は Global CMT によるメカニズム解、世界長周期 CMT は本調査によるメカニズム解を示す。解析結果欄の各項目のうち背景が灰色の項目は 4.4 で示す GOOD 解の基準を満たさなかった項目を示す。また、評価欄のリゼンブランスの項目には Global CMT と世界長周期 CMT のメカニズム解のリゼンブランス値、良否の項目には適切な解に○、不適切な解に×を示した。基準 1、基準 2 の項目には 4.4 に示す基準で判断した結果を示し、そのうち GOOD 解の信頼度を下げることになる、GOOD 解と判断されたが実は不適切な解であるものは、その項目の背景を灰色にした。

Table 2 Number and ratio of proper and improper CMT inversion solutions in comparison with the Global CMT solutions. Criteria for proper solutions require (1) resemblances of 0.7 or greater and (2) differences in magnitudes of smaller than ± 0.3 .

	適切な解	不適切な解
20 分間データ	28 個 (62%)	17 個 (38%)
30 分間データ	43 個 (66%)	22 個 (34%)

4.4 全世界観測網のより長周期成分を用いた自動 CMT 解析の評価

自動 CMT の解析結果のすべてが必ずしも適切な解ではないため、津波警報・注意報へ利用するためには、適切な解であるかどうか判断を下さなければならない。世界長周期 CMT では以下の 2 つの基準を作成した。

基準 1 は、

- ・波形の合致度 30%以上
- ・解析に利用した波形数 10 波形以上

の 2 条件のみとした。この基準 1 では、解析を行った 65 個中、GOOD 解と判定されるイベントは 44 個、その中には不適切な解が 11 個含まれており、GOOD 解の信頼度は 75%であった。

基準 2 は、基準 1 に非ダブルカップル成分とセントロイド時刻差も判断基準に加え以下の通りとした。

- ・波形の合致度 30%以上
- ・解析に利用した波形数 10 波形以上
- ・ ε の絶対値が 0.25 未満
- ・セントロイド時刻差が -5.0 秒より大きい

ここで、 ε は非ダブルカップル成分の大きさを、

$$\varepsilon = -\frac{\lambda_2}{\max(|\lambda_1|, |\lambda_3|)}, \quad (4-1)$$

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3,$$

と書き表せる。なお、 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ はモーメントテンソルの固有値である。

基準 2 では、解析を行った 65 個中、GOOD 解と判定されるイベントは 33 個、そのうち不適切な解が 4 個含まれており GOOD 解の信頼度は 88%であった。Table 3 に基準 1 と基準 2 それぞれで GOOD 解と判定されるイベント数とその信頼度を示す。

Table 3 Number of GOOD solutions and their reliability based on criteria (1) and (2). Criteria (1) require (i) the variance reduction of observed and estimated waveforms to be 30% or greater and (ii) 10 or more waveforms to be used. Criteria (2) require the conditions (i) and (ii) of criteria (1), as well as (iii) the absolute value of ε to be smaller than 0.25 and (iv) the differences in centroid times to be larger than -5.0s.

	基準 1	基準 2
GOOD 解と判定される数	44 個	33 個
GOOD 解の信頼度	75%	88%

4.5 今後の課題

本調査では解析の初期値に USGS の震源を用いた。この手法をリアルタイムの自動処理とするためには、初期値として USGS と同程度の品質の震源データが必要となる。震源データを早い段階で取得することができれば、30 分間のデータを使用した場合でも、地震発生から約 35 分程度で解析結果が得られる。これは全世界の地震を対象として CMT 解析を行っている他の機関と比較しても、相当早い段階での解析結果であるが、今後の業務化に向けては、さらに信頼度を高めるための検討が必要となるであろう。

また、日本の周辺で発生した地震に対しては、より短時間で信頼度の高い CMT 解を求めることが重要である。国内には広帯域地震計が多数整備されているので、30 分も待たずに長周期の CMT 解析を行うことが可能であると思われる。今後はこの点に着目した技術開発を進める必要がある。

5 まとめと今後の展望

自動 CMT 解析の結果は津波警報・注意報のグレードアップ、グレードダウン、早期解除の判断のために非常に重要な情報であり、全ての地震について精度の良い自動 CMT 解を求められることが理想である。そのためには、今後も引き続き解析結果の評価と課題抽出を行うと共に、解析手法の改善にも努める必要がある。

また、近年 Kanamori and Rivera(2008)により W Phase と呼ばれる長周期地震波形を用いてより短時間にメカニズム解と M_w を評価する解析手法が開発されている。今後もより早く、より正確な解析ができるように、新たな解析手法の開発や技術移転も重要である。

6 謝辞

気象庁で行われている CMT 解析は、Kawakatsu(1989)に基づいている。自動 CMT 解析は、これまでの CMT 解析業務を担当してこられた地震予知情報課の歴代発震機構係各氏の技術開発の積み重ねで成り立っている技術である。特に、気象研究所の吉田康宏主任研究官からは、CMT 解析の自動化にあたり様々なご指導を頂くとともに、本稿につい

ても丁寧に査読して頂いた。世界長周期 CMT 解析については、気象庁観測点の他、独立行政法人 防災科学技術研究所 F-net、IRIS-DMC および LISS から取得したデータを使用させて頂いた。地震火山部地震予知情報課の迫田浩司氏、地球環境・海洋部海洋気象課海洋気象情報室の五十嵐陽子氏からは、本稿作成に際し貴重な意見を頂いた。また、匿名の査読者による意見は本稿の改善に大きく役立った。ここに記して感謝する。

文 献

- 青木重樹・中村浩二・吉田康宏・上垣内修(2001): 気象庁における CMT 解析一手法と今後一, 地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会予稿集, Sy-P001.
- 伊藤渉(1997): 近地震の CMT 解自動決定, 東京大学大学院理学研究科修士論文, 66pp.
- 大崎順彦(1994): 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 299pp.
- 川勝均(1991): 地震の大きさと多様性—Moment tensor inversion を中心として—, 地震 第 2 輯, 44, 265-277.
- 地震予知情報課発震機構係・EPOS オフライン担当 (2004): EPOS3 におけるモーメントマグニチュード (M_w) の算出, 験震時報, 68, 77-80.
- 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.
- 中村雅基(2002): P 波初動極性を用いた発震機構解の自動決定処理, 気象研究所研究報告, 52, 81-94.
- 福山英一・石田瑞穂・Douglas S. Dreger・川井啓廉 (1998): オンライン広帯域地震データを用いた完全自動メカニズム決定, 地震 第 2 輯, 51, 149-156.
- 松村稔・伊藤喜宏・木村尚紀・小原一成・関口渉次・堀貞喜・笠原敬司(2006): 高精度即時震源パラメータ解析システム(AQUA)の開発, 地震 第 2 輯, 59, 167-184.
- 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.
- Kanamori, H and L. Rivera(2008): Source inversion of W phase: speeding up seismic tsunami warning, *Geophys. J. Int.*, 175, 222-238.

- Kawakatsu, H.(1989) : Centroid single force inversion of seismic waves generated by Landslides, *J. Geophys. Res.*, *94*, 12363-12374.
- Kawakatsu, H.(1995) : Automated near-realtime CMT inversion, *Geophys. Res. Lett.*, *22*, 2569-2572.
- 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.
- Slad, G. W., R. L. Woodward, and C. R. Hutt(1998) : Live Internet Seismic Server: open distribution of near-real-time data via the internet, *EOS Trans. AGU*, *79*, 569.
- Tsuruoka, H., H. Kawakatsu and T. Urabe(2009) : GRiD MT (grid-based real-time determination of moment tensors) monitoring the long-period seismic wavefield, *Phys. Earth Planet. Inter.*, *175*, 8-16.
- Utsu, T. (1961) : A statistical study on the occurrence of aftershocks, *気象庁欧文彙報*, *30*, 523-605.

CMT 解析の自動処理とその高度化

Table 4 List of the global lower-frequency automatic CMT inversion analyses (30 minutes) for earthquakes from November 16, 2007 to May 31, 2008.

イベント						解析結果										評価		
年	月	日	時	分	震央地名	Mw	GCMT	世界長周期CMT	Mw	合致度	セントロイド距離	波形数	ϵ	セントロイド時刻差	リセンプランス	良否	基準1	基準2
2007	11	16	0	6	NEAR COAST OF N CHILE	6.8			6.8	42	35	14	0.07	16.5	0.97	○	GOOD	GOOD
2007	11	20	21	52	SOLOMON ISLANDS	6.0			6.0	48	46	10	-0.06	1.6	0.99	○	GOOD	GOOD
2007	11	26	1	2	SUMBAWA, INDONESIA	6.5			6.5	58	28	22	-0.09	20.7	0.99	○	GOOD	GOOD
2007	11	26	4	53	SUMBAWA, INDONESIA	6.5			6.6	70	43	12	0.09	12.3	0.87	○	GOOD	GOOD
2007	11	27	20	50	SOLOMON ISLANDS	6.6			6.6	46	12	20	-0.18	5.1	0.92	○	GOOD	GOOD
2007	11	29	12	26	WEST CHILE RISE	6.3			6.6	15	46	15	-0.03	21.7	0.04	×	BAD	BAD
2007	12	14	0	51	SAMOA REGION	6.1			6.2	60	71	15	0.36	12.6	0.96	○	GOOD	BAD
2007	12	15	18	39	TANIMBAR IS., INDONESIA	6.4			6.4	39	51	15	-0.1	8.5	0.94	○	GOOD	GOOD
2007	12	16	17	9	NEAR COAST OF N CHILE	6.7			6.5	27	38	15	0.12	20.9	0.98	○	BAD	BAD
2007	12	19	18	30	ANDREANOF IS., ALEUTIAN	7.1			7.1	50	84	71	-0.05	9.9	0.91	○	GOOD	GOOD
2007	12	20	16	55	OFF N ISL. E COAST, N.Z.	6.6			6.7	41	63	14	0.14	8.8	0.87	○	GOOD	GOOD
2007	12	21	16	24	ANDREANOF IS., ALEUTIAN	6.2			6.2	35	52	29	0.02	6.0	0.40	×	GOOD	GOOD
2007	12	27	7	5	FOX ISLANDS, ALEUTIAN IS.	6.4			6.3	54	76	31	0.25	11.7	0.32	×	GOOD	BAD
2008	1	2	3	54	E NEW GUINEA REG., P.N.G.	6.3			6.3	64	222	18	0.00	12.1	0.96	○	GOOD	GOOD
2008	1	5	20	1	QUEEN CHARLOTTE ISLANDS	6.6			6.5	37	43	46	0.32	18.2	0.94	○	GOOD	BAD
2008	1	5	20	45	QUEEN CHARLOTTE ISLANDS	6.4			6.4	46	58	22	0.12	-5.5	0.98	○	GOOD	BAD
2008	1	9	17	26	XIJANG	6.4			6.4	46	35	30	-0.12	8.2	0.90	○	GOOD	GOOD
2008	1	9	23	40	QUEEN CHARLOTTE ISLANDS	6.0			6.2	28	30	22	-0.07	14.9	0.09	×	BAD	BAD
2008	1	10	10	37	OFF COAST OF OREGON	6.3			6.2	40	37	32	-0.10	37.0	0.88	○	GOOD	GOOD
2008	1	22	16	55	TONGA	6.0		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008	1	22	19	49	TONGA	6.1			6.3	33	62	8	-0.34	10.4	0.66	×	BAD	BAD

CMT 解析の自動処理とその高度化

2008	1	23	2	14	N SUMATERA, INDONESIA	6.1			6.2	20	105	13	-0.02	10.7	0.96	○	BAD	BAD
2008	1	30	16	32	BANDA SEA	6.1			6.1	39	44	16	-0.03	-10.3	0.36	×	GOOD	BAD
2008	2	5	2	1	NEAR COAST OF N CHILE	6.3			6.3	20	38	17	-0.10	5.1	0.97	○	BAD	BAD
2008	2	8	18	38	NOR. MID-ATLANTIC RIDGE	6.9			6.8	-2	21	66	-0.02	3.2	0.93	○	BAD	BAD
2008	2	10	3	33	SOUTHERN MOLUCCA SEA	6.0			5.9	49	78	14	-0.13	-0.5	0.79	○	GOOD	GOOD
2008	2	10	21	22	SOUTH SANDWICH ISLANDS	6.5			6.6	48	47	19	0.16	4.2	0.95	○	GOOD	GOOD
2008	2	14	4	58	TIMOR SEA	6.2			6.5	50	46	11	0.15	-5.5	0.42	×	GOOD	BAD
2008	2	14	19	9	SOUTHERN GREECE	6.9			6.6	43	55	58	0.03	6.8	0.97	○	GOOD	GOOD
2008	2	20	17	8	OFF N SUMATERA W COAST	7.4			7.5	34	52	35	0.01	19.0	1.00	○	GOOD	GOOD
2008	2	21	3	27	SOUTHERN GREECE	6.2			6.2	13	30	20	0.13	4.3	0.60	×	BAD	BAD
2008	2	21	11	46	SVALBARD REGION	6.1			6.2	45	48	18	0.02	9.5	0.50	×	GOOD	GOOD
2008	2	24	0	57	SOUTH SANDWICH ISLANDS	6.7			6.8	60	47	22	0.28	8.6	0.97	○	GOOD	BAD
2008	2	24	23	46	SUMATERA, INDONESIA	6.4			6.1	28	103	10	0.41	-2.6	-0.09	×	BAD	BAD
2008	2	25	17	36	S SUMATERA, INDONESIA	6.9			7.2	39	88	57	0.01	12.6	0.88	○	GOOD	GOOD
2008	2	26	3	6	S SUMATERA, INDONESIA	6.4			6.5	22	128	26	0.00	4.8	0.96	○	BAD	BAD
2008	2	26	6	2	S SUMATERA, INDONESIA	6.5			6.5	29	146	31	-0.06	-1.3	0.98	○	BAD	BAD
2008	2	27	15	54	BONIN ISLANDS REGION	6.2			6.3	38	66	26	0.06	5.4	0.22	×	GOOD	GOOD
2008	3	3	11	37	S SUMATERA, INDONESIA	6.1			6.0	29	30	18	0.00	9.3	0.64	×	BAD	BAD
2008	3	3	18	31	KURILE ISLANDS	6.5			6.6	51	30	51	-0.03	6.0	0.99	○	GOOD	GOOD
2008	3	3	23	11	PHILIPPINE ISLANDS REG.	6.8			6.9	58	45	44	0.17	8.3	0.75	○	GOOD	GOOD
2008	3	12	20	23	VANUATU (NEW HEBRIDES)	6.4			6.5	34	42	15	0.11	12.8	0.93	○	GOOD	GOOD
2008	3	15	7	32	BONIN ISLANDS REGION	6.0			6.1	42	189	15	0.32	30.1	0.25	×	GOOD	BAD

CMT 解析の自動処理とその高度化

2008	3	15	23	43	OFF N SUMATERA W COAST	6.0			6.0	42	92	17	0.14	14.1	0.71	○	GOOD	GOOD
2008	3	18	17	22	KERMADEC ISL., N.Z.L.	6.2			6.3	42	77	8	-0.02	-0.4	0.45	×	BAD	BAD
2008	3	20	23	10	MINDANAO, PHILIPPINES	6.0			6.0	23	53	13	-0.22	11.8	0.95	○	BAD	BAD
2008	3	21	7	33	S XINJIANG PROV., CHINA	7.1			7.2	48	35	77	-0.20	13.3	0.78	○	GOOD	GOOD
2008	3	30	2	30	OFF N SUMATERA W COAST	6.3			6.2	33	120	17	-0.10	14.8	0.96	○	GOOD	GOOD
2008	4	9	21	46	LOYALTY ISLANDS	7.3			7.2	27	87	31	0.11	17.7	0.99	○	BAD	BAD
2008	4	12	9	30	MACQUARIE ISLAND REGION	7.1			7.0	9	67	16	0.33	21.4	0.71	○	BAD	BAD
2008	4	16	7	59	ANDREANOF IS., ALEUTIAN	6.4			6.4	32	58	54	-0.03	3.6	0.74	○	GOOD	GOOD
2008	4	16	9	35	TONGA	6.2			6.6	36	35	10	-0.13	16.0	0.34	×	GOOD	GOOD
2008	4	16	14	54	ANDREANOF IS., ALEUTIAN	6.6			6.6	48	51	53	-0.25	6.1	0.67	×	GOOD	BAD
2008	4	19	12	12	BANDA SEA	6.1			6.0	39	71	8	-0.14	3.2	0.66	×	BAD	BAD
2008	4	19	14	58	LOYALTY ISLANDS	6.2			6.3	38	71	10	-0.17	15.6	0.78	○	GOOD	GOOD
2008	4	19	19	21	BANDA SEA	5.9			5.9	35	62	6	-0.25	-0.2	-0.14	×	BAD	BAD
2008	4	24	21	14	CEN. MID-ATLANTIC RIDGE	6.4			6.3	27	51	29	0.25	2.3	0.41	×	BAD	BAD
2008	4	29	3	33	VANUATU (NEW HEBRIDES)	6.4			6.4	62	48	10	0.24	19.6	0.90	○	GOOD	GOOD
2008	5	12	15	28	SICHUAN, CHINA	7.9			7.6	30	95	86	0.08	28.3	0.73	○	GOOD	GOOD
2008	5	19	23	26	N SUMATERA, INDONESIA	6.0			6.1	27	98	20	0.08	-3.8	0.67	×	BAD	BAD
2008	5	20	22	53	RAT ISLANDS, ALEUTIAN IS.	6.3			6.3	50	67	36	0.01	5.9	0.98	○	GOOD	GOOD
2008	5	24	4	35	CEN. MID-ATLANTIC RIDGE	6.5			6.4	-59	56	45	0.09	0.9	0.98	○	BAD	BAD
2008	5	25	17	21	SICHUAN, CHINA	6.0			6.1	48	18	26	-0.17	9.2	0.75	○	GOOD	GOOD
2008	5	26	4	18	SOUTH OF ALASKA	6.0			5.7	31	73	19	0.26	13.7	0.52	×	GOOD	BAD
2008	5	30	0	46	ICELAND	6.3			6.4	41	16	66	0.34	6.1	0.39	×	GOOD	BAD
2008	5	31	13	37	MID-INDIAN RIDGE	6.4			6.5	60	27	16	-0.28	10.8	0.80	○	GOOD	BAD