

気象庁における国内広帯域地震計を用いた自動 W phase 解析

Automatic W Phase Inversion Analysis Using Broadband Seismometer in JMA

碓井勇二¹, 山内崇彦²

Yuji USUI¹ and Takahiko YAMAUCHI²

(Received May 16, 2012; Accepted April 24, 2013)

1 はじめに

規模の大きな地震の地震波には、P 波と S 波の間に長周期(典型的には周期 200 秒~1000 秒)の波が見られる。この長周期の波は Kanamori (1993) により発見され、W phase と呼ばれている。また、Kanamori and Rivera (2008a) はグローバルな観測網で観測された W phase を用いて地震のモーメントテンソル解析を行う手法(以下、W phase 解析という。)を開発し、Global CMT と同程度の精度で解析が行えることを示した。

W phase 解析は主に P 波から S 波までのデータを用いて解析を行うため、次のような利点がある。

- ①解析に用いるデータ長が短いため、CMT 解析よりも早期に結果が得られる。
- ②主に S 波までのデータを用いるため、データが振り切れることが少ない。

さらに、Kanamori and Rivera (2008b) や Rivera et al. (2010) は近地地震に対してもこの解析手法を適用し、解析に用いるデータ長、周波数帯域について検討した。その結果、日本国内の広帯域地震観測網を用いることで、日本周辺で発生した M6.0 以上の地震について W phase 解析ができることを示した。

今回、金森博士らの好意により最新の W phase 解析プログラムを提供いただき、近地地震を対象とした W phase 解析の自動処理を動作させることができた。その結果、これまでは自動 CMT 解析によるモーメントマグニチュード (Mw) 推定に 15 分程度要していた(碓井・他、投稿中)ところが、約 6 分で Mw の推定が可能となった。この解析結果は 2011 年

12 月から気象庁での津波警報発表のための緊急作業に利用されることとなった。本稿ではその手法および結果を紹介する。

2 自動 W phase 解析の手法

自動 W phase 解析は津波警報・注意報の更新の判断に利用することを第 1 の目標とした。そのため、Mw の精度を確保しつつ、解析に要する時間を出来る限り短縮するように工夫した。また、緊急作業の際に解析精度を瞬時に判断できるよう、3 階級の精度評価を導入した。解析に使用する観測点の選別および波形データに適用するバンドパスフィルターについては、近地地震に対して W phase 解析を適用した Rivera et al. (2010) の手法に倣うこととした。これらについて、以下に紹介する。

自動処理としての解析は「起動」「波形取得」「データ変換と 1 回目波形選別」「解析準備」「初期解析」「グリッドサーチ」「精度評価」の手順で行う。

なお、本稿ではオフラインシステム上で運用している現行の解析手順を述べるが、安定して動作させるためには地震活動等総合監視システム (EPOS) で動作させることが必要で、その場合システムに最適化した調整をすることになるであろう。

①起動

緊急作業で発信した震源報を契機として、自動 W phase 解析処理を起動する。解析対象とする地震はマグニチュード 6.0 以上に設定した。

②波形取得

解析には、(独)防災科学技術研究所 F-net の広帯

¹ 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

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

域地震計 (STS-1, STS-2) データを利用した. Rivera et al. (2010) は, 震源時から 6 分後までのデータを用いて近地地震の W phase 解析を行ったが, 自動 W phase 解析ではさらに時間短縮するため, 5 分 30 秒間のデータを用いて行うこととした. これは, 「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) について, 精度良く M_w を求めることができる範囲で最短の時間を調整した結果である. これ以上時間を短縮するとセントロイド震源の不安定, M_w の過小評価等のため精度の良い解析結果を得ることが出来なかった. ただし, 規模が小さい地震ならば, 卓越する周期が短くなるため, さらにデータ長を短縮しても精度のよい解が得られることも確認できた. 今後は地震規模に合わせたデータ長の変更も課題のひとつであろう.

波形データの取得は, データ収録までの遅延時間を考慮し, 地震発生後の 5 分 40 秒後に win フォーマットの波形データを取得する. 対象とする観測点は震央距離 $5^\circ \sim 10.5^\circ$ の観測点とし, 3 成分 (南北動, 東西動, 上下動) を用いることとした.

③ データ変換と 1 回目波形選別

win フォーマット (卜部, 1994) の波形データを SAC フォーマット (Goldstein and Snoke (2005), Goldstein et al. (2003)) に変換し, サンプリング間隔を 1 秒に変換する. このときデータの欠落, 振り切れがあるチャンネルは解析には利用しない.

④ 解析準備

震源の初期値は緊急作業で決定した震源とし, 波形データに適用するバンドパスフィルターの通過帯域は, 緊急作業で決定したマグニチュードを基に以下の通りとする.

バンドパスフィルター

M7.0 未満: 100~300 秒

M7.0 以上 M7.5 未満: 200~600 秒

M7.5 以上: 200~1000 秒

W phase 解析では理論波形の作成に用いる震源時間関数に, 図 1 のような time shift と half duration で規定される二等辺三角形を用いる. このとき, 三角形の頂点の位置がセントロイド時刻となる. 今回は time shift および half duration を同じ値とし (以後, セントロイド時刻差という.), 緊急作業で決定したマグニチュードを基に以下の通りとする.

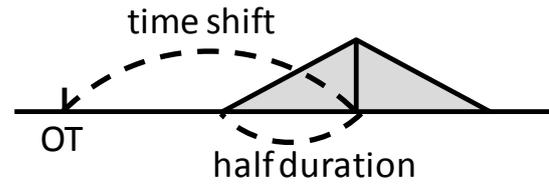


図 1 W phase 解析で用いる震源時間関数

セントロイド時刻差の初期値

M7.0 未満: 8.0 秒

M7.0 以上 M7.3 未満: 12.0 秒

M7.3 以上 M7.6 未満: 18.0 秒

M7.6 以上 M8.0 未満: 25.0 秒

M8.0 以上: 40.0 秒

なお, ここで与える初期値は経験的に得られた標準的なセントロイド時刻差である.

⑤ 初期解析

設定した初期値で W phase 解析の初期解析を行う. この段階ではセントロイド震源を初期震源位置に固定し, 時間のかかるセントロイド震源のグリッドサーチは行わない.

通常の手動で行う W phase 解析では, インバージョン解析と, 個々の波形の合致度を基準として次の計算のために波形を選別するデータセット作成を 4 回繰り返すこと (以下, この繰り返しの計算セットという.) で, S/N が悪いと思われるデータを除外して精度の良い解を求める. この手法では, 解析に用いる初期値が適切でない場合, はじめから理論波形と観測波形が合わず, 解析に失敗したり, 不適切なデータセットを作成して間違った解を求めたりすることがある. ⑥で行うグリッドサーチ処理も, 初期解析で選別されたデータセットで解析を行うため, 初期解析が失敗すると⑥の解析も失敗になる. 適切なデータセットを得るためにも, 初期解析に用いる初期値はとても重要である.

初期値のうち特に問題になるのがセントロイド時刻差である. 断層の破壊がゆっくり進み, 破壊継続時間がマグニチュードから得られる標準的な値よりも非常に長くなる地震 (津波地震など) では, ④で示した標準的なセントロイド時刻差を初期値とした場合, はじめから理論波形と観測波形が異なるため,

精度の良い解析ができない。そのためセントロイド時刻差については、次に示す方法で簡便なグリッドサーチを行うこととした。

(1)式で得られる4個のセントロイド時刻差を初期値として、上述の計算セットを順次実施する。

$$Td_n = Tstd + 30 \times n \quad (n = 0,1,2,3) \quad (1)$$

(単位は秒)

ただし、 Td_n はn回目の計算セットのセントロイド時刻差の初期値、 $Tstd$ は④で示した標準値とする。その結果のうち、波形の合致度が一番良い解析を初期解析の結果として採用する。ただし途中の計算セット終了時点で解析に用いた波形数が20チャンネルを超えた場合は、その時点で精度の良い解析が行えたと判断し、計算を終了してその時の解析結果を採用する。4回の計算セットでいずれも解析に使用された観測点数が3点以下の時は解析失敗とする。

オペレータには、初期解析が終了した段階では、採用された解析結果のMwの値のみを通知する。ただし、震源が浅くメカニズム解が低角で、Mwが過大評価になっている可能性がある場合は、碓井・他(2013)の手法でMwを補正する。解析失敗のときもその旨を通知する。

初期解析の終了まで震源時から6分程度である(以下、この解析を6分W phaseという.)。

⑥グリッドサーチ

初期解析が成功した後に、初期解析で採用された解析のデータセットを用いて、セントロイド時刻差、セントロイド震源(緯度・経度・深さ)に関するグリッドサーチを行い、最適解を求める。ここで言うグリッドサーチのグリッド間隔は、最初は対象領域全体を覆うやや広いものから始め、最適解周辺でより細かいグリッドを設定する手法で決めている。例として東北地方太平洋沖地震を解析した時のセントロイド震源のグリッドサーチの結果を図2に示す。得られた解析結果は次節で述べる精度評価を行い、Mw、メカニズム解、セントロイド震源をオペレータに通知する(以下、8分W phaseという.)。

このグリッドサーチの計算は並列処理で高速に計算されており、オフラインシステムでの運用に用いた計算機では30秒~2分程度の時間で終了する。今回用いた計算機はHp xw9400 Workstation (Quad-Core

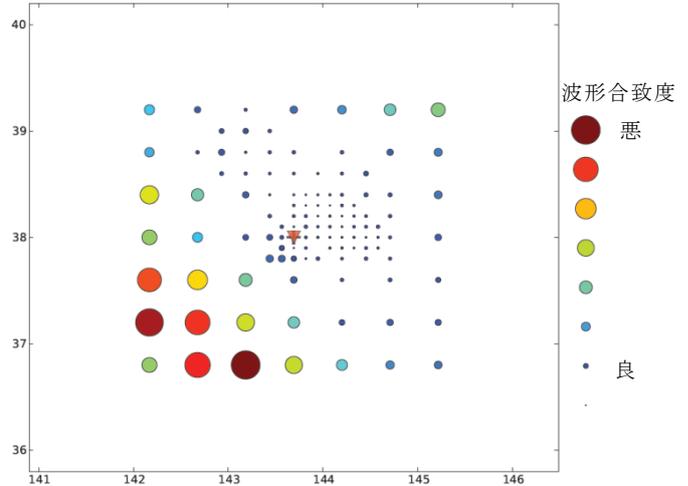


図2 セントロイド震源のグリッドサーチ結果例(東北地方太平洋沖地震の場合)
▼は最適解

AMD Opteron Processor 2380×2)で、8コアで並列処理を行っている。グリッドサーチの計算速度は計算機の性能によるところが大きいため、これよりも高性能な計算機を使用することで、計算時間を短縮することが可能と思われる。一方、自動W phase解析以外の処理と同時に計算を行う場合などは、その負荷の影響を受けて計算に要する時間は長くなるであろう。

3 自動 W phase 解析の精度評価

津波警報・注意報の更新に利用している自動CMT解析では、3階級で精度の評価を示している(碓井・他, 2013)。自動の8分W phase解析でも、この3階級の考え方に倣うこととした。「GOOD」はメカニズム解、Mwともに精度が良い場合、「参考」はMwの精度が良い場合、「BAD」はいずれも精度が良くない場合である。その詳細な評価基準は以下の通りである(図3)。

○BADの基準

観測点数5点未満または波形数8チャンネル未満
セントロイド距離(震源の初期値とセントロイド震源の震央距離)150km超え
波形の合致度が「悪い」

○参考の基準

Mwの値を補正した
波形の合致度が「ふつう」

○GOOD の基準

上記以外

なお、W phase 解析の波形合致度の指標 $Werr$ は観測波形と理論波形の残差の RMS を理論波形で規格化した(2)式で定義した。

$$Werr = \sqrt{\frac{\sum_{chan} \sum_t (O_i(t) - C_i(t))^2}{\sum_{chan} \sum_t C_i(t)^2}} \quad (2)$$

つまり、 $Werr$ は合致度の指標で数値が小さいほど波形の合致度が良いことを表す。 $O_i(t)$ は観測波形、 $C_i(t)$ は理論波形、 Σ は全解析時間あるいは全使用波形の総和を表す。合致度の判定で「悪い」は 1.0 超、「ふつう」は 0.3~1.0、「良い」は 0.3 未満を基準とした。

なお、今回設定した基準は解析事例が少ない段階で設けたものである。今後、多くの事例が集まった段階で点検すべきであろう。

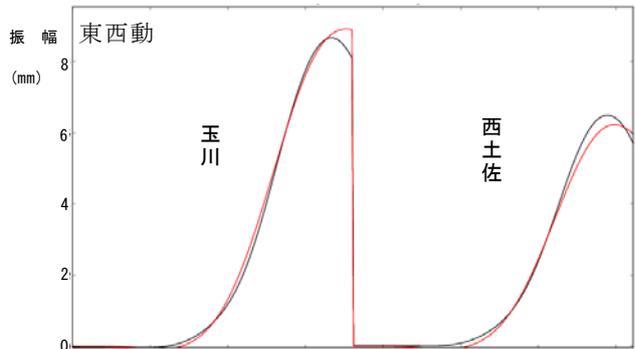
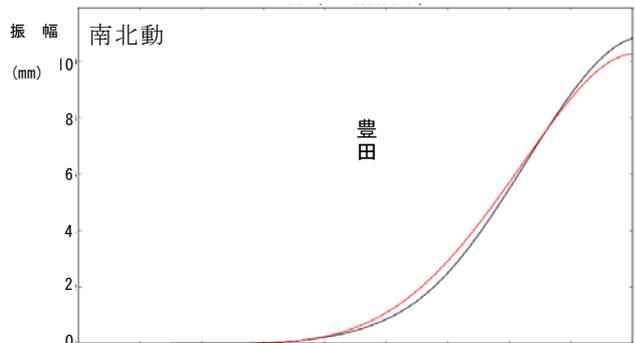
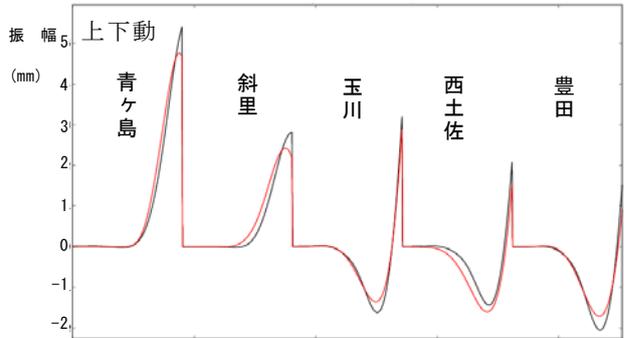
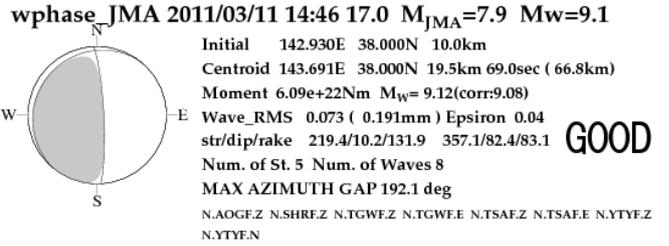


図 4 東北地方太平洋沖地震の W phase 解析結果 (8 分 W phase)。

メカニズム解は東西方向に圧力軸を持つ低角な逆断層。 M_w は 9.1 であった。波形は黒：観測波形，赤：理論波形。使用できた観測点は 5 観測点，波形数は 8 チャンネルであった。

るが、広帯域地震計のデータが振り切れてしまい解析ができなかった。本解析でも振り切れた観測点は

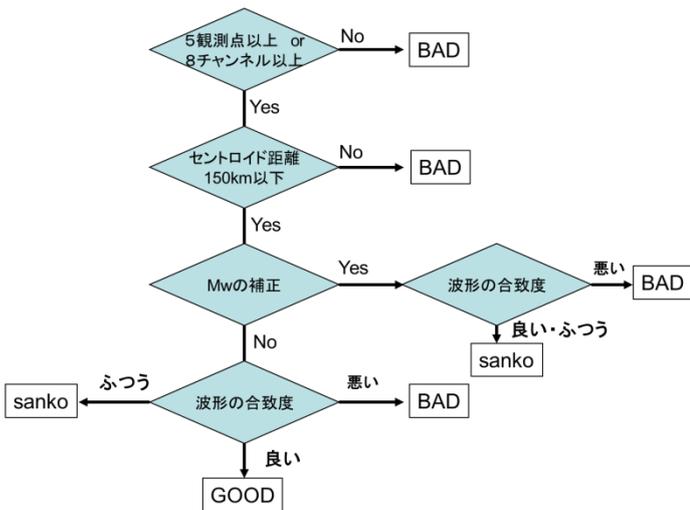


図 3 自動 W phase 解析の精度判定ロジック

4 解析結果

2011 年 3 月 9 日から 2012 年 3 月 20 日までのデータを用い、緊急作業によるマグニチュードが 6.0 以上になった地震について本手法による解析を行った。

東北地方太平洋沖地震については、6 分 W phase で $M_w9.1$ の解析結果が得られている。繰り返しになるが、これは広帯域地震計を用いた結果である。自動 CMT 解析では震源時から 10 分間のデータを用い

多かったが、5分30秒の時点ではまだ振り切れていない点があり、そのデータを用いることで解析ができた。振り切りに強いという W phase 解析本来の特徴を発揮した例である。この解析結果を図4に示す。なお、Duputel et al. (2011) は東北地方太平洋沖地震の W phase 解析について、グローバルな観測網を用いて震源時から20分で解を得ていた。また、彼らは、地震後に F-net を用いたオフラインでのテストを行い、震源時から約7分で解析可能であったとしている。

その他の地震では、規模の大きな地震が発生した後や、Rivera et al. (2010) の指摘にある通り千島列島や台湾など観測網に偏りがある地震は BAD の判定になることがあったが、概ね精度良く解析ができていた。東北地方太平洋沖地震の直後の余震については本震の影響で解析できない地震が多いが、影響の小さくなった2011年3月20日以降で見ると、32イベントのうち、GOODは9個(28%)、sankoは18個(56%)、BADは5個(16%)であった。つまり、8割を超える地震で Mw が求まっている。表1に2011年3月9日から2012年3月20日までの M6.5 以上の地震について解析結果を示す。

先にも書いた通り、自動 W phase 解析は津波警報の更新の判断に利用できる程度の Mw の精度を確保していなければならない。また、緊急作業では沖合の震源は深さを10kmまたは30kmに固定して震源を計算するので、W phase 解析で得られる震源の深さ情報も津波警報の更新の判断に有効と思われる。そこで解析結果のうち Mw およびセントロイド震源の深さについてその精度を調査した。この調査では、すでに精度の確認ができている気象庁による CMT の手動解析の結果と本解析の結果を比較することとした。対象は2011年3月9日から2012年3月20日までの M6.0 以上の地震のうち、本解析で GOOD または sanko となった地震とした。その結果を図5、図6に示す。

本解析による Mw の精度の目安としては、6分 W phase (初期解析) で±0.2程度、8分 W phase (グリッドサーチ) で±0.1程度であった。また、8分 W phase のセントロイド震源の深さについては、概ね±15km程度の精度であった。津波警報の更新の判断としては、この程度の精度が出ていれば十分と考えられる。

5 解析に用いる地震計について

W phase 解析は非常に長周期の波形を用いることが特徴のひとつである。そのため、精度の良い解析には、長周期ノイズの小さいデータを得ることが非常に重要である。代表的な広帯域地震計である STS-1 地震計や STS-2 地震計は、速度の感度特性がそれぞれ300秒程度、100秒程度までしかフラット

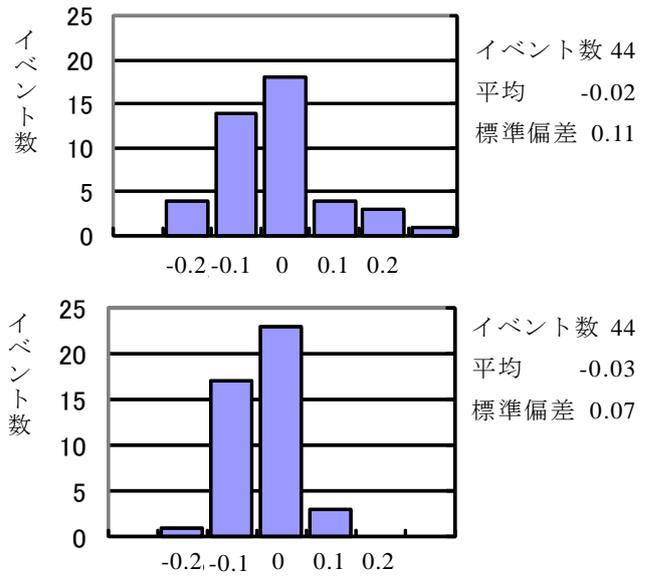


図5 自動 W phase と手動 CMT 解析による Mw 差の度数分布
(手動 CMT の Mw) - (自動 W phase の Mw)
(上: 6分 W phase 下: 8分 W phase)

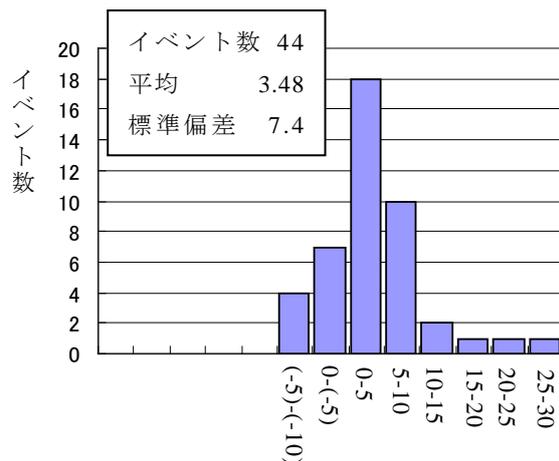


図6 自動 W phase と手動 CMT 解析によるセントロイド深さの差の度数分布
(手動 CMT) - (自動 W phase) 【km】

ではないが、W phase 解析に用いる程度の長周期でも高い S/N 比で地震のシグナルを記録できる性能を有している。今回のオフラインシステム上の運用にあたっては、これら広帯域地震計をトンネル内に設置している（独）防災科学技術研究所の F-net のデータを用いた。

不安定なデータやノイズレベルが高い観測点のデータは、自動で解析を行う際には解析精度を落とすだけでなく、間違った解析結果に導く可能性も考えられる。広帯域地震計といっても地震計の種別や設置環境によりデータの精度は様々であり、精度のよい解析を行うためには、データの品質を慎重に検討する必要がある。

以下、いろいろな観測網（広帯域地震計）のデータについて経験的に得られた特徴を記す。

・気象庁が設置した STS-2 地震計

松代など理想的な環境に設置された地震計もあるが、地上に設置した観測点もある。地上設置の観測点では特に長周期のノイズレベルが高いため、解析に用いる場合は事前に S/N 比の調査を行う必要があると考える。

・気象庁 VSE-311MK（超長周期地震計）

地震計の設置環境は深さ 3m のマンホールを利用するなどノイズ低減を考慮している。地震計は（株）東京測振が新規に開発したものであり、長周期側の性能は STS-1 型地震計と同程度と謳っている。解析に使用された実績が少なく、利用に向けては詳細な性能評価が必要であろう。

・速度型強震計（VSE-355G3）

振り切れない広帯域地震計であり、CMT 解析に使用する程度の長周期（100 秒～300 秒程度）までであれば強震動でも記録する。M7 以上の地震では CMT 解析の周期帯において十分な S/N 比があるため、安定して精度の良い解が得られている（確井・他, 2013）。一方、W phase 解析に用いる長周期（200 秒～1000 秒）ではノイズレベルが高くなるため、通常の広帯域地震計が振り切れてしまうようなシグナルの非常に強い地震に利用が限定される。東北地方太平洋沖地震では、W phase 解析でも精度の良い解析ができたが、それ以外の地震では M7 クラスの地震でも精

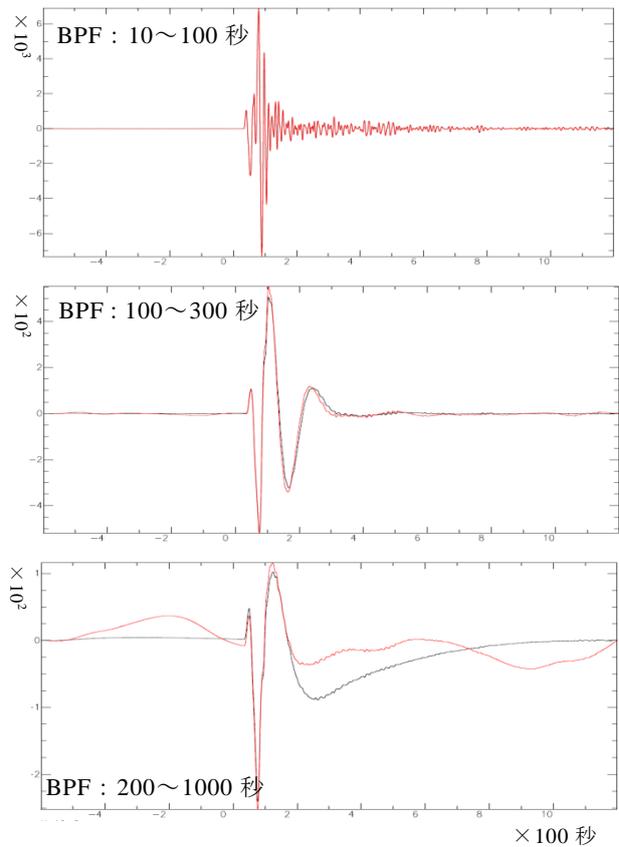


図 7 STS-2 地震計と VSE-355G3 の比較
2011 年 7 月 10 日三陸沖の地震 (M7.3)
気仙沼観測点 (変位: μm)
上下動成分
黒: STS-2 地震計
赤: VSE-355G3

度の良い解析は難しい (図 7)。

6 課題と今後の高度化

今後の高度化に向けて、初期値の課題、気象庁データの利用、GPS データの利用の 3 点を指摘する。今回開発した手法は、緊急作業による震源に強く依存した解析手法となっている。多くの地震の場合、この手法で問題が生じることは少ないが、津波警報の更新の判断を主目的としている以上、自動 W phase 解析は規模の大きな地震ほど確実に動作しなければいけない。規模の大きな地震では、震源（初期破壊開始点）とセントロイド震源が大きく離れる

(例えば 100km 以上など) 場合もある。このような地震については、震源の初期値に緊急震源を用いている今回開発した自動 W phase 解析では、震源の初期値が適切でないことが原因で解析に失敗する可能性がある。これを克服するには、震源初期値を多数用意して同時解析を行う、東京大学地震研究所で開発している Grid W phase のような手法(鶴岡・Rivera, 2012) を取り入れることが必要かもしれない。

今のところ自動 W phase 解析は、(独) 防災科学技術研究所の F-net データを用いている。しかし、大地震が発生したときに F-net の伝送網に障害が発生するかもしれない。今後は気象庁データも利用し、確実に解析できる体制を構築しておく必要がある。

東北地方太平洋沖地震について、金森(私信)がリアルタイムの GPS データを用いた W phase 解析を行ったところ、精度の良い解析ができたそうである。大規模な地震を解析する際には、直接変位を記録した GPS データは、積分処理が必要な地震計のデータよりも安定的である。将来的にはリアルタイムの GPS データも利用して自動解析を行えるような環境を目指すべきであろう。

7 まとめ

金森博士らの好意により W phase 解析の解析プログラムを提供していただき、近地地震の緊急作業での利用を想定した自動 W phase 解析を動作させることができた。本手法では、東北地方太平洋沖地震について、地震発生から 6 分で Mw9.1 の値を得ることができるようパラメータ等を設定した。しかし、6 章で示した通り規模の大きな地震ほど解析が難しくなるので、今後もそれを踏まえた点検や改良が必要と考える。

謝辞

W phase 解析に用いるプログラムは、金森博雄博士らのグループから提供して頂いた。また、金森博雄博士からは W phase 解析についてご指導頂いた。ここに記して感謝する。

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には、波形処理に関して貴重なアドバイスを頂いた。また、青木重樹主任研究官には、丁寧な査読をしていただいた。

自動 W phase 解析では(独) 防災科学技術研究所

の F-net のデータを使わせて頂いた。ここに記して感謝する。

文献

- 碓井勇二・山内崇彦・瀬戸博巳(2013): 気象庁における CMT 解析の改良, 験震時報, **77**, 39-45.
- ト部 卓(1994): 多チャンネル地震波計データのための共通フォーマットの提案, 日本地震学会秋季大会講演予稿集, 24.
- 鶴岡 弘・L. Rivera(2012): W phase を用いた津波警報のための GRiD MT モニタリングシステム, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会予稿集, SSS40-05.
- Duputel, Z., L. Rivera, H. Kanamori, G. P. Hayes, B. Hirshorn, and S. Weinstein (2011): Real-time W phase inversion during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, **63**, 535-539.
- Goldstein, P. and A. Snoko (2005): SAC availability for the IRIS community, *DMS Newsletter*, **7**.
- Goldstein, P., D. Dodge, M. Firpo, and L. Minner (2003): SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers, in "International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology", ed. by W. H. K. Lee, H. Kanamori, P. C. Jennings, and C. Kisslinger, Academic Press, London, 1613-1614.
- Kanamori, H. (1993): W phase, *Geophys. Res. Lett.* **20**(16), 1691-1694.
- Kanamori, H. and L. Rivera (2008a): Source inversion of W phase: speeding up seismic tsunami warning, *Geophys. J. Int.*, **175**, 222-238.
- Kanamori, H. and L. Rivera (2008b): Application of the W phase source inversion method to regional tsunami warning, *Collection of Conference papers, International Conference on Tsunami Warning, Towards Safer Coastal Communities, Bali, Indonesia, November 12-14.*
- Rivera, L., H. Kanamori, and Z. Duputel (2010): The potential of the W phase algorithm for regional tsunami warning in Chile, *AGU chapman chile 2010*, http://www.gps.caltech.edu/~zacharie/posters/Duputel-poster_CHAPMAN2010.pdf

(編集担当 大竹和生・本間直樹)

表 1 自動 Wphase 解析結果 (2011 年 3 月 9 日~2012 年 3 月 20 日, M6.5 以上)
 東北地方太平洋沖地震の後の数日間は、本震の影響により自動解析は精度の良い解析ができない。

地震発生時刻	震央地名	緊急M	自動Wphase				手動CMT			
			評価	Mw(6分)	Mw(8分)	深さ	メカ	Mw	深さ	メカ
2011年03月09日11時45分	三陸沖	7.2	sanko	7.3	7.3	9.5		7.3	19	
2011年03月10日06時24分	三陸沖	6.6	sanko	6.5	6.5	15.5		6.4	21	
2011年03月11日14時46分	三陸沖	7.9	GOOD	9.1	9.1	19.5		9.0	10	
2011年03月11日15時06分	三陸沖	7.0	BAD	—	—	—	—	7.4	21	
2011年03月11日15時15分	茨城県沖	7.4	BAD	—	—	—	—	7.7	35	
2011年03月11日15時25分	三陸沖	7.2	BAD	—	—	—	—	7.5	25	
2011年03月11日16時14分	福島県沖	6.8	BAD	—	—	—	—	—	—	—
2011年03月11日16時28分	三陸沖	6.6	BAD	—	—	—	—	—	—	—
2011年03月11日17時19分	茨城県沖	6.7	BAD	—	—	—	—	—	—	—
2011年03月12日00時13分	茨城県沖	6.6	BAD	—	—	—	—	6.2	13	
2011年03月12日03時59分	新潟県中越地方	6.6	BAD	—	—	—	—	6.3	10	
2011年03月28日07時23分	宮城県沖	6.5	GOOD	6.0	6.2	25.5		6.2	26	
2011年04月07日23時32分	宮城県沖	7.4	sanko	7.1	7.1	50.5		7.1	54	
2011年04月11日17時16分	福島県浜通り	7.1	sanko	6.8	6.8	9.5		6.7	10	
2011年06月23日06時50分	岩手県沖	6.7	sanko	6.9	6.8	23.5		6.7	47	
2011年07月10日09時57分	三陸沖	7.1	GOOD	7.0	7.0	25.5		7.0	21	
2011年07月23日13時34分	宮城県沖	6.5	GOOD	6.3	6.3	60.5		6.3	54	
2011年08月19日14時36分	福島県沖	6.8	GOOD	6.2	6.3	40.5		6.3	48	
2011年11月08日11時59分	沖縄本島北西沖	6.8	GOOD	6.9	6.9	210.5		6.9	238	
2012年01月01日14時27分	鳥島近海	7.0	sanko	6.8	6.8	360.5		6.8	369	
2012年03月14日18時08分	三陸沖	6.8	GOOD	6.9	7.0	11.5		6.9	14	