

地域地震センターデータ処理システム (REDC) における自動震源処理と

その結果について

Automatic Hypocenter Determination Method by Regional Earthquake Data Center System
(REDC) in JMA and Its Accuracy

清本真司¹, 溜渕功史¹, 足達晋平², 上野 寛³, 森脇 健¹, 塩津安政¹, 横田 崇³

Masashi KIYOMOTO¹, Koji TAMARIBUCHI¹, Shimpei ADACHI², Hiroshi UENO³,
Ken MORIWAKI¹, Yasumasa SHIODU¹, and Takashi YOKOTA³

(Received February 24, 2012; Accepted February 21, 2013)

ABSTRACT: When an earthquake occurs, the Japan Meteorological Agency (JMA) immediately determine the hypocenter and it is used to announce Earthquake Early Warning, Tsunami Warning/Advisory, and Earthquake Information. The JMA also report, on a regular basis, information regarding the frequency of earthquakes—but such information does not reflect time-space distribution of the hypocenter. In December 2009 we updated Regional Earthquake Determination System (REDC), and this single system can carry out the processing of data from all seismic stations in Japan in real time.

Using this system, the JMA are able to automatically determine hypocenters for earthquakes occurring anywhere in Japan by using a determination process that includes event detecting, automatic picking, and automatic hypocenter determination. Automatic hypocenter data contributes to reducing labor compared to manual phase picking and real time monitoring. The JMA started uploading automatic hypocenter distribution content to its website at the end of March 2011, and routinely update the content.

1 はじめに

気象庁では、震度 1 以上を観測する地震や規模の大きな地震が発生すると即座に緊急地震速報や津波警報・注意報、地震情報を発表し、これらの情報で地震の発生場所や規模等を伝えている。また、規模の大きな地震が発生した直後の余震活動や局所的な地震活動の活発化等に伴う地震の多発がある場合には、一定時間単位の地震回数を計数し、地震に関するその他の情報として伝えている。

一方、日々発生している微小地震まで含めた個々の地震活動について、翌日を目途に気象庁職員が検測作業を行い、決定した震源（一元化震源）を大学等研究機関が閲覧できる FTP サイトへアップロードするとともに、気象庁ホームページに公開し、広く

一般でも震央分布図及び震源リストを取得できるようにしている。

これらの微小地震については、気象庁内の作業工程上、地震発生後翌日まで待たないと情報が入手できない。また、地震が多発すると作業が間に合わず、遅れが発生してしまう。このタイムラグを埋めるため、作業者の手を介さずシステムで自動決定される震源（以下、自動震源）を用いて準リアルタイムでホームページなどに提供することで解決を図る、という構想は以前からあったが、自動震源は場合によっては誤差を相当量含むだけでなく存在しない震源を生成する可能性があること、従前から使用していた処理システムは処理能力及び伝送回線の問題から管区単位の分散処理しか行えず、管区境界付近で発

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

² 地震火山部地震津波監視課, Earthquake and Tsunami Observation Division, Seismological and Volcanological Department

³ 気象研究所地震火山研究部, Seismological and Volcanological Research Department, Meteorological Research Institute

生じた地震を統合する処理が新たに必要になる、等の事情から実現されることはなかった（図 1）。

平成 21 年 12 月に地域地震情報センターデータ処理システム（REDC: Regional Earthquake Data Center system）が 2 世代目に更新され（以下、更新前のシステムを REDC1、現行のシステムを REDC2 と記す）、計算機処理の飛躍的な向上により全国の地震観測点の波形データを本庁・大阪の二拠点にてリアルタイムで受信し、全国一律で処理することが可能になった（図 2）。

REDC2 は地震発生を検知する地震検知処理、地震波形データの位相等を自動的に検出する自動検出処理、及び震源を自動的に計算する自動震源決定処理等からなる自動震源処理が搭載されている。

今回のシステム更新に伴い、平成 22 年 1 月よりこれらの自動震源の部外への即時的な提供について、

処理面・精度面の検討を行い、平成 23 年 3 月末日より一定の精度を満たした自動震源を気象庁ホームページで提供を開始したので、その処理内容及び結果について報告する。

2 REDC2 の特徴

REDC2 では、REDC1 と比較するとサーバマシンの高性能化、伝送ネットワークの高速化・広帯域化により、全国の千数百観測点、数千チャンネルにも及ぶ地震計データを 1 箇所に集約し処理することが可能となっている。従来は図 1 のように管区単位での処理を行っていたことから、各管区の境界付近では処理する観測点の相違から地震検知能力や震源位置等に差異が存在することもあったが、REDC2 では特に管区境界を意識せずに全国一律の処理が行えるようになった。

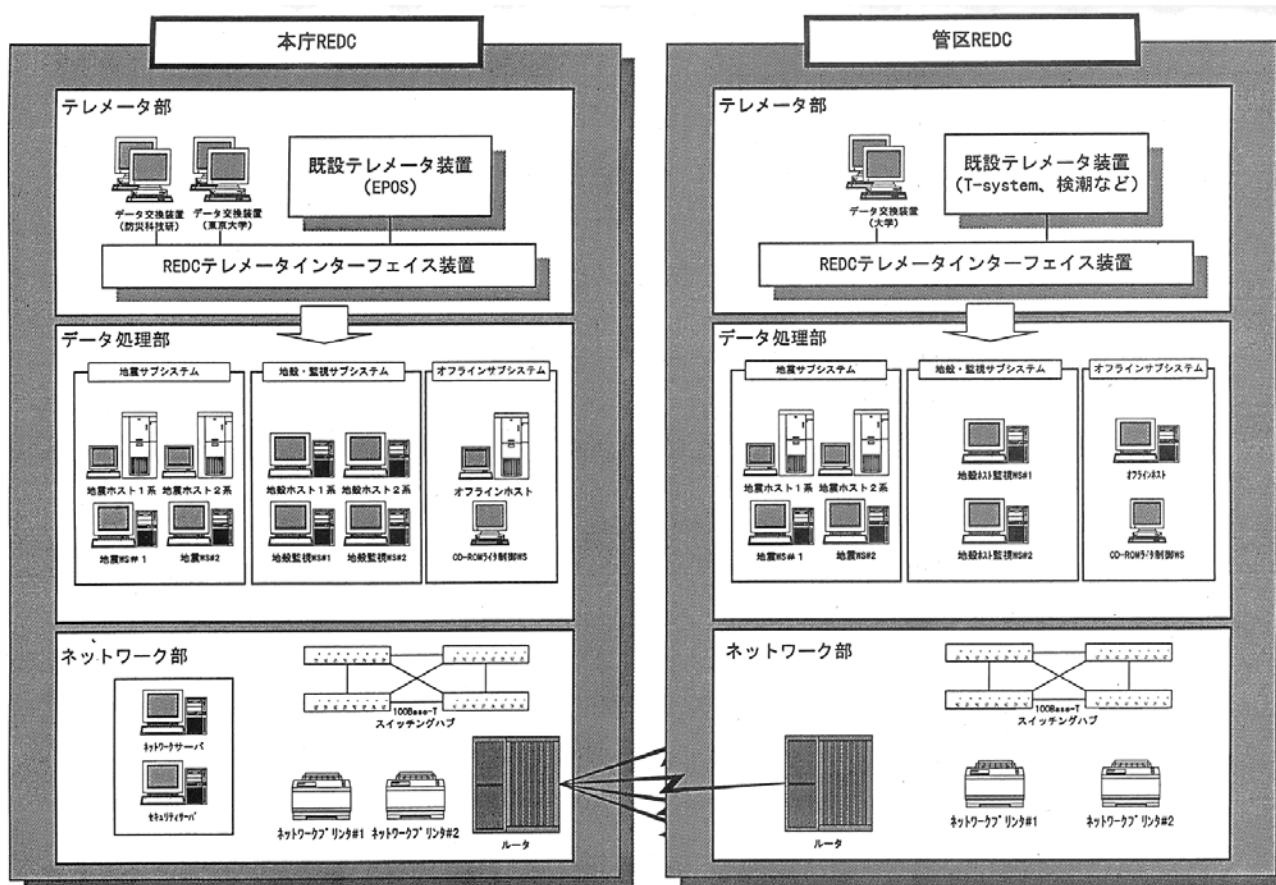


図 1 REDC1 整備当初のシステム概要図. REDC1 は途中で Hi-net 整備に伴う機能増強も行いつつ、平成 9 年（1997 年）10 月から平成 21 年（2009 年）11 月末まで運用された。運用開始当初は中枢間の伝送回線（ルータ間をつなぐ回線）が 64kbps と低速であったこと、大学等研究機関とのデータ交換は各地域で個別に行われていたこと、また全国の波形データを 1 箇所に集約して受信・処理するだけの性能がなかったことから、管区毎にサーバを整備して管区内で発生した地震のみを処理した。

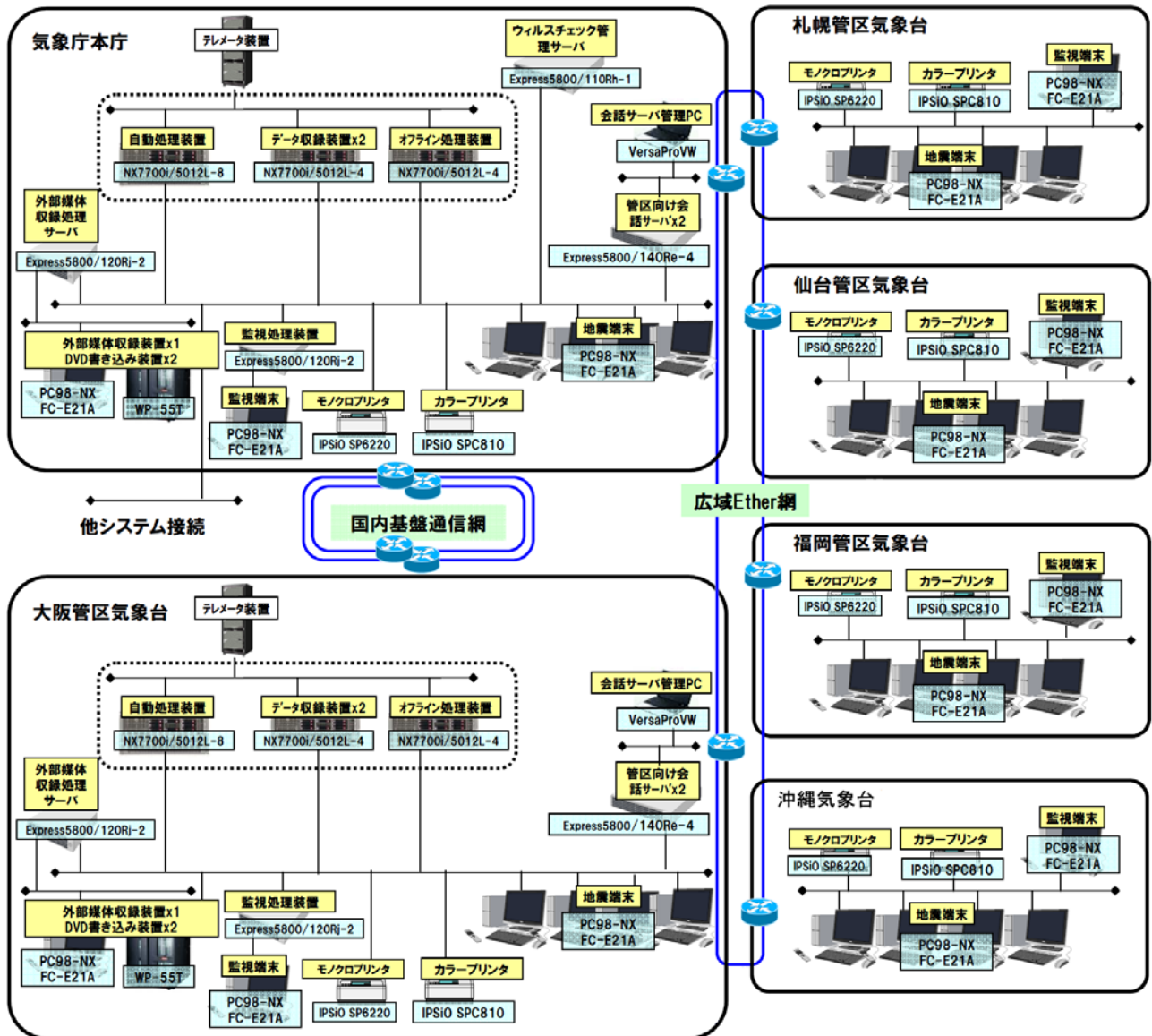


図2 REDC2のシステム構成図。平成21年12月から運用を開始している。図1の構成と異なり、気象庁本庁及び大阪管区気象台は拠点としてサーバが設置され、その他の管区気象台及び沖縄気象台は地震端末及び監視端末が設置されている。地震波形の受信、処理、収録は拠点のサーバで一括して全国分の処理を行い、地震端末は必要な波形、震源、検測値等の各種データを取得し、震源決定等の処理を行う。

一方で、簡素で効率的な政府の実現に向けて、「業務・システム最適化の推進」による業務・システムを効率化・合理化する取り組みが進められており、REDC2についても効率化・合理化の観点から検討・調整が行われた。

REDC1では管区内で地震ホスト2台による二重化の構成制御が行われていたが、上記検討・調整の結果、REDC2では拠点間で二重化を行うなどの見直しが行われ、最終的に図2の構成となった。

図2の通り、REDC2では本庁と大阪に処理サーバ

を整備し全国のデータ処理を行い、札幌、仙台、福岡の各管区気象台、沖縄気象台には地震端末及び監視端末を整備して、日々の業務を行っている。

3 自動震源処理

本稿では、自動震源処理とは観測点単位で個々に地震波形データを処理して地震と思われるシグナルを検出する（これをトリガ検知と呼ぶ）ことから始まり、複数の観測点の検出結果を束ねて地震のイベントを生成し（グループ判定）、自動検出・自動震源決定を行って震源位置を得る、という一連の作業を指す。

REDC2では図3で示した流れに従って自動震源処理が行われており、以下個別処理について説明する。

3.1 地震波形データ受信

気象庁では、REDC2に限らず、地震波形を処理するシステムでは、地震データ収集配信装置（以下、配信装置と記す）と呼ばれるテレメータ装置から波形データを一括して受信している。配信装置は様々な機関から伝送されてくる様々な地震波形の伝送フォーマット及びプロトコルを整理し、チャンネル番号を付け替え、各種サーバに対して波形データを送信する機能を有している。REDC2への地震波形データの伝送はTCPプロトコルのWINフォーマットによって行っている。

配信装置とREDC2自動処理サーバ間の伝送経路は図4のように中継しているL3SWの通信機器も含めて二重化されており、L3SWや通信経路が異常等で一定時間波形伝送できなくなると、待機している別システムの配信経路に伝送経路が自動的に切替される。また、配信装置自体の障害が発生した場合は別システムの配信装置に接続切替を行うことでデータ伝送を継続できる（通常は配信装置1系と接続しており、1系から2系への接続切替は自動で行われる）。これらの措置により、長時間の波形データ断が発生しないようにしている。

3.2 秒値処理

波形を受信すると、まず、各チャンネル単位で平均値やオフセット量などを求め、その後トリガ検知処理に使用するSTA(Short Term Average:短時間平均)、LTA(Long Term Average:長時間平均)等の各種処理値を求める。これらの値は秒単位で行われていることから、気象庁では秒値処理と称している。

3.3 トリガ検知

一般に、地震波形は定常的に地震が発生していない状態では振幅変化が非常に小さく、ほとんど変化が見られない。しかし、一旦地震やパルスノイズ等が発生すると途端に振幅変化が大きくなり、STA/LTAは何らかのシグナルが現れた段階で大きく値が変動する。

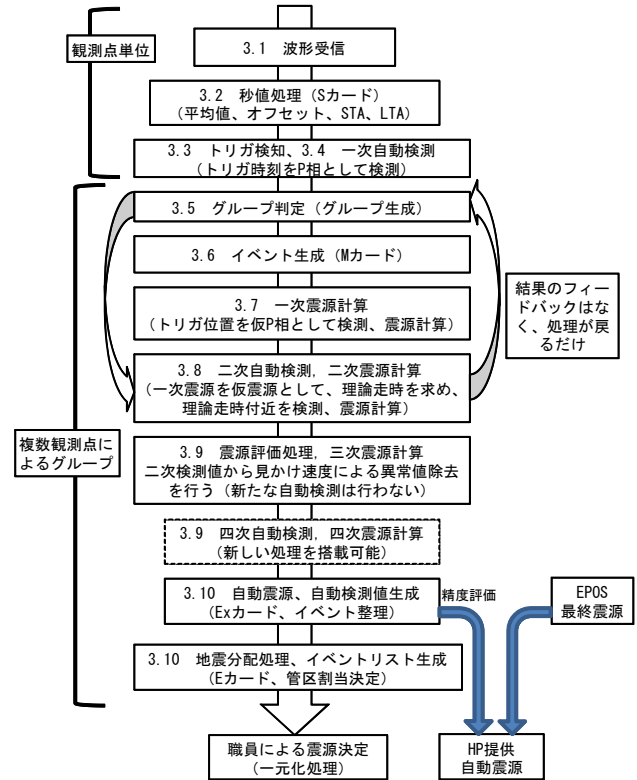


図3 自動処理及び自動震源の処理の流れを示した概念図。各処理の前に書かれた番号は記述される章番号を示す。

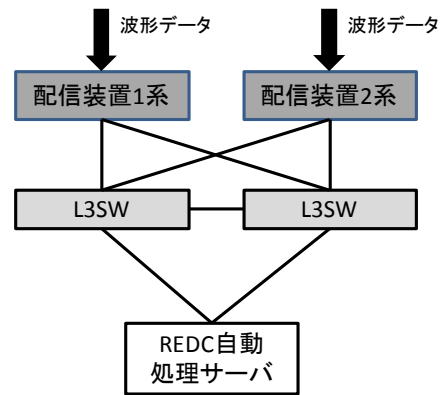


図4 配信装置とREDC自動処理サーバの接続概念図。配信装置、L3SW いずれに障害が発生しても波形データ受信を継続できる。

そのため、STA/LTAの変化を監視し、設定しておいた閾値を超過することで、地震波検知を行うことができる（トリガ検知）。このトリガ検知処理を各観測点で行う。続いて、各観測点ではトリガ検知した時間を基準時刻として自動検出が行われる。トリガ検知が成立する度にSカード⁴が生成され、観測点単位の処理結果が記録される。Sカードはトリガ検知時刻及びトリガ検知に用いた観測点、チャンネルの情報が記述されているデータである。

3.4 一次自動検測

3.3 で S カードが生成された (=トリガ検知) 観測点に対して自動検測処理が行われる。気象庁ではこの処理を一次自動検測と呼んでいる。一次自動検測処理では、トリガ検知した秒単位時刻を P 相の基準時刻として、以下の 3 種類の自動検測を行う。

1. 分散比
2. Characteristic Function[Allen(1978)]
3. AR-AIC[横田・他(1981)]

自動検測は上記の順番で行われるが、例えば 3. の処理で用いる初期値はそれまでの処理結果が用いられる。つまり、3. の処理に際して、2. の処理が成功していれば、2. の処理結果が 3. の初期値となる。もし、2. が失敗していれば、1. の結果を初期値として利用するが、1. の処理も失敗していれば、3. の初期値はトリガ検知時刻が用いられることになる。

この自動検測結果は S カードに書き込まれる。

3.5 グループ判定

一般に地震が発生すると、震源から同心円状にトリガ検知に成功する観測点が増えてゆく。その一方で、風浪、人工振動源に伴うノイズなどその他の要因で振幅変化が発生する場合は 1 点もしくは振動源近傍のごく少数の観測点のトリガ成立がランダムに発生することが多い。3.3 のトリガ検知結果が地震によるものかノイズによるものかを判定するために、グループ判定という方法を用いている。

具体的には、3.3 で作成された各観測点のトリガの成立状況を図 5 で示されるような各トリガグループにあてはめる。各観測点はトリガグループ毎に成立した時のスコアを持っており、各グループのスコアが成立点数を上回った状態が一定時間以上 (例えば 3 秒) 継続すれば、当該トリガグループは成立と判定される。

緊急地震速報や津波警報・注意報、地震情報を発表するために迅速に震源決定を行う必要がある地震活動等総合監視システム (以下、EPOS) と異なり、REDC2 ではやや時間的に遅れても微小な地震まで確実に検知して震源決定を行うことが求められる。そのため、伝送遅延が数分程度と大きな海外の観測点も含めてほぼ全観測点のトリガ検知結果を取得した上でグループ判

定を行うのが理想的である。REDC2 では、現在のところ 200 秒待つてグループ判定を行っている。

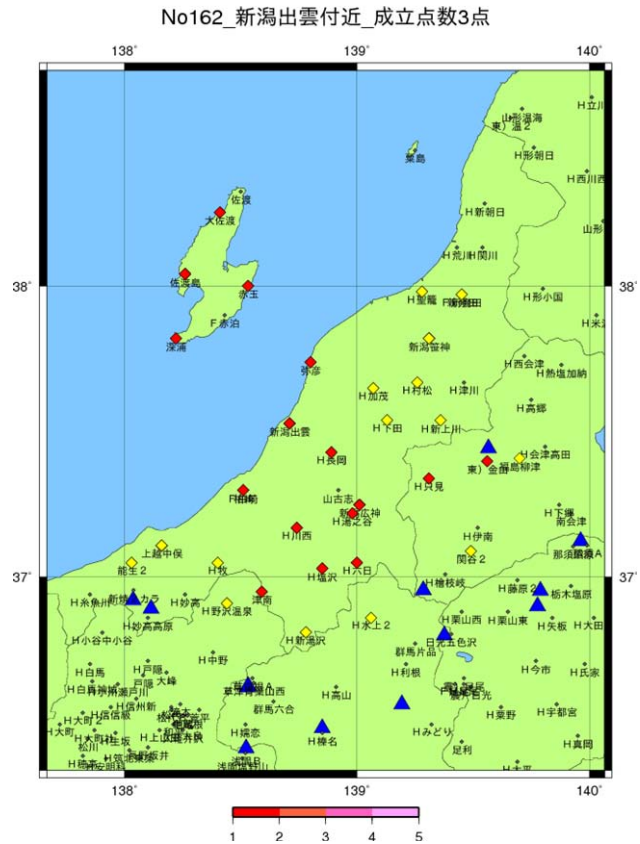


図 5 トリガグループの例。赤色のひし形がトリガ検知に伴うグループ判定を行う観測点を示し、カラーパレットの色に応じてスコアが付与される。タイトルに記される成立点数以上でトリガグループ成立と判定される。黄色のひし形はグループ判定には使用されないが、二次検測で自動検測対象として使用される観測点を示している。

なお、トリガグループは、現在約 300 以上が存在する。内陸の浅い地震については、同心円状に広がるものの、海域で発生する地震の場合は沿岸部観測点に同時に到達する。他にも様々な場所で発生する地震波の広がりや分布、さらには観測点における波形の立ち上がりを考慮して上記のトリガグループは作成している。

3.6 イベント生成 (M カード作成)

例えばマグニチュードが 1.0 未満の微小な地震については、図 5 で示されるトリガグループのせいぜい一

⁴ 本稿では、S カードをはじめとして M カード、E カード、Ex カードという用語が登場するが、これらは複数の処理で作成・更新された結果を一時的に蓄積している領域を指しており、共有メモリの一種である。特に決まった用語ではないが、秒値処理同様、気象庁内部で用いられることが多いため、本稿でもそのまま記すこととした。

S カードは観測点単位の処理結果を、M カードは複数の S カード及び自動震源を、Ex カードは所属する複数の M カード及び自動震源を、E カードは Ex カードと処理対象管区をそれぞれ保持している。

つで成立するか否かといったところであろう。しかし、震度 1 以上の地震など規模がある程度大きな地震が発生すると、広域の多数のトリガグループでほぼ同時もしくは若干の時間差を持って成立することが予想される。

条件1 判定時刻 $\leq \beta + Tg$

β : Mカード生成時刻

Tg : 同一地震監視時間(120sec)

時刻(sec)	0	1	2	3	4	...	n	n+1	n+2
グループA	off	on	on	on	on	...	on	on	on
グループB	off	off	on	on	on	...	on	on	on
グループC	off	off	on	on	on	...	on	on	on
グループD	off	off	off	on	on	...	on	on	on
グループE	off	off	off	off	on	...	on	on	on
グループF	off	off	off	off	off	...	off	off	on

← $Tg(sec)$ →

条件2 判定時刻 $\leq \delta + Tg2$

δ : Mカードへの最終取り込み時刻

$Tg2$: 同一地震成立間隔(60sec)

時刻(sec)	0	1	2	3	4	...	n	n+1	n+2
グループA	off	on	on	on	on	...	on	on	on
グループB	off	off	on	on	on	...	on	on	on
グループC	off	off	on	on	on	...	on	on	on
グループD	off	off	off	on	on	...	on	on	on
グループE	off	off	off	off	on	...	on	on	on
グループF	off	off	off	off	off	...	off	off	on

← $Tg2(sec)$ →

図 6 イベント生成処理で用いられる 2 条件の模式図。
 $\beta = \sigma = 0$ の場合、上図下図いずれもトリガグループ A から E までは同一 M カードに取り込まれるものの、トリガグループ F は判定時刻が閾値を超過しているため、同一の M カードに取り込まれず、別の M カードが生成される。

イベント生成では、成立したトリガグループについて、既存のイベントと結合もしくは全く別のイベントとして独立させるかの判定を行い、その結果を M カードに書き込む。M カードは 3.6 から 3.8 までの処理結果（所属するトリガグループ及び S カード、一次自動震源、二次自動検出、二次自動震源）を保持するデータである。

3.5 で新しいトリガグループが成立すると、イベント生成処理で既存の M カードに統合するか、新規のイベントとして新しく M カードを生成するかの判定が行われる。新規成立したトリガグループに対して図 6

のような 2 つの条件判定を行い、両方満たした場合には既存の M カードに取り込みを行う。

図 6 の通り、M カード作成判定に際しては、成立したトリガグループの時間差のみが条件となっている。しかし、これでは例えば、ほぼ同時に北海道のトリガグループと沖縄のトリガグループが成立した場合、1 つの M カードに統合されてしまうことになり、適切なイベント作成ができなくなる。

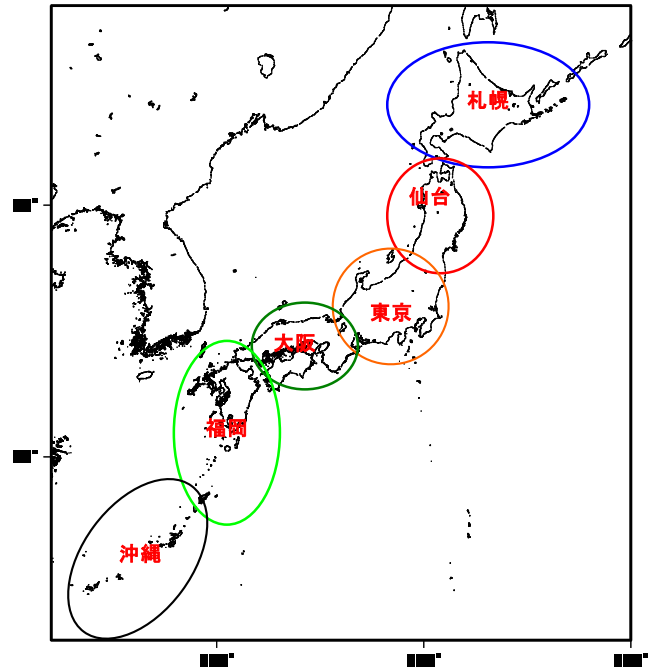


図 7 大グループの概念図。大グループは概ね管区検測領域を目安に設定している。

これを防ぐために、概ね管区を単位とする大グループを作成し、3.5 のイベント生成は原則的に大グループを超えて結合できないようにしている（図 7）。しかし、今度は管区境界付近で発生する地震や規模の大きな地震があっても、管区単位の大グループで分断されてしまうことになる。このような分断を防ぐために、図 5 のトリガグループは複数の大グループに所属することが可能となっている。図 8 の右図のように、複数の大グループに所属しているトリガグループが成立すると、このトリガグループを仲立ちにして、複数の大グループに所属するトリガグループは一つの M カードに結合することができる。これにより、大グループの境界付近で発生する地震についても M カードが大量に生成されることを抑制している。

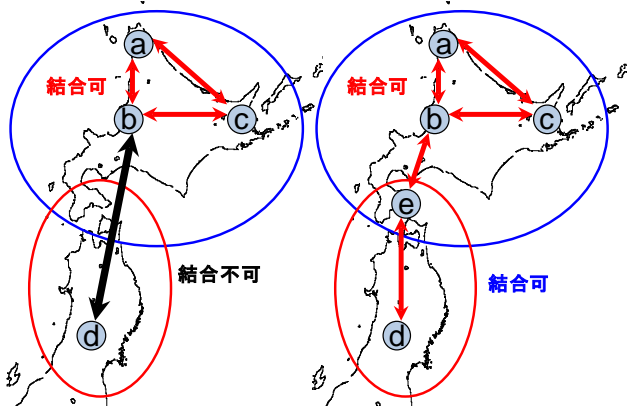


図 8 大グループ間の結合の例. a-c は大グループ「札幌」に所属. d は大グループ「仙台」に所属. e は大グループ「札幌」「仙台」両方に所属する. 左図ではトリガグループ b と d は結合できないが、右図では両方に所属するトリガグループ e が存在するため、a-e は同一 M カードに結合できる.

3.7 一次震源計算

3.4～3.6 を経ることで、M カードに所属する複数の観測点から P 相のみの検測値が集められる. この検測値の震源を計算して初期震源を求めるのが一次震源計算処理、得られる結果が一次自動震源である.

一次震源計算処理に用いられる検測値は M カード内に記述された S カードの自動検測結果 (3.4) である. この自動検測は観測点単位で行われているため、観測点によっては地震波ではなくノイズ等を検知したり、S 相部分でトリガ検知したりするなど正しく P 相を検測していない可能性も考えられる. これらのノイズ検測値が含まれたまま震源計算を行うと、特に検測値が少ない場合においては、嘘の震源を求めるなどして、本当の震源と全く違う位置に震源決定してしまうなどの悪影響を及ぼす場合がある.

そのため、一次震源計算ではノイズ除去対策として、一次震源計算を行う前に検測値から各観測点同士の見かけ速度 (観測点間距離 ÷ 検測時間差の絶対値) を求め、式 (1) のようにパラメータで指定した閾値 (例: 5.5 km/s) による加算を行い、スコアが閾値 (例: 0.6) に満たない検測値は S 相やノイズ等により成立した検測値として排除している.

$$\begin{aligned}
 pick_ok(i) &= \sum_j \begin{cases} 0 (\text{見かけ速度} < \text{閾値}) \\ 1 (\text{見かけ速度} \geq \text{閾値}) \end{cases} \\
 pick_ng(i) &= \sum_j \begin{cases} 0 (\text{見かけ速度} \geq \text{閾値}) \\ 1 (\text{見かけ速度} < \text{閾値}) \end{cases} \\
 score(i) &= \frac{pick_ok(i)}{pick_ok(i) + pick_ng(i)} \quad (1) \\
 i, j &: \text{観測点} (i \neq j)
 \end{aligned}$$

3.8 二次自動検測, 二次震源計算

3.7 の一次震源計算で得られた震源を初期値として、次に二次自動検測、震源計算を行う (なお、一次震源計算で震源が決まらない場合は検測値中で最も早い発現時刻を OriginTime, その観測点の位置を初期値としている).

二次自動検測は初期震源から M カード内に登録されたトリガグループ内の各観測点における理論走時 (P 相, S 相) を求め、理論的な P 波及び S 波到達時刻を初期値として、3.4 と同じ自動検測を行う. 3.4 で行われる一次自動検測はトリガ検知した観測点を対象であったが、二次自動検測ではトリガ検知の有無に関係なく M カード成立に寄与したトリガグループの観測点 (図 5 の赤いひし形だけでなく、黄色のひし形まで) がすべて検測対象とされる. これにより、トリガ検知や自動検測に失敗したものの震央に近い観測点などの検測値が加わることになり、震源の安定性と精度向上に寄与する可能性が高くなる.

一方で、得られた自動震源の精度が悪いために理論的な P 波及び S 波到達時刻が不適切な時刻に求められた観測点については、真の相との時刻が離れてしまい、一次自動検測では検測できたが二次自動検測では検測できなくなる、ということがありうる. また、自動震源の精度が良い場合でも、気象庁の速度構造とあまり整合していない観測点については、一次自動検測結果と理論的な P 波及び S 波到達時刻が大きくなることもあり、その場合は二次自動検測では同様に検測されなくなることもある.

3.9 震源評価処理, 三次震源計算, 四次自動検測, 四次震源計算

3.5 から 3.8 については M カードの取り込み終了条件を満たすまで繰り返し処理が行われる. 終了条件は以下の通りであり、どれかを満たせばよい.

1. 震源計算開始後から一定時間が経過 (120 秒)
2. M カードに追加される S カードが 30 秒間存在しない場合

3. M カードに含まれる S カードが規定枚数(500 枚)を超えた場合
4. M カードに含まれる観測点数が規定数(500 観測点)以上に達した場合
5. M カードに含まれるトリガグループすべてがトリガグループの終了判定条件を満たした場合
上記終了条件を満たした M カードはもうこれ以上はデータ更新を行わなくなり、続く震源評価処理に引き渡される。

震源評価処理は以下の 2 処理を行い、不適切な検測値がないか判定する。

1. 3.7 で行われた検測値同士の見かけ速度チェックを行う。
2. 自動震源から各観測点の理論走時を求め、理論走時差がパラメータで想定した範囲内 ($T_{min} \leq \text{残差} \leq T_{max}$, 例えば ± 2.0 秒以内や理論走時の 5% 以内であることなど) に収まっていれば、検測値として採用する。

上記震源評価処理で不適切な検測値を排除した上で再度震源計算を行う (三次震源決定)。

また、今後の開発等によるロジックが開発された場合を想定して、四次自動検測・四次自動検測として新規処理を投入することができる仕様としている。

3.10 自動震源作成, 地震分配処理, イベントリスト作成

M カード作成時点で複数のトリガグループ成立を吸収しているが、規模の大きな地震や管区境界付近の地震などの場合、M カードの結合がうまくいかず、一つの地震を複数の M カードに分割して個別に自動検測を行い、自動震源を求めていることがある。このため、M カードから Ex カードを生成する。Ex カードは同一イベントであると思われる M カードの統合を行う。

M カードの統合ロジックは以下の 3 つのうち、どれかを満たせば既に成立している Ex カードに統合されるが、いずれも満たさない場合は新規に Ex カードを生成する。

1. M カードと Ex カード間のそれぞれの震源位置及び OriginTime の差がパラメータ範囲内であること。現行では、震源位置の差は 150km 以内、OriginTime の差は 30 秒以内である。
2. Ex カードの震源要素と M カードの検測値を比較し、震源から求めた理論的な P 波及び S 波到達時と検測値の時間差がパラメータ範囲内に収まる観測点が一定数以上であること。現行では、P 波の場

合、 $0.7 \text{ 秒} \leq (\text{観測走時} - \text{理論走時の絶対値}) \leq 4.0 \text{ 秒}$ かつ $(\text{観測走時} - \text{理論走時の絶対値}) \leq P$ 波理論走時の 0.3 倍 を満たす必要がある。さらに、上記条件が成立した観測点が全体の 10% もしくは 2 点以上成立していることが必要である。

3. M カードと Ex カードの各観測点間の検測値の時間差を求め、その時間差が観測点間距離から求められる見かけ速度よりも短い観測点が一定数以上あること。現行では、条件を満たす観測点が 10 個以上もしくは全体の 10% 以上であれば同一と判定される。

上記結合ロジックから示唆される通り、作成された Ex カードには一般に複数の M カードが存在する。複数の M カードから最も震源及び検測値の精度が高いと思われるものを代表 M カードとして選択する。代表 M カード選定は以下の 2 条件で行われる。

1. 自動震源の処理次数が高い (三次 > 二次 > 一次) M カードを選択する
2. 次数が同じ M カードが複数存在する場合は、検測値数が最も多い M カードを選択する

代表 M カードの震源及び検測値は当該地震の自動震源、自動検測値となる。なお、代表 M カード以外の M カードの震源及び検測値は今のところ何の処理にも用いてない。

Ex カード中の代表 M カードが決定されると、自動震源の位置から処理対象管区を選定する地震分配処理が行われる。なお、Ex カードでも震源が決まっていない場合、トリガ検知時刻が最も早い観測点の座標を震源とし、震源の位置に基づいて処理対象管区を振り分ける。

地震分配処理を経て、Ex カードには処理対象管区及びイベント番号が付与され、E カードが作成される。E カードからイベントリストが生成され、イベントリストは地震検知時刻、成立に寄与したトリガ検知観測点及びトリガ検知グループ、及び自動震源が記載されており、気象庁職員はこのイベントリストに記されたトリガ分布や波形処理時刻を元に各種検測作業を手動で行い、精密な震源決定を行っている。E カード (及び Ex カード) は地震多発等がなければ概ね 1 日 1000 個程度生成されている。

4 処理結果の評価

4.1 精度の良い震源の判定基準

自動震源を公表する際に、精度の悪い震源や実際には発生していない震源が多数含まれていると、活動監視や評価に影響を及ぼすことになる。自動震源を公表するにあたり、自動震源が保持している各種精度や検測値数などの情報を元に、自動震源の数を確保しつつも可能な限り精度良い震源を選定することとした。

気象庁は一元化震源を内陸の深さ 30km までで発生する浅い地震とそれ以外の内陸の深い地震及び海域で発生する地震とで、それぞれ満たすべき誤差を分けている。図 9 は震源位置を内陸の浅い地震とそれ以外の内陸の深い地震及び海域で発生する地震に分けて、震源時や誤差分布を求めたものである。図 9 の結果及び水平位置の誤差分布などを念頭に置き、自動震源の公表を行う震源精度の基準を以下の通りとした。

精度良い震源の基準：

内陸の浅い地震（深さ 30km 以内）：

OT 誤差：0.25 秒以内 水平誤差：0.5 分以内

内陸の深い地震及び海域で発生する地震：

OT 誤差：0.5 秒以内 水平誤差：1.0 分以内

なお、島嶼部や沿岸から遠く離れて沖合で発生する地震については、震度 1 以上の地震や規模の大きな地震であっても上記基準を満たさない可能性があるが、これらの地震は EPOS によって地震検知され、気象庁職員が震源決定の処理を行ったうえで各種地震情報を発表している。これらの地震については、自動震源と発表した地震情報の内容と齟齬が出ることを避けるため、地震情報として発表した震源要素を公表する自動震源に取りこんでいる。

4.2 不適切な自動震源の生成とその理由

不適切な自動震源としては、実際には発生していない震源を決定する、実際の震源から遠く離れた場所に自動震源が決定される、もしくは発生した地震を自動震源が取りこぼす、等が挙げられる。これらの理由としては、様々な要素が複合的に関連していることが考えられるが、代表的と思われる要因を以下に示す。

<観測点単位>

1. 振幅変化でトリガ検知していることから、地震以外の現象でもトリガ成立することがある。
2. トリガ検知の誤検知が考えられる（S 相でトリガ検知成立し、そのまま S 相付近を P 相として検出してしまう）。特に札幌管内では誤検知が多い傾向にあるが、これは北海道特有の地下構造等の影響のため、微小地震の場合 P 相でのトリガ検知が難しく取り逃しが多いことから、非地震/地震の判別が付きやすい P 相をターゲットとした上下動成分によるトリガ検知ではなく、S 相が発現する水平動成分によりトリガ検知を行っているためである。この措置はイベントの取り逃しを防ぐため、現業作業上やむを得ない措置かもしれないが、REDC の自動処理ではトリガ検知時刻は P 相と想定して自動検出を開始するため、微小地震ほど自動処理は失敗しやすい傾向がある。
3. STA/LTA でトリガ成立した観測点はトリガ成立時刻付近しか検出を行わない。しかし、地震が多発している状況では、トリガ検知時刻以降でも地震が複数発生している。この場合、続発する地震に対して

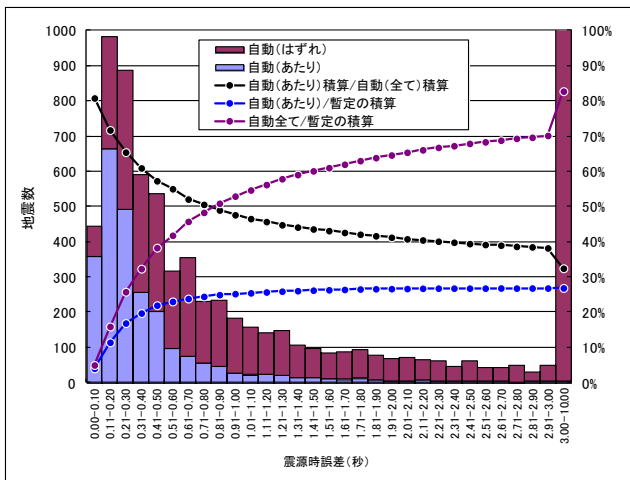
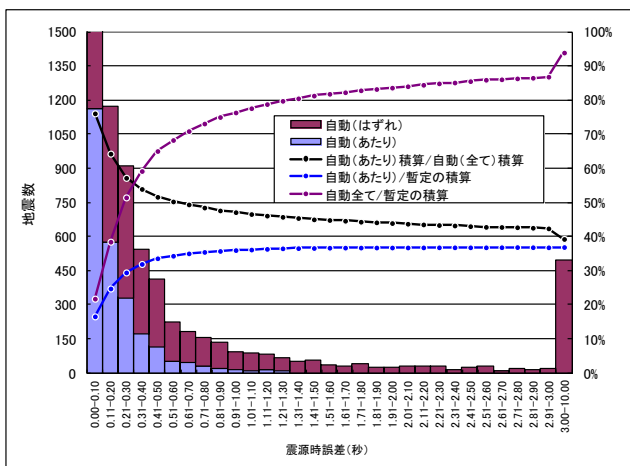


図 9 震源時誤差毎に自動震源と一元化暫定震源の一致不一致を記した頻度分布及び積算図。上段が内陸の浅い地震、下段が内陸の深い地震及び海域で発生する地震を対象としたものであり、震源時誤差が小さいほど“あたり”となる割合が高い。

は地震の規模が大きくても検知・検測が行われず、見逃しとなってしまふ。

<トリガグループ単位>

1. トリガグループの範囲が不適切でグループ成立しない、もしくは成立しても検測値数が十分揃っておらず、自動震源決定が行えないことがある。
2. 短時間に地震が多発している場合、複数の地震の検測値をまとめてしまう、もしくはより細切れに分割してしまう（A 観測点は前の地震を検測し、B 観測点は後ろの地震の検測を行う、など）。
3. 図 8 で示した管区境界付近の大グループ、トリガグループの結合がうまく働かず、M カードの観測点配置がいびつとなり、震源精度が低下する（例：十勝沖の地震で北海道と東北が別々にトリガ検知して管区間の結合に失敗すると、それぞれ自管区の観測点だけで M カードを生成して震源計算を行うことになり、震源精度の悪い地震イベントが複数個生成されてしまう）。

<自動検測、震源計算処理>

1. 図 3 で二次自動検測から再びトリガ検知に処理が戻る時、それまでに検測された二次自動検測値データは引き継がれず、一次自動検測では観測点単位のトリガ検知結果から再び処理を行う。トリガ検知がノイズ起源の観測点がある場合、一次自動検測にはノイズ検測値が混入することとなり、一次自動震源の精度が低下する。これにより、震源位置から検測すべき理論走時が不適切となり、二次自動検測にも悪影響を及ぼす可能性がある。
2. 不適切な検測値を排除する方法は図 9 で示される見かけ速度しかない。例えば、EPOS 緊急処理で用いているような、震源決定した上で残差の大きな検測値を排除して再度震源計算を実行する、というような異常値除去の手法は三次自動検測及び震源決定処理では取り込まれているが、よりノイズ検測値が混入している可能性が高い一次自動検測や二次自動検測の段階ではイベントを取りこぼさないようにするため、行われていない。

4.3 一元化震源、(独) 防災科学技術研究所の自動震源との比較

4.1 の基準により作成された自動震源がどの程度の決定率を持っているのかについて、まず一元化処理された暫定震源との比較を行った。

図 10 を見ると、震源決定数では自動震源は暫定震源

の概ね 30%程度となっていることが分かる。2月 27～28 日にかけては、岐阜県飛騨地方で震度 4 の地震が 2 回発生するなど地震が多発した。一般に地震が短期間に多発するとノイズレベル（≒LTA）が通常時より高くなり、トリガ検知が困難になることで決定率が低下したり、またトリガ検知できても短期間に地震が連発していることで P 相と S 相を誤認したり、前後の地震をひとまとめに混同して検測すること等により震源決定精度が悪くなり、その結果決定率が低下するなどの現象が見られる。図 10 の全体の決定率では上記低下は見られないが、図 11 の M 別決定率では、内陸の浅い地震の M2.0 以上の決定率で 80%以上となっている。地震の多発がない期間であれば、内陸の浅い地震の M2.0 以上の決定率は 90%前後となっているので（図 13 参照）、図 11 の M2.0 以上の決定率は 2月 27～28 日の岐阜県飛騨地方の地震多発による決定率の低下が全体の決定率に影響を及ぼしたものと思われる。

なお、内陸の深い地震及び海域で発生する地震の決定率も図 12 の方が高くなっているが、これは図 12 では小笠原諸島付近などの沿岸から遠く離れた沖合で M4～6 の地震活動があり、それが震源決定率に影響を及ぼしていると思われる。

次に決定した自動震源が水平位置などでどの程度暫定震源と比較してずれているかを示したのが図 13 及び図 14 である。図 13 は内陸の浅い地震を、図 14 はそれ以外の内陸の深い地震や海域の地震について、自動震源と暫定震源のずれをプロットし、分布図としたものである。

図 13 は震源の周辺に対して観測点がまんべんなく分布することが予想されるため、総じてずれが非常に小さな範囲に収まっており、ヒストグラムも中心付近（±1km の位置のずれ）が大部分を占めていることが分かる。

図 14 はやや図 13 に比べると水平位置がずれた震源がやや目立つように見えるが、ヒストグラムで見ると中心付近の分布が大部分を占めていることが分かる。

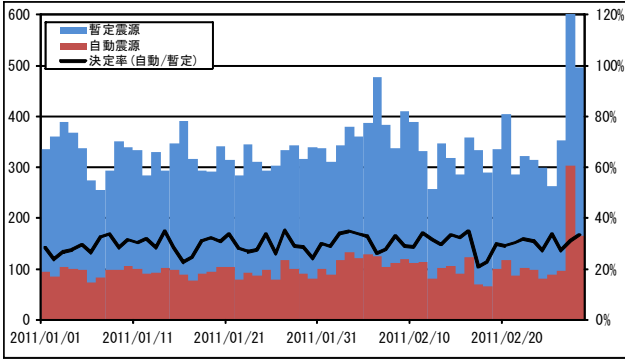


図 10 平成 23 年 1 月 1 日から 2 月 28 日までの期間の自動震源と一元化震源の決定数(棒グラフ)及び決定率(折れ線グラフ)の推移。

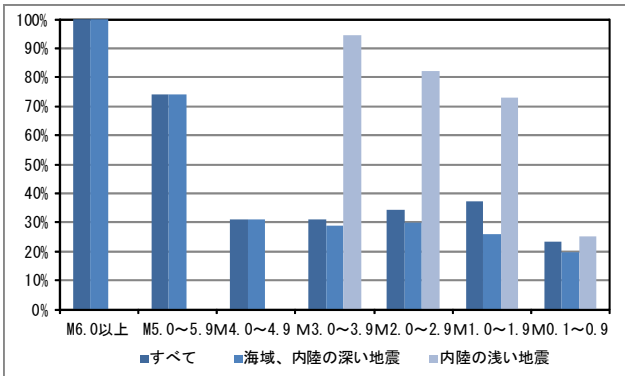


図 11 平成 23 年 1 月 1 日から 2 月 28 日までの期間の自動震源 M 別決定率を内陸の浅い地震とそれ以外に分けて示した。今期間は内陸の浅い地震は M4.0 以上がなかった。

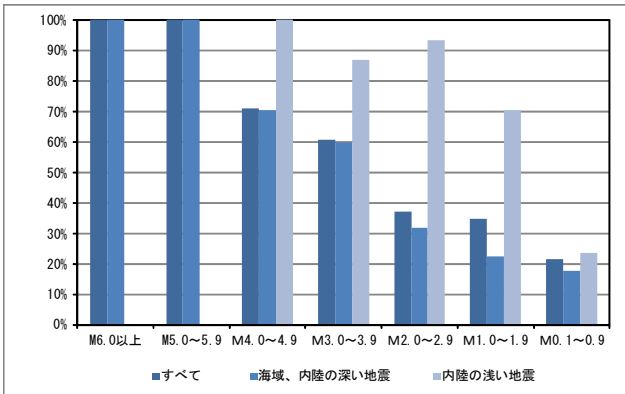


図 12 平成 22 年 11 月 20 日から 12 月 31 日までの M 別決定率。今期間は特に地震の多発なども見られなかったため、内陸の浅い地震では M2.0 以上でも 90% 以上の決定率となっている。

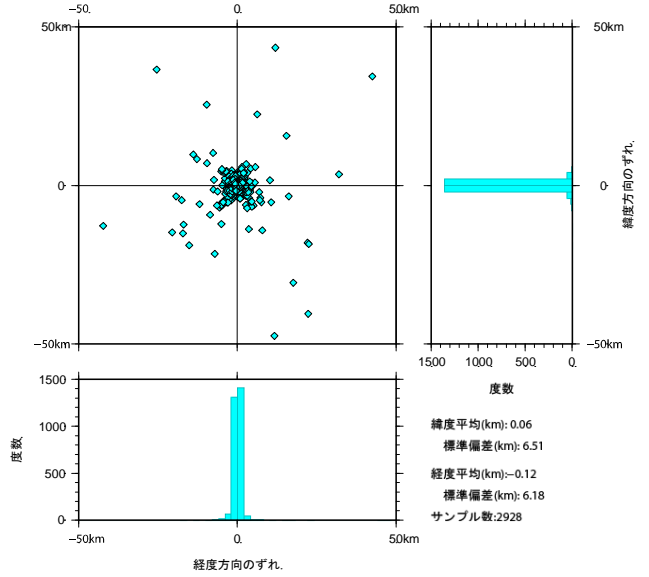


図 13 平成 23 年 1 月 1 日から 2 月 28 日までの期間の内陸の浅い地震について、暫定震源を基準とした自動震源の水平位置のずれ分布及び緯度経度方向のずれのヒストグラム。水平位置の単位は km である。水平位置のばらつきも非常に小さく、ヒストグラムも中心付近(±2km 以内)がほとんどを占めていることが分かる。

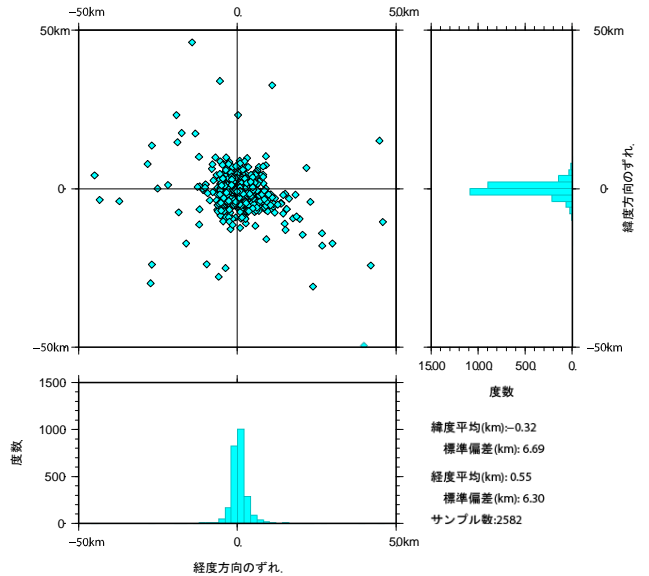


図 14 平成 23 年 1 月 1 日から 2 月 28 日までの期間の内陸の深い地震及び海域で発生する地震について、暫定震源を基準とした自動震源の水平位置のずれ分布及び緯度経度方向のずれのヒストグラム。水平位置の単位は km である。図 13 に比べると水平位置のばらつきがあるが、ヒストグラムを見ると図 13 同様にほとんどが中心付近(±2km 以内)に大半が集まっていることが分かる。

自動震源については、大学等研究機関でも適宜ホームページなどに掲載されている。(独)防災科学技術研究所は Hi-net と呼ばれる高感度地震観測網を用いて南西諸島を除く全国を統一的に処理しているため、全国を対象とする気象庁の自動震源と比較が容易である。今回は同研究所の Hi-net による自動震源(以下、Hi-net 自動震源と呼ぶ)と比較を行った。

図 15 を見ると、自動震源は Hi-net 自動震源の 9 割程度の決定率を示している。しかし、2月 27~28 日の岐阜県飛騨地方の地震多発があった期間は自動震源の決定率は 80% を下回っていた。Hi-net 自動震源についても、気象庁の自動震源同様に地震多発時の決定率、決定数の低下はあると思われるが、気象庁の自動震源よりも決定率が高いものと思われる。

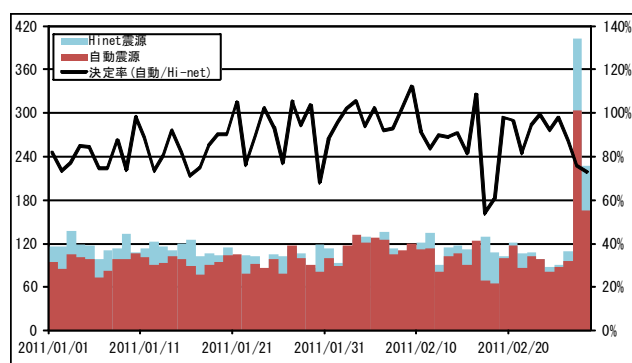


図 15 平成 23 年 1 月 1 日から 2 月 28 日までの間、自動震源と Hi-net 自動震源の決定数(棒グラフ)及び決定率(折れ線グラフ)の推移。

4.4 規模の大きな地震発生時の比較

深発地震を除き規模の大きな地震が発生すると、地震発生直後から余震が大量に発生することが多く、数時間分の地震処理を行うと場合によっては震源断層の広がりが見える程度まで余震が発生することもある。4.3 で示したように、短時間で地震が多発するとイベント検知が十分に行えずに本来処理すべき地震を取り逃す事例が発生することから、4.3 で示した自動震源の決定率よりも低下すると思われる。

REDC2 では、1000 チャンネル(約 300 観測点程度)までという制限はあるものの、地震波形とパラメータを準備すればオフライン地震処理と呼ばれるシミュレ

ーションを行う機能がある。今回は平成 17 年(2005 年)3 月に発生した福岡県西方沖の地震と平成 20 年(2008 年)岩手・宮城内陸地震について、それぞれオフライン地震処理を実施した。図 16 及び 17 の通り、一元化処理した結果に比べると自動処理結果は 1 割強程度の決定数となっており、4.3 で見た 3 割程度の決定率よりもはるかに小さくなっている。これは、現行の自動処理では短時間に地震が多発していることに充分対応していないためである。特に、M-T 図を見ると本震直後の 20~30 分程度の間、自動処理はほとんど震源が決まっていないことがわかる。これは、本震発生及び直後の余震によりそれまでの静穏状態からノイズレベルが急激に上昇したため、静穏時では必ず検知できる M3~4 クラスのような地震であってもトリガ検知しづらくなっているためである。

ただ、決定数は上記の通り少ないものの数時間経過した時点で見ると、自動震源だけでも概ねの震源域を把握することは可能である。

5 考察及び今後の課題

現行の REDC システムの処理を踏まえると、今後は以下の処理について改善が求められる。

- 地震多発時に決定率を落とさないようにすること
- 平常時における決定率をより上げられるようにすること

特に、地震多発時については早期に震源域を把握するためや、活動度を推定するために利用されるなどの需要がある。

謝辞

自動震源決定には気象庁のほか、大学や(独)防災科学技術研究所等の関係機関⁵から提供を受けた地震観測データを使用しました。

震央分布図及び M-T 図の作成には hypdsp[横山(1997)]を、トリガグループ等の地図描画には GMT[Wessel and Smith(1991)]を使用しました。記して感謝の意を表します。

⁵平成 24 年 3 月 31 日現在：独立行政法人防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、独立行政法人産業技術総合研究所、国土地理院、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市及び独立行政法人海洋研究開発機構による地震観測データを利用している。また東北大学の臨時観測点(夏油、岩入、鶯沢、石淵ダム)、IRIS の観測点(台北、玉峰、寧安橋、玉里、台東)のデータを利用している。このほか、平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震大学合同観測グループの臨時観測点(大和、滝沢村青少年交流の家、栗原瀬峰、一関花泉、宮古茂市、金峯山臨時)のデータを利用している。

文献

- ト部 卓・東田進也 (1992): win-微小地震観測網波形
検測支援のためのワークステーションプログラム
(強化版), 地震学会講演予稿集, no.2, 331.
- 尾崎友亮 (2004): 新 EPOS (Earthquake Phenomena
Observation System: 地震活動等総合監視システム)
の紹介, 験震時報, 68, 57-75.
- 汐見 勝彦・小原一成・針生義勝・松村 稔 (2009):
防災科研 Hi-net の構築とその成果, 地震 2, 61 特
集号, S1-S7.
- 地震予知情報課 (1998): 地域地震情報センターデータ
処理システム(REDC)の紹介, 地震火山技術通信,
No.73, 19-35.
- 松村正三 (1989): コンピュータによる地震観測のシス
テム化とその変遷, 地震 2, 42, 371-390.
- 横田 崇・周 勝奎・溝上 恵・中村 功 (1981): 地
震波データの自動検測方式とオンライン処理システ
ムにおける稼働実験, 地震研究所彙報, 55, 449-484.
- 横山 博文 (1997): X ウィンドウシステムを用いた地
震活動解析プログラム, 験震時報, 59, 1-6.
- Allen, R.V. (1978): Automatic earthquake recognition and
timing from single trace, Bull. Seism. Soc. Am., 68,
1521-1532.
- Wessel.P. and W.H.F.Smith (1991): Free software helps map
and display data, EOS Trans.AGU, 72, 441.

(編集担当 大竹和生・本間直樹)

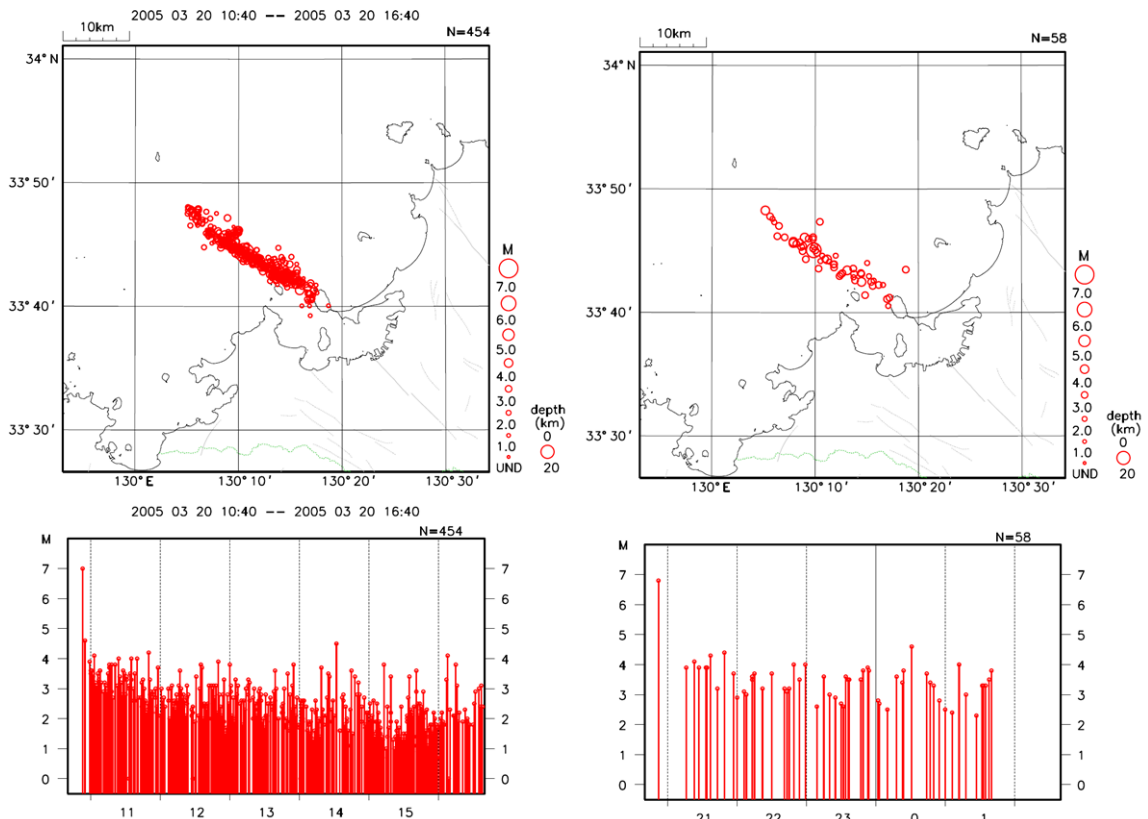


図 16 平成 17 年 (2005 年) 3 月 20 日に発生した福岡県西方沖地震 (6 時間) の処理結果. 左図は一元化処理された震源を, 右図はシミュレーションにより求めた自動震源を示している

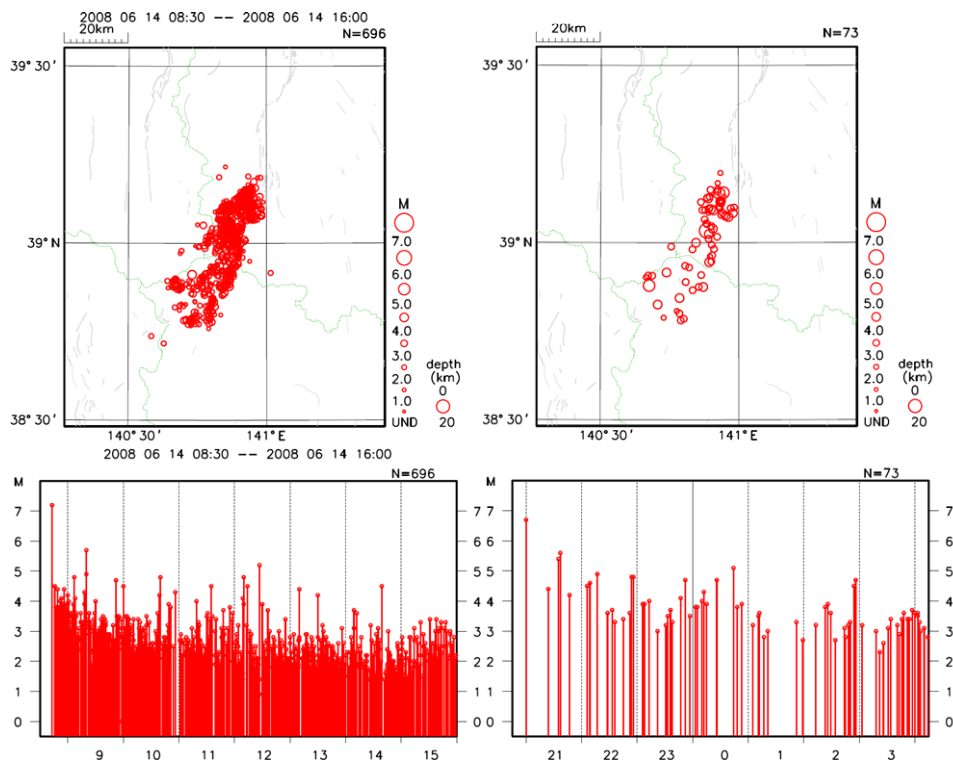


図 17 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震 (7 時間半) の処理結果. 左図は一元化処理された震源を, 右図はシミュレーションにより求めた自動震源を示している.

参考（秒値処理で用いられる計算式）

STA や LTA の作成について、気象庁では以下のロジックを用いて波形データを処理している。なお、震度 1 以上の地震などのように規模の大きな地震を扱う EPOS では、観測点から伝送される地震波形をそのまま用いることが多いが、微小地震を検知する必要がある REDC については、波形をデジタルフィルタ処理させて、よりシグナル部分を強調して（ノイズ部分を低減させて）以下の値を作成している。

1. 単純平均

$$Av = \frac{1}{N} \sum_i^N x(i)$$

$x(i)$: 各サンプルデータ

i : 1 秒間のデータを表すインデックス

N : 1 秒あたりのサンプリングデータ数

2. オフセット

$$Xoff(i) = (1 - \alpha_0) \times Xoff(j-1) + \alpha_0 \times Av(j)$$

j : 各秒を表すインデックス

α_0 : オフセット計算のための係数

この式による $Xoff$ は時間について指数関数的な「引きずり」を持つ。その指数関数の時定数を T_0 秒、 Δt をサンプリング間隔 ($= 1/N$) とすると以下の式で求めることが出来る。

$$\alpha_0 = \frac{\Delta t}{T_0}$$

サンプリング周波数 100Hz の波形に対して時定数 5 秒と設定した場合、 $\alpha_0 = (0.01/5.0) = 0.002$ である。

3. 絶対値平均

$$A_n = \frac{1}{N} \sum_i^N |x(i) - Xoff_c|$$

$Xoff_c$: 計算用オフセット値であり、トリガオフ時は 2. で作成されたものを、トリガオン時はトリガオン直前の値を保持し続ける（トリガオフまではトリガオン直前の $Xoff_c$ となる）。

4. STA(short term average)

$$S_a(j) = (1 - \alpha_s) \times S_a(j-1) + \alpha_s \times A_n(j)$$

α_s : STA 計算のための係数

時定数 T_s との関係で示される： $\alpha_s = \frac{\Delta t}{T_s}$

5. LTA(long term average)

$$L_a(j) = (1 - \alpha_l) \times L_a(j-1) + \alpha_l \times A_n(j)$$

α_l : LTA 計算のための係数

時定数 T_l との α_l の関係： $\alpha_l = \frac{\Delta t}{T_l}$