

緊急地震速報評価・改善検討会
技術部会 (第5回)
資料

目次

Ⅲ. 議事

- 1 緊急地震速報の発表状況について(報告) ----- (P 1)
 1. 1 平成24年10月以降の発表状況 ----- (P 1)
 1. 2 不適切な警報発表事例 ----- (P 3)
 - (1) 平成25年2月25日16時23分頃、栃木県北部の地震
 - (2) 平成25年4月13日5時33分頃、淡路島付近の地震
 - (3) 平成25年8月8日16時56分頃、和歌山県北部の地震
 1. 3 その他不適切な予報発表事例 ----- (P 4)
 - (1) 平成24年10月18日0時1分頃、新潟県中越の地震
 - (2) 平成25年9月18日9時18分頃、鳥島近海の地震
 - (3) 平成26年1月2日2時15分頃、伊豆大島近海の地震

 - 2 ノイズ対策について ----- (P 9)
 - ・・・平成25年8月8日の過大な警報発表を踏まえて
 2. 1 平成25年8月8日の過大な警報発表について ----- (P 9)
 2. 2 ノイズ対策への取り組み状況 ----- (P 12)

 - 3 大深度地震計、DONET海底地震計データの活用について ----- (P 13)
 3. 1 新規観測点利用に当たっての考え方 ----- (P 13)
 3. 2 大深度KiK-NetがHi-netの検定信号の影響を受けることの対策 ----- (P 14)
 3. 3 DONETの加速度波形オフセット対策 ----- (P 15)

 - 4 開発中の新たな手法 ----- (P 17)
 4. 1 パーティクルフィルタを用いた統合震源決定手法 (IPF法) ----- (P 18)
 4. 2 従来手法と、観測されたリアルタイム震度から震度予測をする手法の併用 ----- (P 21)
-

1 緊急地震速報の発表状況について（報告）

この項の要点

- 平成24年10月以降（第4回技術部会以降）、地震同時多発による過大な警報発表はなかった。
- 平成26年1月2日02時15分頃の伊豆大島近海の地震(M2.4、最大震度2)について、M6.0、最大予想震度4と予想した緊急地震速報（予報）を発表した。Mを大きく推定した原因は、観測点近傍ごく浅部で発生した地震について、震源を観測点から実際より遠くに推定したこと、伊豆大島差木地（奥山）観測点では理論値と比較して振幅が過大に観測されたことが挙げられる。

1.1 平成24年10月以降の発表状況

表1.1に平成24年（2012年）10月以降の緊急地震速報（警報）の発表状況を、表1.2に震度5弱以上を観測した地震に対する緊急地震速報の発表状況を示す。平成24年（2012年）10月以降、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震発生後に頻繁に見られた、地震同時多発による過大な警報発表はなかった。

これは、余震活動が本震直後に比べて低下してきたことと、同時多発地震の対策（第4回技術部会資料“1.3 同時多発に関する対策”の項の、地震同一判定処理が対象とする観測点の範囲を狭くしたこと、小規模な地震の震源データを使用しないこと）が相応の効果を果たしたことによるものと考えられる。

表1.1 平成24年（2012年）10月（技術部会第4回）以降の緊急地震速報（警報）の発表状況

No.	月日	時分	震央地名	緊急地震速報（警報）を発表した地域の数	実際に観測した最大震度毎の地域の数				すべての地域で震度2以下（誤報）	一地域でも震度2以下（不適切）	説明（項番号）
					震度5弱以上	震度4	震度3	震度2以下			
平成24年（2012年）											
1	12月7日	17時18分	三陸沖	23	6	17	0	0			
平成25年（2013年）											
2	2月2日	23時17分	十勝地方中部	16	7	7	2	0			
3	2月25日	16時23分	栃木県北部	17	1	2	6	8		×	1.2(1)
4	4月13日	5時33分	淡路島付近	32	4	13	12	3		×	1.2(2)
5	4月17日	17時57分	三宅島近海	3	1	2	0	0			
6	4月17日	21時03分	宮城県沖	8	2	3	3	0			
7	8月4日	12時28分	宮城県沖	9	2	5	2	0			
8	8月8日	16時56分	和歌山県北部	83	0	0	0	83	×	×	1.2(3)
9	9月20日	2時25分	福島県浜通り	8	3	3	2	0			
10	12月31日	10時03分	茨城県北部	1	1	0	0	0			
合計				200	27	52	27	94	1	3	

[凡例] 水色の行：概ね適切に発表した事例

灰色の行：震源の推定、震度の予想の誤差などで適切に発表できなかった事例

表1. 2 平成24年（2012年）10月（技術部会第4回）以降で、
震度5弱以上を観測した地震の緊急地震速報の発表状況

No.	地震発生日	時分	震央地名	M	最大観測震度	警報発表時の最大予想震度	最大予想震度
1	2012年10月25日	19時32分	宮城県沖	5.6	5-	無	4
2	2012年12月07日	17時18分	三陸沖	7.3	5-	5-	5-
3	2013年01月28日	3時41分	茨城県北部	4.8	5-	無	4
4	2013年01月31日	23時53分	茨城県北部	4.7	5-	無	4
5	2013年02月02日	23時17分	十勝地方南部	6.5	5+	5-	5-
6	2013年02月25日	16時23分	栃木県北部	6.3	5+	5+	6-
7	2013年04月13日	5時33分	淡路島付近	6.3	6-	5+	6-
8	2013年04月17日	17時57分	三宅島近海	6.2	5+	5-	5-
9	2013年04月17日	21時03分	宮城県沖	5.9	5-	5-	5-
10	2013年05月18日	14時47分	福島県沖	6.0	5+	無	4
11	2013年08月04日	12時28分	宮城県沖	6.0	5+	5-	5-
12	2013年09月20日	2時25分	福島県浜通り	5.9	5+	5-	5+
13	2013年11月10日	7時37分	茨城県南部	5.5	5-	無	4
14	2013年12月31日	10時03分	茨城県北部	5.4	5-	5-	5+

凡例： 5-；5弱、5+；5強、6-；6弱、6+；6強

No.10の地震では、震度5強を観測したのは1点、震度5弱の観測はなく、それ以外は震度4以下であった。

（注）評価に使用している観測震度は速報値を使用。（後日修正がありうる）

- 最大観測震度5弱以上で警報発表なし：5回（5弱以上14事例中）
（内訳） 最大震度5弱で警報発表なし：4回
最大震度5強で警報発表なし：1回
○最大震度5弱以上で警報または予報の発表なし：0回

1. 2 不適切な警報発表事例

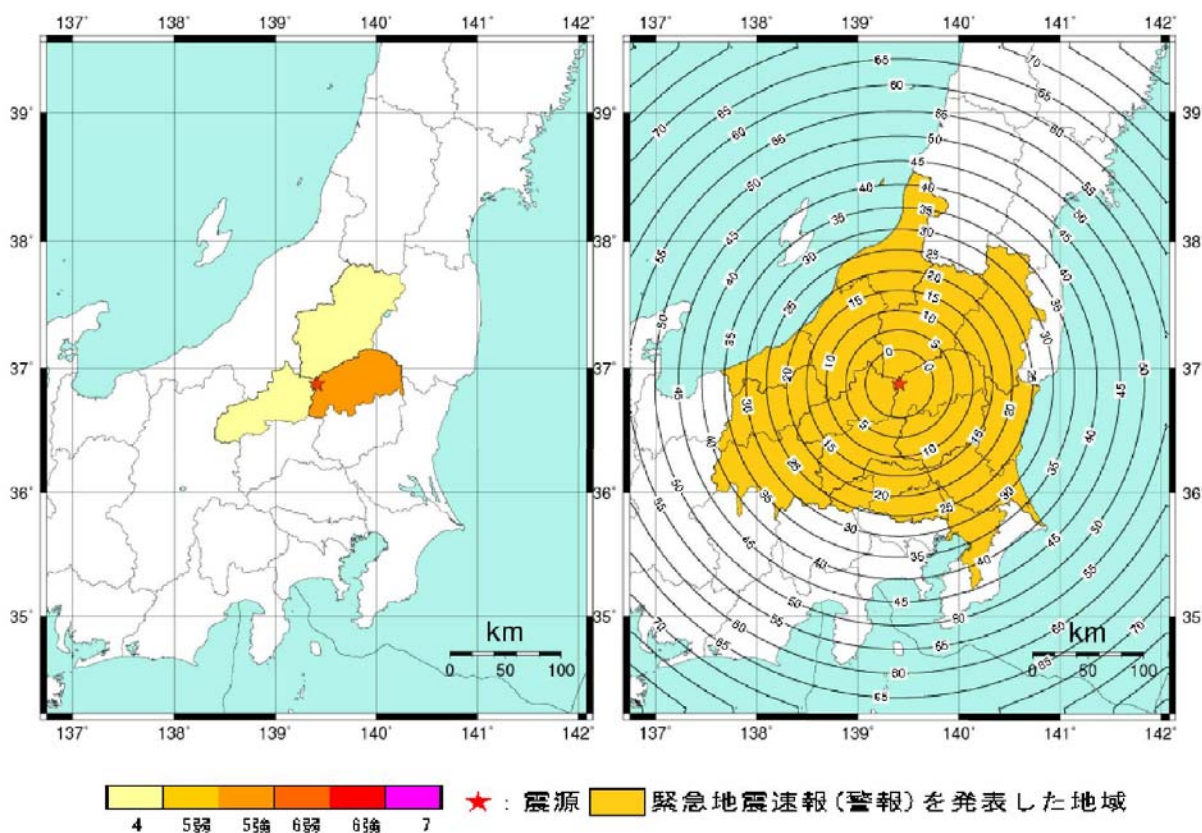
(1) 平成25年2月25日16時23分頃、栃木県北部の地震

(表1. 1のNo.3、図1. 1)

最大観測震度5強に対して最大予想震度は5強、震源位置・深さ、マグニチュード(一元化震源M6.3、警報発表時の予想M6.3)と概ね妥当であったが、震源に近い震度観測点周辺以外では強い揺れは観測されなかった。このため、震度4以上と予想した領域が実際よりかなり広範囲の予想となった。原因として、距離減衰式がこの地域の実際の構造による影響を十分再現できなかったことが挙げられる。

図1. 1 栃木県北部の地震

観測された震度分布(左図)及び緊急地震速報(警報)の猶予時間・発表対象地域(右図)



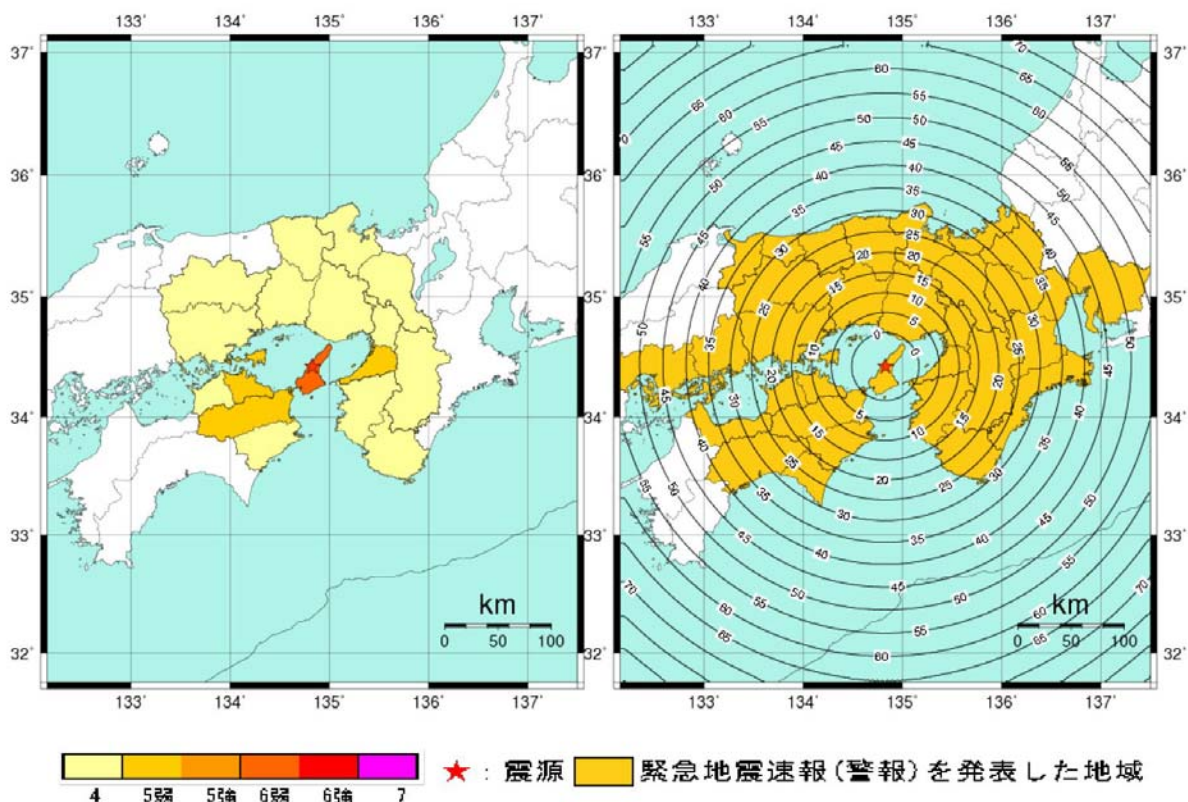
(2) 平成25年4月13日5時33分頃、淡路島付近の地震

(表1. 1のNo.4、図1. 2)

最大観測震度6弱に対して最大予想震度5強、震源位置・深さと概ね妥当な予想であったが、震源に近い観測点以外では強い揺れは観測されなかった。このため、震度4以上と予想した領域が実際よりかなり広範囲の予想となった。原因として、推定したマグニチュード(M)が、一元化震源のM6.3に対して警報発表時の予想Mが6.7であったことが挙げられる。

図1. 2 淡路島付近の地震

観測された震度分布（左図）及び緊急地震速報（警報）の猶予時間・発表対象地域（右図）



(3) 平成25年8月8日16時56分頃、和歌山県北部の地震(表1. 1のNo.8)

和歌山県北部の地震(M2.3、無感)とほぼ同時に検知した東南海海底地震計の機器障害によるノイズを、地震の揺れとして取り込み、過大な警報を広域に発表した(「2. ノイズ対策について」の項を参照)。

1. 3 その他不適切な予報発表事例

(1) 平成24年10月18日00時01分頃、新潟県中越地方の地震

(表1. 3、図1. 3~4)

この地震のMは4.2、最大観測震度は4(新潟県)を観測した。

この地震に対して緊急地震速報(予報)を発表したが、表1. 3のとおり震源推定を大きく誤った。これは、新潟県中越地方の地震(M4.2)の直前に、同じ地域でこれより規模の小さい地震(M2.5)が発生し、この2つの地震の検測値を1つの地震として処理したために震源を大きく誤って宮城県沖に推定したもので、現在の同一地震判定手法の限界である(図1. 3、図1. 4)。

表1. 3 新潟県中越地方の地震（震央推定の誤差大）

	地震発生日時	震央地名	北緯	東経	深さ	M	最大震度
観測値 (一元化震源)	平成24(2012)年 10月18日 00:01	新潟県中越地方	37.0	138.7	7km	4.2	4
緊急地震速報 (予報)	平成24(2012)年 10月18日 00:01	宮城県沖	38.4	141.9	10km	5.7 ~ 6.0	4

図1. 3 新潟県中越地方の地震
(観測した震度の分布)

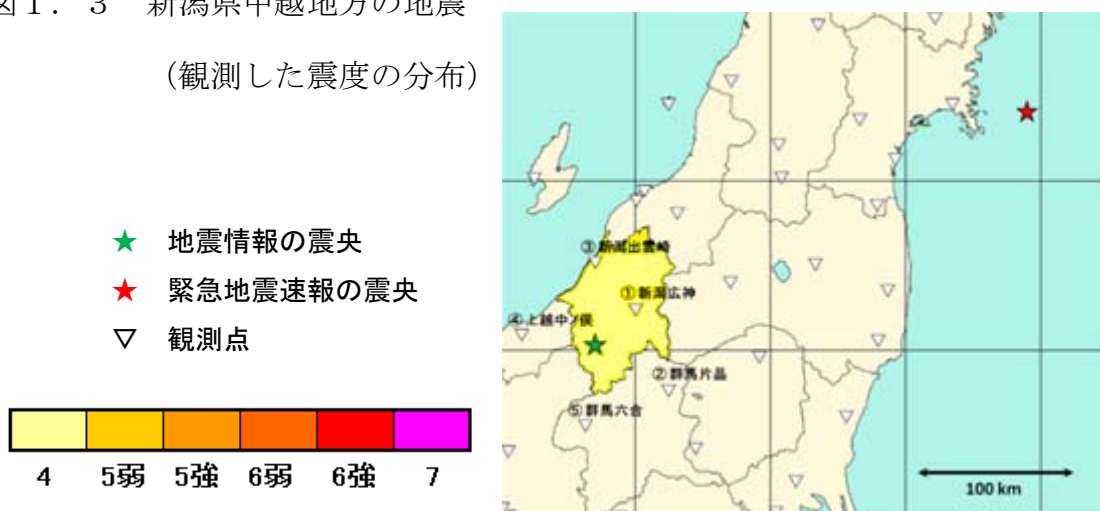
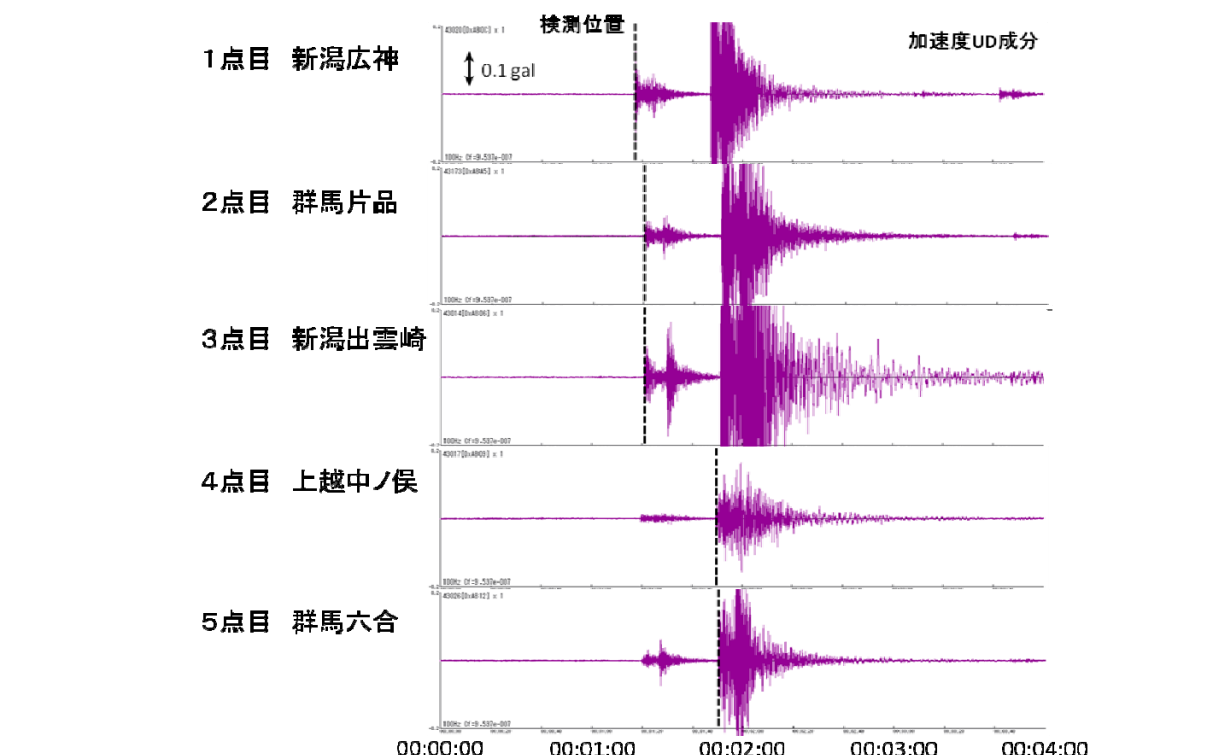


図1. 4 新潟県中越地方の地震（先着5観測点の加速度波形と検出位置）



（2）平成25年9月4日09時18分頃、鳥島近海の地震（図1.5、表1.4）

この地震のマグニチュード（M）は6.8、深さ445km、最大観測震度は4（宮城県～神奈川県）で、広範囲に揺れを観測した。（図1.5）

この地震に対して緊急地震速報は予報・警報とも発表していない。これは表1.4のとおり各観測点で地震を検知したものの、ノイズと判定したりB-Δ法によって推定された震央距離が採用上限を超えていたことから震源が決められなかったものである。

なお、震源は深く、震源が適切に決定できても震度予想を行う地震の対象外（深さ150km以深）であった。

図1.5 鳥島近海の地震の震央と震度分布図（M6.8、最大震度4）

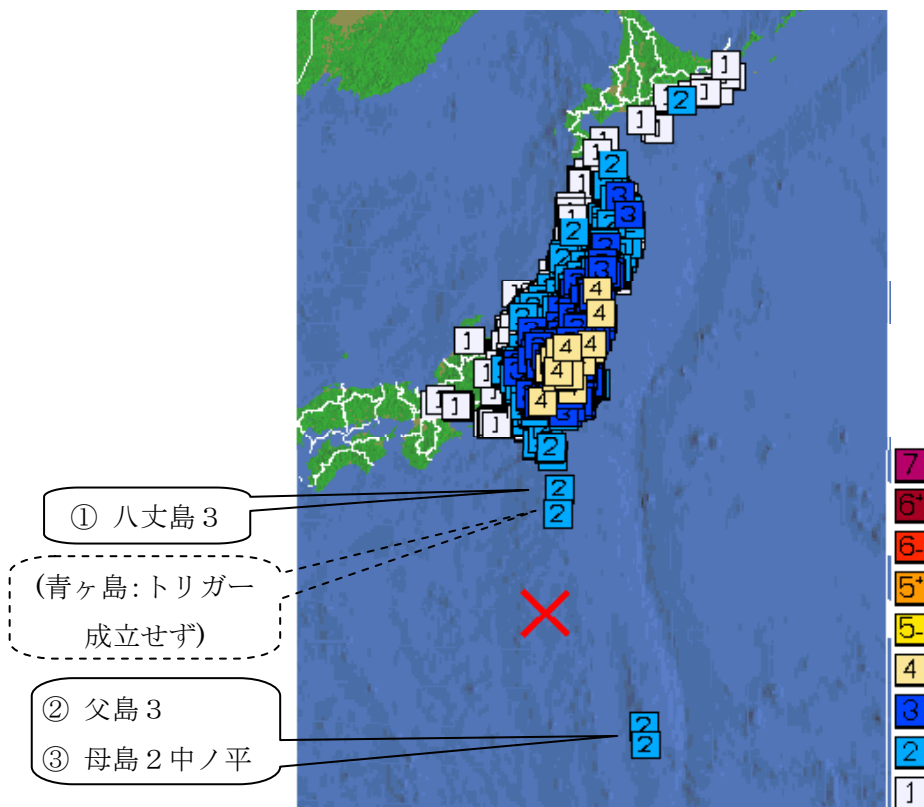


表1.4 鳥島近海の地震に対する緊急地震速報の処理状況（震源決まらず）

検知順	観測点名称	震央距離推定（B-Δ法）	ノイズ判定結果（原因）
①	八丈島3	なし（主成分分析は成功）	ノイズ（分散）
②	父島3	588km	（震央距離推定過大で不採用）
③	母島2中ノ平	なし（主成分分析は成功）	ノイズ（垂直/水平成分比）
④	伊豆下田	なし（主成分分析は成功）	ノイズ（分散）
⑤	千葉三芳	なし（主成分分析は成功）	ノイズ（振幅ノイズ）

（3）平成26年1月2日2時15分に伊豆大島近海で発生した地震（表1.5～6）

① 発表内容

平成26年1月2日02時15分頃の伊豆大島近海の地震(M2.4、最大観測震度2、計測震度1.6)について、緊急地震速報(予報)を発表した。最大予想震度4(計測震度4.3)、M6.0と算出しており、警報発表に至らなかったものの、震度階級で2階級(計測震度で2.7)過大であった。

② 観測・処理状況

現地での単独観測点処理(B- Δ 法・主成分分析法)の結果や中枢での収録波形から計算した結果や過去の観測状況等から、表1.5のとおり観測データや緊急地震速報の処理内容に異常は見られない。

表1.5 処理状況の調査結果(伊豆大島近海の地震)

種別	確認事項	結果
地震トリガー	伊豆大島差木地(奥山)のみでトリガー成立。周辺の観測点では有効な地震検知なし。	ごく浅い地震のため、周辺の観測点では揺れが小さく、観測事実として問題はない。
B- Δ 法 主成分分析法	南東約18km、 実際の震源は島内(観測点直下のごく浅い場所)	Δ は小さな値を推定しており、不適切とは言えない。
B- Δ 法	P波初動1.1秒にS波混入	S波混入前までで処理しても概ね同じ結果。
収録波形	目視で確認	異常なし
収録波形	波形から再計算したP波初動・最大振幅・震度等	現地処理結果と合致しており問題はない。
他の近接観測点との震度比較	差木地(奥山) : 3(3.4) 差木地(公民館) : 2(1.6)	差木地(奥山)では直下の地震の揺れが大きい傾向。
震源が近傍でない地震の観測点M	観測点Mと一元化Mを比較。	常に観測点Mが大きくなるような傾向はなく、観測点として適切。

また、震源が伊豆大島差木地(奥山)観測点直下にあったと仮定した場合、当該観測点の最大振幅を用いて新全相Mを計算すると、観測点Mは震源の深さ1kmで3.9、震源の深さ100mで2.8となる。

③ 原因

ア Mを大きく推定した原因は、震源が島内に決まらず実際より遠くに決定した

こと。

- イ 伊豆大島差木地（奥山）観測点が実際に強く揺れており、観測点直下極浅に震源がある場合、振幅が理論値より過大に出る傾向があること。

④ 改善策

ア 暫定的な措置

同様の地震イベントが同日の02:36と03:51の他、前月12月30日の22時前後にも計2回発生しており、いずれも緊急地震速報（予報）であったが最大予想震度が観測震度と比較して2階級、計測震度では1.8～1.9過大となっていたこと、同島内での地震が散発しており、その規模が少し大きくなれば同観測点以外では大きく揺れていなくても過大な警報を発表することになることから、当面同観測点を緊急地震速報の活用から外した。

（その後活動が落ち着いたと判断し、平成26年2月27日に活用再開）

イ 類似事例

この事例と同様に震源が観測点直下にあった他の例をみると、予想範囲や予想震度が過大になる傾向が見られる（表1.6）。これらは、今回の事例と同様、震源を観測点から実際より遠くに推定することが原因であると考えられる。

表1.6 類似事例(伊豆大島近海の地震)

発生日時刻	震央地名	一元化震源の M/推定M	最大震度 観測/予想
H25.05.30 23:05頃	大分県中部	2.8/4.7	2 / 4
H24.12.27 15:25頃	新島・神津島近海	1.9/4.4	1 / 3

また、伊豆大島差木地（奥山）観測点と同様、観測点直下極浅に震源があり、同程度に振幅が過大になる観測点は、現在のところ他には見つからない。

ウ 今後の対策

観測点直下の極く浅い地震に対して、震源を観測点から実際より遠くに推定することにより、Mや震度予想が過大となる場合があることは避けられない。

今回の事例のように、観測点直下極浅で地震活動が発生し、緊急地震速報における最大予想震度が極過大となる場合には、暫定的に当該観測点を緊急地震速報の処理から暫定的に外す必要があるかどうかの判断を速やかに行う態勢を確保した。

2 ノイズ対策について・・・平成25年8月8日の過大な警報発表を踏まえて

この項の要点

平成25年8月8日の過大な警報発表を踏まえ、その原因、対処とともに、気象庁におけるノイズ対策への取り組みを紹介する。

- 平成25年8月8日16時56分頃の和歌山県北部の地震に関して、関東から九州地方の広範囲に緊急地震速報（警報）を発表したが、震度1以上は観測されなかった。このように過大な震度予想となった原因は、三重県南東沖の海底地震計からのノイズを地震の揺れとして取り込んだためである。
- ノイズによる不適切な情報発表を防ぐため、まずノイズ源を可能な限り排除し、次にノイズがでる危険性がある場合は事前に処理対象から除外するとともに、ノイズが地震と判断された場合でも、他の検測値と同一地震と判定されないように高度化を図ることとしている。

2. 1 平成25年8月8日の過大な警報発表について（図2. 1～3）

（1）発表内容

気象庁は、平成25年8月8日16時56分頃の和歌山県北部を震源とするマグニチュード2.3の地震に対して、この地震検知18.5秒後に、緊急地震速報（警報）を発表した。対象地域は近畿地方を中心に関東から九州地方、うち奈良県・大阪府に対しては最大予想震度7と予想したが、全国いずれの地域でも震度1以上は観測されなかった（図2. 1）。

（2）原因

原因は、和歌山県北部の地震とほぼ同じタイミングで発生した、三重県南東沖の海底地震計（気象庁所有の観測点。以下「東南海 OBS」）のノイズを地震の揺れとして取り込んで計算したことによる。このため、当面は東南海 OBS を緊急地震速報に利用しないこととし、並行して大きなノイズ波形となった原因を調査したところ、ハードウェアの不具合が原因で、時折動作が異常となって波形が乱れる事象が同日午前中から発生していたことがわかった（図2. 2、図2. 3）。

（3）対策

ノイズの直接の原因となったハードウェアの不具合を修理するとともに、同じ不具合が再発しても大きなノイズ波形が現れないようにソフトウェア改修を行い、平成25年10月10日に東南海 OBS の緊急地震速報への利用を再開した。

また単独観測点処理についても、B-Δ法で使用する波形の時間幅を従前のP波到達直後の2秒間から1秒間に短縮した。これによりB-Δ法でのノイズ判定のタイミングを早めて、このノイズ判定前に単独観測点処理結果の送信1回目が行われる（地震イベントが成立する）ことがないようにした。

なお、この過大予想による警報発表後、TV・ラジオ等では画面表示やアナウ

センサーによる注意呼びかけ等を続ける事態となった。このため在京キー局等放送機関と協議し、警報を発表したが強い揺れが観測されない場合には、2～3分で「震源・震度に関する情報」を気象庁が発表し、強い揺れが観測されていない旨を伝えることとした。

図2. 1 実際の地震の震央（左図）と緊急地震速報（警報）発表地域（右図）
緊急地震速報（警報）発表時の猶予時間・発表対象地域

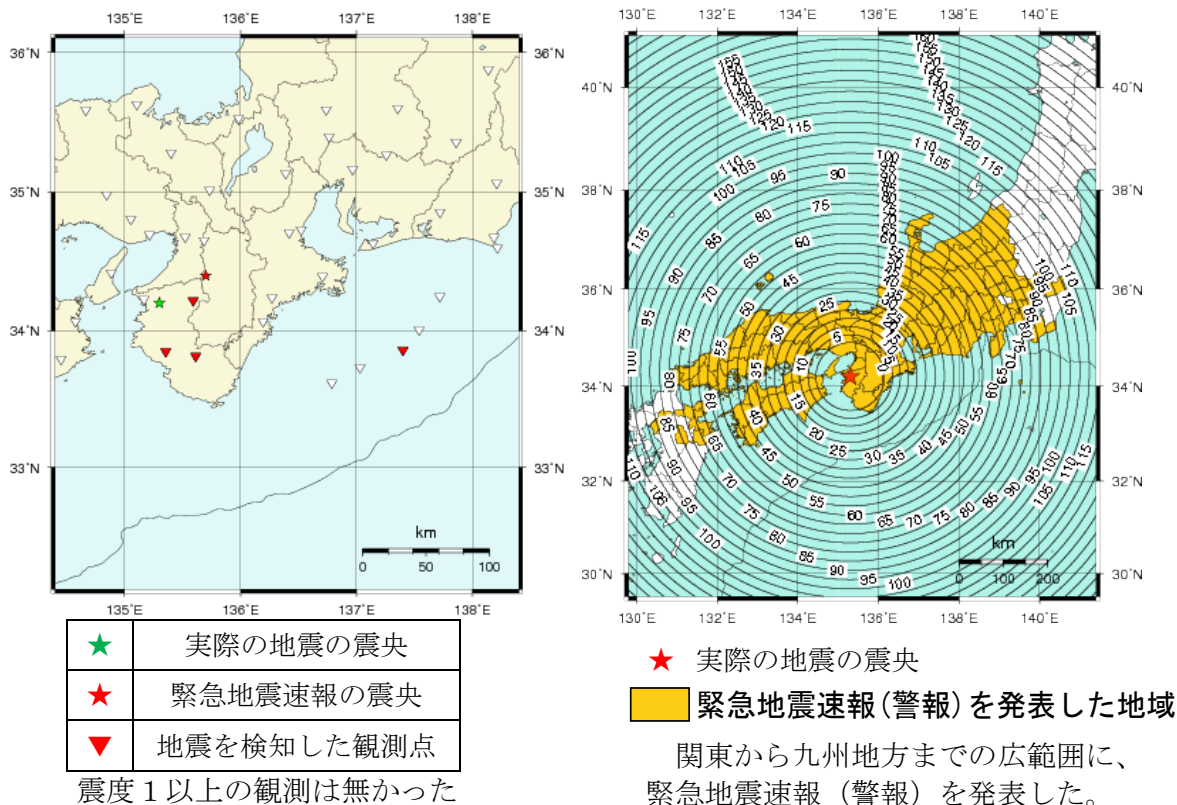


図2. 2 過大な震度予想となった原因

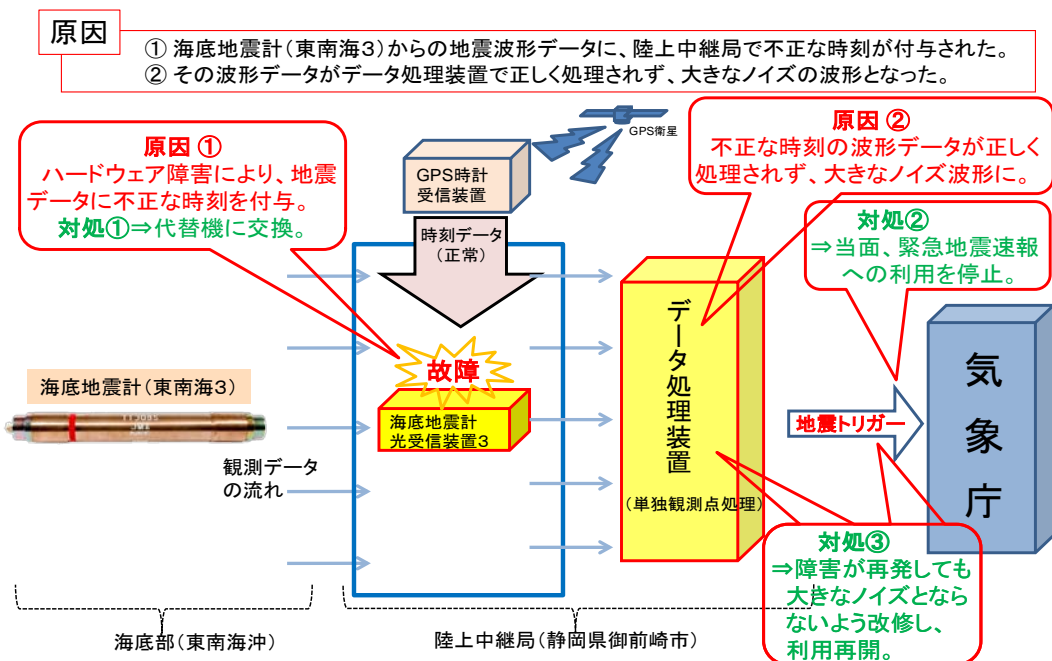
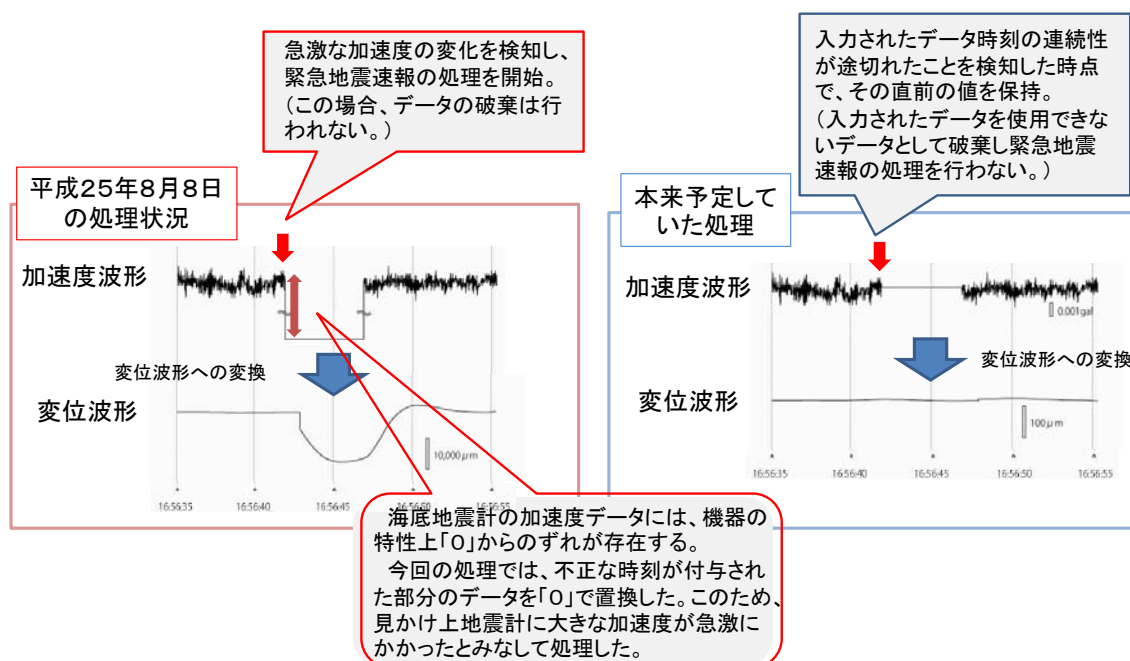


図2. 3 不具合発生時の波形処理状態

不正な時刻が付与されたデータの処理内容（水平1成分のみ掲載）



2. 2 ノイズ対策への取り組み状況

ノイズによる不適切な緊急地震速報の情報発表を避けるため、気象庁では以下のような考え方で、平成25年8月8日の過大警報時もこれに沿って対応している。

(1) ノイズ源を可能な限り排除

まず、ノイズ源を可能な限りなくすよう、観測環境を整備するとともに、観測量の品質管理に努めている。これまで、全ての気象庁多機能型地震計におけるA/D変換をセンサー近傍で行うことにより、雷ノイズの低減を実施している。

今回の事案は、海底地震計のハードウェアの不具合を修理するとともに、同じ不具合が再発しても大きなノイズ波形が現れないようにソフトウェア改修を行った。

(2) ノイズとして判断して、処理対象から除外する

単独観測点処理において品質管理を行っている。これまで、観測施設のドア開放（作業員立ち入り）や機器のテスト時には単独観測点処理結果（A電文）にテストフラグを付加して中枢側で破棄したり、周辺の工事や発破の情報を事前に入手し、必要に応じて処理対象観測点から除外する措置を行っている。

今回の事案では、B- Δ 法で使用する波形の時間幅を従前のP波到達直後の2秒間から1秒間に短縮し、ノイズ判定前にトリガ電文送信が行われないようにした。

（3）他の検測値と同一地震と判定されないようにする

ノイズを処理対象から完全に除外することはできないが、ノイズが新たな地震として判定された場合でも、隣接する観測点との距離に応じた時間経過後も隣接観測点からのトリガー情報が入手できなければ自動的にキャンセル報を送信する仕組みとなっている。

同時多発地震対策として、同一地震判定の高度化を行ってきたところであるが、これは、ノイズによる不適切な情報の排除にもつながるものであり、今後もその高度化を進める（「4. 開発中の新たな手法」参照）。

3 大深度地震計、DONET 観測点データの活用について

この項の要点

- ・大深度 KiK-net データについては、Hi-net の検定信号の影響を受けることが多く、特に定時（毎日9時）前後については波形データを処理しないように対処する。
- ・DONET データについては、地震観測時に加速度波形にオフセットが現れることが多いため、P波到達時刻のみから利用を始める予定である。

緊急地震速報を国の責任として広く確実に提供するため、気象庁では観測点の予備電源やバックアップ回線の強化を行い、地震・津波等による大規模な災害が発生した場合にも、自ら整備した観測網だけで緊急地震速報を発表できるよう対処している。加えて、緊急地震速報の精度と迅速性向上のため、(独)防災科学技術研究所の成果を取り入れ、同研究所が整備した Hi-net（高感度地震観測網）の観測データも活用している。

現在、(独)防災科学技術研究所が整備した基盤強震観測網 KiK-net のうち首都圏の大深度地震計や (独)海洋研究開発機構が紀伊半島沖に整備した海底地震計 (DONET) のデータを活用するための準備を進めており、さらなる精度向上と迅速化に取り組んでいる。

3. 1 新規観測点利用に当たっての考え方

緊急地震速報の処理は、観測した波形の特徴や P 波時刻・振幅データ・稼働している観測点の位置関係を元に、限られたデータと時間の中で、あらかじめ定めた処理手法を用いて（人手を介さず）自動処理だけでデータ解析・情報作成・発表・伝達を行う。したがって、センサーや設置環境等の問題で、頻繁に地震発生時以外に地震トリガーが成立する（または地震発生時にトリガーが成立しない）・振幅が過大（または過小）に観測される等の現象が発生すると、見逃しや地震の過大・過小評価等となって適切に緊急地震速報を発表することができない。特に大規模な地震を見逃したり、揺れを感じない程度の地震で警報を発表することは社会的影響が大きい。このため観測データの検証には慎重を期している。

また、運用開始後は本資料の第2項や上のおり、ノイズは緊急地震速報の不適切な情報発表につながるため、関係機関とは機器点検時等の確実な連絡体制を維持するとともに、観測状態についての情報交換を密にするなどし、不適切な情報発表を防止するよう努めていきたい。

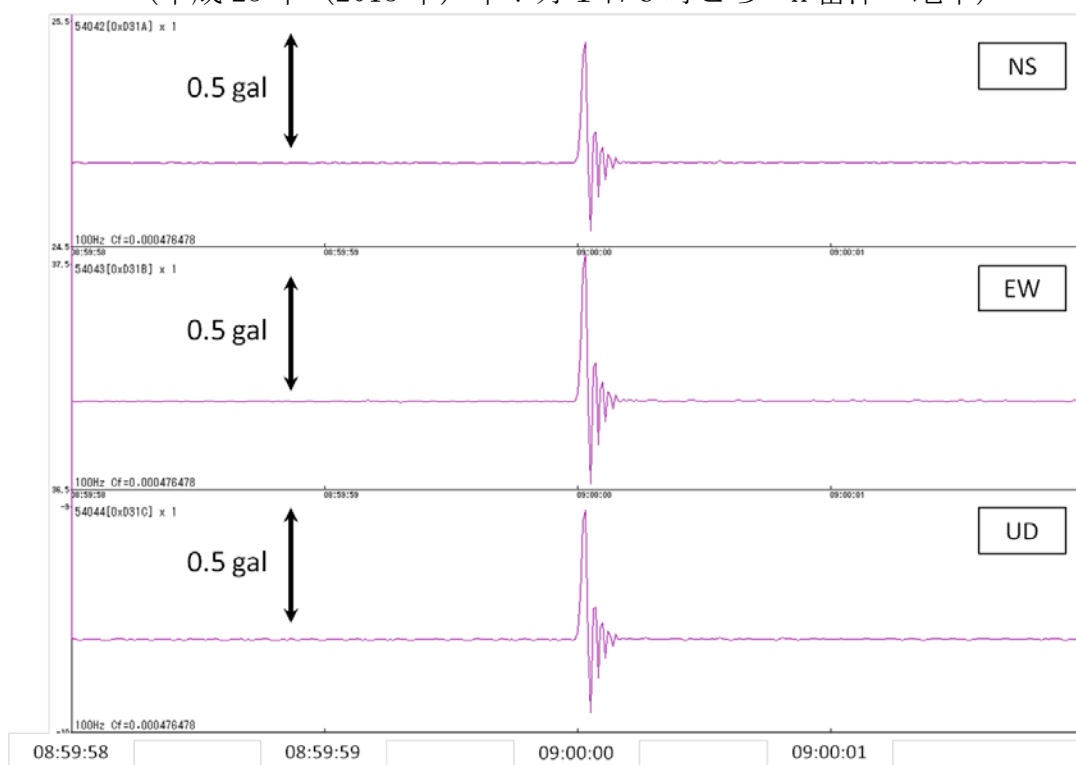
3. 2 大深度 KiK-net が Hi-net の検定信号の影響を受けることの対策

KiK-net 観測点は Hi-net 観測点と同じ観測施設に設置されており、Hi-net 観測点に検定信号が送られると、KiK-net 観測点はその信号を拾って地震波形が乱れることが多い（図3.1）。この検定信号は Hi-net の観測データ品質管理のため、毎日一斉に送信されており、KiK-net 観測点でも同時刻に波形が乱れている。

このため、検定信号で乱れた波形が緊急地震速報の波形処理で地震とみなされた場合には、不適切な情報発表につながる危険性がある。

緊急地震速報の単独観測点処理では、トリガーレベルの判定、上下動・水平動の振幅比や分散などからノイズか地震かを判別しているが、ノイズを完全に排除することはできない。このため、検定信号が入る時刻（毎日9時0分）前後の波形データは使用しないよう、システムの改修を進めているところである。

図3.1 Hi-net の検定信号の影響を受けた KiK-net の波形（例）
（平成25年（2013年）年7月1日9時ごろ H 富津・地中）



また、大深度 KiK-net 観測点について、緊急地震速報で利用するに当たって点検したところ、

- ・地震波到達時のデータオフセット
- ・センサー障害によるノイズトリガ

等が幾つかの観測点において見られた。このため、これらが見られない約十観測点で利用を開始する予定である。

3. 3 DONETの加速度波形オフセット対策

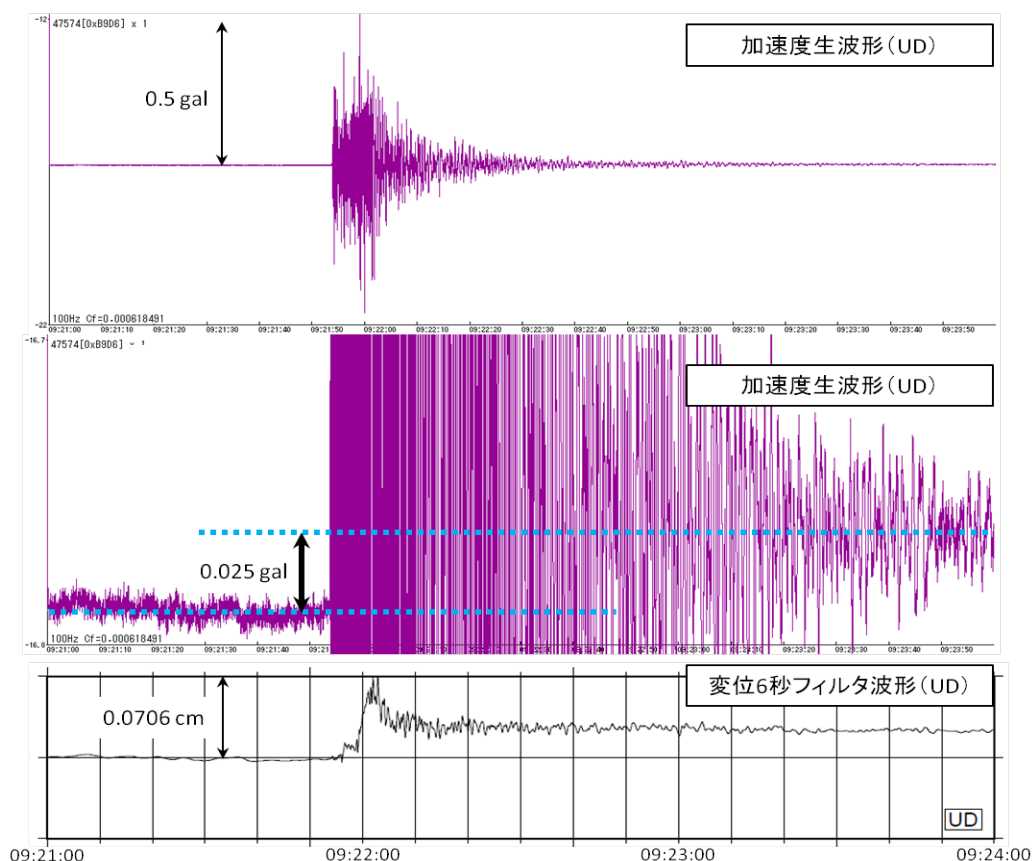
DONET データについては、地震観測時に加速度波形にオフセット(ステップ状のノイズ)が現れることが多かったが、埋設作業を実施して回数は減ってきた。オフセットが現れる場合、緊急地震速報のM計算に必要な最大変位振幅が過大に算出され、過大な震度予想の緊急地震速報（警報）発表を招く恐れがある(図3. 2)。

オフセットの原因は、設置環境依存の問題とセンサー依存の問題が考えられる。前者は、センサーが傾く等により現れる。後者は、センサーの特性として現れる。

設置環境依存の問題を解決するため、(独)海洋研究開発機構は、H25年2月に観測点の再埋設を行ったところであるが、再埋設後のH25年6月18日のM3.5の地震やH26年2月11日のM3.4の地震等の際にも、DONET観測点の幾つかにおいてオフセットが観測された。

これまで、(独)海洋研究開発機構等と協力してフィルタ処理等による対応策を検討してきたところであるが、オフセットに起因する緊急地震速報（警報）の誤発表の可能性を完全に排除するまでには至っていない。このような状況を踏まえ、気象庁では、P波到達時刻のみから利用を始める予定である。

図3. 2 DONETで観測されるステップ状の波形



平成25年(2013年)6月18日に紀伊半島南東沖で発生したM3.5の地震について、DONETのNo.6の観測点で記録された波形(鉛直成分)。
 加速度波形ではオフセットが見られ、変位波形では過大な振幅が見られる。通常と同様の処理を行うと、この観測点Mは補正值を考慮しても5.0と過大に推定される。

また、観測点の選定において、当面は現行 EPOS システムの処理条件を勘案する必要がある。M計算に利用する観測点は、震源計算にP波到達時を利用する観測点のうち早いほうから最大5点としている。これは、地震検知後間もない観測点は地震の規模に見合った振幅をまだ観測しておらず、Mの推定値を引き下げることから、適切なM算出のタイミングが遅れないようにするためである。

今回 DONET データの利用にあたっては振幅を利用しないため、DONET 以外の観測点を使うことが必須であり、適切なM計算には3点以上を確保したいことから、DONET 利用観測点数は最大2点に制限する必要がある。

他に、近接して設置されている気象庁の東南海沖ケーブル式海底地震計システムの観測点の配置を加味し、CまたはDノードから1点、Eノードから各1点とすることが適当である(図3. 3参照)。

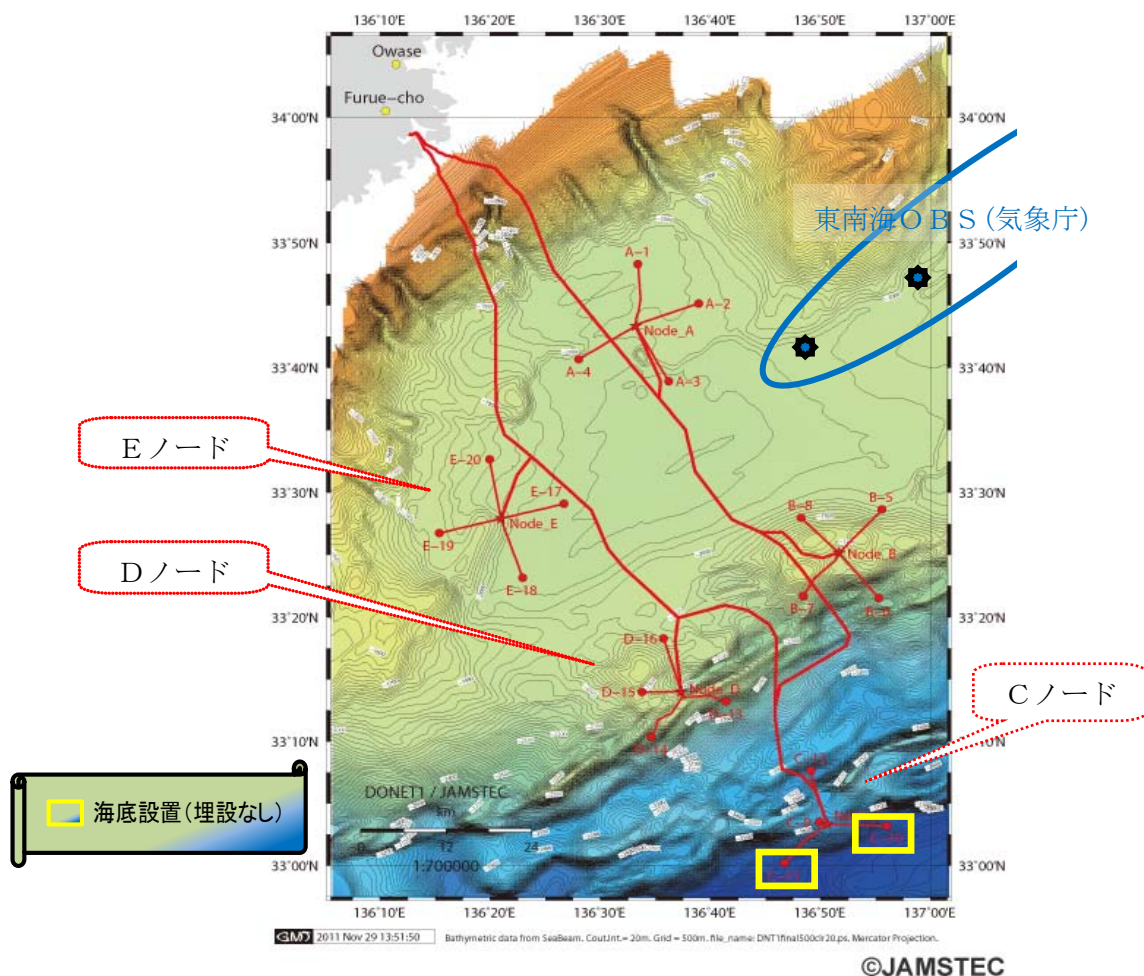
このような運用形態であっても、

- ・緊急地震速報(警報)の発表タイミングが、震源の場所によっては数秒早い。
- ・海域における震源推定精度の向上。

といったメリットが挙げられる。

なお、振幅データの利用方法については、観測点再埋設後の経過を見ながら引き続き検討する。

図3. 3 DONETの観測点配置図((独)海洋研究開発機構)



4 開発中の新たな手法

この項の要点

平成27年度に更新を予定している・地震活動等総合監視システム（EPOS）運用中での実用化を目指し、現在開発している新たな手法について紹介する。

- ・異なる場所でほぼ同時に発生した複数の地震をより適切に識別するために、P波検測時刻、最大振幅等の観測値を統合的に評価し、パーティクルフィルタを用いた新たな統合震源決定アルゴリズム（IPF法：Integrated Particle Filter法）を開発し検証している。
- ・巨大地震発生時や地震同時多発時にも柔軟に対応できるようにするために、震源要素を推定しそれを元に震度を予想する手法（従来法）と、観測点から毎秒入手する震度（以下、「リアルタイム震度」）から震度を予想する手法（PLUM法：Propagation of Local Undamped Motion法）とを併用する手法（ハイブリッド法）を開発し検証している。

現在、緊急地震速報処理では、比較的少ない観測点数で震源を推定するため、B- Δ 法、主成分分析法、テリトリー法、グリッドサーチ法を併用した「多機能型震源処理」を基本に、(独)防災科学技術研究所が開発したHi-net観測点を用いた「着未着法」による震源や、従来からの自動震源決定手法を用いた「EPOS自動震源」を取り込んでいる。また、異なる場所でほぼ同時に発生した複数の地震の識別（同一地震判定）には、主に震源からの理論走時や観測点間の見かけ速度を用いた検測時刻による判定を行っている。

しかしながら、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震後の広域にわたる活発な地震活動の際には、同時多発した地震の分離が適切に行えなかったため、過大な震度予想や情報発表ができない事例が多数見られた。また、本震については、Mの過小評価や震源域の広がりを適切に把握できなかったことにより、震度予想の過小評価につながった。

このような状態を改善するために、平成27年度に更新を予定している次期・地震活動等総合監視システム（EPOS）運用中での実用化を目指し、気象庁が現在取り組んでいる新たな手法について報告する。

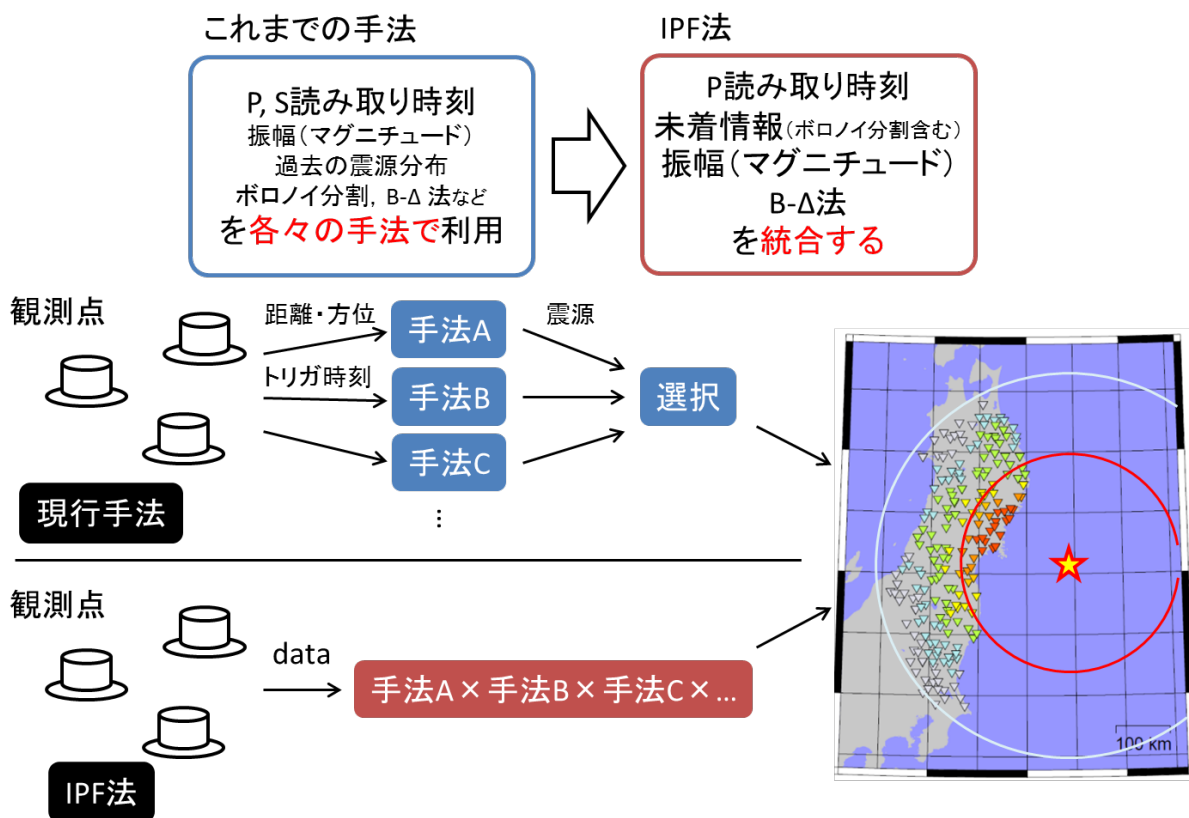
4. 1 パーティクルフィルタを用いた統合震源決定手法 (IPF法)¹

パーティクルフィルタを用いた統合震源決定手法（Integrated Particle Filter法：IPF法）を開発・検証している。この手法は、同一地震判定において最大振幅も考慮することで、より適切に震源を分離できる利点がある。

(1) IPF法の概要

パーティクルフィルタを用いた統合震源決定手法（Integrated Particle Filter法：IPF法）は、従来の手法で独立に利用されていたP波検出時刻、最大振幅、B-Δ法および主成分分析法の各推定要素を尤度関数化し、ベイズ推定を用いることで、これらを統合した震源推定を行うものである（図4. 1）。この手法により、個別の手法で得られた震源推定結果の切り替えを伴わず、安定した震源を得ることができる。また、本手法の同一地震判定ではP波検出時刻に加えて振幅を利用し、さらに震源の不確実性も考慮することで、より厳密な識別を行う。

図4. 1 IPF法の概念図



¹ 本手法は、内閣府の最先端・次世代研究開発支援プログラムに採択された「東南海・南海地震に対応した正確な地震情報を提供する実用的早期警報システムの構築」(代表: 京都大学 防災研究所 山田真澄助教)の成果の一つです。

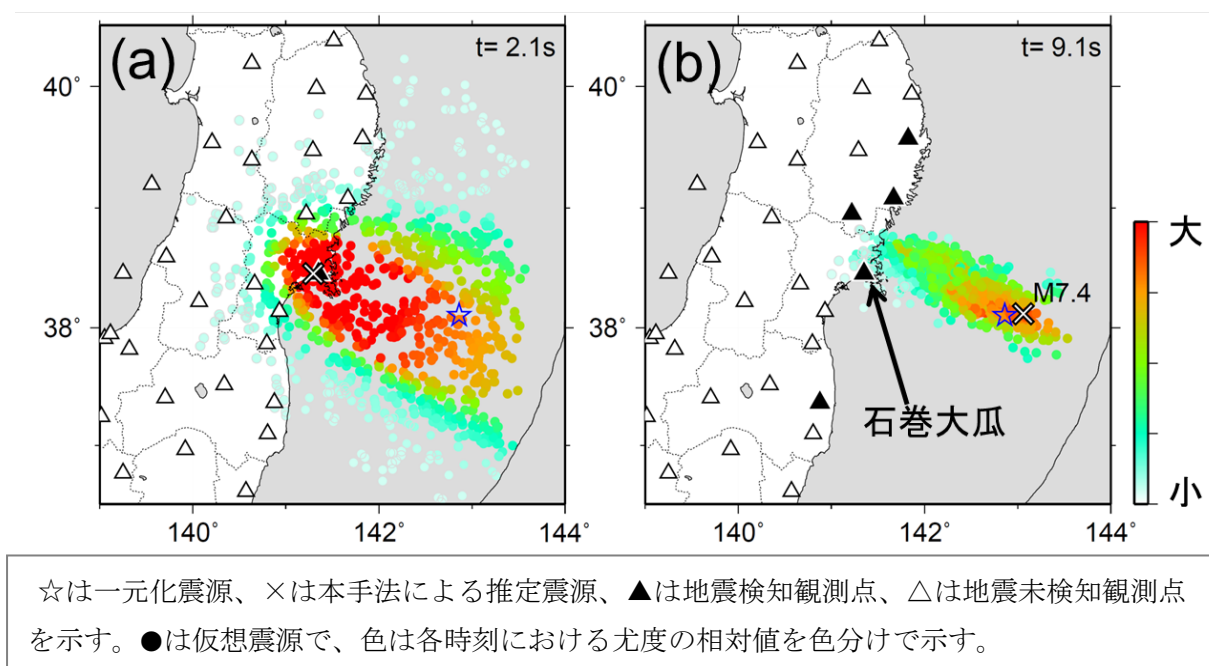
本手法では、グリッドサーチをより効率に行うために、パーティクルフィルタを用いた。パーティクルフィルタは、状態推定を逐次行う時系列フィルタの一種である。IPFでは、事前確率分布に従ってランダムに配置した仮想震源について、観測値に基づいて尤度を算出し、尤度の高い仮想震源の周辺に重点的に仮想震源を再配置することで最尤値を探索する手法である。尤度が高い仮想震源付近の探索密度を上げることで、グリッドの解像度によらない震源推定が可能となる。また、尤度が低い震源周辺の探索密度を下げるため、効率的に推定を行うことができる。

事前確率分布はテリトリ法考え方の考え方と過去の震源分布を基に与えた。また、尤度関数は各観測点のP波検出時刻、最大振幅、B- Δ 法および主成分分析法の結果を基に与えた。さらに、着未着法概念を取り入れて、震源近傍5地点でトリガしない場合は、理論P波到達時刻と処理時点における現在時刻との差を、残差として尤度関数に与えた。

（2）平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震への適用事例

本手法の適用事例（平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震）を図4.2に示す。震源に最も近い石巻大瓜観測点で最初にトリガ検知してから2.1秒後に事前確率分布に従って仮想震源を配置した（図4.2（a））。その後、時間の経過とともに推定を繰り返し、石巻大瓜観測点でトリガ検知してから9.1秒後までに受信したデータを用いて、M7.4（最大震度5弱）を推定した（図4.2（b））。これは、従来处理（地震波検知から8.6秒後に警報発表）と比較しても、警報発表時間の遅延はほとんどない。

図4.2 IPF法の適用事例（平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震）

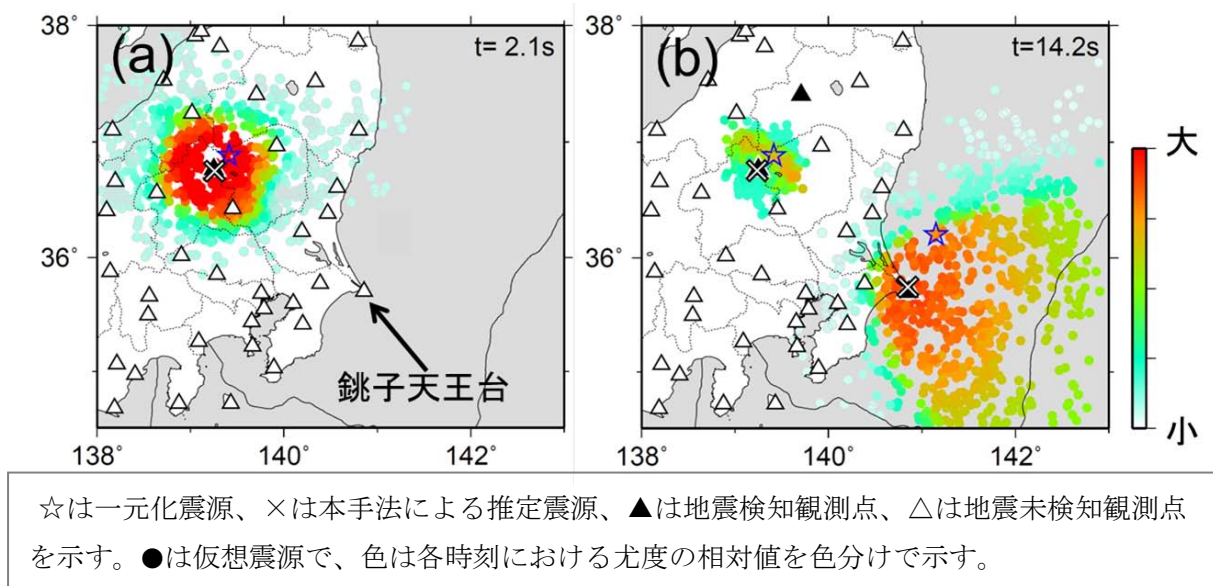


(3) 平成23年(2011年)3月19日06時18分頃、茨城県沖の地震への適用事例
複数の地震がほぼ同時に発生した場合の本手法の適用事例を図4.3に示す。

現行の緊急地震速報処理では、06時18分48秒に栃木県北部で発生したM2.5の地震(最大震度1)と、5秒後の06時18分53秒に茨城県沖で発生したM4.8の地震(最大震度2)を分離できず、2つの地震を混在させて解析した結果、最大予想震度5弱として警報を公表した。

IPF法では、群馬片品でトリガ検知をしてから2.1秒後に栃木県北部の地震の推定を開始した(図4.3(a))。その後、栃木県北部の地震による最初のトリガ検知から14.2秒後に検知した銚子天王台観測点が1つ目の地震によるものではないと判断し、2つの地震に適切に分離し、2つ目の震源の推定を開始した(図4.3(b))。この茨城県沖の地震もM4.6~4.8(最大予想震度3)と推定し、誤った警報を公表することはない。

図4.3 IPF法による緊急地震速報の改善例
(2011年3月19日 茨城県沖の地震の例)



他に、「2. ノイズ対策」(P9)で触れた平成25年8月8日の和歌山県北部の地震(過大な緊急地震速報(警報)を公表)の事例に本手法を適用し、東南海OBS3から入電したデータは別地震として適切に認識されることを確認している。

今回開発した識別アルゴリズムは、緊急地震速報の信頼性向上に大きく資すると考えられ、今後、次期EPOS運用中での導入を目指して、多くの事例に対して検証を進める予定である。

4. 2 従来の手法と、観測されたリアルタイム震度から震度予想をする手法（PLUM法）の併用

従来法と PLUM 法を適切に組み合わせた手法（ハイブリッド法）を開発・検証している。この手法は、従来法の長所である迅速性と PLUM 法の長所である確実性を併せ持つ利点がある。

（1）PLUM 法

震源要素を推定し、それを元に震度を予測する従来手法（従来法）による震度予想は、地震発生直後に精度良く震源要素を推定できた場合、迅速に全国の予想震度が得られ、多くの区域で猶予時間を稼げるという長所を持つ。一方で、推定した震源要素の精度が悪い場合、予想震度を極端に過小予想したり過大予想したりする可能性がある。さらに、東北地方太平洋沖地震のような巨大地震の場合には、震源の広がり等を反映できないことから、震度の過小予想や過大予想となる。

観測点から毎秒入手する震度（リアルタイム震度）から震度を予想する手法（PLUM法）は、Hoshiba(2013)で提案された実時間地震動予測の簡易版である。具体的には、以下の処理で予想震度を計算する。

- ① 予想対象震度観測点から距離R以内にあるリアルタイム震度の観測値を集める。
- ② 地盤増幅度や観測点増幅度を加味した上で、集めたリアルタイム震度の最大値を予想対象震度観測点の予想震度とする。

この処理では、“距離R以内で観測された地震波が、工学基盤面上で減衰しない平面波として入射する”と仮定して震度予想を行っている。PLUM法は、原理的に見逃し無く震度を予想するという長所を持つ。一方、距離減衰させないため震度予想が大きく出る傾向があり、また距離R以内にある波動場の情報しか用いないため、迅速性の面ではある程度劣ることが予想される。

（2）ハイブリッド法

ハイブリッド法の概念図を図4.4に示す。処理の概要は以下の通りである。

- ① PLUM法により各震度観測点における予想震度を求める。
- ② 従来法で予想震源を求め、走時残差や観測点マグニチュード残差等から予想震源の信頼性の評価を行う。信頼できる震源要素が推定できた場合にのみ、従来法による震度予想を各震度観測点に対して行う。
- ③ 各震度観測点において、①と②で得られた予想震度の大きい方を採る

通常は、PLUM法と従来法の両予想値を採用し、PLUM法の確実性と従来法の迅速性を生かす。

従来法によって推定された震源が信頼できないと判断できる場合は、PLUM法の震度予想のみを採用する。現行の緊急地震速報は、従来法による震度予想値しか存在しないため、たとえ推定された震源が信頼できないと判断できる場合であっても、

それを必ず採用して震度予想する。一方、ハイブリッド法では PLUM 法による予想値も同時に得られるため、震源が信頼できないと判断できる際には従来法を使わないことで、極端な震度の過大予想を回避できる。また、トリガ不成立等により従来法が震源計算処理に至らず緊急地震速報を発表できない事例に対しても、PLUM 法によって震度予想ができる。PLUM 法では、より多くの観測点からのリアルタイム震度が望まれるため、気象庁の多機能型地震計だけでなく計測震度計のデータを活用する方向で考えている。

この手法は現在開発・検証中であり、今後、従来法による推定震源が信頼できないと判断して棄却する際の基準などの検討を進める。

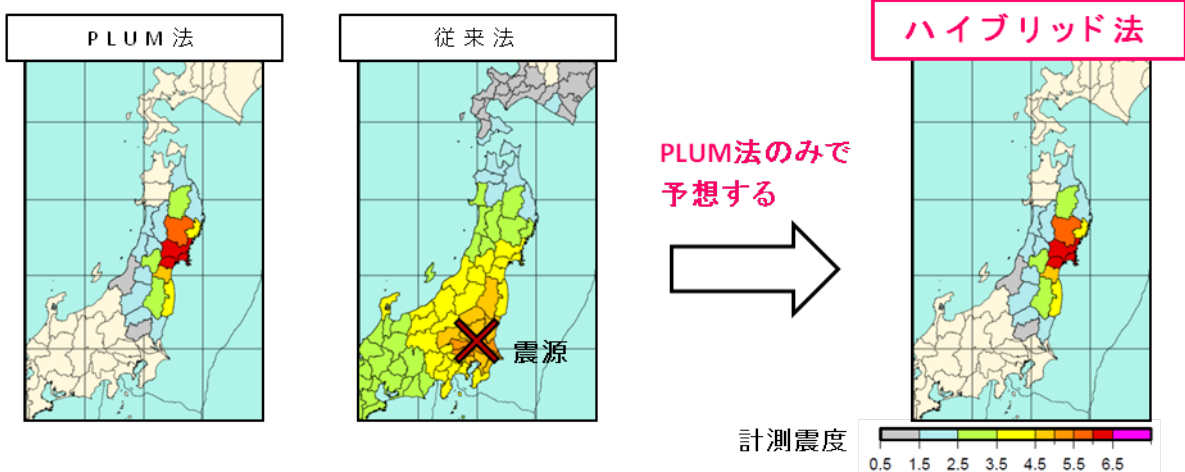
また、PLUM 法による震度予想に必要なリアルタイム震度データを、地震動予報業務許可事業者が入手する環境の検討が別途必要である。

図4. 4 ハイブリッド法の概念図

○ 従来法の震源が信頼できる



○ 従来法の震源が信頼できない



(3) 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震への適用事例(図4.5)

ハイブリッド法の適用事例を示す。入力を気象庁観測点のリアルタイム震度、出力を全国の震度観測点の予想震度、各観測点において最大リアルタイム震度を取得

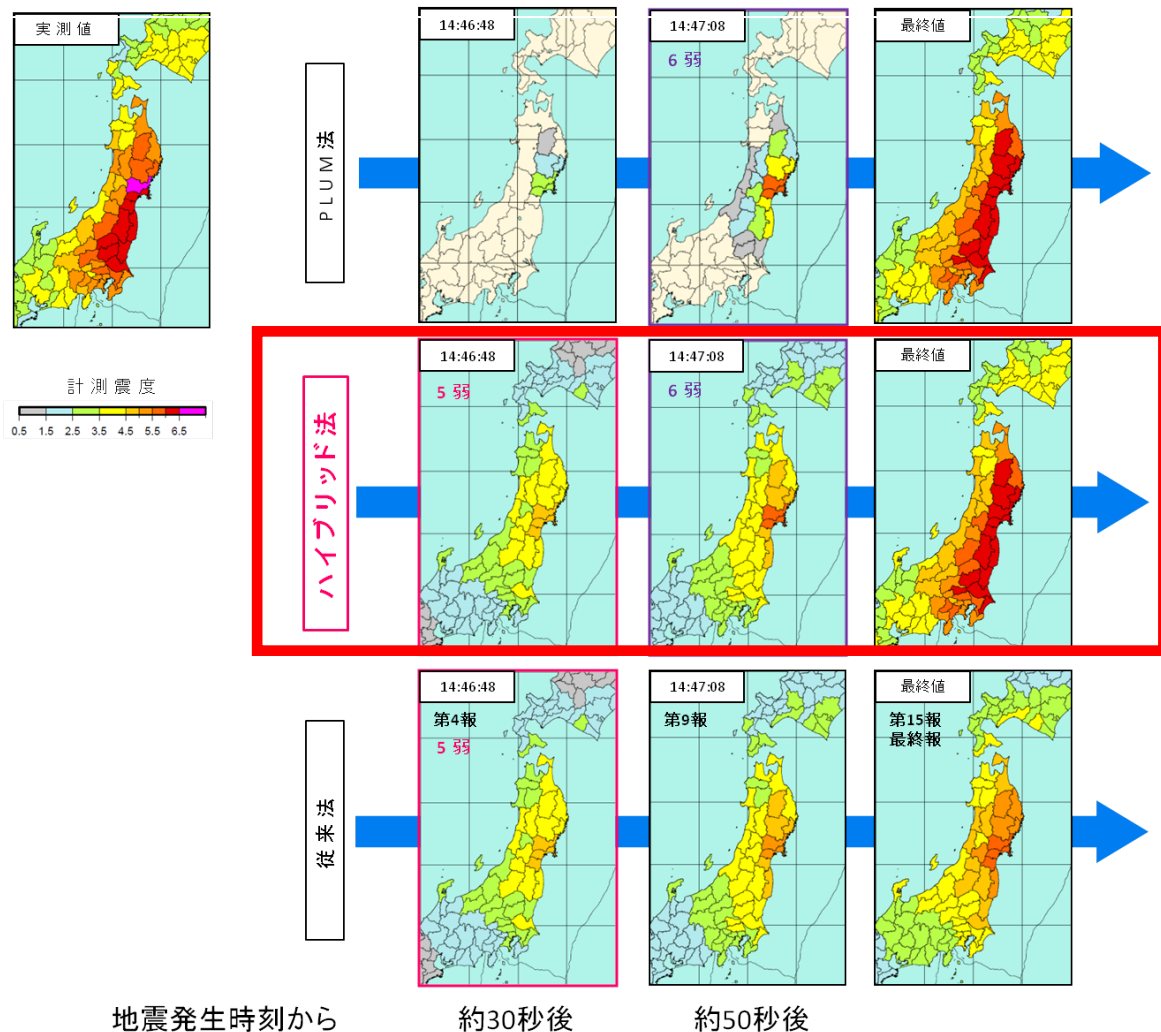
する距離を 30km とした。従来法によって推定された震源要素は発表当時のものを用い、観測点増幅度は平成 25 年 7 月 30 日時点のものを用いた。

ハイブリッド法を東北地方太平洋沖地震へ適用すると、まず地震発生時刻から約 30 秒後に震度 5 弱が予想される。これは従来法による予想値である。PLUM 法は、このとき、最大震度 3 の予想に留まるが、地震発生時刻から約 50 秒経過すると震度 6 弱を予想している。

従来法では、さらに約 37 秒経過したときに初めて震度 6 弱を予想する。その後ハイブリッド法は遅れ破壊に伴い、最終的に関東地方に対して震度 6 弱や 6 強を概ね±1 階級の精度で予想する。東京 23 区において、震度 5 弱がハイブリッド法で予想されるタイミングは、実際のリアルタイム震度で震度 5 弱が観測されるタイミングよりも 7 秒程度早い。従来法のみでは、関東地方に対して殆どの区域で 2 階級以上の過小予想をする。

このようにハイブリッド法は東北地方太平洋沖地震に対し、前半では従来法によって迅速に震度を予想し、後半では PLUM 法によって遅れ破壊等の従来法では対処できない事象をフォローする。

図 4, 5 適用事例 1 : 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震



（4）平成25年4月13日5時33分頃、淡路島付近の地震への適用事例

（図4.6）

平成25年（2013年）4月13日に発生した淡路島付近の地震に対してハイブリッド法を適用すると、最終的に得られる予想震度は震源近傍においてやや過大なものとなる。これはPLUM法による淡路島周辺の予報区の予想震度に由来する。PLUM法は距離減衰を考慮しないため、距離減衰が急激に効く震源近傍においては過大な予想震度をもたらす傾向を持つ。本事例においては、兵庫県淡路島で観測された最大震度付近の震度値を、距離減衰無しで兵庫県南東部等の周辺予報区の震度予想に用いるため、1～2階級の過大予想となる予報区が淡路島周辺に現れると考えられる。

図4.6 適用事例2：淡路島付近の地震

