

緊急地震速報評価・改善検討会 技術部会（第6回）資料

・ 議事

1 緊急地震速報に係わる報告事項

この項の要点

- 平成27年3月に新たな観測点データの活用を開始した。地震活動等総合監視システムを更新中であり、緊急地震速報システムも更新される。
- 平成26年3月以降（第5回技術部会以降）不適切な警報の発表はなかった。
- 平成27年5月の小笠原諸島西方沖の地震の深発地震で震度5強を観測した。第6報以後の緊急地震速報では、深さが150kmを超えたため、震度予測をしなかった。
- 南米西部で発生した深発地震で緊急地震速報（予報）が発表された。
- 「観測点増幅度」の導入により期待されたとおりに震度予測の精度が向上した。

1.1 前回の技術部会以降の緊急地震速報の改善事項

(1) 新たな観測データの活用開始

平成27年3月31日から以下の観測網の新たな観測点データの緊急地震速報への活用を開始した。国立研究開発法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)のDONET1及び国立研究開発法人防災科学技術研究所(NIED)のKiK-netの活用により、南海トラフ沿いや首都圏直下で発生する地震に対し、緊急地震速報の発表が早くなることが期待できる。

海洋研究開発機構 DONET1の活用：2点（図1.1）

防災科学技術研究所 KiK-netの活用：15点（図1.2）

気象庁 多機能型地震計の活用：50点（図1.3）

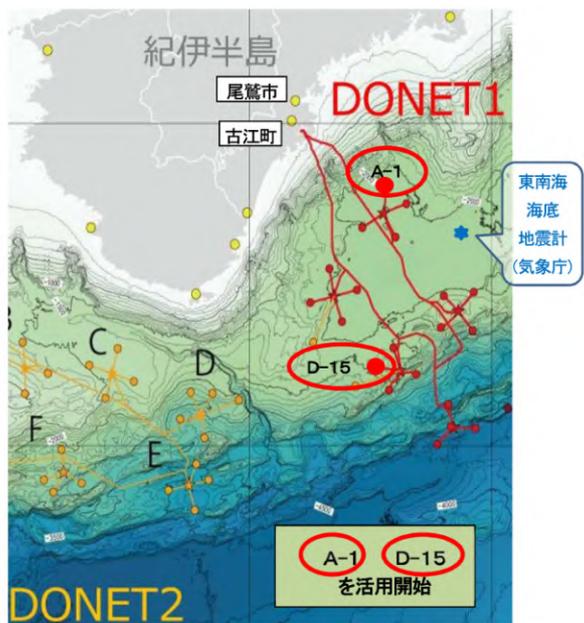


図1.1 JAMSTECのDONET1で活用する観測点



図1.2 NIEDのKiK-netで活用する観測点

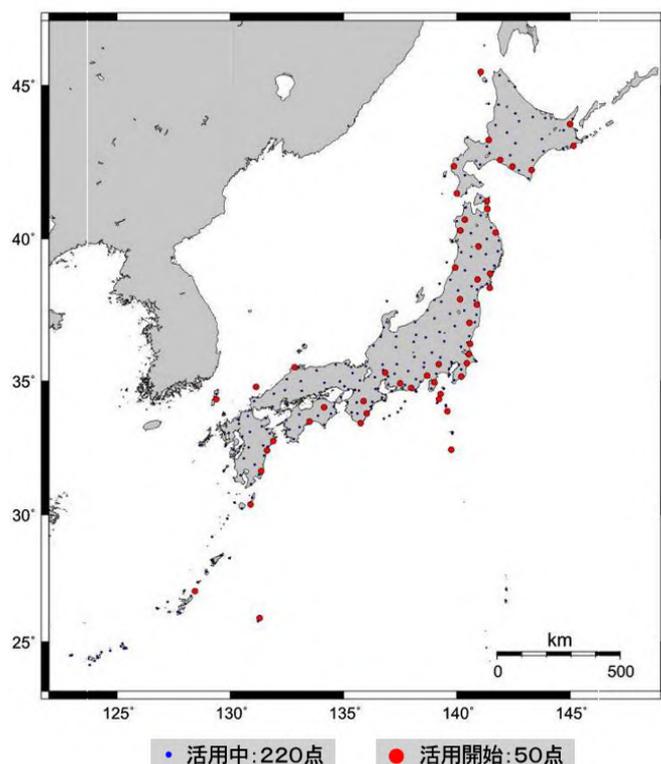


図 1.3 緊急地震速報に活用する気象庁多機能型地震計および海底地震計

(2) 地震活動等総合監視システム（EPOS5）の更新

地震活動等総合監視システム（EPOS5）の更新中である。本庁のシステムは平成27年10月からEPOS5の運用を開始し、大阪管区気象台のシステムは、平成28年3月から運用を開始予定である。緊急地震速報システムの運用については、大阪管区気象台のEPOS5の運用に合わせて開始する予定である。

EPOS5では、第5回技術報告で報告した 同時に発生した複数地震の識別及び巨大地震の際の適切な警報発表に対する改善方法であるIPF法¹及びPLUM法²の運用を準備している。IPF法及びPLUM法の運用にあたっては、動作確認・ランニングの時間を確保し、十分に点検を行ってから運用を開始する予定である。

また、JAMSTECが整備中のDONET2及びNIEDが整備中のS-netの海底地震計についても、今後、データ提供を受けた後に検証を行い、順次、緊急地震速報に活用する予定である。

1 IPF法：Integrated Particle Filter 法

パーティクルフィルタを用いた統合震源決定手法

2 PLUM法：Propagation of Local Undamped Motion 法

リアルタイム震度を用いてその周辺の震度を予測する手法

1.2 平成26年3月から平成28年1月までの発表状況

この期間の緊急地震速報の発表回数は次のとおりである。

- ・緊急地震速報（警報）を発表・・・・・・・・・・：計14回
- ・震度5弱以上を観測したが警報を発表せず・・：計10回
- ・緊急地震速報（予報）を発表・・・・・・・・・・：計1796回

年月日	時分	地震の概要 (観測値)			緊急地震速報 (警報)で発表 した震央地名	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)	地震 検知後 予報 第一報 までの 時間 [秒]	地震 検知後 警報 第一報 までの 時間 [秒]
		震度情報等で 発表した 震央地名 (速報値)	M	最大 震度			震度 5弱 以上	震度 4	震度 3	震度 2 以下			
2014/03/14	2時06分	伊予灘	6.2	5強	伊予灘	27	10	14	3	0		3.2	7.7
2014/07/08	18時05分	胆振地方中東部	5.6	5弱	苫小牧沖	7	1	2	2	2		3.3	3.3
2014/07/12	4時22分	福島県沖	7.0	4	福島県沖	21	0	7	11	3		8.4	17.2
2014/08/10	12時43分	青森県東方沖	6.1	5弱	青森県東方沖	6	1	3	2	0		3.2	3.2
2014/09/16	12時28分	茨城県南部	5.6	5弱	茨城県南部	7	3	3	1	0		3.4	3.6
2014/11/22	22時08分	長野県北部	6.7	6弱	長野県北部	21	2	3	10	6		2.6	3.2
2015/02/06	10時25分	徳島県南部	5.1	5強	徳島県南部	5	1	1	3	0		3.3	6.8
2015/04/20	10時42分	与那国島近海	6.8	4	台湾付近	3	0	1	1	1		15.4	17.5
2015/05/13	6時12分	宮城県沖	6.8	5強	宮城県沖	23	4	8	11	0		5.8	5.8
2015/05/22	22時28分	奄美大島近海	5.1	5弱	奄美大島近海	1	1	0	0	0		8.1	8.1
2015/05/25	14時28分	埼玉県北部	5.5	5弱	埼玉県北部	16	1	12	3	0		4.3	12.3
2015/07/13	2時52分	大分県南部	5.7	5強	大分県南部	8	3	4	1	0		3.3	6.5
2015/11/14	5時51分	薩摩半島西方沖	7.1	4	薩摩半島西方沖	19	0	3	11	5		17.5	54.6
2016/01/14	12時25分	浦河沖	6.7	5弱	浦河沖	20	4	14	2	0		4.0	4.0
		H27.01～H28.01までの合計・(平均)			計14回	184	31	75	61	17	0	(6.1)	(11.0)

表 1.1 緊急地震速報（警報）を発表した地震（計14回）

日時刻	震央地名	M	最大震度	予想最大震度	検知から予報第1報発表までの時間(秒)
2014/05/05 05時18分	伊豆大島近海	6.0	5弱	-*1	3.2
2014/07/05 07時42分	岩手県沖	5.9	5弱	4	3.4
2014/09/03 16時24分	栃木県北部	5.1	5弱	4	3.2
2014/11/22 22時37分	長野県北部	4.5	5弱	3	10.5
2015/02/17 13時46分	岩手県沖	5.7	5強	4	3.2
2015/05/30 20時23分	小笠原諸島西方沖	8.1	5強	-*2	3.4
2015/06/04 04時34分	網走地方	5.0	5弱	4	4.6
2015/07/10 03時32分	岩手県内陸北部	5.7	5弱	4	3.6
2015/09/12 05時49分	東京湾	5.2	5弱	4	3.4
2016/01/11 15時26分	青森県三八上北地方	4.6	5弱	4	3.5

警報を発表しなかった地震の「予想最大震度」は、緊急地震速報(予報)の最終報で発表した予想震度の最大値を示す

*1 深さが150kmを超えたため「予想震度なし」となった(深さ150kmであった第4報の予想最大震度は4)

*2 深さが150kmを超えたため「予想震度なし」となった(深さ10kmであった第5報の予想最大震度は3)

表 1.2 震度5弱以上を観測したが緊急地震速報（警報）を発表しなかった地震（計10回）

表1.1に平成26年（2014年）3月以降の緊急地震速報（警報）の発表状況を、表1.2に同期間の震度5弱以上を観測した地震で緊急地震速報（警報）を発表しなかった地震を示す。

表1.2の伊豆大島近海の地震ならびに小笠原諸島西方沖の地震は深さ150kmより深い地震であり、その他の地震は予測震度が警報の発表基準に達しなかった地震である。

1.3 技術的課題のある緊急地震速報の事例

項番	日時刻	震央	マグニチュード	最大震度	発表状況
(1)	2014年3月3日 5時11分頃	沖縄本島北西沖	M6.6	4	未発表
(2)	2015年4月23日 22時15分頃	青森県下北地方	M3.8	4	震源位置乱れ
(3)	2015年5月30日 20時23分頃	小笠原諸島西方沖	M8.1	5強	深発で警報未発表
(4)	2015年6月23日 21時19分頃	小笠原諸島西方沖	M6.8	4	未発表
(5)	2015年11月25日 7時45分頃	南米西部の地震	M7.5	-	遠地地震で発表

表1.3 技術的課題のある事例

これらは緊急地震速報のお知らせを気象庁WEBに掲載した地震を中心にリストアップしたもので、処理状況は以下のとおり。

（1）平成26(2014)年 3月 3日05時11分頃 沖縄本島北西沖の地震<未発表>

➤ 概要

沖縄本島北西沖の地震（M6.6、最大震度4）について、その前に発生した地震と同一のものと判定したため、緊急地震速報（予報）を発表しなかった。

➤ 処理状況

沖縄本島北西沖付近の地震(B)近傍の観測点のトリガーは正常であったが、その約3分前に発生した福島県沖の地震(A)（M2.2、無感）と理論走時が一致し、この地震(A)によるものと判定した。

このため、本来緊急地震速報を発表すべき地震(B)のトリガー情報を、先に発生していた福島県沖の小さな地震（緊急地震速報の発表対象外）として取り込み、結果、沖縄本島北西沖の地震については緊急地震速報を発表しなかったもの。

➤ 対策

現在更新中の地震活動等総合監視システム（EPOS5）では、震源と検測値を同一判定する処理において距離制限を設けてあり、地震(A)と(B)は別々の地震として処理される。

地震	時刻	震央地名	マグニチュード	最大震度
(A)	05:08	福島県沖	2.2	無感
(B)	05:11	沖縄本島北西沖	6.6	4

表1.4 地震の概要

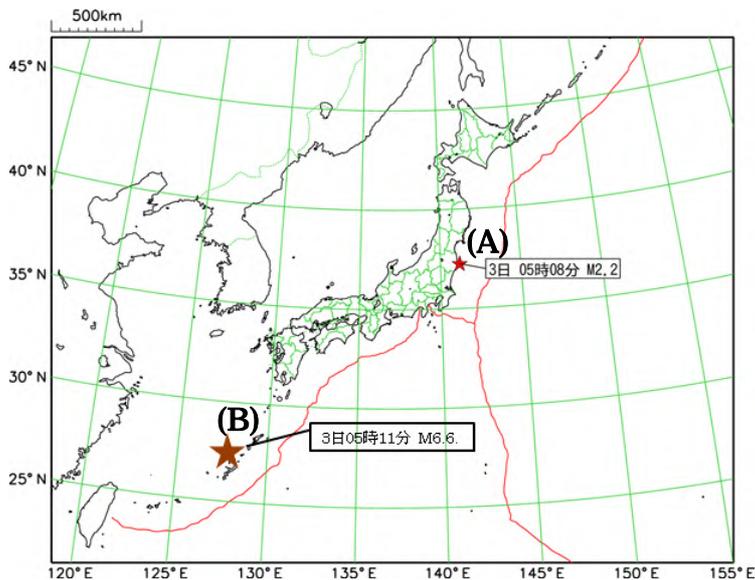


図1.4 イベント発生状況

(2) 平成27(2015)年 4月23日22時15分頃 青森県下北地方の地震<震源位置乱れ>

➤ 概要

青森県下北地方の地震（M3.9・最大震度4）が発生し、これに関して緊急地震速報（予報）を発表したが、第1報から第8報まで震源の推定位置が大きくずれた。

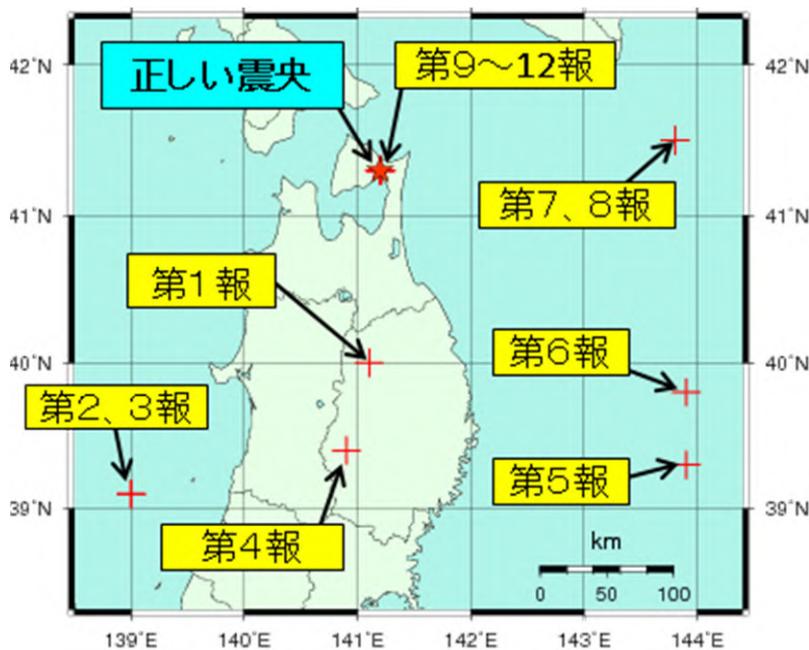


図1.5 震央の変化

地震	時刻	震央地名	マグニチュード	最大震度
(C)	22:15:22	岩手県内陸北部	0.8	無感
(D)	22:15:32	青森県下北地方	3.9	4

表1.5 地震の概要

➤ 処理状況

青森県下北地方を震源とする地震（D）の約10秒前に、観測点「岩手葛巻」の付近で微小地震（C）が発生。

この「岩手葛巻」の（10秒早い）検測値と、青森県下北地方の地震による各観測点の検測値を同一の地震の検測値と判定した。

結果、第1報から適切な推定震源（着末着法による推定震源）が決まる前の第8報まで、不適切な震源で緊急地震速報を発表した。

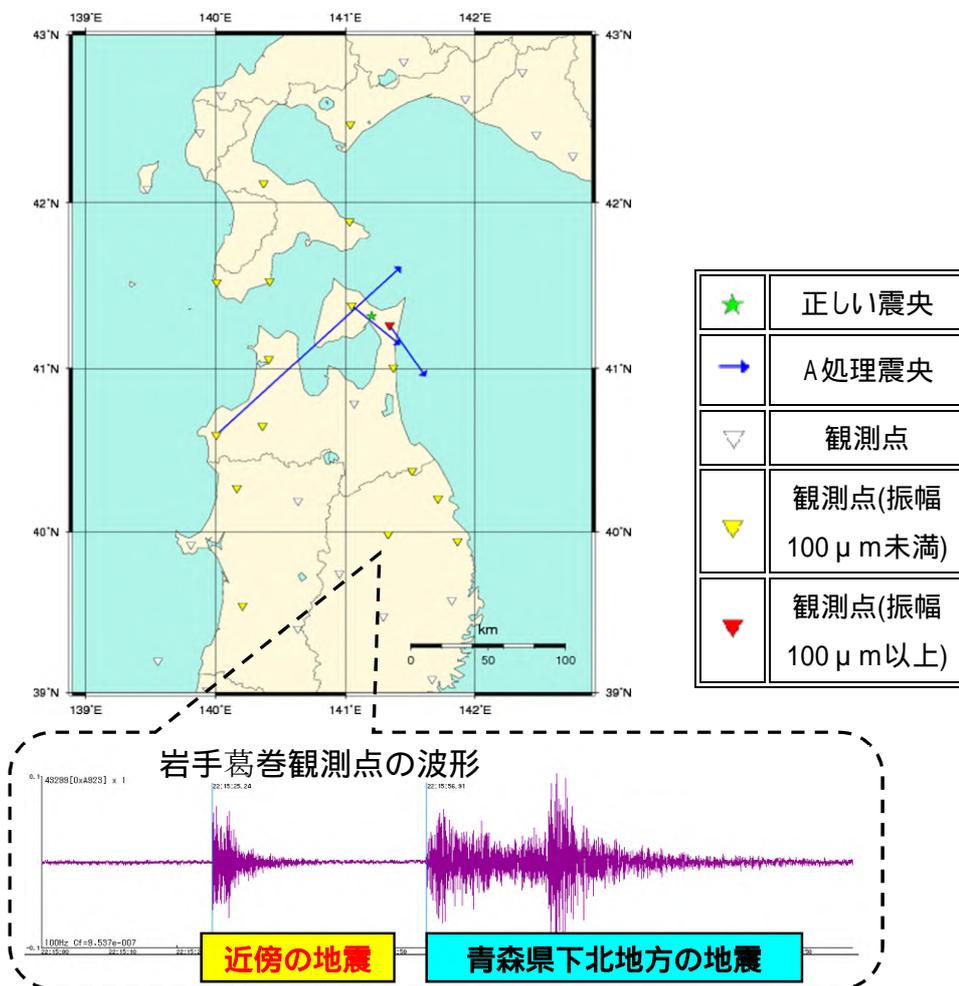


図 1.6 使用した観測点

➤ 対策

IPF法の導入で地震の分離が可能である。当時のトリガデータを再生し、IPF法の動作検証を行った結果を図1.7に示す。青森県下北地方の地震によるトリガデータと「岩手葛巻」付近の微小地震によるトリガデータを分離して処理し、適切な位置に震源を推定した。

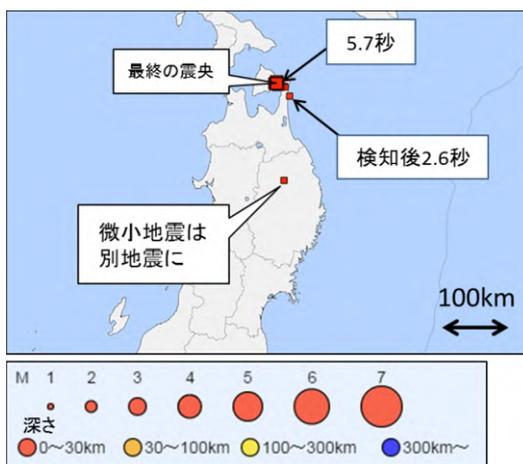


図 1.7 「平成 27(2015)年 4 月 23 日 22 時 15 分頃 青森県下北地方」
に対する IPF 法の震源推定結果

(3) 平成27(2015)年 5月30日20時23分頃 小笠原諸島西方沖の地震

<深発で警報未発表>

「3. 深発地震の予測手法」で説明

(4) 平成27(2015)年 6月23日21時19分頃 小笠原諸島西方沖の地震<未発表>

➤ 概要

この地震は M6.9 (最大震度 4) と規模が大きかったが、B- 法の推定震央距離が長かったこと、及び多くの観測点でノイズと判定されたことで震源計算が成功せず、緊急地震速報(予報)を発表しなかった。

➤ 処理状況

地震検知 1 点目の父島観測点では、B- 法の推定震央距離 (438km) が 1 点震源計算での採用上限 (200km) を超えたため、1 点での震源推定をしていない。

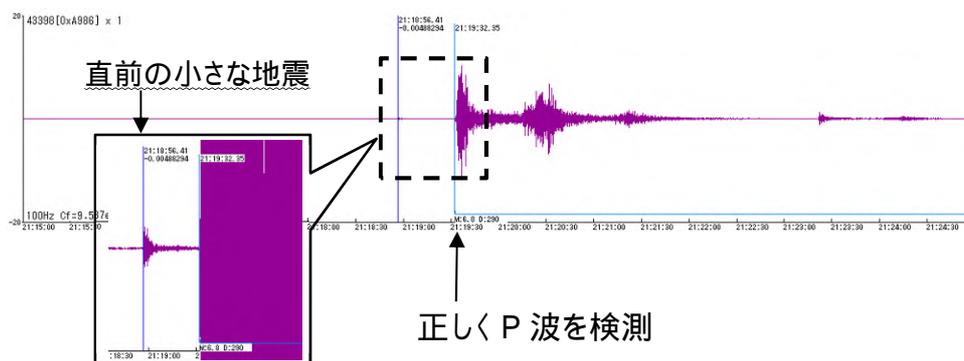


図 1.8 二つの地震波形と P 波検測位置 (父島観測点)

次の母島中ノ平観測点では P 波の検測時刻が、同諸島付近で約 30 秒前に発生していた小さな地震の影響を受け、本来より早い時刻になった。このためノイズと判定し、観測点 2 点の震源推定ができなかった。

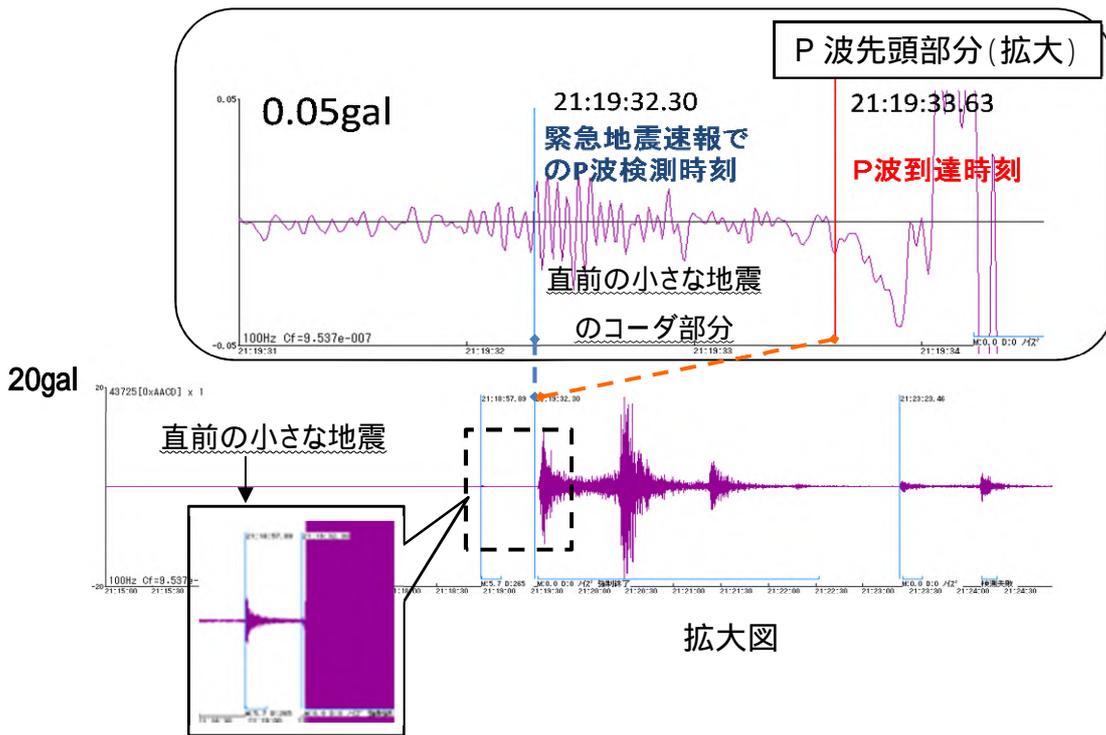


図 1.9 二つの地震波形と P 波検測位置（母島中ノ平観測点）

3 点目の青ヶ島向沢観測点では父島観測点と同様推定震央距離(595km)が長く、グリッドサーチ法で計算対象とする条件（いずれかの観測点において 400km 以下）を超えた。また、4 点から 10 点（震源計算時の最大観測点数）目までは、すべてノイズ判定だった。

結果、トリガーした観測点は多く存在したが、いずれも震源計算を行う条件を満たさなかったため震源が決まらず、緊急地震速報を発表できなかった。

➤ 対策

観測点数が少ない場所で発生した地震であり、解析手法の改善では対処が難しい。

（5）平成27(2015)年11月25日 7時45分頃 南米西部の地震<遠地深発地震で発表>

➤ 概要

南米西部（ペルー・ブラジル国境）で M7.5・深さ約 590km の地震が発生し、気象庁多機能型地震計および DONET の観測データで 8 時 4 分にトリガーが成立し、地震と判別して処理した。その結果、東海道南方沖の地震（M5.0、最大予想震度 2）として緊急地震速報（予報）を発表した。

➤ 処理状況

これは、次の条件がそろったことによる。

図 1.11 に示すチリで発生した地震の初動の立ち上がりに比べ、南米西部の地震の初動の立ち上がりは急峻ではっきりしており（図 1.10、1.11）、V/H 比や分散等によるノイズ判定を通過して地震としてトリガーが成立した観測点が3地点あった。（図 1.12）

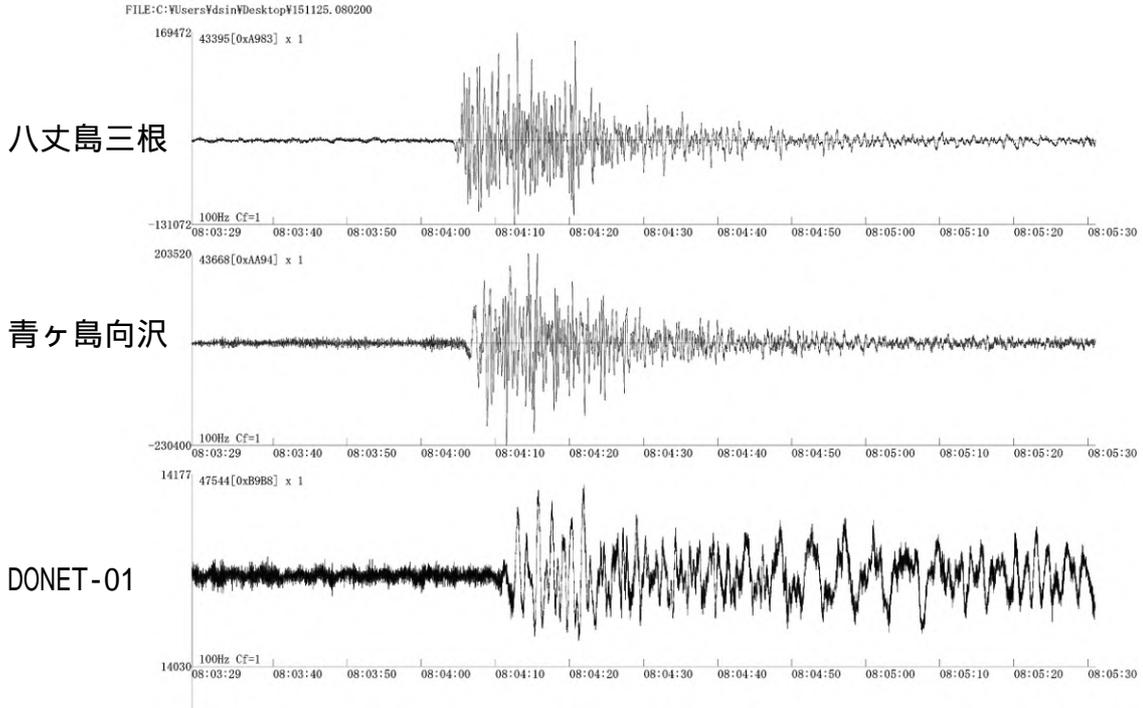


図 1.10 2015/11/25 南米西部の地震（深さ 590km、M7.5）の加速度波形（上下動）の初動部分

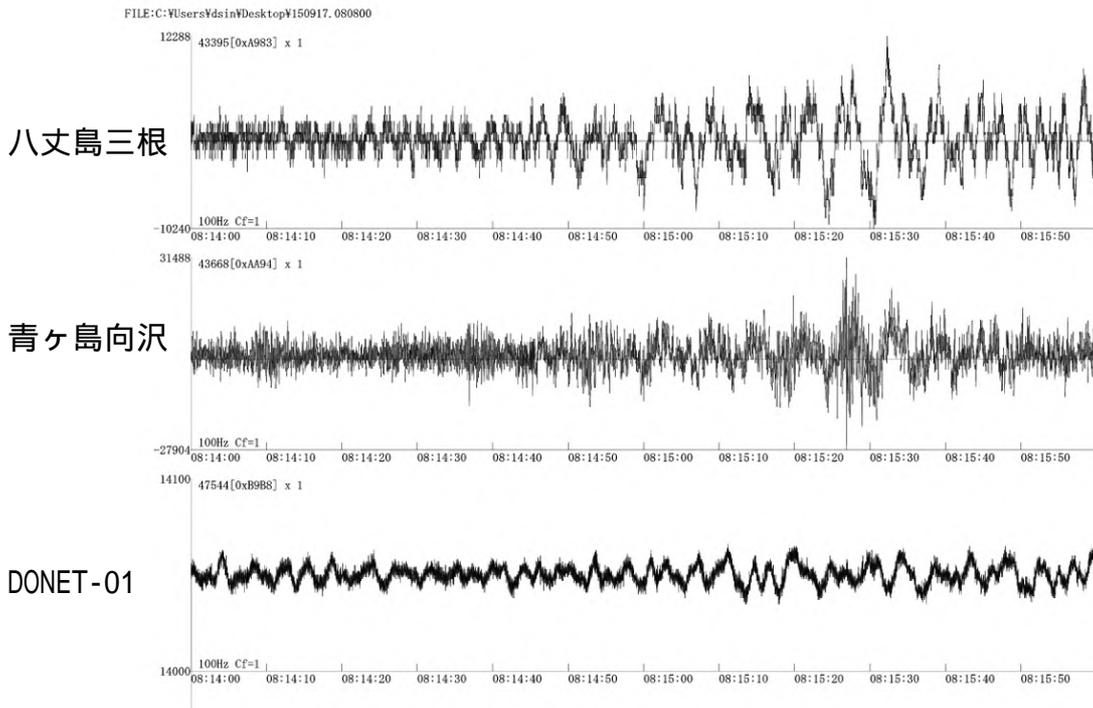


図 1.11 2015/9/17 チリの地震（深さ 20km、M8.3）の加速度波形（上下動）の初動部分

これらの観測点（図 1.12）の検測値を同一地震によるものと判定し、グリッドサーチ法により震源を東海道南方沖・深さ 10km と推定。

変位振幅がマグニチュード計算開始の閾値（100 μm ）以上を観測し、M5.0 を算出。

これらを元に最大震度 2 を予測し、発表基準のひとつ（M3.5 以上）により緊急地震速報（予報）を発表した。

なお、これらの観測点 3 点以外でもトリガーが成立した観測点が少なからずあったが、多くはノイズと判定していた。

➤ 対策

今回のように、遠地地震であっても震源が深くマグニチュードがある程度大きい場合は、近地地震と区別が困難な波形が観測される可能性があると考えられる。その場合、緊急地震速報の発表対象となる近地の地震か否かを判別することは難しい。

現在更新中の EPOS5 では同一地震判定を改善しており、八丈島三根・青ヶ島向沢と DONET-01 観測点を別グループに分離し、その結果震源が決まらない。これによりすべての場合に対応できるものではないが、誤った震源で発表することのある程度防ぐことが可能。

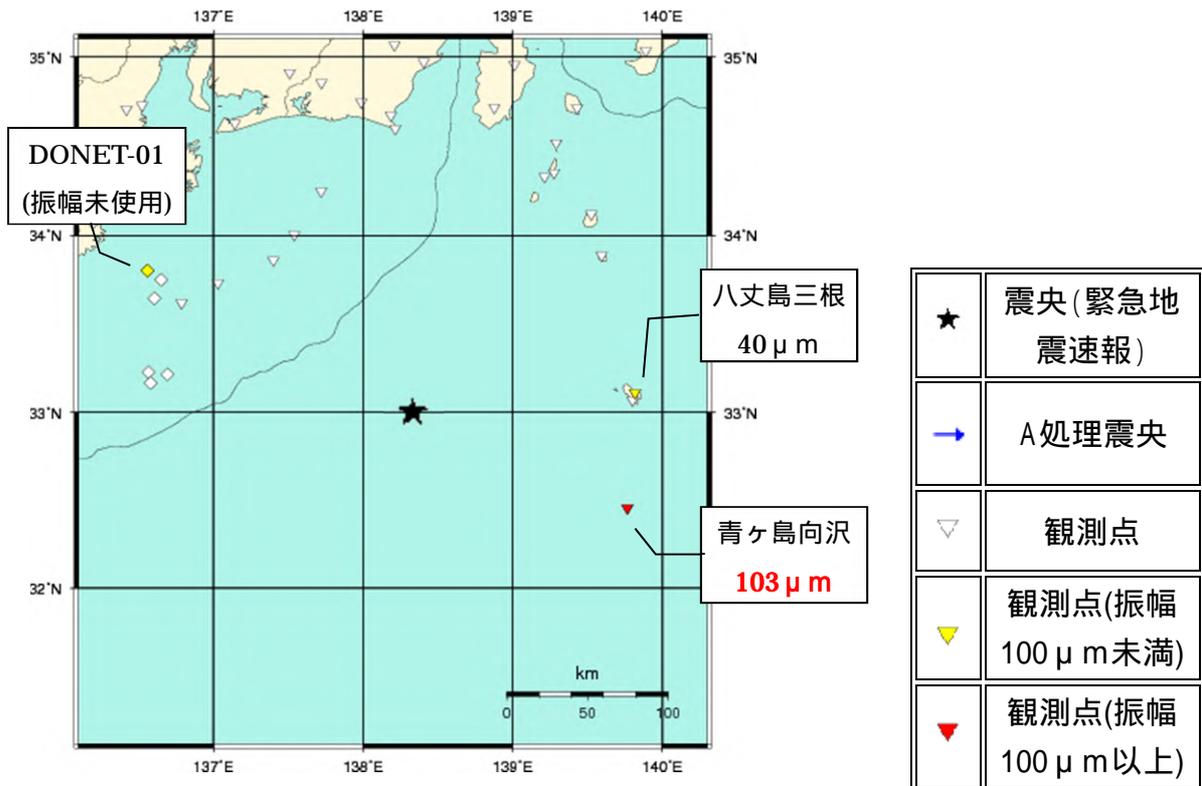


図 1.12 遠地深発地震による P 波検知で推定した震源

1.4 緊急地震速報の予測震度の検証

気象庁が発表する緊急地震速報の震度予測では、微地形区分に基づいた「地盤増幅率」と震度観測点における震度観測データに基づく「観測点増幅度」(緊急地震速報評価・改善検討会第4回技術部会で報告)を用いている。平成24年10月の導入後も年に数回、最新の震度観測値を元に更新しており、現在、全4384震度観測点のうち2573観測点で観測点増幅度が求まっている。それらの観測点については地盤増幅率に代えて観測点増幅度を使って震度予測を行っている。

今般、観測点増幅度導入後3年余りが経過したため、気象庁の発表する緊急地震速報の震度予測の精度を検証した。震源選択基準は、M4.0以上の深さ120km以浅で、最大震度3以上かつ、震度3以上を5点以上で観測した、1996年～2014年のイベントとした(ただし、東北地方太平洋沖地震のように、点震源を仮定した距離減衰式が当てはまらないイベントや、地震が同時多発し、揺れに対応する震源が特定できないようなイベントは除外した)。これらのイベントにおける震度3以上の観測値について、現在緊急地震速報で用いている震度予測手法(震度予測式と現時点の増幅度)を用いて予測値(精査後の震源・Mによる)を求めた。

予測震度と観測震度の差(予測値-観測値)について、観測震度別に集計した(表1.6、図1.9)。緊急地震速報で用いている震度予測式は、震度4以上の揺れに合わせて作成されているため、観測震度3の予測では過大(差の平均:+0.51)となった。また、小さい震度ほど観測されるデータ数が相対的に多くなるため、観測震度3以上すべてを集計した結果も+0.38と過大な結果となっている。しかし、緊急地震速報(警報)の発表対象である震度4以上の結果をみると、差の平均は+0.20～-0.18であり、予測値が観測値の±1.0に入る割合も約95～98%と、適切な震度予測ができています。また、観測点増幅度を用いずに地盤増幅率のみで予測した結果と比較すると、±1.0に入る割合が1～6%程度改善していた。今後も最新の観測データで更新しながら、観測点増幅度を活用していく。

		すべて	震度3	震度4	震度5 弱	震度5 強	震度6 弱以上
観測点増 幅度も用 いて計算 した場合	平均	0.38	0.51	0.20	0.03	-0.08	-0.18
	標準偏差	0.42	0.36	0.39	0.43	0.41	0.45
	±0.5に入る割合	58.4%	48.1%	74.7%	74.3%	77.9%	71.2%
	±1.0に入る割合	93.8%	91.4%	97.6%	98.9%	98.4%	95.2%
地盤増幅 率のみで 計算した 場合	平均	0.35	0.54	0.10	-0.13	-0.29	-0.44
	標準偏差	0.51	0.42	0.47	0.51	0.46	0.46
	±0.5に入る割合	53.9%	44.2%	70.0%	63.8%	62.2%	55.5%
	±1.0に入る割合	90.0%	86.5%	96.0%	94.5%	92.5%	89.1%

表1.6 予測震度と観測震度の差(予測値-観測値)の平均と標準偏差等

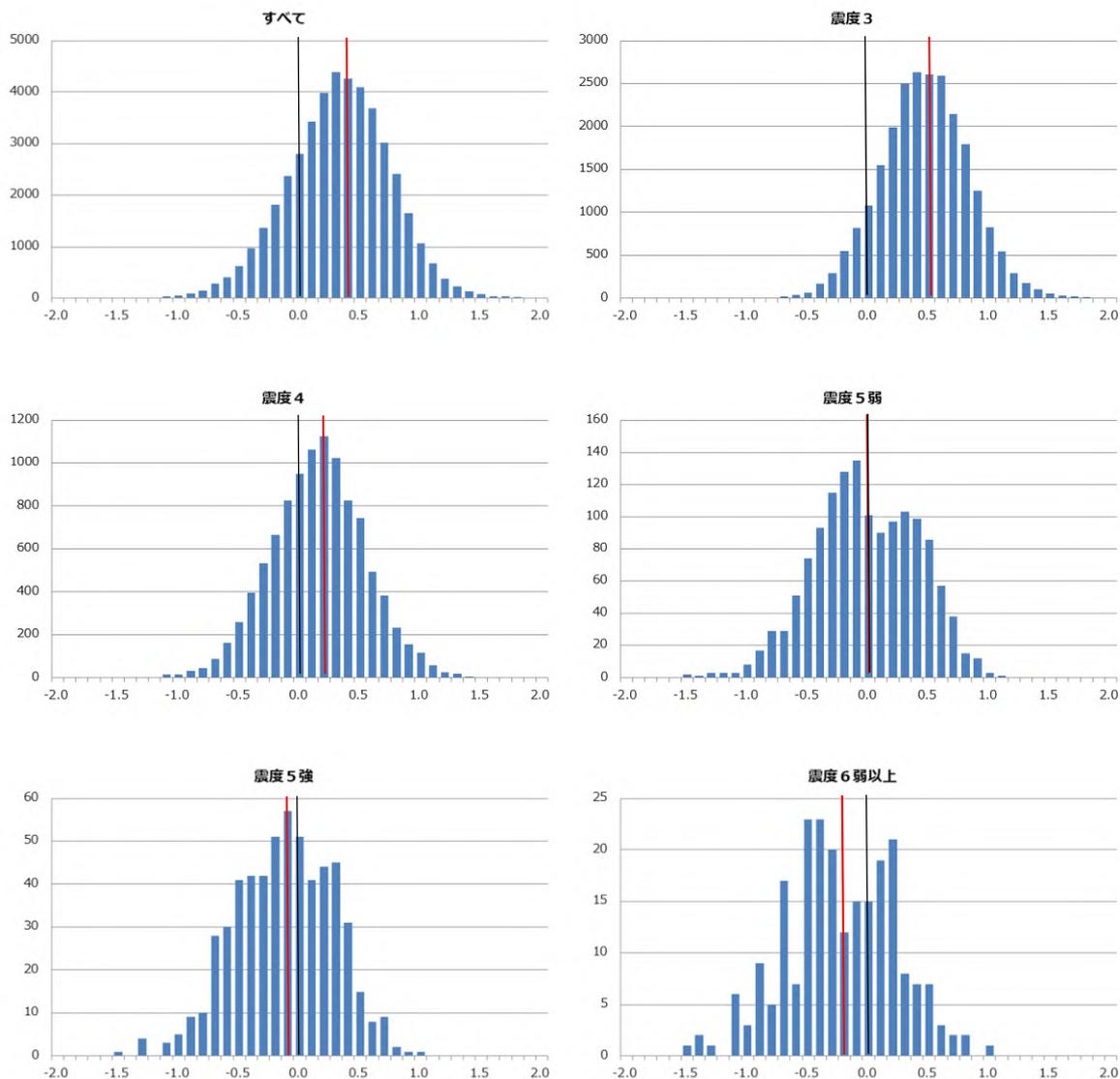


図 1.9 予測震度と観測震度の差（予測値 - 観測値）のヒストグラム（震度別）

赤実線は平均値、黒実線は予測値と観測値の差が0の位置を示す。

- | | |
|---------------|-------------|
| 左上：観測震度3以上すべて | 右上：観測震度3 |
| 左中：観測震度4 | 右中：観測震度5弱 |
| 左下：観測震度5強 | 右下：観測震度6弱以上 |

2 IPF法の処理結果と評価

この項の要点

- EPOS5上でIPF法を実際に動作させ、リアルタイムデータによる動作確認を行っている。
- 単独の地震に対するIPF法の震源決定精度は、既存のA電文を用いた手法と概ね同等であることが確認できた。
- 震源計算処理における最適なB法の結果の活用方法の検証、及び遠地地震発生時に出力され得る不適切な推定震源を破棄するための品質管理処理の検証を行った上で、IPF法を運用開始する。

気象庁では、緊急地震速報の技術的改善のひとつとして、IPF法の運用開始を目指している。現在は、EPOS5においてIPF法の処理を実際に動作させ、過去事例およびリアルタイムデータによる動作確認を行っているところである。現時点までに得られた処理結果とその評価について報告する。

2.1 IPF法導入の概要

技術部会（第5回）で報告したように、IPF（Integrated Particle Filter）法（溜瀧・他(2014)）を導入することで、同時多発地震やノイズ混入時による緊急地震速報の誤報数が減少し、緊急地震速報の予測精度が向上する効果が見込まれる。

現在運用している震源決定手法と導入予定のIPF法との関係を図2.1に示す。現在の緊急地震速報では、多機能型地震計等の強震加速度計約300点から送信されるデータ（A電文）を入力とする震源決定手法（A電文震源）を中核処理として採用している。また、Hi-netの速度計約800点を入力とする着未着法、及び多機能型地震計とHi-netの速度計等を入力とするP波とS波の検測値を用いた従来型の震源決定手法（Hypoon）を並行して実施し、それらの計算結果も緊急地震速報処理に取り込んで活用している。IPF法は、既存のA電文震源と同じく、A電文を入力とする中核処理のひとつという位置付けである。

IPF法導入後は、A電文震源の活用を停止することを検討している。A電文震源の活用を続けていると、同時多発地震やノイズ混入時において、依然として誤ったA電文震源が緊急地震速報処理に取り込まれる恐れが残るためである。一方、着未着法やHypoon震源の活用は引き続き行う。着未着法やHypoon震源は入力としている観測点数が現行のIPF法震源で用いる観測点数より多く、迅速性は劣るものの、現行のIPF法震源に比べて精度の良い震源を計算することができるためである。

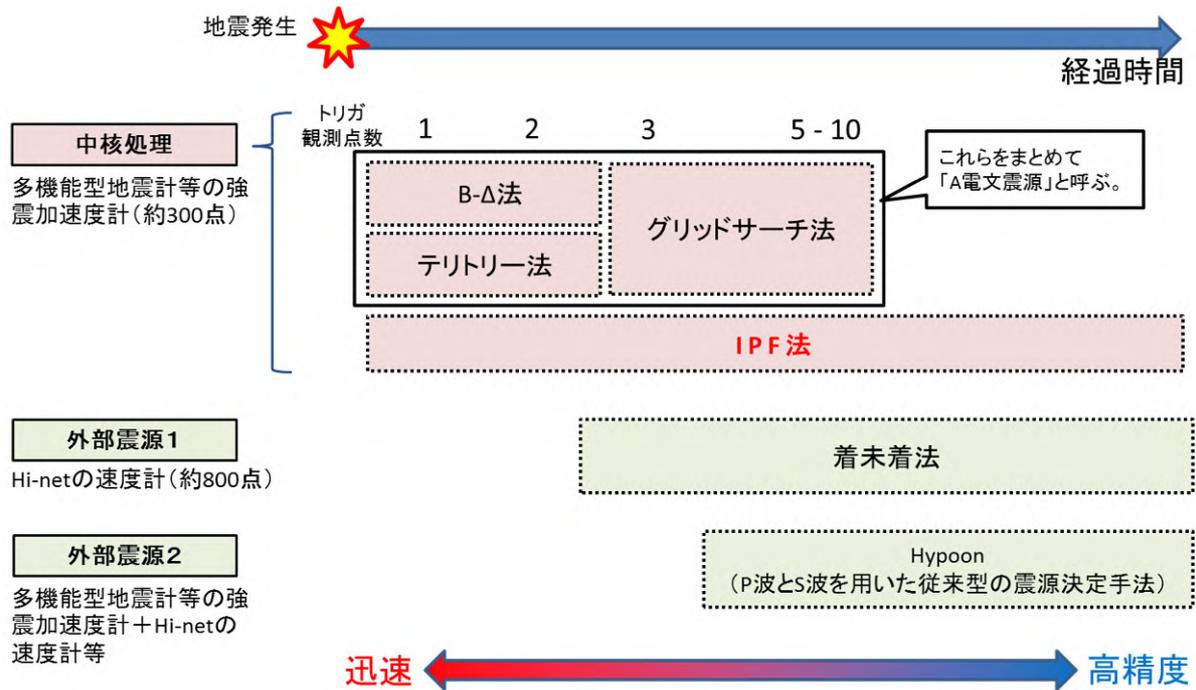


図 2.1 既存の震源決定手法と IPF 法の関係

2.2 リアルタイムデータによる動作確認

現在、EPOS5 上で動作している IPF 法に対して、リアルタイムデータによる動作確認を行っている。平成 27 年 11 月 22 日から平成 28 年 2 月 3 日の期間において得られた計算結果について報告する。

(1) IPF 法と A 電文震源との震源決定精度の比較

最終的な震源推定結果とそれに対応する一元化震源との差異(震央距離差及び深さ差)を見ることで、IPF 法と A 電文震源の震源決定精度を評価した(図 2.2)。この解析においては、情報発表基準を満たさないような小規模な地震イベントを集計から除外している。具体的な集計対象としたデータは次の通りである。

- ・ IPF 法震源...使用観測点のいずれかで変位振幅 100 μm 以上を観測している(注: 緊急地震速報において変位マグニチュードを計算し始める条件に相当する)。また、いずれかで B- 法による震央距離が 400km 以内である。
- ・ A 電文震源...使用観測点のいずれかで変位振幅 100 μm 以上を観測している。(注:A 電文震源では、「使用観測点のいずれかで B- 法による震央距離が 400km 以内」という条件を遠地地震判定として内包しており、これを満たさなかった場合は計算結果を出力しない。)

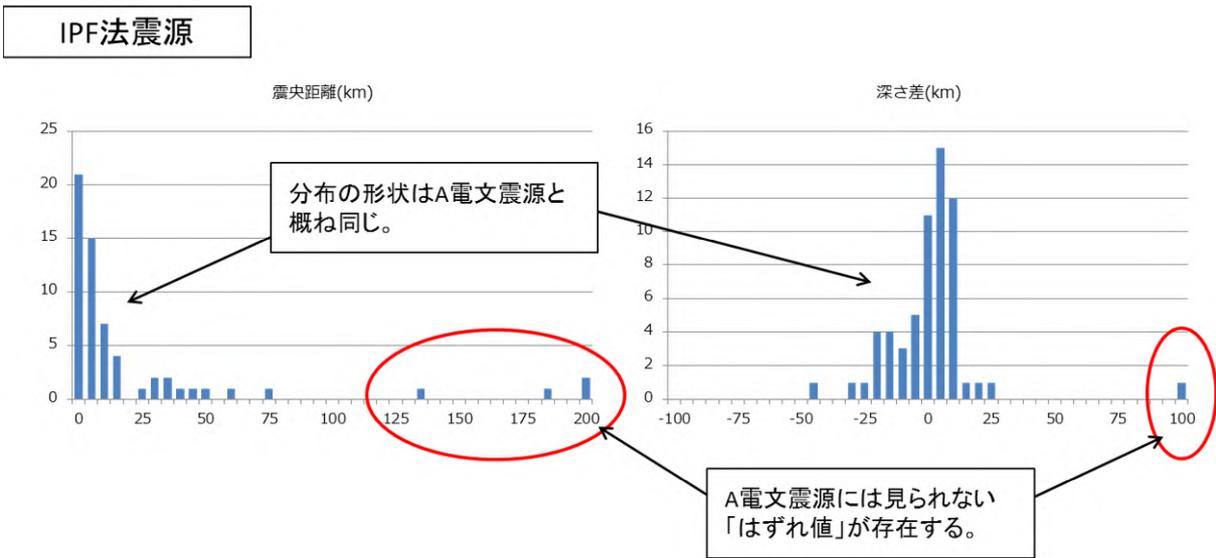


図 2.2 IPF 法と A 電文震源に対する最終的な震源推定結果と一元化震源との差異

図 2.2 から分かることは、次の 2 点である。

IPF 法震源と A 電文震源の分布の形状は概ね同じである。

IPF 法震源において、A 電文震源には見られない「はずれ値」がいくつか存在する。

からは、単独の地震に対する IPF 法の震源決定精度は A 電文震源と概ね同等である、ということが言える。また、最終震源の位置だけでなく、最終震源が求められるまでの推移も両者は類似している、ということも確認している。一例を図 2.3 に示す。

に関しては後述する（「(2)一元化震源との差異が大きな出力結果について」を参照）。

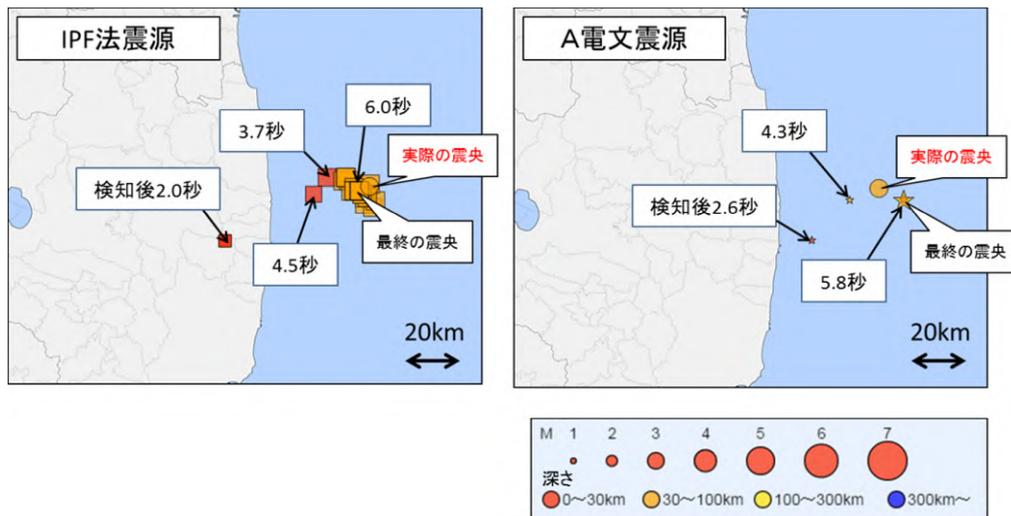


図 2.3 「平成 27 年 11 月 19 日 18 時 33 分頃 福島県沖 (M4.8)」の地震に対する IPF 法震源と A 電文震源の推移

(2) 一元化震源との差異が大きな出力結果について

図 2.2 において、A 電文震源には見られない IPF 法震源における「はずれ値」は、次の 2 タイプに分類される。

適切な B- 法による震央距離が得られない地震

B- 法の結果の活用条件が A 電文震源とは異なるために差が出た地震

の一例として、平成 28 年 1 月 12 日 2 時 8 分頃の北海道北西沖 (M6.2) の地震が挙げられる (図 2.4)。A 電文震源は、地震波検知後約 4.2 秒に適切な位置に震源を求め、それ以降ほぼ同じ位置の推定震源を出力し続けているのに対し、IPF 法震源は、地震波検知後約 4.3 秒に適切な位置に震源を求めた後、実際よりも遠い北西方向の深い位置に推定震源を決め直している。

この主な原因は、現地観測点側から送信された B- 法による震央距離の値が、実際よりも大きな値ばかりであったことによる。A 電文震源は観測点数が増えると P 波の検出時刻のみを用いたグリッドサーチ法に移行するのに対し、IPF 法は観測点数によらず B- 法による震央距離の情報を震源決定に反映させている。実際よりも遠くの震央距離のデータが多数入ったことにより、確率密度関数の形状がそれらの影響で変化し、確率密度関数の最大点が実際よりも遠方へ移動した。

改善のための対応として、観測点からのデータが多数得られている場合には B- 法による震央距離の情報が尤度に与える影響度合いを引き下げる等、より適切な B- 法の結果の活用方法を検討する。

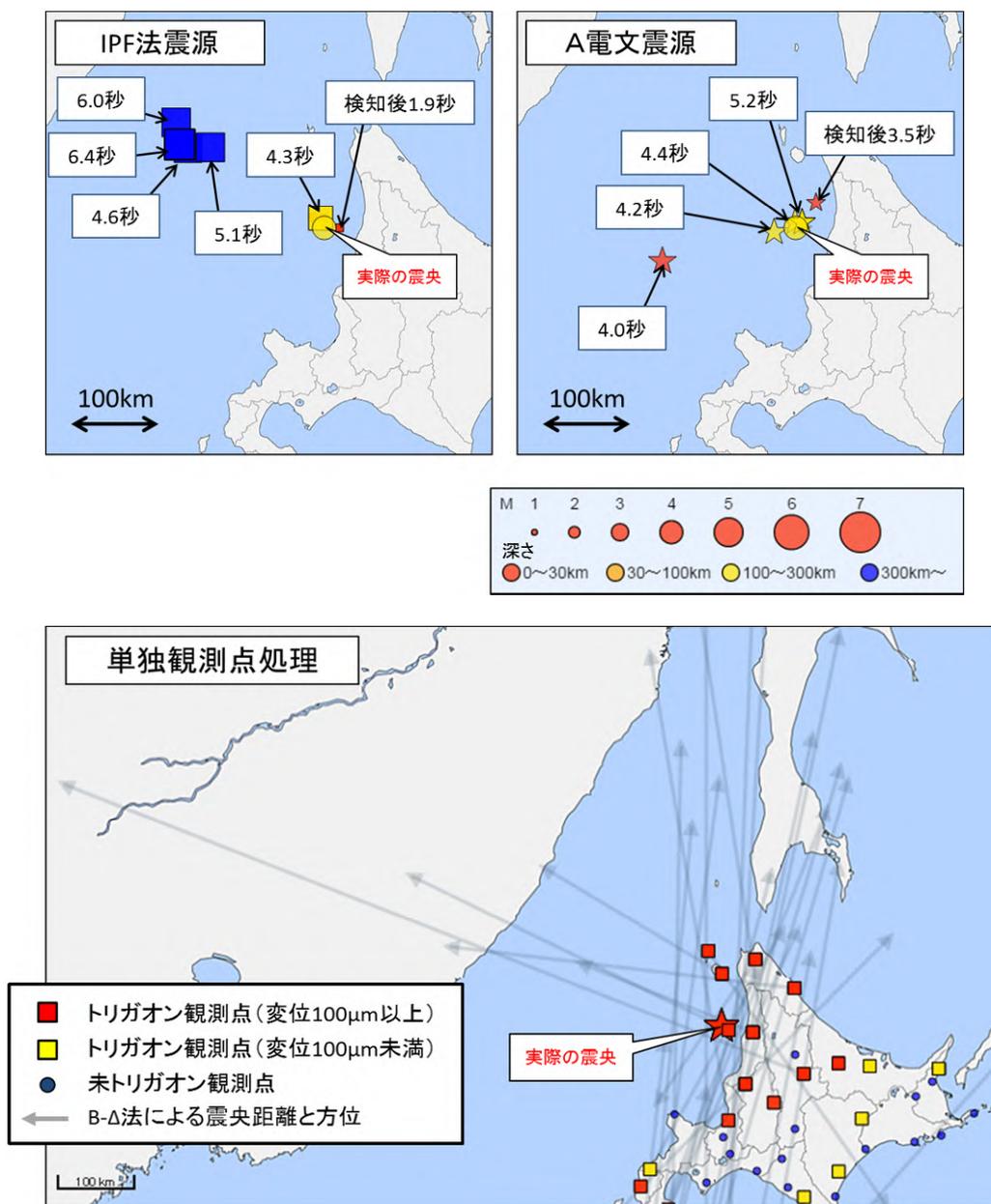


図 2.4 「平成 28 年 1 月 12 日 2 時 8 分頃 北海道北西沖 (M6.2)」に対する IPF 法震源と A 電文震源の推移、及び単独観測点処理の状況

の例としては、平成 27 年 11 月 20 日 14 時 31 分頃 父島近海 (M6.3) の地震が挙げられる (図 2.5)。IPF 法震源は、観測点「母島中ノ平」の B- 法の結果に基づいて震源を推定した。その後他の観測点からデータの入電が無かったために、初期段階の推定震源を更新して修正することができなかった。一方、A 電文震源は、B- 法の震央距離が 200km を越える場合は B- 法の結果を採用しない、という処理を行っているため、当該地震に対する震源推定は実施しなかった。その結果、図 2.2 において A 電文震源側には対応する「はずれ値」が現れなかった。

極端に観測データが少なく、正確に震源決定することが困難な地震イベントであることから、IPF 法の動作に問題があったと見做すべき事象ではない。しかしながら、

現行の IPF 法は、A 電文震源と異なり、無条件で B- 法の結果を活用する設定としている。改善のための対応として、IPF 法における適切な B- 法の結果の採用条件を検討し、適正な設定値の検証を行う。

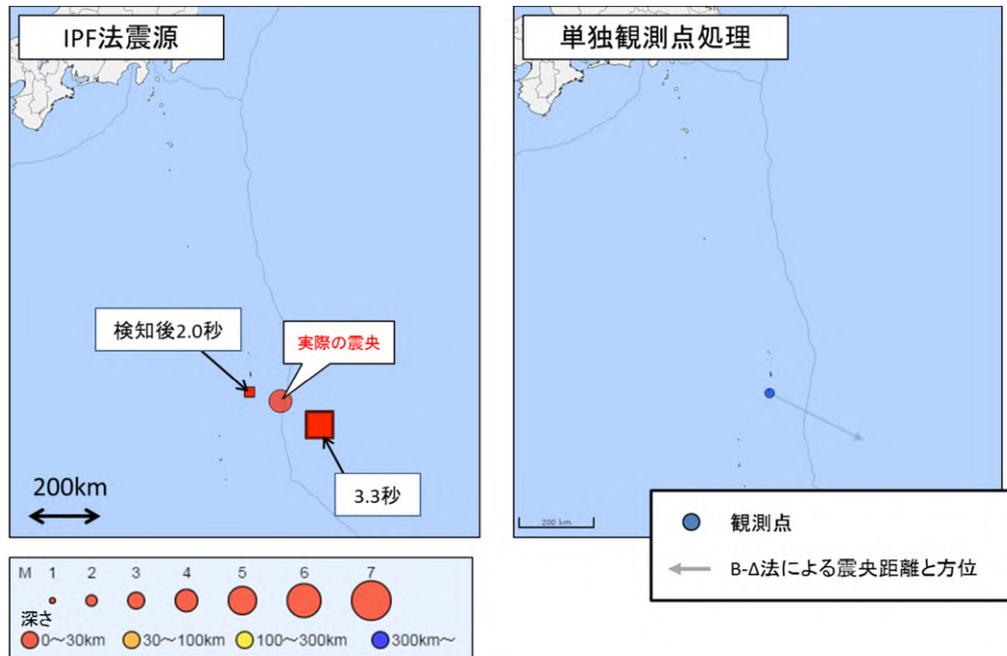


図 2.5 「平成 27 年 11 月 20 日 14 時 31 分頃 父島近海 (M6.3)」に対する IPF 法震源及び単独観測点処理の状況

(3) 一元化震源との対応付けができない出力結果について

期間内に出力された IPF 法の推定震源 (2.3 (1) で除外したのものも含む)のうち、一元化震源と対応付けができないものを調べたところ、多くはノイズによる A 電文を受信した際の 1 点震源計算結果であった。ただし、「平成 27 年 11 月 25 日 7 時 45 分頃 南米西部」の遠地地震 (以下、南米西部の地震) では、A 電文を用いて不適切な震源を決めている。

図 2.6 に上記遠地地震に対する IPF 法震源及び単独観測点処理の状況を示す。1.2 (5) で述べたように、当該地震は P 波の立ち上がりが近地地震のように急峻であったため、関東地方から九州地方にかけての観測点でトリガがかかり、多くの A 電文が送信された。IPF 法はその A 電文を受けて、5 種類の誤った近地地震を決定した。そのうちの 1 つは埼玉県南部の直下に位置する変位 M6.5 の地震であり、そのまま緊急地震速報処理に取り込まれた場合、警報の誤報を引き起こす恐れがある。

このような遠地地震によって決定された不適切な推定震源を緊急地震速報処理に取り込まないようにするために、以下のことを検討している。

入力データに対する品質管理処理の導入：入力された A 電文の B- 法による震央距離が全て 400km を越える場合、それによって計算された推定震源結果を破棄する。

出力結果に対する品質管理処理の導入：震央が陸域である推定震源に対して、緯度及び経度誤差がある閾値を越えている場合、その推定震源は破棄する。

は、現行の A 電文震源で実施している遠地地震判定の処理に相当する。

は、による判定では破棄できなかった誤った推定震源による誤報を防止するための処理である。南米西部の地震における埼玉県南部の推定震源は、緯度及び経度誤差が 1.0 度以上であるため、閾値として 1.0 度を設定すれば、この誤った推定震源による誤報を防ぐことができる。図 2.7 は、平成 27 年 11 月 12 日から平成 27 年 12 月 1 日の期間における全国の IPF 法の推定震源結果に対して、陸域と海域の区別をせずに緯度及び経度誤差の閾値を 1.0 度とした際に、採用及び破棄されるものの分布を示した図である。陸域の IPF 法震源は、前述の埼玉県南部の推定震源を除き、殆どが緯度及び経度誤差が共に 1.0 度未満である。従って、この品質管理処理が陸域の近地地震に対する推定震源結果に与える影響はほとんど無いと言える。一方で、小笠原諸島付近においては緯度及び経度誤差が共に 1.0 度以上の推定震源が数多く存在するため、海域の推定震源結果に対して同じ品質管理処理を導入することは適当ではない。

今後は、(2) で述べた B- 法の結果の活用方法の検証、及び(3) で述べた品質管理処理の検証を行った上で、IPF 法の運用を開始する。

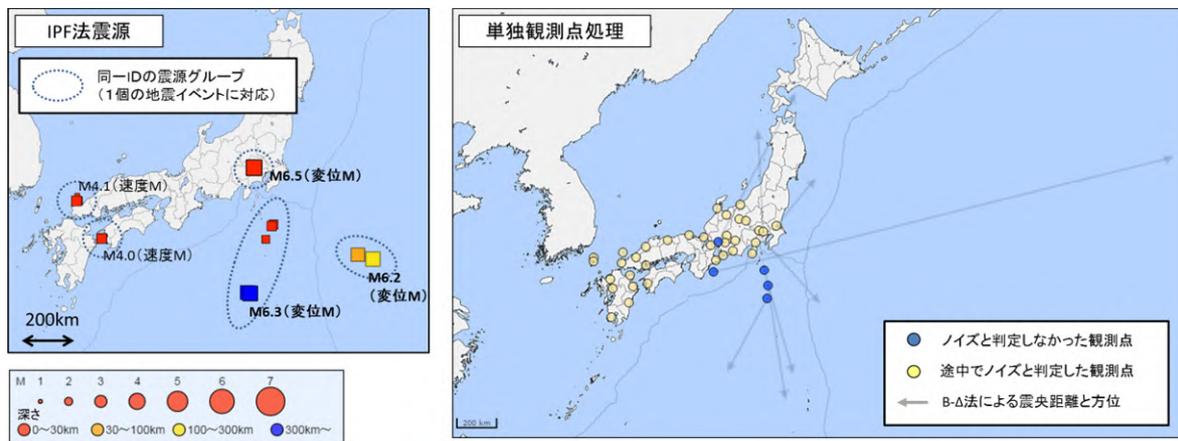


図 2.6 「平成 27 年 11 月 25 日 7 時 45 分頃 南米西部 (M7.5)」に対する IPF 法震源及び単独観測点処理の状況

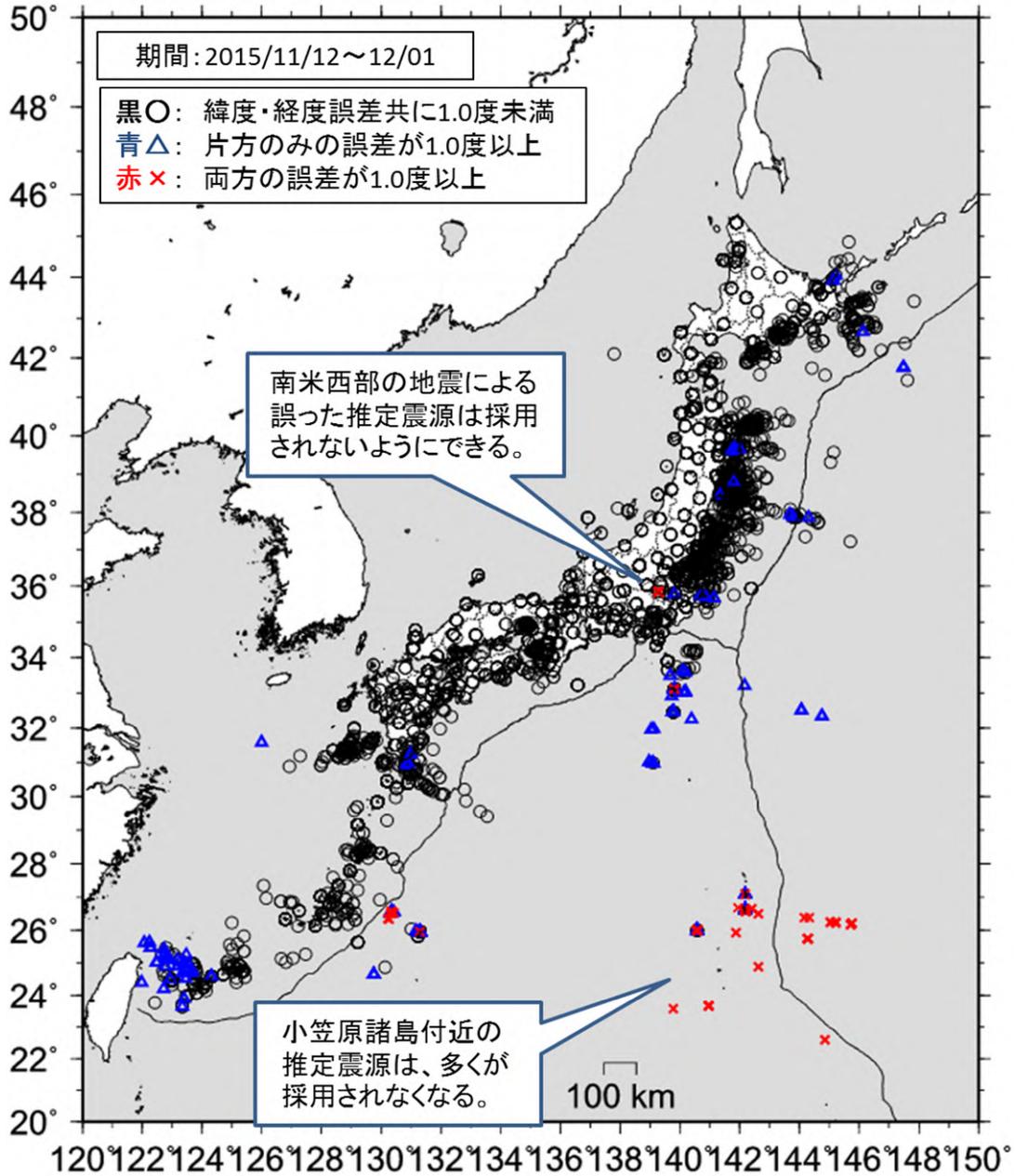


図 2.7 緯度及び経度誤差の閾値を 1.0 度とした場合に破棄される IPF 法の推定震源結果の分布（陸域と海域の区別をせずに適用した場合）

謝辞

IPF 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。

参考文献

溜淵功史、山田真澄、Stephen Wu(2014)：緊急地震速報のための同時多発地震を識別する震源推定手法、地震、第 67 巻、41-55

3 深発地震の震度予測

この項の要点

- 平成27年5月30日の小笠原諸島西方沖の深発地震で最大震度5強を観測したが、警報を公表しなかった。
- 平成12年1月1日～平成27年12月31日までの150kmより深い地震で最大震度1以上を観測した地震は272個。そのうち2個の地震が震度5弱であった。
- 距離減衰式による予測手法では深さを予測するのは困難である。
- PLUM法により深い地震の震度予測は可能であるが、地震波がほぼ垂直に入射するため、猶予時間は短い。

3.1 平成27年5月30日 小笠原諸島西方沖の深発地震の緊急地震速報

平成27年5月30日に小笠原諸島西方沖で発生した深発地震(深さ681km、Mjma8.1)では、最大震度5強を東京都小笠原村、神奈川県二宮町で観測し、震度5弱を3点の震度観測点で観測した(図3.1)。図3.2に緊急地震速報で推定した震央の位置、表3.1に緊急地震速報の発表状況を示す。地震波検知から3.4秒後に第1報を発表した。深発地震では震度予測が困難なため、150kmより深い地震については震度予測は行っていない。今回の地震については、深さ560kmと推定した第6報から震度予測を行わず、緊急地震速報(警報)も発表しなかった。

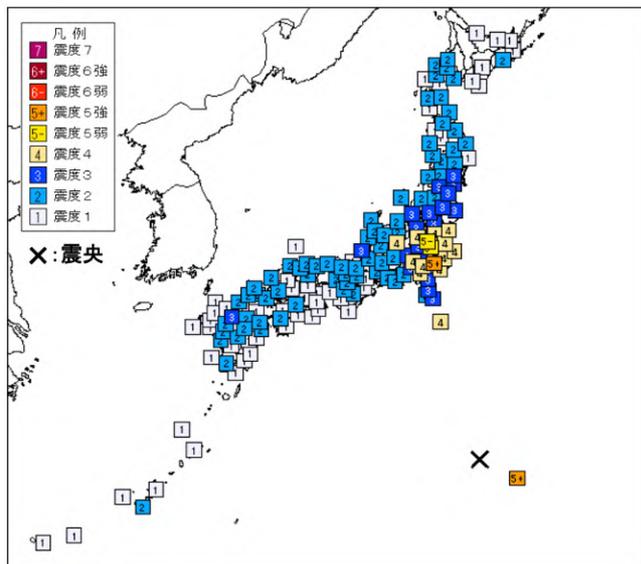


図3.1 小笠原諸島西方沖の深発地震による震度分布

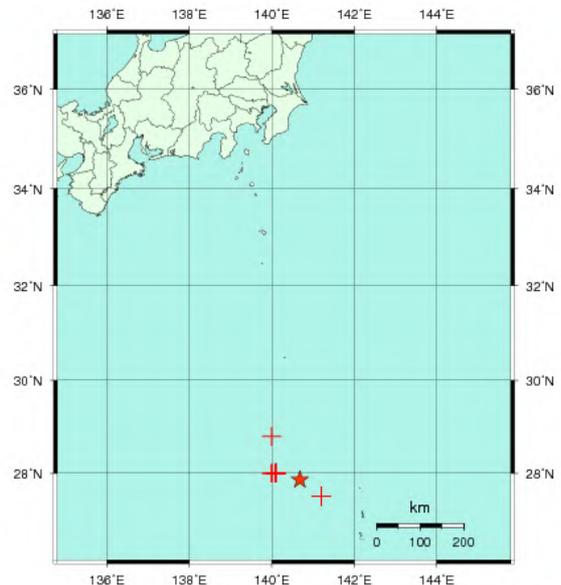


図3.2 緊急地震速報で推定した震央の位置

提供時刻等		震源要素等					予測震度
		地震波検知からの経過時間(秒)	震源要素				
			北緯	東経	深さ	マグニチュード	
地震波検知時刻	20時24分22.7秒	-	-	-	-	-	-
1	20時24分26.1秒	3.4	27.5	141.2	10km	6.8	最大震度3程度以上
2	20時24分32.5秒	9.8	27.5	141.2	10km	7.2	※1
3	20時24分34.1秒	11.4	27.5	141.2	10km	7.2	※1
4	20時24分43.2秒	20.5	27.5	141.2	10km	6.3	最大震度3程度以上
5	20時24分43.9秒	21.2	28.8	140.0	10km	8.0	最大震度3程度以上
6	20時24分44.3秒	21.6	28.0	140.0	560km	8.2	-
7	20時24分53.1秒	30.4	28.0	140.0	560km	8.0	-
8	20時25分03.3秒	40.6	28.0	140.1	560km	8.0	-
9	20時25分23.1秒	60.4	28.0	140.1	560km	8.0	-
10	20時25分43.1秒	80.4	28.0	140.1	560km	8.0	-
11	20時25分58.3秒	95.6	28.0	140.1	560km	8.6	-
12	20時26分06.6秒	103.9	28.0	140.1	560km	8.9	-
13	20時26分26.0秒	123.3	28.0	140.1	560km	9.1	-
14	20時26分46.0秒	143.3	28.0	140.1	560km	9.1	-
15	20時27分06.1秒	163.4	28.0	140.1	560km	9.1	-
16	20時27分25.2秒	182.5	28.0	140.1	560km	9.1	-

※1 震度4程度以上

小笠原

表3.1 小笠原諸島西方沖の地震の緊急地震速報の発表状況

3.2 過去の深発地震による震度

平成12年1月1日～平成27年12月31日までに震度1以上を観測した150kmより深い地震の震央分布を図3.3に示す。地震の総数は272個である。さらに、この中で震度4以上を観測した地震を表3.2に示す。

なお、気象庁の震度のカタログ（1923年～2015年）で、震度5弱以上を観測した深さ150kmより深い地震は、平成26年5月5日伊豆大島近海（M6.0、深さ156km）及び平成27年5月30日小笠原諸島西方沖（M8.1、深さ681km）の2個だけである。

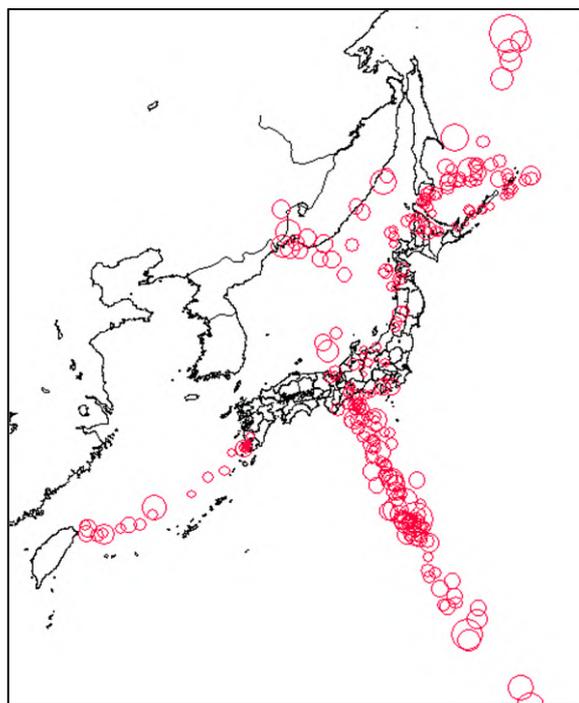


図3.3 平成12年1月～平成27年12月までの震度1以上を観測した深さ150kmを超える地震の震央分布

発震時(年月日)	震央地名	北緯	東経	深さ	Mag	最大震度
2000年8月6日	小笠原諸島西方沖	28° 49.26'	140° 05.16'	444	7.2	4
2003年11月12日	三重県南東沖	33° 09.89'	137° 02.08'	395	6.5	4
2007年7月16日	京都府沖	36° 51.96'	135° 06.27'	373	6.7	4
2008年4月17日	秋田県沿岸南部	39° 02.51'	140° 14.07'	165	5.8	4
2009年8月9日	東海道南方沖	33° 07.68'	138° 24.24'	332	6.8	4
2009年9月3日	薩摩半島西方沖	31° 07.55'	130° 18.03'	166	6.0	4
2011年11月8日	沖縄本島北西沖	27° 17.85'	125° 44.34'	217	7.0	4
2012年1月1日	鳥島近海	31° 25.68'	138° 33.99'	397	7.0	4
2013年9月4日	鳥島近海	29° 56.15'	139° 25.05'	445	6.8	4
2014年5月5日	伊豆大島近海	34° 57.19'	139° 28.86'	156	6.0	5弱
2015年5月30日	小笠原諸島西方沖	27° 51.65'	140° 40.95'	681	8.1	5強
2015年6月23日	小笠原諸島西方沖	27° 42.07'	140° 10.72'	483	6.8	4

表 3.2 平成 12 年 1 月 1 日～平成 27 年 12 月 31 日までの
最大震度 4 以上を観測した深さ 150km より深い地震

3.3 深発地震の距離減衰式による震度予測の可能性

緊急地震速報の震度予測の方法は、司・翠川（1999）の距離減衰式を使用し、地盤増幅率と翠川・他（1999）による最大速度（PGV）と計測震度の関係式から震度を予測するものである。

深発地震の震度予測法としては、森川・他（2003）や森川・他（2006）があるが、これは距離減衰式から推定した最大速度、最大加速度に対し、海溝軸や火山フロントまでの距離に応じて補正を行うという手法である。この手法の有効性については、第2回技術部会においても確認されているが、補正値を求めるために使用した地震の深さの最大が 155km までのやや深い地震である。今後、森川・他（2003）や森川・他（2006）の方法がどの程度の深さまで適用できるかの検証が必要である。

表 3.1 の地震の中から、異常震域の現象が顕著であった 4 つの深発地震に対し、司・翠川（1999）式による PGV600（S 波速度 600m/s の基準基盤での最大速度）、震度予測と実際に観測した計測震度を比較した図を図 3.4～図 3.7 に示す。図中の実線は司・翠川（1999）式により求めた PGV600 の値を示す。気象庁観測点の PGV と地盤増幅率で緊急地震速報の手法による PGV600 を計算し、司・翠川式による PGV600 と比較した。この結果から、観測値から推定した PGV600 には、距離依存性がほとんど見られない。また、観測された震度の小さいところでも、計算による計測震度は小さいところから大きいところまでばらつきが大きく、距離減衰式からは震度予測は困難である。

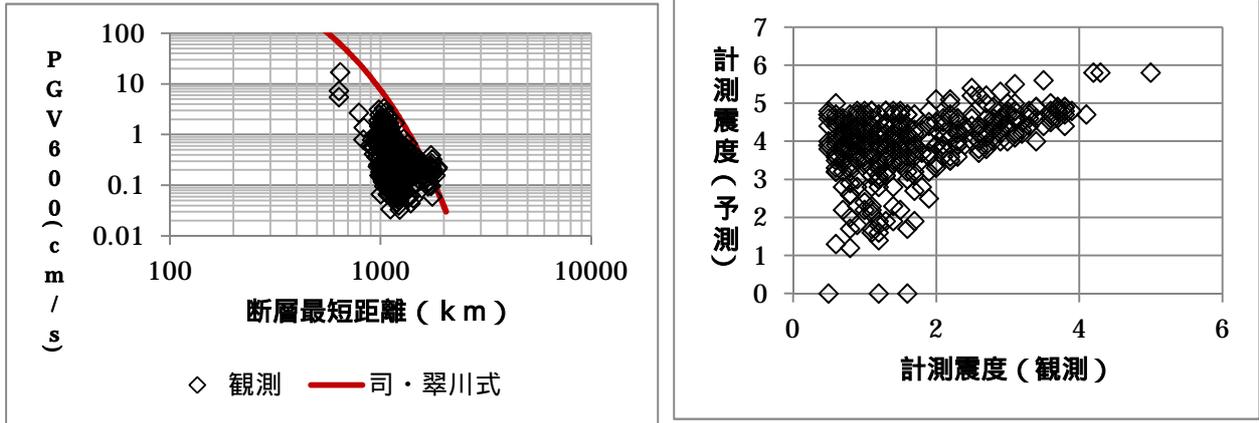


図 3.4 平成 27 年 5 月 30 日 小笠原諸島西方沖の地震 (M8.1、深さ 681km)
 左図：実線は司・翠川式による PGV600 の予測、右図：計測震度の観測値と予測値との比較

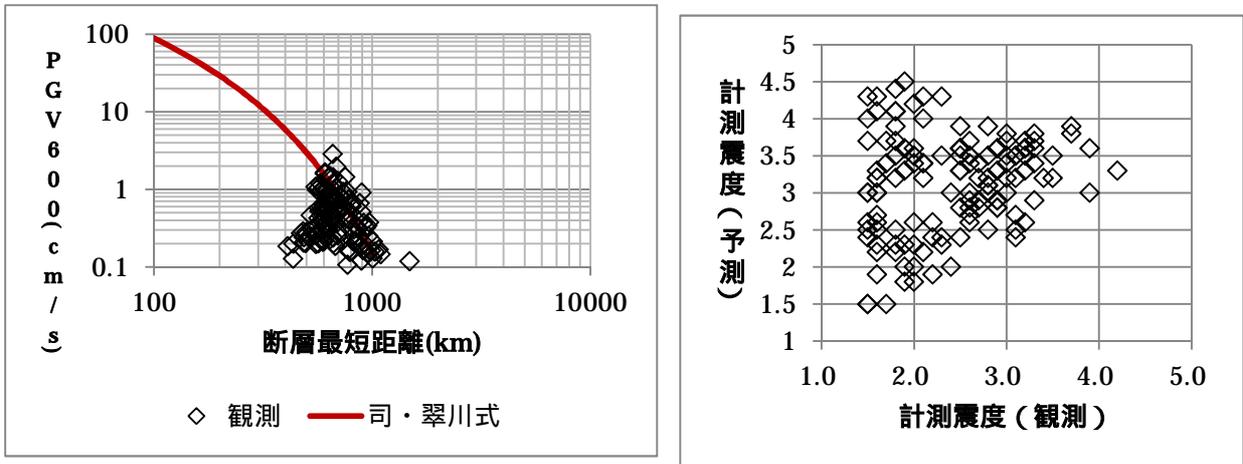


図 3.5 平成 24 年 1 月 1 日 鳥島近海の地震 (M7.0、深さ 397km)
 左図：実線は司・翠川式による PGV600 の予測、右図：計測震度の観測値と予測値との比較

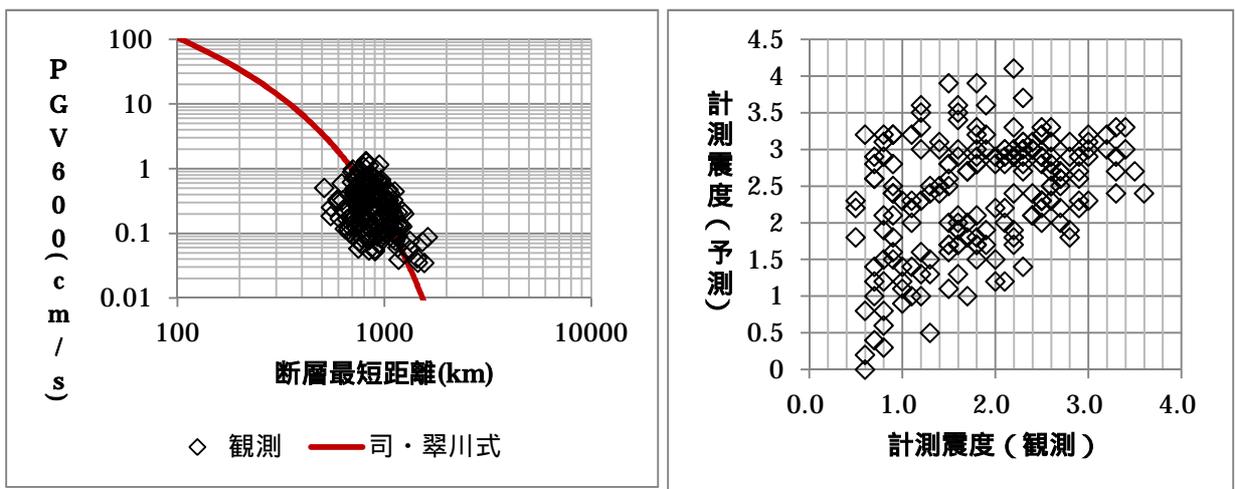


図 3.6 平成 25 年 9 月 4 日 鳥島近海の地震 (M6.8、深さ 445km)
 左図：実線は司・翠川式による PGV600 の予測、右図：計測震度の観測値と予測値との比較

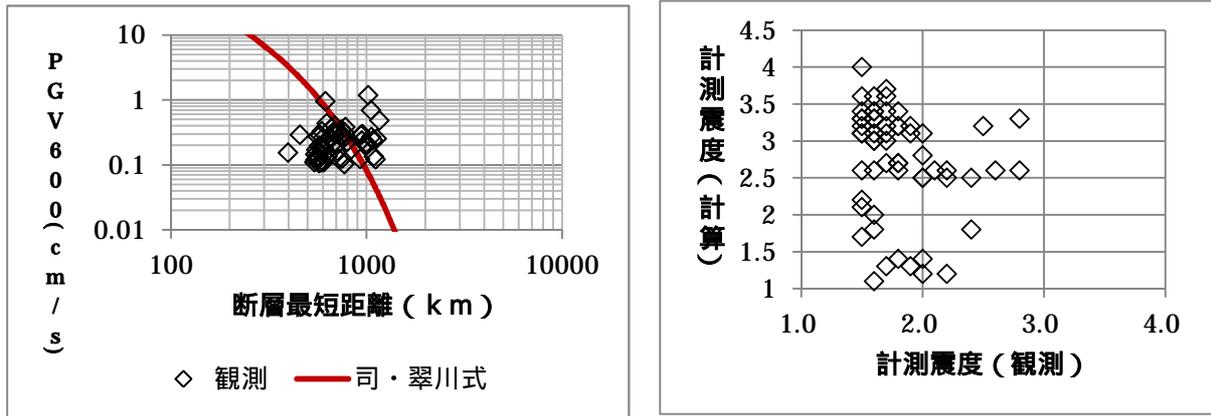


図 3.7 平成 19 年 7 月 16 日 京都府沖の地震 (M6.7、深さ 374km)

左図：実線は司・翠川式による PGV600 の予測、右図：計測震度の観測値と予測値との比較

3.4 PLUM 法による震度予測

深さが約 150km までの深発地震の震度予測の精度向上には、森川・他(2006)式の活用が有効であるが、150km より深い場所で発生する深発地震に対し、どこまで適用できるのか検証されておらず、明らかではない。

さらに、2015年5月30日の小笠原諸島西方沖のように非常に深い地震に対しては、異常震域により、全国一律に適用できるような距離減衰式を作成することは難しいと考えられる。

PLUM 法は、震源、マグニチュードから距離減衰式を用いて震度を予測する方法ではなく、震度を予測する地点の周囲のリアルタイム震度から震度を予測するため、震源の深さに関係なく、震度予測を行うことが可能である。平成 27 年 5 月 30 日の小笠原諸島西方沖の地震の震度予測に PLUM 法を使った場合の結果を図 3.8 及び表 3.2 に示す。しかし、現在導入を予定している PLUM 法では、予測点から距離が 30km の震度観測点のリアルタイム震度を利用するため、深発地震のように地震波が観測点の直下から入射するような場合には猶予時間は短いという短所がある。

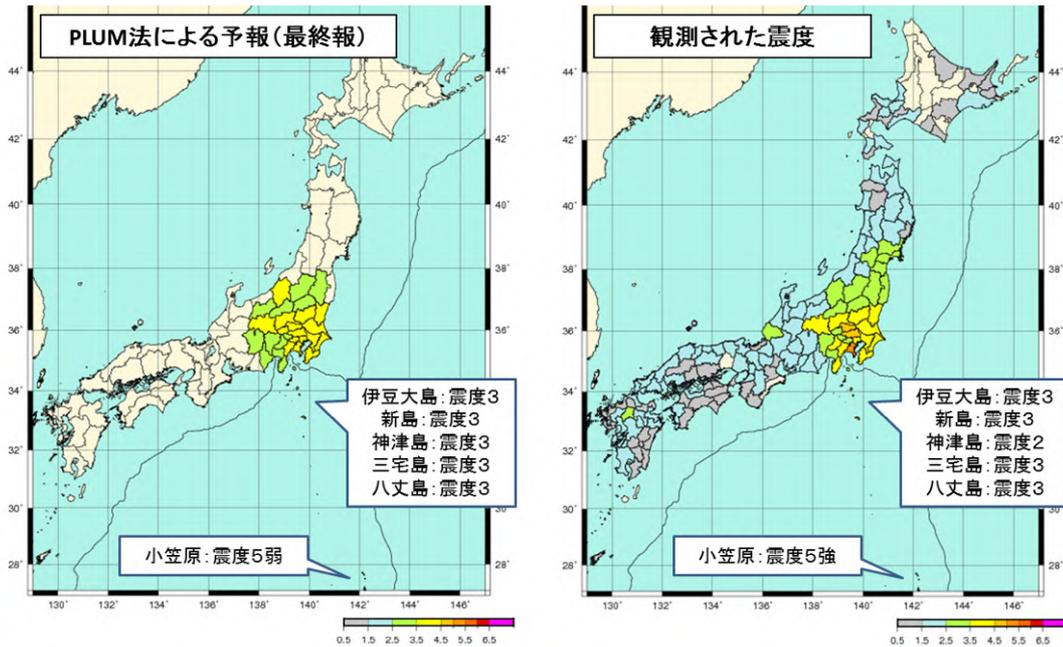


図 3.8 平成 27 年 5 月 30 日小笠原諸島西方沖の地震の PLUM 法による震度予測の結果。

左図：PLUM 法による最終予報の震度予測結果。 右図：観測された震度

報数	提供時刻	新たな予測地域と予測震度	S 波の到達予想時刻	警報
1	20 時 24 分 28 秒台	(最大震度 3)		
2	20 時 24 分 31 秒台	震度 4 小笠原	20 時 25 分 26 秒	
3	20 時 25 分 33 秒台	震度 5 弱 小笠原	20 時 25 分 26 秒	—
4	20 時 26 分 33 秒台	震度 4 千葉県南部	20 時 26 分 26 秒	
5	20 時 26 分 35 秒台	震度 4 神奈川県東部	20 時 26 分 30 秒	
6	20 時 26 分 36 秒台	震度 4 千葉県北東部	20 時 26 分 33 秒	
7	20 時 26 分 38 秒台	震度 4 東京都 23 区 震度 4 千葉県北西部	20 時 26 分 36 秒 20 時 26 分 35 秒	
8	20 時 26 分 43 秒台	震度 4 埼玉県南部	20 時 26 分 40 秒	
9	20 時 26 分 45 秒台	震度 4 東京都多摩東部 震度 4 茨城県南部	20 時 26 分 37 秒 20 時 26 分 39 秒	
10	20 時 26 分 47 秒台	震度 4 埼玉県北部 震度 4 神奈川県西部	20 時 26 分 44 秒 20 時 26 分 31 秒	
11	20 時 26 分 51 秒台	震度 4 茨城県南部	20 時 26 分 45 秒	
12	20 時 27 分 00 秒台	震度 4 栃木県南部 震度 4 埼玉県秩父	20 時 26 分 47 秒 20 時 26 分 44 秒	
13	20 時 27 分 04 秒台	震度 4 茨城県北部	20 時 26 分 45 秒	
14	20 時 27 分 10 秒台	震度 4 長野県中部	20 時 26 分 45 秒	
15	20 時 27 分 16 秒台	震度 4 新潟県中越	20 時 27 分 00 秒	

表 3.3 平成 27 年 5 月 30 日小笠原諸島西方沖の地震の PLUM 法による震度予測の結果と S 波到達予想時刻（S 波の到達時刻は予報区の予想対象点で最も早い時刻）

参考文献

- ◇ 翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄：計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係，地域安全学会論文集，51-56（1999）
- ◇ 司宏俊・翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文報告集，No.523 63-70（1999）
- ◇ 森川信之、神野達夫、成田章、藤原広行、福島美光(2003)：東北日本の異常震域に対応するための距離減衰式の補正係数、日本地震工学会論文集、第3巻、第4号、14-26
- ◇ 森川信之、神野達夫、成田章、藤原広行、福島美光(2006a)：東北日本の異常震域に対応するための最大振幅および応答スペクトルの新たな距離減衰式補正係数、日本地震工学会論文集、第6巻、第1号、23-41
- ◇ 森川信之、神野達夫、成田章、藤原広行、福島美光(2006b)：西南日本の異常震域に対応するための距離減衰式補正係数、日本地震学会講演予稿集、D031

4 海底地震計データの活用について

この項の要点

- 海底地震計について新たに上下動変位振幅を用いたマグニチュード推定手法を考案し、その精度を検証した。
- DONET 地震計をマグニチュード推定に活用するため、速度マグニチュードを適用することを検討した。

4.1 上下動変位振幅を用いたマグニチュード推定手法の検討

(1) 目的

現在の緊急地震速報のマグニチュード(M)算出手法では、気象庁一元化震源のM(M_j)に近いMを算出するために、3成分合成した変位波形の最大振幅による変位M式を用いている。変位波形は、観測された加速度波形に対し、2階積分ののち特性変換のため6秒2次相当のハイパスフィルタを適用するのに相当する処理を漸化式フィルタによって行うことで得られる。しかし、海底地震計の加速度記録には、強震時の傾動やヒステリシスなどを原因とするオフセットが混入する事例があり、変位波形への変換時に振幅の大きなオフセットノイズを生じさせてしまうことで、Mの過大評価につながる可能性がある。

ここでは、海底に転がされて設置されているため、強震動を受けた際には、特に大きいオフセットノイズが発生しやすいインライン式の海底地震計の傾動の特徴に着目し、上下動変位振幅を用いたM推定手法について提案する。上下動変位振幅を用いることで、強震時の傾動やサイト増幅特性など、OBS特有の特徴によって生じるM過大評価の影響を軽減することができる。また、陸域においてもサイト増幅特性の違いによる影響を低減し、3成分合成変位振幅を用いたM推定よりもMのばらつきを抑えることができる可能性がある。

(2) 調査に用いたデータ

解析には、インラインケーブル式OBSを代表して、国立研究開発法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)の釧路沖OBSのデータを用いた。釧路沖OBSは、直下で「平成15年(2003年)十勝沖地震(M8.0)」が発生するなど、周辺の地震活動度が高いOBSである。また、釧路沖OBSに搭載されている加速度センサーやその設置方法は、国立研究開発法人防災科学技術研究所(NIED)が現在構築している日本海溝海底地震津波観測網(S-net)と概ね同様の仕様である。比較のための陸上観測点としては、NIEDのK-NETのデータを利用した。

(3) インライン式海底地震計の強震時の傾動の特徴

平成15年(2003年)十勝沖地震では、強震により釧路沖OBSの地震計筐体が転がる方向に最大約5°回転したことが指摘されている(Yamamoto *et al.* (2004, AGU))。2000年以降の釧路沖OBSの地震波形記録にメディアンフィルタ

を適用することでオフセット変化を抽出し、仮にこのオフセット変化すべてが筐体の傾動による重力加速度変化によって生じたものとみなして、OBS 筐体の姿勢角の変化を算出した(図 4.1)。個別の地震時の姿勢角変化をみると、最大加速度(PGA)に応じて変化量が大きくなり、PGA が 100cm/s^2 を超える地震では、OBS の長軸が傾く方向のピッチ角に対して、OBS の円筒が回転する方向のロール角の変化が有意に卓越する(図 4.2(左))。筐体形状による特徴がみとめられる。地震計の姿勢角を補正して3成分を上下動成分・水平動成分に変換した場合、オフセット変化は上下動成分やケーブル方向の水平動より、ケーブルに直交する水平動で大きくなる(図 4.2(中央))。これは、鉛直方向に作用する重力加速度のロール角回転に対する分力が、上下動成分よりも水平動成分に生じやすいことによる。加速度成分のオフセット変化は、緊急地震速報の M 推定に用いている漸化式フィルタを用いた変位波形にも残留するため、オフセットが緊急地震速報の M 計算に影響を与える可能性がある(図 4.2(右))。

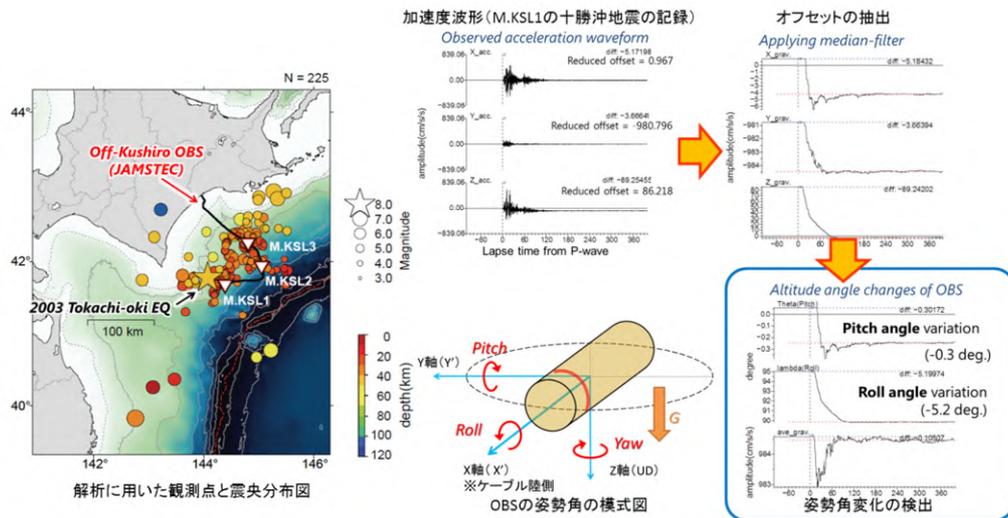


図 4.1 強震時の傾動検出の模式図

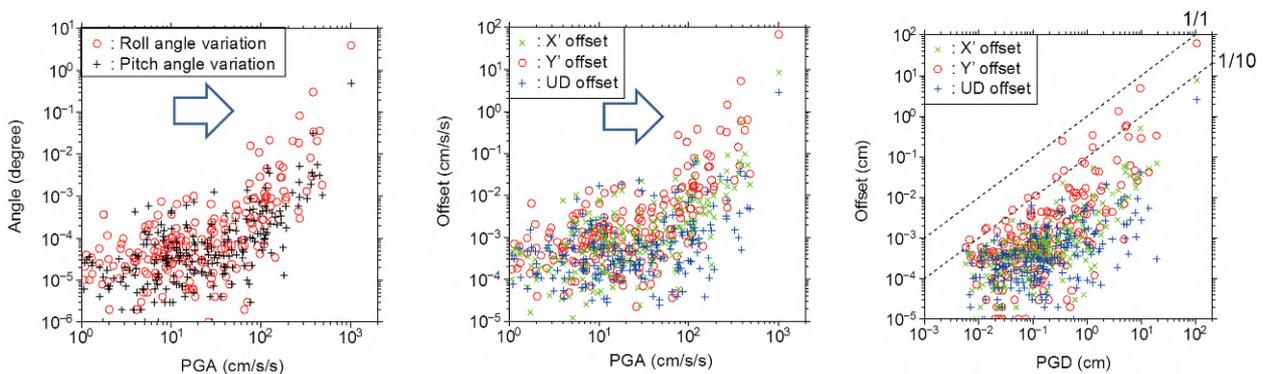


図 4.2 M.KSL3 観測点での地震ごとの検出結果

(左): 最大加速度 (PGA) とロール角 ()・ピッチ角 (+) 変化の関係、(中央): PGA と加速度オフセット量 (上下動成分 (UD)、水平動成分 (ケーブル方向: X'、ケーブル直交方向: Y')) の関係、(右): 最大変位 (PGD) と変位オフセット量の関係

（4） 現行の緊急地震速報全相 M 式を適用した場合の影響

現行の全相 M 式は次式で表される。

$$0.87 \times M = \log A + 1.0 \log R + 1.9 \times 10^{-3} \times R - 5.0 \times 10^{-3} \times D + 0.98$$

ここで、A は 3 成分合成変位波形の 10 μm 単位の最大振幅、R は震源距離(km)、D は震源の深さ(km)であり 100km 以深は 100km で固定される。

釧路沖 OBS で 3 成分合成変位振幅が 100 μm 以上となったデータおよび、同地震で得られた K-NET 観測点の加速度データについて、漸化式フィルタで変位波形に変換し、現行の全相 M 式を適用した結果を図 4.3 に示す。M5 から M8 までの M 平均残差をみると K-NET でも 0.37 とやや過大であるが、釧路沖 OBS は 0.77 と K-NET よりも 0.4 程度過大となることわかる。これは、堆積層によるサイト増幅特性の影響であると推定され、現行 M 式を適用する上では、経験的な観測点補正值等での補正などが必要となる。

ただし、震央距離の離れたデータでも振幅データ取得のタイムウィンドウを確保するため、ここで利用した最大振幅は、現行 M 式の算出の際に用いたタイムウィンドウ（P 波検知後 60 秒）ではなく、S 波後 60 秒間（P 波自動検出時刻 + 理論 S-P 時間 + 60 秒）の最大値としている。

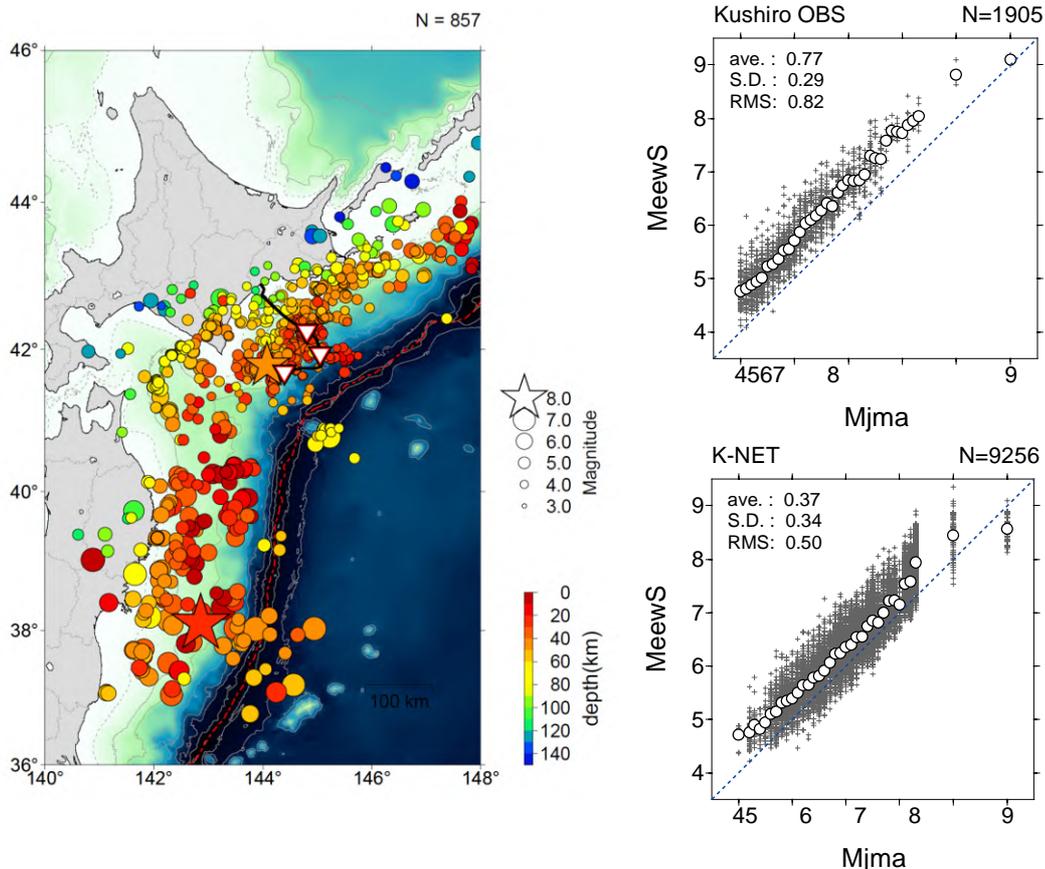


図 4.3 解析に用いた地震の震央分布図(左)と、現行全相 M 式を釧路沖 OBS (右上)と K-NET 観測点 (右下) で得られたデータに適用した結果。統計量は、マグニチュードが 5 ~ 8 の範囲での M 残差の平均・標準偏差・RMS を示す。

同じデータについて、M5~8の範囲において、K-NETで得られた3成分合成変位振幅値に最適なM式を、Two step Stratified法（Joyner and Boore, 1981）により推定し、K-NETおよび釧路沖OBSのデータに適用した例を図4.4に示す。釧路沖OBSではK-NETと比較して、全体では約0.3程度過大評価となる。ここで、入力加速度（PGA）に注目すると、釧路沖OBSではPGAとM残差との間に明瞭な依存性が認められ、震源距離が近くPGAが大きい地震で全相Mの過大評価となっていることがわかる。これらの傾向は陸上観測点には認められず、（2）節で述べたOBSの傾動など強震時のOBSデータの乱れにより生じるものと考えられる。

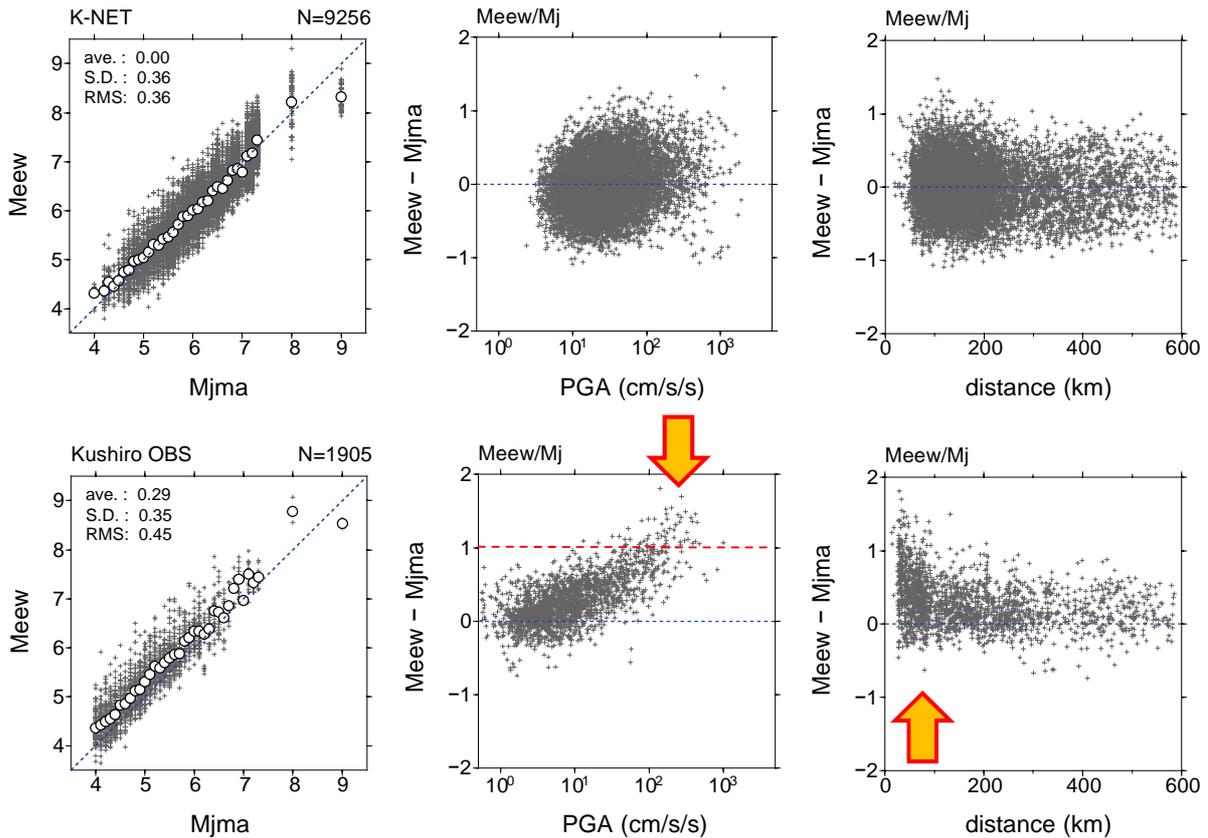


図 4.4 K-NET（上段）と釧路沖 OBS（下段）における 3 成分合成変位振幅を用いた M と気象庁 M (Mj) との比較。統計量は、マグニチュードが 5~8 の範囲での M 残差の平均・標準偏差・RMS を示す。

（5）上下動成分を用いたマグニチュード推定手法の検討

OBSにおける傾動やサイト増幅特性の影響を低減させ、OBSでも安定したM推定を可能にする手法として、上下動変位振幅を用いたM推定手法を提案する。変位波形は、現在の緊急地震速報処理で用いている漸化式で得られたものを利用して。同様に、K-NETの観測値に最適なM式を上下動変位振幅により算出して、釧路沖OBSに適用した（図4.5）。3成分合成変位波形によるM式で顕著であったM残差のPGA依存性は、PGAが100cm/s²を超えるような場合に若干認められるものの、上下動変位振幅を用いることで低減されていることがわかる。また、OBSと陸

上観測点の間でのサイト増幅特性の違いによる M の違いは 0.03 程度と小さくなっていることがわかる。

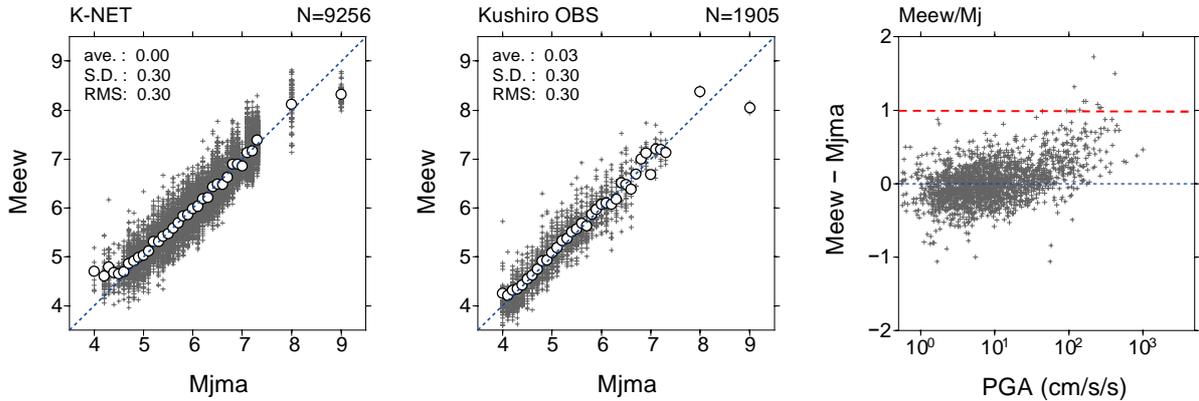


図 4.5 陸上の観測点（左）と釧路沖 OBS（中央・右）における、上下動変位振幅を用いた M と Mj との比較。

(6) 日本全域に適用可能な上下動 M 式の導出

平成 12 年（2000 年）以降に国内で発生した M5.0 以上、深さ 200km 以浅の地震の K-NET 記録から、上下動変位 M 式を推定したところ、M 式は

$$0.84 \times M = \log A + 0.84 \log R + 1.17 \times 10^{-3} \times R - 2.24 \times 10^{-3} \times D + 1.28$$

となり、3 成分合成変位振幅より推定した全相 M、

$$0.79 \times M = \log A + 1.17 \log R + 7.21 \times 10^{-4} \times R - 4.18 \times 10^{-3} \times D - 0.05$$

の結果よりも、RMS が K-NET では 0.35 → 0.29 と観測点間のばらつきが小さくなることがわかった（図 4.6）。このように、上下動変位 M を用いることで、陸上観測点でもサイト増幅特性の影響を低減し、安定した M 推定が可能になると考えられる。ただし、M5 より小さな地震にみられるように、上下動のみを用いることで S/N が小さくなることから、決定可能な M 下限が大きくなる可能性がある。

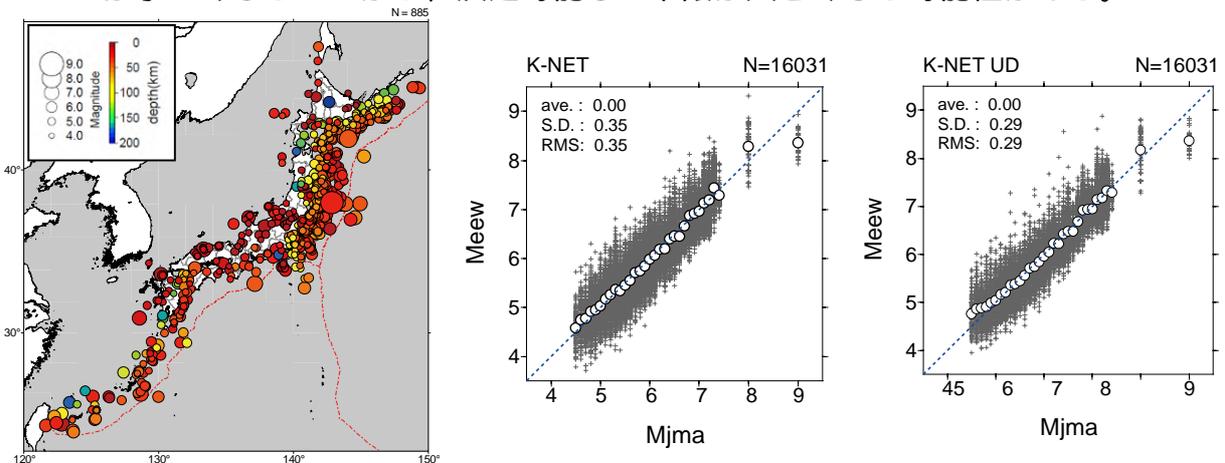


図 4.6 2000 年以降に発生した M4.5 以上、深さ 200km 以浅の地震で、K-NET 記録の得られた 885 個について、M5.0～M8.0 の範囲でフィッティングさせた M 式での観測点 M と Mj との関係。中央が 3 成分合成変位波形、右が上下動変位波形の最大値から M を得たもの。

なお、ここで算出した M 式は、調査のための暫定的な値であるが、今後他の OBS や、気象庁観測点・KiK-net などの他の陸上観測点のデータも利用したうえで、すべての観測網に適用可能な M 式の導出を目指したい。

参考文献

- ◇ Yamamoto, Y., H. Takenaka, K. Hirata, T. Watanabe (2004) :
Estimation of Broadband Ground Motion at Ocean-bottom Strong-motion Stations for the 2003 Tokachi-oki Earthquake, 2004 AGU Fall Meeting.
- ◇ Joyner, W. B. and D. M. Boore (1981) :
Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., 71, 2011-2038.

4.2 DONET 地震計への速度マグニチュードの活用

(1) DONET 地震計の観測データの活用状況

気象庁では、平成27年3月から、国立研究開発法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)の海底地震・津波観測監視システム(DONET1)による観測データを緊急地震速報の震源推定に活用している。DONET1の活用に対しては、海域で発生する地震についていち早く地震波を検知することにより、緊急地震速報を迅速化させる効果が期待されている。一方で、DONET1に搭載している加速度計には、地震観測時にオフセットノイズ(機器ノイズおよび筐体の傾動によるノイズ)が混入することがあるため、現状ではDONET1の観測データを緊急地震速報のマグニチュード(M)推定には活用していない。このため、DONET1周辺において地震が発生した場合、陸上の地震観測点に地震波が到達してから地震の規模推定を行うことになるが、緊急地震速報における海底地震観測の効果を高めるためには、DONET1の観測データを用いたM推定が可能な手法を導入する必要がある。

(2) M推定手法

オフセットノイズ対策として以下の点を考慮し、鉛直成分の速度振幅を用いたM推定の活用を検討した。

ア 筐体が傾動しても影響を受けにくいこと

加速度計の微小な傾動によるオフセットノイズは、主に水平成分の観測値に重力加速度の分力が回りこむことによって発生する。鉛直成分の観測値については、水平成分と比較して傾動の影響が小さい。センサー傾動時の波形例を図4.7に示す。

イ オフセットノイズに敏感に応答しないこと

加速度計による観測値から速度計相当の振幅を得るためには、観測波形に対してフィルタをかけ、時間軸上の1階積分+特性変換を行うことになる。この操作は長周期成分を遮断することに相当するため、オフセットノイズの影響を相対的に小さくできる。

Mの計算式は、気象庁一元化カタログ震源作成時に用いている速度Mの式を用いることとした。M計算に用いる距離・深さ減衰項を図4.8に示す。

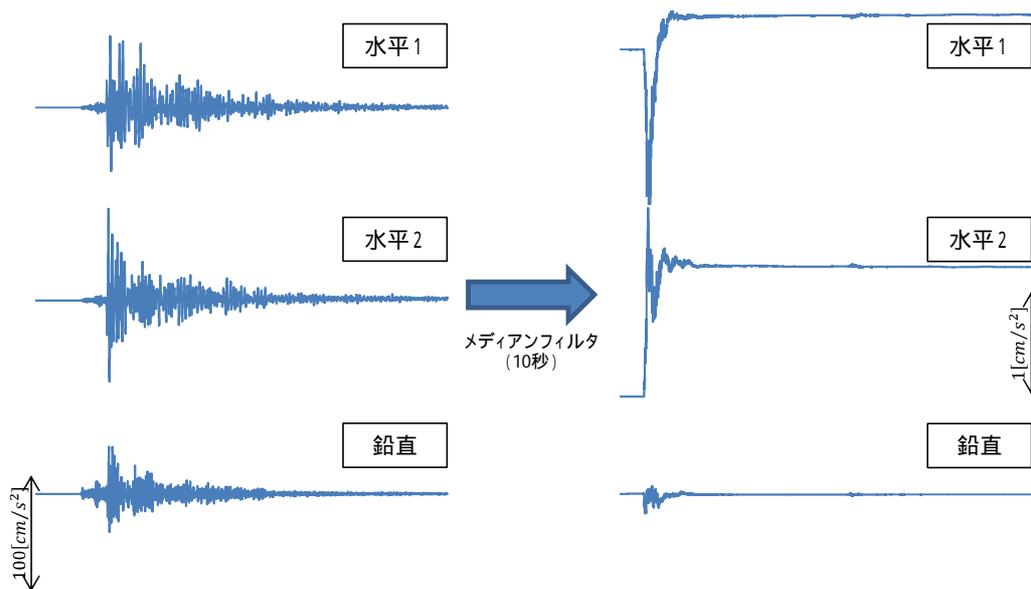


図 4.7 センサー傾動時の加速度波形の例

2014/11/30 08:00 三重県南東沖の地震（M4.2、最大震度1）時の M)10C における加速度波形（左）および10秒のメディアンフィルタを施した波形（右）。

水平成分に1 [cm/s²]程度のオフセットノイズが見られるが、鉛直成分に水平動のノイズに匹敵するほどの大きなノイズは見られない

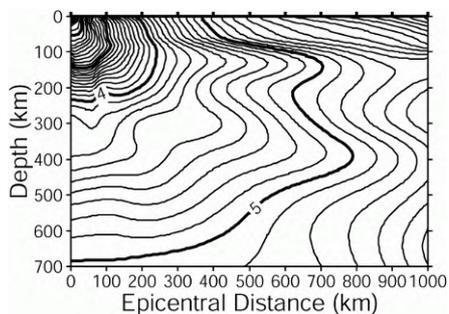


図 4.8 速度 M 距離減衰項

（3）DONETによる速度Mの計算

平成26年1月～平成27年11月の間にDONET近傍で発生した地震(M3以上)についてDONET観測データを用いて速度Mを計算した結果を図4.9に示す。

M推定残差にはM依存性および速度振幅依存性が見られるものの、その偏差は概ね ± 0.5 の範囲に収まっていることがわかる。

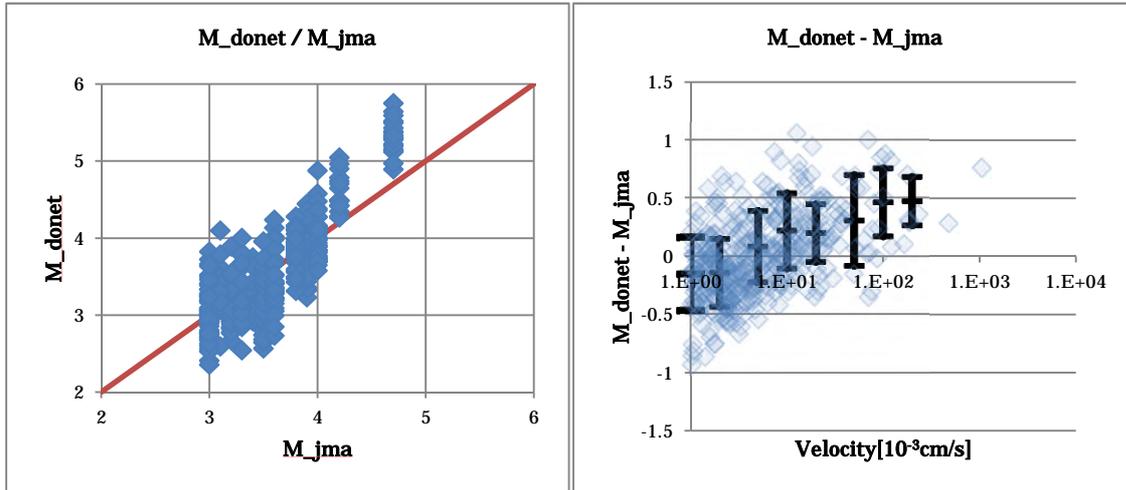


図4.9 DONETによる速度M計算結果

DONETによるM (M_{donet})と気象庁カタログM (M_{jma})との比較(左)と、M残差と速度振幅の関係(右)

（4）速度Mの飽和

短周期速度計相当の振幅値からMを推定する手法は、地震の規模が大きくなるにつれて本来のMよりも小さな値を推定することが予想される。速度M推定の上限值を見積もるため、JAMSTECが釧路沖に設置している海底地震計の観測データを用いて、中規模～大規模地震時の推定状況を確認した。平成15年9月～平成27年11月の間に釧路沖海底地震計の近傍で発生した地震について、釧路沖海底地震計の観測データを用いて速度Mを計算した結果を図4.10に示す。

結果は予想通り、Mが6.5を上回るあたりから速度Mが過小評価となる傾向が見られる。

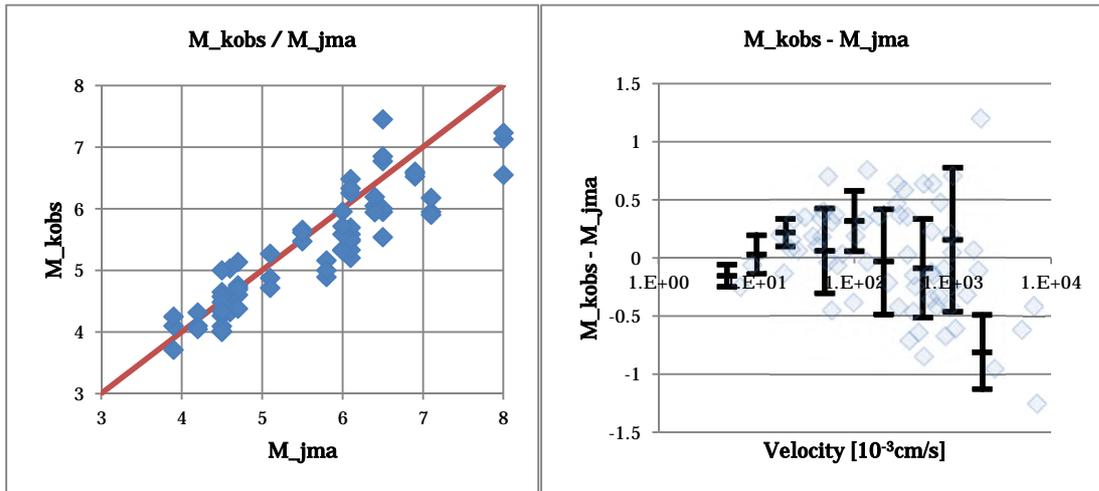


図 4.10 釧路沖 OBS による速度 M 計算結果

釧路沖 OBS による M (M_{kobs}) と気象庁カタログ M (M_{jma}) との比較 (左) と、
M 残差と速度振幅の関係 (右)

(5) 課題

今回検討した M 推定手法には、その推定誤差に M 依存性や速度振幅依存性が見られている。また、大規模な地震についての M 推定精度が充分ではない。これらの課題が確認されているものの、陸域に設置した観測データを併用することで、地震発生後の時間経過とともに多くの課題は改善されるものと考えている。

現在、DONET2 の整備が進んでおり、この海域の海底地震計の数が増え、DONET だけで震源、M を推定することが可能となる。今後、DONET2 を活用するための観測データの点検を行うとともに、本手法の DONET 観測点への導入についても検討を継続する。

謝辞

JAMSTEC の DONET1 および釧路沖 OBS のデータを利用しました。

5. 単独観測点処理の改善

この項の要点

- 緊急地震速報の迅速化および高精度化のために、地震計内部で行われている自動処理についてパラメータを調整した。
- シグナル/ノイズ判定パラメータを調整することで、シグナルの捕捉率およびノイズの識別率が向上する。
- B- 演算の推定区間について、現状の2秒間から1秒間に変更しても、震央距離推定に与える影響は小さい。

(1) 目的

現在の緊急地震速報では、全国の地震観測点の現地における波形解析（B- 演算）結果をリアルタイムに中枢に送信する方式を採用することで、中枢における処理のオーバーヘッドの省力化および迅速化を実現している。現地観測点から送信されるデータ（以下、A 電文）に記述されている内容は、地震波検出時刻、推定震央距離等の地震諸元および最大振幅等の観測データである。中枢における処理は、A 電文が届いてから緊急地震速報を発表するまでの時間を可能な限り短縮するように設計しているため、A 電文には高い信頼性が要求される。

緊急地震速報に活用している地震計は、何らかの顕著なシグナルを検知すると、A 電文を送信すると同時に、そのシグナルが近傍の自然地震によるシグナルであるか判定を行う。自然地震と判定された場合には、地震観測情報として A 電文の更新データを送信し続ける。

現行のパラメータでは、シグナルを検知してからすべてのシグナル/ノイズ判定が完了するまでに2秒の時間を必要としている一方で、A 電文はシグナル検知後約1秒間隔で送信されている。つまり、この2秒の間に送信される1通のA 電文については品質が未確定の状態である。「シグナル/ノイズ判定途中の時点で観測点がA 電文を送信し、その後の処理でノイズと判定される」という事例があると、A 電文を受信した中枢は「1通目の時点から直ちに緊急地震速報を発表し、その後のA 電文をもって緊急地震速報を更新/訂正する」という動作をすることになる。緊急地震速報の信頼性を高めるためには、処理に用いる A 電文の品質をすべて確定させる必要がある。

処理に用いる A 電文の品質をすべて確定させるためには、以下の2通りの対策が考えられる。

1. 中枢の処理で2秒以上、品質が確定するのを待つ
2. 観測点から品質未確定のA 電文を送信しない

上記のうち1.の対策については、緊急地震速報全体の処理を一律に遅くさせる効果があり、デメリットが大きい。そこで、上記2.の対策として、観測点に

おける解析パラメータの一部を調整し、1秒のデータですべての判定を完了させることとした。これにより、送信されるA電文はすべて品質が確定することになり、中枢における処理が安定化することが期待される。

(2) データ

平成23年3月から平成27年11月に日本近海で発生した、マグニチュード6.5以上の地震35例を対象に、気象庁多機能型地震計の加速度記録を用いてB-演算を行った。対象としたイベントの震央分布図を図5.1に、震源一覧を表5.1に示す。これらの波形から成立したトリガ数は1990例であった。

また、過去に観測された特徴的なノイズ（トリガが成立するようなノイズ）の事例56例について演算結果を確認した。ノイズの内訳を表5.2に示す。

#	date	time	region name	depth M	M
1	2011/03/09	11:45	FAR E OFF MIYAGI PREF	8	7.3
2	2011/03/11	14:46	FAR E OFF MIYAGI PREF	24	9.0
3	2011/03/11	20:36	E OFF IWATE PREF	24	6.7
4	2011/03/12	00:13	FAR E OFF IBARAKI PREF	23	6.7
5	2011/03/12	03:59	MID NIIGATA PREF	8	6.7
6	2011/03/13	10:26	FAR E OFF IBARAKI PREF	11	6.6
7	2011/03/14	15:12	SE OFF MIYAGI PREF	7	6.5
8	2011/03/22	16:18	FAR E OFF NORTH HONSHU	28	6.7
9	2011/03/22	18:44	FAR E OFF SANRIKU	0	6.5
10	2011/03/28	07:23	E OFF MIYAGI PREF	32	6.5
11	2011/03/29	19:54	SE OFF MIYAGI PREF	13	6.6
12	2011/04/07	23:32	E OFF MIYAGI PREF	66	7.2
13	2011/04/11	17:16	EASTERN FUKUSHIMA PREF	6	7.0
14	2011/06/23	06:50	E OFF IWATE PREF	36	6.9
15	2011/07/10	09:57	FAR E OFF MIYAGI PREF	34	7.3
16	2011/07/31	03:53	E OFF FUKUSHIMA PREF	57	6.5
17	2011/08/19	14:36	E OFF FUKUSHIMA PREF	51	6.5
18	2011/09/17	04:26	NE OFF IWATE PREF	7	6.6
19	2011/11/08	11:59	EAST CHINA SEA REGION	217	7.0
20	2012/01/01	14:27	NEAR TORISHIMA IS	397	7.0
21	2012/08/14	11:59	SOUTHERN SEA OF OKHOTSK	654	7.3
22	2013/02/02	23:17	TOKACHI REGION	102	6.5
23	2013/04/19	12:05	KURILE ISLANDS REGION	125	7.0
24	2013/09/04	09:18	NEAR TORISHIMA IS	445	6.8
25	2013/10/26	02:10	FAR E OFF NORTH HONSHU	56	7.1
26	2013/10/31	21:02	TAIWAN REGION	15	6.5
27	2014/07/12	04:22	E OFF FUKUSHIMA PREF	33	7.0
28	2014/11/22	22:08	NORTHERN NAGANO PREF	5	6.7
29	2015/02/17	08:06	FAR E OFF SANRIKU	13	6.9
30	2015/02/20	13:25	FAR E OFF SANRIKU	8	6.5
31	2015/04/20	10:42	NW OFF ISHIGAKIJIMA IS	22	6.8
32	2015/05/13	06:12	E OFF MIYAGI PREF	46	6.8
33	2015/05/30	20:23	W OFF OGASAWARA	682	8.1
34	2015/05/31	03:49	FAR E OFF IZU ISLANDS	45	6.6
35	2015/11/14	05:51	SW OFF KYUSHU	17	7.1

表 5.1 対象イベント震源要素一覧

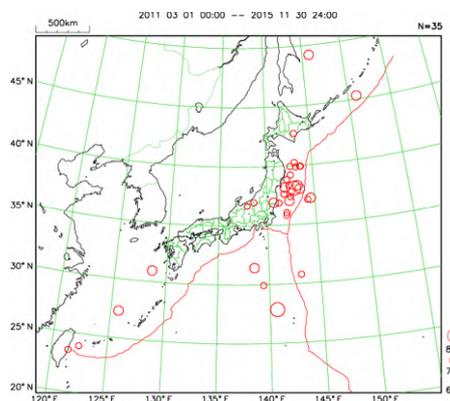


図 5.1 対象イベント震央分布図

ノイズ源	事例数
人工ノイズ	34
雷	19
センサ障害	3
合計	56

表 5.2 対象ノイズ事例の内訳

(3) シグナル/ノイズ判定パラメータの調整

観測点における解析処理では、検出したトリガ波形の初動部分の特徴に着目し、以下の観点からノイズ判定を行っている。

- ・人工ノイズ等の非地震性シグナルの排除
- ・微小地震等による微弱な振幅のシグナルの排除
- ・遠地地震等による緩慢な初動を持つシグナルの排除

つまり、人工ノイズはもとより、自然地震による地震波形であっても、緊急地

震速報の処理対象外となるような地震波形についてはノイズ扱いとして排除するようにしている。現行のパラメータでは、顕著な地震が発生した際の震源近傍の一部の観測点について入力された地震波形をノイズと誤認してしまうことも見受けられているため、このたびのパラメータの調整にあたってはノイズの識別だけでなく、地震イベントの捕捉についても性能を向上させるよう留意した。シグナル/ノイズ識別のフローおよびこのたびの調整対象を図5.2に示す。

前述(2)のトリガ情報に対するシグナル/ノイズ判定結果について、新旧のパラメータによる判定結果を比較した。比較のグラフを図5.3に示す。

なお、ここでは「捕捉率」を次の定義で計算している。

$$\text{捕捉率} = \frac{\text{シグナル判定観測点数}}{\text{トリガオン観測点数}}$$

新たなパラメータを適用することで、すべての地震イベントについて同等程度以上の捕捉率を維持できることが確認された。また、従来のパラメータでシグナルと判定していたものを、新たなパラメータでノイズ扱いとする事例はなかった。捕捉率の向上効果について、震央距離やM等に依存する傾向は見られなかった。シグナル/ノイズ判定数の内訳を表5.3に示す。

なお、震源距離区間別の捕捉率のグラフについて、震源距離800km~1600kmの区間の捕捉率が高めに算出されているのは、主に平成27年5月30日に発生した小笠原諸島西方沖の地震(M8.1、最大震度5強、深さ682km)による顕著なシグナルが全国の約250点の地震計で観測され、そのうち96%がシグナルとして捕捉されたことに起因している。

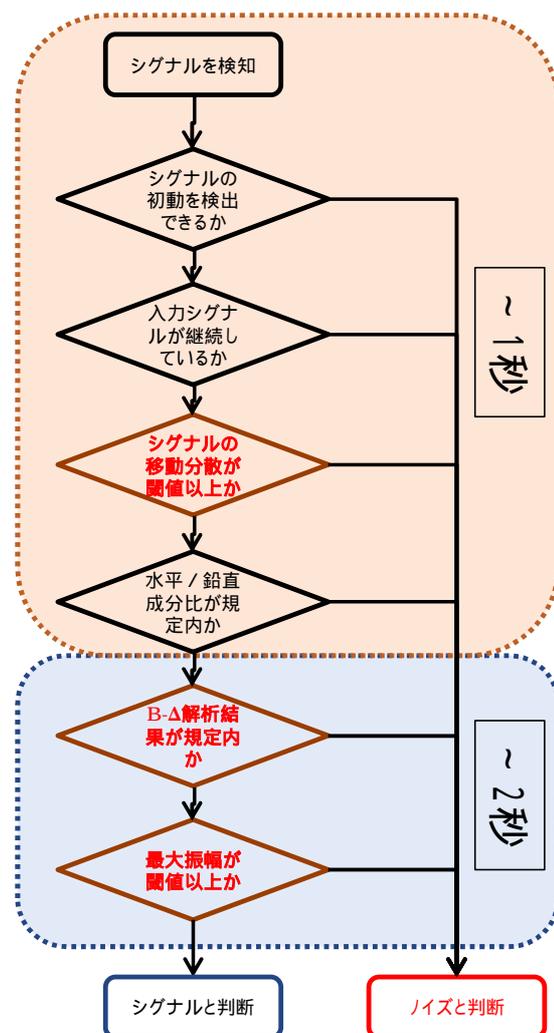


図5.2 シグナル/ノイズ判定フロー
赤字で示した判定フローが今回の調整対象

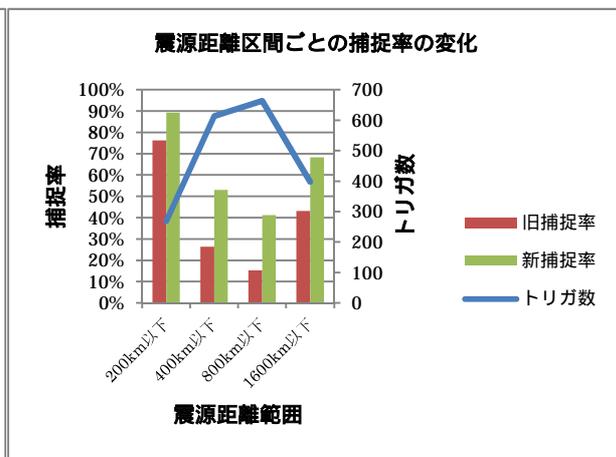
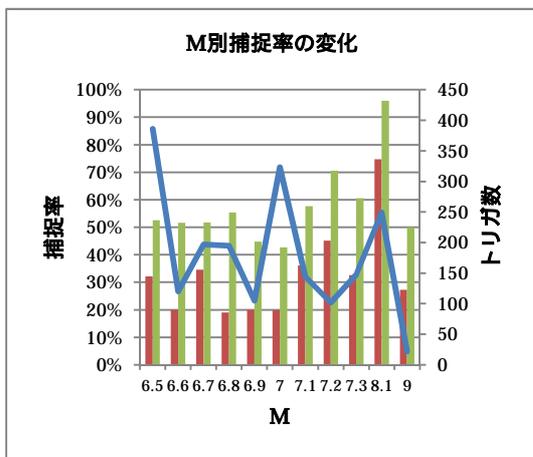
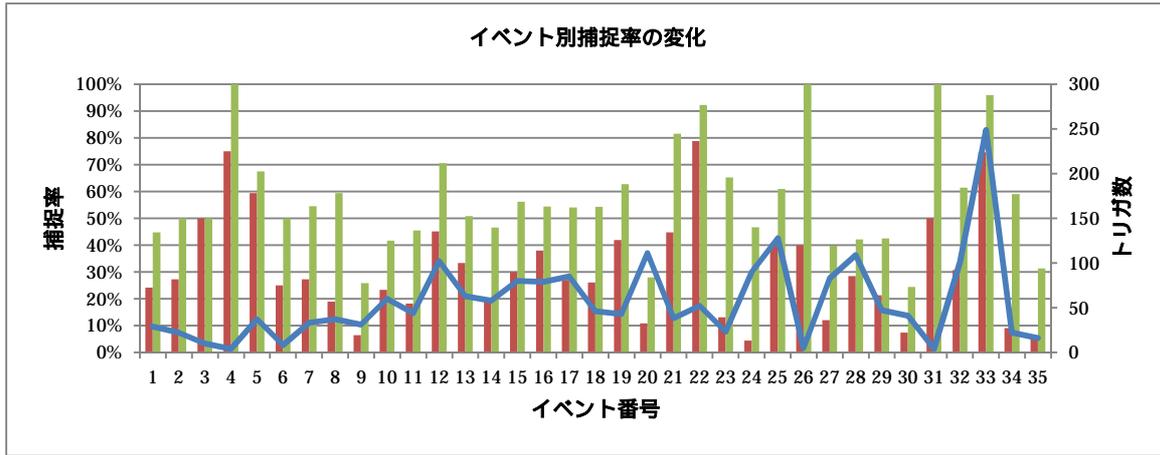


図 5.3 シグナル/ノイズ識別パラメータ調整による捕捉率の差
イベントごとの捕捉率（上）、M別捕捉率（下左）および震源距離区間別の捕捉率（下右）

		新パラメータ	
		シグナル	ノイズ
旧パラメータ	シグナル	676	0
	ノイズ	478	836

表 5.3 地震イベントにおけるシグナル/ノイズ判定数の内訳

ノイズ源	旧パラメータ	新パラメータ
人工ノイズ	34	6
雷	19	14
センサ障害	3	2
合計	56	22

表 5.4 ノイズ事例の誤認数

次に、従来のパラメータではシグナルと誤認してしまっていた特徴的なノイズ（表 5.2）について、新旧のパラメータによる判定結果を比較した。比較の表を表 5.4 に示す。ノイズの種類によらず誤認事例を低減化することに成功しており、特に人工ノイズについて誤認事例が減少した。

(4) B- 演算解析区間長パラメータの調整

観測点における解析処理では、トリガを検出した後の一定期間の波形を対象に B- 演算を行い、観測点から震源までの距離を推定している。現行のパラメータでは、トリガ後 2 秒間の波形を用いて演算しているが、今回はこの解析区間を 1 秒として演算を行った。図 5.1 に示したイベントについて、解析区間長 2 秒のものと解析区間長 1 秒のものとの比較した。比較のグラフを図 5.4 に示す。

解析区間長を変化させても、震央距離推定結果に大きな影響は出ていない。

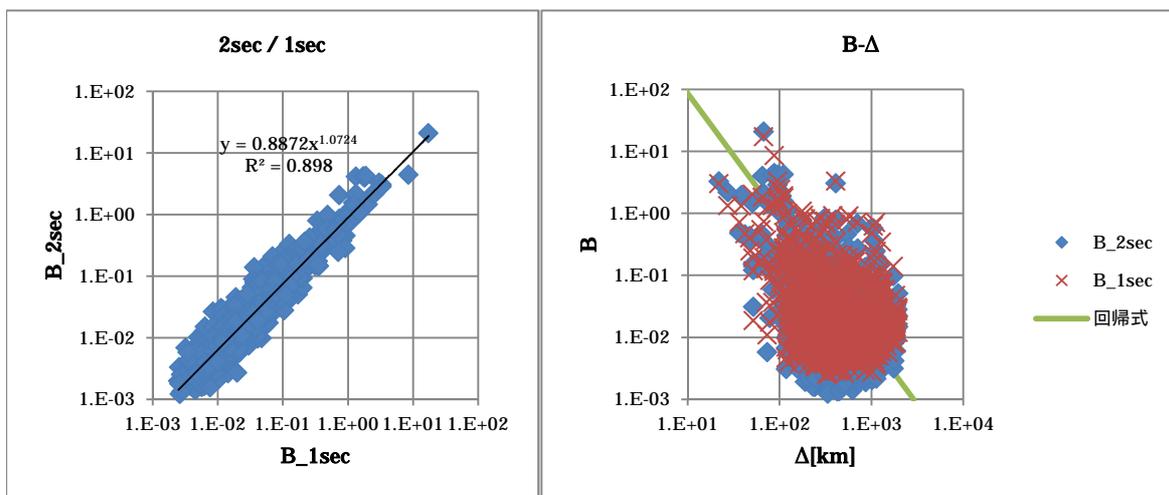


図 5.4 解析区間長による震央距離推定の変化

解析区間長 2 秒と 1 秒との B 値の比較（左）と B 値と震源距離との関係（右）