

緊急地震速報評価・改善検討会
技術部会（第7回）
資料

緊急地震速報評価・改善検討会 技術部会（第7回） 資料

目 次

. 議事

- 1 緊急地震速報に係わる報告事項
 - 1.1 緊急地震速報の発表状況（平成28年2月から平成29年1月）
----- (P 1)
 - 1.2 IPF法の処理結果と評価 ----- (P 3)
 - 1.3 緊急地震速報の精度 ----- (P 8)
 - 1.4 8月1日に発表した緊急地震速報（予報）の誤情報と
その対策について ----- (P 10)
 - 2 海底地震計データの活用
 - 2.1 日本海溝海底地震津波観測網（S-net）の概要 ----- (別添資料)
 - 2.2 S-net、DONETデータの検証状況 ----- (P 15)
 - 3 PLUM法・ハイブリッド法について
 - 3.1 PLUM法の適用距離 ----- (P 27)
 - 3.2 従来法震源の信頼性の判定 ----- (P 32)
-

1 緊急地震速報に係わる報告事項

この項の要点

- 平成28年2月以降（第6回技術部会以降）震度を過大に予測した警報の発表は4回あった。これらは、平成28年（2016年）熊本地震の一連の活動で同時に発生した地震を分離できずに震源推定を誤ったためであり、IPF法により改善されることを確認した。
- 平成28年12月14日からIPF法の運用を開始した。予測精度、発表の迅速性について、現時点で特段問題はない。
- 緊急地震速報の精度は、平成28年（2016年）熊本地震の影響で低下した。
- 平成28年8月1日の緊急地震速報の誤情報の発表に対するシステム改修を行い、平成28年12月14日から運用を開始した。

1.1 緊急地震速報の発表状況（平成28年2月から平成29年1月）

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30回
- 震度5弱以上を観測したが警報を発表せず・・：計11回
- 緊急地震速報（予報）を発表・・・・・・・・・・：計1179回

表1.1に平成28年（2016年）2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。30回の警報のうち、平成28年（2016年）熊本地震の一連の活動で、19回の警報を発表した。震度5弱以上を観測したが警報を発表しなかった11事例は、すべて熊本地震の一連の活動であった。また、同時に発生した地震を分離して処理できず、ひとつの地震として処理したために、震度を過大に予測した事例が4事例あった。

表 1.1 緊急地震速報（警報）を発表した地震（計 30 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				全ての 警報発表地域 で震度 2以下	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]
		震央地名	M	最大 震度			震度 5弱 以上	震度 4	震度 3	震度 2 以下			
2016/04/01	11時39分	三重県南東沖	6.5	4	三重県南東沖	12	0	1	8	3		4.4	5.4
2016/04/14	21時26分	熊本県熊本地方	6.5	7	熊本県熊本地方	26	4	15	7	0		3.8	3.8
2016/04/14	22時07分	熊本県熊本地方	5.8	6弱	熊本県熊本地方	6	1	3	2	0		2.9	21.2
2016/04/14	22時38分	熊本県熊本地方	5.0	5弱	熊本県熊本地方	3	1	1	1	0		2.9	5.0
2016/04/15	0時03分	熊本県熊本地方	6.4	6強	熊本県熊本地方	12	1	9	2	0		3.0	4.1
2016/04/16	1時25分	熊本県熊本地方	7.3	7	熊本県熊本地方	12	12	0	0	0		3.9	3.9
2016/04/16	1時44分	熊本県熊本地方	5.4	5弱	熊本県熊本地方	5	1	3	1	0		3.2	5.2
2016/04/16	1時45分	熊本県熊本地方	5.9	6弱	熊本県熊本地方	19	4	8	7	0		3.6	9.7
2016/04/16	3時03分	熊本県阿蘇地方	5.9	5強	熊本県阿蘇地方	8	1	4	3	0		5.3	5.3
2016/04/16	3時55分	熊本県阿蘇地方	5.8	6強	熊本県阿蘇地方	19	2	5	7	5		3.0	3.4
2016/04/16	4時15分	熊本県熊本地方	3.5	3	熊本県熊本地方	25	0	0	2	23		6.8	6.8
2016/04/16	7時11分	大分県中部	5.4	5弱	大分県中部	9	1	0	1	7		3.7	4.3
2016/04/16	7時42分	熊本県熊本地方	4.2	4	大分県西部	11	0	0	0	11		16.3	16.3
2016/04/16	9時48分	熊本県熊本地方	5.4	6弱	熊本県熊本地方	6	1	1	4	0		5.1	5.1
2016/04/16	11時29分	熊本県熊本地方	2.9	3	日向灘	36	0	0	1	35		9.5	9.5
2016/04/16	14時27分	熊本県熊本地方	4.6	4	熊本県阿蘇地方	3	0	1	1	1		2.9	3.9
2016/04/16	16時02分	熊本県熊本地方	5.4	5弱	熊本県熊本地方	5	1	1	3	0		3.0	5.1
2016/04/17	19時30分	大分県中部	2.7	2	熊本県熊本地方	6	0	0	0	6		43.9	43.9
2016/04/18	20時41分	熊本県阿蘇地方	5.8	5強	熊本県阿蘇地方	9	2	5	1	1		3.9	3.9
2016/04/19	17時52分	熊本県熊本地方	5.5	5強	熊本県熊本地方	3	2	1	0	0		5.4	8.2
2016/05/16	21時23分	茨城県南部	5.5	5弱	茨城県南部	12	1	8	3	0		5.1	9.7
2016/06/16	14時21分	内浦湾	5.3	6弱	内浦湾	11	1	1	2	7		3.6	9.3
2016/06/21	0時10分	内浦湾	4.2	4	内浦湾	1	0	1	0	0		3.3	14.9
2016/09/26	14時19分	沖縄本島近海	5.6	5弱	沖縄本島近海	3	1	1	1	0		5.4	5.4
2016/10/16	16時37分	宮城県中部	5.2	4	宮城県沖	10	0	2	4	4		3.8	7.9
2016/10/21	14時07分	鳥取県中部	6.6	6弱	鳥取県中部	28	5	15	8	0		3.8	12.1
2016/10/21	14時53分	鳥取県中部	5.0	4	鳥取県中部	3	0	3	0	0		3.6	14.2
2016/11/22	5時59分	福島県沖	7.4	5弱	福島県沖	9	4	5	0	0		7.9	16.5
2016/11/24	6時23分	福島県沖	6.2	4	福島県沖	7	0	3	4	0		8.8	8.8
2016/12/28	21時38分	茨城県北部	6.3	6弱	茨城県北部	5	1	4	0	0		4.0	8.9
	H28.02～H29.01までの合計・(平均)				計30回	324	47	101	73	103	2	(6.2)	(9.4)

灰色背景：同時に発生した地震を分離して処理できずひとつの地震として処理したために、震度を過大に予想した事例
(4回)

白色背景：概ね適切に発表した事例
(26回)

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11回）

地震発生日時	震央地名	マグニチュード(M)	最大震度	予想最大震度
平成28年04月14日23時43分	熊本県熊本地方	5.1	5弱	4
平成28年04月15日00時06分	熊本県熊本地方	5.0	5強	1
平成28年04月15日01時53分	熊本県熊本地方	4.8	5弱	4
平成28年04月16日03時09分	熊本県阿蘇地方	4.2	5弱	1
平成28年04月16日07時23分	熊本県熊本地方	4.8	5弱	4
平成28年04月16日09時50分	熊本県熊本地方	4.5	5弱	1
平成28年04月19日20時47分	熊本県熊本地方	5.0	5弱	4
平成28年04月29日15時09分	大分県中部	4.5	5強	3
平成28年06月12日22時08分	熊本県熊本地方	4.3	5弱	3
平成28年07月27日23時47分	茨城県北部	5.4	5弱	4
平成28年08月31日19時46分	熊本県熊本地方	5.2	5弱	4

表中の「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 直前に発生した地震の影響により個別の地震として検知することができず、緊急地震速報を発表していない。

1.2 IPF法の処理結果と評価

平成28年（2016年）12月14日から、IPF法（Integrated Particle Filter法）の運用を開始した。IPF法については、第5回技術部会において開発中の新たな手法の一つとして報告しており、第6回技術部会では、その時点までに行ったりアルタイムデータによる動作確認結果を報告した。今回は、前回報告以後に行った動作確認結果と、運用開始後の状況を報告する。

（1）平成28年（2016年）熊本地震における検証

平成28年（2016年）熊本地震については、最大震度7を観測した4月14日21時26分（M6.5）や4月16日01時25分（M7.3）の地震だけでなく、最大震度5弱以上を観測するような規模の大きな地震が多発した。また、地震活動の活発な領域が、熊本県熊本地方だけでなく、熊本県阿蘇地方や大分県中部にも順次拡大するような状況であった。当時はIPF法の運用開始前であったが、従来手法でも多くの地震で、概ね精度良く緊急地震速報（警報）を発表できていた。しかし、地震が複数同時に発生した際には、震度を過大に予測した警報を発表した事例があった。

IPF法の検証として、熊本地震を含む期間である2016年4月1日から4月30日までの地震のうち、観測震度もしくは最大予測震度が4以上であった101事例について、IPF法を実装したシステム環境で再計算を実施した。そのうち、緊急地震速報（警報）を発表した熊本地震の19事例について確認したところ、従来手法で精度良く発表できていた事例については、IPF法でも予測震度の精度・情報の迅速性ともに現行手法と同程度を確保できていた（表1.3）。同時に発生した地震を分離できずにひとつの地震として処理し、震度を過大に予測した4事例（表1.3の灰色背景の事例）については、IPF法の活用により、より適切な震度予測が可能となった（警報発表となるのは1事例のみ）。

表 1.3 熊本地震において緊急地震速報（警報）を発表した事例
#5の（ ）内は警報第2報の値

	発生した地震				従来手法		IPF法	
	地震発生日時	震央地名	M	最大震度	最大予測震度	警報発表までの経過時間(秒)	最大予測震度	警報発表までの経過時間(秒)
#1	平成28年04月14日21時26分	熊本県熊本地方	6.5	7	6強	3.8	6強	3.4
#2	平成28年04月14日22時07分	熊本県熊本地方	5.8	6弱	5弱	21.2	5弱	1.9
#3	平成28年04月14日22時38分	熊本県熊本地方	5.0	5弱	5弱	5.0	5弱	10.2
#4	平成28年04月15日00時03分	熊本県熊本地方	6.4	6強	5強	4.1	5強	4.5
#5	平成28年04月16日01時25分	熊本県熊本地方	7.3	7	5強 (6強)	3.9 (8.6)	5強 (7)	4.0 (12.0)
#6	平成28年04月16日01時44分	熊本県熊本地方	5.4	5弱	5弱	5.2	5弱	4.0
#7	平成28年04月16日01時45分	熊本県熊本地方	5.9	6弱	6弱	9.7	5弱	6.0
#8	平成28年04月16日03時03分	熊本県阿蘇地方	5.9	5強	5強	5.3	5弱	5.3
#9	平成28年04月16日03時55分	熊本県阿蘇地方	5.8	6強	5弱	3.4	5弱	3.2
#10	平成28年04月16日04時15分	熊本県熊本地方	3.5	3	5強	6.8	5弱	6.1
#11	平成28年04月16日07時11分	大分県中部	5.4	5弱	5弱	4.3	5弱	5.2
#12	平成28年04月16日07時42分	熊本県熊本地方	4.2	4	5弱	16.3	3	--
#13	平成28年04月16日09時48分	熊本県熊本地方	5.4	6弱	5弱	5.1	5弱	3.1
#14	平成28年04月16日11時29分	熊本県熊本地方	2.9	3	7	9.5	情報発表なし	
#15	平成28年04月16日14時27分	熊本県熊本地方	4.6	4	5弱	3.9	4	--
#16	平成28年04月16日16時02分	熊本県熊本地方	5.4	5弱	5弱	5.1	5弱	4.2
#17	平成28年04月17日19時30分	大分県中部	2.7	2	5強	43.9	4	--
#18	平成28年04月18日20時41分	熊本県阿蘇地方	5.8	5強	5強	3.9	5弱	3.1
#19	平成28年04月19日17時52分	熊本県熊本地方	5.5	5強	5弱	8.2	5弱	6.9

このうち、4月16日11時29分に警報を発表した事例では、従来手法では4点目以降の現地観測点から送信される緒元データ（以下「A電文」とする）が取り込まれた時点で震源を日向灘に決定し、M6.9の地震として最大震度7を予測した（この処理に用いた検測値を図1.1に示す）。IPF法では、振幅や未着情報が活用されることで、処理に用いた検測値を適切に分離し、震源を大分に決定した（情報発表基準に至らず）。従来手法とIPF法による予測結果と、観測された震度を図1.2に示す。



単独観測点処理結果一覧

観測点名	検測時刻	震央距離 (km)	方位角 (°)	係数A	最大振幅 (μm)	100μmに達した時間 (秒)	最大M	最大10秒震度
別府天間	11:28:59.30	179	334	0.08	1867	1.08	6.9	2
大分国見	11:29:06.59	—	97	—	—	—	—	—
大分中津江	11:29:06.49	—	232	—	3	—	—	—
玉名	11:29:07.41	—	100	—	—	—	—	—
福岡板屋	11:29:14.46	172	171	1.76	19	—	5.1	0

図 1.1 4月16日11時29分の情報に用いた検測値（A電文）
星印は実際に発生した地震の震源

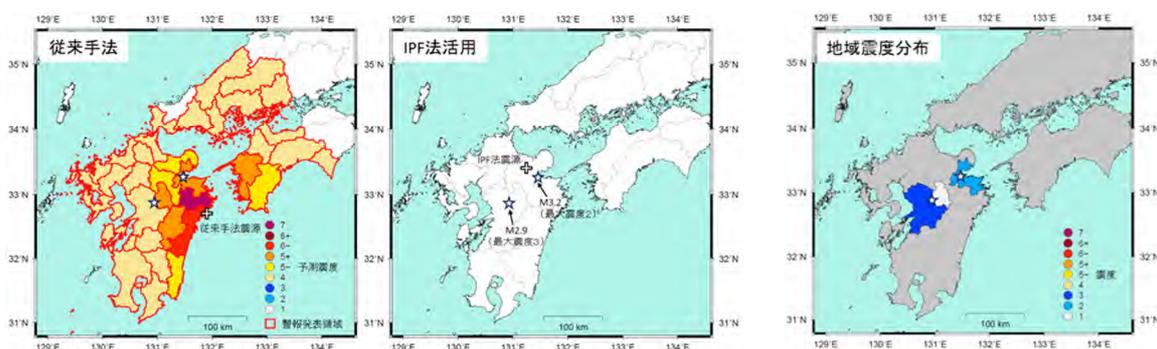


図 1.2 4月16日11時29分の事例における従来手法とIPF法による予測結果と観測された震度

再計算を実施した2016年4月1日から4月30日までの101事例について、観測震度と予測震度の階級差が±1以内に収まる情報発表区分の割合（スコア）を算出した。従来手法での過大予測傾向（表1.4赤枠内：実際の観測では震度2以下だった地域に、震度4以上を予測）が改善され、スコアも68%→83%に改善した。熊本地震のような活発な活動においても高いスコアを確保できており、IPF法による改善効果が確認できた。

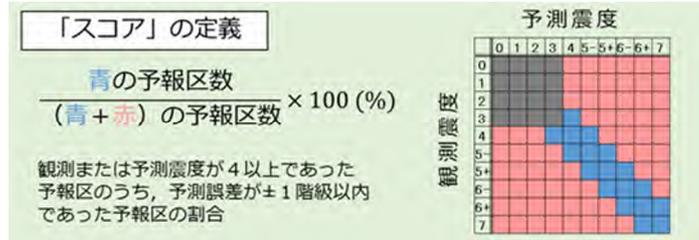
表 1.4 観測震度と予測震度の階級差が±1以内に収まる情報発表区分の割合（スコア）

IPF 法でのスコア（83.4%）

	観測	予測								RANK誤差		RANK誤差	
		震度2以下	震度3	震度4	震度5弱	震度5強	震度6弱	震度6強	震度7	±9	±8	±8以内	100.0%
	震度2以下	96144	336	21	1	0	0	0	0	±9	0	±8以内	100.0%
	震度3	68	188	51	3	0	3	0	0	±8	0	±7以内	100.0%
	震度4	10	52	83	11	2	0	0	0	±7	0	±6以内	100.0%
	震度5弱	0	0	9	7	5	1	0	0	±6	0	±5以内	100.0%
	震度5強	0	1	1	3	2	4	0	0	±5	0	±4以内	100.0%
	震度6弱	0	1	0	3	1	1	0	0	±4	8	±3以内	97.1%
	震度6強	0	0	0	1	1	3	1	1	±3	9	±2以内	93.9%
	震度7	0	0	0	0	0	0	1	1	±2	29	±1以内	83.4%
										±1	137	±0	33.9%
										±0	94		

実際に発表された従来手法でのスコア（67.9%）

	観測	予測								RANK誤差		RANK誤差	
		震度2以下	震度3	震度4	震度5弱	震度5強	震度6弱	震度6強	震度7	±9	±8	±8以内	100.0%
	震度2以下	96935	451	80	8	6	1	0	1	±9	1	±8以内	99.7%
	震度3	68	180	51	1	2	0	0	0	±8	0	±7以内	99.7%
	震度4	9	53	96	6	0	0	0	0	±7	1	±6以内	99.4%
	震度5弱	0	0	9	10	3	0	0	0	±6	2	±5以内	98.9%
	震度5強	0	1	0	4	6	0	0	0	±5	11	±4以内	95.8%
	震度6弱	1	0	1	2	1	1	0	0	±4	55	±3以内	80.4%
	震度6強	0	0	0	1	1	1	0	0	±3	15	±2以内	76.3%
	震度7	0	0	0	0	0	0	2	0	±2	30	±1以内	67.9%
										±1	130	±0	31.6%
										±0	113		



(2) IPF 法運用開始（平成 28 年 12 月 14 日）以降の処理結果

IPF 法の運用を開始した 12 月 14 日 14 時以降、平成 29 年 1 月 31 日までに緊急地震速報（警報）を 1 回、緊急地震速報（予報）を 120 回発表している。このうち、IPF 法による推定震源が情報に採用された事例は、23 回であった。これらの中に、予測精度や予報発表の迅速性で特段問題のある事例はなかった（表 1.5）。

IPF 法の運用後も、以前と同程度の緊急地震速報が発表できている事を確認するため、同じ領域（ここでは震央地名が「福島県沖」であるものとする）で発生した地震について、IPF 運用前後での緊急地震速報（予報）の第 1 報の発表に要した時間を比較した。2016 年 1 月 1 日から 12 月 13 日までに、従来手法（テリトリー法・グリッドサーチ法）で推定された震源で第 1 報を発表した 12 事例と、12 月 14 日以降に IPF 法で推定された震源で発表した 5 事例について、横軸に地震の規模（M）を、縦軸に地震検知時刻から発表時刻までの経過時間をプロットした（図 1.3）。結果として、IPF 法による予報が特段遅いような傾向はみられなかった。

表 1.5 運用開始以降、IPF 法による推定震源が情報に採用された事例

地震発生日時	震央地名	M	最大震度	予報最終報の最大予測震度	予報第1報発表までの経過時間(秒)
平成 28 年 12 月 15 日 14 時 27 分	千葉県東方沖	4.2	2	3	4.5
平成 28 年 12 月 17 日 15 時 18 分	沖縄本島近海	4.6	---	2	23.7
平成 28 年 12 月 23 日 11 時 27 分	福島県沖	4.5	3	3	9.7
平成 28 年 12 月 24 日 08 時 16 分	トカラ列島近海	3.5	4	2	9.0
平成 28 年 12 月 26 日 09 時 49 分	高知県中部	3.6	3	3	3.8
平成 28 年 12 月 28 日 21 時 38 分	茨城県北部	6.3	6弱	5強	4.0
平成 28 年 12 月 28 日 21 時 53 分	茨城県北部	4.7	4	4	57.5
平成 28 年 12 月 31 日 05 時 08 分	福島県沖	5.4	4	3	3.7
平成 29 年 01 月 03 日 13 時 38 分	種子島近海	4.5	2	3	4.0
平成 29 年 01 月 05 日 00 時 43 分	福島県沖	5.3	4	3	3.9
平成 29 年 01 月 05 日 02 時 53 分	福島県沖	5.6	4	4	3.5
平成 29 年 01 月 05 日 19 時 42 分	沖縄本島近海	4.4	---	2	24.8
平成 29 年 01 月 06 日 21 時 42 分	熊本県天草・芦北地方	2.3	2	3	3.9
平成 29 年 01 月 12 日 02 時 12 分	福島県沖	3.8	2	3	8.3
平成 29 年 01 月 13 日 08 時 41 分	福島県会津	3.5	3	3	3.9
平成 29 年 01 月 13 日 12 時 25 分	千葉県北東部	4.9	3	3	7.8
平成 29 年 01 月 13 日 21 時 28 分	沖縄本島近海	4.0	2	2	11.5
平成 29 年 01 月 14 日 06 時 25 分	和歌山県北部	2.7	2	3	7.7
平成 29 年 01 月 19 日 14 時 13 分	新島・神津島近海	3.2	1	3	4.1
平成 29 年 01 月 21 日 00 時 16 分	宮古島近海	3.9	2	2	7.5
平成 29 年 01 月 22 日 21 時 13 分	浦河沖	4.0	2	3	9.0
平成 29 年 01 月 26 日 17 時 06 分	岩手県沖	5.1	3	3	4.8
平成 29 年 01 月 28 日 22 時 40 分	秋田県内陸南部	5.0	3	3	4.7

ほぼ同じ場所で約 45 秒前に発生した地震のデータも取り込まれているため、見かけ上経過時間が長くなっている

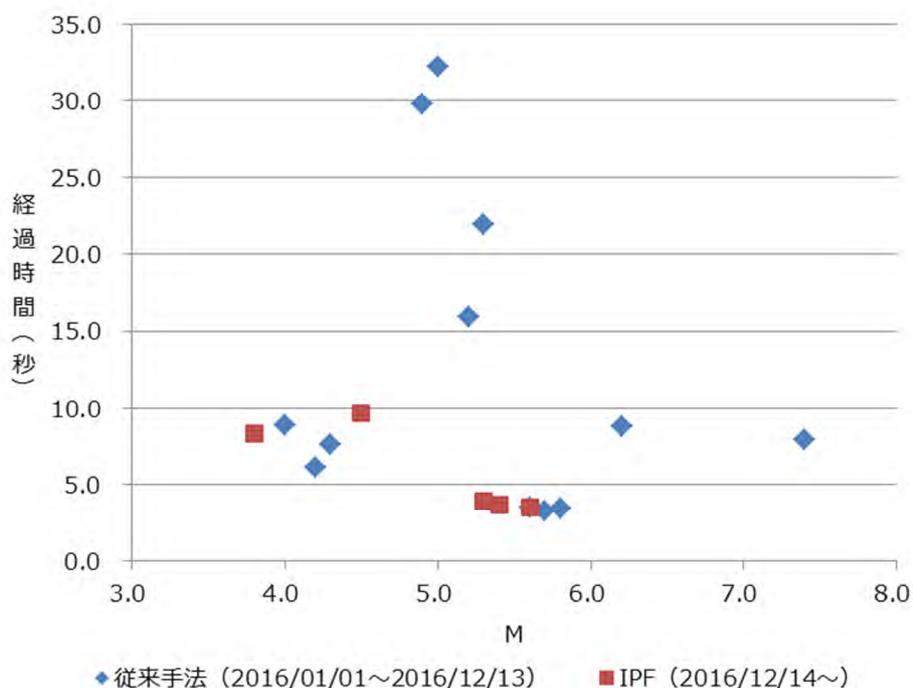


図 1.3 福島県沖の地震（2016/01/01～）についての地震検知時刻から緊急地震速報（予報）第1報の発表時刻までの経過時間

1.3 緊急地震速報の精度

平成23年度から平成27年度まで、緊急地震速報の精度向上を、気象庁の業務目標として取り組んできた。業務目標としての取り組みは平成27年度で終了したが、業務目標の業績評価指標として用いていたスコアによる同じ評価手法で、今年度（平成28年3月～12月）の緊急地震速報の精度を評価するとともに、一般向け提供を開始した平成19年10月から平成28年12月までの結果を図1.4に示す。

年度内に発生した地震で、震度4以上を観測した地域又は緊急地震速報で震度4以上を予測した地域について、震度の予測誤差が±1階級におさまる割合を指標とする。

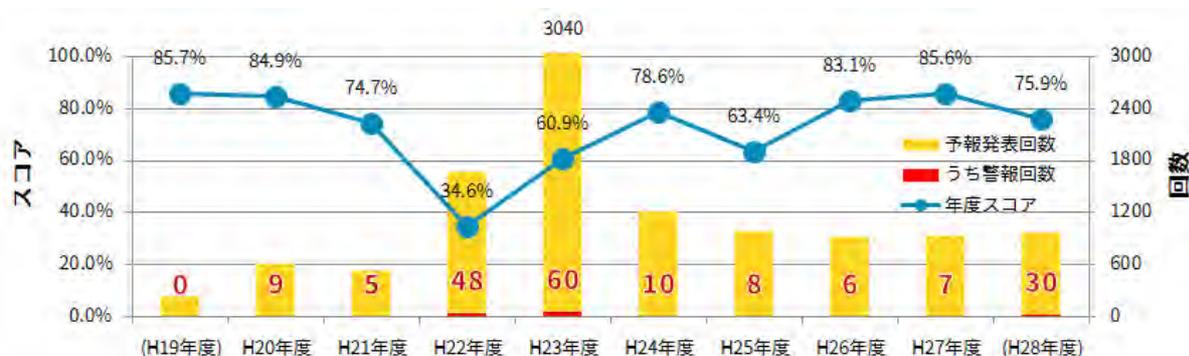


図 1.4 平成19年度から平成28年度のスコア推移および予報・警報発表回数（赤字は警報回数）

平成28年度の12月末時点での暫定的なスコアは75.9%となった。前年度よりもスコアが低下した理由としては、前述の通り平成28年（2016年）熊本地震の影響が大きい。特に、平成28年4月から6月の3ヶ月間に発表した緊急地震速報のスコアでは69.4%であった（図1.5）。

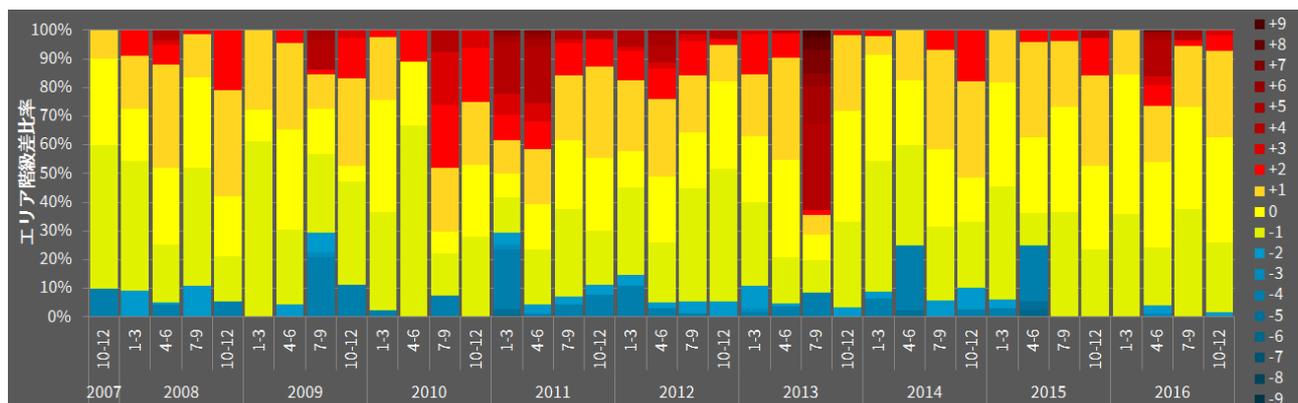


図1.5 （上）2007年10月から2016年12月までの3ヶ月ごとのスコアの推移と予報・警報発表回数（赤数字は警報回数）
 （下）予報区ごとの各予報・警報最終報における実測値に対する震度階級差の分布比率（震度4以上を予測または観測した予報区で算出、全体に対する-1～+1部分の割合がスコアに相当）

1.4 8月1日に発表した緊急地震速報（予報）の誤情報とその対策について

(1) 発表した緊急地震速報（予報）の誤情報について

(ア) 情報発表の概要

平成28年8月1日17時09分頃に、千葉県富津市付近を中心に最大震度7を予測した緊急地震速報（予報）を発表したが、その後周辺の観測点で揺れが観測されなかったため、15秒後にキャンセル報を発表した。また、17時12分頃にも千葉県富津市付近で震度5弱以上を予測した緊急地震速報（予報）を発表した。これらは、緊急地震速報に活用している（国立研究法人）防災科学技術研究所（NIED）の基盤強震観測網（KiK-net）の富津観測点のデータに、故障による大きなノイズが記録されたことを契機としたものであった。

表1.6 17時09分に発表した緊急地震速報（予報）の詳細

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				マグニチュード	
北緯	東経		深さ					
地震波検知時刻	17時09分3.5秒	-	-	-	-	-	-	
1	17時09分04.5秒	1.0	35.3	139.9	10km	—	※1	
2	17時09分06.6秒	3.3	35.4	139.9	10km	9.0	※2	
3	17時09分14.6秒	11.1	35.4	139.9	10km	9.1	※3	
キャンセル	17時09分19.0秒	15.5	—	—	—km	—	キャンセル報	

1 最大震度5弱程度以上

2 最大震度7程度以上

3 最大震度7程度以上

表1.7 17時12分に発表した緊急地震速報（予報）の詳細

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				マグニチュード	
北緯	東経		深さ					
地震波検知時刻	17時09分3.5秒	-	-	-	-	-	-	
1	17時12分03.8秒	180.3	35.3	139.9	10km	—	※1	
2	17時12分04.8秒	181.3	35.3	139.9	10km	—	※1	

1 最大震度5弱程度以上

(イ) 緊急地震速報（予報）の情報発表の時系列詳細

2016年8月1日17時09分03.5秒に、KiK-net 富津観測点でトリガを検知し、加速度上下動振幅が100galを超えたため、1.0秒後の17時09分04.5秒にレベル法による予報を発表した。さらに、地震波検知後1~2秒の波形を用いて実施されるノイズ識別処理によりノイズ判定されなかったため、地震波検知から3.3秒後にM9.0、11.1秒後にM9.1の地震として震源を推定し、南関東に最大震度7を予測する緊急地震速報（予報）を発表した。KiK-net 富津以外の周辺の地震計で地震波を検知しなかったことから、15.5秒後の17時09分19.0秒にキャンセル報を発表した。

続いて、17時12分にもKiK-net 富津観測点から17時09分03.5秒の検知時刻を持った上下動振幅100gal超えのA電文を受信したため、17時12分03.8秒に再

びレベル法による予報を発表した。一連の情報発表処理を終了する時刻を検知時刻から3分経過後としているため、このA電文中の検知時刻から既に3分以上経過していると判断し情報発表処理がすぐに終了してしまい、キャンセル報が発表できなかった。

()レベル法とは、現地観測点において加速度振幅値が100galを超えた場合に観測点周辺で予想震度5弱以上として予報を発表する手法である。

(ウ) KiK-net 富津観測点の波形記録とノイズの原因

図1.6に、誤情報発表の原因となったKiK-net 富津観測点におけるノイズ検知時刻の波形記録を示す。加速度記録には、上下動成分に約1,000galのオフセットノイズが、水平成分にそれぞれ約700gal程度のパルス状のノイズが生じている。また、ノイズ発生後、水平動成分は0galに、上下動成分は-1,000galにそれぞれ漸近している。このノイズは、観測点の電源部故障により、地震計(加速度センサー)への給電のみが断られたことで生じたものである。このデータの急激な変化に先行して発生した小さなノイズ波形でトリガがかかったことで、ノイズ識別処理でノイズと判定することができず、レベル法のみでなく1点震源による情報を発表した。また、加速度波形から漸化式フィルタ(機械式1倍強震計相当)により算出した変位波形の最大振幅をマグニチュード(M)計算に用いており、加速度オフセットを原因とする約10mの最大変位振幅からM9.1を推定するに至った。

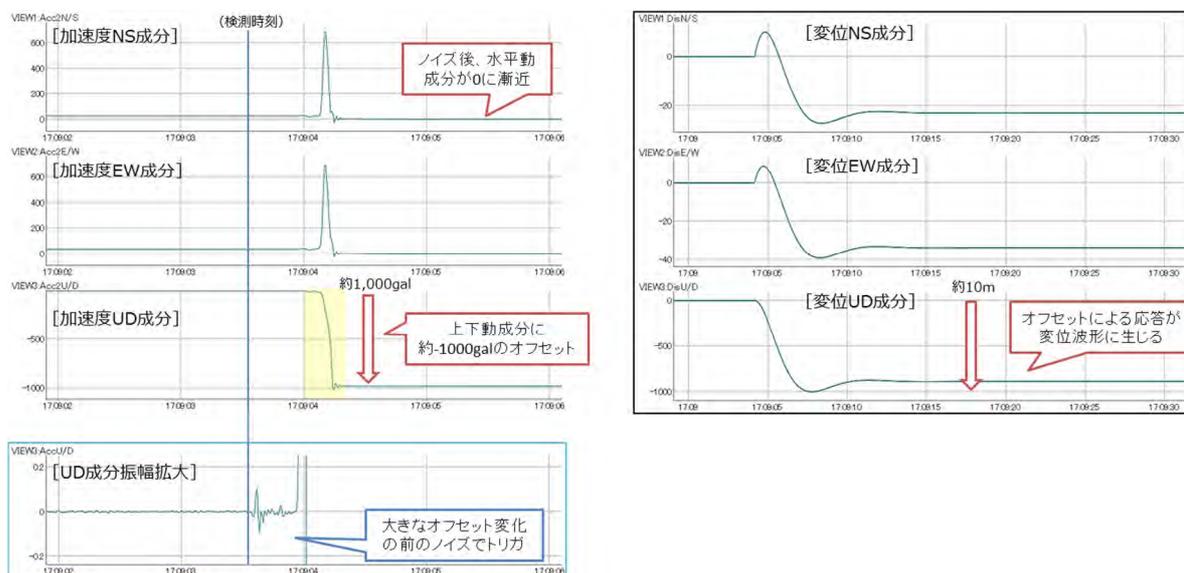


図1.6 KiK-net 富津観測点で記録したノイズの状況

(左) 加速度波形、(右) 加速度波形をフィルタ処理した変位波形

(2) 今回の誤情報に対してとった技術的な対処策

今回のKiK-net 富津のデータは、地震波検知後3~4秒で約10mの変位振幅となり、検知後3.3秒後でM9.0の地震を推定するに至った。しかしながら現実には、M9.0に達する地震では、破壊の終了までに時間を要する。

破壊継続時間(T)と地震のマグニチュード(M)にはスケーリング則(宇津(1977))があり、以下の式(1)で表される。

$$\log T = 0.5M - 2.3 \quad (1)$$

この経験式では、M9.0の地震の破壊継続時間は約160秒となり、今回のように検知後数秒でM9.0が推定できることは地震学的知見からあり得ない。

そこで、このようなノイズによる急激な変化を除外するため、以下の対策を導入することとした。

【対応策】

- ・ 地震学的にありえない大きさの振幅値を除外する。
- ・ 1点処理時に、地震学的に考えられるマグニチュードの上限値を設け、過大な震度予測をしない。
- ・ 閾値超えのデータについては、検知時刻と受信時刻の差が大きいデータを使わない

(ア) 地震学的にありえない大きさの振幅値の除外

地震記録で得られる最大変位振幅値を見積もるため、過去の顕著な地震発生時の最大変位振幅を抽出した。図1.7に、実際にA電文で得られた振幅の成長を示す。この図から、変位振幅最大値(PGD)の上限値が、検出時刻からの経過時間(秒)に対して、両対数軸上で比例関係にあることがわかる。赤と青の破線はそれぞれ、破壊継続時間とMの経験則((1)式)と、立ち上がり時間(rise time)とMの経験則(宇津(1977))

$$\log \tau_r = 0.5M - 3.1 \quad (2)$$

を用いて、それぞれの式の示す時間が検出時刻からの経過時間と等しいと仮定し、経過時間までのMの成長を推定した上で、緊急地震速報の全相マグニチュード式

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

から、観測点にもっとも近い場所(観測点直下、深さ10km)で地震が発生した場合に記録される最大変位振幅(PGD)の時間変化として示したものである。A電文から得られた変位振幅の成長の上限が、これら経験則から得られた振幅成長の時間変化の傾きと良く一致しており、地震学的に意味のある振幅成長であることがわかる。今回のノイズ波形で記録した約10mの振幅の成長(赤星印)は、これら経験的な最大値から大きく外れており、最大振幅の成長からノイズと識別できる可能性がある。

緊急地震速報に利用されている観測点以外で、過去に最大クラスの地震動を記録した事例として、2008年6月14日の岩手宮城内陸地震(M7.2)のKiK-net一関

西と、2016年4月16日の熊本地震のM7.3の地震の西原村小森で得られた記録から算出した変位振幅の成長を同様に示す。これらの地震は、過去のA電文で得られた振幅値より大きな値を示すものの、変位振幅は最大となった西原村小森の記録でも約1mとなっている。

以上のことから、振幅値からノイズを識別する手段として、機械式1倍強震計相当の出力において最大変位振幅が2.0mを超えた場合に、それ以後のデータをノイズとして扱う処理を導入した。なお、許容する変位振幅の上限値を経過時間によって変化する関数形で与えることも可能だが、振幅の成長次第で閾値との出入りが生じ処理が複雑となることや、時間が経過すれば他の観測点の振幅値が利用可能になることから、上限は一定値として与えることとした。

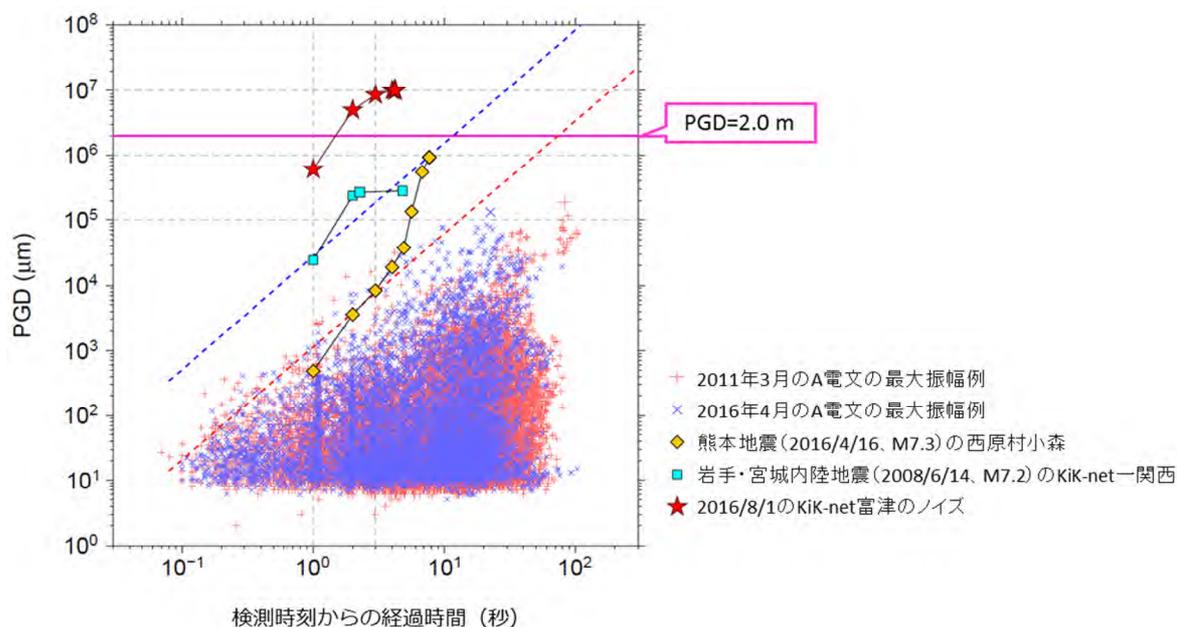


図 1.7 単独観測点処理結果（A電文）の最大振幅値（変位）と経過時間

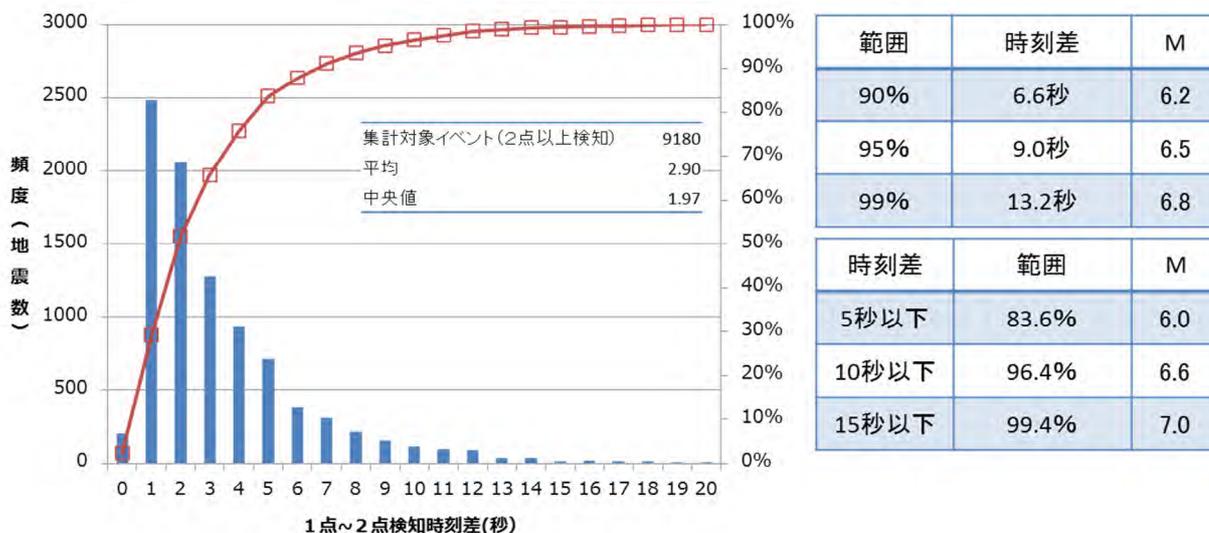


図 1.8 過去に発表した緊急地震速報における1点検知から2点検知に至るまでの時刻差

（イ）1点処理時点でのマグニチュード上限の設定

ノイズである可能性があることや、震源要素の推定誤差が大きいことなどから、緊急地震速報（警報）は観測点2点で地震波を検知するまでは発表しない。しかしながら今回の事例のように、観測点1点で地震波を検知した段階では、たとえ予報であっても、誤情報や過大な震度予測による情報発表は極力避ける必要がある。ここでは、1点で地震波検知後すぐに、地震学上考えられないほどの過大なMが推定されることを避けるため、1点検知時点のマグニチュードに上限を定めることとする。図1.8は、過去に発表した緊急地震速報における1点検知から2点検知に至るまでの時刻差のヒストグラムである。全体の99%が時刻差13.2秒に収まり、15秒以下である割合は99.4%となる。この15秒を破壊継続時間とみなした場合、(1)式の経験則から導き出されるマグニチュードはM7.0となる。すなわち、M7.0の地震として識別できる頃には、多くの地震では2点目の観測点で地震波を検知していると考えられる。以上のことから、1点処理時のマグニチュードの上限をM7.0と定めることとした。

（ウ）閾値超え（100gal 超え）データの検知時刻による除外処理

今回のKiK-net 富津のA電文では、17時12分に入電した100gal超えの電文により最大震度5弱以上の緊急地震速報（予報）を発表したが、データ中の検知時刻が17時09分であったため、一連の処理を終了することになっている検知時刻後3分にすぐに到達してしまい、キャンセル報を発表する前に処理が終了した。この電文は現地処理の不具合であることが判明し改修されたが、システム側としてもこのように検知時刻と受信時刻の時間差が大きいデータを利用しないように、閾値超え電文の採用条件として時間差に上限（3秒）を与えることとした。

2 海底地震計データの活用

この項の要点

- 海底地震計の緊急地震速報への活用を検討するため、S-net および DONET のデータを検証した。
- 自動検測や B- 法などの単独観測点処理が、陸の観測点と同等のパラメータでも適切に動作することを確認した。
- 陸の観測点との P 波の走時残差の差は小さく、IPF 法において走時補正は不要と考えられる。
- 海底地震計でのマグニチュード推定には、上下動変位マグニチュードの利用が適切である。
- 実際に震源決定やマグニチュード推定に用いる観測点の選別や、震源近傍で生じやすい過大振幅値をマグニチュード推定から除外する手法については今後の課題である。

2.1 日本海溝海底地震津波観測網（S-net）の概要

内容については、別添資料参照。

2.2 S-net、DONET データの検証状況

（1）現在の海底地震計の活用状況とその課題

気象庁では、平成20年10月より東海・東南海沖に設置したケーブル式常時海底地震観測システム（東南海 OBS）の運用を開始し、平成21年8月から緊急地震速報への活用を開始している。また、平成27年3月からは国立研究開発法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）が開発・整備し、国立研究開発法人防災科学技術研究所（NIED）が運用する海底地震・津波観測監視システム（DONET）のうち、紀伊半島沖熊野灘に設置された DONET1 による観測結果を緊急地震速報の震源決定に活用している。海底地震計の活用は、海域で発生する地震において緊急地震速報の迅速化に寄与することから、今後も NIED の日本海溝海底地震津波観測網（S-net）や紀伊水道から四国沖にかけて設置された DONET2 など、新たな海底地震計観測網を活用する予定である。しかしながら、海底地震計の加速度計記録には、堆積層による地震波の増幅や、強震時のオフセットノイズの混入が生じることがある。ここでは、S-net や DONET を緊急地震速報へ活用するためのデータ検証を行う。

（2）検証に利用したデータとその処理手法

S-net と DONET2 のデータ検証に用いた地震を図2.1に示す。DONET2 については、設置後に観測できた地震数が少ないため、同様の設計である DONET1 や、近接する気象庁の東南海 OBS のデータと併せて検証を行う。

地震波形に対して、単独観測点処理（自動検出処理（ノイズ識別処理含む）、震央距離推定処理（B-法）、震央方位推定処理（主成分分析法）、最大振幅出力（振幅トリガ処理含む））を実施し、周辺の陸の観測点との相違を比較してその特徴を抽出した。また、単独観測点処理の結果が、震源決定やマグニチュード推定へ与える影響を確認した。なお、自動検出やノイズ識別処理のパラメータは、陸の観測点で適用しているものと同様とした。変位振幅は3成分合成変位振幅に加え、上下動変位振幅の最大値を評価した。

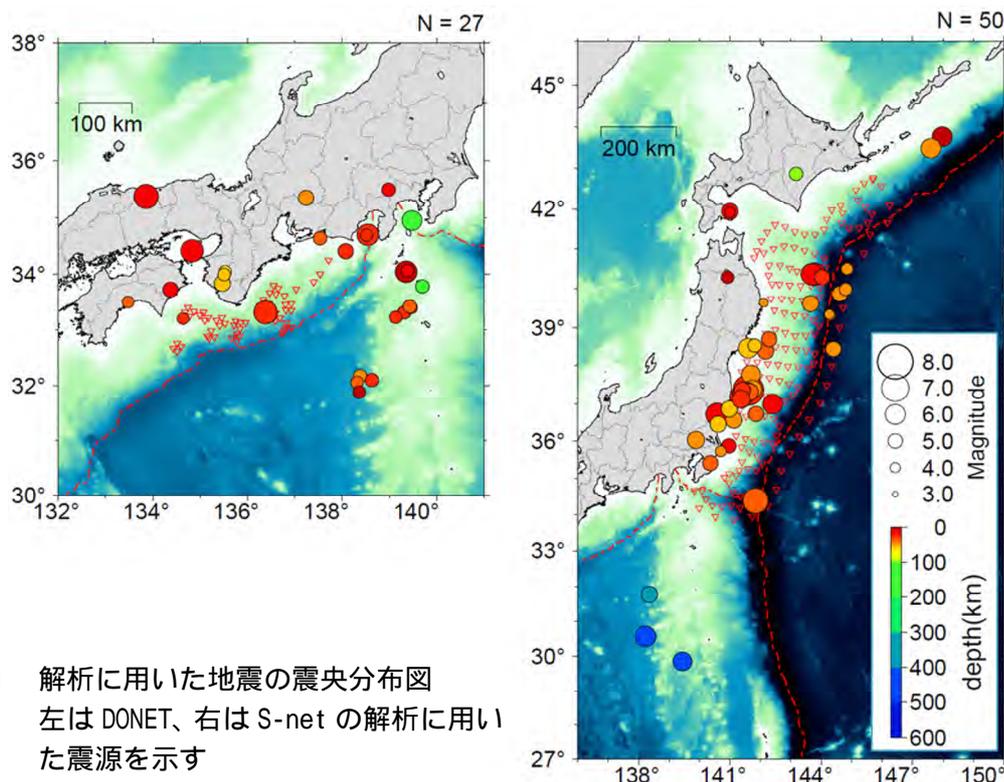


図 2.1 解析に用いた地震の震央分布図
左は DONET、右は S-net の解析に用いた震源を示す

（3） 単独観測点処理に関する検証

（ア）自動検出処理の確認

自動検出による検出値は、STA/LTA によるトリガ検知と遡り検出処理、ノイズ識別処理を行うことで得られる。緊急地震速報の中核システムへは、自動検出が成功した検出時刻が電文で渡され、震源決定処理に用いられる。

図 2.2 に S-net、図 2.3 に DONET (DONET1・2) での自動検出処理の処理事例を示す。走時残差は、気象庁一元化震源の位置が正しいとした場合の理論走時 (JMA2001、上野・他 (2002)) からのずれを示している。陸に近い地震の場合、震源付近の観測点において陸の観測点と海底地震計の走時残差に系統的な違いはみられない (例えば、図 2.2 の (a)、(b))。海溝軸付近や遠方の海底地震計では、走時残差が系統的に負 (理論走時よりも速い) となっているが、これはプレート内の速度構造の速い部分を地震波が伝わることによるものと考えられる (図 2.2(c))。ただし、残差

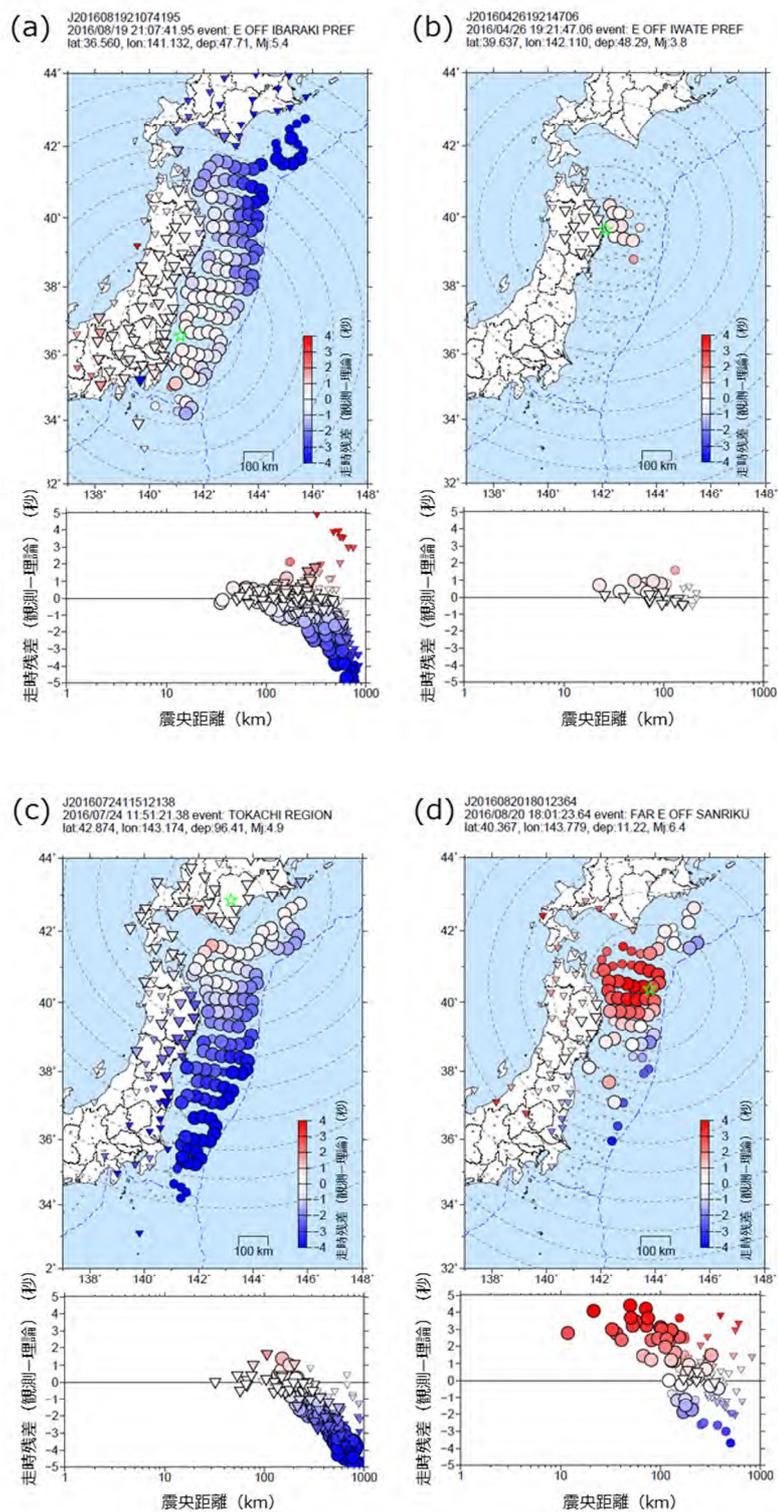


図 2.2 S-net の自動検測による走時残差の例

丸印が海底地震計、逆三角が陸の観測点を示す。下段は走時残差の震央距離との関係。色は走時残差で、青ほど検測時刻が理論走時よりも早く、赤ほど遅いことを示している。シンボルサイズの大きいものが自動検測に成功したもの、小さいものが検測には成功したがノイズ識別処理でノイズと判定されたものを示す。緑の星印が一元化震源の震央位置を示す。

の大きな観測点は震源の遠方であり、震源決定への影響はない。震源が沖合の事例では、震源近傍の走時残差が大きな正の値（理論走時よりも遅い）となる事例（図2.2(d)）がみられるが、観測点間の走時残差の差は小さく、海底地震計のみで決めた震源の位置は一元化震源とほぼ同じであった。走時残差が系統的に正の方向にずれているのは、陸域の平均的な速度構造を基に計算している一元化震源の発震時刻が、海底下の構造の影響を受けやすい沖合の地震については相対的にずれている可能性が考えられる。いずれにしても、震源近傍の観測点を用いる緊急地震速報への影響は少ない。震源から離れるに従って残差が負の方向へずれる傾向はDONETでも確認できる（図2.3）。また、海底地震計においてトリガ検知可能な範囲についても、陸の観測点と海底地震計とで大差ないことがわかった。以上のことから、自動検測に用いるパラメータは陸の観測点で使用しているものをそのまま活用可能である。また、緊急地震速報に用いる震源は、震源近傍の少数の観測点のデータを用いて決定するので、走時補正や海域の速度構造を導入しなくても、実用に供する精度が得られると考えられる。

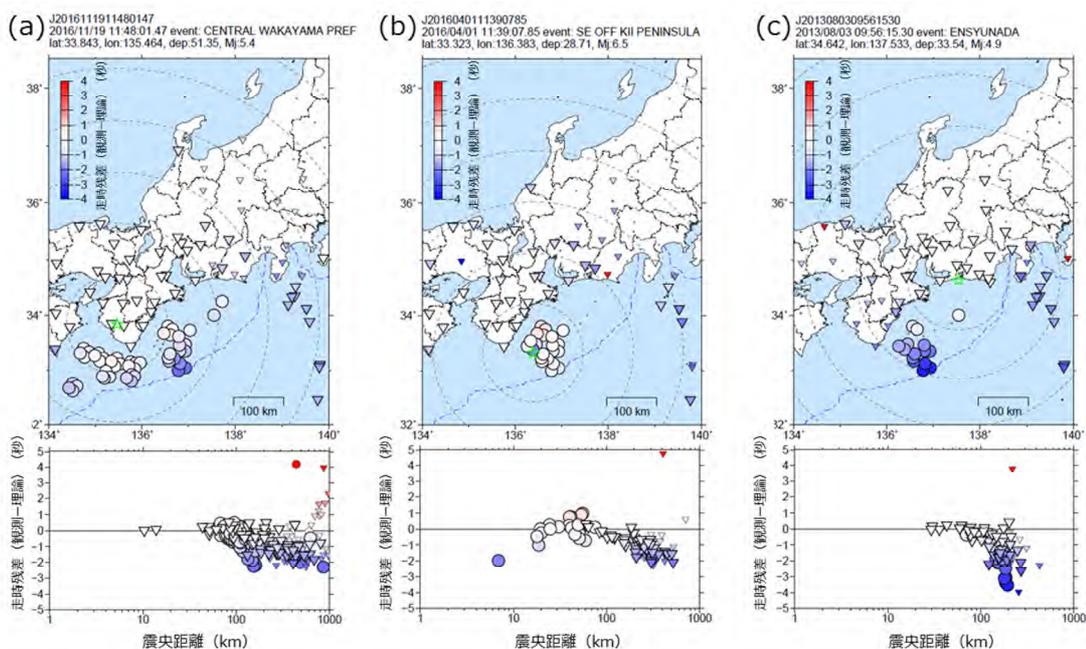


図 2.3 DONET の自動検測による走時残差の例

(イ) 震央距離推定処理 (B- 法) の確認

1 点の観測点の入力から震源要素の特徴を抽出する手法として、地震波の P 波後初期の立ち上がりの傾きから震央距離を推定する B- 法 (東田・他(2004) Odaka *et al.* (2003)) がある。緊急地震速報の震源決定処理である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 (IPF) 法、溜瀨・他(2014)) では、この B- 法により推定された震央距離も尤度を求める指標のひとつ

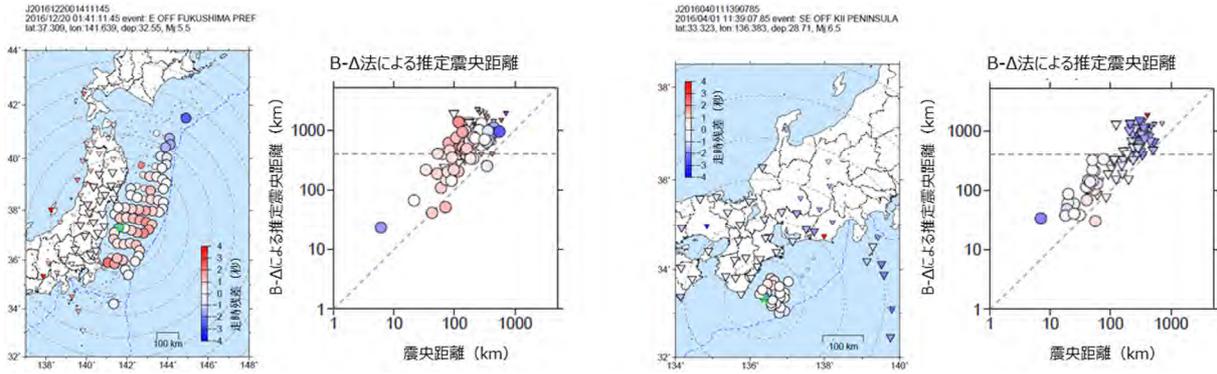


図 2.4 S-net（左）とDONET（右）のB-Δ法適用の例
 地図は自動検測結果と同様の分布図。分布図はB-Δ法によって推定された震央距離と気象庁一元化震源による震央距離との比較でシンボル色は走時残差を示す。

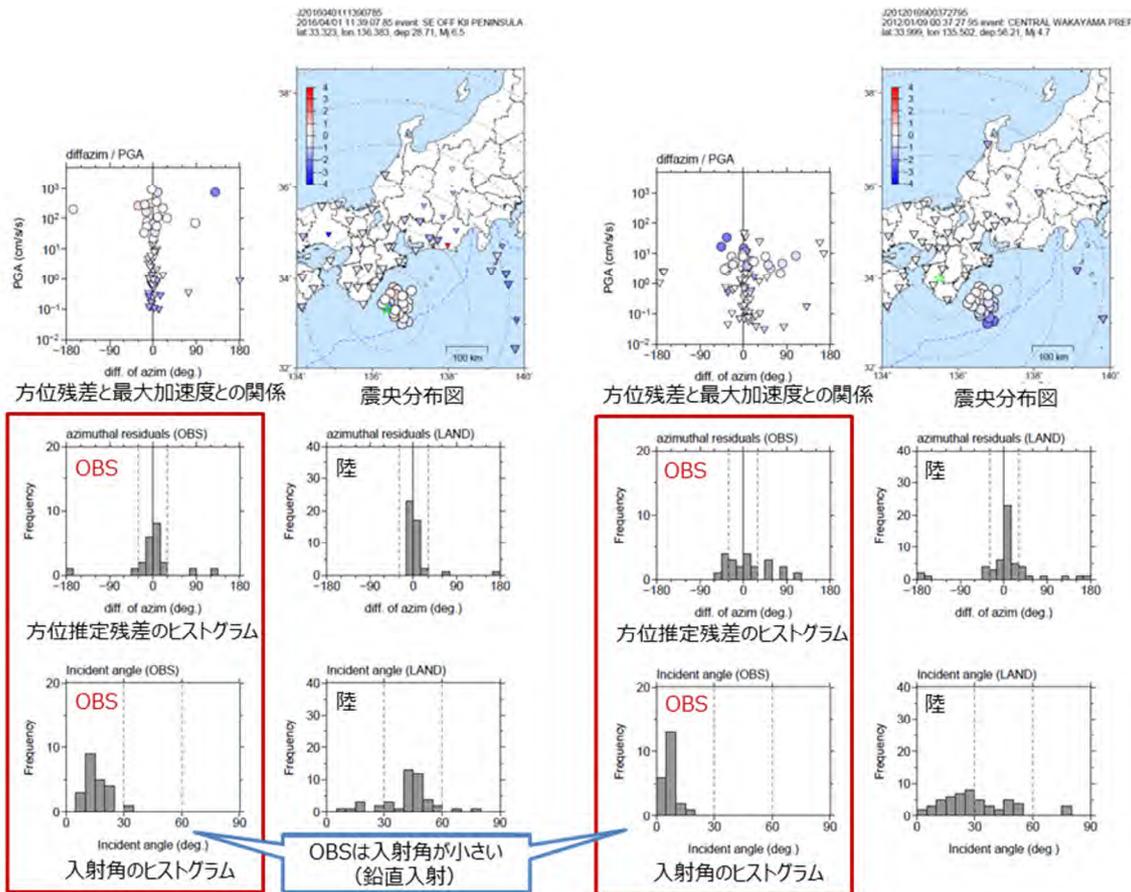


図 2.5 DONETの主成分分析法による震央方位推定事例
 地図は自動検測結果。ヒストグラムは赤枠内が海底地震計、その他が陸の観測点のデータで、上段が推定方位残差のヒストグラム、下段が入射角のヒストグラムを示す。左が2016年4月1日の三重県南東沖の地震（M6.5）、右が2012年1月9日の和歌山県中部の地震（M4.7）。

つとなっているほか、B-法の結果は、自動検測結果のノイズ判定などにも利用されている。

B-法の推定震央距離と気象庁一元化震源の震央距離との比較事例を図2.4に示す。海底地震計の結果（図中 印）は陸の観測点の結果（図中 印）と同様に、地震波の立ち上がりから震央距離を推定することができる。

（ウ）震央方位推定処理（主成分分析法）の確認

B-法同様に、P波直後の振動軌跡を元に震源方位を推定する手法である主成分分析法（気象研究所（1985））についても確認した。ただし、海底地震計は陸の観測点と異なり、地震計設置方位は南北・東西を向いていない。ここでは、地震計設置方位が推定されており、方位補正が可能なDONET1および東南海OBSについての結果を示す。図2.5は、DONET1の設置海域直下で発生した2016年4月1日の三重県南東沖（M6.5）の地震と、2012年1月9日の和歌山県中部の地震（M4.7）における、海底地震計と周辺の陸の観測点での震央方位推定結果である。陸の観測点と比べると推定誤差が大きいものの、海底地震計でも概ね震央方位が推定可能であることがわかる。推定誤差が大きい理由は、海底地震計では表層の堆積層の影響により地震波が鉛直入射に近くなることで水平方向の振動方向分解能が下がるためと考えられる。

（4）マグニチュード（M）推定への最大振幅利用の影響

（ア）海底地震計に適切なマグニチュード推定式の検討

海底地震計では、未固結堆積層の影響により地震波の増幅が生じる。また、強震時には地震計のオフセットノイズ（筐体の傾動によるノイズなどが原因）が混入し得ることが知られている。各地点で得られた最大振幅を元に、現行の3成分合成変位による全相M（清本・他（2010）12ページ(3)式）と地震波の増幅や傾動の影響を受けにくいとされる上下動変位M（林元・他（2016））

$$0.90 \times M = \log A + 0.83 \times \log R + 1.7 \times 10^{-3} \times R - 2.6 \times 10^{-3} \times D + 1.68 \quad (4)$$

のそれぞれの推定結果を比較し、海底地震計で得られる最大振幅の特徴を調べた。

現行全相Mと上下動Mとの、S-net観測点における観測点Mと一元化震源のマグニチュード（ M_j ）との関係を図2.6に示す。上下動Mは現行全相Mと比較して、堆積層による増幅の影響を受けにくいことから残差の平均が小さく（全相M:0.63に対して、上下動M:0.23）、全体のばらつきも小さい。また、現行全相Mでは入力最大加速度（PGA）が大きい場合にM残差が大きくなるPGA依存性がみられるが、上下動Mではこの依存性が緩和されていることがわかる。これは、地震時に傾動が生じた場合にも上下動成分に影響が小さいという効果が現れていることによる。同様の結果は、DONETと東南海OBSの結果（図2.7）でも確認できる。さらに、変位振幅の計算には前段で20秒のハイパスフィルタを適用することにより、シグナル

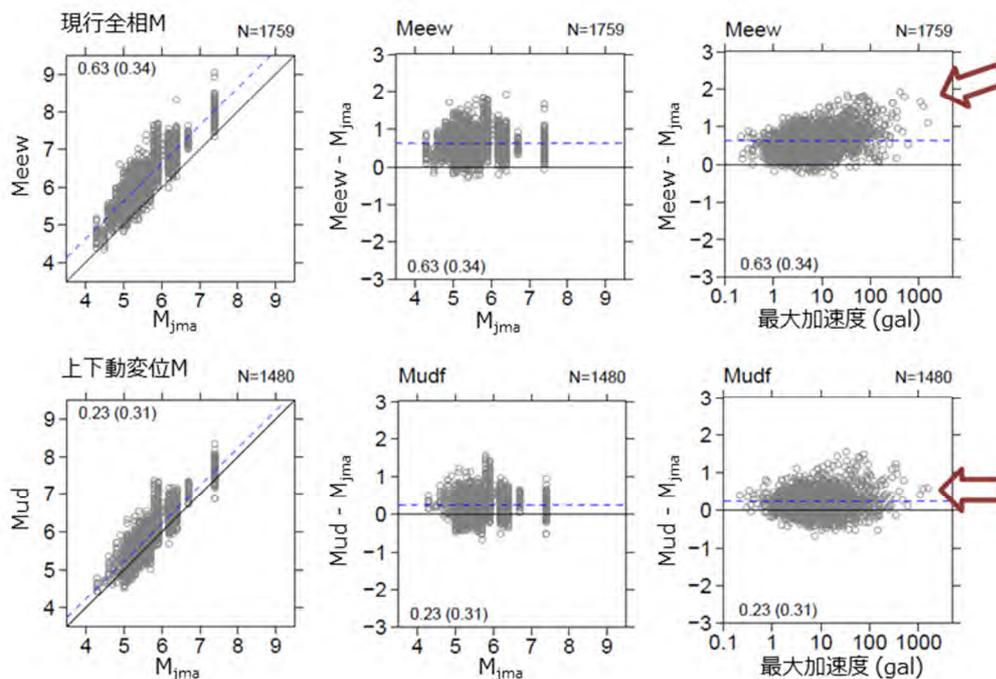


図 2.6 S-net における、現行 3 成分合成変位マグニチュードと上下動変位マグニチュードの気象庁一元化震源のマグニチュードとの関係（震央距離 300km 以内）
 図中左上の数値は、残差の平均値と標準偏差を示す。赤矢印はマグニチュード残差の入力加速度依存性のみられる箇所を示す

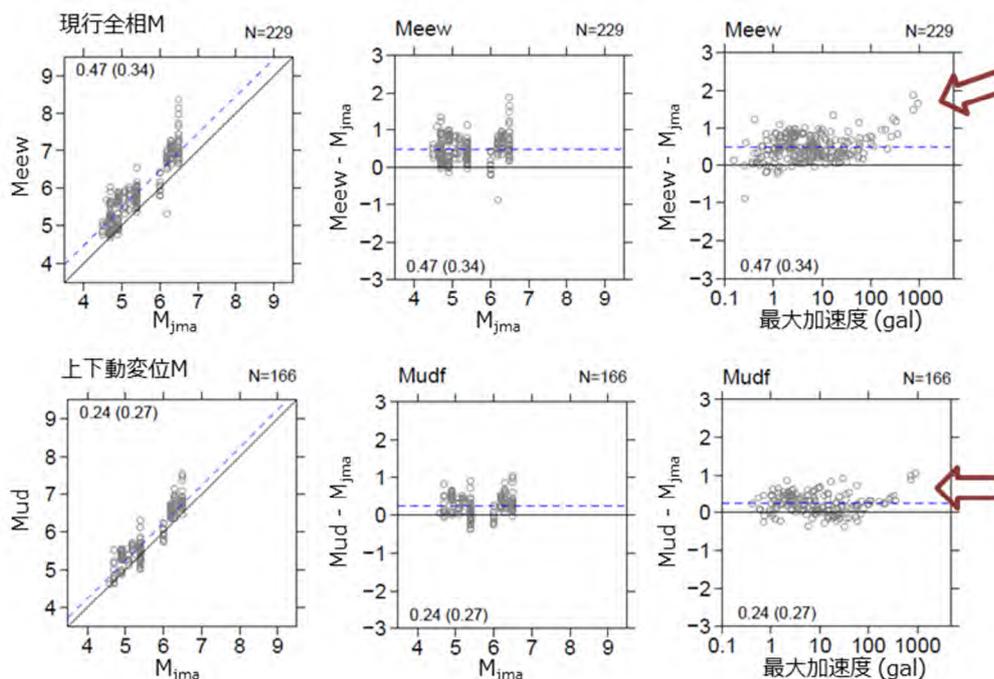


図 2.7 DONET と東南海 OBS における、現行 3 成分合成変位マグニチュードと上下動変位マグニチュードの気象庁一元化震源のマグニチュードとの関係（震央距離 300km 以内）

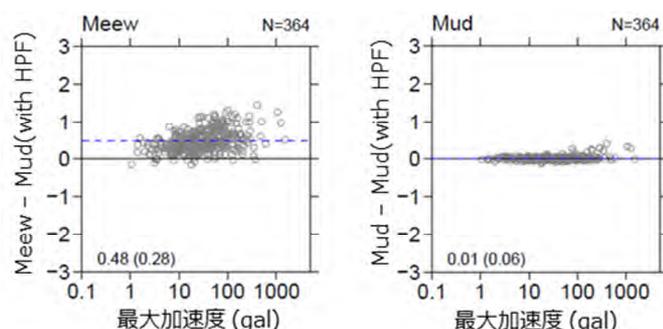


図 2.8 20 秒ハイパスフィルタを適用した上下動 M を基準とした場合の、ハイパスフィルタを利用しない現行全相 M (左) とハイパスフィルタ利用しない上下動 M (右) それぞれの地点 M の差分の、入力加速度に対する関係
最大加速度が大きい地震で M の差が顕著である。

を落とさずにオフセットノイズ等の影響をより軽減できることがわかった (図 2.8)。本資料中の上下動 M 値では 20 秒ハイパスフィルタを追加した変位波形を用いている。

(イ) 地震ごとの最大振幅の特徴

図 2.9 は、2016 年 4 月 20 日 (M5.8) と 2016 年 11 月 22 日の福島県沖 (M7.4) の地震における観測点 M の分布を示している。どちらの地震においても、現行全相 M では、海底地震計において陸の観測点より M が大きく増幅している箇所が多く見られるが、上下動 M では陸の観測点との差が小さくなっている。M7.4 の地震では、震源直近の観測点では、地震計の傾動による水平変位波形のオフセットが生じており、入力加速度の大きい観測点で現行全相 M と M_j との差が大きくなっている。上下動 M ではこの傾動の影響を軽減できることが確認できる。また、特に上下動 M の分布をみると、両地震の震央位置はほぼ同じであるにもかかわらず、4 月 20 日の地震では海溝軸付近の海底地震計に M 残差が大きな正の値となる領域が存在するが、11 月 22 日の地震にはそのような系統的な分布は見られない。前者はプレート境界付近の地震、後者はプレート境界よりも浅い陸の地殻内で発生した地震であり、地震波がプレート内を効率的に伝わる異常震域と同様の効果が現れているものと考えられる。

DONET においても同様に、2016 年 4 月 1 日の三重県南東沖 (M6.5) の地震の例 (図 2.10) を示す。震央直近の観測点で 3 成分合成変位振幅の現行全相 M では +2.0 に近い振幅過大傾向を示すほか、周辺の海底地震計でも M が過大となっている。上下動 M では多くの観測点で増幅傾向が抑えられているが、入力加速度の大きい 3 地点については +1.0 程度の過大傾向が残っている。

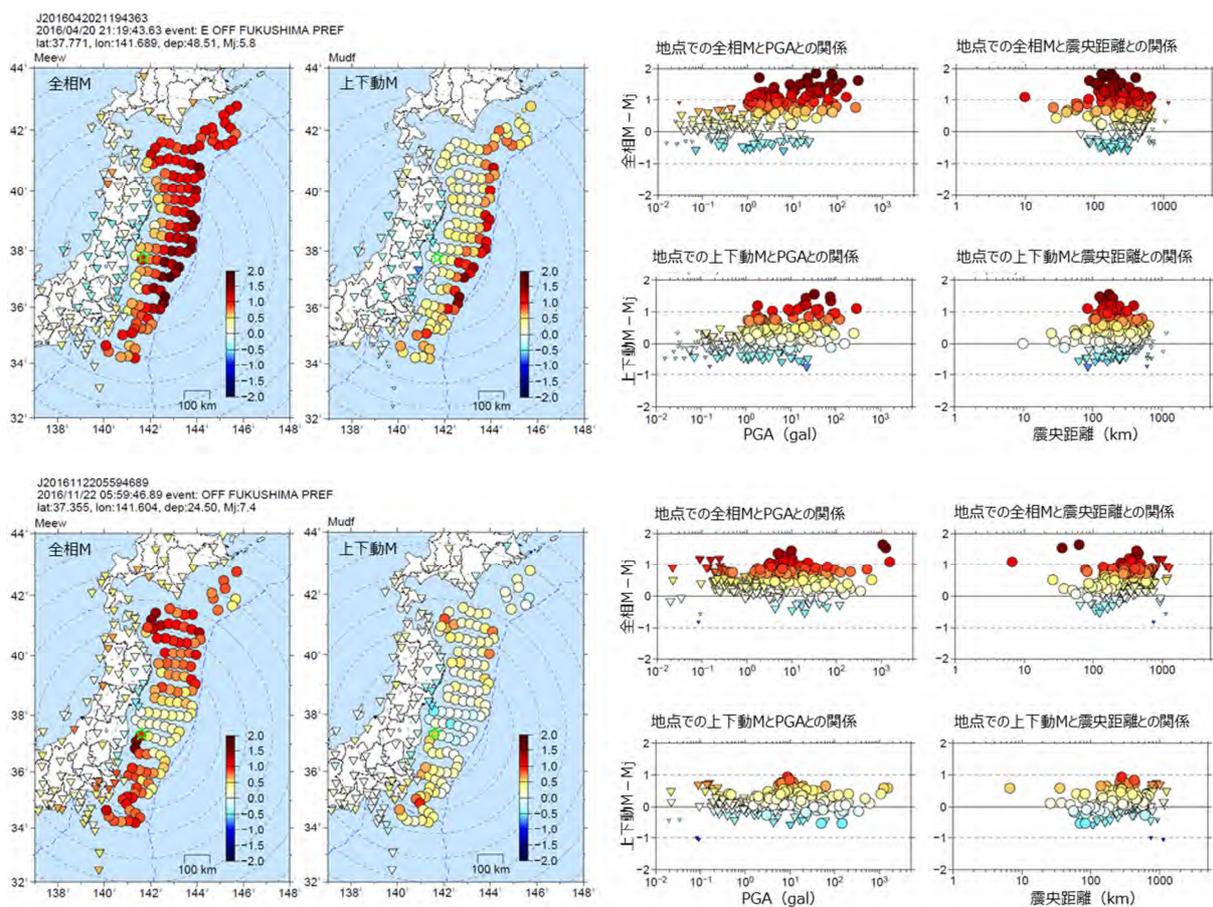


図 2.9 2016年4月20日 (M_j5.8: 上) と11月22日 (M_j7.4: 下) の福島県沖の地震における現行全相M式と上下動M式による観測点Mの比較
 右の分布図は最大加速度 (PGA) と震央距離に対する予測観測点Mの気象庁一元化M (M_j) からのずれを示している。

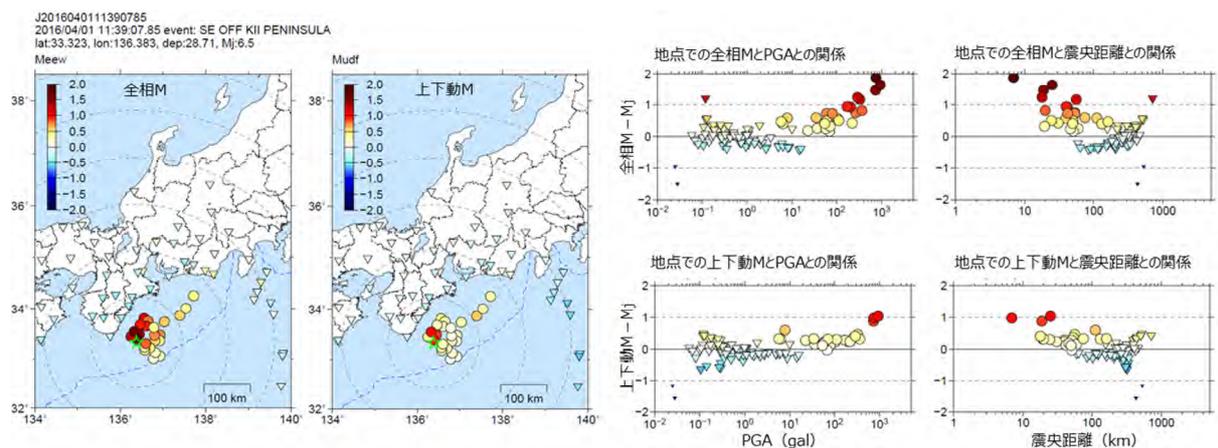


図 2.10 2016年4月1日 (M_j6.5) の三重県南東沖の地震における現行全相M式と上下動M式による観測点Mの比較

（ウ）観測点ごとの最大振幅の特徴

S-net の観測点ごとのM残差平均値を図 2.11 に示す。各観測点別にみても上下動Mでは堆積層による増幅特性の影響が小さいことがわかる。また、ほとんどの観測点で現行全相Mより上下動Mの標準偏差が小さく、M残差のばらつきが小さい。なお、下向きの赤矢印で示した観測点周辺では上下動Mの値に系統的な高まりが見られる。これらは海溝軸付近に位置する観測点であり、図 2.9 でみられるようにプレート境界付近で発生した地震において、異常震域のように海溝軸付近でM残差が大きくなる影響を受けたものである。観測点近傍で発生した地震に対しては、これらの観測点においてもM残差は顕著ではなかった。また、全体を見ると上下動Mでも平均で+0.2 ほどの過大評価傾向が残っている。これは、上下動M式の算出時に海底地震計データに確認できた残差と概ね一致する。

以上のことから、海底地震計には現行の全相Mより、上下動変位振幅を用いたマグニチュードを用いることが適切と考えられる。ただし、上下動振幅にも震源近傍の観測点で振幅が過大となることがあるため、今後は観測点Mの統計処理手法などを検討する。

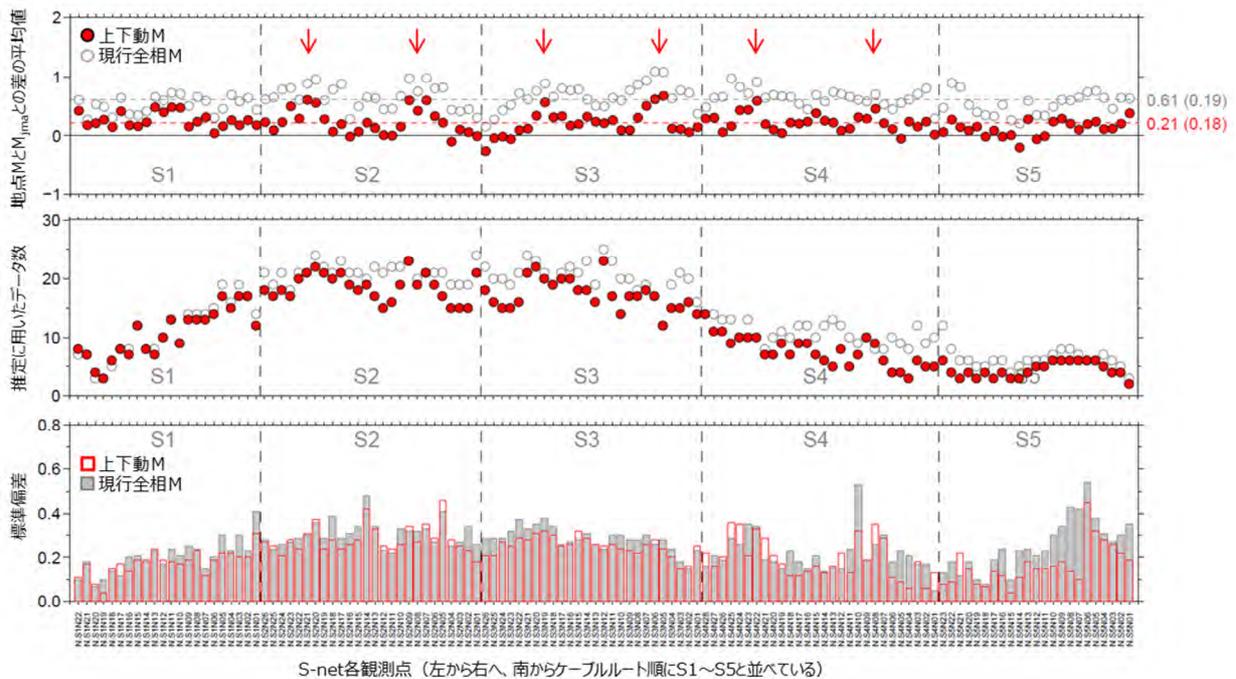


図 2.11 S-net 各観測点での、観測点Mと一元化M (M_j) の差の平均値
震央距離 300km 以内の地震のデータを統計処理した結果で、赤が上下動変位M、
白が全相Mの結果を示す。上からM残差の平均値、データ数、標準偏差を示す。

（5） S-net を含むデータの IPF 法への適用事例

IPF 法では、各観測点で得られたP波自動検出時刻、B- 法による推定震央距離、主成分分析法による震央方位、初動後 5 秒間の速度振幅などを統合的に処理し、震

源を決定する。図 2.12 に、陸域の観測点に加え、S-net を利用した場合の IPF 法の震源・M推定結果の例を示す。ここで、マグニチュードは上下動変位Mを用いている。陸の観測点と S-net が混在するような場合（図 2.11 上）や一元化震源における理論走時との走時残差が大きい地震（図 2.11 下）においても、現行の IPF 法により震源を精度良く推定できることが確認できた。今後は、実際に震源決定に利用する観測点の選別などを行う。

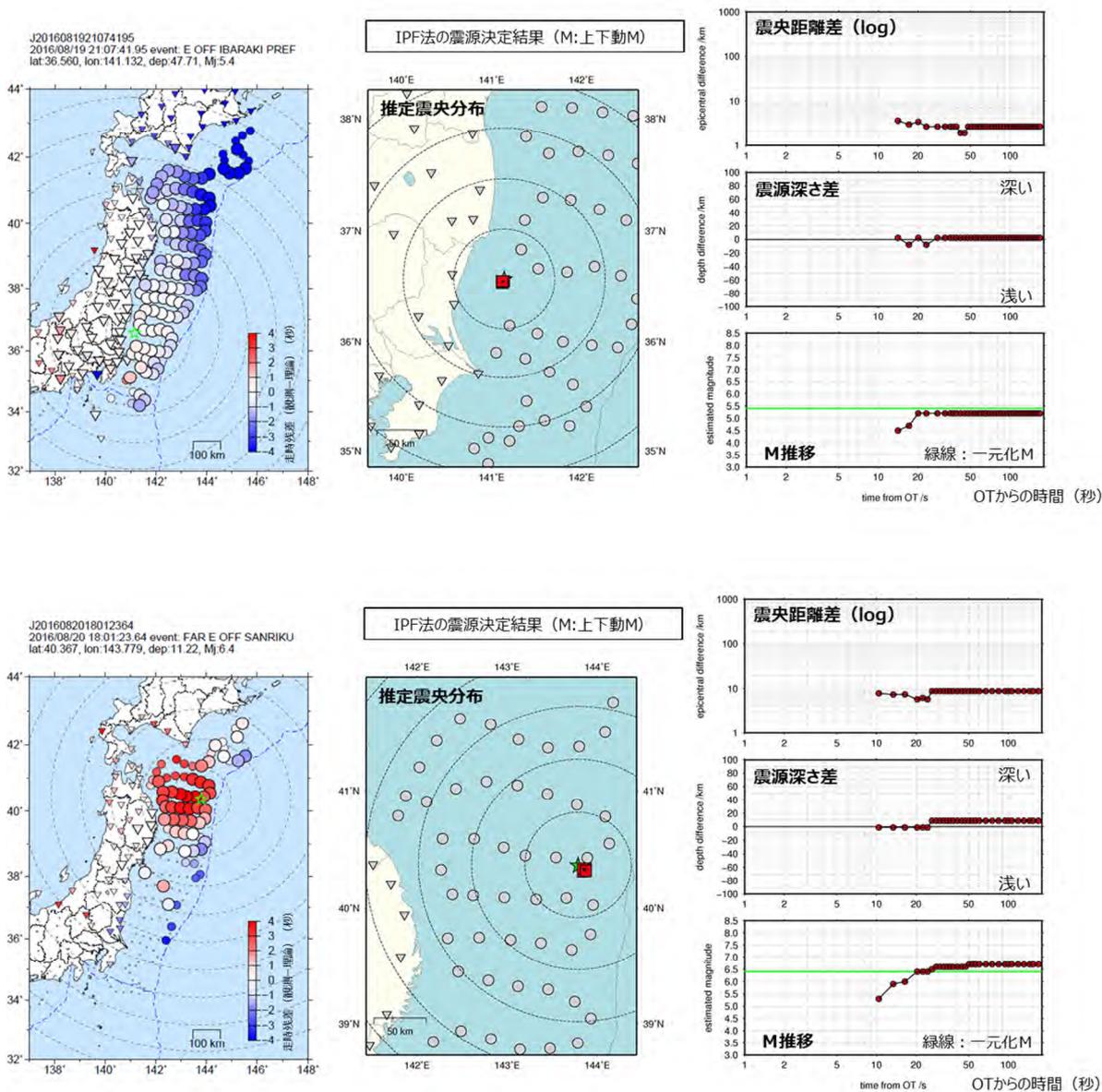


図 2.12 S-net の検測値・単独観測点処理・振幅情報を利用した IPF 法の震源決定例
 上が 2016 年 8 月 19 日の茨城県沖の地震 (M5.4) 下が 2016 年 8 月 20 日の三陸沖の地震 (M6.4) の結果。それぞれ左から走時残差の分布図、IPF により推定された震央位置の推移、震央距離・深さ・Mの一元化震源との時系列比較の図を示す。

謝辞

本検証に用いたデータは、国立研究開発法人防災科学技術研究所および国立研究開発法人海洋研究開発機構からの提供を受けたものである。

参考文献

- ・ 上野寛、畠山信一、明田川保、舟崎淳、浜田信生(2002)：気象庁の震源決定方法の改善 浅部速度構造と重み関数の改良、験震時報、65、123-134
- ・ 束田進也、小高俊一、芦屋公稔、大竹和生、野坂大輔(2004)：P波エンベロープ形状を用いた早期地震諸元推定法、地震2、56、351-361
- ・ Odaka, T., K. Ashiya, S. Tsukada, S. Sato, K. Ohtake and D. Nozaka (2003) :A New Method of Quickly Estimating Epicentral Distance and Magnitude from a Single Seismic Record, Bull. Seism. Soc. Am., 93, 526-532.
- ・ 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2、67、41-55
- ・ 気象研究所地震火山研究部(1985)：自動検測手法の研究、気象研究所技術報告、16、56-100
- ・ 清本真司、明田川保、大竹和生、新原俊樹、下山利浩、森脇健、土井恵治、横田崇(2010)：緊急地震速報における技術的検討事項について、験震時報、73、135-150
- ・ 林元直樹、中村武史、干場充之(2016)：地震規模の即時把握：海域の地震観測網にも適用可能な緊急地震速報のマグニチュード推定手法の検討、日本地球惑星科学連合2016年大会、SSS29-P03

3 PLUM法・ハイブリッド法について

この項の要点

- PLUM法で、予測震度の誤差が ± 1 階級程度となり、ある程度の猶予時間が見込める範囲は約30km程度である。
- ハイブリッド法に用いる震源の信頼性を判定する方法を検討し、90%程度正しく信頼性を判定できることを確認した。

3.1 PLUM法の適用距離

(1) PLUM法の原理

現行の緊急地震速報では、震源要素（位置、マグニチュード（M））を推定し、距離減衰式等を用いて震度を予測している。この方法（以下、従来法）による予測震度は、地震発生直後に精度良く震源要素を推定できた場合には、迅速に全国の予測震度が得られ、多くの地域で猶予時間を確保することができ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、震度を極端に過小/過大予測する場合があります、また東北地方太平洋沖地震のような巨大地震の場合には、震源の広がり等を予測に反映できず、震度を過小に予測することになる。

Propagation of Local Undamped Motion(PLUM)法は、“距離R[km]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”と仮定して震度予測を行う手法(図3.1)であり、震度の予測に震源要素を用いない。従って、PLUM法は、原理的に見逃し無く震度を予測するという長所を持つ一方で、非減衰を仮定しているため震度を過大に予測する傾向がある。また、震度予測には距離R以内にある波動場の情報しか用いないため、実際に揺れが到達するまでに確保できる猶予時間は距離Rによりほぼ一律に規定される。以下では、予測震度の精度とある程度の猶予時間を確保するための適切な距離Rを検討した。

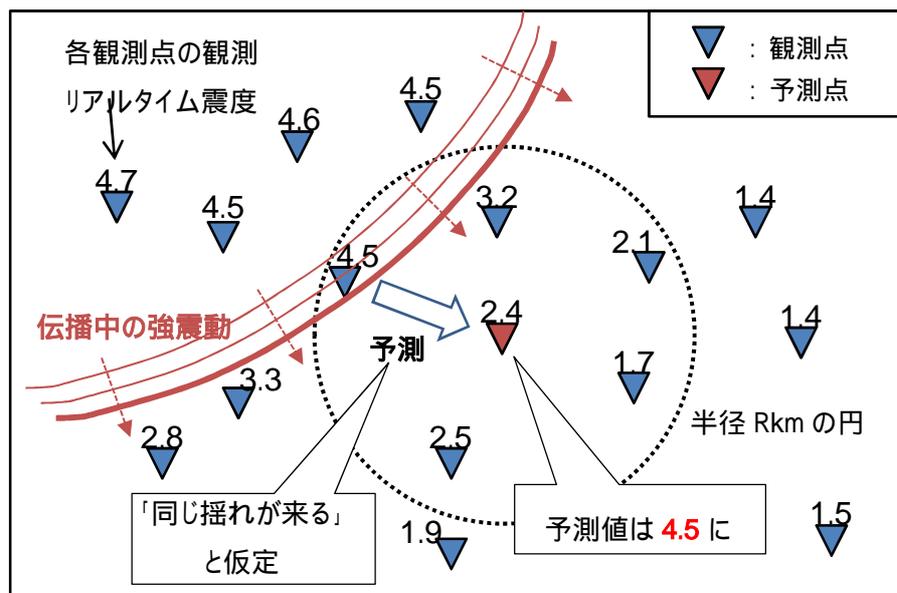


図 3.1 PLUM 法の震度予測の原理

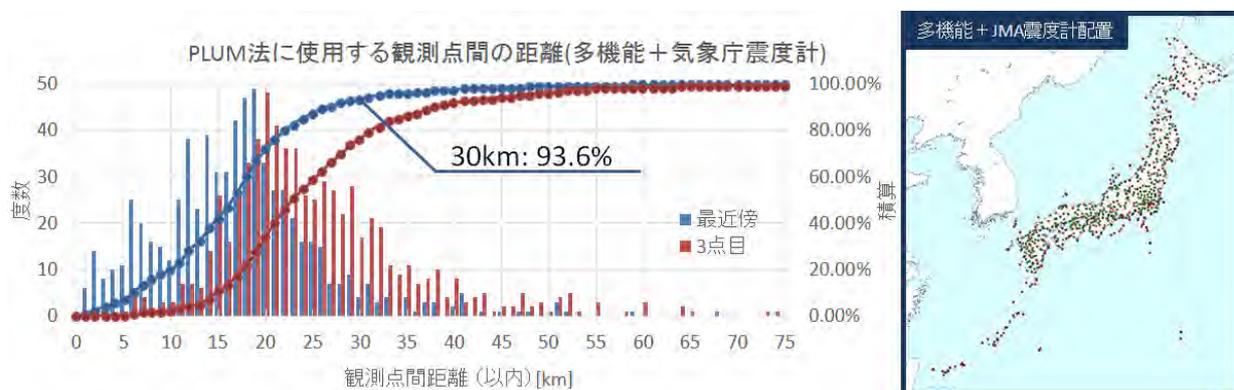


図 3.2 2017 年 1 月現在の PLUM 法に使用する観測点間の距離

(2) 適用距離の設定

PLUM 法は、“ 距離 R [km] 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 ” という仮定をしている。この距離 R の設定は、前述の仮定の下で、 PLUM 法に用いる観測点 (気象庁多機能型地震計および気象庁震度計) の観測点間隔、 強く揺れるまでの猶予時間と震度予測の精度を勘案して設定する必要がある。

について、予測地点の周辺に観測点が一様に分布している場合、あらゆる方向から入射する地震波に対して、予測地点よりも先に地震波を検知するためには、周辺に少なくとも 2 点より多い観測点が必要である。PLUM 法への入力値として用いるリアルタイム震度の観測点である気象庁の多機能型地震計と震度計の設置間隔は、図 3.2 に示すとおり、おおむね 15~30km となっており、猶予時間を持って予測を行うためには適用距離の下限をこの 15~30km とする必要がある。

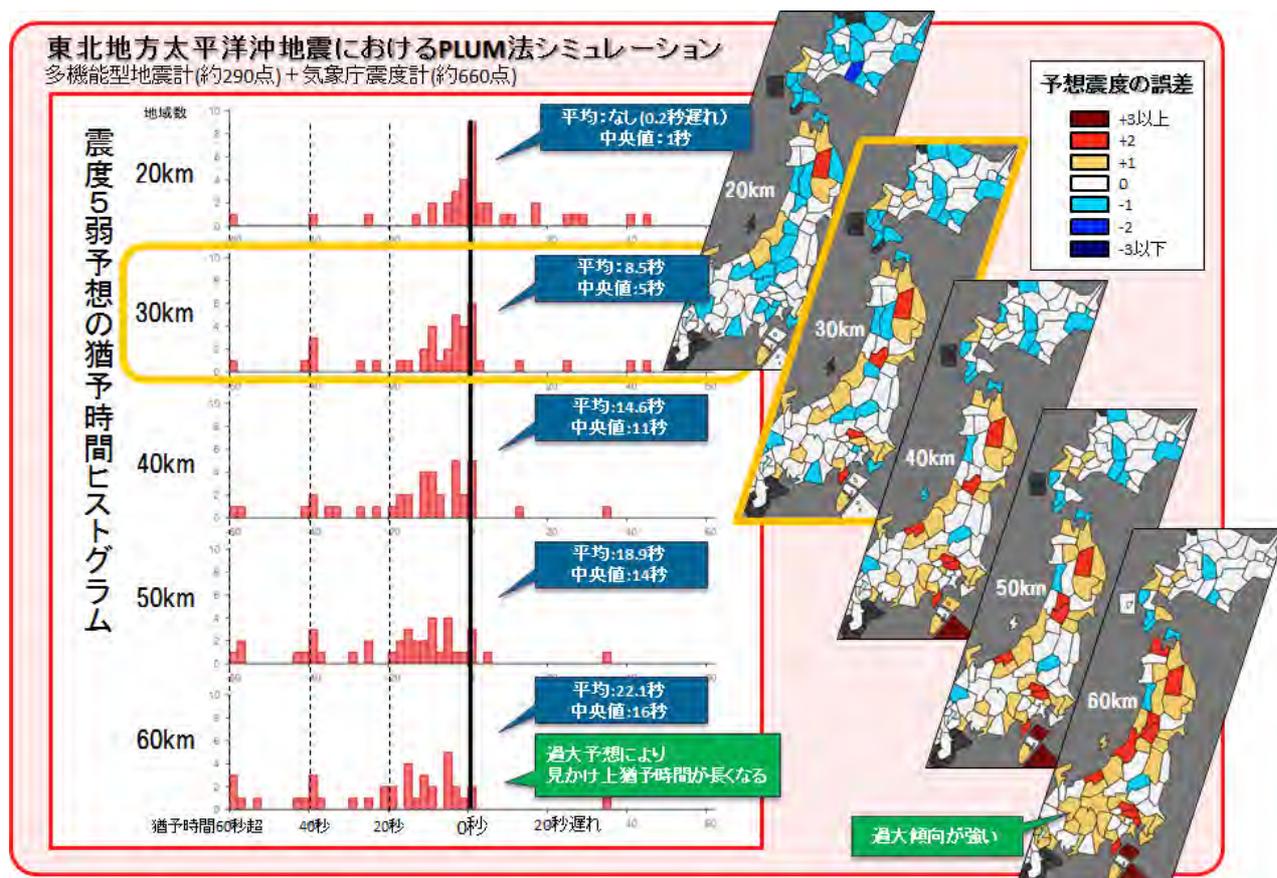


図 3.3 平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震に対する PLUM 法の適用

- （左）震度 5 弱以上の予測を行った観測点で、予測した時刻と震度 5 弱が観測された時刻との差の頻度分布（左に行くほど観測よりも早く予測できている）
- （右）PLUM 法による最終的な震度予測値と実測震度との階級差

について、適用距離を長くとればとるほど、観測データが得られてから予測地点に揺れが到達するまでの時間を長くすることができる。一方で、地震波の非減衰の仮定上、適用距離を長く取るほどに震度を過大に予測することになり、これら予測震度の精度と強い揺れが到達するまでの猶予時間にはトレードオフの関係がある。これについて考察するため、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震のリアルタイム震度の観測結果、および想定南海トラフ地震のシミュレーション（内閣府（2012））を用いて、距離 R を変えて PLUM 法のシミュレーションを行った。距離 R を 20、30、40、50、60km とした時の PLUM 法の結果をそれぞれ図 3.3、図 3.4 に示す。距離 R を 30km とした場合、PLUM 法で震度 5 弱以上を予測した時点から震度 5 弱が実際に観測されるまでの時間は、東北地方太平洋沖地震では平均 8 秒程度、想定南海トラフ地震のシミュレーションでは平均 10 秒程度確保できている。さらに距離を長くとれば、猶予時間を長くとることができるが、長い距離の PLUM 法では震度を過大予測する傾向が強くなる。

PLUM 法による予測震度は、減衰なしでの伝播を仮定しているために過大評価側にバイアスがかかる。この過大となる確率とその過大評価量を 2004 年から 2013 年の過去 10 年分の震度観測データを用いて見積もった。

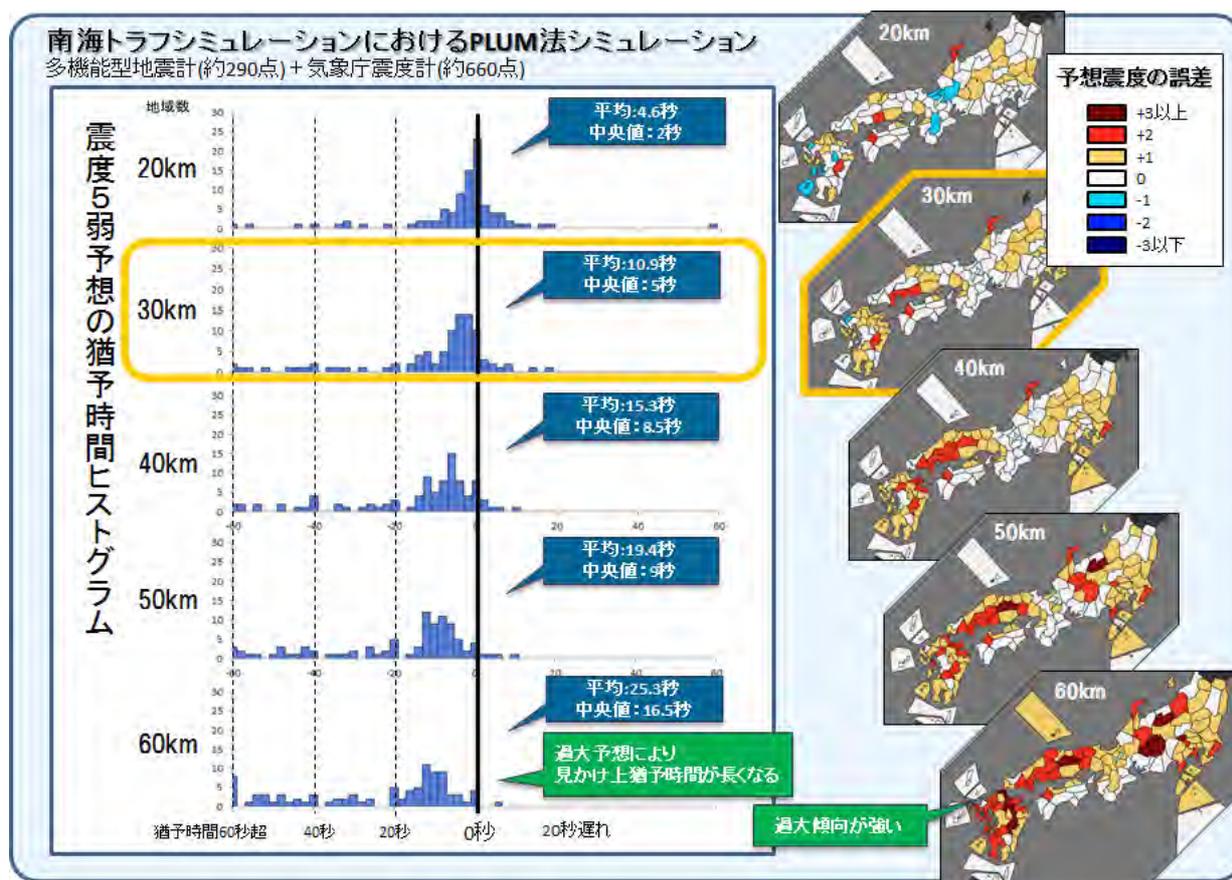


図3.4 想定南海トラフ地震シミュレーションに対する PLUM 法の適用

- (左) 震度5弱以上の予測を行った観測点で、予測した時刻と震度5弱が観測された時刻との差の頻度分布（左に行くほど観測よりも早く予測できている）
- (右) PLUM 法による最終的な震度予測値と実測震度との階級差

当該期間で震度4以上を観測した震度観測点に対し、その周辺で観測された震度の工学基盤面上での差と観測点間距離の関係を距離1kmごとに集計し、一定以上の過大評価が発生した割合を調べた(図3.5)。この関係を元に、実際に観測された過大評価の割合を過大評価が発生する確率とみなし、現在の各予測地点に対し、半径R[km]以内に入るリアルタイム震度の観測地点において、過大評価が発生する確率を積算し、各予測地点の平均を取ったものが図3.6である。図3.6で、距離30kmのところを見ると、計測震度で0.5以上の過大評価が発生する確率は約50%、1.0以上の過大評価が発生する確率は約15%であることがわかる。Rを40kmまで拡大すると、それぞれの確率は0.5以上で約70%、1.0以上で約35%となり、過大評価の発生確率は30kmよりも増す。(ただし実際に情報として発表する場合には、各観測点同士の増幅率の関係や情報発表時に地域単位で最大となるかどうか等が影響する。)

PLUM法による予測震度が実測値と乖離するような状況として、直下型のような急激な距離減衰が発生している場合が考えられる。例えば、2011年6月30日の長野県中部で発生した深さ4.3km、M5.4の地震に30kmのPLUM法を適用した例では、図3.7のように長野県北部および南部に対し、実測の地域最大震度から2階級以上に過大に

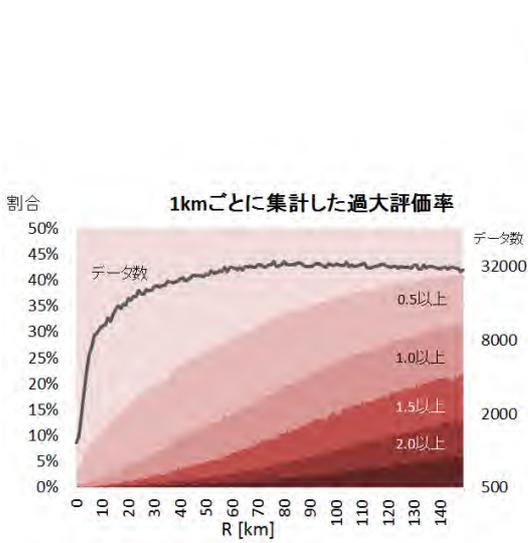


図 3.5 2004-2013年の震度観測データから得られた工学基盤面上での過大評価率

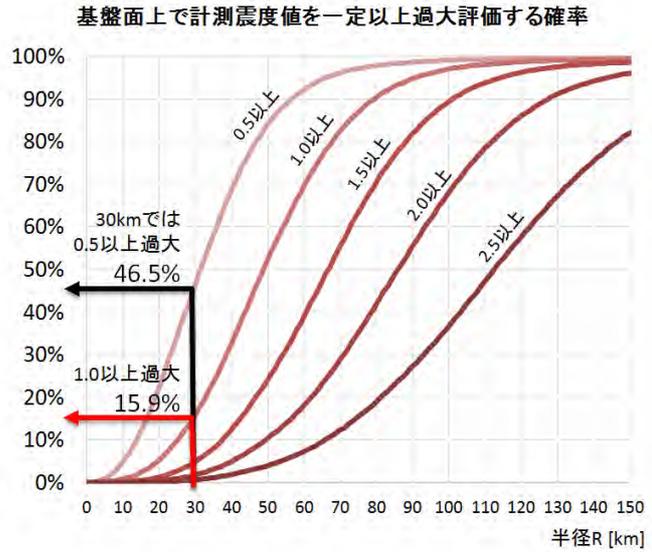


図 3.6 図 3.5 の値を元に予測地点ごとに積算した各閾値以上の過大評価が発生する確率の平均値

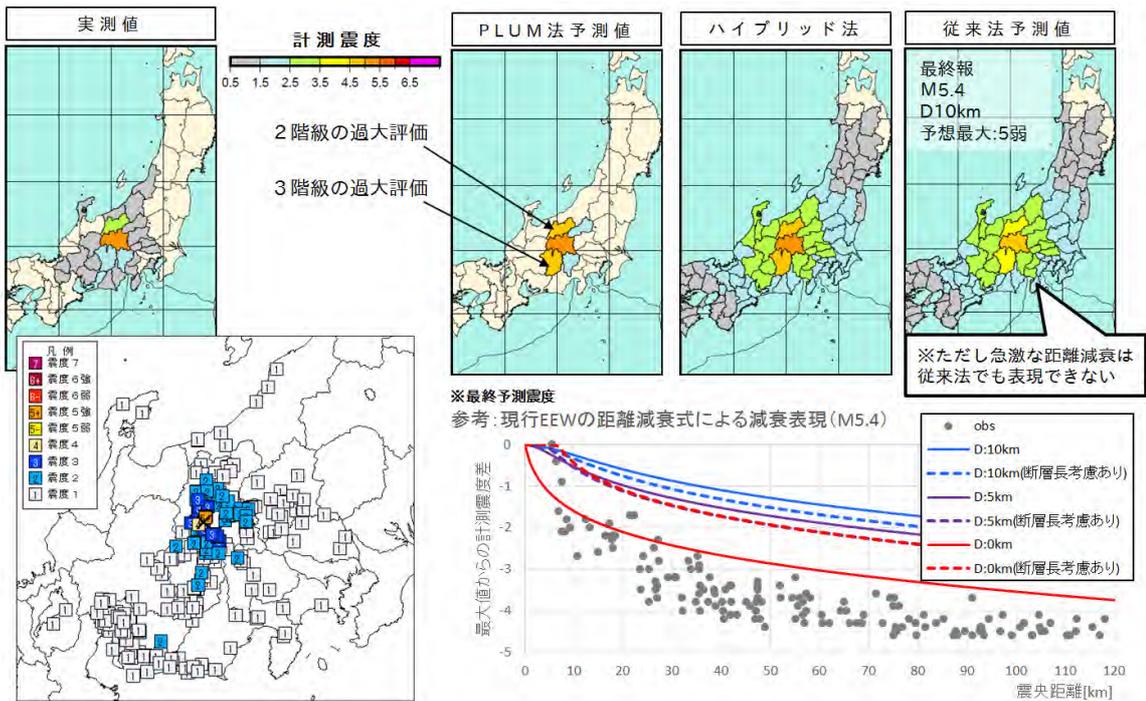


図 3.7 2011年6月30日 長野県中部の地震（深さ 4.30km M5.4 最大震度 5 強）に対する 30km PLUM 法の適用

予測する。ただし、このような浅い震源を持つ地震の場合には、従来法においてもその距離減衰が表現できていない。これは従来法における震源決定精度の要請上、震源の深さを最も浅くて 10km としているために生じているものであり、現在使用している距離減衰式に深さ 10km、M5.4 を入力した場合、震央での最大震度から計測震度 1.0 以上の減衰は 35km 以上離れた領域で表現されることとなる。これを踏まえても 30km の PLUM 法は現在運用している緊急地震速報の精度を著しく損なうものではないと考

える。

以上の検討を踏まえ、気象庁は PLUM 法で用いる適用距離を 30km として運用を行うこととしたい。

3.2. 従来法震源の信頼性の判定

(1) 予測震度をハイブリッドする方法

震度予測を震源要素に基づく従来法は、迅速に緊急地震速報を公表でき、猶予時間を稼げる長所を持ち、PLUM 法は震源要素がなくても、見逃し無く震度を予測するという長所を持つ。この2つの長所を合わせ、従来法と PLUM 法を組み合わせ、震度を予測する方法をハイブリッド法と言う。ハイブリッド法概念図を図 3.8 に示す。処理の概要は以下の通りである。

PLUM 法により各震度観測点における予測震度を求める。

従来法で震源を推定し、走時残差や観測点マグニチュード残差等から推定震源の信頼性の評価を行う。推定震源が信頼できる場合にのみ、従来法による震度予測を各震度観測点に対して行う。

各震度観測点において、と で得られた予測震度の大きい方を採用する。

通常は、PLUM 法と従来法の両予測値を採用し、PLUM 法の確実性と従来法の迅速性を生かす。しかし、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 法の震度予測のみを採用する。

ハイブリッド法では、PLUM 法による予測震度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測を回避できる。以下では、従来法で推定した震源が信頼できないと判断する方法を述べる。

(2) 従来法震源の信頼性の判定方法

深発地震による異常震域を除けば、実際の地震では、推定震央近傍が最も強く揺れていると仮定できる。従って、通常の地震では、従来法の推定震央周辺で、強い揺れが観測されている場合、従来法の震源による予測震度は実際の観測結果により裏付けられているとし、従来法の予測震度の信頼性が高いと考えられる。この場合、予測結果をハイブリッドする方法としては従来法と PLUM 法の予測震度の大きい方のいずれかを予測震度とする。

また、これとは反対に、従来法で推定された震央周辺で強い揺れが観測されていない場合には、推定震源の位置に疑義があるか、もしくは深発地震における異常震域のような、従来法で用いている距離減衰式による予測から大きく乖離するような状況等が考えられる。このような場合、ハイブリッド方法としては、従来法による予測震度を棄却し、PLUM 法の震度予測のみを採用することとする。

従来法の推定震源付近での予測震度と実際の揺れとの整合性を判定する方法において、従来法の予測震度とリアルタイム震度値を単純に比較する方法では、ゆれ始めの段階ではリアルタイム震度はまだ小さく、予測震度との差が大きくなってしまいうた

◆ 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

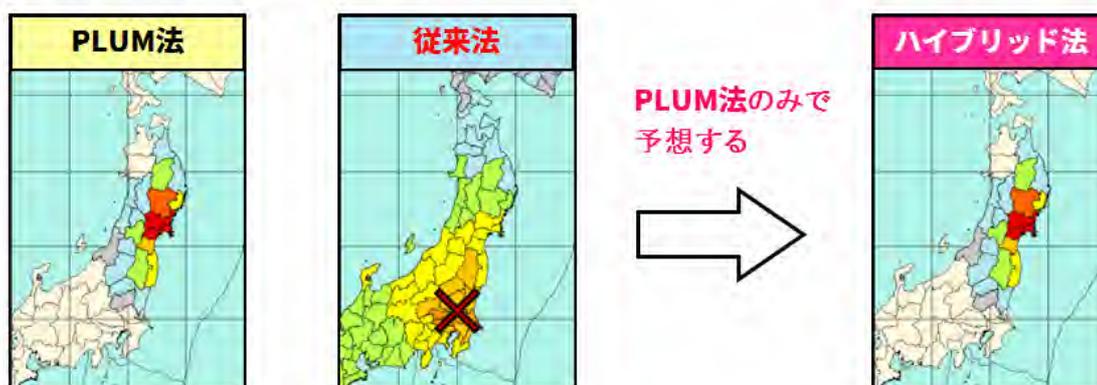


図 3.8 ハイブリッド法の概念図

め使うことができない。そこで代替手段として、推定震源近傍でP波が理論上到達したとされる観測点（震源近傍最大3点）で、通常のM計算と同じく各相の到達時刻に応じたP波/S波M式を用いて算出した「近傍マグニチュード（M）」の中央値を使用する。この「近傍M」と、震源決定に使用した観測点から推定されたM（従来法M）の差（従来法M-近傍M）が、閾値以上であるかどうかで従来法の推定震源の信頼性の判定を行う。これはPLUM法による予測震度が無い場合にも適用するが、150kmより深い震源をもつ深発地震に対しては、この方法では適切に評価できない。このため、深発地震は、品質管理の対象から除外し、震源は採用する。ただしこの場合、現在の緊急地震速報では、従来法による予測震度は発表しないので、PLUM法で予測震度が発表されることとなる。

この従来法の推定震源の信頼性の判定手法の有効性を検証し、また閾値の検討のため、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震以降の期間（2011年3月11日～12月31日）の、余震が頻発する中で従来法予報が大きく外れることが多かった当時の予報データを対象に、この品質管理手法によってこれらの震源がどのように棄却されるかを検証した。検証では、震源要素の確からしさを判定する指標として、震度分布が実測とどの程度適合しているかを示す「スコア」（震度4以上を観測/予測した地

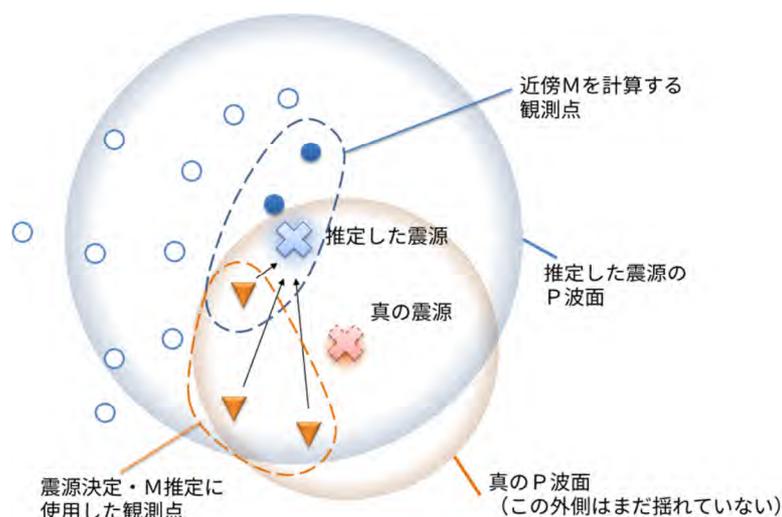


図 3.9 近傍Mによる品質管理の概念図

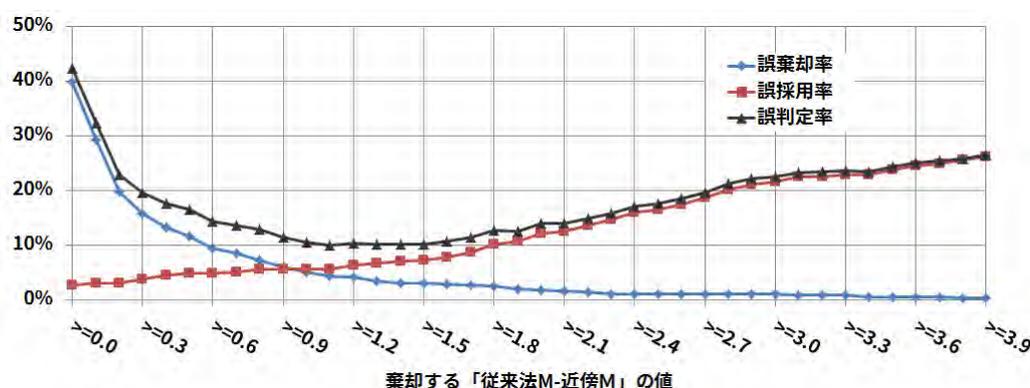


図 3.10 2011年3月11日～12月31日当時警報を発表したイベント内で発表された予報の各震源要素に対し「近傍M」を用いた品質管理を行った場合の閾値ごとの誤判定率

域数に対し、予測震度と観測震度の差が1階級以内に収まった地域数の割合：表 1.4 参照)を用いた。

図 3.10 は棄却する「従来法M-近傍M」の閾値を 0.1 ごとに变化させた際に、“良い”推定震源を誤って棄却した割合（誤棄却率）“悪い”推定震源を誤って採用した割合（誤採用率）を算出したものである。ここで“良い”・“悪い”推定震源の基準は、それぞれスコアが 30%以上かそうでないかとしている。棄却する閾値を小さく設定すると誤棄却率が大きくなり、一方で閾値を大きく設定すると誤採用率が増加する。これらの和である誤判定率は、閾値が 1.0 から 1.5 付近で 1 割程度と最も小さく、またほぼ横ばいとなっている。品質管理による効果が十分に得られ、かつ誤棄却率をなるべく抑えられる値として、運用開始時には「従来法M - 近傍M」が 1.5 以上を棄却という閾値を採用することとしたい。

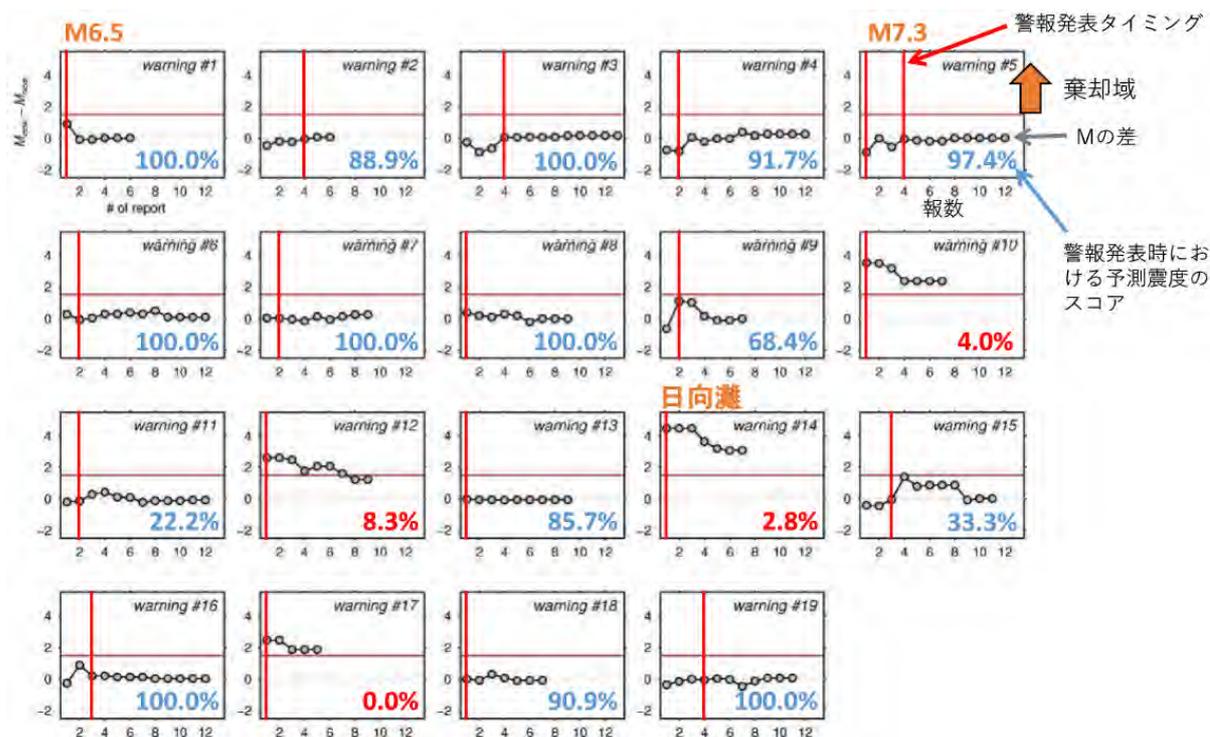


図 3.11 平成 28 年（2016 年）熊本地震の一連の地震での警報発表事例に対する棄却状況およびスコア（番号は表 1.3 に対応）横軸：報数 縦軸：近傍 M との差 赤横線（閾値 1.5）よりも差が大きくなった震源は棄却され、情報発表されなくなる

この品質管理手法と閾値 1.5 を用いて、表 1.3 に挙げた平成 28 年（2016 年）熊本地震の一連の地震で緊急地震速報（警報）を発表した 19 事例についてどのように棄却判定の方法が働くのかを調べた。比較的精度の良い緊急地震速報を発表した地震（Warning #1, #2, #3, #4, #5, #6, #7, #8, #9, #11, #13, #15, #16, #18, #19）については、誤判定により震源が棄却されてしまう事例はなかった。また、予測震度を大きく外し、過大な緊急地震速報（警報）を発表した事例（Warning #10, #12, #14, #17）のうちの Warning #12 を除く 3 つについて、完全に震源を棄却することができた（図 3.11）。Warning #12 については、発表初期の震源は正しく棄却できているが、後半は棄却できていない。これは時間経過に伴い M 式が切り替わったことで、推定 M が低下し近傍 M との差が小さくなったことによる。

参考文献

- ・ 内閣府（2012）：南海トラフの巨大地震モデル検討会「南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について」