

資料 2

緊急地震速報評価・改善検討会 技術部会（第9回） 資料

緊急地震速報評価・改善検討会 技術部会（第9回） 資料

目次

II. 議題

- 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 ----- (P 1)
 1. 2 主な地震における緊急地震速報の発表状況 ----- (P 3)
 1. 3 PLUM 法の処理結果 ----- (P 8)
 1. 4 遠地地震の検知による緊急地震速報（予報）発表事例 --- (P 11)

- 2 緊急地震速報の迅速化と精度向上に向けた取り組み
 2. 1 海底地震計データの活用 ----- (P 13)
 - (1) 単独観測点処理に実装する新たな処理手法 ----- (P 14)
 - (2) 中枢処理に実装する新たな処理手法 ----- (P 16)
 - (3) S-net 活用による IPF 報の迅速化・精度向上 ----- (P 18)
 2. 2 過大予測対策
 - (1) 2018年1月5日の発表状況について ----- (P 23)
 - (2) 今年度に行ったシステム改修 ----- (P 24)
 - (3) 今後の対策 ----- (P 26)

1 緊急地震速報に係わる報告事項

この項の要点

- 2018年2月～2019年1月の予報の発表回数は910回、うち警報は15回。
- 2018年10月04日00時15分の千葉県東方沖の地震で、過大な緊急地震速報を発表したが、S-netを活用することで改善できる。
- PLUM法の導入により、導入していなかった場合と比較して、予測震度が過小評価されるケースは減ったが、震源近傍で過大評価されるケースが増えた。
- PLUM法の導入により、6個の地震で緊急地震速報（警報）を従来法のみの場合より早く発表することができた。

1.1 緊急地震速報の発表状況（平成30年2月から平成31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15回
（うち、警報を発表したが震度4以上が観測されず：計1回）
- 震度5弱以上を観測したが警報を発表せず・・：計2回
- 緊急地震速報（予報）を発表・・・・・・・・・・：計910回

表1.1に平成30年（2018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、表1.3に遠地地震の地震波で緊急地震速報を発表した地震を示す。また、図1.1に平成19年度から平成30年度のスコア推移および予報・警報発表回数を示す。

表 1.1 緊急地震速報（警報）を発表した地震（計15回）.

時刻	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]	発表状況の詳 細説明
	震央地名	M			最大震度	震度5弱 以上	震度4	震度3				
2018/03/01 22時42分	西表島付近	5.6	5弱	西表島付近	4	1	0	1	2	3.6	7.4	
2018/04/09 01時32分	島根県西部	6.1	5強	島根県西部	5	2	2	1	0	3.0	5.9	
2018/04/14 04時00分	根室半島 南東沖	5.4	5弱	根室地方 南部	2	0	2	0	0	5.5	8.0	
2018/05/12 10時29分	長野県北部	5.2	5弱	長野県北部	4	1	0	2	1	2.3	5.4	
2018/06/17 15時27分	群馬県南部	4.6	5弱	群馬県南部	3	1	1	1	0	3.6	7.5	
2018/06/18 07時58分	大阪府北部	6.1	6弱	大阪府北部	15	5	8	2	0	3.2	3.2	(2)
2018/07/07 20時23分	千葉県 東方沖	6.0	5弱	千葉県 東方沖	5	1	2	2	0	3.8	13.5	
2018/09/06 03時07分	胆振地方 中東部	6.7	7	胆振地方 中東部	4	4	0	0	0	5.1	7.3	(1)
2018/09/06 06時11分	胆振地方 中東部	5.4	5弱	胆振地方 中東部	5	1	4	0	0	4.2	4.2	
2018/10/04 00時15分	千葉県 東方沖	4.7	4	千葉県 東方沖	10	0	2	0	8	6.6	7.4	(4)
2018/10/05 08時58分	胆振地方 中東部	5.2	5弱	胆振地方 中東部	7	2	0	4	1	4.4	6.5	
2018/10/24 01時04分	与那国島 近海	6.3	3	台湾付近	4	0	0	1	3	4.6	16.4	(5)
2018/10/26 03時36分	宮城県沖	5.7	4	宮城県沖	8	0	4	4	0	3.3	8.2	
2018/11/02 16時53分	紀伊水道	5.4	4	紀伊水道	4	0	2	1	1	4.2	11.4	
2019/01/03 18時10分	熊本県 熊本地方	5.1	6弱	福岡県 筑後地方	3	1	1	1	0	4.5	6.0	(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2回）.

年月日	時分	震央地名	M	最大震度 (計測震度)	予測最大震度 (計測震度)	検知から予報 第一報発表ま での時間(秒)	発表状況の 詳細説明
2018/05/25	21時13分	長野県北部	5.2	5強(5.3)	4(4.4)	33.0	(6)
2019/01/26	14時16分	熊本県熊本地方	4.3	5弱(4.5)	4(3.9)	4.7	

※表中の「予測最大震度」は緊急地震速報（予報）の最終報で発表した予測震度の最大値を示す。

表 1.3 遠地地震の地震波で緊急地震速報を発表した地震（計2回）.

年月日	時分	発表した震央地名	M	予測最大震度（計測震度）	遠地地震の震央地名	遠地地震のM
2018/08/19	09時29分	房総半島南方沖	5.9	4（3.8）	フィジー諸島	8.2
2018/12/21	02時05分	オホーツク海南部	5.6	3（3.0）	ロシア、コマンドル諸島	7.3

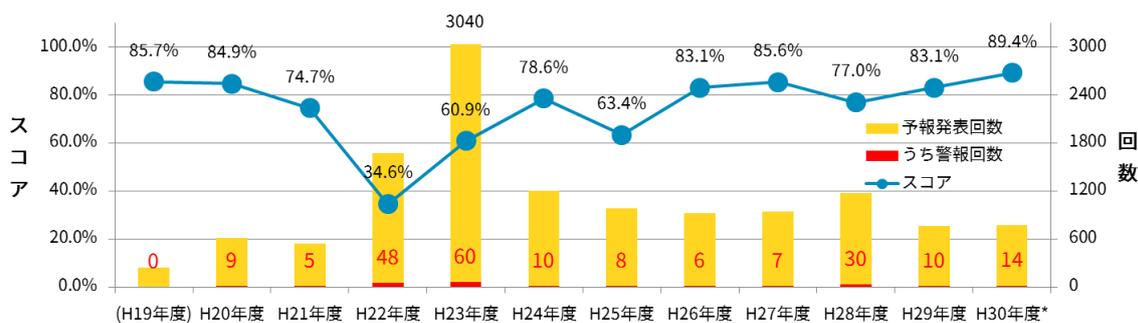


図 1.1 平成 19 年度から平成 30 年度のスコア推移および予報・警報発表回数（赤字は警報回数）. スコアは、警報を発表した場合は警報の最終報、警報を発表しなかった場合は予報の最終報の予測震度で計算している. ※平成 30 年度は平成 31 年1月までの値

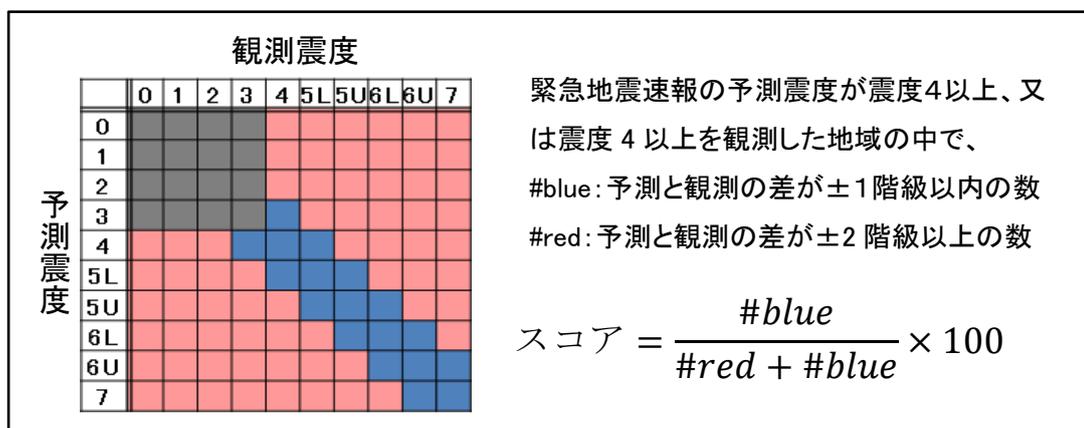


図 1.2 スコアの計算方法.

1. 2 主な地震における緊急地震速報の発表状況

ここでは、最大観測震度が6弱以上の地震、警報を発表したが震度4以上が観測されなかった地震、及び震度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について紹介する。

- (1) 平成30年9月6日03時07分 平成30年北海道胆振東部地震（深さ37km, M6.7）
緊急地震速報（警報）を地震波検知から7.3秒後に第1報、14.7秒後に第2報をそ

れぞれ発表した。緊急地震速報（警報）第1報は、PLUM法の予測震度が胆振地方中東部で震度5弱となったため警報を発表した。第2報は、第1報で警報を発表していない石狩地方中部で、PLUM法の予測震度が震度5弱となったため、更新の警報を発表した。観測震度と予測震度の分布は図1.3、図1.4の通り。

従来法の予測震度がはじめて震度5弱を超えたのは、地震波検知から10.4秒後の予報第10報であったが、震度5弱を予測した胆振地方中東部にはすでに警報を発表していたため、警報は更新しなかった。

PLUM法は震源近くの大きな震度を予測し、従来法は震源からやや離れた地域の震度4以上を予測している。

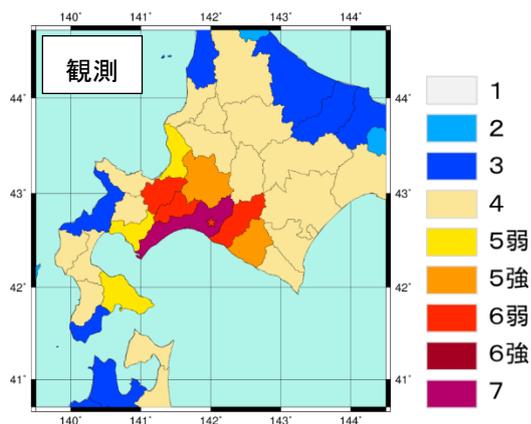
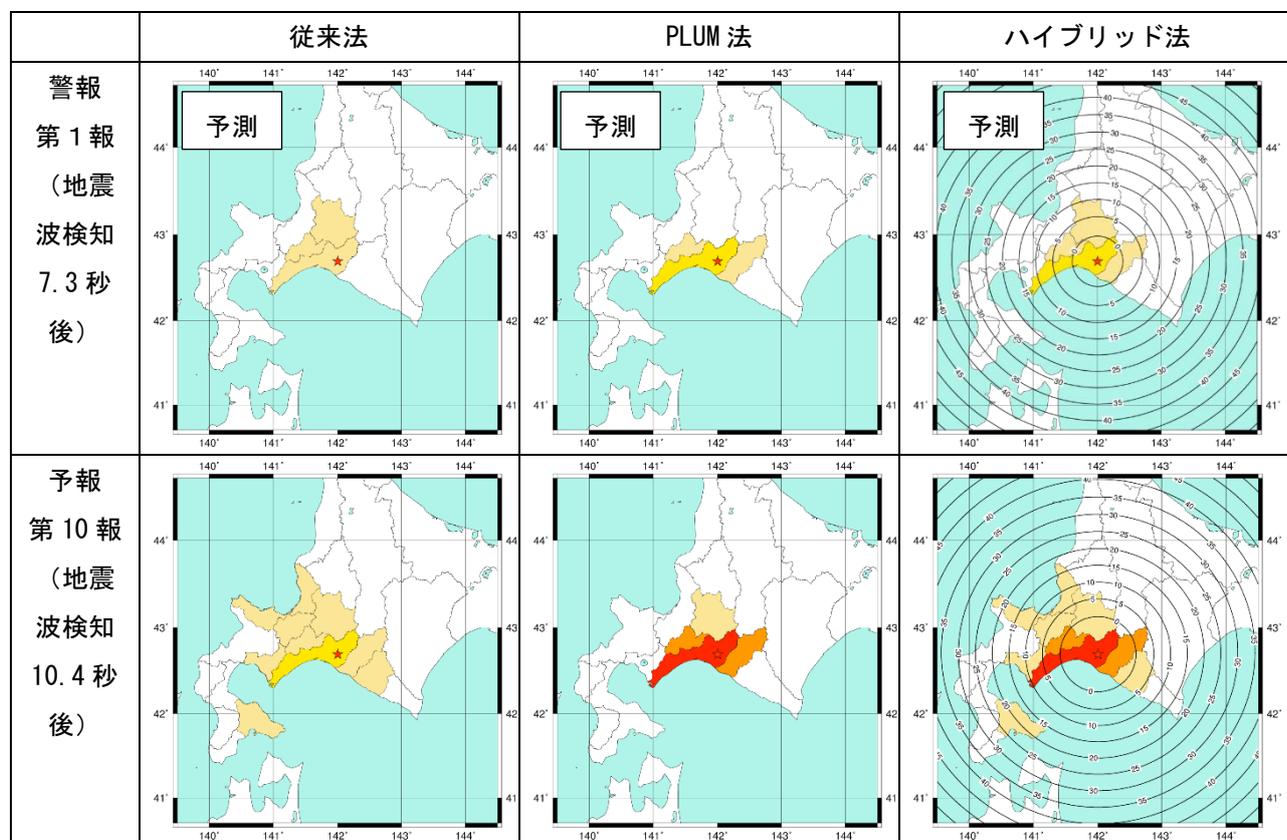


図1.3 平成30年9月6日03時07分平成30年北海道胆振東部地震における観測震度。以下、赤星印は一元化震源を表す。



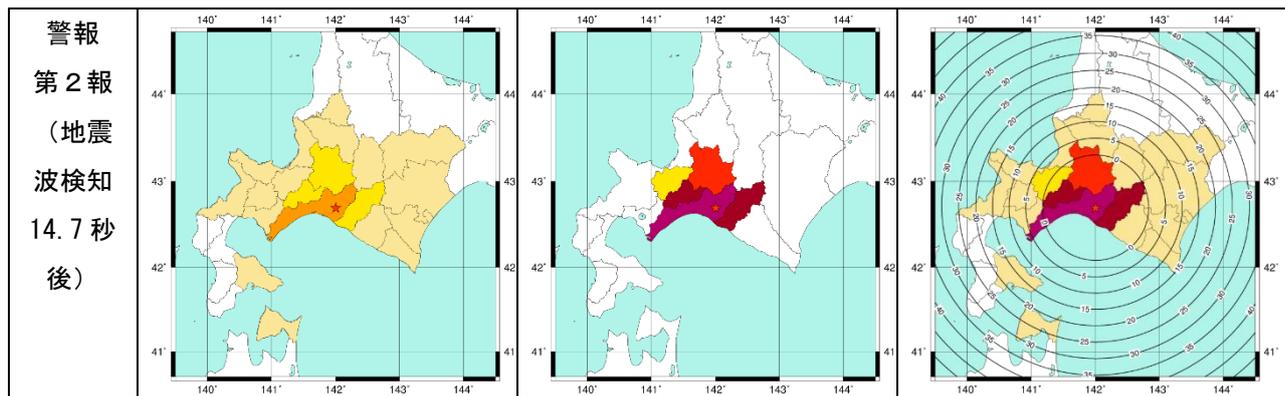


図 1.4 平成 30 年 9 月 6 日 03 時 07 分 平成 30 年 北海道 胆振 東部 地震 における 緊急 地震 速報 (警報) の 予測 結果.

(2) 平成 30 年 6 月 18 日 07 時 58 分 大阪府 北部 の 地震 (深さ 13km, M6.1)

緊急地震速報 (警報) を地震波検知から 3.2 秒後に IPF 法震源により発表した。観測震度と予測震度の分布は図 1.5 の通り。

緊急地震速報 (警報) の予測結果と実際に観測された震度の差は、全地域で±1 階級以内であった。

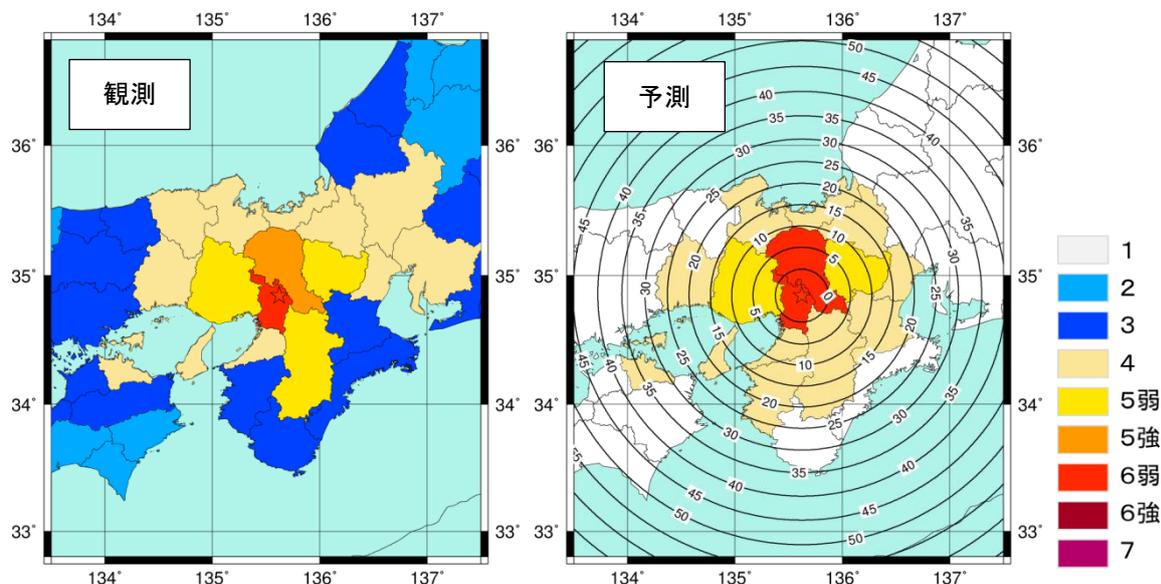


図 1.5 平成 30 年 6 月 18 日 07 時 58 分 大阪府 北部 の 地震 における 緊急 地震 速報 (警報) の 観測 震度 (左図) と 予測 震度 (右図).

(3) 平成 31 年 1 月 3 日 18 時 10 分 熊本県 熊本 地方 の 地震 (深さ 10km, M5.1)

緊急地震速報 (警報) を地震波検知から 6.0 秒後に PLUM 法の予測震度により発表した。予測震度と観測震度の分布は図 1.6 の通り。

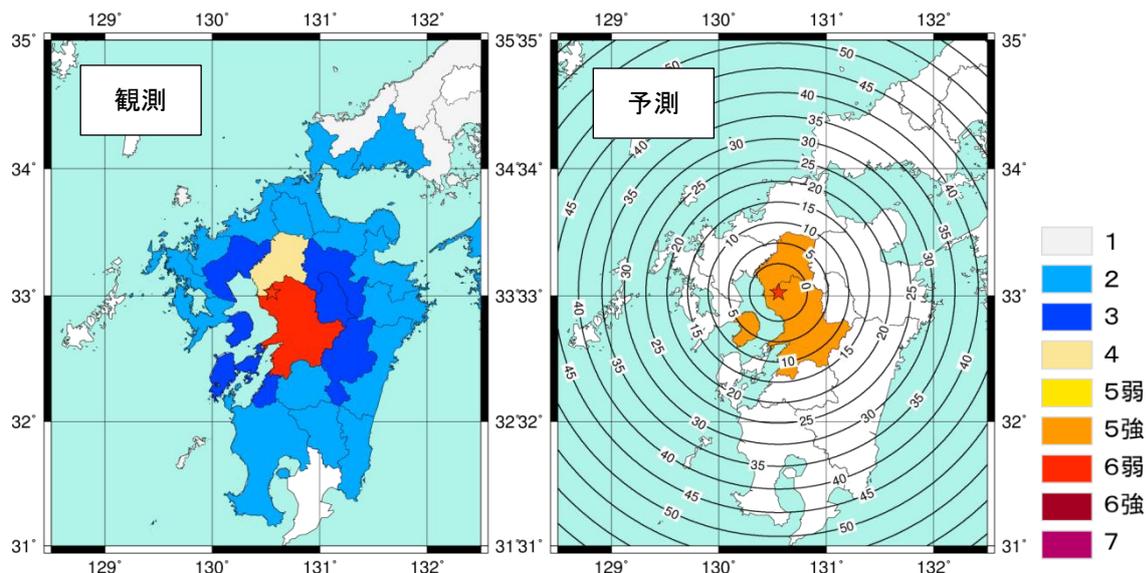


図 1.6 平成 31 年 1 月 3 日 18 時 10 分 熊本県熊本地方の地震における緊急地震速報(警報)の観測震度(左図)と予測震度(右図).

(4) 平成 30 年 10 月 04 日 00 時 15 分 千葉県東方沖の地震 (深さ 31km, M4.7)

IPF 法震源が実際の震源よりもやや沖合に決まったことで緊急地震速報(警報)を発表したが、警報を発表した都県で観測した最大震度は、茨城県・千葉県で震度 4、東京都・神奈川県・埼玉県・栃木県で震度 1 であった。事後解析の結果、S-net を活用すると、IPF 法震源は実際の震源に近くなり、緊急地震速報(警報)は発表しないことがわかっている(2.1 参照)。予測震度と観測震度の分布は図 1.7 の通り。

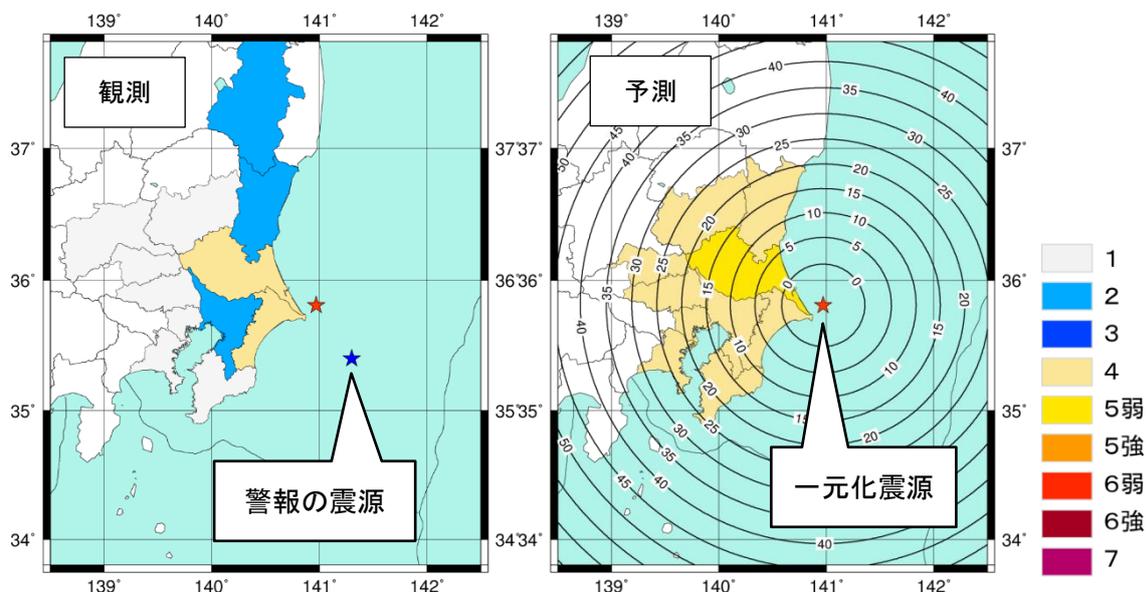


図 1.7 平成 30 年 10 月 04 日 00 時 15 分 千葉県東方沖の地震における緊急地震速報(警報)の観測震度(左図)と予測震度(右図). 赤星印は一元化震源を、青星印は緊急地震速報(警報)を発表したときの予測震源を示す.

（5）平成30年10月24日01時04分 与那国島近海の地震（深さ28km, M6.3）

地震波検知から16.4秒後にIPF法で台湾付近のM7.8の地震と推定し、沖縄県与那国島に最大震度5弱を予測して緊急地震速報（警報）を発表した。しかし、実際に与那国島で観測された震度は震度3であった。予測震度と観測震度の分布は図1.8の通り。

震度を過大に推定した理由は、観測網外で発生した地震であったため震源が実際よりも遠方に推定されたことと、それに伴い、理論S-P時間が大きくなり、地点Mを推定する際にS波により観測した振幅値をP波M式で評価したことでMを過大に推定したためである。

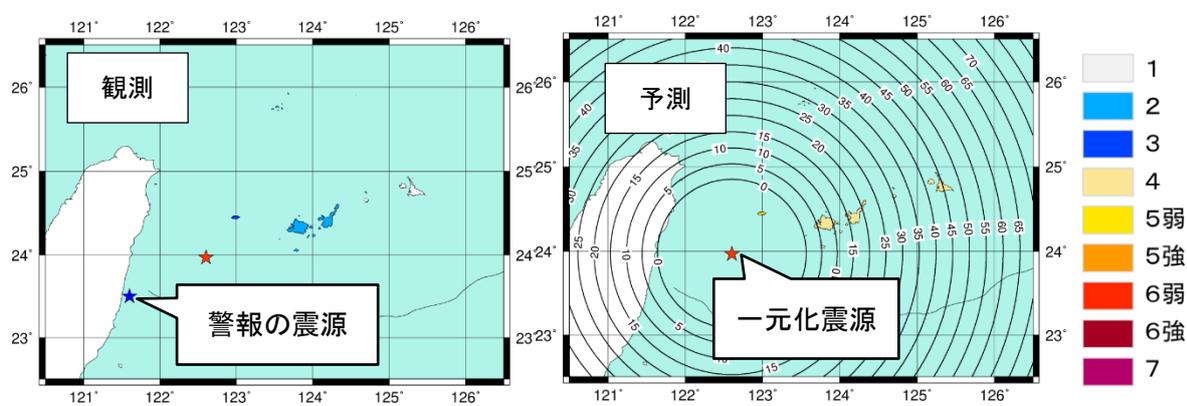


図1.8 平成30年10月24日01時04分 与那国島近海の地震における緊急地震速報（警報）の観測震度（左図）と予測震度（右図）。赤星印は一元化震源を、青星印は緊急地震速報（警報）を発表したときの予測震源を示す。

（6）平成30年5月25日21時13分 長野県北部の地震（深さ6km, M5.2）

この地震で震度5強を観測したのは震源直近の観測点であった。緊急地震速報（予報）の最大予測震度は震度4（計測震度4.4）であったため、緊急地震速報（警報）を公表しなかった。なお、震度4以上を観測した震度観測点はPLUM法非活用地点（長野県及び新潟県が設置した震度計）であり、PLUM法の予測結果も警報の発表基準を超えなかった。予測震度と観測震度の分布は図1.9の通り。

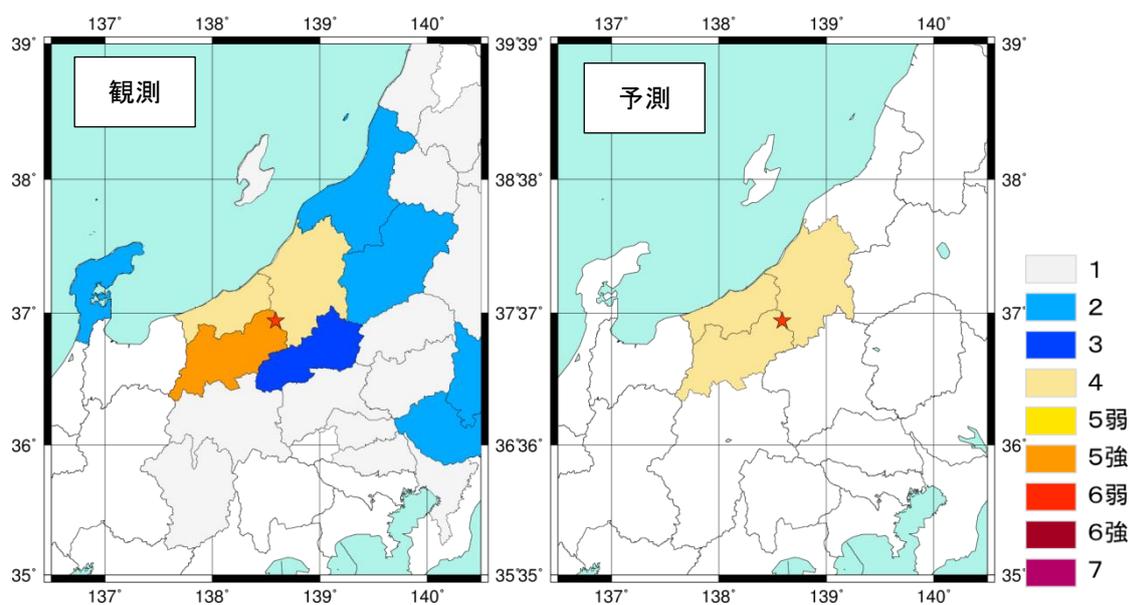


図 1.9 平成30年5月25日21時13分 長野県北部の地震における緊急地震速報(予報)の観測震度(左図)と予測震度(右図)

1.3 PLUM法の評価

(1) 予測精度の評価

2018年3月22日のPLUM法運用開始以降、2019年1月までに緊急地震速報を発表した地震について、ハイブリッド法、従来法、PLUM法の予測震度と観測震度の比較を行った。表1.5がその結果であり、スコアは予報の最終報の予測震度と実際に観測された震度の差が±1階級以内に入る割合を示している。ここで、図1.1と異なり警報を発表した際も予報の最終報でスコア計算を行ったのは、警報を従来法のみで予測震度で発表した場合、PLUM法で予測された震度がなく精度評価ができないためである。また、PLUM法のスコアを計算する際、震度4以上が観測されていてもPLUM法の予測震度がない事例は除いている。これは、PLUM法非活用地点（自治体設置の震度計など）で最大震度が観測された場合に、必ずしもPLUM法活用観測点でPLUM法のトリガオン閾値（リアルタイム震度2.5以上）を超えるとは限らないからである。

ハイブリッド法のスコアは94.5%で予測計測震度は平均で0.24 過大評価となっており、従来法のスコアは97.8%で予測計測震度は平均で0.03 過小評価となっている。これは、PLUM法の導入により予測震度が過小評価されるケースは減ったが、震源近傍で過大評価されるケースが増えたことを意味している。

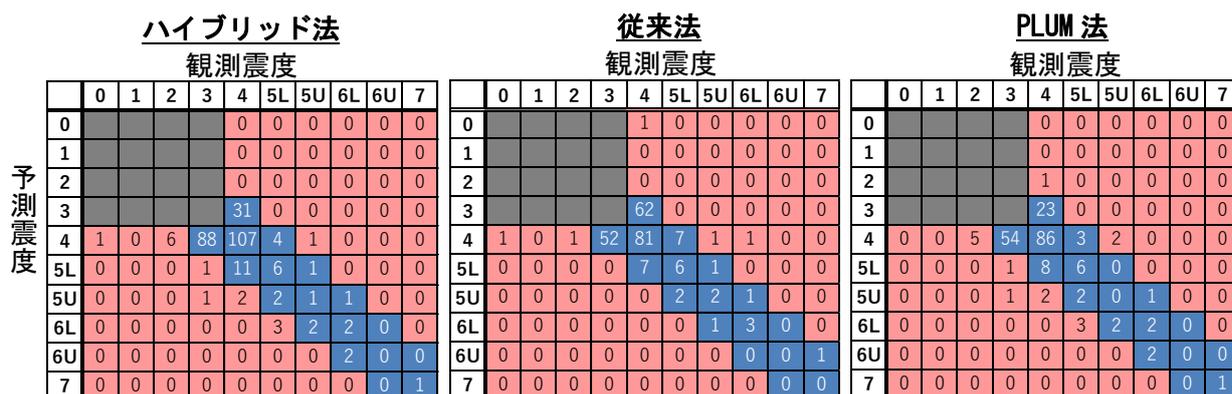
震源近傍については、前回の技術部会で示したとおり、特にMの小さな浅い地震における震源近傍の急峻な距離減衰により、PLUM法による予測震度が過大になる場合がある（図1.10）。このようなPLUM法の特性を踏まえ、今後、震央距離により適用距離を可変にすることなど検討を進めたい。

表 1.5 予測震度と観測震度の比較結果

	計算対象地域数 （※1）	スコア （%）	予測震度と観測震度の差分 の平均値（計測震度）
ハイブリッド法	274	94.5	0.24
従来法	231	97.8	-0.03
PLUM法（※2）	205	92.7	0.23

※1 計算対象は、2018年3月22日以降、2019年1月31日までの予報の最終報で予測震度を発表した地域。ただし、PLUM法の予測震度がない場合は除く。

※2 PLUM法の予測震度がないとき、計算対象から外している。



※スコアの算出方法は図1.2を参照。

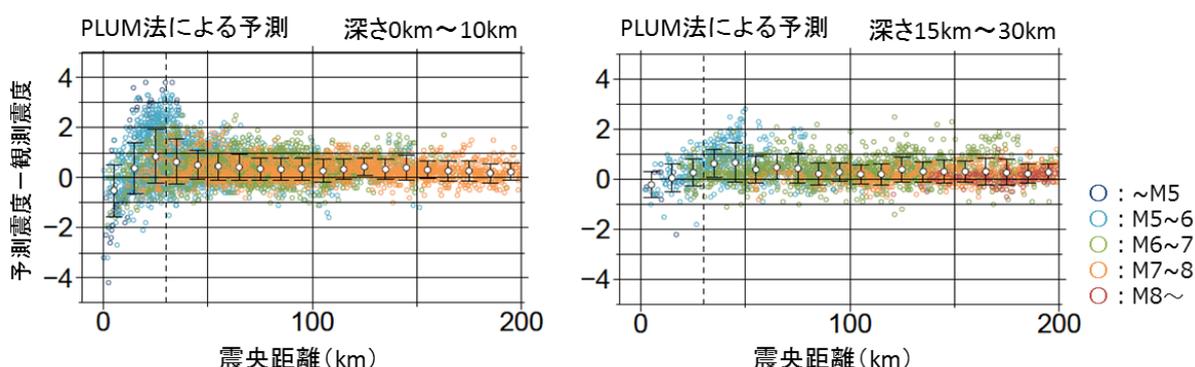


図 1.10 PLUM法による予測震度の残差と震央距離との関係(第8回技術部会資料より抜粋)。左は震源の深さ0~10 km、右は15~30 kmの事例を示し、Mごとに色分けしている。縦の破線は震央距離30 kmを示す。

(2) 警報発表のタイミングの評価

2018年3月22日のPLUM法運用開始以降、2019年1月までに緊急地震速報（警報）を発表した14個の地震のうち、表1.6に示す6個の地震でPLUM法により緊急地震速報（警報）を、従来法のみの場合より早く発表することができた。このうち、4個の地震では従来法の予測結果が5弱未満であり、PLUM法のみによって緊急地震速報（警報）を発表した。

表 1.6 PLUM法により緊急地震速報（警報）を早く発表した地震

時刻	震央地名	M	最大観測震度	PLUM法予測結果が初めて5弱を超えたときの、地震波検知からの経過時間（秒）	従来法予測結果が初めて5弱を超えたときの、地震波検知からの経過時間（秒）	PLUM法の予測最大震度（計測震度）	従来法の予測最大震度（計測震度）
2018/04/14 04時00分	根室半島南東沖	5.4	5弱	8.0	-	5弱 (4.5)	4 (3.8)
2018/06/17 15時27分	群馬県南部	4.6	5弱	7.5	-	5弱 (4.6)	4 (3.8)
2018/07/07 20時23分	千葉県東方沖	6.0	5弱	13.5	-	5弱 (4.6)	4 (4.0)
2018/09/06 03時07分	胆振地方中東部	6.7	7	7.3	10.4	5弱 (4.8)	4 (4.0)
2018/11/02 16時53分	紀伊水道	5.4	4	11.4	-	5弱 (4.5)	4 (3.7)
2019/01/03 18時10分	熊本県熊本地方	5.1	6弱	6.0	9.8	5強 (5.4)	4 (4.1)

※表中の「-」は従来法予測結果が5弱を超えていないことを示す。

※表中の「予測最大震度」は緊急地震速報（警報）の第1報で発表した予測震度の最大値を示す。

1. 4 遠地地震の検知による緊急地震速報（予報）発表事例

遠地地震の揺れを検知して IPF 法により緊急地震速報（予報）を発表した事例が2件（表 1.3）発生した。一例目は2018年8月19日9時19分（JST）にフィジー諸島で発生した M8.2 の地震に対し、房総半島南東沖に震源を推定し、三宅島に対して最大震度4を予測したものである。もう一例は2018年12月21日2時1分（JST）にロシア、コマンドル諸島で発生した M7.3 の地震に対し、オホーツク海南部に震源を推定し、最大震度3を予測したものである。

気象庁では、遠地で発生した地震により緊急地震速報が発表されることを避けるために、B- Δ 法の結果が1イベントに含まれるすべての観測点で400kmを超える場合には、IPF法の震源を情報発表処理に用いないようにしている。上記の二事例では、それぞれ1観測点でB- Δ 法により400km以下の震央距離を推定したことから、IPF法により緊急地震速報（予報）を発表するに至った。

過去の遠地地震におけるB- Δ 法の結果（図 1.11）によると、400km以下の震央距離を推定したものは6個のみであり、400kmという条件が精度よく遠地地震を識別している。

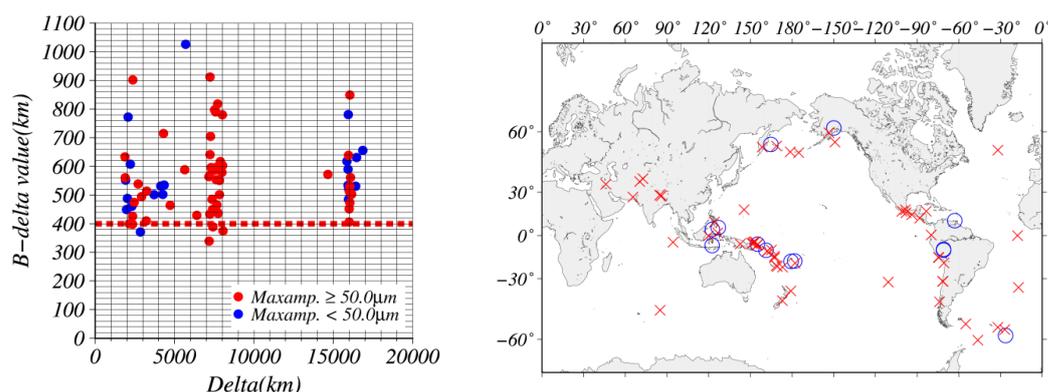


図 1.11. 遠地地震の震央距離とB- Δ 法による推定震央距離の関係(左図)と震央分布(右図)。データの期間は2013年8月1日～2018年12月31日である。左図の赤丸印は最大振幅が50 μ m以上、青丸印が50 μ m未満の観測点を示す。右図の丸印がB- Δ 法による震央距離を求めることが出来た遠地地震の震央、×印が求めることが出来なかったものである。

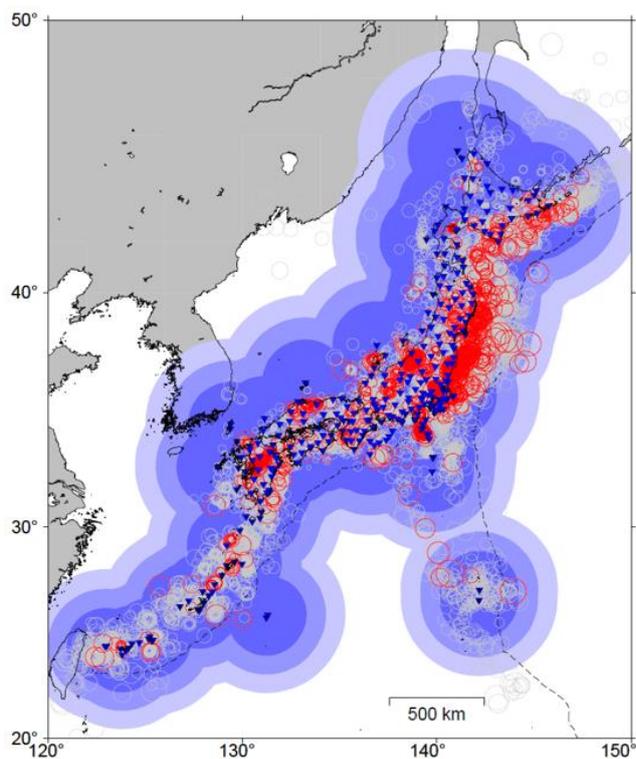
なお、近地地震で震度5弱以上を観測するような地震は、最近傍観測点から300km程度の範囲内に分布しているが、2011年東北地方太平洋沖地震の事例のように、B- Δ 法の推定震央距離最小値が350km程度（図 1.12）になる事例があることから、閾値を400kmよりも小さくすると、IPF法でこれらの情報が発表できなくなる可能性がある。

また、日本周辺では過去にも観測点から300km以上離れた場所を震央とする最大震度4以上の地震が発生しており（図 1.13）、遠地地震判定の距離を400kmとすることで近地地震の未発表を防いでいる。



観測点名	検測時刻	震央距離 (km)	方位角 (°)
石巻大瓜	14:48:40.23	434	108
大船渡猪川	14:48:41.91	---	137
一関舞川	14:48:45.03	344	111
宮古長沢	14:48:46.90	664	134
福島川内	14:48:47.58	643	57
仙台大倉	14:48:48.33	635	95
岩手大迫	14:48:49.55	562	131

図 1.12 東北地方太平洋沖地震における各観測点の B-Δ 法による推定震央距離。一関舞川が 344km、他は全て 400km 以上であった。



多機能型観測点からの距離
 ● : 200km以内
 ● : 300km以内
 ● : 400km以内
 震源
 ○ : 震度 1 以上を観測した地震
 ○ : 震度 4 以上を観測した地震

図 1.13 1997 年 10 月～2018 年 8 月に震度 1 以上を観測した地震の震央分布と多機能型観測点からの距離

2 緊急地震速報の迅速化と精度向上に向けた取り組み

2.1 海底地震計データの活用

この項の要点

- S-net 等海底地震計データの活用に向け、観測点側の単独観測点処理の実装と、中枢側のマグニチュード計算処理等のシステムへの実装を進めている。
- 2018年1月以降の S-net 周辺地域で発生した地震について確認を行い、想定どおり処理可能なことを確認した。

海底地震計データの緊急地震速報への更なる活用については、これまでに、S-net や DONET の海底地震計を緊急地震速報に有効活用するためのデータ検証を進め、緊急地震速報評価・改善検討会技術部会において報告してきた。その結果、特に堆積層による地震波の増幅や姿勢角変化に起因する過大振幅への対策が必要であることがわかった（図 2.1）。現在、海底地震計データの活用に向けて、単独観測点処理への新たな処理手法の実装と、中枢システムでの処理高度化のためのシステム改修を行っているところである。ここでは、実装する機能の詳細と、2018年1月以降に発生した事例での動作検証結果を報告する。

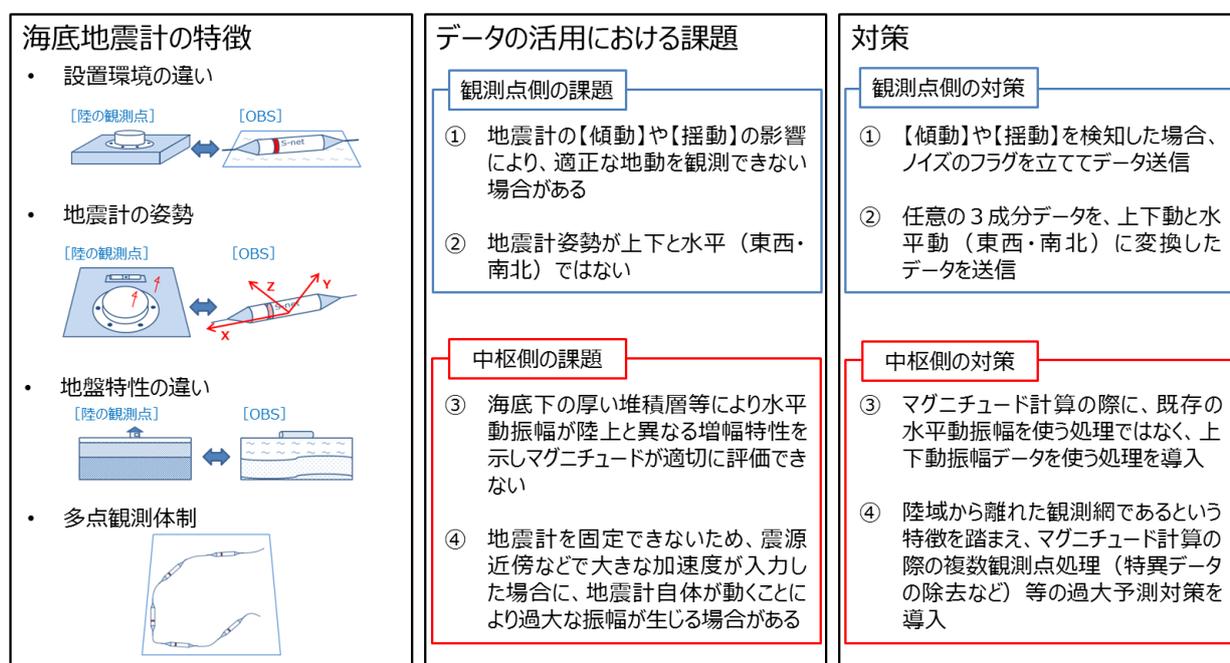


図 2.1 海底地震計の特徴および、データの活用における課題とその対策

（1） 単独観測点処理に実装する新たな処理手法（図2.1中、①および②の対策）

単独観測点処理とは、個々の観測点にて地震波を逐次処理し、自動検出処理により地震波の到達時刻を知るほか、P波初動部分から震央距離・震央方位の算出（B- Δ 法・主成分分析法）や品質管理処理、最大振幅やリアルタイム震度の時間推移の計算などを行い、処理した結果を直ちに中枢システムに送る処理である。この処理により得られたデータ（A電文）をもとに、IPF法による震源決定やマグニチュードの推定が実施される。S-netでは、これまでに単独観測点処理を実施してきた観測点とは異なり、地震計の3成分の方向が定まっていないことなどから、独自の処理が必要となる。そのため、現在、国立研究開発法人防災科学技術研究所（以下、防災科研）の協力のもと、S-netの陸上局に新規機能を追加した単独観測点処理機能の実装を進めているところである（表2.1）。

表2.1 S-netの単独観測点処理に実装される新規機能

対処すべき事象	新規追加機能
姿勢角・設置方位角の補正	パラメータによる3成分の回転補正 回転補正パラメータ値の異常検知機能
振幅の活用	上下動変位振幅の送信 傾動・揺動品質管理処理

単独観測点処理では、地震波検出処理や地震波の到来方向の推定、上下動/水平動振幅比による品質管理処理のために、地震計3成分をそれぞれ上下動・南北動・東西動として得ることが必要である。そこで、S-netでは、単独観測点処理の前処理として、姿勢角と設置方位角の回転補正を実施することとする。姿勢角は各成分に混入する重力加速度の分力を解析することで推定した値を、設置方位角は防災科研によって地震波解析より推定された値を、それぞれパラメータとして与えた上で回転補正を実施する。なお、姿勢角については、強震動の入力や経年により変化する場合が想定されることから、与えたパラメータが現在地震計で記録されている重力加速度の方向と整合するかどうかを逐次確認し、乖離がある場合には中枢側で検知できるような品質管理処理を実施する。

また、海底地震計の強震時の姿勢角変化は、過大振幅の原因となることから対策が必要である。後述のとおり中枢処理側でもマグニチュード計算の高度化による対策を実施するが、単独観測点処理においても、地震計の地震時の「傾動」や「揺動」などの姿勢角変化を検出することが可能なように、上下動加速度波形の単純積分波形を用いた品質管理処理（図2.2）を導入する。

手法の検証のため、2018年1月以降にS-net近傍で発生したM5.0以上の地震について単独観測点処理をオフラインで実施し、傾動・揺動検出処理が働いた事例を調査したところ、全57地震のうち6地震19事例が該当した（表2.2）。いずれも、陸域で

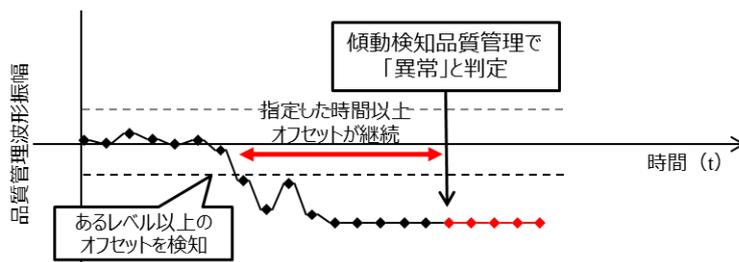


図 2.2 傾動・揺動検知品質管理処理の模式図

上下動加速度波形を単純積分した品質管理波形が一定時間ゼロクロスしないことより、オフセット変化を抽出し異常と判定する。

表 2.2 傾動・揺動検知品質管理処理によって検知された事例

地震	観測点（（ ）内は入力加速度）
2018年1月24日 青森県東方沖 M6.3 最大震度4（警報発表）	<ul style="list-style-type: none"> • N. S4N04 (351.3gal) • N. S4N05 (464.0gal) • N. S4N06 (381.6gal) • N. S4N07 (165.5gal) • N. S4N11 (236.6gal) • N. S4N12 (311.9gal) • N. S4N13 (517.9gal) • N. S5N17 (244.7gal) • N. S5N18 (206.0gal)
2018年5月18日 釧路沖 M5.8 最大震度4	<ul style="list-style-type: none"> • N. S5N01 (231.0gal) • N. S5N02 (276.3gal) • N. S5N03 (119.5gal) • N. S5N04 (188.0gal)
2018年9月5日 茨城県沖 M5.7 最大震度4	<ul style="list-style-type: none"> • N. S2N15 (45.7gal)
2018年10月26日 宮城県沖 M5.7 最大震度4（警報発表）	<ul style="list-style-type: none"> • N. S2N05 (201.5gal) • N. S3N16 (130.7gal)
2018年11月28日 青森県東方沖 M5.7 最大震度3	<ul style="list-style-type: none"> • N. S5N17 (327.9gal) • N. S5N18 (282.3gal)
2019年1月26日 岩手県沖 M5.6 最大震度4	<ul style="list-style-type: none"> • N. S4N13 (224.5gal)

震度4程度を観測するM5後半以上の規模の地震であった。2018年1月24日の青森県東方沖の地震（M6.3、最大震度4、警報を発表）で抽出されたN. S4N13観測点の例を図2.3に示す。傾動・揺動品質管理処理は、波形のオフセット継続時間を評価する関係上、傾動・揺動が発生する契機となる加速度最大振幅の発現から検知までにしばらくの時間を要するが、後述するマグニチュード統計処理において地点Mの上位観測点のデータを除外する処理に加え、最大加速度が500galなど一定以上を超えた観測データではその時点で利用しないようにするなど、他の手法と合わせることで効果的なデータ除外が可能であると考えられる。

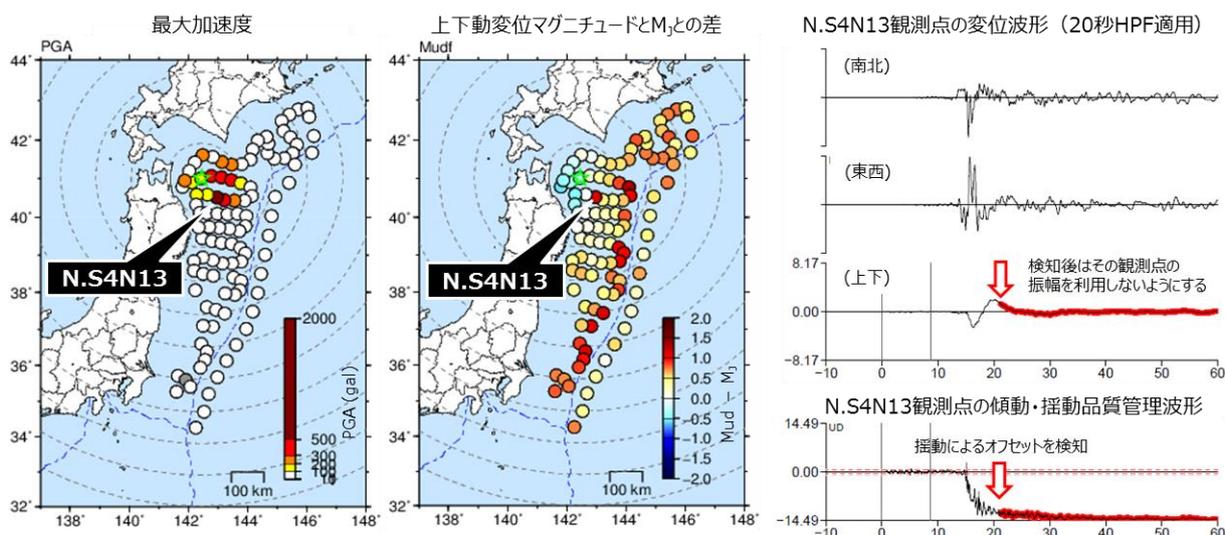


図 2.3 2018 年 1 月 24 日の青森県東方沖の地震 (M6.3、最大震度 4) における、傾動・揺動検知品質管理の処理事例。波形は、上下動変位 M の過大評価傾向が最も顕著であった N.S4N13 観測点における変位波形と品質管理波形を示す。波形を赤色で表示した時点以降で異常と判断し、当該観測点のデータを M 計算へ利用しないようにする。波形の図中縦線は自動検出した P 波位置とそこから理論 S-P 時間を示す。

(2) 中枢処理に実装する新たな処理手法 (図 2.1 中、③および④の対策)

海底地震計では、震源の近傍であるほど振幅値の異常が発生しやすいことがわかってきた。海底地震計においては、陸が強い揺れを観測するまでの間に十分な時間的猶予があることから、第 8 回技術部会において提案したとおり、これまでの 1 点のみから発表を許容する M 推定手法ではなく、複数のデータを待って統計処理を開始する手法を導入する (図 2.4)。具体的には、以下のとおり陸のデータと海底地震計のデータを別々にカウントして M 計算に用いて、従来どおりいずれか 1 地点でも $100\mu\text{m}$ 以上の振幅が得られた場合にその M を情報発表に用いることとする。

- 海底地震計は M 計算に有効な変位振幅 ($50\mu\text{m}$ 以上) が 3 点集まるまで M 計算を行わない。
- 海底地震計では地点 M の上位 2 点のデータは異常値である可能性を考慮して M 統計処理 (中央値算出) からデータを除外する。
- 海底地震計と陸の観測点それぞれ 5 点までを M 計算に参加可能とする。
- 海底地震計の振幅が参加する前に既に陸の観測点が 5 点集まっている場合には、その後に海底地震計での地点 M を採用しない。

(d) の条件は、陸の観測点で情報発表が既に安定している状況において、新たに遅れて入ってきた海底地震計のデータで情報が変化することを避けるためである。ただし、逆に陸のデータが遅れて入ってくる場合には、海底地震計のデータが万が一何らかの理由で M を過大推定したり、反対に M の成長に追従できなかつたりする場合を想定し、陸の観測点のデータを取り込むことができるものとする。

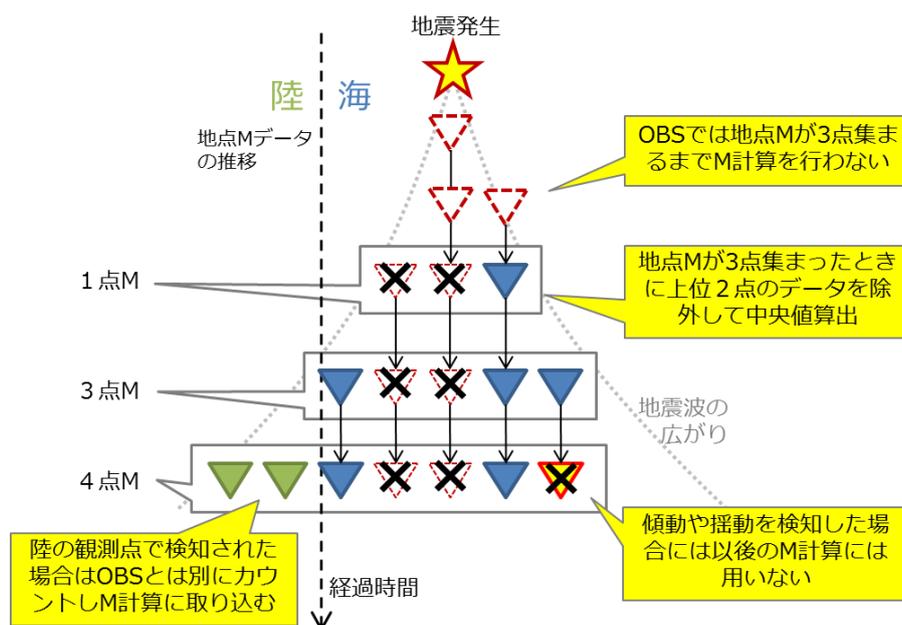


図 2.4 海底地震計の振幅をM計算に利用する際のロジック概要図

また、陸上の観測点のマグニチュード計算については、全相M式(清本・他(2010))、

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

に加え、P波部分においては、理論S-P時間の0.7倍までの時間までの振幅を用いてP波M式(明田川・他(2010))、

$$0.72 \times M = \log A + 1.2 \times \log R + 5.0 \times 10^{-4} \times R - 5.0 \times 10^{-3} \times D + 0.46$$

によって地点Mを評価しているが、S-netなどの海底地震計については、P波M式を用いずに、上下動変位M(林元・他(投稿中))

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

を全相に適用する予定である。

S-netでのP波M式の利用有無での推定結果の違いを検証するため、現行のP波M式に上下動変位振幅を用いてM推定を行った場合のM統計処理の違いの事例を図2.5に示す。2018年1月24日の青森県東方沖の地震の事例では、P波Mの利用によりMのピークがM6.1→M6.3、最大予測震度のピークが4.2→4.5と変化して、Mがやや大きくなったことで警報発表基準に至る。また2018年8月8日の三陸沖の地震においては、P波部分の振幅でやや過小評価となる時間帯での過小評価を軽減して推定できる可能性がある。ただし、2018年12月24日の関東東方沖の地震のように、S-netを活用した場合も震源の精度が安定せず震源が遠方に推定される場合などは、S波振幅にP波M式を利用することにより初期のMが過大評価される場合がある。

海底地震計で利用する上下動変位振幅では、適用した事例で確認されたように、P波部分とS波部分の振幅比が水平動ほど大きくならないと考えられること、震源近傍で観測できた場合には直ちにS波を観測することができること、そして、震源推定誤

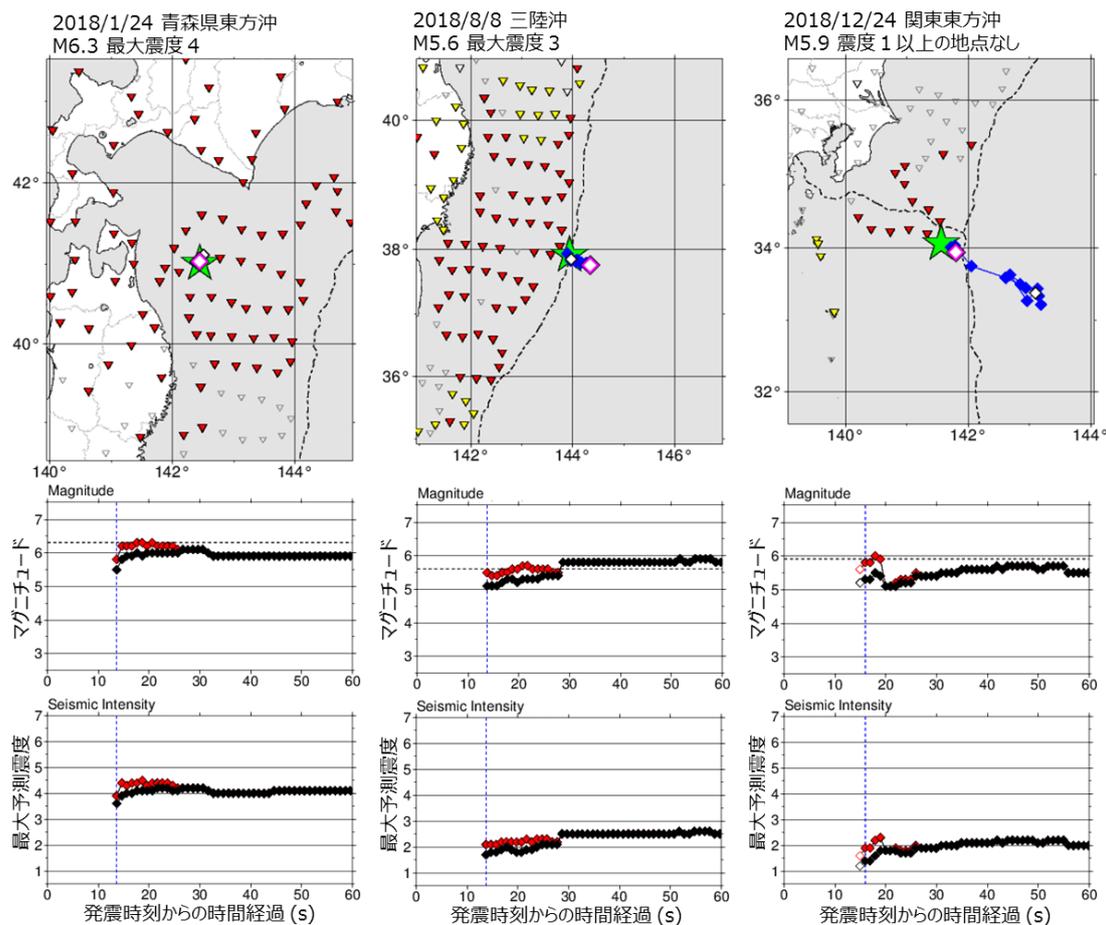


図 2.5 S-net のM推定に全相Mのみ利用した場合と、P波Mを利用した場合とのマグニチュードと最大予測震度の違い。上段が震源位置と利用した観測点を示す。緑の星印が気象庁一元化震源の震央位置を示す。S-net データを利用した IPF 法の震源候補を青のひし形で示しており、最初の震源位置を黒のひし形、最後の震源位置を紫のひし形で示す。震源の詳細については 2. 1. (3) に示す。中段は推定したマグニチュード、下段は最大予測震度の時間経過を示す。グラフ中の黒は全相に上下動変位M式のみを利用した場合、赤は P 波M適用区間においては現行 P 波M式に S-net の上下動振幅を利用した場合を示しており、両者に違いが生じている箇所が、P 波M式による推定Mの違いが生じた箇所となる。縦破線は情報発表可能となったタイミングを示し、マグニチュードの横破線は、一元化震源のMを示す。

差が大きい時点において S 波振幅を誤って P 波Mで過大評価することを避けたいことから、S-net では P 波M式を用いず全相に上下動M式のみを適用することとしたい。

(3) S-net 活用による IPF 法の迅速化・精度向上

(1) の観測点側での対策、(2) の中枢処理側での対策を導入したうえで、S-net を活用することにより発表する情報がどのように変化するか、IPF 法による震源決定と、上下動マグニチュード式によるM推定およびマグニチュード統計処理手法を適用した際の震源・Mと予測震度の推移を示す。なお、ここでは S1～S5 の観測点のデータを活用した場合の結果を示している。S6 の観測点については、海溝軸の外側に設置

されていることにより周辺の S1～S5 の観測点に比べて走時が早いことなどから、データの蓄積を待って更なる検証を行ったのちに活用を検討することとしたい。

2018年1月24日の青森県東方沖の地震（M6.3、最大震度4）について、S-netの活用有無によるIPF法の震源および、マグニチュードと最大予測震度の推移を図2.6に示す。この地震では、S-netの活用により緊急地震速報（予報）の発表が6秒早くなる。また、陸の観測点が囲い込むような配置であり震央位置の精度はさほど変わらないが、深さの精度はより安定している。この地震では、表2.2のとおり、震源近傍の多くの観測点で100gal以上の揺れを観測し、傾動・揺動検出管処理によって検出される観測点が9地点存在した。品質管理処理によりM計算に除外される観測点が生じることになるが、M計算は安定していることがわかる。なお、この地震では陸の観測点のみでは予測震度が5弱となり警報を発表したが、S-netを活用した場合には最大震度4予測となり警報発表には至らない。

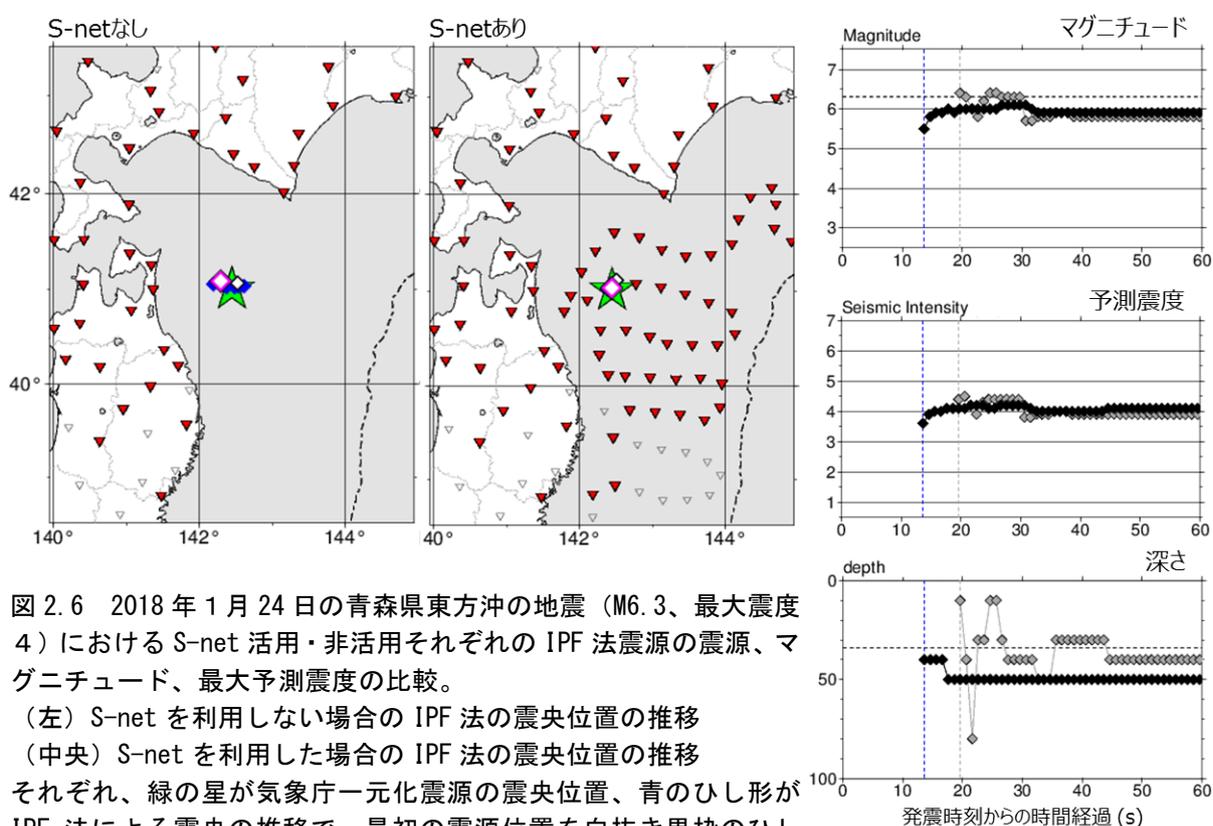


図 2.6 2018年1月24日の青森県東方沖の地震（M6.3、最大震度4）におけるS-net活用・非活用それぞれのIPF法震源の震源、マグニチュード、最大予測震度の比較。

（左）S-netを利用しない場合のIPF法の震央位置の推移

（中央）S-netを利用した場合のIPF法の震央位置の推移

それぞれ、緑の星が気象庁一元化震源の震央位置、青のひし形がIPF法による震央の推移で、最初の震源位置を白抜き黒枠のひし形、最後の震源位置を白抜き紫枠のひし形で示す。逆三角は観測点分布で、太線のシンボルがトリガ検知した観測点、赤色は100 μ m以上、黄色は50 μ m以上の振幅を観測した観測点を示す。

（右）S-netを利用した場合（黒）と利用しない場合（灰色）でのマグニチュード、最大予測震度、深さの時間変化。

縦破線は情報発表可能となったタイミングを示し、青がS-net利用、灰色がS-netを利用しない場合を示す。マグニチュードと深さの横破線は、それぞれ一元化震源のMと深さを示す。

2018年10月4日の千葉県東方沖の地震（M4.7、最大震度4、図2.7）では、1. 2.（4）に示したように初期の震源が沖合に推定され、またS波振幅をP波M式で評価したことによって、震度4以上の予測範囲をやや過大に予測した警報を発表した。S-netを活用した場合には、IPF法による震源が初期の情報から安定して推定されており、最大予測震度も震度4と適切に推定できていることがわかる。図2.8は、1点目の陸の観測点のデータが得られた段階でのIPF法の尤度分布である。千葉県東方沖の地震や房総半島南東沖の地震などは、観測点配置により陸の観測点のみでは初期の震源推定の精度が確保しづらい地域であるが、S-netの活用により震源の精度向上が期待できる。

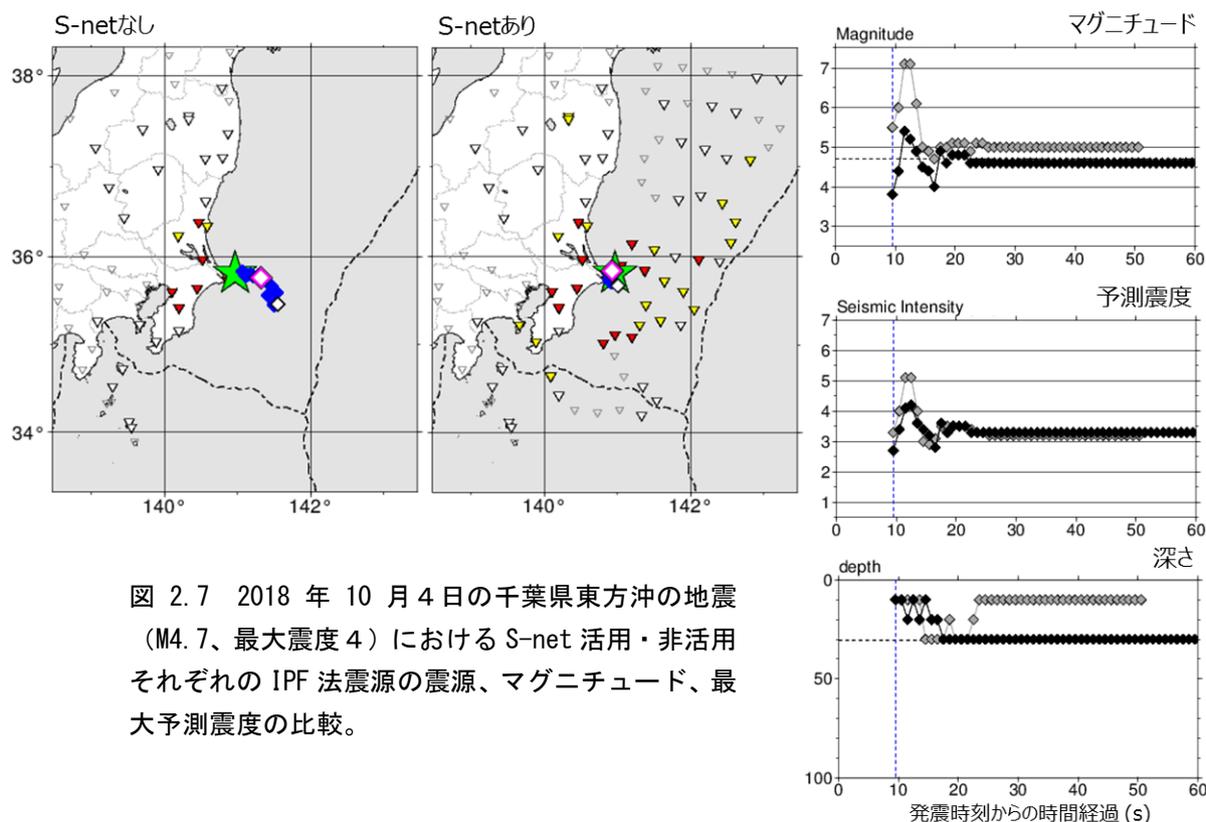


図 2.7 2018年10月4日の千葉県東方沖の地震（M4.7、最大震度4）におけるS-net活用・非活用それぞれのIPF法震源の震源、マグニチュード、最大予測震度の比較。

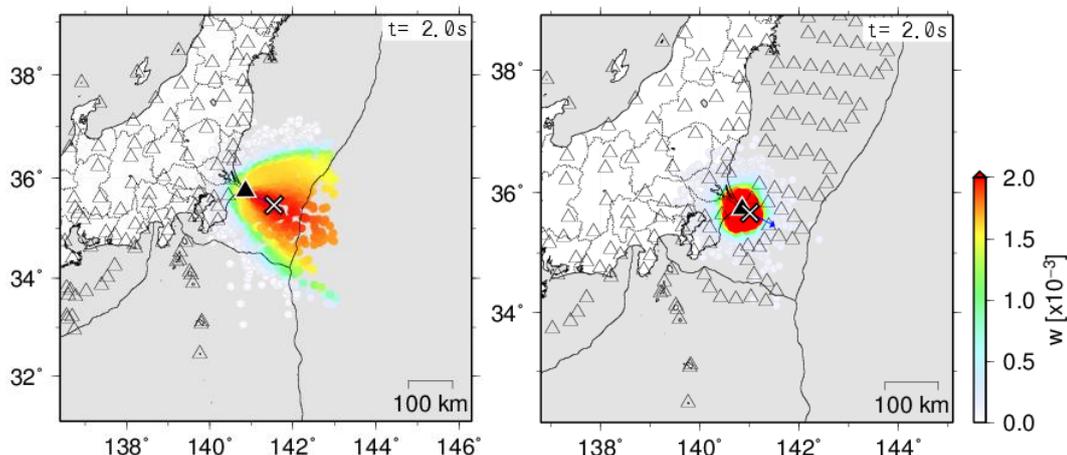


図 2.8 2018年10月4日の千葉県東方沖の地震（M4.7、最大震度4）におけるS-netデータ非活用（左）、S-netデータ活用（右）それぞれの状態でのIPF法の震源決定初期の尤度分布の比較

海溝軸付近で発生した、2018年8月8日の地震（M5.6、最大震度3、図2.9）は、S-netの活用により時間的猶予が最も改善される事例であり、陸の観測点のみで震源とMが推定可能となるよりも30秒ほど早く情報が発表可能となる。初期の情報発表がS-netのデータのみで発表されることになるが、震源とMは適切に推定できている。なお、この事例では陸上の観測点のみでは変位振幅が100 μ mを超えるタイミングが遅く、Mが情報発表対象とならなかったことから、緊急地震速報は着未着法およびHYPOON（波形データからP相、S相、最大振幅の自動検出を行う旧来の震源計算手法）による震源とMで情報発表された。

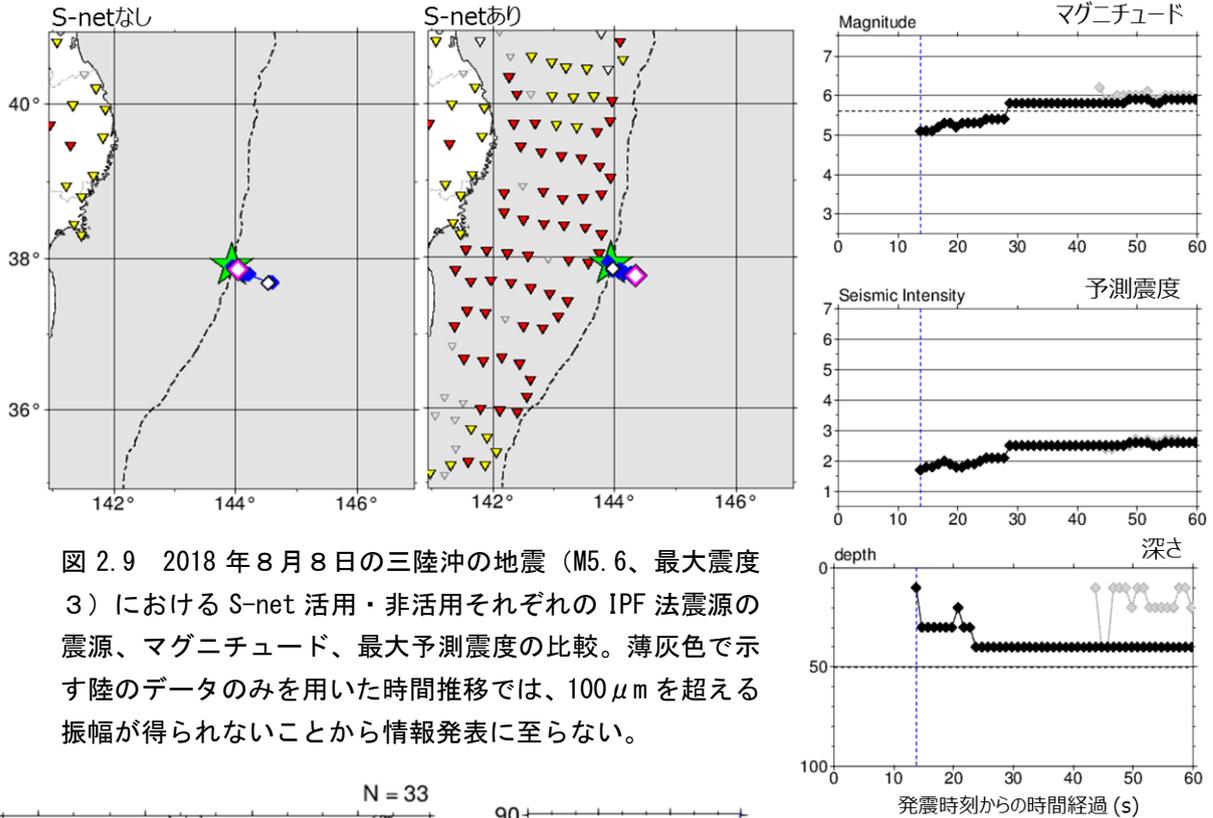


図 2.9 2018年8月8日の三陸沖の地震（M5.6、最大震度3）におけるS-net活用・非活用それぞれのIPF法震源の震源、マグニチュード、最大予測震度の比較。薄灰色で示す陸のデータのみを用いた時間推移では、100 μ mを超える振幅が得られないことから情報発表に至らない。

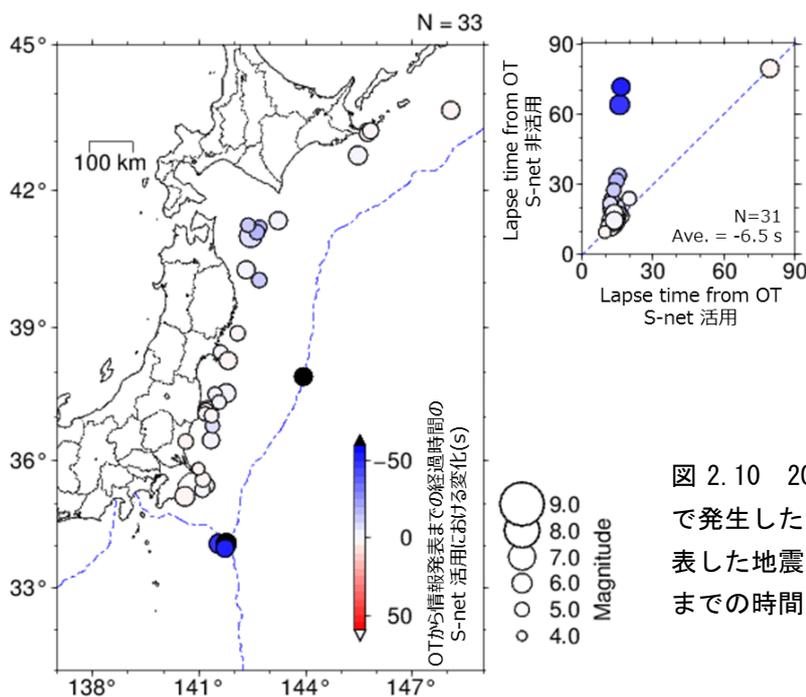


図 2.10 2018年1月以降にS-net周辺海域で発生したM5.0以上の地震および警報を発表した地震（33事例）における、第1報発表までの時間のS-netデータ活用による変化。

図 2.10 は、2018 年 1 月以降に S-net 周辺海域で発生した 33 地震において、S-net データの活用により第 1 報発表までの時間がどの程度改善したか、活用・非活用での第 1 報発表までの経過時間の差を示したものである。三重会合点付近で大きく改善しているのをはじめ、青森県東方沖や岩手県沖でも 10 秒前後の改善がみられた。33 地震のうち、S-net 活用・非活用の両方で情報発表対象となる 31 地震の、S-net 活用による第 1 報の OT からの時間の差の平均値は-6.5 秒であった。

図 2.11 に、今回検証した OBS 活用の条件において、S-net を活用した場合に、警報発表基準を満たす条件となるまでの時間がどの程度迅速になるか、計算した理論値を示す。OBS の振幅のみでは 3 点目の振幅を待つことになるが、S-net の観測網内であれば概ね理論上は 5 秒程度の迅速化が見込まれることがわかる。

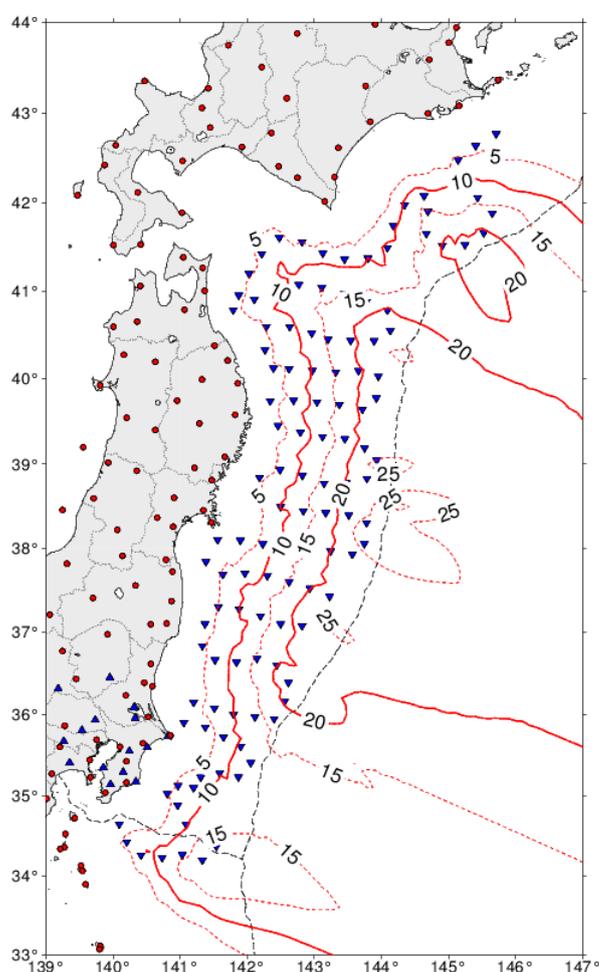


図 2.11 2. 1. (2) に示す条件で S-net データ (S1~S5) を活用した場合の理論上の警報発表可能タイミングの迅速化を示すコンターマップ。S-net の観測網内部では概ね 5 秒程度、海溝軸付近では最大で 28 秒程度、S-net の活用により警報発表が早まる可能性がある。

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からの提供を受けたものである。

2. 2 震度の過大予測対策と地震識別処理の改善について

この項の要点

- 緊急地震速報の震度の過大予測の対策について、M計算で理論走時に整合しない振幅を使用しないことや、震源更新条件を見直す改修を行い、過大予測を回避できることを確認した。

(1) 2018年1月5日の発表状況について

2018年1月5日11時02分頃に茨城県沖を震源とする地震（M4.5、茨城県で最大震度3）に対して緊急地震速報を発表した。この緊急地震速報において震度を過大に予測し、関東地方や福島県に警報を発表した。過大予測の原因は、茨城県沖の地震の約3秒前に約400km離れた富山県西部で発生した別の地震（M4.0、石川県で最大震度3.）による振幅（富山県周辺の2観測点）を用いて、茨城県沖の地震のMを過大（M6.4）に推定したためである。

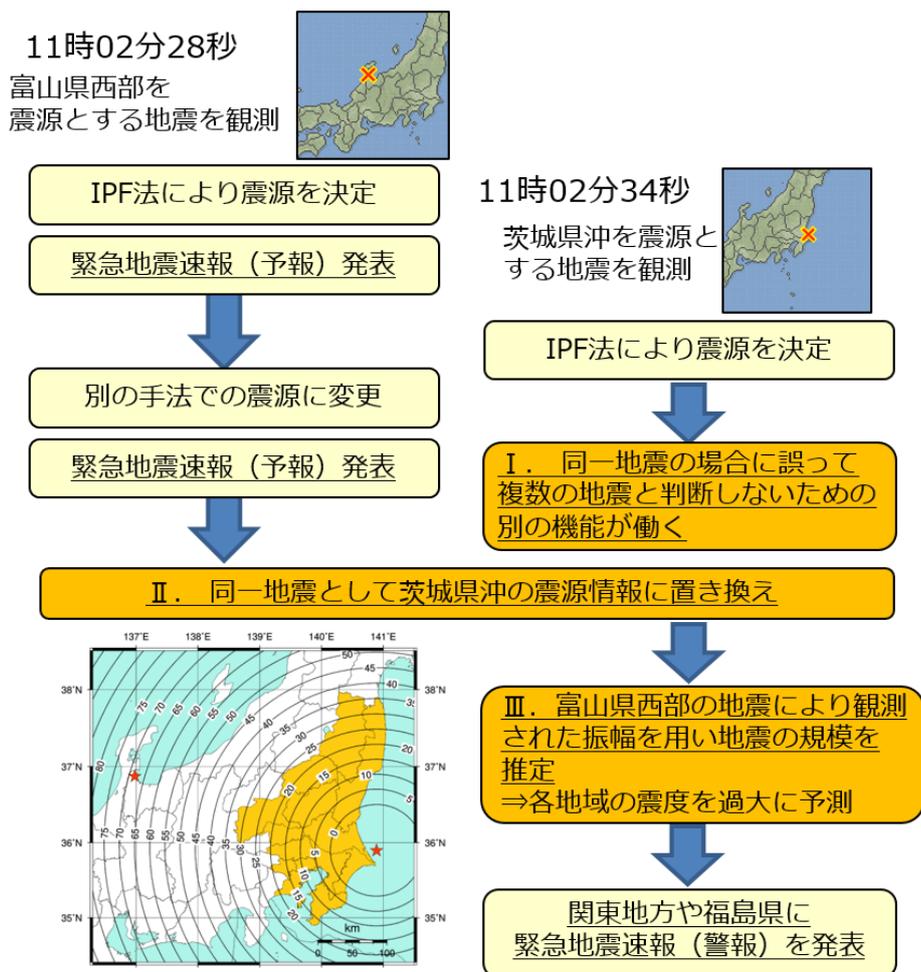


図 2.12 2018年1月5日11時02分に発表した緊急地震速報における主な処理フロー

（2）今年度に行ったシステム改修

昨年度の技術部会では、震度過大予測はマグニチュード（M）計算における観測点選別処理、地震同一判定処理、イベント ID 発番処理の3つの処理に起因するとして気象庁から説明を行い、議論して頂いた。その議論を踏まえ、今年度に緊急地震速報に関する以下の3点のシステム改修を行った。

昨年1月5日の地震波形、A電文データを用いた再現試験（以下、再現試験）では、茨城県沖の震源決定後に緊急地震速報（警報）を発表せず、富山県西部の震源で予報の発表を継続し、震度過大予測が起こらないことが確認できた（表2.3）。これらの改修を2019年3月中にEPOSに適用予定である。

表 2.3 今回の改修を適用後の再現試験の結果

改修の結果、茨城県沖の震源には代表震源が置き換わらず、茨城県沖の地震に対しては発表しない。富山県西部の地震で予報発表を継続し、震度の過大予測は発生しない。

処理時刻	緯度	経度	深さ	M	震央地名	処理状況
11:02:32.46	37.0	136.8	10	3.9	石川県能登地方	予報第1報(最大予測震度なし)
11:02:32.80	36.9	137.1	10	4.4	富山湾	予報第2報(最大予測震度3)
11:02:33.26	36.9	137.0	10	4.3	富山県西部	予報第3報(最大予測震度3)
11:02:37.11	36.9	137.0	10	4.3	富山県西部	予報第4報(最大予測震度3)
11:02:43.78	-	-	-	4.1	-	着未着法震源候補(茨城県沖)を受信し、同一地震判定
11:02:43.79	-	-	-	4.1	-	着未着法震源候補(茨城県沖)への代表震源更新を抑止
11:02:57.10	36.9	137.0	20	4.1	富山県西部	予報第5報(最大予測震度3)
11:03:07.67	36.9	137.0	20	4.1	富山県西部	予報第6報(最大予測震度3)

①M計算における観測点選別処理

緊急地震速報においては、M未計算による未発表（見逃し）等を防ぐために、同一地震起源の可能性のある振幅データは可能な限り計算に利用する処理としている。昨年1月5日の事例では、茨城県沖の震源に対して富山県西部の地震の振幅を取り込み、M計算を行い、震度の過大予測をするに至った。M計算の際に取り込んだ富山県周辺の2観測点の振幅の出現時刻は、茨城県沖の震源から推定した同観測点のP波理論到達時刻の30秒以上前であり、地震学的に因果律を満たさない。

そこで今回、M計算の際に、震源からM計算対象の観測点に対してP波理論到達時刻（以下、P時刻）を計算し、振幅の出現時刻がP時刻以前であった場合に、当該の振幅をM計算に利用しないという改修を行った（図2.13）。この改修を実際にEPOSに実装するにあたっては、震源決定誤差の影響を考慮し、P時刻の前にマージン時間を設定し、P時刻からマージン時間を減算したものを閾値時刻とした。振幅の出現時刻が閾値時刻以前であった場合には、当該振幅をM計算に利用しないこととした。

本改修を適用して再現試験を行った結果、茨城県沖の地震に対してM計算に利用可

能な振幅データがなくなり、茨城県沖の震源を用いて緊急地震速報を発表するに至らず、震度の過大予測は起こらない。

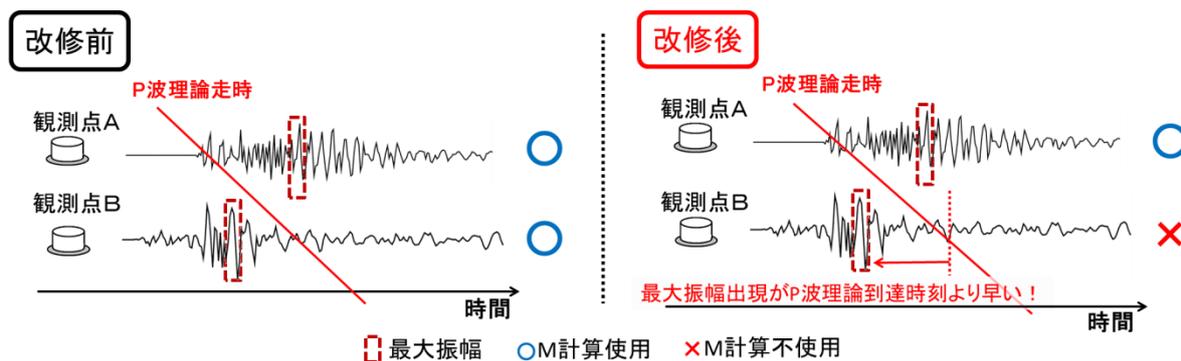


図 2.13 M計算について行った改修の模式図

地震波形の右側に○印のついた地震波形はM計算に使用し、×印のものは使用しない。

②地震同一判定処理

昨年1月5日の事例では、第2報で着未着法による精度の高い震源を代表震源として情報発表していたにも関わらず、第4報で代表震源が着未着法による茨城県沖の地震の震源に置き換えられたことにより、過大な震度予測をするに至った。ここでの問題点は、一旦代表震源が精度の高い震源となっていたにも関わらず、後続の処理において代表震源が別地震の震源に置き換えられたことである。

そこで今回、一旦精度良く決まった代表震源は、後続の同じ震源決定手法による震源で置き換ええないという改修を行った（図 2.14）。ただし、地震の規模の過小評価、震度の過小予測を避けるために、後続の震源のMが代表震源のMを越える場合には、従前通り代表震源の更新を行う。

本改修を適用して再現試験を行うと、第4報での富山県西部から茨城県沖への代表震源の置き換えは起こらない。

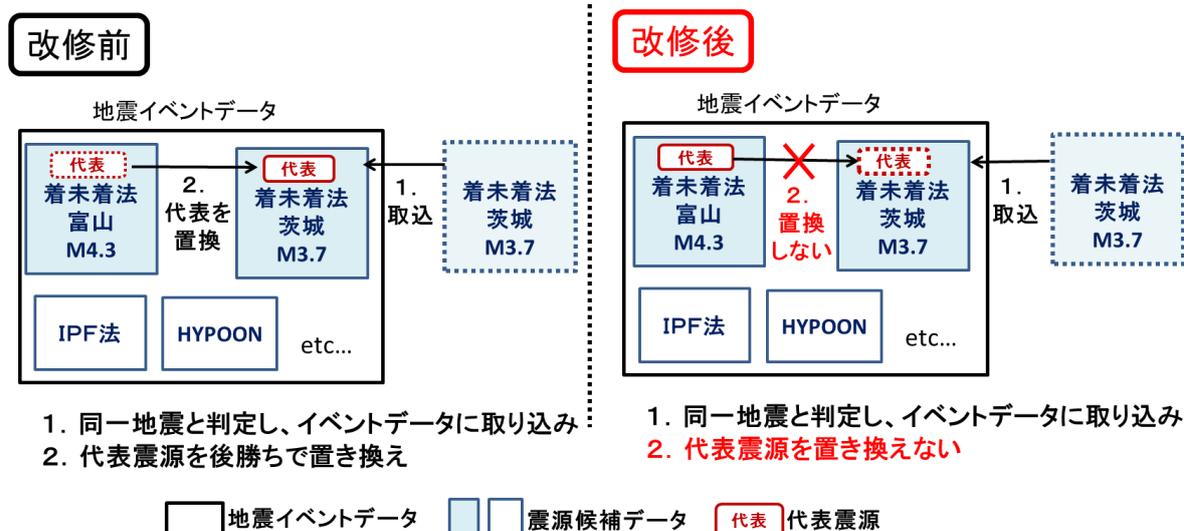


図 2.14 同一地震判定について行った改修の模式図

③イベントID発番処理

上記①または②の手法により、昨年1月5日に発生した震度の過大予測を防ぐことはできるが、富山および茨城で発生した2つの地震を同一地震としてしまう点は改善できない。これについては昨年の技術部会で指摘をいただいたように、現行の処理ロジックでは震源決定手法毎の高性能の地震識別能力を活かしきれていない問題がある。

そこで可能な限り震源決定手法毎の地震識別能力を活かすために、同じ震源決定手法の震源を1つずつ個別に分離する機能の実装を行った。本改修により、IPF法が複数の地震を正確に識別した際には、それらを同一地震と判定せずに別の地震として処理する（図2.15）。

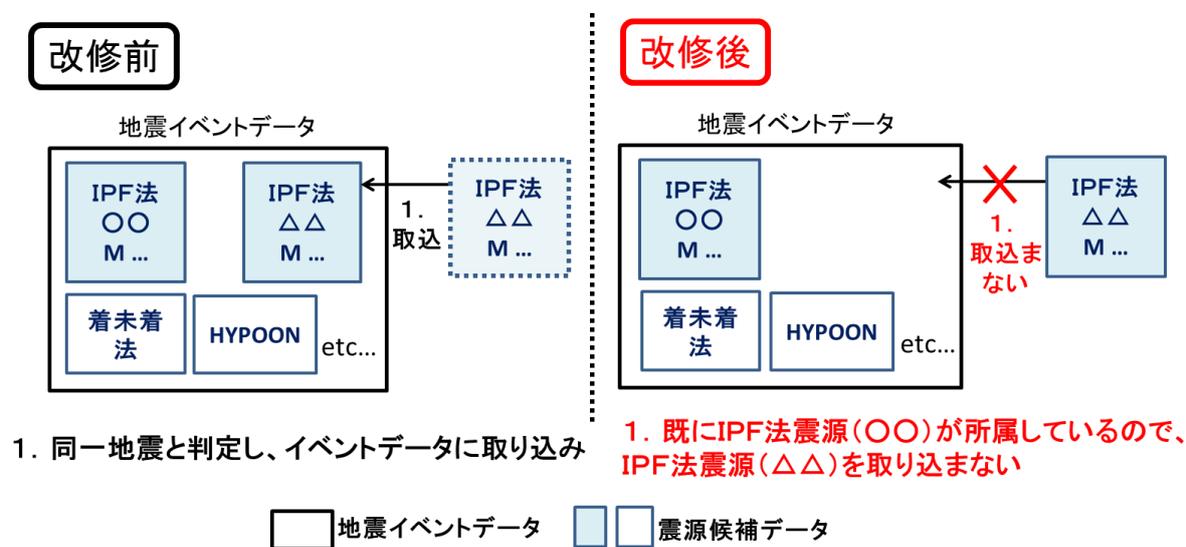


図 2.15 イベントID発番処理について行った改修の模式図

(3) 今後の対策

現在のシステムでは3つの震源推定手法（IPF法・着未着法・HYPOON）を使っていることから、緊急地震速報を発表・更新する際に、各手法により推定された震源を改めて同一の地震か否か判定する必要がある。平成30年1月5日に発表した震度の過大予測も、この同一判定が問題であった。

このため、震源推定手法の整理・統合や、高密度な観測データの活用を検討する。整理・統合することにより、問題となった同一判定が不要となる。また、そのためには震源推定手法のさらなる高度化が必要である。現在IPF法では気象庁観測点と関係機関の一部のデータを利用しているが、より高密度な観測データを活用して迅速性と精度向上を図ることを検討する。