

参考資料 1

緊急地震速報評価・改善検討会 利活用検討作業部会 (第 1 回)

(議題 1)

緊急地震速報の技術的改善について (報告)

1 緊急地震速報の15年の歩み

緊急地震速報は、地震発生後に震源付近での観測データをもとに、震源の場所を速やかに決定するとともに時々刻々地震の規模を速やかに推定し、各地の揺れの強さや到達時刻を予測して、強い揺れが到達することを事前にお知らせする情報である。現地観測点における単独観測点処理や中枢処理としての震源推定手法や震度予測手法など、様々な技術の組み合わせによって、地震動の予測結果を即時に情報提供することが可能となった（中村（2007）、東田・他（2010））。気象庁では2006年8月1日に緊急地震速報の先行的運用を、また2007年10月1日に一般提供を開始した。以降、「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」（以後、東北地方太平洋沖地震）をはじめとして、多くの地震において緊急地震速報は発表され、日本においてはいわばインフラストラクチャーとしての位置づけが得られつつあると言える（東田（2015））。今年で緊急地震速報の一般提供から15年が経過した。これを機に、最近の緊急地震速報の技術的改善について振り返ってみたい。まず、2007年10月1日から2023年1月末まで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）：計258回
- 緊急地震速報（予報）：計16,158回

これら、これまでに発表した緊急地震速報について、予報・警報の発表回数と予測精度を示すスコアの平均値を年度ごとに図1.1に示す。また、スコアの定義については図1.2に示す。

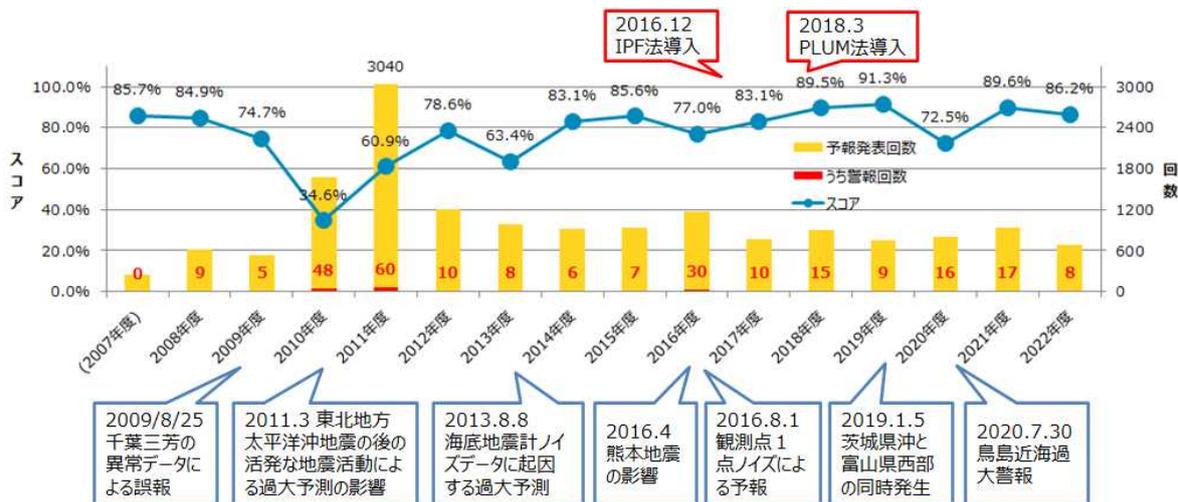


図1.1 緊急地震速報の予報・警報の発表回数およびスコアの推移

赤数字は警報回数、黄色のヒストグラムは予報回数を示す。青折れ線で示すスコアは、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。赤の吹き出しはIPF法とPLUM法の運用開始時期を、青の吹き出しはスコアを悪化させる要因となった原因を示す。

(2007年度は10月より、2022年度は2023年1月まで)

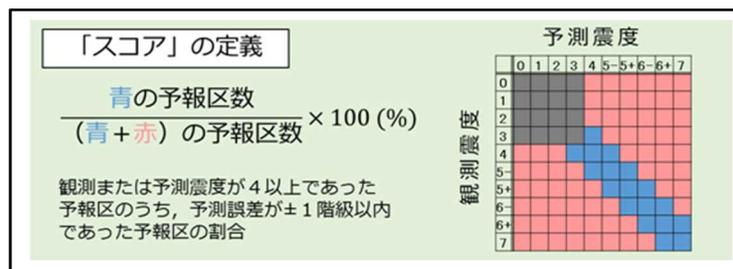


図 1.2 スコアの計算方法

図 1.1 からは緊急地震速報の一般提供開始以来、概ね 8 割前後の予測精度を保って緊急地震速報が発表されてきたことが分かる。しかし、時折、地動ノイズや機器故障、処理の不完全さから緊急地震速報の精度を低下させるような事例も経験してきた。

特に、東北地方太平洋沖地震ではいくつかの本質的な技術的課題に直面した。例えば、地震時に東北地方に対しては迅速に警報を発表できたが、当時の処理手法では巨大地震時の震源域の広がりに対応できず、関東地方の強い揺れを精度良く予測できなかった。また、その後の活発な地震活動では、地震の分離が適切にできずにひとつの地震として処理したことなどを理由として過大予測となった事例が多く、スコアが大きく低下した（気象庁（2012）、干場・尾崎（2012））。

表 1.1 に、東北地方太平洋沖地震以降に取り組んだ緊急地震速報の技術的改善とその運用の状況を示す。技術的な改善の内容は、（1）情報発表の迅速化、（2）巨大地震への対応、（3）震源推定精度の向上、（4）様々な指標での情報提供、と大きく 4 つに分類することができる。本報告では、これら近年の技術的改善を振り返るとともに、2023 年 2 月 1 日に開始した長周期地震動予測について紹介する。さらに、2023 年内目処で運用開始を目指す緊急地震速報の震源決定手法の IPF 法への一本化に向けた検討結果について報告する。

表 1.1 近年の緊急地震速報の技術的改善

運用開始日	内容
2011 年 8 月 10 日	複数の地震を分離するためのソフトウェア改修
2015 年 3 月 31 日	気象庁地震計 50 地点、南関東 KiK-net15 地点等の活用開始
2016 年 12 月 14 日	IPF 法の運用開始
2018 年 3 月 22 日	PLUM 法の運用開始
2019 年 6 月 27 日	海底地震計（S-net、DONET）データの活用開始
2023 年 2 月 1 日	長周期地震動階級の予測情報の追加
2023 年内（予定）	震源決定手法の IPF 法への一本化

2 情報発表の迅速化

緊急地震速報の発表を迅速化するためには、処理そのものの高速化と地震計をできるだけ震源の近くに置くことによる地震検知までの時間の短縮という2つのアプローチが考えられる。前者については緊急地震速報開発当初から取り組まれてきたことであるが、処理そのものの迅速化はかなり限界まで行われている。一方、後者、しかも海域で発生する地震を迅速にとらえることは緊急地震速報の迅速化には特に有効である。気象庁では海底地震計を緊急地震速報に活用するための技術開発を進め、2019年6月より地震・津波観測監視システム（以下、DONETと呼ぶ）、および日本海溝海底地震津波観測網（以下、S-netと呼ぶ）の海底地震計を活用開始した。2020年3月には、S-net観測点のうち日本海溝より東側のS6を追加して活用開始した。

図2.1に2019年6月以降、海底地震計を活用することで緊急地震速報（予報）第1報発表の迅速化の効果が確認された155個の事例の震央分布図を示す。日本海溝沿いでは予報第1報が海底地震計を活用しない場合と比較して20秒以上迅速化された事例が確認できた。これらにはS-netのみで緊急地震速報を発表した34個の事例も含まれている。

図2.2は、S-netの設置海域である日本海溝沿いで発生した地震のうち、緊急地震速報（予報）を発表し、かつ震度1以上を観測した事例について、地震発生から予報第1報発表までにかかった時間の平均値を年度毎に示したグラフである。2010年度から2014年度までの平均値は24.4秒であったこの値は、事例依存は生じるもののS-netを活用開始した2019年6月以降で小さくなり、2022年度は20.5秒と改善が確認できる。さらに、S-netでのマグニチュード（以後、M）推定が可能になることで迅速化の効果が得られやすいM5.0以上の地震に限って平均値を計算すると約15秒程度となり、S-net活用による効果をさらに明瞭に確認することができる。

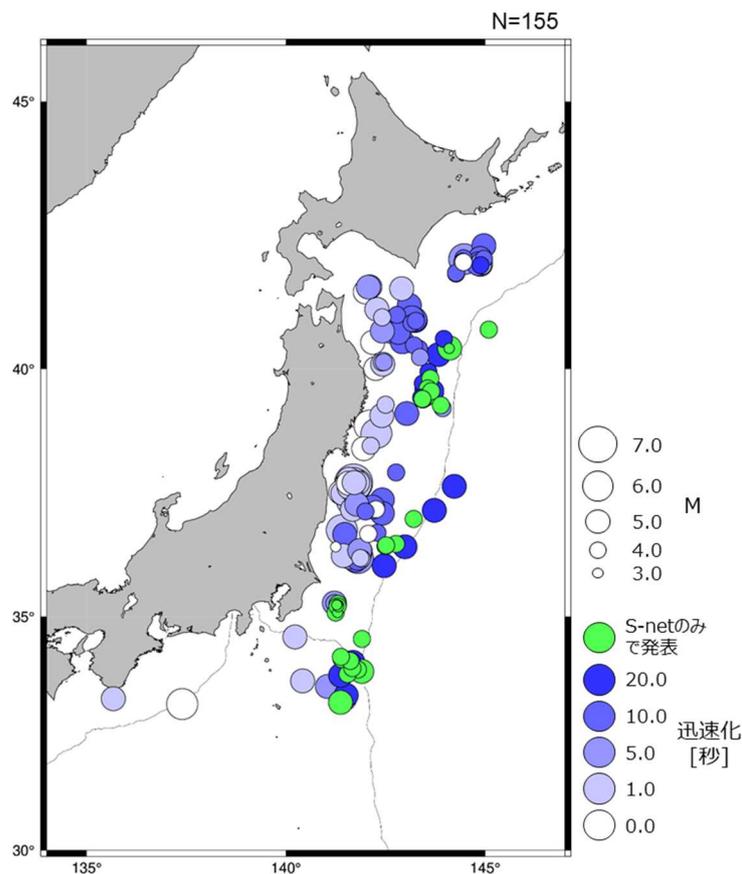


図 2.1 海底地震計を活用することで緊急地震速報（予報）第1報発表の迅速化が確認された事例の震央分布図。

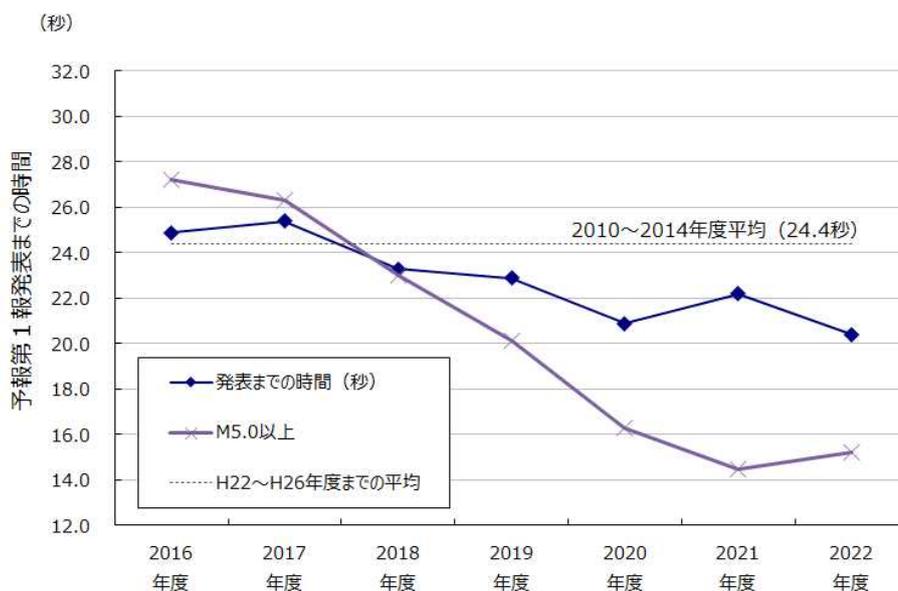


図 2.2 日本海溝沿いで発生した地震に対して緊急地震速報を発表し、かつ震度1以上を観測した事例について、地震発生から予報第1報発表までにかかった時間の平均値の年度別推移。

3 巨大地震への対応

東北地方太平洋沖地震時には緊急地震速報において関東地方の強い揺れが精度良く予測できなかった。これは、震源とMから震度を予測する手法では巨大地震の際の震源域の広がりや震度を過小に評価したためである。このように、巨大地震の際に生じる、点震源仮定からの乖離やMの頭打ちに対応するため、震源とMによる推定によらず、揺れから揺れを直接予測する手法である「PLUM法」(Hoshiya and Aoki (2015) による揺れから揺れの予測の簡易版、Kodera et al. (2018))を開発し、2018年3月から運用を開始した。

図 3.1 PLUM法の震度予測の原理

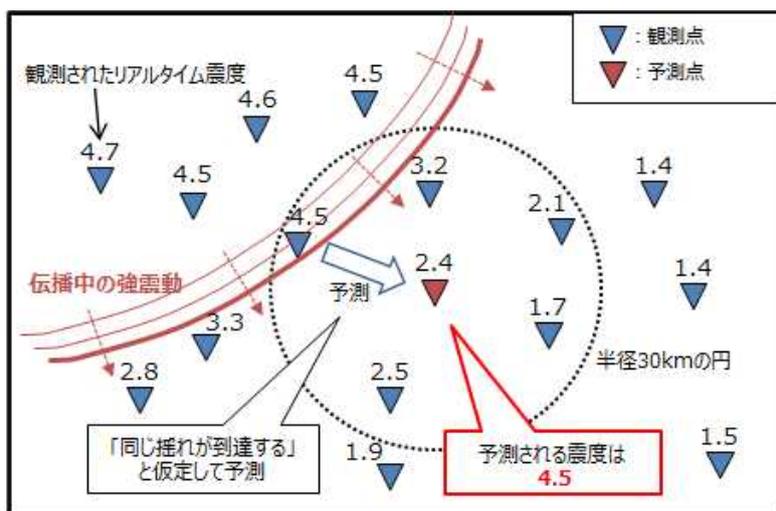


表 3.1 PLUM法を活用して発表した緊急地震速報の事例数

	予報	警報
発表した緊急地震速報の総数	4,077	65
PLUM法を活用して発表した緊急地震速報の数	149	24
PLUM法のみで発表した緊急地震速報の数	12	1

表 3.1 は、PLUM法運用開始後の緊急地震速報の数を示している。緊急地震速報（予報）の総数は 4,077 回であり、そのうち PLUM法により震度予測を行い、緊急地震速報（予報）を発表した回数は 149 回である。また、PLUM法のみで発表した緊急地震速報（予報）は 12 回であった。PLUM法による予測震度で予報を発表した事例のなかには、2022年11月14日の三重県南東沖の地震（M6.4、深さ362km、最大震度4）など、深発地震に伴い観測された揺れに基づいて震度を予測して発表した事例も含まれている。この地震の最終報での推定震源の深さは370kmであったが、震源とMからは精度よく震度を予測することができない深発地震においても PLUM法による震度予測を行うことができた（図 3.2）。

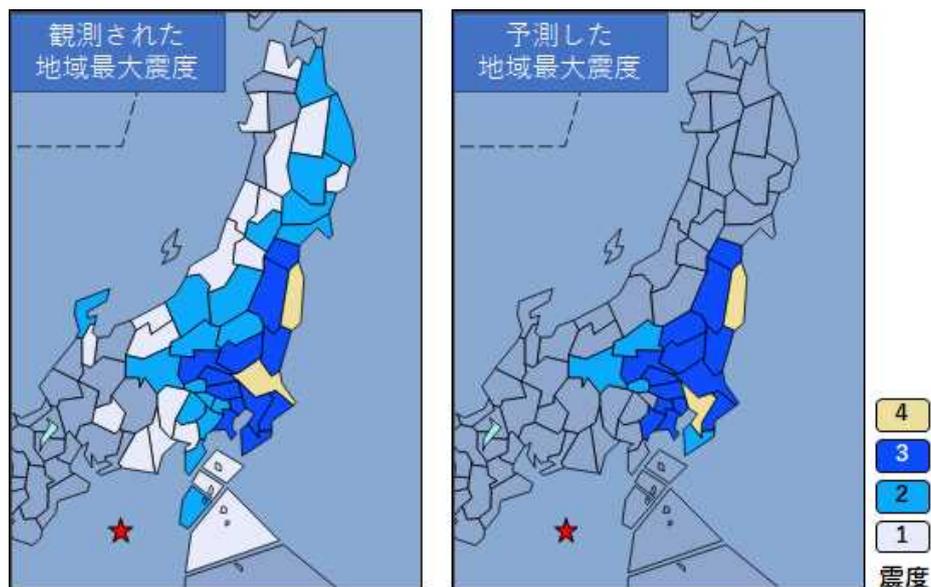


図 3.2 2022 年 11 月 14 日の三重県南東沖の地震（M6.4、深さ 362km、最大震度 4）において観測された地域最大震度（左）と、最終報で発表した地域最大予測震度（右）。

PLUM 法の利点が顕著に表れた事例として、2022 年 3 月 16 日に発生した福島県沖を震源とする M7.4 の地震が挙げられる。この事例は、表 3.1 において PLUM 法のみで発表した緊急地震速報（警報）に示されている。図 3.3 にこの地震に対して発表した緊急地震速報（警報）の状況を示す。23 時 36 分の M7.4 の地震の直前となる 23 時 34 分に、同じく福島県沖を震源として M6.1 の地震が発生した。M6.1 の地震では震源と M を推定して震度予測を行うことができた。一方、M7.4 の地震では、各観測点で M6.1 の地震による処理が継続していたことで、M7.4 の地震波が到達した時点で新たな地震として検知することができなかった結果、M7.4 の地震では震源と M を推定することができなかった。このような中でも、M7.4 の地震で地震計が観測した揺れを基に PLUM 法による震度予測が行われ、PLUM 法のみで緊急地震速報（警報）を発表することができた。

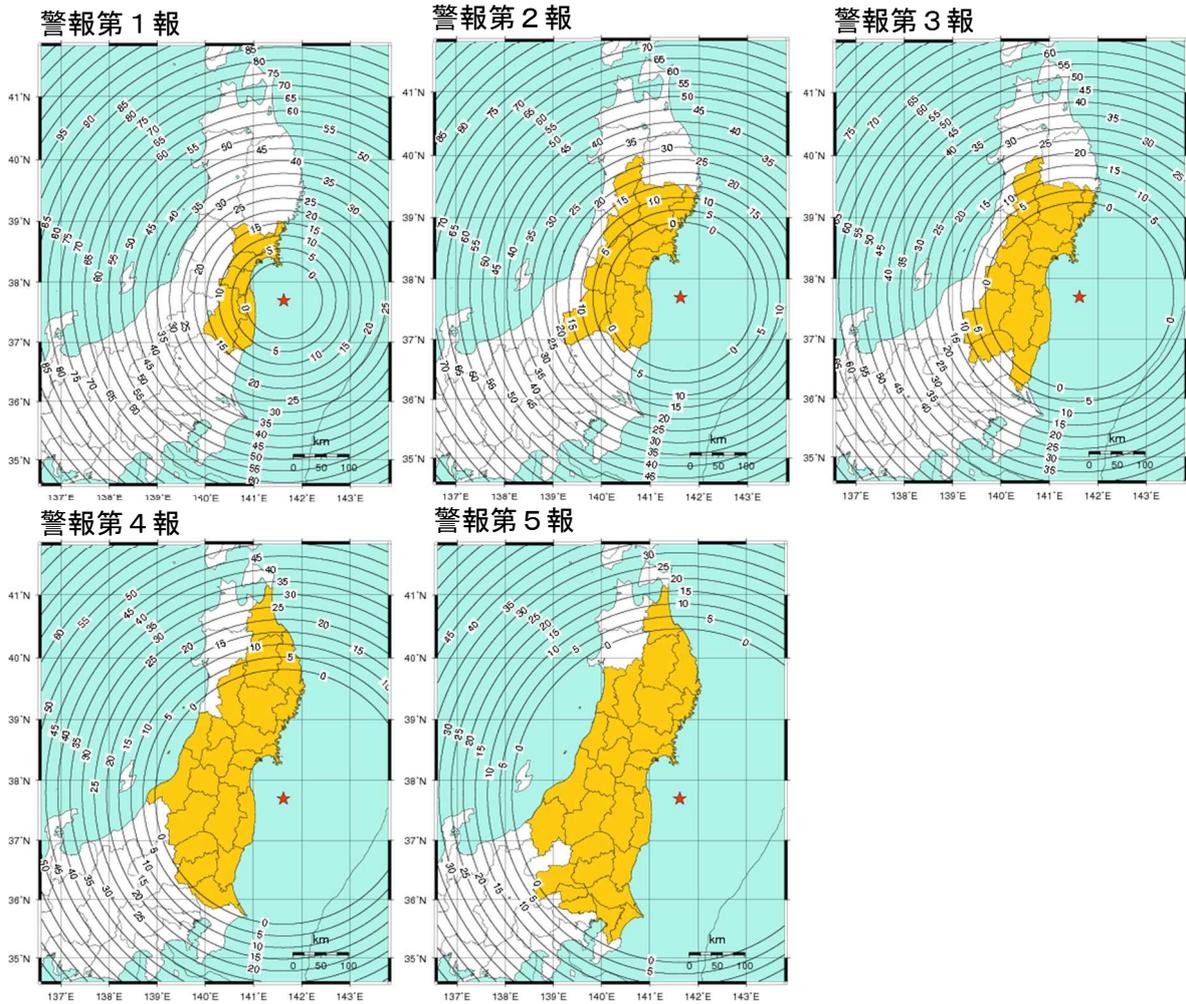


図 3.3 2022年3月16日に発生した福島県沖を震源とするM7.4の地震に対して発表した緊急地震速報（警報）。PLUM法のみで警報を計5回発表している。赤い星印は一元化震源の震央位置、コンターは一元化震源からの理論走時から推定される猶予時間を示す。

4 震源推定精度の向上

4.1 IPF法一本化の経緯

緊急地震速報では震源の推定精度の向上が震度の予測精度の向上には欠かせない。IPF法（溜渕・他（2014））はパーティクルフィルタとベイズ推定を用いた震源推定手法である。図4.1に示すとおり、観測値と仮定震源から計算した理論値の残差（震央方位残差、震央距離残差、M残差、走時残差）が小さいほど尤度が大きくなるような尤度関数を設計し、各パーティクルで尤度を計算し、最も尤度の大きいパーティクルを震源として推定する手法である。また、各観測点で得られた検測値がどの地震に対応するものであるかの判定（以下、同一判定）において、従来手法では走時残差のみを使っていたことに対し、IPF法は走時残差と振幅の残差の両方を用いて同一判定を行うことで、より適切に同一判定を行うことができることから、従来の気象庁の中核側処理を置き換える形で2016年12月より運用開始した。

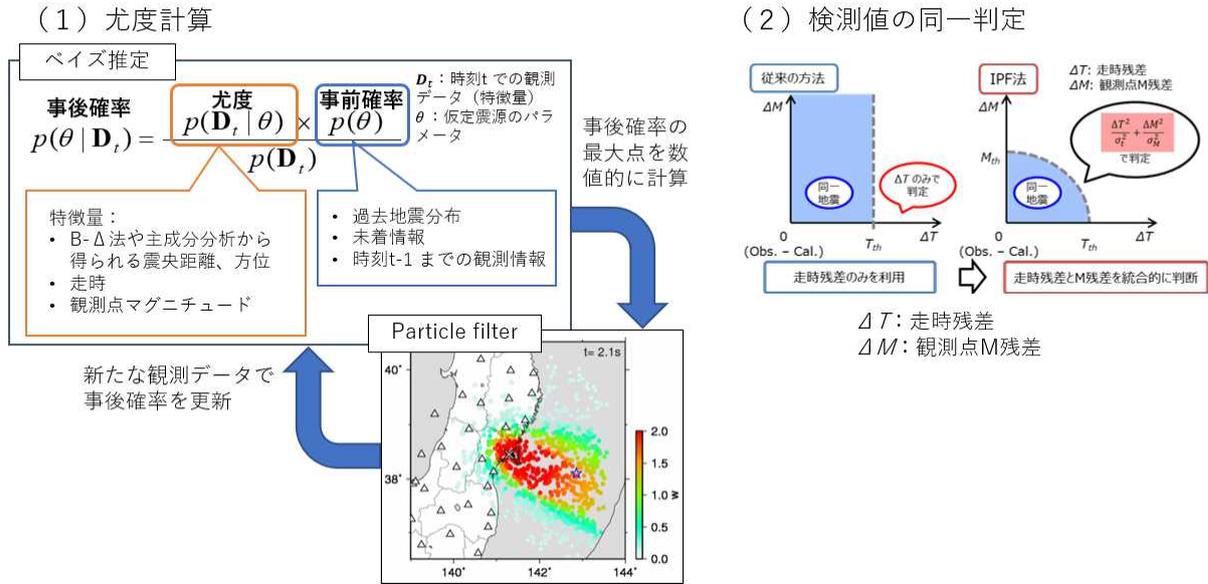


図 4.1 IPF 法の概要

一方、IPF法の運用開始以降にも、同時多発地震やノイズを適切に分離できなかったために過大警報を公表した事例が2回あった。1つ目の過大警報事例（図 4.2 左）は、2018年1月5日にほぼ同時発生した茨城県沖の地震（M4.5）と富山県西部の地震（M4.0）について、着未着法（Horiuchi et al. (2005)）が推定した茨城県沖の震源のMを計算する際に、誤って同一判定した富山県西部の地震による振幅を用いてM計算を行ったため過大なM（6.4）を推定し、過大警報を公表した事例であった。2つ目の事例（図 4.2 右）は、2020年7月30日の鳥島近海の地震（M6.0）について、ノイズの影響で房総半島沖に震源を推定し、そのMを計算する際に母島観測点の振幅を用いてM計算を行ったことで過大なM（7.3）を推定し、過大警報を公表した事例であった。これらの原因はいずれも、緊急地震速報処理がその開発経緯により着未着法やP波S波の検測値をもとに震源を自動決定する処理（以下HYPOONと呼ぶ）を併用しており、これらの処理結果の同一判定に失敗したためであった。

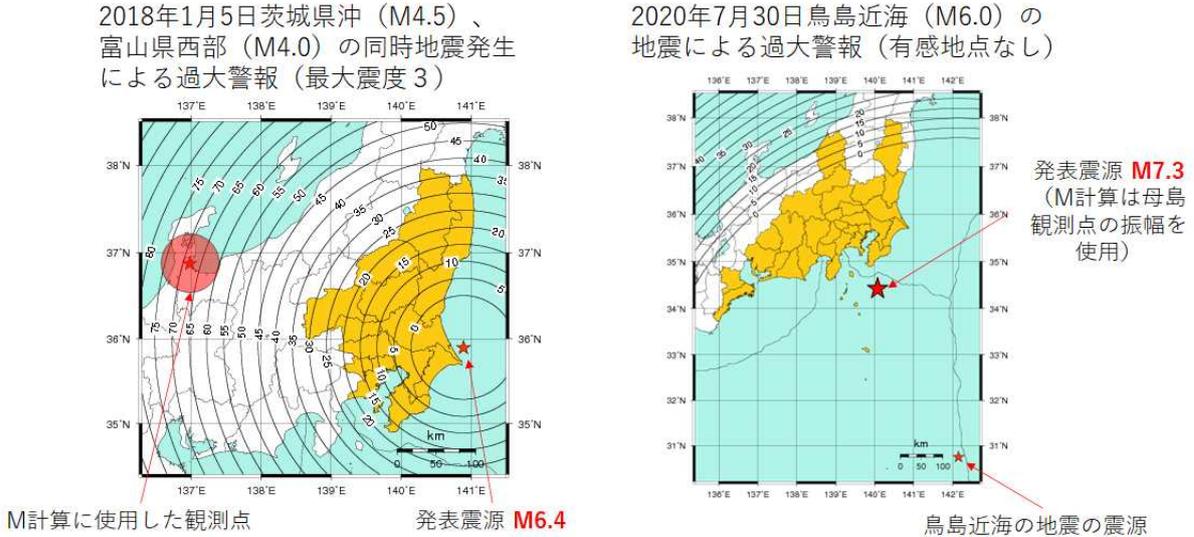


図 4.2 2つの過大警報事例

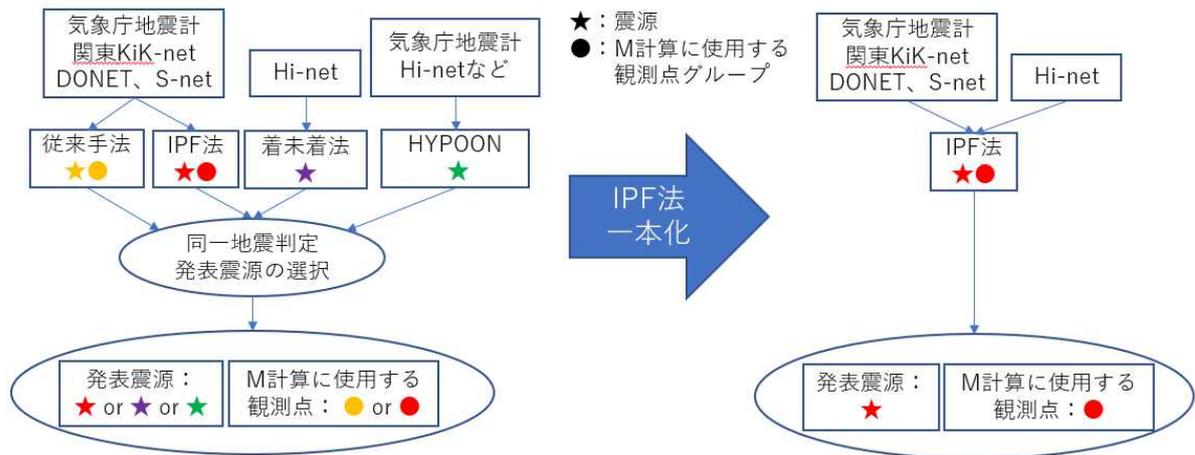


図 4.3 既存のシステムと IPF 法一本化後のシステム

この課題を根本的に解消するため、図 4.3 に示すとおり、すべての観測データに対して IPF 法が一元的に同一判定処理を行い、IPF 法がグルーピングした観測データのみを用いて震源と M を推定するシステムを構築した。すべてのデータを IPF 法の入力として用いるため、現在の IPF 法が使用している加速度計（気象庁観測点、海底地震計、KiK-net の一部）のデータに加えて、速度計である Hi-net のデータも IPF 法に使用できるようにする必要がある。図 4.4 に IPF 法一本化の処理において、追加を行った処理を赤字で、改良を行った処理を青字で示す。1 つ目は、Hi-net の速度波形を IPF 法の入力データ作成処理に入力するための加速度変換、2 つ目は IPF 法の改良で、Hi-net を活用するための処理負荷軽減策と尤度関数の改良、3 つ目は IPF 法一本化に伴う M 計算と発表条件の変更である。

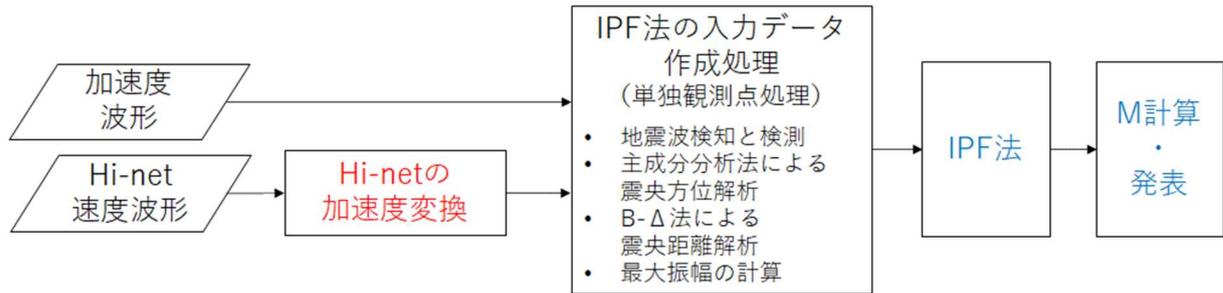


図 4.4 IPF 法一本化の処理概要

4. 2 Hi-net 速度波形の加速度変換

Hi-net の速度波形データを既存の単独観測点処理に適用するため、Hi-net の計器特性（固有周波数 1.0Hz、減衰定数 0.7）を補正したうえで加速度変換する漸化式フィルタを設計した。なお、計算の安定のため、前段の処理で 20 秒のハイパスフィルタと 40Hz のローパスフィルタを適用した。

このフィルタを平成 15 年（2003 年）十勝沖地震に適用した結果が図 4.5 と図 4.6 である。赤線が Hi-net、青線が KiK-net である。波形の先頭部分（図 4.5）では両者は良く一致している。一方、強震時（波形全体：図 4.6）は両者に差異が見られ、加速度波形ではパルス状の波形、変位波形では振幅の頭打ちが見られる。これらは、Hi-net の速度計の振り切れが原因である（汐見・他（2005）、山田・他（2014））。IPF 法で Hi-net を活用する際は、これらの特徴に注意する必要がある。IPF 法の入力データのうち、地震波検知と検測、主成分分析法による震央方位解析、及び B- Δ 法による震央距離解析については、波形の先頭部分を使用するため Hi-net の速度計の振り切れの影響を受けにくく、気象庁一元化震源を真とした場合の分布図（図 4.7）において、気象庁観測点の加速度計と Hi-net との間に差異はみられない。一方で、最大振幅は Hi-net の速度計の振り切れの影響を受け変位振幅の頭打ちが生じるため、変位最大振幅を使用する M 計算において振幅値を利用する観測点の採用方法に工夫を行った。

図 4.8 は、変位 M 計算方法についての模式図である。Hi-net についても変位 M 計算には使用するが優先度を下げることとし、気象庁地震計などの加速度計による振幅が得られた場合はそちらを優先して M 計算に使用し、加速度計による振幅が 5 地点で利用可能となれば Hi-net の変位振幅を使わずに M 計算を行う。これにより、緊急地震速報の迅速性を担保しつつ、Hi-net の振り切れの影響を軽減することとした。

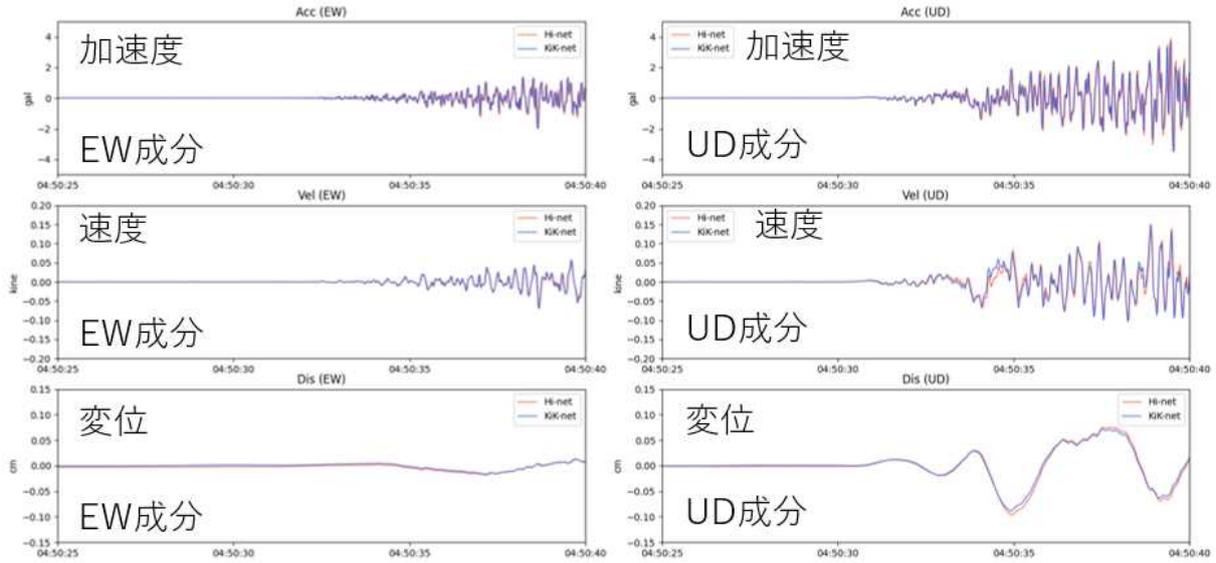


図 4.5 2003 年十勝沖地震における N. TRSH(Hi-net) および KSRH07_G(KiK-net) の地震波形の先頭部分の波形比較。赤線が Hi-net、青線が KiK-net。条件を揃えるため KiK-net にも HP20 秒、LP40Hz を適用。変位波形は加速度波形に対し、機械式 1 倍強震計相当の変位波形に変換するフィルタを適用したもの。

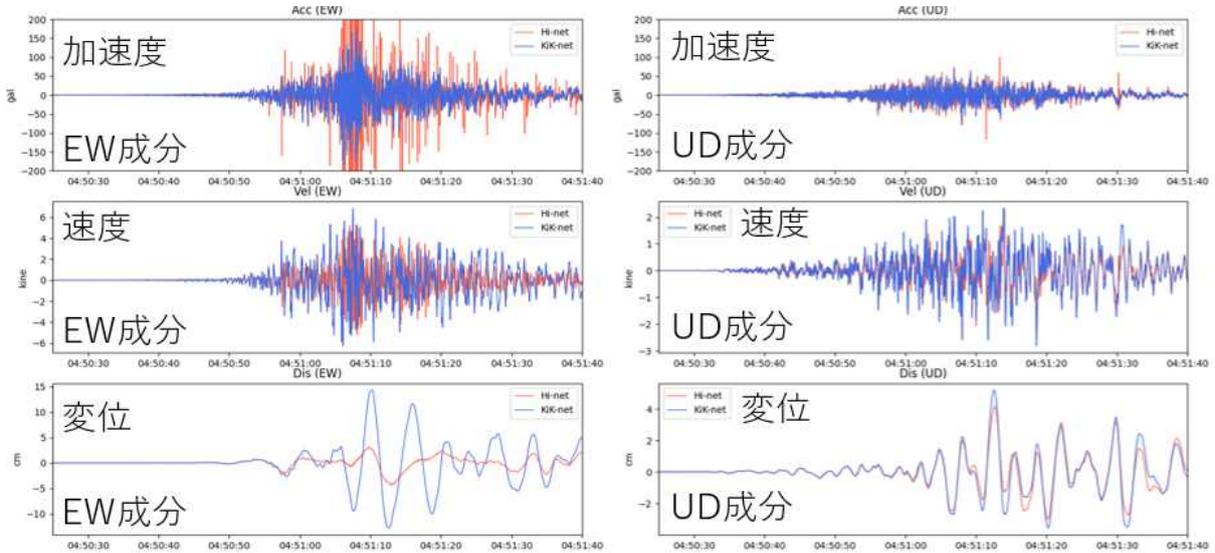


図 4.6 2003 年十勝沖地震における N. TRSH(Hi-net) および KSRH07_G(KiK-net) の地震波形全体の波形比較。図 4.5 と同様。

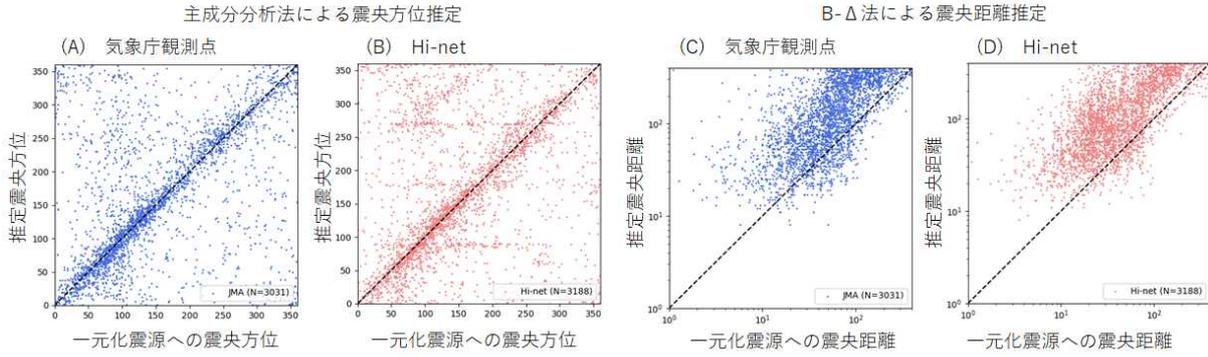


図 4.7 主成分分析法（(A)と(B)）及びB-Δ法（(C)と(D)）についての気象庁観測点とHi-netの比較

データは2017年1月から2020年8月に発表した緊急地震速報の地震波検知時刻の1分前から5分間の波形をもとに計算したものの。IPF法に使用する、近傍5地点以内かつB-Δ法400km以内かつ変位最大振幅50 μ m以上の結果を表示している。



図 4.8 変位 M 計算方法についての模式図

4. 3 IPF 法の改良

IPF法でHi-netのデータを活用するにあたりさらに2つの改良を行った。1つは処理負荷の軽減であり、もう1つは尤度関数の改良である。

4. 3. 1 処理負荷の軽減

Hi-netは約800地点あり、そのまますべての観測データを入力すると現状の約2倍の数の観測点を処理することとなり、処理時間が長くなる(図4.9の青丸)。そこで、計算負荷を下げるために、尤度計算に使用する観測点を以下のとおり選別した。

- ① 最初に地震波を検知した地点
- ② 初期のパーティクル配置の重心または最も尤度の大きいパーティクルの近傍200地点
- ③ 近傍201地点目以降の、Hi-net観測点を除く200地点

観測点選別の例を図 4.10 に示す。3つ目の選別方法は、Hi-net 以外の観測点においてはより広範囲の観測点を尤度計算に利用することにより、推定震源に対する観測点の方位角の偏りを減らすためである。これらの観測点の選別を行うことで、計算実行時間を約半分にすることができ（図 4.9 の赤丸）、運用の目安となる1秒以内の処理が可能であることを確認した。

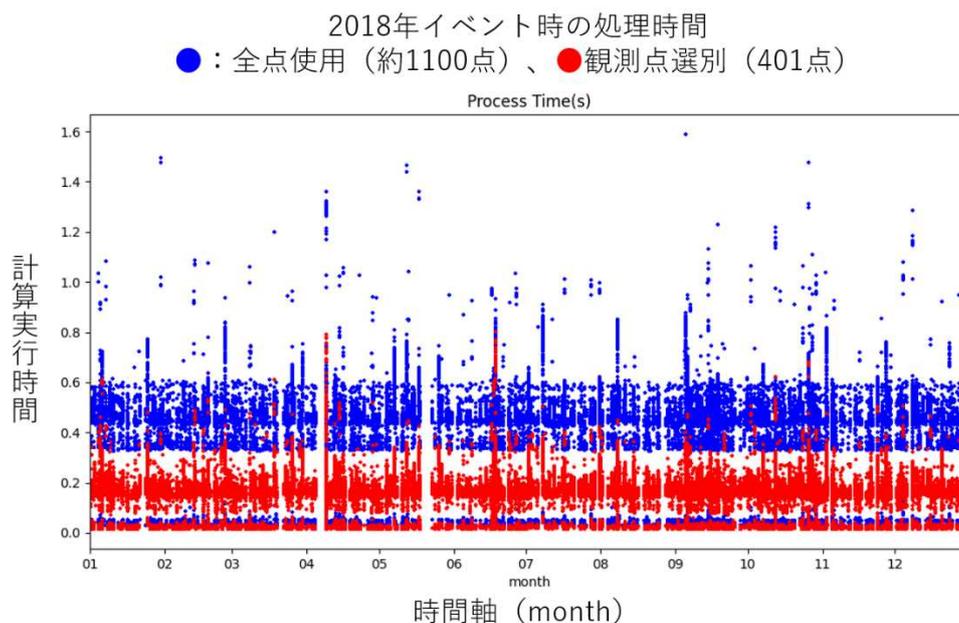
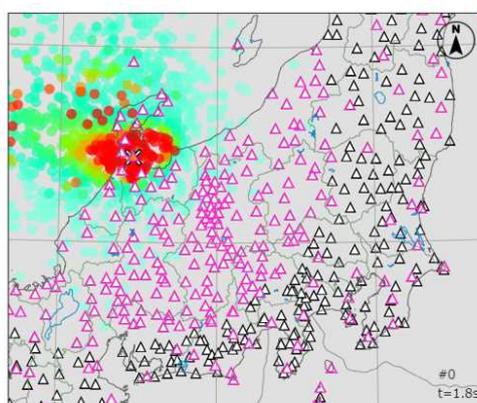


図 4.9 IPF 法の計算実行時間

2018年に発表した緊急地震速報の地震波検知時刻の1分前から5分間の波形をもとにIPF法の入力データを作成し計算した。青が全観測点使用時、赤が観測点選別を行ったときの計算実行時間。



△：選別観測点
△：非選別観測点

図 4.10 観測点選別の例

4. 3. 2 尤度関数の改良

IPF法に用いる尤度関数は入力データである実データの特徴に基づいて設計することが震源推定精度の向上につながる。そこで、過去の入力データ（以下A電文と呼ぶ）の諸元と一元化震源からの理論値との残差について調査を行った。その結果、以下の特徴が得られた。

- 震央距離残差は対数正規分布で、B-Δ法による推定震央距離のほうが一元化震源の震央距離と比べて大きい
- 震央方位、震央距離、及びMにおける残差の標準偏差は震源距離によらずほぼ一定であるが、走時残差の標準偏差には震源距離への依存性がある

これらの特徴を尤度関数に反映させるため、尤度関数の改良を行った。

表 4.1 運用中と改良版の尤度関数の比較。 x は観測値、 μ は仮定震源からの理論値、 σ は誤差、 k は仮定震源に近い観測点数順、 r_k は k 番目の観測点の震源距離、 R_{min} は震源最短距離である。

	運用中	改良版
尤度関数	$p(x \mu, \sigma, k)$ $\propto \lambda_k \exp\left\{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} + (1 - \lambda_k)$ $\lambda_k = d \exp\left\{-\frac{(k - 1)^2}{2c^2}\right\}$ $c = 10$ 底上げ度合 d は各残差ごとに設定	$p(x \mu, \sigma, k)$ $\propto \lambda_k \exp\left\{-\frac{w_k(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} + (1 - \lambda_k)$ 観測点ごとの重み w_k と底上げ λ_k は各残差ごとに設定
震央方位 残差	$\sigma = 20$ $d = 0.2$	$\sigma = 20$ $\lambda_k = 0.1$ $w_k = 1$
震央距離 残差	$\sigma = 100$ $d = 0.2$	残差 $(x - \mu) : \log_{10} x - \log_{10} \mu - 0.4$ $\sigma = 0.3$ $\lambda_k = 0.1$ $w_k = 1$
M 残差	$\sigma = 0.7$ $d = 0.5$	$\sigma = 0.4$ $\lambda_k = 0.25$ $w_k = 1$
走時残差	$\sigma = 2.0$ $d = 0.5$	$\sigma = 1.5$ $\lambda_k = 0.5 \exp\{-0.00795(r_k - r_{10})\}$ $w_k = R_{min}^2 / r_k^2$ 未トリガ地点は $w_k = 1$

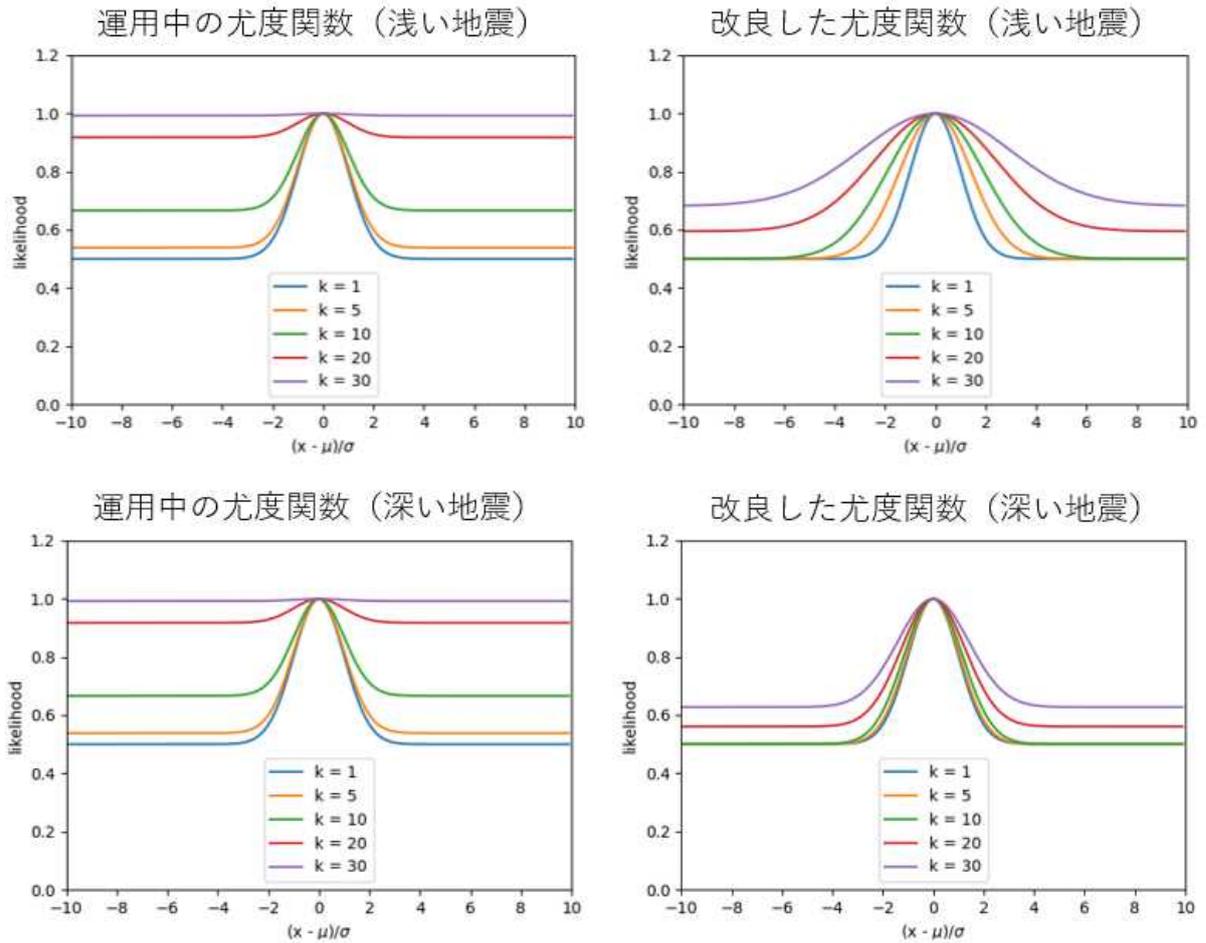


図 4.11 走時残差の尤度関数についての運用中と改良版の比較

浅い地震は秋田県内陸南部の深さ 12km の地震(2020/03/11 13:04)、深い地震はほぼ同じ震央位置で発生した秋田県内陸南部の深さ 151km の地震(2017/01/28 22:40)。

表 4.1 は運用中の尤度関数と改良した尤度関数を比較したものである。両者とも尤度関数は正規分布を一様分布で底上げした形であるが、運用中の尤度関数は観測点数順 k の関数で底上げさせているのに対し、改良した尤度関数は正規分布の分散を重み w_k により変化させる形にしていることが両者の大きな違いである(図 4.11)。改良した尤度関数では、震央方位残差、震央距離残差、M 残差については、入力データの特徴をもとに重み $w_k = 1$ として、震源距離依存しない尤度関数とした。一方で、走時残差の尤度関数については、一元化震源を計算する際の観測点の重み $w_k = R_{min}^2/r_k^2$ を採用した。これにより、運用中の尤度関数と比較して、深い地震ではより広範囲の観測点のデータを使用して尤度を計算することが可能となり、深い地震において震源推定精度が向上することを確認できた。

4. 4 M計算と発表条件の変更

これまで、緊急地震速報では着未着法と HYPOON で推定される M についても発表に使用していたが、IPF 法への一本化に伴い、震源同様に M も使用しないようにするため、M 計算方法と発表条件についてそれぞれ変更が必要である。

まず、M 計算について、変位 M には図 4.8 で示したとおり、振幅の頭打ちを考慮して Hi-net は優先度を下げて M 計算に使用する。さらに、変位 M が推定できないような M の小さな地震の際に、これまでの着未着法と HYPOON の M の代わりとして、速度 M を計算することとする。このとき、M の安定性を考慮して、速度 M は着未着法の採用条件であった 5 地点以上のデータが得られた場合に計算することとし、そのうち少なくとも 1 地点は 10 mkine 以上の振幅を必要とする条件とした。

表 4.2 運用中と IPF 法一本化後の発表条件

加速度計観測点は気象庁地震計、DONET、S-net 及び KiK-net を指す。

発表に必要な観測点の条件	運用中	IPF 法一本化後
予報	加速度計観測点 1 地点以上	加速度計観測点 1 地点以上
警報	加速度計観測点 2 地点以上 または 加速度計観測点 1 地点以上 かつ着未着法 または 加速度計観測点 1 地点以上 かつ HYPOON	加速度計観測点 2 地点以上 または 加速度計観測点 1 地点以上 かつ Hi-net 3 地点以上

発表条件の変更については、表 4.2 にまとめた。予報の発表条件に変更はないが、警報の発表条件について、これまでの加速度計 1 地点と着未着法や HYPOON による条件の代わりとして、「加速度計観測点 1 地点以上かつ Hi-net 3 地点以上」という条件を加えた。この「3 地点」という設定は両者の重み関係を表している。例えば 1 地点とすると加速度計観測点と Hi-net を同等に扱うという意味であり、5 地点とすると運用中の「加速度計観測点 1 地点以上かつ着未着法」と同等の条件になる。今回は IPF 法一本化により加速度計観測点と Hi-net を統合して使用していることを考慮しつつ、警報発表の迅速化を目指して 3 地点とし、次節で示す事例検証において不適切な警報を発表しないことを確認した。

4. 5 事例検証結果

過去事例について、当時の緊急地震速報と IPF 法一本化後のシミュレーション結果の比較検証を行った。検証対象は 2017 年 1 月から 2020 年 8 月の緊急地震速報発表事例（2950 事例）である。

2017 年 1 月から 2020 年 8 月の緊急地震速報発表事例で、当時の緊急地震速報と IPF 法一本化後の推定震源について、同じ一元化震源が紐づいた結果同士を比較した。図 4.12 は推定震源と紐づけた一元化震源との震央間距離のヒストグラムであり、第 1 報と最終報について示している。平均値などからわかるように、IPF 法一本化後の結果は当時の緊急地震速報と同等の震源推定精度であることがわかる。一方、第 1 報の発表時刻差（図 4.13 左）は、当時の緊急地震速報より IPF 法一本化後のほうが早いという結果であった。この検証結果において、IPF 法一本化後のシミュレーション結果には伝送遅延や処理遅延が含まれていないことに注意が必要だが、これらの遅延時間について長めに 2 秒かかると仮定した場合でも第 1 報は IPF 法一本化後のほうが早いと言える。これは、IPF 法一本化後は Hi-net を含めた全地点のうち 5 地点を使って速度 M を計算して発表可能であることに対して、当時の緊急地震速報は、着未着法の推定結果で発表するときは Hi-net のみでの 5 地点を利用しなければ発表しなかったためであり、IPF 法一本化の発表条件の効果によるものである。緊急地震速報の予測精度を示すスコア（図 4.13 右）については、過去に誤った同一判定を原因として発生した 2 つの過大警報事例（2018/01/05 と 2020/07/30）についても M の過大評価による過大警報を発表しておらず、スコアが低くなっていないことがわかった。

以上の検証から、IPF 法に震源推定手法を一本化し Hi-net も含めて観測点を統合的に活用した効果により、2018 年 1 月 5 日と 2020 年 7 月 30 日の過大警報事例について過大警報を発表することなく適切に処理していること、震源推定精度が当時の緊急地震速報と比較して同等以上であること、また予報第 1 報の発表時刻が早くなっていることを確認することができた。

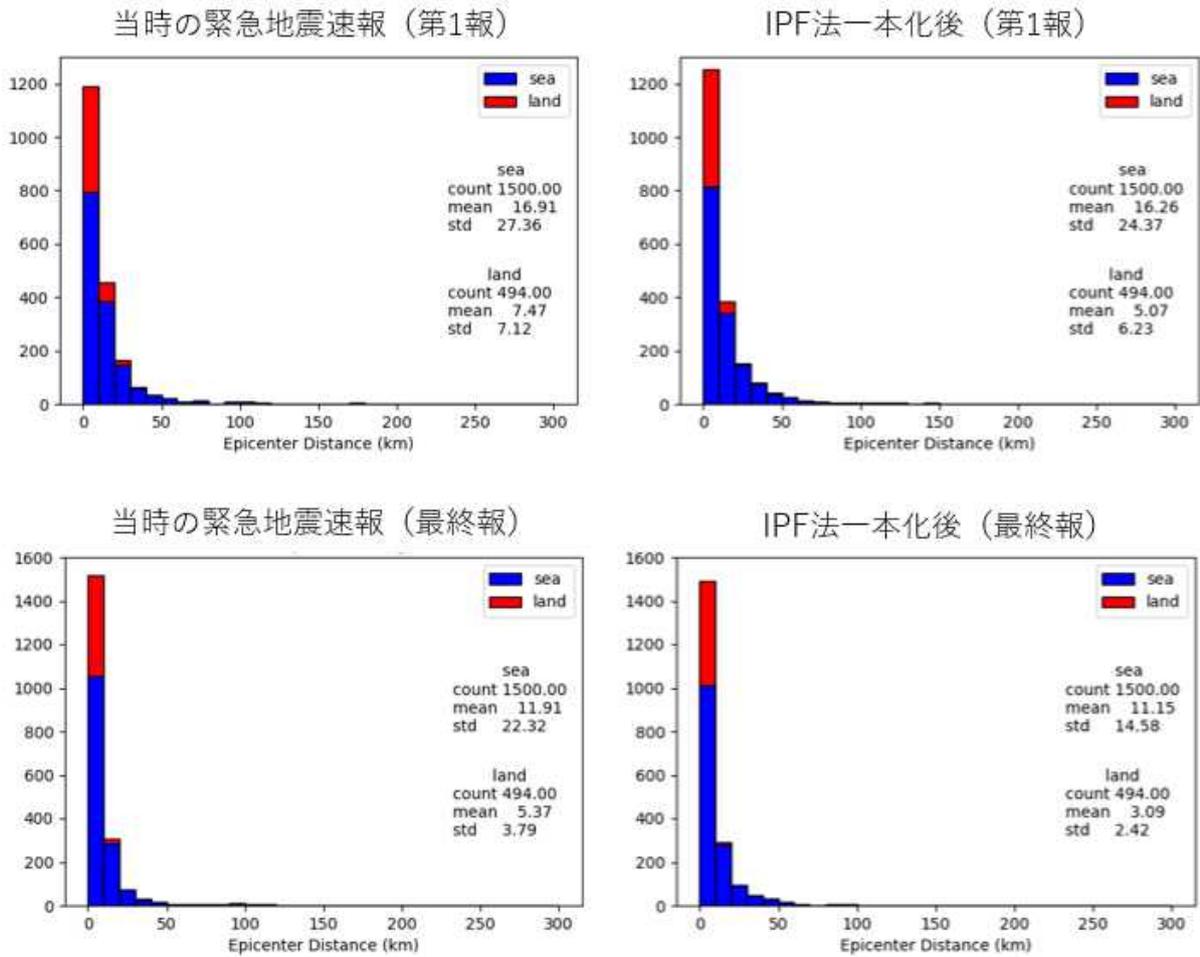


図 4.12 2017年1月から2020年8月の緊急地震速報発表事例における推定震源と一元化震源との震央間距離のヒストグラム

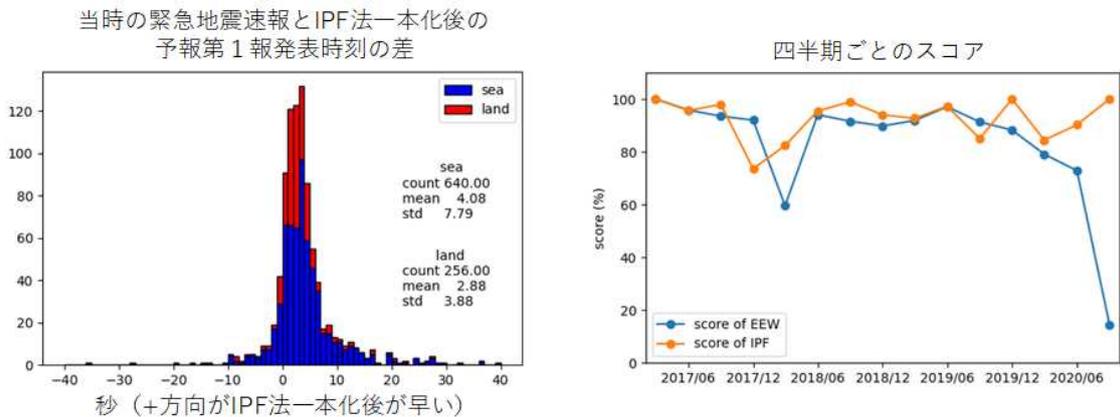


図 4.13 2017年1月から2020年8月の緊急地震速報発表事例における当時の緊急地震速報とIPF法一本化後の第1報発表時刻の差のヒストグラム（左図）と、四半期ごとのスコアの推移（右図）

5 機械学習を用いた観測点管理の自動化

現在運用中の IPF 法では、気象庁の多機能型観測点や防災科学技術研究所(NIED)の S-net、KiK-net、DONET の観測点が利用されている。これらの観測点でトリガを検知する毎に、単独観測点処理により IPF 法に必要な地震検知・ノイズ識別・最大振幅検出・地震諸元推定などの情報を推定し、その内容をまとめた「A 電文」として送信している。利用する観測点の A 電文において、トリガ検知数の著しい増加や過大な振幅が確認された場合には音声報知され、該当する観測点波形を現業者が目視で確認し、必要であれば手動で活用抑止作業を行っている。一方、2023 年内をめぐり、Hi-net のデータを IPF 法へ活用する予定であるが、現在緊急地震速報に使用している観測点数(約 900 地点)に近い地点数(約 800 地点)を新たに活用することになる。それに伴い手動での活用抑止・再開作業が繁忙となるなど、現業業務の負担が増える恐れがある。そこで、自動での Hi-net 観測点制御のためのプログラム(MASC : Machine-learning Auto Station Controller)を検討した。MASC の概要および試験データを用いた実用性の検証結果を以下に報告する。

5. 1 MASC の概要

図 5.1 に示すように、A 電文トリガを入電した Hi-net の観測点とその周辺の波形データ(win 形式)を毎分取得し、取得波形より正常・異常の判定を行う。その出力結果をもとに、自動観測点管理用のデータベースに結果を反映し、一定の条件を満たした観測点の活用状態を変更する。

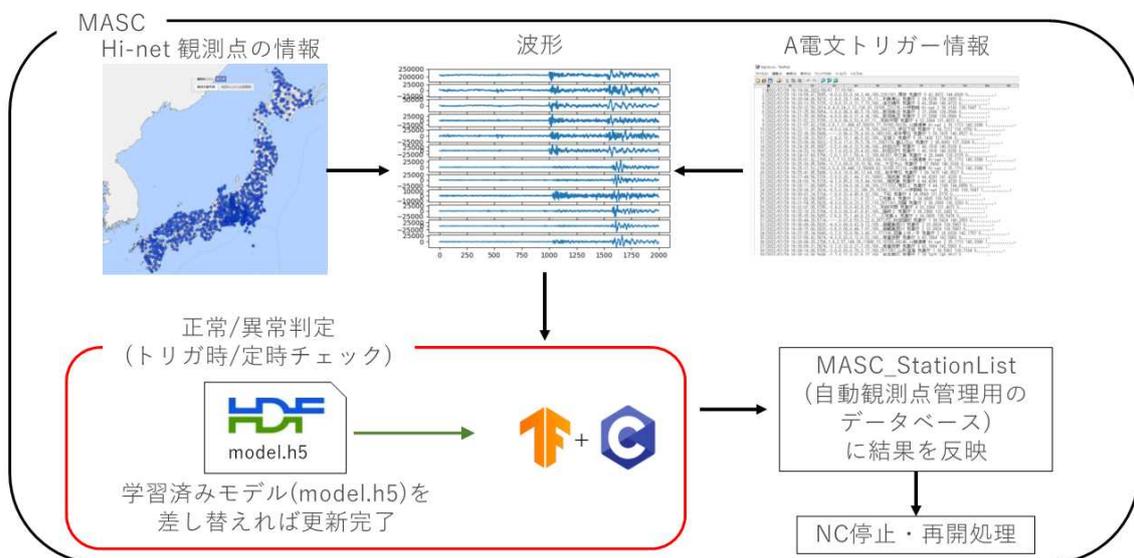


図 5.1 MASC の概要と運用のイメージ

MASC では波形の正常・異常の判断として、①トリガ入電後にトリガ前後の波形の確認(以後、トリガ時チェック)および、②トリガのない観測点波形の定期的な確認(以後、定時チェック)の2種のチェックを実施する。

5. 1. 1 トリガ時チェック

トリガ入電後にトリガ前後の波形を機械学習モデルで推論し、異常か正常かを判別する。機械学習モデルには、一次元の畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いて、緊急地震速報においてトリガした観測点とその近傍2観測点 (Hi-net の観測点と IPF 法に活用されている陸上観測点) の計3観測点の速度波形 (9成分20秒間) を与えたときに、捉えるべき正常な地震波形と、機器障害によるノイズや振動ノイズといった捉えるべきでない異常な波形とを分類するタスクを負わせる。学習に使用するデータとしては、令和3年1月から4月にかけて、一元化検測において、現業者が目視でP相・S相の両方を検測し、かつ最大振幅が全成分で捉えられている観測点の波形とその近傍2地点の波形に「正常」のラベルを付与する。他方、緊急地震速報の単独観測点処理において品質管理を通過し、かつ走時を比較したときにどの一元化の暫定震源とも紐づかないトリガを入電した観測点およびその周辺の観測点波形に「異常」のラベルを付与する。加えて、片成分の波形異常を再現する目的で、上記の「正常」のP相到達前の波形を1成分以上に混入した波形にも「異常」のラベルを付与する。

正常・異常あわせて70万組以上の波形を教師データとして学習を行い、テストデータによる精度検証を行った結果を図5.2に示す。双方のラベルについて、確率50%を分類の閾値とした場合の正解率は98%以上となった。また、適合率・再現率とも正常・異常両方のラベルに対して98%以上となるなど、両方のラベルに対しての見逃し・空振りが少ない、良好な学習済みモデルを構築することができた。

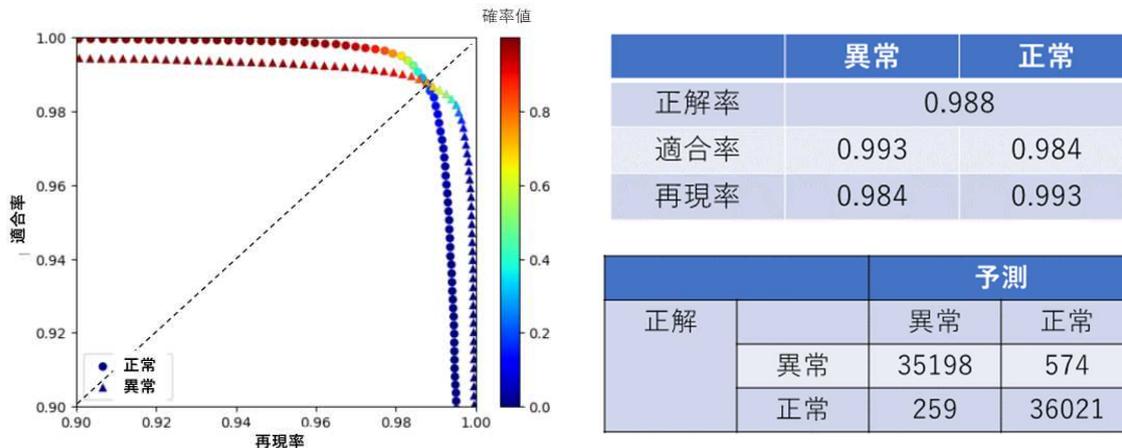


図5.2 テストデータを用いた学習済みモデルの精度検証結果。左は正常・異常それぞれの、確率による判定閾値を変更したときのPR(適合率-再現率)曲線。右は判定閾値50%時の評価指標と混同行列。

図5.3に、平成28年(2016年)熊本地震直後の期間において、トリガ前後の波形を学習済みモデルに推論させた結果を示す。ここでは2つの波形の例のみ示すが、図5.3左の赤枠のような機器異常に伴う波形異常・感度異常を描いている波形(93%の確率で異常と判定)から図5.3右の赤枠のような振動ノイズ(100%の確率で異常と判定)まで、幅広いバリエーションの異常なシグナルを正確に「異常」とみなしていることがわかる。

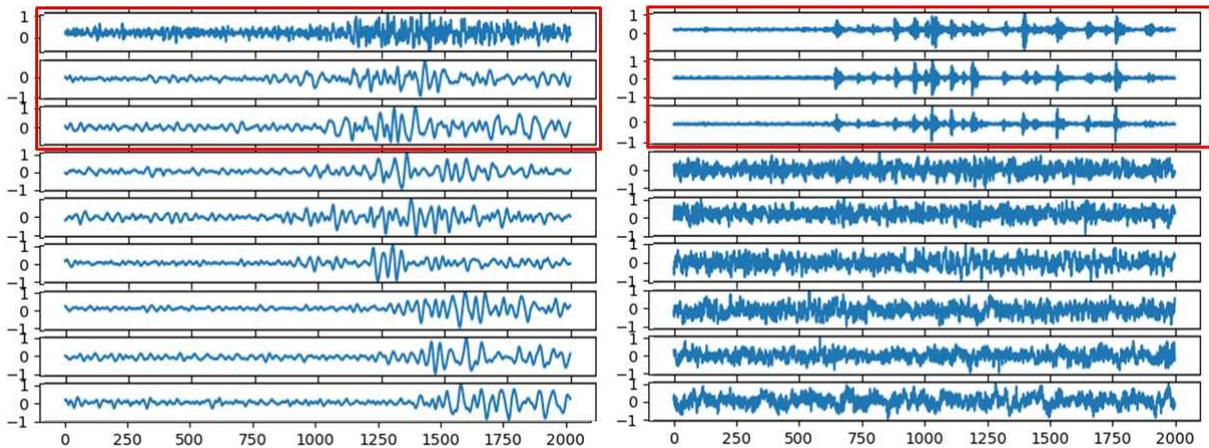


図 5.3 9成分 20秒波形の学習済みモデルへの適用例。赤枠線で囲った部分が、正常・異常判定を行う対象の観測点。下6成分が近傍の観測点(Hi-net および現行で IPF 法活用中の陸上観測点)。全成分ともに2Hzのハイパスフィルタ適用の後、各成分の最大値で振幅を規格化している。

5. 1. 2 定時チェック

トリガ時チェックでは、機器障害によるものか否かに関係なく、異常なシグナルによるトリガを事後的に判断し、早期に活用を停止する狙いがある。対して、主に機器障害の観測点を事前に把握し、機器障害に由来するA電文トリガの入電を予防する目的で、トリガしていない観測点についても定期的に波形を確認するため、定時チェックの処理を併用することとした。具体的には、一定時間トリガしていない各観測点での短時間の波形(3成分8秒間)を毎分ごとに一定数取得し、図5.4に示すように、振幅値からオフセットずれや波形異常、感度異常に関わる簡便的な特徴量を抽出し、各特徴量について設定した閾値を超過した場合に異常と判定することとした。なお、異常と判定する閾値は、正常なシグナル(一元化検測で最大振幅が検測されているP・S相前後の波形)やバックグラウンドノイズから抽出した正常時の各特徴量と、一元化検測での活用停止観測点での異常時の各特徴量との累積頻度分布をもとに比較・検討の上設定した。

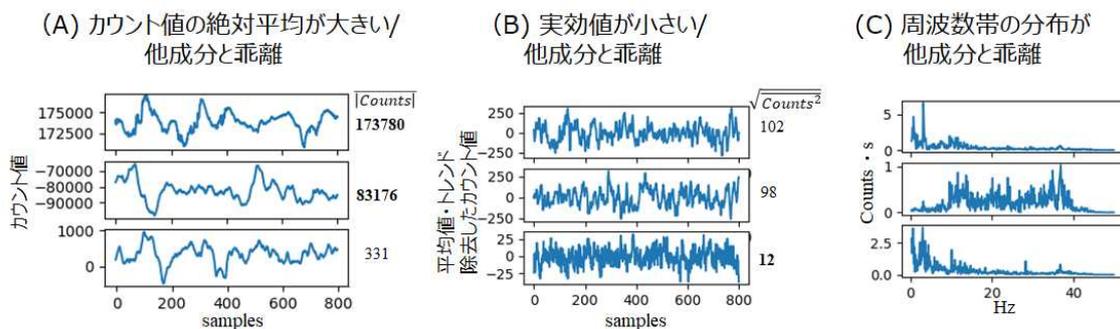


図 5.4 定時チェックで行う特徴量抽出の例。各成分でのカウント値の絶対平均とその比率 (A)、感度異常に関する特徴量として各成分での平均値トレンド除去後の実効値とその比率 (B)、さらに感度異常の一種としての周期帯の異常に関する特徴量として、各成分をフーリエスペクトルへ変換後の相互相関値や振幅が最大となる周波数 (C)などを抽出する。

5. 2 MASCのヒートランデータへの適用

2022/8/20 2:00 から 2022/9/21 0:00 までの間、Hi-net 観測点の波形を用いて A 電文トリガデータをリアルタイムで作成する試験(ヒートラン)を実施した。そのうち 9/17 0:00 から 9/21 0:00 までの4日間のHi-netの波形・トリガデータとIPF法に使う陸上の観測点の波形をもとに、MASCを実行(トリガ時チェック・定時チェックを毎分ごとに実施)した。その際、以下のルールに則って自動的な観測点管理をシミュレーションした。

1. 毎分30秒のタイミングで、トリガ時チェック・定時チェックを行う。この際に、前10分間のトリガ時チェックを優先的に行う。また、トリガ時チェックが行われていない観測点について毎分一定の地点数(50地点)ずつ定時チェックを行う。なお、1分間内に処理する地点数には上限を設ける。
2. 一定時間内に、一定回数連続で「異常」と判定された場合は活用停止とする。
3. 活用停止された観測点は、次回以降のチェックにおいて、一定回数連続で正常と判断される、かつ最初に正常と判定されてから一定時間経過するまでは再開しない。例外として、自観測点が正常と判定され、かつ最も近傍のHi-net観測点が活用停止状態の場合は、正常と判断された回数および経過時間に関係なく速やかに再開する

シミュレーション終了時点(9/21 0:00)でのMASCでの活用停止した観測点の分布を図5.5左に示す。Hi-netの全観測点778地点のうち、123地点を活用停止判断とした。そのうちトリガ時チェックで40地点、定時チェックでは、98地点を自動停止判断とした。9/17 0:00時点(シミュレーション開始直前)の一元化検出処理において現業者が手動で活用停止を判断した観測点が101地点存在するが、そのうちの4分の3にあたる75地点をMASCで自動的に活用停止した。その分布をみると、定時チェックで停止した地点と多く重なることが分かる。これは、人間目線で見たとときに異常な波形を描いている地点をある程度、自動的に停止判断できたことを示唆する。図5.5右は、処理終了時にMASCの結果として活用状態であった地点(655地点)の分布を示す。緊急地震速報の運用上、明らかに支障を来すと思われるような活用観測点の過疎化は見受けられない。なお、9/18には台風22号が非常に強い勢力で九州に上陸し、20日にかけて列島を縦断したが、このような悪天にもかかわらず、過度に停止観測点を増やしてしまうような状況は見られなかった。

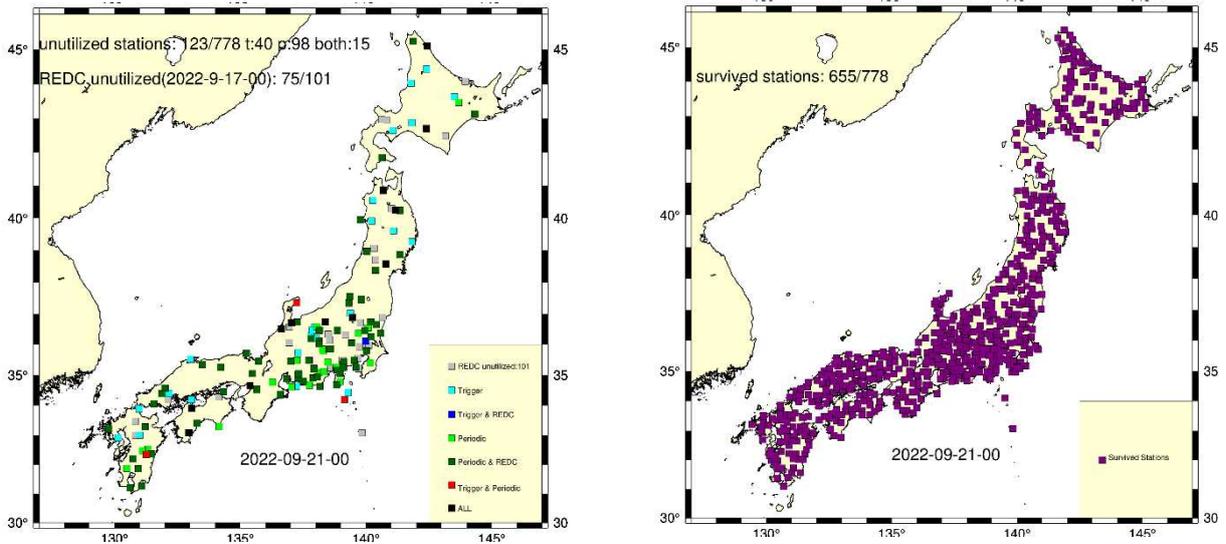


図 5.5 MASC による自動観測点管理のシミュレーション終了時(2022/9/21 0:00)の活用停止観測点(左)と活用中の観測点(右)の分布。左図中の灰色の四角で一元化検測での抑止観測点、青系で MASC のトリガ時チェック、緑系で定時チェックによる停止観測点を示す。なお、それぞれ濃い色合いで一元化の抑止観測点と重なる点を示す。赤色と黒はトリガ時チェック・定時チェックの両方で停止した観測点で、このうち黒は一元化検測の抑止と重なる観測点を示す。

5. 3 今後の展望と課題

MASC による自動観測点管理のシミュレーションをした結果、振動ノイズによるトリガを受信した観測点から機器障害のある観測点まで、ある程度人間に近い目線で活用停止判断を行うことができた。今回は悪天時の期間が含まれたものの、それが要因となって過度に停止観測点を増やすような挙動は見受けられなかった。これは気象現象により定常ノイズレベルがある程度高い状態が発生しても MASC が正常に機能することを暗に示していると考ええる。今後は東北沖地震や熊本地震直後といった、大規模地震とその余震活動が活発な期間や遠地地震直後の期間などで、MASC の挙動を検証する予定である。加えて、今回のシミュレーションにおいて、定時チェックに用いた特徴量は9種存在するが、それぞれの特徴量の正常・異常判定への貢献度合いの確認や閾値の調整、より効率よく異常を識別可能な特徴量の探索などを行い、定時チェックの改良を図りたい。

6 様々な指標での情報提供

6.1 長周期地震動の特徴とこれまでの取組

大地震に伴って発生する長周期地震動は、高層ビル等を大きく揺らし、被害を発生させることがある。東北地方太平洋沖地震でも、震源から遠く離れた東京都内や大阪市内の高層ビルで、低層階よりも高層階で揺れが大きくなり、長周期地震動による家具の転倒・移動等の被害があった。また、このような長周期地震動による被害は、地表での震度から把握することが難しい。

これら長周期地震動の特徴を踏まえ、気象庁では2011年度以降、有識者による検討会を開催し、長周期地震動に関する観測情報のあり方について検討した（気象庁地震火山部（2012）、気象庁地震火山部（2013））。2012年度には高層ビル高層階での揺れによる行動の困難さなどを表す指標として長周期地震動階級を定め、2013年3月からは、各地で観測された長周期地震動階級等の観測情報を気象庁ホームページで試行的に提供し、2019年3月より本運用とした。

また、2013年度以降は有識者によるワーキンググループにて長周期地震動の特性を考慮した予測技術とそれを踏まえた予測情報のあり方を検討し、2020年9月からは長周期地震動階級等の予報業務許可制度を開始した。そして2023年2月から、長周期地震動の予測情報と観測情報のオンライン配信を開始している。

6.2 長周期地震動の予測のための技術

長周期地震動は、その距離減衰に周期依存性があるほか、深部地盤構造などの影響を受け増幅しやすい周期が場所により異なるなどの特性がある。このため、長周期地震動の予測には従来の震度予測とは異なる予測技術が必要となる。

気象庁では、長周期地震動階級を予測するにあたり、長周期地震動予測技術検討ワーキンググループでの検討結果を踏まえ、国立研究開発法人防災科学技術研究所が開発した絶対速度応答スペクトル（Sva）距離減衰式（Dhakal et al. (2015)）を用いている。この式に、緊急地震速報で推定した①マグニチュードと震源の②緯度経度、予測地点の③緯度経度と④補正係数を入力することで、長周期地震動階級を求めている（図6.1）。なお④補正係数については、「A. 観測記録から統計的に得られる補正係数」と「B. 地盤情報から推定される補正係数」の2つを用いる事が可能だが、過去の検証（気象庁地震火山部（2017））で両者の予測適合度を比較すると方法Aを用いた場合の適合度が高かったため、気象庁の長周期地震動予測では方法Aの補正係数が得られた予測対象地点では方法Aを用い、方法Aの補正係数が無い予測地点では方法Bを採用している。

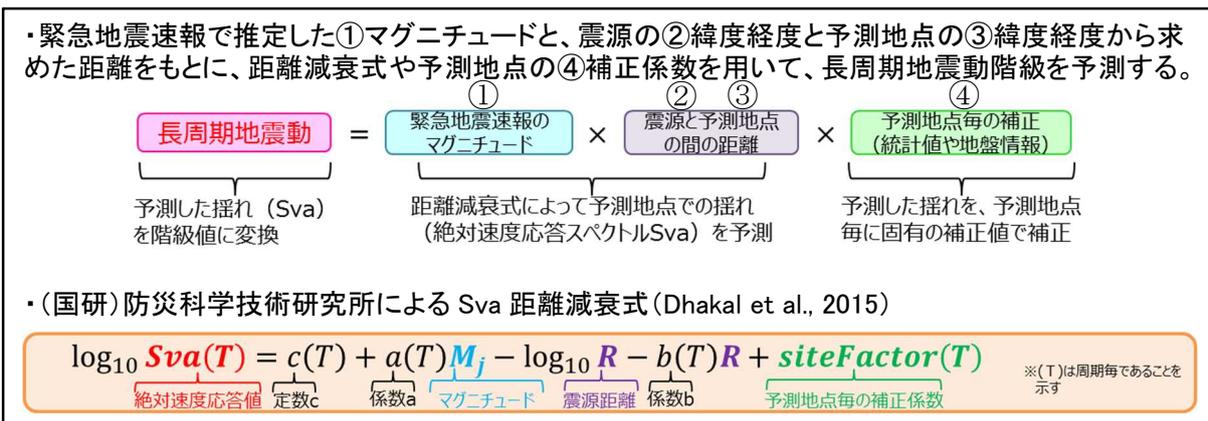


図 6.1 長周期地震動の予測手法概要と気象庁が用いる予測式

6. 3 長周期地震動予測の運用開始（緊急地震速報の改善）

長周期地震動による強い揺れに対して求められる対応行動として、安全な場所で揺れが収まるまで身を守るという点は、震度によるそれと同様である。また、この予測情報は広く国民に警戒・注意が呼びかけられるべきである。これらの条件を満たす予測情報の伝達手段として 2007 年に運用を開始した緊急地震速報（警報）が最適であるとされ（気象庁地震火山部（2017））、これに長周期地震動の予測基準（階級 3 以上の予測で警報基準）を追加し、2023 年 2 月 1 日より運用を開始した。

また新規情報として、緊急地震速報（予報）に長周期地震動の予測結果を加えた、緊急地震速報（地震動予報）の提供を開始した。これによってより細かな予測情報の提供が可能となり、予報業務許可に適合した民間事業者においては、長周期地震動の影響を受ける高層ビル等の長大構造物におけるさまざまなニーズに対応するための予報資料として利用することが可能となった。

対象予報区については、従来の緊急地震速報（警報）を発表する基準に長周期地震動の予測値を追加することから、それにあわせて、地方単位、都道府県単位、予報細分区域単位（全国 188 地域）としている。対象予測地点については、長周期地震動に関する観測情報で既に活用している観測点（現時点では気象庁観測点約 670 点）とし、予報区ごとの最大値を予報区の予測値としている。

長周期地震動の予測精度は、震源の緯度経度・マグニチュードの精度に大きく依存する。そのため、過去の検証（気象庁地震火山部（2017））から、具体的には「マグニチュード決定に係る観測点数が 3 点以上、または地震検知から 15 秒経過した以降の緊急地震速報震源」を利用することで、予測精度を担保している。また、本資料における長周期地震動階級の予測手法は 50km 以浅の地震データに基づいて作られている。過去の検証（気象庁地震火山部（2017））では 150km より深い地震で予測適合度が低下したことから、本予測手法は深さ 150km 以浅の地震を対象として長周期地震動階級を予測している。

参考文献

- 中村浩二（2007）：緊急地震速報について，物理探査，60，367-374.
- 東田進也，堀内茂木，山本俊六（2010）：揺れの予測情報と地震災害低減への活用，平成22年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集，931-936.
- 気象庁（2012）：緊急地震速報評価・改善検討会技術部会（第4回）資料，
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/eew-hyoka/t04/20121001_siryoul.pdf>.
- 東田進也（2015）：緊急地震速報の過去・現在・未来，地震調査研究推進本部20年の資料集，114-120.
- 干場充之，尾崎友亮（2012）：2011年東北地方太平洋沖地震での緊急地震速報と津波警報，地震2，64，155-168.
- Kodera Y., Y. Yamada, K. Hirano, K. Tamaribuchi, S. Adachi, N. Hayashimoto, M. Morimoto, M. Nakamura, and M. Hoshihara (2018) : The Propagation of Local Undamped Motion (PLUM) Method: A Simple and Robust Seismic Wavefield Estimation Approach for Earthquake Early Warning, Bull. Seism. Soc. Am., 108, 983-1003.
- Hoshihara M., and S. Aoki (2015) : Numerical Shake Prediction for Earthquake Early Warning: Data Assimilation, Real-Time Shake Mapping, and Simulation of Wave Propagation, Bull. Seism. Soc. Am., 105, 1324-1338.
- Horiuchi S., H. Negishi, K Abe, A Kamimura, and Y. Fujinawa (2005) : An Automatic Processing System for Broadcasting Earthquake Alarms, Bull. Seism. Soc. Am., 95, 708-718.
- 溜瀧功史，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.
- 汐見勝彦，小原一成，笠原敬司（2005）：防災科研 Hi-net 地震計の飽和とその簡易判定，地震2，57，451-461.
- 山田真澄，溜瀧功史，Stephen Wu（2014）：高精度・高速の緊急地震速報を目指して -気象庁観測網と Hi-net の統合処理-，日本地震工学会論文集，14(4)，21-34.
- 気象庁地震火山部（2012）：長周期地震動に関する情報のあり方報告書（長周期地震動に関する情報のあり方検討会）.
- 気象庁地震火山部（2013）：長周期地震動に関する情報検討会平成24年度報告書（長周期地震動に関する情報検討会）.
- Dhakal Y. P., W. Suzuki, T. Kunugi, and S. Aoi (2015) : Ground Motion Prediction Equations for Absolute Velocity Response Spectra(1 - 10s) in Japan for Earthquake Early Warning, 日本地震工学会論文集，15(6)，91-111.
- 気象庁地震火山部（2017）：長周期地震動に関する情報のあり方について平成28年度報告書（長周期地震動に関する情報検討会）.