

12-8 気象庁の緊急地震速報と津波警報・注意報の高度化 Improvements of Earthquake Early Warning and Tsunami Warning /Advisory of JMA

桑山 辰夫 (気象庁)

KUWAYAMA Tatsuo (Japan Meteorological Agency)

1. はじめに

平成 23 年 (2011 年) 3 月 11 日 14 時 46 分, 東北地方太平洋沖を震源とするモーメントマグニチュード (M_w) 9.0 の巨大地震が発生した。この地震により, 宮城県栗原市で震度 7 を観測したほか, 17 都県で震度 5 弱以上の揺れを観測した。また, 福島県相馬で 9.3m 以上, 宮城県石巻市鮎川で 8.6m 以上等, 東北地方から関東地方にかけての太平洋沿岸を中心に巨大な津波が襲い甚大な被害を生じた (第 1 図)。気象庁では, この「平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震」で明らかとなった地震・津波の情報発表に関する課題を踏まえ, その改善に向けた取り組みを進めてきた。本稿では, 東北地方太平洋沖地震以降に気象庁が実施した緊急地震速報と津波警報・注意報の高度化について紹介する。

2. 緊急地震速報の課題とその高度化

緊急地震速報は, 東北地方太平洋沖地震の本震において, 東北地方に強い揺れが到達する前に迅速に警報を発表することができた。しかしながら, 警報発表時点でマグニチュード (M) 7.2, 高度利用者向けの最終報で M8.1 と M の頭打ちが生じたことや, 球震源モデルからの予測では広がりのある断層面からの揺れに対応できなかったことにより, 予測震度の過小評価が生じた。また, その後の活発な余震活動においては, 同時発生する地震を適切に分離できず 1 つの大きな地震が発生したと解釈してしまうことにより, 予測震度が過大となる警報の発表が相次いだ。気象庁では, これらの課題を解決して緊急地震速報の精度向上を果たすために, 平成 28 年 12 月に IPF 法 (溜瀧・他, 2014¹⁾), 平成 30 年 3 月に PLUM 法 (Kodera et al., 2018²⁾) を導入した。また, 海域で発生する地震の情報発表の迅速化のため, 令和元年 6 月より, 国立研究開発法人防災科学技術研究所が運用している「地震・津波観測監視システム (DONET)」および「日本海溝海底地震津波観測網 (S-net)」の観測データの緊急地震速報への活用を開始した。

IPF 法は, ベイズ推定に基づく震源決定手法である。震源決定や同一地震判定において, P 波の自動検測によって得られた地震検知時刻による走時残差のみではなく, 振幅値や地震波形から得られる諸元推定結果等, 多種類のデータを最も満足させる場所を尤度関数によって評価し, パーティクルフィルタによってもっともらしい震源を効率よく推定することにより, 同時発生する地震についても適切に分離することが可能となり, 震源精度を向上させることができる (第 2 図)。

PLUM 法は, 震源と M を推定した上で各地点の揺れの予測を行う従来の手法とは異なり, 予測地点周辺で観測された揺れの大きさ (リアルタイム震度³⁾) から直接予測地点の震度を予測する手法である。距離 30km 以内で観測された地震波が基盤上を減衰しないで伝播すると仮定して, 予測地点から 30km 以内で観測されたリアルタイム震度をもとに, その最大の値を観測点と予測点の地盤増幅度を考慮した上で予測値として選択する (第 3 図)。予測してから揺れが到達するまでの猶予時間は短くなるものの, 震源と M の推定を介さないため広い震源域を持つ巨大地震であっても精度良

く震度を予測することが可能となる。気象庁では、震源と M からの予測結果と PLUM 法による予測結果を処理して、予測震度が大きいほうを採用して発表している。

さらに、気象庁では DONET や S-net 等の海底地震計の観測データの緊急地震速報への活用を開始した。海底における地震観測は、海域で発生する地震による揺れを直上で観測してより早く検知できるものの、地震計の設置環境や地盤特性が陸上とは異なることから、マグニチュードの推定方法や地震計の姿勢変化の検知等の対策を講じた上で活用を行っている。

3. 津波警報・注意報の課題とその高度化

気象庁では、東北地方太平洋沖地震発生以前より地震発生後 3 分以内に津波警報・注意報を発表することになっていた。東北地方太平洋沖地震においては、地震の規模を M7.9 と推定し、地震発生 3 分後の 14 時 49 分に、岩手県、宮城県、福島県へ津波警報（大津波）、北海道太平洋沿岸中部、青森県太平洋沿岸、茨城県、千葉県九十九里・外房、伊豆諸島へ津波警報（津波）を発表した⁴⁾。しかしながら、この津波警報で発表した地震の規模や津波の高さの予想は、実際の地震の規模や津波の高さを大きく下回るものであった。また、地震発生後速やかに地震の規模を算出した後、約 15 分後に CMT 解を算出して地震の発震機構や Mw を推定し、その Mw を用いて津波警報の精度を高めるといって運用を行っているが、気象庁が整備していた広帯域地震計のほとんどが振り切れたため、CMT 解を計算することができず、その後沖合の津波計や沿岸の検潮所での津波の観測データにより順次津波警報等を引き上げることとなった。

東北地方太平洋沖地震のような巨大地震の場合、断層の破壊の継続中に津波警報等の発表を判断しなければならないため、断層が破壊途中であることが判断できるように長周期成分波形モニタ（第 4 図）を導入して、刻々と変化する地震計の振幅の成長具合を監視し、マグニチュードが過小と判断した場合は、第一報の津波警報等を定性表現で発表することで、早い避難を促すことにした。それに伴い、巨大地震発生時でも Mw を推定できるよう、広帯域強震計を全国 80 地点に導入し、その Mw を使って津波警報等を定量（数値）表現（第 5 図）で切り替えることにした⁵⁾。また、観測された津波の高さが、予想される津波の高さより小さい場合、津波の高さ（数値）をそのまま発表すると安心情報と受け止められ、避難所から自宅に戻ることも想定されるため、今後高い津波が襲ってくることを想像させ、避難所に留まっていただけのように、「観測中」という表現で伝えるようにした。

それに加え、これまでは、沿岸での検潮所での観測値のみ発表していたが、沖合の津波の観測データを監視し、沿岸の観測よりも早く、沖合における津波の観測値と沿岸での津波の推定値も発表し、予想よりも高い津波が推定される時は直ちに津波警報を更新するようになった。これらの津波警報等の改善は平成 25 年 3 月 7 日から運用を開始している⁶⁾。

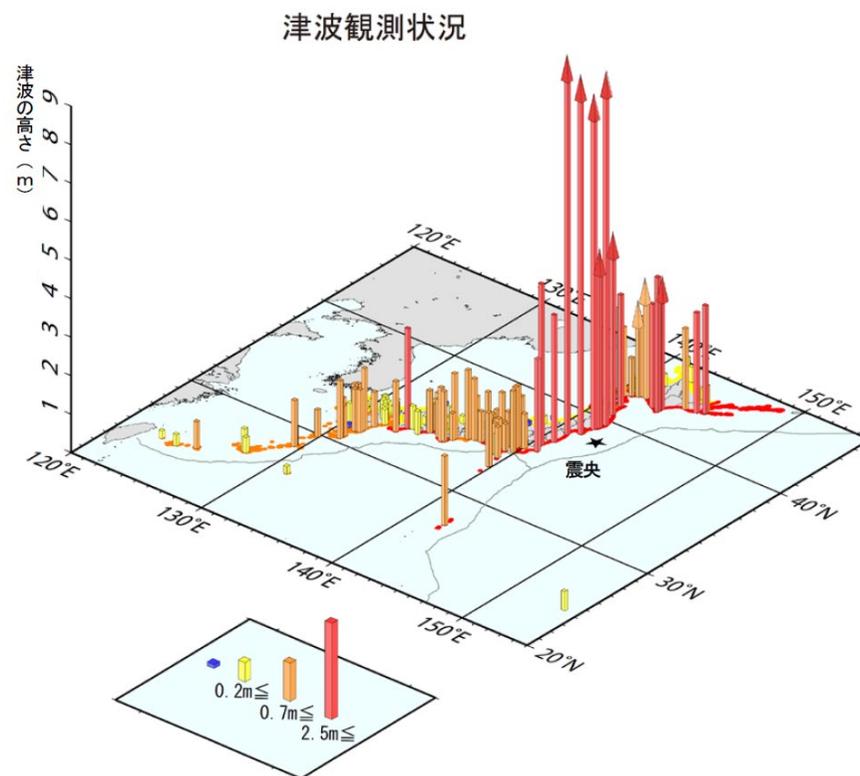
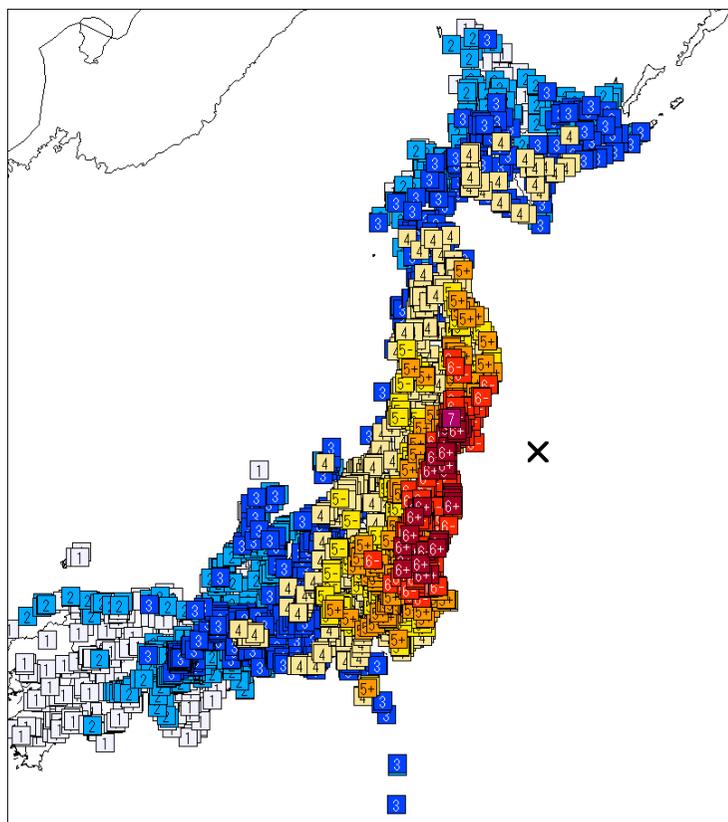
沖合で津波を観測したときには経験則に基づいて沿岸での津波の高さを予測していたが、平成 31 年 3 月から tFISH（tsunami Forecasting based on Inversion for initial sea-Surface Height）^{7),8)}を導入し、沖合に設置している海底津波計で津波を観測した場合、津波波形の逆解析で波源の推定を行い、グリーン関数の線形結合による沿岸での予測波形を合成し、沿岸での津波を予測して津波警報等の更新を行うこととした（第 6 図）。

（桑山 辰夫）

KUWAYAMA Tatsuo

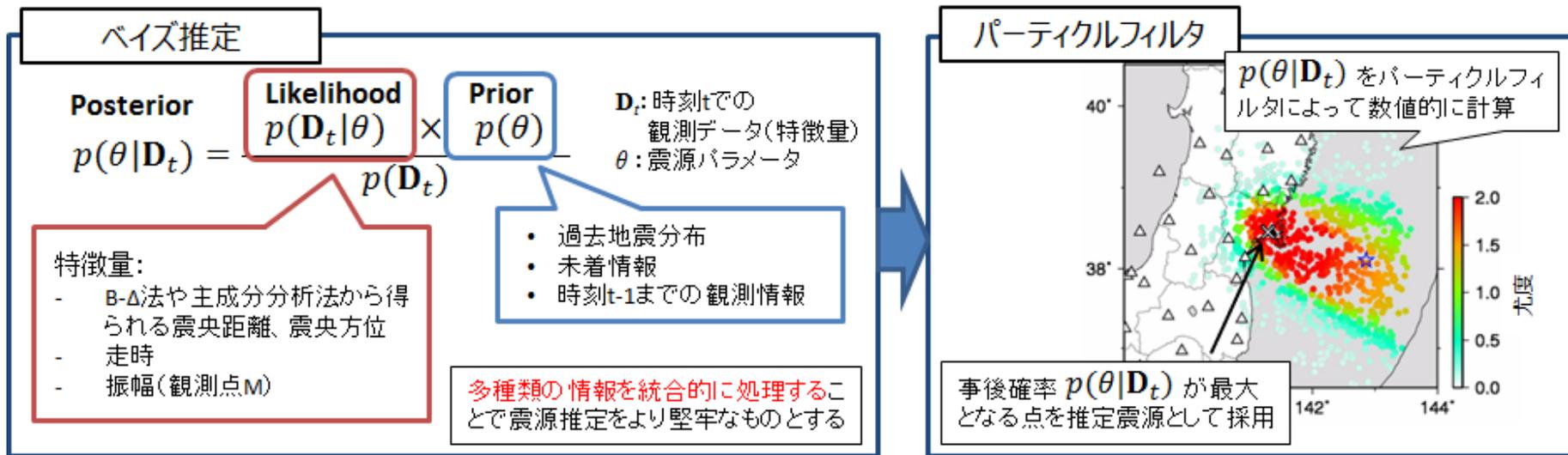
参考文献

- 1) 溜瀧功史, 山田真澄, Stephen Wu (2014), *地震 2*, **67**, 41-55.
- 2) Kodera et al. (2018), *Bull. Seism. Soc. Am.*, **108**, 983-1003.
- 3) 功刀卓, 青井真, 中村洋光, 藤原広行, 森川信之 (2008), *地震 2*, **60**, 243-252.
- 4) 気象庁 (2012), 気象庁技術報告 第 133 号, 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震調査報告.
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/gizyutu/133/gizyutu_133.html
- 5) 気象庁, 津波警報・注意報, 津波情報, 津波予報について,
<https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/joho/tsunamiinfo.html>
- 6) 気象庁, 津波警報の改善について,
<https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/tsunami/kaizen/index.html>
- 7) Tsushima et al. (2009), *J. Geophys. Res.*, **114**, B06309.
- 8) Tsushima et al. (2012), *J. Geophys. Res.*, **117**, B03311.

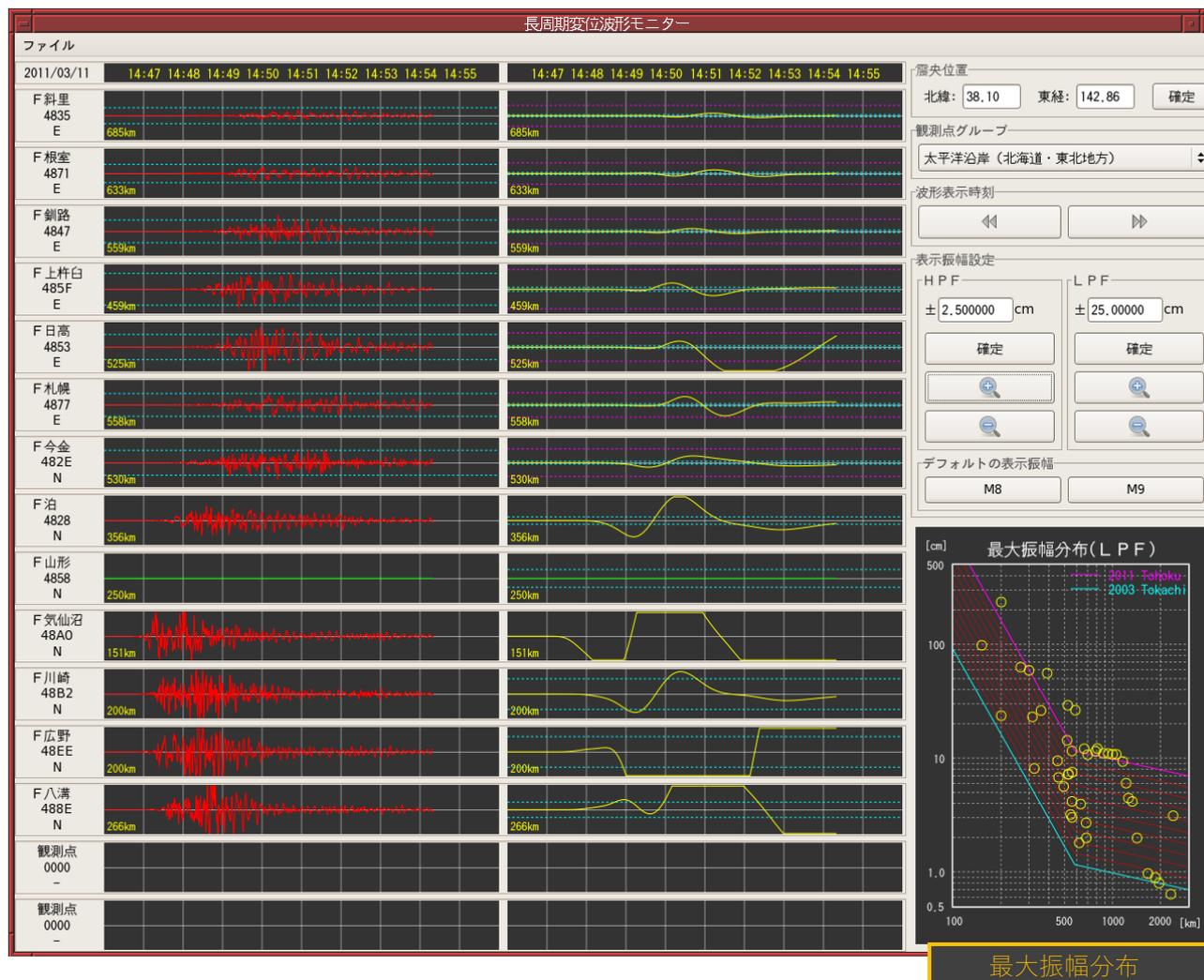


第1図 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震において観測された震度(左)と津波(右)。

Fig. 1 Distribution Map of seismic intensities (right) and Tsunami heights (left) observed during the 2011 Tohoku Earthquake.



第2図 IPF法の概念図.
 Fig. 2 Conceptual diagram of IPF method.



第4図 長周期成分波形モニタの表示例。最大振幅表示の黄色い丸が各観測点の振幅を表し、青いラインがマグニチュード8、紫色のラインがマグニチュード9のラインを示す。

Fig. 4 Example of display of long-period component waveform monitor. The yellow circles in the maximum amplitude display indicate the amplitude of each observation point, and the blue line indicates the magnitude 8 and the purple line indicates the magnitude 9 line.

警報・注意報 の分類	従 来	平成25年（2013年）3月から			
	発表する 津波の高さ	予想される津波の高さ		とるべき行動 （注警報の注意・警戒文 に記述）	津波の高さに応じたりスク （高さ予想の情報の解説文に記 述）
		数値での発表 （発表基準）	巨大地震の 場合の発表		
大津波警報	10m以上	10m超 (10m < h)	巨大	大きな津波が襲い甚大な被害が発生します。沿岸部や川沿いにいる人はただちに高台や避難ビルなど安全な場所へ避難してください。津波は繰り返し襲ってきます。警報が解除されるまで安全な場所から離れないでください。	巨大な津波が襲い壊滅的な被害が生じる。木造家屋が全壊・流失し、人は津波による流れに巻き込まれる。
	8m 6m 4m	10m (5m < h 10m)			巨大な津波が襲い甚大な被害が生じる。木造家屋が全壊・流失し、人は津波による流れに巻き込まれる。
	3m	5m (3m < h 5m)			津波が襲い甚大な被害が生じる。木造家屋が全壊・流失し、人は津波による流れに巻き込まれる。
津波警報	2m 1m	3m (1m < h 3m)	高い	津波による被害が発生します。沿岸部や川沿いにいる人はただちに高台や避難ビルなど安全な場所へ避難してください。津波は繰り返し襲ってきます。警報が解除されるまで安全な場所から離れないでください。	標高の低いところでは津波が襲い被害が生じる。木造家屋で浸水被害が発生し、人は津波による流れに巻き込まれる。
津波注意報	0.5m	1m (0.2m h 1m)	(表記なし)	海の中や海岸付近は危険です。海の中にいる人は、ただちに海から上がって、海岸から離れてください。潮の流れが速い状態が続きますので、津波注意報が解除されるまで海に入ったり海岸に近づいたりしないようにしてください。	海の中では人は速い流れに巻き込まれる。養殖いかだが流失し小型船舶が転覆する。

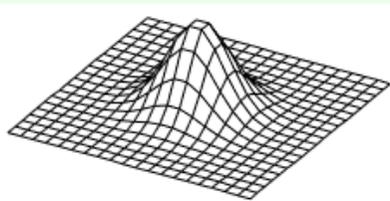
第5図 津波警報・注意報の種類

Fig. 5 Types of tsunami warnings and advisories.

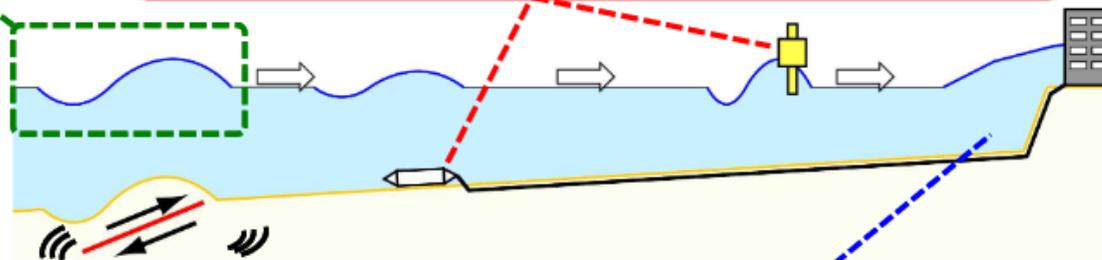
津波波形逆解析
による波源の推定



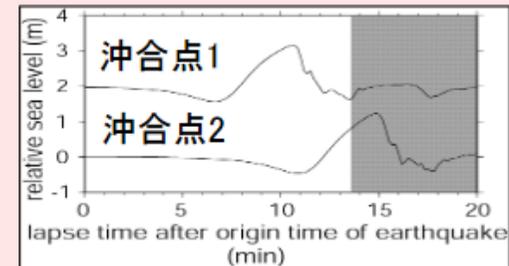
初期水位分布



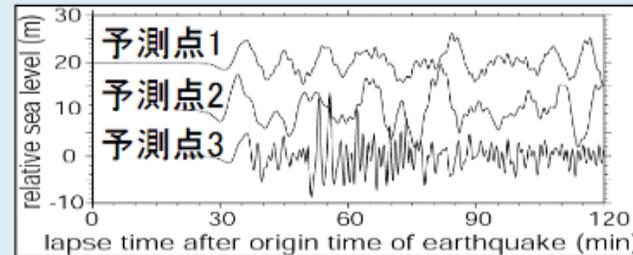
グリーン関数の線形結合
による予測波形の合成



沖合の
観測津波波形
(予測実施時刻まで)



沿岸の
予測津波波形



第6図 tFISHの概念図
Fig. 6 Conceptual diagram of tFISH.