

海底地震計情報を活用した早期地震検知手法の即時性向上

野田 俊太* 岩田 直泰*

Improvement in Rapidness of Earthquake Early Warning using Ocean Bottom Seismic Data

Shunta NODA Naoyasu IWATA

This paper proposes two earthquake early warning (EEW) methods for ocean bottom seismic (OBS) data system of railways. The one is that the P-wave warning method, which has been used in the conventional Shinkansen system, can be applied also to the OBS data. Using multiple-station data, the other method enables us to issue an earthquake alert to areas far from the source region earlier than the conventional technique while an extremely large rupture is in progress. We conclude that the OBS data system can be improved in terms of the rapidness of EEW using the methods proposed in this study.

キーワード：海底地震計，早期地震検知，地震諸元，P波警報，複数観測点処理，マグニチュード

1. はじめに

新幹線の地震対策の一つとして，早期地震警報システムが用いられている¹⁾。このシステムでは，各事業者が管理運用する早期警報用地震計を用い，P波初動の情報から地震の発生位置と規模を推定して警報を出力する手法（以下，P波警報手法），および地震動指標値がしきい値を超過した場合に警報出力する手法（以下，S波警報手法）により列車停止判断を行っている。また，システムの冗長性を高めるために気象庁の緊急地震速報を用いた警報判断も併せて実施している²⁾。さらに近年では，海域で発生する地震に対して警報の即時性を高めるため，国立研究開発法人防災科学技術研究所（以下，防災科研）より日本海溝海底地震津波観測網 S-net（以下，S-net）および地震・津波観測監視システム DONET（以下，DONET）の情報を事業者が直接受信し，新幹線の列車停止判断に活用する取り組みが開始されている³⁾。図1に，S-net および DONET の海底地震計の分布を示す。

上述の海底地震計データ活用の開始に際して，鉄道総研は海底地震計情報を防災科研から直接受信して早期地震警報システムにおいて活用するための地震警報手法および海底地震計情報の伝送手法などを事業者や防災科研と協力して整備し，海底地震計情報受信システムの開発を行った⁴⁾。なお，開発当時は海底地震計の観測データ量が限定されていたため，地震警報手法については，大量のデータに基づく詳細な検討を行なう必要があるP波警報手法は使用せず，S波警報手法のみを用いることになった。現在のS波警報手法では，単点で大きなしきい値超過が確認された場合，その観測点近傍の沿線の受け持ち範囲に警報を出力する方法が使われている（以

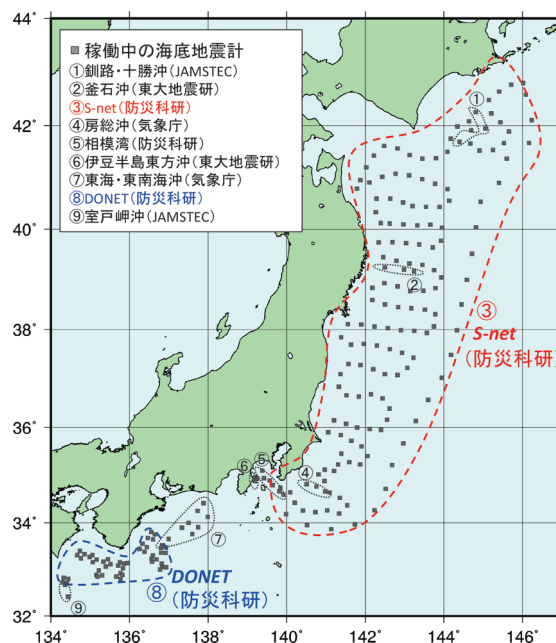


図1 日本周辺で稼働中の海底地震観測網

下，固定範囲制御）。しかしながら，警報の即時性をさらに高めるためには，伝播速度の速いP波の情報を活用したP波警報手法の利用が有効である。一方，海底地震観測網が設置された海域では巨大地震の発生が懸念されていることから，大規模地震時にその発生を迅速に検知することにより，広域に警報を出力するまでの時間を従来のS波警報手法に比べて短縮することが望まれている。

そこで本研究では，海底地震計情報を活用した早期地震検知手法の即時性向上に関する検討を行った。2章では，単独観測点の海底地震計データによりP波警報を行うための検討結果と，具体的な警報判定方法を提案する。3章では，複数観測点の海底地震計情報に基づき，

* 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

大規模地震の発生検知を行う手法とそれによる警報判断方法の例を示す。

2. 海底地震計データを用いた単独観測点情報によるP波警報手法

1章で述べた通り、現時点での事業者の海底地震計情報受信システムはP波警報手法を使用していない。そこで本章では、蓄積された海底地震計データを用いてP波の早期地震諸元推定のパラメータを決定し、推定精度を検証すると共に、その結果を踏まえたP波警報手法を提案する。

2.1 海底地震計データによる早期地震諸元推定の精度

陸上に設置された早期警報用地震計は、観測された地震動データを解析し、P波検知後速やかに地震諸元を推定する⁵⁾。なお、ここでの地震諸元とは震央距離 (Δ)、震央方位、マグニチュード (M) の三要素を指し、それぞれC- Δ 法、主成分分析法、距離減衰式法を用いて推定を行っている。列車を制御する範囲は、推定された地震諸元情報を基にM- Δ 法⁶⁾を用いて決定される。そこで、陸上地震計データに対して使用されていたこれらの各手法を海底地震計データに適用し、地震諸元の推定精度を検証する。検証に使用するデータは、S-netおよびDONETで観測された6,908個の地震波形記録である。このデータセットにおいて、気象庁マグニチュード (M_j) は4.1~7.4であり、震央距離は200km以内のものを用いた。

2.1.1 震央方位の推定

図2に震央方位の推定誤差頻度分布を示す。陸上で観測されたP波初動部分の地震波形データに主成分分析法を適用した場合、その主成分の方向から震央方位を精度よく推定することが可能であり、推定誤差は0度に近いものが多くなる⁷⁾。一方、この図に示す結果では震央方位の推定誤差が広い範囲にほぼ同じ頻度で分布してい

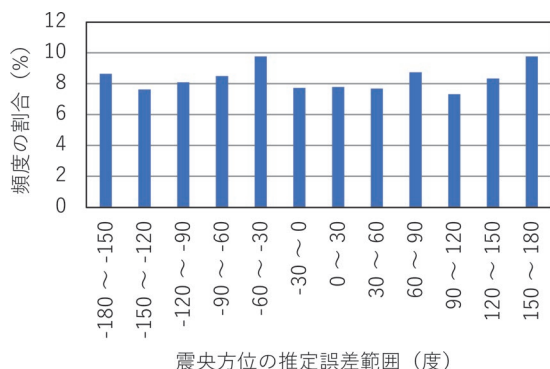


図2 海底地震計データによる震央方位の推定誤差頻度分布

る。この結果は、海底地震計データによる震央方位の推定精度が低いことを示している。これは、海底地震計が設置されている海底の地盤が極めて軟弱であるため、地震計への地震波がほぼ鉛直下方から入射し、P波の到来方向が震央方位を反映しづらいことに起因している可能性がある。そこで、震央方位情報に依存しない警報判定手法を2.2節において提案する。

2.1.2 震央距離の推定

次に、図3に震央距離 $\text{Log}\Delta$ (気象庁震源位置から計算された正解値; 横軸) とC- Δ 法による $\text{Log}C$ (縦軸) の関係を示す (Logは常用対数を表す)。なお、C- Δ 法とはP波初動の傾きを表すパラメータ ($\text{Log}C$) と $\text{Log}\Delta$ が負の相関関係を持つという性質を利用し、 $\text{Log}C$ の値から震央距離を推定する手法である⁵⁾。図3から分かる通り、海底地震計データを使用した解析でも、 $\text{Log}\Delta$ が小さいときは $\text{Log}\Delta$ と $\text{Log}C$ の間に負の相関があることが確認できる。しかしながら、 $\text{Log}\Delta$ が概ね100kmより大きくなると相関性が失われ、データ分布が横軸に平行となる傾向が見られる。そこで以下の解析では、海底データによる震央距離推定の適用上限を100kmとする。

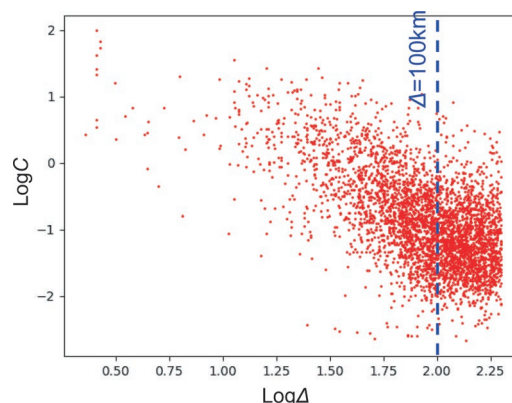


図3 震央距離200km以内の海底地震計データによる震央距離とC値の関係

なお文献8では、陸上の観測点において記録された地震波形データを解析し、P波初動の傾きを表すパラメータと $\text{Log}\Delta$ の負の相関性は震央距離が概ね150km以内の観測点で得られたデータにおいて確認され、それより遠方の観測点では相関性が見られなくなることを指摘した。文献8は、その原因として陸上における150kmより遠い観測点では、P波初動部分のデータは震源から放出された直達波ではなくモホロビッチ不連続面 (以下、モホ面; 地殻とマンツルの境界面) からの屈折波が先着するため、その影響を受けている可能性を指摘した。一方、今回の海底データの分析ではそれよりも相関性が失われる震央距離がやや短かったが、これは陸域と海域では地球内部の構造が異なるため (モホ面までの深さ

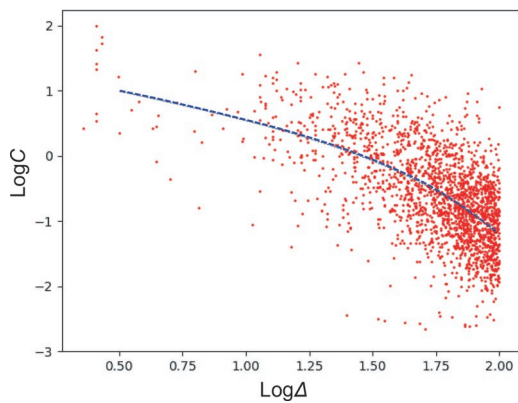


図4 震央距離 100km 以内の海底地震計データによる震央距離と C 値の関係およびその回帰線（青の破線）

は、海域のほうが浅いなど）、震央距離がより短い場所で屈折波の影響が顕在化していることが原因である可能性がある。

図4に震央距離の適用上限を 100km とした場合の LogC と Log Δ の分布、および LogC と Log Δ の回帰式を示す。線形最小二乗法によって得られた回帰式は、式 (1) となる。

$$\text{LogC} = -1.0 * \text{Log} \Delta + 1.687 - 0.008819 * \Delta \quad (1)$$

なお回帰においては、式 (1) 右辺第 1 項は地震動の幾何減衰を表すため、その係数を -1.0 としている。式 (1) の各係数の大きさは、新幹線早期地震警報システムにて陸上データに対して使用されているものと概ね整合している。上述した海底地震計でのデータセット ($\Delta \leq 100\text{km}$) を用いて、式 (1) によって震央距離を推定したところ、推定誤差の対数二乗平均平方根 (RMSLE) は 0.299 となった。防災科研の強震観測網 K-NET (以下、K-NET) の地震波形記録を使用した陸上データによる同推定誤差の結果は $\text{RMSLE} = 0.310$ 程度であるため、今回の海底データの結果は陸上とはほぼ同等の精度であると結論付ける。

2.1.3 マグニチュードの推定

上述の海底地震計データセットを用いて、マグニチュード (M) の推定式 (距離減衰式) を作成した。作成においては、震央距離 100km 以内のデータのみを用いている。現在の P 波警報における早期地震諸元推定方法では、4 種類のマグニチュード推定式 (それぞれ、P 波加速度、P 波変位、S 波加速度、S 波変位データから得られるマグニチュード) を用いている⁵⁾。加速度データから得られるマグニチュードは変位によるものと比べ、値が大きくなるまでの時間が早い (即時性が高い) もの、精度がやや劣るといった性質がある。今回の解析

から得られた式は、それぞれ式 (2) から式 (5) の通りである。

$$M_{ap} = 0.6249 * \text{Log} A_{umax} + 0.3184 * \text{Log} \Delta + 4.195 + 0.006012 * \Delta \quad (2)$$

$$M_{dp} = 0.6008 * \text{Log} D_{umax} + 0.3696 * \text{Log} \Delta + 5.715 + 0.001972 * \Delta \quad (3)$$

$$M_{as} = 0.6500 * \text{Log} A_{3max} + 0.2703 * \text{Log} \Delta + 3.719 + 0.003947 * \Delta \quad (4)$$

$$M_{ds} = 0.6246 * \text{Log} D_{3max} + 0.3831 * \text{Log} \Delta + 5.074 + 0.0003323 * \Delta \quad (5)$$

ここで、 M_{ap} は P 波加速度マグニチュード、 M_{dp} は P 波変位マグニチュード、 M_{as} は S 波加速度マグニチュード、 M_{ds} は S 波変位マグニチュード、 A_{umax} は P 波上下動加速度、 D_{umax} は P 波上下動変位、 A_{3max} は S 波 3 成分合成加速度、 D_{3max} は S 波 3 成分合成変位を表す。

それぞれの推定式から得られる各マグニチュードの推定誤差の二乗平均平方根 (RMSE) は、 0.453 , 0.389 , 0.436 , 0.349 となる。陸上データの結果では、P 波マグニチュードの RMSE は 0.511 、同 S 波マグニチュードは 0.541 であることから、海底データによるマグニチュード推定精度は、陸上データと比較して同等以上である。ただし、この比較は使用しているデータセットの Δ の範囲が異なる点に注意を要する (陸上データは $\Delta \leq 200\text{km}$ 、海底データは $\Delta \leq 100\text{km}$)。以上より、海底地震計データによる早期地震諸元推定のマグニチュード推定が有効であることを確認した。

2.2 海底地震計データによる P 波警報手法の提案

2.1 節で示した通り、海底地震計データによる早期地震諸元推定は震央方位推定の精度が低いものの、 $\Delta \leq 100\text{km}$ の範囲における震央距離およびマグニチュードの推定精度は、陸上地震計データによるものと同等と考えられる。なお、海底地震観測網が地震検知のターゲットとしているのは、主に海底観測網の直下またはその近辺で発生する地震であることから、震央距離の適用上限が陸上データに比べて低いことは早期地震警報の実用上大きな問題とはならないと考える。すなわち、従来陸上の地震計のみで早期地震検知を行っていた時点では、対象を海域で発生する遠方の地震まで含める必要があったが、海底地震観測網が整備されてきた現在においては海底データの主な対象は海域で発生する地震、陸上データの主な対象は陸域で発生する地震と分けて考えることができるため、海底データの適用上限が 100km 以下であっても問題無いと考えられる。以上の事柄を考慮し、海底地震計データによる P 波警報手法として、震央方位を利用しない警報判定手法を以下に提案する。

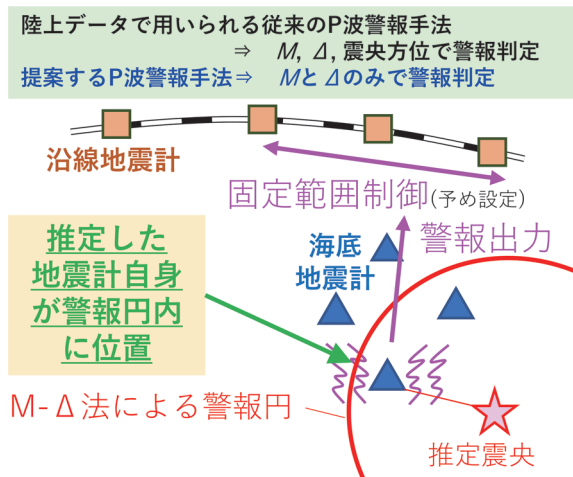


図5 海底地震計データで適用可能なP波警報手法の概念図

1章でも述べた通り、現在の海底地震計情報受信システムでは、海底地震観測点のうち1点において大きなしきい値を超過する地震動が観測された場合、予め定められた区間内の列車を停止させる（=き電停止させる）「固定範囲制御」が用いられている（S波警報手法）。海底地震計データによるP波警報手法では、P波情報を用いて警報の即時性を高めつつも、これに準じた警報判定手法を用いることを提案する。この概念図を図5に示す。具体的な手順は以下の通りである。

- (1) 各観測点において海底地震計データを解析し、P波による早期地震諸元推定により震央距離とマグニチュードを求める。
- (2) 推定を行った観測点がM- Δ 法⁶⁾による警報円内に位置するかどうかを判定する。
- (3) 警報円内に位置している場合、その観測点ではある一定以上の地震動が到来する可能性が高いことから、固定範囲制御を行う。

(3) で述べたP波警報手法における「ある一定以上の地震動が到来する可能性が高い」という状況は、S波警報手法において「ある一定のしきい値を超過する地震動が観測される」ことに相当すると解釈できる。(2)で示した推定した観測点が警報円内に位置するかどうかの判定は、震央距離とマグニチュードの関係のみによって決定されることから、この手法では震央方位の情報に依存せずにP波による警報判断を行うことができる。この提案手法を用いることにより、早期地震警報の即時性が向上し、さらに鉄道の地震時安全性が高まることが期待される。

3. 複数観測点の海底地震計情報による広域への地震警報手法

1章で述べた通り、現行の海底地震計情報受信システムにおいては、S波警報手法による固定範囲制御が用いられている。一方、海底地震観測網が設置された海域では巨大地震の発生が懸念されていることから、大規模地震時にその発生を迅速に検知することにより、従来手法に比べて広域に警報を発出するまでの時間を短縮することが望まれている。そこで本章では、複数観測点の海底地震計情報に基づき、地震の規模を迅速に検知する手法の開発を行った。また、この手法に基づく地震警報の有効性を検討した結果についても述べる。

3.1 空間補間法による地震動分布の計算と地震規模の推定

3.1.1 陸上地震計データを使用した地震規模推定手法の開発

2章で示した通り、マグニチュード (M) を推定する場合、式(2)~(5)に示すような距離減衰式を用いることが一般的である。これは、地震計で記録された変位振幅などの大きさから M を推定する方法であるが、地震規模が非常に大きい (M が 8.3 程度を上回る) 場合、地震計で記録される振幅の大きさは頭打ち（飽和）することが知られている⁹⁾。頭打ちすると M を過小評価してしまうため、本章で対象としているような巨大地震発生の検知に対して、距離減衰式を使うことは適切ではない。そこで、鉄道地震被害推定情報配信システム (Damage Information System for Earthquake on Railway: DIS-ER)¹⁰⁾でも使用されている空間補間法の一つである逆距離加重法 (IDW 法) により地震動分布を計算し、その結果に基づき地震規模を推定する方法を提案する。既往の研究により、ある一定値以上の地震動領域の面積は、地震規模に関係していることが知られている¹¹⁾。この性質を利用する利点は、地震の規模が非常に大きい場合でも、この面積の大きさが頭打ちしないと考えられることである。この理由により、本研究では面積を用いて M を推定する。なお、海底地震計で観測された大規模地震データの蓄積が十分とは言えないことから、最初に陸上地震計で観測されたデータで本手法を検討し、それを海底地震計データに対して適用することで、推定式を構築する。使用する陸上地震計データは、防災科研の K-NET で観測された $M_j=4.5\sim 9.0$ かつ震央距離 200km 以内の計 11,198 記録である。

IDW 法において、任意の地点の地震動強さ A' は式 (6) で計算される。

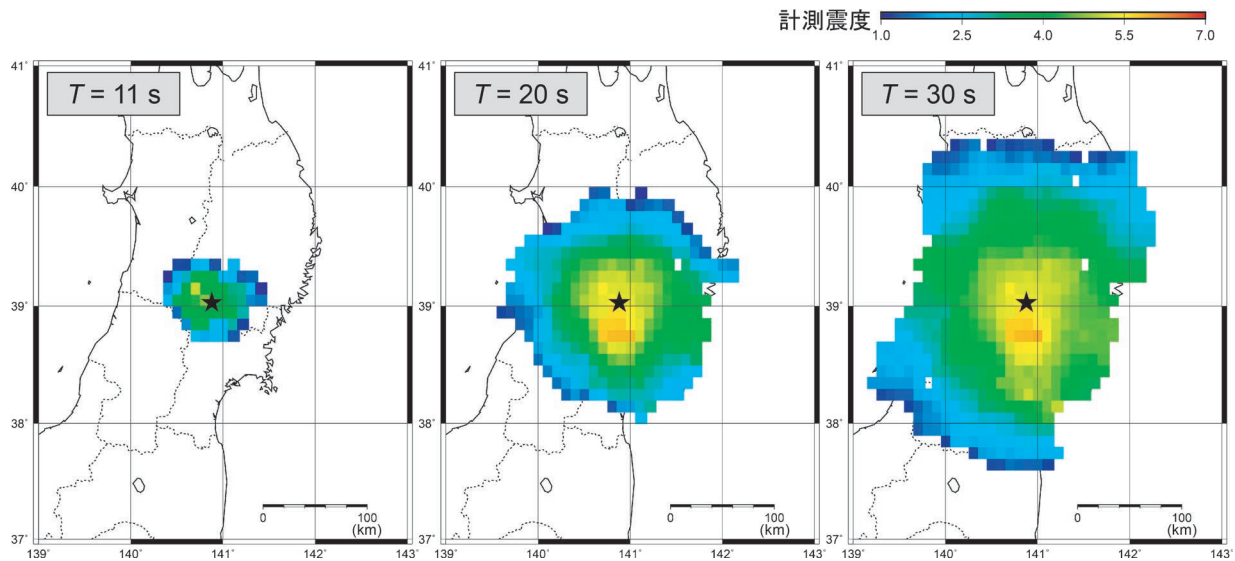


図6 2008年6月14日岩手・宮城内陸地震 (Mj7.2) の観測データを用いてIDW法より推定された地震発生からの経過時間 T における計測震度の分布

$$A' = \sum_{i=1}^n w_i * A_i \quad (6)$$

$$w_i = \frac{1/r_i}{\sum_{i=1}^n 1/r_i}$$

ここで、 A は地震計で観測された地震動指標値の大きさ、 r はその任意地点から地震計の設置位置までの距離、 w は観測された地震動指標値の大きさに掛ける重み、 i は観測点を識別する番号、 n はその任意地点の地震動指標値の大きさを計算するために使われる観測点の数である。

本研究では、地震動指標値として計測震度を使用する。地震毎の計測震度の面的な拡がり进行を計算するために、震央距離が最も小さい観測点から緯度経度それぞれ ± 3 度の領域において、0.1度刻みで計測震度の値を計算するグリッドを設定した。ここで各グリッドにおいて、当該グリッドから30km以内に最低2観測点以上の地震計で観測値が得られている場合のみ計算を行った。ただし、11観測点以上の観測値が得られている場合は、その地点から最寄りの10観測点を選択し、そのデータから計算を行っている。

計算された面的地震動分布の例を図6に示す。この図は、2008年6月14日岩手・宮城内陸地震 (Mj7.2) の各時間 T (T は地震発生からの経過時間) における面的な計測震度分布である ($T=11, 20, 30$ s における結果を例示)。なお各 T における各観測点での計測震度は、文献12によるリアルタイム震度演算手法によって計算している。黒の星印は震央位置を示す。この結果から、時間の経過に伴って地震動が拡がっていく様子が確認される。

各地震において、計測震度分布の最終値がそれぞれ3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5のしきい値を超過するグリッド

表1 式(7)における計測震度しきい値の係数

計測震度 しきい値	α	β	γ
3.5	0.00291	0.0865	5.712
4.0	0.00361	0.0951	5.874
4.5	0.00361	0.1081	6.182
5.0	0.00297	0.1411	6.419
5.5	0.00255	0.1350	6.747

の数の N_{grid} を求め、 M_j との関係式を構築した (式(7))。式(7)の各係数は重回帰による線形最小二乗法により求めた。この結果を表1に示す。

$$M_j = \alpha * N_{\text{grid}} + \beta * \text{Log} \Delta_{\text{closest}} + \gamma \quad (7)$$

ここで、 Δ_{closest} は震央から最寄りの観測点までの距離を表す。 Δ_{closest} を本式に組み入れる理由は、 N_{grid} からマグニチュードを推定する際、地震観測網の近傍で M の小さい地震が発生した場合、観測網の遠方で M の大きな地震が発生した場合に N_{grid} が同じ数になるときがある (=トレードオフが発生する) が、 Δ_{closest} を入れることでそれらを分離することができるためである。海底地震計情報受信システムにおける実際の処理においては、 Δ_{closest} は緊急地震速報による震央位置から計算することができると思われる。

式(7)および表1に示す係数を用いて、陸上地震計データから M を推定した結果を図7に示す (横軸が気象庁マグニチュード M_j 、縦軸が推定マグニチュード M_{est})。この図において、黒の丸印で示した点が陸上地震

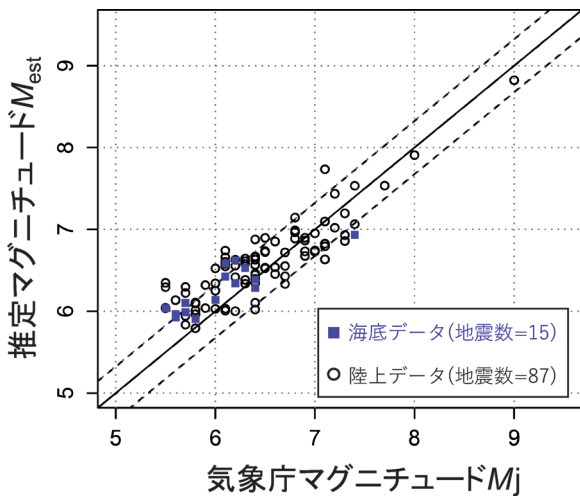


図7 気象庁マグニチュード M_j と提案手法による推定マグニチュード M_{est} の関係

計データを使用した結果である。ここで、表1の通り計測震度のしきい値を5つ定義していることから、 M_{est} の値は1つの地震あたり最大5個求められる場合がある。後述する通り、警報の早期性を高めるためにはより大きなしきい値から求めた M_{est} を使うことが有効であるため、図7は各地震において最も高いしきい値を使用して得られた M_{est} を代表値として表示している。なお $\Delta_{closest}$ は、ここでは気象庁発表の震源情報の値を用いて、最寄りのK-NET観測点までの震央距離を求めている。その結果、 M_{est} の推定誤差 ($M_{est} - M_j$)の二乗平均平方根(RMSE)は0.324となった。前章で示した通り、現行の早期地震諸元推定手法でのP波警報手法による M 推定のRMSEは0.4~0.5程度であり、本章で示した結果はこれと比較しても十分な精度を持つことが分かる。

図8に、2008年6月14日岩手・宮城内陸地震 ($M_j7.2$)

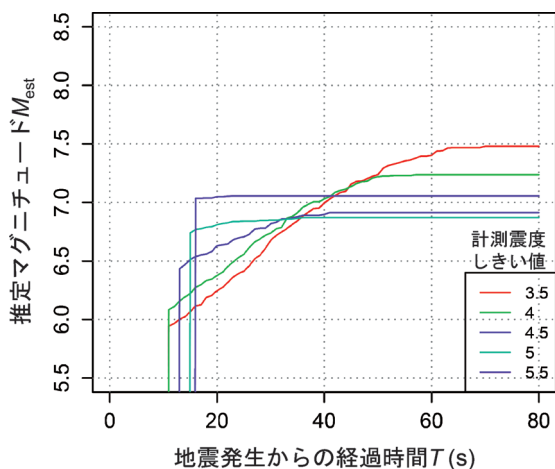


図8 2008年6月14日岩手・宮城内陸地震 ($M_j7.2$)の観測データを用いた提案手法による M_{est} の時間変化

における M_{est} の時間変化を示す(横軸は地震発生からの経過時間、縦軸は M_{est})。各図の右下の凡例に示す色の違いにより、使用している計測震度のしきい値を表す。なおこの計算において、 $\Delta_{closest}$ は気象庁の緊急地震速報で実際に発表された震央位置情報から求めている。この結果から、計測震度のしきい値を高く設定したほうが、より早く大きなマグニチュードを推定できることが分かる。この結果は、次に述べる原理によって説明できる。

地震が発生し、断層破壊が進行して最終的に大きな M の地震イベントに至る状況を考える。ここで破壊進行中のある時点を見ると、震源より遠方の観測点では地震波が到着してからの時間が相対的にまだ短いため、観測されている地震動の振幅もまだ小さく、この地震観測データから得られる震源情報 (M の大きさを含む)が少ない。一方、震源近傍の観測点ではそれと反対の状況になり、相対的に長い時間の地震動を観測することで大きな振幅が得られ、多くの震源情報が推定できることになる。つまり、高いしきい値を使用することは震源近傍の観測点からの情報に着目することに相当し、大きな M をより早く推定することが可能となる。

実用的には、震源近傍の観測点でより大きな地震動が観測された場合、観測されている計測震度の大きさにしたがって使用できる最も大きなしきい値を使うことで M 推定の早期性を高め、警報出力の即時性を確保することができると考えられる。

3.1.2 海底地震計データへの適用

次に、式(7)および表1に示す係数を用いて、海底地震計で観測されたデータを使用して M を推定した結果について述べる。ここで使用する海底地震計のデータセットは、2章で示したものと同一である。なお、海底で観測された地震動データは、陸上データと比較して平均的に大きな揺れになりやすいことが指摘されている³⁾。このことを踏まえ、上述した陸上地震計と海底地震計のデータセットでの観測値を、陸上データから作成された距離減衰式¹³⁾を基に比較した結果、海底地震計で得られた観測値のほうが、計測震度で平均的に0.49大きくなることを確認した。このため、陸上地震計データを用いて作成した式(7)および表1に示す係数を海底地震計データに適用するにあたっては、観測された計測震度値から0.49を減じた上でIDW法による面的地震動分布計算を行うこととした。

海底地震計データから得られた M_{est} の結果を図7の青の四角形にて示す。得られた M_{est} の推定誤差のRMSEは0.33となり、陸上データによる結果とほぼ同等であることを確認した。したがって、ここで提案した方法により、海底地震計データに対しても有効に M を推定できると考える。

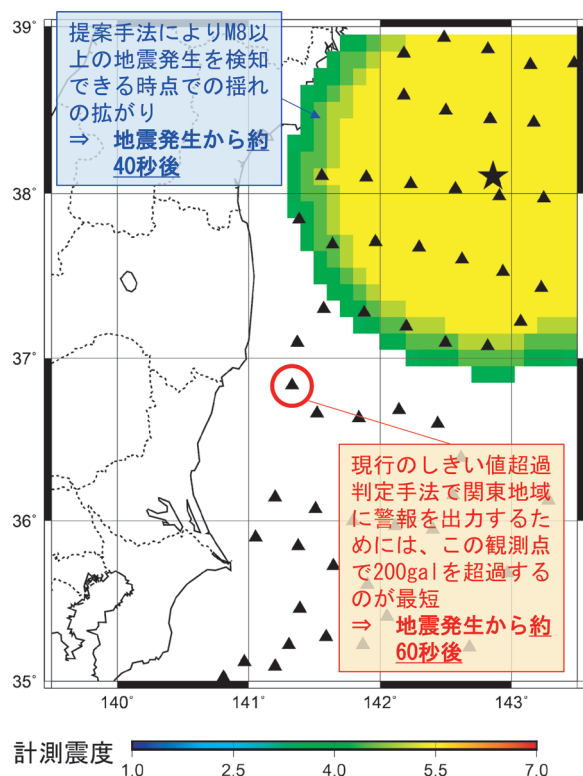


図9 2011年東北地方太平洋沖地震 (M_w 9.0) の震央を仮定したシミュレーションの概要図

3.2 提案手法を用いた広域への地震警報の有効性

ここでは、シミュレーションにより提案手法の有効性を検証する。その実施に先立ち、先述したK-NETの地震波形記録を使用し、各波形データにおける警報用最大加速度⁶⁾および計測震度(リアルタイム震度¹²⁾の上昇(進展)の様子を求めた。その上で、警報用最大加速度および計測震度のしきい値を設定し、地震発生からそれぞれのしきい値を超過するまでの時間を整理した。この結果から、警報用最大加速度および計測震度のしきい値を超過するまでの時間(しきい値をそれぞれ、200galおよび5.5としたときの時間を $T_{JRPGA200}$ 、 $T_{JMAIS5.5}$ とする)を震央距離 Δ の関数として式(8)および式(9)のように定めた。以下のシミュレーションでは、この結果を使用する。

$$T_{JRPGA200} = 0.28 * \Delta + 6.01 \quad (8)$$

$$T_{JMAIS5.5} = 0.33 * \Delta + 5.35 \quad (9)$$

ここで示すシミュレーションは、2011年東北地方太平洋沖地震 (M_w 9.0, M_w はモーメントマグニチュード) の震央位置(図9の黒の星印)において地震が発生し、それをS-netで観測した状況を想定する(実際には、この地震発生時にはS-netは整備されていなかった)。地震発生から、式(8)および式(9)などに示す時間によ

て震央から地震動が拡がり始めることとし、震央からやや離れた関東地域に警報が出力されるまでの時間を考える。なお前提として、震源に近い宮城県などの地域には従来のS波警報手法によって迅速に警報が出ると考えられるが、2011年東北地方太平洋沖地震のような巨大地震においては、最終的に地震の影響を受ける関東地域までを含むような広域に対し、できるだけ早いタイミングで警報を発報することが望ましい。

現行の海底地震計情報受信システムでは、警報用最大加速度を用いたS波警報手法を使用することがある。ここでは、現行のS波警報手法により関東地域に警報が出力されるのが最も早い場合として、図9の赤丸で示す観測点において、警報用最大加速度が200galを超過したときであると考え。これにかかる時間は、式(8)より、地震発生から約60秒後となる。

一方、前節で提案した地震規模推定手法により地震警報を発報する場合を考える。この手法により求められる値は推定マグニチュードであるため、警報判断のためのしきい値が必要となる。ここでは、M- Δ 法⁶⁾における最大の範囲($\Delta=400$ km)に対応した $M=8.0$ を関東地域を含めた広域警報発令の M のしきい値とする。推定マグニチュードが8.0となるタイミングは、式(9)を用いた計算では約40秒になり、その時の計測震度分布の拡がりを図9に示す。以上より、提案手法を適用することにより、従来と比較して20秒程度早く関東地域に警報を出力することができる。したがって、本手法を海底地震計情報受信システムに導入することで、海域での大規模地震発生時において広域に地震警報を出力するまでの時間を大幅に短縮できると考える。

4. まとめ

本研究では、海底地震計情報による早期地震警報の即時性を向上させるため、陸上の早期警報用地震計において使用されているP波警報手法を海底地震計データに適用した場合の精度評価を行った上で、具体的な警報判定方法を提案した。さらに、大規模地震発生時に従来よりも早いタイミングで広域に警報を出力するための方法を提案した。この方法は、複数観測点の情報を基に、大振幅の拡がりの面積を求めてマグニチュードを推定するものであり、震源から離れた場所に警報を出力するまでの時間が短縮される効果を持つ。これらの方法を導入することで、海底地震計情報を活用した早期地震警報システムの性能向上を図ることができる。

謝辞

本研究では、国立研究開発法人防災科学技術研究所の

日本海溝海底地震津波観測網 S-net および地震・津波観測監視システム DONET, 強震観測網 K-NET の地震波形記録を使用しました。

文献

- 1) 岩橋寛臣, 岩田直泰, 佐藤新二, 芦谷公稔: 早期地震警報システムの実用化, 鉄道総研報告, Vol.18, No.9, pp.23-28, 2004
- 2) 芦谷公稔, 佐藤新二, 岩田直泰, 是永将宏, 中村洋光: 鉄道の地震警報システムにおける緊急地震速報の活用, 物理探査, Vol.60, No.5, pp.387-397, 2007
- 3) 是永将宏, 山本俊六, 青井真: 海底地震計データを早期地震警報に使う, RRR, Vol.76, No.3, pp.8-11, 2019
- 4) 宮腰寛之, 山本俊六, 祇園昭宏, 神山真樹, 他谷周一, 渡辺篤, 功刀卓: 鉄道の早期地震警報への海底地震計情報活用に向けたデータ処理, 鉄道総研報告, Vol.29, No.1, pp.35-40, 2015
- 5) 岩田直泰, 山本俊六, 野田俊太, 是永将宏: 早期地震警報に向けた地震諸元推定とノイズ識別のアルゴリズム開発, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72, No.1, pp.133-147, 2016
- 6) 中村洋光, 岩田直泰, 芦谷公稔: 地震時運転規制に用いる指標と鉄道被害の統計的な関係, 鉄道総研報告, Vol.19, No.10, pp.11-16, 2005
- 7) 野田俊太, 山本俊六, 佐藤新二: 早期地震検知における地震諸元推定方法の精度および即時性向上, 鉄道総研報告, Vol.25, No.7, pp.7-12, 2011
- 8) 東田進也, 小高俊一, 芦谷公稔, 大竹和生, 野坂大輔: P波エンベロープ形状を用いた早期地震諸元推定法, 地震第2輯, 第56巻, pp.351-361, 2004
- 9) 野田俊太, 山本俊六, W.L. Ellsworth: 地震波の最大振幅到達時間による非飽和のマグニチュード推定手法, 鉄道総研報告, Vol.31, No.5, pp.41-46, 2017
- 10) 岩田直泰, 坂井公俊, 山本俊六, 室野剛隆, 青井真: 鉄道地震被害推定情報配信システム (DISER) を利用して素早く運転を再開する, RRR, Vol.77, No.2, pp.12-15, 2020
- 11) 村松郁栄: 震度分布と震源との関係, 地震第2輯, 第53巻, pp.269-272, 2001
- 12) 功刀卓, 青井真, 中村洋光, 藤原広行, 森川信之: 震度のリアルタイム演算法, 地震第2輯, 第60巻, pp.243-252, 2008
- 13) 是永将宏, 岩田直泰, 山本俊六, 野田俊太, 下野五月, 小野友也: 早期地震情報の利用を念頭に置いた距離減衰式の提案, 土木学会第66回年次学術講演会, I-481, pp.961-962, 2011