

P波振幅の成長特性を反映した マグニチュード決定方法の適用性

野田 俊太* William L. Ellsworth**

**Earthquake Magnitude Determination Method Considering the Time Dependence of P-Wave Growth
— Its Applicability to the Algorithm of the Railway Earthquake Early Warning System**

Shunta NODA William L. ELLSWORTH

To further improve the safety of running trains using earthquake early warning (EEW), we test an earthquake magnitude (M) determination method recently proposed. The proposed method sets a coefficient in the relation between M and ground displacement as a function of time from the P-wave onset while it is conventionally constant. Our analysis demonstrates that M can be determined from the proposed method faster than from the conventional one without loss of estimation accuracy. An advantage of using the method is that it can be easily installed to the Shinkansen EEW system.

キーワード：早期地震警報，マグニチュード，P波

1. はじめに

鉄道では、地震時に列車の停止判断を可能な限り早く行なうことが求められる。この判断を行なうため、新幹線の早期地震警報システムではP波警報およびS波警報が用いられる¹⁾。なお新幹線早期地震警報システムにおいては、警報の即時性を考慮して、これらの処理を個別の観測点ごとに行なうことを基本としている（単独観測点処理）。このうちP波警報とは、P波初動の数秒間のデータから地震諸元（震央位置およびマグニチュード $[M]$ ）を推定し、この情報に基づいて列車の停止判断を行なうものである。震央距離の推定方法として、新幹線早期地震警報システムではC- Δ 法²⁾を用いたアルゴリズムが近年実用化され、鉄道事業者での導入が進んでいる。

一方、 M の推定は地震計で観測された変位振幅の大きさから決めることが一般的であり、新幹線で使用されているアルゴリズムでは、例えば式(1)が用いられる。

$$\log Disp_c = \log Disp + \alpha \times \log R = \beta \times M + \gamma \quad (1)$$

ここで、 $Disp$ は観測された変位振幅、 $Disp_c$ は距離補正された変位振幅、 R は距離（震央距離または震源距離）、 α 、 β 、 γ は統計的に決められる係数である（ \log は常用対数）。

従来手法では、 α 、 β 、 γ は基本的に一定の値を使用しているため、変位振幅が最大値になるまで M が最終値に到達しない。これが最終 M を決定するまでに必要な

時間を短縮する技術的限界と考えられてきた。

この技術的限界を打破するため、文献3では国立研究開発法人防災科学技術研究所（以下、防災科研）が運用する強震観測網K-NETで観測されたP波記録の統計的な特徴を解析した。その結果、モーメントマグニチュード(M_w)4.5から7程度の範囲においては、P波変位振幅の成長過程が最終 M に依存しないこと（相似的成長の開始）、およびP波変位振幅が相似的成長から離脱する時間（以下、 T_{dp} と呼ぶ）が最終 M に依存することを指摘した。文献3の解析によればこの関係は、式(2)で表わされる。

$$M_w = 2.29 \times \log T_{dp} + 5.95 \quad (2)$$

なおこの式から、 $M_w = 5, 6, 7$ のときの T_{dp} はそれぞれ約0.4, 1.1, 2.9秒となり、最大振幅観測までの経験的な時間（それぞれ約1.5, 3~4, 10秒）と比較して短い。つまりこの結果から、最大振幅の観測よりも早いタイミングで最終 M の推定が可能であることが示唆される。なお、この結果は文献4でも概説されており、その物理的な背景については文献5で議論されている。

この結果を踏まえ、文献6において変位振幅から M を推定する方法の改良を提案した。この手法によれば、現行の M 決定方法の推定精度を保ったまま即時性を向上できることが明らかとなっており、本論文ではまずこの手法を概説する。しかしながら、文献6で示された結果は、新幹線早期地震警報システムで使用されている単独観測点処理を前提としていないため、本論文でこの検

* 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

** スタンフォード大学

特集：地震対策技術

証を行なう。

なお、式(2)の関係は現状ではM7クラスまでの地震についてのみ確認されるため、文献6および本論文で示す手法は、それよりも大きな地震については性能向上が期待できる範囲ではない。ただし、文献6で指摘されている通り、そのような巨大地震のM推定においても、現状のアルゴリズムと同等の性能が得られることは担保される。

2. P波振幅の相似的成長からの離脱時間を踏まえたM決定方法

本章では、文献6で提案されたP波振幅の相似的成長からの離脱時間を考慮したM決定方法を概説する。方法の詳細は文献6を参照のこと。

2.1 データセット

解析に使用したデータは、防災科研K-NETの観測点において記録された鉛直方向のP波変位振幅である。M_wは4.5から8.7の範囲(M_wは防災科研の広帯域地震観測網F-netの記録から決定された値を参照しており、これにおいては2011年東北地方太平洋沖地震のM_wは8.7である)、震源深さは60km以内の地震のみを選択し、その結果使用した地震数は149となった。この地震の震源分布を図1に示す。震源距離200km以内のデータを選択し、使用した観測記録の総数は7,437となった。

P波の開始時刻は手動で読み取りを行ない、P波開始から4秒間のデータを解析に使用した。変位振幅の大きさは、絶対値のランニング・マキシマム(その時点までの最大値のトレース)を解析した。データは観測された加速度記録から二回積分により変位に変換され、その後0.075-3 Hzのバターワース型バンドパスフィルターを適用した。

2.2 提案手法

本手法では、式(1)によりMを決定することとする。ここでは、より正確な分析を行なうため距離の値として震源距離を用いた。係数α, β, γを統計的に2.1節で示したデータにより決定する。ここではまず、地震動の大きさの幾何減衰の強さを決める係数αを先に決定し、その後β, γを決定する(二段階回帰手法例えば⁷⁾)。

係数αを決定するために、ここではまずデータセットをM_w 0.1毎、震源距離を25km毎にグループ分けした。なお、各グループで最低5個以上のデータが存在する場合のみ解析に用いることとする。図2に各グループの対数平均変位振幅値(縦軸)と震源距離(横軸)の関係を示す。時間TはP波開始からの経過時間である。なおこの図において、右下に示すカラーバーに従ってM_wに

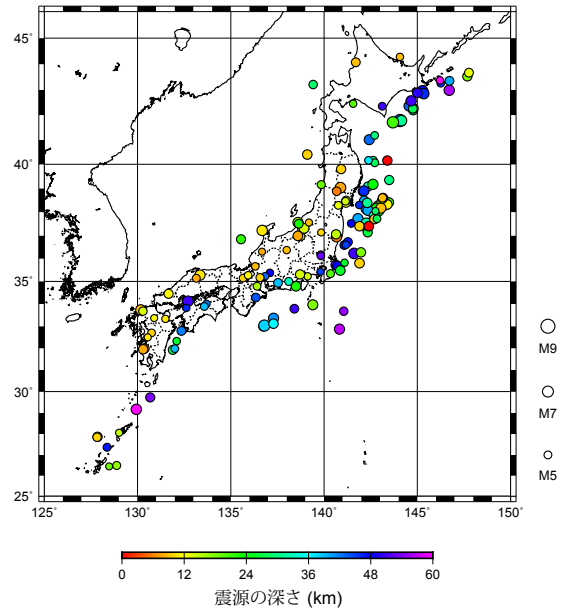


図1 解析に用いた地震の震源分布

応じて色付けを行っており、同じM_w (0.1刻み)のデータを直線で繋げているため、この直線の平均的な傾きが係数αの値に相当する。この図から明らかな通り、直線の平均的な傾きはTによらずデータセット全体にわたって安定しているため、本研究では一定の値を用いる。ここでは、直線の傾きの中央値1.33を係数αの値とする。

次に、係数β, γを決定する。これにあたっては、α=1.33として式(1)によりlog Disp_cを求めた。log Disp_cとM_wを比較した結果を図3(横軸がM_w、縦軸が距離補正された変位振幅)に示す。灰色の点はデータ毎の振幅値、黒の点とそのエラーバーはM_w 0.1毎の振幅の平均値および標準偏差の範囲を表す。時間Tは、図2と同様に、P波開始からの経過時間である。黒の実線は、黒の点に対して最小二乗法により決定されたM_wと振幅値の関係式である。なおこの図において、係数βはM_wと振幅値の関係の傾き、係数γは同関係の切片の値に相当する。この結果から分かる通り、Tが小さいうち(P波開始直後)は黒の実線の傾きが小さいものの、時間が経過するにしたがって傾きが大きくなっていることが分かる。このことを示したのが図4である。

ここで、1章に示した通り、P波振幅は相似的に成長するが、最終Mが小さいほど成長過程がこの相似性から早く離脱する。図5に、T=0.5秒とT=1.0秒のP波変位振幅を例として比較する。ここで、P波変位振幅が相似的成長から離脱する時間T_{dp}=0.5, 1.0秒に対応するM_wは、式(2)よりそれぞれ5.3, 6.0となる。つまり、この図において、赤の点線より左側(M_wが小さい側)のデータについては相似的成長からの離脱が発生し、右側(M_wが大きい側)については離脱がまだ発生していないことを意味する。離脱発生前はM_wに関わりなく同一時刻の

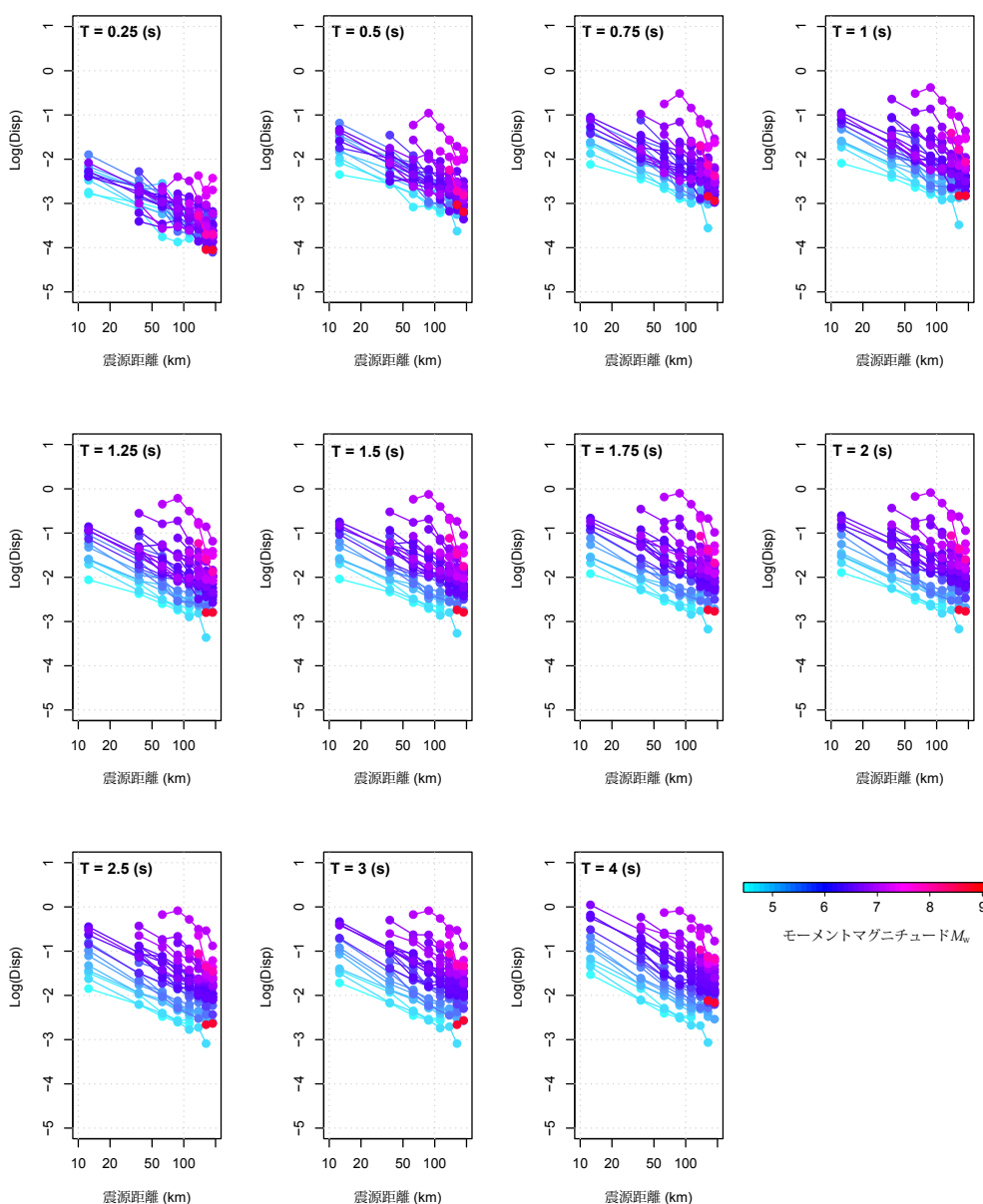


図2 各時間 T (P波開始からの時間) における観測された変位振幅値と震源距離の関係

振幅は統計的にはほぼ一定(緑の実線)で、離脱発生後は M_w との相関性がある(紫の実線)ことから、統計的には緑の実線は横軸とほぼ平行(傾きゼロ)となり、紫の実線は傾きに一定の大きさを持つことが示唆される。

このことを考慮し、文献6では式(1)によって M を決定するにあたって、次の手法を提案した。

- ①係数 β は時間によらず一定の値を用いることとする。
- ②その際、 β は $T=4$ 秒の値(0.68)を用いる。これは、今回用いたデータセットでは $T=4$ 秒までの記録を使用しているため、 M_w と振幅値の間の相関性が最も高まっていると考えられるためである。なお、このことは図4からも分かる($T=4$ 秒のときの傾きが最も大きい値となっている)。
- ③係数 γ はP波開始からの時間 T に応じて変化する値

を設定することとする。具体的には、あらかじめ決められた T のタイミング毎に γ を決定することとし、その際相似的成長からの離脱が発生したと考えられる大きさの地震のみ使用することとする。例えば、図5で示した通り、 $T=1.0$ 秒の際には $M_w 6.0$ 以下の地震において離脱が起きていると考えられるので、そのデータのみを用いる(すなわち、時間が経過するほど γ の決定に用いるデータの M_w の範囲は増加する)。

このようにして決定された係数 β および γ による M_w と振幅値の関係式を、図3の赤の点線で示す。実際の各係数の値を表1に示す。ここで示された手法では、手法の実用性も考慮し、 $T=1.0$ 秒の時点の γ を最短とし、その後 $T=1.25, 1.50, 1.75, 2.00, 2.50, 3.00, 4.00$ 秒の時点での γ を決定した。

特集：地震対策技術

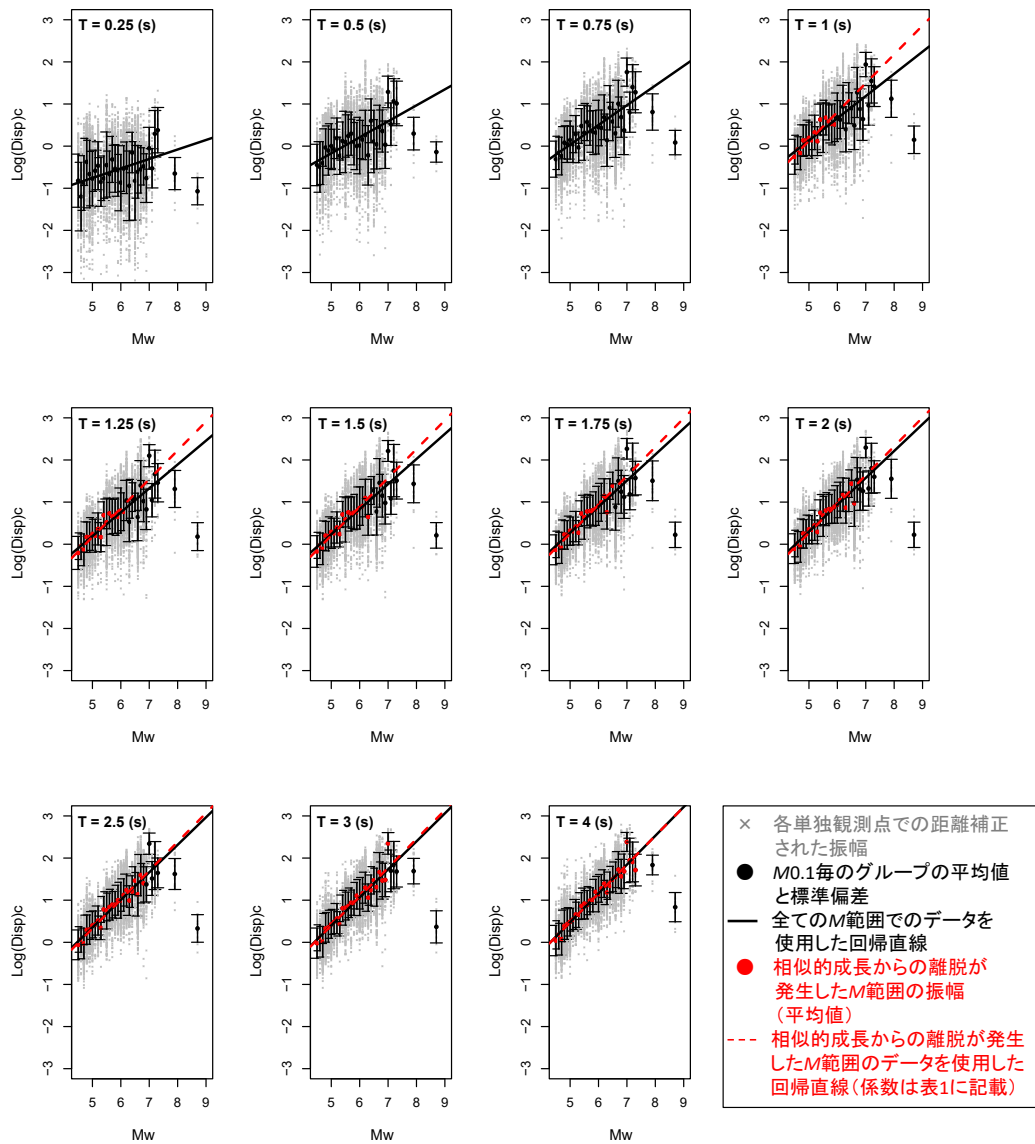


図3 各時間 T における距離補正された変位振幅と M_w (モーメントマグニチュード) の関係

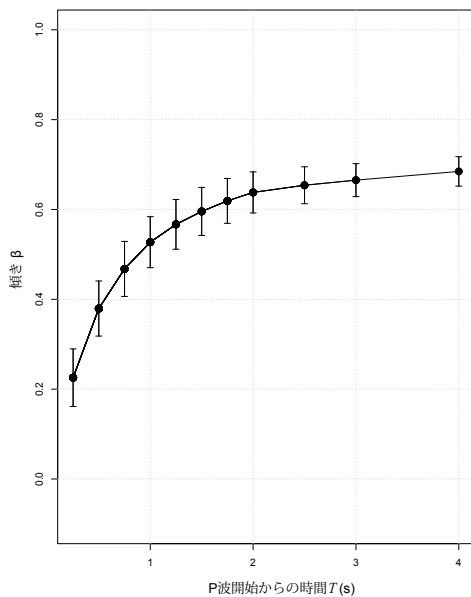


図4 係数 β の時間変化

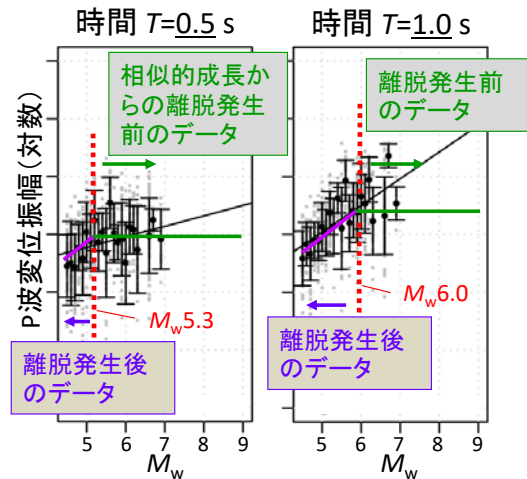


図5 $T=0.5$ および 1.0 秒時の P 波変位振幅値における成長の離脱と M_w の関係

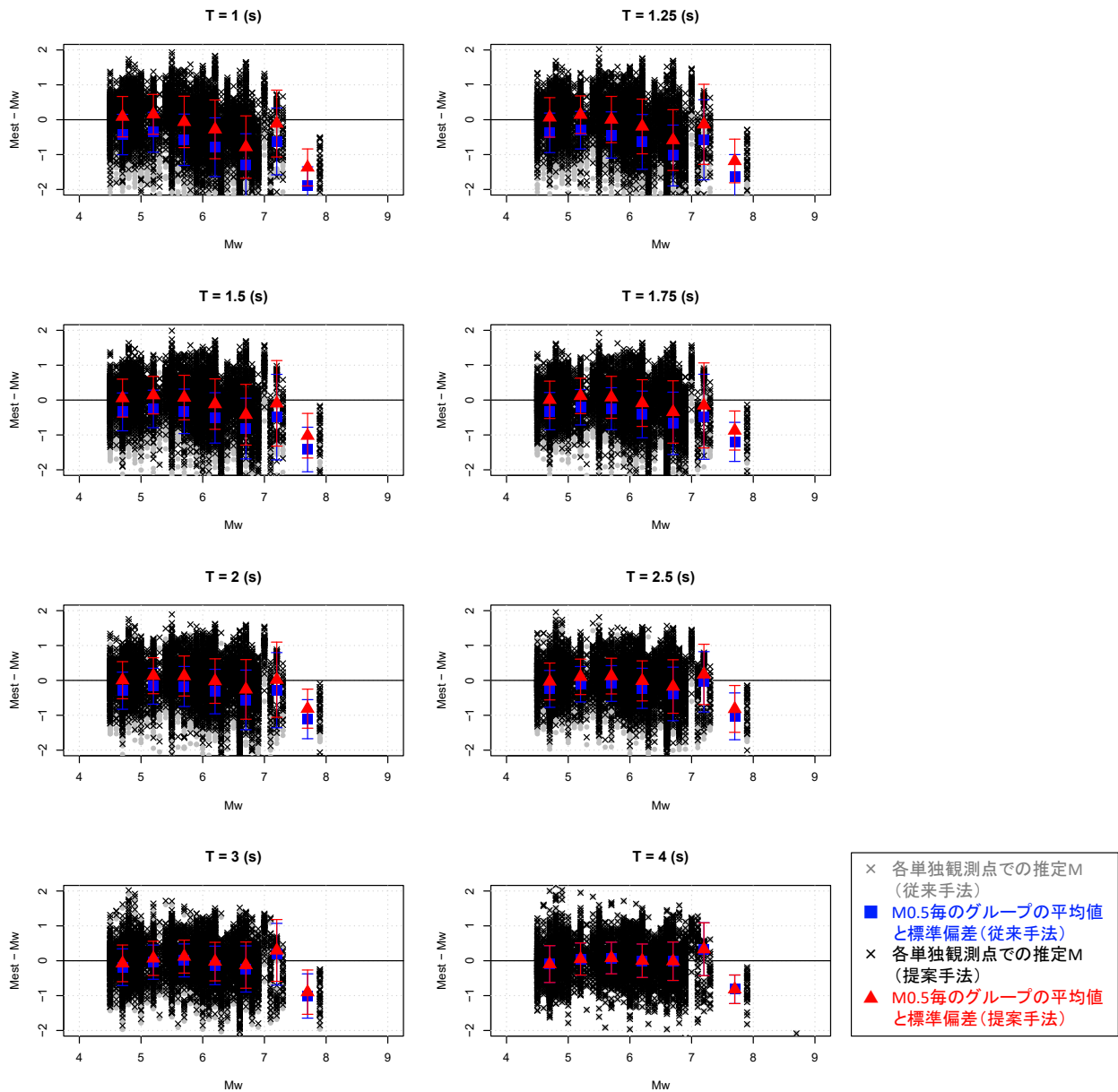


図6 各時間 T における推定 M (M_{est}) の残差 (縦軸) と M_w の関係

1章で述べた通り、従来手法では経過時間によらず一定の γ を使用してきた。しかしながら、提案手法においては、P波開始からの経過時間に応じて異なる係数(切片 $\gamma[T]$)を使用して M を推定する。次章にこの手法の単独観測点処理における性能評価結果を示す。なお、 $T=4$ 秒より後のデータについては $T=4$ 秒時点の γ を全てに適用することで、従来手法と同様に時間に依存しない係数 γ となり、これまでと同じ推定精度および即時性が得られることが担保される。さらに本提案手法は、既存のアルゴリズムにおいてこれまで一定だった係数パラメータを、経過時間に応じた値に設定を変更することによって導入可能である。

表1 提案手法における各係数の値(式(1))

T (秒) : P波開始から の経過時間	α	β	$\gamma[T]$
1.00	1.33	0.68	-3.30
1.25			-3.25
1.50			-3.22
1.75			-3.17
2.00			-3.15
2.50			-3.09
3.00			-3.02
4.00			-2.95

特集：地震対策技術

3. 提案手法の新幹線早期地震警報システムにおける性能評価—単独観測点処理での M 推定

2章で示した手法は、文献6においてその性能が評価されたものの、同文献の解析は震源近傍の5観測点でそれぞれ推定された M の中央値を用いて確認が行なわれた。しかしながら、新幹線早期地震警報システムで使用されている単独観測点処理による性能はこれまで確認されておらず、その適用可能性は未検証であった。そこで本章においてこの確認を行なう。

提案手法を単独観測点処理での M 推定に適用する。使用したデータセットや条件は2章で示したものと同様である。単独観測点毎に推定された M (M_{est}) と M_w の比較結果を図6に示す。この図において、横軸は M_w 、縦軸は M_{est} と M_w の残差を示し、P波開始からの時間 T に応じた結果を表示している。比較のため、従来手法と提案手法の結果を示している。灰色の丸印が従来手法による推定 ($T=4$ 秒の γ を全てのデータ長に対して適用)、黒のバツ印が提案手法による推定結果 (T によって適用する γ を変化) である。また、青色の四角印とそのエラーバーは、従来手法の推定 M (灰色の丸印) を0.5毎にグループ分けし、その平均値と標準偏差の範囲を示す。同様に、赤色の三角印とそのエラーバーは提案手法の推定 M (黒のバツ印) から求めた平均値と標準偏差である。

この結果から、以下の二点が結論付けられる。

- (1) 従来手法と提案手法により推定された M の残差のバラツキは同等であり、推定精度に差は無い。
- (2) 従来手法に比べ、提案手法により推定された M はより早いタイミングで最終値に近い M を適切に推定できており、推定の即時性が高まっている。

これらの結果は、文献6で示された解析結果と同じ結論であり、この提案手法は新幹線早期地震警報システムで用いられている単独観測点処理においても適用可能であることが確認された。結論として、本提案手法を同システムのアルゴリズムに導入することで、更なる新幹線の地震時安全性の向上に寄与することが期待される。

4. まとめ

早期地震警報システムにより走行列車の地震時安全性を更に高めるため、文献6において提案された新たな M 推定手法の適用性の検討を行なった。従来手法は、 M 推

定のために使われる M と変位振幅の関係式の係数が一定であったのに対し、提案手法はその切片を時間の関数とすることが特徴である。また、その実システムへの導入は比較的容易であることが指摘される。本研究では、新幹線早期地震警報システムにおいて用いられている単独観測点処理に対する検証を行ない、その結果 M の推定精度を保ったまま即時性を向上させられることを確認した。

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強震観測網 K-NET で観測された地震波形記録を使用させていただいた。記して感謝申し上げる。

文献

- 1) Yamamoto, S., and Tomori, M., “Earthquake early warning system for railways and its performance,” *Journal of JSCE*, Vol.1, pp.322-328, 2013.
- 2) 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
- 3) Noda, S., and Ellsworth, W. L., “Scaling relation between earthquake magnitude and the departure time from P-wave similar growth,” *Geophys. Res. Lett.*, Vol.43, doi: 10.1002/2016GL070069, 2016.
- 4) 野田俊太, Ellsworth, W. L.: P波成長の特性に着目した地震のマグニチュード推定方法, 鉄道総研報告, Vol. 31, No. 7, pp. 5-10, 2017
- 5) Noda, S., “Statistical characterization of P-wave growth for earthquake early warning,” *Quarterly Report of RTRI*, Vol.59, No.2, pp. 128-134, 2018.
- 6) Noda, S., and Ellsworth, W. L., “Determination of earthquake magnitude for early warning from the time dependence of P-wave amplitudes,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 107, No. 4, pp. 1860-1867, 2017.
- 7) Fukushima, F., and Tanaka, T., “A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 80, No. 4, pp. 757-783, 1990.