

1 2 - 1 地震の大きさの予測可能性と緊急地震速報

Predictability of Earthquake Magnitude and Earthquake Early Warning

気象庁

Japan Meteorological Agency

緊急地震速報は、震源近傍の地震計で捉えた P 波を迅速に解析し、予想される震度及び S 波の予想到達時刻を推定して大きく揺れ始める前に伝えることにより、強震動災害に対する事前対策を可能とすることを旨とした情報である。そのための処理は、①震源の推定、②マグニチュードの推定、及び③それらに基づく各地の震度・到達時刻の推定という三段階から成る。

①については、破壊が開始した時点で既に確定している震源（破壊開始点）の位置を、少ないデータからいかに迅速・正確に推定するかという問題に帰着でき、気象庁では利用可能な観測点数に応じた最適な手法と、防災科学技術研究所により開発された着未着法を組み合わせ使用している。

②のマグニチュードについては、1)破壊開始時点で地震は自らの最終的な大きさを知っており、なおかつ 2)最終規模を波形の最初の部分を利用して許容される精度内で完全自動により推定可能であるという 2 点が解決されて初めて、「既に確定した量」の迅速・正確な推定と位置づけることができる。1)については本連絡会報の飯尾氏によるレビューを参照願いたい、気象庁では未だ決着をみていないと理解している。2)については、従来から卓越周期に着目した手法が提案されている。代表例としては中村の方法¹⁾があり、時間領域において平滑化した加速度と速度の振幅比を実時間でモニターして推定するものであり、それと同様の手法を用いた Allen & Kanamori(2003)²⁾による地震波の最初の数秒間の卓越周期の対数とマグニチュードの関係を第 1 図に示す。この問題点は、a)ばらつきが大きいことと、b)回帰係数が大きすぎる（物理的妥当性）ことである。a)については、緊急地震速報が対象とするようなやや大きめの地震に対応する右図で観測点 M の標準偏差が 0.67 であり、少数の観測点の平均 M に基づき回帰式により震度を推定した場合、誤差を計測震度値で ± 0.5 内（おおむね震度階級で ± 1 内）に収めるのは困難である。b)については、その回帰係数 7.0 と、Kikuchi & Ishida(1993)³⁾による広帯域地震波形の解析から得られた震源時間関数のパルス幅の対数とモーメントマグニチュード M_w との間に成り立つ比例係数 2.0 と比較すると、前者が有意に大きい。これは、卓越周期といえども断層面の各パッチからの波形の寄与の重ね合わせで決定されるものであり、破壊成長の最初の部分のみを反映した最初の数秒間の地震波形データを対象として解析を行う以上、飽和域が存在するのは必然で、本来飽和する領域まで含めて回帰式を求めた結果、係数が理論的に予想される値よりも大きく算出されたためと考えることができる。

卓越周期以外に、最初の数秒間の波形データに基づき地震の最終規模を推定可能な量がないか気象庁でも調査を行っている。これは、対数波形エンベロープの立ち上がり部分の傾きを用いて震央距離を推定する手法（B- Δ 法⁴⁾）を開発する途上で得られた結果であるが、対数波形エンベロープにフィッティングさせた関数 $Bt \cdot \exp(-At)$ （第 2 図）の A 値は、対象とした時間窓の範囲での波形の成長の具合を表す。そのため、地震の最終規模 M との間に相関があることを期待したが、第 3 図に示すとおり、A が小さければ M は大きいという定性的な関係は存在するものの、A 値から M を推定するための回帰式を導出するにはデータのばらつきが大きすぎた。

以上のことから、緊急地震速報の処理においては、地震の最終規模を最初の数秒の波形データを用いて「予測」するのではなく、地震の規模の時間的成長を実時間で「追跡」する手法を採用して

いる。

具体的には、P波部分のみと波形全体の最大振幅からMを推定するふたつの式を作成しておき、最新の震源位置及びオリジンタイムの推定結果から予想されるS波の到着時刻の前後で、ふたつの式を切り替えることで、1秒毎に更新される最大振幅データに基づき、可能な限り早いMの推定を可能としている（第4図）。なお、M推定のばらつきを抑えるために波形は変位波形とし、相の種類によって記録されやすい成分に違いがあるため、最大振幅としては変位の3次元ベクトル合成値を使用している。また、震源位置及びオリジンタイムに推定誤差があることに配慮し、安全をみて理論S到着時刻よりもやや前で式の切り替えを行っている。さらに、式を単純に切り替えるとMの推定値にみかけ上の落ち込みが生じるため、式を切り替えた後一定時間は、直前のM推定値を保持している。

今後のM推定精度向上のための方策としては、リアルタイムで利用可能な強震波形観測点の増加、観測点毎のM推定のバラツキをさらに抑えるための観測点補正値の導入、震度を推定するという目的に特化して防災科学技術研究所において開発された「震度マグニチュード」⁵⁾の導入等を考えている。なお、与えられたMから最大加速度・速度を予測する式の多くに、震源断層近傍でこれらの量が飽和する効果が入り込められている。これは、震源断層近傍では地震波は平面波的で減衰が球面波より遅いこと、及び断層面上であっても実際の地震動は発散しないことに対応していると考えられるが、地震動の振幅から地震の規模Mを推定する式でその効果を取り入れた式は、Mを再帰的に取り込む困難から存在しない。しかし、今後強震計の密度が上がり、緊急地震速報処理の最初の時点で震源断層近傍の観測点のみを用いてMの推定が行われることになると予想されるため、断層近傍での地震動振幅の飽和効果を考慮する必要があるかもしれない。

緊急地震速報処理の③の段階である震度の推定（第5図）にあたっては、現在は震源距離のみによる一次元の地震動距離減衰予測式を用いている。また、震源断層の形状を地震発生後直ちに推定することが困難であるため、断層距離については、防災上の安全を見込んで、M値からスケーリング則を用いて得られる断層長さの1/2を半径とする仮想震源球からの最短距離で代用している。今後の震度推定精度向上の方策としては、地盤増幅度データを観測値/予測値の比で補正して最適化を図ること、震源を点ではなく「震源域」の広がりとしてリアルタイムで追跡可能な手法の導入（たとえばYamada(2007)⁶⁾）、地震波減衰の三次元構造を考慮した手法の導入（たとえば神田(2007)⁷⁾）等を考えている。

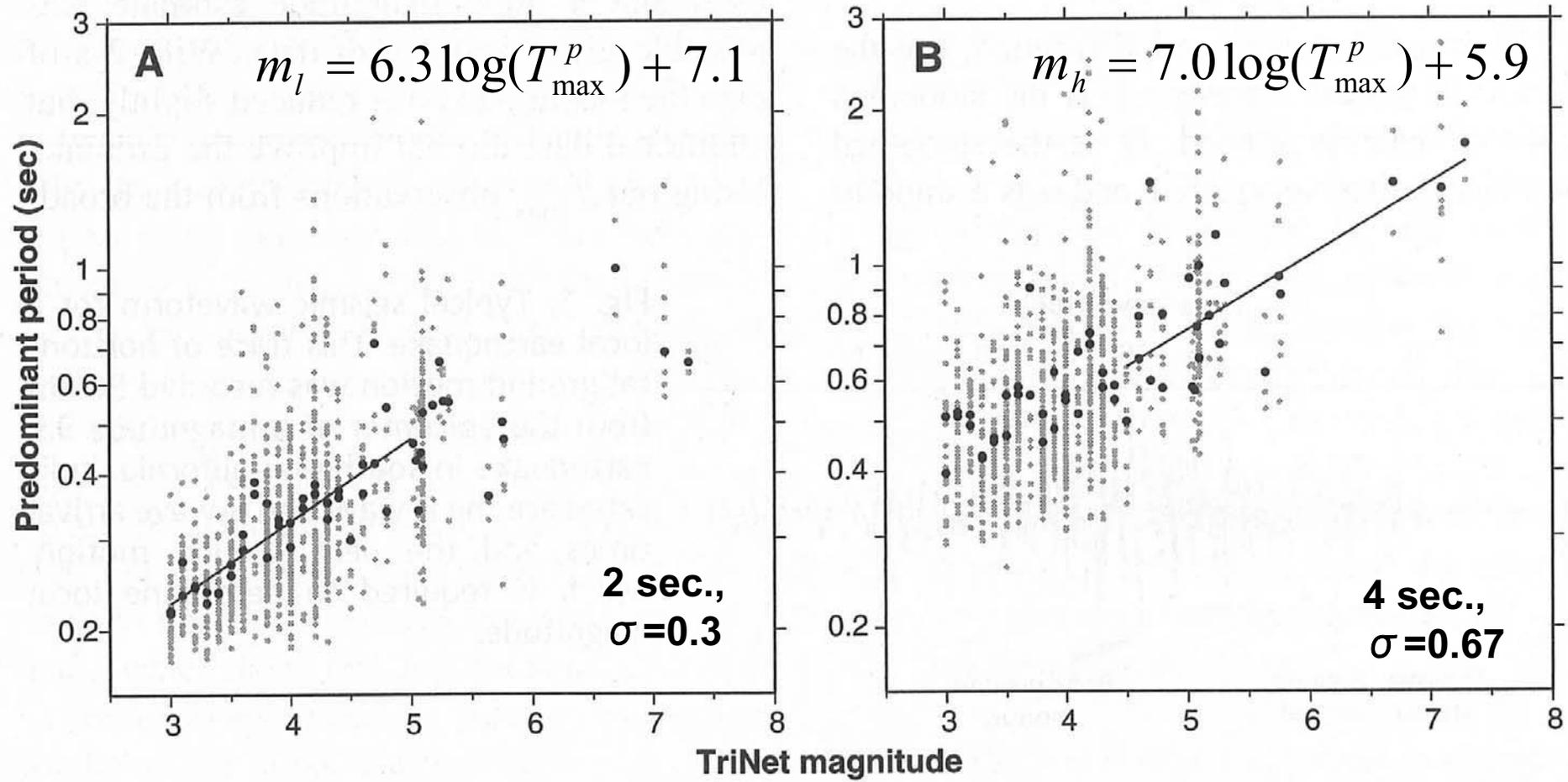
（上垣内修）

参考文献

- 1) 中村豊(1996)研究展望：総合地震防災システムの研究，土木学会論文集I ,No.531/ I -34,1-33.
- 2) Allen,R.M. & H.Kanamori(2003)The Potential for Earthquake Early Warning in Southern California, Science,vol.300,786-789.
- 3) Kikuchi,M & M.Ishida(1993)Source Retrieval for deep local Earthquakes with Broadband Records, BSSA, vol.83, 1855-1870.
- 4) 東田進也ほか(2004)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2,vol.56,351-361.
- 5) 山本俊六ほか(2007)緊急地震速報における震度マグニチュードの有効性，物理探査,vol.60,No.5,407-417.

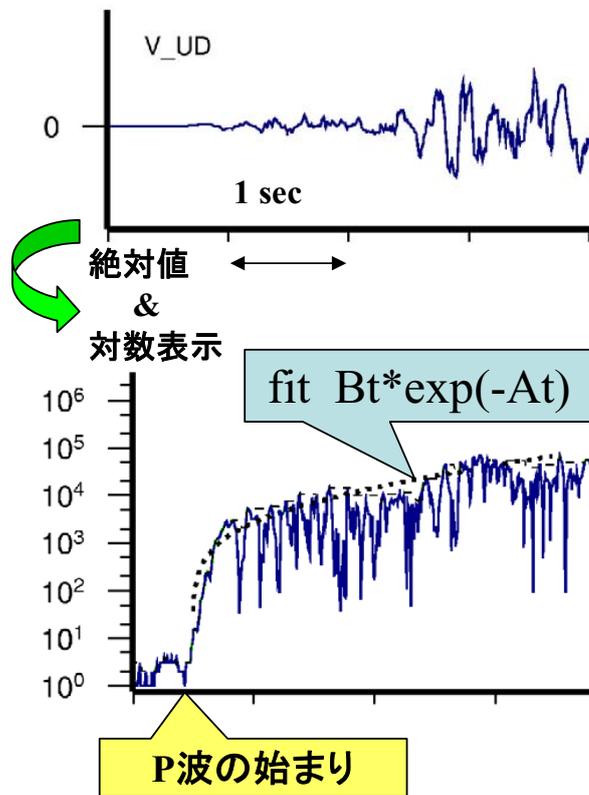
6) Yamada,M.(2007)Early Warning for Earthquakes with Large Rupture Dimension, PhD Thesis, California Institute of Technology, pp.197.

7) 神田克久(2007)観測データに基づいて地盤伝播特性を考慮した震度推定, 震度計の設置促進と震度データの利用高度化に関するシンポジウム論文集,46-51.



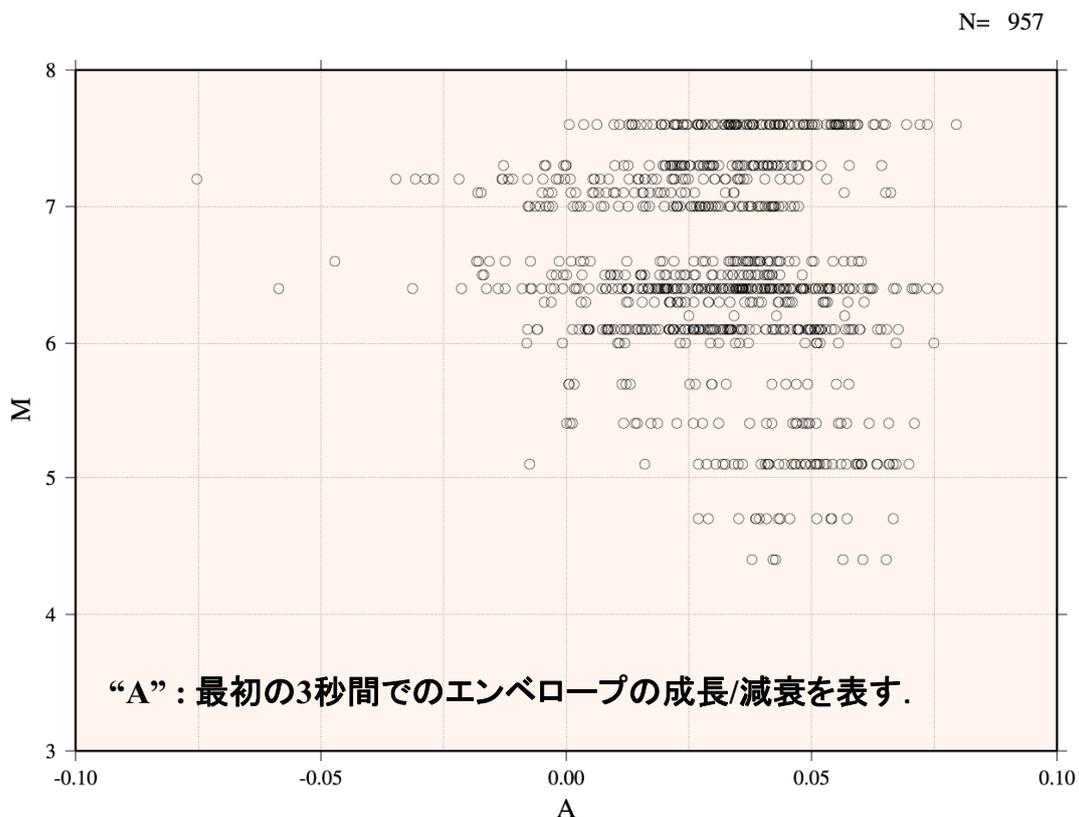
第 1 図 P 波到着から数秒間の時間窓での卓越周期とマグニチュードの関係(Allen & Kanamori(2003)Fig.3 に加筆)

Fig.1 Relation between predominant period and magnitude in a time window of few seconds after the P onset(retouched Fig.3 of Allen & Kanamori(2003)).



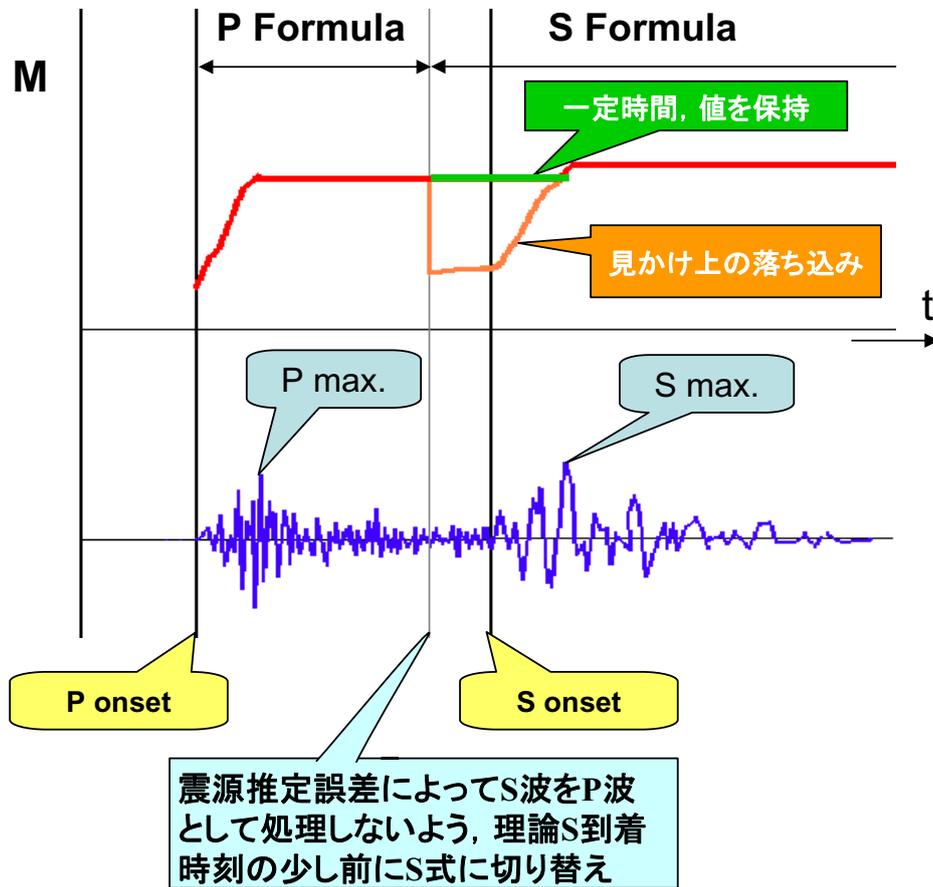
第2図 初動付近の地震波形対数エンベロープ形状の特徴を当てはめ関数($Bt \cdot \exp(-At)$)のパラメータ値で抽出する概念図

Fig.2 Schematic image of the characteristics extraction of log-transferred seismic waveform envelope feature near the P onset by fitting function($Bt \cdot \exp(-At)$).



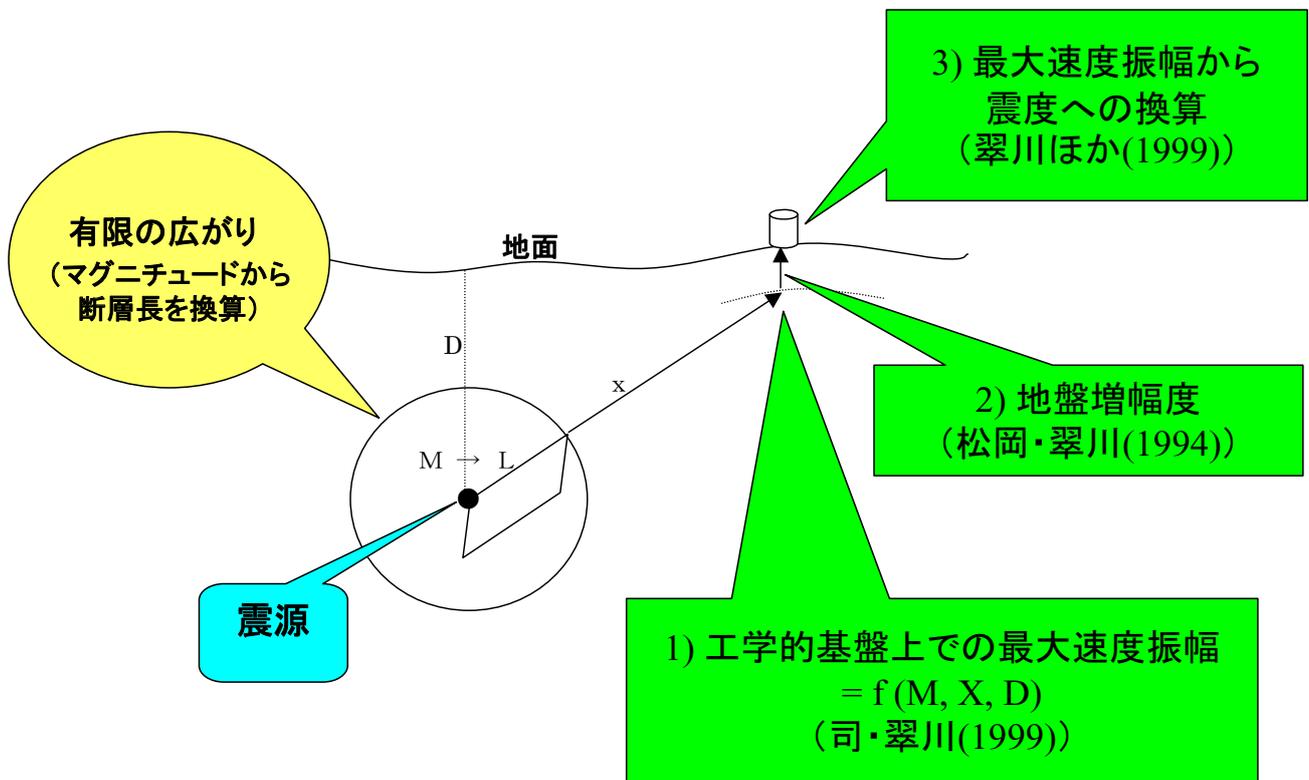
第3図 当てはめ関数($Bt \cdot \exp(-At)$)の A 値 (P 到着時刻から 3 秒間に適用) とマグニチュードとの関係

Fig.3 Relation between the 'A' value of fitted function $Bt \cdot \exp(-At)$ for the three seconds time window after the P onset and magnitude.



第4図 緊急地震速報処理におけるマグニチュード推定手法の概念図

Fig.4 Schematic image of the magnitude estimation in JMA's Earthquake Early Warning.



第5図 緊急地震速報処理における震度推定手法の概念図

Fig.5 Schematic image of the seismic intensity estimation in JMA's Earthquake Early Warning.