

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

より早くマグニチュードを推定する

地震発生時に列車の停止を素早く判断するため、早期地震警報システムにおける地震のマグニチュード [M] の推定をより早める方法を開発しました。現行の早期地震警報で使われている方法では、Mの推定速度に技術的な限界があると考えられてきました。この限界を打破するため、鉄道総研は日本国内で観測されたP波の記録を詳細に解析し、これまでは指摘されていなかった特徴が見られることを発見しました。この特徴を考慮してMの推定を早める方法を提案し、その有効性を確認しました。この提案方法の重要なメリットとして、現在稼働中の早期地震警報システムで使われているMの推定式の係数を書き換えることのみで導入が可能であるため、実装が容易であるという点があげられます。



野田 俊太
Shunta Noda
鉄道地震工学研究センター
地震解析研究室
副主任研究員
【専門分野】地震学、地震工学

はじめに

鉄道では、地震時に列車の停止を可能な限り早く判断することが求められます。より早い判断を行うため、新幹線早期地震警報システムは、P波(☞参照)の情報に基づく警報(P波警報)を用いています。P波警報は、P波の最初の数秒間の地震観測データから地震の発生位置(震源または震央)および地震の規模(マグニチュード[M])

(☞参照)を推定し、この情報により列車停止を判断します。しかしながら、後述の通り、Mを推定するためには大きなMであればあるほど長い時間が必要となります。

現行の新幹線早期地震警報システムでは、観測された地震の揺れの大きさと、Mの大きさが比例するという関係を用いてMを推定します(ただし、地震の揺れの大きさは、震源から距離が離れるにしたがって小さくなるため、この影響を取り除く必要があります)。

一方、地震の原因は断層とよばれる地下の岩盤の亀裂が破壊することによって起こるものと考えられていますが、この破壊は一瞬で終わるものではなく、Mが大きければ大きいほど破壊が長く続きます。つまり、地震の揺れの大きさは破壊が進むにつれて大きくなっていくため、はじめは推定されるMの値が小さい場合でも、断層での破壊が継続すれば大きな値となっていきます。したがって、ある地震でのMの大きさの最終値(以下、最終Mとよびます)を決めるためには、その地震での揺れの大きさの最大値を観測するまで待つ必要があります。具体的

☞ P波

地震の震源からはP波とS波という二種類の波が放出されます。P波は波の進行方向と平行に振動し(縦波)、S波よりも進む速度が速いという特徴があります。S波はP波よりも揺れが大きいため、地震による被害はS波によって生じることが多いです。P波に含まれる情報から震源の情報を推定することにより、S波の到着前に警報を発報することが可能です。

☞ マグニチュード [M]

地震の規模の大きさを表す値で、震源から放出されるエネルギーの量と関係しています。たとえば、2011年東日本大震災を引き起こした東北地方太平洋沖地震のMは9.0、2016年熊本地震(本震)のMは7.3と推定されています。

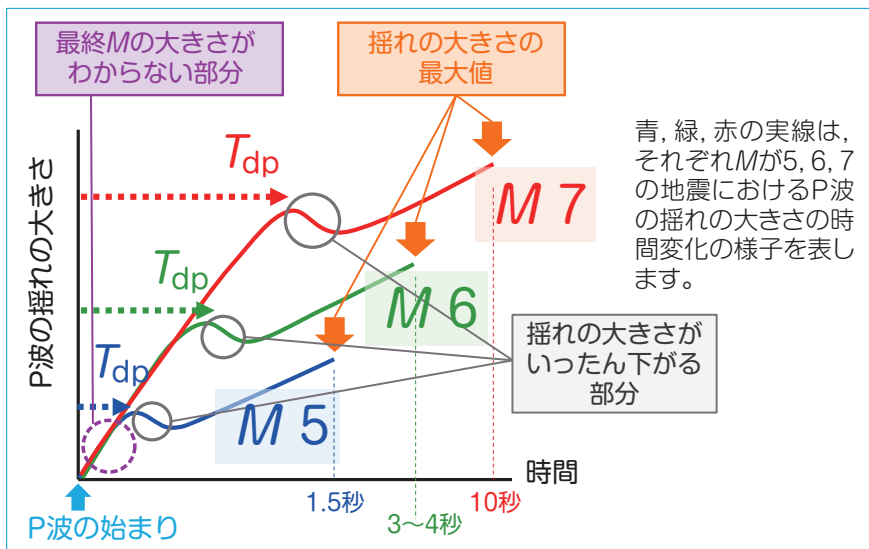


図1 新たに発見されたP波記録の特徴の模式図

には、たとえば最終 M が5, 6, 7のとき、P波の始まりから揺れの最大値を観測するまで、それぞれ約1.5秒, 3~4秒, 10秒ほどの時間が必要とされています(図1の^{だいたい}橙色の矢印)。技術的には、最終 M の推定をこれ以上早く行うのは困難と考えられてきました。

しかしながら、最近の研究¹⁾²⁾により、この技術的限界を克服し、従来よりも早い時点で最終 M を推定できることが明らかとなりました。これにより、走行列車のさらなる地震時安全性向上に貢献できると考えられます。ここではこの方法を紹介します。

新たに発見されたP波記録の特徴

より早く最終 M を推定することができるかどうかを検討するために、鉄道総研は、これまでに日本国内の地震で観測されたP波記録の解析を行いました。この解析では、P波が始まり、どのように大きくなっていくかという点について統計的な特徴を抽出しています。その結果の模式図を図1に示します。P波はその始まりの後、時間が経過していくにつれて大きくなっていきますが、このタイミングでは最終 M の大きさに関する情報を得ることはできません(図1の紫色の破線で示した領域)。

ところがその後、いったん揺れの大きさが低下し(図1の灰色の丸印で囲った部分)、その後ふたたび最大値に向けて大きくなっていく特徴があることが明らかになりました。ここで、P波が始まってからこのいったん下がり始めるタイミングまでの長さ(それぞれ青, 緑, 赤の点線矢印: 以下, T_{dp} とよびます)が最終 M と関係していることを発見しました。揺れの大きさがいったん低下するのは最大値が現れる前ですので、これまでより早く最終 M に関する情報を得られるということになります。

実際に観測されたP波の記録から T_{dp} の長さを求め、最終 M と比較した結果を図2に示します。この図において、縦軸は最終 M の大きさ、横軸は T_{dp} の常用対数(log)を取った値となっています。この結果から、 $\log T_{dp}$ と最終 M の間には比例関係が成立していることがわかります(黒の実線: 黒の破線は誤差範囲の目安)。ただし、その比例関係が確認できるのは最終 M が7程度の地震までで、それを大きく越える2003年十勝沖地震($M8.0$: 青の点線)や2011年東北地方太平洋沖地震($M9.0$: 赤の点線)は比例関係の直線からはかなり外れていることに注意してください。図2で示した比例関係式から、 T_{dp} は最終 $M5, M6, M7$ の

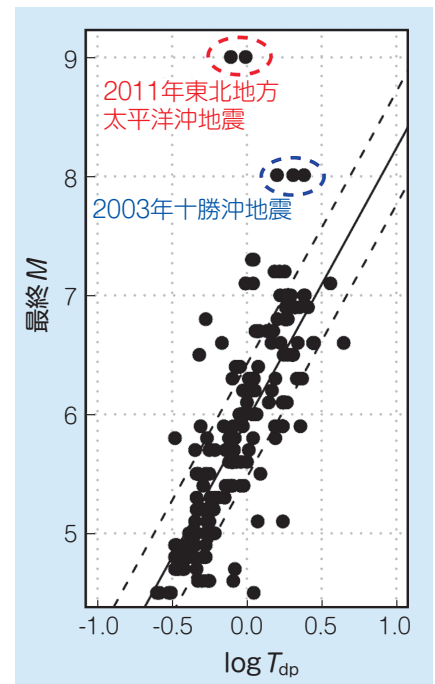


図2 最終 M と T_{dp} の常用対数値(log)の関係

ときそれぞれ、約0.4秒, 1.1秒, 2.9秒となります。これは上述した揺れの大きさが最大になるまでの時間(それぞれ約1.5秒, 3~4秒, 10秒)と比べて三割程度の長さの時間です。

T_{dp} と最終 M の比例関係がなぜ成立するのか、そしてなぜ $M8$ や 9 といった巨大地震においては成立しないのかという理由については、さまざまな議論があるもののまだ結論が出ていません。しかしながら、この観測事実を工学的に利用し、最終 M の推定を早めることが可能です。以下では、この方法について概説します。

T_{dp} を考慮した最終 M 推定の即時性向上

ここまで T_{dp} と最終 M の間に比例関係が成立していることを解説しました。この関係を利用すれば、従来よりも短い時間で T_{dp} から最終 M を直接推定することが可能です。しかしながら、実際の地震観測データを用いてこの方法を試したところ、最終 M の推定精度に限界があることが分かりました。原因のひとつとして、早期地震警報シス

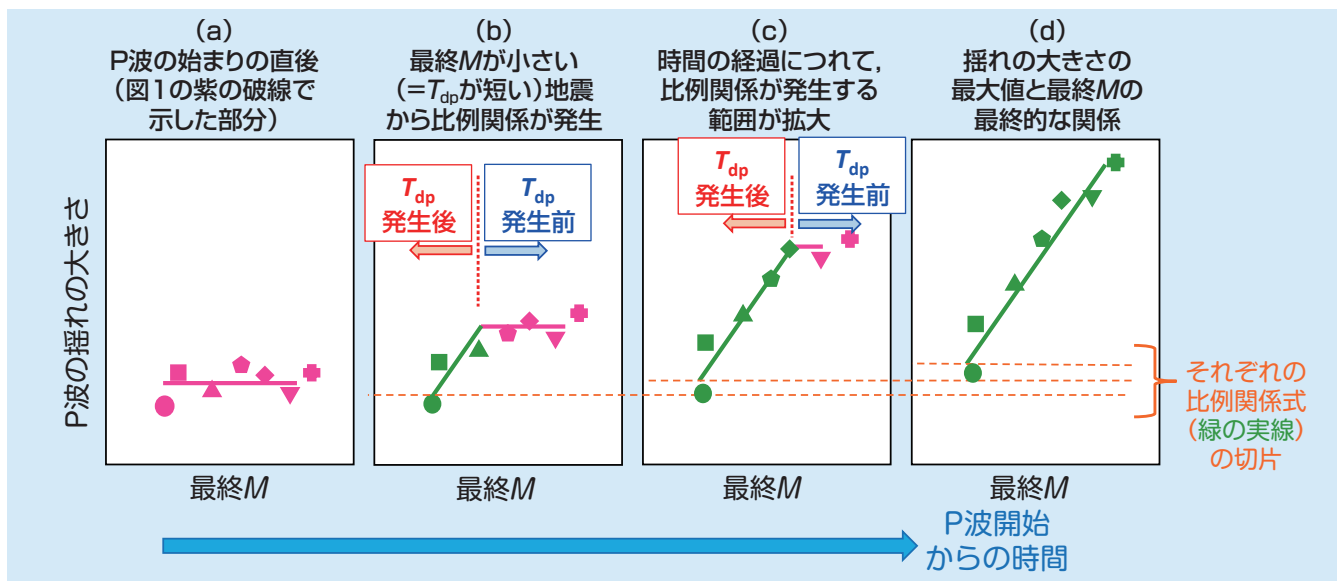


図3 時間経過に伴うP波の揺れの大きさと最終Mの比例関係の変遷の模式図

テムにおける自動処理において T_{dp} が上手く決定できず、誤差が大きくなってしまふことが考えられます。一方、上述のとおり、現行の新幹線早期地震警報システムでは、観測された揺れの大きさの最大値と最終Mが比例するという関係を用いてMを推定します。揺れの大きさは自動処理でも安定して得ることが可能です。そこでここでは、揺れの大きさを用いた現行のM推定方法をベースにしつつも、 T_{dp} による影響を考慮することにより、即時性を向上させるM推定方法について解説します。

まずは、P波開始後の時間経過に伴う最終Mと揺れの大きさの比例関係の変化を眺めてみます。図3にイメージ図を示します。この図は、P波開始後のある時間までの揺れの大きさの最大値を最終Mに応じてプロットしたものです。図3(a)から図3(d)は、P波開始からの経過時間に応じた変化の様子を示しており、同じ形のプロットは同一の地震観測データにおける揺れの大きさの時間変化を表しています。また、比例関係が成立していないデータ群をピンク色、比例関係が成立しているデータ群を緑色で示しています。図中の各直線はそれぞれのデータ群の傾向を表すものです。

図より、P波が開始した直後(図1の紫色の破線で囲った領域)では両者に比例関係は発生していません(図3(a))。一方時間が経過していくと、規模の小さい地震から順に、最終Mと揺れの大きさの間に比例関係が成立していき(図3(b), (c)の緑のデータ群)、最終的には図3(d)のような形となります。小さな地震から次第に比例関係が成立するのは、小さな地震ほど早く T_{dp} が現れるためです。

現行の早期地震警報システムでは、このような時間経過に応じた変化の影響を考慮しておらず、図3(d)で示した比例関係式のみを事前に用意して最終Mを推定する方法を用いています。そこで、鉄道総研は上記の影響を反映し早期地震警報システムで使用するためのM推定方法を提案しました。具体的には、P波開始からの時間経過に伴い変化する最終Mと揺れの大きさの比例関係式を事前に用意し、早期地震警報システムにおける自動処理の際は、M推定に利用する比例関係式を時間によって変化させていく方法です。ただし図3(b)および図3(c)に示したように、常にすべての最終Mについて比例関係が成立しているわけではないので、この場合、図3の緑色の実線

部分(つまり、 T_{dp} が出現し最終Mと揺れの大きさの間に比例関係が成立する部分)のみの比例関係を用います。また、一般に比例関係は「傾き」と「切片」から定義されます。実際に観測された地震データから提案方法の比例関係式を求めた結果、現行のシステムで用いる従来方法の比例関係式と比べて、傾きの値は等しく、切片の値のみが時間によって変化していくことが分かりました。切片の値は時間の経過にしたがって(図3(b)から(c)にかけて)増加していき、最終的には図3(d)のものと同じとなります。

この提案方法で用いる比例関係式と、従来方法の比例関係式を比較した例を図4に示します。ここでは、P波開始から1秒、2秒、3秒の時点でそれぞれ比例関係式を使用するケースを示しています。3秒の時点で観測された揺れの大きさが黒い直線だとした場合、従来方法で使用している式を用いて推定すると、Mは青の矢印で示す値となり、本当の最終Mより過小になります。一方、提案方法の場合、3秒の時点で使用する式を用いると、本当の最終Mとほぼ同じとなります。このことから、提案方法により、最終M推定の即時性が向上することが期待されます。

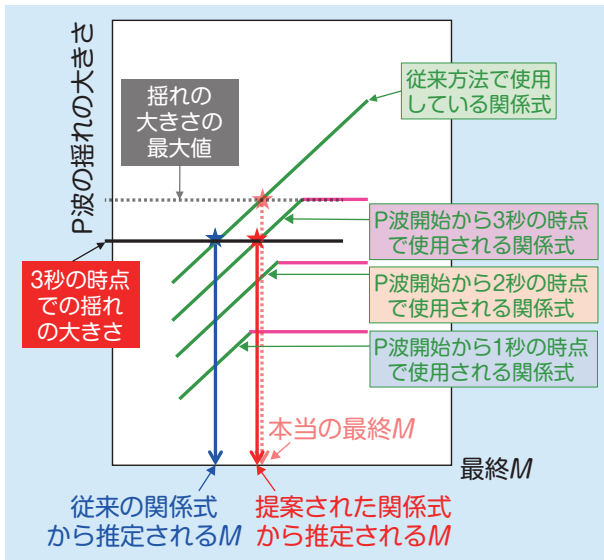


図4 提案方法で用いる比例関係式と従来の比例関係式の比較

提案方法によるM推定の結果

提案方法によるM推定の時間経過の例を図5に示します(赤の実線:2014年長野県北部の地震[M6.7],2016年熊本地震[本震:M7.3])。比較のため、従来方法を使用している気象庁の緊急地震速報が発表したMの推定情報も青の破線で示しています。なおこの例では、推定される値の精度を確保するため、震源周辺の複数の地震観測点で推定されたMの平均的な値を示しています。その結果、推定されるMの値が上がる一方ではなく、下がっている場合もあります。これは解析に用いた実際の観測データのばらつきなどの影響を受けたものです。

これらの地震において、緊急地震速報と提案手法により推定された最終Mの値を図中に示しています。また、推定されたMがそれぞれの最終Mを上回ったタイミングを青矢印(緊急地震速報)と赤矢印(提案手法)で示しています。この結果からわかるとおり、この例においては、提案方法によって従来方法よりも早いタイミングで最終Mを推定することが可能となります。

なお、上述したように T_{dp} と最終Mの間の比例関係が確認できるのはM7程度の地震までとなっています。これ

は、提案方法によってM推定の即時性向上が期待できるのはそこまでの大きさの地震ということを意味します。ただしここで提案した手法でも、M7を大きく越えるような地震に対して、これまでと同じ早さで最終Mを推定することは可能です。その理由は、図3で示したとおり、提案した比例関係式の切片は時間の経過につれて従来の関係式のものに近づいていき、最終的には従来の式とまったく同一になるためです。実は、M7を大きく越えるような地震で揺れの最大値を観測するのはこの後のタイミングであるため、結果として従来と同じ比例関係式を用いることになり、推定の早さは変わらないということになります。

この提案方法の実用化にあたっての大きなメリットとして、現在稼働中の新幹線早期地震警報システムへの導入が容易であるという点があげられます。現行の早期地震警報システムで使われている揺れの大きさとMの比例関係式は、「傾き」と「切片」の値が係数とし

て設定されています。そこで、この切片の値を今回提案のものに書き換え、時間の経化に伴い変化させるようにすれば、提案手法の導入が可能になります。

おわりに

ここでは、早期地震警報システムで使用されている地震のマグニチュード[M]の推定をより早める方法の紹介を行いました。これにより、従来よりも素早く列車の停止を判断することが可能となり、地震時の走行列車のリスクをさらに低減させることが期待されます。[RRR]

文献

- 1) 野田俊太, William L. Ellsworth : 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
- 2) 野田俊太, William L. Ellsworth : 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, 鉄道総研報告, Vol.33, No.12, pp.5-10, 2019

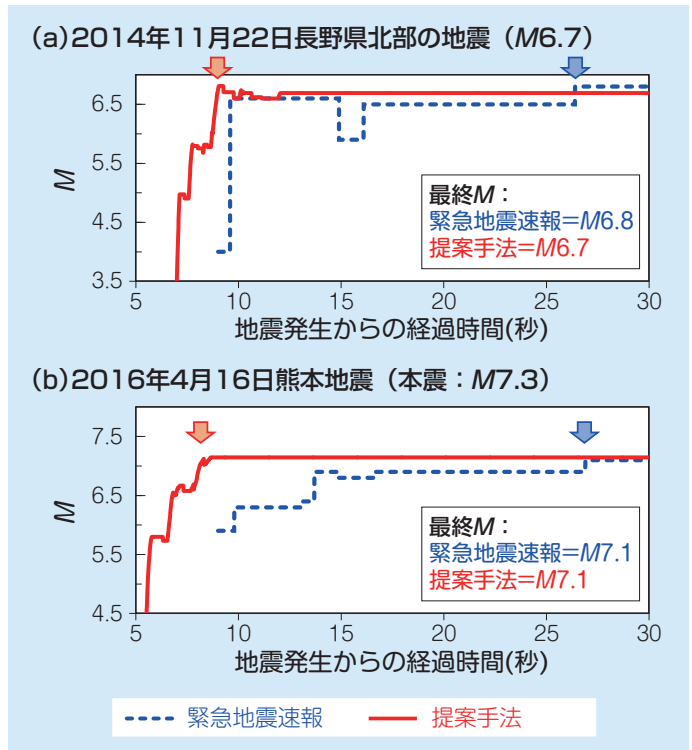


図5 提案方法によって推定されたMと気象庁・緊急地震速報によるMの比較