

単独観測点処理による早期地震諸元推定の改良に関する検討

野田俊太、岩田直泰、鶴飼正人（鉄道総研）、山下貴志（アドバンスソフト）

1. はじめに

鉄道において、地震発生時に走行列車の安全を確保する必要がある場合、可能な限り早く列車を減速・停止することが求められるため、新幹線は早期地震警報システムの運用を行っている（例えば、Yamamoto & Tomori, 2013）。このシステムは、大きく分けて、地震動の大きさが一定の閾値を上回った場合に予め定められた範囲の列車を制御する「S波検知」（またはS波警報）、推定された地震諸元（地震の発生位置およびマグニチュード）に応じて列車の制御範囲を決める「P波検知」（またはP波警報）と呼ばれる方法により、地震時における新幹線の運転制御判断を行っている。

P波検知手法においては、観測されているP波を即時的に解析し、地震諸元を推定する。求める諸元要素は、震央距離、震央方位、マグニチュード (M) である。この推定処理は地震動が観測されている観測点毎に行うため、単独観測点処理とも呼ばれる。この処理は、他の観測点に地震波が到着することを待つ必要が無いため、警報の即時性が高いという利点がある一方で、複数観測点処理に比べて推定精度が劣るという課題がある。

震央距離推定においては、B- Δ 法 (Odaka et al., 2003) や C- Δ 法 (岩田・他, 2016) と呼ばれる手法が用いられる。これらの手法は、P波加速度記録の高周波成分 (10-20Hz) の開始部分の傾き (B または C というパラメータで表わされる) が震央距離 Δ と負の相関を持つという性質を利用している。

また、 M の推定については、Odaka et al. (2003)により示された、いわゆる距離減衰式を用いて逐次得られる変位振幅から M を推定する手法が用いられる。

本研究では、震央距離推定と M 推定において、近年提案された知見を活用し、現行のシステムで用いられている処理プログラムのソースコードを書き換えることなく、設定パラメータの更新のみによって推定精度を向上させる手法の開発を行った結果を報告する。また、それとは異なる新たな取り組みとして、近年発展が目覚ましい機械学習法を適用することにより推定精度を高めるための検討を行った結果についても述べる。

2. C- Δ 法における地域係数と直交回帰手法の導入

前章で述べた通り、単独観測点処理においてはC- Δ 法 (岩田・他, 2016)により震央距離を推定するが、パラメータ C と震央距離 Δ の相関関係には大きなバラツキがある。そこで Okamoto & Tsuno (2015)は、 C の値のバラツキが地域ごとの散乱構造の違いの影響を受けることを明らかにし、これを基にして C と Δ の相関式を地域ごとに設定することを提案した。本研究では、Okamoto & Tsuno (2015)から使用するデータセットを更新し、 C と Δ の相関式の再決定を行った。

解析に用いたデータは、K-NET で観測された $M_j4.0$ 以上、 Δ が 200km 以内の 13,612 個の波形記録である。地域の分割方法は Okamoto & Tsuno (2015) および川瀬・松尾 (2004) を参考に、日本全国を 4 つの領域、または 6 つの領域に分けた場合について比較検討を行った。 C と Δ の関係式の係数決定においては、Steele et al. (2020) による直交回帰手法を使用した。

その結果、地域分割方法を 4 領域に設定した場合と 6 領域に設定した場合で、有意な推定精度の違いは見られなかった。日本全体での推定精度は、現行システムで使用されている式による結果（推定震央距離の対数誤差二乗平均平方根 [RMSLE] で 0.312）と比較して、本研究による結果では Δ が 200km 以内のデータセットに対して約 30% 精度向上が見られることを確認した（同 RMSLE で 0.218）。この結果の妥当性については、今後データセットのバイアスなどを踏まえた議論を行う必要があるものの、今回決定した C と Δ の関係式の係数を用いることにより、新幹線早期地震警報システムにおける震央距離の推定精度が向上することが期待される。なおこの係数は、現行システムの地震計で設定されているパラメータファイルを更新することにより、導入することが可能である。

3. マグニチュード推定式における時間依存係数の導入

上述の通り、単独観測点処理における M 推定においては、 M と変位振幅の大きさの関係を表す距離減衰式を使用する（例えば、Odaka et al., 2003）。Noda & Ellsworth (2017) は、この距離減衰式において、係数のうち特に切片（定数のみの項）を P 波開始からの時間に応じて変化させることを提案した。本研究でもこれに倣い、新たなデータセットを用いることにより M 推定のための距離減衰式の係数再決定を行った。

解析に使用したデータは前章で用いたものと同様であるが、2011 年東北地方太平洋沖地震 ($M_w9.0$) の記録は除外した。P 波の開始時刻は、手動読み取りによる検測結果を使用した。P 波の開始時刻からの経過時間 T が 1.0、1.25、1.5、1.75、2.0、2.5、3.0、4.0 秒となる時点に関して、それぞれの時点までの上下動変位振幅の最大値のデータを用いて距離減衰式の切片の値を決定した。また、P 相全体（P 波開始から S 波開始まで）の最大振幅も使用して係数を求めた。

その結果、決定された切片の値は、Noda & Ellsworth (2017) と同様に、時間の経過に従って低下していくものとなった。なお、 $T=1.0$ 秒、4.0 秒までの時点、および P 相全体のデータによって求められた係数はそれぞれ 6.68、6.30、6.12 となる。したがって、 $T=1.0$ 秒の時点までの最大振幅によって求められた M は、P 相全体での最大振幅によって求められたものと比較して、0.56 程度上昇させられている結果となる。

ここで求められた係数を使用して M の決定を行った結果、現行システムで使用されている式による結果と比較して、 T が小さい時点においても、特に M_j が大きい地震に対して推定 M が過小評価される傾向が軽減されることを確認した。時間の経過に従い、現行パラメータによる結果は M_j が大きい地震に対する過小評価が軽減されていくのに対し、提案手法による結果は M 推定残差の RMS が改善されていくことが確認された。 M 推定残差の RMS

は、提案パラメータによる結果のほうが常に小さくなっており、P相全体の結果ではほぼ等価になっている（RMSは共に0.41）。この結果から、提案パラメータによりMを推定することで、M推定の即時性および精度を高めることが可能となり、地震警報発報の即時性および信頼性を高めることができると結論付ける。なお、時間に応じて切片を変化させていく手法は、現行の新幹線早期地震警報システムの地震計においてソースコードの変更をすることなく、パラメータ調整によって導入することができる。

4. 機械学習法による単独観測点処理に関する検討

上記第2章および第3章で示した検討は、現行システム地震計のパラメータ更新のみにより、容易に実用化することを目指したものである。一方、近年急速に機械学習による解析手法が発展しており、この導入は地震計のソフトウェア等の大幅な変更が必要となるものの、これにより単独観測点処理による地震諸元推定の精度が高まることが期待される。そこで本研究では、震央距離推定においてC-Δ法の代わりに機械学習法を適用した場合、どの程度の推定精度が得られるのかについて検討を行った。

解析に使用したデータは、第2章で示したものと同様とした。ここでは、手動読み取りによるP波開始時刻を使用し、使用するデータ長を0.5、1.0、2.0、3.0秒とした場合で分析を行った。震央距離推定に使用した手法は、畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network：CNN）である（例えば、He et al. 2016）。データセットの8割を訓練用、1割を検証用、残り1割をテスト用に無作為に分類し、構築したCNNに波形を入力して学習および検証を行った。入力する波形の成分を、UDのみの場合と、NS、EW、UDの三成分全ての場合で比較検討を行った。

今回行った検証において、入力する波形の長さおよび使用する成分数の違いによって、大きな推定精度の違いは見られなかった。なお最も高い精度が得られたのは、データ長が1.0秒の場合で、NS、EW、UDの三成分全てを使用した場合となり、そのときのRMSLE（推定震央距離の対数誤差二乗平均平方根）は0.190である。これは、現行システムのC-Δ法による結果（RMSLE = 0.312）と比較して約39%、第2章で提案した改良によるC-Δ法の結果（RMSLE = 0.218）と比較しても約13%の推定精度向上に相当する。なお、B-Δ法（Odaka et al., 2003）からC-Δ法（岩田・他, 2016）に手法を更新した際の推定精度の向上は約6%であったことから、単独観測点処理における震央距離推定において機械学習法を適用することは、有意義であると考えられる。今後は、機械学習法を用いた新幹線早期地震警報システムの地震計開発を目指す。