

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

野田 俊太* 山本 俊六* 佐藤 新二*

Improvement of Earthquake-parameter Estimation for Earthquake Early Warning

Shunta NODA Shunroku YAMAMOTO Shinji SATO

Earthquake parameters are rapidly estimated from single station data in the earthquake alarm system for Shinkansen. In this estimation, epicenter locations are estimated from the Principle Component Analysis (PCA) and the $B-\Delta$ method. In this paper, we propose new methods to improve the accuracy and rapidness of epicenter estimation by introducing variable time window, instead of the conventional fixed time window. By using these methods, it is found that estimation of back-azimuth by PCA is improved by about 30% and 0.25 seconds in accuracy and rapidness respectively, and estimation of epicentral distance by the $B-\Delta$ method can be improved by about 1.3 seconds in rapidness, compared with the conventional method.

キーワード：早期地震検知，緊急地震速報，単独観測点処理，P波， $B-\Delta$ 法，主成分分析

1. はじめに

地震発生時の早期警報技術は近年発展を遂げており、現在は国内全ての新幹線でP波の早期地震諸元推定方法を用いた地震警報システムが導入され^{1) 2)}、また、多くの路線で気象庁が発表する緊急地震速報³⁾が活用されている⁴⁾。

これらのシステムでは、地震を検知した観測点が単独で地震諸元を推定する単独観測点処理が用いられており、この処理においては主成分分析法⁵⁾を用いて震央方位、 $B-\Delta$ 法⁶⁾を用いて震央距離が推定される。

これらの方法は現時点でも実用上問題ない精度および即時性を持っていると考えられるが、解析に使用する記録の時間の長さ（以下、タイムウィンドウ）を全記録で一定としていた従来方法に対して、記録毎にタイムウィンドウを変化させる方法を提案し、両者の方法の推定精度もしくは即時性が更に向上することを示す。

2. 震央方位推定および震央距離推定の従来方法

本章では、主成分分析を用いた震央方位推定、および $B-\Delta$ 法を用いた震央距離推定の従来方法について述べる。

2.1 震央方位推定の従来方法

従来方法では、記録によらず一定の長さに固定されたタイムウィンドウ（以下、固定のタイムウィンドウ）で、P波初動部分の三成分のパーティクルモーションの主軸を求め、震央方位を推定する。

具体的には、まず、観測された加速度波形を漸化式フィルタにより変位波形に変換し、さらに中心周波数が1Hzの漸化式フィルタで変位バンドパス波形を計算する。次に自動検測手法により求められたP波の到達時刻から1.1秒間の変位バンドパス波形を対象に主成分分析を行ない、パーティクルモーションの主軸から震央方位を推定する（図1）。この1.1秒は記録によらず一定としており、本報告では上記したように固定のタイムウィンドウと呼ぶ。

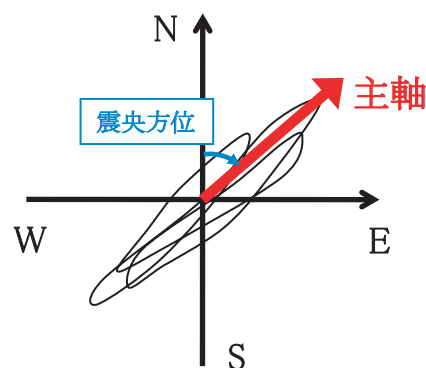


図1 主成分分析法による震央方位の推定

* 防災技術研究部 地震防災研究室

特集：防災技術

2.2 震央距離推定の従来方法

従来方法では、P波到着から1～2秒間のP波初動部分の上下動成分のエンベロープ波形に関数

$$y = Bt \exp(-At) \quad (1)$$

をフィッティングさせた時に求められる係数Bと震央距離Δの高い相関性を利用して、係数BからΔを推定する。

具体的には、まず、観測された加速度波形に中心周波数が10Hzの漸化式フィルタをかけて加速度バンドパス波形を計算する。次に、その波形の上下動成分からエンベロープ波形を計算し、このエンベロープ波形のP波の初動部分に(1)式を最小二乗法によりフィッティングさせ、係数Bを求める。求められたBと震央距離Δの統計的な関係式 ($\log \Delta = -0.498 \times \log B + 1.965$) から震央距離Δを推定する。

なお、フィッティングを行なう際、P波の到達時刻から2秒間の記録を用いることが多いため、この方法を本報告では2秒B-Δ法と呼ぶ。

3. 震央方位推定方法の精度および即時性向上

3.1 従来方法の精度検証

最初に、震央方位推定の従来方法の精度検証を行なった。用いたデータセットは、独立行政法人防災科学技術研究所の強震観測網(K-NET)で1996年から2010年までの間に観測されたマグニチュード5.5以上、震央距離300km以内、計測震度3.5以上の1,991波形である。

従来方法による推定震央方位の誤差の分布を図2に示す。

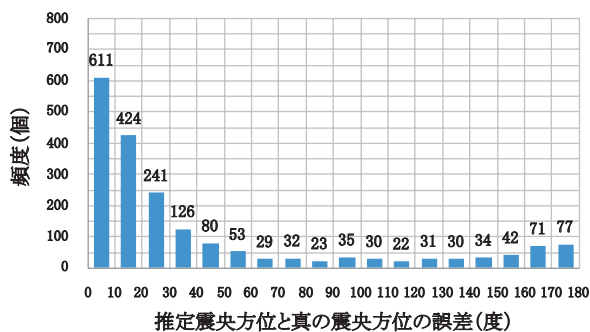


図2 従来方法(全記録で1.1秒固定のタイムウィンドウ)による推定震央方位の誤差

従来方法により推定した震央方位では、誤差が30度以内のものが64%となった。また、誤差の平均値およびRMS(Root Mean Square)はそれぞれ43.0度、67.9度となった。全般的に誤差が大きくなるに従って対応する記録の数は低くなる傾向があるが、誤差が160度から180度(方位がほぼ反対)となる記録が有意に多くなる特徴

も認められる。

以上の結果を踏まえ、震央方位推定の精度を更に向上させる方法を以下に試みる。

3.2 固定のタイムウィンドウと誤差の関係

本研究では、まず主成分分析に使用する固定のタイムウィンドウである従来の1.1秒を変化させることによって精度を評価した。2.1に示す通り、従来方法ではタイムウィンドウは1.1秒で固定となっている。これは従来方法を定めた当時のデータセットを用いた最適値であるが、ここでは最新のデータセットを用いて再検討を行なう。

前節と同一のデータセットに対し、固定のタイムウィンドウを0.1秒ずつ変化させて推定震央方位の誤差の平均値およびRMSを計算した結果を図3に示す。固定のタイムウィンドウが0.6秒の場合で最も誤差が小さく、その時の平均値およびRMSはそれぞれ36.2度、57.3度である。この結果は、従来方法の1.1秒で固定のタイムウィンドウの場合と比べて精度が約16%改善されることを意味する。また、タイムウィンドウが極端に短い場合を除けば、タイムウィンドウが長くなるにつれ誤差が大きくなっている傾向が見られる。これは、タイムウィンドウが長いほどP波の直達波以外の影響、すなわち地殻構造の不均質性等によって生じる後続の散乱波等の影響が大きくなっていくためと考えられる。

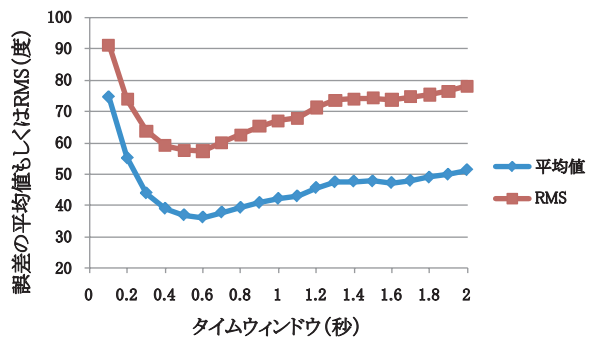


図3 固定のタイムウィンドウと方位推定の誤差の平均値およびRMS

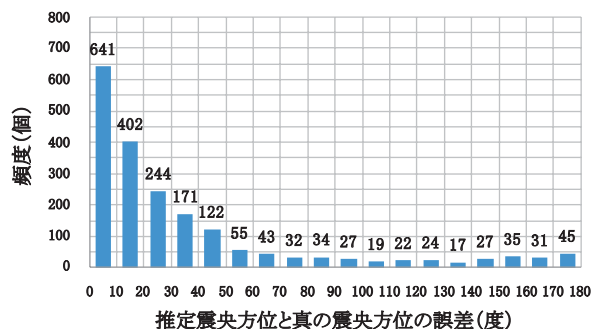


図4 全記録で0.6秒固定のタイムウィンドウによる推定震央方位の誤差

図4に固定のタイムウィンドウが0.6秒の場合の推定震央方位の誤差の分布を示す。0.6秒の固定のタイムウィンドウの場合、従来の1.1秒の場合と比べて震央方位の誤差が30度以内となる記録の数はあまり変わらないが、60度以内となる記録が増え、全体的に精度が向上していることが分かる。また、従来方法で見られる誤差が160度から180度となる記録が有意に多いという傾向はほぼ認められない。これは、1.1秒程度のタイムウィンドウでは、P波の初動の半波長の波よりもその次の半波長以降の波の振幅が大きい場合、P波初動の極性を誤認してしまうためと考えられる。

3.3 可変のタイムウィンドウ

前節に示したように、主成分分析法により震央方位を推定する場合、全ての記録に固定の長さのタイムウィンドウを用いることは、後続の散乱波等の影響を受ける可能性があるため必ずしも最適ではないと考えられる。そこで、本報告ではその影響を低減させるため、記録によってタイムウィンドウを変える方法を提案する。なお本報告ではこのことを可変のタイムウィンドウと呼ぶ(図5)。

提案方法のタイムウィンドウは、変位バンドパス波形の上下動成分のP波の到達時から最初にゼロ・クロスするまでの時間とする。したがって、その長さは記録によって異なる。前節までと同一のデータセットに対し、各々のタイムウィンドウを計算した結果を図6に示す。タイムウィンドウが2秒以内に計算できたケースの平均値は0.85秒である。

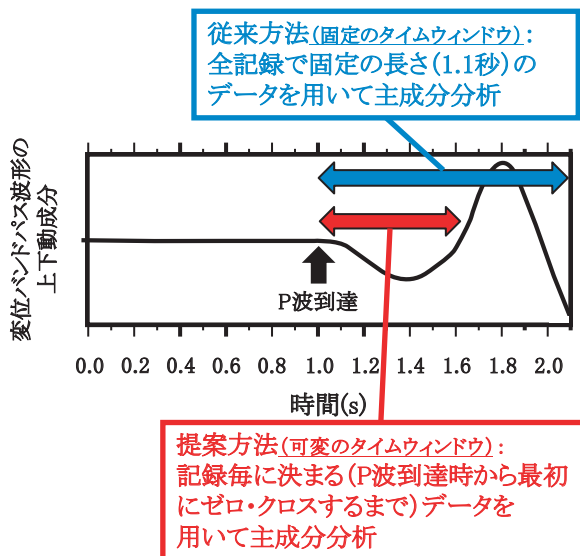


図5 固定のタイムウィンドウと可変のタイムウィンドウの概念

提案方法により、推定震央方位の誤差を計算した結果を図7に示す。なお、タイムウィンドウが0.2秒以下も

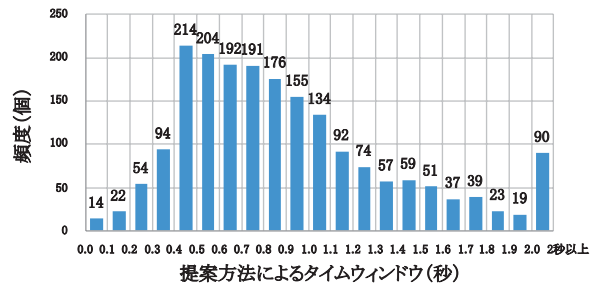


図6 提案方法によるタイムウィンドウの分布

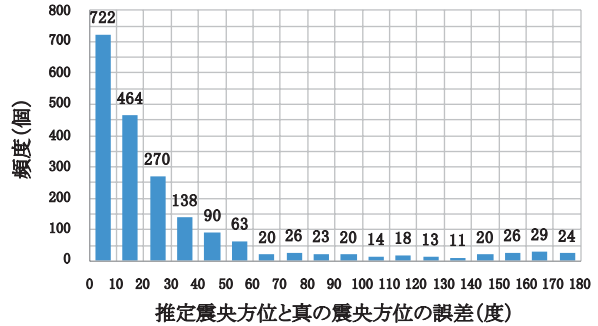


図7 提案方法による推定震央方位の誤差

しくは2秒以内に計算できない場合、タイムウィンドウは固定のタイムウィンドウの最適値である0.6秒(図3参照)を用いている。

提案方法を用いた場合、固定のタイムウィンドウで最も精度が良かった0.6秒よりも、推定震央方位の誤差が0度から30度以内となる精度の良い記録が増加し、それ以外の記録が少なくなる傾向が見られる。また、推定震央方位の誤差の平均値およびRMSはそれぞれ、29.6度、49.0度となった。従来方法と提案方法の震央方位の推定方法の結果を比較すると、表1のようになる。結果として、提案方法を用いると、従来の1.1秒の固定のタイムウィンドウと比較して約28～31%、固定のタイムウィンドウで最も良い精度の0.6秒と比較しても約15～18%精度が向上する。

また、図6で示したタイムウィンドウは、0.4～0.6秒となる記録の数が最も多くなっているが、この値は固定のタイムウィンドウで最も精度が良かった値にほぼ対応しており、今回の検討内容の妥当性を示していると考えられる。

表1 震央方位推定方法の比較

タイムウィンドウ	誤差の平均値(度)	誤差のRMS(度)
固定(1.1秒) (従来手法)	43.0	67.9
固定(0.6秒) (固定で最も高精度)	36.2	57.3
提案方法 (長さは記録により異なる)	29.6	49.0

特集：防災技術

なお、提案方法は、簡単な処理のみをプログラムに追加することで対応できるためリアルタイム処理においてもほとんど負荷が増えず、大きな精度の向上が期待できる。また、タイムウィンドウは従来の1.1秒の固定のタイムウィンドウよりも平均で約0.25秒短くなり、推定に必要な時間が少なくなる効果もある。以上のことから、ここで提案した方法は精度と即時性向上に効果的であることが検証できた。

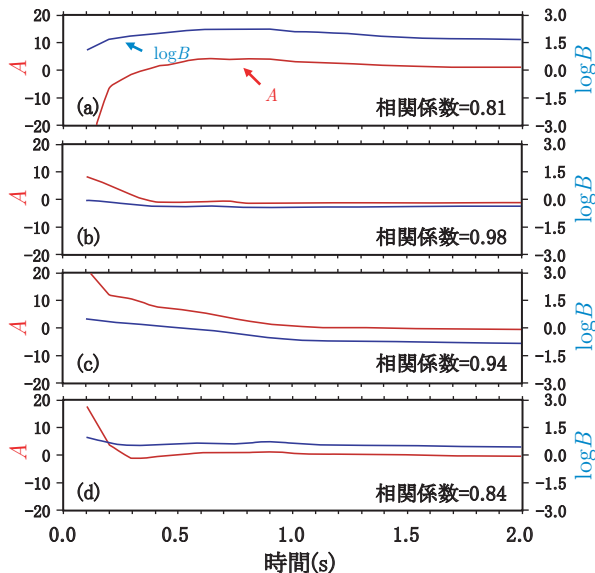
4. 震央距離推定方法の即時性向上

4.1 係数 A および B の時間変化

本報告では、従来方法（2秒B-Δ法）の即時性を向上させるために、(1)式の係数 A および B の時間変化に着目した。

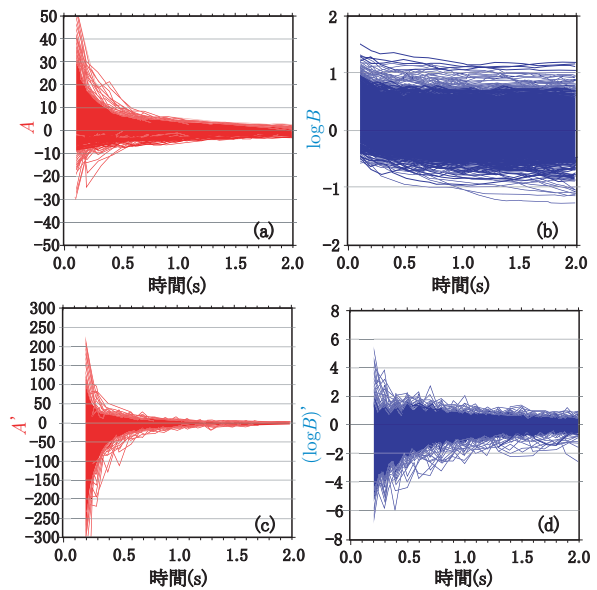
係数 A および B の時間変化を求めるため、(1)式のフィッティングをP波の到達時刻から0.1秒間隔毎に2秒までの記録に対して行なった。なお、用いたデータセットは前章と同一である。A および log B の時間変化の例を図8に示す。また、データセット全体での A および log B の時間変化、およびその時間微分値 (A', (log B)') を示したものが図9である。なお、図9(c)および(d)では、A' および (log B)' が、2秒の間に0に収束していく傾向が見られる。

これらの結果から、A および B の時間変化は二つの重



(a): 1999年2月26日14時18分に発生した地震 (M5.1) でのAKT020 (震央距離8km) の結果
 (b): 2004年紀伊半島沖地震 (M6.9) でのWKY006 (震央距離180km) の結果
 (c): 2004年新潟県中越地震 (M6.8) でのNIG013 (震央距離53km) の結果
 (d): 2008年岩手宮城内陸地震 (M7.2) でのMYG006 (震央距離50km) の結果

図8 A および B の時間変化の例



(a): A の時間変化, (b): log B の時間変化,
 (c): A の時間変化の時間微分値,
 (d): log B の時間変化の時間微分値

図9 A および log B の時間変化とその時間微分値

要な特性を持つことが分かる。ひとつは、図8で見られるように A および log B の時間変化は非常に良い相関性を持つことである。相関係数を計算すると、その平均値および標準偏差はそれぞれ0.85, 0.15となる。もうひとつは、図9から分かるように A および log B は2秒の間にそれぞれ一定の値に収束する性質を持つということである。このことは、(1)式がP波初動部の地震波の振幅の成長を非常によく説明できる関数であり、結果的に概ね2秒以内でエンベロープ波形の形状が安定するためと考えられる。

4.2 B-Δ法の即時性向上方法

前節の結果から、A もしくは B が収束したことを確認することにより、2秒B-Δ法の精度をほぼ保ったまま2秒の経過を待つことなく震央距離を推定できることが分かる。そこで、ここではA もしくは log B の時間微分値の絶対値が、あらかじめ決められた閾値以下の値を一定時間連続して示すのを確認することによって収束したかどうかの判定を行なうこととする。以上を模式的に示したものが図10である。この方法を可変B-Δ法と呼ぶことにする。また、A もしくは log B の時間微分値の閾値をそれぞれ Tad, Tld とし、値が閾値以下となる継続時間の閾値を Dd と呼ぶことにする。

次に、ここで提案した可変B-Δ法と従来の2秒B-Δ法により得られる推定震央距離（それぞれ、 $\Delta_{可変}$ と Δ_{2s} で表わす）の差と、収束までに要する時間について述べる。A で収束判定を行なった場合の可変B-Δ法と、2秒B-Δ法による推定震央距離の常用対数の差のRMSを図11に

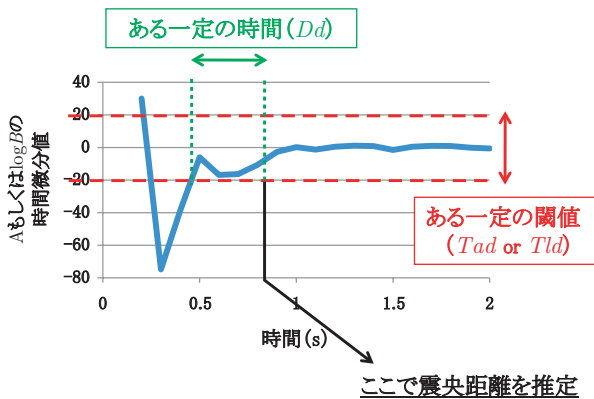
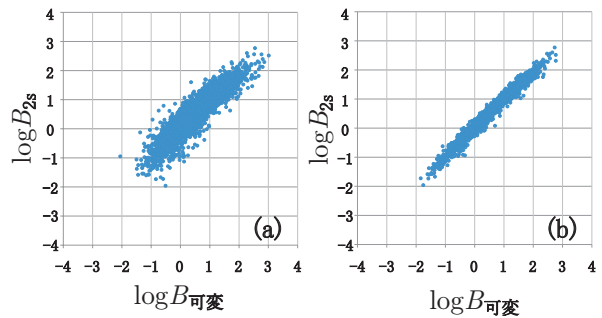


図 10 可変 B - Δ 法の模式図



(a) : $Dd=0.3(s)$, $Tad=40(1/s^2)$ のとき
 (b) : $Dd=1.0(s)$, $Tad=25(1/s^2)$ のとき

図 13 可変 B - Δ 法と 2 秒 B - Δ 法により求められた B の関係の例

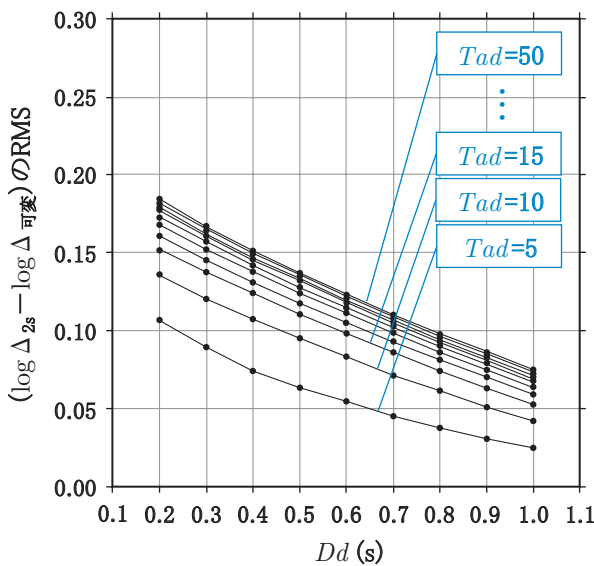


図 11 $\log \Delta_{2s}$ と $\log \Delta_{可変}$ の差の RMS
 (A で収束判定を行なった場合)

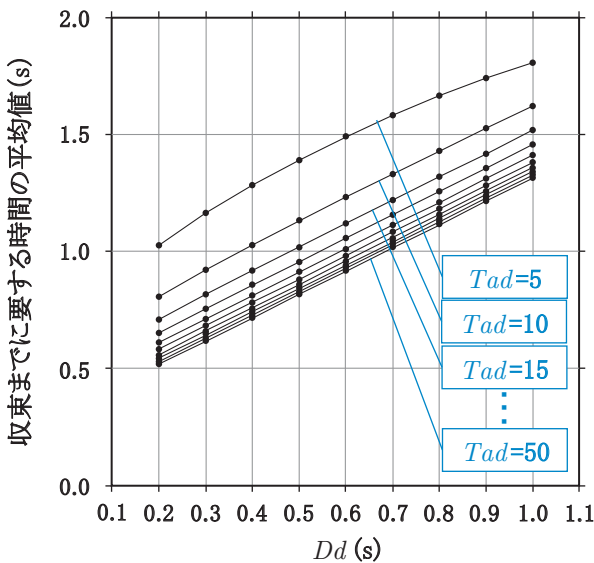


図 12 収束と判定されるまでに要する時間の平均値 (A で収束判定を行なった場合)

示す。なお、A で収束判定を行なう場合、収束が確認された時点での B の値から従来と同様の関係式 (2 章参照) で震央距離 Δ を推定している。また、図 12 に収束に要する時間の平均値を示す。

これらの結果から、 Tad を小さく、 Dd を長くすると (つまり、収束判定が相対的に困難になることに相当する)、収束に要する時間は長くなり、2 秒 B - Δ 法と可変 B - Δ 法による推定震央距離の差は小さくなるのが分かる。図 13 に、可変 B - Δ 法と 2 秒 B - Δ 法により求められた B の値 (それぞれ、 $B_{可変}$ と B_{2s} で表わす) の例を示す。収束判定が困難である場合、可変 B - Δ 法と 2 秒 B - Δ 法による B のバラツキが小さくなっているのが分かる。

次に、収束の判定を $\log B$ によって行なった場合の結果を図 14 および図 15 に示す。A により判定を行なった場合と同様の傾向が見られる。現状では A と $\log B$ どちらで収束の判定を行なっても明確な特性の差はなく、むしろどのように Tad もしくは Tld と Dd の値を設定するかということが重要と考えられる。

以上の結果から、即時性と安定性を確保できる適切なパラメータを設定することによって、現在の 2 秒 B - Δ 法とほぼ同等の精度を確保したまま可変 B - Δ 法で震央距離の推定に必要な時間を短縮できるのが分かる。

最後に即時性と安定性を同時に確保できる適切なパラメータの例について述べる。2 秒 B - Δ 法により推定された震央距離と真の震央距離との誤差の RMS は 0.32 となるため、2 秒 B - Δ 法と可変 B - Δ 法の差の許容範囲をその 1/2 以下とし、収束までに要する時間をできるだけ短くするには、例えば A で収束判定を行なう場合、 $Tad=30$ 、 $Dd=0.3$ という値が選択される。このパラメータを用いたとき、収束までに要する時間の平均値は約 0.68 秒、真の震央距離との誤差も 0.30 となり、2 秒 B - Δ 法とほぼ同等となるため、可変 B - Δ 法によって従来の 2 秒 B - Δ 法の精度を保ったまま即時性を大きく向上させることができる。

特集：防災技術

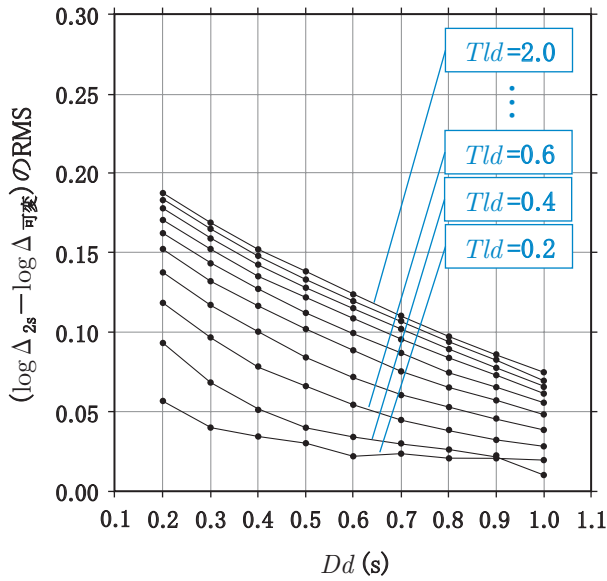


図 14 $\log \Delta_{2s}$ と $\log \Delta_{可変}$ の差の RMS
($\log B$ で収束判定を行なった場合)

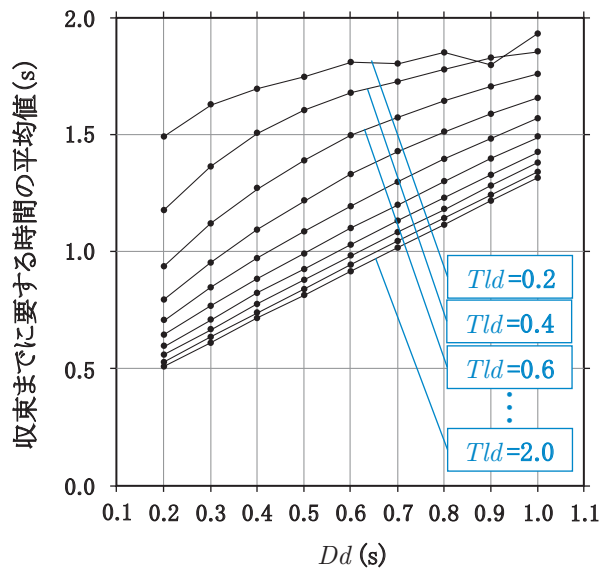


図 15 収束と判定されるまでに要する時間の平均値
($\log B$ で収束判定を行なった場合)

5. 結論

本報告では、P波の早期地震諸元推定方法について、震央位置の推定の精度および即時性を向上させる方法を提案した。

主成分分析法を用いた震央距離推定方法について、変

位バンドパス波形の上下動成分がP波到達から最初にゼロ・クロスするまでの時間を推定に用いるタイムウィンドウとする方法を検証した。この方法により、従来方法と比較して推定精度が約30%向上し、推定に必要な時間が1.1秒から平均約0.85秒に短縮された。

また、 $B-\Delta$ 法を用いた震央距離推定方法については、 $B-\Delta$ 法の係数 A もしくは B の時間変化が収束する時間までの記録を用いる方法を検証した。この方法により、2秒 $B-\Delta$ 法とほぼ同等の精度を保ったまま、推定に必要な時間を0.7秒程度とすることができた。

6. おわりに

本研究では震央位置の推定精度および即時性を向上させる方法を提案したが、今後はマグニチュード推定の精度や即時性を向上させる方法の開発が重要であると考え

謝 辞

本研究では、独立行政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きました。記して感謝いたします。

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) 山本俊六・佐藤新二: 鉄道における早期地震警報システムの変遷, RRR, Vol.67, No.3, pp.16-19, 2010
- 3) Hoshiba, M., O. Kamigaichi, M. Saito, S. Tsukada and N. Hamada, "Earthquake early warning starts nationwide in Japan", EOS Trans, AGU, 89, 73-74, 2008.
- 4) 芦谷公稔: 緊急地震速報と鉄道におけるその活用例, 地盤工学会誌, Vol.56, No.7, pp.24-27, 2008
- 5) 気象研究所地震火山研究部: 自動検測手法の研究, 気象研究所技術報告, No.16, pp.56-100, 1985
- 6) Odaka, T., K. Ashiya, S. Tsukada, S. Sato, K. Ohtake and D. Nozaka, "A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record", Bull. Seism. Soc. Am., Vol.93, No.1, pp.526-532, 2003.