

地中地震記録を利用した地表地震動の即時予測手法

宮腰 寛之* 津野 靖士*

Real-time Prediction of Earthquake Ground Motions using Seismic Records
Observed in Deep Boreholes

Hiroyuki MIYAKOSHI Seiji TSUNO

In the case of local earthquakes occurring beneath Tokyo Metropolitan Area, the present earthquake early warning system may not work efficiently due to the shortness of the hypocentral distance. We proposed a method to directly predict earthquake ground motions using seismic records observed in deep boreholes of KiK-net to make the lead time longer. To develop this method, we investigated relationships between peak amplitudes on the surface and those in deep boreholes. We confirmed that this method could rapidly predict earthquake ground motions, using parameters estimated by both the site amplifications and the radiation patterns.

キーワード：地中地震記録，地表地震動，即時予測，直下地震，速度構造，ラディエーション

1. はじめに

列車の走行安全性を確保するためには、地震発生時に可能な限り早く列車を停止させることが重要である。それを実現するために、地震のP波初動から地震諸元を推定して列車制御を行うシステムが1992年から導入されている¹⁾。現行の早期地震警報システムでは、地表地震動のP波初動部のエンベロープ形状と震央距離の経験的な関係から推定した震央距離に基づいて警報を出力する手法が用いられている²⁾。しかし、今後発生が予想される首都直下地震では震源から検知地点までの距離が短いため、主に沿線の地表に設置された地震計を利用する現行システムでは警報出力までの余裕時間が少なくなる。より早く確実に警報を出力するためには、直下地震の発生に備えて沿線に限らない広範囲に警報用地震計を増設することが方策として考えられる。

また、沿線の地震計で観測した地震動指標が運転規制値を超えた場合、対応する運転規制区間において列車の運転を中止し、徒歩等で鉄道構造物の被害の有無を点検する必要がある^{例え3)}。被害が無ければ運転再開が可能だが、地震計の設置間隔は5～40km程度^{例え4)}であることから運転再開までに多くの時間を要しているのが現状である。現行の運転規制のルールに則って早期運転再開を図るためには、地震計を増設して運転規制区間を短くし、効果的に点検を実施することが方策として考えられる。

このように、地震計を増設することは早期地震警報と早期運転再開の両方に対して効果が期待できる。しかし、地震計の設置、維持管理、老朽取替に係る費用は莫大な

* 防災技術研究部 地震防災研究室

ものとなり、長期間にわたって経営に影響を及ぼすことが予想される。また、地震計の数量が増えることにより故障や誤動作のリスクが高まることから、維持管理体制の強化も視野に入れる必要がある。

一方、兵庫県南部地震以降、公的機関による地震計の整備が進み、日本全国を対象に多数の強震計が整備されている。これらの中には震源に近い地中や海底に設置されている地震計も含まれ、気象庁の緊急地震速報においてこれらの地震計を活用するための検討が行われている⁵⁾。鉄道分野においても、このような公的機関の地震記録を即時的に利用することで、効果的な早期地震警報や地震時運転規制を実現できることが期待される。

そこで本研究では、首都直下地震を対象として、(独)防災科学技術研究所により整備された地中地震計⁶⁾を利用した地表地震動の即時予測手法を提案する。地中で観測したP波(以下、地中P波)から直接的に地表地震動を即時予測することができれば、地震波の地中伝播時間分だけ早く警報を出力できる。また、地中で観測したS波(以下、地中S波)と地下速度構造の情報を利用することで、地震発生直後に地表地震動の面的分布を高精度で推定できる可能性があり、地震後の運転規制区間の点検を行う上で有用な情報となり得る。本報告では、地中と地表の地震記録の最大振幅の関係に着目し、地中地震記録から直接的に地表地震動を即時予測する手法について検討する。

2. 使用したデータ

(独)防災科学技術研究所が運用している基盤強震観測網KiK-netは、地中深くまで掘削したボアホール内部

特集：防災技術

に設置された地中地震計と地表地震計の鉛直アレイを構成している。本研究では地中と地表の両方の地震記録を使用し、地中と地表の最大振幅の関係に着目した。関東平野周辺の KiK-net 観測点の分布を図1に示す。関東平野の地下は先新第三系（約 2300 万年前以前の地質）の基盤の上に厚い堆積層が分布する構造となっている。ボアホールが先新第三系の基盤に到達している KiK-net 観測点は、ボーリングデータの検証結果から図1に示す12箇所とされており⁷⁾、それ以外の観測点における地中地震動は堆積層による増幅の影響を受けていると考えられる。本研究では基盤から地表までの地震動増幅の影響を評価するために、ボアホールが基盤に到達している観測点の地震記録を使用した。

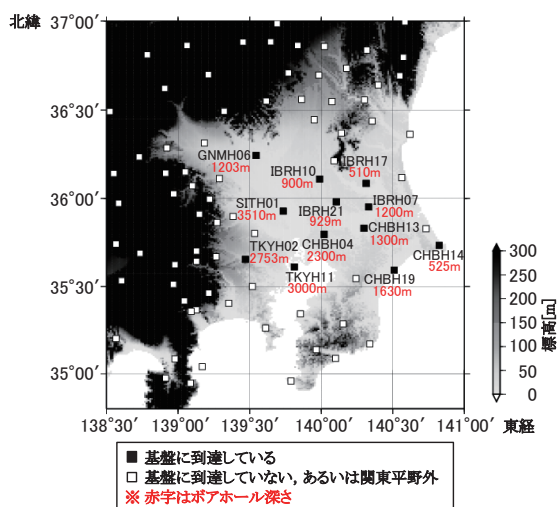


図1 関東平野周辺の KiK-net 観測点の分布

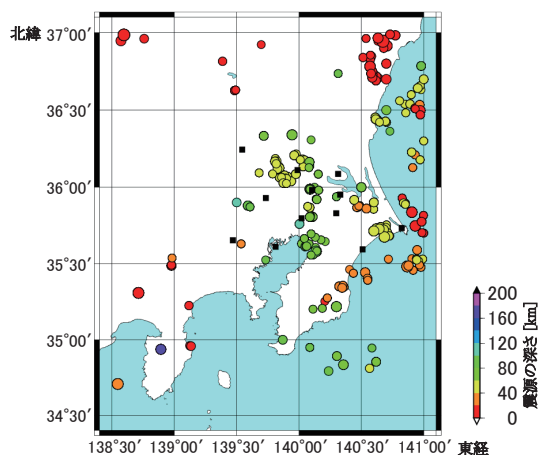


図2 解析対象とする地震の震央分布

本研究は首都直下地震を対象としているため、図2に示す関東平野周辺を震源とする地震を対象とした。気象庁マグニチュードは4.5～7.0の範囲であり、特に4.5～5.5の地震を多く含んでいる。また、図2に示した地震において各観測点で記録された地表最大加速度のヒストグラムを図3に示す。図3より、地表最大加速度が数

10gal以下の地震記録が大半を占めており、地盤の非線形性⁸⁾の発現が予想される最大加速度の頻度は低いことがわかる。したがって、本研究で使用した地震記録には地盤の非線形性の影響を受けた記録は少ないと考えられる。

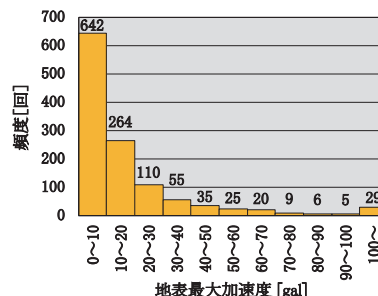
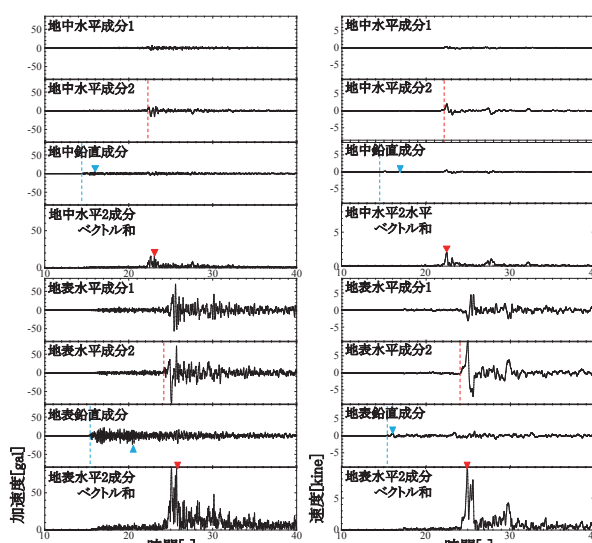


図3 地表最大加速度のヒストグラム

各地震記録について、はじめに加速度波形を用いてP波とS波の到着時間の読み取りを目視で行った。P波の読み取りに対しては鉛直成分、S波の読み取りに対しては水平2成分の加速度波形を用いた。次に、加速度波形を積分して速度波形を求めた。加速度波形に対してカットオフ周波数0.1Hz、20Hzの3次のButterworth型バンドパスフィルタ処理を施した。最後に、加速度波形と速度波形のそれぞれについてP波とS波の最大振幅を求めた。P波の最大振幅はP波到着からS波到着までの時間における鉛直成分の絶対値の最大値、S波の最大振幅はS波到着後の水平2成分ベクトル和の最大値とした。到着時間の読み取りと最大振幅の例として、2005年7月23日に千葉県北西部で発生したマグニチュード6.0、震源の深さ73kmの地震におけるCHBH04の地中と地表の加速度波形および速度波形を図4に示す。



(a) 加速度波形 (b) 速度波形
 P波到着時間 S波到着時間 P波最大振幅 S波最大振幅

図4 加速度波形と速度波形の例 (2005年7月23日 千葉県北西部の地震)

3. 地中地震記録を利用した地表地震動予測の即時性に関する検討

地中地震記録利用時の主要動到達までの余裕時間として地中P波と地表S波の到着時間差を計算し、震源距離との関係をプロットした結果を図5に示す。到着時間差と震源距離には正の相関があり、震源距離が数10km程度の直下地震に対しても、数秒程度の余裕時間が期待できる。

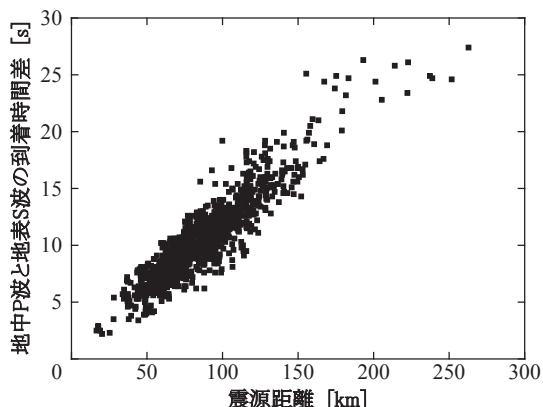


図5 地中P波と地表S波の到着時間差と震源距離の関係

各観測点における地中P波と地表P波の到着時間差を図6に示す。今回使用した観測点では到着時間差は0.1～1.2秒となっており、ボアホールが深い観測点ほど大きいことがわかる。したがって、地中地震記録を利用することで地表地震記録を利用するより若干ではあるが早く警報を出力できる。

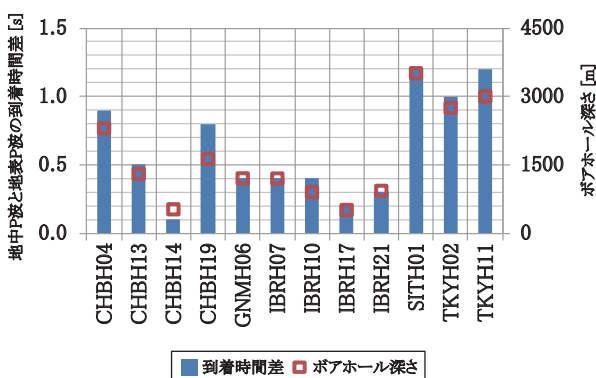


図6 地中P波と地表P波の到着時間差

地中P波の到達から最大加速度が発現するまでの時間の確率分布を図7に示す。震源距離に近い地震ほど早く最大加速度が現れる傾向が見てとれる。特に、図7(a)に示す震源距離40km以下の地震では、80%程度が到着から2秒以内に最大加速度が発現していることがわかる。つまり、直下地震に対しては地中P波の最大振幅を即時に得られる可能性が高い。したがって、地中P波と地表

S波の最大振幅の関係を用いて地表S波の最大振幅を即時予測できる可能性が高いと言える。

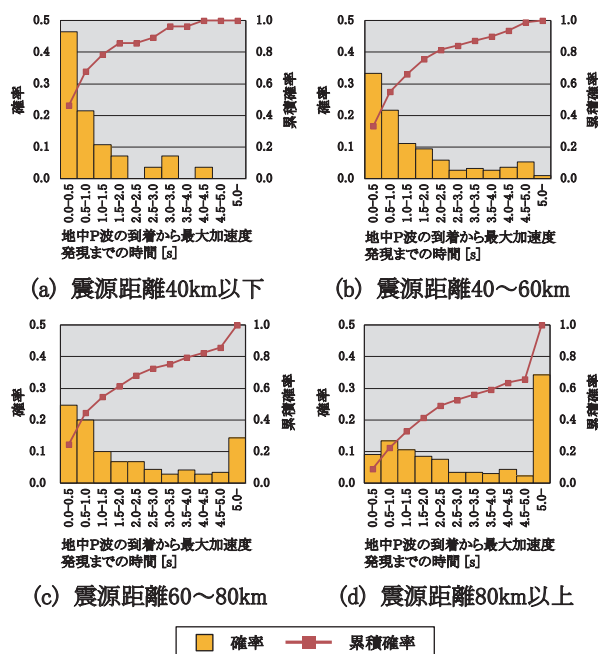


図7 地中P波到着から地中P波の最大加速度が発現するまでの時間の確率分布と累積分布

4. 地中と地表の地震記録における最大振幅の関係

4.1 地中S波と地表S波の最大振幅の関係

本研究ではボアホールが基盤に到達している観測点を使用しているため、地中S波と地表S波の振幅の関係は基盤から地表までの地下速度構造による増幅率を表すパラメータ a_1 を用いて式(1)で表すことができる。

$$\log u_s^S = \log u_b^S + a_1 \quad (1)$$

ここで u は地震波の振幅で、以下では最大振幅で評価する。上添字はP波(P)かS波(S)を表し、下添字は地中(b)か地表(s)を表す。

各観測点における地中S波と地表S波の最大加速度および最大速度の関係をそれぞれ図8と図9に示す。図中の N は地震記録数、 R は相関係数である。 a_1 は式(1)のパラメータであり、上添字は最大加速度(A)か最大速度(V)により求めたことを示す。赤色の直線は式(1)を全観測記録に対して最小二乗法によりフィッティングを行った結果である。

4.2 地中P波と地中S波の最大振幅の関係

震源を点震源かつダブルカップルと仮定したとき、震源から十分離れた観測点におけるP波とS波の波動場を表す式⁹⁾に対して振幅の比を取ると、地中P波と地中S波の振幅の関係は、各地震の震源と観測点の位置関

特集：防災技術

係に依存するラディエーション係数と地震発生域周辺のP波/S波速度比の影響を含むパラメータ a_2 を用いて式(2)で表すことができる。

$$\log u_b^s = \log u_b^p + a_2 \quad (2)$$

各観測点における地中P波と地中S波の最大加速度および最大速度の関係をそれぞれ図10と図11に示す。図中の a_2 は式(2)のパラメータであり、赤色の直線は式(2)を全観測記録に対して最小二乗法によりフィッティングを行った結果である。

4.3 地中P波と地表S波の最大振幅の関係

式(1)と式(2)から、地中P波と地表S波の関係を表す式(3)が求められる。

$$\log u_s^s = \log u_b^p + b \quad (3)$$

ここでパラメータ b は式(4)で表され、地下速度構造による増幅率、各地震のラディエーション係数、そして地震発生域のP波/S波速度比の影響を全て含んでいる。

$$b = a_1 + a_2 \quad (4)$$

各観測点における地中P波と地表S波の最大加速度および最大速度の関係をそれぞれ図12と図13に示す。図中の b は式(3)のパラメータであり、赤色の直線は式(3)を全観測記録に対して最小二乗法によりフィッティングを行った結果である。

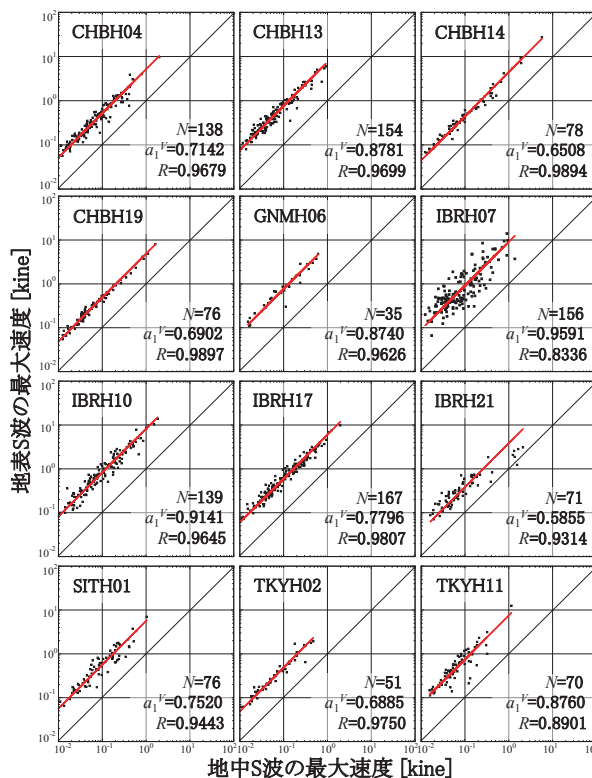


図9 地中S波と地表S波の最大速度の関係

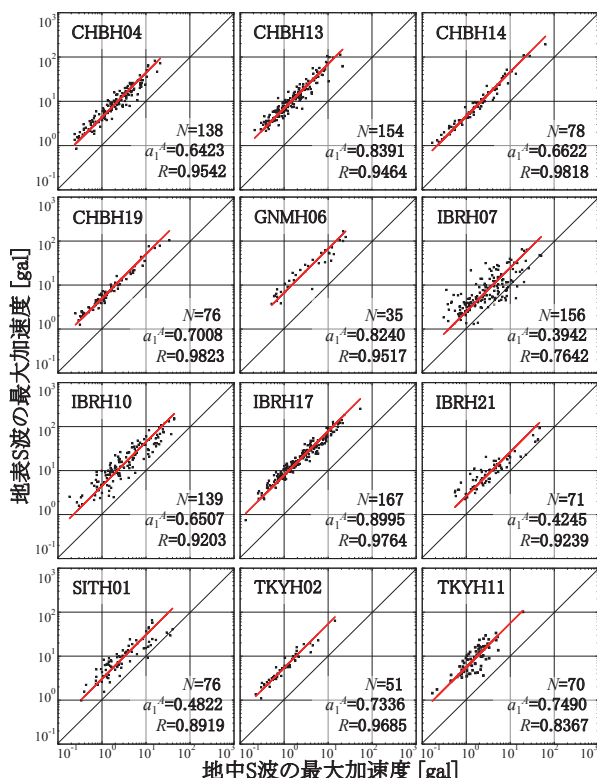


図8 地中S波と地表S波の最大加速度の関係

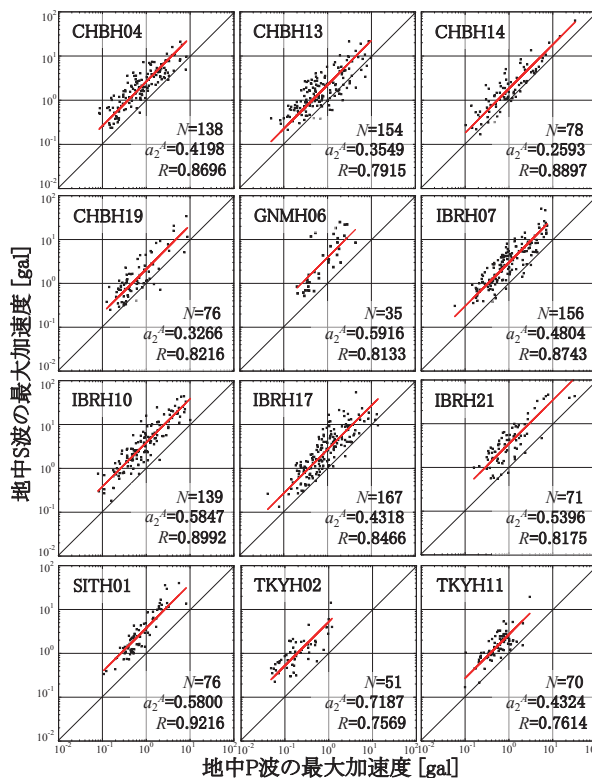


図10 地中P波と地中S波の最大加速度の関係

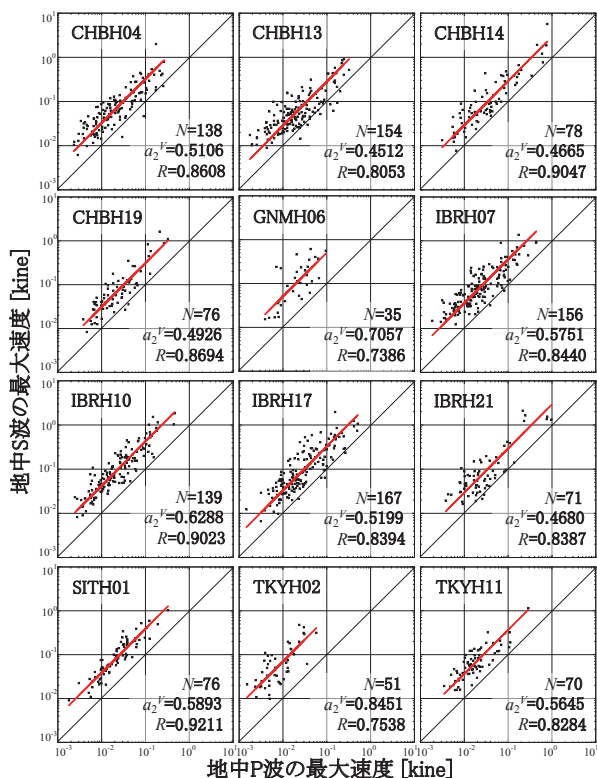


図 11 地中 P 波と地中 S 波の最大速度の関係

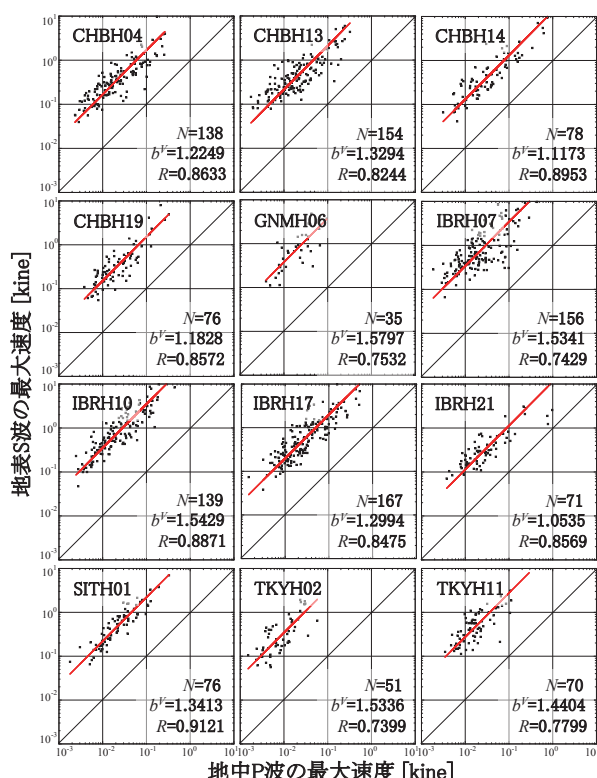


図 13 地中 P 波と地表 S 波の最大速度の関係

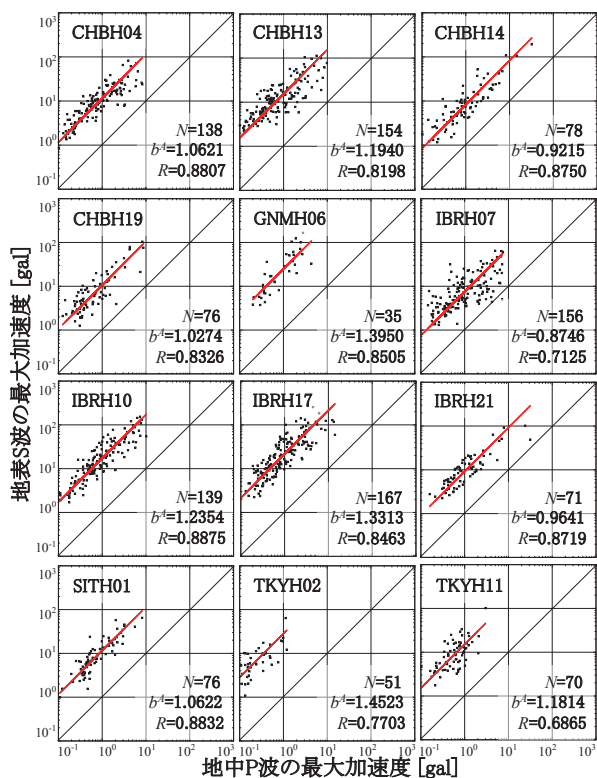


図 12 地中 P 波と地表 S 波の最大加速度の関係

4.4 議論

4.1 と 4.2 で求めた最大振幅の関係におけるパラメータ a_1 、 a_2 を比較したグラフを図 14 に示す。先に述べたように a_1 は基盤から地表までの地下速度構造による増幅率を表すため、観測点間での a_1 の違いは観測点直下の地下速度構造の違いに対応していると考えられる。一方、 a_2 はラディエーション係数と地震発生域周辺の P 波/S 波速度比の影響を表すため、観測点間で a_2 の違いには各観測点において観測された地震の違いによるラディエーションの偏りが主に影響していると考えられる。観測点間でパラメータが異なる原因についての詳細は今後検討する必要がある。

a_1^A と a_1^V の値を比較すると、 a_1^A が大きいにもかかわらず a_1^V が小さい観測点などが存在する。これは、地下速度構造によって増幅される周波数帯が異なるためと考えられる。また、 a_2^A と a_2^V の値を比較すると、IBRH21 を除いて a_2^V の値が大きくなっている。これにはラディエーションおよび伝播経路における地震動減衰の周波数依存性が影響していると考えられる。

次に、4.1 から 4.3 までで求めた最大振幅の関係の相関係数を比較したグラフを図 15 に示す。地中 S 波と地表 S 波の最大振幅の相関係数は一部の観測点を除いて 0.9 を超える高い値を示している。このことは、地中 S 波から地下速度構造による地震動増幅を表すパラメータ

特集：防災技術

を用いて地表S波を精度良く予測できることを示している。したがって、地表に地震計が設置されていない地点についても、基盤から地表までの地下速度構造を精度良く求めて a_1 を与えられれば、地表地震動を高精度に推定できる。これは、地震発生直後における面的地震動分布の高精度推定の可能性を示す結果である。

一方、地中P波と地中S波の最大振幅の相関係数は0.7～0.9程度であり、地中S波と地表S波の最大振幅の相関係数に比べてやや低い。これは、地震によってラディエーションが異なり a_2 にバラツキがあるためと考えられる。地中P波と地表S波の最大振幅の相関係数は0.7～0.9程度であり、地中P波と地中S波の最大振幅の相関係数と同程度である。つまり、地中P波から地表S波を予測する場合には、観測点直下の地下速度構造による地震動増幅のバラツキの影響よりも各地震のラディエーションの違いによるバラツキの影響が大きく現れることを示している。しかし、相関係数の全観測点の平均は0.8を超えていることから、早期地震警報としては十分な精度を有しており、地中P波を利用した即時予測手法の有効性を示す結果であると言える。

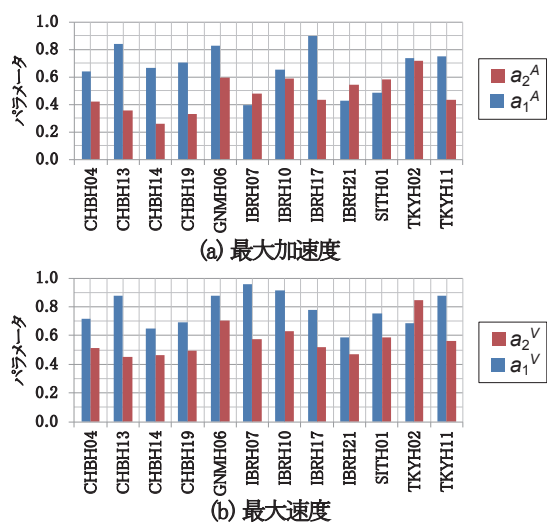


図14 最大振幅の関係におけるパラメータの比較

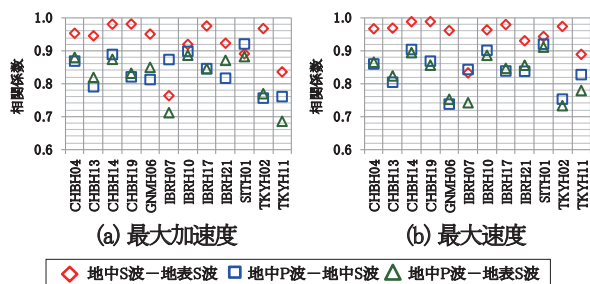


図15 最大振幅の関係の相関係数の比較

5. 結論

本研究では首都直下地震を対象とした地表地震動の即

時予測手法の提案を目指して、地中P波から直接的に地表地震動を即時予測する手法について検討した。本研究の成果を以下にまとめる。

- (1) 地中P波は地表P波に比べ最大1.2秒早く到着し、震源距離が短い地震において地中P波到着後数秒で最大加速度が現れやすい傾向を持つことから、地中P波の利用が有効であることが確かめられた。
- (2) 地中と地表の地震記録の最大振幅の関係を用いて、観測点直下の地下速度構造による地震動増幅およびラディエーションと地震発生域周辺のP波/S波速度比の影響を含むパラメータを求めた。これらのパラメータを用いて地中P波から地表地震動を予測する場合には、各地震のラディエーションの違いによるバラツキの影響を受けることがわかった。しかし、早期地震警報としては十分な精度を有しており、本手法が有効であることが確かめられた。

謝辞

本研究では、(独)防災科学技術研究所のKiK-netの地震記録を使用しました。記して感謝いたします。

文献

- 1) 中村豊：総合地震防災システムの研究，土木学会論文集，No.531/I-34，pp.1-33，1996
- 2) 芦谷公稔，佐藤新二，岩田直泰，是永将宏，中村洋光：鉄道の地震警報システムにおける緊急地震速報の活用，物理探査，Vol.60，No.5，pp.387-397，2007
- 3) 伊藤雄郷，他谷周一：地震発生後の運転規制判断の適正化，日本鉄道施設協会誌，Vol.44，No.10，pp.813-815，2006
- 4) 大川忠広，土屋尚登：在来線早期地震警報システムの導入，日本鉄道施設協会誌，Vol.47，No.1，pp.50-52，2009
- 5) 岩切一宏，干場充之，大竹和生，下山利浩：南関東周辺のKiK-net強震データの緊急地震速報への活用検討，験震時報，Vol.75，pp.37-59，2012
- 6) (独)防災科学技術研究所，強震観測網(K-NET, KiK-net)：http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/
- 7) 林広樹，笠原敬司，木村尚紀：関東平野の地下に分布する先新第三系基盤岩類，地質学雑誌，Vol.112，No.1，pp.2-13，2006
- 8) 翠川三郎：強震時にみられる地盤特性の非線形性，地震第2輯，Vol.46，pp.207-216，1993
- 9) 笠原慶一：地震の力学 近代地震学入門，鹿島出版会，1983