

## 海底地震計の制御基準値に用いる地盤増幅率の精緻化



木下 一孝\*<sup>1</sup>



加藤 健二\*<sup>2</sup>



中山 亮二\*<sup>3</sup>



宮腰 寛之\*<sup>4</sup>

### Elaboration of site factors used for the control value of the ocean bottom seismometer

Kazutaka KINOSHITA\*<sup>1</sup>, Kenji KATO\*<sup>2</sup>, Ryoji NAKAYAMA\*<sup>3</sup>, and Hiroyuki MIYAKOSHI\*<sup>4</sup>

\*<sup>1</sup> Sub-chief Researcher, Disaster Prevention Research Laboratory of Research and Development Center of JR EAST Group

\*<sup>2</sup> Chief Researcher, Disaster Prevention Research Laboratory of Research and Development Center of JR EAST Group

\*<sup>3</sup> Sub-chief Researcher, Disaster Prevention Research Laboratory of Research and Development Center of JR EAST Group

\*<sup>4</sup> Sub-chief Researcher, Disaster Prevention Research Laboratory of Research and Development Center of JR EAST Group

#### Abstract

Since November 2017, the earthquake early warning for Shinkansen uses ocean bottom seismometer(OBS), and an alarm is issued when the ocean bottom seismometer exceeds the control value. The control value is set by multiplying the reference value that changes with distance from Shinkansen line to seismometer due to attenuation and the site factor that takes into account the amplification of seismic motion due to soft deposits on the seabed. However, the site factor is poor accuracy, because that factors is set to the average value at all observation points since there was little observation data when OBS was introduced. Therefore, in this study, we proposed a method to set precise site factor according to the installation environment of OBS by utilizing the observation record obtained by the ocean bottom seismometer.

●**Keywords:** Site factor, Ocean bottom seismometer

\*<sup>1</sup>JR東日本研究開発センター 防災研究所 副主幹研究員 (現 仙台土木設備技術センター)  
\*<sup>2</sup>JR東日本研究開発センター 防災研究所 主幹研究員 (現 新潟土木設備技術センター)  
\*<sup>3</sup>JR東日本研究開発センター 防災研究所 副主幹研究員 (現 安全企画部門)  
\*<sup>4</sup>JR東日本研究開発センター 防災研究所 副主幹研究員

## 1. 緒言

JR東日本では、地震発生時に高速で走行する新幹線の安全を確保するため、沿線や海岸に配置した地震計で観測される地震情報から被害のおそれの有無を早期に判定し、被害のおそれのある場合にはすみやかに列車を停止させる新幹線早期地震検知システムを導入している。一方、社外に目を向けると、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震以降、国立研究開発法人防災科学技術研究所(以下、NIED)が、房総沖から釧路沖までの太平洋海域に日本海溝海底地震津波観測網(以下、S-net)の整備を行ってきた(図1)。S-netは地震計と津波計をケーブルで接続して海底に敷設しており、このS-netを活用できれば、陸上の地震計に比べ太平洋沖で発生する地震を早期に検知することが期待できる。そこで、JR東日本は2017年11月から新幹線早期地震検知システムにS-net情報を用いた地震警報機能を追加している。

S-net情報を用いた地震警報は、海底地震計で観測した加速度が制御基準値を超過すると出力される。この制御基準値は、沿線で80galとなる地震を想定した基準値と海底の軟弱地盤(以下、堆積層)で加速度が増幅される<sup>1),2)</sup>ことを考慮した地盤増幅率の乗算値として設定している<sup>3)</sup>(図2)。沿線で80galとなる地震の規模は線路と震源の距離によって変わるため(図3)、基準値の算出は、陸域の地震観測値に基づく距離減衰式(以下、陸上式)を用いた。なお、距離減衰式とは最大加速度を予測する回帰式で、使用した陸上式は式(1)で表される<sup>4)</sup>。

$$\log_{10}(\text{最大加速度}) = 0.54634Mj + 0.0058D - 0.00332X - 0.01746 - \log_{10}(X + 0.00492 \cdot 10^{0.5Mj}) \quad (1)$$

$Mj$ : 気象庁マグニチュード  $D$ : 震源深さ(km)  $X$ : 震源距離(km)

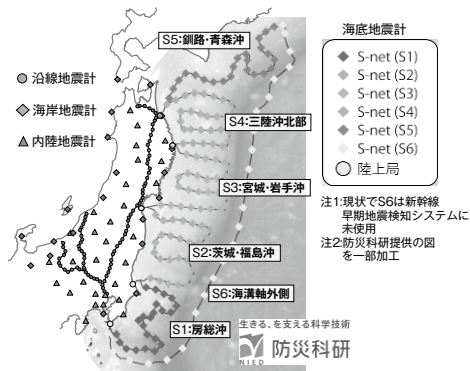


図1 JR地震計、S-net海底地震計観測網 (NIED提供の図を一部加工)

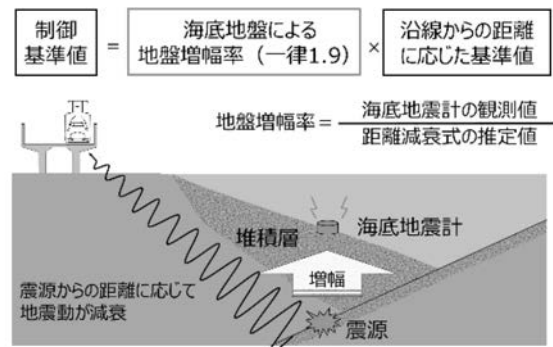


図2 海底地震計による制御基準の考え方

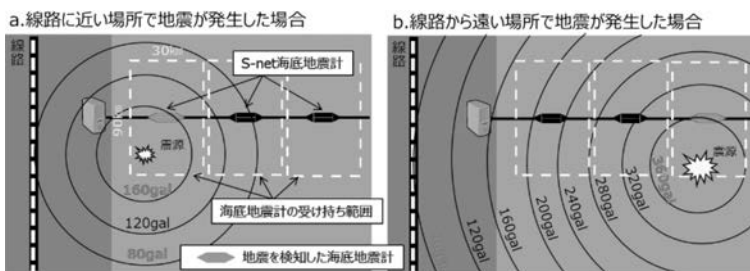


図3 沿線と震源の距離の違いによる地震動の伝搬状況イメージ (震源を中心とする同心円で加速度が減衰する様子を表現)

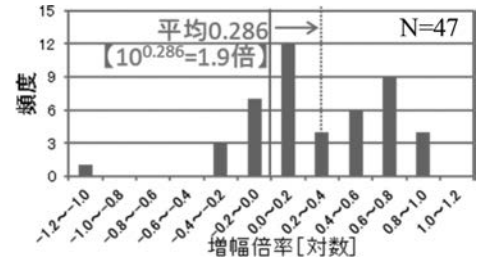


図4 現行地盤増幅率の算出

次に地盤増幅率について述べる。通常、地盤増幅率は観測地点の堆積層の軟らかさや堆積層厚などで変化する<sup>5)</sup>ため、観測点ごとに異なる値になると考えられるが、現行の地盤増幅率は、2016年6月～2017年4月に観測された36地震47データで得られる地盤増幅率の平均値1.9を一律に設定した(図4)。

なお、一律の地盤増幅率とした考え方は以下2点である。

- ①各海底地震計位置の地盤情報が不明であったため、地盤増幅率は「海底地震計の観測値÷距離減衰式(陸上式)の推定値」で定義した。
- ②図3に示すように、各海底地震計が早期効果を発揮すると想定した受け持ち範囲(90km×30km)を設定し、その範囲内の観測値から地盤増幅率を算出した。なお、導入当時は海底地震計の観測値が少なく、地盤増幅率が算出できない観測点があった。

以上のことから、S-net情報を用いた新幹線早期地震検知システムにおいて地震警報の更なる精度向上のため地盤増幅率の精緻化が望まれていた。そこでS-netの導入後、筆者らは新たに得られた海底地盤情報や海底地震計で蓄積された観測値を用いて地盤増幅率の精緻化に向けた研究を進めてきた。本稿では、研究内容の報告を行い、最後に新しい地盤増幅率を提案する。

## 2. 地盤増幅率の精緻化に向けた検討

1章で述べたとおり、海底地盤情報が不明であったため、複数の観点から地盤増幅率の精緻化の検討を行った。本章ではこれまで実施した検討内容とその結果、最後に考察を踏まえ地盤増幅率を提案する。

### 2・1 堆積層厚に着目した検討

本節では、堆積層厚に着目した地盤増幅率の算出方法について述べる。本検討を行うにあたり、既往の海底地盤情報について調査を行い、NIEDおよび国立研究開発法人海洋研究開発機構(以下、JAMSTEC)がS-net海域の堆積層厚の情報を保有していることがわかった。NIEDおよびJAMSTECでは、海底地盤の堆積構造を把握するため、太平洋沿岸部においてマルチチャネル反射法地震探査(以下、MCS)を実施していた。MCSで取得された反射断面において、最深反射面までを堆積層厚として読取りをした結果から各海底地震計位置の堆積層厚を推定することができた(図5)。



図5 MCSによる海底地震計近傍の堆積層厚推定分布

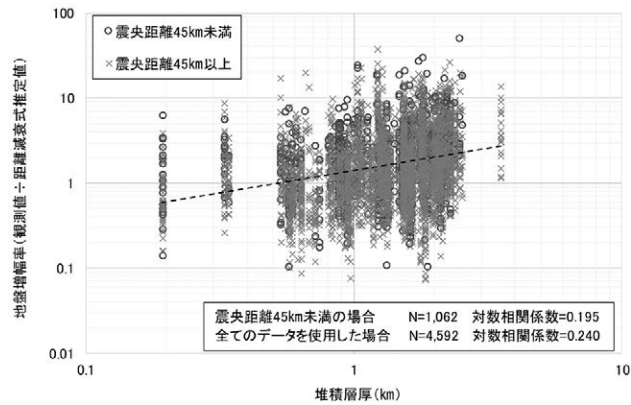


図6 地盤増幅率と堆積層厚の関係

次に地盤増幅率を算出する。本検討では2016年3月～2020年4月に発生したM4.5以上の360地震、4,592データを使用し、地盤増幅率は導入当初と同様に「海底地震計の観測値÷距離減衰式の推定値」で定義した。

以上の結果から地盤増幅率と堆積層厚との関係を求めた(図6)。図6には、受け持ち範囲内の地震に限定する場合と限定しない場合の2パターンを想定して、震央から45km未満の位置に海底地震計がある地震と45km以上の位置に海底地震計がある地震のデータに分けてプロットしている。傾向として堆積層厚が厚い程、地盤増幅率も大きくなる正の相関が確認できる。そこで地盤増幅率と堆積層厚の関係から対数相関係数を算出すると、震央距離45km未満のデータを使用した場合で0.195、受け持ち範囲内の地震に限定せず全てのデータを使用した場合で0.240となった。この結果から、受け持ち範囲の観測値に制限しなくとも影響はないと推察されるため、以降の検討では全てのデータを用いている。以上より、地盤増幅率と堆積層厚の回帰分析から式(2)を算出し、各観測点位置の堆積層厚から地盤増幅率を求める方法を得た。

$$\log_{10} amp = 0.46 * \log_{10} Thickness + 0.3 \quad (2)$$

amp : 地盤増幅率 Thickness : 堆積層厚(km)

## 2・2 距離減衰式の改良による検討

本節では、距離減衰式を改良することで地盤増幅率を精緻化する手法について述べる。これは地盤増幅率の定義である「海底地震計の加速度÷距離減衰式の推定加速度」から、距離減衰式の改良を行うことで地盤増幅率の精度を高めることを期待したものであり、図6で個々の地盤増幅率の値にばらつきが見られたので、海底地震計の観測値から算出する距離減衰式にすることでばらつきを小さくできるのではないかと考えた。

距離減衰式の改良には、海底地震計で2016年3月～2022年5月の間に観測されたM4.5以上の474地震、34,839データを用いた。使用データについてマグニチュードごとの地震数を図7に示すが、M4.5～M5.5が大半を占めており、M7.0を超える地震は3地震である。以上のデータセットから既往研究<sup>4),6)</sup>と同様の回帰分析を行い、式(3)に示す距離減衰式(以下、海底式)を算出した。

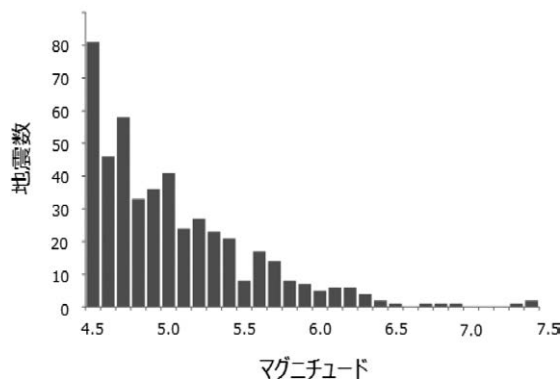


図7 検討に使用した地震のマグニチュードのヒストグラム



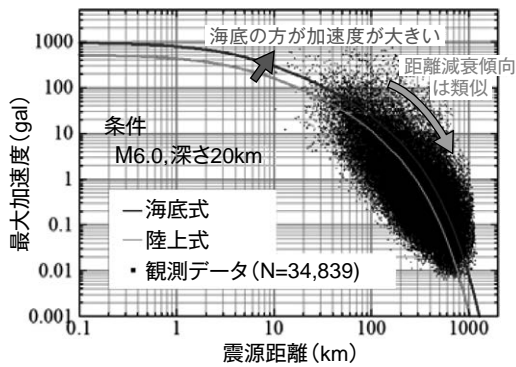


図8 距離減衰式による推定値と観測値との比較

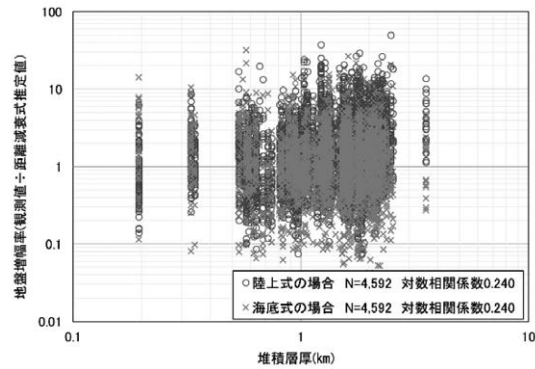


図9 堆積層厚と陸上式、海底式による地盤増幅率の関係の比較

$$\log_{10}(\text{最大加速度}) = 0.82792Mj + 0.01096D - 0.00278X - 1.51174 - \log_{10}(X + 0.00492 \cdot 10^{0.5Mj}) + c_j \quad (3)$$

$Mj$ : 気象庁マグニチュード  $D$ : 震源深さ(km)  $X$ : 震源距離(km)  $c_j$ : 地点補正值

海底式と陸上式の推定値の大きさを比較するため、海底地震計の全観測値とM6.0、震源深さ20kmとした場合の海底式、陸上式による推定値を求めた(図8)。図8から両者の距離減衰傾向が類似していることがわかった。また、同じマグニチュード、震源深さの場合、海底式による推定加速度の方が大きくなる傾向であり、陸上と比較して海底では地震動が平均的に増幅される特徴とも整合した結果が得られている。

次に海底式による地盤増幅率と堆積層厚との関係を求めた(図9)。使用した観測値は、図6と比較するため2・1節の検討と同様である。この結果、陸上式を用いた場合の地盤増幅率と堆積層厚の対数相関係数が0.240に対して海底式の場合、対数相関係数が0.240となり、海底式による地盤増幅率と堆積層厚の相関性に有意な差は見られなかった。

### 2・3 観測値を用いた地盤増幅率の検討

本節では、陸上式や海底式を用いて、海底地震計ごとに地盤増幅率を評価する方法について述べる。陸上式による地盤増幅率は、1章と同様に、「海底地震計の観測値÷距離減衰式(陸上式)の推定値」で定義する。ここでは、全データから求めた地盤増幅率を全海底地震計一律に設定するのではなく、海底地震計ごとに地盤増幅率の平均値を設定することとした。2・2節で説明した海底式の構築に用いたデータセットから、陸上式により海底地震計ごとの地盤増幅率の対数平均値を算出した結果を図10に示す。

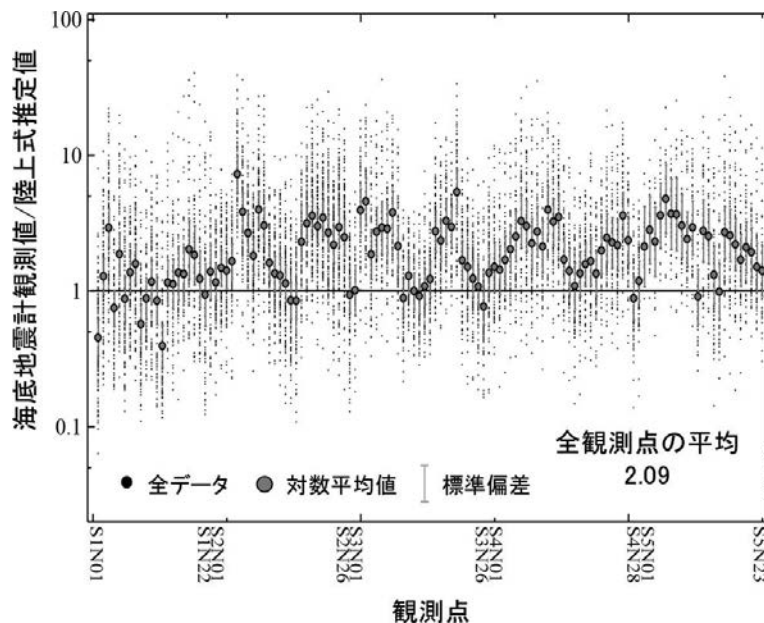


図10 陸上式により求めた観測点ごとの地盤増幅率

一方、海底式による地盤増幅率を検討するために、式(3)を下式のように表す。

$$\text{海底式による最大加速度} = 10^{\{0.82792Mj+0.01096D-0.00278X+1.51174-\log_{10}(X+0.00492 \cdot 10^{0.5M})\}} \times 10^{Cj} \quad (4)$$

式(4)は、平均的な海底地盤における最大加速度に $10^{Cj}$ を乗じて補正する形となっており、 $10^{Cj}$ が海底式による地盤増幅率に対応する。ここで地点補正值 $cj$ は、海底式の構築時に各観測点で固有の値として算出されている。海底式は、図8に示したように、陸上と比較して海底で地震動が平均的に増幅される効果を含んでいるのに対し、沿線からの距離に応じた基準値の設定には、1章で述べたように陸上式が用いられていることから、地盤増幅率として $10^{Cj}$ を直接用いることはできない。そこで、次式によりスケール変換する。

$$Y_i = \frac{c_j - c_{jmin}}{c_{jmax} - c_{jmin}} (M - m) + m \quad (5)$$

$Y_i$ : 観測点  $i$  のスケール変換後の地盤増幅率、 $c_j$ : 観測点  $i$  の  $10^{Cj}$  の値、 $c_{jmax}$ : 相対的に大きいと判断される値を除外した  $10^{Cj}$  のうち最大値、 $c_{jmin}$ : 相対的に小さいと判断される値を除外した  $10^{Cj}$  のうち最小値、 $M$ : 変換するスケールの最大値、 $m$ : 変換するスケールの最小値

式(5)はMin-Max normalization法と言われ、最小値0、最大値1にスケールリングすることでデジタルデータとして扱うための正規化で用いられる。式(5)の適用にあたり、変換するスケールの最小値 $m$ と最大値 $M$ は、図10に示した陸上式による地盤増幅率の値を用いることが可能である。例えば、図11の海底地震計の地盤増幅率のヒストグラムをもとに、地盤増幅率が1未満となる箇所および相対的に大きな値となる箇所を除外したうえで最小値1.0、最大値4.7と設定し、各海底地震計での $10^{Cj}$ の値を式(5)によりスケール変換した結果が図12である。図12より、スケール変換前に比べて、スケール変換後では地盤増幅率が高くなっている。これは、海底式が、図8に示したように、陸上と比較して海底で地震動が平均的に増幅される効果を含んでいたためである。

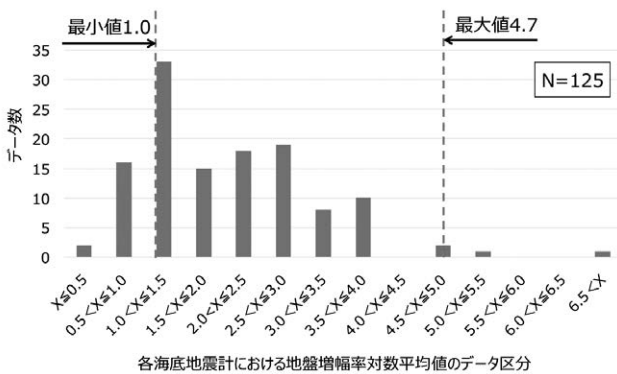


図11 陸上式による地盤増幅率のヒストグラム

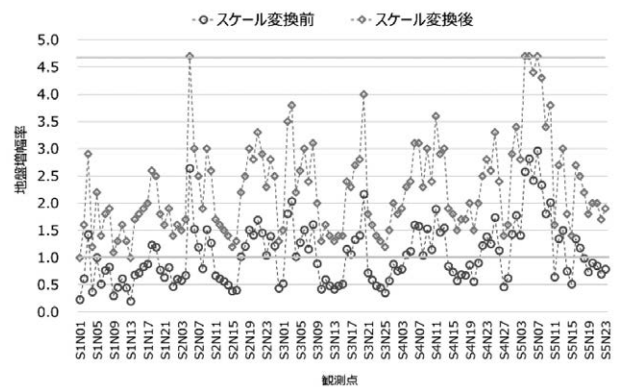


図12  $10^{Cj}$ の変換前と変換後の関係

## 2・4 地盤増幅率の提案

本節では、2・3節までの内容から、現時点で最も適切な地盤増幅率を提案する。2・2節では、地盤増幅率の精度向上のために海底式を構築して、海底式による地盤増幅率と堆積層厚との関係を評価したが、両者の相関性は弱く、陸上式に対する優位性も見られなかった。そのため、式(2)のように堆積層厚のみから地盤増幅率を推定する方法は、現時点では適用困難であり、地盤物性などの堆積層に関する更なる調査・研究が必要である。

2・3節では、現行の地盤増幅率の考え方を踏襲しつつ、データの蓄積を考慮して、陸上式による地盤増幅率を海底地震計ごとに評価する方法を示した。また、海底式による地盤増幅率として地点補正值 $cj$ に基づく $10^{Cj}$ を用いる方法を示したが、陸上式による地盤増幅率を参照したスケール変換が必要であり、地盤増幅率の評価手順が煩雑である。図8に示したように陸上式と海底式の距離減衰傾向は類似しており、図9に示したように海底式による地盤増幅率の評価精度が陸上式と同等程度であることから、現時点では陸上式を用いて海底地震計ごとに地盤増幅率を評価する方法が最も適切と考える。なお、今後もデータの蓄積に応じて、地盤増幅率を評価するための距離減衰式について適宜見直しを行っていく必要がある。

### 3. まとめ

今回、S-netで蓄積された観測値を用いて、地盤増幅率の精緻化を目的として、新しい地盤増幅率の設定方法を検討した。今後、陸上式を用いて海底地震計ごとに評価した地盤増幅率を用いて制御基準値を算出し、早期性や安定性などによる評価から制御基準値を見直す予定である。

#### 謝辞

本研究は、JAMSTEC、NIEDおよび(公財)鉄道総合技術研究所との共同研究によるものです。JAMSTECおよびNIEDより海底地盤情報ならびに海底地震計の挙動に関する情報を提供いただきました。また、新たな距離減衰式を算出するにあたり、回帰統計分析を鉄道総合技術研究所に実施いただきました。ここに記して感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 宮腰寛之、津野靖士、岩田直泰、山本俊六、酒井慎一、篠原雅尚：早期地震警報システムに海底地震計を利用するための基礎検討、日本地球惑星科学連合2013年大会予稿集、SSS23-P03, 2013
- 2) 林元直樹、干場充之：緊急地震速報における東南海海底地震計活用のための走時補正・マグニチュード補正の検討、験震時報、Vol. 76, pp.69-81, 2013
- 3) 鈴木博人、宮腰寛之、山本俊六、是永将宏、鈴木亘、青井真：新幹線における海底地震計を利用した早期地震検知とその効果、自然災害科学 JJSNDS40 特別号 pp.191-206, 2021
- 4) 是永将宏、岩田直泰、山本俊六、野田俊太、下野五月、小野友也：早期地震情報の利用を念頭に置いた距離減衰式の提案、土木学会第66回年次学術講演会、pp.961-962, 2011
- 5) 日本建築学会：地盤振動と強震動予測 - 基本を学ぶための重要項目 -、丸善出版、2016
- 6) 片岡正次郎、佐藤智美、松本俊輔、日下部毅明：短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式、土木学会論文集A, Vol. 62, No. 4, pp740-757, 2006