

巨大地震に対する長周期地震動の評価と長周期構造物の災害予測 —観測記録に基づくやや長周期地震動のMによるスケーリング則—

○元木健太郎¹⁾, 江藤公信²⁾, 佐伯圭彦³⁾, 瀬尾和大⁴⁾

- 1) 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 人間環境システム専攻, kmoto@enveng.titech.ac.jp
- 2) 東京ソイルリサーチ 技術本部 解析技術室, eto@tokyosoil.co.jp
- 3) 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 人間環境システム専攻, saeki.y.ab@m.titech.ac.jp
- 4) 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 人間環境システム専攻, seo@enveng.titech.ac.jp

1. はじめに

2003年十勝沖地震では苫小牧においてスロッシングによる石油タンク火災の被害が発生した。勇払平野の厚い堆積層によって増幅されたやや長周期地震動が被害の要因の一つであると考えられている。数多くの長周期構造物が建設されている関東平野において、やや長周期地震動による被害を軽減するためにやや長周期地震動の適切な評価が望まれる。

関東平野では数多くの長周期地震動が観測された。江藤他(2006)は、その余震と本震の地震動の平野内の基盤に対するスペクトル比は安定していることと報告している。このことは、平野に入射してくるスペクトルを予測することができれば、平野内のスペクトルが推定できることを意味している。

やや長周期帯域の強震動予測は震源モデルを構築したものを理論的に数値計算によって求められることが一般的である。観測記録を用いた経験的な手法はKudo(1990)¹⁾、座間(1993)²⁾があげられるが、研究事例は多くない。その理由として、やや長周期が卓越した地震動記録が少なく、統計的に取り扱うことが難しいことが考えられる。著者らは近年発生しているM7クラスの地震動記録に基づいて、w-2モデルを用いた予測や放射特性を考慮した予測を行ってきた。そこで本研究では経験的に求めたMとやや長周期地震動のスケーリング則を用いて、観測スペクトルの予測を試みる。

2. データ

本研究は平野に入射してくる地震波のスペクトルの評価を目的にしているため、やや長周期帯域で地盤増幅されない基盤上の観測点記録を用いて解析を行う。基盤上の観測点として、F-netの基盤上と思われる観測点とKiK-netの基盤S波速度が2000m/s以上でS波の増幅による卓越周期が1秒未満である観測点を抽出した。図1に使用した観測点と地震を

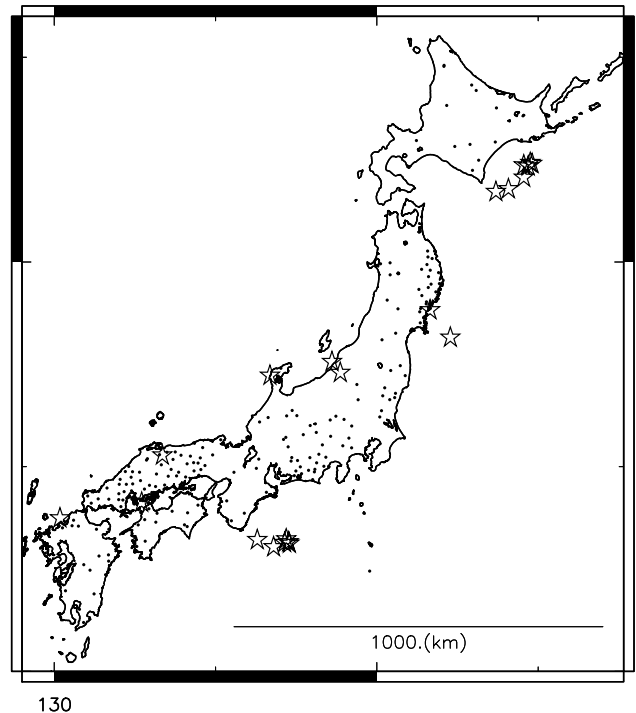


図1 解析対象地震震央分布(☆)と観測点分布図(●)

表1 解析対象地震緒元

date	Mw	Depth(km)	date	Mw	Depth(km)
2000/10/06	6.6	11.0	2004/09/07	6.5	14.0
2001/03/24	6.8	51.0	2004/09/07	5.0	11.0
2003/05/26	7.0	72.0	2004/09/08	5.5	5.0
2003/09/26	7.9	45.1	2004/09/08	6.1	11.0
2003/09/26	7.3	21.4	2004/10/23	6.6	5.0
2003/09/26	6.4	42.5	2004/11/11	6.1	38.6
2003/10/02	5.2	38.3	2004/11/15	5.4	30.0
2003/12/03	5.8	35.3	2005/03/20	6.6	13.1
2003/12/22	5.6	34.4	2005/08/16	7.1	42.0
2003/12/29	6.2	38.9	2007/02/17	6.0	40.1
2004/03/27	5.9	37.0	2007/03/25	6.7	10.7
2004/09/05	7.2	37.6	2007/07/16	6.6	16.8
2004/09/05	7.5	43.5			

示す。2003年十勝沖地震と2004年紀伊半島沖の地震は余震と前震もあわせて用いている。強震動の予測をするため、ここでは震央800km以内の記録を使

うこととする。KiK-net 観測点において、地上と地下の記録を比較して、本研究の対象としている周期帯域 2～10 秒においてほとんど振幅に違いが見られず、増幅されていないことを確認している。解析には直達 S 波直前から約 160 秒の記録を使い、前後 5 秒間にコサインテーパーをかけている。NS、EW 方向成分のスペクトルを水平合成し、スムージングには対数型 Parzen ウィンドウを用いた。そのスペクトルを 2 秒から 10 秒までの帯域を対数軸上で 10 分割し平均化したもので評価を行う。10 分割した周期はその中間値で表記する。なお、データ長が足りない観測記録は解析に用いていない。

3. 解析方法

ここでは基盤上の記録を使い、地盤増幅が十分に小さいとみなして、地震動を震源特性と伝播特性で表記できるものとして定式化を行う。

$$O(\omega) = R(\theta)S(\omega) * r^{-\beta} * \exp(-\alpha r)$$

第一項は震源特性を表し、R はラディエーションパターンを示し、各方向成分で異なる値をもつこととする。第二項は幾何減衰項を表している。ここでは、表面波の幾何減衰に近いものとして、 $\beta = 0.5$ とした。第三項は非弾性による減衰を表している。この減衰項の定数 α が決まれば、震源特性が与えられる。ここでラディエーションパターンが類似している角度として扱う範囲を 20 度として、震央から 20 度以内に入る測線内での減衰を複数のラインで作成する。その観測データと (1) 式による計算値が一致するように α を GA によって求める。 α は図 2 に示す値と評価した。 α は周期が短くなるほど大きな値を示し、減衰が大きくなっていることがわかる。

α が得られたため (1) 式の震源項が得られる。震源は放射特性を考慮するために、方向ごとに値を変え、ここでは 20 度毎の値を求める。この平均値を震源スペクトルとし、M の異なる本震と余震について震源スペクトルの振幅と Mw の関係からやや長周期地震動のスケーリング則を求める。ここでの検討には十勝沖地震と 2004 年紀伊半島沖の地震のデータを用いた。図 3 に振幅と Mw の関係を示す。両地震とも非常に類似していることがわかる。応力効果量が一定で、w=2 モデルに従うなら、コーナー周波数を越えたところで急速に折れ曲がるが、T=9.22 秒 2.17 秒両方ともそのような傾向は見られず、そのほかの周期においても、緩やかに傾斜が変化するだけであり、直線による回帰曲線でも Mw と長周期地震動の振幅の関係は十分に表現できるといえる。そ

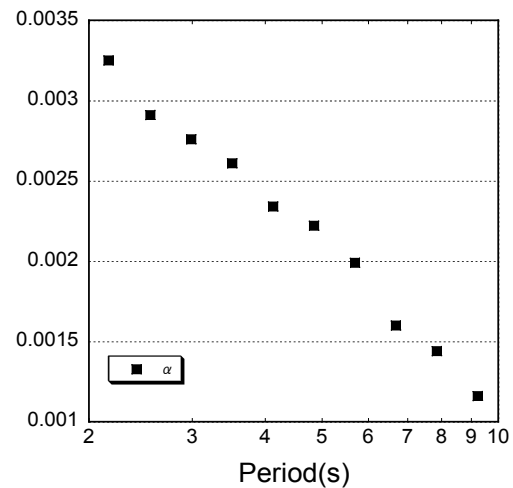


図 2 非弾性減衰を表現する係数の値 α

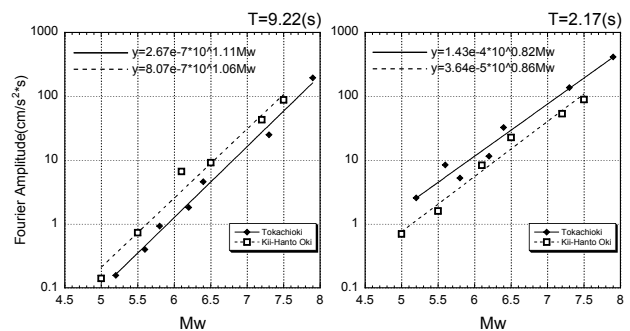


図 3 Mw と振幅の関係

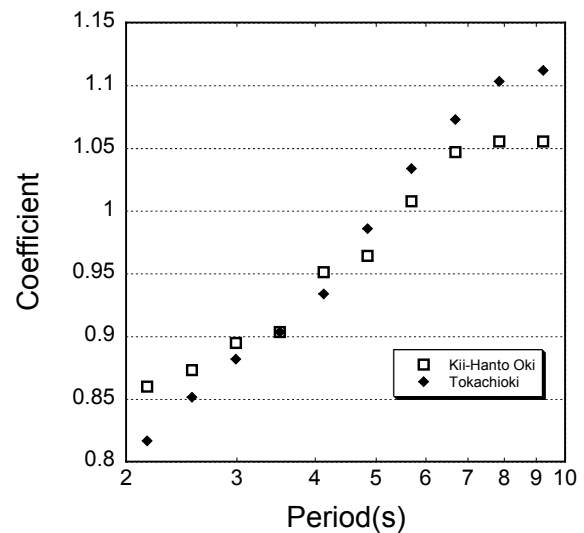


図 4 Mw にかかる係数と周期の関係

の傾斜を表す Mw にかかる乗数と周期の関係を図 4 に示す。周期が長くなるにしたがってその値が大きくなる。既往の PGV の距離減衰式 5) では Mw にかかる係数は 0.58 と小さく、やや長周期領域では、Mw

の変化によって大きく振幅が変わることを示している。

4. 中小地震から大地震への予測

M_w とやや長周期地震動の関係を用いて、中小地震の地震動記録から大地震への地震動振幅の予測する。前セクションまでは基盤上の観測点での解析を行ってきたが、ここでは関東平野内の観測点で予測を試みる。図5に図4に示すスケーリング則から求めた予測スペクトルと観測スペクトルの比較を行っている。ASKは関東平野の西側に位置する基盤上の地点で前セクションまでの解析にもデータとして利用している。NGT、OKYは関東平野内の観測点であり、NGTの方が盆地端部に近い位置にある。なお予測スペクトルの実線はM_w7.2、M_w6.5、M_w6.1の予測値を幾何平均を示し、破線はM_w7.2の一つの地震から本震M_w7.5を推定した値を表している。M_w7.5の地震から推定したスペクトルは3地点の全ての観測点において、観測スペクトルと形状が類似している。これは基となっている要素地震と本震のMが近いため、補正量が少なく特徴を捉えているといえる。一方、3つの地震から推定したスペクトルは形状がなだらかになっており、平均化することによってその周波数特性が薄れてきているものの、その振幅は観測値と調和的で、ピーク値はほぼ同じであるといえる。

図6にピーク値における観測値と予測値の比較を行っている。ここでの予測値は、ほとんどの観測点でM_w6.5、M_w6.1の記録が得られていないため、十分な観測時間が確保されていないため、M_w7.5の地震から推定したものである。全体的に予測値の方が振幅が小さい。しかし、ほとんどの観測点で倍半分以内の範囲に含まれており、ばらつきは小さいといえる。全体的に過小評価となっているのは、震源メカニズムによる影響が大きく関与していると考えている。震源の放射特性は震源破壊開始点とアスペリティの位置関係によって大きく変化し（例えば、Kagawa(2008)）、震源規模が近い地震に置いてもその特性が異なる場合があるため、偏差が生じていると考えられる。

またそのピーク振幅の予測値の観測値に対する比の分布を図7に示す。観測時間が十分にとられている観測点は限られて分布にも偏りがあるため、十分な予測ができるほどではないが、過小評価となっているところは関東平野西部と東京東部付近に集中して分布している。これらの振幅の違いが説明できればさらに高精度の予測の可能性がある。

本研究ではフーリエ振幅スペクトルのスケーリングから予測を行っている。ここには位相が与えられ

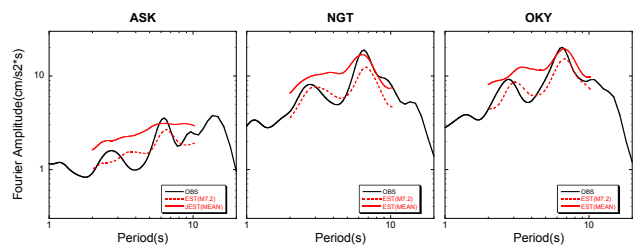


図5 予測フーリエスペクトル（赤線）と観測フーリエスペクトルの比較

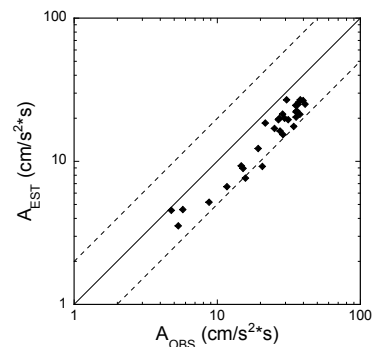


図6 観測フーリエ振幅と予測フーリエスペクトルのピーク振幅の比較の

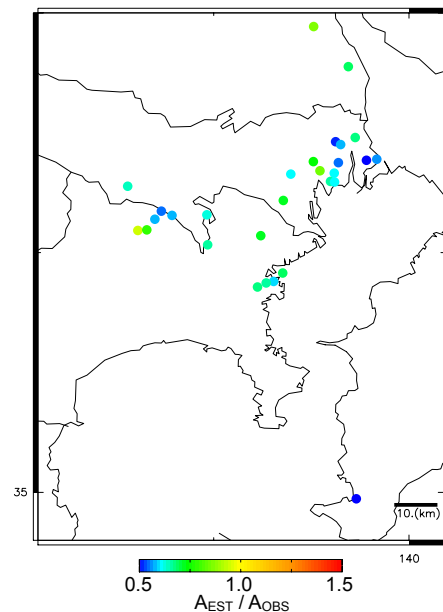


図7 ピーク振幅の予測値の観測値に対する比の分布

ないため、地震動波形を予測することは適用範囲外である。著者らは余震等の同震源域で発生した地震は波形が類似していることに着目し^{文献7)}、前震や余震の位相スペクトルをそのまま利用することで、時間領域の波形に変換することを試みた。図8に、図5に示すOKYの3つの地震から推定した予測スペクトル（赤の実線）をターゲットスペクトルとして、位相スペクトルだけをM_w7.2、M_w6.5、M_w6.1の地震

動記録から抽出して合成した速度波形を示す。この波形は、本研究の対象周期帯域と同じ2秒から10秒のバンドパスフィルターをかけ速度に積分したEW方向成分を表す。観測波形と予測波形は、図5に示す振幅スペクトルが類似しているため、振幅も近く類似しているように見える。観測記録では約300秒付近で振幅が小さくなっているが、予測波形にはそのような傾向は見られない。波形の類似性に関して、これらの波形がどの程度有効で再現性あるのか、今後も引き続き検討を加える予定である。

横浜の気象台の紀伊半島地震の記録を用いて、1944年の東南海地震(M7.9)の評価を行った。ここで用いた地震はMw7.5とMw7.2の2つのイベントで、位相スペクトルはMw7.5のものを用いた。その評価波形の擬似速度応答スペクトルを図9に示し、既往の研究との比較も行っている。差分法計算による推定値(Miyake et. al. (2008))と復元した記録(古村・中村(2006))と比較すると、NS、EW方向成分とも7秒付近と卓越周期が短く、その周期帯域での応答値は高くなっている。2004年紀伊半島の地震と東南海地震の震源断層域は近接した地域であり、グリーン関数の違いによる差であるとは考えにくく、震源特性の違いによると考えるのが自然である。10秒以上の周期帯域では、Mwにかかる係数が図4で求めた値よりも大きく、10秒以上の周期が卓越する考えられる。対象周期帯域を拡大して確認した上で、来るべき東海地震や東南海地震の予測につなげていくことを考えている。

5. まとめ

海溝型地震の2003年十勝沖地震、2004年紀伊半島沖の地震について、Mwによるやや長周期地震動の振幅の経験的なスケールリング則を求めた。そのスケールリング則を用いた予測は観測値と比較して、多少のばらつきや偏差があるものの、倍半分程度の精度で評価できることを示した。

今後はさらに地震を周期帯域を広げ、さらに解析地震を増やして内陸で発生する地震の特徴についても予測を試みる予定である。

謝辞

強震記録を使用させて頂いた防災科学技術研究所(F-NET, K-NET, KiK-net)、気象庁、SK-NETのご関係各位に深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 江藤、元木、瀬尾：地震観測記録のスペクトル比を用いた関東平野のやや長周期地震動特性、日本建築学会学術講演梗概集、B-2、2006

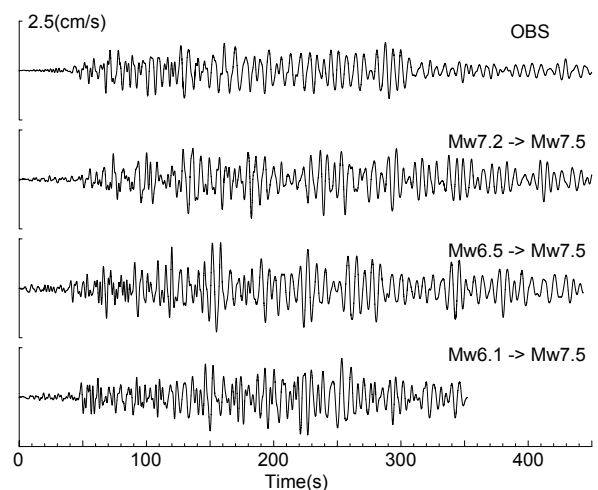


図8 観測点 OKY の M7.5 の観測速度波形と前震、余震の位相スペクトルを用いた予測波形の比較

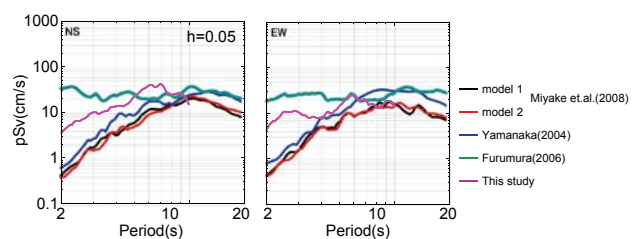


図9 1944年東南海地震の予測応答スペクトルと既往の研究との比較 (Miyake et. al. (2008) に加筆)

- 2) Kudo, K.: Significance of Long-Period Strong Motion in Seismic Risk Evaluation, Proc. of the 4th International Symposium on the Analysis of Seismicity and Seismic Risk, Bechynne Castle, pp.433-439, 1989
- 3) 座間：気象庁1倍強震度計記録にみられるやや長周期地震動特性—その2—、消防研究所報告、第76号、pp1-11、1990
- 4) 釜江、入倉、福知：特定サイトにおける強震動予測、日本建築学会構造系論文報告集、第409号、pp.11-25、1990
- 5) 司、翠川：断層タイプおよび地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、523、63-70、1999
- 6) Kagawa, T.: A study on empirical ground motion estimation in fault rupture propagation effects, Proceedings of the 14th WCEE, 2008
- 7) 佐伯圭彦、元木健太郎、瀬尾和夫、2003年十勝沖地震における苫小牧での本震と最大余震の地震動波形の類似性、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、919-920、2008、9月
- 8) Miyake, H. et. al.: Source modeling of subduction-zone earthquakes and long-period ground motion validation in the tokyo metropolitan area, Proceedings of the 14th WCEE
- 9) 山中佳子：1944年東南海地震と1945年三河地震の震源過程、月刊地球、号外49、739-745
- 10) 古村孝志、中村操：1944年東南海地震記録の復元と関東の長周期地震動、物理探査大59巻、第4号、337-352、2006