

巨大地震に対する臨海部の大型石油タンクのスロッシング災害予防対策 —観測記録に基づく M8 級地震時のやや長周期地震動スペクトルの推定—

○元木健太郎¹⁾, 瀬尾和大²⁾, 江藤公信³⁾

- 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
- 3) 東京ソイルリサーチ 技術本部 解析技術室, eto@tokyosoil.co.jp

1. はじめに

2003年十勝沖地震により、震央距離約270km離れた苫小牧で石油タンクのスロッシングが引き起こされ、大規模火災が発生した。石油タンクを数多く抱える関東平野においても巨大地震時には同様な被害が発生することが予想され、さらに東海、東南海地震のM8級の巨大地震の発生が懸念されており、やや長周期地震動が卓越することが予測されている。以前よりやや長周期地震動に関して研究が数多く行われており、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、その数は少なく、やや長周期が卓越した地震動記録が少ないためと考えられる。兵庫県南部地震以降地震観測網が発達し、記録数が飛躍的に増加し利用することができるようになった。そこで本研究では観測された地震動記録に基づいて観測スペクトルを予測する。経験的な予測手法として、経験的グリーン関数を用いた手法が確立されているが、本研究は同様に余震の記録を使い ω^{-2} モデルに基づいて、M8クラスの地震動スペクトルをどこまで表現できるのかを試みるものである

2. データ

図1は近年関東近辺で発生したM7クラスの地震とその余震前震の大岡山で観測された記録の加速度フーリエスペクトルと周期6-8秒帯域のスペクトル平均値とMの関係を表す。紀伊半島沖の地震、中越地震のどちらのスペクトルにも周期約7秒付近にピークが見られ、中越地震においては、Mが小さくなくても様にピークが見られることがわかる。Mによる振幅の変化は周期帯域によって異なり、長周期ほどその変化率は大きくなっている。図1の右図は周期6-8秒の周期帯域のスペクトル平均振幅とM

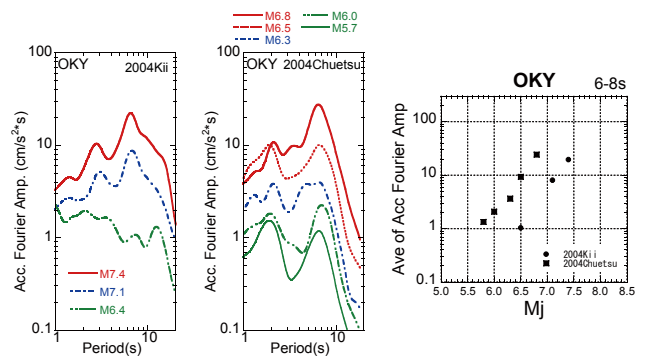


図1 近年関東近辺で発生したM7クラスの地震とその余震前震の大岡山で観測された記録の加速度フーリエスペクトルと周期6-8秒帯域のスペクトル平均値

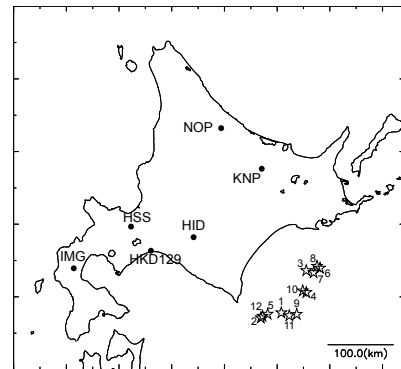


図2 解析対象地震震央分布と観測点分布図

表1 解析対象地震緒元

Event	date	time	Mw	Depth(km)
EQ1	2003/09/26	04:50	7.9	45.1
EQ2	2003/09/26	06:08	7.3	21.4
EQ3	2003/09/26	11:37	6.4	42.5
EQ4	2003/10/02	01:23	5.2	38.3
EQ5	2003/12/03	23:11	5.8	35.3
EQ6	2003/12/22	17:47	5.6	34.4
EQ7	2003/12/29	10:31	6.2	38.9
EQ8	2004/03/27	00:20	5.9	37.0
EQ9	2004/11/11	19:03	6.1	38.6
EQ10	2004/11/15	03:44	5.4	30.0
EQ11	2007/02/17	09:03	6.0	40.1

の関係プロットしたものである。その関係は両地震においてMが1大きくなると振幅が10倍になっているように見える。この関係がM8まで続くとすると、被害が大きくなることが予想される。関東平野ではM8クラスの地震は、記録が得られていないため、その関係性を確認することができない。

そこで、本研究ではM8の地震動記録が得られている十勝沖地震を対象として、地震動スペクトルを推定することを試み、観測記録と比較を行う。図2は解析に用いる観測点と地震を示す。地震はMw5以上の10個の余震を選択した(表1)。K-NETとF-NETで観測された6点の記録を用いる。予測する地震動スペクトルはK-NET 苫小牧(HKD129)の本震とする。F-NETの記録は任意の時間の記録が得られるため、やや長周期地震動をMの小さい地震でも記録時間が十分にあり、余震を十分に生かすには適している。HKD129で得られている記録は少なく、直接推定することは困難であるため、記録の多いF-NETの観測点HIDとHSSから本震のスペクトルを推定する。図3はHKD129とF-NET観測点HIDとHSSを分母にした際のスペクトル比である。HSSでM7.1の余震でずれが見られるが、それは震源域が異なることによると考えられ、そのほかの地震については、スペクトル比は安定しているといえる。したがって、HSSやHIDの観測点で本震スペクトルが推定できれば、スペクトル比をかけることによってHKD129のスペクトルを推定することができる。本研究の対象周期帯域は1~10秒とした。解析には直達S波直前から約200秒の記録を使い、10秒間のコサインテーパーをかけている。スムージングには対数型Parzenウィンドウを用いた。

3. 解析方法

スペクトル推定に用いる際の物理モデルは ω^{-2} モデルであると仮定し、三宅他(1999)³⁾で提案されているsource spectral ratio fitting methodを用いて本震スペクトルを推定する。そのイメージを図4に示す。Cは実行応力降下量、Nはスケールファクターである。相似則に従うとNは地震モーメントの1/3乗に比例する。同じ観測点で得られたMの異なる地震動スペクトルの比は図4右図のようになる。周期によって振幅比は異なり、長周期側では地震モーメントの比に近づき、短周期成分はコーナー周波数に依存している。計算式で表記すると、下式のようになる。

$$\frac{O_i}{O_j} = \frac{S_i P_i G_i}{S_j P_j G_j} = \frac{M_{0i}}{M_{0j}} \frac{1 + (f/f_{ci})^2}{1 + (f/f_{cj})^2} \times \left(\frac{r_i}{r_j}\right)^{0.5} \exp\{0.001(r_i - r_j)\}$$

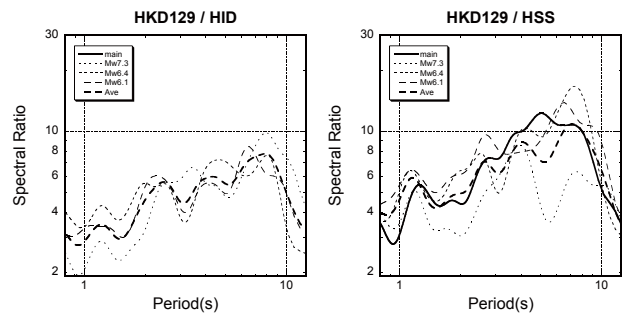


図3 HKD129のF-NET観測点HSSとHIDに対するスペクトル比

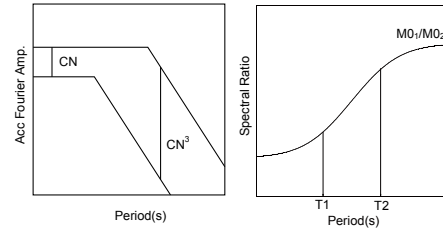


図4 ω^{-2} モデルに基づいた震源スペクトルと大小地震のスペクトル比

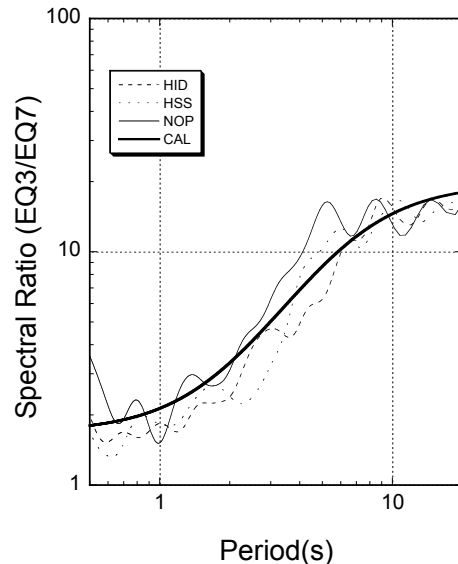


図5 イベント7に対するイベント3の観測スペクトル比と計算スペクトル比の比較

M0は地震モーメント、fcはコーナー周波数、rは震源距離とし、地震によってサイト特性Gは変化しないとした。余震のメカニズムは本震のメカニズムに類似しているためラディエーションパターンを同じであると仮定する。また、距離減衰については、座間の式の減衰項と同じものを採用した。

この式の地震モーメントはF-NETで評価されたものを代入し、各地震のコーナー周波数は未知数として、GAによる逆解析により求めた。探索範囲は0.2~80秒とし、対数的に探索するように設定した。逆解析の際には図2で示されたF-NET観測点5点の観測記録を用い、Mの異なる地震の観測スペクトル

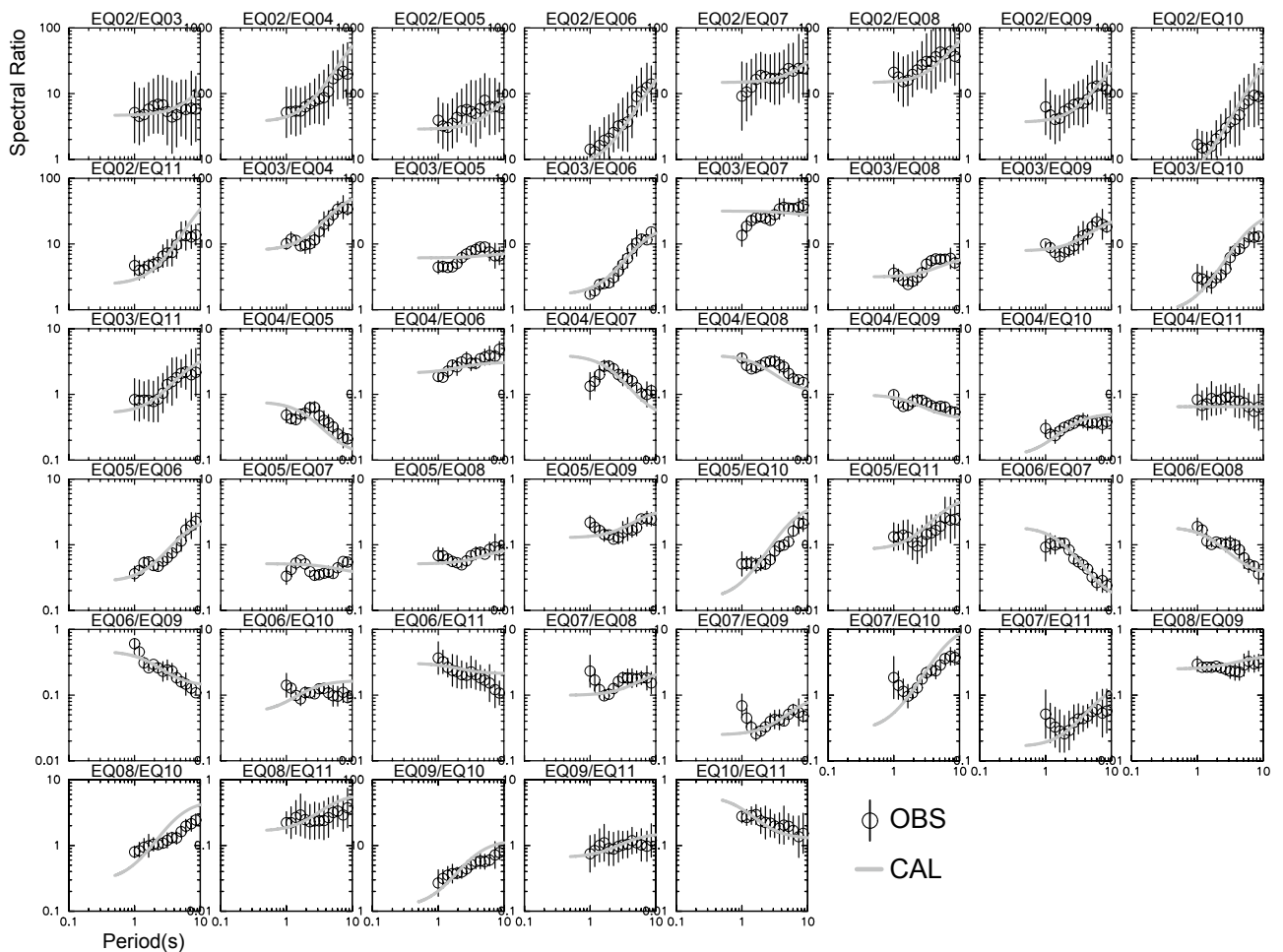


図6 各地震の観測値と計算値スペクトル比の比較 観測値のバーは±標準偏差を表す。

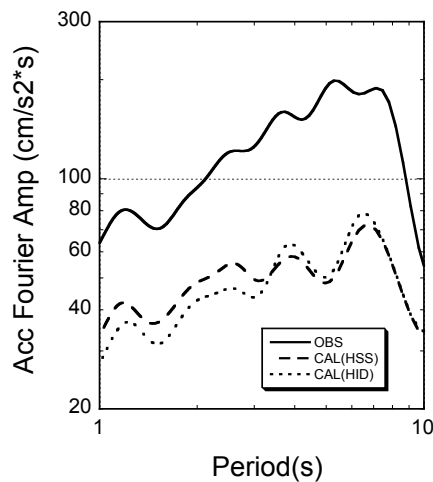


図7 HKD129における推定スペクトルと観測スペクトルの比較

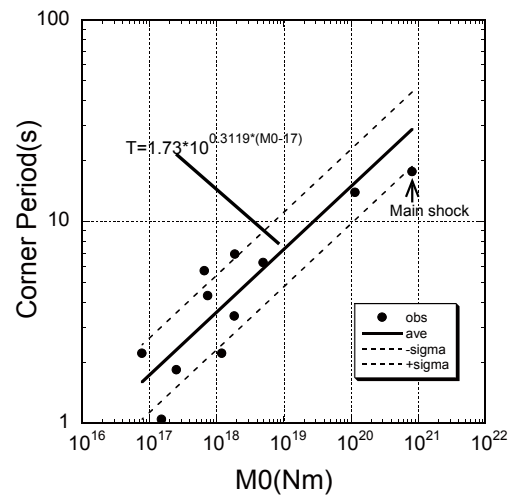


図8 各地震のコーナー周期と地震モーメントの関係

ル比の平均と標準偏差を算出した。目的関数は下式を最小とするものとした。

$$Misfit = \frac{|O_i/O_j - C_i/C_j|}{\sigma}$$

Oは観測スペクトル、Cは理論スペクトルとする。個体数を1000、世帯数を2000として、10回試行し

て最も上式のみスフィットが小さいモデルを採用した。M8クラスの地震動スペクトルの推定は、上記の計算から求められるスペクトル比をかけることにより求める。すなわち、推定する地震の地震モーメントとコーナー周期は本研究で得られた回帰式から求めた推定値を用い、各余震地震スペクトルから本震地震動のスペクトルを算出し、その平均スペクト

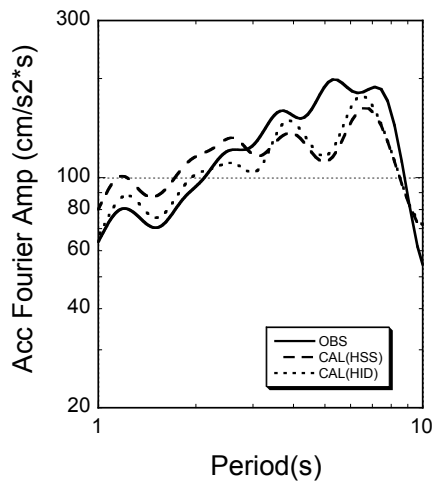


図9 コーナー周期を観測値を用いたときのHKD129における推定スペクトルと観測スペクトルの比較

ルを推定スペクトルとする。

4. 結果と議論

震源の近いEQ3とEQ7のスペクトル比を表した1例を図5に示す。各観測点のスペクトル比と計算された理論曲線もあらかず。理論値は観測値に近傍しており、本手法で説明できているといえる。図6は各地震のスペクトル比とGAによって求められた各コーナー周波数に基づいた計算値の比較である。観測値のばらつきが大きいスペクトルや、計算値が観測値と離れているスペクトル比も見られるが、それはメカニズムを補正していないためと考えられる。しかし、ほとんどのスペクトル比で、計算値は観測値に近傍していることが認められる。したがって、単純な ω^{-2} モデルだけでもある程度説明することができていることがいえる。

ここで求められたコーナー周波数からF-NETで評価された地震モーメントとの回帰式を求め、本震時のコーナー周波数を推定する。そのコーナー周波数を用いて、推定した本震時のスペクトルを図7に示す。この図にはHSSから推定したスペクトルとHIDからのものを示しており、両者はよく類似しているが、いずれも過小評価となっており、観測値から1/5倍の値となっている。これは本震時のコーナー周波数を適切に評価できていないことに因ると考えられる。図8に推定したコーナー周期と地震モーメントの関係を示し、本震を用いずに回帰曲線もあわせて示す。図7に用いたコーナー周期は28.8秒であり、観測値の17.7秒から大きく外れている。応力降下量が一定で断層サイズがMの1/3乗に比例するならば、コーナー周期はMの1/3乗に比例する。図8の回帰式はほぼ上記の関係に近いが、地震規模が大きくなるにつれて勾配が緩やかになるように見

られる。

そこで、本震時のコーナー周期が適切に求められたと仮定して、本震スペクトルを再推定し、図9に示す。図7に示した推定スペクトルよりも観測値に近づき振幅レベルは改善されたが、本手法はそれだけ本震時の推定コーナー周期に敏感なモデルであるといえる。図7と図9に用いたコーナー周期は、図8に示されるように観測値の標準偏差ほどの差である。このばらつきをいかに抑え、本震時のコーナー周波数を精度良く求めることが本手法において最も重要なポイントとなっている。

また図9において、周期3秒よりも短い周期帯域では推定値は過大評価、長い周期帯域では過小評価となっていることが分かる。ここでは断層の広がりや考慮せず ω^{-2} モデルを仮定しているため、M8級の震源を表現するには困難であるとみられる。これはアスペリティ等の不均質性や震源破壊伝播を考慮することによって改善されると考えており、今後検討を行う予定である。

5. まとめ

M8級の東海東南海地震が発生したとき、首都圏で卓越するやや長周期地震動を予測することを念頭において、まずM8級の地震動が観測されている十勝沖地震で、 ω^{-2} モデルに基づいて余震の観測記録から本震地震動がどこまで再現できるかを試みた。本震時のコーナー周期が適切に得られていれば、本震時の地震動スペクトルはある程度再現できることを示した。

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)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) 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, Bechyne Castle, pp.433-439, 1989
- 2) 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
- 3) 三宅、岩田、入倉：経験的グリーン関数を用いた1997年3月26日(M_{JMA}6.5)鹿児島県北西部地震の強震動シミュレーションと震源モデル、地震、第2輯、第51巻、pp431-442、1999