

2005年7月23日の千葉県中部の地震を例とした 疑似点震源モデルの誤差要因に関する検討

長坂 陽介¹・野津 厚²・若井 淳³

¹正会員 港湾空港技術研究所 地震動研究チーム (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail: nagasaka-y@pari.go.jp

²正会員 港湾空港技術研究所 地震動研究チーム (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail: nozu@pari.go.jp

³正会員 (株) ニュージェック (〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)

E-mail: c-wakaits@newjec.co.jp

著者らは以前に2005年7月23日に発生した千葉県中部の地震(Mj6.0)の強震動シミュレーションを行ったが、本論文ではその結果の誤差要因の検討のために対象地点を大幅に増やして強震動シミュレーションを行った。フーリエスペクトル誤差とPSI再現率を指標として調べた結果、まずラディエーション係数の設定法について、周波数・距離依存とした提案方法と平均的なラディエーション係数による結果は同程度の誤差評価結果となることが分かった。誤差の地域的な傾向のうち、震央北側の多くの地点で見られた過大評価はディレクティビティによるものと考えられる。その他、全般的に遠方で過小評価となる傾向が見られたが、これは幾何減衰やQ値の折れ曲がりによるものであると考えられる。

Key Words: the 2005 Central Chiba Earthquake, strong ground motion simulation, pseudo point-source model, radiation pattern, directivity

1. はじめに

強震動予測手法に関するベンチマークテスト¹⁾が行われており、各研究者により提案されている強震動予測手法が比較・検証されている。著者らは、これに参加するため、疑似点震源モデル²⁾を用いて2005年7月23日に発生した千葉県中部の地震(Mj6.0)の強震動シミュレーションを行った³⁾。計算結果は全体的に良い再現性を示したが、いくつかの課題が見られ、疑似点震源モデルのさらなる精度向上につながる可能性が示唆された。課題は大きく2つに分類される。1つはラディエーション係数設定方法の妥当性について、もう1つは計算結果の誤差評価結果に地域的な傾向が見られたことである。しかし、これらを詳細に分析するにはベンチマークテストで指定された計算地点のみでは不十分であったため、本検討では計算対象地点を25地点³⁾から178地点に増やし、上記2点について分析を行った。

1点目のラディエーション係数の補正方法について、文献3では高周波数ほど理論的な値に近づくようにしたが、補正の程度は速度波形のパルス方位を基に目視で判断していた。そこで、本検討ではラディエーション係数の補正程度を変えた計算結果について、2つの指標を用いた誤差評価結果を比較することでラディエーション係

数の補正の効果を定量的に確認する。

2点目の再現性に地域的な傾向が見られたことについて、文献3では現状の疑似点震源モデルはディレクティビティを考慮していないことを原因の1つとして挙げた。しかし、他にもラディエーション係数や伝播経路におけるQ値の折れ曲がり、海洋性プレートの高いQ値なども原因として考えられるため総合的に分析を行う。

2. 疑似点震源モデルの概要

(1) パラメーター一覧

本検討で用いた2005年7月23日の千葉県中部の地震(Mj6.0)の疑似点震源モデルの各パラメーターを表-1に示す。疑似点震源モデルの概要など詳細については文献3を参照されたい。また、位相特性に用いた中小地震は文献3で用いた中小地震のうち、もっとも記録の多かった2004年8月6日の地震によるもので統一した。また、表中の Q_R については次節で説明する。

(2) ラディエーション係数の補正方法

ラディエーション係数は式(1)のように、 α を重みづけ係数として理論的な値と平均的な値の内分値となるように設定した³⁾。式(1)において、右辺第1項が理論値の、

表-1 パラメター一覧

震源東経	140.1342°
震源北緯	35.5692°
震源深さ	68km
走向	179°
傾斜	18°
すべり角	82°
地震モーメント	$9.39 \times 10^{17} \text{Nm}$
地盤密度	3.4 g/cm^3
S波速度	4.6 km/s
Q 値	$100 \times f^{0.7}$
コーナー周波数	0.75 Hz
Q_R	10π

第2項が平均値の寄与を表す。 α は式(2)のように周波数 f と震源距離 r を変数とした関数であり、周波数が低いほど、または震源距離が小さいほど1（理論的な値）に近づき、逆の場合は0（平均的な値）に近づく。 α の挙動は係数 Q_R によって変化し、 α と Q_R の関係は図-1 になる。

$$(R_{\theta\phi} \cdot PRTITN)^2 = \alpha (R_{\text{theoretical}})^2 + (1-\alpha)(\overline{R_{\theta\phi}} \cdot \overline{PRTITN})^2 \quad (1)$$

$$\alpha = \exp(-\pi f r / Q_R V_S) \quad (2)$$

(3)計算対象地点

計算対象地点は図-2 に示す 178 地点で行った。選定基準は、1. K-NET, KiK-net 観測点で本震および位相特性に用いた地震双方の記録がある、2. 移設履歴がない、3. サイト増幅特性⁴⁾が設定されている、の3つである。

3. ラディエーション係数設定法の検討

まず1. (2)で示したラディエーション係数の補正方法について、指標による妥当性の検討を行うため、式(2)の Q_R を変えた計算結果を比較する。本検討では以下に示す4ケースの計算を行った。ケース1： $Q_R=0$ （平均的ラディエーション係数）、ケース2： $Q_R=10\pi$ （文献3で最適とした値）、ケース3： $Q_R=100\pi$ 、ケース4： $Q_R=1000\pi$ 。図1に示したように、 Q_R が大きいほど理論的ラディエーション係数に近づく。誤差評価にはフーリエスペクトル誤差（式(3)、積分範囲は0.2~10Hz、 FS_{obs} ：観測フーリエスペクトル、 FS_{cal} ：計算結果フーリエスペクトル）とPSIの再現率（計算結果／観測）の2つの指標を用いた。PSIは時刻歴速度の時間積分値であり、港湾施設の被害程度

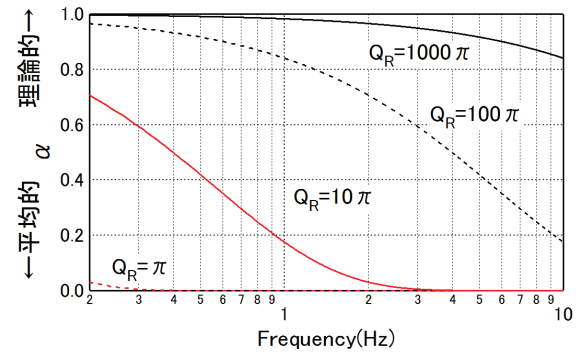
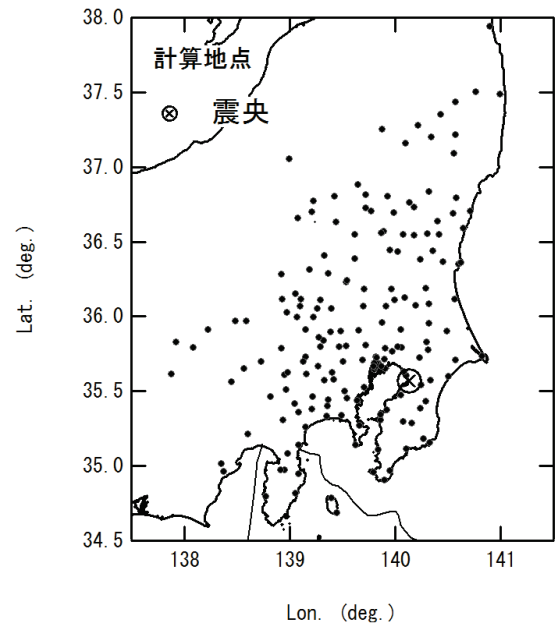
図-1 α と Q_R の関係

図-2 計算対象地点

と相関が高い指標である。

$$\int_f (\log_{10} FS_{\text{obs}} - \log_{10} FS_{\text{cal}})^2 d(\log_{10} f) \quad (3)$$

それぞれの指標について 178 地点の平均を各ケースについて計算し、比較したものを図-3、図-4 に示した。これより、ケース1, 2の結果はほぼ同じであり、ケース3, 4より良いことが分かる。つまり、ラディエーション係数が理論値に近いとき、フーリエスペクトルとPSI再現率はともに観測値からの乖離が大きくなり、平均的なラディエーション係数に近い方が全体的な再現性は良いことが分かった。また、ケース1, 2はほぼ同じ結果となっており、 $Q_R=10\pi$ 程度では平均的ラディエーション係数を使っても指標による再現性は同じ程度であることが分かった。この理由としては、対象地震が震源深さ68kmであり、地上に伝播するまでに平均的に近いラディエーション係数となっていたことが考えられる。今後はより震

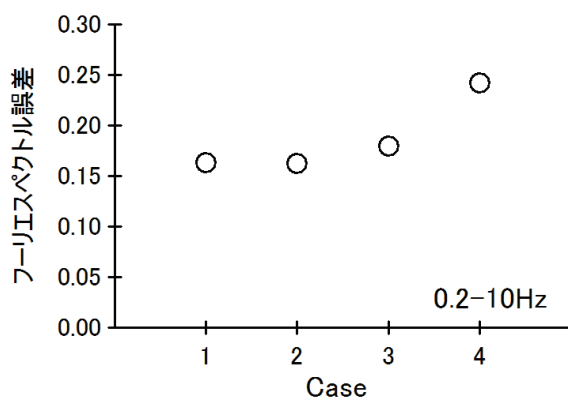


図-3 ケースごとフーリエスペクトル誤差

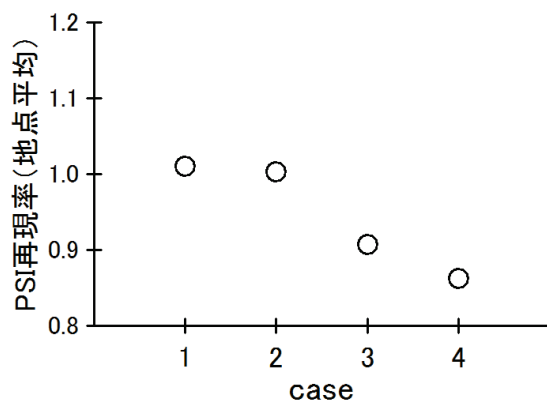


図-4 ケースごと PSI 再現率

源深さの浅い地震でも同様の検討を行う必要がる。

4. 再現性の地域的な傾向について

次に誤差評価の地域的な傾向について調べるため、図-5、図-6にフーリエスペクトル誤差と PSI 再現率の分布を色で示した。図-5のフーリエスペクトル誤差は過大・過小評価の違いを考慮しないことに注意が必要である。まず、福島県などの北方の震源から遠い地点に誤差が大きい地点が固まっており、すべて過小評価となっていることが分かる。震源距離と PSI 再現率の関係を調べた(図-7)ところ、ばらつきは大きいものの平均的には震源距離が大きくなるほど過小評価となる傾向となっていることが確認できた。この原因は幾何減衰の折れ曲がり、または、 Q 値の折れ曲がりによる効果であると考えられる。地震のタイプは異なるが、内陸地殻内地震やプレート境界地震に対して、これらの効果が表れることを示した研究がある⁵⁶⁾。また、伊豆大島などの南部でも同様に過小評価となっているが、こちらは Q 値の高い海洋性プレート内を伝播した影響である可能性がある。

また、震央すぐ北の茨城県中部付近の一帯は PSI 再現率が 1.5 以上の地点もあり、過大評価となっている。こ

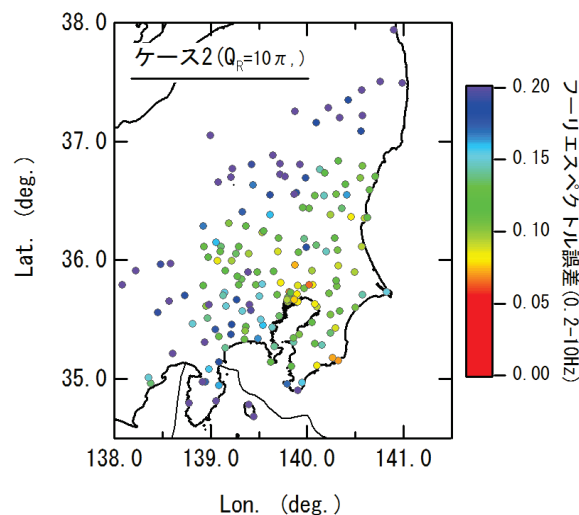


図-5 フーリエスペクトル誤差分布

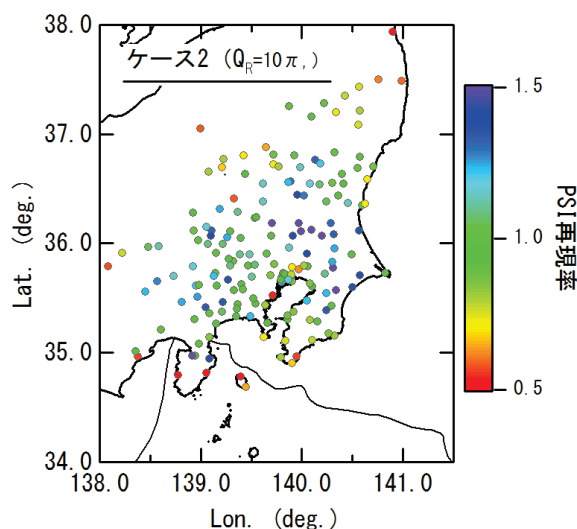


図-6 PSI 再現率分布

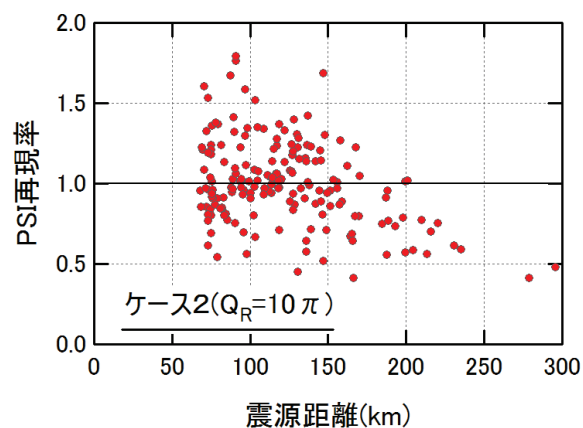


図-7 PSI 再現率と震源距離の関係

れは文献3でも指摘していたが、計算対象地点数が少なく地域的な傾向としてははっきりとは確認できていなかった。本検討で地点数を増やしたことで多くの地点で過大評価となっていることが確認できた。これらの地点のフーリエスペクトルを確認すると、図-8 のようにすべて

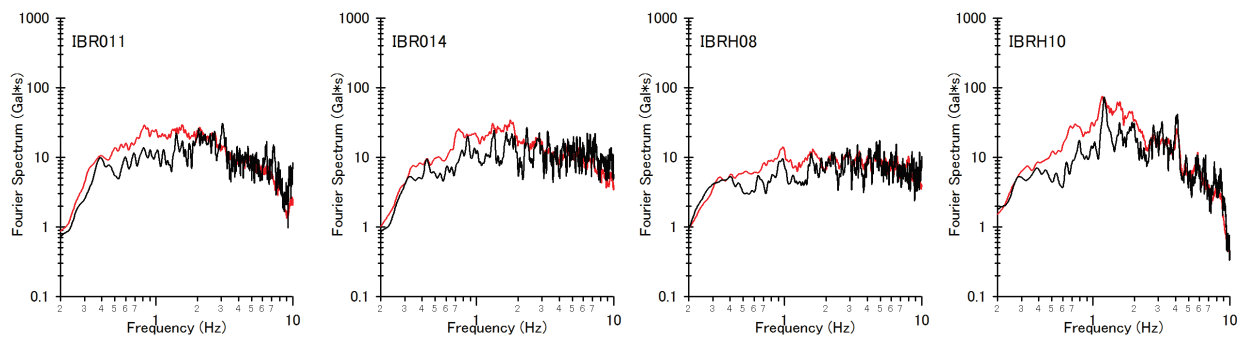


図-8 茨城県中部のフーリエスペクトル計算結果例（黒：観測，赤：計算結果， $Q_r=10\pi$ ）

0.4-3Hz 程度の中間周波数帯でのみ過大評価となり、低周波数、高周波数では観測記録とよく一致していることが分かる。疑似点震源モデルが現状ではディレクティビティを考慮していないことをふまえると、これらの地点は破壊進行のバックワードに位置しており、観測によるコーナー周波数が低くなったため計算結果が過大評価となったと考えられる。

4. 結論

本研究では2005年7月23日の千葉県中部の地震について、既往研究から対象地点を大幅に増加して強震動シミュレーションを行い、観測記録との誤差要因を分析した。主要な結論は以下の通りである。

- ①ラディエーション係数の補正方法について、提案モデル($Q_r=10\pi$)と平均的なラディエーション係数による結果のフーリエスペクトル誤差、PSI 再現率はほぼ同じであり、本地震については平均的なラディエーション係数でも十分精度よく観測を再現できる。これは震源深さが68kmと深く、震源距離の小さい観測点が少なかったことも原因の一つであると考えられる。
- ②誤差の地域的な傾向のうち、茨城県中部一帯における過大評価は、ディレクティビティを考慮していないことが原因である可能性が高い。
- ③この他、全体的に遠方で過小評価となる傾向が見られ

たが、これは、幾何減衰やQ値の折れ曲がりによる効果と考えられる。

謝辞：本研究では、(独)防災科学技術研究所の K-NET および KiK-net による強震記録を利用させていただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 田邊朗仁, 久田嘉章, 野畑有秀, 山本優, 眞鍋俊平, 長坂陽介: 首都直下地震を対象にした強震動予測手法に関するベンチマークテスト その1: 2005年千葉県北西部地震を対象とした統計的手法と観測記録との比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.307-308, 2014
- 2) 野津厚: 強震動を対象とした海溝型巨大地震の震源モデルをより単純化する試みー疑似点震源モデルによる2011年東北地方太平洋沖地震の強震動シミュレーションー, 地震2, Vol.65, pp.45-67, 2012
- 3) 長坂陽介, 野津厚, 若井淳: 疑似点震源モデルによる2005年7月23日千葉県中部の地震の強震動シミュレーション, 第14回日本地震工学シンポジウム, 2014, 投稿中
- 4) 野津厚, 長尾毅: スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料 No.1112, 2005
- 5) 佐藤智美, 巽誉樹: 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, No.556, pp.15-24, 2002
- 6) Aki, K.: Attenuation of shear-waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25Hz, Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol.21, pp.50-60, 1980

VALIDATION OF STRONG MOTION SIMULATION BASED ON THE PSEUDO POINT-SOURCE MODEL WITH THE CENTRAL CHIBA EARTHQUAKE OF JULY 23, 2005 AS AN EXAMPLE

Yosuke NAGASAKA, Atsushi NOZU and Atsushi WAKAI

In the previous study, we developed a pseudo point-source model for the 2005 Central Chiba Earthquake (Mj6.0) and conducted strong motion simulation based on the model. In this study, to further investigate the causes of errors involved in the simulation based on the pseudo point-source model and to improve the model, we conducted strong motion simulation for a much wider region than in the previous study using the same source model. The result revealed that the averaged radiation coefficient yields as good results as the frequency and distance-dependent radiation coefficient, probably because the target event was a deep-focus event and the target stations did not involve near-source stations. The overestimation to the north of the hypocenter is probably due to a backward directivity effect. In addition, the underestimation at larger distance is probably due to the geometric attenuation proportional to $r^{1/2}$ at larger distance or to the constant Q value at smaller frequencies.