

大規模平野の強震動評価技術の開発

プロジェクト責任者

司 宏俊 株式会社構造計画研究所

著 者

西條 裕介^{*1}、正月 俊行^{*1}、田島 礼子^{*1}、司 宏俊^{*1}、廣川 雄一^{*2}

* 1 株式会社構造計画研究所

* 2 独立行政法人海洋研究開発機構

利用施設： 独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間： 平成 22 年 4 月 1 日～平成 23 年 3 月 31 日

アブストラクト

地震災害軽減のためには、ある特定の地震が発生した際の地震動をシミュレーションによって正確に予測し、それに基づいた対策を検討しておくことが有効と考えられる。近年では、地面をガタガタと揺する短周期の地震動だけでなく、高層建築物や巨大構造物に影響を与えるゆっくりした長周期の揺れ（長周期地震動）も適切に評価することが求められている。特に、大規模平野や盆地などでは長周期地震動が卓越することが知られている。これらの地域を対象に短周期から長周期までの広周期帯域における地震動シミュレーションを精度良く行うためには、正確な対象地震の震源モデルと広範囲にわたる 3 次元的な地下構造モデルを用いた計算が必要となる。しかしながら、計算規模が非常に大きくなるため、通常の PC クラスタでは計算速度やメモリなどの制約から実現が困難である。

昨年度は、震源の物理や地震波動理論に基づいた 3 次元有限差分法の地震波伝播解析プログラムを計算能力の高い地球シミュレータに移植し、(株)構造計画研究所所有の PC クラスタの約 90 倍の計算速度が得られることを確認した。本年度は、プログラムの計算速度が昨年度よりも約 48 倍速くなるように改良および最適化を行い、大規模問題の取り扱いを可能にした。本プログラムを使用して、地震が発生した場合に長周期地震動の卓越や大きな被害が予測される関東平野を対象に、過去の被害地震（1923 年関東地震）のシミュレーションを実施した。結果として、最も遅い地震波速度 (V_{s-min}) が 350 m/s となる地下構造モデルを用いた場合に 1 Hz まで、 $V_{s-min} = 600$ m/s のモデルを用いた場合に 2 Hz までの地震動シミュレーションを実現し、観測波形との比較により計算精度の確認を行うことができた。

キーワード： 波動伝播、差分法、長周期地震動、関東地震

1. はじめに

日本は 4 つのプレートがぶつかり合う地域に位置し地震が多く発生するため、古くから地震災害の脅威にさらされてきた。地震による被害を軽減するためには、あらかじめ起こりうる被害を予測しておき、予測結果に基づいた対策を講じておくことが重要である。近年では、短い周期の波によるガタガタした

強い揺れ（短周期地震動）だけではなく、高層建築物や巨大構造物に影響を与える長い周期の波が伝わることによって生成されるゆっくりした揺れ（長周期地震動）も考慮した地震動評価を行うことが求められている。長周期地震動は、2003 年十勝沖地震（気象庁マグニチュード 8.0）の際に震央から約 250 km 離れた苫小牧市内で発生した石油タンク火災の原因の一つとして注目されるなど、地震動による被害を考える上で、主要な課題の一つとなっている。2011 年 3 月に起こった東北地方太平洋沖地震（気象庁マグニチュード 9.0）の際には、震源地から比較的離れた東京都の高層ビルが 10 分以上にわたり、最上階では 1 m を超えて揺れ続けていたことが報告されている（例えば朝日新聞社, 2011¹⁾を参照）。

このような背景と計算技術の向上に伴い、地震波伝播の理論的なシミュレーションを被害の予測に用いることが多くなってきている。図 1 に地震動評価におけるモデル化の概念図を示す。理論的な計算においては、精度の高い 3 次元地下構造モデルと対象地震の震源断層モデルを用いて、長周期から短周期までの広帯域にわたる地震動シミュレーションを精度良く行うことが望ましい。しかしながら、長周期地震動が卓越する関東平野などの大規模平野を対象として、短周期を視野に入れた 3 次元の地震動シミュレーションを実施する場合には、通常の PC クラスタでは計算が困難となる。これは、理論的手法で S 波速度 (V_s) が遅い ($V_s = 350$ m/s 程度の) 層を含む地下構造を伝播する波形を短周期まで計算しようとする、透過振動数の関係から差分格子間隔を非常に細かく設定する必要があり莫大な格子点となり、PC クラスタなどで計算する計算速度やメモリなどの制約が発生するためである。

本プロジェクトでは、昨年度に地球シミュレータに移植した地震波の伝播解析プログラムを改良および最適化して、大規模問題の取り扱いを可能にした。また、本プログラムを使用して、大規模平野での強震動シミュレーションシステムを構築する。具体的には、地震が発生した場合に長周期地震動の卓越や大きな被害が予測される関東平野を対象に、過去の被害地震である 1923 年関東地震のシミュレーションを実施し、観測波形との比較により計算精度の確認を行った。

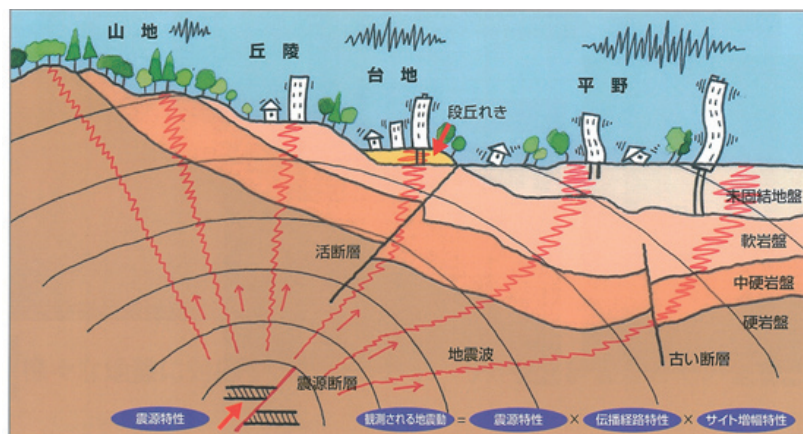


図 1 地震動評価におけるモデル化の概念図

2. 計算プログラム

波動伝播シミュレーションには、3 次元有限差分法に基づく地震波伝播解析プログラムを使用する。昨年度、地球シミュレータに移植した本プログラムに並列化およびベクトル化のチューニングを実施した。最終的なプログラム性能は 96 ノード (768 CPU) の場合において、平均ベクトル化率 99.190%、並列化率 99.898% となった。計算速度は、構造計画所有の計算 PC クラスタ (3 ノード (6CPU), AMD AthlonX2 2.1GHz) の約 4,300 倍、前年度の 48 倍となった。

3. 計算条件

3.1 対象地震

対象地震として、関東平野付近での過去の被害地震である 1923 年の関東地震（関東大震災，マグニチュード 7.9）を採用した。図 2 に対象地震の断層設定、破壊開始点、および評価地点（サイト）を示す。震源断層モデルは、Wald and Somerville (1995)²⁾ が推定した関東地震の震源断層の不均質すべりモデルから、Somerville et al. (1999)³⁾ の手順により強い地震動を生成するアスペリティ（図 2 の黄緑色の部分）を抽出した特性化震源モデルおよび地震調査研究推進本部 (2009a)⁴⁾ を参考に設定した。また、壇・佐藤 (1998)⁵⁾ で使用された震源断層の不均質すべり分布を考慮した震源断層モデルを用いた計算も行った。

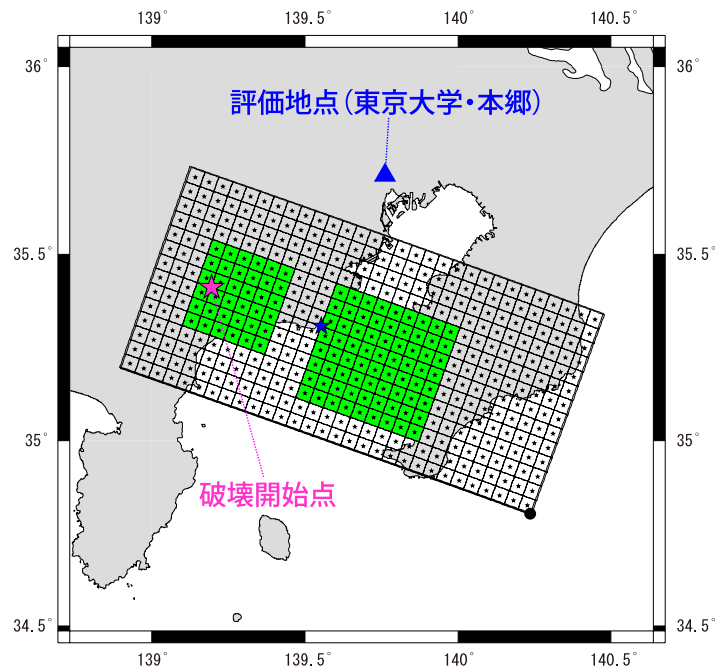


図 2 震源モデル

3.2 計算領域（格子数、格子間隔）

地震波伝播シミュレーションの対象地域には関東平野を含む断層周辺の領域を採用し、地震動の評価地点（サイト）は東京大学の本郷とした。図 3 に 3 次元地下構造モデルと断層の配置を示す。シミュレーションで使用する地下構造モデルは、長周期地震動予測地図 2009 年試作版（地震調査研究推進本部, 2009b⁶⁾）において公開されている想定東海地震・東南海地震のための 3 次元地下構造モデルのうち、地震断層を取り囲む領域を抽出して使用した（図 4 参照）。計算の大きさは南北方向 153.6 km × 東西方向 204.8 km × 深さ方向 51.2 km で、格子間隔は 50 m、計算規模は約 130 億格子規模である。

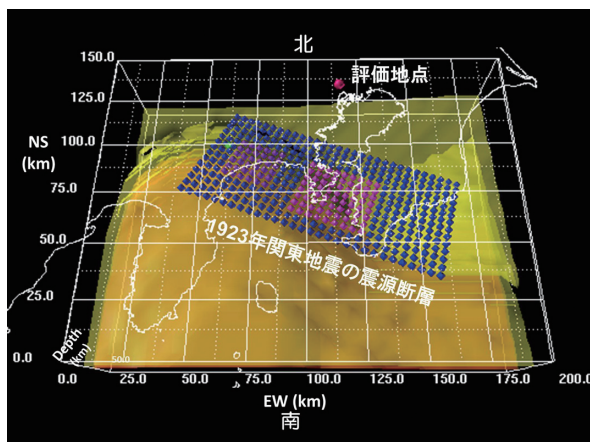


図 3 地下構造モデルと断層の位置

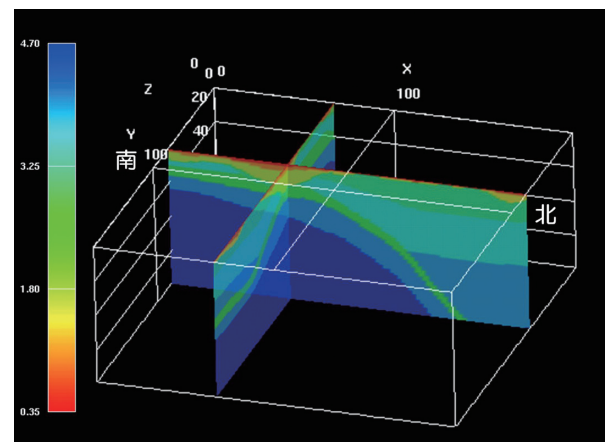


図 4 地下構造モデルの断面図（S 波速度構造）

3.3 計算対象周波数

離散化した波動方程式を数値的に解く場合、数値計算の不安定性に注意する必要がある。十分な演算精度を安定して得るためには、計算対象の地震波の波長に比べて十分に小さな格子間隔を取る必要があり、空間4次精度の差分演算子を用いる場合は、1波長あたり6格子程度が必要となる。これらの関係は、以下の安定条件により表される。

$$f < \frac{V_{\min}}{6h}$$

ここで、

$V_{\min}$ ：対象地盤の最小地震波速度 (m/s)

h ：格子間隔 (m)

f ：周波数 (Hz)

本プロジェクトにおいては、ケース1では対象とする地下構造モデルの最小地震波速度 ($V_{s-\min}$) = 350 m/s とし、ケース2では最小 $V_s = 600$ m/s として計算を行う。格子間隔 (50 m) とケース1およびケース2の最小の地震波速度 (350 m/s および 600 m/s) を代入すると、それぞれ対象周波数帯は約 1 Hz および 2 Hz までとなる。従って、格子サイズが同様であっても地下構造モデルの $V_{s-\min}$ の値が大きいケース2の方が、より短周期まで安定して計算される。

4. 結果

図5に、東京大学の本郷（サイト）における観測記録、既往研究（壇・佐藤, 1998⁵⁾）による計算波形、および本プロジェクトで特性化震源モデルを用いてシュミレーションした計算波形の比較を示す。計算した波形の振幅および位相（波形の形状）は観測記録を再現している。また、サイトは震源（破壊開始点）から約 62 km 離れているが、関東平野の影響で最初の大きな揺れの後に周期的な長周期の波が生成されていることが分かる。図6に波動伝播の様子のスナップショットを示す。この図を見ると、断層面上から放出された地震波が伝播していく様子が分かり、堆積層の厚い平野部では比較的大きな振幅の波が 120 秒後にも続いているのが分かる。短周期を視野に入れた波形計算という視点では、大規模な3次元地下構造モデルにおいて $V_{s-\min} = 350$ m/s とした場合（ケース1）には 1 Hz まで（図7a）、 $V_{s-\min} = 600$ m/s とした場合（モデル2）には 2 Hz まで（図7b）の波形計算を実現することができた。

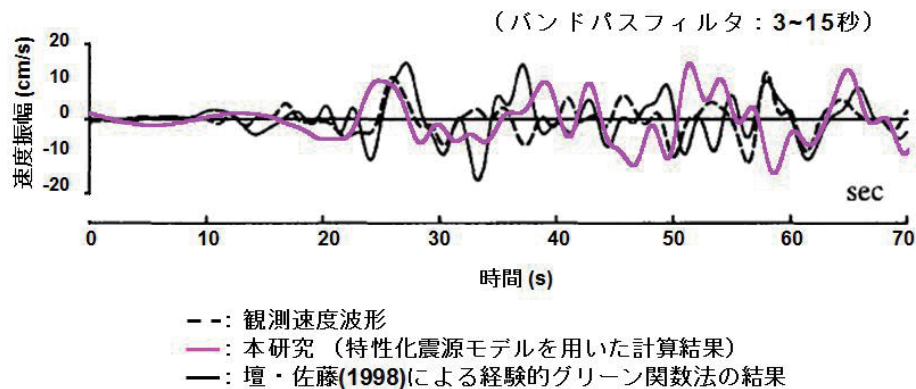


図5 観測記録と計算波形の比較

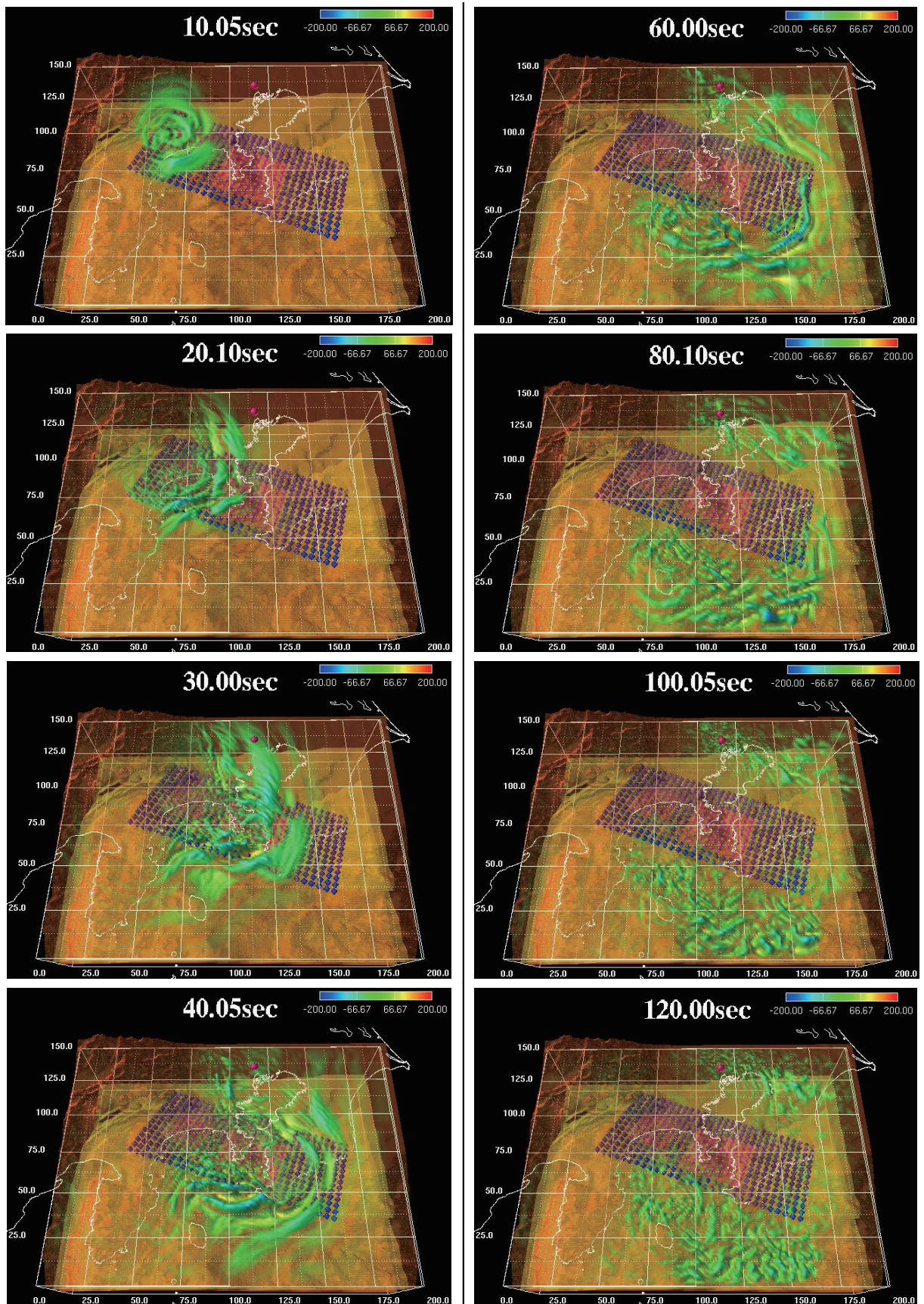


図 6 波動伝播の様子

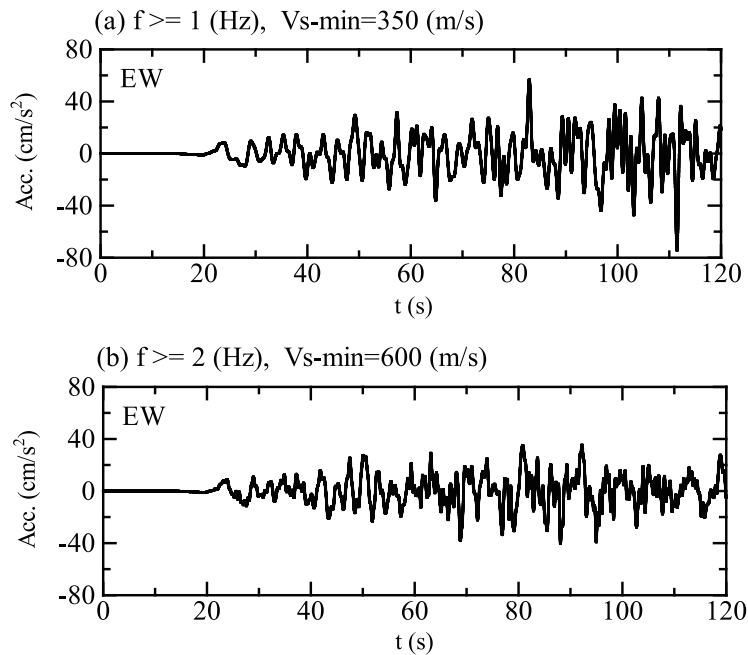


図 7 短周期を視野に入れた波形計算の結果

5. まとめ

地震時の大規模平野の地震動シミュレーション技術の開発を目的に、計算能力の高い地球シミュレータを利用した大規模な計算が出来るように、計算プログラムのチューニングを行い、(株)構造計画研究所所有の PC クラスターの約 4,300 倍（昨年度の約 48 倍）の計算速度が得られることを確認した。地震波の波動伝播解析については、本プログラムを用いて、地震が発生した場合に大きな被害が出ると予測されている関東平野を対象に大規模な波動伝播解析を行い、過去に起こった被害地震の観測記録とも調和的な結果が得られた。今後さらに 3 次元地盤構造を考慮した広帯域地震動シミュレーションの計算精度を高めることにより、結果を高層ビル設計用地震動、被害予測、ハザード評価、家具転倒などの屋内被害予測などの様々な分野へ適用可能と考えられる。

謝辞

東京大学情報学環総合防災情報研究センター（東京大学地震研究所兼務）の古村孝志教授にはプログラム開発および研究についての貴重なご指導、ご助言をいただきました。地球シミュレータの利用に際しては、独立行政法人海洋研究開発機構地球の新宮哲氏、上原均氏にご指導、ご協力をいただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 朝日新聞社 (asahi.com), 新宿センタービル、13 分揺れた 国の耐震基準強化へ,
<http://www.asahi.com/special/10005/TKY201104190244.html>, 2011.
- 2) Wald, D. J. and P. G. Somerville, Variable-slip rupture model of the great 1923 Kanto, Japan, earthquake: geodetic and body-waveform analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, 159-177, 1995.
- 3) Somerville, P. G., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N. and Kowada, A., Characterizing crustal earthquake slip models for the

prediction of strong ground motion, *Seism. Res. Letters*, 70, 59-80, 1999.

4) 地震調査研究推進本部, 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」),
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/g_furoku3.pdf, 2009a.

5) 壇一男, 佐藤俊明, 断層の非一様すべり破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震動予測, 日本建築学会構造系論文集, 509, 49-60, 1998

6) 地震調査研究推進本部, 長周期地震動予測地図 2009 年試作版,
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_choshuki/index.htm, 2009b.