

広域・高解像度評価に向けた強震動予測手法の高度化に関する研究

名古屋大学大学院環境学研究科 都市環境学専攻
博士課程前期課程 2年 福和研究室 千賀 英樹

1 序論

近年、名古屋駅前の超高層ビルに象徴されるように、中部圏においても超高層建築や免震建築物の長周期構造物が多く造られるようになった。これらの構造物の耐震設計には、より高精度の設計用入力地震動が求められる。地震時の揺れはその建設サイトにより大きく異なり、同じ振動特性を有する構造物であっても、地盤条件によって建物応答は大きく異なる。そのためサイト固有の地震動をいかに正確に推定するかが、建物の安全性を評価する上で最も重要な要素の一つといえる。

経験的グリーン関数法は震源・伝播・地盤増幅の特性を考慮できるため、最も信頼性が高い強震動予測手法といわれている。しかし、想定震源域での地震観測記録がないと適用できないこと、想定する震源モデルや波形合成に用いる観測記録によって結果が大きく左右されるなどの問題点もある。そのため、高密度強震観測網の観測記録と、地盤モデルを最大限に活用して、地震観測記録のない地点で地震動推定を行う擬似経験的グリーン関数法が提案された¹⁾。この手法は、経験的グリーン関数法の適用範囲を拡張できる有効な手法であると考えられる。しかし、この手法の適用範囲についてはまだ十分に検討がなされておらず、高精度化に向けた課題も多く残されている。

本論では先ず、既往の強震動予測手法の高度利用を目的とし、経験的グリーン関数法を用いて、震源モデルが予測結果に与える影響を検討する。次いで擬似経験的グリーン関数法の適用性の検証及び高精度化への検討を行

った上で、本手法の適用例として、想定東海・東南海地震の強震動予測を行う。

2 既往の強震動予測手法が評価結果に与える影響

2.1 震源モデルが与える影響

強震動予測結果は用いる震源モデルや地下構造の各種パラメータにより大きく異なる。ここでは壇・佐藤²⁾による経験的グリーン関数法を用い、震源モデルが予測結果に与える影響を検討する。

震源モデルは図1及び表1に示す想定東海・東南海地震を対象とした、中央防災会議によるモデル³⁾、名古屋市三の丸地区を対象とした設計用入力地震動策定時に作成したモデル⁴⁾（中央防災会議モデルを平面にしたモデル、以下、三の丸モデル）、そして愛知県設計用入力地震動研究協議会によるモデル⁵⁾（以下、協議会モデル）の3種を用いる。尚、表1中の応力降下量 σ 及びすべり量 D はそれぞれ、名古屋市に最寄りのアスペリティの値を表している。波形合成は名古屋大学鶴舞キャンパスを対象とし、合成に用いる中小地震は、1997年3月16日の地震（愛知県東部、 $M_j=5.8$ 、深さ39km）及び2000年10月31日の地震（三重県南部、 $M_j=5.5$ 、深さ43km）とする。表2に中小地震の震源パラメータを示す。波形合成結果は、各モデルの平均的特性を抽出するため、要素地震内の揺れの放射位置を10種の乱数でランダムに与え、その応答スペクトルの平均値で比較する。また、大振幅時の表層地盤の非線形性は考慮しない。

図2に波形合成結果の擬似速度応答スペクトル（NS方向、減衰5%）、及び応答スペクトル比を示す。これより、短周期域では中央防災会議モデルと三の丸モデルが概ね対応しており、協議会モデルは比較的小さな応答を示している。これは特に名古屋市域に大きな影響を与える西側断層のアスペリティの応力降下量が、中央防災会議モデルと三の丸モデルでは219barに対し、協議会モデルは167barとやや小さいことが一因と考えられる。一方、長周期域は中央防災会議モデルと協議会モデルは概ね対応しているが、三の丸モデルは小さな応答となっている。中央防災会議モデルと三の丸モデルは、地震モーメントやアスペリティ配置などについて比較的近いパラメータを用いているが、西側断層の要素断層の大きさ（中央防災会議モデル：一辺10km、三の丸モデル：一辺5km）の違いが一因と

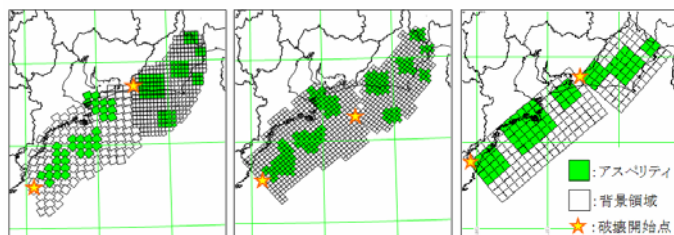


図1 想定東海・東南海地震の震源モデル

表1 各震源モデルの震源パラメータ

| | M_0 (dyn/cm) | M_w | | σ (bar) | D (m) | L (km) | ΣS (km ²) |
|-----------|----------------|-------|-----|----------------|---------|----------|-------------------------------|
| 中央防災会議モデル | 3.40E+28 | 8.3 | 東南海 | 219 | 7.30 | 10 | 14600 |
| | | | 東海 | 216 | 6.90 | 5 | 9400 |
| 三の丸モデル | 3.11E+28 | 8.3 | 東南海 | 219 | 7.29 | 5 | 14600 |
| | | | 東海 | 216 | 6.93 | 5 | 8835 |
| 協議会モデル | 4.00E+28 | 8.3 | 東南海 | 167 | 5.34 | 10 | 14400 |
| | | | 東海 | 167 | 5.45 | 10 | 7500 |

表2 中小地震の震源パラメータ

| 日時 | 震央 | 深さ | M_j | M_0 (dyn/cm) | M_w | f_c (Hz) | σ (bar) | S (km) | D (m) |
|------------------|-------|------|-------|----------------|-------|------------|----------------|----------|---------|
| 1997. 3.16 14:51 | 愛知県東部 | 39km | 5.8 | 2.97E+24 | 5.6 | 1.20 | 509 | 5.87 | 0.81 |
| 2000.10.31 1:43 | 三重県南部 | 38km | 5.5 | 1.70E+24 | 5.4 | 1.35 | 415 | 4.64 | 0.59 |
| 2001. 4. 3 23:57 | 静岡県中部 | 35km | 5.3 | 8.17E+23 | 5.2 | 1.40 | 222 | 4.31 | 0.30 |
| 2004. 1. 6 14:50 | 熊野灘 | 38km | 5.4 | 6.74E+23 | 5.2 | 1.15 | 100 | 6.46 | 0.17 |

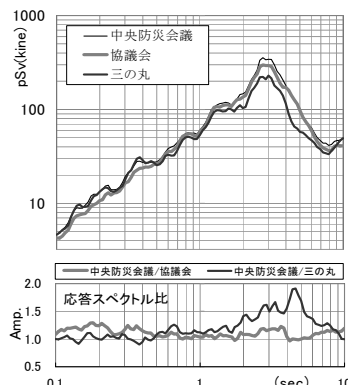


図2 擬似速度応答スペクトル (NS方向、減衰5%)

考えられる。

2.2 要素断層の大きさの影響

上記結果を踏まえ、要素断層の大きさの影響を検討する。検討は協議会モデルの西側断層を用いて、要素断層の一边を10kmと5kmの2通りのモデルを設定する。他のパラメータは同一とする。震源モデルを図3に示す。

図4に波形合成結果の擬似速度応答スペクトル(NS方向、減衰5%)を示す。長周期域にて差異は明瞭に現れており、最も大きな応答を示す3秒付近では、一边5kmの場合の応答値は一边10kmの場合に比べ60%~70%程度である。これは既往の研究⁶⁾の通り、想定地震と要素地震との間の地震モーメント比(重ねあわせ個数n)が大きいと、合成された想定地震は、想定地震と要素地震それぞれのコーナー周波数間の周波数で、 ω^2 モデルからの落込みが生じるためと考えられる。これは震源モデル設定時の断層分割によるものであり、注意が必要である。

3 擬似経験的グリーン関数法の適用性の検討

擬似経験的グリーン関数法は、深部及び浅部地盤モデルを活用して地震観測記録を空間的に補間することで、任意地点における地震動を推定し、これを経験的グリーン関数法に適用するものである。地震観測記録のある観測点をA点とし、地震波を求めたい任意地点をB点とする。B点の地震動 $O_B(\omega)$ は、A点の地震動 $O_A(\omega)$ 及びA点とB点の伝達関数 $R_{BA}(\omega)$ を用いて次の通り推定することができる。

$$O_B(\omega) = R_{BA}(\omega) * O_A(\omega) \quad (1)$$

$$R_{BA}(\omega) = \frac{O_B(\omega)}{O_A(\omega)} \quad (2)$$

ここで、 $O_A(\omega)$ 及び $O_B(\omega)$ は、地盤モデルを用いてシミュレートしたA点、B点における地震動で、長周期域は地震動の三次元的な波動伝播を考慮した三次元有限差分法、短周期域はP、SV、SHの3成分を考慮した統計的グリーン関数法により求める。 $O_B(\omega)$ は、(1)式に基づき、長周期域及び短周期域の推定地震動をそれぞれ計算し、マッチングフィルタを用いてハイブリッド合成することにより求める。こうして得られた推定波形をグリーン関数(以下、擬似経験的グリーン関数)として経験的グリーン関数法に適用する。

3.1 不整形地盤が伝達関数に与える影響

本手法では、擬似経験的グリーン関数が、推定に用いる伝達関数

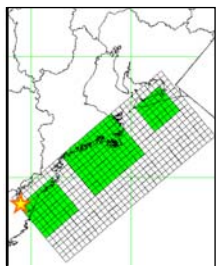


図3 要素断層一边5kmの協議会モデル

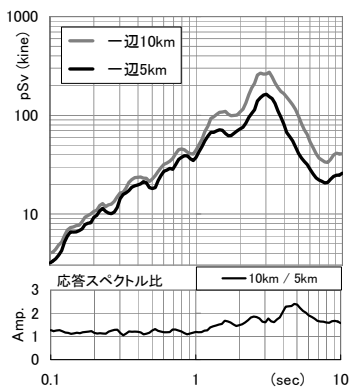


図4 擬似速度応答スペクトル(NS方向、減衰5%)

に大きく依存する。ここでは二次元有限差分法を用いて、地盤構造や震源特性が伝達関数に与える影響を検討する。

表3及び図5に、検討に用いる簡易地盤モデルを示す。modelAは平行成層地盤モデル、modelBは垂直の段差を有する地盤モデル、modelCはmodelBに加え傾斜を有する地盤モデル、modelDは逆断層型の段差を有する地盤モデルである。ここでは、段差のある地点を基準にし、4km間隔の地点の出力波形を6km/2km、14km/10kmのようにそれぞれ区間をずらしながら得られる伝達関数を比較する。各モデルは200mグリッドで、震源は点加振とし、加振点に中心周期3秒のRicker波を入力する。ここではSH波にて検討を行い、解析時間は加振開始時から80秒間とし、加振位置は図中に示す深さ5km地点とする。

図6に段差から2km-6km、10km-14km及び18km-22kmの各地点の応答波形による伝達関数の振幅比を、modelBを基準に示す。これより段差近傍では、modelAとmodelBで振幅比が異なることが確認できる。これは地下構造の急変する地点近傍での伝達関数への影響を示すものである。modelCでは、堆積層厚が薄くなる18km-22km地点間でmodelBとの差異が確認

表3 速度構造

| Layer | Vp (m/s) | Vs (m/s) | H (m) |
|-------|----------|----------|-------|
| 1 | 3000 | 1000 | 2000 |
| 2 | 5500 | 3000 | - |

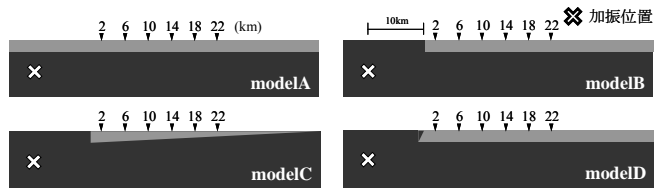


図5 簡易地盤モデル (上部の数字は、段差の生じる境界からの距離を表す)

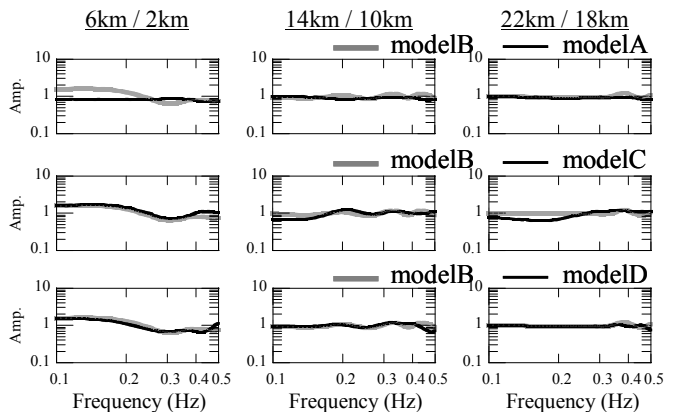


図6 不整形地盤の影響

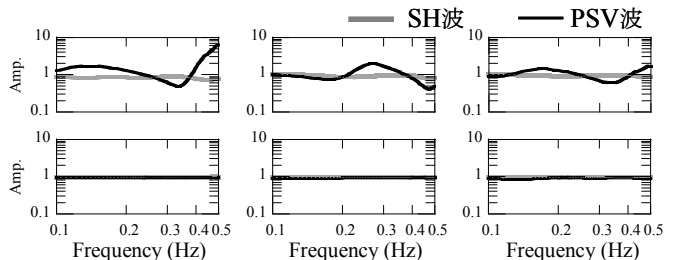


図7 震源特性の影響 (上段:震源深さ5km、下段:震源深さ40km)

できる。これも同様に、平行成層地盤と傾斜地盤の違いが伝達関数に与える影響を示している。これに対し、modelB と modelD では、伝達関数の振幅比に明瞭な差異は確認できない。

3.2 震源特性が伝達関数に与える影響

経験的グリーン関数法にて波形合成を行う場合、用いる中小地震の走向、傾斜角、すべり角等の震源パラメータを設定するが、これに必要な震源メカニズム解の推定精度が不十分な場合も考えられる。これらの影響を確認するため、簡易地盤モデルの modelA を用いて、震源の放射特性であるラディエーションパターンによる影響をSH 波、PSV 波の加振方向の違いと見立て、震源深さを5km、40km とした場合について比較検討する。

図 7 に、面外方向に加振した場合（SH 波）と面内の水平方向に加振した場合（PSV 波）の伝達関数の振幅比を示す。まず震源深さ 5km では SH 波と PSV 波では振幅比が大きく異なる。しかし、震源深さ 40km では伝達関数の振幅比は両者の差異は少ない。これより、揺れを予測する対象地が震源に近い場合、伝達関数は震源のラディエーションパターンの影響を大きく受けるが、震源から遠い場合はその影響はほぼ無視できるといえる。これより、都市部の直下で起こるような震源の浅い地震に対しては、擬似経験的グリーン関数法の適用が現時点は難しいと考えられる。

3.3 重合平均方法の検討

シミュレーション波形による 2 地点間の伝達関数を用いて得られる推定地震動は、伝達関数を求める地点間の地盤モデルの精度に左右される。また、強震計の設置状況等により、どの地点の観測波形を用いて推定するかによっても結果は大きく異なる。それらの影響を考慮するためには、予測地点の近傍の複数の観測地点から推定される地震動を何らかの方法で平均化することが適切と考えられる。ここでは、3 地点の地震観測記録から任意地点の地震動を推定し、伝達関数を適用する 2 地点間の距離と平均化手法の影響について検討する。尚、推定地震動の平均化では、観測記録の刻時精度が重要であり、それらの確認と補正を行った上で推定に用いている。

図 8 に検討に用いる中小地震の震央及び観測地点を示す。検討は A4115E の地震動を推定し、これを観測記録と比較する。中小地震は 2004 年 9 月 8 日 23:58 に発生した地震（紀伊半島沖、Mj=6.5、深さ 36km）を用いる。図 9 に A4115E における観測記録を示す。ここでは、次の 3 種の平均化手法について検討する。

- 手法①：時間軸上で 3 地点からの推定波形の振幅を 2 地点間の距離の逆数で重み付き平均する方法
- 手法②：手法①による波形の位相は保持し、振幅は 3 地点からの推定波形のフーリエ振幅スペクトルの平均とする方法
- 手法③：3 地点からの推定波形の因数分解⁷⁾により得られる最小位相推移関数の平均 $F_M(\omega)$ と、手法①

の波形の全域通過関数 $F_A(\omega)$ の積を用いる方法
 図 10 に、3 地点からの推定波形を上記 3 手法により平均した波形、フーリエスペクトル、A4115E の観測記録とのコヒーレンスを A4115E との距離別に示す。これより、平均に用いる 3 地点の距離が近いほど観測記録との相関が高いことがわかる。

平均化手法に関しては、まず手法①は振幅スペクトルにおいて観測記録との対応が悪い。これは波形を重合平均する際に、位相ずれを生じた波同士が打ち消し合うためと考えられる。手法②及び手法③では、振幅特性は観測スペクトルとほぼ対応しているが、地震動の平均では振幅と位相それぞれの扱いが重要であり、スペクトルの因数分解に基づく手法③の方が理論的にも適切であると考えられる。

4 擬似経験的グリーン関数法の適用例

本節では名古屋市域において一辺 1km のグリッドを展開し、擬似経験的グリーン関数法による想定東南海地震の推定を行い、過去の被害⁸⁾や距離減衰式⁹⁾と比較することで、本手法の妥当性の検証を行った上で、想定東海・東南海地震の強震動予測を行う。尚、地震観測記録は刻時精度の確保されるものを用い、波形合成結果の表層地盤の非線形性は考慮しない。

図 11(a)に想定東南海地震の震源モデルを示す。波形合成には、表 2 に示す 2004 年 1 月 6 日の地震（熊野灘、

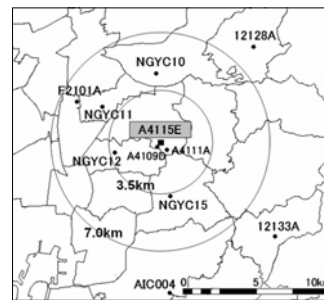


図 8 検討に用いた観測地点

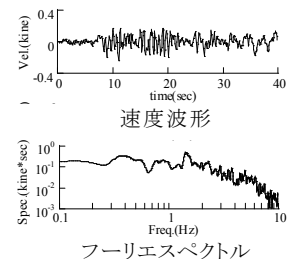


図 9 A4115E 地点の観測記録

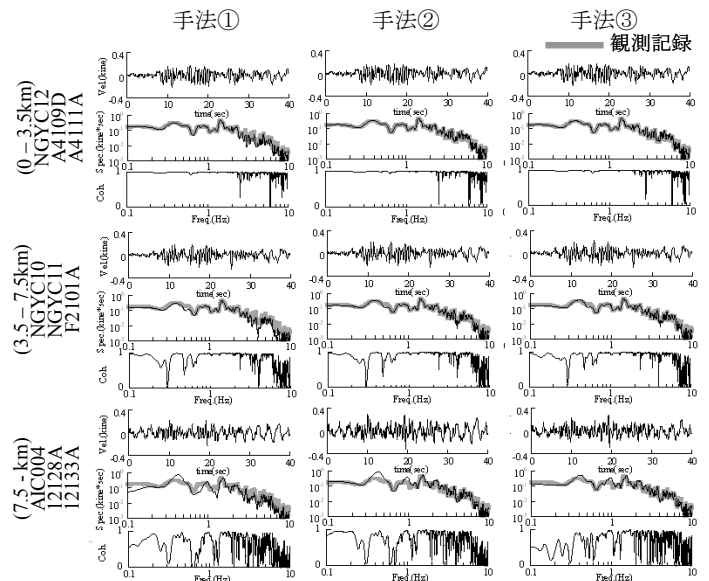


図 10 推定波形と観測記録の比較

Mj=5.4、深さ 37km、以下 EQ6) を用いる。

図 11(b)に本手法による予測結果の計測震度分布を示す。これは、(c)に示す 1944 年東南海地震の住家被害率分布⁸⁾と概ね対応する。また、(d)に示すとおり、Vs600(m/s)相当層における最大速度の距離減衰式⁹⁾との比較でも、震源距離の近い地域ではやや大きめの傾向を示すが、概ね対応している。

次いで、想定東海・東南海連動地震の強震動予測を行う。震源モデルは図 12(a)に示すとおり、2.2 節を踏まえ、中央防災会議によるモデルを元に、東側断層(想定東海地震)の要素断層を 10km に修正したモデルを用いる。ここでは背景領域を考慮せずアスペリティのみの予測を行う。波形合成には EQ 6 に加え、東側断層には表 2 に示す 2001 年 4 月 3 日の地震(静岡県中部、Mj=5.3、深さ 33km、以下 EQ5)を用いる。

図 12(b)と(c)に計測震度分布と最大速度分布を示す。これより、名古屋市南西の港湾部や南区及び緑区では、震度 6 強以上で、最大速度が 100kine を超える強い揺れとなることが分かる。図 12(b)を図 11(b)の想定東南海地震の計測震度分布と比較すると、両者に大きな差異がないことが確認できる。これは震源の破壊のディレクティブティ効果により、想定東南海地震の震源モデルのアスペリティが、名古屋市域の揺れに大きく寄与しているためと考えられる。

図 12(d)に、得られた波形に対する最大速度応答分布を示す。これより、周期による応答の違いが確認できる。1944 年当時に比べ、現代ではより広域に多様な固有周期を有する構造物が分布しているため、震災時には被害の拡大が懸念される。

5 結論

本論では既往の経験的グリーン関数法を用いて、震源

モデルが予測結果に与える影響を検討した。次いで擬似経験的グリーン関数法の高精度化に向けた検討を行った上で、本手法の適用例を示した。

東海・東南海地震を想定した中央防災会議モデル、三の丸モデル及び協議会モデルは、各モデルのアスペリティの応力降下量や要素断層の大きさの違いにより、長・短周期域で異なった傾向を示す。さらに、想定する断層の大きさに対し、設定する要素断層が小さい場合、予測結果を過小評価する可能性がある。

擬似経験的グリーン関数法に用いる伝達関数は地盤構造に大きく影響を受ける。複雑な地盤構造を有する地点間の場合、地盤モデルの精度が予測結果に大きく影響する。また、震源が建設地に極めて近い場合は、震源の放射特性の影響を受ける。そのため、震源の浅い直下型地震への適用は現時点では難しいが、震源距離が十分確保されれば、震源特性に関わらず適用できる。

伝達関数によって得られる地震記録のない地点での推定波形は、スペクトルの因数分解による手法により、周辺地点から平均して求めるのが理論的にも望ましい。

擬似経験的グリーン関数法による想定東南海地震の強震動予測結果は、1944 年東南海地震の被害調査結果と対応することから手法の妥当性が証明された。また、想定東海・東南海連動地震では、名古屋市南部や沿岸部は大きな揺れとなる予測結果を得た。

参考文献

- 1) 高橋:地域スケールに応じた表層地盤のモデリング及び強震動予測手法に関する研究、学位論文、2007.3
- 2) 壇ほか: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 第509号、49-60、1998.7
- 3) 中央防災会議:東海地震に関する専門調査会、東南海、南海地震等に関する専門調査会
- 4) 中田ほか:名古屋市三の丸地区における耐震改修用の地震動作成、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.529-530、2004
- 5) 愛知県設計入力地震動研究協議会「愛知県設計入力地震動の作成」2005 改訂版
- 6) 入倉:震源のモデル化と強震動予測、地震 第2輯、第46巻、495-512、1994
- 7) 和泉ほか:地震動の因数分解に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文集、第390号、27-33、1988.8
- 8) 飯田:昭和19年12月7日東南海地震の震害と震度分布、愛知県防災会議、1977
- 9) 司ほか:断層タイプ及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、No.523、63-70、1999.9

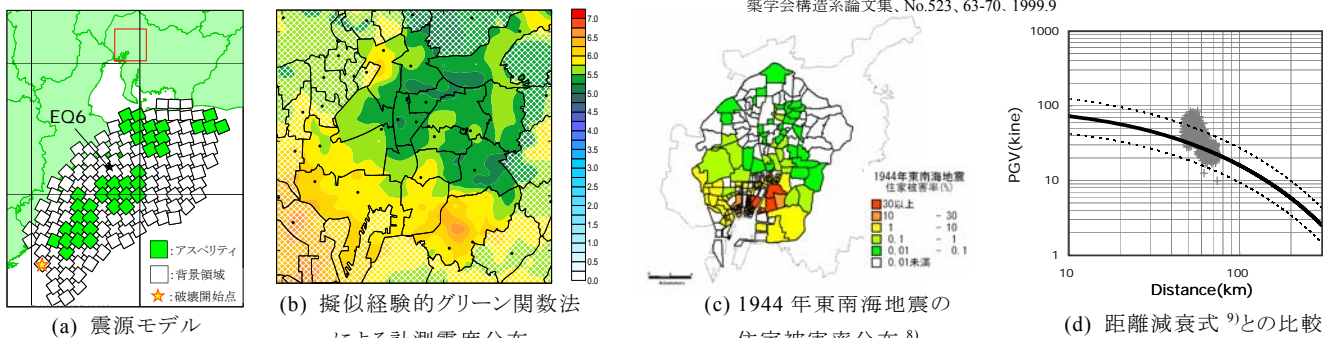


図 11 東南海地震による擬似経験的グリーン関数法の検証

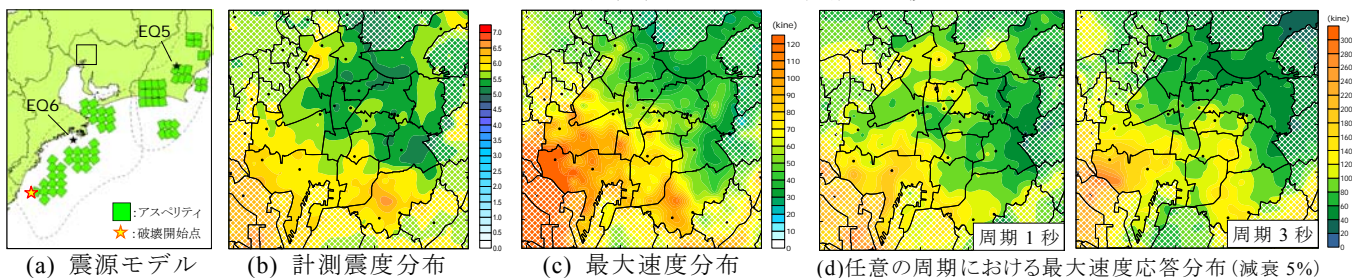


図 12 擬似経験的グリーン関数法による想定東海・東南海連動地震の強震動予測