

4. 地震動の予測

4.1 地震動予測手法

想定地震の断層モデルから、地盤モデルを介して地表の地震動の大きさを予測する流れを図4.1.1に示す。

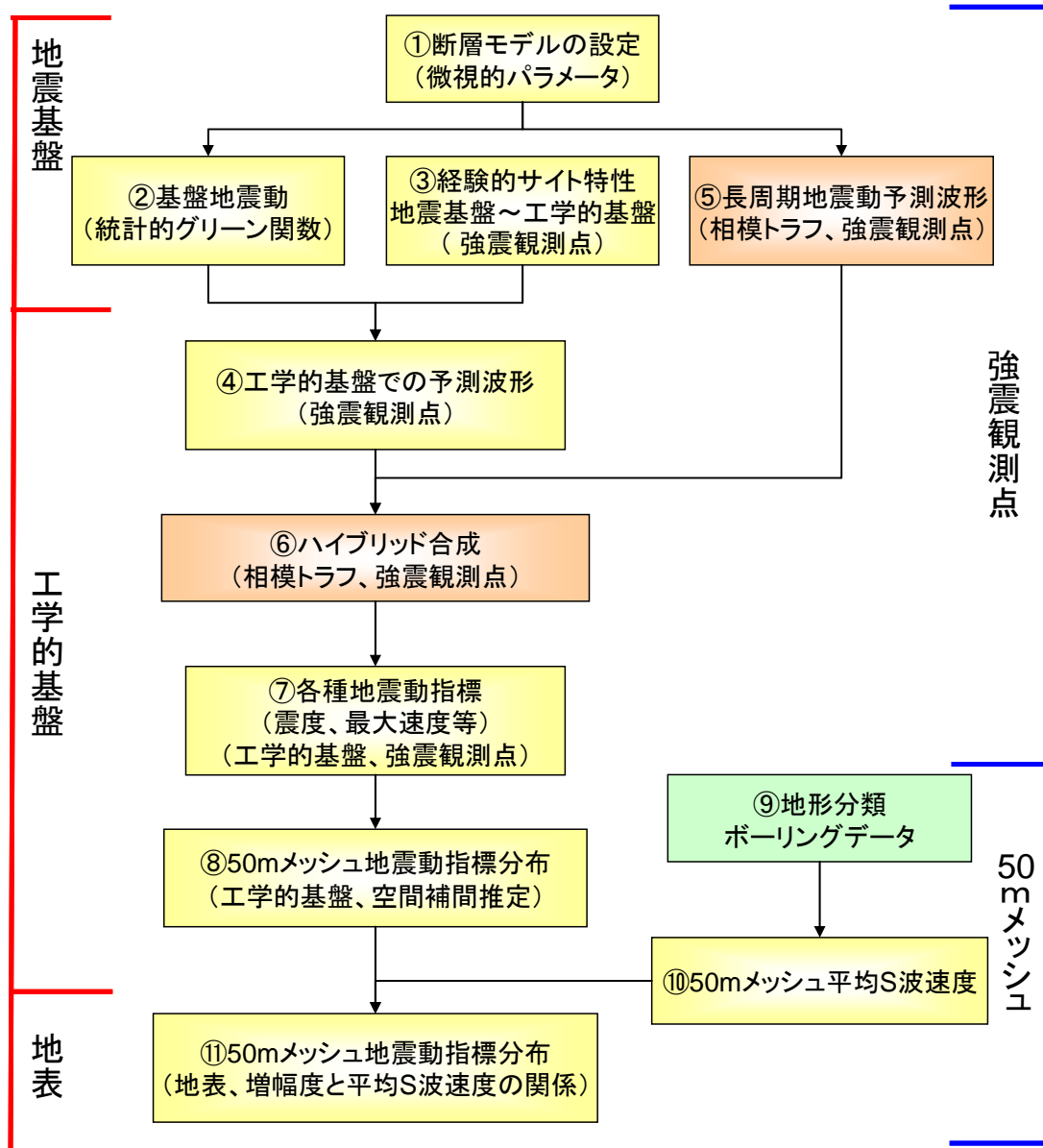


図4.1.1 地震動予測の流れ

図4.1.1の流れは次の通りである。

最初に、「①想定地震の断層モデル」を設定し、それに基づいて「②基盤地震動」を作成する。これは、深部の「地震基盤($V_s=3300\text{m/s}$ 相当)」での地震動であるため、強震観測記録から得られる「③経験的サイト特性」を用いて、「④工学的基盤($V_s=600\text{m/s}$ 相当)」での予測波形を算出する。

このとき、地震規模が大きく横浜市直下まで断層面が伸びる「元禄型関東地震」については、通常の構造物が影響を受ける短周期成分のみならず、超高層ビルに影響を与える長周期成分(2~3秒以上)も大きいと考えられるので、「⑤長周期地震動の予測」を行い、④工学基盤での予測波形に、ハイブリッド合成して、「⑥長周期成分を考慮した予測波形」にする。この予測波形から、液状化の発生や被害予測に直結する、「⑦震度や最大速度等、各種地震動指標」を算定する。

上記の①~⑦は、150箇所の強震観測点の地盤と地震データに基づいての値である。これを全市域に展開するため、各強震観測点までの距離を重みとして空間補間を行い、「⑧50mメッシュ毎の工学的基盤での各種地震動指標」を求める。

これらの値に、「⑨地形分類やボーリングデータ」による、「⑩50mメッシュ毎の表層地盤の平均S波速度」を基に増幅度を考慮して、「⑪50mメッシュ毎の地表面での地震動指標」を求める。

地震動は、式(4.1.1)に示すように、断層での地震動に、伝播経路と地盤増幅の特性を乗じることにより得られる(図4.1.2参照)。

$$S(f) = S_f(f) \times P(f) \times G_d(f) \times G_s(f) \quad (4.1.1)$$

$S(f)$: 地表の地震動

$S_f(f)$: 断層での地震動

$P(f)$: 伝播経路の特性

$G_d(f)$: 地震基盤~工学的基盤の深層地盤の増幅特性

$G_s(f)$: 工学的基盤~地表の浅層地盤の増幅特性

地震動予測手法の前回想定との比較を表4.1.1に示す。

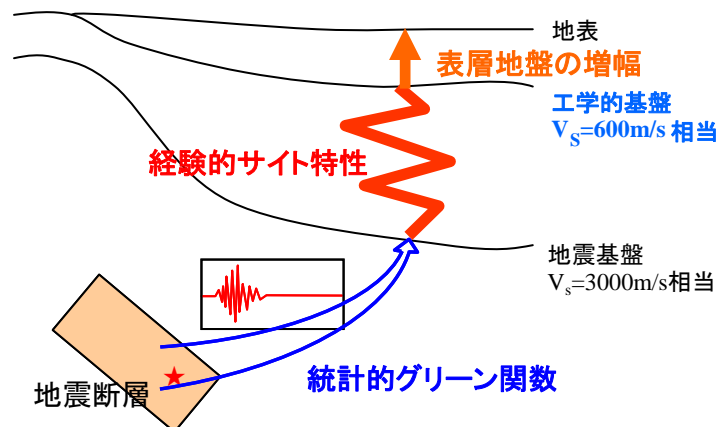


図4.1.2 地震動予測の流れの物理的なイメージ

表4.1.1 地震動予測手法の比較

項目	前回想定	今回想定
地震基盤上の地震動 ^{*1}	統計的グリーン関数法	統計的グリーン関数法
地震波の位相特性（波形の経時変化特性）	乱数	市内強震観測地点ごとに、震源域に近い地震での観測波形データを使用
深層地盤増幅 ^{*2}	一次元地盤モデルによる理論増幅スペクトル	市内強震観測地点ごとに観測データから算出した経験的増幅スペクトル
長周期地震動 ^{*3} （ハイブリッド法で合成）	差分法	ボクセル型有限要素法
工学的基盤上の地震動計算	市内強震観測地点	市内強震観測地点
工学的基盤上の50mメッシュでの地震動強さ（計測震度等）	READYでの受け持ちメッシュ	距離の重みによる補間
表層地盤による増幅度 ^{*4}	一次元地盤モデルの地震応答解析に基づく増幅スペクトル。速度応答スペクトルと地震動強さの関係から算出。 $A_{\max} = 0.32 \int_{0.12}^{2.4} \omega S_v(T) dT$ $V_{\max} = 0.27 \int_{0.12}^{2.4} S_v(T) dT$ $I_j = 2 \log\left(\int_{0.12}^{2.4} \omega S_v(T) dT\right) - 0.52$	深さ30mまでの平均S波速度と地震動強さとの相関関係

*1：地震基盤上の地震動：内閣府等で広く用いられる統計的グリーン関数法を、前回想定同様に用いた。ただし、小断層の位相特性は、乱数でなく、観測点での観測波形を用いて、深層地盤増幅と合わせて、地震観測点の特性を考慮した。

*2：深層地盤増幅：地震観測データを用いる方法は、地震観測点にしか適用できないながら、近年の強震観測記録をよく再現できている。本市は、約2km間隔という高密度で地震観測記録を蓄積しているため、強震観測点を対象に適用した。

*3：長周期地震動：複雑な地形をモデル化でき、かつ数百kmの大規模な地下構造についても有効なボクセル型有限要素法を用いた。

*4：表層地盤による増幅度：内閣府(2012)などで広く用いられている深さ30mまでの平均S波速度（以下、AVS30）を、地盤増幅の大きさを表す指標とする方法を用いた。

4.2 断層モデルの設定

4.2.1 断層モデルの設定方針

元禄型関東地震と東京湾北部地震の強震動予測のための断層モデルは、以下の方針に従って設定した。南海トラフ巨大地震は、内閣府(2012)のモデルを用いる。

- ①最新の知見に基づく断層モデルを採用する。
- ②地震学的に同一断層に起因すると考えられる地震は同一のモデルを用いる。
- ③地震規模や強震動生成域(アスペリティ)のすべり量などは、地震調査研究推進本部(2009)の強震動予測レシピ(「震源断層を特定した地震の強震動予測手法」)に従って設定する。

なお、震源モデルの設定は多くの仮定に基づいており、4.4で示す震度も、誤差やバラツキを伴うことに留意する必要がある。

強震動予測レシピは、断層パラメータの設定手順を記したものであり、プレート境界地震とプレート内地震(地殻内の活断層で発生する地震)とで、手順や用いる関係式が異なっている。以下、対象地震が該当するプレート境界地震の断層パラメータの設定の要点を示す。

プレート境界地震の地震規模算出の手順を図4.2.1に示す。断層面積と平均応力降下量から地震規模が定まる。平均応力降下量は、入倉¹による強震動予測レシピにおいて平均的な値として3MPaが示されていること、中央防災会議(2005)で想定した東京湾北部地震や地震調査研究推進本部(2001)で想定していた南海トラフの地震でも3MPaを採用していることから、この値を適用した。

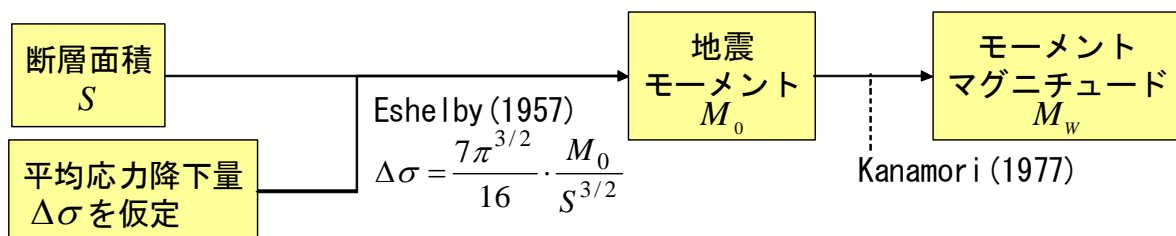


図4.2.1 強震動予測レシピにおけるプレート境界地震の地震規模設定手順

¹ 入倉孝次郎: 強震動予測レシピ、日本地震工学会、関西地震観測研究協議会主催セミナー「強震動予測レシピ—新潟県中越沖地震や能登半島地震などに学ぶ—」、

http://www.kojiro-irikura.jp/pdf/kyoushindouyosoku_recipe.pdf、2008年

4.2.2 想定地震の震源モデルの設定

(1) 元禄型関東地震 (M8.1)

- 断層面形状：相模トラフ部分と房総半島沖部分の2面で考える。相模トラフ側は大正型関東地震と同じと考え、神奈川県(2009)と同様に既往研究成果 (Sato et al. (2005)¹) に基づき設定した(図4.2.2参照)。房総側は、佐竹・宍倉ら(2008)²でのモデルの房総半島沖部分に基づき設定した。深さについては、文部科学省の「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」(平成14~18年度)や「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」による知見、すなわちフィリピン海プレート上面が従来考えられていたより浅いということを反映した。上端深さ4km、傾斜角16度とした(図4.2.3参照)。
- 震源パラメータ：地震調査研究推進本部(2009)の「強震動予測レシピ」に従い設定した。なお、相模トラフの断層面、房総半島沖の断層面、それぞれで設定するセグメントモデルを適用した。
- 強震動生成域：既往研究成果¹に基づきつつ、房総半島沖を加えた。
- 破壊開始点：既往研究成果¹に基づく。

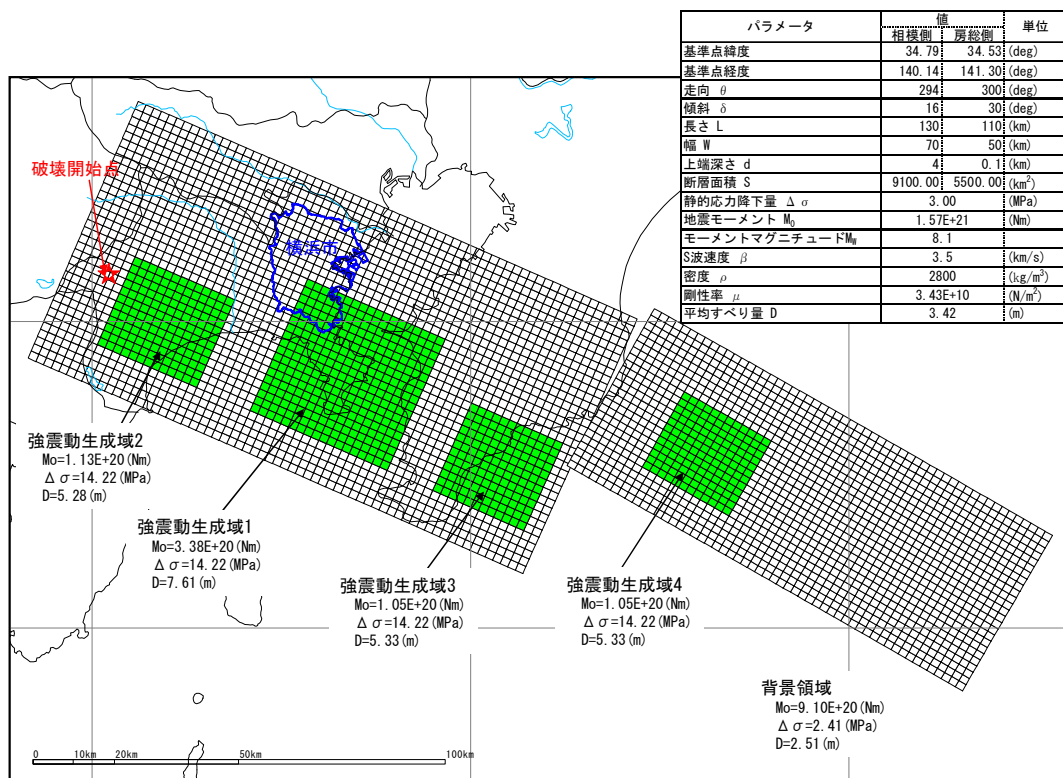


図4.2.2 元禄型関東地震の震源モデル

¹ Hiroshi Sato, Naoshi Hirata, Kazuki Koketsu, David Okaya, Susumu Abe, Reiji Kobayashi, Makoto Matsubara, Takaya Iwasaki, Tanio Ito, Takeshi Ikawa, Taku Kawanaka, Keiji Kasahara and Steven Harder: Earthquake Source Fault Beneath Tokyo, Science, Vol.309 no.5733, pp.462-464, 2005年

² 佐竹健治・宍倉正展・行谷佑一・藤良太郎・竹内仁：元禄関東地震の断層モデルと外房における津波、歴史地震、第23号、pp.81-90、2008年

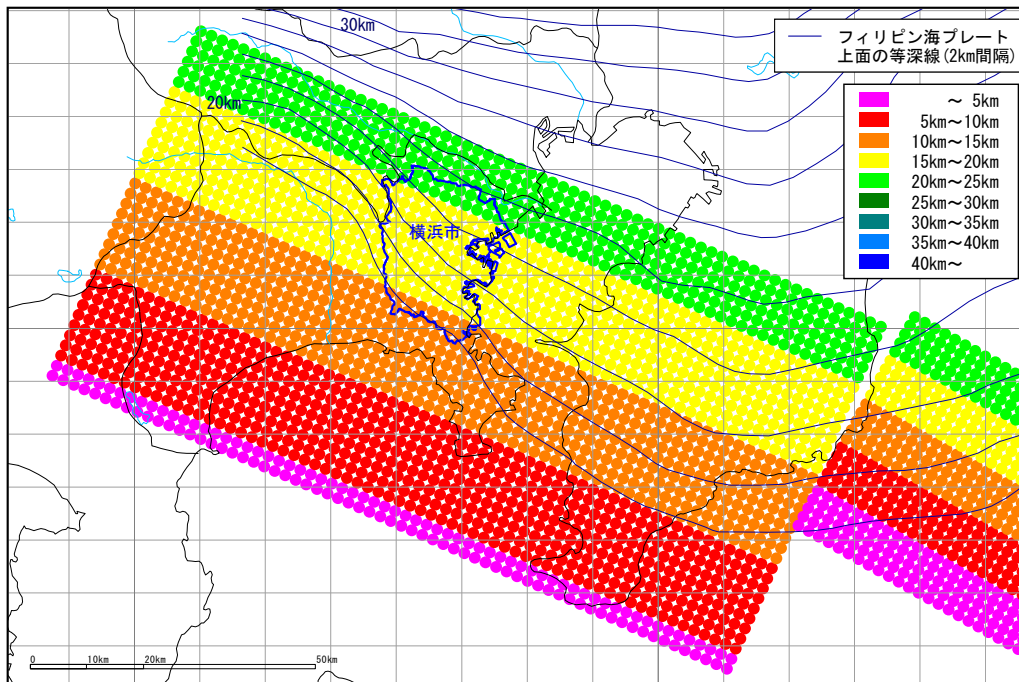


図4.2.3 要素断層の深さとフィリピン海プレート上面深さ

【用語説明：セグメントモデルと全域モデル】

複数の断層面（セグメント）が連動する場合、「強震動予測レシピ」のスケーリング則を、全域に対して適用する「全域モデル」と、個々のセグメントに対して適用する「セグメントモデル」（カスケードモデルとも呼ばれる）の2通りの考え方がある。全域モデルでは、複数の断層を一つの地震と考えるので、破壊区間の広がりに応じてすべり量が増加する。セグメントモデルでは、個々の断層の地震が連動することにより規模の大きな地震になると考える（個々の断層のすべり量は増加しない）。

1703年元禄関東地震での詳細な震度分布は不明であるが、横浜市付近では、1923年関東地震と同様の震度分布であったと考えられることから、試算の結果、震度分布が整合したセグメントモデルを適用した。これにより、元禄型関東地震の地震規模はM8.1となる。

(2) 東京湾北部地震 (M7.3)

- 断層面形状：要素断層の緯度経度やパラメータ、強震動生成域（アスペリティ）の設定は中央防災会議「首都直下地震対策専門調査会」（2005）での設定を採用（図4.2.4参照）。深さについては、(1)で記したようにフィリピン海プレート上面の形状を反映し、中央防災会議のモデルと比べて1.1~16.7km、平均では9.7km浅く設定した。
- 震源パラメータ：中央防災会議「首都直下地震対策専門調査会」による。
- 強震動生成域（アスペリティ）： 同上
- 破壊開始点： 同上

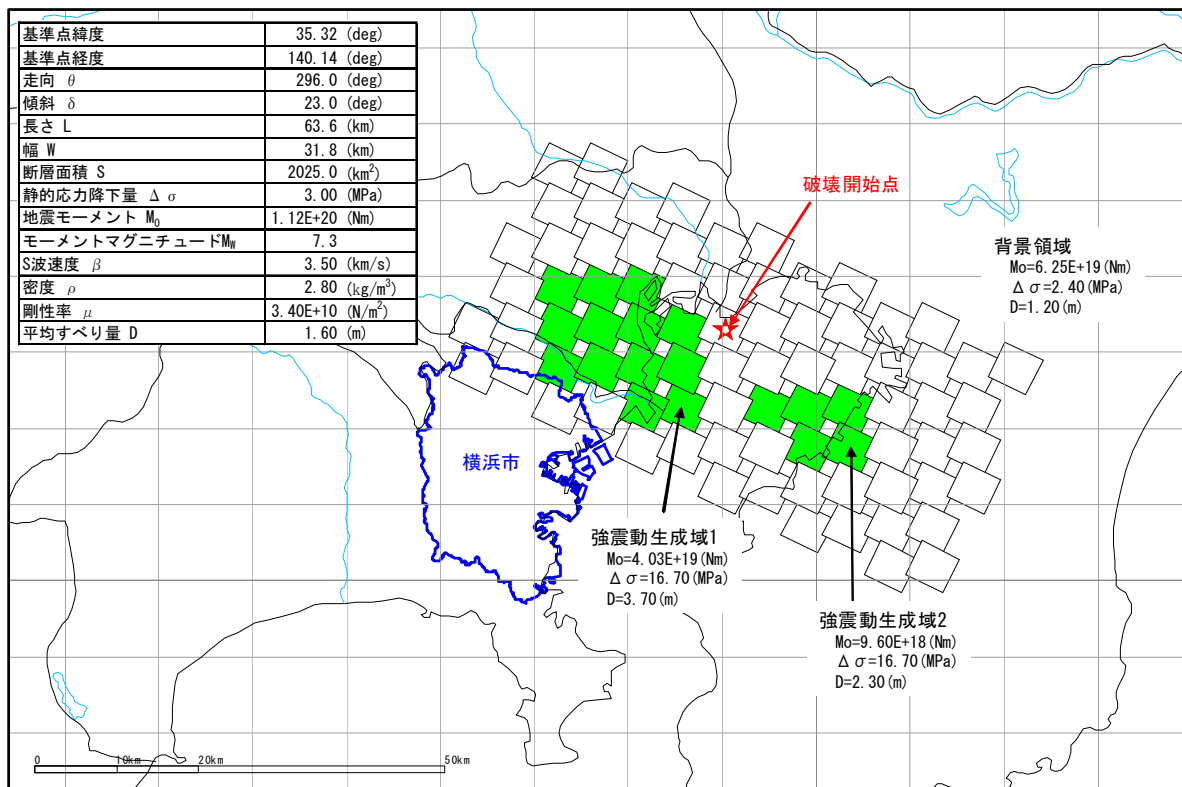


図4.2.4 東京湾北部地震の震源モデル

(3) 南海トラフ巨大地震 (M9.0)

内閣府「南海トラフの巨大地震モデル検討会」(2012)の想定では、図4.2.5に示すように設定されている。本調査でも、これを用いた。

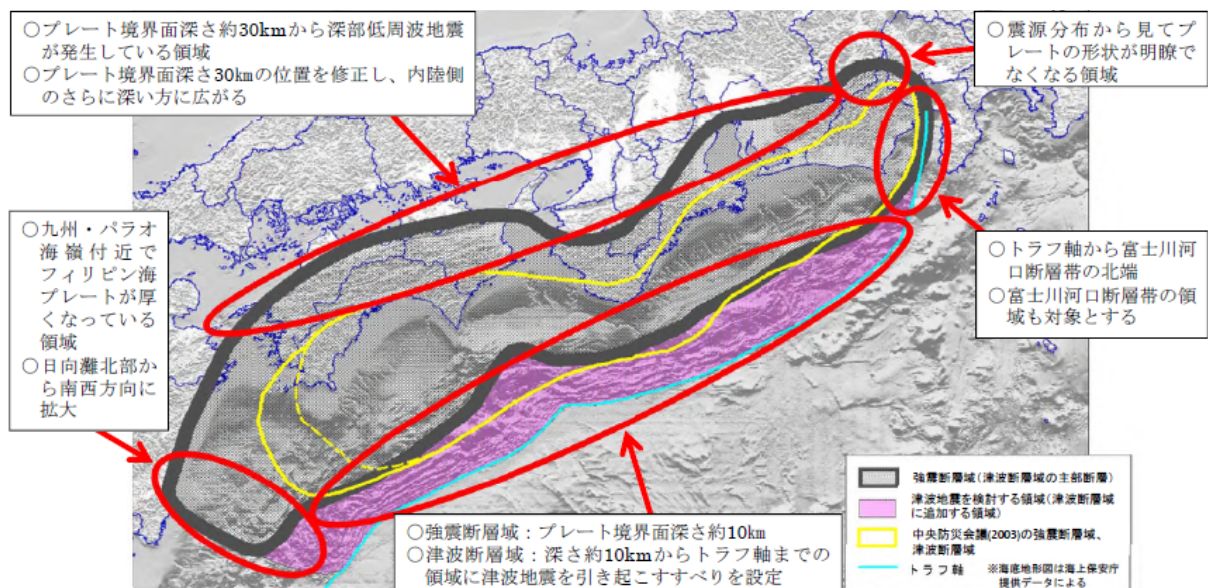


図4.2.5 南海トラフ巨大地震の震源域

4.3 表層地盤の増幅度

4.3.1 50mメッシュ平均S波速度モデルの構築

50mメッシュAVS30の算出手順を図4.3.1に示す。

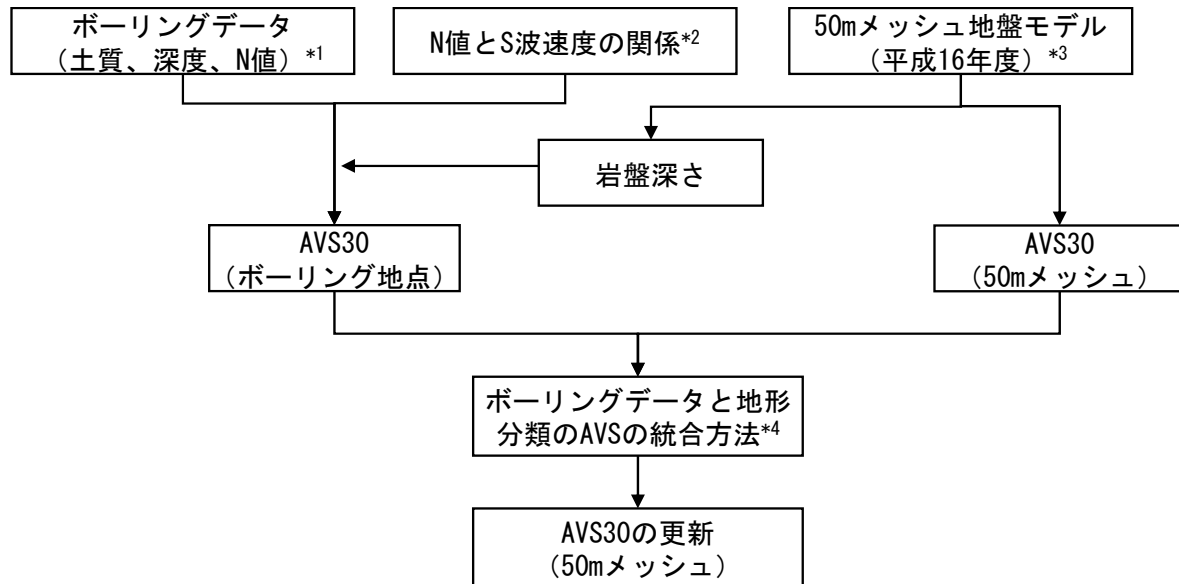


図4.3.1 50mメッシュのAVS30の算出手順

*1：ボーリングデータを活用（約2万点）

*2：N値とS波速度の関係として、市内150点のPS検層データを用いた手法（田村・山崎（2002）¹⁾）を適用

*3：岩盤深度と地形分類に応じた特性を反映させるため、前回想定での50mメッシュ地盤モデルを活用（本市では $V_s=700\text{m/s}$ 程度の泥岩または土丹の出現深さが30mより浅い箇所が多い）

*4：両者によるAVS30を統合する手法²⁾を適用

この手順により得られた50mメッシュのAVS30の分布を図4.3.2に示す。AVS30が小さい箇所（赤系の色で示した箇所）が、地盤が軟らかく揺れやすいところである。そのような場所は、鶴見川流域、横浜駅～今井川沿い、関内～大岡川沿い、等で見られる。

¹⁾田村勇・山崎文雄：K-NETと横浜市強震計ネットワークの地盤調査データに基づくS波速度推定式、土木学会論文集 No. 696/I-58、pp. 237-248、2002年

²⁾末富岩雄ら：地形分類とボーリングデータの統合処理による地盤増幅度評価と2004年新潟県中越地震における地震動分布の推定、日本地震工学会論文集、第7巻、第3号、pp. 1-12、2007年

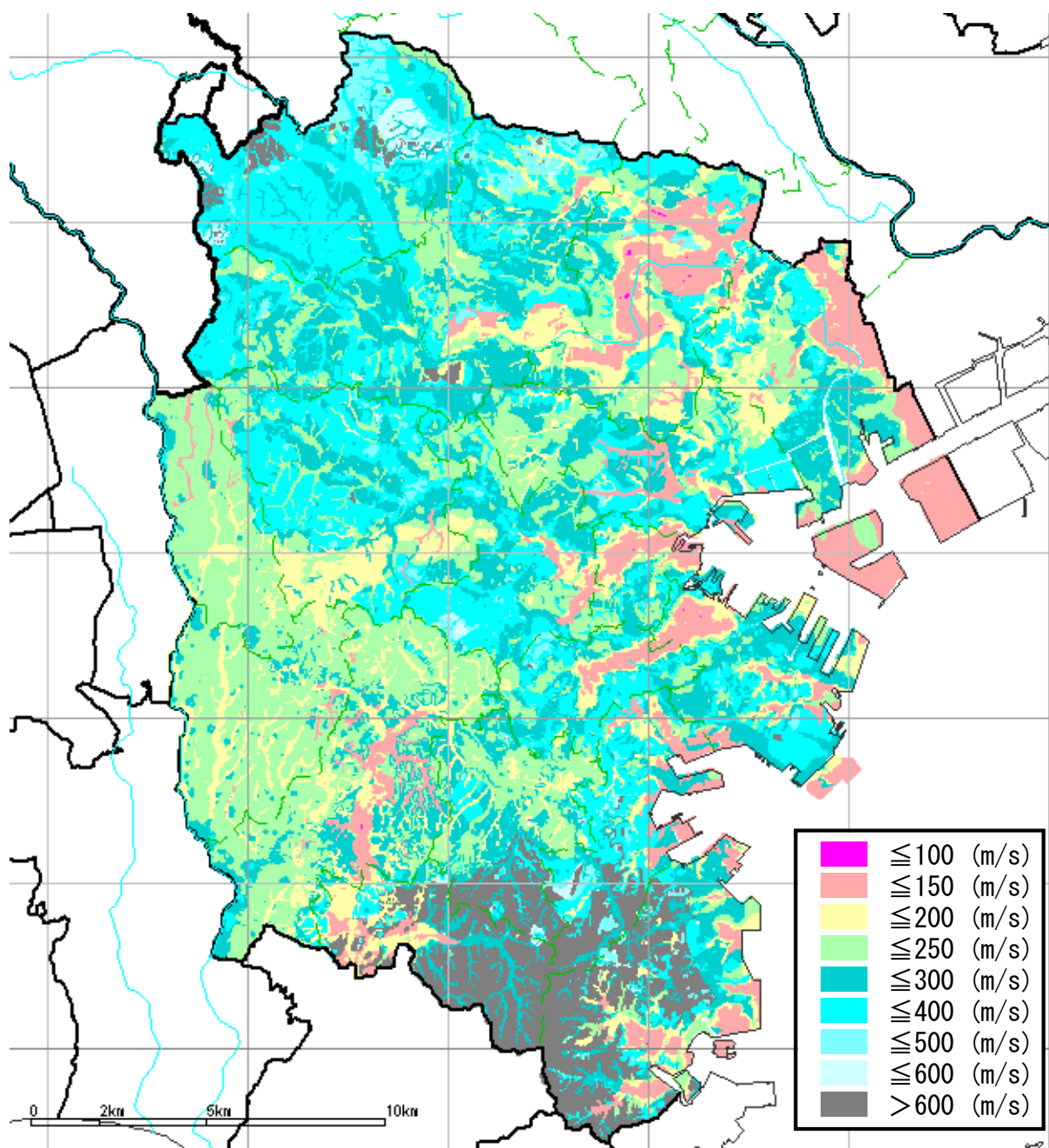


図 4.3.2 深さ 30m までの平均 S 波速度 (AVS30) の分布

4.3.2 地震動指標の増幅度モデルの設定

50mメッシュの各点について、工学的基盤上の地震動指標値に、表層地盤による増幅度を乗じることで、50mメッシュの地震動指標分布が得られる。3つの地震動指標について、平均S波速度と増幅度の関係を表4.3.1に示すように用いる。表層地盤の増幅では、強震時における地盤の非線形化の影響が重要となる。最大速度については、その影響は小さいとされている。SI値についても、同様である。計測震度については影響が大きいので、非線形性を考慮したモデルとしている。

他に、最大加速度もしばしば用いられる指標である。しかしながら、非線形化の影響を強く受けること、5Hz以上の高振動数成分の影響を強く受け、この成分は空間的変動が大きいことなどから、最大加速度の予測幅は大きいものとなる。そのため、単一の値として示すことは困難であることから、予測対象としないこととした。

表4.3.1 最大値指標と増幅度モデル

	平均S波速度と増幅度の関係	備考
最大速度	翠川・松岡・作川(1994) ¹ $\log_{10} \lambda_{PGV} = 1.83 - 0.66 \log_{10} (AVS30)$	自治体の揺れやすさマップや、地震調査研究推進本部の地震動予測地図など広く用いられている。その後の研究事例でも同程度の係数が得られている。
計測震度	横田ら(2005) ² ：係数は表4.3.2 $\lambda_{IJ} = a - b \cdot \log_{10} AVS30$	中央防災会議で用いられており、非線形化の影響を考慮している
SI値	—	最大速度から童・山崎ら(1994) ³ の関係をを用いて算出 $SI = 1.18 \cdot PGV$

表4.3.2 横田ら²の関係における係数a, b

基盤震度	a	b
3.0~3.9	2.943	1.034
4.0~4.4	2.916	1.026
4.5~4.9	2.888	1.015
5.0~5.4	2.715	0.954
5.5~5.9	2.494	0.876
6.0~6.4	2.434	0.855

¹ 翠川三郎・松岡昌志・作川孝一：1987年千葉県東方沖地震の最大加速度、最大速度にみられる地盤特性の評価、日本建築学会構造系論文集、第442号、pp.71-78、1994年

² 横田崇・稲垣賢亮・増田徹：数値実験による地盤特性と増幅率の関係、日本地震学会講演予稿集(2005年度秋季大会)、p.86、B064、2005年

³ 童華南・山崎文雄・佐々木裕明・松本省吾：被害事例に基づく地震動強さと家屋被害率の関係、第9回日本地震工学シンポジウム、pp.2299-2304、1994年

4.4 地震動分布予測結果

予測した地表面震度分布を図4.4.1に示す。

元禄型関東地震で震度7となっている大岡川流域、帷子川流域は、1923年関東地震の際も大きな被害があったところである(図(b)：高濱・翠川(2003)¹より)。他に埋立地でも震度7となっている。埋立地は1923年の震災以降の造成であるので、当時とは比較できないが、揺れやすいところである。

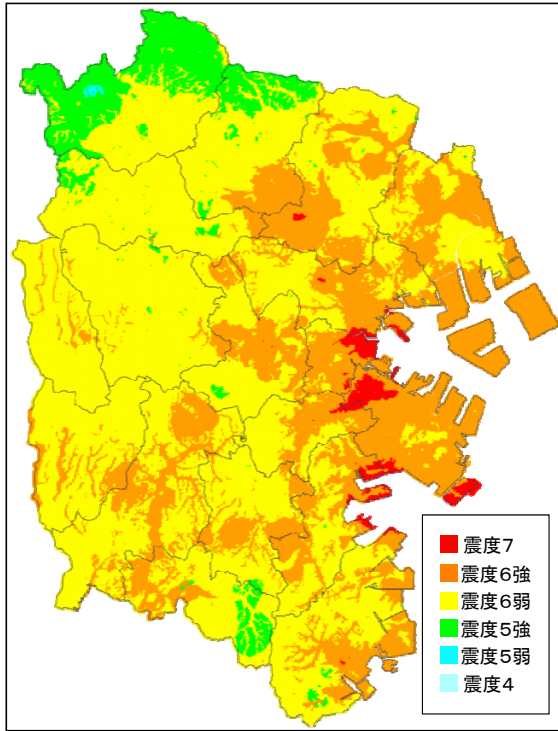
前回想定と比較すると、金沢区など市南部に震度7が見られていたのに対し、中区・西区の中心部に震度7が見られる、また鶴見区など北部の震度が今回の方が大きい、など分布が異なっている。表4.3.1に示した増幅度モデルによる方法(AVS30が小さいほど揺れが大きく、大きいほど揺れが小さくなる)を用いたことが大きな要因である。また、金沢区から栄区の地域、青葉区北部のほぼ岩盤が露頭しているところでの揺れが小さい。前回想定の方法でも、S波速度が小さいほど大きく揺れる傾向となるが、今回の方法はより明瞭に差が現れる。さらに、プレート境界が浅くなったことで南北での断層面との距離の差が相対的に小さくなったことも要因である。また、観測点データによる深部地盤の増幅を用いたことで、南部で地震基盤がやや浅い影響が反映され、深部の増幅も小さくなったものと考えられる。

東京湾北部地震では、震源が浅くなったので、その条件が異なる中央防災会議(2005)で想定した揺れと比較すると、中心部から北側では大きくなっている。南部で小さくなるのは、上述の元禄型関東地震について述べた理由による。

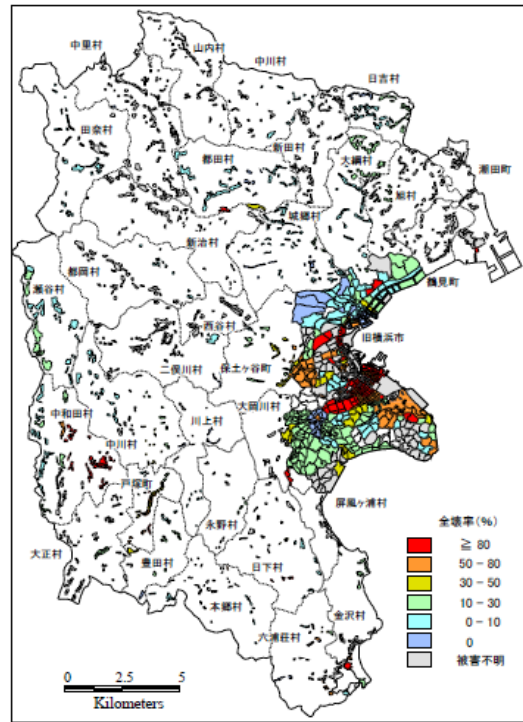
南海トラフ巨大地震については、元禄型関東地震、東京湾北部地震に適用した前述の方法と異なり、経験的手法²を用いた。内閣府(2012)の想定で、経験的手法による値が最も大きいことによる。内閣府(2012)の想定と同程度の震度となるように、経験的手法の適用条件を合わせて工学的基盤上の震度を算出し、表層地盤の増幅は前節で示した横浜市50mメッシュAVS30データを用いている。内閣府(2012)の想定で一部震度6弱の箇所があり、図(d)と概ね整合しているため、これを被害想定に用いる。東日本大震災の際、市内では中区、神奈川区、西区、港北区で震度5強を観測したが、多くは震度5弱または震度4であった。南海トラフ巨大地震で予測される震度は、これを上回るものとなるので、被害も上回るものと想定される。

¹高浜勉・翠川三郎：1923年関東地震による横浜市での木造家屋の被害分布 その2 横浜市南西部での調査結果と地盤条件との関係、第27回土木学会地震工学論文集、2003年

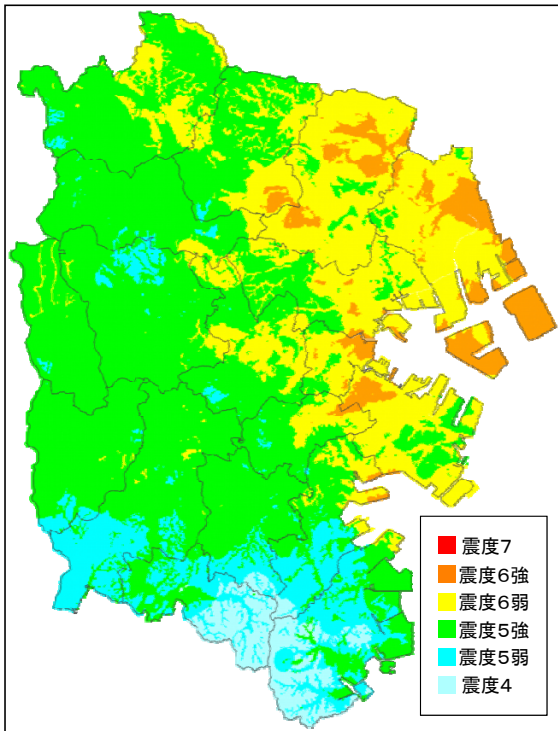
²司宏俊・翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、第523号、pp.63-70、1999年



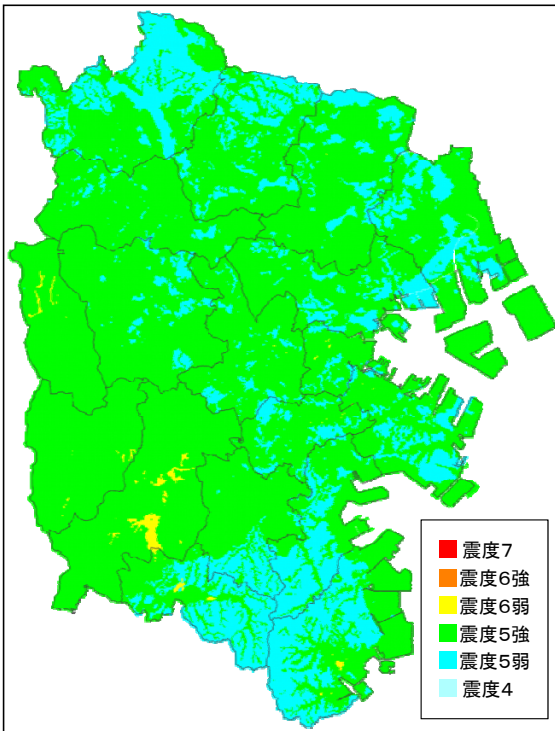
(a) 元禄型関東地震



(b) 1923年関東地震の被害分布



(c) 東京湾北部地震



(d) 南海トラフ巨大地震

図4.4.1 想定地震における震度分布予測

4.5 長周期地震動の検討

超高層ビルや長大橋梁、大型タンクなどは地震動の長周期成分の影響を強く受ける。そのため、地下数km～数十kmの深部の構造の影響で生じる「長周期地震動」を別途算定して、前節で得られる地震動に合成した。

合成の対象とする地震は、選定した想定地震の中で最も近くでマグニチュードが大きく、かつ断層面が大きく、継続時間も長くなり、長周期成分が多くなると考えられる地震である元禄型関東地震とした。

4.5.1 地下構造モデル

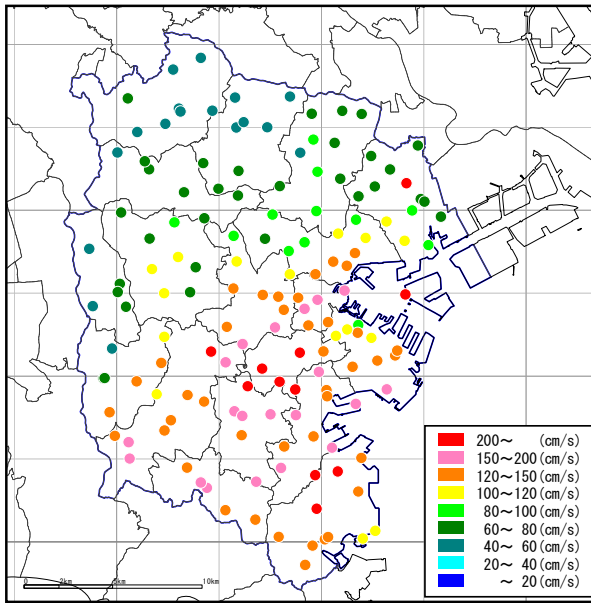
地下構造モデルは、以下のデータを組み合わせて作成した。

- ・横浜市周辺：
平成10～13年度に実施した「横浜市地下構造調査」
- ・マントルより深い部分（南関東広域）：
地震調査研究推進本部「長周期地震動予測地図」2009年版の地下構造モデル
- ・マントルより浅い地殻部分（南関東広域）：
地震調査研究推進本部「全国地震動予測地図」で用いられている深部地盤モデル
(防災科学技術研究所「地震ハザードステーション J-SHIS」で公開)

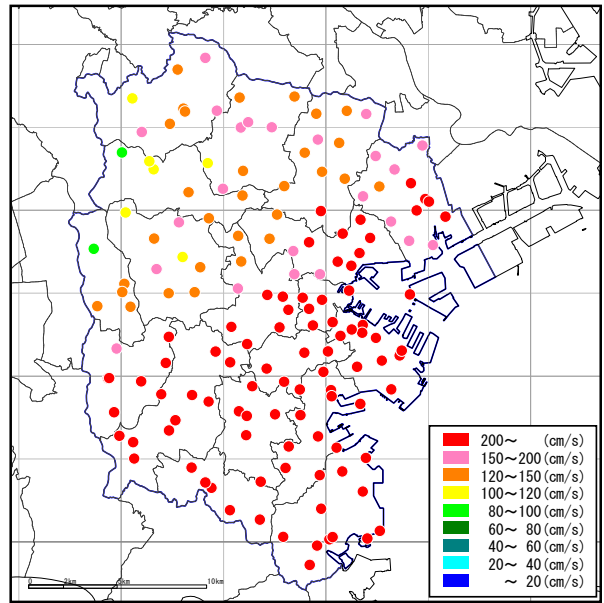
4.5.2 長周期地震動の予測結果

元禄型関東地震について、横浜市強震観測点(150地点)での工学的基盤の長周期地震動予測を行った。図4.5.1に例として、固有周期3、5、7、9秒における最大速度応答（減衰5%）の分布を示す。200cm/sを上回る大きな揺れが、広い範囲で見られると予測される。

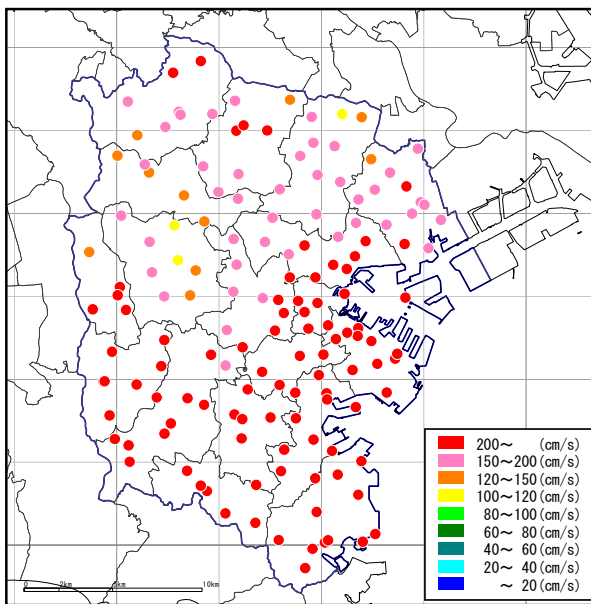
2011年東北地方太平洋沖地震の際に首都圏で観測された地震動では、長周期での速度応答は50cm/s程度であった。過去の観測事例としては、2003年十勝沖地震の際に、K-NET 苫小牧で130cm/s程度の速度応答となる揺れが観測されている。予測結果は、これらを大きく上回るものである。



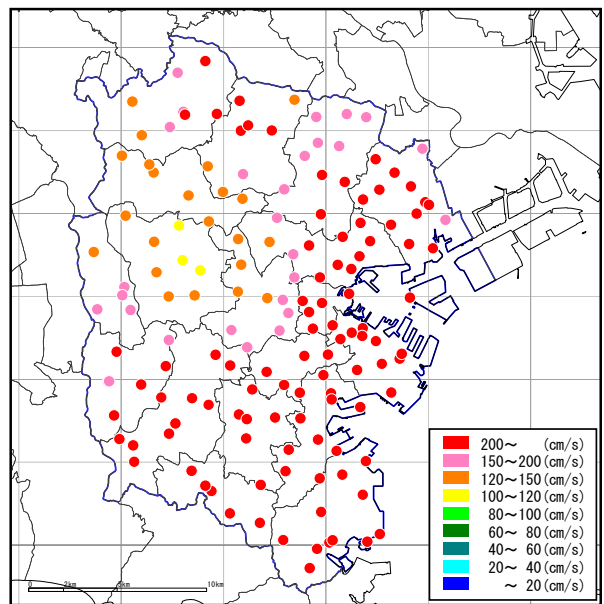
(a) 周期 3 秒



(b) 周期 5 秒



(c) 周期 7 秒



(d) 周期 9 秒

図4.5.1 最大速度応答の分布