

第4章 地震動の予測

4.1 概要

地震動の予測は、第2章で整理した4地震のうち以下の3地震について行った。

- 1) 千葉県北西部直下地震：南関東地域で発生する可能性の高いM7クラスの地震（首都直下地震）のうち、人口が集中し被害が大きくなると想定され、防災・減災対策の主眼に置く県北西部の地震である。被害量の算出、シナリオの作成などを行った。
- 2) 大正型関東地震：当面発生する可能性は低いが、今後百年先頃には発生の確率が高くなっていると考えられ、長期的視野に立った対策の対象とする地震で、地震動、液状化危険度などを算出した。
- 3) 防災リスク対策用地震：近い将来における地域の防災リスクを考える上で、最も大きい揺れの震源として、県域直下のプレート内でM7クラスの地震及び地殻内のMw6.8の地震を想定した（内閣府2013の防災対策用地震と同じ）。これらの震度と1)の震度をメッシュ毎に比較して、その最大震度を「短・中期防災リスク対策用震度」とした。

さらに、1)～3)の3地震による250mメッシュ毎の最大震度を算出し、これを「長期防災リスク対策用震度」とした。

これらはある特定の震源を想定した地震であるが、これ以外に、特定の震源を想定せず、地域毎の相対的な地盤の「揺れやすさ」を比較することを目的とした地盤の揺れやすさマップを作成した。表4-1に、各想定地震の地震動予測手法を整理して示した。

表4-1 各想定地震の地震動予測手法

	千葉県北西部直下地震	大正型関東地震	防災リスク対策用地震	揺れやすさマップ
地震動の評価	地震動波形 (計測震度)		計測震度	SI値を用いた地盤の増幅度
工学的基盤地震動予測手法	統計的グリーン関数法と三次元差分法のハイブリッド法		距離減衰式	複数の既存の観測波形
地表地震動予測手法	一次元等価線形法		表層地盤の平均S波速度から求めた増幅率	一次元等価線形法
計測震度等の算出方法	地震波形から直接算出		距離減衰式による最大速度から計測震度に変換	地震波形から直接算出
出力	地震動波形、スペクトル、計測震度、最大速度、最大加速度、SI値		計測震度	地盤の増幅度

4.2 千葉県北西部直下地震及び大正型関東地震の予測

千葉県北西部直下地震及び大正型関東地震については、構造物の防災・減災対策として地震波形やスペクトル等を算出するとともに、高層建築物やコンビナートといった施設も視野に入れ、長周期及び短周期の両地震動を考慮することとした。まず深部地盤を対象として、短周期地震動予測については**統計的グリーン関数法***で、長周期地震動予測は**三次元差分法***で計算し、両者をハイブリッドした波形を作成することにより、工学的基盤の地震動を求めた。

このハイブリッド波形を入力地震動として浅部地盤について 250m メッシュ毎に一次元等価線形法による応答計算を行うことにより、地表の地震動を求めた。地震動予測の概念図を図 4-1 に示した。

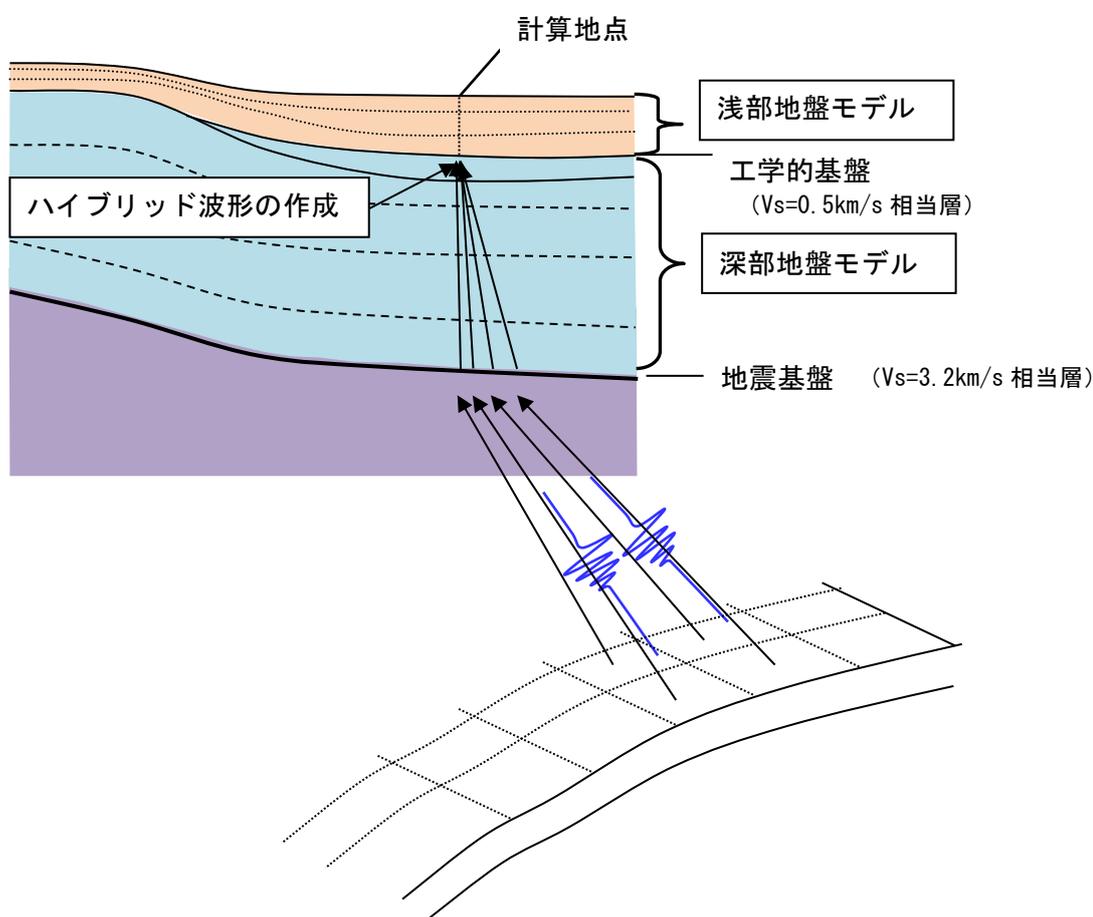


図 4-1 強震波形計算の概念（内閣府 2013 を一部修正）

***統計的グリーン関数法：**震源から放射される地震波は、震源断層をいくつかに分割した小断層から放射される地震波を足し合わせたものであると考えることができる（図 4-1 参照）。小断層による小地震は大地震よりも多く発生するため、このような小地震の観測記録（経験的グリーン関数）から大地震の波形を合成することができて、経験的グリーン関数法と呼ばれる。観測記録の代わりに小地震の波形を計算により求めて大地震の波形を合成する手法が、統計的グリーン関数法である。

***三次元差分法：**地盤を三次元方向の格子点に分割し、格子点における地震動の大きさを逐次方程式を解いていくことにより計算する手法。長周期地震動の予測に多く用いられているが、多大な計算機容量及び計算時間を要する。

4.2.1 計算手法

(1) 三次元差分法による長周期地震動予測

三次元差分法計算に用いる断層モデル及び深部地盤モデルは、統計的グリーン関数法と共通とした。計算の対象周期は 0.75 秒以上とした。

(2) 統計的グリーン関数法による工学的基盤における地震動計算方法

工学的基盤面における短周期側の地震動の計算には統計的グリーン関数法を用いた。統計的グリーン関数法では、震源断層を小さな要素断層に分割し、要素断層毎に地震波形（要素波形*）を作成し、それらの波形を合成することにより地震波形を作成した。

(3) ハイブリッド法による工学的基盤波計算方法

三次元差分法及び統計的グリーン関数法により計算された波形を、マッチングフィルター（図 4-2）を介し接合し、工学的基盤波形を計算した。各計算方法による波形のスペクトルがスムーズに接合されるよう、周期 2 秒で接合を行うこととした。

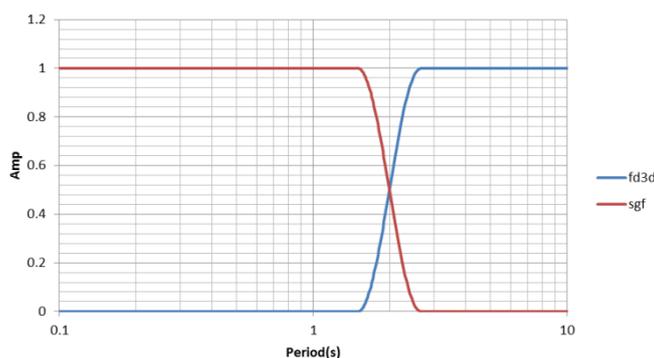


図 4-2 マッチングフィルター

(4) 地表における地震動計算方法

地表における地震動の計算方法については、千葉県（2008）、千葉県（2012a）²⁶と同様に、工学的基盤で算出された地震動波形を用いて、浅部地盤モデルにおける一次元の地震応答解析を行い、その結果得られた加速度波形から計測震度、最大加速度値、最大速度値、SI 値等の指標を算出した。

地震応答解析は、地盤の非線形性を考慮する必要があるため、一次元の等価線形法を用いた。ただし、通常の等価線形計算では、高周波数での地震動の減衰が大きくなりすぎるため、有効ひずみの周波数依存性を考慮した等価線形計算を行った。解析コードとしては、吉田・末富(1996)²⁷による DYNEQ を用いた。

*要素波形：震源から放射される地震波は、震源断層をいくつかに分けた小断層から放射される地震波を足し合わせたものであると考えることができる（図 4-1 参照）。この小断層のことを要素断層、要素断層から放射される地震波の波形を要素波形という。

4.2.2 計算結果

(1) 千葉県北西部直下地震の計算結果

千葉県北西部直下地震の地震動については、ハイブリッド法により求め、図 4-3 に地表震度分布を、図 4-4 に地表の SI 値、最大速度、最大加速度の分布をそれぞれ示した。

地震動予測結果では、震源に近い千葉県北西部の千葉市、習志野市、船橋市、市川市などで震度 6 強の地域が広がり、県北西部全体に震度 6 弱の地域が広がる。その面積は、震度 6 強が 4.2%、震度 6 弱が 38.6%、震度 5 強が 47.2%となる。浦安市などの東京湾岸部の沖積層の厚い地域では、地表震度、地表最大加速度はあまり大きくならない傾向が見られる。これは、地盤の**非線形化***により、短周期成分が地表まで伝わりにくくなった影響と考えられる。

(2) 大正型関東地震の地震動予測結果

大正型関東地震の地震動については、ハイブリッド法により求め、図 4-5 に地表震度分布を、図 4-7 に地表の SI 値、最大速度、最大加速度の分布をそれぞれ示した。

大正型関東地震の地表震度は、SMGA 直上の館山市、鴨川市、君津市、富津市、南房総市、鋸南町の一部地域で震度 7 となり、震源に近い県南部（市原市から御宿町を結んだラインの南側）では震度 6 強以上の地域が広がる。震源からの距離に応じた形で、県北部では、震度は小さくなり、表層地盤の違いによる揺れ方の違いがより大きく表れる。

住家全潰率から集落単位で震度階を求めた大正型関東地震の震度分布を図 4-6 に示した（諸井・武村 2002²⁸）。図 4-6 から市区町村別の最大震度を読み取ると、震度 7 となるのが館山市、南房総市、富津市、市原市である。また、震度 6 強となるのが鴨川市、鋸南町、木更津市、富津市である。今回の計算結果（図 4-5）と震度 7 となる領域、震度 6 以上となる領域などの比較や、県北西部北東部で震度 5 弱が広範囲で見られる点など、両者は概ね良く一致しているといえる。

また、長周期地震動に関する指標として、図 4-8 に工学的基盤における周期 0.2 秒～20 秒までの代表的な周期ごとの**疑似速度応答分布***（減衰定数 $h=5\%$ ）を示した。周期 5～10 秒程度で、東京湾岸の市原市付近を中心として 400 cm/s 近くの大きな応答となることが分かる。

***非線形化**：一般的には、浅部地盤によって地震動の大きさは増幅されることから、工学的基盤への入力地震動が大きくなるほど地表で観測される地震動は大きくなると考えられる。しかし、入力地震動がある程度大きくなると、揺れにより地盤の性質が変化し、地震動が増幅しにくくなるという特徴がある。このような変化は地盤の非線形化と呼ばれ、軟弱な地盤ほどより顕著に非線形化が発生する。

***疑似速度応答分布**：1 枚の台上に様々な周期の振り子を置いたと考える。この台を入力地震動の速度で揺すったときに、それぞれの振り子がどれだけの速度で揺れる（応答する）かを求め、横軸に振り子の周期、縦軸に速度応答の最大値をプロットしたグラフが、（疑似）速度応答分布である。

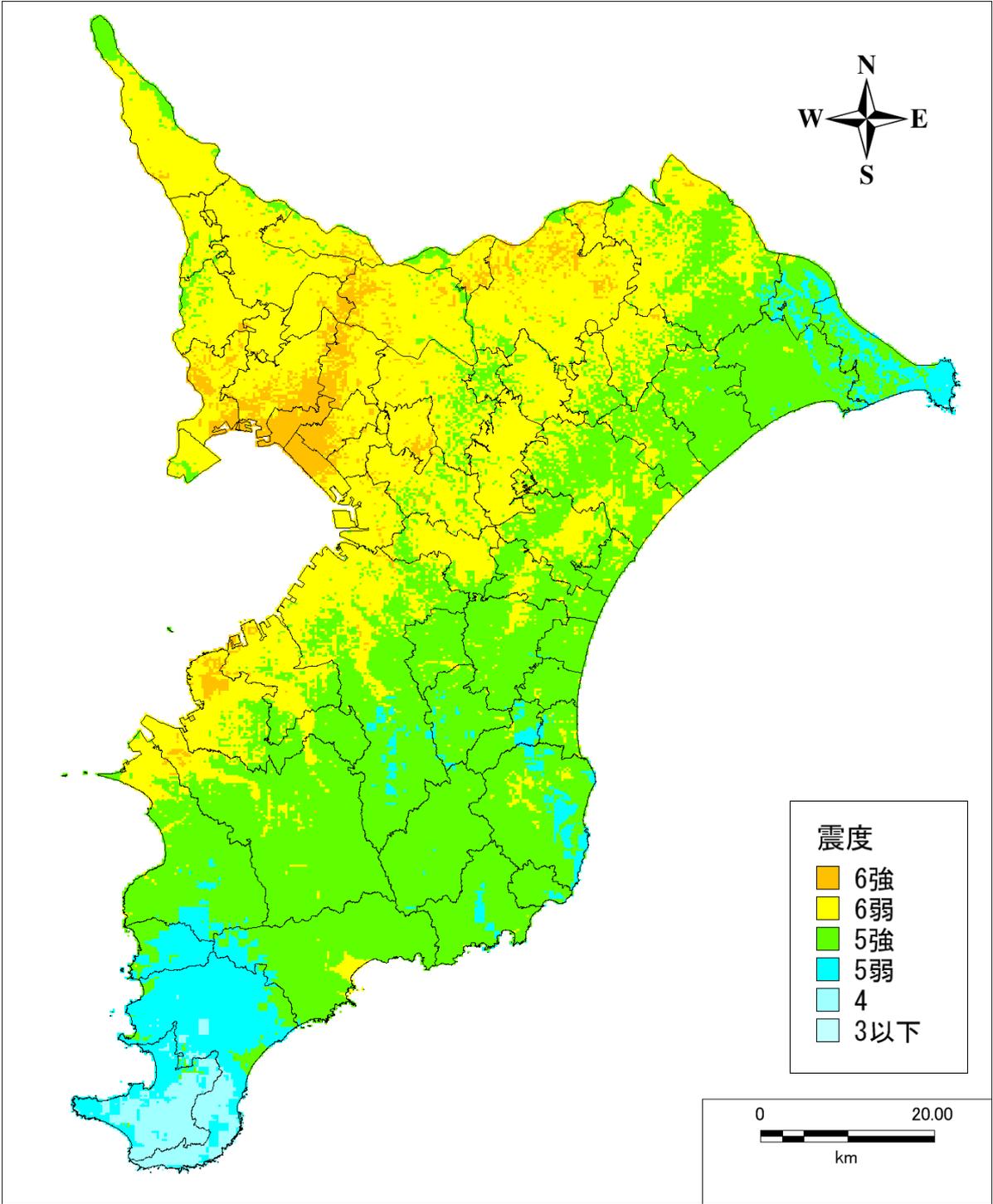
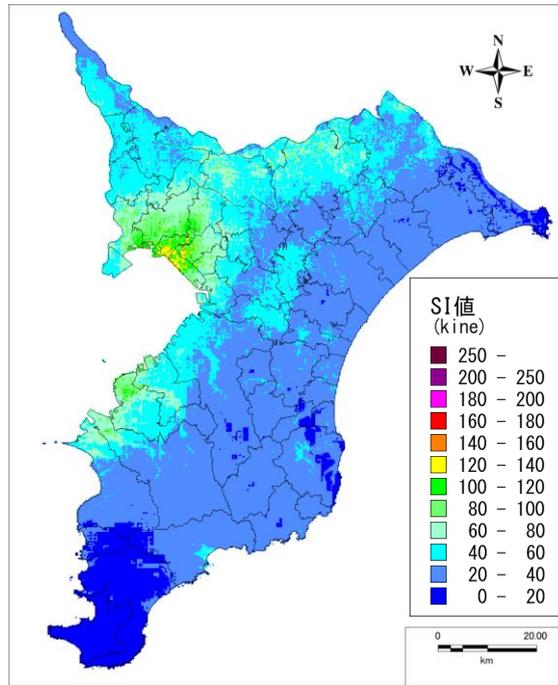
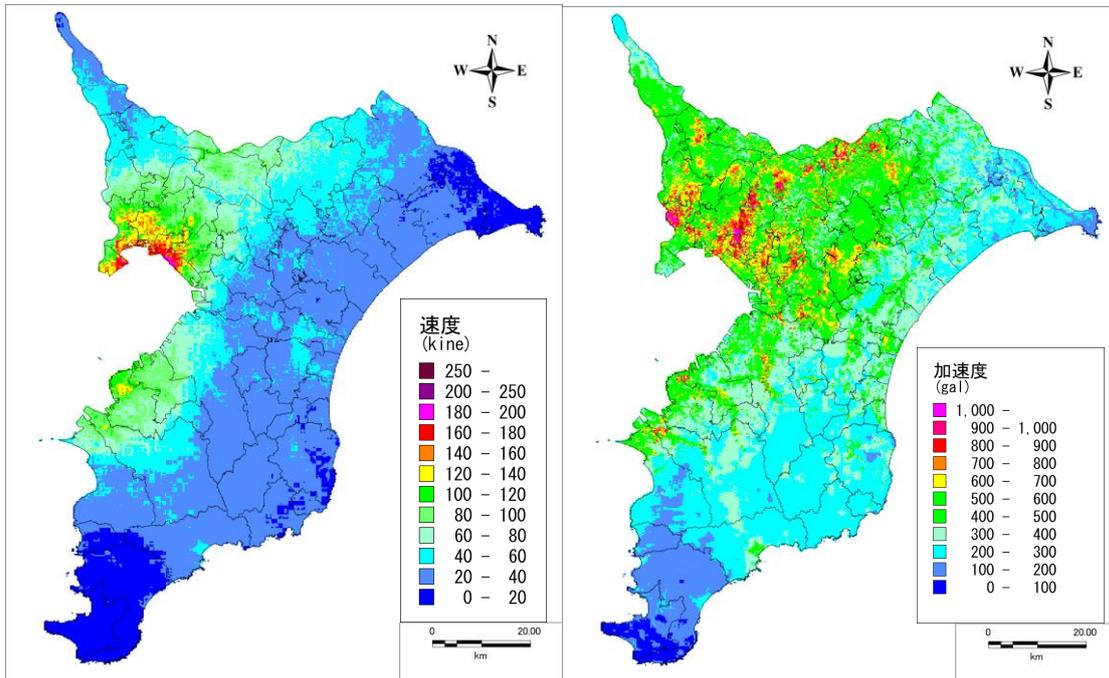


図 4-3 千葉県北西部直下地震の地表の震度分布



SI 値



最大速度

最大加速度

図 4-4 千葉県北西部直下地震の地表の地震動分布

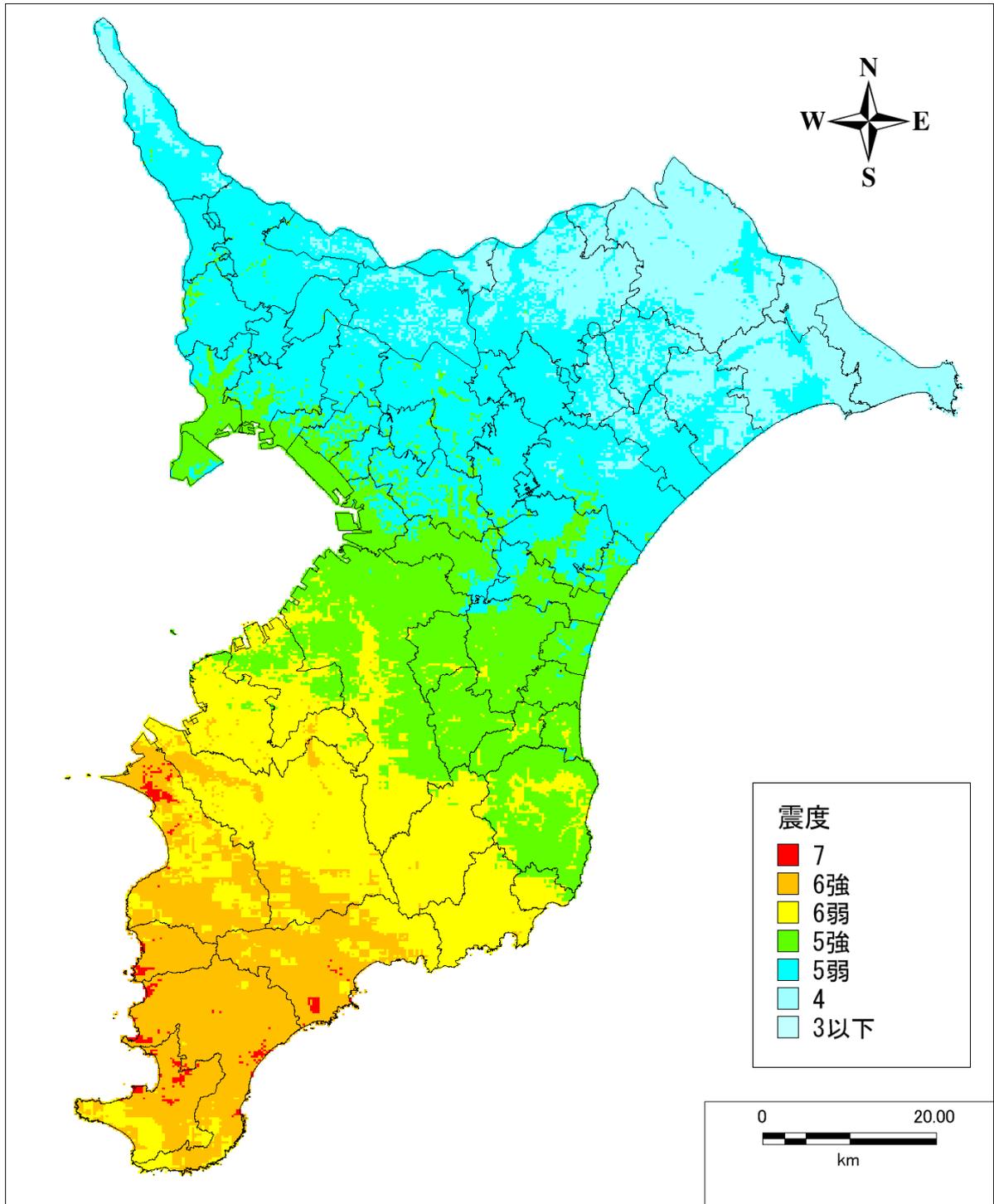


図 4-5 大正型関東地震の地表の震度分布

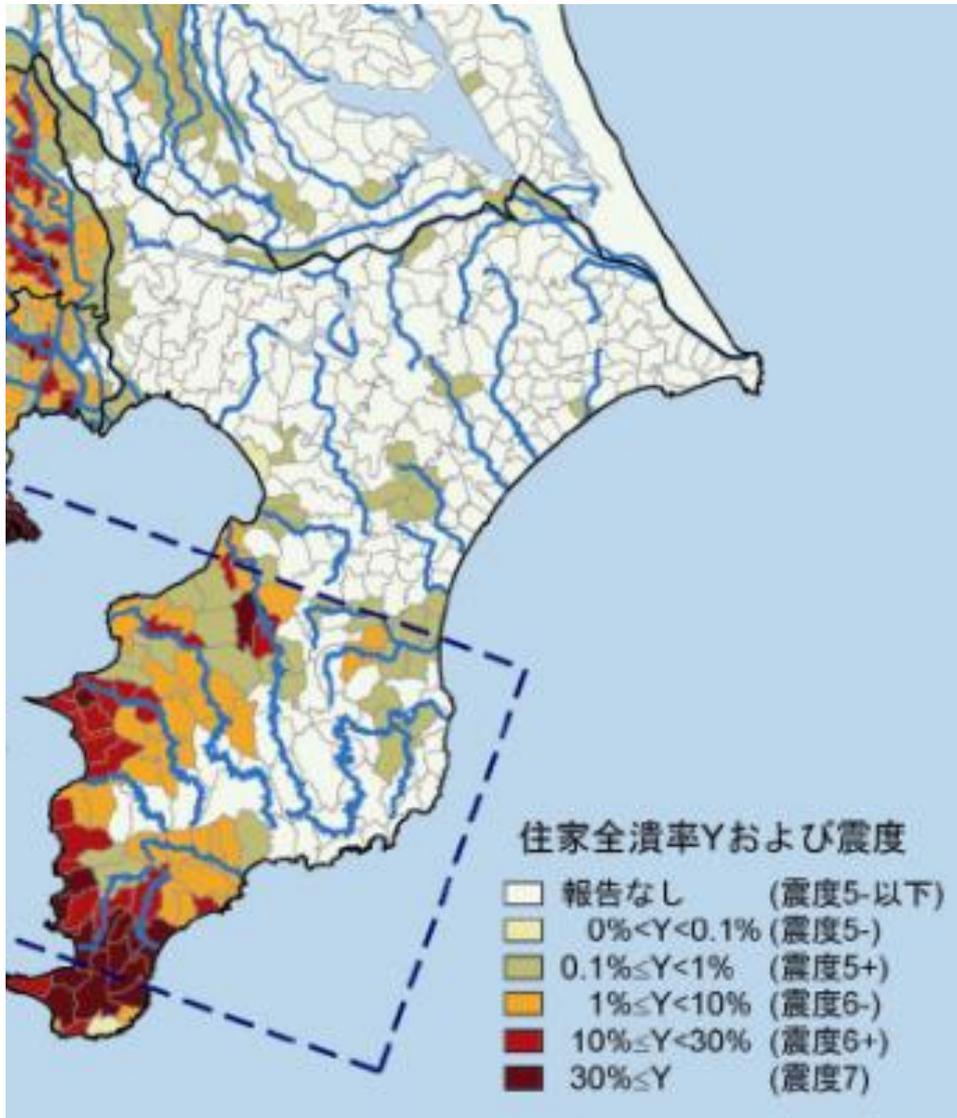
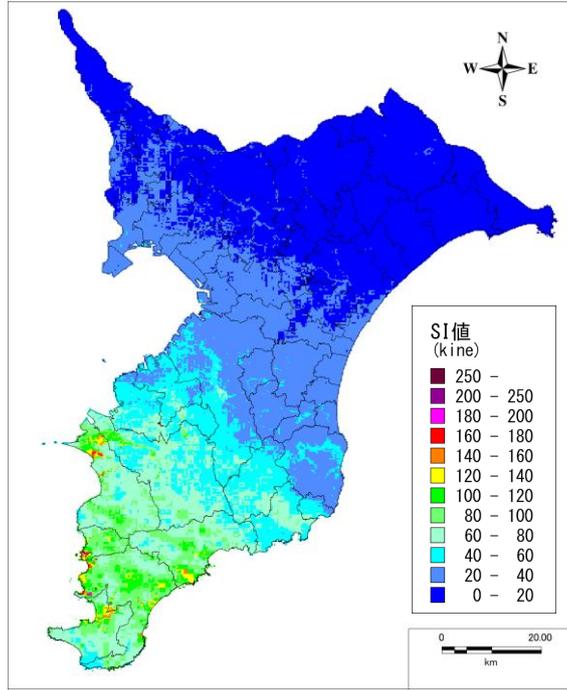
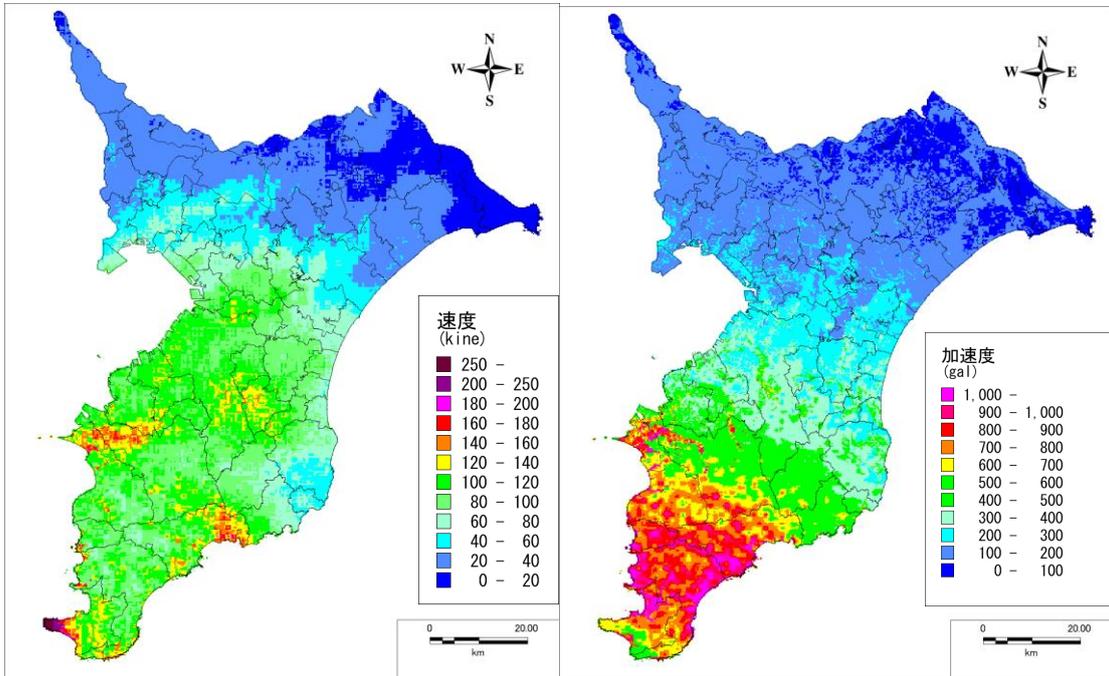


図 4-6 大正型関東地震の地表の震度分布（諸井・武村 2002 による推定震度分布）



SI 値



最大速度

最大加速度

図 4-7 大正型関東地震の地表の地震動分布

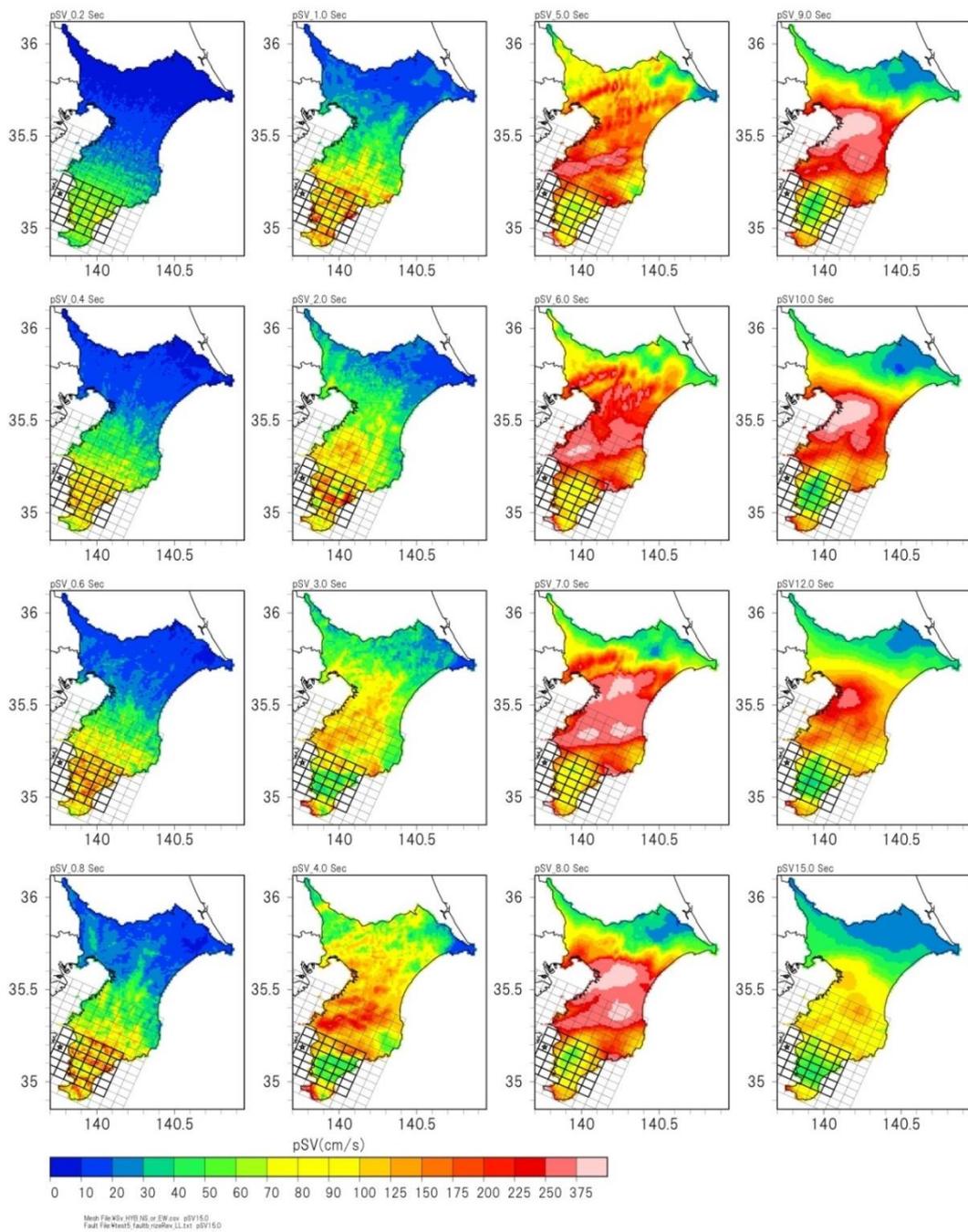


図 4-8 大正型関東地震の疑似速度応答分布 (減衰定数 $h=5\%$)

4.3 防災リスク対策用地震の地震動予測手法及び結果

南関東地域は、今後 30 年以内に M7 クラスの地震の発生確率が 70%程度とされることから、近い将来における地域の防災リスクを考える上で、最も大きい揺れの震源として、県域直下のプレート内で M7 クラスの地震及び地殻内の Mw6.8 の地震をそれぞれ 1km² 毎に想定、計算し、それぞれの震度を整理した。さらに、これらの震度と千葉県北西部直下地震の計測震度をメッシュ毎に比較して、その最大値を短・中期防災リスク対策用地震の震度とした。また参考として、100 年後を見越した長期的なケースとして、短・中期防災リスク対策用地震と大正型関東地震の計測震度の最大値を算出し、これを長期防災リスク対策用地震の震度とした（表 4-2）。

計算手法としては、地震の大きさ（マグニチュード）震源距離との関係式（距離減衰式）を用いた簡便な手法（内閣府 2013 と同じ手法）により工学的基盤震度を計算し、今回作成した浅部地盤モデルの平均 S 波速度から求めた震度増分を加えて地表の計測震度を算出した（図 4-9）。

表 4-2 防災リスク対策用地震の一覧

	短・中期防災リスク対策用地震	長期防災リスク対策用地震
千葉県北西部直下地震	○	○
大正型関東地震	—	○
直下地震（フィリピン海プレート内に一律 Mw7.3 の震源を想定した場合）	○	○
直下地震（地殻内に一律 Mw6.8 の震源を想定した場合）	○	○

※○の付いた地震の計測震度の最大値

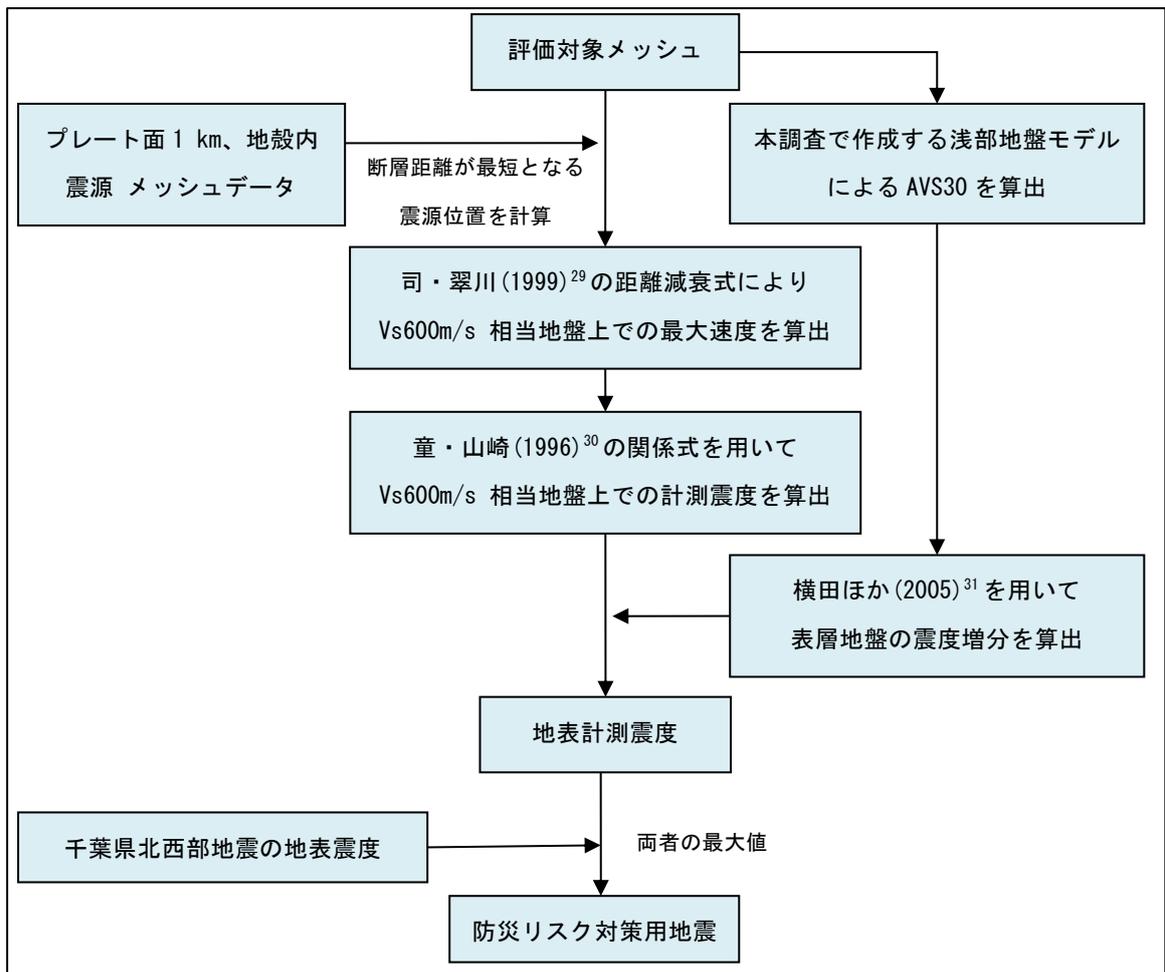


図 4-9 防災リスク対策用地震の地震動計算フロー

4.3.1 直下地震の地震動予測結果

図 4-10（左）にフィリピン海プレート内に 1km² 間隔で Mw7.3 の震源（総点数 5,618）を想定した場合の地表最大震度分布を示した。全県で震度 6 強あるいは 6 弱となる。河川沿いの谷底低地や浦安市、市川市などの埋立地において計測震度が大きくなっている。

図 4-10（右）に地殻内に 1km² 間隔で Mw6.8 の震源を想定した場合の地表震度分布を示した。全県で震度 6 強あるいは 6 弱となる。河川沿いの谷底低地や浦安市、市川市などの埋立地において計測震度が大きくなっている。

このことから、南関東地下で近い将来（今後 30 年間）で発生が懸念されている M7 クラスの直下地震に対しては、一部の市区町村においては震度 6 弱の地域も見受けられるが、千葉県内の市区町村は最大震度 6 強の揺れを想定して事前の対策を推進すべきとの結果となる。

4.3.2 防災リスク対策用地震の計算結果

これまでに想定した千葉県北西部直下地震及び千葉県直下のどこでも発生しうる直下地震（フィリピン海プレート内に 1km² 間隔で Mw7.3 の震源を想定した場合と地殻内に 1km² 間隔で Mw6.8 の震源を想定した場合）について、250m メッシュ毎に最大震度を求め、これを短・中期防災リスク対策用地震の震度とした。

図 4-11（左）に短・中期防災リスク対策用地震の震度の分布図を示した。

県央の一部地域を除いた全ての地域において、震度 6 強である。県内においては震度 6 強の強い揺れが地域を問わず発生する可能性があり、予防的な対策が必要とされる。

なお、参考として、長期的視野に立った防災対策の必要性を検討するため今回想定した地震の最大震度として、大正型関東地震も含めた長期防災リスク対策用地震の震度の分布を図 4-11（右）に示した。

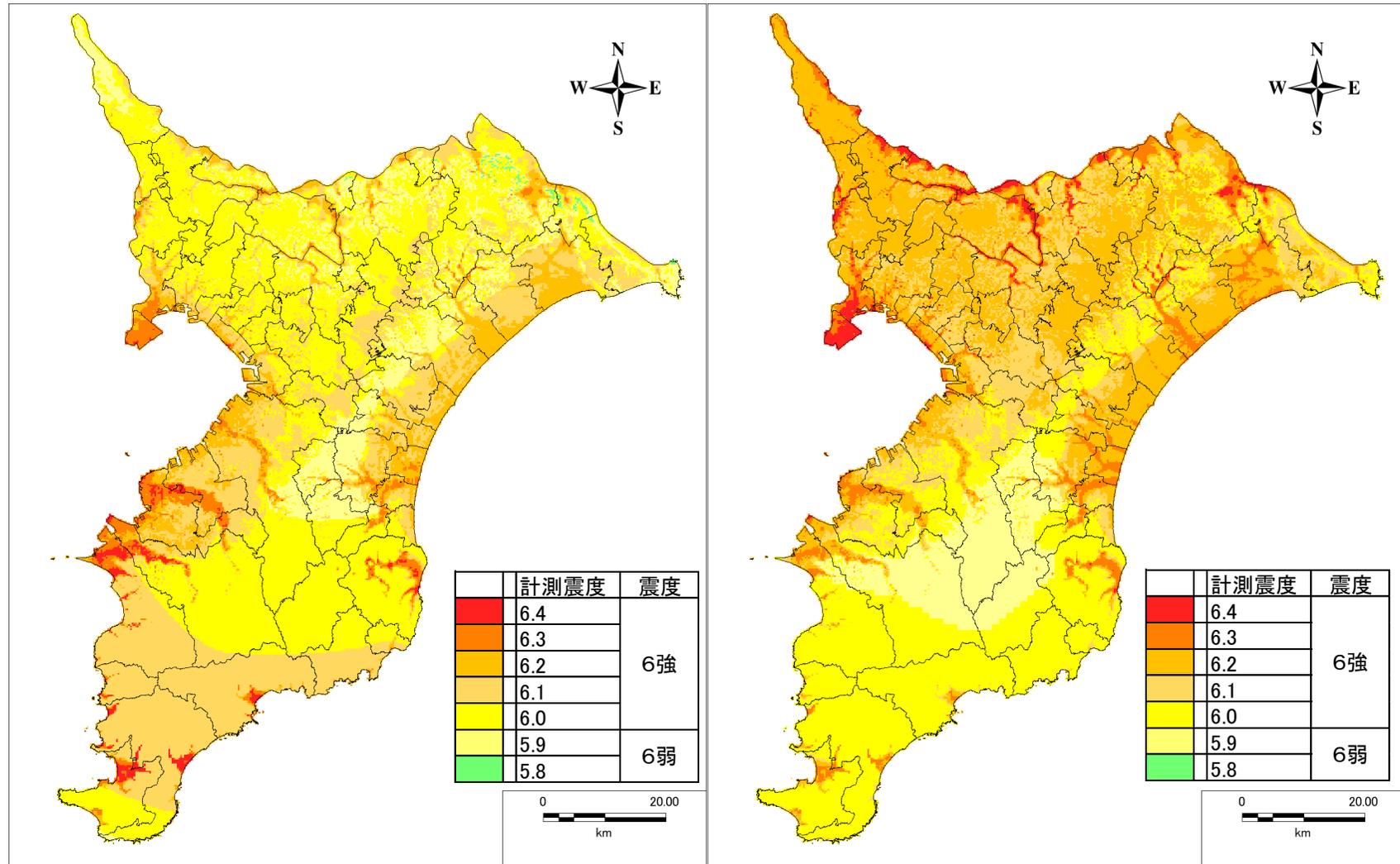


図 4-10 フィリピン海プレート内に 1km^2 間隔で Mw7.3 の震源 (左) 地殻内に 1km^2 間隔で Mw6.8 の震源 (右) を想定した場合の地表震度予測結果

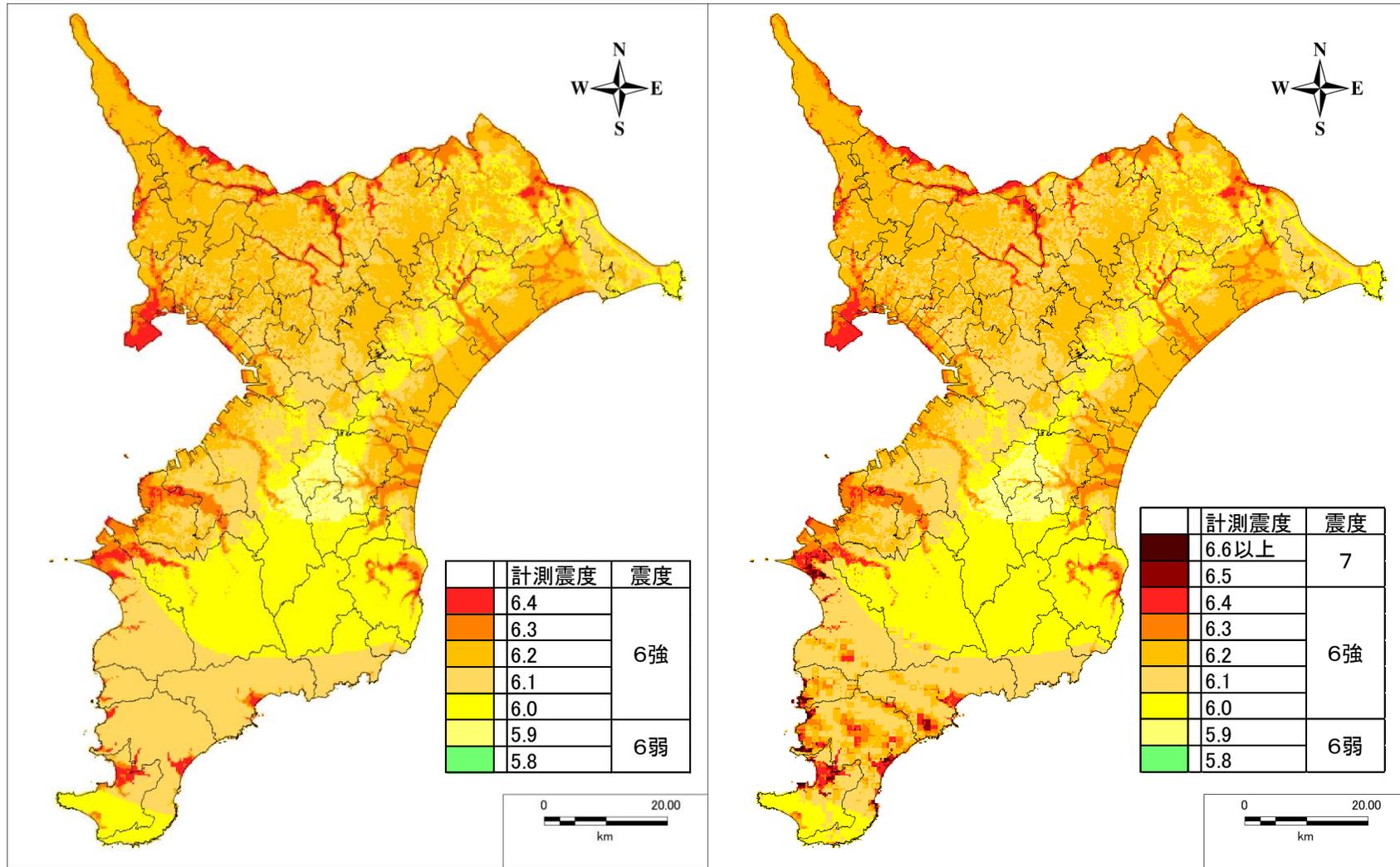


図 4-11 短・中期防災リスク対策用地震（左）・長期防災リスク対策用地震（右：参考）の震度分布

4.4 揺れやすさマップの作成

(1) 揺れやすさマップの作成

今回新たに作成した地盤モデルを用いて、千葉県（2012a）と同様の手法で地盤の揺れやすさの評価を行った。

今回の検討では、表 4-3 に示す 6 種類の地震動の周期特性の異なる波形を入射波形として全てのメッシュについて次元線形地震応答解析を行い、地表の加速度波形を求めた。工学的基盤と地表の波形から SI 値を計算し、6 ケースの **SI 増幅率***の平均値を揺れやすさの指標として採用した。SI 増幅率の値の相対的な大小により最も揺れやすい領域を赤色、最も揺れにくい領域を青色とし、メッシュ数が概ね等しくなるように全県で 6 つのランクに色分けした。

表 4-3 計算に用いた入力波形の諸源

No.	日付	地震名	M	地点名	最大加速度 (gal)	卓越周期*
1	1940/5/19	Imperial Valley	6.9	El Centro	341.7	1 秒付近
2	1994/1/17	Northridge	6.7	RRS	877.6	1 秒付近
3	1995/1/17	兵庫県南部地震	7.3	神戸海洋気象台	678.8	1 秒より長い
4	2000/10/6	鳥取県西部地震	7.3	日野	1105.0	1 秒より短い
5	2001/3/24	安芸灘地震	6.7	呉	500.1	1 秒より短い
6	2011/3/11	東北地方太平洋沖地震	9.0	KNET 浦安	157.3	1 秒より長い

図 4-12 に作成した揺れやすさマップを示した。湾岸地域、利根川流域、及び九十九里の広い地域及び大きな谷筋沿いの旧河道を含む広い範囲で「揺れやすい」と評価される赤で塗られた領域が広がっている。それを囲む領域及び九十九里低地の一部において、黄色～橙色のやや揺れやすい領域が広がっている。

また、野田市～柏市～松戸市にかけての範囲や八街市～富里市～成田市にかけての範囲についても、台地ではあるものの平均 S 波速度が比較的遅いため、黄色～橙色のやや揺れやすい領域となっている。

また同じ埋立地でも、浦安市～千葉市中央区の臨海部は赤色で非常に揺れやすくなっているのに対し、船橋市～千葉市中央区の埋立地より内陸側の領域や、市原市以南の埋立地では緑色～青色であり、相対的に揺れにくくなっている。これは、沖積層の厚さが臨海部よりも内陸側で薄くなっていることや、市原市以南の埋立地における洪積層の S 波速度が他と比較してやや大きくなっていることなどの地盤特性を反映したものである。

*SI 値 (増幅率) : SI 値 (Spectral Intensity : スペクトル強度) とは、一般的な建物がどれだけ揺れやすいかを表す地震動の強さの指標。単位は cm/s。地震波形のスペクトルのうち、周期が 0.1～2.5 秒の成分を用いて算出する。SI 値が 30 (cm/s) をこえると、地震による被害がかなりの確率で発生することが確認されており、SI 値の検知センサーが都市ガス等の地震防災に活用されている。また、地表の SI 値と工学的基盤の SI 値の比を、ここでは SI 値増幅率と定義する。

*卓越周期 : スペクトルの大きさが最も大きくなる周期。

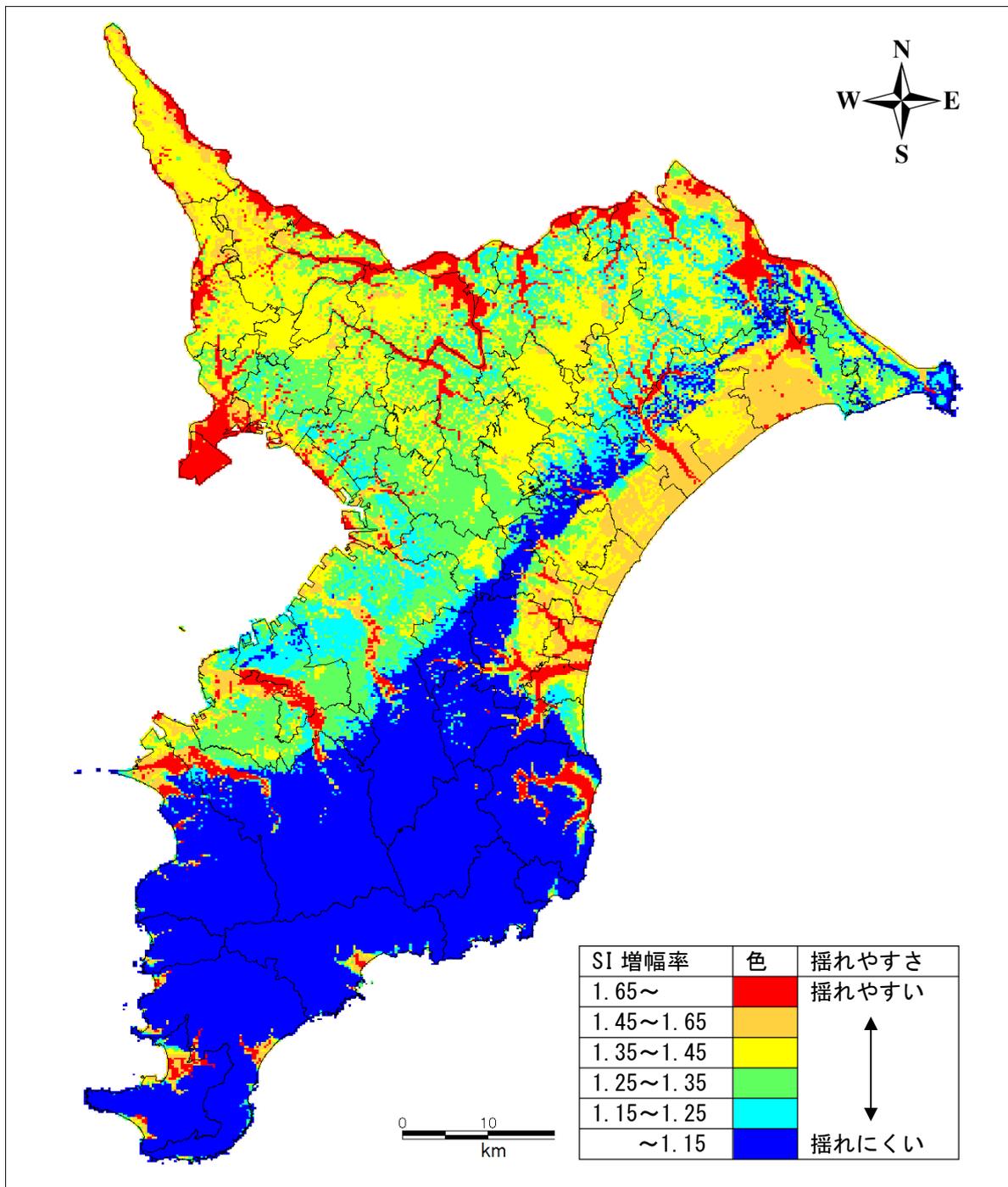


図 4-12 揺れやすさマップ（応答計算結果による SI 増幅率）

(2) 揺れやすさマップ活用上の注意点

揺れやすさマップを活用するにあたり、注意すべき点を以下に述べる。

- 揺れやすさの大きさは地盤の平均的な S 波速度の速さ（S 波速度が遅いほど地盤が軟弱であり揺れやすい。一般的に新しい地盤や粘土層が厚場合は S 波速度が遅くなる）に概ね対応している。このような揺れやすさの大きい地域については、現地の状況を踏まえ地盤や構造物について対策することが望ましい。
- 揺れやすさマップでは液状化の有無については考慮していないため、液状化しやすさマップ（5 章参照）を参照して別途考慮する必要がある。
- 地盤モデルは、ボーリングデータを元に推定している（3 章参照）が、近隣にボーリングデータが存在しない範囲については、距離の離れたデータから推定している場合もあることから、揺れやすさの推定には若干の誤差が含まれることに留意する必要がある。
- 地盤モデルは 250m メッシュ単位で作成しているため、250m メッシュよりも範囲の狭い地盤の改変（小規模な埋め立て）については表現できていない可能性があることに留意する必要がある。

4.5 地震動予測結果の考察

(1) 千葉県北西部直下地震

震源に近い千葉県北西部の千葉市、習志野市、船橋市、市川市などで震度 6 強の地域が広がり、県北西部全体に震度 6 弱の地域が広がる。東京湾岸部の沖積層の厚い地域では、地表震度、地表最大加速度はあまり大きくならない傾向が見られる。これは、地盤の非線形化により、短周期成分が地表まで伝わりにくくなった影響と考えられる。

(2) 大正型関東地震

SMGA 直上の館山市、鴨川市、君津市、富津市、南房総市、鋸南町の一部地域で震度 7 となり、震源に近い県南部（市原市から御宿町を結んだラインの南側）では震度 6 強以上の地域が広がる。震源からの距離に応じた形で、県北部では、震度は小さくなり、表層地盤の違いによる揺れ方の違いがより大きく表れる。

大正関東地震の震度分布（諸井・武村 2002）と比較すると、震度 7 となる領域、震度 6 以上となる領域などの比較や、県北西部北東部で震度 5 弱が広範囲で見られる点など、両者は概ね良く一致しているといえる。

長周期地震動については、周期 5～10 秒程度で、東京湾岸の市原市付近を中心として 400 cm/s 近くの大きな応答となる。

(3) 防災リスク対策用地震

県央の一部地域を除いた全ての地域において、震度 6 強である。県内においては震度 6 強の強い揺れが地域を問わず発生する可能性があり、予防的な対策が必要とされる。

(4) 揺れやすさマップ

湾岸地域、利根川流域、及び九十九里の広い地域及び大きな谷筋沿いの旧河道を含む広い範囲で「揺れやすい」と評価される赤で塗られた領域が広がっている。それを囲む領域及び九十九里低地の一部において、黄色～橙色のやや揺れやすい領域が広がっている。

また、野田市～柏市～松戸市にかけての範囲や八街市～富里市～成田市にかけての範囲についても、台地ではあるものの平均 S 波速度が比較的遅いため、黄色～橙色のやや揺れやすい領域となっている。

また同じ埋立地でも、浦安市～千葉市中央区の臨海部は赤色で非常に揺れやすくなっているのに対し、船橋市～千葉市中央区の埋立地より内陸側の領域や、市原市以南の埋立地では緑色～青色であり、相対的に揺れにくくなっている。これは、沖積層の厚さが臨海部よりも内陸側で薄くなっていることや、市原市以南の埋立地における洪積層の S 波速度が他と比較してやや大きくなっていることなどの地盤特性が反映されている。