

3 地震動

(1) 概要

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 50m 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 2.2-19 に示す。

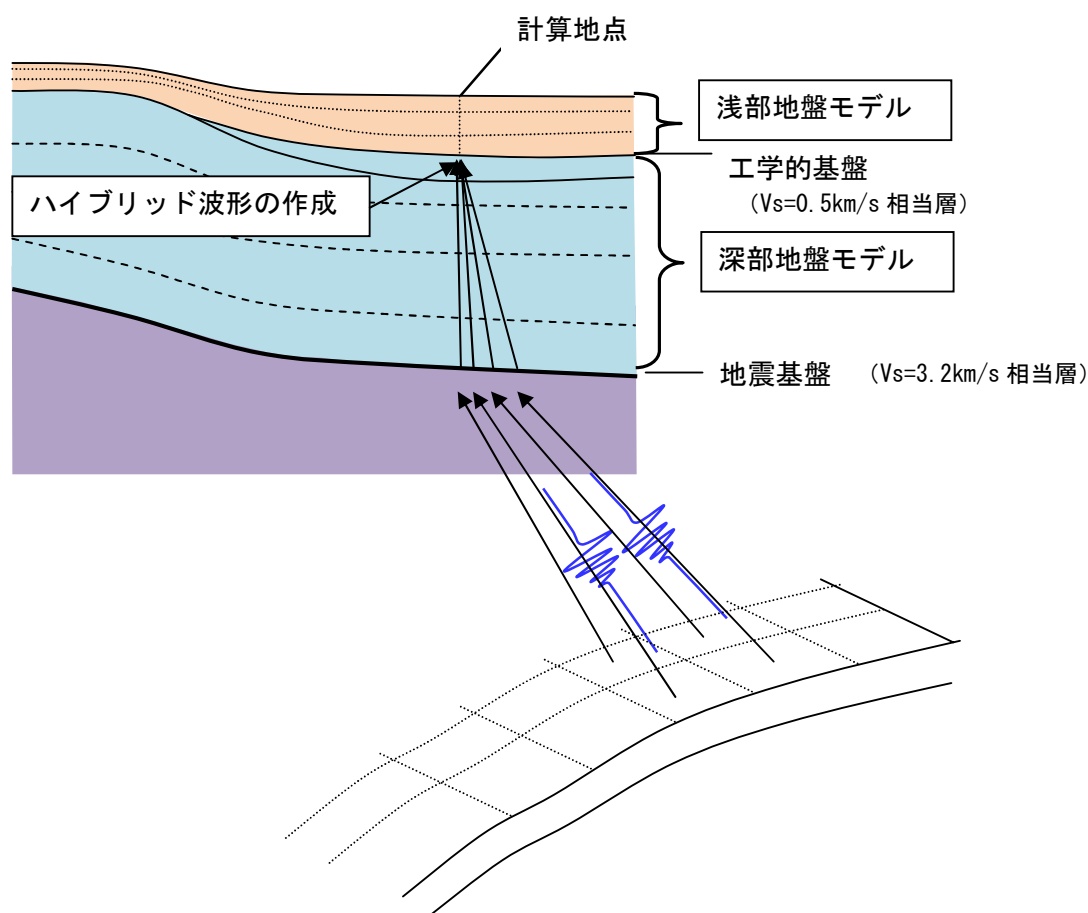


図 2.2-19 強震波形計算の概念 (千葉県(2016)⁴⁾

***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出来る(図 2.2-19 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。

(2) 計算手法

地震動の予測手法については、千葉県（2016）⁴と同様の手法とした（表 2.2-8）。

構造物の防災・減災対策として地震波形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した手法である。

表 2.2-8 各想定地震の地震動予測手法

	千葉県北西部直下地震	船橋市役所直下の地震
地震動の評価	地震動波形(計測震度)	
工学的基盤地震動予測手法	統計的グリーン関数法(短周期)と 三次元差分法(長周期)のハイブリッド法	
地表地震動予測手法	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	
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	

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 2.2-20）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。

*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出来る（図 2.2-19 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。

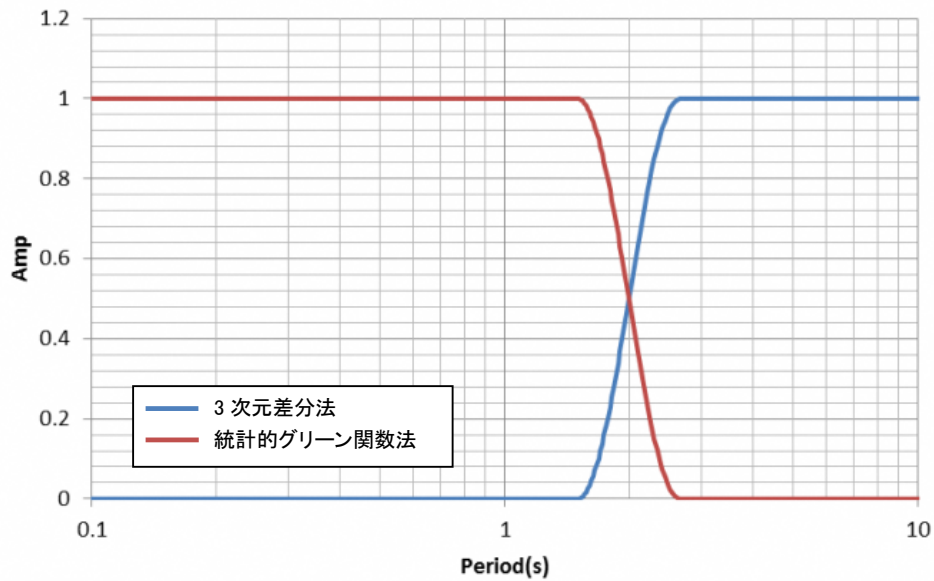


図 2.2-20 マッチングフィルター

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（2016）⁴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、吉田望・末富岩雄（1996）¹⁰によるDYNEQを用いた。

(3) 物性値

地震応答計算に必要な物性値について、以下のように設定した。

① S波速度

土質区分ごとの N 値と S 波速度との関係式を基に、S 波速度を設定した。

砂質土及び粘性土の速度については、永田ほか (2007)¹¹による千葉市内の N 値と S 波速度との以下の関係式を用いて設定した (千葉県 (2008)²)。

$$V_s = a \cdot N^b \cdot Dep^c \quad \text{—— (式 2.2-1)}$$

ここに、

N : N 値

Dep : 地表からの深さ(m)

$a \sim c$: 表 2.2-9 に示す土質毎の係数

表 2.2-9 S 波速度 (砂質土及び粘性土) の計算に用いた係数

土質名	a	b	c
埋立粘性土	81.2	0.211	0.221
埋立砂質土	93.8	0.178	0.000
沖積粘性土	116.9	0.188	0.055
沖積砂質土	103.5	0.089	0.158
洪積粘性土	125.5	0.145	0.137
洪積砂質土	163.4	0.183	0.029

礫質土については中央防災会議事務局 (2001)¹²による以下の関係式を用いて設定した。

$$V_s = a \cdot N^b \cdot c \cdot d \quad \text{—— (式 2.2-2)}$$

ここに、

N : N 値

$a \sim d$: 表 2.2-10 に示す土質毎の係数

表 2.2-10 S 波速度 (礫質土) の計算に用いた係数

土質名	a	b	c	d
沖積礫質土	112.73	0.256	1.000	1.000
洪積礫質土	112.73	0.256	1.223	0.885

② 密度

地震応答計算及び液状化計算に必要な密度の値については、中央防災会議事務局 (2001)¹²による値を用いた (表 2.2-11)。

表 2.2-11 地震応答計算のための物性値（中央防災会議事務局（2001）¹²⁾

時代	土質	記号	N値	密度 (g/cm ³)
完新統	盛土	B1	0~4	1.60
		B2	4~10	1.70
		B3	10~	2.00
	埋立土	F1	0~4	1.60
		F2	4~10	1.70
		F3	10~	2.00
	腐植土	Ap1	0~1	1.20
		Ap2	1~	1.30
	泥	Ac1	0~2	1.40
		Ac2	2~4	1.50
		Ac3	4~8	1.60
		Ac4	8~15	1.70
		Ac5	15~30	1.80
		Ac6	30~	1.80
	砂質土	Am1	0~2	1.40
		Am2	2~4	1.50
		Am3	4~8	1.60
		Am4	8~15	1.70
		Am5	15~30	1.80
		Am6	30~	1.80
	砂	As1	0~4	1.70
		As2	4~10	1.80
		As3	10~30	1.90
		As4	30~50	1.90
As5		50~	1.90	
礫	Ag1	~20	1.90	
	Ag2	20~30	2.00	
	Ag3	30~50	2.00	
	Ag4	50~	2.10	
更新統	腐植土	Dp1	0~1	1.20
		Dp2	1~	1.30
	ローム	DI1	0~4	1.40
		DI2	4~	1.50
	泥	Dc1	0~2	1.50
		Dc2	2~4	1.60
		Dc3	4~8	1.70
		Dc4	8~15	1.80
		Dc5	15~30	1.80
		Dc6	30~	1.80
	砂質土	Dm1	0~2	1.50
		Dm2	2~4	1.60
		Dm3	4~8	1.70
		Dm4	8~15	1.80
		Dm5	15~30	1.80
		Dm6	30~	1.80
	砂	Ds1	0~4	1.80
		Ds2	4~10	1.80
		Ds3	10~30	1.90
		Ds4	30~50	1.90
		Ds5	50~	2.00
	礫	Dg1	~20	1.90
		Dg2	20~30	2.00
		Dg3	30~50	2.00
Dg4		50~	2.10	
岩	RW	50~	1.80	
	R	50~	1.80	
下総層群	SL1	50~	1.80	
	SL2	50~	1.80	
	SL3	50~	1.85	
上総層群	KZ1	50~	1.85	
	KZ2	50~	1.90	

③ 動的変形特性

浅部地盤を構成する土質は非線形性を有するため、**等価線形法***による地震応答解析では、「動的変形特性曲線」により土質ごとの非線形性を設定する。

動的変形特性とは、地震動によって地盤が変形した時に、変形の大きさによって地盤の性質がどのように変化するかを示す特性のことである。**せん断ひずみ*** (γ) と **剛性率*** (G/G_0) 及びせん断ひずみと **減衰定数*** (h) の関係であり、横軸に γ 、縦軸に G/G_0 、 h をとった土質区分ごとのグラフで表される。

今回の検討で用いる動的変形特性については、千葉県(2016)⁴で設定された土質区分ごとの平均的な動的変形特性曲線を採用した。なお、砂質土については**拘束圧***によって曲線を分けた。設定した曲線を図 2.2-21～2.2-23 に示す。

***等価線形法**：地盤の非線形性を疑似的に評価する手法。非線形計算では時刻歴波形を逐次計算する必要があるが、等価線形計算ではスペクトルを用いて計算可能であり簡便であるため、広く採用されている。

***せん断ひずみ (γ)**：物質に力が加わった時の単位体積当たりの変形量の大きさ。高さ1の長方形の上辺を右に Δl だけ移動して平行四辺形に変形させたとき、「 $\Delta l/l$ 」の値。せん断ひずみの値が 1×10^{-4} を超えると、地盤が明瞭に非線形性の挙動を示すようになる。

***剛性率 (G/G_0)**：せん断ひずみに対して地盤がどれだけ変形しにくいかを表す量。 $\gamma = 1 \times 10^{-6}$ の時の剛性率を1として、ひずみが大きくなるにつれて剛性率は小さくなる。動的変形特性曲線のグラフでは右下がりの曲線で示される。

***減衰定数 (h)**：地盤によって揺れがどれだけ減衰するかを表す量。0～1の値をとり、値が大きくなるほど減衰が大きくなる。動的変形特性曲線のグラフでは右上がりの曲線で示される。

***拘束圧**：地盤にかかる圧力のこと。実際の地盤では、より上位の地盤の荷重により受ける圧力(全上載圧)から、地下水による浮力を引いた圧力(有効上載圧)を受ける。砂質土の動的変形特性については、拘束圧(=有効上載圧)に依存する。

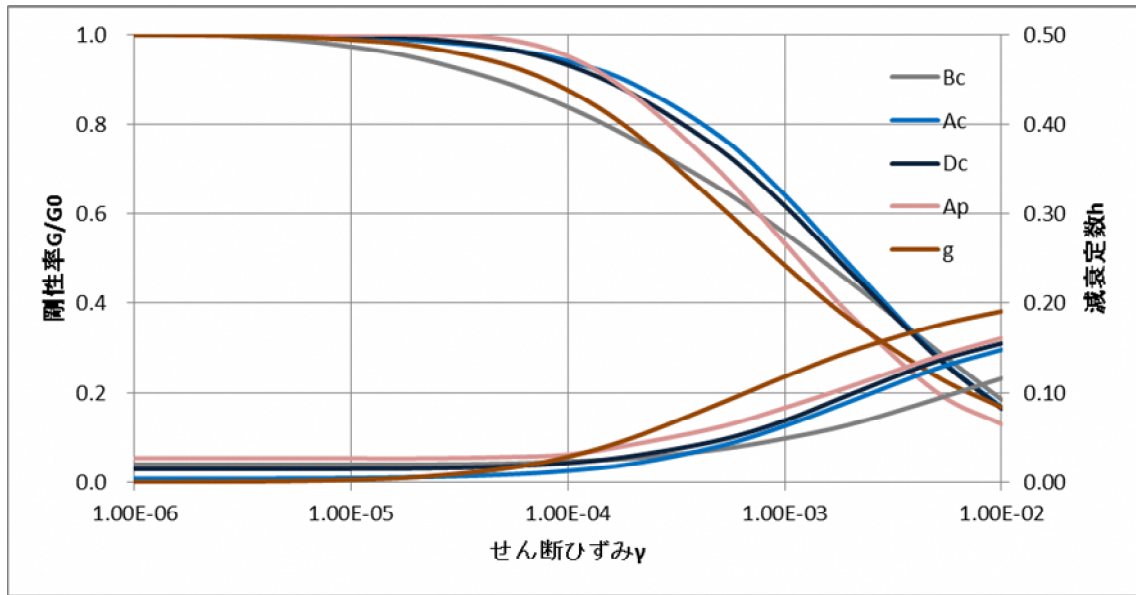


図 2.2-21 計算に使用した動的変形特性曲線
 (埋立土 (Bc)・粘性土 (Ac, Dc)・腐植土 (Ap)・礫質土 (g))

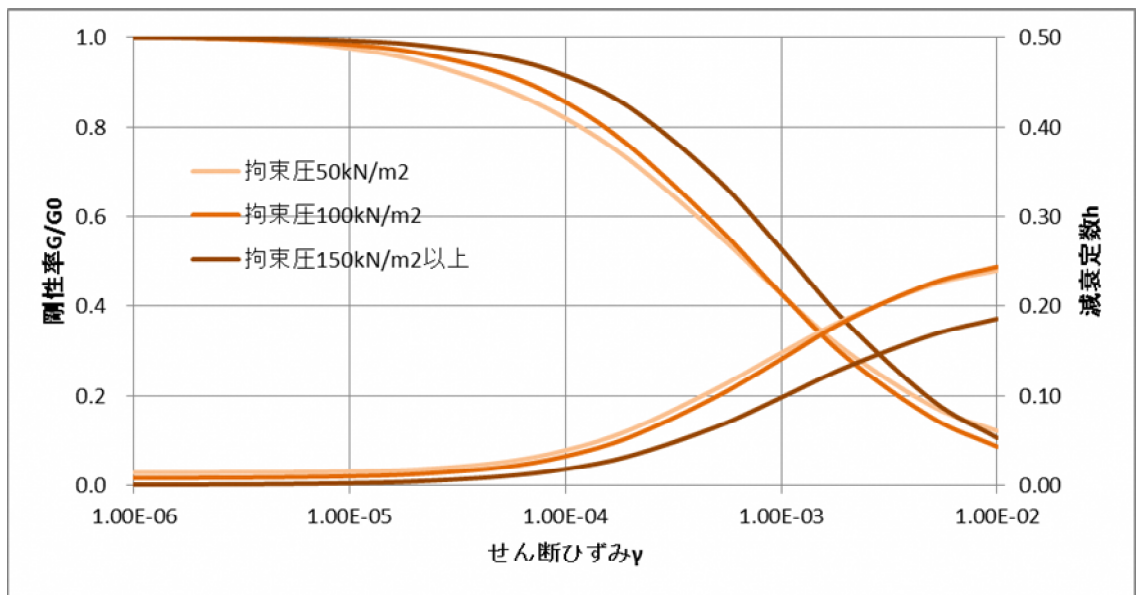


図 2.2-22 計算に使用した動的変形特性曲線 (沖積砂質土)

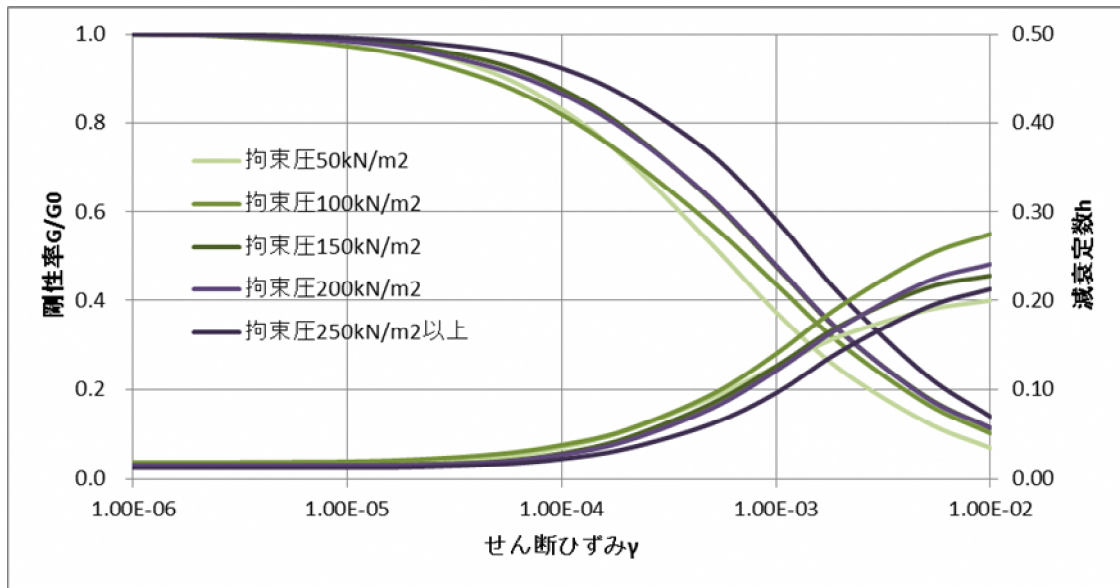


図 2.2-23 計算に使用した動的変形特性曲線（洪積砂質土）

(4) 予測結果

千葉県北西部直下地震の震度分布を図 2.2-24 に示す。また、SI 値*、最大速度*、最大加速度*の分布を図 2.2-25 に示す。

以下に、震度分布の傾向について述べる。

千葉県北西部直下地震では、市南側の低地部及び市東部の低地～台地部の幅広い範囲で震度 6 強を示す。また、台地上の谷底低地の一部においても震度 6 強を示す。それ以外の範囲では、震度 6 弱となる。

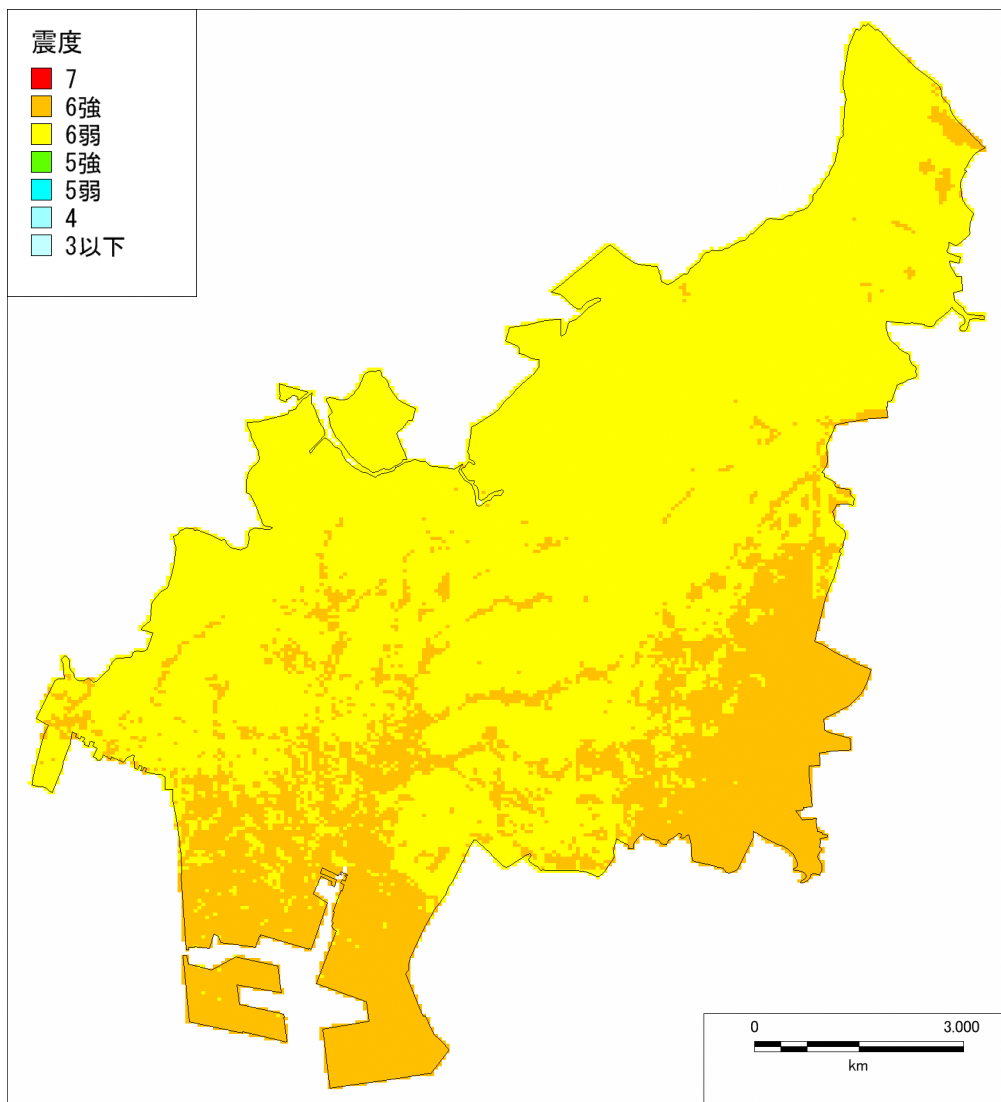
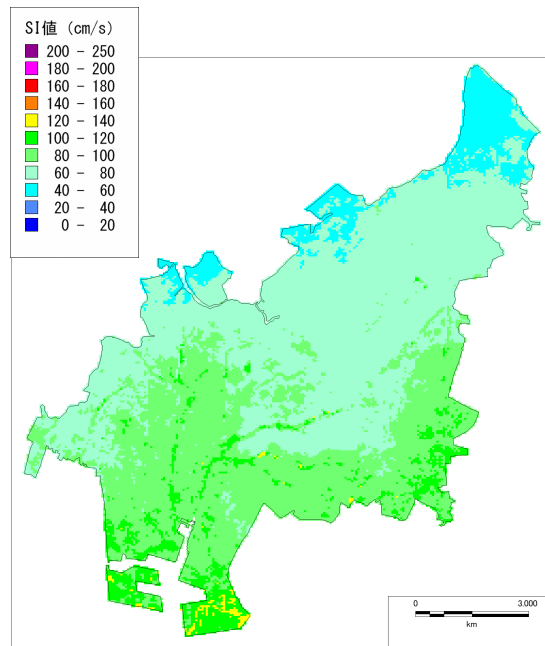


図 2.2-24 千葉県北西部直下地震 地表震度分布 (50m メッシュ)

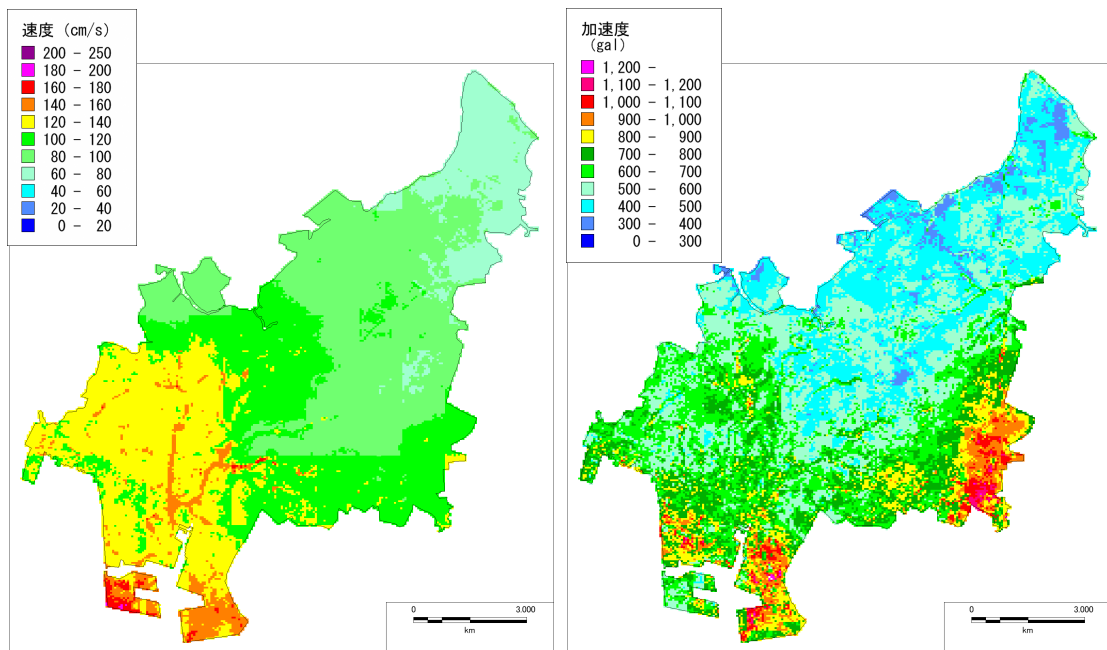
*SI 値 : SI 値 (Spectral Intensity : スペクトル強度) とは、一般的な建物がどれだけ揺れやすいかを表す地震動の強さの指標。単位は $\text{cm/s} = \text{kine}$ 。地震波形のスペクトルのうち、周期が 0.1~2.5 秒の成分を用いて算出する。

*最大速度 : 地震の際にある 1 点に着目して、非常に遠い (地震時に揺れない) 別の地点から見た場合、この点が動く速さが速度である。単位は $\text{cm/s} = \text{kine}$ が使われる。その最大値が最大速度である。

*最大加速度 : 速度が時間を追って大きくなる (または小さくなる) 度合いが加速度で、 $\text{cm/s}^2 = \text{Gal}$ を単位として使う。その最大値が最大加速度である。



SI 値



最大速度

最大加速度

図 2.2-25 千葉県北西部直下地震 地表の地震動分布 (50mメッシュ)

図 2.2-26 に示す千葉県 (2016) ⁴による 250m メッシュでの想定結果と比較すると、概ね震度分布の傾向は一致している。今回の想定では新たに提供されたボーリングデータを用いて 50m メッシュの地盤モデルを作成して計算しており、より詳細な地形の効果を反映した震度分布になっていると考えられる。

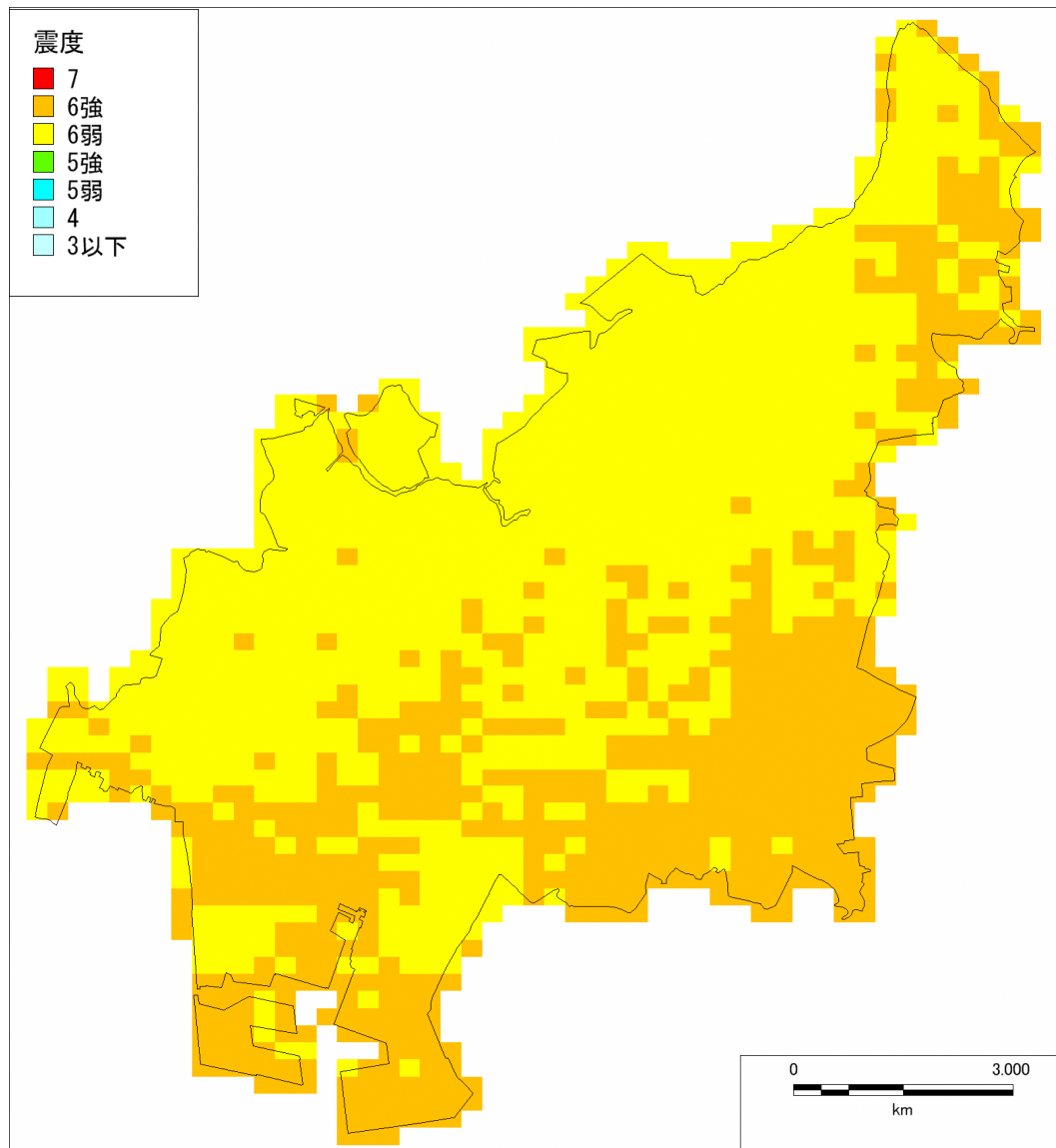


図 2.2-26 千葉県北西部直下地震 地表震度分布
(千葉県 (2016) ⁴による想定 250m メッシュ)

船橋市役所直下の地震（タイプ I）の震度分布を図 2.2-27 に示す。また、SI 値、最大速度、最大加速度の分布を図 2.2-28 に示す。

市南部の埋立地や低地の広い領域で震度 6 強となっている。また、台地上の谷底低地の一部でも震度 6 強を示す。それ以外の範囲では概ね震度 6 弱となっている。

千葉県北西部直下地震と比較すると、市東部の震度が小さくなっている一方、市南部の埋立地や低地については、震度 6 強となる領域がやや北側に移っている。

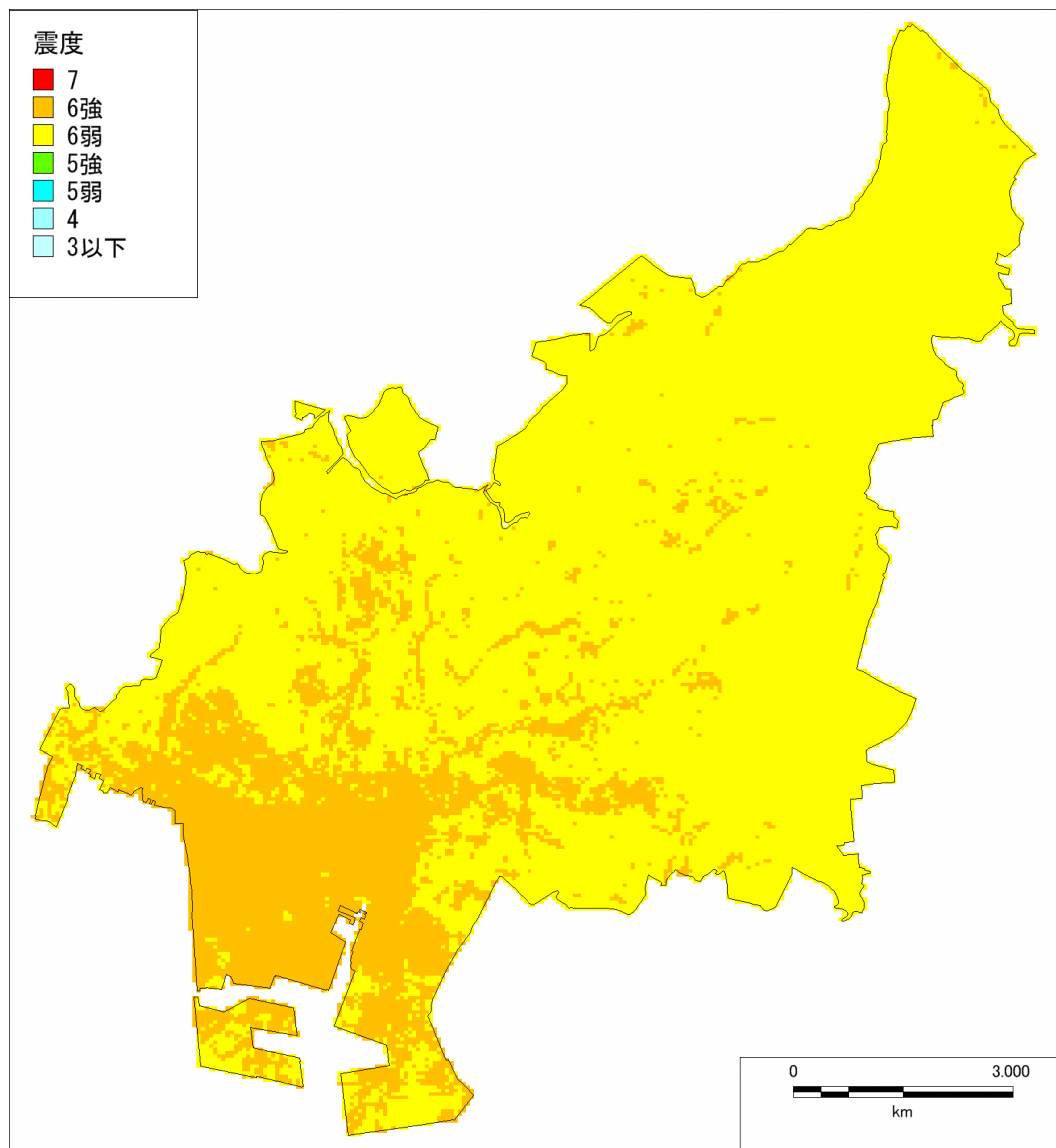
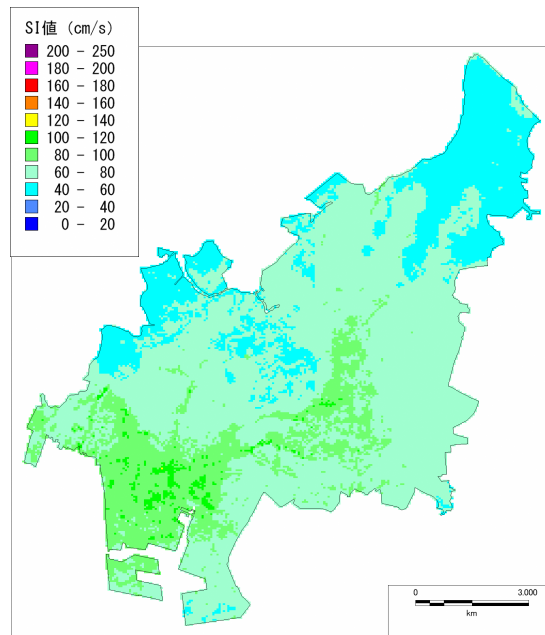
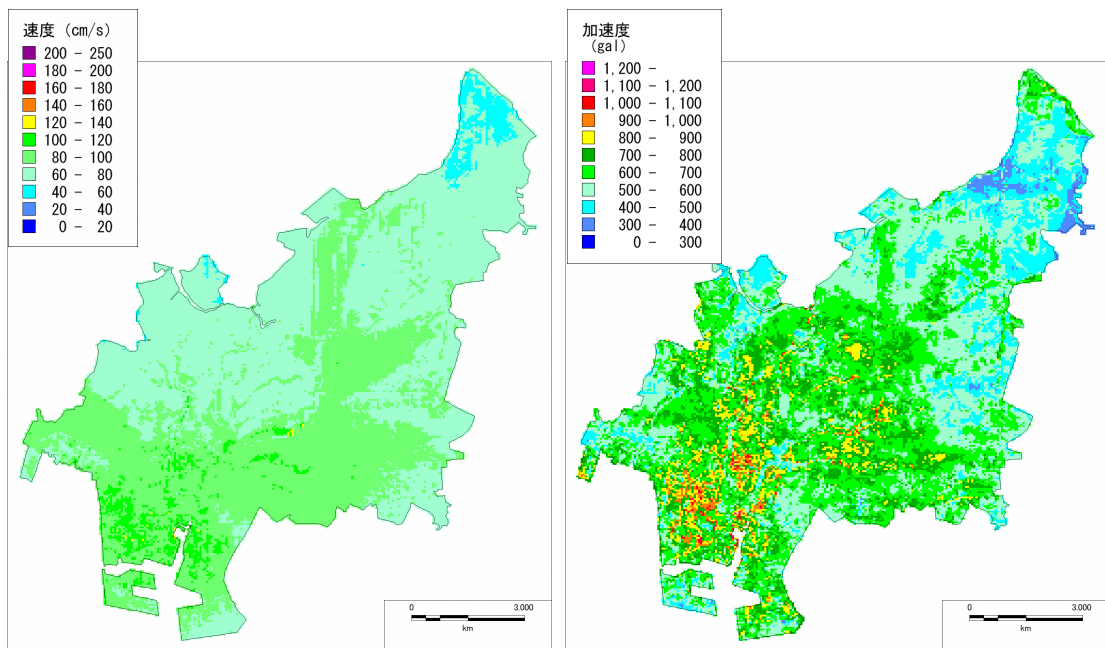


図 2.2-27 船橋市役所直下の地震（タイプ I） 地表震度分布（50m メッシュ）



SI 値



最大速度

最大加速度

図 2.2-28 船橋市役所直下の地震（タイプ I） 地表の地震動分布

船橋市役所直下の地震（タイプⅡ）の震度分布を図 2.2-29 に示す。また、SI 値、最大速度、最大加速度の分布を図 2.2-30 に示す。

市南部の埋立地や低地の一部で震度 6 強となっている。また、市最北部の谷底低地の一部でも震度 6 強を示す。それ以外の範囲では概ね震度 6 弱となっている。

千葉県北西部直下地震と比較すると、震度 6 強の面積はやや狭くなっている。

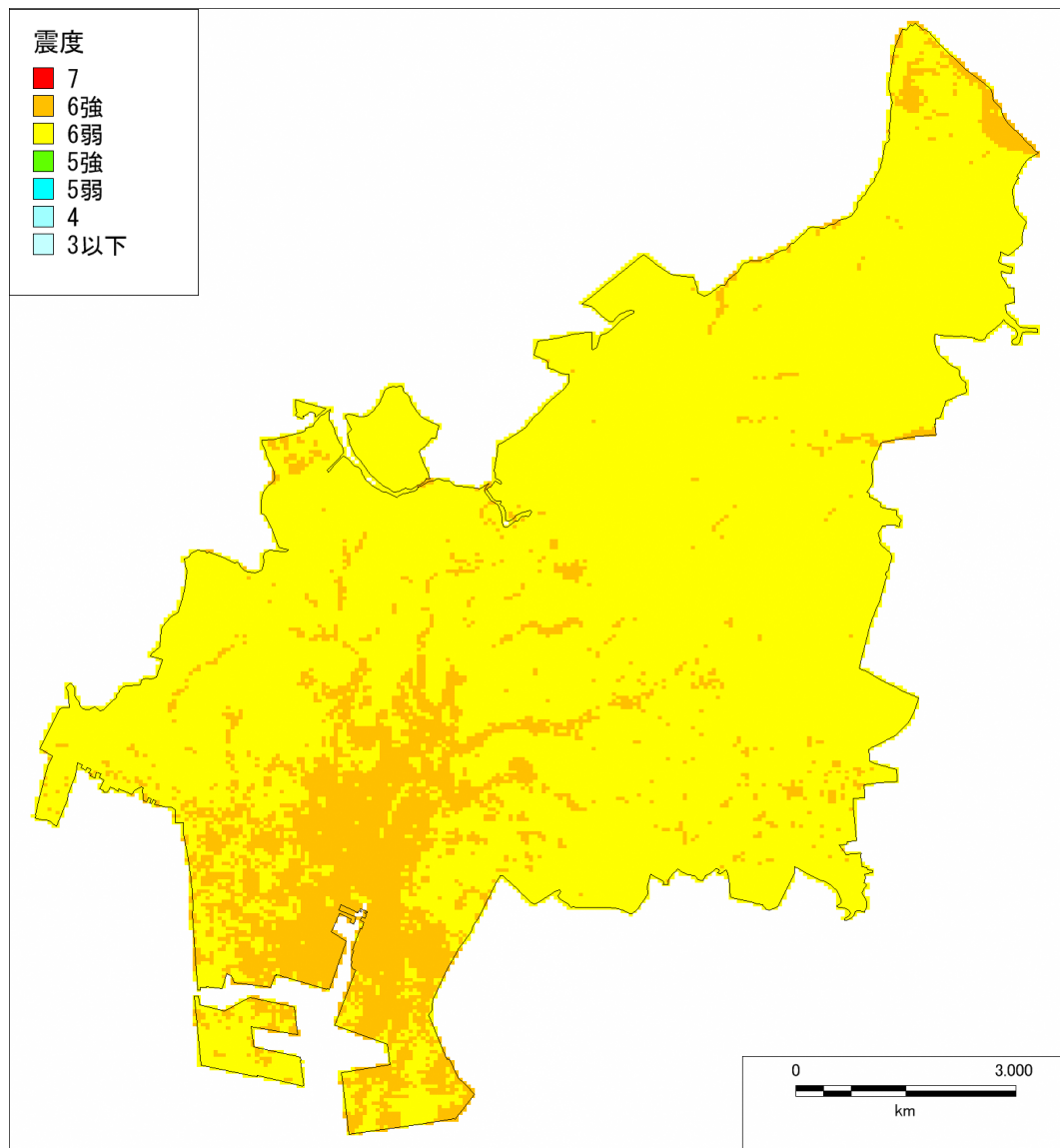
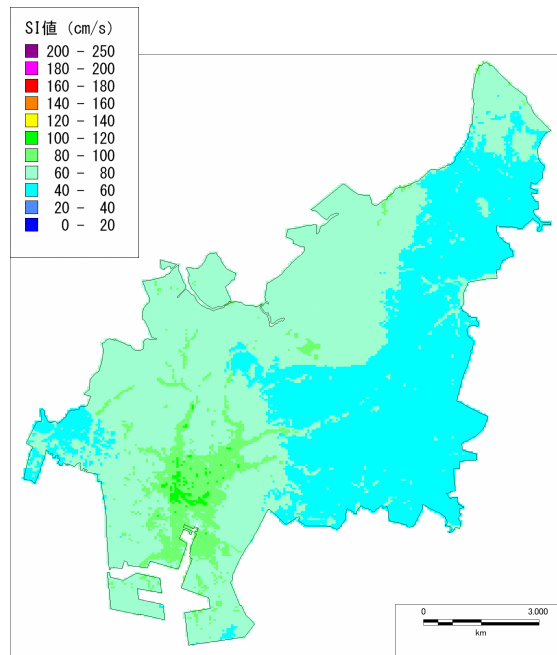
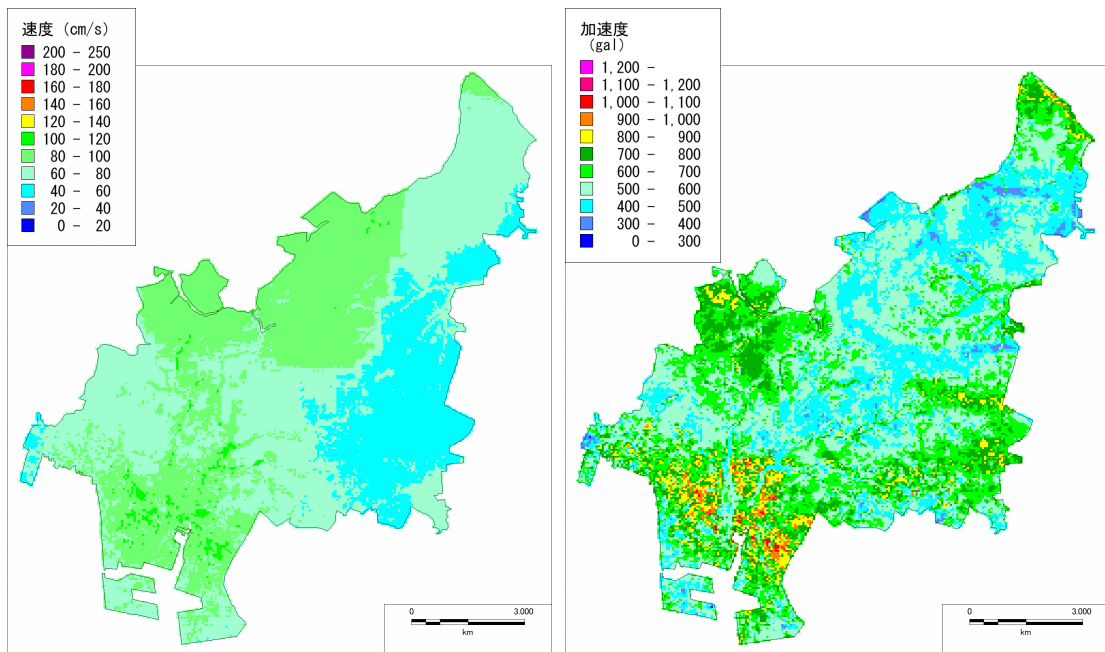


図 2.2-29 船橋市役所直下の地震（タイプⅡ） 地表震度分布（50m メッシュ）



SI 値



最大速度

最大加速度

図 2.2-30 船橋市役所直下の地震（タイプⅡ） 地表の地震動分布

4 3 地震の被害比較

前項で検討した3地震について、市全体で被害量が最大と見込まれる地震を被害想定の対象とする。具体的には、建物、人的被害で多くを占めると考えられる、揺れによる建物被害及び建物倒壊による人的被害を算出し、比較した。これらの建物、人的被害には、震度分布と建物分布、人口分布の関係が大きく影響する。すなわち、建物や人口の多い地域で、揺れが大きいと被害が多くなる。これを踏まえ、第2章第5の建物データ及び想定手法を用いて、揺れによる建物被害を算出し、第2章第6の人口データ及び想定手法を用いて、建物倒壊による人的被害を算出した。なお、季節及び時間帯は、多くの人が自宅におり、建物倒壊による人的被害が最も多くなる冬5時を想定した。

揺れによる建物被害を表2.2-12に、建物倒壊による人的被害を表2.2-13に示す。千葉県北西部直下地震では南部に加え、建物や人口が多く分布する東部においても、広いエリアで震度6強となり、3地震で最大の建物・人的被害となった。

この結果より、3地震で揺れによる建物被害、人的被害ともに最大となる千葉県北西部直下地震を対象に今回、地震アセスメント調査を実施することとした。

表 2.2-12 揺れによる建物被害

(単位：棟)

No.	地震名	全壊棟数	半壊棟数	全壊率	半壊率
1	千葉県北西部直下地震	11,400	20,520	8.2%	14.7%
2	船橋市役所直下の地震 (タイプⅠ)	9,260	18,870	6.6%	13.5%
3	船橋市役所直下の地震 (タイプⅡ)	6,280	15,670	4.5%	11.2%

表 2.2-13 建物倒壊等による人的被害(冬5時)

(単位：人)

No.	地震名	死者数	重傷者数	軽傷者数	死傷者率	負傷者率
1	千葉県北西部直下地震	710	870	3,640	0.112%	0.713%
2	船橋市役所直下の地震 (タイプⅠ)	580	710	3,210	0.091%	0.620%
3	船橋市役所直下の地震 (タイプⅡ)	390	480	2,530	0.062%	0.476%