

I 調査概要と災害危険性の把握

第1章 調査概要

第1 背景

柏市（以下「本市」）では、平成18年3月に地震被害想定調査（以下「平成17年度調査」という。）を実施した（柏市（2006）¹）。これは、当時の国や千葉県等の被害想定結果を踏まえ、柏市に大きな被害を発生させる可能性が高い、東京湾北部地震、茨城県南部地震、柏市直下地震を想定対象としたものである。

この想定から10年以上経過している。その間に内閣府（2013）²は、平成23年に発生した東日本大震災の教訓と新たな科学的知見を踏まえ、首都直下のマグニチュード（以下「M」という。）7クラスの地震（首都直下地震）、相模トラフ沿いのM8クラスの地震（1923年大正関東地震タイプの地震）など、南関東地域で防災・減災対策等の検討対象とする地震について整理した。過去、中央防災会議、千葉県及び本市で想定対象地震としていた東京湾北部地震については、1923年大正関東地震の震源域に含まれ、近い将来に発生することは無いものとして想定対象から除外された。

中央防災会議は、M7クラスの首都直下地震のうち、被害が大きく首都中枢機能への影響が大きい都心南部直下地震を、防災・減災対策の対象としたほか、長期的な防災・減災対策の対象とする地震を「1923年大正関東地震タイプの地震」、津波避難対策の対象とする地震を「延宝地震」とし、地震動・津波による被害を算出した。人的・物的被害量の算出は、都県単位又は地域一括とされ、地域の詳細な状況は検討されていない。

このため、千葉県では平成28年3月に首都直下地震として、市川市から千葉市を震源域とする「千葉県北西部直下地震（M7.3）」を想定した地震被害想定調査（以下「平成26・27年度県調査」という。）を実施し、市町村別の人的・物的被害量を算出した（千葉県（2016）³）。

これらの新たな知見を踏まえて、今回新たに地震被害想定調査を実施し、今後の地震防災・減災対策の基礎資料とするものとする。

第2 目的

本調査は、本市に大きな被害をもたらす可能性がある地震について、最新の科学的知見と地域社会に関する最新データに基づく被害想定を実施するとともに、本市が作成した災害時あんしんマップ、地区別防災マップ、柏市洪水ハザードマップ、柏市浸水（内水）ハザードマップ、その他本市に関連する防災リスク情報を参考とし、柏市地域防災計画の前提となる防災アセスメント調査を実施することを目的とする。

また、柏市防災アセスメント調査の結果を基に、地域別防災カルテを作成し、市民の防災意識の向上を図ることを目的とする。

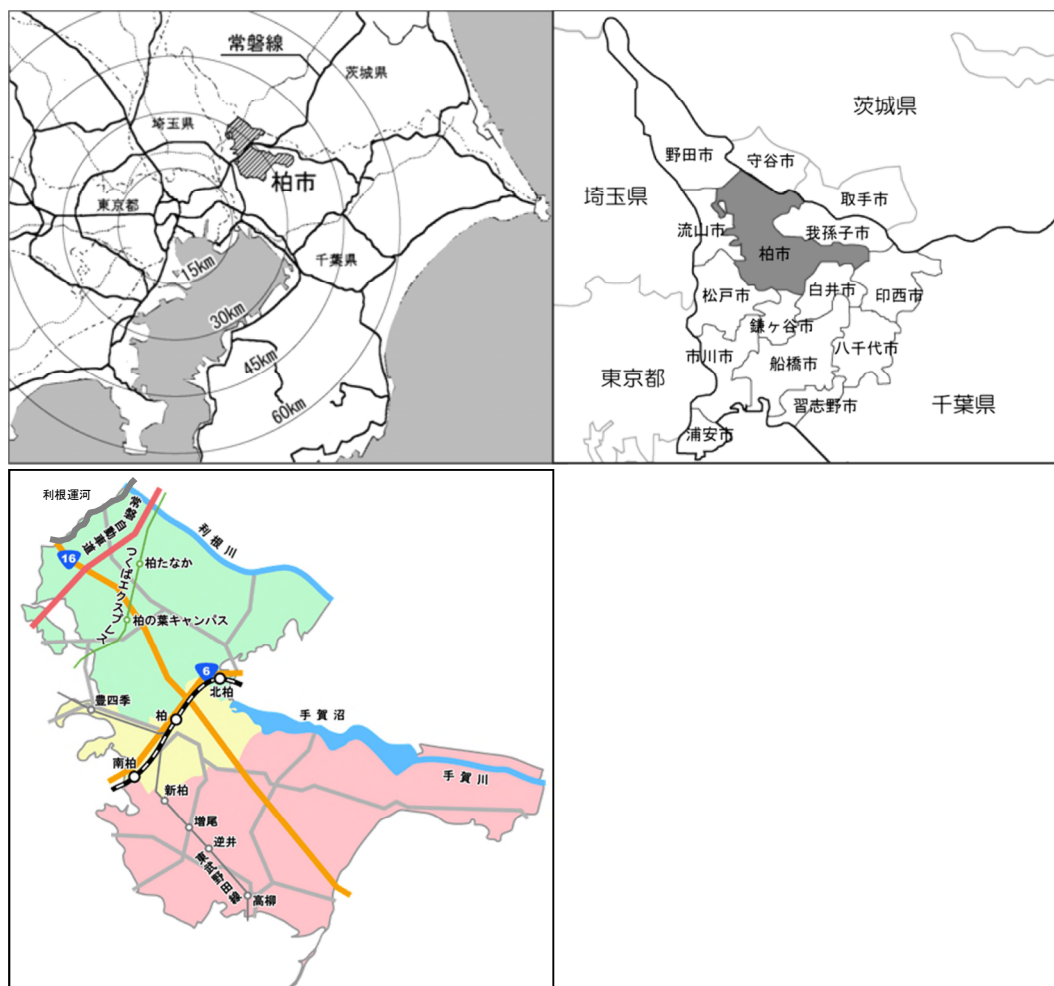
第3 柏市の地域特性

1 地勢・地形・気候

本市は、東京都心から 30 km圏の千葉県北西部に位置する中核市であり、東西約 18 km、南北約 15 km、面積は 114.74 km²である。東に我孫子市及び印西市、利根川を挟んで茨城県取手市及び守谷市、南に鎌ヶ谷市及び白井市、西に松戸市及び流山市、北に野田市が隣接する。

本市は下総台地の北西部に位置し、その大部分は台地上にある。北東部には利根川が流れ、利根川沿いには沖積低地が広がっている。約 7 割を占める台地面と 3 割の沖積面の割合で、階段状を成している。標高差は、最大 32m でほぼなだらかな地形である。

柏市統計書（平成 29 年度版）による平成 29 年の年間平均気温は 15.6℃、年間降水量は 1,124.5mm である。



柏市都市計画マスタープラン、柏市 HP より 一部加筆

図 I-1.3-1 柏市の位置図

2 人口分布及び都市形成

図 I-1.3-2 に近年における本市の人口と世帯数の推移を示す。平成 27 年 10 月 1 日（国勢調査）現在の人口は 413,954 人、世帯数は 175,691 世帯であり、平成 2 年比で 35.7%増加している。また、図 I-1.3-3 に示すように、年齢別人口比率は全国的な傾向と同様、本市においても高齢者比率が増加傾向にあるが、北部地域への市街地拡大・人口流入が進んだことから、地域別の平均年齢は相対的に中心部から南部地域で高く、北部地域で低い傾向にあり地域によりバラつきがある。図 I-1.3-4 に示すように、2025 年をピークに減少することが見込まれている。なお、ここでは経年比較のため国勢調査の人口を用いているが、本調査において採用している人口は、住民基本台帳（平成 30 年 12 月末日現在）のものである。

本市の魅力は手賀沼等の豊かな自然環境や、サッカー、バスケットボール、陸上競技等のホームタウンチームの存在、東京大学をはじめとする多くの教育・研究機関が存在していること等がある。また、柏の葉キャンパス駅周辺地区を中心に進められている「公民学連携による自律した都市経営」をテーマにしたまちづくりは、国の環境未来都市及び地域活性化総合特区に選定され、まちづくりにおける先進的モデルとして国内外から注目を浴びている。

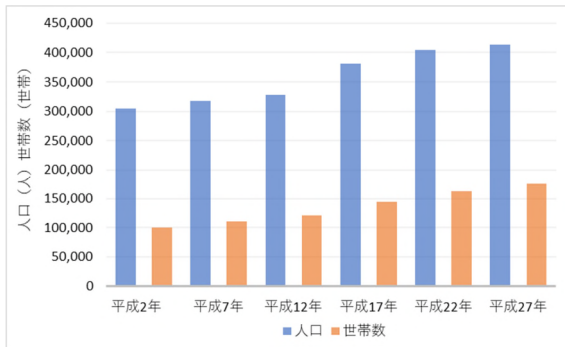


図 I-1.3-2 人口数，世帯数の推移

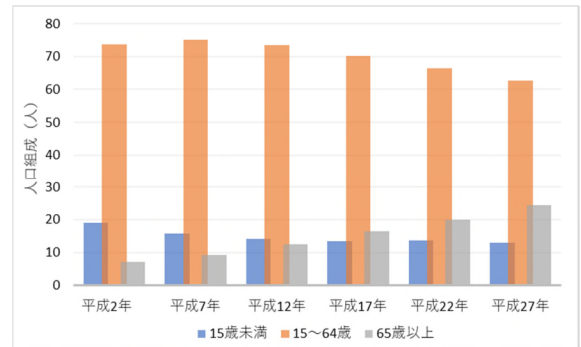
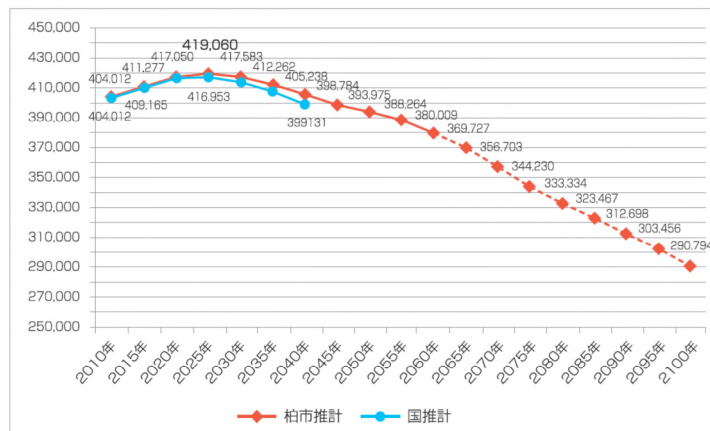


図 I-1.3-3 人口構成



※2010年の国勢調査結果を基に推計
※2015年は推計値

※柏市第五次総合計画より

図 I-1.3-4 今後の人口の見通し

3 交通

北部地域に常磐自動車道の柏インターチェンジが設置されているほか、広域的な幹線道路である国道6号、国道16号等が設置されている。鉄道は、3路線（JR常磐線、東武野田線、つくばエクスプレス線）11駅が立地している。

災害発生後は、県指定の常磐自動車道、国道6号、国道16号、国道464号等が緊急輸送道路となる。

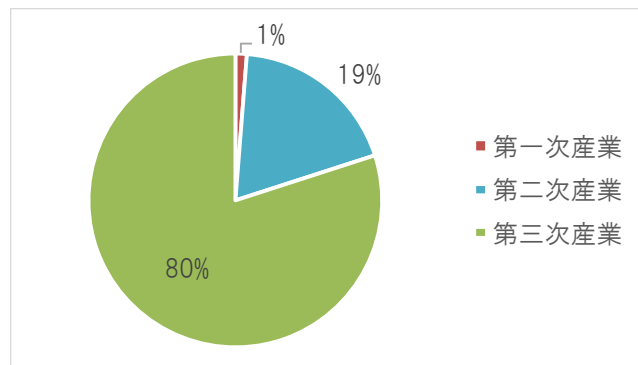


柏市都市計画マスタープランより

図 I-1.3-5 道路インフラの状況

4 産業

本市の産業は図 I-1.3-6 に示すように、第三次産業の占める割合が 80%と多く、第二次産業の割合が 19%、第一次産業が 1%となっている。産業別の内訳は、表 I-1.3-1 に示すように、第三次産業の卸売業・小売業が 18%と最も多く、第三次産業の医療・福祉と第二次産業の製造業が 11%と続いている。さらに、第二次産業の建設業、第三次産業のサービス業及び運輸業・郵便業がそれぞれ 7%となっている。



柏市統計書（平成 29 年版）より

図 I-1.3-6 産業別就業者数構成割合

表 I-1.3-1 産業別就業者数一覧

産業(大分類)		就業者数(人)	割合	
第一次産業	農業, 林業	2,216	1%	1%
	漁業	5	0%	
第二次産業	鉱業, 採石業, 砂利採取業	29	0%	19%
	建設業	13,259	7%	
	製造業	19,953	11%	
第三次産業	電気・ガス・熱供給・水道業	737	0%	80%
	情報通信業	10,218	6%	
	運輸業, 郵便業	11,671	7%	
	卸売業, 小売業	31,392	18%	
	金融業, 保険業	6,868	4%	
	不動産業, 物品賃貸業	5,453	3%	
	学術研究, 専門・技術サービス業	7,962	4%	
	宿泊業, 飲食サービス業	10,072	6%	
	生活関連サービス業, 娯楽業	7,032	4%	
	教育, 学習支援業	9,726	5%	
	医療, 福祉	19,887	11%	
	複合サービス事業	777	0%	
	サービス業(他に分類されないもの)	12,651	7%	
	公務(他に分類されるものを除く)	7,099	4%	
分類不能の産業		11,996	-	-
合計		189,003	100%	

柏市統計書（平成 29 年版）より

第4 基本的な考え方

本調査は、柏市全域を対象とした。

地震動予測手法及び被害予測手法など、近年の技術的發展や東日本大震災等の被害状況を踏まえ、高精度化された手法を用いて地震被害想定調査を実施した。本調査での基本的な考え方は以下のものである。

- ① 南関東地域における地震の規模や発生頻度を考慮して、近い将来（今後 30～100 年以内）に発生する可能性が高く、かつ、本市への影響が大きくなると想定される地震を対象として、地震動、液状化危険度及び人的・物的被害について予測を行った。合わせて予防対策用の地震を設定し想定を行った。
- ② 精度の高い調査結果を得るため、地震波形の計算を行うなど可能な限り詳細な予測手法を採用した。
- ③ 地震による被害や市民生活への影響の全体像を明らかにするため、建物被害や人的被害だけでなく、ライフライン被害や交通施設被害、建物の耐震化等による被害軽減効果等についても幅広く調査を実施した。
- ④ 被害想定調査の結果を、今後の市及び市民の地震防災対策に活用するため、調査結果を、分かりやすさを考慮して、報告書及び防災カルテにまとめた。
- ⑤ 本調査における被害想定調査結果は、あくまで想定地震を基にした予測であり、実際に被害が発生した場合は異なる様相となる場合もあることに注意が必要である。

第5 被害想定単位

地震動算出及び被害予測などの解析を行う単位は、基本的に 50m 標準メッシュ（以下「50m メッシュ」）とし、項目によっては、コミュニティエリア、または線・点とする。

第6 地震発生の季節・時刻・風速

想定する地震発生の季節と時刻については3ケース（表 I-1.5-1）、地震火災の風速については内閣府（2013）を踏襲し2ケース（表 I-1.5-2）を設定した。なお、風向については、柏市最寄りの気象観測点である我孫子における過去5年間の最頻風向から、冬：北西、夏：東を採用した。

表 I-1.5-1 季節と時刻の想定ケース一覧

No.	季節・時刻	想定ケースの説明
1	平日冬5時	1995年兵庫県南部地震と同じ時間帯で多くの人が住宅で就寝中
2	平日夏12時	1923年関東地震と同じ時間帯で、多くの人が職場・学校に滞在中
3	平日冬18時	出火が1年中で最も多いと想定される

表 I-1.5-2 風速の想定ケース一覧

No.	風速	想定ケースの説明
1	4m/s	平均的な風速のケース（冬：北西、夏：東）
2	8m/s	強風のケース（冬：北西、夏：東）

第7 想定地震

中央防災会議（2013a）による、本市を含む南関東地域の直下及びその周辺地域で発生した過去の地震を整理した結果が図 I-1.6-1 である。これによると、M8クラスの地震が200～400年おきに発生しており、過去には、元禄16年（1703年）元禄関東地震、大正12年（1923年）大正関東地震が発生している。また、これらのM8クラスの地震の前にはM7クラスの地震が複数回発生している。大正12年（1923年）大正関東地震から既に約90年が経過しており、今後、次のM8クラスの地震が発生するまでの間に、M7クラスの地震が複数回発生する可能性が考えられる。これに対して、M8クラスの地震については当面発生する確率は低いものの、今後100年先頃には発生する確率が高くなっていると考えられる。

本業務における想定地震は、内閣府（2013）、千葉県（2016）に基づくとともに、平成17年度調査結果、および、周辺の地震環境を踏まえ、本市に影響を及ぼす地震として、以下の3種類の地震を想定するものとする。

- ① 柏市直下地震（Mw7.3）
- ② 千葉県北西部直下地震（Mw7.3）
- ③ 大正型関東地震（Mw8.2）

想定地震の詳細については、第2章で説明する。

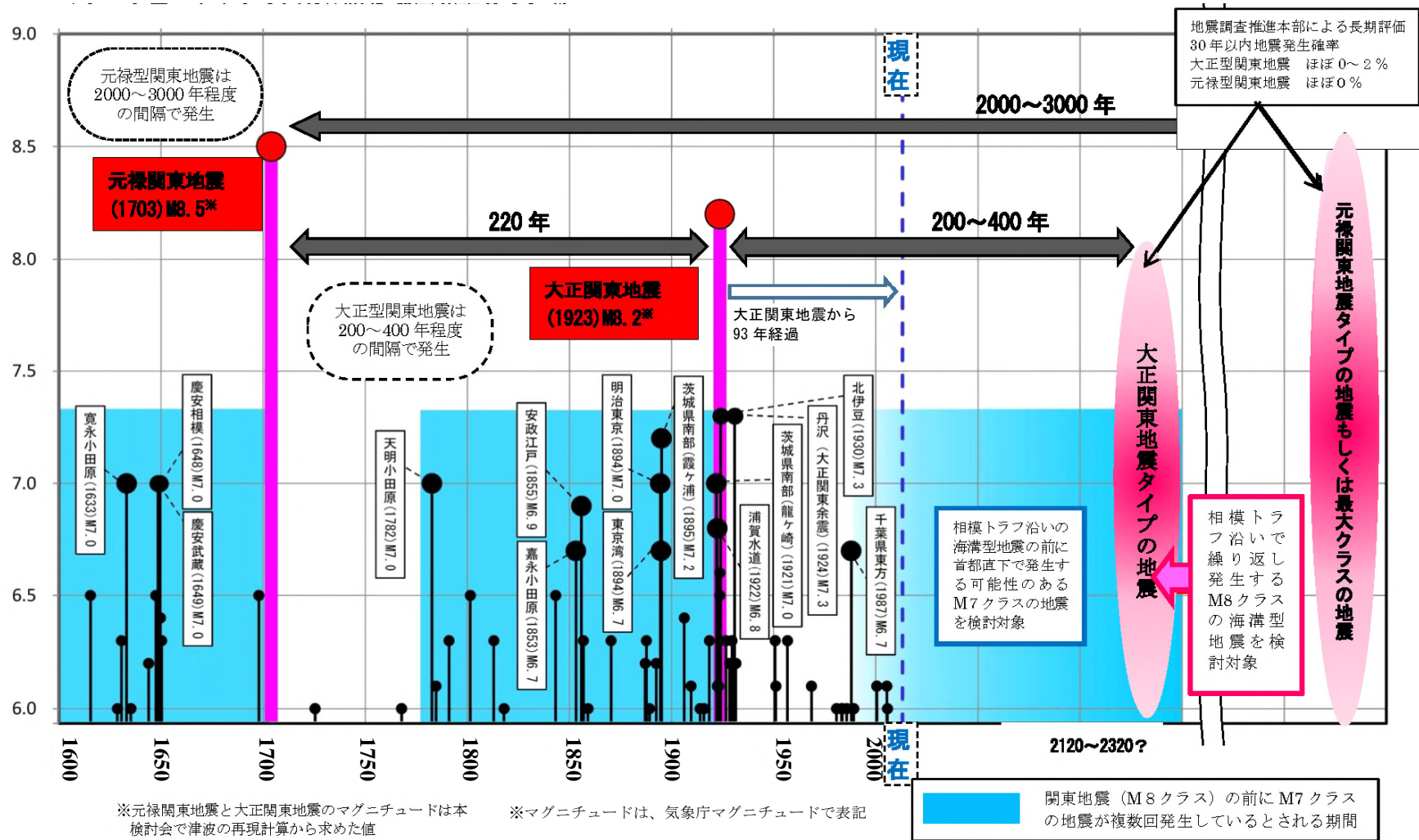


図 I-1.6-1 南関東地域で発生した地震 (中央防災会議 (2013a) ⁴を一部修正)

第8 調査内容

本調査における主な被害予測項目と予測内容は表 I-1.7-1 のとおりである。

表 I-1.7-1 本調査の被害予測項目一覧表

種別	小項目	予測項目
揺れ・地盤被害	地震動	震度分布等
	液状化	液状化危険度、地盤の沈下量
	急傾斜地崩壊	急傾斜地崩壊危険度
建物被害・火災被害	揺れ	全壊・半壊棟数
	液状化	全壊・半壊棟数
	急傾斜地崩壊	全壊・半壊棟数
	出火・延焼	焼失棟数
人的被害	建物倒壊	死者数、重傷者数、軽傷者数
	屋内収容物移動・転倒、屋内落下物、屋内ガラス被害	死者数、重傷者数、軽傷者数
	急傾斜地崩壊	死者数、重傷者数、軽傷者数
	火災	死者数、重傷者数、軽傷者数
	ブロック塀・自動販売機の転倒、屋外落下物	死者数、重傷者数、軽傷者数
ライフライン被害	電力	停電軒数、停電率
	上水道	機能支障人口、機能支障率
	下水道	機能支障人口、機能支障率
	通信	機能支障回線数、機能支障回線率
	ガス	都市ガス機能支障戸数、機能支障率
交通施設被害	道路施設	道路橋梁被害数、道路閉塞率
	鉄道施設	不通区間及び復旧日数
生活への影響	避難者数	避難所避難者数、避難所外避難者数
	帰宅困難者数	主要駅周辺の帰宅困難者数
	ペット被災	被災ペット数、避難所同行ペット数
その他の被害	震災廃棄物	震災廃棄物発生量
	エレベータへの閉じ込め	エレベータへの閉じ込め発生台数
	長周期地震動の影響	長周期地震動の影響について定性的に評価
	医療機能支障	医療需要に対する過不足量を予測
	直接経済被害予測	直接経済被害額
減災効果	建物の耐震化等による被害軽減効果の推計	建物の耐震化、家具転倒防止対策、出火防止対策、上下水道の耐震化対策による被害軽減効果の推計
シナリオ	災害シナリオ	被害シナリオ及び対応シナリオ

第9 調査フロー

調査のフローを図 I-1.8-1 に示す。

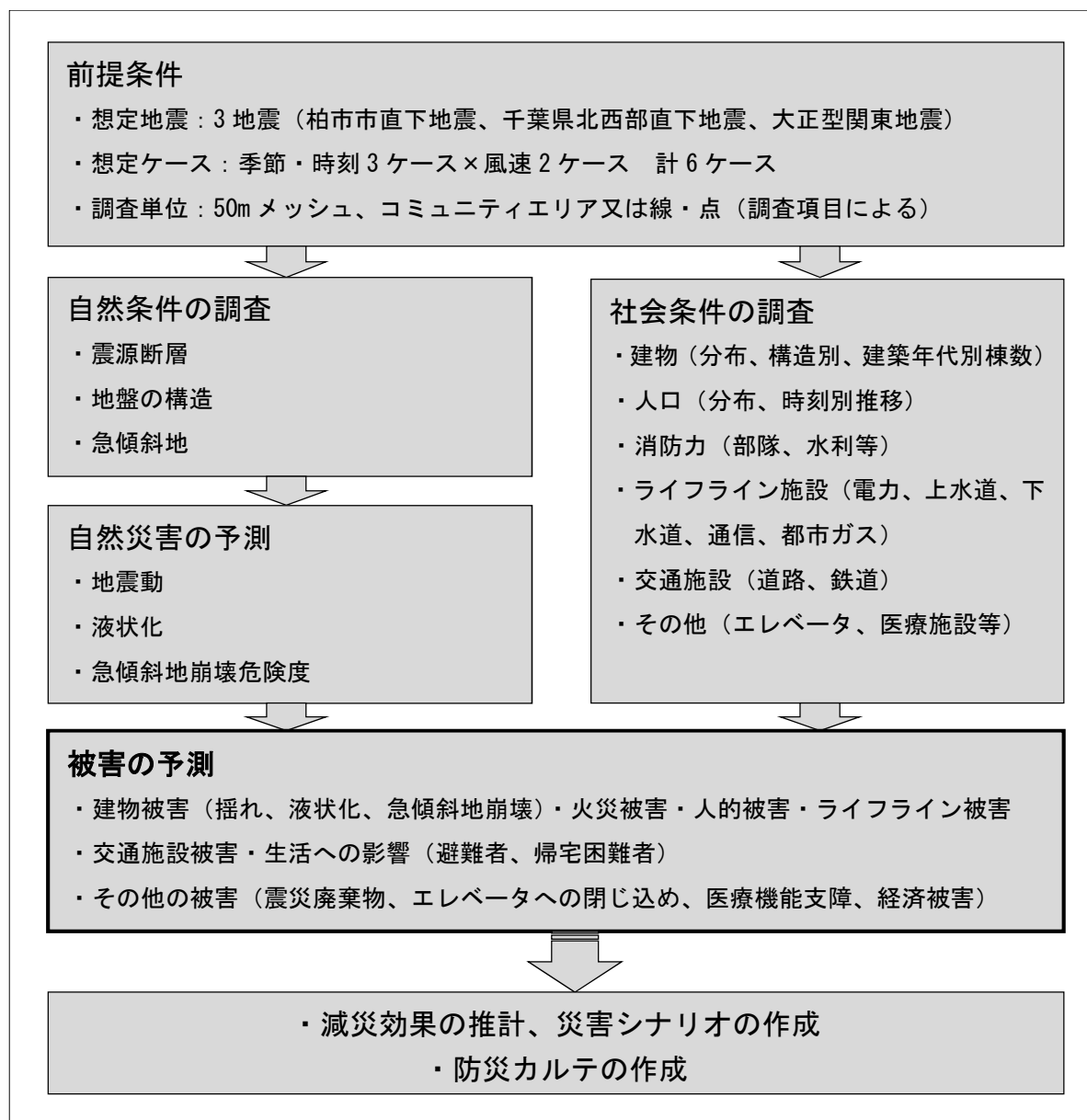


図 I-1.8-1 調査のフロー図

第2章 想定地震の断層モデルの設定

第1 南関東地域における地震環境

本市の位置する南関東地域は、北米プレート、フィリピン海プレート及び太平洋プレートの3つのプレート*が交わって沈み込む地域である(図 I-2.1-1)。このため、この地域ではプレートの境界面やプレートの内部で様々なタイプの地震(図 I-2.1-2)が発生し、大きな被害を引き起こしてきた。

文部科学省の地震調査委員会(2004)⁵は、南関東地域でプレートの沈み込みに伴うM7程度の地震の発生確率を今後30年以内で70%程度であるとしている。また、中央防災会議(2013a, b)⁶は南関東地域では1923年大正関東地震タイプのM8程度の地震の発生前に、沈み込むプレート内で発生するM7程度の地震(図 I-2.1-2の③)の発生が頻発するとしている(図 I-1.6-1)。

これらの地震の発生想定から、内閣府は、防災・減災対策の主眼を置く地震として都心南部直下地震(図 I-2.1-3)について被害想定を実施した。また、平成26・27年度県調査ではプレート内で発生するM7程度の地震として、市川市～千葉市直下を震源域とする千葉県北西部直下地震(図 I-2.1-4)について新たに被害想定を実施した(千葉県(2016))。

これらのフィリピン海プレート内で発生するM7程度の地震については、発生する可能性の高い位置を特定することは困難であるため、内閣府や千葉県の想定においては、国や県に最も大きな被害をもたらすと考えられる位置に震源を設定して被害想定を実施している。このような状況を踏まえると、本市においても直下に震源を設定した地震を想定することが適当であると考えられる。

一方、フィリピン海プレートと北米プレートの境界の地震(図 I-2.1-2の②)においては、中央防災会議(2004)⁷や千葉県(2008)⁸において「東京湾北部地震」が想定されており、本市の平成17年度調査においても、東京湾北部地震について検討している。しかしながら内閣府(2013)は、大正12(1923)年に発生したプレート境界地震である大正関東地震の震源域に、従来東京湾北部地震が発生すると想定されていた範囲が含まれるとしており、大正関東地震の際にひずみが解放されたと想定されることから、この範囲で近いうちに地震が発生する確率は低いとして検討から除外している。

1703年元禄地震や1923年大正関東地震等のフィリピン海プレートと北米プレートの境界のM8クラスの地震については当面発生する確率は低い、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る。

*プレート：プレートとは、地球の表面を覆っている十数枚の巨大な板状の岩盤で、それぞれが違う方向に年間数センチメートルの速度で動いている。千葉県付近では、陸のプレートである北米プレートの下に海のプレートであるフィリピン海プレートと太平洋プレートが引きずり込まれ、その力に耐えきれず跳ね上がろうとするときに海溝型地震が発生する。

また、地殻内の浅い地震（図 I-2.1-2 の①）としては一般に「活断層*」による地震が想定され、本市の平成 17 年度調査においても「柏市直下地震」を想定して検討している。しかしながら千葉県がこれまでに実施した活断層調査の結果では、本市内に活断層は確認されていない⁹。ただし、既往の調査で活断層が確認されていない地域においても地震が発生する可能性は存在することから、地殻内の浅い地震（図 I-2.1-2 の①）のリスクについても検討する必要があると考えられる。



図 I-2.1-1 関東周辺のプレート境界（内閣府（2013））

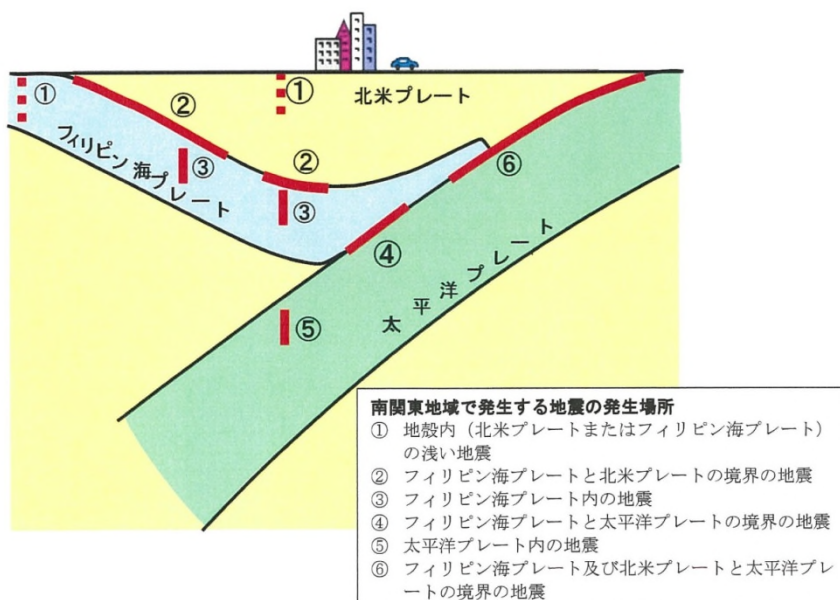


図 I-2.1-2 南関東地域で発生する地震のタイプ（内閣府（2013））

*活断層：比較的最近（数 10 万年～ 200 万年）において地震を繰り返し発生させてきた断層であり、今後も地震を引き起こす可能性が高いと考えられる。地形図の判読やトレンチ調査（活断層と推定される領域でトレンチ（溝）を掘り、壁面の地層を観察する調査）などにより推定される。

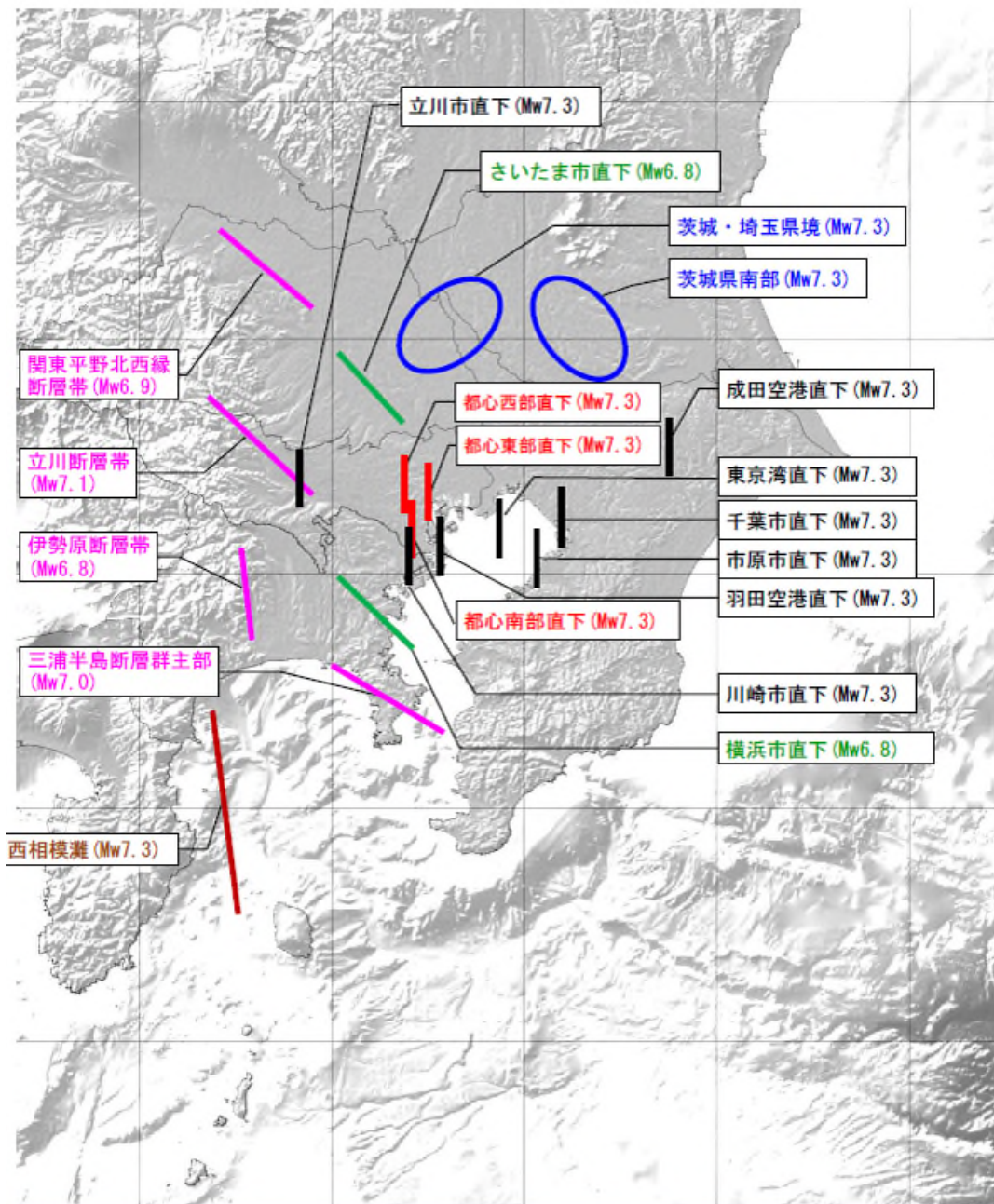


図 I-2.1-3 内閣府（2013）で検討対象とした地震の断層位置（内閣府（2013））

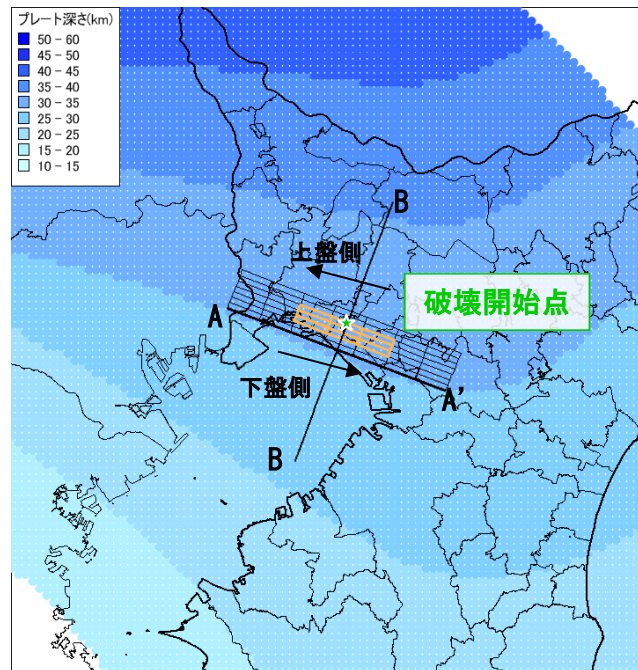


図 I-2.1-4 千葉県北西部直下地震の震源位置及び破壊開始点* (千葉県 (2016))
 (フィリピン海プレートの深さは内閣府 (2013) による) ー背景領域 ーSMGA*

*破壊開始点:断層面の中で最初に破壊が開始する位置であり、順次隣接する小断層面を破壊が伝播する。
 *強震動生成域 (SMGA) : 断層面の中で特に強い地震波 (強震動) を発生させる領域のことを「強震動生成域 (SMGA)」という。従来は「アスペリティ」と呼ばれていたが、この言葉は強い強震動を発生させる領域と断層すべりの大きな領域の両方を示す用語であり、東北地方太平洋沖地震の詳細な結果、両者は必ずしも一致しない場合があるため、強震動生成域と呼ばれるようになった。(内閣府 2013)

第2 想定地震の設定

以上に述べたこれまでの知見や最新の研究成果を踏まえ、想定地震として以下の 3 地震を設定した（図 I-2.2-1、表 I-2.2-1）。

- 1) 柏市直下地震（M7 クラスの地震）
- 2) 千葉県北西部直下地震（M7 クラスの地震）
- 3) 大正型関東地震（長期的な視野に立った地震）

これらの 3 地震に加えて、地域の防災リスクを考える上で各地の直下でプレート内と地殻内で M7 程度の地震の発生を想定し、各地の最大の揺れを予防対策用地震の震度として算出することとした。

- 4) 予防対策用地震（どこで発生するかわからない M7 程度の地震）

表 I-2.2-1 想定対象とした地震の一覧

タイプ	地震名	Mw	概要	30 年以内 発生確率
プレート内	柏市直下地震	7.3	防災・減災対策の主眼に置く地震	70%
	千葉県北西部直下地震	7.3		70%
プレート境界（相模トラフ沿い）	大正型関東地震	7.9	長期的視野に立った対策を実施する地震	0~2%
プレート内	予防対策用地震（プレート内一律）	7.3	地域の防災リスクを考えるための地震	70%
活断層	予防対策用地震（地殻内一律）	6.8		70%

※マグニチュード（M）とモーメントマグニチュード（Mw）の違い

平成 17 年度調査では、地震の規模をマグニチュード（M）で表していた。これは、気象庁が地震発生直後に公表するマグニチュードと同じもので、気象庁マグニチュード（Mj）とも呼ぶ。一方、近年、国際的に「震源における断層運動の大きさ」を反映したモーメントマグニチュード（Mw）が用いられており、最新の国や自治体等の調査でも同様である。そのため、本調査においても地震の規模はモーメントマグニチュード（Mw）で表している。



図 I-2. 2-1 想定断層の位置

★：破壊開始点* ●：柏市役所 ■, ●：強震動生成域 (SMGA)*

* 破壊開始点: 断層面の中で最初に破壊が始まる位置。順次隣接する小断層面を破壊が伝播する。

* 強震動生成域 (SMGA): 断層面の中で特に強い地震波 (強震動) を発生させる領域。

(1) 柏市直下地震

柏市直下地震は、本市直下の M7.3 のフィリピン海プレート内の想定地震（過去に発生が確認されていない地震）である。首都直下地震は南関東地域の直下を震源とする大規模な地震とされ（首都直下地震対策特別措置法）、発生場所は特定されていない。このことから、本市で最も被害が大きくなるような地震として、柏市役所が断層の重心となるような位置に新たに本地震を設定し「柏市直下地震」と命名した（図 I-2.2-2～3、表 I-2.2-2）。この地震を防災・減災対策の主眼に置く地震（シナリオ地震）とし、被害量の算出、シナリオの作成等を行った。

なお、平成 17 年度調査では、「柏市直下地震」として活断層による M6.9、上端深度 4.5km の地震を想定したが、今回の柏市直下地震は、これらの地震とは震源位置や地震のタイプが異なる。

(2) 千葉県北西部直下地震

千葉県北西部直下地震は、平成 26・27 年度県調査による市川市から千葉市直下の M7.3 のフィリピン海プレート内の想定地震（過去に発生が確認されていない地震）である。人口が集中する県北西部で発生する地震が県に対し最も被害が大きくなることから、新たに本地震を設定し「千葉県北西部直下地震」と命名した（図 I-2.2-4～5、表 I-2.2-3）。

平成 26・27 年度県調査による千葉県北西部直下地震の本市での最大震度は 6 強であり、本市を含む広い範囲で被害が想定されることから、本調査においても想定地震とした。

なお、平成 17 年度調査における「東京湾北部地震」（プレート境界地震）と今回の千葉県北西部直下地震は、震源位置や地震のタイプが異なる。

(3) 大正型関東地震

大正型関東地震（関東大震災を引き起こした相模トラフ沿いの M8 クラスの地震）の発生間隔は約 180～590 年程度（地震調査研究推進本部 2004）とされ、前回発生の 1923 年から 90 年以上が経過しているが大正方関東地震の発生の可能性は当面低い。今後百年先頃には発生の可能性が高くなっていると考えられることから、社会情勢の変化を考慮し長期的視野に立った対策を実施する地震として、想定地震とした（図 I-2.2-6、表 I-2.2-4）。

(4) 予防対策用地震

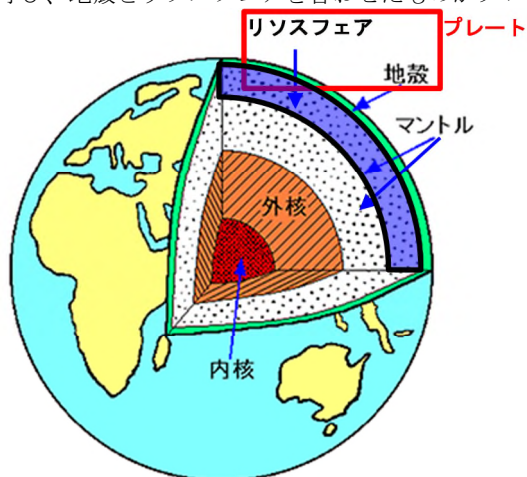
本市を含む南関東地域では、今後 30 年以内に M7 程度の地震の発生確率が 70%程度とその発生が切迫しているとされるが、発生場所の特定は困難で、どこで発生するかわからない。このことから、南関東地域全域で同時に M7 程度の地震が発生すること

は無いが、地域の防災リスクを考える上で各地の直下でプレート内と地殻*内で M7 程度の地震の発生を想定し、各地の最大の揺れを予防対策用地震の震度として算出することとした。

予防対策用地震としては、以下の 2 つの地震タイプの震源による地震を想定した。(陸域の 1km メッシュに 1 つずつ震源を想定し、その震源で地震が発生した場合を想定している。)

- ・ 内閣府 (2013) の「フィリピン海プレート内に一律に Mw7.3 の震源を想定した場合」(図 I-2.2-7)
- ・ 内閣府 (2013) の「地殻内に一律に Mw6.8 の震源を想定した場合」(図 I-2.2-8)

* **地殻**：地殻とは、地球を構成する地殻、マントル、外核、内核の 4 層のうち、最も表層に位置し、最も固い層である。地殻 (図中緑色の範囲) の厚さは大陸部で約 30~40km、海洋で約 6km である。地殻の下位に位置するマントル (藍色+白色) の上層部の比較的固い部分をリソスフェア (岩石圏) (藍色) と呼び、地殻とリソスフェアを合わせたものがプレート (藍色+緑色) である。



竹内均「地球の科学」NHK ブックスに加筆

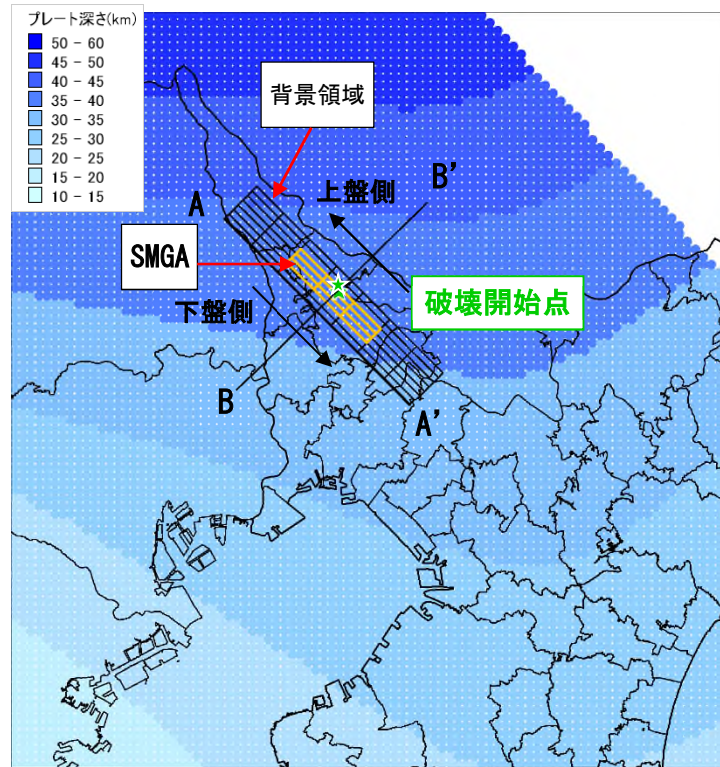


図 I-2. 2-2 柏市直下地震の震源位置及び破壊開始点*

(フィリピン海プレートの深さは内閣府 (2013) による) —背景領域 —SMGA*

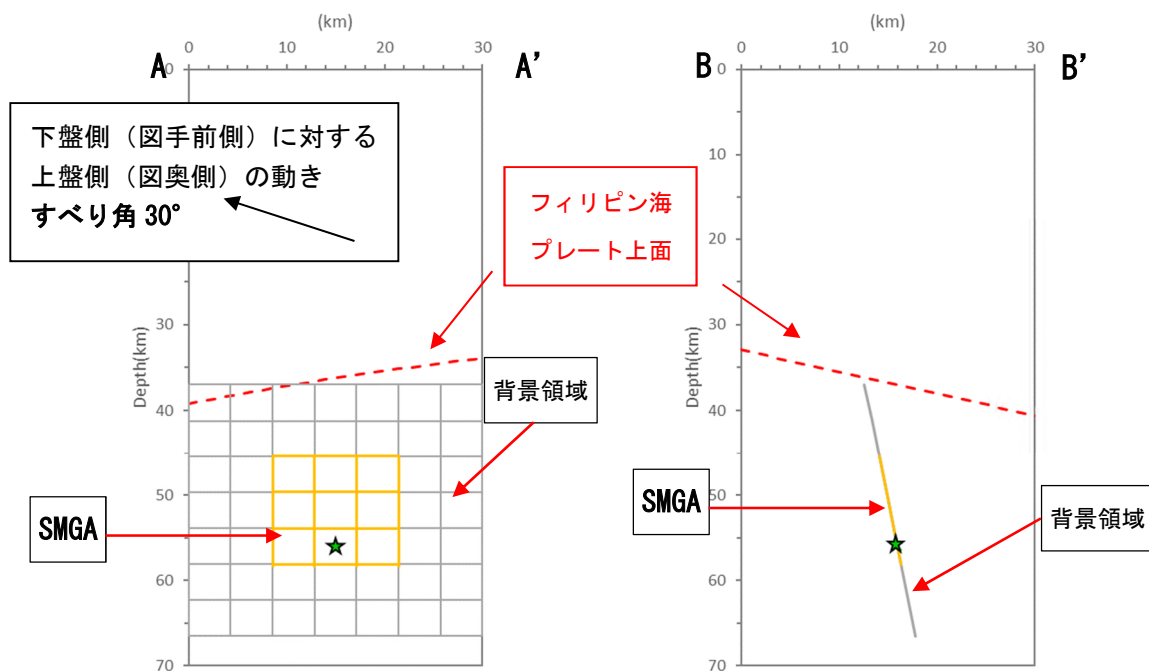


図 I-2. 2-3 断面図とすべり角 —背景領域 —SMGA

*破壊開始点: 断層面の中で最初に破壊が開始する位置であり、順次隣接する小断層面を破壊が伝播する。

*強震動生成域 (SMGA): 断層面の中で特に強い地震波 (強震動) を発生させる領域のことを「強震動生成域 (SMGA)」という。従来は「アスペリティ」と呼ばれていたが、この言葉は強い強震動を発生させる領域と断層すべりの大きな領域の両方を示す用語であり、東北地方太平洋沖地震の詳細な結果、両者は必ずしも一致しない場合があるため、強震動生成域と呼ばれるようになった。(内閣府 2013a)

表 I-2.2-2 柏市直下地震 (Mw7.3) における断層パラメータリスト

項目		数値	備考
断層全体	断層原点緯度	°N	35.76
	断層原点経度	°E	140.07
	面積	km ²	900
	平均応力降下量	MPa	10.3
	平均すべり量	m	2.5
	地震モーメント	Nm	1.1E+20
	モーメントマグニチュード		7.3
	長さ	km	28.1
	幅	km	32.1
	深さ	km	37
	走向	°	315
	傾斜	°	80
	すべり角	°	30
強震動生成域 (S M G A)	応力パラメータ	MPa	62
	面積	km ²	150
	面積比	%	16.7
	平均すべり量	m	5.1
	地震モーメント	Nm	3.5E+19
	モーメントマグニチュード		7.0
	深さ	km	45.4
その他	破壊伝播速度	km/s	2.9
	高周波限界遮断周波数	Hz	6
	剛性率	N/m ²	4.6E+10

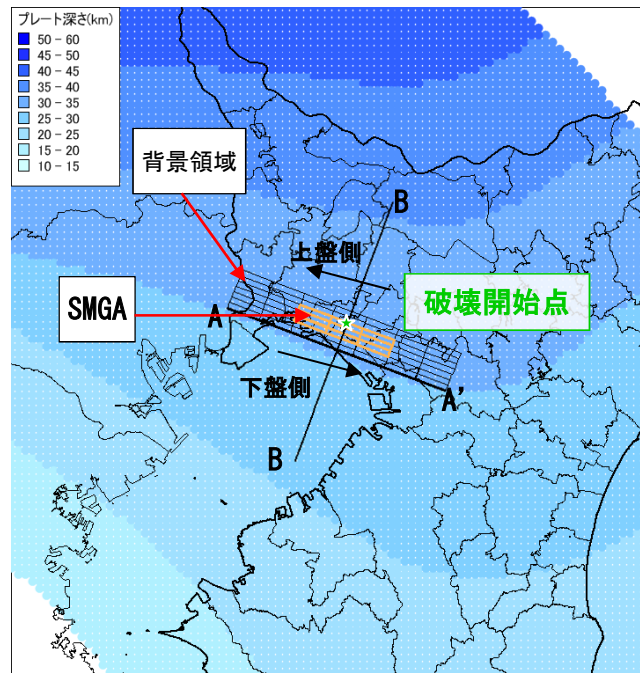


図 I-2.2-4 千葉県北西部直下地震の震源位置及び破壊開始点 千葉県 (2016)
 (フィリピン海プレートの深さは内閣府 (2013) による) —背景領域 —SMGA

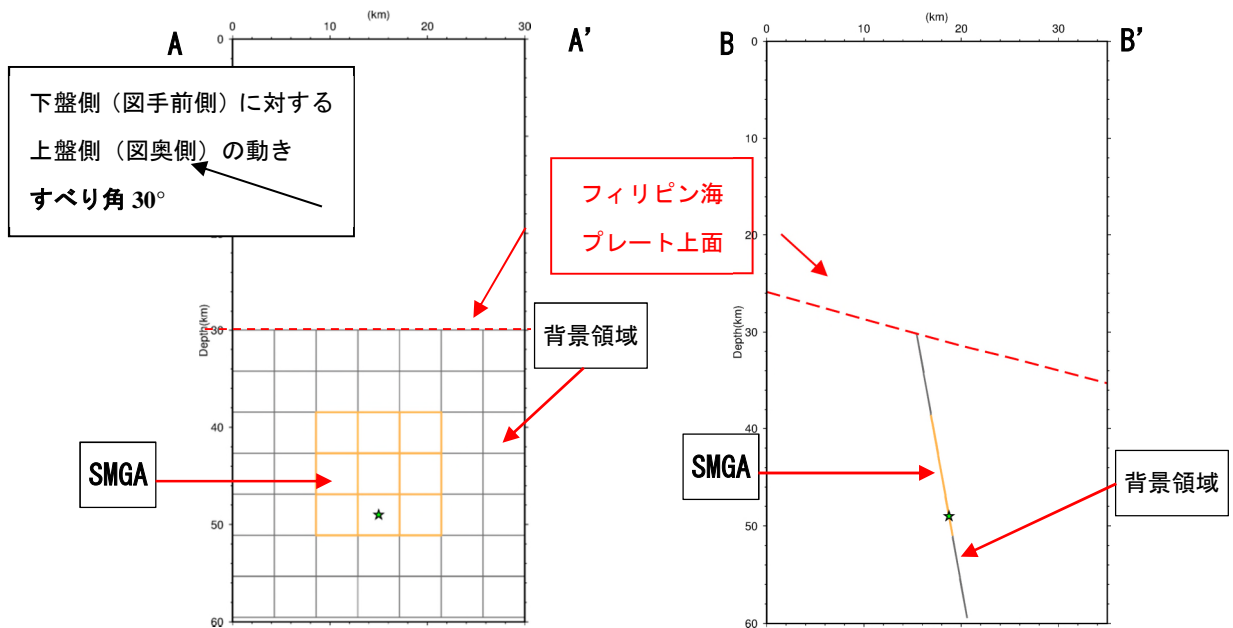


図 I-2.2-5 断面図とすべり角 (千葉県 (2016)) —背景領域 —SMGA

表 I-2. 2-3 千葉県北西部直下地震 (Mw7.3) における断層パラメータリスト
(千葉県 (2016))

項目		数値	備考	
断層全体	断層原点緯度	°N	35.59	
	断層原点経度	°E	140.19	
	面積	km ²	900	岩田・浅野 (2010) ¹⁰
	平均応力降下量	MPa	10.3	面積と地震モーメントの関係より
	平均すべり量	m	2.5	
	地震モーメント	Nm	1.1E+20	岩田・浅野 (2010)
	モーメントマグニチュード		7.3	
	長さ	km	28.1	
	幅	km	32.1	
	深さ	km	30	
	走向	°	290	東南東-西北西
	傾斜	°	80	高角
	すべり角	°	30	縦ずれ成分を持った左横ずれ
強震動生成域 (S M G A)	応力パラメータ	MPa	62	岩田・浅野 (2010)
	面積	km ²	150	
	面積比	%	16.7	
	平均すべり量	m	5.1	平均すべり量×2
	地震モーメント	Nm	3.5E+19	$M_{0s}=mDS$
	モーメントマグニチュード		7.0	$Ds \times S/S_s$
	深さ	km	38.4	
その他	破壊伝播速度	km/s	2.9	
	高周波限界遮断周波数	Hz	6	
	剛性率	N/m ²	4.6E+10	

※断層原点座標、走向、深さ、傾斜、すべり角以外は内閣府 (2013) による

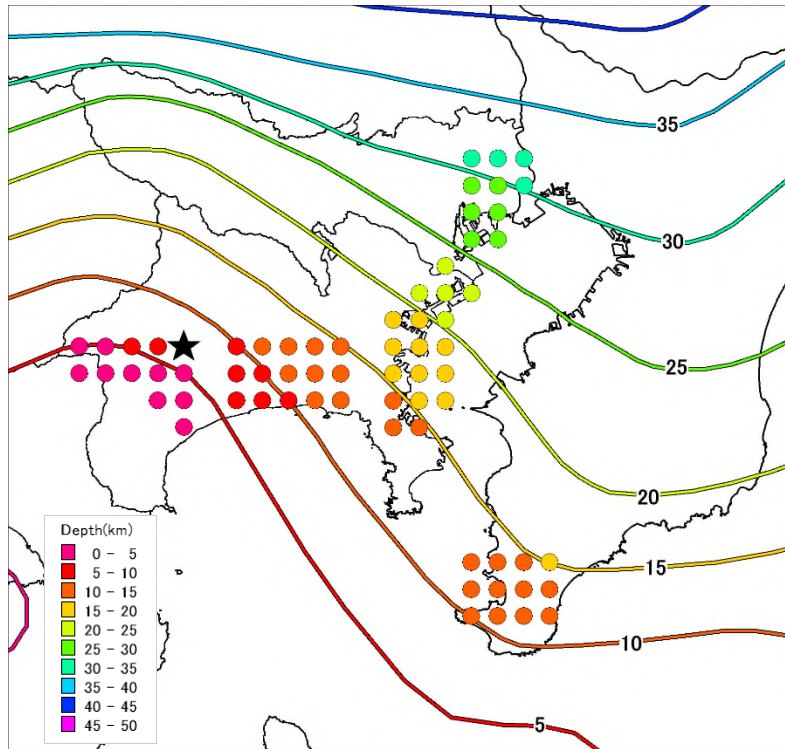


図 I-2. 2-6 大正型関東地震の断層深さとフィリピン海プレート上面深さ
○SMGA ★破壊開始点

表 I-2.2-4 大正型関東地震 (Mw8.2) における断層パラメータリスト
(内閣府 (2013))

項目		数値	備考	
SMGA	面積	km ²	1764	セグメント内の SMGA の面積の和
SMGA①	面積	km ²	312.8	
	地震モーメント	Nm	5.7E+19	$M_0=0.41 \times \square \square \times S^{3/2}$
	Mw		7.1	$\log(M_0)=1.5Mw+9.1$
	応力パラメータ	MPa	25.0	
	ライズタイム	s	3.3	$0.5 \times \sqrt{S}/V_r$
SMGA②	面積	km ²	401.1	
	地震モーメント	Nm	8.2E+19	$M_0=0.41 \times \square \square \times S^{3/2}$
	Mw		7.2	$\log(M_0)=1.5Mw+9.1$
	応力パラメータ	MPa	25.0	
	ライズタイム	s	3.7	$0.5 \times \sqrt{S}/V_r$
SMGA③	面積	km ²	314.4	
	地震モーメント	Nm	5.7E+19	$M_0=0.41 \times \square \square \times S^{3/2}$
	Mw		7.1	$\log(M_0)=1.5Mw+9.1$
	応力パラメータ	MPa	25.0	
	ライズタイム	s	3.3	$0.5 \times \sqrt{S}/V_r$
SMGA④	面積	km ²	473.5	
	地震モーメント	Nm	1.1E+20	$M_0=0.41 \times \square \square \times S^{3/2}$
	Mw		7.3	$\log(M_0)=1.5Mw+9.1$
	応力パラメータ	MPa	25.0	
	ライズタイム	s	4.0	$0.5 \times \sqrt{S}/V_r$
SMGA⑤	面積	km ²	262.1	
	地震モーメント	Nm	4.3E+19	$M_0=0.41 \times \square \square \times S^{3/2}$
	Mw		7.0	$\log(M_0)=1.5Mw+9.1$
	応力パラメータ	MPa	25.0	
	ライズタイム	s	3.0	$0.5 \times \sqrt{S}/V_r$
その他	破壊伝播速度		2.7	$V_r=V_s \times 0.72$
	f_{max}		6	

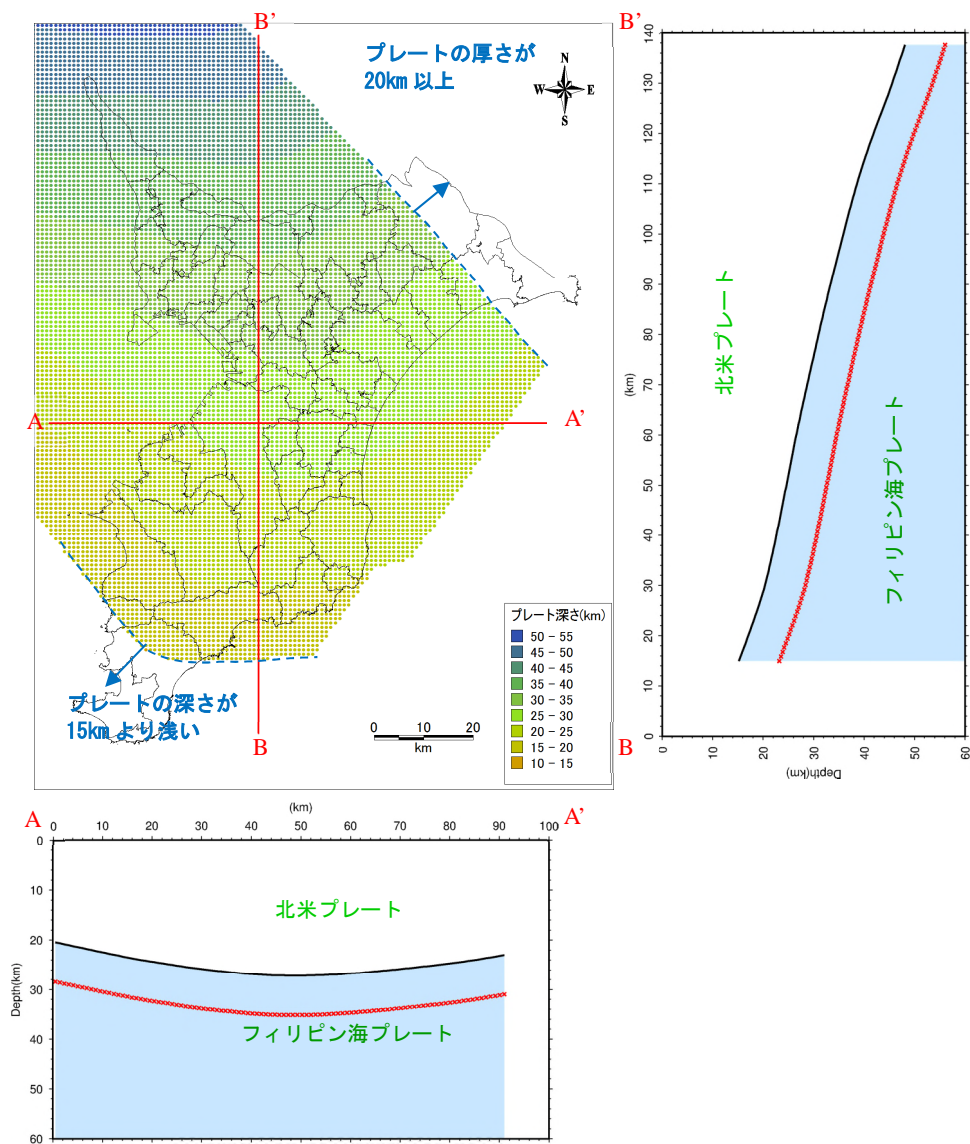


図 I-2.2-7 予防対策用地震（プレート内）の地震動計算に用いる
プレート深さ（プレート面約 1 km メッシュデータ）（千葉県（2016））
ーフィリピン海プレート面

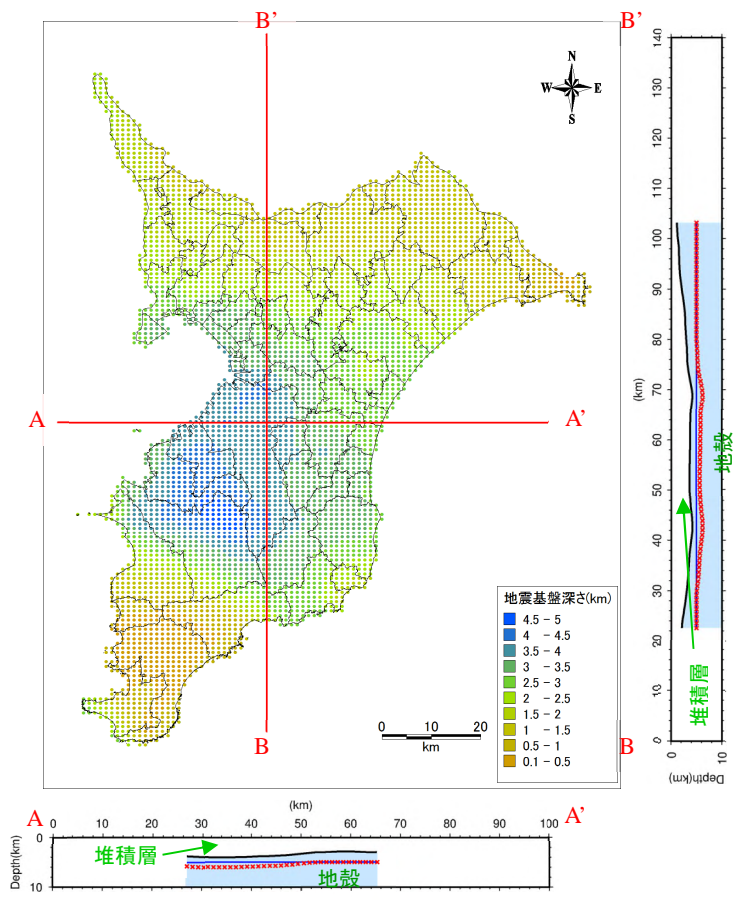


図 I-2.2-8 予防対策用地震（地殻内）の地震動計算に用いる
 地震基盤深さ（地震基盤約 1 km メッシュデータ）（千葉県（2016））
 —地震基盤面 —深さ 5 km

第3章 地盤モデルの作成

第1 地盤モデルの概要

地震動は地中深くの震源断層で発生し、地震基盤（S波速度 3,200m/s 相当層）～深部地盤～工学的基盤（S波速度 500m/s 相当層）～浅部地盤を伝わって地表に達する（図 I-3.1-1）。地表の地震動を計算するためには、深部地盤及び浅部地盤の地盤モデルが必要である。

深部地盤は、地震基盤から工学的基盤までを合わせたものであり、千葉県（2016）および中央防災会議（2013）による地盤モデルを基本とした。浅部地盤は、工学的基盤面から地表までの地盤であり、千葉県（2016）で作成された 50m×50m メッシュ単位の層構造モデルを基本とした。

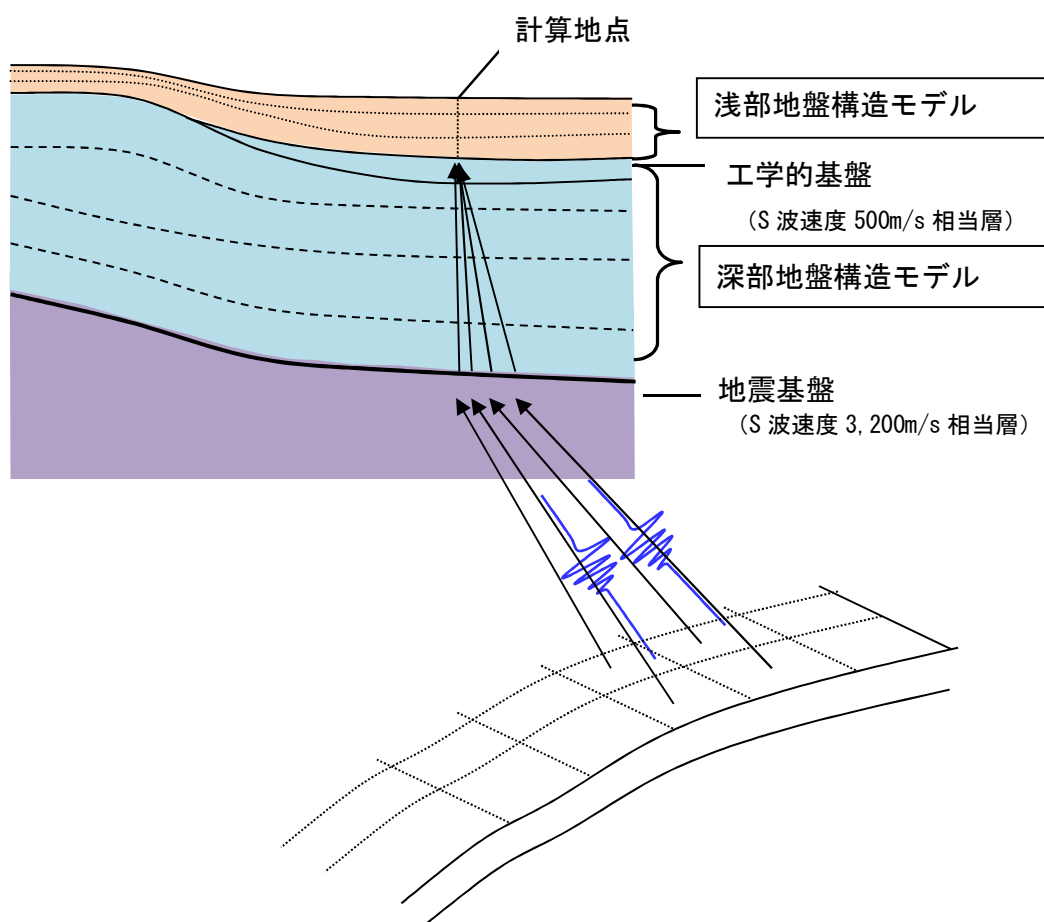


図 I-3.1-1 深部地盤モデルと浅部地盤モデル

表 I-3.1-1 本調査における地盤モデルの概要（千葉県（2016））

今回作成したモデル		S 波速度 (m/sec)	地質区分
浅部地盤（モデル）	N 値 50	100~300 (土質と N 値から換算)	埋立土 沖積層 ローム 下総層群上部（木下層）
		300	下総層群下部 (横田層～地蔵堂層)
	350		
	工学的基盤*	400	
深部地盤（モデル）	地震基盤*	500~2900	上総層群～先第三系
		3200	地殻最上部

千葉県 (2016)では、県内で収集された約 5 万 8 千本のボーリングデータを基に、地震動、液状化について詳細な検討をすることを目的として、特に沖積層（最も新しい時代に堆積した地層）の分布について 50m×50m の詳細なモデルを作成している（被害量は 250m×250m メッシュ単位で想定）。

柏市では、現在約 3,500 本のボーリングデータを所有し、デジタル化を行っている（図 I-3.1-2）。これらのボーリングデータについては、千葉県 (2016)の層構造モデルにも反映されている。

***工学的基盤**：建築物の杭基礎の支持層となる、ある程度の硬さを持った地盤のこと。県内の平野部では地表から数 10m 程度の深さである。

通常ボーリング調査は工学的基盤面まで実施されるため、工学的基盤以浅については詳しいモデル化が可能である。このため、工学的基盤以浅と以深とを分けて解析することがよく行われる。

***地震基盤**：地盤の硬さが水平方向に概ね一定であり、地震動の増幅特性が均質であると想定される地盤のこと。この性質のため、地震基盤面上の地震動の大きさは地震のマグニチュードと震源距離で表すことが出来る。

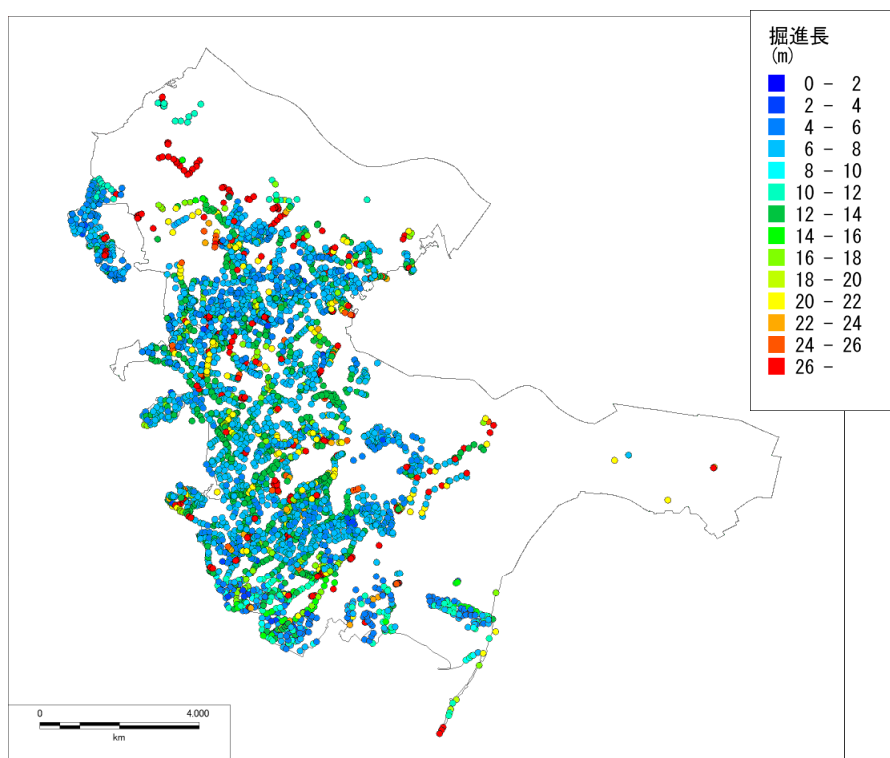


図 I-3. 1-2 柏市が所有するボーリングデータの分布

第2 地盤モデルの物性値

地震応答計算のために必要な浅部地盤モデルの物性値については、千葉県（2016）に従い、以下のように設定した。

土質区分層構造モデルを速度区分層構造モデルに変換するために必要なS波速度 V_s は、砂質土及び粘性土については、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）。

$$V_s = a \cdot N^b \cdot Dep^c \text{ ————— (式□-3.2-1)}$$

ここに、

N : N値

Dep : 地表からの深さ(m)

$a \sim c$: 以下に示す土質毎の係数

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（2001）¹²による以下の関係式を用いて設定した。

$$V_s = a \cdot N^b \cdot c \cdot d \text{ ————— (式□-3.2-2)}$$

ここに、

N : N値

$a \sim d$: 以下に示す土質毎の係数

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

密度については、中央防災会議（2001）による値を用いた（表 I-3.2-1）。

表 I-3. 2-1 地震応答計算のための物性値（中央防災会議 2001）

時代	土質	記号	N値	密度 (g/cm ³)	S波速度(m/s)			動的 記号	
					係数a	係数b	係数c		
完新統	盛土	B1	0~4	1.60	116.9	0.188	0.055	Bc	
		B2	4~10	1.70	116.9	0.188	0.055	Bc	
		B3	10~	2.00	116.9	0.188	0.055	Bc	
	埋立土	F1	0~4	1.60	97.1	0.146	0.059	Bs	
		F2	4~10	1.70	97.1	0.146	0.059	Bs	
		F3	10~	2.00	97.1	0.146	0.059	Bs	
	腐植土	Ap1	0~1	1.20	116.9	0.188	0.055	Ap	
		Ap2	1~	1.30	116.9	0.188	0.055	Ap	
	泥	Ac1	0~2	1.40	116.9	0.188	0.055	Ac	
		Ac2	2~4	1.50	116.9	0.188	0.055	Ac	
		Ac3	4~8	1.60	116.9	0.188	0.055	Ac	
		Ac4	8~15	1.70	116.9	0.188	0.055	Ac	
		Ac5	15~30	1.80	116.9	0.188	0.055	Ac	
		Ac6	30~	1.80	116.9	0.188	0.055	Ac	
	砂質土	Am1	0~2	1.40	116.9	0.188	0.055	Ac	
		Am2	2~4	1.50	116.9	0.188	0.055	Ac	
		Am3	4~8	1.60	116.9	0.188	0.055	Ac	
		Am4	8~15	1.70	116.9	0.188	0.055	Ac	
		Am5	15~30	1.80	116.9	0.188	0.055	Ac	
		Am6	30~	1.80	116.9	0.188	0.055	Ac	
	砂	As1	0~4	1.70	103.5	0.089	0.158	As	
		As2	4~10	1.80	103.5	0.089	0.158	As	
		As3	10~30	1.90	103.5	0.089	0.158	As	
		As4	30~50	1.90	103.5	0.089	0.158	As	
		As5	50~	1.90	103.5	0.089	0.158	As	
	礫	Ag1	~20	1.90	101.457	0.256	0.000	g	
		Ag2	20~30	2.00	101.457	0.256	0.000	g	
		Ag3	30~50	2.00	101.457	0.256	0.000	g	
		Ag4	50~	2.10	101.457	0.256	0.000	g	
	更新統	腐植土	Dp1	0~1	1.20	125.5	0.145	0.137	Ap
			Dp2	1~	1.30	125.5	0.145	0.137	Ap
		ローム	DI1	0~4	1.40	125.5	0.145	0.137	Dc
			DI2	4~	1.50	125.5	0.145	0.137	Dc
		泥	Dc1	0~2	1.50	125.5	0.145	0.137	Dc
			Dc2	2~4	1.60	125.5	0.145	0.137	Dc
			Dc3	4~8	1.70	125.5	0.145	0.137	Dc
			Dc4	8~15	1.80	125.5	0.145	0.137	Dc
			Dc5	15~30	1.80	125.5	0.145	0.137	Dc
			Dc6	30~	1.80	125.5	0.145	0.137	Dc
		砂質土	Dm1	0~2	1.50	125.5	0.145	0.137	Dc
Dm2			2~4	1.60	125.5	0.145	0.137	Dc	
Dm3			4~8	1.70	125.5	0.145	0.137	Dc	
Dm4			8~15	1.80	125.5	0.145	0.137	Dc	
Dm5			15~30	1.80	125.5	0.145	0.137	Dc	
Dm6			30~	1.80	125.5	0.145	0.137	Dc	
砂		Ds1	0~4	1.80	163.4	0.183	0.029	Ds	
		Ds2	4~10	1.80	163.4	0.183	0.029	Ds	
		Ds3	10~30	1.90	163.4	0.183	0.029	Ds	
		Ds4	30~50	1.90	163.4	0.183	0.029	Ds	
		Ds5	50~	2.00	163.4	0.183	0.029	Ds	
礫		Dg1	~20	1.90	124.082	0.256	0.000	g	
		Dg2	20~30	2.00	124.082	0.256	0.000	g	
		Dg3	30~50	2.00	124.082	0.256	0.000	g	
		Dg4	50~	2.10	124.082	0.256	0.000	g	
岩		RW	50~	1.80	300.0	0	0	-	
		R	50~	1.80	300.0	0	0	-	
下総層群		SL1	50~	1.80	300.0	0	0	-	
		SL2	50~	1.80	350.0	0	0	-	
		SL3	50~	1.85	400.0	0	0	-	
上総層群		KZ1	50~	1.85	400.0	0	0	-	
		KZ2	50~	1.90	500.0	0	0	-	

第4章 地震動

第1 概要

これまでに整理した知見及び構築した地盤モデルを基に、地震動の想定を行った。

地震動の予測手法としては、震源断層の位置と規模（マグニチュード）及び地盤の増幅率（揺れやすさ）を基に、震源断層モデルや地盤の構造を詳細にモデル化して地震波形を理論的にシミュレーション計算する手法（詳細法）による地震動の予測を行うこととする。

また予測については、深部地盤と浅部地盤とに分けて検討する。深部地盤については、地震学の理論に基づき、断層の破壊過程を考慮した波形計算手法である「統計的グリーン関数法」を、浅部地盤の予測手法としては、地震工学の理論に基づき、浅部地盤の非線形性の挙動を考慮した波形計算手法である「一次元等価線形法」を用いることとする。

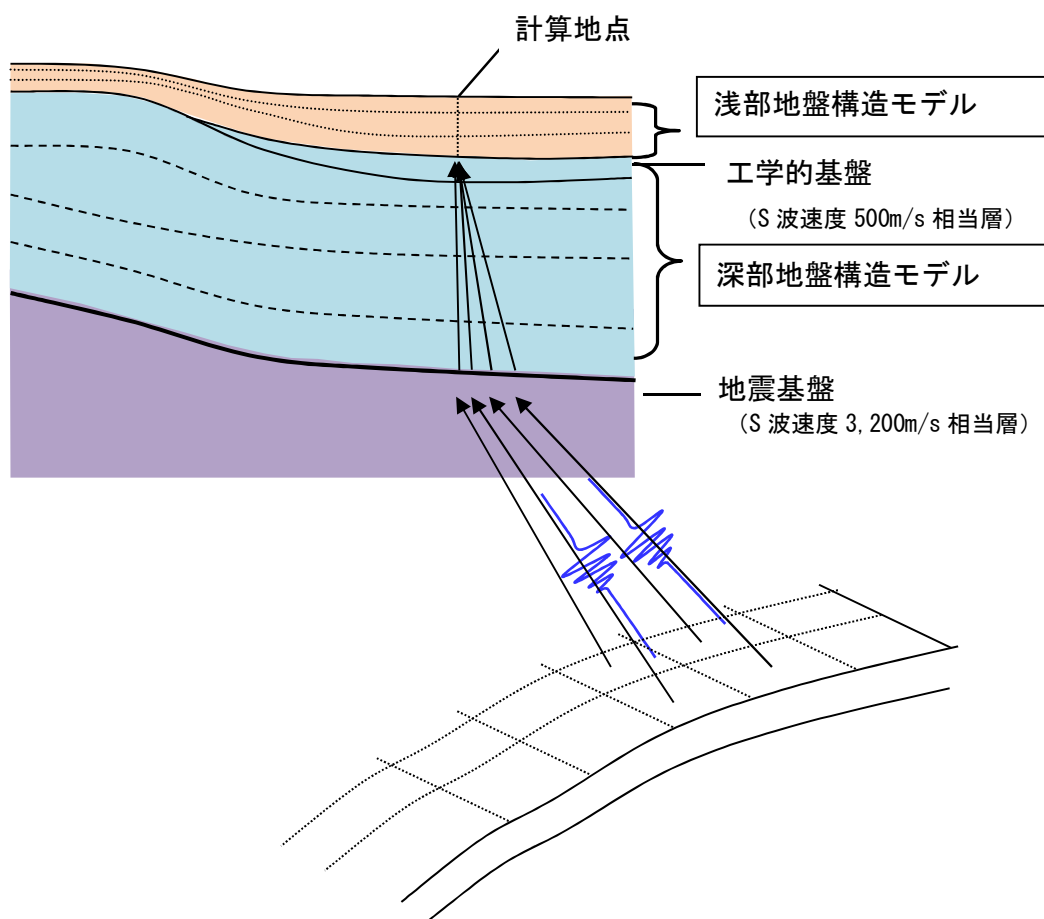


図 I-4. 1-1 地震動波形計算の概念

第2 深部地盤における地震動の計算（統計的グリーン関数法）

1 計算手法

地震動の予測手法について、近年の地震被害想定に用いられている代表的な予測手法をまとめた。まず、深部地盤モデルを用いた震源から工学的基盤までの代表的な予測手法を表 I-4.2-1 に示す。

表 I-4.2-1 震源から工学的基盤面までの代表的な予測手法

	予測手法	特徴	出力
詳細法	経験的グリーン関数法*	<ul style="list-style-type: none"> 地震観測記録をグリーン関数*として用いた予測手法 震源パラメータが適切であれば、再現性は高い 予測対象地点の地震観測記録が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 時刻歴波形*
	統計的グリーン関数法*	<ul style="list-style-type: none"> 乱数による人工地震*を用いてグリーン関数を作成する予測手法 深部地盤構造を一次元*の線形計算*により評価 乱数や深部地盤構造などの計算パラメータの影響を強く受ける 	<ul style="list-style-type: none"> 時刻歴波形
	三次元*有限差分法	<ul style="list-style-type: none"> 震源から計算対象地域を一体で数値計算する手法 表面波や不整形地盤構造の影響を考慮できる 短周期まで計算することは精度や計算機の負荷により困難 	<ul style="list-style-type: none"> 時刻歴波形
簡便法	距離減衰式	<ul style="list-style-type: none"> 地震動の大きさと震源距離の関係式を用いた予測手法 観測記録との整合性は高い 震源の破壊過程や深部地盤構造を考慮できない 	<ul style="list-style-type: none"> 地震動指標 (PGV*、PGA*など) 応答スペクトル

*経験的グリーン関数法：グリーン関数法による地震動の計算のうち、グリーン関数として規模の小さい小地震の観測記録を用いる方法。

*グリーン関数：ここでは、小断層の破壊を表すための関数。具体的には、ある点に瞬間的に力を加えた場合の別な点の応答を与える関数のこと。地震動の計算においては、断層面を細かい小断層に分割し、それぞれの小断層の破壊をグリーン関数で与え、これを足し合わせるにより断層全体の地震動を計算することができる。

*時刻歴波形：地震発生直後からある一定時間の各時刻における地震動の大きさの変化を示したデータであり、縦軸に地震動の大きさ、横軸に時刻をとって作成したグラフ。

*統計的グリーン関数法：グリーン関数法による地震動の計算のうち、グリーン関数として乱数による人工地震を作成して与える方法。

*乱数による人工地震：経験的グリーン関数法で用いている地震観測記録の代わりに、計算式をもって人工的に地震を再現する手法。実際の地震は複雑な過程を経て発生し、微細な初期条件の違いによって地震観測記録は大きく変化するため、乱数を用いて地震の初期条件を設定する。

*一次元：地盤は東西方向、南北方向、上下方向に構造が変化するが、計算を単純化するために、このような三方向の構造の変化を考慮せず、東西方向び南北方向（水平方向）はどこまでいっても一定の構造で変化しないものと仮定し、上下方向の構造の変化だけを考慮することを、一次元という。

*線形計算：地盤の非線形性を考慮せず、線形であると仮定して計算する手法。

*三次元：地盤は東西方向、南北方向、上下方向に構造が変化するが、このように三方向の構造の変化を考慮することを、三次元という。

*PGV：Peak Ground Acceleration の略。地動最大加速度。

*PGA：Peak Ground Velocity の略。地動最大速度。

今回の調査では、以下の理由により、詳細法のひとつである「統計的グリーン関数法」を用いることとする。

- ・浅部地盤を 50m メッシュという大きさに詳細にモデル化したため、地震動についても震源の破壊過程や深部地盤構造を詳細に反映できる手法を採用することが望ましい。このため、詳細法である統計的グリーン関数法を採用し、詳細な地震動の分布を計算することとする。
- ・統計的グリーン関数法は内閣府（2013）、千葉県（2016）等、国や県など多くの自治体で採用されている。
- ・想定地震と同等の地震観測記録が得られていないため、経験的グリーン関数法は適用が難しい。
- ・想定地震の特性（短周期の揺れが卓越する）から短周期地震動の影響が重要であるため、三次元有限差分法の適用は難しい。

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の作成の流れを図 I-4.2-1 に示す。

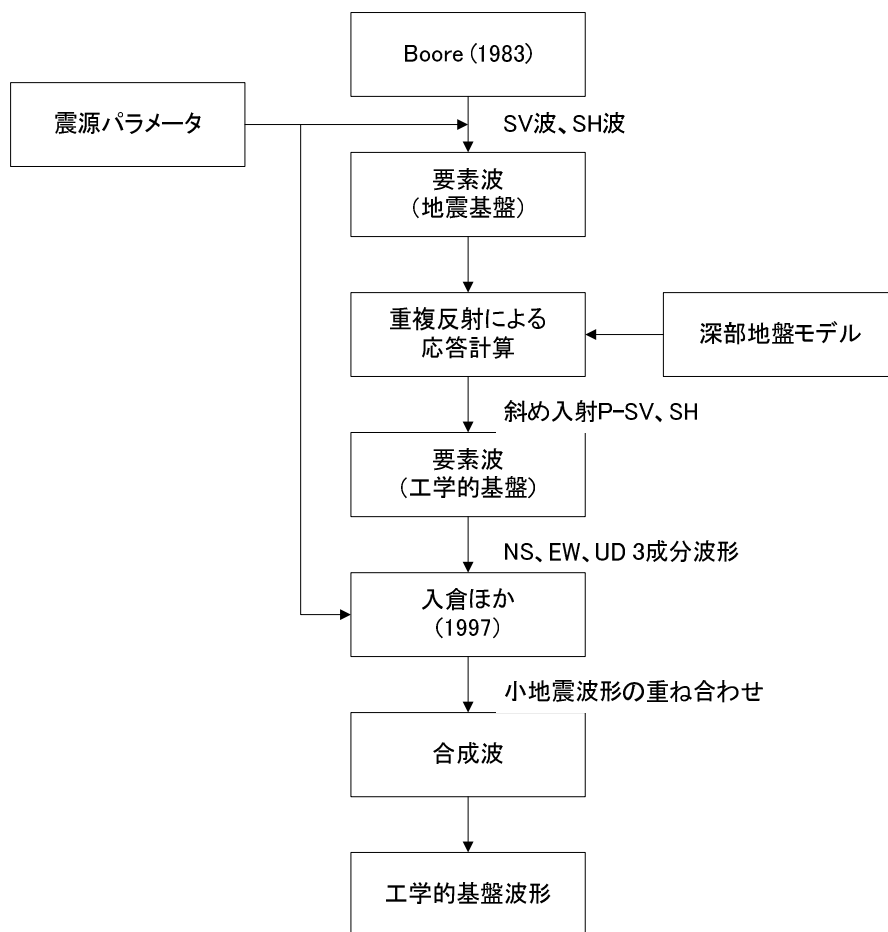


図 I-4. 2-1 統計的グリーン関数法の流れ

以下に、今回想定に適用した統計的グリーン関数法の計算手法について示す。

- ① 対象とする断層面を小断層に分割し、小断層ごとに、Boore (1983)¹³の手法により ω^2 乗則*を満たす振幅スペクトル*の形状を求める。要素地震波形*として、このスペクトルモデルに経験的な位相*特性を与えたものを使用する。
- 小断層ごとに Boore (1983) の手法により ω^2 乗則を満たす振幅スペクトルの形状を求める。このスペクトル形状は以下の式で表現される。

$$S_A(\omega) = \frac{R_{\theta\phi}}{4\pi\rho\beta^3} M_0 \cdot \frac{\omega^2}{1 + (\omega/\omega_c)^2} \cdot \frac{1}{1 + (\omega/\omega_{\max})^2} \frac{e^{-\omega R/2Q\beta}}{R + C} \quad \text{--- (式 4.2-1)}$$

ここで $\omega_c = 2\pi f_c$, $f_c = 4.9 \times 10^6 \beta (\Delta\sigma/M_0)^{1/3}$

$\omega_{\max} = 2\pi f_{\max}$, f_{\max} は高周波遮断周波数

なお、 M_0 は地震モーメント [dyne·cm=10⁷Nm]、 ρ は密度 [g/cm³]、 β は媒質の S 波速度 [km/s]、 R は震源距離 [km]、 $\Delta\sigma$ は応力パラメータ [bar=10⁻¹MPa] である。 $R_{\theta\phi}$ はラディエーション係数であるが、これは、小断層ごとに計算地点への方位角、射出角により計算する。位相特性については、小断層—計算地点間の距離を考慮する佐藤 (1994)¹⁴に従って設定する。

- ② 上記手法で作成した計算地点での地震基盤におけるスペクトルに対して、工学的基盤までの地盤構造による増幅を考慮するため、SH 波*については斜め入射の SH 波動場を、SV 波*については、P-SV 波動場の応答計算を行う¹⁵。

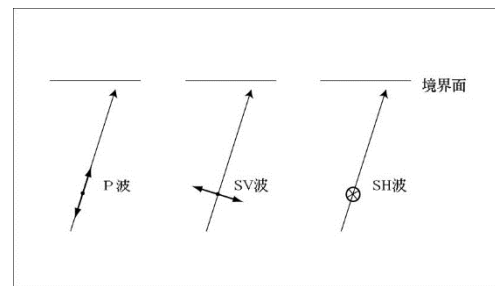


図 I-4.2-2 P 波、SV 波と SH 波

* ω^2 乗則 (オメガにじょうそく): 要素地震波形を定義するスペクトルの振幅は、低い振動数 (ω) では地震モーメントにほぼ等しい一定値であるが、ある振動数 (「コーナー振動数」) より高い振動数では、振動数の二乗に逆比例して振幅が減少するという法則。

*スペクトル: 地震波形には、様々な周期の波が含まれている。理論的には、任意の波形はある振幅と周波数を持つ正弦波 (サインカーブ。 $y=A \cdot \sin(\omega t - \phi)$) という関数で表される。 t は時刻、 A は振幅、 ω は角周波数、 $-\phi$ は初期位相 ($t=0$ における位相) という。) の和で表すことができる。これらの正弦波の周波数とその振幅を並べたものを「スペクトル」と呼ぶ。地震の特徴を説明するためにスペクトルが用いられることがある。

*要素地震波形: 細かく分割した断層 (第 2 章参照) のそれぞれが発生する地震波形のこと。

*位相: 正弦波をグラフで表した時に、グラフが横軸 (時刻) 方向にどれだけずれているかを示す値。

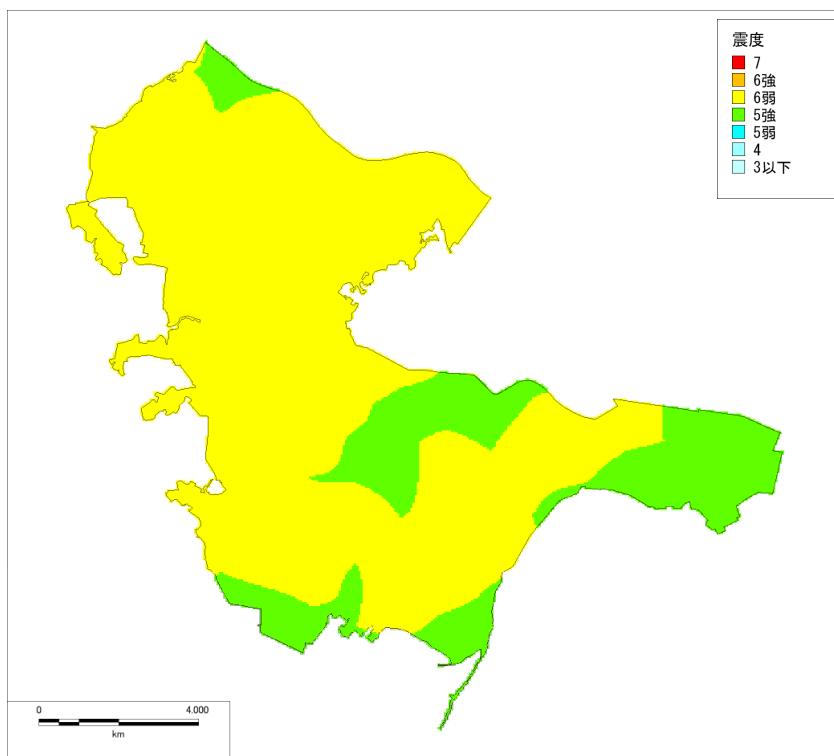
*SH 波: 地震波の進行方向の垂直方向に振動する波のうち、地震波の進行方向を矢印で紙の上にかいたときに、紙面と垂直方向に振動する波。横波。(図 I-4.2-2 参照)

*SV 波: 地震波の進行方向の垂直方向に振動する波のうち、地震波の進行方向を矢印で紙の上にかいたときに、紙面と平行方向に振動する波。横波。(図 I-4.2-2 参照)

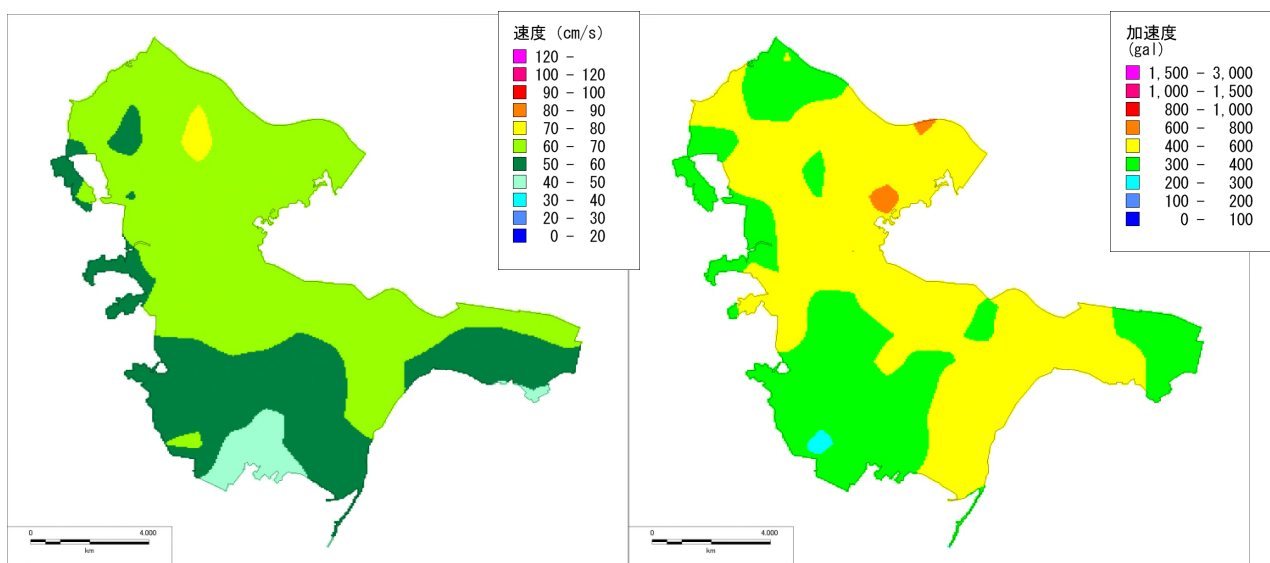
- ③ 求められた工学的基盤で P 波、SH 波、SV 波を東西、南北、上下方向の成分に変換する。工学的基盤での各小断層からの波形を入倉ほか（1997）¹⁶に従って、それぞれの成分ごとに足し合わせる。これにより、工学的基盤での 3 成分波形を求める。

2 工学的基盤における地震動予測結果

工学的基盤面における震度分布、最大速度分布および最大加速度分布を図 I-4.2-3～図 I-4.2-5 に示す。柏市直下地震は、市の広範囲で震度 6 弱となった。千葉県北西部直下地震は、市東部で震度 6 弱となったが、市のほとんどの地域で震度 5 強となった。大正型関東地震は強震動生成域 (SMGA) に近い市南部で震度 6 弱、それ以外の地域で震度 5 強となった。



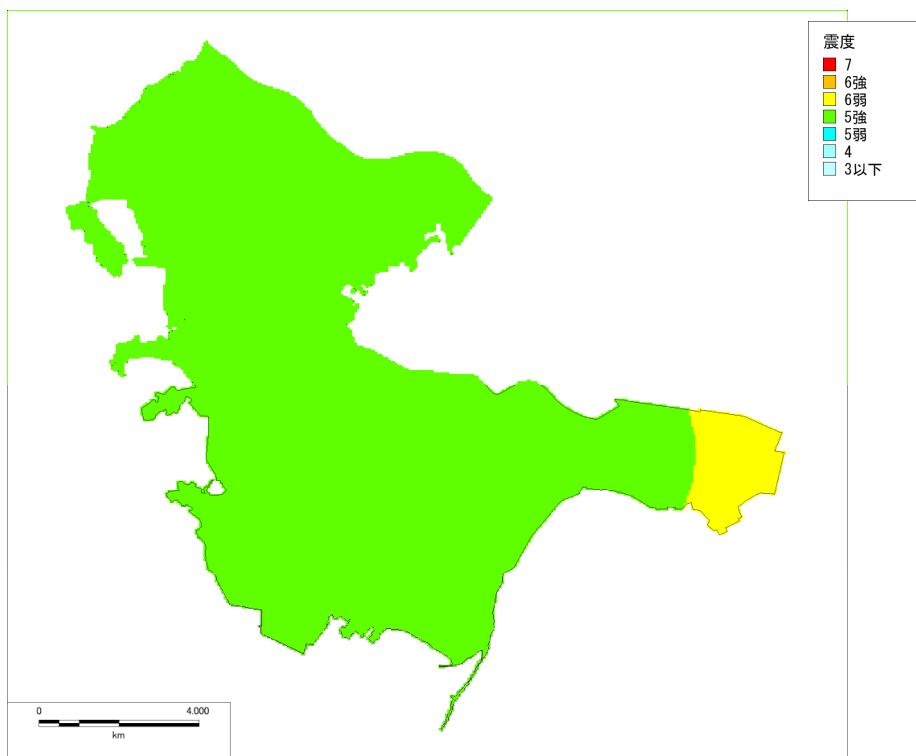
震度



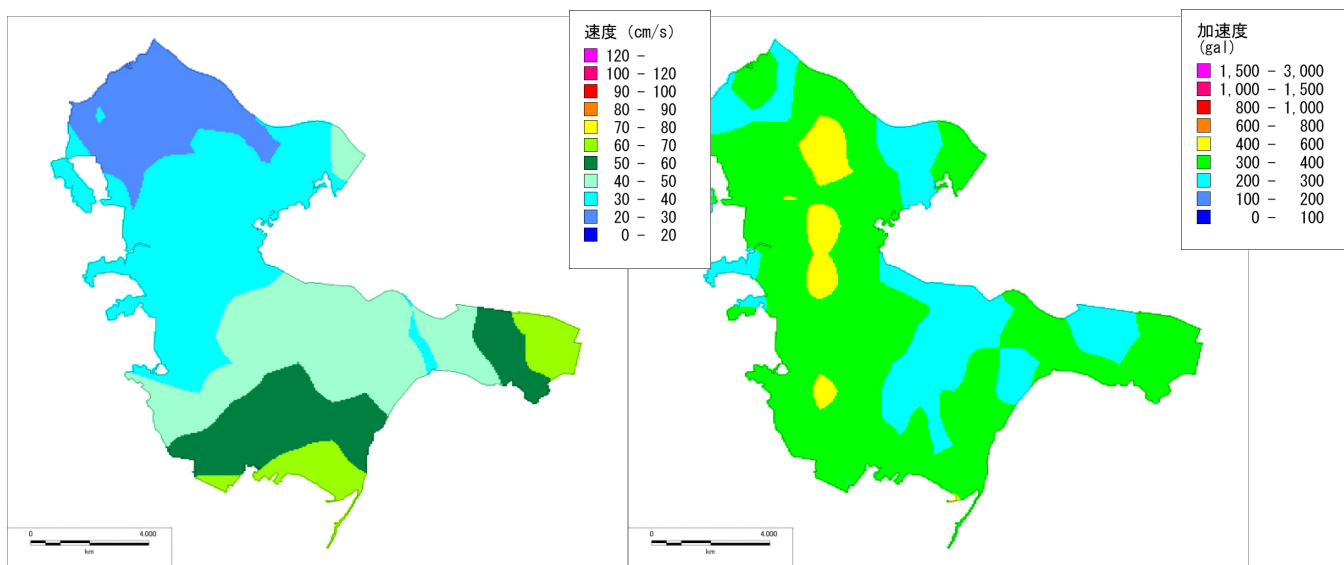
最大速度

最大加速度

図 I-4. 2-3 柏市直下地震 工学的基盤の地震動分布



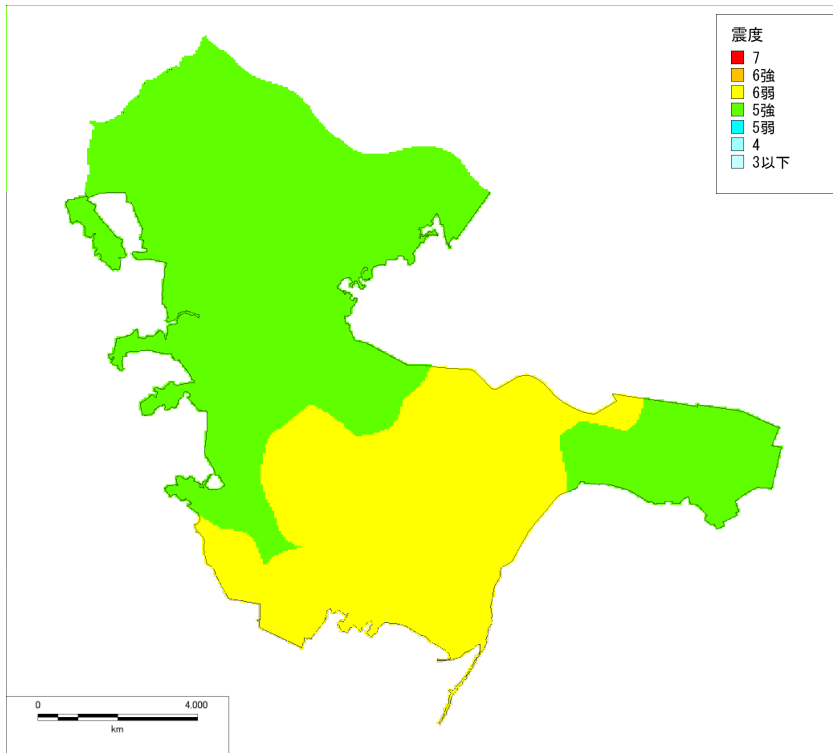
震度



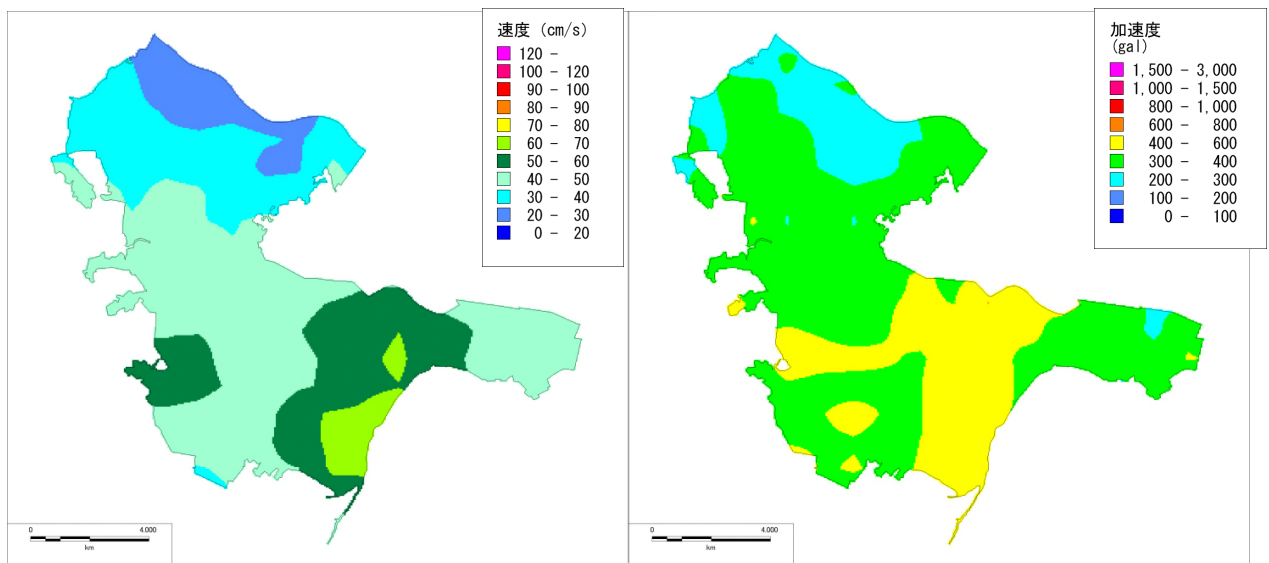
最大速度

最大加速度

図 I-4. 2-4 千葉県北西部直下地震 工学的基盤の地震動分布



震度



最大速度

最大加速度

図 I-4. 2-5 大正型関東地震 工学的基盤の地震動分布

第3 浅部地盤における地震動の計算（一次元等価線形法）

1 計算方法

地表における地震動の計算方法については、工学的基盤で算出された地震動波形と浅部地盤モデルを用いて一次元の**地震応答解析***を行い、その結果から得られた**加速度波形***から**計測震度***、**地表最大加速度*値**、**地表最大速度*値**、**SI 値***の指標を算出する。

地震応答解析は、地盤の非線形性を考慮するために、一次元の等価線形法を用いる。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て実際の地震動と合わなくなるため、周波数の大きさによって**有効ひずみ***の大きさが変化することを考慮した等価線形計算を行う。解析プログラムとしては、吉田・末富(1996)¹⁷による「DYNEQ」を用いる。図 I-4.3-1 に一般的な等価線形地震応答解析プログラムの概要を示した。以下に、計算手順の概略を示す。

- ① 工学的基盤における入力地震動波形をフーリエ変換し、振幅スペクトルを求める。
- ② 工学的基盤面のひとつ上の層について、その層の動的変形特性曲線と初期減衰定数 (h) から有効ひずみ (γ_{eff}) を求め、有効ひずみに対応するその層の周波数応答関数（振動数ごとの増幅率）を求める。
- ③ ①の振幅スペクトルと②の周波数応答関数を掛け合わせ、②の層上面における振幅スペクトルを求める。
- ④ ③を逆フーリエ変換し、②の層上面における地震動波形を求める。
- ⑤ ④からひずみ応答の波形を求め、ひずみ応答の最大値 (γ_{max}) の 65% を有効ひずみ (γ_{eff}) とする。
- ⑥ ②～⑤の計算を全層について行う。
- ⑦ 事前に②で設定した有効ひずみと⑤で求めた有効ひずみとを比較し、両者がある一定値以内に収まっていれば、計算終了とする。一定値内に収まって（収束して）いなければ、⑤の有効ひずみを初期値として、②～⑤の計算を再度行う。
- ⑧ すべての層について有効ひずみの値が収束した時点で計算終了とする。

***地震応答解析**：地震時に工学的基盤に入射した波形が、地盤内をどのように伝わって地表でどのような波形になるかを数値計算により求める解析手法。

***加速度波形**：地震動の大きさとして加速度値をとった地震波形。加速度の時刻歴波形。

***計測震度**：地震計で観測される地震波形を処理して得られる、震度に対応する地震動の大きさを表す数値。例えば、計測震度 6.0～6.4 は震度 6 強に対応する。

***地表最大加速度**：地表加速度の時刻歴波形の中で、加速度値の絶対値の最大。単位は gal (ガル) = cm/s²。

***地表最大速度**：地表速度の時刻歴波形の中で、速度値の絶対値の最大。単位は kine (カイン) = cm/s。

***SI 値 (Spectral Intensity)**：建物被害への影響が大きい周期帯による地震動の指標。減衰 20% の速度応答スペクトルの周期 0.1～2.5 秒の積分値。単位は kine (カイン) = cm/s。今回の調査では建物被害、ライフライン被害 (ガス)、道路施設被害 (道路橋梁) の想定などに用いられる。

***有効ひずみ**：地盤にある一定の大きさの力が加わった時に、地盤が変形する大きさをひずみという。ひずみは加速度や速度と同様に時刻歴でその大きさが変化するが、時刻歴での最大値を最大ひずみという。これに対して、時刻歴の中で平均的なひずみの大きさを、有効ひずみという。

一般的な等価線形計算においては、⑤で示したように、ひずみ応答の最大値の65%を有効ひずみとしている。しかし、一般的な方法では高周波数で地震動の減衰が大きくなりすぎる傾向があるため、周波数によって有効ひずみの大きさを変える（有効ひずみの周波数依存性を考慮する）こととする。周波数依存性の設定については、山本・笹谷（2007）¹⁸による手法を採用した。

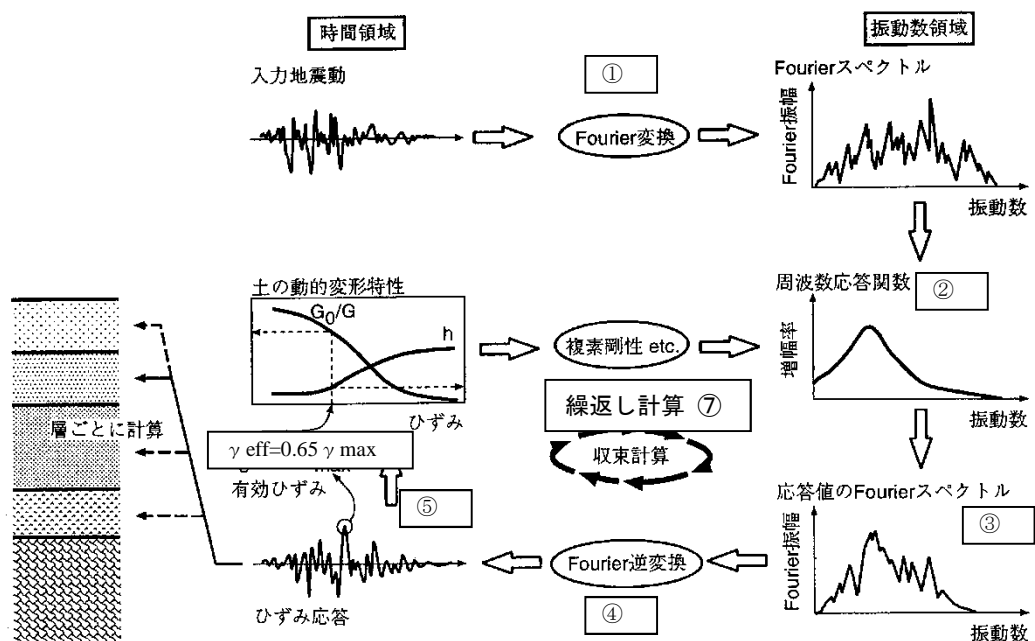


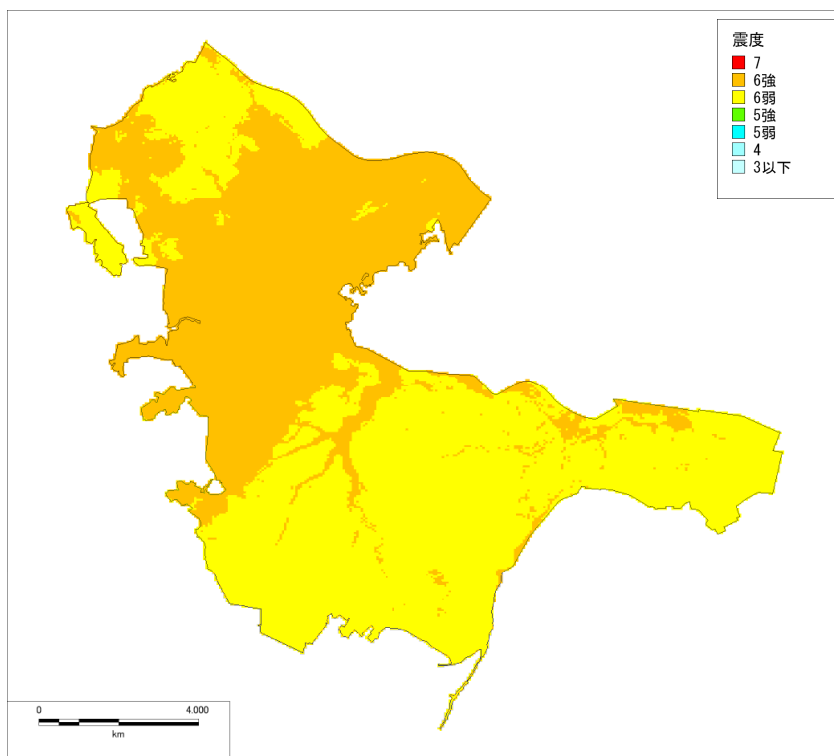
図 I-4.3-1 等価線形地震応答解析プログラムの概要（盛川（2005）¹⁹）

2 地震動予測結果

地表における震度分布、最大速度分布および最大加速度分布を図 I-4.3-2～図 I-4.3-4 に示す。

柏市直下地震は、市北部に震度 6 強の地域が広がった。この理由として、市役所直下に破壊開始点を設定しており、断層の上盤側あたる市の北側で地震動が強くなったためと考えられる。

最大速度は、強震動生成域 (SMGA) 直上の地域および茨城県と接する市境の地域で 120cm/s を超えた。最大加速度は、強震動生成域 (SMGA) 直上の地域から取手市と接する市境にかけての地域で 1,500gal を超えた。千葉県北西部直下地震は、市のほとんどの地域で震度 6 弱となった。最大速度は、震源からの距離に応じた形で小さくなるが、市東部の一部で大きくなった。最大加速度は市の中央部で 800gal を超えた。大正型関東地震は、市のほとんどの地域で震度 6 弱となった。最大速度は、市南部で 120cm/s を超えた。最大加速度は市南部の多くの地域で 600gal を超えた。



震度

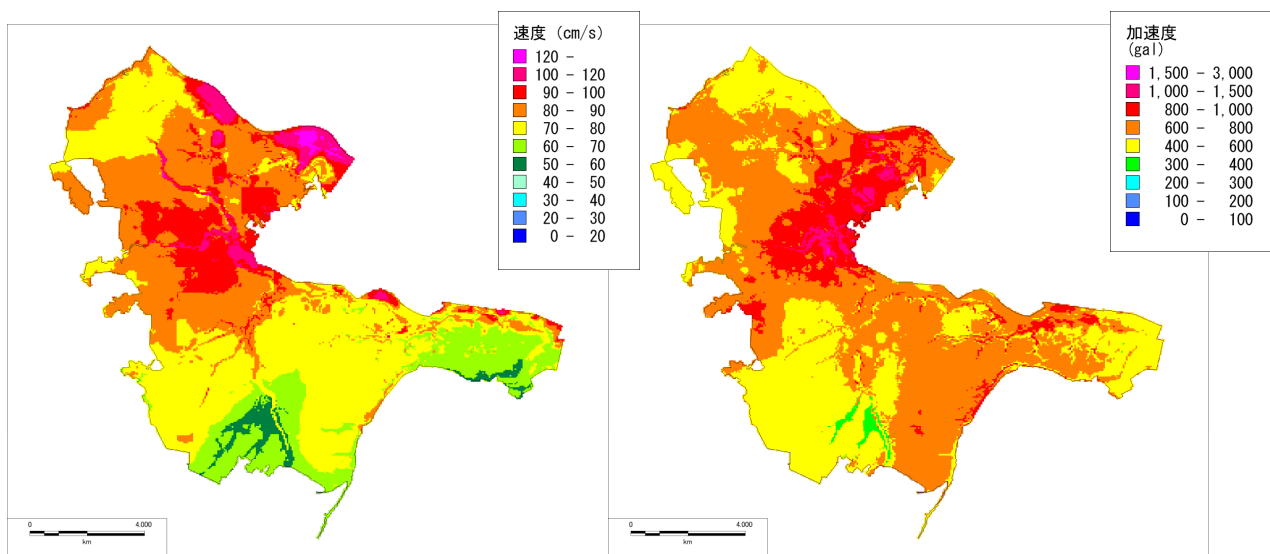
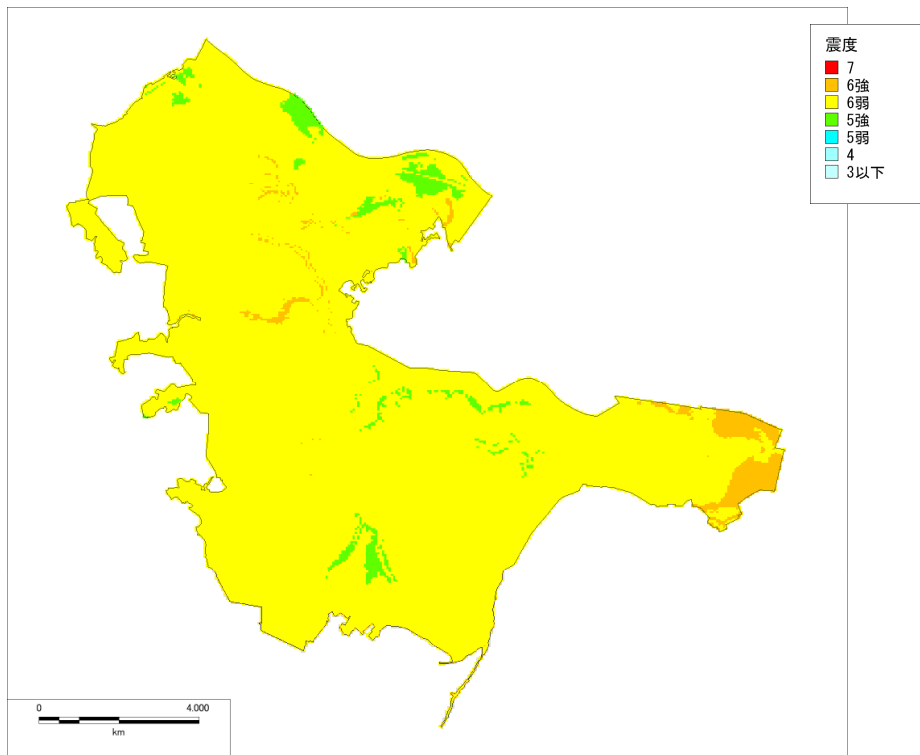


図 I-4.3-2 柏市直下の地震 地表の地震動分布 (等価線形計算)



震度

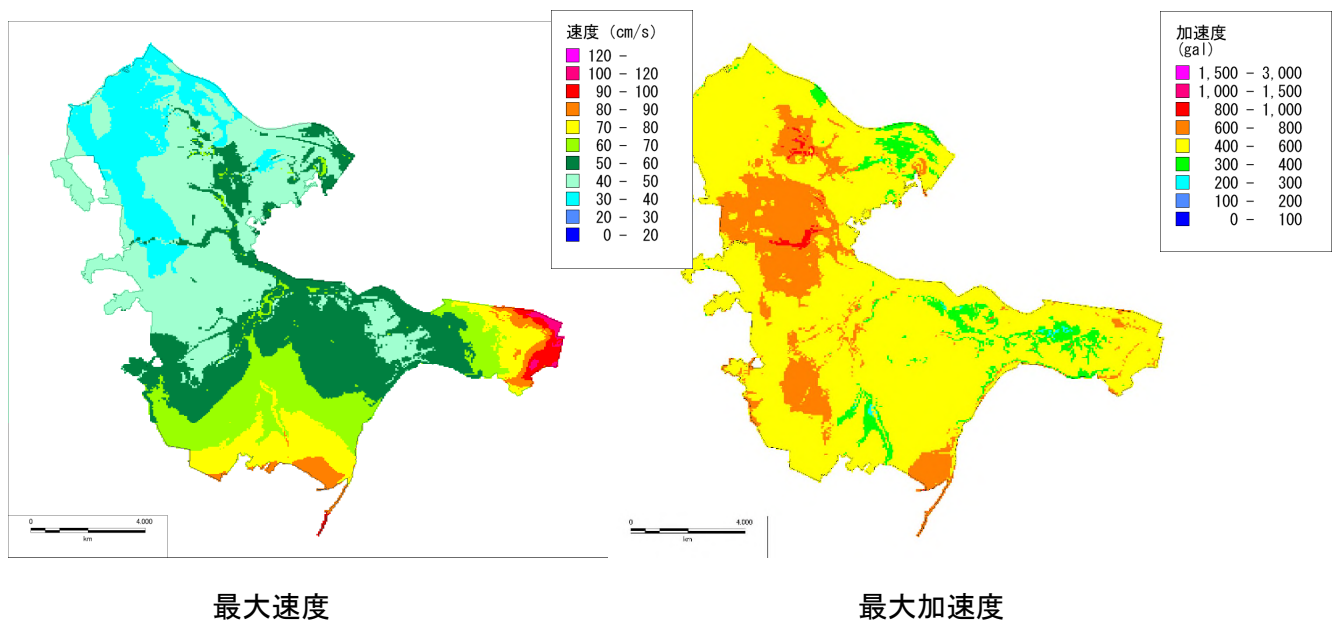
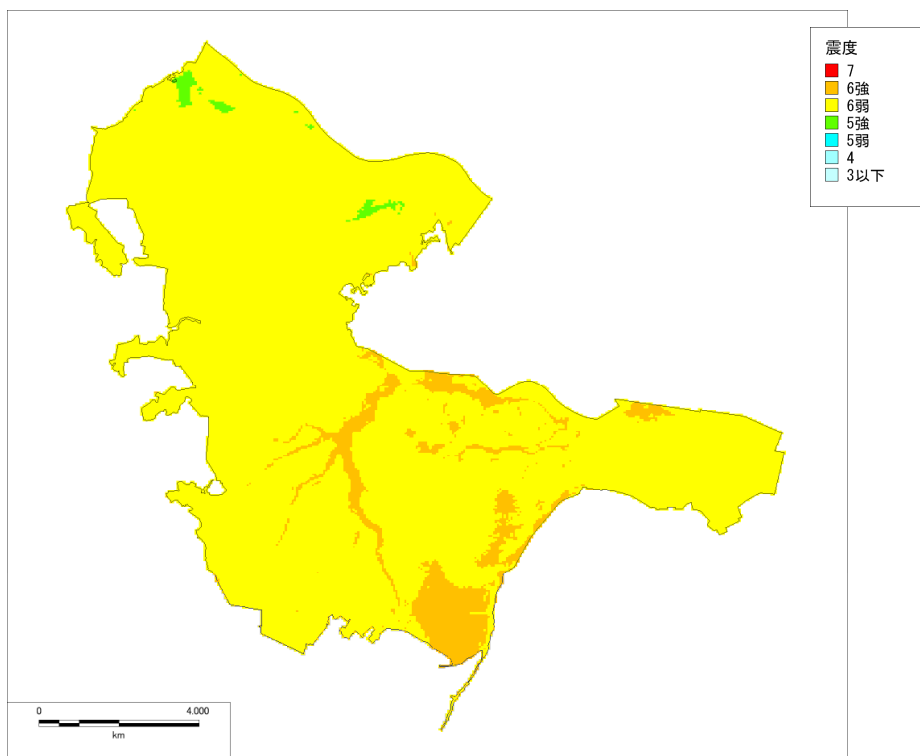
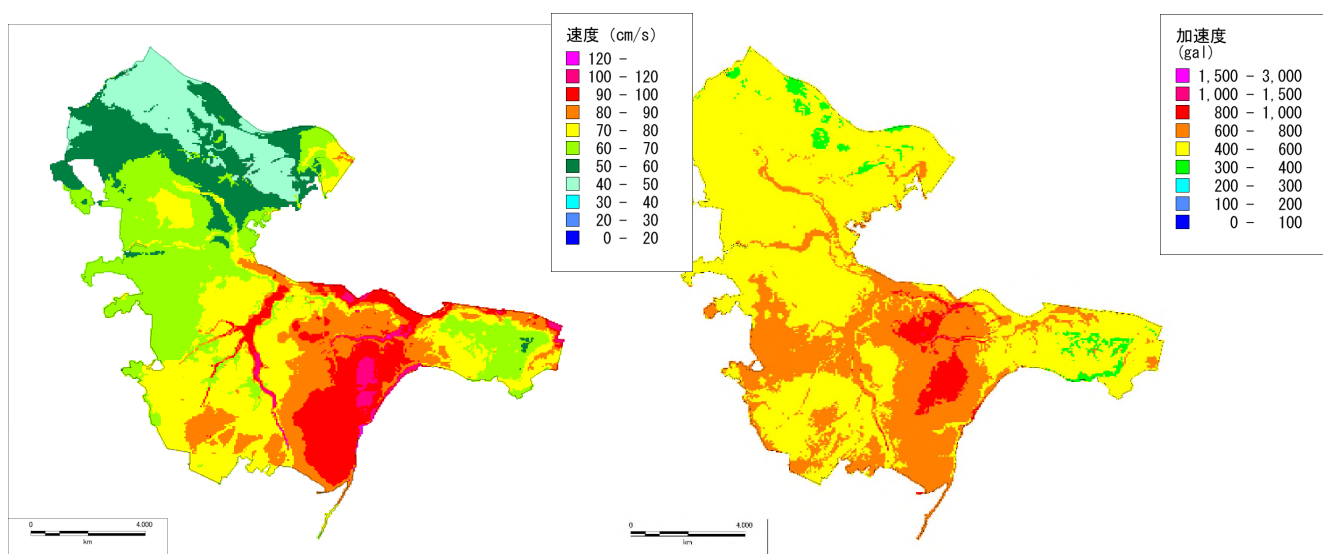


図 I-4. 3-3 千葉県北西部直下地震 地表の地震動分布 (等価線形計算)



震度



最大速度

最大加速度

図 I-4.3-4 大正型関東地震 地表の地震動分布 (等価線形計算)

第4 予防対策用地震の検討

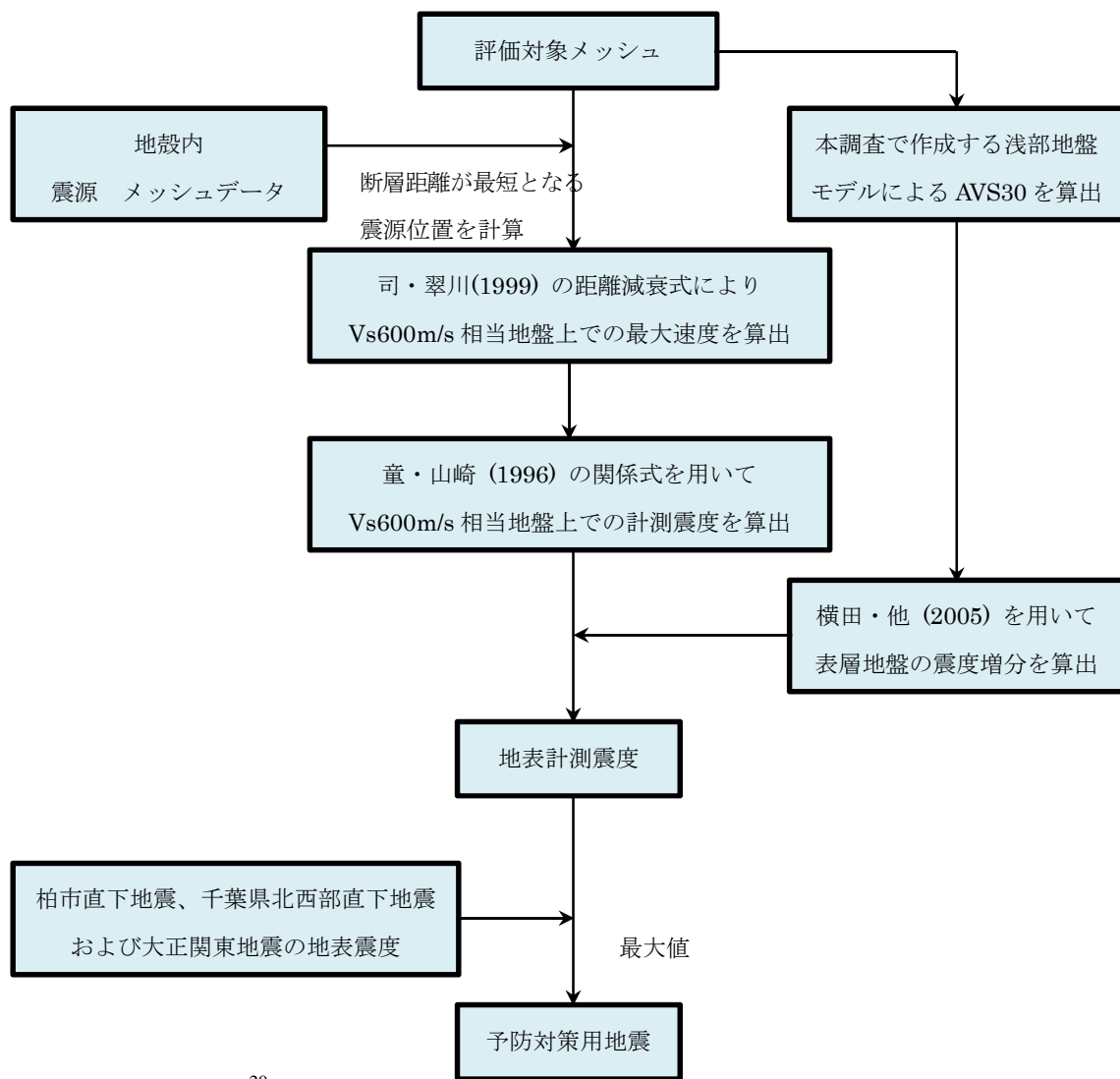
南関東地域では、今後 30 年以内に M7 クラスの地震の発生確率が 70%程度とされることから、近い将来における地域の防災リスクを考える上で、最も大きい揺れの震源として、市域直下の地殻内 Mw6.8 の地震を 50m メッシュごとに想定、計算し、震度を整理した。さらに、これらの震度と柏市に影響を及ぼすと考えられる 3 つの想定地震の震度をメッシュごとに比較して、その最大値の震度分布を作成した。

計算手法としては、地震の大きさ（マグニチュード）と震源距離との関係式（距離減衰式）を用いた簡便な方法（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。予防対策用地震の地震動計算フローを図 I-4.4-1 に示す。

地殻内に 50m メッシュ間隔で Mw6.8 の震源を想定した場合の地表震度分布を図 I-4.4-2 に示す。全市で震度 6 強（計測震度 6.0～6.4）となった。

これまでに想定した柏市直下地震、千葉県北西部直下地震および大正型関東地震と地殻内に 50m メッシュ間隔で Mw6.8 の震源を想定した場合の地表震度について、50m メッシュ毎に最大値を求め、これを予防対策用地震の震度とした。予防対策用地震の震度分布を図 I-4.4-3 に示す。全市で震度 6 強となり、柏市直下地震の直上では、地殻内に 50m メッシュ間隔で Mw6.8 の震源を想定した場合よりも大きな震度になった。

このことから、南関東直下で近い将来（今後 30 年間）に発生が懸念されている M7 クラスの直下地震および予防対策用地震に対して、市内においては震度 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。



司・翠川 (1999)²⁰

$$\log PGV = 0.58M_w + 0.0038D - 1.29 - \log(X + 0.0028 \times 10^{0.50M_w}) - 0.0027X$$

PGV : Vs600m/s 相当地盤上での最大速度(cm/s)

M_w : モーメントマグニチュード

D : 震源深さ (km) X : 断層最短距離 (km)

童・山崎 (1996)²¹

$$I = 2.30 + 2.01 \log PGV$$

I : 計測震度 PGV : 最大速度 (cm/s)

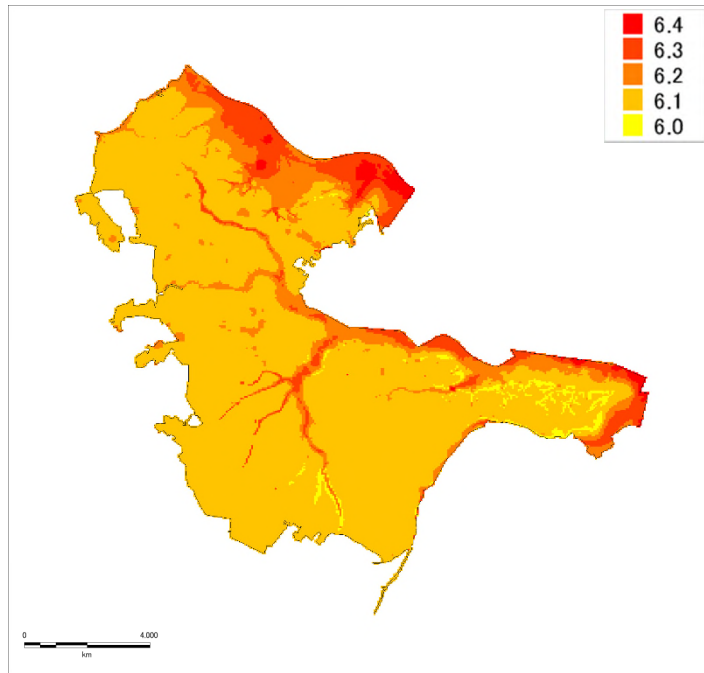
横田・他 (2005)²²を一部修正

$$\Delta I = 2.820 - 1.015 \log AVS$$

ΔI : Vs600m/s 相当地盤上での地表の震度増分

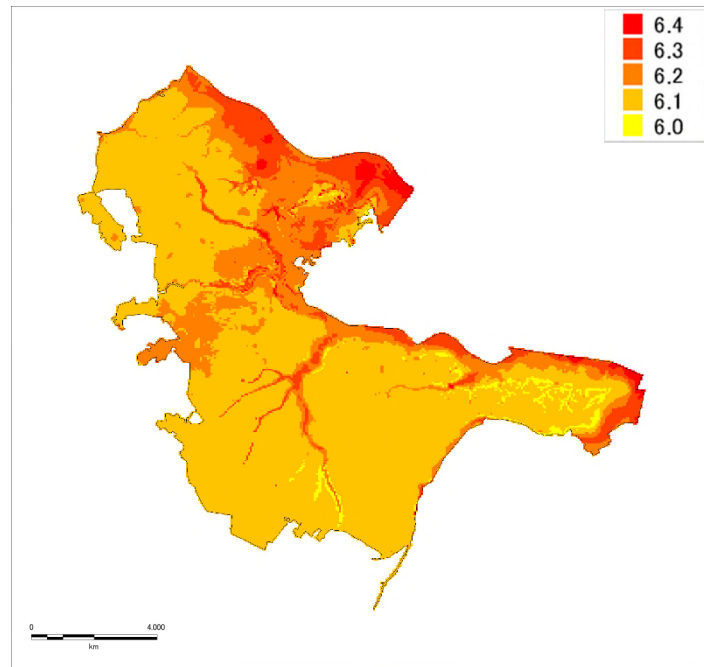
AVS : 浅部地盤モデルによる表層 30m の平均 S 波速度

図 I-4. 4-1 予防対策用地震の地震動計算フロー



注：全域で震度6強となるため、震度6強の範囲を0.1刻みで凡例表示し揺れの強弱を示している

図 I-4. 4-2 地殻内にメッシュ間隔で Mw6. 8 の震源を想定した場合の
地表計測震度予測結果



注：全域で震度6強となるため、震度6強の範囲を0.1刻みで凡例表示し揺れの強弱を示している

図 I-4. 4-3 予防対策用地震の地表計測震度予測結果

表 I-4. 4-1 想定地震ごとの震度別面積割合一覧

震度階	柏市直下地震			千葉県北西部直下地震			大正型関東地震		
	メッシュ数	面積(km ²)	面積率(%)	メッシュ数	面積(km ²)	面積率(%)	メッシュ数	面積(km ²)	面積率(%)
震度6強	20,039	50.68	44.17	1,359	3.33	2.90	3,478	8.78	7.65
震度6弱	25,186	64.06	55.83	42,648	108.29	94.38	41,484	105.28	91.75
震度5強	0	0.00	0.00	1,218	3.12	2.72	263	0.68	0.59
合計	45,225	114.74	100.00	45,225	114.74	100.00	45,225	114.74	100.00

※柏市面積：114.74 km²

表 I-4. 4-2 予防対策用地震の震度別面積割合一覧

震度階	計測震度	予防対策用地震		
		メッシュ数	面積(km ²)	面積率(%)
震度6強	6.4	865	2.11	1.84
	6.3	4,766	11.89	10.36
	6.2	9,052	22.74	19.82
	6.1	29,825	76.31	66.51
	6.0	656	1.69	1.47
合計	合計	45,164	114.74	100.00

※柏市面積：114.74 km²

※震度（震度階級）と計測震度（数値）の関係

震度は地震が発生した際に公表される各地の揺れの強さを表すもので、0～7までの10段階（5と6は5弱、5強、6弱、6強に細分されている）に区分されている。計測震度は地震計で記録された地震波形をデジタル処理することで求められる数値である。

下表のように、例えば震度が6強のとき、計測震度は6.0以上6.5未満の範囲となる。

参考 気象庁震度階級表（気象庁HPより）

震度階級	計測震度	震度階級	計測震度
0	0.5未満	5弱	4.5以上5.0未満
1	0.5以上1.5未満	5強	5.0以上5.5未満
2	1.5以上2.5未満	6弱	5.5以上6.0未満
3	2.5以上3.5未満	6強	6.0以上6.5未満
4	3.5以上4.5未満	7	6.5以上

第5章 液状化

第1 概要

液状化とは、地下水の豊富な砂質の地盤が地震による振動で液体状になる現象のことである。

図I-5.1-1に地盤が液状化するメカニズムを示した。

地震前の地盤 1) は、砂の粒子同士が接した状態で安定しており、その間隙を地下水（間隙水）が埋めている。

（地盤が粘土質の場合は、粒子が砂よりも小さいため、間隙水が発生する状態にはならない。）

このような地盤が地震によって揺すられる 2) と、間隙水にかかる圧力が上昇して砂粒同士の接合が離れることにより流動化して、一部は地表に噴砂として噴出する。

地震後 3) には、間隙水が消失した間隙を砂の粒子が埋めることにより、地盤が沈下して、建物を傾かせたりするなどの被害が発生する。

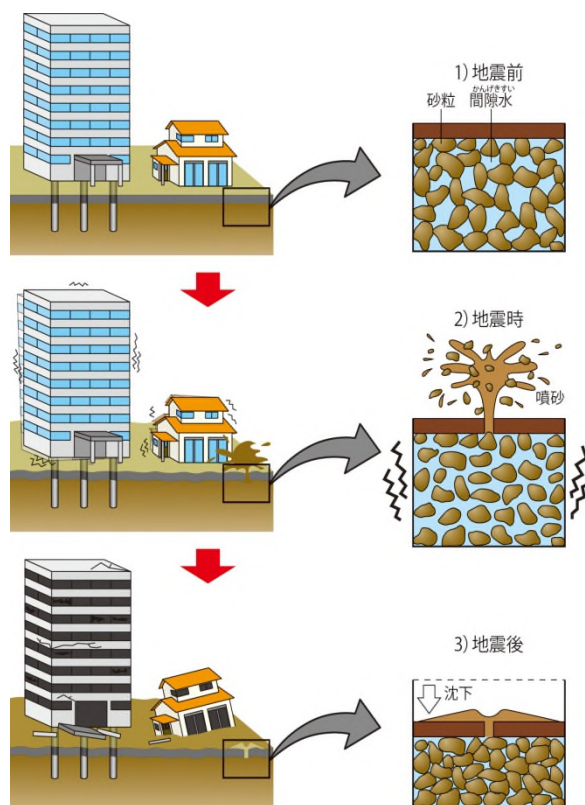


図 I-5. 1-1 液状化のメカニズム

一般的に液状化が起こりやすい条件としては、以下のことが挙げられる。

- ① 揺れが大きい場合の方が小さい場合より液状化しやすい。
- ② 同じ震度であっても、継続時間の短い地震（兵庫県南部地震など）よりも、継続時間の長い地震（東北地方太平洋沖地震、南海トラフの地震など）の方が液状化しやすい。
- ③ 自然に形成された地盤よりも、埋立地などの人工地盤の方が液状化しやすい。また、以前に河川だったところに砂が堆積して出来た地盤（旧河道）も液状化しやすい。
- ④ 粒子の細かい粘土、シルトを主体とする地盤よりも砂を主体とする地盤の方が液状化しやすい。（砂を全く含まない地盤では、液状化は発生しない。）
- ⑤ 同じ砂質地盤でも、締まった地盤よりも緩い地盤の方が液状化しやすい。
- ⑥ 同じ砂質地盤でも、地下水位が高い方が液状化しやすい。（地下水位が低い地盤では液状化は発生しない。）
- ⑦ 同じ砂質地盤でも、時代の新しい（完新世）地盤（沖積層）の方が液状化しやすい。

い。更新世以前の砂質地盤は、液状化しにくい。

①、②は、地震の特性の違いによるものであり、③以降は地盤及び地下水位の違いによるものである。液状化の予測においては、このような条件が反映される。

以上を踏まえて、液状化予測手法については、平成 26・27 年度県調査でも採用し、実績も豊富であることから、メッシュごとに液状化指数 (P_L 値) を求める方法を採用し、柏市直下地震について予測を行った。加えて、液状化による建物被害の想定に用いるため、メッシュごとの地盤沈下量についても予測を行った。

第2 予測手法

液状化予測計算は、内閣府（2013）及び平成26・27年度県調査でも採用されている**道路橋示方書***（2012）²³の方法に準じて、後述する F_L 法及びこれを深度方向に重み付けして積分した P_L 法を用いた。前節の地震動予測結果及び前項で設定した地盤モデルを用いて予測計算を行う。

以下に、採用した手法について述べる。

1 F_L 法

F_L 法とは、検討対象とする地盤（本調査では50mメッシュごとに作成した地盤モデル）の液状化対象層を抽出し、液状化対象層それぞれについて、液状化に対する抵抗力と地震力の強さとを比較し、液状化に対する抵抗率（ F_L 値）を求める手法である。

（1）液状化予測対象メッシュ

液状化予測対象とするメッシュは沖積層及び埋立土層が分布する範囲、すなわち低地・台地・埋立地境界図（図I-5.2-1）における埋立地及び低地に該当するメッシュとした。台地においては沖積層が分布しないことから、対象外とした。

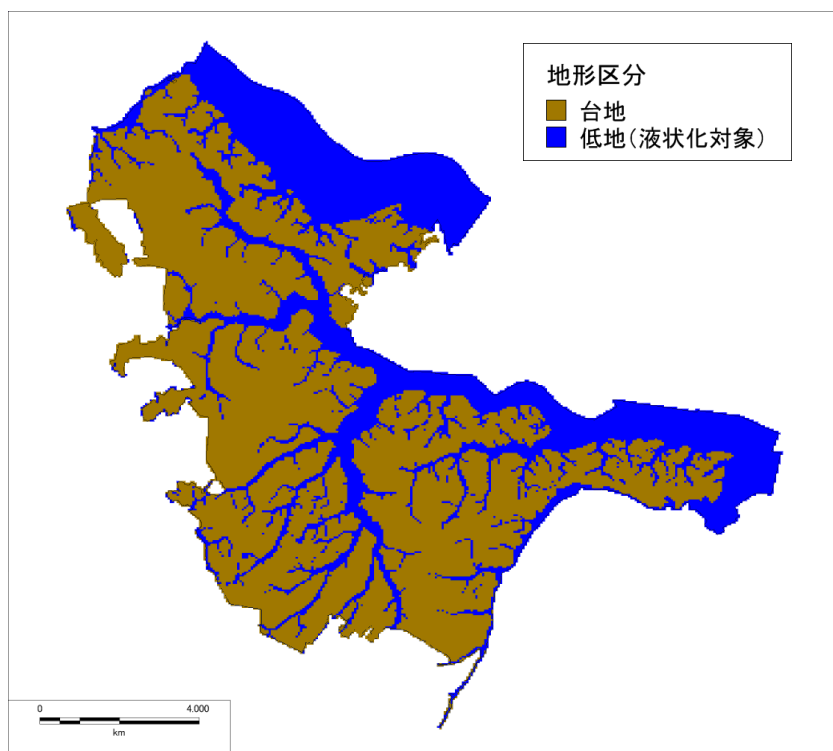


図 I-5. 2-1 地形区分

***道路橋示方書**：橋や高架の道路等を設計するための日本道路協会より刊行されている技術指針。「V耐震設計編」には砂質地盤の液状化の判定手法（ F_L 法）が示されており、地震被害想定調査においては広く参照されている。阪神・淡路大震災等の知見を踏まえて何度か改訂されている。

(2) 液状化対象層

以下の全てに該当する地盤を液状化対象層とした。

- ・地下水位以深で、地表から深さ 20m までの沖積層の砂質土層。
- ・細粒分含有率 FC^* が 35% 以下の土層。

(3) F_L 値

F_L 値は、次式で与えられる。

$$F_L = R/L \quad \text{————— (式□-5.2-1)}$$

R : 液状化抵抗比

L : 繰り返しせん断強度

F_L 値が 1.0 を下回る層については、液状化するものと見なす。

(4) 液状化抵抗比 R の求め方

液状化抵抗比 R とは、地盤がどれだけ液状化しにくいを示す指標であり、 N 値や地震動のタイプ等を考慮して、以下の式により与えられる。

$$R = c_w R_L \quad \text{————— (式□-5.2-2)}$$

$$R_t = 0.0882 \sqrt{N_a / 1.7} \quad (N_a < 14)$$

$$R_t = 0.0882 \sqrt{N_a / 1.7} + 1.6 \cdot 10^{-6} (N_a - 14)^{4.5} \quad (14 \leq N_a)$$

<砂質土の場合>

$$R = c_w R_L$$

$$N_a = c_1 \cdot N_1 + c_2$$

$$N_1 = 1.7 \cdot N / (\delta_v^{0.7} + 0.7)$$

$$c_1 = 1 \quad (0\% \leq FC < 10\%)$$

$$c_1 = (FC + 40) / 50 \quad (10\% \leq FC < 60\%)$$

$$c_1 = FC / 20 - 1 \quad (60\% \leq FC)$$

$$c_2 = 0 \quad (0\% \leq FC < 10\%)$$

$$c_2 = (FC - 10) / 18 \quad (10\% \leq FC)$$

*細粒分含有率 FC : 地盤を構成する粒子は、粒子の大きい順に「礫」「砂」「シルト」「粘土」と呼ばれる。細粒分含有率は、これらのうち液状化しにくい細かい粒子である「シルト」「粘土」が地盤全体の中で占める割合のことである。

<礫質土の場合>

$$N_a = \{1 - 0.36 \log_{10}(D_{50}/2)\}$$

ここに、

R : 液状化抵抗比

c_w : 地震動特性による補正係数*

R_L : 繰返し三軸強度比*

N : 標準貫入試験から得られる N 値

N_1 : 有効上載圧* 1 kgf/cm^2 相当に換算した N 値

N_a : 粒度の影響を考慮した補正 N 値

c_1, c_2 : 細粒分含有率による N 値の補正係数

FC : 細粒分含有率(%) (粒径 $75 \mu\text{m}$ 以下の土粒子の通過質量百分率*)

D_{50} : 平均粒径* (mm)

(タイプ I の地震動の場合)

$$c_w = 1.0$$

(タイプ II の地震動の場合)

$$c_w = 1.0 \quad (R_L \leq 0.1)$$

$$c_w = 3.3R_L + 0.67 \quad (0.1 < R_L \leq 0.4)$$

$$c_w = 2.0 \quad (0.4 < R_L)$$

※1) タイプ I : 大きな振幅が長時間繰返して作用する地震動 (プレート境界型の大規模な地震) を表したものである。

※2) タイプ II : 継続時間は短いが極めて強度を有する地震動 (兵庫県南部地震のような内陸型地震) を表したものである。柏市直下地震はタイプ II に該当する。

*地震動特性による補正係数 : 地震の揺れの継続時間が長いか短いかによって液状化のしやすさが異なることから、これを考慮するために導入した係数。

*繰返し三軸強度比 : 地盤の強度を表す指標。正式には「繰返し三軸試験」という室内土質試験で測定されるが、ここでは N 値による推定式で算定される。

*有効上載圧 : 地盤内のある 1 点において、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もの。

*通過質量百分率 : 細粒分含有率の測定方法として、よくほぐした土粒子を網目の大きさの異なる様々なふるいにかけることが行われる。通過質量百分率は、全土粒子のうちどれだけの割合がふるいを通過したかを質量の比で表した値。

*平均粒径 : 地盤を構成する土粒子を大きい順に並べたと仮定したときに、中央にくる粒子の大きさ。

(5) 繰り返しせん断強度 L の求め方

繰り返しせん断強度 L とは、地盤内のある 1 点にかかる地震力の大きさを表す指標であり、地表加速度から以下の換算式を用いて求める。

$$L = r_d \cdot \alpha / g \cdot \sigma_v / \sigma'_v \quad \text{———— (式□-5.2-3)}$$

$$r_d = 1.0 - 0.015x$$

$$\sigma_v = \{\gamma_{t1} h_w + \gamma_{t2} (x - h_w)\} / 10$$

$$\sigma'_v = \{\gamma'_{t1} h_w + \gamma'_{t2} (x - h_w)\} / 10$$

ここに、

L : 繰り返しせん断強度

r_d : 繰り返しせん断強度の深さ方向の**低減係数***

α : 地表最大加速度 (gal)

g : 重力加速度 (980gal)

σ_v : **全上載圧*** (kgf/cm²)

σ'_v : 有効上載圧 (kgf/cm²)

x : 地表面からの深さ (m)

γ_{t1} : 地下水位面より浅い位置での土の**単位体積重量*** (tf/m³)

γ_{t2} : 地下水位面より深い位置での土の**単位体積重量** (tf/m³)

γ'_{t2} : 地下水位面より深い位置での土の**有効単位体積重量*** (tf/m³)

h_w : 地下水位の深さ (m)

2 P_L 法

道路橋示方書 (2012) に示された手順に従って、地表からの各深度での F_L 値を算出し、その値を深さ方向に重みをつけて足し合わせ (図 I-5.2-1 参照)、地点での液状化

* (繰り返しせん断強度の) **低減係数** : 地震力の大きさである繰り返しせん断強度が地盤内でどのような分布をするかは、地震の種類、大きさや地盤状況によって異なる。しかしながら、過去の地震時の状況を調べた結果では、ある深さにおける繰り返しせん断強度は、地表における値からある一定値を深さに乗じた値を引くことで近似できるとされており、深さに乗じる値を低減係数と呼んでいる。

* **全上載圧** : 地盤内のある 1 点において、より上位の地盤の荷重により受ける圧力。

* **土の単位体積重量** : 単位体積当たりの土の重さ。本調査では土質区分、 N 値ごとに設定している。

* **土の有効単位体積重量** : 単位体積重量から、地下水の重量 (1tf/m³) を引いたもの。

危険度を表す P_L 値を算出し、この P_L 値によって液状化危険度の判定を行う。液状化危険度判定は、岩崎ら (1980) ²⁴による図 I-5.2-1 及び表 I-5.2-2 に示すような関係により判定を行う。 F_L 値から P_L 値を計算した例を表 I-5.2-3 に示す。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L)(10 - 0.5x) dx \quad \text{----- (式 I-5.2-4)}$$

ここに、

P_L : 液状化指数

F_L : 液状化に対する抵抗率

x : 地表面からの深さ (m)

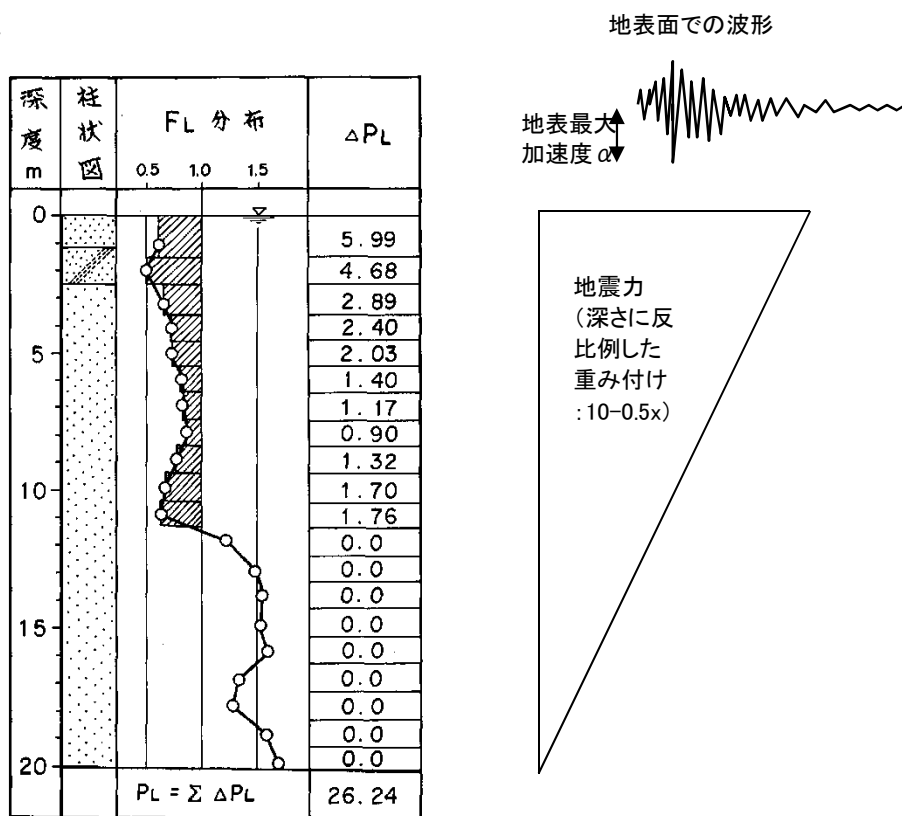


図 I-5.2-1 P_L 値の概念図 (岩崎ほか (1980) に加筆)

表 I-5.2-2 P_L 値による液状化危険度判定区分 (岩崎ほか (1980))

	$P_L=0$	$0 < P_L \leq 5$	$5 < P_L \leq 15$	$P_L > 15$
P_L 値による液状化危険度判定	液状化危険度は極めて低い。	液状化危険度は低い。	液状化危険度はやや高い。	液状化危険度は高い。

※台地部については、「なし」とした。

表 I-5.2-3 P_L 値の計算例

PL 値 32.014

判定深度 Z (m)	判定層厚 ΔZ (m)	FL	(1-FL)	重み関数 W	ΔPL
1.00	1.00	0.727	0.273	9.50	2.595
2.00	1.00	0.688	0.312	9.00	2.804
3.00	1.00	0.573	0.427	8.50	3.627
4.00	1.00	0.592	0.408	8.00	3.262
5.00	1.00	4.269	0.000	7.50	0.000
6.00	1.00	0.673	0.327	7.00	2.286
7.00	1.00	0.637	0.363	6.50	2.357
8.00	1.00	0.615	0.385	6.00	2.312
9.00	1.00	0.547	0.453	5.50	2.493
10.00	1.00	1.359	0.000	5.00	0.000
11.00	1.00	0.460	0.540	4.50	2.428
12.00	1.00	0.544	0.456	4.00	1.825
13.00	1.00	0.537	0.463	3.50	1.620
14.00	1.00	0.529	0.471	3.00	1.412
15.00	1.00	0.660	0.340	2.50	0.851
16.00	1.00	0.554	0.446	2.00	0.892
17.00	1.00	0.582	0.418	1.50	0.626
18.00	1.00	0.559	0.441	1.00	0.441
19.00	1.00	0.636	0.364	0.50	0.182
20.00	1.00	0.592	0.408	0.00	0.000

3 沈下量

内閣府（2012a）²⁵の方法に従って、液状化に伴う地盤の沈下量を求める。

沈下量の計算については、全液状化対象層について F_L 値の計算結果より体積ひずみ（＝各層の沈下量）を求め、これを合計することにより求める。沈下量の計算の流れを図I-5.2-2に示す。

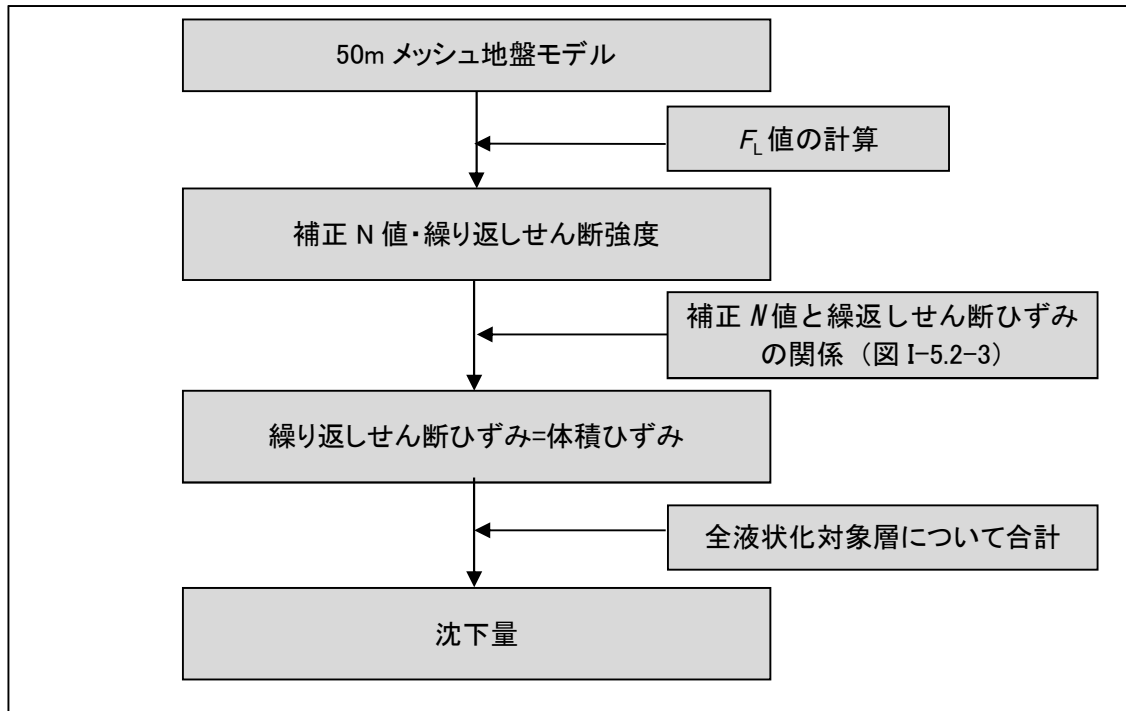


図 I-5.2-2 沈下量計算の流れ

まず、建築基礎構造設計指針（2001）²⁶に示されている補正 N 値と繰返しせん断ひずみの関係（図I-5.2-3）を用いて、検討対象とする層の補正 N 値 N_a （横軸）と繰返しせん断強度 L （縦軸：図中では応力比）をプロットし（補正 N 値、繰返しせん断強度については、 F_L 値の項を参照）、プロットした点に対応する繰返しせん断ひずみの値を繰返しせん断ひずみ γ_{cy} 曲線から読み取る。例えば $N_a=15$ 、 $L=0.3$ とすると、 $\gamma_{cy}=2\%$ の曲線と重なることから、 $\gamma_{cy}=2\%$ であると読み取れる。

プロットした点が曲線と曲線の間に来る場合は、それぞれの曲線の γ_{cy} の値を対数補間することにより求める。このとき、繰返しせん断ひずみ 8% の曲線より左側にプロットされる場合には $\gamma_{cy}=8\%$ とし、 0.5% より右側にプロットされる場合には、 $\gamma_{cy}=0.5\%$ とする。

せん断ひずみと体積ひずみとは異なる概念である（図 I-5.2-4）が、ここでは両者を同等であるとみなして、繰返しせん断ひずみ γ_{cy} を体積ひずみ ε_v として読み替える。

そして、沈下量 S を次のようにして推定する。

$$S = \sum_{i=1}^n (H_i \times \varepsilon_{vi}) \quad \text{— (式 5.2-5)}$$

ここに、
 S : 沈下量
 H_i : $F_L < 1.0$ となる砂質土層 i の層厚
 ε_{vi} : $F_L < 1.0$ となる砂質土層 i の体積ひずみ
 n : $F_L < 1.0$ となる砂質土層数

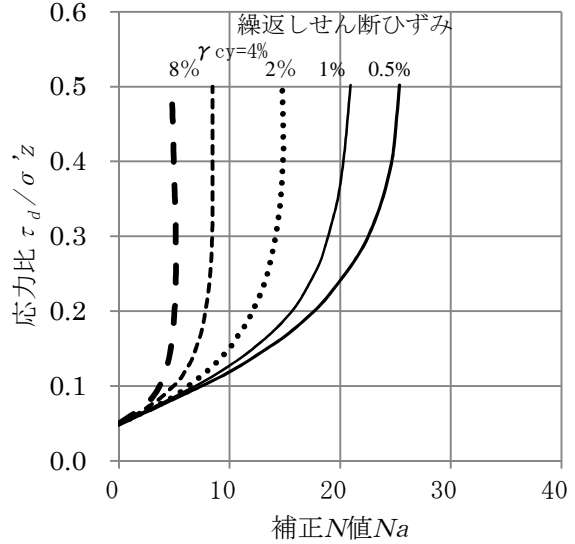
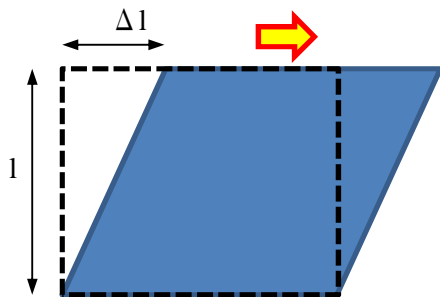
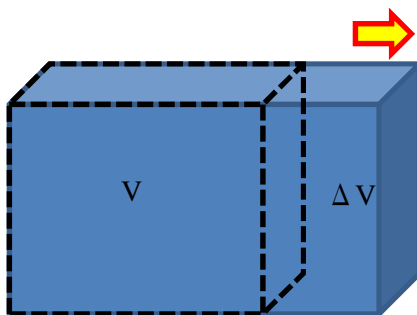


図 I-5.2-3 補正 N 値と繰返しせん断ひずみの関係

(建築基礎構造設計指針(2001), p66, 図 I-4.5.7 補正 N 値と繰返しせん断ひずみの関係に加筆)



高さ 1 の長方形 (点線) の上辺を右に Δl だけ移動して平行四辺形 (青色) に変形させたとき、「 $\Delta l/1$ 」の値を「せん断ひずみ」という。



体積 V の箱 (点線) の右側面を引っ張って ΔV だけ横長に膨張させた (青色) とき、「 $\Delta V/V$ 」の値を「体積ひずみ」という。

図 I-5.2-4 せん断ひずみ (上) と体積ひずみ (下) の概念

第3 予測結果

液状化危険度分布および液状化に伴う沈下量を図 I-5.3-1～図 I-5.3-3 に示す、想定地震別の液状化可能性および沈下量のメッシュ数、面積、面積率を表 I-5.3-1～表 I-5.3-2 に示す。

3 地震とも、茨城県と接する市境の利根川近辺や手賀沼近辺で液状化の可能性が高くなり、沈下量も大きくなった。これらの地域では河川によって運搬された緩い砂が多く堆積し、同じ低地の中でも液状化しやすい地盤が比較的厚く分布するため、液状化の可能性が高くなる傾向にある。

液状化可能性が「高い」「やや高い」にランクされる範囲は柏市直下地震で一番広く約 4%、千葉県北西部直下地震、大正型関東地震で約 2%となる。一方、沈下量の大きい範囲については、3 地震いずれについても沈下量 5cm 以上となる範囲は約 2%であり、ほとんど差は見られない。

これは、ある地盤で想定される沈下量の大きさには上限があり、地震動がある程度以上の大きさになってしまうと、沈下量がほとんど増加しなくなるためである。(図 I-5.2-3 の図で、応力比(≒地震動の大きさ)が 0.3 以上の領域ではグラフがほぼ垂直になっていることが、この現象に対応する。)今回想定した 3 地震いずれについても液状化が想定される範囲の震度は概ね 6 弱以上と大きく、想定地震間での沈下量の値に相違が見られなくなったものと考えられる。

表 I-5.3-1 想定地震別液状化可能性一覧表

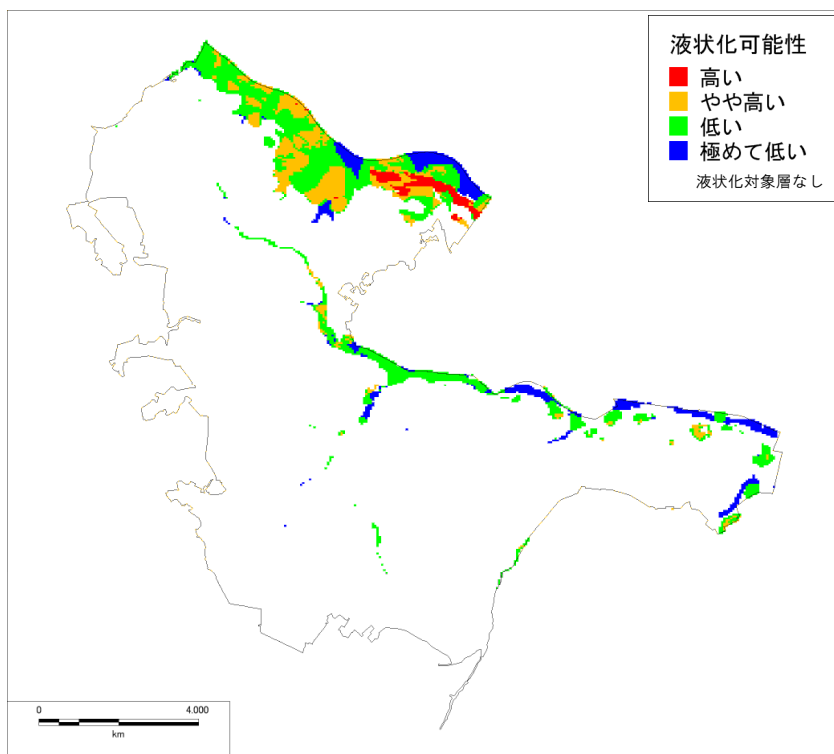
液状化可能性	柏市直下地震			千葉県北西部直下地震			大正型関東地震		
	メッシュ数	面積(km ²)	面積率(%)	メッシュ数	面積(km ²)	面積率(%)	メッシュ数	面積(km ²)	面積率(%)
高い	287	0.74	0.64	0	0.00	0.00	19	0.04	0.04
やや高い	1,371	3.45	3.01	868	2.21	1.93	635	1.62	1.41
低い	2,849	7.07	6.17	3,532	8.80	7.67	3,794	9.46	8.24
極めて低い	937	2.22	1.94	1,044	2.48	2.16	996	2.37	2.06
なし	39,781	101.25	88.25	39,781	101.25	88.25	39,781	101.25	88.25
合計	45,225	114.74	100.00	45,225	114.74	100.00	45,225	114.74	100.00

※柏市面積：114.74 km²

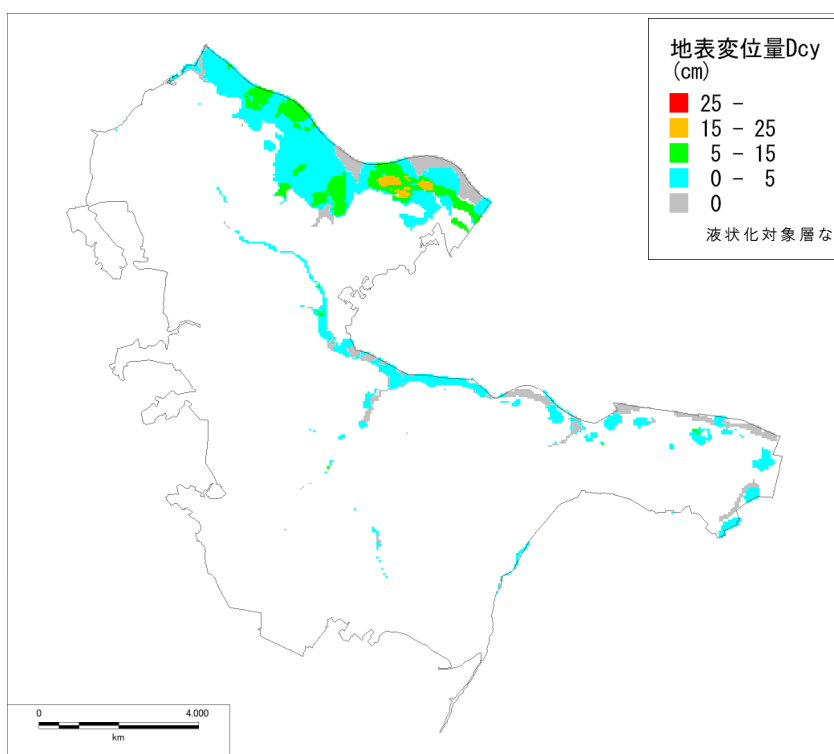
表 I-5.3-1 想定地震別沈下量一覧表

沈下量(cm)	柏市直下地震			千葉県北西部直下地震			大正型関東地震		
	メッシュ数	面積(km ²)	面積率(%)	メッシュ数	面積(km ²)	面積率(%)	メッシュ数	面積(km ²)	面積率(%)
15～25	108	0.28	0.25	76	0.20	0.17	98	0.26	0.22
5～15	890	2.26	1.97	897	2.28	1.99	851	2.16	1.88
0～5	3,354	8.36	7.29	3,177	7.92	6.91	3,324	8.30	7.23
0	1,092	2.59	2.26	1,294	3.09	2.69	1,171	2.77	2.42
なし	39,781	101.25	88.25	39,781	101.25	88.25	39,781	101.25	88.25
合計	45,225	114.74	100.00	45,225	114.74	100.00	45,225	114.74	100.00

※柏市面積：114.74 km²

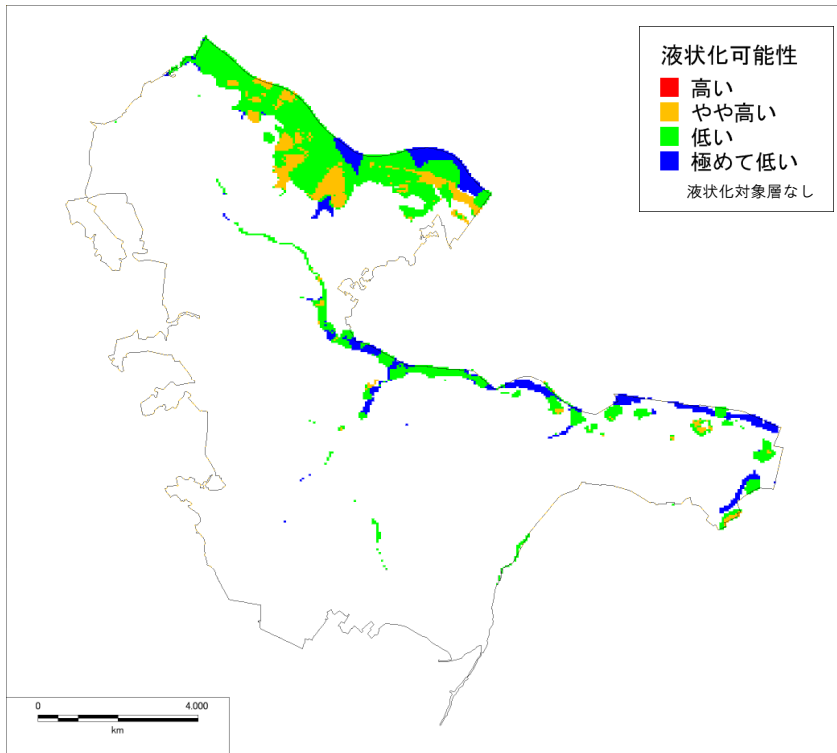


液状化危険度

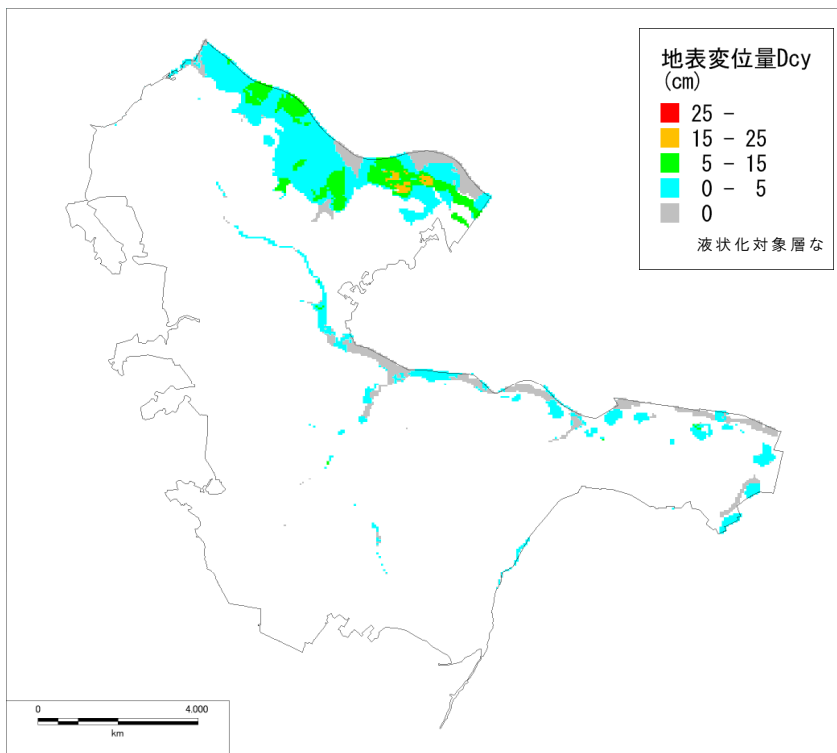


沈下量

図 I-5. 3-1 柏市直下地震 液状化分布

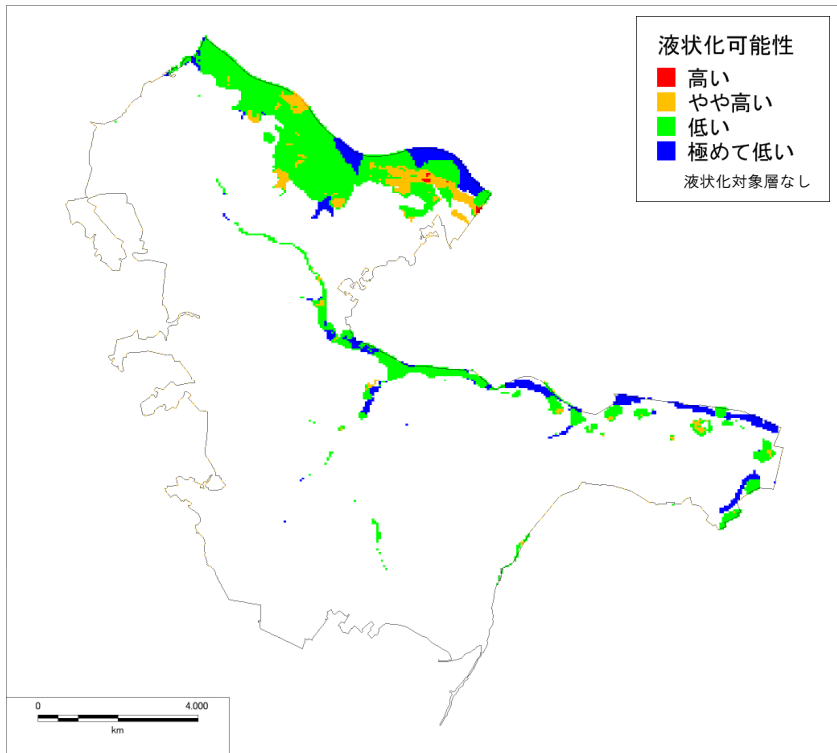


液状化危険度

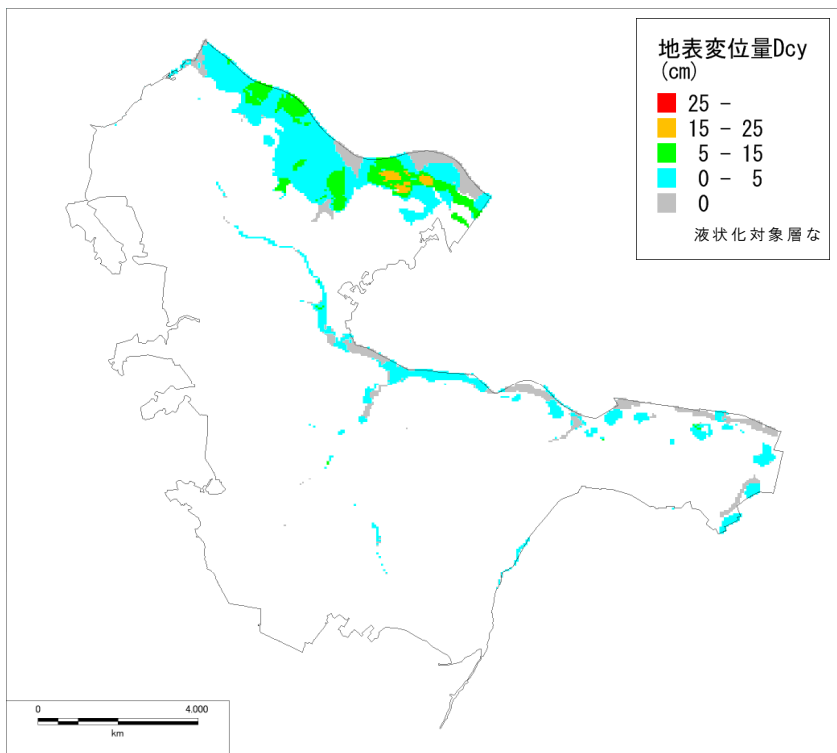


沈下量

図 I-5. 3-2 千葉県北西部直下地震 液状化分布



液状化危険度



沈下量

図 I-5. 3-3 大正型関東地震 液状化分布

第6章 急傾斜地崩壊

第1 概要

がけ崩れ（急傾斜地の崩壊）は土砂災害のひとつであり、雨や地震などの影響によって土の抵抗力が弱まり、突然斜面が崩れ落ちる現象である。本調査では、千葉県が公表している**急傾斜地崩壊危険箇所***を対象として、相対的な危険度を評価した。

第2 予測手法

今回、斜面の危険度評価で使用したデータは、千葉県が公表している「急傾斜地崩壊危険箇所（土砂災害警戒区域及び土砂災害特別警戒区域、その他の土砂災害危険箇所）」の62箇所について、地震時の危険度を評価した。

第3 予測結果

急傾斜地崩壊危険箇所の分布を図 I-6.4-1 に示し、地震時の被害可能性評価結果を表 I-6.4-1 に示した。地震時に崩壊等の被害を受ける可能性がある箇所は市内で60箇所となった。

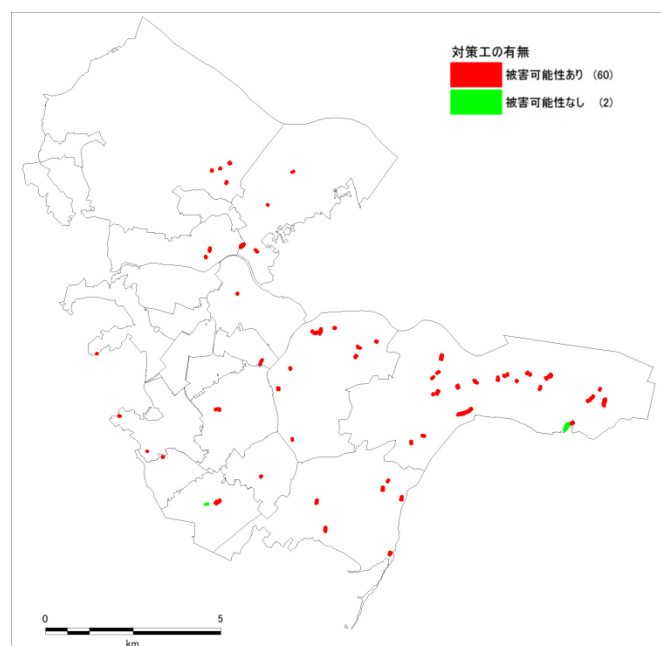


図 I-6.4-1 急傾斜地崩壊危険箇所の分布

*急傾斜地崩壊危険箇所：国土交通省の「急傾斜地崩壊危険箇所等点検要領」に基づいて千葉県が調査した、人家や公共施設に被害を及ぼすおそれのある傾斜度30度以上、高さ5m以上の急傾斜地及び近接地をいう。土砂災害警戒区域や土砂災害特別警戒区域も含まれる。

表 I-6. 4-1 急傾斜地崩壊危険箇所一覧

No	コミュニティ	箇所番号	箇所名	市町村名	字名
1	新田原地域	I-0239	戸張	柏市	東柏2丁目
2	高田・松ヶ崎地域	I-0240	松ヶ崎1	柏市	松ヶ崎腰巻
3	手賀地域	I-0254	納屋	柏市	布瀬納屋
4	手賀地域	I-0255	上柳戸	柏市	柳戸上柳戸
5	風早南部地域	I-0256	品川根	柏市	高柳品川根
6	手賀地域	I-0257	木崎	柏市	布瀬木崎
7	手賀地域	I-1279	腰巻	柏市	布瀬腰巻
8	南部地域	I-2018	逆井	柏市	新逆井1丁目
9	田中地域	II-1007	花野井1	柏市	花野井台ノ山
10	田中地域	II-1008	花野井2	柏市	花野井古谷前
11	田中地域	II-1009	花野井3	柏市	花野井葉能田
12	富勢地域	II-1010	布施1	柏市	布施東
13	田中地域	II-1011	花野井4	柏市	花野井三畝割
14	高田・松ヶ崎地域	II-1012	松ヶ崎2	柏市	松ヶ崎須賀
15	高田・松ヶ崎地域	II-1013	松ヶ崎3	柏市	松ヶ崎須賀
16	富勢地域	II-1014	根戸1	柏市	根戸花戸原
17	新富地域	II-1015	豊四季1	柏市	豊四季笹原
18	光ヶ丘地域	II-1016	中新宿1	柏市	中新宿1丁目
19	光ヶ丘地域	II-1017	東山1	柏市	東山2丁目
20	酒井根地域	II-1018	酒井根1	柏市	酒井根根崎
21	藤心地域	II-1019	逆井藤ノ台1	柏市	逆井藤ノ台北ノ台
22	風早北部地域	II-1048	大井1	柏市	大井大納屋
23	風早北部地域	II-1049	大井2	柏市	大井大六元
24	風早北部地域	II-1050	大井3	柏市	大井中ノ橋
25	風早北部地域	II-1051	箕輪1	柏市	箕輪坊ノ口
26	風早北部地域	II-1052	五條谷	柏市	五条谷
27	手賀地域	II-1053	鷺野谷1	柏市	鷺野谷
28	手賀地域	II-1054	鷺野谷2	柏市	鷺野谷
29	手賀地域	II-1055	鷺野谷3	柏市	鷺野谷
30	手賀地域	II-1056	泉1	柏市	泉高畑
31	手賀地域	II-1057	泉2	柏市	泉山中
32	手賀地域	II-1058	泉3	柏市	泉山中
33	手賀地域	II-1059	泉4	柏市	泉山中
34	手賀地域	II-1060	片山1	柏市	片山北ノ作
35	手賀地域	II-1061	片山2	柏市	片山北ノ作
36	手賀地域	II-1062	片山3	柏市	片山辻ノ内
37	手賀地域	II-1063	手賀1	柏市	手賀
38	手賀地域	II-1064	手賀2	柏市	手賀
39	手賀地域	II-1065	手賀3	柏市	手賀太田
40	手賀地域	II-1066	手賀4	柏市	手賀太田
41	手賀地域	II-1067	手賀5	柏市	手賀太田
42	手賀地域	II-1068	手賀6	柏市	手賀船戸
43	手賀地域	II-1069	布瀬4	柏市	布瀬宮前
44	風早北部地域	II-1070	塚崎1	柏市	塚崎
45	手賀地域	II-1071	金山1	柏市	金山北谷津口
46	手賀地域	II-1072	金山2	柏市	金山北谷津口
47	手賀地域	II-1073	布瀬5	柏市	布瀬腰巻
48	手賀地域	II-1074	布瀬6	柏市	布瀬木崎
49	風早南部地域	II-1075	藤ヶ谷1	柏市	藤ヶ谷大作
50	風早南部地域	II-1076	藤ヶ谷2	柏市	藤ヶ谷大作
51	風早南部地域	II-1077	藤ヶ谷3	柏市	藤ヶ谷馬場
52	風早南部地域	II-1078	高柳2	柏市	高柳
53	風早南部地域	II-1079	藤ヶ谷4	柏市	藤ヶ谷白砂
54	富勢地域	II-7026	宿連寺1	柏市	宿連寺前原
55	柏中央地域	II-7027	柏1	柏市	柏大穴
56	南部地域	II-7028	逆井2	柏市	逆井小山
57	南部地域	II-7029	逆井3	柏市	逆井小山
58	壇尾地域	III-1064	中原1	柏市	中原
59	風早北部地域	III-1066	大井1	柏市	大井
60	風早北部地域	III-1067	箕輪1	柏市	箕輪
61	手賀地域	III-1068	片山1	柏市	片山
62	手賀地域	III-1069	柳戸1	柏市	柳戸

参考文献

- ¹ 柏市 (2006) : 柏市被害想定調査報告書, 柏市, 平成 18 年 3 月.
- ² 内閣府 (2013) : 首都直下の M7 クラスの地震及び相模トラフ沿いの M8 クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書, 内閣府首都直下地震モデル検討会, 平成 25 年 12 月.
- ³ 千葉県 (2016) : 平成 26・27 年度千葉県地震被害想定調査報告書, 平成 28 年 3 月.
- ⁴ 中央防災会議 (2013a) : 首都直下地震の被害想定と対策について (最終報告) ~首都直下の M7 クラスの地震及び相模トラフ沿いの M8 クラスの地震等に関する図表集~, 中央防災会議 首都直下地震対策検討ワーキンググループ, 平成 25 年 12 月.
- ⁵ 地震調査委員会 (2004) : 相模トラフ沿いの地震活動の長期評価, 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 平成 16 年 8 月 23 日.
- ⁶ 中央防災会議 (2013b) : 首都直下地震の被害想定項目及び手法の概要 ~人的・物的被害~, 中央防災会議 首都直下地震対策検討ワーキンググループ, 平成 25 年 12 月.
- ⁷ 中央防災会議 (2004) : 中央防災会議「首都直下地震対策専門調査会」(第 12 回) 地震ワーキンググループ報告書, 平成 16 年 11 月 17 日.
- ⁸ 千葉県 (2008) : 平成 19 年度千葉県地震被害想定調査報告書, 平成 20 年 3 月.
- ⁹ 千葉県 : 活断層調査・地下構造調査結果と地震防災.
- ¹⁰ 岩田知孝・浅野公之 (2010), 強震動予測のためのスラブ内地震の特性化震源モデルの構築, 北海道大学地球物理学研究報告, 73, 129-135.
- ¹¹ 永田葉子・中井正一・関口徹 (2007) : 千葉市における表層地盤の S 波速度推定式の検討, 日本地震工学会大会-2007 梗概集, pp. 90-91.
- ¹² 中央防災会議事務局 (2001) : 東海地震に関する専門調査会 (第 10 回), 平成 13 年 11 月 27 日, 資料 3-1, p12-23.
- ¹³ Boore, D.M. (1983) : Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.73, No.6, pp. 1865-1894.
- ¹⁴ 佐藤智美・川瀬博・佐藤俊明 (1994) : ボアホール観測記録を用いた表層地盤同定手法による工学的基盤波の推定及びその統計的特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 461 号, pp. 19-28.
- ¹⁵ Haskell, N. A.(1964): The dispersion of surface waves on multi-layered media, BSSA, 43(1), pp. 17-34.
- ¹⁶ 入倉孝次郎・香川敬生・関口春子 (1997) : 経験的グリーン関数法を用いた強震動予測方法の改良, 地震学会講演予稿集, 1997 年度秋季大会, B25.
- ¹⁷ 吉田望・末富岩雄 (1996) : DYNEQ : 等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム, 佐藤工業 (株) 技術研究所報, pp. 61-70.
- ¹⁸ 山本明夫・笹谷努 (2007) : 2003 年十勝沖地震における地盤の非線形応答 : KiK-net 鉛直アレー記録の活用, 日本地震工学会論文集, 第 7 巻, 第 2 号 (特集号), pp. 144-159.
- ¹⁹ 盛川仁 (2005) : 非線形地震応答解析と SHAKE の使い方, 強震動予測-その基礎と応用, 日本地震学会強震動委員会.
- ²⁰ 司宏俊・翠川三郎(1999) : 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, 523, 63-70.
- ²¹ 童華南・山崎文雄(1996) : 地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係, 生産研究, 48, 11, 547-550.
- ²² 横田崇・稲垣賢亮・増田徹 (2005) : 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秋季大会, B064, 86.

²³日本道路協会（2012）：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，平成 24 年 3 月．

²⁴岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田進（1980）：地震時地盤液状化の程度の予測について，土と基礎，Vol.28，No.4，pp. 23-29.

²⁵内閣府（2012a）：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）強震断層モデル編（別添資料）－液状化可能性、沈下量について－，p. 4.

²⁶日本建築学会（2001）：建築基礎構造設計指針，p. 66.