

3. 福岡地区における3次元地盤構造モデルの作成事例

3.1. 3次元地盤構造モデルの作成範囲

社会インフラの強靱化を推進するために、インフラ施設の液状化被害推定手法を高精度化することが重要である。取り組み方針は、液状化被害に関連する地層の連続性など地盤構造の複雑さを考慮した3次元地盤構造モデルの構築、個別インフラ施設の液状化リスクの評価とした。目的の達成、取り組み方針から、福岡地区における広域な調査対象範囲（0次モデル作成範囲と呼ぶ）を、下記の観点で設定した（図53）。

- ・人口・道路の密集している地区を含む範囲
- ・既往の被害想定で液状化危険度の高い箇所を含む範囲
- ・液状化層が広く分布すると考えられる沿岸低地を含む範囲

0次モデル作成範囲のうち、液状化被害に関連する地層の連続性など地盤構造の複雑さを考慮するために、3次元地盤構造モデルを作成する範囲（1次モデル作成範囲と呼ぶ）として、液状化評価の指標を自然条件などの関連する条件の違いによって検討可能な範囲を設定した。

- ・人口・道路の密集している範囲
- ・地盤情報が豊富で、地盤条件を比較的想定可能な範囲
- ・複数の液状化し易いとされる地形（埋立地、氾濫原、砂州など）が分布する範囲
- ・過去の地震災害で液状化が認められた地点が含まれる範囲
- ・活断層である警固断層など、地質分布を大きく規制する地質構造の含まれる範囲
- ・既往の想定で液状化危険度の高い範囲

3.2. 地盤情報の収集

3.2.1. モデル作成に必要な地盤情報の整理

福岡地区におけるモデル作成のために収集した地盤情報等に係る資料は、表 11 に示すリストの通りである。

表 11 地盤情報に係る資料リスト

区分	収集資料		発行年	データ属性	位置精度	数量	解釈レベル	0次モデル使用	3次元地盤モデル使用	備考
	種別	名称								
地理情報	基盤地図	行政界	2019	事実	A	—	—			
	基盤地図	水域	2019	事実	A	—	—		○	
	基盤地図	道路	2019	事実	A	—	—			
地形情報	DEM	国土地理院数値標高データ 5mメッシュ	2016~2019	事実	A	—	—			
	DEM	国土地理院数値標高データ 10mメッシュ	2016	事実	B	—	—			
	DEM	国土地理院数値標高データ 250mメッシュ	2011	事実	C	—	—	○		
	地形解析図	傾斜図	—	事実	A	—	—		○	DEMから作成
	地形解析図	陰影図	—	事実	A	—	—		○	DEMから作成
	地形区分図	土地履歴調査「福岡」	2016	解釈	B	—	D		○	
	地形区分図	数値地図25000「土地条件」	2014	解釈	B	—	D		○	
地盤情報	地質図	5万分の1地質図「福岡」	1994	解釈	B	—	D		○	
	地質図	シームレス地質図20万分の1	2015	解釈	C	—	D	○		
	地質図	5万分の1土地分類調査「福岡」	1984	解釈	B	—	D			
	地質図	福岡市地盤図	1981	解釈	B	—	D			
	地質図	福岡地盤図	1981	解釈	B	—	D		○	
	地質図	福岡地盤図(南部編)	1992	解釈	B	—	D		○	
	既存地盤モデル	J-SHIS AVS30	2019	解釈	C	—	D	○		
	既存地盤モデル	地震被害想定 地盤モデル	1997	解釈	B	—	D	○		自治体から提供
	ボーリング	国土地盤情報検索サイト「Kunijiban」	2019	事実	A	—	—		○	九州地盤情報共有DBと重複
	ボーリング	九州地盤情報共有データベース2018	2018	事実	A	15699	—		○	
	ボーリング	福岡市所有データ	—	事実	A	435	—		○	ホームページから

収集したボーリングデータの位置図を図 54 に示す。ボーリングデータは主に、地盤工学会九州支部・九州地盤情報システム協議会による九州地盤情報データベース⁴³より収集した。

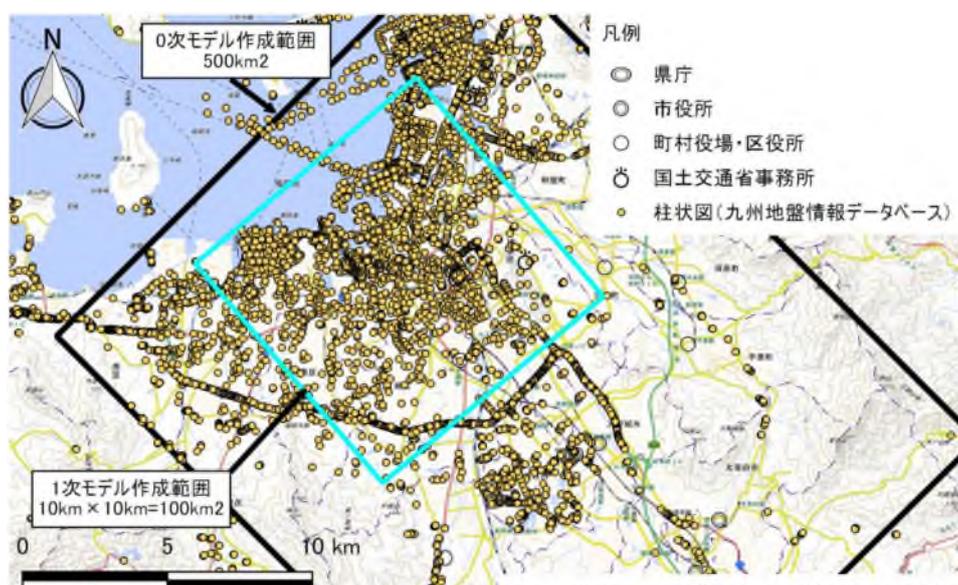


図 54 対象範囲周辺において収集したボーリングデータ位置図

3.3. 追加調査計画の立案

福岡地区の現地調査の方針は以下の通りとした。

- 人口密集度が高く、緊急輸送路周辺での液状化履歴箇所及び液状化予測でのリスクの高い地域を対象として、微地形区分ごとの地盤特性に焦点を当てて調査を実施する。
- 浅層の液状化対象層について微地形（砂州、氾濫原低地）ごとにボーリング調査/PS 検層を実施して、地層分布、物理探査（2次元微動探査）との関係を把握する。また、サンプリングの実施、室内土質試験により地層ごとの物性値を把握して地盤の深さ方向の精度の向上を図る。
- PDC を多地点で実施することにより地下水位、液状化・非液状化層厚を把握、表層 10m のモデル精度の向上を図る。
- 2次元微動探査により、基盤層の不陸および地表までの S 波速度分布の把握し、3次元地盤構造モデルの精度の向上を図る。

また、以下の理由によりボーリング等の調査深度、調査手法、調査位置を決定した。

- 対象地域の工学的基盤の確認は、ボーリング調査による PS 検層で確認し、補完する。ボーリングの掘削深度は 30～50m 程度の液状化対象層程度の深度とする。
- ボーリング調査は浅層の液状化対象層について微地形（砂州、氾濫原低地）ごとに 2 孔実施して、地層分布、物理探査との関係を把握する
- 地震動特性に影響が大きい動的変形特性を把握するために、沖積の砂質土層、洪積の砂質土層や粘性土層を狙ってサンプリング、室内土質試験を実施する。
- ボーリングを補完するために PDC を 19 箇所実施する。

追加調査数量表を表 12 に、調査位置図を図 55 にそれぞれ示す。

3.4. 3次元地盤構造モデルの作成

3.4.1. 3次元地盤構造モデルの作成手法

3次元地盤構造モデルを構築するためのアルゴリズム（計算手法）は、可能な限り客観性を持たせて比較検討が可能なアルゴリズムを採用した。

一般的な地層ソリッドモデルソフトウェアで採用されている手法として、サーフェスモデル（地質境界面）は最適化原理（Horizon2000,BS-Horizon）を、3次元地盤構造モデルのボクセルモデルは、IDW（Inverse Distance Weighted：逆距離加重法）を採用した。

3.4.2. サーフェスモデル等の構成

サーフェスモデルは、平面的分布に関しては「治水地形分類図(初期整備版)」、地質層序（深度方向）に関しては、既往の地質調査報告書をベースに試作した。サーフェスモデルでは、完新統として埋土・盛土層、沖積層、更新統として大坪砂礫層、須崎層上部、須崎層下部、仲原礫層、基盤岩類の7つの地層についてサーフェスモデルで表現した。

それらに対し、ボーリング柱状図や物理探査結果などの事実、他の文献と異なる部分に関しては、随時変更を加えた。なお、本モデルの構築にあたり使用したボーリングデータ（調査結果含む）は4380本である。

作成した地層ソリッドモデルの例を図40に示す。

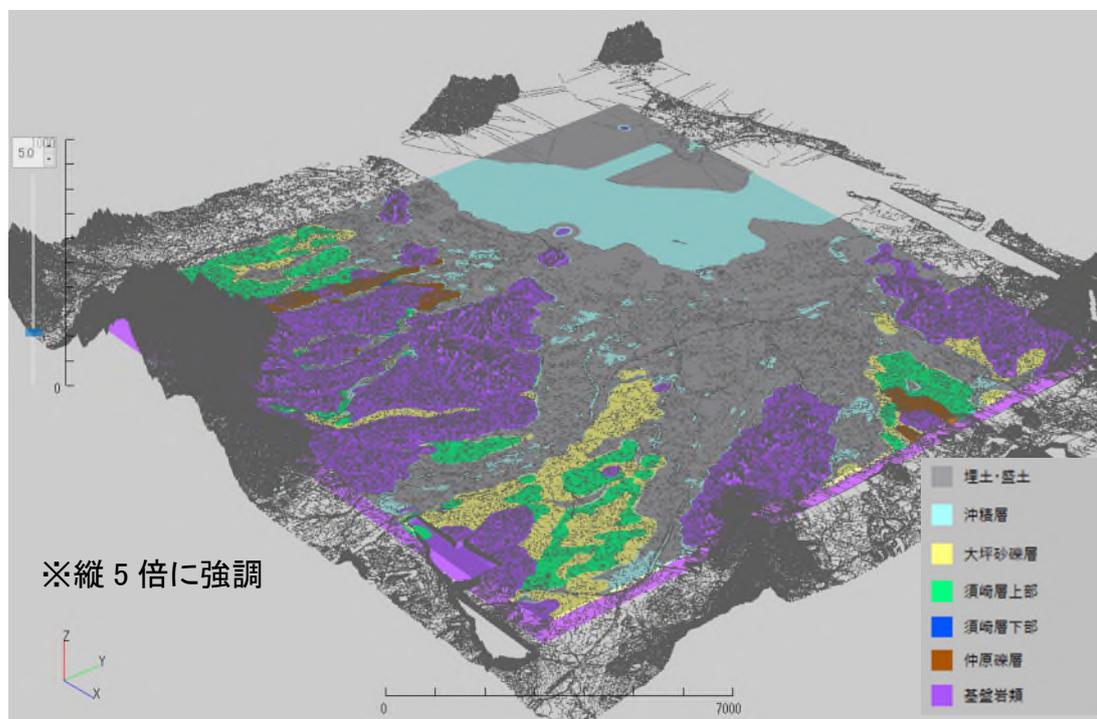


図 56 地層ソリッドモデルの例

3.4.3. ボクセルモデル（土質・N値）の構成

ボクセルモデルの作成にあたり、地層区分を設定した。地層区分は前節の3区分に分類した。3次元ボクセルモデルの例を図57～図58にそれぞれ示す。

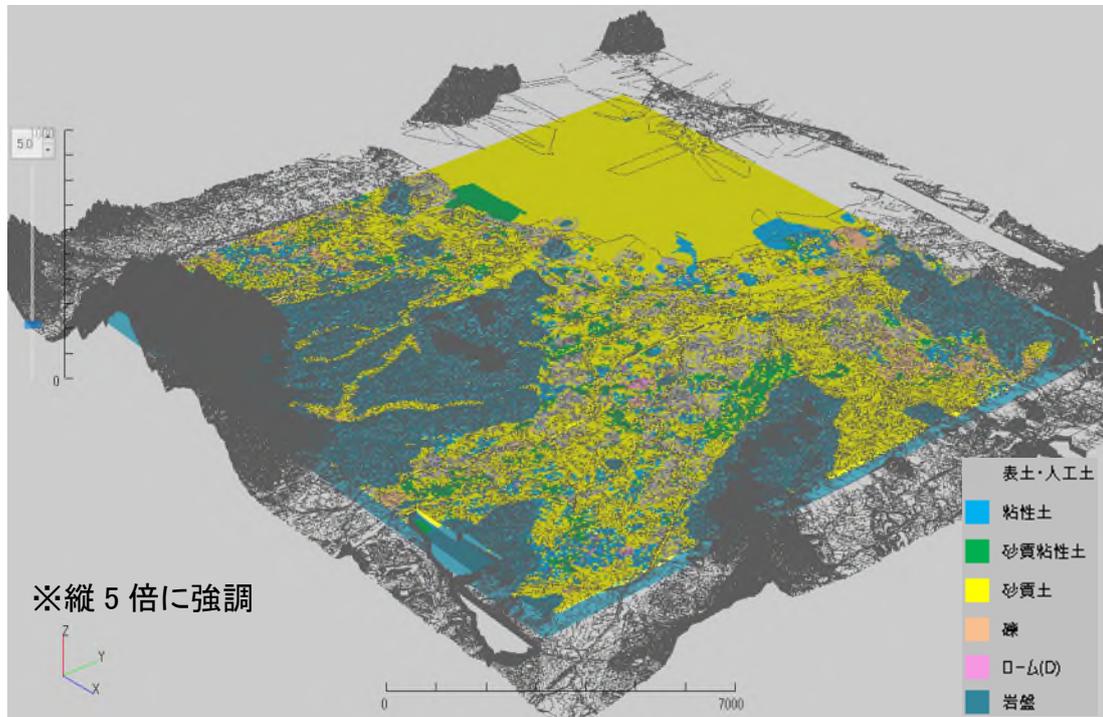


図 57 3次元土質区分ボクセルモデルの例

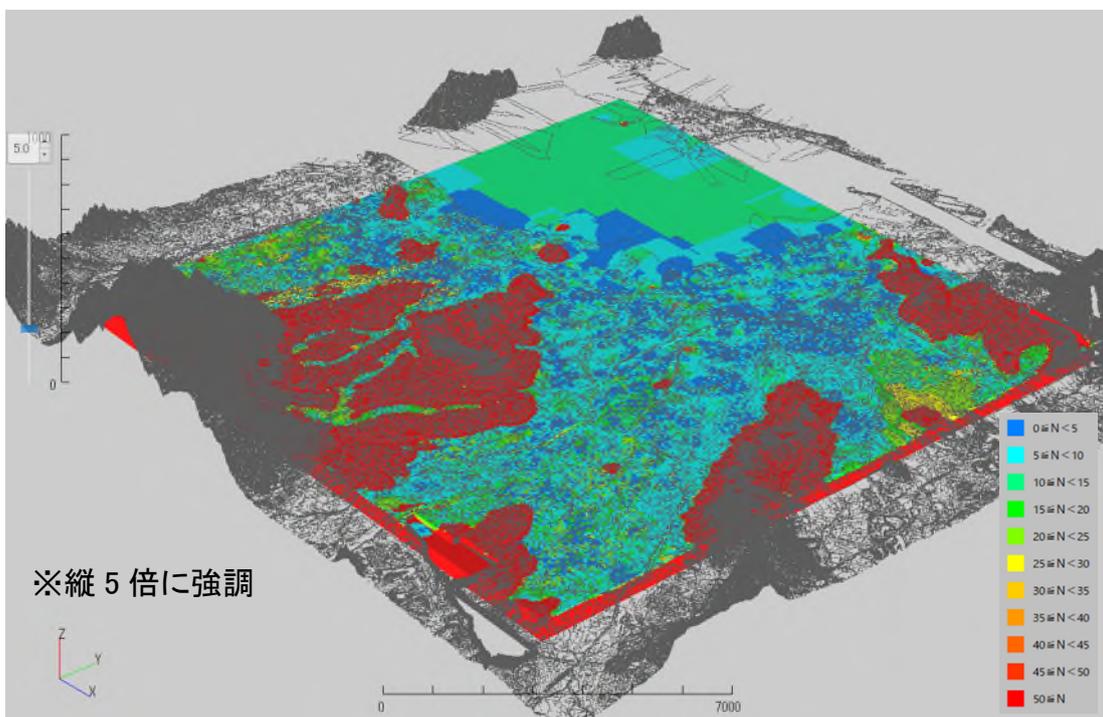


図 58 3次元N値ボクセルモデルの例

3.4.4. 地下水位

ボーリング柱状図および PDC に記載された孔口標高と孔内水位標高を図 59 に、設定した地下水位の分布を図 60 に示す。

不圧地下水位と推測されるボーリング柱状図に記載された初期水位と本研究で実施した PDC 調査で確認された孔内水位の標高（全 1552 本）は、孔口標高と相関が認められた。そのため、地下水位は、孔内水位の標高を目的変数、孔口標高を説明変数とした線形回帰モデルから設定した。

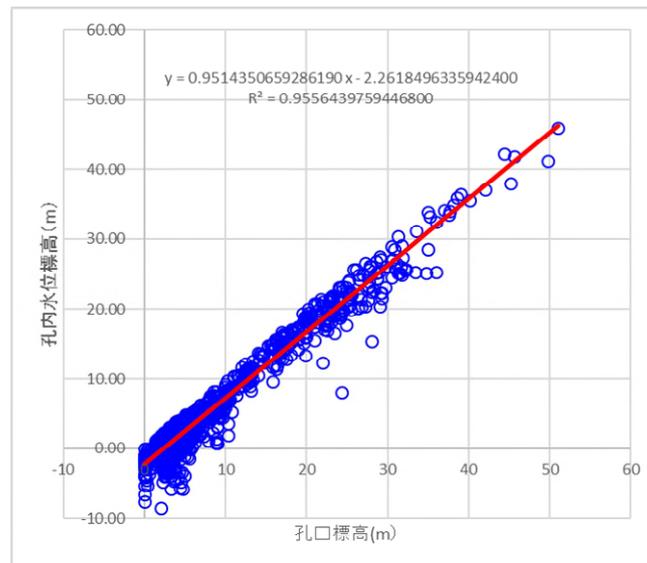


図 59 ボーリング柱状図および PDC に記載された孔口標高と孔内水位標高

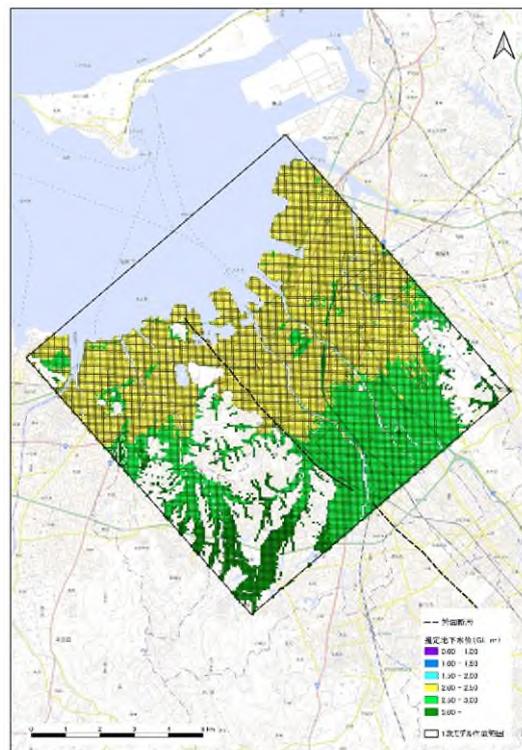


図 60 設定した地下水位の分布（解析で考慮しない水域・岩盤露出部を除く）

3.4.5. 物性値

解析に用いた物性値は、現地調査・室内土質試験の結果または一般値をもとに設定し、3次元地盤構造モデルを基にメッシュごとに作成したボクセルモデルへ物性値を割り当てた。

S波速度(Vs)は、2次元微動探査結果（一部はPS検層結果含む）をもとに整理した地層ごとの平均値から設定した。

表13に地震応答解析および液状化判定に用いた地盤定数の一覧を示す。

表 13 地盤定数一覧表

地層	記号	土質区分	FL対象	湿潤密度 yt kN/m ³	飽和密度 ysat kN/m ³	S波速度 Vs m/s	土層区分	土層種別	細粒分含有率 FC %	塑性指数 Ip %	平均粒径 D50 mm	10%粒径 D10 mm	ひずみ依存曲線	備考	
盛土・埋土	B-a	表土・人工土	○	15.0	17.0	170	0	0	28	1	0.02	0.1	土研式h		
	B-c	粘性土		14.9	16.9	170	0	2	59	1	0.04	0.1	土研式g		
	B-sc	砂質粘性土	○	15.8	17.8	170	0	4	44	1	0.46	0.1	土研式g		
	B-s	砂質土	○	15.9	17.9	170	0	0	19	1	0.39	0.1	土研式h		
	B-g	砂礫	○	19.0	21.0	170	0	1	11	1	2.00	0.1	土研式h		
沖積層	Ch-c	粘性土		13.5	15.5	200	0	2	78	1	0.03	0.1	土研式g		
	Ch-sc	砂質粘性土	○	16.1	18.1	200	0	4	44	1	0.04	0.1	土研式g		
	Ch-s	砂質土	○	16.7	18.7	200	0	0	20	1	0.74	0.1	試験値1		
	Ch-g	砂礫	○	19.0	21.0	200	0	1	10	1	1.10	0.1	土研式h		
大坪砂礫層	Ot-c	粘性土		14.1	16.1	250	1	2	71	1	0.03	0.1	土研式i		
	Ot-sc	砂質粘性土		16.0	18.0	250	1	4	31	1	0.04	0.1	土研式i		
	Ot-s	砂質土		16.3	18.3	250	1	0	22	1	0.94	0.1	土研式h		
	Ot-g	砂礫		19.0	21.0	250	1	1	17	1	1.10	0.1	土研式h		
	Ot-v	ローム		13.3	15.3	250	1	0	51	1	0.10	0.1	土研式h		
須崎層	上部層	Su-c	粘性土		16.1	18.1	280	1	2	69	1	0.02	0.1	試験値2	
		Su-sc	砂質粘性土		17.9	19.9	280	1	4	44	1	0.04	0.1	試験値2	
		Su-s	砂質土		17.5	17.7	280	1	0	24	1	0.56	0.1	試験値3	
		Su-g	砂礫		19.0	21.0	280	1	1	14	1	2.00	0.1	土研式h	
	下部層	Sl-c	粘性土		16.1	18.1	350	1	2	69	1	0.02	0.1	土研式i	
		Sl-sc	砂質粘性土		17.9	19.9	350	1	4	44	1	0.04	0.1	土研式i	
		Sl-s	砂質土		15.7	17.7	350	1	0	24	1	0.56	0.1	土研式h	
		Sl-g	砂礫		19.0	21.0	350	1	1	14	1	2.00	0.1	土研式h	
中原礫層	Nb-c	粘性土		15.5	17.5	400	1	2	75	1	0.03	0.1	土研式i		
	Nb-sc	砂質粘性土		16.0	18.0	400	1	4	65	1	0.04	0.1	土研式i		
	Nb-s	砂質土		17.5	19.5	400	1	0	30	1	0.15	0.1	土研式h		
	Nb-g	砂礫		19.0	21.0	400	1	1	0	1	2.00	0.1	土研式h		
基盤岩類	岩盤		25.0	25.0	640	2	-	-	-	-	-	-	基盤層		

FL対象 ○：FL計算の対象層（砂質粘性土、砂質土、砂礫）、それ以外の土質区分（粘性土、沖積層および岩盤）は対象外
土層区分 0：沖積層、1：洪積層、2：その他
土層種別 0：砂質土、1：礫質土、2：粘性土、3：その他、4：粘性土(砂式)
塑性指数 仮値を入力（Ip、D10による液状化判定の必要性を判定することは困難なため）
10%粒径 仮値を入力（Ip、D11による液状化判定の必要性を判定することは困難なため）
ひずみ依存曲線 土研式g：沖積粘性土、土研式h：砂質土・礫質土、土研式i：洪積粘性土、試験値1～3：本委託研究の試験結果に基づく設定曲線
土研式は「土研資料第1778号 地盤の地震時応答特性の数値解析法-SHAKE：DESRA-」昭和57年2月に記載の方法による

3.5. 既往地震の液状化被害による評価

3.5.1. 地震動の設定

2005年福岡県西方沖地震相当を想定し、J-SHIS（地震ハザードステーション）⁴⁴より公開されている警固断層帯北西部による地表の計測震度を使用した。

3.5.2. 地震応答解析

本項では、地震応答解析は実施せず、計測震度の結果を用いて最大加速度を算定した。図 61 に、計測震度より換算した地表最大加速度分布図を示す。

沿岸部においては加速度が大きく、 500cm/s^2 以上を示す。

3.5.3. 液状化指標値（土の強度及び支持力の低下）マップ

道路橋示方書（2017）に基づき深度0～10mの平均 F_L と平均 R を対象に、土質定数の低減係数（ D_E ）を算出し、液状化指標値（土の強度及び支持力の低下）マップを作成した。図 62に、液状化指標値（土の強度及び支持力の低下）マップを示す。

室見川右岸～大濠公園にかけての範囲と検討範囲の北東部において、低減係数が0～1/3を示すメッシュが散在し、土の強度及び支持力の低下の度合いが大きくなっている。それ以外は、低減係数は2/3または1が多く、土の強度及び支持力の低下の程度は低くなっている。

3.5.4. 液状化指標値（ P_L 値）マップ

メッシュごとの液状化判定は、道路橋示方書（2017）に準拠して実施した。液状化抵抗率（ F_L ）は R/L （ R ：動的せん断強度比、 L ：地震時せん断強度比）で表されるが、予測の精度向上を図るため、 L は地震応答解析結果により算出した。図 63に、液状化指標値（ P_L 値）マップを示す。

深度20mまでの F_L 値を用いて算出した P_L 値をマップに整理すると、海岸沿いの埋立地および低地では、危険度が大きい（ $P_L \geq 15$ ）に該当するメッシュが大部分を占めている。それに対し、台地では危険度が小さい（ $0 < P_L \leq 5$ ）または液状化発生の危険性がない（ $P_L = 0$ ）に該当するメッシュが多くなっている。

3.5.5. 液状化指標値 (Dcy 値) マップ

液状化に伴う水平変位 Dcy (≒沈下量) を建築基礎構造設計指針 (2019) に準拠して実施した。図 64 に、液状化指標値 (Dcy 値マップ) を示す。

図より、海岸沿いの埋立地および低地では、液状化の程度が甚大($Dcy > 0.4$)～中($0.1 < Dcy \leq 0.2$)に該当するメッシュが多く分布している。台地では、軽微($0 < Dcy \leq 0.05$)、なし($Dcy = 0$)に該当するメッシュが多く、液状化の程度が小($0.05 < Dcy \leq 0.1$)のメッシュが散在している。

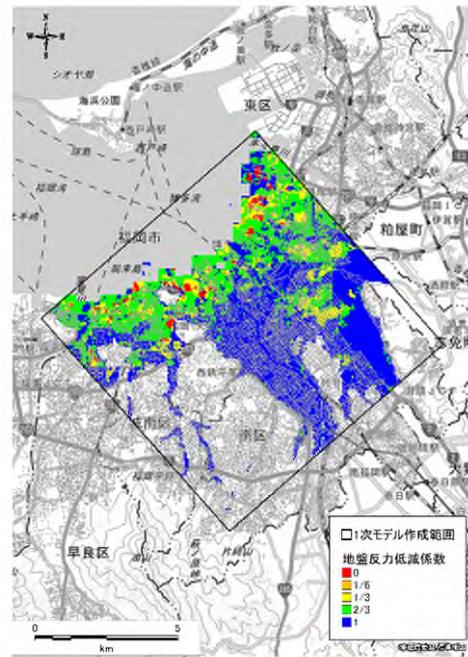
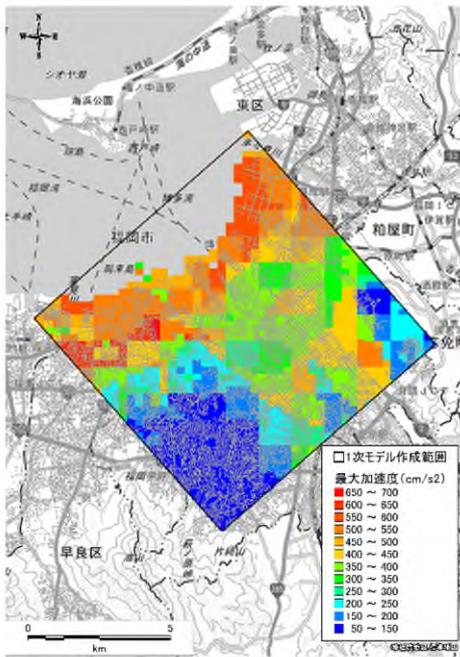


図 61 地震応答解析結果による地表最大加速度 図 62 液状化指標値 (土の強度及び支持力の低下マップ)

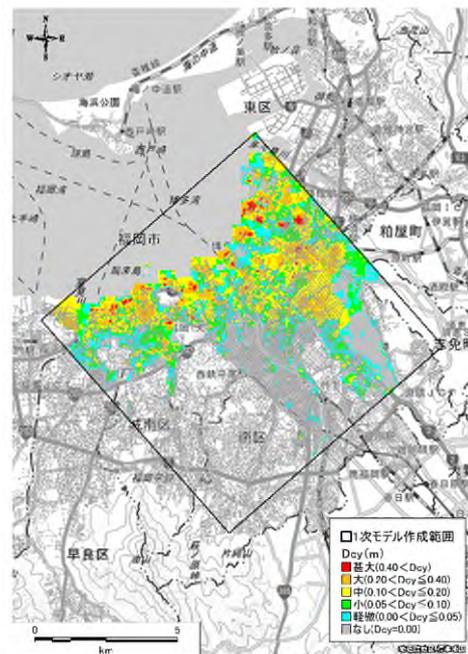
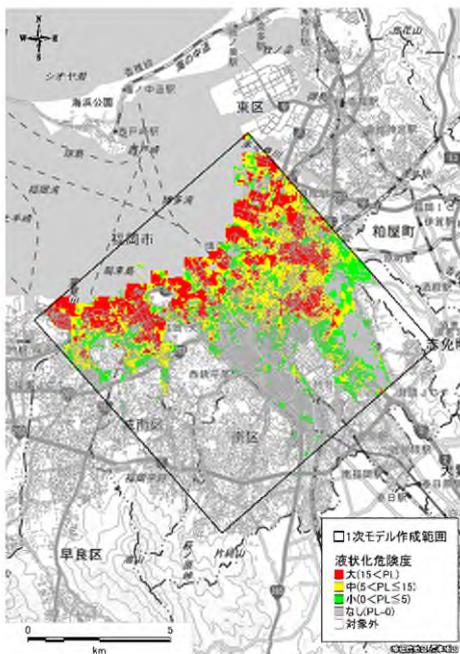


図 63 液状化指標値 (PL 値マップ)

図 64 液状化指標値 (Dcy 値マップ)

3.5.6. 2005年福岡県西方沖地震における被害実績との対比

2005年福岡県西方沖地震での液状化履歴と、本研究成果による液状化危険度マップとの対比について図65に示す。本ガイドライン(案)で作成した3次元地盤構造モデルによる液状化危険度マップは、警固断層帯北西部を想定とした結果である。なお、想定地震動については、J-SHISによる警固断層帯北西部の想定結果を利用した。

2005年福岡県西方沖地震での液状化履歴は、沿岸域を中心として主に埋立地において地盤の液状化被害が集中している。一方、想定されている液状化危険度も主に埋立地において危険度が中～大の結果となっており、液状化履歴と概ね合致している。また、内陸部においては一部の地域で、危険度が中～大となっている。

なお、液状化強度の予測方法について、沖積砂層の堆積年代や液状化強度の経年変化を考慮した液状化強度の結果を用いると、より実被害履歴と整合が良くなる例もある⁴⁵。

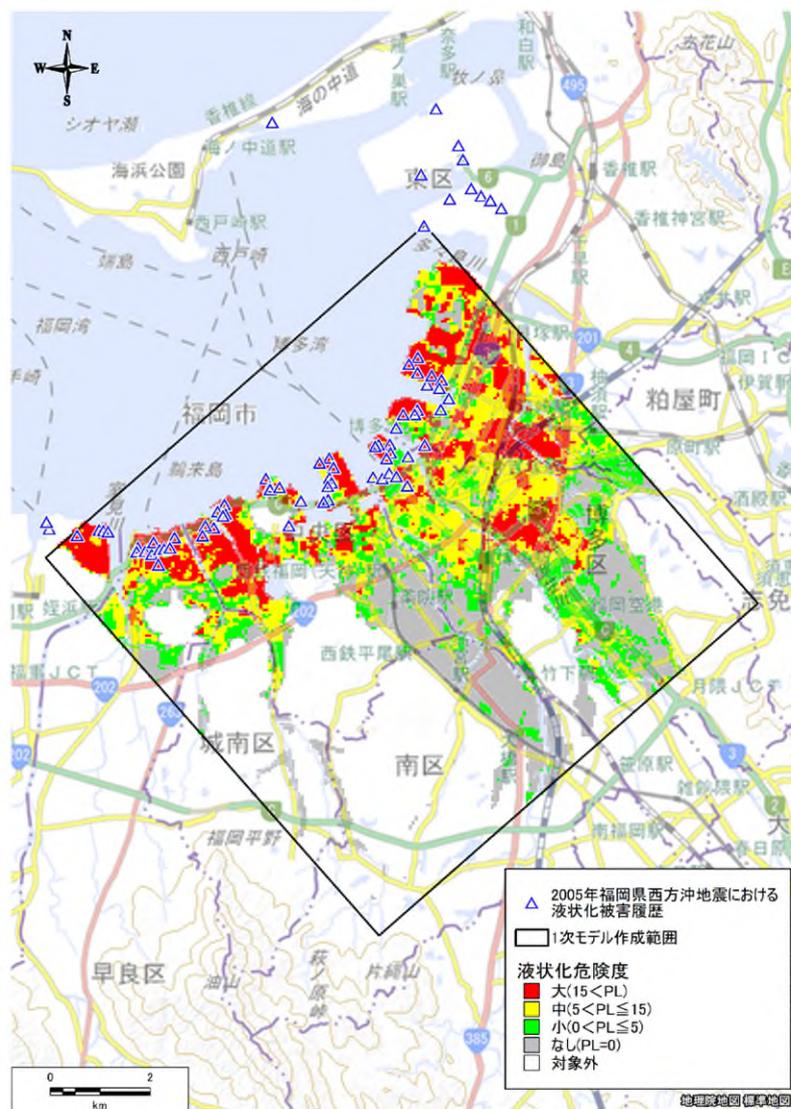


図 65 液状化危険度マップと2005年福岡県西方沖地震における被害実績との対比