

## 【巻末】液状化リスク評価のための3次元地盤構造モデルの作成事例およびその他の留意事項

本ガイドラインは3次元地盤構造モデルの作成方法について示している。ここでは、本ガイドラインの作成方法に準じて作成した3次元地盤構造モデルを用いて、過去の液状化による被害が生じた地震に対してインフラ施設のハザードマップを作成し、地盤モデルの妥当性や課題等について検討したものである。

### 1. 新潟地区における3次元地盤構造モデルの作成事例

#### 1.1. 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、新潟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16）。

- ・人口集積度・道路密集度が高い新潟市街地を対象とする。
- ・既往の液状化ハザードマップにおいて液状化リスクの高い範囲を優先に実施する。
- ・信濃川周辺の氾濫原堆積物は液状化対象層と考えられ、層厚変化による検討を実施する。

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。

- ・人口密集度が高く、重要インフラ施設を含む緊急輸送路周辺での液状化履歴が確認される。
- ・液状化想定層の分布、地盤情報豊富で比較的想定可能な地域  
（地質モデル構築に十分なデータの入手が可能で情報公開が可能）
- ・複数の液状化しやすいとされる地形（砂丘間堆積物、埋立地、氾濫原、旧河道など）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災害履歴情報の明確な範囲。
- ・既往の想定で液状化危険度の高い範囲。



図 16 調査エリアの絞り込み

## 1.2. 地盤情報の収集

### 1.2.1. モデル作成に必要な地盤情報の整理

新潟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 5 に示すリストの通りである。

表 5 地盤情報に係る資料リスト

区分	種別	収集資料		発行年	データ属性	位置情報	解釈レベル	0次モデル 使用	3次元地盤モデル 使用
		名称							
地形情報	DEM	国土地理院数値標高データ5mメッシュ		2015	事実	A	—	—	○
	DEM	国土地理院数値標高データ10mメッシュ		2014	事実	B	—	—	○
	DEM	国土地理院数値標高データ250mメッシュ		不明	事実	C	—	○	—
	地形解析図	傾斜図		—	事実	A	—	—	○
	地形解析図	陰影図		—	事実	A	—	—	○
	地形区分図	J-SHIS地形分類		2019	解釈	C	—	○	—
	古地図・治水履歴	江戸から昭和期における信濃川後部の流路変遷		2002	解釈	E	D	—	○
地盤情報	古地図・治水履歴	信濃川【下流】の現状		—	解釈	E	D	—	○
	地質図	新潟及び内野「図幅」5万分の1		2016	解釈	B	D	—	○
	地質図	治水地形分類図「新潟北部」2万5千分の1(初期整備版)		1977	解釈	B	D	—	○
	地質図	治水地形分類図「新潟南部」2万5千分の1(初期整備版)		1977	解釈	B	D	—	○
	地質図	治水地形分類図「新潟北部」2万5千分の1		2009	解釈	B	D	—	○
	地質図	治水地形分類図「新潟南部」2万5千分の1		2009	解釈	B	D	—	○
	地質図	越後平野の地盤と防災		2018	解釈	C	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	新潟県地盤図		2002	解釈	C	D	—	○
	地質図・断面図	越後平野中央部における沖積層層序の再検討		2002	解釈	D	C	—	○
	断面図・古地図	新潟市周辺の表層地質		1963	解釈	E	D	—	○
	地質断面図	新潟及び内野「図幅」5万分の1		2016	解釈	C	D	—	○
	地質断面図	ボーリングデータベースに基づく越後平野の沖積層モデル		2011	解釈	C	C	—	○
	地質断面図	ほくりく地盤情報システム		—	解釈	C	—	—	○
	既存地盤モデル	新潟県地震被害想定調査報告書(平成10年)		1998	解釈	D	—	—	—
	既存地盤モデル	J-SHIS AVS30		2019	解釈	C	—	○	—
	ボーリング	ほくりく地盤情報システム		—	事実	—	—	—	○
	ボーリング	kunijiban		—	事実	A	—	—	○
	ボーリング	国土地盤情報データベース		—	事実	A	—	—	○

収集したボーリングデータの位置図を図 17 に示す。ボーリングデータは、主に公開データとなっている Kunijiban および「ほくりく地盤情報システム<sup>39)</sup>」からデータを収集した。

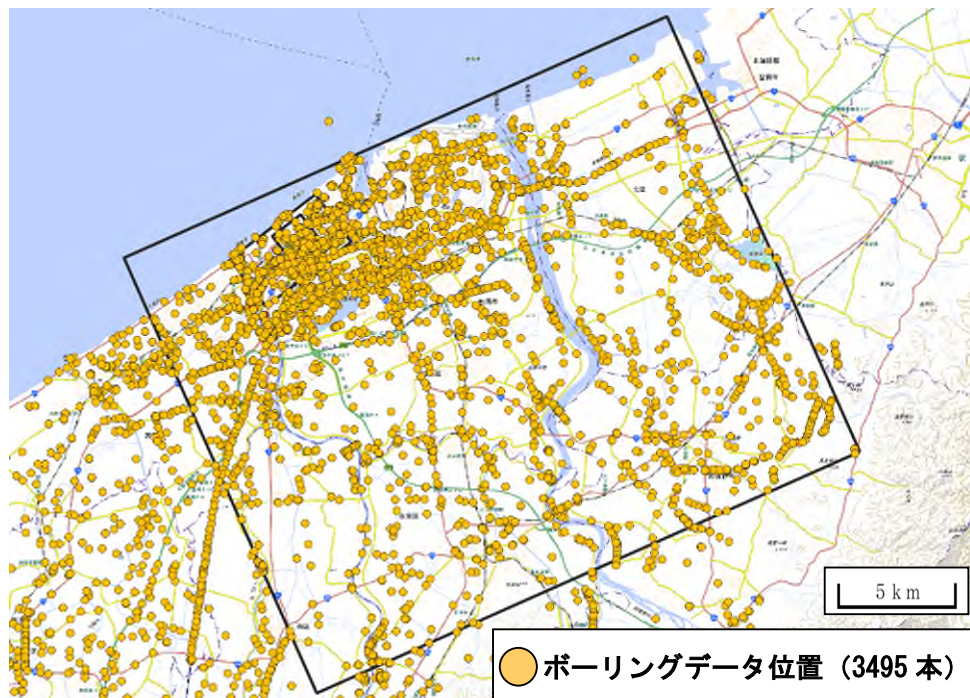


図 17 対象範囲周辺において収集したボーリングデータ位置図

### 1.3. 追加調査計画の立案

新潟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。
- 新潟平野の工学的基盤は 100m 程度以上と深いことから、微動探査を実施して、既存データと合わせて工学的基盤深度を把握する。
- 浅層の液状化対象層について微地形（砂州、氾濫平野、盛土埋土）ごとにボーリング調査および PS 検層を実施して、地層分布、物理探査（表面波探査、3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次元表面波探査、3次元微動探査の実施により、地盤の連続性・非連続性を把握して3次元地盤構造モデルを作成し、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、ボーリング調査で確認し、微動探査により補完する。
- 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、氾濫平野、盛土埋土）ごとに3孔実施して、地層分布、物理探査との関係を把握する。各孔の氾濫平野（後背湿地）で 20m、砂州～旧河道で 50m 深度までの液状化対象層程度の深度とする。
- 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、砂質土層、粘性土層を対象にサンプリング、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。



追加調査数量表をに、追加調査位置図をにそれぞれ示す。

表 6 追加調査数量表

追加調査	
調査項目	実施数量
・機械ボーリング	3 孔、計 90m
・PS 検層	3 孔、計 90m
・サンプリング（試料採取）	4 本
・PDC	19 箇所、計 182m
・物理探査（表面波探査）	11 測線、総延長 5.76km
・物理探査（1次元微動探査）	9 箇所
・物理探査（3次元微動探査）	1 領域（200m×500m）

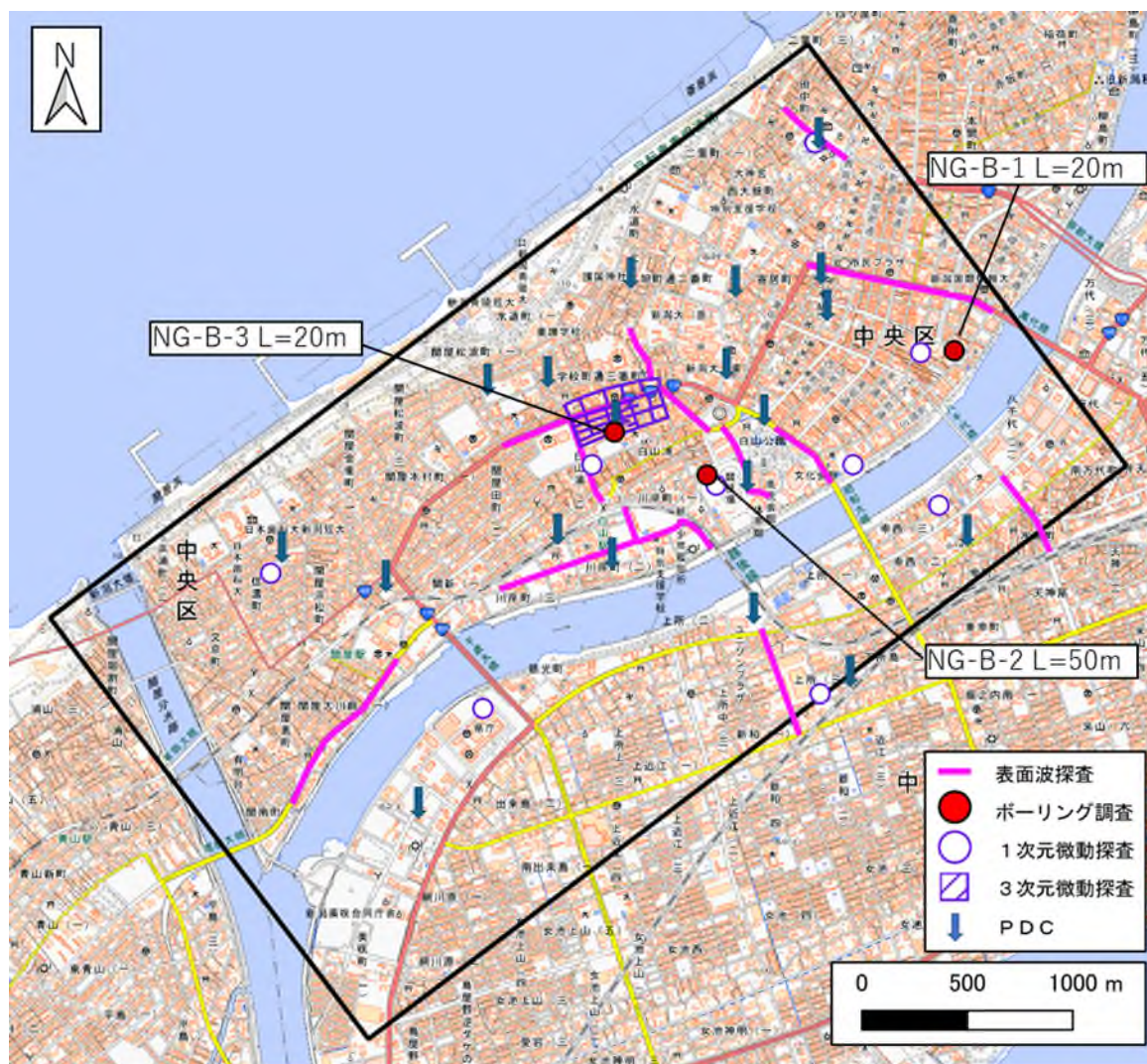


図 18 追加調査位置図

### 1.4. 3次元地盤構造モデルの作成

#### 1.4.1. 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。

#### 1.4.2. 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、「新潟及び内野「図幅」5万分の1」および、既往の地質調査報告書をベースに試作した。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。図19にサーフェスモデルの例を示す。

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、約825本である。

3次元地盤構造モデルでは、6つの地層についてサーフェスモデルで表現した。本地域ではSmm1層の下面が工学的基盤として設定されることから、以上の6つの地層に設定した。

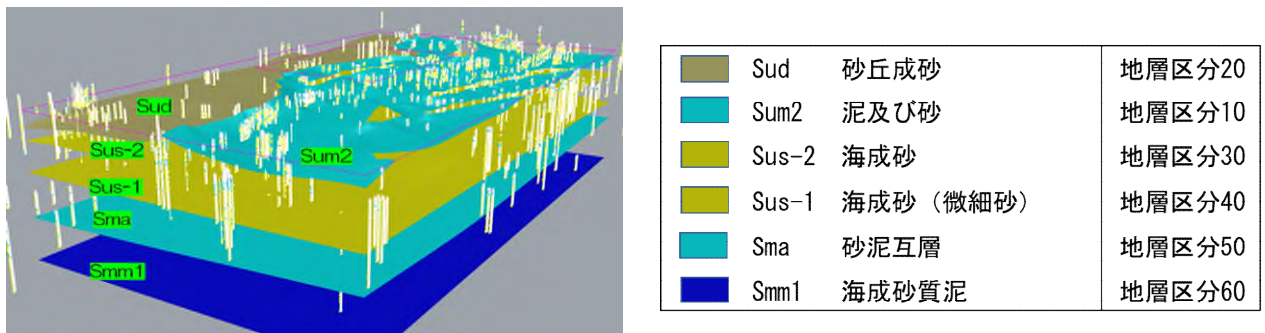


図 19 サーフェスモデルの例（南西から望む）

#### 1.4.3. 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。地層区分は表7に示す通り、6区分に分類した。

表 7 ボクセルモデルの構成

時代	地層名		記号	堆積物	地層区分	
完新世	白根層	上部	砂丘堆積物	Sud	砂丘成砂	地層区分20
			後背湿地堆積物	Sum2	泥及び砂	地層区分10
		海成層		Sus-2	砂（中間部 N 値高い）	地層区分30
				Sus-1	砂（中間部 N 値高い）	地層区分40
			Sma	砂泥互層	地層区分50	
	中部	汽水～海成層	Smm2	濁成泥		
		Smm1	海成砂質泥	地層区分60		
更新世		下部	淡水～汽水成層	Sl1	砂泥互層	
中期～後期	蒲原層群		K	泥、砂、礫及び泥炭		



図 20～図 22 に、各地層区分上面のボクセルモデルの例を示す。

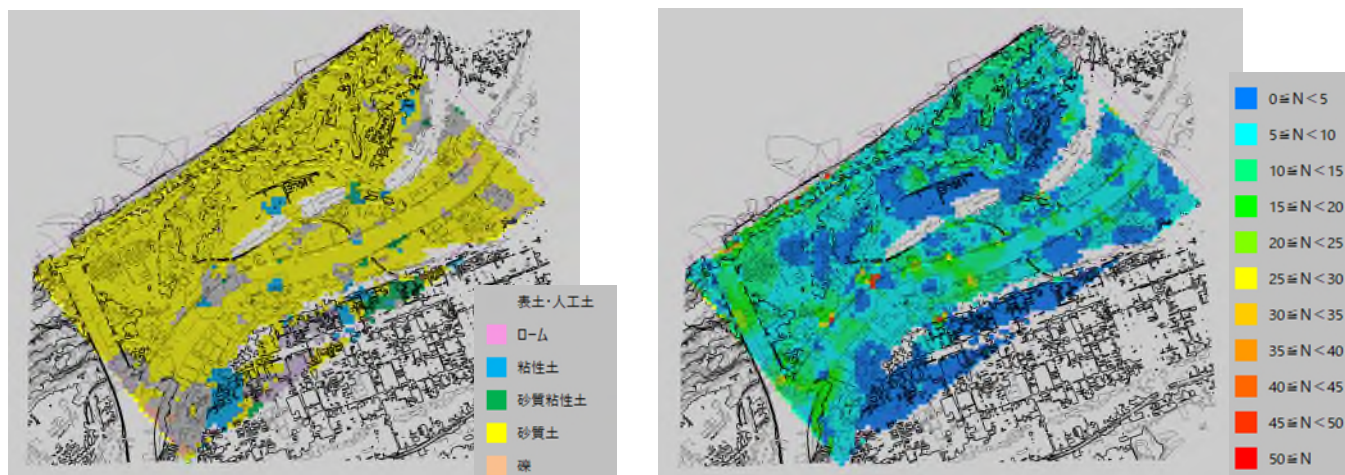


図 20 ボクセルモデル【地層区分 10・20 上面】の例（左：土質、右：N 値）

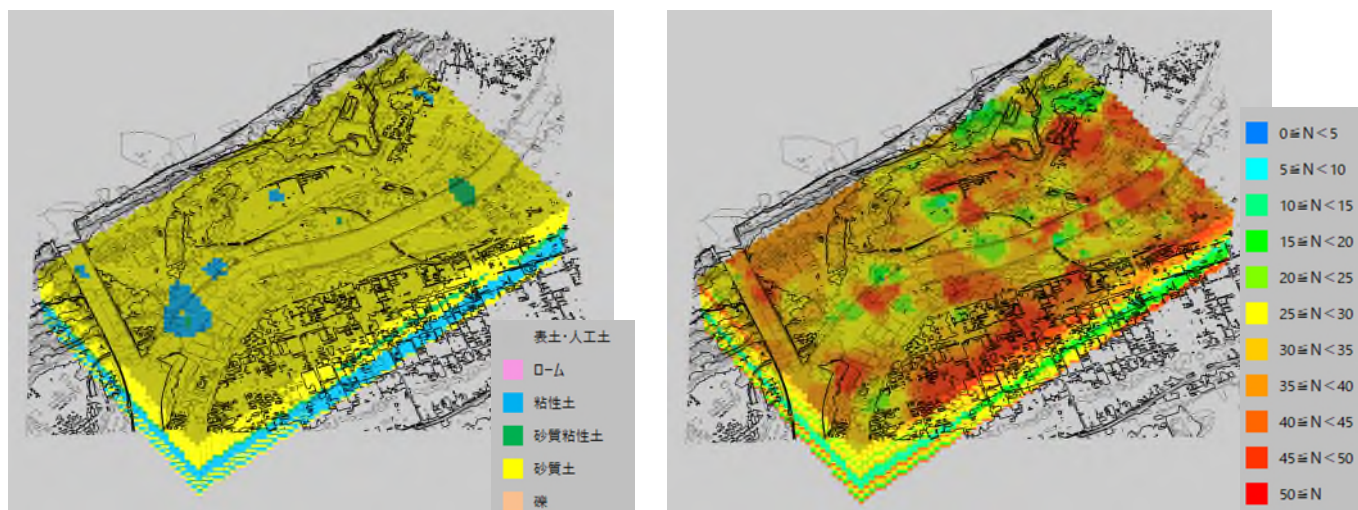


図 21 ボクセルモデル【地層区分 40 上面】の例（左：土質、右：N 値）

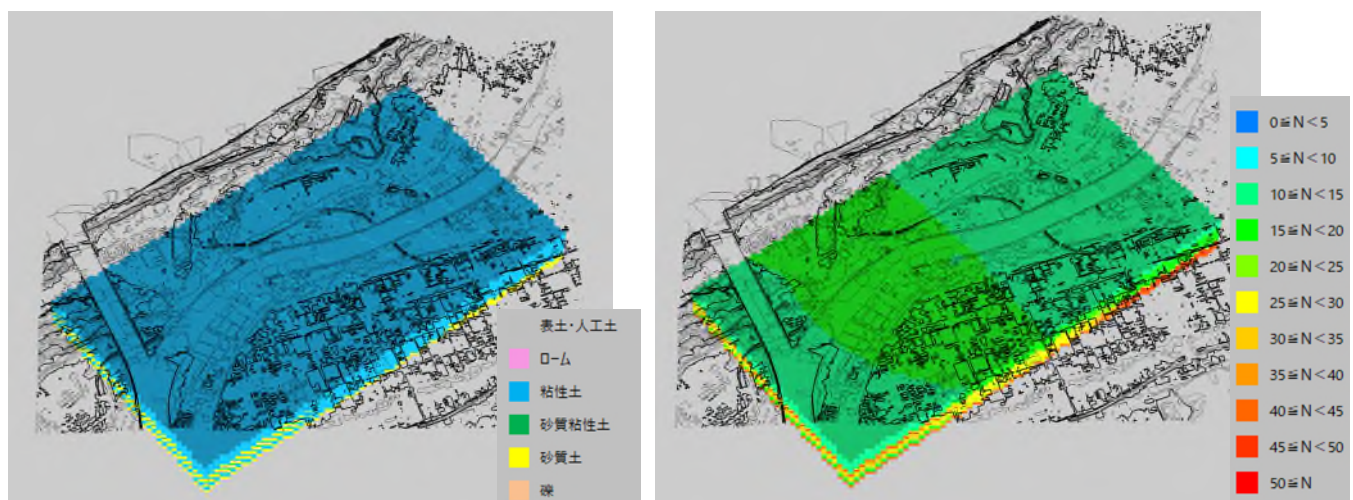


図 22 ボクセルモデル【地層区分 60 上面】の例（左：土質、右：N 値）



#### 1.4.4. 地下水位

PDC の結果から、地形状況や河川等の流況状況を参考に地下水位コンター図を作成した。図 23 に PDC 調査結果に基づく地下水位コンター図を示す。この地下水コンター図を入力データに地層モデル同様、最適化原理 (BS-Horizon) を用い、地下水サーフェスモデルを作成した。サーフェスモデルの鳥観図を図 24 に示す。

このサーフェスモデルより、各メッシュにおける水位を抽出し、液状化解析に用いる地下水位として設定した。



図 23 PDC 調査結果に基づく地下水位コンター図

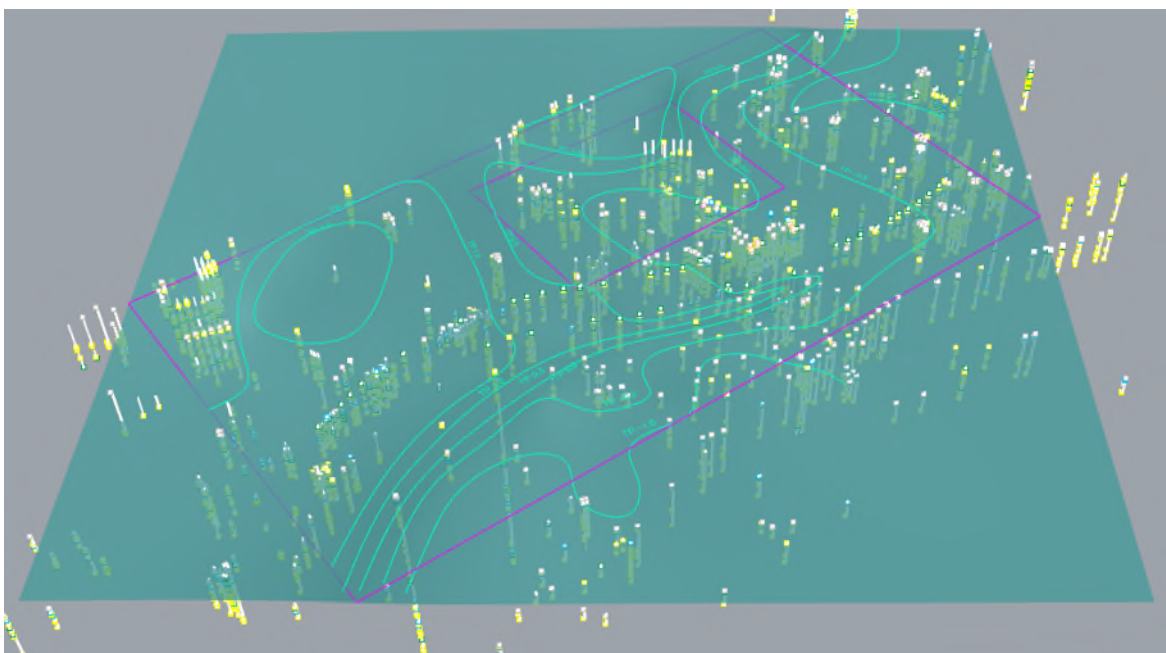


図 24 PDC 調査結果に基づく地下水サーフェスモデル図



#### 1.4.5. 物性値

S波速度は1次元微動探査に基づき作成したN値とS波速度の換算式を用い、ボクセルモデルに割り当てた。

新潟地区においては、計9地点で1次元微動探査を実施した。計9地点のS波速度と3次元N値モデルとして構築されたN値について、地層ごとに対比した。その結果を図26に示す。図中赤丸は、3次元N値モデルのN値と1次元微動探査のS波速度の対比結果、黒丸は、道示によるN値と道路橋示方書による換算S波速度である。赤点線は、赤丸の点の回帰式であり、回帰にあたっては、S波速度はN値の1/3乗に比例することを確認した。

Sud（砂丘成砂）やSmm（海成砂質泥）等においては、道路橋示方書の換算式と同様な傾向が認められおり、当該式を用いることの妥当性が示されているものと考えられる。その一方で、Sus上部（海成砂上部）は、道路橋示方書の砂質土式の換算係数より小さい値を示している。このことは、道路橋示方書の換算式を用いた場合、剛性を小さく評価する恐れがあることを示している。1次元微動探査のS波速度を考慮することで、現地状況に即したN値とS波速度の対応関係を把握でき、解析モデルにその結果を反映できるものと考えられる。ここで、3次元N値モデルから換算したS波速度構造モデルを図25に示す。新換算式を用いることで、解析モデルに物理探査結果を反映できるものと考えられる。新潟地区では、N値と1次元微動探査のS波速度の対比結果を得られた換算式を用い、解析モデル構築に使用した。

図26に新潟地区の地層ごとのVs-Nのクロスプロット図を示す。

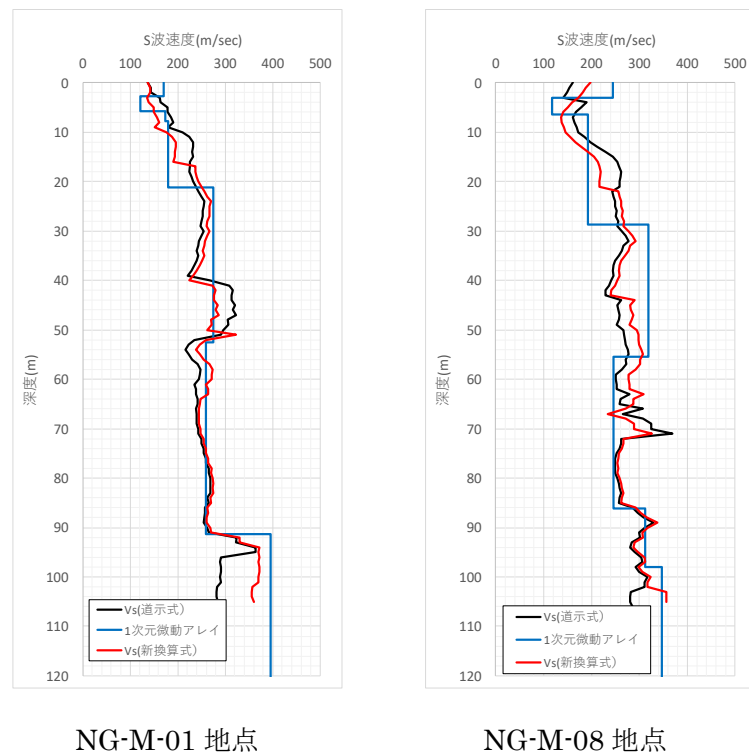


図25 新潟地区における1次元微動探査結果と3次元N値モデルから換算したS波速度構造モデル（赤：本検討による換算式、黒：道路橋示方書の式）の例

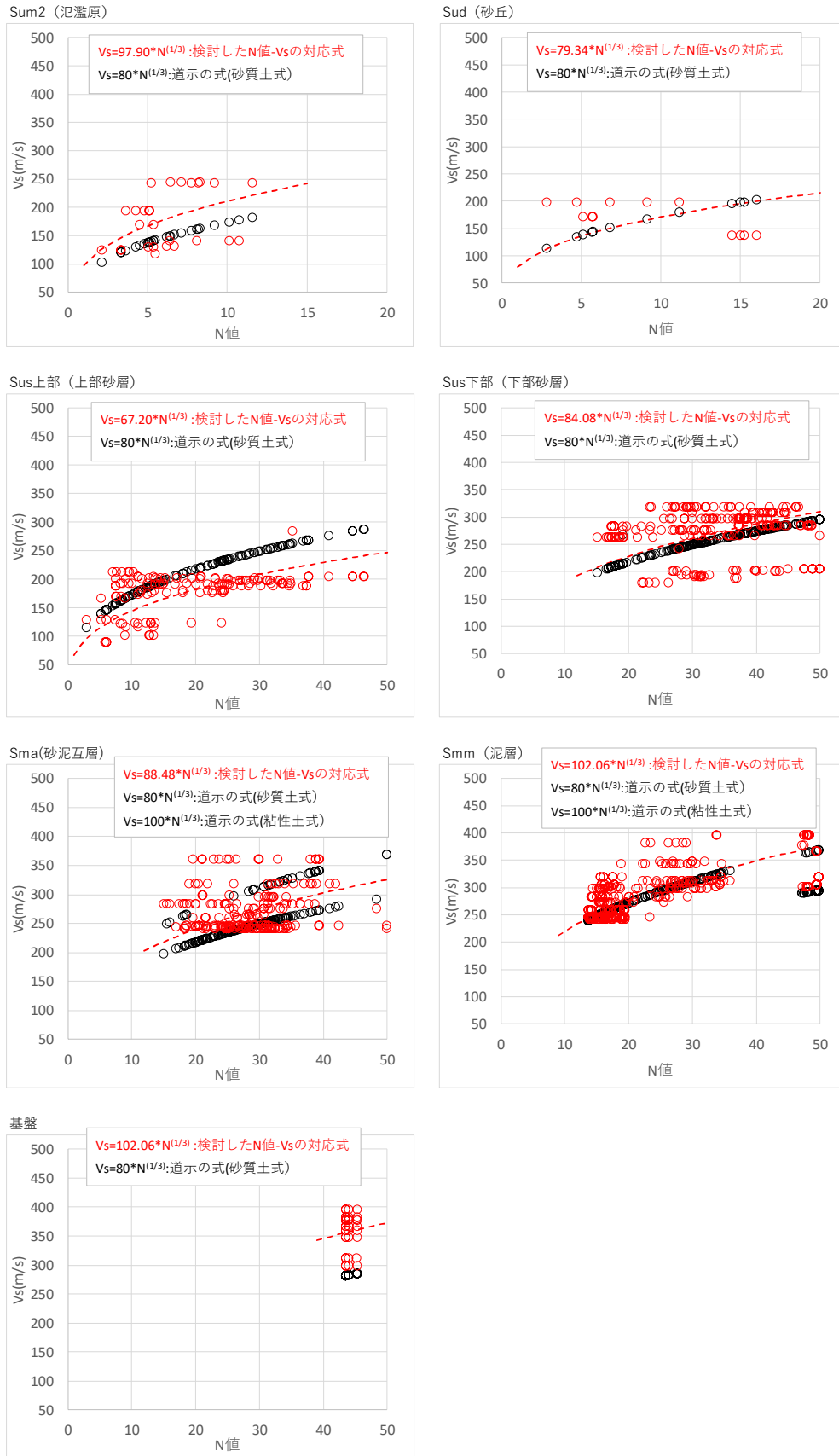


図 26 新潟地区の地層ごとの Vs-N のクロスプロット図



## 1.5. 既往地震の液状化被害による評価

### 1.5.1. 地震動の設定

地震動の設定は、当該地域で過去に大きな液状化被害を発生させた1964年の新潟地震を対象とした。入力地震動は、「1964年新潟地震の際の新潟市の工学的基盤における地震動の推定」（野津ら,第49回地盤工学研究発表会,2014.7）で設定された再現波形を使用した（図 27）。

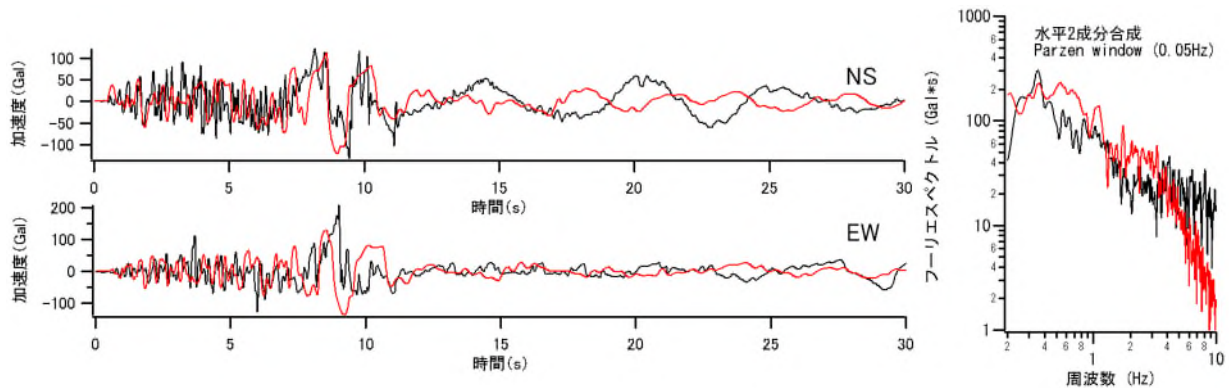


図 27 1964 年新潟地震（再現波（图中赤線））の加速度波形およびフーリエスペクトル

### 1.5.2. 地震応答解析

地震応答解析は、等価線形解析（SHAKE）<sup>40</sup>とした。図 28に、地震応答解析結果による地表最大加速度分布図を示す。

解析の結果、地表面の応答加速度の最大値は467galで、全体的に加速度は入力に対して大きくなっている。特に、信濃川沿いの箇所で応答加速度が大きくなる傾向であり、沿岸部では応答加速度が100gal未満の箇所が見られる。

### 1.5.3. 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 29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。

信濃川北西部の範囲において、低減係数が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。その他の範囲は、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。

### 1.5.4. 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 30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、信濃川沿いの広範囲で危険度が大きい（ $P_L \geq 15$ ）に該当するメッシュが分布する。

### 1.5.5. 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 31 に、液状化指標値 (Dcy 値マップ) を示す。

信濃川沿いの領域では、液状化の程度が大( $0.2 < Dcy \leq 0.4$ )～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。

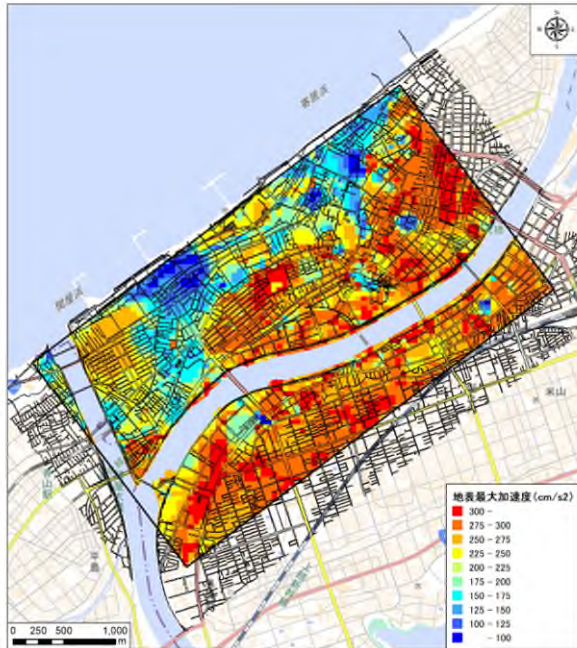


図 28 地震応答解析結果による地表最大加速度分布図

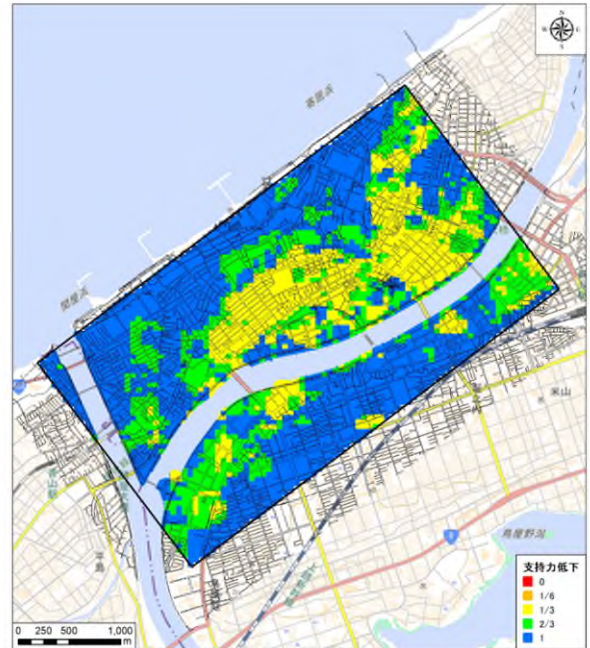


図 29 液状化指標値 (土の強度及び支持力の低下マップ)

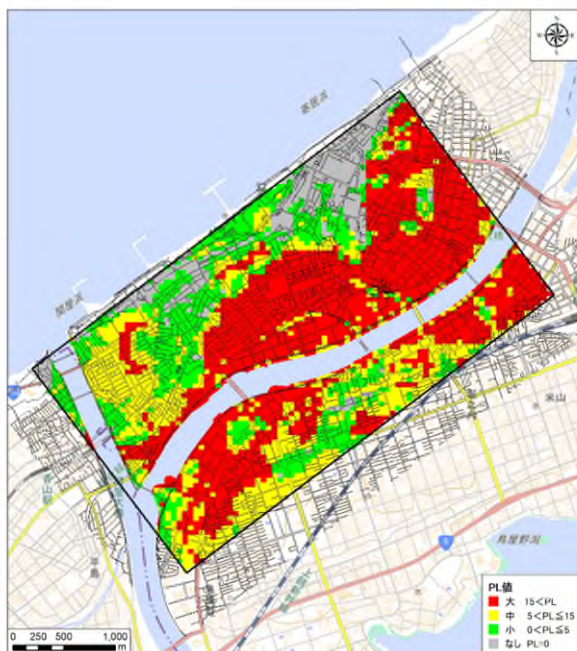


図 30 液状化指標値 (PL 値マップ)

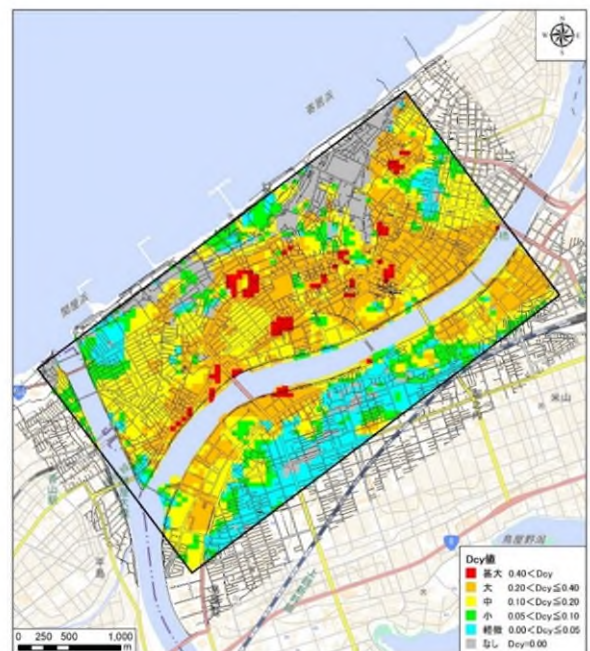


図 31 液状化指標値 (Dcy 値マップ)



### 1.5.6. 1964年新潟地震における被害実績との対比

図 32 に  $P_L$  値と実被害箇所<sup>41)</sup>の比較を、図 33 に既存の液状化危険度マップにおける液状化危険度マップとの比較をそれぞれ示す。ここで実被害とは参考文献に示される被害のうち、本マニュアルで対象とする道路施設に関連する被害（亀裂、波状変形、陥没および地盤の膨れ上がり）を対象とした。

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と既往の液状化しやすさマップでは、液状化危険度の高い範囲（本研究のマップでは液状化危険度「大」、既往のマップでは危険度ランク4の範囲）は概ね整合する結果となった。既往の液状化しやすさマップは過去の地震における液状化発生状況や地形地質等に関する情報を元に作成されたものであり、比較的精度の高いものであると考えられる。

新潟地区は3次元的な地形の起伏や人工地盤が少ないことから、3次元地盤構造モデルに基づく液状化危険度マップは地形情報に基づく液状化危険度マップとほぼ同等の結果を与えている。このような地形を呈する地区においては3次元地盤構造モデルの作成は液状化危険度マップの高精度化に大きな影響を与え難いものと考えられる。



図 32  $P_L$  値と実被害箇所の比較

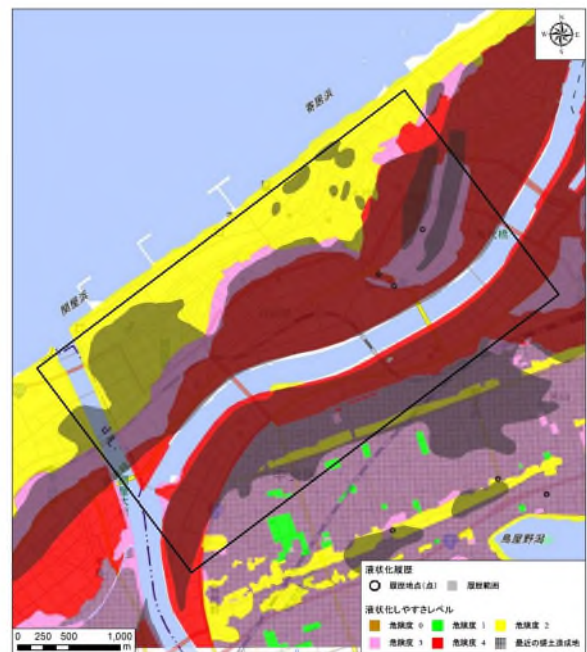


図 33 既存の液状化危険度マップ  
(北陸地方整備局「新潟県内の液状化しやすさマップ」)

## 1.6. インフラ施設のハザードマップの作成

### 1.6.1. 道路施設（平面道路）の液状化被害ハザードマップ

国土技術政策総合研究所資料 第1034号・土木研究所資料 第4363号（平成30年4月）における知見等をもとに、道路の液状化に伴う危険度（道路危険度）を、下のように区分し、マップに表現した。（図 34）

- ・ A：危険性が高い（道路舗装厚<sup>※1</sup>が0.8m未満）
- ・ B：危険性あり（非液状化層厚3m未満かつ直下に液状化層あり）
- ・ C：危険性は低い（非液状化層厚3m以上または深度3m以内に非液状化層<sup>※2</sup>が分布）

※1 道路舗装厚は、路床改良を含んだものである。

※2  $F_L \geq 1$ の地層、洪積層、岩盤など

ただし、道路舗装厚の資料は使用せず、危険度AまたはBと危険度Cのいずれかに判定を行った。また、液状化対策実施の有無に関する資料も収集できていないことから、危険度区分には反映させていないことに留意されたい。



図 34 道路施設（緊急輸送道路）の液状化被害



### 1.6.2. 下水道施設（管路や人孔等）の液状化被害ハザードマップ

土木研究所成果報告書<sup>4</sup>（平成21年）における知見等をもとに、下水管路の液状化に伴う危険度（下水危険度）を、以下のように区分し、マップに表現した。（図 35）

- ・ A：危険性が高い（埋戻土の液状化対策工が未実施）
- ・ B：危険性あり（砂層土の平均N値 $\leq 7$ または粘性土の平均N値 $\leq 5$ ）
- ・ C：危険性は低い（砂層土の平均N値 $> 7$ かつ粘性土の平均N値 $> 5$ ）

※1 砂層土の平均N値は、深度5m以内に分布する砂質土のN値を平均したものである。

※2 粘性土の平均N値は、深度5m以内に分布する粘性土のN値を平均したものである。

ただし、埋戻土の液状化対策工の資料は使用せず、危険度AまたはBと危険度Cのいずれかに判定を行った。

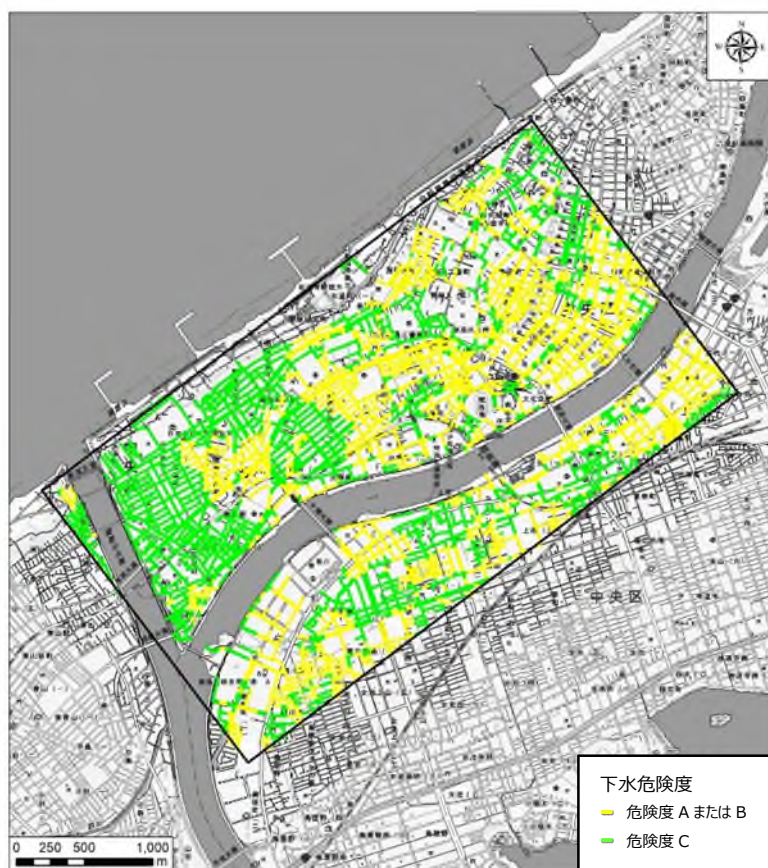


図 35 下水道施設の液状化被害