

川崎市臨海コンビナートの 地震防災性に関する研究

—液状化および長周期地震動による被害の予測—

早稲田大学 理工学術院
教授 濱田 政則

2012年10月28日 川崎市

報告書目次 ①

1. 2011年東日本大震災による京浜コンビナートの被害

- 1.1 液状化の発生状況の調査方法
- 1.2 液状化発生の状況
- 1.3 東日本大震災によるコンビナートの事故
- 1.4 東京湾で観測された津波

2. 地盤資料、護岸構造とタンクに関する資料の収集と整備

- 2.1 地盤資料
 - (1) ボーリング資料
 - (2) 検討用地盤資料の作成(50mメッシュによる地盤資料)
- 2.2 護岸構造資料の収集
- 2.3 タンク資料の収集

3. 2011年東北地方太平洋沖地震による川崎市臨海部の液状化の判定

- 3.1 液状化の判定法
- 3.2 東北地方太平洋沖地震による川崎市臨海部の地震動
 - (1) 観測された地震動(千鳥町)
 - (2) 数値解析による5人工島の地震動の推定
 - (3) 地表面加速度の最大値と震度階
- 3.3 液状化の判定

報告書目次 ②

4. 東京湾北部の地震による川崎市臨海部の液状化と側方流動の予測

- 4.1 基盤入力地震動の設定
- 4.2 地表面加速度の算定
- 4.3 液状化の判定用加速度の設定
- 4.4 液状化の判定
- 4.5 護岸移動量と地盤変位の推定法
- 4.6 護岸および地盤の水平・鉛直変位

5. 長周期地震動による浮屋根式タンクの内容液の液面上昇と溢出量の推定

- 5.1 液面上昇高と溢出量の推定方法
- 5.2 入力長周期地震動
 - (1) 東海地震、東南海地震連動による長周期地震動
 - (2) 高圧ガス指針による長周期地震動
- 5.3 東海地震・東南海地震連続発生による液面上昇と溢出量
- 5.4 高圧ガス指針による液面上昇と溢出量

6. 護岸移動による直接的被害額の算定

- 6.1 被害額算定の方法
- 6.2 被害額(各人工島での総計)

7. 基礎地盤のひずみによるタンクの危険度分類

- 7.1 地盤ひずみの算定法
- 7.2 地盤ひずみによるタンクの危険度の分類

報告内容

1. 2011年東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)による液状化
 - ・衛星写真等による噴砂等液状化の痕跡の判読
2. 東京湾北部の地震による液状化および側方流動の予測
 - ・予測のための資料収集と整備(ボーリング、護岸構造)
 - ・液状化の予測(地震動の予測→液状化判定)
 - ・護岸変位の予測
 - ・地盤の側方流動の予測
 - ・護岸近傍に位置するタンク周辺の地盤ひずみ
3. 東海地震および東南海地震連続発生によるタンクのスロッシング振動の予測
 - ・予測のための資料収集(タンクの位置、直径、高さ、液深)
 - ・液面の上昇量と内容液溢出量の算定
(長周期地震動の予測→スロッシング振動の解析)
4. 護岸被害による直接損害額の算定

液状化によるタンクの傾斜・沈下・移動 (1995年兵庫県南部地震、神戸市長田区)



臨海コンビナート、大型貯槽の長周期地震動に対する安全性

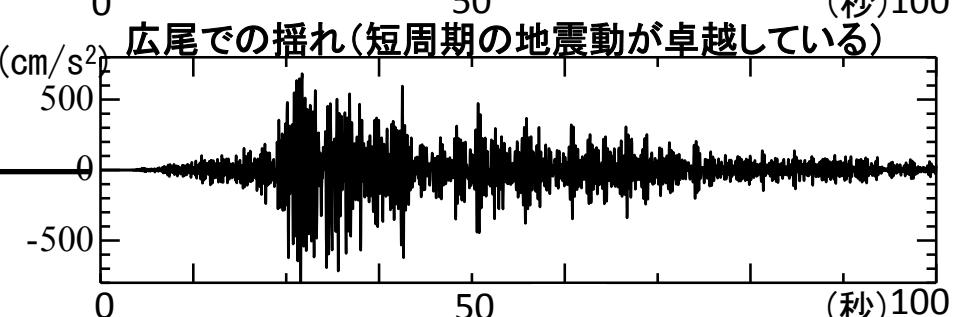
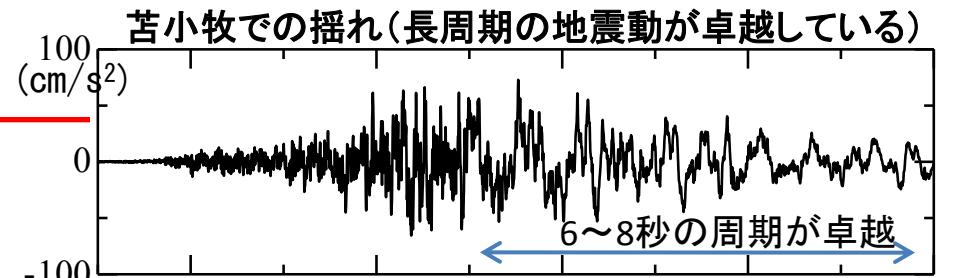
6



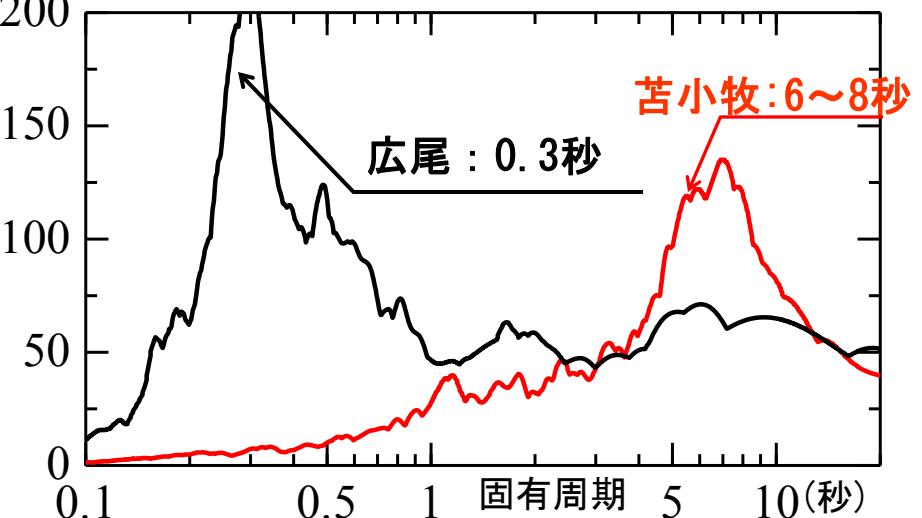
2003年十勝沖地震の震央と地震動の観測点



石油タンクの火災

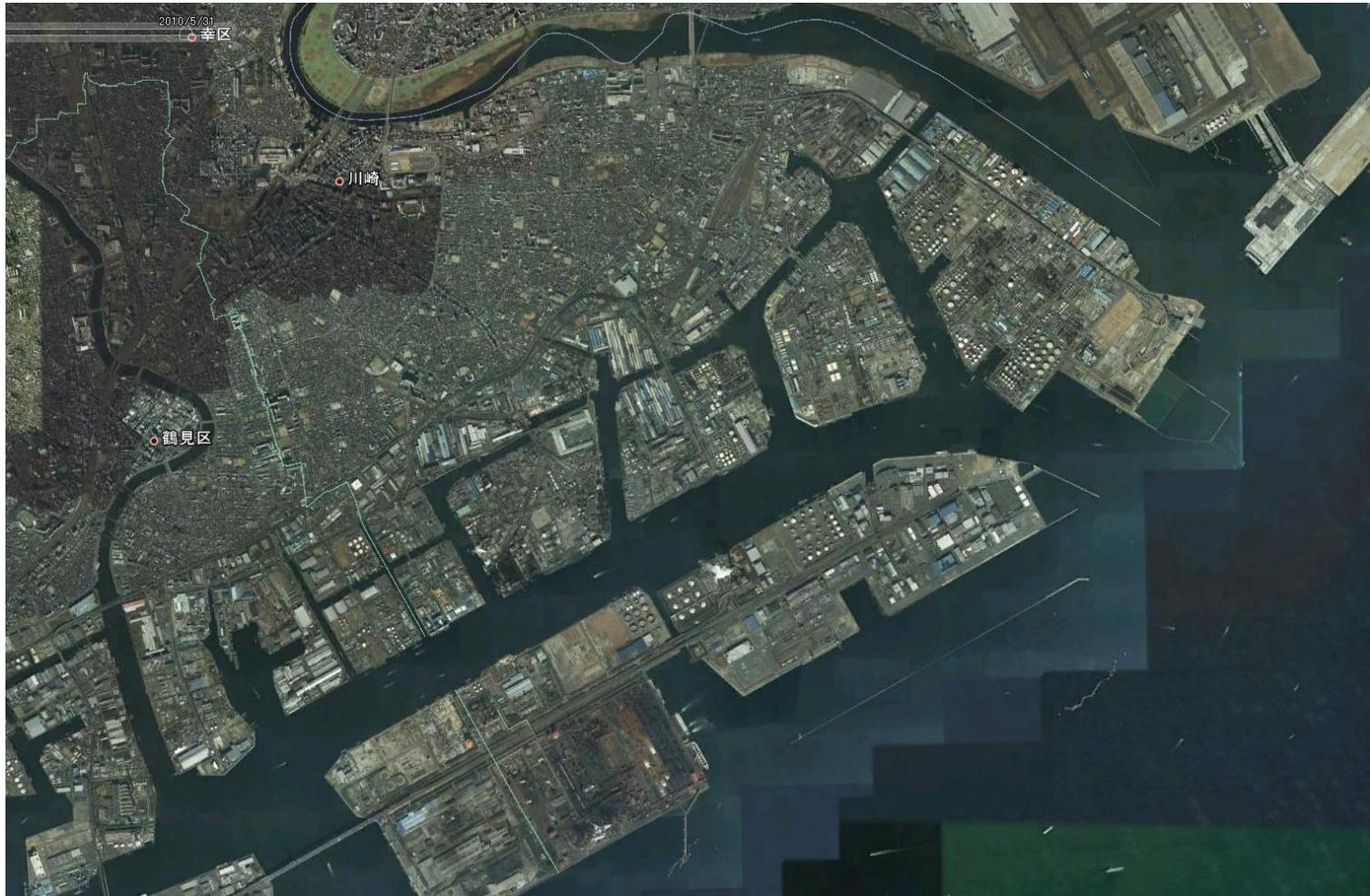


地震動に卓越している周期成分



2003年十勝沖地震では周期6~8秒の長周期地震動が苦小牧で発生し、原油タンク(浮屋根式タンク)のスロッシング振動により火災が発生した。

2011年東北地方太平洋沖地震による 液状化の実体調査

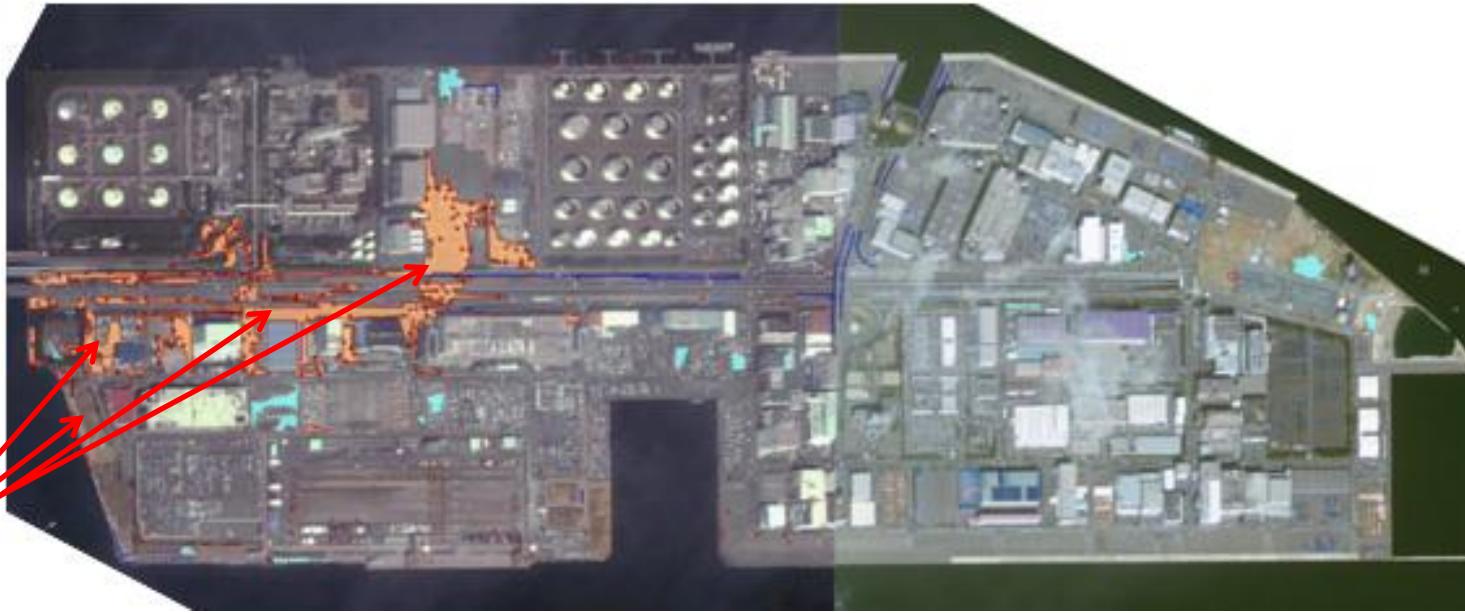


- i) 地震前 : 衛星写真 Google-earth (2010年3月16日)
- ii) 地震後 : 衛星写真 Google-eye (2011年3月16日)
World-view (2011年3月14日)

液状化判読に用いた地震前後の衛星写真の例(東扇島)



地震前(2010年3月16日) Google-earth



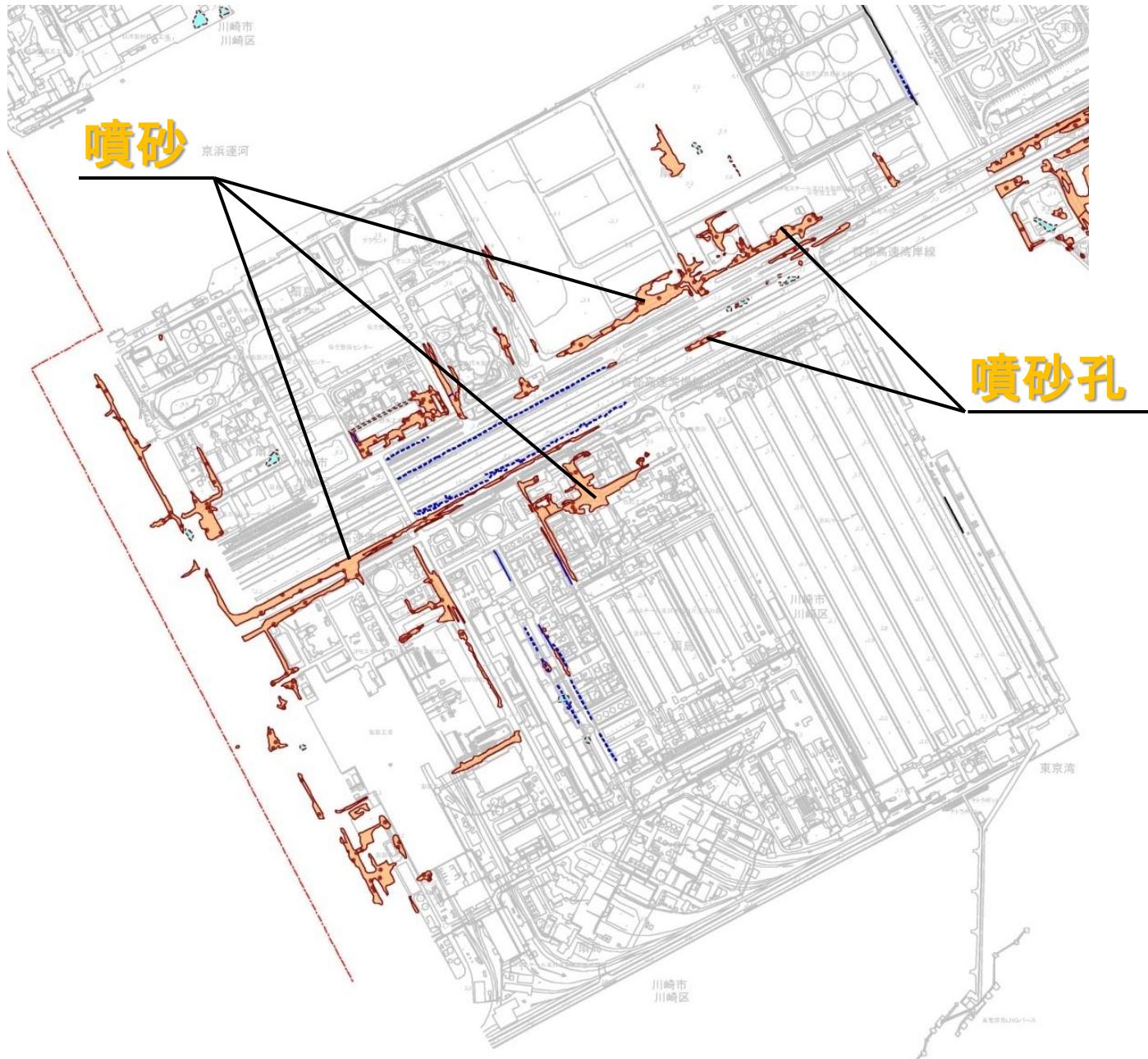
噴砂
と認定される

地震後(2010年3月16日) Google-view

空中写真判読と地表踏査との比較(東扇島)

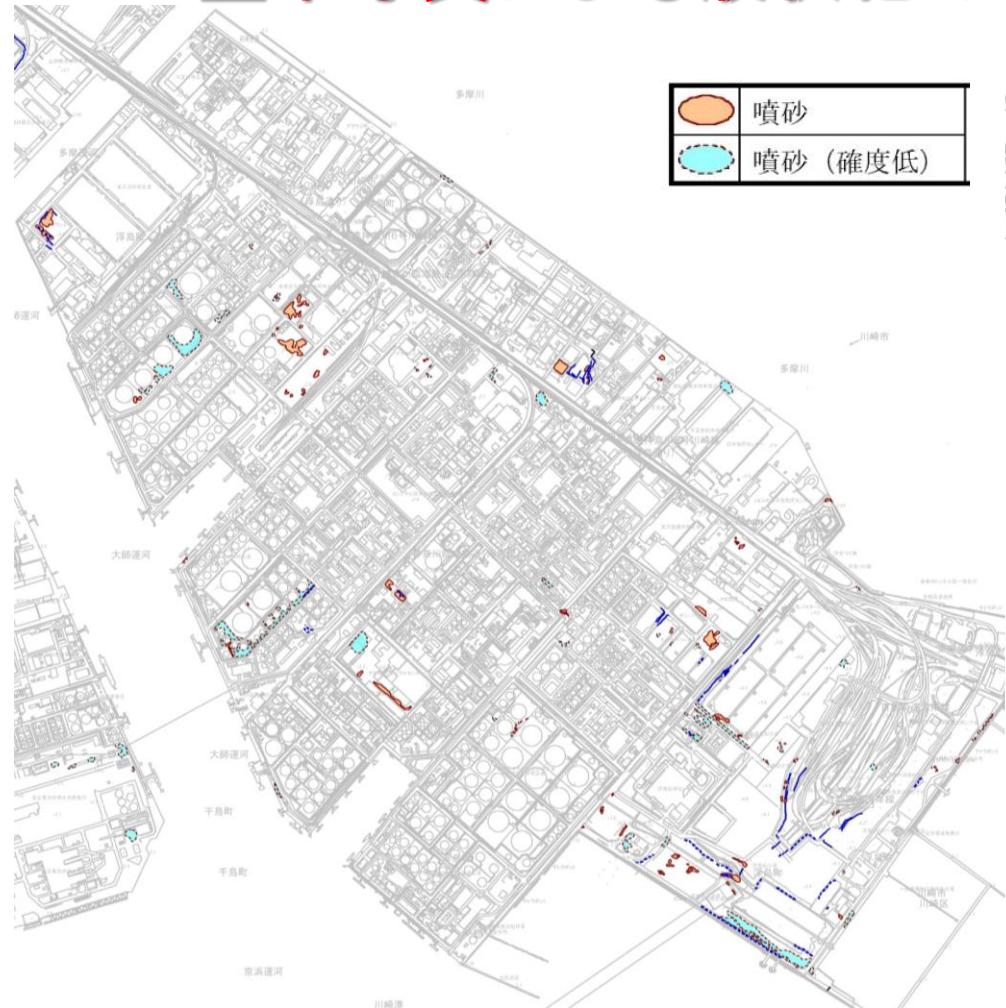


空中写真判読(扇島)



空中写真による液状化の判読(浮島および水江)

	噴砂
	噴砂（確度低）



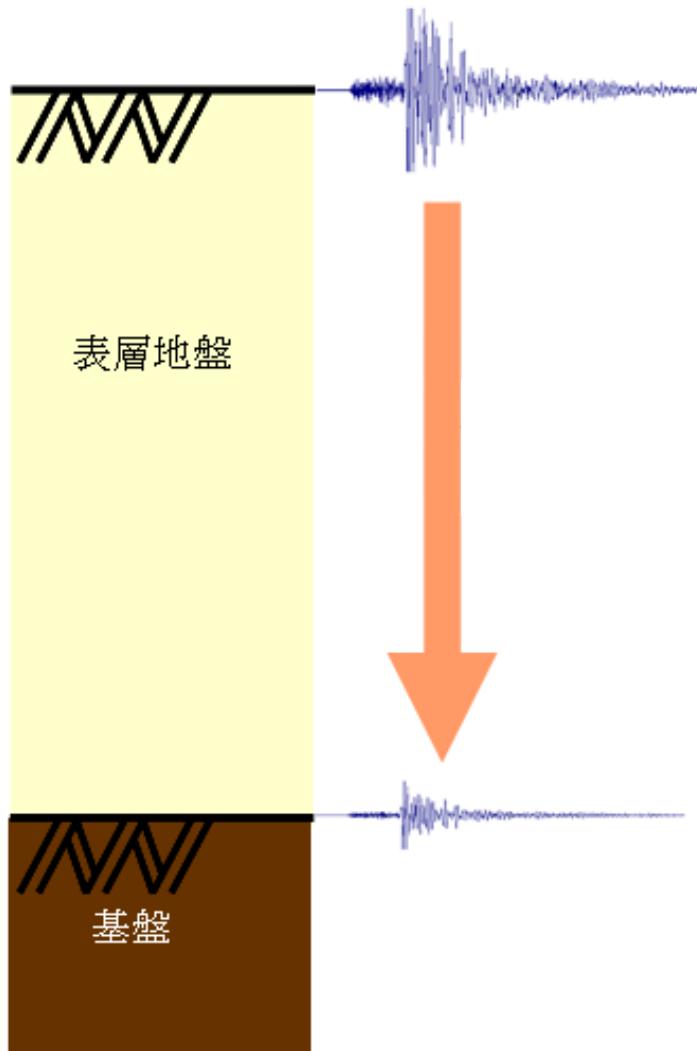
浮島



水江

点々と噴砂の堆積は見られるものの地表面には大規模な液状化の痕跡は認められない。地上踏査によって一部は確認済(浮島)。報告なし(水江)

東北地方太平洋沖地震による川崎市コンビナート地区の地震動の推定



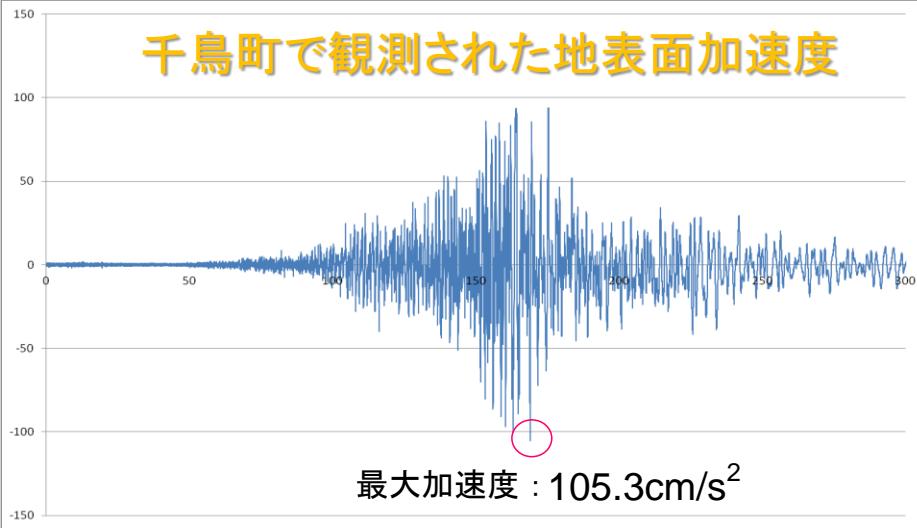
臨港消防署千鳥町出張所にて観測された地震波を用いて、数値解析により工学基盤面の地震波を算出

算出された工学基盤面の地震波を川崎地区5島に入力し、同様の手法で各島の地表面地震動を算出した

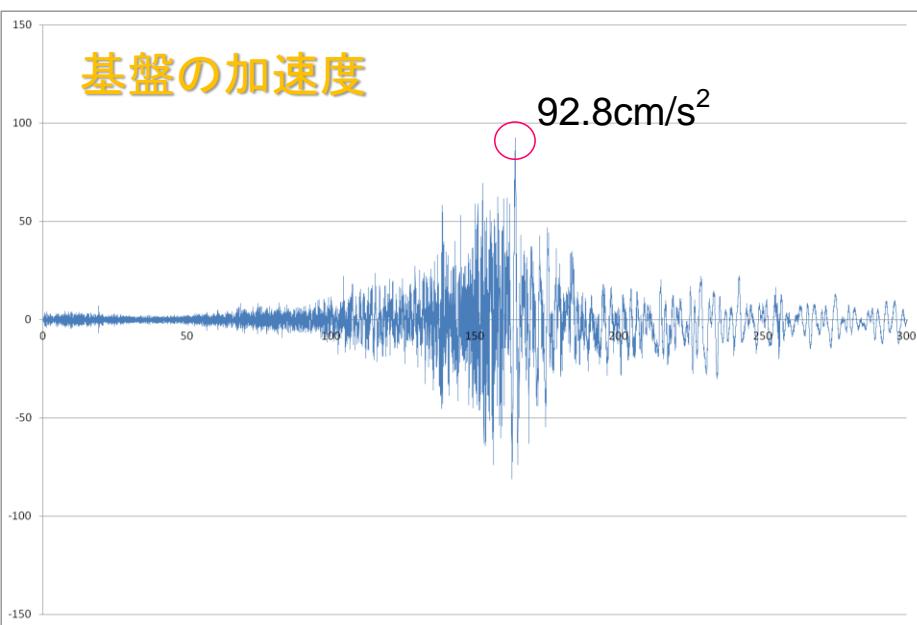


東北地方太平洋沖地震による地表面加速度の算定

千鳥町で観測された地表面加速度

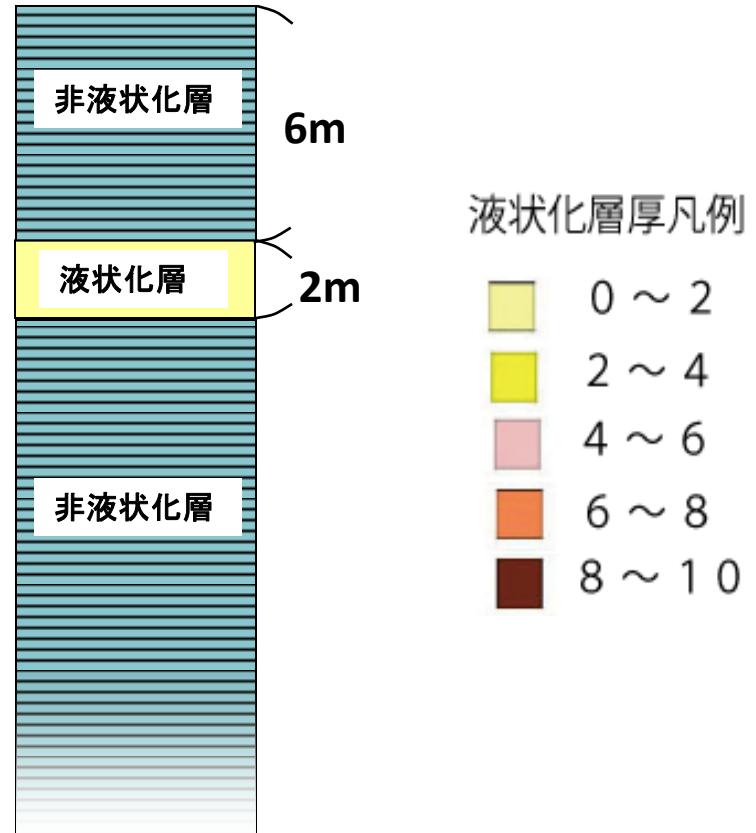
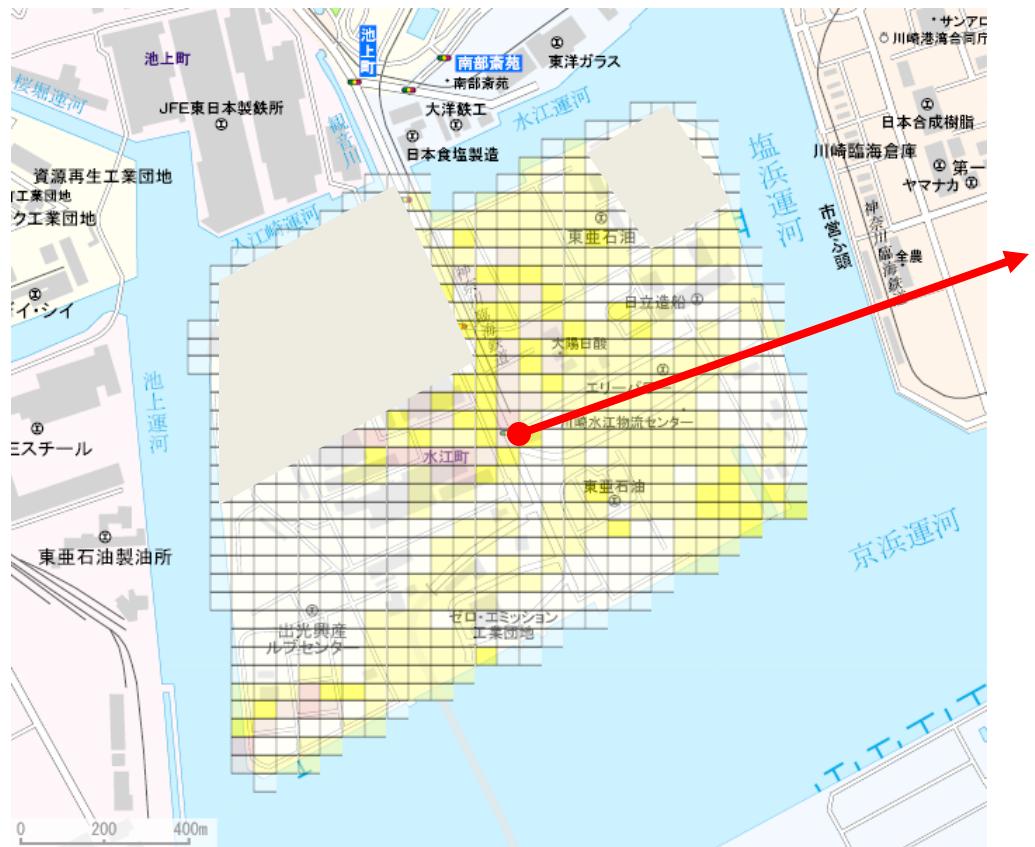


基盤の加速度



	地表面加速度	気象庁震度階 (最大)
東扇島	123.8cm/s ²	5 強
扇島	133.2cm/s ²	5 強
浮島	140.8cm/s ²	5 強
千鳥	113.7cm/s ²	5 強
水江	146.7cm/s ²	5 強

東北地方太平洋沖地震による液状化の推定 液状化と非液状化層



東京湾北部の地震による液状化および側方流動の予測

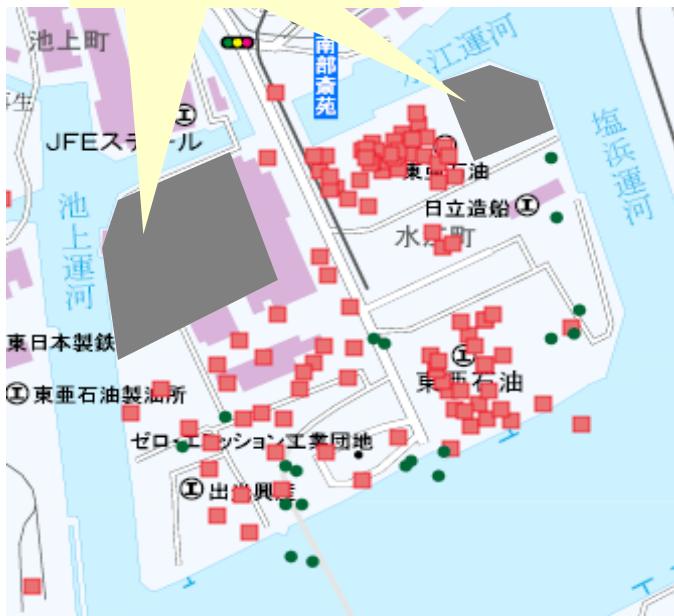
	ボーリングデータ数 (既存)	ボーリングデータ数 (新規)	ボーリングデータ数 (計)
東扇島	161	37	198
扇島	147	262	409
浮島	100	179	279
千鳥	38	84	122
水江	19	99	118
総計	465	661	1126

既存：公的機関で公開されているボーリングを収集した本数

新規：民間企業により入手したボーリング資料本数

収集されたボーリング資料

検討対象範囲外



検討対象範囲外



水江

■ 新規 (99本)

● 既存 (19本)

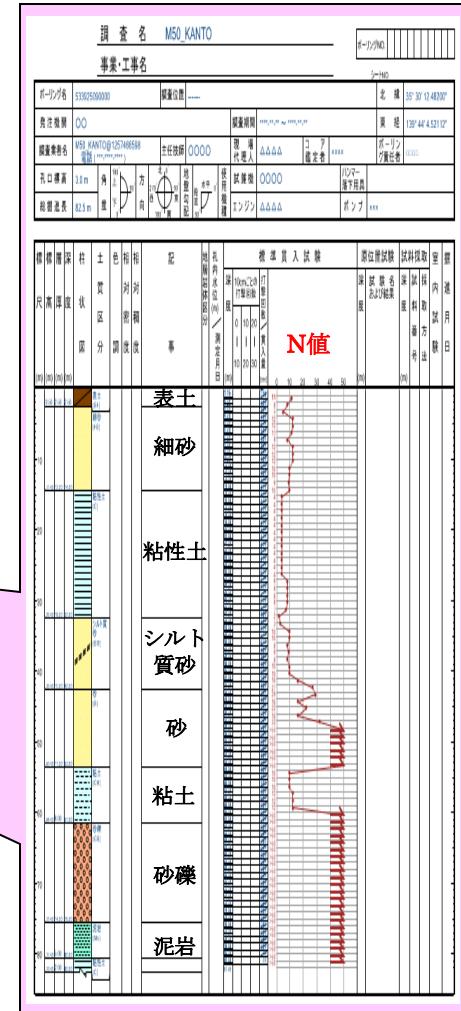
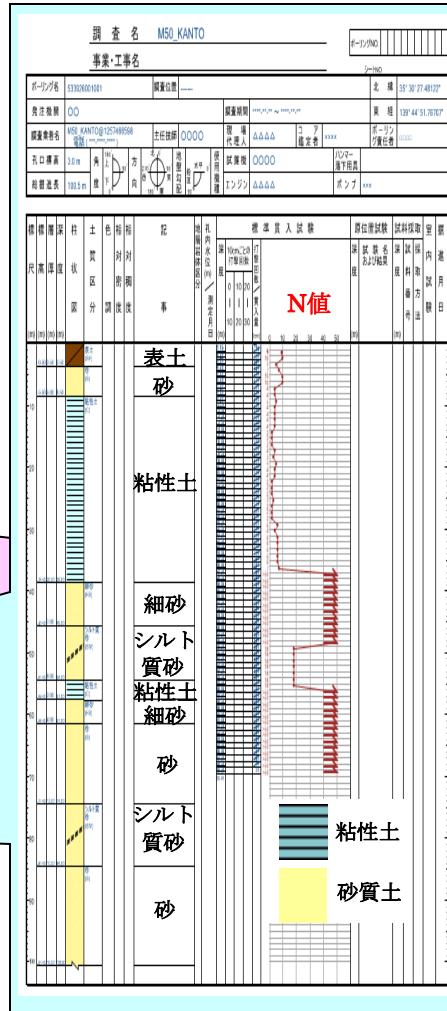
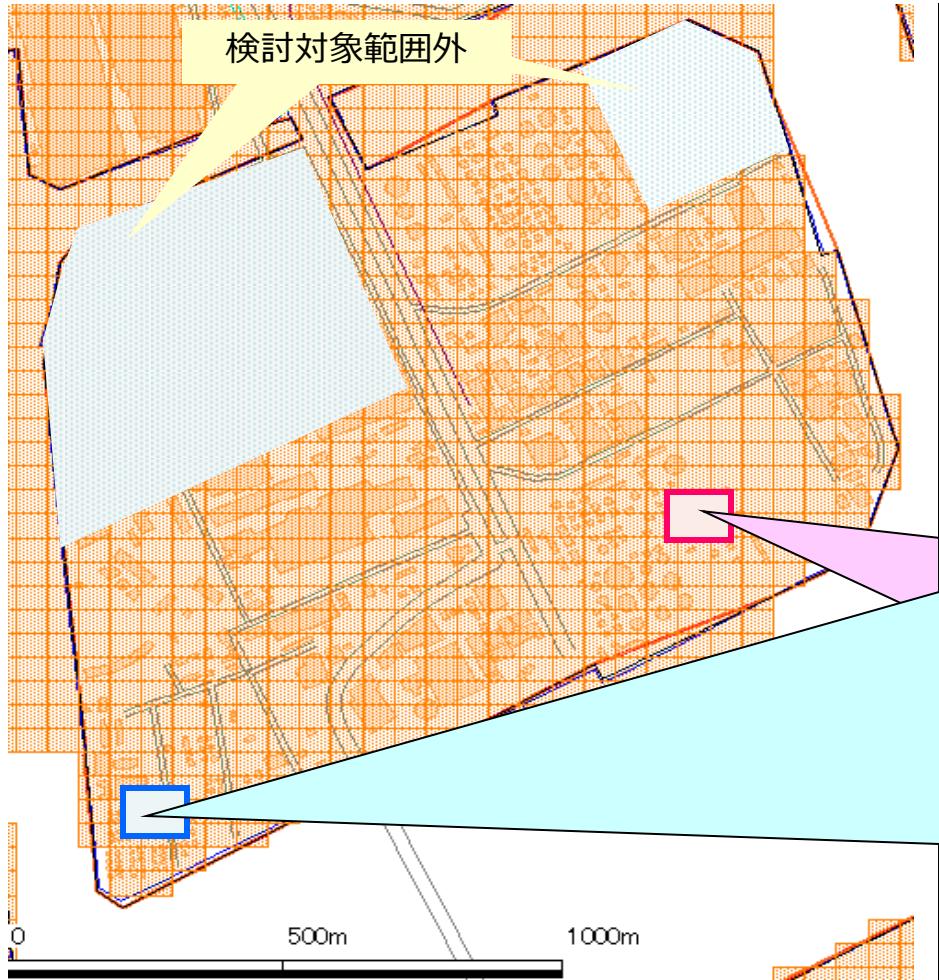
東扇島

■ 新規 (37本)

● 既存 (161本)

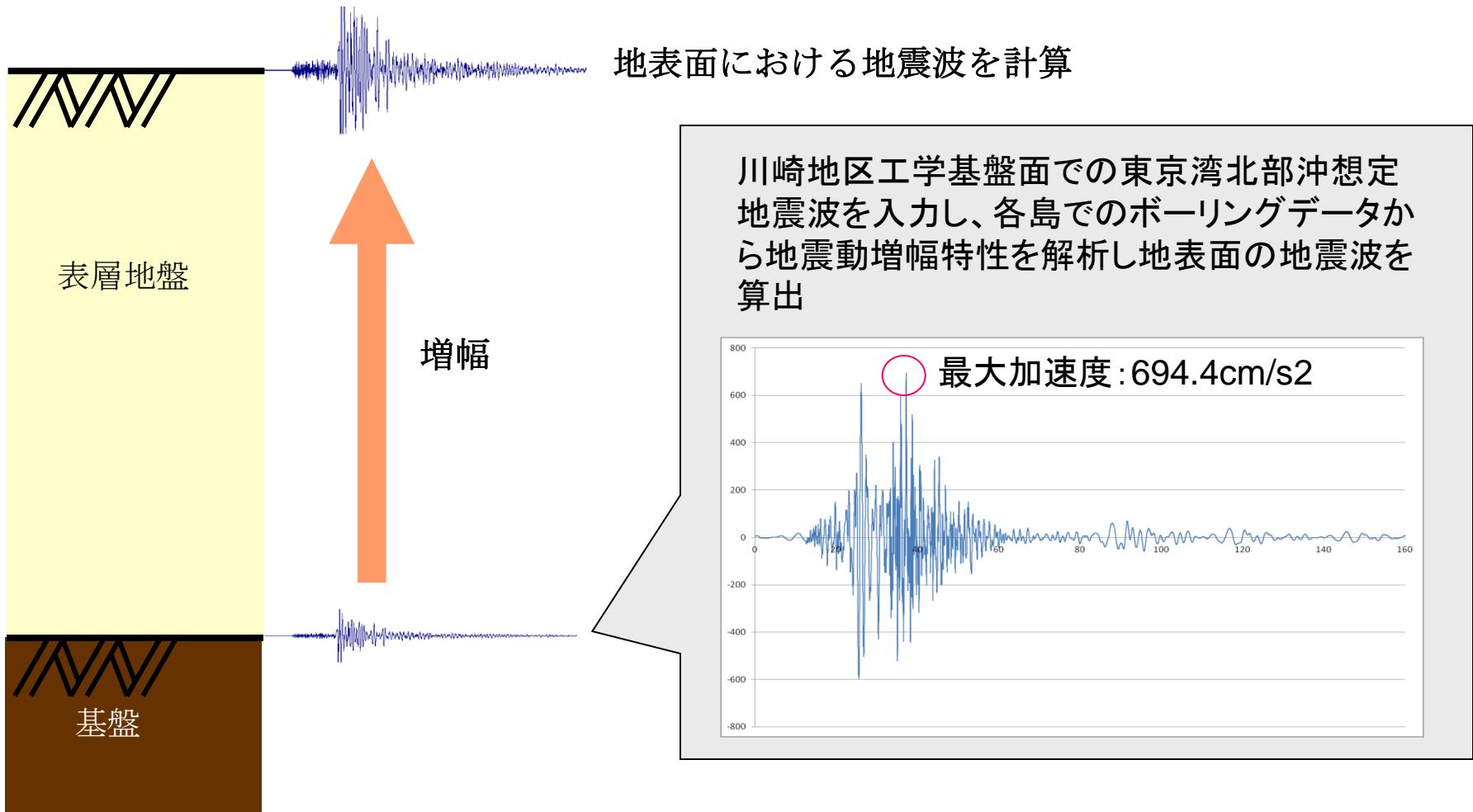
ボーリング資料の収集本数が少なく地盤モデル作成が行えない地域は「検討対象範囲外」としている。

50mメッシュによる土質条件データの整備 約8,000メッシュ



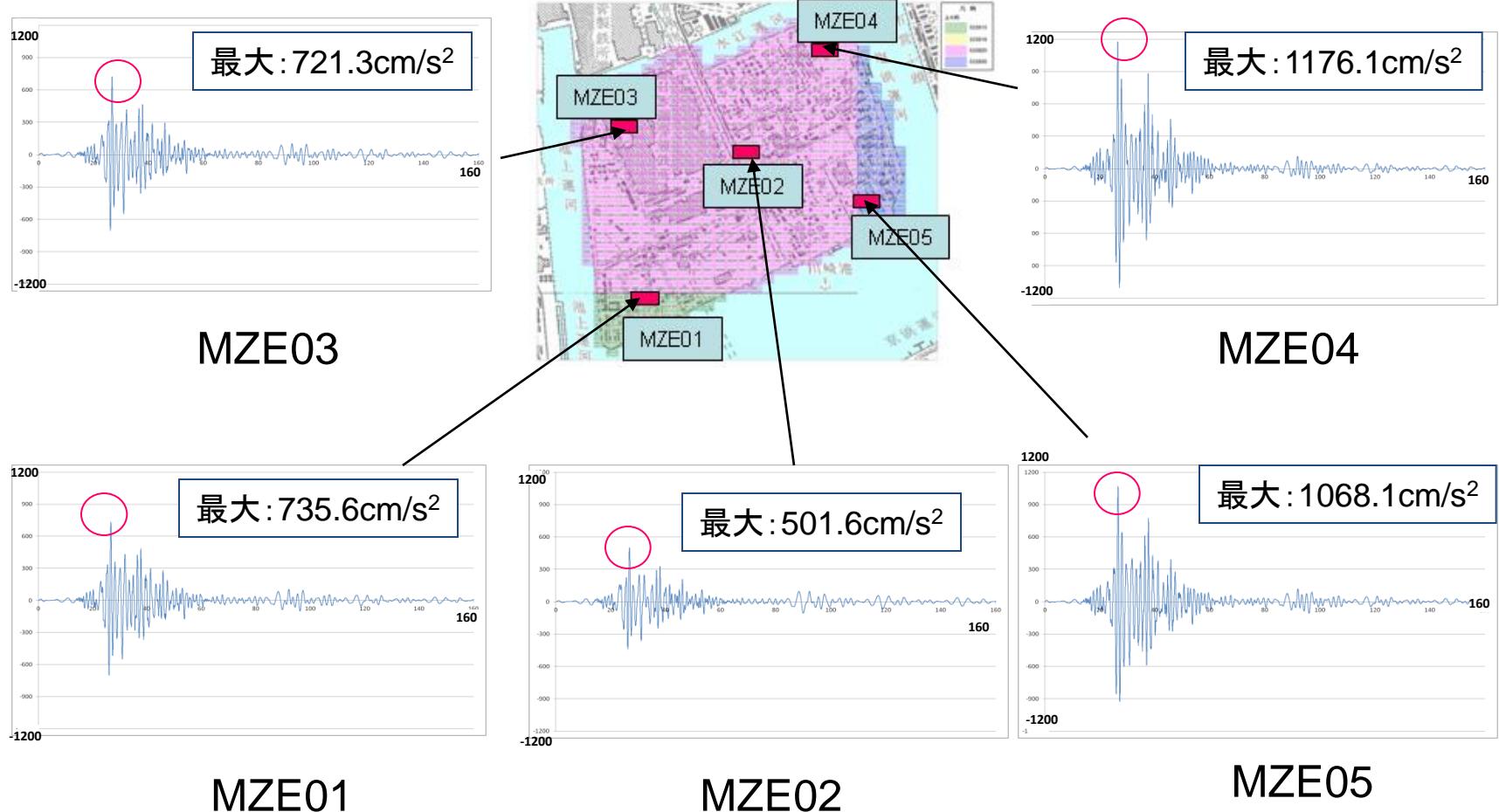
東京湾北部の地震による川崎市コンビナート地区の地震動の推定方法

地震動の推定は成層地盤応答解析により工学基盤面の地震波を算出。



地震動推定の例(水江)

最大加速度:501.6cm/s²～1176.1cm/s²(気象庁震度階:6強～7)



東京湾北部の地震による液状化判定用の最大加速度



道路橋示方書による液状化の判定方法

①液状化に対する抵抗率 F_L 値を求める

$$F_L = R/L$$

R : 液状化抵抗比(液状化に対する土の抵抗値)

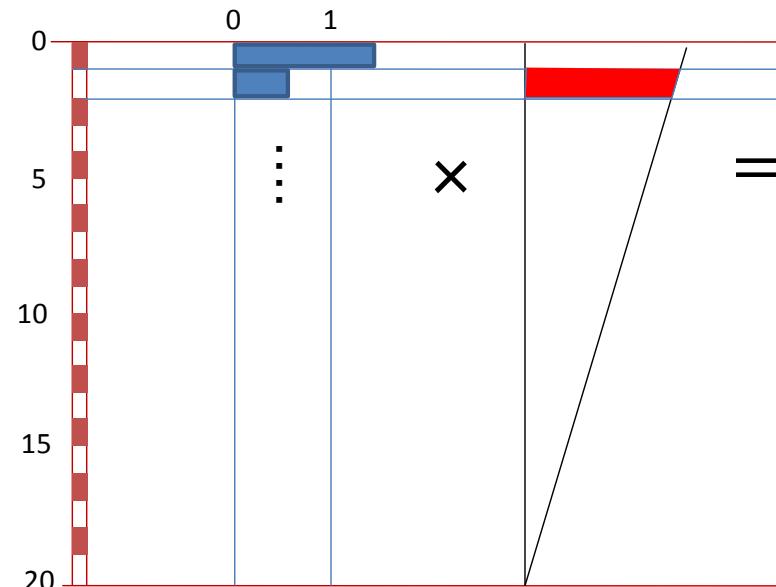
L : 繰り返しせん断応力比(液状化を起こす地震の力)

⇒ F_L 値が1.0以下の土層を液状化すると判定

②液状化指数 P_L 値を求める

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L)(10 - 0.5x) dx$$

深さ(m) F_L 値 重みづけ



P_L : 液状化指数(液状化の激しさを表す指標)

F_L : 液状化に対する抵抗率

x : 地表面からの深さ(m)

$$\begin{aligned} & 0 \\ & (1-F_L) \times (\text{赤色面積}) \\ & \vdots \\ & \end{aligned}$$

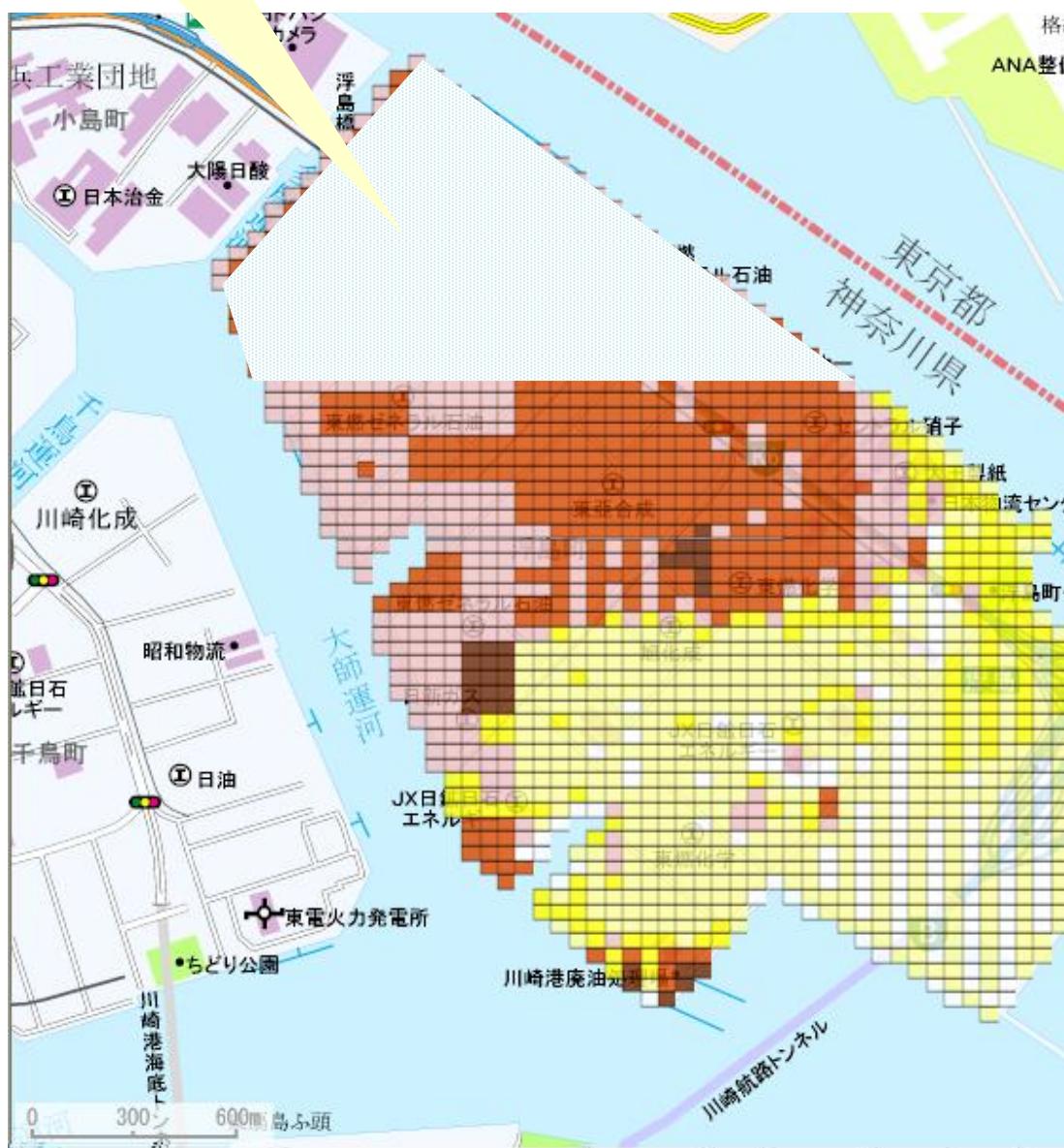
$$\begin{aligned} & \vdots \\ & \end{aligned}$$

各層の計算値の
総合計 = P_L 値

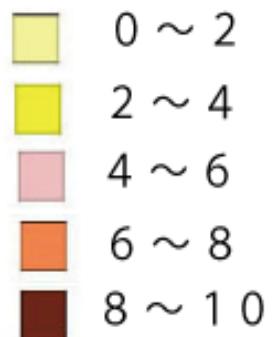
液状化予測の例(浮島)

① 液状化層厚

検討対象範囲外



液状化層厚凡例



液状化予測の例(東扇島)

② PL値

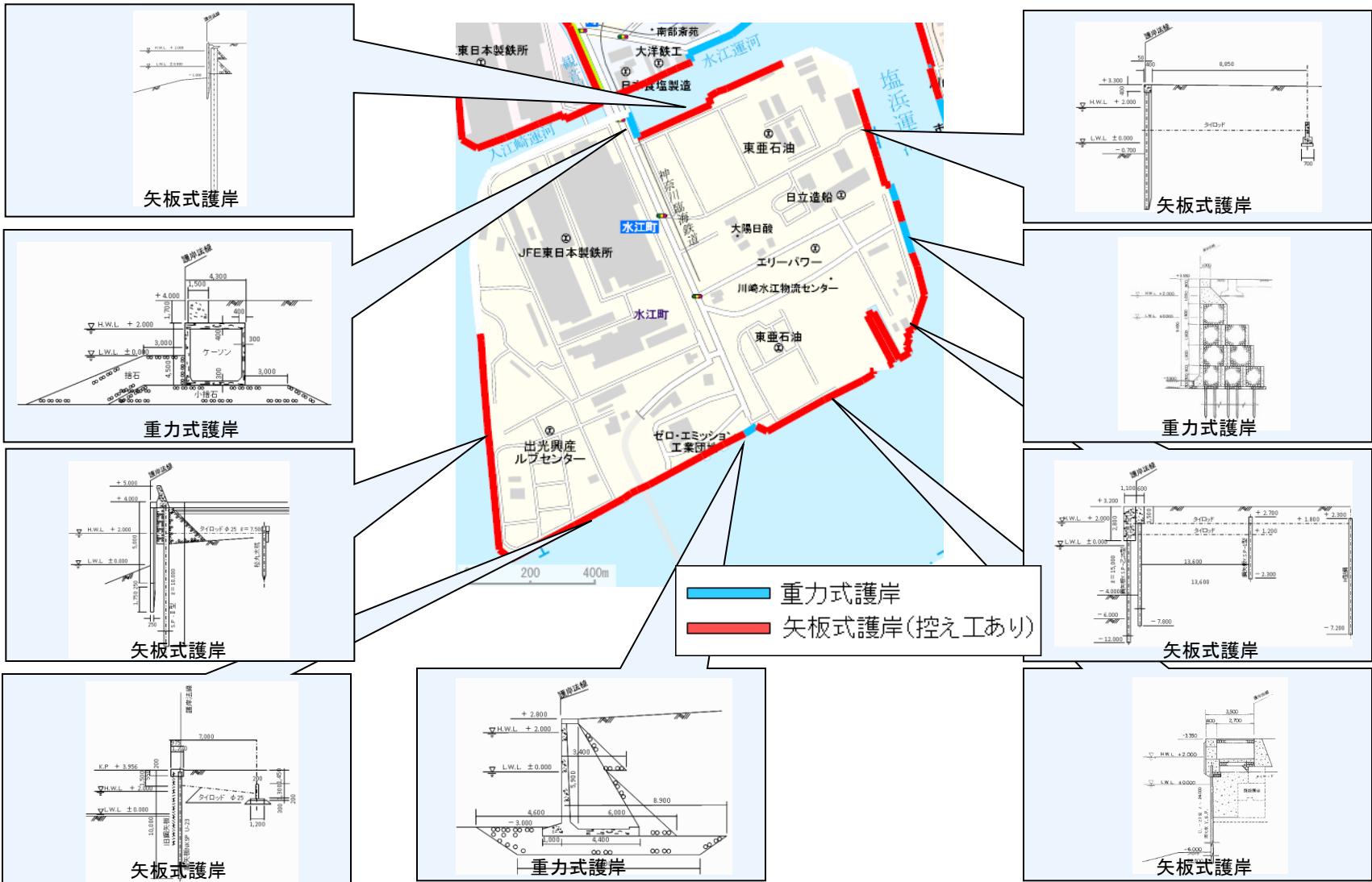
検討対象範囲外



PL 凡例

■	0 ~ 5
■	5 ~ 10
■	10 ~ 15
■	15 ~

護岸構造資料の収集①(水江)



護岸構造資料の収集②(東扇島)



護岸と地盤の水平方向変位の予測法

(1) 護岸移動量の算出方法

$$\Delta = \frac{F_d}{100} \cdot H_W$$

Δ : 護岸の水平変位量 (m)
 H_W : 護岸の高さ (m)
 F_d : 護岸の変形率

(2) 地盤の水平移動量の算出方法

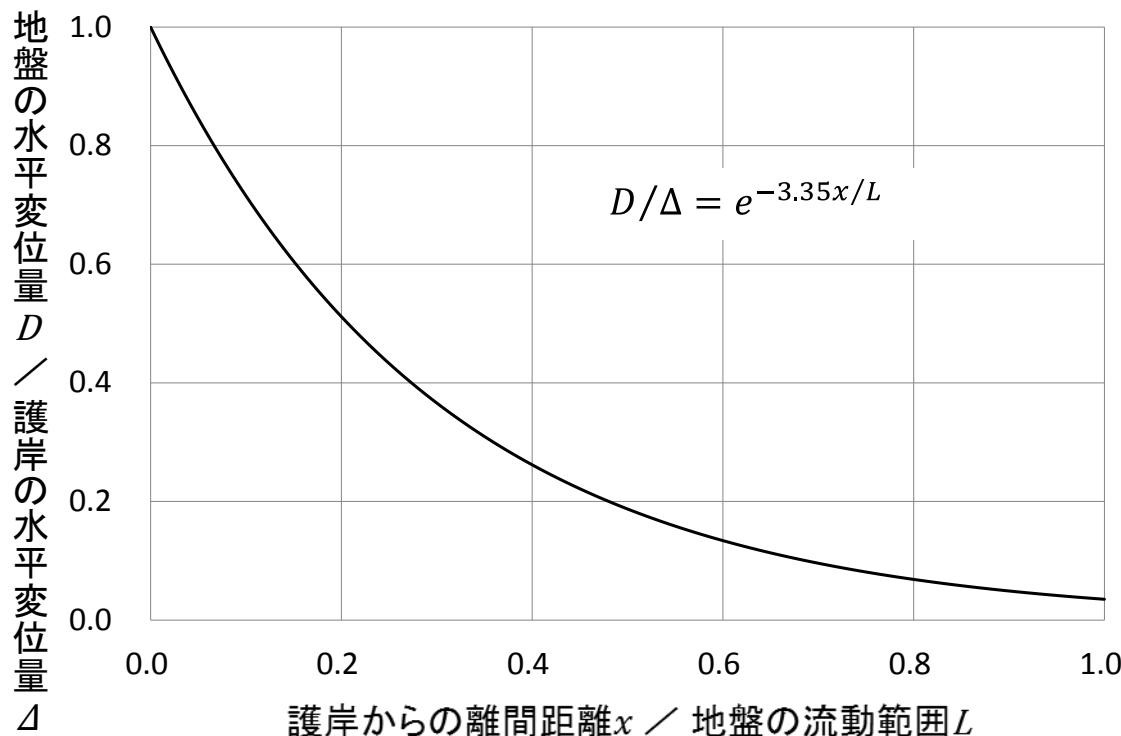
$$D = e^{-\alpha x} \cdot \Delta$$

$$\alpha = -0.0007H + 0.0182$$

D : 地盤の水平変位量 (m)

x : 護岸からの離間距離 (m)

Δ : 護岸の水平変位量 (m)



護岸と地盤の鉛直方向変位の予測法

液状化による鉛直方向変位の沈下原因として、以下の2要因を考える。

- (1) 地下水、砂の噴出による沈下
- (2) 側方流動による地盤の水平変位による沈下

$$W = \varepsilon H + S$$

$$S/\Delta = 0.8e^{-6.37x/L}$$

W : 液状化による地盤の沈下量(m)

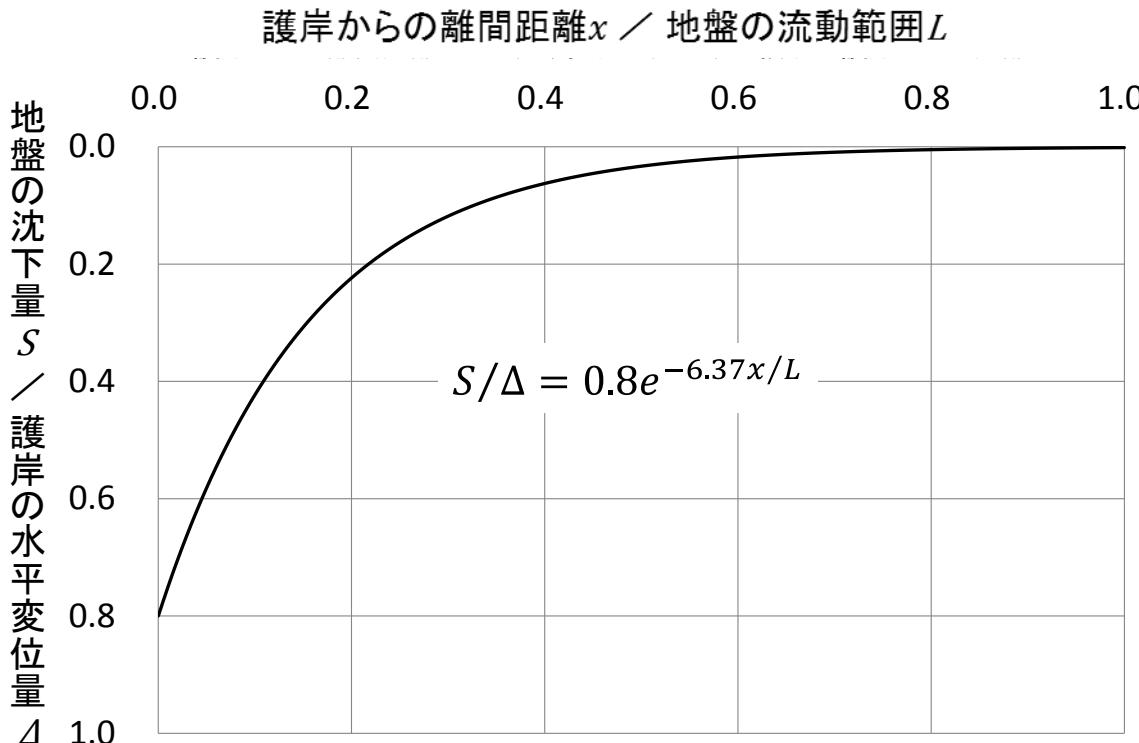
ε : 液状化層厚に対する地下水、
砂の噴出による沈下率(5%)

H : 液状化層厚(m)

x : 護岸からの離間距離(m)

L : 地盤の流動範囲(m)

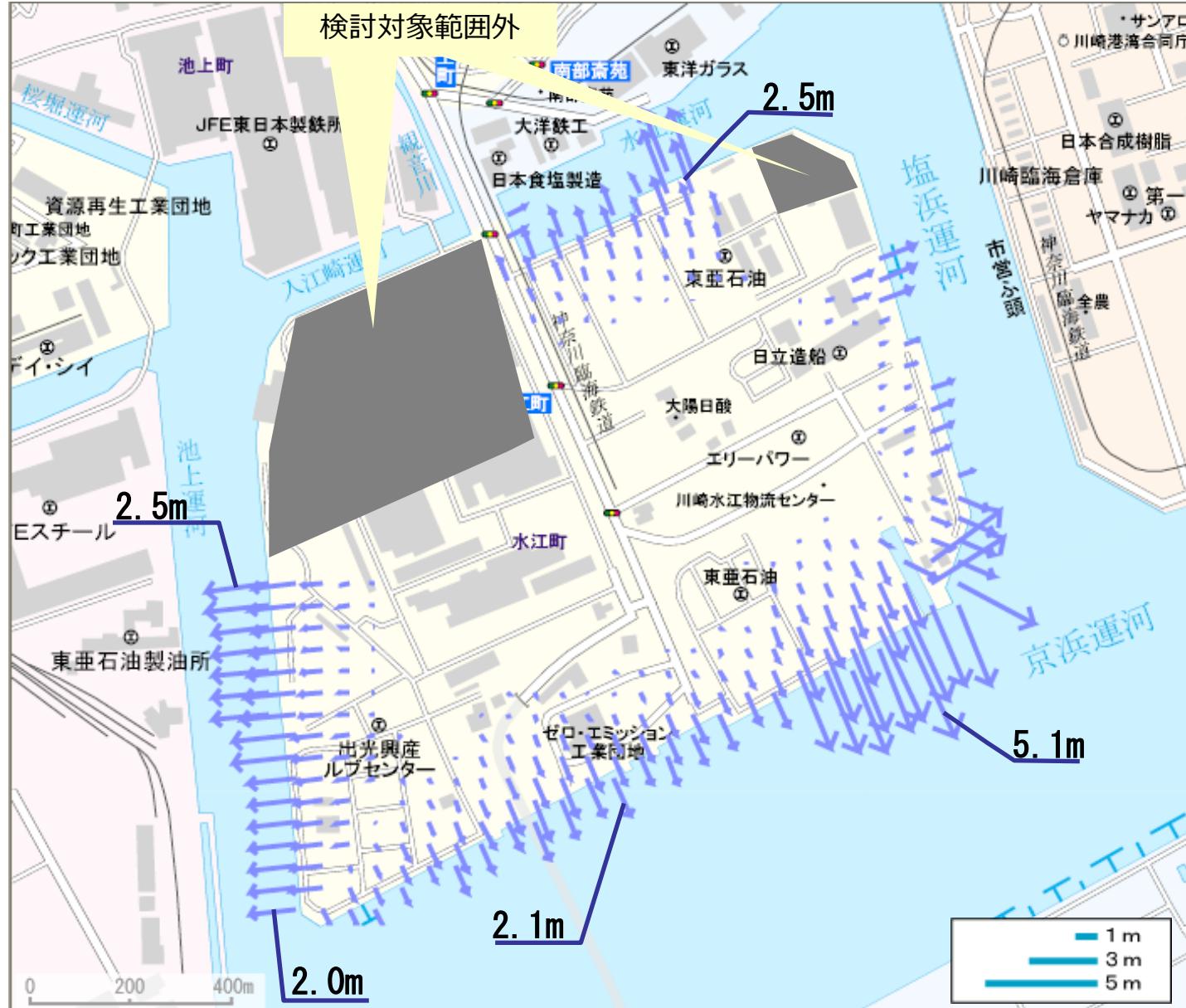
Δ : 護岸の水平変位量(m)



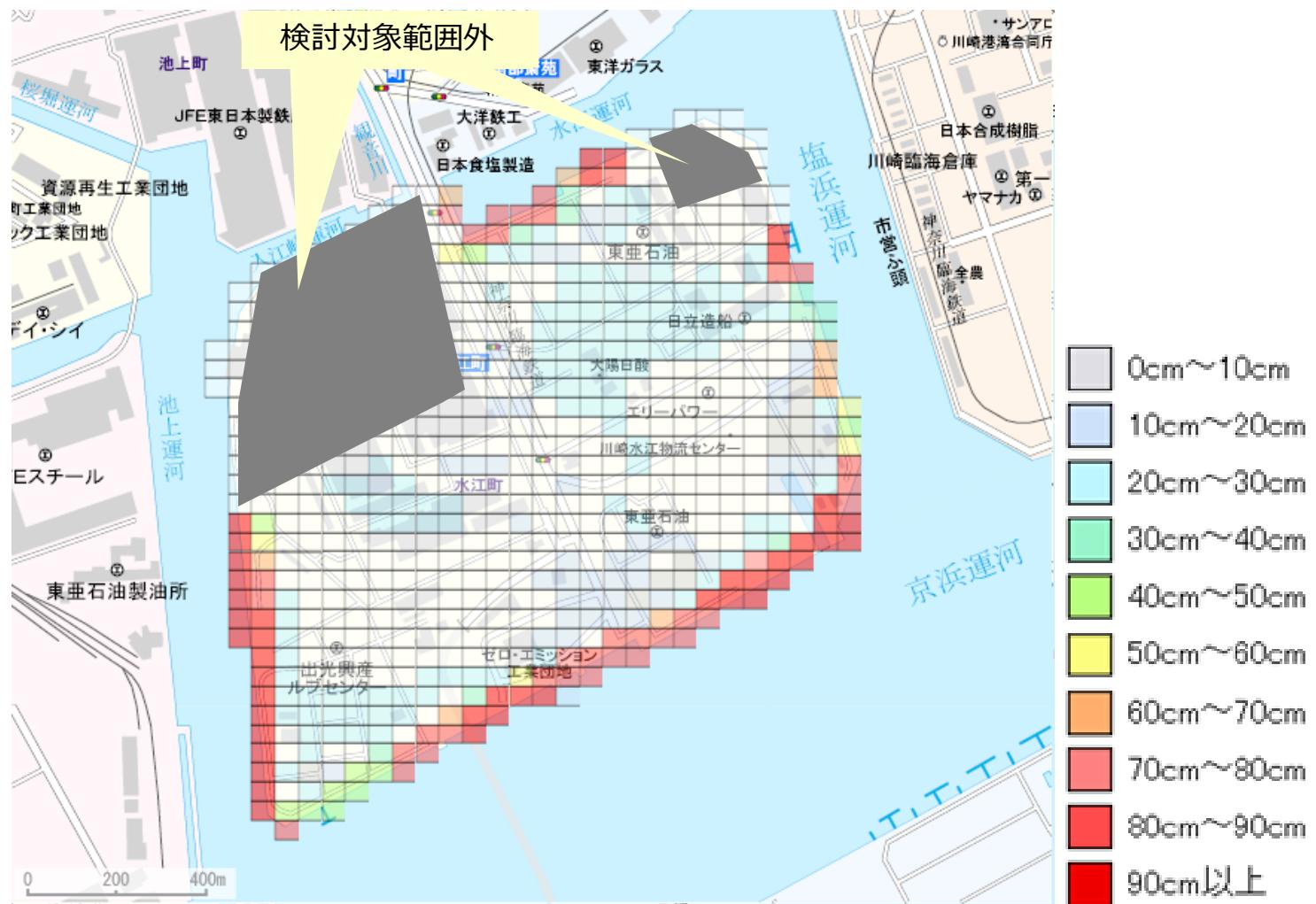
護岸と地盤の水平方向変位の予測結果(水江)



地盤の水平変位の予測結果(水江)



護岸と地盤の鉛直方向変位(沈下量)の予測結果(水江)



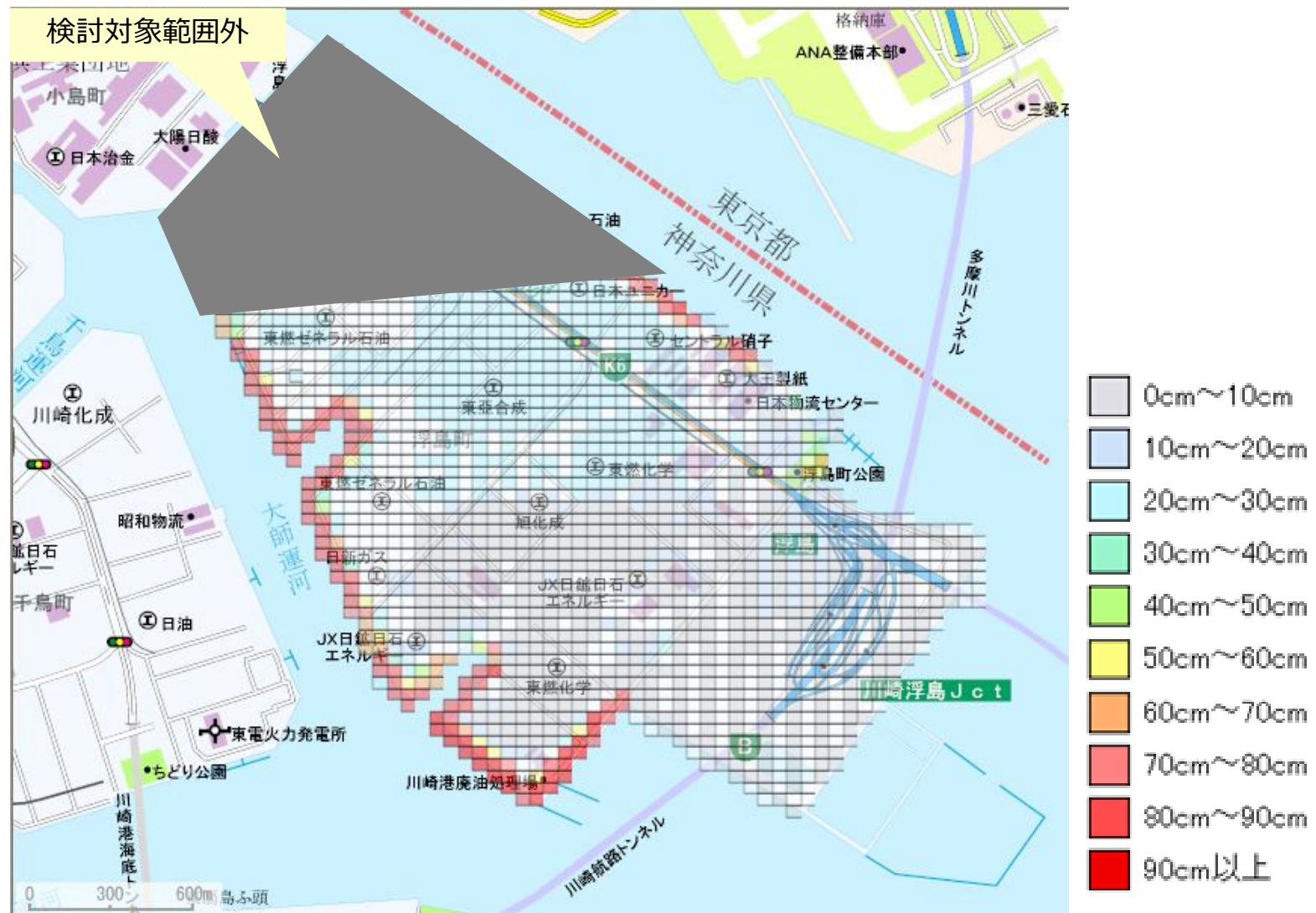
護岸の水平方向変位の予測結果(浮島)



地盤の水平変位の予測結果(浮島)



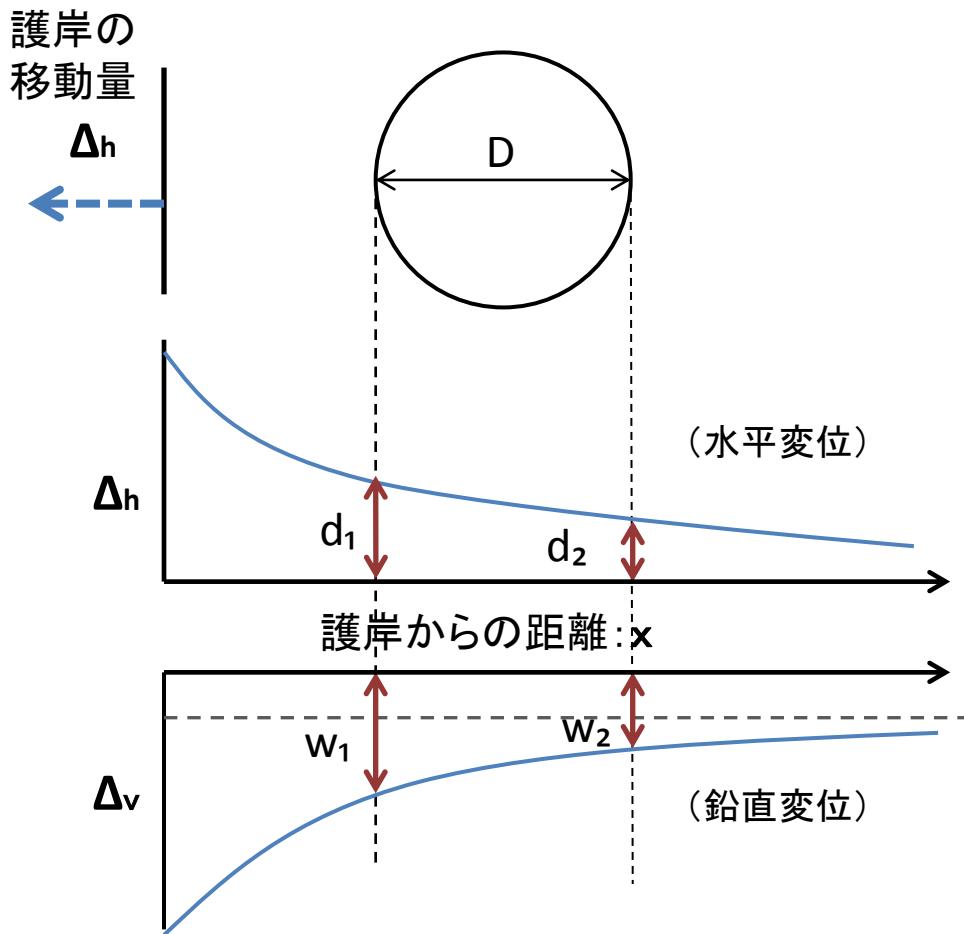
護岸と地盤の鉛直方向変位(沈下量)の予測結果(浮島)



液状化および流動予測結果のまとめ

	最大 液状化層厚(m)	最大 PL値	最大 護岸水平移動量(m)
東扇島	9.0	62	8.0
扇島	8.5	56	9.6
浮島	9.0	52	3.5
千鳥	9.0	53	2.8
水江	8.0	42	5.1

地盤の水平方向および鉛直方向のひずみによるタンクの危険度分類



$$d = \Delta_h e^{-x(-0.0007H_L + 0.0182)}$$

$$\varepsilon_h = \frac{d_1 - d_2}{D}$$

D : タンクの直径(m)

Δ : 護岸の水平移動量(m)

x : 護岸からの距離(m)

H_L : 護岸背後地盤での液状化層厚(m)

$$w = \varepsilon \times H_L + \Delta_h \times 0.8 e^{-6.37x/L}$$

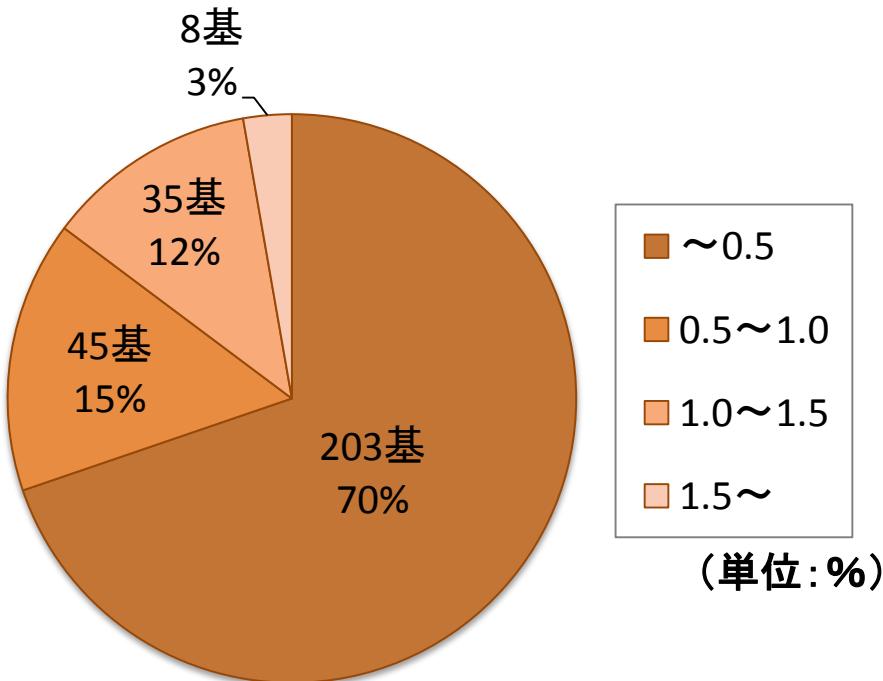
$$\varepsilon_v = \frac{w_1 - w_2}{D}$$

ε : 体積ひずみ($=0.05$)

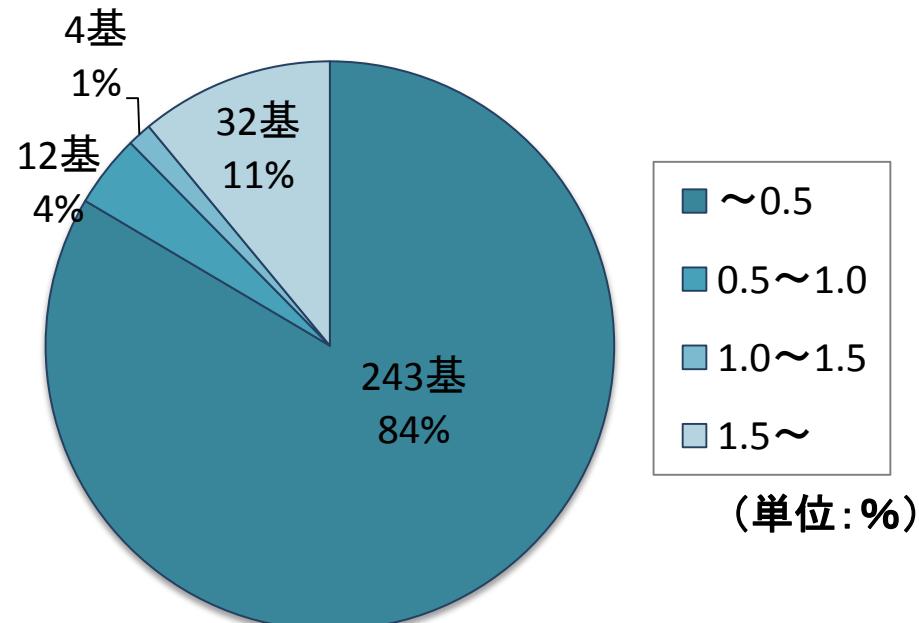
L : 地盤の流動範囲($=100m$)

対象地域: 浮島(291基)、水江(81基)、東扇島(28基)

地盤ひずみによるタンクの危険度分類(浮島)



水平方向ひずみ



鉛直方向ひずみ

※ 地盤ひずみがタンクの応力度に及ぼす影響については
今後数値解析などにより検討する必要がある

地盤ひずみが(水平方向1%以上, 鉛直方向1%以上)を超えるタンク

水平方向



鉛直方向



東海地震および東南海地震連続発生によるタンクのスロッシング 振動の予測のための資料収集(航空写真判読による)



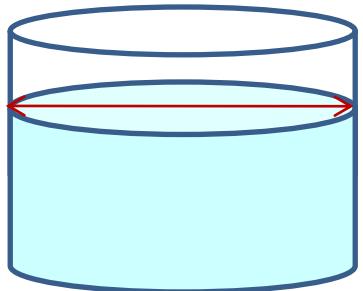
タンク位置図(浮島5)

航空写真判読によるタンク情報(浮島5)

タンク番号	直径D (m)	高さH (m)	液面高さH'(m)
UK273	32.87	15.94	11.06
UK274	32.98	16.40	11.66
UK275	31.35	18.05	
UK276	32.86	16.80	10.54
UK277	32.98	16.00	3.50
UK278	32.93	16.46	3.52
UK279	32.95	16.60	7.36
UK280	25.49	11.90	
UK281	22.60	19.42	
UK282	43.27	21.36	
UK283	38.04	14.01	
UK284	26.33	15.15	
UK285	51.75	16.87	
UK286	32.92	14.95	4.13
UK287	32.93	14.65	8.82
UK288	32.99	16.92	5.53
UK289	32.79	15.04	
UK290	32.85	16.42	3.27
UK291	32.83	16.93	4.83

液面上昇高と溢出量の算定式

液面上昇高の計算



$$\eta = 0.837 \left(\frac{D}{2g} \right) \left(\frac{2\pi}{T_s} \right) S_v(T_s)$$

$$T_s = 2\pi \sqrt{\left(\frac{D}{3.682g} \right) \coth \left(\frac{3.682H'}{D} \right)}$$

η : 液面上昇高(m)

D : タンク内径(m)

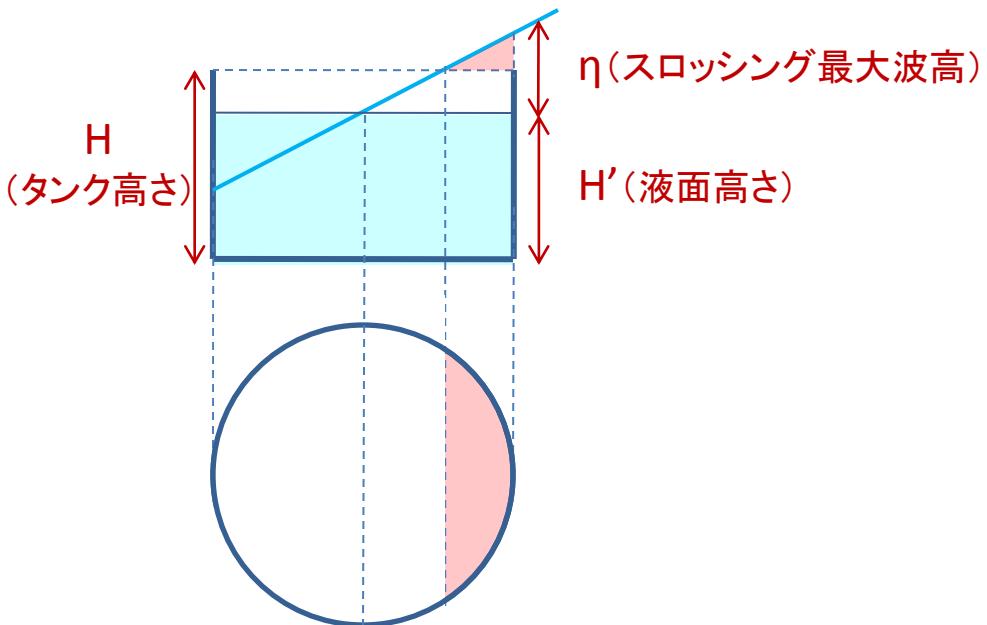
H' : 液面高さ(m)

g : 重力加速度(9.8m/s/s)

T_s : タンクのスロッシング基本固有周期(s)

S_v(T_s) : 周期T_sにおける速度応答スペクトル(m/s)

溢出量の計算



$$V = \frac{D^2}{4} \left[\frac{1}{3} \left\{ 2 + \frac{(H - H')^2}{\eta^2} \right\} \sqrt{\eta^2 - (H - H')^2} \right.$$

$$\left. - (H - H')^2 \cos^{-1} \frac{H - H'}{\eta} \right]$$

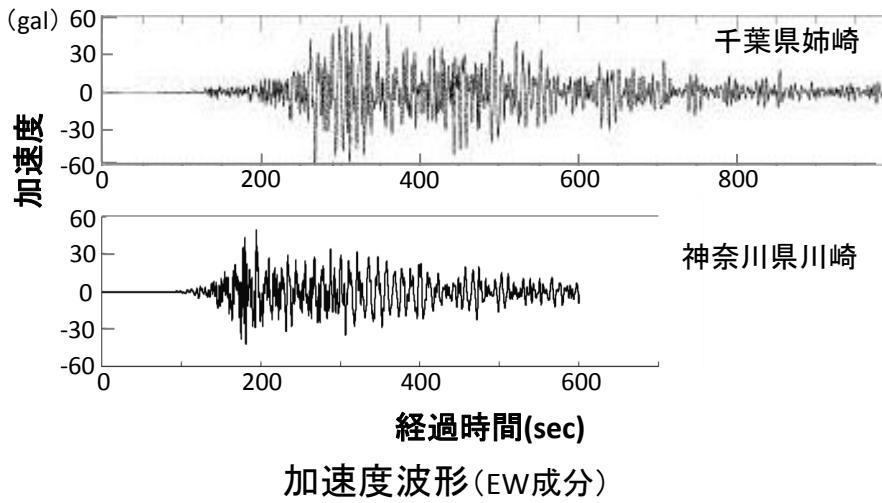
V : 溢出量(kl)

H : タンク高さ(m)

速度スペクトルSvの決定方法

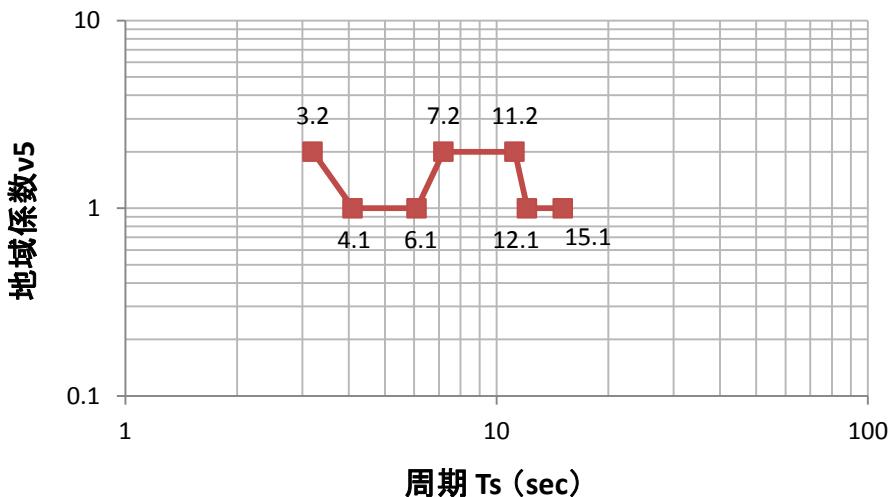
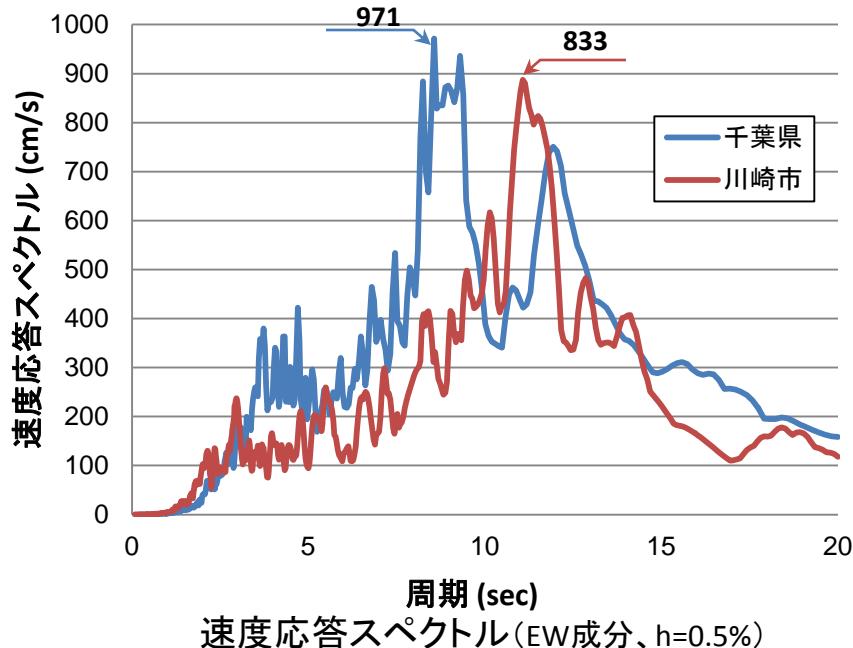
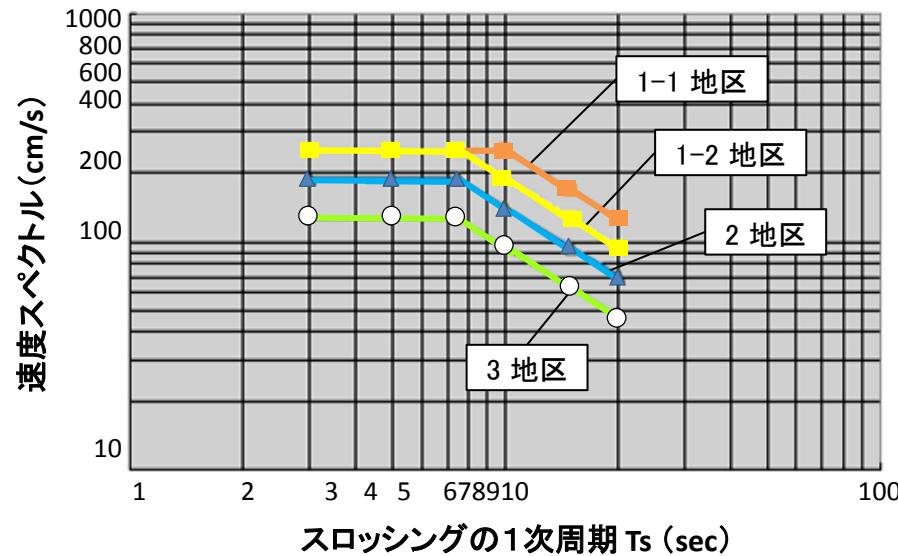
case1

東海地震・東南海地震同時発生を
想定したシミュレーション(東京大学 古村教授提供)



case2

高圧ガス設備等耐震設計基準



$$Sv = Sv_0 \times \nu_5$$

タンク溢出量(浮島②)

東海地震・東南海地震連動

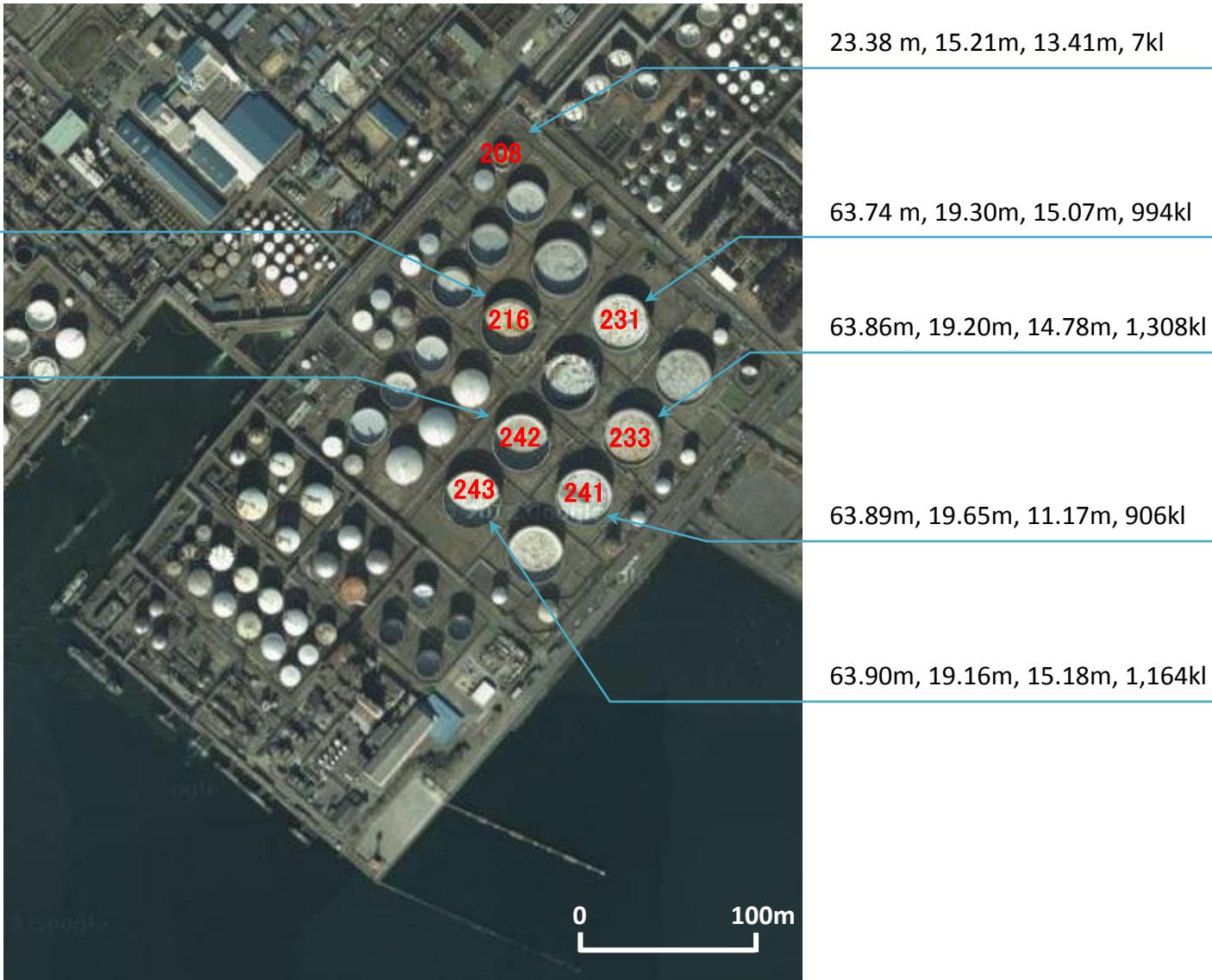
浮島②の総溢出量:5,794kl

浮島①,②の総溢出量:10,042kl

内径, 高さ, 液面高さ, 溢出量

63.87m, 19.27m,
12.76m, 6kl

63.73m, 19.31m,
14.53m, 1,408kl



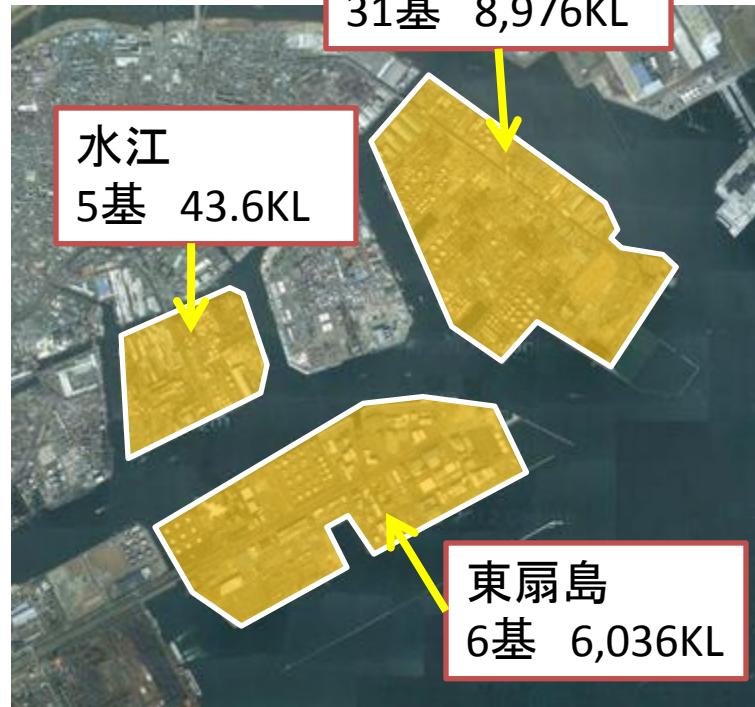
溢出するタンクの基数と溢出量(根岸地区を含む)

地区別の溢出タンク基数と溢出量

	総タンク基数	溢出する タンク基数	溢出量(KL)
神奈川県	水江	25	5 (20%) 43.6
	東扇島	35	6 (17%) 6,036
	浮島	116	31 (27%) 8,976
	根岸	54	6 (11%) 2,354
計	230	48 (21%)	17,410

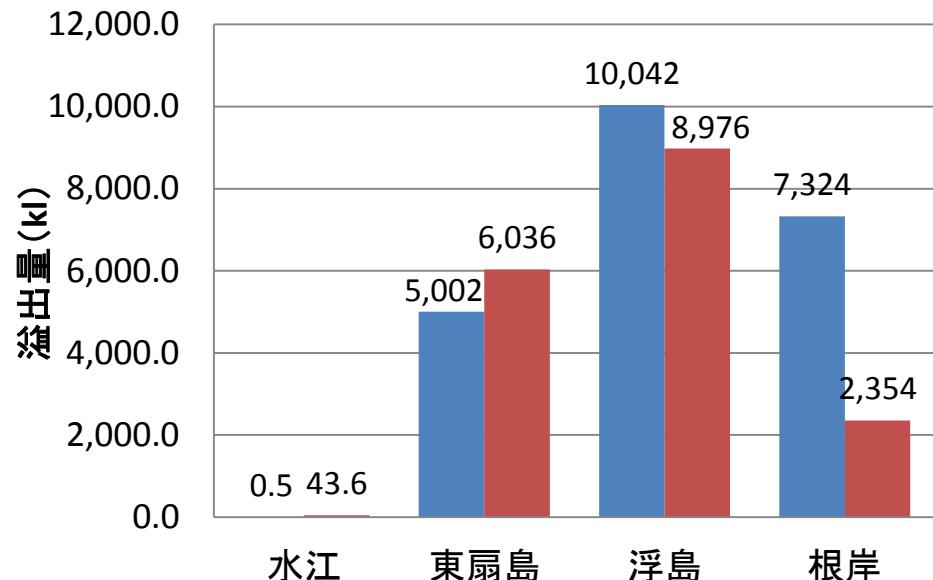
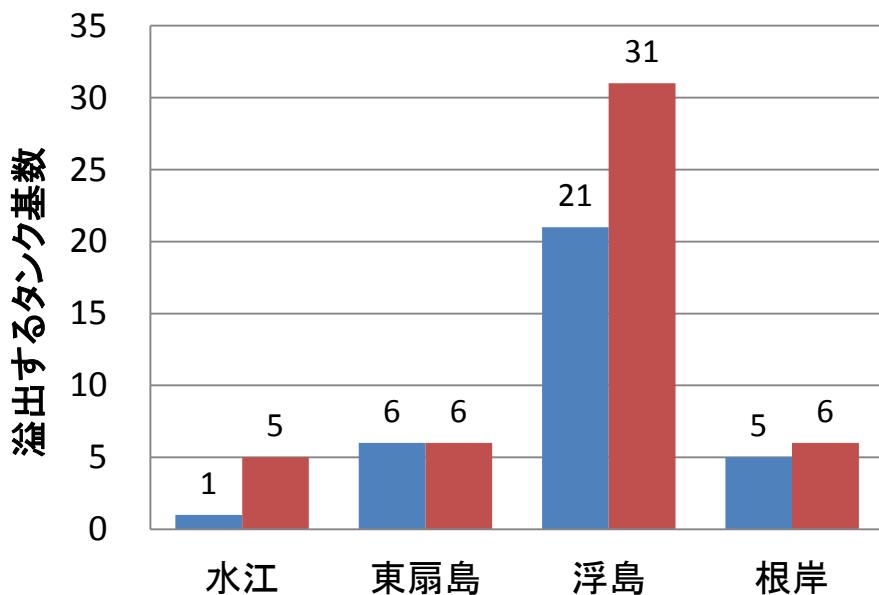
直径別の溢出タンク基数と溢出量

直径(m)	総タンク基数	溢出する タンク基数	溢出量(KL)
~30	103	14 (14%)	290
30~50	77	17 (22%)	1,968
50~70	39	16 (41%)	13,713
70~	11	1 (9%)	1,439
計	230	48 (21%)	17,410



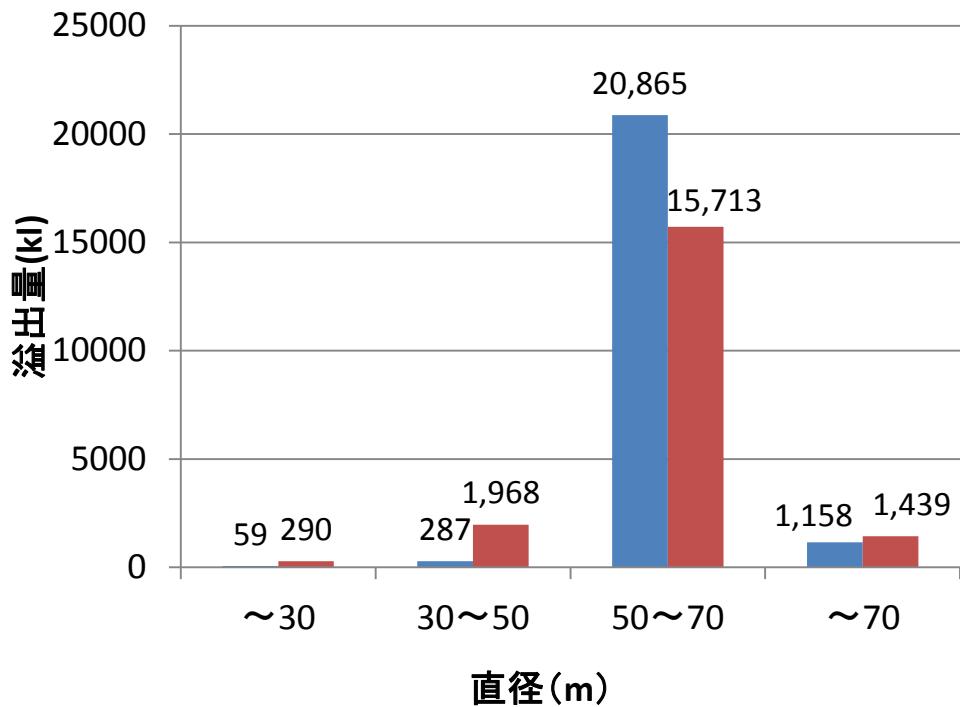
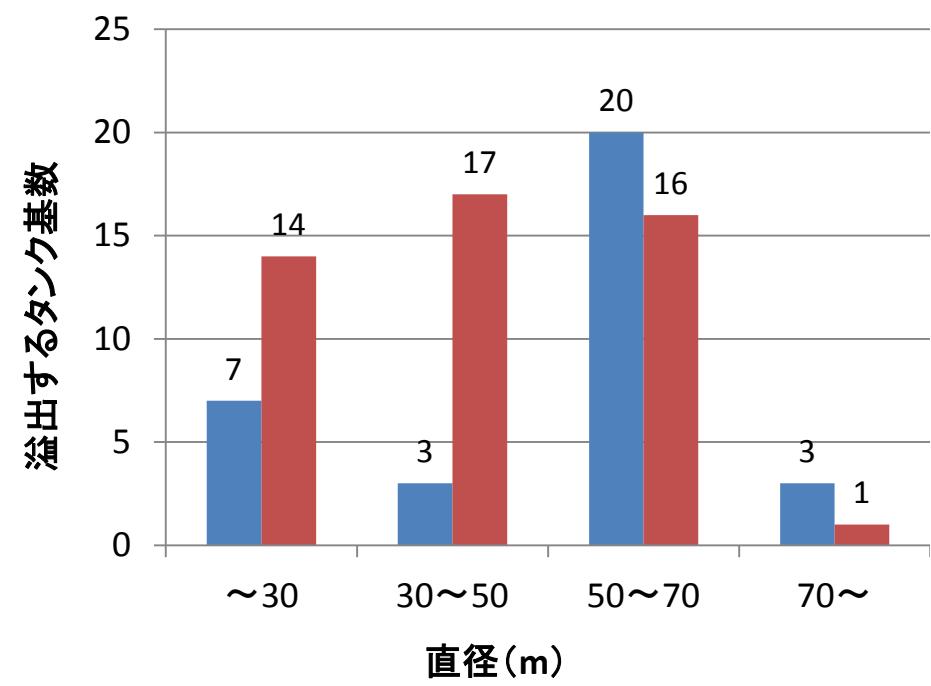
溢出するタンクの基数と溢出量の地区別の統計

- 東海地震・東南海地震連動
- 高圧ガス指針



溢出するタンクの基数と溢出量のタンクの直径による統計

■ 東海地震・東南海地震連動
■ 高圧ガス指針



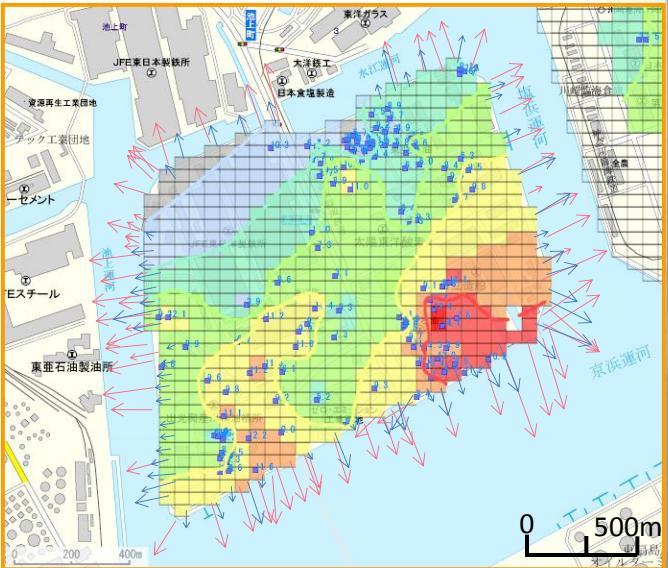
今後の課題

- 1) 側方流動対策工法の開発と実用化
 - ・対策工法(一部別途実施中)
 - ・実用化と工費の見積り
- 2) 津波への対応
 - ・東京湾での津波の予測
- 3) 被害額の算定
 - ・護岸被害(一部実施済)
 - ・側方流動と長周期地震動によるタンク被害
- 4) 京葉地区における調査の連携
 - ・京葉地区、根岸地区、九里浜地区等の被害予測
- 5) 東京湾コンビナート被害が社会に与える影響
 - ・火災の拡大、経済活動への社会の影響

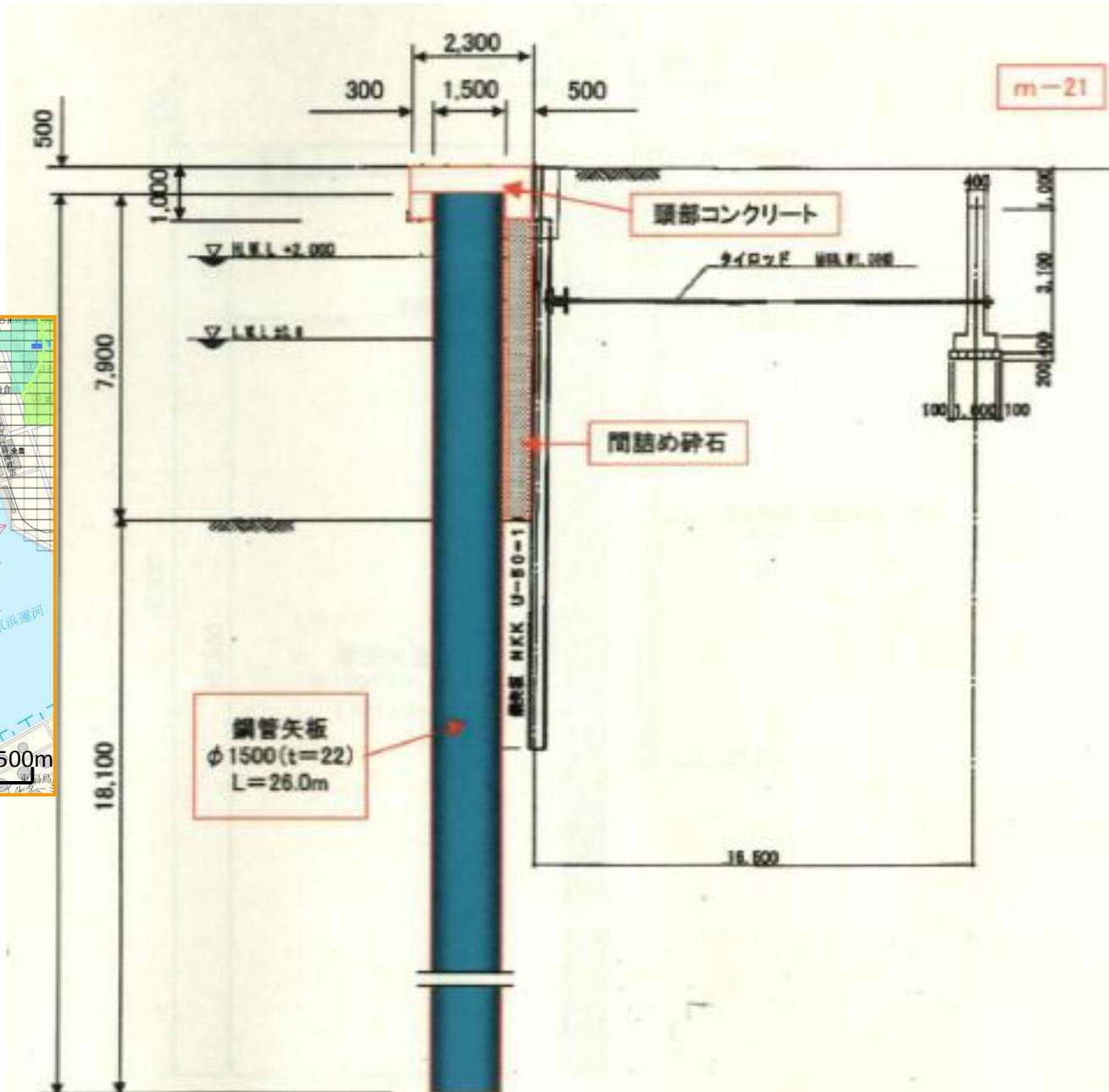
1) 側方流動対策工法の開発と実用化

46

液状化と流動化の予測

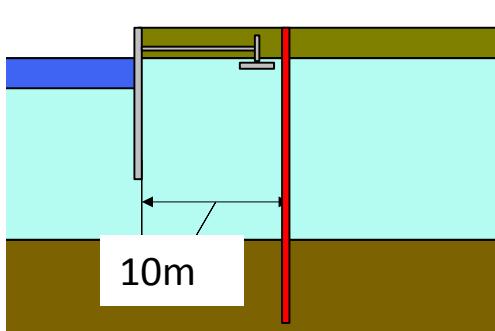


川崎市水江
周囲5.5km



側方流動を防止するための護岸の補強方法の研究

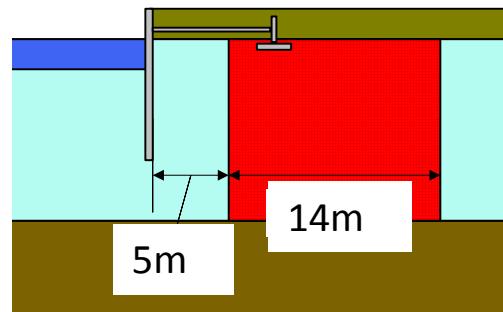
連続壁



部材: 鋼矢板



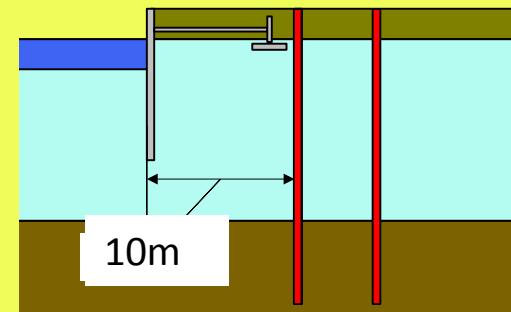
地盤改良



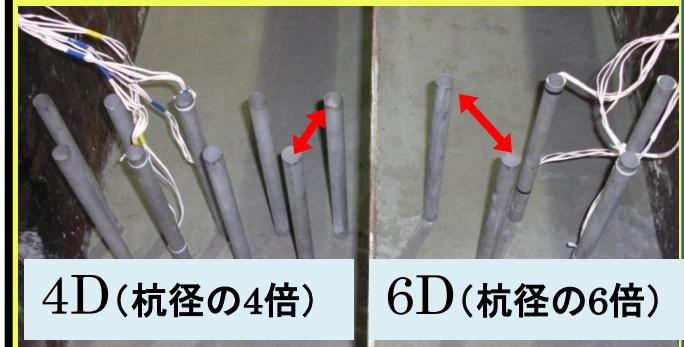
圧入締固め工法



抑止杭

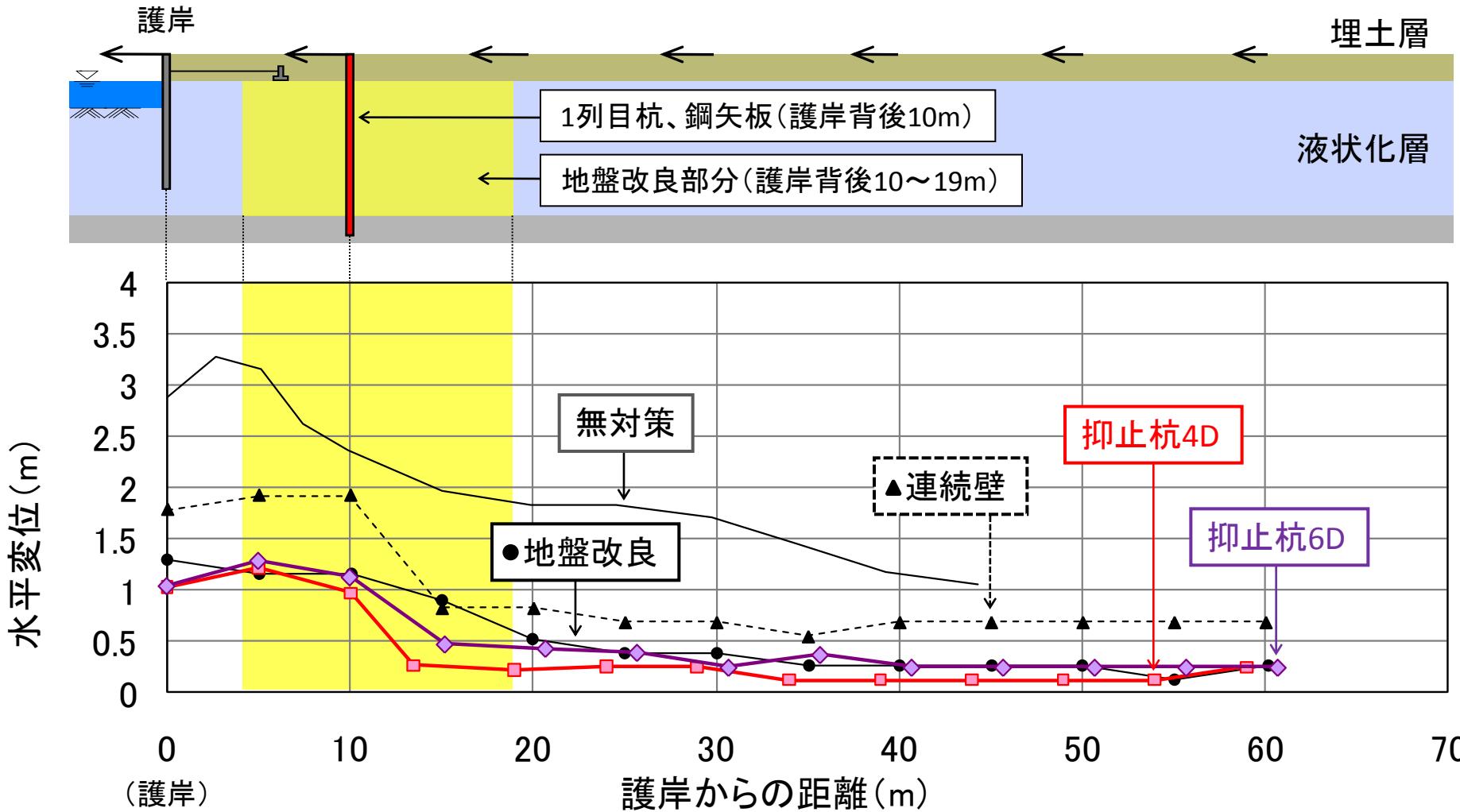


部材: 鋼管杭



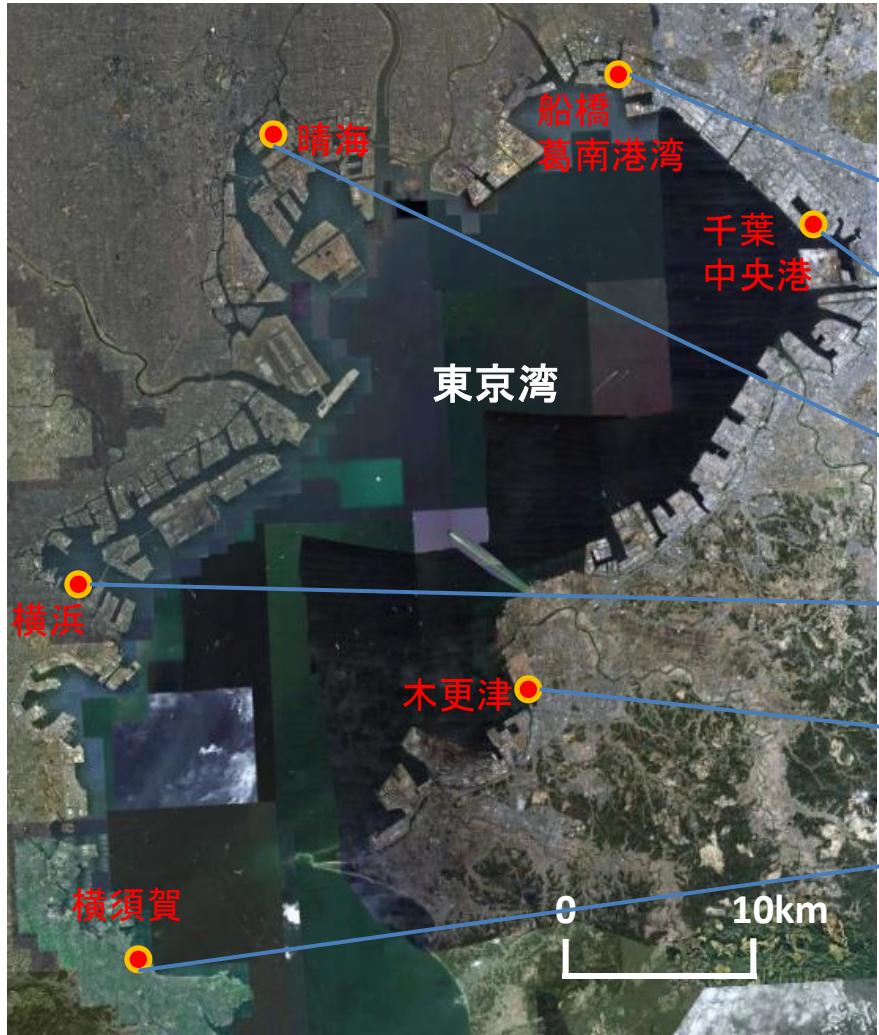
(模型実験)

各種対策法による流動の抑止効果



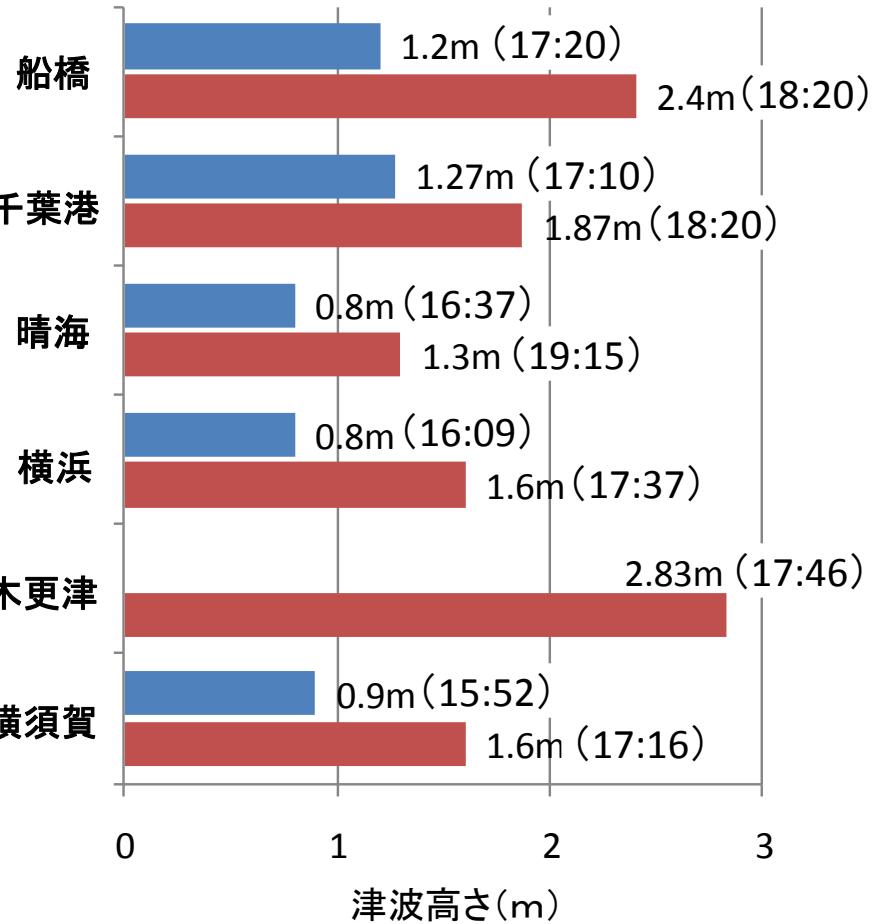
2) 津波への対応

東日本大震災による東京湾の津波高さ



凡例

■ : 第一波(観測時刻)
■ : 最大波(観測時刻)



出典：「千葉県石油コンビナート防災アセスメント検討部会」の報告を図化

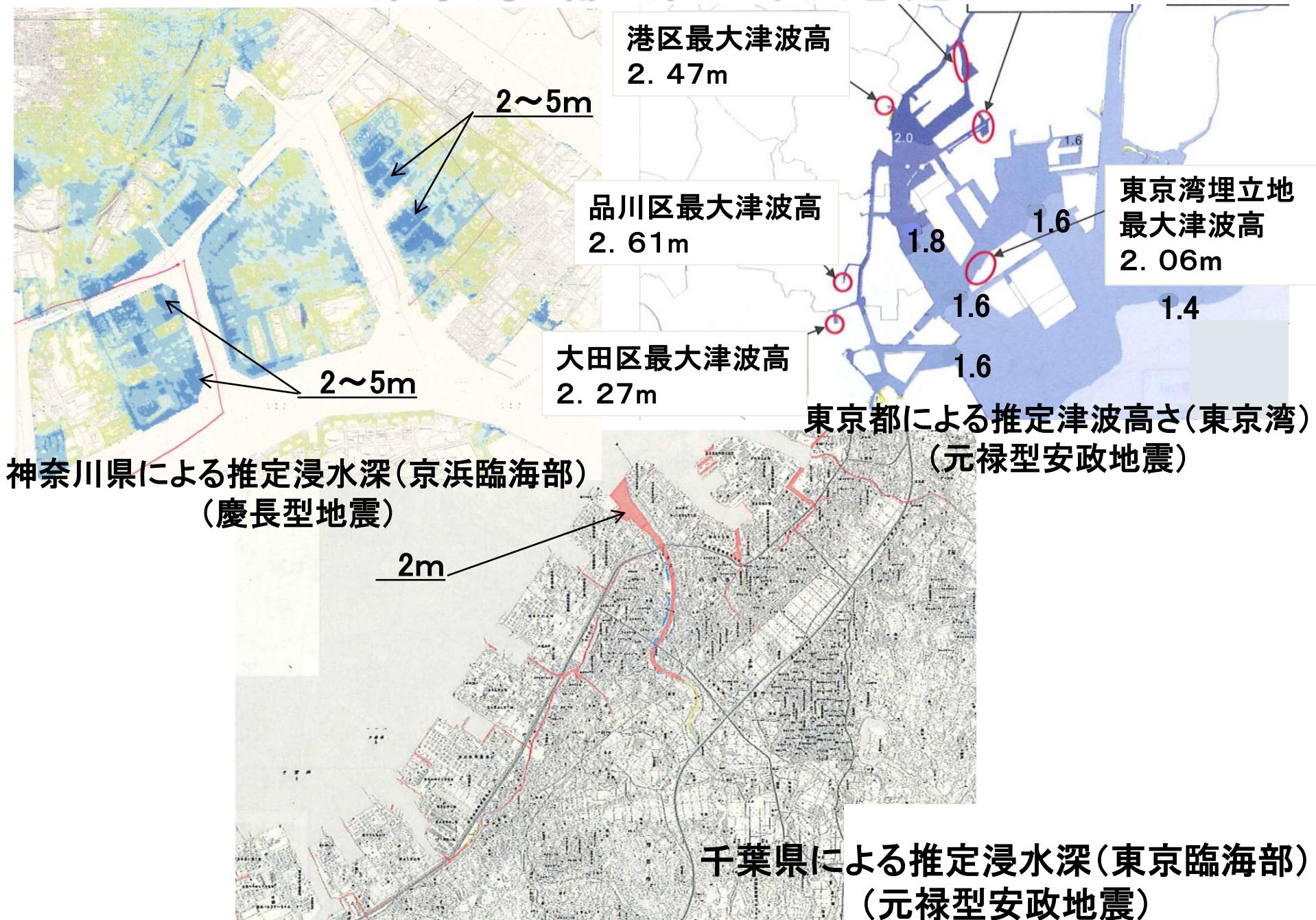
津波防災地域づくりに関する法律(平成23年12月6日)

- ・都道府県知事は、基本方針に基づき、かつ基礎調査の結果を踏まえ津波浸水想定(浸水区域及び水深)を設定する。

津波防災地域づくりの推進に関する基本的な方針 (平成24年1月16日 国土交通省告示)

- ・都道府県知事は、国からの情報提供等を踏まえて、各都道府県の沿岸にとって**最大クラス**となる津波を念頭において、津波浸水想定を設定する。
- ・悪条件下として、設定潮位は朔望平均満潮位を設定すること、海岸堤防、河川堤防等は津波が越流した場合には破壊されることを想定するなどの設定を基本とする。

東京湾1都2県の津波想定



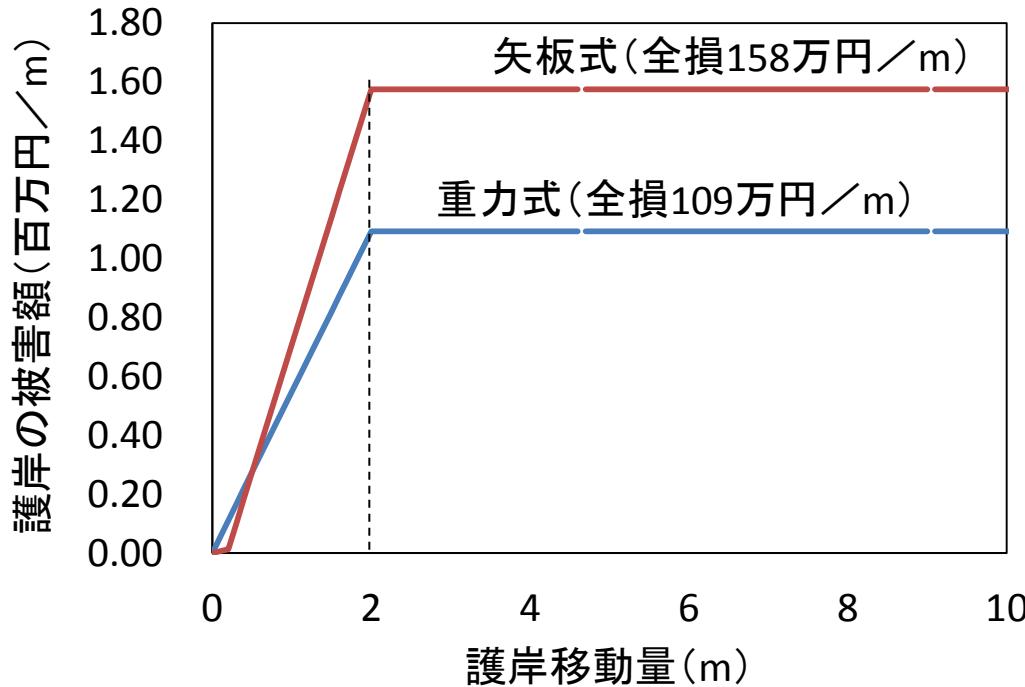
護岸移動による直接的被害額の算定

被害額算定の方法

$$C_f = 2.0 + 4.38D_x \quad \text{重力式護岸}$$

$$C_f = -128.4 + 6.97D_x \quad \text{矢板式護岸}$$

↓ デフレーター1.24を考慮



出展:上部達生, 地震被災事例に基づく重力式および矢板式係船岸の被災変形量と被災額の推定, 運輸省港湾技術研究所, 港湾技研資料No.473, 1983年12月

検討対象護岸 - 護岸移動による直接的被害額の算定 -



護岸の延長距離 **－護岸移動による直接的被害額の算定－**

	浮島	千鳥	水江	東扇島	扇島	全体
検討対象護岸	7,351	4,193	3,724	7,047	8,073	30,388
検討対象外	4,599	1,747	1,726	3,023	4,877	15,972
全外周	11,950	5,940	5,450	10,070	12,950	46,360

検討対象護岸の延長約30km
そのうち重力式は17km、矢板式は13km

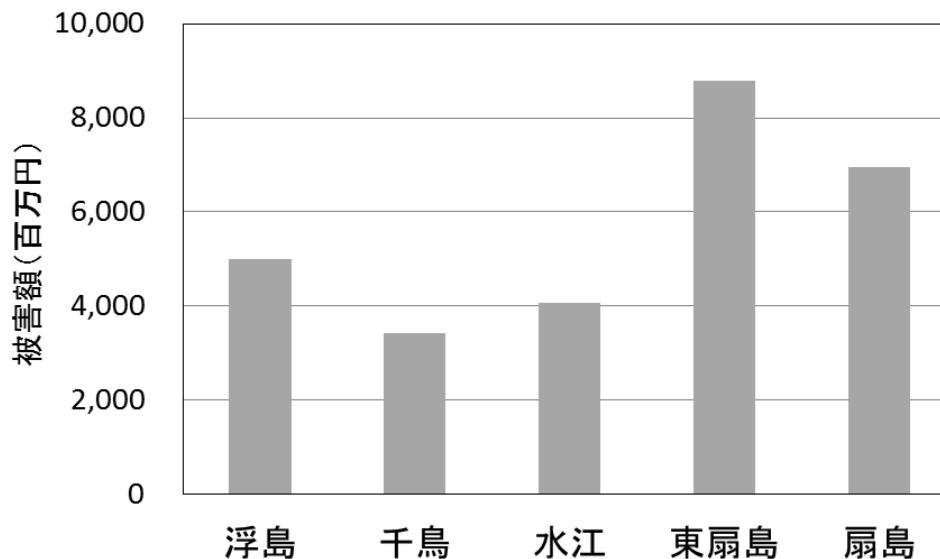
護岸移動量が2.0m以上(全損)の総延長は約10km
そのうち重力式は1.4km、矢板式は8.6km

護岸の被害額 －護岸移動による直接的被害額の算定－

被害額の総計は約282億円

	浮島	千鳥	水江	東扇島	扇島	全体
全損額(百万円)	14,340	7,811	8,019	14,256	16,566	60,992
被害額(百万円)	4,999	3,429	4,055	8,787	6,941	28,210
被害率	34.9%	43.9%	50.6%	61.6%	41.9%	46.3%

被害額の比較



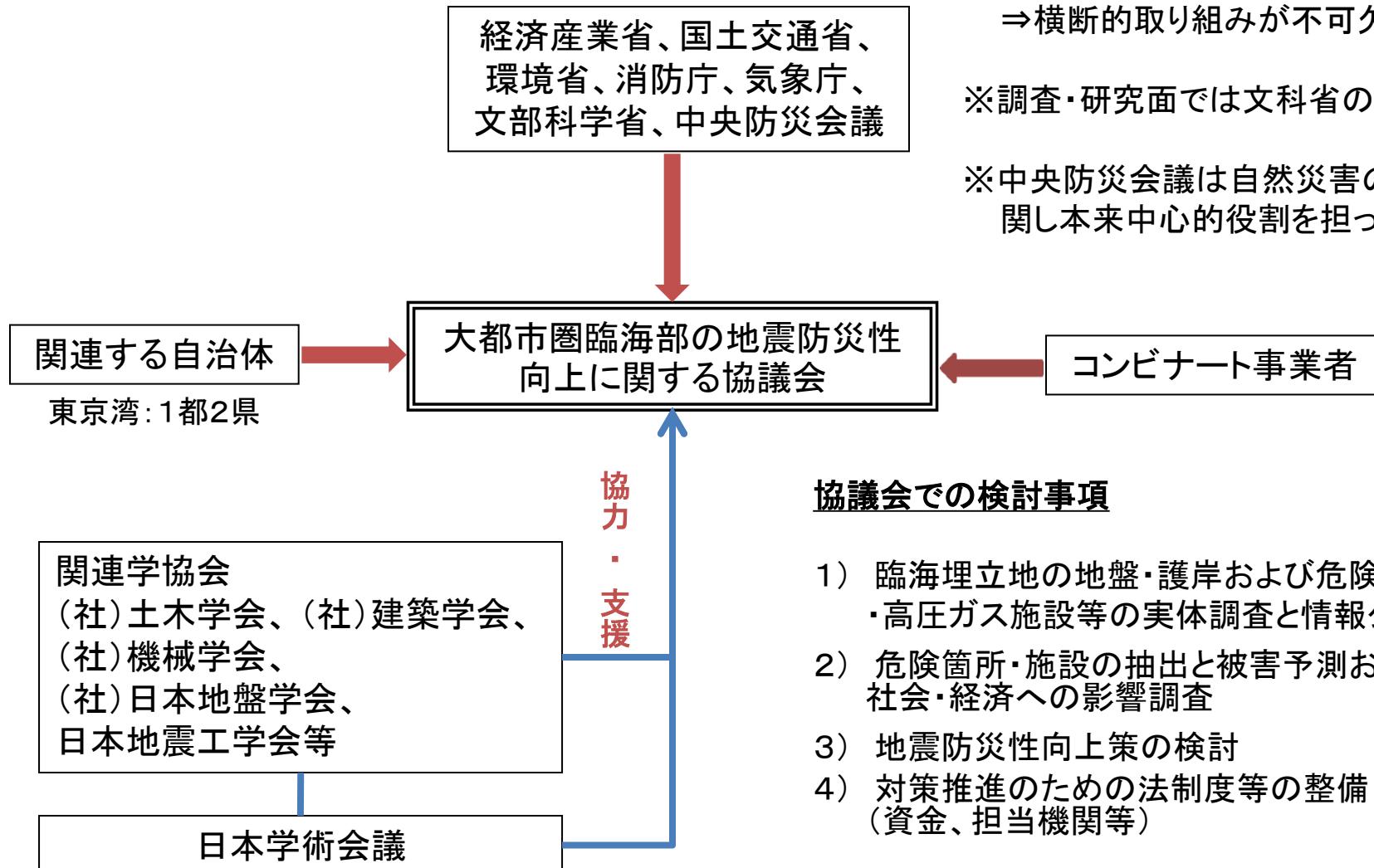
大都市圏臨海部の地震防災性対策推進のための提案

56

※臨海部施設および海域の管理・監督は
多省庁にわたっている
(コンビナー: 経済省、消防庁、
海域: 国交省、環境省)
⇒横断的取り組みが不可欠

※調査・研究面では文科省の参画が必要

※中央防災会議は自然災害の軽減に
関し本来中心的役割を担っている。



シンポジウム「東京湾の安全を考える」

シンポジウム主旨:

東京湾臨海部には、わが国の主要な産業施設や火力発電所等重要な都市インフラ施設が集中している。これらの施設が、逼迫する東京湾北部の地震等首都直下地震および南海トラフ沿い巨大海溝型地震によって被害を受けた場合、近隣住民と産業等の従業員の生命、首都圏の経済・産業活動のみならず、国際社会にも甚大な影響を及ぼすことなる。

土木・建築・都市分野のみならず化学、機械、経済、行政等の幅広い分野の専門家と国、自治体、企業等関係者が、自由な立場で意見交換を行い、東京湾の地震防災等の安全性向上への取り組みに資することを目的とする。

日 時:2012年11月21日(水)13:30～17:00 (受付開始13時より)

場 所:早稲田大学 国際会議場

プログラム: 第Ⅰ部 基調講演

濱田 政則 早稲田大学教授

鈴木 浩平 (元)首都大学東京工学部長

座間 信作 消防研究センター基盤研究部長

第Ⅱ部 パネルディスカッション

丸山 隆英 國土交通省海岸・防災課長

渡辺 健 経済産業省資源エネルギー庁石油精製備蓄課長

坂井 藤一 FS技術事務所代表

田辺 修 東京ガス(株)生産エンジニアリング部長

尾島 俊雄 (元)早稲田大学理工学部長

参加申込み:hamada@waseda.jp