

東京湾口部海底における液状化の危険性

村田一城：

特任研究員、東京大学生産技術研究所

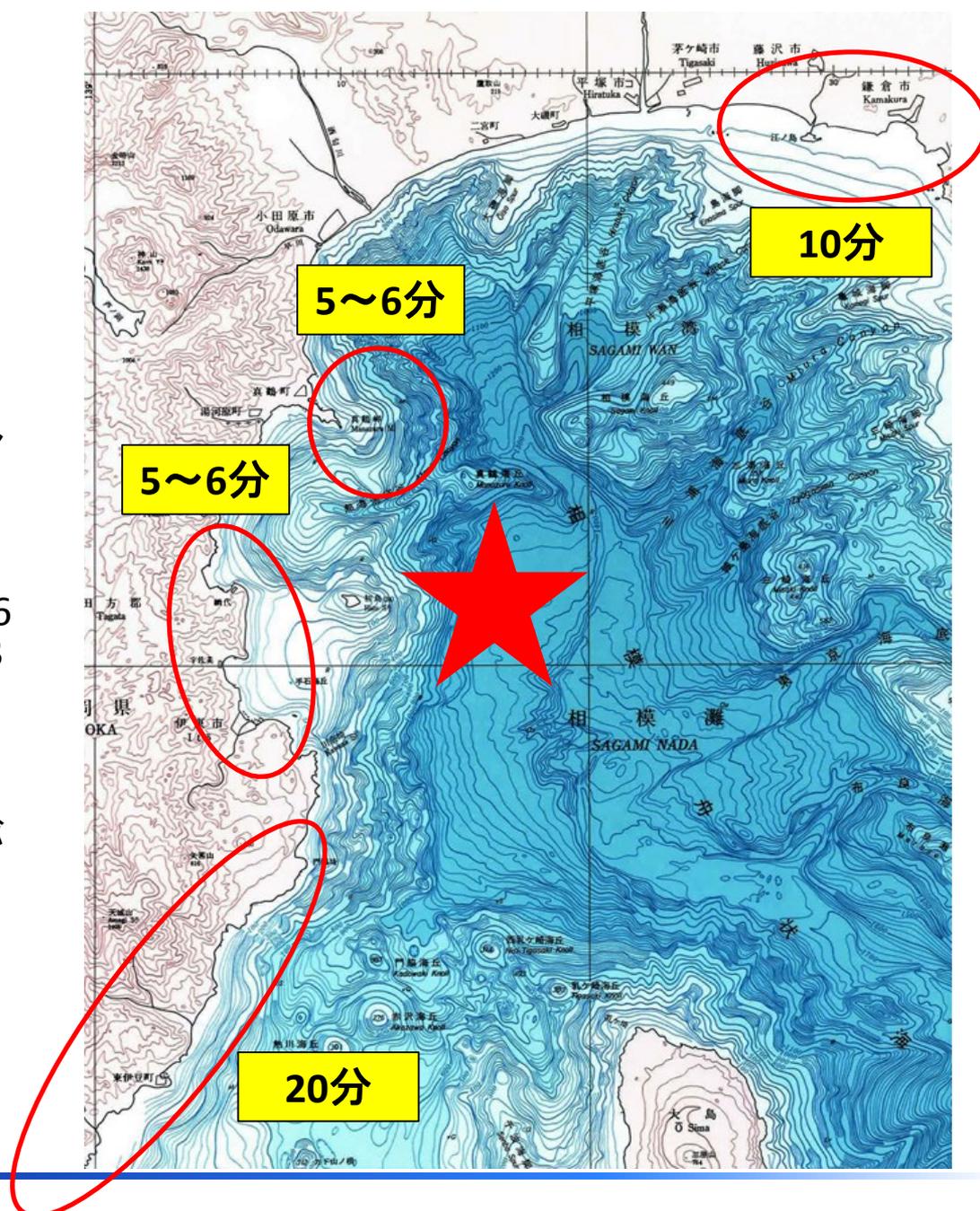
戎崎俊一：

主任研究員、国立研究開発法人 理化学研究所



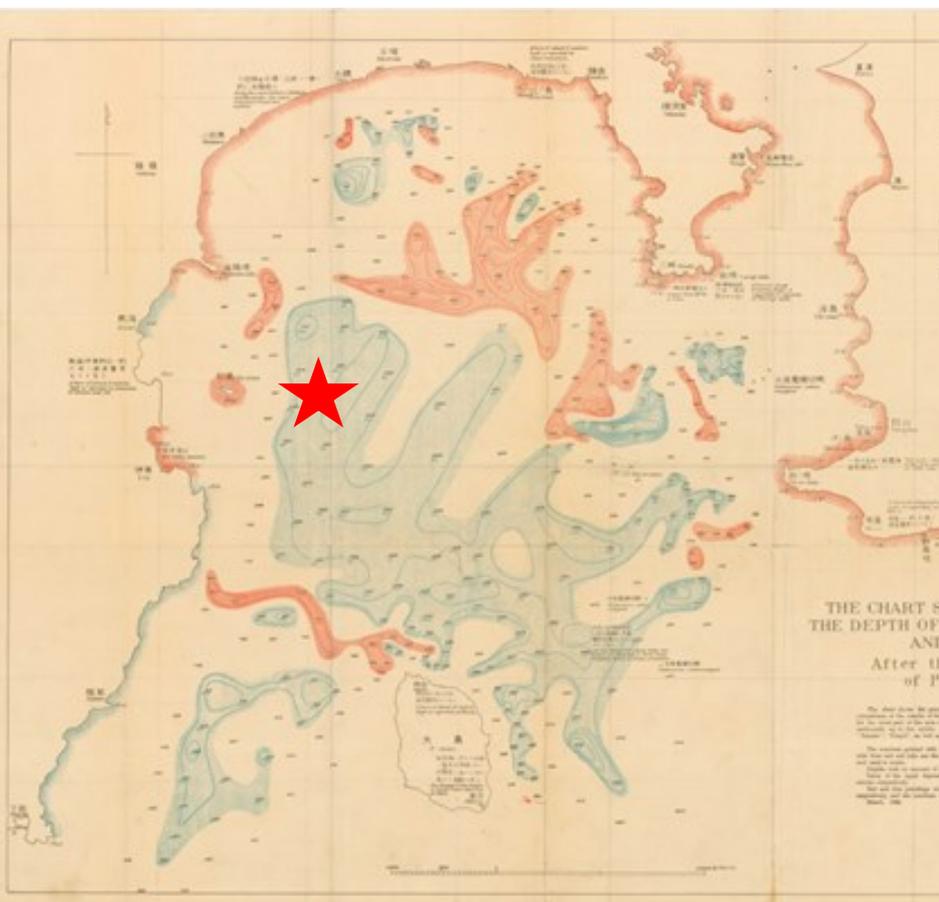
大正関東地震(1923年)の津波@相模湾

- 西部真鶴付近にあっては激震後5～6分にして、
- 長井鎌倉等北上するに従って遅れて江ノ島付近にては約10分後であった。
- 熱海伊東間最も烈しく激震後5～6分にして多少の退潮があった後、3回津波が来襲して、その高さは6mから10.5mに達した。
- 川奈崎以南は次第にその大きさが減少して、下田では、激震後約20分に高さ1.8m～2.1mのものが押し寄せた。



過去の大規模な海底地すべりの事例

関東地震1924年による相模湾の水深変化



THE CHART 8
THE DEPTH OF
AND ITS VICINITY
After the Great Earthquake
of 1st September, 1923.



大震後相模灘附近水深変化調査圖

○ 本圖ハ大正十二年九月一日ノ烈震後本年一月中旬ニ至ル間當部ニ於テ測量
艦松江、武藏、膠州、大和、並ニ測量班四班ヲ以テ精測セシメタル測量成
果ト舊測量成果（大部分ハ大正元年以後ノ測量）トノ比較ニヨリテ得タル
變化ノ概況ヲ示スモノナリ

○ 黒色數字ハ舊測量ノ水深ニシテ其下部ニ記セル 藍色數字ハ其ノ變化量増
示ス（單位米）

○ 變化量ヲ附セサル水深ハ新舊測量ニ於テハ其差ヲ認メサルモノナリ

○ 等變水深ハ五十米毎ニ作り陥没部ハ藍色、隆起部ハ紅色ヲ以テス

○ 沿岸紅色ハ隆起、藍色ハ沈下ヲ示シ附記セル括弧内ノ數字ハ其變化量ヲ示
ス（單位米）

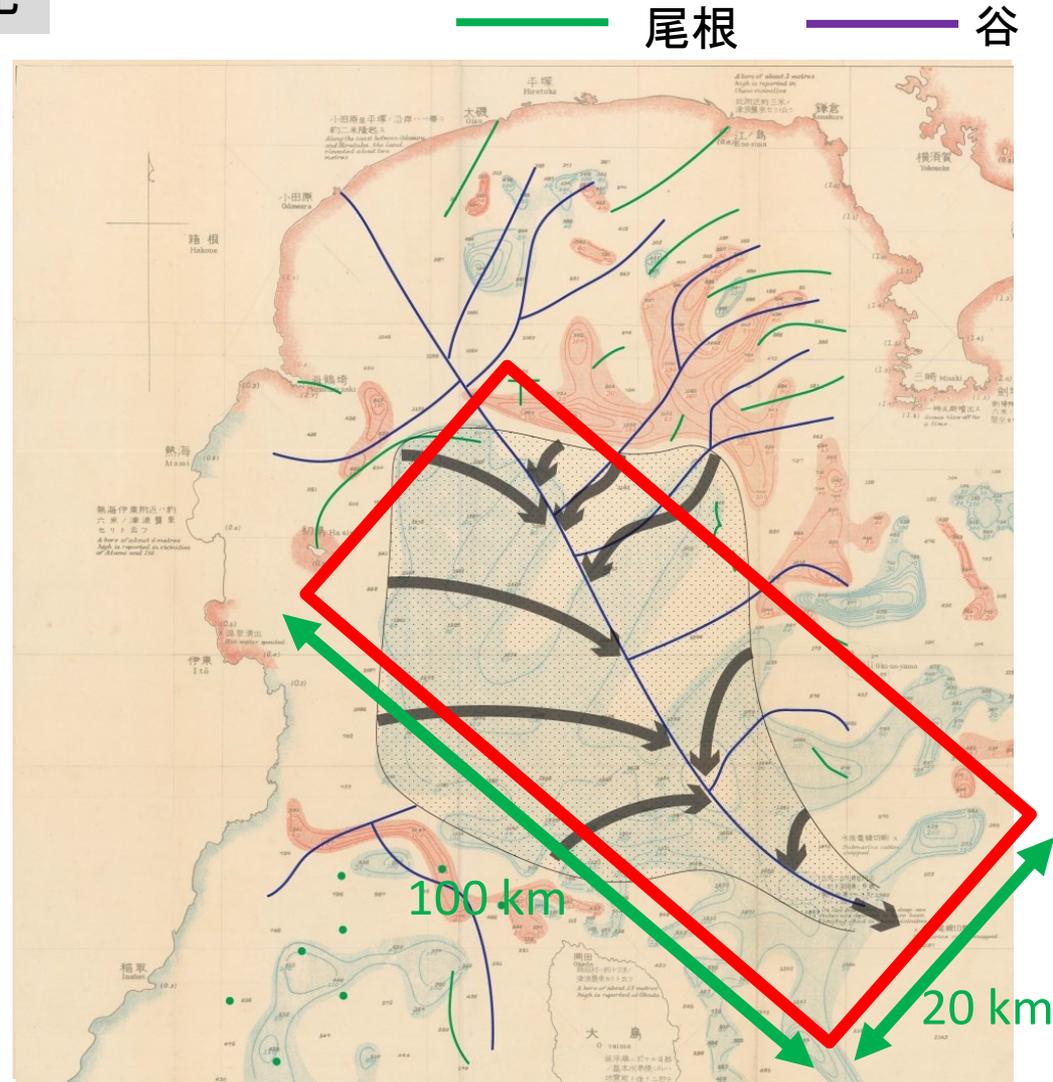
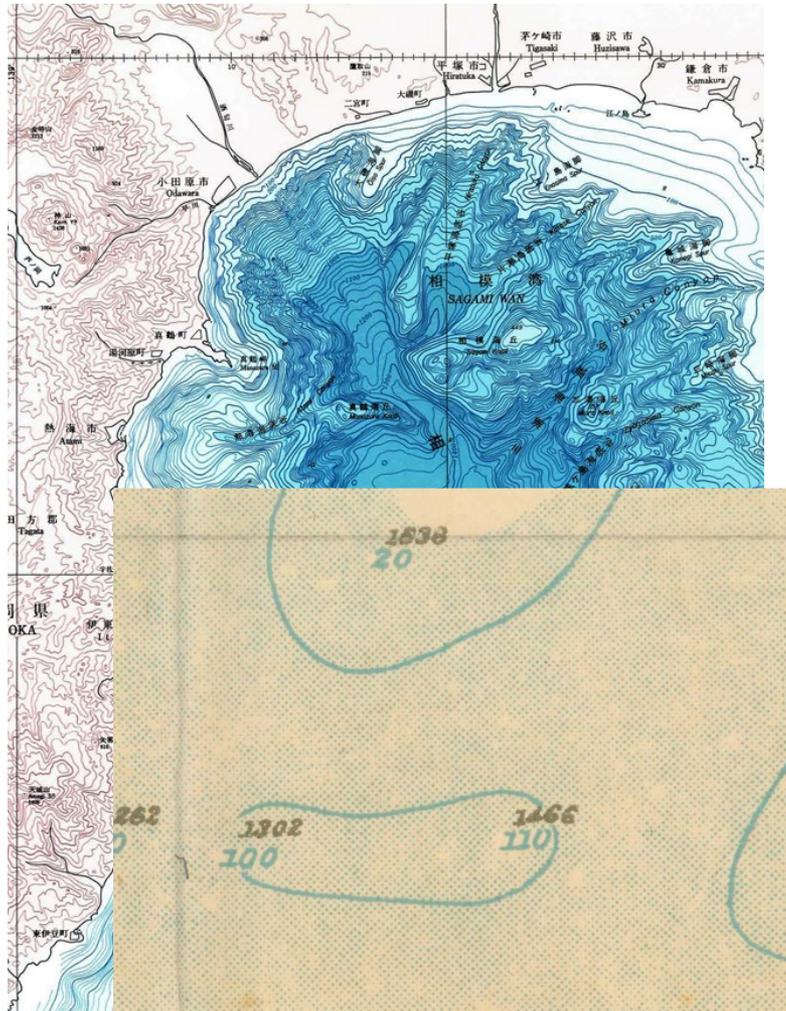
大正十三年三月

水路部

鴨川

過去の大規模な海底地すべりの事例

関東地震1924年による相模湾の水深変化

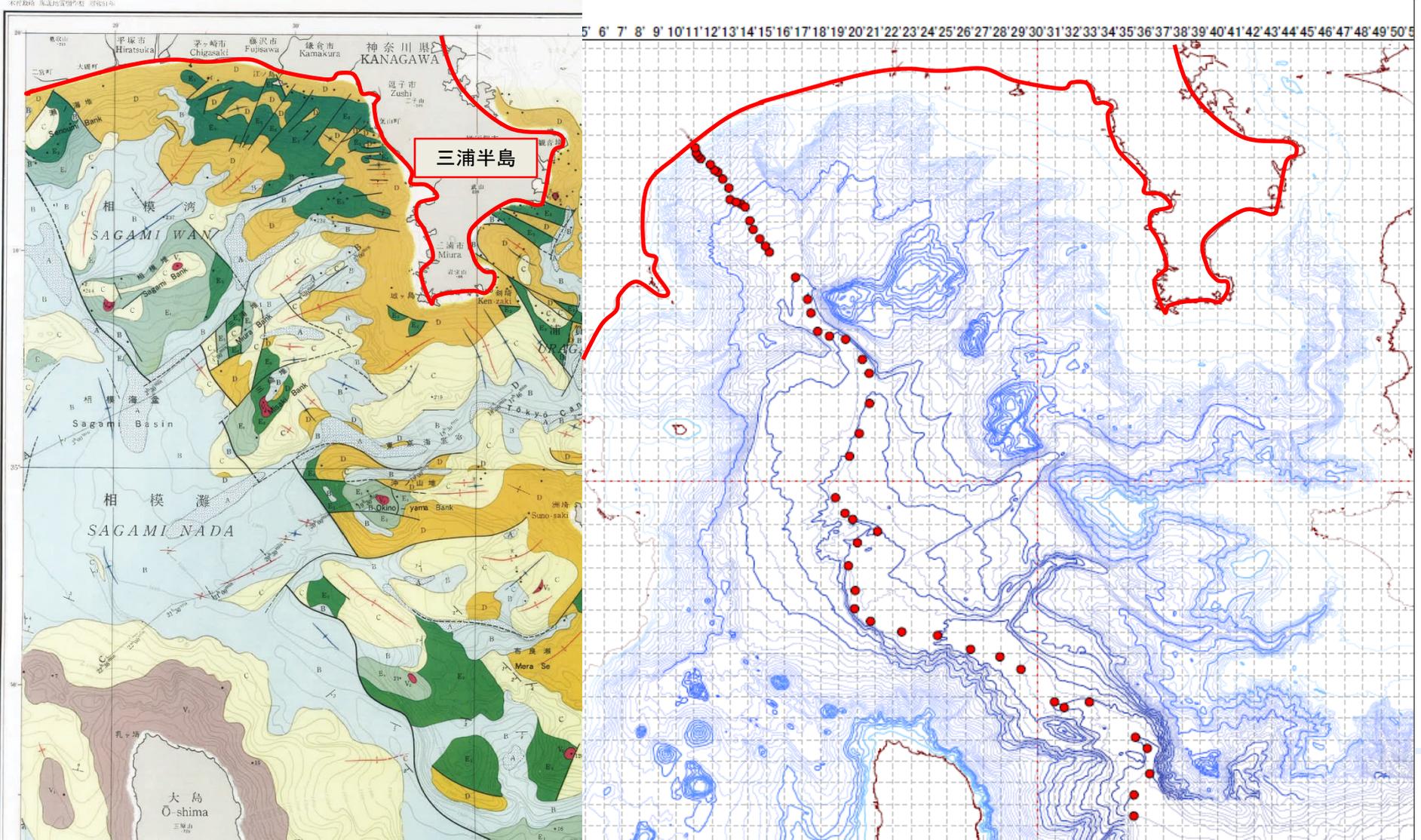


大島周辺の地質図の海底地盤

相模灘及
SAGAMI-NADA SEA AND
海底地質
SUBMARINE GEOLOGY

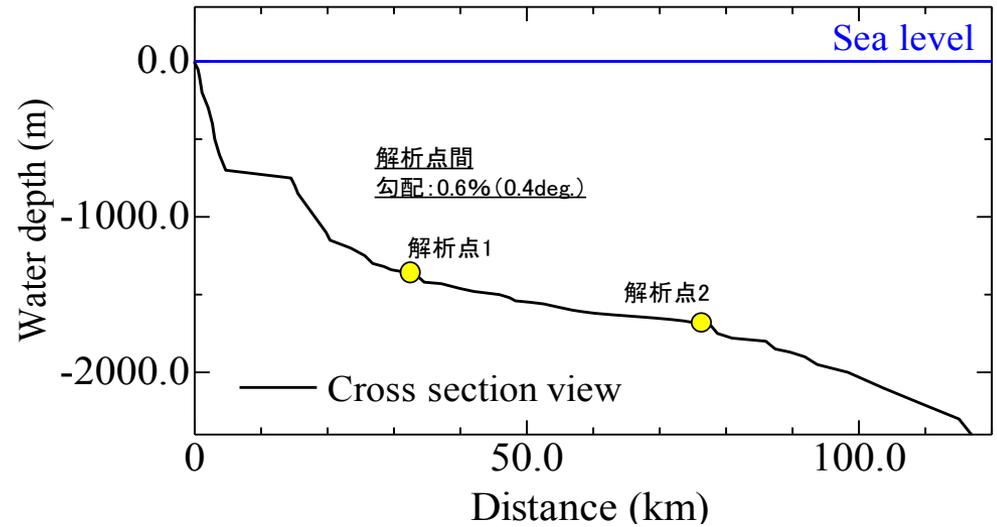
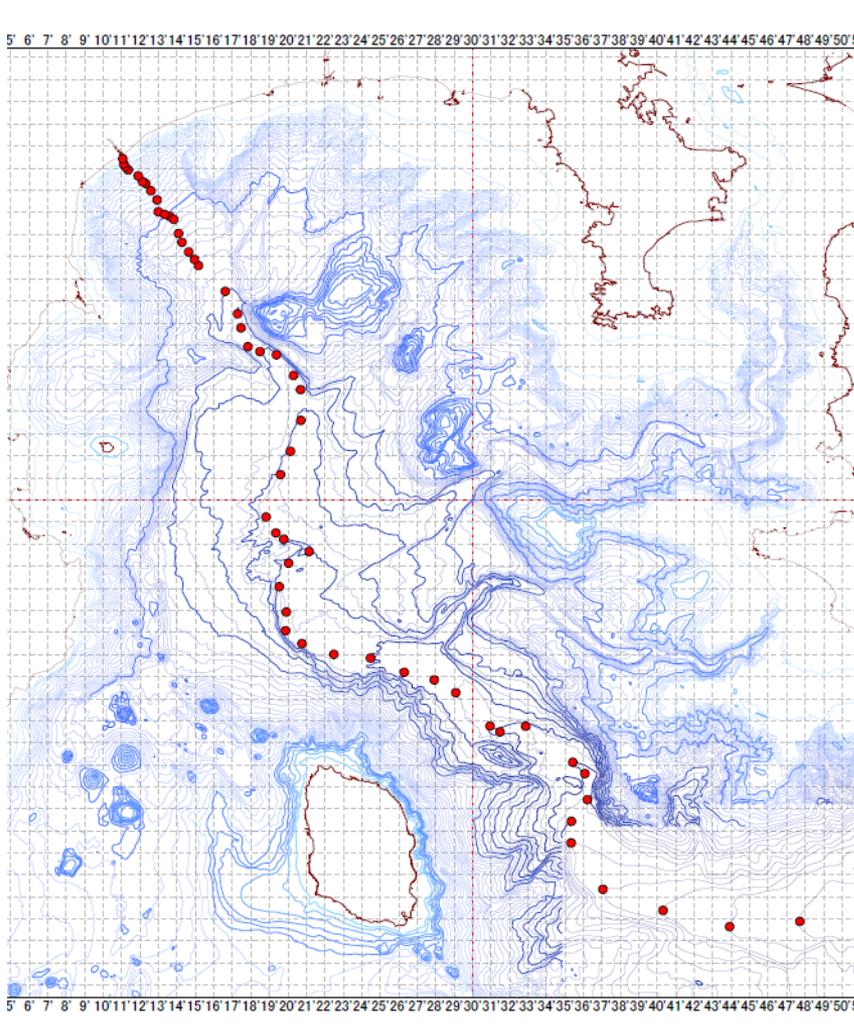
地質調査所：海洋地質図3 相模灘及付近
海底地質図，1976.

日本水路協会



過去の大規模な海底地すべりの事例

関東地震1924年による相模湾の水深変化

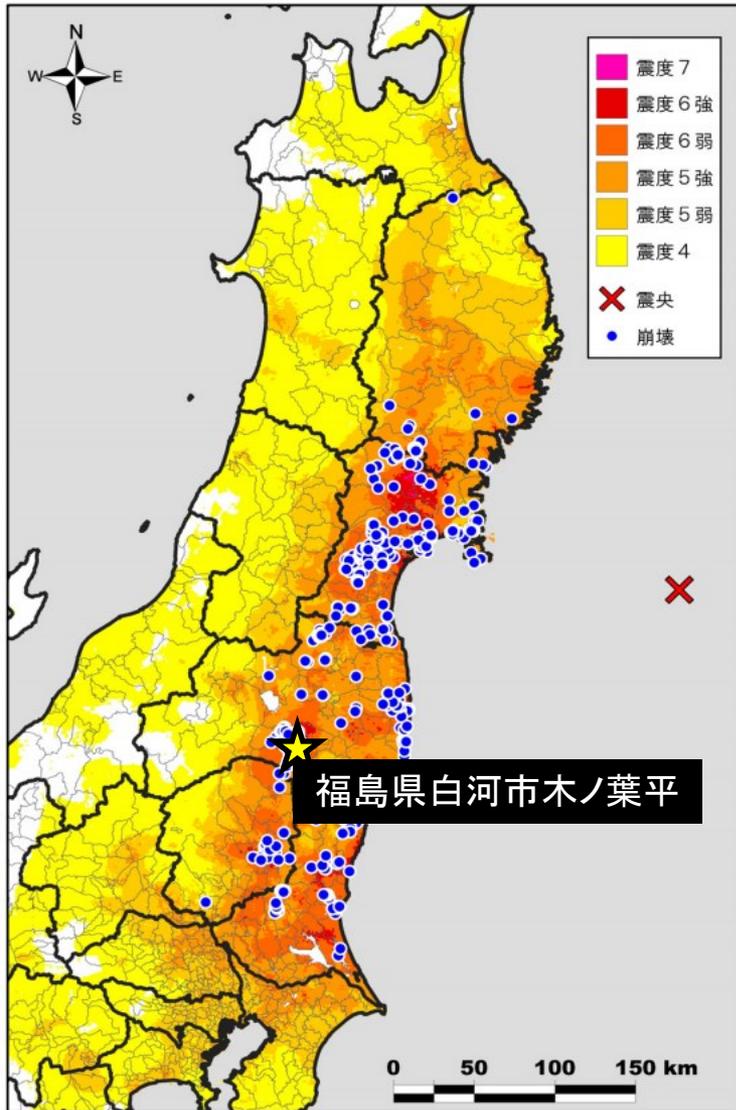


日本水路協会



東北地方太平洋沖地震 陸域の地すべり

地すべりが確認された地域

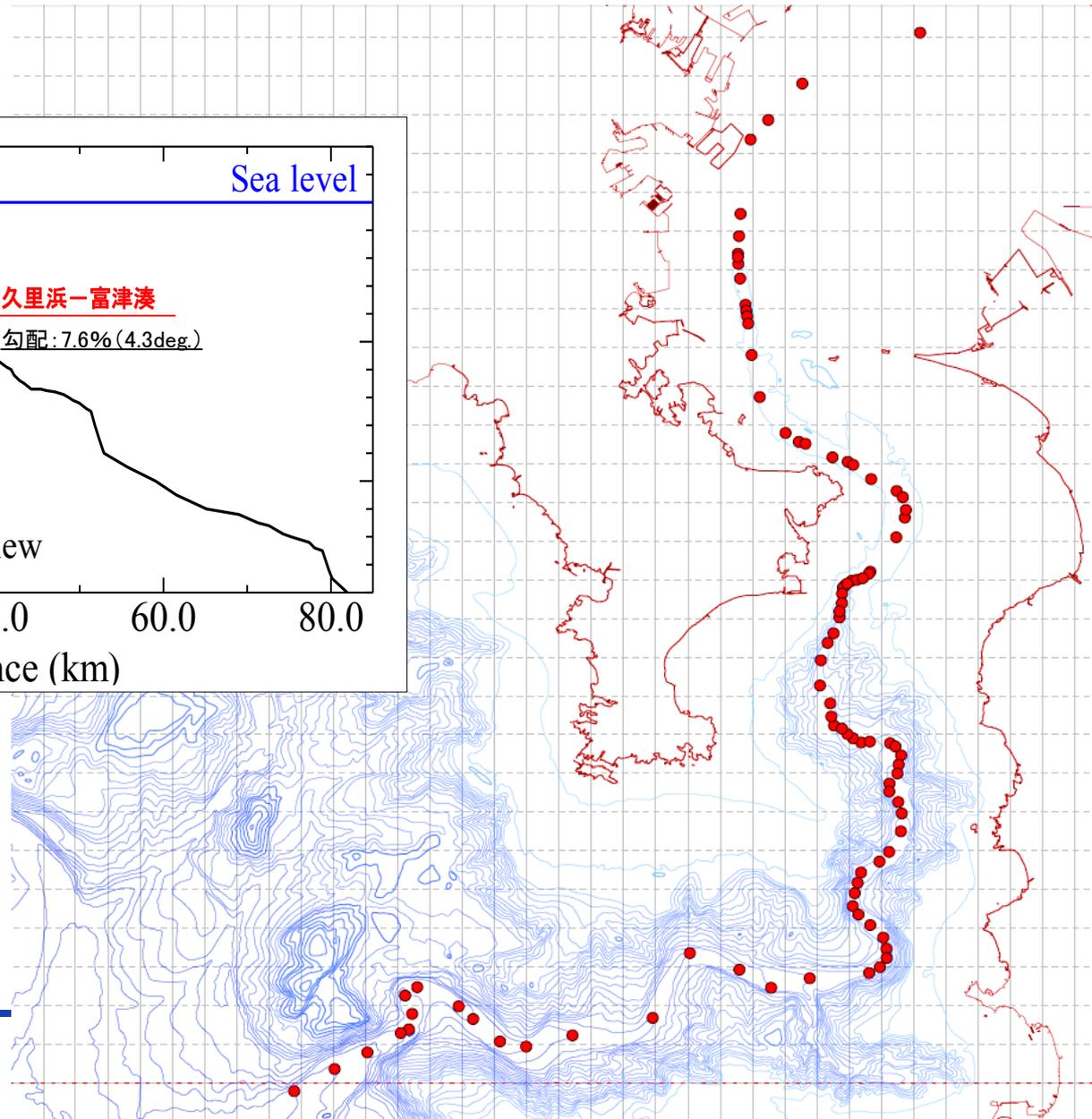
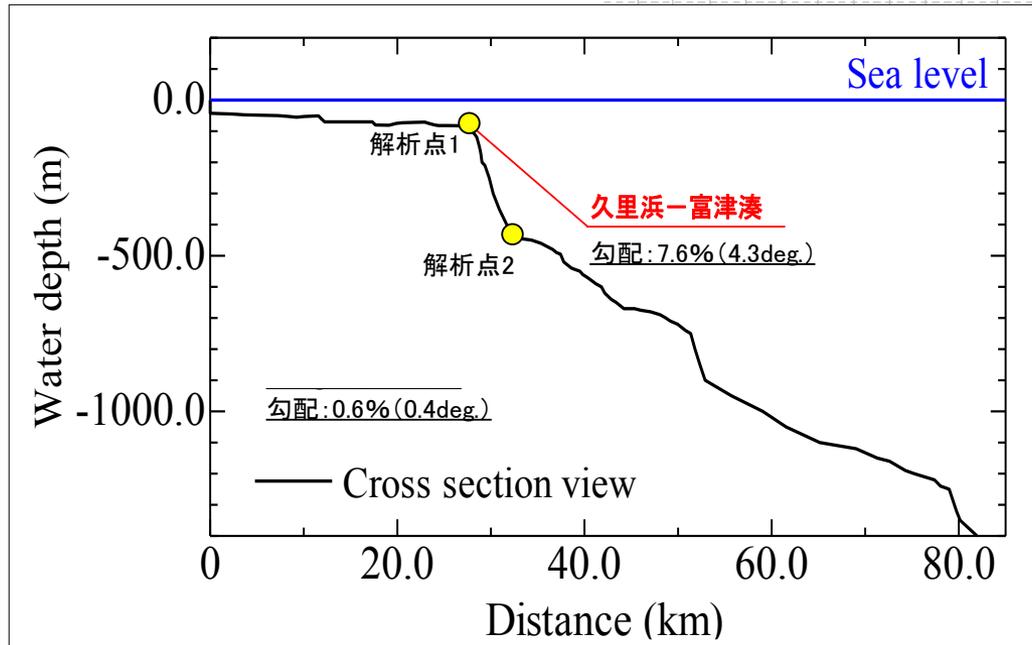


- 地震による陸域の土砂災害は確認された
- 地すべりも含め140か所以上を確認

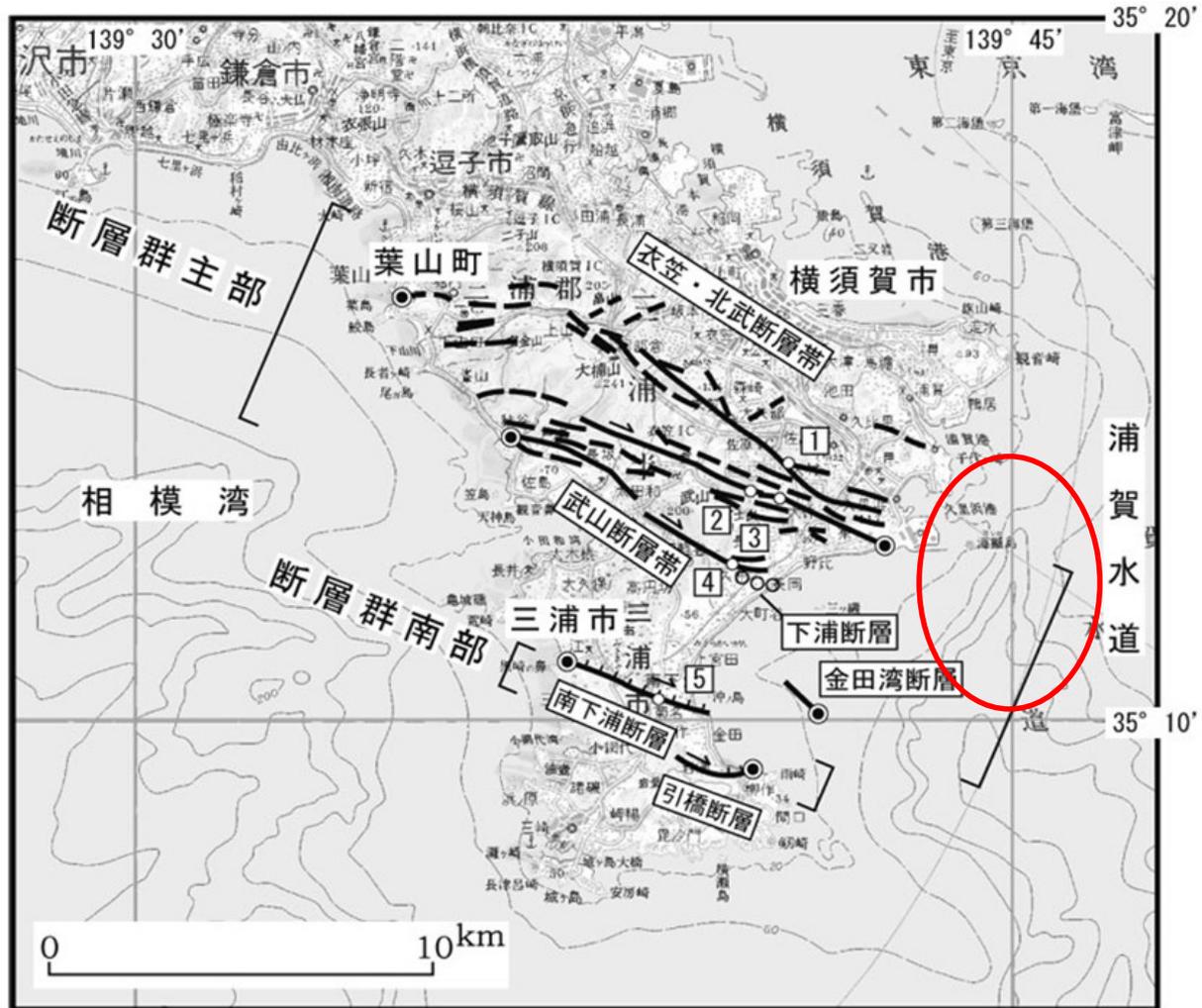


福島県白河市葉ノ木平
斜面長: 160.0m
移動距離: 120.0m
最大斜面幅: 70.0m

東京湾口部の海底堆積物



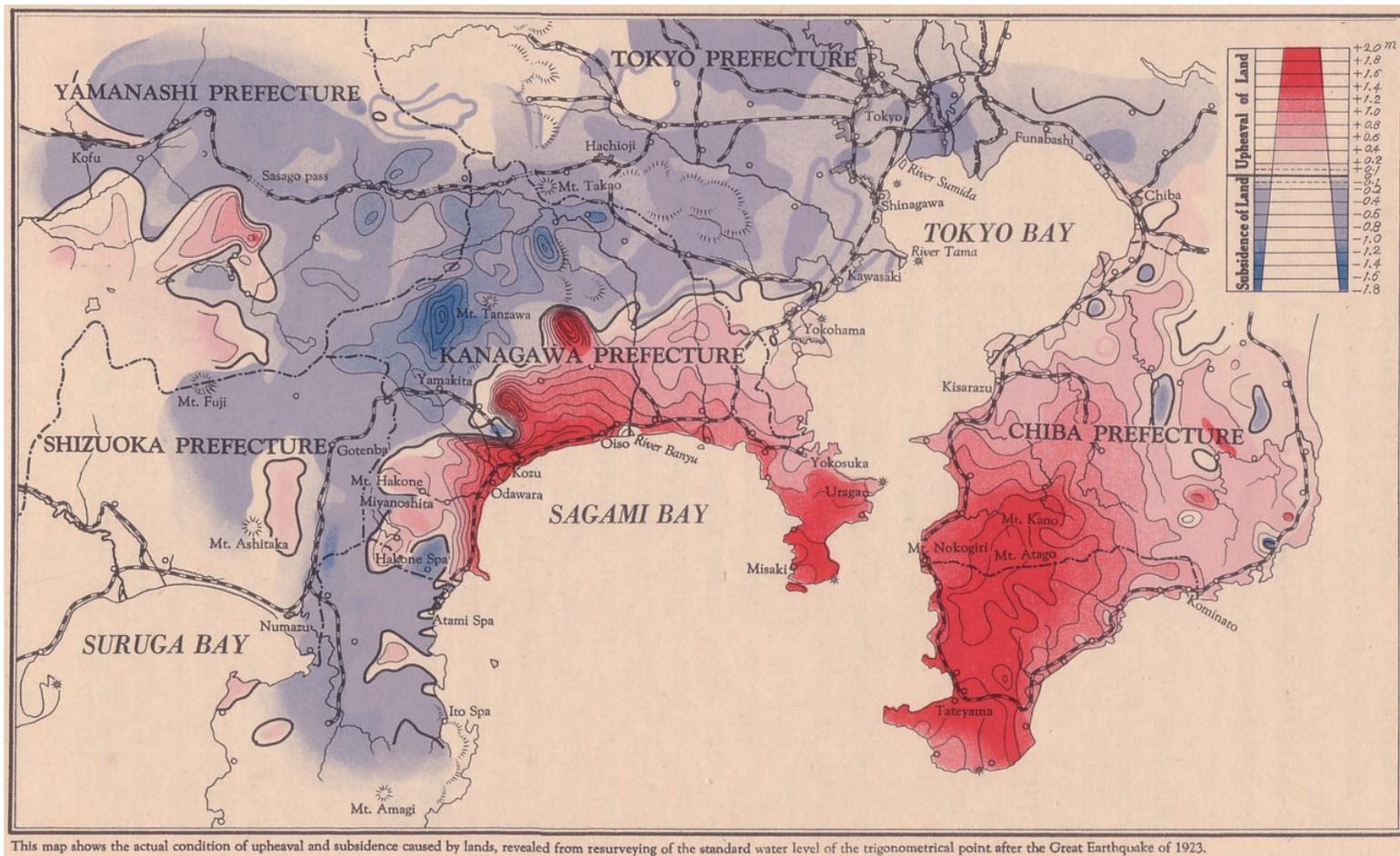
三浦半島の活断層図



地震調査研究推進本部地震調査委員会



大正関東地震における隆起・陥没



“THE RECONSTRUCTION OF TOKYO” published by Tokyo City 1933



東京湾口部の海底堆積物

東京湾第二海堡・第三海堡の地質データから地盤の特徴をみる



第二海堡

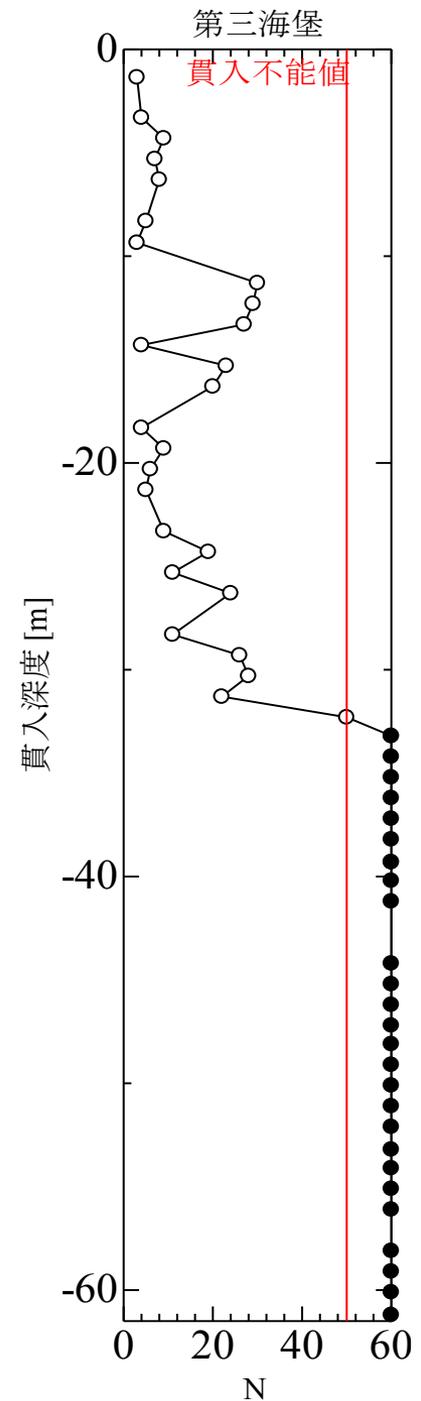
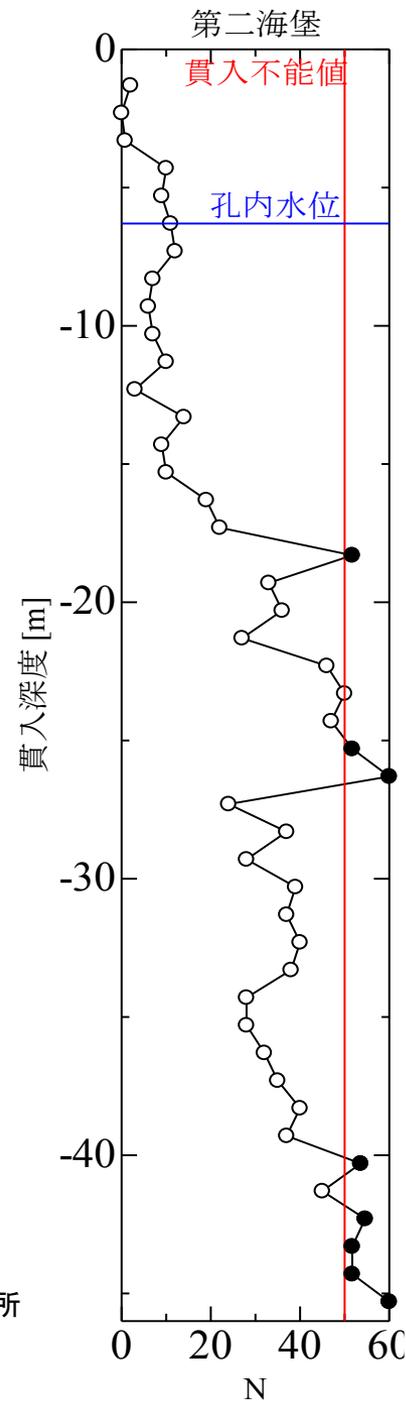
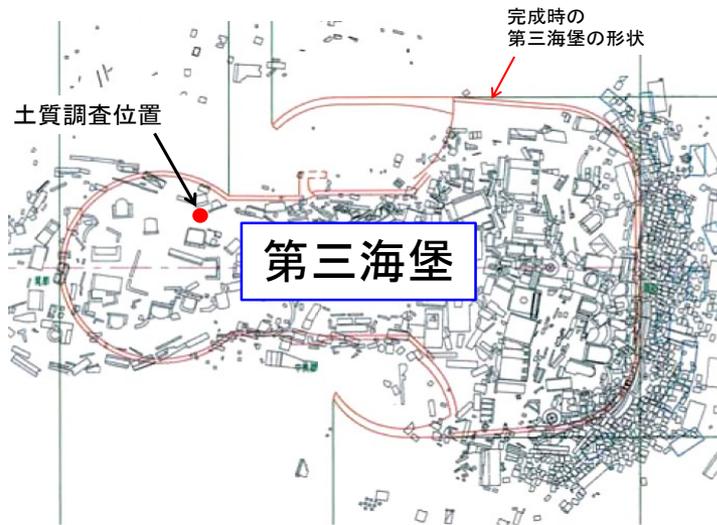
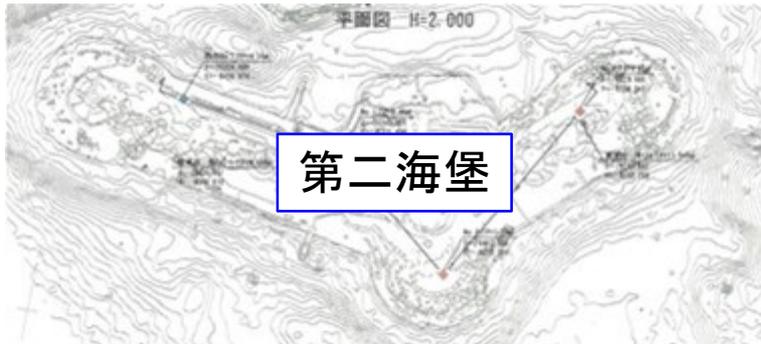


第二海堡
1889年8月起工
1914年6月完成。第一海堡と共に富津市に属する。
面積: 約41,000m²
1923年9月1日の関東大震災により被災
その年の内に廃止・除籍

第三海堡

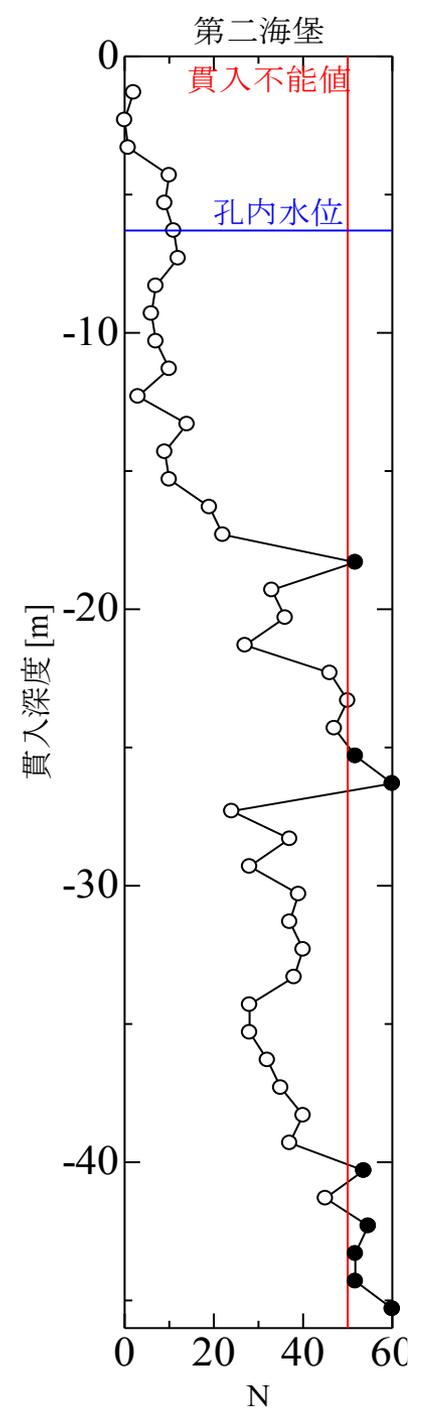
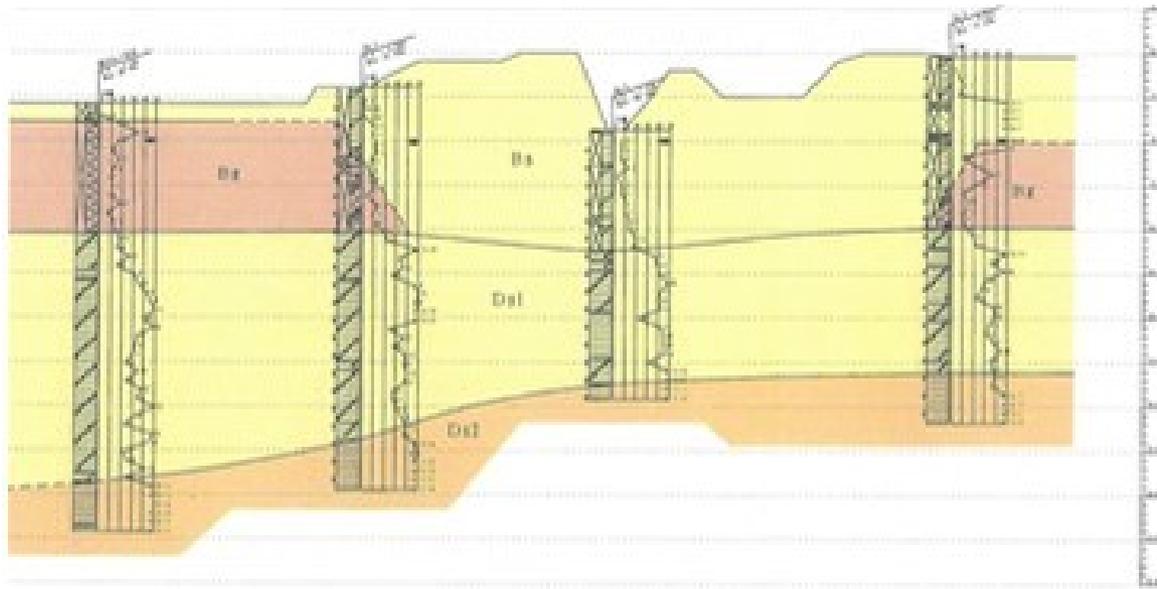
第三海堡
1892年8月起工
1921年完成。横須賀市観音崎沖に建設
面積: 約34,000m²
水深約39メートルの位置に造成した難工事であった(完成までに30年)
関東大震災により崩壊し4.8メートル沈下(全体の1/3が水没したため、廃止・除籍)

第二海堡と第三海堡のある調査地点のN値



土質調査資料 資料提供: 国土交通省 関東地方整備局 東京湾口航路事務所
 第二海堡: H18年3月から開始された土質調査時の資料
 第三海堡: H14年1月から開始された土質調査時の資料

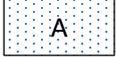
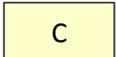
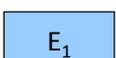
東京湾口部の海底堆積物

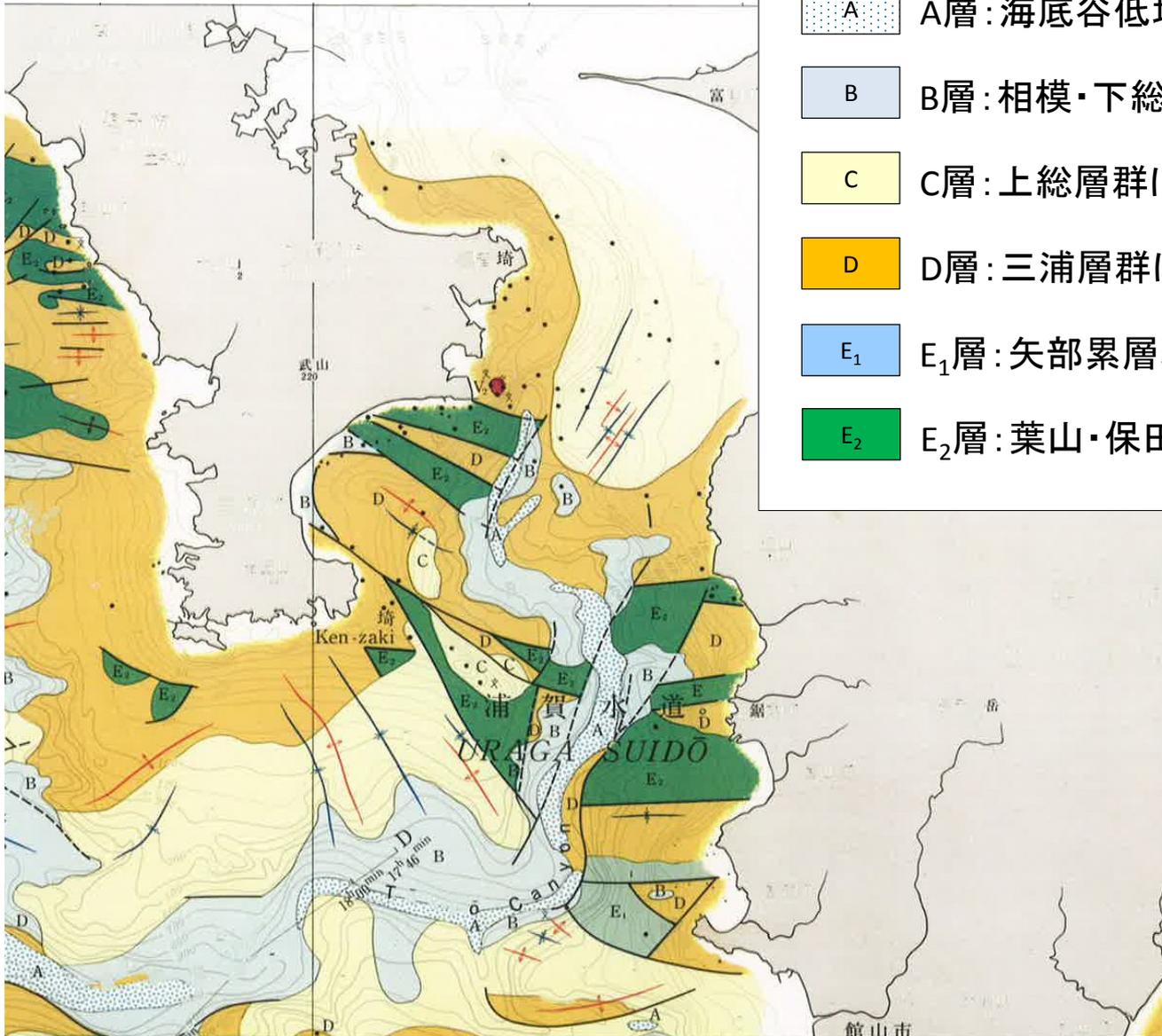


地質時代	地質区分		地質記号	主な土質	N値	特徴	
新 生 代	現 世	盛 土 埋 土	砂質土部	Bs	礫混り細砂 細砂 コンクリート・レンガ	0~50+ (13.6/30) 13.41	φ10mm以下の円礫を混入するルーズな細砂を主とする。No.2では地下兵舎の柱部と推察される煉瓦やコンクリートが確認された
			礫質土部	Bg	シルト質泥岩礫	3~14 (9.4/12) 3.17	埋め立て造成時の割栗石および捨石と推察される。基質は泥岩を主とするが全体に脆弱化しており粘土化が進んでいる。間隙が多く、循環泥水の全量逸水が良くみられる。
第 四 紀	更 新 世	下 総 層 群	洪積第1砂質土層	Ds1	貝殻混り細砂 貝殻混り粗砂 細砂	19~50+ (38.0/54) 9.48	全体に貝殻片を多く混入する細砂~粗砂を主とする。φ10mm以下の円礫を少量混入する。見掛けの含水は多い。一部で貝殻片の混入が少ない。
			洪積第2砂質土層	Ds2	細砂	36~50+ (53.2/14) 8.69	比較的粒径がそろった細砂を主とする。貝殻片が点在する。また、部分的に貝殻片をラミナ状に複数連続して狭く存在する。見掛けの含水は中位。

※本層序表は今回の調査結果による。
 N値のランで上段は範囲、中断は（平均値/個数）、下段は標準偏差をそれぞれ示した。
 N値の平均値、標準偏差はN値50以上を示す値は換算N値を用いて算定した。
 N値は地層境界およびコンクリートやレンガの打撃結果を含まない。

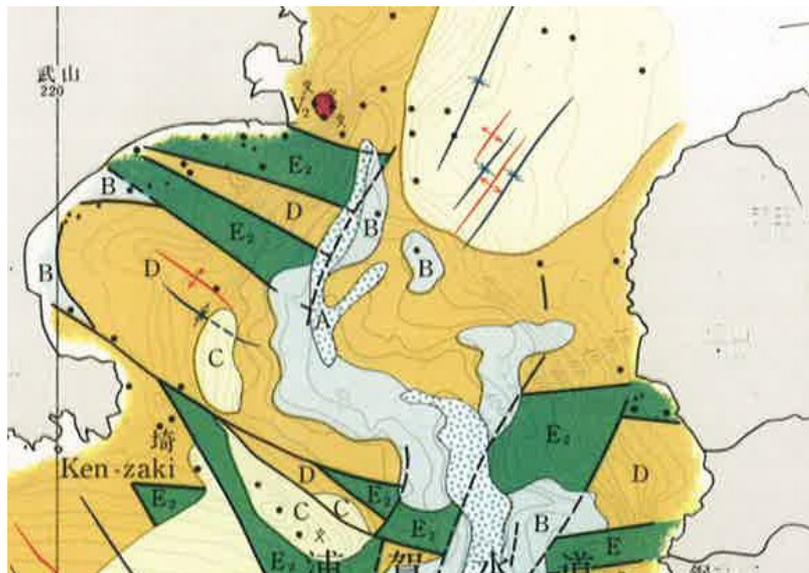
東京湾海底の地質図ーどの地盤が軟弱かー

-  A層: 海底谷低堆積物.....N値=0~8程度
-  B層: 相模・下総層群に相当.....N値=30程度
-  C層: 上総層群に相当.....N値=50程度
-  D層: 三浦層群に相当.....N値=100以上
-  E₁層: 矢部累層群に相当.....N値=100以上
-  E₂層: 葉山・保田層群に相当.....N値=100以上



地質調査所：海洋地質図3 相模灘及
付近海底地質図，1976.

PL法(液状化危険度評価)

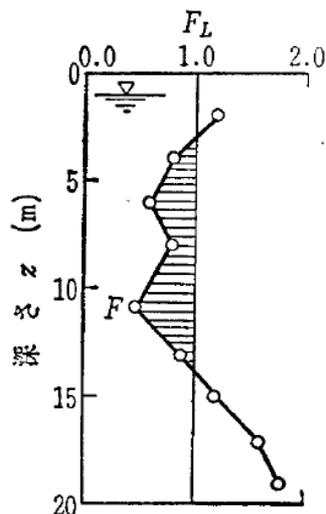


$P_L = 0$	液状化危険度はかなり低い
$0 < P_L \leq 5$	液状化危険度は低い
$5 < P_L \leq 15$	液状化危険度は高い
$15 < P_L$	液状化危険度は極めて高い

PL法:

ボーリング調査で得られたN値から対象地盤の液状化危険度を評価することが可能な簡易判定法

$$P_L = \int_0^{20} F_L \cdot \omega(z) dz \quad F_L = \frac{R}{L}$$



PL: 液状化指数

FL: 土の要素の安全率

z: 深度[m]

ω : 重み関数

R: 液状化に対する動的せん断強度比,

L: 地震時せん断応力比

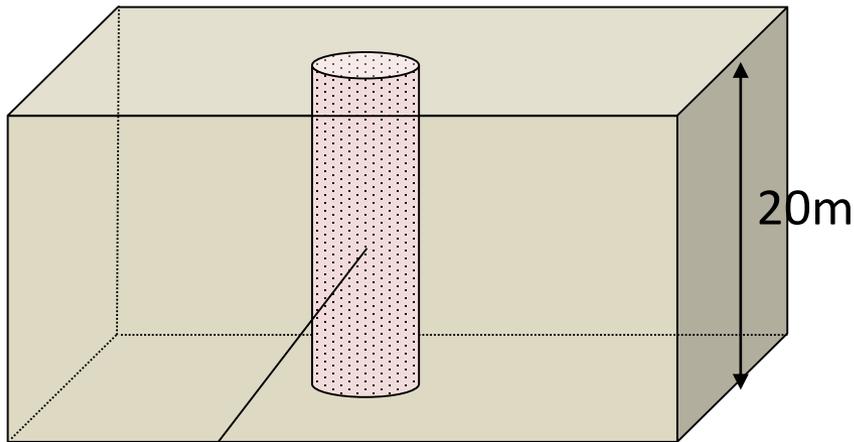
岩崎敏男, 龍岡文夫, 常田賢一, 安田進: 地震時地盤液状化の程度の予測について, 土と基礎, Vol.28, No.4, pp.23-29, 1980.



PL法(液状化危険度評価)

Case	N	土質種類	D ₅₀	FC	γ_{t2}
1	1	シルト質細砂	0.07	60.22	1.80
2	5	微細砂	0.10	34.96	1.85
3	8	細砂	0.15	23.72	1.95
4	10	中砂	0.35	18.18	2.00
5	20	粗砂	0.60	1.86	2.00
6	37.75	砂礫	2.00	0.0	2.10
7	50	砂礫	2.00	0.0	2.10

一様なN値を持つ地盤が20mあると仮定



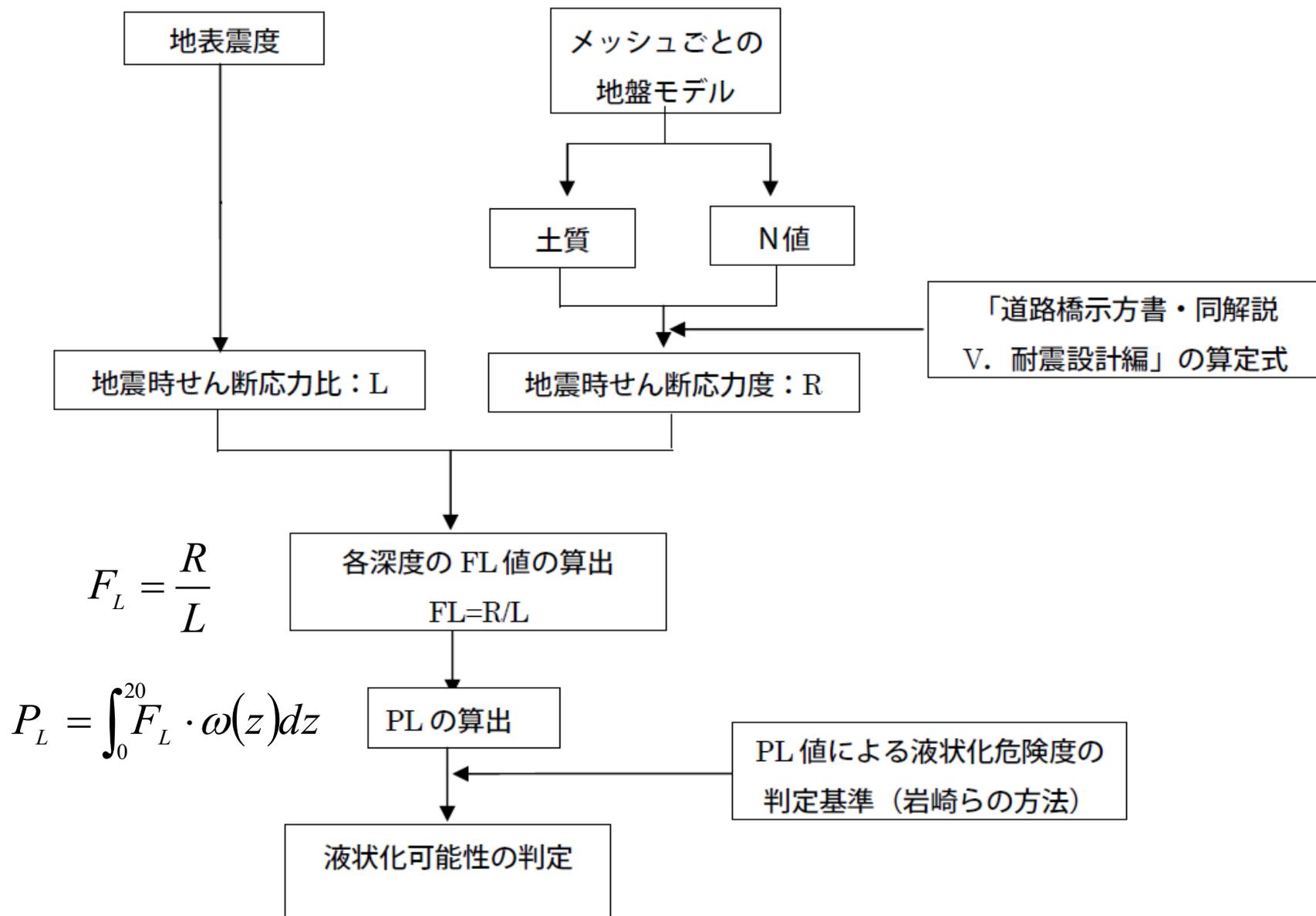
N値毎に土質の種類を定義し各種パラメータを設定

設計予測深度:地震動の規模のレベル
0.15(レベル1) :震度5強の揺れ
0.54(レベル2タイプ1):関東大震災規模の揺れ
0.70(レベル2タイプ2):神戸地震規模の揺れ

(社)日本道路協会:道路橋示方書(V耐震設計編)・同解説に従って
液状化の計算を行う



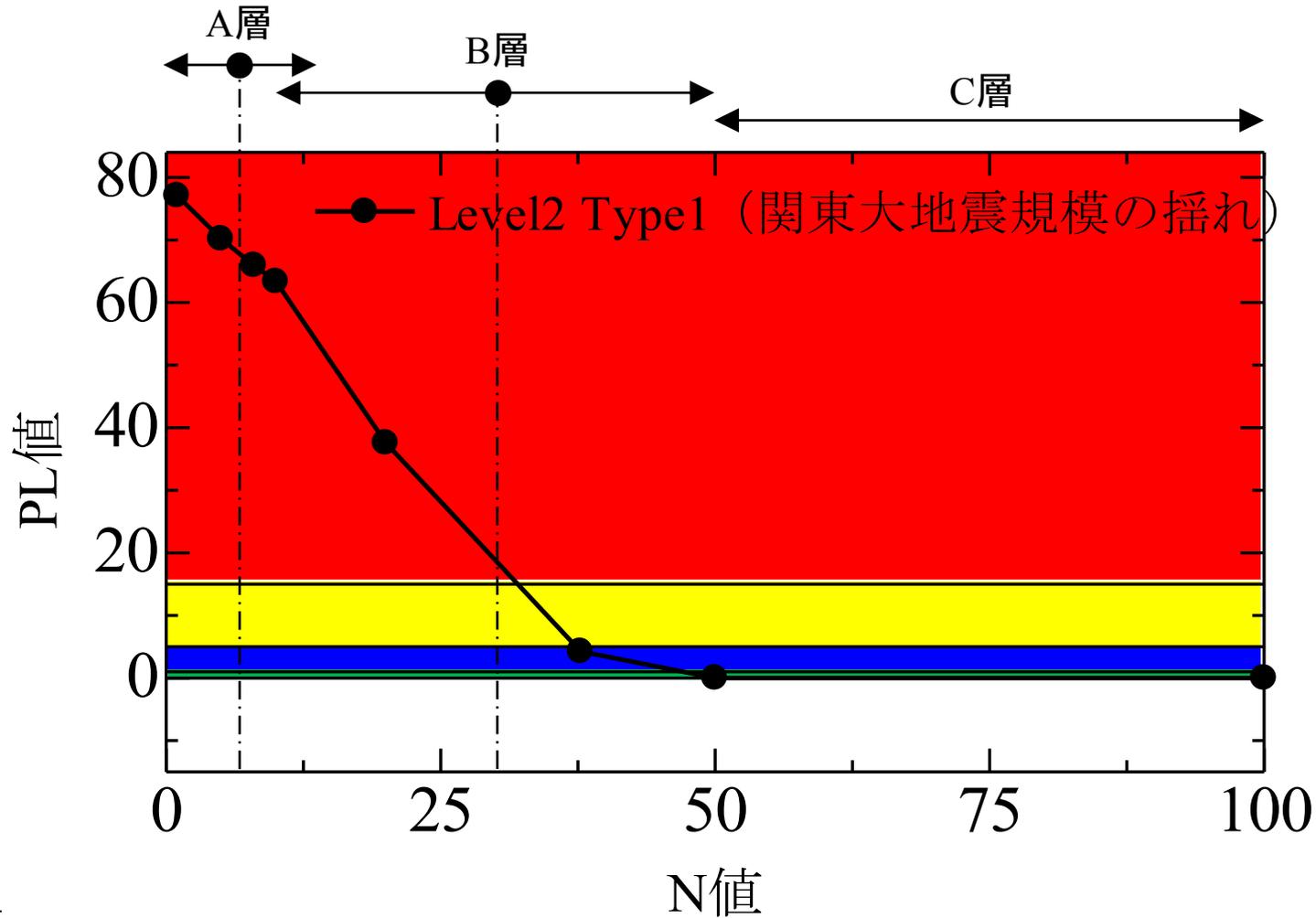
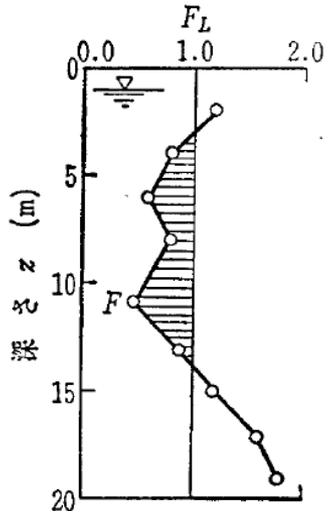
液状化判定の流れ



PL法:ボーリング調査で得られたN値から地盤の液状化危険度を評価可能な簡易判定法

$$P_L = \int_0^{20} F_L \cdot \omega(z) dz$$

$$F_L = \frac{R}{L}$$



PL: 液状化指数

FL: 土の要素の安全率

z: 深度[m]

ω : 重み関数

R: 液状化に対する動的せん断強度比

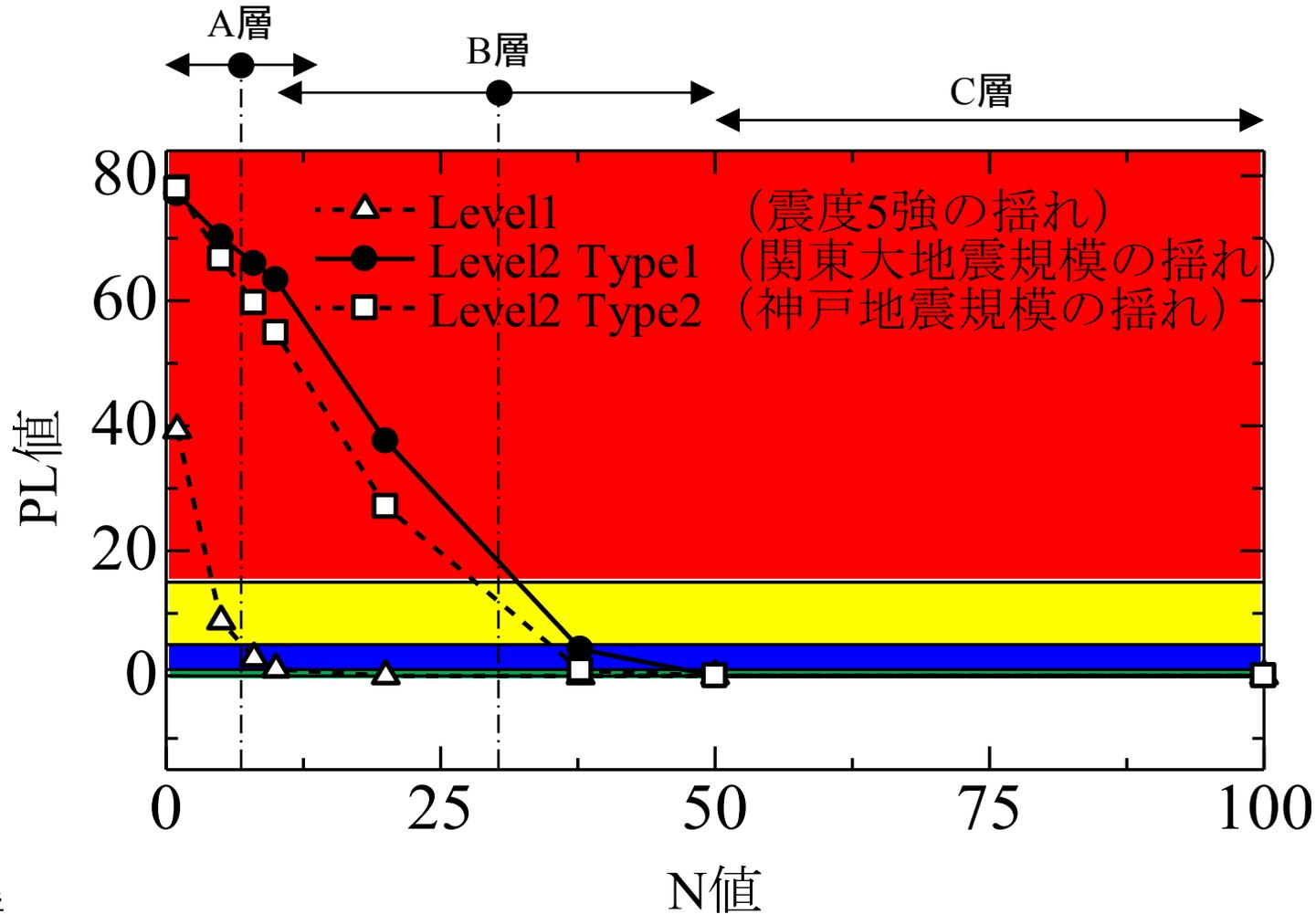
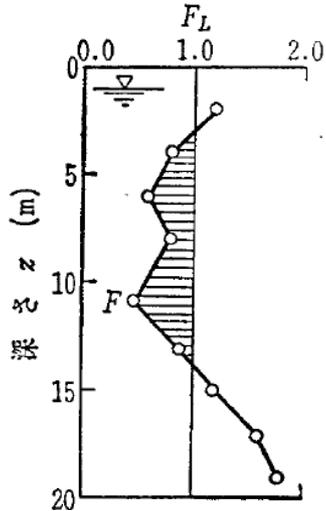
L: 地震時せん断応力比

$15 < P_L$	液状化危険度は極めて高い
$5 < P_L \leq 15$	液状化危険度は高い
$0 < P_L \leq 5$	液状化危険度は低い
$P_L = 0$	液状化危険度はかなり低い

PL法:ボーリング調査で得られたN値から地盤の液状化危険度を評価可能な簡易判定法

$$P_L = \int_0^{20} F_L \cdot \omega(z) dz$$

$$F_L = \frac{R}{L}$$



PL: 液状化指数

FL: 土の要素の安全率

z: 深度[m]

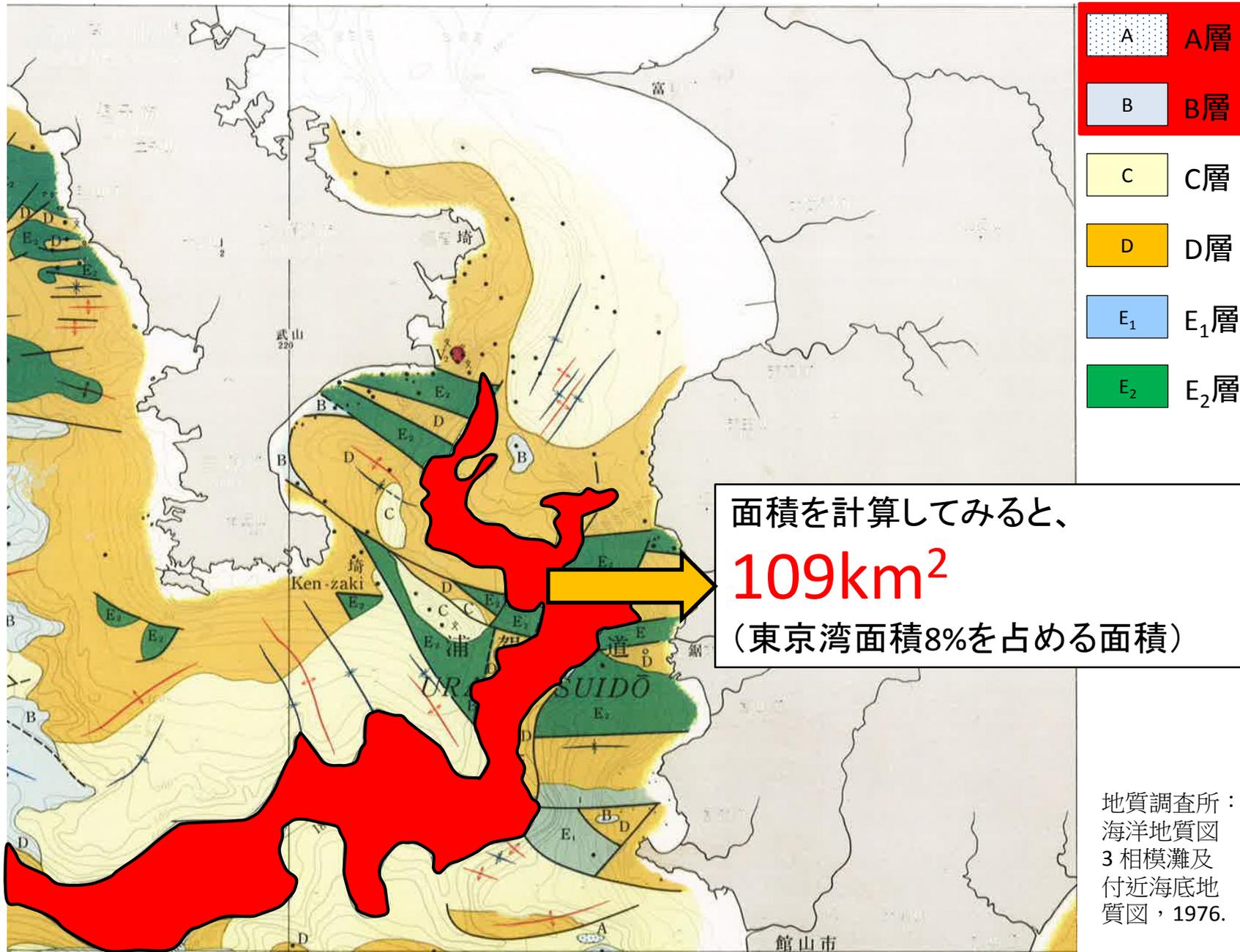
ω : 重み関数

R: 液状化に対する動的せん断強度比

L: 地震時せん断応力比

$15 < P_L$	液状化危険度は極めて高い
$5 < P_L \leq 15$	液状化危険度は高い
$0 < P_L \leq 5$	液状化危険度は低い
$P_L = 0$	液状化危険度はかなり低い

A・B・C層は地震時に流動すると考えなければならない



地滑りのパラメータと励起する波

- 地滑りフロントの終端速度

$$U_{\text{term}} = \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) \frac{2gz(\sin\theta - f\cos\theta)}{C_F}}$$

- 表面波の速度

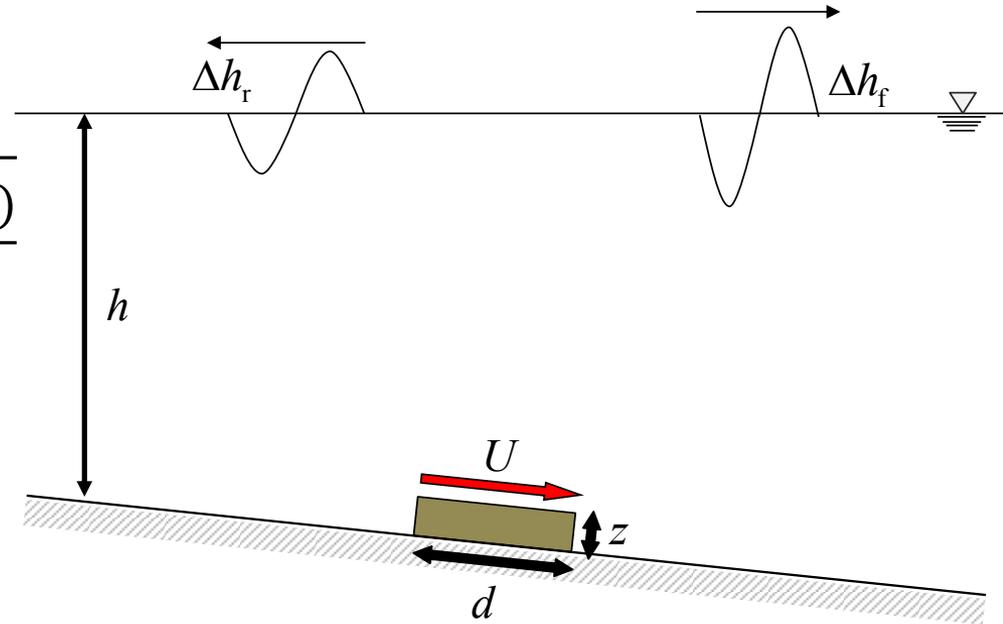
$$c = \sqrt{\frac{gd \tanh(\pi h/d)}{\pi}}$$

- 前方波の高さ

$$\Delta h_f \sim z \frac{c}{c - U} \exp(-\pi h/d)$$

- 後方波の高さ

$$\Delta h_r \sim z \frac{c}{c + U} \exp(-\pi h/d)$$



ρ_s, ρ_w	: 堆積物と海水の密度
θ	: 斜面の水平からの角度
C_F	: 流体力学的な抵抗係数
$\Delta h_f, \Delta h_r$: 地滑り前方と後方に伝搬する波の高さ
z	: 地滑りの高さ
d	: 地滑りの長さ
h	: 水深
U	: 地滑りの速度
g	: 重力加速度
k	: 発生する波の波数
$U \doteq U_{\text{term}}$	

浅海域の方がより影響は大きい

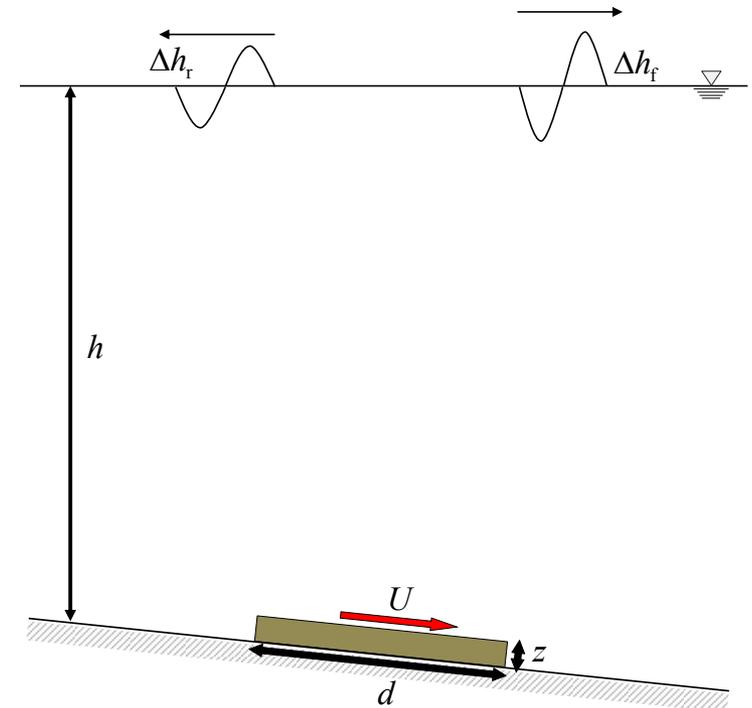
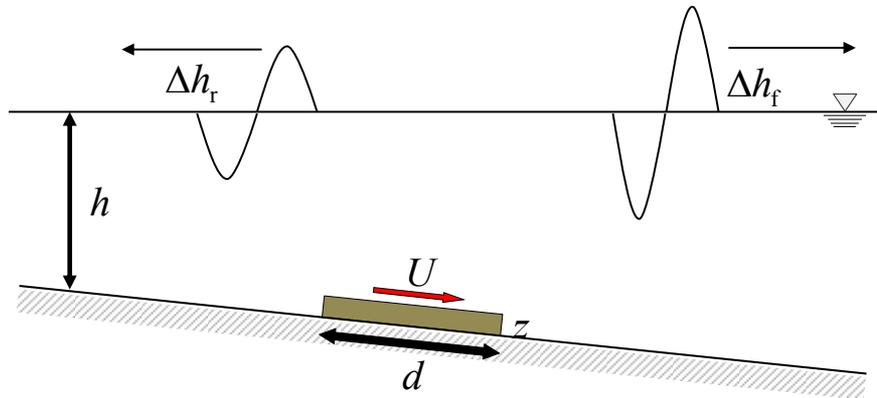
Harbitz, C.B. (1992): Model simulations of tsunamis generated by Storegga slides. Marine Geology, 105, 1-21.

- 後方波の高さ

$$\Delta h_r \sim z \frac{c}{c+U} \exp(-\pi h/d)$$

- 前方波の高さ

$$\Delta h_f \sim z \frac{c}{c-U} \exp(-\pi h/d)$$



- $\Delta h_f, \Delta h_r$: 地滑り前方と後方に伝搬する波の高さ
- z : 地滑りの高さ
- d : 地滑りの長さ
- h : 水深
- U : 地滑りの速度 ($\equiv U_{\text{term}}$)
- g : 重力加速度

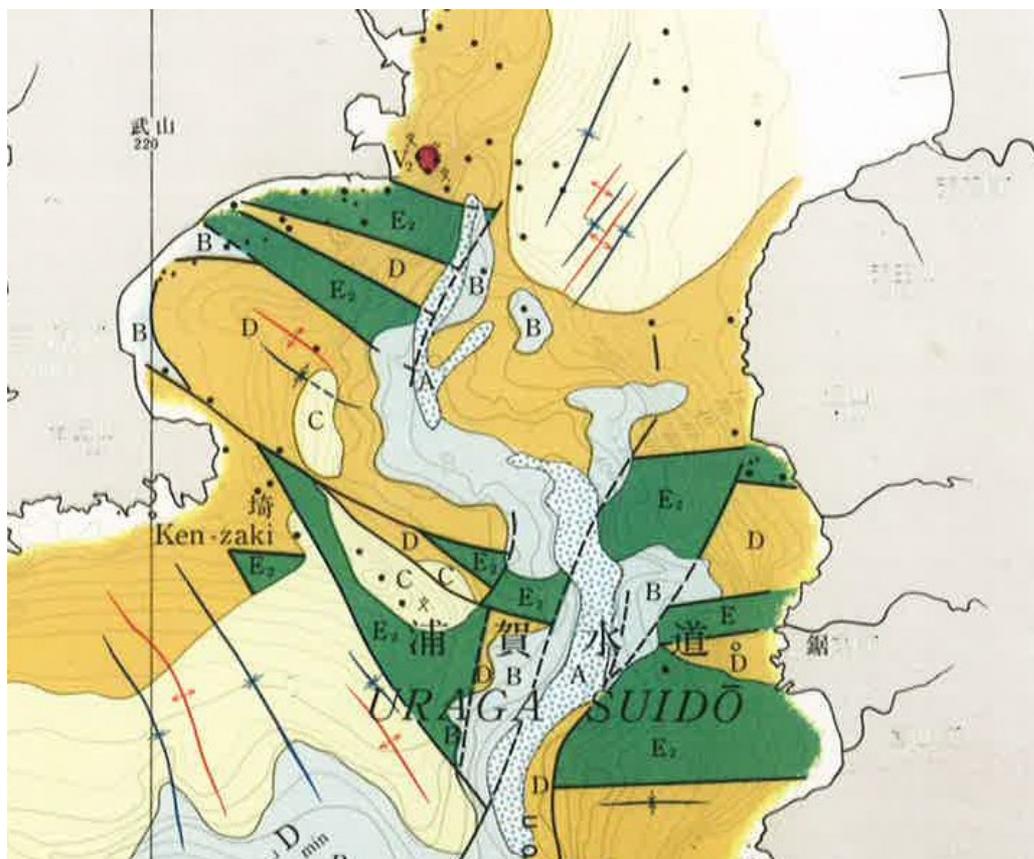
水深が浅い場合 (= 数十m等)

exp項の影響が出るため小さい地すべりでも大きな津波が発生する。

水深が深い場合 (= 数千m等) はたとえ大きな地滑りが発生してもその影響は水深に伴い小さくなる

海底地すべりによる津波災害を確実に防ぐためには

地盤が軟弱と予想される危険なA層・B層の地すべりを防ぐことを考えていかなければならない



久里浜-富津湊付近の崖上面が崩れることを考えると

hf=12m程度の波が発生する可能性がある。(北側の湾内に向かって波及した場合)

大正関東地震では → 1.0m程度
元禄関東地震では → 2.0m程度

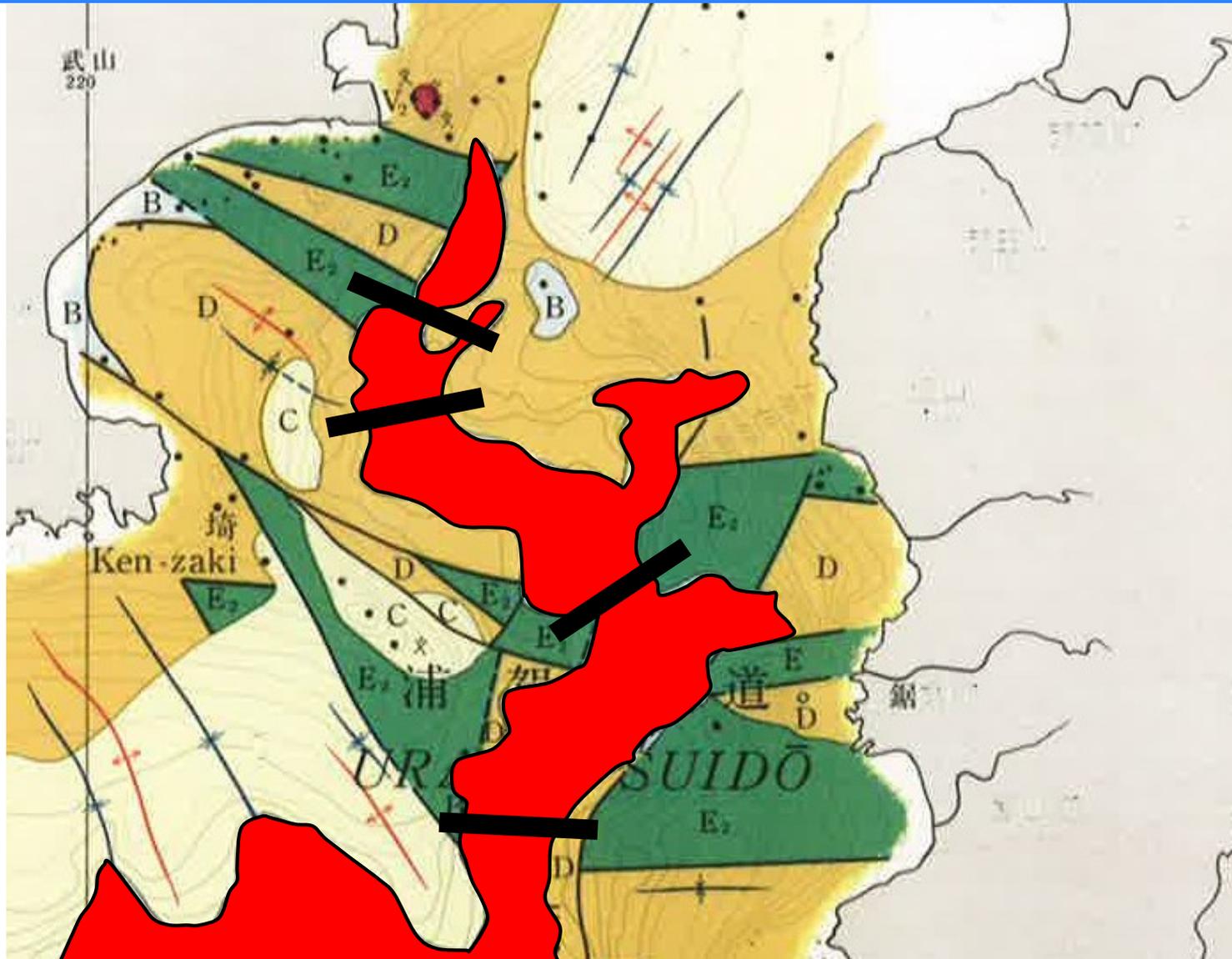
崖の一部の地盤が崩れたケースと考えられる。

津波増大の可能性を確認するために湾口部の詳細な調査が必要である。



海底地すべりによる津波災害を確実に防ぐためには

地盤が軟弱と予想される危険なA・B・C層の流動化を防ぐことを考える



まとめ

1. A層は危険、B層は一部の場所によっては危険であることから地滑りが発生する地盤であると注視した方が良い。
2. 久里浜-富津湊に位置する崖付近での地滑りを考えると規模は、およそ12mとなる可能性が高い。
3. 大正関東地震時は、その一部のみが崩れた可能性が高い。
4. 津波増大の可能性を確認するために、湾口部の海底地盤の調査を精密に行っていくことが今後重要な課題となる。
5. 海底地滑り防止策は、①砂防ダムの建設、②薬液注入工法等で防止することが有効でありそう。砂防ダムの場合は強度が高いとD, E層相当の地層に直接固定し、複数設けることでその安全性を高められる。



ご清聴ありがとうございました

