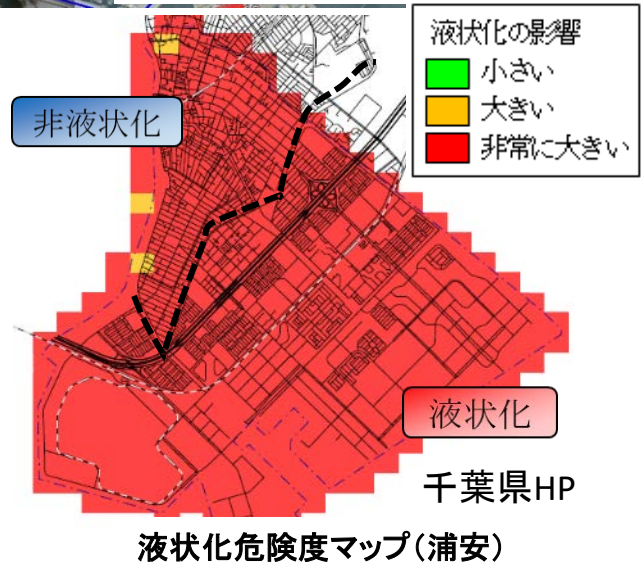
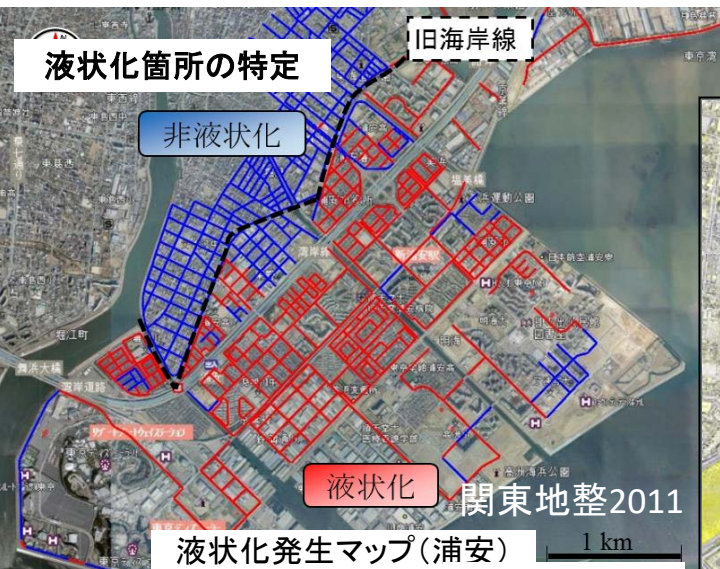


液状化防災の高度化に関する研究紹介

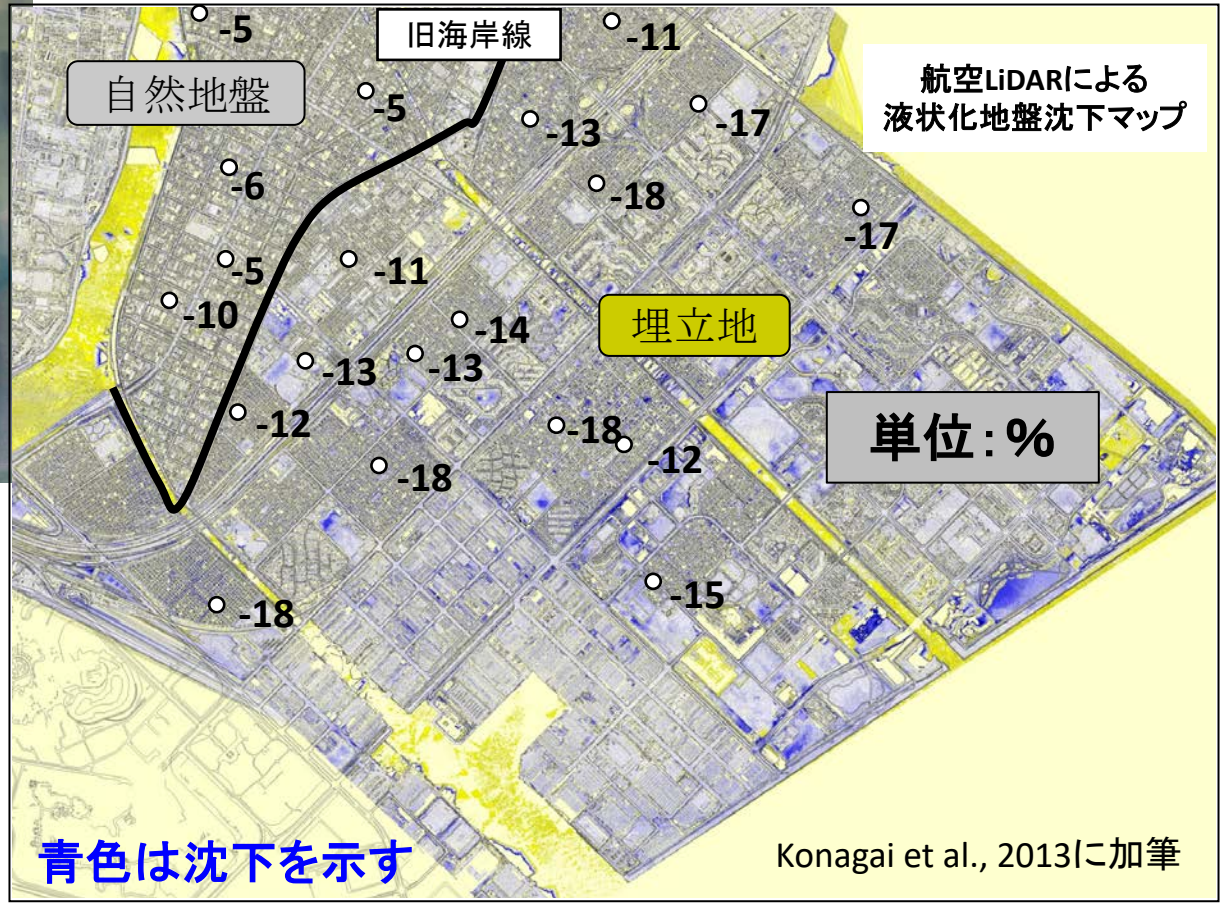
東京大学生産技術研究所

清田 隆

液状化強度予測に伴う問題



公示地価の変動(東日本大震災の前後)



液状化防災に関する問題

液状化強度予測 地価への影響、インフラ・構造物への莫大な過剰投資、対策の遅れ

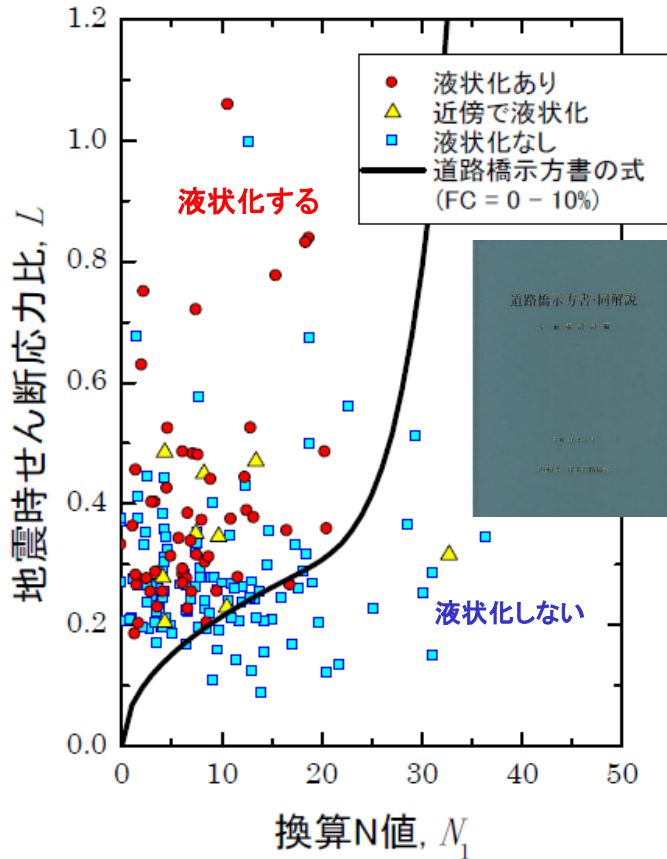
液状化強度予測の現状

標準貫入試験(N値)に基づく簡易判定の現状

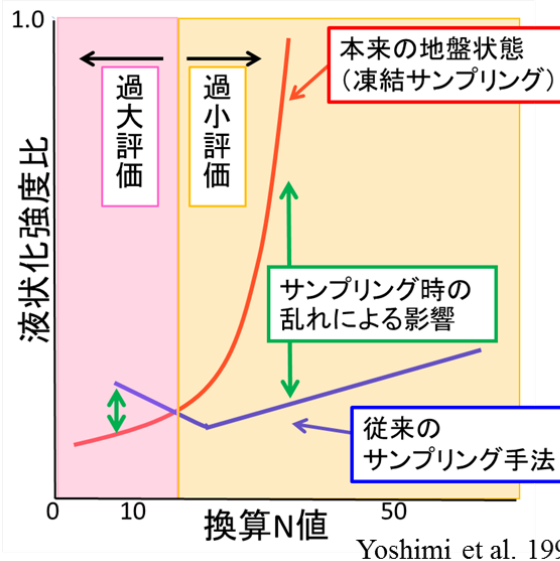
- ✓ 見逃しはほとんどないが、非液状化箇所の70%以上の地点で液状化強度を過小評価
- ✓ 液状化判定ラインを動かしても解決できない

乱れの少ない試料による室内実験の現状

- ✓ 液状化検討の対象となる緩～中密の砂に対し、従来のチューブサンプリング法(トリプル・固定ピストン式等)ではその品質に問題がある。



東北地方太平洋沖地震時の液状化の実態
換算N値と地震時せん断応力比Lの関係
(土木研究所, 2014)



液状化防災に関する問題

地価への影響、インフラ・
建造物の耐震化への過
剰投資、それに伴う対策
の遅れに繋がる

Yoshimi et al. 1994より

液状化強度に影響を及ぼす諸要因

ある砂の液状化強度に及ぼす要因
(地盤種別は当然として)

Seed, 1979

- ①密度
- ②土粒子構造
- ③過去の地震等の応力履歴
- ④時間(年代)効果
- ⑤応力状態(K_0)



Prof. Harry Bolton Seed
(1922-1989)
ASCE website

液状化強度に影響を及ぼす諸要因

ある砂の液状化強度に及ぼす要因

Seed, 1979

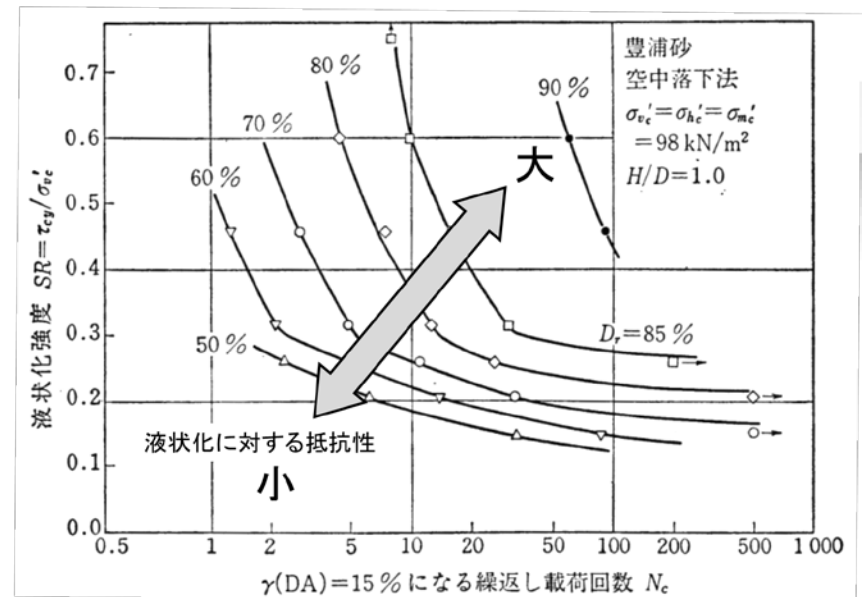
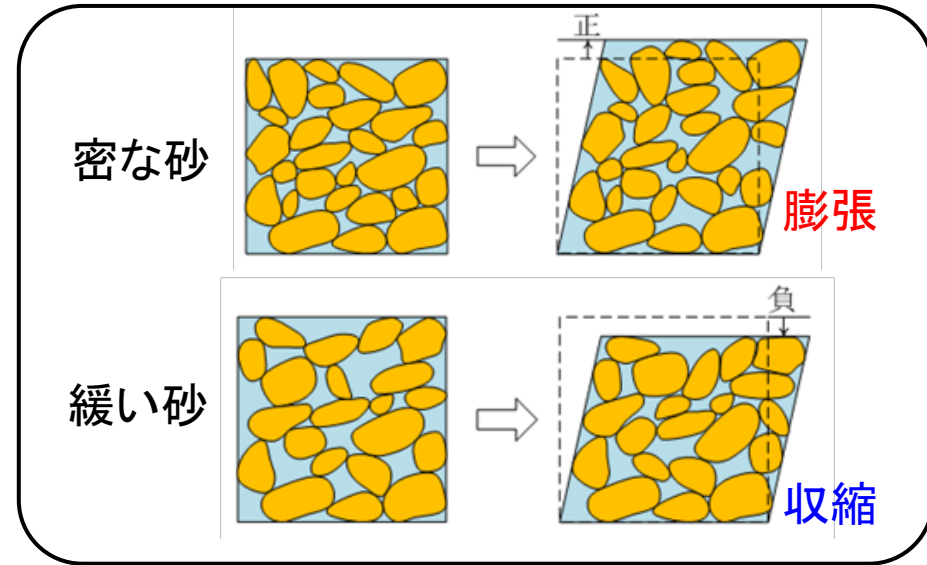
①密度

②土粒子構造

③過去の地震等の応力履歴

④時間(年代)効果

⑤応力状態(K_0)



Tatsuoka et al., 1982

液状化強度に影響を及ぼす諸要因

ある砂の液状化強度に及ぼす要因

Seed, 1979

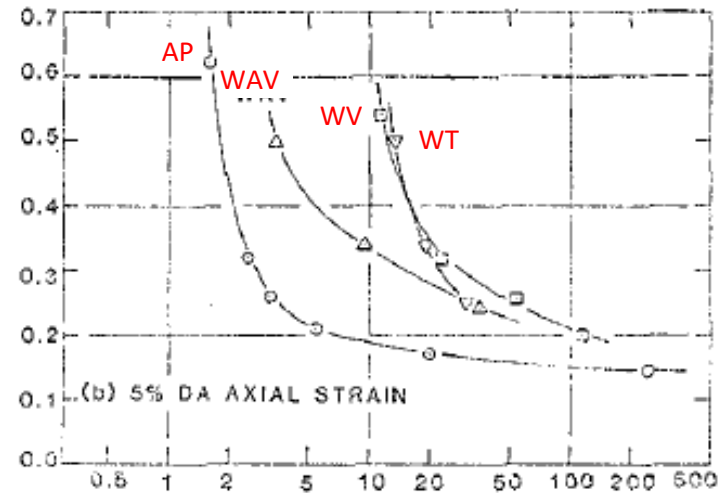
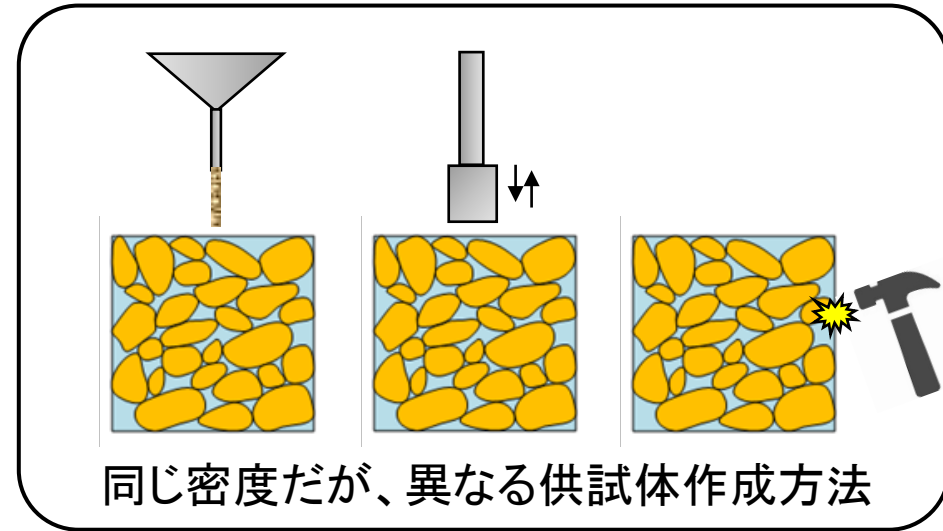
①密度

②土粒子構造

③過去の地震等の応力履歴

④時間(年代)効果

⑤応力状態(K_0)



$\gamma(\text{DA})=15\%$ になる繰返し載荷回数 N_c

土粒子配列・かみ合わせ・構造異方性の変化

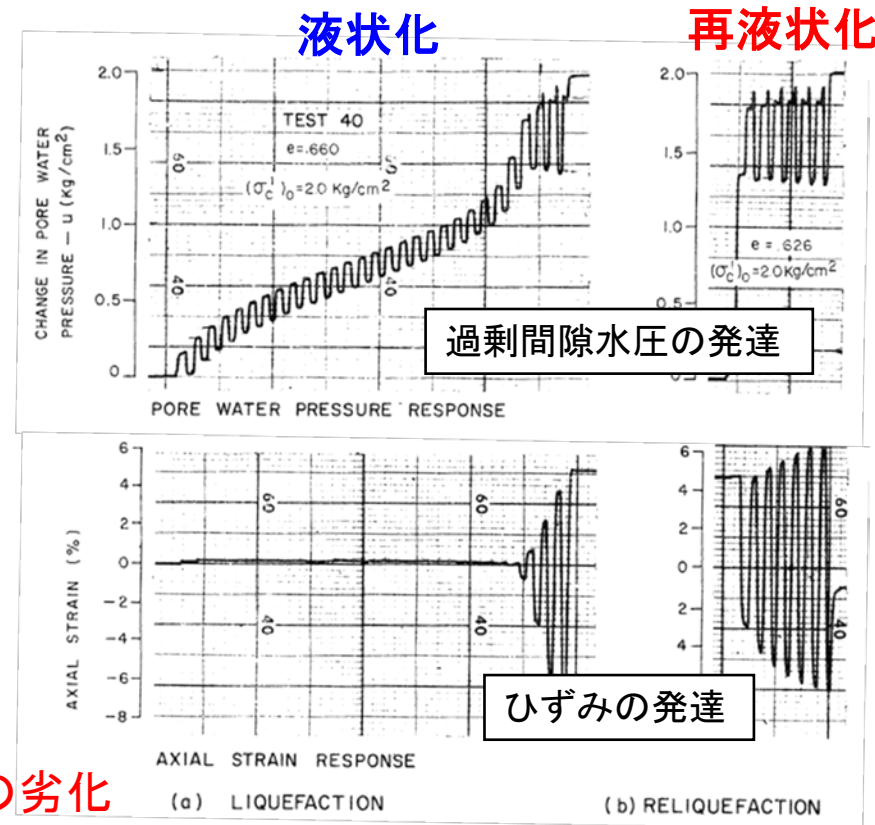
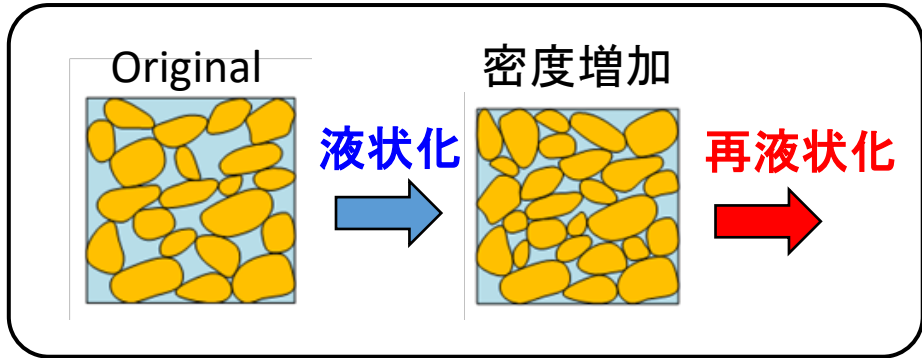
Tatsuoka et al., 1986

液状化強度に影響を及ぼす諸要因

ある砂の液状化強度に及ぼす要因

Seed, 1979

- ①密度
- ②土粒子構造
- ③過去の地震等の応力履歴
- ④時間(年代)効果
- ⑤応力状態(K_0)



土粒子構造の劣化
(強化すること)

Finn et al., 1970

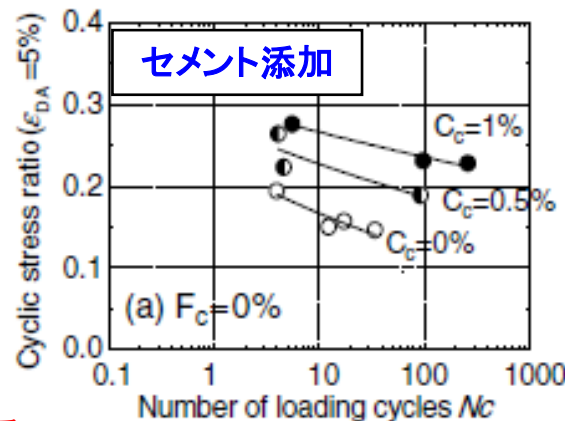
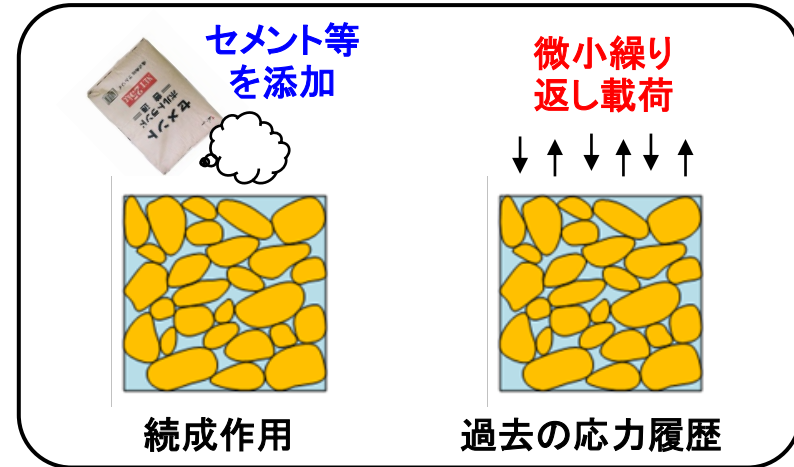
液状化強度に影響を及ぼす諸要因



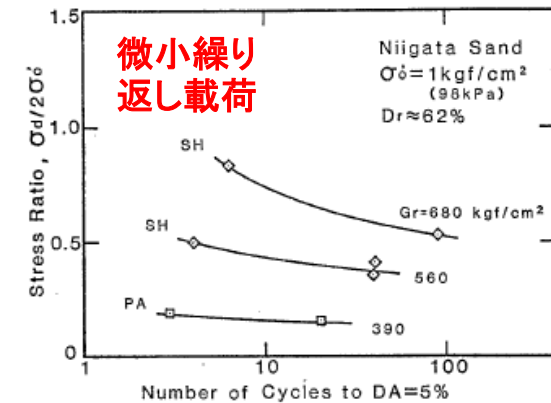
ある砂の液状化強度に及ぼす要因

Seed, 1979

- ①密度
- ②土粒子構造
- ③過去の地震等の応力履歴
- ④時間(年代)効果
- ⑤応力状態(K_0)



Kokusho et al., 2011



Tokimatsu et al., 1986

固着やかみ合わせ強化による
土粒子構造の安定

液状化強度に影響を及ぼす諸要因

ある砂の液状化強度に及ぼす要因

Seed, 1979

- ①密度
- ②土粒子構造
- ③過去の地震等の応力履歴
- ④時間(年代)効果
- ⑤応力状態(K_0)

既往研究のまとめ

密度の影響と別に、異方性、かみ合わせ、セメンテーションの強化・喪失により、異なる液状化強度が得られることが示されている

実務での適用例は非常に限られている
各要因が複雑に絡み合っている自然地盤の状況を把握することは困難

- ✓ 応力履歴や年代効果の程度に対応した土粒子構造が形成される

ある応力状態(K_0)の、ある地盤の液状化強度に及ぼす影響

①密度

②土粒子構造

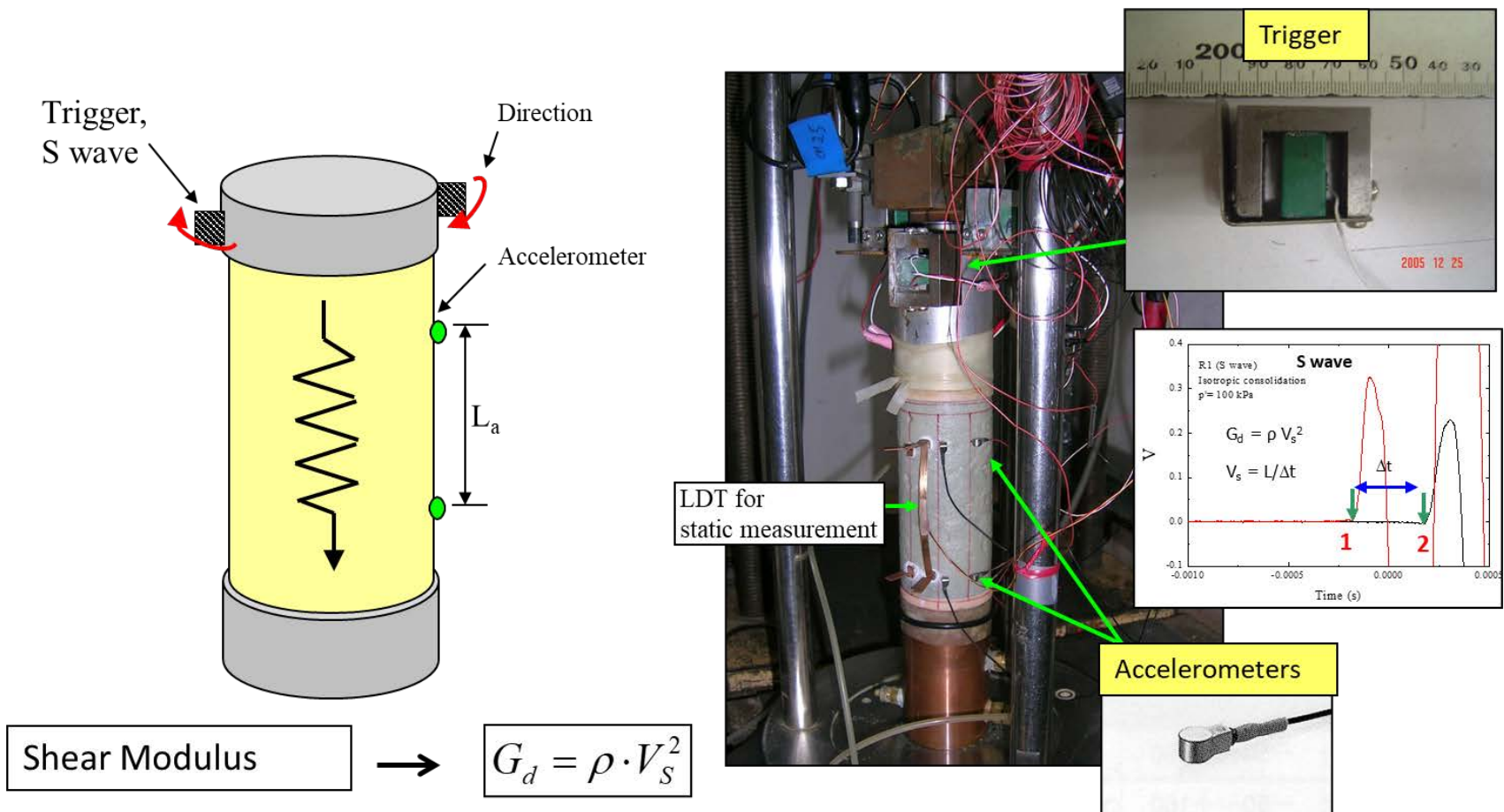
に集約されると解釈できる

- 実験試料は原位置と同じ応力履歴や地質年代を経験する必要はない
- 実験試料は、原位置と等価な密度と土粒子構造を有していればよい

土粒子構造は微小せん断剛性率 G_0 で説明できると仮定した系統的な実験を実施

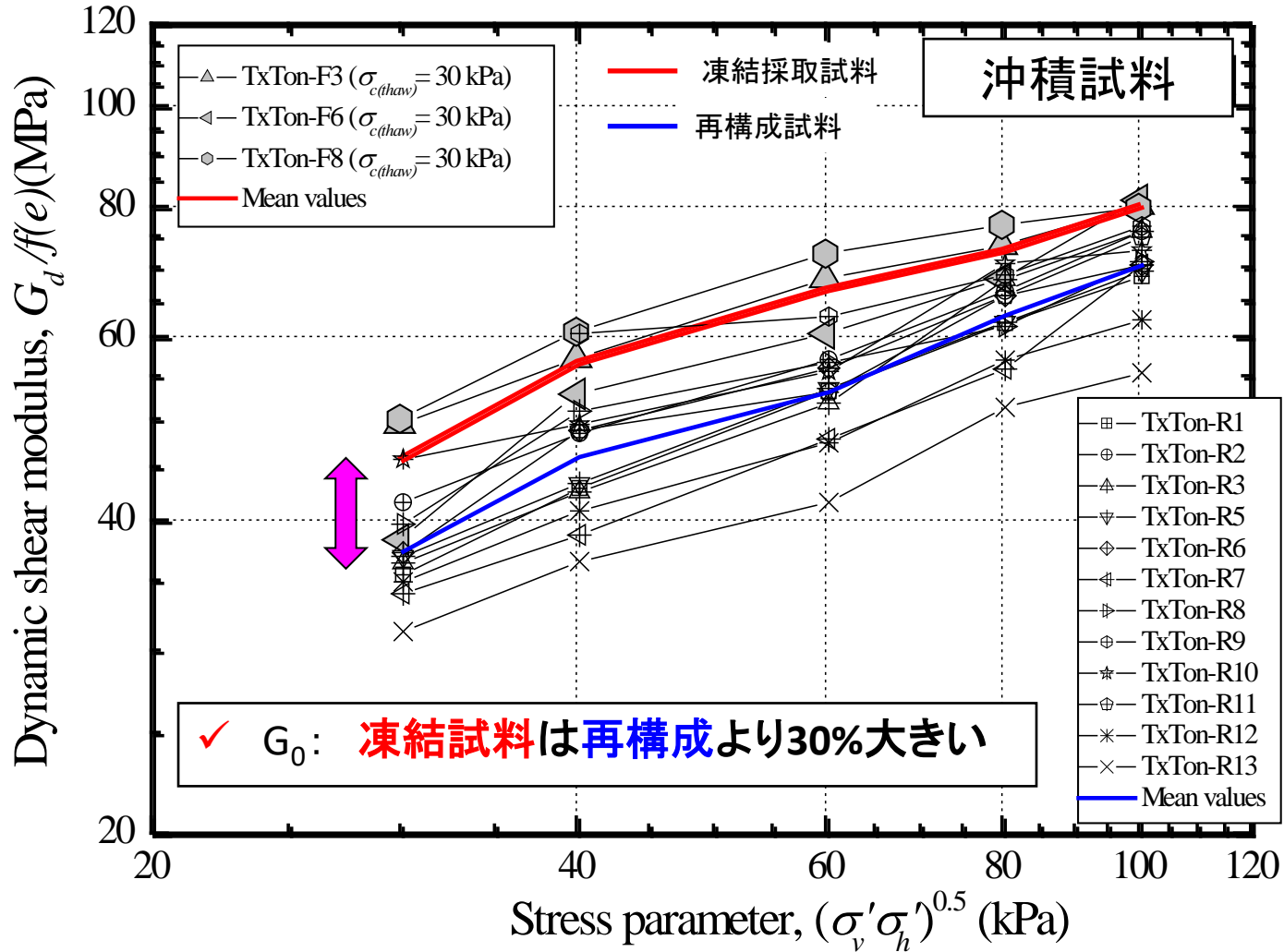
V_s 計測を併用した三軸液状化試験

微小せん断剛性率 $G_0 (= \rho V_s^2)$ が如何に土粒子構造の影響を反映するか...



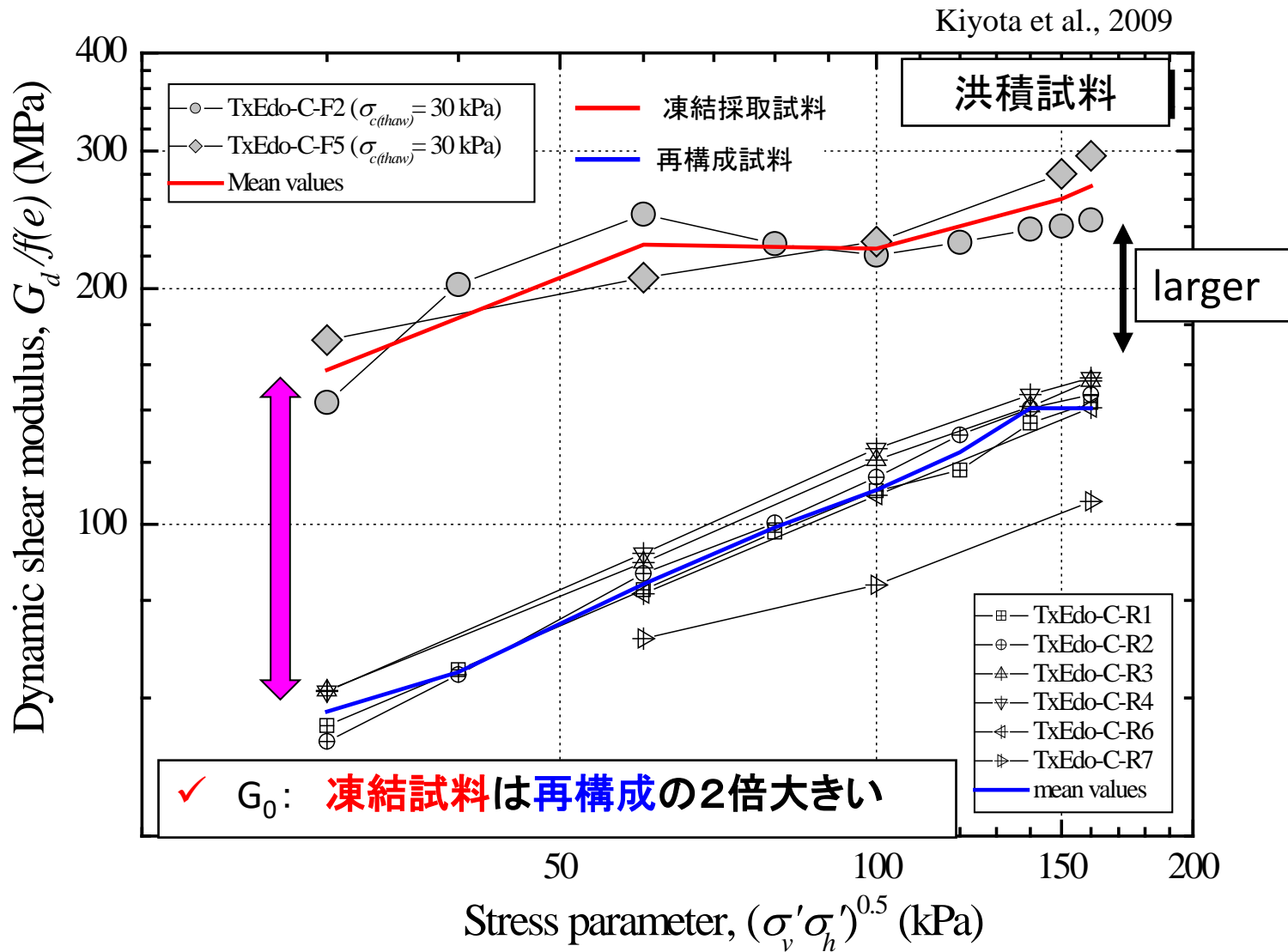
等方圧密時における微小せん断剛性率

Kiyota et al., 2009



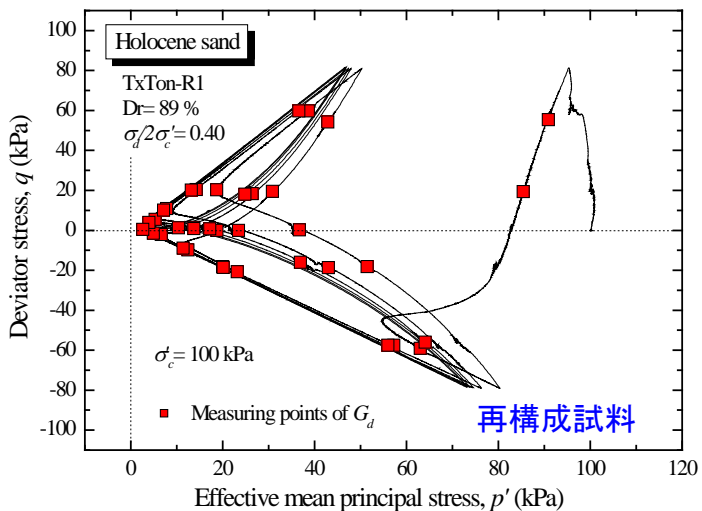
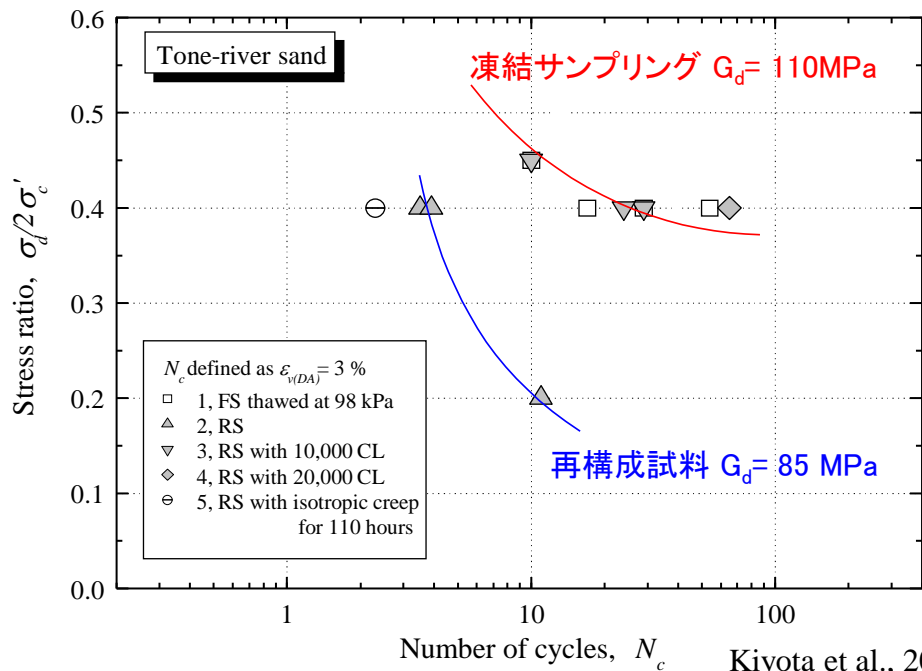
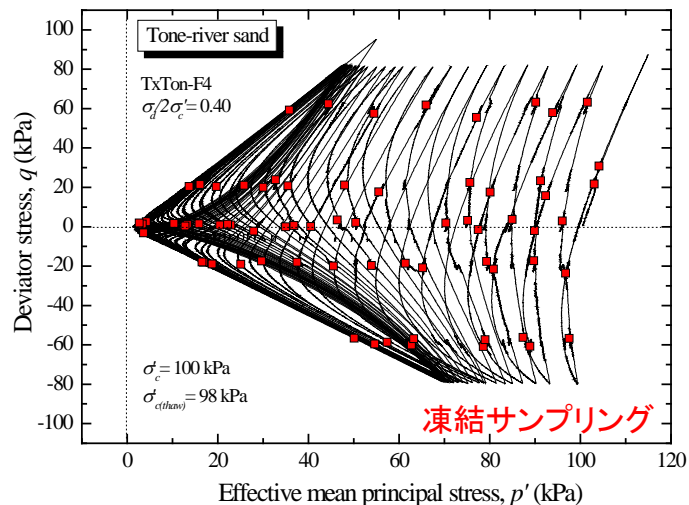
凍結採取試料と再構成試料の密度は同じ。
 よって、 G_0 の差は土粒子構造(年代効果)の程度を表す

等方圧密時における微小せん断剛性率



洪積試料の土粒子構造の影響(年代効果)は沖積試料より大きいと解釈できる

凍結試料と再構成試料の液状化強度の違い



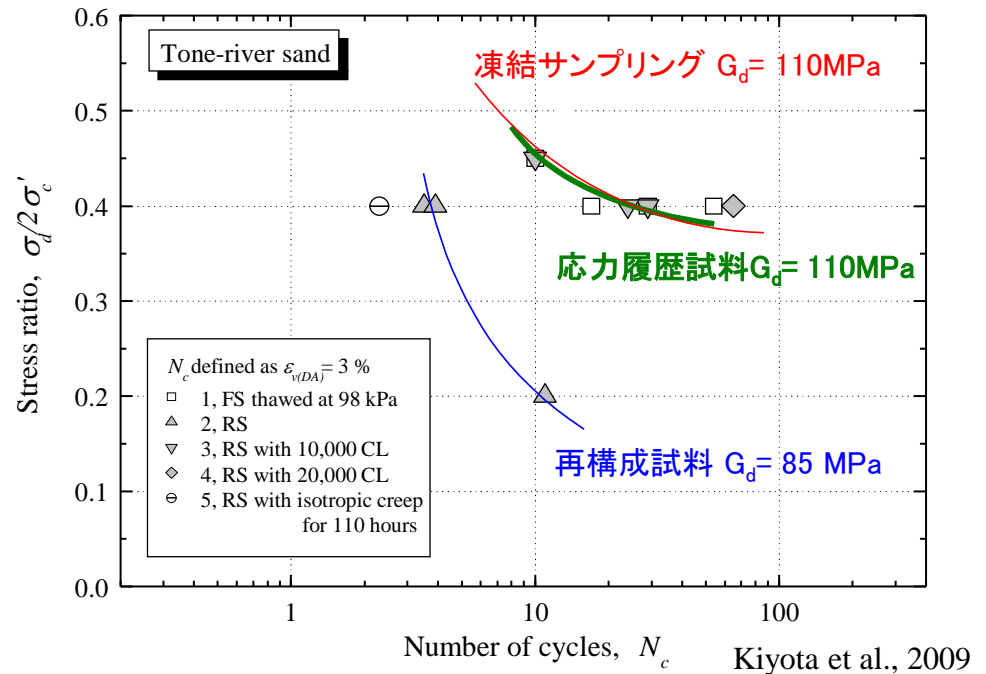
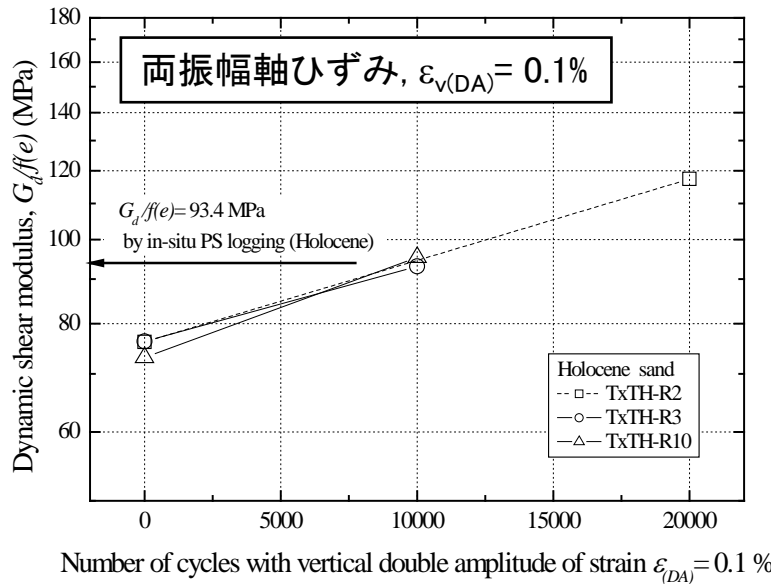
➤ 凍結試料と比較し、再構成試料のせん断剛性率と液状化強度は非常に小さい

➤ 密度は同じでも異なる強度・変形特性

➡ 土粒子構造(年代効果)の喪失

初期繰返し排水せん断の影響

せん断剛性率 G_0 が土粒子構造を反映するのであれば、再構成試料の G_0 を凍結試料の値に合わせてみれば？



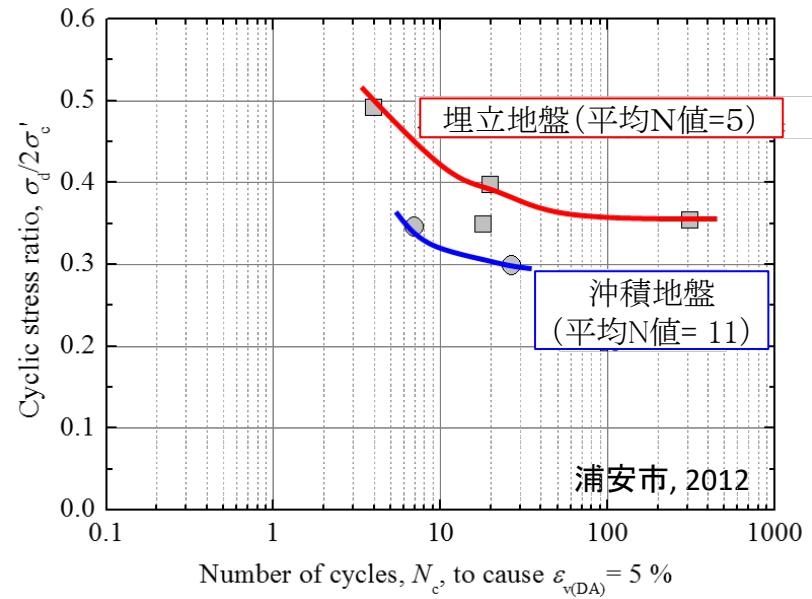
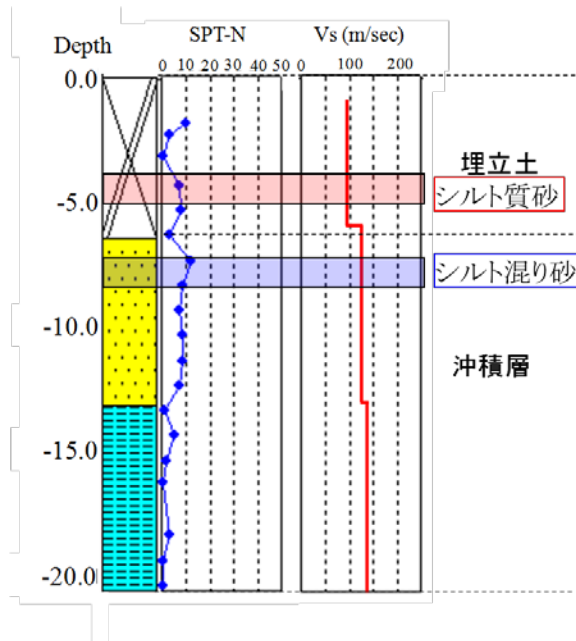
- 排水繰返し履歴により、せん断剛性率 G_0 が増加。体積変化は0.5%以下
- せん断剛性率増加の要因は、土粒子構造の強化(密度増加ではない)
- 密度とせん断剛性率 G_0 を凍結試料と同じにすると、液状化強度も同じになる

不攪乱試料による液状化試験結果 (浦安市)

調査地
本震で液状化



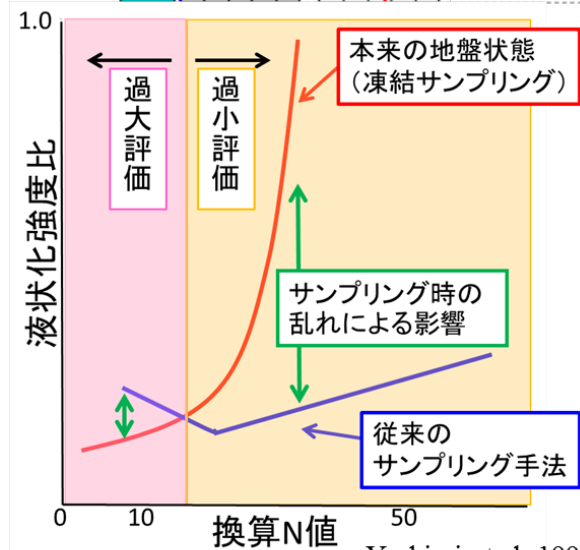
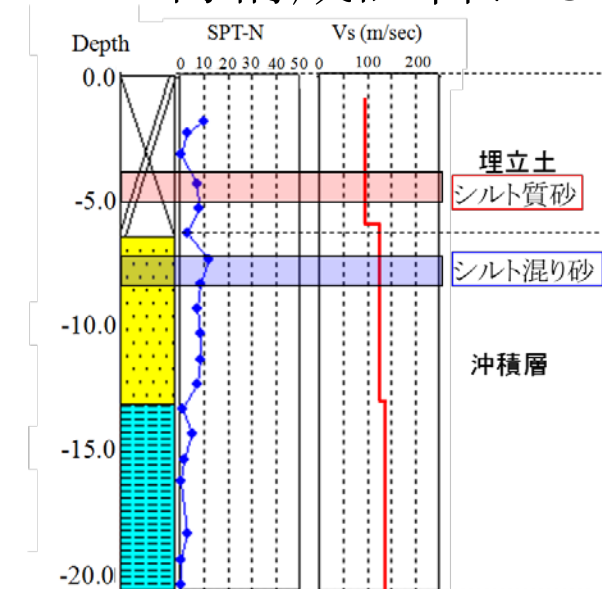
固定ピストン式シンウォールサンプリング



➤ 不攪乱試料を用いた実験結果は、一般的な理解と**整合しない**

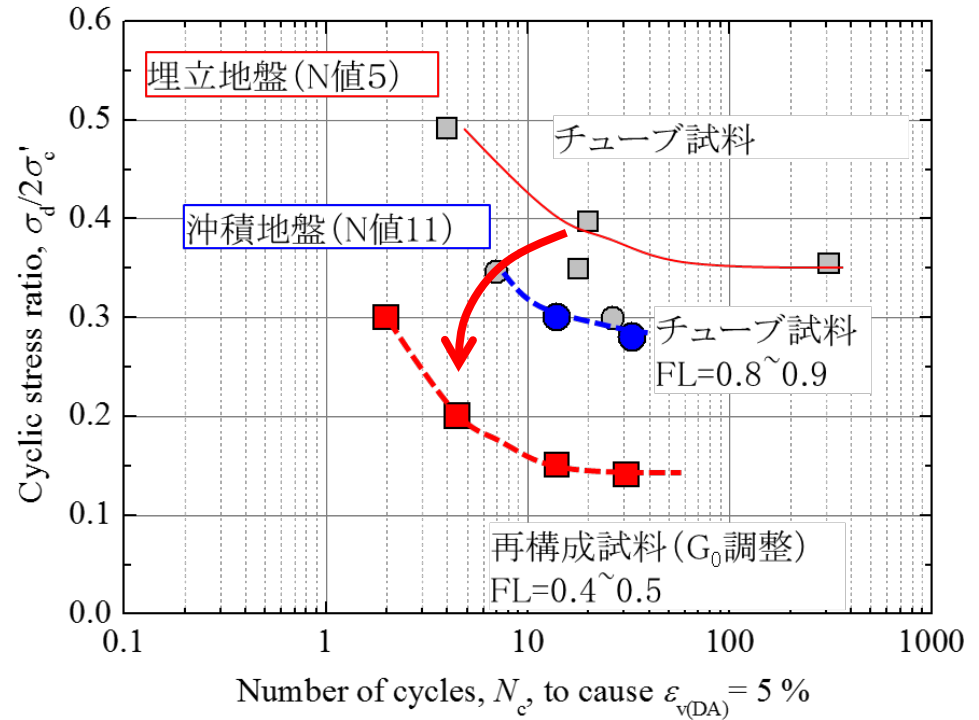
➤ N値=5の埋立地盤では、過大な液状化強度 ($CRR= 0.4$)

再構成試料による液状化試験結果 (浦安市)



Yoshimi et al. 1994より

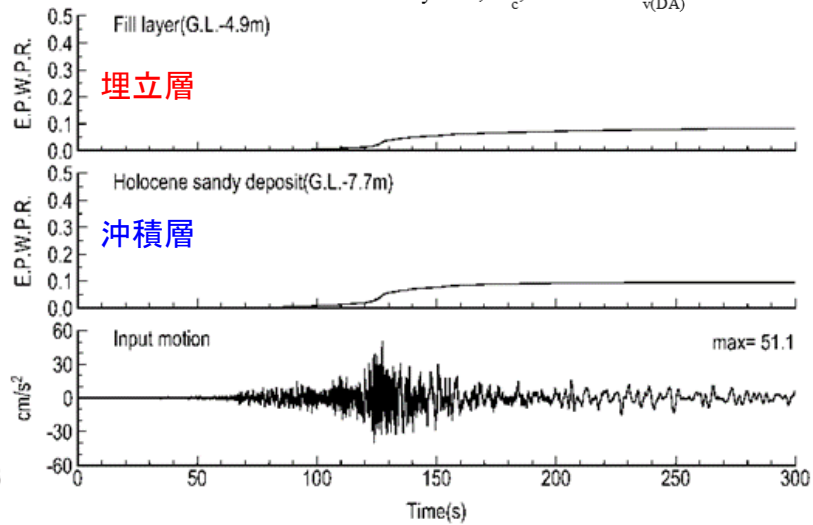
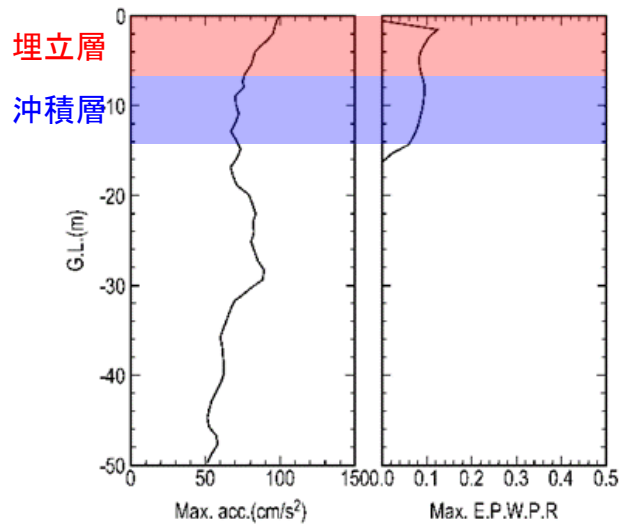
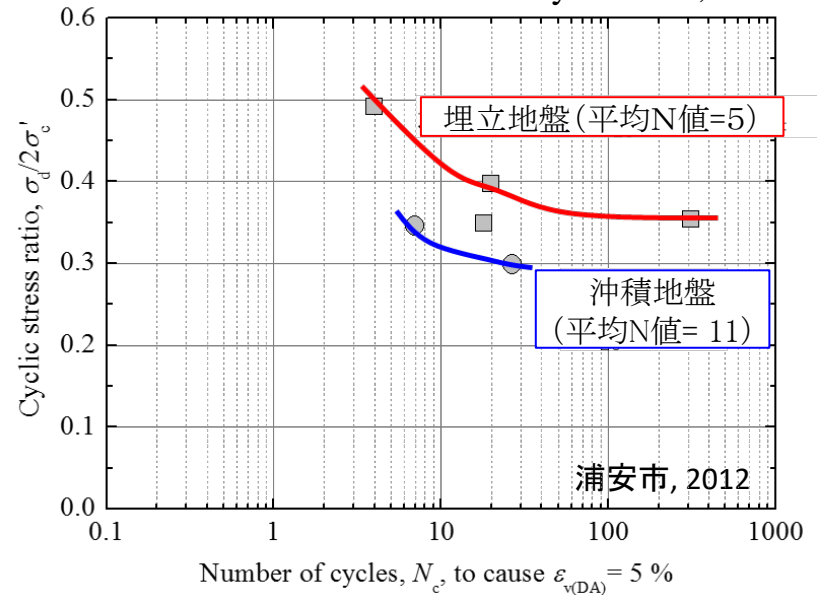
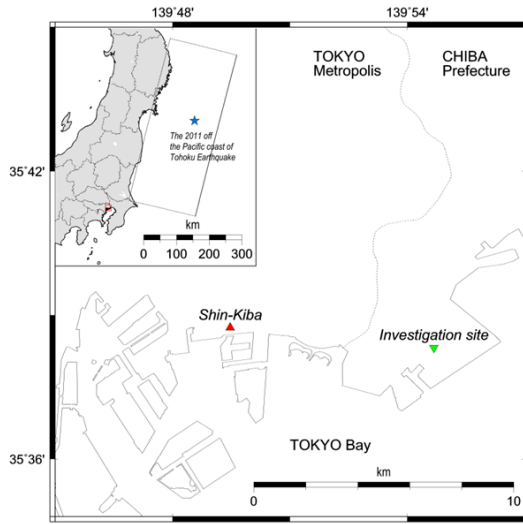
Kiyota et al., 2016



- チューブ試料の実験による液状化強度は、埋立 > 沖積 (チューブ試料の乱れ)
- 密度と G₀(Vs)を原位置に調整した埋立土の再構成試料は、事実と整合

YUSAYUSA-2による検証 (2011年東北地方太平洋沖地震)

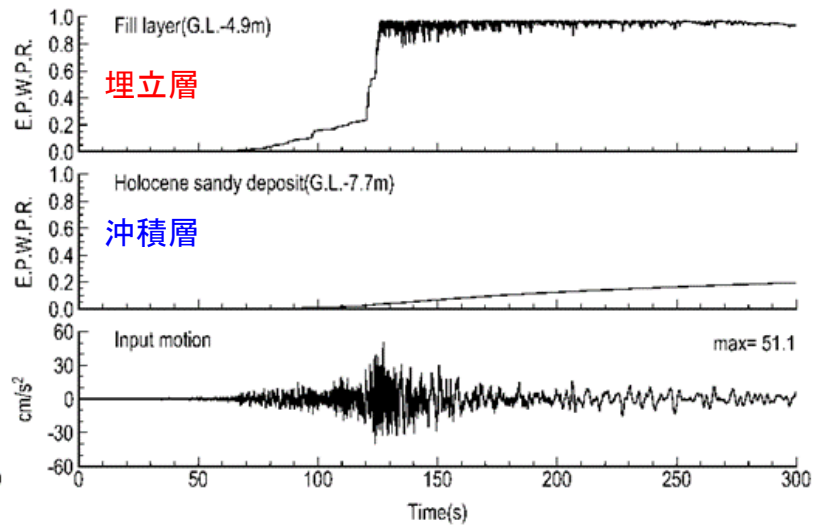
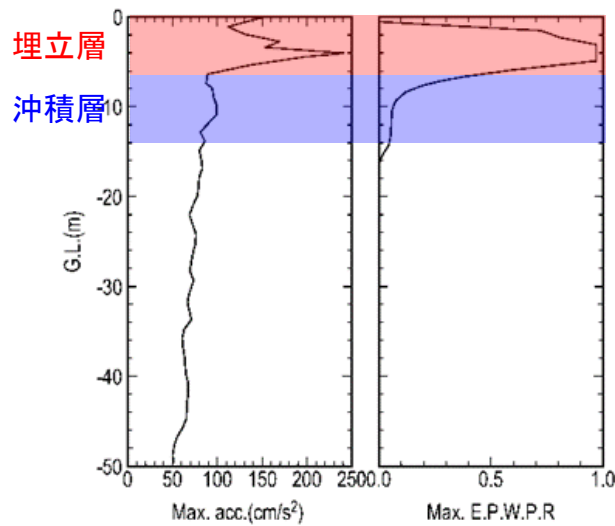
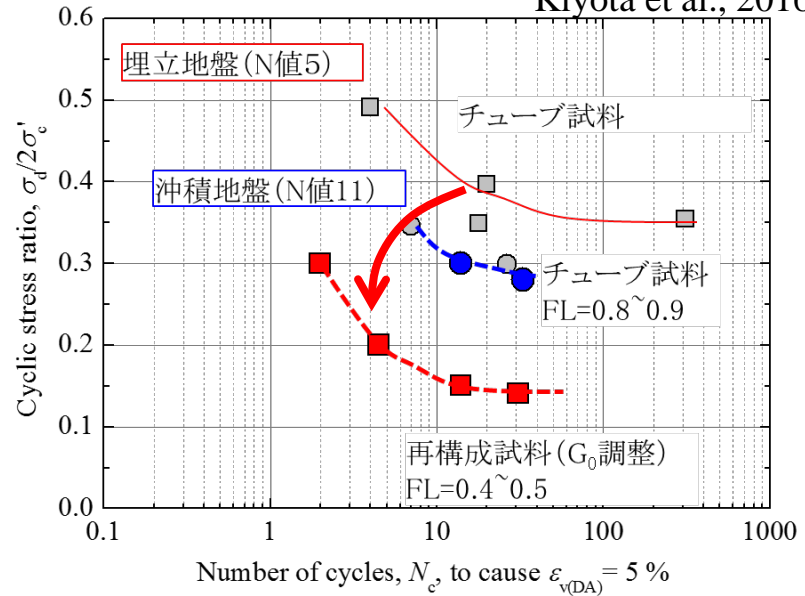
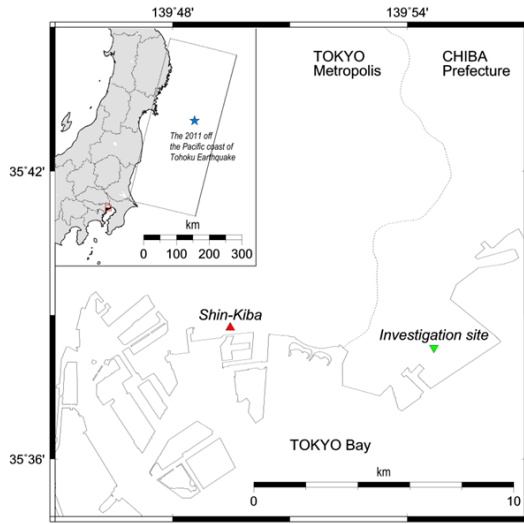
Kiyota et al., 2016



チューブサンプリング試料の実験結果を利用すると、埋立地盤は液状化しない

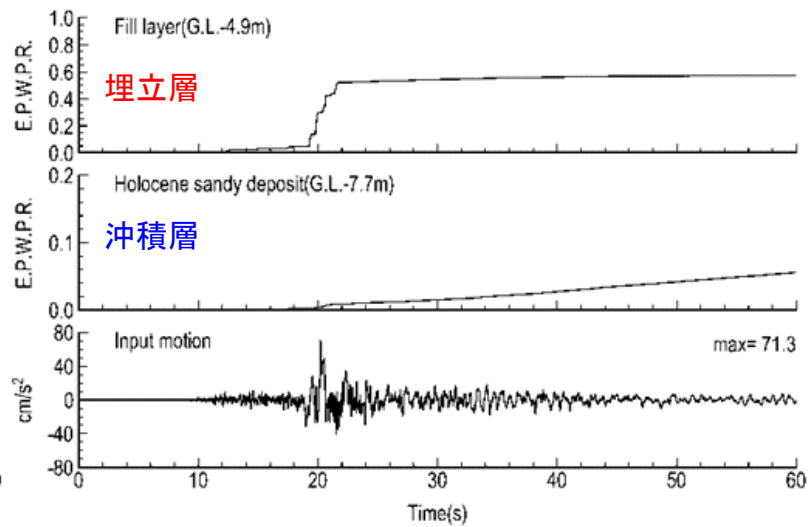
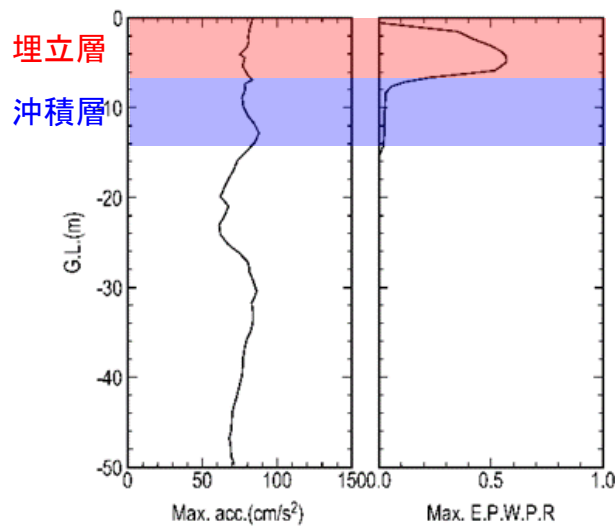
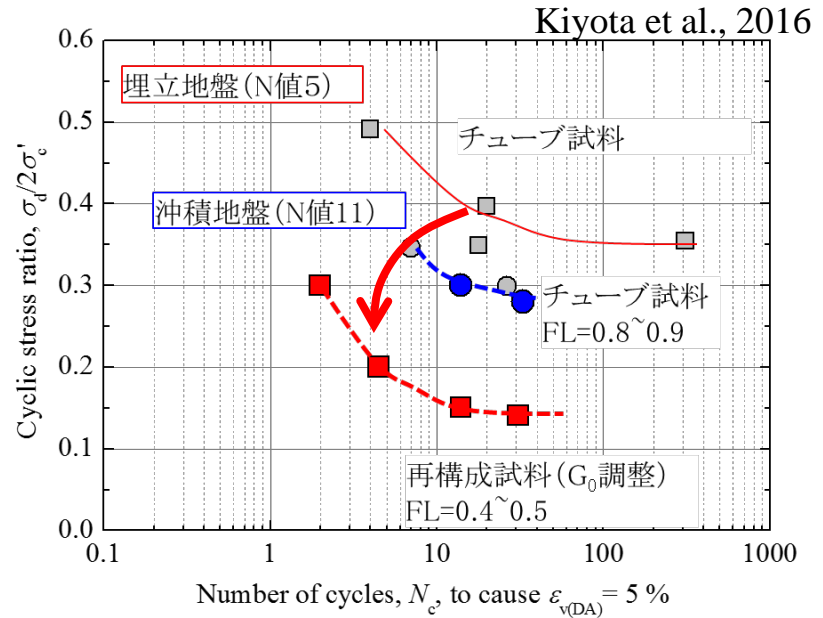
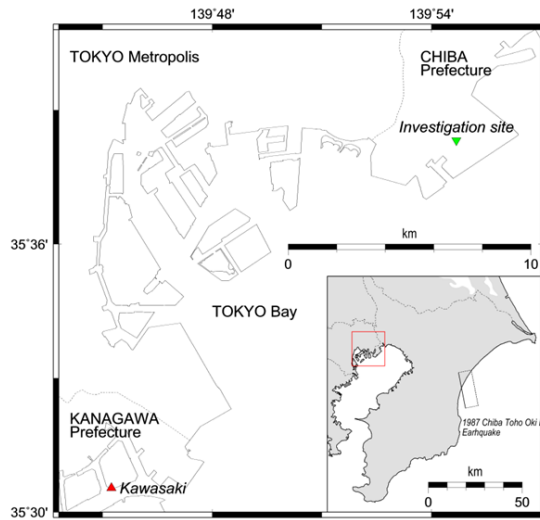
YUSAYUSA-2による検証 (2011年東北地方太平洋沖地震)

Kiyota et al., 2016



密度とせん断剛性率 G_0 を原位置に合せた再構成試料では、事実と整合する結果

YUSAYUSA-2による検証 (1987年千葉東方沖地震)

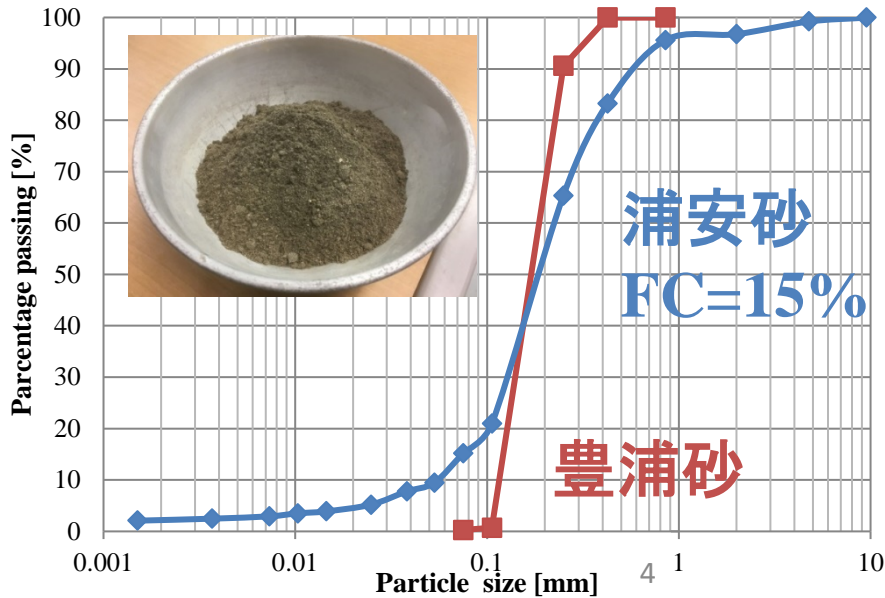


千葉東方沖地震では当該地盤が液状化しなかった事実とも整合する結果

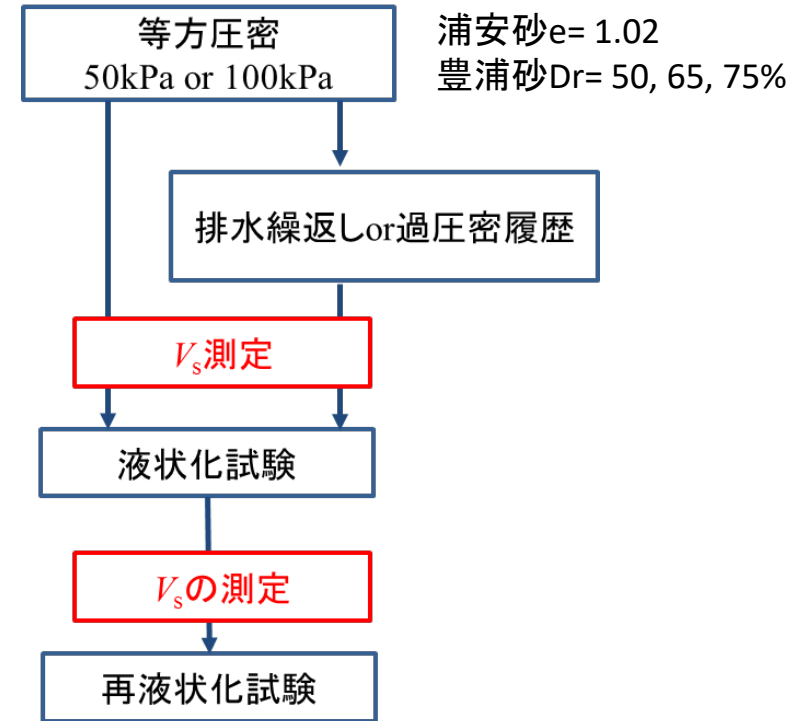
Short summary

- ✓ 現行の液状化強度評価手法の信頼性は低い
 - N値：液状化強度を**極端に過小評価**
 - 不攪乱試料：トリプル等の通常手法では**乱れの影響**で使用できない
- ✓ ある応力状態における砂質土の液状化強度特性に影響を及ぼす要因は「**密度**」と「**土粒子構造**」に集約。後者は**せん断剛性率 G_0** で表現できる
- ✓ **密度**と**せん断剛性率 G_0** を原位置に合せた再構成試料は、凍結採取不攪乱試料と同じ品質(原地盤と同じ)と見なせる。また、過去の地震シミュレーションでも、その妥当性が検証された。
- ✓ しかし、この手法(**密度**と**せん断剛性率**を合わせることを)を実務で適用することは、実験が煩雑になり難しい

浦安砂と豊浦砂の実験



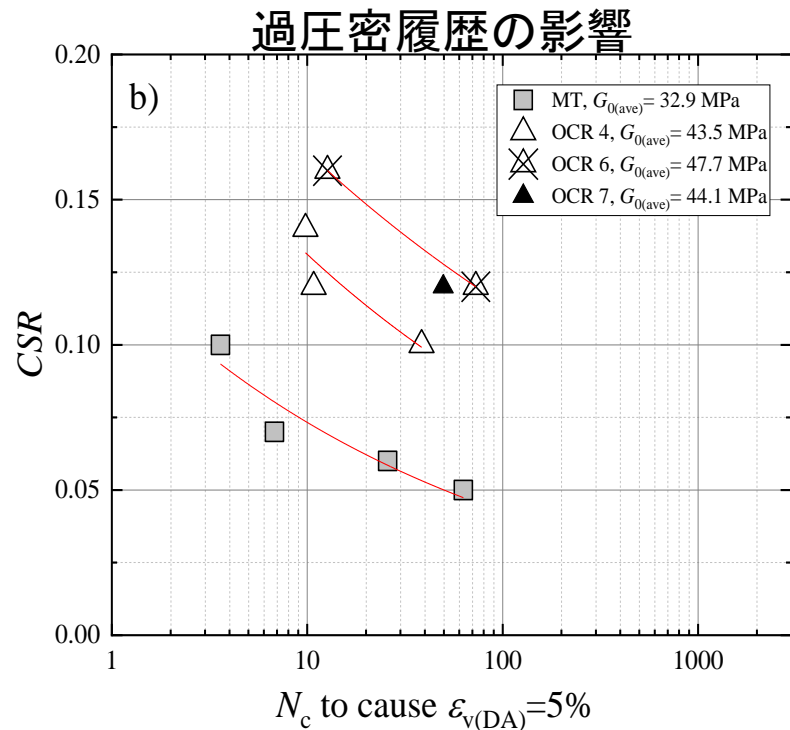
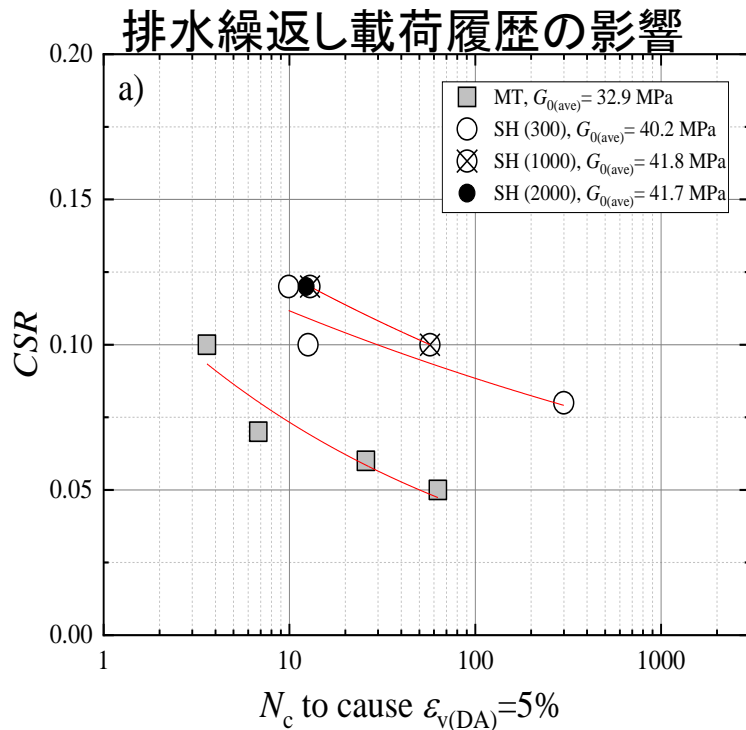
実験手順



- ✓ 応力履歴により様々な土粒子構造を有する試料の液状化強度と G_0 (V_s)の関係を求める。
- ✓ 各シリーズの液状化試験時の供試体密度は一定
- ✓ 履歴による構造変化を G_0 (V_s)で表現

実験結果(浦安砂)

Kiyota et al., 2019



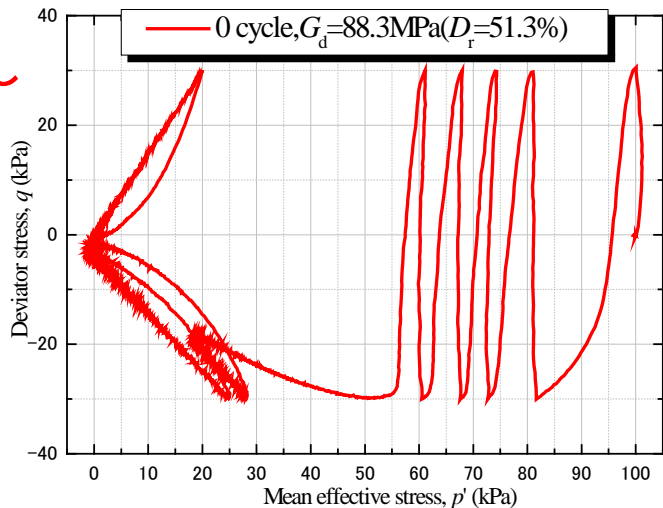
- ✓ 応力履歴により、同じ密度でも液状化強度とせん断剛性率 G_0 が大きく変化する。
- ✓ 応力履歴による土粒子構造の安定と解釈
- ✓ 応力履歴による液状化強度とせん断剛性率 G_0 の増加には限界がある？

液状化試験結果(豊浦砂, $D_r=50, 65, 75\%$)

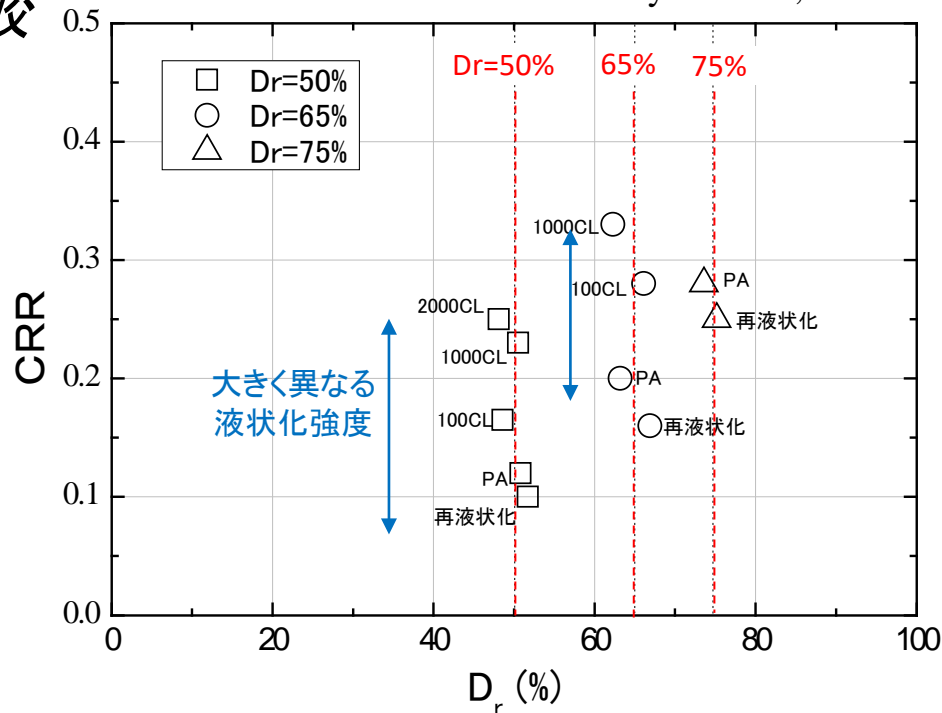
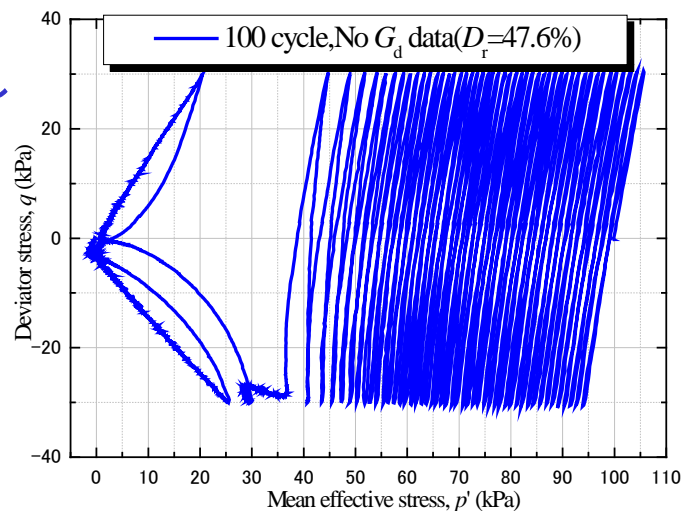
同等の密度($D_r 50\%$) 同士の比較

Kiyota et al., 2019

応力履歴なし



初期繰返し
載荷100回



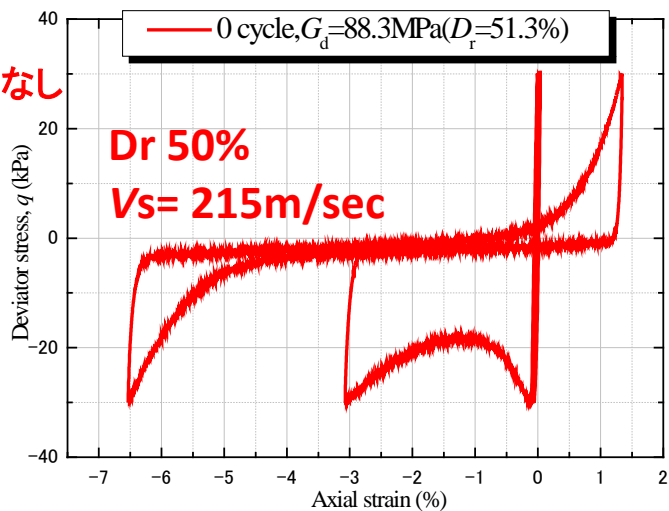
➤ 密度(D_r)が同じでも、土粒子構造の違いで液状化強度CRRは大きく異なる

密度(D_r)だけでは液状化強度予測は困難

液状化試験結果(豊浦砂, $D_r=50, 65, 75\%$)

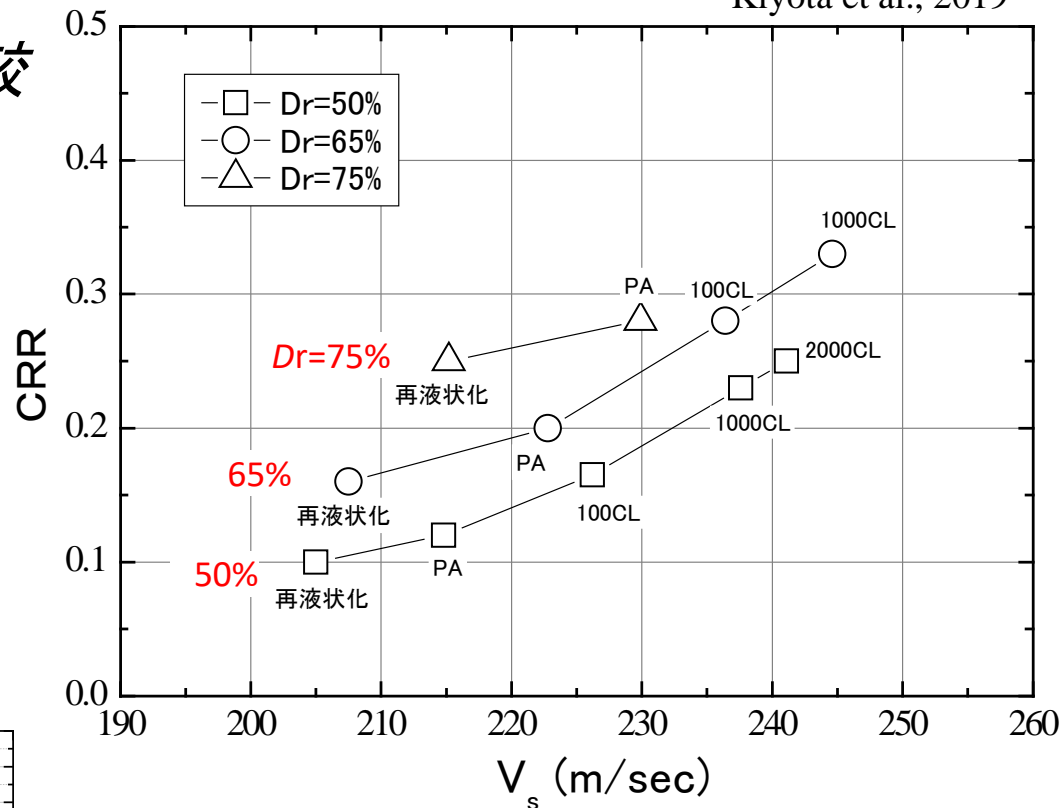
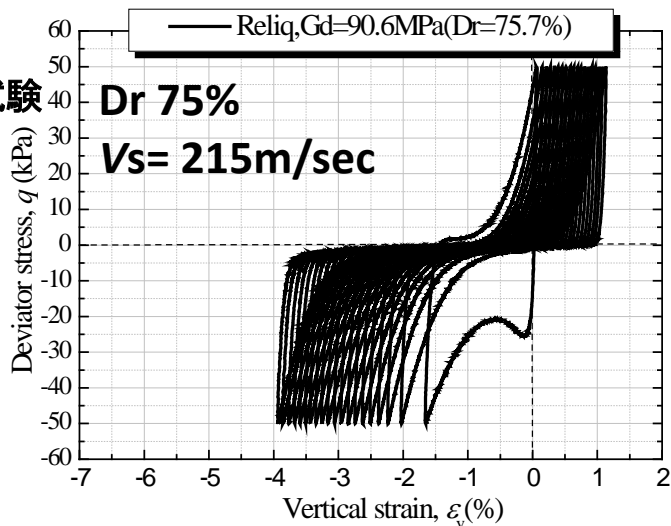
Kiyota et al., 2019

同等の $V_s(G_0)$ 同士と比較



応力履歴なし

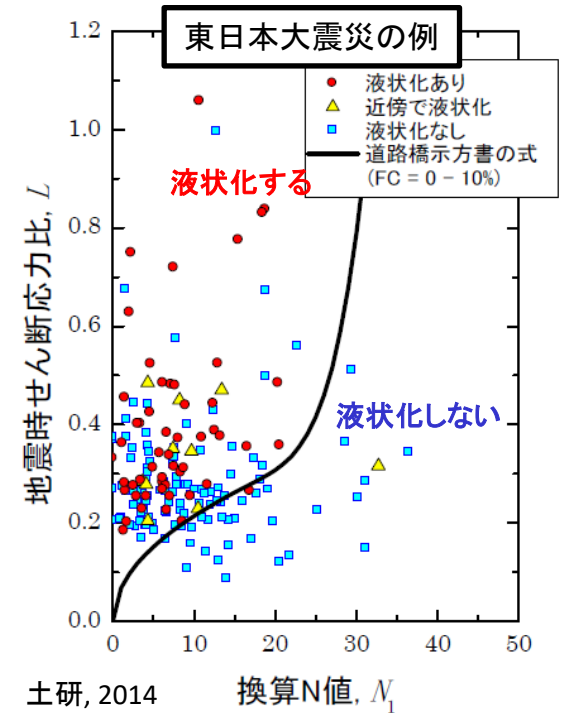
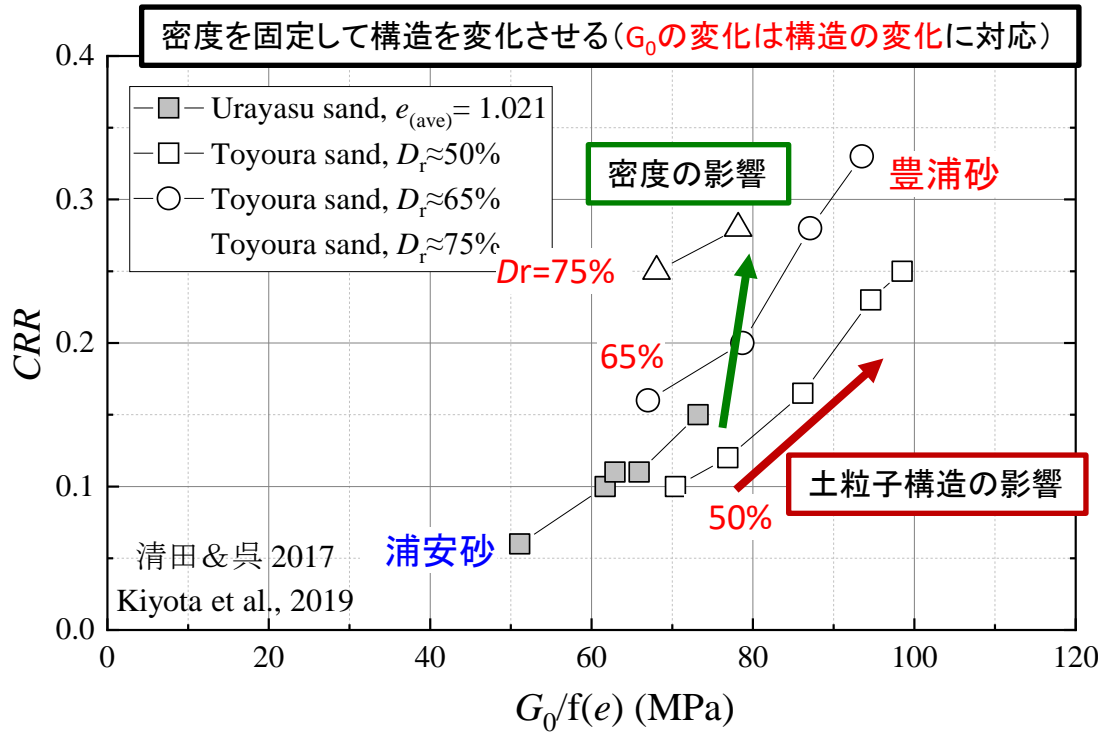
再液状化試験



- $V_s(G_0)$ と CRR の間には正の相関がある。
- しかし、 D_r が異なれば一意的な関係は得られない
- 本研究は皆同じ試料(豊浦砂)

FCや e_{min} 等で補正したとしても、 $V_s(G_0)$ だけでは液状化強度予測は困難

$G_0/f(e)$ - CRR 関係から考える簡易予測法の精度



➤ 密度が同じでも液状化強度は大きく異なる
 D_r だけでは CRR 予測は困難

➤ 密度が異なれば $G_0/f(e)$ - CRR 関係も異なる
 $V_s(G_0)$ だけでは CRR 予測は困難

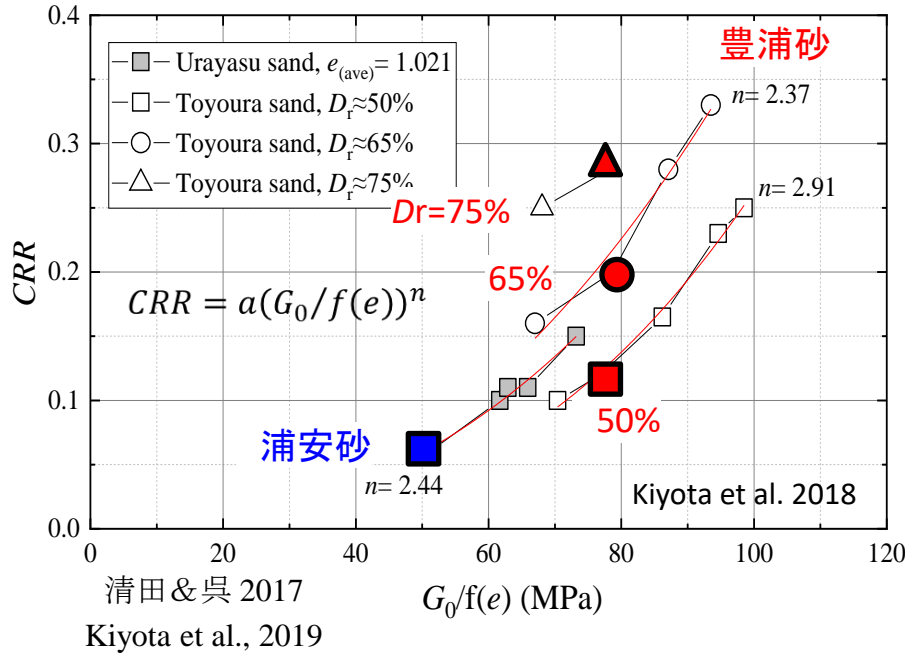
密度と土粒子構造が液状化強度に及ぼす影響はそれぞれ異なる

簡易手法の精度が低い理由

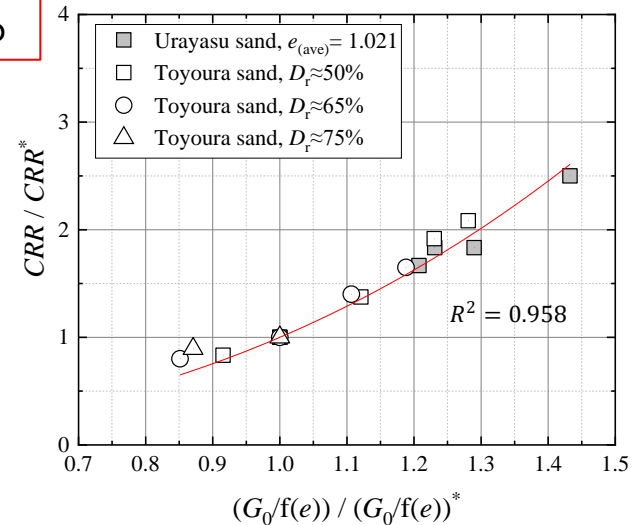
一つのパラメータ(N 値 or G_0 , V_s)だけで総合的に密度と土粒子構造の影響を評価しようとしている

Vsを用いたCRR評価手法のアイデア

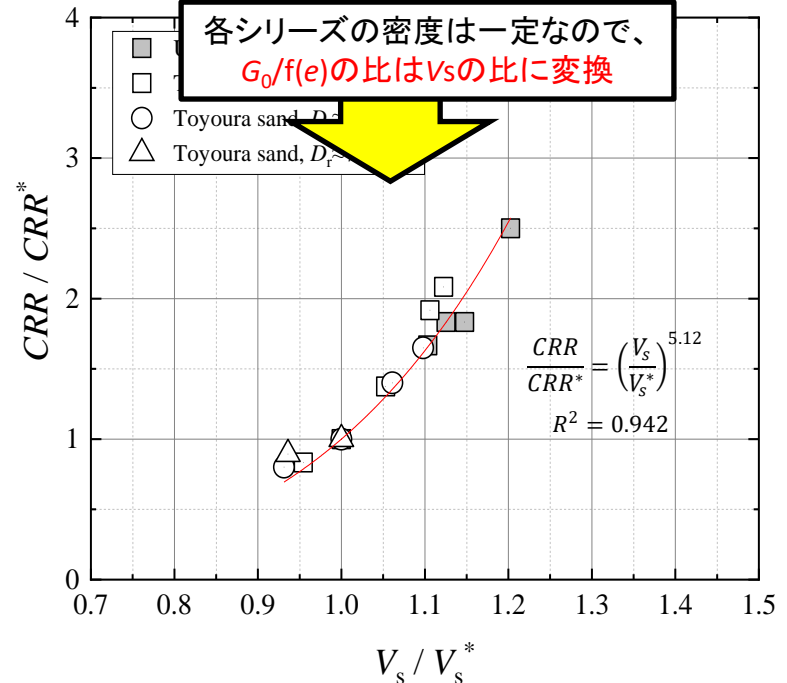
応力履歴の無い試料をリファレンス $G_0/f(e)^*$, CRR^* とする



$G_0/f(e)/G_0/f(e)^*$ - CRR/CRR^* 関係



各シリーズの密度は一定なので、 $G_0/f(e)$ の比は V_s の比に変換



- 地盤・拘束圧・密度に寄らず、べき乗の差は小さい⇒ 重要な意味がある
- 原位置密度に合せた再構成試料の G_0 と CRR から、原位置 CRR を求められる可能性

リファレンスとなる V_s^* , CRR^* の定義により結果は変わる??

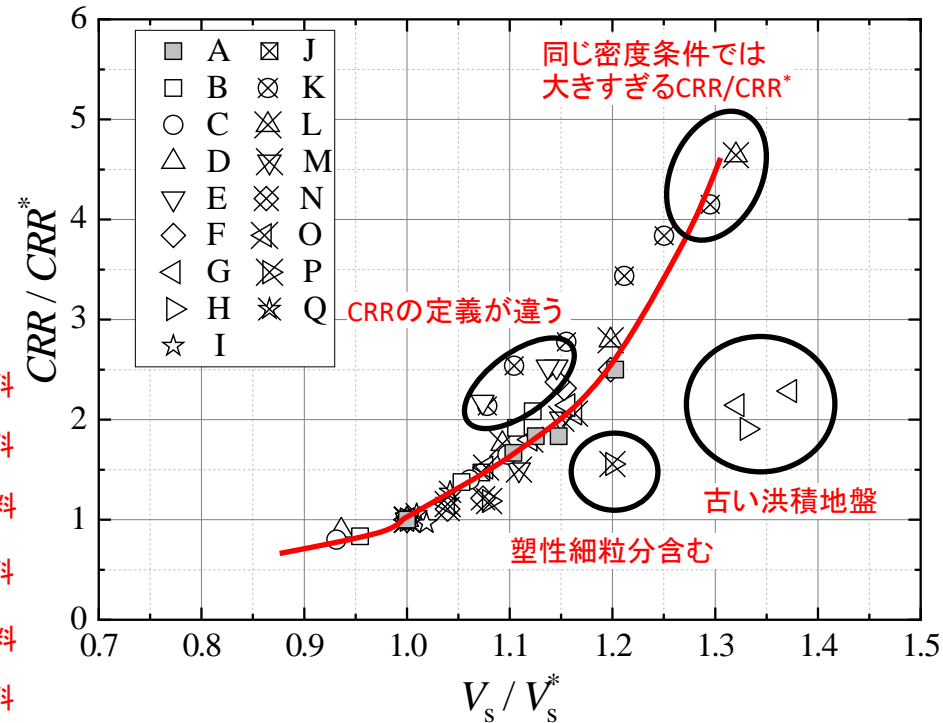
- 同じ関数(べき乗)を用いている以上、理論的に変わらない

$V_s / V_s^* - CRR / CRR^*$ に関する既往文献調査

分析に利用した既往文献 密度が同じで異なる V_s の試料のグループ

Soil Type	Group	σ_c'	D ₅₀	FC	文献・ V_s 計測
浦安砂	A	50	0.202	15.2	Kiyota et al. (2018), TA
豊浦砂	B C D	100	0.187	0	Wu & Kiyota(2018),TA
沖積 利根川砂 (沖積)	E	✓ 100	0.188	1.2	Kiyota et al. (2009),TA 凍結試料
洪積 江戸川砂B (洪積)	F	✓ 100	0.561	3.0	Kiyota et al. (2009),TA 凍結試料
洪積 江戸川砂C (古い洪積)	G	✓ 160	0.189	2.9	Kiyota et al. (2009), TA 凍結試料
洪積 江戸川砂 (古い洪積)	H	✓ 150	0.70	1.6	堀ら (2002), BE 凍結試料
沖積 東扇砂 (沖積)	I	98	0.29	1.9	堀ら (2002), BE 凍結試料
沖積 名取川砂 (沖積)	J	76	0.25	2.8	堀ら (2002), BE 凍結試料
新潟砂	K, L	✓ 98	0.290	0	Tokimatsu & Uchida (1986), SM
沖積 Bohai Bay (沖積)	M N O	100 150 200	-	19.4	Wang et al. (2006), TT チューブ試料
Mai Liao Sand	P	✓ 100	-	30*	Huang et al. (2004), BE
沖積 Olneyville silt (沖積)	Q	100	0.018	96	Baxter et al. (2008), BE ブロック試料

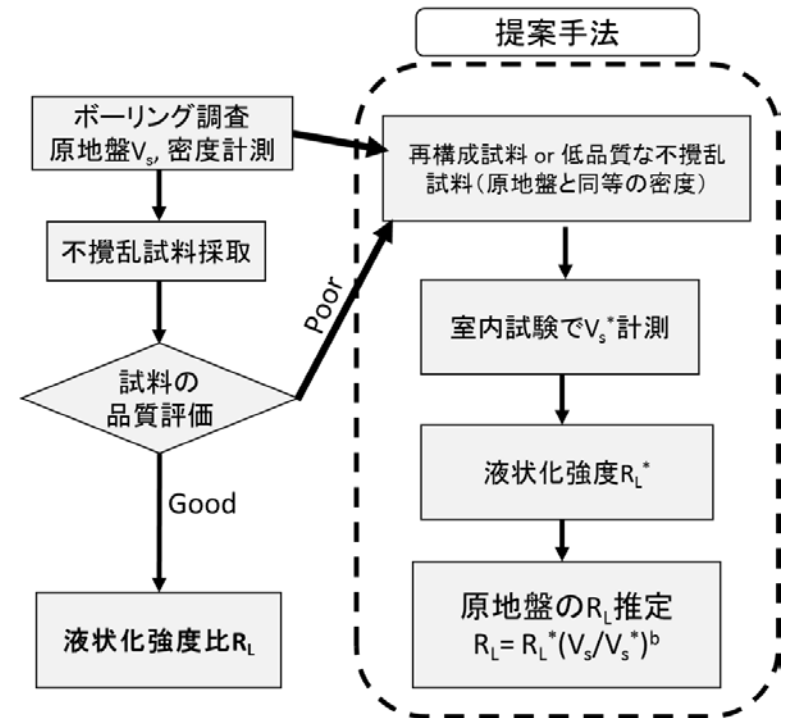
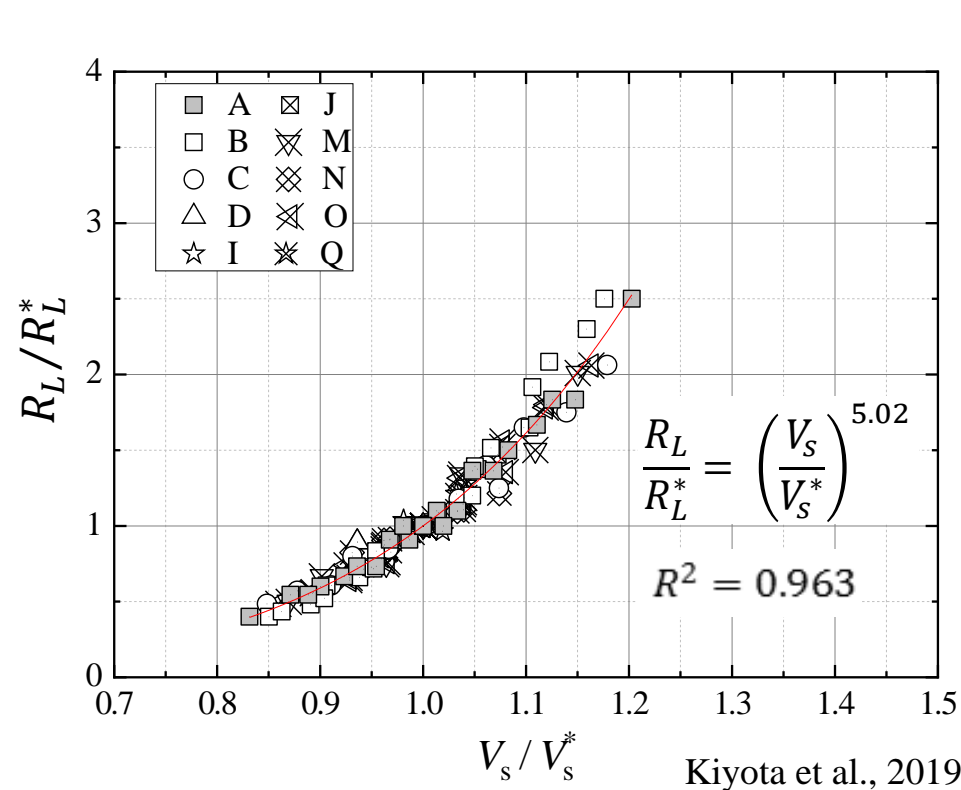
* V_s 計測法 : TA (Trigger & Accelerometer法)、SM (静的微小ひずみ法)、BE (ベンダーエレメント法)、TT (Piezoelastic torsional transducer法)



- 様々な地盤、拘束圧、 V_s 計測方法の結果に対し、概ね良い相関
- 合わない試料: 古い洪積の不攪乱試料 (G,H)と塑性細粒分を含む試料(P)
- その他: (K,L)静的 V_s 計測で、過大なCRR、(E,F,G) CRRの定義が違う

インターロッキングが主体の不攪乱・再構成試料(6試料、10グループ)で再検討

原位置と室内試験の V_s を用いた液状化強度推定法を提案



提案手法の特徴:

- ある応力状態の液状化強度に及ぼす要因、①地盤種別、②密度、③土粒子構造、④応力履歴、⑤年代効果の内、原位置試料を用いて原位置密度に揃えることで①②を、原位置と室内試験の V_s の比で③④⑤を考慮する**合理的な手法**
- **現行の地盤調査手法** (PS検層、RI検層、液状化試験) で実現可能
- ボンディング効果 (セメンテーションや塑性細粒分) を有しない地盤に有効
- 地盤工学分野で長年の課題であった**地震履歴**や**年代効果** (埋立・沖積～若い洪積の自然地盤) を考慮した液状化強度を推定できる

原位置と室内試験のVsを用いた液状化強度推定法の検証

検討対象地

検討深度

2011東北

2011東北

2011東北

2011東北

2003十勝沖

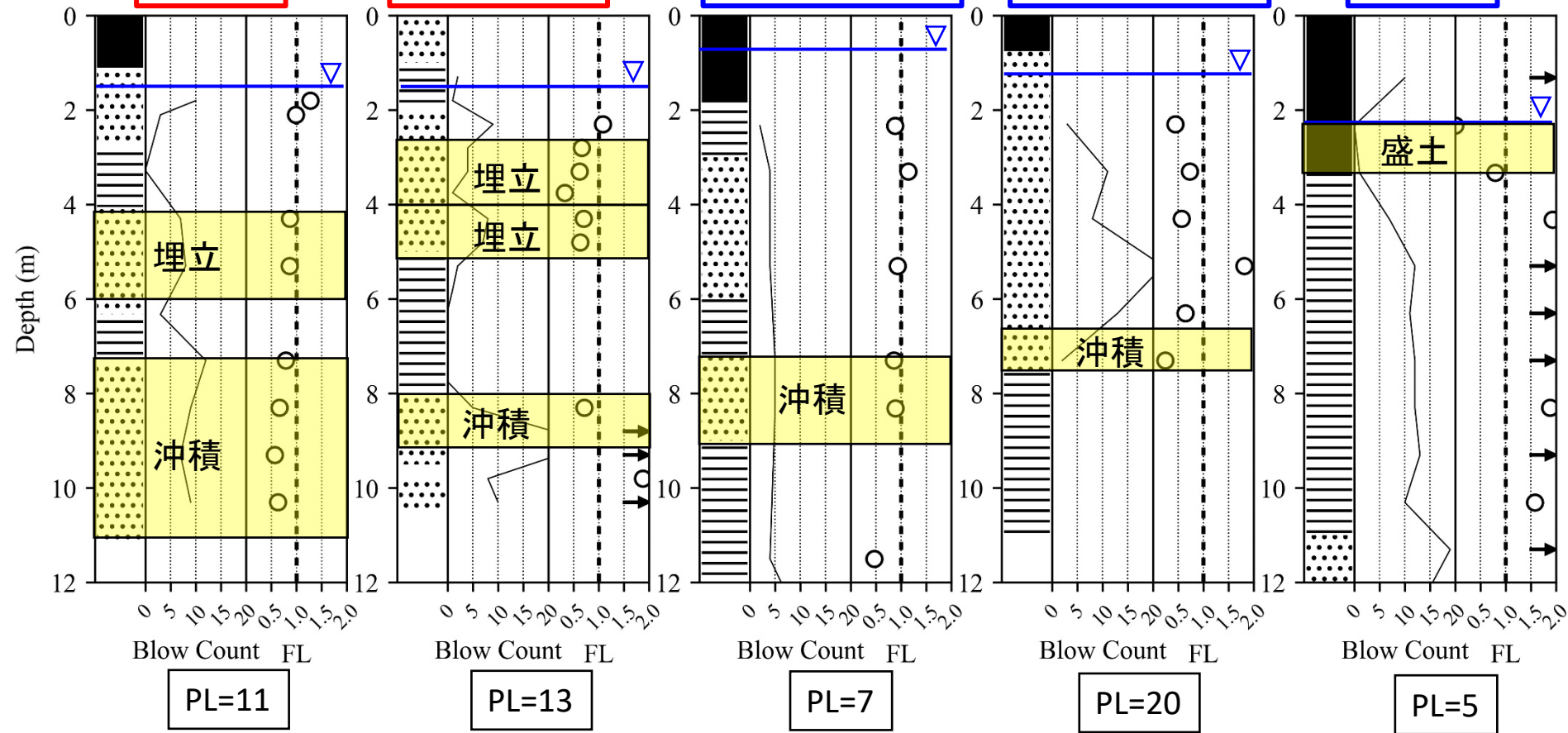
浦安市

千葉美浜区

川崎市川崎区

江戸川河川敷

美幌町



液状化の発生確認

液状化の発生は確認されず

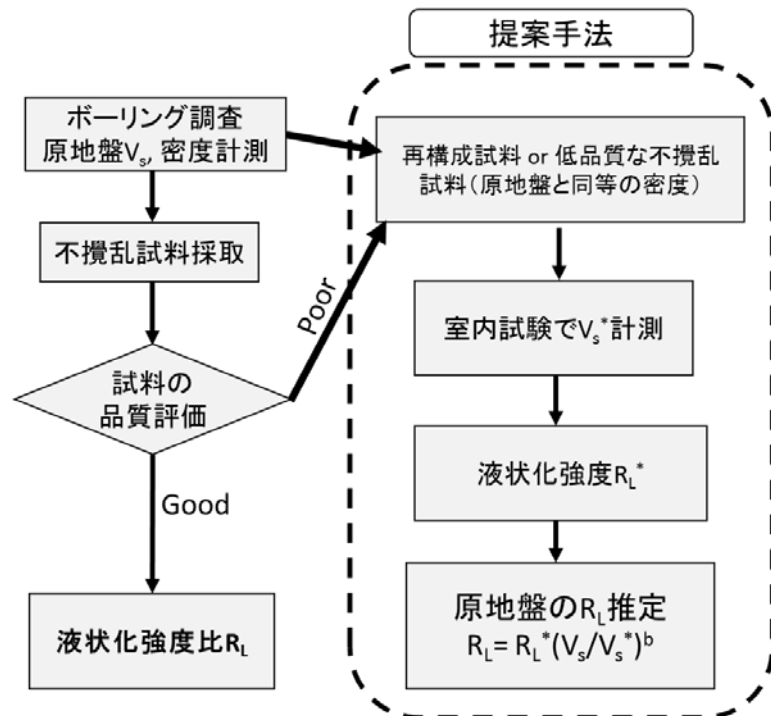
検討方法

○原位置：PS検層 V_s
密度検層

○試験供試体：
再構成試料 or 不攪乱
密度は現場密度検層と整合

○せん断波速度 V_s 計測（ベンダーエレメント or 加速度計） V_s^*

○三軸液状化試験 R_L^*



清田&呉 2017
Kiyota et al., 2019

$$\text{原位置の液状化強度比, } R_L = R_L^* \left(\frac{V_s}{V_s^*} \right)^5$$

簡易法と室内試験結果、およびVsによる手法の比較

液状化の発生確認

調査地名	対象地震	地表面加速度 (gal)	地質年代	液状化	検討深度 (GL- m)	平均N値	サンプルリング	原位置Vs (m/s)	室内試験		原位置RL		安全率FL	
									Vs* (m/s)	RL*	簡易法	清田ら	簡易法	清田ら
①浦安市	2011東北	200	埋立	発生	4.0-6.0	8	攪乱	98	99	0.14	0.27	0.13	0.86	0.43
			沖積	不明	6.4-11.2	9	TS	124	128	0.29	0.22	0.25	0.66	0.77

➤ 埋立層

- ◆ 原位置Vsと室内Vsはほぼ同じ = 室内試験と清田ら(Vs)の新手法のRLはほぼ同じ
- ◆ RLの値は低く、顕著な液状化が生じた事実が反映される

➤ 沖積層

- 原位置Vsと室内Vsはほぼ同じ = 不攪乱試料の品質は良かった

➤ N値簡易法では、液状化強度は埋立 > 沖積となり、おかしい？

➤ 清田ら(Vs)の新手法では、埋立と沖積の関係は一般的な理解と整合

簡易法と室内試験結果、およびVsによる手法の比較

液状化の発生確認

調査地名	対象地震	地表面加速度 (gal)	地質年代	液状化	検討深度 (GL- m)	平均 N値	サンプルリング	原位置Vs (m/s)	室内試験		原位置RL		安全率FL	
									Vs* (m/s)	RL*	簡易法	清田ら	簡易法	清田ら
②千葉市美浜区	2011 東北	232	埋立	発生	2.5-4.0	4	TS GP	89	110 117	<u>0.31</u> <u>0.40</u>	0.20	0.11 0.10	0.64	0.35 0.32
				発生	4.0-5.0	8	TS	129	135	0.31	0.23	0.25	0.66	0.73
			沖積	不明	8.0-9.5	16	GP	148	151	0.39	26.8	0.35	69.9	1.14

➤ 埋立層

- ◆ 液状化地盤にしては、不攪乱試料 (TSとGPサンプル) の液状化強度は大きすぎる (試料の乱れ)。
- ◆ 清田ら (Vs) の新手法では、液状化強度は現実的な値に
- ◆ (GL-2.5~4.0m) それぞれ異なる不攪乱試料の液状化強度も、Vsを考慮して新手法を適用すると同等の値になる。 **サンプリングによる土粒子構造の乱れがVsで適切に補正されている。**

➤ 沖積層でも、概ね妥当な結果

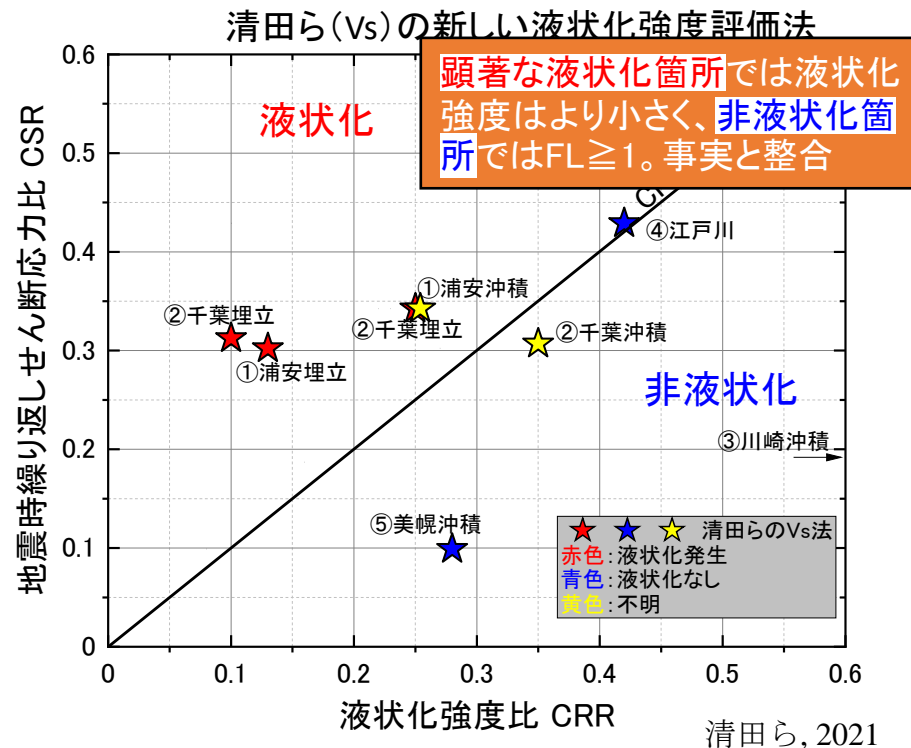
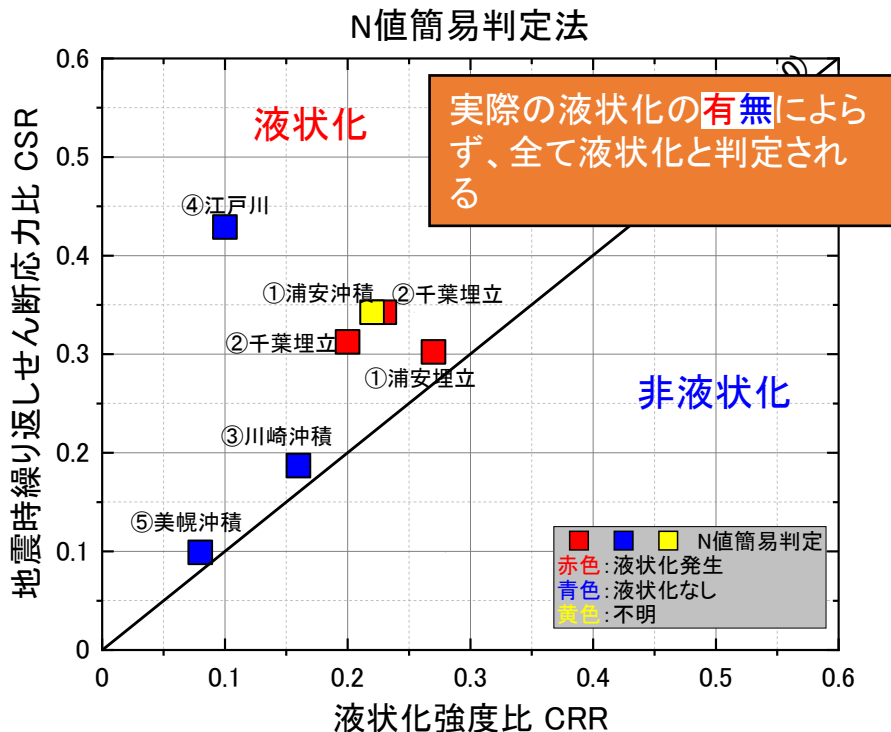
簡易法と室内試験結果、およびVsによる手法の比較

実際は非液状化、しかし簡易判定では液状化

調査地名	対象地震	地表面加速度 (gal)	地質年代	液状化	検討深度 (GL- m)	平均N値	サンプルリング	原位置Vs (m/s)	室内試験		原位置RL		安全率FL	
									Vs* (m/s)	RL*	簡易法	清田ら	簡易法	清田ら
③川崎市川崎区	2011東北	128	沖積	なし	7.2-9	5	攪乱	179	104	0.09	0.16	1.07	0.85	5.73
④江戸川河川敷	2011東北	262	沖積	なし	6.5-7.5	2	攪乱	155	128	0.16	0.10	0.42	0.24	0.98
⑤美幌町	2003十勝	85	盛土	なし	2.5-3.3	4	攪乱	124	119	0.22	0.08	0.28	0.78	2.42

- 再構成試料を用いた室内試験の液状化強度は小さい(年代効果がない)
- 清田ら(Vs)の新手法では、原位置と室内試験のVsの比が年代効果を表現し、推定される液状化強度は大きくなる。
- いずれの地点でも、液状化が確認されなかった**事実と整合する結果**となった

まとめ



➤簡易判定法では、液状化の有無によらず、 $FL < 1$ となる

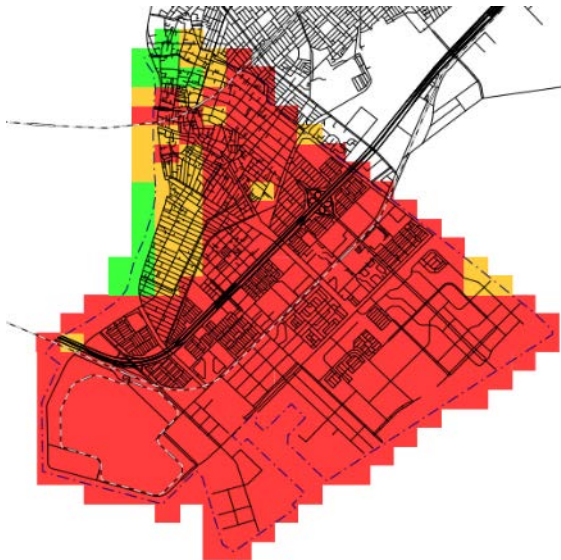
➤清田ら(V_s)の手法では、顕著な液状化が生じた地点はRLがより小さく、液状化が生じなかった地点では $FL \geq 1$ となり、事実と整合する結果となった

本研究の知見が、年代効果や応力履歴を有する地盤の液状化強度特性の理解に貢献し、延いては構造物の耐震設計の合理化につながることを期待いたします。

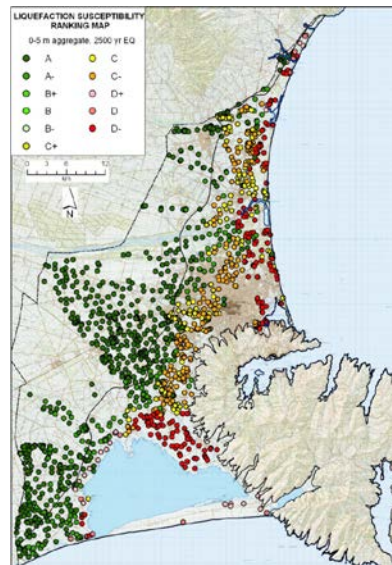
東日本大震災時の液状化被害



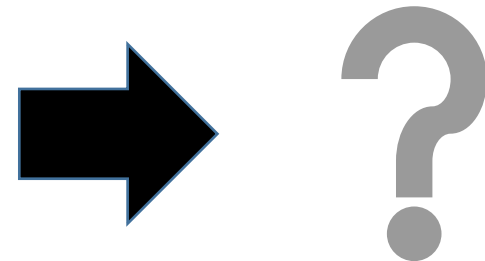
液状化ハザードマップの高度化に関する研究



浦安市(千葉県HP)



Christchurch (GNS)



Challenge 利活用される液状化ハザードマップの構築

液状化地域ゾーニングマニュアル
(旧国土庁防災局震災対策課, 1999)



- ・予測手法
- ・マップ作成手法

液状化危険度予測図



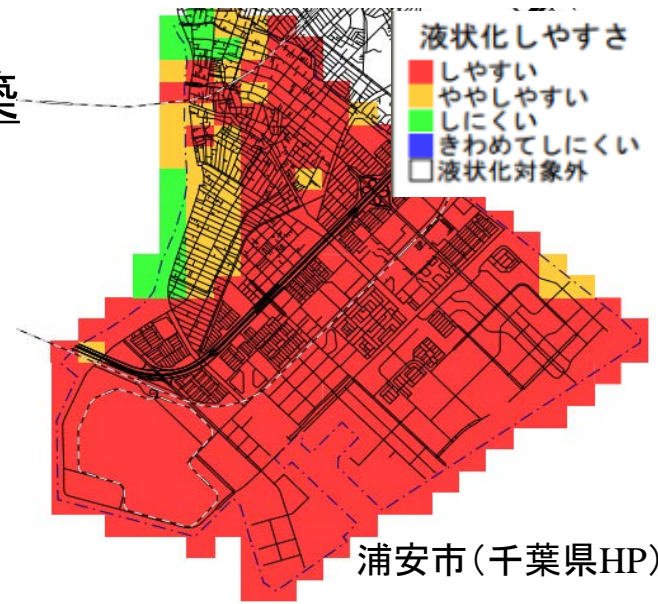
- ・ハザードマップの精度
- ・災害発生領域及び影響範囲が不明瞭
- ・危険度の表現が曖昧

地域防災力向上への有効な利活用

従来の液状化ハザードマップ

- ✓ ハザードマップは液状化判定による液状化指数 P_L 値に基づく
- ✓ 具体的・定量的な情報がない(例えば地盤変形・沈下量)
- ✓ 液状化判定から沈下量を求める手法(Dcy値等)もあるが、要素試験結果に基づくため噴砂が考慮されていない

- 現場調査で判明した道路の特徴的な事象
- これをハザードマップで表現できないか？



生活道路

被害大

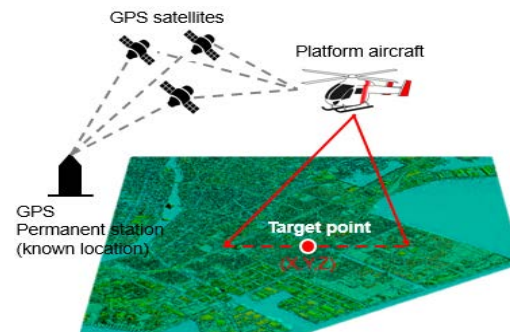


幹線道路

被害小

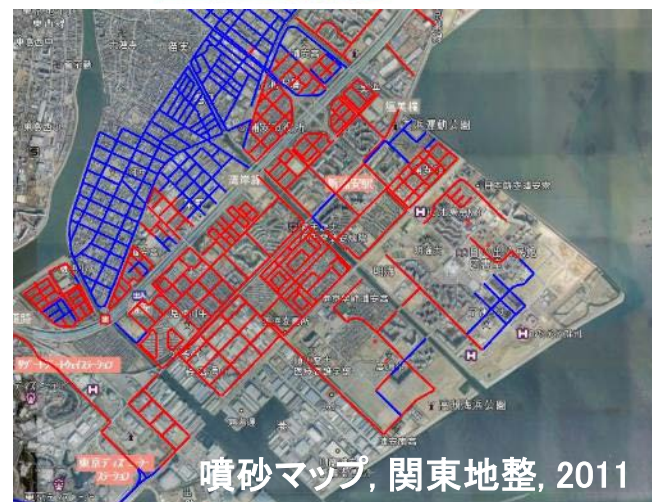


航空LiDARによる液状化沈下マップの構築



2006年と2011年4月の地盤標高の差分

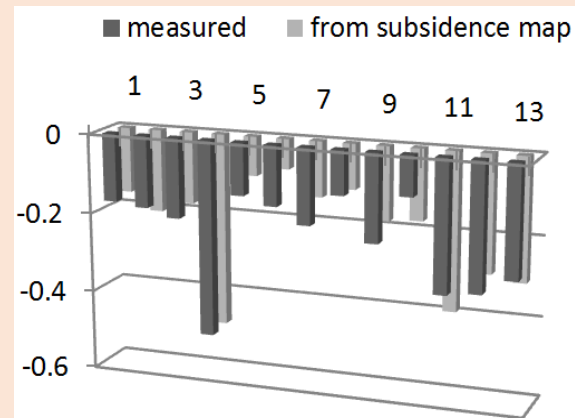
国道・市道・生活道路の沈下量を多数抽出



Konagai et al., 2013

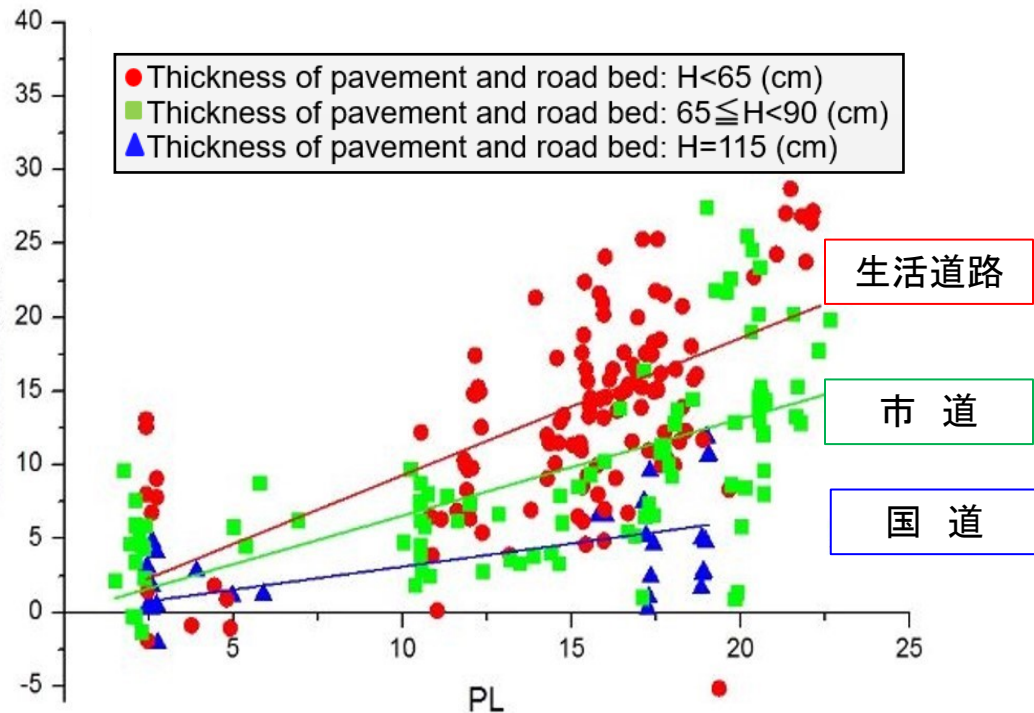
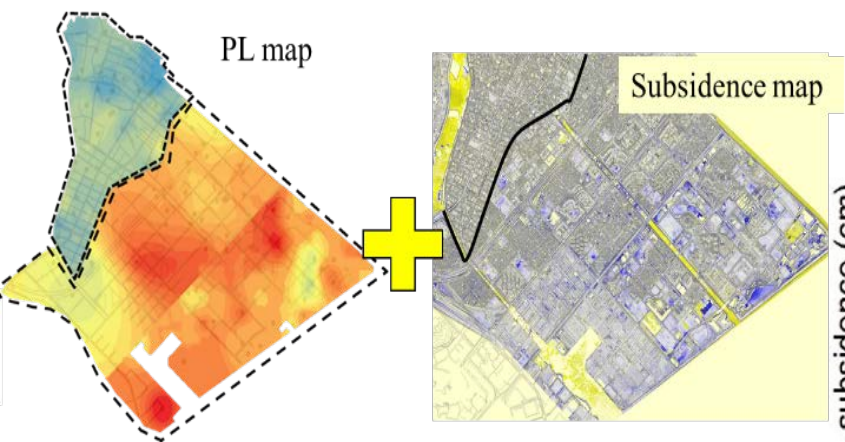
液状化沈下マップの利活用

- 埋立地盤の液状化メカニズム解明
- 合理的な液状化予測法の開発
- 既存の地盤改良技術の性能評価
- **ハザードマップの高度化**

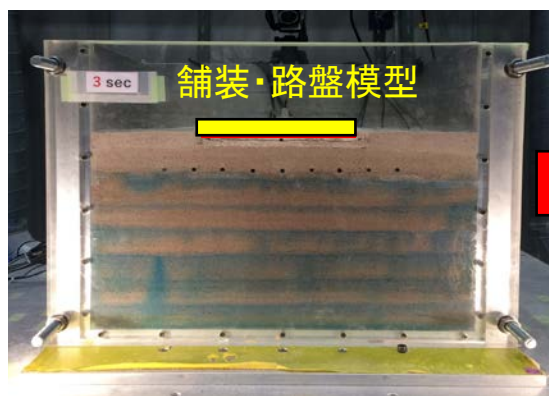
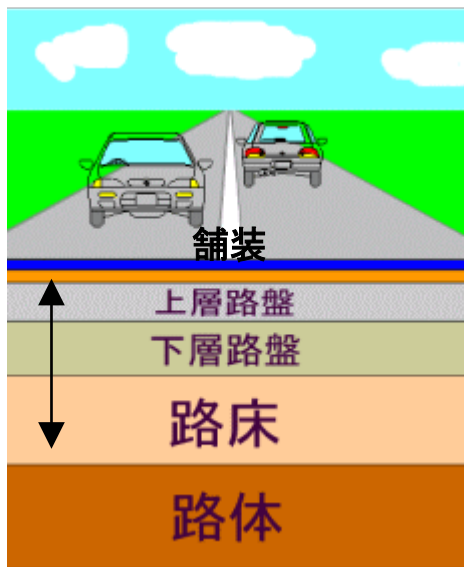


平均誤差: 13 mm 沈下量評価には
標準偏差: 44 mm 十分な精度

液状化による地盤沈下に及ぼす道路構造の影響



液状化指数 P_L と沈下量の関係は、道路の種類により大きく異なる⇒ 模型実験で再現



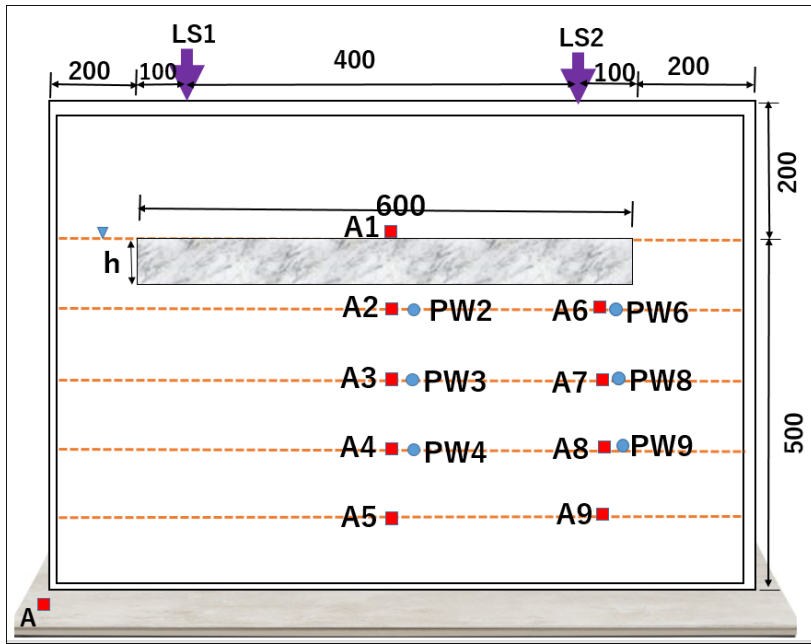
通常土槽では地盤が液状化しないため、せん断土槽に切り替え



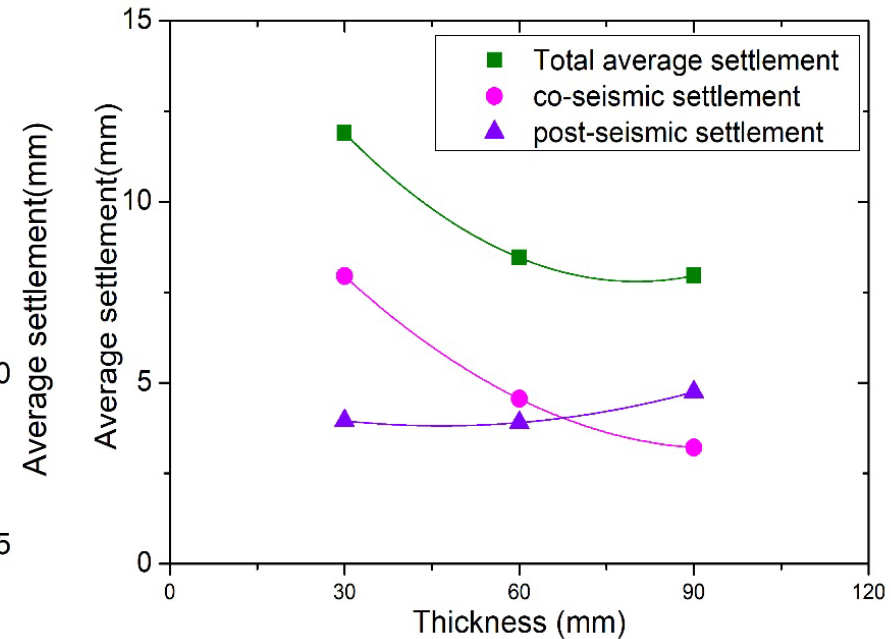
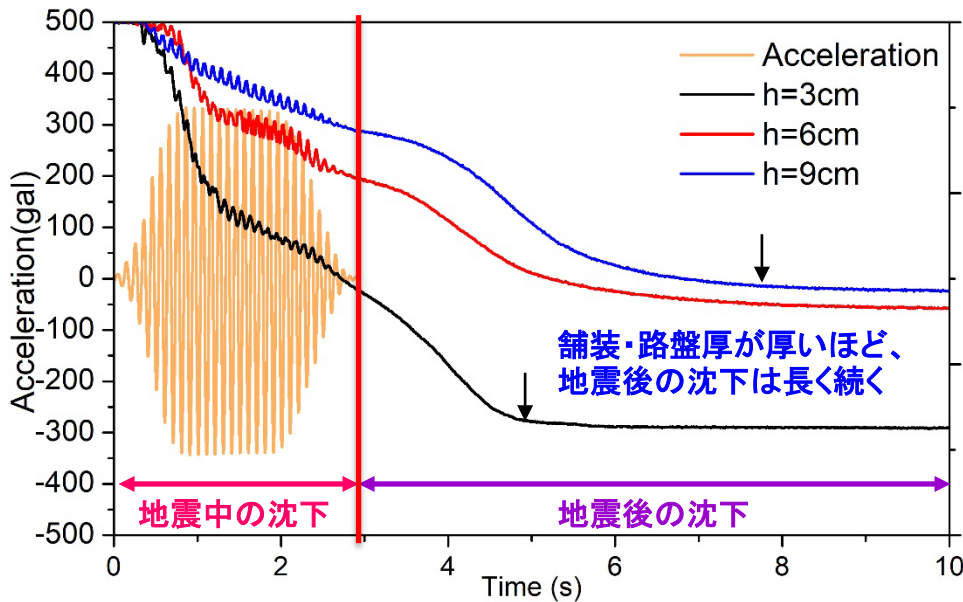
(100cm × 40cm × 70cm)

締固められた路盤は液状化しない

振動台模型実験結果



Thin pavement case
 $h=3\text{cm}, b=60\text{cm}$
 $a=300\text{gal}, t=3\text{s}$

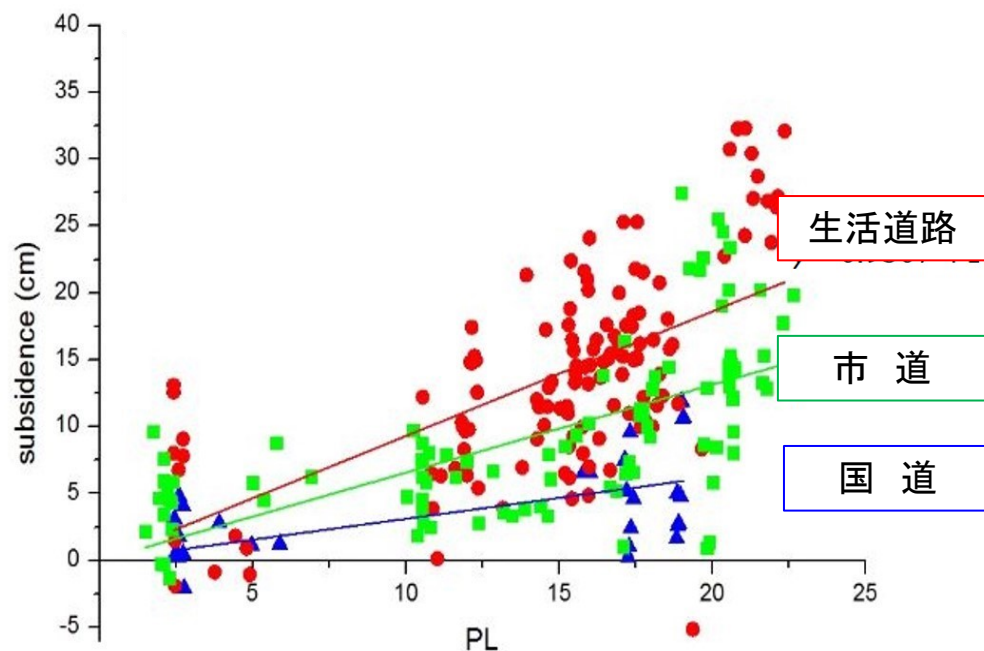
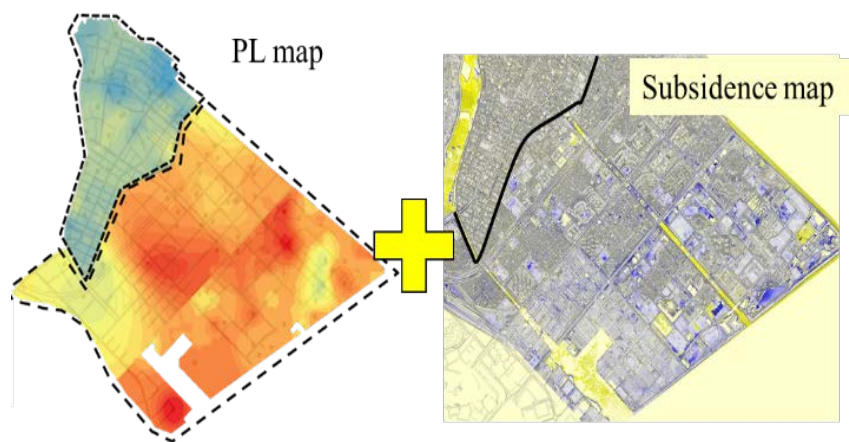


道路の規格を考慮した液状化ハザードマップの構築

現場調査・航空LiDAR・模型実験結果は整合する：舗装・路盤層厚と液状化による地盤沈下量は相関がある

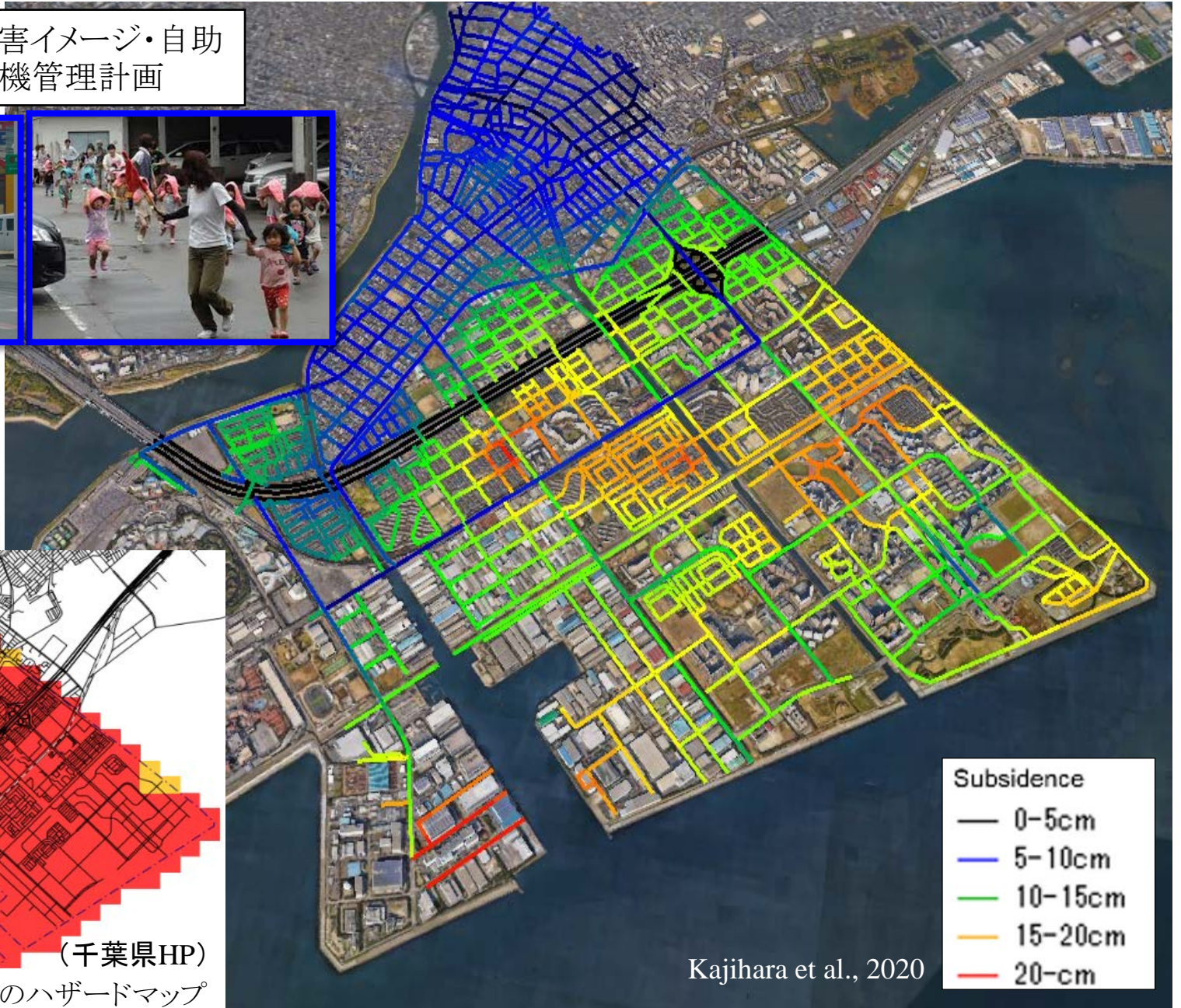


道路種別に応じた被害関数で新たなハザードマップ構築

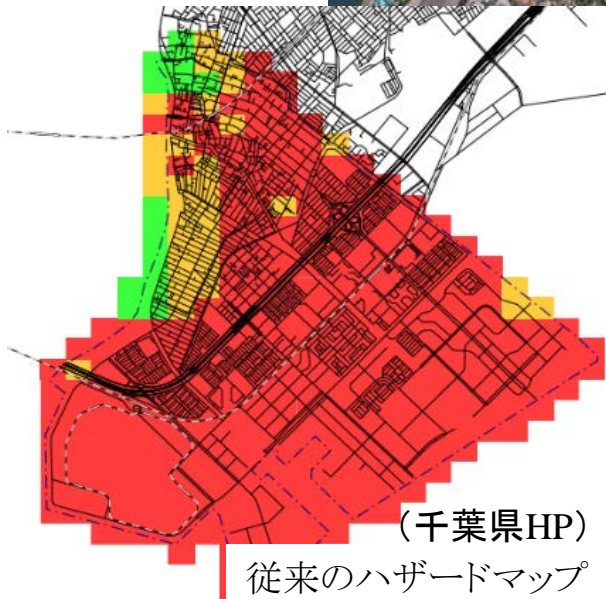


定量的な情報(道路沈下量)を示す液状化ハザードマップ

民: 具体的な被害イメージ・自助
官: 都市の危機機管理計画



Subsidence	
—	0-5cm
—	5-10cm
—	10-15cm
—	15-20cm
—	20-cm



(千葉県HP)

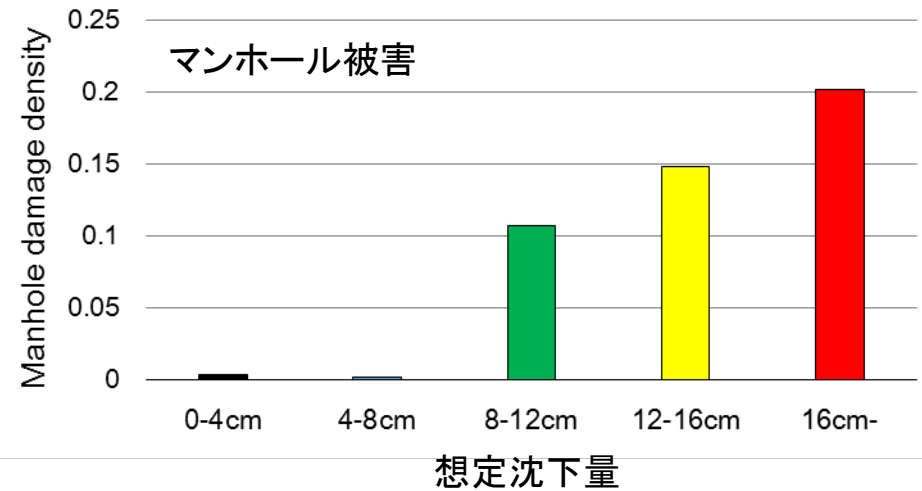
従来のハザードマップ

Kajihara et al., 2020

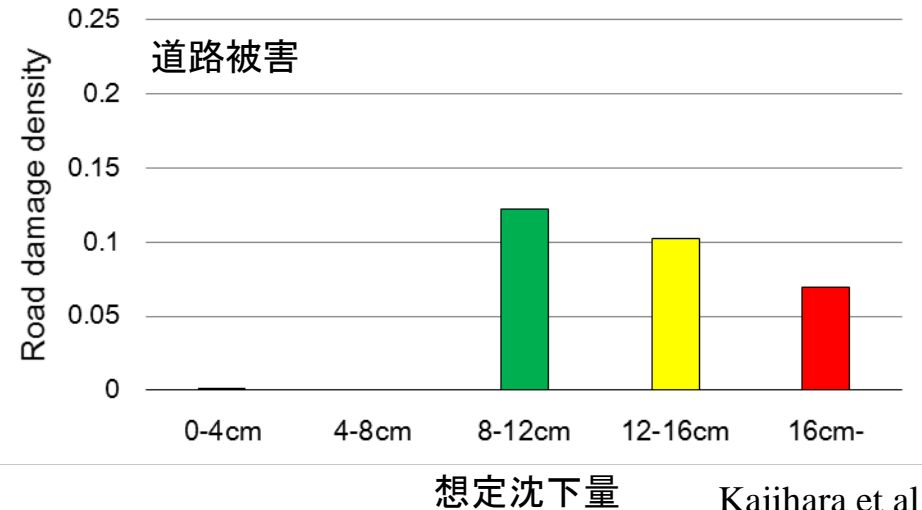
想定道路沈下量の精度検証(浦安市を対象)

Damage densityについて

被害マンホール(箇所)
道路延長 (km)



被害道路延長 (km)
道路延長 (km)



Kajihara et al., 2020

- 東日本大震災による浦安市の**実被害と想定沈下量との比較**
- 想定沈下量が**8~12cm以上**では、被害報告事例が多くなる

まとめ

■東北地方太平洋沖地震で生じた地盤沈下の検出

- (1) 千葉県浦安市で生じた液状化による地盤沈下量を広域かつ定量的に記録した液状化沈下マップを整備した

■道路沈下量と液状化指数に基づく新たな液状化ハザードマップの展開

- (2) 液状化沈下マップから道路沈下量を抽出し「同じPL値を示す場所であっても舗装・路盤厚によって道路沈下量が異なる」傾向を確認した
- (3) この関係を用いて道路沈下量を定量的に予測する新たなハザードマップを作成。新しいハザードマップは、緊急輸送道路や避難ルートを選定といった防災計画への利活用が期待できる

■舗装厚が道路沈下量に与える影響の実証と今後の課題

- (4) 模型地盤の振動台実験を行い、道路舗装・路盤厚が道路沈下量を決定する要因となることを実証した
- (5) 道路沈下軽減の背景に、舗装・路盤が厚くなると路盤直下地盤の過剰間隙水圧の上昇が抑制(=液状化発生が抑制)されていることを実験で確認した