

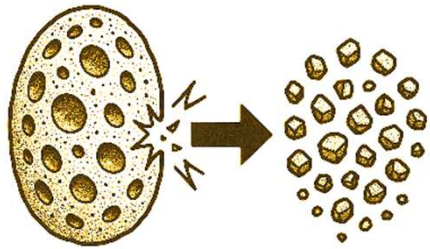
# 多孔質粒状体の力学特性～粒子破碎と限界状態～

---

**佐藤 樹** <sup>1)</sup> , **桑野 玲子**<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>港湾空港技術研究所

<sup>2)</sup>東京大学生産技術研究所



問題土  
軽石（破砕性多孔質物質）



高い圧縮性と破砕



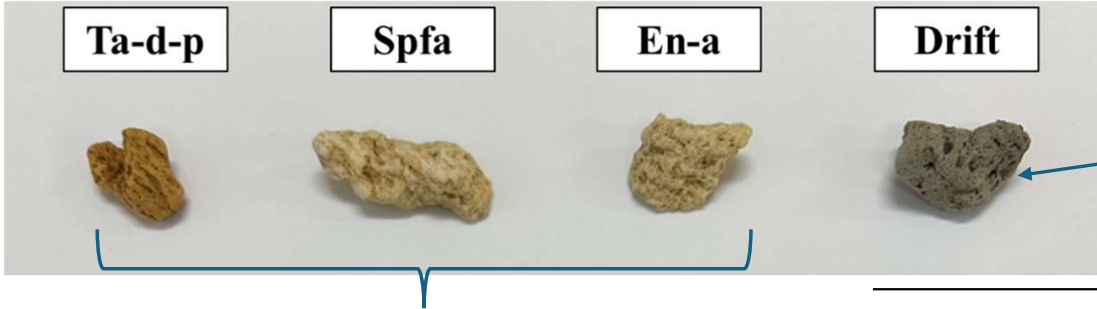
緩やかな斜面  
流動崩壊

北海道の土砂災害（2018年）

- 軽石として知られる多孔質で破砕しやすい問題土は、世界中に分布している。
- これらの多孔質粒状材料は高い圧縮性と破砕性を示し、斜面崩壊などの問題やその他の工学上の課題を引き起こす。
- こうした土は問題土に分類されることが多く、通常は事例ごとに研究されるため、その力学的挙動に関する体系的な理解が欠けている。

⇒ 研究の最終目標：破砕性多孔質土の挙動を体系的に理解すること。

# 実験材料



漂流軽石

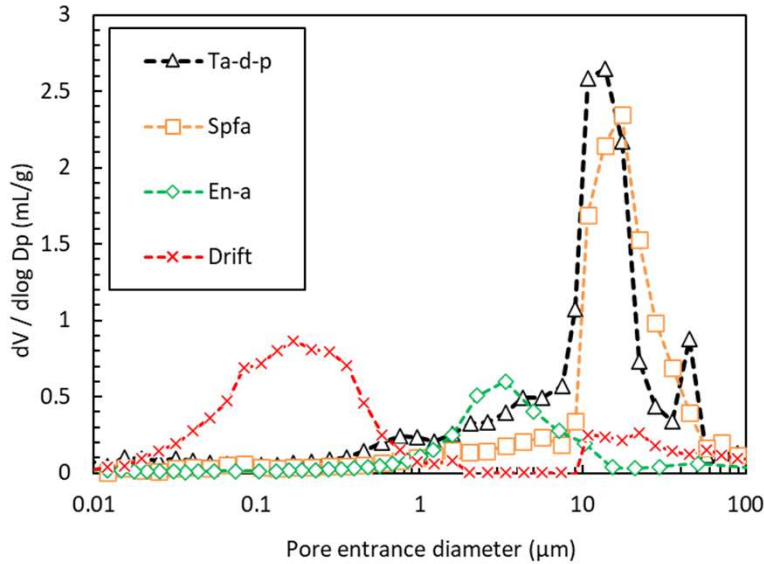
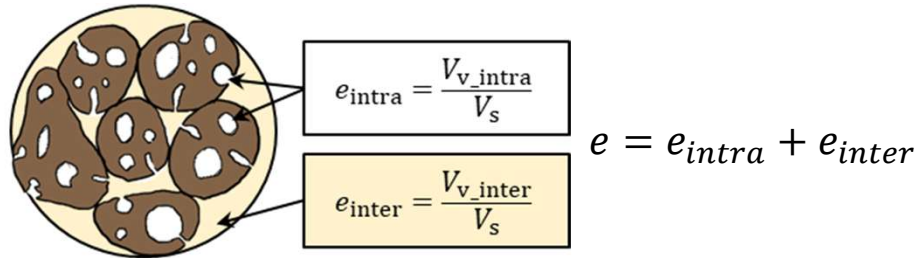
([https://scienceportal.jst.go.jp/gateway/clip/20211105\\_g01](https://scienceportal.jst.go.jp/gateway/clip/20211105_g01))



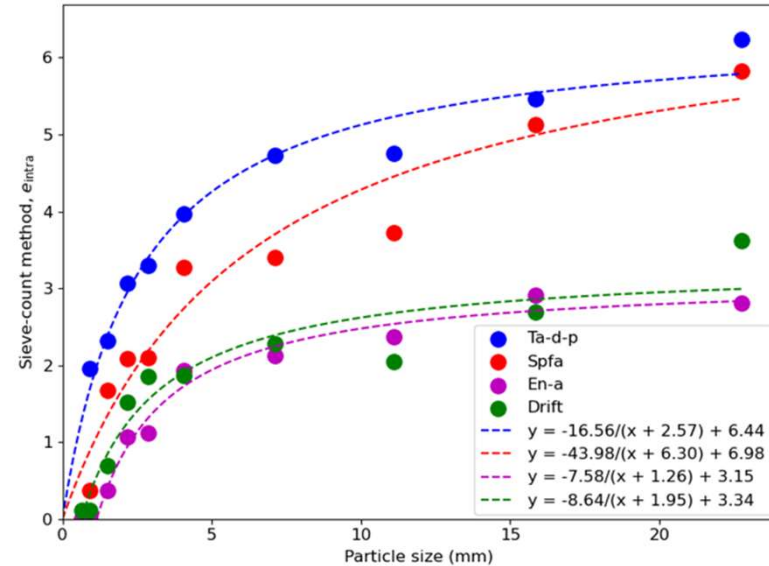
北海道、日本

	[g/cm <sup>3</sup> ]	コンシステンシー特性			アスペクト比
		w <sub>L</sub> [%]	w <sub>P</sub> [%]	I <sub>P</sub> [%]	
Ta-d-p	2.574	99.20	94.23	4.969	1.301
SPFA	2.548	55.50	NP	NP	1.437
En-a	2.636	51.10	NP	NP	1.307
Drift	2.390	-	-	-	1.352

- 過去2年間、我々の研究グループは4つの軽石を使用。
- 3つは日本の北海道の斜面で採取され、残りの1つは海底火山噴火によって生成され、海岸に打ち上げられたものである。
- 表に示す粒子密度は粉碎試料で測定したものであり、真の粒子密度に近いと考えられる。これらの軽石試料は主に非塑性である。



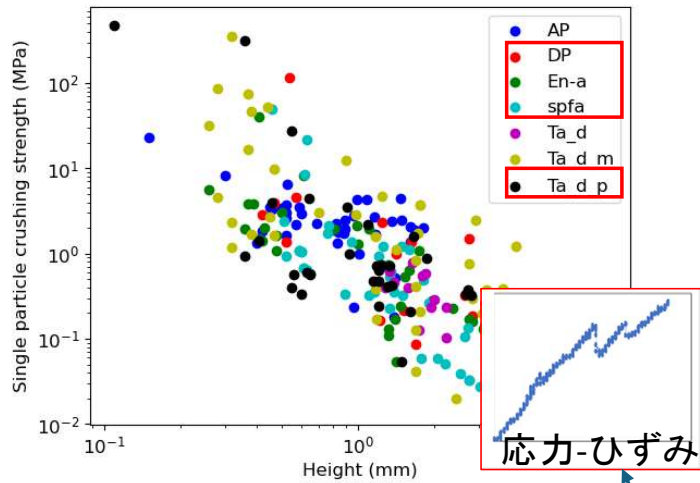
水銀圧入法の結果



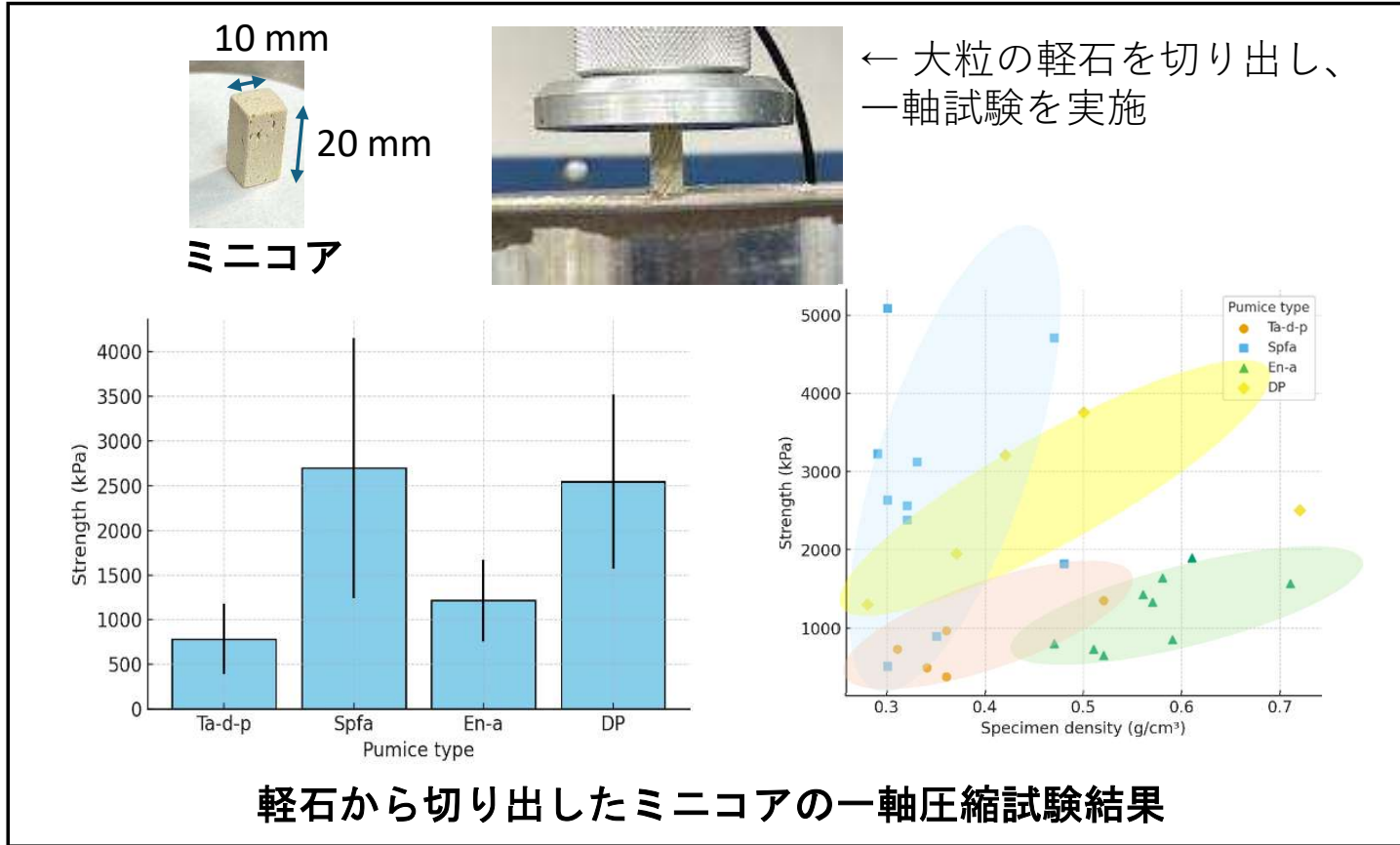
ふるいカウント法による粒子内間隙比

( $e_{intra}$ ) の分布 (佐藤ら、2025)

- ▶ 水銀圧入法の結果を見ると、全ての試料に内部空隙が存在することが明らかである。
- ▶ 海上で長期間浮遊できる漂流軽石は、内部に水が浸透しにくい多数の微細な細孔を含む。
- ▶ 粒子内間隙比を測定し、上記のように各粒子サイズごとにプロットすると、全てが高い粒子内間隙比を示していることが明らかである。



単粒子破碎試験



軽石から切り出したミニコアの一軸圧縮試験結果

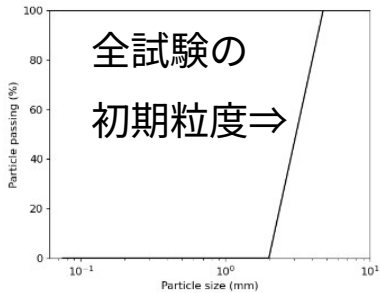
- 単粒子破碎試験を実施したところ、全ての軽石試料は普通砂に比べて単粒子強度が著しく低かった。（軽石は圧縮性が高いため、単粒子破碎試験では明確なピークを得ることが難しく、結果の解釈が困難である。）
- ミニ一軸圧縮試験から、各軽石の強度はおおよそ  $q_u = 700\text{--}2500$  kPa であった。
- コア強度と供試体密度との間には一定の相関関係が認められた。

## 材料

材料：軽石数個



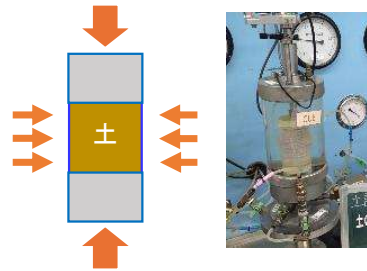
今日は、この2つの結果のみを紹介する。



全試験で、同一の粒径加積曲線から開始

## 三軸試験

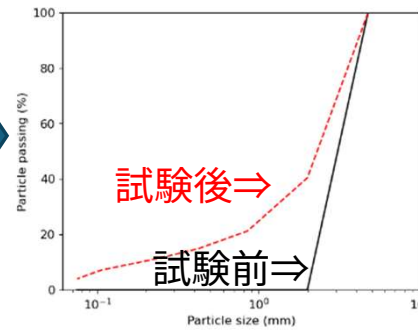
- CD
- CU
- C (圧密)



様々な条件下で三軸試験を実施。  
150ケース以上。

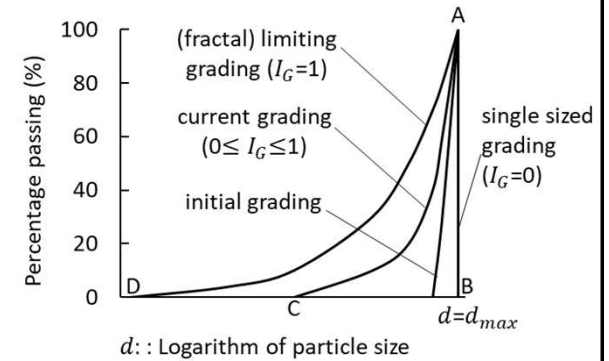
## 試験後

3分間手動ふるい分け



破砕量は、試験前後の粒径加積曲線から用いて定量化。

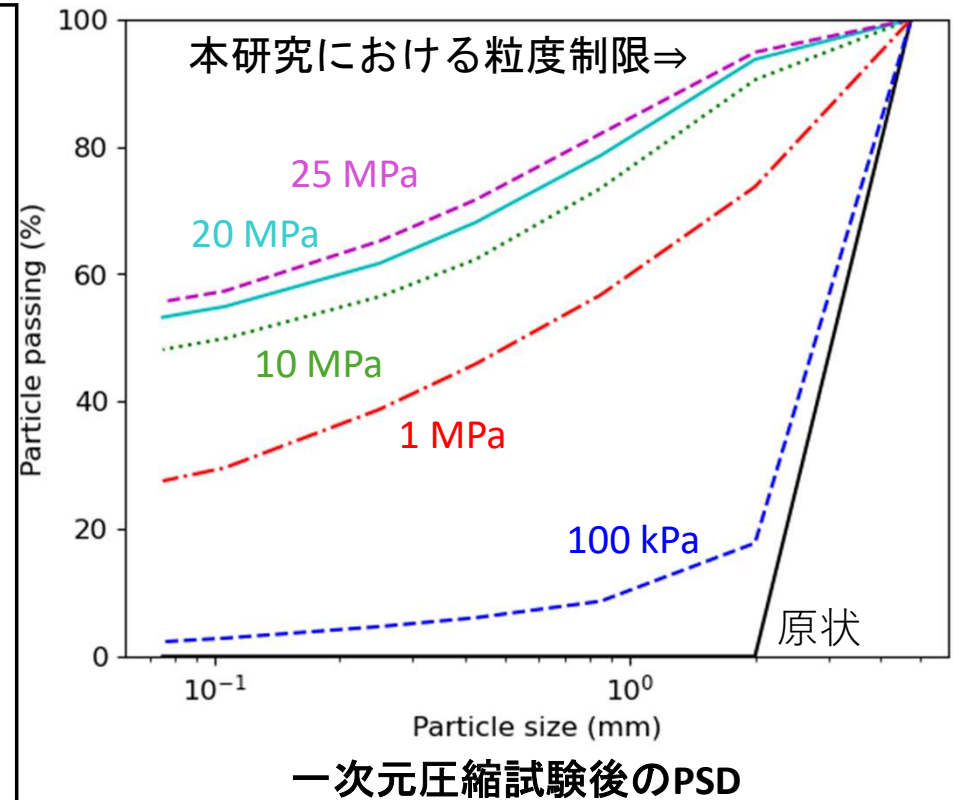
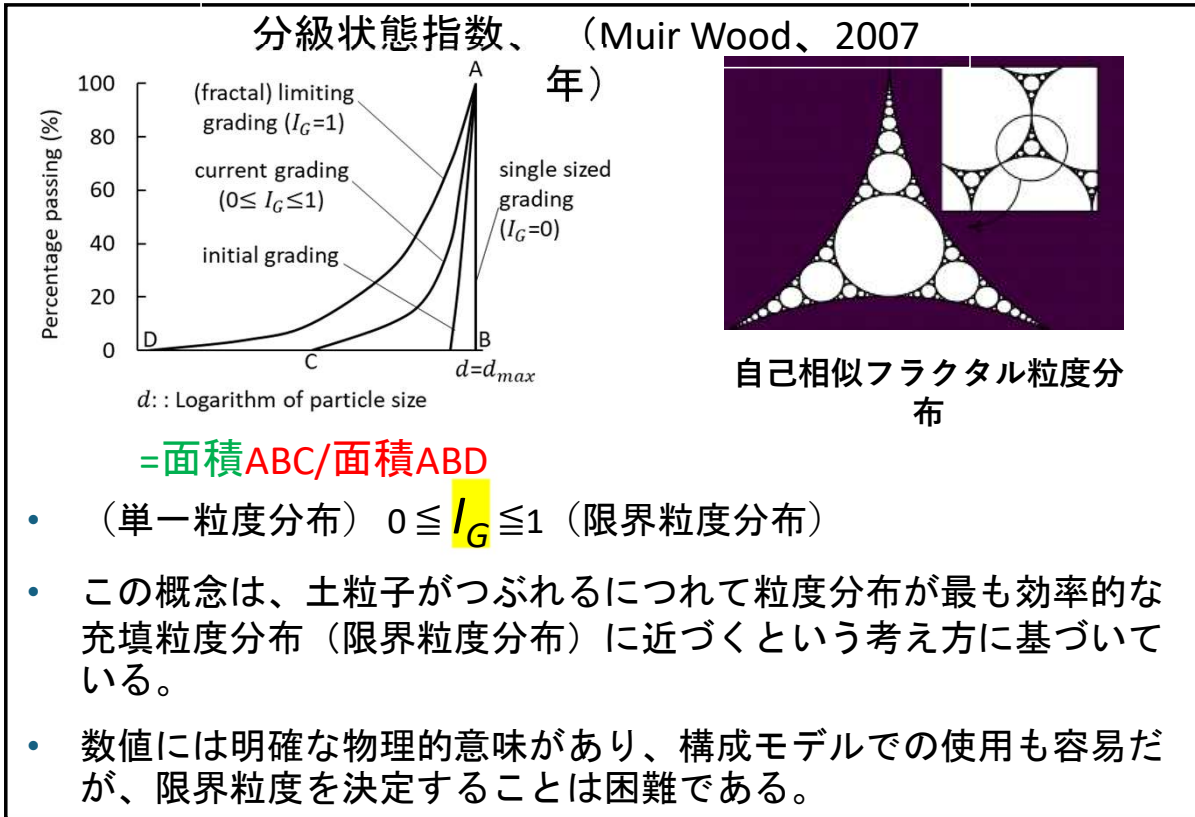
Grading state index (Muir Wood, 2007)



$$I_G = \frac{\text{面積ABC}}{\text{面積ABD}}$$

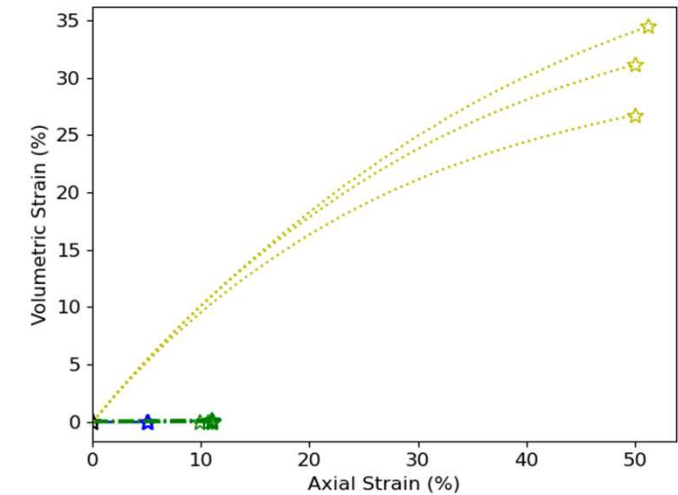
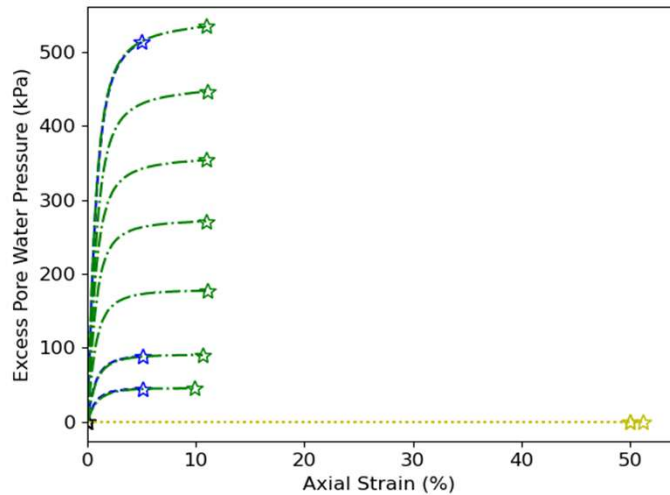
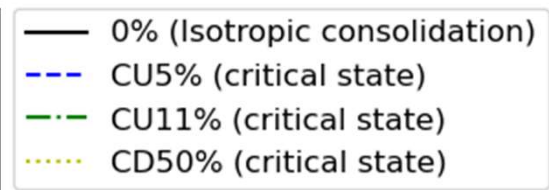
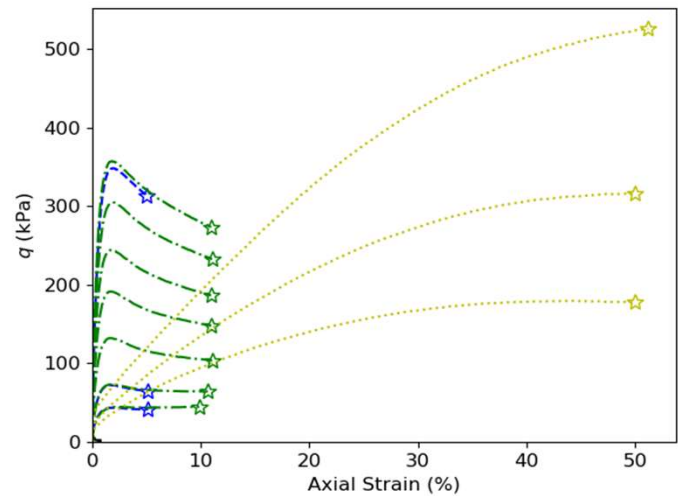
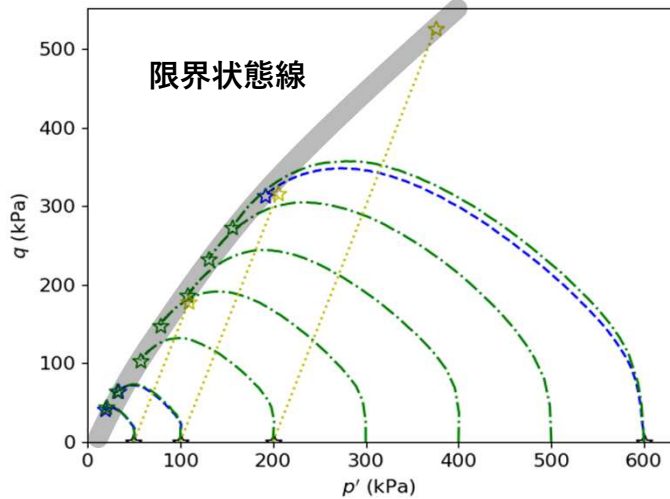
ABC面積とABD面積の比率から算出される。

計算上、限界粒度が必要。



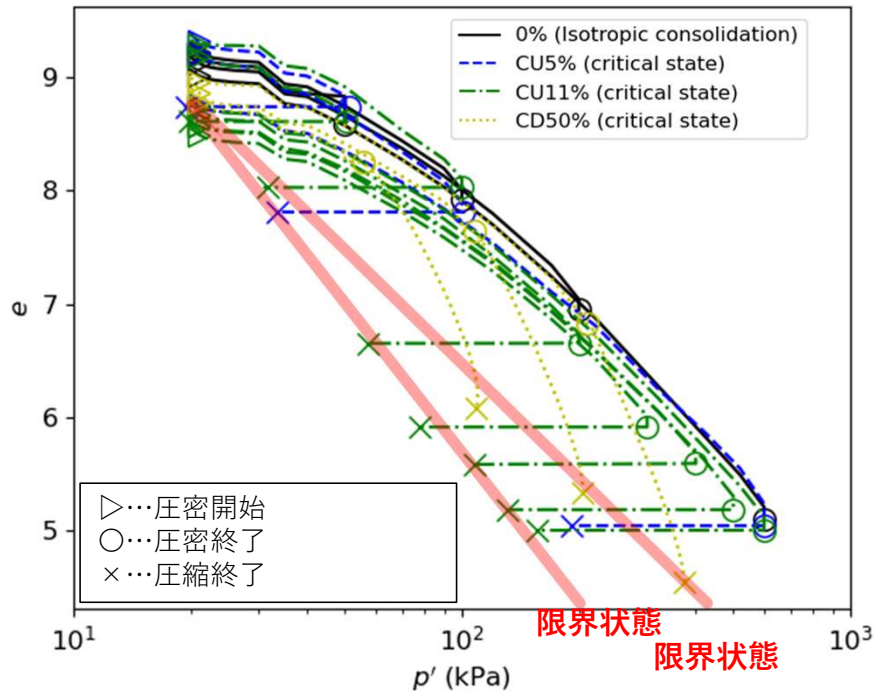
- 限界粒度分布は自己相似フラクタル粒度分布 (いくら拡大しても同じ幾何学的パターンが現れ、空隙が埋め続けられ、粒度分布曲線を対数軸でプロットすると直線になる粒度分布) になると言われている。しかし、無限のフラクタル粒度分布が存在するため、特定の土に対して単一の限界粒度分布を定義するのは難しい。
- 本研究では、オドメーター試験を実施し、高圧 (25MPa) 下で可能な限り粉碎した後の粒度分布曲線を限界粒度分布とみなし、IGを算出した。

# 三軸試験の基本結果

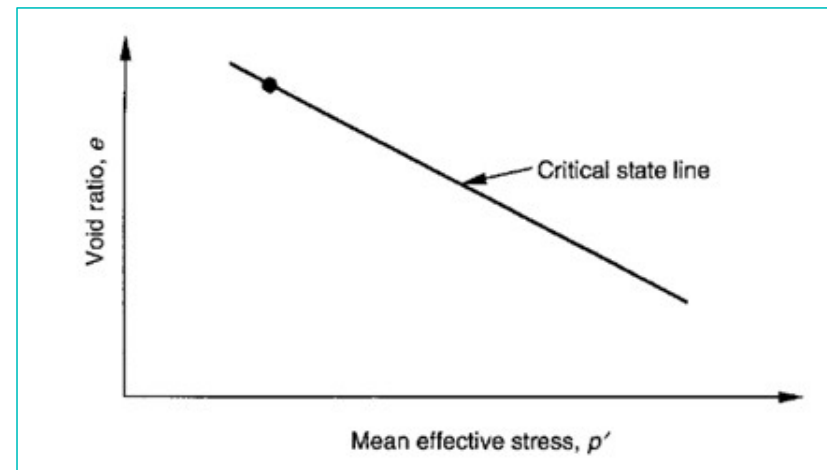


- 前述の通り、全ての試験は同一の粒度分布から開始された。
- この段階では、応力経路 ( $q-p'$ ) が限界状態線に達したデータのみを基本結果として示す。
- 本研究では、体積ひずみが収束していなくても、応力比が応力経路において限界状態線に達した場合は限界状態に達したと判断した。  
(これは粒子破碎が発生する可能性があり、粒度変化が体積変化の継続につながるためである。)

# 三軸試験の基本結果

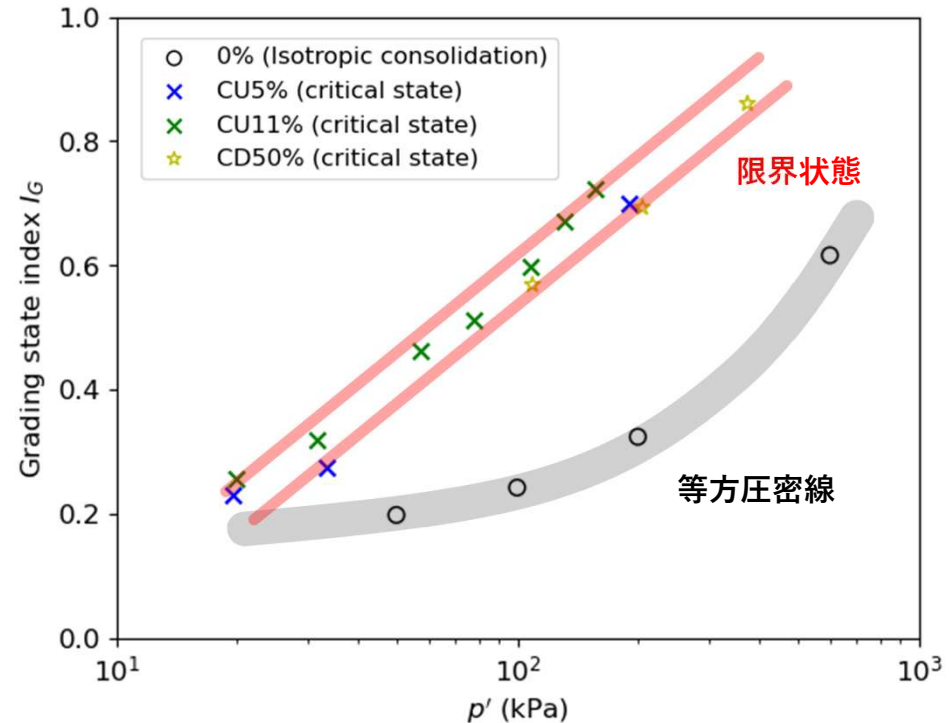
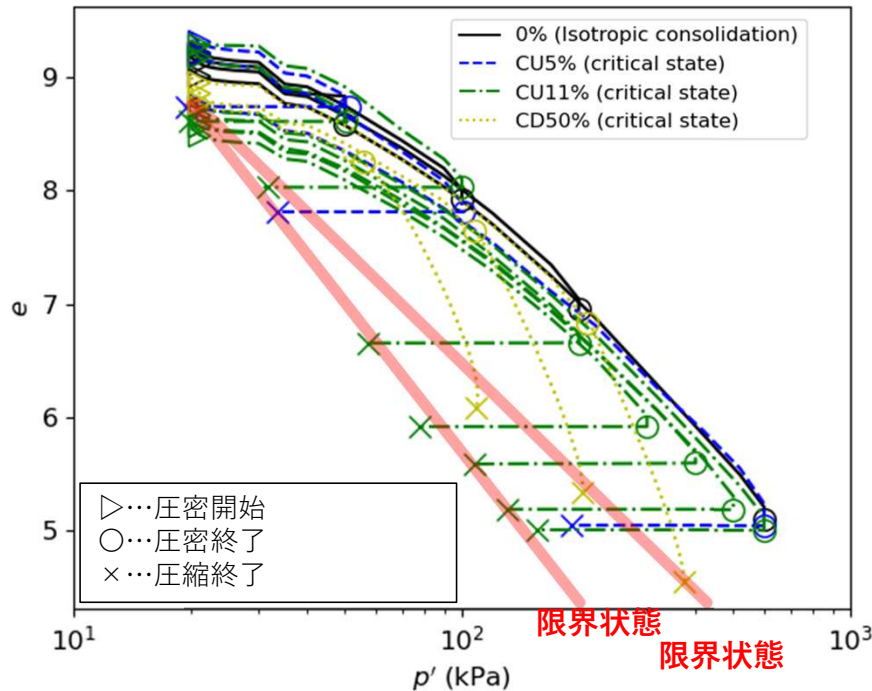


↓通常、同じ粒度分布を持つ緩い砂は一つの限界状態線を持つ

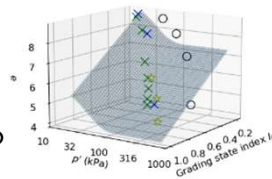


- 単一の限界状態線にはならない。
- 粒子破碎は、ある土を異なる粒度分布を持つ別の土に変えるため。
- 次のスライドでは破碎指数に着目する

# 三軸試験の基本結果



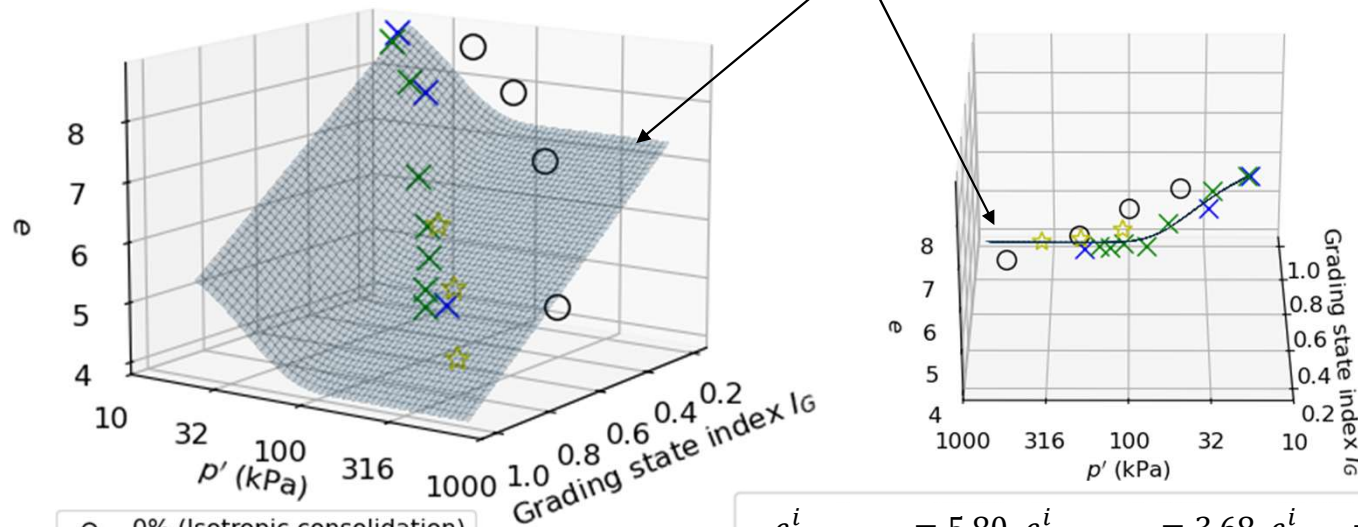
- 最終圧力( $p'$ )を横軸に、破砕量を縦軸にプロットすると、等方圧密線は単一の直線で表せる。
- 限界状態は一般的に単一の直線で表せるが、多少のばらつきがある。  
⇒ これら二つの限界状態グラフにおけるばらつきは、二次元で表現したことに起因する。
- $e$ 、 $p'$ 、 $I_G$  を用いて三次元でプロットすると、単一の限界状態面によって説明できる。



# 三軸試験の基本結果

Critical state surface equation for porous soils (Sato, Kuwano and Otsubo, 2025)

$$e = e_{\text{inter\_min}}^i - e_c I_G + (e_{\text{inter\_max}}^i - e_{\text{inter\_min}}^i) \exp \left[ - \left( \frac{p'}{p_{\text{CS}}} \right)^{k_1} \right] + e_{\text{intra}}^i$$



- 0% (Isotropic consolidation)
- × CU5% (critical state)
- × CU11% (critical state)
- ☆ CD50% (critical state)

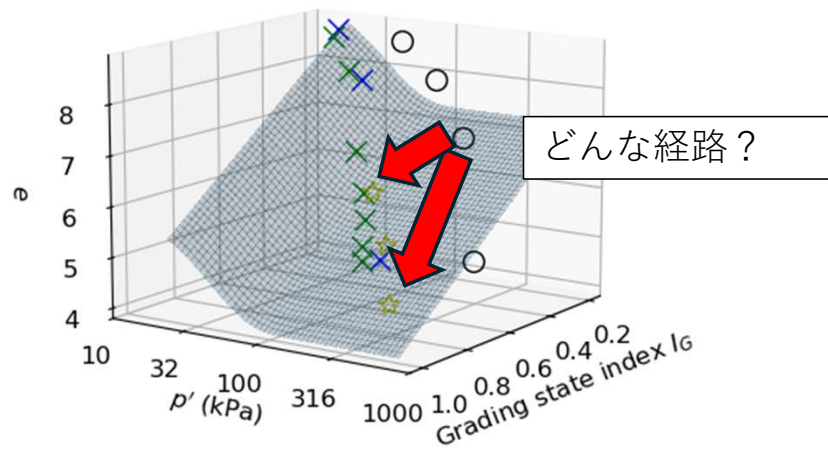
$$e_{\text{inter\_max}}^i = 5.80, e_{\text{inter\_min}}^i = 3.68, e_{\text{intra}}^i = 4.51,$$

$$k_1 = 1.63, e_c = 4.29, p_{\text{CS}} = 39.6 \text{ kPa},$$

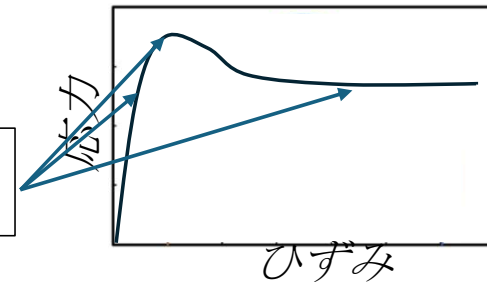
$$(e_{\text{inter\_max}}^{*i} = 1.05, e_{\text{inter\_min}}^{*i} = 0.67)$$

- 限界状態に達した試験結果を限界状態曲面方程式に当てはめた。
- 右図の角度から見ると、この曲面は圧縮、応力、間隙比の関係を効果的に捉えている。
- しかし、等方性圧密の結果は別の曲面に位置しているように見える。

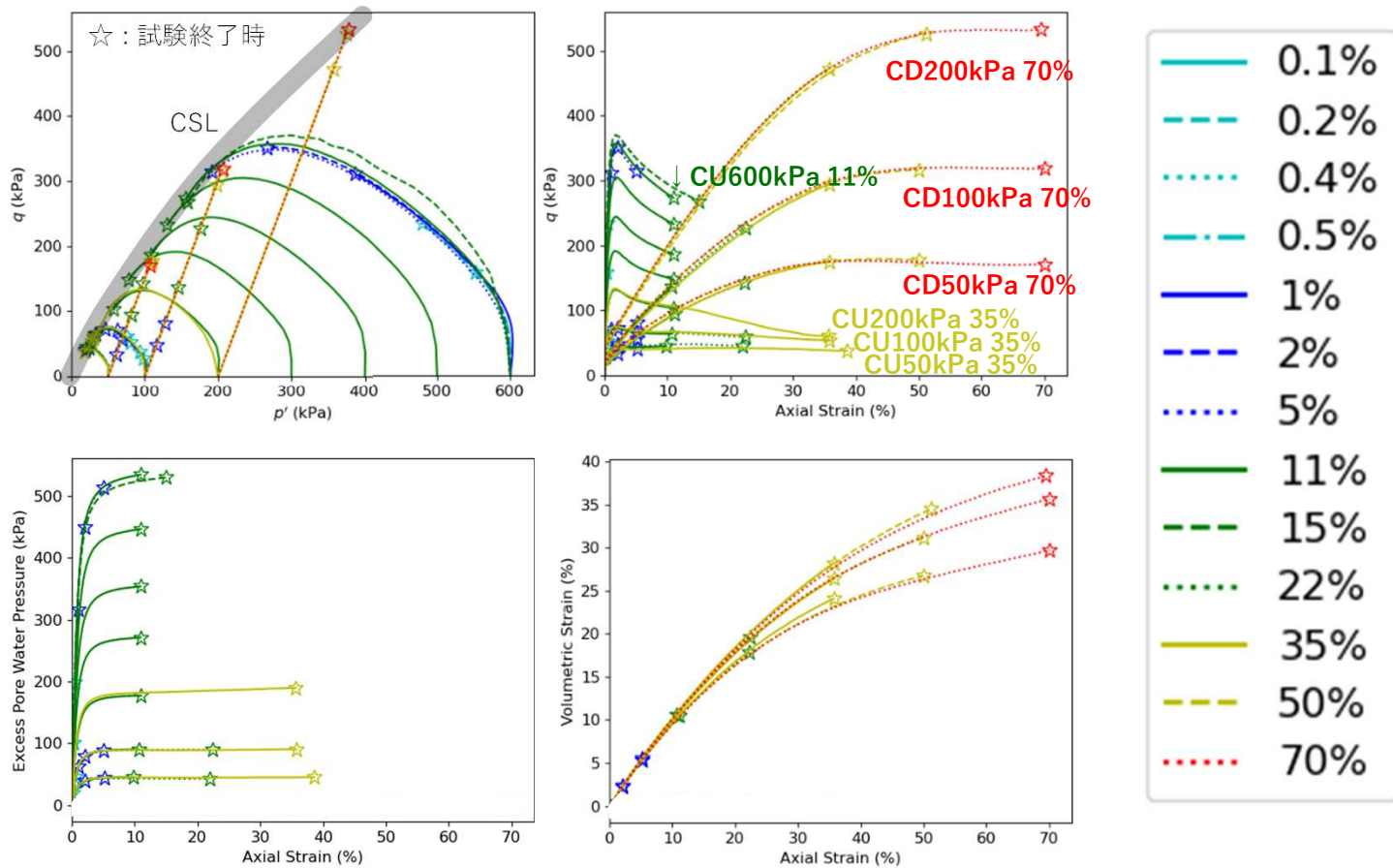
Q：土は限界状態曲面に到達するまで、どのような経路を取るのか？



どこで破碎が起  
こるのか？

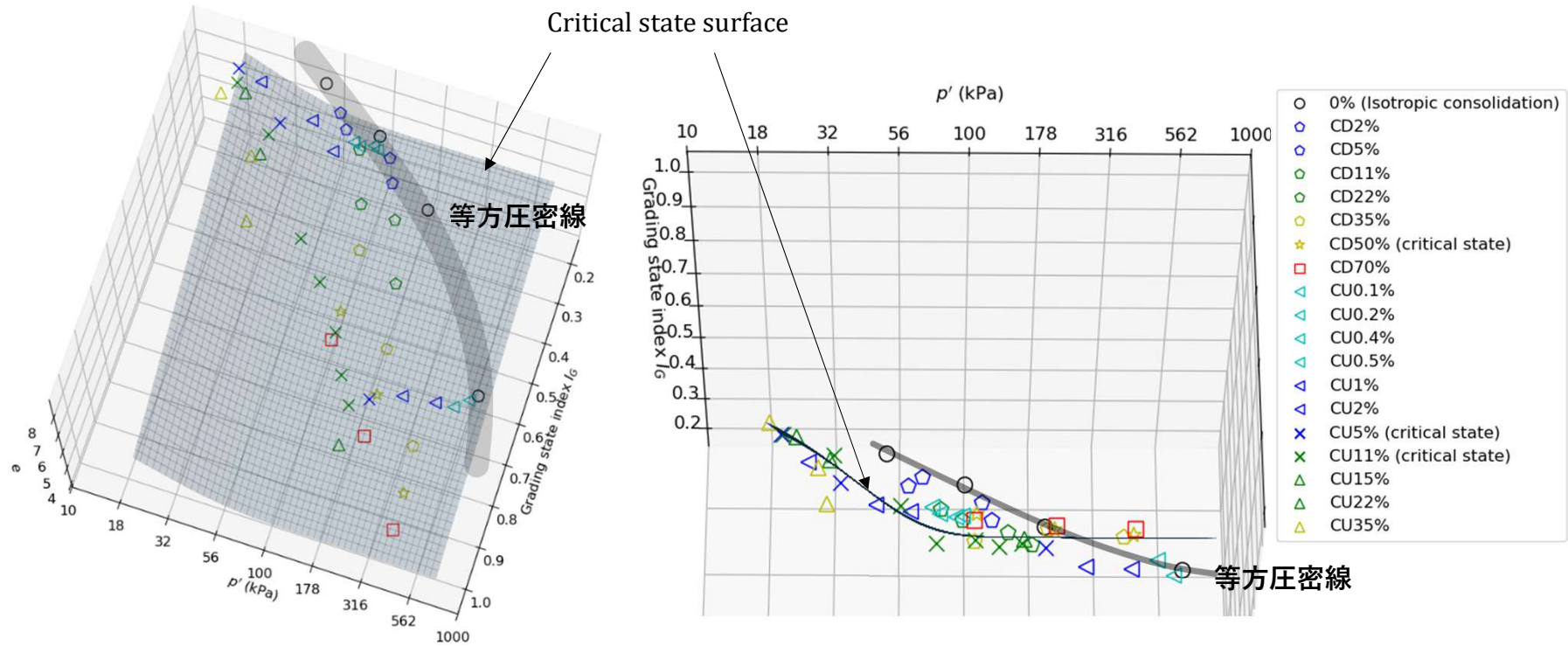


# 限界状態曲面への経路

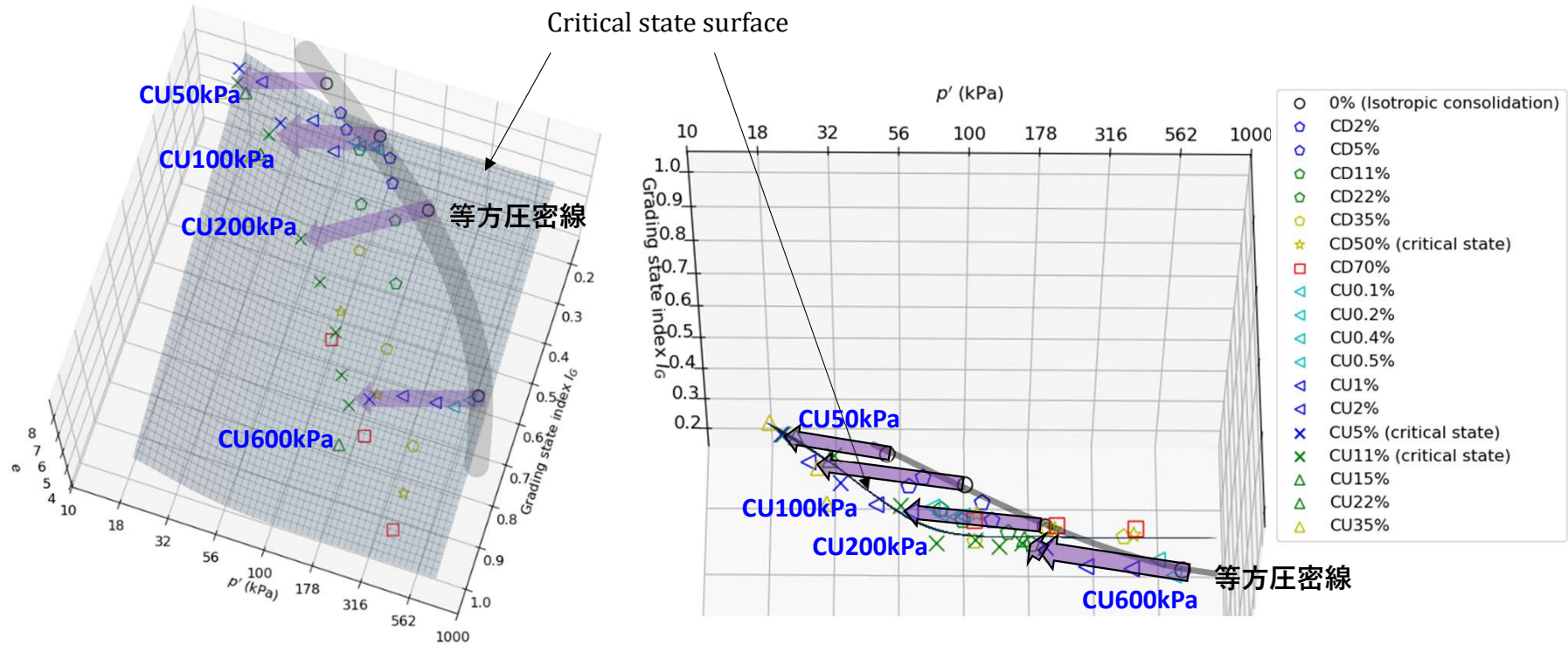


- これを検証するため、同じ条件下で実験を開始し、試験の最終的な軸ひずみを変化させた。
- 実験は再現性が高かった

# 限界状態曲面への経路

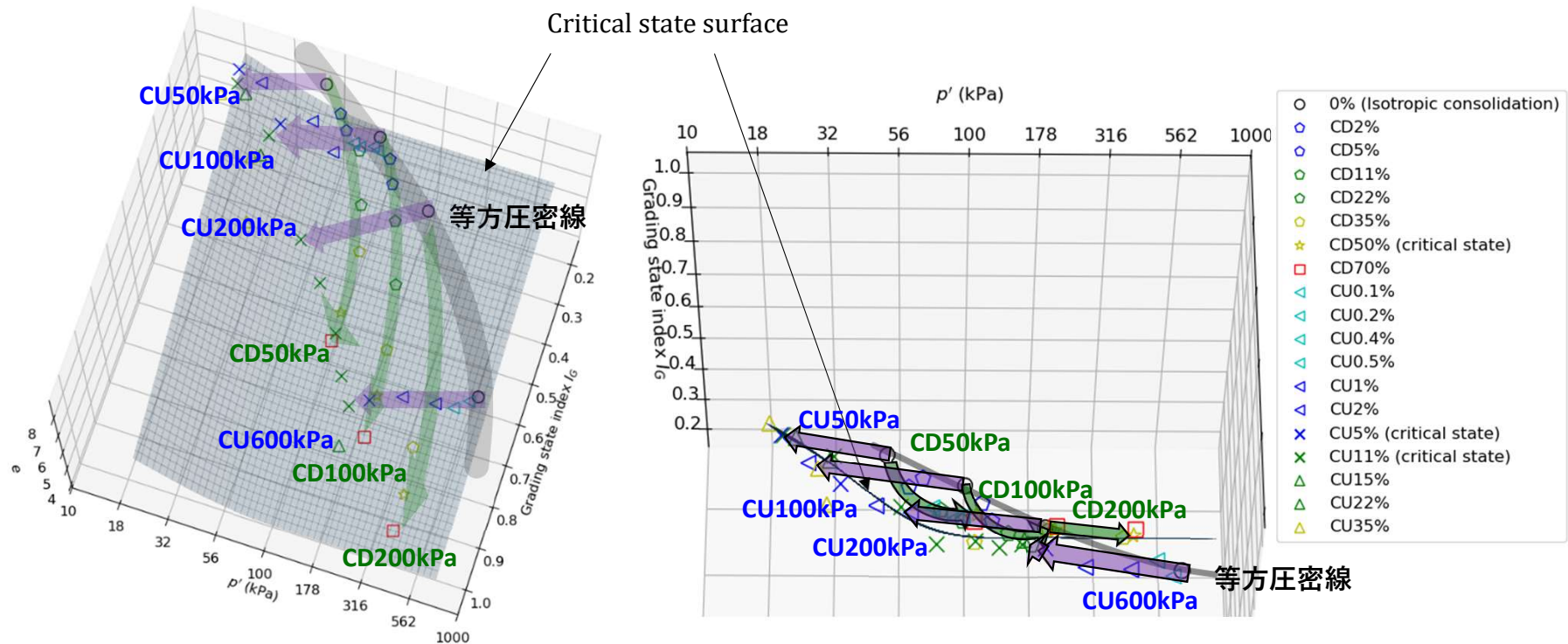


# 限界状態曲面への経路



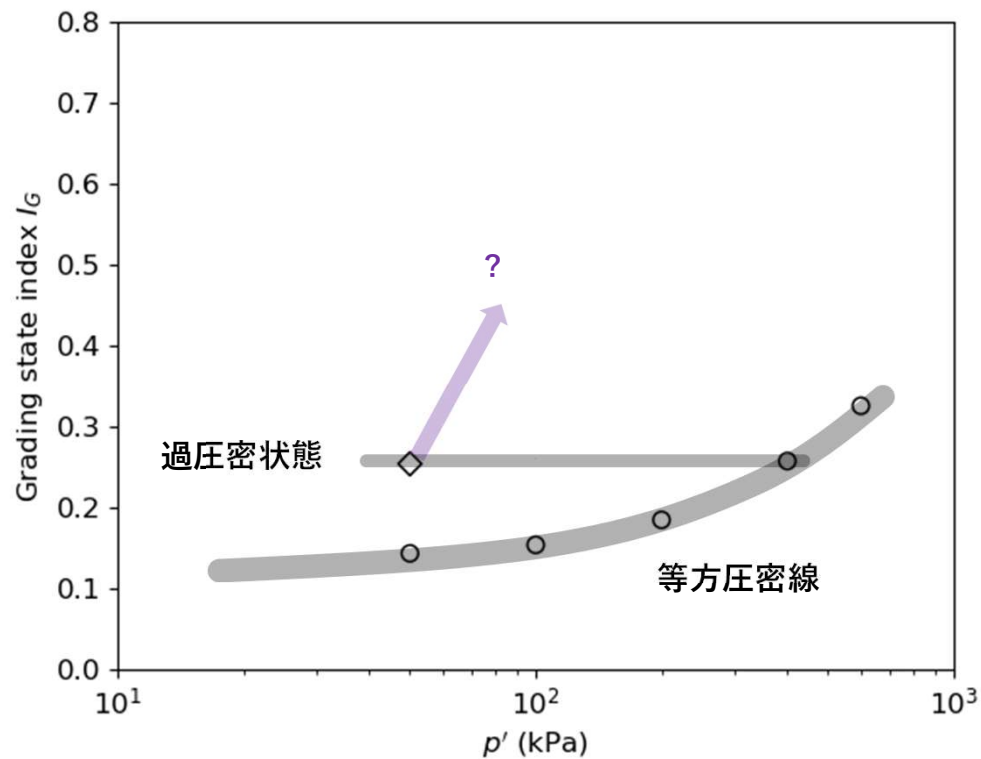
- CU試験では、供試体は粒子破碎を伴いながら限界状態曲面に向かって直線的な経路をたどり、軸方向ひずみ約5%で限界状態曲面に到達した。

# 限界状態曲面への経路



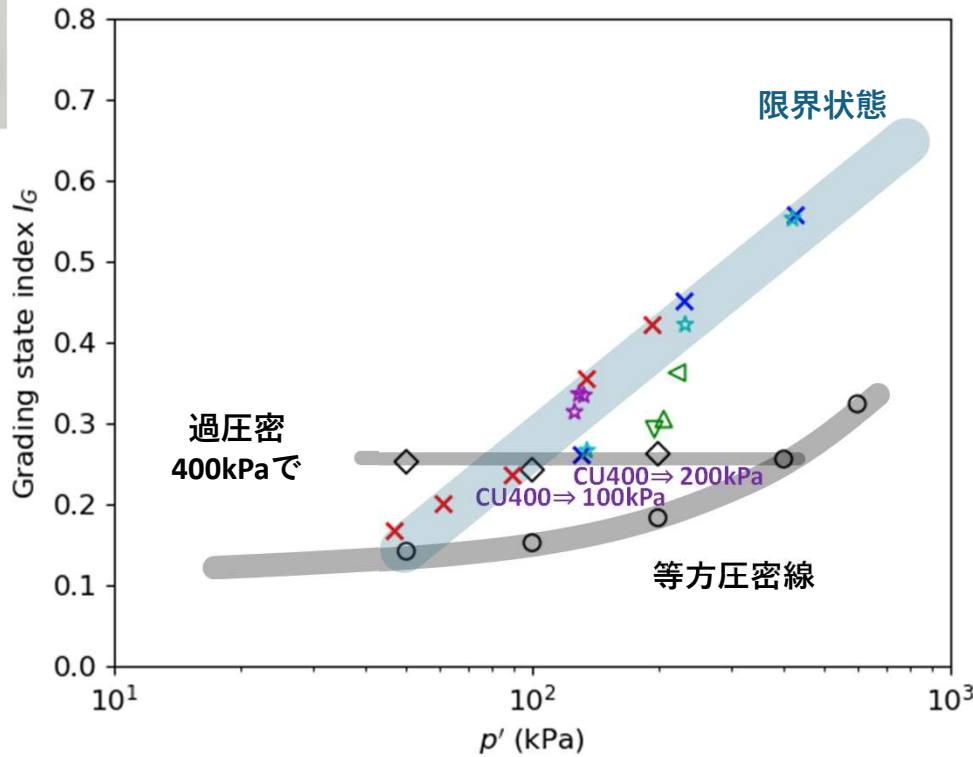
- CU試験では、供試体は粒子破碎を伴いながら限界状態曲面に向かって直線的な経路をたどり、軸方向ひずみ約5%で限界状態曲面に到達した。
- CD試験では、軸ひずみの増加に伴い、圧力と破碎が増加し、供試体は体積が収縮しながら限界状態曲面に徐々に近づき、軸ひずみ約50%で限界状態に達した。

Q2：初期粒度、拘束圧力、間隙比が変化した場合、限界状態はどの位置に収束するのか？

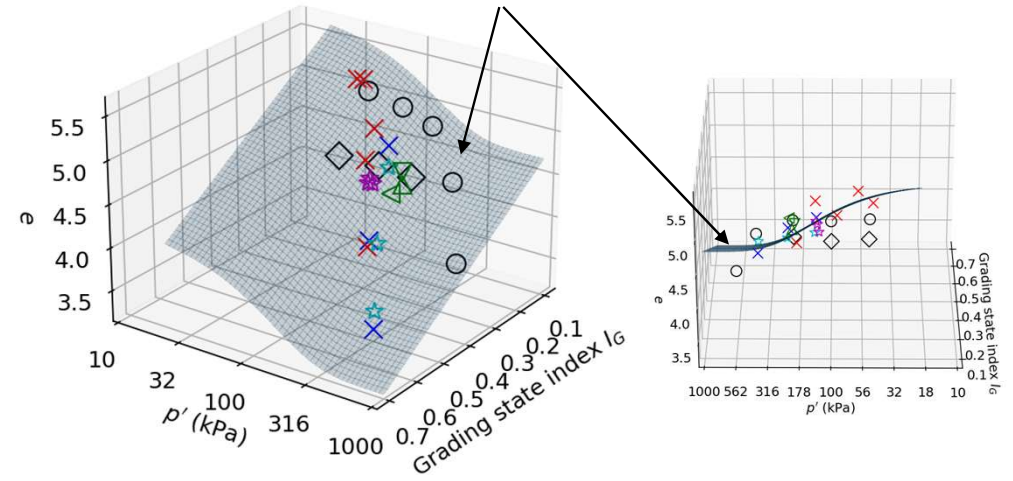


例えば、試料が同じ初期粒度から圧密され、その後過圧密（400 kPa → 50 kPa）された場合、何が起こるか？

# 初期粒度、圧力、間隙比の影響



$$e = e_{inter\_min}^i - e_c I_G + (e_{inter\_max}^i - e_{inter\_min}^i) \exp \left[ - \left( \frac{p'}{p_{CS}} \right)^{k_1} \right] + e_{intra}^i$$



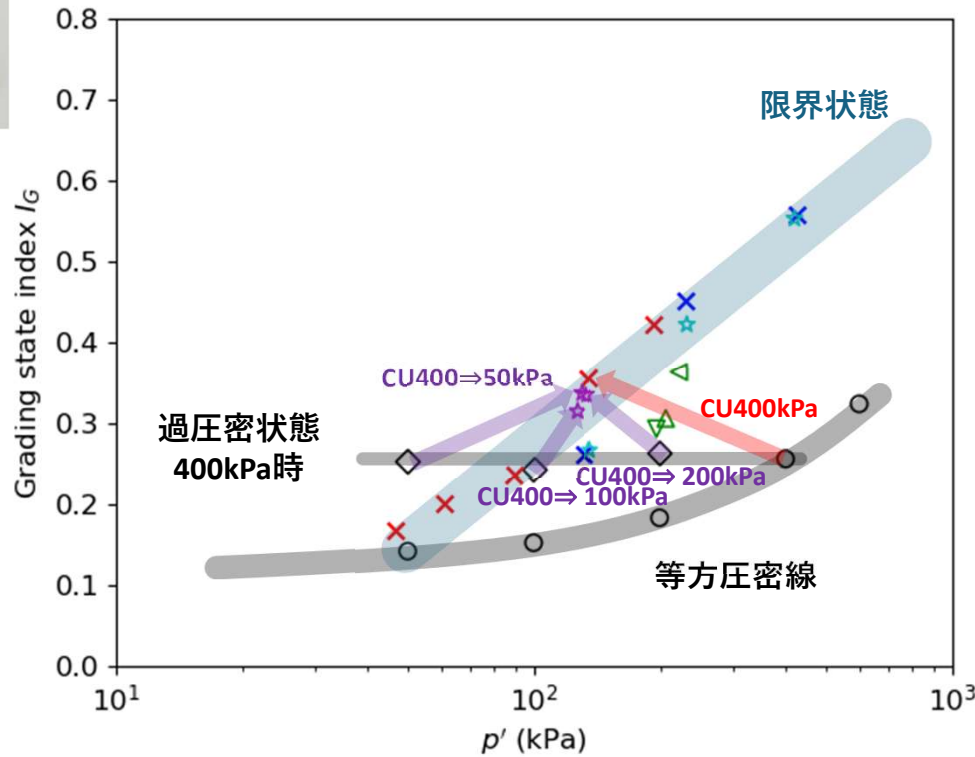
$$e_{inter\_max}^i = 3.0, e_{inter\_min}^i = 2.0, e_{intra}^i = 3.0,$$

$$k_1 = 1.3, e_c = 2.6, p_{CS} = 148 \text{ kPa},$$

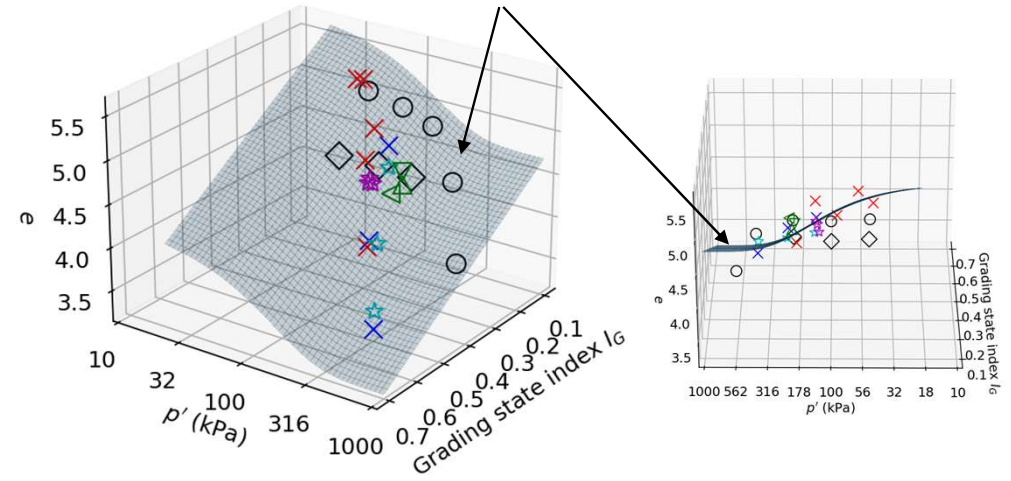
$$(e_{inter\_max}^{*i} = 0.75, e_{inter\_min}^{*i} = 0.50)$$

- Spfa軽石で実験を行った。ここでは400kPaでの過圧密を例に示す。過圧密状態における圧密線は平行となる。

# 初期粒度、圧力、間隙比の影響



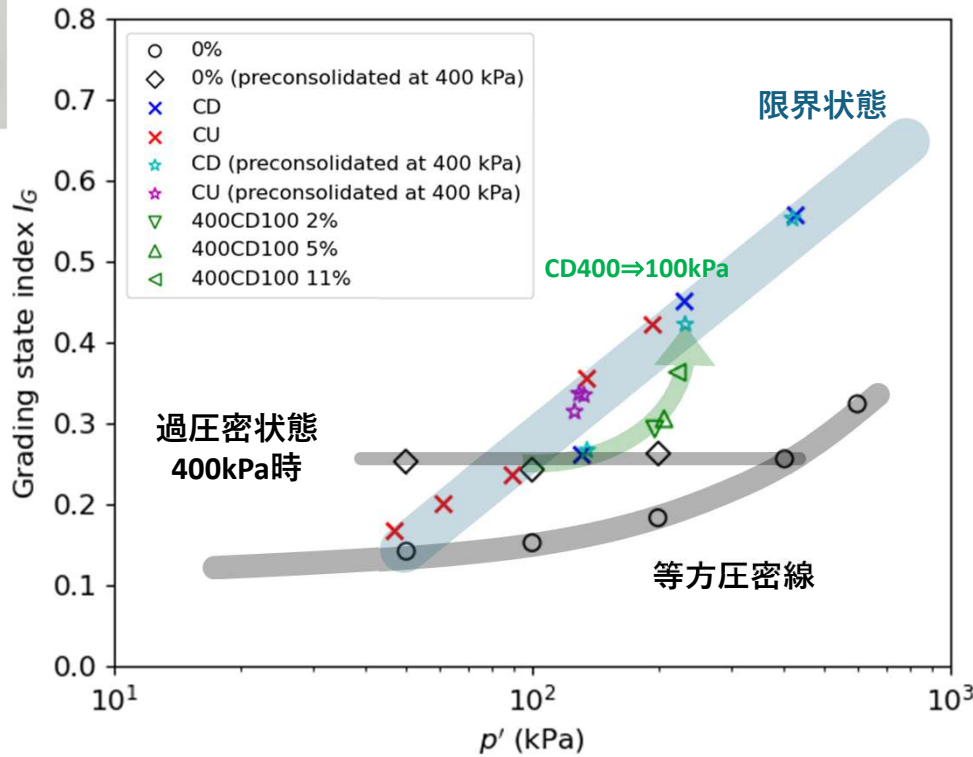
$$e = e_{inter\_min}^i - e_c I_G + (e_{inter\_max}^i - e_{inter\_min}^i) \exp \left[ - \left( \frac{p'}{p_{CS}} \right)^{k_1} \right] + e_{intra}^i$$



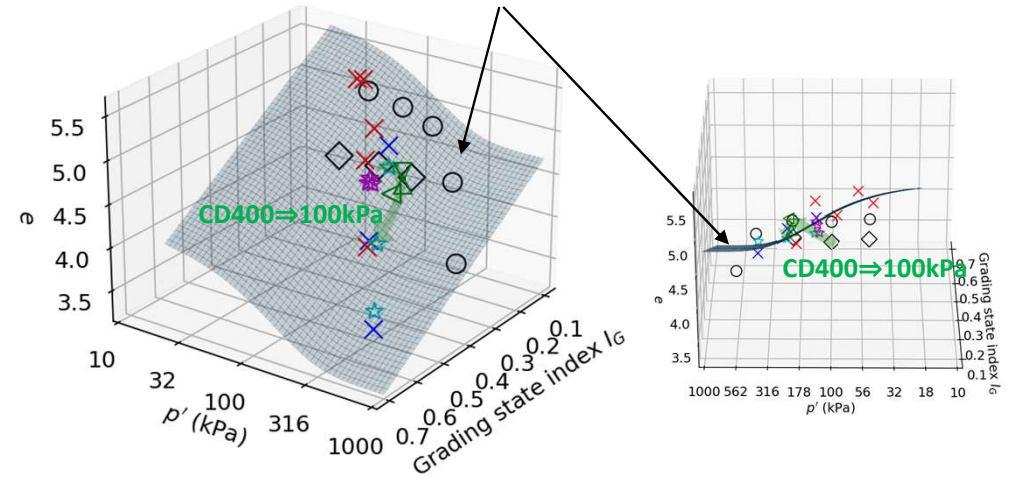
$$e_{inter\_max}^i = 3.0, e_{inter\_min}^i = 2.0, e_{intra}^i = 3.0, \\ k_1 = 1.3, e_c = 2.6, p_{CS} = 148 \text{ kPa}, \\ (e_{inter\_max}^{*i} = 0.75, e_{inter\_min}^{*i} = 0.50)$$

- Spfa軽石で実験を行った。ここでは400kPaでの過圧密を例に示す。過圧密状態における圧密線は平行となる。
- 非排水せん断試験において、400kPaでの過圧密後に試験した3つのケースの限界状態は、400kPaでの通常圧密状態の限界状態と一致した。これは、初期粒度指数 $I_G$ と間隙比 $e$ が類似している場合、非排水せん断における限界状態（応力と粒度に関して）は、過圧密履歴や拘束圧に関係なく一意に定義され得ることを示唆している。

# 初期粒度、圧力、間隙比の影響



$$e = e_{inter\_min}^i - e_c I_G + (e_{inter\_max}^i - e_{inter\_min}^i) \exp \left[ - \left( \frac{p'}{p_{CS}} \right)^{k_1} \right] + e_{intra}^i$$



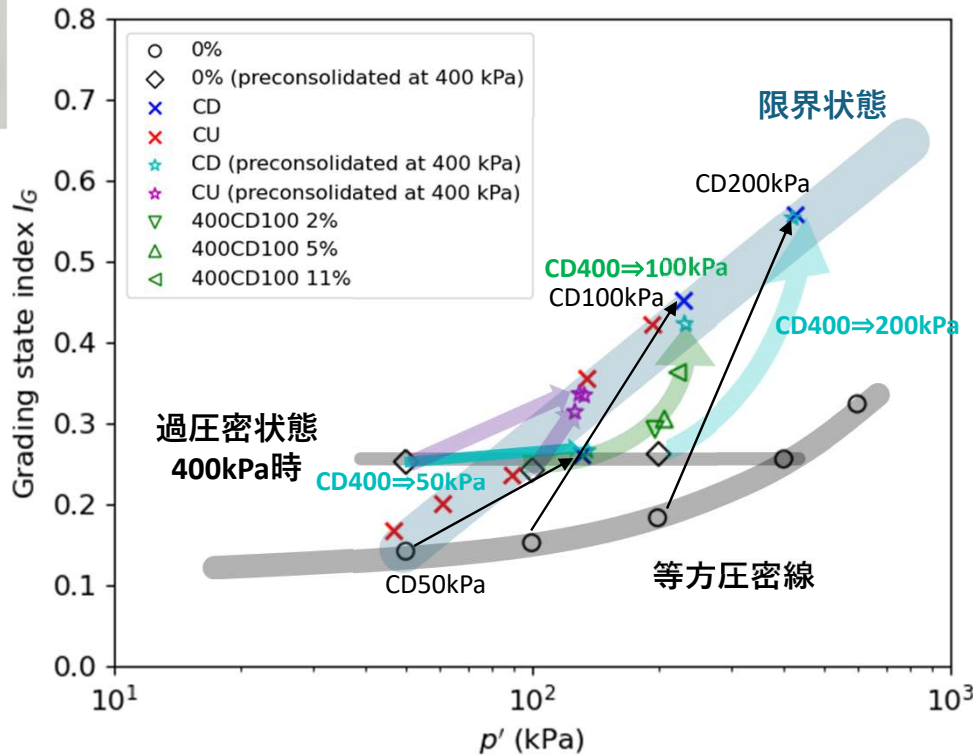
$$e_{inter\_max}^i = 3.0, e_{inter\_min}^i = 2.0, e_{intra}^i = 3.0,$$

$$k_1 = 1.3, e_c = 2.6, p_{CS} = 148 \text{ kPa},$$

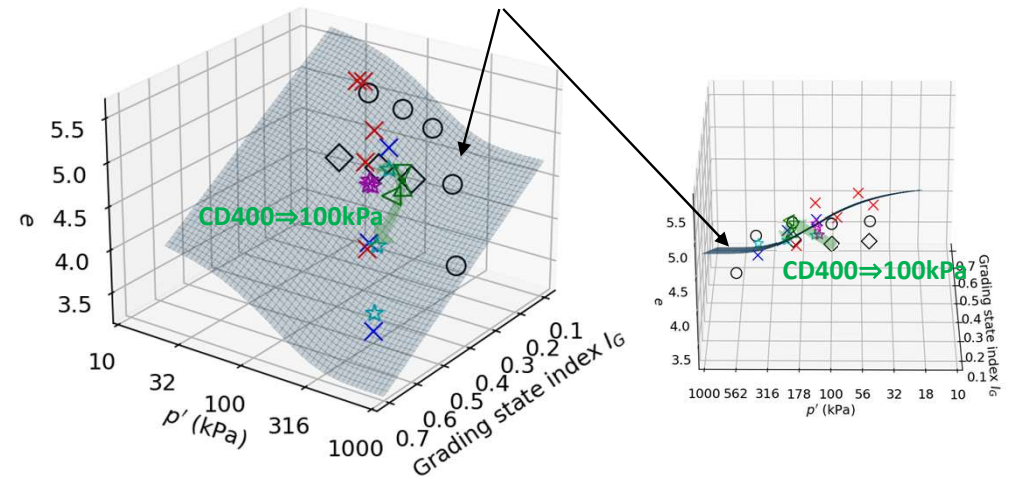
$$(e_{inter\_max}^{*i} = 0.75, e_{inter\_min}^{*i} = 0.50)$$

➤ 緑色の矢印は、4つのCD試験ケースである。これらの試験では、試験体を400kPaまで過圧密した後、せん断前に等方的に100kPaまで減圧している（せん断終了時の軸方向ひずみが異なる）。

# 初期粒度、圧力、間隙比の影響



$$e = e_{inter\_min}^i - e_c I_G + (e_{inter\_max}^i - e_{inter\_min}^i) \exp \left[ - \left( \frac{p'}{p_{CS}} \right)^{k_1} \right] + e_{intra}^i$$



$$e_{inter\_max}^i = 3.0, e_{inter\_min}^i = 2.0, e_{intra}^i = 3.0,$$

$$k_1 = 1.3, e_c = 2.6, p_{CS} = 148 \text{ kPa},$$

$$(e_{inter\_max}^{*i} = 0.75, e_{inter\_min}^{*i} = 0.50)$$

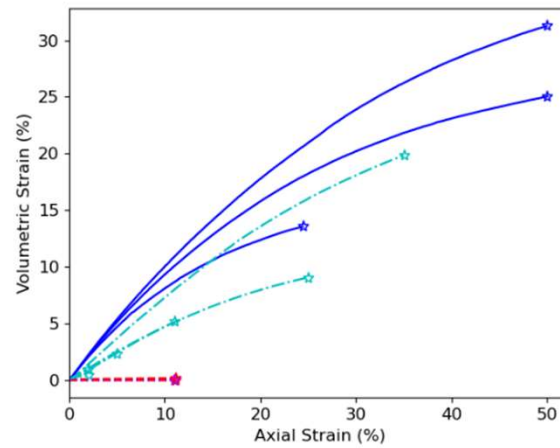
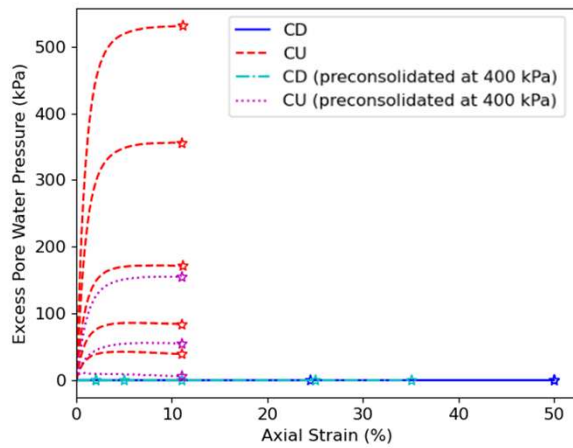
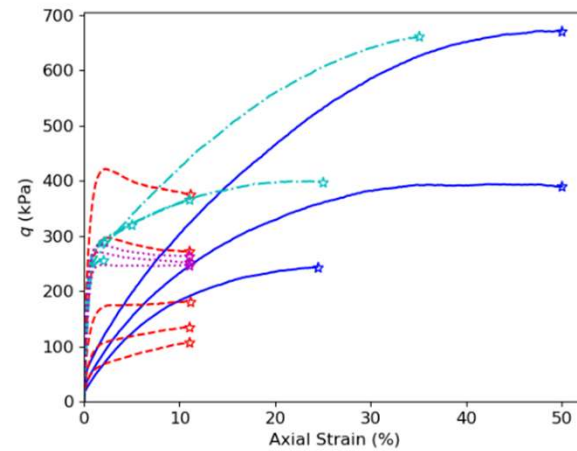
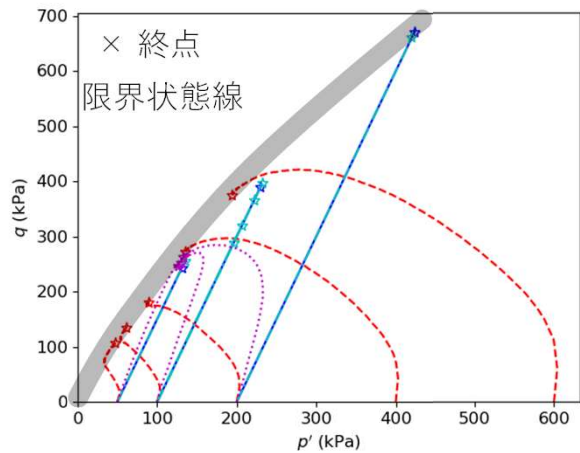
- 緑色の矢印は、4つのCD試験ケースである。これらの試験では、試験体を400kPaまで過圧密した後、せん断前に等方的に100kPaまで減圧している（せん断終了時の軸方向ひずみが異なる）。
- 過圧密状態と通常の圧密状態のCD試験を比較すると、同じ拘束圧下では試験結果がほぼ同一の位置に収束した。これは、排水せん断において拘束圧が同じ場合、限界状態が初期の $I_G$ や $e$ に依存しにくいことを示唆している。

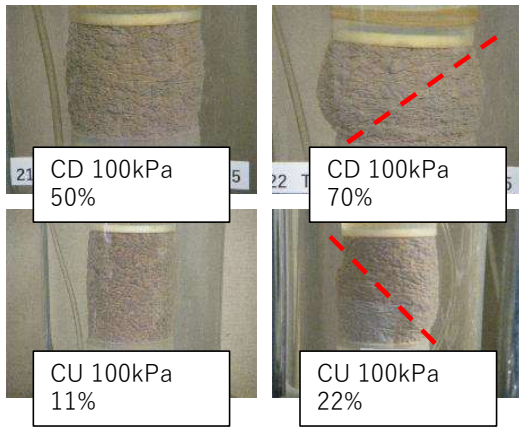
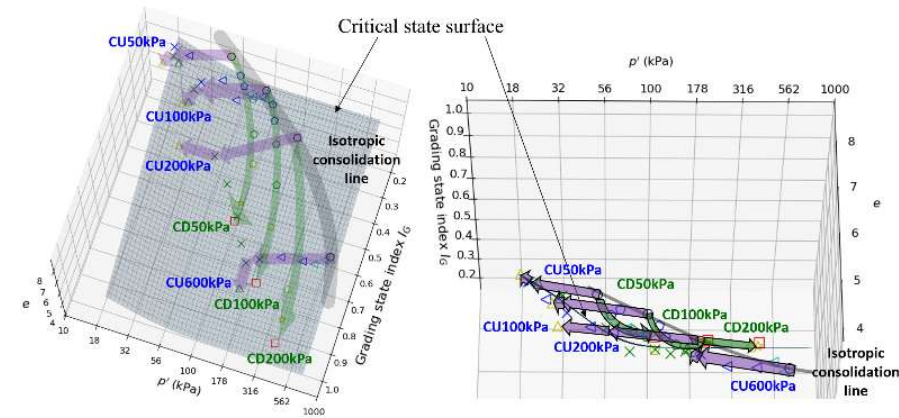
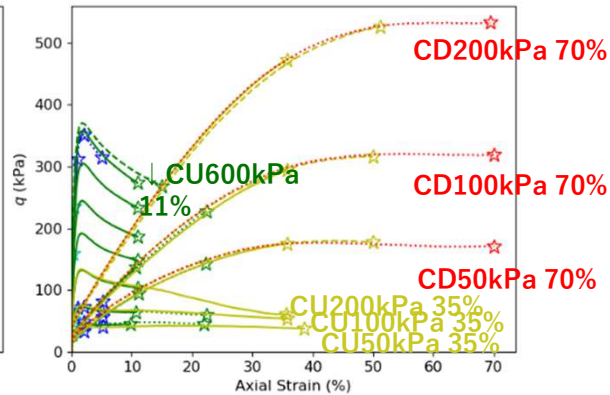
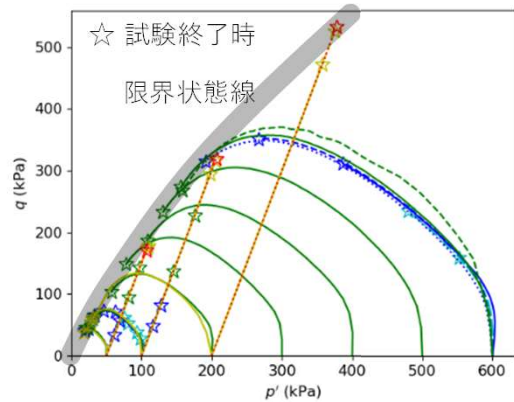
- 新しい構成モデルの開発
- 構成モデルを用いたFEMとMPMシミュレーション
- DEMシミュレーションによるミクロな挙動の把握研究
- 論文執筆や国際会議での発表

Thank you for listening

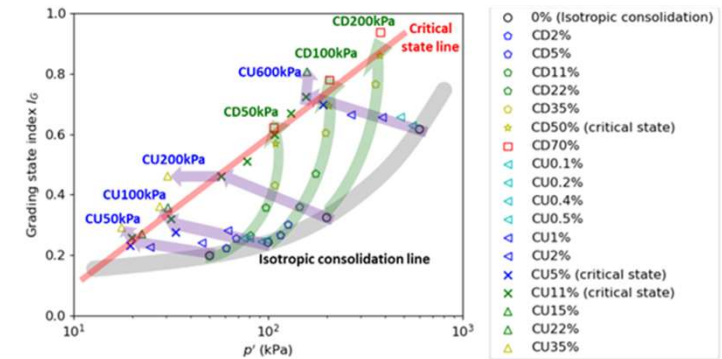
---

# 付録





• 試験後の供試体の観察から、CU試験では軸ひずみ11%まで明確なせん断面は形成されず、CD試験では軸ひずみ50%を超えるまで明確なせん断面は観察されなかった。これらのひずみレベルを超えると、明確なせん断面が視認された。



• 限界状態に達し、明確なせん断面が観察された場合（すなわち、CU試験では軸ひずみ15%以上、CD試験では70%以上）、プロットは赤線で示された限界状態線より上の位置に位置し、より大きな粒子破損を示した。これは、供試体全体が限界状態に達した後も軸方向ひずみが増加し続けたため、せん断面が支配的となり局所的な破砕が進行したためと考えられる。