



# 要素試験を通じた火山性軽石 の力学特性解明と斜面防災手 法の新規検討

---

佐藤 樹

国立研究開発法人 港湾空港技術研究所 研究官

- 毎年火山性土における斜面災害が数多く発生している
- 通常の砂では考えにくい長距離流動や緩斜面の例もある
- 表層崩壊では完全飽和とは限らない

火山性土が斜面崩壊を引き起こした既往の地震被害

年	地震名
1968	えびの地震
1968	十勝沖地震
1970	ペルー地震
1978	伊豆大島近海地震
1978	宮城県沖地震
1984	長野県西部地震
1993	銀路沖地震
1993	北海道南西沖地震
1994	北海道東方沖地震
1994	三陸はるか沖地震
1997	鹿児島県北西部地震
2001	エルサルバドル地震
2003	三陸南地震
2003	十物沖地震
2008	岩手・宮城内陸地震
2011	東北太平洋沖地震
2016	熊本地震
2018	北海道胆振東部地震



熊本地震 阿蘇(2016)

(ソース <http://news.mjcom.jp/sp/domestic/story/all/ASJ4R05N2J4QTIPE054.html>)



北海道厚真町の斜面災害(2018)

## 火山性土(特に粗粒土)の特徴

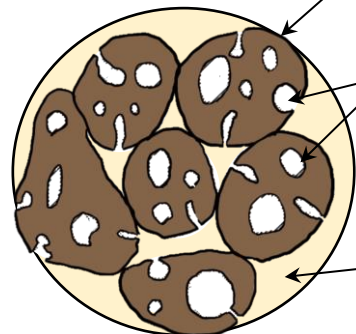
- 軽石やスコリアを含む火山放出物に由来し、マグマ噴出時に冷え固まる過程で溶解物質の破片や粒子が溶結

### 複雑な粒子構造

粒子破碎	多孔質な粒子
高間隙 (高い圧縮性)	高い保水性
	非～低塑性



多孔質粒子



内間隙

間隙



- 火山性土は”特殊土”に分類され、個別に議論されてきた

# 研究の最終的な目的

破碎する多孔質粒状体の力学特性を体系的に明らかにする



人工多孔質粒状体  
(固化破碎土、軽量混合  
処理土、多孔質ろ材、マ  
クロポーラス材料など)



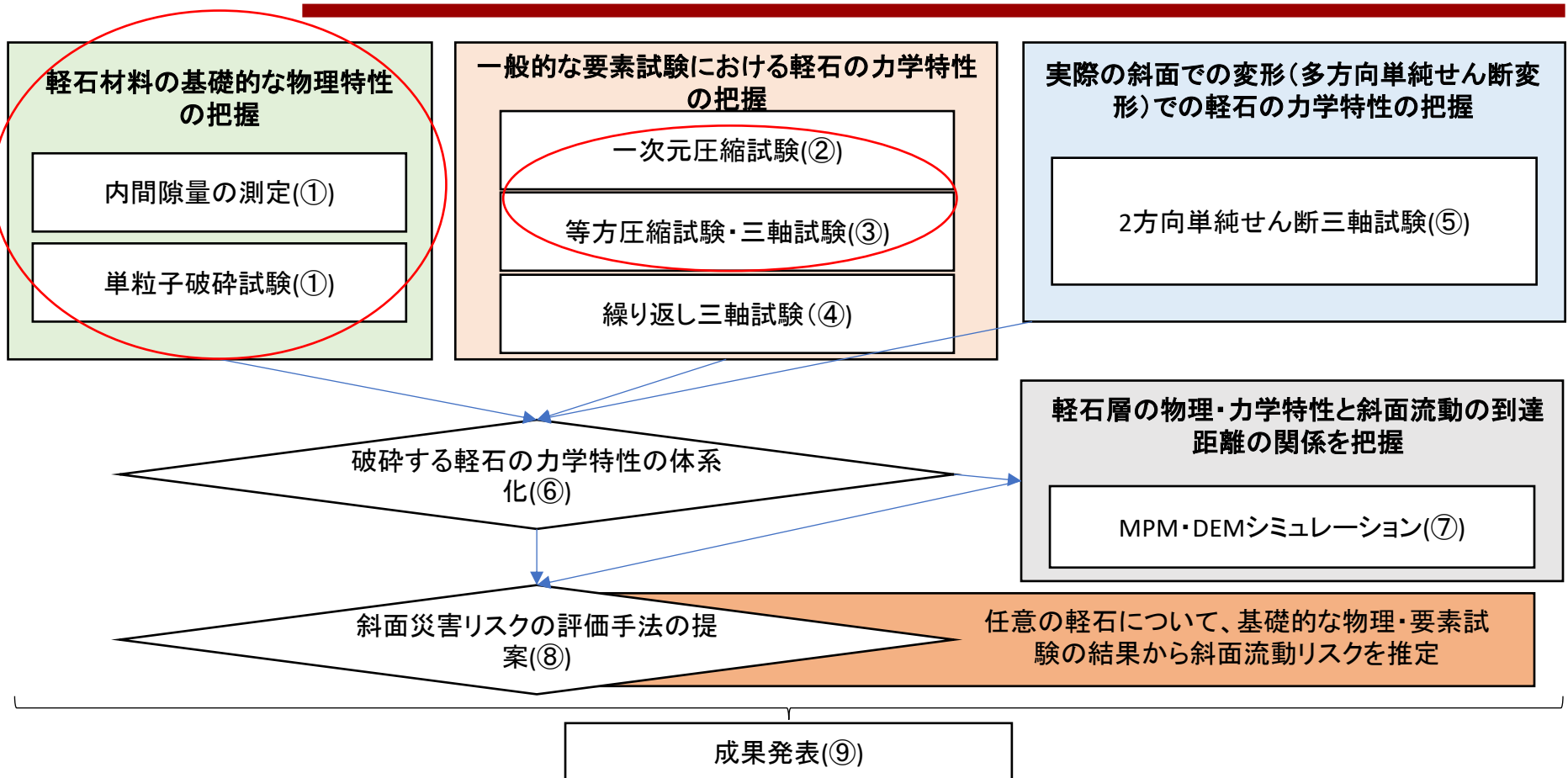
自然の多孔質粒状体  
(軽石、珪藻土など)



その他(おかきなど)

(出典:

[https://www.torobisen.jp/sho\\_pdetail/000000000034/](https://www.torobisen.jp/sho_pdetail/000000000034/))



## 軽石材料の基礎的な物理特性の把握

内間隙量の測定(①)

単粒子破碎試験(①)

### 前半

単粒子破碎試験の結果

内間隙比分布の測定に関する研究の一部結果

## 一般的な要素試験における軽石の力学特性の把握

一次元圧縮試験(②)

等方圧縮試験・三軸試験(③)

### 後半

合計100ケース以上実施済。

本日は、一部の結果(Ta-d軽石の三軸圧縮試験)を少し紹介



先々週の学会でISSMGEからBright Spark Lecture賞を受賞



前半

---

# 軽石の種類

人工軽石AP



漂流



Ta-d

En-a

Spfa



北海道勇払郡



北海道厚真町



GSJ, AIST

漂流軽石

全ての軽石で、最大粒径は概ね40mm程度



	土粒子密度	液性限界	塑性限界	塑性指数	アスペクト比	12.7~19mmでの内間隙比
Ta-d-p	2.574	99	94		1.30	5.59
Spfa	2.548	56	NP	NP	1.44	5.06
En-a	2.636	51	NP	NP	1.30	2.77
漂流軽石 (DP)	2.390	-	-	-	1.35	2.62

➤ どれも高い内間隙比(CT計測)

# 単粒子破碎試験結果

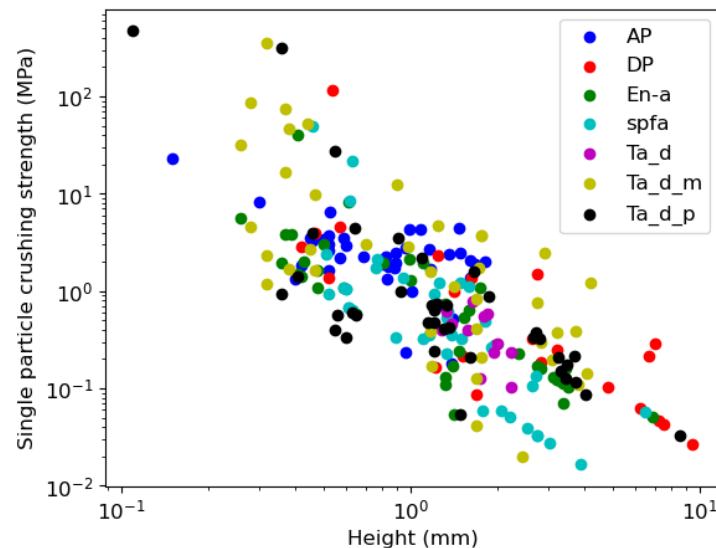


単粒子破碎試験のイメージ



実際の写真

通常の砂  
(豊浦砂など)



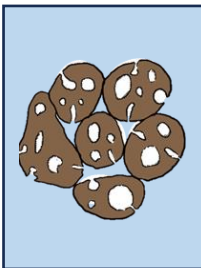
試験結果

# 内間隙比の計測方法

## 乾燥ピクノメーター法

粒子をピクノメータに入れ、直ちに計測し、体積を計算

計測時間の影響を受ける  
泡の影響



## カウント法

粒子の数から体積を概算  
(1~2mmが100個 など)

簡単

小さい粒子に適用できない



## パラフィン法

パラフィンでコーティングした粒子をピクノメータに入れ、体積を計算

砂以下に適用できない

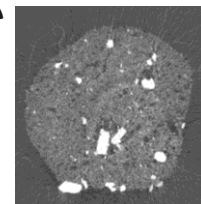


## CT計測

CT装置で1つの粒子をスキャンし、体積を計算

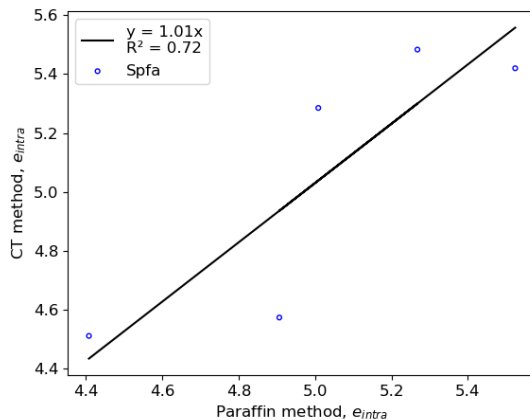
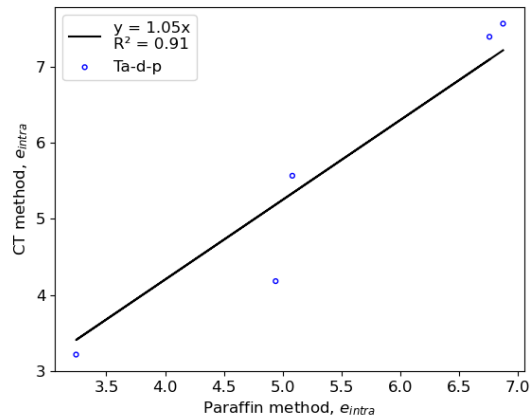
砂以下に適用できない

時間とコストがかかる



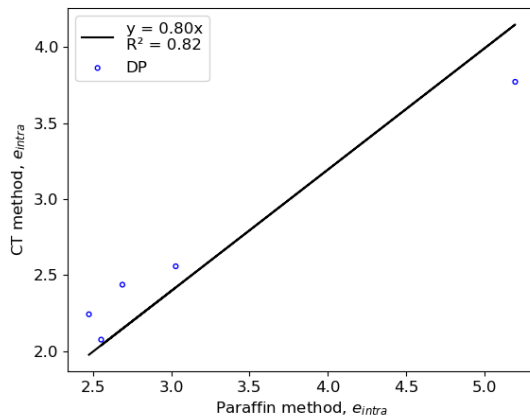
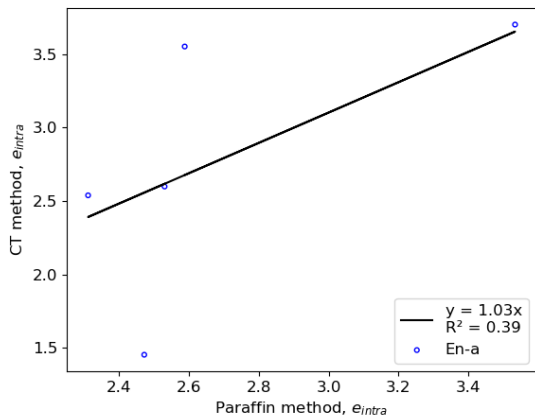


# CT vs パラフィン法

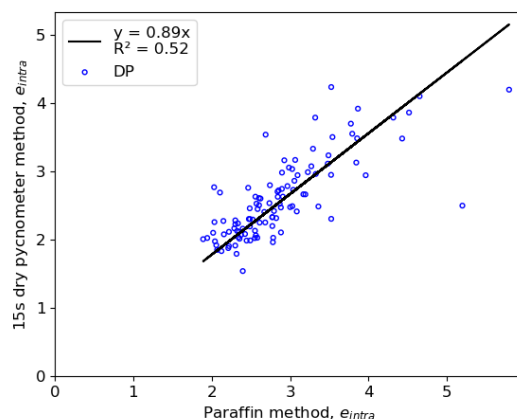
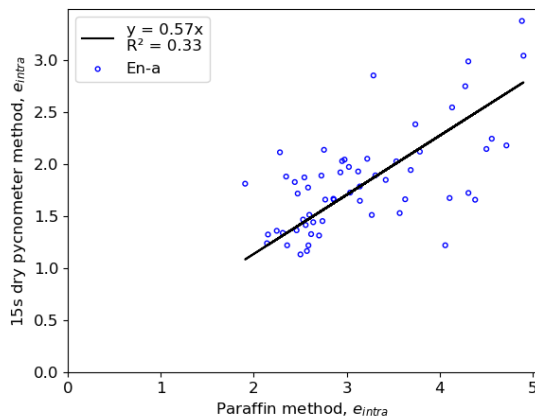
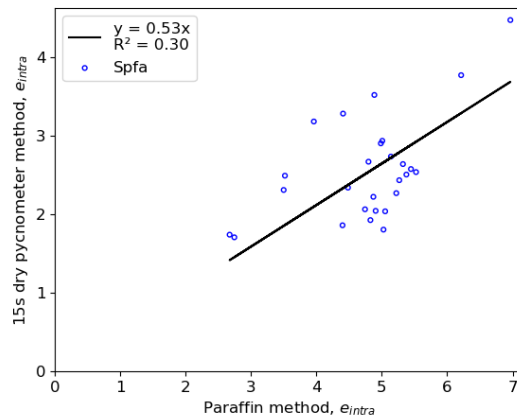
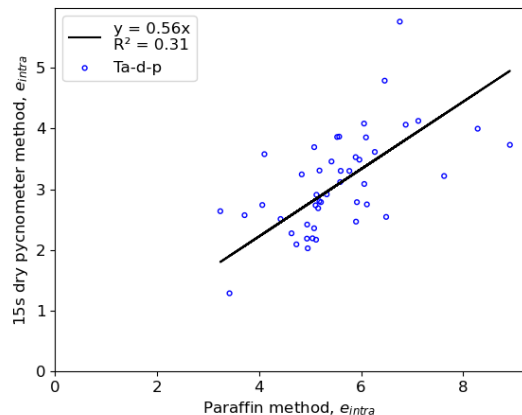


➤ 高い相関

➤ CTが真値とするならば、  
パラフィン法は十分な精  
度で計測できている？



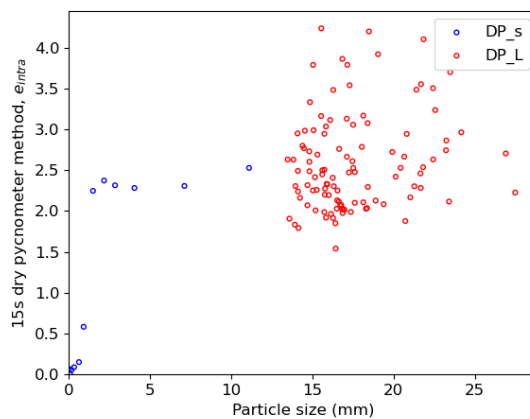
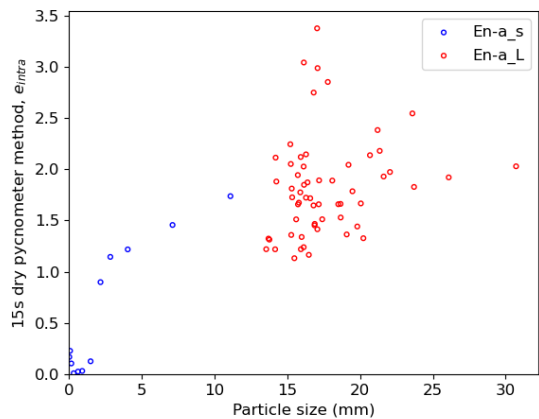
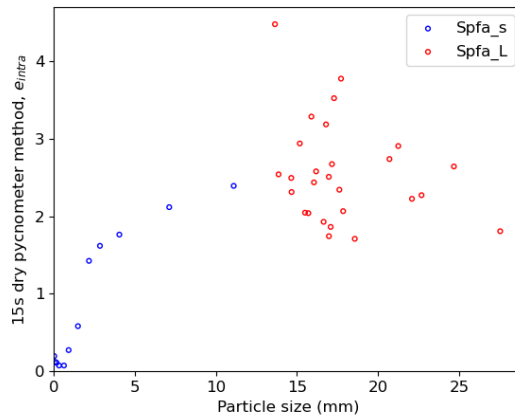
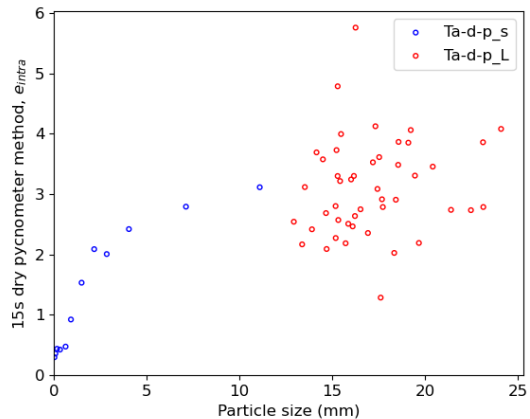
# 乾燥ピクノメータ法 vs パラフィン法



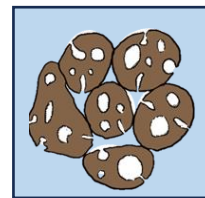
➤ 15秒の乾燥ピクノメータ法であれば、ピクノメータの半分程度の値？

➤ 独立気泡が多いと思われる漂流軽石では、高い相関

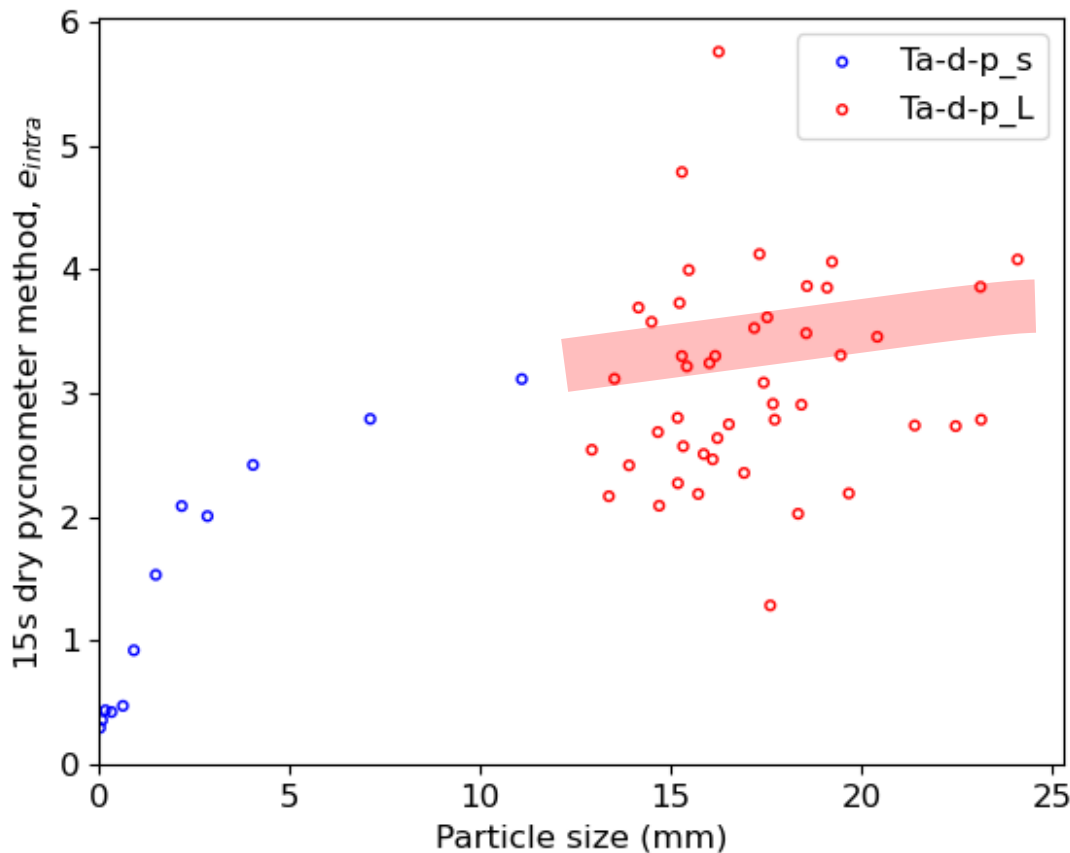
# 15秒乾燥ピクノメータ法の内間隙分布



- 内間隙分布を描くには、あらゆる粒径で測定可能な乾燥ピクノメータ法が最適
- パラフィン法より低い値が出るため、相関を計測し、補正することが必要

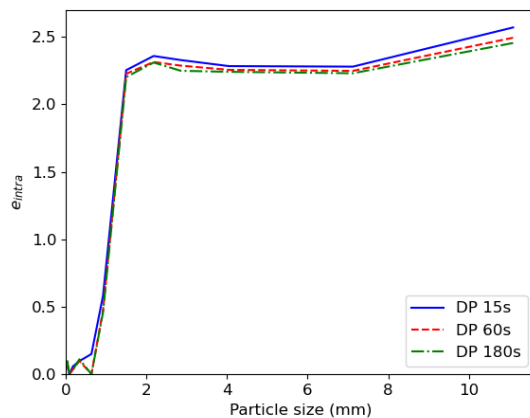
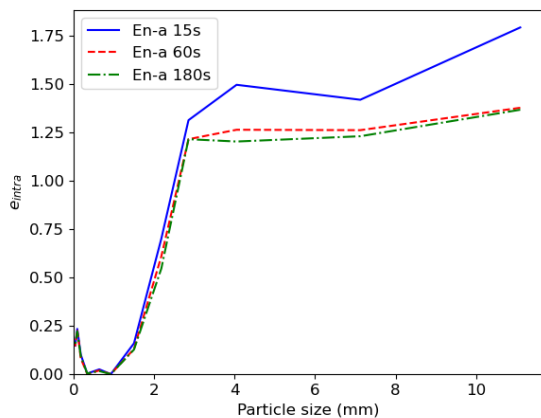
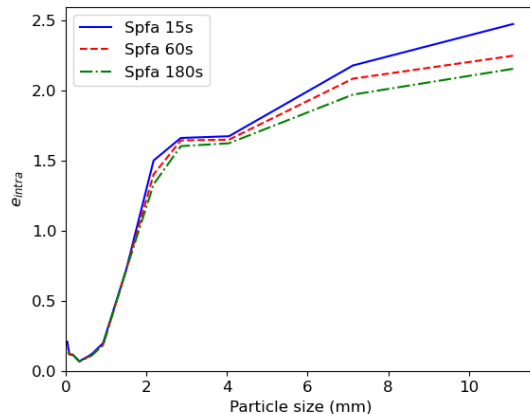
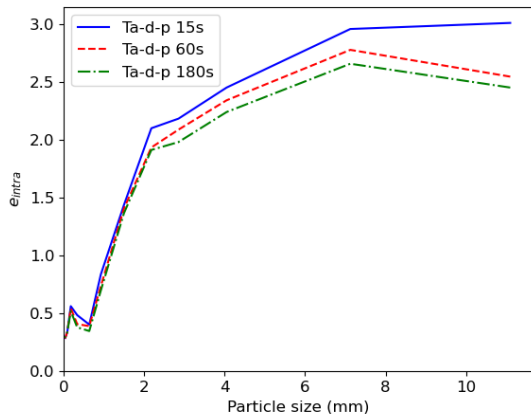


# 15秒乾燥ピクノメータ法の内間隙分布

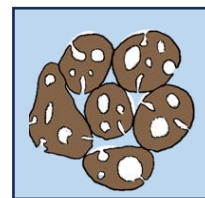


- 内間隙分布を描くには、あらゆる粒径で測定可能な乾燥ピクノメータ法が最適
- パラフィン法より低い値が出るため、相関を計測し、補正することが必要

# 乾燥ピクノメータ法の時間の影響

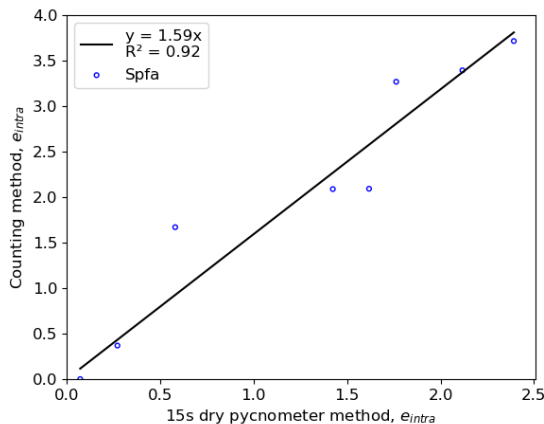
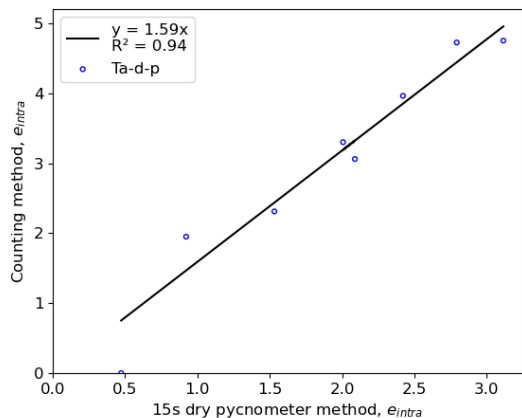


- 2mm以上の粒径では、時間とともに計測される内間隙比が減少傾向
- 独立気泡が多いと思われる漂流軽石では、時間による影響がほぼ無い

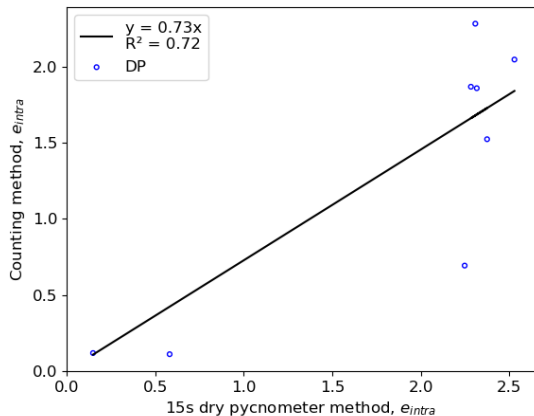
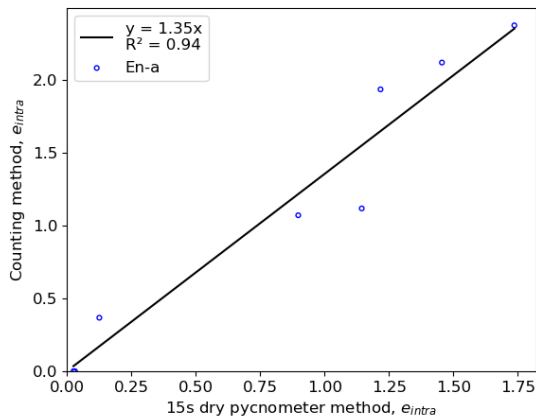




# 乾燥ピクノメータ法 vs カウント法



- 一定の相関がある
- 独立気泡が多いと思われる漂流軽石では、時間による影響がほぼ無い



	CT	パラフィン	乾燥ピクノ	カウント法
Ta-d-p	100.0	95.2	53.3	84.8
Spfa	100.0	99.0	52.5	83.4
En-a	100.0	97.1	55.3	74.7
漂流軽石(DP)	100.0	122.0	108.5	79.2

- CTとパラフィン法は非常によく相関(漂流軽石を除く)
- 乾燥ピクノメータ法は、細かい粒子も含めて内間隙分布を描ける。
- 乾燥ピクノメータ法は、粒子の内間隙の状態によって値にブレがある為、パラフィン法と比較し、相関関係を割り出して補正すべき。
- カウント法は、真値の8割程度で安定しており、簡便な方法として有効

## 軽石材料の基礎的な物理特性の把握

内間隙量の測定(①)

単粒子破碎試験(①)

## 一般的な要素試験における軽石の力学特性の把握

一次元圧縮試験(②)

等方圧縮試験・三軸試験(③)



先々週の学会でISSMGEから  
Bright Spark Lecture賞を受賞

## 後半

合計100ケース以上実施済。

本日は、一部の結果(Ta-d軽石の三軸圧縮試験)を少し紹介

続いて...



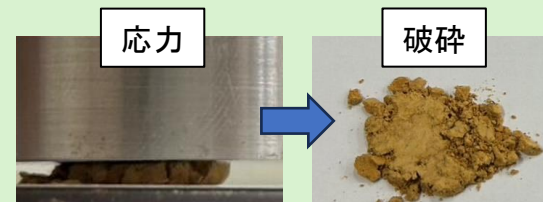
後半

---

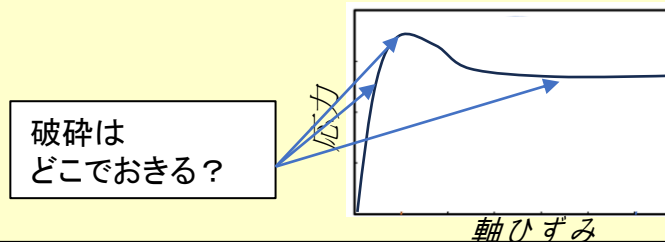
最終目標: 破砕性多孔質土の挙動を系統的に理解する。

この研究では、2つの目的を定義。

目的1: 破砕性多孔質地盤の破砕とcritical state  
の関係を実験的に明らかにする。



目的2: せん断過程のどの段階で破砕がおこるのか  
を実験的に明らかにする。

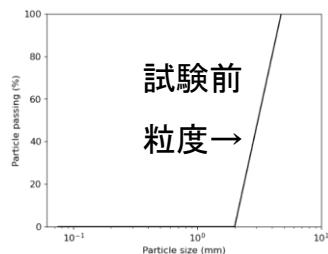


## 材料

材料：  
Ta-d軽石



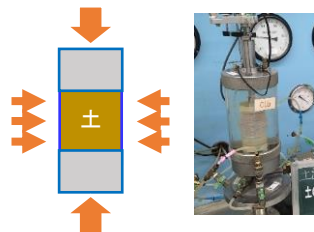
2018年に北海道で発生した地震によって引き起こされた多数の斜面崩壊の引き金となった軽石。



全試験で同じ粒度からスタート。

## 三軸試験

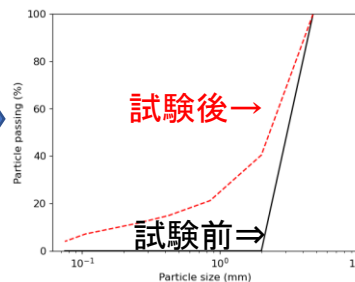
- CD
- CU
- C ( 等方圧密 )



様々な条件での三軸試験を実施

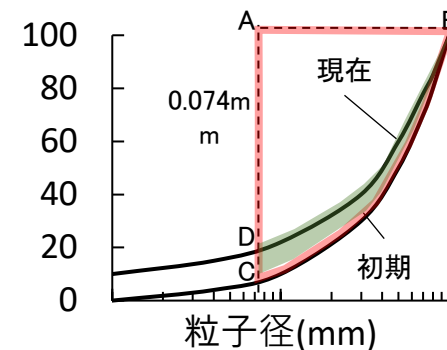
## 試験後

3分手動  
ふるい分け



破砕量は、試験前後の粒子分布曲線から。

ハーディンの相対破砕量  
(Hardin, 1985)



$$= \text{面積ABC} / \text{面積ABD}$$

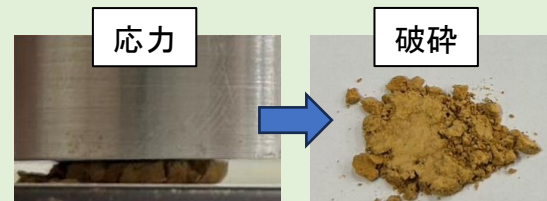
有名な破砕指数。

面積ABCと面積ABDの比から計算される。

# 三軸試験リスト(実験手法)

目的1: 破碎性多孔質地盤の破碎とcritical state  
の関係を実験的に明らかにする。

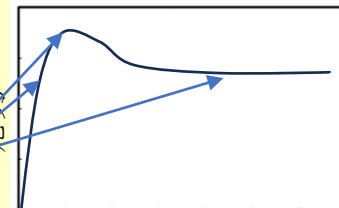
→1st テストシリーズ



目的2: せん断過程のどの段階で破碎がおこるのか  
を実験的に明らかにする。

→2nd テストシリーズ

破碎はどこで行  
われるのか?



軸ひずみ

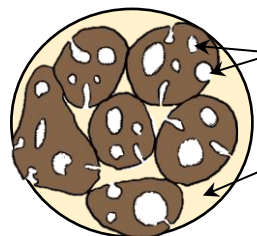
	三軸試験タイプ	閉じ込め圧力	軸ひずみ
1st テストシリーズ	CD、CU C(等方圧密)	30kPa、100kPa、200kPa、400kPa	0%、20%
2nd テストシリーズ	CD、CU	200kPa	2%、5%、10%、20%

試験終了時の軸方向ひずみのみを変化させ、破碎量を比較する。

# 材料の多孔質性



Ta-d軽石



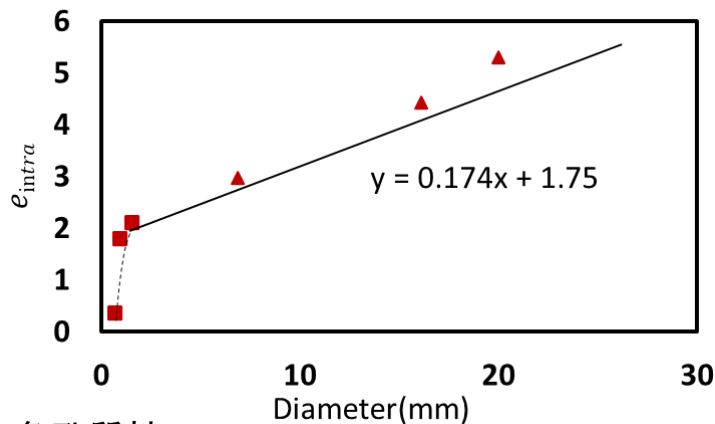
$$e_{intra} = \frac{V_{v.intra}}{V_s} \Rightarrow \text{粒子内間隙比}$$

$$e_{inter} = \frac{V_{v.inter}}{V_s} \Rightarrow \text{粒子間間隙比}$$

- ▶ 多孔質土壌の間隙は、**粒子内**間隙と粒子間間隙に分けられる。
- ▶ **粒子内間隙比**は、粒子内の間隙の量を表す。

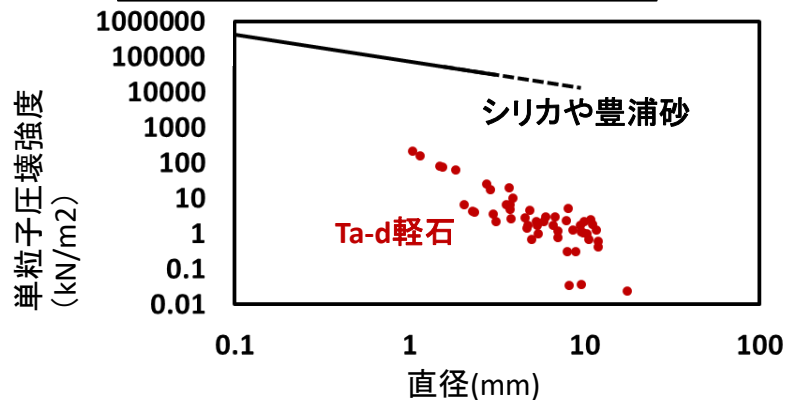
$$e = e_{intra} + e_{inter}$$

Ta-d軽石の**粒子内間隙比**分布



- ▶ 多孔質性

Ta-d軽石の単粒子強度



- ▶ 多孔性による低い粒子強度

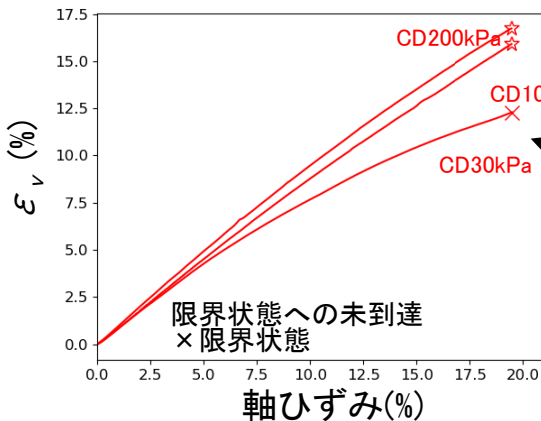
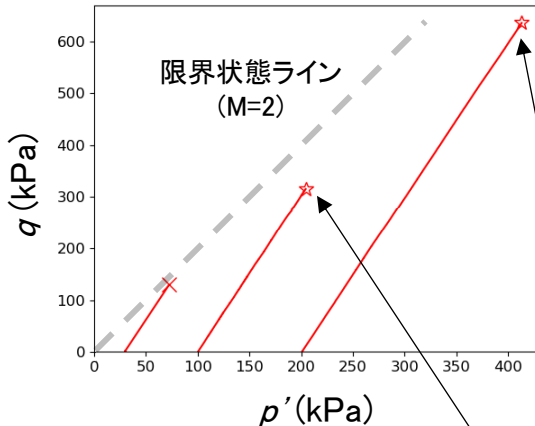
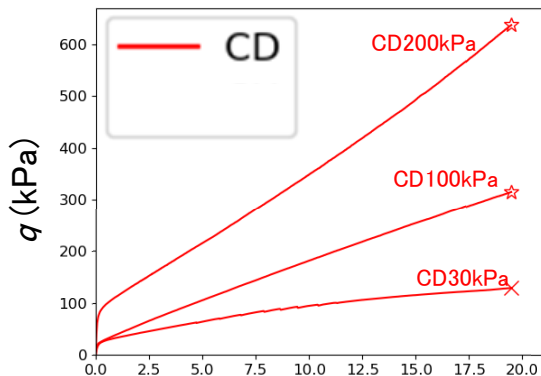




# 結果 (1<sup>st</sup> シリーズ)

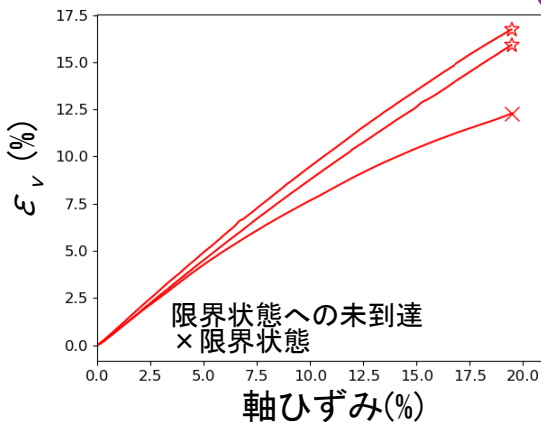
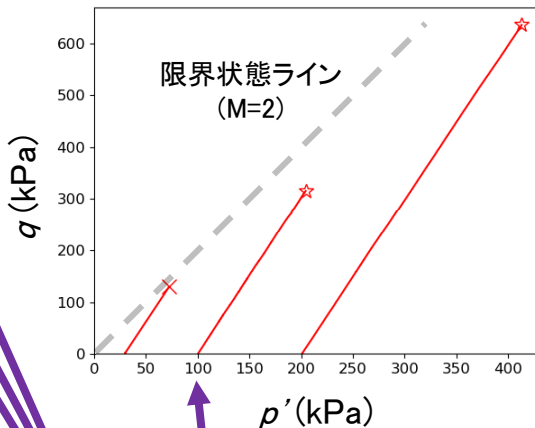
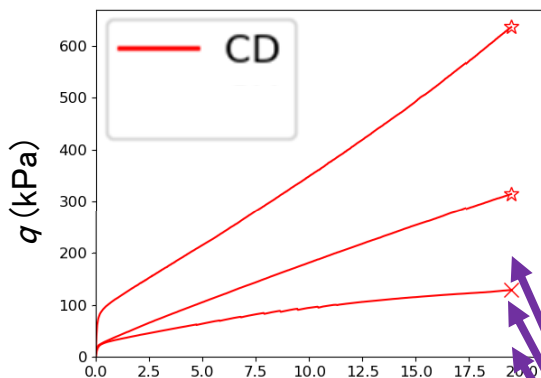
---

# CDテスト結果 (1st シリーズ)



- 高い圧縮性
- 100kPaと200kPaの場合は限界状態に達しない

# CUテスト結果 (1st シリーズ)

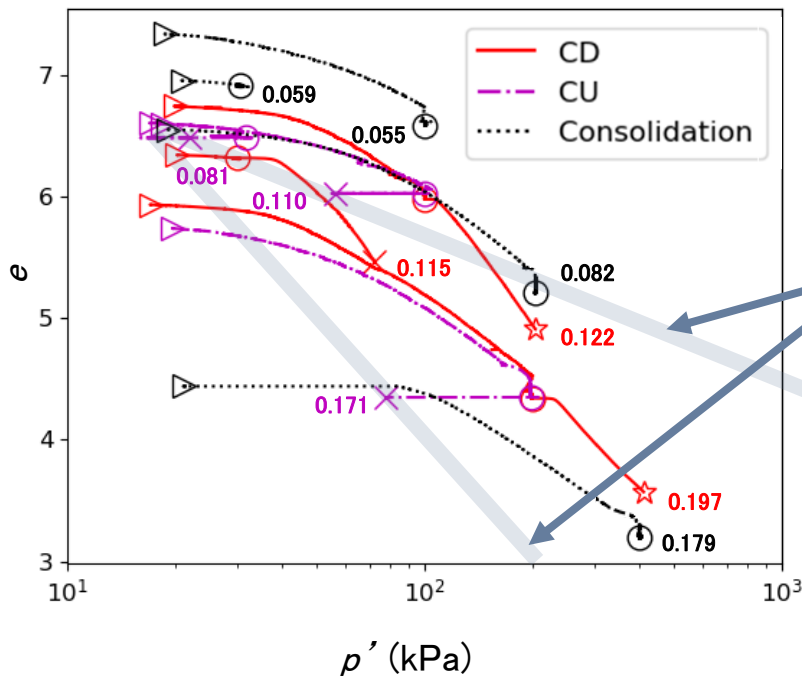


➤ 収縮傾向

➤ **Critical state (steady state)** とは、 $p'$  が減少した後、ひずみが等体積・等応力で進行し続ける状態のこと。  
(砂の場合、critical stateは非常にゆるい砂で観察される)。

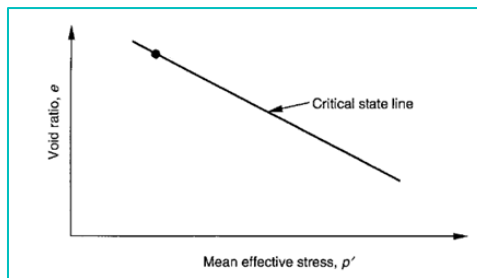
➤ 全体として、非常に圧縮性の高い挙動が観察された。

# $e - \log p'$ のグラフと $B_r$ (1<sup>st</sup> シリーズ)



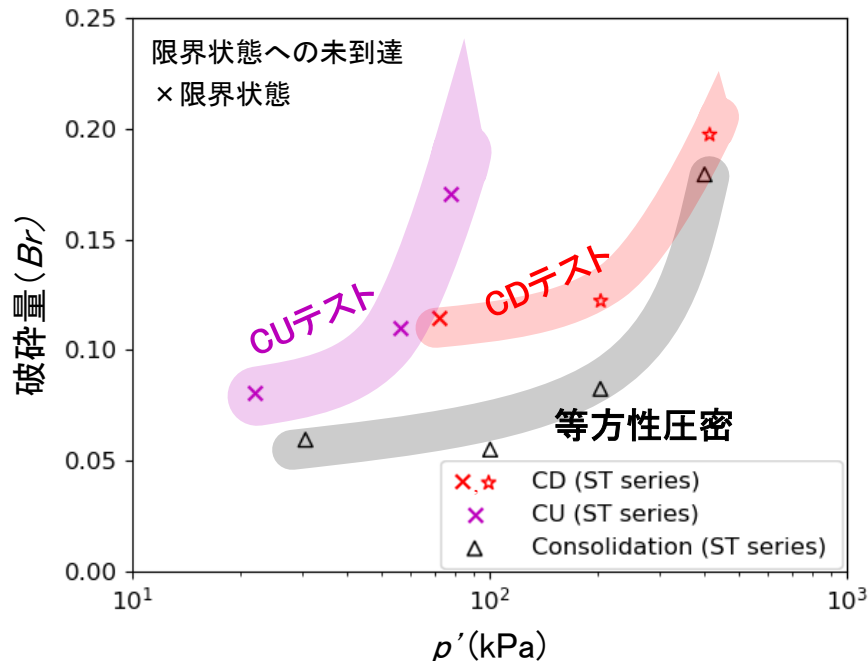
\*図中の数字は、各試験終了後のハーデンの相対破砕量( $B_r$ )を示す。

- シングル限界状態ラインは表示されていない。
- 破砕量は限界状態の位置に影響する、  
というのも、粒子を破砕すると、土は粒度の異なる粒状物質  
に変わるからである。

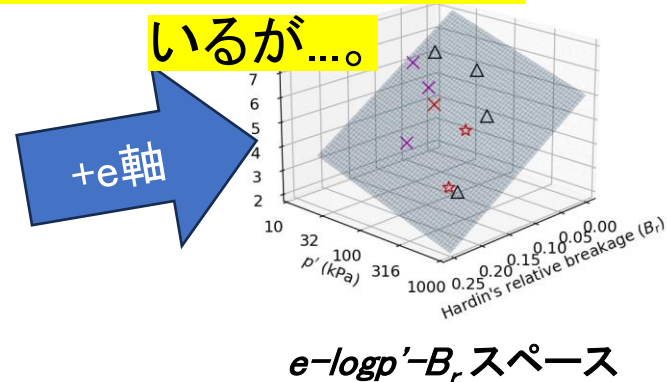


←通常、緩い砂はライナー限界状態が1本ある。

# 破碎と応力の関係 (1st シリーズ)



このプロットではそれぞれを別の線で示しているが...

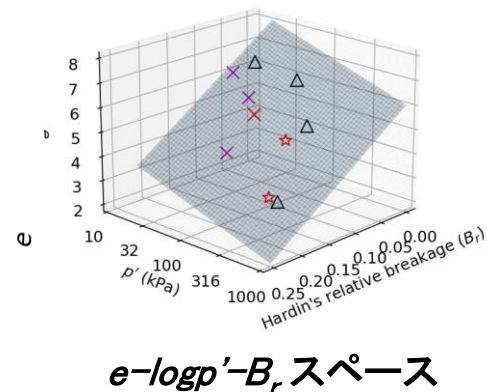
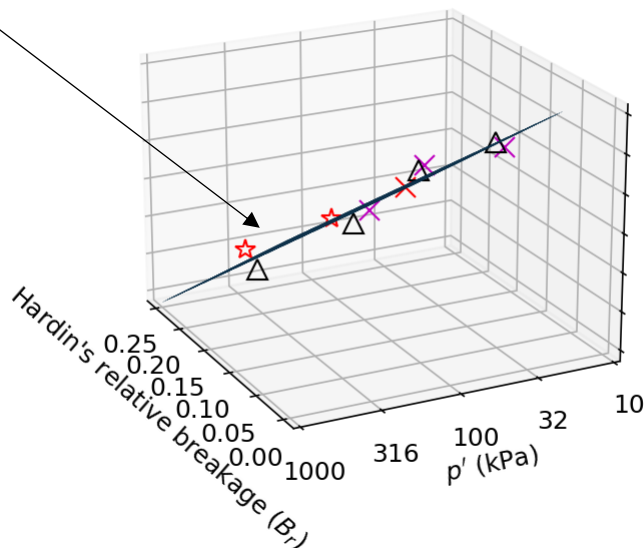
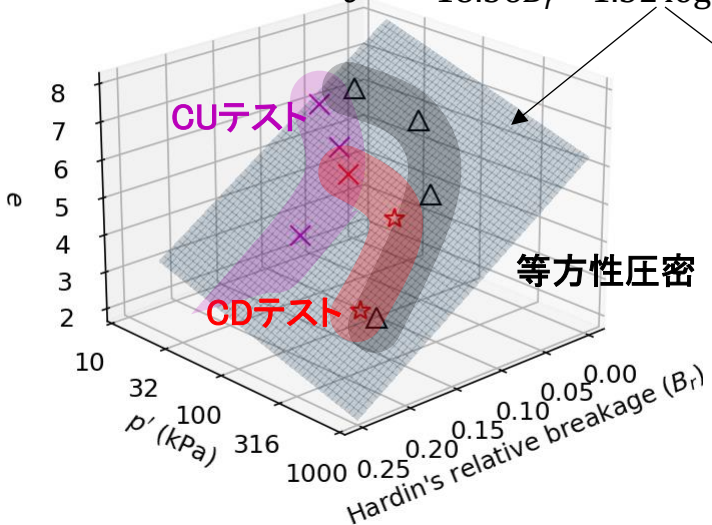


- 粒子の破碎と圧力の関係が観察され、これはそれぞれ等方圧密試験とCD&CU試験のプロットの曲線で表すことができる。

# $e - \log p' - B_r$ の3Dプロット (1<sup>st</sup> シリーズ)

## Crushing Surface

$$e = -18.56B_r - 1.32 \log_{10} p' + 10.03$$



$e - \log p' - B_r$  スペース

- 間隙比、応力、破砕量は、3D空間の単一平面上にプロットすることができる。
- 興味深いことに、限界状態に達していないCDと圧密のケースも、同じ面上にプロットすることができる。

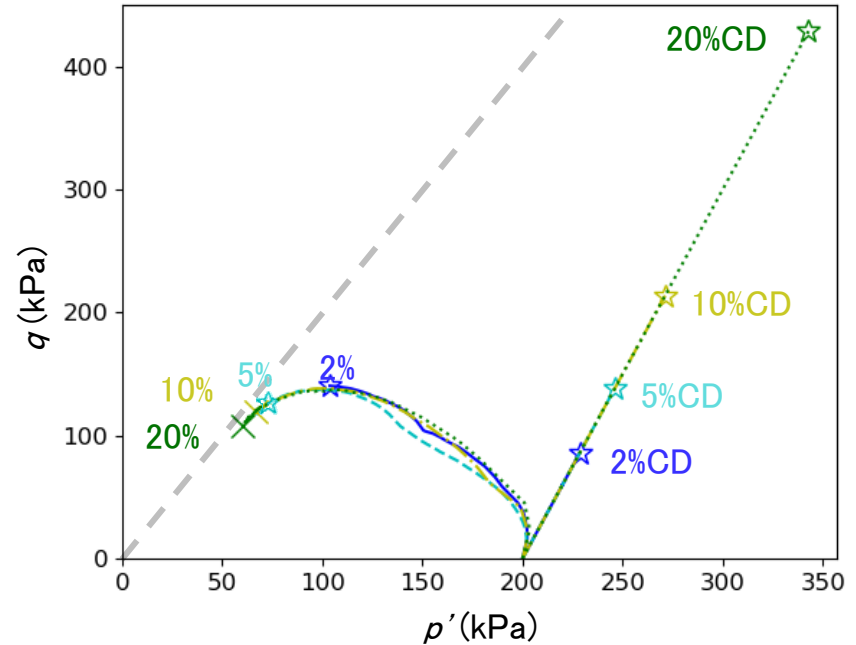
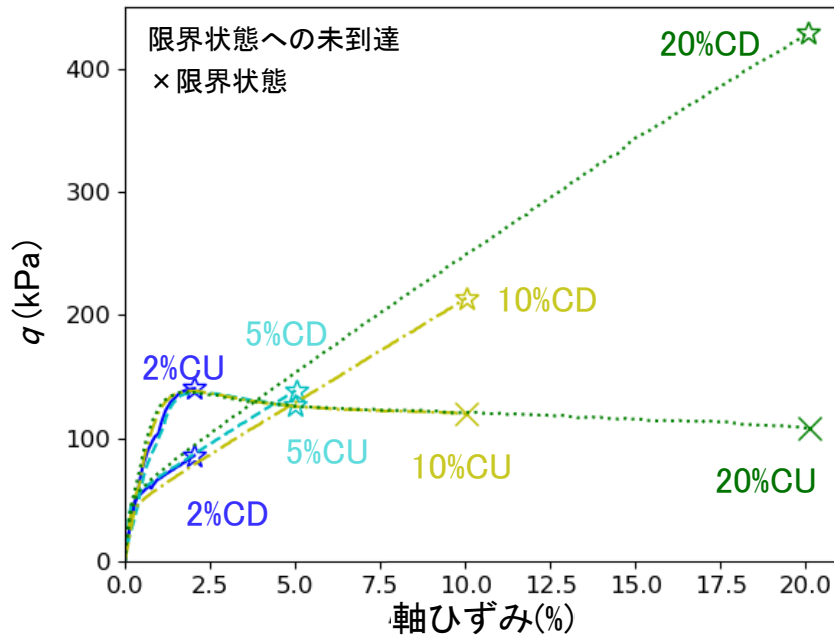
⇒ある程度の変形を経た軽石の応力状態は、単一表面で説明できるのでは・・・？



# 結果 (2<sup>nd</sup> シリーズ)

---

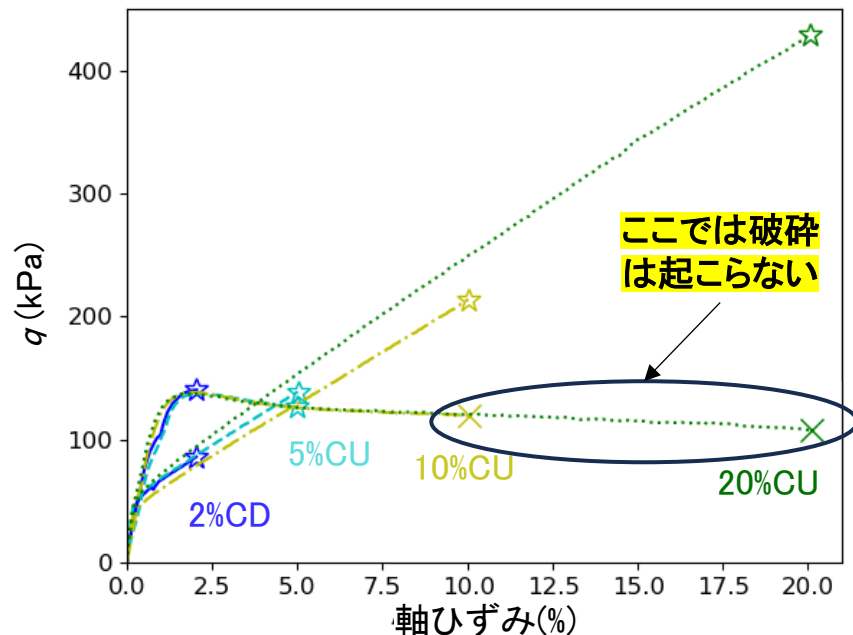
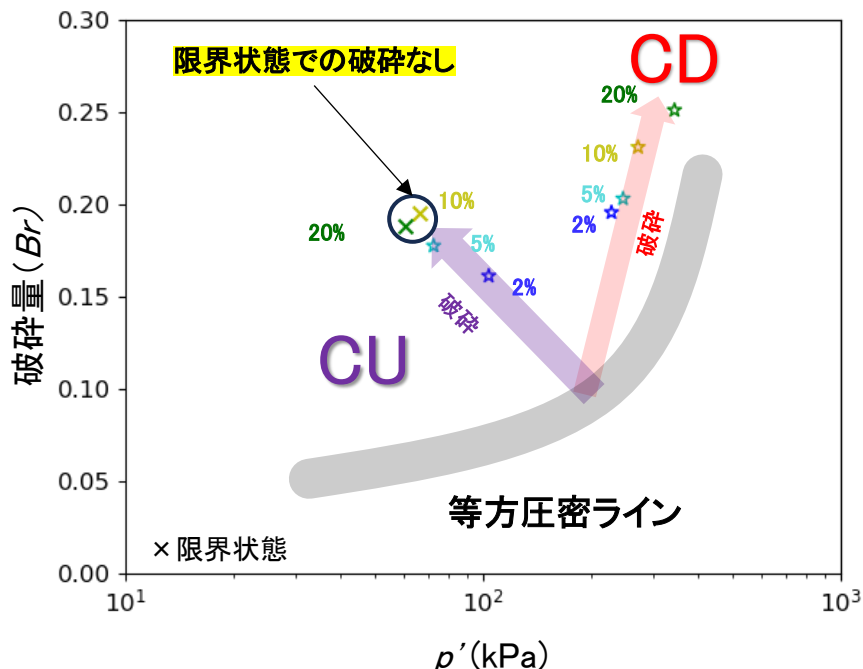
# CD&CUテスト結果 (2<sup>nd</sup> シリーズ)



- 2<sup>nd</sup> シリーズでは、端部の軸方向ひずみを変化させて破碎を比較した。
- グラフは非常に近く、実験の再現性が確認された。

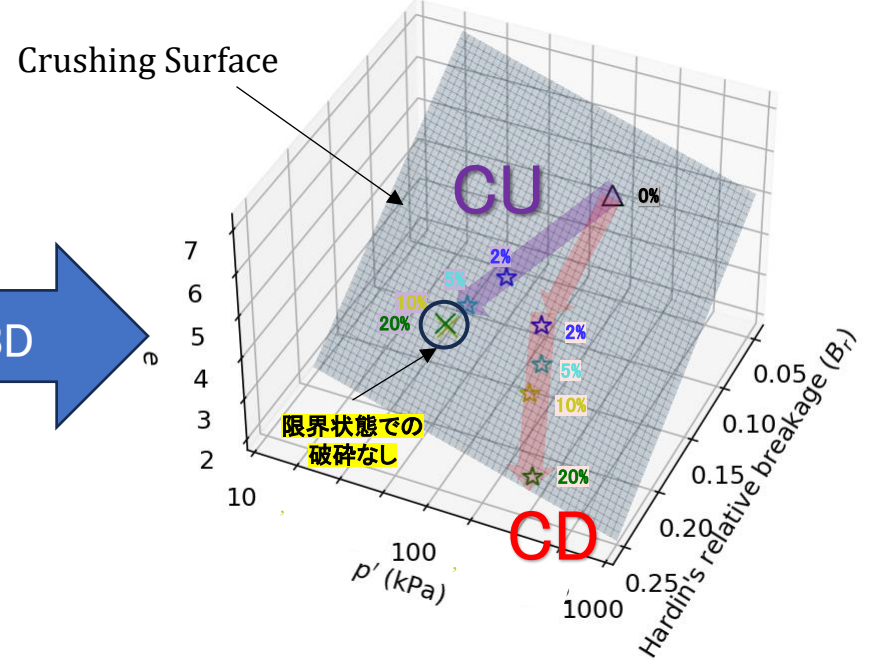
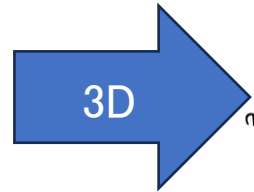
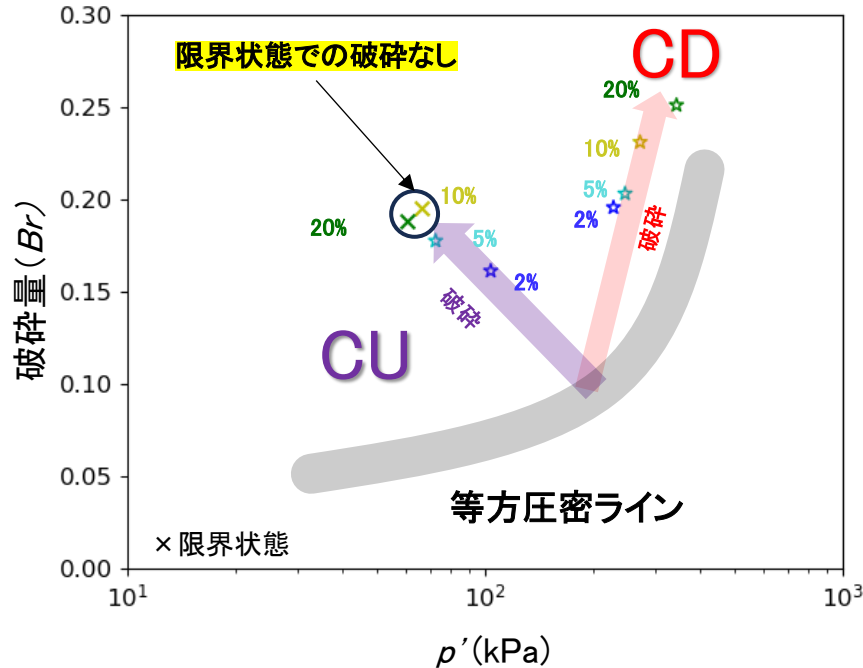


# 破砕 vs 応力 (2<sup>nd</sup> シリーズ)



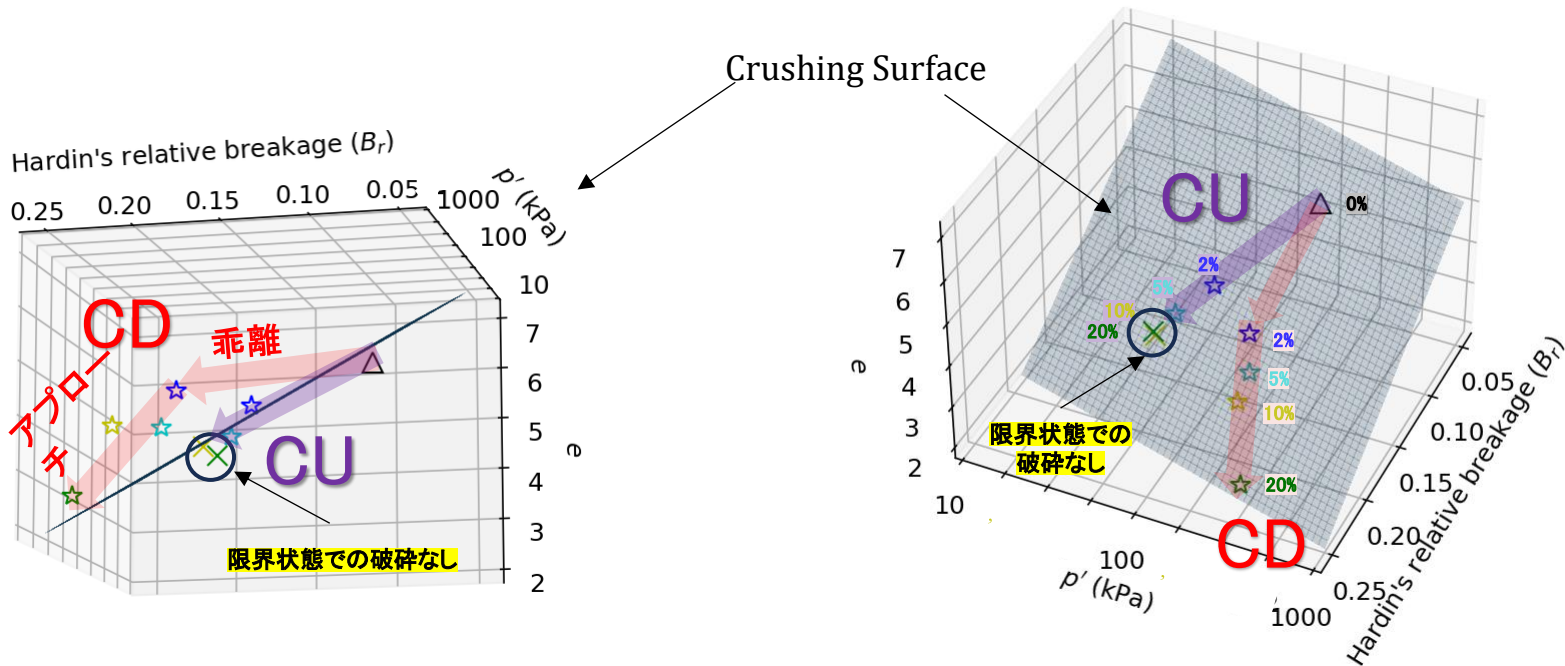
- CD試験では、軸方向ひずみの増加とともに破砕が増加した。
- しかし、CU試験では、軸ひずみが10%を超えても、限界状態に達してもそれ以上の破砕の増加は見られなかった。⇒限界状態では破砕が進行しない！

# 破碎 vs 応力 (2<sup>nd</sup> シリーズ)



- CD試験では、軸方向ひずみの増加とともに破碎が増加した。
- しかし、CU試験では、軸ひずみが10%を超えても、限界状態に達してもそれ以上の破碎の増加は見られなかった。⇒限界状態では破碎が進行しない！

# $e - \log p' - B_r$ の3Dプロット (2<sup>nd</sup> シリーズ)



- CDテストでは、破砕は最初は表面から逸脱していたが、徐々に漸近していった。
- CU試験では、破砕は表面に沿って増加したが、限界状態に達した後はそれ以上の増加は見られなかった。

# 結論

## 目的1: 破碎性多孔質地盤における破碎と限界状態の関係を明らかにする。

- 破碎可能な多孔質粒状材料は圧縮性が高く、その応力経路は非常に緩い砂の非排水三軸試験で得られたものと似ており、限界状態に至る。
- 試験終了時の有効平均応力に対する粒子破碎のグラフは、等方圧密試験、CD試験およびCU三軸試験のそれぞれについて、単一の曲線で表すことができた。
- 破碎可能な多孔質粒状材料の限界状態は、粒子破碎体積、間隙比、および試験終了時の平均有効応力の3軸の空間における単一の面 (Crushing Surface) で表すことができる。さらに、等方圧密状態も同じ面上にプロットされる可能性がある。

## 目的2: せん断過程のどの段階で粒子破碎が起こるかを明らかにする。

- 破碎性多孔質土のCD試験では、最初は Crushing Surface から逸脱しながら破碎が進行し、 $e - \log p' - B_r$  の3次元空間内で漸近的に破碎面に近づいていった。
- 破碎性多孔質土のCU試験では、Crushing Surface に沿って破碎は増加したが、 $e - \log p' - B_r$  の3次元空間内で限界状態に達した後はそれ以上増加しなかった。

## Critical state surface

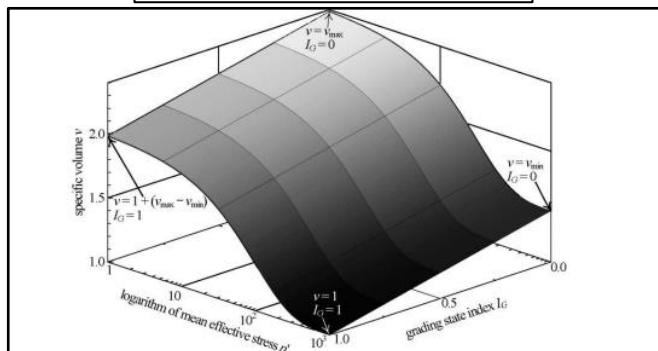


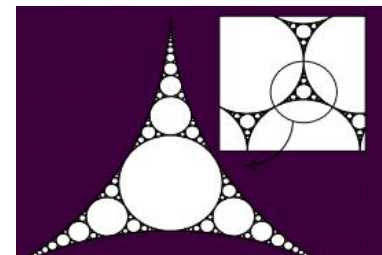
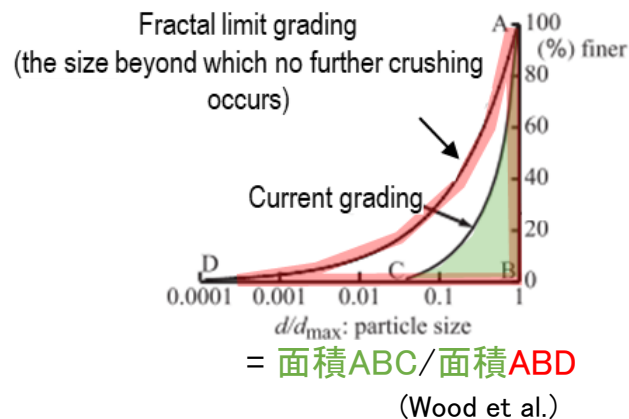
Fig. 14. Critical state surface of mean stress  $p'$ , specific volume  $v$  and grading state index  $I_G$

$$v = v_{min}^i - v_c I_G + (v_{max}^i - v_{min}^i) \exp[-(p'/p_{cs})^{k_1}]$$

$$e = e_{min}^i - e_{min}^i I_G + (e_{max}^i - e_{min}^i) \exp[-(p'/p_{cs})^{k_1}]$$

(Kikumoto et al., 2010)

## $I_G$ (Grading State index)



自己相似な粒度

- (単一粒度)  $0 \leq I_G \leq 1$  (フラクタル限界粒度)
- $I_G = 0$ は破碎無しを示し、 $I_G = 1$ は最も破碎した状態を示す。数値には明確な物理的意味があり、簡単にモデル化できる。

**今後の計画:** この結果に基づき、現在、破碎可能な多孔質地盤の構成モデルを開発中。

## Modified critical state surface for porous soils

Critical state surface

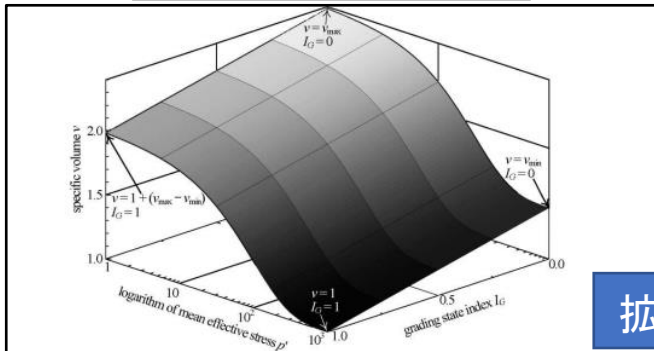


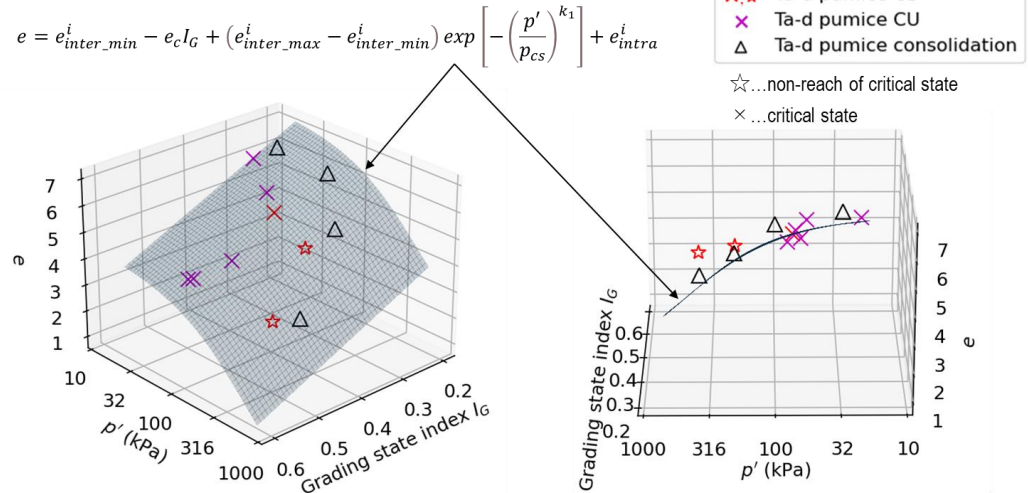
Fig. 14. Critical state surface of mean stress  $p'$ , specific volume  $v$  and grading state index  $I_G$

$$v = v_{min}^i - v_c I_G + (v_{max}^i - v_{min}^i) \exp \left[ - (p' / p_{cs})^{k_1} \right]$$

$$e = e_{min}^i - e_{min}^i I_G + (e_{max}^i - e_{min}^i) \exp \left[ - (p' / p_{cs})^{k_1} \right]$$

(Kikumoto et al., 2010)

拡張



- ×, ☆ Ta-d pumice CD
- × Ta-d pumice CU
- △ Ta-d pumice consolidation
- ☆ ...non-reach of critical state
- × ...critical state

$$e_{inter\_max}^i = 6.43, e_{inter\_min}^i = 1.79, e_{intra}^i = 2.57,$$

$$k_1 = 1.00, e_c = 7.94, p_{cs} = 485 \text{ kPa},$$

$$(e_{inter\_max}^{*i} = 1.80, e_{inter\_min}^{*i} = 0.500)$$

今後の計画: この結果に基づき、現在、破碎可能な多孔質地盤の構成モデルを開発中。

1. Altuhafi, F.N. & Coop, M.R., 2011. Changes to particle characteristics associated with the compression of sands. *Geotechnique*, 61(6), pp.459–471. <https://doi.org/10.1680/geot.9.P.114>
2. Bandini, V. & Coop, M.R., 2011. The Influence of Particle Breakage on the Location of the Critical State Line of Sands. *Soils and Foundations*, 51(4), pp.591–600. <https://doi.org/10.3208/sandf.51.591>
3. Been, K. & Jefferies, M.G., 1985. A state parameter for sands. *Geotechnique*, 35(2), pp.99–112. <https://doi.org/10.1680/geot.1985.35.2.99>
4. Castro, G., 1969. Liquefaction of Sands. Harvard University, Harvard Soil Mechanics Series 81.
5. Chiaro, G., Kiyota, T., Umar, M. & Cappellaro, C., 2022. Earthquake-Induced Flow-Type Slope Failure in Weathered Volcanic Deposits—A Case Study: The 16 April 2016 Takanodai Landslide, Japan. *Geosciences*, 12(11), p.394. <https://doi.org/10.3390/geosciences12110394>
6. de Cristofaro, M., Olivares, L., Orense, R.P., Asadi, M.S. & Netti, N., 2022. Liquefaction of Volcanic Soils: Undrained Behavior under Monotonic and Cyclic Loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148(1), pp.1–11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002715](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002715)
7. Hardin, B.O., 1985. Crushing of Soil Particles. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(10), pp.1177–1192. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1985\)111:10\(1177\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:10(1177))
8. Hashimoto, H., Horinouchi, K., Sato, I. & Kuno, M., 2023. Soil Structure in Volcanic Pumice Soil of Dazou-sawa River Evaluated from In Situ and Laboratory Tests. *Geotechnical Testing Journal*, 46(6), p.20230324. <https://doi.org/10.1520/GTJ20230324>
9. Hyodo, M., Hyde, A.F.L. & Aramaki, N., 1998. Liquefaction of crushable soils. *Geotechnique*, 48(4), pp.527–543.
10. Ishihara, K., Tatsuoka, F. & Yasuda, S., 1975. Undrained Deformation and Liquefaction of Sand Under Cyclic Stresses. *Soils and Foundations*, 15(1), pp.29–44. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.15.29>
11. Ishikawa, T., Miura, S., Uzuoka, R., Yasuda, S., Tatsuoka, F., Toyooka, Y., 2021. Reconnaissance report on geotechnical damage caused by 2018 Hokkaido Eastern Iburu earthquake with JMA seismic intensity 7. *Soils and Foundations*, 61(4), pp.1151–1171. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.06.006>
12. Ishikawa, T. & Miura, S., 2011. Influence of Freeze-Thaw Action on Deformation-Strength Characteristics and Particle Crushability of Volcanic Coarse-Grained Soils. *Soils and Foundations*, 51(5), pp.785–799. <https://doi.org/10.3208/sandf.51.785>
13. Kawamura, S., Takahashi, A., Sugiura, T., Nakamura, S., Yamada, S., 2019. Slope failures/landslides over a wide area in the 2018 Hokkaido Eastern Iburu earthquake. *Soils and Foundations*, 59(6), pp.2376–2395. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.08.009>
14. Li, R., Wang, F. & Zhang, S., 2020. Controlling role of Ta-d pumice on the coseismic landslides triggered by 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake. *Landslides*, 17(5), pp.1233–1250. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01349-y>
15. Sasitharan, S., Robertson, P.K., Sego, D.C. & Morgenstern, N.R., 1994. State-boundary surface for very loose sand and its practical implications. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3), pp.321–334. <https://doi.org/10.1139/t94-040>
16. Sato, I., Kuwano, R. & Otsubo, M., 2024a. Particle crushing and critical state of volcanic pumice – 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake. *Soils and Foundations*, 64(3), p.101465. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2024.101465>
17. Sato, I., Kuwano, R. & Otsubo, M., 2024b. Particle crushing and critical state surface of porous granular materials – derived from artificial pumice. *Soils and Foundations*, under review
18. Sugimoto, H., Takeshi, T., Uto, T. & Honma, H., 2013. Geomorphologic and Geologic Features of Landslides Induced by the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, in Shirakawa Hills, Fukushima Prefecture. In: *Earthquake-Induced Landslides*, pp.189–201. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-32238-9\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-642-32238-9_20)
19. Vilhar, G., Jovičić, V. & Coop, M.R., 2013. The role of particle breakage in the mechanics of a non-plastic silty sand. *Soils and Foundations*, 53(1), pp.91–104. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.12.006>
20. Xiao, Y., Desai, C.S., Daouadji, A., Stuedlein, A.W., Liu, H. & Abuel-Naga, H., 2020. Grain crushing in geoscience materials—Key issues on crushing response, measurement and modeling: Review and preface. *Geoscience Frontiers*, 11(2), pp.363–374. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.11.006>
21. Yoshimine, M. & Ishihara, K., 1998. Flow Potential of Sand During Liquefaction. *Soils and Foundations*, 38(3), pp.189–198. [https://doi.org/10.3208/sandf.38.3\\_189](https://doi.org/10.3208/sandf.38.3_189)
22. Zhang, S., Wang, F., Li, R., Chen, Z., 2019. Characteristics of landslides triggered by the 2018 Hokkaido Eastern Iburu earthquake, Northern Japan. *Landslides*, 16(9), pp.1691–1708. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01207-6>

## 軽石材料の基礎的な物理特性の把握

内間隙量の測定(①)

単粒子破碎試験(①)

## 一般的な要素試験における軽石の力学特性の把握

一次元圧縮試験(②)

等方圧縮試験・三軸試験(③)

繰り返し三軸試験(④)

## 実際の斜面での変形(多方向単純せん断変形)での軽石の力学特性の把握

2方向単純せん断三軸試験(⑤)

破碎する軽石の力学特性の体系化(⑥)

## 軽石層の物理・力学特性と斜面流動の到達距離の関係を把握

MPM・DEMシミュレーション(⑦)

斜面災害リスクの評価手法の提案(⑧)

任意の軽石について、基礎的な物理・要素試験の結果から斜面流動リスクを推定

成果発表(⑨)





Thank you for your attention

---