

# 敬天愛人と量体裁衣の精神で挑む

## Computer-Aided Engineering

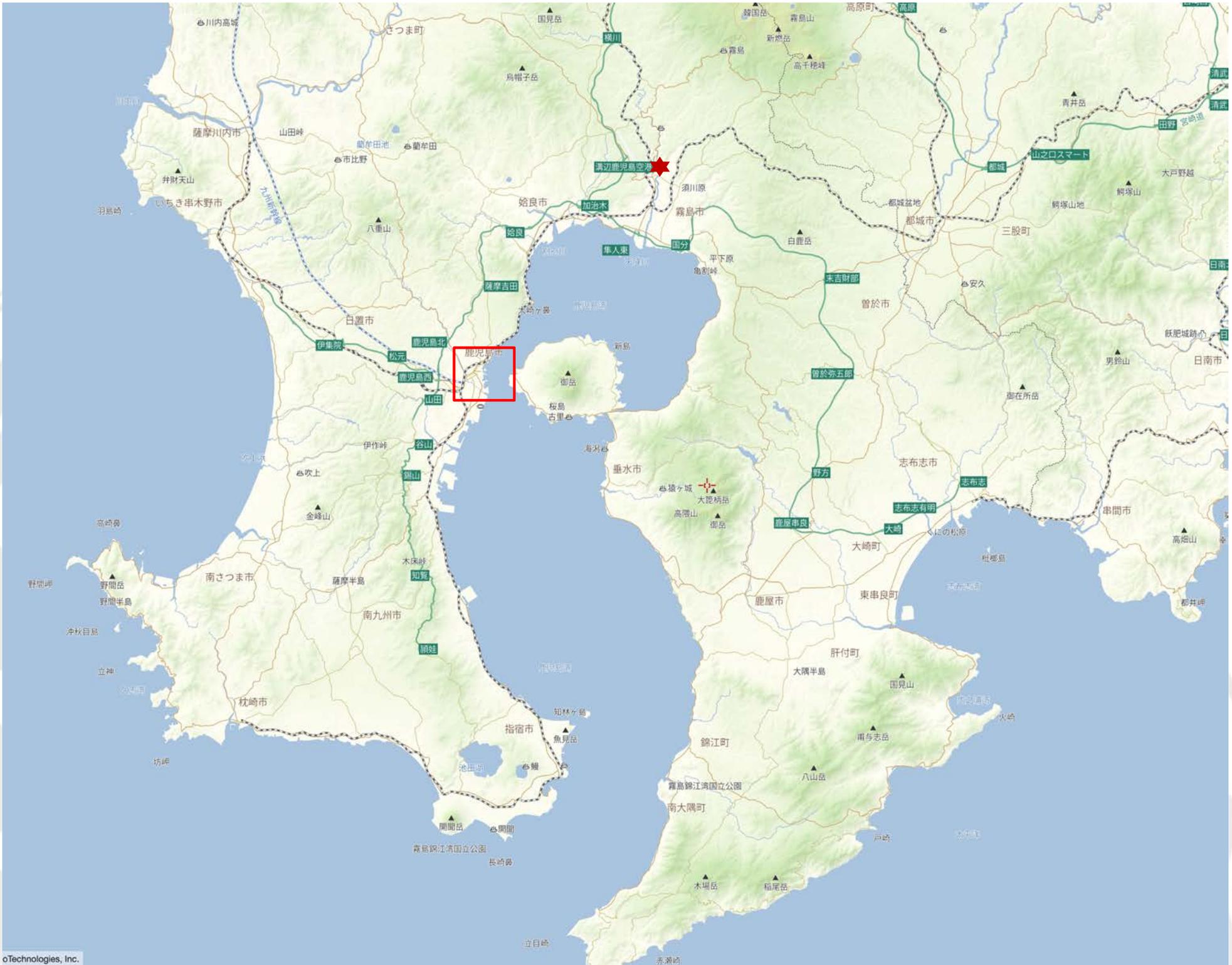
～材料科学から災害科学まで～

「東北大学フォーラムin福岡」

2026年1月25日，大名カンファレンス，福岡

東北大学 大学院工学研究科 土木工学専攻  
災害科学国際研究所（兼務）

寺田賢二郎





自宅

鹿児島市立 清水中学校

鹿児島市立 大龍小学校

南州神社  
(西郷隆盛を祀る神社)  
南州墓地  
(西南戦争の戦死者を埋葬)

照國神社  
(御祭神・照国大明神：島津斉彬公)

生家

鹿児島県立 鶴丸高等学校

母方の実家

南洲翁（西郷隆盛）の墓（隣は桐野利秋と篠原国幹の墓）



大龍小学校 正門



- 道は天地自然のものにして、人はこれを行うものなれば、天を敬するを目的とす。天は人も我も同一に愛し給う故、我を愛する心を以て人を愛する也（南洲翁遺訓）
- 自分の力だけで生きているのではなく、大きな運命や理（ことわり）の中に生かされているという謙虚な姿勢を貫き、私心を捨て、世のため人のために尽くす慈愛の心を持つこと。

天を敬い 礼儀正しくあれ  
人を愛し 心やさしくあれ （小中学生向け）



- ✓ 出身：鹿児島市（高校まで）
- ✓ 中学・高校では水泳部（自由形）
- ✓ 大学では軽音楽部（Gibson L-5をローンで購入）



- 1984 名古屋大学 工学部 土木工学科 入学  
軽音楽部（Jazzに沼る）、水彩画部（幽霊）
- 1990 名古屋大学 工学部 土木工学科 卒業
- 1990-1991 清水建設株式会社
- 1992-1996 米国ミシガン大学工学部機械工学・応用力学科 修了  
Ph.D. (Applied Mechanics)（応用力学・計算力学に沼る）
- 1996 東京大学大学院工学系研究科船舶海洋工学専攻 助手
- 1996-1997 東北大学大学院情報科学研究科人間社会情報科学専攻 講師
- 1997-1999 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 助教授（2007~准教授）
- 1999-2012 東北大学災害科学国際研究所 教授
- 2012-2024 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 教授
- 2014-現在

- **応用力学** (Applied Mechanics)

- 「応用力学」とは、質量保存, 運動量, 角運動量, 万有引力などの数少ない基本法則をもとに, 論理的な推論によって, 対象とした系の挙動を解析し, 予測することである. その適用対象は広範多岐にわたり, スケールも原子分子のオーダーから宇宙規模にも及んでいる. また, これらの法則は, 共通の記述言語である数学を用いて表現され, 対象系を構成する材料や系全体の特性も数理的に記述される. これによりの確な共通理解が得られることになる.

- 土木学会誌 Vol.85-8, 2000 巻頭論説「応用力学の明日 [小林昭一]」より
- <https://ja.wikipedia.org/wiki/応用力学>

- **計算力学** (Computational Mechanics)

- 応用力学が目指す学理の追求のため「デジタルコンピュータの積極的利用」を前提とした理論・技術体系
- (ウィキペディア和訳) 計算力学とは、様々な力学法則により支配される現象を解明するための計算手法の(構築および)利用に関する学問領域である。計算科学(科学技術計算とも呼ばれる)が現れる前は計算力学は応用力学における一つの分野として広く知られていたが、現在では計算科学の一領域と考えられている。

- [https://en.wikipedia.org/wiki/Computational\\_mechanics](https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_mechanics)

- **敬天愛人と量体裁衣の精神で臨む計算工学** (≒Computer-Aided Engineering: CAE)

- 量体裁衣 (tailoring to fit)
  - 体の寸法を測って服を作るように、物事を実際の状況や相手の体格に合わせて最も適切な方法で処理すること (実際の状況に応じて、物事を現実に適した形で処理する策を講じること)
- 自然科学および工学における現象や人工物について、その規模の大小を問わず、振る舞いを一貫した原理に基づく数理モデルとして記述し、コンピュータを積極的に活用した数値計算によって、解析・予測・設計・最適化・意思決定を行い、複雑かつ大規模な工学問題の理解と解決を図る。
- in order to make them happy! (≒生かされていることに感謝し、世のため人のために尽くす)

工学的要求  
<ものづくり・防災>

ツール

理論



計算



実験

数理モデリング

検証

科学的推論・工学的判断

結論 = 答え

## 計算力学

- 現存する計算ツールでは再現が難しい現象に対して新しいシミュレーション手法を提供
- 実務利用もしくは汎用化の道筋を作る
- Make them happy (**敬天愛人**≡生かされていることに感謝し、世のため人のために尽くす)

## • 量体裁衣

- 実際の状況に応じて、物事を現実に適した形で処理する策を講じること

## • 応用力学と計算力学を軸足に取り組んできた研究 (1996~)

1. 均質化法に基づくマルチスケール解析
  - 一体型/分離型、汎用化、etc.
2. 材料のモデル化と解析手法
  - 鉄鋼、合金、マグネシウム、コンクリート、地盤、ゴム、樹脂、繊維強化プラスチック、etc.
3. き裂進展解析
  - 離散/スミアードひび割れ・損傷モデル、フェーズフィールドモデル、etc.
4. トポロジー最適化
  - 最適設計：構造、電磁波、マルチスケール、etc.
5. CAE技術
  - FEM / IGA / FCM / MPM、マルチフィジックス、劣化予測、etc.
6. 防災・減災関連シミュレーション
  - 地震防災、土砂災害予測、津波と建造物の相互作用、機械学習と津波予測、etc.
7. 量子CAE (量子コンピューターを用いたシミュレーション手法)

# 1. 均質化法に基づくマルチスケール解析

- 住友金属工業（現材の日本製鉄）
  - 炭素鋼のマルチスケール解析（2001-2004）
  - 多結晶金属のマルチスケール解析（2005-2008）
- JFEスチール
  - DP鋼のマルチスケール解析（2006-2007）
- 日東紡績
  - 強化プラスチックのマルチスケール解析（2006-2010）
- サイバネットシステム
  - マルチスケール解析ソフトウェアの汎用化（2006~現在）
- 横浜ゴム
  - 高分子複合材料のマルチスケール解析，他（2004-2006）
- 清水建設
  - 複合地盤のマルチスケール解析（2008~2010）
- トヨタ自動車
  - 燃料電池：積層構造体の解析，他（2004~2005）
- 日本ガイシ
  - セラミックス多孔質体のマルチスケール解析（2004）
- 中部電力
  - 互層岩盤のマルチスケール解析（2013~2020）
- CREST（2006~2008）
  - シミュレーション技術の革新と実用化基盤の構築：材料の組織・特性設計統合化システムの開発
- SIP-II 統合型材料開発システムによるマテリアル革命
  - 多機能CFRPの開発による高付加価値化（2018~2023）

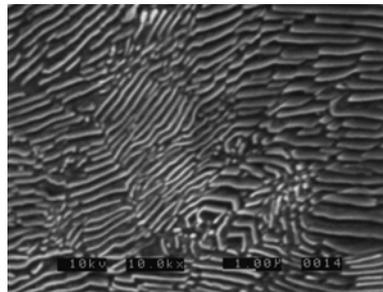
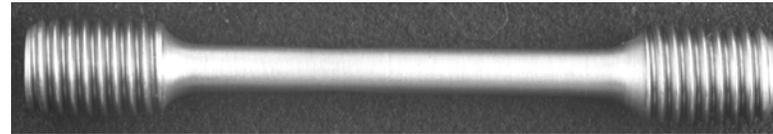


# マルチスケール解析

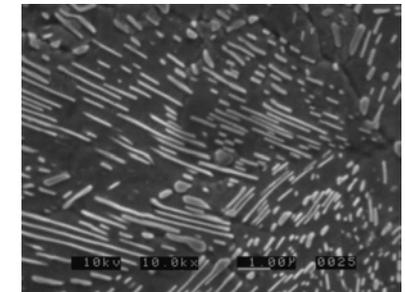
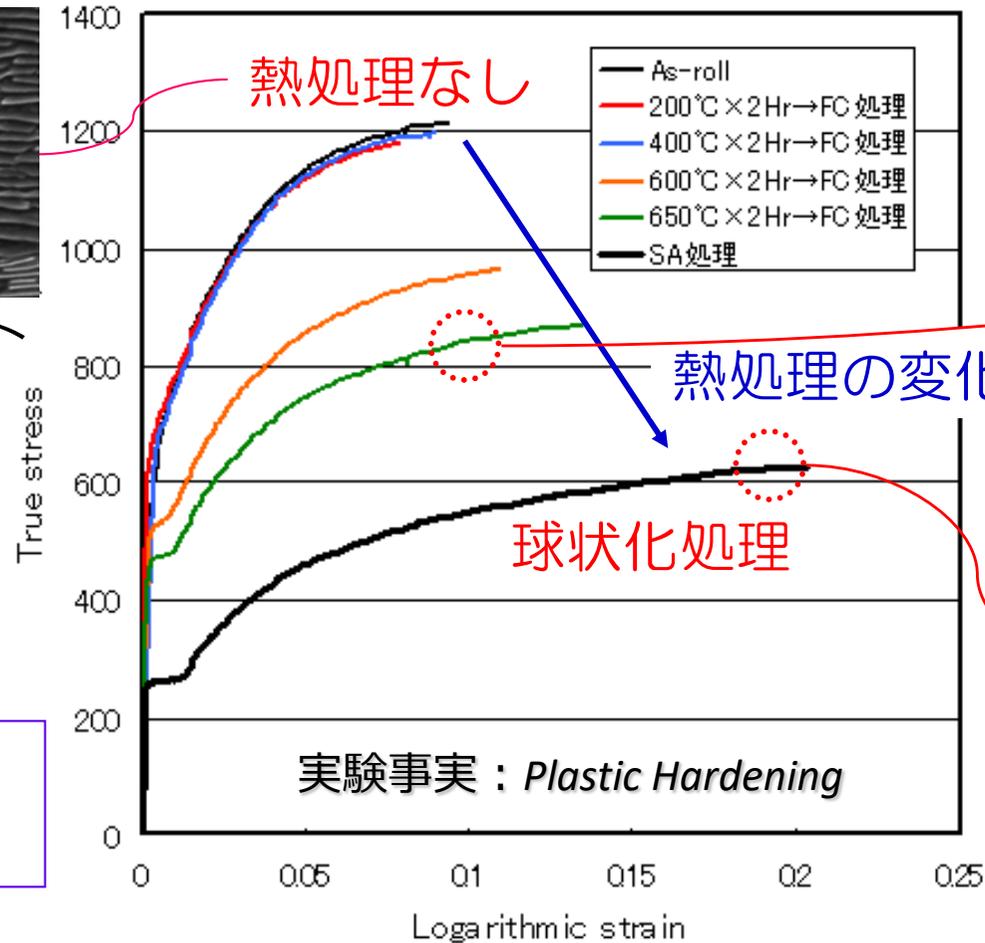
# Multiscale Analysis

TOHOKU  
UNIVERSITY

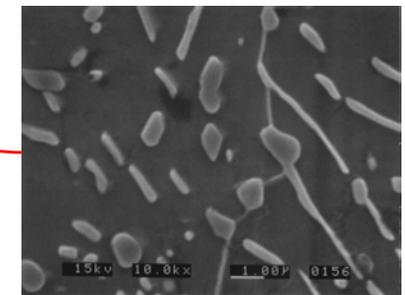
# 例：炭化物形態が鋼の硬化特性に及ぼす影響



層状パーライト



(半球状化組織)

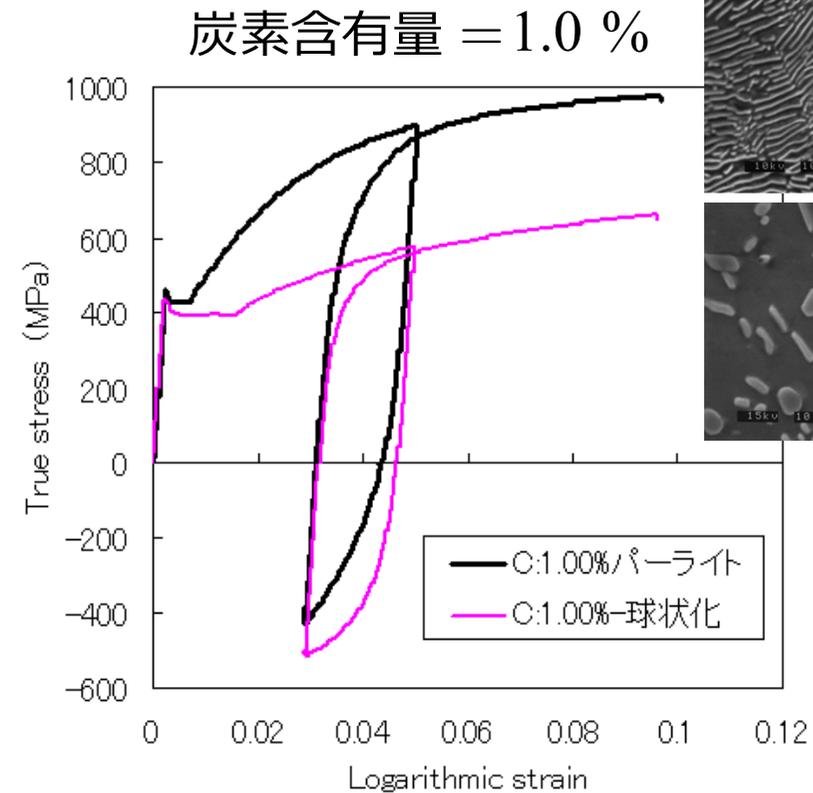
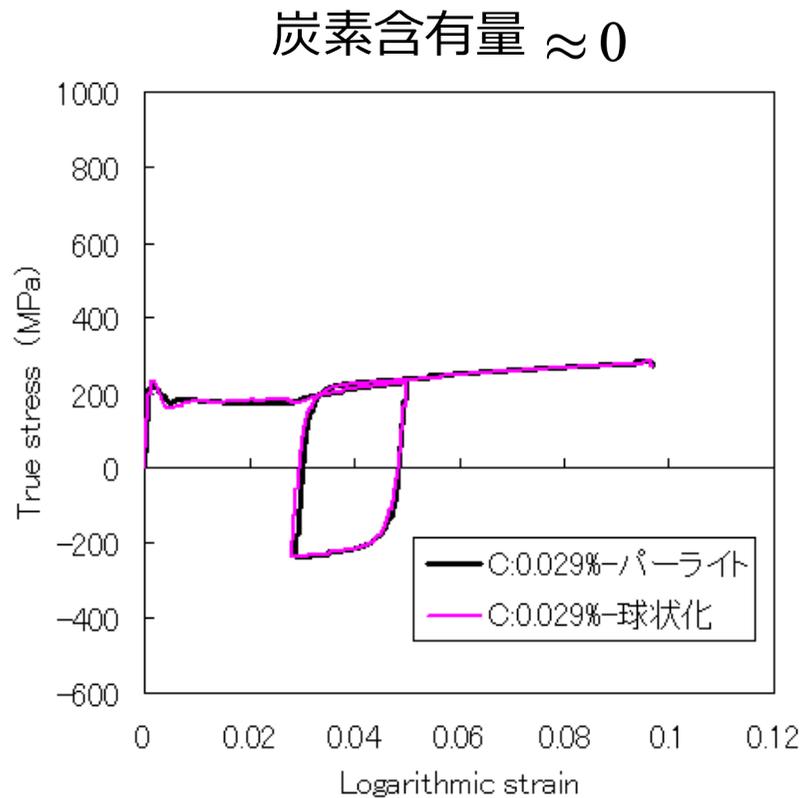


球状化組織

提供：  
住友金属工業（株）  
総合技術研究所

- ◆ 熱処理によって炭化物の形態が変化（含有量一定）
- ◆ 炭化物形態によって硬化特性が異なる

# 例：炭化物形態が鋼の硬化特性に及ぼす影響

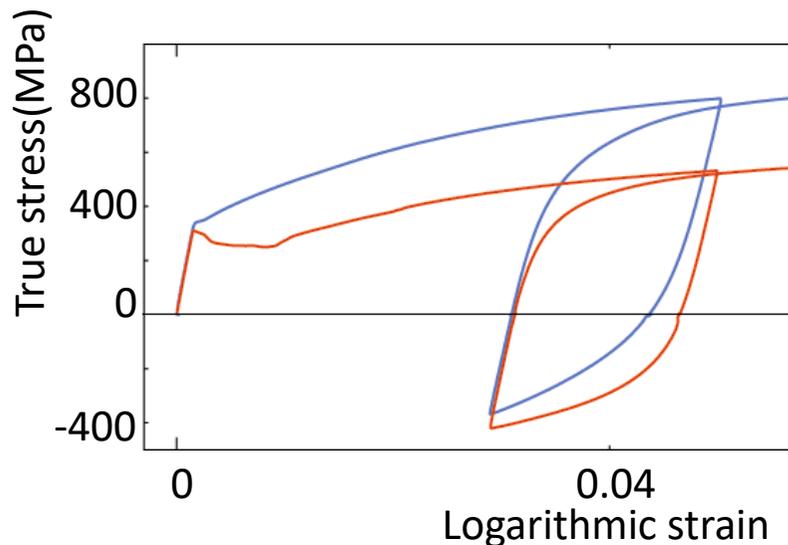


提供：住友金属工業（株）総合技術研究所

- 炭化物の含有量が高いほどバンジंगा効果が顕著
- バウシंगा効果のメカニズムの解明
  - 炭素鋼 = フェライトとセメンタイトの混合物 = ミクロ的には非均質体
  - 非均質性に起因したミクロ領域での残留応力の仕業

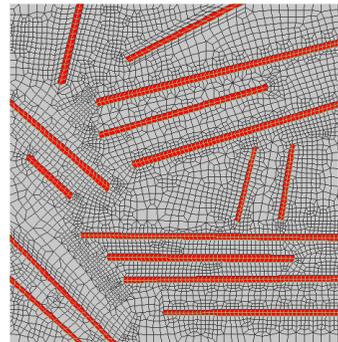
# 均質化法：数値材料実験による“実験”の再現

## 実験結果

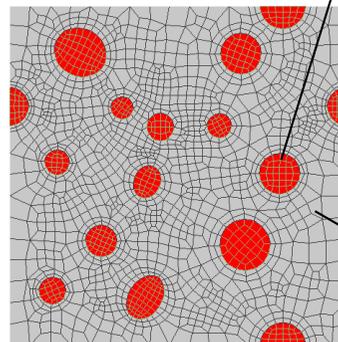


提供：住友金属工業（株）総合技術研究所

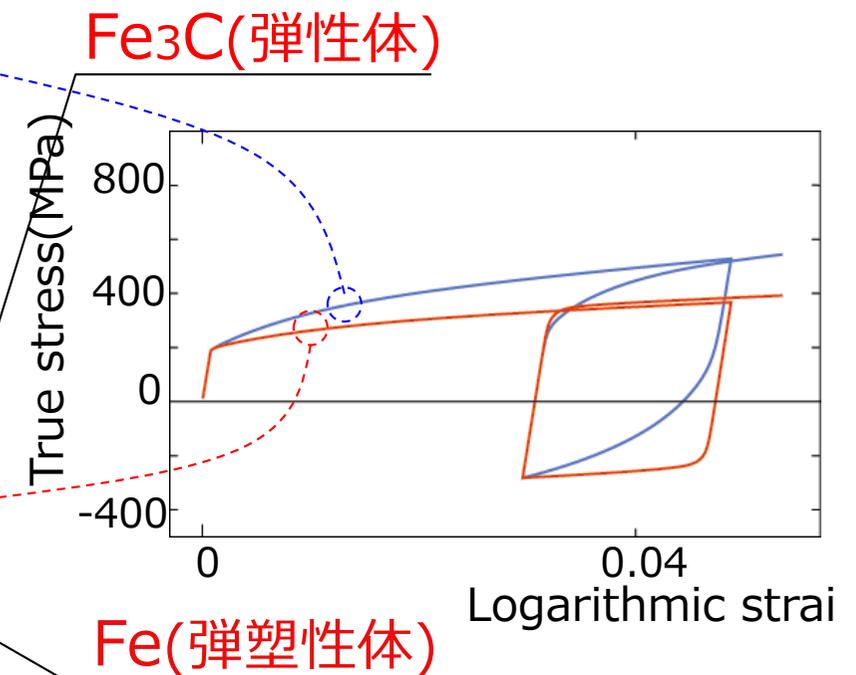
層状パーライト組織



球状化組織



## 数値材料実験の結果



微視領域における力学挙動から  
メカニズムの解明の試み

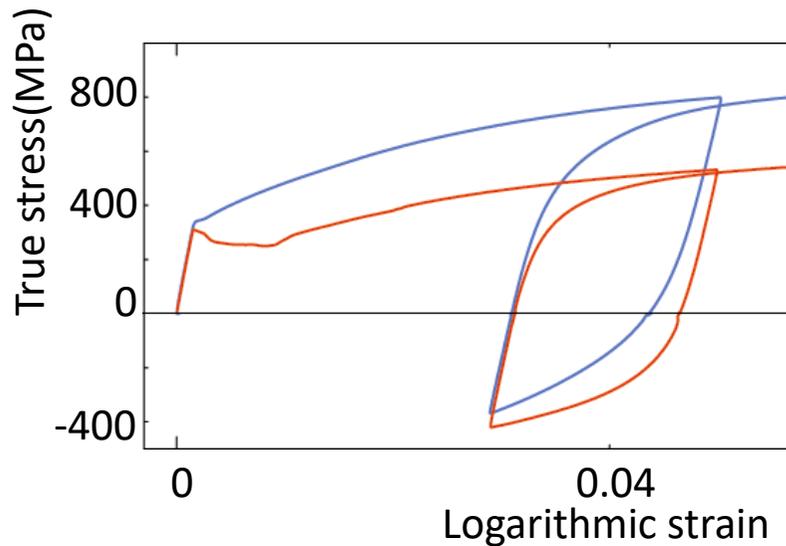


## 実験結果と定性的に合致

- バウシinger効果が発現
- 炭化物形態の加工硬化に対する影響
- 炭化物形態のバウシinger効果の程度に影響

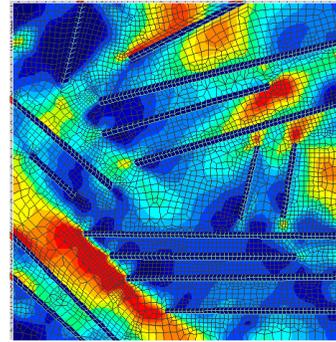
# 均質化法：数値材料実験による“実験”の再現

## 実験結果

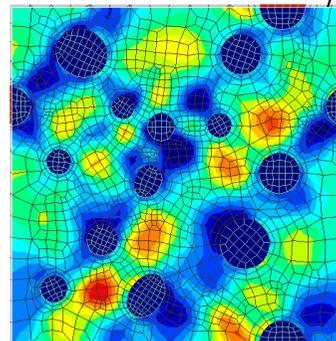


提供：住友金属工業（株）総合技術研究所

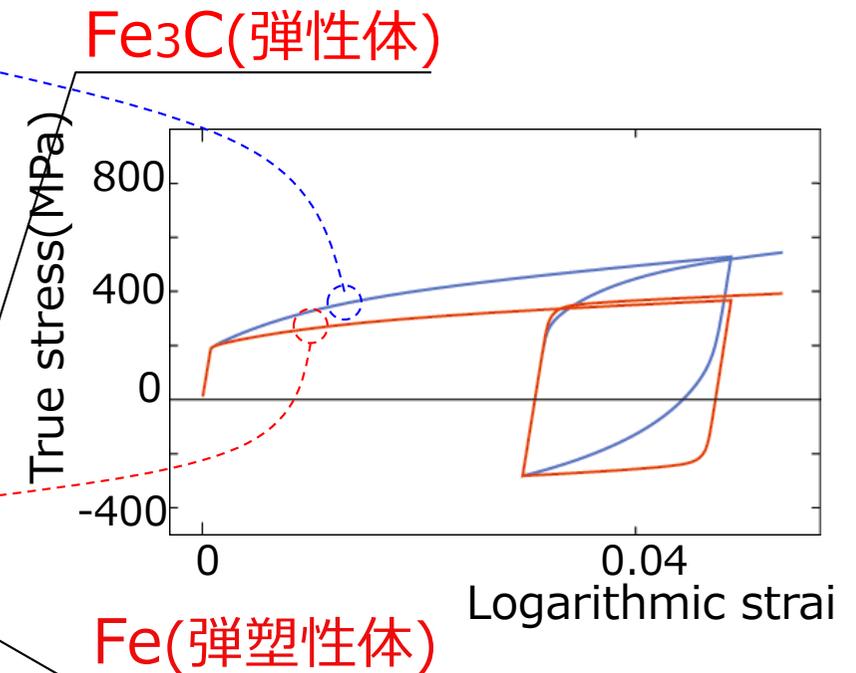
層状パーライト組織



球状化組織



## 数値材料実験の結果



## 実験結果と定性的に合致

- バウシinger効果が発現
- 炭化物形態の加工硬化に対する影響
- 炭化物形態のバウシinger効果の程度に影響

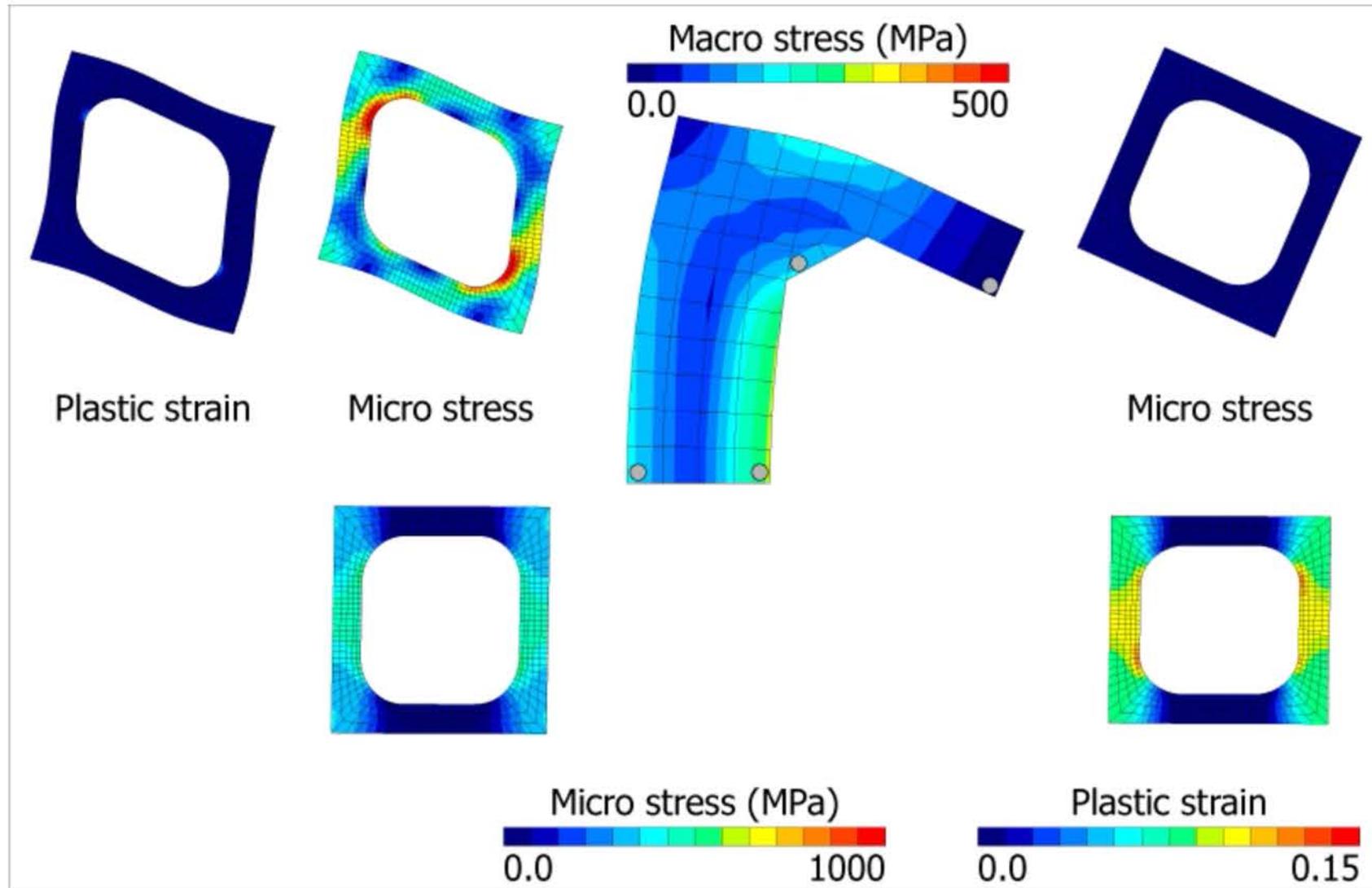
微視領域における力学挙動からメカニズムの解明の試み



# マイクロ・マクロ連成解析手法 (1995~)

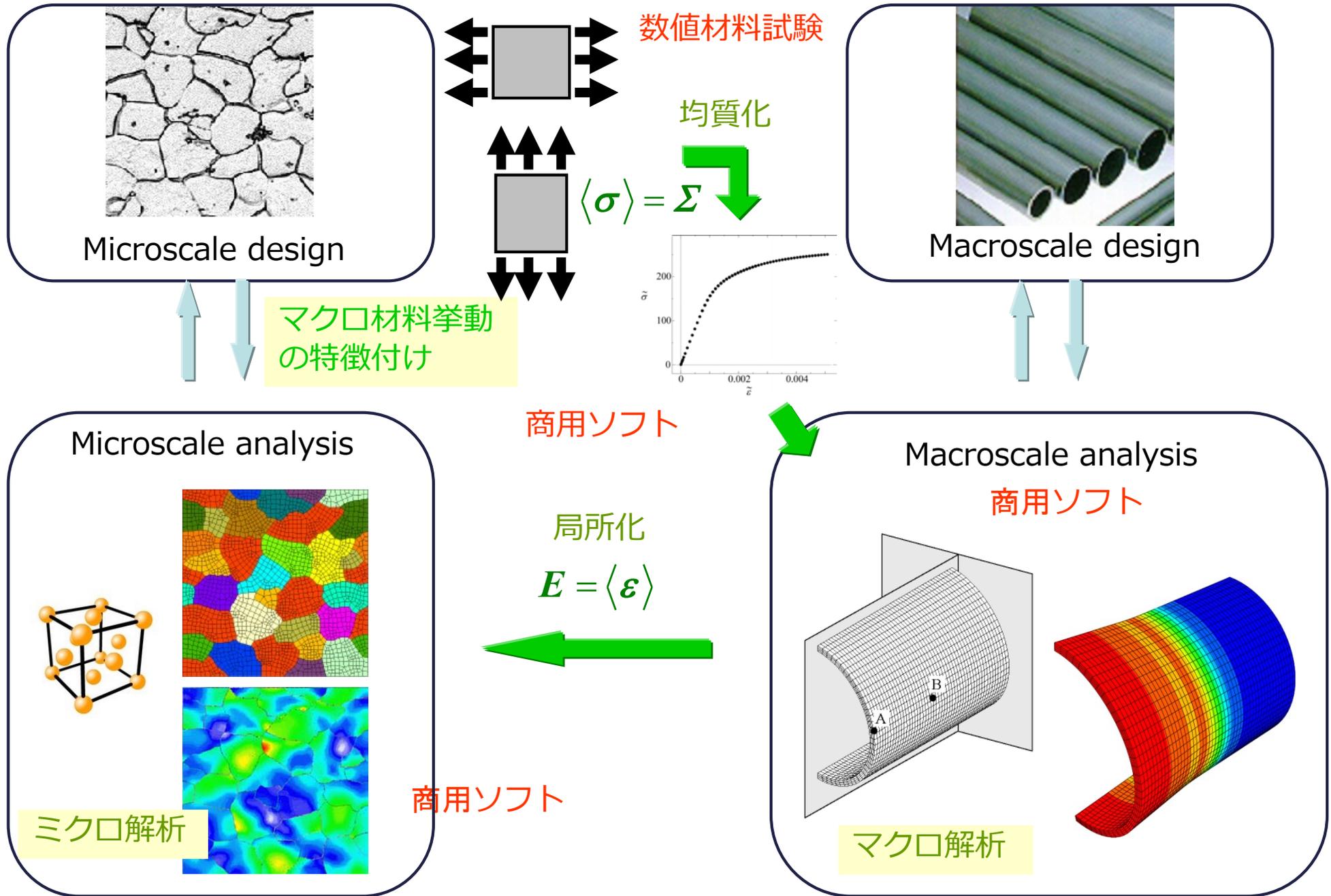
( $FE^2$ , Nested FEM, Multi-level FEM, etc,)

マクロ構造物のマクロつり合い式を満たすマクロ応力を得るために各計算（積分）点  
および各反復計算ステップでマイクロつり合い問題を同時に解く

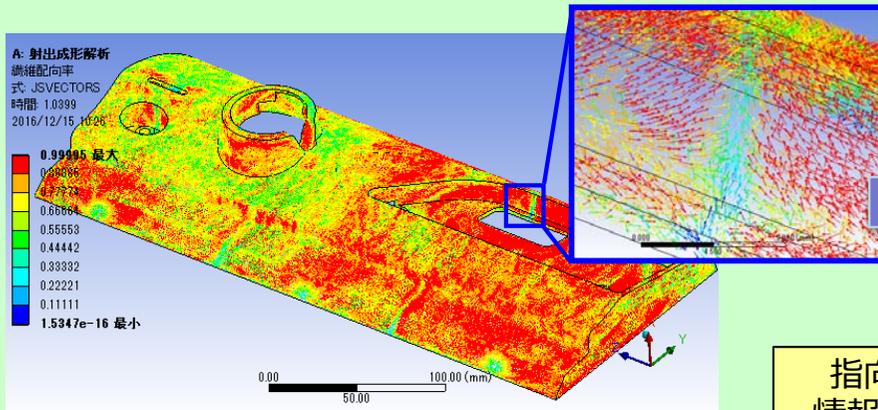


# ミクロ・マクロ分離型解析手法 (2010~)

(Decoupled scheme)



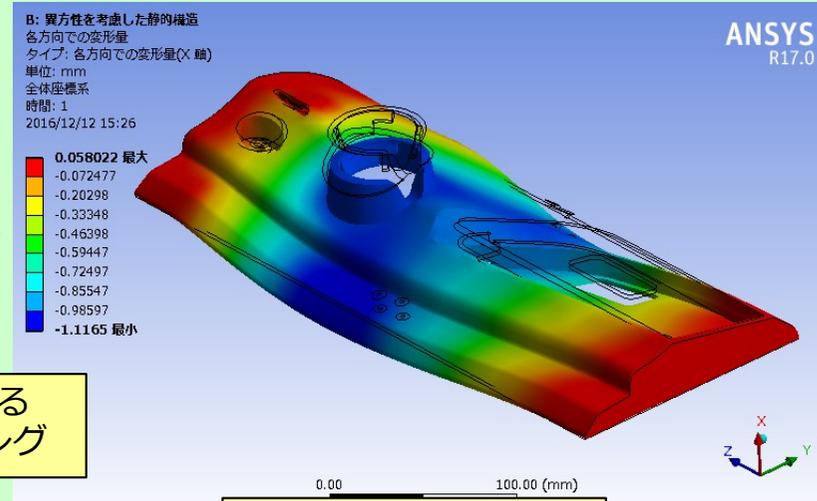
## 樹脂流動解析ツール「PlanetsX」を用いた樹脂射出成形解析による繊維配向予測



繊維配向ベクトルの分布と配向比

指向性に関する情報のマッピング

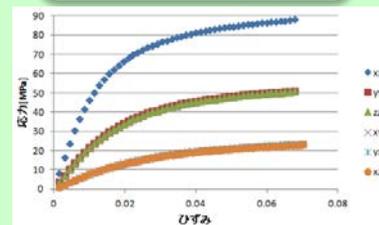
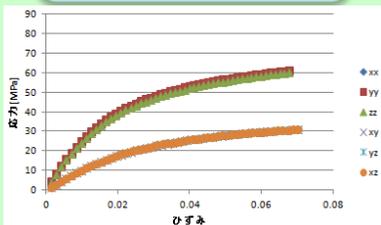
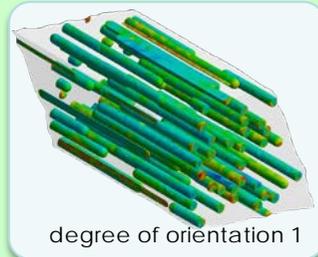
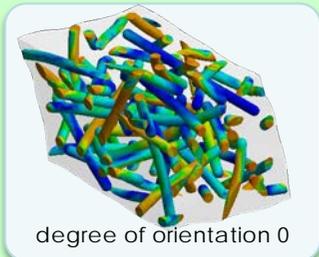
## ANSYS Mechanicalによる非線形応力解析を実行



材料特性のマッピング

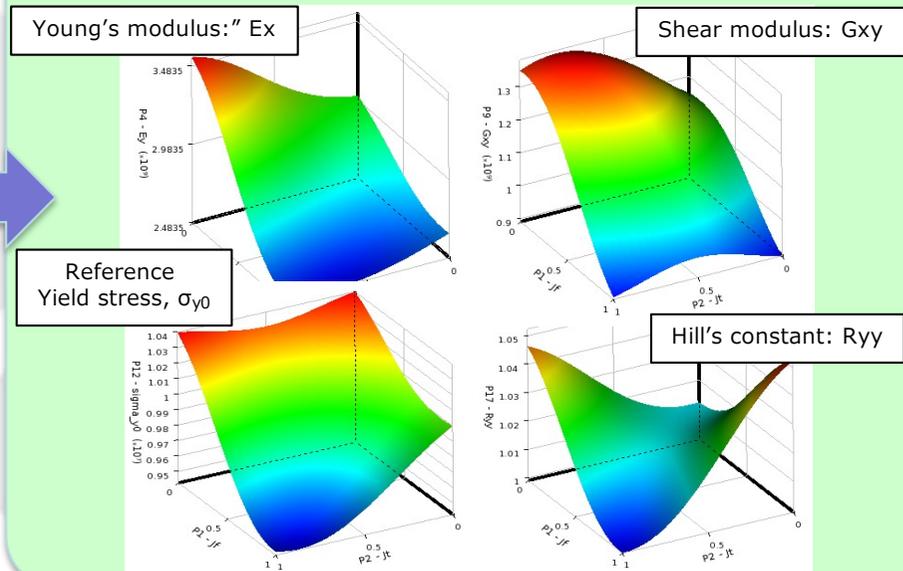
## MDCCHソフトウェアを用いて、仮定した巨視的構成則の材料パラメータを得るための数値材料試験を実施

異なる方位度を持つ典型的なマイクロ構造



マクロ応力-ひずみ曲線

## ANSYS DesignXplorerを用いてマクロ材料パラメータの応答曲面を取得



## 2. 材料のモデル化と解析手法の開発



- ナミックス・メカニカルデザイン
  - 硬化収縮を考慮した熱硬化性樹脂の材料モデルと解析手法の開発（2017~2019）
- 東洋紡
  - 樹脂の構成則の開発（2016~現在）
- リクシル・メカニカルデザイン
  - 衛生陶器の乾燥・焼成過程の数値シミュレーション（2013~2015）
- トヨタ自動車
  - マグネシウムの双晶／転移相互作用に関する研究（2011-2012）
  - ゴムの時間依存物性評価と構成則の開発（2016~2017）
- 日産自動車、関連会社
  - Li電池の熱・化学・機械連成解析手法の開発（2017~2021）



## 3. CAE技術の高度化



- 電源開発（J-Power）
  - 有限要素メッシュおよび要素性能に関する研究、他（2001~2002）
- トヨタ自動車
  - ブレーキ鳴きのメカニズムの解明と抑制技術（2001~2004）
- 鉄道総合研究所
  - 地下構造物の劣化予測に関する数値解析的研究（2018~2021）
- NEDO
  - 固体酸化物形燃料電池の電気化学連成解析技術と強度評価技術の研究開発（2008~現在）



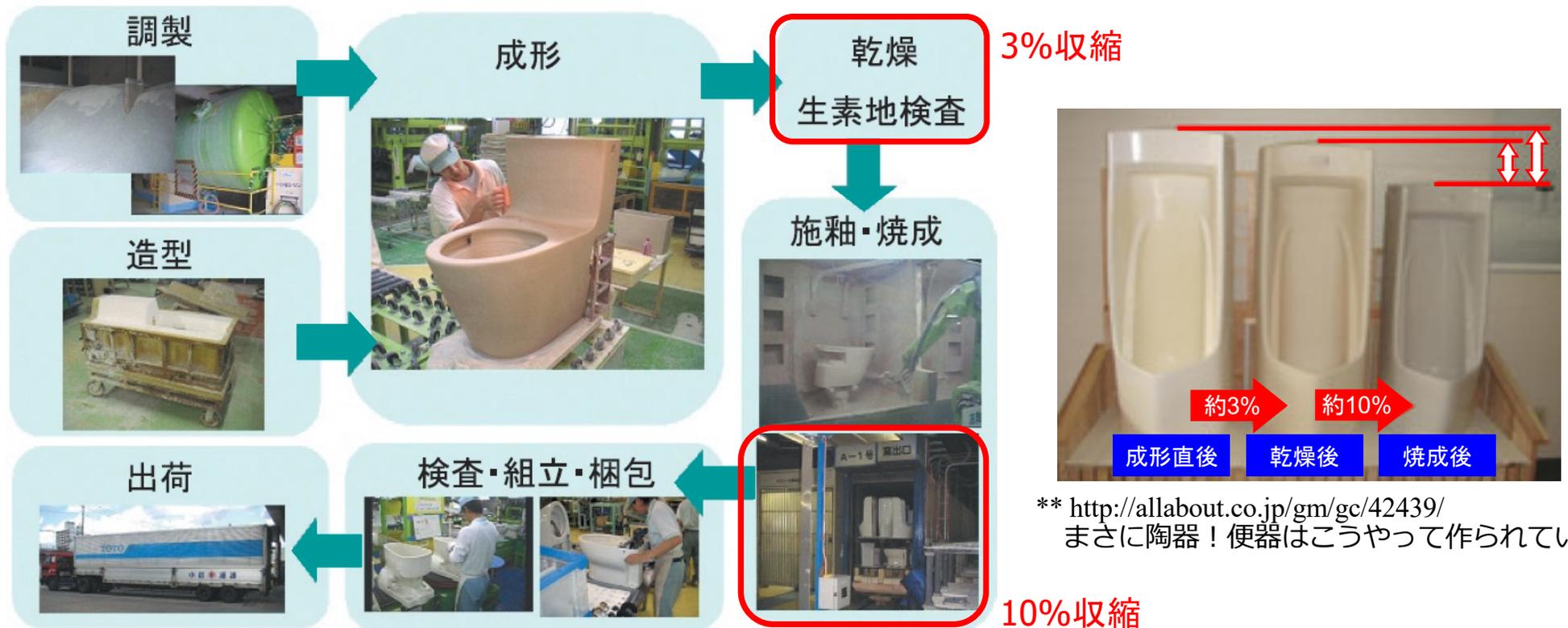
# 材料モデリング

# Material Modeling

TOHOKU  
UNIVERSITY

# 衛生陶器の製造工程

- 衛生陶器の乾燥・焼成解析による形状予測技術の開発
  - 乾燥や焼成工程での収縮量が非常に大きい\*\*.
  - 変形予測ができず，試作・設計を繰り返し行う必要がある。



\*\* <http://allabout.co.jp/gm/gc/42439/>  
まさに陶器！便器はこうやって作られていた

\* [http://www.ceramic.or.jp/museum/contents/pdf/2008\\_05\\_01.pdf](http://www.ceramic.or.jp/museum/contents/pdf/2008_05_01.pdf)  
セラミックスアーカイブス，衛生陶器，日本セラミックス協会

全変形

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}^m \mathbf{F}^{\text{im}}$$

未知パラメータ：18個

Matsubara, Tarada, Kobayashi,  
Saitou, Umeda, Mihara, Oide, Shin,  
Engineering Computations, 2017

非機械変形

$$\mathbf{F}^{\text{im}} = (1 + \varepsilon^t + \varepsilon^s) \mathbf{1}$$

(時間変化する2種類の非機械ひずみを考慮)

$$\begin{cases} \text{熱膨張変形速度} & \dot{\varepsilon}^t = \alpha \dot{T} \\ \text{焼結ひずみ速度} & \dot{\varepsilon}^s(T, h) = -\frac{1}{3} \Omega(T) (\rho_{\text{rel}}^\infty(T) - \rho_{\text{rel}}(h))^{n(T)} \end{cases}$$

機械変形

$$\mathbf{d}^m = \text{sym}[\dot{\mathbf{F}}^{\text{im}} (\mathbf{F}^m)^{-1}] = \mathbf{d}^e + \mathbf{d}^{\text{VP}}$$

$$\text{弾性構成則} \quad \dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{C}(E, \nu) \boldsymbol{\varepsilon}^e = \mathbf{C}(E, \nu) \mathbf{d}^e$$

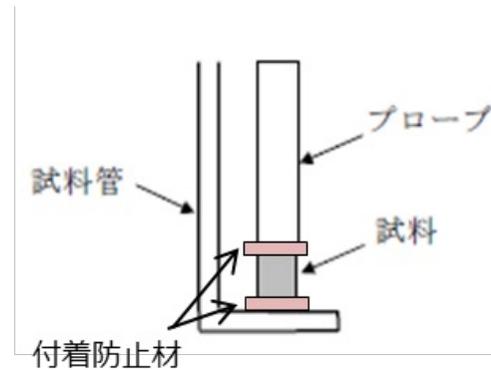
$$E(T) = -1027 \times \tanh\left(\frac{T - 1096}{33}\right) + 1602$$

Creep 発展則

$$\mathbf{d}^{\text{VP}}(\boldsymbol{\sigma}, t, T, \rho_{\text{rel}}(h)) = \dot{\gamma}^{\text{VP}} \mathbf{N} \quad \begin{cases} \mathbf{s} = \text{dev}(\boldsymbol{\sigma}) \\ \mathbf{N} = \text{normalize}(\mathbf{s}) \\ \sigma_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{s} : \mathbf{s}} \end{cases}$$

$$\dot{\gamma}^{\text{VP}} = \sqrt{\frac{3}{2}} C_1 \|\sigma_{\text{eq}}\|^{C_2} t^{C_3} \left[ \tanh\left(\frac{T - T_0}{W}\right) + 1.0 \right] \exp(C_4 \rho_{\text{rel}})$$

# 焼成過程における陶器材料の構成方程式 とその関数形の決定方法の提案



熱機械測定装置(TMA)による材料の膨張・収縮測定

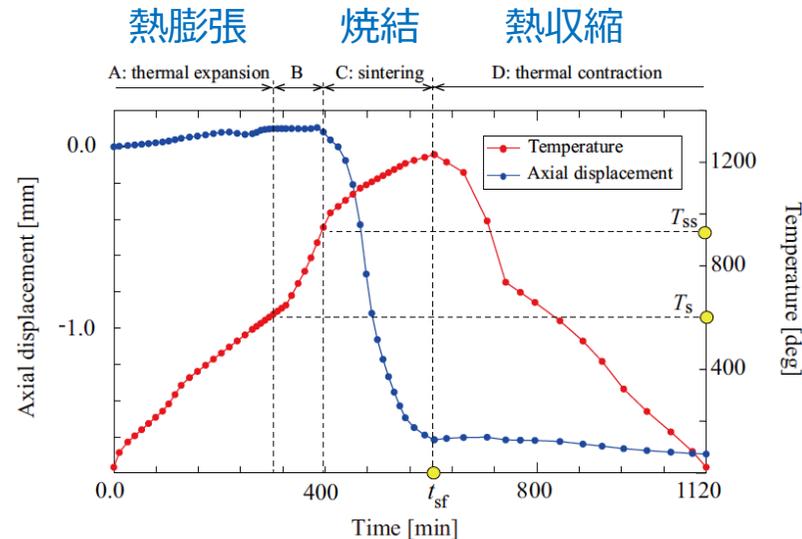


Fig. 8 Heat-curve and axial displacement obtained in a no-load firing test. The region is divided into four: A: thermal expansion only, B: transition involving both thermal deformation and sintering, C: sintering w/o thermal deformation, D: thermal contraction only. It is assumed that there is no deformation in Phase B.

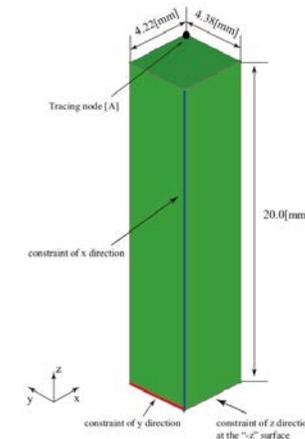


Fig. 7 Test specimen model with spatial dimension and boundary conditions in the identification analysis of coefficients of thermal expansion (CTEs).

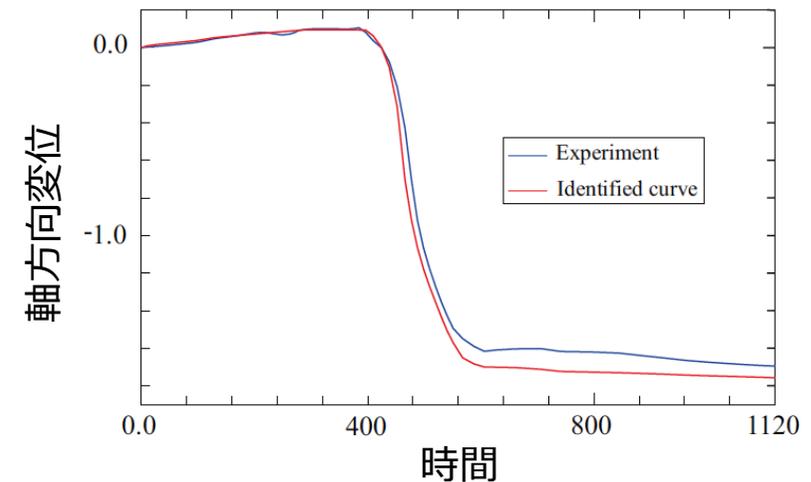


Fig. 9 Time-variation of axial displacement obtained by numerical analysis with identified CTEs along with experimental one. The identified curve (depicted by a red-colored solid line) indicates the axial displacement in the z-direction at node [A] in Fig. 7.

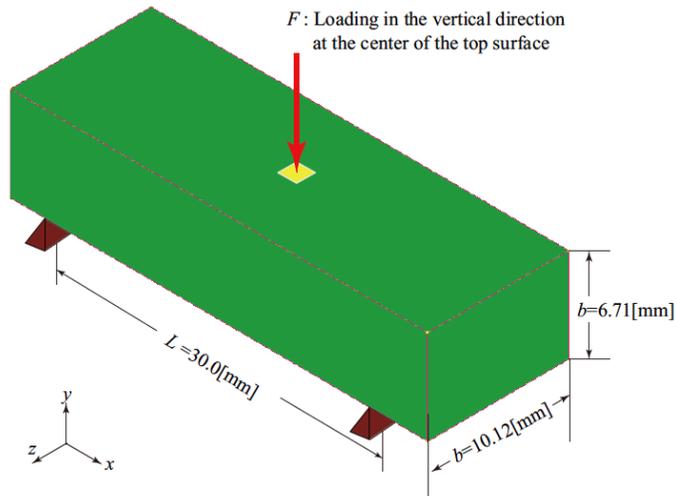


Fig. 12 Bending specimen with spacial dimension and boundary condition for identification of temperature dependent elastic modulus. The specimen is subjected to three-point bending.

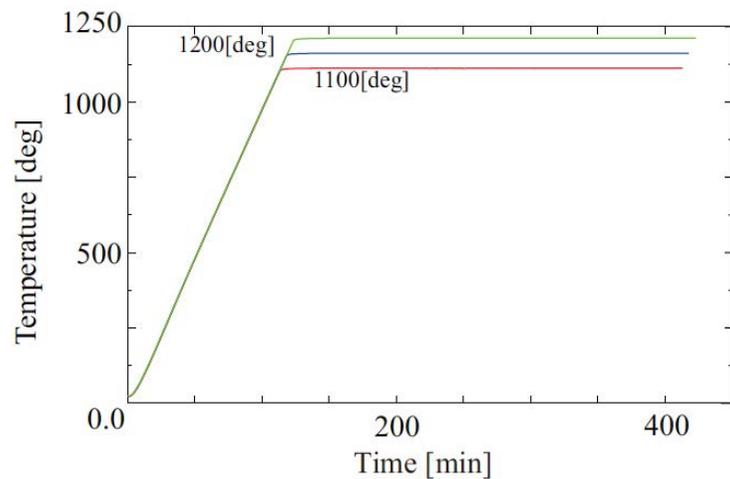


Fig. 16 Heat curves in identification analysis of creep parameters

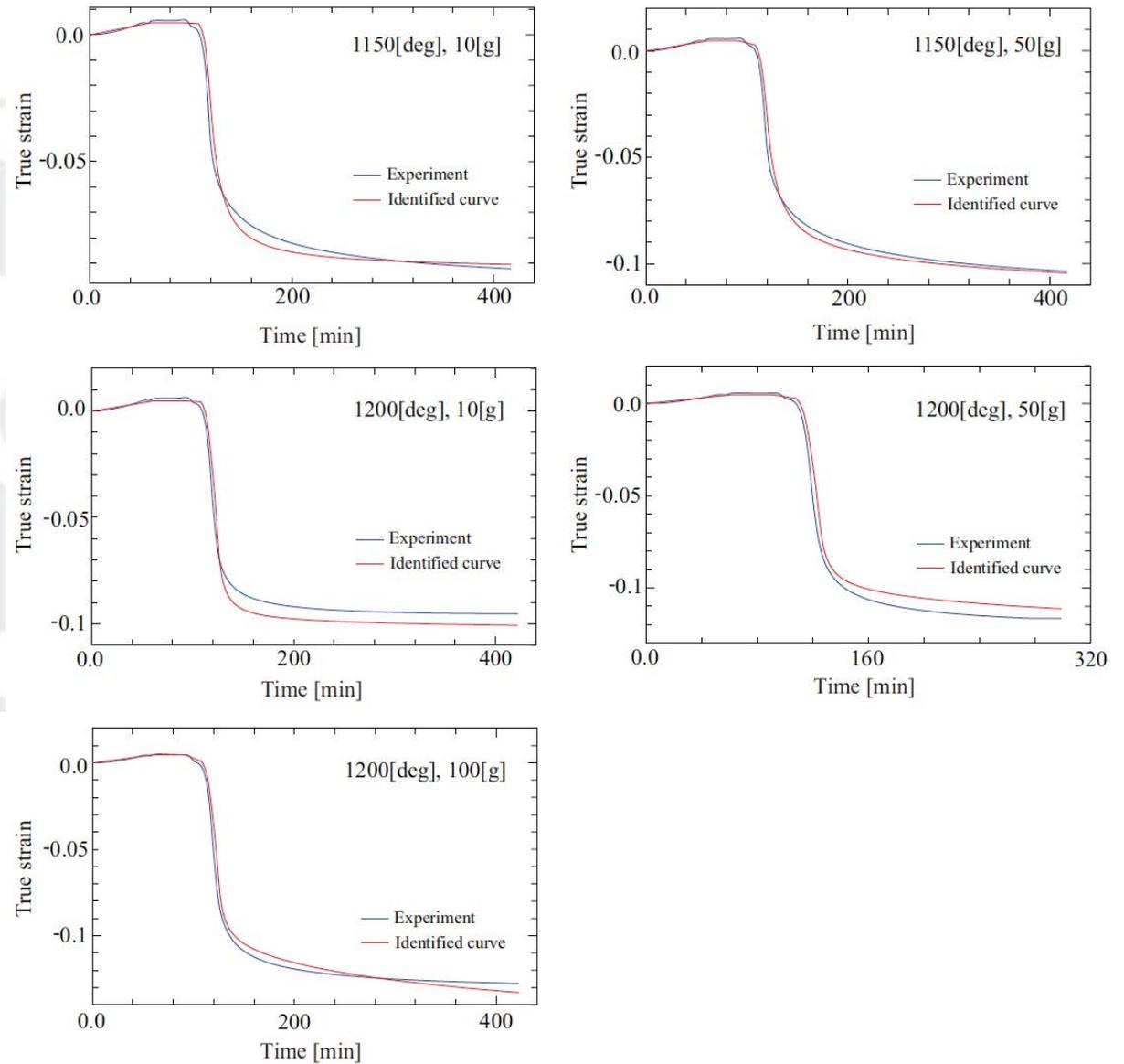
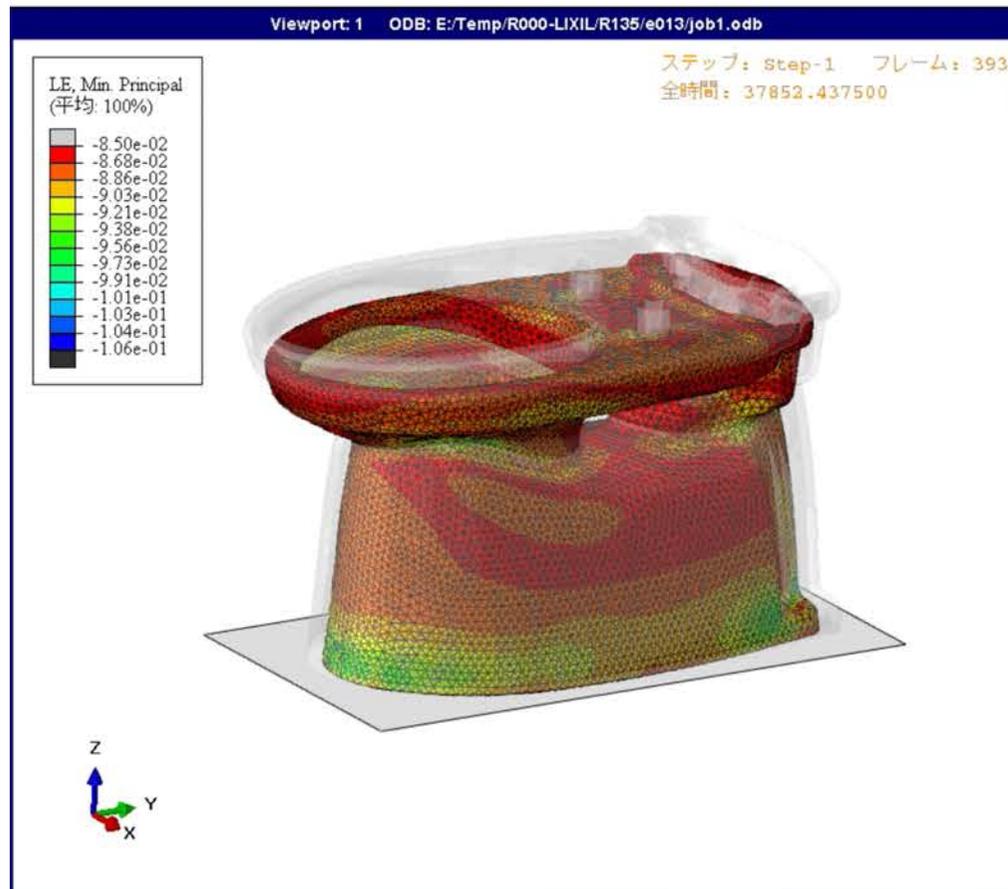
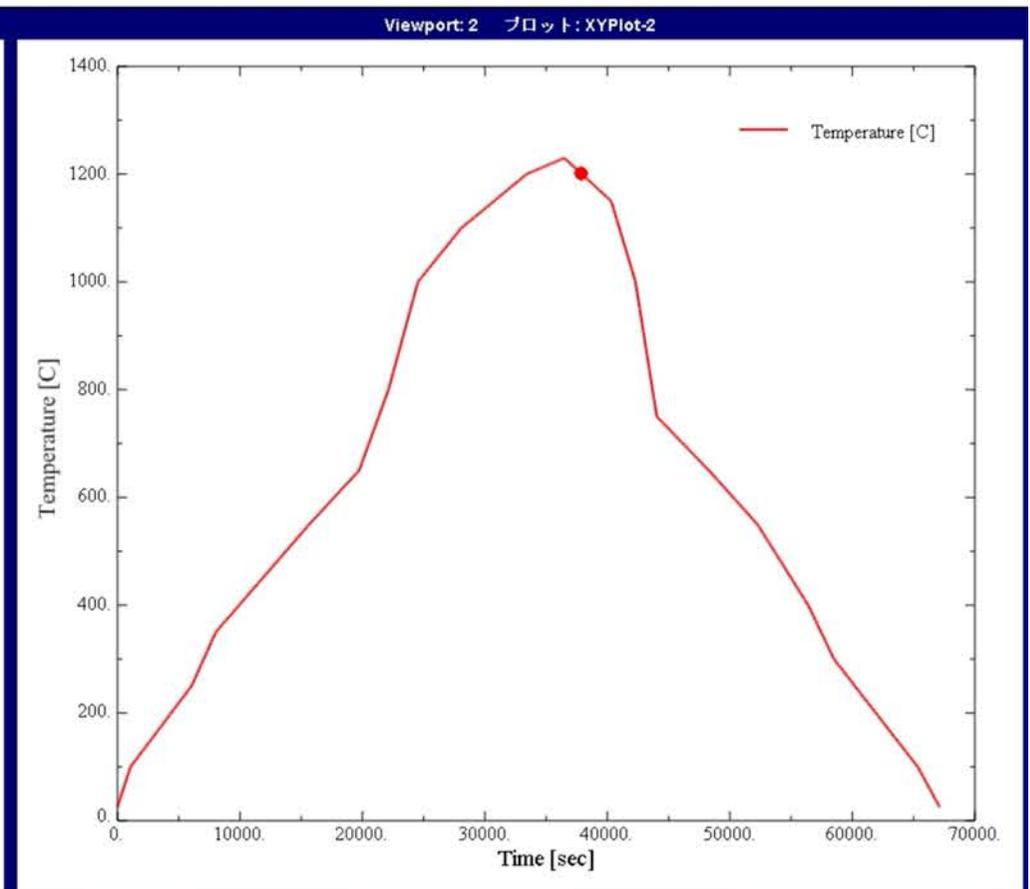


Fig. 18 Time-versus-strain curves calculated by the creep constitutive equation with the identified creep parameters with the experimental results. In the case of "1200[deg]-100[g]", creep evolution is different between identified and experimental result. However, everything is in good agreement with corresponding experimental results.

## 変形と応力分布



## ヒートカーブ



- Seishiro Matsubara, Kenjiro Tarada, Takaya Kobayashi, Toshiyuki Saitou, Manabu Umeda, Yasuko Mihara, Kai Oide, Hiroto Shin, Yasuhiro Katsuda, A set of constitutive functions for dried body to predict entire deformation process of ceramic products during firing, *Engineering Computations*, Vol. 34 Issue: 8, pp.2668-2697 (2017) <https://doi.org/10.1108/EC-12-2016-0444>

齊藤俊幸, 進博人, 勝田泰広, 梅田学, 生出佳, 三原康子, 寺田賢二郎, 松原成志朗, 有限要素法を用いた陶磁器の焼成変形予測, 計算工学講演会論文集, Vol.21, C-4-5, 2016.

特許: 衛生陶器の製造時の変形予測方法

登録番号 JP6571580B - 特許6571580 (2019-09-04)

出願人: 株式会社 L I X I L ・ 寺田 賢二郎 (東北大学) ・ 他

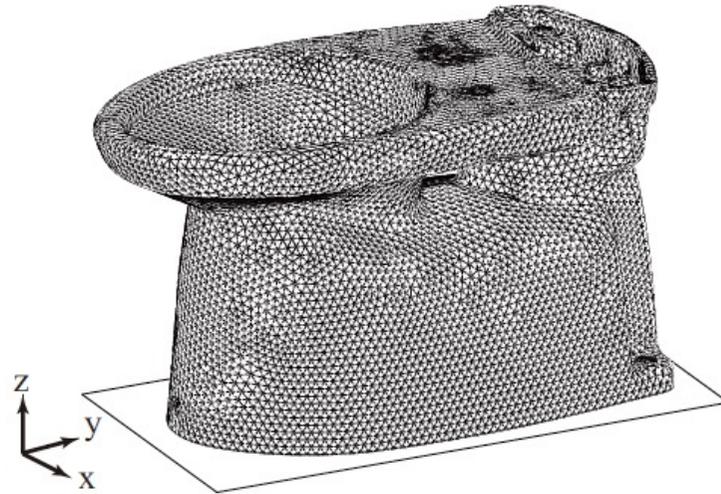


Fig. 19 FE model for firing process of a sanitary ware. The model is composed of approximately 150,000 ten-node tetrahedral elements and 80,000 nodes. The initial geometry of the model was prepared as a result of a preliminary analysis for the drying process.

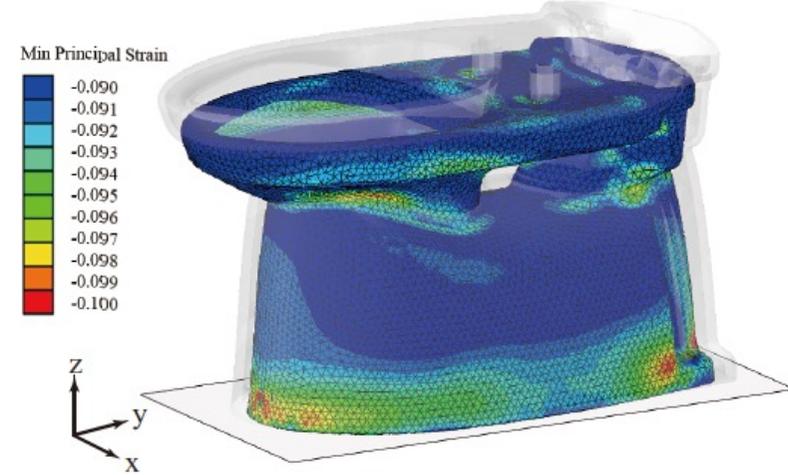


Fig. 20 Analysis result of the firing process. Up to 10% of the maximum shrinkage strain was attained during the sintering stage.

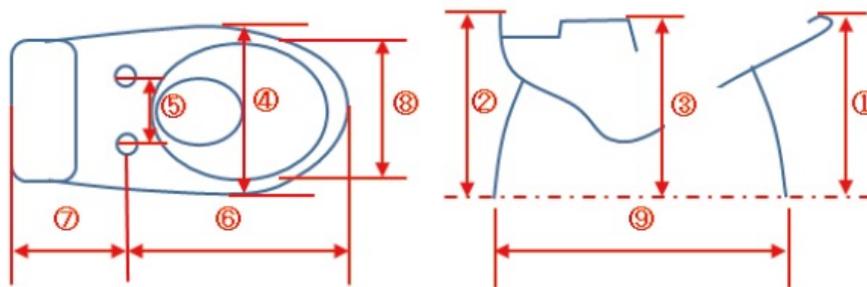
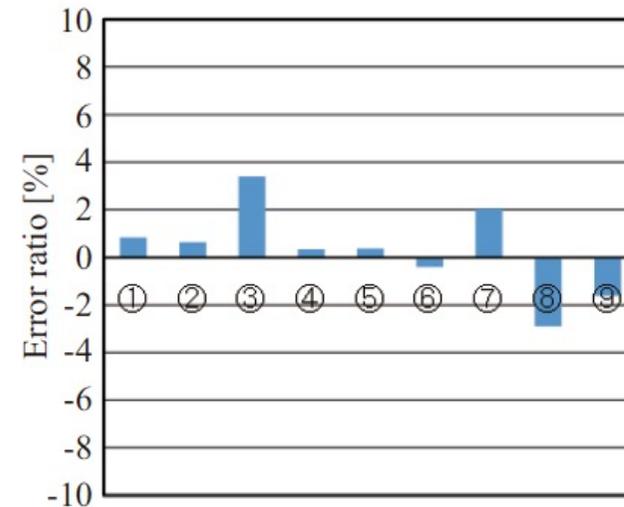


Fig. 21 Errors in dimension of the simulated results in comparison with the measured data for the final configuration of the sanitary ware, which was taken out of the furnace and cooled down to a normal temperature. All of the errors are suppressed within 1-2 % with the proposed modeling and identification strategies.



## 4. き裂進展解析手法の開発

- 鹿島建設
  - 超高強度セメントペーストの圧縮载荷によるひび割れ進展解析 (2008)
- 本田技研工業・メカニカルデザイン・名古屋市工業研究所・慶応大学
  - A-Step (JST): 超高強度鋼板のき裂進展解析手法の開発 (2018~2022)



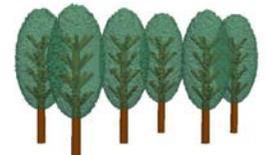
## 5. トポロジー最適化

- 豊田中央研究所・くいと
  - トポロジー最適化に関する研究 (2001~2003)
- ブリヂストン
  - タイヤ内部複合構造およびホイール構造のトポロジー最適化に関する研究 (2001-2004)
- SIP革新的設計生産技術
  - 迅速で創造的な製品設計を可能とするトポロジー最適化に基づく超上流設計法の開発 (2015~2018)



## 6. 防災・減災関連

- 日本工営
  - X-GISおよび各種防災技術の開発 (2015~現在)
- 防災科研
  - 地すべりV&V (2023~現在)
- 中部電力
  - 機械学習に基づく津波災害リスク/地盤災害リスクの予測手法の高度化 (2018~現在)



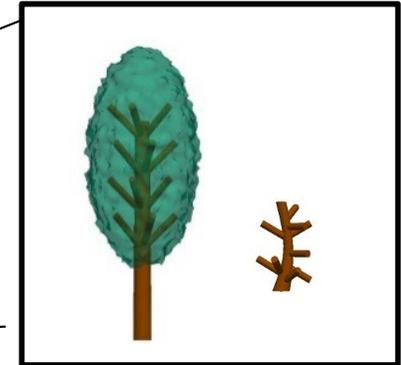
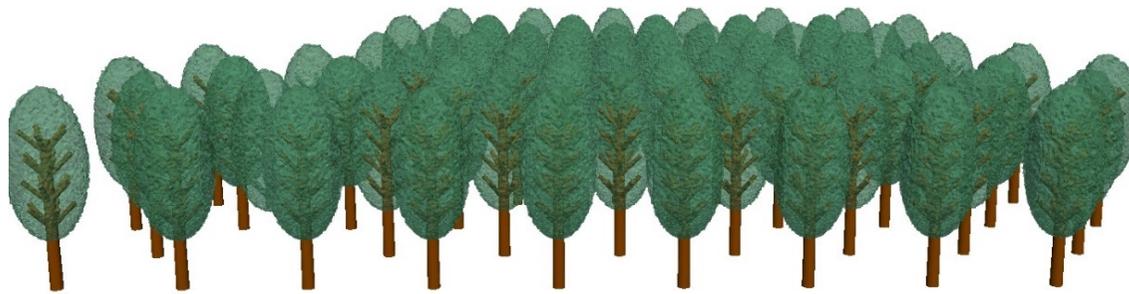
災害シミュレーション

Disaster Simulation

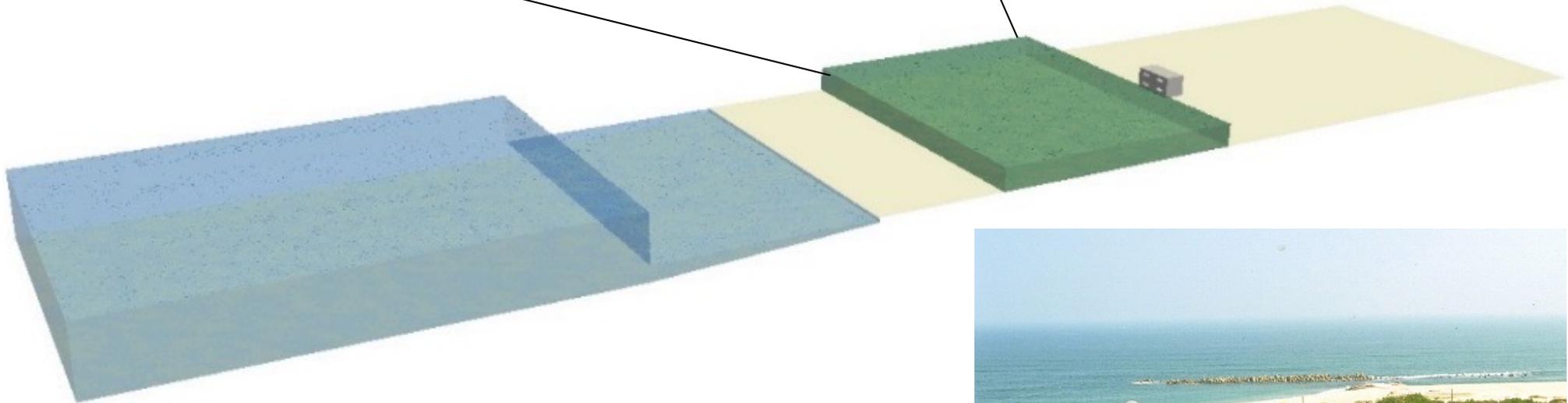
TOHOKU  
UNIVERSITY

# 防潮林の波力の減衰効果

防潮林全体 ≡ マクロ領域



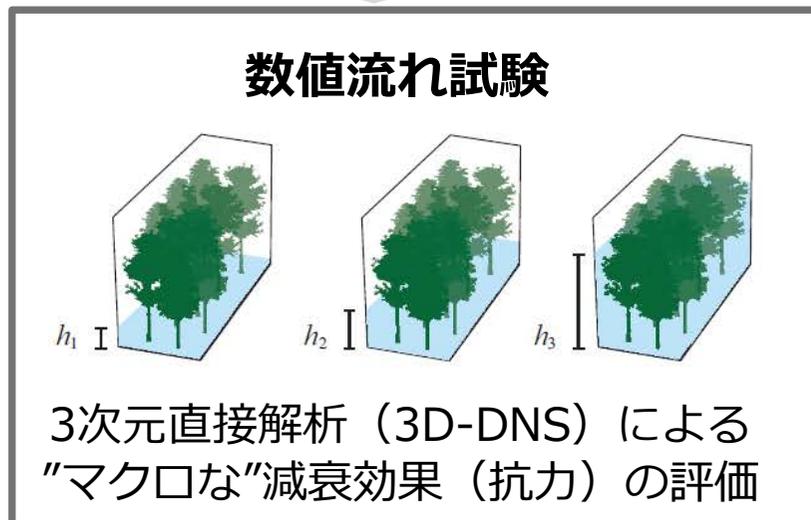
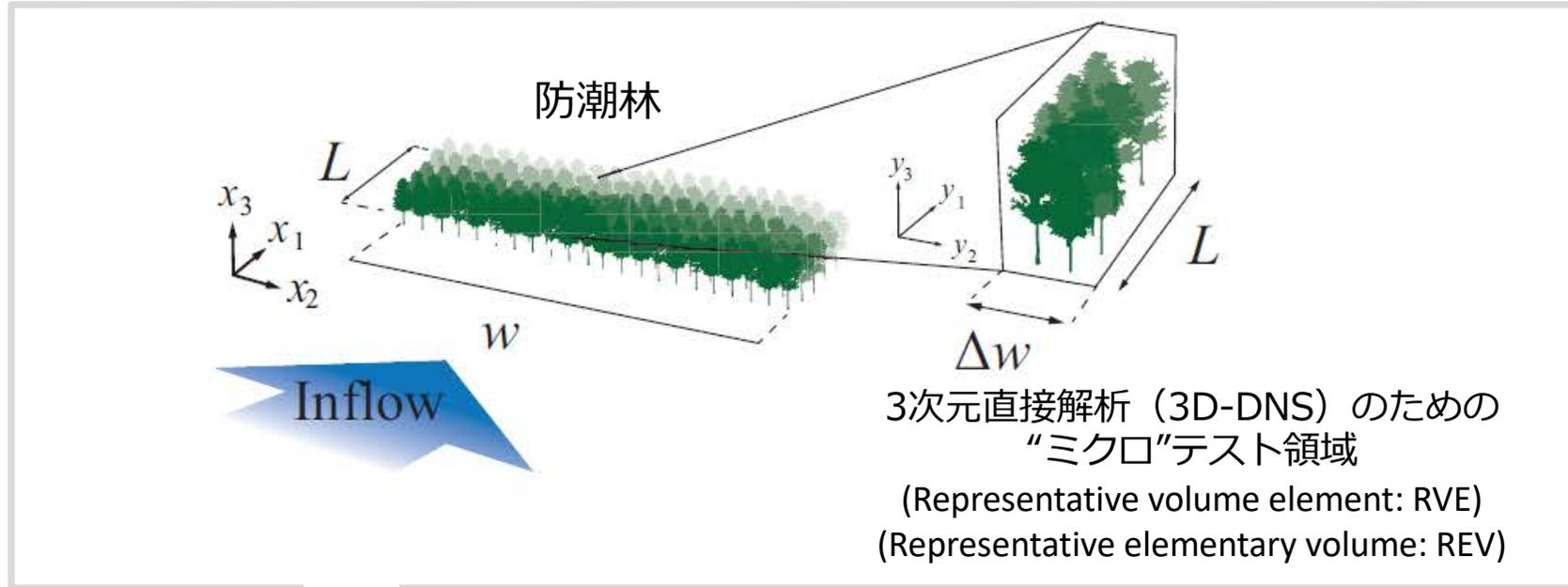
樹木・枝 ≡ ミクロ領域



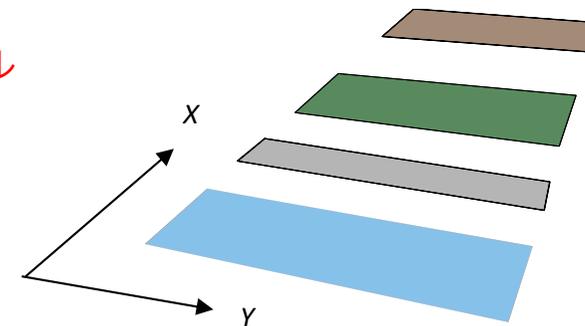
- 浅水長波方程式の抗力項の評価
- 背面構造物に対する影響



# 防潮林のマルチスケール解析



抗力の代理モデル  
の構築



2次元浅水長波解析

# 数値流れ試験

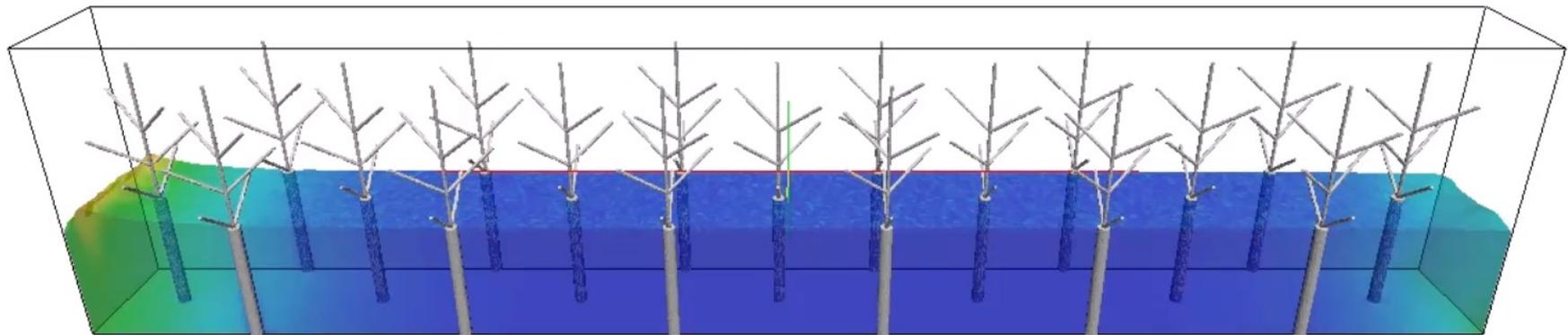
- 支配方程式 (3D-DNS)
  - Navier-Stokes 方程式

$$\rho_f \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} - \mathbf{f} \right) - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_f = \mathbf{0}$$

- 離散化

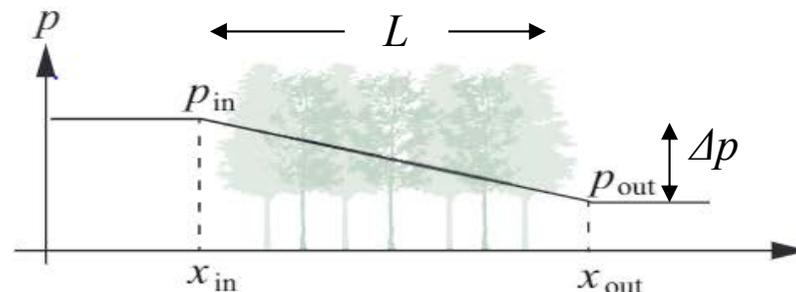
$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

- 安定化有限要素法\*1, 2
- フェーズフィールド法による自由表面捕捉\*3, 4



Assuming negligible bottom friction

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} \approx \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial x}$$



$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = -\frac{1}{2} \rho C^* \langle u_1 \rangle |\langle u_1 \rangle|$$



$$C^* = \frac{\Delta p}{L} \cdot \left( \frac{1}{2} \rho \langle u_1 \rangle^2 \right)^{-1}$$

\*1. Brooks & Hughes (1982), \*2. Tezduyar (1991), \*3. Takada et al. (2013), \*4. Chiu & Lin (2011)

# Rigid tree model

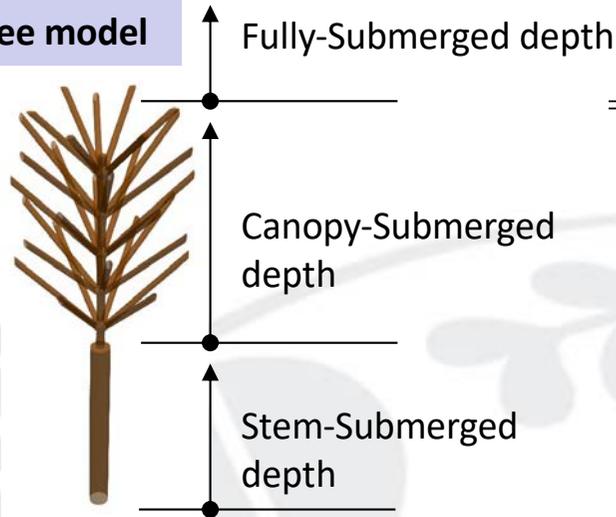
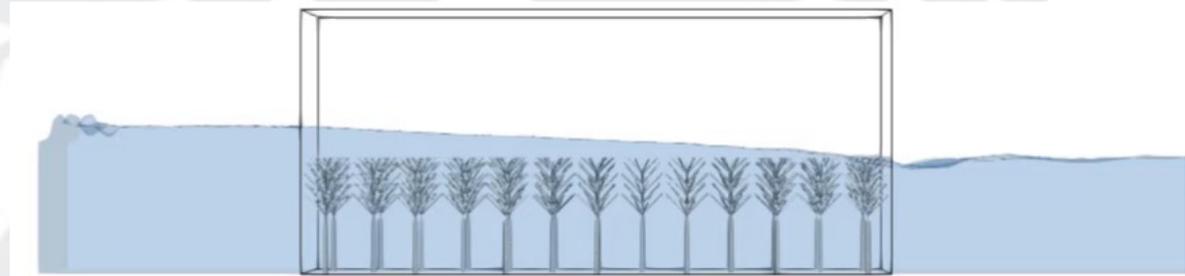
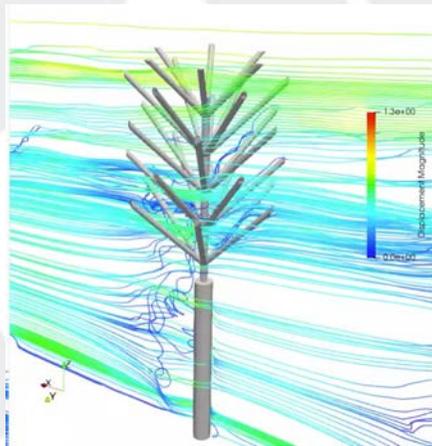


表1 Initial flow conditions of numerical flow tests

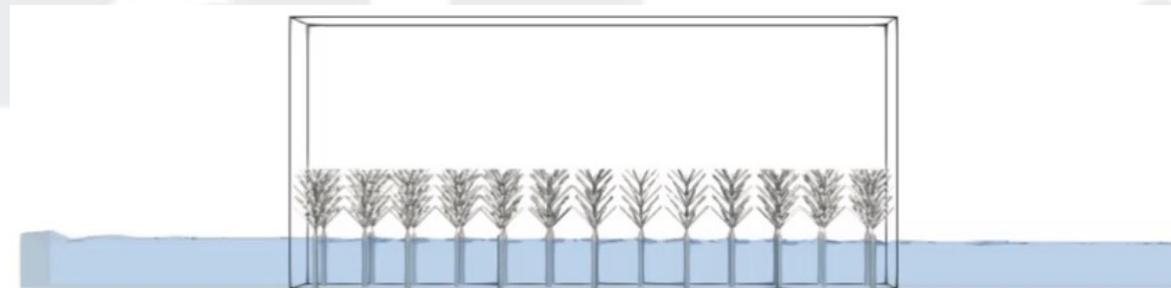
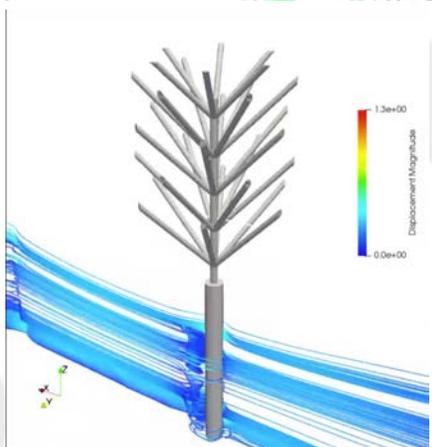
Case No.	$\hat{u}$ (m/s)	$\hat{h}$ (m)	Inflow conditions	$T$ (s)
1	0.300	0.10	Lower velocity & Stem-submerged depth	3.75
2	0.500	0.10	Higher velocity & Stem-submerged depth	2.25
3	0.300	0.15	Lower velocity & Canopy-submerged depth	3.75
4	0.500	0.15	Higher velocity & Canopy-submerged depth	2.25
5	0.300	0.25	Lower velocity & Fully-submerged depth	3.75
6	0.500	0.25	Higher velocity & Fully-submerged depth	2.25
7	0.300	0.35	Lower velocity & Fully-submerged depth	3.75
8	0.500	0.35	Higher velocity & Fully-submerged depth	2.25

樹冠部の複雑形状を考慮した樹木抵抗力の代理モデル

三次元数値流体解析により  
樹木の複雑形状を考慮した抗力を評価



樹冠部(Canopy) まで没水しているケース (左: 流線図, 右: 水面形の様子)

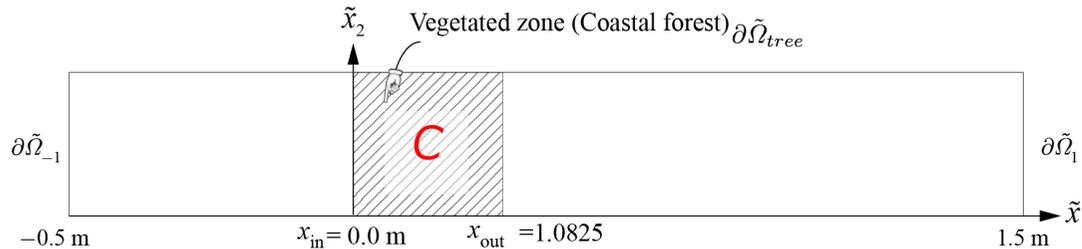


樹幹部(Stem) まで没水しているケース (左: 流線図, 右: 水面形の様子)

# 浅水長波方程式によるマクロ流れ解析



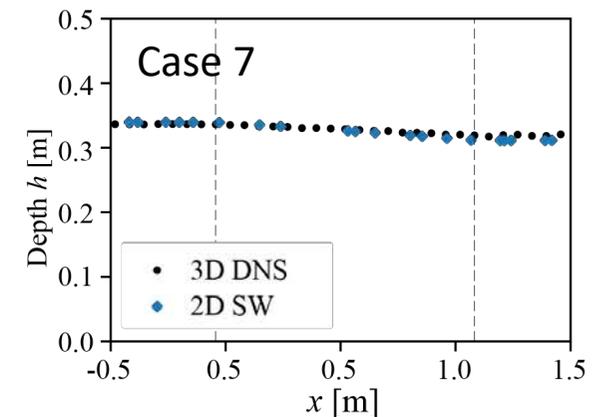
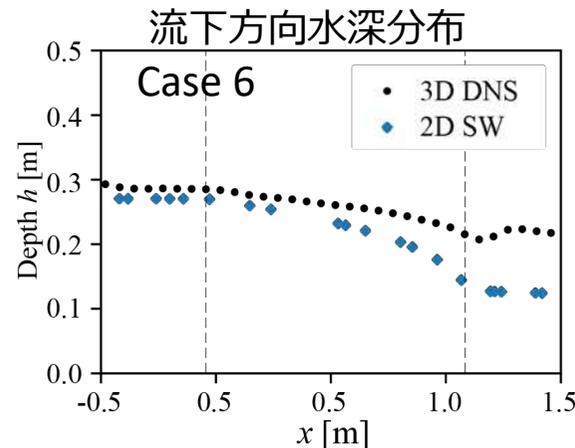
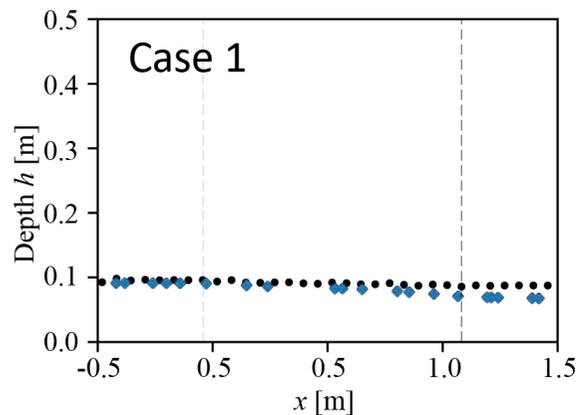
$$\left. \begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial \tilde{x}_j} \right) &= -\rho g \frac{\partial h}{\partial \tilde{x}_i} - S_i \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \tilde{x}_i} U_i h &= 0 \end{aligned} \right\} \text{ in } \Omega \quad S_i = \frac{1}{2} \rho C |\mathbf{U}| \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \left( \approx \begin{bmatrix} P_{x_1} \\ 0 \end{bmatrix} \right)$$



- 試験領域と同一の寸法の二次元試験領域 (左図) を設定
- 代理モデル (応答曲面) によって運動量損失係数  $C$  を決定

Case No.	3D micro-scale flow (Results of numerical flow tests)	2D macro-scale flow
Case 1	0.328	0.344
Case 6	0.543	0.490
Case 7	0.320	0.316

## 検証例



# 土砂流動の数値シミュレーション

近年多発している土砂災害 土砂発生前の**事前予測**が重要

- 高速で広範囲に及ぶ崩壊土砂による甚大な被害
- 土砂発生から到達するまでの時間が非常に短く、発生後の避難・対策が困難
- 固体と流体の力学挙動が双方向で遷移

数値解析を利用したアプローチの現状

- 地盤材料の解析：固体状態と流動状態を区別
- 土砂流動解析：すべり面を仮定



固体として振る舞う地盤の変形・破壊とその後の流動状態の双方を表現できるモデル・解析手法が必要

目的

固体材料の固体的・流体的挙動  
の包括的な数値解析手法の開発



深層崩壊（地すべり）（2011）<sup>1)</sup>



破堤（2015）<sup>2)</sup>

1) [http://www3.pref.nara.jp/doshasaigai/sabokyouikucontents/dosya\\_shinsouhoukai/](http://www3.pref.nara.jp/doshasaigai/sabokyouikucontents/dosya_shinsouhoukai/)

2) [https://www.nikkei.com/article/DGXLASDG10H5L\\_Q5A910C1000000/](https://www.nikkei.com/article/DGXLASDG10H5L_Q5A910C1000000/)

# 2016年熊本地震による土砂災害 (2016年4月18日)



<https://blogs.agu.org/landslideblog/2016/04/18/kumamoto-earthquake-1/>

地震による地滑りの衝撃 or 橋脚基礎の崩落により損失した阿蘇大橋

# 乾燥した土の力学挙動のモデル化



- ✓ Hyperelastic model (Hencky's)

$$\boldsymbol{\sigma}' = \frac{2\mu}{J} \ln \boldsymbol{\varepsilon} + \frac{\lambda}{J} \ln J \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} \ln \mathbf{b} = \frac{1}{2} \ln \mathbf{F}^e \mathbf{F}^{eT} \quad \mu, \eta : \text{Lamé constants}$$

Multiplicative decomposition of deformation gradient:  $\mathbf{F} = \mathbf{F}^e \mathbf{F}^p$

- ✓ Drucker-Prager's yield condition (plastic potential)

$$\Phi(\boldsymbol{\sigma}', c) = \sqrt{J_2(\mathbf{s}(\boldsymbol{\sigma}'))} + \eta p(\boldsymbol{\sigma}') - \xi c \quad \eta, \xi \quad \text{Material parameters depending on internal friction angle}$$

- ✓ Flow potential for non-associative flow rule

$$\Psi(\boldsymbol{\sigma}', c) = \sqrt{J_2(\mathbf{s}(\boldsymbol{\sigma}'))} + \bar{\eta} p(\boldsymbol{\sigma}') \quad \bar{\eta} : \text{dilatancy angle}$$

$$\eta = \frac{\tan \phi}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi}}, \quad \xi = \frac{3}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi}}$$

- ✓ In fluidization, damage effect is taken into account

$$K = \begin{cases} K & \text{if } \frac{\xi}{\eta} c - p > 0, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad K = (3\lambda + 2\mu)/3 \quad \begin{array}{l} \text{'sedimentation'} \\ \text{'fluidization'} \end{array}$$

Once the soil moves down, the soil no longer behaves as a solid but will be fluidized especially in the expanding state.

Assumption: soil loses its stiffness when it loses its yield strength

➔  $\boldsymbol{\sigma} \approx \mathbf{0}$

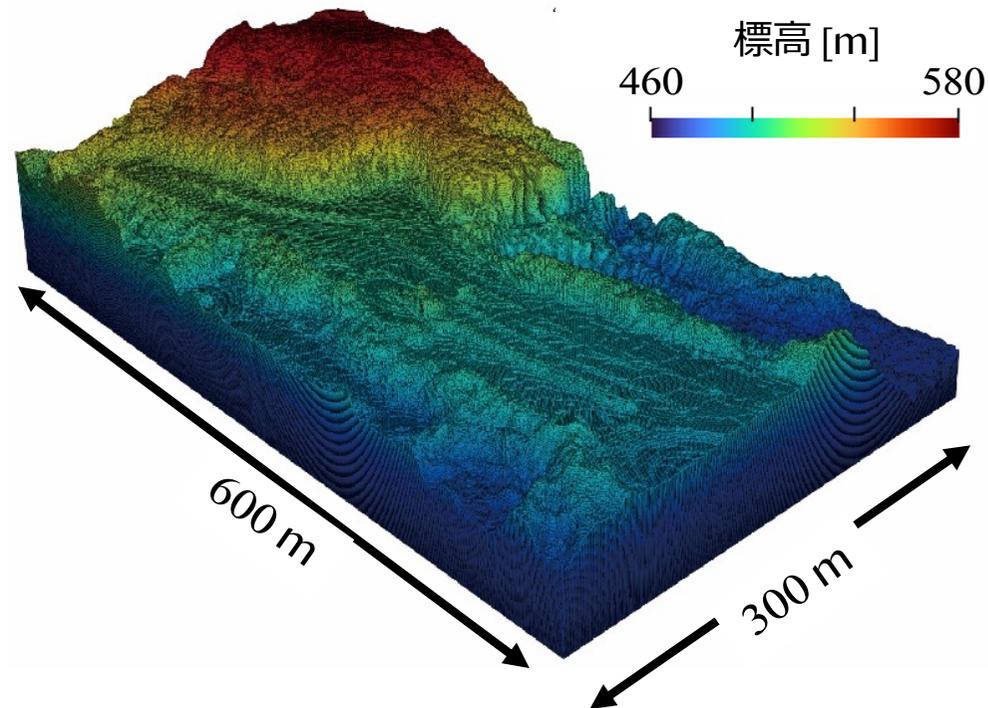
# 土砂流動の外形はほぼ一致、でもまだまだダメ



## 【課題】

- 崩壊土塊の場所と量は既定
- 崩壊土塊を自重のみで流下：地震誘起のシミュレーションではない
- 橋に作用する衝撃力の検証が不足

# 2021年福島県沖地震による エビスサーキット斜面崩壊 (2月13日)



仙頭ら<sup>1)</sup>によると,

- 崩壊箇所は幅 39 m, 長さ 138 m
- 土砂は斜面の末端から 200 m ほど移動
- 表層は火山灰粘性土が約 4 m (高い流動性)
- 崩壊部底面は高い含水比の粘土

- 固体から流体へ遷移するような挙動  
    ➡  $\mu$ -I rheology に基づく遷移モデル<sup>2)</sup>
- 動的負荷分散の適用による大規模解析

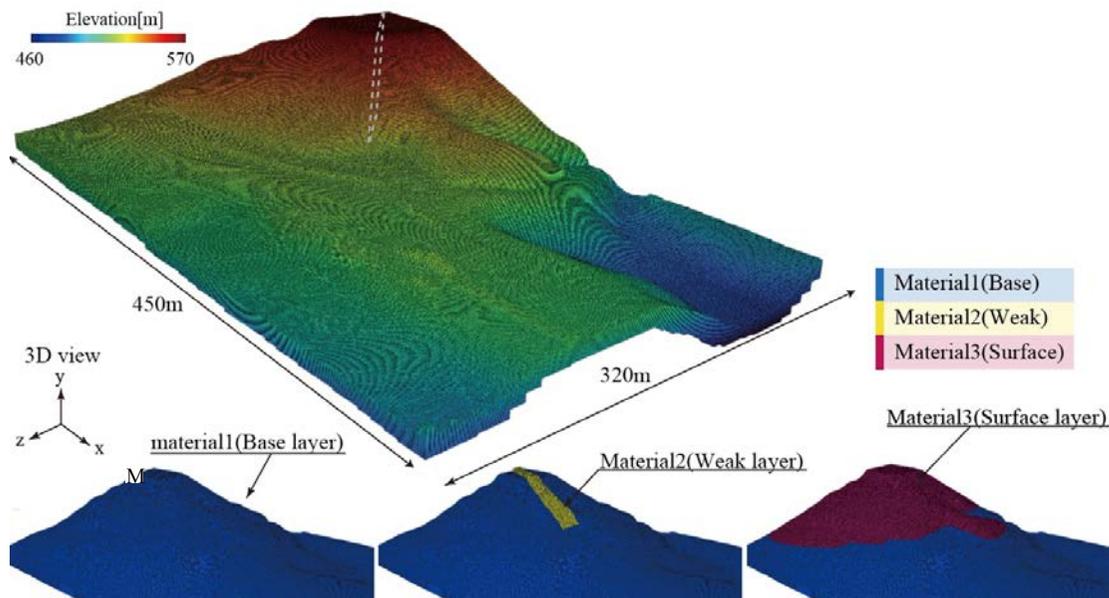
- 0.5mの分解能：1億自由度以上  
(計算点数×変数の数)
- 陽解法MPMの直接適用は非現実的

1) 仙頭紀明, 原勝重, 海野寿康, 畠良一, 加村晃良, 森口周二: 地盤工学会誌, 2021.

2) 木村凌一: 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻修士論文, 2023.

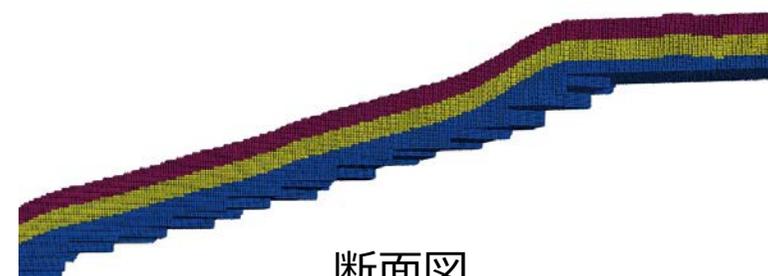
# 数値解析モデルの作成

## 2021年2月13日の福島県沖地震によるエビスサーキット斜面崩壊の再現解析



- 格子サイズ : 1辺 1.0 m
- 粒子数 : 8 (2×2×2)
- 時間刻み幅 :  $1.0 \times 10^{-3}$  s
- 解析ステップ : 100,000
- 粒子数 : 1400 万
- 格子数 : 1800 万
- 自由度数 (未知数の数) : 5400 万
- 並列数 (スパコン) : 5760 cores (CPUの数)
- 現象の継続時間 : 約1.5分

Parameters		Surface layer	weak layer	Base layer
ヤング係数 (Pa)	$E$	$4.00 \times 10^6$	$4.00 \times 10^6$	$1.0 \times 10^9$
ポアソン比	$\nu$	0.40	0.40	0.30
内部摩擦角 (residual state)(°)	$\phi_r$	3.0	6.5	53.4
内部摩擦角 (peak state)(°)	$\phi_p$	30.9	10.0	57.3
軟化則における定数	$\eta_s$	10.0	10.0	100.0
静水圧補正係数 (kPa)	$c$	30.1	23.0	300.0
inertial numberにおける定数	$\mu_2$	0.75	0.961	0.75
inertial numberにおける定数	$I_0$	0.01	0.01	0.01
粒径 (mm)	$d$	0.0045	0.030	0.20
粒子密度 (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$	2,529	2,534	3,000
遷移モデルにおける定数	$\omega$	0.6	0.5	0
遷移モデルにおける定数 (Pa · s)	$\eta_0$	1.0	1.0	1.0
遷移モデルにおける定数	$\alpha_0$	1.0	1.0	1.0



仙頭ら<sup>1)</sup>の調査をもとに3層に分類

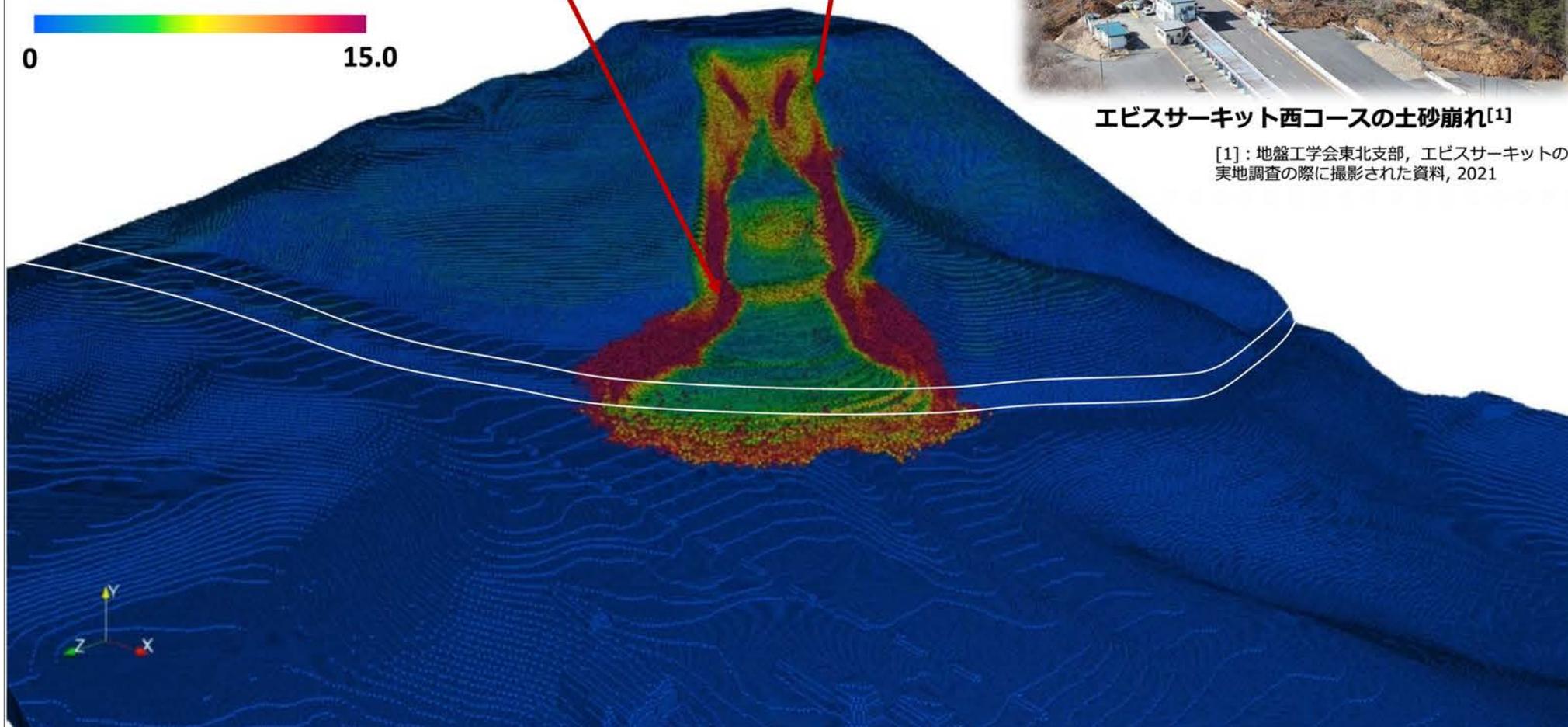
# 数値シミュレーション結果

1) 防災科学技術研究所: 2021 年2 月13 日福島県沖地震加速度(二本松), 2024,  
<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/quake/>

斜面全体の**表層崩壊**

切土位置での**すべり線**

累積塑性ひずみ

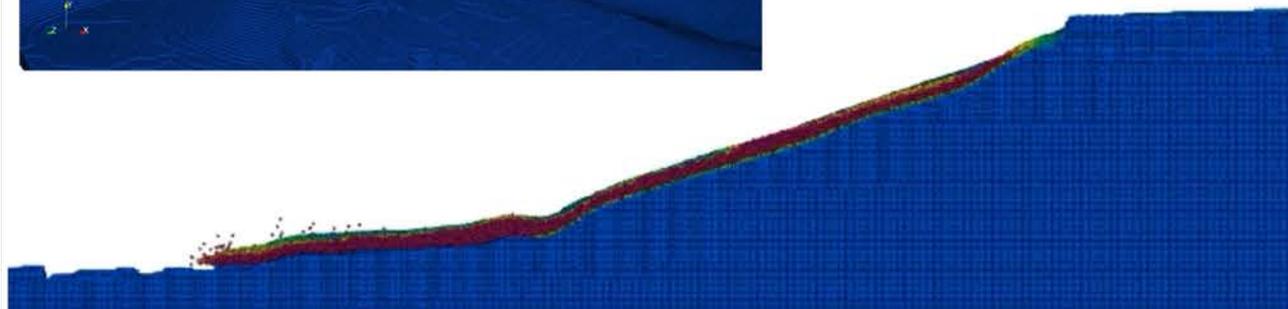
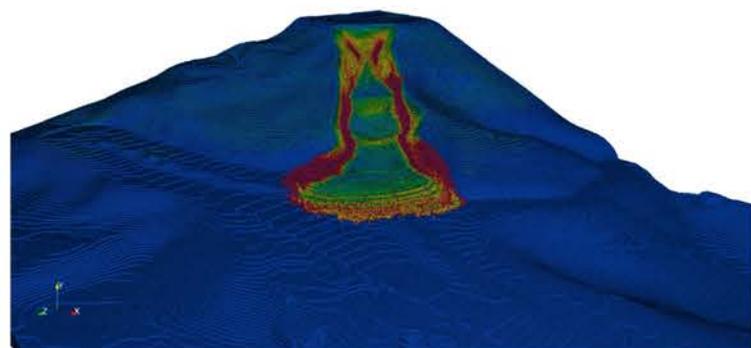


エビスサーキット西コースの土砂崩れ<sup>[1]</sup>

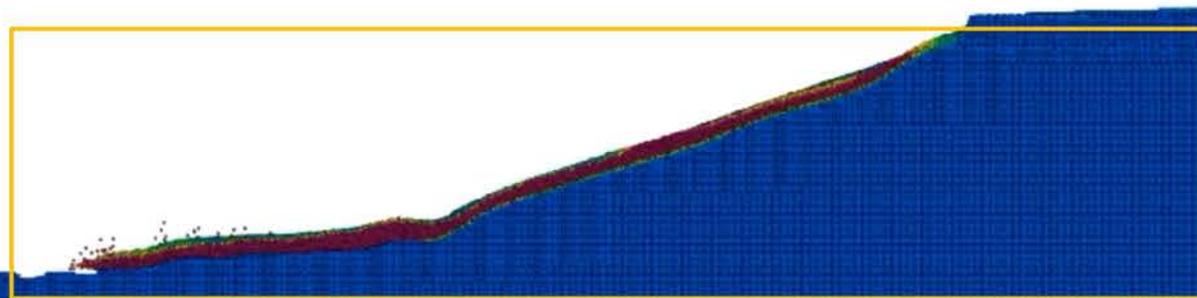
[1]: 地盤工学会東北支部, エビスサーキットの  
実地調査の際に撮影された資料, 2021

# 数値シミュレーション結果

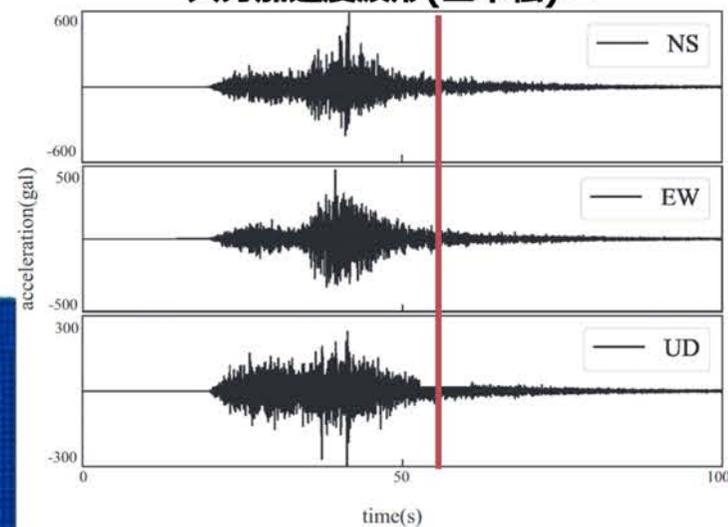
累積塑性ひずみ  
0 15.0



断面図

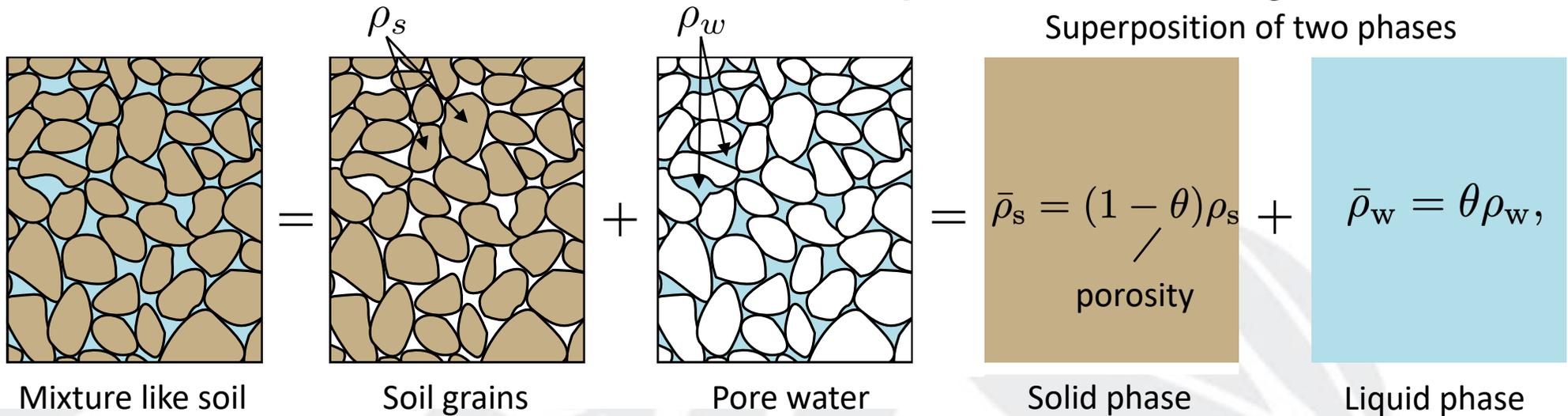


入力加速度波形(二本松)<sup>[9]</sup>



# Two-phase modeling of solid-liquid mixture

## ~Conservation of mass: present study~



Solid phase

$$\rho_s \frac{D(1 - \theta)}{Dt} + (1 - \theta) \frac{D\rho_s}{Dt} + (1 - \theta)\rho_s \nabla \cdot \mathbf{v}_s = 0$$

Incompressibility of soil grains

Water phase

$$\rho_w \frac{D\theta}{Dt} + \theta \frac{D\rho_w}{Dt} + \theta\rho_w \nabla \cdot \mathbf{v}_w = 0$$

Incompressibility of water

[Y. Yamaguchi, S. Takase, S. Moriguchi, KT, CPM, 2020]

Partial densities

$$\bar{\rho}_s = (1 - \theta)\rho_s,$$

$$\bar{\rho}_w = \theta\rho_w,$$



Utilization of a matured scheme in the CFD community



$$\nabla \cdot [(1 - \theta)\mathbf{v}_s + \theta\mathbf{v}_w] = 0$$

... Continuity equation of mixture

# Two-phase modeling of solid-liquid mixture

## ~Momentum Balance Equations~



- Momentum balance equations

$$\bar{\rho}_s \mathbf{a}_s = \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\sigma}}_s + \bar{\rho}_s \mathbf{b}_s + \hat{\mathbf{p}},$$

$$\bar{\rho}_w \mathbf{a}_w = \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\sigma}}_w + \bar{\rho}_w \mathbf{b}_w - \hat{\mathbf{p}},$$

- Partial stresses

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}}_s = \boldsymbol{\sigma}' - (1 - \theta)p_w \mathbf{I},$$

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}}_w = -\theta p_w \mathbf{I},$$

porosity

- Momentum exchange between soil and water phases

[Ehlers, Graf, Ammann, CMAME (2004)]

$$\hat{\mathbf{p}} = \hat{\mathbf{p}}_E - p_w \nabla \theta,$$

Effect of buoyancy for immiscible mixtures

Interaction caused by the viscosity

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\mathbf{p}}_E = \frac{\theta^2 \mu}{k} (\mathbf{v}_w - \mathbf{v}_s), \\ \hat{\mathbf{p}}_E = \frac{\theta^2 \mu}{k} (\mathbf{v}_w - \mathbf{v}_s) + \frac{1.75}{\sqrt{150}} \frac{\rho_w \theta^2}{\sqrt{k}} \frac{|\mathbf{v}_w - \mathbf{v}_s|}{\theta^{3/2}} (\mathbf{v}_w - \mathbf{v}_s). \end{array} \right.$$

In a region with relatively **low Reynolds number**: saturated soil has low relative velocity of the pore water

Darcy-Forchheimer law involving a nonlinear term for **high Reynolds number** cases [Larese, Rossi, Onate, Idelsohn, CPM (2012)]

diameter of the volume equivalent spherical particle

$$k = \frac{D_{50}^2 \theta^3}{150(1 - \theta)^2}$$

# Fractional-step projection method

$$(1 - \theta^n) \rho_s \frac{\mathbf{v}_s^{n+1} - \mathbf{v}_s^n}{\Delta t} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}'^n - (1 - \theta^n) \nabla p_w^{n+1} + (1 - \theta^n) \rho_s \mathbf{b}_s + \hat{\mathbf{p}}_E^n,$$

$$\theta^n \rho_w \frac{\mathbf{v}_w^{n+1} - \mathbf{v}_w^n}{\Delta t} = -\theta^n \nabla p_w^{n+1} + \theta^n \rho_w \mathbf{b}_w - \hat{\mathbf{p}}_E^n, \quad \text{Kularathna, Soga, JH (2017)}$$

**Semi-implicit MPM for solid-fluid mixtures**

## Fractional-step projection method

[Chorin, Math. Comput. (1968)]

$$\Delta t \sum_{J=1}^{N_n} L_{IJ} p_w^{n+1} = - \sum_{J=1}^{N_n} \mathbf{D}_{sIJ} \cdot \mathbf{v}_{sJ}^* - \sum_{J=1}^{N_n} \mathbf{D}_{wIJ} \cdot \mathbf{v}_{wJ}^*$$

## Many MPMs for CFD calculations:

Kularathna, Soga, CMAME (2017) ; Stomakhin, Schroeder, Jiang, Chai, Teran, Selle, ACM Trans Graph (2014); Zhang, Zhang, Sze, Lian, Liu, JCP (2017)

**The 1st to apply to solid-fluid mixture problem**

[Yamaguchi, Takase, Moriguchi, KT, CPM, 2020]

Pressure Poisson eqn.  
to be solved *implicitly*

$$- \sum_{J=1}^{N_n} \mathbf{P}_{IJ} \cdot (\mathbf{v}_{wJ}^* - \mathbf{v}_{sJ}^*) + \int_{\partial\Omega_w} N_I(\mathbf{x}_w) t_w^{n+1}(\mathbf{x}_w) ds.$$

$$\begin{cases} m_{sI}^n \mathbf{v}_{sI}^* = m_{sI}^n \mathbf{v}_{sI}^n + \Delta t \left[ \mathbf{f}_{sI}^{\text{int}, n} + \mathbf{f}_{sI}^{\text{ext}, n} + \mathbf{f}_{sI}^{\text{mom}, n} \right], \\ m_{wI}^n \mathbf{v}_{wI}^* = m_{wI}^n \mathbf{v}_{wI}^n + \Delta t \left[ \mathbf{f}_{wI}^{\text{ext}, n} + \mathbf{f}_{wI}^{\text{mom}, n} \right], \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_{sI}^n \mathbf{v}_{sI}^{n+1} = m_{sI}^n \mathbf{v}_{sI}^* - \Delta t \sum_{J=1}^{N_n} \mathbf{G}_{sIJ} p_w^{n+1}, \\ m_{wI}^n \mathbf{v}_{wI}^{n+1} = m_{wI}^n \mathbf{v}_{wI}^* - \Delta t \sum_{J=1}^{N_n} \mathbf{G}_{wIJ} p_w^{n+1}, \end{cases}$$

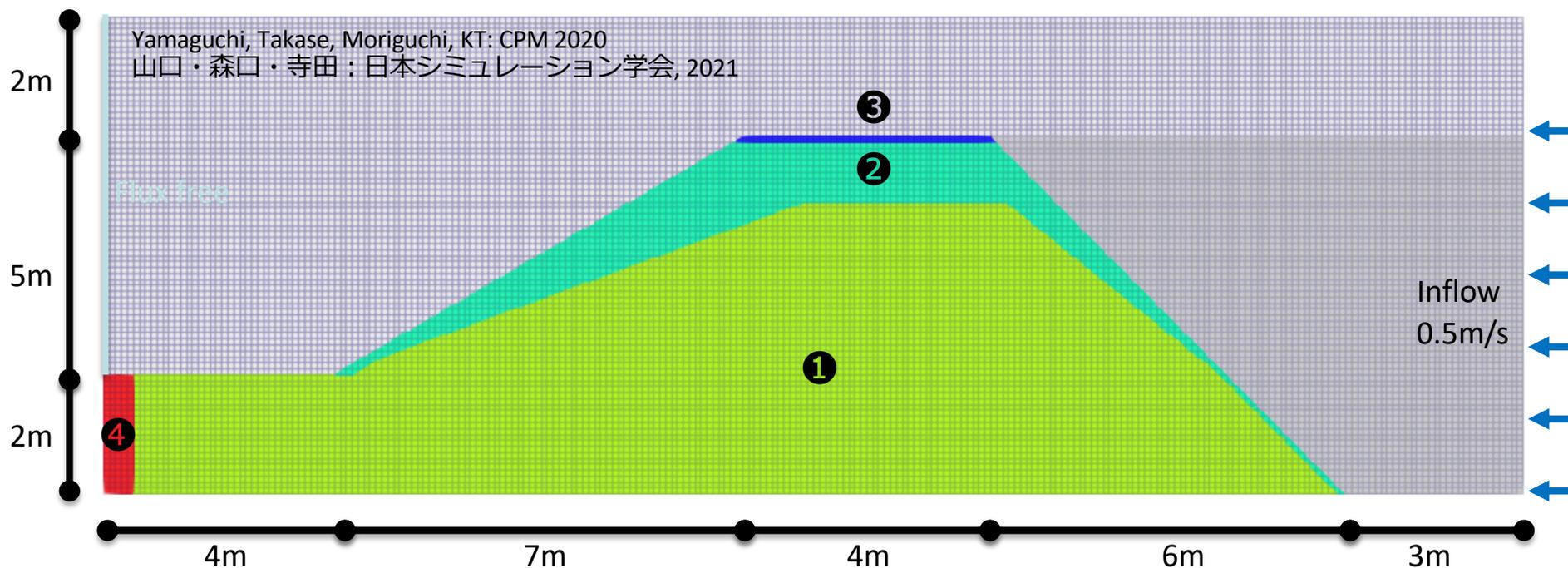
Momentum balance eqn.  
to be solved *explicitly*

$$\mathbf{f}_{sI}^{\text{mom}, n} = -\mathbf{f}_{wI}^{\text{mom}, n} \approx V_I \frac{m_{sI}^n}{\hat{\theta}_s \rho_s} \frac{m_{wI}^n}{\hat{\theta}_w \rho_w} \hat{\mathbf{p}}_{EI}^n$$

$$\begin{cases} \hat{\theta}_\alpha(\mathbf{x}_p) = \sum_{I=1}^{n_n} N_I(\mathbf{x}_p) \hat{\theta}_{\alpha I} \quad \alpha = s \text{ or } w \\ V_I = \int_{\Omega} N_I(\mathbf{x}) dV \quad m_{\alpha I}^n = \sum_{\alpha p=1}^{n_{\alpha p}} m_{\alpha p} N_{I\alpha p} \end{cases}$$

Mutual interaction force, which should be treated with special attention [Mackenzie-Helnwein, Arduino, Shin, Moore, Miller, IJNME (2010)]

# 堤防の越流・決壊



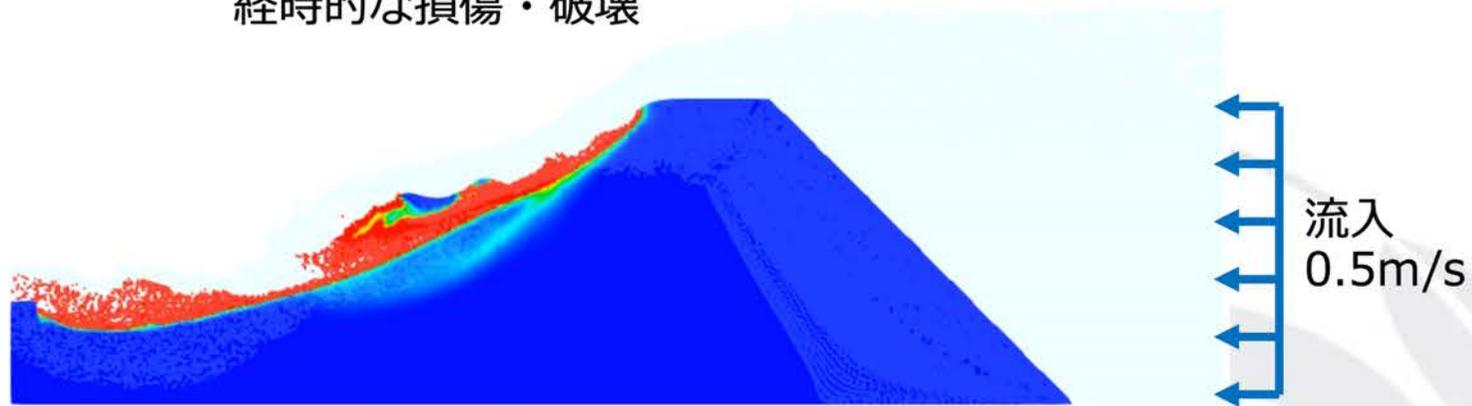
4つの土質材料からなる堤体

Layers	①	②	③	④
Mass density (Solid) $\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2700	2700	2700	2700
Young's moduku $E$ [MPa]	20	20	20	20
Poisson's ratio $\nu$	0.3	0.3	0.3	0.3
Cohesion $c$ [kN]	0.005	0.5	50	-
Int. friction angle $\phi$ [°]	30	30	30	-
$\theta_{\min}$	0.7	0.7	0.7	-
$\theta_{\max}$	1.0	1.0	1.0	-
Initial void's volume fraction $\theta$	0.3	0.3	0.1	0.3
Average diameter $D_{50}$ [mm]	2	2	0.5	2

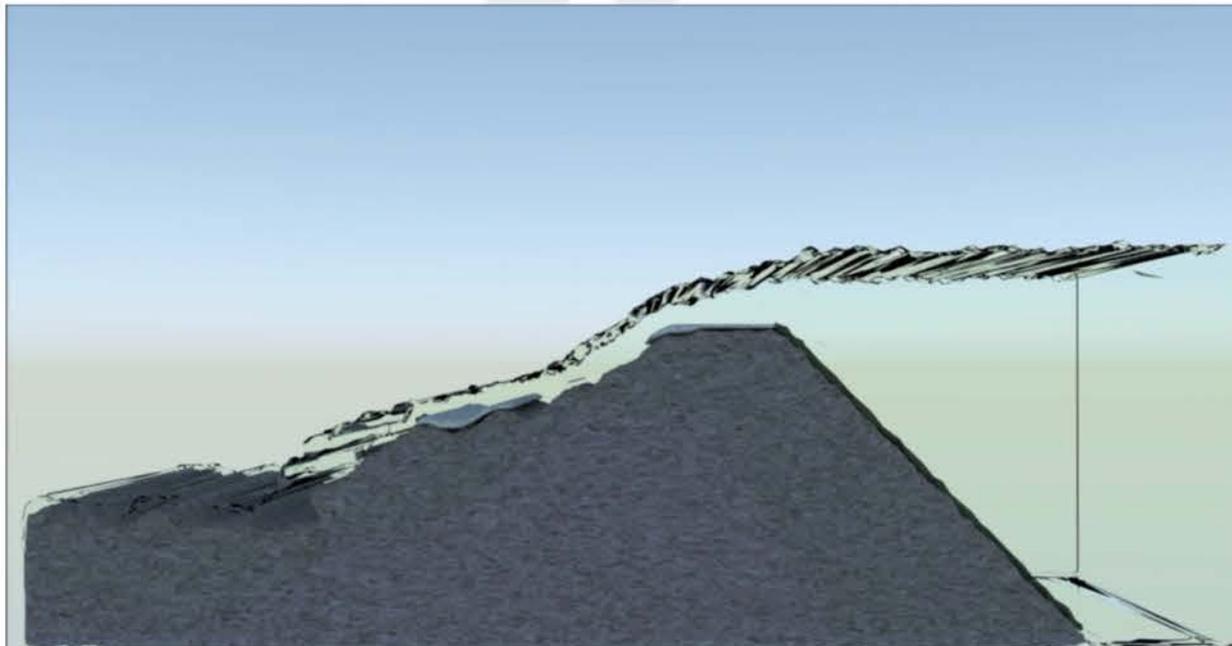
Initial number particle / cell	16 (4x4)
Length of ell edge[m]	0.1
Time increment $\Delta t$ [s]	$2.5 \times 10^{-4}$
Total time [s]	100
Mass density (fluid) ( $\rho_w$ [kg/m <sup>3</sup> ])	1000
Viscosity $\eta$ [Pa·s]	$1.0 \times 10^{-3}$

# 堤防の越流・決壊

経時的な損傷・破壊



Norm of the total deformation gradient



非一様性  
断続的・間欠的

不安定崩壊

Yamaguchi, Takase, Moriguchi, KT: CPM 2020  
山口・森口・寺田：日本シミュレーション学会, 2021

# まとまらないですが最後に

敬天愛人と量体裁衣の精神で挑む計算工学 ～材料科学から災害科学まで



## ● 持論

- 「教育・研究は、その取り組み方や楽しみ方において、音楽などの芸術とさほど違いはない。アーティストにとっての舞台が、戦場であると同時に何よりも楽しい場所であるのと同じで、研究者にとって講義や論文・学会などの研究発表の場は、常に真剣勝負の場であると同時に晴れの舞台でもある。」 (<https://www.cybernet.co.jp/belief/episode04.html>)
- 自分の研究が、言葉が、表現が、誰かに伝わること (喜んでもらえること) ほどの喜びはない。

## ● ものづくり／防災・減災に資する計算力学の3つの柱

- 解けない問題を解けるようになるための手法論
- 現状の解析手法で解ける (商用解析ソフトでも解析可能な問題) 現象を対象とした
  - 大規模化への対応／不確かさの考慮
  - 解析機能の利便性・効率向上、精緻化と信頼性向上
  - 最適化機能の高度化と多様化
- 汎用 (商用) ソフトの利用技術と新しい解析技術の実装

- ✓ 量体裁衣  
原子分子のオーダーから宇宙規模
- ✓ 敬天愛人  
世のため人のために尽くす

を図る応用技術と社会実装



## 謝辞

- 師匠を始め、様々な局面でサポート・プロモートして下さった (ている) 方々
  - 京谷・森口・加藤・高瀬・野村 (東北大) ・山口 (富士通) ・村松 (慶応) ・平山 (日大) ・石井 (くいんと)、東北大学の同僚、その他多数
- 卒業生 (特に学位取得者) ・在校生の皆様
  - 浅井・松井・生出・渡邊・車谷・新宅・松原・西・小谷・野村・菅野・鈴木・外里・潘・韓・山中・Nilo DOLOJAN・飛弾野・藤田・・・・
  - 石川 (清水建設) ・牛田 (鉄道総研) ・山本 (サイバネット) ・上川 (日産) ・佐藤 (MD)
- 共同研究企業・機関、共同研究者

