

MIDAS Construction Technical Seminar

粒子法を用いた地盤の大変形 解析に関する一連の研究

日本大学工学部土木工学科
阿部 慶太

MIDAS × Abe

目次

MIDAS
Construction
Technical
Seminar

1. 研究の背景

地盤の大変形解析に関する研究の必要性

2. 粒子法の特徴とMPMの有用性

MPMの地盤変形解析法としての有用性

3. MPMによる地盤の大変形解析事例

MPMを用いた斜面, 土石流, 洗掘の解析事例

4. まとめと今後の展望

地盤の大変形解析に関する今後について

SESSION

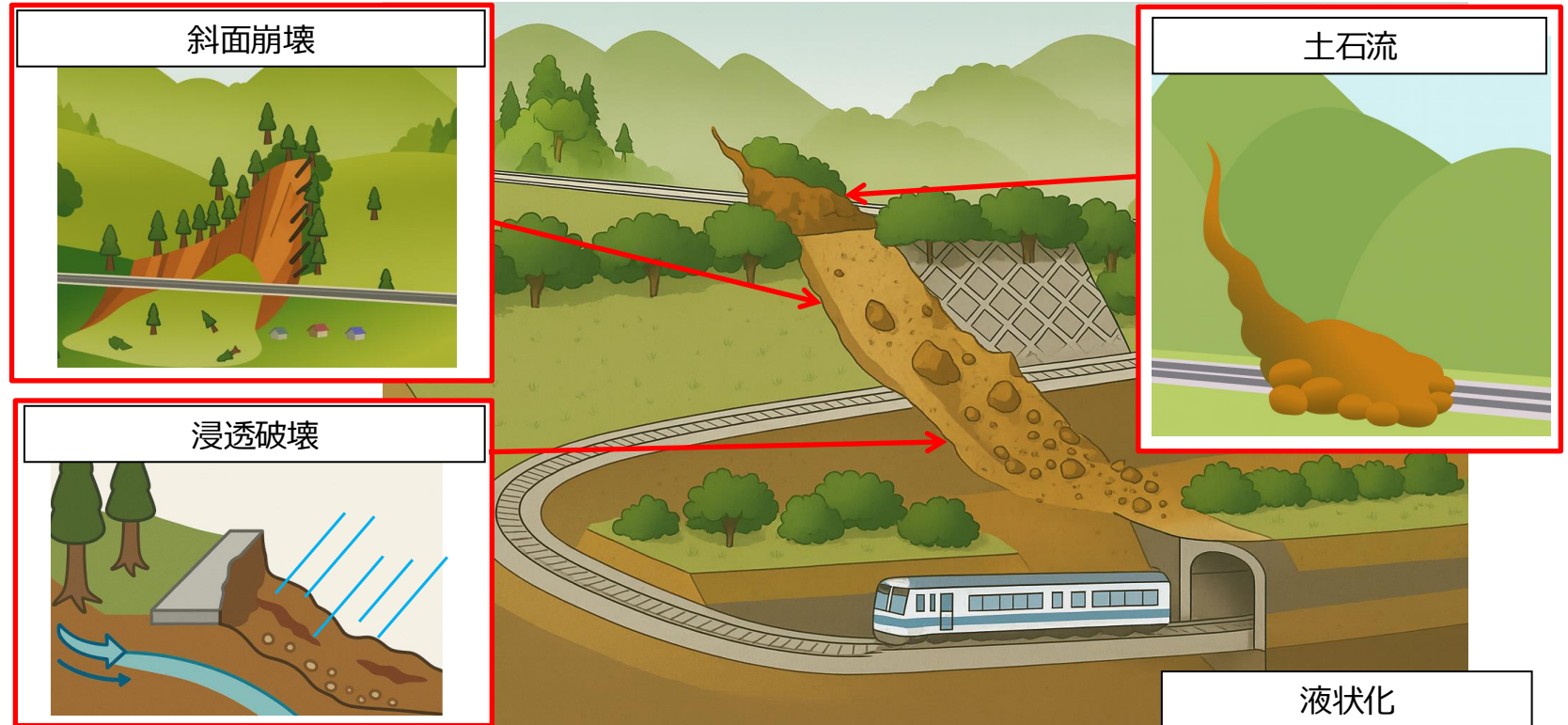
1

研究の背景

地盤の大変形解析に関する研究の必要性

粒子法を用いた地盤の大変形解析に関する一連の研究 日本大学工学部 土木工学科 阿部 慶太

地盤の大変形を伴う現象



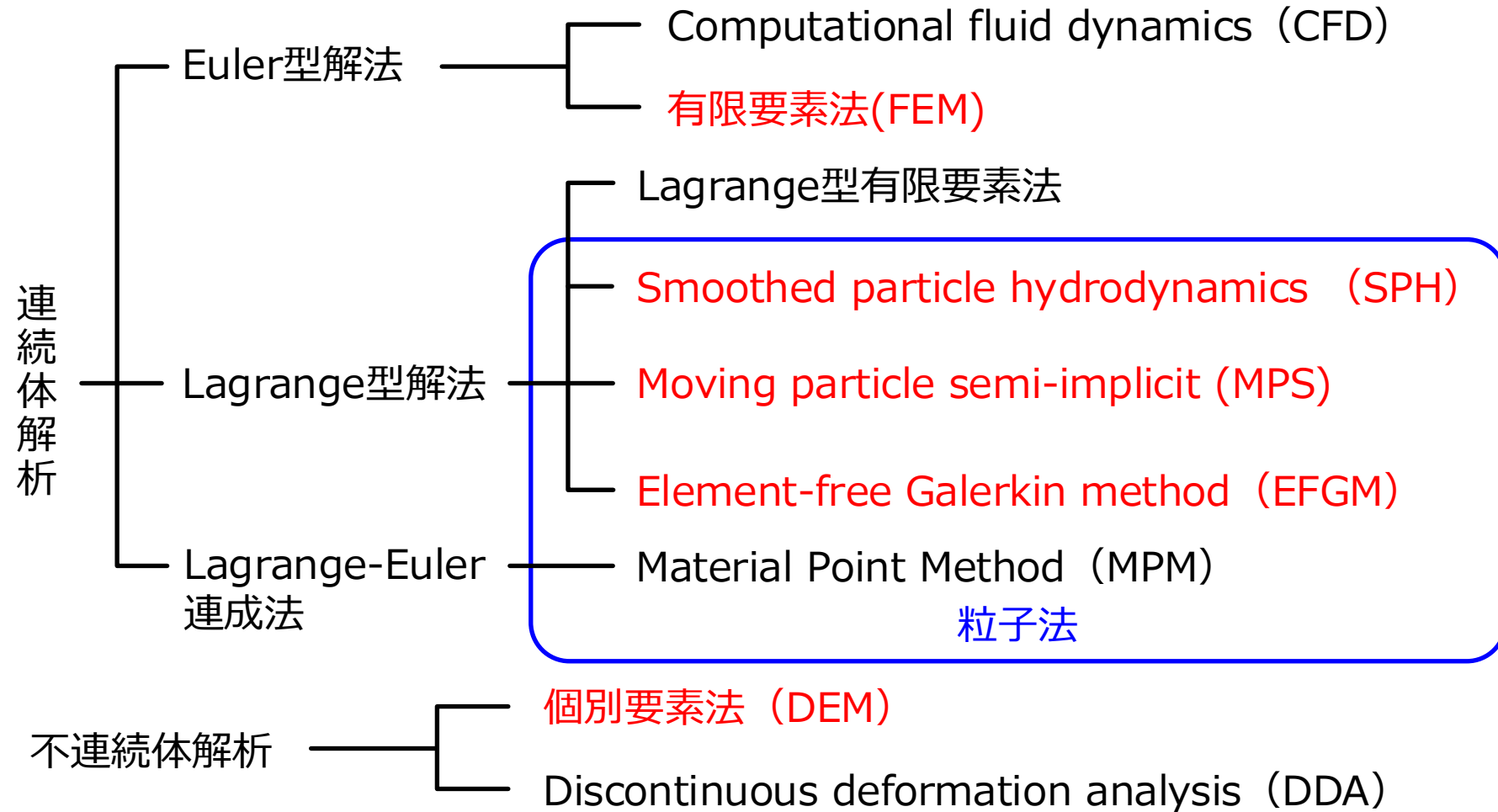
近年、地震、豪雨などによる地盤の大変形を伴う現象が頻発

設計実務等でこれらの現象を扱う解析手法は、円弧すべり法、
ニューマーク法等、簡易な手法が主流であり、詳細な解析は発展途上

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

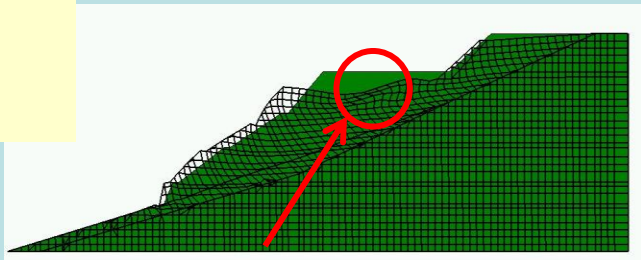
日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

地盤の変形解析で用いられる詳細な解析手法




地盤の変形解析で用いられる詳細な解析手法

有限要素法 (FEM)



メッシュ依存性：要素の変形レベルが大きくなると精度が悪化



計算格子

差分法・有限要素法 など

格子法



粒子

MPS法・SPH法など

粒子法

粒子法の格子法に対する利点

- ・変形形状、解析の限界に対するメッシュ依存性を回避
- ・陽解法であるため、小変形から大変形まで連続して解析可能
- ・プレ・ポストが楽

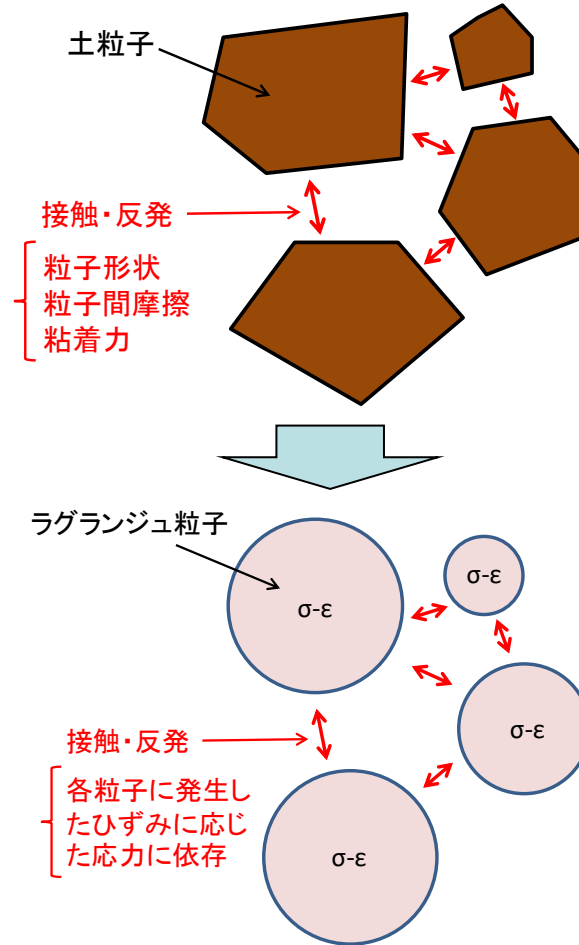
粒子法 → 有限要素法より大変形の扱い容易

粒子法を用いた 地盤の大変形解析に 関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

地盤の変形解析で用いられる詳細な解析手法

個別要素法 (DEM)



粒子法のDEMに対する利点

- パラメータを要素試験結果に基づき決められる。
→個別要素法より明確に決定
- ラグランジュ粒子間で発生する応力により、土粒子間の接触と反発を考慮
- Jaumann応力等により剛体回転の影響を考慮

粒子法 ⇨ 地盤の離散的挙動も扱える。

※ただし、粒子法は、地盤の離散的挙動を連続体力学延長上で扱っているため、正確ではない。

→土粒子・岩間の相互作用などを詳細に扱う場合は、DEM等を使用すべき。

SESSION

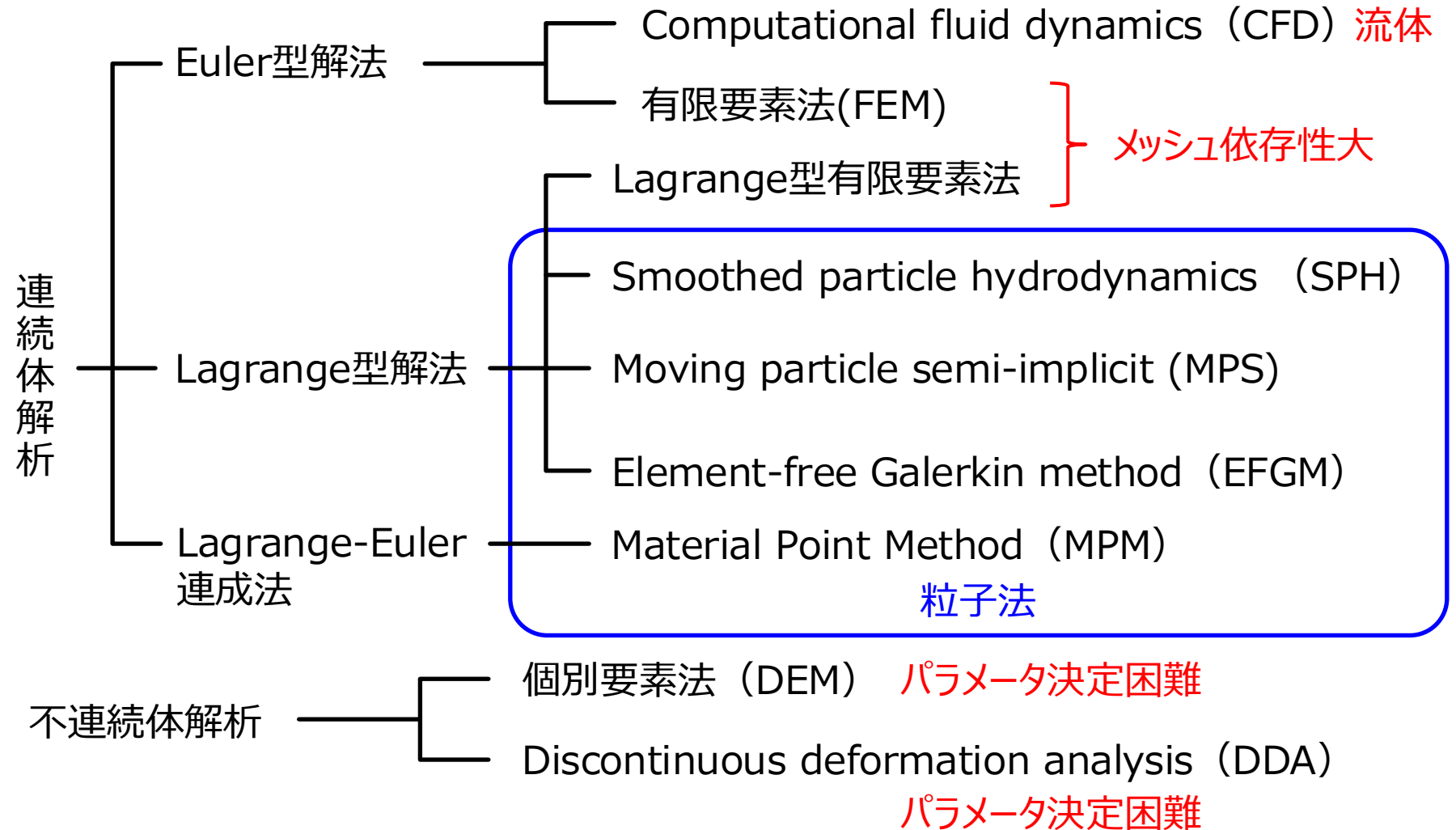
2

粒子法の特徴とMPMの有用性

MPMの地盤変形解析法としての有用性

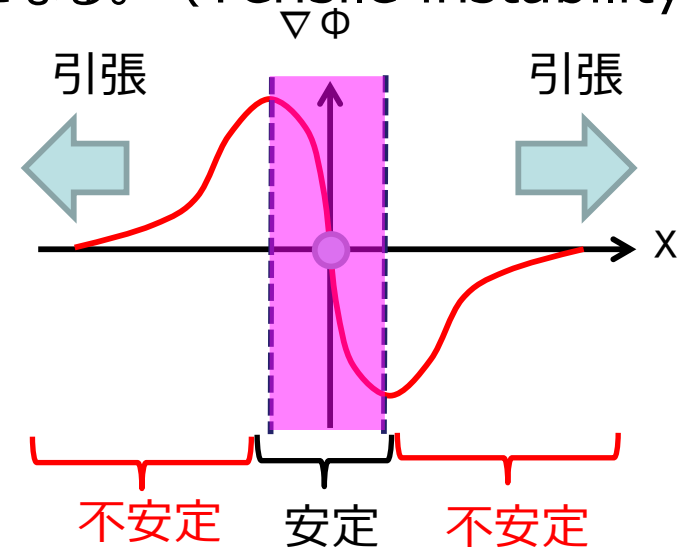
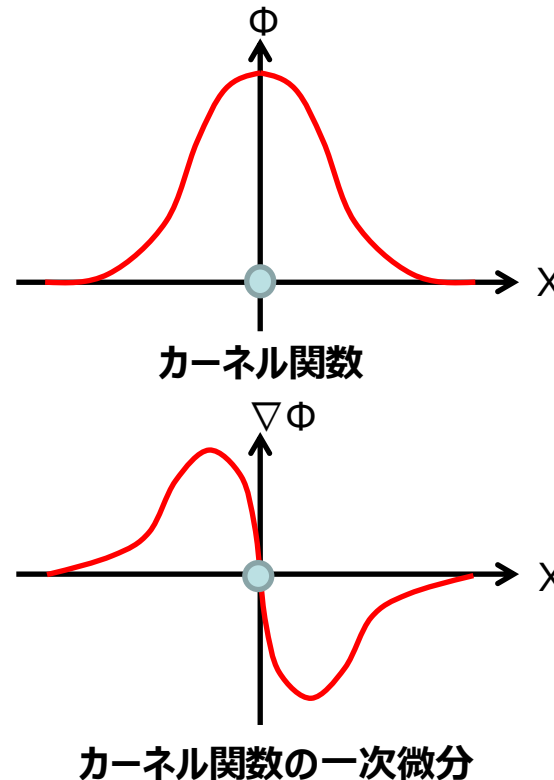
粒子法を用いた地盤の大変形解析に関する一連の研究 日本大学工学部 土木工学科 阿部 慶太

地盤の変形解析で用いられる詳細な解析手法



Smoothed particle hydrodynamics (SPH)

- ✓ 人工粘性、人工応力により解析を安定化させる必要がある。
- ✓ 引張応力が働くと解析が不安定になる。(Tensile instability)



カーネル関数の一次微分から応力を求める際、変曲点で不安定になる

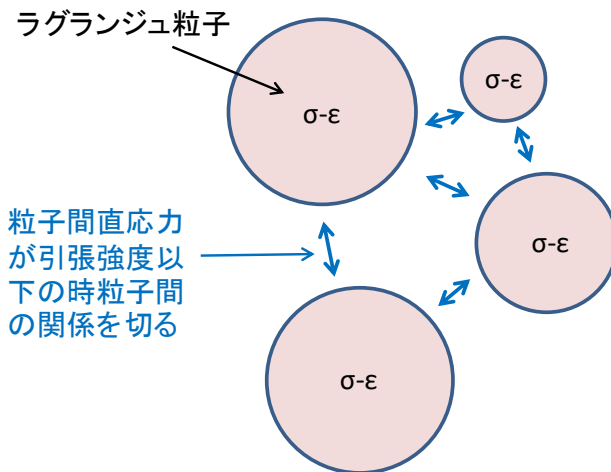
➡ 特に砂質土を扱う際に課題

Moving particle semi-implicit (MPS)

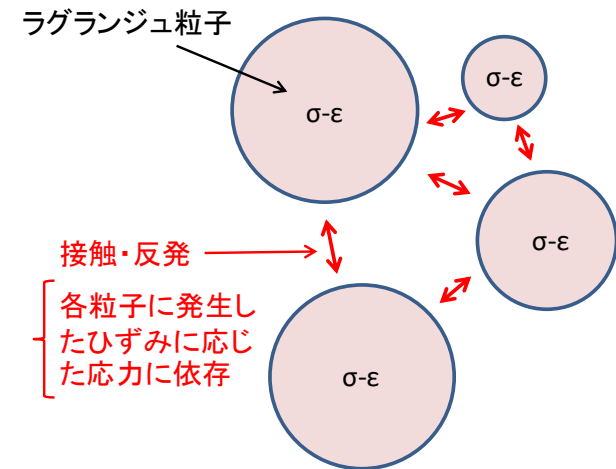
- ✓ Fixed kernelを用いる。(Tensile instability回避可能)
- ✓ 重み関数が変わらないため破壊ひずみを設定する必要があり、破壊ひずみ超過後は、DEMと同じ解析となる。

➡ 破壊ひずみの設定、MPSからDEMへの移行が任意的

MPS⇒ある応力を超えるとDEM

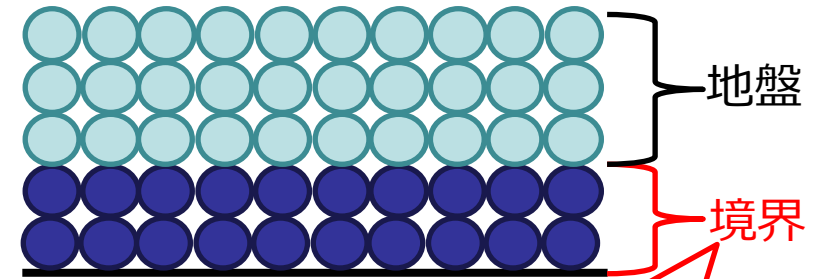
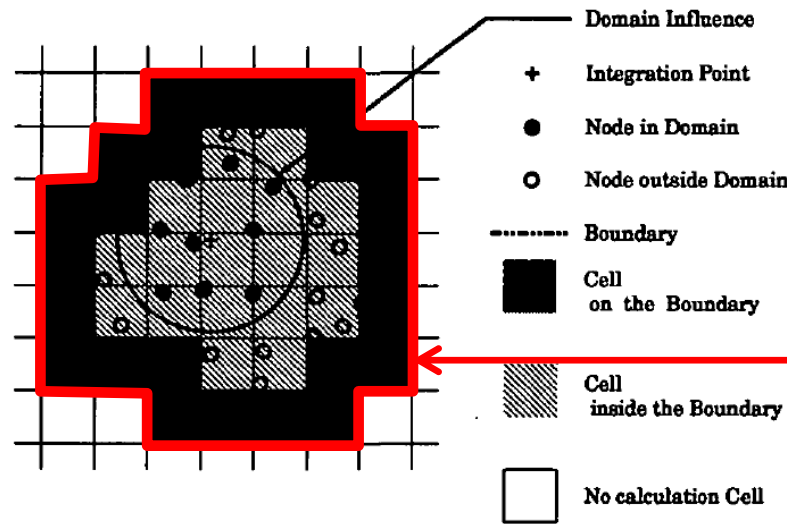


SPH⇒構成則で不連続体的挙動を解析



Element-free Galerkin method (EFGM)

- ✓ ディリクレ型境界条件の設定が困難
- ✓ 不連続体の挙動は表現が困難



境界条件の設定が困難

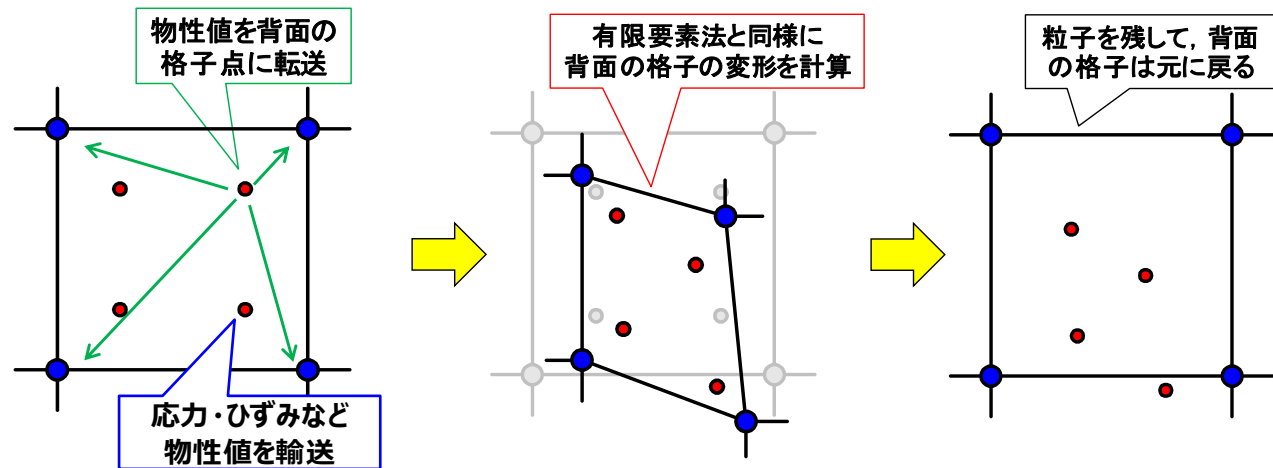
変形が背面の要素サイズに拘束されるため、離散的挙動の表現は困難

EFGMの概要 (川端ら (1999) より引用)

川端浩司, 村上章, 青山咸康: EFGMによる水～土連成解析, 応用力学論文集, Vol. 2, pp. 295-302, 1999.

Material Point Method (MPM) ^{1),2)}

- ✓ FEMに計算スキームに近い。(カーネル関数を使用しない)
- ✓ 人工粘性, 人工応力等の解析固有のパラメータが無い。
- ✓ デリクレ型境界条件の設定が容易。 ✓ 計算負荷大 ✓ インターフェイスのモデル化困難
- ✓ 背面格子を粒子が通過する際にノイズ発生 ⇒ GIMPにより改善

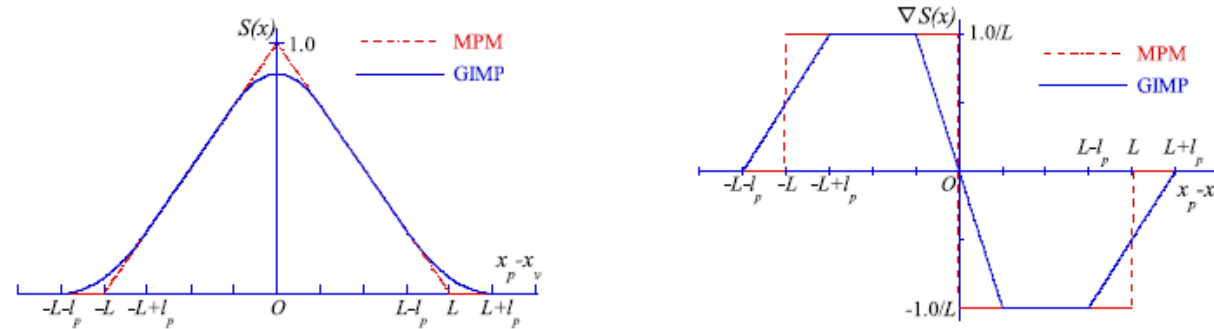


- 1) Sulsky, D., Chen, Z and Schreyer, H. L. (1994): "A particle method for history-dependent materials," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 118, pp. 176–196.
- 2) Sulsky, D., Zhou, S. J. and Schreyer, H. L. (1995): "Application of a particle-in-cell method to solid mechanics," Computer Physics Communications, Vol. 87, pp. 236–252.

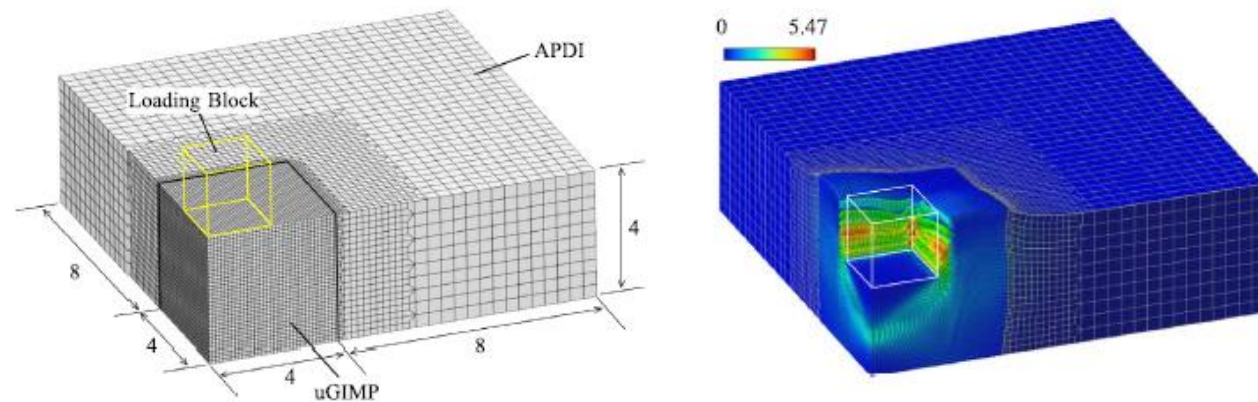
粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

粒子法の特徴とMPMの地盤変形解析法としての有用性



GIMP³⁾による内挿関数の修正⇒クロッシングノイズの低減⁴⁾

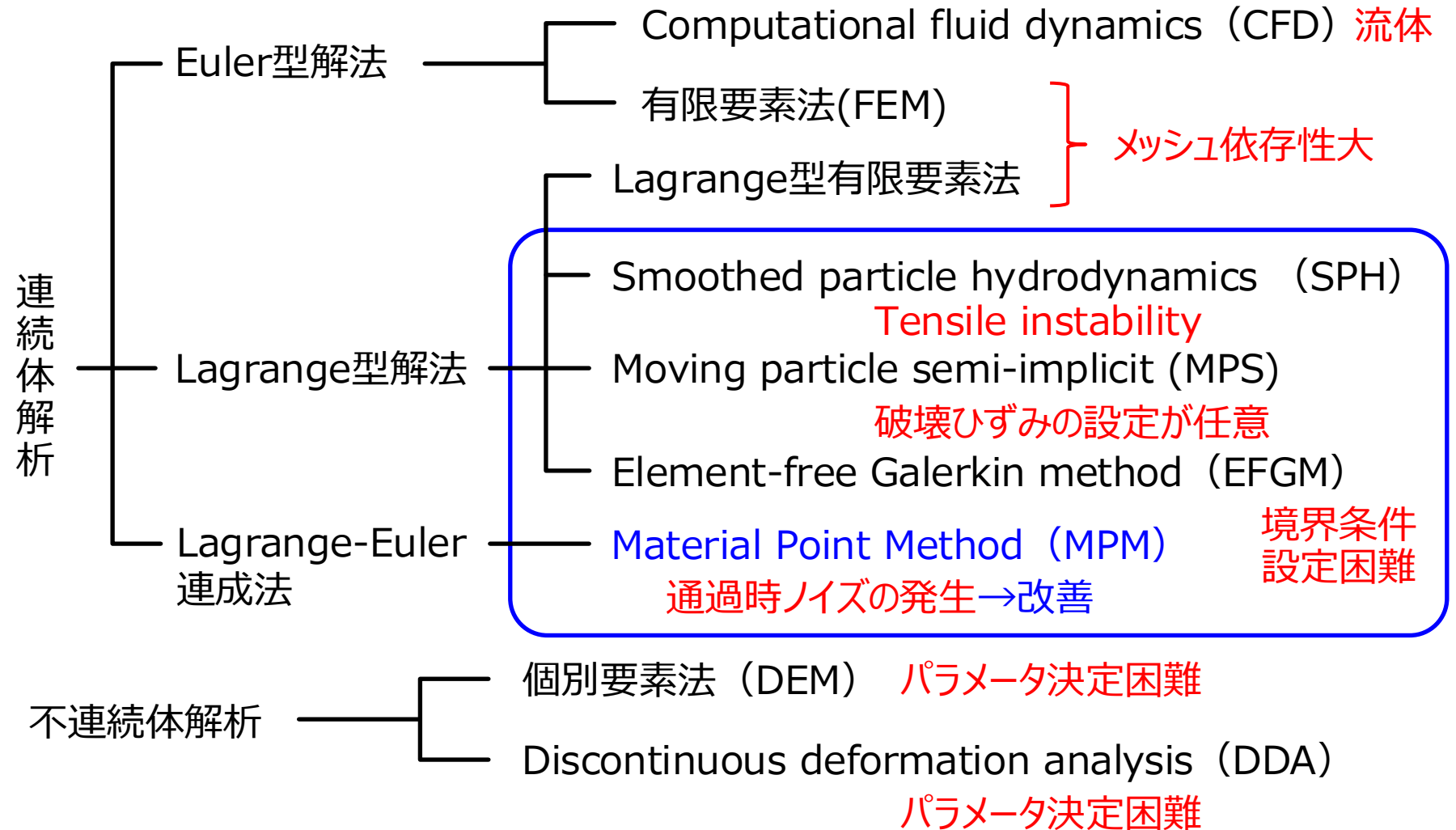


APDI法とGIMPのハイブリッドによる計算負荷低減⁴⁾

3) SG Bardenhagen, EM Kober: The generalized interpolation material point method. Computer Modeling in Engineering and Sciences, 5 (6), 477-495, 2004

4) Kiriya, T. and Higo, Y.: Arbitrary particle domain interpolation method and application to problems of geomaterial deformation, Soils and Foundations, Vol. 60, pp.1422-1439, 2020.

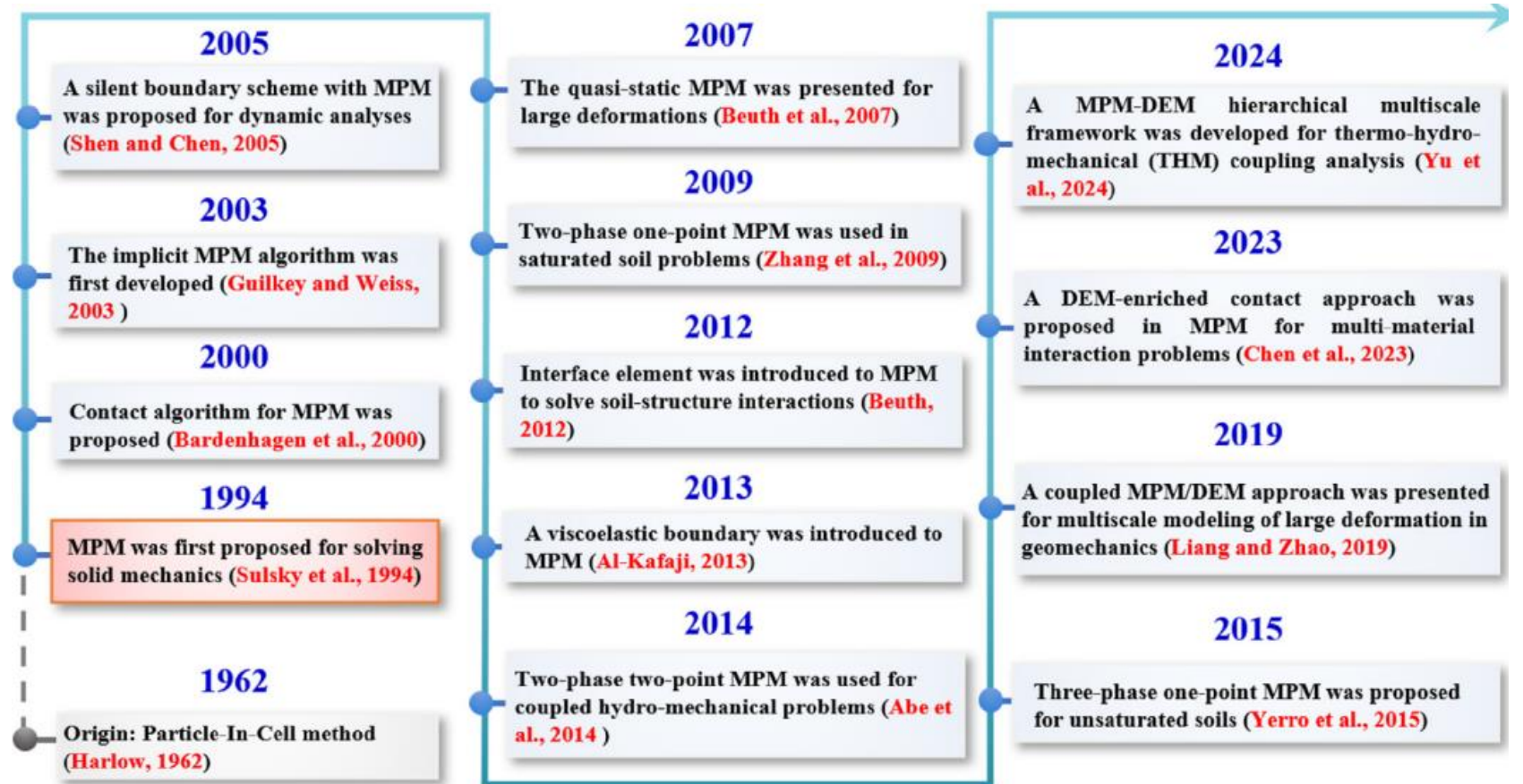
地盤の変形解析で用いられる詳細な解析手法



粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

粒子法の特徴とMPMの地盤変形解析法としての有用性



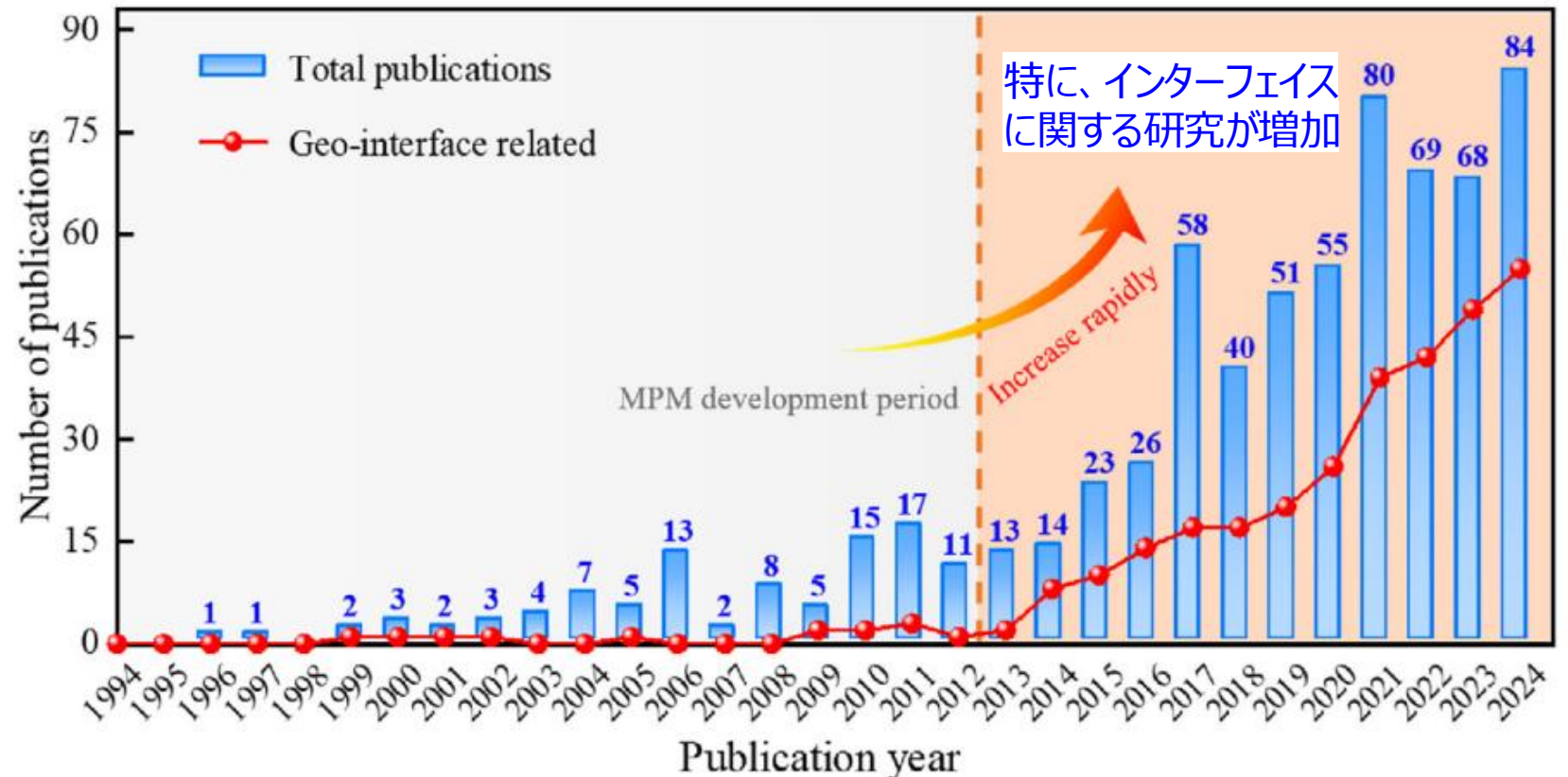
MPMに関する研究の変遷⁵⁾

5) Xie, T., Zhu, H., Dong, Y., Zhou, M., Wang, B., Zhang, W., Zhao, J. (2025): "Geo-interface modeling with material point method: A review," Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol.17, No.6, pp. 3950-3977.

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

粒子法の特徴とMPMの地盤変形解析法としての有用性



MPMに関する論文数⁵⁾

5) Xiea, T., Zhua, H., Dong, Y., Zhou, M., Wang, B., Zhang, W., Zhao, J. (2025): "Geo-interface modeling with material point method: A review," Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol.17, No.6, pp. 3950-3977.

MPMのソフトウェア

Anura3D (地盤工学向け)

- GUI (前処理・後処理) が整備されている。
- ドキュメント・チュートリアル・事例が豊富。
- ユーザーコミュニティが活発で質問しやすい。
- 本格的な解析をするには学習コストがある。
- 一部の機能は研究版／ライセンス制。

基本的に、フリーソフト
ウェアとして使用可能

NairnMPM (教育・材料科学向け)

- セットアップが比較的簡単。
- 入力ファイル形式がわかりやすく、基本的な MPM を試すには最適。
- オープンソースなので手元ですぐ走らせる。
- GUI がなく、入力ファイルを手書きする必要がある。
- 大規模な地盤工学問題よりも、材料シミュレーションに適している。

Taichi MPM / Graphics 系実装 (CG/VFX向け)

- Python ベースなので導入が楽。
- コードが短く直感的に MPM を試せる。
- アニメーションや動画生成が容易。
- 地盤工学的な構成モデルや浸透流解析などは未対応。
- 研究論文用の精密な解析には向かない。



<https://www.finereport.com/en/data-analysis/taichi-a-brand-new-programming-language-frozen-in-99-lines-of-code.html>

SESSION

3

MPMによる地盤の大変形解析事例

MPMを用いた斜面, 土石流, 洗掘の解析事例

粒子法を用いた地盤の大変形解析に関する一連の研究 日本大学工学部 土木工学科 阿部 慶太

粒子法を用いた
地盤の大変形
解析に関する
一連の研究

MPMによる地盤の大変形解析事例

session3-01

MPMによる地盤の大変形解析に向けたモデル化

session3-02

地震時での地盤の大変形現象に対する解析事例

session3-03

降雨時での地盤の大変形現象に対する解析事例

MPMによる地盤の大変形解析に向けたモデル化

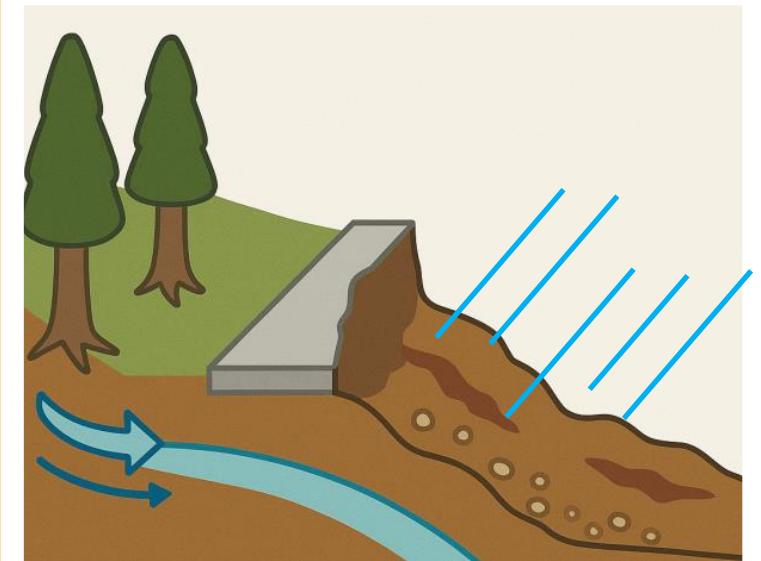
地盤の大変形が関わる現象

地震時



斜面崩壊、液状化

降雨時



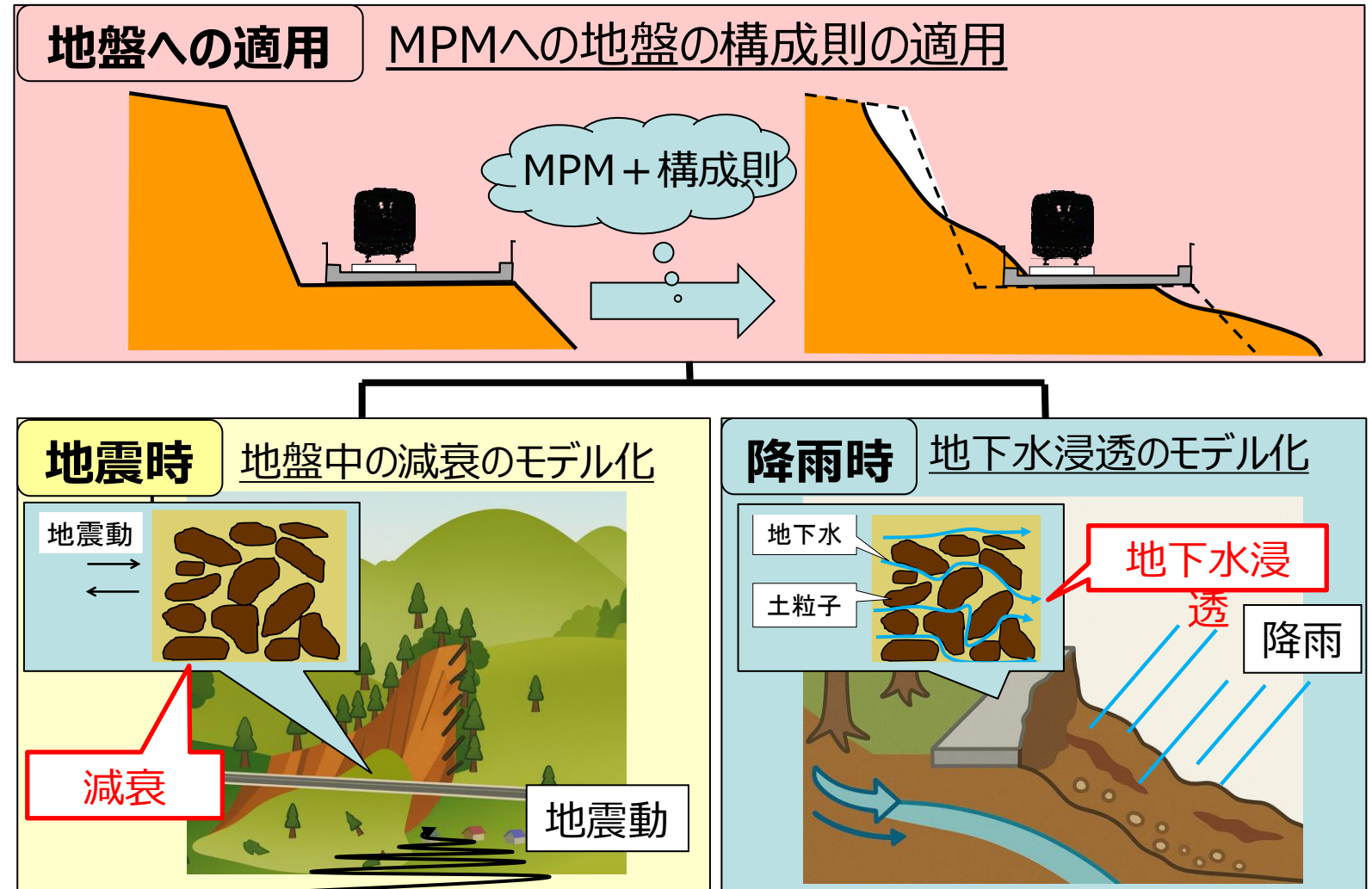
浸透破壊、土石流

一連の地盤の大変形現象に対する解析手法としての適用性を検討

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

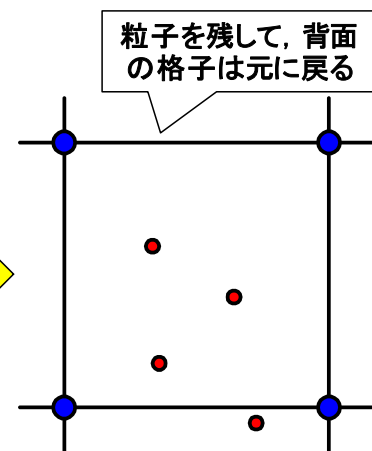
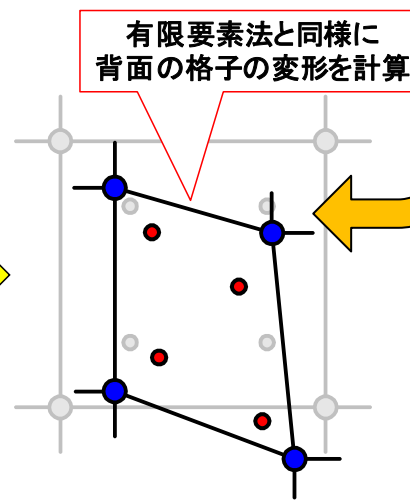
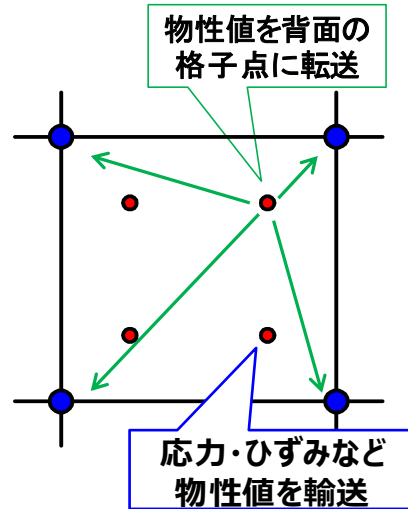
MPMによる地盤の大変形解析に向けたモデル化



MPMへの地盤の構成則の適用

Material Point Method (MPM)

粒子の移動以外の計算スキームは、基本的にFEMと同じ。



地盤の構成則 (応力ひずみ関係)

モール・クーロン、下・上負荷面モデル

粒子に適用

微小時間で発生したひずみを背面格子で計算(FEMと同じ)→粒子で構成則から応力を計算→背面格子は戻るが粒子にひずみが残る。

地盤中の減衰のモデル化

運動方程式

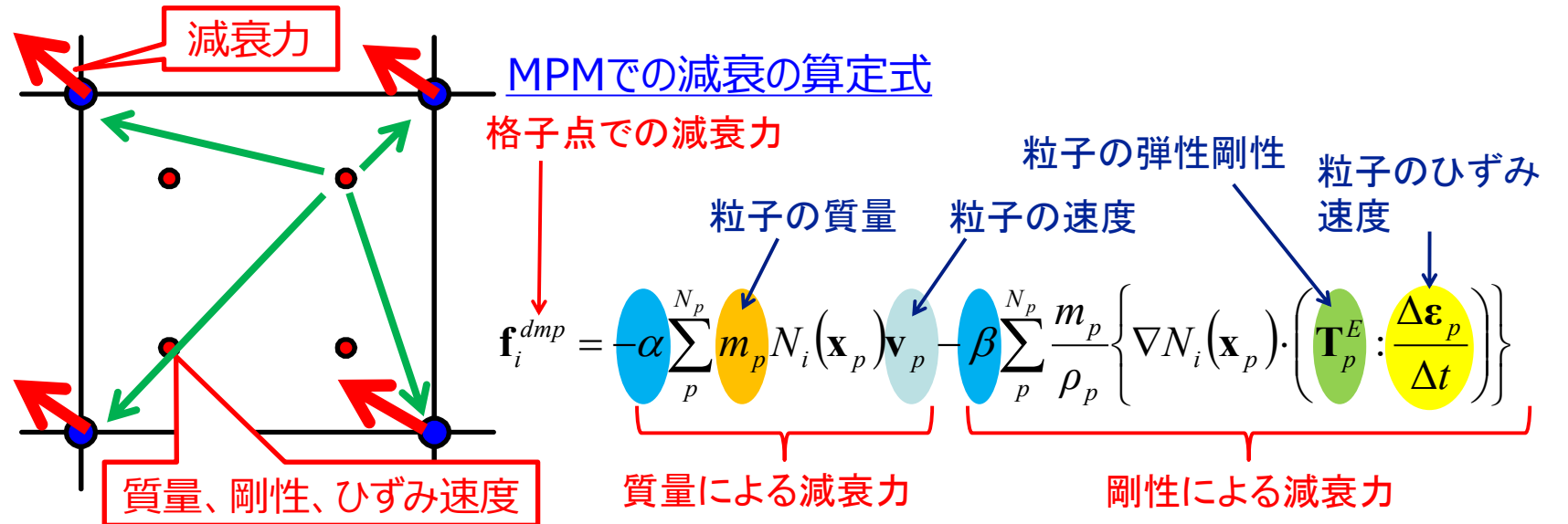
$$\text{質量} \times \text{加速度} + \text{剛性} \times \text{変位} + \text{減衰} \text{ 減衰定数} \times \text{速度} = \text{合力}$$

材料減衰

弾塑性構成則によりモデル化

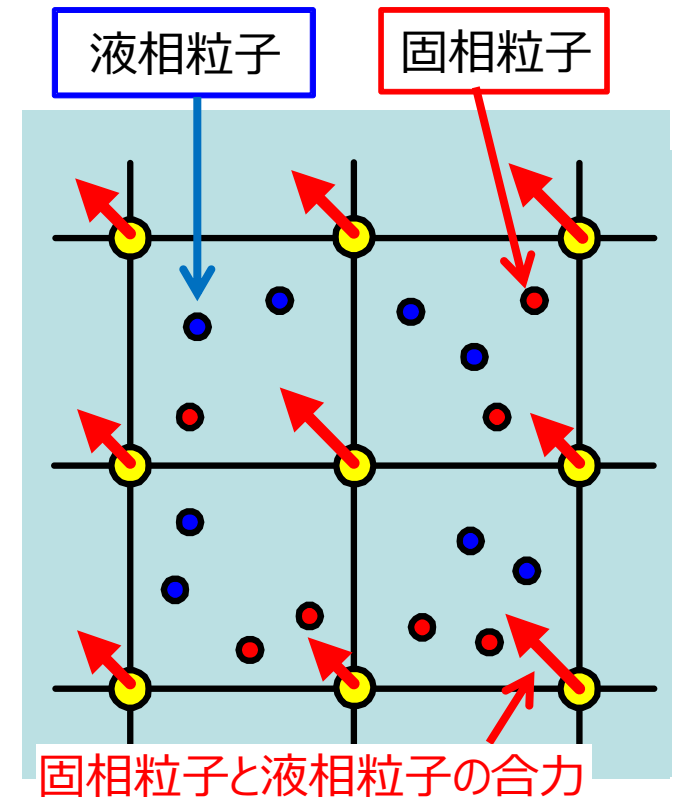
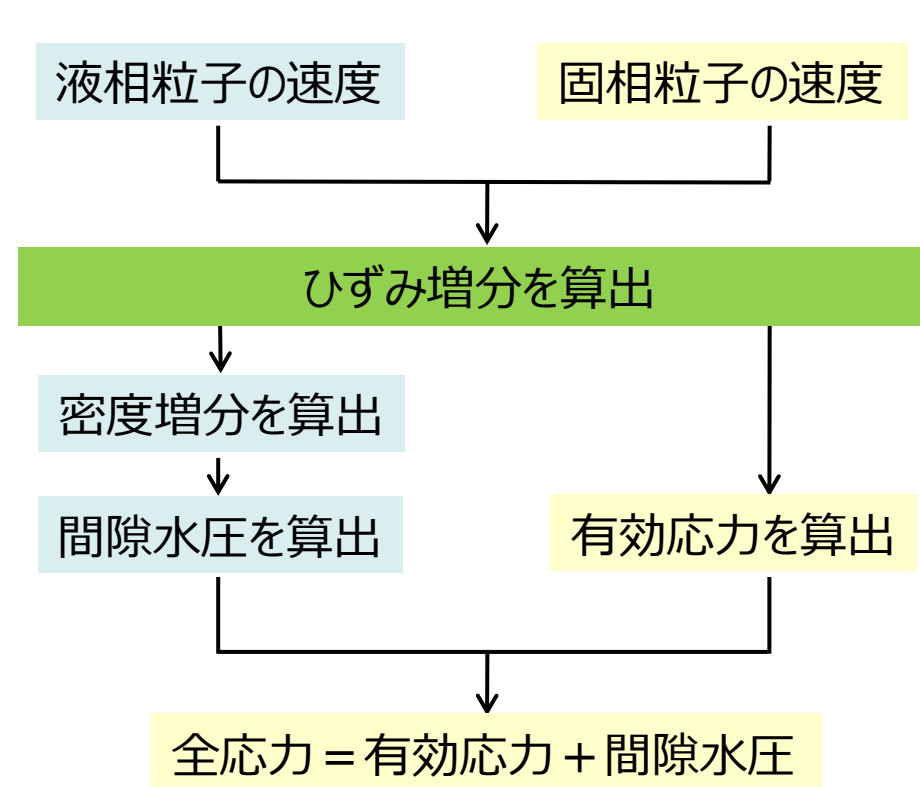
質量剛性比例減衰 (レーリー減衰)

$$\text{減衰力} = \alpha \times \text{質量} \times \text{速度} + \beta \times \text{剛性} \times \text{ひずみ速度} \quad \alpha, \beta : \text{減衰定数}$$



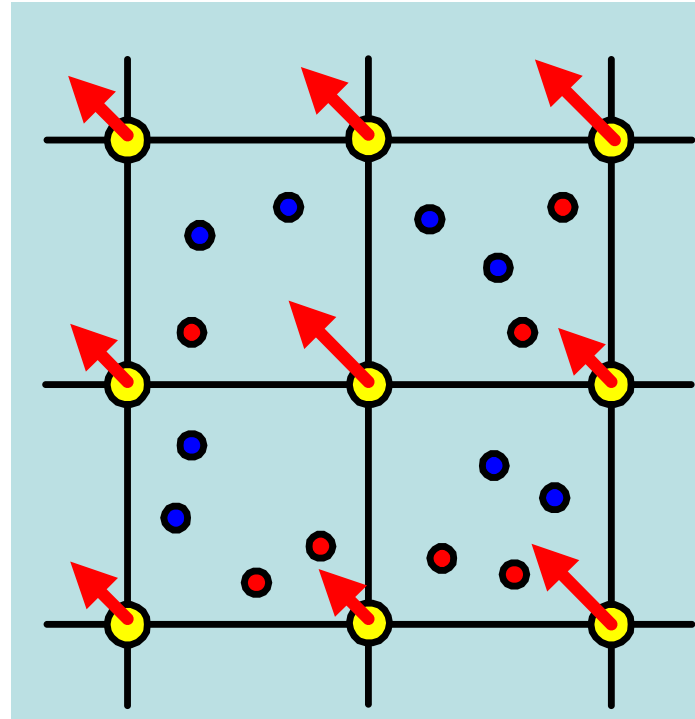
地盤中の地下水浸透のモデル化

従来の**固相粒子**に加え土の中の水の挙動を表現する**液相粒子**を追加し、運動方程式を格子で解いて**固液混合**をモデル化⁶⁾

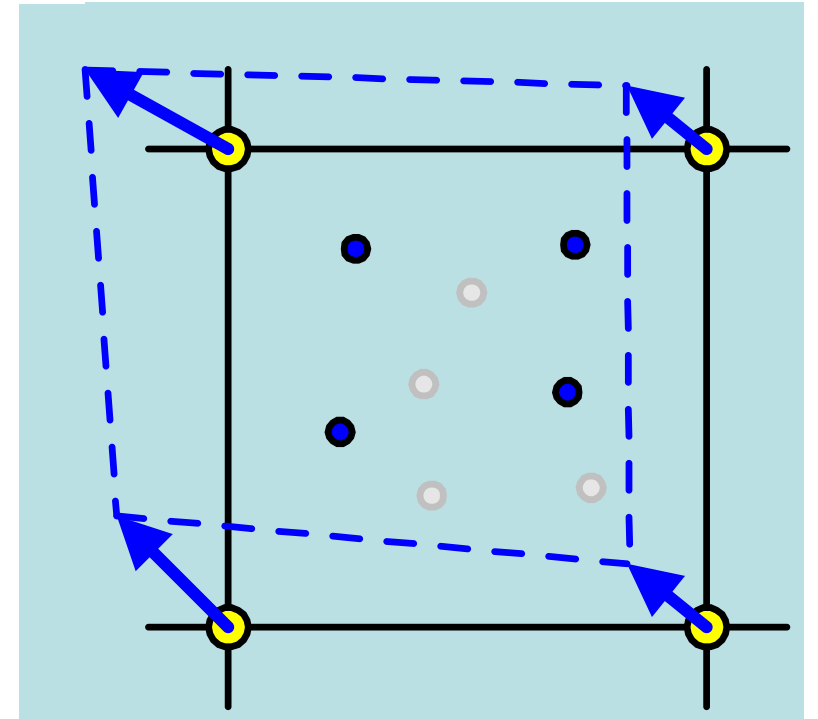


6) Abe, K., Soga, K. and Bandara, S. (2014): "Material Point Method for Coupled Hydromechanical Problems," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.140, No.3, pp 04013033.

地盤中の地下水浸透のモデル化



土の速度の算定
速度 = (合力 ÷ 質量) × Δt



固相、液相のひずみ増分の算定
ひずみ増分 = 速度の微分 × Δt

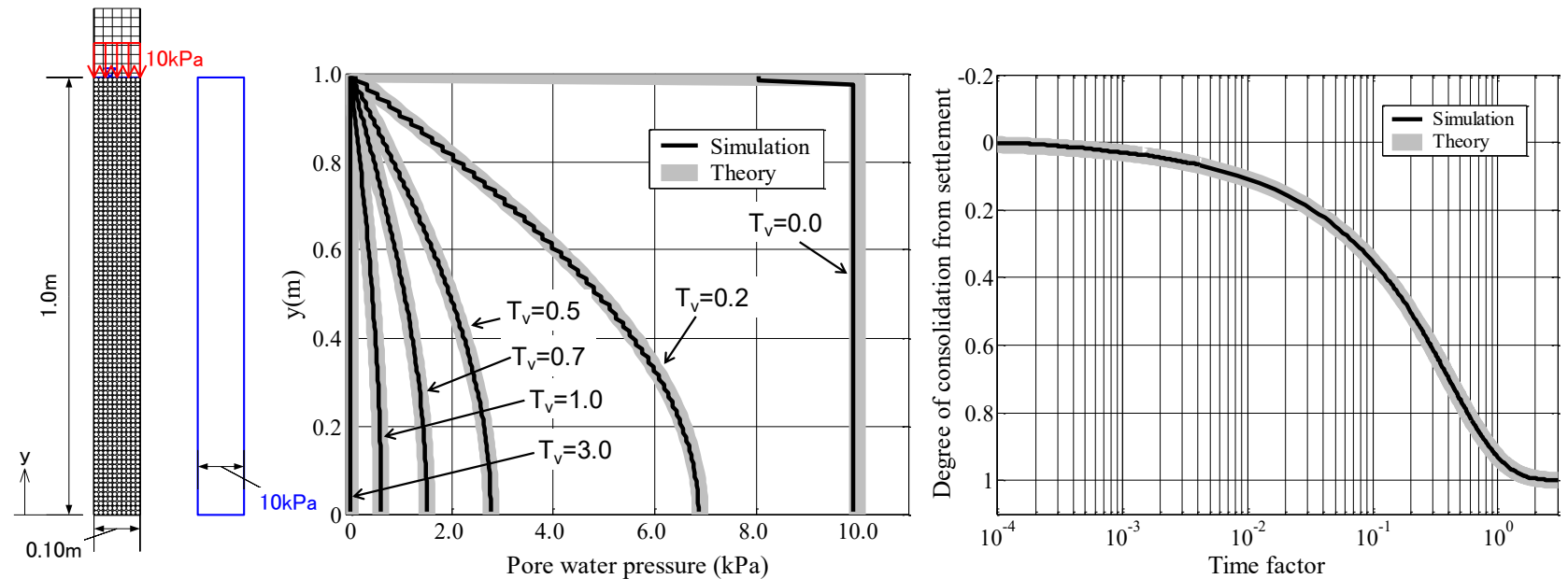
土の速度を格子点で求め、ひずみ増分を格子で求める。

6) Abe, K., Soga, K. and Bandara, S. (2014): "Material Point Method for Coupled Hydromechanical Problems," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.140, No.3, pp 04013033.

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

Terzaghiの圧密理論との比較



解析モデル

間隙水圧分布

圧密度 - 時間係数関係

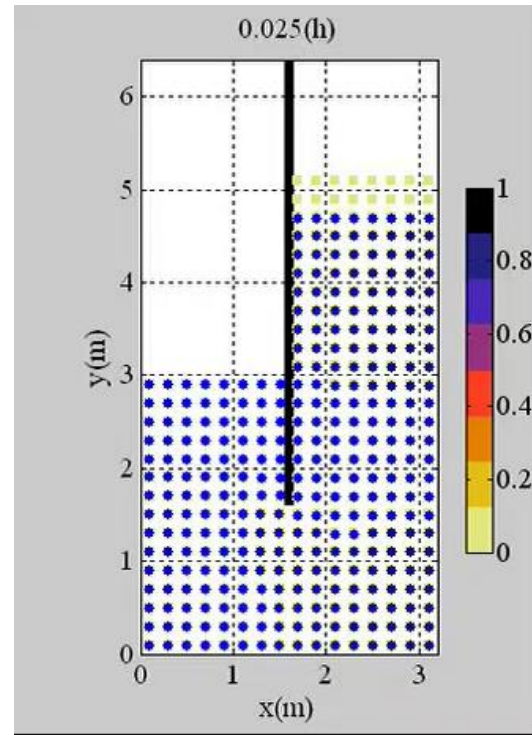
➡ 間隙水圧の時系列分布、圧密度 - 時間係数関係ともに理論値と一致することを確認し精度を検証⁶⁾

6) Abe, K., Soga, K. and Bandara, S. (2014): "Material Point Method for Coupled Hydromechanical Problems," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.140, No.3, pp 04013033.

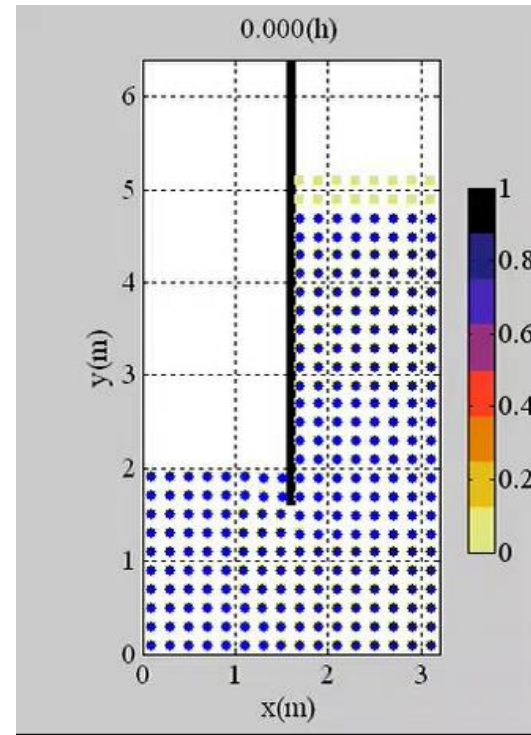
粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

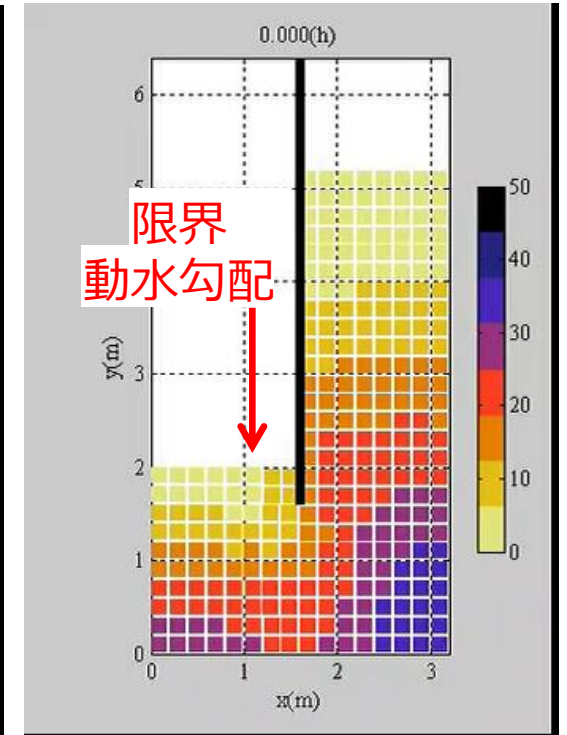
掘削深さが浅い



掘削深さが深い



鉛直動水勾配

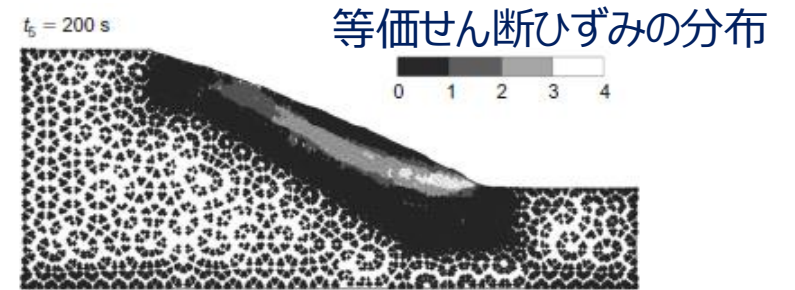
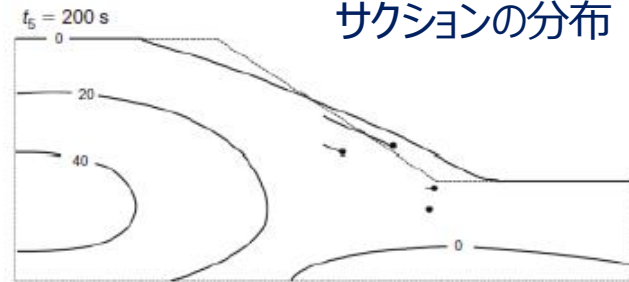
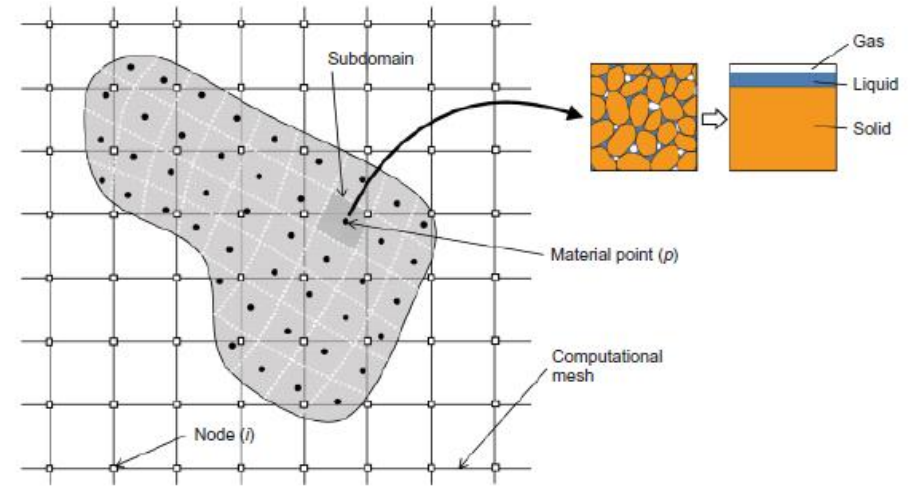
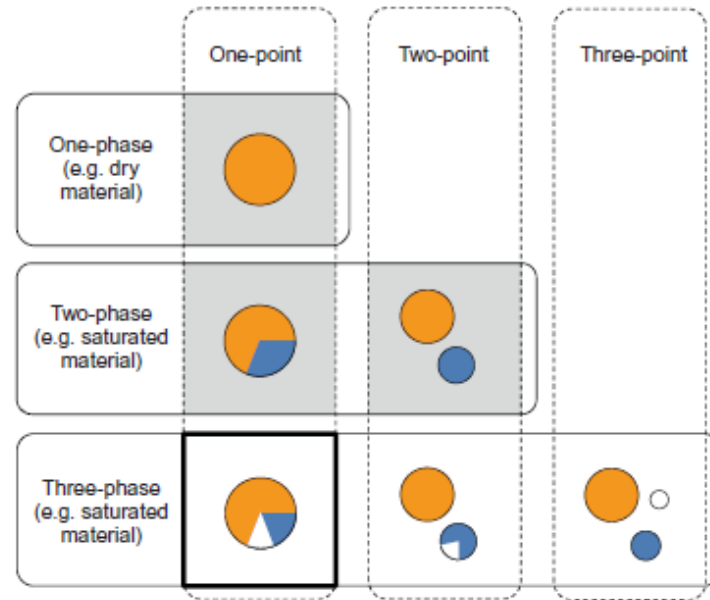


カラーバー：最大せん断ひずみ

➡ 水頭差により間隙水が浸透し、ボイリング（ヒービング）を再現。
ただし、噴砂（固相と液相の分離）の表現は課題

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

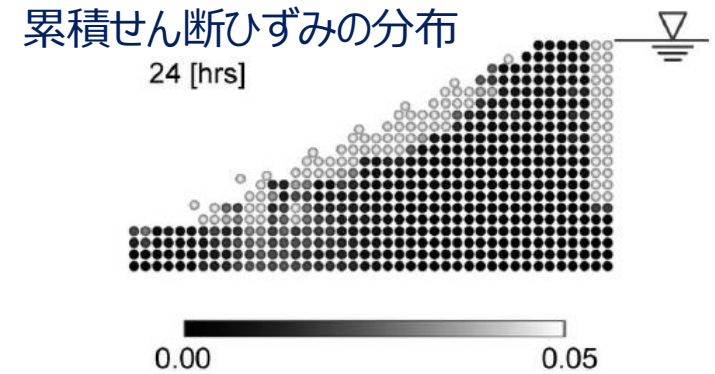
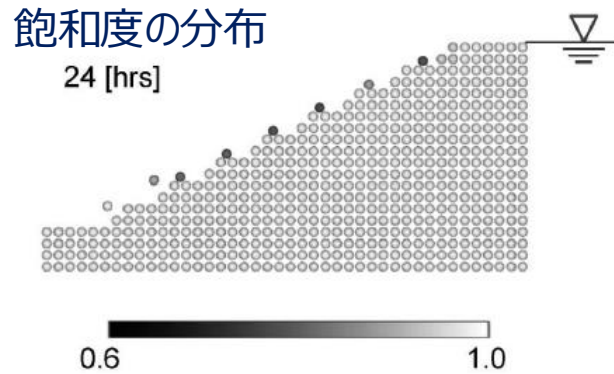
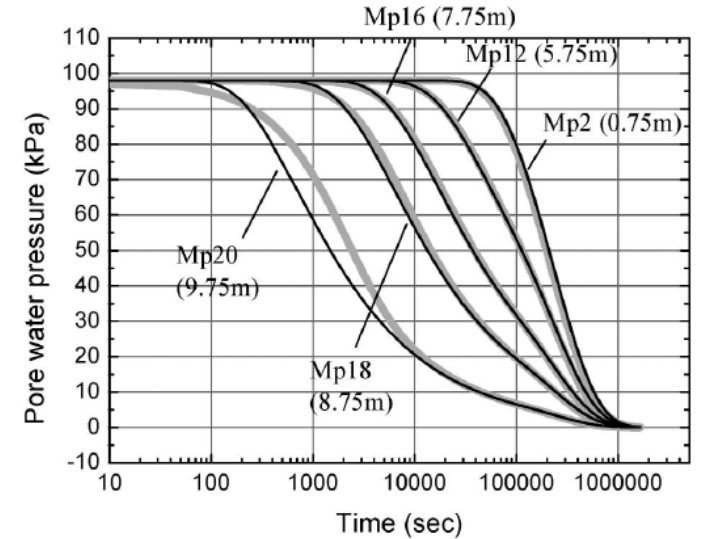
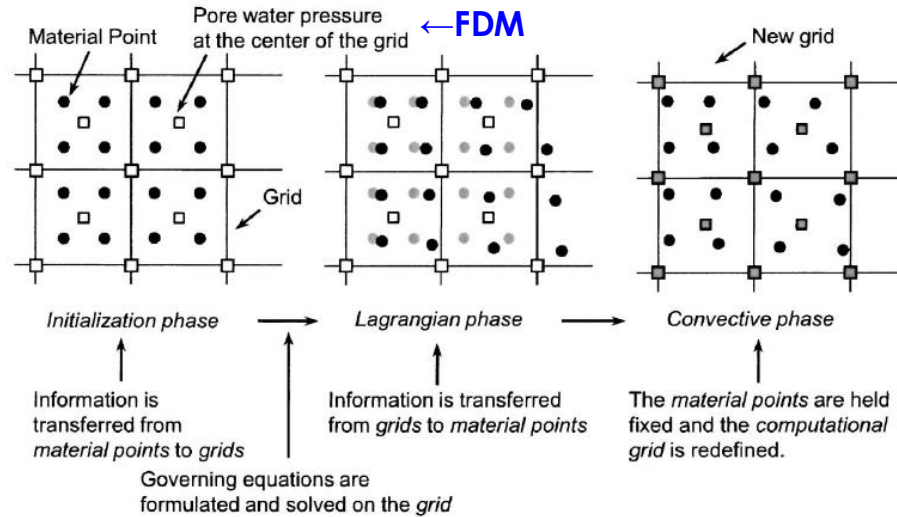


7) Yerro, A., Alonson, E. & Pinyol, N. (2015). The material point method for unsaturated soils. Géotechnique 65, No. 3, 201–217, <http://dx.doi.org/10.1680/geot.14.P.163>.

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

固液三相系のモデル化⁸⁾



8) Higo, Y., Oka, F., Kimoto, S., Morinaka, Y., Goto, Y. and Zhen, C. : A coupled MPM-FDM analysis method for multi-phase elasto-plastic soils, Soils and Foundations, Vol.50, No.4, pp.515-532, 2010.

粒子法を用いた
地盤の大変形
解析に関する
一連の研究

MPMによる地盤の大変形解析事例

session3-01

MPMによる地盤の大変形解析に向けたモデル化

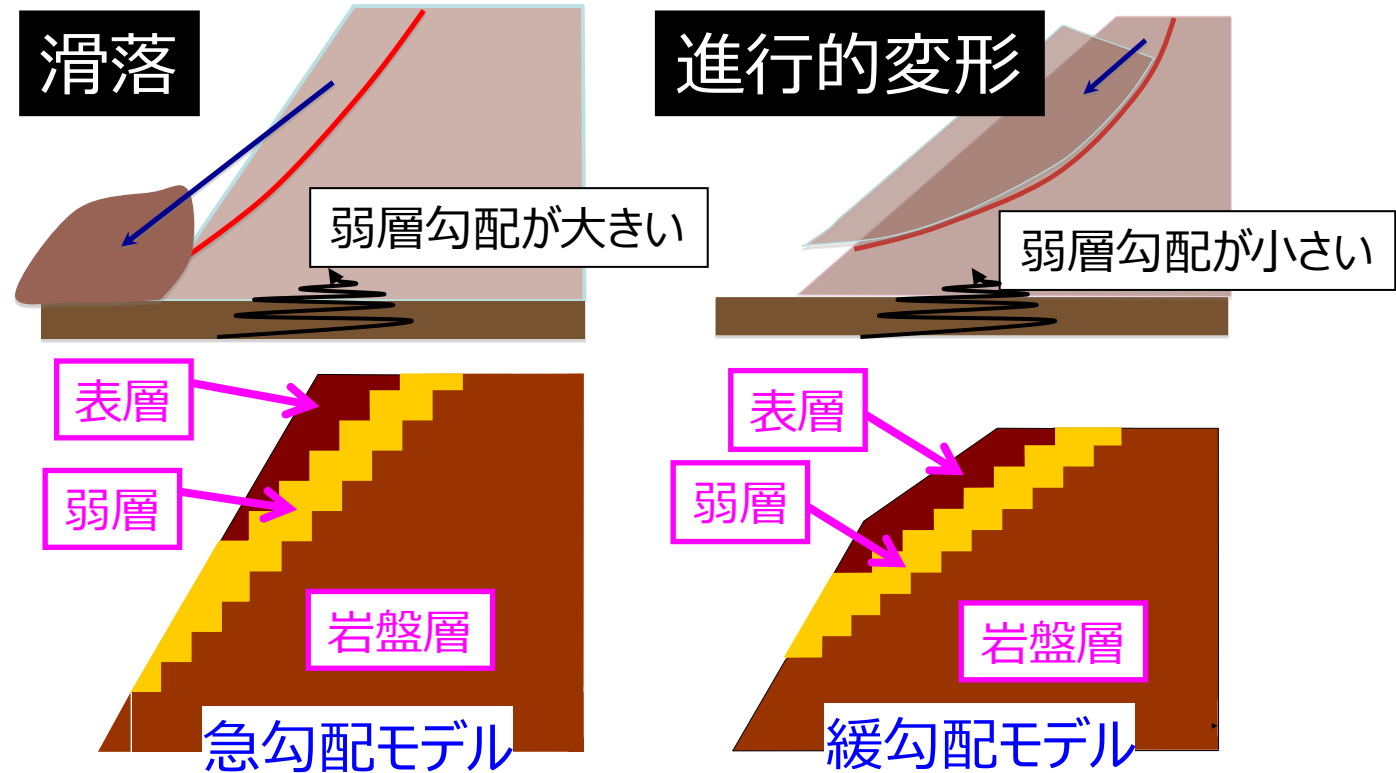
session3-02

地震時での地盤の大変形現象に対する解析事例

session3-03

降雨時での地盤の大変形現象に対する解析事例

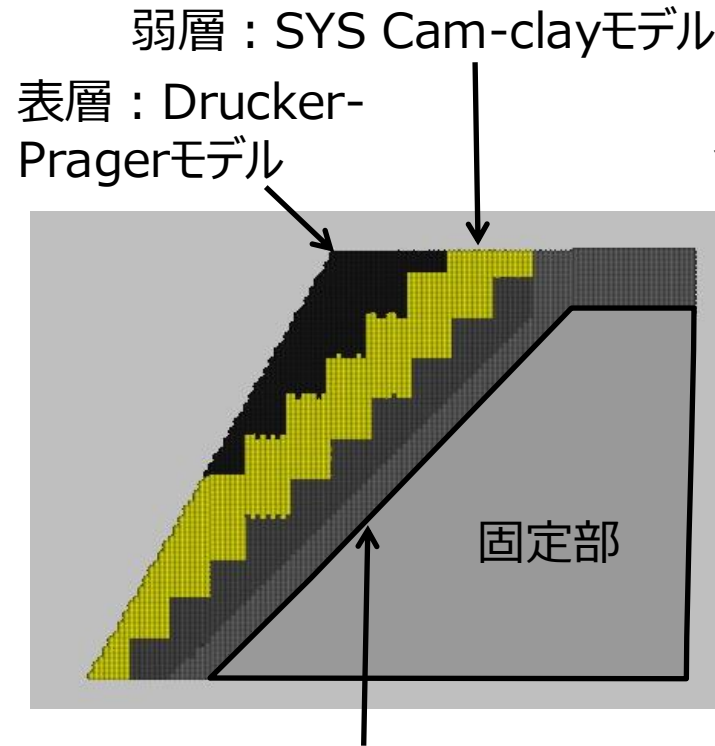
地震時斜面崩壊への適用



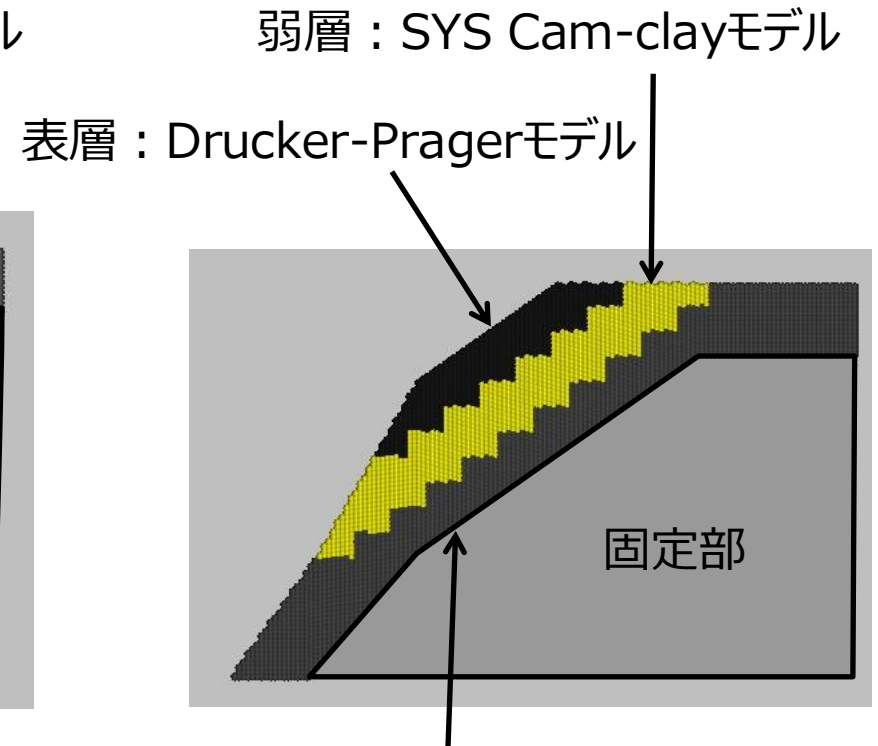
弱層勾配の違いによる崩壊後の挙動を検討

- 9) Shinoda, M., Watanabe, K., Sanagawa, T., Abe, K., Nakamura, H., Kawai, T. and Nakamura, S. (2015): "Dynamic behavior of slope models with various slope inclinations," Soils and Foundations, Vol.55, No.1, pp.127-142.
- 10) Abe, K., Nakamura, S., Nakamura, H. and Shiomi, K.: Numerical study on dynamic behavior of slope models including weak layers from deformation to failure using material point method, Soils and Foundations, Vol. 57, pp. 155-175, 2017.

地震時斜面崩壊への適用



基盤層：弾性モデル
急勾配モデル

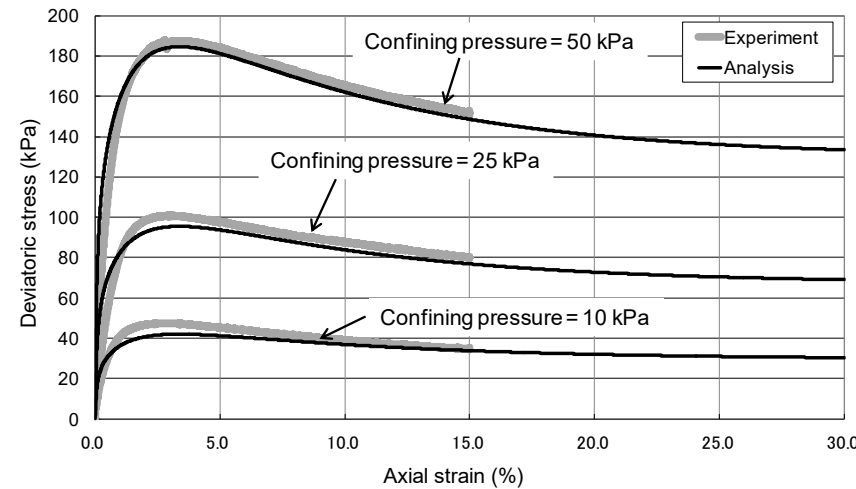


基盤層：弾性モデル
緩勾配モデル

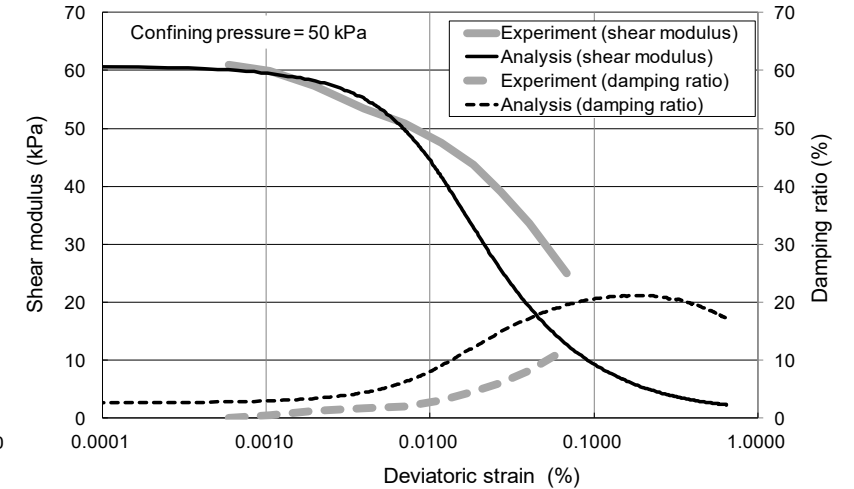
斜面を粒子の集合でモデル化し、地盤の構成則を適用

10) Abe, K., Nakamura, S., Nakamura, H. and Shiomi, K.: Numerical study on dynamic behavior of slope models including weak layers from deformation to failure using material point method, Soils and Foundations, Vol. 57, pp. 155-175, 2017.

弱層に用いた構成則



三軸圧縮試験



繰返し三軸試験

- 上下荷面モデルにより、要素試験結果に基づきモデル化
- 急勾配、緩勾配いずれのモデルにも同じ構成則を適用

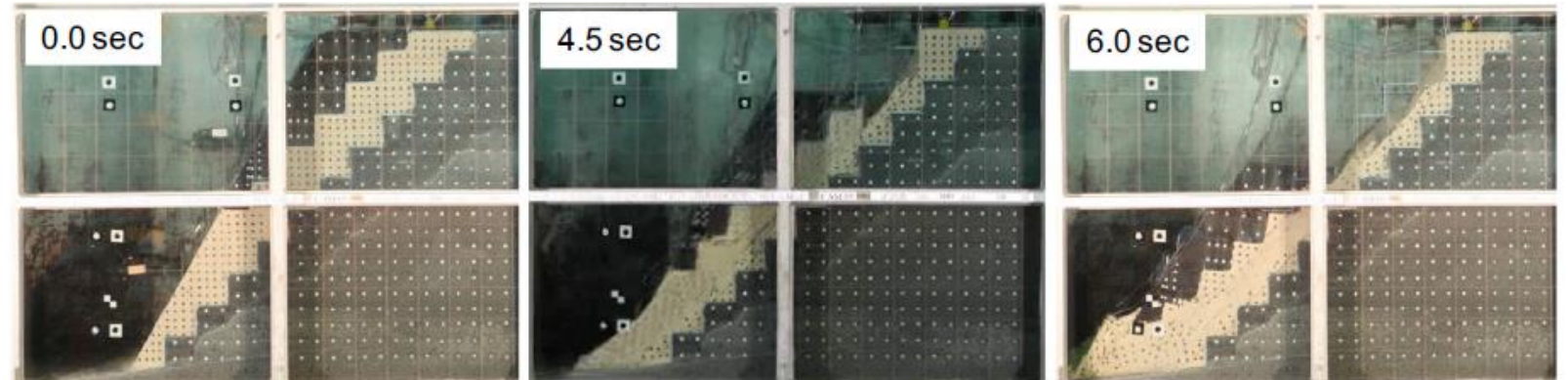
10) Abe, K., Nakamura, S., Nakamura, H. and Shiomi, K.: Numerical study on dynamic behavior of slope models including weak layers from deformation to failure using material point method, Soils and Foundations, Vol. 57, pp. 155-175, 2017.

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

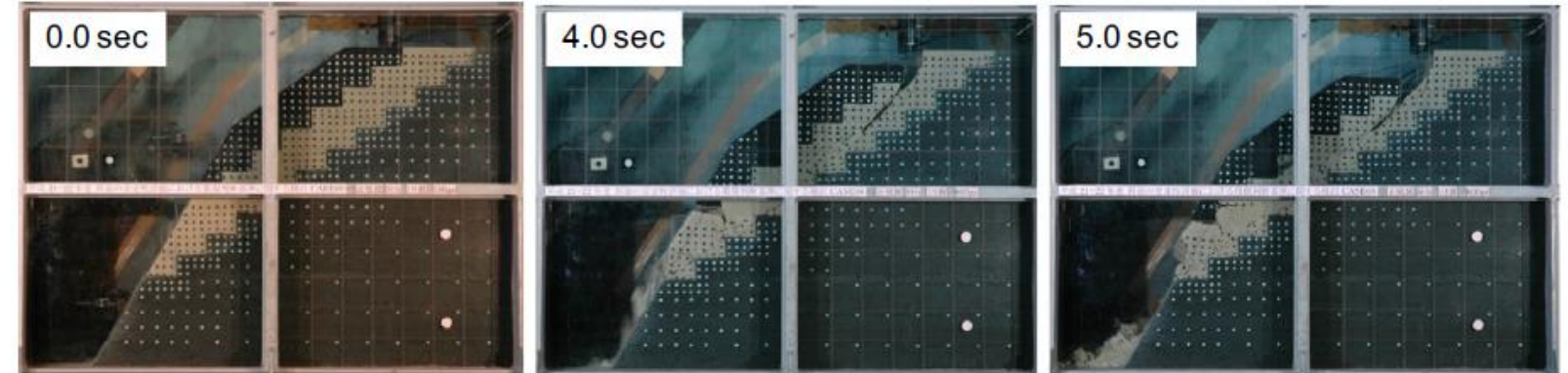
日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

MIDAS
CONSTRUCTION
TECHNICAL
SEMINAR

急勾配モデル



緩勾配モデル



実験結果^{9),10)}

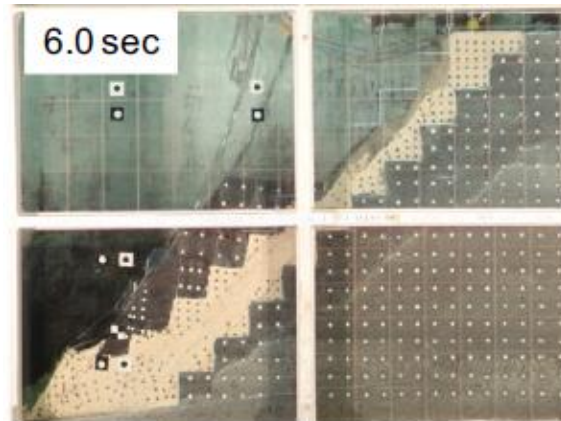
- 9) Shinoda, M., Watanabe, K., Sanagawa, T., Abe, K., Nakamura, H., Kawai, T. and Nakamura, S. (2015): "Dynamic behavior of slope models with various slope inclinations," Soils and Foundations, Vol.55, No.1, pp.127-142.
- 10) Abe, K., Nakamura, S., Nakamura, H. and Shiomi, K.: Numerical study on dynamic behavior of slope models including weak layers from deformation to failure using material point method, Soils and Foundations, Vol. 57, pp. 155-175, 2017.

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

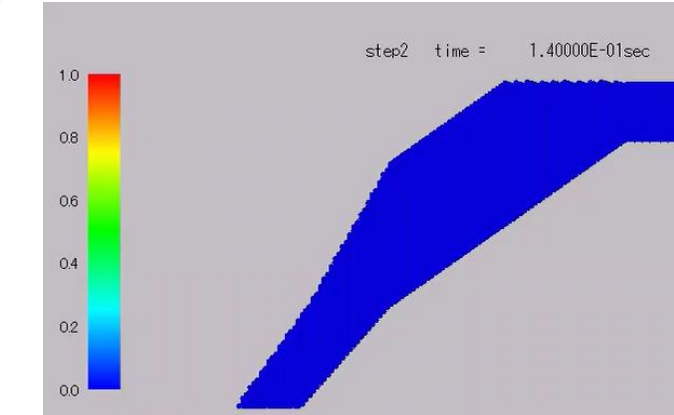
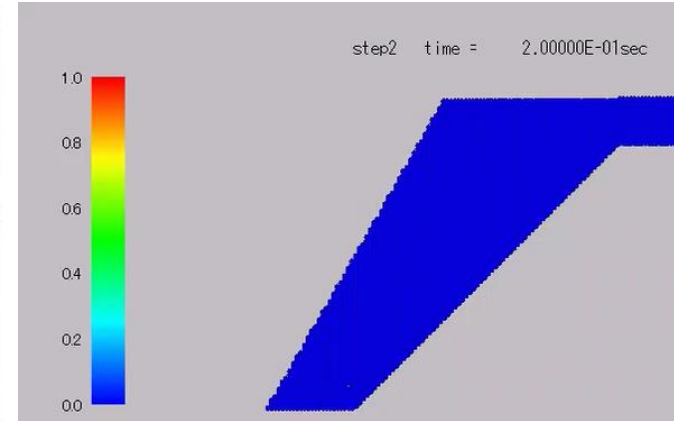
日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

地震時斜面崩壊への適用

急勾配モデル



緩勾配モデル



コンター：最大せん断ひずみ

実験結果^{9),10)}

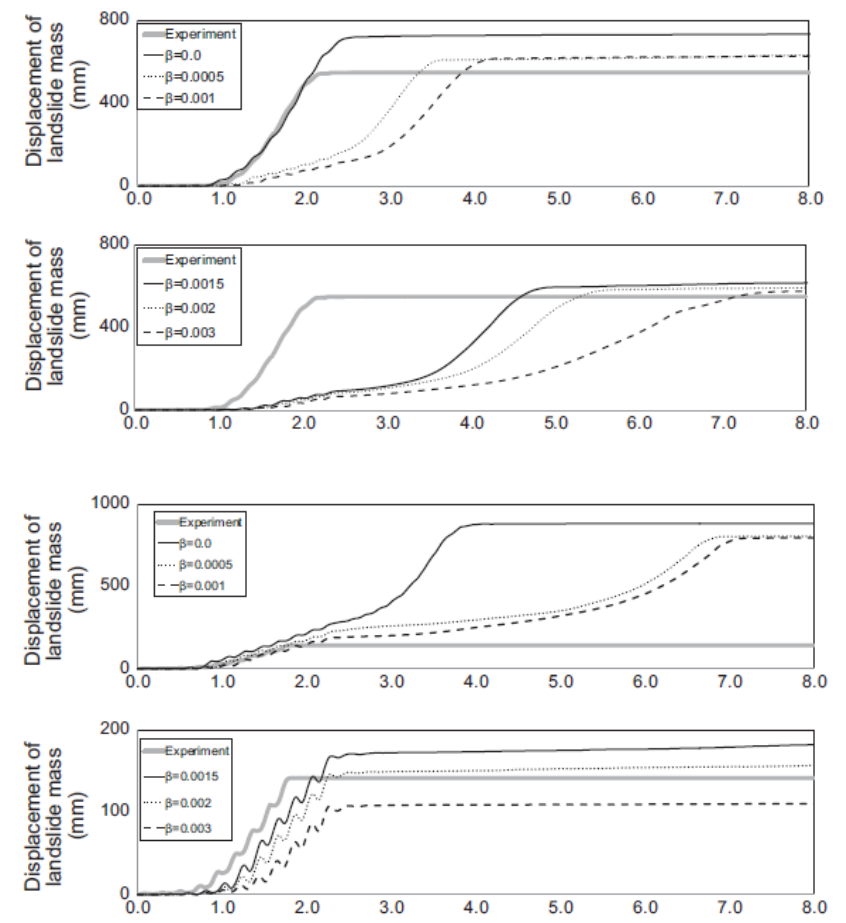
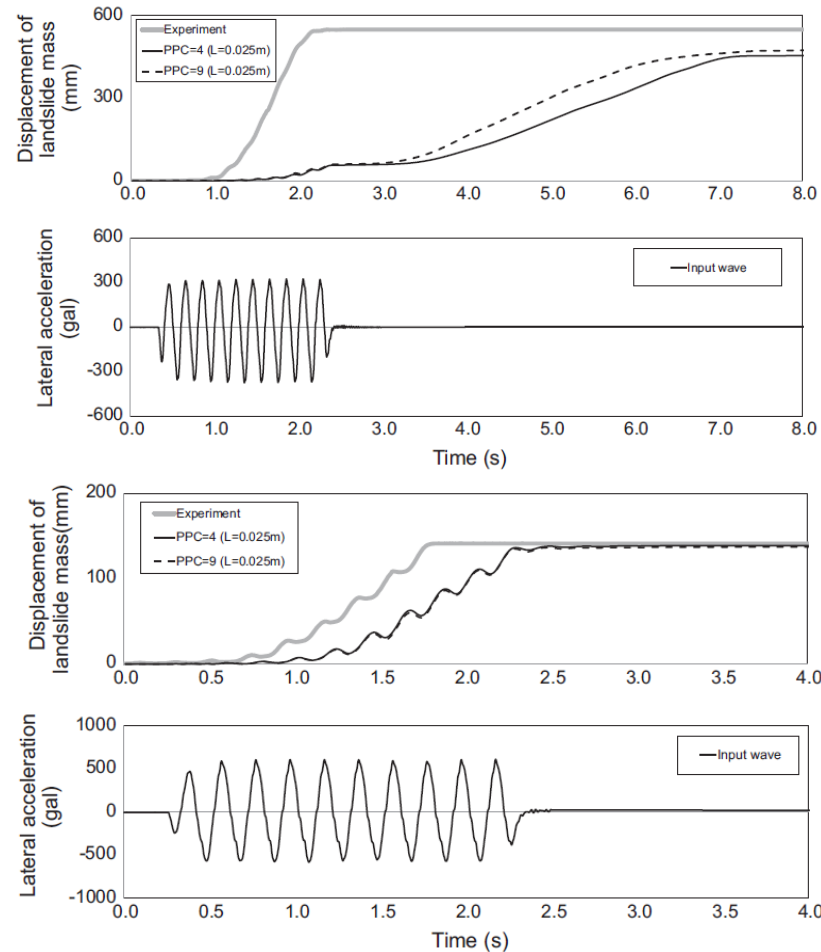
解析結果¹⁰⁾

- 9) Shinoda, M., Watanabe, K., Sanagawa, T., Abe, K., Nakamura, H., Kawai, T. and Nakamura, S. (2015): "Dynamic behavior of slope models with various slope inclinations," Soils and Foundations, Vol.55, No.1, pp.127-142.
- 10) Abe, K., Nakamura, S., Nakamura, H. and Shiomi, K.: Numerical study on dynamic behavior of slope models including weak layers from deformation to failure using material point method, Soils and Foundations, Vol. 57, pp. 155-175, 2017.

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

地震時斜面崩壊への適用

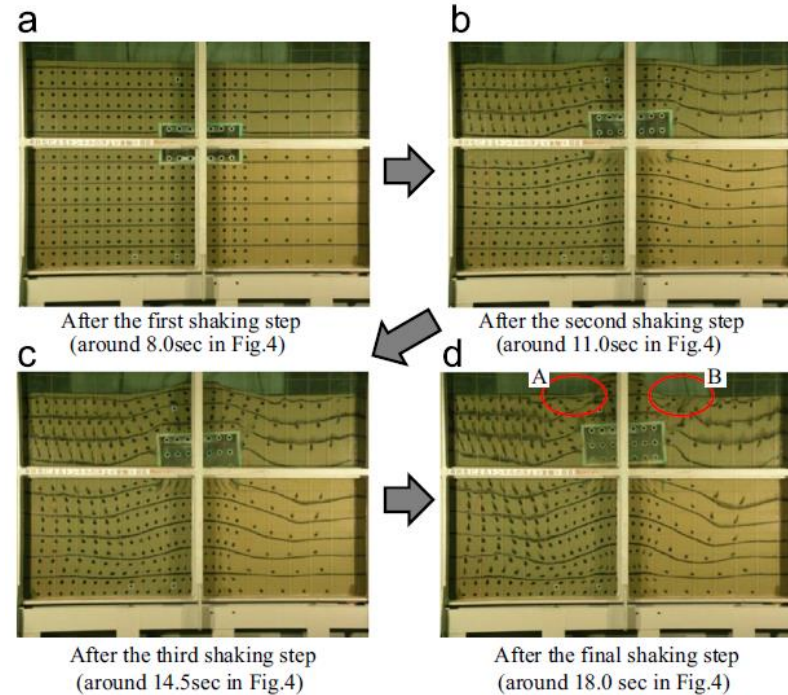


10) Abe, K., Nakamura, S., Nakamura, H. and Shiomi, K.: Numerical study on dynamic behavior of slope models including weak layers from deformation to failure using material point method, Soils and Foundations, Vol. 57, pp. 155-175, 2017.

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

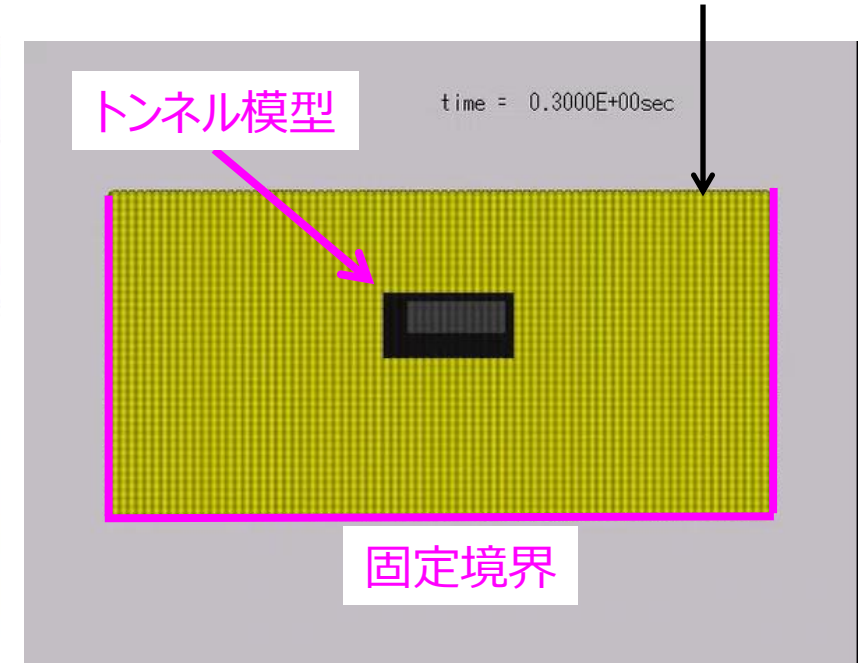
日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

液状化解析への適用



液状化による開削トンネルの
浮き上がり模型実験¹¹⁾

砂の繰返しモデル（岡・渦岡）

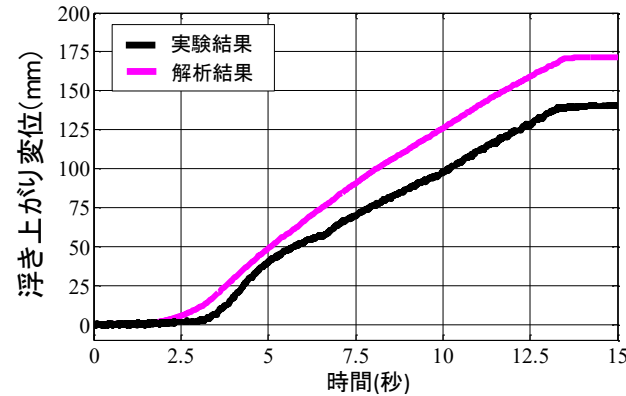


- ✓ 地盤は完全飽和と仮定
- ✓ 非排水・等体積条件を仮定

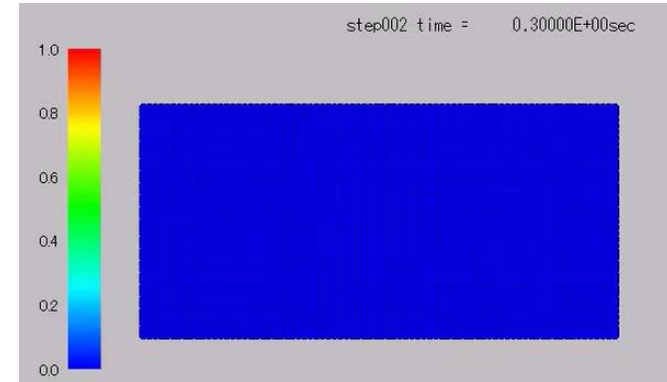
11) Watanabe, K., Sawada, R. and Koseki, J. (2016): "Uplift mechanism of open-cut tunnel in liquefied ground and simplified method to evaluate the stability against uplifting," Soils and Foundations, Vol.56, No.3, pp.412-426.

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

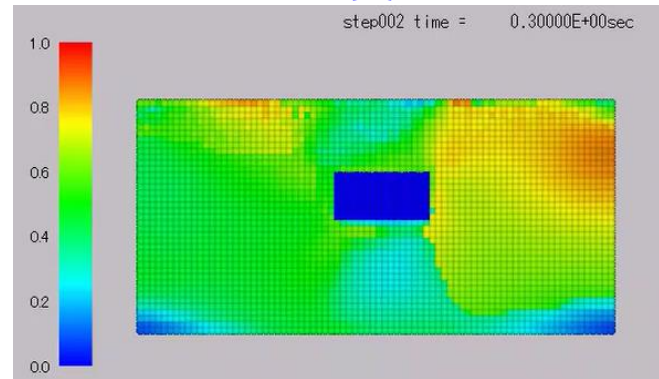
日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生



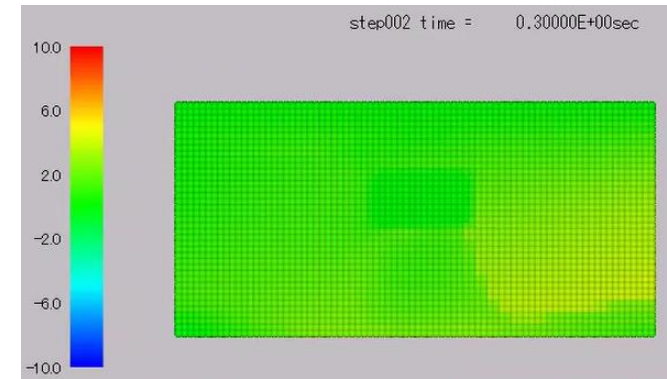
浮き上がり変位履歴



最大せん断ひずみ



液状化率



過剰間隙水圧(kN/m²)



- 実験で見られた地盤変形の傾向を再現
- 加振と同時に地盤下部で過剰間隙水圧が上昇し液状化
- 排水・透水特性のモデル化は課題

土留め壁の耐震補強への応用

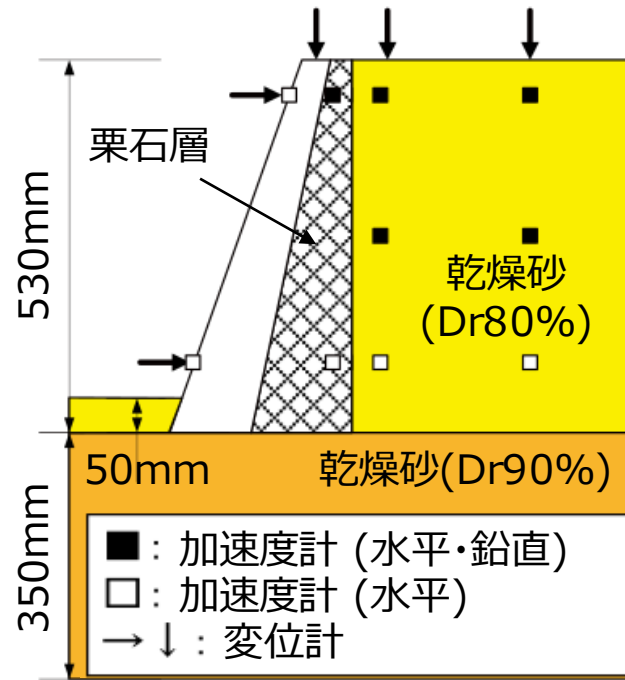


1995年兵庫県南部地震
での転倒被害¹²⁾

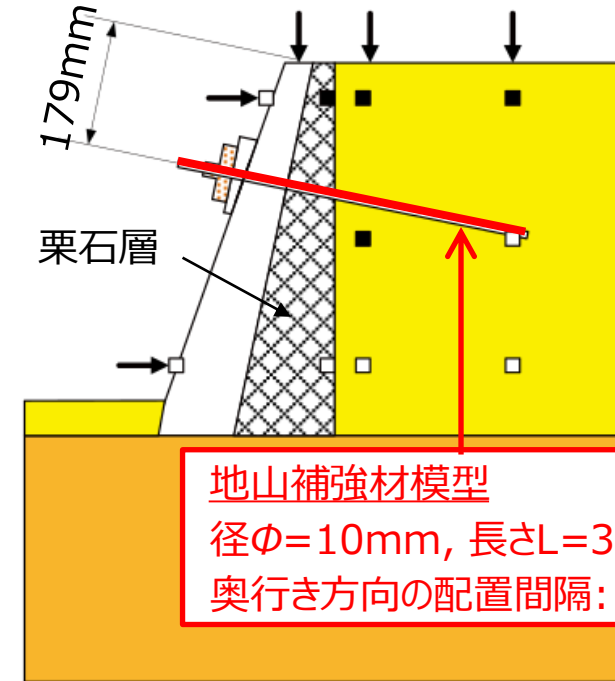
過去の大地震時で、旧式土留め壁の、もたれ壁の転倒被害が発生

12) 中島進, 工藤敦弘, 成田浩明, 渡邊健治: 既設もたれ壁の耐震補強効果および設計手法に関する実験的研究, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 75, No. 3, pp.316-335, 2019.

土留め壁の耐震補強への応用



無補強ケース



補強ケース

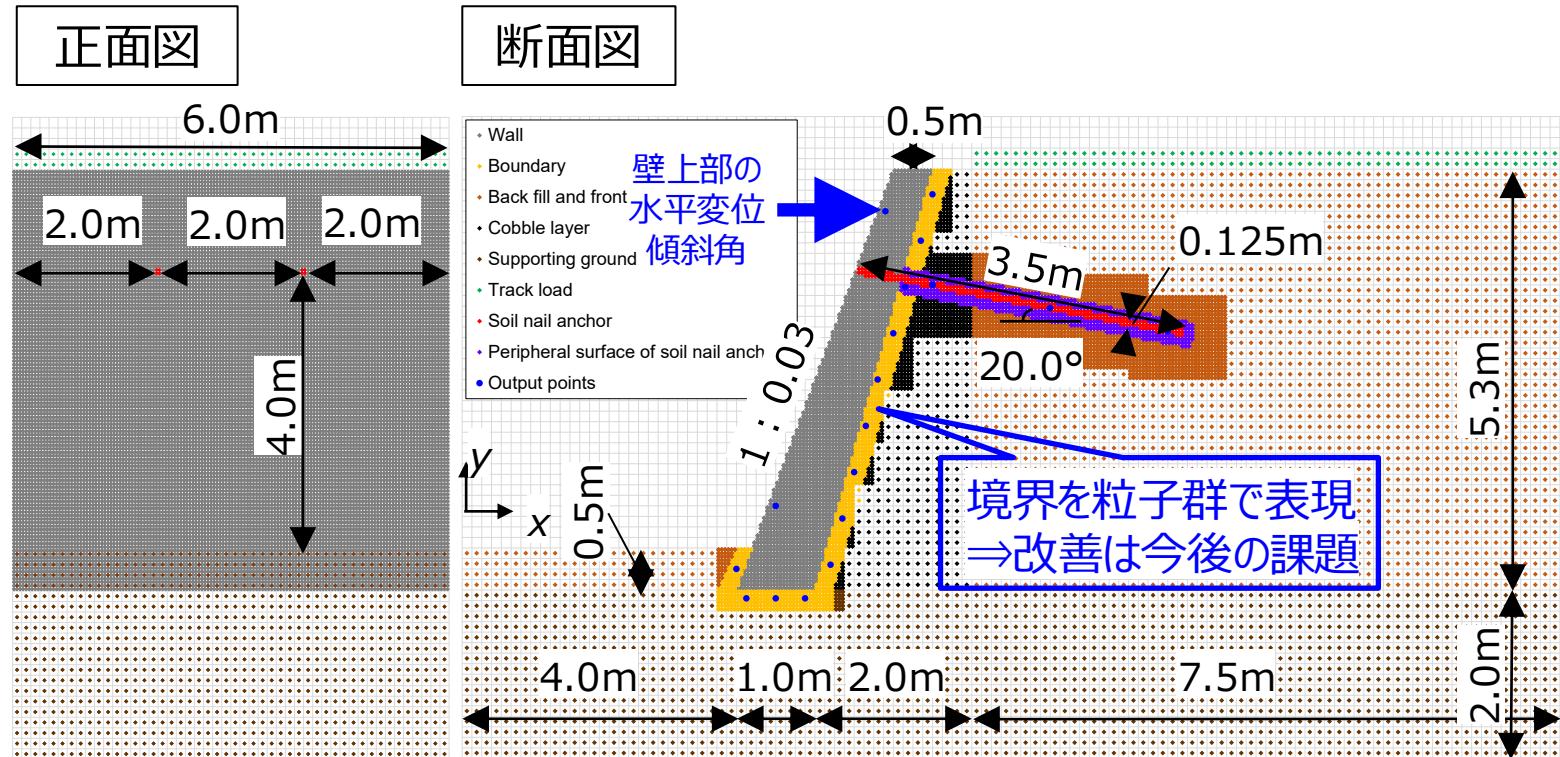
- ✓ 中小地震（設計水平震度 $k_h=0.25$ ）に抵抗できるよう設計された5.0m高さのもたれ壁の1/10スケール模型
- ✓ 5Hz, 10波の正弦波を50~100galずつ上げる段階加振

12) 中島進, 工藤敦弘, 成田浩明, 渡邊健治: 既設もたれ壁の耐震補強効果および設計手法に関する実験的研究, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 75, No. 3, pp.316-335, 2019.

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

MIDAS
CONSTRUCTION
TECHNICAL
SEMINAR

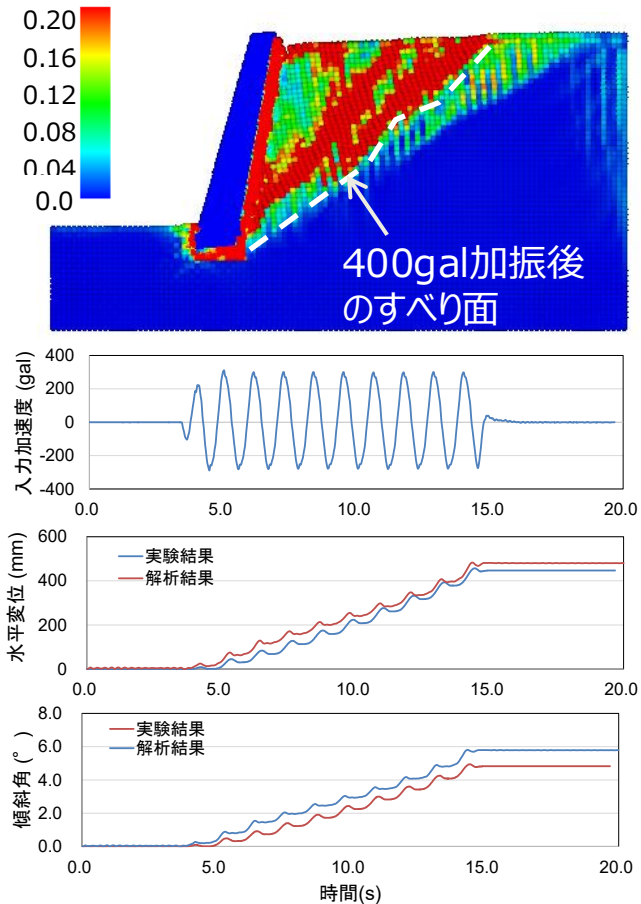


- ✓ **解析モデル:** MPMを用いて実物大スケールでモデル化
⇒相似則で換算した実験結果と解析結果を比較
- ✓ **応力ひずみ関係:** 地盤・境界 → 弾塑性 壁・補強材 → 弾性

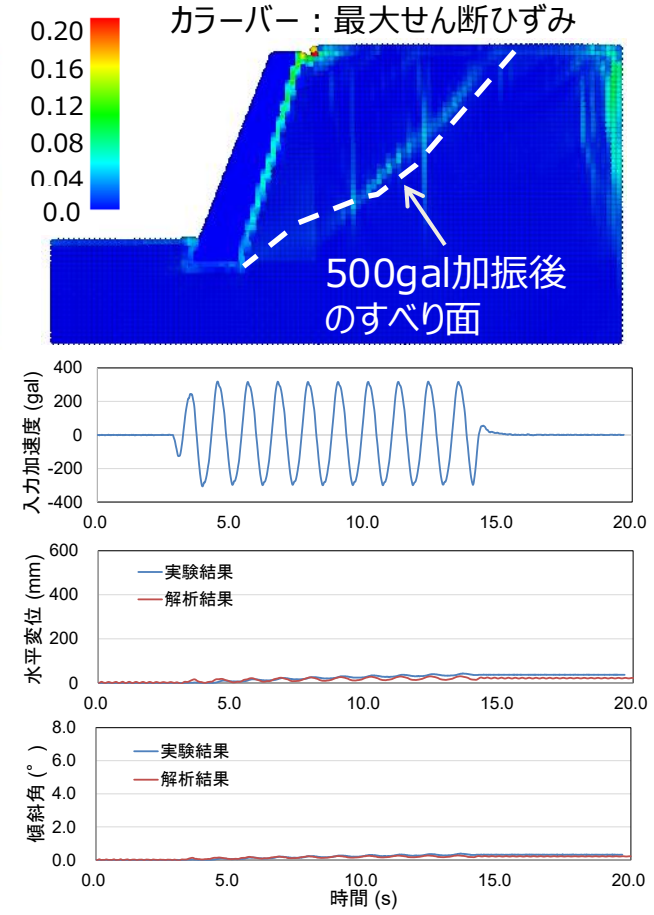
13) 阿部慶太, 仙頭紀明, 中島進: 地山補強材で壁体下部を補強したもたれ壁の地震時挙動に関する一考察, 土木学会論文集, 80巻, 13号, 論文ID: 23-13126, 2024.

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生



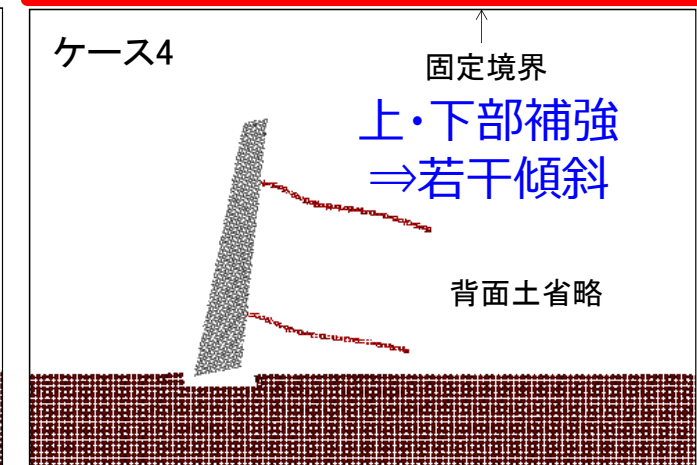
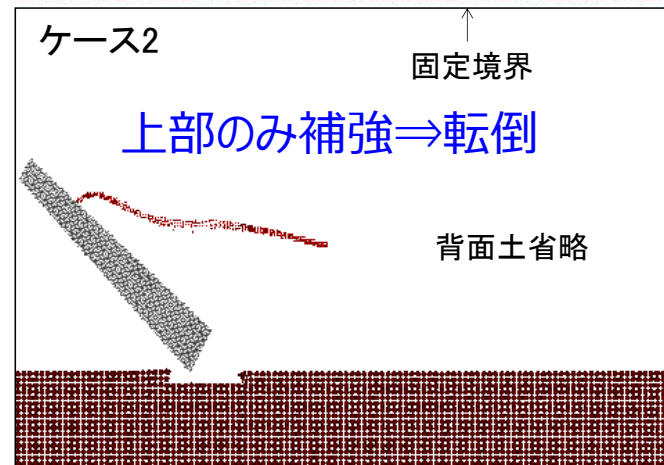
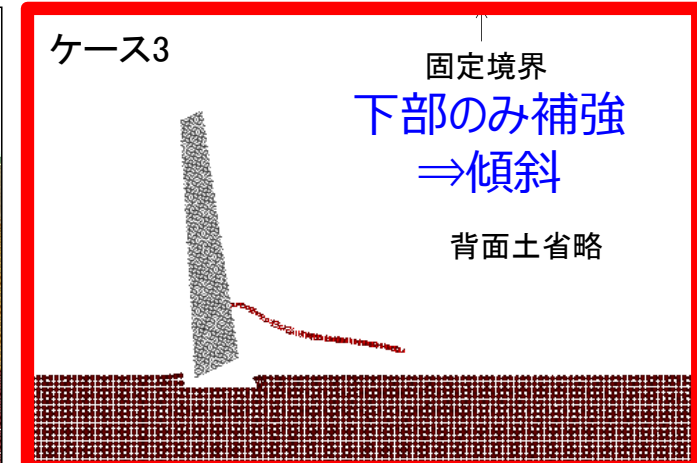
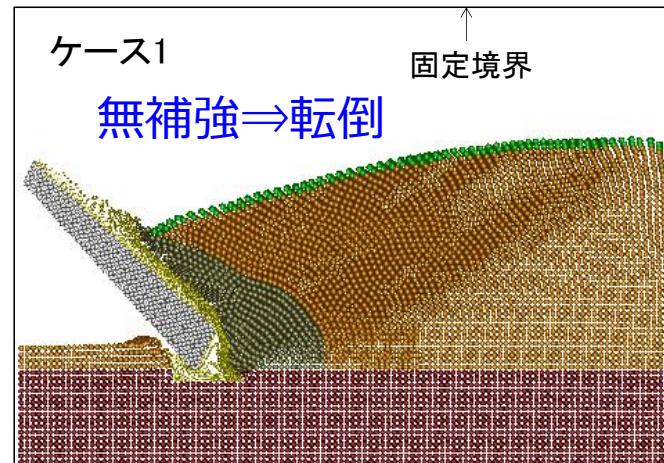
無補強ケース



補強ケース

13) 阿部慶太, 仙頭紀明, 中島進: 地山補強材で壁体下部を補強したもたれ壁の地震時挙動に関する一考察, 土木学会論文集, 80巻, 13号, 論文ID: 23-13126, 2024.

土留め壁の耐震補強への応用



変位量の大きさに関らず、耐震補強の効果を解析的に検証

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

土留め壁の耐震補強への応用



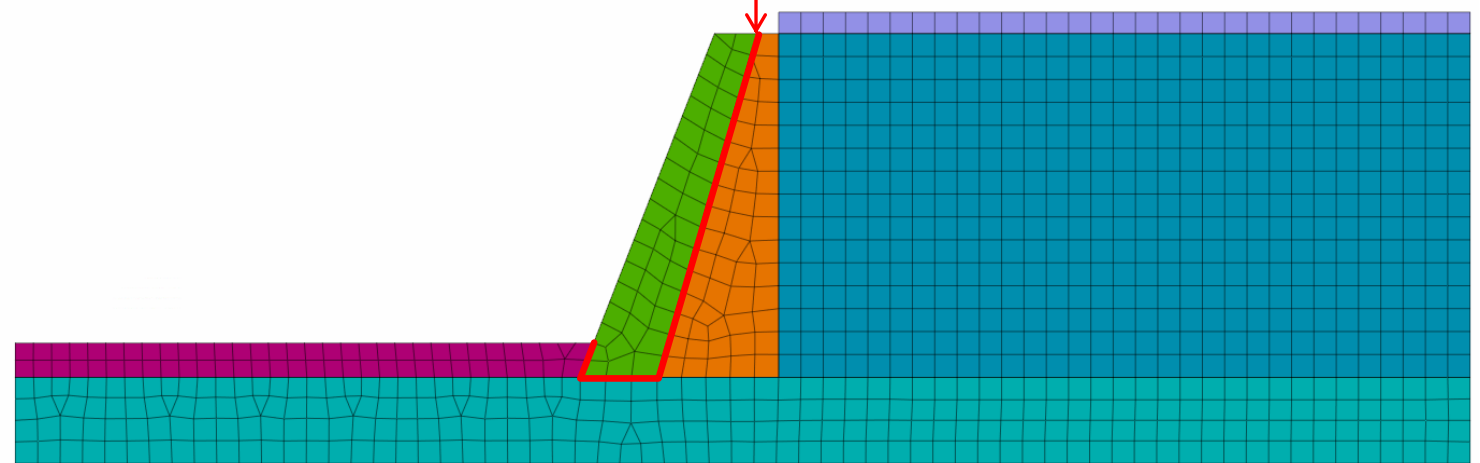
粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

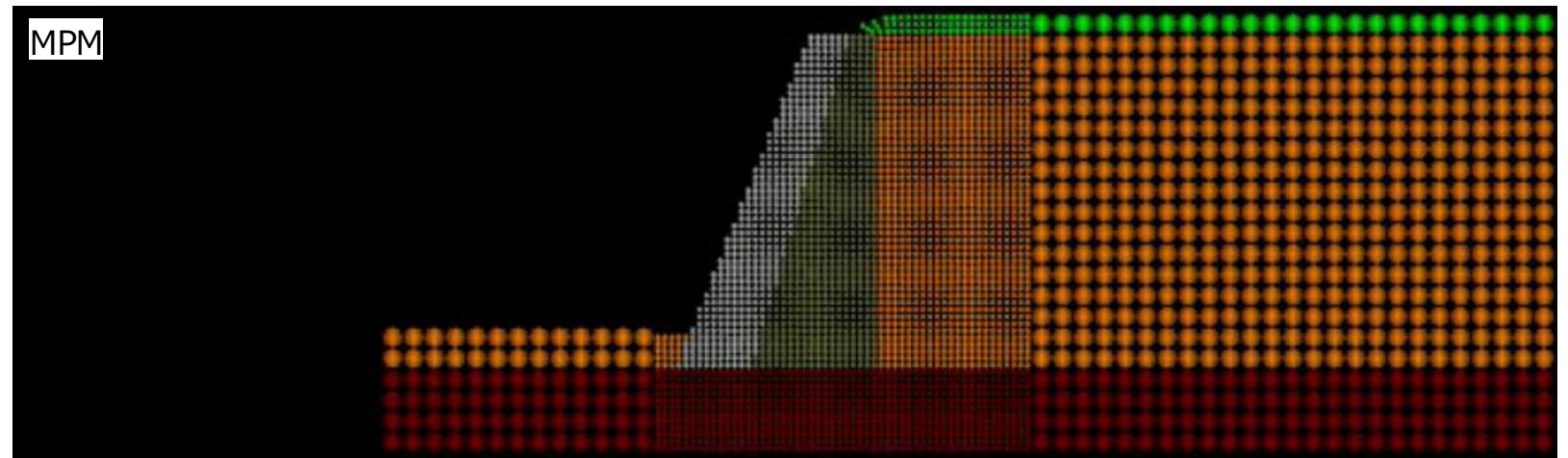
土留め壁の耐震補強への応用

FEM(FEA-NX)

ジョイント要素



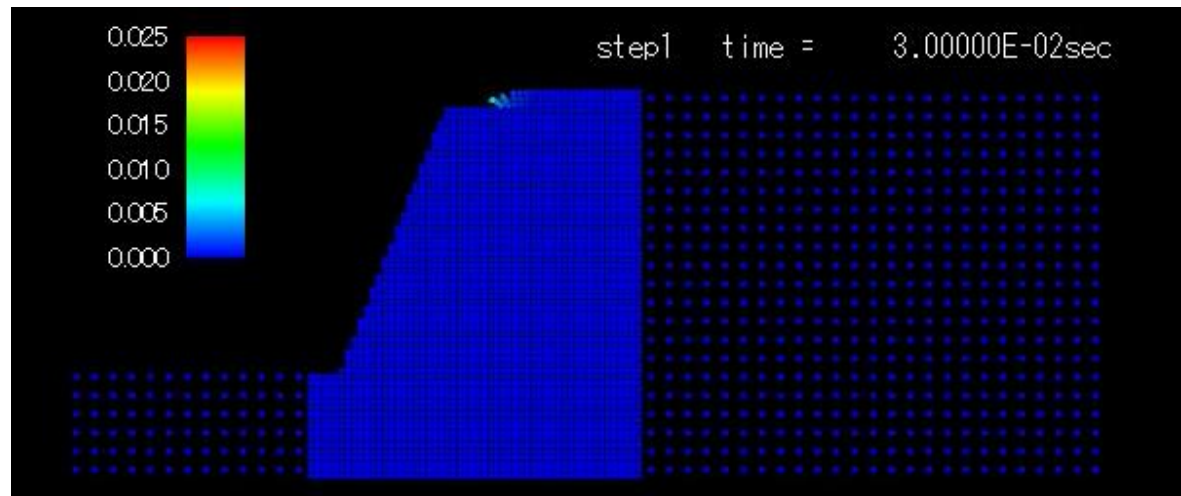
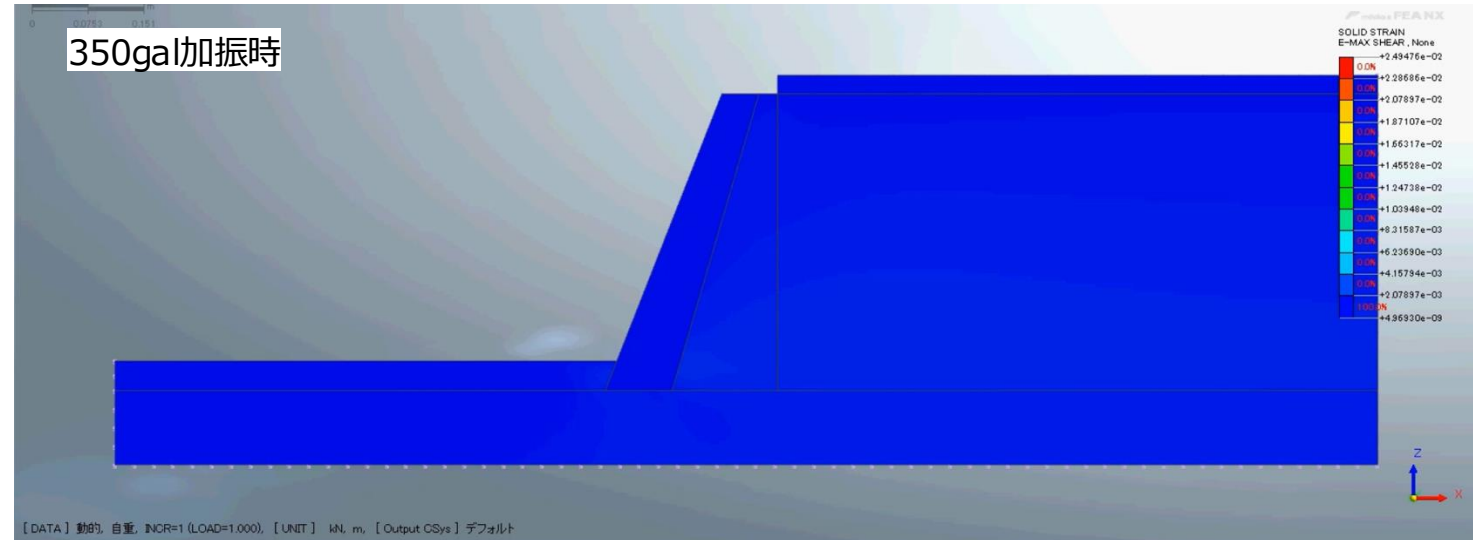
MPM



粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

土留め壁の耐震補強への応用

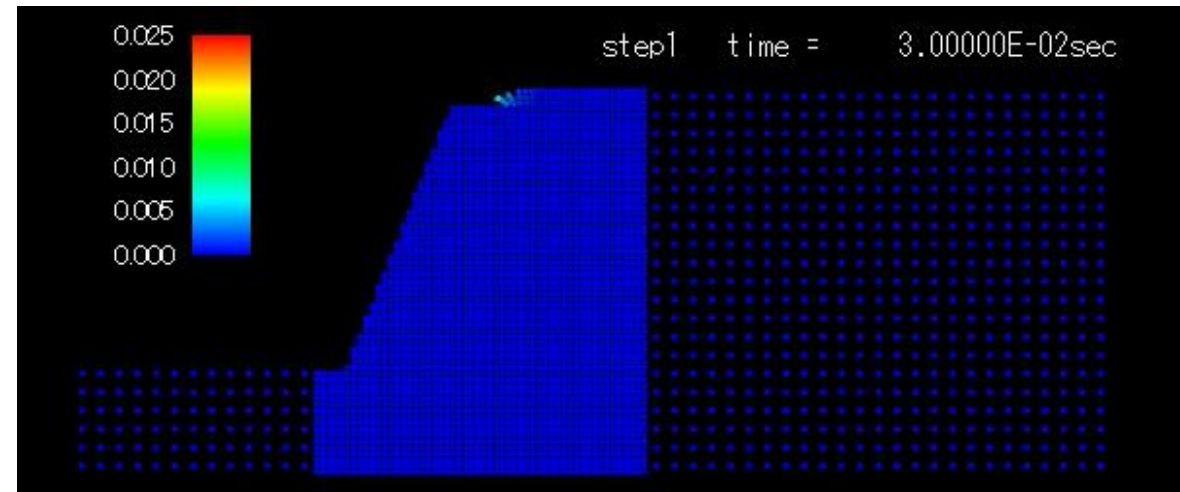


粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

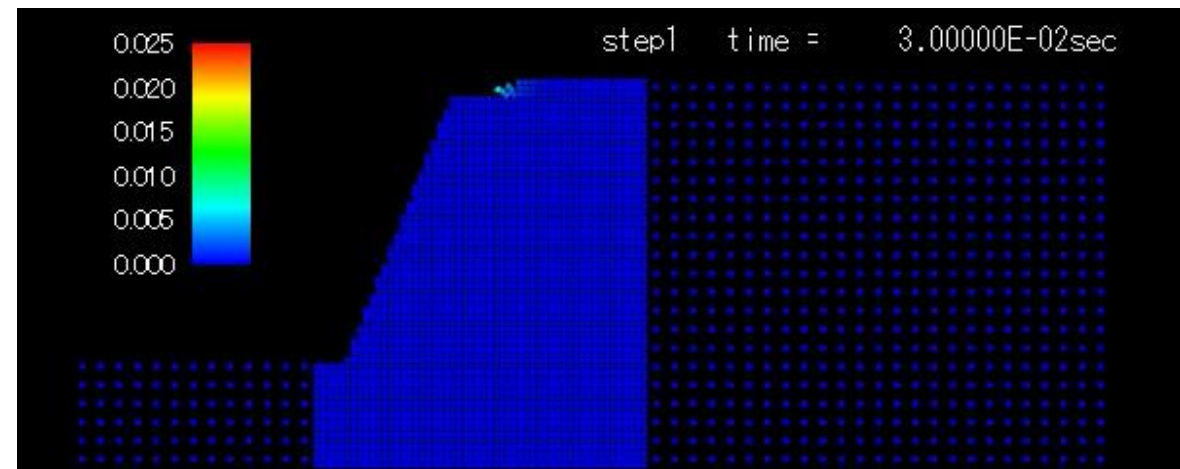
日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

土留め壁の耐震補強への応用

350gal加振時



600gal加振時

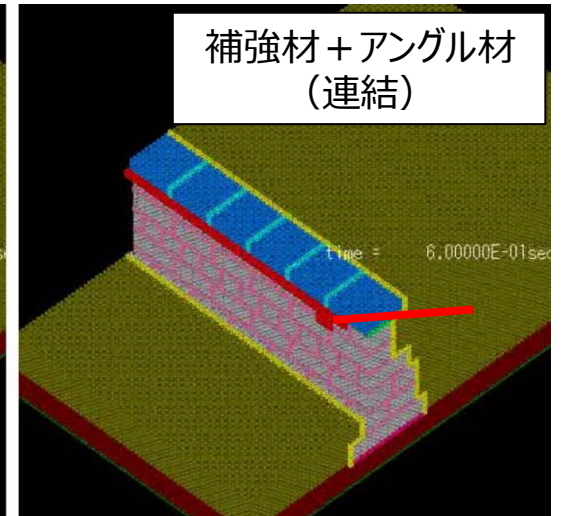
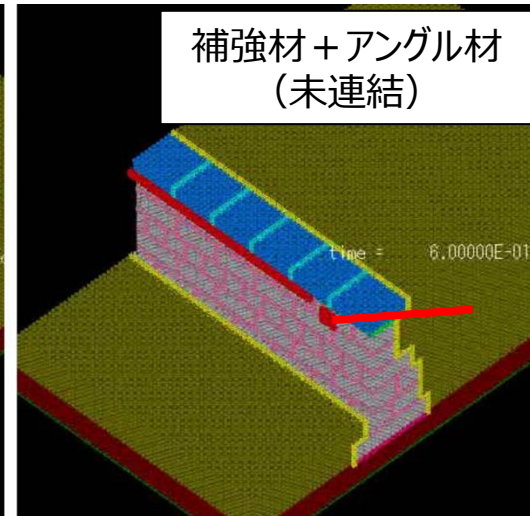
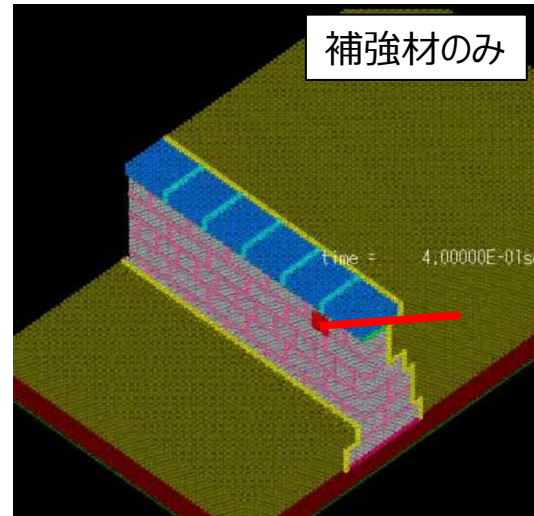
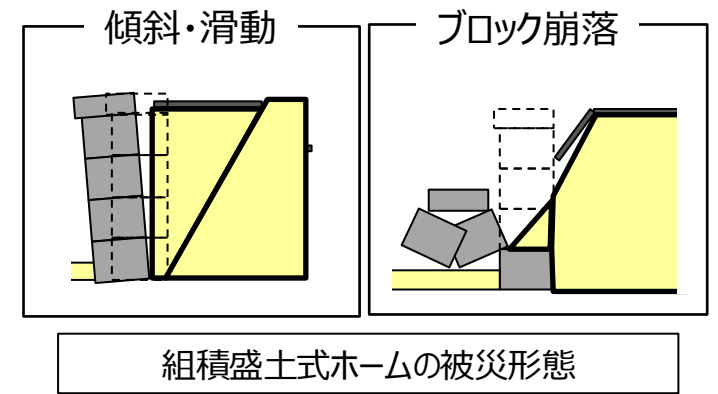
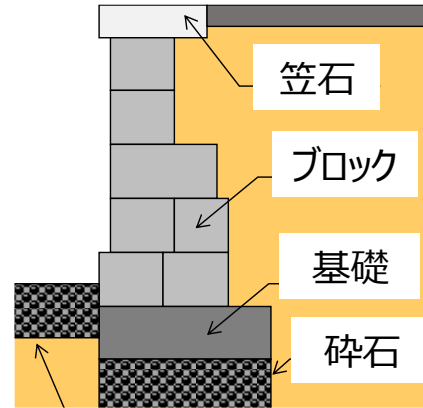


粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

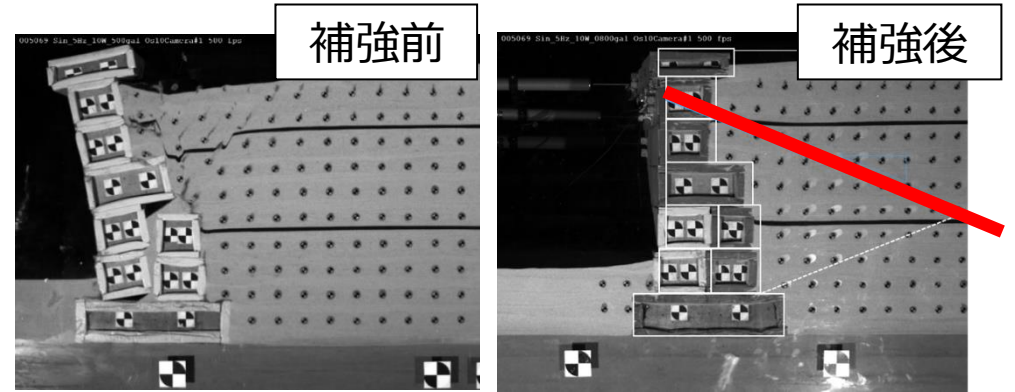
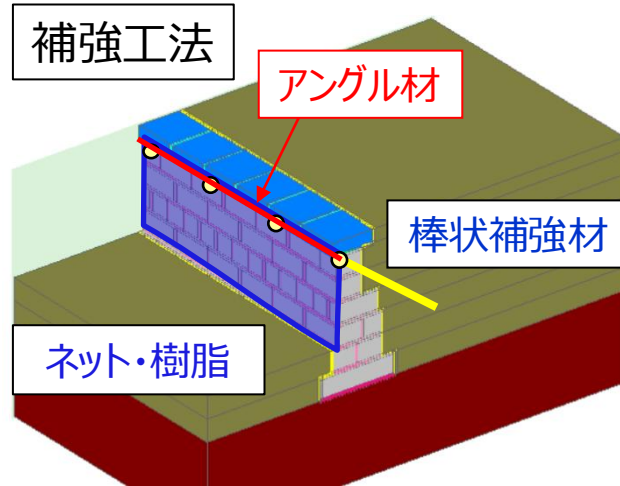
組積構造物の耐震補強への応用

過去の地震において盛土式乗降場が被災（ブロックの崩壊や傾斜・滑動）



粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

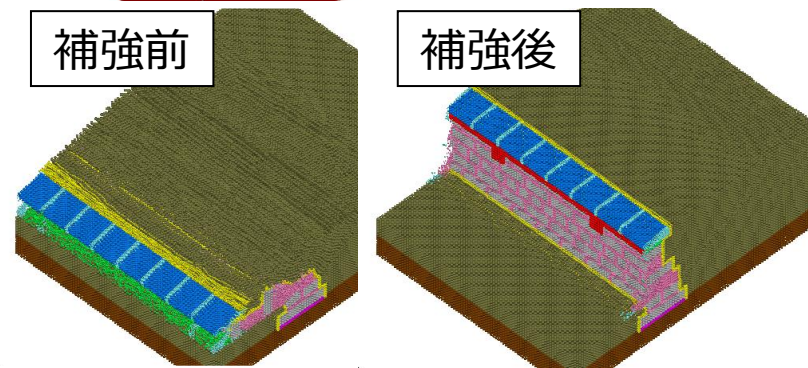
日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生



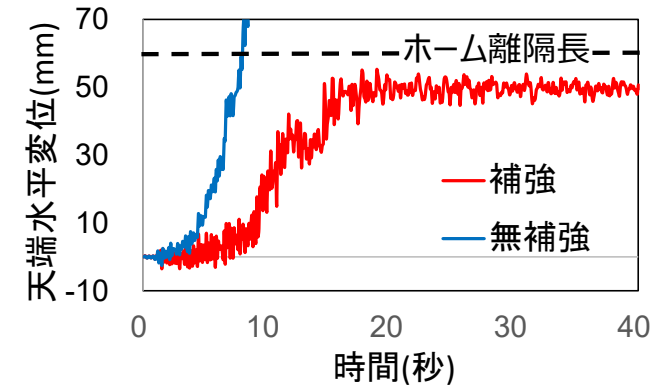
正弦波450gal加振後

正弦波800gal加振後

1/3スケールの模型実験結果¹⁴⁾



設計地震動850gal加振後 (数値シミュレーション)¹⁵⁾

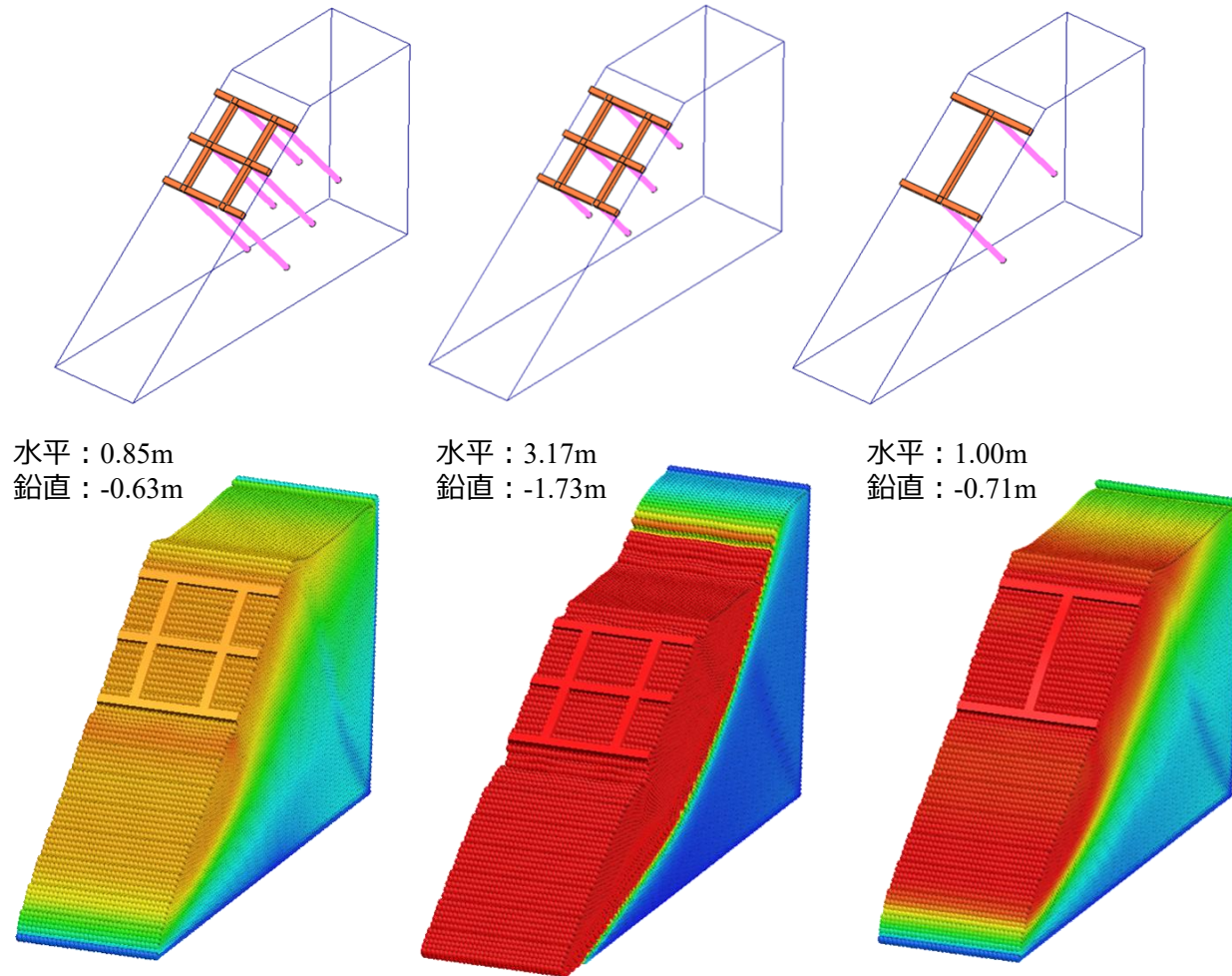


- 14) 滝沢聡, 野本将太, 阿部慶太, 中島進, 高崎秀明, 山本忠: 組積構造の盛土式乗降場の耐震補強に関する実験的研究, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.76, No.4, pp.L_571-L_581, 2021.
- 15) 阿部 慶太, 野本 将太, 中島 進, 滝沢 聡, 高崎 秀明, 山本 忠: 無補強・補強時の組積構造の盛土式乗降場の耐震性能に関する解析的研究, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学) 76(4) L_430-L_440, 2020.

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

盛土の耐震補強への応用¹⁶⁾



16) 桐山貴俊：数式のない土木の数値解析 第5回 粒子法による地盤大変形問題への適用，土木学会誌，Vol.102，No.5，2017.

粒子法を用いた
地盤の大変形
解析に関する
一連の研究

MPMによる地盤の大変形解析事例

session3-01

MPMによる地盤の大変形解析に向けたモデル化

session3-02

地震時での地盤の大変形現象に対する解析事例

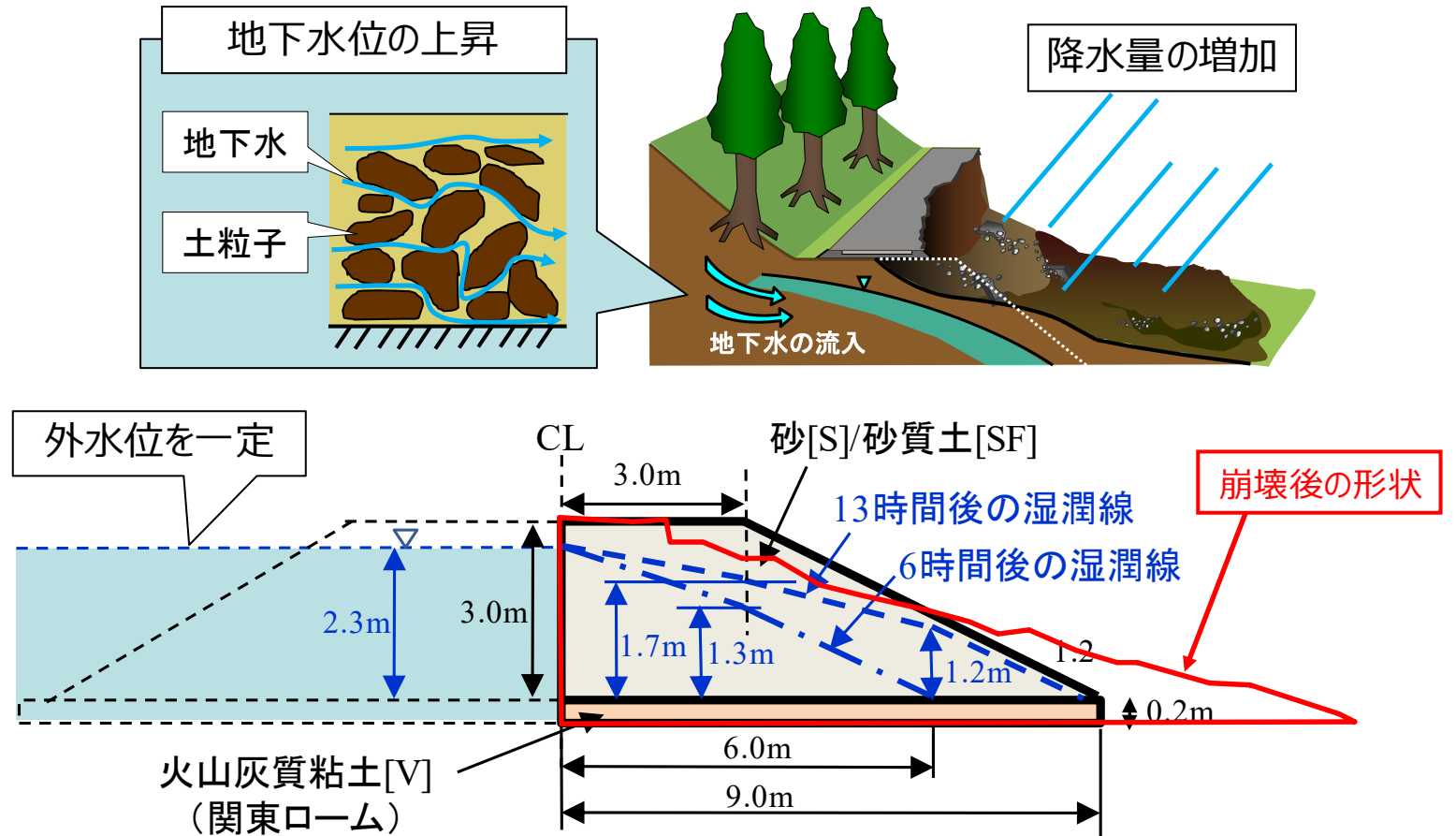
session3-03

降雨時での地盤の大変形現象に対する解析事例

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

MIDAS
CONSTRUCTION
TECHNICAL
SEMINAR



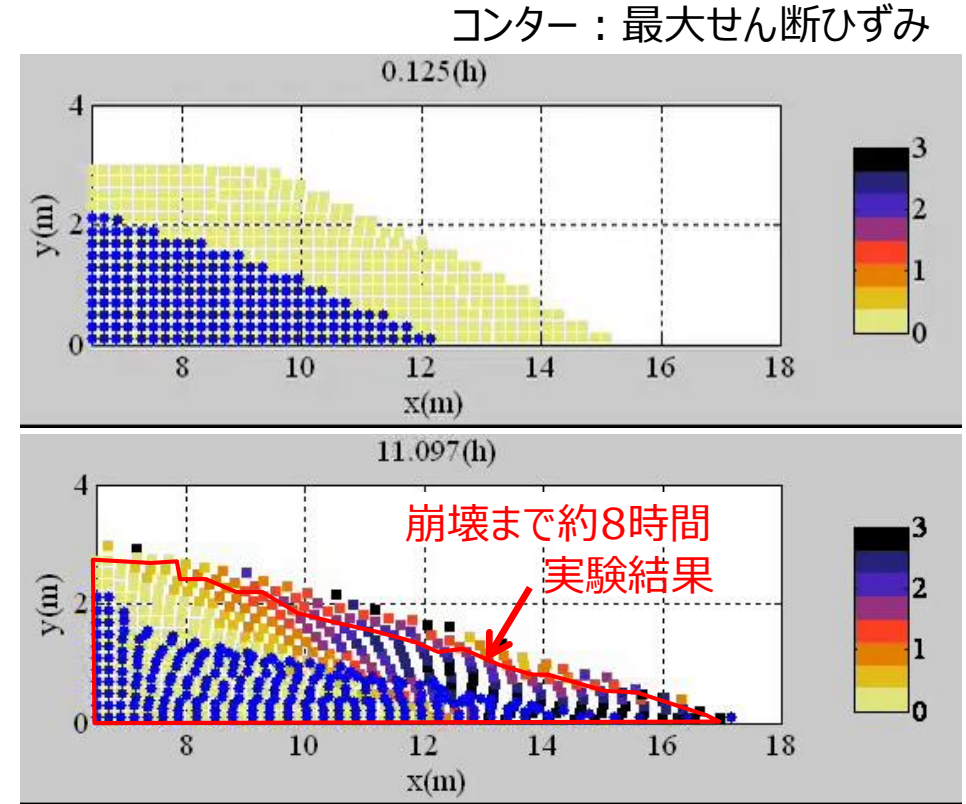
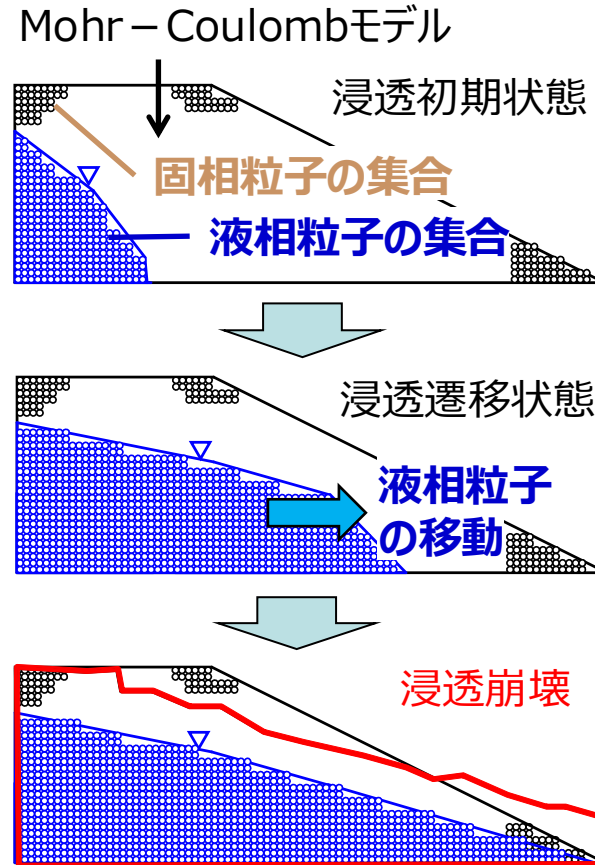
盛土の浸透破壊実験¹⁷⁾

17) 伊勢野暁彦, 小橋秀俊, 古本一司, 森啓年, 大野真希: のり尻ドレーン工法を用いた河川堤防の浸透強化対策に関する大型模型実験, 第39回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1255-1256, 2004

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

MIDAS
CONSTRUCTION
TECHNICAL
SEMINAR



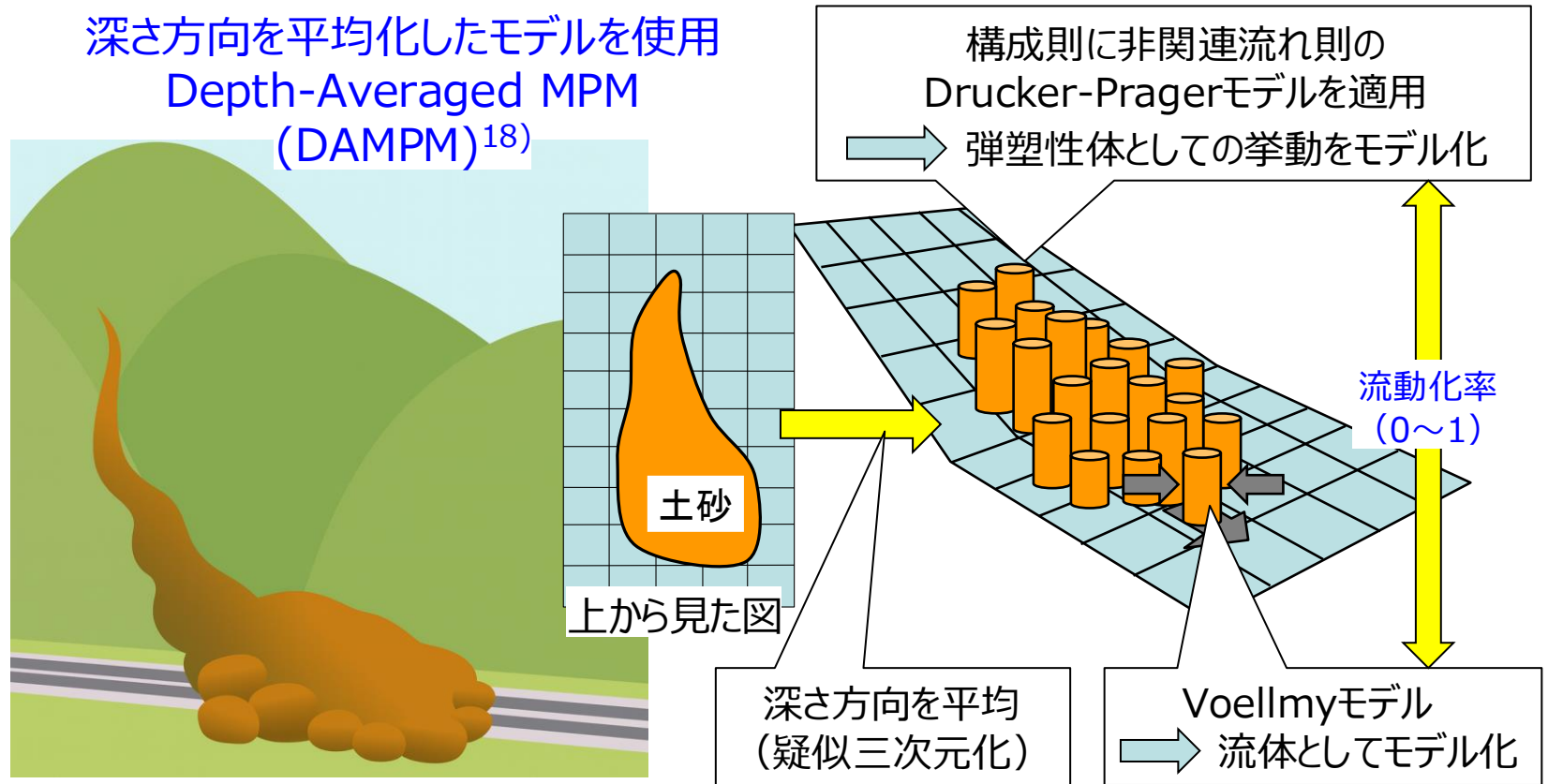
不飽和特性, パイピングのモデル化は課題

6) Abe, K., Soga, K. and Bandara, S. (2014): "Material Point Method for Coupled Hydromechanical Problems," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.140, No.3, pp 04013033.

土石流への適用

土石流 → 複雑な地形を高速で流下し、平地部に土砂が大きく広がり被害を拡大

深さ方向を平均化したモデルを使用
Depth-Averaged MPM
(DAMPM)¹⁸⁾



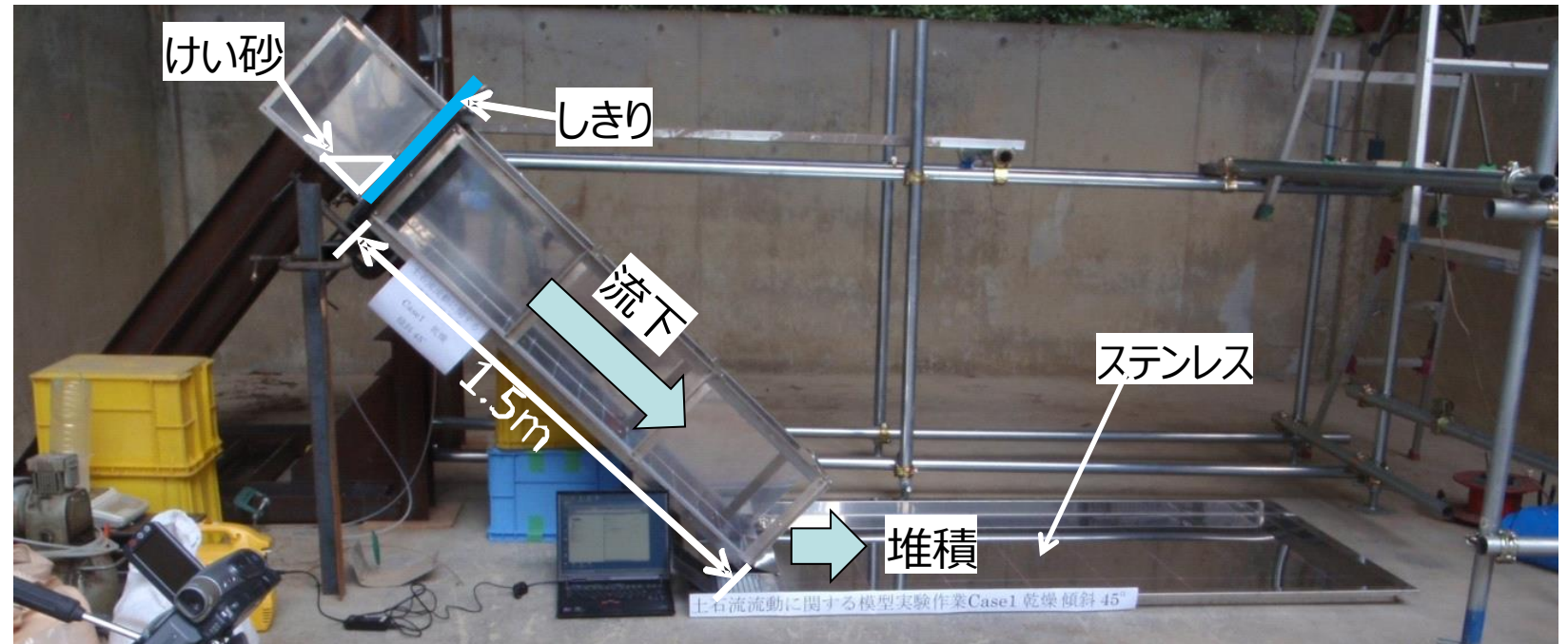
18) Abe, K. and Konagai, K. (2016): "Numerical simulation for runout process of debris flow using depth-averaged material point method," Soils and Foundations, Vol.56, No.5, pp.869-888.

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

土石流への適用

乾燥砂と飽和砂の模型流動実験¹⁸⁾



- 乾燥砂または飽和砂で実施
- 流路勾配を30°または45°で実施

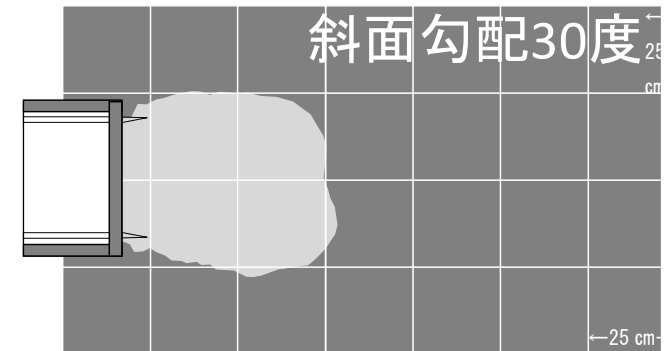
乾燥砂の物性
内部摩擦角：約37°（ピーク強度）
変形係数：2.5～5.0MN/m²

18) Abe, K. and Konagai, K. (2016): "Numerical simulation for runout process of debris flow using depth-averaged material point method," Soils and Foundations, Vol.56, No.5, pp.869-888.

土石流への適用

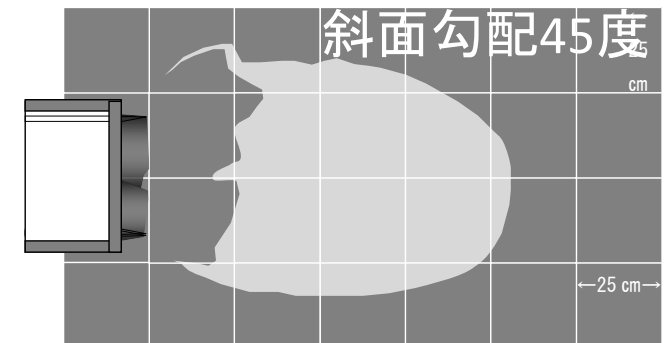
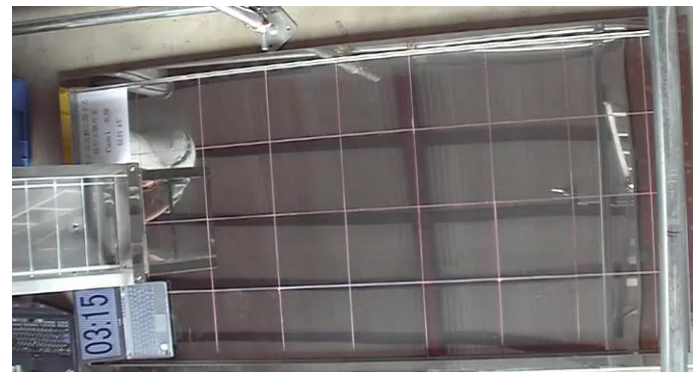
実験結果¹⁸⁾ (乾燥砂)

流路勾配
30°



流路直下に堆積

流路勾配
45°

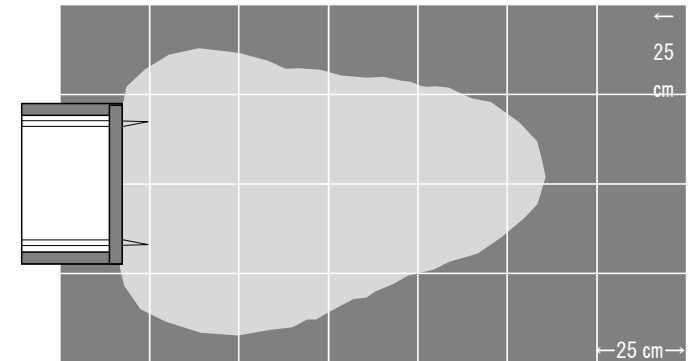
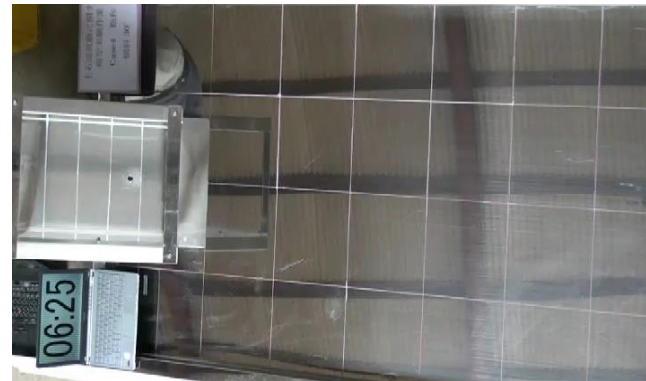


流路から離れて堆積

18) Abe, K. and Konagai, K. (2016): "Numerical simulation for runout process of debris flow using depth-averaged material point method," Soils and Foundations, Vol.56, No.5, pp.869-888.

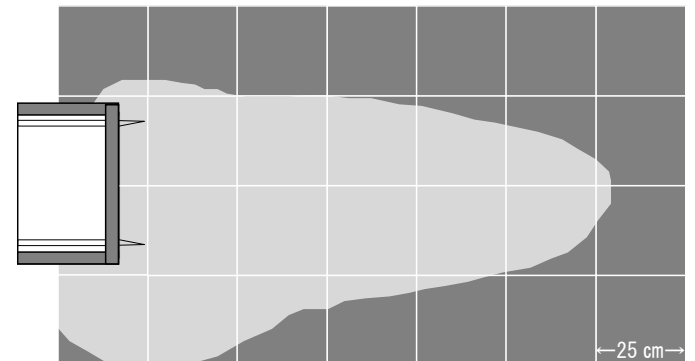
実験結果¹⁸⁾ (飽和砂)

流路勾配
30°



全体的に広がるように堆積

流路勾配
45°



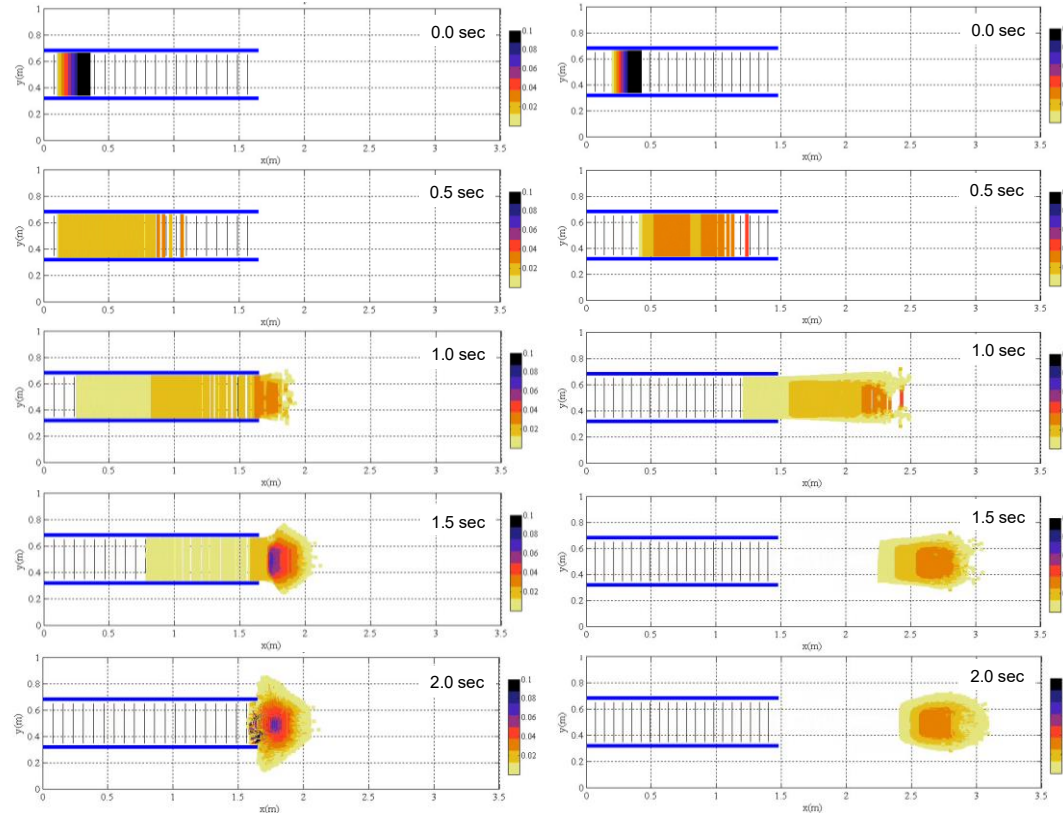
流路勾配の違いの影響が小さい

18) Abe, K. and Konagai, K. (2016): "Numerical simulation for runout process of debris flow using depth-averaged material point method," Soils and Foundations, Vol.56, No.5, pp.869-888.

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

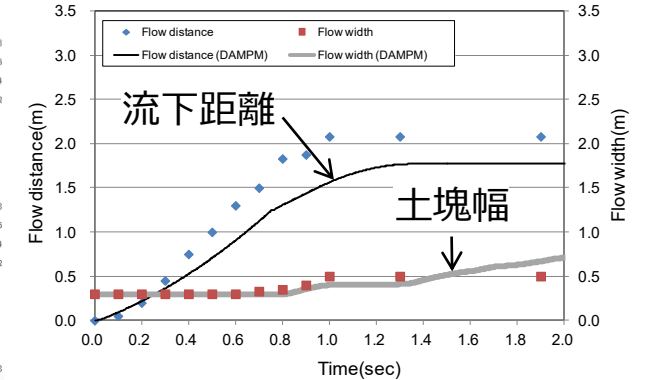
日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

乾燥砂ケースの解析結果¹⁸⁾ → 流下速度と堆積状況を再現

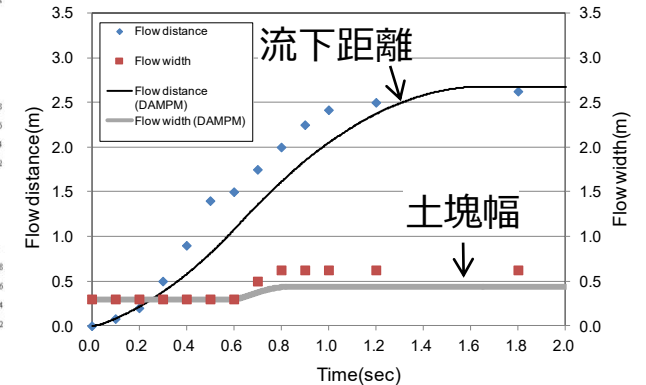


流路勾配30度

流路勾配45度



流路勾配30度



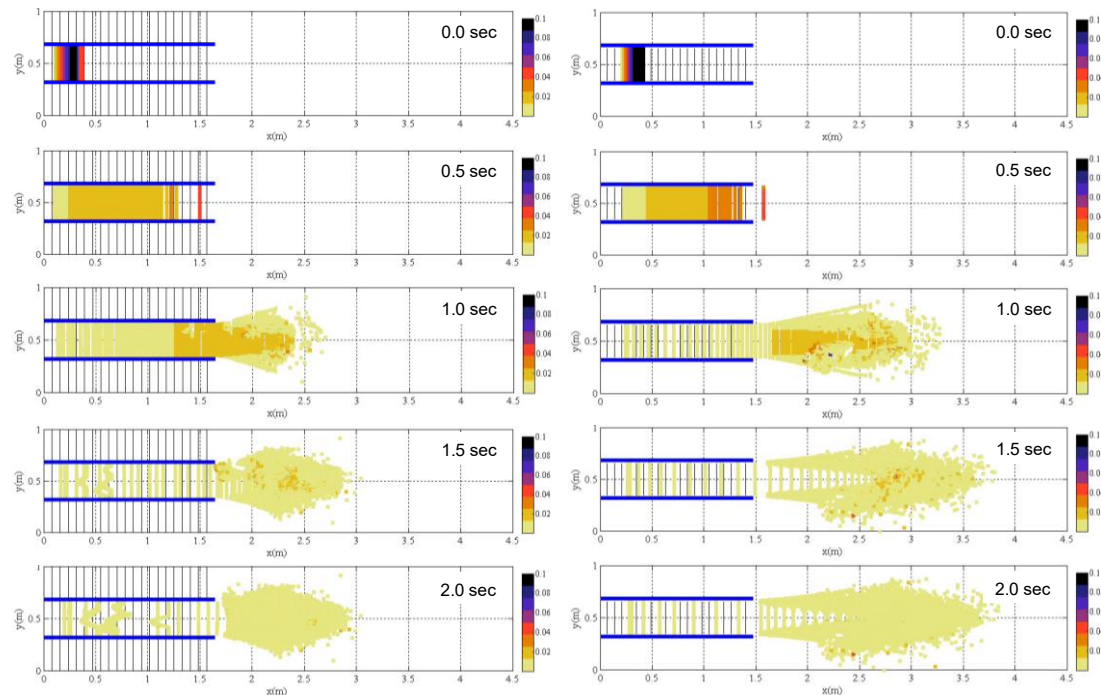
流路勾配45度

18) Abe, K. and Konagai, K. (2016): "Numerical simulation for runout process of debris flow using depth-averaged material point method," Soils and Foundations, Vol.56, No.5, pp.869-888.

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

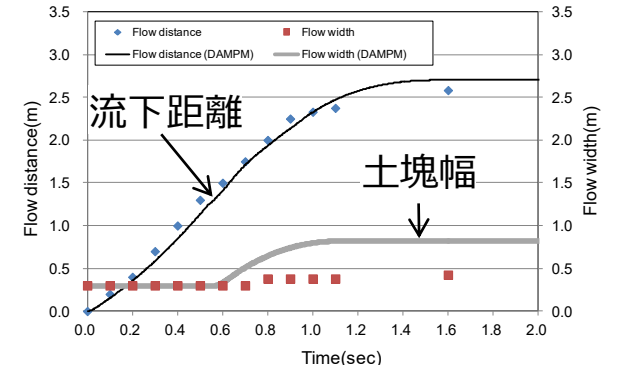
日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

飽和砂ケースの解析結果¹⁸⁾ → 流下速度と堆積状況を再現

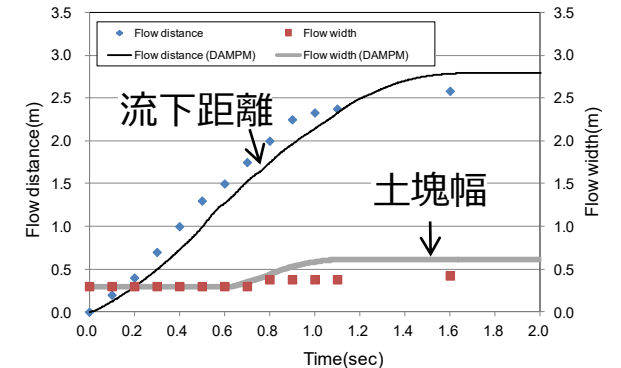


流路勾配30度

流路勾配45度



流路勾配30度



流路勾配45度

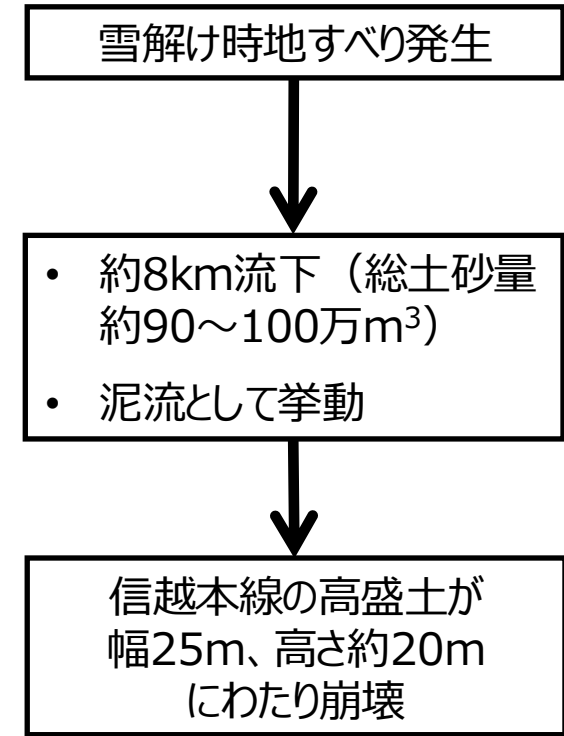
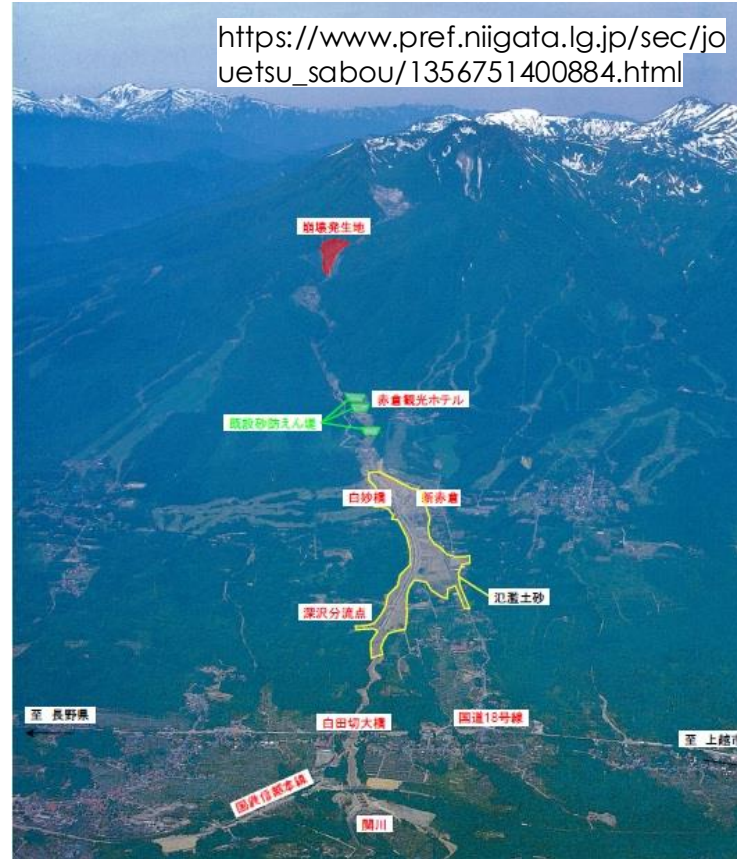
18) Abe, K. and Konagai, K. (2016): "Numerical simulation for runout process of debris flow using depth-averaged material point method," Soils and Foundations, Vol.56, No.5, pp.869-888.

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

土石流への適用

信越本線妙高高原・関山間土石流(1978)のシミュレーション¹⁸⁾

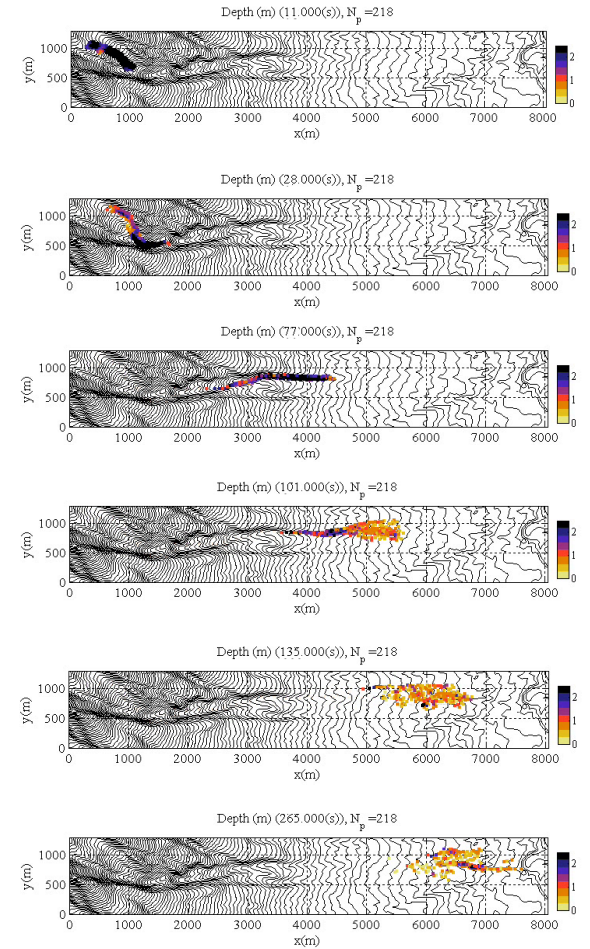
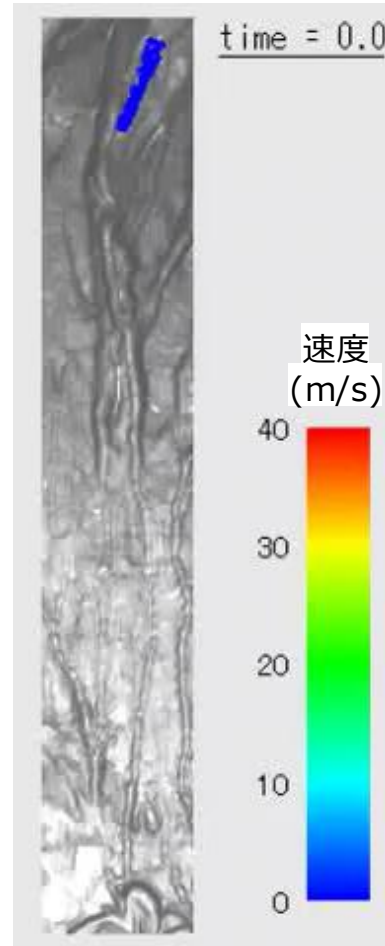
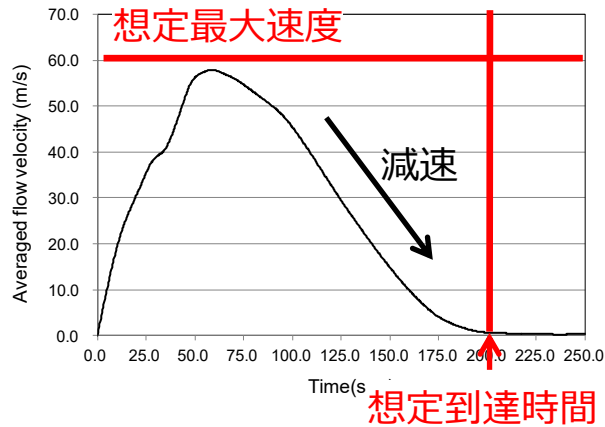
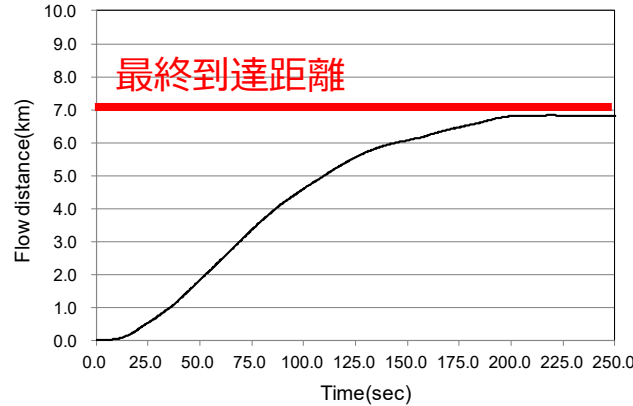


18) Abe, K. and Konagai, K. (2016): "Numerical simulation for runout process of debris flow using depth-averaged material point method," Soils and Foundations, Vol.56, No.5, pp.869-888.

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

シミュレーション結果¹⁸⁾



18) Abe, K. and Konagai, K. (2016): "Numerical simulation for runout process of debris flow using depth-averaged material point method," Soils and Foundations, Vol.56, No.5, pp.869-888.

土石流への適用

砂防堰堤効果に関するシミュレーション¹⁹⁾



砂防堰堤無し

砂防堰堤有り

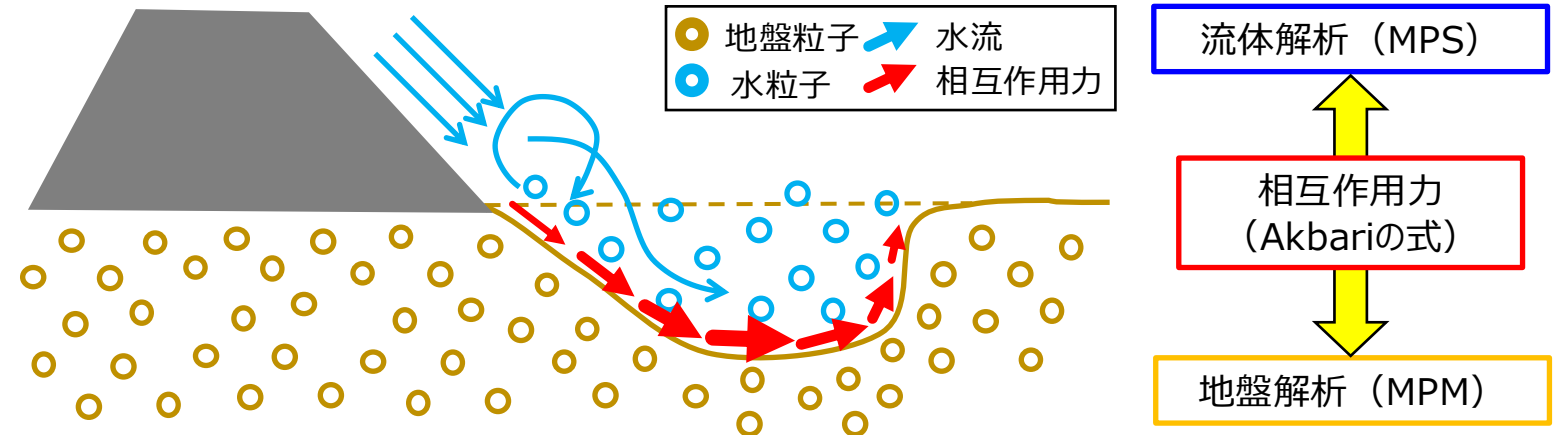
土石流対策のシミュレーションによる見える化

19) 阿部慶太, 川越健, 田中宏樹, 塩見和利 (2016): 砂防ダムの影響を考慮した土石流流動シミュレーション, 土木学会第71回年次学術講演会講演概要集, pp.705-706.

越流・洗掘への適用



流体が得意なMPSと地盤が得意なMPMを連成



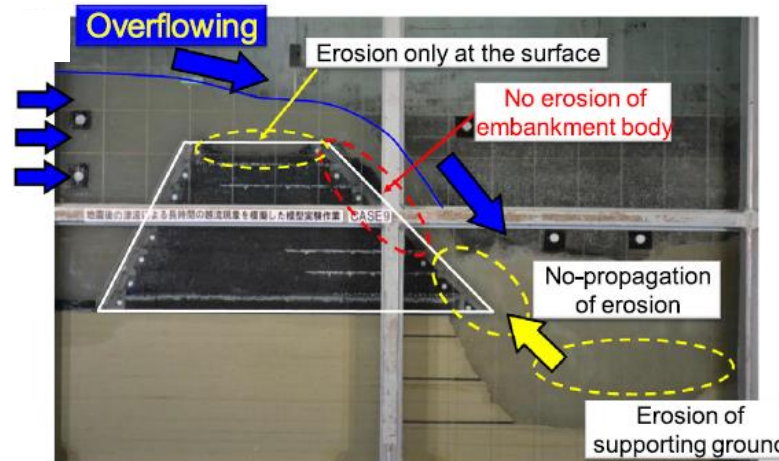
20) Tokida K., Tanimoto R.: Lessons for countermeasures using earth structures against tsunami obtained in the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Soils and Foundations*, 54(4), pp.523-543, 2014.

21) Yasuda S., Shimizu Y., Deguchi K.: Investigation of the mechanism of the 2015 failure of a dike on Kinu River, *Soils and Foundations*, 56(4), pp. 581-592, 2016.

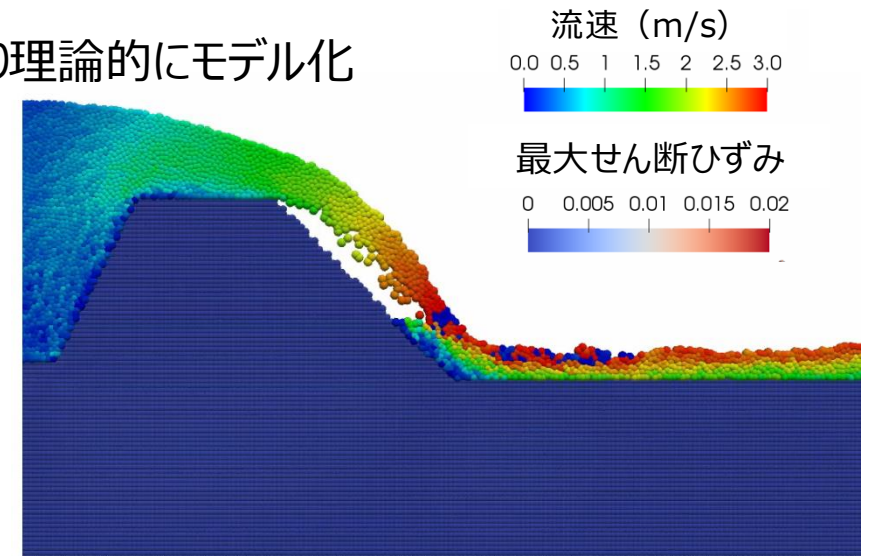
越流・洗掘への適用

MPM-MPS連成解析手法による越流洗掘実験のシミュレーション

- 水の流れ⇒MPS法によりナビエ-ストークス式を陽に計算
- 土の変形⇒MPMにより大変形時まで計算
- 水と土の相互作用力⇒Akbari式により理論的にモデル化



実験結果²²⁾



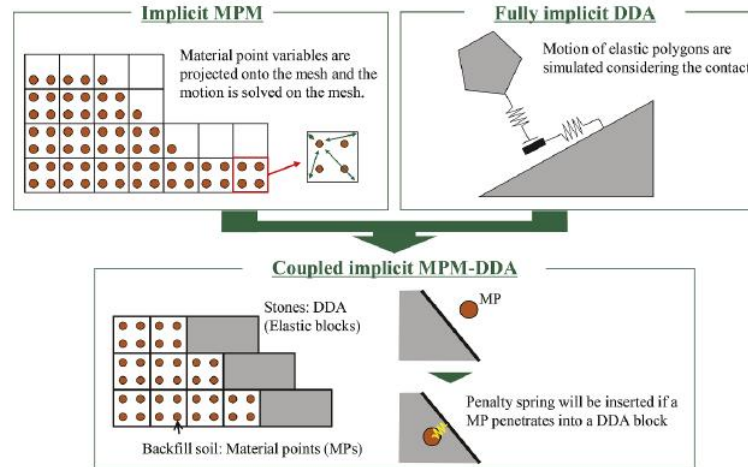
解析結果²³⁾

- 22) Watanabe, K., Nakajima, S., Fujii, K., Matsuura, K., Kudo, A., Nonaka, T., Aoyagi, Y. : Development of geosynthetic-reinforced soil embankment resistant to severe earthquakes and prolonged overflows due to tsunamis, Soils and Foundations, Vol. 60, No. 2 , 1317-1386, 2020.
- 23) Abe, K., Murotani, K. and Watanabe, K. : Development of MPM-MPS coupling method and numerical analysis of scouring of embankment caused by overflow, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM)), Vol. 76, No. 2 , I_205-I_216, 2020.

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

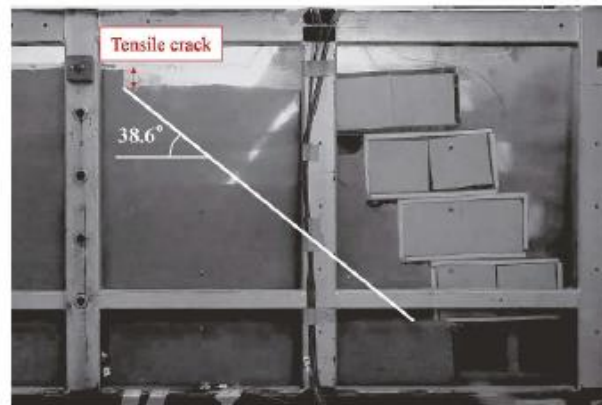
MPM以外の方法とのハイブリッド



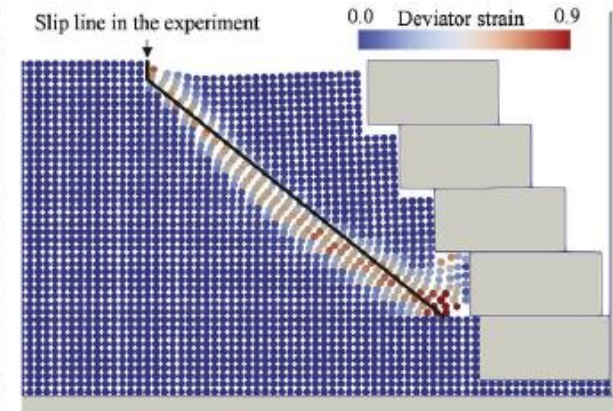
MPMとDDAを組み合わせた方法²⁴⁾



連続体ベースのMPMではモデル化困難な剛体をDDAでモデル化



(a) Experiment



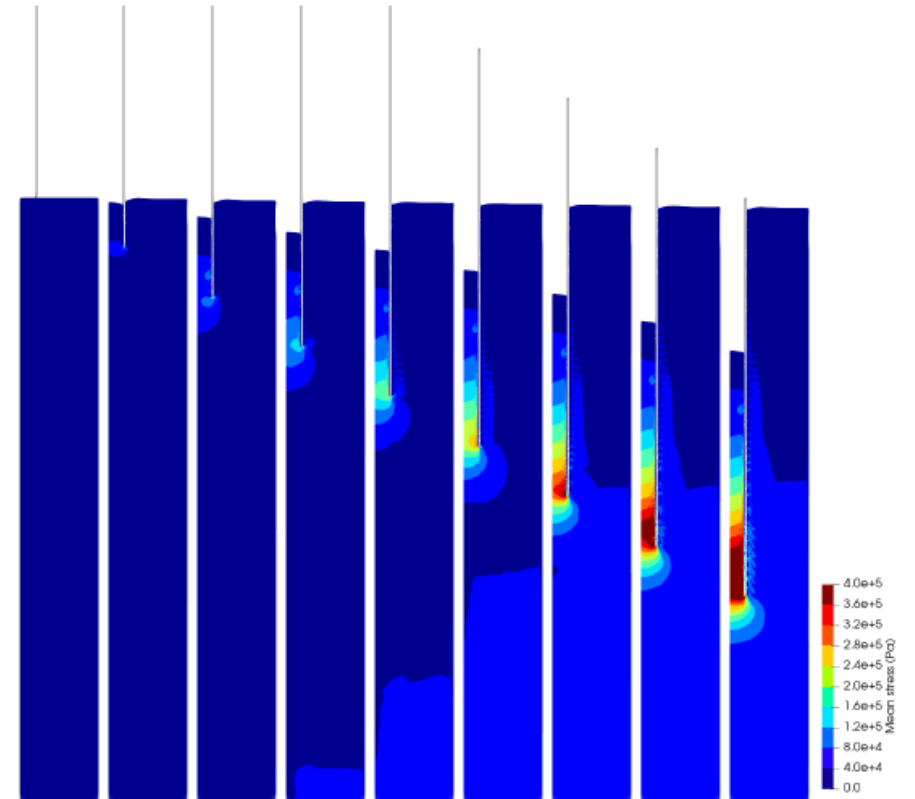
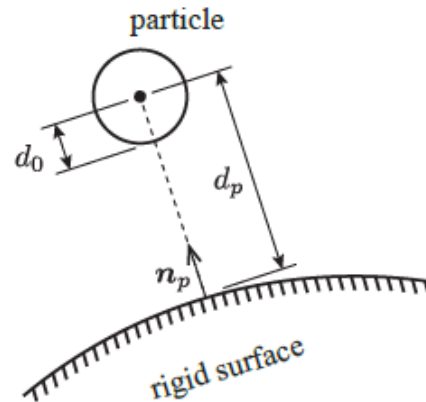
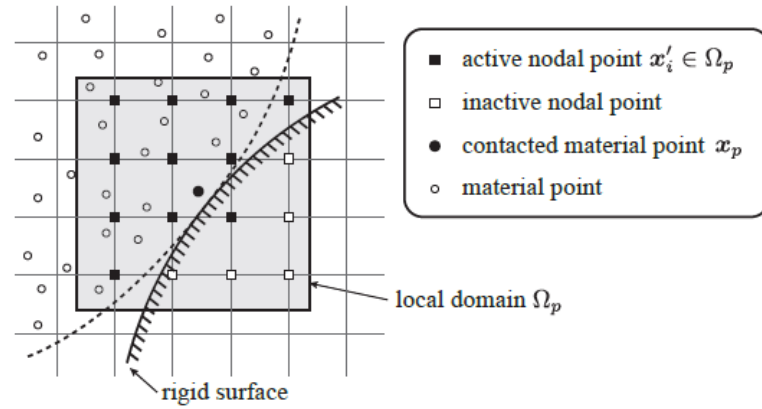
(b) Deviator strain contour by the MPM-DDA

24) Kawano, S. and Hashimoto, R.: Shaking analysis of masonry wall in large deformation range using coupled MPM-DDA, Smart Geotechnics for Smart Societies – Zhussupbekov, Sarsembayeva & Kaliakin (Eds)© 2023 The Author(s), ISBN 978-1-003-29912-7 Open Access: www.taylorfrancis.com, CC BY-NC-ND 4.0 license

粒子法を用いた
地盤の大変形解析に
関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

MPM以外の方法とのハイブリッド



MPMとDEMを組み合わせた方法²⁵⁾

25) 中村圭太, 松村聡, 水谷崇亮: MPM-剛体シミュレーションのための最小二乗法を用いた摩擦接触アルゴリズムの開発と開端杭の地盤への貫入挙動への適用, 港湾空港技術研究所報告, 第60巻第1号, 2021.

SESSION

4

まとめと今後の展望

地盤の大変形解析に関する今後について

粒子法を用いた地盤の大変形解析に関する一連の研究 日本大学工学部 土木工学科 阿部 慶太

粒子法を用いた 地盤の大変形解析に 関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

まとめ

1. 近年、地震、豪雨による地盤の大変形現象が発生しており、これらを詳細に解析するための手法が求められている。
2. 粒子法は、有限要素法や個別要素法などの従来の解析方法が有する地盤の大変形解析をする上で不利な点をカバーする上で有用な解析手法である。
3. 粒子法の中でも、MPMは取り扱いやすさから地盤の大変形解析への適用が増加している。
4. MPMを地盤へ適用するためには、構成則、減衰、地下水（間隙水圧）などのモデル化が必要になる。
5. 土石流など規模が大きい現象に対しては、疑似三次元モデルで解析する方法も考えられる。
6. 洗掘の解析などでは、異なる粒子法の組み合わせが行われている。

粒子法を用いた 地盤の大変形解析に 関する一連の研究

日本大学
工学部土木工学科
阿部 慶太 先生

今後について

1. 地震、豪雨の増加に伴い、今後、さらに地盤の大変形解析の需要は伸びてくると考えられる。
2. 地盤大変形時の土の挙動は複雑で未解明な部分が多くあることから、解析と併せて、実験的研究の発展とともに、AIを活用したデータサイエンスの応用が重要であると考えられる。
3. 地盤大変形時の土の挙動に関する研究の進捗に併せ、構成則や間隙水圧のモデルの発展、それらの粒子法への適用が重要であると考えられる。
4. MPMは計算負荷が大きいため、並列計算（MPI、GPGPUなど）が重要であり、これらの分野の発展が重要である。
5. 構造物と地盤間のモデル化などに必要なインターフェイスのモデル化が、現状のMPMで特に求められている。

**ご清聴
ありがとうございました。**

粒子法を用いた地盤の大変形解析に関する一連の研究
日本大学工学部 土木工学科 阿部 慶太