

令和 5 年 5 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14671

研究課題名（和文）大規模データ同化に基づく乾燥亀裂の素過程の理解と解明

研究課題名（英文）Understanding the elementary process of desiccation cracks based on large-scale data assimilation

研究代表者

伊藤 伸一（Ito, Shin-ichi）

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：10756331

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：水と粉の混合物（ペースト）が乾燥してできる破壊パターンは干上がった水田や水たまりなどで日常的に観測される。乾燥が進む中で、水の蒸発と粉体粒子の再配置に伴って、ペーストの硬さや脆さなどは時間変化するうえに、空間的に不均一になる。本研究課題では、そのような空間不均一性を可視化を通じて不均一性と破壊過程関係を理解するため、乾燥亀裂パターンのシミュレーションモデルと実験計測データを融合する大規模データ同化技術を開発を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

破壊現象は我々にとって身近な現象であり、その予測・制御技術の開発は学術的にも社会的にも大きな意義を持つ。破壊の進展に伴って形成される亀裂パターンは破壊される物質の硬さや脆さなどの空間的に不均一な物性値に大きく依存する。そのようなパターン形成と物性値空間不均一性を定量化することは破壊進展の予測や制御への基礎的な知見となる。本研究は亀裂パターンのシミュレーションと実験計測データを融合する大規模データ同化の枠組みを開発することにより破壊現象の背後にある空間不均一性を評価する技術を創出する基盤研究となる。

研究成果の概要（英文）：The crack patterns that occur when a mixture of water and powder (paste) dries are commonly observed. As drying progresses, the hardness and brittleness of the paste change over time due to the evaporation of water and the rearrangement of powder particles, becoming spatially non-uniform. This research project developed a large-scale data assimilation technique to integrate simulation models of drying crack patterns and experimentally measured data in order to understand the relationship between heterogeneity and fracture processes through visualisation of such spatial heterogeneity.

研究分野：ソフトマター、データ同化、ベイズ統計、計算物理

キーワード：破壊 乾燥亀裂 不均一性 フェーズフィールドモデル データ同化 深層学習 PINN PIV

## 1. 研究開始当初の背景

水と粉の混合物(ペースト)が乾燥してできる破壊パターンは干上がった水田や水たまりなどで日常的に観測される。乾燥が進む中で、水の蒸発と粉体粒子の再配置に伴って、ペーストの硬さや脆さなどは時間変化するうえに、空間的に不均一になる。この不均一性は亀裂の発展の仕方に強く影響を与えるが、既存の実験技術のみで不均一性を計測することは困難であった。そこで本研究では、乾燥亀裂パターンのシミュレーションモデルと実験計測データを融合する大規模データ同化技術を用いて、空間不均一性を可視化する新規解析技術を創出することで、不均一性と破壊素過程の関係を明らかにする。

## 2. 研究の目的

液体と粉体の混合液の乾燥破壊では、水の蒸発と粉体粒子の再配置に伴いヤング率や降伏応力などの物性パラメータが時空間で変化しながら不均一に分布する。この不均一性は亀裂進展の動力学に強く影響を与えるが、既存の実験技術のみで不均一性を計測することは難しい。そこで本研究では乾燥破壊の数値モデルと計測データを大規模データ同化技術で融合し、物性パラメータの空間不均一性を可視化する新規解析技術の確立を主たる目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究目的を達成するために、以下のように実験解析・シミュレーションモデル開発・データ同化技術開発の3軸を総合して研究を進める。

### (1) 乾燥破壊実験

図1のように、質量計に乗せた試料を乾燥させその過程をデジタルカメラによるインターバル撮影する。質量計はPCに接続され、亀裂写真の撮影時刻と同期された質量の時系列を測定する。また、PCに接続された温湿度計により温湿度の時系列データも同時に測定する。この実験により乾燥過程に伴う亀裂進展の様子と質量の変化を同時計測が可能となり、系の密度変化と亀裂進展が紐付けられた一連の時系列データを取得できる。また、マーカ粒子を散布した系を乾燥させマーカ粒子の軌跡を解析することで表面変位場の時系列データも取得する。

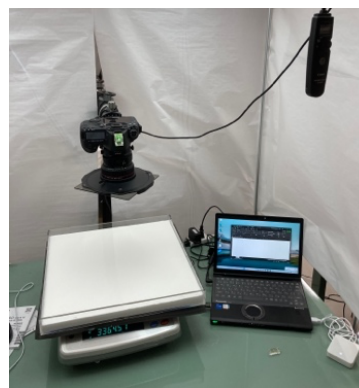


図1：実験のセットアップ

### (2) シミュレーションモデル開発

液体と粉体の混合液の乾燥破壊では、水の蒸発と粉体粒子の再配置に伴いヤング率や降伏応力などの物性パラメータが時空間で変化しながら不均一に分布する。このことを考慮し、物性不均一性を取り入れた乾燥破壊のシミュレーションモデルを開発する。モデル化のためにはフェーズフィールド(PF)法によるモデリングを実施する。PF法では亀裂を空間連続な場の量として表現することで、亀裂が発生・進展することによる系のエネルギー収支に基づいて系の時間発展が記述される。また本研究では物性不均一性も場の量としてエネルギー関数に組み込むことで、物性不均一性を考慮した乾燥破壊のシミュレーションモデルの開発を目指す。

### (3) データ同化技術開発

研究(1)(2)で得られたデータとシミュレーションモデルを統合するデータ同化法の技術開発を行う。研究(2)で開発されるシミュレーションのモデルの規模を考慮し、用いるデータ同化法として4次元変分法やPhysics-informed neural networks(PINNs)を想定している。これらは大規模シミュレーションモデルにおいて計算量の観点から他のデータ同化法と比べ本研究に適していると考えられる。

## 4. 研究成果

本研究で得られた成果を3.研究の方法で挙げた方法ごとにまとめる。

### (1) 乾燥破壊実験

実験研究を加速させることを目的として新規に高解像カメラとレンズを導入した。これにより詳細な亀裂画像を広域で撮影できるようになった上、領域サイズ・密度・厚さなどの実験パラメータを変化させた亀裂パターンの時間発展のスナップショットデータを多く拡充することができた。また、これまでは亀裂画像解析のために手作

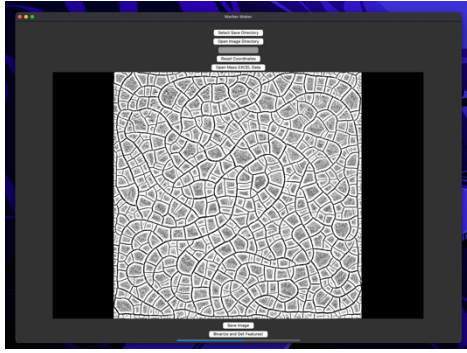


図 2 : 解析アプリケーション

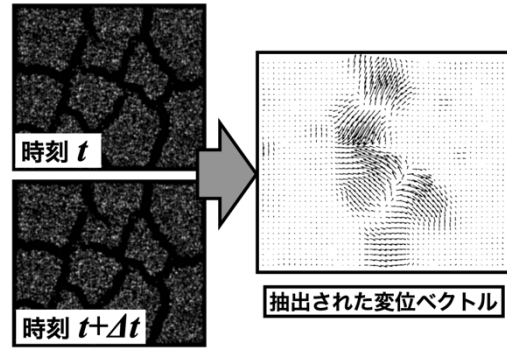


図 3 : PIV による変位場撮像結果

業の前処理が必要になっていたが実験データの蓄積に伴いこれが困難になったため、これまでに開発してきた画像解析プログラムを統合し自動化・アプリ化した(図 2)。これにより手作業の前処理が必要なくなったことで解析コストを削減することができ、実験解析が大きく進展した。さらに、変位場時系列データについては、粒子画像流速測定法(PIV)により、マーカ粒子を含んだ 2 つの異なるパターン写真の差分を解析することで取得が可能となった(図 3)。

(2) シミュレーションモデル開発

PF 法に基づき、物性不均一性を取り入れた乾燥破壊のシミュレーションモデルを開発した。PF 法では、亀裂を 0 から 1 の間を取る オーダーパラメータの空間場  $\phi$  としてモデル化し、変位場  $u$  と  $\phi$  の汎関数として定義された系全体の自由エネルギーの変分計算から  $u$  と  $\phi$  の発展方程式を得る(図 4)。PF 法では、自由エネ

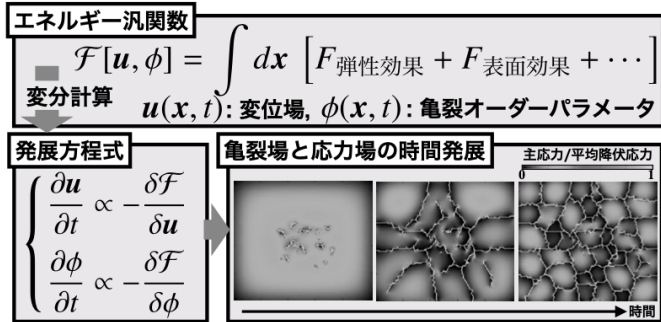


図 4 : PF 法によるモデリングの概要

ルギーが減少するように現象が進み、数値計算で利用するメッシュ形状に依存しない自然な亀裂進展の表現を可能にする。さらに本研究では、水の蒸発と粉体粒子の再配置に伴い局所的な物性値が空間依存することを考慮し、表面エネルギー項にその効果を取り入れた。これにより空間不均一性を取り込んだ乾燥破壊の数値モデリングが達成された。

(3) データ同化技術開発

本研究では研究(1)(2)で得られたデータとシミュレーションモデルを統合するデータ同化法の技術開発を行った。研究期間の前半では 4 次元変分法によるデータ同化法の開発を試みた。4 次元変分法とは天気予報などの大規模シミュレーションモデルを扱う分野で用いられるデータ同化法であり、シミュレーションモデルとは別にアジョイントモデルと呼ばれるモデルを作成しそれに基づきシミュレーションモデルパラメータの推定・評価を行う手法である。研究②で得られたシミュレーションモデルに対してアジョイントモデルを作成し検証したところ、パラメータによっては系が不安定化することが確かめられた。一般にシミュレーションモデルが解けるとしてもアジョイントモデルが安定的に解けるかどうかは自明ではなく、本シミュレーションモデルにおいても何らかのモデル特有の数理構造がアジョイントモデルの不安定性を励起していると考えられる。今後この不安定性について詳細な調査が必要である。これを受けて、研究期間の後半では PINNs によるデータ同化法の開発研究に移行した。PINNs は近年開発されたニューラルネットワークに基づく逆問題解法の 1 つで、系に登場する変数をニューラルネットワークの出力として表現し、その重みパラメータを出力変数が系の発展方程式および観測データと合うように最適化を行うことで、モデルの解と未知モデルパラメータの同時推定を行う手法である。本研究では、PINNs で亀裂を表現する適切な符号化を導入することで、図 5 のような亀裂パターンを再現することが可能となった。

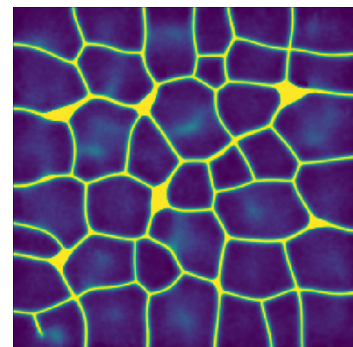


図 5 : PINNs の結果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 S. Ito, T. Matsuda, and Y. Miyatake	4. 巻 -
2. 論文標題 Adjoint-based exact Hessian computation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 BIT Numerical Mathematics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10543-020-00833-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 R. Anzaki, S. Ito, H. Nagao, M. Mizumaki, M. Okada, and I. Akai	4. 巻 103
2. 論文標題 Phase prediction method for pattern formation in time-dependent Ginzburg-Landau dynamics for kinetic Ising model without a priori assumptions of domain patterns	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.103.094408	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Ito Shin-ichi, Kano Masayuki, Nagao Hiromichi	4. 巻 232
2. 論文標題 Adjoint-based uncertainty quantification for inhomogeneous friction on a slow-slipping fault	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 671 ~ 683
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggac354	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Morikawa Kosuke, Nagao Hiromichi, Ito Shin-ichi, Terada Yoshikazu, Sakai Shin'ichi, Hirata Naoshi	4. 巻 226
2. 論文標題 Forecasting temporal variation of aftershocks immediately after a main shock using Gaussian process regression	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1018 ~ 1035
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggab124	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ito Shin-ichi, Nagao Hiromichi, Kurokawa Takashi, Kasuya Tadashi, Inoue Junya	4. 巻 3
2. 論文標題 Bayesian inference of grain growth prediction via multi-phase-field models	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.3.053404	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計25件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 S. Ito, M. Kano, and H. Nagao
2. 発表標題 Adjoint-based Uncertainty Quantification of Frictional Inhomogeneity on Slow-Slipping Fault
3. 学会等名 AOGS 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤伸一, 中原明生, 湯川諭
2. 発表標題 乾燥亀裂パターンの動的統計則に現れる相転移的性質
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤伸一, 松田孟留, 宮武勇登
2. 発表標題 シンプレクティックアジョイント法に基づく高精度不確実性評価法
3. 学会等名 統計関連学会連合大会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤伸一, 加納将行, 長尾大道
2. 発表標題 Adjoint-based uncertainty quantification of frictional inhomogeneity on slow-slipping fault
3. 学会等名 JpGU 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤伸一, 加納将行, 長尾大道
2. 発表標題 変分法データ同化に基づく断層すべり面の摩擦特性空間分布の不確実性評価
3. 学会等名 統計関連学会連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Ito, M. Kano, and H. Nagao
2. 発表標題 Uncertainty quantification based on 4DVar data assimilation for massive simulation models
3. 学会等名 JpGU (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Ito, H. Nagao, T. Kurokawa, T. Kasuya, and J. Inoue
2. 発表標題 Bayesian inference of grain growth prediction via multi-phase-field models
3. 学会等名 JpGU (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Ito
2 . 発表標題 Uncertainty quantification for massive simulation models based on a second-order adjoint method
3 . 学会等名 A3 Soft Matter Workshop 2019 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Ito and H. Nagao
2 . 発表標題 Uncertainty quantification based on 4DVar data assimilation for massive simulation models
3 . 学会等名 FSP2019: Frontiers of Statistical Physics ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Ito, H. Nagao, T. Kurokawa, T. Kasuya, and J. Inoue
2 . 発表標題 Bayesian Inference of Grain Growth Prediction via Multi-Phase-Field Models
3 . 学会等名 AOGS ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Ito, M. Kano, and H. Nagao
2 . 発表標題 Uncertainty quantification based on 4DVar data assimilation for massive simulation models
3 . 学会等名 StatSei11 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Ito
2. 発表標題 Detection of dynamic transition in drying crack patterns based on Bayesian model selection
3. 学会等名 Seminar of joint research: Royal Society/JSPS collaboration project (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Ito, H. Nagao, T. Kurokawa, T. Kasuya, and J. Inoue
2. 発表標題 Bayesian inference of grain growth prediction via multi-phase-field models
3. 学会等名 NIMS WEEK 2019 Academic Symposium Poster Session (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Ito, M. Kano, and H. Nagao
2. 発表標題 Uncertainty quantification for inhomogeneous frictional features in a slow-slipping fault based on a large-scale four-dimensional variational data assimilation
3. 学会等名 American Geophysical Union(AGU) 2019 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤伸一
2. 発表標題 乾燥亀裂パターンの動的スケーリング則と統計的モデリング
3. 学会等名 日大理工・船橋セミナー (招待講演)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 伊藤伸一, 中原明生, 湯川諭
2. 発表標題 乾燥破壊パターンにおける破片サイズ分布のモデル選択
3. 学会等名 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤伸一, 加納将行, 長尾大道
2. 発表標題 大規模 4 次元変分法データ同化に基づくスロースリップ断層面における摩擦特性不均一性の不確実性評価
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤伸一, 松田孟留, 宮武勇登
2. 発表標題 Adjoint-based exact Hessian-vector multiplication using symplectic Runge-Kutta methods
3. 学会等名 固体地球データ同化に関する研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Ito
2. 発表標題 Grain growth prediction based on data assimilation implementing 4DVar on multi-phase-field models
3. 学会等名 StatPhys Seminar (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Ito, T. Matsuda, and Y. Miyatake
2. 発表標題 Symplectic-adjoint-based Uncertainty Quantification Method for Large-scale Data Assimilation Problems
3. 学会等名 AOGS 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤伸一, 加納将行, 長尾大道
2. 発表標題 シンプレクティックアジョイント法に基づくスロースリップ断層面の摩擦不均一性の不確実性評価
3. 学会等名 日本地震学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤伸一
2. 発表標題 Second-order adjoint 法の数理と応用
3. 学会等名 統計数理研究所 諸科学集会 諸科学における統計思考 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤伸一, 松田孟留, 宮武勇登
2. 発表標題 Symplectic-adjoint-based uncertainty quantification method for large-scale data assimilation problems
3. 学会等名 JpGU 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤伸一, 加納将行, 長尾大道
2. 発表標題 シンプレクティックアジョイント法に基づくスロースリップ断層面上の摩擦空間不均一性の不確実性評価
3. 学会等名 JpGU 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤伸一, 中原明生, 湯川諭
2. 発表標題 収縮亀裂パターンの動的統計則に現れる相転移的性質
3. 学会等名 JpGU 2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------