

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03380

研究課題名（和文）動的破壊問題の数学解析と地震学への応用

研究課題名（英文）Mathematical Analysis on dynamic rupture problems and its seismological application

研究代表者

伊藤 弘道 (Itou, Hiromichi)

東京理科大学・理学部第二部数学科・教授

研究者番号：30400790

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、地震の進行過程がもつ特有な性質（スケール不変性や摩擦によるエネルギー散逸など）を盛り込んだ数理モデルを考察した。その結果、線形動弾性体における固定されたき裂面上に既知の摩擦力と一般化した非貫通条件（SCD条件と名付けた）を与えた初期値境界値問題に対する定性理論が得られた。また、地震学への応用として、自己相似的に拡大するき裂に対し、いくつかの摩擦条件を課した問題について、すべり速度の表示公式を導出した。さらに、弾性体におけるき裂の逆問題についての手法を発展させ、コンクリートや岩石などの多孔性媒質を記述する新しい弾性体モデルについてのき裂問題に対する数学理論を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

線形動弾性体におけるき裂問題に摩擦条件と接触条件を課した問題については未解決なことが多かったが、現象に見合ったき裂面における摩擦条件や接触条件を考察し、数学理論を発展させた。これらは今後、地震学で用いられている摩擦モデルの理論的解析に貢献できると考えられる。また、地震の特徴を組み込んだ数理モデルの解析解の導出は地震学における破壊伝播速度の決定機構の解明につながるものである。さらに、非破壊検査に関連するき裂の逆問題および多孔質弾性体を記述する新しい数理モデルにおけるき裂問題の数学解析で得られた成果は工学分野への波及効果が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we consider a mathematical model that incorporates the unique properties of the earthquake progression process, such as scale invariance and energy dissipation due to friction. As a result, a qualitative theory for an initial value boundary value problem with a given friction force and a generalized non-penetration condition (named SCD condition) on a fixed crack surface in a linear dynamic elastic body is obtained. As an application to seismology, an indication formula for the slip velocity was derived for a problem in which several friction conditions are imposed on a self-similarly expanding crack. Furthermore, the method for the inverse crack problems in elastic bodies was developed, and a mathematical theory for the crack problem was constructed for a new elastic model describing porous media such as concrete and rock.

研究分野：偏微分方程式

キーワード：動弾性体 き裂 摩擦 接触問題 逆問題 非線形弾性体 粘弾性体 多孔性媒質

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

破壊現象とはき裂進展過程を示す動的現象である。1920年頃に2次元線形弾性体領域におけるき裂進展に関する理論的解析が開始され、破壊現象の数理解析の先駆けとなった。その後、静的問題については数学の分野内でも、き裂や角を含むような滑らかでない領域における偏微分方程式の研究が発展し、特に重み付きソボレフ空間などの関数空間の整備により、数学的にも体系化されてきた。

一方、動的き裂進展問題については支配する法則は未だ確定されておらず、様々な数理モデルが提唱されている現状である。また、き裂が固定されている場合においても、動弾性体や粘弾性体を考えると、支配方程式が双曲型や放物型となる上、き裂上に摩擦条件や非貫通条件を課した問題の解析には多くの数学的困難が伴うため、重要であるにもかかわらず未解決問題が多く残っている状況であった(参考:C. Eck, J. Jarušek, M. Krbeč 著の書籍“Unilateral Contact Problems. Variational Methods and Existence Theorems”)。

また、地震学分野においては、近年、地震の進行過程の自己相似性すなわちスケール不変性という発見に基づき、地震の数理モデルを無次元化によって大まかに解釈できる可能性が示唆されている。しかし、破壊が伝播する速度が岩石のS波(横波)速度の40~100%相当と個々の地震において多様であることは、これまでの材料力学など工学分野での研究によって体系化された破壊力学の古典的な破壊の数理モデルでは容易に説明できない状況である。破壊伝播速度は地震の規模とは独立に地表の強震動振幅を決定する、すなわち社会的被害の大きさに直結する、極めて重要なパラメータであるため、破壊伝播速度の決定機構の解明が待たれている。

破壊現象を逆の視点で捉えることも重要である。例えば、地震学における震源過程解析は、複雑な地球内部を伝播した波を、限られた場所のみに設置された地震計で記録し、そこから未知の断層挙動を推定することであり、いわゆる逆問題として定式化される。しかし、未知である波源(破壊領域)が時間とともに拡大し、伝達関数の不確実性(地殻の不均質性の影響)が大きく、さらに部分的な境界データ(限られた観測点の情報)しか使えないという極めて困難な逆問題である。そのために現在の震源過程解析は非常に解像度が低くだけでなく、解析手法や仮定するパラメータの差異によってしばしば解が大きく異なるという不安定性による問題に直面している。

### 2. 研究の目的

上述の背景をふまえ、本研究では「動的破壊問題の数理解析と地震学への応用」をテーマとし、地震の進行過程がもつ特有な性質(スケール不変性や摩擦によるエネルギー散逸など)を盛り込んだ数理モデルを構築し、それを数学的に解析することにより、断層挙動の理解を深めるだけでなく、強震動予測における重要な震源パラメータである破壊伝播速度やすべり速度の決定機構の解明を目指す。また逆解析として、観測地震波形を用いた震源過程の理論解析を行う。不安定性などの問題を打破すべく、線形(粘)弾性体におけるき裂や空洞の逆問題について、これまで得られた研究成果の応用可能性の検証や、新たな理論的解法の開発を行う。これらにより、地震研究の発展の理論的サポートとして貢献することが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するため、主に以下の3つの課題に取り組む。なお、本研究で主に扱う方程式は以下の線形弾性体方程式である。

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \sum_{j,k,l=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} \left( C_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right) + \rho_0 f_i \quad i = 1, 2, 3.$$

ここで、 $\rho_0$ は物体密度(正定数)、 $C = \{C_{ijkl}\}$ は弾性テンソル(4階のテンソル)、 $\mathbf{u} = (u_i)$ は変位ベクトル、 $\mathbf{f} = (f_i)$ は外力ベクトルである。

(1)課題1: 2次元の面内・面外変形の場合をそれぞれ考え、き裂がき裂方向に自己相似的に等速(系の拡大速度、すなわち破壊伝播速度に相当)で拡大する問題の解析解を求める。そして、断層破壊面の複雑な幾何形状や摩擦の効果、および接触条件をき裂面上の境界条件に取り入れて考える。また、断層モデルで提唱されている様々な摩擦条件(すべり量に依存する摩擦則など)における定性理論を構築する。

(2)課題2: 課題1で得られた解析解からき裂先端における弾性歪みエネルギー解放率を計算し、破壊伝播速度、摩擦挙動に関するパラメータ、周囲の物性値、遠方からのプレート運動による力などの依存性を明らかにする。その後、課題1のき裂面上の境界条件を変化させて考える。例えば、応力ベクトルが定数ではなく、き裂先端で応力が有限となり、かつすべり速度が破壊開始時点でゼロからスタートするような関数を与え、その関数に含まれるパラメータと破壊伝播速度との関係を明らかにする。

(3) 課題3: これまで得られた線形弾性体における手法を深化させる。特に、線形動弾性体の場合への拡張として、3次元線形動弾性体内の空洞及びき裂を再構成する理論的手法を確立する。その後、地震学における震源過程解析の研究動向を調査しながら、地震学への応用として、破壊が進行している(き裂が伝播している)中で、き裂の再構成の逆問題や、課題1の破壊伝播速度やき裂面上のパラメータの再構成の問題についても取り組む。

平成30年度から課題1、課題2の順に取り組み、結果に応じて随時フィードバックする。課題3はそれらと並行して進める。また、得られた研究成果は多種の研究集会での発表や国際専門誌への投稿により広く公開する。

#### 4. 研究成果

上記研究課題1、2、3に対応する研究成果をそれぞれ以下に記す。また、当初の研究計画にはなかったが、本研究課題を遂行する中で、それらに関連する研究成果が得られたため、それについても記す。

##### (1) 課題1・課題2について

2次元の面外変形において、二層の界面にあるき裂がき裂方向に自己相似的に等速で拡大する問題を考察した。き裂面上に応力ベクトルが定数という条件を与えた場合の解析解を考察し、き裂先端における変位場や応力場の挙動を解析した。そして、き裂先端における応力拡大係数の表示式を得ることができた。その際、自己相似性から、2次元線形弾性体で用いられた複素関数を用いる手法が有効であることが確認でき、さらに、応力ベクトルが定数ではなく(-1)次の斉次関数の場合についても検討した。また、均質媒質中のmode-III(面外)平面き裂に自己相似な等速破壊伝播を仮定し、距離弱化型の摩擦条件を課した問題を考察し、すべり速度を表す解の公式を導出した。

地震時の断層破壊を想定した数値モデルについて、特にき裂面(断層面)に摩擦条件を課した問題の数学解析を行った。研究協力者の柏原崇人氏との共同研究により、線形動弾性体において、固定されたき裂面上に既知の摩擦力を与えた初期値境界値問題を考察した。き裂に作用する摩擦力が時間だけでなく空間変数にも依存する場合を考察している点に本研究の新規性がある。この問題は双曲型の変分不等式として表され、適当なデータとの適合条件の下で解の存在と一意性を証明した。証明は、ペナルティ項を加えた正則化問題についてのガレルキン近似解を構成し、そのアプリオリ評価を得ることにより行われた。

の結果を拡張し、粘性を考慮しない線形動弾性体において、固定されたき裂面上に既知の摩擦力と速度を含む接触条件を課した初期値境界値問題について柏原氏との共同研究を行った。この問題に関連する既存の結果としては、線形粘弾性体において境界にクーロン摩擦と速度で与えた接触条件を課した問題については知られていたが、粘性を含まない線形動弾性体のき裂問題や摩擦則と変位で与える通常の接触条件を課した問題については未解決であった。そこで我々は、動的なシニョリーニ接触条件(SCD条件)と名付けた修正接触条件とトレス力摩擦条件を課したき裂を持つ線形動弾性体考えた。SCD条件とは変位と速度の両方を含む条件であるが、その特別な場合として通常の新貫通条件を含んでいるものである。この問題に対して、一意的な強解が存在することを証明した。

##### (2) 課題3について

2次元導電体におけるき裂の再構成について、研究協力者である池畠優氏が創案した囲い込み法を援用し、既存の手法を発展させ、その数値実験も行った。これまでに1つの線分き裂の再構成公式が得られたが、その数値実験や複数のき裂の場合に関しては十分な結果が得られていなかった。そこで池畠氏らとの共同研究により、2枚の導電板を溶接した際の溶接部を評価する問題を考察し、複数の線分き裂を再構成する理論的アルゴリズムを与えた。さらに、フィンランドの研究グループとの協働により、その有効性を確認するための数値実験を行った。

の結果を2次元線形弾性体の場合への拡張を検討し、池畠氏との共同研究により、解決の糸口を見出した。同時に、数値実験については、フランスの研究グループとの共同研究を開始し、現在、研究を継続しながら、論文の執筆準備中である。

##### (3) 研究目的に関連する成果について

本研究遂行中に関連する以下の2つの問題を考察し、成果が得られた。前述の線形弾性体を仮定した脆性破壊は現在まで線形破壊力学として体系化されてきた。しかし、き裂を含む線形弾性体を見ると、き裂先端で応力が集中し、これは歪みも発散してしまうことを意味するため、線形弾性体の前提条件である微小歪みと矛盾が生じる。研究協力者であるK.R.Rajagopal氏(Texas A&M University)はこの不条理を解消し得るより広範な、構成則が陰関数で与えられる弾性体モデルを提案した。その1つの例である、弾性係数が密度に依存するモデルにおけるき裂問題を考察した。また、き裂の新貫通条件は不等式タイプで与えられ、元来、物体間の接触問題を基にして考えられてきた。そこで、粘弾性体への剛体圧子の押し込み問題に関する研究を行った。

コンクリートや岩石などの多孔性媒質を記述する弾性体モデルとして、材料係数が平均垂直応力に依存する弾性体モデルについて、研究協力者である V.A.Kovtunenکو氏 (University of Graz) と Rajagopal 氏との共同研究を行った。本研究の特徴は、構成方程式が非線形であることだけでなく、非貫通条件を課したき裂問題を考えた点にある。この問題を変分不等式で表し、その一意可解性を証明し、アプリアリ評価を導出した。また、上記の多孔性媒質を記述する弾性体モデルをより広範に数学的に扱うために、線形化されたひずみテンソルと平均垂直応力との依存性を閾値で正則化したいくつかのモデルに対する境界値問題を考察し、それらの解の存在性を示した。さらに、一般化した圧縮性ケルビン-フォークト粘弾性体の場合へと拡張した。

Kovtunenکو氏らとの共同研究により、流体駆動破壊を記述する非貫通条件を課したき裂の連成多孔質弾性体問題に対して、解の存在性を示し、変位と間隙水圧のき裂先端における漸近展開を導出した。これにより、解の特異性が明らかになり、また、応力拡大係数を表現する積分公式が得られた。

線形粘弾性体における剛体圧子の押し込み問題について、Kovtunenکو氏と Rajagopal 氏との共同研究を行った。まず、剛体円柱圧子の押し込み問題および円柱の半径を 0 としたブシネスク問題についての数学解析の結果をまとめた。さらに、より一般の形状の圧子の場合に拡張することに成功した。

上記のように、課題 1、課題 2、課題 3 すべてにおいて、一定の成果を上げた。特に線形動弾性体における摩擦と非貫通条件を考慮したき裂問題の数学解析についての成果は得られたが、地震学や逆問題への応用に関しては、当初の研究目的を達成するためには今後も研究の継続が必要である。そこで、令和 3 年度には、本研究で理論的に考察した摩擦を伴うき裂進展を実験的に検討するために、ソフトマターを専門とする田中良巳氏（横浜国立大学）を研究分担者に加え、共同研究を開始した。UV/オゾン洗浄装置によって摩擦面の条件制御について検討し、様々な摩擦条件の実現可能性を考察した。実験面での研究成果は本研究期間内には得られなかったが、本研究で得られた数学解析結果の応用を今後も継続して検討したい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 13件 / うちオープンアクセス 15件）

1. 著者名 Itou Hiromichi, Kovtunenکو Victor A., Rajagopal Kumbakonam R.	4. 巻 -
2. 論文標題 A generalization of the Kelvin-Voigt model with pressure dependent moduli in which both stress and strain appear linearly	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mathematical Methods in the Applied Sciences	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) 10.1002/ma.9417	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 該当する
1. 著者名 Itou Hiromichi, Kovtunenکو Victor A., Lazarev Nyurgun P.	4. 巻 15
2. 論文標題 Poroeleastic problem of a non-penetrating crack with cohesive contact for fluid-driven fracture	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applications in Engineering Science	6. 最初と最後の頁 100136 ~ 100136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apples.2023.100136	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 該当する
1. 著者名 Kashiwabara Takahito, Itou Hiromichi	4. 巻 380
2. 論文標題 Unique solvability of a crack problem with Signorini-type and Tresca friction conditions in a linearized elastodynamic body	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences	6. 最初と最後の頁 20220225
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsta.2022.0225	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 Itou Hiromichi, Kovtunenکو Victor A., Rajagopal Kumbakonam R.	4. 巻 32
2. 論文標題 Investigation of implicit constitutive relations in which both the stress and strain appear linearly, adjacent to non-penetrating cracks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Mathematical Models and Methods in Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1475 ~ 1492
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218202522500336	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 該当する

1. 著者名 Itou Hiromichi, Kovtunenکو Victor A., Lazarev Nyurgun P.	4. 巻 10
2. 論文標題 Asymptotic series solution for plane poroelastic model with non-penetrating crack driven by hydraulic fracture	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applications in Engineering Science	6. 最初と最後の頁 100089 ~ 100089
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apples.2022.100089	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 該当する

1. 著者名 Itou Hiromichi, Kovtunenکو Victor A., Rajagopal Kumbakonam R.	4. 巻 144
2. 論文標題 On an Implicit Model Linear in Both Stress and Strain to Describe the Response of Porous Solids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Elasticity	6. 最初と最後の頁 107 ~ 118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10659-021-09831-x	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 該当する

1. 著者名 Itou Hiromichi, Kovtunenکو Victor A., Rudoy Evgeny M.	4. 巻 7
2. 論文標題 Three-field mixed formulation of elasticity model nonlinear in the mean normal stress for the problem of non-penetrating cracks in bodies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applications in Engineering Science	6. 最初と最後の頁 100060 ~ 100060
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apples.2021.100060	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 該当する

1. 著者名 Itou Hiromichi, Kashiwabara Takahito	4. 巻 28
2. 論文標題 Unique solvability of crack problem with time-dependent friction condition in linearized elastodynamic body	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mathematical notes of NEFU	6. 最初と最後の頁 121 ~ 134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.25587/SVFU.2021.38.33.008	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 Itou Hiromichi, Kovtunenکو Victor A., Rajagopal Kumbakonam R.	4. 巻 -
2. 論文標題 Lagrange multiplier approach to unilateral indentation problems: Well-posedness and application to linearized viscoelasticity with non-invertible constitutive response	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mathematical Models and Methods in Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1 ~ 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218202521500159	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 該当する

1. 著者名 Itou Hiromichi	4. 巻 179
2. 論文標題 On an inverse crack problem in a linearized elasticity by the enclosure method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Hokkaido University Technical Report Series in Mathematics	6. 最初と最後の頁 89 ~ 98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14943/94913	査読の有無 無
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 Furtsev Alexey I., Itou Hiromichi, Kovtunenکو Victor A., Rudoy Evgeny M., Tani Atusi	4. 巻 2174
2. 論文標題 On unilateral contact problems with friction for an elastic body with cracks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 RIMS Kokyuroku	6. 最初と最後の頁 43 ~ 58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 Itou Hiromichi, Kovtunenکو Victor A., Rajagopal Kumbakonam R.	4. 巻 151
2. 論文標題 The Boussinesq flat-punch indentation problem within the context of linearized viscoelasticity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Engineering Science	6. 最初と最後の頁 103272 ~ 103272
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijengsci.2020.103272	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 該当する

1. 著者名 Hasanov Alemdar, Itou Hiromichi	4. 巻 87
2. 論文標題 A priori estimates for the general dynamic Euler-Bernoulli beam equation: Supported and cantilever beams	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Mathematics Letters	6. 最初と最後の頁 141 ~ 146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.aml.2018.07.038	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Itou Hiromichi, Kovtunen Victor A., Rajagopal Kumbakonam R.	4. 巻 29
2. 論文標題 Crack problem within the context of implicitly constituted quasi-linear viscoelasticity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mathematical Models and Methods in Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 355 ~ 372
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218202519500118	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 該当する

1. 著者名 Hauptmann Andreas, Ikehata Masaru, Itou Hiromichi, Siltanen Samuli	4. 巻 35
2. 論文標題 Revealing cracks inside conductive bodies by electric surface measurements	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Inverse Problems	6. 最初と最後の頁 025004 ~ 025004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6420/aaf273	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 該当する

1. 著者名 Itou Hiromichi, Kovtunen Victor A., Rajagopal Kumbakonam R.	4. 巻 136
2. 論文標題 Well-posedness of the problem of non-penetrating cracks in elastic bodies whose material moduli depend on the mean normal stress	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Engineering Science	6. 最初と最後の頁 17 ~ 25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijengsci.2018.12.005	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 該当する



〔学会発表〕 計21件（うち招待講演 14件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 池島優、伊藤弘道
2. 発表標題 囲い込み法を用いた線形弾性体におけるき裂の再構成について
3. 学会等名 日本応用数理学会2022年度年会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiromichi Itou
2. 発表標題 On inverse crack problems in linearized elastic bodies by the Enclosure method
3. 学会等名 Theoretical and numerical trends in inverse problems and control for PDE's, and Hamilton-Jacobi equation: French-Italian-Japanese conference（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤弘道
2. 発表標題 き裂問題の数学解析 - 摩擦・接触、非線形弾性体 -
3. 学会等名 Elastic and dissipative motions of curves and interfaces in continuum media
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Itou Hiromichi
2. 発表標題 On an inverse crack problem in a linearized elasticity by the enclosure method
3. 学会等名 The 8th European congress of Mathematics, Nonsmooth Variational Methods for PDEs and Applications in Mechanics (MS - ID 8) （国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤弘道
2. 発表標題 ある非線形(粘)弾性体モデルの数学解析
3. 学会等名 幾何学・連続体力学・情報科学の交差領域の探索(II) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Itou Hiromichi、Kashiwabara Takahito
2. 発表標題 A remark on crack problems with time-dependent friction condition in linearized elastodynamic body
3. 学会等名 The XXIII International Symposium on Mathematical Methods Applied to Science (XXIII SIMMAC) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柏原崇人、伊藤弘道
2. 発表標題 速度を含むSignorini型接触条件とTresca摩擦条件下での線形動弾性体方程式の一意可解性
3. 学会等名 日本数学会2022年度年会 函数方程式論分科会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Itou Hiromichi
2. 発表標題 On a flat-punch indentation problem within the context of linearized viscoelasticity
3. 学会等名 The Second Russia-Japan Workshop "Mathematical analysis of fracture phenomena for elastic structures and its applications" - 20th Conference of Continuum Mechanics Focusing on Singularities (CoMFoS20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Itou Hiromichi
2. 発表標題 On unilateral indentation problems in viscoelasticity with non-invertible constitutive response
3. 学会等名 Critical Exponent and Nonlinear Partial Differential Equations 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤弘道
2. 発表標題 粘弾性体におけるき裂問題と圧子押し込み問題について
3. 学会等名 第32回さいたま数理解析セミナー (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤弘道
2. 発表標題 弾性体における摩擦を伴う接触問題について
3. 学会等名 第724回応用解析研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Itou Hiromichi, Kovtunenکو Victor A., Rajagopal Kumbakonam R.
2. 発表標題 On flat-punch indentation problems within the context of linearized viscoelasticity
3. 学会等名 日本数学会2020年度秋季総合分科会 函数方程式論分科会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤弘道
2. 発表標題 On an inverse crack problem in a linearized elasticity by the enclosure method
3. 学会等名 第45回偏微分方程式論札幌シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤弘道
2. 発表標題 On some problems within the context of implicitly constituted (visco)elasticity with limiting small strain
3. 学会等名 松山解析セミナー2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiromichi Itou
2. 発表標題 On unilateral contact problems with friction for an elastic body with cracks
3. 学会等名 RIMS共同研究 (公開型) 「偏微分方程式による逆問題解析とその周辺」 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiromichi Itou
2. 発表標題 On some problems for fracture phenomena
3. 学会等名 Russia-Japan Workshop "Mathematical analysis of fracture phenomena for elastic structures and its applications" (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiromichi Itou
2. 発表標題 Detecting cracks in conductive bodies by the enclosure method
3. 学会等名 International Conference AIP2019: Applied Inverse Problems conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiromichi Itou
2. 発表標題 On Crack Problems for Nonlinear (Visco)Elasticity
3. 学会等名 International Conference AIP2019: Applied Inverse Problems conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiromichi Itou
2. 発表標題 On inverse crack problems in conductive bodies by the enclosure method
3. 学会等名 The 11th Conference on Inverse Problems, Imaging and Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiromichi Itou
2. 発表標題 On an interfacial self-similar crack problem in anti-plane deformation
3. 学会等名 9th International Conference IP:M&S (Inverse Problems: Modeling and Simulation) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤弘道
2. 発表標題 ある非線形(粘) 弾性体におけるき裂問題について
3. 学会等名 大分微分方程式研究集会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Itou, H., Hirano, S., Kimura, M., Kovtunenکو, V.A., Khudnev, A.M. (Eds.)	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 204
3. 書名 Mathematical Analysis of Continuum Mechanics and Industrial Applications III -Proceedings of the International Conference CoMFoS18- (Mathematics for Industry Volume 34)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

HIROMICHI ITOU <a href="http://www.rs.tus.ac.jp/h-itou/">http://www.rs.tus.ac.jp/h-itou/</a>
---

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
研究分担者	田中 良巳  (TANAKA Yoshimi)  (10315830)	横浜国立大学・大学院環境情報研究院・教授   (12701)	

## 6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	池畠 優  (IKEHATA Masaru)		
研究協力者	柏原 崇人  (KASHIWABARA Takahito)		
研究協力者	コフツネンコ ヴィクトル  (KOVTURNENKO Victor A.)		
研究協力者	ラジャゴバル クムバコナム  (RAJAGOPAL Kumbakonam R.)		

## 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6件

国際研究集会 若手研究集会「波動・振動・流れの制御と逆問題 -理論と数値計算-」	開催年 2022年～2022年
国際研究集会 Workshop for young scholars Control and inverse problems on waves, oscillations and flows - Mathematical analysis and computational methods -	開催年 2021年～2021年
国際研究集会 「数理モデリングと数学解析研究部門」セミナー『逆問題と機械学習』	開催年 2020年～2020年
国際研究集会 若手研究集会「波動・振動・流れの制御と逆問題 -理論と数値計算-」	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 International Conference CoMFoS18: Mathematical Analysis of Continuum Mechanics II	開催年 2018年～2018年
国際研究集会 Inverse Problems for Partial Differential Equations	開催年 2018年～2018年

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			
オーストリア	University of Graz			
ロシア連邦	Novosibirsk state University	Institute of hydrodynamics	North-Eastern Federal University	
米国	Texas A&M University			
フィンランド	University of Helsinki			
中国	Chinese Academy of Sciences			
英国	University College London			
フランス	Aix-Marseille University	University of Toulouse		