

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 4 月 14 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04009

研究課題名(和文) XBIEM地震サイクルシミュレーションで探る構造不均質と地震発生の因果関係

研究課題名(英文) Earthquake cycle simulation in heterogeneous medium by XBIEM

研究代表者

亀 伸樹 (Kame, Nobuki)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：90304724

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：付加帯構造という沈み込み帯に特徴的な構造不均質が地震発生の応力荷重過程に持つ効果を調べるために、構造を単純化した「三角付加帯モデル」を考え、弾性変形を計算するための数値計算コードを拡張型境界積分方程式法(XBIEM)を用いて開発した。固着域においてバックスリップを与え、上盤の付加帯と下盤のプレートの剛性率コントラストを系統的に変化させて、上盤・下盤におけるバックスリップの分配、海底地殻変動の大きさ、およびプレート境界応力荷重量の定量的変化を数値解析した。結果、応力場は空間分布は変化せずに剪断応力が減少し、低剛性率の付加帯構造があると地震サイクルの応力荷重レートが下がることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高度化する地震観測研究は、地下の「構造不均質」と「断層形状」について明かにしつつあるが、「地震発生前の応力場」の直接測定は未だ困難な問題として残る。本研究では、地震発生の理論的研究から応力場のヒントを探る。すなわち、構造不均質を含む地震発生サイクルモデルを用いて、構造不均質に起因する応力場が地震の動的破壊を規定し得るか調べた。本研究が更に発展し、地震開始/停止の位置と構造不均質との関係が理論的に示されたならば、強震動予測における想定シナリオ地震の断層モデルパラメータ(現在、不確実性が非常に大きい)に強い拘束を与えることができる。より正確な予測は地震減災と直接結びつき、社会への影響も大きい。

研究成果の概要(英文)：To investigate the effect of structural heterogeneity, which is characteristic of subduction zones called accretionary structures, on the stress loading process of earthquake occurrence, a simplified "triangular accretionary zone model" is considered and a numerical code is developed to calculate elastic deformation using the extended boundary integral equation method (XBIEM). Backslip was applied in the sticking zone and the stiffness contrast between the upper accretionary zone and the lower plate was systematically varied to numerically analyze the distribution of backslip in the upper and lower plates, the magnitude of submarine crustal deformation, and quantitative changes in the plate boundary stress loadings. The results show that the stress field decreases in shear stress without changing the spatial distribution, and that the presence of low-stiffness accretionary zone structures lowers the stress loading rate of the seismic cycle.

研究分野：地震学

キーワード：地震サイクルシミュレーション 境界積分方程式法 不均質構造 断層 XBIEM

1. 研究開始当初の背景

(1) 先行する地震観測研究 v.s. 地震破壊の理論研究の現状

2004年新潟県中越地震(M6.8)発生後、ただちに、余震の稠密観測が展開された。地下の地震波速度構造と余震位置を高解像度で決定する解析から、本震と余震は、基盤と堆積岩の境界で発生し、これら断層面と構造不均質が対応することが明らかにされた(Kato et al., 2005)。また、「地下深部において実験室レベルの距離(数m)で地震破壊を直接測定する」挑戦的な観測が南アフリカ金鉱山で行われた(通常地震観測では数千m)。母岩/ダイク(貫入岩)の構造境界で発生する地震の動的すべりを待ちかまえ、鉱山地下3545mに注意深く配置されたセンサーにより、世界で初めて極近距離での地震観測に成功した(図1)。

高度化する観測研究は従来見えなかった媒質境界と地震の動的破壊(始まりから停止まで)の関係を明らかにしつつあり、今後の事例の蓄積は地震発生機構の理解への重要な手がかりとなる。一方、このような地震破壊現象の定量的理解に必要となる「不均質媒質中の地震破壊進展の理論的研究」は、従来の理論的枠組みが均質媒質中に限られ対応できない状況が続いてきた。不均質媒質を取り扱う地震破壊の理論的研究分野の立ち上げは、地震学における急務の課題と考えられる。

(2) 均質媒質中の「非平面モデル」を超えるより現実的な地震発生モデル

地震破壊を、予め破壊経路等を仮定することをなるべくせずに、地殻が壊れたいように壊れる過程として、物理法則に従って計算で再現することを理想と考え、この発想の下、破壊面の幾何形状が亀裂の動的進展にどのような影響を果たすのか、について理論および数値シミュレーションに基づく一連の研究を行ってきた。これまで、従来の理論的研究の枠組みにおける「平面形状亀裂」の強い拘束を廃し、破壊方向を自在に選択可能とする画期的な「非平面亀裂モデル」を解析した。しかし、これらの解析も「均質媒質中」に限られるものである。そこで申請者は、更に「不均質媒質中」で形状自由な動的破壊解析を目指し、新たな破壊計算法 XBIEM を提案し、破壊解析手法の開発を進めてきた。

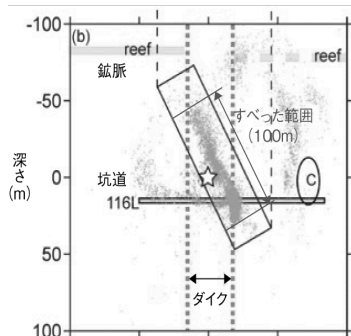


図1. 2007年12月27日発生した地震の余震分布。南アフリカ・ムボンネ金鉱山の地下3545mの坑道L116に設置したアコースティック・エミッションセンサー9台の観測から決定された。☆印は本震震源(破壊が始まった場所)、灰色の点は余震震源、点線はダイク・母岩境界の位置を示す。センサー群から30m離れた場所で破壊が始まり、わずか6mのところを破壊面が通過し、総長さ100mにわたる断層がすべり構造境界で屈曲・停止した。マグニチュードは2.1。(Naoi et al., 2011 に加筆)。

2. 研究の目的

XBIEM地震サイクルシミュレーション手法を開発し、シミュレーション数値実験により地震発生機構の理解を目指すことを目的とする。申請者は、亀裂進展の理論的枠組みを不均質媒質に拡張する新しい定式化(XBIEM)を提案し(図2)、「動的破壊解析」の手法開発を進めてきた。本研究ではこれを「地震サイクルシミュレーション解析(XBIEM-based Earthquake Cycle Simulation=XBIEM-ECS)」へ展開する。

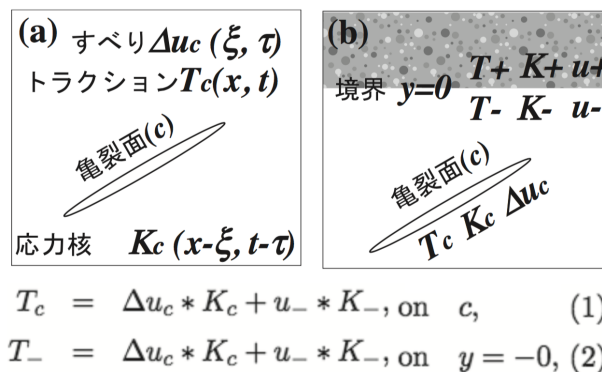


図2. (a) 均質媒質中の古典的 BIEM の模式図と(b) XBIEM の模式図。

3. 研究の方法

(1) XBIEM-ECS (XBIEM-based Earthquake Cycle Simulation) の計算コード開発

これまで開発した動的 XBIEM プログラムを基に、地震発生サイクルシミュレーションの計算コードを開発する。地震サイクル解析では、既に開発済みの動的破壊の時間発展計算に加えて、地震間の断層固着期間の「準静的」な時間発展計算が必要になる。この計算により構造不均質を起源とする「動的破壊」直前の非一様な応力場の評価が可能になり、「構造不均質」起源の応力場と「地震破壊」の因果関係を検討できるようになる。図 3(a)(b)の基本モデルで弾性変形場の数値解を求める計算コードを開発し、動作検証の後、より現実的な局面への応用に進む。

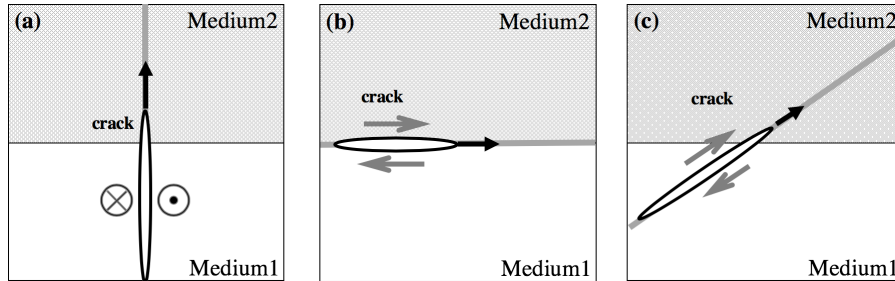


図 3. XBIEM-ECS 計算コード開発で対象とする層構造中の亀裂進展の基本モデル (a) 境界を横切る横ずれ亀裂, (b) 境界を進む縦ずれ亀裂層構造中の亀裂進展の検討モデル, (c) 境界を横切る縦ずれ亀裂

(2) 媒質不均質と地震破壊機構の因果関係の抽出

南海トラフでは、沈み込むプレート境界(縦ずれ断層)に付加体が存在する構造を持ち、また派生する巨大分岐断層構造が見つかった(図 4)。来たるべき南海地震の際、破壊経路がプレート境界に沿って進むか、高角の分岐断層に進むかの破壊経路選択は、強震動発生と津波発生の観点から重要な問題である。また、2011 年 (Mw9.0) 東北地方太平洋沖地震では、海溝軸付近で 50m を超える海底地殻変動が観測された。現実的なモデル構築の方向として、海底地形、浅部構造、断層形状を考慮したモデル化が考えられる。本研究では、まず単純な付加体の三角モデルの解析からはじめる。

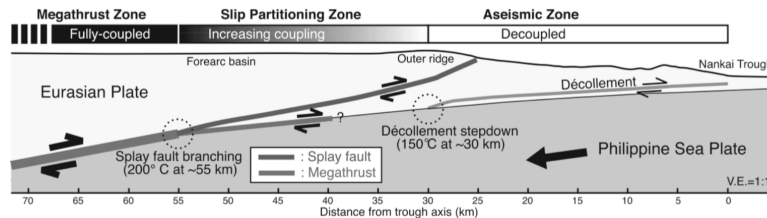


図 4. 南海トラフの巨大分岐断層構造 (Park et al., 2002)。来たるべき南海地震はプレートに沿うか、派生する分岐断層に進むか?基本モデル図 3(b)+検討モデル図 3(c)+海底地形+分岐断層でモデルを順次ステップアップする。

4. 研究成果

(1) 沈み込み付加体構造の単純な三角モデル

沈み込み帯の 2 次元構造断面は、しばしば低剛性率の三角形状の付加帯 (compliant prism, 例えば Seeber et al. (2007), Lotto et al. (2017)) を伴う。本研究では、これを単純化した 2 次元の「三角付加帯モデル」を考える (図 4)。このモデルは沈み込み帯の上盤領域 (D_p) と下盤領域 (D_n) の 2 つの剛性率の異なる領域から構成される。それぞれの剛性率を μ_p, μ_n とする。デカルト座標 (x_1, x_2) において上盤上面と下盤上面を x_1 軸上にとり、それぞれ「地表面 ($x_1 < 0$)」と「海底面 ($x_1 > 0$)」とする。プレート境界は直線とし、海溝軸を座標原点 $(0, 0)$ に取る。プレート境界との dip 角を $\theta = 30^\circ$ とする。プレート境界に沿う座標系 (x_t, x_n) をとり、プレート境界に沿う座標軸 x_t において、地震固着域を $-40 \text{ km} < x_t < -20 \text{ km}$ に取る。数値計算においては、地表面、海底面、プレート境界をそれぞれ有限の領域で表現する必要がある。特徴的長さ $\Delta s = 0.1 \text{ km}$ として地表面、海底面、プレート境界をそれぞれ 200 km とし、注目する固着域に対して計算打ち切り領域が十分遠くなるようにする。プレートカッ プリング率は、単純化した状況を考え、固着域で 1 (完全固着)、固着域の浅部と深部で 0 (プレート速度で常に滑っている) とする。なお、弾性定数に関してはポアソン固体を仮定し、ラメ定数は $\lambda = \mu$ とする。本研究では、地震発生前の応力載荷が構造不均質の存在によりどのような影響を受けるのかを明らかにしたい。そこでここでは、プレートが一定速度 V_{pl} で運動することでプレート境界の断層面が載荷される状態を考える。地震発生の準備期間に、地震発生域ではプレートが固着して応力が上昇するのに対し、固着域の浅部と深部では固着せず応力が上昇しない状態を考える。このプレ

ート境界に荷重される応力を評価するために、バックスリップモデルを考える。ここでは、固着域において一様なバックスリップ $\Delta u_{BS} = V_p t / T$ (T は loading period) を与えた場合の、三角付加帯モデルに生じる弾性変形を計算する。これに対して固着域の外側では、バックスリップ 0 を与える。「三角付加帯モデル」の弾性変形を計算するときの境界条件として、地表面と海底面は自由表面とする (トラクション 0)。プレート境界は、固着域では変位の食い違いを Δu_{BS} 、固着域外では変位の食い違い 0 (すなわち、変位連続) とする。またプレート境界全体で上盤と下盤のトラクションを連続とする。

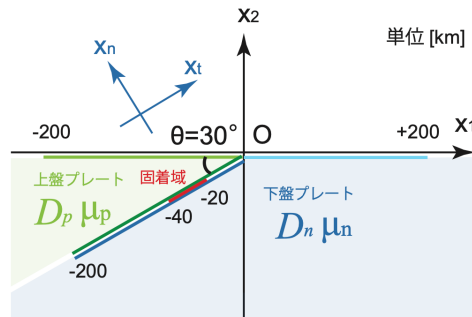


図 5. 単純化した 2 次元の「三角付加帯モデル」の概念図

(2) 拡張境界積分方程式法 (XBIEM) を用いた計算プログラム開発

本研究では、構造不均質を入れた静的弾性応力場および変位場の計算手法として、拡張境界積分方程式法 (eXtended BIEM) を用いる。これは、複雑形状境界を持つ計算領域に適するが均質媒質に適用が限られてきた境界積分方程式法 (Boundary Integral Equation Method: BIEM) を、不均質媒質に拡張した計算手法である。計算対象とする「三角付加帯モデル」は、 $D_p \cdot D_n$ の計算領域の両方において構造に沿う境界面で構成され、かつ媒質の弾性定数が異なる。ここでは XBIEM を三角付加帯モデルに適用し、「静的弾性応力場」および「静的弾性変位場」を計算するプログラムを開発した。 D_p, D_n に対して境界条件を含む形の連立方程式を行列形式で表現すると図 6 の形になる。

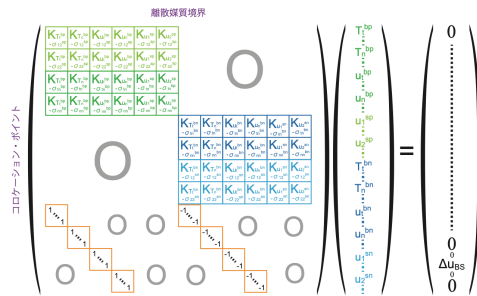


図 6. 三角付加帯モデルにおいて、解く連立方程式の行列表記

(3) 上盤プレートの低剛性率の影響: プレート境界の変位

プレート境界の変位を図 7 に示す。接線方向の成分 u_t は、 D_p と D_n を均質媒質とした場合は、固着域のバックスリップ量は D_p と D_n で 1:1 に分配される。上盤の剛性率を小さくすると、 D_p と D_n のバックスリップ量の分配は、 D_p 側に偏るようになり、 $\mu_p / \mu_n = 0.5$ では 7:3、 $\mu_p / \mu_n = 0.1$ では 9:1 になる。

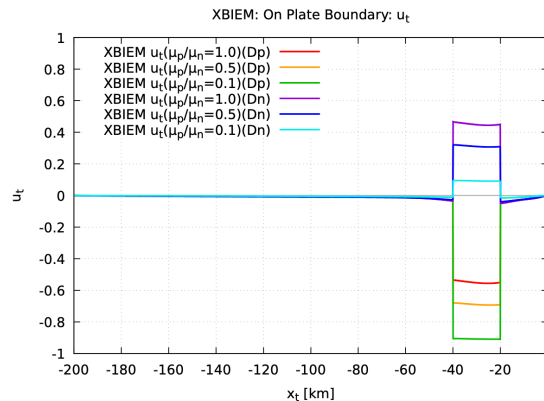


図 7. 媒質コントラストを変化させた場合のプレート境界上の変位 u_t 成分。 Δu_{BS} で規格化、横軸 [km]。線の色は (赤) $\mu_p / \mu_n = 1$ (D_p 側)、(紫) $\mu_p / \mu_n = 1$ (D_n 側)、(橙) $\mu_p / \mu_n = 0.5$ (D_p 側)、(青) $\mu_p / \mu_n = 0.5$ (D_n 側)、(緑) $\mu_p / \mu_n = 0.1$ (D_p 側)、(水) $\mu_p / \mu_n = 0.1$ (D_n 側)

(4) 上盤プレートの低剛性率の影響：プレート内部の応力場

プレート内部の応力場について考える (図 8)。Dp の剛性率を小さくすると、応力場は均質構造のときの分布のパターンを保ったまま絶対値が小さくなっていった。剛性率が異なるのに Dp と Dn の応力場の対称性が崩れず、分布のパターンが保たれるというのは興味深い結果である。上盤の剛性率の低下によりプレート境界のバックスリップ量の分配は Dp 側が大きく Dn 側が小さくなる。Dp 内では変形が大きく歪みが大きくなるが、それより低剛性率の影響が勝って応力場は小さくなり、一方 Dn 内では剛性率はそのままだけで変形が小さくなるので応力場はやはり小さくなる。その結果全体としてプレート内部応力場は分布のパターンを保ったまま小さくなると考えられる。つまり、上盤プレートと下盤プレートの内部で地震活動が同じ摩擦学的セッティングの小断層上で起こる場合は、上盤の剛性率が低下すると均質構造の場合と比較して上盤プレートだけでなく下盤プレートの内部でも地震発生頻度が低下することが示唆される。

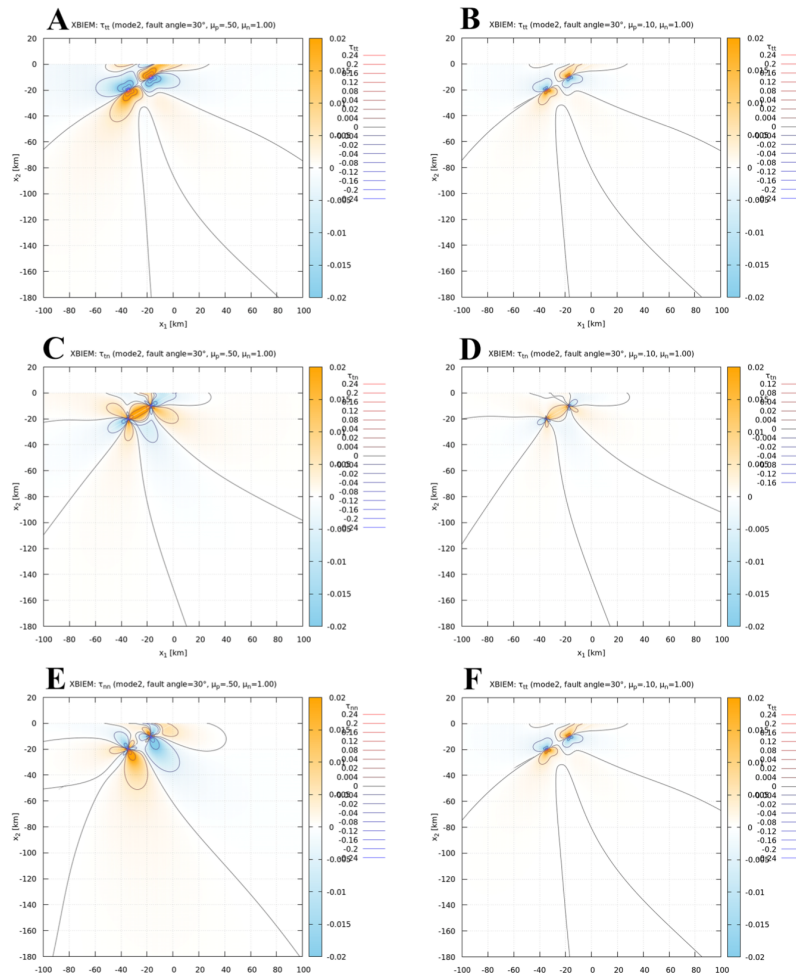


図 8. $\mu_p/\mu_n=0.5, 0.1$ のときのプレート内部の応力場。 $\Delta u_{BS}/\Delta s \cdot \mu_n$ で規格化。 $\mu_p/\mu_n = 0.5$ のときの (A) σ_{tt} , (C) σ_{tn1} , (E) σ_{nn} の分布、および $\mu_p/\mu_n=0.1$ のときの (B) σ_{tt} , (D) σ_{tn1} , (F) σ_{nn} の分布

(5) まとめと今後の展望

付加帯構造という沈み込み帯に特徴的な構造不均質が地震発生の応力载荷過程に持つ効果を調べることを目的として、構造を単純化した「三角付加帯モデル」を考え、弾性変形を計算するための数値計算コードを拡張型境界積分方程式法 (XBIEM) を用いて開発した。固着域においてバックスリップを与え、上盤の付加帯と下盤のプレートの剛性率コントラストを系統的に変化させて、上盤・下盤におけるバックスリップの分配、およびプレート境界応力载荷量の定量的変化を数値解析で調べた。同一バックスリップ量に対して、上盤の剛性率が小さくなるにつれ、上盤変位への分配量が増す方向に変化する傾向となり、既往研究と調和的な結果を得た。これに応答して応力場は、空間分布はそのままに剪断応力の絶対値が小さくなった。これは、地震サイクルにおいて、低剛性率の付加帯構造があると応力载荷レートが下がることを意味する。この計算法を地震サイクルシミュレーションに適用していくことが今後の課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kimura Masaya, Kame Nobuki, Watada Shingo, Araya Akito, Kunugi Takashi, Wang Rongjiang	4. 巻 73
2. 論文標題 Determination of the source parameters of the 2011 Tohoku-Oki earthquake from three-component pre-P gravity signals recorded by dense arrays in Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	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） 10.1186/s40623-021-01553-7	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 Nobuki Kame	4. 巻 379
2. 論文標題 Pre-P gravity signals from dynamic earthquake rupture: modelling and observations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society A	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1098/rsta.2020.0136	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 -
1. 著者名 Ohtani Makiko, Kame Nobuki, Nakatani Masao	4. 巻 124
2. 論文標題 Nucleation of Characteristic Earthquakes in Simulated Cycles Involving Deep Huge Slow Slip Events	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 1822 ~ 1837
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2018JB016156	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 -
1. 著者名 Kimura Masaya, Kame Nobuki, Watada Shingo, Ohtani Makiko, Araya Akito, Imanishi Yuichi, Ando Masaki, Kunugi Takashi	4. 巻 71
2. 論文標題 Reply to comment by Vallee et al. on "Earthquake-induced prompt gravity signals identified in dense array data in Japan"	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-019-1099-2	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大谷真紀子, 亀伸樹, 加納将行
2. 発表標題 豊後 SSEの断層摩擦特性・すべり推定の4 DVAR数値実験
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河合貴太郎, 亀伸樹, 綿田辰吾, 新谷昌人
2. 発表標題 地震で即時に生じる重力場変動の弾性歪み計測による検出可能性
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nobuki Kame, Masaya Kimura, Shingo Watada, Akito Araya, Takashi Kunugi, Rongjiang Wang
2. 発表標題 Determination of source parameters of the 2011 Tohoku-Oki earthquake from three-component pre-P gravity signals recorded by dense arrays in Japan
3. 学会等名 2021 JPGU
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河合貴太郎・亀伸樹
2. 発表標題 P波前地震重力信号に現れる地震波形と異なる見かけの震源励起依存性
3. 学会等名 日本地震学会2020秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大竹和機・亀伸樹・大谷真紀子
2. 発表標題 構造不均質中の2次元地震サイクルシミュレーションで必要となる静的XBIEM核関数の全導出
3. 学会等名 日本地震学会2020秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村 将也・亀 伸樹
2. 発表標題 表現定理とグリーン関数 (3) 全無限グリーン関数の2階微分を用いた点震源が引き起こす歪み・応力・密度摂動場の表現
3. 学会等名 JpGU2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 亀 伸樹・日下部 哲也・綿田 辰吾
2. 発表標題 津波のグリーン関数Kajiura Filterの級数表現の導出
3. 学会等名 JpGU2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村将也・亀伸樹・綿田辰吾・大谷真紀子・新谷昌人・今西 祐一・安東正樹・功刀 卓
2. 発表標題 Detection of Earthquake-induced Prompt Gravity Signals in Multi-channel Data
3. 学会等名 JpGU2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 亀 伸樹・木村 将也
2. 発表標題 即時に生じた重力摂動に対する弾性体の過渡的応答の根源的性質:「総内力ゼロ」となる不思議な弾性変形様式とその物理機構
3. 学会等名 日本地震学会2019秋季大会
4. 発表年 2019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
---------	---------