

令和元年5月20日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05532

研究課題名(和文) 構造不均質がコントロールする地震の動的破壊機構：XBIM高度化による理論解析

研究課題名(英文) Structural control of earthquake dynamic rupture: theoretical analyses using advanced XBIM

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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では2次元拡張境界積分方程式法(XBIM)の数値計算コードの開発をおこなった。線表面要素に載荷された一定牽引力に対する無限一様等方性媒質の過渡的な変位応答および応力応答のカーネル関数に対して、閉じた関数形での陽的な表現を全て導出した。また、媒質界面を横切る動的破壊をシミュレートする際に必要となる陰的なタイムステッピングスキームを提案した。完成したXBIMコードを用いて、媒質不均質性が地震の動的破壊伝播に及ぼす重要な影響を抽出するためのシミュレーションをおこなった。結果、媒質コントラストに起因する透過・反射波の作り出す応力により、破壊進展が促進・停止する媒質効果が明らかにされた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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の関係を明らかにし、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、これらの地震破壊現象の定量的理解に必要な「不均質媒質中の地震破壊進展の理論的研究」は、従来の理論研究が均質媒質中に限られ対応できない状況が続いてきた。本研究では、不均質媒質を取り扱う地震破壊の理論研究に取り組む。地震開始や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、現在不確定性が非常に大きい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に拘束を与えることができる。

研究成果の概要(英文)：We present analytical time-domain expressions for 2D extended boundary integral equation method (XBIM) kernel functions, which represent the transient displacement and stress responses of an infinite homogeneous isotropic medium to a constant traction applied on a line surface element. Using kernels, we propose an implicit time-stepping scheme to simulate a dynamic rupture crossing a bimaterial interface and show the significant control that medium inhomogeneity exerts on rupture propagation.

研究分野：震源物理学

キーワード：境界積分方程式法 地震 断層 亀裂 動的破壊

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

最先端の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「不均質媒質中の亀裂の動的進展の理論的研究」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、地震の規模予測など地震学における急務の課題と考え取り組み始めた。

2. 研究の目的

XBIEM は元々メッシュフリーで境界面と破壊面形状に制限のない解析法であるが、これまでに開発された数値計算コードはせん断応力のみ生じるモード III 型の平面亀裂が、平面媒質境界を横切る、単純なモード III/平面形状の問題に留まる。この XBIEM を高度化し、せん断・法線の両応力が作用する一般的なモード II/I 型破壊を含む I,II,III 全ての破壊モードで、複雑な媒質境界と力学的相互作用しながら破壊経路が自在に選択可能なコードを開発する。これを用いて不均質媒質中の動的な亀裂進展解析を世界に先駆けて実現する。

媒質境界と亀裂進展の幾何で分類される基本的なモデルを用いて、初期応力、不均質コントラストをパラメタとするシミュレーション解析を行い、媒質境界の影響下で亀裂進展がどう変化するか基本的性質を抽出する。

3. 研究の方法

2D-XBIEM 計算コードに必要な変位応答・応力応答の全てのカーネル関数の解析式の導出を行う。動弾性体力学における表現定理から始める。

$$u_q(\mathbf{x}, t) = \int_0^t d\tau \int_{\Gamma} d\Gamma(\mathbf{y}) \Delta u_i(\mathbf{y}, \tau) n_j(\mathbf{y}) c_{ijkl}(\mathbf{y}) \frac{\partial}{\partial y_l} G_{qk}(\mathbf{x}, t - \tau; \mathbf{y}, 0) \\ + \int_0^t d\tau \int_S dS(\boldsymbol{\xi}) T_i(\boldsymbol{\xi}, \tau) G_{qi}(\mathbf{x}, t - \tau; \boldsymbol{\xi}, 0) \\ - \int_0^t d\tau \int_S dS(\boldsymbol{\xi}) u_i(\boldsymbol{\xi}, \tau) n_j(\boldsymbol{\xi}) c_{ijkl}(\boldsymbol{\xi}) \frac{\partial}{\partial \xi_l} G_{qk}(\mathbf{x}, t - \tau; \boldsymbol{\xi}, 0),$$

線表面要素に載荷された一定牽引力に対する無限一様等方性媒質の過渡的な変位応答および応力応答のカーネル関数に対して、閉じた関数形での陽的な表現を全て導出した。

2次元面外問題の場合、グリーン関数は、

$$G_{33}(x_1, x_2, t) \equiv \frac{1}{2\pi\mu} \frac{1}{\sqrt{t^2 - r^2/\beta^2}} H\left(t - \frac{r}{\beta}\right),$$

である。単位トラクション入力に対する変位応力と応力応答はそれぞれ、

$$I^{\sigma_{31}:T_3}(x_1, x_2, t) = \mu \frac{\partial}{\partial x_1} I^{u_3:T_3}(x_1, x_2, t) \\ = -\frac{1}{4\pi} H\left(t - \frac{r}{\beta}\right) \log \frac{t - \sqrt{t^2 - (r/\beta)^2}}{t + \sqrt{t^2 - (r/\beta)^2}}, \\ I^{\sigma_{32}:T_3}(x_1, x_2, t) = \mu \frac{\partial}{\partial x_2} I^{u_3:T_3}(x_1, x_2, t) \\ = -H(x_1) \operatorname{sgn}(x_2) H\left(t - \frac{|x_2|}{\beta}\right) \frac{1}{2} \\ + \operatorname{sgn}(x_1) \operatorname{sgn}(x_2) H\left(t - \frac{r}{\beta}\right) \frac{1}{2\pi} \operatorname{Arccos} \frac{|x_1|t}{ru_\beta}.$$

$$I^{u_3:T_3}(x_1, x_2, t) \\ = H(x_1) H\left(t - \frac{|x_2|}{\beta}\right) \frac{1}{2\mu} (\beta t - |x_2|) \\ - \operatorname{sgn}(x_1) H\left(t - \frac{r}{\beta}\right) \frac{1}{2\pi\mu} \left\{ \frac{|x_1|}{2} \log \frac{t - \sqrt{t^2 - (r/\beta)^2}}{t + \sqrt{t^2 - (r/\beta)^2}} \right. \\ \left. + \beta t \operatorname{Arccos} \frac{|x_1|}{\beta u_\beta} - |x_2| \operatorname{Arccos} \frac{|x_1|t}{ru_\beta} \right\}.$$

となる。2次元面内問題の場合、対応するグリーン関数を用いて、単位トラクション入力に対する変位応力と応力応答はそれぞれ、

$$I^{u_1:T_1}(x_1, x_2, t) = \frac{1}{4\pi\rho} \frac{\partial}{\partial t} \{2J_\beta + x_1(L_\alpha - L_\beta)\},$$

$$I^{u_1:T_2}(x_1, x_2, t) = \frac{1}{4\pi\rho} x_2 \frac{\partial}{\partial t} (L_\alpha - L_\beta),$$

$$I^{u_2:T_1}(x_1, x_2, t) = I^{u_1:T_2}(x_1, x_2, t),$$

$$I^{u_2:T_2}(x_1, x_2, t) = \frac{1}{4\pi\rho} \frac{\partial}{\partial t} \{2J_\alpha - x_1(L_\alpha - L_\beta)\},$$

$$I^{\sigma_{11}:T_1}(x_1, x_2, t) = \frac{1}{2\pi} \left\{ (\alpha^2 - \beta^2) \frac{\partial^2 J_\alpha}{\partial t \partial x_1} + \beta^2 \frac{\partial^2 J_\beta}{\partial t \partial x_1} + \beta^2 (x_1^2 - x_2^2) (N_\alpha - N_\beta) \right\},$$

$$I^{\sigma_{12}:T_1}(x_1, x_2, t) = \frac{\beta^2}{2\pi} \left\{ \frac{\partial^2 J_\beta}{\partial t \partial x_2} + 2x_1 x_2 (N_\alpha - N_\beta) \right\},$$

$$I^{\sigma_{22}:T_1}(x_1, x_2, t) = \frac{1}{2\pi} \left\{ (\alpha^2 - \beta^2) \frac{\partial^2 J_\alpha}{\partial t \partial x_1} - \beta^2 \frac{\partial^2 J_\beta}{\partial t \partial x_1} - \beta^2 (x_1^2 - x_2^2) (N_\alpha - N_\beta) \right\},$$

$$I^{\sigma_{11}:T_2}(x_1, x_2, t) = \frac{1}{2\pi} \left\{ (\alpha^2 - 2\beta^2) \frac{\partial^2 J_\alpha}{\partial t \partial x_2} + 2\beta^2 x_1 x_2 (N_\alpha - N_\beta) \right\},$$

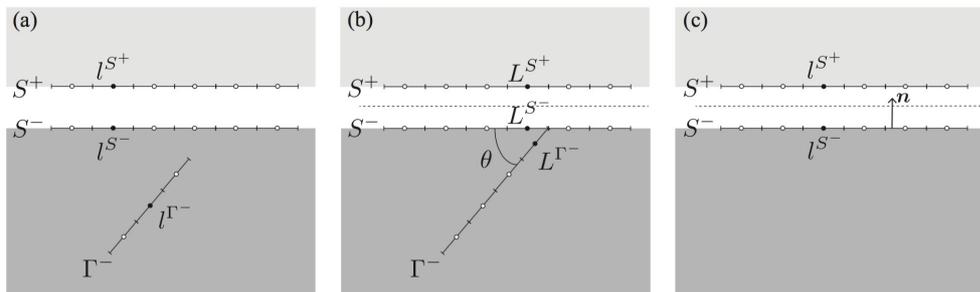
$$I^{\sigma_{12}:T_2}(x_1, x_2, t) = \frac{\beta^2}{2\pi} \left\{ \frac{\partial^2 J_\alpha}{\partial t \partial x_1} - (x_1^2 - x_2^2) (N_\alpha - N_\beta) \right\},$$

$$I^{\sigma_{22}:T_2}(x_1, x_2, t) = \frac{1}{2\pi} \left\{ \alpha^2 \frac{\partial^2 J_\alpha}{\partial t \partial x_2} - 2\beta^2 x_1 x_2 (N_\alpha - N_\beta) \right\},$$

$$J_c \equiv H(x_1) H\left(t - \frac{|x_2|}{c}\right) \frac{\pi}{2c} \left(t - \frac{|x_2|}{c}\right)^2 + \text{sgn}(x_1) H\left(t - \frac{r}{c}\right) \\ \times \left\{ -\frac{|x_1|}{2c^2} \left( t \log \frac{t - \sqrt{t^2 - (r/c)^2}}{t + \sqrt{t^2 - (r/c)^2}} + \sqrt{t^2 - (r/c)^2} \right) - \frac{1}{2c} [t^2 + (x_2/c)^2] \text{Arccos} \frac{|x_1|}{cu_c} + \frac{|x_2|t}{c^2} \text{Arccos} \right. \\ \left. L_c \equiv H\left(t - \frac{r}{c}\right) \left[ -\frac{1}{2c^2} \left\{ t \log \frac{t - \sqrt{t^2 - (r/c)^2}}{t + \sqrt{t^2 - (r/c)^2}} + 2\sqrt{t^2 - (r/c)^2} + \frac{2c^2}{3r^2} \left(t^2 - \frac{r^2}{c^2}\right)^{3/2} \right\} \right], \\ u_c \equiv \sqrt{t^2 - x_2^2/c^2}, \\ c = \alpha, \beta.$$

となる。

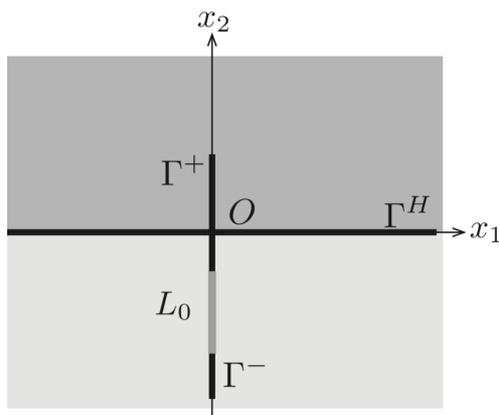
次に、これらの応答カーネル関数を用いた媒質境界を横切るプログラム開発において、必要となる陰的タイムステップスキームを開発した(下図)。



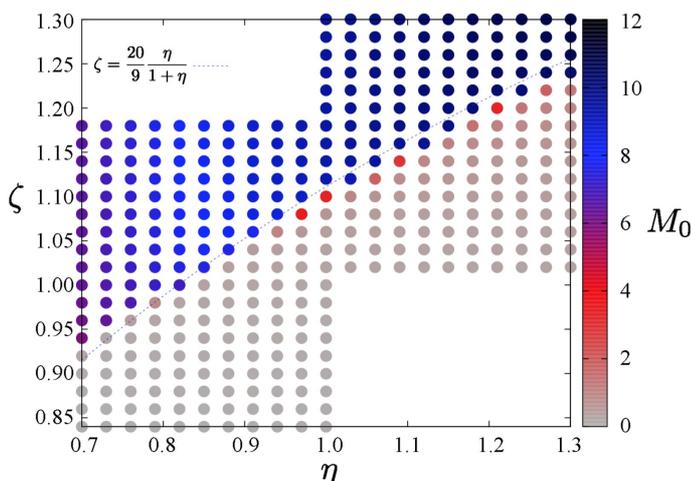
こうして開発したXBIEMプログラムの検証のため、テスト計算を行った。これにより、核関数が正しく評価されていること、タイムステップが想定通り動作することを確認できた。

#### 4. 研究成果

媒質不均質がコントロールする動的破壊の局面抽出を目的とするシミュレーションを実施した。二層媒質に向かい横ずれ主断層が亀裂進展し、その応力集中により媒質境界の副断層が二次的に引き起こされるモデルで動的破壊解析を行った(下図)。「構造不均質だけ」が「地震破壊」をコントロールする局面を抽出するために、(1) 媒質コントラスト  $= \mu_2 / \mu_1$  に加えて、(2) 両断層に作用する法線応力比  $= \sigma_{22} / \sigma_{11}$  をパラメタに選んだ。



網羅的に模擬した結果、「主断層成長が卓越(主断層が地表に達する)」と「副断層成長が卓越(主断層が構造境界で停止)」の2つの破壊レジームがパラメタ平面(  $\eta, \zeta$  )上で直線分割された(下図)。波動場解析の結果、この直線上では「媒質コントラスト が引き起こす反射波応力」と「  $\sigma_{22} / \sigma_{11}$  の関数となる副断層の破壊基準」が等しくなることがわかった。結果、媒質コントラストに起因する透過・反射波の作り出す応力により、破壊進展が促進・停止する媒質効果が明らかにされた。一旦、副断層が破壊を始めると主断層を効果的に停止し、破壊レジームが直線分割されるのである。このXBIEM動的解析は、「構造不均質」は確かに「地震破壊過程」をコントロールする。が、しかし、地震発生に先立ち破壊過程を予測するためには「応力場」の情報が必要である、ことを示す。



#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計8件)

- (1) Masaya Kimura, Nobuki Kame, Shingo Watada, Makiko Ohtani, Akito Araya, Yuichi Imanishi, Masaki Ando, Takashi Kunugi, Earthquake-induced prompt gravity signals identified in dense array data in Japan, Earth, Planets and Space, 71, 2019, 1-12, DOI: 10.1186/s40623-019-1006-x. (査読有)
- (2) Makiko Ohtani, Nobuki Kame, Masao Nakatani, Nucleation of characteristic earthquakes in simulated cycles involving deep huge slow slip events, J. Geophys. Res., 124, 2019, 1-16, doi:10.1029/2018JB016156. (査読有)
- (3) So Ozawa, Takahiro Hatano, Nobuki Kame, Longer migration and spontaneous decay of aseismic slip pulse caused by fault roughness, Geophys. Res. Lett., 46, 2019, 1-8, DOI:10.1029/2018GL081465. (査読有)
- (4) 木村将也・亀伸樹, 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, 地震, 71, 2019, 153-160, DOI: 10.4294/zisin.2017-20. (査読有)

- (5) Tetsuya Kusakabe and Nobuki Kame, Derivation of 2-D XBIEM kernels and their application to a rupture crossing a bimaterial interface, *Geophys. J. Int.*, 210, 2017, 1374-1387, doi: 10.1093/gji/ggx240. (査読有)
- (6) 水野尚人・亀伸樹・市原美恵, 楕円体体積震源モーメントテンソル評価のための Web 計算ツール 3 つのモデルの順計算と逆計算: (1)膨張, (2)流体移動, (3)流体移動後の圧力回復, *火山*, 61, 449-457, 2016. (査読有)
- (7) 日下部哲也・亀伸樹・市原美恵・熊谷博之, 表現定理とグリーン関数(2) 体積震源のモーメントテンソル表現, *地震*, 68, 2016, 169-176, DOI: 10.4294/zisin.68.169. (査読有)
- (8) Mie Ichihara, Tetsuya Kusakabe, Nobuki Kame and Hiroyuki Kumagai, On volume-source representations based on the representation theorem, *Earth Planets Space*, 68, 2016, 1-14, DOI 10.1186/s40623-016-0387-3. (査読有)

[学会発表](計 28 件)

- (1) So Ozawa, Takahiro Hatano, Nobuki Kame, Longer Migration and Spontaneous Decay of Aseismic Slip Pulse on the Earthquake Nucleation Process Induced by Fault Roughness, AGU 2018 Fall Meeting, 2018.
- (2) Nobuki Kame and Masaya Kimura, Transient elastic response to instantaneously applied gravity load induced by a point mass; Derivation of an analytic solution in an unbounded homogeneous isotropic elastic medium, AGU 2018 Fall Meeting, 2018.
- (3) 亀伸樹・木村将也, 新たに見いだされた因果を及ぼし合わない弾性変形様式: 質点が全空間に渡り突然引き起こす重力加重に対する弾性体の過渡的応答, 日本地震学会 2018 秋季大会, 2018.
- (4) 大谷真紀子・亀伸樹・中谷正生, バネブロックモデルで観察される地震と周期的 SSE の同期, 日本地震学会 2018 秋季大会, 2018.
- (5) Koji Uenishi, Yuki Fukuda, and Nobuki Kame, Multiple cracks in brittle solids: individual mechanical interaction versus collective behavior, 日本地震学会 2018 秋季大会, 2018.
- (6) So Ozawa, Takahiro Hatano, and Nobuki Kame, Fault roughness induces longer migration of aseismic slip pulse on the earthquake nucleation process, 10th ACES International Workshop, 2018.
- (7) So Ozawa, Takahiro Hatano, and Nobuki Kame, Longer migration and spontaneous decay of aseismic slip pulse caused by fault roughness, International joint workshop on slow earthquakes, 2018.
- (8) 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, 地震による即時重力変化の検出可能性: 既存モデルから期待される理論信号の加速度データ解析における不検出および重力計測原理に基づく解釈, JpGU2018, 2018.
- (9) 小澤 創・波多野恭弘・亀伸樹, フラクタル的な非平面断層における震源核形成, JpGU2018, 2018.
- (10) 亀伸樹・西條 祥・西田 究, シングルチャンネル記録における地震波初動同定のニューラルネットワークに基づくアプローチ, JpGU2018, 2018.
- (11) Nobuki Kame, Naoto Mizuno and Mie Ichihara, Moment tensors associated with the expansion and movement of fluid in ellipsoidal cavities, EGU 2017 General Assembly, 2017.
- (12) Makiko Ohtani, Nobuki Kame and Masao Nakatani, Simulated precursory large aseismic slip at the deeper extension of the seismic region along the Nankai Trough, SW Japan, EGU 2017 General Assembly, 2017.
- (13) Makiko Ohtani, Nobuki Kame and Masao Nakatani, Time to instability of the seismic event triggered by SSE, Joint Scientific Assembly of IAG-IASPEI, 2017.
- (14) 木村将也・亀伸樹, 重力で地震発生を捉える(5) 地震即時重力変化による弾性変形場の理論解析, 日本地震学会 2017 秋季大会, 2017.
- (15) 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, 重力で地震発生を捉える(4) データ解析における信号不検出とその物理的解釈, 日本地震学会 2017 秋季大会, 2017.
- (16) Masaya Kimura, Nobuki Kame, Shingo Watada, Makiko Ohtani, Akito Araya, Yuichi Imanishi, and Masaki Ando, Absence of prompt gravity signal induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake in data recorded by gravimeters and seismometers, EGU 2017 General Assembly, 2017.
- (17) Masaya Kimura and Nobuki Kame, Theoretical gravitogram and gravito-gradiogram associated with seismic sources, EGU Annual Meeting, 2017.
- (18) Masaya Kimura, Nobuki Kame, Shingo Watada, Makiko Ohtani, Akito Araya, Yuichi Imanishi, Masaki Ando, and Takashi Kunugi, Absence of prompt gravity signal induced

by the 2011 Tohoku-Oki earthquake in data recorded by gravimeters, seismometers, and tiltmeters, ERI-IPGP 2017 Workshop, 2017.

- (19) Nobuki Kame, Modeling earthquake dynamic rupture in an elastic continuum: a boundary integral equation approach, CoMFoS17 International Conference on Mathematical Analysis of Continuum Mechanics, 2017.
- (20) Masaya Kimura and Nobuki Kame, Earthquake-induced prompt gravity change and its negative observability due to self-gravity effect, CoMFoS17 International Conference on Mathematical Analysis of Continuum Mechanics, 2017.
- (21) Masaya Kimura, Nobuki Kame, Shingo Watada, Makiko Ohtani, Akito Araya, Yuichi Imanishi, Masaki Ando, and Takashi Kunugi, Search for Earthquake-Induced Prompt Gravity Signals in Gravimetric Data: Data Analysis and a New Observation Model, AGU 2017 Fall Meeting, 2017.
- (22) 大谷真紀子・亀伸樹・中谷正生, 南海トラフ巨大地震発生領域深部で発生する大きな前兆すべりのモデル化, JpGU2016, 2016.
- (23) Makiko Ohtani, Nobuki Kame and Masao Nakatani, Modeling large precursory slip at the deeper extension of the seismic region along the Nankai Trough, SW Japan -Interaction between slow slip events and brittle nucleation-, ESC 2016 General Assembly, 2016.
- (24) 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, 重力で地震発生を捉える(3) -重力変化と重力勾配変化の理論記象のモーメントテンソル表現-, 地震学会 2016 秋季大会, 2016.
- (25) Nobuki Kame, Naoto Mizuno and Mie Ichihara, Moment tensors associated with the expansion and movement of fluid in ellipsoidal cavities, EGU 2016 General Assembly, 2016.
- (26) 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, 重力で地震発生を捉える(2) -地震重力変化の理論波形を用いたデータ解析, 地震学会 2016 秋季大会, 2016.
- (27) Makiko Ohtani, Nobuki Kame and Masao Nakatani, Simulated precursory large aseismic slip at the deeper extension of the seismic region along the Nankai Trough, SW Japan, EGU 2016 Annual Meeting, 2016.
- (28) 日下部哲也・亀伸樹, 2次元動的破題担問題で必要となる XBIEM 核関数の全導出, 地震学会 2016 秋季大会, 名古屋, 2016.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等：<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/kame>

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者：なし

(2) 研究協力者：なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。