

令和元年6月27日現在

機関番号：82114

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06525

研究課題名（和文）種々のスケールに応じた海氷の熱・変形・破壊挙動のマルチフィジックス解析手法の開発

研究課題名（英文）Multiphysical analysis system for deformation and fracture behavior of sea ice considering thermal changes under various scales

研究代表者

木岡 信治 (Kioka, Shinji)

国立研究開発法人土木研究所・土木研究所（寒地土木研究所）・主任研究員

研究者番号：20414154

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：船舶や構造物、海底等との相互作用において、熱環境による氷の力学変化も考慮しつつ、氷板の変形（連続体挙動）から、クラック伝搬、破壊、大小の氷片化された大量の氷片群としての挙動（離散的挙動）まで、様々な視点で扱い、氷の形態・力学的多様性を経時的に追跡し統一的に記述する、マルチフィジックスな数値解析システムの基礎を開発した

研究成果の学術的意義や社会的意義

急務とされている氷海域での津波防災対策、そして北極海航路や鉱物・石油天然ガス等の海底資源探掘などの北極海・亜極地開発にとって必要不可欠な高精度の海氷漂流予測ならびに構造物の安全性評価、海氷の利活用や共存のためのアイスマネジメント等への応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：We developed a fundamental and multiphysical analysis system for the interaction between sea ice and ship hull, marine structures, seabed and others, which can uniformly simulate the mechanical diversity and/or forms of sea ice from “continuum behavior” such as deformation of ice sheet to “discrete or non-continuum behavior” such as crack propagation, fracture and dynamic behavior of a large amount of ice fragments, and the numerical model can also consider the ice condition such as thermal shrinkage and expansion due to the thermal environmental changes.

研究分野：氷工学，海岸工学

キーワード：海氷 破壊 個別要素法 有限要素法 変形 熱

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

近年、氷海域での津波防災や北極海での資源開発・気候変動解明のための調査研究等において、幅広いスケールでの海水の挙動や外力の予測のニーズが急速に高まっている。海水は極めて多様で複雑な振る舞いをし、それはまた、スケールに応じて、そして気象（熱的）環境に応じて変化するため多様なレオロジー特性を有しているものである。

本研究では、船舶や構造物、海底等との相互作用において、熱環境による氷の力学変化も考慮しつつ、氷板の変形（連続体挙動）から、クラック伝搬、破壊、大小の氷片化された大量の氷片群としての挙動（離散体的挙動）まで、様々な視点で扱い、氷の形態・力学的多様性を経時的に追跡し統一的に記述する、マルチフィジックスな数値解析システムを開発し、多くの工学的諸問題に資する学術的資源の提供を目的とする。

### 2. 研究の目的

本研究で取り組む目的は主に3つある。(1)海水など離散体特有のクラック伝搬・破壊分離、多数の離散体挙動の表現に馴染む個別要素モデル(DEM)の熱伝導表現や膨張収縮などの熱的変化も考慮できるようにすること、(2)連続体挙動に適している有限要素モデル(FEM)の海水への適用、およびマルチスケールを意図した、氷野の広域的な領域への適用である。変形が著しく破壊が生じる、または、破壊分離後の氷片群の離散体的挙動を考慮すべき比較的局所な海水領域にはDEMを、その周辺には計算コストが安いFEMを適用することを想定している。つまり、スケールに応じた合理的なFEM-DEMのハイブリット計算法の構築を目指すものである。しかし、計算時間やコンピュータメモリの都合、すべて計算でなく、部分的に簡易モデルの導入により、計算の効率化を図るのが合理的といえる。本研究では、その基礎的な取り組みの一つとして、(3)海水の衝突破壊荷重の簡易式の提案をおこなう。

### 3. 研究の方法

#### (1) 個別要素モデル(DEM)の熱環境による海水の状態変化を考慮したモデルの開発

まず、個別要素モデルにおいて、粒子を格子と見なした離散的な熱伝導のモデルを導入することにより、1次元の棒を例に、温度分布の時間変化を計算し、熱伝導方程式による理論解と比較した。また温度変化に応じて粒子径を変化させることにより、海水の膨張収縮量や温度応力を計算する手法も構築し、理論値と比較した。これは、特に拘束時の温度応力によるクラックの再現など、連続体モデルでは困難な現象にもおのずと容易に再現できるモデルとなる。

#### (2) マルチスケールな計算を意図したDEMとFEMの融合の検討

海水の変形が大きくなり破壊が生じない場合には、一般に計算コストの安いFEMの適用性を検討した。FEMには、3次元の動的弾塑性FEMを適用し、構成則は、ひずみ硬化しない弾完全塑性モデルを、材料の構成モデルは、降伏関数にモール・クーロンの破壊基準を採用した。塑性ポテンシャルは、モール・クーロン式の $\phi$ 、 $c$ に関連づけたDrucker-Prager式を用いた。また、マルチスケールな計算もしくは安い計算コストを意図し、変形が著しく破壊が生じる局所領域にはDEM(DEM領域、マイクロ～メソスケール)を、その周辺あるいは破壊が及ばない弾塑性領域であるFEMモデルの海水板(FEM領域)を接続したモデルを構築した。DEM領域とFEM領域の境界面では、DEM粒子の個々の荷重をFEM領域の各節点に振り分ける。つまり接触力を境界での接触点から最も近いFEM領域での節点を探索し、その節点に作用させる。さらにFEMと応力レベルでの検証を可能とするため、DEMの粒子間の応力をCauchy応力で表すことにより、FEM領域での応力の伝達を調べ、海水板中に船舶が航行する複雑な状態を例として、その妥当性を調べた。

#### (3) 海水の衝突破壊荷重の簡易式の提案

様々なサイズの杭または平板への氷の中規模衝突実験に加え、海水モデル(DEMおよびFEM)による数値実験を多数実施することにより、衝突現象の本質をとらえるとともに、実務的な衝突力の簡易式を提案した。こうした一部の簡易式の援用により、計算時間やコンピュータメモリを節約した計算の合理化に貢献する。

### 4. 研究成果

#### (1) 個別要素モデル(DEM)の熱環境による海水の状態変化を考慮したモデルの開発

図-1には、簡単な例として、棒の1端に熱を加えた場合の温度分布の時間変化をDEMモデルによる数値計算結果と、熱伝導方程式による理論解（差分法による数値解）と比較したものを示す。なお、ここでは氷でなく一般的な材料を想定している。温度による時空間変化はよく一致しており、粒子を格子と見なした離散的な熱伝導のモデルが妥当であることを意味する。次に、解析領域の両端部を固定支持し、一端から熱を加えた場合の温度変化と物体の膨張による温度応力、ならびに壁面への反力の時間変化を計算し、理論値と比較したものを図-2に示す。これも非常によく一致している。加えて条件により物体内のクラックも再現でき、連続体モデルでは困難な現象にもおのずと容易に再現できるモデルであることが確認できる。以上から、熱環境による氷の状態変化も考慮した解析を可能とする計算環境が整ったといえる。

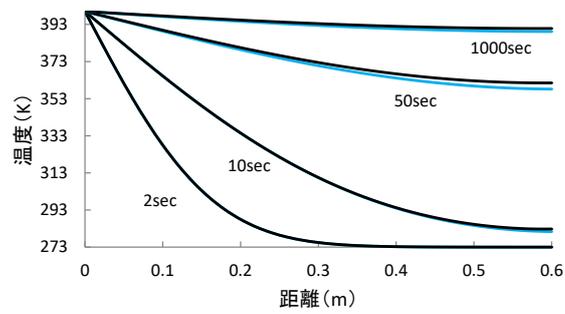
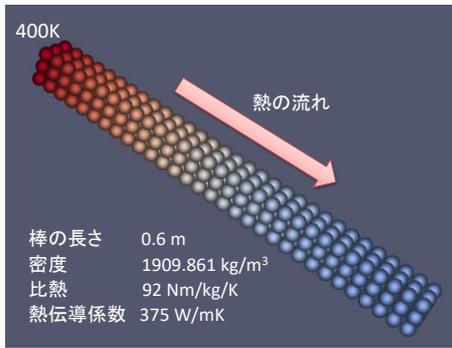
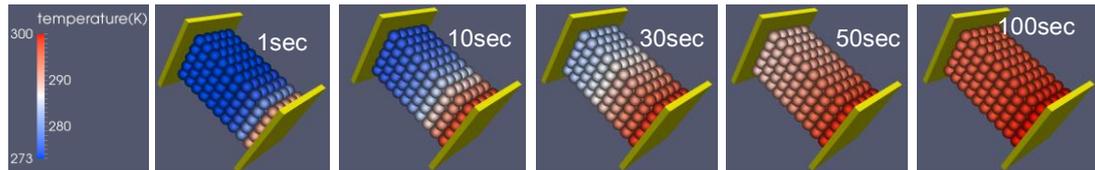
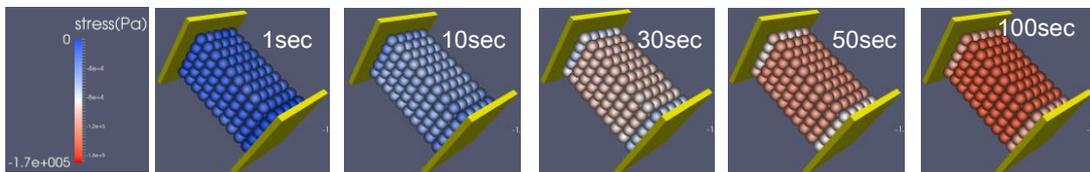


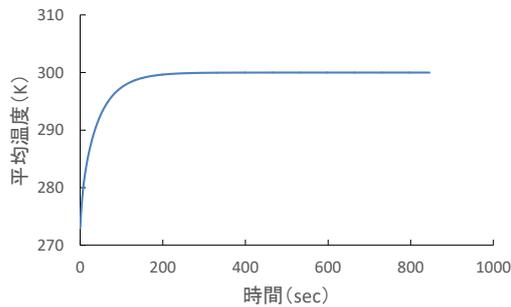
図-1 棒の1端に熱を加えた場合の温度分布の時間変化の DEM モデルによる数値計算結果と熱伝導方程式による理論解(差分法による数値解)との比較



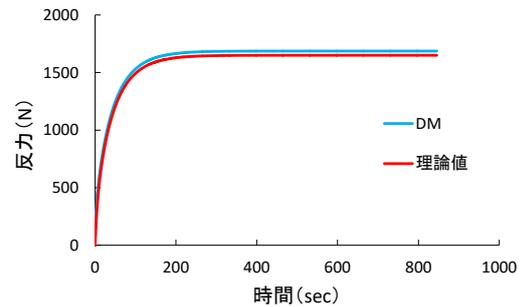
温度分布の経時変化



応力分布の経時変化



平均温度の経時変化



壁面に作用する力

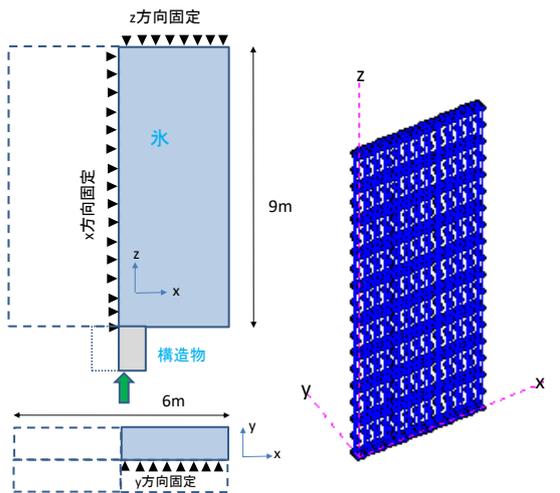
図-2 解析領域の両端部を固定支持し、一端から熱を加えた場合の温度変化と物体の膨張による温度応力、ならびに壁面への反力の時間変化

(2) マルチスケールな計算を意図した DEM と FEM の融合の検討

海氷の変形が大きくなく破壊が生じない場合には、一般に計算コストの安い FEM の適用性を検討するため、まず、簡単な例として、無限氷板中に構造物（インデンター）が貫入する場合についてシミュレーションを実施し、経験的あるいは貫入実験等から一般的に知られている傾向特性と比較した。図-3 には、FEM による海氷板のモデル化と、インデンターによる氷板中への貫入シミュレーションの例（8 面体せん断ひずみで表示）を示す。氷は一般的に脆性材料であるが、脆性破壊領域は弾塑性 FEM モデルにおける塑性変形に相当するものと仮定している。ここで貫入速度、構造物幅(D)および氷板厚(h)を様々変えて計算し、主に構造物の寸法効果について検討した。その一つに、「接触力(F)を氷の圧縮強度( $\sigma_c$ )と D,h で除した接触圧力の無次元量」と「氷と構造物との接触面積」との関係を図-4(a)に、アスペクト比(D/h)との関係を図-4(b)に示した。無次元量は接触面積のべき乗に比例し、寸法効果が認められ、その指数部も一般的に知られているものと大体同程度であった。こうした単純なモデルでも、大きな海氷の変形など破壊分離がない場合には計算コストの安い FEM が適用できる可能性が見出された。

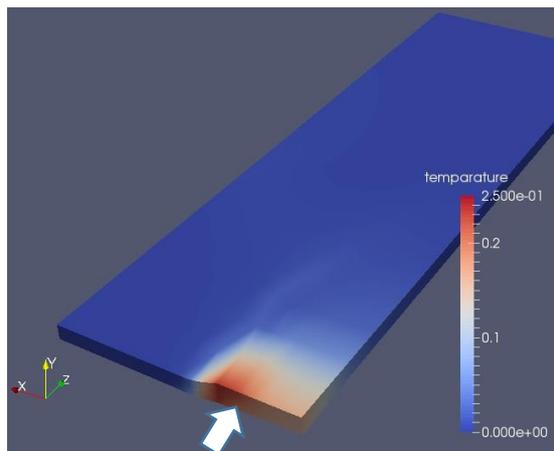
次に、マルチスケールな計算もしくは安い計算コストを意図し、変形が著しく破壊が生じる局所領域には DEM(DEM 領域、マイクロ～メソスケール)を、その周辺あるいは破壊が及ばない弾塑性領域である FEM モデルの海氷板 (FEM 領域) を接続したモデルを構築した。例として、有限氷板中への構造物の干渉（進行方向の応力分布を表示）を想定し、図-5(a)に平板が氷板を押す場合、同図(b)には、船体が氷板中を航行する場合、を示した。DEM 領域と FEM 領域でうまく応力が伝達されており、DEM における粒子間の Cauchy 応力への換算手法が妥当であること、今後、マルチスケールな計算あるいはハイブリット計算による合理的な計算が可能である

ことを示唆している。しかし、条件により、両領域での境界面で破壊が生じたり、一部の応力が反射したりする場合があるので課題は残る。



対称性を考慮して、 $\frac{1}{2}$ 領域について解析  
メッシュ分割は x, y, z 方向にそれぞれ 12, 2, 9 (要素数 216, 節点数 1361)

(a) 解析モデル



インデーターによる貫入

(b) 数値シミュレーション  
(8面体せん断ひずみを表示)

図-3 FEMによる海氷板のモデル化と、インデーターによる氷板中への貫入シミュレーションの例

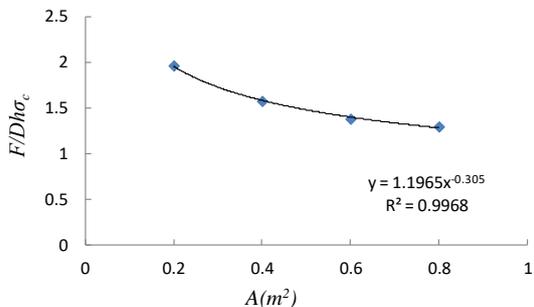


図-4(a) 接触面積  $A(=Dh)$  と無次元圧力との関係

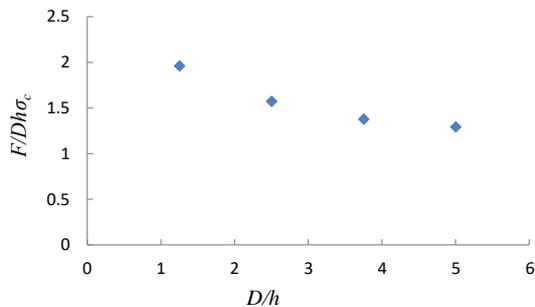
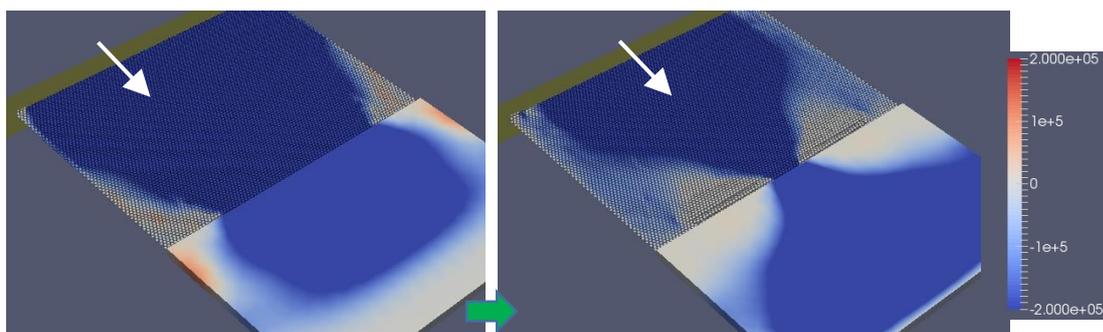
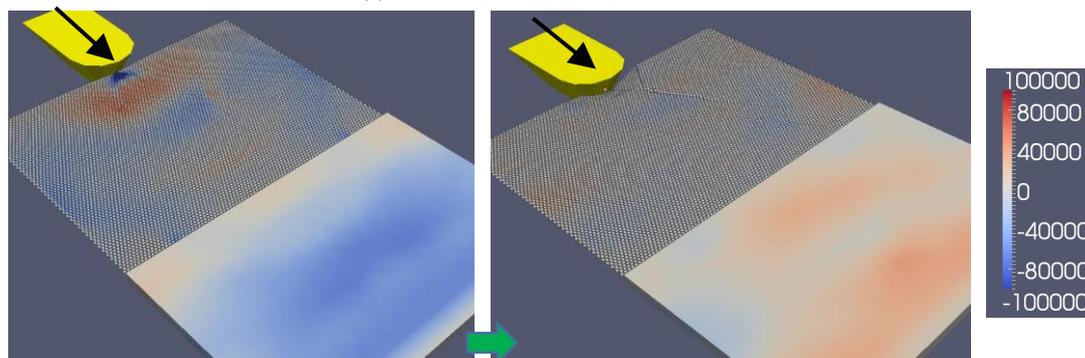


図-4(b) アスペクト比  $(D/h)$  と無次元圧力との関係



(a) 平板が氷板を押し場合



(b) 船体が氷板中を航行する場合

図-5 DEMとFEMモデルによる有限氷板中への構造物の干渉例(進行方向の応力分布を表示)

### (3) 海氷の衝突破壊荷重の簡易式の提案

最も基本的な構造体である平板を中心とする様々な規模の角柱を対象とした海氷の衝突実験及びDEMによる数値実験を実施した。実験との整合性を確認するとともに、理想条件での衝突が現実では極めて困難または稀であり、必然的に実験結果がバラつく事、その衝突波形や破壊機構が複雑である事、などを数値実験から説明した(図-6)。実験値及び様々な条件での数値実験結果は、破壊の有無、動弾性率、衝突速度、氷の規模等に関わらず、理論的に得た弾性体の平板への最大衝突力の傾向特性と一致した。粒状体の衝突力も、やや低減するがその傾向特性を示し、主に構造物と同時に接触する衝突粒子の個数(接触面積)と、個々の粒子が発揮する弾性衝突力に依存する事などが推察された。また、任意サイズの角柱構造物へ拡張し、FEMによる分離破壊しない弾性体の計算結果も加味することにより、物体側の破壊条件、つまり脆性破壊の有無に応じた、最大衝突力の上限と下限を与える簡便な式を提案した(図-7)。

こうした実験的および数値的に明らかになった氷の本質的な破壊挙動の傾向特性や簡易モデル・簡易式の知見は、上述の氷板の複雑な破壊挙動を計算するためのDEMやFEMに組み込むひとつのモジュールとして部分的に援用することにより、その計算時間やコンピュータメモリを大幅に節約した計算の合理化に貢献すると考えられる。

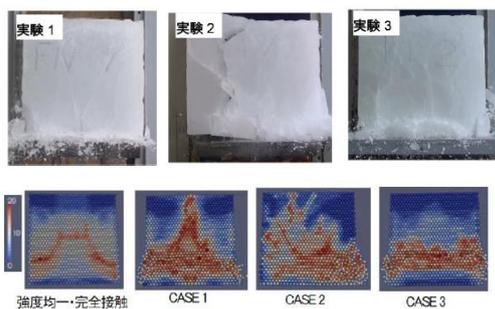


図-6 平板( $B/b < 1$ )への中規模衝突実験と数値計算結果の例 [  $B=L=0.6\text{m}$ ,  $h_i=0.16\text{m}$ ,  $V_0=4.8\text{m/s}$ ,  $B/b < 1$  ]

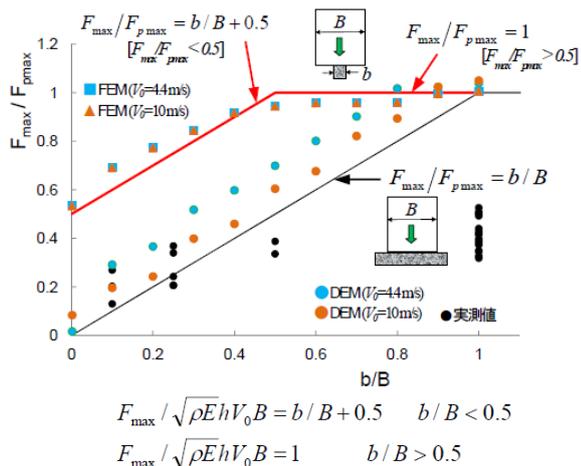


図-7 構造物幅( $b$ )を考慮した最大衝突力の簡易式の検討。実験および数値実験結果(DEMおよびFEM)を考慮。

### (4) 本研究の達成状況と意義ならびに今後の展望

冒頭に述べた、本研究で取り組む目的を概ね達成した。ただ、FEM-DEMのハイブリット計算法においてその境界面の設定に課題が残ったこと、また、今回DEMで設定した粒子の大きさは氷の結晶粒径相当を想定しているが、当初の目標(申請時)で設定した、分子動力学法等によるミクロスケールにおける検討が十分にできなかった。しかし、本研究では、船舶や構造物、海底などとの相互作用において、熱環境変化も考慮しつつ、氷板の変形(連続体挙動)から、クラック伝搬、破壊、そしてice-jam, ice pile-upなど大小の氷片化された大量の氷片群としての挙動(離散体的挙動)まで、一連の多種多様な挙動と、それら物体に作用する静的、動的(衝撃)荷重(応力波の分布)等を推定できるマルチスケール・マルチフィジックスな解析手法の開発を試みたという点で、概ね目標を達成したとともに学術的にも大きな成果を得たと自負している。本研究成果はまた急務とされている氷海域での津波防災対策、そして北極海航路や鉱物・石油天然ガス等の海底資源採掘などの北極海・亜極地開発にとって必要不可欠な高精度の海氷漂流予測ならびに構造物の安全性評価、海氷の利活用や共存のためのアイスマネジメント等への応用が期待される。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2件)

- (1) 木岡信治, 遠藤強, 竹内貴弘, 渡部靖憲: 中規模衝突実験及び数値実験に基づく海氷等脆性体の衝突力特性と簡易式の提案, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.73(12), 2017, 査読有。
- (2) S.Kioka, M. Ishida and T. Takeuch: Experimental and theoretical consideration on water depth and force on onshore structures driven by run-up Tsunami wave in ice-infested waters, Proc. of 24<sup>th</sup> IAHR International Symposium on Ice, 2018, 査読有。

[学会発表] (計 件)

[図書] (計 件)

〔産業財産権〕

○出願状況（計 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況（計 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※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。