

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11467

研究課題名（和文）仮想生物進化における新奇な個体間関係の創発と生態理解・応用への展開

研究課題名（英文）Emergence of novel individual relationships in evolution of artificial creatures and its application to understand ecological interactions and engineering

研究代表者

鈴木 麗璽（SUZUKI, REIJI）

名古屋大学・情報学研究科・准教授

研究者番号：20362296

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）：新奇な個体間関係の進化・創発の仕組みの解明と応用を目的とし、物理衝突によって発生する音を介した個体間相互作用の進化に焦点を合わせたブロック型仮想生物進化環境を構築した。ニッチの共有・競合に関する状況設定（集合、資源探索共有、音響ニッチ棲み分け）を想定し、リーダー・フォロワー創発、外適心に基づく集団行動、音響ニッチにおける棲み分け等の、新奇で複雑な個体間関係の進化を観察した。機械学習による進化過程の可視化も検討した。ロボット聴覚技術を活用した鳥類間の相互作用観測システムの開発も進め、実生態の知見と仮想生物の進化傾向の比較に向けた検討にも取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

仮想物理空間上の生物の体と動きを同時に進化させる手法が、リーダーとフォロワー、群れ行動、音声の周波数領域の棲み分けなど、音を介した個体間関係が創発する過程の議論に役立つことが示された。これは、相互作用するロボット集団設計などの工学的観点や、同時に開発したロボット聴覚技術に基づくシステムによって観測する鳥類の鳴き声相互作用などの実生態との比較に基づく理解からも重要であるといえる。

研究成果の概要（英文）：We constructed a framework for emergence and evolution of acoustic communication in the population of virtual creatures that can make sounds in a 3D physically simulated environment, aiming at understanding emergence of novel individual relationships and its application to understand ecological interactions and engineering. The experiments with several settings showed that the framework enables us to discuss the evolution of collective behaviors, exaptation, and acoustic niche separation, originating from an inevitable noise generated by behaviors of embodied agents. We also developed a framework for observing vocal interactions among songbirds in fields using a robot audition software HARK, and observed their behavioral patterns quantitatively.

研究分野：人工生命

キーワード：仮想生物進化 進化的新奇性 資源共有問題 鳥類の歌行動 人工生命

1. 研究開始当初の背景

進化の過程において従来存在しなかった新しい機能をもたらす構造や特性が出現することである進化的新奇性が生じるメカニズムの解明は、従来個別に議論されてきた生物の発生や生態がもたらす影響や相互作用を進化の理解に取り入れた、いわゆるエコ・エボ・デボ研究における重要な問いの一つである。

このような複数のレベルや時間スケールの過程間の相互作用の理解には、状況設定を抽象化した個体ベース進化モデルによるアプローチが有用であるが、従来のシンプルなエージェントモデルでは、質的な変化を伴う新奇な形質や多様な個体間関係そのものの創発を議論する点で限界があった。

一方、仮想的な物理空間において実体を持った生物の形態と行動を遺伝的アルゴリズム等で進化させる、いわゆる仮想生物の進化の研究がある。研究代表者のグループでは、エコ・エボ・デボに関連する概念の理解に対して、世界に先駆けて仮想生物の進化の枠組みでアプローチしており、初期世代では機能のないランダムな形態や行動から、生態的状況設定に応じた多様な形態や行動がスクラッチから創発しうることを示されており、仮想生物進化環境の新奇性創発理解のためのプラットフォームとしての有用性が強く示されていた。

2. 研究の目的

以上を踏まえ、本研究は、仮想生物進化環境を開発・使用して新奇な個体間関係の進化・創発の仕組みを明らかにすることを目的とする。具体的には、仮想物理空間を生かした個体間・種間相互作用に注目するため、物理衝突によって発生する音を介した仮想生物間の相互作用の進化に焦点を合わせたブロック型仮想生物進化環境を構築した。具体的な状況設定として、ニッチの共有・競合に関する複数の状況設定（集合、資源探索共有、音響ニッチ棲み分け）を想定した。これらの状況設定において、集団内に適応的な形態や行動が創発するか、そこにどのように可塑性や多様性が生じうるかを明らかにすることを目指した。この際、創発する複雑な行動傾向を機械学習等を用いて定量的に計測・可視化する手法も検討した。

また、研究代表者が継続して開発している、ロボット聴覚技術を用いた鳥類の鳴き声源定位システム HARKBird による、個体間相互作用の観測分析に基づく実生態の知見と仮想生物の進化傾向の比較も検討した。

加えて、個体間関係における可塑性・多様性進化に関する一般的知見を得るため、また、今回の状況設定との比較のため、関連する仮想生物・人工生命モデルによる進化実験と分析も行った。

3. 研究の方法

今回開発したモデルの概念図を図1に示す。3次元空間において複数のブロックから構成される複数の仮想生物が共存し、相互作用しながら進化する環境の土台を構築した。具体的には、各個体は、ネットワークで構成される遺伝子を持ち、これが形態（ブロックの形状と接続）を決める発生過程を表現する。さらに、遺伝子は各ブロックにおいて接触や8方向からの音量、資源ブロックの方向・距離の入力を受けるセンサーとそれに基づいてブロック同士の接続に力を加えるアクチュエータをつなぐニューラルネットワークを決定しており、全体として形態と行動パターンを決定している。ブロックは地面や直接接続していない自他のブロックと接触するとその場で音を発し、その音量は距離に応じて減衰して自他のセンサーへの入力となる。また、新奇な個体間関係の創発を議論するため、競合資源を表現するブロックを認識する機能も盛り込んだ。

上記のモデルに関して、他個体が発する音を手掛かりに集合するタスク、定常音源を手掛かりに環境中の資源を探索し共有するタスク、音響ニッチ仮説に基づく種間の周波数領域における棲み分けタスクを想定して実験・分析を行った。

また、屋外環境において個体間相互作用を観測可能なマイクアレイを用いた観測システム構築に向けて、野外個体に対するプレイバック実験やテント内の複数個体の観測システム構築を行い、知見の比較検討の可能性について検討した。

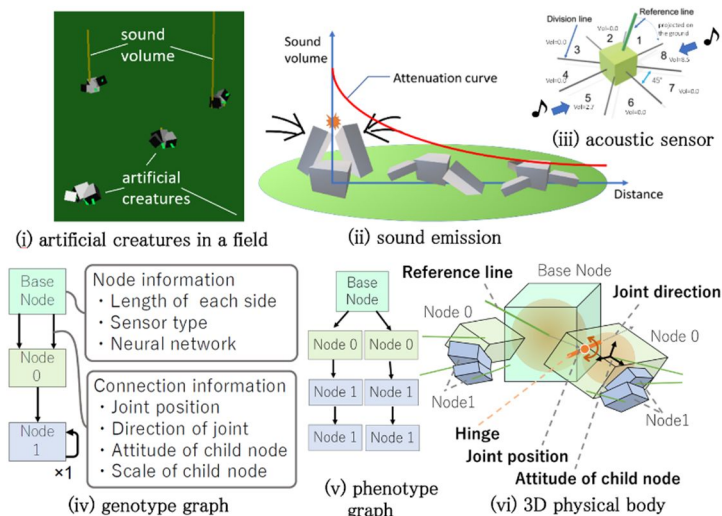


図1：仮想生物進化モデル

4. 研究成果

次のことが明らかになった。

- (1) まず、他個体が発する音を手掛かりに、一定ステップ後に自身の近傍により多くの個体を集めるほど適応的とした集合タスクを想定した(図2i)。実験と分析の結果、次第に数個のブロックからなる個体が音を発しながら複数のグループを形成する過程を確認することができた(図2i上)。最終世代における最適個体のクローンからなる集団における相互作用過程を分析したところ、その場にとどまり積極的に音を発して他個体を集めるリーダー的個体と、それに集まるフォロワー的個体が生じ、音響相互作用が柔軟な個体間関係を生じることが示された(図2i下)。
- (2) 次に、より環境構造や個体間相互作用を活かした仮想生物の進化を議論するために、定常音源を頼りに餌資源ブロックから決められた半径内の個体で分け合う問題設定を採用し、モデルを拡張した(図2ii上)。開発にあたっては、進化実験プログラムの実行を不安定化する要因となる遺伝子長増大の抑制、致死遺伝子の発生に起因する生物単純化の抑制、突然変異率の詳細な調整による多様化の促進等を考慮した。個体の移動軌跡を用いた集団行動の次元圧縮による可視化手法を構築し分析した結果、共有半径が個体間の物理的競合や資源共有のしやすさの程度に大きく影響し、半径が小さい場合には物理的競合により多様な集団進化が断続的に発生すること、半径が中程度の時には漸進的な進化によって最も適応的な集団へと進化しうることなどが判明した。詳細な調査の結果、特に、環境内に資源の在処の手がかりとなる定常音源が存在する状況において、音声を頼りに資源を発見・共有するように進化した生物集団を、定常音源のない環境に置いた場合、個体自身が地面等に接触して発する音を互いに認識し、集合する行動が創発した(図2ii下)。これは、ある適応行動が別の新奇な役割を持つ外適応の一種であると考えられ、特に、環境内に偏在する音声に基づく外適応は、個体間の新奇な関係の創発に重要な役割を果たしうることが示唆された。
- (3) また、多様な行動の創発と共存の進化により焦点を合わせるため、複数種を想定した音響ニッチ仮説に関する共進化モデルに拡張した。各個体について、一定時間において地面との接触等で発する音の周波数スペクトル成分の重心を計算する。各個体の適応度は、他種のスペクトル重心の平均からの距離で計算される。これは、発する音の成分が他種のそれと重複しないほど情報が伝わり適応的であることを示しており、音響ニッチ仮説に基づく棲み分けを期待するものである。実験の結果、低周波を出す種と高周波を出す種に分化し、それぞれ異なる体構造と行動パターンを持つことが判明した(図2iii)。
- (4) 鳥類の行動観測に関しては次のことを行った。米国加州の森林におけるホシワキアカトウヒチョウに対して同種の鳴き声をスピーカで再生するプレイバック実験を行った。再生する音声をかえて実験を行い、個体がいつどの歌をどこで歌ったかを2つのマイクアレイを用いて二次元平面上の歌の分布として表現し、影響の違いを明らかにした。生成モデルを用いて生成した人工的な鳴き声への国内ウグイスに対する反応についても調査した。以上から、生態環境にける個体間関係の定量的計測手法が開発できた。さらに、個体の多様性観測により適した環境として、テント内のキンカチョウの小集団における複数個体の鳴き声分布のマイクアレイを用いた抽出手法の検討を進め、高精度な鳴き声の二次元定位に成功した。一方、個体間相互作用の分析において重要となる、分離音源を用いた個体識別については、予備的分析において良好な結果を得つつあるが、改善が必要な状況にあり、さらなる進展が期待される。

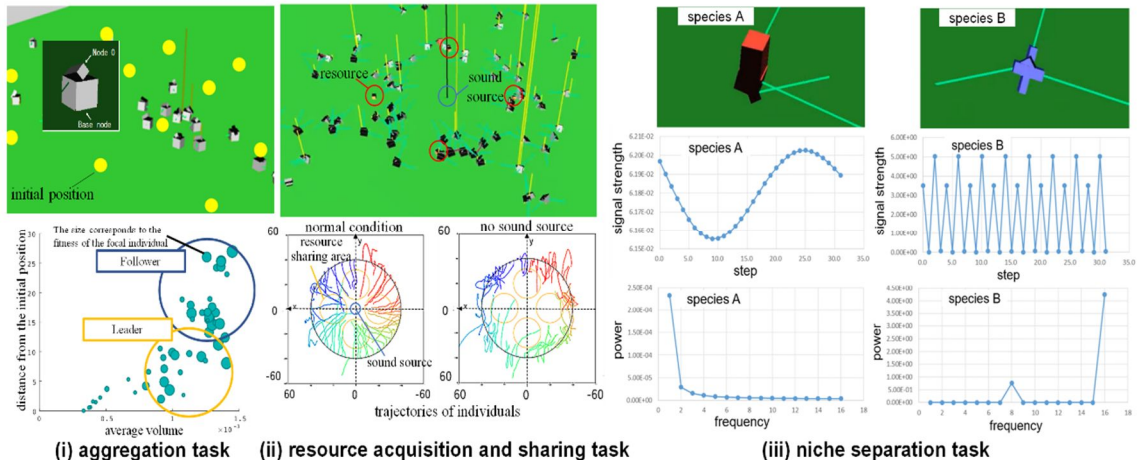


図 2 : (i)集合タスク, (ii)資源獲得・共有タスク, (iii)音響ニッチ棲み分けタスク

(5) 以上を総合し, 仮想生物進化手法が, リーダー・フォロワー創発, 外適応に基づく集団行動, 音響ニッチにおける棲み分け等の, 新奇で複雑な個体間関係の創発の議論に有用であることが示された。これは, 複雑な個体間相互作用に基づくシステム設計などの工学的観点からも重要な示唆であると考えられる。このように, 実生態における複雑な個体間関係に近いレベルの複雑さが仮想生態系で創発しうることが示されたのは, 知見の生態理解への展開においても重要な進展であると考えられる。また, 個体間相互作用に基づく可塑性進化や, ニッチ構築に基づく仮想生物進化ダイナミクスの定量的な観測への機械学習手法の応用を狙った研究等も並行して進めることで, 知見や手法の議論・応用を積極的に検討できた。

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 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ryohei Seki, Yoshiyuki Omomo, Naoaki Chiba, Reiji Suzuki and Takaya Arita	4. 巻 25(3)
2. 論文標題 A 3D simulation framework based on body-controller coevolution of virtual creatures for investigating the origin of acoustic interactions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 419-426
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10015-020-00601-x	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 Naoaki Chiba, Reiji Suzuki and Takaya Arita	4. 巻 7(45)
2. 論文標題 Evolution of complex niche-constructing behaviors and ecological inheritance of adaptive structures in a physically grounded environment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Robotics and AI	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） 10.3389/frobt.2020.00045	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 Shinji Sumitani, Reiji Suzuki, Shiho Matsubayashi, Takaya Arita, Kazuhiro Nakadai, Hiroshi G. Okuno	4. 巻 7(1)
2. 論文標題 Fine-scale observations of spatio-spectro-temporal dynamics of bird vocalizations using robot audition techniques	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Remote Sensing in Ecology and Conservation	6. 最初と最後の頁 18-35
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/rse2.152	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 Reiji Suzuki and Martin L. Cody	4. 巻 24
2. 論文標題 Complex systems approaches to temporal soundspace partitioning in bird communities as a self-organizing phenomenon based on behavioral plasticity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 439-444
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10015-019-00553-x	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 Masanori Higashi, Reiji Suzuki, Takaya Arita	4. 巻 6 (88)
2. 論文標題 The Role of Social Learning in the Evolution on a Rugged Fitness Landscape	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers in Physics	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphy.2018.00088	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22件(うち招待講演 1件/うち国際学会 16件)

1. 発表者名 坂野孝広, 鈴木麗璽, 有田 隆也
2. 発表標題 3次元仮想生物の進化における音響的相互作用に基づく資源共有戦略の創発
3. 学会等名 人工知能学会第34回全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河合恒輝, 鈴木麗璽, 有田隆也
2. 発表標題 仮想生物進化を用いた音響ニッチ仮説に関する初期的検討
3. 学会等名 情報処理学会第83回全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuya Nakamura, Reiji Suzuki, and Takaya Arita
2. 発表標題 Evolutionary design of soft robots that achieve energy-efficient locomotion based on co-evolution of morphology, materials, and control
3. 学会等名 The 26th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Reiji Suzuki, Ryohei Seki, Takahiro Banno, Kouki Kawai and Takaya Arita
2. 発表標題 An Artificial Creature Approach to the Origin of Acoustic Communication
3. 学会等名 The 2021 Conference on Artificial Life (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木麗壘, 炭谷晋司, 松林志保, 有田隆也, 中臺一博, 奥乃博
2. 発表標題 ロボット聴覚技術を用いた鳥類の鳴き声観測に対するマルチスケールアプローチ
3. 学会等名 日本生態学会第67回全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroki Hayashi, Reiji Suzuki, and Takaya Arita
2. 発表標題 Behavioral robustness and evolved evolvability of virtual developmental soft robots
3. 学会等名 The 25th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shinji Sumitani, Reiji Suzuki, Kazuhiro Wada, Takaya Arita, Kazuhiro Nakadai and Hiroshi Okuno
2. 発表標題 A robot audition approach toward understanding social interactions among songbirds in a semi-free flight environment
3. 学会等名 The 25th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 炭谷晋司, 松林志保, 鈴木麗璽, 有田隆也, 中臺一博, 奥乃博
2. 発表標題 生成モデルに基づく鳴き声を用いた鳥類に対するプレイバック実験の試行
3. 学会等名 第55回AIチャレンジ研究会(SIG-Challenge)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 炭谷晋司, 鈴木麗璽, 和多和宏, 有田隆也, 中臺一博, 奥乃博
2. 発表標題 ロボット聴覚技術を用いた鳥類小集団の相互作用観測環境の構築と予備調査
3. 学会等名 第37回ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinji Sumitani, Takemi Morimatsu, Reiji Suzuki, Shiho Matsubayashi, Takaya Arita, Kazuhiro Nakadai, Hiroshi G. Okuno
2. 発表標題 Robot Audition Approaches to Field Observation of Bird Songs
3. 学会等名 Late breaking results poster presentation in IROS2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Reiji Suzuki
2. 発表標題 Roles of social learning and physical niche construction on evolutionary novelty and diversity
3. 学会等名 The Fourth International Workshop of Social Learning and Cultural Evolution in the 2018 Conference on Artificial Life (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名	Shinji Sumitani, Reiji Suzuki, Naoaki Chiba, Shiho Matsubayashi, Takaya Arita, Kazuhiro Nakadai, Hiroshi G. Okuno
2. 発表標題	An Integrated Framework for Field Recording, Localization, Classification and Annotation of Birdsongs Using Robot Audition Techniques - Harkbird 2.0
3. 学会等名	2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP2019) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Ryohei Seki, Yoshiyuki Omomo, Naoaki Chiba, Reiji Suzuki, Takaya Arita
2. 発表標題	A 3D simulation framework based on body-controller coevolution of virtual creatures for investigating the origin of acoustic interactions
3. 学会等名	The 24th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 2019) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Hiroto Yonenoh, Reiji Suzuki, Takaya Arita
2. 発表標題	The effects of individual and social learning on the evolution in a co-creative fitness landscape
3. 学会等名	The 24th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 2019) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Yoshiyuki Omomo, Ryohei Seki, Naoaki Chiba, Reiji Suzuki, Takaya Arita
2. 発表標題	A framework for emergence and evolution of acoustic communication among virtual creatures that physically make sounds
3. 学会等名	EVOSLACE: Workshop on the emergence and evolution of social learning, communication, language and culture in natural and artificial agents in ALIFE2018 (国際学会)
4. 発表年	2018年

1 . 発表者名 Reiji Suzuki, Shinji Sumitani, Shiho Matsubayashi, Takaya Arita, Kazuhiro Nakadai, Hiroshi G. Okuno
2 . 発表標題 Understanding ecoacoustic interactions among songbirds as complex systems using robot audition techniques
3 . 学会等名 EVOSLACE: Workshop on the emergence and evolution of social learning, communication, language and culture in natural and artificial agents in ALIFE2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Reiji Suzuki, Shinji Sumitani, Shiho Matsubayashi, Takaya Arita, Kazuhiro Nakadai, Hiroshi G. Okuno
2 . 発表標題 Fine-scale observations of spatiotemporal dynamics and vocalization type of birdsongs using microphone arrays and unsupervised feature mapping
3 . 学会等名 The 10th International Conference on Ecological Informatics (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Shinji Sumitani, Reiji Suzuki, Shiho Matsubayashi, Takaya Arita, Kazuhiro Nakadai, Hiroshi G. Okuno
2 . 発表標題 Spatial localization of vocalizations of Spotted Towhee (<i>Pipilo maculatus</i>) in playback experiments using robot audition techniques
3 . 学会等名 The 10th International Conference on Ecological Informatics (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Shinji Sumitani, Reiji Suzuki, Shiho Matsubayashi, Takaya Arita, Kazuhiro Nakadai, Hiroshi G. Okuno
2 . 発表標題 Extracting the relationship between the spatial distribution and types of bird vocalizations using robot audition system HARK
3 . 学会等名 The 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 Shinji Sumitani, Reiji Suzuki, Shiho Matsubayashi, Takaya Arita, Kazuhiro Nakadai, Hiroshi G. Okuno
2. 発表標題 Understanding relationships between spatial movements and bird song-types using a robot audition system HARK with microphone arrays
3. 学会等名 The 27th International Ornithological Congress (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 炭谷晋司, 鈴木麗璽, 松林志保, 有田隆也, 中臺一博, 奥乃博
2. 発表標題 ロボット聴覚技術に基づく鳥類の歌行動の二次元定位精度改善と次元圧縮に基づく分類支援
3. 学会等名 日本鳥学会 2018年度大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Reiji Suzuki, Ryohei Seki, Takahiro Banno, Kouki Kawai and Takaya Arita
2. 発表標題 An Artificial Creature Approach to the Origin of Acoustic Communication
3. 学会等名 The 2021 Conference on Artificial Life (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究代表者Webページ http://www.alife.cs.i.nagoya-u.ac.jp/~reiji/</p>

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		
米国	University of California, Los Angeles		