

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12020

研究課題名（和文）領域の形状変化と隣接関係に着目した定性空間推論

研究課題名（英文）Qualitative Spatial Reasoning Based on the Shape Change of Regions and Their Adjacency

研究代表者

高橋 和子（Takahashi, Kazuko）

関西学院大学・工学部・教授

研究者番号：30330400

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、定性空間推論の手法を使って、隣接するオブジェクト同士が制約条件を満たしながら形状変化する様相を論理的に扱うシステムの基盤を与えた。これに基づき、輪郭に曲線を含むオブジェクトの形状が時間的に変化する状況や、空間的に離れた位置にあるオブジェクト同士が制約条件を満たすような連結方法を論理的に説明する。代表例として地質学における褶曲構造や断層をとりあげ、それらをモデル化して対応する定性的な記号表現を提案した。その表現上で、局所データからそれらを結ぶ大域的な構造を推論する手法を確立し定式化した。これを一般化し、曲線セグメントの2次元平面上における定性的な扱いの枠組みを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

数理的手法、データサイエンスなどを取り入れることで発展が期待されている研究分野は多いが、対象を論理ベースの離散モデルとして扱ったものは極めて少ない。本研究では、定性空間推論に基づく新たなアプローチをとっている。論理的記述を与えることで、応用分野の専門家が対象の構造や変化の意味を理解しやすい。論理的な推論システムを構築することで、すべての可能な解が機械的に生成されるだけでなくその解に至る根拠が明確になる。従って、これまで専門家の経験のみから解候補を出していた問題に論理的な説明を与えることができる。曲線を対象としており応用分野と計算機科学、トポロジーなどを結ぶ学際的研究としての価値も高い。

研究成果の概要（英文）：This study provides the basis for a system for logically handling the aspects of shape change with preserving the constraint between adjacent objects using qualitative spatial reasoning. It can show a logical explanation to the situation in which the shapes of objects with curves in their contours change in time and the method by which objects spatially distant from each other are connected in such a way that they satisfy the constraint conditions. We took fold structures and faults in geology as representative examples, modeled them, and proposed a corresponding qualitative symbolic representation. On the basis of this representation, we established and formulated a method for inferring the global structure connecting them from local data. We generalized this method and developed a framework for qualitative treatment of curved segments on a two-dimensional plane.

研究分野：情報学

キーワード：定性空間推論 構造地質学 トポロジー 論理推論

### 1. 研究開始当初の背景

定性空間推論(Qualitative Spatial Reasoning, QSR)[1,2]は、数値データを使わずある特定の特徴に着目して、オブジェクトやオブジェクト間のさまざまな関係を記号表現しその上で推論する手法であり、人工知能の一分野として1980年代頃から欧米を中心にさかんに研究されてきた。数値データを使用する定量的手法は正確かつ詳細な計算結果を出す。一方、定性的手法の多くは宣言的な記述によって人間の認知と合致する表現を与えるため、オブジェクトの変化の過程や理由を明確に説明でき、計算量も少ないというメリットがある。そのため、正確な計算をする前に対象を概観するための相補的手段として位置づけられる。着目する性質にはオブジェクト間の包含関係、接続関係、相対的位置や方向、サイズ、距離などさまざまなものがあるが、形状に着目したものは少なく、さらに形状が時間的に変更していくようなものを扱ったQSRの体系はほとんどない。また、オブジェクト同士の接続関係の表現は多く提案されているが、それを形状変化と統合的に扱うためには既存のQSRの手法では無理であり、まったく新しい表現方法を考える必要がある。

一方、地形の変化のようなマクロレベルから発生生物学で扱う器官形成のようなマイクロレベルまで、我々のまわりでは形状が時間的に変化していく様相が多く観測される。一般に、このような形状変化は周囲のオブジェクトと影響を及ぼしあっており、あるオブジェクトが周囲と隣接関係を保ちながら変形する場合と、分断してその間に別のオブジェクトの侵入を許す場合がある。そのため、ある物体の形状変化を観測・解析しようとする場合、対象とするオブジェクト単体ではなく、隣接する物体との接続関係をあわせて考慮することが望ましい。このような様相を説明するためのモデルは各分野で提案されており、解析するシミュレーションツールも提供されている。しかし、これらの手法やツールはいずれも定量的データを扱っているため、全体的な変化を辿ることはできても、変化の特徴や意味が容易に把握できない、という欠点がある。さらに、大量の数値データに対する計算を行うことから計算機の負荷も高くなる。

### 2. 研究の目的

本研究は、定性空間推論の手法を使って、時系列で与えられた空間データで起こっている形状変化を論理的に推論するシステムの基盤を与えることを目的とする。特に輪郭に曲線を含むオブジェクトについて、隣接するオブジェクト同士が制約条件を満たしながら形状が時間的に変化したり、空間的に離れた位置にある別のオブジェクトと制約条件を満たすように連結される状況を対象として、これに論理的な説明を与えるシステムを構築する。

### 3. 研究の方法

代表的な応用例として構造地質学[3]における地層を対象としてとりあげ、層同士の隣接関係と形状に着目した記述言語とその上で推論する体系を構築する。当初は、ある時刻における地層の構造や形状を1状態として記述し、記述言語上で状態遷移関係を定義することで時間的な形状変化を推論する体系を構築する予定だった。しかし、地層の全貌が露出していることは少ないため、構造地質学者が地層の解析をする際には複数の地点で採取された局所的なデータから全体の形状を推測するという手段をとっており、この部分は専門家の経験と判断のみによっていた。このような事実をふまえ、先に局所データから全体の構造を推論する手法に取り組むことにした。また、ここで取り組んだ問題は曲線の2次元平面上における扱いと関係することがわかったため、2次元平面上の曲線セグメントの定性推論手法について理論的な考察をした。

(記述言語の提案)

まず、褶曲構造を対象とする。褶曲構造は、平坦な地層に対して左右両側からおす力が加わったり下側から隆起する力をうけるなど外圧が加わることで変形してできるもので、力の方向によって回転したり折れたたまっていったりするが、構成する層同士の隣接関係が不変で、同一層がある方向に連続しているなどの特徴をもつ。この考えに基づき、褶曲構造の断面図を定性的に表す記述言語を定め、それが地層の特性をとらえたものになっているかについて議論する。

(推論体系の構築)

この記述言語上で局所データから大域的なデータを推論する方法を確立する。局所的に採取された2つのデータの記号表現に対して、同一性、および連続性の概念を定義しそれらを判定する規則を定める。同一性は同じ構成をもつ地層かどうかを表し、連続性は同一性をもつ2つのデータを左右または上下に連結したとき自然な褶曲地層が得られることを表す。

たとえば、図1の1, 2, 3の地点で得られたデータは、いずれもABCという隣接関係を含むことから同一地層の一部と考えることができる。

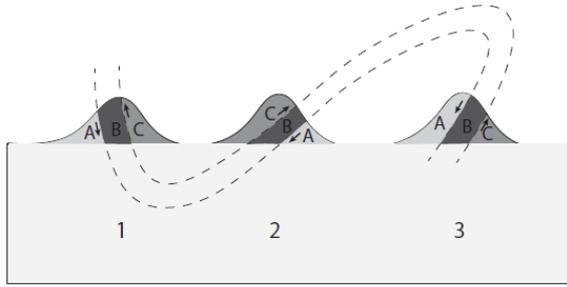


図 1: 局所データから大域的データの推論

このとき、B に対して A, C の層が矢印のようにすべることで B 層にひきずり褶曲と呼ばれる褶曲の一種の形状が観測されると、これらのデータを統合する大きな褶曲構造として図の点線部分のようなものが推論される。同一性と連続性の条件を満たすような局所データを補間していくことで大域的褶曲の概形を推論する手法を確立する。

(枠組みの拡張)

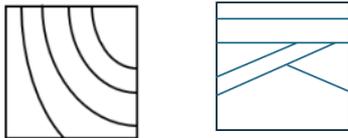
断面図で表示される 2 次元構造だけでなく 3 次元構造への拡張を考える。さらに、褶曲だけでなく断層のような不整合面を含む場合が扱えるように記述言語および推論体系を拡張する。

#### 4. 研究成果

(1) 褶曲地層を主な対象とし以下の研究を行った。

##### ① モデルの確定と記述言語の提案

褶曲軸に垂直な面を 2 次元平面に投影しその一部を矩形領域で切り取ったもの(図 2(a))を局所データのモデルの基本単位とし、これを表現する記述言語を定めた。モデルはいくつかの制約条件をもつ。代表的なものは以下の通りである。各層に対応する領域が連結であり層同士の境界線は円滑な連続曲線とする。また、境界線は必ず矩形の外枠に端点をもちそれは四隅には重ならないものとする。比較的単純な褶曲構造を対象とするため、層同士の境界線の傾きは同一とし、各境界線の傾きは単調で極点は存在しない。このようなモデルを記述する言語を定めた。この言語は層同士の隣接関係と境界線の形状に注目する定性的な記述になっている。境界線の形状については傾きおよび凸性のみに着目し、正確な曲率や層の厚みは無視する。



(a) 褶曲 (b) 断層

図 2: 褶曲と断層のモデル

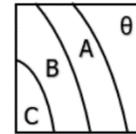


図 3: モデルと記述言語

まず、2 次元平面上で縦横それぞれの方向にそって走査する際に出現する層の順序を調べ、それをペアのデータとして表すことで試験的な記述言語を考案した。次に、より洗練され実装の簡便さを考慮した表現として、縦横各方向にそったペアのデータではなく層の並びを 1 つの列に集約して記述する方式を考案した。この方式では、局所データの外周を 1 周するときに出現する層を辺ごとに分割しながら記述することで単一の列として地層の構成を記述し、これに境界線の概形情報を加えて基本単位のデータを記述する。境界線の概形情報は、傾きと凸性で 4 種類に分類する。たとえば図 3 のモデルは  $((A\theta)(ABC)(B), 3)$  と記述する。A, B, C は層の名前であり、 $\theta$  は地表で層が存在しないことを、3 は境界線の形状が右下がりであり上に凸であることをそれぞれ表す。この記述言語をもとに以後の研究をすすめた。

与えられた記述言語に対して、条件を満たすモデルの図が描画できるようなものを妥当な記述言語と定義してそれが満たす条件を定め、モデルとの対応関係を示した。そして、与えられた任意の記述言語の妥当性判定および妥当な場合に対応するモデルの図を描くシステムを実装した。回転や反転などの操作結果の表示も可能にした。

##### ② 推論手法の構築

この記述言語上で、境界線の概形と矩形の外枠に出現する層の構成順序を引き出すことで、2 つの局所データ間の同一性と連続性を機械的に判定する手法を考案した。同一性は、記号列を辺ごとに分割せず循環列としてみたとき記号の並び方が完全一致するものとして簡単に判定できる。連続性は、2 つの局所データの連結部分の層の順序が完全一致することおよび連結したときに境界線が尖点のない円滑な連続曲線になることとして判定できる。連結を連続的に繰り返す場合、連結可能な条件や連結の結果得られるモデルの満たす条件は、上下左右どの方向にどの順番に連結するかによって複雑になる。連結可能な場合に、その結果得られるモデルの満たす拡張記述言語およびその拡張妥当性を定義し、それらの関係を証明した。この手法を応用し、複数の離れた場所における局所データが同一性を持つ場合にすべてを含むような大域的な褶曲構造を求めることができることを示した。

##### ③ 3 次元モデルへの応用

褶曲や不整合面のない単純な地層を対象として、1 次元データである複数のボーリング柱状図から 3 次元モデルの形状を推論する方法を記述言語上で考案した。柱状図は層の堆積順のみ

を与える1次元データとし、そのペアから地層の断面図である2次元データを得、さらにそれを使って3次元的な傾きを推論する手法を提案した。

以上の結果、地層の構造を解析するにあたり、提案した記述表現を用いることで地層の形成に関する論理的根拠を示すシステムの基盤を与えることができた。これによって、これまで専門家の経験と判断のみにたよっていた問題に対して専門家同士の議論も明確になり非専門家へのわかりやすい説明を提供できるようになった。

### (2) 不整合面を含む地層への拡張

(1)で述べた柱状図から断面図を得る方法を、不整合面を含む地層(図2(b))が扱えるように拡張した。同時に記述言語を不整合面を含む地層が扱えるように拡張し、断面図からそれに対応する記述言語を導く手法を考案した。具体例として、この手法を産業技術総合研究所(AIST)がWebサイトで公開しているボーリング柱状図[4]に適用し、すべての可能な断面図を生成した。このサイトに組み込まれた、一定の範囲内で断面図を生成する機能を利用して地質断面図を作成すると、本研究で生成した断面図に相当するものが含まれていることがわかった。

以上により、対象となる地層の種類を増やすことができ、また、実データにより提案手法の有効性が確認できた。今後の主な課題としては、モデルの制約条件の緩和と規模や複雑度の大きなものに適用できるように手法を改善することである。また、時間的な形状変化の扱いについて検討していくことが考えられる。

### (3) 他分野との関係

地層を対象とした研究の結果、曲線の扱いが重要であることがわかり、トポロジーや曲線の埋め込み問題等との関係が深いことがわかった。したがって、理論としてこのテーマを中心に研究を行った。

曲線の形状のみに焦点を絞り、曲線セグメントの2次元平面上における定性的な扱いについて考察した。具体的には、2次元平面上の離れた場所にある2つの曲線セグメントおよびそれらの相対的な位置関係が与えられたとき、複数の曲線セグメントを補間していくことでこの2つをつなぐ円滑な曲線を求めるという問題として以下の2つに分けて定式化した。

① 2つのセグメントの連結と、連結した結果得られる大局的曲線の始点と終点の方向関係に関する推論

② 与えられた方向関係を満たす2つのセグメントの連結と、大局的曲線を得るために補間されるセグメントに関する推論

曲線セグメントは正確なサイズや曲率を無視している。そのため、定性的に同じ形状ととらえられる2つのセグメントを直接連結するとこれらと同じ形状をもつ1つのセグメントが得られる。図4は2次元平面上で同じ形状をもつ2つの曲線セグメントX,Yが与えられたときの①②の問題の解を提示している。(a)はX,Yの位置を指定しない場合、直接に連結することで円滑な連結曲線を得、結果としてYはXの右上方向に位置することを表す。(b)はYがXの左下に位置するという条件を課した場合にX,Yの間に3つのセグメントを新たに挿入する必要があることを表す。曲線のセグメントは傾きと凸性で区別すると8種類になるが、任意のペアに対して最大4個のセグメントを挿入すれば(a)(b)ともに満たされることを示した。

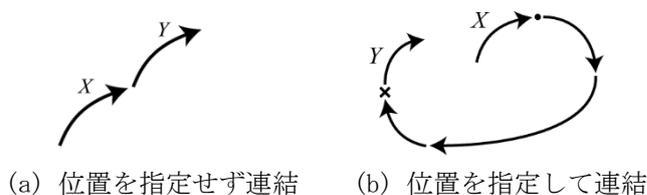


図4: 2次元平面上の曲線セグメントの連結

これによって2次元平面上の曲線セグメントの連結に関する定性的な扱いの枠組みが構築できた。この結果は医療画像や回路の配線レイアウト設計などの応用における新しいアプローチとして期待できる。今後は、2次元平面上に埋め込んだときの曲線の自己交差性について曲線埋め込み問題と関係させながら考察する。さらに、この結果をもとにQSRの体系としての整備をすることが考えられる。

#### [参考文献]

- [1] J. Chen, A. Cohn and D. Liu, "A survey of qualitative spatial representations," The Knowledge Engineering Review:30(1), pp.106-136, 2013.
- [2] Michael Sioutis and Dietrich Wolter, "Qualitative spatial and temporal reasoning: current status and future challenges." Proceedings of 30<sup>th</sup> International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp.4594-4601, 2021.
- [3] 狩野謙一, 村田明広「構造地質学」朝倉書店, 1998.

[4] 産業技術総合研究所, “都市域の地質地盤図” <https://gbank.gsj.jp/urbangeol/ja/map/tokyo/index.html>, 2024 年 3 月 1 日参照.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 2件）

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Yuta Taniuchi and Kazuko Takahashi   | 4. 巻<br>14546             |
| 2. 論文標題<br>Spatial Representation and Reasoning about Fold Strata: A Qualitative Approach                        | 5. 発行年<br>2024年           |
| 3. 雑誌名<br>15th International Conference, ICAART 2023, Revised Selected Papers, Springer LNCS                     | 6. 最初と最後の頁<br>244 ~ 266   |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |
| 1. 著者名<br>Kayo Masuda  | 4. 巻<br>27                |
| 2. 論文標題<br>Factorial affine $G_a$ -varieties isomorphic to hypersurfaces of Danielewski type                     | 5. 発行年<br>2022年           |
| 3. 雑誌名<br>Transformation Groups  | 6. 最初と最後の頁<br>1287 ~ 1305 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/s00031-020-09631-y   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |
| 1. 著者名<br>Daneshvar Narges, Azizi Hossein, Tsuboi Motohiro   | 4. 巻<br>12                |
| 2. 論文標題<br>Estimating Magma Crystallization Temperatures Using High Field Strength Elements in Igneous Rocks     | 5. 発行年<br>2022年           |
| 3. 雑誌名<br>Minerals   | 6. 最初と最後の頁<br>1260 ~ 1260 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3390/min12101260  | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する              |
| 1. 著者名<br>Sumihiro Yoneyama and Hiroyoshi Miwa   | 4. 巻<br>1                 |
| 2. 論文標題<br>Algorithms for Path Planning and Scheduling of Automated Guided Vehicles Iteratively Carrying Objects | 5. 発行年<br>2022年           |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of the 14th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative System    | 6. 最初と最後の頁<br>432 ~ 441   |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/978-3-031-14627-5_44   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Yuta Taniuchi and Kazuko Takahashi  | 4. 巻<br>2               |
| 2. 論文標題<br>Qualitative Spatial Representation and Reasoning about Fold Strata               | 5. 発行年<br>2023年         |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of 5th International Conference on Agents and Artificial Intelligence | 6. 最初と最後の頁<br>211 ~ 220 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|   |                 |
|---|-----------------|
| 1. 著者名<br>Fatemeh Nouri, Motohiro Tsuboi, et al.  | 4. 巻<br>362     |
| 2. 論文標題<br>Early Cambrian highly fractionated granite, Central Iran: Evidence for drifting of northern Gondwana and the evolution of the Proto-Tethys Ocean | 5. 発行年<br>2021年 |
| 3. 雑誌名<br>Precambrian Research  | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.precamres.2021.106291   | 査読の有無<br>有      |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する    |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>赤坂 昌孝, 大島 由裕, 巳波 弘佳          | 4. 巻<br>121           |
| 2. 論文標題<br>ネットワークフロー量増加のためのリンク増設容量決定問題 | 5. 発行年<br>2022年       |
| 3. 雑誌名<br>信学技報                         | 6. 最初と最後の頁<br>85 ~ 90 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし         | 査読の有無<br>無            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>矢野皓, 米山純央, 巳波弘佳                | 4. 巻<br>121           |
| 2. 論文標題<br>故障確率を考慮したノード保護による分断耐性ネットワーク設計 | 5. 発行年<br>2022年       |
| 3. 雑誌名<br>信学技報                           | 6. 最初と最後の頁<br>37 ~ 42 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし           | 査読の有無<br>無            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>高橋和子, 谷内勇太, 森田凌平, 黒岩杏衣              |
| 2. 発表標題<br>定性的形状に基づく2次元平面上の曲線分の表現およびその連結に関する推論 |
| 3. 学会等名<br>第128回人工知能基本問題研究会                    |
| 4. 発表年<br>2024年                                |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>谷内勇太, 高橋和子                |
| 2. 発表標題<br>地層の傾きに関する3次元上での定性的な推論について |
| 3. 学会等名<br>第22回情報科学技術フォーラム           |
| 4. 発表年<br>2023年                      |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>谷内勇太, 高橋和子              |
| 2. 発表標題<br>地層データの定性表現と其上での推論方法について |
| 3. 学会等名<br>第21回情報科学技術フォーラム         |
| 4. 発表年<br>2022年                    |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Motohiro Tsuboi  |
| 2. 発表標題<br>Raman spectroscopic study of minerals in granitic rocks  |
| 3. 学会等名<br>The European Symposium on Analytical Spectrometry 2022 and the 17th Czech-Slovak Spectroscopic Conference (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>増田佳代   |
| 2. 発表標題<br>Factorial affine $G_a$ -varieties with principal plinth ideals |
| 3. 学会等名<br>第21回アフィン代数幾何学研究集会（招待講演）（国際学会）                                  |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|                             |
|-----------------------------|
| 1. 発表者名<br>高橋和子, 守安諒祐       |
| 2. 発表標題<br>地層データの定性空間表現について |
| 3. 学会等名<br>情報処理学会第84回全国大会   |
| 4. 発表年<br>2022年             |

〔図書〕 計1件

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>R.V. Gurjar, K. Masuda, M. Miyanishi | 4. 発行年<br>2021年 |
| 2. 出版社<br>De Gruyter                           | 5. 総ページ数<br>348 |
| 3. 書名<br>Affine Space Fibrations               |                 |

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|           | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                    | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)            | 備考 |
|-----------|--|----------------------------------|----|
| 研究<br>分担者 | 増田 佳代<br><br>(Mazuda Kayo)<br><br>(40280416) | 関西学院大学・理学部・教授<br><br><br>(34504) |    |

6. 研究組織（つづき）

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                        | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                   | 備考 |
|-------|--|---|----|
| 研究分担者 | 巳波 弘佳<br><br>(Hiroyoshi Miwa)<br><br>(40351738)  | 関西学院大学・工学部・教授<br><br><br><br>(34504)    |    |
| 研究分担者 | 壺井 基裕<br><br>(Motohiro Tsuboi)<br><br>(60411774) | 関西学院大学・生命環境学部・教授<br><br><br><br>(34504) |    |

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 |
|---------|---------|
|         |         |