

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14646

研究課題名（和文）脳動脈瘤の応力集中部の特定に向けた4D流体応力場計測システムの開発

研究課題名（英文）Development of 4D hydrodynamic stress field measurement system for specification of stress concentration in cerebral aneurysm

研究代表者

武藤 真和（Muto, Masakazu）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：30840615

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、二次元非定常流体応力場の光学計測手法「高速度光弾性法」を拡張し、脈動流により非定常変動する脳動脈瘤内部の応力集中部の三次元位置を実験的に特定することを最終目標に掲げた。成果として、円管内を流れる模擬血液の三次元応力場を非定常計測できる「4D (3 dimension + time) 流体応力場計測システム」の構築に成功した。本手法は高速度偏光カメラとindex-matching法を複合しており、さらには得られた計測データに画像再構成手法を施すことで、円管の任意断面における二次元応力ベクトル場を可視化できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

流体応力場を実験的に非定常・非接触計測できる本計測手法の開発は、流速場計測を基盤に発展してきた流体力学分野に対して学術的および社会的に意義がある。本計測手法は、新たな流体計測技術として活用できるだけでなく、流体応力場計測データを基盤とした流体力学の学問を進展させるポテンシャルを秘めている。例えば、血行力学分野に限定した具体例として、くも膜下出血の原因となる脳動脈瘤の破裂機構の解明や、血液（非ニュートン流体）の応力構成方程式の開発などに貢献する。

研究成果の概要（英文）：In the present study, high-speed photoelasticity, an optical measurement method for two-dimensional unsteady hydrodynamic stress fields, was applied to the experimental detection of three-dimensional stress concentrations inside a cerebral aneurysm fluctuating unsteadily due to the pulsating flow. As a result, we succeeded in constructing a “4D (3 dimension + time) hydrodynamic stress field measurement system” that enables unsteady measurement of the three-dimensional stress field of simulated blood flowing in a circular tube. This method combining a high-speed polarization camera and an index-matching method enables the visualization of a two-dimensional stress vector field in an arbitrary cross-section of a circular tube by applying an image reconstruction method to the measured data.

研究分野：流体力学

キーワード：血行力学 流体計測 圧力計測 可視化技術 偏光計測 複屈折 高速度光弾性法 画像再構成

1. 研究開始当初の背景

心疾患や脳血管障害などの血液循環系の疾患は日本の三大死因である。日本はクモ膜下出血の発症が世界的に高い(年間1万3千人が死亡、その約95%は応力集中による脳動脈瘤の破裂が原因(小松ら, *脳神経外科*, 1994))。脳動脈瘤破裂の原因解明には、応力集中部の調査が鍵となるが、下記(1)-(3)の課題が存在する。

(1) 非定常性(血流の脈動流)

血液の脈動流の流速発達時間は80msと短く、それに伴い流れ場と応力集中部が非定常変動する。

(2) 三次元複雑形状を有する瘤

瘤は三次元複雑構造を有するため、圧力センサなどの接触式計測では応力集中部を逃す可能性が高い。また、血管内の血流を三次元可視化する4D flow MRIでは、時空間分解能の低さから大動脈解析に限られる(Ooji et al., *Ann. Biol. Eng.*, 2014)。

(3) 議論段階にある非ニュートン流体(血液)の数理モデル

PIVや4D flow MRIなどの非接触式光学計測では、瘤内の任意断面の流れのみを可視化できる。そのため、計測した流速場に対して、非ニュートン流体(血液)の数理モデルに基づきせん断応力を推定する手法が採用される。しかし、数理モデルの妥当性について十分な実験的検証が行われていないといった学術的な問いが存在する(Boyd et al., *Phys. Fluids*, 2007)。

2. 研究の目的

申請者の提案する二次元非定常流体応力場の光学計測手法「高速度光弾性法」(課題番号: 19K23483)を、三次元非定常計測へと拡張することで「4D(3 dimension + time)流体応力場計測システム」を構築する。さらに、脳動脈瘤の破裂メカニズムの解明に向け、脈動流により非定常変動する瘤内部の応力集中部の三次元位置を特定することを本研究計画の最終目標とする。

3. 研究の方法

本研究では、(1)位相差と主応力差の校正実験、(2)計測対象厚さの補正係数の導出、(3)4D流体応力場計測システムの構築、を本計測手法の開発基盤として、最終課題(4)脳動脈瘤モデルの非定常流体応力場における応力集中部の特定、の達成を目指した。

(1) 位相差と主応力差の校正実験:

位相差と主応力差の校正実験を通して、高速度光弾性法により取得した位相差の計測データを応力に変換させるための校正係数(応力光学係数)を取得する。

(2) 計測対象厚さの補正係数の導出:

光弾性法では、主応力差 σ_d 、計測対象厚さ t 、応力光学係数 C の積に対する位相差 δ の比例関係($\delta = C\sigma_d t$)が知られている(辻ら, *光弾性実験法*, 1965)。そこで、計測した位相差の三次元積算データを、厚さ t の影響を含まない二次元投影画像に落とし込むために、計測対象厚さの補正係数を導出する。

(3) 4D流体応力場計測システムの構築:

複雑形状の脳動脈瘤内の非定常せん断応力場の可視化に向けて、円管流路における三次元流体応力を非定常に可視化する「4D流体応力場計測システム」を構築する。

(4) 脳動脈瘤モデルの非定常流体応力場における応力集中部の特定:

血液を模擬した作動流体を用いて、瘤モデルの非定常流体応力場を可視化し、応力集中部の三次元位置を5mm未満の精度で特定する。

4. 研究成果

(1) 位相差と主応力差の校正実験

液体の伸長応力計測手法 CaBER-DoS (Dripping-onto-substrate capillary break-up extensional rheometry) と高速度光弾性法を複合した伸長レオ・オプティックス校正実験装置を構築し、応力光学係数の取得を試みた(図1)(Muto et al., *ArXiv*, 2022)。CaBER-DoSでは、一軸伸長させた高分子流体に作用する純粋な垂直応力を非接触計測できる。さらに、一軸伸長状態の高分子流体が発現する位相差分布(積算複屈折分布)を高速度偏光カメラにより撮影することで(図1(c))、位相差と主応力の同時計測を実現し、応力光学係数の取得に成功した(Muto et al., *APS/DFD*, 2020)。

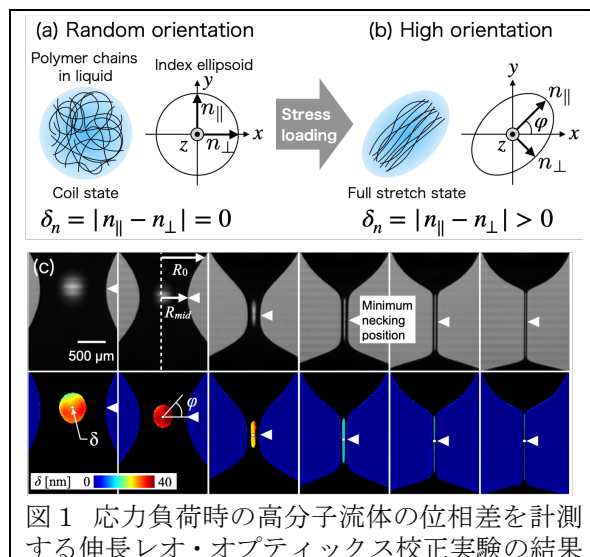


図1 応力負荷時の高分子流体の位相差を計測する伸長レオ・オプティックス校正実験の結果

伸長レオ・オプティックス校正実験装置の高精度化に向けて、一軸伸長する液体高分子の複屈折・伸長粘度・伸長応力の導出方法を見直した。semi-rigid な高分子（キサンタンガム）と flexible な高分子（ポリエチレンオキシド）の差異を調査した結果、複屈折データが高分子鎖の構造変化（高分子鎖が絡まり合うコイル状態（図1(a))から、引き延ばされたストレッチ状態（図1(b))へ遷移する過程）を反映する可能性が示唆された（Muto et al., *ICTAM*, 2021）。これらは光学応力則（複屈折と流体応力の比例関係）の成立条件の調査に対して有益となる。

(2) 計測対象厚さの補正係数の導出

異なる厚さ（断面積）を有する矩形直線流路内を流れる高分子流体の位相差計測を実施した。位相差は光軸方向に積算した主応力差と比例するため、Matlab (R) により算出した積算応力場と比較検証したが、両者の空間強度分布は一致しなかった。そこで、積算応力場に対して鎖状高分子の配向方向に対応した応力テンソル変換を施し、それと位相差分布を比較した結果、両者の空間強度分布はよい一致を示したことから、液体高分子における応力光学応力則を実証できた。さらに計測対象を、円管内を流れる高分子結晶（セルロースナノクリスタル）水溶液まで拡張し、この条件においても同様に応力光学応力則が成立することを確認した（図2）（武藤ら、*日本流体力学会誌* ながれ, 2022）。上記の活動を通して、当初は補正係数の導出を予定していたが、実際には光軸方向に傾く屈折率楕円体を考慮する必要があるなどの複数の課題が浮かび上がり、単純な補正係数として記述できないことが判明した。

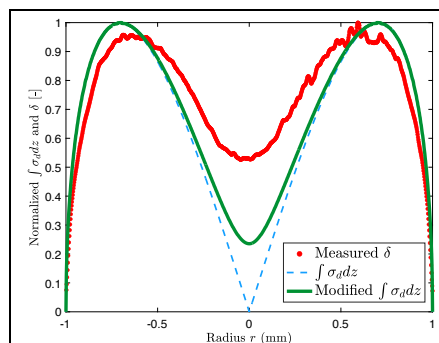


図2 円管の流路幅方向における位相差分布（実験値）と積算応力場（理論値）の空間強度分布の比較

(3) 4D 流体応力場計測システムの構築

円管内流動場の計測では、高分子結晶水溶液を使用し、ガラス製流路壁面の屈折光の影響を抑える index matching を導入し、位相差分布の良好な可視化に成功した（武藤ら、*日本混相流学会*, 2021）。

位相差分布画像に画像再構成技術（逆投影法、逆ラドン変換）を施すことで、流路内任意断面の二次元複屈折分布の取得に成功した（図3）（武藤ら、*日本流体力学会年会*, 2022）。高速度偏光カメラによる高速撮影により取得した位相差画像データから二次元場および三次元場の複屈折分布の連続画像データを取得できるため、4D 流体応力場計測システムの構築を達成した。

高速度偏光カメラにより計測した方位データと位相差を複合し、応力ベクトル場（主応力差ベクトル場）を可視化した。また、液体ジェットの応力ベクトル場可視化の先行研究（Miyazaki, Muto et al., *Scientific Reports*, 2021）と同様の方法を利用して、流路壁面に作用する垂直応力と壁面せん断応力を分解した。流体応力ベクトル場の可視化は当初予定していなかった。一方、脳動脈瘤の破裂因子には血流のせん断応力が寄与している背景があるため、垂直応力とせん断応力の各種応力ベクトル場を分解して可視化できる本手法はこれに貢献できる可能性を示している。

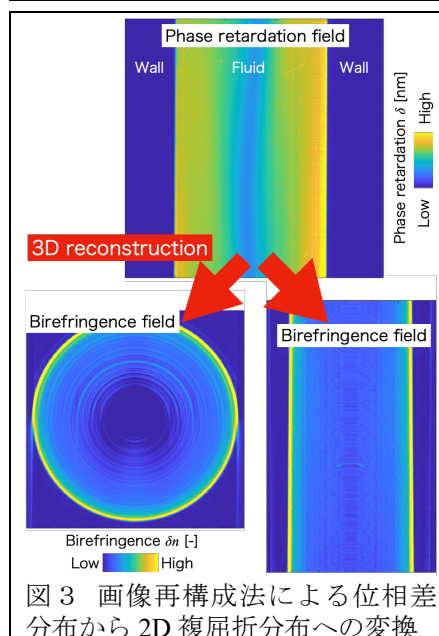


図3 画像再構成法による位相差分布から2D複屈折分布への変換

(4) 脳動脈瘤モデルの非定常流体応力場における応力集中部の特定

本実験の作動流体（よう化ナトリウム（index matching 材料）と高分子結晶を添加した水溶液）は、せん断速度の上昇に従いせん断粘度が低下する shear-thinning 特性を示し、血液（全血）の粘度特性と良好な一致を示した。よって、模擬血液として使用できる作動流体の開発を達成した。

瘤モデルの非定常流体応力場の可視化に関しては、小林和也助教（日本工業大学）のご協力のもとでゲル製の脳動脈瘤モデルを開発し、流量増加に伴う瘤モデルの位相差分布の連続画像撮影に成功した（図4）。しかし、瘤モデルの応力集中部の三次元位置の特定を達成するためには、複屈折の画像再構成だけでなく、流体工学に止まらない複合的な学術的・技術的課題（屈折率楕円体や結晶高分子凝集など）が明らかになった。これら課題の解決には、ソフトマター/レオロジー/物理化学/光学などに精通する異分野研究者との新研究体制を編成する必要がある。そこで、さらに研究を大幅に加速させるために研究課題を基盤(B)（課題番号：23K26038）へと切り替え、新たな研究体制を構築した上で継続して実施することに至った。

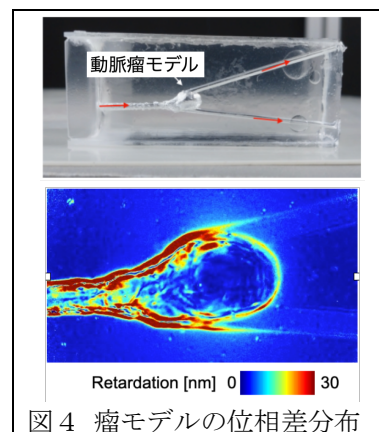


図4 瘤モデルの位相差分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Nakamine Kento, Yokoyama Yuto, Worby William, Muto Masakazu, Tagawa Yoshiyuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Integrated photoelasticity measurements of a three-dimensional laminar flow: second-order stress terms in the stress-optic law	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optica Open	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） 10.1364/opticaopen.21967049	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 武藤真和, 小林和也	4. 巻 43
2. 論文標題 高分子ゲルおよび液体高分子の応力相互作用の高速度光弾性法による可視化技術の開発	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 可視化情報学会誌	6. 最初と最後の頁 46-49
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 武藤真和, ウォービーK.A.ウィリアム, 中峰健登, 横山裕杜, 田川義之	4. 巻 41
2. 論文標題 流動複屈折計測とインデックスマッチングを複合した円管内流体応力場計測手法の開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本流体力学会誌	6. 最初と最後の頁 383-386
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 Masakazu Muto, Yoshiyuki Tagawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Unsteady rheo-optical measurements of uniaxially extending liquid polymers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 arXiv	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） 10.48550/arXiv.2204.13450	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Miyazaki Yuta, Usawa Masashi, Kawai Shuma, Yee Jingzu, Muto Masakazu, Tagawa Yoshiyuki	4. 巻 11
2. 論文標題 Dynamic mechanical interaction between injection liquid and human tissue simulant induced by needle-free injection of a highly focused microjet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	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) 10.1038/s41598-021-94018-6	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 -

1. 著者名 五十嵐大地, 宮崎優太, 鶴澤雅, 河合脩真, YEE Jingzu, 武藤真和, 関口翔斗, 田川義之	4. 巻 2
2. 論文標題 集束ジェットによる無針注射時発生応力と機械学習によるジェット速度安定性調査	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ながれ	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) なし	査読の有無 無
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18件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Masakazu Muto, William Kai Alexander Worby, Kento Nakamine, Yuto Yokoyama, Yoshiyuki Tagawa
2. 発表標題 Non-contact and non-steady rheo-optical measurement of hydrodynamic stress fields inside a cylindrical tube
3. 学会等名 20th International Symposium on Applications of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics (LISBON) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kento Nakamine, Masakazu Muto, Yuto Yokoyama, Yoshiyuki Tagawa
2. 発表標題 Three-Dimensional Measurement Of A Stress Field In A Rectangular Channel Flow Using A Photoelastic Method
3. 学会等名 20th International Symposium on Applications of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics (LISBON) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Misa Kawaguchi, Harumi Yagi, Ryuta X. Suzuki, Masakazu Muto, Yuichiro Nagatsu, Yoshiyuki Tagawa
2. 発表標題 Photoelastic measurement and numerical investigation on viscous fingering
3. 学会等名 The 11th International Conference on Multiphase Flow (ICMF2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 武藤真和, ウォービーウィリアム海アレクサンダー, 中峰健登, 横山裕杜, 田川義之
2. 発表標題 流動複屈折計測とインデックスマッチングを複合した円管内流体応力場計測手法の開発
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 武藤真和, ウォービーウィリアム海アレクサンダー, 中峰健登, 小林和也, 田川義之
2. 発表標題 血液-血管応力相互作用の理解に向けた液体高分子と高分子ゲルの高速度光弾性法の開発
3. 学会等名 日本実験力学会 2022年度年次講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林和也, 中峰健登, ウォービーウィリアム海アレクサンダー, 武藤真和, 田川義之
2. 発表標題 血液と血管の応力相互作用解明に向けた高速度光弾性法の開発
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ウォービーウィリアム海アレクサンダー, 中峰健登, 横山裕杜, 武藤真和, 田川義之
2. 発表標題 クエット流動下における応力計測と高速度偏光カメラによる複屈折の同時計測手法の開発
3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉野辰哉, 菊地慶悟, 武藤真和, 村岡彩子, 岩田修一, 中村匡徳, 大須賀智子, 玉野真司
2. 発表標題 ヒト卵胞液の内部構造変化とせん断粘度の関係
3. 学会等名 日本機械学会東海支部 第72期総会・講演
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 菊地慶悟, 吉野辰哉, 武藤真和, 村岡彩子, 岩田修一, 中村匡徳, 大須賀智子, 玉野真司
2. 発表標題 微量生体サンプルの伸長粘度計測に向けた液滴落下装置の開発
3. 学会等名 日本機械学会東海支部 第54回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masakazu Muto, Yoshiyuki Tagawa
2. 発表標題 Development of unsteady hydrodynamic stress field measurement method using photoelastic technique
3. 学会等名 ICTAM 2020+1 (The 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武藤真和, 中峰健登, 田川義之
2. 発表標題 血流応力場の実験計測に向けた高分子流体の光弾性法の開発
3. 学会等名 混相流シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中峰健登, 武藤真和, 田川義之
2. 発表標題 光弾性法による矩形管内層流の応力と偏光位相差の関係
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関口翔斗, 宮崎優太, 鶴澤雅, 河合脩真, Yee Jingzu, 五十嵐大地, 武藤真和, 田川義之
2. 発表標題 集束マイクロジェットの射出および軟質材料貫入時の応力場計測
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 五十嵐大地, 宮崎優太, 鶴澤雅, 河合脩真, Yee Jingzu, 武藤真和, 関口翔斗, 田川義之
2. 発表標題 無針注射器の実現に向けた集束形状マイクロジェットと人体模擬組織の相互作用の実験的解明
3. 学会等名 日本機械学会 第99期 流体工学部門 講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masakazu Muto, Yoshiyuki Tagawa
2. 発表標題 Measurement of Unsteady Stress Field of Extending Liquid Polymer
3. 学会等名 73rd Annual Meeting of the American Physical Society Division of Fluid Dynamics (APS DFD) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武藤 真和, 田川 義之
2. 発表標題 光弾性を利用した伸長状態下の高分子流体の流体応力場計測
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中峰 健登, 武藤 真和, 田川 義之
2. 発表標題 矩形マイクロ流路内定常層流の理論応力場と実験計測
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河合 脩真, 宮崎 優太, 武藤 真和, 田川 義之
2. 発表標題 集束形状型マイクロジェット貫入による軟質材料内応力場の可視化
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 マイクロ・ナノ熱工学の進展編集委員会 代表者 丸山茂夫 編集委員一同	4. 発行年 2021年
2. 出版社 (株)エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 808
3. 書名 マイクロ・ナノ熱工学の進展	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>流動複屈折計測とインデックスマッチングを複合した円管内流体応力場計測手法の開発 https://www.nagare.or.jp/download/noauth.html?d=41-6_383_tokushu2.pdf&dir=168</p> <p>動的流体応力場の実験的可視化手法の開発 https://www.nagare.or.jp/download/noauth.html?d=38-6_tokushu8.pdf&dir=94</p> <p>独立行政法人日本学術振興会 科研費 研究成果トピックス https://topics.jstps.go.jp/Opac/LpSxvk1jrG98S_8z0LP756gxi5e/1XrIH3DTLdoCZy0hX_KRB5vClIve/description.html</p> <p>武藤真和 research map https://researchmap.jp/mmuto/</p> <p>複雑流体制御研究室（玉野・武藤研究室） http://complex-fluids.web.nitech.ac.jp/</p> <p>研究者データシステム（名古屋工業大学） https://researcher.nitech.ac.jp/html/100001061_ja.html</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
研究協力者	小林 和也 (Kobayashi Kazuya) (00849474)	日本工業大学・基幹工学部・助教 (32407)	

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
---------	---------