

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01245

研究課題名（和文）渦生成・発達・消滅過程の定量的解析と高効率壁乱流制御への応用

研究課題名（英文）Quantitative analysis of vortex generation, development and decay processes, and its application to highly efficient wall turbulence control

研究代表者

岩本 薫（Iwamoto, Kaoru）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：50408712

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、壁乱流の核心的構造である「渦」の生成・発達・消滅過程を含むライフサイクルを、新たに導出した渦構造の輸送方程式を用いて定量的に解明した。具体的には、高解像度スペクトル法を用いたチャンネル乱流の直接数値計算を実施し、輸送方程式各項の流体力学的特性を明らかにした。さらに、渦の輸送方程式を用いることで、従来勘案できなかった渦の時間発展に着目し、既存の制御則より高効率な壁乱流制御手法を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、壁乱流の中核的構造である渦の生成・発達・消滅過程を定量的に世界で初めて明らかにし、渦構造の普遍的知見を得た。新規に導出した渦の輸送方程式は、抵抗低減を目的とした乱流制御に留まらず、渦に関連する全ての流体现象に応用が可能である。即ち剥離や流れ構造の制御、流体力の制御、騒音低減、伝熱・拡散制御、反応制御などにも適用でき、新技術開発、環境問題軽減に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：Life cycle of vortices, which are core structures of wall turbulence, was quantitatively elucidated including generation, development, and decay processes using a newly derived transport equation for vortical structures. Specifically, direct numerical simulations of turbulent channel flow were performed using a high-resolution spectral method, and the characteristics of each term in the transport equation were clarified. Furthermore, by using the vortex transport equation, we focused on the temporal evolution of vortices, which could not be taken into account in the past, and developed a more efficient turbulence control law.

研究分野：流体工学

キーワード：壁乱流 渦 輸送方程式 直接数値計算 乱流制御

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 固体壁に接する乱流(壁乱流)の本質的解明には、乱れエネルギーの散逸を担う空間的構造(乱流準秩序構造)である微細な「渦」の解析が必要不可欠である。渦構造は「渦中心の対流速度で移動する座標系から見たときに、中心軸に垂直な平面に投影した瞬時の流線が大まかに円形あるいは螺旋状を描く構造」と定性的に定義できる。スカラー量を基準とした定量的な渦同定が多く行われているが、その定義や閾値は研究者により異なる。例えば速度勾配テンソルの第2不変量は渦運動とよく対応する。

(2) 渦構造の生成・発達・消滅過程の解明は壁乱流現象の第一義的理解に必須であるが、定性的解釈しか得ていない。例えば、渦のレッグ部から生成し、ネック、ヘッド部へと成長してヘアピン渦が出来上がる。2000年代では高レイノルズ数壁乱流の正確な描像を求めて、渦が流れ方向に連続して生成を続けるパケット構造や外層において大規模低速領域に渦構造が集まる現象(渦構造のクラスター化)が観察された。レイノルズ数が増加するにつれて、渦構造のスケールのダイナミックレンジが広がるだけでなく、力学的に異なったメカニズムが存在する可能性があるが、未解明である。すなわち、渦構造の時空間的発展の描写は人間の目による可視化を基にしており、定性的な評価しかなし得なかった。

2. 研究の目的

(1) 高解像度高精度スペクトル法を用いたチャネル乱流の直接数値計算を実施する。新規に導出した渦構造の輸送方程式の各項を分析し、従来では定性的解釈に留まっていた渦の生成・発達・消滅過程を含めたライフサイクルを定量的に明らかにする。

(2) 次に、摩擦抵抗低減を目的とした乱流制御手法が、渦の生成・発達・消滅過程に与える影響を定量的に明らかにする。つまり渦生成の抑制効果、渦の発達の抑制効果、渦の減衰の活性化効果を区別して解析する。最終的に、高効率に摩擦抵抗を低減するために、時間発展を含めた渦構造への最適な制御手法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 新規に導出した渦構造の輸送方程式各項の流体力学的特性を定量的に明らかにする。各項の統計量分布を算出し、渦の時間発展への各項の寄与を定量的に示す。低レイノルズ数のチャネル乱流だけでなく、高レイノルズ数壁乱流も対象とし、定量的に明らかにする。

(2) 流れの瞬時場の可視化により、渦の生成・発達・消滅領域を定量的に同定する。複雑な渦構造の時間発展であり、普遍的知見を見出すのは困難であるため、2つの手法：渦の条件付き抽出法と狭い計算領域の流れを導入する。

(3) 渦の輸送方程式を用いて、摩擦抵抗低減を目的とした乱流制御手法が渦の生成・発達・消滅過程に与える影響を定量的に明らかにする。具体的には、 V 制御(壁面からある距離における(渦の)壁垂直方向の速度成分をセンシングし、その逆位相の吹出し・吸込み速度を壁面上の制御入力として与える制御)を取り上げる。総じて、渦生成の抑制効果、渦の発達の抑制効果、渦の減衰の活性化効果の各評価を統計的手法、可視化手法を駆使して定量的に求める。さらに、渦を直接弱体化させるだけでなく、渦の生成・消滅過程に作用する制御手法、例えば渦が生成する前に渦の基となる乱れを減衰させる高効率な制御手法を提案する。

4. 研究成果

(1) 新規に導出した渦構造の輸送方程式各項の流体力学的特性を定量的に明らかにした。具体的には、各項の統計量分布を算出し、渦の時間発展への各項の寄与を定量的に示した。まず、各項の総和がゼロになることから、必要十分な統計時間が確保されていることを確認した。各項のおおよその分布として、生成項と粘性項がどの位置でもほぼ釣り合っている。また、生成項は粘性底層で負であり、緩和層・対数領域で幅広く正の寄与を持つことが分かった(粘性項はその逆)。さらに、壁に沿う乱流場における渦のレイノルズ数依存性を評価するために、3つのレイノルズ数(摩擦レイノルズ数が110, 300, 650)の乱流場を直接数値計算を用いて再現した。新規に導出した渦構造の輸送方程式各項の流体力学的特性を統計的に評価した。従来のレイノルズ応力の輸送方程式の場合と同様に、各項の分布はレイノルズ数に依らず同様の傾向を示すが、レイノルズ数が増加するにつれて緩やかに変化した。

(2) 流れの瞬時場の可視化により、渦の生成・発達・消滅領域を定性的に同定した。複雑な渦構造の時間発展であり、普遍的知見を見出すのは困難であるため、狭い計算領域の流れを導入した。その結果、渦が生成する領域を事前に把握することが可能となった。また、同一の渦構造内でも

成長，減衰する場所が混在するなど新たな知見を得た（図 1 参照）。

(3) 渦の輸送方程式を用いて，摩擦抵抗低減を目的とした乱流制御手法が渦の生成・発達・消滅過程に与える影響を定量的に明らかにするために，従来から大きな抵抗低減効果を有することが報告されていた V 制御に，渦の輸送方程式の実質微分項を制御の入力に追加して，抵抗低減効果に与える影響を評価した．その結果，些少ではあるがより高い抵抗低減効果を得たことから，渦の生成・消滅過程を導入した制御アルゴリズムの有効性が示された．具体的には，渦の消滅過程により大きな吹き出し・吸込み速度を壁面上で与え，渦の消滅を早める制御において，抵抗低減効果が増加した．他方，渦の生成過程でより強い制御入力を与えて渦の生成を抑える制御アルゴリズムでは，抵抗低減効果が減少した．また， V 制御を渦の発達，消滅過程ごとに効果を確認した．その結果，渦の発達過程に V 制御を適用すると渦はより早く減衰するが，他方，渦の減衰過程に適用しても渦の減衰は早まらなかった．よって，渦の発達過程のみに V 制御を与える新たな制御則がより効果的であることを示している．

(4) 渦の情報を加味した深層強化学習を用いて V 制御の改良を試みた（図 2 参照）．具体的には，畳み込みニューラルネットワークと全結合層を用いたモデルを用いた．学習用の入力として，壁面からある距離における壁垂直方向の速度と渦の強度を採用し，出力は壁面上での吹き出し・吸込み速度である．学習により得られた制御則は，渦が壁から遠ざかる領域では吸い込みが強く，渦が壁に近づく領域では吹き出しが弱くなる特徴を有する．また， V 制御と比較して抵抗低減率は及ばないが，より少ない入力エネルギーで高い制御効果が得られる（制御効率が低い）ことも分かった．

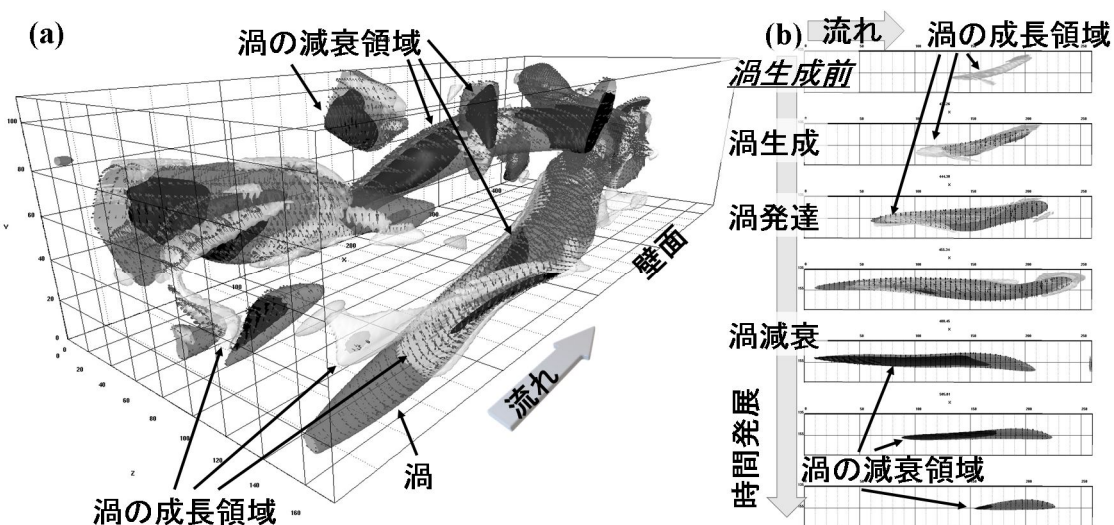


図 1：チャンネル乱流 DNS の可視化．半透明の灰色は渦（回転速度をベクトルで表示），半透明の白色は渦の成長領域，黒色は渦の減衰領域を示す．(a) 瞬時場の鳥瞰図，(b) 渦の移流速度で移動する視点から見た，代表的な渦の時間発展．

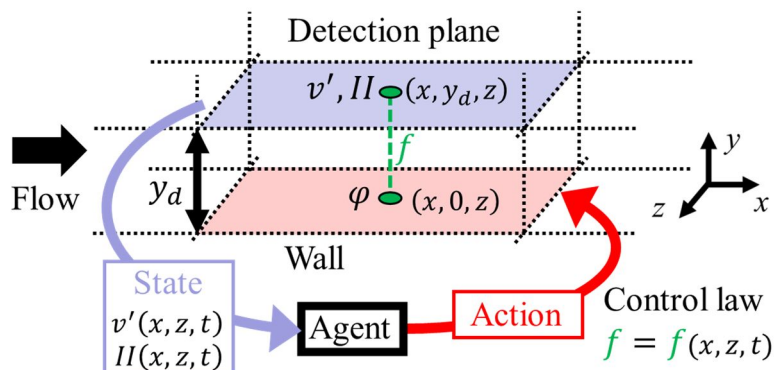


図 2：渦の情報を加味した深層強化学習の概念図．壁面からある距離における（渦の）壁垂直方向の速度成分と渦情報をセンシングし，吹き出し・吸込み速度を壁面上の制御入力として与える制御．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Matsubara K., Mitsuishi A., Iwamoto K., Murata A.	4. 巻 104
2. 論文標題 Prediction of pulsating turbulent pipe flow by deep learning with generalization capability	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Fluid Flow	6. 最初と最後の頁 109214 ~ 109214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatfluidflow.2023.109214	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 Ohta Takumi, Mitsuishi Akihiko, Shimura Takaaki, Iwamoto Kaoru, Murata Akira	4. 巻 198
2. 論文標題 Dependence of mainstream angle of vortex generator arrays on heat transfer enhancement in boundary layer flow on flat plate based on direct numerical simulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 123362 ~ 123362
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123362	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 光石 暁彦, 志村 敬彬, 岩本 薫	4. 巻 40
2. 論文標題 壁乱流の抵抗低減を目的とした進行波制御技術	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本流体力学会誌	6. 最初と最後の頁 271-278
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 -

〔学会発表〕 計30件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 丸山 明人, 仁村 友洋, 光石 暁彦, 村田 章, 岩本 薫
2. 発表標題 抵抗低減を目的とした斜め吹き出しを伴う平板乱流境界層のPIV計測
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 第 30 期総会・講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 熊澤 創太, 仁村 友洋, 村田 章, 岩本 薫
2. 発表標題 円管内脈動乱流における乱流統計量の予測精度向上を目的とした深層学習モデルとCNN低次元モードの解析
3. 学会等名 第 37 回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤 大晟, 仁村 友洋, 村田 章, 岩本 薫
2. 発表標題 対向制御を基に壁近傍の渦構造に着目した強化学習による抵抗低減制御
3. 学会等名 流体力学学会年会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 飛田 涼, 仁村 友洋, 村田 章, 岩本 薫
2. 発表標題 平板乱流境界層流れにおける局所斜め吹き出しが摩擦抵抗と渦構造に与える影響
3. 学会等名 流体力学学会年会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉田 泰大, 仁村 友洋, 光石 暁彦, 村田 章, 岩本 薫
2. 発表標題 進行波制御下の乱流境界層流れにおける準秩序構造に関する実験的研究
3. 学会等名 流体力学学会年会2023
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 K. Kimura, T. Nimura, A. Mitsuishi, A. Murata and K. Iwamoto
2 . 発表標題 The Effect of Side Ribs on Drag Reduction through Streamwise Traveling Wavy Wall Deformation in Turbulent 3D-Printed Pipe Flow
3 . 学会等名 The 9th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow-2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 H. Otaki, T. Nimura, A. Mitsuishi, A. Murata and K. Iwamoto
2 . 発表標題 Floating Effect of Riblets for Drag Reduction in Turbulent Channel Flow by Direct Numerical Simulation
3 . 学会等名 The 9th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow-2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Y. Yoshida, T. Nimura, A. Mitsuishi, A. Murata and K. Iwamoto
2 . 発表標題 Experimental Evaluation of Drag Reduction Effect of Traveling Wavy Wall in Turbulent Boundary Layer Flow
3 . 学会等名 The 9th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow-2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 S. Okamoto, A. Mitsuishi, K. Iwamoto and A. Murata
2 . 発表標題 Effect of Angles of Streamwisely-Uniform Protrusions on Convective Heat Transfer in a Pipe with Transverse Vibration by Direct Numerical Simulation
3 . 学会等名 Turbulence, Heat and Mass Transfer (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Tobita, A. Mitsuishi, K. Iwamoto and A. Murata
2. 発表標題 Drag Reduction Effect of Local Oblique Blowing with Shallow Angle for Turbulent Boundary Layer Flow on Flat Plate
3. 学会等名 14th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Tanisho, A. Mitsuishi, K. Iwamoto and A. Murata
2. 発表標題 Evaluation of Drag Reduction Effect and Surface Stress on Riblet in Turbulent Channel Flow Using Direct Numerical Simulation
3. 学会等名 The 15th World Congress in Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Matsubara, A. Mitsuishi, K. Iwamoto and A. Murata
2. 発表標題 Prediction of Friction Drag in Pulsating Turbulent Pipe Flow by Deep Learning for Improvement of Generalization Capability
3. 学会等名 The 12th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kitta, A. Mitsuishi, K. Iwamoto and A. Murata
2. 発表標題 Prediction of Drag Reduction Effect in Turbulent Pulsating Pipe Flow by Machine Learning Based on Experimental Data
3. 学会等名 The 12th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 寺原 彬弘, 光石 暁彦, 岩本 薫, 村田 章
2. 発表標題 流れ方向に一様なブレードを有する振動円管内流れにおける微細渦の伝熱促進効果
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第29期総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田 泰大, 光石 暁彦, 岩本 薫, 村田 章
2. 発表標題 進行波制御によって抵抗低減された乱流境界層流れのLDV計測
3. 学会等名 第38回生研TSFDシンポジウム「乱流シミュレーション、データ科学による流れのモデリング、予測、制御」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡本 土門, 光石 暁彦, 岩本 薫, 村田 章
2. 発表標題 流れ方向に一様な突起を設置した振動円管内流れにおける双子渦による伝熱促進メカニズム
3. 学会等名 第36回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松原 一憲, 光石 暁彦, 岩本 薫, 村田 章
2. 発表標題 円管内脈動乱流の時系列予測を目的とした深層学習モデルにおける CNN 低次元モードの解析
3. 学会等名 第36回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋田 拓歩, 光石 暁彦, 岩本 薫, 村田 章
2. 発表標題 円管内乱流の脈動制御の最適化に向けた機械学習による抵抗低減効果の予測
3. 学会等名 日本機械学会 第100期 流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷所 俊亮, 光石 暁彦, 岩本 薫, 村田 章
2. 発表標題 直接数値計算を用いたチャネル乱流におけるリプレットの抵抗低減効果とリプレット基部に発生するトルクの評価
3. 学会等名 日本機械学会 第100期 流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田 泰大, 光石 暁彦, 岩本 薫, 村田 章
2. 発表標題 進行波状壁面に沿う乱流境界層流れのLDVによる2成分計測
3. 学会等名 流体力学会年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田 泰大, 光石 暁彦, 岩本 薫, 村田 章
2. 発表標題 進行波制御下の乱流境界層流れに対するLDV計測と抵抗低減メカニズムの解析
3. 学会等名 日本機械学会 第100期 流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Yoshida, A. Mitsuishi, T. Shimura, K. Iwamoto and A. Murata
2. 発表標題 Experimental Study on Traveling Wave Control for Drag Reduction of Zero-Pressure-Gradient Turbulent Boundary Layer Flow
3. 学会等名 32th International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Yanai, A. Mitsuishi, T. Shimura, K. Iwamoto and A. Murata
2. 発表標題 Drag Reduction Effect of Arbitrarily Wavy Riblets in Turbulent Channel Flow by DNS
3. 学会等名 8th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Iwamoto
2. 発表標題 Wall Turbulence Control for Drag Reduction and Heat Transfer Enhancement Based on Biomimetics and Deep Learning
3. 学会等名 8th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田 泰大, 志村 敬彬, 光石 暁彦, 岩本 薫, 村田 章
2. 発表標題 抵抗低減を目的とした流れ方向進行波制御下の乱流境界層流れのLDV計測
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 2021年

1. 発表者名 寺原 彬弘, 志村 敬彬, 光石 暁彦, 岩本 薫, 村田 章
2. 発表標題 伝熱促進を目的とした振動円管内流れにおける渦誘起のためのブレードの角度依存性
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 2021年

1. 発表者名 宮澤 貴司, 志村 敬彬, 光石 暁彦, 岩本 薫, 村田 章
2. 発表標題 3Dプリンタで製造された様々なリブレット形状のテイラー・クエット乱流における抵抗低減効果
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 2021年

1. 発表者名 松原 一憲, 光石 暁彦, 志村 敬彬, 岩本 薫, 村田 章
2. 発表標題 汎化性能向上を目的としたTime delay NN-RNNモデルによる円管内脈動乱流の摩擦抵抗の予測
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 宮澤 貴司, 志村 敬彬, 光石 暁彦, 岩本 薫, 村田 章
2. 発表標題 テイラー・クエット乱流におけるリブレットの抵抗低減効果およびPIV計測によるメカニズム解析
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 石黒 太一, 光石 暁彦, 志村 敬彬, 岩本 薫, 村田 章
2. 発表標題 円管内乱流の再層流化現象に関する進行波状吹出し吸込み制御の流跡線解析
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京農工大学 大学院 工学府 機械システム工学専攻 岩本研究室ホームページ
<https://iwamoto.lab.tuat.ac.jp/>

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
研究分担者	光石 暁彦 (Mitsuishi Akihiko) (90456715)	大阪電気通信大学・工学部・准教授 (34412)	
研究分担者	仁村 友洋 (Nimura Tomohiro) (90982603)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・特任助教 (12605)	

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