

Title	シミュレーション技術を利用した定量リスク管理法の提言
Sub Title	A simulation-based approach for the quantitative risk management
Author	今井, 潤一 (Imai, Jun'ichi)
Publisher	
Publication year	2021
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2020. )
JaLC DOI	
Abstract	<p>本研究では、解析的な分析が不可能な様々な不確実性が存在する金融問題、経営の意思決定の問題に対して、実務的に意味のある定量的な分析を可能とする数値計算手法のアプローチとして、ADPRL (Approximate Dynamic Programming &amp; Reinforcement Learning) を提案した。研究ではその構成要素であるモデル開発、シミュレーション技法、最適化アルゴリズムそれぞれに関する研究を行い統合フレームワークを構築した。</p> <p>次に、実際の経営者がリスクとリターンの両方を分析し、最適な意思決定を行うために、高次元、曖昧性、モデルの不確実性の下で様々なアプリケーションを分析した。</p> <p>We proposed ADPRL (Approximate Dynamic Programming &amp; Reinforcement Learning) as a distinct approach to numerical computation that enables quantitative analysis that is practically useful for financial problems and management decision-making problems where various uncertainties exist that cannot be analyzed analytically.</p> <p>We thoroughly studied three factors: modeling, simulation, and numerical optimization, and have constructed an integrated framework.</p> <p>Next, based on ADPRL, we analyzed various applications under high -dimensionality, ambiguity and/or model uncertainty for actual management to analyze both risk and returns and to make the optimal decisions.</p>
Notes	<p>研究種目：基盤研究 (B) (一般) 研究期間：2015～2019 課題番号：15H02973 研究分野：金融工学</p>
Genre	Research Paper
URL	<a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_15H02973seika">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_15H02973seika</a>

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2019

課題番号：15H02973

研究課題名(和文) シミュレーション技術を利用した定量リスク管理法の提言

研究課題名(英文) A simulation-based approach for the quantitative risk management

研究代表者

今井 潤一 (imai, junichi)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：10293078

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、解析的な分析が不可能な様々な不確実性が存在する金融問題、経営の意思決定の問題に対して、実務的に意味のある定量的な分析を可能とする数値計算法のアプローチとして、ADPRL(Approximate Dynamic Programming & Reinforcement Learning)を提案した。研究ではその構成要素であるモデル開発、シミュレーション技法、最適化アルゴリズムそれぞれに関する研究を行い統合フレームワークを構築した。次に、実際の経営者がリスクとリターンを両方を分析し、最適な意思決定を行うために、高次元、曖昧性、モデルの不確実性の下で様々なアプリケーションを分析した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ファイナンス研究の世界は、金融モデルの数学的側面に焦点を絞る分野、定性的なケースを分析して政策提言を試みる分野、ヒストリカルデータを用いて実証分析に焦点を絞る分野など、多様な分野の研究者が混在する複合的な分野である。このような背景の中、本研究の学術的意義は、工学という観点から定量的な分析を可能とする実践的・具体的手法を開発したことである。すなわち、状態方程式や存在定理の導出を目指すのではなく、現実のビジネスでも利用できる効率的な定量分析手法を具体的に明示し、プログラムとして実装することで研究成果は金融・経営分野への利用が可能である。

研究成果の概要(英文)：We proposed ADPRL (Approximate Dynamic Programming & Reinforcement Learning) as a distinct approach to numerical computation that enables quantitative analysis that is practically useful for financial problems and management decision-making problems where various uncertainties exist that cannot be analyzed analytically. We thoroughly studied three factors: modeling, simulation, and numerical optimization, and have constructed an integrated framework. Next, based on ADPRL, we analyzed various applications under high-dimensionality, ambiguity and/or model uncertainty for actual management to analyze both risk and returns and to make the optimal decisions.

研究分野：金融工学

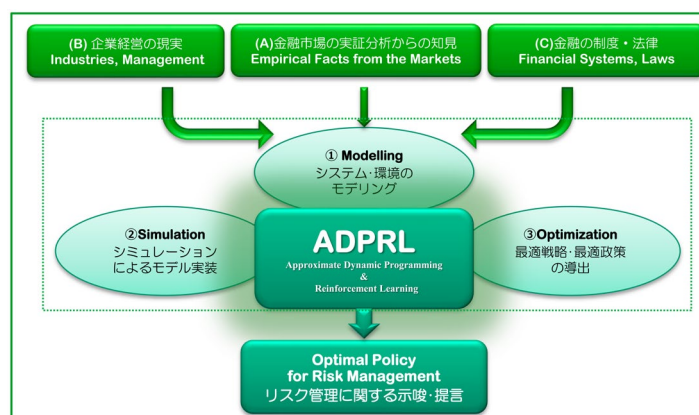
キーワード：準モンテカルロ法 近似動的計画法 金融工学 リスク管理 リアルオプション

## 1. 研究開始当初の背景

現代の企業活動において、リスク管理活動は不可欠なものとなっている。金融機関が日々の資産負債管理活動の中で様々な金融リスクを管理しているのは言うまでもなく、非金融機関もまた原材料の価格変動、取引相手の契約不履行のリスク、流動性リスク、販売価格や販売量の変動リスク、そして為替変動リスク、金利変動リスク、オペレーショナルリスク等にさらされており、それらのマネジメントは企業活動の重要な部分を担っている。リスク管理活動とは、消極的・防衛的にリスクを回避する活動ではなく、リスクの質を見極め、適切な種類のリスクを適切な大きさと積極的・能動的に引き受ける活動を意味しており、複雑性の高い現代においてその重要性は極めて高い。

学術的な視点から見ると、金融工学、金融リスク管理の分野は、ファイナンス理論をはじめとして、経済学、統計学、確率・確率過程論、オペレーションズ・リサーチ (OR)、コンピュータ・サイエンス (CS)、といった様々な研究分野が融合的に利用される学際分野である。そのため、異なる分野の研究が融合することで数多くの金融イノベーションが生み出されてきた。ただし、この分野で用いられる理論は、依然として発展途上であることも事実であり、また、金融市場が世界経済における影響の大きさゆえ、リスク管理が失敗することによる損失額も大きい。そのため、この分野ではこれまで以上に精密なリスク計測、リスク管理の理論とそれを現実社会で正しく実現できる技術・システムの発展が社会から渴望されている。

そもそも株式をはじめとする数多くの金融資産市場と、その資産市場の複雑な動き、様々なカテゴリーに属するリスク、それを司る人間行動など、この分野が扱う社会システムは非常に複雑である。このような複雑なシステムに対し、初期の金融理論では、正規分布、ブラウン運動、線形相関など、比較的解析的取り扱いの易しい金融モデルを仮定した研究が行われていた。しかし、金融市場の実証分析が進むにつれて、モデルの非正規性、非連続的な価格変動、ボラティリティ自身の変動、そして非線形な依存構造などが広く観測されることが明らかになった。そのため、現状を適切に反映する優れたモデルを想定する必要が生まれた。さらに、金融資産を取引するときに必要な手数料や税金、ときに大きな問題を引き起こす流動性の欠如といった摩擦の影響は、必然的に資産の価格や取引戦略に影響を与えることから、このような市場の摩擦を考慮することの重要性も認識されているものの、これらを踏まえた現実的な投資戦略案やリスク管理手法の工学的な研究は不十分といわざるを得ないのが現状である。



## 2. 研究の目的

本研究の目的は、金融に関連する様々なリスクを定量的に計測・評価・管理する体系的方法を開発することである。そのため、次の2つを具体的目的として研究を遂行する。

### (1) 金融の問題に適用できる ADPRL 手法の確立と実装

ADPRL (Approximate Dynamic Programming & Reinforcement Learning) は、マルコフ決定過程、近似的動的計画法、強化学習、最適制御、シミュレーション最適化、確率計画といった分野と密接に関連している。いずれも数学的な構造は似ているが、各分野の既存のコミュニティでは、それぞれ独自の問題意識を持ち、それぞれの分野への適用を想定した議論が行われている。ADPRL の構成要素は、Modelling, Simulation, Optimization であり、この分野では、全ての問題の最適解を求める絶対唯一の解法は存在せず、個別の問題の特性をある程度導入することが成功への道筋であることが知られている。すなわち、金融分野への適用を想定して ADPRL の研究を進めるといふ本研究のテーマは、既存研究と異なる視点を持っている。

### (2) 現実的な金融問題に対する ADPRL 手法の適用による新たな知見の蓄積

本研究の第2の目的は、金融市場の実証分析からの知見や、金融産業の現実、金融制度・法律を適切に反映したモデルを想定し、ADPRL を用いて、リスク管理に関する示唆・提言を得ることである。金融に関する実証分析は数多く発表されているが、必ずしも本研究に直接利用できる

形ではないため、自ら実証研究も行う。また、近年になって金融市場の高頻度取引が話題になっているように、金融市場の質が変化している可能性もあり、改めて緻密な実証分析が必要であると考えられる。

### 3. 研究の方法

最初に、金融問題に適用できる ADPRL 手法の開発に焦点を当て、金融の問題の特徴を踏まえた条件のもとで、効率的かつ精度の高い実行可能解を導出するアルゴリズムを開発する。これらができることで初めて現実問題の適用フェーズに進むことができる重要な土台となる。そのため金融の問題を扱う場合に不可避な条件である時間の連続性、状態空間と行動空間の高次元性、目的関数の非線形性を扱うことができる手法の開発を行う。

次に、現実的な金融問題に対する ADPRL 手法の適用に研究の焦点を移す。これまでの実証研究結果や経験的な分析と比較分析する一方、ADPRL を適用したからこそ抽出できる、単純な推定や方策提案にとどまらない、動的かつ実行可能な最適方策の提案ができる形で研究を遂行し、それらの知見を蓄積、公開することに注力する。また、近年になって金融市場の高頻度取引が話題になっているように、金融市場の質が変化している可能性もあり、改めて緻密な実証分析が必要であると考えられる。

### 4. 研究成果

以下に主要な研究成果をまとめる。

#### ・ミクロレベルの金融行動についてのモデリングとパラメータ推定に関して

株式市場のミクロレベルの証券取引の特性を分析するためには、高頻度データと総称される売り注文と買い注文に関する板注文の時系列データの分析を行うためには、日次データや年次データを扱う場合に利用する収益率データを分析するのでは不十分である。そこで、本研究では、Hawkes 過程と呼ばれる点過程をベースにして、価格データだけでなく、その注文量の大きさを同時にモデルに取り込んだマーク付き Hawkes 過程を取り上げ、東京証券取引所のティックデータと呼ばれるデータを利用してモデル化とパラメータ推定を行った。その結果、マーク付き Hawkes 過程が優れたフィッティングを達成することを実証した。そして、それを踏まえて、個別株式が持つ特性を抽出し、また、株価の水準や、東証の取引制度によって、投資家のミクロレベルの取引戦略が異なる可能性を明らかにした。

・デジタル技術の普及モデルと技術の不確実性が存在するもとのモデリングとパラメータ推定、そして、最適な意思決定について

DX という言葉に代表されるように、IT デジタル技術の持つ特性により、デジタル産業の収益構造やビジネスモデルはこれまでの技術と大きく異なる特徴があることが知られている。本研究では、代表的な例の一つである 3D プリンティング技術(additive manufacturing)を取り上げた。モデルとしては、マーケティングの分野で用いられる BASS モデルからアイデアを得てこのモデルに、不確実性を加えた新しいモデルを構築した。さらに確率的 BASS モデルのパラメータを推定するために、2つの情報源からのデータを用いた。第1は SCI や Web of Science, Scopus など文献計量学で用いられるデータであり、第2は特許データである。パラメータを推定した結果、提案モデルの精度の高さが明らかであった。さらに、新しいモデルの実際的な意味を検証するため、提案モデルと従来の標準的なモデルの元で、それぞれの最適な意思決定戦略を導出し、その違いを検証した。その結果、リアルオプションの最適な行使のタイミングが大きく異なることが実証された。

デジタル技術を基盤とした新しいビジネスモデルを持つ産業分野の企業価値の分析も行った。マーケティングの世界で用いられる顧客ベースのデータを用いた新しいタイプのモデルを提案し、それが近年注目を浴びている IT 企業(Netflix, Roku, Stitch Fix)の企業価値評価に有用であり、既存の会計情報をベースとした企業価値も出るよりもより正確に推定できる可能性を実証した。

#### ・ADPRL の土台となる数値計算アルゴリズムに関して

金融市場での取引の場合と同様に、実物投資を含む事業会社の意思決定においてもリスクを考慮した意思決定は不可欠である。ところが、金融市場とは異なり、事業会社が晒されている将来の需要などに伴うリスクは、必ずしも十分なデータが得られないケースが多い。このような状況では曖昧性(ambiguity)と呼ばれるより深いレベルの不確実性を考慮した意思決定が求められる。本研究では、格子モデルと呼ばれる金融工学分野では標準的に用いられるモデルを拡張して、この曖昧性を考慮した最適な意思決定を近似動的計画法の原理を用いて導出できることを明示し、実際のアルゴリズムを提案した。このモデルをもとにして、従来のリスクのみを考える場合と、曖昧さを考える場合の違いを明確にした。その結果、より深いレベルの曖昧さが存在する場合は、期待される事業価値が低下する一方、本件で扱ったケースにおいてはマネジメントが下す最適な意思決定戦略はロバストであることも明らかとなった。

曖昧さを考慮した最適化問題には、様々な原理が提案されているがその中でも最も多く利用されている Maximin 戦略を導出するための最適化アルゴリズムは、一部の例外を除いて通常の最大(あるいは最小)化アルゴリズムよりはるかに導出が困難である。本研究では、Maximin 戦略の解が鞍点 (saddle point) になることを利用して、この鞍点を動的な環境下で効率的に求めるア

ルゴリズムを提案した。

一方、金融市場でも曖昧性、あるいはほぼ同じ概念として **model uncertainty** の重要性が指摘されている。本研究では、連続時間の設定を用いる多くの理論研究の設定に関して、確率空間を拡張し、曖昧性がブラウン運動を超えたレヴィ過程にまで広がるケースを想定し、その場合に定量的な分析が可能となる数値計算手法を ADPRL のフレームワークとして開発した。そして、その重要な応用先として、アメリカンオプションの最適なヘッジ戦略問題で利用し、リスク下では起こることのない様々な現象が起こりうることを具体的な数値例とともに実証した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7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 Schneider Robin、Imai Junichi	4. 巻 8
2. 論文標題 User-based Valuation of Digital Subscription Business Models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Real Options and Strategy	6. 最初と最後の頁 1~26
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.12949/ijros.8.1	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 佐藤 正崇、今井 潤一	4. 巻 18
2. 論文標題 マーク付き多次元Hawkes過程を用いた高頻度注文板データの分析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ジャフィー・ジャーナル	6. 最初と最後の頁 63~88
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.32212/jafee.18.0_63	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 Schneider Robin、Imai Junichi	4. 巻 7
2. 論文標題 Valuing Investments in Digital Transformation of Business Models	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Real Options and Strategy	6. 最初と最後の頁 1~26
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.12949/ijros.7.1	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 Fukui Yuta、Imai Junichi	4. 巻 6
2. 論文標題 A Study on a Membrane Ceilings Business under Ambiguity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Real Options and Strategy	6. 最初と最後の頁 13~44
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.12949/ijros.6.13	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 Y. Otani and J. Imai	4. 巻 48
2. 論文標題 An Empirical Analysis of the Dependence Structure of International Equity and Bond Markets Using Regime-switching Copula Model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IAENG International Journal of Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 191-205
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 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 Yuko Otani and Junichi Imai	4. 巻 -
2. 論文標題 An empirical analysis of the dependence structure of international equity and bond markets using regime-switching copula model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IAENG International Journal of Applied Mathematics	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 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 福井勇太, 今井潤一	4. 巻 7
2. 論文標題 リアルオプションアプローチによる平均回帰過程の下での投資タイミングの分析	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 リアルオプション研究	6. 最初と最後の頁 37-57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.12949/realopn.7.37	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24件(うち招待講演 2件/うち国際学会 10件)

1. 発表者名 R. Schneider and J. Imai
2. 発表標題 Valuing Investments in Digital Business Transformation
3. 学会等名 The 22nd Annual International Real Options Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今井潤一
2. 発表標題 リアルオプション分析におけるソフトウェアの活用
3. 学会等名 日本リアルオプション学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Junichi Imai, Motoh, Tsujimura
2. 発表標題 Optimal Investment under Levy Ambiguity
3. 学会等名 21st Annual International Real Options Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuta Fukui, Junichi Imai
2. 発表標題 Valuing the Acquisition of a New Business under Ambiguity: A Case Study in Japan
3. 学会等名 21st Annual International Real Options Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Sumito Onozaki, Junichi Imai
2. 発表標題 Reference-dependent Expected Shortfall: A new measure without perceiving tail events
3. 学会等名 International Federation of Operational Reserch Societies (IFORS) 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 Sumito Onozaki, Junichi Imai
2. 発表標題 Reference-dependent Expected Shortfall: a new descriptive risk measure consistent with Prospect theory
3. 学会等名 A seminar in Statistics and Actuarial Science, University of Waterloo (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 今井潤一
2. 発表標題 フィナンシャル・エンジニアリングにおける準モンテカルロ法の効率化
3. 学会等名 日本OR学会中部支部シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 今井潤一, 福井勇太
2. 発表標題 A real option case under ambiguity
3. 学会等名 日本リアルオプション学会 2017研究大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小野崎純人, 今井潤一
2. 発表標題 意思決定理論との整合性を考慮した記述的リスク尺度の提案
3. 学会等名 日本リアルオプション学会 2017研究大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小野崎純人, 今井潤一
2. 発表標題 プロスペクト確率優越に整合的なリスク尺度
3. 学会等名 日本保険・年金リスク学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Sumito Onozaki, Junichi Imai
2. 発表標題 Reference-dependent Expected Shortfall: new descriptive risk measures consistent with Prospect theory
3. 学会等名 Quantitative Methods in Finance 2017 (QMF2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Junichi Imai
2. 発表標題 Enhancement of QMC: severity and tail dimension
3. 学会等名 Keio Symposium on Risk Assessment (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Motoh Tsujimura and Junichi Imai
2. 発表標題 Assessing Capital Investment Strategy with Convex Adjustment Cost under Ambiguity
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Motoh Tsujimura and Junichi Imai
2. 発表標題 Assessing Capital Investment Strategy with Convex Adjustment Cost under Ambiguity
3. 学会等名 日本リアルオプション学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Junichi Imai
2. 発表標題 Real Option: Back to Origin and Heading for New frontier
3. 学会等名 日本リアルオプション学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 小野崎純人, 今井潤一
2. 発表標題 プロスペクト確率優越に整合的なリスク尺度 Truncated Expected Shortfall の提案
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 池田浩司, 今井潤一
2. 発表標題 マーケットファクターがCDSスプレッドの変動の分布に与える影響の分析
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 今井潤一, 辻村元男
2. 発表標題 Optimal Investment under Levy Ambiguity
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福井勇太, 今井潤一
2. 発表標題 膜天井事業の経済性分析と最適な意思決定: リアルオプションアプローチを用いた新規ビジネスに関するケーススタディ
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新谷一平, 今井潤一
2. 発表標題 近似動的計画法を用いたマーケットインパクト影響下での最適執行戦略の導出
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Junichi Imai
2. 発表標題 An Efficient Numerical Procedure for Financial Engineering Using Quasi-Monte Carlo Method
3. 学会等名 計量経済学ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Junichi Imai
2. 発表標題 Hedging Financial Derivatives in Incomplete Market Using an Approximate Dynamic Programming
3. 学会等名 Columbia-JAFEE Conference 2015 (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Yuya Suzuki, Junichi Imai
2. 発表標題 Archimedean Copulas for Random Sums
3. 学会等名 The Quantitative Methods in Finance 2015 Conference (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Junichi Imai
2. 発表標題 A Review of Developing Efficient Quasi-Monte Carlo Method
3. 学会等名 Research seminar in department of Statistics and Actuarial Science (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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