

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601
研究種目：基盤研究(A)
研究期間：2012～2014
課題番号：24243027
研究課題名(和文) マクロ・エコノフィジクス

研究課題名(英文) Macro-econophysics

研究代表者

吉川 洋 (YOSHIKAWA, Hiroshi)

東京大学・経済学研究科(研究院)・教授

研究者番号：30158414

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,100,000円

研究成果の概要(和文)：現在の主流派経済学はミクロの経済主体の最適化行動の相似拡大としてマクロ経済の動きを捉えようとする。本研究は、現実のマクロ経済現象を直視し、多数の相互作用する経済主体のマクロな振舞いは代表的な経済主体のものとは異なりうることを前提として統計物理学的なアプローチによるマクロ経済学の再構築を行う。具体的な研究対象は、1)労働生産性分布の実証解析とモデル化、2)中小企業の労働生産性と技術革新、3)物価指数とデフレ/インフレとの動態関係などである。

研究成果の概要(英文)：The central dogma of the current mainstream economics is to assume optimization of the representative agent such as consumer and firm. Now macroeconomics is regarded just as a discipline obtained by uniformly expanding microeconomics to a macroscopic scale. However, we are so open-minded to accept heterogeneity of economic agents as indicated by looking straight at real macroeconomic phenomena. In this research project, we attempt to reconstruct macroeconomics by adopting ideas and methodologies of statistical physics, that is, foundation of "Macro-econophysics". We always respect empirical results. Needless to say, we have to carefully treat real data in which scientific truths are often masked by noises. The research themes in this project includes: 1) empirical analysis of labor productivity distribution together with modelling, 2) labor productivity of small to medium-sized firms and innovation, and 3) dynamical relationship between deflation/inflation and price indices.

研究分野：マクロ経済学

キーワード：マクロ経済 エコノフィジクス 労働生産性 エントロピー 分布 新古典派 負の温度 実証分析

1. 研究開始当初の背景

かつてケインズ経済学と同義であったマクロ経済学は、過去 40 年間に大きく変質し、Micro-founded Macroeconomics(MM) , Dynamic Stochastic General Equilibrium (DSGE)へと変貌した。Lucas(1972)の合理的期待モデル、Kydland/Prescott (1982) の実物的景気循環理論、Aghion/Howitt (1992)らの内生的経済成長理論などに代表される MM, また DSGE は、代表的消費者(企業)の効用(利潤)最大化行動を詳細に分析した上で、そうしたミクロの経済主体の最適化行動の相似拡大としてマクロ経済の動きを理解しようとする。

そのような新古典派経済学のロジックはよく知られている。産業・企業間でもし労働の限界生産が異なるなら、生産性の低い所から高い所へ労働者が自由に移動することにより、アウトプットは増大する。社会全体で純利得が生じ、個々の企業・労働者にとっても所得が増大するのだから、こうした移動はすべての産業・企業間で労働の限界生産が等しくなるまで続く。行き着く先が新古典派的な「均衡」にほかならない。

しかし、現実には「均衡」において存在するのは、労働生産性の分布である。現実の均衡は、新古典派が期待する唯一の労働の限界生産すなわち「点」ではなく、「分布」になるのである。このことは労働に関するサーチ理論も認識しているが、その分析は半分代表的主体に基礎を置く不徹底なものである。

本研究の代表者は、有効需要を統計物理学における温度に対応するものと考え、労働生産性の分布が Boltzmann 分布すなわち指数分布になることを指摘した。その後、本研究メンバーとの実証的研究を通して、この分布が指数分布ではなく、べき分布であることを見出した。この問題は、有効需要が一定と仮定するのではなく、その変動を考慮に入れた superstatistics のフレームワークを用いて解決することができることを明らかにした。

2. 研究の目的

本研究の目的は、理論物理学(統計物理学)の方法に基づくマクロ経済学の再構築を実証分析を通して行い、現在ミクロの相似拡大として位置づけられてしまっているマクロ経済学の復権を目指すことである。マクロ経済学と統計物理学の融合にあたっては、マクロ経済に関する現象論を実データに基づいて確立しながら、その知見をもとに確固たる理論基盤(マクロ・エコノフィジクス)を創出する。具体的には、

(1) これまでの研究成果を踏まえ、研究期間内に労働生産性の分布に関して詳細な実証分析を進めることを目指す。具体的には、日本においては生産性の低い領域では分布が指数ないしべき分布のように右下がりではなく右上がりになるため、これを説明するた

めに有効需要に対応する変数として「負の温度」を導入することを検討する。また、生産性の分布は、有効需要(温度)の高低に基づくゆらぎのほかにイノベーション、労働者の高賃金(すなわち高生産性)企業/セクターへの移動などにも依存する。こうしたダイナミックスを有効需要の理論と統合するモデルを構築し、その結果を実際の分布と比較検討することにより理論モデルの妥当性を検証する。加えて、この理論が国際比較や時代比較に耐えうる理論となるように拡張する。

(2) デフレ/インフレはなぜ起きるのか。デフレを止めるためには何が必要なのか。本研究では、ミクロの個別物価の時系列データを用いて、こうした問いに答えるべく実証分析を行う。デフレ/インフレは、多くのモノやサービスの価格を加重平均した一般価格指数の下落/上昇である。したがって、デフレ/インフレの動学を理解するためには、個別物価の動きに関する情報が不可欠である。個別物価の動きを調べてみると、それは定常的ではない。また、一般物価の動きは、ミクロの個別物価の「相互作用」によって生み出されている部分が多い。まさにデフレ/インフレの原因の追及とその制御にとって、新しいマクロ経済学であるマクロ・エコノフィジクスが必要とされる。

3. 研究の方法

(1) 経済現象の統計物理学的定式化

本研究のアイデアの具現化には、ミクロとマクロの経済を橋渡しするための道具立てが必要となる。そこで統計物理学に着目した。気体は多数の原子・分子からなるが、気体のマクロの性質をそれらの連立された運動方程式を解くことによって導くことは事実上困難である。統計物理学の極意は、原子・分子の個別運動を統計処理によって捨象し、それらのミクロの情報を確率分布に置き換えてしまうことである。このような粗視化法が自然現象に対してのみならず社会・経済現象についても有効であることは、交通の流れを見ても明らかである。

統計物理学における重要な概念であるエントロピーは、経済学においても重要な概念として有用であることを強調する。企業による労働者雇用、労働者による企業選択はそれぞれランダムに行われ、その結果として、生産性の観点で見た労働者分布はその分布の実現確率が最大となるような状態で定まる(エントロピー最大化)と考えることができる。もちろん、この考え方の正しさは思弁的ではなく、実証結果との突き合わせによって確立されなければならない。

(2) 複素主成分分析

複素主成分分析(CPCA)法を新しく開発した。CPCA は解析すべき時系列データをヒルベルト変換を使って複素化することから出発す

る。得られた複素時系列に対して主成分分析を適用すると、位相の異なる時系列同士の相関抽出が可能になるため、従来の方法（実数の原時系列に対する主成分分析）では抽出されにくかった動的な相関構造の抽出・解析が容易に可能となる。

また、主成分分析は、経済学のみならず社会学はじめ他の人文・社会科学分野でよく使われる手法であるが、これまでいくつの主成分（固有モード）を有意なもののみならず、研究者の主観に任されていた。これに対して、ランダム行列理論(RMT)は統計的に有意な主成分を抽出するための明解な判定規準を与える。なお、時系列データに自己相関が存在していると、RMTの主成分判定基準は修正を受ける。データ長の有限性のために、相関行列に疑似的な相互相関が現れるからである。そのような場合に備えて、RMT法の代替とし回転ランダム・シャッフリング(RRS)法を考案した。RRS法は数値的手法であるものの、どのような自己相関に対しても有効である。

(3) 解析データの整備

我が国における中小企業の財務データベースである Credit Risk Database (CRD) と日経 NEEDS の大企業データベースを統合した網羅的データベースを 2010 年から遡り過去 10 年分作成した。労働生産性分布の信頼できる計測にとっては、付加価値の正確な計算が鍵である。付加価値の計算にあたっては、日銀方式（積み上げ法）を採用し、計算に必要な財務項目がすべて揃っている企業のみを解析の対象とした。また、各国企業財務データ（ビューロー・ヴァン・ダイク社）および自動車部品納入データ（総合技研株式会社）を入手し、労働生産性分布に関する国際比較や自動車産業内での詳細分析を行う準備を進めた。

4. 研究成果

(1) 労働生産性分布の実証解析とモデル化

図 1 が示すように、低生産性の領域では、生産性の向上とともに 1 企業あたりの平均従業員数は増加するのに対し、高生産性の領域では逆に減少する。自然界では異常である負の温度が、低生産性側における労働者の分布を説明するためには正常であることがわかる。負の温度とは、エネルギーがより高い状態のほうが存在確率が高くなっていることを言い、ここでは、図 1 の低生産性側において生産性がより高い企業ほど平均労働者数が多くなっている状況を指している。なお、仮に総需要が十分に大きければ（負の温度領域における絶対零度の状態であり、新古典派経済学が基盤とするもの）、すべての労働者は生産性の高い企業に集中することとなる（この場合、エントロピーがゼロに近づく）ので、負の温度は需要不足の度合いを定量的に計測することにより示される。また、

図 1 の高生産性側における実証分析は労働者に対して先導的企業が限られた労働者収容能力しかもたないことを示唆する。このように、全生産性領域にわたって有効な統計物理学的モデルが構築され、得られたモデルは現実の労働生産性の分布の特徴的振る舞いを再現できる（図 1）。均衡条件に照らし合わせると、需要については製造業と非製造業の間で非均衡の状態にある（非製造業は製造業に比べて大きな需要不足）。他方、労働者の流れは両セクター間でほぼ均衡していることがわかる。さらに分析データを充実させることにより、我が国の産業経済に潜む不均衡性について知見を得ることができると期待される。

現在、資本の集中とそれに伴う経済的な不平等が着実に進行しつつある。まさに、労働生産性の広がりや経済格差の典型的な現れである。マクロ・エコノフィジクスは、主流派経済学に取って代わり、現代経済の諸問題にアプローチするための学問的基盤を提供する。

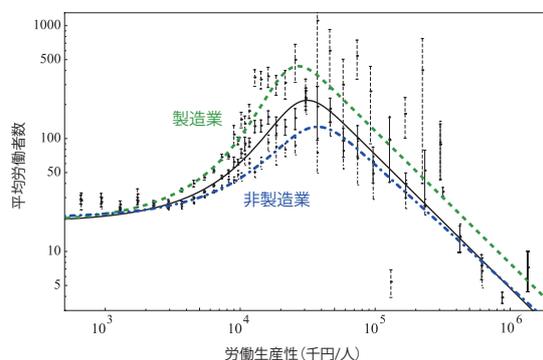


図 1. 我が国における労働生産性の分布（2008 年）
横軸は労働生産性、縦軸は 1 企業あたりの平均労働者数。

(2) 中小企業の労働生産性と技術革新

CRD-NEEDS の統合データを用いて、我が国における中小企業の労働生産性の実態を分析した。その結果を図 2 に示す。従業員数で大企業と中小企業を区別すると、中小企業が生産性の低い母体グループと少数の高い生産性をもつ先導グループに分かれる。製造業と非製造業について比較すると、製造業に対して非製造業では需要不足が顕著である。製造業については、業種ごとに高生産性企業の出現確率は大きく変わらず、生産性の向上をもたらす技術革新が、産業のインキュベーターの役割を果たしている中小企業群の中で中立的に発生していることがわかる。他方、非製造業については、経済を支えるべき主要業種（建設業、卸業、小売業）において確率的に見合う刷新的な生産性向上が著しく欠けている。また、労働生産性の向上の質についても製造業と非製造業では大いに異なっている。労働生産性と通常の場合とは相反する資本生産性に着目すると、製造業においては

資本生産性を低下させることなく労働生産性の向上が行われている。この意味で、製造業は真の技術革新を行っていると言える。ところが、非製造業における労働生産性の向上は、資本生産性の犠牲下で実現している。

我が国の製造業におけるイノベーションの創発は、特定の業種に偏ることなく健全な様相を示し、製造業は十分に成熟していると考えられる。政策的にも公平性が保たれてきたのであろう。それに比べ非製造業については、労働生産性で分解してみると産業構造の歪みが顕著に現れる。この結果は、非製造業の主要業種において企業間の自由競争を阻害してきた過去の保護的政策のつけを明確にあぶり出している。非製造業企業の生産性向上に向けて、効果的な政策の実行が大いに望まれる。

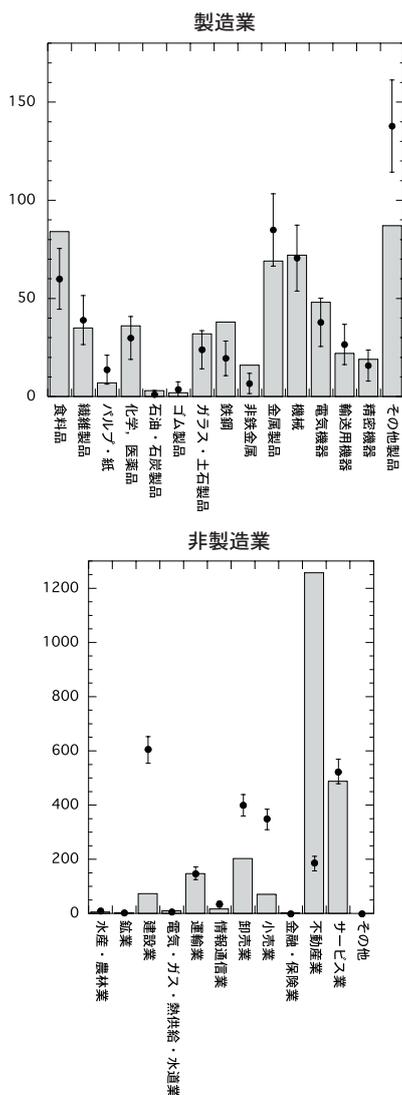


図2 高労働生産性中小企業の産業別分布 (2006年) エラーバー付きの黒点は、各産業の全体に占める割合から期待される高労働生産性企業の数を表す。

(3) 物価指数とデフレ/インフレ

複素主成分分析を用いて物価ダイナミクスの解析を行った。企業物価指数、輸入物価指数および消費者物価指数の中で 1980 年から

使われている 830 品目を選び出し、それらの月次データを得た。加えて、マクロ経済指標として賃金指数、所定外労働時間、住宅着工、失業率、マネタリーベース、マネーストック M2、ドル・円為替レート、原油価格の 8 指標を収集した。回転ランダム・シャッフリング法を用いることにより、総計 830 時系列の物価データにおける統計的に有意な固有モード (計 26 個) を同定した。また、コミュニティ解析 (位相が同期する物価をコミュニティとして抽出) を行うことにより、物価変動の集団的振る舞いについて知見を得た。図 3 は第 1 主成分を複素平面上で図示したものであり、輸入物価から企業物価そして消費者物価への価格変動の波及の様子を見て取ることができる。

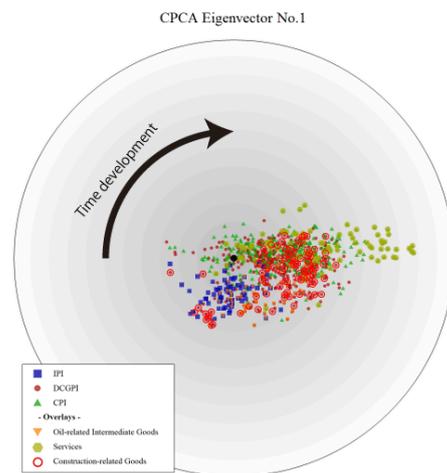


図3 個別物価集団の第1主成分 (時間発展は時計向き)

ミクロの個別物価は従来の文献で仮定されているように定常ではない。さらに、自己相関を調べると、時間のずれを伴う個別物価の相関が、集計的な物価指数の振舞いに非常に重要な役割をしていることが分かる。CPIなどの物価指数は、マクロ経済と金融政策にとっては「ノイズ」と呼べる寄与を含んでいる。しかし、中央銀行で使われる「コア」CPIは単に常識と通り一遍の観察に基づいている。本研究のデータについて言えば、主成分 830 個の内、真に意味ある主成分はわずか 26 個であり、残りの大多数の主成分はノイズと区別できない。その 26 個の主成分に基づき、「トゥルーコア物価指数」と名付けた新しい物価指数を定義した。新しい物価指数は時間外労働時間、失業率、および為替と関連しているが、マネー・サプライとは有意な相関をもっていない。また、ミクロ個別物価の相互作用から生じる慣性が集計的な物価の振舞いを、期待仮説よりうまく説明することも示した。本研究で得られた結果は、ハイパワード・マネーを増やし、「期待インフレ」を上昇させることによりデフレから脱却しようとする、日本や EU における現行の金融政策の有効性に疑問を投げかけるものである。

(4)その他

①銀行・企業間の融資関係に関する年次データ（1980年から2012年まで）から構築される日本の信用ネットワーク（2部グラフ）について、ネットワーク解析の手法である“DebtRank”を用いて、各銀行の重要性、脆弱性についての研究を行った。また、コミュニティ解析を行うことにより、金融信用構造の変遷を明らかにした。抽出されたコミュニティはリスクが高まりやすい銀行・企業集団とみなすことができる。また、参照となる経済現象として、金融ビッグバン(1996～2001)に着目した。

②Credit Risk Databaseの大規模データを用いて、企業の労働生産性に関する新しいスケールリング則を発見して、その数理的な構造を明らかにした上で、労働生産性とそれに関連する分布の関数に制限が課されていることを見出した。同じデータを使い、大企業のみならず中小企業の全要素生産性を計測し、全要素生産性と企業成長の関係について分析した。

③世界の48カ国について通貨と株式市場の日ごとの推移を1999年から2012年まで解析し、その相関固有ベクトルの特性解析、協働ネットワークのコミュニティ解析などを行った。

④地理的空間上における高労働生産性企業の分布を明らかにし、これまでのクラスター計画に代わる新たな政策方針を提案した。

⑤各国企業財務データ（ビューロー・ヴァン・ダイク社）を使い、労働生産性分布の国際比較についての予備的解析を行った。

⑥Enrico Scalas教授（Sussex大）を招聘し、本研究を進展させるにあたっての助言を得た。

⑦本研究成果を国際的に広く発信するために、“A Primer to Macroeconophysics: New Studies on Economic Networks and Synchronization”と題する英文単行本の出版を立案し、現在、出版社の最終決定を待っている状況である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計26件)

- ① H. Yoshikawa, Stochastic macro-equilibrium: a microfoundation for the Keynesian economics, *Journal of Economic Interaction and Coordination*, vol.10, pp.31-55, 2015, 査読有, DOI:10.1007/s11403-014-0142-4
- ② H. Aoyama, H. Iyetomi and H. Yoshikawa, Equilibrium distribution of labor productivity: a theoretical model, *Journal of Economic Interaction and Coordination*, vol.10, pp.57-66, 2015, 査読有

DOI: 10.1007/s11403-013-0118-9

- ③ H. Aoyama, Y. Fujiwara, and M. Gallegati, Micro-macro relation of production: double scaling law for statistical physics of economy, *Journal of Economic Interaction and Coordination*, vol.10, pp.67-78, 2015, 査読有
DOI: 10.1007/s11403-014-0124-6
- ④ L. Marotta, S. Micciche, Y. Fujiwara, H. Iyetomi, H. Aoyama, M. Gallegati, and R. N. Mantegna, Bank-firm credit network in Japan. An analysis of a bipartite network, *PLoS ONE*, vol. 10, pp.18, 2015, 査読有
DOI: 10.1371/journal.pone.0123079
- ⑤ H. Yoshikawa, H. Aoyama, H. Iyetomi, and Y. Fujiwara, Deflation/Inflation Dynamics: Analysis based on micro prices, *RIETI Discussion Paper Series*, vol.15-E-026, pp.60, 2015, 査読有
<http://www.rieti.go.jp/jp/publications/dp/15e026.pdf>
- ⑥ T. Mizuno, W. Souma, and T. Watanabe, The structure and evolution of buyer-supplier networks, *PLoS ONE*, vol.9, pp.10, 2014, 査読有
DOI: 10.1371/journal.pone.0100712
- ⑦ T. Ito, K. Iwata, C. McKenzie, S. Urata, and T. Watanabe, Japan's Persistent Deflation and Monetary Policy: Editors' Overview, *Asian Economic Policy Review*, vol.9, pp.1-19, 2014, 査読有
DOI: 10.1111/aepr.12040
- ⑧ Y. Ikeda, H. Aoyama, H. Iyetomi, and H. Yoshikawa, Direct evidence for synchronization in Japanese business cycles, *Evolutionary and Institutional Economics Review*, vol.10, pp.315-327, 2013, 査読有
DOI: 10.14441/eier.A2013016
- ⑨ Y. Arai, T. Yoshikawa, and H. Iyetomi, Complex principal component analysis of dynamic correlations in financial markets, *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, vol.255, pp.111-119, 2013, 査読有
DOI: 10.3233/978-1-61499-264-6-111

[学会発表] (計38件)

- ① H. Aoyama, Synchronization Network of Global Foreign Exchange and Equity Markets, CFP IEEE COMPLEX NETWORKS 2014, 2014年11月25日, Marrakesh (Morocco)
- ② Y. Fujiwara, Modeling Chained Failures on Large-scale Economic Networks in Japan, SMSEC2014, Social Modeling and Simulations + Econophysics Colloquium

- 2014, 2014年11月05日, ニチイ学館神戸
ポートアイランドセンター (兵庫県, 神戸市)
- ③ T. Watanabe, How Much Do Official Price Indexes Tell Us about Inflation?, Macroeconomics seminar, Treasury, Australian Government, 2014年10月15日, Sydney (Australia)
- ④ H. Aoyama, Dynamics of Individual Prices and Macroeconomic Indices, European Conference on Complex Systems, 2014年09月22日~2014年09月26日, Lucca (Italy)
- ⑤ Y. Fujiwara, Dynamics of Commodity Price Fluctuations in Japan, European Conference on Complex Systems, 2014年09月22日~2014年09月26日, Lucca (Italy)
- ⑥ H. Iyetomi, A New Insight into the Financial Big Bang in Japan through a Community Analysis on the Credit Network, European Conference on Complex Systems, 2014年09月22日~2014年09月26日, Lucca (Italy)
- ⑦ 家富洋, 鉱工業指数の位相ダイナミクス, 京都大学数理解析研究所共同研究「マクロ経済動学の非線形数理」研究会, 2014年09月16日~2014年09月17日, 京都大学 (京都府, 京都市)
- ⑧ T. Watanabe, Estimating Daily Inflation Using Scanner Data: A Progress Report, Meeting of the Group of Experts on Consumer Price Indices, 2014年05月27日, Geneva (Switzerland)
- ⑨ H. Yoshikawa, A Model of Macroprudential Policy, International Conference on Financial Networks and Systemic Risk Analysis, 2013年07月17日~2013年07月19日, 京都大学 (京都府, 京都市)
- [図書] (計5件)
- ① 渡辺努 (編著), 日本経済新聞社, 長期デフレの解明, 2015 (印刷中)
- ② T. Mizuno, W. Souma, and T. Watanabe, Buyer-Supplier Networks and Aggregate Volatility, in *The Economics of Interfirm Networks*, eds. T. Watanabe et al., Springer, 2015, pp. 15-37
- ③ T. Iino and H. Iyetomi, Community Structure of a Large-scale Production Network in Japan, in *The Economics of Interfirm Networks*, eds. T. Watanabe et al., Springer, 2015, pp. 39-65
- ④ A. Chakraborti, Y. Fujiwara, A. Ghosh, J.-I. Inoue and S. Sinha, Physicists' Approaches to a Few Economic Problems, in *Econophysics and Data Driven Modelling of Market Dynamics*, eds. F. Abergel et al., Springer, 2015, pp. 237-286
- ⑤ 相馬亘, 東京大学出版会, 山口栄一編「イノベーション政策の科学: SBIR の評価と未来産業の創造」, 第12章 日本のクラスター政策, 2015, pp. 265-288
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
吉川 洋 (YOSHIKAWA, Hiroshi)
東京大学・大学院経済学研究科・教授
研究者番号: 30158414
- (2) 研究分担者
青山 秀明 (AOYAMA, Hideaki)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 40202501
- (3) 研究分担者
家富 洋 (IYETOMI, Hiroshi)
新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号: 20168090
- (4) 研究分担者
相馬 亘 (SOUMA, Wataru)
日本大学・理工学部・准教授
研究者番号: 50395117
- (5) 研究分担者
藤原 義久 (FUJIWARA, Yoshihisa)
兵庫県立大学・大学院シミュレーション研究科・教授
研究者番号: 50358892
- (6) 研究分担者
渡辺 努 (WATANABE, Tsutomu)
東京大学・大学院経済学研究科・教授
研究者番号: 90313444
- (7) 連携研究者
池田 裕一 (IKEDA, Yuichi)
京都大学・大学院総合生存学館・教授
研究者番号: 90610858