

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26285043

研究課題名(和文) 帰納的学習による意思決定理論の構築と資産取引実験への応用

研究課題名(英文) Inductive learning theory and its application to experimental asset markets

研究代表者

石川 竜一郎 (Ishikawa, Ryuichiro)

早稲田大学・国際大学院・准教授

研究者番号：80345454

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,700,000円

研究成果の概要(和文)：本プロジェクトの目的は、限定合理的な主体が経験を通じて行動の学習過程を描写する帰納的学習理論の構築である。特に市場取引実験に注目し、被験者の(i)合理性の分類 (ii)高次期待の影響の抽出 (iii)将来価格の予測 (iv)経験の違いの影響を明らかにする行動データの分析を行った。その結果、市場参加者の認知能力の多様性が資産価格バブルを助長し、それが被験者の高次期待に起因することが明らかになった。また資産取引実験の経験を持つ被験者も、現在の状況に適応的に学習することも検証された。加えて、これらの一連の実験を通じて、被験者に複数の動機付けが実験内に存在する際の動機付け統制の手法を提示した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project is to construct inductive learning theory to describe learning process of bounded rational decision makers, which is based on their experiences. We focused on experimental asset markets, and analyzed their behavioral data for the following purposes: (i) Classification of subjects' rationality, (ii) Extraction of effects of their higher order beliefs, (iii) Their predictions of future prices, and (iv) Effects of their heterogeneous experiences. As a result, we found that the bubble of asset prices is facilitated by heterogeneous cognitive abilities, and is due to subjects' higher order beliefs. Furthermore, we also observed that the experienced subjects in experimental markets adaptively learn price paths in their present markets. In addition, we show a new methodology of experimental assets markets to control subjects' incentive when they have more incentives.

研究分野：認識論的ゲーム理論

キーワード：帰納的学習 帰納的ゲーム理論 資産取引実験 資産価格バブル 高次認識 経験 期待形成

1. 研究開始当初の背景

近年のゲーム理論・意思決定理論の研究において、帰納的学習を基礎とした研究成果が報告されている。Gilboa and Schmeidler (2001) の「事例ベース意思決定理論」、Kaneko and Kline (2008)による「帰納的ゲーム理論」はその代表である。これらの研究では、直面している経済環境を必ずしも熟知していない**限定合理的的な意思決定主体**が「何を、どこまで、どのように認識し学習するか」の過程を分析している。経験を主体の学習の源泉とし、その範囲で規則や行動パターンを構築するため、帰納的学習に基づく意思決定理論と言える。

こうした帰納的学習の研究では、限定合理的な主体が学習に必要な「認識能力や計算能力」などの認知的特徴が明示的に定式化される。その上で、経験を通じて獲得した情報、学習した行動規則が不確実性やリスクを伴う意思決定にどのように反映され、その帰結が学習過程にどのようにフィードバックされるかを考察する。

このような理論は、現実の意思決定をどの程度説明可能かが問われる。近年、実験経済学はそのような理論の検証を行うための方法論を提供している。本プロジェクトでは、資産取引実験を通じて、理論との整合性を検証する。

資産取引実験は、Smith, et al. (1988)以降、資産のファンダメンタルズが既知である有限期間の取引であっても、理論的帰結と反して資産価格バブルが発生することが知られている。この結果の頑健性は多くの追実験により明らかにされ、特に Lei, et al. (2001)では被験者の利潤最大化行動の欠如をその根拠としている。

こうした実験結果と理論分析の矛盾は、経済理論が合理的主体に特化した分析を行って来たことに他ならない。有限期間で資産価格バブルが生じないことは、各主体が利潤最大化を目的とし、そのことが主体間で共通認識となっており、全ての主体が有限期間の取引終了最終期から後ろ向きに適切な推論を行えることに依拠している。このような要請が過度であることが、Smith, et al.の研究で明らかになり、主体の合理性をどの程度要請できるのかは、理論を構築する上で重要な要件になる。そのため、主体の認知能力を理論的に定式化している帰納的学習理論を通じて、実験結果と統合的な意思決定理論を構築することが、経済学研究において重要な意味を持つ。

2. 研究の目的

こうした背景から本プロジェクトでは、被験者実験を通じた資産取引行動およびそこから生じる資産価格バブルの発生の原因を検証する。それを通じて、主体の合理性、認知能力、学習過程などを検証し、帰納的学習理論と結びつける。そのために、主体の将来

資産価格の予測とその変化の抽出が必要になる。バブル発生に対する予測が何に起因しているかを精査することで、**自己実現的(内生的)バブルの発生の解明を、帰納的学習理論を用いて試みる。**

帰納的学習では、取引主体の経験に焦点を当てるため、過去にどのような主体と、どのような取引価格・数量で取引を行ったかに注目する必要がある。主体の経験は、取引相手や実現価格・取引数量として集約される。その取引データと主体が抱く将来価格への期待やその期待下での取引計画を、帰納的学習を通じた意思決定の帰結として捉える。

資産取引実験を含む相互依存的な状況では、各々が対峙する取引相手の行動の予測、及びその変化の予想も必要になる。そのため、各主体の思考や期待形成は、他者の思考パターン・期待形成を考慮した上で構成されることになる。主体が十分に合理的であれば、さらにそれは『「他者の思考を自分がどのように捉えているか」を他者がどのように捉えているか』の思考を必要とし、そうした思考の連鎖で形成される高次期待の分析が必要になる。

実験及び通常的意思決定者がそうした高次期待を、長い連鎖で形成することに限度があることは想像に難くない。そのため、実験データとして期待形成を分析するためには、高次期待がどこまで影響するのかを検証しながら進める必要がある。こうした手法の構築も本研究では重要な役割を担う。

したがって本研究では、資産取引実験を通じて (i) 主体の期待形成の分析や(ii) 高次期待の影響の抽出するための新しい実験方法・環境を導入する。その上で、(iii) 資産取引行動データと資産価格バブルの関係を分析し、(iv) 帰納的学習に基づいた理論的分析に関連づける。

3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するために、まず資産取引実験環境の全体像を説明する。その上で、実験設定をどう変化させることで、研究目的を達成するための行動データが得られるかを説明する。

(1) 資産取引実験の環境

資産取引実験は、Smith, et al. (1988)でその手法が確立された。本プロジェクトでもその手法に基づき、ネットワークで繋がったコンピュータを用いて、被験者に仮想的な資産市場で資産取引を行ってもらった。初期保有として、仮想的株式と貨幣を与え、それを用いて複数期間の取引をしてもらった。本実験では、各期で一回の売買しか行えないためコール市場ルールを採用したため、期間の長さが取引機会の回数となる。具体的には、10・12・15 期間の期間を設定した。

被験者は各期ごとに、資産を購入したい場合は、一株あたりに自分が最大払っても良いと思う購入希望価格(最高購入希望価格)と

その数量、売却したい場合には、一株あたりで自分が得たい最小の販売額（最低売却希望価格）と数量を提示することで、取引の注文を市場に提示する。

各期でそれらの注文情報をコンピュータがまとめ、需要と供給が一致する取引価格を決定し、株式と貨幣の移転が行われる。株式の売買において、購入価格よりも高く売却できればキャピタルゲインを得ることができ、低く売却した場合にはキャピタルロスを受ける。

また、被験者が株式を保有している際には、各期の終了後に配当を得る。そのため、仮に株式の売買を行わなくても、その保有を通じて被験者はインカムゲインを得る。各期から最終期までに得られる配当額がこの株式の本源的価値（ファンダメンタル・バリュー）と考えられるので、各期の配当金額を事前に被験者に伝えることで、被験者は一株あたりの本源的価値を完全に知っていることになる。

このようにして、資産取引実験では、キャピタルゲインとインカムゲインの二つの方法から利益を得られ、通常の株式取引と同じ状況を仮想的な市場で実現している。

理論的には、この状況では株式の取引は行われず、取引価格も本源的価値に一致することは、Milgrom and Stokey (1982)などが示した「無投機定理」としてよく知られている。それにも関わらず、Smith et al. (1988)が行った実験では、資産は取引期間の途中で本源的価値と大きく乖離した価格で取引される資産価格バブルを観察した。現在では、こうしたバブルの発生は人々の認知能力・合理性のいずれかに起因することが知られており、以下の実験環境を通じて、その原因の特定を試みた。

(2) 実験設定の工夫と意義

前述の資産取引実験環境において、実験設定を様々に変えることで、目的とする被験者の行動データを収集した。その設定項目は、以下の五項目に分類できる。

- i. 被験者の合理性の分類
- ii. 被験者の高次期待の影響の抽出
- iii. 被験者の将来価格の予測データの収集
- iv. 被験者の経験の違いの影響
- v. 被験者の実験参加の動機付けの統制

以下でその詳細を説明する。

(i) 被験者の合理性の分類

先行研究を通じて、理論で仮定される主体の合理性と被験者の合理性との乖離が、資産価格バブルを助長する原因となっていることがわかっている。そのため、被験者の合理性からの乖離の程度を何らかの測度で測る必要がある。

本研究では、心理学の認知テストを援用し、Raven test と呼ばれる認知能力検査テストを用いて被験者の認知能力の類別を行った。このテストのスコアに応じて、被験者をグルー

プ分けし、それに基づいた市場を構成した。

(ii) 被験者の高次期待の影響

被験者の高次期待の影響を見るために、本研究では、市場の構成メンバーをすべて人間にした場合(Human Treatment; HT)と、人間一人とコンピュータプレーヤーで構成される場合 (Human-Computer Treatment; HC)とで区別した。

このような市場構成員の違いが高次期待の影響を検証できる理由は、コンピュータプレーヤーが合理的行動を意味する本源的価値での取引しか行わないことを被験者に伝えただけである。

HT の環境では、市場構成員全てが人間であるため、価格バブル下での株取引は、主体の非合理性によるものか、その非合理的主体を読み込んだ高次認識によるものかの区別はつかない。

一方で、HC の環境ではコンピュータは合理的意思決定しか行わないため、もし被験者が価格バブル下で株取引を行った場合には、被験者が対戦相手であるコンピュータの合理性を読み取れない単なる非合理的主体ということになる。

したがって、被験者のそれ以外の特徴を一定だと仮定すると、被験者比較が可能になりその行動の差が高次認識の影響ということになる。

このようなコンピュータトレーダーを導入した資産取引実験の検証は、我々の知る限りではこれまで行われておらず、本プロジェクトが最初の試みと言える。

(iii) 被験者の将来価格の予測データの収集

被験者の将来価格の予測（期待形成）に関しては先行研究に基づき、各期の取引が始まる前に将来取引価格の予測を入力を行ってもらった。これは、Haruvy et al. (2007)の手法を援用したものである。

(iv) 被験者の経験の違いの影響

経済実験においては、通常一度実験に参加した被験者は、二度同じ実験に参加することはない。これは、一度目の実験での学習効果が二度目以降の実験の行動データに反映してしまうためである。

しかし本実験では、帰納的学習の検証のために資産取引実験の多様な経験を持つ被験者の行動データを収集する必要がある。そのため、資産取引実験に一度参加した被験者を再招集し、初めて資産取引実験を行う被験者との対比を行なった。この対比により、被験者の経験の違いがもたらす行動の違いを検証可能なデータの収集が可能になった。

(v) 被験者の実験参加の動機付けの統制

こうした経済実験が社会科学における実験として意味を成すに至ったのは、2002年のノーベル経済学賞受賞者で、資産取引実験の先駆的な枠組みを構築した Vernon Smith 教授によるところが大きい。彼は価値誘発法と呼ばれる被験者の実験内のパフォーマンスに応じて謝金を違える手法を実験に導入した。

$$RAD = \frac{1}{\text{取引期間数}} \sum_{t=1}^T \frac{|p_t - FV_t|}{\text{本源的価値の平均}}$$

これにより、被験者の実験への動機付けを最大限引き出せるように統制した。

この手法を踏襲した実験を計画したが、本実験では上記で説明した将来価格の予測データの収集も行なっているため、資産取引と価格予測の二つの異なる動機付けが存在することになった。両者は依存関係にあるため、被験者が予測や取引を通じて互いを操作する可能性もある。このような動機の分散を避けるために、動機付け統制の方法論に関する実験も行った。具体的には、将来価格の予測から得られた利益と、株取引から得られた利益に対する謝金のいずれか（もしくは両方）を用いるかのルールを比較し、将来価格の予測を行わない実験の行動データと統計的に有意な違いがない手法がどのルールかを特定した。

4. 研究成果

(1) 資産取引実験

以下では、上述の実験の工夫と意義で説明した (i)~(v) に沿って成果をまとめる。特に (v) 被験者の実験参加の動機付けの統制については、本プロジェクトの実験全般に関わるために、最初に結果を示す。

被験者の異なる二つの動機付けの統制を考察するために、複数の動機付けスキームを比較・検討した。その結果、将来価格の予測を伴う実験では、そこから得られる謝金と取引から得られる謝金が事後的にランダムに決定される場合において、通常の資産取引実験と統計的に有意な差がないことがわかった。この検証は、本プロジェクトの終盤で行われたため、以下で説明する研究成果には反映されていないが、今後の資産取引実験の動機付け統制の基盤となる検証を行えたと考えている。

以下の実験では、価格予測の正答数から得られる謝金と資産取引から得られる謝金の両方が被験者の実験における動機付けになっている際の、被験者の合理性や高次認識の役割を検証した実験の結果をまとめる。

資産価格バブルの度合いを中心に説明するが、その測度として相対的絶対値乖離度 (Relative absolute deviation; RAD) と呼ばれる以下の指標を用いる。

ここで p_t は t 期の取引価格、 FV_t は t 期の本源的価値、 T は最大取引期間を表す。すなわちこの指標は、各期の価格と本源的価値との乖離の和を本源的価値の平均値で基準化し、1期あたりの平均で評価している。この指標が大きければ、バブルが大きいことを意味し、0 に近ければ実現した取引価格は本源的価値に近かったことになる。

以下ではこの指標を用いた分析結果をまとめる。

(i) Raven test に基づく合理性の影響

被験者には資産取引実験前にあらかじめ Raven test を受けてもらい、そのスコアで被験者を分類し市場を構成した。ハイスコアグループ (6H)、ロースコアグループ (6L)、その混合グループ (3H3L) でグループ分けを行なった。その結果を RAD で分析したものが図 1 となる。

図 1 は横軸に RAD のスコア、縦軸にその値をとった市場の割合 (各グループ 12 市場中の割合) の累積密度を表している。RAD の値が大きくなるにしたがって、累積密度は 1 に近くなるので、低い RAD で累積密度が 1 に到達すればするほど、そのグループのバブルの度合いが低いことになる。

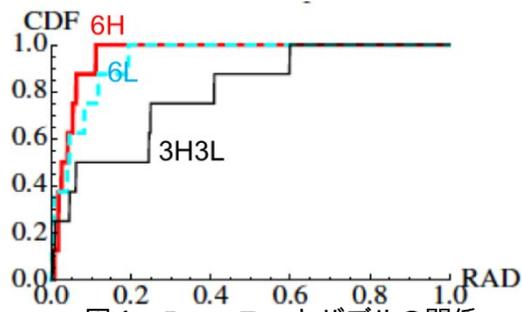


図 1 : Raven Test とバブルの関係

図 1 から、3H3L グループがバブルの度合いが明らかに大きいことがわかる。実際、6H や 6L と統計的にも有意な違いがあることが示されている。

これにより、個々の主体の認知能力の高さよりも、市場を構成する認知能力の違い・多様性がバブルの原因となっていることが明らかになった。

(ii) コンピュータープレーヤーとの違い

3(2)(ii) で述べたように、HT と HC の設定の違いから、高次認識の影響が明らかになる。この分析では、実現価格の違いが二つの設定の違いから統計的に有意な結果が得られなかった。しかし、3(2)(iii) で説明した将来価格の予測データを検証するとその違いが明らかになった。それを示しているのが図 2 である。

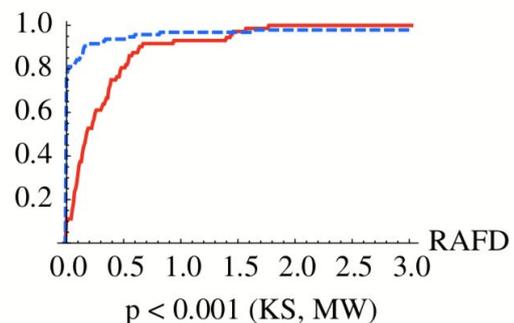


図 2 : 価格予測と本源的価値の乖離の関係 (赤線: HT, 青線: HC)

図2ではRADの定義で用いた実現価格 p_t を価格予測に置き換えて計算した指標 RAFD (Relative Absolute Forecast Deviation)を計算した。すなわち、価格予測が平均的にどれだけ本源的価値から乖離しているかを示している。赤線がHT、青線がHCの結果となる。

図内の p 値が示しているように、この二つの環境の違いは統計的に有意に異なる。上述の実験設定の工夫で説明したように、この差が高次期待の影響と言える。**高次期待は、直接に資産価格バブルを助長しないが、被験者の期待レベルでは、バブルを助長することが検証された。**(i)の結果と合わせると、**市場参加者の認知能力の多様性がバブルを助長しているが、それは被験者の高次期待に起因しており、その意味で被験者が他者の行動の予測の予測などを高次レベルで行っていることわかる。**

(iii)被験者の経験の違いの影響

これを見るために、3(2)(iv)に手法に則り、一度資産取引実験を行なった被験者に、二度目の参加を依頼した。この実験設定においても被験者の将来価格の予測に有意な違いが見られた。

一度資産取引実験に参加した被験者は、当初本源的価値に近い価格予測を行った。しかし取引機会を重ね、資産取引実験に初めて参加している被験者の注文に起因して資産価格バブルが生じていることがわかると、直ちに予測価格を修正した。その結果、最終的には実験参加経験のある被験者も資産価格バブルを予測するに至った。この意味で、被験者の価格予測はいわゆる適応的期待モデルに近いことが検証できる。

(2)帰納的学習との融合

本プロジェクトでは、資産取引データを様々な実験環境下で収集することに成功した。これを帰納的学習と結びつけるためには、以下の二点の要因を含める必要がある。

一点は被験者の高次認識を表現できるモデルであること、もう一点はその下で動学的適応期待モデルを構築することである。

現段階で、この点を考慮できる行動モデルの構築には至っていない。しかし、途中計画経過として、McKelvey and Palfrey (1995)による質的応答均衡(Quantal response equilibrium)の動学化を試み、そこから資産取引データの分析を行っている。質的応答均衡は多様な主体の認知能力をパラメータで統制可能なので、その下で期待形成表現も可能だと考えている。

<引用文献>

Gilboa, I. and D. Schmeider (2001) *A Theory of Case-based Decisions*, Cambridge Univ. Pr.

Kaneko, M. and J. Kline (2008) "Inductive game theory: A basic Scenario," *J. Math Econ*, 44, 1332- 1363.

Smith, V., G. Suchanek, and A. Williams

(1988) "Bubbles, crashes, and endogenous expectations in experimental spot asset markets," *Econometrica* 56, 1119-1151.

Lei, V., C. Noussair, and C. Plott (2001) "Nonspeculative bubbles in experimental asset markets: Lack of common knowledge of rationality vs. actual irrationality," *Econometrica*, Vol. 69, 831-859.

Milgrom, P., N. Stokey (1982) "Information, trade, and common knowledge," *Journal of Economic Theory* 26, 17-27.

Haruvy, E., Y. Lahav, C. N. Noussair, (2007) "Traders' expectations in asset markets: experimental evidence," *American Economic Review*, 97(5), 1901-1920.

McKelvey, R., T. Palfrey (1995) "Quantal Response Equilibria for Normal Form Games", *Games and Economic Behavior* 10: 6-38.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計10件)

Hanaki, N., E. Akiyama, R. Ishikawa, "Behavioral uncertainty and the dynamics of traders' confidence in their price forecasts," *Journal of Economic Dynamics & Control*, 88: 121-136, 2018. (査読有)
DOI: 10.1016/j.jedc.2018.01.020

Hanaki, N., E. Akiyama, R. Ishikawa, "Effects of different ways of incentivizing price forecasts on market dynamics and individual decisions in asset market experiments," *Journal of Economic Dynamics & Control*, 88: 51-69, 2018. (査読有)
DOI: 10.1016/j.jedc.2018.01.018

Akiyama, E., N. Hanaki, R. Ishikawa, "It is not just confusion! Strategic uncertainty in an experimental asset market," *Economic Journal*, vol.127 (Oct.): F563-F580, 2017. (査読有)
DOI: 10.1111/eoj.12338

片平啓、秋山英三、"参加周期の異なるプレイヤーが混在する少数派ゲーム," 『情報処理学会論文誌, Vol 58 No.1, 269-277, January (2017). (査読有)

横手美史暢、秋山英三、"社会ネットワークのサイズと空間構造が文化圏形成に与える影響の分析," *The Proceedings of the Joint Agent Workshop (JAWS) 2017*, 47-52 pages, (2017). (査読有)

Hanaki, N., E. Akiyama, Y. Funaki, R.

Ishikawa, (2017) “Diversity in Cognitive Ability Enlarges Mispricing in Experimental Asset Markets,” No. 2017-08, Groupe de REcherche en Droit, Economie, Gestion (GREDEG CNRS), University of Nice Sophia Antipolis. (査読無)

Hoshihata, T., R. Ishikawa, N. Hanaki, E. Akiyama, (2017) “Flat Bubbles in Long-Horizon Experiments: Results from two Market Conditions,” 2017-32, Groupe de REcherche en Droit, Economie, Gestion (GREDEG CNRS), University of Nice Sophia Antipolis. (査読無)

Tsuruzono, H., Y. Fujii, T. Goto, Y. Hattori, R. Ishikawa, “Heterogeneous Information in Experimental Asset Markets,” *Osaka Sangyo University Journal of Economics*, 16(1-2): 23-35, 2015. (査読有)

藤倉崇晃、小川一仁、秋山英三、“仲介者と取引するトレーダーの曖昧性忌避とリスク回避 経済実験による検証,” *応用経済学研究*, 8, 69-94, March (2015). (査読有)

Akiyama, E., N. Hanaki, R. Ishikawa, “How do experienced traders respond to inflows of inexperienced traders? An experimental analysis,” *Journal of Economic Dynamics Control*, Vol. 45, 1-18, 2014. (査読有)
DOI: 10.1016/j.jedc.2014.05.007

[学会発表](計9件)

R. Ishikawa, “Difference of Price dynamics between trading institutions in longtime-horizon experimental asset markets,” *2016 North American Regional Economic Science*, Tucson, Arizona, USA, 2016年11月10日.

E. Akiyama, “Diversity in cognitive ability enlarges mispricing,” *International Conference on Socio-economic systems with ICT and Networks*, 東京大学、2016年3月27日.

E. Akiyama, “Diversity in cognitive ability enlarges mispricing,” *Consciousness and Intension in Economics and Philosophy*, 京都産業大学、2015年12月11日.

R. Ishikawa, “Repeated bilateral contracting under unawareness,” East Asian Game Theory Conference, 早稲田大学、2015年8月25日.

E. Akiyama, How Do Experienced Traders Respond to inflow of Inexperienced traders? *An Experimental Analysis*,” *Kyoto Workshop on Experimental Economics 2015*, 京都大学、2015年7月13日.

E. Akiyama, How Do Experienced Traders Respond to inflow of Inexperienced traders? An Experimental Analysis,” *Computational Economics and Finance (CEF2015)*, Taiwan, Taipei, 2015年6月21日.

R. Ishikawa, “Repeated bilateral contracting under unawareness,” *Joint conference of “Logic, Game Theory, and Social Choice 8” and “The 8th Pan-Pacific Conference on Game Theory”*, 台湾、2015年5月21日.

R. Ishikawa, “Heterogeneous Information in Experimental Asset Markets” *14th SAET Conference on Current Trends in Economics*, 早稲田大学、2014年08月19日~2014年08月21日.

R. Ishikawa, “Belief Revision for Inductive Game Theory,” *Interdisciplinary Workshop on Game Theory at UC Davis*, UC Davis, USA, 2014年4月25日.

[その他]
ホームページ等

<http://www.f.waseda.jp/r.ishikawa/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

石川 竜一郎 (ISHIKAWA, Ryuichiro)
早稲田大学・国際学術院・准教授
研究者番号：80345454

(2)研究分担者

秋山 英三 (AKIYAMA, Eizo)
筑波大学・大学院システム情報系・教授
研究者番号：40317300

(3)研究協力者

花木 伸行 (HANAKI, Nobuyuki)
仏国ニース・ソフィアアンティポリス大
学・経済経営学部 教授