

Title	学習を取り入れたシミュレーション技術の開発と金融への応用
Sub Title	Developing simulation technology with learning and its application to finance
Author	今井, 潤一 (Imai, Junichi) 辻村, 元男 (Tsujimura, Motoh) Tan, Ken Seng()
Publisher	
Publication year	2025
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2024.)
JaLC DOI	
Abstract	本研究は、学習を取り入れた準モンテカルロ法 (QMC) の効率化を通じて、金融リスク管理と投資戦略の高度化を目指し、数値計算と意思決定支援の両面で成果を挙げた。回帰分析やニューラルネットワークを用いた実質次元削減法を開発し、高次元・非連続な問題に対応可能な新たな枠組みを構築、エキゾチックオプションの価格評価への応用で高い有効性を確認した。また、モデル不確実性や曖昧性のもとでの意思決定モデルを構築し、能動的な学習が意思決定の改善に有効であることを定量的に示した。これにより、QMCと学習手法の融合が、金融数理の複雑な課題への有力な解決策となることを示唆した。 The objective of this study is to enhance financial risk management and investment strategy formulation by improving the efficiency of quasi-Monte Carlo (QMC) methods through the integration of learning-based techniques. It is anticipated that this approach will yield substantial contributions in the domains of computational finance. A framework for effective dimension reduction was developed using quadratic regression analysis and neural networks, enabling robust treatment of high-dimensional and discontinuous problems. The proposed methods demonstrated high effectiveness when applied to the pricing of exotic options. Furthermore, a decision-making model under model uncertainty or ambiguity was constructed, and the effectiveness of active learning in improving decision quality was quantitatively verified. These findings suggest that integrating QMC and learning methodologies could offer a robust approach for addressing complex challenges in financial engineering.
Notes	研究種目：基盤研究 (C) (一般) 研究期間：2021～2024 課題番号：21K04534 研究分野：金融工学
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_21K04534seika

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.

令和 7 年 6 月 2 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2024

課題番号：21K04534

研究課題名（和文）学習を取り入れたシミュレーション技術の開発と金融への応用

研究課題名（英文）Developing simulation technology with learning and its application to finance

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） 2,900,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、学習を取り入れた準モンテカルロ法（QMC）の効率化を通じて、金融リスク管理と投資戦略の高度化を目指し、数値計算と意思決定支援の両面で成果を挙げた。回帰分析やニューラルネットワークを用いた実質次元削減法を開発し、高次元・非連続な問題に対応可能な新たな枠組みを構築、エキゾチックオプションの価格評価への応用で高い有効性を確認した。また、モデル不確実性や曖昧性のもとでの意思決定モデルを構築し、能動的な学習が意思決定の改善に有効であることを定量的に示した。これにより、QMCと学習手法の融合が、金融数理の複雑な課題への有力な解決策となることを示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、準モンテカルロ法と学習手法を融合させることで、複雑な数理モデルに対する数値計算の精度と効率を大幅に向上させた点で、学術的に新規性と汎用性の高い成果を提供している。とりわけ、高次元・非線形・非連続といった従来手法では扱いにくかった構造に対しても対応可能な枠組みを確立したことは、数値解析・コンピュータ所なるファイナンスの分野における重要な進展である。また、これにより、リスク指標の算出やエキゾチックオプションの価格評価が高速化・高精度化され、金融実務におけるリスク管理や商品評価の信頼性向上、意思決定支援の高度化に直接的な貢献が期待される。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to enhance financial risk management and investment strategy formulation by improving the efficiency of quasi-Monte Carlo (QMC) methods through the integration of learning-based techniques. It is anticipated that this approach will yield substantial contributions in the domains of computational finance. A framework for effective dimension reduction was developed using quadratic regression analysis and neural networks, enabling robust treatment of high-dimensional and discontinuous problems. The proposed methods demonstrated high effectiveness when applied to the pricing of exotic options. Furthermore, a decision-making model under model uncertainty or ambiguity was constructed, and the effectiveness of active learning in improving decision quality was quantitatively verified. These findings suggest that integrating QMC and learning methodologies could offer a robust approach for addressing complex challenges in financial engineering.

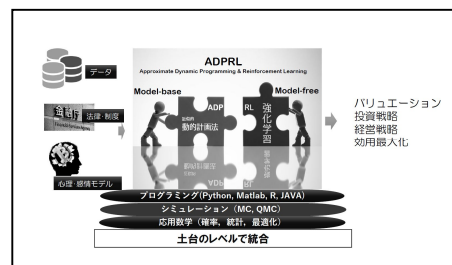
研究分野：金融工学

キーワード：準モンテカルロ法 金融工学 リアルオプション 学習

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究者は、前研究課題「シミュレーション技術を利用した定量的リスク管理法の提言」において、動的な意思決定問題に対する最適解導出のためのフレームワーク「ADPRL」(図参照)を提案し、その基本アルゴリズムの実装を行った。この研究過程において顕在化した主な課題の一つが、数理ファイナンスにおける標準的アルゴリズムの非効率性である。実際に、ニューラルネットワーク、RBF (Radial Basis Function) 補間、強化学習におけるポリシー／バリュー・イテレーションなどの手法を用いて、標準的な最適ポートフォリオ選択問題や動的最適消費問題に適用したところ、しばしば深刻な非効率性に直面した。具体的には、解の精度の低さや最適解に到達するまでに要する計算コストの大きさが問題となった。この問題に対する一つの解決策として、本研究者が専門的知見と実績を有するモンテカルロおよび準モンテカルロ (MCQMC) 法の効率化技術を活用し、ADPRL フレームワークにおける基幹部分であるシミュレーション処理の効率を向上させることが、フレームワーク全体の計算効率の向上につながると考えた。ただし、従来手法である LT 法や GLT 法をそのまま適用することは困難であることも明らかとなっていた。



2. 研究の目的

本研究の目的は、金融リスクを定量的に管理するための効率的な数値計算手法を開発し、それを金融機関における投資戦略の構築およびリスク管理業務に実用的な形で応用可能なツールとして提供することである。本研究の最大の特長は、(準)モンテカルロ法を基盤としたシミュレーション技術の精度を向上させるために、データ駆動型の学習手法を導入する点にある。具体的には、統計的あるいは機械学習的アプローチを採用することで、従来の解析的手法では対応が困難であった非線形性を柔軟に扱うことが可能となり、既存の問題に対しては更なる精度向上が期待される。

3. 研究の方法

「学習」を問題解決に活用するという発想自体は、これまでも多くの分野で広く用いられてきたが、準モンテカルロ (QMC) 法の効率化に学習を導入するというアプローチは、本研究課題において初めて提案されたものである。特に、QMC の実質次元を低減させることでその効率を高める手法は、QMC において乱数の代わりに用いられる LD 列に特有の数学的性質を活用するものであり、通常のモンテカルロ (MC) 法にそのまま適用しても有効性は期待できない。したがって、このアプローチは QMC に特有の構造を前提とする独自性の高い方法である。さらに本手法の利点として、「学習」の概念を導入することにより従来の解析的なアプローチと異なり、重回帰分析はもちろんニューラルネットワークをはじめとする機械学習分野の多様な手法を柔軟に組み合わせて活用できる点が挙げられる。これにより、解析の自由度と表現力は飛躍的に向上する。

4. 研究成果

本研究では、金融リスク管理および投資戦略の高度化を目的として、学習を取り入れた準モンテカルロ法 (QMC) の効率化を中心に、数値計算手法と意思決定支援モデルの両面で複合的な成果を挙げた。以下では、得られた成果を(1)数値計算手法の理論的展開、(2)数値計算手法の応用、(3)意思決定支援の理論モデル構築、(4)意思決定支援の応用的検証の4つに整理して述べる。

(1)数値計算手法の理論的展開

本研究の中核的な理論的貢献は、準モンテカルロ法に統計的・機械学習的アプローチを導入することにより、高次元問題に対する効率的な数値解法を開発した点にある。従来の解析的な分析による次元削減法とは異なり、回帰によるアプローチにより、2次モデルや、より一般的な非線形構造を持つ問題にも柔軟に対応可能な新しい枠組みを提示した。推定の不安定性という二次回帰モデル特有の課題に対しては、リッジ回帰を組み合わせることでロバスト性を高めた。さらに、ニューラルネットワークを用いた非線形次元削減法 (NNT) を構築し、Randomized QMC (RQMC) と統合することで、非連続性や高次元性によって従来法が機能しにくかったケースに対しても、分散の大幅な低減と精度の向上を両立する理論的基盤を確立した。

(2)数値計算手法の応用

上記の手法を用いて、複数のエキゾチックオプションの価格評価に応用を行った。とくに、為替リスクを伴う Quanto オプションや、デリバティブのペイオフに2次形式を含む商品に対して、

開発した二次回帰モデルベースの次元削減手法は高い効果を示した。また、ニューラルネットワークを用いたアプローチは、ルックバックオプションやレインボーオプションなど、解析的な分析が困難なペイオフ構造を持つ複雑な金融商品においても、従来手法を凌駕する精度を実現している（図参照）。これらの数値実験により、提案手法の有効性と汎用性が明らかとなり、学術的にも実務的にも高い適用可能性を有することが実証された。

(3)意思決定支援の理論モデル構築

本研究では、数値手法の開発と並行して、モデル不確実性 (model uncertainty) および曖昧性 (ambiguity) の下での意思決定に関する理論的分析も進めている。とくに、金融市場における将来の価格変動が確率的に特定できないという状況において、金融オプション及びリアルオプションの最適行使戦略がどのように影響を受けるのかを理論的に分析した。この枠組みでは、従来のリスクベースのモデルでは表現できない構造を扱うため、確率過程の非標準的設定や、複雑な意思決定プロセスの数理的記述が求められた。

(4)意思決定支援の応用的検証

上記の理論モデルを基盤として、意思決定支援に資する実践的なシミュレーションも実施した。具体的には、プロジェクトマネージャーによる能動的な情報取得を可能とする意思決定モデルを構築し、最適行使戦略の導出とそれに基づく数値シミュレーションによって、有効性を検証した。特に、将来が曖昧な状況下において学習が果たす役割について、これまで定性的に語られてきた内容を定量的に評価するという新しい試みを行い、学会発表に結びつけた。また、学習による不確実性軽減効果は、意思決定におけるリスクマネジメント手法の設計にも有益であることが確認された。

以上のように、本研究は、数値計算技術の理論的发展とその金融工学的応用、さらに意思決定理論への拡張とその実証という、複数の視点から一貫性のある成果を挙げており、準モンテカルロ法と学習手法の融合を通じて、金融分野における高度な数理的課題に対する有力な解決策を提供している。

4. Lookback option (floating strike) under GBM

$$\text{payoff} = \max S - S(T)$$

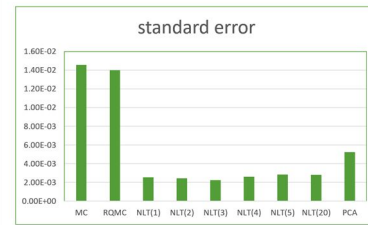


Fig.7 under GBM (250 dimension)

5. Lookback option (floating strike) under NIG

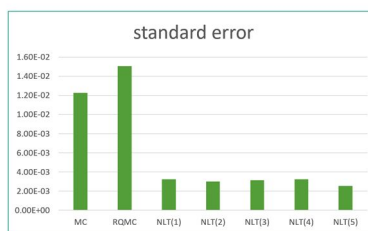


Fig.8 under NIG(250 dimension)

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Imai Junichi	4. 巻 22
2. 論文標題 A Numerical Method for Hedging Bermudan Options under Model Uncertainty	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Methodology and Computing in Applied Probability	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） 10.1007/s11009-021-09901-6	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 Imai Junichi, Tan Ken Seng	4. 巻 227
2. 論文標題 Dimension reduction for Quasi-Monte Carlo methods via quadratic regression	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 Mathematics and Computers in Simulation	6. 最初と最後の頁 371～390
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.matcom.2024.08.016	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 該当する

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 辻村元男, 今井潤一
2. 発表標題 The Effect of Both Sides Operational Flexibility in Capacity Investment under Uncertainty
3. 学会等名 日本ファイナンス学会 第31回大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Junichi Imai, Motoh Tsujimura
2. 発表標題 Operational Flexibility To Expand Or Contract Capacity Investment Under Model Uncertainty
3. 学会等名 The Annual International Conference on Real Options, Corporate Finance, Innovation and Strategy (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 今井潤一
2. 発表標題 ニューラルネットワークを利用した準モンテカルロ法の分散減少法
3. 学会等名 2023年度中之島ワークショップ 金融工学・数理計量ファイナンスの諸問題 2023（大阪大学）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 滝本雄太, 今井潤一
2. 発表標題 機械学習を用いた炭素の社会的コストのモデル分析
3. 学会等名 J A F E E 2023 冬季大会（東京大学駒場キャンパス）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 尾原太成, 今井潤一
2. 発表標題 偶発転換 CAT 債の評価と分析
3. 学会等名 J A F E E 2023 冬季大会（東京大学駒場キャンパス）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Motoh Tsujimura, Junichi Imai
2. 発表標題 The effect of both sides operational flexibility in capacity investment under uncertainty
3. 学会等名 Energy Finance Christmas Workshop (EFC23) (Kyoto university) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 四ノ宮裕貴, 今井潤一
2. 発表標題 パンデミック債の価格評価モデル
3. 学会等名 日本リアルオプション学会 2022 研究発表大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Junichi Imai
2. 発表標題 Dimension reduction via neural network for enhancing quasi-Monte Carlo method
3. 学会等名 2022 CORS/INFORMS INTERNATIONAL CONFERENCE (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Junichi Imai
2. 発表標題 Dimension reduction via neural network for enhancing quasi-Monte Carlo method
3. 学会等名 2022年度冬季ジャフィー大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 四ノ宮裕貴, 今井潤一
2. 発表標題 パンデミック債の価格評価モデル
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2023 年春研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 今井潤一,辻村元男
2. 発表標題 The effect of both sides operational flexibility in capacity investment under model uncertainty
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2023 年春研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Junichi Imai
2. 発表標題 Dimension Reduction for a Quasi-Monte Carlo Method via Quadratic Regression
3. 学会等名 日本金融・証券計量・工学学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Junichi Imai
2. 発表標題 Dimension reduction via neural network for enhancing quasi-Monte Carlo Method
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 2022年

1. 発表者名 Junichi Imai,Motoh Tsujimura
2. 発表標題 Optimal Strategies For Information Updating, Learning and Investment Under Knightian Uncertainty
3. 学会等名 The 27th Annual International Real Options Conference (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 滝本 雄太, 今井潤一
2. 発表標題 極値深層学習を用いた炭素の社会的コストの 次元削減法
3. 学会等名 日本オペレーションズリサーチ学会 2024年秋季研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 今井潤一, 辻村 元男
2. 発表標題 The Effect of Learning Options under Knightian Uncertainty
3. 学会等名 日本リアルオプション学会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 滝本 雄太, 今井潤一
2. 発表標題 深層学習を用いた炭素の社会的コストの次元削減法とグローバル感度分析
3. 学会等名 日本リアルオプション学会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 尾原 太成, 今井潤一
2. 発表標題 損害保険会社の災害保険プログラムの設計 : プロテクションギャップ縮小
3. 学会等名 日本リアルオプション学会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 吉田晴紀, 今井潤一
2. 発表標題 リアルオプションアプローチを&用いた CVC の価値評価
3. 学会等名 日本リアルオプション学会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 工藤 康平, 滝本 雄太, 尾 原 太成, 今井潤一
2. 発表標題 マクロ要因を考慮したリアルオプション分析フレームワーク:電力価格モデリング の統合的アプローチ
3. 学会等名 日本リアルオプション学会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

https://lab.ae.keio.ac.jp/imai_lab/

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	辻村 元男 (Tsujimura Motoh)		

6. 研究組織（つづき）

	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	TAN KENSENG (Tan Ken Seng)		

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