



Title	Studies on Quantum/Quantum-Inspired Numerical Integration Techniques Applied to Mathematical Finance Problems
Author(s)	藤田, 昌士
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/101735
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏名 (藤田 昌士)	
論文題名	Studies on Quantum/Quantum-Inspired Numerical Integration Techniques Applied to Mathematical Finance Problems (数理ファイナンスの問題に応用される量子/量子インスピアード数値積分手法の研究)
論文内容の要旨	
<p>近年、急速に発展し注目を集めている量子コンピュータであるが、金融分野（数理ファイナンス・金融工学）においても、リスク管理や商品開発等の現場で高次元・高負荷の大量計算が必要とされているため、その応用の可能性が大いに期待されている。</p> <p>本博士論文では、誤り耐性付き量子コンピュータアルゴリズムの一例である量子モンテカルロ積分手法や、量子インスピアード古典アルゴリズムの一例であるテンソルネットワークを用いた数値積分手法を、数理ファイナンスの問題に応用することに关心を持ち、以下の2つのトピックスに関して研究を行った：</p> <p>(1) 量子モンテカルロ積分を用いた後退確率微分方程式の数値解法「量子最小2乗モンテカルロ法」の提案とその理論的誤差解析の実施。</p> <p>(2) テンソルネットワークのクレジットポートフォリオリスク解析の数値解法への適用と、数値実験を通しての有効性の確認。</p>	
論文の構成は以下の通りである。	
第1章：論文の概要や構成が紹介されている。	
第2章：量子コンピューティングに関する基礎事項が本論文に必要な範囲で紹介されている。	
第3章と第4章：誤り耐性付き量子コンピュータアルゴリズムの一つである量子モンテカルロ積分を用いた、後退確率微分方程式の数値解法アルゴリズム：「量子最小二乗モンテカルロ法」が提案され、その理論的誤差解析が実施されている。特に、第3章では後退確率微分方程式のドライバー関数が解Zに依存しない場合が、第4章では後退確率微分方程式のドライバー関数が解Zに依存する場合が、それぞれ取り扱われている。さらに、それぞれの章で、理論的誤差解析の結果に基づいた（古典）最小2乗モンテカルロ法と量子最小2乗モンテカルロ法の計算コスト比較も行われており、後者の優位性が両章で確認されている。	
第5章：パラメータ依存性を許したテンソルネットワークを用いた数値積分手法が、クレジットポートフォリオの損失額の確率密度関数やリスク量(Value at Risk)の数値計算に応用されている。特に、数値実験を通して以下の2点が確認されている：(i) 共通ファクターの次元数が33以下の設定下では、テンソルネットワークを用いた数値計算がモンテカルロ法と比較して高速に実行可能である。(ii) 共通ファクターの相関が小さい設定下では、テンソルネットワークを用いた数値計算がモンテカルロ法と比較して非常に高速に実行可能である。	
第6章：論文のまとめが述べられ、今後の研究課題がいくつか提示されている。	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (藤田 昌土)		
論文審査担当者	(職)	氏 名
	主査 教授	関根 順
	副査 教授	深澤 正彰
	副査 教授	矢野 裕子
	副査 准教授	宮本 幸一 (量子情報・量子生命センター)

論文審査の結果の要旨

本博士学位論文の中では、以下の二つのトピックスが扱われている：(1) 誤り耐性付き量子コンピュータアルゴリズムの一例である量子モンテカルロ積分を用いた後退確率微分方程式の数値解法「量子最小2乗モンテカルロ法」の提案とその理論的誤差解析の実施。(2) 量子インスペイアード古典アルゴリズムの一例であるテンソルネットワークのクレジットポートフォリオリスク解析の数値解法への適用と、数値実験を通しての有効性の確認。

論文の重要な貢献を、それぞれのトピックスに関して箇条書きの形で記す。

- (1) 量子モンテカルロ積分をヨーロピアンデリバティブやアメリカンデリバティブ（最適停止問題）の数値解法に応用する研究は他にも見られるが、後退確率微分方程式のような非線形問題の数値解法に対して理論的な誤差解析まで実施した研究は見られない。3種類の数値誤差（離散化誤差、射影誤差、量子モンテカルロ誤差）が入れ子になって集積する複雑な構造があるため、理論的誤差解析の結果は決して自明なものではなく、重要な貢献が認められる。
- (2) テンソルネットワークを高次元の数値積分の計算に応用する研究は他にも見られるが、これを金融工学上の実務的問題に実際に応用して数値実験まで行った研究は他には見られない。特に、単なる期待値計算に留まらず、分布の裾に依存するリスク量(Value at Risk)計算の数値実験まで実施しており、この点は野心的な試みであると考えられる。数値実験の結果からも状況次第でテンソルネットワークの応用が有効であることが確認できており、興味深い。

なお、研究トピック(1)の一部は既に学会でも報告されており、掲載済みの論文1編がある状態である。また、研究トピック(2)については、産学連携の形で共同研究が進行中である。

また、2月10日に本博士学位論文の公聴会を主査・副査も出席の下で行い質疑応答や意見交換を行ったが、藤田氏の説明や応答は丁寧かつ的確なものであり、藤田氏が積み重ねた考察の中で得た知見が見て取れるものであった。以上の貢献により、藤田氏の博士学位論文は博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認めるものである。