OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Quantum Algorithms for Derivative Pricing with Efficient Classical-Quantum Transformations
Author(s)	Kubo, Kenji
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/89655
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　久保健治　）	
論文題名	Quantum Algorithms for Derivative Pricing with Efficient Classical-Quantum Transformations （効率的な古典・量子情報変換を用いたデリバティブ価格計算のための量子アルゴリズム）

論文内容の要旨

デリバティブは、株式、債券、通貨など、より基礎的な資産の価格を参照してその支払額が決定される金融商品である。デリバティブは金融商品であるため、その価格を計算する必要があるが、一般的にデリバティブの価格計算には大量の計算資源が必要となる。そこで、量子コンピュータを利用して、デリバティブの価格計算に必要な計算量を削減する試みがなされている。量子コンピュータによるデリバティブ価格計算は大きく分けて二つのアプローチがある。一つは、デリバティブ価格は支払い関数の期待値として計算できるため、量子振幅推定を用いてモンテカルロシミュレーションを高速化するアプローチである。もう一つはデリバティブ価格が従う偏微分方程式を離散化して得られる常微分方程式を、量子常微分方程式ソルバを用いて解くアプローチである。これらの量子アルゴリズムを用いる場合でも、ナイーブなアルゴリズムでは古典情報と量子情報の変換がボトルネックとなることが多い。実際、量子振幅推定を用いる際には、確率分布を量子状態に埋め込む部分がボトルネックになりうる。また、量子常微分方程式ソルバを用いる際には、確率分布や初期値を量子状態に埋め込む部分に加え、結果として得られる量子状態からデリバティブの現在価格を取り出す部分もボトルネックになる。

本研究では、効率的な古典-量子変換を実現し、デリバティブ価格計算のボトルネックを克服する量子アルゴリズムを提案する。古典情報から量子情報への変換方法として、変分量子計算を用いた確率分布の時間発展シミュレーションを提案する。確率微分方程式から、確率分布が従う線形常微分方程式を導出し、得られた常微分方程式を変分量子計算でシミュレーションするための量子回路を構成する方法を示す。これにより、マルコフ過程の確率分布を量子状態に埋め込むためのユニタリ演算子を得ることができる。この方法では、他の量子状態生成モデルに比べ、一度のシミュレーションで複数の時点における埋め込み演算子を得られるという利点がある。量子情報から古典情報への変換方法としては、マルチンゲールを用いた量子アルゴリズムを提案する。マルチンゲールとはデリバティブの現在価格が任意の将来時点におけるデリバティブ価格の期待値として計算できる、という性質である。量子常微分方程式ソルバを用いて、デリバティブ価格が従う偏微分方程式を現在時点まで解く代わりに、ある将来時点まで解く。加えて、その将来時点における確率分布を埋め込んだ量子状態を用意する。これらの量子状態の内積を量子振幅推定により計算することで、デリバティブの現在価格が計算できる。この方法では、量子状態の1つの基底の振幅に埋め込まれたデリバティブの現在価格を取り出す代わりに、量子状態の振幅全てを使って期待値を計算できる。そのため、量子情報から古典情報への変換におけるボトルネックが解消され、古典アルゴリズムに比べて大幅な高速化が実現できる。さらに、このアルゴリズムを小規模な量子コンピュータ上で実行するために、変分量子計算で実行する方法も提案する。本研究の結果は、デリバティブの価格決定における量子アルゴリズムの重要なブレークスルーとなることが期待される。

様式７

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　　名　（久保　健治）			
論文審査担当者	（職）	氏　　名	
主 査	教　授	藤井 啓祐	
副 査	教　授	北川　勝浩	
副 査	教　授	山本　俊	
副 査	特任准教授	宮本 幸一	（量子情報・量子生命研究センター）

論文審査の結果の要旨

本論文は、量子コンピュータを金融工学分野、特にデリバティブ（金融派生商品）の価格計算に応用するための量子アルゴリズムに関するものである。当該分野でこれまでボトルネックとなっていた、古典情報の量子状態への埋め込み，量子状態からの古典情報の取り出し、に関する新規手法を構築し、それに基づいた新たなデリバティブ計算のための量子アルゴリズムの提案やその計算量評価について述べられている。

量子コンピュータは量子力学の原理で計算をすることで、特定の問題を高速に計算することがきるため、莫大な計算を必要とする金融工学分野への応用が期待されている。その中でもデリバティブ価格計算は、実務上重要な課題であり、また、その問題の性質から量子アルゴリズムとの相性もよく、金融分野への量子コンピュータの応用における中心的課題として取り扱われている。既存のコンピュータ（古典コンピュータ）によるデリバティブ価格計算のアプローチとしては、モンテカルロ計算を用いる方法と偏微分方程式を数値的に解く方法があり、量子コンピュータの応用も主にこの２つの方向性で研究が進められている。前者については、量子コンピュータによって２乗加速が得られることが知られている。一方で、後者の場合には、資産数が増えた場合に有限差分法に必要となる計算量が指数関数的に増加するという問題点があり、この問題を解決するために量子アルゴリズムの応用がこれまで検討されてきた。しかし、期待値を計算するためには確率分布を量子状態に埋め込む必要があり、またデリバティブの現在価格の計算には１つの測定結果を選択的に得る必要があり、これらのプロセスに指数関数的な計算コストが必要となってしまうという問題点があった。

本論文では、このような問題点を克服するために、(1)確率分布の時間発展方程式（マスター方程式）の解として与えられる確率分布を量子状態の確率振幅に効率よく埋め込む方法、(2)１つの量子状態の確率振幅からではなく、マルチンゲール性を使い量子状態の内積からデリバティブの現在価格を評価する方法、(3)(2)で述べた手法を現在実現している規模の量子コンピュータでも実行可能にするための方法、について述べられている。(1)については、興味のあるマスター方程式を、変分量子アルゴリズムを用いて解くことによって、その解として量子状態の確率振幅に確率分布を埋め込めることを示し、数値的にその有効性も検証した。(2)については、マルチンゲール性に基づき、デリバティブの現在価格を２つの量子状態間の内積で表すことで、デリバティブの現在価格の計算結果を取り出すために必要となる計算量を削減できること示している。一方で、この量子アルゴリズムでは、ブラック・ショールズ方程式を量子逆行列計算アルゴリズムを用いて解くことが前提となっており、大規模な誤り耐性量子コンピュータを必要とする。この点を克服するために、(3)では逆行列計算ではなく、ブラック・ショールズ方程式を変分量子アルゴリズムによって解く方法を用いて、デリバティブの現在価格の計算を、現在実現している規模の量子コンピュータでも実行可能であることを示した。また、簡単なモデルに対して数値的にその有効性も検証した。

上記の結果は、量子コンピュータの金融工学分野への応用において非常に重要な課題に対して、既存の量子アルゴリズムが抱える問題点である、古典情報の量子状態への埋め込み、量子状態からの古典情報の取り出し、という古典・量子の情報変換に対して、それぞれの確率過程の性質を利用することで解決する新規方法を提案するものであり、学術的意義が高く、分野への貢献も大きい。以上の理由から博士（理学）の学位論文としての価値があるものと認める。