

## 論文審査結果の要旨

氏 名 小 林 弘 忠

本論文は、量子計算の数学的モデルにおいて、量子モデル化が計算能力においてどのような効果をもたらすかを古典計算モデルと比較することにより明らかにしようとしたものである。計算モデルとしては、大きな計算能力をもったものとして多証明者対話型証明システム、また能力が限定されたモデルとしてカウンタオートマトンを取り上げて、その量子版の能力を解明する一連の定理を得ている。

本論文は、7章からなり、第1章から第2章では、計算の量子化モデル全般について、その概念とこれまでに知られている結果を概観し、本論文で得られら結果の位置付けをしている。

第3章では、Watrousによって定義された証明者が一人だけの対話型証明システムを拡張することにより、量子多証明者対話型証明システムの定義を与えている。この量子多証明者対話型証明システムでは、証明者間に事前の量子相関を許す場合と許さない場合の二つのモデルが考えられる。本論文では、まず、証明者間に事前の量子相関のない量子多証明者対話型証明をもつ言語クラスは古典計算量クラス NEXP と一致するという結果を証明している。この結果は、証明者が一人の場合とは対照的であり、多証明者対話型証明システムにおいては、証明者間の事前量子相関がなければ、量子モデルと古典モデルの間に計算量的な能力の差がないという著しい性質を明らかにしている。また、証明者が一人だけの対話型証明においても、証明者が自分だけが扱える量子空間をもたない場合には、量子対話型証明をもつ言語クラ

スは NEXP と一致することも証明している。これらの結果は、古典計算量のクラスを量子計算の観点から正確に特徴付けた数少ない結果ともいえる。

第 4 章では、証明者達が検証者に最初に各 1 回のみ証拠を送り、検証者には質問が許されないという多証明者対話型証明の特殊な場合について考察している。古典モデルにおいては、証拠が複数送られることとただ 1 つのみ送られることは本質的に同等であるが、量子モデルにおいては、証拠が量子状態として複数独立に送られる場合、全体としての証拠列は各証拠のテンソル積として表されるため、検証者はそのテンソル積の構造を検証に利用できる可能性がある。このことに着目し、任意の定数  $k$  に対し、 $k$  個の量子状態の証拠を受け取って “no” 側の片側有限誤り確率で効率的に検証できる言語は、2 個の量子状態の証拠を受け取るのみでも “no” 側片側有限誤り確率で検証できることなどを証明している。

第 5 章と第 6 章では、それぞれ 1 方向カウンタオートマトンと 2 方向カウンタオートマトンの量子化モデルを定義し、1 方向量子 1 カウンタオートマトンと各古典 1 方向 1 カウンタオートマトンの間の認識可能な言語クラスの関係性を完全に解明し、2 方向カウンタオートマトンについては、2 方向量子 1 カウンタオートマトンが 2 方向決定性 1 カウンタオートマトンより真に強力であることなどを証明している。最後に第 7 章では、本論文の成果を総括している。

なお、本論文の第 3 章から 6 章についての内容は、徳永裕己氏、山上智幸氏、山崎智弘氏、松本啓史氏、今井浩氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析及び検証を行ってもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。