

# 論文審査の結果の要旨

氏名 秋笛 清石

分散型量子計算 (DQC) とは、離れた地点にいる多者が、共有されたエンタングルメントや古典および量子通信を利用して、ひとつのタスクを実行する量子計算のスキームである。本論文では、DQCに関して、特に以下の二つのテーマについての研究を行っている。1. 量子ネットワーク上で実装可能な量子計算クラスの解析、2. SEP (エンタングルメントを分離可能状態から生成できない量子操作のクラス) の globalness の意味付け。テーマ1では、クラスターネットワークと呼ばれる二次元量子ネットワーク上で実装可能なユニタリー操作のクラスを解析し、非自明な理論限界を得ている。またバタフライネットワーク上での、任意の2体ユニタリー操作を実現する新しいネットワークコーディングのプロトコルを提案している。テーマ2における主要結果は、今まであまり例の知られていなかった、LOCCではないSEPの例を具体的に構成した点である。

本論文は英文で、8章からなる。第1章は序論で、量子情報科学の概観、分散型量子計算、量子エンタングルメントと時空、および本論文の構成などについて述べられている。特に、本論文において議論される二つのテーマの研究背景および動機について詳しく述べられている。第2章では、最初に量子情報理論の基礎事項についての解説があり、次にその後の解析で必要となる、量子操作の Kraus 表示および Choi-Jamiolkowski 表示についての詳しい解説が与えられている。また、局所的な量子操作および古典通信からなる、LOCC と呼ばれる操作について詳しい定義が与えられ、さらにその確率的な場合 (SLOCC) についても議論している。

第3章~5章の内容が、テーマ1の研究内容に対応する。第3章では、ネットワークコーディング理論についてのレビューを行っている。特に、バタフライ、グレイルと呼ばれる基本的なネットワークの古典・量子系での対比、および Kobayashi らの先行研究についての詳しい解説が与えられている。またユニタリー操作の分類に必要な、Kraus-Cirac 分解および演算子 Schmidt 分解を導入している。第4章では、 $(k, N)$ -クラスターネットワークと呼ばれる二次元量子ネットワークが導入され、この上で決定論的に実装可能な  $k$  体のユニタリー操作は特定の分解をもつ、という定理とその証明が与えら

れている。これがテーマ1での主要結果である。またこの章では、バタフライおよびグレイル・ネットワークを用いれば、任意の2体ユニタリー操作を実装できることを具体的なプロトコルとともに示している。さらに、(2,2)-クラスターネットワークでは確率的にも実装できない2体ユニタリー操作が存在することも示している。第5章は、テーマ1のまとめである。

第6~8章の内容が、テーマ2の研究内容に対応し、DQCにおける量子通信の役割を調べるのが主題である。第6章では、状態識別と呼ばれるDQCのタスクに必要なエンタングルメントに関する定量的な議論がなされている。第7章では、二者間DQCにおける量子操作を記述する枠組みとして、CC\*（予め定まった因果順序をもたない古典通信）という概念が導入され、SEPがLO+CC\*と等価であることが示される。さらに、LOCCではないSEP（global SEP）は、LOCC\*で表したとき、因果順序をもつCC\*で表せないという解釈を与え、global SEPの例を具体的に構成している。これがテーマ2での主要結果である。第8章は、テーマ2のまとめである。

Conclusionでは論文全体のまとめと結論が述べられている。AppendixはA, Bからなり、本文中の主要結果の証明に必要となる定理や補題の証明が与えられている。

以上のように、本論文では、分散型量子計算の二つのテーマに関する研究を行い、それぞれにおいて数学的に厳密な解析に基づき、非自明な結果を得ることに成功している。特に、本論文で明らかにされた、与えられたクラスターネットワーク上で実装可能なユニタリー操作のクラス、およびglobal SEPの具体例の構成方法は、分散型量子計算の理論の基礎に寄与していることが期待される。よって本論文は、博士論文として十分な内容を持つものと審査委員全員が認めた。

なお、本論文は、尾張正樹氏、加藤豪氏、添田彬仁氏、村尾美緒氏との共同研究であるが、論文提出者が主体になって分析及び検証を行ったもので、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。