

審査の結果の要旨

氏 名 高 田 健 太

本論文は、「Quantum Theory and Experimental Demonstration of a Coherent Computing System with Optical Parametric Oscillators (光パラメトリック発振器を用いたコヒーレント計算機の量子論及び実装実験)」と題し、英文6章から構成されている。相互注入を行う縮退光パラメトリック発振器 (Degenerate Optical Parametric Oscillator: DOP0) を用いてイジングモデルの基底状態を計算する装置 (コヒーレント計算機) について、その量子力学的なモデル化及び数値シミュレーションが行われ、系に働く量子効果の検討がなされている。さらに、パルス DOP0 系を用いた、時分割多重方式のコヒーレント計算機に対する実装実験2件について述べられており、双方において NP 困難問題のインスタンスに対する高い正答率の報告がなされている。

第1章は「Introduction (序章)」であり、コヒーレント計算機の研究背景を学際的に概観している。まず、イジングモデルの基底状態の探索問題 (イジング問題) を、主に時間計算量クラス及び計算複雑性の観点から導入している。また、理論計算機科学の計算困難問題への取り組みとして、イジング問題に帰着可能な MAX-CUT 問題の研究に言及している。さらに、電子計算機の時間計算能力を凌駕する可能性を持つ量子計算機として、ゲートモデル量子計算機、量子アニーリングマシン、及び量子シミュレーターを挙げ、それらの研究の現状と課題を論じている。その中で提案されたコヒーレント計算機の概要を述べ、本研究のテーマである、コヒーレント計算機の量子論と実装実験の意義を説明している。

第2章は「Quantum Theory of DOP0 (DOP0 の量子論)」であり、本研究で用いる DOP0 の量子論を概観している。まず、量子状態を近似無く定式化出来る正 P 表示に基づいた、DOP0 のモード複素変数に関する理論モデルが導入されている。さらに、その定常解を用いて、光子数、スクイーミング特性及びコヒーレント状態のマクロな重ね合わせ状態成分が論じられている。また、有限の光子数下においても生ずる過渡的な重ね合わせ状態成分の形成や、エバネッセント結合下の二つの DOP0 間に生じるエンタングルメント、及び DOP0 を用いたコヒーレント計算機に関する先行研究についても言及している。

第3章は、「Quantum States in Two DOP0s Coupled with Mutual Injection (相互注入によって結合した二つの DOP0 の量子状態)」と題し、最小のコヒーレント計算機である相互注入下の 2DOP0 系における量子効果を理論的に検討している。二つの DOP0 端面の間の相互注入パスを空のキャビティと捉える事で、系全体を純量子力学的に定式化する事に成功している。系のポンピングを徐々に増加させる条件下で、逆位相相互注

入を行う系の数値シミュレーションが行われ、まず系の発振、及び発振後の二つの DOP0 の電場振幅における逆位相秩序が確認されている。次に、発振閾値下において DOP0 複素電場の虚部（直交振幅 p ）の量子相関に起因するエンタングルメントが示され、また量子相関の絶対指標である量子ディスコードが計算されている。最後に、発振前後の p の分布関数の振動を示し、系に重ね合わせ状態成分が形成可能である事を述べている。尚、系の散逸に量子状態が影響を受ける事を指摘しており、注入による結合と注入パスからの散逸が同程度の時に量子相関が、また系が低散逸の時に重ね合わせ状態成分が生じやすいと論じている。

第 4 章は「Design and Operation of Pulsed Sub-Harmonic OP0（サブハーモニックパルス OP0 の設計と動作）」であり、パルス OP0 の設計法、及び設計された通信波長帯発振器の動作実験の結果が報告されている。まず、擬似位相整合、共振器安定性、収差補償、空間モードマッチング等の観点から、パルス OP0 の設計法が不足無く論じられ、シミュレーション結果が示されている。続いて、動作実験の結果として、縦モード特性、出力パワー特性、スペクトル、パルス幅測定、パルス間干渉測定等のデータが示されている。

第 5 章は「Demonstration of Coherent Ising Machine with Time-Multiplexed DOP0 Networks（時分割多重 DOP0 ネットワークを用いたコヒーレントイジングマシンの実装実験）」と題され、パルス DOP0 を用いたコヒーレント計算機の実装実験の結果が報告されている。実験装置は単一のリング共振器に複数の DOP0 パルスを含んだもので、そのそれぞれが疑似スピンとして用いられる。ビームスプリッタの組を用いた光学遅延線によって、パルス間の相互注入が導入され、相互注入の状況に対応したイジングモデルが装置にプログラムされる。第一の実験は $2\ \mu\text{m}$ 帯の DOP0 に基づいた 4 パルス系の装置を用いたもので、4 ノードの完全グラフにおける MAX-CUT 問題（NP 困難）と等価なイジング問題に対して計算が行われている。これはフラストレーションが強い問題であるが、1000 回の試行全てにおいて基底状態（即ち最大カット）が得られている。第二の実験は、通信波長帯の 16 パルス系の装置に対して行われたもので、一次元リング系のイジング問題、及び単一の 3-正則グラフにおける MAX-CUT 問題と等価なイジング問題が計算されている。特に後者は局所最適解（ローカルミニマム）を含む問題であるが、いずれの場合も 1000 回の試行中 99.7 %以上の高い正答率が報告されている。

第 6 章は「Conclusion（結論）」であり、本論文にて報告された理論、及び実験研究の結果がまとめられており、またさらなる研究の方向について論じられている。

以上これを要するに、本論文は DOP0 を用いたコヒーレント計算機の量子論、及び実装実験の結果について論じたものである。前者では、相互注入を行う DOP0 系の純量子力学的モデル化を初めて行い、系の量子相関、エンタングルメント及び重ね合わせ状態成分の存在を示す事で、装置が量子計算資源を有する可能性を示した。後者では、4 変数、及び 16 変数の NP 困難問題に対するコヒーレント計算機の初めて、及び 2 例目の実

装実験を続けて行い、それらの高い正答率を以て、中規模装置までのコヒーレント計算の原理検証について高い信頼性を与えたという点で、電子情報学上貢献するところが少なくない。

よって本論文は、博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。