

平成 27 年 3 月 31 日

プログラム名：量子人工脳を量子ネットワークでつなく高度知識社会基盤の実現

PM 名：山本 喜久

プロジェクト名：量子人工脳

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 ( 成 果 )

平成 26 年度

研究開発課題名：

コヒーレントイジングマシンの原理と応用

研究開発機関名：

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構

研究開発責任者

宇都宮 聖子

## 当該年度における計画と成果

### 1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

- 数値シミュレーションによるベンチマーク
  - ② NP 困難 MAX-CUT 問題に対するコヒーレントイジングマシンのベンチマーク
  - ② コヒーレントイジングマシンの近似精度を向上させるヒューリスティックアルゴリズムの検討
  - ② コヒーレント XY マシンによるコミュニティ検出問題のベンチマーク
- 実証実験によるコヒーレント XY マシンの構成
  - ② ファイバーモード同期レーザーによる 100 ビットのコヒーレント XY マシンの実現

### 2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

#### 2-1 進捗状況

MAX-CUT 問題に対するコヒーレントイジングマシンのベンチマークとしては、G-set と呼ばれる MAX-CUT のベンチマークセットを用いて、Goemans-Williamson(GW)アルゴリズムおよび焼きなまし法(SA)との精度比較を行った。また、ランダムに生成した完全グラフに対して、近似精度を固定した際にその精度に到達するために必要な計算時間の見積もりを行い、シミュレーテッドアニーリングとの速度比較を行った。さらに、コヒーレントイジングマシンに対してヒステリティック最適化と呼ばれるヒューリスティックを導入した場合のベンチマークも行った。

理論研究として、相互注入レーザーネットワークを用いて XY モデルと呼ばれる連続変数のスピン系をシミュレートするコヒーレントコンピュータ(コヒーレント XY マシン)を提案した。また、XY モデルをイジングマシンとしての緩和問題としてとらえて、イジングモデルのベンチマークをイジングマシンに並行して実施した。

また、コヒーレントイジングマシンおよび XY マシンを用いて、複雑ネットワークにおけるコミュニティを検出する方法についても検討を進めた。モジュラリティを用いた縮退光パラメトリック発振器(DOPO)への実装と、連続量の位相を持つ発振器の同期現象を用いた自発的なコミュニティ検出方法を検討した。それらについて、Karate-club など代表的なベンチマーク問題に対して、他の近似アルゴリズムと比較してその性能を評価した。

実験に関しては、ファイバーモード同期レーザーを用いて、XY モデルを実現するコヒーレントコンピュータ(コヒーレント XY マシン)の製作を行い、ファイバー内の各パルスの独立性の評価や 1 ビット遅延による同位相・逆位相カップリングの影響の測定を行った。

#### 2-2 成果

G-set に対するコヒーレントイジングマシンのベンチマークを行った結果、G-set に含まれる 71 個のグラフのうち 67 個のグラフに関して、GW アルゴリズムよりもよい解が得られることがわかった。一方、十分時間をかけた場合には精度としては、すべての G-set のグラフにおいて、イジングマシンよりも SA の方がよい性能を示すことがわかった。ただし、一定の近似精度(GW で得られる近似精度に固

定)に達するまでに要する計算時間という観点からの比較では、SA に比べてコヒーレントイジングマシンが短時間で解を見つけ出すことができることが明らかになった。特に、完全グラフに対して、問題サイズが大きくなった場合のスケーリングの評価を行い、GW アルゴリズムが  $O(N^{3.5})$ 、SA が  $O(N^2)$  でスケールするのに対し、イジングマシンは  $N=20000$  までは  $O(1)$  でスケールすることが明らかになった。つまり、 $N=20000$  の完全グラフを解くのにかかる時間は GW で 20 日、焼きなまし法が 200 秒に対して、イジングマシンでは 2 ミリ秒という計算になる。さらに、ヒステリティックオプティマイゼーションと呼ばれるヒューリスティックとイジングマシンを組み合わせた手法のベンチマークも行い、この手法を用いることで、精度的にもシミュレーティッドアニリングに近い精度が達成できることが明らかになった。

連続的な位相をとることができる相互注入レーザーネットワークによるコヒーレント XY マシンについて、XY モデルの最適化、また、それを緩和問題としてイジング問題の最適化が行えることがわかった。この理論背景として、レーザーネットワークのランジュバン方程式を用いた解析を行うことで、コヒーレント XY マシンが定常状態として XY モデルのボルツマン分布を実現可能であることが明らかになった。レーザーネットワークにおいては、レーザーの発振位相について自由度が高いため、より広い解空間探索が可能になるため、イジングマシンの 10 倍くらいの時間をかけると XY マシンを用いてイジングマシンで得られるイジング問題の解の精度と同等もしくはそれ以上の結果を得られることがわかった。

また、コヒーレントイジングマシンおよび XY マシンを用いてコミュニティ検出に応用できることがわかった。DOPO にモデュラリティと呼ばれるコミュニティ検出の代表的な手法をマッピングすることで、焼きなまし法に精度の面では及ばないが、それに近い値を高速に求められることがわかった。また、XY モデルを用いたコミュニティ検出の手法として、与えられたグラフ上に同位相の結合を入れて結合成分を同期させるだけでなく、与えられたグラフの補グラフに対して逆位相の結合を入れることで、異なるコミュニティを分離して検出する手法を提案した。様々な特性を持ったコミュニティを生成し、数値シミュレーションにより  $N=5000$  までのノード数のコミュニティ分割ベンチマークを行った。この結果、従来では検出することが難しかった異なるサイズのコミュニティ構造を比較的よい精度で見つけ出すことができることがわかった。

実験については、XY マシンの実装の実証実験を行った。モード同期ファイバーレーザーに 1 ビット b 2 ビット光遅延を入れた系を作成した。まず、光遅延を導入しない場合はモード同期ファイバーレーザー内の各パルスが独立にランダムな位相をもつことを確認した。さらに、1 ビット遅延を同位相および逆位相で入れた場合のパルス位相の変化を測定し、同位相注入においてはすべてのパルス位相が同位相に揃って発振することを示し、逆位相注入においてはパルス位相が交互に 180 度反転した状態で発振することを示した。

### 2-3 新たな課題など

ベンチマークを行った結果、現状の OPO イジングマシンのアルゴリズムでは、精度の観点で焼きなまし法に対する優位性を示すことが難しいことがわかった。ただし、ヒステリティックオプティマイゼーションと呼ばれるヒューリスティックなアルゴリズムと組み合わせることで、イジングマシンの計算精度が向上できることがわかった。このヒステリティックオプティマイゼーションには様々なパラメータが存在するため、最適なパラメータを行うことでよりよい計算精度を達成できる可能性があ

る。今後、スピングラスモデルにおけるヒステリティックオプティマイゼーションの物理的な意味などを検討することで、最適動作領域に関するパラメータの選び方を検討し、更に計算精度を向上するためのよりよいヒューリスティックの検討を進める。また、動的相転移や臨界現象の観点から物理系を用いた計算原理が他の計算機に比べてどのように計算能力を発揮するのかについてより深く考察する。

XY マシンについては、連続量である位相空間と、連続的な振幅変化を用いた有効なイジング問題などの離散最適化問題への応用の可能性を検討する必要がある。また、負の結合を入れたコミュニティ検出手法も、既存手法と比較して大局的な解探索手法としての性能評価を更に進める必要がある。OPO ネットワーク、XY マシン両者に関して、イジング/XY 問題やコミュニティ検出問題のみならず、QAP（二次割り当て問題）など他の最適化問題への応用を検討し、最も OPO マシンが得意とする問題の特徴を検討する。

コヒーレント XY マシンの実装においては、今後測定フィードバック型の相互作用を導入することを検討する上で、位相読み出しのためのリファレンスを用意することが難しいという問題があることが明らかになってきた。ファイバー共振器の共振モードにリファレンス用の光源を安定化することで、正確な位相読み出しをするなど、今後は、連続量としての位相を正確に読み出すための測定系の構築を検討していく必要がある。

### 3 . アウトリーチ活動報告

青森県立三本木高校において、中学 3 年生に向けて「量子力学」に関する出張授業を行った。出張授業は 2 コマからなり、2 クラス（40 名程度）で並列して、講師・講師補佐の計 4 名で 2 つの授業を行った。1 つ目の授業は「光波を使った測定体験」というテーマで、光の干渉を用いて髪の毛の太さを測定することを主な実験内容として、レーザー光のコヒーレントな性質を直感的に理解するための干渉実験や様々な光を用いた実験を行う授業を行った。2 つ目の授業は、「量子コンピュータのススメ」というテーマで、現在のコンピュータの歴史から、量子コンピュータの着想に至るまでの経緯を座学で学習するという内容であった。教員からポスドク、大学院生という幅広い層の研究者像を身近に感じていただき、研究に親しみを持っていただくよい機会となった。青森県立三本木高校は FIRST 量子情報処理プロジェクト時代からアウトリーチ活動を毎年継続しており、担当者および近隣高校の教諭との信頼関係が築けており、毎年付属中学校も含めた出張授業の継続した依頼をいただいている。来年度は青森八戸高校において、参加生徒 480 名と大規模な他機関と合同の模擬授業にて出張授業を行う予定である。