# 量子技術を用いた新しい計算機への取組み



日本電信電話株式会社 NTT物性科学基礎研究 量子電子物性研究部 超伝導量子回路研究 グループ グループリーダ



日本電信電話株式会社 NTT物性科学基礎研究 量子光物性研究部 量子光制御研究グルー プグループリーダ

武居

ひろき



日本電信電話株式会社 NTT物性科学基礎研究 企画担当 企画担当部長



# 1. はじめに

デジタル計算機の進展に飽和が見られる現在、物理シス テムを用いて既存の計算機が不得手としてきた問題を効率良 く解くことを目的とした計算機の研究開発が盛んに行われてい る。中でも、量子計算機は、量子重ね合わせ状態を用いる ことで従来の計算機に対して計算時間、エネルギー消費等 において飛躍的な効率化を可能とする技術として注目を集 め、最近ではIBM、Google、マイクロソフトといった巨大企 業が開発に本腰を入れつつある。本稿では、NTTにおける 物理システムを用いた新しい計算機実現への取組みついて 紹介する。第1章では、NTTがこれまで開発してきた量子エ レクトロニクス技術を用いた新しい計算機「コヒーレントイジン グマシン (CIM)」について述べる。第2章では、量子計算 機の基本素子となる量子ビットを用いた量子力学の原理実証 実験を紹介する。

# 2. 光を使った新原理計算機「コヒーレントイジングマシン」

NTTでは、量子エレクトロニクス技術を用いて、組合せ最 適化問題と呼ばれる問題を効率よく解く新原理計算機CIM の研究開発を行っている。CIMは、縮退光パラメトリック発 振器 (DOPO) と呼ばれる光発振器を用いて、相互作用する スピン群の理論モデルである「イジングモデル」のエネルギー 最小問題を高速に解くことができるものである。

DOPOは、発振閾値より上においてその発振位相が後述 のポンプ光の位相に対して0またはπの2値の何れかしかとりえ ない、特殊な光発振器である。よって、位相0を上向きスピン、 位相πを下向きスピンと割り当てることにより、イジングスピン状 態をDOPOの位相で安定に表現することができる。DOPOは、 位相感応増幅器 (PSA)<sup>[1]</sup> と呼ばれる特殊な光増幅器を光 共振器内に配置することで生成する。PSAは、光パラメトリッ ク増幅器の一種で、非線形光学媒質にポンプ光と信号光を 入力することで、信号光を増幅し、信号光とポンプ光の差周 波に相当する周波数の光(アイドラ光)を発生するものである。 ここで、信号光とアイドラ光が同じ周波数となるとき、この増 幅器はポンプ光に対する位相差が0またはπの光をもっとも効 率よく増幅する。これを光共振器内に配置することで、ポン プ光に対する位相差0またはπのみで発振する光発振器を得 ることができる。

この光発振器において、パルス状態のポンプ光を用い、 光共振器の1周時間をポンプ光パルスの時間間隔のN倍に設 定することで、1つの光システムを用いてN個の独立なDOPO パルスを発生することができる<sup>[2]</sup>。NTTでは、長さが1km~ 20kmの光共振器と、繰り返し周波数1GHz~10GHzのポン プ光パルスを用いることで、5000~100万の時間多重された DOPOパルス群の一括発生に成功している<sup>[3-6]</sup>。

DOPOパルス間の相互作用は、遅延干渉計による直接結 合法<sup>[2, 3]</sup>と測定・フィードバック法 (MFB)<sup>[5, 6]</sup> がこれまで に報告されている。ここではMFBについて述べる。MFBを 用いたCIMの概略図を図1に示す。1kmの光ファイバ共振器 内に配置されたPSAを1GHzの繰り返し周波数のポンプ光パ ルスで駆動することにより、約5000のDOPOパルス群を発生 可能である。PSAにポンプ光を入力すると、真空スクイズド光 と呼ばれる雑音光パルスが発生し、それらが共振器を周回し、 PSAにより繰り返し増幅を受けることで、光パルス振幅が次 第に増幅し、約1000周後にDOPOの特徴である位相の離散 化が起こる。このとき、DOPO共振器1周ごとに2048個の DOPOパルス群のエネルギーの一部をビームスプリッターで共 振器外に取り出し、平衡ホモダイン検出器を用いてその振幅 測定を行う。得られた2048の振幅測定結果(2048要素のべ クトル) は、Field programmable gate array (FPGA) に入力される。FPGAには、解きたいイジングモデル問題に 相当するスピン間相互作用(2048 x 2048の行列)をあらか じめ入力しておく。FPGAは、これらの積を計算することで、 所望の結合を実現するための各DOPOパルスへの帰還信号





図1. CIMの構成 (NTT技術ジャーナル Vol.2017.5、pp.11-14 (2017) より転載)



図2. CIMによる最大カット問題の解探索。(a) 頂点数2000、枝数19900のグラフ問題の可視化。 頂点がピンクの点、枝が白線で示されている。(b) CIMによる解探索結果。頂点が赤と青の 2グループに分割された結果、緑で示す枝を切ることができた。(NTT技術ジャーナル Vol.2017.5、pp.11-14(2017)より転載)

を得る。これを光変調器により、共振器内を周回するDOPO パルスと同じ光周波数をもつ光パルスに重畳し、DOPOパル スに注入することで、DOPO間結合を実現する。本手法によ り、2000スピン間の全ての組合せの2体相互作用(有方向 結合も含めると、約400万通り)を実現することができる。動 作開始時にはランダムな位相を有していた真空スクイズド光パ ルス群は、MFBにより相互作用を繰り返し、やがて全系が最 も安定となる位相の組合せで発振する。発振後の各DOPO の位相を読み取ることで、入力したイジング問題の解を得る。

NTTは、NII、大阪大学、東京大学らと共同で、MFB に基づくCIMを構築し、大規模組合せ最適化問題の解探索 を実現した(図2)<sup>[5]</sup>。2016年に実施した実験では、2000要 素の全結合グラフの最大カット問題の解探索において、CPU 上で実装した焼きなまし法と同程度の解を、約50倍の速さで 得た。現在NTTでは、コンパクト化と長期安定動作を達成し たCIM装置を開発、LASOLVという技術ブランド名を冠して 実社会への適用を目指し研究開発を進めている。

## 3. 量子ビットを用いた量子力学の原理実証実験

量子計算機実現に向けて注目を集めているのが、イオント ラップ量子計算機と超伝導量子ビットである。前者は、天然 の原子というミクロな物理系を量子ビットとして利用するため、 周りのノイズ環境から隔離され、量子計算に必要なコヒーレ ンス時間が長いという特徴を有する。一方、後者は、キャパ シタ、インダクタ、ジョセフソン接合といった回路要素の組合 せで構成されるため、素子を自由に設計することができ、拡 張性・制御性に優れている。しかしながら、半導体微細加 工技術で作製する超伝導量子ビットは、原子と比較してマク ロな物理系(数µm程度)であるためノイズの影響を受けや すく、コヒーレンス時間が短いという欠点があった。近年、 回路設計の工夫により飛躍的にコヒーレンス特性が改善し、 イオントラップと遜色のないゲート忠実度が得られているが、こ こ20年、超伝導量子ビットの研究では、コヒーレンス特性改 善に多大な努力が払われてきた。その過程において、NTT では超伝導量子ビットがマクロな系であるという特徴を活かし、 「量子力学はどのスケールまで適用できるのか?」という量子 力学誕生以来の基本問題を検証した。

#### 実在性と非実在性

カップの中にサイコロを入れて振る実験を行う。カップを開 けて観測したときに「1」の目が出たならば、開ける前からサ イコロの目が「1」であったと考えられる。このようにある物体 を観測しその状態を知ったとき、観測以前から既にその状態 が決まっていた、すなわち観測により状態は変化しないという 考えは「実在性」と呼ばれ、日常の世界で当たり前に成り立っ ている(図3(a))。

一方、量子力学に従う物体は、「重ね合わせ状態」という、 日常の世界での常識に反する奇妙な状態を示す。例えば図3 (b)のように、量子力学に従う量子サイコロを仮定する。カッ プの中では「1」から「6」までの目が同じ確率で存在する 重ね合わせ状態が実現されており、カップを開けて観測した 瞬間にどれか1つの状態が確定する。このように観測以前に は状態が確定しておらず観測によって初めて状態が確定す る性質は「非実在性」と呼ばれ量子力学に従うミクロな系(電



子や原子など) で現れることが知られている。もちろん、サイ コロのようにマクロな物体で「非実在性」を検証することは できないが、どの程度マクロな系で量子力学が成立するかは、 興味深い問題である。

#### マクロな系の準備

1985年イリノイ大学のレゲット教授は、ジョセフソン接合を 有する超伝導リングを準備すると、右回りに流れる電流と左 回りに流れる電流の重ね合わせ状態が実現し、マクロな系で の「非実在性」を検証できるという論文を発表した<sup>「7]</sup>。そ の後、量子計算機の注目が高まる中、超伝導回路が発展し、 3つの接合を有する超伝導リングが超伝導磁束量子ビットとし て確立された(図4 (a))。リングを貫く磁場が磁束量子 $\Phi_0$ の半整数倍(…-0.5、0.5、1.5、…)の近傍となるとき、磁 束量子ビットを右回り(または左回り)に流れる電流状態が 安定化する。特筆すべきは、磁束量子ビットのサイズ(数 $\mu$ m) が電子や原子と比較してマクロである点と、この電流(数 100nA)は毎秒1兆個もの電子の流れであるという点である。 NTTでは、このマクロな物理量である電流の量子重ね合わ せ状態を確認し、非実在性を検証することを目指した。

#### 「非実在性」の検証

レゲット教授は、超伝導リングの電流状態を複数の時刻で 観測する思考実験を提案した。状態を乱さない観測が可能 であり、かつ実在性が成立する場合、その観測値の相関で 表されるレゲット・ガーグ不等式が満たされることを示した。 つまり、状態を乱さない観測を行い、この不等式の破れを示 すことができれば非実在性の現れ、すなわち量子力学の成 立を示すことができる。NTTでは、この不等式と数学的に等 価な条件を導き出し、以下に示す方法で実験的に非実在性 を検証した<sup>[8]</sup>。

磁東量子ビットが量子力学に従うならば、2つの電流状態  $|-1\rangle$ 、 $|+1\rangle$ のエネルギー差に相当するマイクロ波を適切な 時間照射すると、量子重ね合わせ状態 $|-1\rangle$ + $|1\rangle$ が実現 される。この操作を4回繰り返すと図4 (b)に示すように元の 状態に戻るため、このマイクロ波照射を状態操作( $\theta=\pi/2$ ) と呼ぶことにする。この状態操作を用いて図4 (c)に示す2つ の実験を行う。まず磁束量子ビットを $|-1\rangle$ の状態に準備し、 2回状態操作を繰り返し、最終状態に対する読み出し結果を 比較する。違いは状態操作間の観測の有無である。仮に実 在性が成立するならば観測の前後で状態は変化しないため、 2つの実験に違いは現れず、読み出しの期待値 $\langle Q_3 \rangle$ の差



#### $d_{\rho}$ は0となる。

次に、非実在性が現れる、すなわち量子力学が成立する 場合を考える。図4 (c) の2番目の実験では、初期状態  $|-1\rangle$ は2回の状態操作後、最終状態  $|1\rangle$ となり、読み出しの期 待値は1となる。一方、1番目の実験では、1回目の状態操作 後、重ね合わせ状態  $|-1\rangle + |1\rangle$ に対して観測を行う。この 観測では確率的に  $|-1\rangle + |1\rangle$ に対して観測を行う。この 観測では確率的に  $|-1\rangle + |1\rangle$ に量子的な射影が起こる ので、次の状態操作で  $|-1\rangle + |1\rangle$ か  $|-1\rangle - |1\rangle$ の重ね合 わせ状態が生成され、状態の読み出しの期待値はどちらの 場合も0となる。つまり、2つの実験の読み出しの期待値の差  $|d_{\rho}|$ は1である。実際の実験では、読み出しの明瞭度に制 限があるため  $|d_{\rho}|$ は1以下の有限な値となる。以上の考察 から、実在性が成立する場合は、 $d_{\rho}=0$ 、非実在性が成立 する場合は  $|d_{\rho}|$  >0となることが期待される。この実験をメイ ン実験と呼ぶ。

なお、「状態を乱さない観測」でメイン実験を行うのが理 想的だが、ノイズの存在や観測の不完全性のため、現実に は「観測による状態の乱れ」がわずかに存在する。これを 定量的に評価するためのコントロール実験を行う。最初の状 態操作で重ね合わせではなく純粋な |-1〉または |+1〉を用 意し、観測の有無による読み出し結果の違いを評価する。こ こでは、|-1〉または |+1〉を準備した際の、読み出しの期 待値の差をそれそれd<sub>g</sub>、d<sub>e</sub>と定義する。理想的にはd<sub>g</sub>=d<sub>e</sub>=0 だが、実際には観測による状態の乱れにより0からのわずか なずれが生じる。ここまでの実験結果を図4 (d) に示す。d<sub>ρ</sub> はd<sub>g</sub>とd<sub>e</sub>の間を大きく超えた値をとり、磁束量子ビットの振る舞 いは実在性では説明できず、非実在性が成立すること意味 している。この実験結果は、実験誤差の標準偏差の約84倍 の精度で、磁束量子ビットにおける量子重ね合わせ状態の 実現を示しており、マクロな系に量子力学が適応できること が実証された。

### 4. おわりに

前半では、新しい非ノイマン型コンピュータであるCIMが、 特定の最適化問題に関して従来型のコンピュータを上回る特 性を示すことを紹介した。今後は、システムの大規模化によ り実社会の問題への応用が期待される。後半では、一個の 電子などの微視的なスケールでしか現れていなかった量子重 ね合わせ状態という量子力学の本質的な現象が、光学顕微 鏡で見える程度のスケールのデバイス上のマクロな電流にお いても現れることを実証した。今後は、さらにマクロなスケー ルでの非実在性の検証が期待される。

## 参考文献

- T. Umeki, M. Asobe, and H. Takenouchi, Opt. Express 21, 12077 (2013).
- [2] A. Marandi, Z. Wang, K. Takata, R. L. Byer, and Y. Yamamoto, Nat. Photon. 8, 937 (2014).
- [3] T. Inagaki, I. Inaba, R. Hamerly, K. Inoue, Y. Yamamoto, and H. Takesue, Nat. Photon. 10, 415 (2016).
- [4] H. Takesue and T. Inagaki, Opt. Lett. 41, 4273 (2016).
- [5] T. Inagaki, Y. Haribara, K. Igarashi, T. Sonobe, S. Tamate, T. Honjo, A. Marandi, P. L. McMahon, T. Umeki, K. Enbutsu, O. Tadanaga, H. Takenouchi, K. Aihara, K. Kawarabayashi, K. Inoue, S. Utsunomiya, and H. Takesue, Science 354, 603 (2016).
- [6] P. L. McMahon, A. Marandi, Y. Haribara, R. Hamerly, C. Langrock, S. Tamate, T. Inagaki, H. Takesue, S. Utsunomiya, K. Aihara, R. L. Byer, M. M. Fejer, H. Mabuchi, and Y. Yamamoto, Science 354, 614 (2016).
- [7] A. J. Leggett and A. Garg, Phys. Rev. Lett. 54, 857 (1985).
- [8] G. C. Knee, K. Kakuyanagi, M-C. Yeh, Y. Matsuzaki, H. Toida, H. Yamaguchi, S. Saito, A. J. Leggett, and W. J. Munro, Nat. Comm. 7, 13253 (2016).