

## 研究課題別事後評価結果

### 1. 研究課題名：超伝導量子ビットシステムの研究開発

### 2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は研究参加期間終了時点）

研究代表者：蔡 兆申（日本電気株式会社ナノエレクトロニクス研究所 主席研究員）

主たる共同研究者：

中村 泰信（日本電気株式会社ナノエレクトロニクス研究所 主席研究員）

＜量子情報ビットシステムの研究＞

日高 睦夫（(財) 国際超伝導産業技術研究センター 主管研究員）

＜量子ビットインターフェイスシステムの高速度制御＞

藤巻 朗（名古屋大学大学院電子工学分野 教授）

＜SFQによる量子ビットの高速度、高精度観測＞

吉川 信行（横浜国立大学大学院工学研究院 教授）

＜SFQによる量子ビットの操作＞

アベリン デミトリ（ニューヨーク州立大学 物理・天文学部 教授）

＜複数量子ビット回路のデコヒーリング＞

セミノフ ヴァシリー（ニューヨーク州立大学 物理・天文学部 教授）

＜SFQ回路設計＞

加藤 岳生（東京大学物性研究所 准教授）

＜量子ビットの制御・観測に関する理論的評価＞

フランコ ノリ（(独) 理化学研究所 物質機能創成創成研究領域 チームリーダー）

＜量子情報処理の物理的実現のための理論的研究＞

### 3. 研究内容及び成果：

#### 3-1. 研究課題全体の研究内容及び成果

このチームは、NECを中心にISTEC、名大、横浜国大、ニューヨーク大、東大、理研からなる国際的なプロジェクト体制をとって、ジョセフソン接合素子を用いたキュービットの制御技術の確立を目指した。このチームを率いる研究代表者（蔡兆申）と共同研究者（中村泰信）の2名は、世界における固体量子コンピューターの開発を長年牽引してきた人物であり、その見識の深さとグループの技術レベルの高さが、今回のCRESTチームの成功の原動力であった。同時に参加した共同研究者が幅広く、NECグループの研究を周囲からサポートしてきた事実も見逃せない。科学と技術、理論と実験がうまくかみ合ったCRESTらしい研究開発が実現された。

#### 3-2. NECグループ（蔡兆申）の研究内容

このグループはジョセフソン接合素子を用いた電荷キュービット、磁束キュービットの基礎的な特性にフォーカスして研究開発を行い優れた成果を上げた。特に量子ゆらぎ、 $1/f$ 電荷ゆらぎ、 $1/f$ 磁束ゆらぎによるデコヒーレンス特性の解明は、一見地味ではあるが的を得た重要な基礎研究の成果である。同グループによる最近のデコヒーレンス時間の飛躍的な改善は、こうした地道な研究の積み重ねから生まれたものであろう。また、世界に先駆けて行われた2キュービットの量子演算は大きな成果であった。この間、ジョセフソン接

合素子キュービットの研究分野では、Circuit QEDという新しいコンセプトと実験技術がエール大学の Robert Schoelkopf等により発表され、世界的に研究の流れを大きく変えることとなった。NECグループは、こうした世界の潮流にいち早く反応し、Circuit QED 技術を用いた単一人工原子メーザーの開発に成功した。この研究成果は、今後の研究の一つの方向(ジョセフソン接合素子による量子光学)を示唆するものとして重要な意味を持つ。

### 3-3. ISTEKグループ(日高睦夫)の研究内容

このグループは、ジョセフソン接合キュービット素子とその制御を行う外部回路の高速インターフェイスを取るユニークな技術の開発を行い、優れた成果を上げた。

### 3-4. 名大グループ(藤巻明)、横浜国大グループ(吉川信行)、NY大グループ(セミノフ バシリー)の研究内容

名古屋大学グループでは、SFQ回路と適合性の高い磁束量子ビットの状態をシングルショットで読み出す技術の確立に必要な低消費電力化に成果をあげた。横浜国立大学グループでは、超伝導量子ビットの高速かつ正確な制御を行うことを目的として、高速動作と低消費電力動作を特徴とする単一磁束量子(SFQ)回路による量子ビット操作回路の開発を行い、成果を上げた。

NY大学のグループはSFQ回路の一種であるnSQUIDと呼ばれる回路を提案し、実験的にその動作を確認し、実際に回路のエネルギー散逸が、熱力学限界に近い(数倍高い)程度にまで下がることを示した。この回路は量子的にも磁束量子ビットとしての動作が可能である。

### 3-5. NY大グループ(アベリン デミトリ)の研究内容

超伝導磁束量子ビットの高速な読み出し方法に関しての理論的研究を行った。

ジョセフソン伝送線中の磁束量子フラクソンのバリスティックな運動が、量子ビットの磁束状態と相互作用することを利用し、バックアクションを低減した、最適化高速読み出し法を主に研究した。これは本研究チームの名古屋大グループで研究されてきた、「量子ビット読み出し用SFQ回路」に対応する、基礎的な理論研究である。

### 3-6. 東大グループ(加藤岳生)の研究内容

東大グループでは、NECグループと密に討議を行うことに留意し、実験で生じる新たな課題について、理論的に考察した。また、さまざまなタイプの超伝導量子ビットの理論的評価および、メーザー発振など微小超伝導接合系で実現される新規な現象についても理論研究を行った。さらに高温超伝導接合や超伝導・金属強磁性・超伝導接合などの新しいタイプの超伝導素子についての研究を立ち上げた。

### 3-7. 理研グループ(フランコ ノリ)

このグループは、NECグループが世界に先駆けて実証に成功した2キュービットの制御実験を理論的にサポートした。また、このグループは量子情報処理技術のインプリメンテーションに関して実に幅広く様々な系を理論的に検討し、多くの研究論文を発表し、その存在感を示した。

#### 4. 事後評価結果

##### 4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

このチームからの発表論文数は1件(国内)、117件(国際)、招待講演数は31件(国内)、78件(国際)、特許出願数は2件であった。

以下に主な論文をリストアップする。

1. "Controllable scattering of a single photon inside a one-dimensional resonator waveguide"  
Phys. Rev. Lett. 101, 100501, Sept. 2008  
L. Zhou, Z.R. Gong, Y.X. Liu, C.P. Sun, F. Nori
2. "The physics of Maxwell's demon and information"  
Reviews of Modern Physics in press, Aug. 2008  
K. Maruyama, F. Nori and V. Vedral
3. "Controllable Coherent Population Transfers in Superconducting Qubits for Quantum Computing"  
Phys. Rev. Lett. 100, 113601, Mar. 2008  
L. F. Wei, J. R. Johansson, L. X. Cen, S. Ashhab, and Franco Nori,
4. "Simultaneous Cooling of an Artificial Atom and Its Neighboring Quantum System"  
Phys. Rev. Lett. 100, 047001, Jan. 2008  
J. Q. You, Yu-xi Liu, and Franco Nori
5. "Semiclassical dynamics of electron wave packet states with phase vortices"  
Phys. Rev. Lett. 99, 190404, Nov. 2007  
K.Yu. Bliokh, Yu.P. Bliokh, S. Savel'ev, F. Nori
6. "Single artificial-atom lasing"  
Nature Vol449, Oct. 2007  
O. Astafiev, K. Inomata, T. Yamamoto, Yu. Pashikin, Y. Nakamura, J. S. Tsai
7. "Quantum Coherent Tunable Coupling of Superconducting Qubits"  
Science 316, 723, May 2007  
A. O. Niskanen, K. Harrabi, F. Yoshihara, Y. Nakamura, S. Lloyd and J. S. Tsai
8. "Modeling an adiabatic quantum computer via an exact map to a gas of particles"  
Phys. Rev. Lett. 98, 120503, Mar. 2007  
A.M. Zagoskin, S. Savel'ev, F. Nori
9. "Probing tiny motions of nanomechanical resonators: classical or quantum mechanical?"  
Phys. Rev. Lett. 97, 237201, Dec. 2006  
L.F. Wei, Y.X. Liu, C.P. Sun, F. Nori
10. "Producing Cluster States in Charge Qubits and Flux Qubits"  
Physical Review Letters, 97, 230501, Dec. 2006  
T. Tanamoto, Y. Liu, S. Fujita, X. Hu and Franco Nori
11. "Maxwell's demon assisted thermodynamic cycle in superconducting quantum circuits"  
Phys. Rev. Lett. 97, 180402, Oct. 2006

- H.T. Quan, Y.D. Wang, Y.X. Liu, C.P. Sun, F. Nori
12. "Decoherence of Flux Qubits due to  $1/f$  Flux Noise"  
Physical Review Letters, 97,167001, Oct. 2006  
F. Yoshihara, K. Harrabi, A. Niskanen, Y. Nakamura, J. S. Tsai
  13. "Temperature square dependence of the low frequency  $1/f$  charge noise in the Josephson junction qubits"  
Physical Review Letters,96,137001, Apr. 2006  
O. Astafiev, Yu.A. Pashkin, Y. Nakamura, T. Yamamoto, J.S. Tsai
  14. "Controllable Coupling between Flux Qubits"  
Physical Review Letters, 96, 067003, Feb. 2006  
Yu-xi Liu, L. F. Wei, J. S. Tsai, and Franco Nori
  15. "Quantum Noise in the Josephson Charge Qubit"  
Physical Review Letters, 93, 267007, Dec. 2004  
Astafiev, Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, Y. Nakamura, and J. S. Tsai

文献6は、新しく登場したcircuit QED システムを利用して単一人工原子メーザーを実現させたものである。本物の原子(リドバルグ状態に励起された)を超伝導キャビティに閉じ込めた単一原子メーザーは1985年にマックスプランク量子光学研究所のWaltherにより実現されていたが、これを初めて固体素子化することに成功したものである。文献7はジョセフソン接合素子キュービットで初めて2ビット演算を達成したものである。競合する研究グループが多数ある中で、世界で初めて2ビット演算に成功した意義は大きい。文献12は、磁束キュービットの $1/f$ 雑音によるデコヒーレンス特性を調べたものである。文献13は、電荷キュービットの $1/f$ 雑音によるデコヒーレンス特性を調べたものである。文献15は、電荷キュービットの量子雑音によるデコヒーレンス特性を調べたものである。

#### 4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

このチームが世界に先駆けて2キュービットの制御の実証実験に成功したのは大きな成果であり、ジョセフソン量子コンピューターの実現に向けた大きな一歩であった。ジョセフソン接合素子キュービットのデコヒーレンス機構の解明とその改善も地味ではあるが極めて重要な成果であった。ただし、これらの技術だけでは、大規模な量子コンピューターの開発にそのままつながらないことも、この5年の研究を通して次第に明らかになってきた。誤り訂正もしくは耐性符号化によるリソースの爆発的増大、キュービットの転送に必要な演算数の増加、などの問題がクリアできなければ、スケーラブルな量子コンピューターの実現は難しい。Circuit QEDをベースとしてマイクロ波回路を量子通信網としてどう使い切るか、に一つのブレークスルーの可能性があると思われる。デルフト工科大学、エール大学、カリフォルニア大学サンタバーバラ校、などの世界の強豪と今後も競争し合いながら、この分野の牽引役を果たしていつてもらいたい。

#### 4-3. その他の特記事項(受賞歴など)

日本における量子情報処理技術の研究開発の中心にNECが位置して来たことは、以下の受賞リストを見ても明らかなことである。このような基礎研究がNECという企業研究所で長年にわたり育成されてきたことに対して、関係者の熱意に深い敬意を表するものである。しかしながら、このこと自体がこれまでに於いてでも奇跡的なことであり、まして現在のような経済状況の中にあつては、このような企業研究の努力

を積極的にサポートしていくことは、国の大きな責任ではないか、と感じる。

以下に受賞歴をリストアップする。

1. 蔡兆申・中村泰信 2008年サイモン記念賞 2008年8月1日  
「世界で初めて巨視的な物理系である超伝導固体素子上で量子コヒーレント状態を実現し、固体素子を用いた量子コンピュータ実現の可能性を示したこと、および量子コヒーレント物理の研究成果」
2. Yu-xi Liu Frontier Research System Award for Excellent Research 2007年  
フロンティア研究システム 奨励賞
3. Franco Nori Elected Fellow of the American Association for the Advancement of Science (AAAAS), USA 2007年  
アメリカ科学振興協会フェロー就任
4. 中村泰信 Agilent Technologies Europhysics Prize “Demonstration of quantum bits using superconducting circuits” 2006年6月22日  
共同受賞者 Daniel Esteve (CEA Saclay),  
Hans Mooij (TU Delft),  
Michel Devoret (Yale University)
5. 山本剛 理研フロンティア研究システム賞大賞 2006年5月12日  
“ジョセフソン接合回路を使った量子論理ゲートの実現”
6. 蔡兆申 仁科賞 2004年12月16日  
“ジョセフソン接合素子を用いた2個の量子ビット間の量子もつれ状態の実現”
7. 山本剛 Technology Review 100 (MIT TR100) 2004年
8. 蔡兆申・中村泰信・山本剛 NEC社長賞 (NEC Presidential Award) 2004年

以上