

博士（工学）中村泰信氏及びPh.D. 蔡 兆申
 氏の「超伝導量子ビットとその量子制御
 に関する先駆的研究」（共同研究）に対
 する授賞審査要旨

中村泰信・蔡 兆申の両氏は、超伝導回路上の量子ビット (qubit) 動作を世界に先駆けて実現し、超伝導系の量子ビットとして初めて量子状態の制御可能性を実証し、その後も関連の研究を進め、超伝導量子コンピュータの研究の進展に先駆的貢献をなした。また、両氏は、超伝導量子ビットの物理の解明ならびに超伝導量子ビットを用いたマイクロ波量子光学やハイブリッド量子系の研究においても先導的役割を果たし、卓越した成果を達成している。

量子情報科学、特に量子コンピュータの分野では、量子力学の基本原理を素子の物理の解明や高性能化に活かすだけでなく、情報処理の階層に適用することにより、従来技術では到達できない高効率計算が実現できることが期待されている。従来のコンピュータでは、〇か一の値をとる「ビット」を情報の基本単位として用いるが、量子コンピュータでは〇と一の任意の重ね合わせ状態を表現

できる「量子ビット」が用いられる。量子ビットの状態を高精度で制御し、重ね合わせや量子もつれ、射影測定といった量子の世界に特有の性質を活かすことにより、量子コンピュータに固有のアルゴリズムに基づく計算が行われる。

二〇二二年ノーベル物理学賞が、量子もつれを実証した研究者に授与されたように、二〇世紀後半、徐々に量子情報科学の考え方が芽生え、一九九〇年代半ばには素因数分解アルゴリズムや量子誤り訂正プロトコルが発表されるに至った。その結果、量子計算への関心が急激に高まり、それを実現するために適した様々な物理系の探求が始まった。

最初の量子ビットの実証実験では、偏光・経路・光子数などの光の状態、溶液中の分子のもつ核スピン、真空中に捕縛されたイオンなどが用いられた。一方、中村・蔡両氏は、ジョセフソン接合と呼ばれる超伝導トンネル接合素子上で、電子のペアであるクーパー対がエネルギーの散逸なしに二つの超伝導電極の間をトンネルすることに着目した。これを単一電子帯電効果と組み合わせることにより、クーパー対が一つだけ微小電極に入入りするクーパー対箱と呼ばれる回路で、超伝導電荷量子ビット制御の実証に成功した。その後、両氏は、世界に先駆けて超伝導量子ビット間の二ビットゲート制御を実証するとともに、中村氏は、デルフト工科大学グループの

協力者とともに、二〇〇三年に超伝導の磁束量子ビットを初めて実現させた。また、両氏は、量子ビットのデコヒーレンス要因の研究、量子ビット読み出し技術の向上などの研究も行い、超伝導量子コンピュータの研究開発に貢献してきた。

世界的には、量子コンピュータの研究開発は、近年、IBMやGoogleなどの大企業による超伝導回路を用いた大規模な取り組みに加え、真空中に捕縛された中性原子やイオン化した原子を用いた研究や半導体量子ドットを用いた研究なども加速されており、量子情報科学分野全体を牽引する技術のひとつに成長している。超伝導系では、一〇〇量子ビットを超える規模の量子コンピュータが実現され、課題である誤り率も急速に改善しており、小規模での量子コンピュータと古典コンピュータのハイブリッド応用が進展している。また、量子誤り訂正技術の進歩による大規模な誤り耐性量子計算システムの実現も期待されている。人類が初めて大規模な物理系の量子状態を自在に制御し、その能力を最大限引き出すという観点で、科学技術の新分野の幕開けとも言える。

他方、超伝導量子ビットは、その優れた特性から、マイクロ波周波数領域における量子制御・観測・計測技術の最先端ツールとなっている。特に、低損失の超伝導の共振回路や導波路を組み合わせた回路は、単一光子レベルでマイクロ波モードの量子状態を制御する

「マイクロ波量子光学」分野の飛躍的發展に大きく寄与し、分野開拓の必須要素となっている。中村・蔡両氏は、初期段階から「回路量子電磁力学」と呼ばれる、超伝導量子ビットと共振回路中に閉じ込められたマイクロ波光子の間のコヒーレントな相互作用の研究で優れた成果を上げるとともに、「導波路量子電磁力学」と呼ばれる、量子ビットと導波路上を伝搬するマイクロ波光子の相互作用の研究分野を拓く一連の研究を行ってきた。その結果、超伝導量子ビットを用いたマイクロ波単一光子生成や単一光子検出、ジョセフソンパラメトリック増幅器を用いた真空スクイーズド状態の生成や検出などの成果を達成した。これらの成果は、磁性体中のスピン集団励起の量子（マグノン）やナノメカニカル素子中の機械振動の量子（フォノン）などの物理系における素励起の制御や観測に適用され、「ハイブリッド量子系」の研究として展開されている。

以上のように、中村・蔡両氏が先駆的に実現した超伝導量子ビットは、人工的かつ巨視的な電気回路の上で量子二準位系を実現するもので、学術面と応用面の両面で大きなインパクトをもたらした。これらの研究は、量子情報科学分野において新たな潮流を作るとともに、量子技術に大きな発展をもたらしており、日本学士院賞に相応しい成果である。

1. "Fast readout and reset of a superconducting qubit coupled to a resonator with an intrinsic Purcell filter", Y. Sunada, S. Kono, J. Iives, S. Tamate, T. Sugiyama, Y. Tabuchi, and Y. Nakamura, *Phys. Rev. Appl.* **17**, 044016 (2022).
2. "Autonomous quantum error correction in a four-photon Kerr parametric oscillator", S. Kwon, S. Watabe, and J. S. Tsai, *npi Quantum Inf.* **8**, 40 (2022).
3. "Quantum circuits for exact unitary t -designs and applications to higher-order randomized benchmarking", Y. Nakata, D. Zhao, T. Okuda, E. Bannai, Y. Suzuki, S. Tamiya, K. Heya, Z. Yan, K. Zhuo, S. Tamate, Y. Tabuchi, and Y. Nakamura, *PRX Quantum* **2**, 030339 (2021).
4. "Fast parametric two-qubit gates with suppressed residual interaction using a parity-violated superconducting qubit", A. Noguchi, A. Osada, S. Masuda, S. Kono, K. Heya, S. P. Wolski, H. Takahashi, T. Sugiyama, D. LaChance-Quirion, and Y. Nakamura, *Phys. Rev. A* **102**, 062408 (2020).
5. "Programmable directional emitter and receiver of itinerant microwave photons in a waveguide", N. Gheeraert, S. Kono, and Y. Nakamura, *Phys. Rev. A* **102**, 053720 (2020).
6. "Single-photon quantum regime of artificial radiation pressure on a surface acoustic wave resonator", A. Noguchi, R. Yamazaki, Y. Tabuchi, and Y. Nakamura, *Nat. Commun.* **11**, 1183 (2020).
7. "Entanglement-based single-shot detection of a single magnon with a superconducting qubit", D. LaChance-Quirion, S. P. Wolski, Y. Tabuchi, S. Kono, K. Usami, and Y. Nakamura, *Science* **367**, 425–428 (2020).
8. "Dispersion-based quantum sensing of magnons with a superconducting qubit", S. P. Wolski, D. LaChance-Quirion, Y. Tabuchi, S. Kono, A. Noguchi, K. Usami, and Y. Nakamura, *Phys. Rev. Lett.* **125**, 117701 (2020).
9. "Breaking the trade-off between fast control and long lifetime of a superconducting qubit", S. Kono, K. Koshino, D. LaChance-Quirion, A. F. Van Loo, Y. Tabuchi, A. Noguchi, and Y. Nakamura, *Nat. Commun.* **11**, 3683 (2020).
10. "Pseudo-2D superconducting quantum coupling circuit for the surfacecode: proposal and preliminary tests", H. Mukai, K. Sakata, S. J. Devitt, R. Wang, Y. Zhou, Y. Nakajima, and J. S. Tsai, *New J. Phys.* **22**, 043013 (2020).
11. "Tunable microwave single-photon source based on transmon qubit with high efficiency", Y. Zhou, Z. H. Peng, Y. Horieuchi, O. V. Astafiev, and J. S. Tsai, *Phys. Rev. Appl.* **13**, 034007 (2020).
12. "Hybrid quantum systems with circuit quantum electrodynamics", A. A. Clerk, K. W. Lehnert, P. Bertet, J. R. Petta, and Y. Nakamura, *Nat. Phys.* **16**, 257–267 (2020).
13. "Hybrid quantum systems based on magnonics", D. LaChance-Quirion, Y. Tabuchi, A. Gloppe, K. Usami, and Y. Nakamura, *Appl. Phys. Express* **12**, 070101 (2019).
14. "On-demand generation of traveling cat states using a parametric oscillator", H. Goto, Z. R. Lin, T. Yamamoto, and Y. Nakamura, *Phys. Rev. A* **99**, 023838 (2019).
15. "Information-to-work conversion by Maxwell's demon in a superconducting circuit quantum electrodynamical system", Y. Masuyama, K. Funo, Y. Murashita, A. Noguchi, S. Kono, Y. Tabuchi, R. Yamazaki, M. Ueda, and Y. Nakamura, *Nat. Commun.* **9**, 1291 (2018).
16. "Quantum non-demolition detection of an itinerant microwave photon", S. Kono, K. Koshino, Y. Tabuchi, A. Noguchi, and Y. Nakamura, *Nat. Phys.* **14**, 546–549 (2018).
17. "Qubit-assisted transduction for a detection of surface acoustic waves near the quantum limit", A. Noguchi, R. Yamazaki, Y. Tabuchi, and Y. Nakamura, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 180505 (2017).
18. "Nonclassical photon number distribution in a superconducting cavity under a squeezed drive", S. Kono, Y. Masuyama, T. Ishikawa, Y. Tabuchi, R. Yamazaki,

- K. Usami, K. Koshino, and Y. Nakamura, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 023602 (2017).
19. "Resolving quanta of collective spin excitations in a millimeter-sized ferromagnet", D. Laethance-Quinton, Y. Tabuchi, S. Ishino, A. Noguuchi, T. Ishikawa, R. Yamazaki, and Y. Nakamura, *Sci. Adv.* **3**, e1603150 (2017).
20. "Tunable on-demand single-photon source in the microwave range", Z. H. Peng, S. E. de Graaf, J. S. Tsai, and O. V. Astafiev, *Nat. Commun.* **7**, 12588 (2016).
21. "Ground state cooling of a quantum electromechanical system with a silicon nitride membrane in a 3D loop-gap cavity", A. Noguuchi, R. Yamazaki, M. Ataka, H. Fujita, Y. Tabuchi, T. Ishikawa, K. Usami, and Y. Nakamura, *New J. Phys.* **18**, 103036 (2016).
22. "Single microwave-photon detector using an artificial Λ -type three-level system", K. Inomata, Z. R. Lin, K. Koshino, W. D. Oliver, J. S. Tsai, T. Yamamoto, and Y. Nakamura, *Nat. Commun.* **7**, 12303 (2016).
23. "Coherent coupling between a ferromagnetic magnon and a superconducting qubit", Y. Tabuchi, S. Ishino, A. Noguuchi, T. Ishikawa, R. Yamazaki, K. Usami, and Y. Nakamura, *Science* **349**, 405–408 (2015).
24. "Circuit QED-based scalable architectures for quantum information processing with superconducting qubits", P.-M. Billangeon, J. S. Tsai, and Y. Nakamura, *Phys. Rev. B* **91**, 094517 (2015).
25. "Hybridizing ferromagnetic magnons and microwave photons in the quantum limit", Y. Tabuchi, S. Ishino, T. Ishikawa, R. Yamazaki, K. Usami, and Y. Nakamura, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 083603 (2014).
26. "Microwave down-conversion with an impedance-matched Λ system in driven circuit QED", K. Inomata, K. Koshino, Z. R. Lin, W. D. Oliver, J. S. Tsai, Y. Nakamura, and T. Yamamoto, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 063604 (2014).
27. "Josephson parametric phase-locked oscillator and its application to dispersive readout of superconducting qubits", Z. R. Lin, K. Inomata, K. Koshino, W. D. Oliver, Y. Nakamura, J. S. Tsai, and T. Yamamoto, *Nat. Commun.* **5**, 4480 (2014).
28. "Coherent flux tunneling through NbN nanowires", J. T. Peltonen, O. V. Astafiev, Yu. P. Korneeva, B. M. Voronov, A. A. Komeev, I. M. Charaev, A. V. Semenov, G. N. Goltsman, L. B. Ioffe, T. M. Klapwijk, and J. S. Tsai, *Phys. Rev. B* **88**, 220506(R) (2013).
29. "Implementation of an impedance-matched Λ system by dressed-state engineering", K. Koshino, K. Inomata, T. Yamamoto, and Y. Nakamura, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 153601 (2013).
30. "Coherent quantum phase slip", O. V. Astafiev, L. B. Ioffe, S. Kafanov, Yu. A. Pashkin, K. Yu. Arutyunov, D. Shahar, O. Cohen, and J. S. Tsai, *Nature* **484**, 355–358 (2012).
31. "Noise spectroscopy via dynamical decoupling with a superconducting flux qubit", J. Bylander, S. Gustavsson, F. Yan, F. Yoshihara, K. Harabi, G. Fitch, D. G. Cory, Y. Nakamura, J. S. Tsai, and W. D. Oliver, *Nat. Phys.* **7**, 565–570 (2011).
32. "Superconducting qubits consisting of epitaxially-grown NbN/AlN/NbN Josephson junctions", Y. Nakamura, H. Terai, K. Inomata, T. Yamamoto, W. Qiu, and Z. Wang, *Appl. Phys. Lett.* **99**, 212502 (2011).
33. "Dynamics of coherent and incoherent emission from an artificial atom in a 1D space", A. A. Abdumalikov, O. V. Astafiev, Yu. A. Pashkin, Y. Nakamura, and J. S. Tsai, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 043604 (2011).
34. "Electromagnetically induced transparency on a single artificial atom", A. A. Abdumalikov, Jr., O. Astafiev, A. M. Zagoskin, Yu. A. Pashkin, Y. Nakamura, and J. S. Tsai, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 193601 (2010).
35. "Ultimate on-chip quantum amplifier", O. Astafiev, A. A. Abdumalikov, Jr., A. M. Zagoskin, Yu. A. Pashkin, Y. Nakamura, and J. S. Tsai, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 183603 (2010).

36. "Resonance fluorescence of a single artificial atom", O. Astafiev, A. M. Zagoskin, A. A. Abdumalikov, Jr., Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, K. Inomata, Y. Nakamura, and J. S. Tsai, *Science* **327**, 840–843 (2010).
37. "Quantum Computing", T. D. Ladd, F. Jelezko, R. Laflamme, Y. Nakamura, C. Monroe, and J. L. O'Brien, *Nature* **464**, 45–53 (2010).
38. "Flux-driven Josephson parametric amplifier", T. Yamamoto, K. Inomata, M. Watanabe, K. Matsuba, T. Miyazaki, W. D. Oliver, Y. Nakamura, and J. S. Tsai, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 042510 (2008).
39. "Single artificial-atom lasing", O. Astafiev, K. Inomata, A. O. Niskanen, T. Yamamoto, Yu. A. Pashkin, Y. Nakamura, and J. S. Tsai, *Nature* **449**, 588–590 (2007).
40. "Quantum coherent tunable coupling of superconducting qubits", A. O. Niskanen, K. Harrabi, F. Yoshihara, Y. Nakamura, S. Lloyd, and J. S. Tsai, *Science* **316**, 723–726 (2007).
41. "Decoherence of flux qubits due to $1/f$ flux noise", F. Yoshihara, K. Harrabi, A. O. Niskanen, Y. Nakamura, and J. S. Tsai, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 167001 (2006).
42. "Coherent dynamics of a flux qubit coupled to a harmonic oscillator", I. Chiorescu, P. Bertet, K. Semba, Y. Nakamura, C. J. P. M. Harmans, and J. E. Mooij, *Nature* **431**, 159–162 (2004).
43. "Demonstration of conditional gate operation using superconducting charge qubit", T. Yamamoto, Yu. A. Pashkin, O. Astafiev, Y. Nakamura, and J. S. Tsai, *Nature* **425**, 941–944 (2003).
44. "Coherent quantum dynamics of a superconducting flux-qubit", I. Chiorescu, Y. Nakamura, C. J. P. M. Harmans and J. E. Mooij, *Science* **299**, 1869 (2003).
45. "Quantum oscillations in two coupled charge qubits", Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, O. Astafiev, Y. Nakamura, D. V. Averin, and J. S. Tsai, *Nature* **421**, 823–826 (2003).
46. "Charge echo in a Cooper-pair box", Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, and J. S. Tsai, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 047901 (2002).
47. "Rabi oscillations in a Josephson-junction charge two-level system", Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, and J. S. Tsai, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 246601 (2001).
48. "Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box", Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, and J. S. Tsai, *Nature* **398**, 786–788 (1999).
49. "Spectroscopy of energy-level splitting between two macroscopic quantum states of charge coherently superposed by Josephson coupling", Y. Nakamura, C. D. Chen, and J. S. Tsai, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 2328–2331 (1997).