

応用物理学会 薄膜・表面物理分科会

Sept. 2026 ■ No. 196

News Letter

薄膜・表面を活用した
量子センサー・量子コ
ンピューター開発の最
前線



薄膜・表面物理分科会ホームページ — <https://annex.jsap.or.jp/tfspd/>

目 次

巻頭言

薄膜・表面を活用した量子センサー・量子コンピューター開発の最前線～特集号に寄せて	1
--	---

研究

1. 量子コンピューター技術入門：基礎 から最先端まで	川畑史郎先生（法政大）	2
2. ダイヤモンド量子センサーの研究	水落憲和先生（京都大学）	12
3. シリコン量子コンピューターの基盤技術	樽茶清悟先生（理化学研究所）	14
4. 超伝導量子コンピューターの開発と大規模化に向けた課題	玉手修平先生（理化学研究所）	16
5. 半導体量子ドット量子コンピューター	小寺哲夫先生（東京科学大）	18
6. 走査ダイヤモンド NV プローブ顕微鏡	安東秀先生（北陸先端科学技術大学）	22
7. 冷却原子量子シミュレーター	高橋義朗先生（京都大学）	24

談話室

早稲田大学 理工学術院 ナノ材料情報学研究室	31
------------------------	----

掲示板

開催案内

1. 第 27 回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会	33
2. 第 55 回薄膜・表面物理基礎講座「表面・界面分析の原点回帰と進化～最先端技術を正しく使いこなすための理論と実践～」	34
3. 16th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-16)／The 34rd International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM34)／第 40 回応用物理学会薄膜・表面物理分科会特別研究会「走査型プローブ顕微鏡」	35
4. 第 18 回「電子デバイスにおける原子拡散・応力現象研究会」	36

開催報告

1. 第 54 回薄膜・表面物理セミナー（2026） 「薄膜・表面を活用した量子センサー・量子コンピューター開発の最前線」	37
2. 機能性ナノ界面科学研究会 春合宿 2026	39

議事録

薄膜・表面物理分科会 第 55 期第 1 回常任幹事会議事抄録	41
薄膜・表面物理分科会 第 55 期第 2 回幹事会議事抄録	43

会 告

薄膜・表面物理分科会 第 55 期幹事名簿	45
薄膜・表面物理分科会 会員数、賛助会社数・社名	46
ニュースレター投稿規定	47

編集後記

賛助会社広告	48
--------	----

薄膜・表面を活用した量子センサー・量子コンピューター開発の最前線 ～特集号に寄せて

川畑 史郎

法政大学 大学院情報科学研究科

〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2

2025 年は、ハイゼンベルクによる行列力学の提唱から 100 年に当たり、国連が定めた国際量子科学技術年として、量子科学技術の歴史と将来に世界的な注目が集まりました。量子力学は、半導体やレーザーをはじめとする革新的技術を生み出し、20 世紀の産業を支えてきました。そして現在、量子力学の原理を積極的に利用する量子コンピュータ、量子センサー、量子暗号・量子通信などの量子技術が、社会実装へと進む新たな段階を迎えています。

日本では、政府による量子技術の研究開発支援が進められており、日本成長戦略会議においても、量子技術に関する官民投資や研究開発税制などの施策が検討されてきました。海外においても、量子技術は長期的な産業競争力と経済安全保障を左右する重要な戦略分野と位置付けられ、各国による投資競争が加速しています。このように、量子技術の社会実装を目指す動きは、世界規模で急速に進展しています。

量子技術を本格的に社会へ普及させるためには、量子コンピュータや量子センサーなどの性能を、さらに向上させなければなりません。そのためには、高品質な薄膜、精密に制御された表面・界面、低欠陥・低損失材料、精密微細加工技術およびナノ計測技術を高度化することが不可欠です。

超伝導量子コンピュータでは、基板表面や金属/絶縁体界面に存在する欠陥と誘電損失が、量子ビットの寿命を制限します。シリコン量子コンピュータにおいても、半導体/酸化膜界面の欠陥や電荷雑音が、忠実度と大規模集積化を左右します。また、冷却原子量子コンピュータでは、大規模化・小型化に向けて集積フォトリソの導入が進められています。これらの光学素子を高性能化するためには、薄膜の均一性、光損失などを精密に制御する薄膜・表面・界面技術が重要になります。さらに、ダイヤモンド NV 中心量子センサーでは、ダイヤモンド表面の終端状態、電荷状態および欠陥分布が、コヒーレンスとセンサー感度を左右します。このように、量子コンピュータ及び量子センサーの性

能を向上させるためには、高品質な薄膜を形成するとともに、表面・界面に起因する欠陥を原子スケールで理解し、制御する技術を確立する必要があります。

本特集号では、はじめに量子コンピュータの基本原則、最新研究開発・ビジネス動向、薄膜・表面・界面物理への期待を概説します。続いて、水落憲和氏（京都大学）がダイヤモンド NV 中心量子センサー、樽茶清悟氏（理化学研究所）がシリコン量子コンピュータ、玉手修平氏（理化学研究所）が超伝導量子コンピュータの最新動向について解説します。さらに、小寺哲夫氏（東京科学大学）が半導体量子ドット量子コンピュータ、安東秀氏（北陸先端科学技術大学院大学）が走査ダイヤモンド NV プローブ顕微鏡、高橋義郎氏（京都大学）が冷却原子量子シミュレータ・量子コンピュータの最新研究開発動向を紹介しします。

20 世紀の情報社会を支えた半導体産業は、材料の高純度化、結晶成長、薄膜形成、界面制御、微細加工などに関する長年の研究と技術の蓄積によって発展しました。21 世紀の量子技術においても、薄膜・表面物理分野との連携が、本格的な社会実装を実現する鍵になると考えられます。本特集号が、薄膜・表面物理分野の皆様にとって、これまで培ってきた専門性を生かし、量子技術という新たな研究分野へ踏み出す契機となることを、心から期待しています。



川畑 史郎(かわばた しろう)

1998 年大阪市立大学大学院工学研究科応用物理学専攻博士課程修了。工学博士。1998 年通産省電子技術総合研究所入所。2001 年より産業技術総合研究所。2024 年より法政大学大学院情報科学研究科教授。現在、NEDO

イノベーション戦略センターフェロー、文科省 Q-LEAP プログラムディレクター。量子コンピュータ、量子情報理論、量子アニーリング、超伝導量子回路、クライオエレクトロニクス、物性物理の研究に従事。

量子コンピュータ技術入門：基礎から最先端まで

川畑史郎*

法政大学 大学院情報科学研究科

〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2

概要

量子コンピュータは、量子力学的重ね合わせや量子もつれを情報処理に利用するコンピュータである。近年、量子エラー訂正機能を備えた誤り耐性量子コンピュータ（FTQC: Fault-Tolerant Quantum Computer）の実現に向けた研究開発が急速に進展している。特に、2024年のGoogleによる論理量子ビットの動作実証以降、格子手術、魔法状態蒸留・栽培、量子LDPC符号、論理量子ビット間演算など、FTQCに必要な要素技術の実証報告が相次いでいる。一方、実用的FTQCを実現するためには、材料、設計、製造、実装、冷却、制御、アーキテクチャ、ミドルウェア、ソフトウェア、クラウドを含む多数の技術レイヤーを高い信頼性で統合する必要がある。本稿では、量子コンピュータの基本原則を概説した後、様々な方式の量子コンピュータ、量子エラー訂正、企業ロードマップ、FTQC実現のための技術課題を俯瞰し、薄膜・表面・界面科学への期待について述べる。

Key words: quantum computer, fault-tolerant quantum computer, quantum error correction, logical qubit, superconducting qubit, semiconductor technology

1 はじめに

2025年は量子力学誕生から100周年の節目であり、国際連合により「国際量子科学技術年」と定められた¹。同年、日本政府は量子技術を重要な成長分野に位置づけ、その後、高市政権下の日本成長戦略会議において、量子コンピュータ²を対象とした官民投資ロードマップの策定が進められている³。米国においても、2026年5月に量子コンピュータ開発企業に対する20億ドルの拠出など、大型官民投資が拡充され⁴、2026年6月には、量子コンピュータ開発を国家的に加速する大統領令と、量子コンピュータによる暗号解読リスクに備える大統領令が相次いで発令された^{5,6}。そのため、量子コンピュータは、産業競争力および経済安全保障を左右する重要先端技術として位置づけられている。

一方、技術的な観点では、量子コンピュータの研究開発は新たな段階に入りつつある。これまでの開発は、主として物理量子ビット数や物理量子ゲート忠実度などの向上であった。しかし、近年は、多数の物理量子ビットを用いて量子エラー訂正機能を持つ論理量子ビット^{*1}

を構成し、論理エラー率^{*2}を低減しながら量子アルゴリズムを実行する誤り耐性量子コンピュータ（FTQC: Fault-Tolerant Quantum Computer）の実証へと技術開発フェーズが移行している^{7,8}。本稿では、量子コンピュータの基礎からFTQCの最新研究開発動向までを非専門家向けに概説する。

2 量子コンピュータの基本原則

古典コンピュータが0または1の値をとるビットを情報単位とするのに対し、量子コンピュータ^{9,10}では量子ビットを情報単位として用いる。単一量子ビットの状態は

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \quad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \quad (1)$$

と表される。ここで、 α と β は複素数である。 n 量子ビット系は、 2^n 個の古典 n ビット列の重ね合わせとして記述される。量子コンピュータでは、 n 量子ビットからなる状態全体に量子論理ゲートを作用させることができる。ただし、測定によって 2^n 個の計算結果をすべて読み出せるわけではない。そこで、量子干渉効果などを利用して望ましい解に対応する確率振幅を増幅し、最終的な測定から解を高い確率で得ることが、量子アルゴリズムの基本的な考え方である。

* Introduction to Quantum Computing Technology: From Fundamentals to the Cutting Edge. Shiro Kawabata. Hosei University, (3-7-2 Kajino, Koganei, Tokyo 184-8584, Japan). E-mail: kawabata@hosei.ac.jp

*1 論理量子ビットとは、量子情報を複数の物理量子ビットを用いて符号化し、エラーを訂正できるように構成した量子ビットである。

*2 論理エラー率とは、量子エラー訂正後の論理量子ビットに生じるエラーの発生確率である。

しかしながら、量子コンピュータは、あらゆる数学的問題を古典コンピュータより高速に解く夢のコンピュータではない点に注意が必要である。現在までに、素因数分解、離散対数問題、量子系のシミュレーション、データ探索、線形代数や機械学習に関する一部の問題など、特定の計算問題に対して量子加速が理論的に示されている¹¹⁻¹⁴。特に、Shor のアルゴリズムは、大規模な整数の素因数分解を古典計算に比べて指数関数的に高速化するため、RSA 公開鍵暗号の安全性に重大な影響を与える。そのため、耐量子計算暗号への移行が現在、世界的に急ピッチで進められている⁶。

現在商用化されている量子コンピュータは、量子エラー訂正機能を持たないため、NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) と呼ばれる。現在、NISQ の製品開発とユースケース探索が世界的に進められているが、実用的問題に対する古典コンピュータを上回る量子優位性は、特殊なケースを除いて明確には示されていない。そのため、実用的な問題を高速に解くためには、FTQC の実現が不可欠である。

3 NISQ から FTQC へ

物理量子ビットはエラーに対して極めて脆弱である。そのため、量子エラー訂正¹⁵⁻¹⁷は、量子コンピュータに不可欠な基盤技術である。量子エラー訂正においては、量子情報を多数の物理量子ビットを用いて符号化し、エラーに関する情報であるシンドロームを測定によって得ることでエラーの検出と訂正を行う。

図 1 に、物理量子ビットの実現から実用的 FTQC に至る技術ロードマップを示す。大規模かつユニバーサルな FTQC を実現するためには、低い物理エラー率、反復量子エラー訂正、Break-even^{*3}を超える論理量子ビット、論理量子ビット間演算、Clifford 演算^{*4}および非 Clifford 演算^{*5}を含むユニバーサル量子論理ゲート集合^{*6}、論理

量子ビットの集積化と魔法状態工場^{*7}との統合が必要となる。

代表的な量子エラー訂正符号は表面符号^{18,19}である。表面符号は、二次元格子上に配置された物理量子ビットによって論理量子ビットを構成する。表面符号は最隣接物理量子ビット間の演算だけで量子エラー訂正を実装でき、物理エラー率の閾値が比較的高いことから、超伝導量子コンピュータを中心に広く利用されている。表面符号の場合、符号距離 d^{*8} を増加させ、物理エラー率 p_{phys} を閾値 p_{th} 以下に保つことができれば、論理エラー率 p_L は概ね

$$p_L \sim \left(\frac{p_{\text{phys}}}{p_{\text{th}}} \right)^{(d+1)/2} \quad (2)$$

のように指数関数的に低下する。

実用的 FTQC の性能を定量的に評価するためには、論理量子ビット数、論理エラー率、実行可能な量子論理ゲートの種類、量子論理ゲート時間、実行可能な量子論理ゲート総数 $N_{\text{gate,L}}$ を総合的に評価する必要がある。実用的 FTQC に向けた初期の重要なマイルストーンの一つとして、論理量子ビット数 $N_{\text{q,L}}$ が 100 以上、論理エラー率 p_L が 10^{-10} 以下が挙げられる^{*9}。論理量子ビット数については、50-100 論理量子ビット規模の十分に深く複雑な量子論理回路を、HPC を含む古典コンピュータによって厳密にシミュレーションすることは困難となる。一方、論理エラー率については、計算中に一度も致命的なエラーを起こさないためには、総量子論理ゲート回数 $N_{\text{gate,L}}$ に対して概ね $p_L \lesssim 1/N_{\text{gate,L}}$ が要求される。

4 FTQC のリソース推定

近年、実用的な問題を FTQC で解くために必要な end-to-end リソースの推定が行われるようになってきた。RSA 暗号解読に必要なリソースは、物理エラー率、魔法状態生成、量子エラー訂正符号、量子エラー訂正復号器、ハードウェアアーキテクチャの改善によって急速

^{*3} Break-even とは、量子エラー訂正を施した論理量子ビットの論理エラー率が、符号化に用いた物理量子ビットの物理エラー率を下回る状況を意味する。

^{*4} Clifford 演算とは、Pauli 演算を共役変換によって別の Pauli 演算へ写す量子論理ゲートの集合であり、代表例は Hadamard や CNOT ゲートである。Clifford 演算のみからなる量子論理ゲートは、古典コンピュータで効率的に模倣できる。

^{*5} 非 Clifford 演算とは Clifford 演算の集合に含まれない量子論理ゲートであり、代表例は T ゲートと Toffoli ゲートである。Clifford 演算に適切な非 Clifford 演算を加えることでユニバーサル量子計算が可能となる。ここで、Toffoli ゲートは、2つの制御量子ビットがともに 1 のときだけ標的量子ビットを反転する 3 量子ビットゲートである。

^{*6} ユニバーサル量子論理ゲート集合とは、有限個の量子論理ゲートを組み合わせることで、任意の量子計算を所望の精度で近似

的に実行できる量子論理ゲート集合を指す。代表例は Clifford ゲートと T ゲートの組合せである。

^{*7} 魔法状態とは、 T ゲートなどの非 Clifford 演算を量子テレポーテーションで実行するために用いる特殊な補助入力量子状態である。魔法状態工場とは、低品質な魔法状態の生成と蒸留、蒸留された高品質な魔法状態の供給を並列かつ連続的に行う FTQC 内の専用領域を指す。

^{*8} 符号距離 d とは、論理エラーを引き起こすために必要な最小の物理量子ビットエラー数である。表面符号を構成する物理量子ビット数 $N_{\text{phys}} = 2d^2 - 1$ を増やすと d が大きくなるため、より多くエラーを検出・訂正できる。

^{*9} 100 論理量子ビットおよび論理エラー率 10^{-10} 以下は、小規模な量子化学計算や量子多体系シミュレーションなどを対象とする FTQC の大まかな目安である。



図1 実用的な誤り耐性量子コンピュータ (FTQC) の実現に向けた技術ロードマップ。青色は原理実証が既に達成された技術、黄色は小規模実証が進みつつある技術、赤色は大規模統合を含む今後の主要課題を示す。なお、各段階は必ずしも直線的に進むものではなく、複数の技術レイヤーが並行して開発される。

に減少している。

2021年のリソース推定では、RSA-2048の素因数分解に約6200論理量子ビット（約2000万物理量子ビット）と8時間が必要と見積もられていたが²⁰、2025年にGoogleが報告した、表面符号、近似算術量子回路、魔法状態栽培（後述）を組み合わせたリソース推定では、約1400論理量子ビット（約100万物理量子ビット）を用いて1週間以内に暗号解読できると報告された²¹。さらに2026年には、量子LDPC符号を用いるPinnacleアーキテクチャ^{*10}により、物理エラー率 10^{-3} の仮定の下で約10万物理量子ビットまで削減できるとのリソース推定が示されている²²。

また、ビットコインなどの暗号資産で利用される256ビット楕円曲線暗号については、1200–1450論理量子ビット（約50万物理量子ビット未満）と約 $7 \times 10^7 - 9 \times 10^7$ 回の総量子論理ゲート回数 $N_{\text{gate,L}}$ を用いて数十分で解読可能との見積もりが報告された²³。ただし、仮定する物理エラー率 p_{phys} 、符号サイクル時間^{*11}、物理量子ビット間の接続性、復号レイテンシ^{*12}によって必要リソースは大きく変化する。

量子化学においても、触媒や酵素を対象としたend-to-endリソース推定が精密化している^{24–27}。代表例を表1に示す。生物窒素固定触媒FeMocoでは約1512論理量子ビットと $N_{\text{gate,L}} \sim 10^9$ 、窒素固定触媒であるMoピ

ンサー錯体および二酸化炭素固定用Ruポリピリジル錯体では約4000論理量子ビットと $N_{\text{gate,L}} \sim 10^{11}$ 、薬物代謝酵素シトクロムP450では約999論理量子ビットと $N_{\text{gate,L}} \sim 10^9$ が推定値として報告されている^{25–27}。これらの値は、計算に利用する基底関数、目標精度、初期状態と厳密基底波動関数との重なりなどによって変動するが、化学産業において重要な問題では、数千論理量子ビットと極めて低い論理エラー率が必要となることを示している。

5 FTQCの技術進展

5.1 単一論理量子ビット

表面符号では、多数の物理量子ビットを二次元格子状に並べて1個の論理量子ビットを構成する。Googleは2024年に、105物理量子ビットを搭載した超伝導量子コンピュータ”Willow”を発表し、そのうち最大101物理量子ビットを用いて、符号距離を $d = 3, 5, 7$ と増加させるにつれて単一論理量子ビットの論理エラー率が低下することを世界で初めて実証した²⁸。これは、表面符号の符号距離を増やすほど論理エラー率が指数関数的に低下するという理論予測を明確に実証した極めて重要な成果である。

表1 触媒・酵素系量子化学計算の代表的リソース推定。数値は量子アルゴリズムと要求精度に依存するおおよその値である。

対象	論理量子ビット	総量子論理ゲート回数 $N_{\text{gate,L}}$
FeMoco（生物窒素固定）	約1512	約 10^9
Moピンサー錯体（窒素固定触媒）	約4000	約 10^{11}
Ruポリピリジル錯体（CO ₂ 固定）	約4000	約 10^{11}
シトクロムP450（薬物代謝）	約999	約 10^9

^{*10} Pinnacle アーキテクチャ²²とは、量子LDPC符号で多数の論理量子ビットをまとめて保持するブロックを、計算用・魔法状態供給用・記憶用に分けて接続するモジュール型FTQCアーキテクチャである。

^{*11} 符号サイクル時間とは、1回のシンドローム測定を実行する時間である。

^{*12} 復号レイテンシとは、シンドローム測定結果を古典復号器で処理し、推定されたエラー情報を制御系へ返すまでに要する時間である。

5.2 論理量子ビット間演算

表面符号では、隣接する論理量子ビットの領域を一時的につなげたり分けたりする格子手術により、論理パリティ測定や論理 CNOT ゲートを実行できる²⁹。2025年には、格子手術に基づく2論理量子ビットの量子論理ゲートの実証が報告された³⁰。さらに2026年には、格子手術や符号変形を用いて、論理 CNOT, 論理 Hadamard, 論理位相ゲートなどが実証された^{31,32}。これは、論理量子ビットを単に長時間保持する段階（量子メモリ）から、量子エラー訂正を実行しながら論理量子ビット間で演算する段階（量子計算）へ進化していることを意味する。

5.3 魔法状態蒸留と魔法状態栽培

表面符号で効率的に実装できる Clifford ゲートだけでは、ユニバーサル量子計算を実行できない。非 Clifford ゲート、特に T ゲートを実行するためには、高品質な論理魔法状態を供給する必要がある。

魔法状態蒸留とは、複数の低品質な論理魔法状態に論理 Clifford 演算と論理測定を施し、測定結果に応じて、よりエラーの少ない少数の高品質な論理魔法状態を確率的に生成する手法である³³。魔法状態の生成は、FTQCに必要な物理量子ビット数と実行時間を左右する主要な要因の一つである^{*13}。

ゼロレベル魔法状態蒸留^{34,35}などの先行研究に基づいて、符号距離 d の小さな量子エラー訂正符号で論理魔法状態を生成し、エラーを検出しながら符号距離 d を段階的に拡大することで高品質化する魔法状態栽培法が提案された³⁶。その後、異なる量子エラー訂正符号や物理量子ビット間接続方式を用いた改良法も提案され³⁷、超伝導量子コンピュータ上で魔法状態栽培が実証された³⁸。また、中性原子量子コンピュータでは論理量子ビットを用いた魔法状態蒸留が実証され³⁹、イオントラップ量子コンピュータでは高忠実度論理魔法状態の生成および論理非 Clifford ゲートの実証が報告されている^{40,41}。

5.4 量子 LDPC 符号

量子 LDPC (Low-Density Parity-Check) 符号^{42,43}は、表面符号に比べて高い符号化率を持ち、少ない物理量子ビット数で論理量子ビットを構成できる。一方、量子 LDPC 符号では遠距離の物理量子ビット間演算が必

要となるため、二次元最隣接結合を基本とする超伝導量子コンピュータへの実装は極めて困難であった。

最近、中国の研究グループが長距離結合された32個のトランズモンからなる超伝導量子コンピュータ“Kunlun”を用いて、量子 LDPC 符号による論理量子ビットを実装した⁴⁴。ただし、論理量子ビットの論理エラー率は約7.8%であり、Break-evenは達成できていない。一方、超伝導量子コンピュータにおいて長距離結合を実装しやすくする局所配線、共振器ネットワーク、ルーティング方式も提案されている^{45,46}。イオントラップ量子コンピュータでは、IonQが18物理量子ビットから4論理量子ビットを符号化する量子 LDPC 符号を含む9種類の量子エラー訂正符号を同一量子コンピュータ上で実装し、Break-evenの実証を報告した⁴⁷。

6 量子コンピュータハードウェアの主要方式

FTQC ハードウェアには現時点で決定的な単一方式はなく、超伝導、中性原子、イオントラップ、光、シリコンなどの複数方式が並行して開発されている。方式ごとに、物理量子ビットの原理、動作温度、制御方法、接続性、演算速度、大規模化の方法が大きく異なる。表2に主要方式の特徴を示した後、各方式の原理、現状、課題を概説する^{7,8}。

6.1 超伝導量子コンピュータ

超伝導量子コンピュータにおいては、キャパシタンスとジョセフソン接合から構成される非線形 LC 共振回路「トランズモン」を物理量子ビットとして利用する。トランズモンにおいては、最低エネルギー状態と第一励起状態を計算基底 $|0\rangle, |1\rangle$ として用い、数 GHz のマイクロ波によって物理量子ゲートを実行する⁴⁸。超伝導量子コンピュータは、物理量子ゲート時間が数十 ns 程度と高速であり、半導体微細加工、平面配線、三次元実装との親和性が高いという特徴を持つ。2024年にGoogleは超伝導量子コンピュータ“Willow”の101物理量子ビットを用いた論理量子ビット実験により、符号距離 d を増やすと論理エラー率が指数関数的に低下することを示した²⁸。

一方、超伝導量子コンピュータには多くの課題がある。具体的には、希釈冷凍機内の大量のマイクロ波配線、冷凍能力の制限、クロストーク、ジョセフソン接合のばらつき・歩留まり、薄膜・界面欠陥による誘電損失が大規模化・高忠実度化を大きく制約する。今後は300 mm CMOS プロセスを用いた集積回路製造・三次元実装、クライオエレクトロニクス⁵⁵、モジュール型大型希釈冷凍機と量子インターコネクションによるモジュール間接続、

*13 通常の魔法状態蒸留では、複数の低品質な論理魔法状態を入力として、論理 Clifford 演算と論理測定を行う。一方、ゼロレベル魔法状態蒸留^{34,35}では、複数の論理魔法状態をあらかじめ準備せず、物理量子ビット上で Clifford 回路を実行し、測定結果に基づいてエラーを検出することで、低エラーの論理魔法状態を生成する。この状態を通常の魔法状態蒸留の入力として用いることで、必要な物理量子ビット数と実行時間を削減できる。

表 2 主要量子コンピュータ方式の特徴と FTQC 化に向けた課題。

方式	物理量子ビット	長所	課題
超伝導	トランズモン, フラクソニウム, ボソニック量子ビット ^{48,49}	高速な物理量子ゲート, 平面集積, 半導体製造・実装技術との親和性	薄膜・界面損失, ジョセフソン接合ばらつき・歩留まり, 配線, 大型冷凍機, クライオエレクトロニクス, 宇宙放射線起因バーストエラー
中性原子	原子の基底状態内部準位 ^{50,51}	集積化, 原子配置の自由度, 高い接続性	原子損失, 物理量子ゲート速度, レーザー安定性, リアルタイム復号
イオントラップ	イオン内部準位 ⁵²	高忠実度, 全結合性, 中間回路測定	物理量子ゲート速度, レーザー・光学系, 大規模トラップ, シャトルリング, 光接続
光	単一光子, 連続量光モード ⁵³	室温動作, 量子通信との親和性	低損失大規模光集積回路, 非ガウス状態の高効率生成, 光子数識別検出器
シリコン	電子・核スピン ⁵⁴	CMOS プロセスとの親和性, 大規模集積化	界面欠陥による雑音, 特性ばらつき・歩留まり, 交換相互作用の高忠実度制御, 配線, 同位体ウエハ

宇宙放射線起因バーストエラー対策を含むシステム化技術が課題となる。

また, トランズモン以外にも, 長いコヒーレンス時間を持つフラクソニウムやボソニック量子ビット^{*14}を用いて量子エラー訂正に必要な物理量子ビット数を削減する研究が進められている。ボソニック量子ビットの代表例が, 猫量子ビット^{*15}と GKP 量子ビット^{49,56,57*16}である。

6.2 中性原子量子コンピュータ

中性原子量子コンピュータにおいては, レーザー冷却した原子(Rb や Cs など)を光ピンセットで真空中に捕獲し, 原子の基底状態にある内部準位を物理量子ビットとして利用する。2 物理量子ビット間の物理量子ゲートでは, 原子を一時的に Rydberg 状態^{*17}へ励起し, Rydberg 状態間の強い相互作用を利用する^{50,51}。同種原子は本質的に均一であり, 光ピンセットで原子を移動・再配置できるため, 多数の物理量子ビットを様々な配置に並べら

れる点の特徴である。そのため, 二次元最隣接結合に制約されない量子 LDPC 符号や再構成可能な量子論理回路を実装できる可能性があり, 超伝導量子コンピュータに比べて FTQC アーキテクチャの自由度が高くなる可能性がある。

Harvard 大学, MIT, QuEra は, 最大 280 物理量子ビットを用いてエラー検出機能を備えた最大 48 論理量子ビットを構成し, 量子論理回路の実行に成功した⁵⁸。さらに, 3000 個を超える原子を 2 時間以上維持しながら, 失われた原子を連続的に補充する大規模中性原子配列の連続運転技術が実証された⁵⁹。また, 最大 448 物理量子ビットを用いて, 表面符号による Below-threshold 動作, 論理量子ビット間演算, ユニバーサル論理演算に必要な Clifford 演算と非 Clifford 演算, および最大 96 論理量子ビットを同時に用いる量子論理回路が実証された⁶⁰。

中性原子量子コンピュータの主な課題は, 原子損失, 物理量子ゲートの高速化, レーザーの高出力化と長期安定化, 原子輸送の高速化, 連続的な原子供給と再配置, モジュール間光接続, リアルタイム復号である。特に, 数千から数万原子を長時間安定に捕獲しながら, 欠損した原子を補充し, 量子エラー訂正サイクルを連続実行する技術は未確立である。

6.3 イオントラップ量子コンピュータ

イオントラップ量子コンピュータでは, 真空中に電磁場で捕獲したイオンの超微細構造準位や光学遷移を物理量子ビットとして利用する。単一物理量子ビットゲートはレーザーまたはマイクロ波を用いて実行し, 2 物理量子ビットゲートは複数イオンの集団運動(振動モード)

^{*14} ボソニック量子ビットとは, 共振器が持つ多数のエネルギー準位からなるボソンモードへ量子情報を符号化する量子ビットである。単一の共振器内部で量子エラー検出・訂正を行えるため, 通常の二準位量子ビットを多数用いる量子エラー訂正手法に比べてハードウェアオーバーヘッドを大幅削減できる可能性がある。

^{*15} 猫量子ビットとは, 位相空間で互いに離れた二つ以上のコヒーレント状態の重ね合わせ, いわゆる Schrödinger 猫状態へ量子情報を符号化するボソニック量子ビットである。光子損失に強いことが特徴である。

^{*16} GKP 量子ビットとは, Gottesman-Kitaev-Preskill 符号に基づき, 調和振動子の位置・運動量位相空間に周期的な波動関数を形成して量子情報を符号化するボソニック量子ビットである。

^{*17} Rydberg 状態とは, 原子中の電子が非常に大きな主量子数を持つ高励起軌道へ遷移した状態である。原子半径と電気双極子モーメントが大きく, 離れた原子間に強い相互作用を生じるため, 2 物理量子ビット間の物理量子ゲートに利用される。

を介して実行する⁵²。同一のイオンは本質的に均一であるため、物理量子ビット間の個体差が小さい。加えて、長いコヒーレンス時間と高い2物理量子ビットゲートの忠実度を実現できるという優位性を持つ。

QCCD (Quantum Charge-Coupled Device) 方式では、イオン列を空間的に分割・輸送・合流させ、演算領域へ移動することで、高い物理量子ビット間接続性を実現できる。Quantinuum は、中間回路測定とリアルタイムフィードフォワードを組み合わせた量子エラー訂正を実証し⁶¹、3 論理量子ビット上で量子フーリエ変換を実行した⁶²。さらに、高忠実度な論理魔法状態生成と論理非 Clifford 演算を報告している^{40,41}。また、98 物理量子ビットの QCCD 方式量子コンピュータ “Helios” では、イオン輸送による全結合性、高忠実度物理量子ゲート、および中間回路測定の結果に応じて後続の物理量子ゲートやイオン輸送を変更する動的量子回路のリアルタイム制御系が実証された⁶³。最近、Helios 上で高符号化率の Iceberg 量子エラー検出符号^{*18}を用い、48-94 論理量子ビット規模で Break-even 超えが実証された⁶⁴。

一方、物理量子ゲート時間が超伝導量子コンピュータに比べて大幅に長い点は、深刻な課題である。また、多数のレーザー光源と光学系の集積化、イオンシャトリング、大規模トラップの製造、モジュール間光接続も課題となっている。

6.4 光量子コンピュータ

光量子コンピュータでは、単一光子の経路、偏光、時間モード、あるいは連続量光モードを量子情報として利用する⁵³。光子は環境との相互作用が小さいため室温で量子性を保ち、量子通信との親和性も高い。一方、光子同士を直接相互作用させることが困難であるため、測定とフィードフォワードを利用した測定型量子計算^{*19}や融合型量子計算^{*20}が用いられる。

PsiQuantum はシリコンフォトニクスによる融合型 FTQC⁶⁵ を目指し、Xanadu は時間多重型連続量光回路と GKP 符号を用いる測定型 FTQC 方式を開発している⁶⁶。日本では、東京大学古澤研究室の連続量・時間多

重測定型量子計算技術を基盤とする OptQC が、100 入力、100 MHz クロック、クラウド接続を備えたフルスタックのアナログ光量子コンピュータを報告した⁶⁷。

光量子コンピュータの課題は、非ガウス状態の高効率生成、高効率かつ均一な単一光子源、光子数識別検出器、低損失大規模光集積回路、高速フィードフォワードである。また、光源、導波路、結合器、光スイッチ、検出器などの個別要素を高性能化するだけでなく、システム全体の性能を協調して高めることも課題である。

6.5 シリコン量子コンピュータ

シリコン量子コンピュータでは、Si/SiGe ヘテロ構造あるいは MOS 量子ドット中に閉じ込めた電子スピン、またはシリコン中の不純物原子の電子・核スピンを物理量子ビットとして利用する^{54,68,69}。単一物理量子ビットゲートは電子スピン共鳴、2 物理量子ビットゲートは主として交換相互作用を電氣的に制御することで実行する。物理量子ビット寸法が数十 nm 程度と極めて小さく、先端 CMOS 製造技術を活用した高密度集積化と、クライオ CMOS との同一パッケージ化が期待されている。

Intel は 300 mm CMOS 量産ラインを用いて、12 物理量子ビットのシリコンスピン量子ビットを集積化したシリコン量子コンピュータ “Tunnel Falls” を製造し、ウエハスケールでの高い歩留まりと均一性を報告した⁷⁰⁻⁷²。この成果は、物理量子ビット性能だけでなく、製造ばらつきと極低温ウエハ評価を半導体量産体制の中で管理できる可能性を示している。また、Equal1 は、シリコンスピン量子ビットと制御回路を同一パッケージへ集積した 6 物理量子ビットのラック搭載型 Bell-1 を 2025 年に発表し⁷³、2026 年には標準 19 インチラック内で動作する RacQ を公表した⁷⁴。ただし、これらは NISQ であり、Break-even の量子エラー訂正および論理量子ビットの実証は現段階で未達である。

スピン量子ビットのコヒーレンスを低下させる主要因の一つが、核スピンを持つ²⁹Si である。このため、核スピンを持たない²⁸Si を高濃度に濃縮した同位体ウエハや²⁸Si/SiGe ヘテロ構造が用いられる⁷¹。したがって、同位体濃縮した²⁸Si ウエハの供給とサプライチェーン確立が課題となっている。また、量子ドットの電位・交換結合のばらつき、谷分裂、界面欠陥による電荷雑音、極低温での多層配線、歩留まり・性能ばらつき、自動較正が主要な課題である。

シリコン量子コンピュータの優位性は、先端 CMOS プロセスの前工程・後工程、実装技術および評価技術を活用することである。しかしながら、CMOS プロセスと

^{*18} Iceberg 量子エラー検出符号とは、 $k + 2$ 個の物理量子ビットで k 個の論理量子ビットを表現する高符号化率の量子エラー検出符号である。

^{*19} 測定型量子計算とは、あらかじめ大規模な量子もつれ状態であるクラスタ状態を準備し、各物理量子ビットを順次測定することでユニバーサルな量子計算を実行する方式である。

^{*20} 融合型量子計算⁶⁵とは、小規模な量子もつれ状態を多数生成し、異なる量子もつれ状態に属する光子を Bell 測定 (4 種類の Bell 状態のうち、どの状態にあるかを判定する測定) を行い、より大規模な量子もつれ状態へ融合しながら、量子エラー訂正と量子論理演算を実行する方式である。

表3 主要量子コンピュータハードウェア開発企業が公表する FTQC ロードマップの例。数値は 2026 年 7 月時点の企業による公式発表に基づく将来目標値である。また、論理量子ビット数および論理エラー率の定義、想定する量子エラー訂正方式などは企業ごとに異なるため、数値の単純比較には注意が必要である。

企業	方式	目標年	論理量子ビット数	論理エラー率
IBM ⁷⁵	超伝導	2029	200	非公表
Google ⁷⁶	超伝導	非公表	10–1000 超	10^{-6} – 10^{-12}
D-Wave Systems ⁷⁷	超伝導	2032	100	非公表
OQC ⁷⁸	超伝導	非公表	200	10^{-6}
Alice & Bob ⁷⁹	超伝導	2030	100	10^{-6}
IQM ⁸⁰	超伝導	2030	240–720	$< 10^{-7}$
富士通 ⁸¹	超伝導	2035	1000	非公表
QuEra ^{82,83}	中性原子	2028–2029	1000 超	10^{-9}
Pasqal ⁸⁴	中性原子	2029	200	10^{-6}
Quantinuum ⁸⁵	イオン	2029	1000 超	$< 10^{-10}$
IonQ ⁸⁶	イオン	2030	80000	$< 10^{-12}$
Quantum Art ⁸⁷	イオン	2031	40000	非公表
Xanadu ⁸⁸	光	2029–2030	500	非公表
Quandela ⁸⁹	光	2030–2031	100	非公表
Equal1 ⁹⁰	シリコン	非公表	1000 超	非公表

の親和性は、大規模かつ高精度な FTQC を容易に実現できることと同義ではない点に注意が必要である。特に、界面欠陥などに起因する電荷雑音は、デジタル CMOS 回路の場合に比べて、シリコン量子ビットの特性に極めて深刻な影響を与える。

また、シリコン量子ビットを微細化して高密度集積すると、多数のゲート電極へ独立に電圧を供給し、マイクロ波制御信号を伝送するための配線問題が深刻になる。このため、クロスパー配線、電子スピンのシャトリング、極低温 MUX（多重化）回路、およびマイクロ波駆動を必要としない exchange-only 量子ビットなどが検討されている。

7 企業の FTQC ロードマップ

量子コンピュータハードウェアを開発している主要企業は 2028–2035 年頃を目標として、論理量子ビット数、論理エラー率、論理演算回数などの目標を掲げたロードマップを公表している。表3では、2026 年 7 月時点で各社が公開しているロードマップに基づき、目標論理量子ビット数と論理エラー率を示す。

ロードマップを評価する際には、論理量子ビット数および論理エラー率に加えて、量子エラー訂正を連続的に実行しながら任意の論理量子ビットを選択して演算できるか、複数の論理非 Clifford ゲートを高精度に実行でき

るかなどについても総合的に確認する必要がある。

8 まとめ：薄膜・表面・界面科学への期待

量子コンピュータの研究開発は、物理量子ビット数や物理エラー率を競う段階から、量子エラー訂正によって保護された論理量子ビットを構成し、それらを用いて高精度な量子論理演算を実行する FTQC の実現を目指す段階へ移行しつつある。近年, below-threshold 動作, 量子 LDPC 符号, 論理量子ビット間演算, 魔法状態生成など, FTQC を構成する個々の要素技術について重要な実験実証が相次いでいる。一方, これらの要素技術が実証されたことと, 大規模な実用 FTQC が完成したことは同義ではない。今後は, 多数の論理量子ビットを長時間安定に保持し, 任意の論理量子ビット間で高精度な演算を行うために, 材料, 設計, 製造, 実装, 冷却, リアルタイム量子エラー訂正, ミドルウェア, ソフトウェア, クラウドなどの各レイヤーの要素技術を垂直統合したシステム開発が不可欠となる。

薄膜・表面・界面の研究は, この大規模 FTQC 化を支える基盤技術である。例えば, 超伝導量子コンピュータにおいては, 表面酸化膜や界面欠陥が, 誘電損失や二準位欠陥, 準粒子生成を介して物理エラー率を左右する。シリコン量子コンピュータにおいては, ヘテロ界面の粗さ, 電荷トラップ, 材料組成の揺らぎが, 電荷雑音, 谷分裂, 交換相互作用のばらつきや物理量子ビットの歩留まりとして現れる。

また, イオントラップ量子コンピュータにおいては, 電極表面の汚染や吸着層が, イオンを揺さぶる電場雑音を生じさせ, 運動状態の異常加熱を通じて物理エラー率に影響を与える。光量子コンピュータにおいては, 半導体レーザー光源, 光導波路, 結合器, 光スイッチ, 光子検出器などを構成する材料・界面の損失, 欠陥, 均一性が, 光子損失や素子性能のばらつきを通じて, 多光子もつれ状態やクラスタ状態の規模, 光量子回路の規模, および量子エラー訂正性能を左右する。また, 中性原子量子コンピュータにおいても, ミラー, 光学素子, 真空容器内表面などの損失, 汚染, 経時変化は, レーザー制御・読出しの安定性や大規模集積化に影響を与える。

このように, 表面・界面の構造や化学状態は, 物理エラー率, 性能ばらつき, 歩留まりを通じて, 物理量子ビットや周辺素子の性能を左右し, ひいては FTQC システム全体の性能に大きな影響を与える。したがって, 薄膜成長, 表面処理, 界面制御, ナノ加工, 局所計測に関する技術は, 単に物理量子ビットや周辺素子の性能を改善す

るだけでなく, 量子エラー訂正のオーバーヘッドを低減し, 実用 FTQC に必要な物理量子ビット数を削減するとともに, その性能を大きく向上させ得る。本稿が, 薄膜・表面科学における様々な技術を, FTQC の性能改善へと結び付ける契機となることを期待する。

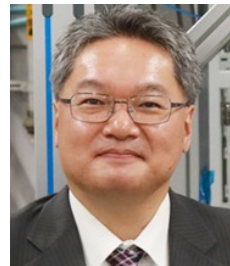
参考文献

- [1] United Nations General Assembly, Resolution A/RES/78/287, (2024) <https://docs.un.org/en/A/RES/78/287>.
- [2] 藤井啓祐, 「教養としての量子コンピュータ」ダイヤモンド社 (2026).
- [3] 内閣官房, 日本成長戦略会議 (2026), <https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/nipponseichosenryaku/index.html>.
- [4] U.S. Department of Commerce, “Department of Commerce Announces Letters of Intent With 9 Companies for \$2 Billion to Accelerate U.S. Leadership in Quantum Computing,” NIST (2026) <https://www.nist.gov/news-events/news/2026/05/department-commerce-announces-letters-intent-9-companies-2-billion>.
- [5] The White House, Executive Order, “Ushering in the Next Frontier of Quantum Innovation” (2026) <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2026/06/ushering-in-the-next-frontier-of-quantum-innovation/>.
- [6] The White House, Executive Order, “Securing the Nation Against Advanced Cryptographic Attacks” (2026) <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2026/06/securing-the-nation-against-advanced-cryptographic-attacks/>.
- [7] 川畑史郎, 「表面と真空」 Vol.69 (2026) 54.
- [8] 川畑史郎, 「情報処理」 Vol.66, No.1, (2025) e7.
- [9] R. P. Feynman, Int. J. Theor. Phys. 21, (1982) 467.
- [10] D. Deutsch, Proc. R. Soc. Lond. A 400, (1985) 97.
- [11] 嶋田義皓, 川畑史郎, 「情報処理」 Vol.66, No.5, (2025) d1.
- [12] P. W. Shor, Proc. 35th FOCS (1994) 124.
- [13] L. K. Grover, Proc. 28th STOC (1996) 212.
- [14] A. W. Harrow, A. Hassidim and S. Lloyd, Phys. Rev. Lett. 103, (2009) 150502.

- [15] P. W. Shor, Phys. Rev. A 52, (1995) R2493.
- [16] A. M. Steane, Phys. Rev. Lett. 77, (1996) 793.
- [17] E. Knill, R. Laflamme and W. H. Zurek, Proc. R. Soc. Lond. A 454, (1998) 365.
- [18] A. Y. Kitaev, Ann. Phys. 303, (2003) 2.
- [19] A. G. Fowler *et al.*, Phys. Rev. A 86, (2012) 032324.
- [20] C. Gidney and M. Ekerå, Quantum 5, (2021) 433.
- [21] C. Gidney, arXiv:2505.15917, (2025).
- [22] P. Webster *et al.*, arXiv:2602.11457, (2026).
- [23] R. Babbush *et al.*, arXiv:2603.28846, (2026).
- [24] M. E. Beverland *et al.*, arXiv:2211.07629, (2022).
- [25] G. H. Low *et al.*, Phys. Rev. X 15, (2025) 041016.
- [26] N. Bellonzi *et al.*, arXiv:2406.06335, (2024).
- [27] A. Caesura *et al.*, PRX Quantum 6, (2025) 030337.
- [28] Google Quantum AI and Collaborators, Nature 638, (2025) 920.
- [29] C. Horsman *et al.*, New J. Phys. 14, (2012) 123011.
- [30] I. Besedin *et al.*, Nature Phys. 22, (2026) 189.
- [31] Y. Wang *et al.*, arXiv:2606.06598, (2026).
- [32] W. Lin *et al.*, arXiv:2607.01473, (2026).
- [33] S. Bravyi and A. Kitaev, Phys. Rev. A 71, (2005) 022316.
- [34] Y. Hirano, T. Itogawa and K. Fujii, Proc. 2024 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE), Vol. 1, (2024) 843.
- [35] T. Itogawa *et al.*, PRX Quantum 6, (2025) 020356.
- [36] C. Gidney, N. Shutty and C. Jones, arXiv:2409.17595, (2024).
- [37] Z. H. Chen *et al.*, arXiv:2503.18657, (2025).
- [38] Google Quantum AI and Collaborators, arXiv:2512.13908, (2025).
- [39] P. S. Rodriguez *et al.*, Nature 645, (2025) 620.
- [40] L. Daguerre *et al.*, Phys. Rev. X 15, (2025) 041008.
- [41] M. DeCross *et al.*, arXiv:2506.14688, (2025).
- [42] P. Panteleev and G. Kalachev, IEEE Trans. Inf. Theory 68, (2022) 213.
- [43] S. Bravyi *et al.*, Nature 627, (2024) 778.
- [44] K. Wang *et al.*, arXiv:2505.09684, (2025).
- [45] S. H. Choe *et al.*, arXiv:2606.06062, (2026).
- [46] K. Liu *et al.*, arXiv:2604.18714, (2026).
- [47] E. Tham *et al.*, arXiv:2606.06455, (2026).
- [48] P. Krantz *et al.*, Appl. Phys. Rev. 6, (2019) 021318.
- [49] B. L. Brock *et al.*, Nature 641, (2025) 612.
- [50] M. Saffman, T. G. Walker and K. Mølmer, Rev. Mod. Phys. 82, (2010) 2313.
- [51] S. J. Evered *et al.*, Nature 622, (2023) 268.
- [52] C. D. Bruzewicz *et al.*, Appl. Phys. Rev. 6, (2019) 021314.
- [53] J. L. O'Brien, A. Furusawa and J. Vučković, Nature Photonics 3, (2009) 687.
- [54] D. Loss and D. P. DiVincenzo, Phys. Rev. A 57, (1998) 120.
- [55] S. Kawabata, arXiv:2601.03922, (2026).
- [56] F. Hopfmueller *et al.*, Quantum 8, (2024) 1539.
- [57] M.-A. Lemonde *et al.*, arXiv:2409.05813, (2024).
- [58] D. Bluvstein *et al.*, Nature 626, (2024) 58.
- [59] N.-C. Chiu *et al.*, Nature 646, (2025) 1075.
- [60] D. Bluvstein *et al.*, Nature 649, (2026) 39.
- [61] C. Ryan-Anderson *et al.*, Phys. Rev. X 11, (2021) 041058.
- [62] K. Mayer *et al.*, arXiv:2404.08616, (2024).
- [63] A. Ransford *et al.*, Nature 655, (2026) 81.
- [64] S. Dasu *et al.*, arXiv:2602.22211, (2026).
- [65] S. Bartolucci *et al.*, Nature Commun. 14, (2023) 912.
- [66] J. E. Bourassa *et al.*, Quantum 5, (2021) 392.
- [67] S. Yokoyama *et al.*, arXiv:2506.16147, (2025).
- [68] M. Veldhorst *et al.*, Nature 526, (2015) 410.
- [69] A. M. J. Zwerger *et al.*, Nature Electron. 5, (2022) 184.
- [70] S. Neyens *et al.*, Nature 629, (2024) 80.
- [71] H. C. George *et al.*, Nano Lett. 25, (2025) 793.
- [72] Intel, "Intel's New Chip to Advance Silicon Spin Qubit Research" (2023) <https://newsroom.intel.com/new-technologies/quantum-computing-chip-to-advance-research>.
- [73] ビジューアルテクノロジー, "Bell-1 Quantum Server" (2025) https://www.v-t.co.jp/wp-content/uploads/2025/09/Equal1_Bell-1_A4_VT_202508.pdf.
- [74] Equal1, "Equal1 Unveils World's First Hybrid

- Rack-Mounted Silicon-Spin Quantum Computer” (2026) <https://www.equal1.com/insights/equal1-unveils-worlds-first-hybrid-rack-mounted-silicon-spin-quantum-computer>.
- [75] IBM, “IBM Quantum Roadmap” (2025) <https://www.ibm.com/roadmaps/quantum/>.
- [76] Google Quantum AI, “Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit,” Google Research Blog (2023) <https://research.google/blog/suppressing-quantum-errors-by-scaling-a-surface-code-logical-qubit/>.
- [77] D-Wave Quantum Inc., “D-Wave Charts a New Course to Fault-Tolerant Quantum Computing with Gate-Model Roadmap” (2026) <https://www.dwavequantum.com/learn/blog/posts/why-error-awareness-matters-a-faster-path-to-fault-tolerant-quantum-computing/>.
- [78] Oxford Quantum Circuits, “Technical Roadmap: TITAN and ATHENA” (2026) <https://oqc.tech/tech/technical-roadmap>.
- [79] Alice & Bob, “Alice & Bob’s Quantum Computing Roadmap” (2025) <https://alice-bob.com/newsroom/alice-bob-quantum-computing-roadmap/>.
- [80] IQM Quantum Computers, “Roadmap” (2025, updated 2026) <https://www.meetiqm.com/technology/roadmap>.
- [81] Fujitsu, “Quantum Computing by Fujitsu” (2026) <https://www.fujitsu.com/global/about/research/technology/quantum/>.
- [82] QuEra Computing, “Our Quantum Roadmap” (2026) <https://www.quera.com/our-quantum-roadmap>.
- [83] QuEra Computing, “Gigaquop-Class Fault-Tolerant Roadmap” (2026) <https://www.quera.com/press-releases/quera-announces-2028-fault-tolerant-quantum-computer-and-expanded-multi-year-strategic-collaboration-with-aws>.
- [84] Pasqal, “Defining the Quantum Reality: Analyst and Investor Presentation” (2026) <https://www.pasqal.com/wp-content/uploads/2026/06/Pasqal-Analyst-Investor-Presentation-June-2026-1.pdf>.
- [85] Quantinuum, “Accelerated Roadmap to Achieve Universal Fault-Tolerant Quantum Computing by 2030” (2024) <https://www.quantinuum.com/press-releases/quantinuum-unveils-accelerated-roadmap-to-achieve-universal-fault-tolerant-quantum-computing-by-2030>.
- [86] IonQ, “IonQ Roadmap” and “IonQ’s Accelerated Roadmap: Turning Quantum Ambition into Reality” (2025) <https://www.ionq.com/roadmap>.
- [87] Quantum Art, “Technology and Product Roadmap” (2025) <https://www.quantum-art.tech/roadmap>.
- [88] Xanadu Quantum Technologies, Annual Report and Form 6-K (2026) <https://investors.xanadu.ai/static-files/7d3ebcf6-dd22-4f6c-9507-43d9333b455c>.
- [89] Quandela, “Roadmap 2026–2033” (2026) <https://www.quandela.com/wp-content/uploads/2026/03/Quandela-Roadmap-190326-web.pdf>.
- [90] Equal1, “Roadmap” (2026) <https://www.equal1.com/roadmap>.

川畑 史郎 (かわばた しろう)



1995 年名古屋大学大学院工学研究科結晶材料工学専攻修士課程修了, 1998 年大阪市立大学大学院工学研究科応用物理学専攻博士課程修了。博士 (工学)。1998 年通産省電子技術総合研究所入所。2001 年より産業技術総合研究所。

2024 年より法政大学大学院情報科学研究科教授。現在, NEDO イノベーション戦略センターフェロー, 文科省 Q-LEAP 人材育成プログラム領域プログラムディレクタ, 同量子情報処理領域サブプログラムディレクタ, 内閣府ムーンショット型研究開発事業目標 6「2050 年までに, 経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」アドバイザー, 内閣府 BRIDGE 評価ワーキンググループ委員, 経産省研究開発税制等の在り方に関する研究会委員, 経産省安全保障貿易管理調査員, JST さきがけ「量子協奏」アドバイザー, JST ASPIRE 量子領域アドバイザー, JST NEXUS 量子領域アドバイザー等を兼務。量子コンピュータ, 量子情報理論, 量子アニーリング, 超伝導量子回路, クライオエレクトロニクス, 物性物理の研究に従事。

ダイヤモンド量子センサーの研究

水落 憲和

京都大学化学研究所、京都大学スピントロニクス学術連携研究教育センター

〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

mizuochi.norikazu.7w@kyoto-u.ac.jp

近年、量子情報科学技術の発展に伴い、量子センサーへの関心が高まっている[1]。量子センサーは、従来のセンサーを超える高感度化や高空間分解能化を実現する技術として期待されている。高感度量子センサーの代表例としては、超伝導量子干渉デバイス (SQUID)、原子蒸気磁力計、原子時計などが挙げられる。一方、量子状態を高効率に生成・制御できることから、近年ではスピンを利用した量子センサーが大きな注目を集めている。

特に、ダイヤモンド中の窒素-空孔 (NV) 中心[2]の電子スピンは、固体中の電子スピンとして室温で最長のスピンコヒーレンス時間 (T_2) を有する[3]。この特性により高い磁場感度が得られるとともに、単一スピンを室温で観測できることから、高空間分解能を有する量子センサーとして期待されている。また、他の量子センサーと比較して広いダイナミックレンジを有する点も、実用上重要な特徴である。実際に、室温の単一 NV 中心を用いて、高い感度を維持しながら約 7 桁のダイナミックレンジが実証されている[4]。

NV 中心は、磁場のみならず、電場、温度、圧力などの計測も可能であり、物理学、材料科学、生命科学、医療をはじめとする幅広い分野への応用が期待されている。近年では、大型のダイヤモンド単結晶の合成技術に加え、ダイヤモンドナノ粒子の作製・制御技術も進展しており、生体環境におけるセンシングやイメージングへの応用研究が活発に進められている。

多数の NV 中心を利用するアンサンブル系では、極めて高い感度の実現が期待されており、脳磁図計測や核磁気共鳴 (NMR) など、生命科学分野への応用が検討されている。また、高感度に加えて広いダイナミックレンジを有するという特徴から、スピンと暗黒物質との相互作用の観測を目指した暗黒物質探索[5]をはじめとする基礎物理学実験への応用も期待されている。

一方、高い空間分解能を活かした展開としては、ナノダイヤモンドを用いることにより、細胞内などの生命科学系における磁場、電場、温度、pH などの局所情

報を取得することが期待されている。例えば、細胞の生理機能は、細胞内部の温度分布の不均一性や局所的な温度変化と密接に関係しており、細胞内の微小領域における温度変化を検知可能なプローブの開発が求められている。また、細胞レベルの微量試料を対象とした NMR 計測により、分子構造やダイナミクスを解析する研究への展開も期待されている。

本講演では、ダイヤモンド量子センサーの原理と最新の研究動向を紹介するとともに、その特徴について解説する。さらに、生命科学や基礎物理学を含む応用研究の現状を概観し、今後の展望について議論する。

謝辞

本発表の成果は MEXT Q-LEAP (JPMXS0118067395, JPMXS0120330644), CREST (No. JPMJCR23I5), A-STEP (JPMJTR231B), 科研費 (25H00845), ASPIRE (JPMJAP24C1), CURE Spin-L program (JPMXP1323015488)、京大化研国際共共より支援いただきました。

文献

- 1) D. Z. Anderson, et al., "The future of quantum technology as seen from the EU, USA and Japan: experts' vision over the next two decades", *Journal of Physics B*, **59**, 071001 (2026)
- 2) 水落憲和, "NV 中心の物理と応用への魅力", 「応用物理」, **87**, 251-261 (2018)
- 3) E. D. Herbschleb, H. Kato, Y. Maruyama, T. Danjo, T. Makino, S. Yamasaki, I. Ohki, K. Hayashi, H. Morishita, M. Fujiwara, N. Mizuochi, *Nat. Commun.*, **10**, 3766 (2019).
- 4) E. D. Herbschleb, H. Kato, T. Makino, S. Yamasaki, N. Mizuochi, *Nat. Commun.*, **12**, 306 (2021).
- 5) S. Chigusa, M. Hazumi, E. D. Herbschleb, N.

Research of diamond quantum sensor. Norikazu Mizuochi. Institute for Chemical Research, Kyoto University, (Gokasho, Uji-city, Kyoto, 611-0011, JAPAN). E-mail: mizuochi.norikazu.7w@kyoto-u.ac.jp

Mizuochi, K. Nakayama, Journal of High Energy Physics. **2025**, 83 (2025).



水落 憲和 (みずおち のりかず)

2000 年 東北大学大学院理学研究科博士 課程修了. 理学博士. 2016 年京都大学化学研究所教授. ダイヤモンド量子センサに関する研究, 量子情報素子に関する研究に従事.

シリコン量子コンピュータの基盤技術

樽茶清悟

理化学研究所 創発物性科学研究センター&量子コンピュータ研究センター

〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

tarucha@riken.jp

半導体シリコンによるゲート型量子コンピュータは、量子ビット（情報単位）あたりの占有面積が小さい、作製において従来の集積技術と互換性がある、CMOS 低温電子回路との集積が可能である、といった特徴があることから、国内外で研究が活発化している。最近では、Intel、imec、CEA-Leti といった主要半導体製造機関も開発に乗り出している。私たちは、ゲート型量子コンピュータの技術開発の鍵とされる、量子操作の高忠実度化、量子誤り訂正の導入、量子ビットデバイスの大規模化の研究を進めている。ここでは、これらのうち高忠実度化と大規模化について現状と今後の課題を説明する。

Key words: quantum computing, silicon, quantum dot, spin, qubit

1. はじめに

量子コンピューティング (QC) は、主に超伝導回路、中性原子、束縛イオンをプラットフォームとして開発が進められている。一方で半導体方式は、超伝導方式よりも数年遅れて研究が始まったが、近年研究が加速している。その中でシリコン (Si) を用いて作られる量子ビットは高性能で拡張性のある QC を実現する有力な候補として注目されている。

各方式の QC に共通して、高忠実度の量子ビット操作は誤り耐性のある QC を実現するための重要な前提条件であり、また論理量子ビット（誤り訂正可能な量子ビット）を構成するために必要な物理量子ビットの数の削減にも有用である¹⁾。私たちはこれまでに、同位体精製した ^{28}Si を量子井戸とする $\text{SiGe}/^{28}\text{Si}/\text{SiGe}$ の中に作られる量子ドットを用いて、誤り耐性閾値を超える忠実度をもつ単一量子ビットゲートおよび二量子ビットゲートを実現してきた^{2,3)}。本講演では、さらなるゲート忠実度の向上と最近研究が進んでいる多ビット化について説明する。

2. 誤り耐性量子ビット操作

この十数年間に、 $\text{SiGe}/\text{Si}/\text{SiGe}$ 、 Si-MOS を始めとして様々な Si 量子ビットデバイスが報告されている。初期には天然 Si を用いた研究が行われ、誤り耐性の閾値 ($F=99\%$) を越える報告がなされた。その数年後から同位体制御された ^{28}Si が導入され、 99.9% を越える忠実度（ランダムベンチマーク法で測定）が達成された。我々は最近、さらなる高忠実度化に向けた研究を

行い⁴⁾、 $\text{SiGe}/^{28}\text{Si}/\text{SiGe}$ の 5 量子ビットデバイス（図 1）⁵⁾を用いて、全ての量子ビットについて 99.99% を超える高忠実度操作を達成した。これは、量子ビットの操作方法の改善によるもので、ゲートパルスの高精度な調節、ゲートパルス波形の最適化などによる。

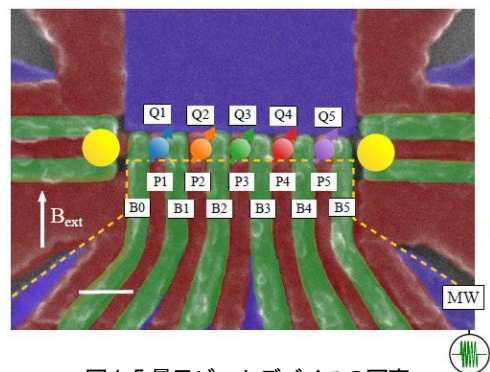


図1 5量子ビットデバイスの写真

3. 大規模化

量子ビットの大規模化に向けては、従来 1 次元のビット配列が作られ、Intel から Si/SiGe の 12 量子ビット⁶⁾、imec&UNSW から MOS の 8 ビット⁷⁾が報告されている。しかし、量子ビットの大規模化を進める上で一次元配列には限界がある。このため、最近では $2 \times N$ 、 $3 \times N$ といった擬 2 次元の量子ドット配列が提案され、主要な半導体製造機関を中心に作製され始めている。HRL では 3×18^8 、Intel では 3×33 の量子ドット配列が作られ、それぞれ、3 つの量子ドットの統合による交換専用の 18 量子ビット (HRL)、33 量子ビット (Intel、現在実験中) が報告されている。我々は、

現状、図1の5量子ビットに続いて、1次元配列の10量子ビットの動作を確認している。

また、スピンを数~10ミクロン長の線路を行き来させる、シャトリング技術を利用して離れた量子ビットを結合させることによりスパースな2次元ビット配列を形成し、表面符号の誤り訂正に適合させることが提案されている⁹⁾。ごく最近、その基本技術として、シャトリングを介した4つのビット結合が報告されている¹⁰⁾。大規模化の研究はまだ始まったばかりの段階であるが、今後の発展が期待される。



樽茶 清悟

1977年東京大学大学院工学系研究科物理学専攻修士課程修了。1986年同工学系研究学位取得 工学博士。1977年NTT基礎研究所入所。1998年東京大学理学系研究科物理学専攻 教授。2005年同大学工学系研究科 物理工学専攻 教授。2012年理化学研究所兼務、2019年理化学研究所（現在に至る）。以来半導体物理に関する研究、量子情報に関する研究に従事。

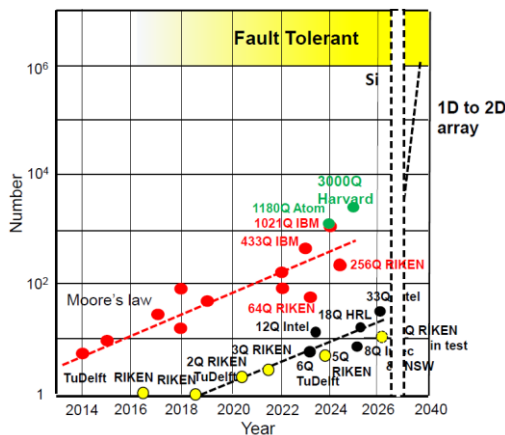


図2 多ビット化の傾向。黒丸：Si量子ビット、黄色は我々の報告、赤丸：超伝導の量子ビット、緑丸：中性原子の量子ビット。破線は半導体のムーア則に類似の増加傾向を示す。

文献

- 1) A.G. Fowler, Phys. Rev. A 86 (2012) 32324.
- 2) J. Yoneda et al., Nature Nanotechnol. 13 (2018) 338.
- 3) A. Noiri et al., Nature 601 (2022) 338.
- 4) Yi-H. Wu, L.C. Camenzind, et al., npj Quantum Info. 10 (2024) 8.
- 5) Yi-H. Wu, L.C. Camenzind et al., arXiv:2507.11918; to appear in Nature Phys.
- 6) S. Neyens et al., Nature 629, (2024) 80.
- 7) N. Andreas et al., Nat. Commun. 17, 5872 (2026).
- 8) HRL Quantum Team, Nature 655, 1154 (2026).
- 9) M. Kuenne et al., Nat. Commun. 15, 4977 (2024).
- 10) B. Undseth et al., Nature 655, 1160 (2026).

超伝導量子コンピュータの開発と大規模化に向けた課題

玉手 修平

理化学研究所 量子コンピュータ研究センター

〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

本発表では、理化学研究所で開発している 144 量子ビットの超伝導量子コンピュータのアーキテクチャを紹介し、超伝導量子コンピュータの大規模化に向けた課題について紹介する。

Key words: Superconducting quantum computer, 3-dimensional integration

1. はじめに

近年、超伝導量子コンピュータは加速的に発展しており、2019 年に Google のチームが古典コンピュータに対する量子コンピュータの計算能力の優位性（量子優位性）が示されて以降¹⁾、次のマイルストーンである誤り耐性量子コンピュータの実現に向けて、着実に研究が進展している。2023 年には同じく Google のチームが 105 量子ビットをもった超伝導量子プロセッサを用いて、表面符号と呼ばれる誤り訂正符号において、誤り訂正閾値を超える物理誤り率を達成し、符号化による誤り率の指数的な低減が実証された²⁾。このことは、物理誤り率を保ちつつ、量子ビット数を増大させることが可能であれば、量子ビット数に応じてより高度な量子計算が可能となることを意味し、今後は超伝導量子ビットの大規模化に向けた開発が更に加速することが予想される。一方で、超伝導量子ビットのような平面上に集積化した量子プロセッサでは、RSA-2048 の素因数分解などの実用的なアルゴリズムを実行するためには、100 万量子ビット程度の規模が必要とされており³⁾、スケーラブルな形で量子プロセッサを実現することが必要不可欠となっている。

2. 超伝導量子コンピュータの開発

理化学研究所では、大規模化時の配線のスケーラビリティに対応するために、コンタクトプローブを用いた完全垂直配線方式の量子ビットチップおよびパッケージング方式を開発してきた。図 1 にチップおよびパッケージ構造の模式図を示す。この方式では配線層が量子ビットに対して垂直方向に実装されているため、量子ビットと読み出し回路からなる単位セルパターン（図 2）を繰り返し用いることで、水平方向に原理的には無限に拡張することが可能な構造となっている。単位セルを基本とするタイル状のアーキテクチャは、回路

設計の観点でもスケーラビリティをもっている。量子ビットや読み出し回路の設計は単位セルのみで行えばよく、理化学研究所では初期に開発した 16 量子ビットチップから設計を大きく変更することなく、量子ビット数を拡張してきており、現在 144 量子ビットからなるチップの評価を進めている。

超伝導量子ビットの性能向上に向けた研究としては、現在量子誤り訂正を実現する上で、一番の性能のボトルネックとなっている状態読み出しの忠実度を改善することに重点をおいて、デバイスの開発を行ってきた。状態読み出しを高速化しつつ、量子ビットのコヒーレンスを保持するための非常にコンパクトなオンチップマイクロ波フィルタの提案を行っており、このフィルタ構造を用いることで、4 量子ビットの多重読み出しにおいて、読み出し時間 52ns、平均読み出し忠実度 99.77% という、非常に高速かつ高忠実度な読み出し性能を実現することに成功している。⁴⁾

3. 大規模化の課題

超伝導量子ビットの更なる大規模化に向けては、量子ビットサイズの小型化やインターポーザーによる配線自由度の向上といった、量子ビットチップ自体の性能および集積度の向上がまず重要である。このためには、量子ビット回路の損失源の解明や、チップ間接続の技術など、製造プロセスに関する理解や技術の発展が必要不可欠である。一方で、冷凍機やエレクトロニクスも含めたシステム全体としての大規模化も今後重要度が増してくると考えられる。マイクロ波サーキュレーターの小型化や、低温エレクトロニクスの開発など、冷凍機・制御システム全体としてのスケーラビリティを確保するためには様々な技術開発が必要である。本発表では、このような大規模化に向けた課題についても、最近の研究を踏まえて紹介する。

文献

- 1) F. Arute et al., Nature **574**, 505-510 (2019).
- 2) Google Quantum AI and Collaborators, Nature **638**, 920-926 (2025).
- 3) C. Gidney, arXiv:2505.15917 (2025).
- 4) P. Spring et al., PRX Quantum **6**, 020345 (2025).



玉手 修平

2013 年京都大学大学院工学研究科電子工学専攻博士 課程修了。工学博士。現在、理化学研究所量子コンピュータ研究センターにおいて、超伝導量子ビットの集積化に関する研究に従事。

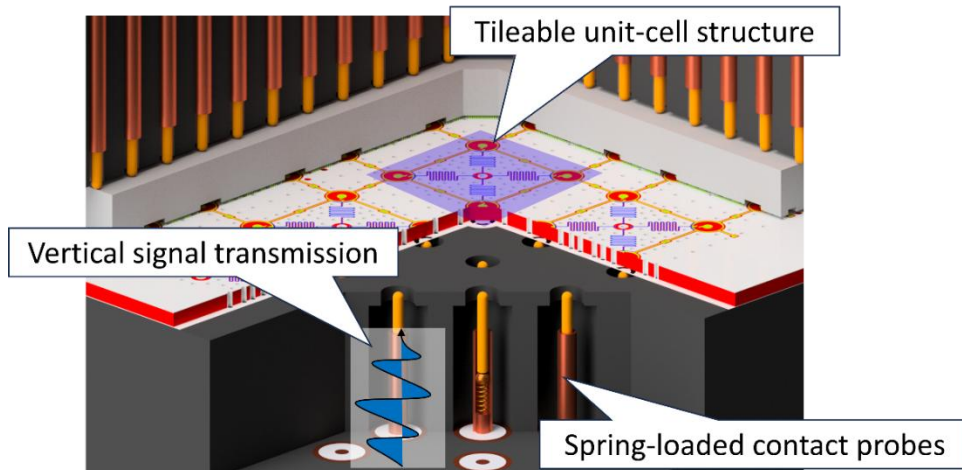


図 1 理化学研究所で開発を行っている完全垂直配線方式の量子ビットチップおよびパッケージの模式図

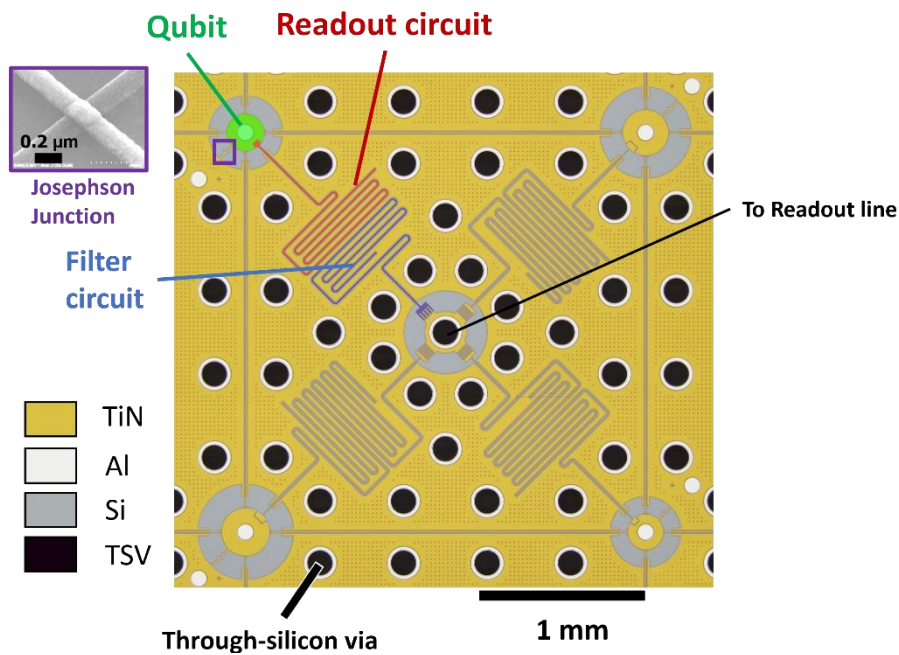


図 2 4 量子ビットからなる単位セル構造

半導体量子ドット量子コンピューター

小寺哲夫

東京科学大学

〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

成熟した半導体の集積化技術を量子コンピューターに活用することが期待されている。なかでも、エレクトロニクス技術との適合性やコヒーレンスの観点から、シリコン量子ドット中のスピンを利用した量子ビットの研究が盛んに進められている。また、大規模な量子ビットの集積化を目指し、必要となる周辺技術の研究開発も推進されている。本講演では、シリコン量子ビットの基礎について解説し、研究開発の動向、課題、展望を示すとともに、我々の研究のセットアップや現状についても触れる。

Key words: silicon, qubit, semiconductor, coherence, spin, integration

1. はじめに

量子コンピューターのハードウェア研究は、様々な物理系で研究開発が盛んに行われている。半導体量子ドットを用いた量子コンピューターの研究開発も、近年ますます活発化している^{1,2)}。半導体は集積化技術が成熟しており、量子コンピューターにその技術を活用できると期待されている。

2. 半導体スピン量子ビット

2.1 半導体量子ドット

半導体トランジスタは、ソース・ドレイン電極間のチャネルに対してゲート電極を取り付けた構造である。チャネル部の構造制御に加えてゲート電圧制御により、直径数 10 nm 程度の領域に三次元的に電子を閉じ込めることができるようになる。このような系は単電子トランジスタ、あるいは半導体量子ドットと呼ばれ、電荷一つ一つを電氣的に制御できる³⁾。

2.2 半導体スピン量子ビット

半導体量子ドットを用いた量子ビットの方式は複数あるが、ここでは量子ドット 1 つに閉じ込めた 1 つの電荷のスピンを 1 つの量子ビットとする方式について述べる⁴⁾。電荷を量子ドットに閉じ込めて、静磁場を印加すると、電荷状態は下向きスピン状態と上向きスピン状態にエネルギー分離する。この 2 つのスピン状態の重ね合わせを実現することによりスピン量子ビットを作ることができる。スピンを任意に回転させる 1 量子ビット操作と、量子もつれを生成する 2 量子ビット操作の組み合わせにより、量子論理演算を自由に組み合わせることができる。静磁場、マイクロ波、パルス電圧などの制御により、これらを実装できる。

まず、1 量子ビット操作について説明する。ゼーマンエネルギーに等しい周波数のマイクロ波磁場を、静磁場と直交する向きに印加すると、スピン共鳴を起こして下向きスピン $|\downarrow\rangle$ と上向きスピン $|\uparrow\rangle$ の間を振動する。これをラビ振動という。マイクロ波磁場の印加時間を制御することによって、 $|\downarrow\rangle$ と $|\uparrow\rangle$ の割合を変えることができる。交流磁場の振幅を大きくすると、振動の周波数が高くなり、1 量子ビット操作を高速化できる。

次に、2 量子ビット操作について説明する。1 量子ビット素子を二つ用いて、2 量子ビット入出力の系を作ると、論理演算を実現できる。そのための 2 量子ビット操作には二つの量子ドット中のスピン間にはたらく交換相互作用を用いる。交換相互作用は、平行スピン状態 ($|\uparrow\uparrow\rangle$ や $|\downarrow\downarrow\rangle$) に対して、反平行スピン状態 ($|\uparrow\downarrow\rangle$ や $|\downarrow\uparrow\rangle$) のエネルギーを下げるはたらきをする相互作用であり、その相互作用の大きさは二量子ドット間のトンネル結合の二乗に比例する。二量子ドット間に設置されたゲート電極にパルス電圧を印加するなどしてトンネル結合を制御し、交換相互作用を時間的に制御することで、2 量子ビット操作を実現できる。

これらの高忠実な制御が既に実現されており^{5,6)}、現在は量子ビットの集積化を目指した研究が盛んとなっている。

2.3 半導体スピン量子ビット素子の材料

半導体スピン量子ビットの物理的探求と基盤技術の研究は、10 年以上の長きにわたり、主に GaAs 中の電子を閉じ込める量子ドット系を用いて行われてきた。GaAs は、高品質な結晶成長が容易であることや、電子の有効質量が小さく閉じ込め制御性に優れるといっ

た材料的利点を有しており、初期の量子ドット研究における標準的なプラットフォームとしての役割を担ってきた。2000年代の研究を通じて蓄積されたGaAs系量子ドットの研究成果は、同時にIII-V族化合物半導体が抱えるスピン量子ビットに対する本質的な課題も浮き彫りにした。それは、構成元素が有する核スピンとの超微細相互作用が電子スピンのコヒーレンスを乱すという点である。この磁気的な雑音環境を克服し、スピン量子ビットのコヒーレンス時間を延ばすためのホスト材料として、2010年代以降、シリコン(Si)が量子ビット研究の主役となった。

Siが量子ビットのホストとして優れている理由は、その同位体組成にある。天然のSiには、核スピンをもつ同位体(^{29}Si)が約4.7%しか含まれておらず、残りの95%以上は核スピンを持たない ^{28}Si や ^{30}Si で構成されている。これだけでもGaAsに比べてクリーンな磁気環境であるが、Siの真価は同位体濃縮技術にある。これによって核スピンを持つ ^{29}Si を人為的に除去し、核スピンゼロの ^{28}Si のみで構成された「同位体濃縮Si基板」を用いることが可能となり、スピン量子ビットにとって理想的なホスト材料である。Si微細加工技術の発展、同位体制御技術との融合、GaAs系において研究開発されたスピン量子ビットに関する技術や知見のSi系への移植により、Si量子ビット研究は急速に進化した。

2.4 Si スピン量子ビット素子の構造

ここではSiを用いたスピン量子ビットの実装について大きく三つのアプローチに大別して説明する。

第一のアプローチは、Si結晶中の不純物原子(ドーパント)を量子ビットとして利用する「ドーパント型」である。リン(P)などのドナー原子によってエネルギー的に深い準位が形成されることから、電子の閉じ込めが安定的であり、スピン状態の安定性が高いという特徴をもつ。

第二のアプローチは、バンドギャップエンジニアリングに基づいた「Si/SiGeヘテロ構造型」である。これは、歪みSi層をSiGe層で挟むことで量子井戸を形成し、そこに生じる2次元電子ガス(2DEG)を利用するものである。このアプローチは、電子が界面や表面から離れた位置に閉じ込められるため、電荷ノイズの影響を受けにくいという利点がある。

第三のアプローチは、現代のエレクトロニクスを支える技術を基盤とする「Si-MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) 構造型」である。Si基板表面に酸化

膜を介して金属ゲートを形成するこの構造は、現在のLSI製造プロセスそのものであり、産業界の膨大な技術インフラと知見を直接活用できる点にメリットがある。ゲート電界による閉じ込めポテンシャルを強固に形成しやすく、比較的高温での動作も確保しやすい。既存の微細加工技術との整合性が高く、将来的な大規模集積量子プロセッサを実現するための有力候補として、活発な研究開発が進められている。

3. 半導体スピン量子ビットの測定セットアップ

3.1 希釈冷凍機と配線

量子の性質は乱されやすく、熱雑音などの影響を低減する必要がある。このため、半導体スピン量子ビットは絶対零度近くの極低温環境下で動作させる。マイクロ波、パルス電圧などを印加する際にも、熱や雑音の流入を防ぐ必要がある。ここでは、半導体スピン量子ビット実験環境の一例について紹介する²³⁾。

極低温環境を実現するために、希釈冷凍機を用いる。希釈冷凍機の最上部にエレクトロニクスからの配線を繋ぐコネクタがある。希釈冷凍機の内部には複数の金属のプレートがあり、下のプレートほど温度が低く、最下層は $\sim 10\text{ mK}$ になっている。冷凍機内部のケーブルは高周波用もDC用も、室温からの熱や雑音の流入を防ぐため、フィルタや減衰器の設置、サーマルアンカーなどを各プレートで行っている。下向きスピン状態と上向きスピン状態にエネルギー分離させるのに必要な静磁場は、超伝導マグネットにより印加することができる。超伝導マグネットの磁場中心に半導体量子ビット素子を設置する。具体的には、高周波用やDC用の配線、フィルタ、グラウンド、コネクタ等を有するプリント基板に半導体スピン量子ビット素子を銀ペーストなどで接着し、素子上のパッドとプリント基板上のパッド間をワイヤボンディングにより配線する。

3.2 エレクトロニクス

次に、半導体スピン量子ビット実験に用いられるエレクトロニクスの一例を紹介する。半導体スピン量子ビット素子には多くの電極があり、動作条件を調整するためにそれらの電極にDC電圧を印加する。多チャンネル、最大電圧2-10V程度、分解能 $100\mu\text{V}$ 以下という性能を持つ安定的なDC電圧源が用いられる。電圧パルスによる制御には、任意波形発生装置が用いられる。量子ドット内が空の状態から単一電荷状態を準備するために数10 mV程度の電圧パルスが量子ドット素子に印加される必要があり、またリード(ソース・

ドレイン電極) のフェルミ面がゼーマン分離の中間に来るように制御できる数10 μV 程度の垂直分解能も必要である。熱雑音を抑えるために配置された減衰器により減衰されることを見越して、最大振幅1 V 程度、垂直分解能が14bit 程度のものが用いられる。DC 電圧とパルス電圧の合成も必要なため、バイアスティが最低温部に配置されている。バイアスティは、薄膜抵抗と温度特性の安定しているキャパシタにより構成されている。

スピン共鳴による1量子ビット操作には、操作忠実度を悪化させないように、低位相雑音(オフセット周波数100 kHz において-100 dBc/Hz)のマイクロ波信号発生装置が用いられている。実際にスピン回転操作に用いる制御波形は、スピン共鳴周波数のマイクロ波(数GHz から数10GHz)に対してIQ 変調し、オンとオフの制御や、スピン回転軸の切り替えを行っている。10 MHz 程度のサイドバンド変調を行って、マイクロ波の振幅を所望のラビ周波数に合わせるために、サンプリング時間1 ns 程度、垂直分解能が14bit 程度の任意波形発生器が用いられている。

4. 半導体スピン量子ビットの集積化

誤り耐性型量子コンピューターを実現するためには100 万規模の量子ビットが必要となる。世界中でさまざまな進展があるものの、現時点でのスピン量子ビット数から4.5 桁程度増やす必要がある。近年、筆者らも含め、大規模集積化に向けて量子ビットの2次元配置の検討⁷⁻¹⁰⁾や2次元配置された量子ドットの動作実証¹¹⁾、量子ビット動作実証の報告があった。2022年に2次元配置されたスピン量子ビットに適用可能な3次元配線がHRL から提案され¹²⁾、CMOS 標準作製プロセスにより面直ゲート電極構造が作製された。それを用いた2量子ビット操作も実証された¹³⁾。さらに、54量子ドット素子技術などを含めたさらなる大規模化の道筋も示されている¹⁴⁾。

Intel は、自社の持つ最先端のナノデバイス製造技術を用いて、スケーラブルな量子プロセッサ開発を目指している。大量生産に適した300 mm シリコンウェハ上に量子ビットが作製されている¹⁵⁾。さらなる大規模化に向けて、2026年には729量子ドット、2027年には1971量子ドットからなる量子ビット素子を作製するというロードマップを公表している。また、IMEC や、CEA-Leti もSi 量子ビットの集積化を推進している。国内では、筆者らもムーンショットプログラム等での連携研究を通じて、日立製作所や産業技術総合研究所、IMEC のプロセスラインで作製されたSi 量子ビット素

子の極低温評価を進めている^{16,17)}。

離れた場所に作製された小・中規模の量子ビットモジュールを量子チャネルで繋いで、2次元配置の量子ビットの拡張を図ろうという取り組みもなされている。量子ビットを繋ぐリンクとして、マイクロ波フォトンを通して移動させるアプローチがある¹⁸⁻²⁰⁾。あるいは、スピンを物理的に移動させ、離れた量子プロセッサ間を結合させるシャトリングというアプローチも有望であり研究開発が盛んである²¹⁻²²⁾。筆者らも日立製作所との共同研究でその基盤技術である電荷のポンピング輸送を報告した²³⁾。また表面弾性波はより長距離のスピン輸送に向けて期待され、筆者らも産業技術総合研究所およびNeel 研究所との共同研究で、高精度単一電子輸送の実証などを行ってきた²⁴⁻²⁶⁾。

Si 量子ビットの大規模化に向けて、研究開発課題は他にも数多くある。例えば、ばらつき制御のための²⁸Si の結晶成長基板の品質向上や酸化膜質の向上、界面欠陥の低減、雑音源の理解と抑制^{27,28)}、集積量子ビットへの配線技術^{29,30)}、量子ドットの自動調整^{31,32)}、拡張性のある読み出し技術^{33,34)}などである。また、99.999%を超えるような更なる高忠実度化により、1論理量子ビットを作るのに必要となる物理量子ビット数を減らせるという考え方もあり、理化学研究所からつい最近実証報告がなされている。量子ビットの高忠実度化と集積化を共に進めることが肝要である。

5. まとめ

半導体スピン量子ビットについて説明し、量子ビットの集積化についての研究開発状況を紹介した。Si 量子コンピューターは将来的な集積化が期待されているものの開発途上の段階であり、課題は多い。成熟してもなお成長著しい半導体技術を活用し、幅広い技術レイヤーの研究開発者がタッグを組み、産官学が連携しながら、また適切に国際連携を行いながら、研究開発を推進したい。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、JST Moonshot R&D Grant No. JPMJMS256H, MEXT Quantum Leap Flagship Program (MEXT QLEAP) Grant No. JPMXS0118069228, JST CREST Grant No. JPMJCR24A1, JST ASPIRE Grant No. JPMJAP25A2, 科研費(JP25K24574, JP23K17327)の支援を受けた。

文献

- 1) T. Kodera: JSAP Rev. 2402, 240101, 1 (2024).
- 2) 小寺哲夫: 応用物理 92, 713 (2023).
- 3) 小寺哲夫: 量子ドット技術の最前線, pp.76, (2025).
- 4) 小寺哲夫, 太田俊輔: 量子技術イノベーションハンドブック, pp.349-368, (2026).
- 5) J. Yoneda, *et al.*: Nat. Nanotechnol., 13, 102 (2018).
- 6) A. Noiri, *et al.*: Nature 601, 338 (2022).
- 7) N. Lee, *et al.*: Appl. Phys. Lett., 116, 162106 (2020).
- 8) L.M.K. Vandersypen, *et al.*: npj Quantum Inf. 3, 34 (2017).
- 9) M. Veldhorst, *et al.*: Nat. Commun., 8, 1766 (2017).
- 10) M. Tadokoro, *et al.*: Sci. Rep. 11, 19406 (2021).
- 11) R. Mizokuchi, *et al.*: Appl. Phys. Lett. 114, 073104 (2019).
- 12) W. Ha, *et al.*: Nano Lett. 22, 1443 (2022).
- 13) A.J. Weinstein, *et al.*: Nature 615, 817 (2023).
- 14) Members of the HRL Quantum Team: Nature 655, 1154, (2026).
- 15) S. Neyens, *et al.*: Nature 629, 80 (2024).
- 16) N. Lee, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. 61, SC1040 (2022).
- 17) T. Kuno, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., 64, 011001 (2025).
- 18) N. Samkharadze, *et al.*: Science 359, 1123 (2018).
- 19) X. Mi, *et al.*: Nature 555, 599 (2018).
- 20) F. Borjans, *et al.*: Nature, 577, 195 (2020).
- 21) J. Yoneda, *et al.*: Nat. Commun: 12, 4114 (2021).
- 22) A. Noiri, *et al.*: Nat. Commun. 13, 5740 (2022).
- 23) T. Utsugi, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. 62, SC1020 (2023).
- 24) J. Wang, *et al.*: Phys. Rev. X 12, 031035 (2022).
- 25) J. Wang, *et al.*: Nat. Nanotechnol. 18, 721 (2023).
- 26) S. Ota, *et al.*: Phys. Rev. Applied 21, 024034 (2024).
- 27) R. Matsuoka, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., 64, 076503 (2025).
- 28) R. Matsuoka, *et al.*: Appl. Phys. Lett. 128, 224002 (2026).
- 29) T. Futaya, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., 63, 03SP64 (2024).
- 30) K. Higashimomo, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., 65, 03SP19 (2026).
- 31) C. Wen, *et al.*: Appl. Phys. Express, 18, 015001 (2025).
- 32) C. Kondo, *et al.*: APL Mach. Learn., 3, 016114 (2025).
- 33) R. Mizokuchi, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., 65, 02SP03 (2026).
- 34) D. Zhang, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., 65, 05SP22 (2026).



小寺 哲夫 (こでら てつお)

2007 年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了。博士（理学）。同年同大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構特任助教。2009 年東京工業大学量子ナノエレクトロニクス研究センター助教。2010 年から 2014 年まで JST さきがけ研究員兼務。2014 年同大学大学院理工学研究科准教授, 2026 年東京科学大学工学院教授, 現在に至る。量子ドット, 量子技術, 固体物理に関する研究に従事。

走査ダイヤモンド NV プローブ顕微鏡

安 東秀

北陸先端科学技術大学院大学

〒921-8117 石川県能美市旭台 1-1

ダイヤモンド中の窒素－空孔 (NV) 複合中心は、磁場計測などの量子センサーとして有用である。この応用計測技術の一つとして、NV 中心を走査プローブ先端近傍に含有するダイヤモンドピラープローブを作製し、ナノスケールの磁気イメージングを可能にする走査 NV 中心プローブ顕微鏡がある。この走査プローブにより、局所磁気計測・イメージングが高感度で可能となり、最近では、漏洩磁場の小さい反強磁性体の磁気構造の観測が次々に報告されている。本セミナーでは、走査ダイヤモンド NV 中心プローブ顕微鏡の原理と応用例、核スピンや電子スピンの局所計測など、今後の展望について紹介する。

Key words: Diamond, Nitrogen Vacancy Center, Scanning Probe Microscope

1. はじめに

ダイヤモンド中の窒素－空孔 (NV) 複合中心は、スピン三重項状態を有し、光学的磁気共鳴法(ODMR)により、単一の NV 中心の磁気共鳴信号の計測が室温・大気中で紹介されて以来、磁場・電場・温度センサーとしての利用が様々に開発されてきた¹⁾。その中の一つの応用に走査 NV 中心プローブ顕微鏡があり、単一、或いは複数の NV 中心を先端に含有するナノピラー形状のダイヤモンドを走査プローブ顕微鏡の先端に取り付けて原子間力顕微鏡プローブとしても動作させながら試料表面を走査することにより、表面形状と磁気情報を同時に計測・イメージングする走査プローブとして用いることが可能となる (図 1)^{2,3)}。

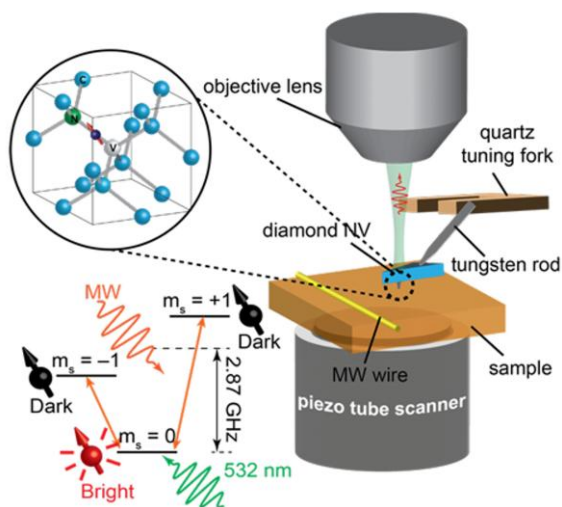


図 1. 走査 NV 中心プローブ顕微鏡。

2. 走査 NV 中心プローブ

2.1 プローブ作製法

NV 中心プローブは、通常はフォトリソグラフィーと電子線リソグラフィー法を用いて作製され、単一 NV 中心を含有するプローブも市販されている^{2,3)}。我々は、レーザーカッティングと集束イオンビーム法を組み合わせたダイヤモンドピラー (複数の NV 中心 (30 - 50 NV) を含有する NV 中心プローブ) 加工法を加工自由度の高い手法として考案している³⁻⁵⁾。

2.2 DC・AC 磁場計測・イメージング

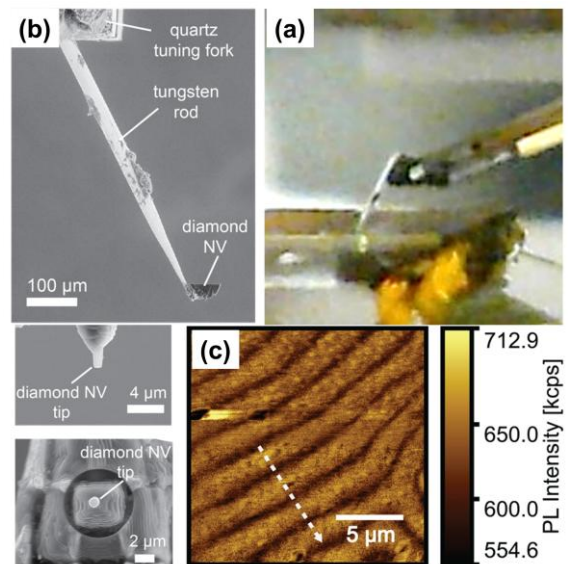


図 2. 水晶振動子型 AFM プローブ((a))先端に取り付けられたダイヤモンドピラープローブ((b))と観測された磁性体の磁気ドメイン構造((c))⁶⁾。

磁気計測の手法として、まず、NV 中心の ODMR 信号強度が DC 磁場下でゼーマン分裂を示すこと、磁場と NV 中心軸との角度により減光するなど、蛍光強度が漏洩磁場に依存して変化することを利用して、磁性体の磁気ドメイン構造 (図 2) や電気回路中の磁場分布のイメージングが可能である²⁾。

さらには、NV 中心を用いた AC 磁場計測も可能である。特に、核スピンの歳差運動に相当する MHz 帯、電子スピンの歳差運動に起因する GHz 帯の周波数の AC 磁場を計測することにより、NV 中心の周囲の核スピン、電子スピンをナノスケールで計測可能となる。これらの方法を走査 NV 中心プローブに応用することにより、将来的には半導体中試料中の欠陥スピン状態や、分子中の核スピンや電子スピン状態をナノスケールで計測・イメージングできると期待される。

本セミナーでは、この中で、電子スピン計測・イメージングに向けた取り組みについて紹介する。図 3 には単一 NV 中心を含有する市販の走査 NV 中心プローブ (プローブ表面からの NV 中心深さ約 10 nm) を用い、まず、プローブ-試料間距離が離れた状況で (図 3(a))、単一 NV 中心により電子スピン信号を計測して

得られたスペクトルを示す (図 3(b))。この際には、電子-電子二重共鳴法 (DEER) 法と呼ばれるパルス計測手法を用いている^{6,7)}。得られた共鳴ディップ信号 (図 3(b)) は、NV 中心プローブ先端に存在するダングリングボンドなどの常磁性スピン種による信号であると推測される。続いて、常磁性電子スピンの表面に存在する試料を用意し、NV 中心プローブを近接させた際に、信号強度の増加が観測された (未発表)。上記において、プローブが試料と離れている際と近接する際の DEER 信号強度の差分を計測することで、試料表面の電子スピン密度に依存したイメージングが得られると期待され、この電子スピンイメージングの試みについても紹介する。

3. まとめ

走査 NV 中心プローブ顕微鏡について、プローブの作製法について解説し、DC 磁場・AC 磁場計測の原理、核スピン、電子スピン計測・イメージングの最新の研究動向について紹介する。

文献

- 1) R. Schirhagl, et al., Annu. Rev. Phys. Chem., **65**, 83 (2014).
- 2) A. Finco and V. Jacques, APL Mater. **11**, 100901 (2023).
- 3) 研究紹介、“ダイヤモンド走査 NV 中心プローブ顕微鏡”，安 東秀，貝沼 雄太，Prananto Dwi, 表面と真空, 2026 年 **69** 巻2 号 p. 75-79
- 4) Y. Kainuma, et al., J. Appl. Phys., **130**, 243903 1-7 (2021)
- 5) D. Prananto, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **65**, 130904 (2026).
- 6) J. Du, et al., Rev. Mod. Phys. **96**, 025001 (2024).
- 7) B. L. Dwyer, et al., PRX Quantum **3**, 040328 (2022).

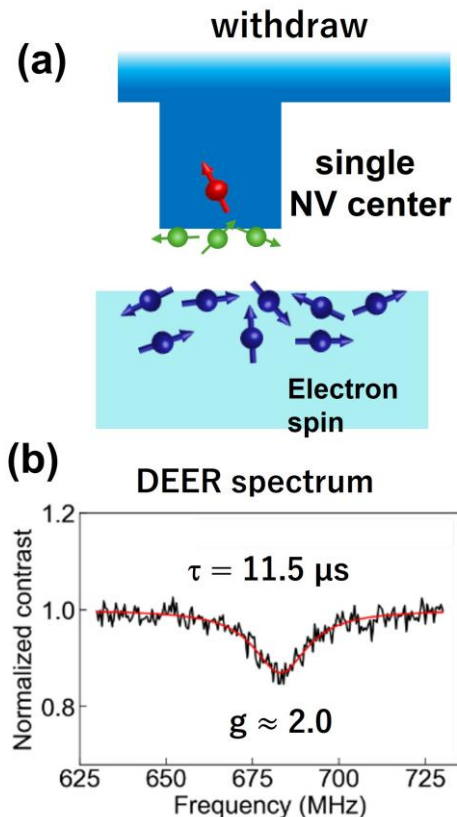


図 3. 試料に近接していない状況((a))で NV 中心プローブより計測された電子スピン (DEER) 信号((b))



安 東秀

2000 年豊田工業大学工学部大学院博士後期課程極限材料専攻修了。博士 (工学)。同年日本学術振興会特別研究員。2003 年科学技術振興機構特別研究員。2006 年東京大学物性研究所研究員。2006 年科学技術振興機構さきがけ研究員。2010 年東北大学金属材料研究所助教。2013 年独立行政法人理化学研究所。2015 年。現職。ダイヤモンド NV 中心を用いた量子センシング・イメージングに関する研究に従事。

冷却原子量子シミュレーター

高橋義朗

京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻
〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

概要

本講演では、レーザー冷却の手法により達成された超低温の中性原子を用いた凝縮系物理の量子シミュレーションに関する最近の我々の研究を紹介するとともに、そうした研究を通して開発した冷却原子に対する量子制御・量子測定技術の応用展開した、中性原子方式量子計算機の開発についても紹介する。最後に薄膜・表面分野とレーザー冷却分野との接点についても触れる。

Key words: quantum simulation, quantum computer, ultracold atoms

1. はじめに

凝縮系物理学において、異方性超伝導や遍歴磁性などの強相関系を記述する重要な模型の一つとして、格子点内での電子間相互作用項と電子の格子点間のトンネリング項の2つの項からなるハバード模型が知られている。フェルミハバード模型をより深く理解することが重要であると認識されている一方で、負符号問題として知られている困難さのため古典計算機による古典数値シミュレーションが有効とならない系である。この強相関量子多体系に対して、レーザー冷却された超低温の中性原子を用いたアプローチが近年世界中で注目を集めている。フェルミ縮退気体やボース・アインシュタイン凝縮などの超低温の量子縮退原子気体を光格子と呼ばれる周期ポテンシャルに導入した系を用いて実験的に解答を提供する量子シミュレーションの研究が創出され、現在盛んに研究されている。ここで、制御性の高い量子多体系を用いて別の興味ある量子多体系をシミュレートすることを、ファインマンに倣って量子シミュレーションと呼ぶことにする。光格子中の超低温原子気体の系は、固体中の電子系以上によくハバード模型で記述されることが分かっており、その量子制御の豊富さから、理想的な量子シミュレーターとして注目を浴びている¹⁾。

この光格子系は固体と比べると、格子欠陥や不純物がないという非常にクリーンな系で、かつ高度で精密な制御が可能である。ハバードモデルにおける重要な

パラメータである隣接サイト間のホッピングやオンサイト相互作用の大きさは、光格子を形成するレーザー光の強度を変えることで精密に制御することができる。ここで光格子のポテンシャルの深さは精密にコントロールすることができる。また、ある種の原子は原子間の相互作用を磁場により、大きな斥力から大きな引力まで自由自在にコントロールすることが可能で、これをフェッシュバハ共鳴と呼んでおり、こういう特徴が冷却原子系には存在する。さらに多様な系を対象とすることができ、量子統計性の違うボース粒子、フェルミ粒子、また、その混合系を対象にすることができ、光格子の配置も3次元、2次元、1次元も可能で、様々な光格子を光技術と組み合わせることで実装することが可能である。実際に代表的なものとして、ハニカム格子、カゴメ格子、三角格子、リープ格子を光格子で実装したことが報告されている。このような多様な格子を実現できるのも、光格子系の大きな特徴と言える。**図1**に光格子量子シミュレーション研究の動向をまとめたものを示す。

こうした量子シミュレーションの研究を通じて、超低温原子の極めて高度な制御技術が蓄積されてきた。この背景を受けて、最近、こうした研究領域は冷却原子型量子計算機の研究へと応用展開されている。空間光変調器などにより任意の2次元及び3次元光配列を生成し、そこに単一の原子を導入することが可能になっている。これを光ピンセットアレイと呼んでいる。この単一原子の内部自由度を利用することで、長い

Yoshiro Takahashi. Graduate School of Science, Kyoto University (Oiwakecho, Kitashirakawa, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan). E-mail: takahashi.yoshiro.7v@kyoto-u.ac.jp

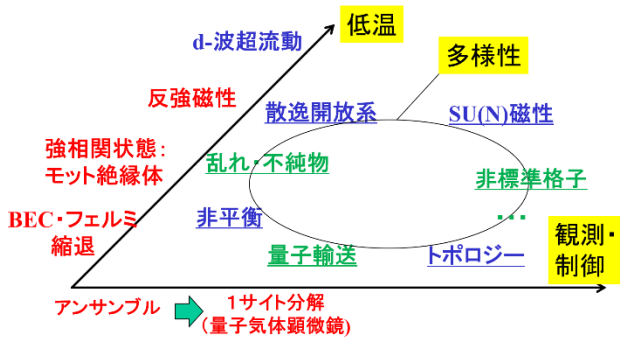


図1 光格子量子シミュレーションの研究動向。大きな方向性として、1) (非自明な量子相の実現のための) 原子集団の温度の低温化、および、2) (量子気体顕微鏡に代表される) 原子の観測・制御の高度化、がある。さらに、3) 多様で興味深い研究テーマ、も大きな特徴であるといえる。

コヒーレンスを有した量子ビットを実装することが可能となっている。現在では、1量子ビット及び2量子ビットゲート操作ともに99.9%以上の忠実度が報告されている。また、光で原子を閉じ込めているため、固体系でのいわゆるワイヤー問題は存在しない。そのため、量子ビット数の拡張性に優れていることが利点となっている。現在では量子ビット数は10,000を超えたものが報告されている。さらに空間光変調器や音響光学変調などの光制御装置を用いることで、光ピンセットアレイにトラップされた原子を空間的に自由に移動されることができる。これは、量子ビット間のいわゆる全結合が可能であることを意味する。こうした技術を駆使して、表面符号その他の量子エラー訂正符号の実装が行われている。

我々は、中性原子の中でも、多くのユニークな特徴を有するイッテルビウム(Yb)原子に着目して、量子シミュレーション及び量子計算機の開発研究を行っている。

2. 中性原子気体のレーザー冷却・光トラップ

各論に入る前に、中性原子気体のレーザー冷却・光トラップの手法について簡単に紹介したい。いろいろなレーザー冷却の手法がある中で最も標準的に、実験の最初の段階として行われるのがドップラー冷却法である。原子に共鳴する周波数よりも少し低めに設定したレーザー光を6方向から照射する。このとき、原子が例えばある方向に動いていた場合には、ドップラー効果により、原子はその運動方向と反対側から照射されるレーザー光の周波数は高く感じる。レーザー光の

周波数は前術の通り、元々低く設定していたので、この場合は、共鳴条件により近くなることになる。一方で、原子の運動と同じ向きからのレーザー光の周波数は元々低く設定してあるのが、ドップラー効果でさらに低くなるということで、共鳴条件から外れていたものがより外れることになる。これは原子がどの方向に運動していても同じで、結局、どちらに原子が動いていても、反対側から来るレーザー光がより共鳴条件に近くなるという状況になる。レーザー光は運動量も持っているので、吸収に伴ってレーザー光から運動量を受け取り、これにより原子は減速される。

どのくらいの温度まで冷却できるかは、上述の冷却の機構と、ランダムな吸収および自然放出の過程に伴う加熱の機構とのバランスで決定され、その温度をドップラー限界温度と呼んでいる。ここで、 T_1 を励起状態の寿命とすると、この $2T_1$ 分の1というエネルギースケールを温度に焼き直したものがドップラー限界温度といわれるもので、典型的な例として、アルカリ原子のナトリウム原子のD線の場合はドップラー限界温度が240マイクロケルビン、イッテルビウム原子の寿命の長い状態に関係した吸収線を使うと、さらに2桁ぐらい低い温度である4.4マイクロケルビンの温度が得られる。

このように、ドップラー冷却法は非常に強力な手法であるが、原子集団を空間的に閉じ込めて高密度の状態にする機構は存在しないため、単独で用いられることはほとんどなく、磁気光学トラップという手法に内在された形で利用されている。この磁気光学トラップでは、両側からレーザー光を照射するという配置はドップラー冷却と同じだが、さらにここにコイル等を使い、3次的に空間的に変化する磁場を印加する。それによりドップラー冷却と組み合わせり、原子を空間的に閉じ込めることが可能になる。

このような低温の原子集団に対しては、光だけで原子を閉じ込めることが可能になり、光トラップと呼ばれている。その光を閉じ込めるポテンシャルは印加したレーザー光の強度に比例し、原子の状態であるとか、加えているレーザー光の周波数によって決まる。例えば、レーザー光をレンズで一点に焦点を結ばせると強度の極大ができるので、その周りに原子を閉じ込めることが可能である。光の定在波を3次的に作ってあげると、原子は光の強度の強弱を周期的なポテンシャルとを感じる。これは光でできた格子状のポテンシャルであるため、光格子と呼んでいる。

最近では、量子シミュレーション、量子コンピュータ

への応用として、空間光変調器と呼ばれる光学素子を用いてほぼ任意の空間パターンの位相を入射レーザー光に印加することが可能になり、これと対物レンズとを組み合わせることで、強度の極大を2次元(さらにフレネル位相を印加することで3次元)的に配列したものを生成することが可能になっている。これを光ピンセットアレイと呼んでいる。一つ一つの強度の極大のところに単一原子を閉じ込め、これを量子ビットとして利用することが、量子シミュレーション、量子コンピュータや量子計測への応用で盛んに研究されている。

上述の通り、光トラップされたレーザー冷却原子の系は様々な応用研究に利用されているが、光格子中の原子を用いた量子シミュレーションの研究では、熱揺らぎのほとんどない、ボース・アインシュタイン凝縮体やフェルミ縮退などの量子縮退領域まで冷却する必要がある。大抵の場合、これはナノケルビン台の超低温が必要となる。そのため、レーザー冷却で達成された温度からさらに3桁以上、原子集団の温度を冷やす必要がある。これは蒸発冷却と呼ばれる手法により達成される。例えば、光トラップ中に原子集団を閉じ込めると、この中で原子は衝突を繰り返して、熱平衡状態になる。このトラップは有限なので、あるエネルギー以上のものはトラップの中に残れず、トラップから逃げていく。これを“蒸発”と呼んでいる。この“蒸発”した後の残った原子集団の平均エネルギーは、“蒸発”が起こる前より低くなっている。温度で表現すると低温であるということに相当する。トラップの深さを徐々に下げていくことによって、最終的にナノケルビン以下の原子温度の状態が実現され、例えば、ボース・アインシュタイン凝縮相転移を起こして、量子気体と呼ばれる新しい物質の状態に相転移する。さらに冷却を進めていくことで、ほとんど純粋なボース・アインシュタイン凝縮体のみの状態を準備することが可能で、上述の光格子量子シミュレーションをはじめとした様々な研究に応用されている。

3. Yb 原子光格子量子シミュレーション

我々はYb原子のユニークな特徴に着目した光格子量子シミュレーションの研究を行ってきた。最近の研究では、SU(N)量子磁性、開放量子多体系、量子輸送・不純物、非平衡・非エルゴードダイナミクス、トポロジカルポンピング、平坦バンド・非標準格子、量子気体顕微鏡の開発、などに取り組んできた。さらに、ごく最近では、アクティブマターを量子系に拡張する新

しい試みを始めている。本稿では、このうち、SU(N)量子磁性及び開放量子多体系の研究について、以下で詳しく解説する。

3.1 Yb 原子光格子量子シミュレーション

標準的な2成分系のフェルミハバード模型に対して、スピン $N(>2)$ 成分を持つフェルミ粒子に対するSU(N)フェルミハバード模型はこれまで主に理論研究として注目を集めてきた。標準的な2成分系に比べて計算量が大幅に増大してしまうこの系では、古典数値シミュレーションは極めて困難であるため、超低温の原子量子シミュレーターが大きな威力を発揮する問題となっている。さらに、2成分系では理論的に期待されているのは単純な反強磁性スピン相関である一方で、SU(N)フェルミハバード模型では、隣接および長距離にわたる新奇なスピン相関が理論的に予言されている。有限温度でのホールをドーピングした系の振舞いや、スピンインバランスを導入した系の振舞いは、理論的予言すら困難な問題となっているが、2成分系でのフェルミハバード模型で発現が期待されている高温超伝導・超流動からの類推で、SU(N)フェルミハバード模型でも同様な高温超伝導・超流動等の新奇な振る舞いが期待されている。

我々は、Yb原子のフェルミ同位体 ^{173}Yb が核スピン $5/2$ を有している一方で、核スピンと電子スピンのデカップルしているため、異なる核スピンを有する原子間の相互作用は核スピンに依存しない。これはすなわちSU(N=6)スピン対称性を理想的な形で実現していることを意味する。我々はこれに着目し、SU(6)フェルミハバード模型の量子シミュレーションの研究を推進してきた。これまでに、短距離、すなわち隣接サイト間でのSU(N)量子磁性の振舞いを実験的に明らかにした。特に、これまで液体・固体ヘリウムの系で知られていたボメランチュク冷却として知られる冷却機構により、冷却原子フェルミハバード模型の最低温度を実現することに成功している²⁾。

3.2 開放量子多体系

これまで紹介してきたように、超高真空中で光によって閉じ込められた光格子中の超低温原子という系は、固体のような(ハバードモデルなどで記述される強相関電子系などの)着目する系が、格子振動や不純物などの影響を受けている状況とは異なり、環境から

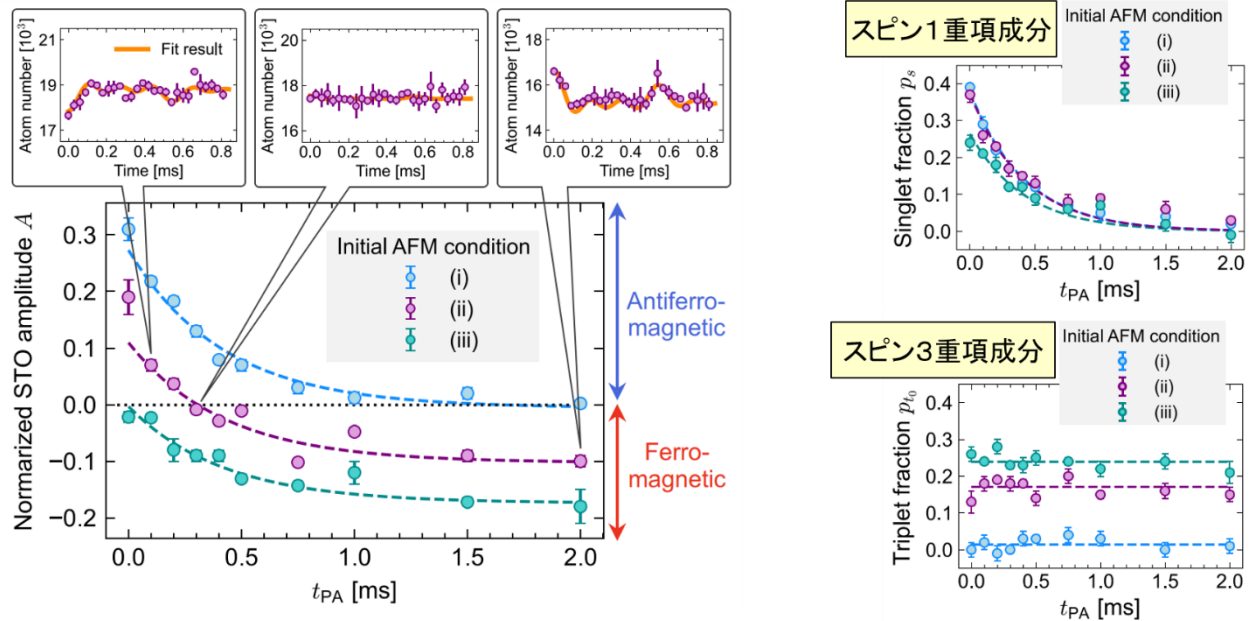


図2 散逸の導入による量子磁性の反転の観測。(左) 隣接量子磁性(スピン相関)を特徴づける観測量であるST0(1重項・3重項振動)の振幅を、散逸を加えた時間(t_{PA})の関数として示した。3つの異なる初期条件での実験結果を同時にプロットしている。散逸を印加する前および印加した当初は、反強磁性スピン相関を示していたものが、散逸の印加により次第に強磁性スピン相関に転移していく様子を示している。(右) 上はスピン1重項成分、下はスピン3重項成分の、散逸印加による変化を示している。散逸によって、スピン1重項成分が選択的にロスとなっているのに対して、スピン3重項成分は変化がないことがわかる。

孤立した極めて理想的な閉じた量子多体系である。したがって、こうした特徴を生かして、孤立量子系の熱化の問題等が研究されているのはごく自然な流れとして理解できる。こうした孤立量子多体系の研究を行ううえでは、散逸や擾乱といったデコヒーレンスが混入するのはコヒーレントな量子ダイナミクスを阻害してしまうので、もっての外であり、極力最小化することが望まれる。一方で、あえて、外部から散逸や擾乱を、極めてよく制御された状態で、導入することで、開放量子多体系の非自明な現象を明らかにする恰好の研究対象となりうる。

我々は、最近、光格子中の超低温フェルミ原子の系に、制御された2体の散逸を導入することにより、反強磁性から強磁性への転移を観測することに成功している³⁾。通常、超低温の原子系を光格子中に導入した場合には反強磁性的なスピン相関が実現される。ここに、二つの原子を対となってロスさせるようなレーザー光をあえて照射する。図2に示す例が、最初は反強磁性的なスピン相関を持っていたものを、制御された散逸を導入することにより、強磁性的なスピン相関に変換させることが可能であることを示したものである。これは言い方を変えると、超低温の正のスピン温度の状態を散逸を導入することにより負の温度の状態

を実現したというのに対応する。このような非自明な現象を量子シミュレーションの研究として実現した。これはシミュレーションと言っているが、固体の系でこのような研究は期待できないので、シミュレーションを超えて、新しい量子多体系の現象を光格子系で研究できた例であるといえる。

散逸(ロス)とともに、利得(ゲイン)も開放系を特徴づける重要な要素である。古典系のフォトニクスの場合は、ゲインもロスと同様に、よく制御された状態で導入することが容易に実証されているが、量子系ではこれまでゲインに関する実験的な研究は報告されていなかった。ごく最近、我々は、原子の内部状態を人工の格子点に対応させる「人工次元」というアプローチにより、量子系、特に量子気体であるボース・アインシュタイン凝縮体に対して、制御されたゲインの導入“ゲインエンジニアリング”に成功した。より具体的には、ルビジウム原子の基底状態の超微細構造準位を用いて、マイクロ波の印加により、トポロジカル端状態を準備して、前述の蒸発冷却を施すことにより、特定のトポロジカル状態でボース凝縮を誘起されることに成功した。別の言い方をすると、量子気体へのゲインを制御することにより、特定のトポロジカル原子レーザーの発振に成功した、ということに相当する。

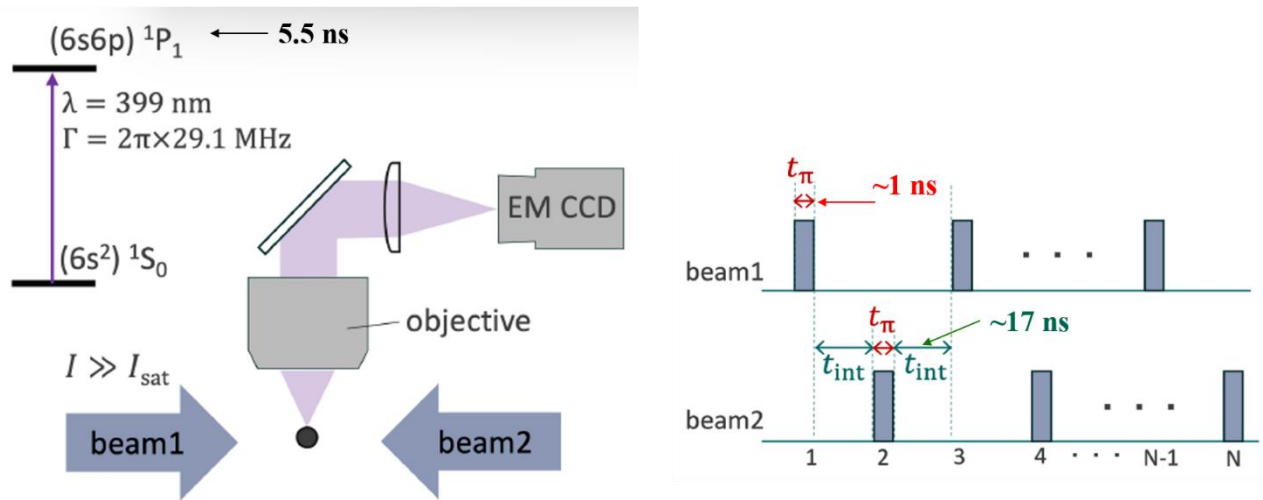


図3 高速かつ最小非破壊の原子量子ビット読み出し法。(左) 実験配置図。光ピンセットアレイにトラップされた原子に対して、1次元方向の両側から原子の吸収線に共鳴する光（プローブ光）を照射し、それによって引き起こされる原子からの発光を対物レンズを通して CCD カメラに結像する。量子ビットとして、原子の基底状態（ $|0\rangle$ ）と準安定状態（ $|1\rangle$ ）からなる光時計遷移量子ビットを考えたときには、発光が観測された場合は $|0\rangle$ 、観測されなかった場合は $|1\rangle$ 、というように量子ビットの状態が読み出される。(右) 本手法のプローブ光のパルス列。それぞれのプローブ光は、コヒーレントな π パルスに相当した短いパルスである。二つの対向するプローブ光ビーム 1 と 2 は、同時に照射されず、片方が照射されてから、17ns という寿命 5.5ns の約3倍程度の時間間隔を経て、もう一方の光ビームが照射される。

4. Yb 原子型量子計算機

中性原子方式量子計算機に使われる原子種は研究の初期段階では、レーザー冷却の研究で標準的に対象とされてきたアルカリ原子が用いられてきた。しかし、最近、希土類原子のYb原子が様々な有利な特徴を有することが判明し、急速に研究が進展し、注目を集めている。例えば、核スピン1/2を有する ^{171}Yb 原子の場合、電子基底状態では、上述の通り、核スピン自由度が、電子のスピンおよび軌道角運動量とデカップルしているため、極めて堅牢な量子ビットとして利用することが可能であることが大きな利点となっている。実際、10秒を優に超える長いコヒーレンス特性が報告されている。さらに、放射寿命が10秒以上の準安定状態が複数存在することも量子ビット操作の観点で大きな利点を提供する。例えば、基底状態との間のミリヘルツ程度の超狭線幅な時計遷移を用いることにより、基底状態の核スピン量子ビットを核スピン選択的に、準安定状態に移送、すなわちシェルビング、することで、基底状態の核スピン量子ビットの非破壊読み出しが可能となる。さらに、Yb原子の場合は、長寿命の準安定状態から高エネルギー状態で大きな相互作用を及ぼすリドベルグ状態への励起について、単純に1光子励起が可能のため、2量子ビット操作に関して高い忠実度の励起が可

能となり、結果として高忠実度の2量子ビットゲートが実現されている。

我々は、これまでに培ったYb原子量子シミュレーション技術をもとに、現在、Yb原子の豊富な内部自由度及び多様な同位体の存在に着目して量子計算機の開発研究を展開している。まず、長いコヒーレンスの核スピン量子ビットを有する ^{171}Yb 原子と非破壊測定を可能にする基底状態と準安定状態間の光時計遷移量子ビットを有する ^{174}Yb 原子の2種類の同位体からなるハイブリッド原子アレーの系を実装することに成功した⁴⁾。これは表面符号などの補助量子ビットを用いた量子エラー訂正符号の実装において有利と考えられる。さらに、磁場に感度のある準安定状態を駆使した3次元原子アレーの層選択制御に成功した⁵⁾。これは、量子ビット数を拡張する上で有利であるとともに、3次元の量子エラー訂正符号を実装するうえで重要な基盤技術となる。さらに、核スピン5/2を有する ^{173}Yb 原子を用いてスピン猫量子ビットの実装に成功した⁶⁾。特にこのスピン猫量子ビットがバイアスノイズを有することを確認した。これによりエラー閾値を緩和することが期待される。

さらに、ごく最近、量子ビットの読み出し時間を大幅に短縮するとともに読み出しに伴う加熱を最小化する手法の開発に成功した⁷⁾。この実験配置を図3に示す。

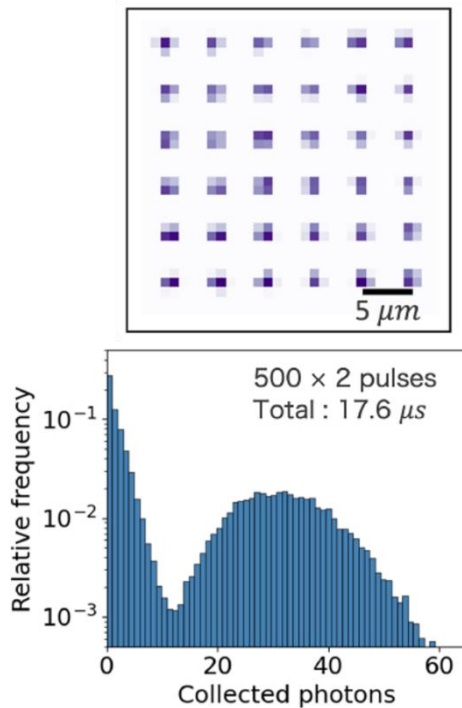


図4 高速かつ最小非破壊の原子量子ビット読み出しの結果。(上) 間隔5ミクロンの6×6の2次元アレイの光ピンセットにトラップされた単一原子からの発光の画像。(下) 原子からの発光をCCDカメラで検出した光子数分布のヒストグラム。原子のある場合とない場合が明瞭に分離されているのがわかる。

通常、原子の量子ビットに読み出しでは、基底状態と短寿命の励起状態の2つの状態間でのみ励起及び自然放出による緩和が起こるような遷移、いわゆる“閉じた”光学遷移、を用いて、共鳴のプローブ光を繰り返し吸収させ、そして自然放出させる。これを繰り返し多数の光子をCCDカメラなどにより検出することにより、2次的に配列された多数の単一原子のアレイの測定を一挙に行う。ただし、原子の有無を高い忠実度で識別するためには、数10光子をCCDカメラで検出する必要があり、さらに、光の吸収と放出に伴う加熱を抑制するために、プローブ光は弱励起の条件で照射し、同時に冷却光を照射する。また、集光効率は通常数%以下の限られたものであるため、この読み出しのためには数ミリ秒から数10ミリ秒程度を必要とする。これは、量子誤り訂正において多数回の量子ビット読み出しを必要とするため、この過程を律速してしまう。したがって、これは冷却原子方式の大きな問題と認識されてきた。これに対して、我々は、プローブ光パルスのコヒーレントな励起を行い、さらにその照射方向を交互に繰り返し反転させるという手法によ

り、20マイクロ秒以下の高速な読み出し手法を開発することに成功した。図4にその結果を示す。単一原子の存在に関する識別忠実度は99.89(5)%と十分に高い値が得られている。これは、これまで冷却原子方式量子計算の弱点とされてきた課題を克服する手法となっており、本分野の大きな前進といえる。さらにコヒーレントに原子励起を行う本手法では、吸収される光子数は確定している。そのため、従来のインコヒーレントな励起に伴う吸収光子数の揺らぎが存在しないため、光子の反跳に伴う加熱は、自然放出過程のみになり、従来法に比べて約半分程度に抑えられることも実験的に確認しており、これも大きな利点であるといえる。

5. 薄膜・表面分野への期待

最後にレーザー冷却分野からの薄膜・表面分野への期待について述べてみたい。

まず、本稿でも紹介したように、我々は最近、新たな光格子量子シミュレーションのテーマとして、量子アクティブマターの研究を進めている。その第一歩として、ASEP (= Asymmetric Simple Exclusion Process, 非対称単純排他過程) と呼ばれる現象を、1次元光格子中のボース凝縮体を用いて量子シミュレーションする実験の第一段階に成功した。このASEPは、交通渋滞の最も単純な可解モデルとして知られている一方で、KPZ (Kardar-Parisi-Zhang) 普遍性クラスの揺らぎが現れる系であることも知られていて、これは、界面成長の物理と密接に関係している。我々の系では、量子性を導入することも可能であり、薄膜・表面分野との様々な接点や問題提起が期待される。

エルビウムやツリウムなど融点の高い原子種をレーザー冷却実験で用いる場合は、数10 cmにもなる原子オーブンをを用いて高速の原子ビームを発生させ、さらにゼーマン減速器というこれも数10 cmにもなる装置で減速させることが必要となっている。これに対して、電着等の技術により表面に付着させられた原子をレーザーによって脱離させる技術は、LIAD (レーザー誘起原子脱離) と呼ばれ、レーザー冷却のための簡便かつ効率的な原子源として以前から注目を集めている。ただし、そのメカニズムについては依然として謎が多く、脱離がレーザー光による基盤の加熱によるものなのか、化学結合をレーザー励起によって切断するものなのか、ほとんどわかっていないといっても過言ではない。表面にどのように原子が吸着されるかも条件に大きく依

存することが予想され、統一かつ定量的な考察は現在のところほとんどされていない。これも薄膜・表面分野との協力により、レーザー冷却用原子源の新たな可能性が拓けるかもしれない。特に、放射性同位体などは、その原子数が限られている場合は多く、電着表面基盤などからのLIADによるものが唯一であると考えられる場合もあり、薄膜・表面分野からの知見は極めて重要であるといえる。

はじめに、現在では量子ビット数は10,000を超えた原子アレイが報告されている、と述べた。この実験では、メタサーフェスと呼ばれる、ナノメートル規模の構造をもったmmからcm程度の大きさの表面実装デバイスが、光ピンセットアレイの生成に用いられている。まず原子アレイの配置をあらかじめ決め、それを実現するためのナノ構造を設計するというものである。量子ビット数の大規模化は量子コンピュータ実現のための重要な課題であり、ここに、薄膜・表面分野との重要な接点があるといえる。我が国が得意とする薄膜・表面分野の技術が、冷却原子型量子コンピュータの開発において我が国の優位性をもたらすとしたら、我が国の大きなチャンスといえるのではないだろうか。

謝辞

本講演で紹介する内容は京都大学の量子光学研究室のメンバー及び理論共同研究者との共同研究に基づいている。

文献

- 1) F. Schäfer *et al.*, Nat. Rev. Phys. **2**, (2020) 411.
- 2) S. Taie *et al.*, Nat. Phys. **18**, (2022) 1356.
- 3) K. Honda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **130** (2023) 063001.
- 4) Y. Nakamura *et al.*, Phys. Rev. X. **14** (2024) 041062.
- 5) T. Kusano *et al.*, Phys. Rev. Research. **130**, **5** (2025) 12345.
- 6) T. Kusano *et al.*, arXiv:2602.22883.
- 7) R. Yokoyama *et al.*, arXiv: 2605.24175.

高橋 義朗(たかはし よしろう)

1992 年京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻修士 課程修了。京都大学博士(理学)。以来、量子シミュレーション、量子計測、量子計算に関する研究に従事。



早稲田大学 理工学術院 ナノ材料情報学研究室

渡邊 孝信

早稲田大学 理工学術院 基幹理工学部 電子物理システム学科

〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

<https://www.watanabe-lab.jp>

当研究室は 2009 年 4 月の創設以来、未来の IoT/AI 時代を支えるシリコン・エレクトロニクスの研究を、計算機シミュレーションと実験の両輪で推進してきました。研究テーマは、Si 製マイクロ熱電デバイスの開発、絶縁膜の古典分子動力学シミュレーション、羽ばたき飛行ロボットの制御と多岐にわたります。半導体の研究室で飛行ロボットまで手掛けることを意外に感じられるかもしれませんが、未来のシリコン・エレクトロニクスの発展を見据え、多くの学生を擁する私学の研究室として果たすべき役割を熟考した上で設定した研究課題です。本「談話室」への寄稿は 2014 年 9 月号に続いて 2 回目となります。本稿では、この 10 年間の主な取り組みについて紹介します。

Keywords: Silicon, Thermoelectric device, Molecular Dynamics, Dielectric thin films, AI robotics

1. はじめに

図 1 は、筆者が毎年、所属学科の研究室配属説明会で学生たちに示している研究室のグランドビジョンです。サイバー空間と現実空間が融合する人間中心の豊かな社会「Society 5.0」では、どんなデバイスが求められるのか。また、それを 20～30 年後に実現するには、現在どのような要素技術を開発すべきなのか。そのような観点からバックキャスティングで研究テーマを設定しているとし、その位置付けと活動内容を紹介しています。このストーリーはわかりやすいと学生たちから好評を得ています。

ビジョンの一つがスマート・ダストです。これは、環境に無害な素材で構成された砂粒大のセンサ群によって多点センシングを行うシステムですが、その実用化を阻む最大の課題は電源です。熱や振動、電波など環境中のエネルギーを電力へ変換する環境発電技術が必要となります。当研究室では、シリコン LSI 製造技術を活用し、熱エネルギーを電力へ変換する環境発電デバイスの研究開発を進めています。

一方、センサ自体が移動能力を持つなら、電力供給に関する制約を大幅に緩和できます。当研究

室では、トンボのような高度な飛行能力を備えた究極の小型無人飛行体の実現を目指し、羽ばたき飛行ロボットの AI 制御に関する研究を進めています。

2. 主な研究成果

2. 1 シリコン熱電デバイスの開発

2008 年に Si ナノワイヤがすぐれた熱電変換性能指数 (ZT) を示すことが発見されて以来、多くの研究機関で Si を使った熱電デバイスの開発が行われるようになりました。当研究室でも、微細化・高集積化によって単位面積当たりの発電性能を向上させるという、ムーア・デナード則と同様のスケーリング戦略に基づき、Si-CMOS プロセスで製造できる集積熱電デバイスの開発に取り組んでいます[1]。

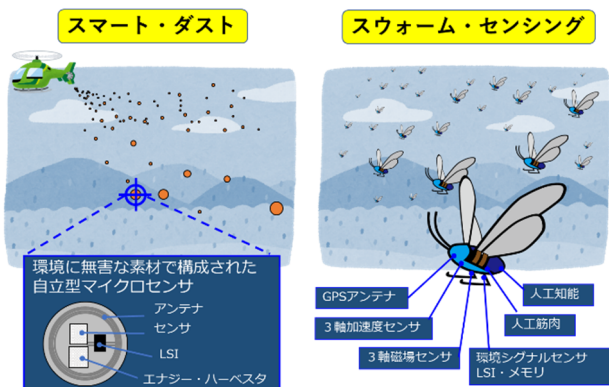


図 1 筆者の研究室が目指す未来技術

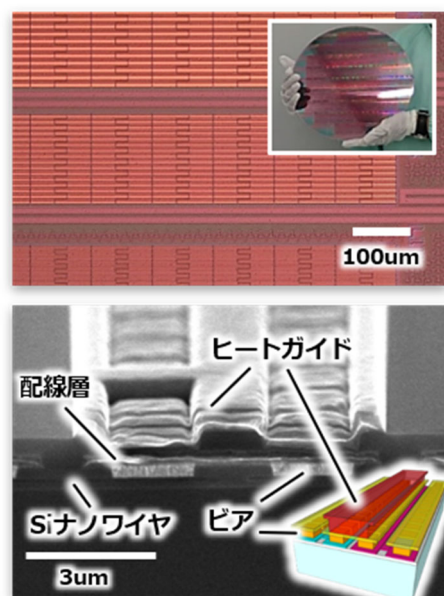


図 2 開発したシリコン熱電デバイス

本研究は 2015 年に発足した JST-CREST・さきがけ複合領域「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」領域で採択いただき、また産業技術総合研究所のスーパークリーンルームの支援もいただいて、2022 年に図 2 に示す集積熱電デバイスを完成させることができました。2026 年時点で Si 熱電デバイスにおける歴代 2 位の発電密度を達成しています[2]。ここまで来たらチャンピオンデータを狙いたいところです。現在、寄生抵抗を抑制するデバイス構造の最適化や、熱電性能の高いシリサイド化合物の導入によって、さらなる性能向上を目指しています。

2. 2 HfO₂ 強誘電体薄膜のシミュレーション

エッジ AI では省電力化が必須となるため、不揮発メモリを用いたインメモリコンピューティングなど、消費電力を劇的に抑える次世代技術に期待が寄せられています。中でも HfO₂ 系強誘電体を MOSFET に組み込む FeFET は、CMOS デバイスと親和性が高く、高速かつ低消費電力動作が可能となるため、次世代 AI 用デバイスの本命候補として、近年注目が高まっています。

当研究室では、HfO₂ 系の機械学習ポテンシャルを開発し[3]、数万原子規模の大規模分子動力学シミュレーションで直方晶 HfO₂ の強誘電体特性の再現に成功しました(図 4)。第一原理計算では再現が難しい、結晶粒界や異種材料との界面、欠陥や不純物原子などを含むような大規模系のシミュレーションも可能となるため、本手法を駆使して、喫緊の課題となっている wake-up/fatigue のメカニズム解明につなげたいと考えています。

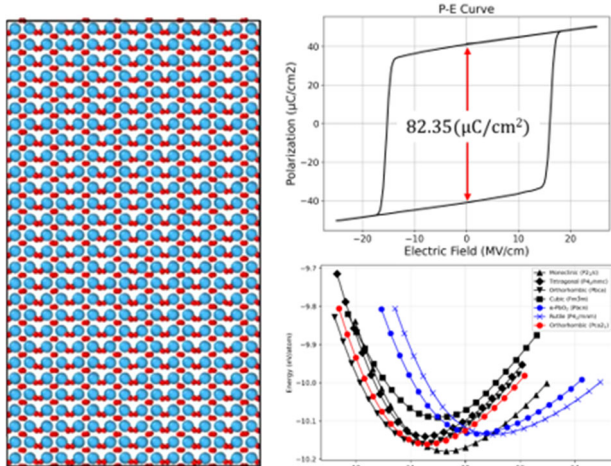


図 3 古典 MD による直方晶 HfO₂ の強誘電体特性シミュレーション[3]

2. 3 羽ばたき飛翔ロボット

当研究室では 2016 年から、機体の重心を飛行中に移動することでホバリング飛行と水平飛行をシームレスに切り換えられる羽ばたき型飛翔ロボット「WiFly」を開発してきました[4]。図 4 は、急

旋回や宙返りなどの高度な飛翔能力を有する最新モデルです。ブラシレスモータの採用でペイロードが大幅に向上し、小型カメラの搭載も可能となりました。これにより、周辺環境をリアルタイムでモニタリングしながら自律飛行に挑戦するための基盤が整いました。

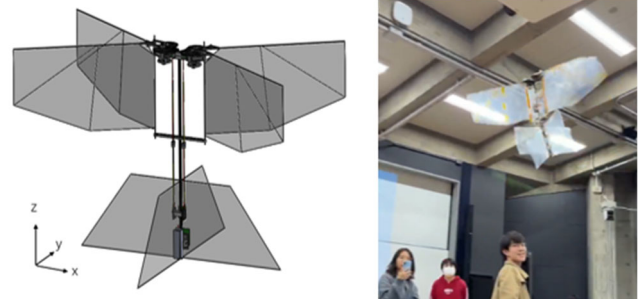


図 4 羽ばたき型飛翔ロボット「WiFly」

3. おわりに

2014 年 9 月号の「談話室」では、「2045 年頃に技術的特異点が到来するというシナリオに乗って研究を進めよう」と決意した」と書きました。以来、AI は予想をはるかに超える速さで進歩し、シンギュラリティはかなり前倒しで起こるとの声が高まっています。サイバー空間と現実空間が融合する社会も、想像を超えて早く到来するかもしれません。その時果たして、人間中心の豊かな社会になるのか、そもそもそれがどんな社会なのか想像もつきませんが、人間がいつまでも好奇心を持ちつづけ、探求する喜びを味わえる世の中であり続けてほしいと願っています。

参考文献

- [1] 渡邊孝信, “大規模集積シリコン熱電デバイス,” 電気学会論文誌 145, pp. 371-376 (2025).
- [2] T. Miura, et al., “Si-based Thermoelectric device with cavity achieving a normalized power output of $43 \mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{K}^2$,” JJAP 65, 02SP02 (2026).
- [3] 野村 拓樹ほか, “機械学習分子動力学シミュレーションによる HfO₂ 結晶の強誘電特性と α -HfO₂/SiO₂ 界面ダイポール層の再現,” 第 73 回応用物理学会春季学術講演会 2026 年 3 月 17 日.
- [4] T. Nozawa et al., “The WiFly: Flapping-wing Small Unmanned Aerial Vehicle with Centre-of-Gravity Shift Mechanism,” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 33, No. 2, pp. 205-215 (2021).



渡邊 孝信 (わたなべ たかのぶ)
早稲田大学理工学術院教授。1999 年早稲田大学理工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。日本学術振興会特別研究員、早稲田大学理工学術院講師、助教授を経て、2012 年より現職。専門は半導体材料工学と計算科学。

2026 年 8 月吉日

応用物理学会 薄膜・表面物理分科会

第27回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会のご案内

主 催：応用物理学会・薄膜表面物理分科会

協 賛：日本表面真空学会(依頼中)、日本物理学会 (依頼中)

記

日 時：2026年12月15日(火) 13:00—12月16日(水) 16:00 (予定)

場 所：東北大学 青葉山キャンパス 工学部センタースクエア中央棟 (対面形式)

仙台市地下鉄東西線 青葉山駅(キャンパス直結) キャンパス内 移動 徒歩 20 分

アクセス：<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/profile/campus/01/access/>
キャンパス内連絡バスあり

内 容：イオンビームを用いた固体表面・界面の分析および改質、

イオンビームと固体表面との相互作用

招待講演：数件、一般講演：20件程度。

招待講演予定者(Matej Mayer: Max-Planck-Institut, 平田悠歩: 日本原子力機構 他調整中)

参加費：応用物理学会 薄膜・表面物理分科会会員 1000円

協賛・関連団体会員(日本表面真空学会、日本物理学会、応用物理学会) 2000円

一般 3000円

学生、招待講演者 無料

言 語：日本語(英語も可(スライドは英語))

懇親会：12月15日(火) 18:30- (費用：別途)

講演申込み締め切り：10月30日(金)(A4で1頁のアブストラクト(英文)を提出して頂きます)

<https://www.t.kyoto-u.ac.jp/fs/qsec/ionbeam/2026/abstractsubmission>

参加申込み締め切り：11月20日(金)

https://eventpay.jp/event_info/?shop_code=1804158131583761&EventCode=C902710874

※ 宿泊施設の確保は各自でお願いします。

問い合わせ連絡先：

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01-2

東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻 加田 渉

E-mail: wataru.kada.a4@tohoku.ac.jp, Tel: 022-795-7931 (代表)

担当幹事: 土田秀次(京都大学), 鈴木 拓(物質・材料研究機構)



第 55 回薄膜・表面物理 基礎講座（2026）

表面・界面分析の原点回帰と進化

～ 最先端技術を正しく使いこなすための理論と実践 ～

日本において表面分析技術の開発・応用が本格化してから、およそ 60 年が経過しました。この間、材料研究・開発の高度化に伴い、表面・界面科学が扱う対象は飛躍的に広がり、多種多様な分析機器が普及するとともに、革新的な新手法の開発も目覚ましく進展しております。一方で、複雑化した表面・界面の性質を適切に評価するためには、個々の測定機器の特性を正しく把握し、目的に応じて最適な手法を選択する力が不可欠です。本年度の基礎講座では、表面・界面分析における「原点」となる基本原理を再整理するとともに、近年進展が著しい高度な解析プロセス、および最新の装置動向と活用のポイントを体系的に解説し、多くの研究者、技術者の方々の表面・界面評価の質をさらに高めることを目指します。

日時：2026 年 11 月 12 日（木） 9:45-17:20

場所：(株)島津製作所 Shimadzu Tokyo Innovation Plaza （対面開催）

https://www.shimadzu.co.jp/research_and_development/tokyo-innovation-plaza/

神奈川県川崎市川崎区殿町 3 丁目 25-40 京急大師線 小島新田駅より 徒歩 12 分

1. プログラム：（敬称略）

時間	講演テーマ	講師
9:45-9:50	開会	
9:50-10:35	日本の表面分析技術の歩み ー約 60 年にわたる技術開発ー	尾張 真 (東大 名誉教授)
10:35-11:15	高度化された表面・界面の構造解析 における表面分析機器の役割	橋本 哲 (JFE テク ノ)
11:15-11:55	先端計測機器硬 X 線光電子分光法 (HXPES の実体、役割)	上田 茂典 (NIMS)
11:55-13:10	休憩	
13:10-13:50	低エネルギー逆光電子分光 ー何が分かるのか、原理・応用ー	吉田 弘幸 (千葉大)
13:50-14:30	大気圧光電子分光法の現状と応用	松田 巖 (東大)
14:30-15:10	二次イオン質量分析 ー技術はどこまで進んでいるかー	二宮 啓 (山梨大)
15:10-15:25	休憩	
15:25-16:05	先進的な走査電子顕微鏡の表面・界 面評価における役割	Dirk van der Wal (TESCAN GROUP)
16:05-16:45	測定データの利活用に向けて ーデータ形式の標準化ー	一村 信吾 (AIST 特別顧問)
16:45	閉会	
16:45-17:20	(株)島津製作所 Tokyo Innovation Plaza 見学（希望者：定員 48 名、申 込順）	

2. 参加費：テキスト代、消費税を含む

薄膜・表面物理 分科会会員*	応用物理学会会員** ・協賛学会会員	学生	その他
10,000 円	15,000 円	無料	25,000 円

*薄膜・表面物理分科会賛助会社の方は分科会会員扱いといたします。

**応用物理学会賛助会社の方は応用物理学会会員扱いといたします。

現在非会員の方でも、参加登録時に薄膜・表面物理分科会（年会費正会員：2,200 円（学生・院生：500 円）、準会員：3,000 円（学生・院生：500 円））にご入会いただければ、本セミナーより会員扱いとさせていただきます。

<http://www.jsap.or.jp/> より入会登録を行い、会費支払及び仮会員番号を取得後、本セミナーにお申込み下さい。（年会費を基礎講座参加費と同時に振込なさらないで下さい。）

3. 定員：100 名（満員になり次第締め切ります。）

4. 参加申込期間： 2026 年 10 月 1 日 ～ 11 月 5 日（木）

5. 参加申込方法：下記 URL あるいは QR コードからイベントページのサイトにアクセスし、参加登録してください。

https://eventpay.jp/event_info?shop_code=1804158131583761&EventCode=C824791558

コンビニ支払い、ページー決済可。
原則として、参加費の払い戻し、
請求書の発行はできません。領収書
は申し込みサイトからダウンロード
可能です。



5. 参加費支払期限：2026 年 11 月 5 日（木）

6. 企画に関する問合せ先：第 55 回基礎講座企画担当

東京農工大 飯島善時 yijimamot@gmail.com

奈良先端大 武田さくら sakura@ms.naist.jp

7. 参加登録問合せ先：

応用物理学会事務局 分科会担当 岡本 普一

TEL：03-3828-7723

E-Mail：divisions@jsap.or.jp

8. 見学会：

(株)島津製作所 Tokyo Innovation Plaza 見学会（1F～4F 各フロアーの最先端機器（SEM、XRD、MS など）の見学）を閉会後に実施予定です（無料）。見学会は希望者（定員 48 名）・申込順となります。希望者は参加登録時に、見学会申込にチェックを入れてください。



応用物理学会薄膜・表面物理分科会 NewsLetter No.196 (Sept 2026)



16th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-16)

34th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM34)



Oct. 19-23, 2026

Arcrea HIMEJI, Himeji city, Hyogo, Japan

Sessions of Conference

Surface Characterization, Methods and Instruments
Scanning Probe Microscopy
Fabrication of Nanostructures and Films
Surface and Interface Engineering for Electronic Devices
Electrons, Spins, Photons, Phonons in 1D, 2D Materials
Soft Materials: Synthetic and Biological
Surfaces under Vacuum, Vapor, Plasma
Interfaces Buried in Liquid, Solid

Symposia

Machine Learning for Atomical Control
Quantum Beams for Atomical Control
Atomically Controlled Materials for Carbon Neutrality
Atomically Controlled Materials for Quantum Applications

Conference Chairs

Organizing: H. Watanabe (The Univ. of Osaka)
Steering: M. Yoshimura (Toyota Tech. Inst.)
K. Sumitomo (Univ. of Hyogo)
Program: H. Onishi (Kobe Univ.)



Registration fee

Abstract Deadline : June 22, 2026
Acceptance Notice : July 21, 2026
Advanced Registration : September 7, 2026
Proceedings Deadline : November 30, 2026

	Early Bird By September 7, 2026	General From September 8, 2026
Regular	65,000 JPY	75,000 JPY
Student	25,000 JPY	30,000 JPY

第 18 回「電子デバイスにおける原子拡散・応力現象研究会」

18th Workshop on Atomic Diffusion and Stress Induced-Phenomena in Electronic Devices

本研究会では、Si LSI 配線をはじめ、Si・フォトリソ・二次元・有機・超電導・センサー素子など、多岐にわたる微細デバイス、それらのプロセス、材料を対象と致します。

休会前の「LSI 配線における原子輸送・応力問題研究会」(15 回開催)に継続とし、今回は第 18 回と致します。

日時：2026 年 10 月 26 日 (月) 開場 9:30, 研究会 10:00-16:30

場所：エッサム神田ホール 1 号館 9 階 プレゼンルーム (901)

JR 神田駅 東口徒歩 1 分、東京メトロ銀座線 神田駅 3 出口前

参加形式：Hybrid 形式 (会場参加 および On-Line)

参加費用：

応用物理学会 薄膜・表面物理分科会会員 現地参加 2,000 円 オンライン参加 3,000 円

応用物理学会、協定学会員 現地参加 2,500 円 オンライン参加 3,500 円

一般 現地参加 3,000 円 オンライン参加 4,000 円

学生・依頼講演者 現地参加 無料 オンライン参加 無料

プログラム (仮)

・ Automated Simulation of the Effect of Interconnect Microstructure on the Initiation and Propagation of Migration Failures

石井 秋光 (NIMS マテリアル基盤技術領域)

・ Nanostructural Characterization of Nanovoids and the Electroless Cu Film at the Bonding Interface of Micro-via in Advanced Semiconductor Substrates.

西嶋 雅彦 (大阪大学 産業科学研究所)

・ ボンディング技術関係で交渉中

・ Physics and Current Status of Negative Thermal Expansion Materials

竹中 康司 (名古屋大学 大学院工学研究科)

・ Investigation of Highly-Reliable Cu Interconnect with Upper W Vias for 3D Flash-Memory

山口 陽平 (キオクシア(株) 先端メモリ開発センター)

・ Atomistic Modeling of Twin Boundary Scattering in PtCoO₂

田中 貴久 (慶応大 大学院理工学研究科)

参加申込締切：2026 年 10 月 23 日 (金)

問い合わせ先：電子デバイスにおける原子拡散・応力現象研究会事務局

email：adsip@semiconportal.com

第 54 回薄膜・表面物理セミナー報告書

第 54 回薄膜・表面物理セミナー（2026）「薄膜・表面を活用した量子センサー・量子コンピューター開発の最前線」を、2026 年 7 月 30 日（木）10:00～17:00、東京理科大学 森戸記念館 第一フォーラムにおいて、現地とオンライン（Zoom）のハイブリッド形式で開催しました。

事前の参加申込は、イベントペイによる申込者 69 名、講演者 7 名、世話人 2 名の計 78 名でした。当日は厳しい猛暑となりましたが、現地会場には 29 名、オンラインでは 39 名が参加し、合計 68 名の参加となりました。

企画概要

生成 AI の急速な普及に伴い、世界の情報量は増大し、それを処理するために必要な電力や資源の需要も急速に高まっています。持続可能な情報基盤の構築が求められる中、環境負荷を抑えながら情報処理技術の革新を実現する新たなアプローチとして、「量子スピントロニクス」をはじめとする量子技術が注目されています。量子コンピューターや量子センサーの実現には、安定かつ高性能な量子ビット・量子状態の構築と制御が不可欠です。その基盤技術として、微細加工、ナノスケール計測、表面・界面制御など、薄膜・表面科学が培ってきた技術の重要性がますます高まっています。そこで本セミナーでは、ダイヤモンド、半導体、超伝導体、量子ドット、冷却原子など、多様な材料・プラットフォームを用いた量子センサーおよび量子コンピューター研究の最前線について、各分野を代表する専門家の先生方にご講演いただきました。薄膜・表面科学に携わる研究者の皆様に、量子技術との新たな接点を見いだしていただくことを本企画の目的としました。

講演内容

冒頭に、世話人の山田より開会挨拶と本セミナーの趣旨説明を行いました。続いて、川畑史郎先生から、量子コンピューターの基礎的な概念から、なぜ現在、世界的に量子コンピューターの研究開発が重要視され、激しい開発競争が行われているのかについて、わかりやすくご解説いただきました。さらに、実用化を目指して開発されているさまざまな量子コンピューター方式について、その原理的な違いやそれぞれが直面する課題、これまでの研究開発の経緯から最新の研究動向まで、幅広くご紹介いただきました。畑先生による全体的なオーバービューに続き、水落憲司先生からは、ダイヤモンド中の窒素空孔（NV）センターを利用した量子センサーについて、その基本原理、これまでの発展の歴史から最新の研究成果までご講演いただきました。樽茶清悟先生からは、シリコン半導体を用いた量子ビットについて、研究開発の経緯から現在の技術的状況まで、丁寧にご説明いただきました。昼休みを挟んだ午後の部では、玉手修平先生から、超伝導量子コンピューターの開発の歴史や基本原理、現在直面している技術的課題について、研究開発の面白さを交えながらご講演いただきました。続いて、小寺哲夫先生からは、半導体量子ドットを利用した量子コンピューターについて、量子ビットの実現原理から最新の研究開発まで、詳細にご紹介いただきました。安東秀先生からは、ダイヤモンド中の NV センターをプローブ先端に組み込むことで実現される高感度な量子センサーイメージングについてご講演いただきました。NV センターを利用することで、さまざまな材料の局所的な磁気・電場を高感度に計測できることや、その応用研究の広がりについてご紹介いただきました。最後に、高橋義郎先生から、真空中に捕捉した冷却原子を利用した量子

コンピュータについて、その基本原理から量子ビットの制御方法、最新の研究開発まで、詳細にご講演いただきました。

総括と謝辞

当日は、開始から終了まで参加者数がほぼ変わることなく、多くの参加者の皆様に最後まで熱心にご参加いただきました。今回のセミナーを通して、量子コンピューターや量子センサーに対する薄膜・表面科学分野からの関心の高さを改めて実感するとともに、量子技術と薄膜・表面科学との間には、今後さらに新たな研究連携や技術展開が生まれる可能性があることを強く感じました。ご多忙の中、貴重なご講演を賜りました講演者の先生方、ならびに会場・オンラインでご参加いただいた皆様に、心より御礼申し上げます。また、会場の手配をはじめ、セミナー開催にあたり多大なるご支援・ご協力をいただきました、東京理科大学 先進工学部 マテリアル創成工学科 小嗣真人先生、田村淳子様に、厚く御礼申し上げます。

世話人

山田豊和（千葉大学） 中村芳明（大阪大学）

機能性ナノ界面科学研究会 春合宿 2026

日時：2026年5月31日（日）、6月1日（月）

場所：湯〜モアリゾート太山寺なでしこの湯（兵庫県神戸市）

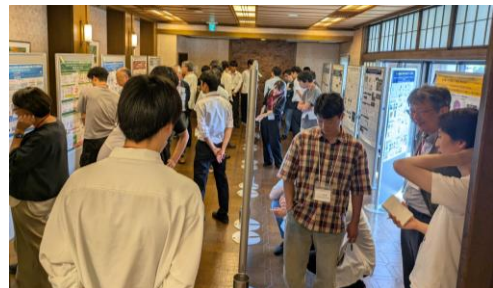
<https://www.nadeshikonoyu.com/>

近年、薄膜の制御形成および表面・界面の測定・制御技術は著しい発展を遂げており、エレクトロニクス、材料科学、エネルギー変換・保存、バイオ・メディカルなど、様々な分野において応用が進んでいる。一昨年発足した機能性ナノ界面科学研究会では、これらの技術の基礎に立ち返り、表面・界面・薄膜における制御および物理的性質について、分野横断的な視点から議論を深めている。本研究会は、本分野における若手研究者や学生間の交流の活発化と“研究者になりたい”という若者を増やすことを目的として、昨年の夏の学校に引き続き、1泊2日の合宿形式で春合宿を開催した。

参加者は、35名であり、基調講演、チュートリアル、招待講演、ポスター発表が行われ、計33件の発表があった。1日目、開会の挨拶が住友研究会委員長（兵庫県立大）より行われ、その後、高桑雄二先生（東北大学）に、今までのご研究をベースとしたチュートリアルをしていただいた。とくにSi酸化についてのお話は興味深かった。次に、すべての学生から1分間のシュートプレゼンが行われた。昨年と比べ、情報があるためかすこし慣れた感じの学生もいたが、多くはかなり緊張感をもって発表していた。続いてポスターセッションが行われ、学生同士の間で熱い議論や質問がなされた。その後、ポスターを背景にして交流会を開催した。学生と先生との間で様々な会話がなされていた。特に自分の研究テーマや将来について熱く語る学生とそれに対して冷静にコメントする先生方という光景が見られたのが面白い。



会場の様子.



ポスターセッションの様子.

2日目は、吉村雅満先生（豊田工大）から基調講演をしていただいた。グラフェンの最新のお話は興味深かった。次に、招待講演として、野内亮先生（大阪公立大）から2次元材料を用いた化学反応制御について、藤谷海斗先生（兵庫県立大）から圧電薄膜材料開発について、最後に一井崇先生（京都大学）から固液界面での結晶成長のAFM 現場観察について、最新のお話をいただいた。どの学生も昨日夜遅くまで交流会が行われていたにもかかわらず、熱心に聴講していた。最後に、ポスター発表の中から優秀発表賞（3人）が選出され、その授賞式が行われた。中村芳明研究会副委員長から挨拶があり、閉会した。

受賞者は、以下の3名である。

受賞者：北澤 善（大阪大学）

発表題目：酸化グラフェンの層間分子制御による高耐久性・高出力 Moisture 発電デバイスの開発

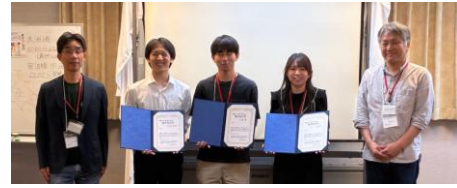
応用物理学会 薄膜・表面物理分科会 機能性ナノ界面科学研究会 春合宿 2026 開催報告

受賞者：井上 友莉香（兵庫県立大）

発表題目： イオン透過による小胞融合

受賞者：神尾 省吾（京都大学）

発表題目： 高温液中 qPlusAFM による溶融塩 / 固体界面構造分析



受賞者の集合写真.

学生は合宿形式の交流を楽しんでいたと思われる。また、この合宿交流会中で博士進学を決意したという学生が現れて、指導教員を驚かすという場面があった。実際に進学するかは別としても、この取り組みは若手の背中を押す効果があるものと思われる。



閉会後の集合写真.

会計報告を以下に示す。収入が 560,000 円、支出が 569,611 円であった。

会計報告

収入				支出				
	人数	参加費		科目	内訳			
学生	22	15,000	330,000	会合費	なでしこの湯（宿泊・会議室）			317,250
一般（会員）	9	20,000	180,000	賃借料	ポスターパネル			101,200
一般	2	25,000	50,000	収納手数料	イベントベイ手数料			28,539
招待	2	0	0	夕食	兵庫県立大生協	35	3,000	105,000
				消耗品費	名札・賞状等			8,510
					ポスターセッション （ドリンク、スナック）			9,112
合計	35		560,000	合計				569,611

世話人 住友弘二（兵庫県立大学）、中村芳明（大阪大学）、一井崇（京都大学）、
牧原克典（名古屋大学）

応用物理学会 薄膜・表面物理分科会 第 55 期第 1 回 常任幹事会議事録

日時：2026 年 5 月 23 日(月) 13:00～14:45

場所：TKP 新大阪ビジネスセンターカンファレンスルーム 3B + オンライン(Zoom)併用

出席者(順不同、敬称略)：

現地：中村雅一、渡邊孝信、一井崇、秋山亨、松本裕司、小野倫也、土屋敬志、山田豊和、中村芳明、山元隆志

オンライン：都甲薫、飯島善時、田岡紀之、重藤暁津、有馬健太

計 15 名

- (1) 前回常任幹事会(2/14)議事録の確認、承認
第 54 期第 5 回常任幹事会議事録(案)を確認し承認された。
- (2) 薄膜・表面物理分科会 第 55 期幹事・常任幹事、専門委員会委員の確認
中村幹事長より第 54-55 期常任幹事および第 55-56 期常任幹事、2026 年度専門委員会委員が紹介された。
- (3) 理事会報告
渡邊副幹事長(幹事長の代理出席)より理事会報告がなされた。
- (4) 2026 年度事業計画・行事予定の確認、決定
・常任幹事会・幹事会、国際会議および研究会の日程及び場所の決定
中村幹事長より常任幹事会・幹事会、国際会議および研究会の日程と場所の確認がなされた。
電子デバイス界面テクノロジー研究会：1/13-14 @三島
ACSIN/ICSPM：10/19-23@姫路
機能性ナノ界面科学研究会 2006 春合宿：5/31-6/1@神戸
電子デバイスにおける原子拡散・応力現象研究会：10/26@東京神田
イオンビームによる表面・界面の解析と改質特別研究会：12/15@東北大学
・各種企画 (2027 年春・秋応物学会企画、セミナー、基礎講座担当者の決定)
第 55 回セミナー 重藤企画幹事+常任幹事から(次回まで常任幹事会までに決める)
第 56 回基礎講座 田岡企画幹事+秋山庶務幹事
2027 年春シンポジウム 小野会計幹事+武内広報幹事
2027 年秋シンポジウム 土屋編集幹事+常任幹事から(次回まで常任幹事会までに決める)
・会計報告
有馬(昨年度)会計幹事より会計報告がなされた。決算報告書、貸借対照表、収支予算書内訳表の News Letter No. 195 (6 月)への掲載が承認された。
松本会計幹事より 2026 年 1/1 から 4/30 までの会計報告がなされた。
- (5) 2026 年度春季応用物理学会 分科会主催シンポジウム開催報告
山元企画幹事より分科会主催シンポジウムについて開催報告がなされた。
- (6) 2026 年度秋季応用物理学会 分科会主催シンポジウム進捗報告
一井庶務幹事より分科会主催シンポジウムが採択(9/9 開催)されたことが報告された。
- (7) 第 55 回薄膜・表面物理セミナー進捗報告
山田広報幹事よりセミナー「薄膜・表面を活用した量子センサー・量子コンピューター開発の最前線」(東京理科大学森戸記念館で 7/30 開催予定)の進捗報告があった。
- (8) 第 56 回薄膜・表面物理基礎講座進捗報告

飯島企画幹事より基礎講座「表面・界面分析の原点回帰と進化 ～ 最先端技術を正しく使いこなすための理論と実践 ～」(島津製作所 Tokyo Innovation Plaza で 11/12 開催予定)の進捗報告があった。

(9) ニュースレターに関する報告・検討

都甲編集幹事よりニュースレター (No.196, 9 月) の進捗報告があった。

巻頭言は川畑先生に執筆を依頼、談話室は No. 196 より渡邊副幹事長、小野会計幹事、土屋編集幹事、武内広報幹事、田岡企画幹事、重藤企画幹事の順で執筆依頼することとした。

(10) 第 11 回「応用物理学会薄膜・表面物理分科会論文賞」および「応用物理学会薄膜・表面物理分科会奨励賞」公募

渡邊副幹事長より公募(9/25 締切)について説明があった。提出期間(8/5～9/25)を設定することとした。

(11) 第 48 回応用物理学会論文賞公募 (候補論文推薦) について

中村幹事長より説明があった。

(12) 各種国際会議・特別研究会等の状況報告

・第 18 回電子デバイスにおける原子拡散・応力現象研究会 (10/26 開催予定)

重藤企画幹事より説明があった。

・第 27 回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会(12/15 開催予定)

中村幹事長より説明があった。次回より、説明が必要な場合は担当の幹事に常任幹事会に参加して貰うこととなった。

(13) その他

・応用物理学会理事の候補の推薦について

候補者がいればメール等で幹事長に連絡する。(7/31 迄)

・分科会および新領域意見交換会について

応物執行部への質問や要望等があればメール等で幹事長に連絡する。(8/2 迄)

応用物理学会 薄膜・表面物理分科会 第55期第2回 幹事会議事録

日時：2026年5月23日(月) 15:00～16:30

場所：Zoom によるオンライン

出席者(順不同、敬称略)：

飯島善時、大見俊一郎、岡伸人、小川修一、小川真一、小野倫也、川井茂樹、河原敏男、小林圭、重藤暁津、志村考功、住友弘二、武内修、田畑仁、土田秀次、寺本三記、中村雅一、林司、福岡剛士、山田豊和、山元隆志、秋山亨、浅沼周太郎、有馬健太、一井崇、大西洋、神吉輝夫、田岡紀之、鈴木哲、鈴木拓、土屋敬志、都甲薫、中塚理、中村芳明、野平博司、安部功二、牧原克典、松本祐司、宮崎久生、渡邊孝信、渡部平司

計 41 名

- (1) 前回常任幹事会(2/14)議事録の確認、承認
第54期第5回常任幹事会議事録(案)を確認し承認された。
- (2) 薄膜・表面物理分科会第55期幹事・常任幹事、専門委員会委員の確認
中村幹事長より第54-55期常任幹事および第55-56期常任幹事、2026年度専門委員会委員が確認・紹介された。
- (3) 理事会報告
渡邊副幹事長(幹事長の代理出席)より理事会報告がなされた。
- (4) 2026年度事業計画・行事予定の確認、決定
・常任幹事会・幹事会、国際会議および研究会の日程及び場所の決定
中村幹事長より常任幹事会・幹事会、国際会議および研究会の日程と場所の確認がなされた。
電子デバイス界面テクノロジー研究会：1/13-14@三島
ACSIN/ICSPM：10/19-23@姫路
機能性ナノ界面科学研究会 2026 春合宿：5/31-6/1@神戸
電子デバイスにおける原子拡散・応力現象研究会：10/26@東京神田
イオンビームによる表面・界面の解析と改質特別研究会：12/15@東北大学
IWDTF：2027.10/19-21@北九州国際会議場
・各種企画(2027年春・秋応物学会企画、セミナー、基礎講座担当者の決定)
第55回セミナー 重藤企画幹事+常任幹事から(次回常任幹事会までに決める)
第56回基礎講座 田岡企画幹事+秋山庶務幹事
2027年春シンポジウム 小野会計幹事+武内広報幹事
2027年秋シンポジウム 土屋編集幹事+常任幹事から(次回常任幹事会までに決める)
・会計報告
有馬(昨年度)会計幹事より会計報告がなされた。決算報告書、貸借対照表、収支予算書内訳表の News Letter No. 195(6月)への掲載が承認された。
松本会計幹事より2026年1/1から4/30までの会計報告がなされた。
- (5) 2026年度春季応用物理学会 分科会主催シンポジウム開催報告
山元企画幹事より分科会主催シンポジウムについて開催報告がなされた。
- (6) 2026年度秋季応用物理学会 分科会主催シンポジウム進捗報告
一井庶務幹事より分科会主催シンポジウムが採択(9/9開催)されたことが報告された。
- (7) 第55回薄膜・表面物理セミナー進捗報告
山田広報幹事よりセミナー「薄膜・表面を活用した量子センサー・量子コンピューター開発の最前線」(東京理科大学森戸記念館で7/30開催予定)の進捗報告があった。

- (8) 第 56 回薄膜・表面物理基礎講座進捗報告
飯島企画幹事より基礎講座「表面・界面分析の原点回帰と進化 ～ 最先端技術を正しく使いこなすための理論と実践 ～」(島津製作所 Tokyo Innovation Plaza で 11/12 開催予定)の進捗報告があった。
- (9) ニュースレターに関する報告・検討
都甲編集幹事よりニュースレター (No.196, 9 月) の進捗報告があった。
巻頭言は川畑先生に執筆を依頼、談話室は No. 196 より渡邊副幹事長、小野会計幹事、土屋編集幹事、武内広報幹事、田岡企画幹事、重藤企画幹事の順で執筆依頼することとした。
- (10) 第 11 回「応用物理学会薄膜・表面物理分科会論文賞」および「応用物理学会薄膜・表面物理分科会奨励賞」公募
渡邊副幹事長より公募(9/25 締切)について説明があった。提出期間(8/5～9/25)を設定することとした。
- (11) 第 48 回応用物理学会論文賞公募 (候補論文推薦) について
渡部前幹事長および中村幹事長より説明があった。
- (12) 各種国際会議・特別研究会等の状況報告
・ 第 18 回電子デバイスにおける原子拡散・応力現象研究会(10/26 開催予定)
小川幹事より説明があった。
・ 第 27 回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会(12/15 開催予定)
鈴木幹事より説明があった。担当幹事が誰だか解るように記載等に留意することとなった。
- (13) ACSIN/ICSPM について
住友幹事より準備状況について説明があった。
- (14) その他
・ 応用物理学会理事の候補の推薦について
候補者がいればメール等で幹事長に連絡する。(7/31 迄)
・ 分科会および新領域意見交換会について
応物執行部への質問や要望等があればメール等で幹事長に連絡する。(8/2 迄)
・ 薄膜・表面物理分科会の顧問について
内規への記載を検討する。詳細な状況を知っている場合は幹事長に連絡する。
・ iWOE32 の開催について
松本会計幹事より告知があった。(9/27-30@仙台国際センター)
・ SSDM の投稿締切について
中塚幹事より告知があった。(5/31 迄@出島メッセ)

薄膜・表面物理分科会 幹事名簿（第55期：2026年4月1日～2027年3月31日）

<54-55期>

氏名	所属
飯島 善時	東京農工大学
伊藤 貴司	岐阜大学
大見 俊一郎	東京科学大学
岡 伸人	近畿大学
小川 修一	日本大学
小川 真一	産業技術総合研究所
小野 倫也	神戸大学
川井 茂樹	物質・材料研究機構
河底 秀幸	東京都立大学
河原 敏男	中部大学
神田 一浩	兵庫県立大学
小飼 真人	東京理科大学
小林 圭	京都大学
酒井 忠司	東京科学大学
佐道 泰造	九州大学
重藤 暁津	物質・材料研究機構
清水 智子	慶應義塾大学
清水 麻希	埼玉大学
志村 考功	早稲田大学
住友 弘二	兵庫県立大
曾根 逸人	群馬大学
高村(山田) 由起子	北陸先端科学技術大学院大学
武内 修	筑波大学
田畑 仁	東京大学
土田 秀次	京都大学
寺本 章伸	広島大学
寺本 三記	住友電気工業(株)
内藤 正路	九州工業大学
中村 誠	富士通(株)
中村 雅一	奈良先端科学技術大学院大学
林 司	住友電気工業(株)
吹留 博一	東北大学
福間 剛士	金沢大学
牧野 俊晴	産業技術総合研究所
安江 常夫	大阪電気通信大学
山田 豊和	千葉大学
山元 隆志	(株)東レリサーチセンター
葉 文昌	島根大学
吉川 太郎	(株)ダイセル
吉村 雅満	豊田工大

<55-56期>

氏名	所属
相蘇 亨	(株)日立ハイテク
秋山 亨	三重大学
浅沼 周太郎	産業技術総合研究所
有馬 健太	大阪大学
一井 崇	京都大学
大西 洋	神戸大学／分子科学研究所
神吉 輝夫	大阪大学
喜多 浩之	東京大学
組頭 広志	東北大学
田岡 紀之	愛知工業大学
近藤 大雄	(株)富士通
林 智広	東京科学大学
佐々木 成朗	電気通信大学
鈴木 哲	兵庫県立大学
鈴木 拓	物質・材料研究機構
須藤 孝一	大阪大学
武田 さくら	奈良先端科学技術大学院大学
土屋 敬志	物質・材料研究機構
徳田 規夫	金沢大学
都甲 薫	筑波大学
豊田 智史	パキウムプロダクツ(株)
中塚 理	名古屋大学
中村 芳明	大阪大学
永村 直佳	物質・材料研究機構
野平 博司	東京都市大学
古川 貴司	(株)日立ハイテク
安部 功二	名古屋工業大学
牧原 克典	名古屋大学
松永 宗一郎	(株)日立製作所
松本 祐司	東北大学
三宅 晃司	産業技術総合研究所
宮崎 久生	(株)東芝
目良 裕	滋賀医科大学
柳原 英人	筑波大学
山崎 詩郎	東京科学大学
山田 貴壽	産業技術総合研究所
川原村 敏幸	高知工科大学
吉越 章隆	日本原子力研究開発機構
渡邊 孝信	早稲田大学
渡部 平司	大阪大学

<顧問>

氏名	所属
市川 昌和	東京大学
一宮 彪彦	名大・名誉教授
魚住 清彦	前青学・社会情報
尾浦 憲治郎	阪大・電顕センター
大泊 巖	早大・理工
河津 璋	タカノ(株)・技術顧問
財満 鎮明	名城大学

氏名	所属
高桑 雄二	東北大・ μ SiC
徳本 洋志	元中央大・産総研ナノテク
本間 芳和	東京理科大・理
宮崎 誠一	広大
山崎 聡	金沢大・ナノマテリアル研
山部 紀久夫	筑波大・物理工
重川 秀実	筑波大学

薄膜・表面物理分科会 会員数、賛助会社数・社名 (2026. 8. 31 現在)

会員数：

本会会員：	525 名
分科会会員：	23 名
合計	548 名

賛助会社数 (口数)：13 社 (15 口)

賛助会社名：

(株)東芝 研究開発センター
(株)日立製作所 中央研究所
明電ナノプロセス・イノベーション(株)
東洋製罐(株) テクニカルセンター
三菱マテリアル(株) イノベーションセンター
(株)ユニソク
(株)日本レーザー
巴工業(株)
コスモ・テック(株)
(株)東京インスツルメンツ
アステラテック(株)
USTRON (株)
(株) KOKUSAI ELECTRIC

「ニュースレター」投稿規定

ニュースレターは、応用物理学会薄膜・表面物理分科会が原則として年 2 回発行する学会誌で、薄膜・表面物理に関する原著論文、解説、分科会活動の要約、及びその他の記事を掲載する。尚、当分の間、分科会常任幹事会がニュースレター編集委員会を兼ねるものとする。

1 記事の種類とその刷り上がりの長さ

1. 1 研究：薄膜・表面物理に関するオリジナルな内容を含む研究論文。従来の「論文」の型にとらわれず、装置、手法、問題点などに関して有益な情報を含むものを取りあげる。図、表を含めて刷り上がり 10 ページ以内を原則とする。
1. 2 解説：一般性のあるテーマについて、専門分野以外の読者にも分かり易いことを考慮して解説したもの。図、表を含めて刷り上がり 6 ページ以内を原則とする
1. 3 ノート：実験、理論のアイデア、コツなど論文では表に出ないような有益な情報。
1. 4 寄書：薄膜・表面物理、及び、分科会活動に関する見解や意見。
1. 5 談話室：分科会会員の意見交換、相互理解のための広い範囲の記事。
1. 6 掲示板：分科会の行事予定、活動報告など。

2 投稿者の資格

投稿者は、分科会会員でなければならない。著者が複数の場合はその中の一人は必ず分科会会員でなければならない。但し、編集委員会が認めた場合はこの限りではない。

3 執筆要領

3. 1 原稿の順序は、表題、著者氏名、所属機関とその住所、アブストラクト、本文、引用文献、著者紹介 (20×25mm² の写真付) とする。表題、著者氏名、所属機関とその住所は、その英文表記を E-mail アドレスとともに第 1 ページの脚注として記す。
3. 2 原稿は、ワードプロセッサを用いて作成した電子ファイル (PDF, MS-word) での提出を原則とする。印刷した原稿 (カメラレディ原稿) のでも受け付ける。
3. 3 原稿は、A 4 用紙の上下に 25mm、左右に 20mm の余白を取り作成する。
3. 4 原稿の書き方は「応用物理」執筆要項に準ずる。薄膜・表面物理分科会 web ページに掲載のテンプレートを参照のこと。
<https://annex.jsap.or.jp/tfspd/newsletter/howtowrite/>

4 原稿の閲読及び校正

4. 1 投稿された全ての原稿は、閲読の後掲載の可否を編集委員会で決定する。閲読の結果、原稿の修正を求めることができる。
4. 2 著者校正は、著者が希望した場合に初稿のみについて行う。
4. 3 投稿者は、原稿の控えを手元に保存すること。提出された原稿、フロッピーディスクは原則として返却しない。

5 投稿料及び原稿料

投稿料は無料とする。編集委員会から依頼した原稿に対する原稿料は支払わない。

6 投稿の手続き

投稿者は、連絡先、原稿の種類を示したカバーレターを添え、原稿一部を下記に送付する。

〒113-0031 東京都文京区根津1-21-5 応物会館

公益社団法人 応用物理学会 薄膜・表面物理分科会ニュースレター編集委員会

7 著作権、転載の許可

本ニュースレターに掲載された記事の著作権は分科会に所属する。

編集後記

NEWS LETTER 第 196 号をお届けいたします。本号では、2026 年 7 月 30 日に東京理科大学神楽坂キャンパスで開催された、第 54 回薄膜・表面物理セミナー「薄膜・表面を活用した量子センサー・量子コンピューター開発の最前線」のテキストを掲載しています。非常に貴重で有用な内容となっております。著者の先生方には心から御礼申し上げます。

談話室では、早稲田大学渡邊先生の研究室についてご紹介いただきました。

開催案内では、第 27 回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会、第 55 回薄膜・表面物理基礎講座「表面・界面分析の原点回帰と進化～最先端技術を正しく使いこなすための理論と実践～」、16th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-16) / The 34rd International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM34) / 第 40 回応用物理学会薄膜・表面物理分科会特別研究会「走査型プローブ顕微鏡」、第 18 回「電子デバイスにおける原子拡散・応力現象研究会」についてご案内しました。ぜひ、ご参加いただければと思います。

開催報告では、第 54 回薄膜・表面物理セミナー（2026）「薄膜・表面を活用した量子センサー・量子コンピューター開発の最前線」、機能性ナノ界面科学研究会春合宿 2026 を掲載しております。

多忙の合間を縫って原稿をご執筆いただいた皆様に、この場を借りて深く感謝申し上げます。

編集担当常任幹事 都甲薫、土屋敬志 記

応用物理学会 薄膜・表面物理分科会
NEWS LETTER No.196
(無断転載を禁ず)
発行日 2026 年 9 月 20 日
発行 公益社団法人 応用物理学会
編集 公益社団法人 応用物理学会 薄膜・表面物理分科会
〒113-0031 東京都文京区根津 1-21-5 応物会館
E-mail divisions@jsap.or.jp
ホームページ <https://annex.jsap.or.jp/tfspd/>
幹事長 中村雅一 (奈良先端科学技術大学院大学)
編集担当幹事 都甲 薫 (筑波大学)
土屋敬志 (物質・材料研究機構)

TOSHIBA

東芝で、

世界にまだない、あたりまえ をつくろう。

24時間きれいな水が飲める。

停電を心配することなく電気が使える。

時間通りに電車がくる。

そんな「あたりまえ」を、東芝はものづくりで支えてきました。

東芝の先人たちが、

多くの困難を乗り越えて生み出してきた技術が

「今のあたりまえ」になっています。

ものづくりを超えて、

私たちは、これからも挑み続けます。

「世界にまだない、あたりまえ」をつくることに。

ともに、世界を前に進めよう。

人と、地球の、明日のために。



「人と、地球の、明日のために。」は東芝グループ経営理念です。



あらゆる容器

私たちの身近にある「容器包装」。

時間や場所を越えて、

大切な中身を守り、無駄なく運ぶ。

「社会インフラ」とも言える大切な役割を担っています。

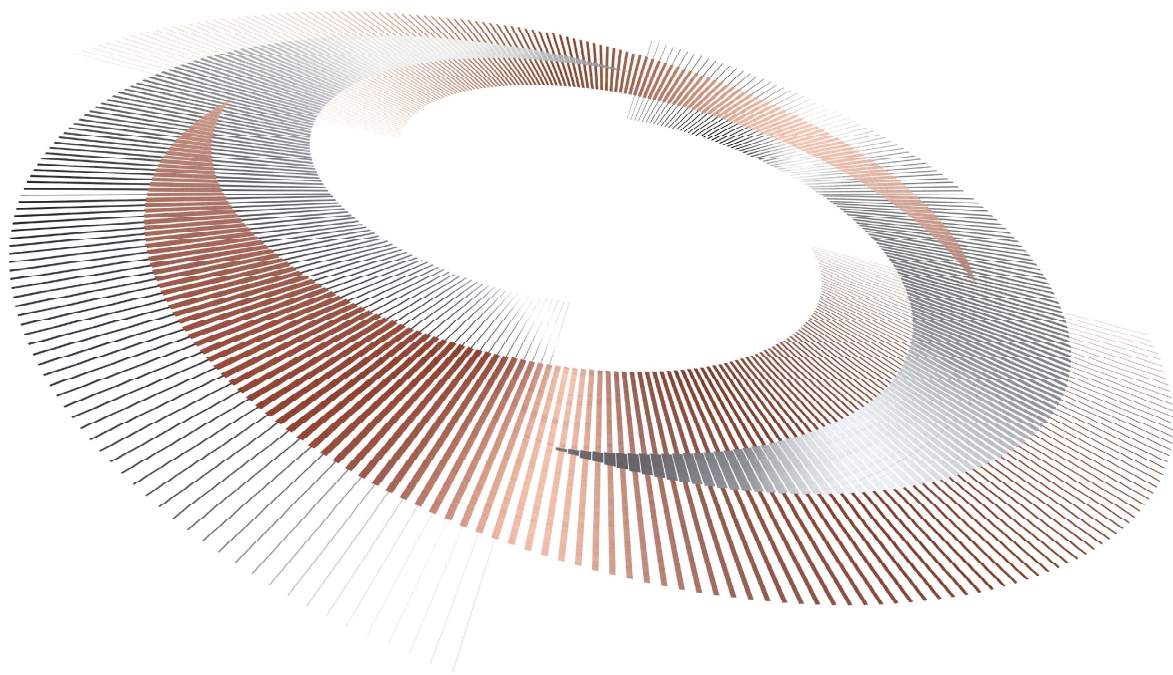
東洋製罐グループは様々な技術に秘められた可能性を集結し、

日本の、そして世界のお客様の心がときめくような

新たな領域をひらくモノづくりを目指していきます。

 **東洋製罐グループ**

<http://www.tskg-hd.com/>



人と社会と地球のために、 循環をデザインし、 持続可能な社会を実現する

限りある資源を大切に使うために、使用済みの製品を資源として再生させる。

そこに新たな価値を付加し、再び社会に送り出す。

その循環のプラットフォームを構築し、自らプレイヤーとして価値を創出する。

そして未来に向けて、持続可能な社会の実現に力強く貢献し、循環の輪を広げていく。

STM装置を購入せずに、STMデータを取得してみませんか？

目的

「レンタルラボ」サービスでは、最先端の低温SPM装置をご利用いただけます。研究者が高度な実験データを効率的に取得し、論文発表のために最適な成果を得られるよう支援いたします。

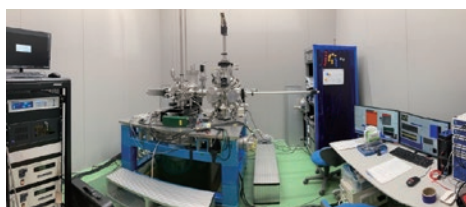
サービス内容

● ご来訪による実験 ● リモート実験 ● 弊社スタッフによる代行実験

装置購入や維持管理の負担が不要となり、研究者の皆さまの時間と労力を節約し、SPM測定への投資効率を大幅に向上させます。

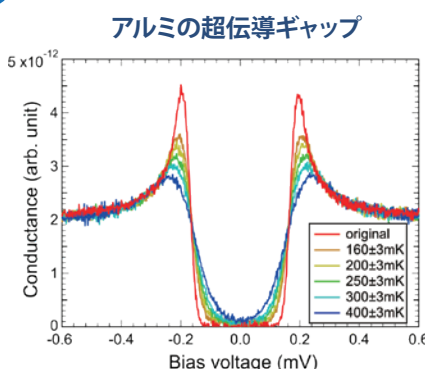
ご利用いただける装置

20 mK 超高真空・強磁場STM



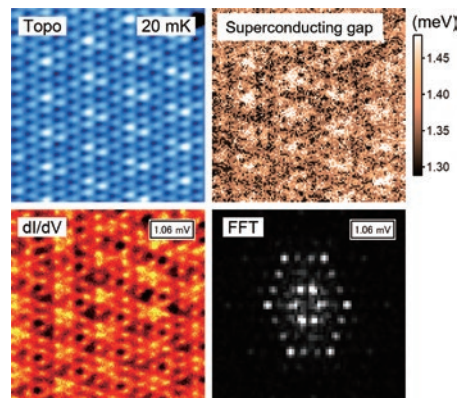
USM1600

- 仕様 - $T_{\text{STM}} = 20 \text{ mK}$
- ペクトル磁場 (1.75 T-1.75 T-7 T)
- RFケーブル (< 40 GHz)
- 長時間STS測定
- 位置センサー(精度: 2 μm)



📺 動画はこちら (X)

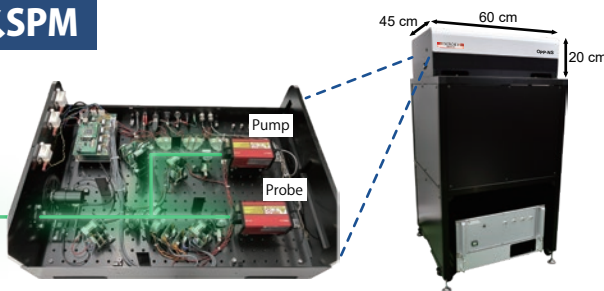
NbSe₂のSTS測定 (128×128点)



1.5K 超高真空 光学アクセスSPM

USM1200 JT

- 仕様 - $T_{\text{SPM}} = 1.5 \text{ K}$ (光学アクセス閉鎖時)
- AFM対応
- 内部レンズ付き光学アクセス
- 高空間分解能時間分解STM
- ショットノイズ測定

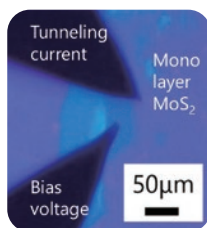


超高真空 時間分解マルチプローブ顕微鏡

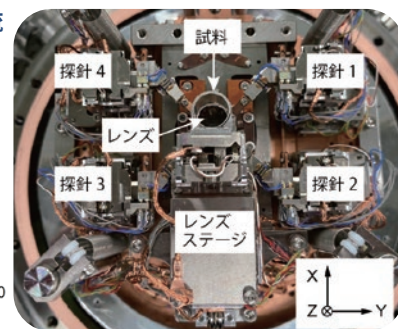
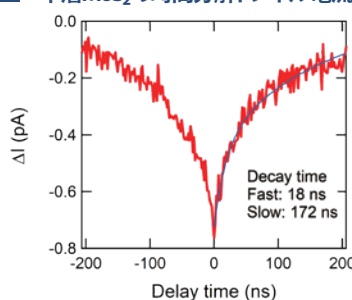
絶縁体基板上的の微小試料のキャリアダイナミクス測定可能

デモ実験条件

- 温度: 77 K または 300 K
- 真空度: $\sim 10^{-8} \text{ Pa}$
- レーザー波長: 488, 532 nm
- 時間分解能: $\sim 80 \text{ ps}$ (532 nm), $\sim 10 \text{ ns}$ (488 nm)



単層MoS₂の時間分解トンネル電流



詳細についてはお気軽にご相談ください！

info@unisoku.co.jp

株式会社 ユニソク

UNISOKU
TII Group

E-mail: info@unisoku.co.jp Web site: <https://www.unisoku.co.jp/>

〒573-0131 大阪府枚方市春日野 2-4-3 TEL 072(858)6456 FAX 072(859)5655

各種 AFM (原子間力顕微鏡)



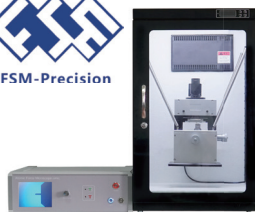
OME Technology
Optical Mechanical Electrical

CrabiAFM

- 超低価格
(PC、その他標準セットアップ構成)
- コンパクト

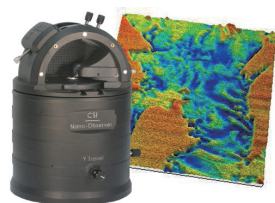
Nanoview 1000 AFM

- 低価格
- 高分解能
- 高コストパフォーマンス



CSI Concept Scientific Instruments

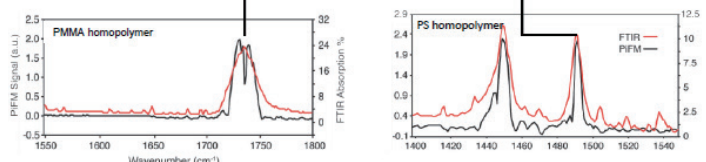
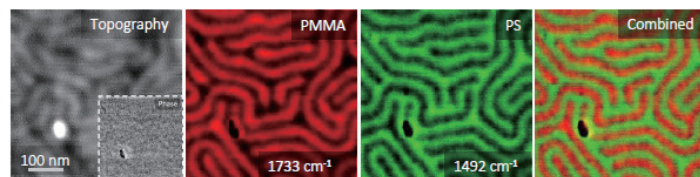
NanoObserver AFM



- 高分解能
- 業界最高の電気特性測定
(C-AFM, KFM)
- 環境制御、液中測定、温度制御

AFM-IR 光誘起力顕微鏡【PiFM】

molecular
VISTA



- ナノケミカルイメージング：空間分解能 10 nm
- 非接触測定
- サンプルの最表面を測定：<30 nm
- 幅広いサンプルに対応：
ポリマー、無機物、半導体材料、炭水化物、
生体材料、1D/2D 材料など
- hyPIR 機能：視野内全ピクセルでフルスペクトルを取得
- 高精細表面電位測定 (KFM)

白色干渉計 装置組込み用顕微鏡ヘッド



SENSOFAR
LIGHTING UP YOUR QUALITY

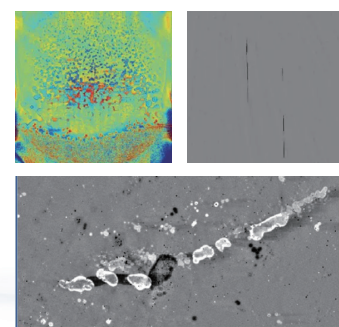


- 非接触・非破壊で表面の微細な3D形状と粗さを測定
- 用途に応じた幅広いラインナップ：装置組込み用顕微鏡ヘッド、テーブルトップ、大型ステージ付き
- 一台で3つの測定技術：共焦点、焦点移動、白色干渉計
- 装置組込み用顕微鏡ヘッド：
測定のオンライン/自動化を実現。クリーンルーム対応
- 高速測定：共焦点フレームレート 50 fps
- 直感的で使いやすい計測・分析・検査ソフトウェア

SiC GaN フォトルミネセンス マッピング対応 高速レーザー欠陥スキャナー

innovation.

onto



- 対応ウェハサイズ 100-300mm
- 5つの検出チャンネル：フォトルミネッセンス、
偏光、スロープ、BF(明視野)、DF(暗視野)
- サブナノメートル感度の全表面スキャンとイメージング
- 粒子欠陥 (≥90nm PSL) / 表面汚染 (≥5Å)
- 薄いウェハ (≥100μm) & 厚いウェハ (≤10mm)
- 基板-エピタキシャル層欠陥マッピング
- 自動画像欠陥分類

<https://www.japanlaser.co.jp/>

E-mail : meas@japanlaser.co.jp



株式会社日本レーザー

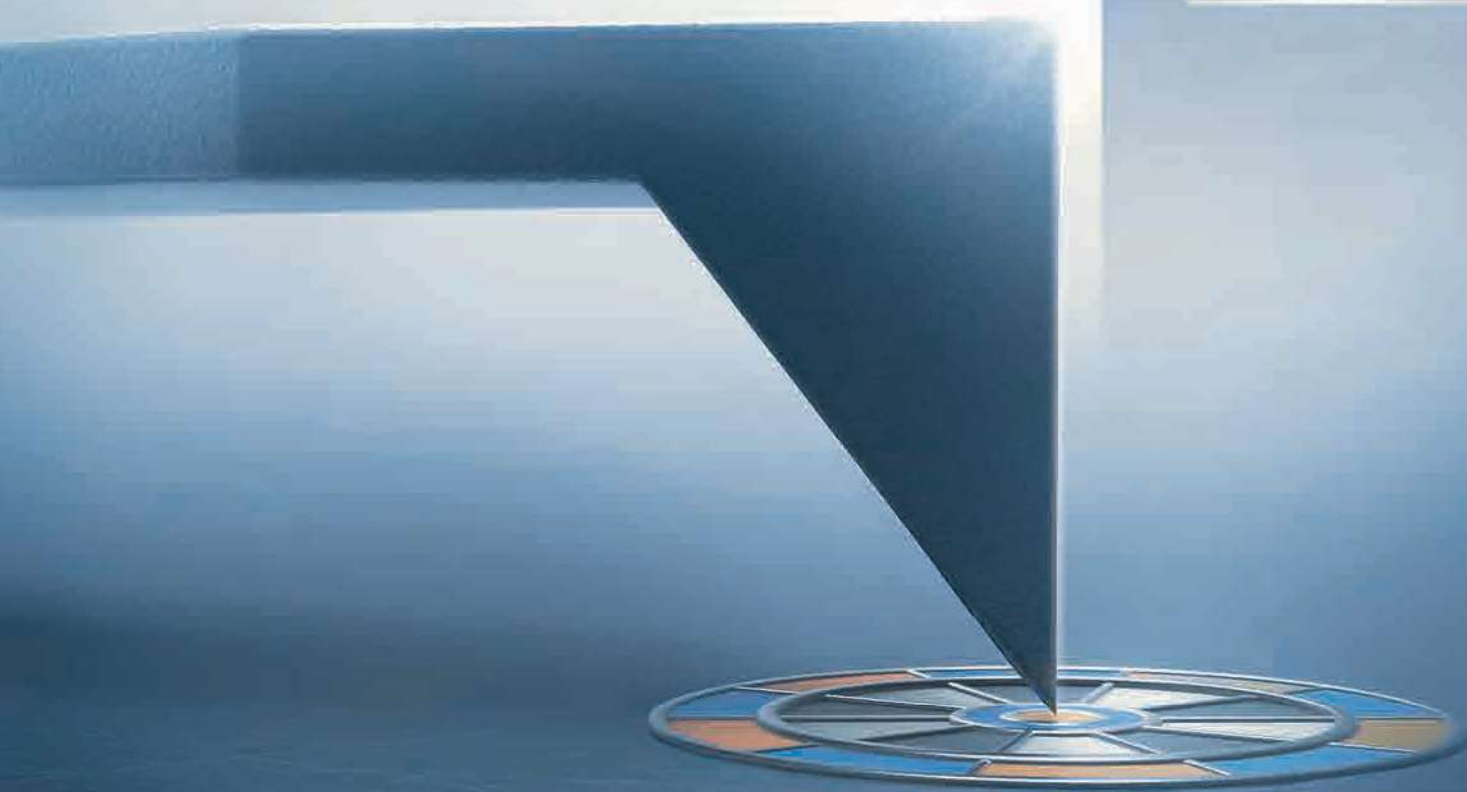
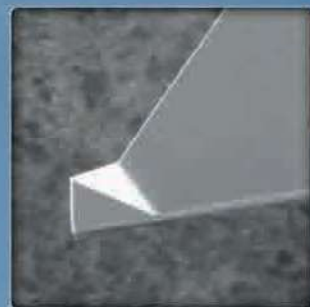
東京本社 〒169-0051 東京都新宿区西早稲田2-14-1 TEL 03-5285-0861
大阪支店 〒533-0033 大阪市東淀川区東中島1-20-12 TEL 06-6323-7286
名古屋支店 〒460-0003 名古屋市中区錦3-1-30 TEL 052-205-9711



WWW.OPUSTIPS.COM

探針ポジショニングに最適な AFMプローブ

- ・探針がカンチレバー先端に見える構造
- ・高品質
- ・ベストプライス
- ・短納期対応



無料サンプルのお申し込みは販売代理店まで



巴工業株式会社

www.tomo-e.co.jp

Tel: 03-3442-5142

E-mail: akobayashi@tomo-e.co.jp



cosmotec
最良の結果を、最短で

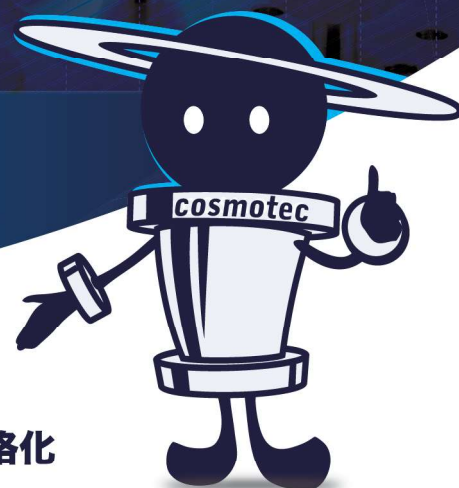
ADPシリーズ

変換アダプタ 真空配管用継ぎ手

	B 側																		
	NW	ICF	VF	VG	ISO-K	ゴム管	ゲージポート	チューブ(インチ)	チューブ(ミリ)	ICフラジアルポート	Swagelok®	VCR®めす	VCR®おす	テーパめねじ	テーパおねじ	デュアルアダプタ	平行めねじ	平行おねじ	サニタリーフェルール
A 側	NW																		
	ICF																		
	VF																		
	VG																		
	ISO-K																		
	ゴム管																		
	ゲージポート																		
	チューブ(インチ)																		
	チューブ(ミリ)																		
	ICF ラジアルポート																		
	Swagelok®																		
	VCR®めす																		
	VCR®おす																		
	テーパめねじ																		
	テーパおねじ																		
	デュアル アダプタ																		
	平行めねじ																		
	平行おねじ																		
	サニタリー フェルール																		

配管を組み上げた時に、規格が違い
困ったという経験はございませんか？

コスモ・テックでは便利なラインナップをカタログ規格化
常時在庫で即日出荷いたします



www.cosmotec-co.jp

研究室で オペランド測定が可能な ESCA

SPECSGROUP

SPC01



溶液、バイオ燃料、2次電池、燃料電池、触媒材料、生体適合材料の測定に最適！

環境制御 X 線光電子分光装置 EnviroESCA™

特長

- 試料環境を低真空～高真空まで制御
- 固体から溶液、バイオ試料も測定可能
- 大型試料測定：最大Φ60 mm、高さ40 mm
- 試料環境の制御（雰囲気・温度）、測定が全自動
- 簡単試料導入
- 全自動で試料搬送から測定までをバッチ処理
- ロボットによる無人自動搬送・自動測定
- ディレイライン検出器：最大 400 ch
- グローブボックスと接続可能、オールインワン設計

用途・アプリケーション

- Operando, In-situ 測定
- 気液界面の化学反応分析
- 触媒反応
- エネルギー材料とデバイス、動作中の電池反応
- 塗膜、メッキ膜
- 土壌、鉱物
- セラミックス
- 宇宙科学、宇宙生物学
- ナノマテリアル
- 磁気記録媒体ほか
- 液体分析
- 固液界面測定
- 金属の腐食反応
- 医療、生体適合材料
- バイオサンプル
- 樹脂
- プラスチック
- 繊維、布
- エレクトロニクス

TII 東京インスツルメンツ
TOKYO INSTRUMENTS

グローバルにネットワークを広げ、最先端の科学をお客様に提供

本 社：〒134-0088 東京都江戸川区西葛西6-18-14 T.Iビル

Tel. 03-3686-4711

営業所：〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原4-1-46 新大阪北ビル

Tel. 06-6393-7411

URL: <https://www.tokyoinst.co.jp> Mail: sales@tokyoinst.co.jp

TII Group Company

UNISOKU
TII Group

超高真空・極低温走査型プローブ顕微鏡
高速分光測定装置、クライオスタート

LOTIS TII

Nd:YAGレーザー、Ti:スレーザー
OPOLレーザー

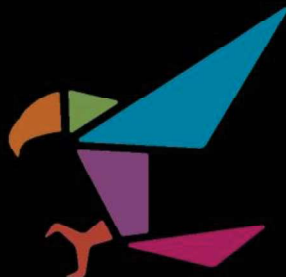
総合カタログ2024-2026をお求めのかたはコチラ！

* 価格帯は、WEBカタログには付属しません。
配送分のみのお取り扱いになります。



T O K Y O 2 3
FOOTBALL CLUB

東京インスツルメンツは、東京23FCを応援しています。



ファインガラスカッター・アルタイル

UL TILE

もうガラス切りは失敗しない

企業・大学・研究機関から
ガラス工芸まで



ガラスに合わせて
高さ調整と圧力調整が自由自在



ワンアクションで
刃を基板からリリース

Astellatech



アステラテック 株式会社

〒214-0014

神奈川県川崎市多摩区登戸 2088 第7井出ビル5階

TEL: 044-299-7512

FAX: 044-299-7514

E-mail: contact@astellatech.co.jp

URL: <https://www.astellatech.co.jp>

USTRON

薄膜材料を創造するアストロン



Material

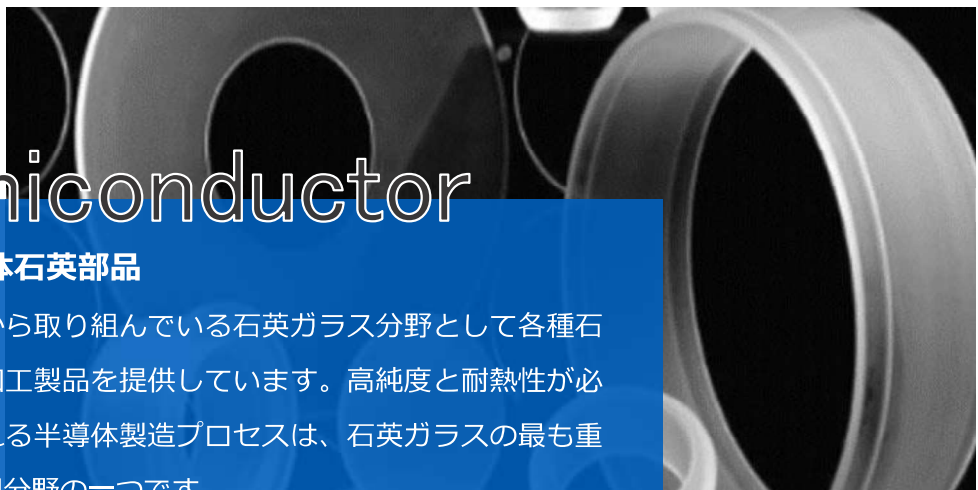
> 薄膜マテリアル

当社独自の開発・生産技術と高いマーケティング力によって、お客様の生産工程・最終製品に必要不可欠な高性能材料を提供しています。

Semiconductor

> 半導体石英部品

設立時から取り組んでいる石英ガラス分野として各種石英精密加工製品を提供しています。高純度と耐熱性が要求とされる半導体製造プロセスは、石英ガラスの最も重要な応用分野の一つです。



Advanced

> 先進機器材料

先進機器材料関連事業におきまして、自動車・医療用機器・航空宇宙・産業用ロボット等、必要不可欠な高品質で付加価値の高い製造設備や測定検査機器・高性能素材を販売しています。

製品へのお問い合わせは：USTRON 株式会社

東京都台東区台東 1-22-4 アストロン台東ビル

<https://www.ustron.co.jp>

E-mail: info@ustron.co.jp

担当：中島

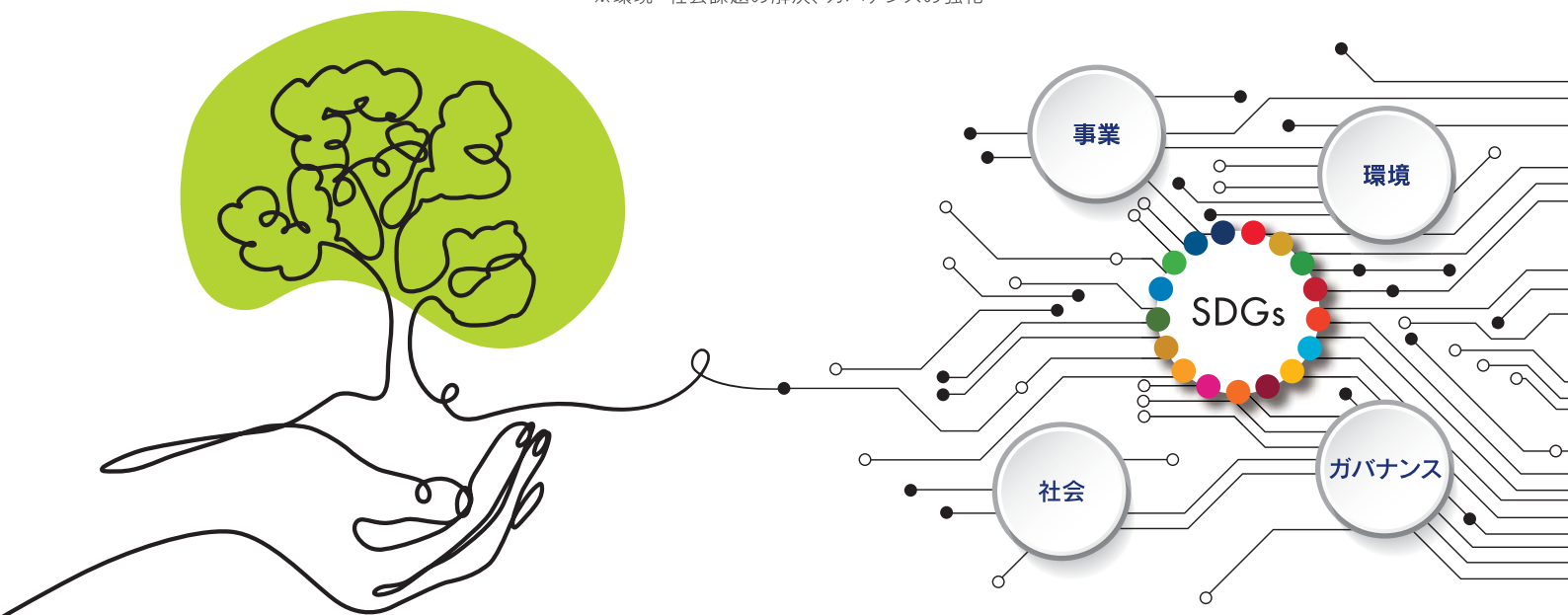
TEL: 03-5812-1811

技術と対話で未来をつくる

誰も想像がつかないような革新をもたらし続ける半導体。

私たちは、進化する半導体の最先端を担う半導体製造装置専門メーカーとして
事業活動とESGの取り組み※の両側面からサステナビリティ経営に取り組んでいます。

※環境・社会課題の解決、ガバナンスの強化



AdvancedAce®II

高生産性縦型装置



TSURUGI-C2®

高品質成膜・高性能半導体製造装置



MARORA®

枚葉プラズマ窒化・酸化装置

