

## 量子技術 2.0 ～量子コンピュータから次世代 MRI まで



若 者

根 来 誠\*

Quantum Technology 2.0:  
From Quantum computer to New generation MRIKey Words : quantum computer, quantum sensing, metabolic imaging, triplet-DNP,  
quantum error correction

## 1. はじめに

量子技術は人々の暮らしを幾度も革新してきた。半導体はコンピュータを生み出し、レーザーは光通信を生み出し、放射線やMRI（磁気共鳴画像）は生体深部をセンシングする術を生み出した。ゴードン・ムーアが予想した半導体型従来コンピュータの連続的發展が終焉を迎えつつある昨今、量子物理が生み出した新しい計算アーキテクチャが不連続な技術革新を担うと期待されている。それは、情報を量子状態によって表現し、その精密な制御によって実現する「量子コンピュータ」である。2014年に超伝導型量子回路で目覚ましい成果が発表され、実現までのメジャーな困難の一つが取り除かれたことを背景に、量子コンピュータへと直結する技術への投資が全世界で加速している。この量子状態の精密制御技術は量子コンピュータ実現の手前に、量子シミュレーション、量子通信、量子センシングといった革新的な応用が期待されている。これらは現在、量子情報技術や「量子技術 2.0」と総称されており、超伝導をはじめ、半導体量子ドット、レーザー、トラップ粒子、分子スピン系等の様々なシステムに広い投資がなされている。

本稿では、分子スピン量子コンピュータと次世代MRIに関する私のこれまでの研究を振り返りながら「量子技術 2.0」について述べる（エンタングル

メント状態制御技術からをさらに差別化して「量子技術 3.0」と呼ぶ流派もあることを注記しておく）。

## 2. 学部生時代～量子誤り訂正

私の学部四年生（2005年）の研究テーマは、分子中の核スピン系を用いた量子コンピュータでいかに量子誤り訂正を実装するかであった。この系では核スピン状態によって情報を量子的なビット「量子ビット」で表現し、核磁気共鳴（NMR）によって精密な状態制御を実現する。量子ビットは、通常のコンピュータで用いられるビットとは異なり、0と1の重ね合わせ状態をとることができる。最先端分子技術をもってすれば核スピンを自在に多数配置することが可能であるが、N個の量子ビットでは、2のN乗個の重ね合わせ状態をとる。演算途中でこのような重ね合わせ状態、とくにスピン同士が切り離して表せないくらい強く相関した状態である「エンタングルメント状態」を経由することが計算の高速性に寄与していると考えられている。1994年Shorによって従来コンピュータより量子コンピュータの方が、ビット数Nに対して指数的に高速に素因数分解問題を解けることが示され、量子コンピュータ研究に火が付いた。高速性の起源を理解したい人は[1]、そして是非、[2]へと読み進めて欲しい。その後10年間、様々な系での小規模な実装がなされた。分子の核スピン系は状態操作性がとくに優れていたため、2003年、7量子ビットを用いた素因数分解アルゴリズムの実装という最初のマイルストーンに最も早く到達した[3]。

量子的な重ね合わせ状態はとてもノイズに弱い。そのため、冗長度を持たせることでこれを守る「量子誤り訂正」を実装する必要がある。単位操作当たりの誤り率がある値を下回るようにすれば、量子誤り訂正を用いてノイズの影響を抑え込むことができ



\* Makoto NEGORO

1983年2月生  
大阪大学大学院基礎工学研究科 システム創成専攻 (2011年)  
現在、大阪大学大学院 基礎工学研究科 システム創成専攻 電子光科学領域 助教 理学 量子情報、磁気共鳴  
TEL : 06-6850-6321  
FAX : 06-6850-6321  
E-mail : negoro@ee.es.osaka-u.ac.jp

る [4]。この値を誤り耐性閾値と呼び、この達成が第二のマイルストーンである。一般的に量子誤り訂正は「測定」と「操作」によって実現するものであるが、分子核スピン系では測定より「初期化」の方がどちらかという得意であったため、初期化と操作だけで量子誤り訂正を実装する方法がないかを考えた。結局学部生時代に答えは見つからなかったが、理論家の藤井博士との共同研究で2014年にやっと見つけることができた [5]。いずれにせよ私たちの系では、まだまだこの閾値には程遠かったため大学院では初期化、操作、測定の研究に取り組んだ。

### 3. 大学院生時代～分子スピン量子コンピュータ

初期化とはすべての量子ビットを0に揃えることに対応するが、核スピンの系ではこれが難しい。一般的なNMR分光に用いられているような約10テスラ、室温下では水素核スピンのゼーマンエネルギーは熱エネルギーに対してとても小さく、熱平衡状態では上向きと下向きのエネルギー状態に対応するスピン数はほとんど同数である。この比率を偏極率と呼び、上述の環境では0.0033%である。私は量子的な過程を用いて核スピンを初期化へと導く「トリプレット DNP」と呼ばれる方法を研究してきた。

DNP (動的核偏極) とは、不対電子が少量存在する試料にマイクロ波を照射して電子スピンの偏極率を転写することで核スピン偏極率を高める手法である。高い偏極率を目指す、従来法ではまず電子スピンを高偏極化するために古典的な熱平衡化過程を用いるので1ケルビン以下の極低温が必要になる。トリプレット DNP は、ペンタセンなどの分子を少量ドープした試料においてその光励起三重項状態の電子を用いる。光励起後、スピン軌道相互作用に起因する選択側により、磁場や温度によらない量子的な過程で高偏極率の電子スピン状態になる。これをDNPに用いることで室温でも核スピンを初期化に導ける。大学院修了後も研究を続け、2013年、当時大学院生だった立石博士とともに偏極率34%を達成した [6]。

また、核スピン状態の測定感度を上げる手法として「スピン増幅」を研究した。これは量子コンピュータ実現のための文脈で産まれたアイデアである。測定したい一つのスピン成分を、周りに大量に存在するスピンへと転写させ、スピン成分を増幅し感度

を上げる。私は大規模に拡張可能な増幅方式を考案し、100倍以上の増幅率が実現できることを示した [7]。2011年、これらの成果をまとめ博士論文を執筆した [8]。

### 4. 量子センシング、次世代MRIに向けて

2011年から2014年、この頃は今思えば量子コンピュータ冬の時代であった。量子誤り訂正で要求されるレベルは、楽観的に見積もっても、1000量子ビットを1億スピンの冗長的に表現して、単位操作当たりの誤り率を1000回に1回程度に抑えなければいけないわけである。出来もしないものをいつまで研究しているのだと風当たりも強くなっていき、匙を投げてしまう研究者も増えていった。私はこの程度だったら30年以内にはできるだろうからあきらめてはいけないと考えていた半面、もう少し早めの出口を志向した研究もしなければ研究者として生きていけないとも考えていた。世界の量子コンピュータ研究者も、量子シミュレーション、量子通信、量子センシングといった出口を目指していった。世界が量子コンピュータから量子シミュレーションへと研究を移行させていった経緯については [9] を参照されたい。

量子センシングとは、環境にとっても敏感な重ね合わせ状態やエンタングルメント状態を用いてセンシングしようというものである。磁気共鳴は本来、センシング用途に用いられている。最近、従来DNPを用いて感度の高い高偏極状態のセンサ分子を体に注射して代謝をセンシング、イメージングする研究が盛んになされており、次世代のMRIとして非常に注目されている。人体深部でリアルタイムに代謝をイメージングできれば、具体的な応用としてはがん治療の効果判定が可能になる [10]。トリプレットDNPでは、極低温を用いないため低コスト化が可能で爆発的な普及が期待できると考え、私たちも次世代MRIの研究に参入することを決めた。時を同じくして国外の量子コンピュータ研究者らもこの分野への参入を始めた [11-13]。量子コンピュータ実現に向けて培われた技術がパイプロダクトとして社会実装されていく時代に突入した。

### 5. Martinisの衝撃

そんななか2014年UCSBのJohn Martinisらが、

拡張可能性の高い超伝導量子回路の5量子ビット系で誤り耐性閾値を達成したとの報が世界を駆けめぐった [14]。私たちもこれに衝撃を受け、阪大で開かれる国際会議に招待したのだが [15]、その会議の翌月、Google が彼の研究室に巨額を投じると CNN が報道した。ほどなくして IBM、Microsoft、Intel ら IT Giant が量子コンピュータへの投資を加速させ、各国政府も量子技術 2.0 への大型予算を決め、EU は 1000 億円規模の投資を発表した。投資対象が書かれた Quantum Manifesto は量子技術 2.0 を概観するのに非常に適しているので一読をおすすめする [16]。また、多くの投資ファンドが量子技術 2.0 への投資を始め、D-wave や Rigetti らのスタートアップ企業は 100 億円前後の投資を集めている (2017 年現在)。一本の論文が世界を大きく変えてしまったこの流れは Nature 誌の特集 [17] に良くまとめられている。

日本でも平成 28 年度戦略目標「量子状態の高度制御による新たな物性・情報科学フロンティアの開拓」、平成 29 年度戦略目標「量子技術の適用による生体センシングの革新と生体分子の動態及び相互作用の解明」が立ちあがった。私の分子スピンの精密量子制御技術の研究はさきがけに採択され、次世代 MRI の研究が CREST に採択され私は連携研究者として参画している。

## 6. むすびに

従来コンピュータを確実に凌駕できる量子誤り訂正搭載の量子コンピュータは、20 年以内を実現できると私は信じている。50 量子ビット程度のマシンに関しては数年以内には実現が期待できる。実は近年このレベルでも、量子コンピュータにのみ許された知の未踏領域「量子スプレマシー [18]」が存在し、量子化学計算、物性計算 (量子シミュレーション)、検索問題、最適化問題、機械学習等の十分実用的な計算ができるのではないかと懸命に議論がなされており、今後の動向に注視されたい。上述したように、数年以内には次世代 MRI を始めとした量子センシングや量子通信等の社会実装も期待が高い。量子技術 2.0 が注目される背景は、このような 20 年に渡って持続可能な発展が約束されているからである。今まさに量子の新時代が始まろうとしている。本稿

を通じて少しでも多くの方が量子技術 2.0 に興味を持っていただければ幸いである。

最後に北川勝浩教授をはじめとした共同研究者に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 竹内繁樹、「量子コンピュータ超並列計算のからくり (ブルーバックス)」(講談社、2005)。
- [2] M. A. Nielsen, I. L. Chuang, “Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniv. Ed.” (Cambridge Univ. Press 2010).
- [3] L. M. K. Vandersypen, *et al.*, Nature **414**, 883 (2001).
- [4] K. Fujii, “Quantum Computation with Topological Codes: From Qubit to Topological Fault-Tolerance” (Springer 2015).
- [5] K. Fujii, *et al.*, Phys. Rev. X **4**, 041039 (2014).
- [6] K. Tateishi, *et al.*, PNAS **111**, 7527 (2014).
- [7] M. Negoro, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 050503 (2011).
- [8] 根来誠、「固体核スピン量子ビットの初期化、操作、観測に関する研究」(大阪大学博士論文、2011)。
- [9] “Quantum leaps” Nature **491**, 322 (2012).
- [10] S. E. Day, *et al.*, Nat. Med. **13**, 1382 (2007).
- [11] M. C. Cassidy, *et al.*, Phys. Rev. B **87**, 161306 (2013).
- [12] E. Rej, *et al.*, Nat. Commun. **6**, 8459 (2015).
- [13] Y. Wu, *et al.*, Angew. Chem. Intl. Ed. **55**, 6586 (2016).
- [14] R. Barends, *et al.*, Nature **508**, 500 (2014).
- [15] J. M. Martinis, “Superconducting qubits poised for fault-tolerant quantum computation” Physics of Quantum Information Processing, Osaka, 2014.
- [16] <http://qurope.eu/manifesto>
- [17] “Quantum computer quest” Nature **516**, 24 (2014).
- [18] J. Preskill, “Quantum computing and the entanglement frontier” arXiv:1203.5813v3 [quant-ph] (2012).