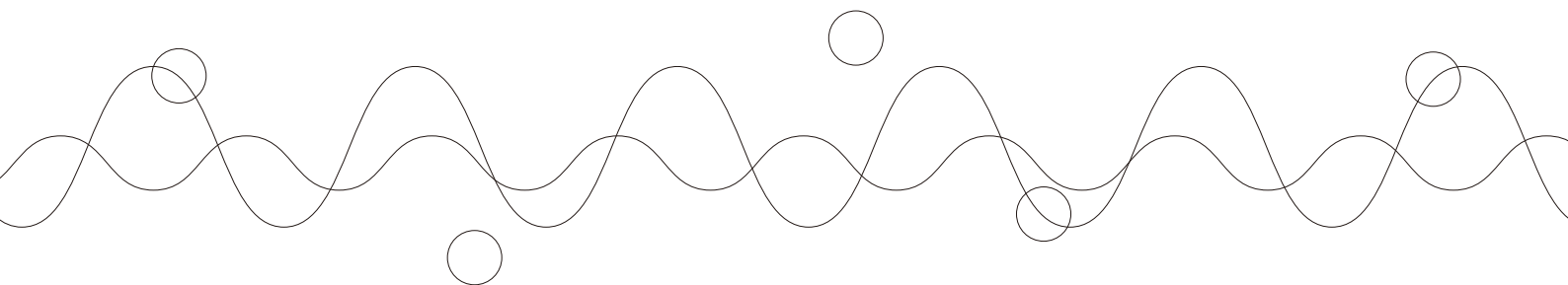


科学技術未来戦略ワークショップ報告書
社会変革を先導する量子科学技術

2019年6月14日（金）開催



国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

エグゼクティブサマリー

本報告書は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）が令和元年 6 月 14 日に開催した科学技術未来戦略ワークショップ「社会変革を先導する量子科学技術」に関するものである。

量子科学技術は、第 5 期科学技術基本計画において新たな価値創出のコアとなる基盤技術として位置づけられ、近年では Society 5.0 実現に向け社会課題の解決と産業応用を視野に入れた技術体系へと発展しつつある。米国、欧州各国、中国を中心とした海外では、これまでの常識を凌駕し社会変革をもたらす「第 2 次量子革命」をうたって、政府主導で研究開発戦略が策定され、大規模な研究開発投資が始まっている。また、世界的な大手 IT 企業も積極的な投資を行っており、ベンチャー企業の設立や巨額の資金調達も進んでいる。このように産学官の研究開発競争が激化している中で、我が国も官民投資の拡大により量子科学技術の研究開発を推進するとともに、基礎研究をいち早くイノベーションにつなげ、産業競争力を強化することが重要である。量子コンピュータ、量子センシング、量子暗号・通信、量子マテリアルの主要領域からなる量子科学技術の研究開発に加え、これらを行うための礎となる理論体系・学理基盤、先端計測技術などの基盤研究や量子生命、量子 AI などの分野間融合による応用研究も加速させ、我が国の総力を結集して関連する取組みを抜本的に強化、拡充すべきである。これにより、将来における国の産業競争力強化や国民の安全・安心基盤の確立が可能になると期待される。

本ワークショップでは、量子科学技術で社会変革を起こすために必要な研究開発の方向性を明らかにするとともに、その推進方策について第一線の研究者と議論することを目的とした。まず、日本の強みである基礎理論や知識・技術基盤等を活かしながら、そのシステム化・実用化に向けたイノベーションを誘発し、当該分野の研究開発を長期的に継続、進展させていく仕組みに関して、産学官の専門家から話題提供をしていただいた。その後の総合討論では、産業・イノベーション、国際戦略、知財・標準化戦略、人材育成の観点から、量子科学技術に関する研究開発の推進方策や拠点形成・運営のあるべき姿、さらにはそれらを実現するための課題などについて議論した。

これらの議論を行うため、CRDS の考える解決策を仮説として 2 つ提示した。一つは研究開発の底上げ、多様化を図るため、研究開発、コミュニティ形成、人材育成などへの各種支援制度の充実が重要であるとの仮説、もう一つは人材、知識・技術を結集し、現状では散発的と言われる我が国の研究開発をある決まった目標に向かって集中させることが必要との仮説である。ここでは、研究開発・教育の複数の拠点を様々な体制、規模で形成していくことを考えている。

話題提供では、国内外の研究開発動向と国際戦略、人材育成、標準化に関する取組みと将来展望について、量子科学技術全体、量子コンピュータ、量子計測・センシング（特に量子慣性センサ）、量子暗号ネットワーク、量子マテリアルの領域から報告がなされた。また、拠点形成・運営と研究推進方策として、理化学研究所計算科学研究センター（R-CCS）、量子科学技術研究開発機構量子生命科学領域における例が紹介された。さらに、産業・イノベーションに関する話題と

して、研究機関とベンチャー企業の視点から量子コンピュータ研究開発の方向性が示されるとともに、大企業の研究開発におけるオープンイノベーションの位置づけなどが報告された。最後に、内閣府における「量子技術イノベーション戦略」検討状況について中間報告がなされた。

総合討論では、上記仮説の検証のため、(1)～(3)の点について具体的な議論が行われた。

- (1) **研究開発の推進方策**：新しい応用分野の開拓やオープンイノベーションの加速のため、幅広い分野が連携・融合して研究開発に取り組むことの重要性が指摘された。そのためには、大学、研究機関、企業等による様々な形での研究開発拠点の設置が必要との共通認識が得られた。このような拠点形成は、研究開発の効率化をもたらすだけでなく、将来を担う人材の育成・確保や高額な大型研究施設・設備（インフラ）の共用が可能になるなどの利点が期待される。また、社会実装を前提とした有望技術の絞り込みと戦略的開発の実施と同時に、予想外の進展や着想を得るための基礎・基盤的研究や、量子技術を深化、発展させる周辺技術の開発への長期的支援の必要性も確認された。
- (2) **拠点形成・運営**：分野・領域によって状況は異なるため拠点には多様性が必要、つまり、新しいアイデアの蓄積のための基礎研究から産業応用への技術開発まで、どういうフェーズの研究開発を行うかによって拠点の性格付けがなされるべきとの指摘があった。このための現実的な選択肢としてオープンプラットフォーム型、機関独立運営型、機関センター型などの分類が提示された。また、HPC や AI などの分野を例に中途半端な拠点の分散化は効果が薄いとして、資金・人材・インフラを集中させ、世界的に認知され研究者にとってのシンボリックな存在となり得る真の中核を目指すべきとの意見が出された。拠点が担う重要な役割として、若手研究者や大学院生の育成、社会人に対するリカレント教育、中等教育段階（中学校、高等学校等）におけるアウトリーチ活動なども挙げられた。
- (3) **ボトルネック・重要課題**：周辺技術の開発は単に投資を受けるだけでは量子科学技術への大きな貢献が期待できないことや、研究開発の拠点到リーダーシップが与えられず独自の取り組みができないことなどが懸念される点として挙げられた。原理実証までが中心の研究開発では新しい応用先の開拓が進まないという問題に対し、拠点内に産学官オープンラボを設置するなど産業界との連携推進を強化するアイデアが出された。大規模産学官連携、オープン・クローズド戦略等を担うコーディネーターや URA 等の人材が、研究開発人材とともに不足している点も指摘された。

ワークショップでの議論を踏まえ、CRDS は、今後、国として重点的に推進すべき研究領域、具体的な研究開発課題を検討し、研究開発の推進方法を含めて戦略プロポーザルを策定し、関係府省や関連する産業界・学会等へ提言を行っていく予定である。

目 次

エグゼクティブサマリー

1. 開会挨拶	曽根 純一（JST-CRDS）	1
2. ワークショップ趣旨説明	八巻 徹也（JST-CRDS）	2
3. 国内外の研究開発動向と国際戦略、人材育成、標準化		5
3. 1 量子技術への期待 ～国際戦略を中心に～	荒川 泰彦（東京大学）	5
3. 2 量子マテリアル領域	川崎 雅司（東京大学）	10
3. 3 量子計測・センシングにおける各国の研究開発動向： 量子慣性センサーに対する期待と挑戦	中川 賢一（電気通信大学）	17
3. 4 量子暗号ネットワークにおける産学官連携と標準化	富田 章久（北海道大学）	23
3. 5 産業イノベーションのための量子情報人材育成	藤井 啓祐（大阪大学）	30
4. 拠点形成・運営と研究推進方策		36
4. 1 理研計算科学研究センター（R-CCS） およびスーパーコンピュータ「京」「富岳」の概要	松岡 聡（理化学研究所）	36
4. 2 量子生命科学領域の構築と拠点形成	馬場 嘉信（名古屋大学／量研機構）	43
5. 産業・イノベーション		49
5. 1 量子コンピュータ研究開発の推進にむけて	萬 伸一（理化学研究所）	49
5. 2 ベンチャー企業からみた量子コンピュータ技術と ディープラーニング技術の共通点・相違点	平木 敬（PFN）	55
5. 3 企業研究からのオープンイノベーション	山田 真治（日立製作所）	61
5. 4 内閣府における「量子技術イノベーション戦略」検討状況について	奥 篤史（内閣府）	67
6. 総合討論	ファシリテーター：嶋田 義皓（JST-CRDS）	72
6. 1 研究開発の推進方策		72
6. 2 拠点形成・運営		74
6. 3 ボトルネック・重要課題		76

7. 閉会挨拶	曽根 純一（JST-CRDS）	78
付 録		80
付録1：開催趣旨・プログラム		80
付録2：参加者一覧		83

1. 開会挨拶

曾根 純一（JST-CRDS）

本日は、ご案内のとおり、量子科学技術についていろいろとご議論いただきたい。

このワークショップを開催した背景には、皆さんご存じのとおり、ここ最近、量子科学技術をめぐる動きが非常に慌ただしくなっていることがある。特に、アメリカでは昨年暮れに上院と下院で量子法案が可決され大規模投資が始まろうとしており、ドイツやイギリスでも大きなプログラムがそれぞれ動こうとしている、動いているという状況である。一方、日本政府も、本日のワークショップの最後にご講演があると思うが、国家戦略を作成中という状況である。

言うまでもなくデジタル化社会、いわゆる高度情報社会、IoT/AI 時代を先導する半導体技術には、ムーアの法則に従った微細加工による性能向上の限界やノイマン型コンピューティングの通信ボトルネックなどに見られるように、様々な意味で陰りが見えてきている。その不安を払拭する可能性を秘めた最先端技術に対する社会の大きな期待から、量子科学技術の研究開発が急速に展開している。

この分野に関して、日本は昔から基礎技術の蓄積を十分行ってきた、と自負しているわけだが、世界の大きな流れの中で取り残されないためにどうしたらいいのか。今日は量子科学技術の研究開発をどう推進していくか、国際戦略はどうするのか、産業・イノベーション、人材育成はすべきか、などといった観点から議論させていただきたい。

量子は未熟な技術であるというのが皆さんの共通認識だと思うが、では社会からの大きな期待に対するギャップをどう埋めていくのか。今日は皆さんの知恵をいただき、それを凝縮して政府の政策へフィードバックできたらと思っている。

2. ワークショップ趣旨説明

八巻 徹也（JST-CRDS）

本ワークショップのタイトルにも含まれる量子科学技術については、これまでの常識を凌駕し社会変革をもたらす「第2次量子革命」をうたって、米欧中で政府主導による研究開発戦略が策定されている。また、政府投資の増大だけでなく、世界的大手 IT 企業からの積極的な投資も見られ、ベンチャー企業の設立や巨額の資金調達も進んでいる。研究でいえば、量子コンピュータ、量子センシング、量子暗号・通信、量子マテリアルという主要領域、これを行うための礎となる理論体系・学理基盤、計測技術などの基盤領域、さらには量子生命、量子 AI などの量子科学技術の融合・応用分野も重要である。したがって、これらの研究開発を加速させて、我が国の総力を結集して関連する取組みを強化、拡大すべきと考えている。ここでは、産業・イノベーション、国際戦略、知財・標準化、人材育成という4つの観点から、量子科学技術の研究開発の推進方法などについて議論し、我が国においてより有効な戦略を策定するために本ワークショップを開催する。

量子科学技術については、量子力学が完成した20世紀初頭から量子1.0の技術が半導体エレクトロニクスに応用されたが、21世紀に入ってからその限界も見えてきた。そのような中で最近、量子コヒーレンスや量子もつれなどの量子2.0の技術が目覚ましく進展し、多様な量子現象を操作・制御ができるようになってきた。それに伴い、新たな研究領域として、量子暗号・通信、量子コンピュータ、量子センシング、量子マテリアルという分野が盛り上がってきた。社会が資本集約型（モノ）から知識集約型（データ）へと移る中、この動きは人々の生活の質の向上や社会の発展を大きく期待させるものになっている。

我々の考える量子科学技術の範囲を図2-1の俯瞰図を使って示す。量子科学技術における重要な技術領域は、上で示したとおり、量子コンピュータ、量子暗号・通信、量子センシング、量子マテリアルの4本柱であり、それぞれにおけるキーワードも図に記してある。各技術領域の研究で操作・制御すべき量子現象と操作・制御技術を生み出してきた応用領域、技術基盤、量子力学を礎とした様々な学理など、4本の柱を支えるための領域と、4本柱を融合したり応用したりすることで社会実装を目指す量子インターネット、量子AI、量子生命、革新エレクトロニクスの領域がある。今回、これら全体を量子科学技術として我々は定義し、その研究開発戦略を考えたい。

次に、日本と世界における量子科学技術の重要なR&D動向である。キーワードだけを紹介すると、量子コンピュータでは超伝導量子ビット、イオントラップ、誤り耐性無しで中規模の量子コンピュータを指すNISQ、量子アニーリングなどの研究分野、量子暗号・通信では量子鍵配送（QKD）、その標準化やネットワーク化、さらには量子中継と呼ばれる研究分野に注力されている。また、量子センシングの技術領域では、固体量子センサとしてのダイヤモンドNV中心、光格子時計、原子干渉計型ジャイロスコープなどの量子慣性センサ、量子もつれ光センサの研究分野が活発である。量子マテリアルは、非常に新しく未開拓で、これから何が出てくるかわからない領域であると思うが、現状ではトポロジカル量子物質、スピン流、冷却原子集団などの研究が注目されている。さらに、4本柱を支える微細加工技術や分光・計測手法、デバイス・システム化技術などを含むナノテクノロジー、量子ビーム技術の領域も非常に重要だと考えている。

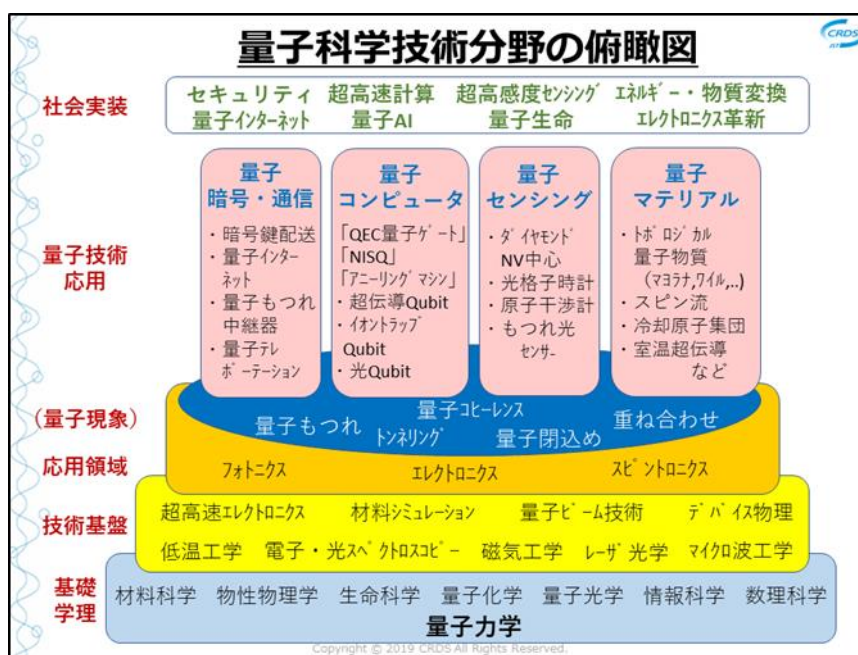


図 2-1 量子科学技術分野の俯瞰図

社会変革を起こすために、このような量子科学技術の研究開発をどうやって推進していくのか。図 2-2 に我々の考えを整理している。近年、知的社会基盤の確立とデジタル経済社会の到来と同時に、アメリカ、中国、ヨーロッパの政府投資が非常に大きくなってきている。政府にとどまらず民間による投資も急激に拡大する中、まだまだ基礎フェーズの量子技術に対して、社会変革への強い期待が寄せられている。しかしながら、これは期待し過ぎなのかもしれない、つまり基礎フェーズなのに社会変革を起こすのではないかという過度な期待がある気がする。このような現状と期待のギャップを埋めるため、またデジタル経済社会の到来に伴ってデータ基盤の横断的整備、知財権と国際標準の覇権競争が不可避であるという背景により、我が国の成長や国民の安全・安心の基盤への脅威に対してどうしていくのかを考えずにはいられないだろう。

このような背景の下、4 つの論点があると思う。すなわち、技術シーズの応用・実証加速、産官学イノベーションの実施、知財確保、標準化促進・主導といった「産業・イノベーション」と「知財・標準化」、国際連携・協力と国際競争を使い分けた戦略的取組みを含む「国際戦略」、さらに量子科学技術の可能性を追求する研究への長期的支援としての「人材育成」という論点である。

これらの論点を議論するため、我々の考える解決策を仮説として 2 つ提示する。一つは研究開発の底上げ、多様化を図るため、研究開発、コミュニティ形成、人材育成などへの各種支援制度の充実が重要との仮説である。もう一つは人材、知識・技術を結集し、現状では散発的と言われる我が国の研究開発をある決まった目標に向かって集中させることが必要との仮説である。ここでは、研究開発・教育の複数の拠点を様々な構造、規模で形成していくことを考えている。

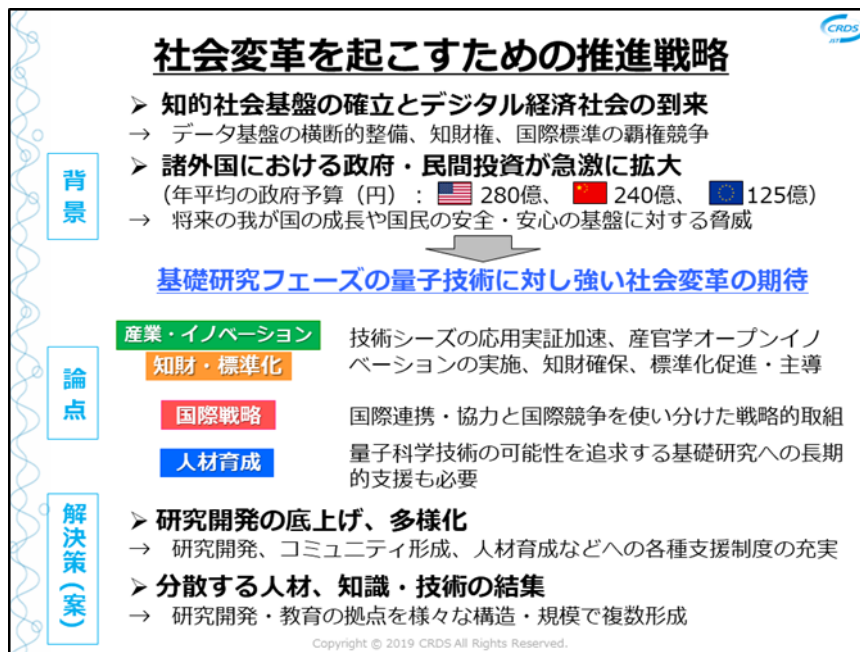


図 2-2 社会変革を起こすための推進戦略

世界における量子拠点の例を見ながら、拠点形成の必要性和利点を改めて考えてみると、まず多様な専門性を持つ人材が結集する場ができることだろう。対象とする分野がどんどん拡大しており、研究開発を個別に進めては諸外国に勝てないという我が国の状況において、分野内連携・融合が促されるという利点である。また、量子科学技術の研究者にとってシンボルとなる拠点の形成により、外国から我が国に人が集まり我が国で学んだ人が世界に出て行くという循環ができることや、高価な研究インフラを参画者で共有できることも重要と考えられる。

本日これから議論していくために、4つの論点における具体的な視点を示しておく。

- ・「産業・イノベーション」： 量子技術イノベーション拠点の形成、産学官コンソーシアムの形成、創業・投資環境の整備
- ・「知財・標準化」： 安全保障貿易管理、柔軟なオープン・クローズド戦略、国際標準化
- ・「国際戦略」： 我が国の国際優位性の確保＋グローバル連携強化、多国間・2国間の協力フレームワーク、政府・大学・研究機関等での研究協力
- ・「人材育成」： 量子科学技術と関連分野における研究・技術者の育成と確保、頭脳循環、中学・高等学校からの教育

本日のプログラムでは、これらの観点でのご講演を先生方をお願いした。ご講演後の質疑応答では、国際戦略、人材育成、標準化、拠点形成、産業・イノベーションについてより具体的な議論をできればと思う。最後の総合討論では、上記仮説の検証のため、研究開発の推進方策、拠点形成・運営、そのためのボトルネック、重要課題を抽出して議論させていただきたい。

3. 国内外の研究開発動向と国際戦略、人材育成、標準化

3. 1 量子技術への期待 ～国際戦略を中心に～

荒川 泰彦（東京大学）

本日は、内閣府で3月29日に開催された第1回イノベーション政策推進のための有識者会議「量子技術イノベーション」に提出した私のコメントに基づいて、国際戦略を中心に、量子技術への期待についてお話ししたい。



図 3-1-1 第5回ソルベー会議の集合写真

図 3-1-1 は 1927 年の第 5 回ソルベー会議の集合写真であり、私が Q-LEAP の開始時に見せたものである。Q-LEAP が終了するのが 2027 年であり、このソルベー会議からちょうど 100 年になる。つまり、1 世紀を経て量子力学が量子技術として開花する、もしくは開花させるべき状況になったということで、決意を世界中が共有しているということが最近のトレンドであろう。

国際協力の観点から言うと、ソルベー会議の参加者のほとんどが欧州の物理学者であったが、当時の欧州の距離感覚と今の世界の距離感覚は、時間的に見れば同じようなものだったのではないか。創成時は欧州に限られていた量子力学の国際協力が、今は量子技術の世界において日米欧中と世界中に拡がっている。1 世紀を経てそのような状況になったと認識しておくべきであろう。

図 3-1-2 は文科省が作成した図である。これを見るとわかるように、実は考え得るほとんどの量子技術に関するテーマには既に一定規模以上の予算が配分されていると言える。文科省だけではなく、経産省や総務省などの各省庁が連携しながら推進しているわけである。

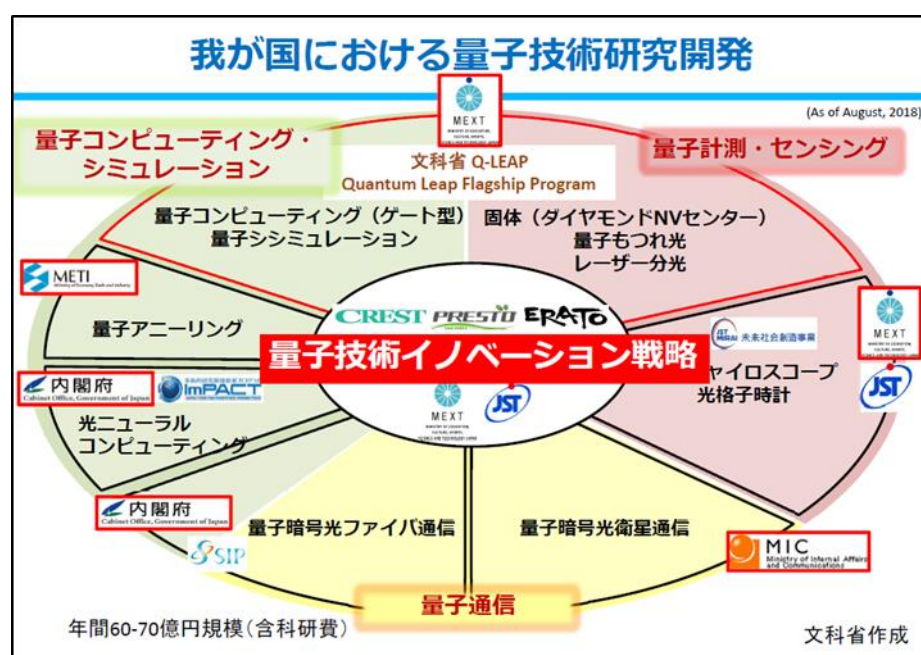


図 3-1-2 我が国における量子技術研究開発

しかしながら、予算だけ見ると欧米に比べて少ないため、もっと支援していく必要があり、それにはおそらく2つの戦略がある。1つ目は、特定のテーマを重点化によりに加速させて出口まで持って行く戦略である。2つ目として裾野を広げていこうとする戦略があり、これらの戦略の推進が拠点形成や人材育成につながっていくことは言うまでもない。

既に内閣府で量子技術イノベーション戦略が検討されている中で、今日の議論がそれとどういう関係になっていくのかということは今後わかっていくと思うが、いずれにしても政府としてイノベーション戦略を策定中であるということは頭に入れておくべきである。

文科省あるいはJSTで実施されている各プロジェクトを踏まえて、私が第1回有識者会議で申し上げたことは次のとおりである。1点目は量子技術を広く捉えるべきであり、AI、バイオ、安心安全などの他の国家戦略と連携を図ることが重要であるという点である。2点目は、実用化に向けた技術開発と基礎科学創成の両方が必要であるということである。国の技術戦略である以上は前者をメインにしながらも、後者のような学術価値の高い研究も当然重要である。

量子技術の議論をするときに気をつけておかないといけないのは、長期的な基礎研究と5～10年後の出口を意識した技術開発を区別することである。この点をしっかり認識しておかないと混乱が生じるため、本日もその観点で議論を進めていくのが望ましいと思う。また、かつては電子立国と言われていた日本が、これから量子立国と呼ばれるように新しい方針を立てることを意識すべきであろう。

他に有識者会議で述べたこととして、量子コンピューティング技術に関しては古典コンピュータやソフトウェアも含めて、広くコンピューティング技術全体として開発を位置づけていく必要性である。ゲート型量子コンピュータ開発では、長期的な視点が必要であり、それを踏まえての人材育成を考えなければならない。一方で、量子アニーリングマシンや量子インスパイアードコ

ンピュータ、準量子コンピュータなどには、ゲート型量子コンピュータよりも現実的な手法で十分に役に立つ用途、課題があるということを認識しておくことも必要である。

先ほどコンピューティング技術全体から量子コンピュータを位置づけるべきだと申し上げたのは、依然として汎用コンピュータも重要で、HPC はこれからもどんどん開発を進めていくべきだと感じているからである。そのプラグインモジュールとして量子コンピュータが用いられると、両方が役に立っていくと思われる。このため、量子技術だけではなく、周辺の基盤技術開発も不可欠である。

例えば、量子演算モジュールの入出力の大容量化や熱の絶縁を考えるとときには、光情報技術の高度化が必要であり、光コンピュータや光インターコネクトといった技術を活用していくことが重要になる。さらに、先進技術に関しても固体量子センサーを始めとしていろいろあるが、今後5～15年後に実用化されることが期待されており、産業技術への移行を十分に意識した上での戦略策定が必要となる。量子通信分野では、真のユーザー、例えば防衛省などに使ってもらえる技術を作ることが最優先になるのではないかと思う。

これらを踏まえて、推進方策についての私の考えをいくつか簡単に述べたい。まず、基礎研究における人材育成を中心としつつも、産業技術としての発展には出口の視点を有する産業界とのシームレスな繋がりが欠かせず、基礎と応用の両方を見渡せるような人材の育成が急務である。ただし、これは簡単な話ではない。おそらく結果的には若い時代にはどちらか一つ、つまり基礎に集中するか、応用に集中するかであろう。その後、同じ人が成熟していくにつれて、俯瞰的な見方ができるようになっていくのではないかと思われる。それに必要な再教育や新しい分野との相互作用を積極的に行うような素質をもった人を育てていくことが望まれる。

また、長期的な研究開発を担う人材については、大学や国研での確保が大変重要で、そのためにポストを増やしていく必要があるが、10年後に滞留が起こるのは避けるべきである。量子技術が産業技術になるように本分野を育てていくためには、人材も1カ所に滞留せずに大きく展開していくことが重要ではないかと思う。

その意味で今後、大学における中核的な拠点がいくつか形成されることになると思うが、人材流動を高める方策が非常に重要である。そのためには私は任期制を導入すべきであると考えている。例えば、A大学の拠点で10年の任期を全うした後に、B大学の拠点に異動して昇任し、さらにそこで経験を積んでC大学の拠点で昇任する。そのようなモチベーション向上、テニユアシップに配慮しつつ流動性を確保することが必要ではないかと考えている。

個人的には、藤井先生が良いモデルになっているのではないかと感じている。理論分野という側面もあるかと思うが、藤井モデルが実験分野にも適用できるかどうかの検討が必要である。

最後に、国際戦略について述べたい。科学としての国際協調と産業技術としての競争あるいは独自開発のバランスが重要である。量子コンピュータはおそらくオープンな国際戦略が必要であるが、量子計測・センシング分野ではクローズドな戦略も考える必要がある。クローズドな戦略を考える際には、当然他国もクローズドするため、日本が優位性を持っていないとうまく戦えないということを念頭に置いておくべきである。

当然のことながら人材が最も重要である。海外の研究者が日本に来なくなる、流動の一環に入

ような仕組みをどう作っていくのか、今後真剣に議論する必要がある。ポイントとして、魅力を感じるような国際的リーダーが日本にいて、拠点における国際化の徹底、もちろん給与体系や言語、昇任制度についての検討が含まれる。さらに、将来の産業界への進出をにらみ、人材が日本で育っているということが望ましい。拠点の国際ネットワーク化は言うまでもない。

標準化に関しては、自分たちが開発したものを如何に市場に入れるかという視点をもって戦略的活動に取り組み、キャスティングボードの獲得を目指して推進していくことが重要である。

量子技術領域においては国際協調が非常に重要であるため、研究者が中心でありつつ政策立案者が議論するための国際ワークショップの継続的開催が不可欠である。その観点で昨年、JST 主催の日欧ワークショップがパリで開催され、キックオフとして意味があったと感じている。今年は日米欧の国際ワークショップを 12 月 16 日～17 日に京都で開催することになっており、日本は私、米国は Jake Taylor 氏、欧州は Tommaso Calarco 氏がオーガナイザーである。具体的な内容を現在検討しているところである。

【質疑応答】

Q：海外から人を呼び込むための待遇や条件の話があったが、同じ条件で日本人も雇用すべきではないか。例えば、10 年後に量子のベンチャー企業が作られ、そこで国際レベルの待遇で人材を雇用する、といった目標を立てるべきではないか。

A：同意する。個人的には企業も含めた給与体系が終身雇用制を前提としているところから見直すべきではないかと感じている。海外から良い人材を集めることと、優秀な日本人を海外に流出しないことの両面を考慮すべきである。

C：研究拠点を作るとすると終身雇用ではないため、最初から待遇面を考えていく必要があるのではないか。

Q：国際ワークショップに関して、日米欧でどのようにオープンな協働をしていこうとしているのか、既に議論は行われているのであれば差し障りのない範囲で教えてほしい。

A：現時点では、日米欧でどのような枠組みで進めていくかは議論していないが、1 月の欧州での会議に呼ばれた際には、協調が大事、という話があった。具体的に何をしていくかはこのワークショップのパネル討論で議論する予定である。

Q：人材が育った後の受け皿について、欧米の産業界はどのような対応をしているのか。

A：直接的には知らないが、現在は欧米での大型ファンディングは大学が中心であり、そこで雇用されているのではないかと。欧米では、量子を学んで来た人がそのまま量子関連の産業界に行くこともあるが、もっと広い視点をもって量子とは直接関係ない業界にも進出している状況になっているのではないかと。つまり、一人一人が量子で PhD をとったことを誇りにしながら別の分野にチャレンジしている。PhD の幅の広さが国力を支えている部分がある中で、量子技術の分野だけにこだわらない人材が育っているのが欧米ではないかと感じている。特に、米国ではベンチャー企業が躍進しており、日本でも量子技術を基礎としながらも幅の広い視点を持ち、かつ新しい産業の芽を見いだす力を持つ人材を切磋琢磨させる環境作りが重要ではないかと感じている。

C：量子情報の分野に限って言えば、海外では人材争奪戦になっていると聞いている。特に最近ではソフトウェア分野でこの傾向が顕著である。NISQ 向けのソフトウェアの技術者の

奪い合いになっており、受け皿がどうこうと言う話は聞かない。むしろ、日本に誰かいい人がいないか、と聞かれるほどである。

3. 2 量子マテリアル領域

川崎 雅司（東京大学）

本日は、量子マテリアル領域における人材育成と国際戦略の取組みについてお話ししたい。

量子マテリアルは、本日の議論の中では最も基礎寄り、おそらくサイエンスの領域だと思う。電子の動きを古典力学の範囲でもある程度理解できる半導体技術が大変成功を収めたことは周知の事実であるが、量子マテリアルでは電子の波の性質をダイレクトに使うことが特徴である。昔は極低温領域の話と言われていたが、今では室温でも堅牢な種々の様々な量子現象を扱えられるようになっている。

本日は人材育成と国際戦略の事例についてお話しするが、人材育成に関しては、大学における博士課程の学生を見ていて感じていることを中心にお話ししたい。



図 3-2-1 理研 CEMS

図 3-2-1 に示しているのは、十倉先生がセンター長をされている理研創発物性科学研究センター（CEMS）である。2013 年 4 月に設立されたが、当時、エネルギーが非常に重要なキーワードになっていたということで文科省の環境エネルギー課が所管となっている。電子や分子など個々の粒子が多数集まったとき、その集合体が新たな性質を生み出す学理を念頭に「創発」という言葉を言い始めた。ファラデーの法則以降、古典電磁気学の範囲ではほとんど進展がないものの、量子力学をダイレクトに使う固体中の電子の新しい創発電磁気学をエネルギー変換技術や情報処理技術の根幹に使うことも考えている。

当初は「創発」という言葉がなかなか理解されなかったが、説明を繰り返していくうちに、今では大部分の方にご理解いただけるようになっている。

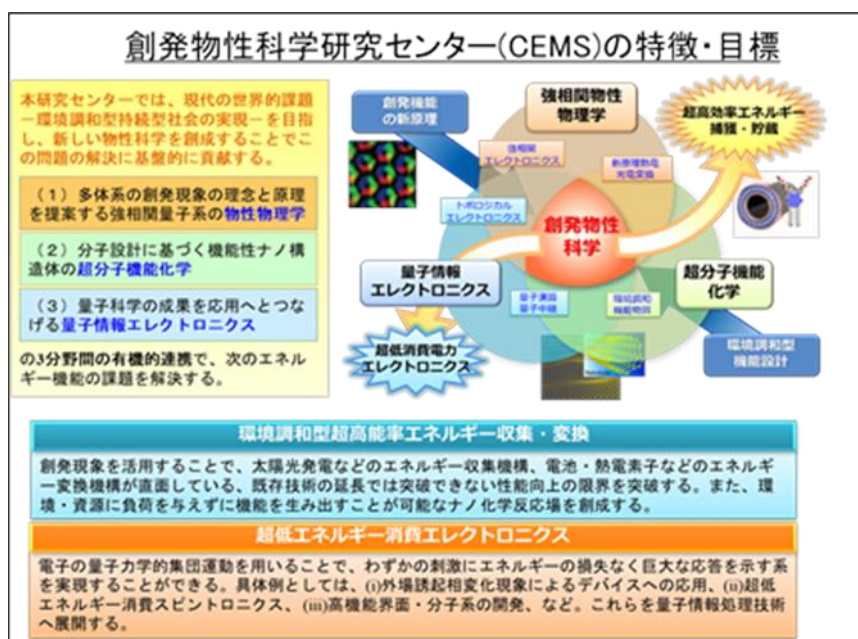


図 3-2-2 CEMS の特徴・目標

図 3-2-2 に示すように、CEMS には「物性物理学」、「超分子機能化学」、「量子情報エレクトロニクス」の 3 つの分野がある。物性物理学分野は量子マテリアルのど真ん中の分野であり、量子情報エレクトロニクス分野には量子技術の世界を牽引するリーダー（中村泰信教授、樽茶清悟教授など）を擁している。超分子機能化学分野は量子マテリアルという意味では一番遠いと思われるが、有機合成のような研究ではなく、機能化学、すなわち、電子の波の干渉を用いた新しい太陽電池の原理解明などの研究も行っている。

人材育成の観点からは、若手をプロモートする創発物性科学研究プログラムというものを設置し、主に 30 代の若手研究者がここで力をつけて転出するといった頭脳循環の湧き出し口になることを目指している。後でも述べるが、理研と東大の連携だけではなく、理研と中国の清華大学との連携講座も作っている。

ここで強調しておきたいことは、CEMS 内では、それぞれ独自性を持った研究室が単に並んでいるのではなく、部屋や装置などに関してほとんど垣根がなく共同研究を行うことが常態化している点である。

基礎研究に近いところに位置する我々にとっての定量的ベンチマークというのはどうしても論文の引用数になるわけだが、過去の統計をとってみると Top 1%論文が約 5%ある。この数字からだけでも我々が如何にインフルエンシャルな論文を出しているかが理解できると思うし、私自身も CEMS が頭脳循環の求心力を持っていると感じている。優秀な若い研究者を集めるには研究資金や環境もちろん関係しているであろうが、それ以上にクリティカルマスを越えたインフルエンシャルな研究者が集まっていることが重要な要素である。若手研究者に「自分もその一員になりたい」と思ってもらわないと優秀な人材を確保することが難しいことを実感している。

CEMS だけではなく、理研の様々な研究センターでは基本的に任期付の研究員あるいは PI が

大半で、その他に技術系・事務系・定年制の方が若干名、という構成になっている。一方で、任期制を無期雇用に転換せよという数年前にできた法律の影響がそろそろ出始める頃であり、理研では鋭意対応中である。

もう一度お伝えすると、人材育成を考える場合には、垣根のない共同研究の場を作っておくことが非常に重要である。私自身は Ph. D を取った後にすぐ IBM の研究所に留学したが、IBM や当時のベル研では小さな研究室はいっぱいあるが、彼らは垣根のない共同研究をしないと生きていけない状況であった。逆の例がマックスプランクのようなヒエラルキー的な組織ではないかと思うが、私としては IBM やベル研のやり方が量子の時代には必要になるのではないかと考えている。



図 3-2-3 CEMS 研究ミーティングの様子

実際に、CEMS では企業から来た方、海外からの留学生、PI、研究主催者、研究員、ポスドク、また東京大学の学生などが一堂に会したミーティングを毎週行っている（図 3-2-3）。以前、論文データ改ざんの問題が世間を騒がせたことがあったが、CEMS では論文に掲載予定の図は全てこういう場で揉んでいて、生データも見ながら議論している。こういうことを常態化しておけばデータ改ざんのような問題は起こるはずもなく、またこういう場での切磋琢磨が若手の成長にも繋がっている。

かつて、アトムテクノロジーという、米国がナノテクイニシアティブを出す前に始まった国家プロジェクトがあったが、当時は半導体産業が活況だったこともあり、半導体会社からたくさん人が来ていたし、アトムテクノロジーという一つのスローガンの下、研究的にも人材育成的にも非常に良い成果を挙げたのではないかと思います。

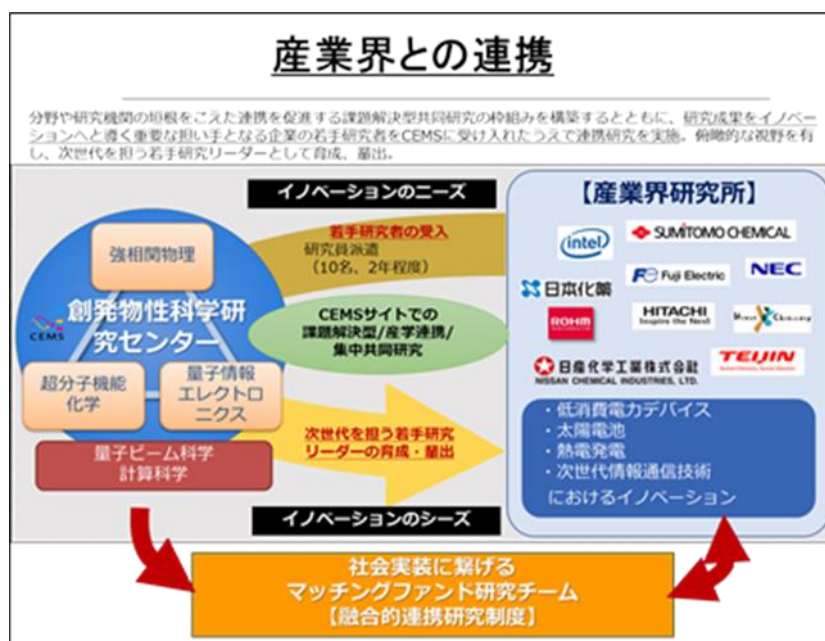


図 3-2-4 CEMS における産官連携

量子マテリアルは基礎科学に近い領域ではあるが、CEMS ではアトムテクノロジー研究体（JRCAT）の形式をモデルに現代風にアレンジした産官連携の体制を構築している（図 3-2-4）。様々な産業界の方が我々のセンターに来ていただく際には集中研究方式が非常によく、競合関係にある産業界の方も含め、オープンな場で議論しながら研究シーズを産業界へ引き継いでもらいながらネットワークを構築している。理研では、このように社会実装に繋がる芽が出たときには、その会社の人を PI として新しいチームを作って橋渡しをする、という事例がいくつか生まれている。

再度、人材育成の話に戻るが、CEMS ではシニア研究者がメンターシップをとりながら、若手のユニットリーダーを育てるという取り組みを行っている。CEMS 内のユニットリーダーだけではなく、東京大学にいる特任講師や特任准教授、あるいは清華大学の准教授の方たちも頻繁に理研に来て、一緒に議論しながら自分自身の研究を進めている。

さらに、東京大学の中に連携講座も作っている。ここでは東大と理研の若い人材をまぜこぜにして互いに行き来しながら大学の中で学生指導も含めて PI の訓練も行っており、非常にうまくいっていると感じている。図 3-2-5 は過去 9 年間の記録である。様々なところから大学の連携講座の特任教員としてリクルートして、おおよそ 3～5 年で転出していくというエコシステムが構築できている。優秀な人にとっては環境を変えることがジャンプするきっかけにもなるため、人材育成にとって環境を変えることも非常に重要な要素である。

「鉄は熱いうちに打て」ということわざがあるが、人材育成も同じである。文部科学省のリーディングプログラムで私は物質科学関係のコーディネーターをさせていただいた。同じ時期に五神先生と相原先生がコーディネーターをされた光量子関係のプログラムもあったが、両者とも非常にうまくいったのではないかな。ここでは 3 つの壁、すなわち、修博の壁、分野の壁、基礎と応用

の壁を破ることを目的にして、広い視野をもつ人材教育をやってきた。

東京大学 国立研究開発法人連携講座「創発物性科学」

設置元：理化学研究所 創発物性科学研究センター（CEMS）
 設置組織：工学系研究科 附属量子エレクトロニクス研究センター（QPEC）

第1期 2010年4月1日～2014年3月31日4年間（特任教員6名）
 第2期 2014年4月1日～2018年3月31日4年間（特任教員3～4名）
 第3期 2018年4月1日～2024年3月31日7年間（特任教員3～4名）

目的
 (1) 持続可能社会の形成に必要な、超高効率エネルギー変換・超低消費電力エレクトロニクスへ向けた革新的な物性科学原理を開拓する。
 (2) 理研CEMS—東大連携の最先端研究環境下における大学院生教育を行うとともに、将来の学術リーダー人材を育成する。

- 運営は、QPECの内規に従い、物理工学専攻との強い連携のもとに行う。
- 特任教員は、物工専攻と理化学研究における審査を経て採用
- 特任教員は物理工学専攻に所属、課程担当、任期4～5年、独立研究室を主宰、メンター教員の配置
- 特任教員は理研のユニットリーダーを兼任

図 3-2-5 東大・理研連携講座



図 3-2-6 CEMS の国際連携活動状況

国際連携に関しては、ハーバードやマックスプランクなど欧米の機関と常に連携をしているところではあるが、中国に関しては特に清華大学とも連携している（図 3-2-6）。過去に私が IBM やベル研に行ったように、今後はおそらく若いうちから中国とネットワークを構築しておくことが重要ではないかという想いもあり、そのような仕組みを設計している。

最後、まとめであるが、荒川先生のお話にもあったように、量子技術立国としてこれから舵取りをしていく際に、量子マテリアル領域は最も基礎寄りではあるものの、それこそ Quantum Leap が起こったときには波及効果が大いではないか。本日は理研と東大の話をしたが、既に理研には量子マテリアルを推進する拠点化が進んでいるため、それを強化することも一つの作戦ではないかと感じている。人材育成に関しては、非常に多くの試行錯誤が必要で、過去の経験

を学びながら進めていくことが有効である。

【質疑応答】

- Q：量子マテリアル領域に関して、今日のお話では情報科学の人が参加できる枠組みになっていないように感じたが、デバイスや材料を実際に使うときに、情報科学の協力は必要にはならないか。
- A：材料開発ではマテリアルズ・インフォマティクス、また柏のカブリ数物連携宇宙研究機構の中でも AI 研究が含まれている。私自身が情報科学とは少し離れた位置にいるため今日のスライドには反映していないが、情報科学との連携は非常に重要になっていると認識している。
- Q：量子コヒーレンスや量子もつれを使う新しいフェーズに入ってきて、またトポロジも新しいコンセプトで、今後、第二波、第三波の新しいコンセプトが生まれることに期待しているところであるが、CEMS は拠点型でトップダウン、東大は各研究者のオリジナリティに基づくボトムアップで研究されている中、新しいものを生み出していくときに理研と東大での運営方法にはどのような違いを感じているか。
- A：おそらく東大のなかでも物理工学専攻は CEMS に近い形になっているように思う。材料研究を進めるときにどのようなスタイルが適切なのかを考えた際、先ほど少し例に挙げたマックスプランクのようなヒエラルキーの強い体制ではなくて、トップの PI が一緒に集まる、例えば ERATO を 4 つ分くらいを束ねた大きなプロジェクト、実際に十倉 FIRST ではそのような体制が実現したが、そういう場では若い人たちがポスドクも含めて垣根なく議論し、PI が何も指示しなくても勝手に協働が進んでいった。理研でも若い PI が偉い先生を捕まえて議論したり、ときには共同研究に至ったりして縦横無尽に動ける研究体制が構築されている。東大でも似たようなことが起こりつつある状況である。
- Q：年齢に関係なく、同じ土俵で研究する、というイメージか。
- A：そのとおり。先述のとおり、トップサイエンティストがクリティカルマスを超える数集まるということが重要で、そういう場に若い人が惹きつけられると、その若い人たちも縦横無尽に議論をふっかけながら自分の研究を進めるようになる。そういう一種のエンタングルメントが常態的に起こる状況にするにはスクラップアンドビルドで新しい箱を作ってもおそらくうまくいかない。
- Q：量子マテリアルのようにサイエンスに近い領域の研究を進める際には、選択と集中をすべきなのかどうか。また、よく大型化のために企業の助けが必要と言われるが、企業の立場からすると、何らかの見通しや見積もりのようなものが知りたくなるが、量子マテリアルではそのあたりはどう考えれば良いのか。
- A：選択と集中はもちろん我々もやっているが、選択するときの基準がおそらく企業とは違って、研究対象とするものが成功したときのインパクトと成功確率のかけ算で判断している。また、榊 ERATO の頃に量子の波の性質を半導体に使おうとしていたことがあり、当時は極低温に限られていたが、今では室温でも起こる現象をいくつか発見している。そういう状況の中で、既存の半導体技術のどの部分を置き換えることができるのか、どういうインパクトがあるのかを、もちろん我々も概念実証（POC）のレベルでは考えるが、そ

の先については企業の方との協働が必要ではないかと感じている。

Q：CEMS が素晴らしい拠点になっていることは理解したが、全員が全員トップサイエンティストになれるわけではないのではないか。

A：ご指摘のとおりで、果たしてトップサイエンティストは育てるものなのか、勝手に生まれてくるものなのか、という議論がある。私自身は環境の中から出てくるのではないかと考えている。結局はその人がどう生きていくかという問題でもあり、人が流動していくときにその人なりに生き方を考えていくのではないかと。私は化学から材料、物理へと分野を変えていったが、私の場合にはトップサイエンティストになるのではないかと、10 年もやっていると飽きてくるので違う分野に飛び込むことになったというだけで、おそらく誰もがその分野での自分の行く末を見ながら、オリジナリティを分野や研究対象も含めて変えていくということが普通に起こっているのではないかと考えている。また、リーディングプログラムにおいても、40 人採用した学生全員が一流のリーダーになってしまったらやかましくてしょうがないので、自然と一流以外の超二流（一流をサポートしながらチームをうまくまとめる能力に長けた人材）が相当数必要なのだ、ということを学生にも伝えている。

Q：物理工学から発展して、例えば半導体産業で活躍されている方が物理工学専攻から多数出てきていると思うが、将来の産業界のリーダーがいつ頃に現れて、あるいはどういう分野に出てくる可能性があるのか、何かわかる範囲で教えてほしい。もしくはアトムテクノロジーのプロジェクトが終了してから 20 年くらい経つと思うが、現時点でどういう人が出ているか教えてほしい。

A：今の半導体メーカーのリーダーは、おそらく 30 年くらい前に物理工学専攻から相当数いるという話を聞いたことがあるが、半導体メーカー以外で活躍しているリーダーがいるのかどうかについて私は情報を持っていない。一方、量子技術に関してリーダーとして活躍できる産業の場が今はまだないので、潜伏期間ということかもしれない。

3. 3 量子計測・センシングにおける各国の研究開発動向：量子慣性センサーに対する期待と挑戦

中川 賢一（電気通信大学）

量子計測・センシングは、1 個の原子やスピンをセンサーとして用いるなど、量子的な性質を利用して物理量の高精度計測を可能にするものである。図 3-3-1 に示すとおり、代表的な例として原子時計、本日のテーマである慣性センサー、ダイヤモンド NV センタなどの磁気センサーがある。量子計測というのは、量子もつれ状態やスクィーズド状態などの量子力学特有の性質により、イメージングをしたりレーザー干渉型重力波検出器の感度を上げたりすることに応用されている。

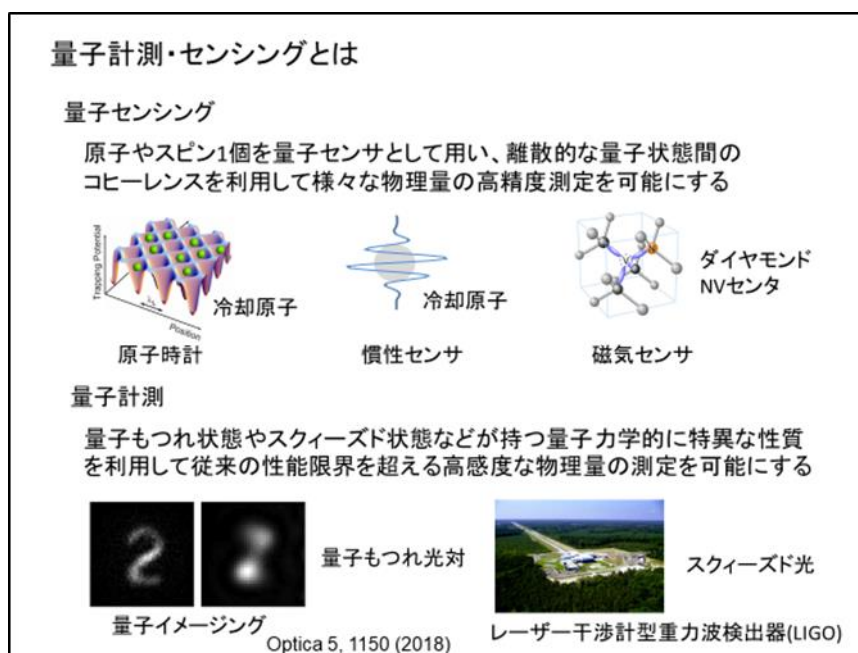


図 3-3-1 量子計測・センシングとは

どのように基礎研究と応用が関わっているかを最初に紹介する。冷却原子の量子技術を応用している分野の一つが量子コンピュータである。超伝導量子ビットによる量子コンピュータも有力候補であるが、実は今一番進んでいるのは冷却イオンを量子ビットに用いたイオントラップ系である。もう一つは量子シミュレーションで、これも冷却した原子やイオンを用いたシステムが最も研究されている。さらに、量子センシングについても冷却原子による原子干渉計（重力、ジャイロ）が代表例であるし、度量衡（計測）分野の原子時計もある。

ここで、冷却原子を得るためのレーザー冷却技術について簡単に説明する。レーザーを使って原子の運動を制御すると、室温から 100 μK ぐらいの温度まで、しかも 1 ms ほどの短い時間で原子を冷却できる。こういうものを 1 個 1 個と並べると周囲環境の影響を受けにくくなり、さらに真空中で原子同士の衝突をなくすと、1 秒～数 10 秒程度の間、極めて理想的な量子状態を維持することができる。これを利用したものが量子センサーである。もう一つは、原子の温度を下げ

ていくと波動的な性質が露わに見えてくるという現象を使う。その最初の実験として、冷却原子ではないが、加速したヘリウム原子によるヤングのダブルスリット実験（1991 年）が知られる。そのたった 1 年後に、電気通信大学レーザー新世代研究センターにおいて、清水富士夫先生が日本で最初のレーザー冷却実験を行っている。つまり、研究開発の初期段階において、慣性センサーの嚆矢となる実験が日本で行われており、我が国の技術力も十分である。アメリカでは、スタンフォード大学の教授である Steven Chu が干渉効果を使った重力加速度センサーを 1992 年頃に実現し、レーザー冷却による原子捕捉の研究でノーベル賞を受賞している。

今、海外における研究開発の方向性として、本家本元のスタンフォード大学では、高さ 10 メートルのタワーを使って原子を落下させることにより、一般相対性理論の弱い等価原理を検証したり異なる原子種で重力加速の差異を測定したりする試みがなされている。ヨーロッパでは、原子干渉のために長さ 2 メートルぐらいのカプセルを製作し、それを高さ 100 メートルのタワーの中で自由落下させることで、5 秒もの長い相互作用時間を確保することに成功している。フランスでは、同じ実験を飛行機による放物飛行で行うことにより、相互作用時間を 20 秒ぐらいにまで延ばした。こういう努力がこの 10 年間行われてきた。

飛行機や潜水艦に用いられている慣性航法では、GPS が使えない環境で、GPS と同等の位置決め精度を実現することが課題である。原子干渉計を使えば、従来のリングレーザージャイロに比べ小型化と高い精度が実現できると期待されている。1997 年に、スタンフォード大学のグループが 2 メートルの装置を使って従来のジャイロを超える性能を報告している。

このように、量子慣性センサーの実験は 20 年以上も前に行われ、大きさ制限がない、実験室の理想的な環境下では原理実証されている。しかし、実用化には、実験室外のフィールドにおける諸々の制約下でも使えることが重要であり、そこが今一番の問題になっている（図 3-3-2）。この問題の解決には、単なる物理だけではなく、幅広い分野の周辺技術と科学を含む知見が必要になる。

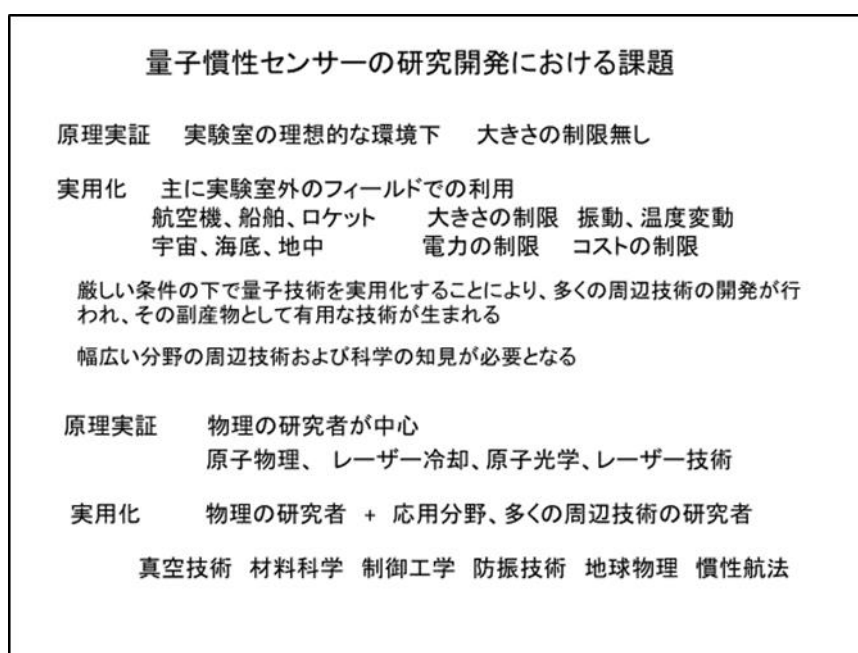


図 3-3-2 量子慣性センサーの研究開発における課題

今ものすごい勢いでこの分野に力を入れているのが中国であり、今日は是非そのことを紹介したい(図 3-3-3)。1 年前に私が参加した冷却原子の国際シンポジウムには、海外から 20 名程度のトップクラスの研究者が集まり、先ほど紹介した飛行機での原子干渉計の実験や、イタリアの研究グループによる原子干渉計を用いた万有引力測定の実験が発表された。

本国際シンポジウムのチェアであった Ming-Sheng Zhan 博士は、我々のレーザー新世代研究センターに 20 年以上前にポスドク研究員として滞在しレーザー冷却の実験を行った後、中国に戻って一連の研究を進めている。彼による今回の発表では、スタンフォード大学と同様に、10 メートルのタワーを作り自由落下の実験を開始したとのことであった。基礎研究としては、アメリカ、ヨーロッパが計画しているとおり、中国でも先ほどの等価原理の検証と重力波検出を始めたところである。その皮切りに、500 人もの参加者を集めた本国際シンポジウムに世界の第一人者を招へいたのである。



図 3-3-3 中国における量子慣性センサーの研究開発の動向

現在、中国では、日本とは比較にならない勢いで、若い人たちが原子時計や量子コンピュータの分野に参入してきている。また、量子慣性センサーに関しても、基礎科学～原理実証だけでなく、地震計測やジャイロスコープ開発が始まっており、武漢のグループが拠点的役割を担いながら国内の様々なグループを巻き込んだ幅広い動きがある。

アメリカでは、スタンフォード大学のグループがベンチャーを立ち上げてジャイロスコープの実用化を目指していたり、カリフォルニア大学バークレー校でも可搬型装置を開発したりしているし、NIST も代表的な研究機関として知られる。また、NASA の冷却原子プロジェクト(図 3-3-4)では、去年、宇宙ステーションにおいて BEC (ボース=アインシュタイン凝縮) の実験に成功したとのことである。宇宙における無重力実験の目標は、pK という極低温下の物性研究や、原子干渉計を使って相互作用時間が十分長い時間をとれることを利用した基礎実験である。同じよう

なプロジェクトはヨーロッパでも進行しており、中国には自前の宇宙ステーションで進める計画がある。

NASAの宇宙冷却原子実験室プロジェクト



CAL(Cold Atom Laboratory)の目標

- ・国際宇宙ステーション(ISS)の微小重力下で1nK以下の極低温を実現
- ・量子縮退ガス(BEC、フェルミ縮退ガス) 温度<100pK 自由膨張時間>5s
- ・原子干渉計 相互作用時間 > 5s 等価原理の検証、ダークマターの検出

Launch and Installation



Deferred to NASA ISS in December 2015 April 2016 launch in a pressurized cargo vehicle

Installation into EXPRESS Rack with Sequenced Control Operations from ISS

Docking with ISS

<http://coldatomlab.jpl.nasa.gov/>

NASA/JPLが中心となって、JILA等のグループと共同で装置の開発を行う

2018/5 ISSに装置を打ち上げ
2018/7 ISS上でBECの実現に成功

ヨーロッパおよび中国でも同様の宇宙での冷却原子の実験を計画

図 3-3-4 NASA の宇宙冷却原子実験室プロジェクト

さて、こういう中で日本はこれからどうするか。日本は出遅れた状況にあるが、電気通信大学を中心として 2000 年から重力波の研究プロジェクトに着手し、干渉計実験を 2005 年に実現している。その後、研究は中断したが、去年から Q-LEAP の量子計測・センシング技術領域で再スタートしている。それ以外にも、一昨年から東京工業大学でジャイロスコープに特化した研究が進められている。我々の電気通信大学は、ジャイロスコープだけでは市場が小さいと考え、重力加速度センサーと合わせて研究開発している。また、ジャイロスコープに関しては、ここ 1、2 年、民間を中心とした研究機関と技術情報の交換をしているし、今年からは東京大学地震研究所や産業技術総合研究所を含めて共同研究を行う予定である。このように、応用研究は、実用的ニーズがある重力計と、慣性航法への利用が期待できるジャイロスコープとを車の両輪として進めるべきである。大学、研究所、民間会社が幅広く連携したチームを作り、目標を明確に定めたプロジェクトとして進める必要がある。

今後の研究開発において留意すべき点を図 3-3-5 に示す。まずはモノを作ることが重要である。モノを作って実際に動かしてみると、様々な応用のアイディアが生まれてくることも多いし、デモンストレーションにより新分野の開拓もできるので、早急に着手したい。それから、多様な分野の人を巻き込むことである。その良い例がレーザー干渉計型重力波検出器である。アメリカの LIGO が世界で最初の検出を行ったが、これはレーザーの研究者、技術者が一堂に会し 30 年近く共通の目標に向かって研究した結果である。こういう研究スタイルが同じように必要である。

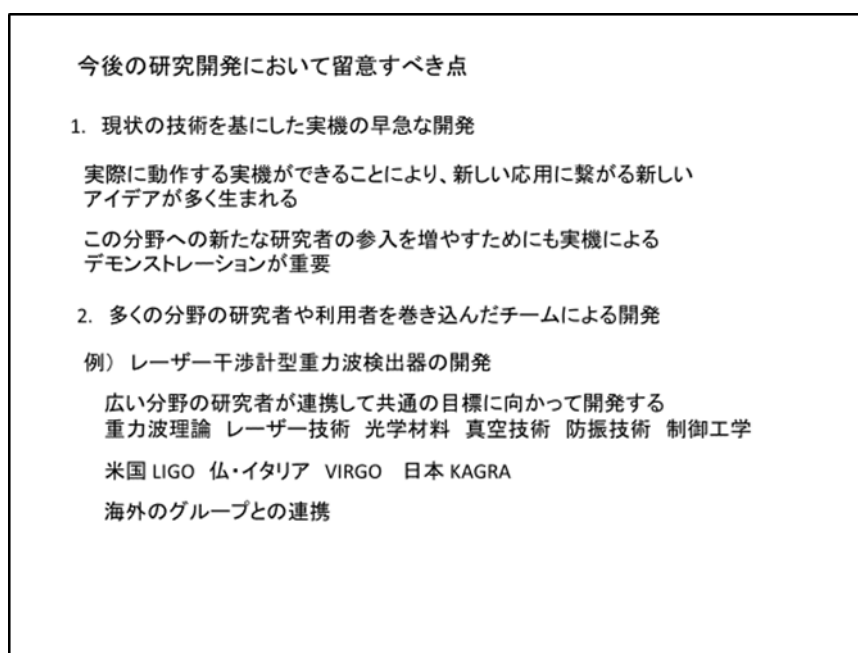


図 3-3-5 今後の研究開発において留意すべき点

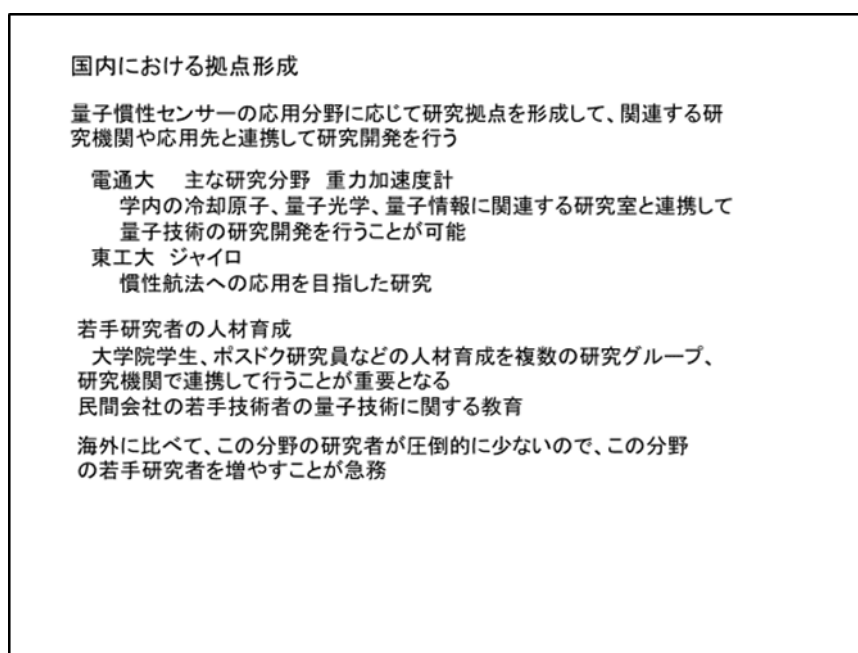


図 3-3-6 国内における拠点形成

国内における拠点形成について図 3-3-6 に示す。慣性センサーに関しては、我々の電気通信大学が国内で最初に重力加速度計の研究を始めた一方、東京工業大学はジャイロ스코ープにフォーカスした研究開発を進めている。これらがこれからの拠点形成において中心になっていくのではないかと考える。若手人材の育成は大学だけではなく企業にとっても一番重要な取組みであり、こういう拠点により進められるのがよいのか。海外では多くの若手が参画してきているが、我が国ではそれをどう育てていくかが鍵になる。

最後に、John F. Kennedy 大統領が、アポロ計画をスタートするに当たって、「10 年後に月に人類が到達する」という決意を述べた演説を紹介する。「達成困難な目標を掲げて多くの人の力と技術を結集する」、「掲げた目標の実現に向け邁進することで、自分たちの能力を評価できる」と言ったが、まさにそのとおりと思う。量子科学技術も同様に、一見、達成できないような目標に挑戦した者のみがその成果、恩恵を享受する。まさに国の力が試されている。是非、我が国も力を注ぐべきである。

【質疑応答】

Q：ルビジウム原子を使う慣性センサーだと原理的には 10 桁ぐらい精度が向上すると思うが、実際は 2 桁か、せいぜい 3 桁ぐらいだ。それはどこにボトルネックがあるのか。もう一つは、諸外国の動向紹介があったが、慣性センサーは完全に安全保障技術で、中国とかアメリカとかは軍が水面下でやっている研究が多々あると思う。状況をどう考えているか。

A：この 10 年以上、日本もこういうのをやるべきだと、スタンフォード大学のグループの動向を常に見ていた。スタンフォード大学では、Mark Kasevich 教授自身が主に科学を研究し、重力加速度計、ジャイロスコープ等への応用は自身で作ったベンチャーの AOSense 社が進めている。既に実用機としての重力加速度計を出しているが、ジャイロスコープに関しては試作機の発表が最近あったものの、それほど順調でないという印象を持っている。一番の問題は振動の影響である。静かな環境では十分性能が出て、車載するとノロノロ運転でようやく検出できるというレベルである。要するに、振動で埋もれて信号の検出が難しく、乗り物に搭載するのは非常にチャレンジングである。

フランスの ONERA が、ジャイロスコープではない加速度計を船に乗せて重力マップ作成に成功した。この ONERA もある意味、国防に関係する研究所だ。重力マップを作ったのも、ジャイロスコープと違う方法で航法に使うためである。一方、中国は国防科技大学で研究が進められているが、そんなに秘密という印象は持っていない。実際のところ、軍の研究所では大学以上のことはできていないと思われ、基礎研究では未熟である。

実用化はすぐ達成できるものではなく、それまでに解決すべきものがたくさんある。だから、最初もっと幅広く研究し、実用性が見えてきたところで秘密に、要するにクローズド・オープンである。いきなりクローズドでやっても、多分追いつくのがやっとなであろう。

Q：最後のスライドでアポロ計画の話が出てきた。達成困難な目標を掲げ、いろいろ乗り切っていくのは大変重要なことだと思うが、アポロ計画は人類の月面着陸という明確な目標があった。量子慣性の分野で、それに対応する目標を掲げることはできるか。

A：今すぐが出せる答えはないが、そういう目標を設定すべきと考える。何か目標があつて初めて数値目標なり何なりを考えることができる。重力波や物理定数の問題が重要なのは、それ自身が基礎科学として駆動力になり、その応用を目標に定めることできるからである。

3. 4 量子暗号ネットワークにおける産学官連携と標準化

富田 章久（北海道大学）

量子暗号鍵配送（QKD）は量子情報技術の応用として一番実用化に近い、と言われ続けて、20年が経過している。その間、近くで見ていた者として、産官学連携のあり方、現況、標準化などについてお話ししたい。

我が国における QKD の本格的な開発は、2000 年に NICT の委託研究が三菱電機、NEC、東大（今井秀樹先生）のジョイントで立ち上がったというのが最初だろう。同時期に JST-ERATO では今井浩先生のプロジェクも立ち上がり、これは日本で最初の量子情報技術にフォーカスしたナショナルプロジェクトであった。この中では量子暗号の理論的、実験的な研究も実施された（図 3-4-1）。

NICT の研究第一期は 2005 年までであったが、この時点で 2 週間手放しで動く量子暗号装置など物としての完成度は高く、実用化の話はその頃からあったのだが、あまり進展しなかった。続く第二期では、高性能化とシステム化・ネットワーク化に取組み、東京 QKD ネットワークで実際にテレビ会議をデモンストレーションするなど、具体的な成果もあった。ERATO プロジェクトで進めた量子暗号の理論研究の成果は、デコイ QKD の理論・実践という形でのコラボレーションにつながった。しかし、それでもまだ実用化には届かなかった。

なぜか、ということをお我々も自問自答したが、本技術のアプリケーションが暗号通信しかないという点、アプリケーションレイヤとの間のインターフェイスや鍵管理などのソフトウェアが出来ていない点、安全性保証が不足している点などが理由として考えられた。物そのものというよりは、その物を支える情報技術が足りないということに気がつき、その後の第三期と ImPACT ではそういった部分に力を入れながらやってきたというのが現状である。それは現在の SIP「光・量子を活用した Society5.0 実現化技術」にも引き継がれている。

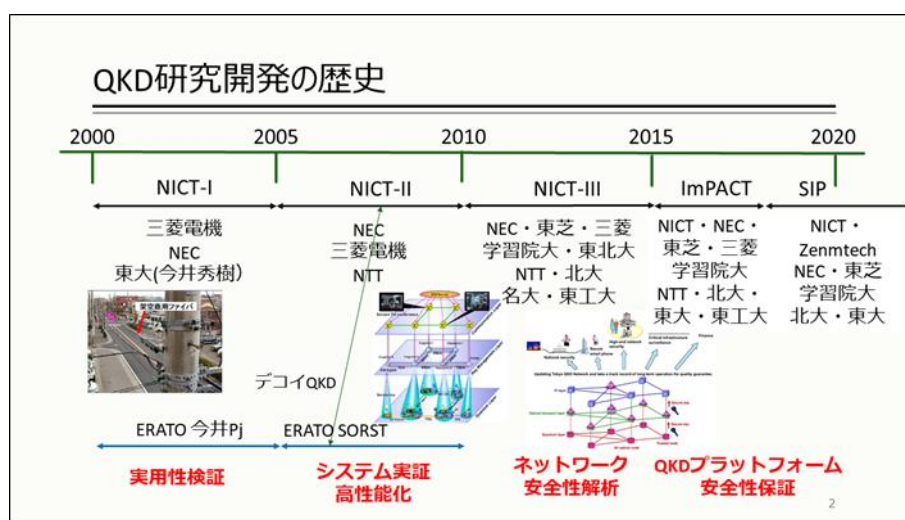


図 3-4-1 日本の QKD 研究開発の歴史

では、現在の SIP で何をやっているかというと、量子暗号の使い方、社会的な応用として量子

セキュアクラウドを提案している（図 3-4-2）。QKD のレイヤで作る情報理論的に安全な鍵とセキュアなストレージとを組み合わせ、何らかのアプリケーションを提供しようという計画で、具体的には医療関係の電子カルテのストレージなどを考えている。SIP ではかなり厳密な工程表を作っており、低コスト化、暗号源、安全性の評価、社会実装に関する研究開発項目まで含まれている。

図 3-4-3 に日本の QKD 研究開発の特徴と課題をまとめた。研究者コミュニティでは、5 年ごとに注力すべき課題というのを明確化し共有することができており、それには NICT における量子暗号研究グループのイニシアティブと委託研究の枠組みが働いていた。ある民間企業が幹事となりプロジェクトを進めることになって、なかなか他の会社のやり方に口を出すのはやりにくく、国の研究機関やファンディングエージェンシーがリーダーシップを取らないと物事は進まないと思う。

我が国の QKD は世界でもトップクラスの実績を持っている。スピード記録は東芝の QKD 装置が持っており、実装安全性という概念や実践に関しても我々が先鞭をつけ、それに対して他国がいろいろとインスパイアされて研究開発が進んでいる。また、QKD プラットフォームという概念や、鍵管理の方法、アプリケーション開発などの分野も我々の方が進んでいると考えている。

ただし、リソースは圧倒的に不足している。都市内の 50 ノードを超えるような大きなネットワークを作るとか、北京と上海を結ぶ 2000 km の QKD ネットワークを作るとか、飛ばした衛星間で量子暗号をすとか、そういった研究開発に関しては完全に遅れをとっているというのが現状である。このような大規模化や長距離化はその気になってお金さえ出せばできるだろうが、衛星量子暗号に関しては人工衛星にまつわる光制御技術開発での遅れは正直あるだろう。

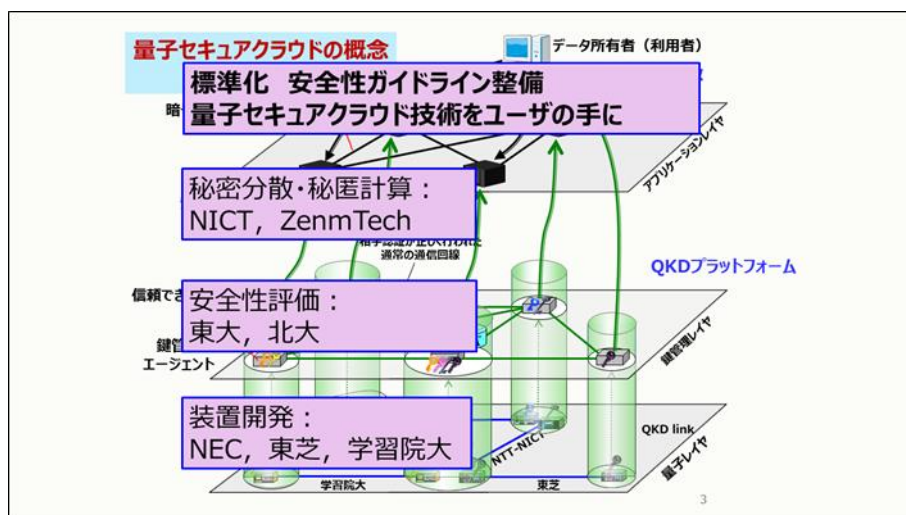


図 3-4-2 量子セキュアクラウド

また、課題を明確化、共有し、単に有名ジャーナルに論文を載せるというのではなく、各期に設定した目標を達成してきたというところは我々として誇りに思っている反面、新しい技術への対応が遅れていたように思う。例えば、一番実用性が高いと思われるデコイ BB84 というプロトコルに注力してしまった結果、ラウンドロビンや MDI といった新しいプロトコルに対しての原理実証は遅れてしまった。これらのアイディアは元々、日本の理論家が出したにもかかわらず、

原理実証までできなかったというのには忸怩たる思いがある。また、将来技術として、シリコンフォトニクスなどを使った量子暗号装置の集積化も必要だが、まだ足りていない。

日本のQKD研究開発の特徴と課題

- 注力すべき課題を明確化・共有：NICTと関係者の協力
- 世界でもトップクラスの実績
 - 世界最高速のQKD装置
 - 実装安全性
 - QKDプラットフォームの概念、鍵管理
 - 量子セキュアクラウド：暗号通信以外のアプリケーション
- リソースの不足：大型プロジェクトで後れをとる
 - 大規模(50ノード以上)・長距離（中国では北京―上海2000km, USでも700km）
 - 衛星量子暗号
- 新技術への対応遅れ(デコイBB84に注力)
 - RR-QKD, MDI-QKD, ...
 - 集積化：Si-Photonicsなど

図 3-4-3 日本の QKD 研究開発の特徴と課題

リソースという意味で資金規模の大きさとの関連を考察する。まず、周知の既存技術でできるものを作る、依頼製作するという段階があり、この段階では例として 50 ノードのネットワークを目指すような大型プロジェクトが可能だろう。もう少し資金があると、他人の保有技術を購入し利用することができる。例えば、米国の光子検出器事業を中国企業が買収したと疑われる例がある。さらに、もっと資金規模が大きくなると、相手が既に持つ技術を延長するような量子技術開発自体を任せたり、量子情報に必要な未知の技術を開発してもらったりすることもできる。ただ、こういったとき任せる側が欲しいものを分かっている必要はない。量子分野では技術の裾野が広く、そのために多分野の技術を使いこなせる人材が必要だと思われる。産官学連携という点では、日本の研究はそれなりに上手くいっているが、光通信産業との連携や量子暗号を用いたビジネス開発など足りない部分もある。これからはその部分をやらなければいけないが、そのときにお金さえあれば良いのかということは問題提起しておきたい。

量子暗号の世界ではすごい勢いで国際標準化が進んでいる。図 3-4-4 は先日上海で行われた ITU-T のワークショップでのスライドを引用したもので、ISO/IEC ジョイントテクノロジーグループ 1 と ITU-T がメインになっているのがわかる。その他には、ETSI や、量子コンピュータ関係では NIST や IEEE、Cloud Security Alliance などでも取組みがある。ETSI はヨーロッパの標準化機関であり、2008 年に Industry Specification Group を立ち上げた先駆けであるが、アカデミアの人が多くて進みがやや遅い印象がある。それに対して、ITU-T では韓国の SK テレコムが中心となり、2018 年にワークアイテムを提案しているほか、日本、中国からも提案がなされている。SG13 が QKD ネットワークフレームワーク、SG17 は量子乱数発生器とセキュリティに関するものを議論している。それぞれドラフトが今作られており中間会合が何回も開かれている。特に SG13 が進んでいる。2019 年 10 月に量子暗号ネットワークに関する初の勧告である Y.3800 が採択されることになっている。これには日本も多大な貢献をしている。

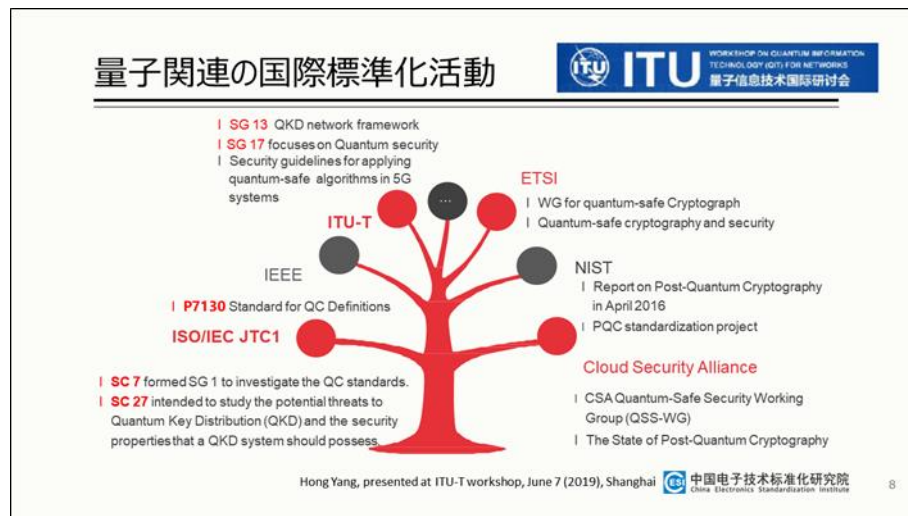


図 3-4-4 量子関連の国際標準化活動

ISO では、SC27 (Information security, Cyber security, and privacy protection) という専門委員会です。まず検討項目が出された後、2019 年 4 月に中国の提案が採用されている。現在、Requirements と Test and evaluation methods という 2 つについて原稿第一版の作成が始まったばかりの状況だが、清華大学や中国の標準化機関、シンガポール大学、東芝ケンブリッジ研究所、ベルギーの標準化機関などといったところがチェアになって進めている。日本側は NICT と東芝が主に対応しているが、中国国内でも標準化の動きが非常に進んでいる。

標準化活動ではもともとヨーロッパが先行していたが、今の国際機関では中国と韓国の勢いが強くなっている。活動の特徴としてはネットワーク、インターフェースなど議論しやすいところから始まり、相互接続性や実証安全性はこれから議論が始まる場所である。対応する日本の標準化団体は TTC や CRYPTREC であり、QKD についての連携が今後重要になると思われる。また、研究者中心の標準化活動には限界があり、経験のある企業や標準化団体のコミットメントが必要である。

最後に我々の活動も紹介する。この 5 月 30 日に「量子 ICT フォーラム」という一般社団法人を設立した。これは NICT、NII、理研、産総研といった 4 つの国研と大学などから量子情報を研究している関係者が集まって作ったもので、産官学の連携促進を狙っている。量子コンピュータ、QKD、量子センサーといった分野で産官学の交流をし、標準化の支援を進めていこうと考えている。

【質疑応答】

Q：QKD は最終的な解決策なのか？ 量子耐性の暗号があれば QKD は要らないのではないのかという疑問がわくが、どのようにお考えか？

A：基本的に、暗号というのは解読技術の進歩に対して更新が必要である。ポスト量子暗号についても、20～30 年のオーダーでは世代交代が必要だろうと思っている。それに対し、量子暗号で作られた暗号は未来永劫に解かれないものである。通信を傍受して、それを後で解読できるようになってから解読するという手がとれないように、すなわち長期の安全性が保証できるようにするために必要であろうというのが我々の見解である。

- Q：量子耐性暗号についてはどう思われるか？
- A：量子耐性暗号に関しては、まず、どこまで実際に使えるものができているのか、という懸念がある。原理的には良いが、演算時間なども含めてまだまだ実用的なものではできていないのではないかと考えている。また、将来解かれるかも知れないという危険に関しては、常に他の暗号と一緒に、量子コンピュータができて RSA が破れるというようにドラスティックな話では無いにせよ、計算能力が上がっていくこと自体が脅威となり得る。また、必ずどこかで実装上のバグあるいは原理的なバグが出ないとも限らないため、絶対に無条件で安全というのは言えないだろう。穴の空き方の度合い、時間スパンから見ると、量子で暗号化した方がより間違いがない応用分野があると考えている。
- Q：量子暗号通信はビジネスになるのか？ 技術としては一定のレベルまですでに確立されており、あとは如何に市場を見つけるかだと思うが？
- C：ビジネスになるかどうかは、お客さんの都合が一番大きい。コストと時間によってある程度のセキュリティは守られている。量子鍵配送は、コストと時間を超越したところで守るという技術である。質問は、これが too much なのではないのかという指摘だと理解している。これは too much ではないと思っただけの方は誰かということ、まず、防衛関係、あるいは国家機密を扱っているところであろう。このような領域では、中国やアメリカで投じられている規模のお金が日本でも投じられるようであればビジネスとしては成立するだろう。絶対守らなければいけない物はいくらコストをかけても守るのだというふうに、国として思えるかどうかの判断によって、これからの日本でのビジネスの正否が決まると思う。
- C：絶対安全、原理的に安全、などという言い方は科学の世界ではそうだけれども、実際に運用することを考えたら、「ここを攻めたら破ることができる」という方法は私でも 10 や 20 は想定できる。言いたいのは、全て相対的な問題だということの中で、こういった技術をどう使うかというのを考えなければ、ということである。
- A：QKD だけの安全性を議論するだけでは不十分であることに同意する。量子クラウドの話にもあるが、全体システムというかアプリケーションやネットワークシステムの全体として、安全性を担保するというものである。一つのパーツとして、例えば情報理論的に安全な鍵を供給できるという機能を持った QKD があり、その上位の研究が非常に重要ということは全くそのとおりである。
- Q：SIP では事業化シナリオが求められているだろう。ユーザーとしてはどのようなところを考えているのか？ また方式としては BB84 を想定して議論されているのか？
- A：SIP で一つの出口として考えているのは医療関係で、電子カルテの暗号化とそれを用いたセキュアクラウド技術である。まず、QKD 部分を除いたセキュアクラウド技術というのを開発しており、既に高知医療センターなどで実証実験も進めている。QKD の方式については、長距離の用途では、安全性が保証され、かつ高速なデコイ BB84 が恐らく当面唯一の解だと思っている。加えて、低コストで普通の光通信と同じファイバーコアで共存できる技術として連続量 QKD (CV-QKD) も重要であり、SIP でも開発している。これは学習院大学がずっと基礎研究を続けており、現在では NICT と NEC のジョイントで実用試作機を作る計画となっている。
- Q：標準化の議論は、ヨーロッパがトリガーとなって、韓国、中国と議論が進んでいるという

話があった。これに日本はなかなか参加できていないということだが、参加しないと日本にとって何か不利益があるのか？ 警告などあれば、ご提供ください。

A：日本が参加していないわけではない。開始のイニシアティブはとられたが、一生懸命に入ってドラフトの中に我々の意思を取り込もうとしている。例えば、ネットワークのアーキテクチャに我々と別のものが標準化されてしまうと、それを使わざるを得なくなってしまうので、東京 QKD ネットワークが長年作ってきたネットワーク技術が標準化に取り込まれるかどうか重要である。これからは、様々なルールが日本でも諸外国でも世界標準に準拠しないとダメということになるだろう。また安全性の保証に関しても、こちらの技術でアドバンテージがあるものを標準化していかないと、他者の技術を買わざるを得ないということになったりする。これはかなり重要な問題だと認識している。

Q：全部光でネットワークが組めるようになったとたんに、すごく大きくブレイクすると思う。今は電気と共存しているためにいろいろなリスクがある。だとしたら、少しずつ成果を出すよりも、今の時代のために集中して取り組むのだと皆で合意・認識して、一生懸命できるような体制作りが重要ではないか？

A：どういう戦略をとるのが今の量子暗号の研究として正しいのかの判断が難しい。今、我々が取組んでいることは、電気も光も含めて、全体のネットワークシステムとして安全性を担保できるようにするということである。そこでは、必ず古典と量子のインターフェイスが存在するため、その部分も含めてセキュアなものを作らなければいけないと考えている。

従って、ネットワークが全光になったときには量子暗号は必須の要素になると思うが、それを待っていてはいけないのではないかなと思う。その前に、量子暗号で鍵が作られたらこういうこともできる、というのを作って見せておく、使っていくということが重要ではないかなと考え、今はその部分に取り組んでいる。全光ネットワークができたときには、そこに今作っている技術をはめこんでいくという形になると思う。全光になるまで基礎研究でずっと頑張っていこうというのは違うのではないかな。

Q：国プロは5年ごとに評価が必ず来て、何か社会貢献、社会実装できそうなものができてないといけないので仕方がない面もあるだろう。しかし、5年ごとのために何か無理をしているようなところもあると思う。その辺りについて、もう少し国家的な合意のようなものがあるといいのでは？

A：新技術を作っていかなければいけないというのは事実だろう。それは基礎研究をずっとやっていけばいいというものではなく、基礎研究を確実に実用技術につなげるための技術が必ず必要になる。そういった意味で短期的かもしれないが、目標をきちんと定めて作っていくというのが研究の一つの形だと思う。もちろん、より優れた量子暗号の方式も含めて、基盤技術の研究を同時に進めなければいけない。

Q：中継技術についてどう考えるか？ 中国での北京・上海の例では、多数の中継が必要だったと聞くが。

A：これはまさに将来の全光ネットワークに備えての研究だと思う。現状として、距離が足りない部分は、中継ステーションを置いて一旦量子から古典情報に戻して再度量子で送りだす、そのところのセキュリティをばっちり固めれば残りのファイバー回線の部分は大丈夫だとするのは一つの考え方であり、ネットワークとしてのフレキシビリティも考えたときに解になると思う。一方で、全光ネットワークで本当に安全が保証されたものを作ろう

と思ったら量子中継技術が必要になる。ただし、こういったパフォーマンスの量子中継をどうやって使うか、という基本的な課題を検討している段階なので、長い目で見てどういうものが本当に必要かというのをよく考えながら研究開発を進めるべきだと思う。

藤井 啓祐 (大阪大学)

最初に、量子情報分野、特に量子技術領域における人材育成の現状や問題点について話した後、これまでの当該分野の取組や大阪大学における取組を通じて、量子情報と学際・融合領域や産業イノベーションとの関連性についてお話しする。

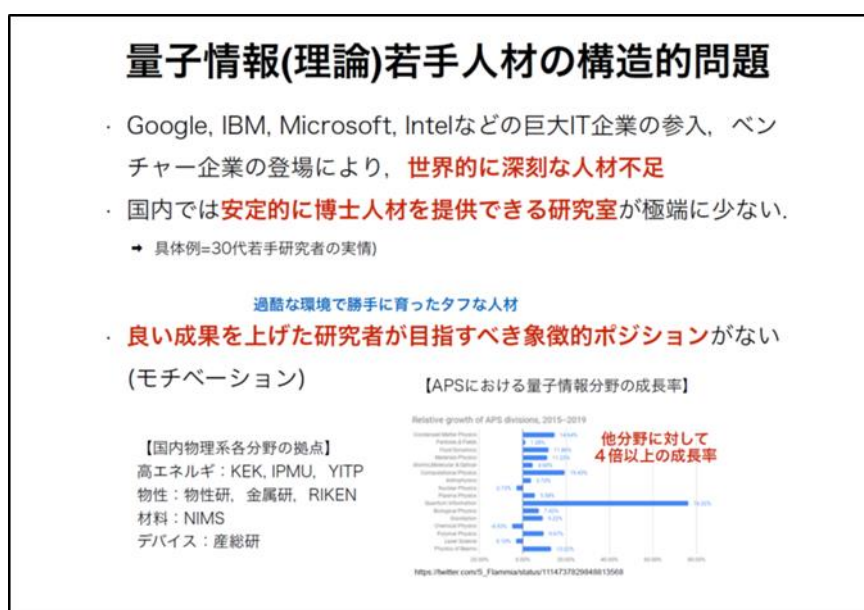


図 3-5-1 量子情報（理論）若手人材の構造的課題

まず、量子情報（理論）若手人材の構造的問題について図 3-5-1 に示す。量子コンピュータの研究開発において、Google、IBM、Microsoft、Intel といった世界的 IT 企業が参入、ベンチャーも数多く立ち上がっていて、日本だけでなく世界的に量子情報の理論やソフトウェア分野の人材不足が深刻である。日本国内を見ても、この分野で安定的に博士人材を提供できる研究室も極端に少ない状況である。例えば、今、30 代で量子コンピュータの理論で精力的に論文を書いているプレーヤーの実情を見てみると、私の場合にはもともとは素粒子の理論研究室出身で、たまたま指導教官が量子であれば何をやってもいいという方だったのでそういう文化の中でこの分野に入ることができた。私の共同研究者の例では、もともとは物性寄りの理論研究をされていたが、一回企業に就職して、その後ポスドクをされたところで量子計算の研究に入られたという経歴をお持ちである。ある企業の方は大学の研究室で実験していたが、その片手間で理論研究を始められた。私が以前に指導した学生で、ずっと実験をやっていた中で D3 から理論に転向した方もいる。さらに、大学では主に量子暗号の理論研究をしていたが、自力で量子計算の理論を勉強された方もいる。つまり、この分野には王道はなく、獣道のようなところから入ってきたような方達ばかりである。

私も含めて、ここに挙げた皆さんは非常にタフな人ばかりで、これは良い面もある。非常に過酷な環境に置かれて勝手に育つとタフな人材になるということのようだが、これからもタフな人材が出てくるのを待てるかという、そういう状況でもなくなっている。加えて、私が当事者として感じてきたことは、良い成果を挙げたときにどこを目指せばいいのか、ということであり、量子情報、特に量子計算の理論分野では目指すべき象徴的なポジションがないのが問題である。

他の分野で見ると、高エネルギー関係だったら KEK、理論物理だったら東大 IPMU や京大 YITP、物性だと東大 ISSP、東北大金研や理研 CEMS、材料だったら NIMS、デバイスだったら産総研など、各分野で「よし、ここに行ってやろう」というモチベーションを掻き立てられる機関があるわけだが、量子計算の理論やソフトウェアではそういうものが存在しない。

一方、米国物理学会における量子情報ディビジョンに所属する会員は、他と比べて4倍以上高い率で成長していて、かなりの人口を占めているようになってきた。したがって、米国もこれから優れた研究成果を挙げそうな有望な研究者が目指せるポジションを作らないといけないという課題を抱えている。

ここで、私の経歴を申し上げますと、博士号を取るまでに5本の論文を書いた。5本というのは少なくとも量だと思うが、D3の12月くらいまでポジションが取れず、何とか阪大の井元研でポスドクになることができた。ポスドクの2年間は10本以上の論文などの成果を出して、その後は京大の白眉センターに異動した。幸い、白眉センターは分野の色がついていない組織なので、私にもトライできたのではないかと感じている。当時、量子情報分野は冬の時代で、量子コンピューティングはそれほど注目されない時代だったが、色のついていないポジションであったので目指せたわけである。その後、東大小芦研の助教を経て、卓越研究員制度というこれまた色のないポジションで京大に戻り、1年半ほど京大で過ごした後、今、阪大で量子コンピューティングの研究グループを立ち上げているという状況である。

このように、私は辛くも生き残ってきたという具合で、順当に何かを目指して今のポジションにたどり着いたわけではないということがご理解いただけたのではないかと思います。

ちょうどタイムリーに日本物理学会誌に面白い記事が掲載されていたので簡単に紹介する(図3-5-2)。これは、平成の飛跡という特別企画の中で、井元先生が「量子情報の黎明期から第二次ブームまで」というタイトルで書かれたものであるが、まさに私が研究を始めた2006年頃は量子情報の冬の時代に入っていたわけである。その前に第一次ブームがあり、公的資金が量子情報に入っていた頃に「いろんな人が群がるだろうね。ただ、5~10年すると実用の困難さがわかってブームが去ったら人も去って行き、結局我々が残って頑張りながら前進するんだろうね」という北川・井元予想をされたそうである。量子コンピュータの実現は今でも難しいわけなので、2000年当初はもっと難しかったと考えられる。この予想は概ね当たっており、実際に人材の世代間にギャップがある。井元先生や北川先生のような第一世代の人たちの後、第一次ブーム後に入るべき人たちの層が非常に少なく、また量子情報に競争的資金が入ってこない冬の時代であった。

幸い、今は第二次ブームになってはいるが、今後どうなるのかということを経験に基づいてきちんと考えていく必要がある。結局何も残らず、私たちが頑張ってるしかない、という状況にならないよう、十分留意しないといけないと感じている。

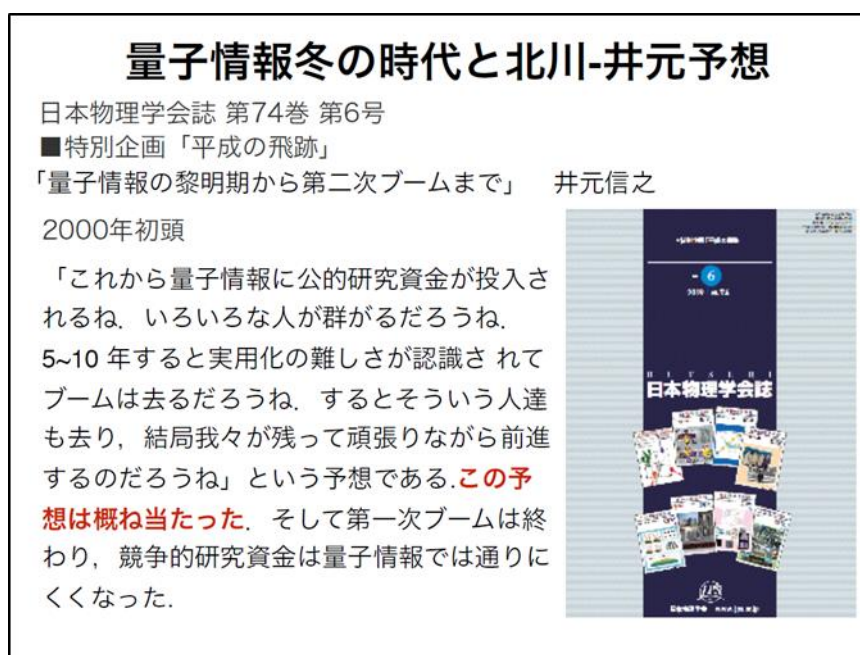


図 3-5-2 量子情報冬の時代と北川-井元予想

過去の冬の時代において、阪大の役割は非常に大きかったのではないかな。そもそも阪大では、1993 年に北川先生が来られて以降、量子情報人材がほぼ単調増加している。量子情報に関わっている PI は年に 1 人くらいの割合で増加、私がこの 4 月に来て今は 26 名になった。周囲の状況が様々に変わる中、20 年以上も量子情報の博士人材を輩出しているという実績が阪大にはある。今、冬の時代を乗り越えて量子コンピューティングが世界的にも盛り上がっているが、例えば、Q-LEAP の Flagship プロジェクト「超伝導量子コンピュータの研究開発」で実験を主導する若手研究者はこの厳しい時代に阪大で育ってきた方である。私もポスドクに辛くも拾っていただいた一人として、同時代の阪大によるサポートが非常に重要であったと思う。

次に、量子情報の人材育成やアウトリーチの取組みについてお話する（図 3-5-3）。まず、第一次ブームで公的資金が潤沢に手当されていた頃の産物としてよかったのは夏の学校で、学生たちが量子情報についてしっかりと学ぶ機会になっていた。また、量子情報学生チャプターという枠組みで学生同士が主体的に集まり、年に 2 回くらい様々な量子情報分野の理論と実験が分野横断的に交わる自発的会合が運営されていた。ここで育った当時の学生たちが、現在伊藤公平先生が研究総括をされているさがけに採択されていることから、非常に重要な機会であったと感じている。さがけというのは若手研究者育成という点が注目されがちであるが、実は CREST や FIRST といった大型資金による研究室への支援が入ることで、所属する学生やポスドクが育成されるという側面もある。若手育成という観点では CREST も重要な仕組みである。

これまでの量子人材育成・アウトリーチ

【第一次量子コンピュータブームの産物】

- ✓ 量子情報夏の学校
- ✓ 量子情報学生チャプター
 - ・ 関西25回、関東25回
 - ・ 他分野からの参入、研究室の紹介

CREST、FIRST、新学術「量子サイバネティクス」の評価書でも優れた特色として紹介

現在のさががけ量子機能領域の採択者(PI)の多くはここから.学生・ポスドクの育成はCREST等が担った→若手育成はCREST・さががけの両輪が必要.

【冬の時代の(年間予算~100万円)の活動】

- ✓ 量子情報の新展開'14(170人), 新時代'15, 新潮流'18
 - 必ずしも学部教育が整っていない量子情報分野の情報の提供. 異分野からの参入・共同研究の活性化.
- ✓ 量子Twitter (2014~)
 - 海外研究者/メディアやディジションメーカー/量子コンピュータを勉強する企業人/量子コンピュータを初めて知る高校生
 - 研究者の使命感と時間外労働ベースから20年持続可能なシステムベースへ

図 3-5-3 これまでの量子人材育成・アウトリーチ

第一次ブームの後、冬の時代が到来するわけであるが、そこで育った研究者たちが自発的に「量子情報の新展開」という研究会を開催し、2014 年には 170 人くらいが参加して盛り上がった。最近でも量子 Twitter で情報共有し合うといった形で地道な活動が続いているが、結局のところ、研究者個々の使命感の下で時間外労働で頑張っている面があるため、これでは持続しないであろう。

よく量子コンピュータの研究は困難な課題を含むので長期的に継続していかないといけないという話になるが、むしろ私は急ぐ必要があると感じている。量子コンピュータが 20 年後にできるとすれば、そのとき 40 歳になる人は現在大学 3 年生になっているわけで、すぐにでも人材育成に手を着ける必要がある。

大阪大学では、量子情報・量子生命研究部門を立ち上げている。量子情報分野というのはそもそも物理学と情報科学というかなりかけ離れた 2 つの分野の学際融合領域である。したがって、基礎物理にも触れないといけないし、量子コンピュータや情報処理がテーマであるため、情報科学の履修も必須である。さらに量子コンピュータを扱うためにはソフトウェア、アルゴリズムも必要になる上、性能評価をするためにはハイパフォーマンスコンピューティング、アーキテクチャの理論も必要である。機械学習というキーワードも基礎物理で普及している昨今、量子情報というのはこれら様々な分野を結びつけてきた「融合のつぼ」になっているため、量子情報を共通の土俵もしくは共通の言語として、新たなフロンティアを見つける舞台としても使えるのではないかと考えている。さらに、量子化学、生命科学も取り込んで、現状では未知の分野も将来的には取り込みながらフロンティアが開拓されていくのではないかと考えている。

最後に、産業イノベーションについてであるが、量子コンピュータはアカデミックには純粋に興味深い研究対象として、産業界にとっては役に立つ実用デバイスとして両立するものである。

ただ、量子コンピュータの実現には課題が山積しているし、現状レベルですぐに役立つかと言え
ばそうではない。つまり、課題を解決する人がしっかりとやるべきことをやらないと前に進まな
い状況である。

長期的には何とかなるかもしれないが、短期的に考えると量子コンピュータが社会実装できる
かどうかは非常に不確実である。不確実というとネガティブに聞こえるが、そもそもできないこ
とが確実であつたらやる必要はなく、できることが確実だったら既に誰かが取り組んでいるため
今からではもう遅い。すなわち、不確実というのはチャンスであり、やらないといけないことで
はないかと私は考えている。実際に、計算機理論や理論物理、理論化学の科学者が中心となって
ベンチャーを立ち上げてチャレンジしているというのが現状である。

米国の Jake Taylor 氏も「We are still in discovery mode」と、量子コンピュータを役に立て
る、産業界に社会実装することはそう簡単なことではなくて、まだまだ様々なことを発見しない
といけない、discovery mode を続けていく必要がある、と述べている。その中で大学などの研究
機関で行う基礎研究が重要な要素であるとともに、量子コンピュータの研究開発には様々なドメ
インがあるため、ハードウェアだけではなく、ハードウェアを使うための基礎理論、アルゴリズム
、応用先や、それぞれの基礎、社会実装に向けて産業界の力も必要になる。

実際に実装するとなると人がたくさん必要になり、世界的に今はベンチャーを中心に高給での
人材確保が進むが、大学ではそれがなかなか難しい。したがって、様々な組織がそれぞれ得意な
ドメインの研究開発を着実に実行することで、量子コンピュータの実現に向けたエコシステムの
構築が必要ではないかと感じている。

【質疑応答】

Q：2003 年頃に CREST が立ち上がって、その後も FIRST とか新学術、ImPACT と、冬の時
代にもそれなりに公的資金があつたかと思うが、なぜ人材の流出というか、世代間にギャ
ップが空いてしまったのか。

A：業界自体が量子コンピュータは実現されないんじゃないか、という暗い雰囲気になったこ
とが原因ではないかと感じている。あの時代に決めつける必要はなかったと思うが、量子
コンピュータは絶対にできません、というメッセージが広く伝わってしまい、量子コンピ
ュータを目指す研究者の心が折れてしまったのではないかと。私自身も当時はポスドクであ
つたが、そういう雰囲気の中で明るい未来が見えずに離れていってしまった人が多かった
ように感じる。あのときに 20 年かかってもやるか、という雰囲気になっていれば人材が
途切れるという事態にはならなかったかもしれない。

C：藤井先生のおっしゃったように、日本はとりわけ業界全体が暗い気持ちになったが、海外
でも同じように量子コンピュータはおそらくそう簡単にはできない、できたとしても何が
できるようになるのかがよくわからない、という時代が長く続いていし、暗号解読以外
にも何か素敵なことができるということが言えないとブームは去って冬の時代になる、と
いうのは言われていた。実際に海外でも研究資金がつきにくい時代があつたが、それでも
人が逃げなかったのはおそらく余りにも物理が面白くて捨てきれなかったということと、
どう考えても量子という方向性が正しいものなのでいずれは何とかなるだろうという根拠
のない楽観論があつたからではないかと想像している。日本ではそうならずにお金がつか
ないことで諦めてしまった直後に、世界的な第二次ブームが到来したように思う。人材的

にも、少なくともここ 4~5 年で海外では物理学以外の方、ソフトウェア、情報工学、電気電子工学の方がどんどん参入してきている一方、日本では相変わらず物理学者が大半を占めていて、それ以外の分野の人にあまり興味を持たれていないというのは冬の時代が影響しているかもしれない。

Q：冬の時代という意味では、実は今井 ERATO が終了した後、後続として本当の純情報屋のプロジェクトが立っておらず、せっかく面白いことをやってきたのに、それを発展させることができなかったのも一因ではないか。社会実装するためには、実際に計算モデルと結びつくことを研究する人がたくさん必要になる。その意味では、今回、これを契機に何かプロジェクトを作るのであれば、考えるべき大きな課題になるのではないかと感じるがいかがか。

A：私自身は情報の人たちとも議論できる程度の知識は持っているが、バックグラウンドが物理に近いので、情報分野でこちらの分野に貢献してくれるスペシャリストに参入してもらうために何をすればいいかわからないという面もある。

Q：量子情報の理論やソフトウェアとハードウェアとの連携というのはどのような状況なのか。先日、IBM Q を使っている方から話を聞いたが、現在の IBM マシンは性能は低いものの、やれることがいろいろある、ただし、ノウハウは全て IBM に吸収されている、ということであったが、日本でも実機があれば状況は変わるのではないか。

A：文科省 Q-LEAP でもハードウェアとソフトウェアの連携を進めているが、実際にハードウェアがあって、そこで物理的に動いているものを考察することは非常に重要で、特に NISQ デバイスをどう使っていくかという部分では、ソフトウェアでハードウェアの性能を引き出さないといけないため、コラボレーションすることが不可欠になっている。IBM にノウハウを吸収される点については、契約関係をしっかり確認する必要がある。一方、Rigetti Computing が提供するプラットフォームはベンチャーであるがゆえにまずは使って欲しいということで契約の中身は win-win になるようになっている。そのあたりは量子コンピュータのハードウェアのベンダーごとに戦略は様々である。ただ、近くに実機があるというのは非常に重要なことだと思う。

Q：人材育成に関して、冬の時代を乗り越えて藤井先生のような方が出てきたというのは非常に心強い。確かに、数年前には米国と比べると全然いなかったのではないと思うが、今はかなり状況が変わってきているのではないか。つまり、情報科学者やデータサイエンティストは世界中で引っ張りだこであることと同じように、今は量子情報、特に理論やソフトウェアのわかる人材を企業も欲しがっている状況のように感じるが、実際はどういう状況なのか。

A：以前と比べると敷居が低くなり、量子情報の世界に入ってきたという学生、若手研究者が数多くいるが、受け皿が用意できていない。つまり、量子情報を研究すると物理もわかるし、情報もわかり、また最近では機械学習も入ってきているので、様々なドメインで役立つ人材を育てる枠組みの一つとしても機能すると思う。しかし例えば、物理のモデリングができて、機械学習もできて、量子コンピュータもできるという人が集まる場所は現時点では用意できていない。実際に私の研究室にも企業でソフトウェアを専門としている方が研究員で来られるといった話が 2~3 件あって今環境を整えているところであるが、一つの研究室で全てできるかと言うと規模的には厳しい。全ての需要を吸収できる仕組み作りが必要ではないかと感じている。

4. 拠点形成・運営と研究推進方策

4. 1 理研計算科学研究センター（R-CCS）およびスーパーコンピュータ「京」「富岳」の概要

松岡 聡（理化学研究所・神戸地区）

理研 R-CCS は、高性能計算 HPC の拠点であり、図 4-1-1 に示すとおり「計算の計算による計算のための科学」をミッションステートメントとして標榜している。計算の科学というのは、いわゆるコンピュータサイエンスにおいて計算自身を研究の客体とするということで、特に高性能な計算を中心に、ソフトウェア、ビッグデータ、AI の高性能化、プログラミングなどを研究している。一方、計算による科学は、その研究によって得られる莫大な計算パワーをどのように国民の関心のあるアプリケーション分野に適用していくことを目指す。生命科学、工学、気象、防災・減災、創薬などにおける様々なサイエンスを「京」「富岳」及び他のスパコンを使って研究していく。さらに計算のための科学、これは例えば新デバイスといった計算の進化を助けるような研究開発である。これらを三位一体の協調活動として、さまざまな国内外の機関、大学、企業の研究者との協力を拡大し、我が国を代表する計算科学の拠点として、本センターは運用されている。我々のミッションとしては、「京」「富岳」などを開発し、それを運用しつつ高度化して、さらに将来の計算進化を図るための研究を行っている。

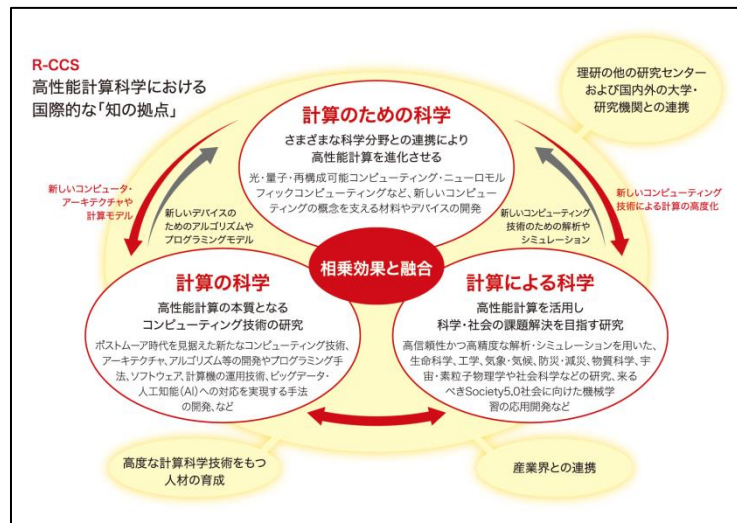


図 4-1-1 計算の計算による計算のための科学

拠点というのは我々だけではない。我々は、各大学にある計算機センター等と連携した HPCI という組織で、トップセンターとして研究及び運用活動を行っている。図 4-1-2 に示すとおり、それと同時に旧帝大及び東工大、筑波大、産総研などを中心としてスーパーコンピュータを運用している計算機センターや、さらにその枠組みの中で研究している拠点というのは数多くあり、これらが横で連携している。つまり、ピラミッドでいえば我々が頂点の研究及び運用施設であるが、全国の大学にも分散した連携拠点があり、例えば「京」や「富岳」ではできない補完的なマシンを導入したり、我々やアプリケーション分野の方々と協力して科学・技術を進展させたりし

ている。

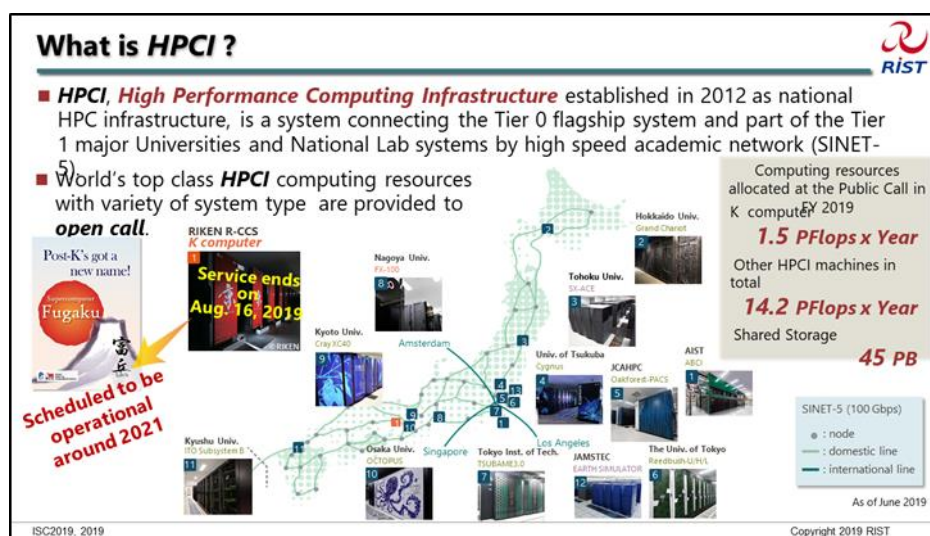


図 4-1-2 HPCI とは

計算による科学という意味で国民の関心事が高い分野を中心に、大規模スーパーコンピュータでなければできないシミュレーションやデータ処理、AI などの研究とそれらの応用に関する様々な成果がある。例えば、防災やタンパク質のシミュレーションによる創薬、細胞モデルレベルからの心臓のシミュレーション、さらに多様な風のコンディションを非常に精緻に再現するような数値風洞などのアプリケーション等がある。

これらの計算機的能力というのは、基礎研究だけに提供されているわけではなく、当然ながら、これらが我が国の産業を発展させることを目標とした様々な仕組みがある。「京」の産業利用枠は着実に拡大し、現在では 180 社以上が使っている。次の「富岳」の時代になると、このプログラムを大幅に促進し、産業利用のさらなる発展を目標としている。

このような産業利用の活動は、ただ単に使いに来るのを待っているだけではなくて、理研のコンソシウム制度を活用して、様々な分野における産業成果の創出を目指している。図 4-1-3 にその例を示す。一つは燃焼に関するコンソシウムで、燃焼といっても発電や一部ジェットエンジン等に用いるタービンの会社が主に参加している。会社単独のシミュレーション技術ではできないようなマルチフィジックスで音響を取り入れたシミュレーションなどを行っている。これは、単に速いマシンを使っているだけではなくて、我々の研究チームが新たなシミュレーション手法を開発するなど、R-CCS の総合的能力をコンソシウムで提供することにより進んでいる。また、自動車の CAE、特に空力系を中心とした自動車の設計に HPC を使っていくためのコンソシウムもあり、数多くの主要自動車メーカーが入っている。他にも、土木建築、創薬のコンソシウムなども計画している。理研全体でも産業応用に関するアウトプットを非常に重視しており、今年度から産官学連携部門を別組織として独立させて、産業育成により貢献していこうという組織の変革を行っている。

研究面については、計算の科学、計算による科学という分野でそれぞれ複数の研究チームがある。研究成果は様々であり、受賞や産業応用、もちろん基礎科学への貢献もあるが、R-CCS 全体としては「富岳」の開発・共用・高度化というのが我々の当座の目標となっている。もう一つは、

テクノロジーやソフトウェアの発展に向けた各層における様々な研究である。特に今後注力していくのは、「富岳」の次のスーパーコンピュータをどうするか、今までの第一原理シミュレーションだけではなくて、AI・機械学習等の経験的手法をどのようにシミュレーションと合致させて取り入れていくか、AI自身を如何に加速するか、などの課題も研究している。もちろん、「富岳」後というのは、いわゆるムーアの法則が終焉していくときにどうするかということで、その中で一部のチームは量子計算等の研究も行っている状況である。

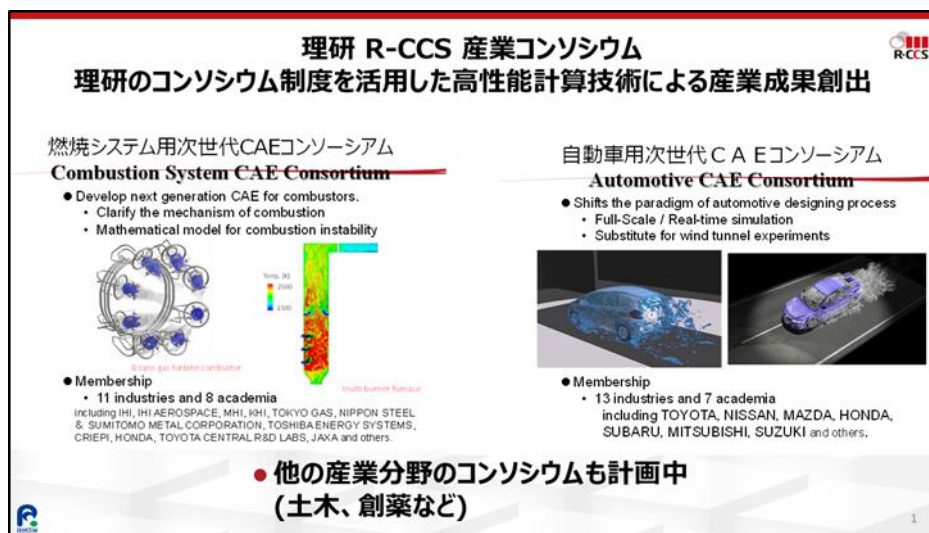


図 4-1-3 理研 R-CCS 産業コンソシウム

これらの活動は、我々が単独ではなくて、理研内、および様々な国内外の研究機関と連携して進めている。他の国内研究機関の方々も一緒になって活動に参加しており、我々はいわばその代表である。例えば、フランスの CEA やヨーロッパの他機関、米国の DOE などとは MOU を結び、多様な共同研究を行っている。

加えて、広報活動、人材育成というのも非常に重要である。「京」がもうすぐシャットダウンすることもあり、特に去年から国民の理解を得るための活動として、計算機室の見学を行っているが、特に子どもや中高生の関心は強く好評である。一方、研究面では、国内外からのインターンの受入れに力を入れており、DOE やヨーロッパの研究機関並みの受入れを目指さないといけないと常々言っている。つまり、インターンが年間何百人という単位でやってくるような研究機関を目指している。その他、講習会やスクールといった活動も、PI のリーダー及び研究チームが主体的に行っている。

「富岳」の開発に関しては、2012 年、実際は 2009 年辺りからずっと取り組んできているが、ようやく完成間近である。昨年の総合科学技術イノベーション会議でも非常に高い評価をいただき、長年の開発を経てようやく製造に着手している。

特徴の一つは「京」からの連続性が挙げられるが、我々の目標は各アプリケーション分野で最大 100 倍の性能を達成することである。つまり、LINPACK で世界一をとるといえるのは全く目標になく、実際のアプリケーション分野での性能向上が一つの目標であった。

また、非常に高いアプリケーション性能と幅広い利用を両立させるスパコンをつくるというのが大きな目標である。そのため、様々なアプリケーション分野の方々、全国の HPC を特に大規

模で利用されている研究グループの方々など理研内外のメンバーがチームを組むことで、図 4-1-4 に示す 9 つの重点課題と 4 つの萌芽的課題を選定し、「富岳」で新しいサイエンスのブレークスルーを行うようなアプリケーションを同定した。



図 4-1-4 富岳に向けたアプリケーション研究課題

開発側としては、「京」と比べて「富岳」ははるかにイノベーションを引き起こす能力が高いと見ている。さまざまな性能指標があるが、端的に言えば、同世代のインテルのプロセッサと比べても何倍も速く、かつ、電力効率の高い CPU ができた。同時に、Arm という年間 200 億個ぐらい売れる CPU のエコシステムを充実させることができ、適用範囲も今までのシミュレーションだけにとどまらず、AI やビッグデータなどの分野にまで広げられる命令拡張等が達成された。例えば、インテル最高峰の CPU と比べても、流体のベンチマークではチップ当たりでは最大で 8 倍の性能が出るものができた。さらに、これは特殊な CPU ではなくて Arm-CPU であるから、通常の Linux だけでなく、Windows も Word も動く。このように汎用性がありながら、1 個 100 万円ぐらいのインテル CPU より最大 8 倍速いものがシステム全体で 15 万個以上集まって「富岳」を構成する。

「富岳」のような大規模スパコンの量子分野への適用について図 4-1-5 に示す。量子計算に対して何ができるかという、様々な量子デバイスのシミュレーションはもちろん、量子計算自身のシミュレーションも可能となる。例えば、ゲート型であれば、800 万 CPU コアと 5 ペタバイトのメモリー空間があるので、単純なアルゴリズムでも 50 量子ビット程度のシミュレーションは可能であろう。最近では探索空間を削減するようなものもあるので、より多くの量子ビットに対するシミュレーションも可能と思われる。また、量子アニーリングを模倣するというのも十分できるだろう。

また、今、一番の問題となっているのは、実際に量子計算はどこに役立つのかということなので、量子スピードアップ可能なアルゴリズムと古典アルゴリズムを実際に比較したり、古典計算と量子計算のハイブリッドアルゴリズムを探求したりする研究もできるだろう。さらに、プログラミングができないとコンピュータは使えないため、超並列を生かした量子計算のプログラミングに必要となるツールチェーンの開発も面白いテーマだろう。



富岳等の大規模スパコンの量子計算研究への適用



- 様々な量子デバイスのシミュレーション
- 量子計算のシミュレーション
 - 量子ゲート型: 800万CPUコア、5ペタバイトの高速メモリ空間
 - 単純なアルゴリズムでも富岳上では50qubit 程度のシミュレーションは可能
 - より先進的な、探索空間を削減するアルゴリズムならばより多いqubitも
 - 量子アニーリング型
 - 種々のアニーリング法の並列適用 e.g., レプリカ交換法など
- クラシカル並列計算と量子計算との比較・連携
 - 量子スピードアップ可能なアルゴリズムとクラシカルなアルゴリズムの実地的な比較
 - 量子計算とクラシカル計算のハイブリッドアルゴリズム
- 量子計算のプログラミングのためのツールチェーンの開発
 - 超並列を活かせるツールチェーンとは

1

図 4-1-5 富岳等の大規模スパコンの量子計算研究への適用

計算がこれからどうやって発展していくかということを研究するのが我々の拠点としての大きな役割であるが、CPU がありネットワークにつながった超並列計算機という形態は「富岳」が最後の世代だと思っている。それが今後、「富岳」の次、さらに次の次、将来にわたって計算が発展していくためには全く新たな技術、例えば光だとか、ニューロモルフィック、量子、様々なパッケージ法だとか、新デバイスだとか、様々なことが組み合わせあって全く新しい計算の世界を作っていく必要がある。これによるポストムーア時代の探求は大きな使命だと考えている。また、理研全体でも、我々を含み量子情報に関する総合的な体制づくりをしている。量子計算が適用可能な分野において、もし本当にうまくいけば、我々は非常に高い関心があるので、ぜひ拠点づくりをしていただきたい。そして、研究進展とともに HPC との協業を模索して欲しい。

【質疑応答】

Q：理研 R-CCS では量子計算のアルゴリズムやソフトウェアの研究はされていない？

A：現状では、量子計算の様々なデバイスの基本的なシミュレーションを行ったり、あるいは量子計算機をシミュレーションしている研究室が中心であり、その一部として量子計算のアルゴリズムなどの基礎研究もある。一方、量子計算を実際のアプリケーションに応用していくレベルのソフトウェアの研究はまだない。今後理研の他のセンター（iTHEMS, CEMS, AIP など）や外部との連携で、それらも探求していった。

Q：量子計算で行う物質の量子化学計算、量子シミュレーションなどにどのような期待あるいは切り分けがあるか、メッセージがほしい。

A：古典コンピュータで行う量子化学計算というのは HF などあくまでも近似である。本来の量子化学計算の規模はエクスポネンシャルであり、それを一生懸命近似してオーダーを N_4 , N_5 にしている。オーダーと精度はトレードオフである。量子化学計算というのは実際にはスパコンのワークロードのなかでも大体 1~2 割くらいを占める非常に大事な計算である。触媒などでは精度が重要であるが、量子計算がもたらす近似精度と計算可能な分子の大きさがどのようにクロスオーバーするかなどというのはまだわかっていないので、ここは逆に探求していくことが大事であろう。

また、他の種類の計算でも、量子計算が量子スピードアップという観点で意味を持つものや、古典アルゴリズムとのハイブリッド型のアルゴリズムを探索していく事が重要である。このあたりは DoE の研究所などのエクサ級のスパコンを開発している海外の研究機関がリードしているので、我々はそれらとの連携を予定している。

Q：海外のグループを見ていると、例えば Google のハードウェアのチームが NASA のグループと協力したり、インテルのスパコン部隊と協力したり、最近では Summit というマシンを使って量子コンピュータをスパコンでシミュレーションして、かかる時間とか電力、精度の限界などを追究したりする研究が結構盛んにされている。また、中国でも、Alibaba のマシンを使って 100 量子ビットを条件付きで何とかシミュレーションするなど、スパコンの研究者がかなり興味を持って取り組んでいる。日本での取組みや興味を持たれている方などについてご意見をいただきたい。

A：Google の例にあるように、量子コンピュータの本当の意味での優位性みたいなものが得られるかどうかというのは、大きいスパコンを使わないとどうしようもない。例えば、100 量子ビットぐらいのシミュレーションというのは「富岳」を使えば、限定された問題ならばできると思う。そのくらいになると、量子化学のシミュレーションに関する様々な知見が得られ出すので、非常に重要だと思っている。多様な研究プログラムの一つとして、量子化学のシミュレーションを「富岳」などのスーパーコンピュータで行うというような研究テーマというのは重要である。したがって、我々理研だけでなく、日本の中で、そういうグループの方々は是非名乗りを上げていただいて、我々みたいな計算機屋と一緒にやっていただくと良いと思う。このような実用的なアルゴリズムの話は DoE がリードしているが、我が国も応用数理などの分野で並列計算をやっている方々が興味を持つのではないかなという印象である。その点、今後日本の機関だけでなく、理研全体の取組みとして DoE などの海外の機関とも連携していく。

Q：コンピュータとしての性能比較についてお尋ねしたい。今、量子コンピュータはまだないが、アニーリングマシンであるとか、QNN であるとか、いろんな形の新しいコンピュータがいろいろ出てきており、そのベンチマーク比較という論文もいろいろ出ているが、大体は当然、新しいコンピュータ側の方がやっているのだから公平な比較になっているのかという議論が常に絶えない。恐らく古典コンピュータ側の方は多分、そういうところですからぐくしのぎを削っておられるので、そちらの方がもし興味を持って比較すると、違った角度からの比較ができるのではないかなとも思っている。そもそも関心がある人がいるかも含め考えをお聞きしたい。

A：実は同じような現象が AI で起こっており、ディープラーニングにおけるベンチマーキングというのが実はなかなか最初はどうもよくいかず、みんな勝手なメトリックで有利な勝手な条件で比較して、こっちがいいとかやっていた。HPC の分野というのは長年こういう速度競走をやってきたので、逆にベンチマーキングというのは我々の最も得意とするところで、それに関する一種の厳格さがある。例えば、どういうふうに比較するのか、どういうふうに測るのか、どうやってそれを分析するのかなどというのは、分野としてずっと取り組んできている。それは様々な HPC のベンチマーカにも反映されているが、コンピュータアーキテクチャーも含めて、それが今 AI にも普及しつつある。最近の AI の学習というのはまさに HPC になってしまっているので、逆にそれをベンチマークするというところ

ろにおいては、きちんとベンチマークができる人たちが HPC の分野から入り込んでいて、標準的なベンチマークというのが少しずつ確立されていっている状況である。

多分、同じようなことは量子計算にもあって、多分、最初は百花繚乱で今の段階では、特に基礎研究レベルではさまざまな方々が自分の研究はすぐれているということを示すために、特定のある条件ですばらしいということを主張されて、それは別に悪いことではなくて、研究としては当然だと思われる。しかし、いざ、公平な比較をするというときは、それとは違ったいわゆるきちんとした厳格な条件だとか、厳格なデータセットとか、厳格なアルゴリズムの指定とか、そのようないわゆるレベルプレーンフィールドをちゃんと設定するということの厳格さが必要だろう。そういうベンチマークをやっているような人たちが入ってくるということに加えて、それが正しい、正当なベンチマークだということをコミュニティ全体で討議して、コミュニティが同意するようなものをつくっていく必要がある。

したがって、もし量子計算の拠点ができるのであれば、世界のその手の拠点と協力して、コミュニティが同意できるようなベンチマークというのをつくっていくということは、非常に大きなアクティビティになると思われる。

4. 2 量子生命科学領域の構築と拠点形成

馬場 嘉信（名古屋大学／量研機構）

本日は、量子科学技術と生命科学の融合領域について、拠点形成、人材育成等を中心にお話します。

我々QSTでは、量子生命科学会を立ち上げており、ここの有識者会議の先生方に量子生命科学というのはそもそも何かということをご議論いただいた。理学、工学、情報、医学、薬学、生物系を中心に、量子と非常に関わりのある人から関わりの少ない人まで、様々な分野の先生に集まっていたいただき、量子生命科学について議論していただいた。

量子生命科学の誕生の背景を図 4-2-1 に示す。量子科学技術の進展に伴って、例えば渡り鳥が量子もつれを使って飛ぶ方向を決めていることや、光合成に量子コヒーレンスが成り立っている反応があることが 21 世紀になって発見された。様々な量子科学技術が登場し、それを生命科学と融合することで生命全般の根本原理の解明と、革新的な、特に医療等への応用が期待されるのではないかと我々は考えている。

同じ有識者会議の先生方によって量子生命科学の推進に関する提言がまとめられた。ポイントだけお話しすると、まず大きな長期目標として、量子論あるいは量子技術を応用して「量子でヒトを理解する」、「量子でヒトを幸せにする」という 2 つがある。これらをキャッチフレーズとして、様々なイノベーションを量子科学技術と生命科学の融合で起こしていこうというわけである。

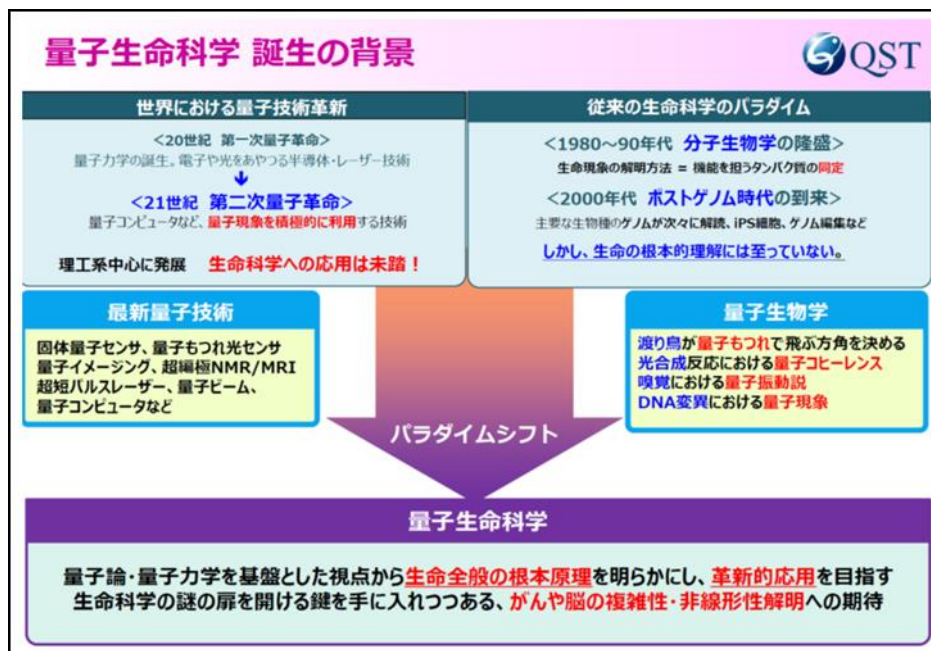


図 4-2-1 量子生命科学誕生の背景

具体的な当面の重点研究テーマとして、次の 3 つを有識者会議で決定している。1 つは先ほども申し上げた渡り鳥や光合成の例にあるように、生命現象の中で量子論的な現象がどれだけ起きているのかということ突き詰めていくことである。このような基礎的研究に加えて、2 つ目は量子センシングや量子イメージングをはじめとした量子科学技術を応用して生命科学を研究す

ることである。3つ目は、この2テーマでの成果をもとに、例えば医療ではがんの診断と治療、または再生医療や、それ以外の情報、エネルギー、農業、安全性といった分野への貢献が期待できるイノベーションを起こす研究である。この3つの柱が現状では極めて重要であるという結論に至った。同じく有識者会議で、それを推進するための推進体制についても議論いただき、今日のワークショップの主題である拠点形成、人材育成が極めて重要であるということをご指摘いただいた。

QSTでは、こうした研究開発を進めるために、今年4月に量子生命科学領域を理事長直轄の組織として立ち上げた。その組織体制を図4-2-2に示す。現在、領域長は私で、研究統括を京都大学の白川先生、副領域長を須原先生にお願いして、4カ所の拠点にわたる13グループ、13人のGLと研究者約100名で始まっている。もちろん、これだけのグループで先ほどの研究を全て推進することは非常に困難なので外部との連携を進めている。

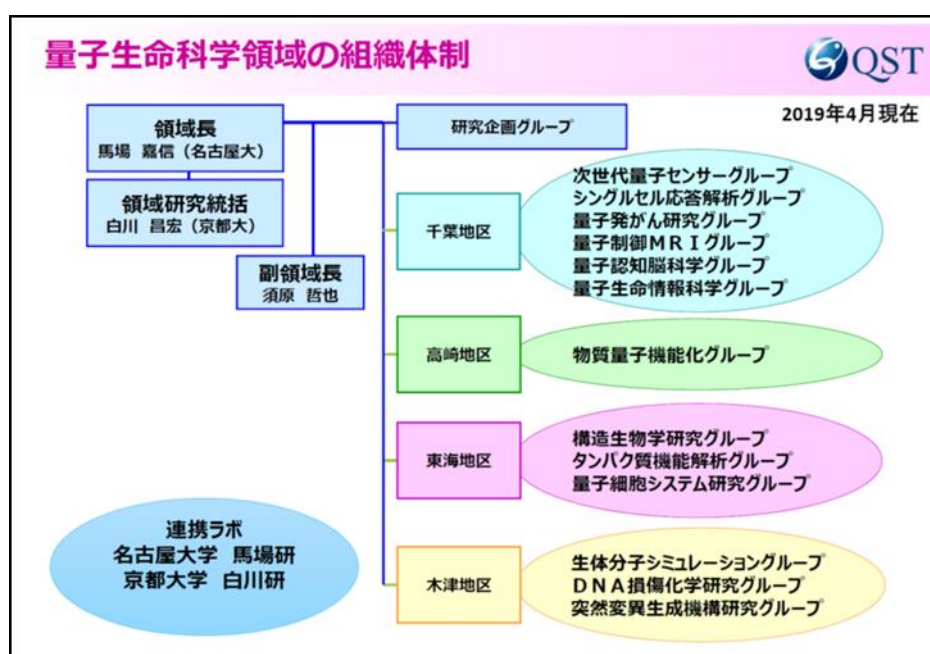


図4-2-2 QSTにおける量子生命科学領域の組織体制

我々が目指すところは、QSTが作った量子生命科学領域に、量子科学技術と生命科学の両方に興味を持っている国内外の研究機関並びに企業の方々に参集していただく拠点を形成して、量子論に基づく生命科学に関する基礎研究をはじめ、量子技術による新たな生命研究と、それを実際のイノベーションにつなげるような研究、あるいは情報科学とも連結した研究を進めることによって、イノベティブな社会に実装可能な技術を開発していくことである。人材育成についても、先ほどご紹介した学会等と連携して進めていく予定である。

生命科学に関する課題を抱えている研究者と、それを解決できる量子科学技術を持っている研究者が出会わなければ、新しい解決策は出てこないと我々は考えており、そのために先ほどのような組織を作った。現状では13グループはフラットな体制にしている。ナノ量子センサーによる生命科学の革新というテーマでは、図4-2-3に示すとおり、QSTのグループが外部のグループ、例えば固体量子センサーや量子もつれセンサーを研究されている外部の先生方との連携ラボを作

ることで、オープンな形で様々な生命科学の問題を解決するような研究開発を進める体制をとっている。新しい量子センサーを使って再生医療やガン発生、あるいは脳科学といったところに研究を進める予定である。

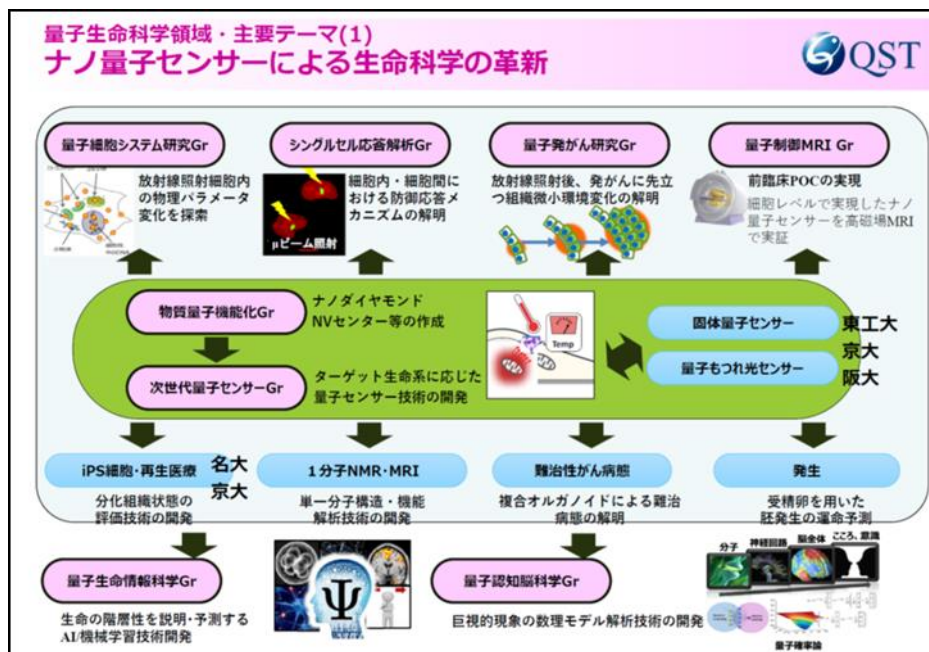


図 4-2-3 量子生命科学領域の主要テーマ：ナノ量子センサーによる生命科学の革新



図 4-2-4 量子生命科学領域の主要テーマ：量子制御 MRI の実現と情報認知

さらに最近、量子認知脳科学という新しい学問領域が生まれ始めており、人による認知を理解するために量子確率論を使わないと理解できないという分野が出てきている。そこで、図 4-2-4

のように脳と量子、情報と量子科学技術の融合というのが生命科学でも極めて重要な状況になっている。

我々の拠点は、量子センサー、量子生命、医療に関係する技術を既に QST 内に持っているが、それと国内外グループとの強力な連携、さらには産学官でのアライアンスを組むことにより、いわゆる国内外のオープンラボなどからなる量子生命科学の拠点を今後さらに強固に構築していきたいと考えている。

量子生命科学のロードマップについては、先ほどご紹介した量子生命科学会の有識者会議により、既に 5 年から 10 年後に達成できる目標と 20 年後ごろに達成する目標を実際の提言としてまとめている。これをさらにブラッシュアップする検討を QST 内で進めており、こういったロードマップに基づいて拠点を運営しながら、実際に量子科学技術が生命科学で如何に貢献できるのかということを研究開発を通して明らかにしていく予定である。

量子生命科学の産業・イノベーション拠点
人材育成、国際戦略、知的財産戦略・国際標準化戦略

1. 産業・イノベーション拠点形成・知的財産戦略・国際標準化戦略

- **量子生命科学領域の発足 (H31.4)**
13研究グループ、研究者約100名でスタート 4月22日 発足式典(永岡文部副大臣来賓挨拶)
- **オープンイノベーション体制の構築**
国内外連携ラボ(量子もつれ光センサ、固体量子センサ、超編極MRI、再生医療等研究G)、産学アライアンス
- **知的財産戦略・国際標準化戦略**
コアコンピタンスな技術の特許網を構築し、一部技術をオープンプラットフォームで公開し、グローバル協働測定法、分析プロセス、分析結果の評価法を国際標準化する

2. 国際戦略・人材育成・学術領域創成

- ✓ オールジャパン体制の構築と国内外との連携による拠点形成と人材育成
- ✓ 学術領域としての量子生命科学の確立・量子生命科学を通じた量子科学技術によるイノベーションの実現
- **QST International Symposium Quantum Life Science**

第1回 (H29.7)

第2回 (2019年12月4日、5日・奈良春日野国際フォーラム)

(来賓挨拶を依頼予定。前回ご来賓：水落副大臣)

第1回QST国際シンポ 参加者314名
- **量子生命科学会の発足 (H31.4)**
H29.4に前身の「量子生命科学研究会」を設立
5月23日 量子生命科学会第1回大会
(通算第3回学術集会) (松尾局長来賓挨拶)
- **「量子生命科学の推進に関する提言」のとりまとめ (H31.3)**
- **量子生命科学会と連携した量子ネイティブ人材育成**
QST国際シンポジウム女子高校生ワークショップ「Joshiikai for Future Scientists」開催(16高校55名参加)
量子生命科学会・JSTさきがけ「量子生体」と協力して、量子生命科学分野の人材育成(計画中)

量子生命科学会第1回大会 参加者273名

図 4-2-5 量子生命科学における産業・イノベーション、国際戦略、人材育成

最後に、産業・イノベーション、国際戦略、人材育成の観点を図 4-2-5 に整理する。産業・イノベーションの拠点形成という観点では、本日ご説明した新たな領域がまだ発足したばかりであるが、そこでオープンイノベーション体制を今まさに構築中である。知的財産や国際標準化の戦略については、今後、新体制が整備された後に具体化する予定である。

国際戦略については、QST 理事長でいらっしゃる平野先生のご主導により QST 国際シンポジウムを毎年開いており、平成 29 年には量子生命科学のテーマで開催した。ここでは、国内外のトップサイエンティストを招へいし、300 名以上の参加を得て大変な盛会であった。実は、今年も 12 月 4 日、5 日に、奈良で同様のシンポジウムを開催予定であり、国内外の先生方にプログラム委員にも入っていただいている。量子生命科学領域における国際的アライアンスの構築という目論見もあり、国際会議を軸に様々な連携を今後進めていく予定である。

人材育成という観点では、量子科学技術と生命科学の融合を具現化するような大学の学科など

はなく、QST 自身も教育の機能を持っていない。したがって、もともとは QST が設立し今年からは一般社団法人として独立した量子生命科学会と連携することで、当面は若手の人材育成を進めていく予定である。今年 5 月に、本学会の第 1 回大会を開催し約 270 名の方に出席いただいた。若い出席者も多く、この分野が将来有望な研究者から注目を集めているということを強く感じたし、このような活動を継続して続けることで人材を育成して参りたいと思う。

先ほど藤井先生からもあったが、できれば夏の学校のようなイベントを量子生命科学会あるいはさがけの領域等と連携して実施できればと考えている。また、1 回目の QST 国際シンポジウムのときは、QST の各拠点がある地元の高校にお願いして、16 の高校から 55 名の女子高校生が参加し、女子会"Joshikai" for Future Scientists を開催した。実際に、日本人だけでなく外国人の方も含む女性のトップサイエンティストの皆様にメンターになっていただき、非常に活発な議論がなされたと聞いている。もちろん、我々はジェンダーバランスを十分に理解しており、次は男子高校生も含めて、将来の量子ネイティブ、量子生命科学ネイティブをつくる活動を進めて参りたいと思う。

【質疑応答】

Q：量子制御 MRI とは量子で制御する MRI を指すと思うが、どういう意味で量子と言っているのか。

A：超偏極状態を利用するというのが量子技術的な部分である。超偏極の技術とは、スピンの MRI、NMR シグナルとして検出されるような状態をこれまでの何倍も作り、それにより感度を上げるものである。

Q：高磁場 MRI と書いてあるが、これは高磁場にしてプロトン以外も見たいということなのか。

A：観測の対象はプロトンであるが、超偏極用プローブとして水以外も合成が試みられている。まだそれほど多くはないが、超偏極状態を作るプローブを東大・山東先生のグループが CREST で合成している。それを使うと、例えば代謝時の変化、がんの代謝による変化などが超高感度で観測できるということである。

Q：拠点が様々な地域に比較的分散している気がするが、運営として何か工夫点はあるか。

A：本来、一つの建物の中、アンダーワンルーフに集まっていたのが理想的でベストなのだが、現状ではまだ相当する建物がないので、QST の各 4 拠点で領域が形成されている。今のところ、ミーティングにテレビ会議を使う程度のことしかやっていないが、将来的には QST の中だけでも 100 名にもなる研究者の皆さんが拠点間連携を推進することを考えている。また、外部との連携ラボを増やすことだけではなく、大学の中にも QST のラボを作り、そこで QST の研究者と学生との連携を図るなど、どういう形が一番いいのか、いろいろ模索中である。

さらに、特に高崎、東海、木津などの拠点は量子ビーム施設を持っているので、全員が 1 カ所に集まるということとはなかなか難しい。そこをどう運営するかも検討中である。

Q：量子生命科学の研究開発を進めるに当たって、こういう分野の人と是非、などという希望はあるか。

A：我々は、量子コンピュータあるいは量子情報の分野が生命科学にとって非常に重要であると考えている。様々な研究から出てきた情報を如何に処理するか、例えば AI を技術によ

る研究などが大事だと思っており、量子コンピュータや情報の分野から是非参画していただきたい。QSTの平野理事長からは、量子科学技術を是非使いたいという生命科学や医学の研究者も集結させた方がいいと言われており、量子科学技術と生命科学の研究者が一番簡単に出会える場所としての拠点を目指したいと考えている。

Q：センシングというのが非常に重要になってきて、そこに量子というキーワードが入っている。午前中にダイヤモンドNV中心やジャイロスコープなどの話があったが、この量子センサーはどんなものを期待しているか。

A：既に取り組んでいるのは、ナノダイヤモンドのNV中心を利用して、これまでなかなか難しかった細胞内の温度、電場、pHの計測である。細胞の計測はこれまでも研究されているが、それを例えば動物や、まだまだ難しいが人の中で、1個1個の細胞レベルから現象をセンシングしようという試みである。例えば、iPS細胞を注射したら、それが肝臓へ届いているということがわかるが、本当に肝臓で治療が進んでいるか、肝臓でその細胞はがんになっていないかなどの情報は従来技術ではわからない。それがこのナノダイヤモンドNV中心によるセンサーで解明できるのではないかと考えている。

ナノダイヤモンドNV中心によるセンサーはQSTの中で研究しているが、これから京都大学の竹内先生らのご協力で量子もつれ光センサーの生命科学の研究への応用も是非進めていきたい。そのときに大事なのは、生命科学の一番重要な課題は何で、それを量子センサーでどう解決できるかというマッチングの機会を提供できることである。我々の研究領域の中で、マッチングによる成果を挙げていきたいと思っている。

Q：量子生命科学の研究を理論的な立場で先導をされている方を何人か挙げていただけないか。日本人でなくてもよい。

A：一番有名な方の一人はMcFadden先生で、量子生物学という本を書かれているし、QST国際シンポジウムで招待講演もしていただいた。日本人では神戸大の田中先生が情報系でいらっしゃるが、世界的に見ても、またアメリカ、ヨーロッパ、中国でも、量子と生命科学の融合というのはまだ始まっていない状況と思う。

5. 産業・イノベーション

5. 1 量子コンピュータ研究開発の推進にむけて

萬 伸一（理化学研究所・和光地区）

量子コンピュータについては、日本工学アカデミーで調査プロジェクトを立ち上げ1年ぐらい活動したので、本日の発表はその結果をベースにして報告したい。

高性能コンピュータというものへの要求というのはとまらない、その一方で、デバイス技術を初めとして、だんだんと限界が見えてきている。ヘテロジーニアスなコンピューティング、要は新しい方式のコンピューティングが受け入れられやすい状況になってきており、その中で量子コンピュータが浮上してきている。D-Wave で量子アニーリングマシンが商用化されたこと、それからグーグルその他で開発が進んだことでさらに期待が高まっているのが現在である。図 5-1-1 は、世界の動きとして、企業による量子ゲート型コンピュータの開発を整理したものである。企業がやろうが、国がやろうが、量子コンピュータの開発は時間がかかるものだが、これだけの企業に取り組んでいるということだけでも、大変な状況であるということがわかる。



図 5-1-1 世界の動き：企業による量子ゲート型コンピュータ開発

日本では、文科省による Q-LEAP 量子情報処理領域と、JST から ERATO というプロジェクトがそれを担っている。図 5-1-2 に示すとおり、Q-LEAP は、大きなフラッグシッププロジェクトと基礎基盤のプロジェクトに分かれ、新たな候補になり得る技術も研究している。また、ハードウェアとソフトウェアの両方を対象としており、バランスのとれた体制になっている。

Q-LEAP の当面の戦略として、日本発のハードウェアを提供し、日本の技術競争力強化と産業化への足場を確保することで、応用探索とかミドルウェア、システムアーキテクチャー研究開発を実践できる、マシンの提供をできるだけ早くやることをミッションとしている。ここでは、量子ビットの基礎技術の蓄積を生かして、低エラーレートでスケーラブルに量子ビットを集積できる技術をつくり、なるべく早く数十ビットの領域に達する。そのための量子ビット技術、3D 実装技術の研究を行っている。当面は可能な限り、既存技術をベースに進める。

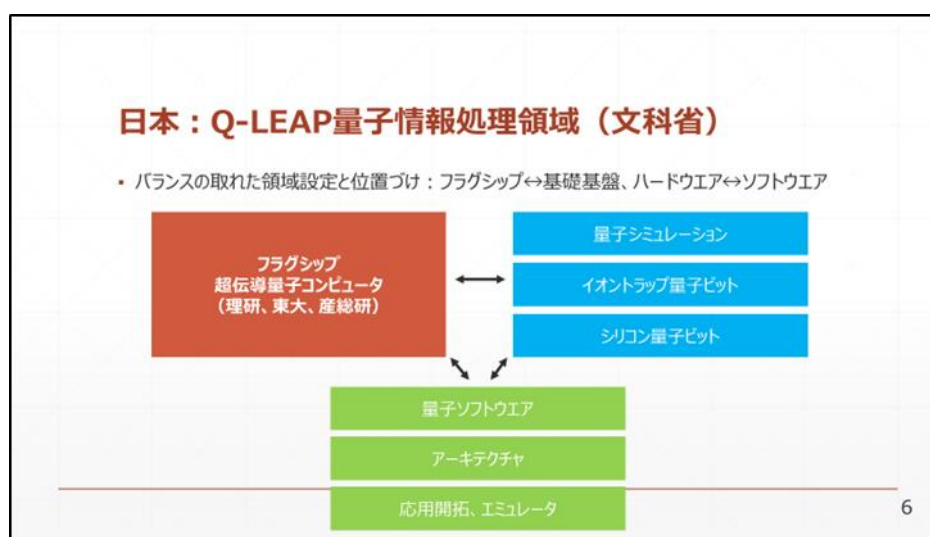


図 5-1-2 日本：Q-LEAP 量子情報処理領域（文科省）

将来の本格量子コンピュータへというフェーズに向けた道筋を図 5-1-3 に示す。今紹介したファーストステップで数十ビットの領域に到達し、量子超越性の実証、及びそのポテンシャルを持った領域へまづいく。問題はその先である。ビット数を優先して集積を目指すか、エラーレートを加味した真ん中をいくか、エラーレートをさらに下げる方に行くかの選択があるし、多分、現状技術の実装限界もある。また、NISQ アプリが非常に研究され、アーキテクチャー研究も相当進んでいるという中で、今、道を一本に定めていくことはなかなかできない。

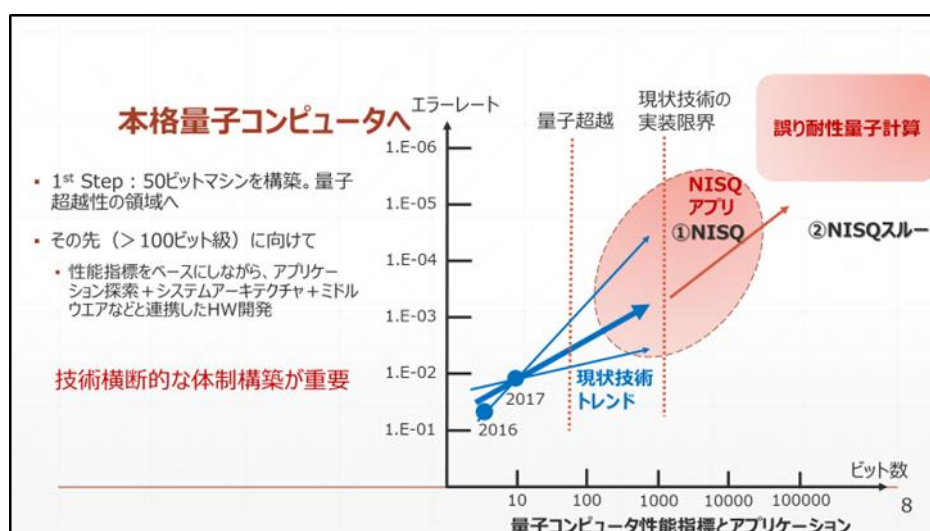


図 5-1-3 本格量子コンピュータへ

つまり、そういったアプリケーション探索、システムアーキテクチャー、ミドルウェアなどと連携してハードウェア開発をやらないと、正しいところへ到達できないだろうと考えている。技術横断的な体制構築をやって、量子コンピュータは進めていくべきである。

今はデバイスの研究をやっているが、今後の量子ゲート型コンピュータの研究は、ソフトウェア

ア、システム化を加えた三者が相互に絡み合いながら進んでいくと考えている。やるべきことが様々あるが、デバイス研究であれば、ファブの充実だけでなく、コヒーレンスの崩壊要因などにナノテクや材料の知見が重要になる。将来有望な他原理の候補を基礎研究の一環として進めていくことや、ソフトウェアはもちろんコンピュータサイエンスや応用、情報理論そのものの3つの課題も必要だ。アプリのアルゴリズムやエラー訂正の問題、シミュレーションの高度化で知見を得ていくとともに、NISQマシンと古典コンピュータとのハイブリッドの可能性も追求しなければならない。さらに、システム化研究、多分、100ビット以上になるとすぐに派生してくる問題だと思うが、そこにはいわゆる物理ではなくて電子工学やマイクロ波工学、低温工学の知識が必要になってくる。

量子コンピュータに魅力が出てくれば、おのずと、例えばデバイスであれば製造装置メーカーやファンドリー企業が協力関係になるだろうし、ソフトウェアであればソフトウェア会社や情報サービス会社、あるいはユーザとなり得る人たちに関心を持ってもらえる。システムは、実は部品メーカーや計測器メーカー、コンピュータメーカーが得意とする分野であり、これらの企業の関与が期待される。

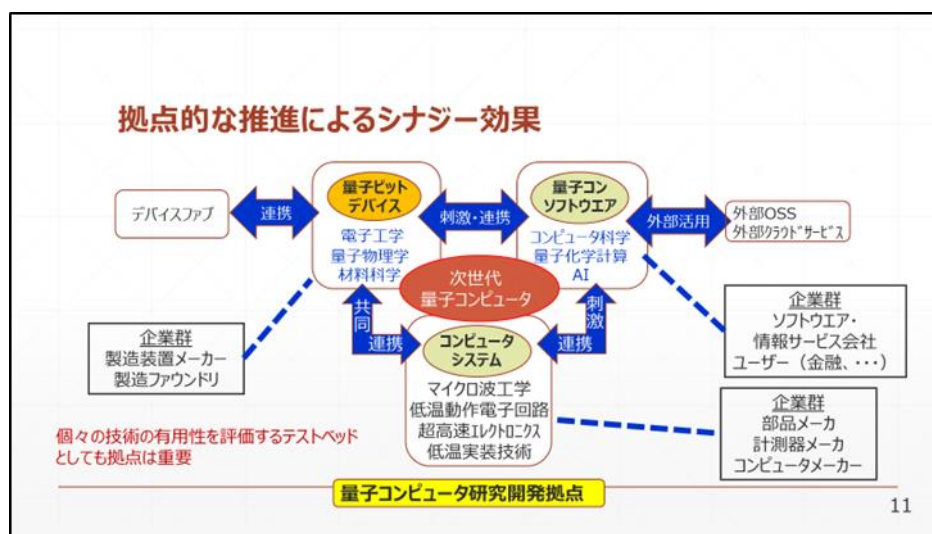


図 5-1-4 拠点的な推進によるシナジー効果

やれることは有限だが、周辺にある尖った技術を持った研究室との交流、ここにキーパーソンがいれば、相互交流することによってさらに研究開発の加速も期待できる。特にソフトウェアは、同じ研究拠点に必ずしもいなくても良いので、様々な分野から研究の知恵を集めて加速するのに効果的だろうし、大学が関与して相互交流が図られることによって人材育成にも効果がある。融合的な仕事と非常に尖った仕事とを行き来する学生には非常に効果的な教育になると期待できる。海外では拠点化がなされていて進められている。

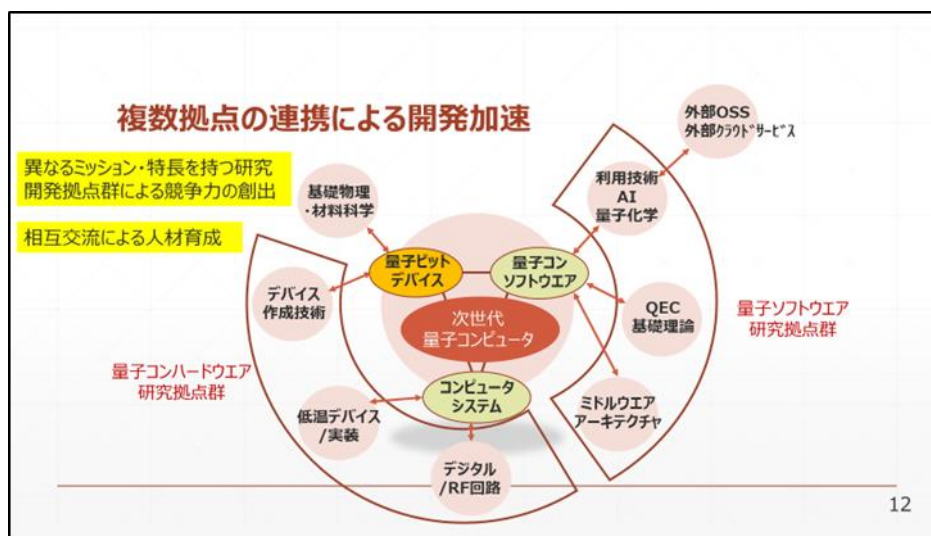


図 5-1-5 複数拠点の連携による開発加速

最後に産業化を考える。こういった拠点では、必ず出口問題が顕在化してくるが、コンピュータの研究開発をやるのだから産業化との関わりが非常に重要である。コンピュータの研究開発を推進する観点だと、コンピュータを売る、あるいはコンピュータでどういう事業をするかが出口であると普通は考える。

真に実用的な量子コンピュータの実現には今から 10 年はかかる。10 年先を最初から見ておくことも必要だが、それだけではない。プロトタイプの開発期から運用期と本格運用期で出てくるプレーヤーが違ってくるかもしれないし、それぞれのプレーヤーがそれぞれの事業モデル、あるいは事業の見込みを持っているはずである。

今、日本はプロトタイプ開発期にある。アメリカは既にプロトタイプ運用期と思うので、例えばアプリケーションとかサービスレイヤーでは、日本が量子ビット回路をつくるのに必要なものという観点で協力してもらおう。また、アプリケーションを探索したい人は、例えば IBM Q のような枠組みを使って研究開発をやるということになる。

では、産業としてはどういうところが重要かというと、関連する部品やデバイス、装置などの研究開発も加速することになる。結果的に量子コンピュータができるかできないかわからないけれども、非常に難しい開発を進め、その会社の技術力が上がった結果、別の製品に応用されていく可能性はある。こういうフェーズでも、企業に関わらないかというところではない。運用期には、ソフトウェア会社や情報サービス会社がどんどん連携すると思うし、本格運用になったらアプリケーションやシステムソフトなど、そういった分野が非常に伸びて連携することができよう。

当面、量子コンピュータをいち早く提供するというところに力点を置いているが、中長期的にはもう少し本格的な量子コンピュータをつくれる体制を整えるべきである。産業化へ向けて長期的な開発となることを前提に、各フェーズに合わせた、ふさわしいプレーヤーと強く組んでいく戦略が必要なのではないかと思う。

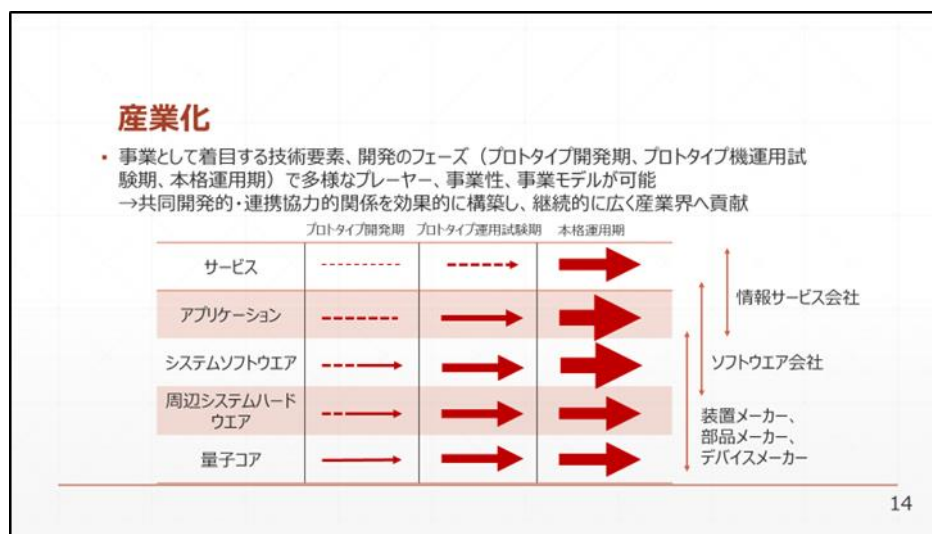


図 5-1-6 産業化

【質疑応答】

- Q：一番感じるのはキラーアプリの欠如ではある。最初は暗号を何とかすることがキラーアプリと言われていたが、逆に初期の段階よりもキラーアプリ、その方向性が見えなくなっていると思う。どういう方向性を感じているか。
- A：キラーアプリは大事だと思うが、今、ちょうどアプリの方が IBM Q を使ったり、あるいは自分でシミュレータをつくったりして、機械学習と比べたり、量子化学とか、材料系のアプリとか、日進月歩で提案されていて、以前に暗号解読一本でやっていたときに比べるとはるかに豊かな提案がなされている。それほど心配していない。
- Q：産業化で、量子コンピュータなり、量子通信なりにかかわるところを徐々に事業化していく考え方もあるが、断トツシステムを目指している途中で、副産物として、既に事業がある検出器とかの性能を上げる展開というか、そういうのも考えるべきじゃないか。
- A：例えば量子センサーのようなものに、量子コアの技術を展開できる、あるいは非常に高精度な装置開発で、量子計測とかの分野、あるいは量子中継器に入っていけるところはある。量子にかかわらなくとも、非常に高度なマイクロ波制御ができるわけで、そういうものは横展開できる。コンピュータができるまでは出てこないと考える必要はない。
- Q：すごく小規模から足りないところを少しずつ補って大きくなっていくと思うが、それぞれのサイズでできるものは何か、いつごろ、どういう制約のものが出る、その中で、どういうアプリを解きましょう、どういうアプリなら世間は驚くと議論するフェーズが重要だと思う。ハードだけでなく、アプリ、ソフトとうまく連携する工夫があれば良い。
- A：そのとおりだ。途中のフェーズでは事業にはならないでも、しっかりと見せていくことが大事だと受け取ったが、それはもちろん、そのとおり。
- Q：キラーアプリの話が出たが、米国とか、グーグルとか、そちらではどういう議論がアプリケーションについてされているのか。
- A：学会などでは、アプリとか、ソフトウェアに関しては日本とほぼ同レベル。アメリカは、ハードウェアがかなり先行しているのは確かだが、ソフトとか、アプリケーション探索で

はほぼ同レベルで、きょうも議論になったようなことが言われている。材料計算とか、機械学習の適用とか、あるいは量子コンピュータと古典コンピュータをうまく組み合わせた性能向上とか、そういうところが今、盛んに行われている。

- Q：キラーアプリが量子ケミストリーだったり、マシンラーニングだったりあったとき、ハードウェア側に、要請というか、制限というか、ある程度、コンストレイントをかけたほうが性能としては出ることがあるのか。今、ハードウェアの開発では、世界的なトレンドとしてジェネラルパーパスを目指していると思うが、その中で、NISQ かどうかは別として、パーパスを少し制限して性能としては向上できるみたいなさじかげんというのは何かあるのか。
- A：まさにそういう一つの答えがない、コンピュータをこういうふうにつくればよいというふうにまだゲート型はなっていない。だから、ソフトウェアとか、アプリケーションの人たちと緊密に連携しながら最適ハードウェアをつくっていくとまずい。
- C：今はそういうことを論じる段階ではない。例えば量子機械学習とか、そういうものが実用規模になるのは、もうちょっと規模も大きくなって精度もある程度はよくなる必要があるので、今は懸命に頑張るだけ。その先に特化ということがあると思う。
- C：そのとおりだ。あと、キラーアプリに関しては、最近はいろんな多様性も見せていて、例えば乱数でサーティファイドランダムネスという考え方があって、複数のプレイヤーがいるとベル不等式を使ってランダム性を担保できるけれども、複数でどうやって量子的なものを共有するかが難しい。そこで、サーバーが提供する乱数の、量子コンピュータによる量子ランダムネスの検証をグーグルが NISQ アプリとしてやろうという話が出てきている。そういうのが今後、たくさん出てくる。そういうのが出てくるためには、そういうことを考える人が必要で、情報科学とかソフトウェア工学をやっている人たちの思考が必要なので、そういうコミュニティをつくっていく必要がある。

5. 2 ベンチャー企業からみた量子コンピュータ技術とディープラーニング技術の共通点・相違点

平木 敬（株式会社 Preferred Networks）

本日お話しすることは、会社の見解というよりも私個人の意見である。

まず、Preferred Networks (PFN) を簡単に紹介したい。AI 一般ではなくて深層学習（ディープラーニング）をキーテクノロジーに、様々な企業と協業している会社である。ディープラーニングとは、ニューラルネットワークを非常に深い多段のネットワークを使って機械学習をするものである。グーグルによる 2012 年のいわゆる「キャットペーパー」の成果によりブレイクし、これまでに画像認識や音声認識など多くの分野に応用されている。

PFN は 2014 年に設立され、社員数は現在 250 名と結構多い。非常に優秀な方々に来ていただき、主に交通システム、自動運転、産業用ロボット・機器、バイオ・ヘルスケア、パーソナルロボット、クリエイティブ、スポーツなどというような分野を対象に日夜開発を進めている。それらを支える技術として、Chainer というソフトウェアやディープラーニング専用のスーパーコンピュータを現在開発中である。

社員数は 2 年で約 4 倍と急成長を遂げ、経営も安定している。優秀な人に声をかけても、このような小さい会社に喜んで来ていただける。なぜなら、ここには本当に優秀な人がたくさんいて、その下で働きたいと思うからである。この意味では、やっと日本もアメリカ並みになったのかというのが私の正直な感想である。実は、これがベンチャービジネスの一番大事な点である。つまり、量子でベンチャーを立ち上げるとしたら非常にいい人を雇うことで、やりがいのある面白い仕事ができるとの周囲からの期待感を醸成し、優秀な人がそれを胸に入社してくるような流れをつくらなくてはならない。正直言うと、アカデミアの人は肩を叩いた瞬間に PFN に入社してくれるというのが現状である。

ディープラーニングのアプリケーションは、例えばトヨタ自動車と開発している「ぶつからない車」の他、自動お片付けロボットシステムやピッキングシステムなど、非常にたくさんの分野にわたっている。また、エックス線像を自動的に解読し病気を検出するなどのバイオ・医療応用や、材料探索への応用は非常に難しく、優秀な人が研究開発に挑戦しない限り進展は見込めない。それをできるようにしたということが我々の強みである。

これらのアプリケーションを支える技術として、Chainer と呼ばれるディープラーニングのフレームワークを作っている。例えば、GPU 上で 1,750 時間かかっていたディープラーニングを Chainer の改良により 33 時間に短縮することができる。一般に我々が待てる時間は普通数十時間で、1,000 時間かかっているのは実用性はない。LSI を製作するときのシミュレーションが大体 1 週間かかるというが、直感的にはこの辺りが限界だろう。このことは量子コンピュータにも当てはまり、限られた時間の中で面白い計算をできるようにすることがとても大事だと思う。計算時間が長過ぎると誰も使ってくれない。

我々は、まず普通の計算機、GPU を使ったクラスターを構築し、合計 16 ビット精度で 200 ペタフロップスのマシンを既に動作させている。多分、この性能というのは、理研のスーパーコンピュータに半分くらい負けているが、それでも日本で片手に入るくらいの規模だと思っている。構築場所として地球シミュレータ棟の一部を借りている。2020 年からは我々の開発したコアをそれに加えてより高速にし、日本一を目指したい。

私個人の考えでは、基本的道具をディープラーニングに絞り、そのための最高レベルの人材を世界中から集める。そのためにはもちろん、給与面で魅力的な条件を提示するだけでなく、周囲の人を呼び込むような人材を集めることが重要である。また、企業がやって欲しいと強く思っている現実の問題を扱うと同時に、基本技術の先進的研究開発を並行してやっていく。これらをうまくできているところが PFN の強みである。

量子コンピュータには、ご存じのとおり、量子ゲートと量子アニーリングの 2 つの方式が主にあって、アニーリング方式については非量子の古典素子を使ったアニーラも存在している。残念ながら、今のところ、量子アニーリング方式は非量子アニーリング方式に大きく負けており、近い将来にも勝てるという技術的な目処は立っていない。

一方、量子ゲート方式がなぜすごいのかというと、古典コンピュータでは計算量が多過ぎて事実上解けない問題の一部を解決してくれる可能性があるからである。10 年先のスーパーコンピュータでも計算に 10 年かかるという問題もあり、もしかしたら量子ゲート方式がそれを解けるかもしれないという期待がある。

また、利用可能な量子ゲートの数は、誤りを許容する量子ゲート方式の量子コンピュータでは急速に増加している。私は、このまま指数関数的に増加するかどうかということに疑いを持っているが、正確な答えを持っているわけではない。アニーラは開発が簡単なので規模はどんどん大きくなるが、誤り訂正量子ゲート方式の量子コンピュータというのはまだまだ研究課題の段階である。ただ、現在多くの研究者が真剣に取り組んでいるので、そんなに遠くない将来に物は出てくると思う。

量子コンピュータの応用分野として、巨大な離散最適化問題、ディープラーニング、人工知能、暗号解読、遺伝子データマイニングなど、現在のスーパーコンピュータでは解けない問題が既に考えられている。その中で、どれが量子コンピュータに向いているのかを見極めることが大事である。

量子コンピュータが解くべき問題について図 5-2-1 で考える。2030 年～2040 年には、量子コンピュータが登場し、我々が使い始めていると予想する。いつになるかはわからないが、その時点での解きたい問題全体がグレーの大きな範囲だとして、その一部は古典コンピュータ、量子コンピュータそれぞれで解ける。量子コンピュータで解ける問題の一部—もしかしたら問題の大部分かもしれない—は実は古典コンピュータでも解ける。このときに重要なのは、量子コンピュータだけが解ける、赤色の範囲に属する問題が何であるかを明確にしなければいけないことである。実際、この議論があまり行われていない。

実用的な応用分野としての暗号解読は、大規模量子コンピュータがないとできないので、現状では地平線の彼方にわずかししか見えないという技術レベルである。通信は人から人へのシステムであるから、その間で盗聴者に解読される可能性があり、秘密通信も絶対安全ということにはならない。したがって、特定の箇所だけすごくフォーカスするというのは、秘密保持という観点で問題がある。

例えば、スイッチの中の LSI にこっそり情報を盗む回路を組み込んでおいて、それを全世界に向けて販売すれば、あらゆるところから簡単に情報を集められるようになる。これは既に問題になっている話である。また、秘密通信において、データを送れるバンド幅の実現は当面なく、現在は鍵配送が中心である。データ送信が可能になれば非常に面白いので、どんどん研究すべきと思うが、これで全て解決というのも事実ではないだろう。

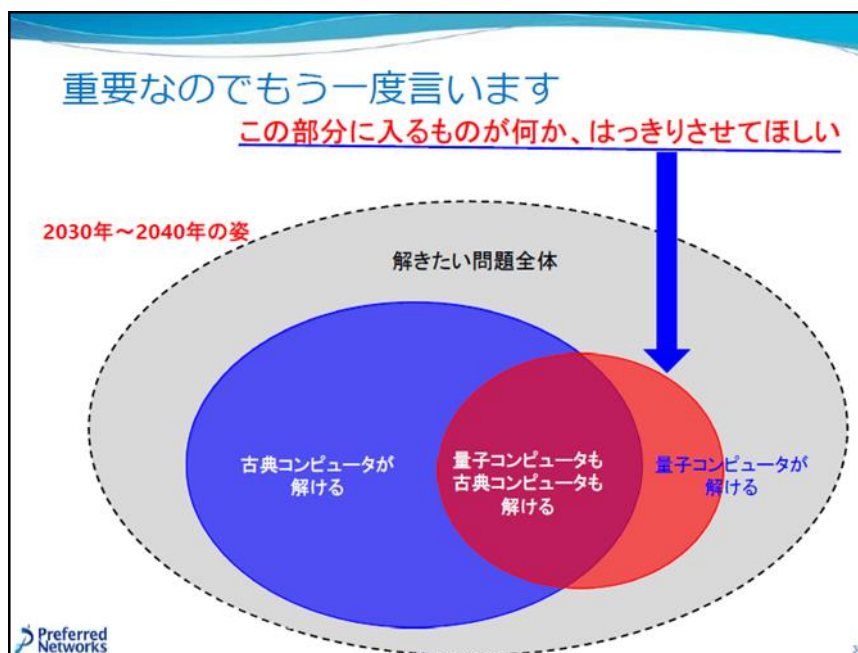


図 5-2-1 量子コンピュータでしか解けない問題を明確に

現状、量子アニーリングによる離散最適化においては、残念ながら解ける問題サイズに限界があり、しかも非量子アニーリングよりも計算が遅い。クラスター化によりスケーラビリティ実現は可能との期待から、非量子アニーリングの研究開発を進めている企業もあるが、古典コンピュータを用いたヒューリスティックな手法よりも性能が劣るという現状を考えると、見込みがないと思っている。配送や LSI 設計の問題、ポートフォリオ最適化やマシンラーニングなどの分野にアニーラを使うためには、とにかく離散最適化の問題が解けることが必要である。

量子化学シミュレーションは今後有力になっていく応用分野であると思う。将来、古典コンピュータではできない巨大分子の量子シミュレーションができるようになるだろう。最適化計算が高速になり金融応用や量子マシンラーニング、バイオ・医療応用などができたら素晴らしい。是非、当社でもやってみたい。

実用的な量子コンピュータが少なくとも 10 年先までできないからといって、アプリケーションのことだけを考えていたら全然ダメである。将来に向けて、例えば 5 年後に想定される規模の量子コンピュータ実機をシミュレート、エミュレートできるように備えなければならないが、一般のコンピュータシミュレータでは間に合わないの、私は専用機を作ってもいいと思う。その意味で、構築する量子コンピューティング拠点において、仮に 200 量子ビットを有する量子コンピュータのシミュレータが動き、遅いながらも実用規模の計算ができるようになったら、皆に大きな利益があるだろう。

最初は FPGA ベース、技術が固まったら ASIC により超高速化するという方針で、量子アニーラを一生懸命シミュレートしようとしているが、その労力をゲート方式に向けて欲しい。研究拠点においては、2025 年までに、実機並みの速度を示すシミュレータを 256 量子ビット規模、アニーラであれば 10 万ノード規模での開発を目指す。そのようなシミュレータを使ってソフトウェアの開発をして、2030 年ごろに恐らく実現する量子コンピュータ実機とクロスオーバーさせた

いというのが私の考えている、情報科学サイドから見たタイムスケジュールとストーリーである。

我が国は、1982年から10年間、第五世代コンピュータのプロジェクトを推進した。論理型言語を高速実行する並列コンピュータとそのための言語、アプリの開発を目標に、応用分野として自然言語処理、パターン認識、その他のAI技術を目指した。電総研、富士通、NEC、日立、三菱、沖電気などからの出向者を集めてICOTを設立したが、問題は途中で各企業が個々のマシン開発に夢中になってしまい、アプリケーション開発が忘れ去られたことであった。その結果、512プロセッサの並列第五世代コンピュータなど、企業ごとに5種類のマシンができたが、アプリケーションがなかったのが残念ながらどれも使われることがなかった。また、開発したマシンの速度は多少向上しただけで、当時の汎用コンピュータのせいぜい数倍であった。この程度の成果に多額の資金を投資したのはよかったのか。私は、日本におけるコンピュータ国産の最大の失敗例と思っており、量子コンピュータで同じことを繰り返さないで欲しい。

アプリケーションがないまま、今から例えば10年間プロジェクトが走り、もしかしたらどこかで量子コンピュータの動作をデモンストレーションできるようになるかもしれない。でも、それだけではダメで、できた時点では活用されるようなものを作っておかないと、今話した第五世代コンピュータと同じ轍を踏むことになる。

繰り返しになるが、研究開発の強化策として私が提案するのは、量子コンピュータで世界トップレベルの人材を集める方法を考えることである。もしかしたら、それは高い報酬かもしれないし、強力なリーダーを抜てきすることかもしれないし、この両方かもしれない。そして、研究プロジェクトとして現実の問題を扱い、最終的には解決させることが重要で、アプリとハードウェア、基本ソフトウェアを並列に研究開発する。私の経験では、ハードウェア開発に全体の4分の1、システムソフトウェア開発にも4分の1の人を割り当て、残り2分の1がアプリケーションを開発する。このぐらいの比率でないと、ただ量子コンピュータという箱ができただけ、という結論になってしまうのではないかと危惧している。

したがって、全予算の半分を情報系に、4分の1を量子コンピュータ開発に配賦して欲しい。残り4分の1の配賦は、情報系以外のアプリケーション研究者で、この人たちが使用する大規模シミュレータとかエミュレータをつくる。コンピュータサイエンスの人材を結集し、彼らが目の色を変えてやらなければいけないような本当の仕事を与え続けることが重要である。

今、以上のことを真剣に考えたいと切に思う。

【質疑応答】

Q：例えばソフトウェアやアプリケーションのことを考えると、量子コンピュータ自体を高速にシミュレーションできないと全然研究が進まない。今はCPU、GPUを使って100倍速くなった。でも、まだ遅いのでFPGAの利用を考えているが、例えばディープラーニングでそういう専用マシンを作ると、ASIC利用でどれぐらい速くなるのか。

A：10分の1程度か。速さよりはむしろ電力を下げるということの方が今回の場合には有効と思う。

Q：例えばFPGAやASICで速さだけに特化して、そういった専用エミュレータなどを開発するのは可能なのか。

A：もちろんできる。資金だけの問題である。

Q：そうすると、GPUに比べてどれぐらい速くなるのか。

- A：GPUで量子コンピュータをシミュレートするのに対して、最低10倍、目標が100倍と思う。大規模量子コンピュータの開発には、計算でなくネットワークが問題なので、GPUは向かない。コヒーレント性をエミュレートするために工夫の余地があると思っている。
- Q：2025年時点で256量子ビットをエミュレートするという予想に大変驚いている。Q-LEAPの目標は超伝導量子ビットで100量子ビットですが。
- A：古典コンピュータであるエミュレータは量子を一瞬も使わないので、その倍ぐらいは可能と思っている。残念ながら、古典コンピュータと量子コンピュータのクロスオーバーというのは当分こないのではないかな。
- Q：以前、藤井先生が有識者会議でお話しされたときには、50量子ビットぐらいでクロスオーバーがくるとおっしゃっていた記憶がある。これについてご意見を。
- A：50量子ビットでクロスオーバーがきたらうれしいが、50量子ビットの量子コンピュータであれば、それに負けないマシンを古典技術で作れる。
- A：そういう意味でも、クロスオーバーに達するのはまだまだ困難なので、古典コンピュータも引き続き開発しなくてはいけないという印象を持った。
- C：256量子ビットは相当大変だと思う。50量子ビットで純粋にデータを確保すると16ペタバイトに達するので、それが256量子ビットとなるとデータは指数関数的に増え相当大きな量になる。
- A：相当大きいと思う。それはディープラーニングの話と同じで、ネットワークを全部真面目にやったら相当な量になる。
- Q：そもそもメモリーが足りるのか。多少、うまくデータ構造を工夫して減らすことはできるとしても、256量子ビットのデータを忠実にストアできるのかという点には懐疑的である。
- A：その点はディープラーニングとすごく似ている。ディープラーニングもある規模で限界がくるので、現実的にはそれを避けるために問題に必要なところだけを残すという方法によって動かしている。量子コンピュータも全体、全通信を考えていたら、メモリーも発散するし限界が来る。対象とする問題を解くのに必要なところだけを残すという現実的な対応になると考えている。
- C：結構、そういう研究も進んでいる。すごくチャレンジングで面白い分野と思う。今グーグルがやっているのは、人工的に定義した量子コンピュータと従来コンピュータとで、計算時間と消費電力、あるいは超伝導量子ビットのデバイスではサンプリング時間の勝負であるが、対象とする問題は解けたところで全然役には立たない。実用的に解きたい問題集合の中で量子コンピュータが勝つというのは非常に難しく、20年ぐらい先の話であろうと予想する。
- Q：アプリケーションの重要性については全くそのとおりと思う。ここで言うアプリケーションとは、素因数分解を解くための初歩アルゴリズムのような特殊な数学モデルも含まれるのか。
- A：はい。その意味で初歩アルゴリズムは特別である。実は、いくつもアルゴリズムというのは知られているが、大抵はそこまでは並列性がきかないので、実際の計算は非常に困難であることもわかっている。
- Q：ということは、量子コンピュータに適した形のアルゴリズムも作っていくと、そういう意味でのアプリケーションですか。

- A：はい。そのためにアルゴリズム研究者がたくさん必要なのである。
- Q：誤り訂正という、量子ビットには非常に微妙な問題を、古典コンピュータでエミュレートできるものなのか。
- A：誤るコンピュータをエミュレートするのは難しいため、エミュレータは間違わないコンピュータにしたい。
- C：今でも、結構大変ではあるが、誤りそのものをシミュレーションすることはできる。我々は実際にそういうシミュレータを使っている。
- Q：エミュレーションの例として、マイクロソフトのクラウドサービスであるアジュールのカタパルトプロジェクトでは、FPGA 上で様々な環境を作り提供している。ここにわざわざ投資する必要はないような気がする。量子誤りまで忠実にシミュレーションする藤井先生の研究には、投資すべきだと思うが。
- A：アジュールの場合、基本ネットワークがツリー構造なので、量子コンピュータには適当でないと思う。もちろん FPGA を使って作るのも同じなのだが、今、諸外国においてその方向性で大規模な研究開発は進められていないので、私は投資の価値があると思っている。
- C：アプリケーションを考えるとときにシラミ潰しの暴力というのがある。計算時間の短縮という問題をアプリケーションの数理研究者ともっと真剣に考える必要があると思っている。もしかしたら計算時間が短いアプリが埋もれているかもしれないので、それをシラミ潰しに検討するという体制に投資した方がいいと思う。

5. 3 企業研究からのオープンイノベーション

山田 真治（日立製作所）

日立のオープンイノベーションは、社会課題解決を起点とし、Value to Society、社会に対する価値を大義として立てている。図 5-3-1 に示すとおり、ビジョンドリブン型の産学協創をめざし、知識の体系化、人材育成、文理融合からルール形成まで取り組んでいる。

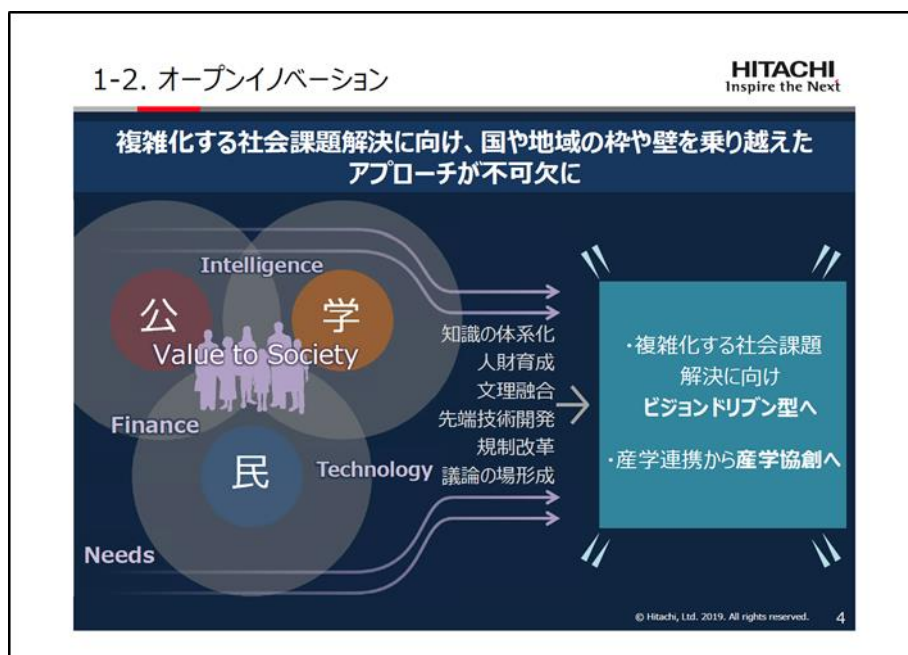


図 5-3-1 オープンイノベーション

最近の新しい動きとしては、大学の中に立上げたラボが挙げられる。2016 年に北大、東大、京大に、そして翌年に神戸医療産業都市にラボを作り、ここに約 40 人が常駐している。我々が大学に期待するのは知恵、技術、人材、更には地域、国ともつながるネットワークなど多様である。融合型アプローチこれはステークホルダーの融合、分野の融合もある—によって、日立単独ではできないことをやっていく。

次に知財活動である。図 5-3-2 に示すとおり、知財活動は、プロダクト事業かソリューション事業かで大きく考え方を変えている。事業の性格に応じて、コンペティションなのかコラボレーションなのかが決まる。コンペティションの場合は、競争力強化をめざして強い知財を所得し、場合によりそれを行使するという従来どおりのやり方である。一方、ソリューション事業の場合は、お客様、パートナーとのパートナーシップ促進やエコシステム構築を目的とするため、バックグラウンド IP はしっかり押さえる。これは日立のみならずお客様のビジネスを守るための活動である。また、ビジネスモデルを契約の段階から適切に設計すること、標準化やルール形成にも参画していくことが重要である。

後者のデジタルソリューション事業を進めるにあたり、図 5-3-3 で示す 2 つの異なる観点で対応している。1 点目は、お客様と協創するという観点である。ここでは、お客様の知財を尊重するためのポリシーを先に固めておくため、知財ポリシー、契約、ビジネスモデルに加えて、自社・

他社の特許をどう扱うかを明確に決める。2 点目は、デジタル化という新技術に対し、従来のプロダクト事業とは異なる観点を持ち込む。デジタルというテクノロジーの性格を考慮し、またグローバル化にともなう、国・地域ごとのルールを留意し、契約に反映しないとならない。2 つの活動から得られた成果は、IoT プラットフォームである IP Policy Library for Lumada として蓄積、整理した。



図 5-3-2 社会イノベーション事業における 2 つの知財活動

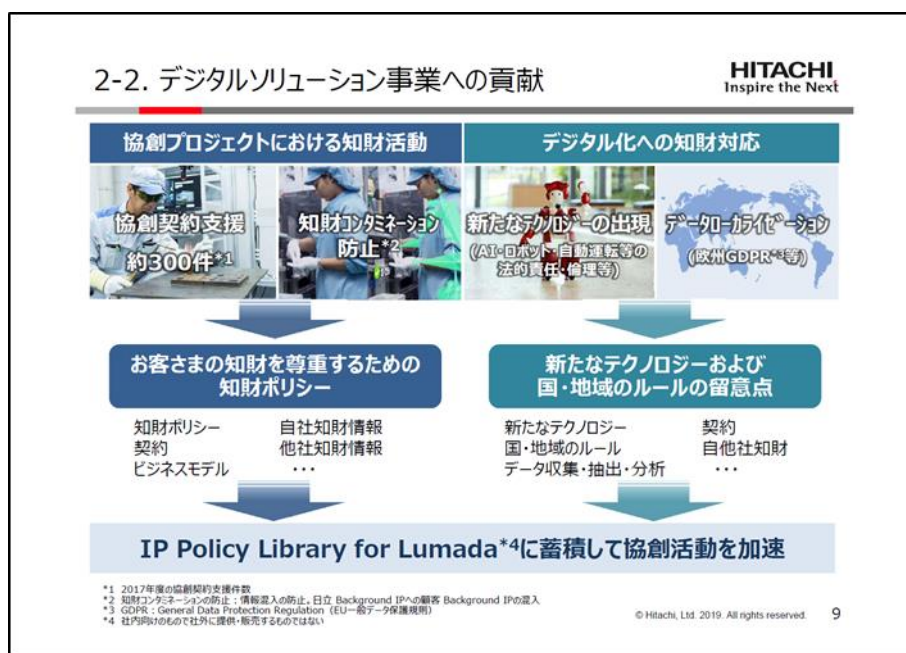


図 5-3-3 デジタルソリューション事業への貢献

デジタル化の進展によって知財活動そのものの領域がどんどん広がり、従来の技術的オリジナリティや権限性というところから経営、法律まで拡大し、多様な観点を持たないと知財活動を進めることが困難になってきている。また、知財をコアにしてエコシステムを構築する IP ドリブンイノベーションの実現をめざしている。国際標準化、ルール形成、あるいは政府機関への人材派遣、オープンイノベーション推進、アカデミア連携などを具体的に推進している。

日立の量子科学技術に関する研究開発状況を図 5-3-4 に示す。長期戦の量子技術に加えて、早期の実用化をめざした古典・準量子技術を並行開発している。日立ケンブリッジラボを中心にゲート型の CMOS スピン量子ビットに取り組むとともに、量子インスパイアド技術として、量子情報処理領域ではアニーリング型の CMOS アニーリングマシン、セキュア通信領域でも量子ノイズを活用した準量子暗号通信の研究開発を先行させている。

3-1. 日立の量子関連研究開発状況					HITACHI Inspire the Next
早期実用化をめざし、量子技術に加え、古典・準量子技術を並行開発					
					古 古典 準 準量子 量 量子
日立研究テーマ・取組み		施策 (国PJ)		連携機関 [研究期間]	
量子 情報 処理	アニーリング	CMOSアニーリングマシン	古	NEDO, CREST	北大, 産総研, 理研, NII, 早大 [約5年]
	ゲート	CMOSSピン量子ビット	量	(Q-LEAP) EU-JP	ケンブリッジ大, CEA-LETI ^{*1} , 理研, 東工大他 [約15年]
セキュア通信		準量子暗号通信	準	—	東大 [約15年]
量子センシング		NVダイア搭載SPM ^{*2}	量	Q-LEAP	東工大, QST ^{*3} , 東大 [約8年]
放射光計測		量子ビーム計測応用	—	—	SPring-8, KEK ^{*4} , 東北放射光他 [約35年]

*1 CEA-LETI: フランス原子力・電子・情報技術研究所
*2 SPM: Scanning Probe Microscope (走査型プローブ顕微鏡)
*3 QST: 量子科学技術研究開発機構
*4 KEK: 高エネルギー加速器研究機構

© Hitachi, Ltd. 2019. All rights reserved. 13

図 5-3-4 日立の量子関連研究開発状況

効果実証、応用探索に向けて、プロトタイプ試作を重ねている。2014 年に、CMOS アニーリングマシンの初号機（第 1 世代機；20 キロビット）を ASIC で製作し社内評価した。第 2 世代機は、ビット数は犠牲にして FPGA で書き換えられるマシンとした。第 2.5 世代はお客様に使ってもらえるよう、5×5 枚の FPGA で 100 キロビットマシンを試作し、クラウド公開を始めた。さらに第 3 世代は、解精度の向上を目的に、量子効果を擬似的に組み込みアルゴリズムを改善したマシンである。

同時に、応用探索に向けて実感しやすい様々なアプリケーションソフトを作成したり、初心者向けクラウド環境を提供し、大学でのプログラムコンテストを通じて多くの学生に関わってもらったりなど、普及に向けた協創施策も進めている。

準量子暗号通信においても、プロトタイプを作成し、弊社の鳩山サイトと国分寺サイトの両拠点間での通信テストを実施している。

ユーザからの反応を図 5-3-5 に示す。CMOS アニーリングマシンに関しては、現状必須のニー

ズが見当たらない、継続的に最適化してきている現システムに比べて性能の優位性や価値が出しにくい、使いにくい・マニアしか使えない、プログラミングが難しい、インターフェースが稚拙、などの意見が挙がった。セキュア通信に関しても、安全性を強化しても儲からない、切り替えコストが大きいなど、同様の意見が出た。ここで重要なキーワードは、ニーズ、ビジネス戦略、量子超越性、使用環境であると考えている。

3-6. ユーザの反応



■ **CMOSアニーリングマシン：**

- ・切迫したニーズが見当たらない
- ・従来手法と比べて性能の優位性、価値が出しにくい
- ・使いにくい。マニアしか使えない
 - プログラミング手法が確立されていない
 - インタフェースが使いずらく、相当な勘と勉強が必要

■ **セキュア通信：**

- ・現状の暗号で問題が発生していない
- ・既存システムの入替はスイッチングコストが大きい
- ・安全性を強化しても儲からない

ニーズ

ビジネス戦略

量子超越性

使用環境

© Hitachi, Ltd. 2019. All rights reserved. 18

図 5-3-5 ユーザの反応

最後に、本発表での提言 4 項目を図 5-3-6 にまとめる。1 点目は、企業が本格的に参入するには見通しが必要ということ。実現時期や、フェーズ認識、いかなるバリューを提供するかなどを踏まえた国家戦略、ロードマップの共有である。また、科学、工学、イノベーション基礎、開発、統合と言い換えられるがーのいずれを強化するのかを明確に認識する必要がある。

2 点目はオープンイノベーションである。拠点化が効果的な開発と、分散して種を蒔く研究の両方が必要である。拠点化は一般的にはプロジェクト型の開発に適しており、研究リーダーと社会実装リーダーの 2 リーダー体制が良いのではないか。その中での人材の流動化を図り、可能な限りプロジェクトに専従できる措置を取ることが重要である。一方、サイエンスに近い研究はむしろ分散体制が適していると感じる。

3 点目はユーザ拡大である。量子技術の大きな潮流を作るには、ユーザ側の引きが提供側の押しよりも必要と個人的には考える。そのために、プロト機を公開したり、アイデアソンやハッカソン、シンポジウムを通じて、どのような価値が創生可能か、どのような社会課題解決に貢献可能かを検討、発掘すべきと考える。また、先ほどの CMOS アニーリングマシンやセキュア通信にも当てはまるが、開発当事者がその有効性を語っても信じてもらえにくいいため、公的な機関、施策を通じて、共通評価、客観評価などを期待する。そのような機能が国のどこかに設置されれば好ましい。

4 点目は主に企業サイドの問題である。先ほどお話した「ソリューションかプロダクトか」も

含めて、ビジネスモデル、特にソリューションの場合は協創知財戦略が必要である。また、優秀な研究者に加えて、目利き人材・プロデューサー人材がより一層重要となるため、その育成を強化する必要がある。

4. 量子科学技術の強化に向けた提言

1. 国家戦略とロードマップの共有：

- ・見通し(実現時期、インパクト)、フェーズ、日本の競争力に関する認識
- ・強化領域：科学(研究)、工学(開発)、イノベーション(統合)か？

2. オープンイノベーション：集中と分散、研究/開発/統合の効果的推進

- ・拠点化：プロジェクト型開発、重点投資、2リーダー(研究、社会実装)
- ・研究施設・設備共有：挑戦的萌芽研究、分散(体制、資金)
- ・人材流動化：プロジェクトへの研究者の専従・異動、海外連携

3. ユーザー拡大：ユーザー(企業、量子ネイティブ)による産業化・普及の牽引

- ・プロト機公開、イベント(アイディアソン、ハッカソン、シンポジウム)：ニーズ発掘
- ・広報活動強化：リテラシー向上
- ・評価・認定、量子超越性実証：価値創生、社会実装加速

4. 研究からイノベーション強化へ：

- ・ビジネスモデル、協創知財戦略構築
- ・目利き人材、プロデューサー人材の育成

HITACHI
Inspire the Next

© Hitachi, Ltd. 2019. All rights reserved. 20

図 5-3-6 量子科学技術の強化に向けた提言

【質疑応答】

Q：日立ケンブリッジラボの CMOS スピン・ゲート型の進捗はどうか。

A：まだまだ。多 Qubit 化のためのレイアウトは先行してできている。CMOS 型に切り替えたのは、従来のシリコン Qubit ではマルチ Qubit 化が難しいと判断したため。レイアウト設計を優先させている。

Q：スピンを使うのは極低温でシリコンチップを動かすのか。

A：期待はもちろん極低温から出ることだが、現状はまだ極低温。

Q：現地 VC 連携可能性調査とあったが、海外ではコーポレート VC をやっているように読み取れた。デジタルソリューションへ舵を切ると、量子コンピュータのような先物はサポートしにくくなっていくのではないと思うが、リスクヘッジなどの意味で、コーポレート VC が投資する可能性はあるのか。

A：実際、グローバル戦略に基づくビジネス展開に向けて、コーポレート VC を欧州に開設した。日立単独では困難な案件の強化、地域毎の最先端のアンテナ機能、新しい破壊的技術の目利き機能への期待も本調査にはある。

Q：そういう視点で、量子コンピュータはどういうふうに見えるのか。

A：日立には今、Lumada という IoT プラットフォームを育てており、当然、量子コンピュータは Lumada プラットフォームの一角に座るはず。コンピュータ事業はおそらく弊社ではやらないと思うが、それ Lumada を活用したデジタルソリューション事業は日立の事業の

中心に座る。すべて個人的意見だが。

- Q：オープンイノベーションを推進するときに、オープンにする部分とクローズにして守るところがあるが、その判断基準、切り分けはどう判断しているのか。
- A：オープンクローズ戦略は統一的に語るのは難しく、個別に検討する必要がある。例えば、現事業があり、それを成長させる、次の製品を開発する場合はクローズの要素が多く、バックグラウンド IP、ノウハウも重要である。一方、社会課題解決は多様なステークホルダーと連携した大きなソリューションで、正直、取組み開始時には、何をやったら成功するかが分かりにくい。すべてのバックグラウンド IP を押さえ、地を固めてから外部に呼びかけるなどは現実的でないし意味がない。エコシステムの中に飛び込み、社会課題を解決するソリューションが実現でき、そこから日立の事業を引き出したいという考え方である。
- Q：日立は 1990 年代からずっと量子コンピュータの理論はやってきていたが、実機マシンを開発したのは最近だと思う。しかも、90 年代は NEC、三菱、NTT と多くの会社が量子コンピュータをやっていたが、そのころにはやらず、今、どちらかというゲート型から企業が引いたタイミングでやるというのは何か理由があるのか。
- A：自分は中途採用で入ったので 90 年半ばまでの詳細は良く知らないが、一つはムーアの法則が破綻しつつある中、改めて将来のコンピューティングを考えた時に、研究所の見識として、量子あるいは量子インスパイアドに関わる研究開発の強化が必要との判断による。また、日立の場合、日立ケンブリッジラボをキャベンディッシュ研究所に設置し 28 年間研究推進している。ラボの研究者およびキャベンディッシュ研究所、更にはケンブリッジ大学の研究者のタレントと蓄積したノウハウを基に、量子コンピュータ研究をリードする環境にあると認識している。

5. 4 内閣府における「量子技術イノベーション戦略」検討状況について

奥 篤史（内閣府）

本日は、政府における量子技術イノベーション戦略の検討状況についてご説明させていただく。

まず、本検討を始めたきっかけは、官房長官を議長、全閣僚を構成員とする昨年 12 月の統合イノベーション戦略推進会議において、官房長官からご指示があったことである。今後のエマージング技術として、AI とバイオに加え、量子技術についても早急に有識者会議を設置して検討を開始しなさいというご指示であった。これを踏まえて、経済同友会の前代表幹事の小林氏を座長とし、ここにいらっしゃる荒川先生、寒川所長、中村先生にも入っていただき、合計 8 名の有識者会議を立ち上げ、これまで検討を進めてきた。

この検討に先立ち、内閣府では量子技術の専門チームを作っており、ここで国内研究者の約 70 名にヒアリングをさせていただいた。それをベースに骨子を作った上で、3 月、4 月、5 月と 3 回の有識者会議で議論していただき、今のところ中間整理という形で取りまとめている。

図 5-4-1 に中間整理の概要を示す。融合領域の設定、量子拠点の形成と国際協力についての詳細は後でご説明するが、これらを目玉として掲げるとともに、全体では 5 つの項目からなる戦略になっている。すなわち、技術開発戦略、国際戦略、産業・イノベーション戦略、それと知的財産・国際標準化戦略、人材戦略の 5 本柱で構築されている。ここで、量子 AI や量子ソフトウェアという言葉があるが、先ほど平木先生がアプリケーション、アルゴリズムを含めたソフトウェアの重要性をご指摘になったことと関連して、本戦略でも大まかな方向性や焦点は同じであるということがご理解いただけると思う。

政府が掲げている Society5.0 を実現するため、人工知能やデータ連携が基盤技術として位置づけられているが、これをさらに次の段階に進める際には、量子技術が鍵であろうと考えている。海外の動向として、例えばアメリカでは去年トランプ政権の下で量子情報科学に関する法案が成立し、この中では 5 年間で 13 億ドル、約 1,400 億円の投資を行うということが法律で明記された。法律で予算額まで書いてあるというのはかなりの意気込みを感じる。EU でも同様に、10 年間で 10 億ユーロのフラグシッププロジェクトが開始されたが、これに加えて各国も 100 億以上の単位で資金を投資している。中国は詳細がよくわからないが、一説によれば 1 兆円ほどで量子情報研究室を構築中と言われている。また、グーグルや IBM、またはアリババのような世界的企業が莫大な投資を特に量子コンピュータを中心に行っているというのが現状だと思う。

一方で、日本は端的に申し上げれば、これまで中長期戦略というのは一切なく、各関係省庁がバラバラに研究開発を進めていた。内閣府は量子暗号、文科省は量子コンピュータと量子センシング、経産省はアニーリング型の量子コンピュータと、それぞれ小規模なプロジェクトが乱立していたというのが現状だと思う。一方で、日本には、基礎的な技術や理論にはまだまだ強みがあるので、こういうところをうまく生かしながら競争力を高めていくという戦略が必要であると考え、今回初めて検討した次第である。

今回、基本方針として量子技術イノベーションという言葉进行明確に掲げ、これを前面に押し出していこうと考えている。要は、単なる研究戦略、技術戦略にとどまらずに、産業イノベーションまで念頭に置いた戦略を作っていくという強い意思があつて、この言葉を使っているのである。

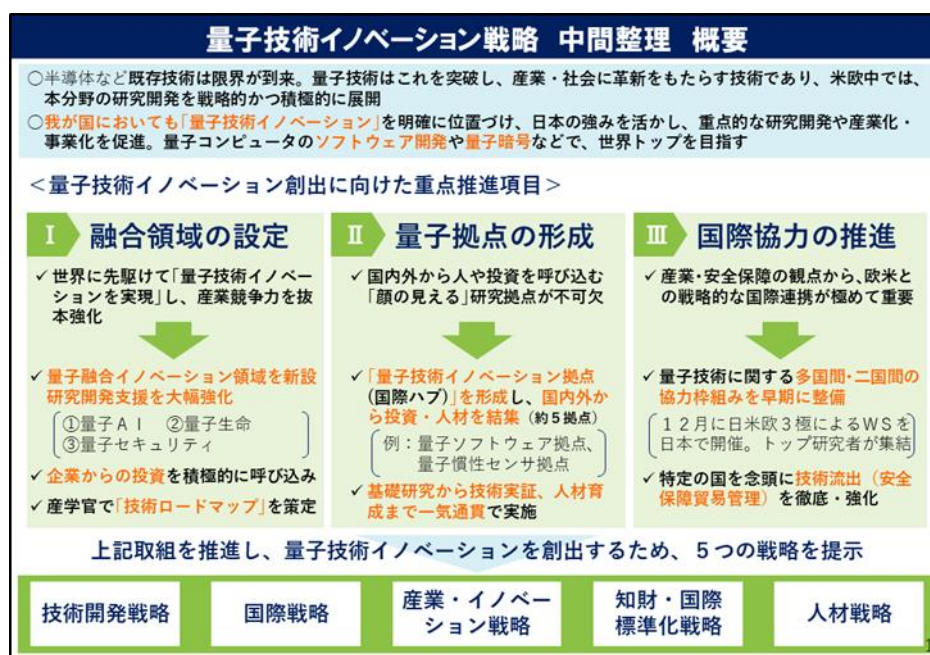


図 5-4-1 量子技術イノベーション戦略の中間整理（概要）

現在、政府には、AI 戦略、バイオ戦略、安全・安心という別の戦略があるが、これらと量子技術イノベーション戦略をバラバラに進めていっても意味がないので、うまく全部を組み合わせることで日本の主要産業をリードするという方向性を打ち出していこうと考えている。また、量子技術は技術ごとにタイムスパンが全然違う。例えば、量子暗号では東芝が来年にも装置を売り出すのに対して、ゲート型量子コンピュータの登場には 20 年、30 年の時間がかかる。短中期と中長期の両側面を念頭に置いた研究戦略が必要であるというのが基本方針です。

イノベーション戦略としてやる以上、産業出口を明確に描く必要がある。今のところ生産性革命の実現と健康・長寿社会の実現、国及び国民の安全・安心の確保という 3 つを社会像として提示している。これを実現するための主要技術をバックキャスティングで抽出するという形をここではとっている。

ここから本戦略の 5 本柱について説明する。1 本目の柱は技術戦略で、中長期、短中期ともに、量子技術の範囲を狭く捉えるのではなく、量子技術と古典技術、既存技術をうまく組み合わせる取組を推進していくことが掲げられている。主要な技術領域として、量子コンピュータ・量子シミュレーション、量子計測・センシング、量子通信・暗号、量子マテリアルの 4 つを定めている。

これら 4 つの技術領域において、国として特に重点を置いて進めるべき技術課題（重点技術課題）と、中長期的視点で着実に行う基礎基盤技術課題の 2 つに重みづけの振り分けをしている。前者が NEDO プロジェクトや Q-LEAP など国家プロジェクトとして進めるもの、後者は科学研究費助成事業や戦略的創造研究推進事業などの基礎研究レベルとしてやるものというすみ分けである。これらについて、それぞれロードマップの作成、ファンディング、産学連携を行うなどの取組みをイメージしている。

重点技術課題として、例えば量子コンピュータ・量子シミュレーションの技術領域では、ゲート型量子コンピュータ（超伝導量子ビット）、量子ソフトウェア（ゲート型、アニーリング型）、量子シミュレーション（冷却原子）、アニーリング型量子コンピュータ（超伝導量子ビット）の 4

つを掲げている。つまり、この4つに国家プロジェクトの対象を限定し、それ以外は基礎基盤技術課題に振り分ける。

量子計測・センシングの技術領域も同じである。固体量子センサ、量子慣性センサ・光格子時計、量子もつれ光センサの3つを重点技術課題とし、それ以外は基礎基盤技術課題に振り分けている。量子通信・暗号の技術領域でも、量子暗号技術、量子通信技術（光ファイバー、衛星通信）を重点技術課題とする一方で、量子中継技術、ネットワーク化技術はまだまだ先の話なので基礎基盤技術課題としている。最後の量子マテリアルの技術領域については、幅広い分野への応用が期待され、全体がまさに基盤となる領域であることから、敢えて重点技術課題は設けていない。

以上4つの主要技術を確立した上で、それらを出口、産業・イノベーションに結びつけていくため、量子融合イノベーション領域というのを新しく立ち上げることをここでは謳っている。現時点では、融合領域として、1つ目は機械学習、ディープラーニングを含む人工知能と量子技術とを組み合わせた量子AI、2つ目は量子生命（量子バイオ）の領域、3つ目は量子セキュリティを明確に設定し、これらを国で重点化するためにファンディングを強化していくことを打ち出している。量子AIの研究開発では、教師あり・なし学習のためのアルゴリズム開発、古典コンピュータと量子コンピュータによる全体システム化も必要だと思う。

さらに、先ほど説明のあった量子inspired技術・準量子技術も、例えばソフトウェア開発などの観点で極めて大事だと思う。日立のCMOSアニーラや富士通のデジタルアニーラ、NTTのラゾルブQNNなども戦略の中で位置づけた上で、全体を取り込んだ形で研究開発を進めていくと書かれている。一方、基礎基盤の研究分野はまだまだサイエンスベースでの取組が不可欠なので、長期的視野に立った取組により進めるべきである。ここでは、量子技術の周辺・関連技術として、微細解析、微細加工技術や光波制御・光デバイス技術、半導体製造技術、極低温エレクトロニクス、解析・評価技術を含む幅広い基礎基盤的な研究も推進すると書いてある。

2本目の柱は国際戦略である。実は、令和元年5月2日にアメリカで日米の科学技術合同委員会が開かれ、そこで日米欧三極による合同ワークショップを令和元年12月に開催することが閣僚級で合意・決定された。荒川先生に大変ご尽力いただいているが、このワークショップをきっかけに対中国というわけではないが、政府間合意の下、日米欧の枠組みで研究開発、研究協力を進めていくことが書かれている。

国際協力の方で、技術流出の防止がこの分野は不可欠である。アメリカでは、国防上、量子技術が重要なエマージング技術の一つと位置づけられているため、このことも念頭に外為法で規制されている技術流出防止、安全保障貿易管理を量子技術でも徹底していくということを当然ながら書かせていただいている。

3本目の柱である産業・イノベーション戦略では、まず量子技術イノベーション拠点の形成を謳っている。図5-4-2は量子技術イノベーション拠点のイメージである。ご承知のとおり、例えばデルフト工科大学のQuTechやカナダのウオーターloo大学、イギリスのオックスフォード大学など、多くの国で拠点化の動きが進んでいる。日本でも、基礎研究から社会実装、人材育成まで一気通貫でやるような拠点の形成は不可欠という考えにより、今回、このような量子技術イノベーション拠点を技術課題ごとに複数構築することを提案している。

量子技術イノベーション拠点の形態として、オープンプラットフォーム型というのはいわゆる産学連携拠点的、真ん中の機関独立運営型はアカデミア寄りのWPI的、国立研究開発法人等の下に置く機関センター型などが考えられる。こうした拠点には、国際的に評価されている卓越研

研究者がいて、国際競争力の高い技術があり、かつ国内外からの投資が集まる。このような条件を満たす量子ソフトウェア、量子マテリアル、量子慣性センサなど、幾つかの拠点候補を考えているところである。

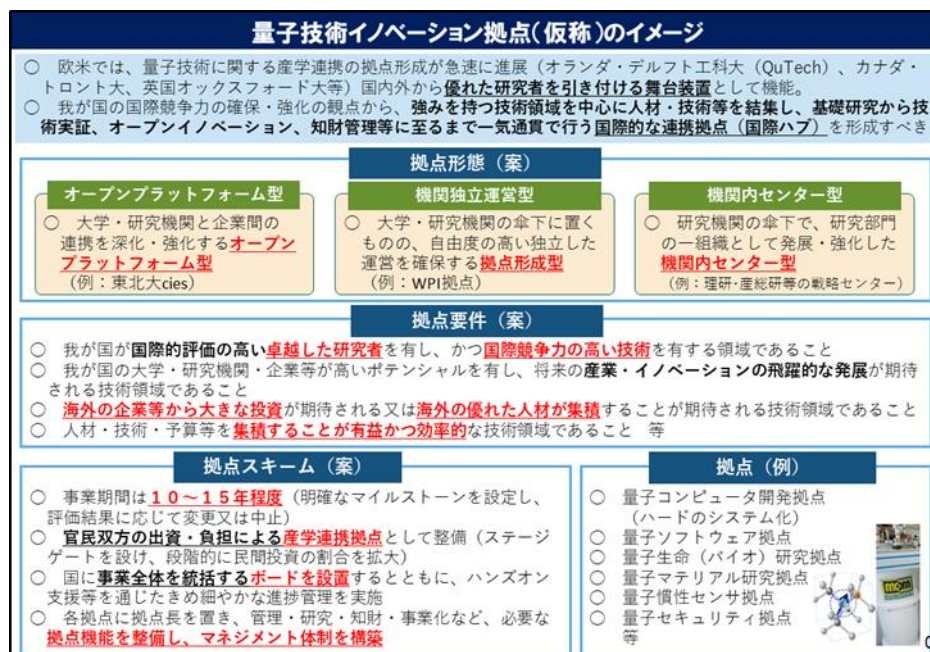


図 5-4-2 量子技術イノベーション拠点のイメージ

また、量子技術イノベーション協議会の創設を産業・イノベーション戦略として掲げている。これは、産業界がまだ様子見の、または本格参入する状況にはない分野において、アカデミアと産業界との対話の場、コンソーシアムを作ってはどうかという提案である。本日のご講演で出た量子 ICT フォーラムのような組織の中で位置づけていければと思う。

さらに創業・投資環境の整備である。量子暗号装置の企業への導入はなかなか進まないで、政府調達のような形、すなわち政府がアーリーユーザ、ファーストユーザとなつてうまく導入していく取組が必要だと考えている。

4 本目の柱は知的財産・国際標準化戦略である。オープン・クローズド戦略は当然として、特に国際標準化については、量子暗号の技術領域において ITU-T に向けて QKD の積極的な提案を行うなど先行的な取組がなされている。量子コンピュータの技術領域でも日米欧中を中心に勉強会の形で、ISO、ITU-T の下で検討が進んでいる標準化の課題がある。こうした活動を我々政府としても、日本がリードできるよう支援していくことが重要である。

最後の 5 本目の柱は人材戦略である。ここでは、研究者、技術者の層の厚みと質を確保することが不可欠だと謳っている。NII のような国立機関も含めたプロジェクトとして、共通的な教材、教科書、カリキュラムの開発などを進めたいと思っている。また、頭脳循環とは国内外における研究者の流動性向上、量子ネイティブ育成とはデジタルネイティブ、AI ネイティブに続く量子ネイティブ(Quantum Native)として、特に高専や高等学校の学生への早期教育を指している。後者については、量子コンピュータが今はクラウド上でも使える環境にあるので、それに馴染む人材を早い段階から本分野に取り入れていくということである。

【質疑応答】

プログラム構成上、質疑応答はなし。

6. 総合討論

ファシリテーター 嶋田 義皓（JST-CRDS）

メインテーブルの招へい有識者、コメンテータには事前に質問票を送付し、回答をまとめた資料をもとに議題を区切って討論した。議論を通して明らかになったポイントや重要な示唆を以下にまとめる。

6. 1 研究開発の推進方策

- ・ 各技術の新たな応用分野を開拓するため、従来からの研究者を中心とした基礎研究だけでなく、様々な領域からの研究者による連携研究・開発が進められる仕組みを作ることが必要。このためには、研究開発のテーマごとに目標を設定し、大学、研究機関、企業による連携研究の支援を担う研究開発拠点の設置が望ましい。
- ・ 量子科学技術の社会実装に必要な関連技術との融合や、不足気味である人材の確保が不可欠。本分野からこれまでになかった新しい研究領域が生まれることも想定し、意識的に融合を促す拠点を形成し、研究開発と人材育成を車の両輪として推進することが重要。
- ・ オープンイノベーション施策として、重点投資の下で開発プロジェクトの推進・加速と異分野連携を担う拠点の形成が必要。拠点では、大型・高額な研究施設・設備（インフラ）を共用し、挑戦的萌芽研究も同時に推進する。
- ・ リソースが限られているため有望技術の絞り込みが不可欠であるが、同時に予想外の進展や着想を得るために、それ以外の基礎・基盤研究にも少額でよいので長期的支援が必要。
- ・ 研究開発の進展の鍵は実は古典技術であることも多いため、量子科学技術をサポートする周辺技術の開発も重要。ただし、量子科学技術の実現に必要な課題であるという方向付けが不可欠。
- ・ 当面は、一種の融合であるハイブリッドも有効。例えば、量子とバイオの融合では、量子の専門家が量子センサを作り、バイオあるいは医学の研究者が自身の研究に応用するという共同作業がそのきっかけになるのではないかな。共同作業を続けていくうちに互いの理解が深まり、本当の意味での融合が始まってくことを期待したい。
- ・ 量子科学技術の強みを作るためにはアカデミックなアプローチがまだまだ必要なレベルにあると思われるが、社会実装を前提とした目的基礎研究的な体制とマインドを作る必要がある。
- ・ 研究開発の重点を量子コンピュータや量子デバイスの構築だけに置くのではなく、将来における応用技術の選択肢や応用のための基盤技術をできる限り多く保持していることを想定した幅広い研究開発の推進が必須。それが無いと、海外あるいは国内で有用技術が実現したときに、諸外国に大きく後れを取ることになってしまう。
- ・ 企業が「量子科学技術によって新たなビジネスを創出できそうだ」、「今やらないと乗り遅れる」と感じるような波及効果の大きい目標を示すことが重要。

- ・ サプライズのある実証の成果は、世間からの認知、期待につながり、その結果として研究者のモチベーションの向上と資金投資の増大をもたらすため多数あるとよい。これまで、一部の研究分野ではノーベル賞などが同じ役割を担ってきたが、量子科学技術においてはそれがサプライズ実証により有難みを感じることに相当するのではないか。その際、**Before and After** を明確にすること、実証のための費用として研究と同等の投資をすることが重要。
- ・ 実現時期、研究開発フェーズ、日本の競争力に関する現状認識を共有するとともに、戦略策定においては強化領域を科学（研究）、工学（開発）、イノベーション（統合）を意識しながら設定することが重要。
- ・ 研究レベルでの重要な海外連携先として、量子物理に強い欧州の研究機関が良いではないか。
- ・ 若い人を呼び込むためには、学術的な魅力と産業応用の実証によって、量子科学技術が将来有望な分野であることを示すことが重要。
- ・ 人材育成で重要なことは、モチベーションが非常に高い高専出身者を如何にこの分野に取り込むかである。まずは、この分野でどういうキャリアパスがあるかを知ってもらうことから始めなければならない。
- ・ 以前の博士課程教育リーディングプログラムや今の卓越大学院プログラムは人材育成の制度としてうまく機能している。このような複数の大学、研究機関が参画できる仕組みを量子科学技術の各領域で作っていくことが重要。
- ・ 標語的に研究者が産業・イノベーションを叫んでも達成は難しい。基礎から応用、そして周辺分野、社会実装に至るまでのチェーンができてこそイノベーションの生まれる環境が整う。各研究者が各分野で自分の得意なことに専念すれば産業・イノベーションが自動的に生まれるようなエコシステムを醸成することが必要。
- ・ すぐに公金投資を増やすべきという意見が出るが、現実的ではない。そうではなく、先んじて役に立つようになった研究が、現状では役に立つかどうか不明な研究を支えるという構造とすべき。例えば、量子コンピュータなどでも、単に公的資金だけに頼るだけでなく、いち早く役立ち資金回収できるシナリオを見つけ、民間からの投資を実現した上で、得られた資金を基礎研究に回すというサイクルを確立しなくてはならない。
- ・ 量子コンピュータの開発は、実際のアプリケーションで量子スピードアップが貢献しうるシナリオをきちんと確定し、古典的な計算より明らかに上回ることの実証を技術目標とすべきである。
- ・ マテリアルの研究では、試料合成と実験室装置による各種の物性評価に加え、放射光や中性子などの高度施設群や計算科学を重量する必要性がますます大きくなっている。その際、個人や小さな研究チームに競争的資金を配分し、相互には目的指向型の共同研究をアレンジして種を育むことと、中心拠点への資金の集中投資を進めることで一体的研究を展開して国内外へのビジビリティーを上げることとの割合をどのように考えるかが重要。
- ・ 量子生命分野では、量子生物学の基礎研究と量子科学技術を応用しイノベーションを目指す研究開発がある。各研究開発の現状を踏まえて、基礎研究への長期的支援、他分野との融合、産学官オープンプラットフォームの形成、知財のオープン・クローズド戦略を検討する必要がある。量子生命科学会等の関連学会や量子生命国際会議との連携による中長期

ロードマップの策定も重要である。

6. 2 拠点形成・運営

- ・ 拠点と言っても多様性が必要であるが、分野・領域によって状況は異なる。例えば、基礎研究においては研究チーム、個人の独自性や工夫が発揮できるような適度な分散性と、それぞれが時々集まって議論するというフレキシビリティを有する拠点が大変有効ではないか。実際、米国 NSF 主導の拠点というのはそういう形になっている。それに対し、量子コンピュータ、量子センサを開発する拠点では、目指す実現技術についての問題、課題を日々集中して議論し方向性を共有していくことが不可欠である。つまり、どのようなフェーズの研究開発を行うかによって拠点の性格付けがなされるべきで、オープンプラットフォーム型、機関独立運営型、機関センター型などの分類から最適なものを選んでいくのが現実的ではないか。
- ・ 拠点では、各研究開発のフェーズで産業界の若手と大学研究者が何か共有できるような場を設けていくというのが重要。
- ・ 若手研究者や大学院生の育成も拠点が担うべき非常に重要な課題である。若手研究者に対しては、国内外の連携研究機関・企業の協力により長期的に研究に専念できるような仕組みを作ると同時に、人材流動、頭脳循環を図るための施策が必要。一方、人材育成については、複数の大学や研究機関だけでなく関連企業とも連携することで、学生が卒業・修了後も研究を継続できるようにするための支援が望まれる。また、社会人に対するリカレント教育コースの構築、中等教育段階（中学校、高等学校等）におけるアウトリーチ活動の促進に必要な体制も整備する。
- ・ 若手同士を研究の現場で切磋琢磨させ競争と協創の連環を経験させることが、人材育成上、最も有効と考える。その中で、個人の興味や発想に大きく依存する種も育まれる。そのための組織を拠点に如何に構築するかが重要。
- ・ プロジェクト期間中は研究者の専従、配置転換がフレキシブルに行えるような高い人材流動性の確保が重要。
- ・ 研究開発の拠点には専任スタッフを配置するとともに、研究者間のネットワークを充実させるためのサテライト拠点を設置する。
- ・ アンダーワンループに集まらないう融合が進まない分野がある一方、親和性がない分野を無理やり一緒にしようとする研究者は相当疲弊することになってしまうので、サテライトを束ねるような拠点とアンダーワンループの拠点は峻別しないといけない。
- ・ 量子科学技術を広くとらえると、既に十分な基盤や母体がある分野（物性、高エネルギー物理、情報などとの関連分野）とこれから強固な基盤を作っていく必要がある分野とに分かれ、それぞれ異なったアプローチが求められる。量子情報分野は、米国 APS における会員比率の高まりを見ても、そのシンボリックな拠点があつてしかるべき規模に成長・拡大している。したがって、分野にまたがった量子情報分野の学際的拠点を構築し、世界的な成果を出した優秀な研究者がポストを得るための道筋を示すべきである。
- ・ 拠点は当該分野の真の中心として、資金・人材・インフラが集まり、世界的にもそこが我

が国の拠点であると認知されるべきである。HPC や AI などの分野ではそのような拠点が既に形成されている。中途半端な拠点の分散化は効果が薄い。

- 量子生命科学の拠点においては、国内外の研究者・技術者を結集したアンダーワンループでのオープンプラットフォーム型研究開発、基礎段階（協調領域）にある研究開発のオープンイノベーション加速と競争領域のオープン・クローズド戦略とを明確化した大規模産学連携を推進する体制、さらには学会等との連携による量子生命科学教育コースなどの検討が必要。
- 拠点内に国内外大学、研究機関や企業による産学官オープンラボを設置し、研究者同士や量子科学技術に関連する拠点間の連携、さらには関連する CREST・さきがけ等との連携を促す体制、最先端技術および関連大型機器・設備等の産学官への共用体制、想定する応用分野における技術実証体制、成果を社会実装するための大規模産学連携支援・ベンチャー創出支援体制を構築することが重要。
- 各技術領域における国際標準獲得体制、および量子科学技術からもたらされる利益の社会還元と安全性に関する国際標準化を担う組織が必要。
- 量子科学技術の環境・健康・安全面（EHS）および倫理的・法的・社会的問題（ELSI）検討による量子科学技術（特に量子生命科学、量子暗号等の領域）の社会受容促進を図ることが重要。
- 各拠点が自身のミッションを明確にして、それに合わせた運営をすべきである。例えば、産業寄りの研究開発をミッションとする拠点の運営は、遂行する領域を十分に知る人間により注意深くなされるべきである。全体としては、このような事業化指向と科学・技術指向とのバランスをとることが重要。
- 拠点の担うべき役割、機能として、プロジェクト推進、施設・設備の共用、人材育成・交流（プロトタイプの試用、教育・研修など）、社会実装に向けた普及活動（アイデアソン、ハッカソン、シンポジウム、広報など）、開発技術の実証（比較評価・認定）を検討することが必要。
- 量子技術の産業化にはシステム・サービス提供側とともにユーザ側の拡大が鍵を握ることから、拠点の参画者として、異分野・異業種はもちろん、ユーザ企業、将来の量子ネイティブ若手人材など多様なステークホルダーが集まれるようにする。
- 研究リーダーと社会実装リーダーとでは担う役割が全く異なるため、2人ペアで拠点運営とプロジェクト推進を行うことが理想である。また、今は新プロジェクトの立ち上げだけに目が向けられているが、終了後の活動・設備維持に関する方針と仕組みも検討しておく必要がある。
- 量子科学技術の実験研究には、低温技術や高周波・レーザー技術など装置の購入、保守・運用に相当のコストがかかるという問題があるので、あまり拠点数が増えると分割損が生じることに配慮すべき。
- 拠点の複数化に関しては、鍵となる設備（+運用経験）の所有先や先生方の所属先の問題があり仕方ないと思われる。せっかく複数の拠点を作るのであれば、研究員も1か所にとどまらず、拠点間をまたがって頑張る体制があってもよい。

6. 3 ボトルネック・重要課題

- ・ 周辺技術の開発は非常に重要であるが、単に投資を受けるだけで量子科学技術への貢献がないと無意味である。
- ・ 拠点における研究開発のテーマや担当機関の選定においては、いつもの人、声の大きい人にならぬように配慮することが必要ではないか。
- ・ 研究開発の拠点にリーダーシップが与えられず、独自の取組みができないことが懸念される。
- ・ 特定の PI 研究者に予算関連の雑務が集中して、研究自体を進めるためのエフォートが低下してしまうという問題がある。また、成果が求められる若手研究者がマネジメントから人材育成までを行うという事例も見られる。分業できる規模へと組織を拡大するか、何らかの研究者支援をしないと研究開発も人材育成も滞ってしまう心配がある。
- ・ 研究開発の重要な担い手は大学院生と若手研究者であるが、現在、多くの大学で博士後期課程の学生、ポスドク研究員（特に日本人）を確保することが難しくなっている。このような状況にかかわらず、優秀な人材を量子科学技術分野に取り込むための方策がない。
- ・ 量子科学技術の分野には大学にポストがない研究領域もあり、世界的に認められる成果を挙げても安定な職を得るのが難しいことがある。このためプロジェクトの盛衰に人材が大きく影響され、世代間の偏りが大きい。安定な職がなければそこにぶら下がる任期付のポストもできない。雇用先の確保が不可欠。
- ・ 従来の物理や化学のプロジェクトでは、残念ながら情報・アプリケーション領域の研究者を手伝いに使う感があり、真に優秀な人材を集めることができていなかった。量子科学技術の研究者と対等に働けるような制度設計が必須。
- ・ 諸外国の研究開発と比較すると、若手研究者の数の差は大きく、圧倒的に不利な状況にある。この分野の博士後期課程の大学院生を増やすための奨学金のような制度、および企業の若手研究者に対しても、この分野に入って大学等と連携して研究開発ができるような仕組みを作ることが課題。
- ・ 分野をまたいだ融合はトップダウンでは進まない。人材確保に当たってはボトムアップで融合する潜在能力やその実績を見極める必要がある。
- ・ 今までの量子科学技術の研究開発は、原理実証までが中心であり、主に大学や研究機関で行われてきた。今後の新しい応用先を開拓するには、狭い意味での量子科学技術の専門家だけでは限界がある。実用化に関しては、日本の企業は多くの先端技術を持ち、その蓄積が豊富であるので、米国を除く諸外国と比較しても有利な立場にある。大学中心の従来型研究開発では限界があるため、日本企業の技術を活用するための方策が課題。
- ・ 単年度財源では、雇用が1年ごとの契約になるし、また次年度に減額される可能性もある。これでは人材がほぼ全てとなる理論・ソフトウェア分野は立ち行かない。
- ・ 率直な現状観測では、米中などと比較して我が国は投資や人材の面で遅れていて、かつ追いつくような大規模な公的投資が行われる可能性は薄い。少ない研究投資を有効利用するためには、有望な分野、技術の同定を行い、そこに集中投資するのが得策だが、現状では未だに基礎研究としての多様な投資をそのまま引き上げるようなポリシーになっている。基礎研究に向けた幅広い投資と強化・推進領域に向けた集中投資とでは明らかに戦略が違

- う。後者は有望分野に絞るべきだが、そのような戦略がとられていない。
- ・ 拠点を設置する国立研究開発法人、国立大学法人等における制約の見直しが課題。
 - ・ 量子技術は実用化には時間的に長くなりそうなのが多く、研究開発を学术界に閉じずにイノベーションにつなげるためには、拠点として産業界との連携を如何に行うかが重要。しかし現状では、そのための大規模産学連携、オープン・クローズド戦略等を促進するためのコーディネーターや URA 等の人件費が足りない。
 - ・ 長期の計画を立てて、周辺分野との調和のとれた研究開発体制にしないと、結果が出ない研究開発を推進することになるとの懸念がある。
 - ・ プロジェクト資金確保を含む長期間持続可能な体制構築、輸出管理、知財管理に関するマネジメントスキルと資金調達、企業との連携、複数企業参画、人材交流などでの一体感あるプロジェクト運営、企業における量子技術関連事業に向けたビジネスモデルの構築が課題。
 - ・ これまでではできなかったことが量子科学技術ならできる、といったイメージを伝えることが重要であるが、量子の不思議さとそれにより実現する夢を正確に語るのは非常に難しい。今は過大な期待があるが、それが逆に科学の首を締める可能性も危惧。特に量子コンピュータや量子暗号の技術領域でこの傾向が顕著であり、省庁も研究者もその点を認識することが必要。タイムリーで適切な（誇大でも過少でもない）情報発信を行い、社会に正しい理解と期待を与えることが課題。

7. 閉会挨拶

曾根 純一（JST-CRDS）

本日は、研究開発の拠点や国際連携などについて様々なご意見をいただいたが、量子科学技術といっても我々の提案している4本柱のそれぞれで置かれている状況が違っているのではないかな。その意味で、どう攻めるかという戦略もそれぞれ異なってくるように思う。今、海外で大規模投資が始まっている理由の一つは、やはり量子コンピュータへの大きな期待にあると思うが、実現するまでには相当の時間がかかるので、まずは投資が継続できるようなキラーアプリを見つけることが重要と考える。

現状の技術レベルを実用レベルにまで引き上げるためには、まだたくさんの山を越えなければならない。もし今、その山のいくつかが目前にあり、研究資金が得られるのであれば、山を登ってみる好機であろう。この大規模投資の後、量子科学技術に冬の時代が来るかもしれないが、それは覚悟の上でやり抜くことが重要である。とにかく、今の好機を研究開発の進展に利用し、海外との共同研究で国際連携を強固にしていくことによって、いろいろなアイデアを創出、蓄積していき、冬の時代を乗り切る体力を付けることも考えなくてはならない。

産業応用に向けた研究開発を貫徹すると、今見えている技術的な、あるいは産業的な風景が変わってくる。私はそれに期待したい。貫徹後に様々な面白い成果が創出され、企業がそれに惹きつけられて参画してくる可能性もあるだろう。今がその端緒についたばかりの状況であれば、まさに全力投球で研究開発に臨むべきと考えている。

量子暗号は技術的にかなり成熟しているものの、専用回線が必要であったりビットレートが低かったりと課題も多い。しかし、それでも新しいユーザの開拓のために、防衛省だけでなく様々な分野・業種で応用展開を図っていく努力が重要である。また、量子中継の技術では、非常に基礎的な全光中継やNVセンタの例にも見られるように原子光学、量子計測・センシングの領域と多くの共通点がある。そういう基礎研究に対して様々な角度から知恵を出し合い如何に成果を充実させていくかが今は大事と思う。

量子マテリアルでは、拠点形成による重点化と底上げ、ボトムアップとのバランスが重要とお話があった。確かに、量子科学技術でマテリアルを掲げているのは日本だけかもしれないが、ここは日本の強みなので勝っていかなければならない。そのためにはトップサイエンティストが集結した拠点を作り、そこへ世界中から優秀な研究者を呼び込むことも必要であろう。いい論文が書け将来の自分のキャリアを築くことができる拠点に、ポスドクのような若手研究者が集まってくるのは当然である。同じ拠点と言っても、量子コンピュータ開発の拠点とは大きく違うセンター・オブ・エクセレンスの拠点である。さらに、量子はナノテクノロジーと表裏一体の関係にあるので、量子マテリアルの世界ではトポロジー、スピン流などの面白い研究分野が形成されるとともに、今後も新分野が出現してくる可能性も高い。したがって、そのような研究開発はボトムアップで、例えばJSTのCRESTやさがけを充実させて様々な分野の面白いアイデアを引き出すことで推進していくのが良いのではないかな。量子マテリアルの技術領域も、今の勢いに乗って日本がよいポジションをとっていけるように頑張りたい。技術領域ごとに状況が様々であり、そういう意味で全体戦略を作るのは非常に難しいが、本日の議論で頭の中が少しずつ整理されてきたと思う。

最後に、拠点形成など様々な取組みの重要なポイントは、世界のトップに行く、つまり世界から認知されることである。それがうまくいくと、世界における多くの研究者とコミュニケーションができ、それによりさらに視野が広がってくる。超伝導量子ビットの発見と最近までの基礎分野における進展に見られるように、世界の中で確固とした地位を確立することは非常に重要で、各技術領域の研究者コミュニティもそうなって欲しいと思っている。

付 録

付録 1：開催趣旨・プログラム

開催趣旨

JST 研究開発戦略センター（CRDS）では、科学技術に求められる社会的・経済的ニーズを踏まえて国として重点的に推進すべき研究領域や課題を俯瞰の視点から系統的に抽出し、そのファンディング戦略を明確にするための活動を行っております。このような活動の一環として、これまでに技術分野の俯瞰を目的とした「俯瞰ワークショップ」や、重要テーマの研究開発戦略を検討する「科学技術未来戦略ワークショップ」などを開催して参りました。本ワークショップ「社会変革を先導する量子科学技術」は、上記「科学技術未来戦略ワークショップ」に位置付けられます。

量子科学技術は、第 5 期科学技術基本計画において新たな価値創出のコアとなる基盤技術として位置づけられ、近年では Society 5.0 実現に向け社会課題の解決と産業応用を視野に入れた新しい技術体系へと発展しつつあります。米国、欧州各国、中国を中心とした海外では、これまでの常識を凌駕し社会変革をもたらす「第 2 次量子革命」を謳って、政府主導で研究開発戦略が策定され、大規模な研究開発投資が始まっています。また、世界的な大手 IT 企業も積極的な投資を行っており、ベンチャー企業の設立や巨額の資金調達も進んでいます。このように産学官の研究開発競争が激化している中で、我が国も官民研究開発投資の拡大により量子科学技術の研究開発を推進するとともに、基礎研究をいち早くイノベーションにつなげ、産業競争力を強化することが重要です。量子コンピュータ・シミュレーション、量子計測・センシング、量子通信・暗号、量子マテリアルの主要領域からなる量子科学技術の研究開発に加え、これらを行うための礎となる理論体系・学理基盤、先端計測技術などの基盤研究や量子生命、量子 AI などの分野間融合による応用研究も加速させ、我が国の総力を結集して関連する取組みを抜本的に強化、拡充すべきと考えております。これにより、将来における国の産業競争力強化や国民の安全・安心の基盤を確立できると期待されます。

本ワークショップでは、量子科学技術で社会変革を起こすために必要な研究開発の方向性を明らかにするとともに、その推進方策について第一線の研究者と議論することを目的とします。まず、日本の強みである基礎理論や知識・技術基盤等を活かしながら、そのシステム化・実用化に向けたイノベーションを誘発し、当該分野の研究開発を長期的に継続、進展させていく仕組みに関して、産学官の専門家から話題提供をいただきます。それを基に、総合討論では、産業・イノベーション、国際戦略、知財・標準化戦略、人材育成の観点から、量子科学技術に関する研究開発の推進方策や拠点形成・運営のあるべき姿、さらにはそれらを実現するための課題などについて議論します。これらの議論を通して、社会変革を先導する量子科学技術の重要な研究開発の方向性を明らかにし、その推進方法・推進体制、専門領域を超えた連携、産学官連携の方策などの共通認識を得たいと考えております。

なお、本ワークショップは非公開とさせていただきますが、議論の内容は報告書として纏め、参加者及び関連府省に配布後、CRDS の web サイト上で一般公開させていただくとともに、今後の施策や提言書作成の参考にさせていただきます。

プログラム

(敬称略)

開催日時：2019年6月14日（金）10:00～17:30

開催会場：TKP 市ヶ谷カンファレンスセンター バンケットホール 9A

オーガナイザー：曾根 純一（JST-CRDS）

ファシリテーター：嶋田 義皓（JST-CRDS）

司会：八巻 徹也（JST-CRDS）

10:00～10:05 開会挨拶

曾根 純一（JST-CRDS）

10:05～10:20 ワークショップの趣旨説明

八巻 徹也（JST-CRDS）

国内外の研究開発動向と国際戦略、人材育成、標準化

10:20～10:45 量子技術への期待～国際戦略を中心に～

荒川 泰彦（東大）

10:45～11:10 量子マテリアル領域

川崎 雅司（東大）

11:10～11:35 量子計測・センシングにおける各国の研究開発動向：量子慣性センサー
に対する期待と挑戦

中川 賢一（電通大）

11:35～12:00 量子暗号ネットワークにおける産学官連携と標準化

富田 章久（北大）

12:00～12:25 産業イノベーションのための量子情報人材育成

藤井 啓祐（阪大）

拠点形成・運営と研究推進方策

13:25～13:50 理研計算科学研究センター（R-CCS）およびスーパーコンピュータ「京」
「富岳」の概要（遠隔）

松岡 聡（理研・神戸）

13:50～14:15 量子生命科学領域の構築と拠点形成

馬場 嘉信（名大／量研機構）

産業・イノベーション

14:30～14:55 量子コンピュータ研究開発の推進にむけて

萬 伸一（理研・和光）

14:55～15:20 ベンチャー企業からみた量子コンピュータ技術とディープラーニング
技術の共通点・相違点

平木 敬（PFN）

15:20～15:45 企業研究からのオープンイノベーション

山田 真治（日立）

15:45～16:00 内閣府における「量子技術イノベーション戦略」検討状況について

奥 篤史（内閣府）

16:20～17:20 総合討論 ファシリテーター 嶋田 義皓 (JST-CRDS)

論点 1．研究開発の推進方策

論点 2．拠点形成と運営

論点 3．ボトルネック・重要課題

17:20～17:30 閉会挨拶 曽根 純一 (JST-CRDS)

付録2：参加者一覧

招聘識者（発表者）

- ・荒川 泰彦 東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構 特任教授
- ・奥 篤史 内閣府政策統括官（科学技術政策・イノベーション担当）付 企画官
文部科学省科学技術・学術政策局 研究開発基盤課 量子研究推進室長
- ・川崎 雅司 東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 教授
- ・富田 章久 北海道大学大学院 情報科学研究院 教授
- ・中川 賢一 電気通信大学レーザー新世代研究センター センター長／教授
- ・馬場 嘉信 名古屋大学未来社会創造機構 ナノライフシステム研究所 所長／教授
（量子科学技術研究開発機構 量子生命科学領域 領域長）
- ・平木 敬 株式会社 Preferred Networks シニアリサーチャー
- ・藤井 啓祐 大阪大学大学院 基礎工学研究科 教授
- ・松岡 聡 理化学研究所計算科学研究センター センター長
- ・山田 真治 株式会社日立製作所 研究開発グループ 技師長
- ・萬 伸一 理化学研究所創発物性科学研究センター コーディネーター

招聘識者（コメンテータ）

- ・寒川 哲臣 日本電信電話株式会社 先端技術総合研究所 所長
- ・中村 祐一 日本電気株式会社 中央研究所 上席技術主幹
- ・古田 彩 日経サイエンス 編集長

JST-CRDS 量子戦略チームメンバー

- ・曾根 純一 JST-CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット 上席フェロー
- ・八巻 徹也 JST-CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
- ・新田 英之 JST-CRDS 海外動向ユニット フェロー
- ・嶋田 義皓 JST-CRDS システム・情報科学技術ユニット フェロー
- ・藤田 維明 JST 監査・法務部法務・コンプライアンス課 主任調査員
- ・宮下 哲 JST-CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー／ユニットリーダー

関係府省・機関

- ・登内 敏夫 内閣府政策統括官（科学技術政策・イノベーション担当）付 政策企画調査
官（産業技術・ナノテクノロジー）
- ・半澤 悟 内閣府政策統括官（科学技術政策・イノベーション担当）付 産業技術・
ナノテクノロジーグループ 上席政策調査員
- ・黒澤 弘義 文部科学省研究振興局 参事官（ナノテクノロジー・物質・材料担当）
- ・高橋 功 文部科学省研究振興局 参事官（ナノテクノロジー・物質・材料担当）付 参
事官補佐
- ・栗辻 康博 文部科学省科学技術・学術政策局 国際情報分析官

- ・ 廣瀬 麻野 文部科学省科学技術・学術政策局 研究開発基盤課 量子研究推進室 室長補佐
- ・ 新宮 茜 文部科学省科学技術・学術政策局 研究開発基盤課 量子研究推進室 係員
- ・ 三浦 昭彦 文部科学省科学技術・学術政策局 研究開発基盤課 量子研究推進室 科学技術・学術行政調査員
- ・ 中新 信彦 文部科学省科学技術・学術政策局 研究開発基盤課 量子研究推進室 科学技術・学術行政調査員
- ・ 宮地 俊一 文部科学省科学技術・学術政策局 企画評価課 新興・融合領域研究開発調査戦略室 室長補佐
- ・ 鈴木 慎司 文部科学省科学技術・学術政策局 企画評価課 新興・融合領域研究開発調査戦略室 室長補佐
- ・ 松本 理恵 経済産業省大臣官房 グローバル産業室 室長補佐
- ・ 堤 潤也 経済産業省商務情報政策局 情報産業課 課長補佐
- ・ 鎌田 紀彦 外務省総合外交政策局 国際科学協力室 科学技術専門員
- ・ 佐藤 玲司 防衛装備庁先進技術推進センター 特別研究官
- ・ 中村 尚 防衛装備庁先進技術推進センター 研究管理官（先進技術担当）付第2先進技術計画室長
- ・ 佐藤 史生 防衛装備庁電子装備研究所 研究企画官付 研究調整官
- ・ 小森 旭 防衛装備庁電子装備研究所 情報通信研究部 サイバーセキュリティ研究室 主任研究官
- ・ 梶原 亮 防衛装備庁 技術戦略部 技術戦略課 技術企画室 科学技術政策企画専門官
- ・ 伊藤 智 新エネルギー・産業技術総合開発機構技術戦略研究センター ユニット長
- ・ 藤本 辰雄 新エネルギー・産業技術総合開発機構技術戦略研究センター ユニット長
- ・ 森 孝博 新エネルギー・産業技術総合開発機構技術戦略研究センター ナノテクノロジー・材料ユニット ユニット長
- ・ 長澤 良次 情報処理推進機構 イノベーション人材部 未踏グループ 調査役
- ・ 武田 敏幸 情報処理推進機構 イノベーション人材部 未踏グループ
- ・ 田中 朗彦 理化学研究所 経営企画部 企画課 課長
- ・ 星野 聡 理化学研究所 創発物性科学・光量子工学研究推進室 室長
- ・ 有沢 俊一 物質・材料研究機構 経営戦略室 運営主席
- ・ 川喜多磨美子 物質・材料研究機構 主幹エンジニア
- ・ 川畑 史郎 産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門 グループ長
- ・ 森 貴洋 産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門 主任研究員
- ・ 山崎 聡 産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクスセンター 招聘研究員
- ・ 小笠原泰弘 産業技術総合研究所 エレクトロニクス・製造領域 研究戦略部 企画主幹
- ・ 竹永 秀信 量子科学技術研究開発機構 経営企画部 部長
- ・ 須原 哲也 量子科学技術研究開発機構 量子生命科学領域 副領域長
- ・ 藤巻 秀 量子科学技術研究開発機構 量子生命科学領域 研究企画グループリーダー
- ・ 伊藤 久義 量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学部門 高崎量子応用研究所所長
- ・ 秦野 歳久 量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学部門 研究企画部 研究統括

- ・酒井 忠司 東京工業大学工学院 特任教授／Q-LEAP「量子計測・センシング」HQ

JST

- ・森 知子 JST プログラム戦略推進部 主任調査員
- ・永井 諭子 JST 研究プロジェクト推進部 副調査役
- ・瀧澤 浩史 JST 戦略研究推進部 副調査役
- ・中神 雄一 JST 戦略研究推進部 副調査役
- ・高橋 誠 JST 戦略研究推進部 主任調査員
- ・松尾 浩司 JST 未来創造研究開発推進部 調査役
- ・鹿島 泰介 JST 未来創造研究開発推進部 主任調査員
- ・中山 智弘 JST-CRDS 企画運営室 室長
- ・尾山 宏次 JST-CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー
- ・青木 孝 JST-CRDS システム・情報科学技術ユニット フェロー／ユニットリーダー
- ・荒岡 礼 JST-CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
- ・馬場 寿夫 JST-CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
- ・日江井純一郎 JST-CRDS 科学技術イノベーション政策ユニット フェロー

■ワークショップ企画・報告書編纂メンバー■

総括責任者：	曾根 純一	上席フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
リーダー：	八巻 徹也	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
メンバー：	嶋田 義皓	フェロー	(システム・情報ユニット)
	宮下 哲	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
	新田 英之	フェロー	(海外動向ユニット)
	藤田 維明	主任調査員	(監査・法務部)

※お問い合わせ等は下記までお願いします。

CRDS-FY2019-WR-07

科学技術未来戦略ワークショップ報告書

社会変革を先導する量子科学技術

令和 2 年 3 月 March 2020

ISBN 978-4-88890-673-9

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町
電 話 03-5214-7481
E-mail crds@jst.go.jp
https://www.jst.go.jp/crds/
©2020 JST/CRDS

許可無く複写／複製をすることを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.
Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

