

調査報告書

論文・特許マップで見る 量子技術の国際動向

エグゼクティブサマリー

近年、量子状態を精密制御し、量子もつれや量子干渉などの量子力学特有の性質を計測・通信・情報処理などに活かす「量子技術」の研究開発が世界中で活発化している。その代表例は、量子センサ、量子通信、量子コンピュータ、量子シミュレータ、量子マテリアルである。

米国、欧州、中国が量子技術への政府研究開発投資を拡大する中、我が国においても2018年12月に内閣府が「今後イノベーションを進める上で重要な3つの分野」としてAI、バイオに並んで「光・量子」を挙げ、「量子技術イノベーション戦略」も策定された。基礎研究から社会実装まで様々なレベルでの国際競争が激化しており、我が国において量子技術の研究開発と実用化をどう推進すべきか、総合的に判断する岐路に立たされている。

我が国の科学政策・産業政策の方向性を判断する上では、論文・知財空間における技術体系の客観的・定量的な俯瞰と、それに基づく国・研究機関・著者（出願人）のポジション・得意不得意・年変化の把握と理解が欠かせない。本調査は、我が国の研究開発戦略の立案に資する基礎データとして、量子技術に関連する論文と特許をクラスタリングし、マップとして可視化することで俯瞰的に分析し、政策的含意を得ようとするものである。また同時に、量子技術の国際動向を見る上で特に注意を要する中国の研究機関・研究者について、中国語での公開情報を頼りに整理・分析することとした。これらの研究機関・研究者の重要性は論文・特許の分析からも明らかとなった。

調査の結果、論文・特許マップにおける各技術領域の相対的な位置関係から、国や機関によって得意とする量子技術が異なることを見出した。また、国別の時系列変化からは、中国における量子通信・量子暗号の論文・特許の急激な伸びと、それとは対照的な日本での特許公開数の減少が確認された。日本は相対的に量子マテリアルの分野で優位とみられた。米国は特許・論文ともに量子コンピュータ分野、とりわけソフトウェアで顕著であった。このような国ごとの発表・出願傾向は、調査前に定性的には認識されていたことだったが、本調査によって初めて定量的に裏付けられた。

量子技術の研究開発の発展は目覚ましく、産業界や政府からの大規模な研究開発投資は多くのブレークスルーを期待させる。誤り耐性量子コンピュータや量子インターネットの実現は未だ長期的な課題と認識されているが、徐々に実験実証などが報告されてきている。実用化に至るまでにはまだ多くの技術的ブレークスルーや革新的アイデアが必要であり、量子技術の研究開発に対する継続的なリソース投資を促すことが極めて重要である。本調査は、戦略的な研究開発投資の判断に必要な量子技術の進歩を追跡するツールの一つとして、論文・特許マップとその調査・分析結果を提供するものである。

目次

1	背景と研究動向	1
1.1	背景	1
1.2	量子技術の概要	1
1.3	分野別の研究開発動向	2
2	調査の概要	6
2.1	調査目的	6
2.2	文献・特許データ母集団	6
2.3	特許のノイズ除外	8
2.4	トピックモデルによる類似度評価	9
2.5	共著ネットワーク分析	10
2.6	中国語文献・ウェブサイト調査	11
3	論文・特許俯瞰マップ	12
3.1	俯瞰マップ	12
3.2	俯瞰マップの経年変化	24
3.3	重要技術領域の同定	26
3.4	国際比較	31
3.5	組織・出願人別分析	40
4	研究者マップ	45
4.1	共著ネットワーク	45
4.2	研究者のフェーズ推定	47
5	中国における量子技術の動向	51
5.1	量子技術政策の概要	51
5.2	中国の研究開発動向	53
5.3	注目研究機関・研究拠点	55
5.4	注目企業	71
5.5	注目スタートアップ	85

5. 6 注目研究者.....	91
参考文献.....	95

1 | 背景と研究動向

1.1 背景

量子力学の原理を利用した「量子技術」の代表例である集積回路や光通信は、コンピュータやインターネットなどのICT（情報通信技術）として私たちの暮らしを支えてきた。近年、量子状態を精密制御し、量子もつれや量子干渉などの量子力学特有の性質を最大限に活かす「量子技術2.0」とも言うべき技術の研究開発が世界中で活発化している。その代表例は、量子センサ、量子通信、量子コンピュータ、量子シミュレータ、量子マテリアルなどである^[1]。

欧州では「量子マニフェスト」に基づく10億ユーロ（約1250億円）規模の研究開発投資によって、科学研究と産業競争力を強化し、「第2の量子革命」の牽引が謳われている。イギリス、ドイツ、オランダなどの国では、独自の量子技術戦略と政府投資も準備された。米国でも「国家量子イニシアティブ法」のもと政府の動きが活発化している。「量子情報科学の国家戦略概要」も発表され、国立科学財団（NSF）やエネルギー省（DoE）が研究プロジェクトの支援を表明している。また、国立標準技術研究所（NIST）の主導で「量子経済発展コンソーシアム」も設立されている。

量子技術の国際動向を把握する上で注視が必要なのは中国の動向である。国を挙げて量子技術に注力し、とりわけ量子通信分野での技術進展が著しい。北京と上海を結ぶ全長2,000kmを超える量子通信幹線ネットワークの構築や人工衛星「墨子」による量子暗号鍵配送と量子テレポーテーション実験の成功など、世界から耳目が集まっている^[2]。量子コンピュータ分野でも「九章2号」「祖冲之2号」による量子超越の実験検証^[3,4]など、極めて精力的に研究開発を進めている。

我が国ではこれまで、量子技術は文部科学省、経済産業省、総務省などに跨がって推進されてきており、一体的に推進するような科学・産業政策や重点投資戦略はなかった。しかし、2017年8月の文部科学省による「量子科学技術（光・量子技術）の新たな推進方策」の発表を皮切りに、2018年12月には内閣府から「今後イノベーションを進める上で重要な3つの分野」としてAI、バイオに並んで「光・量子」が挙げられるなど、いよいよ量子技術への注力が始まった。2020年1月には我が国初となる量子技術に関する統合戦略「量子技術イノベーション戦略」も発表された^[5,6]。

量子暗号鍵配送のような社会実装フェーズの競争から、誤り耐性量子コンピュータに代表される長期的・基礎的な研究開発競争まで、様々なレベルでの国際競争が激化しており、量子技術を我が国においてどのように推進すべきかを判断する岐路に立たされている。科学政策・産業政策の方向性を判断する上では、論文・知財空間における日本のポジション・得意不得意・年変化の把握と理解が欠かせない。

本調査は、我が国の研究開発戦略の立案に資する基礎データとして、量子技術に関連する論文と特許をクラスタリングし、マップとして可視化することで俯瞰的に分析し、政策的含意を得ようとするものである。

1.2 量子技術の概要

量子技術には、量子コンピュータ、量子シミュレータ、量子通信、量子センシング、など多様な技術が含まれ、それらが相互に深く関係しながら精力的な研究開発が行われている（図1-1）。米国、中国、欧州各国を中心に量子技術は産業競争力を左右すると認識され、大規模な政府研究開発投資が行われている。国家安

全保障の面からも期待が持たれている。大手企業の量子暗号鍵配送や量子コンピュータへの積極的な投資も見られ、研究開発だけでなく新サービス・新ビジネスモデルの開発と実行など市場獲得競争も急速に激化している。我が国でも統合イノベーション戦略推進会議の下に新たな国家戦略として「量子技術イノベーション戦略」が策定された。量子技術は社会・経済的課題の解決だけでなく新しい学術分野の誕生にも貢献し、世界の新しい潮流を作り、将来の成長・発展を主導する重要な技術といえる。

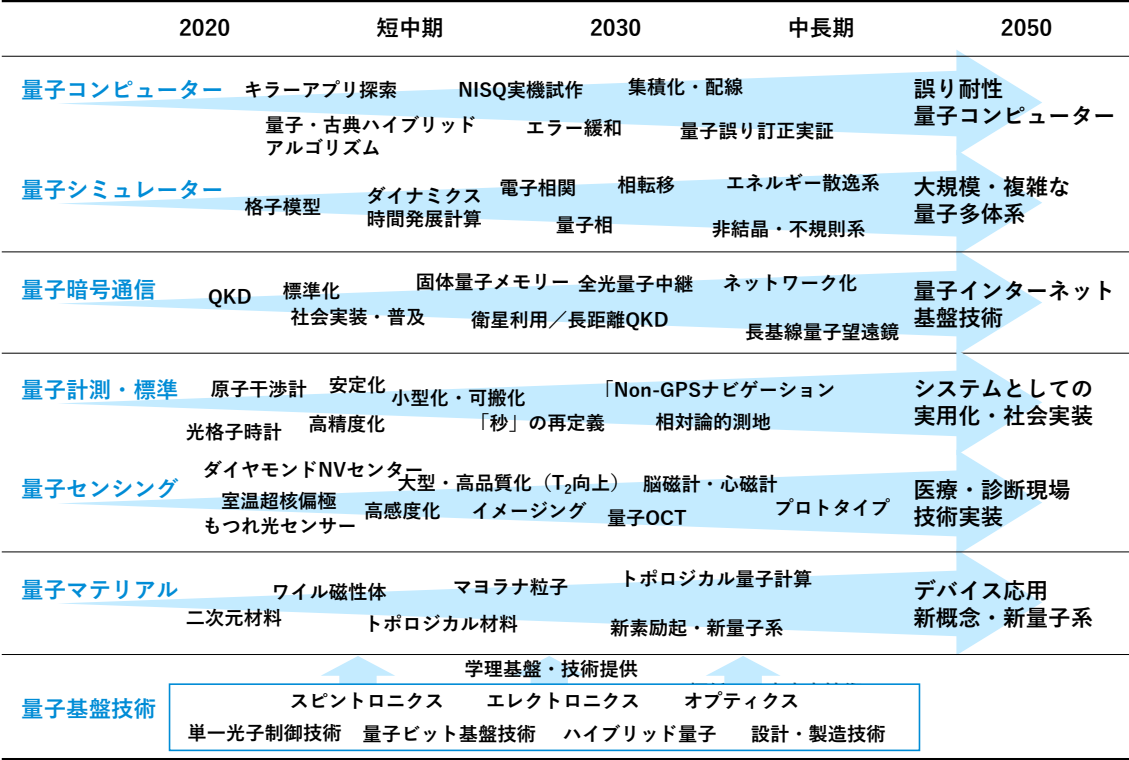


図 1-1 量子技術の現状と展望^[1]

1.3 分野別の研究開発動向

1.3.1 量子コンピュータ・量子シミュレータ

現在の量子コンピュータブームに火をつけたのは、2014年のカリフォルニア大学サンタバーバラ校 Martinis グループによる、超伝導 5 量子ビットデバイスの高忠実度の動作実証だと言われている。時期を同じくして米国の IT 企業が研究開発に参入を明らかにし、ソフトウェア・ハードウェアのスタートアップが続々と立ち上がった。このブームの特徴は、理論・実験の両面で工学的なフェーズに入ったことにある^[7]。物理実装系は様々なものが提案されているが、代表的なものに超伝導量子ビットとイオントラップがある。他に光量子、半導体量子ドット、トポロジカル量子なども研究開発が進められている。いずれも、現状のシステムでの量子ゲートの誤り率は高く、意味ある結果が得られるようなプログラム（量子回路）のサイズは限られる。集積度とゲート精度の両立は難しく、誤り耐性量子コンピュータの実現にはまだ時間がかかる見込みである。

したがって、現実的に手に入る誤り耐性無しの量子コンピュータ上で、論理誤りを許しつつも量子コンピュータで初めて実行可能になる計算の実行が重要な研究開発課題である。小規模の量子デバイスは NISQ

(noisy intermediate-scale quantum) と呼ばれる。様々なサブルーチンを実機で実行したベンチマークも報告されている^[8]。スーパーコンピュータでは1万年かかる乱数生成計算を53量子ビットのNISQプロセッサにより200秒で実行したとGoogleの研究チームが2019年10月に発表し話題となった^[9]。テンソルネットワークを利用するなど計算の工夫でスパコンによる計算時間の改善も報告されている。

ハードウェアの技術進展に伴い、その計算能力を引き出すソフトウェアの重要性も増している。ソフトウェア開発の基盤となるプログラミング言語やソフトウェア開発キット (SDK) が提供されるようになり、実機やシミュレータ上で量子プログラムを実行できるクラウドプラットフォームも登場した。また、NISQデバイスでの実行を考慮し、小さな量子回路と統計処理や最適化を組み合わせで演算する変分量子アルゴリズムの提案も近年相次いでおり、今後もこの流れは大きくなると予想される^[10]。ただし、量子化学計算や機械学習タスクでのNISQ量子コンピュータの優位性の実証には至っていない。クラウド量子コンピュータの提供など、キラーアプリを探索する環境は整いつつある。統計処理によるノイズ補償技術の開発も進められている。

冷却原子による量子シミュレーターでは、リュドベリ軌道電子の高速生成・制御が可能となり、シミュレーションの自由度が向上している。今後、実用性の拡大へ向けた活動が更に活発化すると見られる。

1.3.2 量子暗号鍵配送・量子通信

量子性を用いることで、従来法では実現できない通信プライバシーや安全性を確保するのが量子通信技術である。量子暗号鍵配送 (Quantum Key Distribution, QKD) は1984年のBB84プロトコルの提案に始まり、精力的な研究により2010年頃までに理論的基礎が確立、装置の不完全性があっても成立する安全性理論も開拓された。実装されたデバイスの特性にまで踏み込む実装安全性の研究や、実装の不備を突くサイドチャネル攻撃の研究などは、欧州電気通信標準化機構 (ETSI) や国際標準化機構 (ISO) で進められているQKD装置の安全性保証の標準化の動きに強い影響を与えた。

QKDは暗号鍵の伝送距離や速度に限界がある。BB84プロトコルでの光ファイバーを用いた場合の現性能としては、距離は光子が届く距離に制限を受けるため約100 km、そのときの速度は約1kbpsである。クロック周波数については、東芝とNECによって2015年頃までにクロック周波数1GHz台の実用的な装置が完成している (デコイBB84プロトコル)。さらなるクロック周波数向上に向けた研究開発も続けられている。伝送距離の延長では「安全な局舎 (trusted node)」という安全性の保証された局舎を介したネットワーク化が試みられた。先駆的な例としては米国高等研究計画局 (DARPA) のワシントンDCでの実験、ウィーン市内で欧州の研究機関が構築したSECOQCでのネットワーク制御の実験実証が知られている。日本では2010年に量子暗号ネットワークテストベッドであるTokyoQKDネットワークが実現した。中国は北京-上海間2,000kmの幹線と合肥などでの都市内ネットワークも完成させるなど、大型の実装で先行している。人工衛星「墨子」を用いた実験の成功も注目される^[2]。衛星利用の実験は、我が国でも最近実用的な超小型衛星による基礎実験に成功しており、世界各国で様々なプロジェクトが立ち上がりつつある。米国では民間企業がQKDネットワークを提供開始、欧州でもEUと各国 (英国、ドイツ、イタリア、スペインなど) が量子ネットワークの建設を進めている。近年では単純にQKD装置を安全な局舎で結ぶだけでなく、鍵生成の制御、鍵管理、供給といった鍵提供プラットフォームとしての研究開発も進められている。

QKD装置の低価格化のための研究として、従来型のコヒーレント光通信の部品のみで構成でき、既存技術との親和性も高い連続量 (CV) QKDが注目されている。光通信とのファイバコア共有が可能であることも実証され今後の実用化が期待されるものの、実装安全性を含めた無条件安全性の証明がされていない (安全性はデコイBB84プロトコルの水準に達していない) 点には注意を要する。

離れたノード間の量子もつれの形成は量子通信の長距離化に必須の技術である。その実現の鍵を握るのは隣接しているノード間の量子もつれを離れたノード間の量子もつれに変換する量子中継技術である。量子テレポーテーション転写や量子メモリといった新たな技術開発が進展している。量子状態を室温で長時間保持で

き光で容易に初期化、読み出し可能なダイヤモンドNVセンターを量子メモリとして用いる技術や、光の送受信装置のみで実現可能な全光量子方式が量子中継の候補として挙げられる。

量子コンピュータや量子センサーなどの量子情報処理機器をノードとして、量子データをやりとりする「量子インターネット」の検討も進められている。暗号鍵の安全な配送に加えて、クラウド量子コンピュータへの安全なアクセス、分散型の量子計算の実現、光格子時計の同期、量子センサーネットワークの構築など、様々な応用が期待されている^[11,12]。

1.3.3 量子計測・量子センシング

計測・センシング技術は科学技術の基盤である。その限界を、個々の光子や原子の量子状態制御によって打ち破るのが量子計測・量子センシング技術である。

角速度に応じて原子波の量子干渉の位相が変化する効果を利用すると、高感度のジャイロスコープが実現できる。冷却原子噴泉型や熱原子ビーム干渉型が知られているが、いずれも古典技術（従来技術）の性能に劣る。実現に必要な基盤技術の多くを光格子時計や量子シミュレータなどと共有しつつも、古典技術との融合が求められる。航法応用では高感度の他に、加速度耐性やダイナミックレンジといった性能も求められている。加速度と角速度を切り分けられる量子センシング技術の開発も進められている。

光格子時計の研究開発の主眼は応用・実用化に移っている。2001年の提案以降、欧米やアジア各国の計量標準研究所などに波及し、2016年には当初目標の18桁精度が実現された。欧州では数千kmにわたる光ファイバ網の整備が進められ、各国の標準研究所の時計を比較する準備が整いつつある。時計のネットワーク化は再現性の確保や時間情報の共有に重要である。「秒」の再定義に向け、時刻標準を生成する取り組みも行われている。また、重力ポテンシャル計としての応用も注目されている。地震や火山活動の測定といった応用を目指し、室外で安定動作する可搬型光格子時計の開発が進められている^[13]。

光検出磁気共鳴の発見から二十数年、ダイヤモンドNVセンターを利用する量子センサーの研究開発が進められ、磁場、電場、温度、圧力、pHなどの測定で従来技術を凌ぐ可能性が見出されている。応用先としては脳磁計測、心磁計測、細胞内計測、タンパク質構造解析などのバイオセンサーから金属の欠陥検出まで様々な分野での利用が期待されている。センサーデバイスでの利用に加え、直径数ナノメートル程度のダイヤモンドナノ粒子をプローブとして用い、生命現象や細胞内環境を量子計測する研究も盛んである。スタートアップも多数立ち上がり、今後徐々に市場が確立されていくと見られる。

魅力的な量子センシング技術のひとつに、安定同位体核の超高感度計測を実現する「超偏極MRI」がある。これは、超偏極誘導した安定同位体核を検体に投与することで、核スピンの偏極率を一時的に数万倍して高感度にMRI撮像を行う技術である。³Heや¹²⁹Xeなど希ガスから始まり、2003年に水溶性物質を動的核偏極（DNP）で高感度化させてから水溶液に溶解させるdissolution DNP（dDNP）法が開発され¹³CのNMR信号の1万倍の増幅に成功すると、PET等に代わる放射線被曝の無い安全な分子イメージング診断を目指した研究が世界中で進められた^[14]。米国GEヘルスケア社製の¹³C励起装置が世界23カ所以上に導入され、数百人規模の臨床試験が進められている。精力的な研究により、その適用範囲はがん診断から心機能評価まで拡大している一方で、日本国内には臨床研究に使用できる（医薬品製造基準に対応した）¹³C励起装置が導入されておらず、致命的な遅れと指摘されている^[15]。

光あるいは物質の量子もつれを利用した計測技術は量子もつれセンシングと呼ばれる。その代表例には「量子もつれ顕微鏡」がある。ここでは、微分干渉顕微鏡のレーザー光の代わりに量子もつれ光が使われ、解像度の向上が見込まれる。また量子光干渉断層計（量子OCT）というイメージング応用も知られている。スクイーズドスピン状態や原子気体系を利用した物質の量子もつれによるセンシングの提案もある。いずれも基礎研究段階が中心であり、システムインテグレーションおよび応用の開拓が待たれる。

1.3.4 量子マテリアル

物性物理学、量子情報、化学・材料工学などの様々な分野にわたる概念として「量子マテリアル」が注目されている^[16]。もともとは、高温超伝導体や重い電子系など固体物理学における新奇な量子現象や量子相などを強調するために導入された言葉である。しかし現在では、新物質やその上で実現される量子状態が量子情報の研究の舞台として提供されたり、その逆の、量子情報の概念や手法を用いて物質における量子多体系のふるまいを理解したりと、相互に行き来できる学際的な分野へと変化しつつある。最も顕著な例は、エンタングルメントエントロピーを用いたトポロジカル物質の理論的な研究であろう^[17]。

質量を持たないディラック電子の輸送特性がグラフェンで発見されて以来、物質中の相対論効果であるスピン軌道相互作用の役割が注目された。スピン軌道トルク、スピンホール効果、スキルミオン、マヨラナフェルミオンなど、魅力的な量子現象が多く見いだされた。また、二次元物質をファンデルワールス接合したヘテロ構造でも、近接効果による新現象が多数報告されている。代表的なものとして、ツイスト二層グラフェンにおける超伝導、 WTe_2 における量子スピンホール効果、グラフェン/ WS_2 ヘテロ構造におけるスピン電荷変換、などが挙げられる。

トポロジカル絶縁体・超伝導体の理論予測とその実験による検証も進められている。これらの物質の表面（二次元物質の場合は端）ではトポロジカルに保護された状態が生じることが期待され、カルコゲナイド半金属などでは実験的に確認されている。

量子情報と量子物性の理論面での関係は緊密である。分数量子ホール状態には新しいタイプの秩序が存在し、従来型の物性理論アプローチであるランダウ対称性の破れの理論は適さないことが問題となっていた。量子情報はここに「量子もつれ」の概念を持ち込み、トポロジカル秩序の理解で成功を収めた。トポロジカル秩序と新しい量子相の研究は、量子情報の言葉では量子もつれのパターンの研究とも言える^[17]。非自明なパターンは、トポロジカル秩序相（スピン液体状態や分数量子ホール状態）における分数電荷や分数統計、ギャップレス励起など新しい量子現象の宝庫である。

新しい量子マテリアルが提供する新しい量子系は、様々な量子技術のプラットフォームとして期待されている。顕著な例は、量子スピン液体に現れるマヨラナ粒子のトポロジカル量子コンピュータへの応用であろう^[18]。超伝導量子ビットの性能への不純物の影響など、量子技術だけでは解決が困難な問題では材料科学からのアプローチが重要となる局面も多くなると考えられる。また、機械学習アルゴリズムによりトポロジカル秩序相の分類を行うなど分野交流も盛んである^[19]。

2 | 調査の概要

2.1 調査目的

本調査は主要国における量子技術の研究開発動向を、学会や論文誌などの文献情報、および、特許の公開情報から把握・分析する。この目的のため、本調査では関連する分野の文献情報および特許公報を広く収集したうえで、それらを同じ技術マップ上に統合し可視化、分析する。また、論文の共著ネットワークと研究者情報を技術マップ上の技術分類と組み合わせ研究者マップとして可視化し分析する。これらに基づき、量子技術分野の研究開発動向について技術・人の両面から把握・分析することを目的とする。

2.2 文献・特許データ母集団

量子技術分野の文献および特許を検索キーワードをベースに収集を行った（表2-1）。キーワードの検索対象は文献はタイトルと要約、特許はタイトルと要約と請求項とした。文献について1990 年以降に発行された査読付き論文（article およびconference paper）を対象とし、キーワードに加えて論文に付与されたASJC 分類も利用した。特許について、1990 年以降に発行された公開公報のうち、量子技術分野に関連が高いものをキーワード検索により抽出、分類記号（IPC とCPC）による限定を施した。発行国・機関は米国、欧州、WIPO、中国、日本、韓国、ドイツ、フランス、英国、カナダである。

量子技術は量子情報および、量子材料、量子センシング、量子シミュレータに大まかに分類してキーワードを設定した。量子情報および量子材料の検索では、内容をより限定するため表2——3のような補助検索条件を付加した。

表2-1 検索範囲

項目	論文	特許
種別	"ar" or "cp"	Publication
収録	1990年以降	
論文ASJC分類	"COMP" OR "PHYS" OR "MATE" OR "ENGI" OR "MATH"	
特許発行国・機関	CN or EP or JP or KR or US or WO or CA or DE or FR or GB	
言語	英語	英語または英語機械翻訳
使用データベース	Scopus	TotalPatent

表 2-2 検索キーワード

分類	技術	検索キーワード	論文件数	論文合計	特許件数	特許合計	補助条件
量子情報	キュービット	quantum W/5 (qubit OR Qbit)	8,074	90,341	2,709	14,246	B
	インフォメーション	quantum W/5 informat*	20,554		3,219		B
	量子コンピューティング	quantum W/5 comput*	24,846		5,039		B
	量子制御	quantum W/5 control*	12,462		3,166		B
	量子通信	quantum W/5 communicat*	8,092		3,317		B
	量子シミュレーション	quantum W/5 simulat*	17,240		678		B
	量子計算機	(quantum W/5 (processor OR processing OR anneal*)) OR "NISQ"	10,332		3,449		B
	量子誤り修正	quantum AND ((fault* OR error* OR noise*) W/2 (detect* OR correct* OR robust* OR threshold* OR toleran* OR reduct* OR compensat* OR redundan*))	6,831		1,818		B
	量子鍵配送など	(quantum W/5 ("key distribut*" OR crypt* OR encrypt* OR cipher*)) OR QKD	9,830		4,372		B
	ポスト量子暗号	post quantum cryptograph* OR PQC OR ((quantum W/3 resist*) W/5 cryptograph*)	874		104		B
	量子秘密共有	quantum secret sharing	580		45		B
	量子と機械学習	quantum W/5 ("neural net*" OR learning OR "AI" OR "artificial intelligence")	2,248		530		B
	量子中継器	quantum W/5 repeater*	762		161		B
	量子ネットワーク	quantum W/5 network*	6,361		1,700		B
	量子インターネット	quantum W/5 internet*	229		99		B
	量子ノード	quantum W/5 node*	886		790		B
量子センシング	量子センサー／量子センシング	quantum W/5 (sensor* OR sensing*)	4,333	10,606	3,256	4,269	
	量子標準	(quantum PRE/2 metrolog*) OR (quantum PRE/2 standard)	1,889		126		
	量子ジャイロスコープ	quantum W/5 gyro*	116		52		
	原子干渉計	atom* W/5 interferometer*	1,350		310		
	光格子時計	optical lattice clock	445		15		
	動的核偏極NMR	("dynamic nuclear polarization" W/2 "nuclear magnetic resonance") OR (DNP W/2 "nuclear magnetic resonace") OR ("dynamic nuclear polarization" W/2 NMR) OR (DNP W/2 NMR)	423		96		
	ダイヤモンドNVセンター	nitrogen vacancy center OR "NV center"	2,664		503		
量子シミュレータ	イオントラップ	trapped ion*	3,193	8,409	981	1,654	
	冷却原子	cold atom*	5,341		673		
量子材料	グラフェン	graphene	4,718	46,121	1,533	7,676	A
	遷移金属ダイカルコゲナイド／金属モノカルコゲナイド	dichalcogenide OR "chalcogenide" OR Monochalcogenide OR telluride OR oxychalcogenide OR sulfide OR selenide	1,701		1,931		A
	h-BN_六方晶窒化ホウ素	hBN OR "hexagonal boron nitride" OR "hexagonal BN"	244		112		A
	ボロフェン	borophene	78		2		A
	シリセン	silicene	362		2		A
	二次元ナノシート	2D nanosheet OR "two dimensional nanosheet"	6		0		A
	ヘテロ超格子	heterostructur* super lattice OR "heterostructur* superlattice"	1		0		A
	ファンデルワールスヘテロ構造	Van der Waals heterostructures	182		7		A
	モアレ構造	moire structur*	4		0		A
	ツイスト積層界面	twisted layer	0		0		A
	マルチフェロイック	multiferroi*	641		37		A
	トポロジカルヘテロ構造	topological heterostructure	4		0		A
	層状物質	layered* W/2 structure*	1,050		3,481		A
	Kitaev物質	Kitaev material	39		0		
	Weyl磁性体	Weyl magnet OR "Weyl ferromagnet" OR "Magnetic Weyl Fermion"	8		0		
	ボロジカル絶縁体	topological insulator	8,045		536		
	スキルミオン	Skyrmion	3,433		208		
	量子異常ホール効果	quantum anomalous hall effect	401		4		
	量子スピンホール効果	quantum spin hall effect	402		8		
	スピン運動量ロックン	spin momentum locking	300		12		
量子材料	ワイル／ディラック半金属	Weyl semimetal OR "dirac semimetal"	1,788		42		
	マヨラナ準粒子	majorana quasiparticle OR "majorana particle" OR "majorana fermion"	2,040		29		
	モット絶縁体	mott insulator	3,924		124		
	Kitaev量子スピン	kitaev quantum spin	62		0		
	量子相転移	quantum phase	8,604		209		
	強相関電子系	strongly correlated electron OR "strongly correlataed system"	1,606		74		
	重い電子系	heavy fermion OR "heavy electron"	6,344		129		
	量子材料	quantum material	602		198		
	トポロジカル相転移	topological phase	4,459		48		
	トポロジカルスピントロニクス	topological spintronics	27		0		
	トポロジカルフォトリクス	topological photonics	190		0		
	バレートロニクス	valleytronics	724		2		
	ツイストロニクス	twistronics	54		0		
	エッジトロニクス	edgetronics	1		0		
	反強磁性スピントロニクス	antiferromagnetic spintronics	166		0		
合計				147,853		27,067	

表 2-3 補助条件

補助検索項目	条件
補助条件A	"weyl fermion" OR "weyl electron" OR "dirac fermion" OR "dirac electron" OR majorana OR anyon OR "anomalous hall effect" OR "spin hall effect" OR spintronic* OR "quantum spin" OR "quantum phase transition" OR "mott transition" OR semimetal OR superconduct* OR "two dimensional magnetism" OR "2D magnetism" OR "dirac fermion" OR "topological photonics"
補助条件B	IPC:(G06 OR H04) OR CPC:(G06 OR H04)

量子情報では16の小分類について収集し、文献で90,341件、特許で14,246件となった。量子センシングでは7小分類について収集し、文献で10,606件、特許で4,269件となった。同様に、量子シミュレータでは2小分類について、文献で8,409件、特許で1,654件となった。量子材料では、35小分類について収集し、文献で46,121件、特許で7,676件となった。これら全ての技術分類について重複を排除して合計すると、文献で147,853件、特許で27,067件であった。

更に、文献データについては、酷似文献の除外、記述が短くて分析に適さない文献の除外を行って、最終的に137,718件を分析対象の母集団とした。特許データについては、ファミリー特許の重複削除、現地語のみで機械英語翻訳のない特許、および記述が短い特許の除外を行い、最終的に16,020件を分析対象とした。

2.3 特許のノイズ除外

量子技術分野として収集した母集団中に含まれる明らかなノイズの除外を行った。俯瞰図左端および右端と極端な上端に配置された、およそ量子技術と関係ない青実線楕円の領域中で、簡易テキスト判定で量子関連技術と見做されない灰色のプロットで表示された特許を除外した。量子関連と判定された特許は青実線楕円内でも分析対象として採用した。全16,020件中から、1,540件を除外した。簡易的な関連文献判定として「量子」と「コンピュータ or 通信 or 情報 or プロセス or アルゴリズム or 鍵 or セキュリティ or 回路 or 画像 or 標準 or センサ or 中継器 or ネットワーク or インターネット or ノード or ニューラル」が前後5ワード以内で共起している文献を関連文献とした。但し、前者の「量子」が、「量子力学、量子化学、量子分子（動力学）、量子物理、量子効果、量子遷移、量子モンテカルロ、量子色力学、量子電磁力学、量子場、量子構造、量子井戸、量子効率」の一部である場合は非関連文献とした。また補助条件として、量子ビットの記載のあるものも関連文献とした。

量子技術分野として収集した母集団中に含まれる明らかなノイズとして、量子時間（システム最小処理時間）を含む青プロットの特許181件を除外した。前ページによる除外対象1,540件と、今回の181件から重複を除いて最終的に14,321件を量子技術関連文献と融合して分析を行った。尚、量子技術関連文献には明確なノイズがないため全件を融合分析対象とした。

時間量子は正規表現によりtime.0,1?quantumの形式で検索を行った。但し、real-time quantum keyやreal-time quantum computer、space time quantum、one-time quantum symmetric keyなど9件の分析対象も含まれていたため、目視により採用した。

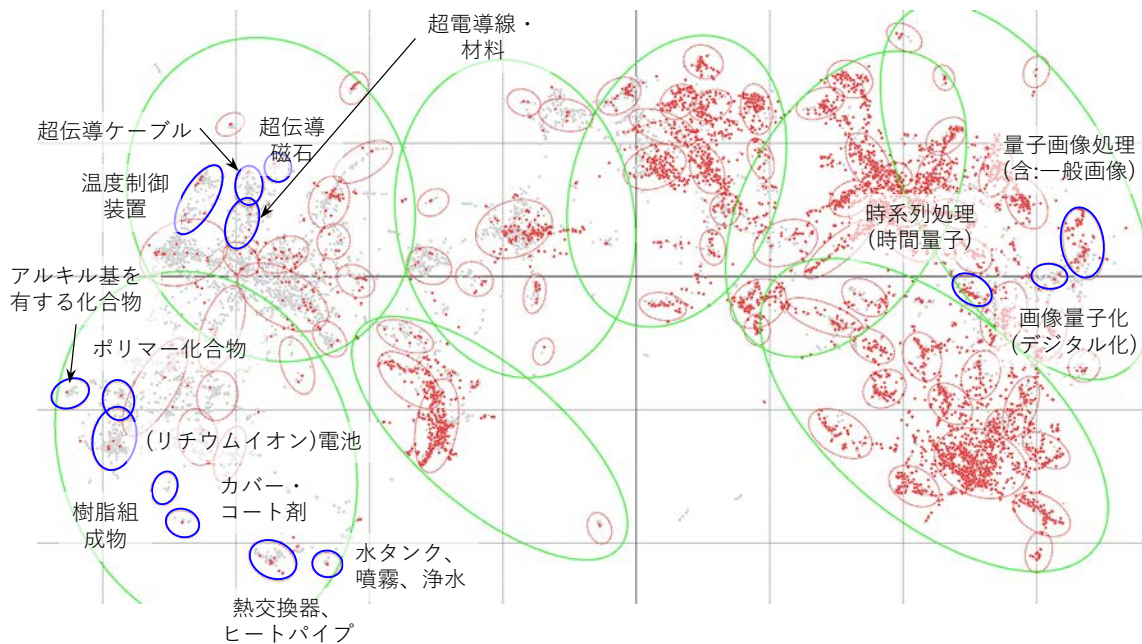


図2-1 不要な技術領域の設定

2.4 トピックモデルによる類似度評価

本調査では、トピックモデル（LDA：Latent Dirichlet Allocation）によって論文・特許の分類を行った。トピックモデルは確率モデルの一種で、文書中の「単語の出現する確率」を推定し、似た単語が出てくる文章を似たものとして評価する自然言語処理の基本的手法である。

単語の出現確率の推定は実際の文書内の単語の出現頻度を元に行われる。トピックモデルでは各文章は複数のトピックで構成され、各トピックの単語分布の組み合わせで単語が生成されているものと仮定する。このように、トピックモデルにはトピックの単語と文書の単語が異なってもよいという柔軟性があり、文章の特徴を複数のトピック構成として把握することで文章間の差異（類似度）を定量的に評価する手法である。

本調査では、文書の可視化を以下3ステップで行った。

- (1) トピックモデル（Latent Dirichlet Allocation:LDA）を用いて、各文献の内容を（自動抽出された）トピックの組合せで表現を求める
- (2) 各文献におけるトピックの共有関係から文献間のトピック空間における高次元類似度を求める
- (3) 多様体学習により2次元に次元削減を行って図示化を行う

類似度の評価をトピックモデルにより行ったのち、多様体学習によって二次元座標にマッピングして可視化した。二次元座標の原点は、母集団の中で最頻出となる概念を意味する。原点からの距離は原点にある概念からの差異の度合いと理解できる。各文書間の距離も同様に文書間の差異を表しており、距離が近い文書同士は類似した概念を含む文章だといえる。クラスターや文書の絶対的な位置には意味は無く、それぞれの相対的な位置関係のみが重要である。本調査では、文書ごとに推定されたトピックに基づいてグループ化し、トピック内のキーワードの組み合わせなどを元に手作業で各クラスターにラベル付けをした。

トピックモデル（LDA）では、（各キーワードの組合せである）トピックの組合せというように、2段階で文献の内容表現を求める。そのため、キーワードの組合せのみでの表現と比較して、1キーワードのみによる類似判定が生じにくいとされる。例えば、cellのみでの類似判定ではなく、stemとcellによる類似判定（幹細胞）と、solarとcellによる類似判定（太陽電池）とに、自動的に分かれる。

概して、各文献に付与された筆頭のトピックが同一の文献どうしが集積するが、2番目以降のトピックの差異により集積領域内での相対位置が変わる。ノイズの除去にあたり、筆頭トピックが関心のないものであっても、2番目以降のトピックに関心のある技術が含まれている場合は、復活採用した。

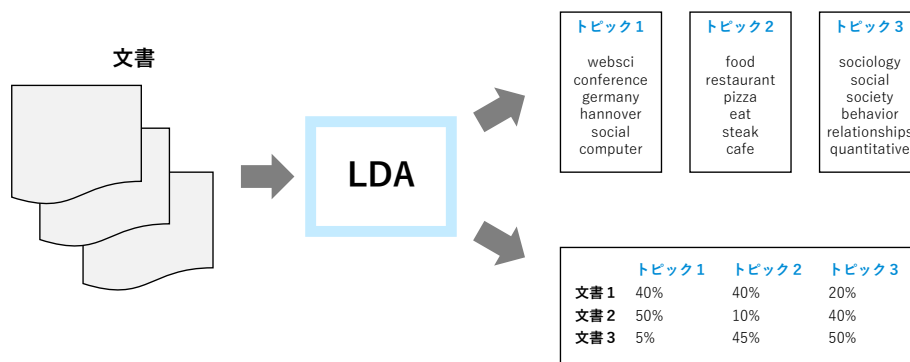


図2-2 トピックモデル（LDA）

2.5 共著ネットワーク分析

収集した論文の共著関係をグラフで表現し、研究実績の指標（被引用数、等）と共著ネットワークでの重要性指標（媒介中心性、等）の多角的な観点で分析した。共著ネットワークの各ノードは研究者（論文著者）である。グラフ上の重要性指標には様々なものが知られているが、本調査では中心性を用いる（中心性指標にも様々なものがあり、どのような観点で「重要」と見做すかによって注目すべき指標は異なる）。

本調査では（1）次数中心性（最も繋がりが多い研究者）、（2）媒介中心性（グループ間を繋ぐ研究者）、（3）近接中心性（皆と平均的に近い研究者）のうち、（2）媒介中心性を利用する。図2-3に共著ネットワーク上で各種の中心性がどのようなノードを特徴づけるかを例示した。

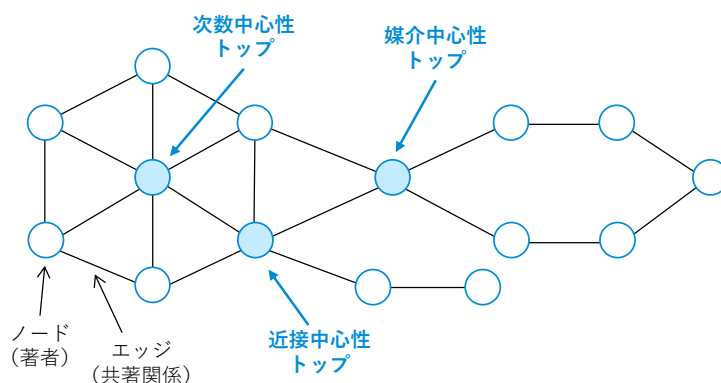


図2-3 共著ネットワークと中心性

共著ネットワーク分析から得られる中心性の変化（媒介中心性トレンド）と、被引用数を組合せ、研究者のフェーズを推定した。媒介中心性トレンドは研究者のフェーズが変化する前に変化する先行指標、被引用数はフェーズ変化後に論文等の評価として定まる遅延的指標と考えられる。本調査では、図2-4のように二次元座標上に可視化し、研究者のフェーズを推定しながら目的に合った研究者を探索する。

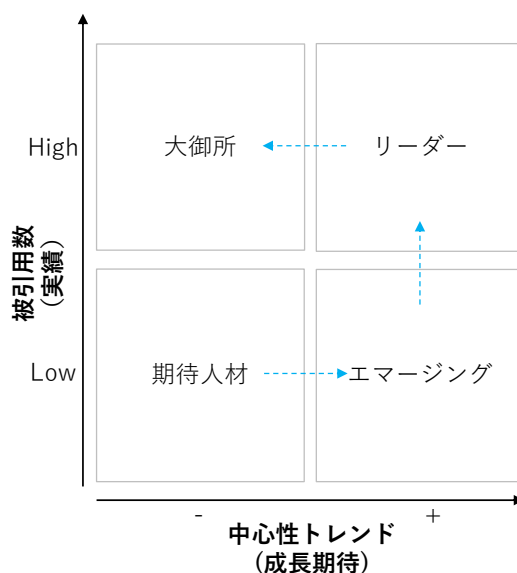


図2-4 研究者のフェーズ推定

2.6 中国語文献・ウェブサイト調査

本調査では、近年成長の著しい中国での研究開発状況を把握するため、政策概要を俯瞰し、注目機関と注目研究者について調査を行った。情報源としては、人民網をはじめとする中国語文献や、各機関・研究者の中国語公式ウェブサイトを参照した。

注目機関は、中国語文献での出現頻度と論文・特許数から総合的に判断して大学・研究機関と企業をそれぞれ10件程度ずつ選定した。調査項目はJST SciencePortal China「中国の主要800大学」^[20]に準じて設計した。また注目研究者は、所属機関での職位、研究開発関連の報道、論文情報からみるパフォーマンス（発表論文数、被引用数、媒介中心性指標）などから総合的に選定し、国際的な位置付けや学界での顕著な活動についても特記した。

3 | 論文・特許俯瞰マップ

3.1 俯瞰マップ

量子技術分野の学術文献 137,718 件及び特許 14,321 件を融合した計 152,039 件を対象にトピックモデル + 多様体学習による俯瞰解析を行った（図 3-1）。分析対象は、文献がタイトル及び要約、特許は要約のみである。トピックモデルの主要トピックが共通の領域を赤破線楕円で示した（以降、「技術群」と呼ぶ）。

大域的な構造として、類似の赤楕円群をキーワードを頼りに目視で判断し 19 の技術領域に分けた（青実線楕円）。この技術領域をさらに大別したものが「区分」である。文献を橙色、特許を青のプロットで示す。同定した技術群と技術領域は表 3-1 のとおりである。

俯瞰図右上に「量子コンピューティング」、「量子暗号・通信」が集積し、その間に「量子基礎・基盤」が食い込んで、「超伝導量子ビット」が「量子コンピューティング」と引き離された。「量子誤り訂正」は「量子コンピューティング」と「量子暗号・通信」の両方で利用されるためかその中間に位置した。但し「量子暗号・通信」寄りである。「超伝導量子ビット」の周辺には「量子光学」、「冷却原子量子系」、「ダイヤモンド NV 中心」、「イオントラップ系」、「ジョセフソン接合」などの量子系実現システムが配置された。

量子材料系は俯瞰図左側に配置され量子技術との類似度が低いほど左に配置されている。「量子物性」「量子マテリアル」は「量子デバイス」との重なりがあるが、「重い電子系」「マルチフェロイック・磁気スキルミオン」は遠くに配置された。俯瞰図右端には「量子計算エミュレータ」として量子ドットセルラーオートマトンや FPGA を利用した計算機システムが分離された。

青丸で示した特許は、「量子暗号・通信」、「量子光学」、「層状化合物」に集中しているように見えるが、特許のみでプロットすると他の領域にも広く分布していることが分かる。

表3-1 区分と領域

区分	領域（カッコ内は技術群の数）	技術群
量子コンピュータ	量子誤り訂正 (2)	「量子誤り訂正」「量子コード、表面コード」
	量子コンピューティング (23)	「量子検索アルゴリズム」「各種量子アルゴリズム・遺伝的量子」「DNA計算、クラウド計算など」「量子機械学習・強化学習」「量子ニューラルネットワーク」「計測型量子コンピュータ」「量子テンソルネットワーク」「量子脳理論・意識」「量子計算の複雑性」「量子フィードバック制御」「量子系制御」「量子(非)断熱時間発展」「量子系、量子ハミルトニアン」「量子演算子(操作)」「量子時間発展・マスター方程式」「量子計算と古典計算の境界」「量子位相空間と古典位相空間」「(リ-)代数表現と量子位相」「量子行列計算」「量子関数による計算」「量子コンピュータとVQEなどのアルゴリズム」「量子プログラム言語」「量子最適化、量子アニーラ」
	量子計算エミュレータ (8)	「NAND、RQL(reciprocal)ロジック回路」「(近似)量子フーリエ変換」「FPGAを用いた量子計算エミュレータ」「QCA入出力」「量子ドットセルラオートマトン(QCA)」「可逆(論理)回路」「量子グラフ」「量子ウォーク」
	DFT・量子化学計算 (14)	「カーボンナノチューブ・デバイス(FET)」「反応・遷移計算」「(水素)結合エネルギー計算」「(エネルギー)量子デバイスの数値計算」「分子動力学計算」「量子モデル計算(シュレディンガー方程式など)」「原子・分子の振動エネルギー・回転エネルギー」「原子・分子の運動エネルギー・遷移エネルギー」「量子モンテカルロ計算」「遷移スペクトル計算」「クラスターモデル計算」「密度汎関数計算」「生体分子計算」「触媒反応計算」
量子暗号・通信	量子暗号・通信 (18)	「量子ネットワーク・ノード」「QKDネットワーク」「衛星量子鍵配送・量子通信」「連続可変量子鍵配送」「量子鍵配送(QKD)」「量子署名」「公開鍵・秘密鍵」「耐量子計算機暗号(PQC)」「量子鍵」「量子画像暗号」「量子データ通信・処理」「量子乱数発生器」「量子計算の複雑性」「量子チャンネル」「量子通信システム」「量子暗号・通信プロトコル」「量子秘密共有」「量子バイト」
量子基盤技術	量子基礎・基盤 (15)	「量子情報」「量子エントロピー」「不確定性原理」「量子コヒーレンス」「量子相関・量子不一致」「ベル不等式など」「量子フィッシャー情報(QFI)」「量子もつれ」「量子テレポーテーション」「各種量子状態」「量子コヒーレント状態」「量子位相・転移」「スクイーズド状態」「デコヒーレンスフリーの部分空間(DFS)の量子系」「量子計測、パラメータ推定」
	超伝導量子ビット (4)	「(超伝導)量子ビット」「アンシラ量子ビット」「量子ゲート回路」「ベリ-位相」
	量子光学 (16)	「光子もつれ・通信」「光子の各種自由度」「(単一)光子量子状態」「光子ベアのもつれ」「単一光子源」「フォトリソグラフィ」「量子メモリ」「(超伝導ナノワイヤ)単一光子検出器」「ビーム偏極」「光信号処理」「光源・ビームスプリッターなど」「(量子)ノイズ(低減)」「量子カスケードレーザー」「レーザーガスセンサ」「光周波数コム」「フォトリソグラフィ」「フォトニック結晶導波路」
	ジョセフソン接合 (1)	「ジョセフソン結合」
	イオントラップ系 (3)	「トラップ・イオン全般」「可飽和吸収体・トポロジカル絶縁体」「希土類イオンドープ結晶」
	冷却原子量子系 (11)	「冷却原子の原子干渉計」「冷却原子全般」「超冷原子のフェッシュバハ共鳴」「リユードベリ原子」「光の軌道角運動量状態(OAM)」「電磁誘導透明化」「フォトリソグラフィ」「(超伝導)量子共振器」「キャビティ量子・CQED」「光格子時計」「原子干渉計による重力波検出」
	ダイヤモンドNV中心 (3)	「ダイヤモンドNVの単一光子源」「ダイヤモンドNVセンタ全般」「ダイヤモンドNVのスピニ状態検出」
	量子デバイス (18)	「量子波パケット(の制御)」「レーザーパルス」「パルス制御」「高次高調波発生」「量子ドット中の励起子作用」「Pekar変分法励起状態計算」「量子計算用CMOS」「量子ドット・デバイス」「量子デバイス」「半導体量子ドット、電子スピン量子ビット」「スピン系全般」「光検出の量子効率」「核スピン量子ビット」「(量子)DNAセンサ」「グラフェン・量子ドット(センサ)」「超伝導量子干渉装置(SQUID)センサ」「量子電流標準、量子計測トライアングル」「量子ホール抵抗標準」
量子マテリアル	量子ドット (5)	「InGaAs量子ドットLED」「自己組織化InGaAs量子ドット」「シリコン量子ワイヤ・シリコン量子ドット」「量子ドット・バイオセンサ」「量子ドットセンサ(ガス、湿度、温度など)」
	量子物性 (21)	「電子輸送、電子-電子相互作用」「強相関電子系の電子-フォノン相互作用」「ハバードモデル・モンテカルロ計算」「量子位相スリッパ(QPS)」「有機モット絶縁体」「モット絶縁体」「(軌道選択型)モット転移」「エンタングルメント・エントロピー」「量子相転移全般」「無秩序量子系の相転移」「ボーズ-アインシュタイン凝縮」「量子相転移におけるスピン作用」「フラクソン(fluxon)、アブリコソフ渦、ジョセフソン渦」「軌道自由度、軌道秩序」「アハラノフ・ボーム効果」「マグノン(magnon)、スピン波」「(量子閉じ込め)Stark効果」「マヨラナフェルミオン」「エニオン(アーベル、非アーベル)」「対称性保存(を破る)トポロジカル相転移」「鉄系超伝導体」
	重い電子系 (7)	「近藤効果、近藤格子モデル」「重フェルミオン物質のフェルミ準位」「重フェルミオン全般」「圧力下での重フェルミオン(超伝導体)の物性」「重フェルミオンの熱膨張と磁歪」「重フェルミオン物質の低温物性」「DFT+一般化勾配近似(GGA)による物性値」
	量子マテリアル (26)	「グラフェン層間挿入化合物(ダイカルコゲナイドなど)」「結晶格子歪みの影響」「電荷密度波(CDW)状態(ダイカルコゲナイドなど)」「2D遷移金属ダイカルコゲナイド」「半導体障壁輸送計算」「量子ジャンプコードと、薬品センサ」「バレートロンクス・デバイス候補」「ディラック半金属」「ワイル半金属」「表面プラズモン・ボラリトン」「Bi2Se3などの4層(quintuple)トポロジカル絶縁体」「ファンデルワールスヘテロ構造」「対称性保存(を破る)トポロジカル相転移」「トポロジカル絶縁体の相転移」「エニオン(アーベル、非アーベル)」「マヨラナフェルミオン」「トポロジカル絶縁体のエッジ状態」「量子ホール効果」「ディラック材料、ディラック・フェルミオン」「ラシュバ効果、ラシュバ・スピン軌道相互作用」「スピン軌道相互作用、逆スピン・ホール効果」「スピン電流、スピントロニクス・デバイス」「(ジゲザグ型)グラフェン・ナノリボン、シリセン・ナノリボン」「魔法角ねじれ二層グラフェン(tBG)」「量子ホール抵抗標準」「グラフェン材料」
	マルチフェロイック・磁気スキルミオン (4)	「マルチフェロイック材料」「薄膜全般」「反強磁性層状材料」「磁気スキルミオン、レオストラック・メモリ」
	層状化合物 (7)	「層構造材料全般」「量子ドット・ディスプレイ」「コンポーネント・キャリア、絶縁体」「太陽電池」「層状(2次元)超伝導体など」「リチウムイオン電池材料」「希土類ドープ層構造材料」
その他	その他 (14)	「量子ゲーム理論など」「化学式の記載のある材料文献」「六方晶窒化ホウ素・量子エミッタ」「量子場の理論、ゲージ理論」「量子画像センサ、CMOS画像センサ」「スキルム・モデル、トポロジカル・ソリトン」「DNP-NMR分光用のジャイロトロン」「素粒子標準モデル」「マヨラナ粒子、2重ベータ崩壊」「マテリアルズ・インフォマティクス」「量子宇宙・ブラックホール」「量子有限オートマトン」「量子論の教育・学習」「量子クローン(クローニングマシン)」

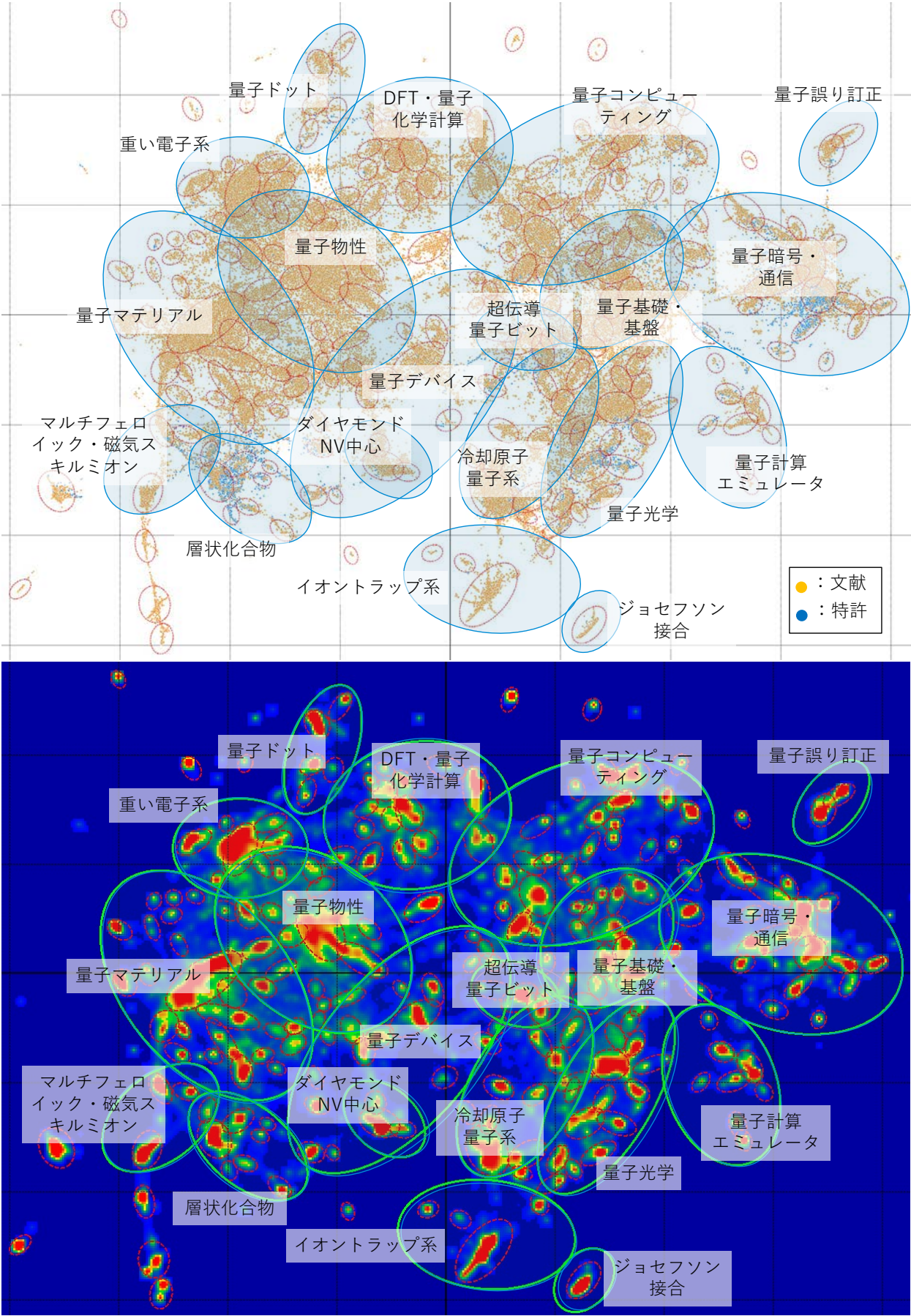


図3-1 論文・特許俯瞰マップ

図3-2に俯瞰図右端の量子情報3領域「量子暗号・通信」、「量子誤り訂正」、「量子計算エミュレータ」の各密集領域（技術領域）の詳細を示す。KWは、集積の源となった筆頭トピックに含まれる上位5キーワードを示す。

「量子暗号・通信」領域の中心には、量子鍵、量子鍵配送、量子暗号・通信プロトコルがある。量子鍵配送からは、連続可変量子鍵配送や衛星量子会議配送・量子通信、QKDネットワーク、量子ネットワーク・ノードと広がり、「量子コンピューティング」領域へと接続している。また量子通信システムや、量子チャンネルへと連なる道からは「量子基礎・基盤」へ繋がっている。「量子誤り訂正」領域は、量子誤り訂正と量子コード・表面コードの2つに分かれた。「量子計算エミュレータ」領域は、量子ドットセルラオートマトンやFPGAを用いた量子計算エミュレータなど、（量子回路型の）量子計算と関係の薄いものが俯瞰図の外周領域で集積したようである。他にも可逆（論理）回路、量子グラフ、量子ウォークなども集まった。

図3-3に俯瞰図右上の量子情報3領域「量子コンピューティング」、「量子基礎・基盤」、「超伝導量子ビット」の各密集領域（赤い楕円）の詳細を示す。

「量子コンピューティング」領域は、大きく2つに分けて、上側の各種量子アルゴリズム・遺伝的量子のようなアルゴリズム系と、下側の量子系・量子ハミルトニアンのような時間発展計算系（「量子基盤」に近い）に構成される。そしてその2領域の間に量子コンピュータとVQEなどのアルゴリズムや、計測型量子コンピュータなどの量子コンピュータ関連が配置されている。量子アルゴリズム側では、量子機械学習・強化学習、量子ニューラルネットワーク、量子最適化・量子アニーラなどに分かれた他、量子プログラム言語も現れた。量子系・量子ハミルトニアンの周辺では、量子演算子（操作）、（非）断熱時間発展、量子計算と古典計算、量子位相空間と古典位相空間などが現れた。「量子基礎・基盤」領域では、各種量子状態を中心に、その周辺に量子もつれ、量子テレポーテーション（量子暗号・通信に近い）、量子コヒーレント状態に分かれた。「量子コンピューティング」領域には、量子情報、量子エントロピーなどがある。「超伝導量子ビット」領域には、（超伝導）量子ビット、アンシラ量子ビット（量子誤り訂正側?）、量子ゲート回路、量子幾何学的位相などに分かれた。「量子コンピューティング」に直接つながらず、「量子基礎・基盤」に引き離された感がある。

図3-4に俯瞰図右下の量子デバイス5領域「冷却原子量子系」、「量子光学」、「イオントラップ系」、「ダイヤモンドNV中心」と「ジョセフソン接合」の各密集領域の詳細を示す。

「量子光学」領域には、単一光子源を中心に、上側には光子もつれ、光子の各自由度があり、「量子基礎・基盤」領域につながっている。下側には量子カスケードレーザー、レーザーガスセンサとなり、更に光周波数櫛・量子櫛となりその他の量子システム実現系へと繋がっている。「冷却原子量子系」は下側に冷却原子全般や、その原子干渉計や重力波検出、リュードベリ原子などが形成されたが、「量子基礎・基盤」寄りにキャビティ量子・CQED、フォトリック結晶キャビティなどが現れた。「イオントラップ系」はトラップ・イオン全般、光格子時計、希土類イオンドープ結晶などとなった。「ダイヤモンドNV中心」領域は、中心にダイヤモンドNVセンタ全般、「量子光学」よりもダイヤモンドNVCの単一光子源、「量子物性」よりもダイヤモンドNVCのスピン状態検出となった。また、「ジョセフソン接合」領域も他の量子システム実現系の近辺に配置された。

図3-5に俯瞰図中央上の3領域「量子デバイス」、「量子ドット」、「DFT・量子化学計算」の各密集領域の詳細を示す。

「量子デバイス」領域には、量子ドット・デバイスを中心に、「量子物性」的なスピン系全般、半導体量子ドット・電子スピン量子ドット、核スピン量子ビットの領域がある。「層状化合物」付近には、量子ホール抵抗標準、量子電量標準・量子計測トライアングル、超伝導量子干渉装置（SQUID）、グラフェン・量子ドット（センサ）、（量子）DNAセンサなど、雑多なセンサ、標準の技術がある。「量子ドット」領域は、自己組織化InGaAs量子ドット、量子ドットLED、シリコン量子ワイヤ、バイオセンサなど、やや半導体的なものが集積した。「DFT・量子化学計算」領域は、「量子コンピューティング」領域近傍では、量子モデル計算などがあり、領域下側では、振動・回転エネルギー、運動エネルギー、遷移エネルギーなどの基礎的な計算（そのためか、その下に量子場の理論領域は入ってしまった!）、そこから上側に分子動力学（MD）、密度汎関数計算（DFT）と

なり、更に生体分子、触媒などのバイオ的な計算となった（そのためか、「量子ドットII」のバイオセンサが集まった可能性がある）。

図3-6に俯瞰図左上の「重い電子系」「量子物性」領域の詳細を示す。

「重い電子系」領域は、重フェルミオン全般を中心に、その周辺に重フェルミオン物質の低温物性、熱膨張と磁歪、圧力下での超伝導体物性、近藤効果などに分かれた。「量子物性」領域は、量子相転移全般を中心に、その周辺に光格子のボーズ・アインシュタイン凝縮、スピン作用、フラクソン・渦、マグノン・スピン波、モット絶縁体、有機モット絶縁体、（起動選択型）モット遷移などに分かれた。「DFT・量子化学計算」寄りには、高相関電子系の電子-フォノン相互作用や電子輸送、電子-電子相互作用なども現れた。

図3-7に俯瞰図左下の量子材料3領域「量子マテリアル」、「マルチフェロイック・磁気スキルミオン」と「層状化合物」の各密集領域の詳細を示す。

「量子マテリアル」領域では、「量子デバイス」側に、トポロジカル絶縁体の相転移、エニオン、マヨラナフェルミオン、量子ホール効果、魔法角ねじれ二層グラフェンなどが現れた。それとは反対側の「量子デバイス」から遠い側には、2D遷移金属ダイカルコゲナイド、ディラック半金属、ワイル半金属など材料関係が並んだ。

「マルチフェロイック・磁気スキルミオン」領域には、マルチフェロイック材料および磁気スキルミオンのほか、薄膜全般も含まれている。「層状化合物」領域は層状（2次元）超伝導体などを介して「量子マテリアル」領域と接しているものの、主にリチウムイオン電池材料、層構造材料全般、量子ドット・ディスプレイ、太陽電池、などであり、グラフェンや各種のファンデルワールスヘテロ構造などとは距離がある。後で見るように、この領域は他と比べて特許の割合が高いという特徴を持つ。

図3-8に俯瞰図周辺部にある関連性の低い領域の詳細を示す。

俯瞰図外周部にプロットされたものには、関連度の低いものが多いが、その中でも、六方晶窒化ホウ素・量子エミッタ、量子有限オートマトン、量子クローン、DNP-NMR分光用のジャイロトロンなど、関連度の高いものも幾つかあった。今回は量子計算に関するDNP-NMRもこの領域に多く含まれた。量子計算の一部は、「量子デバイス」領域の核スピン量子ビットに分かれた。

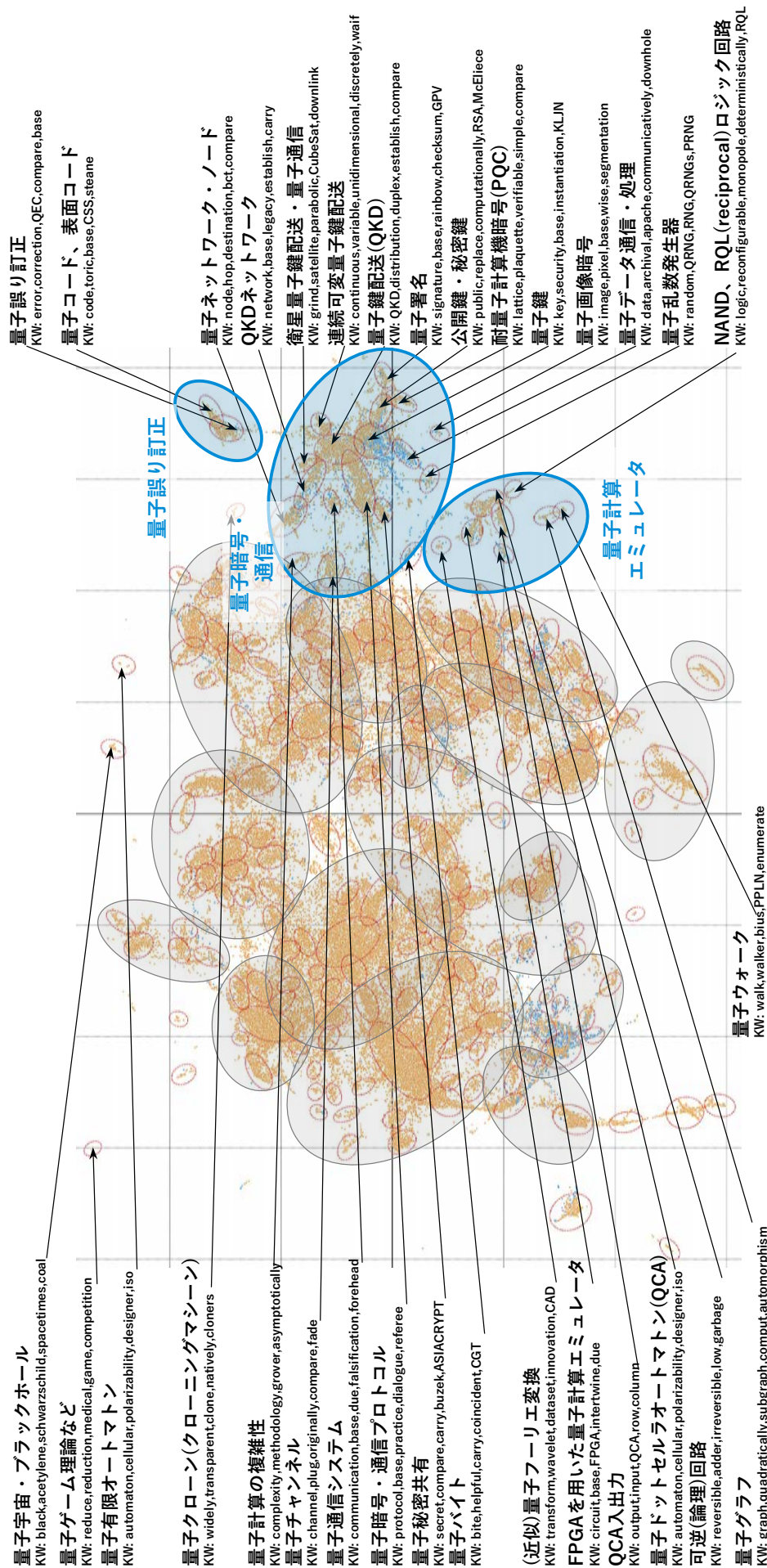


図3-2 「量子暗号・通信」「量子誤り訂正」「量子計算エミュレータ」

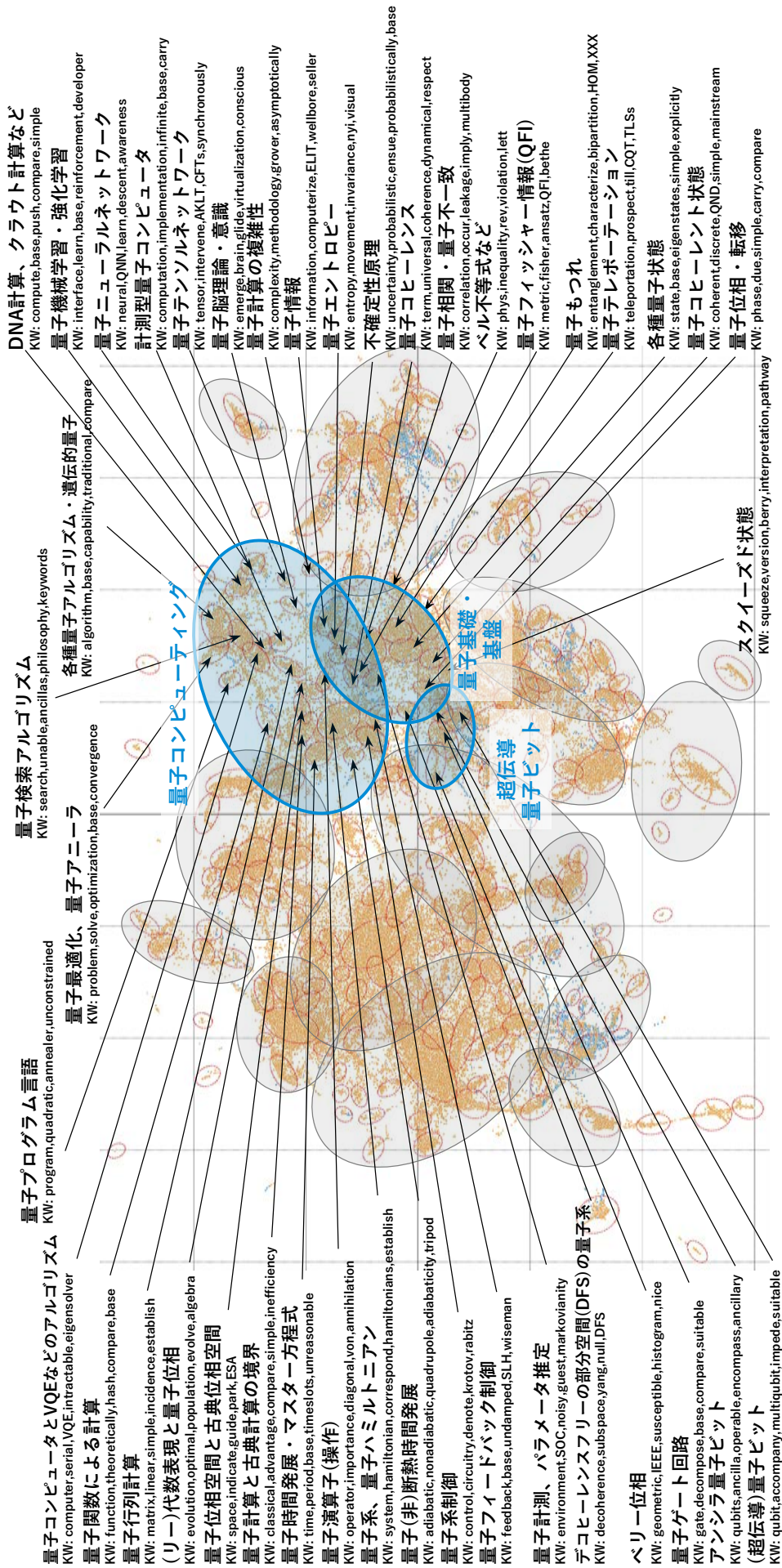


図3-3 「量子コンピューティング」「量子基礎・基盤」「超伝導量子ビット」

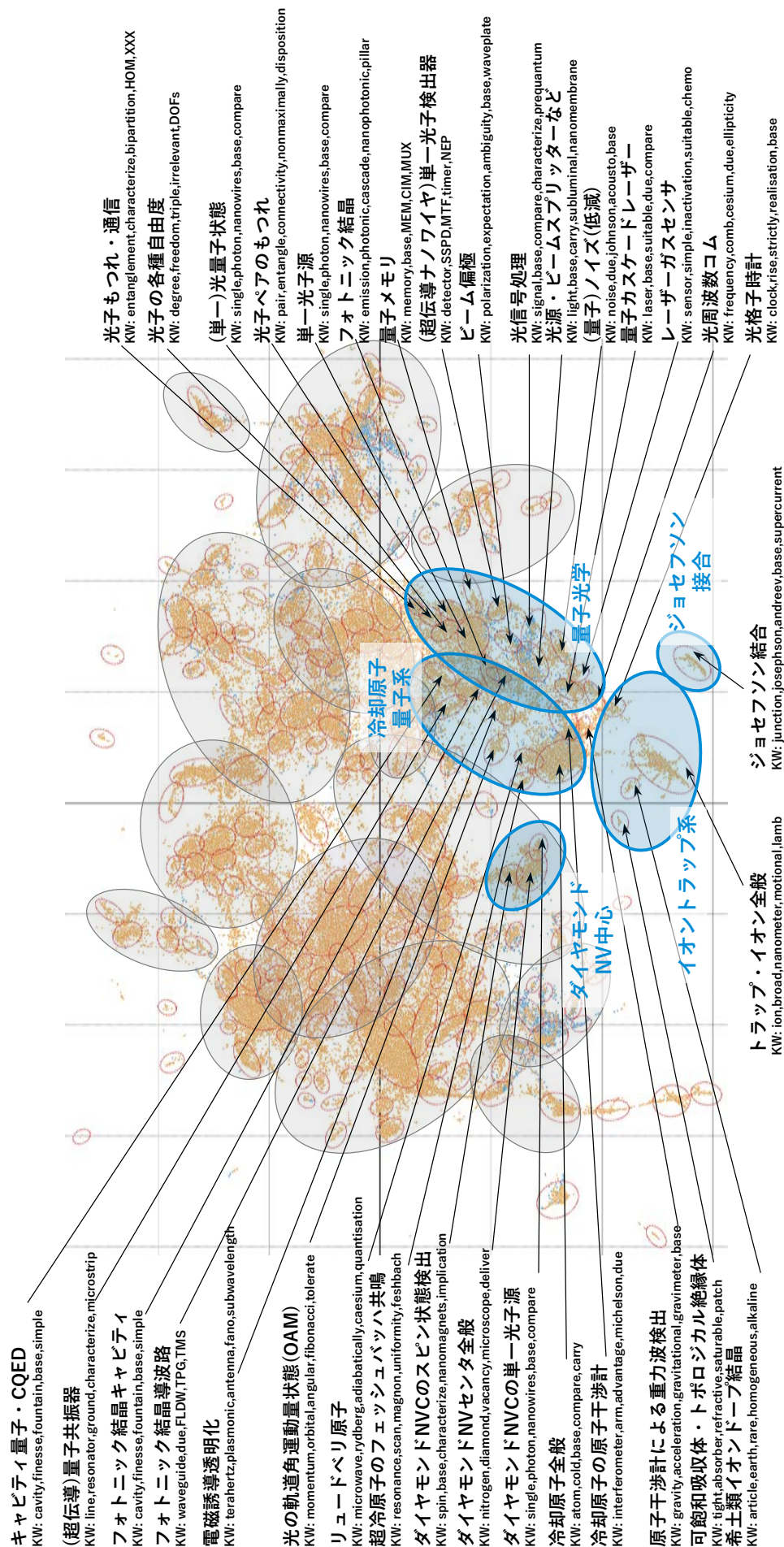


図3-4 「冷却原子量子系」「量子光学」「イオントラップ系」「ダイヤモンドNV中心」「ジョセフソン接合」

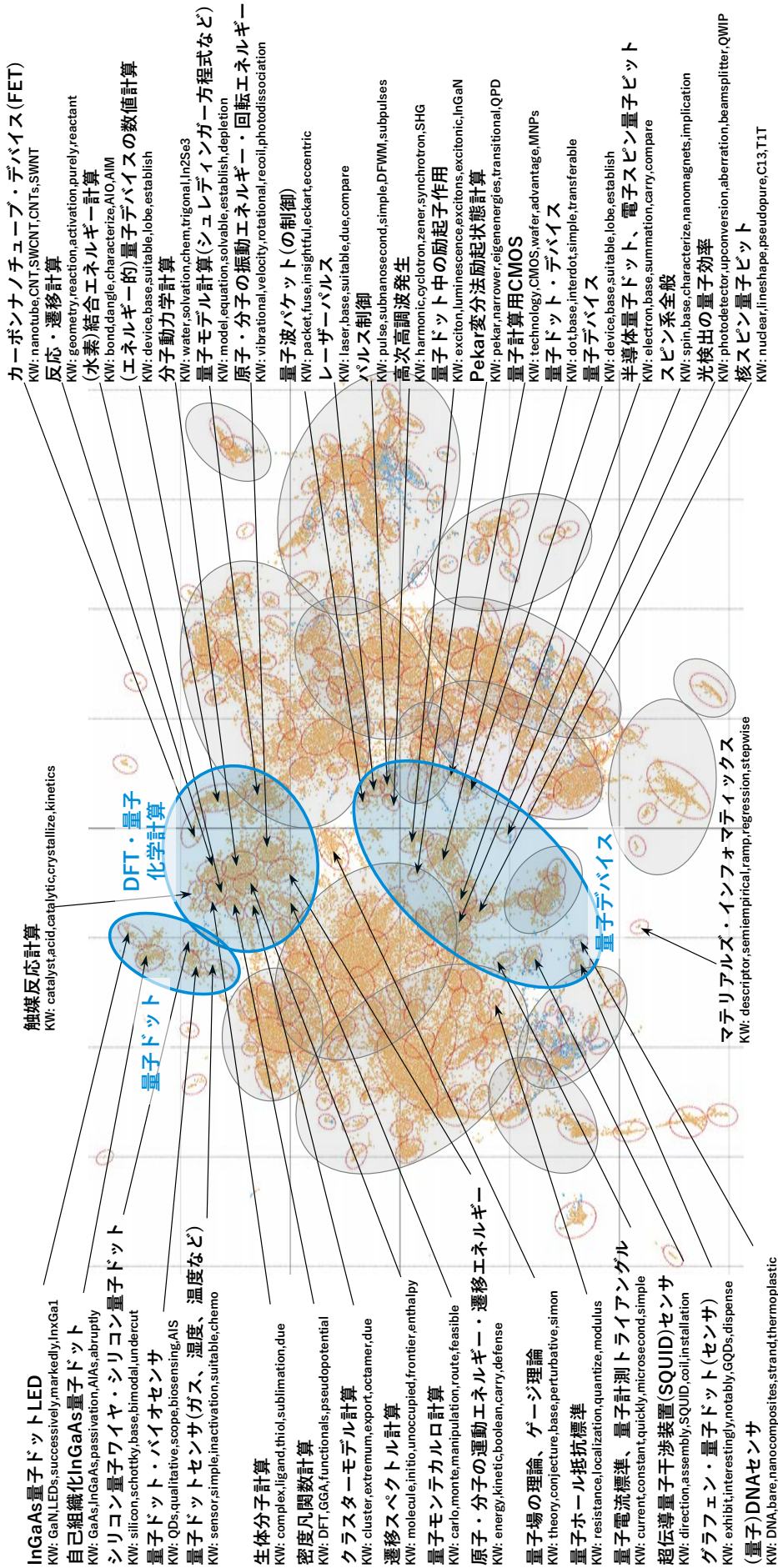


図 3-5 「量子デバイス」「量子ドット」「DFT・量子化学計算」

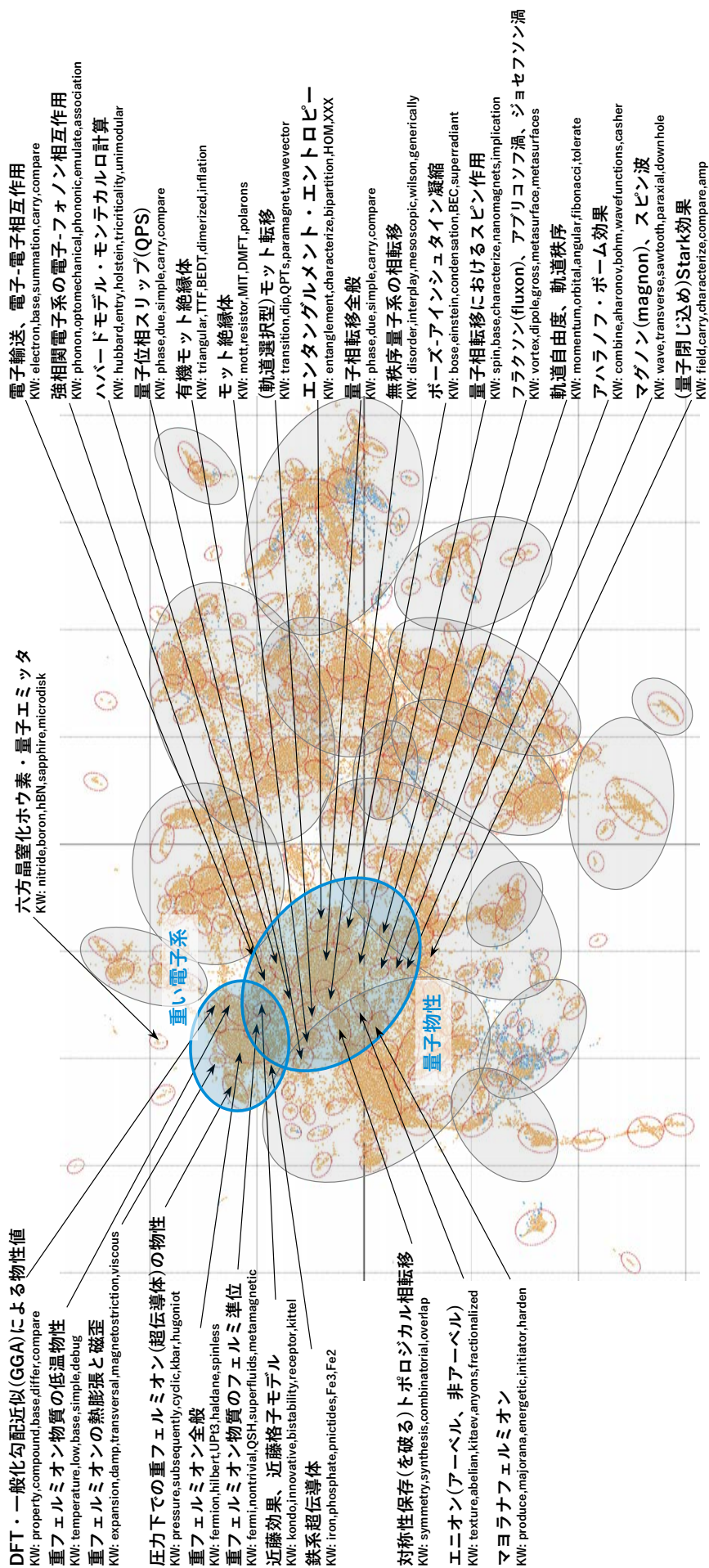


図3-6 「重い電子系」「量子物性」

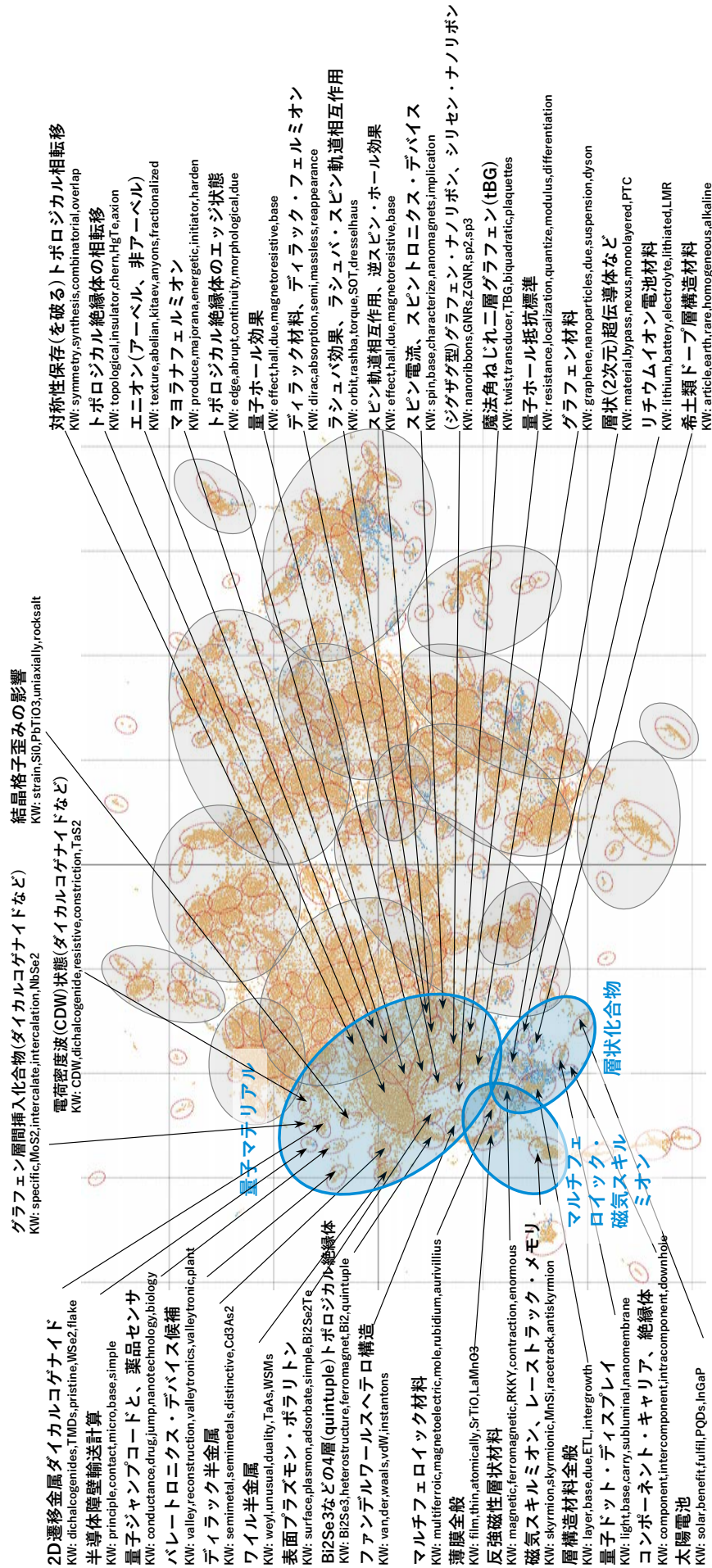


図3-7 「量子マテリアル」「マルチフェロイック・磁気スكىルミオン」「層状化合物」

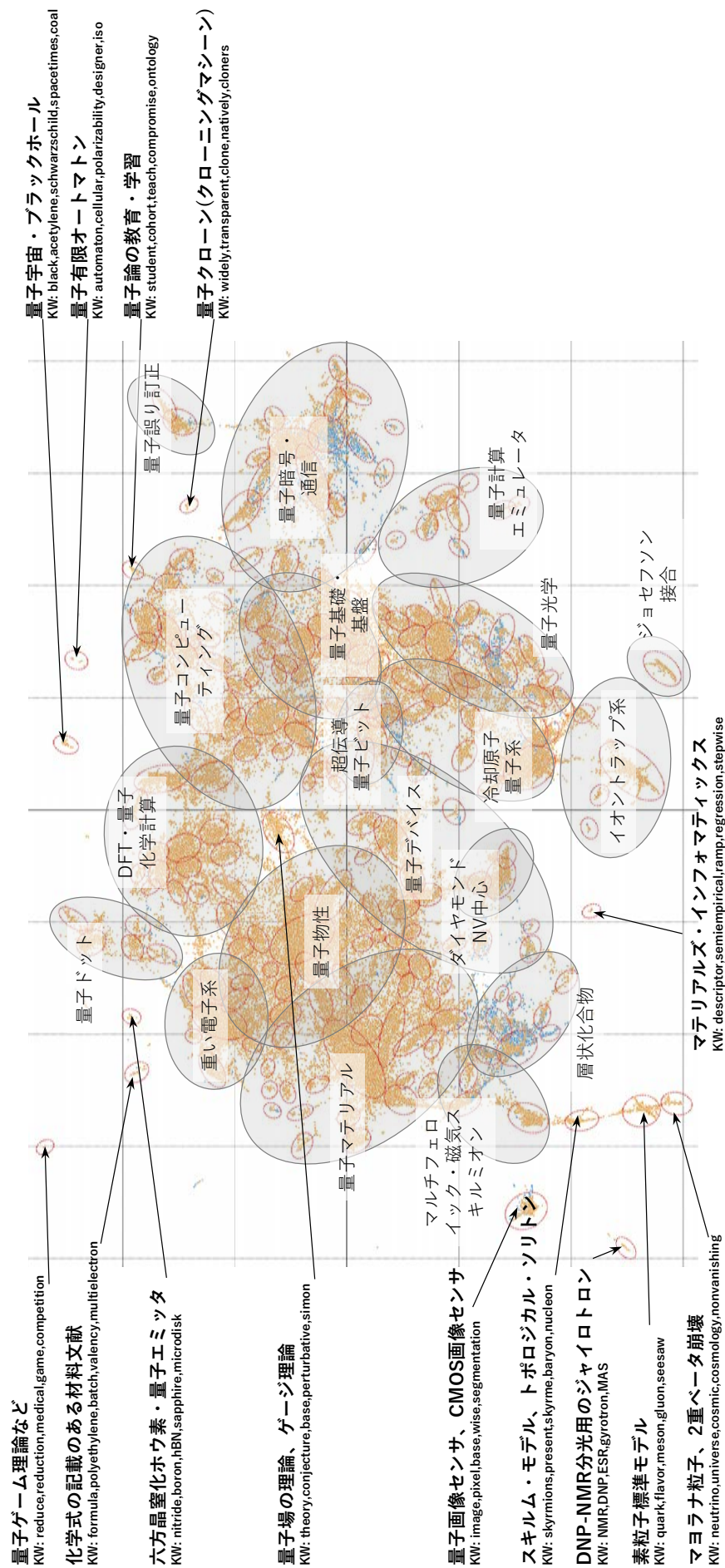


図 3-8 周辺部にあるクラスター

3.2 俯瞰マップの経年変化

図に1990年から直近の2021年（途中）までの全32年を、16年、8年、4年、4年の4期間に分けてプロットした。年あたりの件数が同じになるようにヒートマップの感度を調整してある。

(a) 1990～2005年では「超伝導量子干渉デバイスと通信・計算」と「量子ドット素子（一部量子演算素子）」領域のほかは、ほとんど目立たない。1993年のBennetらによる量子テレポーテーションに関する論文発表やShorによる因数分解アルゴリズムの発表（94年）など、この期間中に量子情報科学の重要な研究成果がいくつも発表されている。ついで、量子もつれ光子対の生成（95年）、冷却原子におけるボーズアインシュタイン凝縮（95年）、Groverの検索アルゴリズム（96年）、誤り耐性量子計算の提案（96年）、量子テレポーテーション実験検証（97年）、NMR量子計算（97年）、超伝導量子ビットの提案・実験（99年）など華やかな成果が並ぶ時期であったが、マップに顕な論文・特許の集積は見られない。

続いて超伝導位相量子ビットにおけるラビ振動の観測（2002年）や共振器による回路QEDの提案・実験（04年）、固体単一光子源（00年）やダイヤモンドNVセンターによる量子ビット（04年）など重要な進展もあり、幾分は論文・特許に反映されていると考えられる。この期間は量子暗号・量子通信分野でも、無条件安全性の証明（00年）、超シャノン限界符号化の原理実証（03年）など基礎研究の進展があったことに加えて、DARPAによる量子暗号ネットワーク運用実験（03年）、MagiQ社による商用量子暗号鍵配送（QKD）装置の発表（03年）など、応用面での動きが活発化した時期でもあるが、マップ上での露わな動きは見られない。

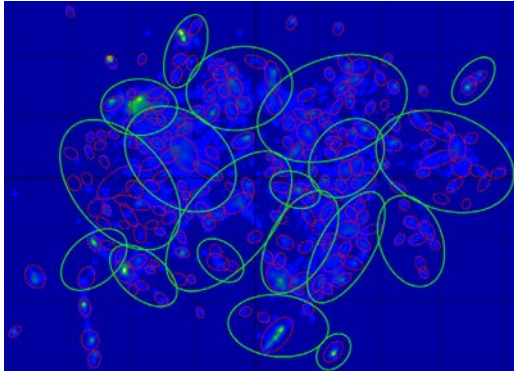
(b) 2006～2013年にはこれまでホットな領域であった「量子誤り訂正」「ジョセフソン接合」「イオントラップ全般」領域に顕著な集積が見られるようになる。D-wave Systems社による16量子ビットの計算機システムの発表（07年）との関連が示唆される。「量子暗号・通信」「量子光学」「量子物性」区分の中にもいくつかの集積領域が見受けられる。我が国でがこの時期にTokyo QKDネットワークによる量子暗号鍵配送の実証実験が行われた（10年）が、論文・特許数の増加への影響は小さいと推測される。

また、「ジョセフソン接合」は超伝導量子ビット実現に必須の技術であり、Lockheed Martin社、南カリフォルニア大学、Google、NASAなどがD-wave Systems社のマシンを購入した時期と符合している。「量子コンピューティング」区分の「量子系制御」領域に集積が見られるのは、超伝導量子ビットハードウェアの研究開発の加熱に対応していると考えてよいだろう。

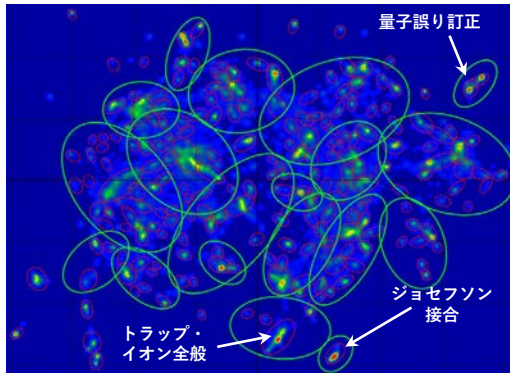
論文も特許も増加傾向が継続している中、(c) 2014～2017年で急激な増加が確認できる。特許が2016年頃から急激に増加している。2014年頃からほぼ全域での注力が始まっている。2018年以降から注力されているのは、量子暗号・通信、量子コンピューティングの領域である。継続して最も注力されているのはトポロジカル絶縁体である。「層構造材料」「量子鍵」「光源」などの技術領域は増加の中心は特許である。「量子コンピューティング」領域にも多数ではないものの特許が現れているのが確認できる。

図3-10に件数増加の著しい2014年から直近の2021年（途中）までを、2年毎に4期間に分けてプロットした。増加の著しい2014年からの8年間で更に細分し、各技術の出現時期の差異を明確化した。2020年以降での注力が著しいのは、量子コンピュータ、DNA計算、量子ネットワーク、耐量子暗号（PQC）などであった。各種量子状態、量子もつれなど、「量子基礎・基盤」領域でも最近増加の領域がある。

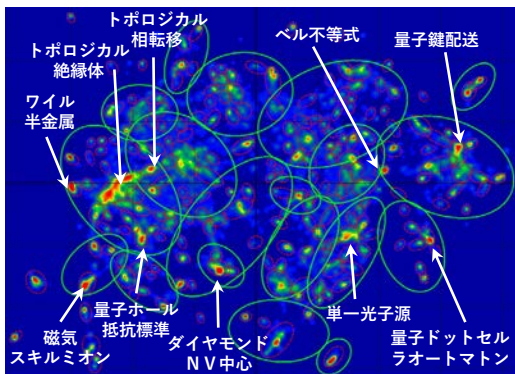
(a) 1990-2005(感度×1/4)



(b) 2006-2013(感度×1/2)



(c) 2014-2017



(d) 2018-2021(途中)

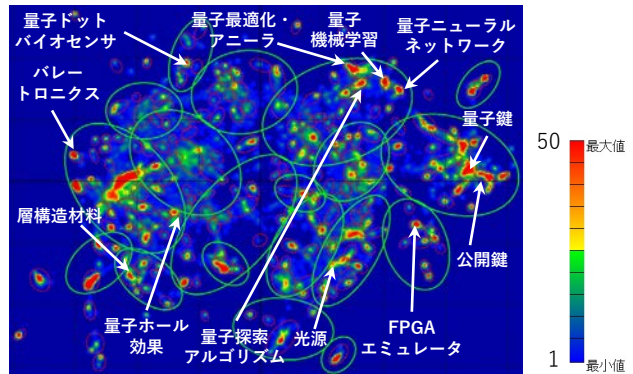
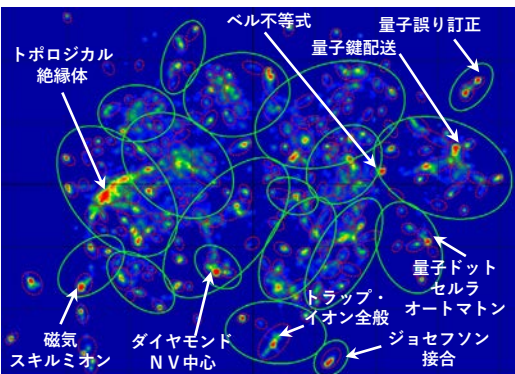


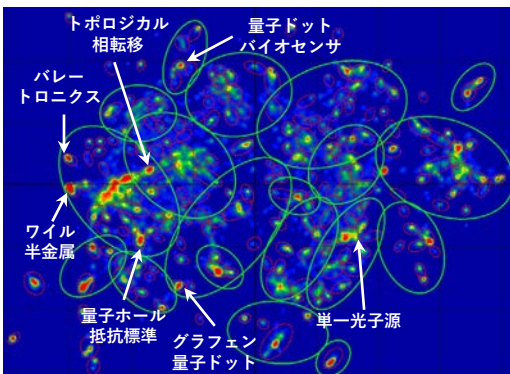
図3-9

俯瞰マップの年次推移

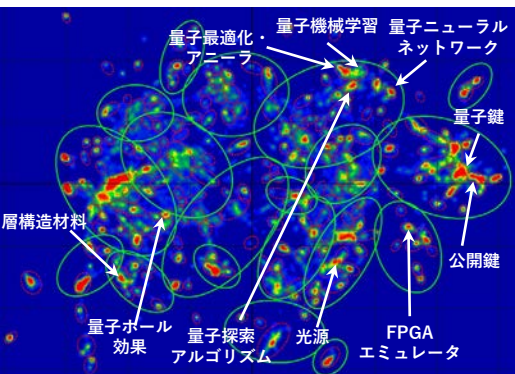
(a) 2014-2015



(b) 2016-2017



(c) 2018-2019



(d) 2020-2021(途中)

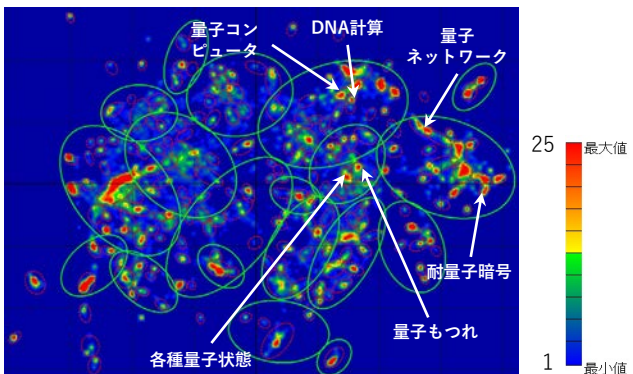


図3-10

俯瞰マップの年次推移 (直近8年)

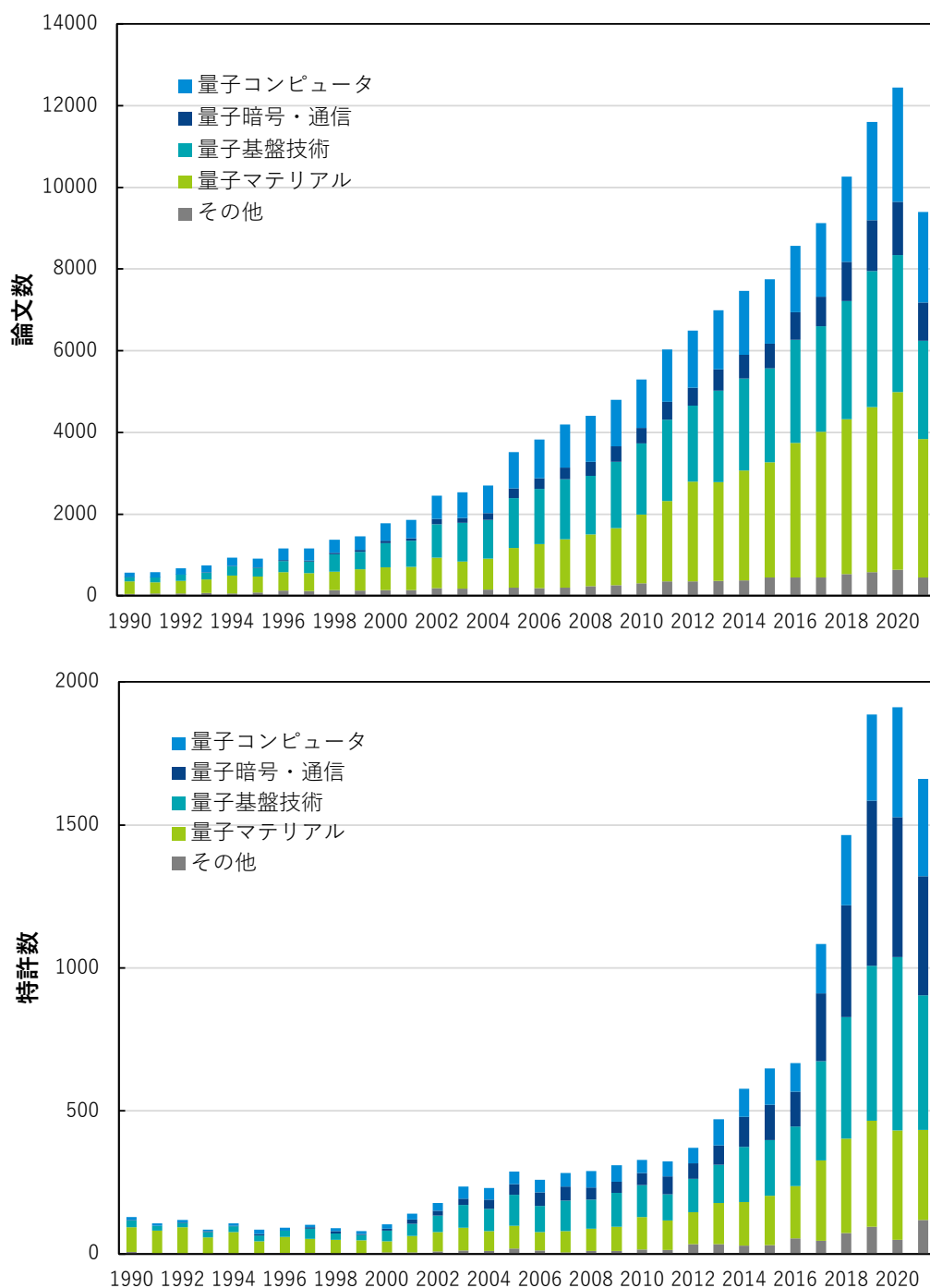


図3-11 論文・特許件数の推移

3.3 重要技術領域の同定

3.3.1 エマージング技術

論文数や特許数が増加している領域をエマージング技術領域と考えてその増減を調べた。俯瞰図をメッシュに分割して、メッシュ毎にその経時変化を成長曲線（ロジスティック関数）フィットを行い、立ち上り年を求めた。この値が新しい程、今後の成長が期待できる。

図3-12 (a) では件数をそのまま（絶対値）で用い、欠損のある2021年のデータは利用していない。量子技術は全体的に増加傾向であるため、多くの領域で成長判定となった。「量子コンピューティング」、「量子暗号・通信」、「量子光学」の領域で多いほか、「量子マテリアル」でも高評価ではないものの暖色系の領域がある。

図3-12 (b) では件数を全体平均で除して相対評価を行った。相対化により欠損のある2021年のデータも分析に利用した。単に増加しているだけでなく平均以上に増加している領域を求めた。

相対評価により、全体的な平均以上に増加している領域に限定され、厳しめの評価となったが、「量子コンピューティング」と「量子暗号・通信」、「量子光学」の一部では引き続き成長判定となった。また、「量子マテリアル」領域も暖色ではないものの広領域でやや高めの判定となった。絶対値でも相対値でも高評価の領域を太字で示した。これらの領域の論文特許が急激に立ち上がってきており、2025年をピークに今後も発展すると見込める確度が高いと言える。

3.3.2 量子技術の産業利用

全体として論文の量が特許を上回るが、相対的に文献の割合が高い技術領域ほど産業利用割合が低いと考えられる。まず図3-13 (a) に示したとおり、俯瞰図をメッシュに分割し、各メッシュ内の文献の割合を求めた。文献の割合が高いほど暖色のプロット、低いほど寒色のプロットとした。

文献割合が低く、特許割合（産業普及度）が高いのはまず「量子鍵」「光源」「層構造材料」の3領域、次いで「量子アルゴリズム」「トポロジカル絶縁体」である。「重フェルミオン」「量子相転移」の特許割合は低く、基礎研究テーマであるとの理解と整合している。量子技術は文献割合が全体的に高いため99%以上に限定して1/3程度の技術領域が該当した。

図3-13 (b) では偏差値別にプロットした（注：文献割合は正規分布ではない）。図3-13 (a) に示した文献割合だけでは分かりにくい、細かな構造が見える。大域的な構造には大きな違いはなく、結果としては「量子鍵」「光源」「層構造材料」の3領域、次いで「量子アルゴリズム」「トポロジカル絶縁体」の特許割合が高いと判断される。

3.3.3 技術の汎用性

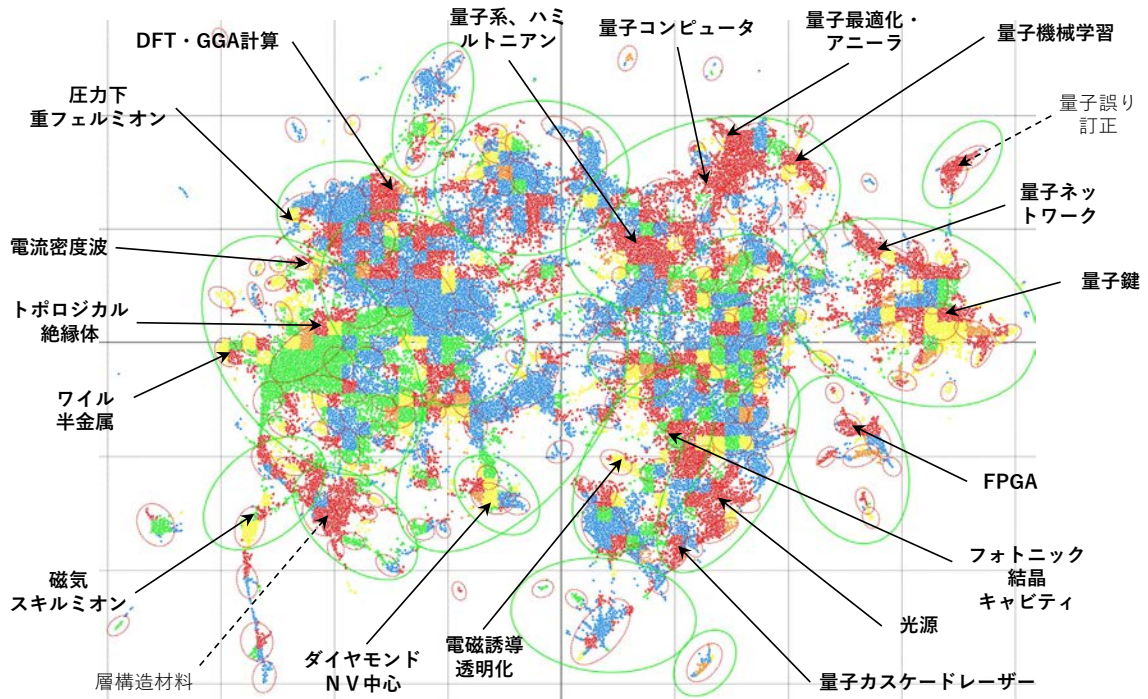
主要トピックの割合が低いほど、技術の汎用性（または普及度）が高いと考えることができる。図3-14 (a) では俯瞰図を縦横のメッシュに分割して、各メッシュ内の学術文献について付与数最多のトピックを求めたのち、そのトピックが全領域で主要トピック（ウェイト3.5%以上のトピック）が付与されている割合を算出し、その割合に応じて色分けしてプロットした。各メッシュ内の技術がメッシュ外で利用されている割合を示す。

技術の汎用性（普及度）の高い順に並べると、「層構造材料」「量子ハミルトニアン」「重フェルミオン」が並び、次いで「単一光子源」「冷却原子」「量子相関」「量子アルゴリズム」である。汎用性が低いのは「トポロジカル絶縁体」「ダイヤモンドNV中心」「量子暗号」となった。「重フェルミオン」の汎用性が高いのは気になるが、ほぼ一般的な認識と近い判定になったと思われる。量子暗号技術はほぼ独立して運用される技術と言える。

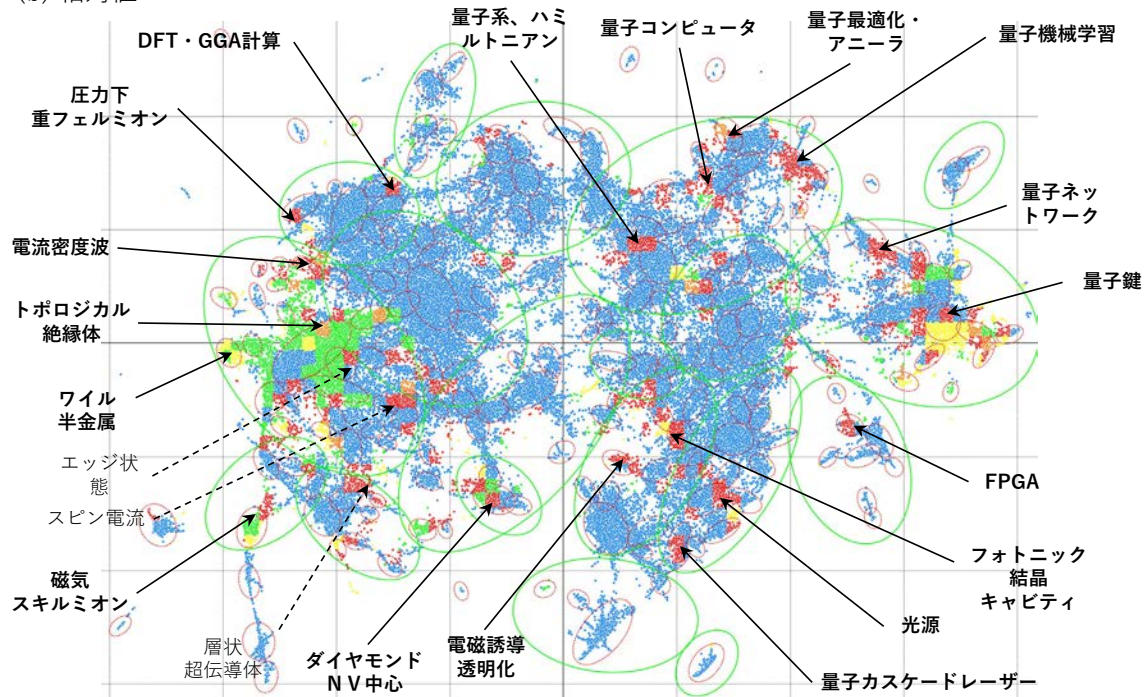
図3-14 (b) では各メッシュ内の特許について付与数最多のトピックを求めたのち、そのトピックが全領域で主要トピック（ウェイト3.5%以上のトピック）が付与されている割合を算出し、その割合に応じて色分けしてプロットした。各メッシュ内の技術がメッシュ外で利用されている割合を示す。主要トピック割合が低いほど、応用への普及がなされているとの仮定の下で求めた。

量子技術の特許は全領域で出ていないため、この評価は適切とは言えないが参考として求めた。論文主導でトピックが作成されているため、結果として図3-14 (a) と (b) は似たような結果が再現されたと思われる。特許で見ても量子暗号技術はほぼ独立して運用される技術と言える。

(a) 絶対値



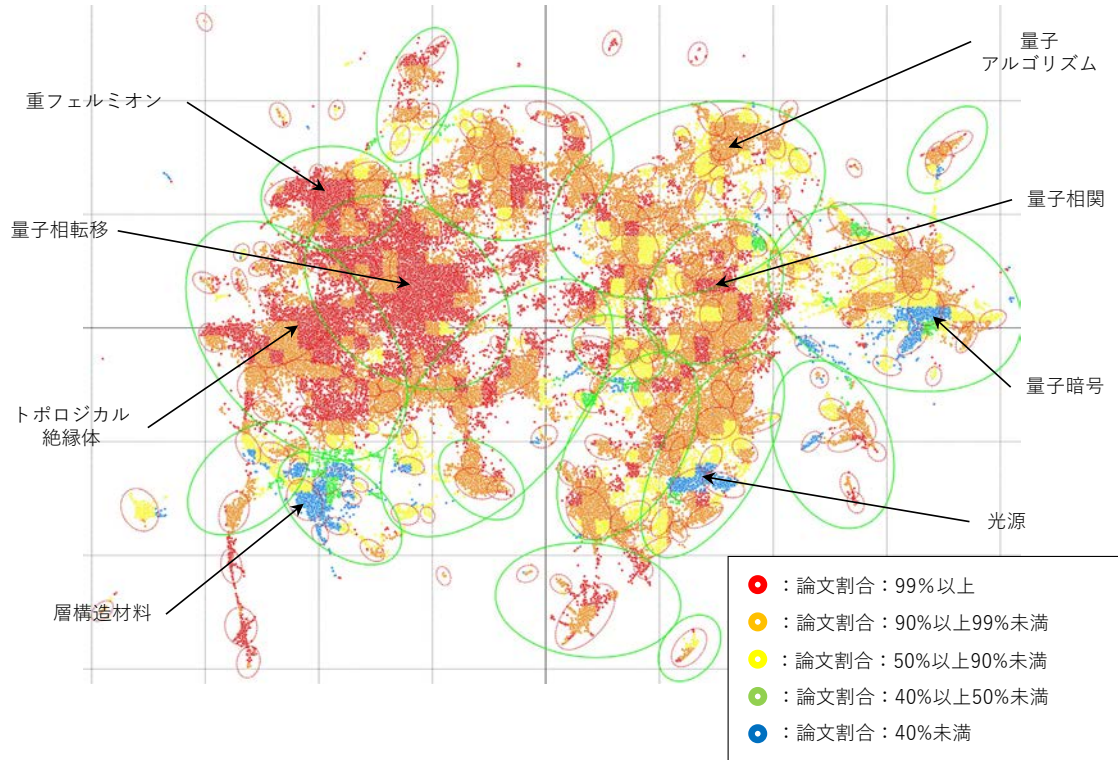
(b) 相対値



- : 立ち上り年：2025年以降
- : 立ち上り年：2020年以上2025年未満
- : 立ち上り年：2015年以上2020年未満
- : 立ち上り年：2010年以上2015年未満
- : 立ち上り年：2010年未満、或いは計算不能

図 3-12 エマージング技術

(a) 論文割合



(b) 論文割合偏差値

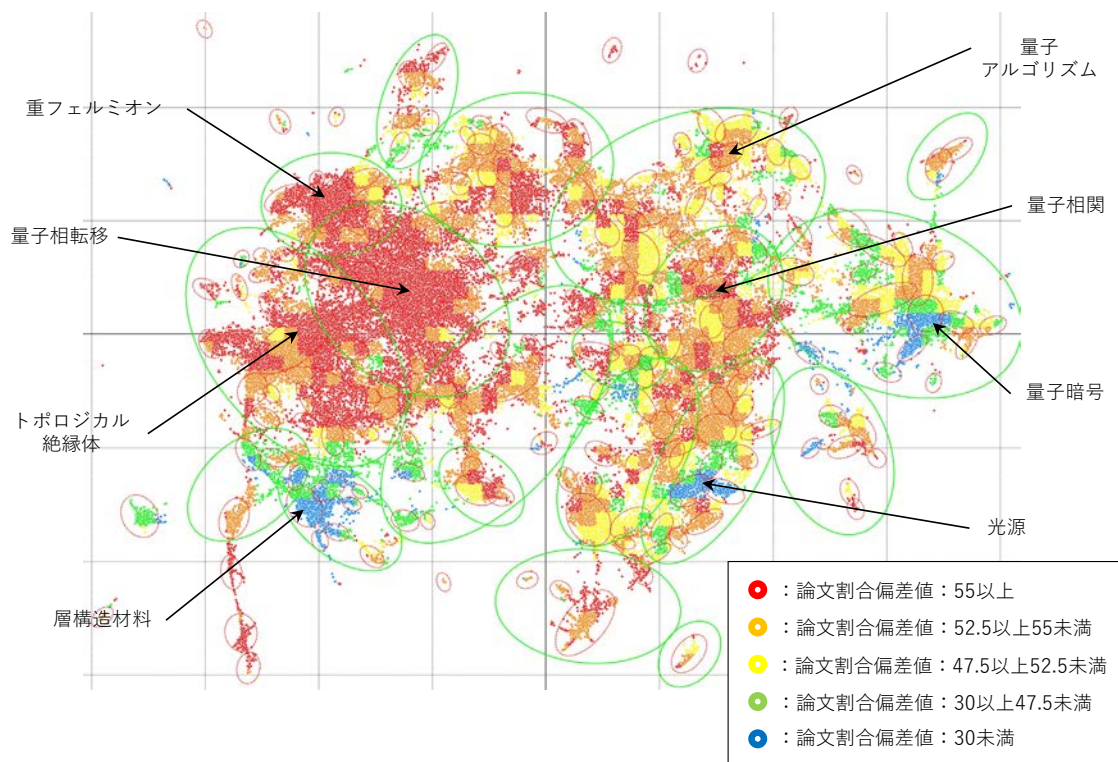
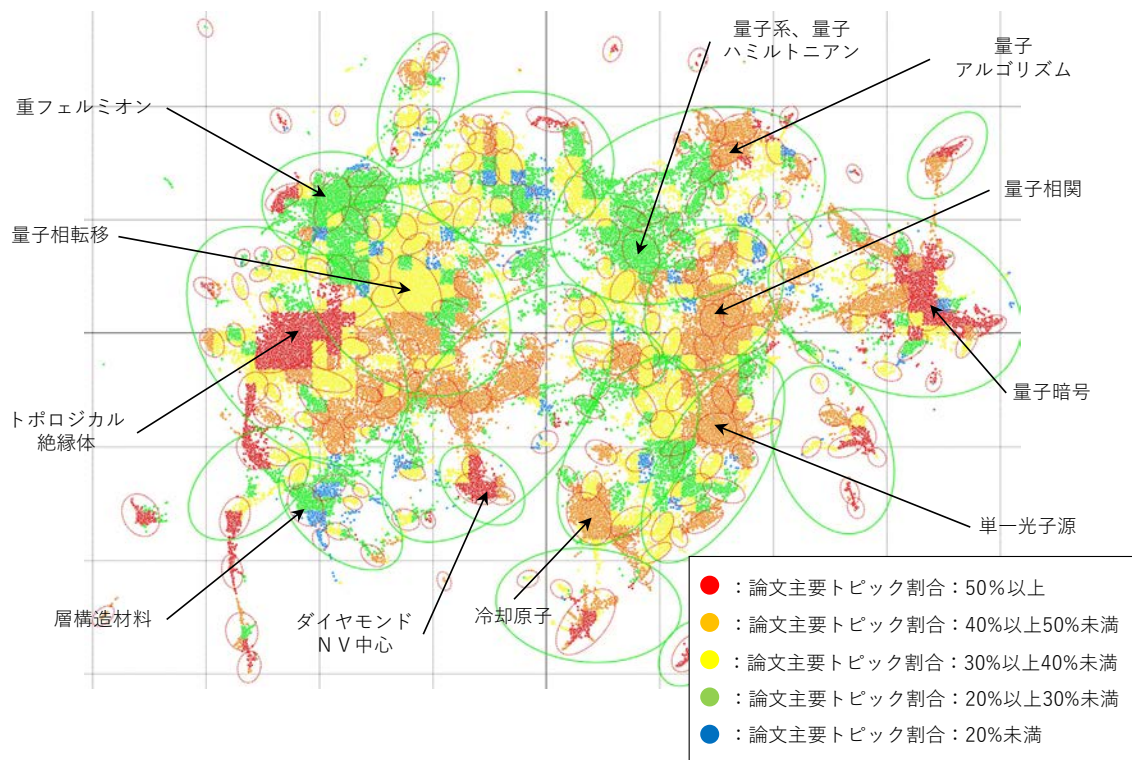


図3-13 論文と特許の割合分布

(a) 論文主要トピック割合



(b) 特許主要トピック割合

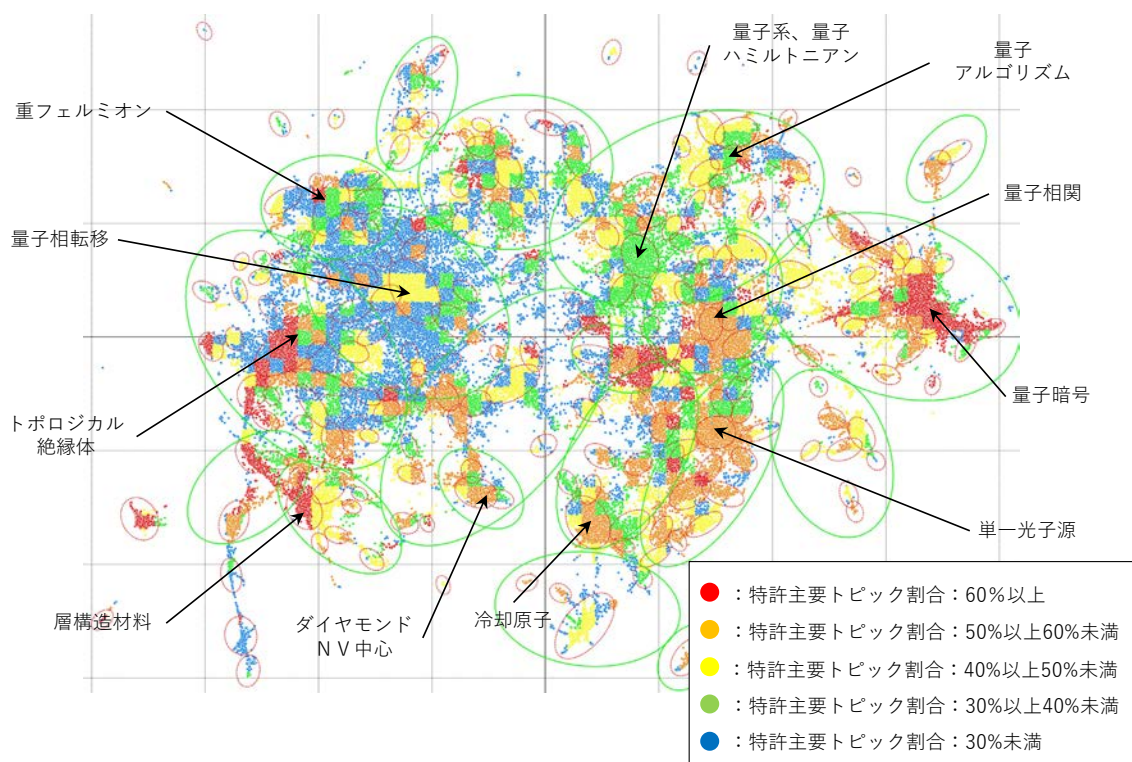


図3-14 主要トピック割合の分布

3.4 国際比較

量子技術分野の学術文献137,718件及び特許14,321件を融合した計152,039件の国別件数情報をまとめる。文献は著者所属機関の国籍、特許は優先権情報から国情報を抽出した。国単位での整数カウントを行った。図3-15に学術文献、図3-16に特許を集計した。それぞれ全件は上位30位、年推移は上位6位まで求めた。

量子技術関連文献の国別件数首位は米国、2位は中国となった。3位以降の上位はドイツ、日本、英国、フランス、イタリアと欧州と日本となっている。日中以外のアジア勢は、9位にインド、13位に韓国と、やや低い。

件数2位の中国は、2017年を境に米国を抜き首位となっている。4位の日本は2009年に当時4位のドイツに抜かれ、最近では5位の英国に迫られている。

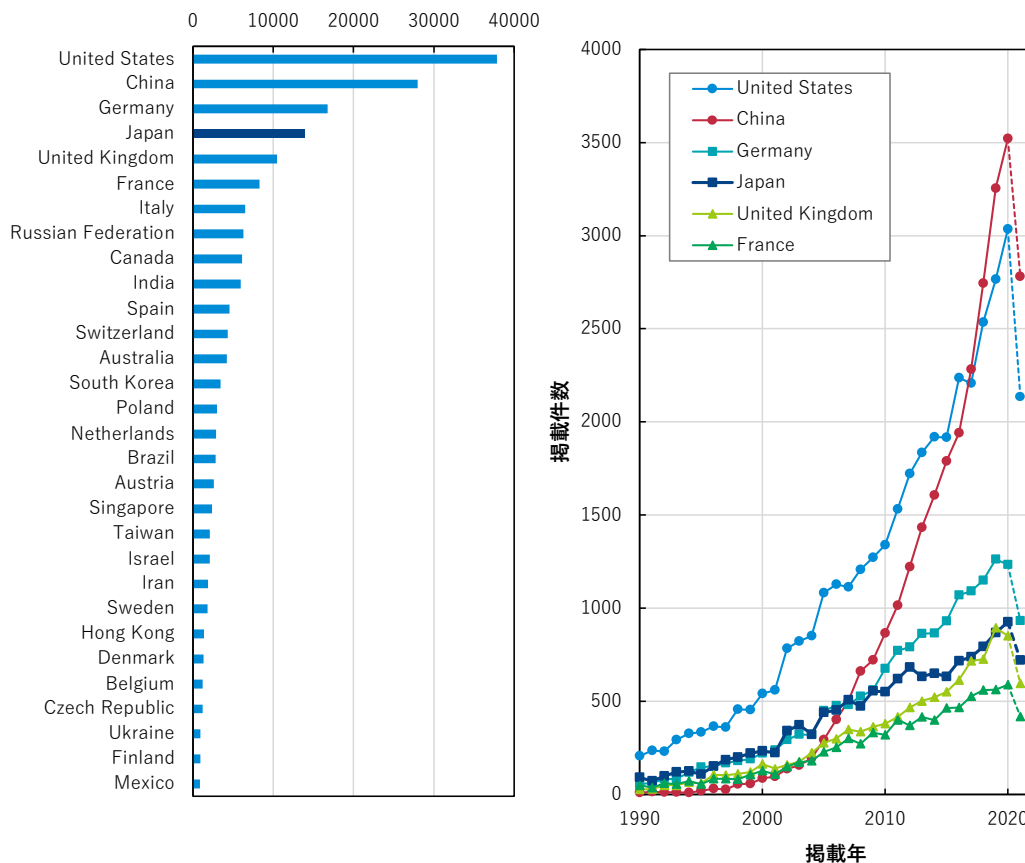


図3-15 論文数の国際比較

量子技術関連特許の国別件数首位は中国、2位は米国、3位に日本となった。それ以降のランキングは韓国、EP（欧州特許庁への出願）、ドイツ、英国、フランスなど、文献と同様、欧州と日本となったが、特許での韓国の存在が大きくなった。

特許において首位中国と2位米国の差は大きい。特に直近での差が著しい。3位の日本は1990年当初首位であったが、増減を繰り返して現在に至っている。特許でも最近のドイツの増加が目立つ。また2021年の中国特許件数の減少が気になる。

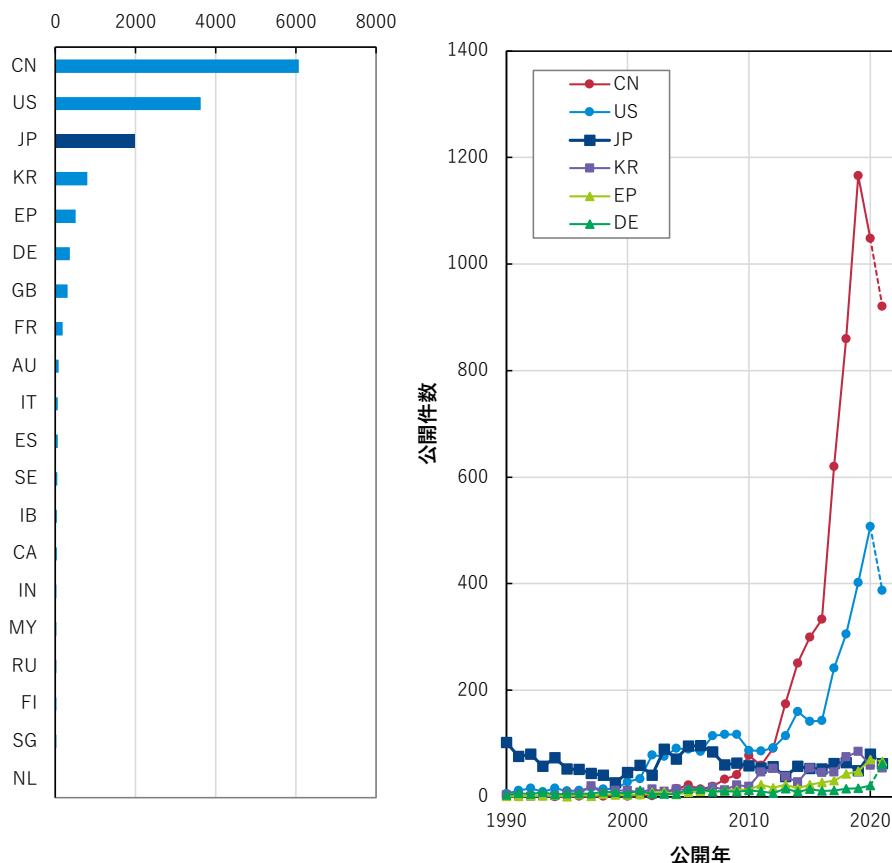


図3-16 特許数の国際比較

量子技術分野の文献と特許の合計数上位6か国の俯瞰図上での注力技術の位置を求めた。

図3-17に示したとおり、論文数首位の米国はほぼ全領域を網羅しているが、量子暗号・通信が少ない。2位の中国は反対に量子暗号・通信で強い。また重い電子、量子物性も米国と比較して弱い。量子マテリアルではバレートロニクスなどで一部米国を上回っている。量子コンピューティング関連ではハード側で米国が強く、一部ソフト側で中国が優勢である。3位以下のドイツ、日本などは一部の技術のみに注力していると言える。重フェルミオンに注力している国が多く、ドイツ、日本、フランスでそうである。

特許数首位の中国は、特許でも量子暗号・通信で優位であるほか、量子コンピューティングのアルゴリズムで注力している（図3-19）。また量子光学や層状化合物でも注力が見られる。2位の米国は、層状化合物で注力があるほか、量子コンピューティングのハード（量子ビット）とソフト（プログラム言語）などで注力している。3位以下の国では一部の領域のみで注力があり、3位の日本は層構造材料、薄膜、SQUIDと限定、4位以下ではほぼ層構造材料程度と少ない。

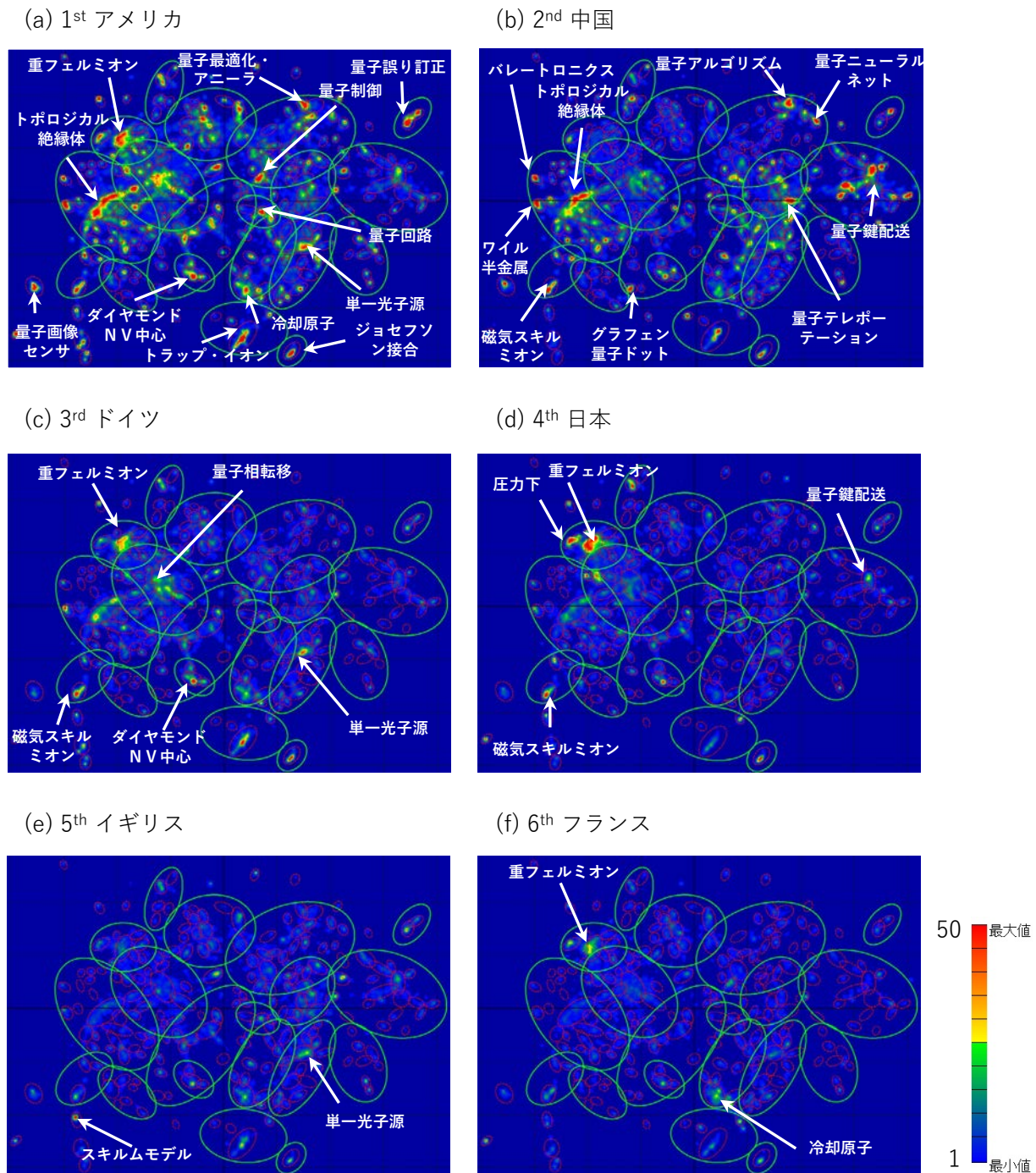
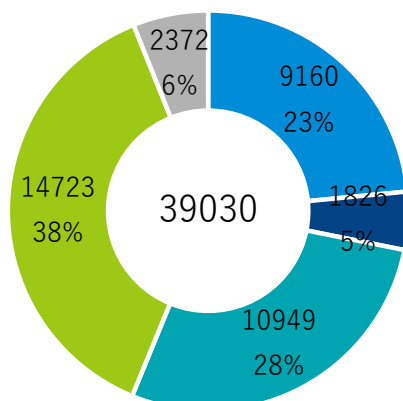
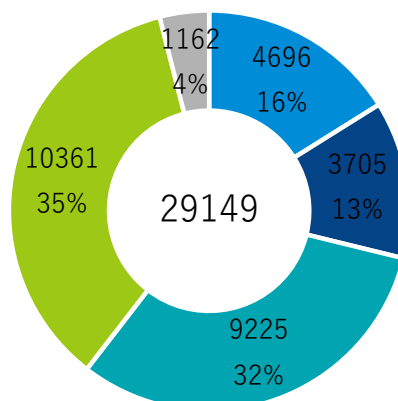


図3-17 論文の国別俯瞰マップ

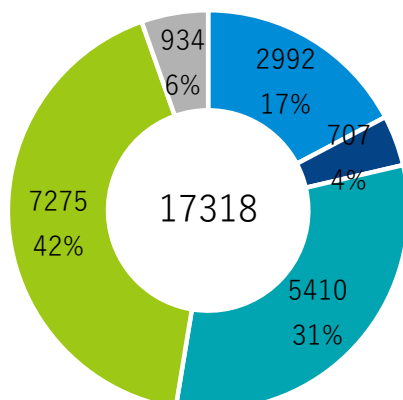
(a) 1st アメリカ



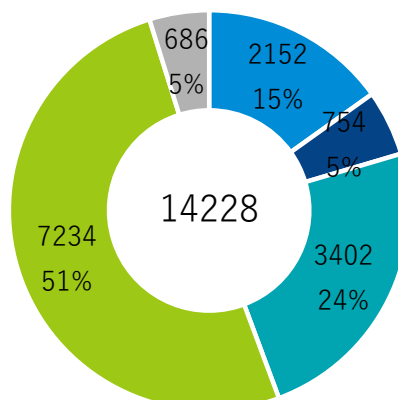
(b) 2nd 中国



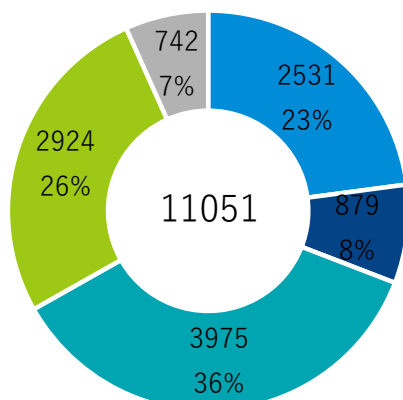
(c) 3rd ドイツ



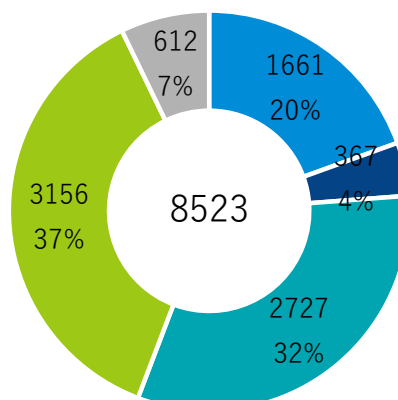
(d) 4th 日本



(e) 5th イギリス



(f) 6th フランス



■ 量子コンピュータ ■ 量子暗号・通信 ■ 量子基盤技術 ■ 量子マテリアル ■ その他

図3-18 国別・技術区分別の論文数

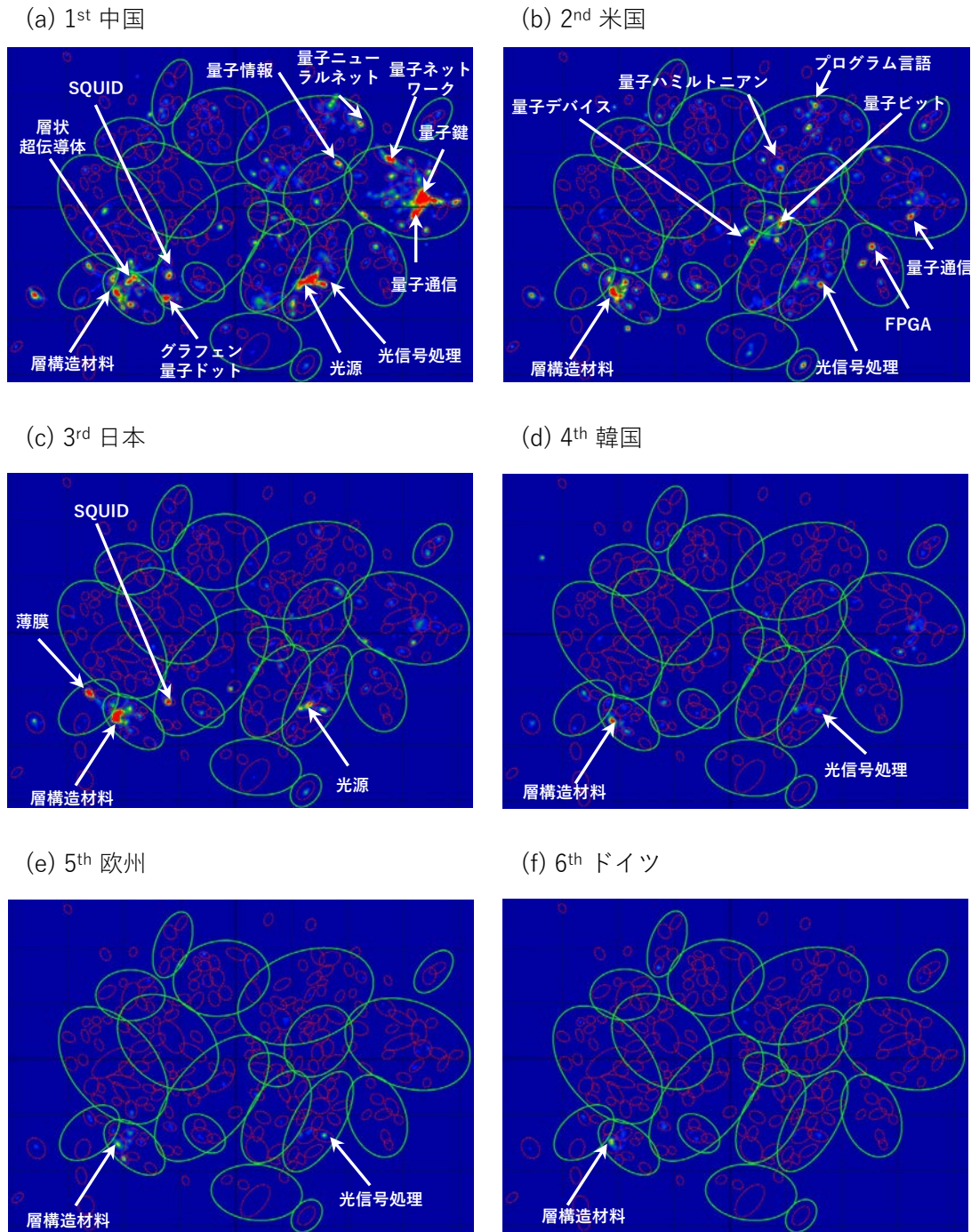
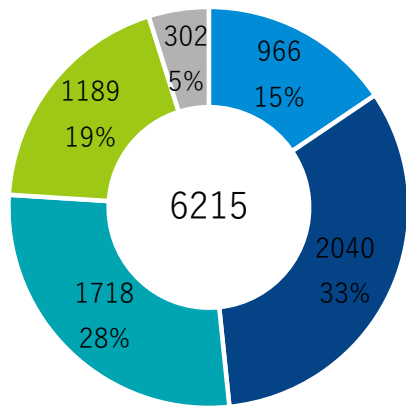
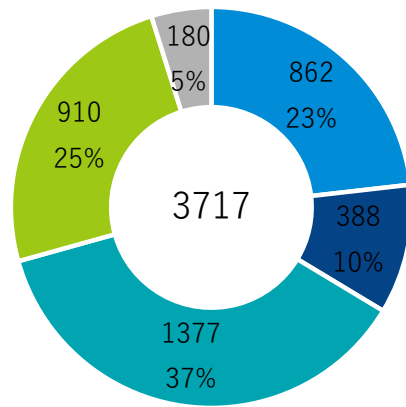


図 3-19 特許の国別俯瞰マップ

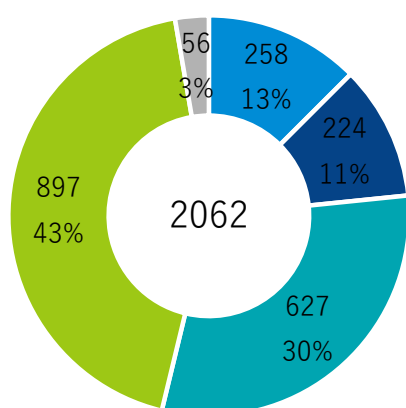
(a) 1st 中国



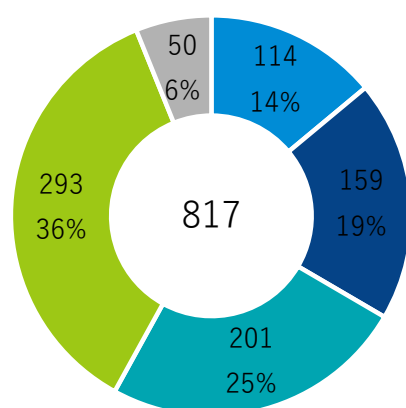
(b) 2nd 米国



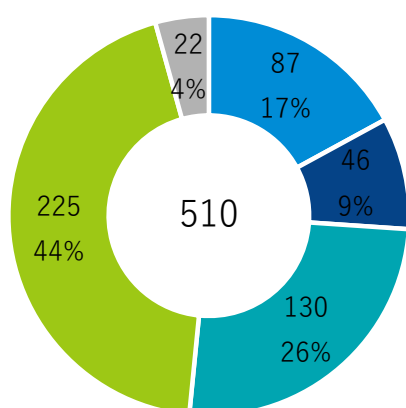
(c) 3rd 日本



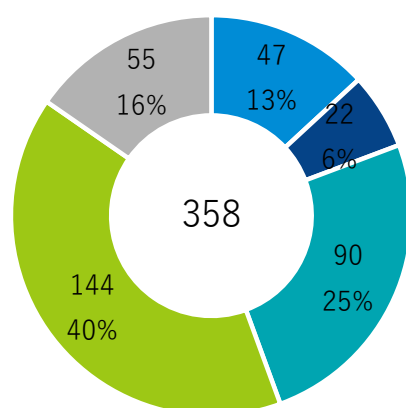
(d) 4th 韓国



(e) 5th 欧州



(f) 6th ドイツ



■ 量子コンピュータ ■ 量子暗号・通信 ■ 量子基盤技術 ■ 量子マテリアル ■ その他

図3-20 国別・技術区分別の特許数

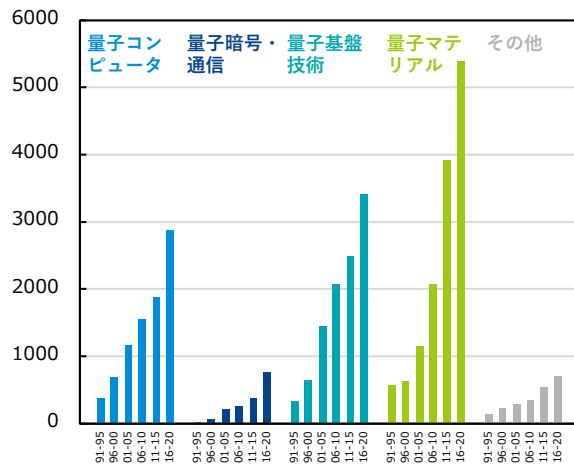
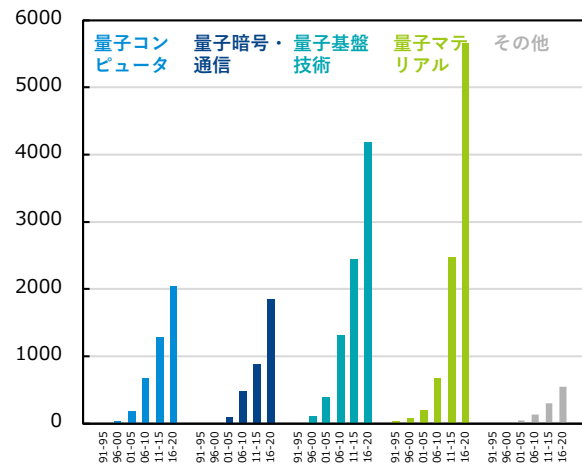
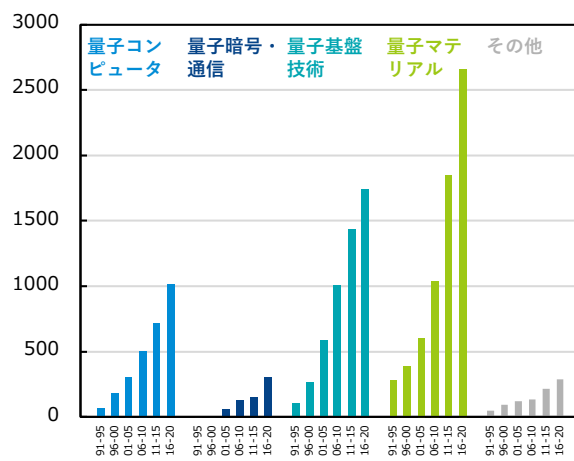
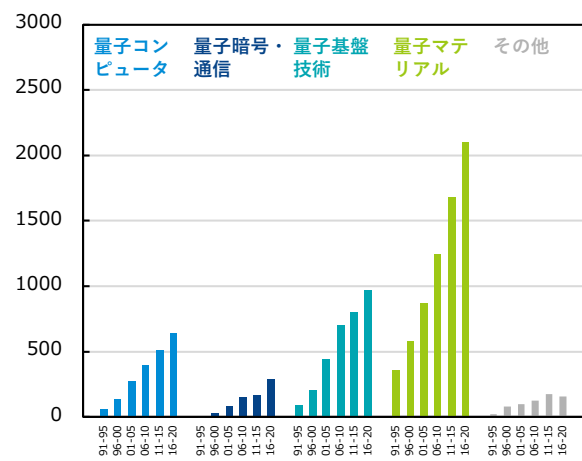
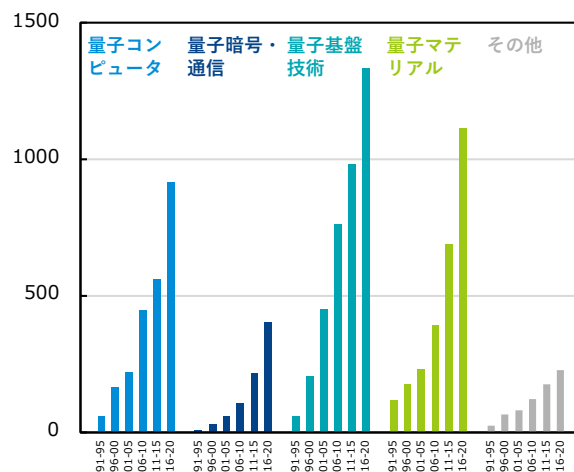
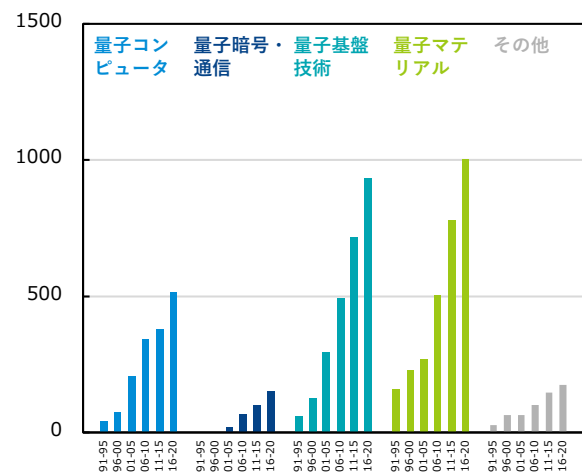
(a) 1st アメリカ(b) 2nd 中国(c) 3rd ドイツ(d) 4th 日本(e) 5th イギリス(f) 6th フランス

図3-21 論文の国別・技術区分別の年次変化

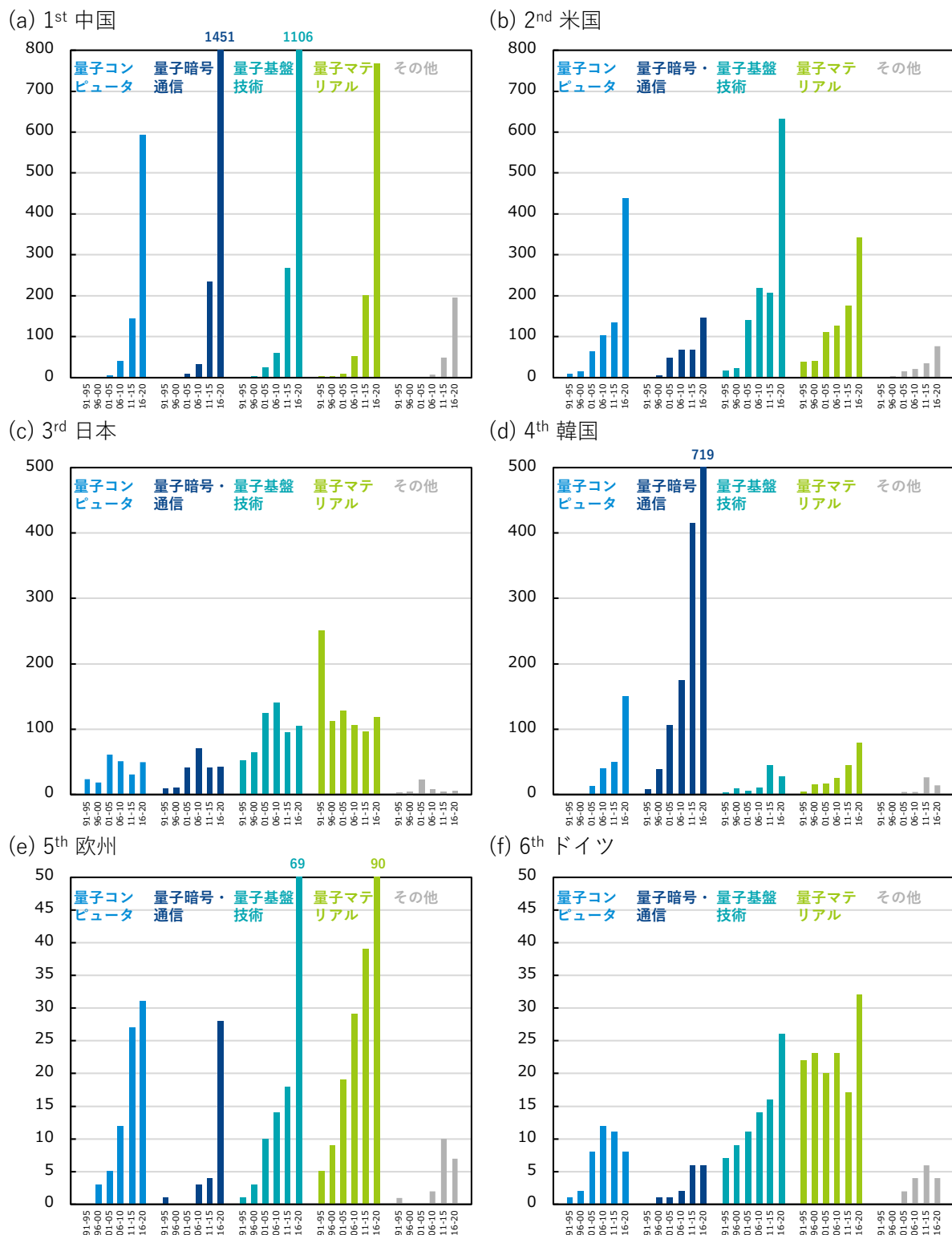


図 3-22 特許の国別・技術区分別の年次変化

	量子コンピュータ	量子暗号・通信	量子基盤技術	量子マテリアル	その他
アメリカ	41%	46%	45%	54%	43%
中国	31%	18%	26%	41%	30%
ドイツ	61%	59%	64%	70%	63%
日本	38%	38%	42%	38%	40%
イギリス	60%	70%	64%	75%	58%
フランス	62%	68%	61%	76%	68%
イタリア	55%	62%	61%	69%	59%
ロシア	38%	23%	50%	62%	55%
カナダ	64%	68%	69%	70%	58%
インド	26%	23%	32%	33%	34%

図3-23 論文の国際共著率

(a) 量子コンピュータ

	アメリカ	中国	ドイツ	日本	イギリス	フランス	イタリア	ロシア	カナダ	インド
アメリカ										
中国	589									
ドイツ	538	144								
日本	291	111	72							
イギリス	382	132	232	91						
フランス	297	28	155	70	148					
イタリア	265	32	170	48	173	157				
ロシア	112	15	88	23	31	35	25			
カナダ	472	124	149	47	120	63	48	9		
インド	131	24	61	31	35	22	18	7	44	

(b) 量子暗号・通信

	アメリカ	中国	ドイツ	日本	イギリス	フランス	イタリア	ロシア	カナダ	インド
アメリカ										
中国	163									
ドイツ	74	33								
日本	71	60	29							
イギリス	132	89	72	53						
フランス	44	11	22	14	40					
イタリア	58	12	34	6	66	18				
ロシア	13	6	10	5	12	7	8			
カナダ	158	94	52	38	81	34	7	9		
インド	26	11	5	8	11	8	5	6	15	

(c) 量子基盤技術

	アメリカ	中国	ドイツ	日本	イギリス	フランス	イタリア	ロシア	カナダ	インド
アメリカ										
中国	844									
ドイツ	896	338								
日本	554	249	272							
イギリス	603	283	564	225						
フランス	355	106	376	86	250					
イタリア	312	100	281	59	297	197				
ロシア	304	64	293	98	101	111	66			
カナダ	540	197	188	91	220	71	70	65		
インド	120	28	58	32	42	36	18	9	39	

(d) 量子マテリアル

	アメリカ	中国	ドイツ	日本	イギリス	フランス	イタリア	ロシア	カナダ	インド
アメリカ										
中国	2133									
ドイツ	1585	541								
日本	990	430	601							
イギリス	659	324	603	267						
フランス	624	123	672	413	314					
イタリア	320	95	332	123	189	248				
ロシア	413	117	568	172	126	199	82			
カナダ	648	186	211	81	91	83	48	33		
インド	250	47	160	71	64	56	43	26	46	

図3-24 技術区分別の国際共著状況

分野・国ごとの論文の国際共著率を図3-23に示した。中国と並び、日本はどの分野についても総じて国際共著率が低い。一方で、ドイツ、英国、フランス、イタリアなど欧州各国は60%の共著率を超える分野が多く、国際的な共同研究の活発さが伺える。多くの国で分野による共著率の差はあまり顕著ではないが、「量子マテリアル」区分の国際共著率が他を上回る場合が多いようである。これは、対象となる研究が基礎研究フェーズのものが多く含まれるためと見られる。一方、中国では「量子暗号・通信」区分の国際共著率が他の技術区分と比べて有意に低くなっている。量子暗号鍵配送など国家安全保障に関係するような技術を扱うことによると考えられる。このような「量子暗号・通信」での顕著な共著率低下が見られるのはここに挙げた10カ国（論文数トップ10）の中では中国とロシアのみである。

これらの10カ国の間での共著論文数を図3-24にプロットした。このように絶対値で見ると、米国の国際共著論文の多さが際立つ。米国とカナダとの共著関係は極めて強く、4分野いずれも多数の共著論文が出ている。米国と欧州各国との共著関係は分野による個性が伺える。「量子コンピュータ」や「量子マテリアル」はドイツと、「量子暗号・通信」や「量子基盤技術」はイギリスと、など分野ごとの共著には濃淡がある。イギリスやドイツはどの分野でも多数の国際共著論文を出しており、とりわけイギリスとカナダとの共著は目立っている。日本は総じて国際共著論文数が少ないが、ドイツやイギリスとの国際共著論文と同程度かそれを上回る数で、中国との国際共著を持つ。中国側から見ても、日本はドイツ、イギリス、カナダと並ぶ水準での国際共著相手であることがわかる。

3.5 組織・出願人別分析

量子技術分野の学術文献137,718件及び特許14,321件を融合した計152,039件の組織・出願人別件数情報をまとめる。機関単位での整数カウントを行った。

文献での組織別ランキングをとると国別上位米中の研究機関で独占されることなく、多くの国の大学・研究機関が上位にランクインした（図3-25）。首位が米国カリフォルニア大、2位が中国科学院、3位に日本の東大が入った。4位にドイツのマックスプランク研究所。以下、中国科学技術大学、米国MIT、精華大学、米国メリーランド大などとなった。技術区分の割合を見ると、日本の研究機関は「量子マテリアル」の割合が高い傾向が伺える。

図3-26に示したとおり、特許の出願人別ランキングでは国別上位の中国が多い。首位は中国科学院、2位がIBM、3位が日本の東芝、4位に中国 Ruban Quantum Technology（如般量子科技）となった。以下、Huawei、国家电网、D-Wave、インテルと続く。技術区分の割合から明らかに、「量子暗号・通信」の割合が高い。多くが量子暗号鍵配送（QKD）関係の特許であると考えられる。

図3-27に量子技術分野の文献数上位6機関の俯瞰図上での注力技術の位置を求めた。

論文件数首位のカリフォルニア大は、重フェルミオン、トポロジカル絶縁体、ダイヤモンドNV中心など量子マテリアルで多いほか、量子誤り訂正、量子最適化・アニーラなどでも注力している。2位の中国科学院もトポロジカル絶縁体、ワイル半金属、バレートロニクス、トラップイオンなど材料系が多いほか、量子鍵配送などでも注力している。3位の東大は重フェルミオン、磁気スピンミオン、モット絶縁体などのほか、光格子時計で件数が多い。4位のマックスプランク研究所では重フェルミオン、ワイル半金属、5位の中国科学技術大学では量子鍵配送、ダイヤモンド、6位のMITではDNP-NMRとトラップ・イオンでの注力がある。

図3-28に量子技術分野の特許数上位6出願人の俯瞰図上での注力技術の位置を求めた。

首位の中国科学院では、SQUID、層構造材料、薄膜に注力している。2位のIBMではFPGA、量子回路、層構造材料に注力。3位のRuban Quantum Technologyでは量子鍵のみ、4位の東芝では量子鍵と層構造材料、5位のハーウェイは光信号処理、6位の中国国家電網も量子鍵に注力している。

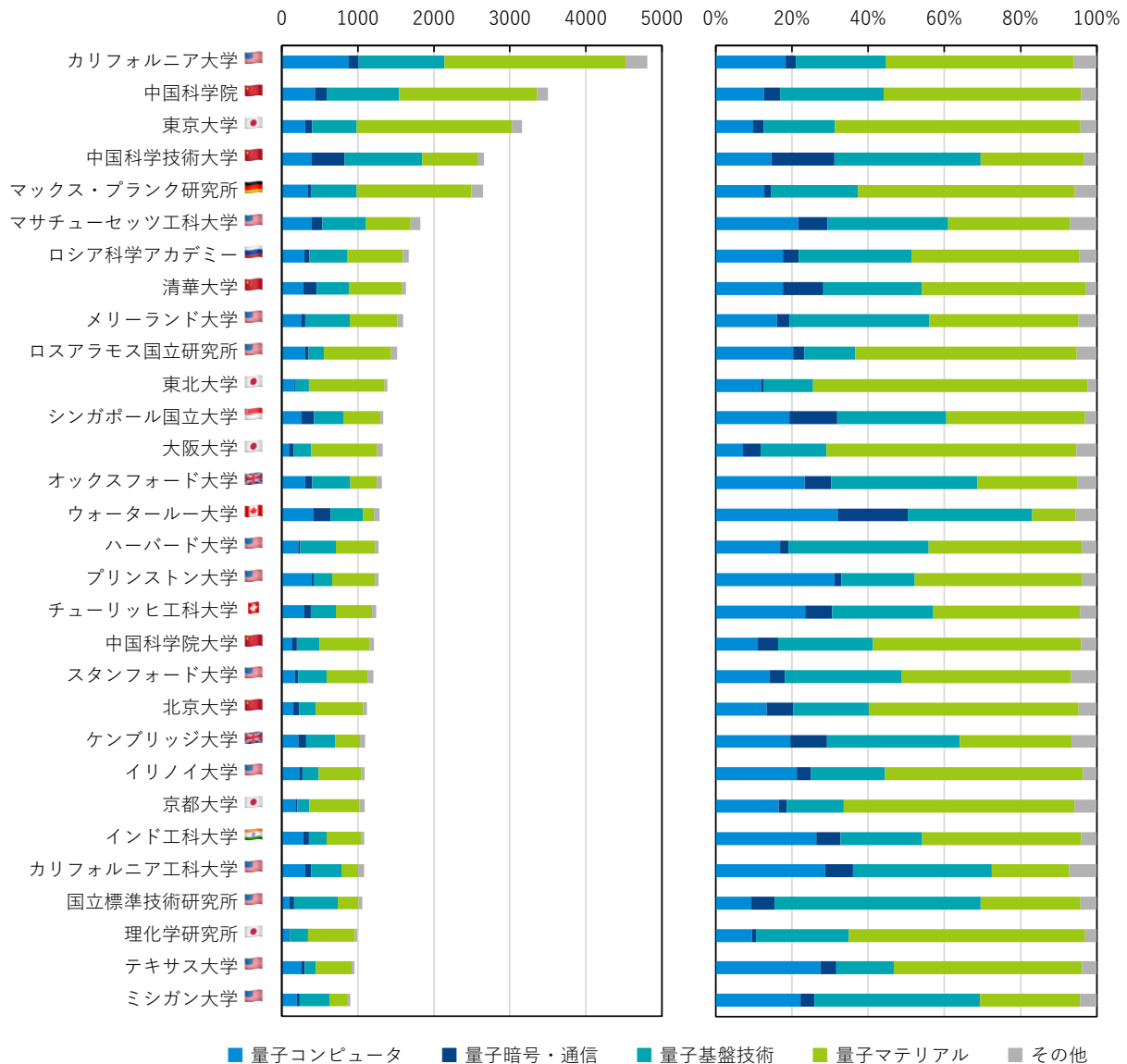


図 3-25 論文出版数ランキング

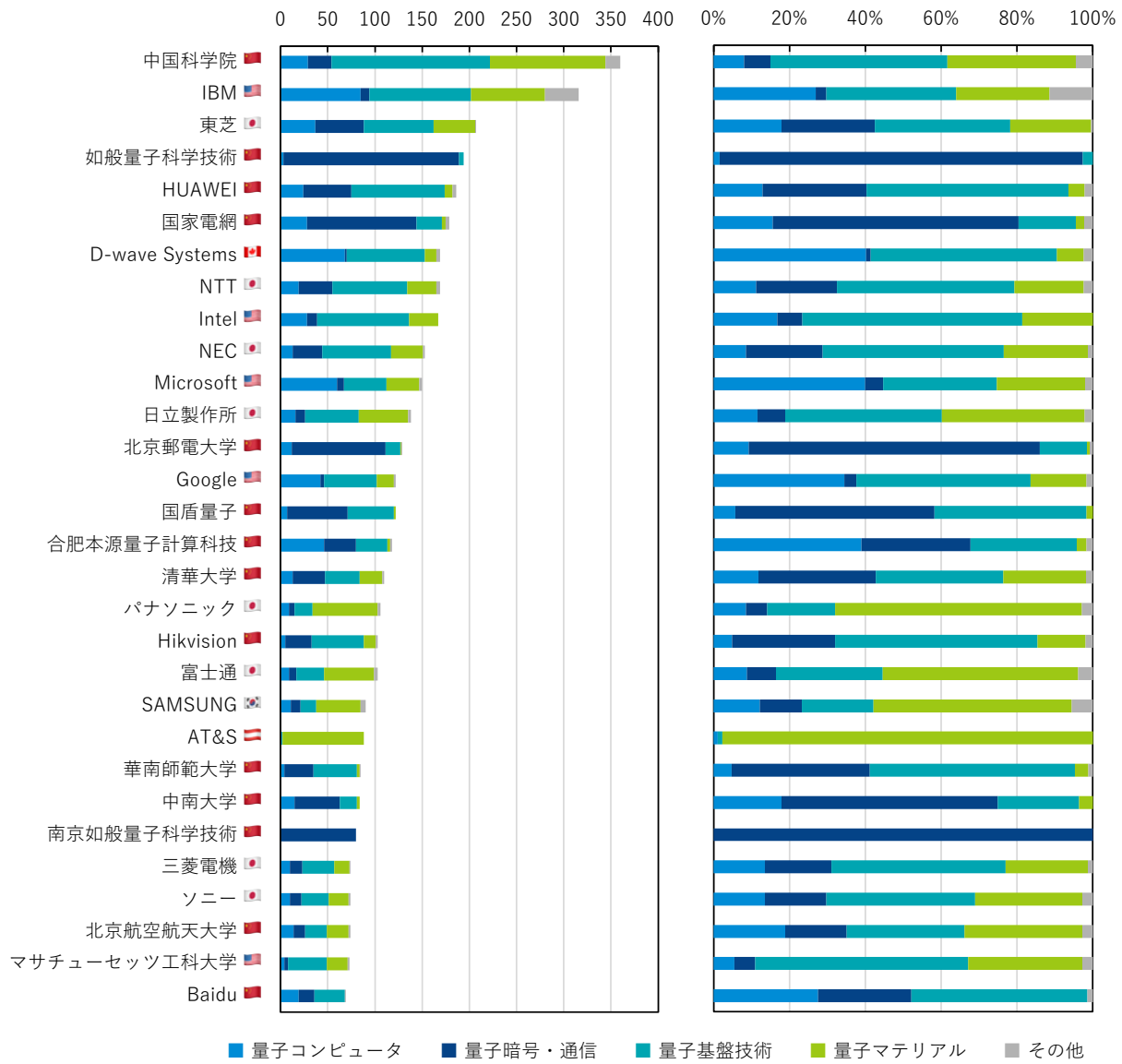


図 3-26 特許出願数ランキング

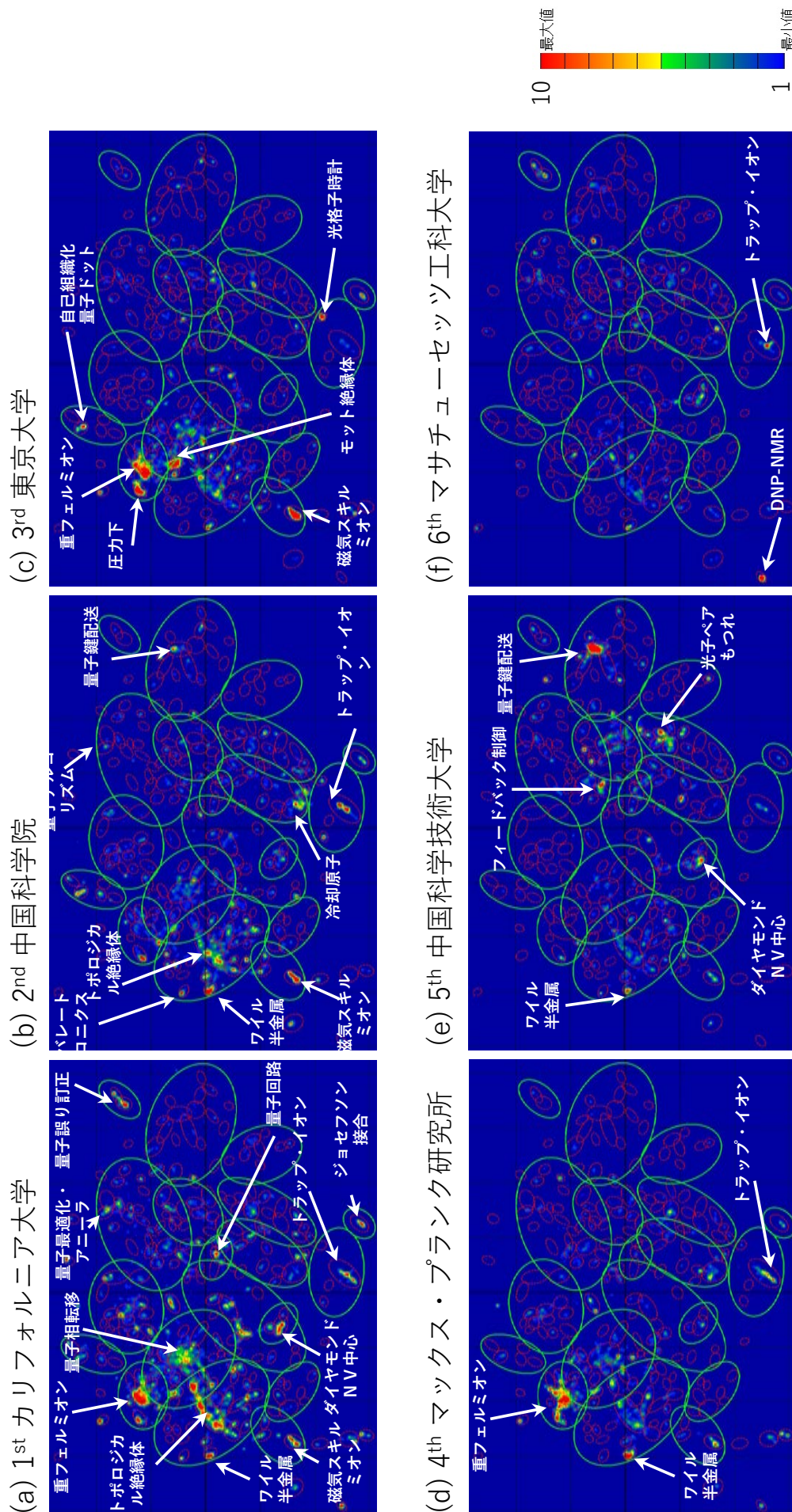


図3-27 論文の発行組織別俯瞰マップ

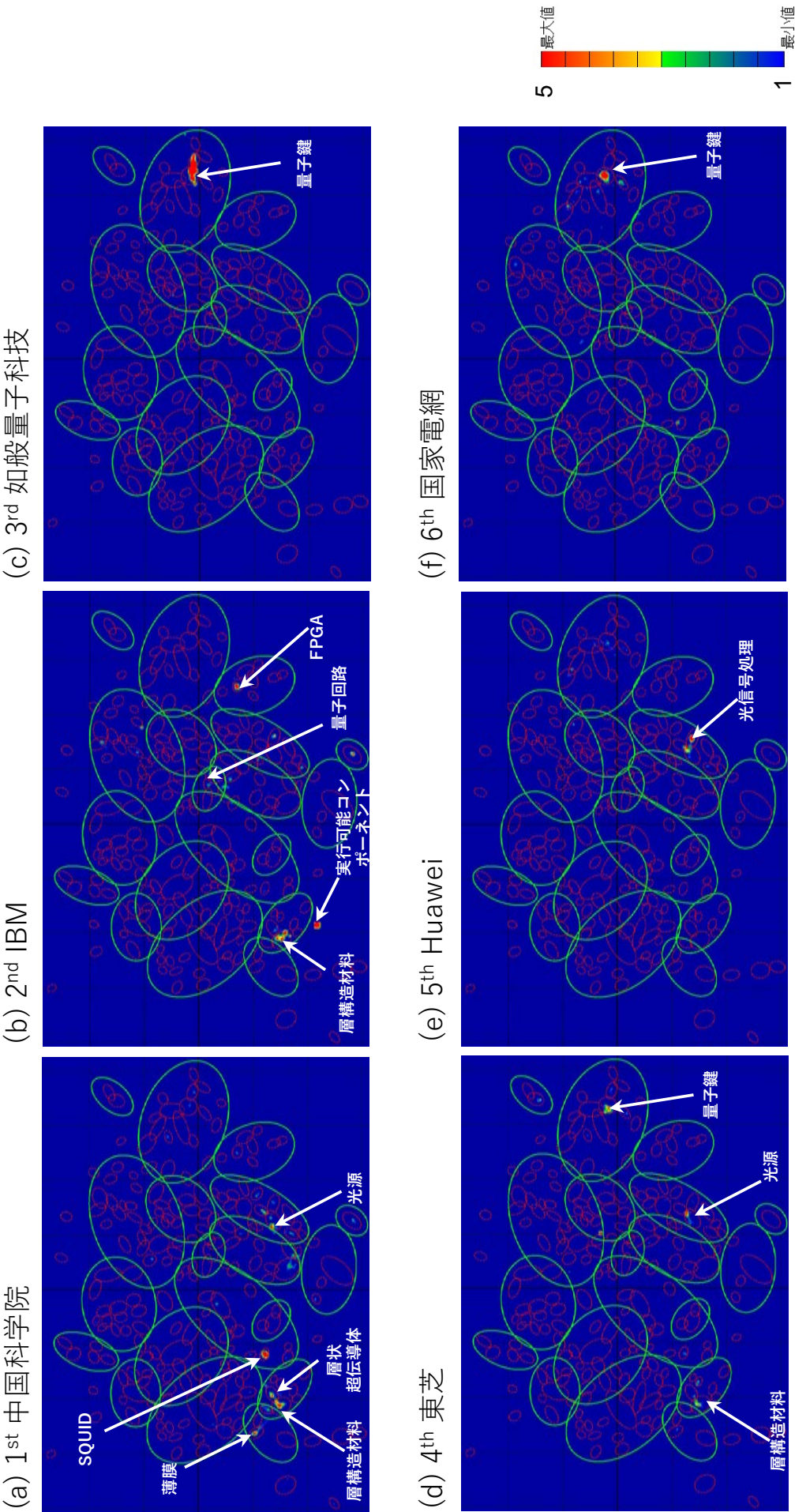


図 3-28 特許の出願人別俯瞰マップ

4 | 研究者マップ

4.1 共著ネットワーク

2011年～2020年の10年間に発表された量子技術関連論文は83,348件であった。その著者143,901人のうち3件以上発表している35,638人を調査対象とした。

著者をノード、共著関係をエッジとするネットワークを構築すると、最大（第1）連結ネットワークは32,816人で構成されており、約92%を含む。2番目に大きい第2連結ネットワークは22人で構成されており、第1連結ネットワークとの差は大きい。表4-1に著者ごとの指標値の基本統計を示した。

著者数の国別比較を図4-1に示した。ここでの国は、当該の著者の直近の所属機関の所在国であり、著者の国籍ではない。例えば、米国の大学に所属する中国籍の研究者は米国の著者としてカウントされる。また、著者に付与された技術区分は、当該の著者が発表した論文それぞれに論文・特許俯瞰マップ上での技術区分を付与した上で、最も多い区分をその著者の技術区分として付与してある。そのため、技術区分が「量子コンピュータ」の著者であっても、少なくない数の「量子暗号・通信」の論文を発表していることがありえる点に注意を要する。

中国とアメリカの著者数が群を抜いて多く、ドイツ、日本、イギリスと続く。トップ10カ国のうち米国と中国を除く8カ国はいずれも著者数としては1000～3000人規模にとどまる。技術区分割合で見ると、日本、韓国、台湾では「量子マテリアル」が多い傾向が伺える。逆にカナダ、オーストラリア、オーストリアでは「量子マテリアル」の割合が他国と比べて低い。

ここでの「量子コンピュータ」は表3-1のとおり理論・ソフトウェア関係を主に表しており、インドやカナダで顕著に高い割合となっている。量子光学や量子デバイスなどのハードウェア関係は「量子基盤技術」に含まれており、イギリス、フランス、オーストラリアなどで割合が高くなっている。中国は「量子暗号・通信」を専門にする著者割合が高いと考えられがちだが、他の国の割合と比較して、飛び抜けて大きな割合を占めているということにはなかった。「量子暗号・通信」の割合が相対的に高いのは、シンガポール、韓国、台湾などである。

表4-1 著者の基本統計量

	論文数	被引用数	被引用数 (常用対数)	媒介中心性 トレンド	次数中心性 トレンド
平均	9.779	323.6	1.988	0.009723	0.01512
標準誤差	0.0704	5.398	0.003458	0.0001746	0.0002169
中央値	6	88	1.949	0.000004165	0.01163
最頻値	3	56	1.756	0.000004379	0.07332
標準偏差	13.30	1019	0.6528	0.03297	0.04096
分散	176.8	1038308	0.4261	0.001087	0.001677
最小	3	0	0	-0.1442	-0.1461
最大	598	35861	4.5546345	0.1512	0.1408
標本数	35638	35638	35638	35638	35638

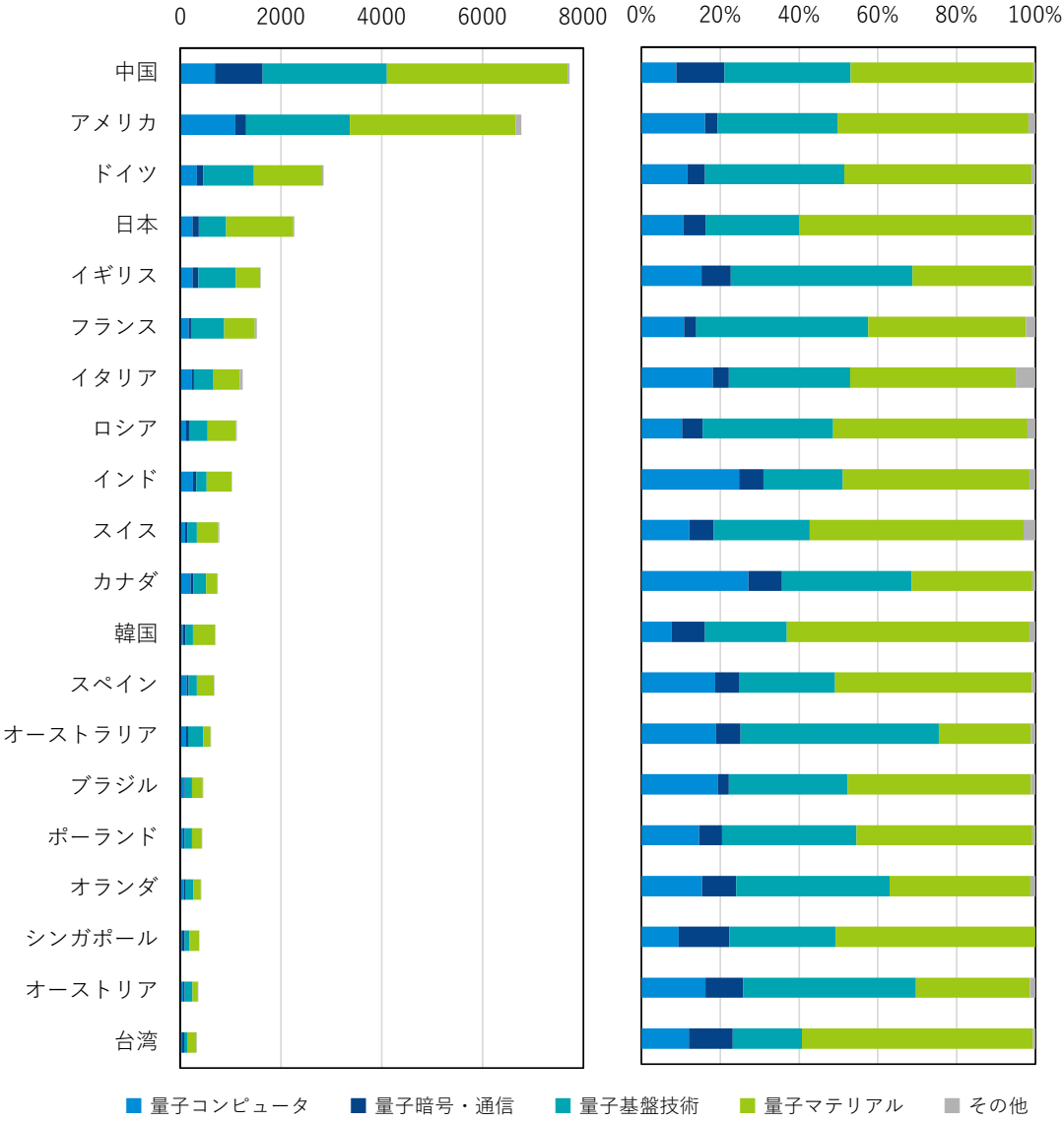


図4-1 著者数の国際比較

4.2 研究者のフェーズ推定

媒介中心性の変化（中心性トレンド）をX軸とし、Y軸に被引用数をプロットすると図4-2のようになる。これを、媒介中心性および被引用数の平均値を用いて図2-4のように「リーダー」「大御所」「期待人材」「エマージング」の4象限に分け、それぞれ研究者のフェーズとする。

研究者フェーズ割合の国際比較を図4-3に示した。中国は相対的に「大御所」の研究者が少なく「エマージング」「期待人材」の割合が多い。アメリカ、ドイツ、日本、イギリス、フランスはそれぞれのフェーズの割合は極めて類似しており、おおむね大御所：リーダー：エマージング：期待人材の比は4：2：1：3である。ロシアやインドは「期待人材」の割合が大きい。

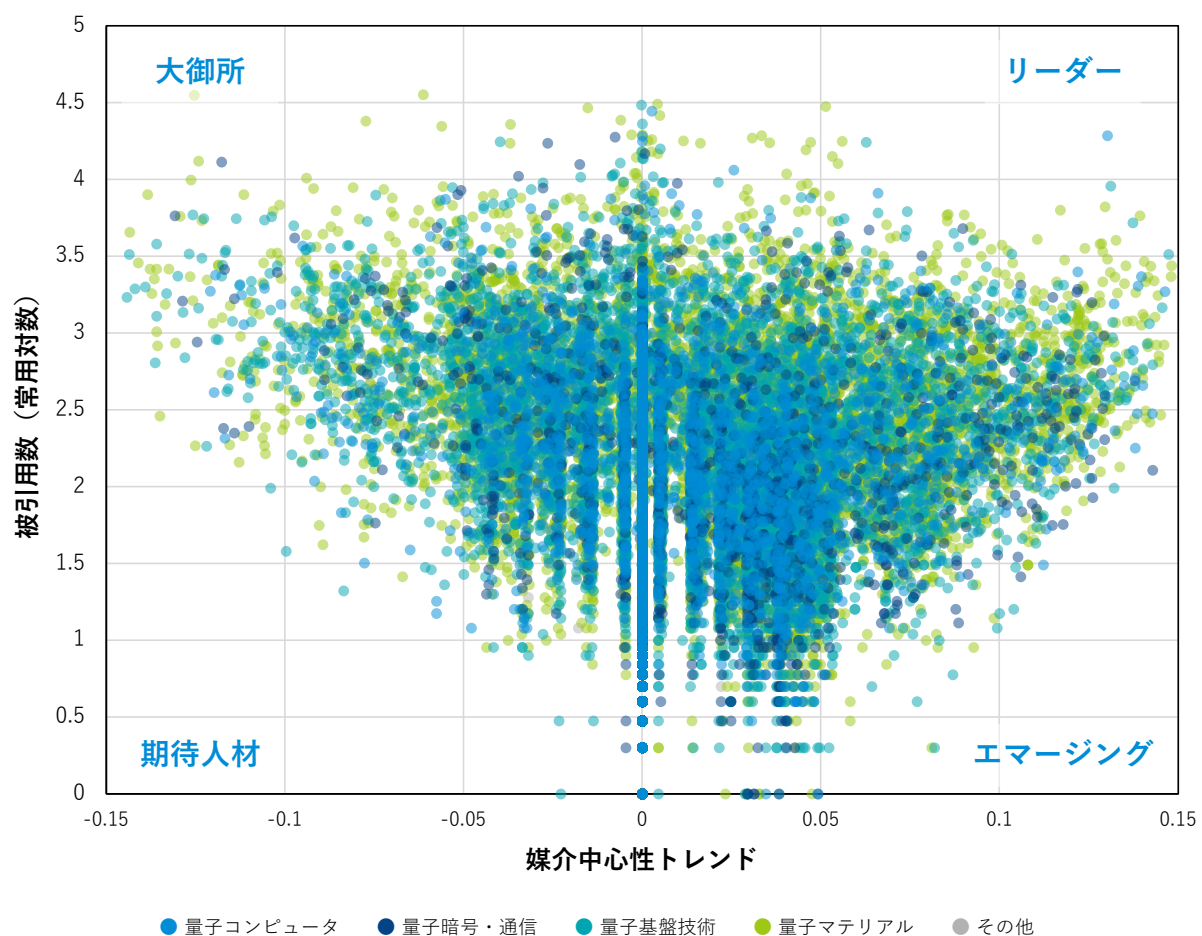


図4-2 著者のプロット

図4-4に技術区分ごとに各国の研究者フェーズ割合を比較した。中国で「大御所」の研究者が少なく「エマージング」「期待人材」の割合が多いという傾向は、どの技術区分にも見られた。

イギリスとドイツは前述の「大御所：リーダー：エマージング：期待人材=4：2：1：3」の構造をどの区分でも保っている。アメリカは「量子通信・暗号」区分で「大御所」研究者が少なく、フランスは「量子コンピュータ」区分での「リーダー」が少ない。日本は「量子コンピュータ」での「リーダー」「エマージング」層の薄さが目立つが、「量子基盤技術」「量子マテリアル」は概ね「4：2：1：3」構造をもつ。

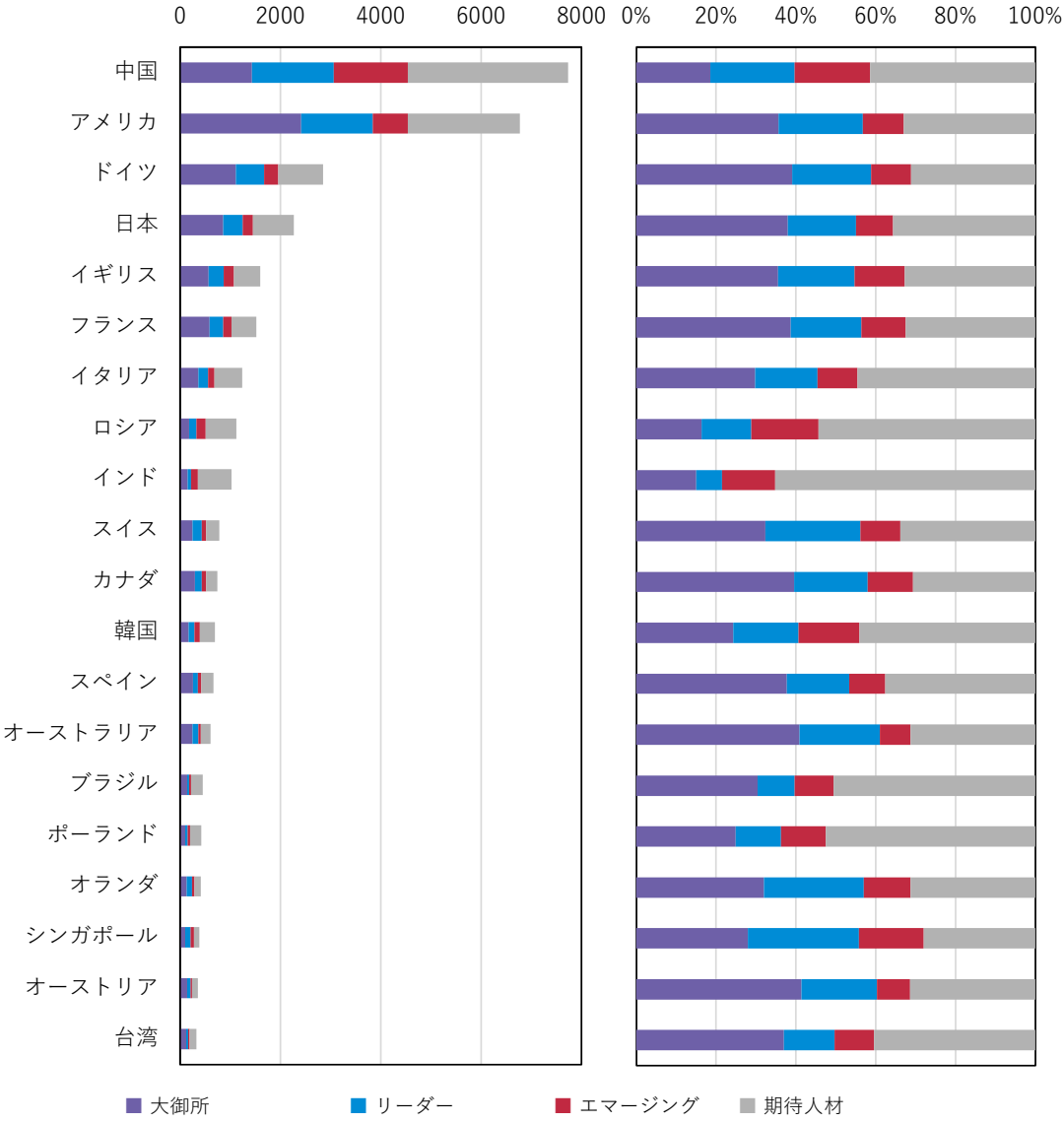


図 4-3 研究者フェーズ割合の国際比較

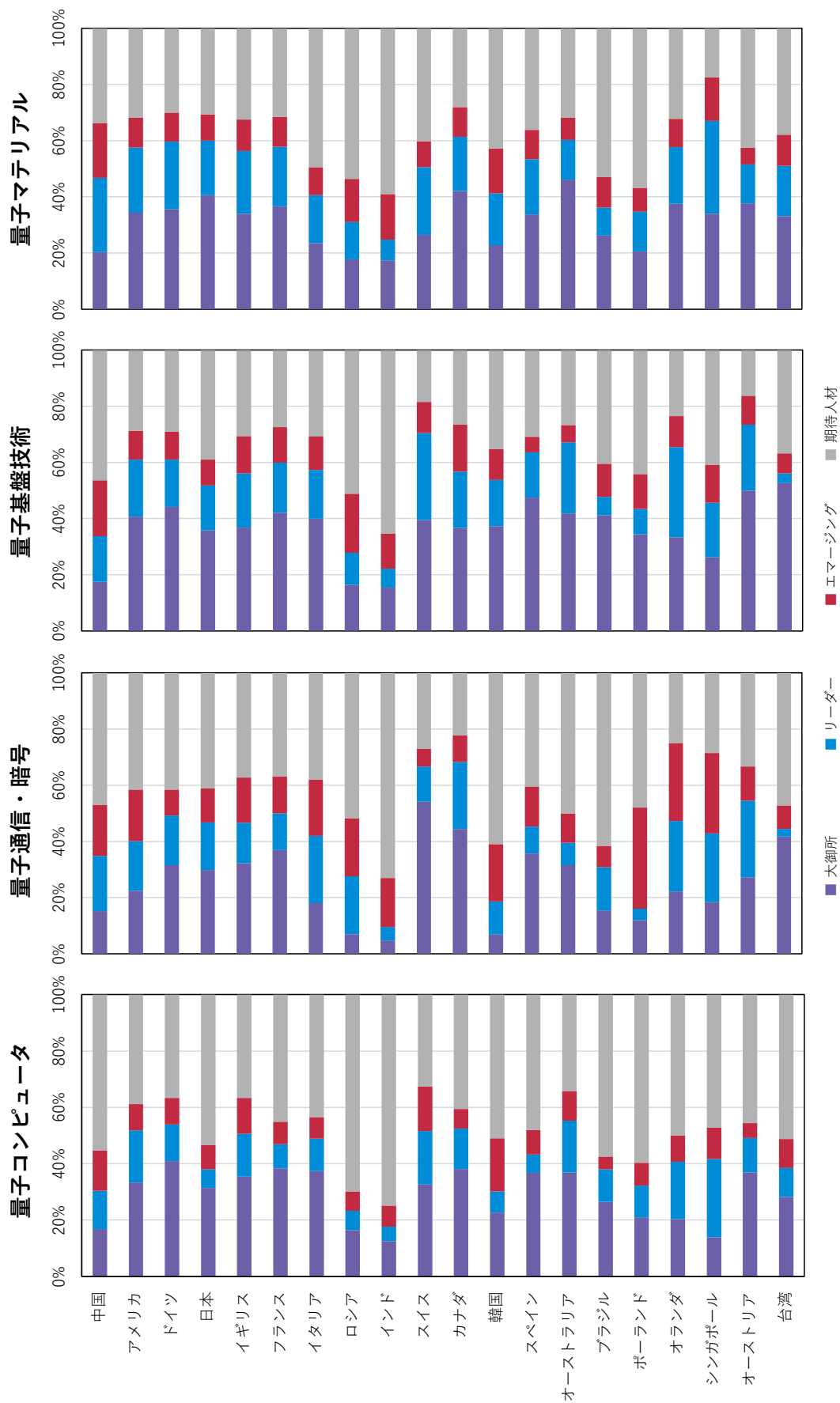


図 4-4 技術区分ごとの研究者フェーズ割合の国際比較

米国と中国との人的な結びつきの把握のため、米国の研究機関に所属する著者のうち中国姓の研究者の割合を調べた。中国人の姓は上位100種類（英語表記では90種類）で人口の9割がカバーされており^[21]、この調査では単純に著者の姓がこの上位100種類の姓かどうかのみで判断した。そのため、著者の国籍は不明である。この「中国姓をもつ著者」には、台湾、韓国、シンガポールなどに国籍をもつ研究者や、米国に帰化あるいは二世・三世といった中国系米国人も含まれており、結果の解釈には注意を要する。

米国に所在地をもつ研究機関に所属している著者6,775名のうち、中国姓の著者は1,206名であった（17.8%）。図4-5に技術区分ごとの研究者フェーズの分布を示した。どの分野でも中国姓の研究者は「エマージング」の割合が高く、反対に「大御所」の割合が低い傾向が見られた。

図4-6には、米国の研究機関所属の著者全体に対する中国姓の研究者の割合を、技術区分・研究者フェーズごとに示した。これを見ると、「量子マテリアル分野」に中国姓の著者の集積が見られ、とりわけ「エマージング」のフェーズの研究者が多かった。「量子マテリアル」区分における「リーダー」「エマージング」の研究者のうち、中国姓をもつ著者の割合はそれぞれ28.5%、34.1%と、平均を大きく上回っている。「大御所」「リーダー」はどの分野でも少ない傾向にあるが、とりわけ「量子基盤技術」での当該の研究者層に中国姓の研究者が少ないことも見て取れる。

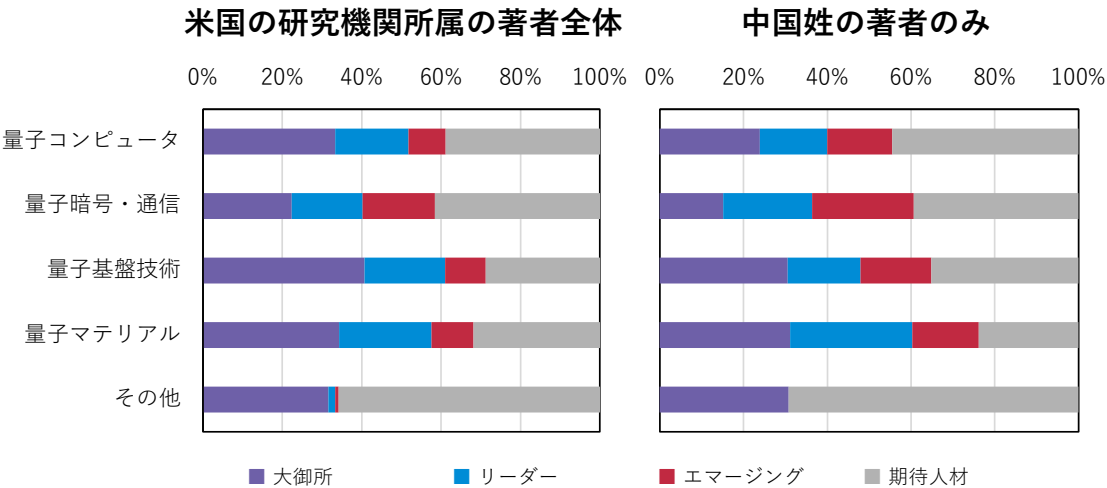


図4-5 米国の研究機関に所属する中国姓の研究者

	大御所	リーダー	エマージング	期待人材	総計
量子コンピュータ	10.2	12.4	23.5	16.3	14.2
量子暗号・通信	10.2	17.9	20.0	14.3	15.1
量子基盤技術	9.4	10.7	21.1	15.3	12.6
量子マテリアル	20.5	28.5	34.1	17.0	22.7
その他	10.8	0.0	0.0	11.7	11.1
総計	14.8	20.7	27.8	16.1	17.8

(単位：%)

図4-6 米国の研究機関に所属する中国姓の研究者の割合

5 | 中国における量子技術の動向

5.1 量子技術政策の概要

中国における量子技術研究は、初期の基盤的研究が始まった20世紀末、「国家ハイテク研究開発計画（863計画）」や「国家重点基礎研究開発計画（973計画）」などの資金援助を受けていたが、公的支援は組織的なものではなかった。量子情報科学分野も一つの独立した研究分野とはなっていなかった。

中国の一大量子研究拠点である中国科学技術大学（USTC）の張強（ZHANG Qiang）らによれば、1998年に中国国家自然科学基金（NSFC）が北京で開催した研究フォーラムが一つの契機となり、USTC、中国科学院（CAS）物理研究所、山西大学などの大学・研究機関で、実験的な研究が開始されたという^[22]。1999年には、80年代前半から量子光学の研究を始めていたUSTCの郭光燦（GUO Guangcan）が、CASで量子情報専門のラボを開設した。2001年には、のちに中国「量子の父」と呼ばれることになる潘建偉（PAN Jianwei）が留学先のオーストリアから帰国し、31歳でUSTCに量子物理・量子情報研究室を設立したが、この頃から中国における量子情報科学研究が本格化したと考えられる。

中国政府による量子研究振興が組織的に始まったのも2000年代に入ってからと思われる。2006年2月、國務院は中国で初の本格的な科学技術中長期計画である「国家中長期科学技術発展計画綱要2006～2020年」を発表、推進すべき重大科学研究4領域の1つとして初めて「量子制御」が指定された。同年から始まった第11次5ヵ年計画（06～10年）下では、科学技術部（MOST）が「量子制御」、NSFCが「単一量子状態の検出と相互作用」、CASが「長距離量子通信」といったように、量子技術に焦点を当てた研究プロジェクトが開始された^[23]。

2009年にはUSTCが安徽省蕪湖市に世界初の「量子政府ネットワーク」を構築、2011年には潘建偉がオーストリア科学院と協力して量子科学実験衛星（QUESS: Quantum Experiments at Space Scale）計画を開始するなど研究に進展が見られた。2012年の中国共産党第18回党大会では、潘建偉が研究者チームを率いて、会場と参加者のホテル、北京政府を結ぶ量子通信ネットワークのデモンストレーションを行った^[24]。

量子通信を中心に量子技術が急速に進歩し、安全な通信確保等に大きな影響を与える可能性があることがわかると中国政府は第12次5ヵ年計画（11～15年）で量子研究支援を強化する。12年5月にはMOSTが「実用的量子暗号技術と量子通信技術、鉄系超電導とトポロジカル絶縁体などの研究領域において一連の世界トップレベルの重要成果を獲得した」との認識のもと、「量子制御研究国家重大科学研究計画12・5特定計画」を策定。量子計算、冷却原子系、相関電子新材料開発と量子情報技術の統合などの面でさらに強化が必要だとして詳細な目標を提示した^[25]。CASも同年1月、15の重大科学技術任務の一つとして「量子情報通信と量子計算」の重点化を決めている^[26]。研究支援と同時に中国は量子技術の実用化にも注力し始める。2015年5月に発表された産業政策「中国製造2025」では、次世代情報技術産業カテゴリーの優先事項として量子コンピューティング開発の積極推進が盛り込まれた^[27]。

2016年を計画初年度とする第13次5ヵ年計画（16～20年）では、量子技術に明確な焦点が当てられた。16年8月、5ヵ年計画を受けて策定された「国家科学技術イノベーション第13次5ヵ年計画（16～20年）」では、重点領域として「量子通信と量子コンピューティング研究」、「量子制御と量子情報」が指定された^[28]。「国家中長期科学技術発展計画綱要」の後継的性格を帯びた「国家イノベーション駆動型発展戦略要綱（16～30年）」でも、産業変革を牽引する破壊的技術として、自動運転技術や先進製造技術、人工知能ロボットなどと共に量子情報技術が取り上げられた^[29]。

中央政府による振興策だけではなく、中国の研究開発システムで重要な役割を果たしている地方政府による取り組みも増えている。USTCを中心とするサイエンスパークを抱え、ハイテク産業開発区にも指定されている合肥市を省都とする安徽省は2017年12月、「安徽省量子科学産業発展基金」を設立、量子コンピュータ・通信・計測に100億元（約1830億円）の資金を充てる計画を発表した^[30]。済南市を科学技術都市として発展させたい山東省は18年3月、「山東省量子技術革新発展計画（2018-2025）」を発表^[31]、2019年1月には済南量子技術研究院を中心とした複数の量子技術研究室から構成される「済南量子情報科学センター」の建設計画を公表している^[32]。

また、習近平政権が進める軍民融合戦略においても、量子技術は重点強化の対象となっている。2017年8月の「第13次5カ年科学技術研究開発軍民融合特別プロジェクト計画」では、衛星を含む量子通信とコンピューティングがプロジェクトに含まれている^[33]。前出の「山東省量子技術革新発展計画」の中でも軍民融合戦略を念頭に、「量子情報技術を中心とした軍民の科学技術成果の双方向の転換と応用、軍民の革新資源の共同構築と共有を推進」と明記されている^[34]。

これらの中央政府と地方政府の後押しを受けて、2010年代には量子科学分野における研究・実験成果が顕著に表れはじめた。2015年には、CASとアリババ（Alibaba）が共同で「量子計算実験室」を設立し、量子コンピュータのクラウド提供を開始した。16年8月にはCAS国家宇宙科学センターが、世界初の量子科学実験衛星「墨子号」を長征2号（CZ-2D）で打ち上げ、世界的に大きなニュースとなった。17年1月には墨子号を用いて1200km離れた青海省と雲南省間の大規模量子暗号通信の実証実験に成功したと発表、3月にはUSTC、CAS-アリババ量子コンピューティング研究所、CAS物理研究所、浙江大学のチームが、将来の量子コンピュータに向けた重要なステップである10個の超伝導量子ビットの絡み合いに成功し、グーグルの先行記録を破ったと報告している。

量子技術の進展に伴い、近年は更に研究機関の新設が続いている。2017年には、量子技術の中心的な研究開発拠点として、安徽省合肥市に総工費70億元（約1280億円）^[35]ともいわれる「量子情報科学国家実験室」を建設する計画が発表された。同年7月には、合肥研究拠点の中核施設として「量子情報・量子科学技術イノベーション研究院」が安徽省とCASによって設立された^[36]。同じ頃人民解放軍（PLA）の軍事科学院（AMS）は、「国防科学技術イノベーション研究院」を設置し、神経認知、量子技術、フレキシブルエレクトロニクスなどの分野の研究を進めると発表した^[37]。12月には清華大学の薛其坤（XUE Qikun）の指導のもと、北京市政府、CAS、軍事科学院、北京大学、清華大学、北京航空航天大学などが提携し、「北京量子情報科学研究院（BAQIS）」が設立された^[38]。18年には百度（Baidu）が量子コンピューティング研究所の設立を発表し、豪シドニー工科大学の段潤堯（DUAN Runyao）元教授が所長に就任した。

21世紀に入って中国政府が量子技術振興に傾注してきたことは明らかであるが、投入された資金額については中国政府も公表しておらず情報が限られている。中国発の情報としては、潘建偉自身が2019年の共著論文の中で推計を発表している^[22]。それによると、1998～2006年の初期段階は総額1000万ドル（11.6億円）、2006～10年の第11次計画期は総額1億5000万ドル（173億円）、2011～15年の第12次計画期は4億9000万ドル（567億円）、2016～20年の第13次計画期は3億3700万ドル（389億円）が支出されたとし、1998年から2019年までの約20年間では総額約9億8700万ドル（約1141億円）と見積もられている。

米ランド研究所は、米中の量子技術産業基盤を比較検討した報告書の中で、潘の推計では最近の1年あたりの資金額は8400万ドル（97億円）となるが、潘建偉の研究拠点の一つでもある合肥マイクロスケール物質科学研究センターの2017年の設立資金が10億6000万ドルとの中国国内報道や、前出の安徽省量子基金計画を引用して、潘の試算をすでに大きく越えていると指摘している^[39]。米シンクタンクの新アメリカ安全保障センター（CNAS）は、潘建偉が2013～15年の総額は19億元（約348億円）だったと発言している中国国内報道や、国家重点研究開発計画の「量子制御と量子情報」プロジェクトの2017年資金レベルが10億元（約183億円）だったことなどから、「最近および現在の資金調達のレベルは、数十億ドル、少なくとも数百億人民元に達すると思われる」と推測している^[24]。いずれにせよ、中国の年間投資レベルについては、

100 億円から数千億円まで推計に幅があり、どの数字が正確なのかについては公開情報からは判断できないと思われる¹。

近年は、米中技術摩擦を背景に、中国政府の量子技術推進を目指す取り組みは一層強化されている。2020 年 10 月 16 日、中国共産党中央政治局は、習近平総書記主宰の下、量子の科学技術研究と応用の見通しに関する集団学習会を行った^[42]。習総書記は「量子科学技術の発展推進の重要性和緊急性を十分認識し、量子科学技術発展戦略の策定と体系的な展開を強化し、大きな流れを把握し先手をしっかり打つ必要がある」と強調し、研究開発の加速化を求めた。党中央において総書記が個別の科学技術分野について強化を指示することは異例であり、講話の後 MOST は AI と量子技術を特徴とする次世代ハイテク計画に重点的に取り組む方針を示している²。

2021 年 3 月に全人代で承認された第 14 次 5 年計画（21～25 年）においても量子情報は、AI や脳科学とともに「国家の安全と発展の大局に関係する基礎核心分野」として位置づけられた。特に①都市内、都市間および自由空間における量子通信技術の研究開発、②汎用量子コンピュータのプロトタイプおよび実用型量子シミュレータの研究開発、③量子精密測定技術のブレイクスルーの 3 分野が重点化対象として指定されている^[43,44]。

技術の標準化の重要性を強調した 14 次 5 年計画に連動する形で 2021 年 10 月には中国初の標準化戦略「国家標準化発展綱要」が公表された^[45,46]。綱要は、2035 年に向けて中国の標準化発展の目標・ミッションを定めたものであるが、標準化と科学技術イノベーションの相互発展を目指すべき対象として、AI・バイオ技術とともに量子情報が取り上げられ、標準化研究を急ぐ姿勢が示された。

また、2022 年 1 月に発表された「計量発展計画（21～35 年）」においても、量子技術の重要性が強調されている。この計画は、計測技術の強化、測定能力の向上、計量関連産業の発展に向けた取組みについて定めているが、イノベーション大国化を目指す上で鍵となるのは、量子精密測定技術、センシング機器の製造集積技術、センシング測量技術といった量子計測技術であるとしている^[47]。

中国の量子技術政策は、政府・党指導部の積極的な重点化方針を受け、研究支援、技術開発を中心に、拠点形成、人材育成、産学連携、標準化と科学技術イノベーション政策のツールを総動員して量子技術の発展を目指している状況にあるといえる。

5.2 中国の研究開発動向

量子通信分野での中国の研究開発の水準は極めて高い。中国科学技術大学の潘建偉教授を中心とするグループが 2014 年に量子暗号鍵配布システムの安全な通信距離を更新し、世界の耳目を集め続けている。2016 年 8 月 16 日には世界初となる量子科学実験衛星「墨子号」が打ち上げ成功し、量子もつれ光子の配送および量子テレポーテーション実験にも成功している。また、2017 年には世界初の量子暗号鍵配送ネットワーク「京滬幹線」を構築した。

この他にも、単一光子源の開発、量子中継システムの構築など長距離・高信頼の量子暗号鍵配送ネットワークの研究開発が精力的に進められている。2016 年 12 月には潘建偉、**陆朝阳**、**陈宇翱**らのグループが「10

- 1 米議会調査局（CRS）は 2018 年の資金額は 2 億 4400 万ドル（約 282 億円）と推計している^[40]。ハーバード大学ケネディスクールは、最近の報告書で中国の量子情報科学投資額を 100 億ドル（約 1 兆 1500 億円）と見積もっている^[41]。
- 2 習近平の量子技術重視の姿勢は一貫しているように思われる。すでに 13 年 9 月には合肥市の大学・企業を訪問・視察するとともに量子通信について集団勉強会を開催、潘建偉と意見交換している。16 年 4 月にも USTC を訪問し研究の進捗を自ら確認した。同年 10 月のサイバーセキュリティに関する政治局研究会でも、量子通信の重要性を強調したという^[24]。

者間量子もつれ」の実現に成功し世界記録を更新した。これらの研究者3名は、いずれも欧州物理学会の「フレネル賞」³を受賞している。潘建偉は2005年、陈宇翱は2013年、陆朝阳は2017年に受賞。当該分野での中国人研究者の高い研究能力が国際的にも評価されていることが伺える。

2021年には、墨子号と京滬幹線とを結ぶ世界初の衛星・地上間量子通信ネットワークの構築に成功したことが報じられた。この成果は中国科学技術大学の潘建偉、陈宇翱、彭承志らの主導のもと、中国科学院上海技術物理研究所の研究チーム、済南量子技術研究院、中国ケーブルテレビネットワーク有限公司などとの協力により実現した。4600キロのマルチユーザー量子鍵配送ネットワークが、2年余りの安定性・安全性試験を突破したとされる。このように、量子通信分野では中国は20年以上の研究開発の歴史を持ち、世界をリードする存在となっている。

量子コンピュータ開発でも、近年目覚ましい成果が上がっている。2021年5月に超伝導量子コンピュータのプロトタイプ「祖冲之号」の開発成功が発表された。量子ビット数は62にのぼり、この上で2次元量子ウォークを実現することで、プログラマブルであるとした。

同年10月には、中国科学院量子情報・量子科学技術イノベーション研究院の研究チームから、超伝導と光量子という2つの異なる方式のマシンでの「量子優位性」の実験実証が報告された。超伝導量子コンピュータの研究チームは、66量子ビットの「祖冲之2号」を用い、ランダム量子回路サンプリングを用いて実験検証を行った。現時点での最速のスーパーコンピュータよりも1000万倍も早く、計算の複雑度はグーグルの量子プロセッサ「Sycamore」の100万倍以上と論文では報告している^[3]。一方、光量子コンピューター研究チームは、光子113個、144モードの専用マシン「九章2号」を用い、ボソンサンプリングによって実験検証に挑んだ^[4]。これらの方法は、量子超越アルゴリズムとも呼ばれ、現在もなお精力的に研究開発が進められている。

研究開発以外の面での中国の量子技術への傾注を見る動向として、「墨子量子賞」が挙げられよう。この賞は、量子物理・量子情報分野の発展を奨励し、中国の同分野における国際影響力をさらに拡大するために設けられたものだ。安徽省投資集団持株有限公司など3社が共同で資金を拠出し、墨子量子科技基金会を共同設立して賞金に充てている。賞金100万元（日本円で約1800万円）と金メダルが授与される。

2018年度は量子計算分野で傑出した貢献を果たした6人の科学者（Ignacio Cirac, David Deutsch, Peter Shor, Peter Zoller, Rainer Blatt, David J. Wineland）に贈られた。19年度の対象分野は量子通信で、やはり6名（Charles Bennett, Gilles Brassard, Artur Ekert, Stephen Wiesner, Jian-Wei Pan（潘建偉）、Anton Zeilinger）が選ばれた。

3 フレネル賞は19世紀の光学者フレネルから名付けられた、量子エレクトロニクス・量子光学の研究に従事する35歳以下の若手科学者を表彰するもので、基礎・応用研究分野の各1人に隔年で授与される。

5.3 注目研究機関・研究拠点

中国語文献での出現頻度と論文・特許数から総合的に判断して注目すべき研究機関と企業をそれぞれ10件程度ずつ選定した（表5-1）。

表 5-1 注目の研究機関・企業

研究機関・研究拠点	企業
中国科学技術大学量子物理・量子情報研究部	浙江神州量子通信技術有限公司
中国科学技術大学量子マテリアル・光子技術実験室	安徽問天量子科技株式会社(Qasky)
中国科学院量子情報・量子科学技術イノベーション研究院	国家電網有限公司
中国科学院量子情報重点実験室	アリクラウド計算有限公司
中国科学院大学カブリ理論物理学研究所	中国科学技術大学国盾量子技術有限公司
清華大学量子情報センター	山東量子科学技術研究院有限公司
清華大学学際情報学研究院	合肥本源量子計算科技有限公司
北京量子情報科学研究院	中国電子科学技術集团公司 第 14 研究所
北京大学量子材料科学センター	百度量子計算研究所
南方科学技術大学深圳量子科学・工学研究院	国开启科量子技術（北京）有限公司

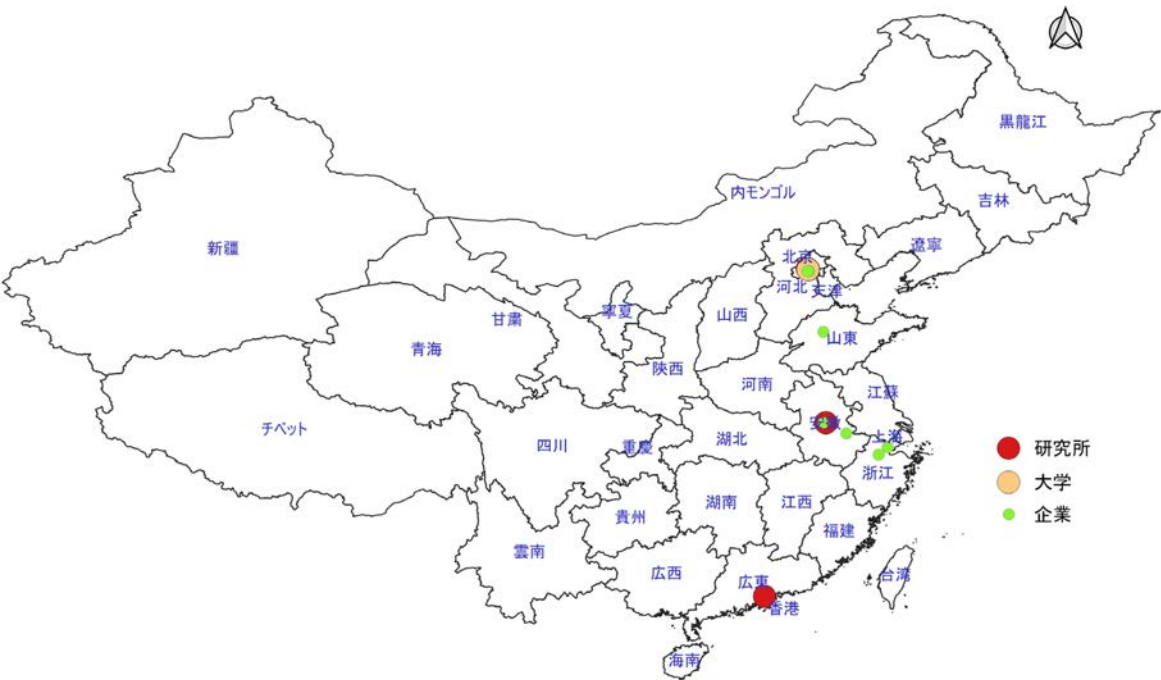


図 5-1 注目の研究機関・企業の所在地

5.3.1 中国科学技術大学量子物理・量子情報研究部

(中：中国科学技术大学量子物理与量子信息研究部、英：Division of Quantum Physics and Quantum Information, USTC) ^[48]

(1) 概要

2001年、中国科学院（CAS）の一組織である中国科学技術大学（USTC）潘建偉教授研究室に、中国科学院が重点実験室の位置づけを与えて設立。全員が他研究機関に所属しつつ同研究部研究員も兼任。主要人員である約30人はUSTCの教授が大多数を占める。完全な空中統合広域量子通信システムを構築し、国防・国政分野で幅広い汎用性を牽引することを戦略的目標に掲げる。

(2) 組織

潘建偉がチーフサイエンティストとして部内全体の研究活動を統括している。特に量子科学実験衛星「墨子号」の打ち上げ（「5.その他」で詳述）に際しては、他研究機関の研究者を主任・チーム長に加えた「総合技術チーム」「統合実験チーム」が設置され、実験に関わる研究活動の組織化と調整が進められている。

(3) 主要な研究分野

量子力学、光ファイバーに基づく大都市間量子通信、衛星ベースの広域量子通信、量子ストレージと量子リレー、光量子コンピューティング、超伝導量子コンピューティング、超低温原子量子の基本原理

(4) 研究体制

所長（Director） 潘建偉（PAN Jian-wei）

教授 24名

副教授 1名

研究員 5名

特任研究員 1名

副研究員 4名

シニアエンジニア 3名

大学院生 172名

(5) その他

量子科学実験衛星「墨子号」の打ち上げ

2011年に中国科学院の戦略的先駆者科学技術プロジェクトによって特定された最初の5つの科学実験衛星の1つ。衛星-地上間（天地間）に長距離プラットフォームを構築し、量子力学の基礎物理学研究におけるブレークスルーと国際レベルの成果を達成するために設計された。宇宙での量子通信の実用化に向け、地上での高速量子鍵配信実験とそれに基づく広域量子鍵ネットワーク実験、宇宙規模での量子もつれ分布や見えない量子移動の実験、宇宙規模での量子力学の完全性の検証に関する実験研究を行うことが、同衛星の主な科学的目的である。以下が「四大実験」である。

- ・地球上や惑星上での高速量子鍵配信実験：高精度な捕捉・追跡・照準システムの支援を受けて、おとり状態に基づいた衛星・地上間の量子鍵生成・配布を行い、量子鍵を核とした衛星・地上間の絶対安全・極秘通信実験を実現する。
- ・広域量子通信ネットワーク実験：衛星-地上間の高速量子鍵配信を実現し、2つの光地上局とそれ

に接続された2つのローカル光ファイバー量子通信ネットワークを組み合わせ、衛星中継による広域量子通信ネットワークを形成する。

- ・衛星に搭載された量子もつれ光源が、もつれた光子を2つの光地上局に同時に分配し、その完了後に、もつれた光子に対して独立した量子測定を同時に行う。数千キロオーダーの量子もつれ状態を観測することで、宇宙スケールでの量子力学の完全性を確認する実験的な研究を行う。
- ・星-地上間の長距離の真の意味と、量子記憶装置の助けを借りた量子不可視状態の転送の実現可能性を探り、宇宙のような条件での量子力学的非決定性の実験的検証を完成させる。

量子超越性の実験検証

USTCの潘建偉研究グループは、超伝導量子コンピュータのプロトタイプ「祖冲之2号」(プログラムブル、66量子ビット)、および光量子コンピュータ試作機「九章2号」(実験専用機、光子113個)の二つの物理系で量子超越性を実験検証した(2021年11月2日付科技日報)。

合肥市マイクロスケール物質科学研究センターにおける量子技術研究の推進

合肥市マイクロスケール物質科学研究センター(NRCM)は、USTCに依拠して、科学技術省が2017年11月に設置認可した研究機関であり、潘建偉が「光・冷原子物理研究部」主任を務めている。光量子系のコヒーレントな操作、メゾスコピック系の量子光学、超低温原子・分子間の多体系相互作用、光と冷原子系に基づく精密測定の実験研究を進めている。

5.3.2 中国科学技術大学量子マテリアル・光子技術実験室

(中：中国科学技術大学 量子材料与光子技术实验室、英：Quantum Materials and Photonic Technology Laboratory, USTC)^[49]

(1) 概要

中国科学技術大学(USTC)量子機能材料研究グループを前身として陸亜林(LU Yalin)教授によって2016年正式に設立された。以来急速に発展し、現在、20人以上の研究者と約40人の大学院生が在籍する。高度な光学および電子分光特性評価技術により、マルチパラメータ複合量子機能材料を用いて、量子情報プロセス、エネルギー、環境の科学的フロンティアに対峙し、主要な量子の作成を実現、デバイス機能への機能性材料デモンストレーションのブレークスルーを目指す。

(2) 組織

中国科学技術部の承認で設置された研究センターや中国科学院の「研究院」からUSTCに委託された業務の実施機関。「量子情報・量子科学技術イノベーション研究センター(量子信息与量子科技创新研究院)」のほかに「マイクロスケール物質科学国家研究センター」「ハイエンド科学技術安徽省実験室プラットフォーム」からも業務を委託されている。

(3) 主要な研究分野

- ・高度な量子機能材料とデバイス
- ・多物理近接場分光技術
- ・高度な自由電子レーザー技術
- ・高度な放射光光源の物理設計

(4) 研究体制

所長 陆亚林 (LU Yalin)

副所長 王林 (WANG Lin)、孙喆 (ZHE Sun)、张国斌 (ZHANG G. B.)

教授 1名

准教授(副教授) 2名

研究員(准教授・副教授・研究員・副研究員) 11名

特任副研究員 2名

エンジニア 1名

ポスドク 6名

(5) その他

特記無し

5.3.3 中国科学院量子情報・量子科学技術イノベーション研究院

(中：中国科学院量子信息与量子科技创新研究院、英：CAS Center for Excellence in Quantum Information and Quantum Physics) ^[50]

(1) 概要

中国科技部が中国科学技術大学 (USTC) に委託し、「国家実験室」の方式で設置を先行探索中の機関。2016年8月25日、中国科学院と安徽省が「量子情報科学国家実験室建設連合会議」を設立、「協力協議書」に署名し、包括的なイノベーション協力協定を締結した。「量子協同イノベーションセンター (量子協同创新中心)」と「量子情報・量子科学技術センターオブエクセレンス (量子信息与量子科技前沿协同创新中心)」を統合し、2017年7月、合肥研究拠点の中核施設として安徽省とCASによって設立された。中国全土の大学、研究機関、関連企業の革新的要素と有利な資源の有効活用、USTCとの中国科学技術の共同構築を目的とする。

(2) 組織

理事会のもとに院長 (1名) が置かれ、院長のもとに「学術委員会」「産業と応用発展委員会」がある。「量子通信研究部」「量子コンピューティング研究部」「量子精密計測研究部」「エンジニアリングサポート部」の4つの研究ユニットが設置されている。

(3) 主要な研究分野

- ・量子情報・通信：量子情報科学・技術、量子ステガノグラフィ伝送、マルチノード・マルチレベル量子リレー、光ファイバー量子通信、長距離量子暗号鍵配送、量子中継、量子ネットワーク、超伝導量子ビット、冷却原子量子中継、量子誤り訂正、量子人工知能、量子機械学習
- ・量子精密計測、光格子時計、量子もつれ光、ダイヤモンド量子チップ、ナノ粒子
- ・トポロジカル物質、スピン系量子シミュレーション、トポロジカル不変量、トポロジカル量子相転移、トポロジカル励起などの重要な物理量・物理的性質の測定・観測の完成
- ・超伝導量子コンピュータ、量子アルゴリズム、量子回路、量子優位性、量子シミュレータ、半導体量子ドット、イオントラップ量子コンピューティング、光量子レーダー、量子ナビゲーション

(4) 研究体制

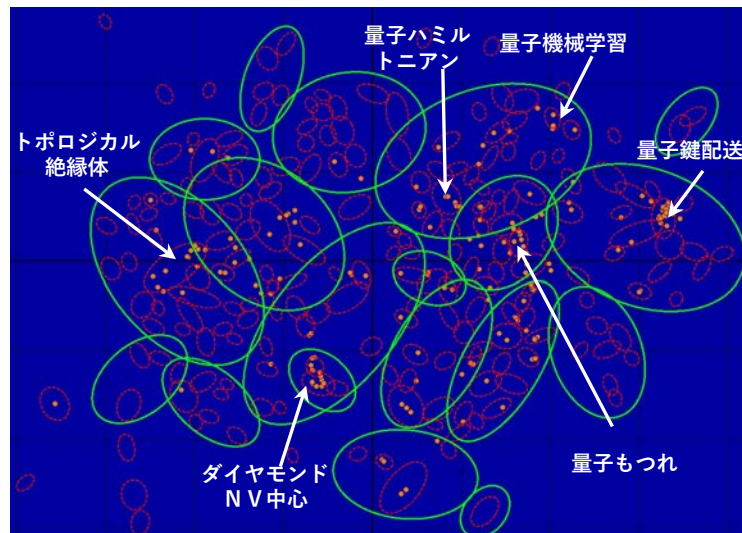
所長・理事長は潘建偉（PAN Jianwei）。共同イノベーションユニットには北京大学、清華大学、復旦大学、上海交通大学、南京大学、国防科学技術大学、浙江大学、北京航空航天大学、華東師範大学、北京計算科学研究センターなどの関連チームが参加している。合肥、上海、北京、済南、深圳などの地域で明確な分業体制を形成し、上級職560人以上の科学研究者をはじめ、基礎研究、技術開発、工学的応用に従事するその他科学研究者、計1,800人以上が所属する（2020年9月現在）。

(5) その他

2017年2月27日着工。総面積33.5万m²、累計4.5億元施工完成、累計13.5億元投資済。

2022年2月25日付で、中国科学院ソフトウェア研究所のチームは、北京中科弧光量子ソフトウェア技術有限公司の技術チームとの共同開発で、新しい量子コンピューティング・プログラミングソフトウェア「isQ-Core」を発表。中国科学院量子情報・量子科学技術イノベーション研究院の量子コンピューティングクラウドプラットフォーム（量子計算云平台）への展開に成功した。

(a) 中国科学院量子情報・量子科技创新研究院



(b) 中国科学院量子情報重点実験室

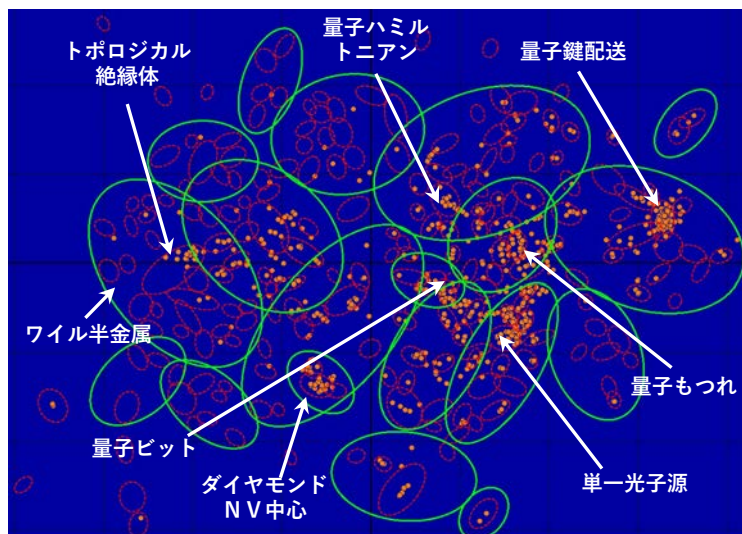


図5-2 注目研究機関の論文・特許マップ（1）

5.3.4 中国科学院量子情報重点実験室

(中:中国科学院量子信息重点实验室、英:CAS Key Laboratory of Quantum Information, USTC) ^[51]

(1) 概要

量子通信と量子コンピューティングの理論的・実験的研究に長年携わり、一連の世界クラスの独自の革新的な科学研究結果を産出、量子情報分野の才能の重要なトレーニング拠点の1つ。1983年設立の「中国科学院量子光学研究組」を前身とし、99年そのサポートで「中国科学技术大学量子通信及量子計算開放実験室(通称LQCC)」に改組。2001年に科学院の承認下で「中国科学院中国科学技术大学量子信息重点实验室」、05年に「中国科学院量子信息重点实验室」(英語表記は変更無し、中国語表記でUSTCが削除)と改名。

(2) 組織

中国科学技术大学(USTC)が管理するため所在地は安徽省合肥市キャンパス中に位置するが、行政的には中国科学院(CAS)の所属となっている。実験室は次の5つの研究ユニットから構成される。①固体量子コンピューティング、②量子もつれネットワーク、③量子統合光学チップ、④新しい量子暗号プロトコルおよび実用的量子デバイスの開発、⑤量子理論。

(3) 主要な研究分野

- ① GaAs半導体量子ドット、ノンドープGaAsおよびSiGeヘテロ接合量子ビットの作製と操作、超伝導キャビティに結合した半導体量子ドットによる複合量子ビットと多重量子ビット拡張、新二次元材料(グラフェン、TMDS)系を用いた量子デバイス作製と量子物理学研究
- ② パラメトリック光学システム、量子ドット、ソリッドステート量子ストレージ、イオントラップ、冷却原子システム
- ③ ダイヤモンド窒素空孔カラー、量子マイクロナノ光学技術、キャビティ光メカニクス
- ④ 新しい量子暗号プロトコル、量子暗号実用デバイス、安全な量子通信ネットワーク、量子暗号プロトコルのセキュリティ、量子暗号システム関連モジュール
- ⑤ 量子シミュレーションと多体物理学、冷却原子物理学、計算物性物理学と量子デバイス設計、量子光学と量子力学の基本原則

(4) 研究体制

所長 郭光灿(GUO Guangcan)

副所長 李传锋(LI Chuan-feng)、郭国平(GUO Guoping)

教授 16名

准教授(副教授)・研究員 9名

ポスドク 18名

(5) その他

2005年に世界初、実際の通信光路を介し125kmの単一ベクトルサブ鍵配送を実現した。09年に世界初の量子政府ネットワークを呉湖に建設した。11年に8光子の絡み合いを発生させた。同年、光子の偏光状態の固体量子貯蔵を初めて、99.9%の忠実度で世界最高水準を実現した。13年、光子軌道角運動量の量子貯蔵を冷却原子研究ユニットで初めて実現した。

5.3.5 中国科学院大学カブリ理論物理研究所

(中：中国科学院大学 卡弗里理论物理研究所、英：Kavli Institute for Theoretical Sciences) ^[52]

(1) 概要

中国科学院大学（UCAS）のKavli Institute for Theoretical Sciences（カブリ理論科学研究所、KITS）は、中国科学院（CAS）と米国のKavli Foundation（カブリ財団）からの基金およびUCASの共同支援を受け、2006年に設置された。世界に20あるカブリ研究所の一つとして、中国の理論物理学研究の促進と、物理学および関連する学際分野の国際プログラムの開催に重要な役割を果たしている。なお、はじめはCASの理論物理研究所（ITP）と連携し、Kavli Institute for Theoretical Physics, China（中国カブリ理論物理研究所、KITPC）として設立されたが、改組等が行われて今に至る。

(2) 組織

中国科学院の配下にあり、カブリ財団の資金提供を受けている。なお、中国科学院理論物理研究所は、①第一研究室、②第二研究室、③KITS、④理論物理学フロンティア重点研究室、の4つの機関を有しているようである。

(3) 主要な研究分野

理論物理学とそれに関連する学際的な科学（生物学、化学、地球科学などを含む）を実施していると記載があるのみで、上記の他の分野も横断した研究内容を実施していると推察される。

なお、上記①第一研究室は、素粒子論／量子場理論、物質の微細構造に関する研究、超弦理論／統一理論と初期宇宙の進化に関する研究、重力理論と天体宇宙論を研究。②第二研究室は、物性理論の研究、統計物理学・理論生物物理学の研究、バイオインフォマティクスの研究、量子物理学、量子情報、光と物質の相互作用の理論を研究。上記④理論物理学フロンティア重点研究室は、素粒子物理学・素粒子宇宙物理学・原子核物理学、超ひも理論・重力理論・宇宙論・統計物理学・理論生物物理学、物性物理学・量子物理学を研究。

(4) 研究体制

所長（Director） 张富春（ZHANG Fuchun）

中国科学院院士 19名

教授 4名

准教授 5名

助教授 7名

ポスドク 11名

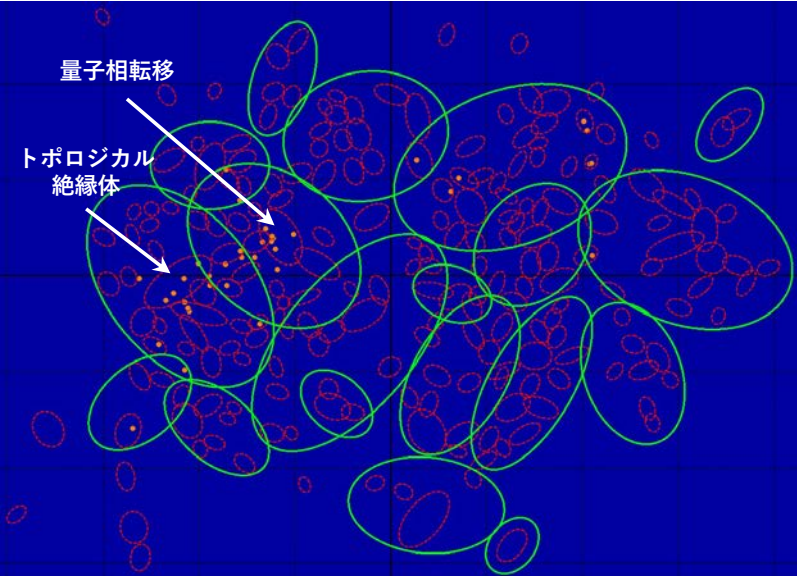
学生 12名

(5) その他

使命

理論科学における国際的な拠点としての地位を確立すること。理論物理学とそれに関連する学際的な科学に従事しており、ポストドクトラル・フェローシップ、ビジタープログラム、アウトリーチ・プログラム、準会員制度など様々な学術プログラムを実施している。

(a) 中国科学院大学カブリ理論物理学研究所



(b) 清華大学量子情報センター

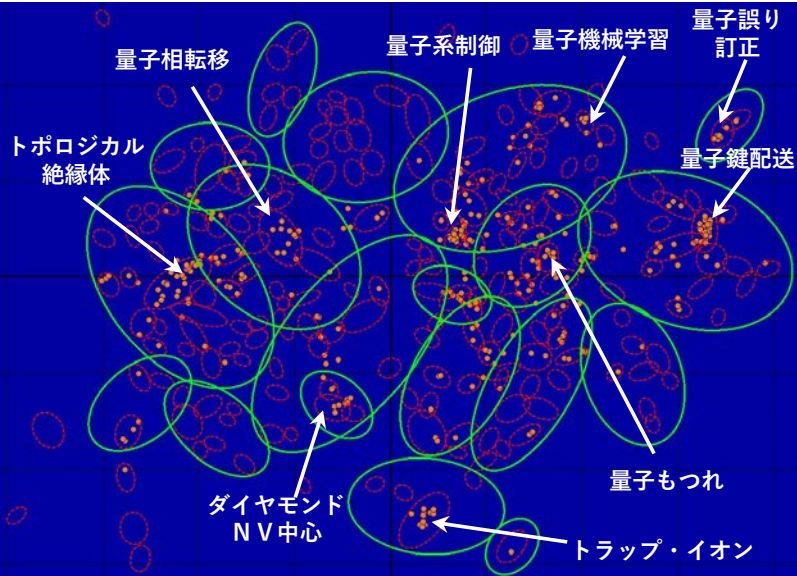


図5-3 注目研究機関の論文・特許マップ（2）

5.3.6 清華大学量子情報センター

(中：清华大学量子信息中心、英：Tsinghua University Center for Quantum Information) ^[53]

(1) 概要

清華大学量子情報センター（CQI）は、2011年1月6日に設立され、1月15日に清華大学FITビルのレクチャーホールで発足式が行われた。CQIは、2000年にチューリング賞を受賞した世界有数のコンピュータ科学者である姚期智（Andrew Chi-Chih Yao）教授が中心となり、中国における量子情報の教育と研究のための世界的なプラットフォームを構築することを目的としている。

(2) 組織

清華大学学際情報学研究院の下に位置する。

(3) 主要な研究分野

- ① 量子コンピューティングと制御理論：量子制御理論、量子計算理論、固体量子デバイスの理論、量子論理と量子情報の基礎
- ② 量子計算機と実験：超伝導量子コンピューティング、NMR量子コンピューティング
- ③ 量子デバイスと量子通信

なお、973 試験プロジェクト「完全量子ネットワーク」、教育部「清華量子情報センター建設」プロジェクト、科学技術部「量子コンピューティング重点研究開発プロジェクト」などの主要国家プロジェクトにも取り組んでいる。

(4) 研究体制

所長（Director） 姚期智（Andrew Chi-Chih Yao）

中国科学院院士 1名

教授 14名

助理教授 4名

研究員 1名

副研究員 3名

ポスドク 17名

(5) その他

関係機関に下記がある。

ITCS 理論計算機科学研究センター

CQI 量子情報センター

CTCS 清華大学-MIT-香港中文大学 理論計算機科学研究センター

JCQI 清華・ミシガン・量子情報共同センター

CTIC 清華-オーストラリア インタラクティブ計算理論センター

JCQC 清華・ウォータールー量子コンピューティング共同センター

5.3.7 清華大学学際情報学研究院

(中：清华大学交叉信息研究院、英：Institute for Interdisciplinary Information Sciences, Tsinghua University) ^[54]

(1) 概要

2011年1月設立、中国初の学際情報学研究に特化した研究・教育ユニット。IIISは、2000年にチューリング賞を受賞した世界有数のコンピュータ科学者である姚期智（Andrew Chi-Chih Yao）教授が中心となり、中国における世界最高水準の学際情報学研究機関を構築し、国際競争力のある革新的人材を育成することを目的としている。

(2) 組織

下に幾つかの研究教育部局・産学連携部局を置く。2005年設立の「清華学堂コンピュータ科学実験教室（姚班）」と2019年設立の「清華学堂人工知能教室（智班）」および2021年設立の「清華学堂量子情報教室（量信班）」はそれぞれ、コンピュータ科学と人工知能（AI）および量子情報分野の人材育成拠点として地位を確立。研究教育部局としてはほかに、「CQI」量子情報センターと「IFTI」インテリジェント・フィンテック研究所が、産学連携部局としては 清華大学-南京大学 学際知能共同研究センター、清華大学・西安大学 学際情報学共同研究センター、清華大学-Ant デジタル・フィンテック金融共同研究室、清華大学・西安大学 学際金融工学共同研究センターがある。

(3) 主要な研究分野

- ① 量子光学
- ② 量子通信：量子中継器のコア・アクセラレーション・ステップの実現
- ③ 超伝導量子コンピューティング：超伝導量子回路を用いたボゾニック量子誤り訂正符号
- ④ 実践的な（実用的な）量子情報研究：一般化された安定な量子もつれ状態の効率的な生成と検出
- ⑤ 量子人工知能
- ⑥ トポロジカル物性物理学

(4) 研究体制

所長（Director） 姚期智（Andrew Chi-Chih Yao）

中国科学院院士 1名

教授 7名（うち兼任教授3名・訪問教授1名・名誉客員教授1名）

助理教授・副教授 29名

研究員 1名

助理研究員・副研究員 8名

エンジニア（実験員） 3名

ポスドク 11名

(5) その他

近年の研究成果

単一イオンの量子相転移を初めて観測、単一イオンの量子相転移を初めて観測、量子中継器のコア・アクセラレーション・ステップの実現、超伝導量子回路を用いたボゾニック量子誤り訂正符号、一般化された安定な量子もつれ状態の効率的な生成と検出、超伝導システムを用いた5ビット量子誤

り訂正符号の実験的研究、デバイスに依存しない量子乱数拡張、信頼できないデバイスを用いたコヒーレンス・メトリクス の推定、量子機械学習最適化のための神経進化アルゴリズムの適用、高次のトポロジカルアンダーソン絶縁体の初発見、構造の乱れが引き起こす3次元の2次トポロジカル絶縁体を初発見

大学院教育

学際情報学研究院IIISには、博士課程188名、修士課程42名の計230名の大学院生が在籍。2021年6月現在、109名の博士号取得者と61名の修士号取得者を育成。36人のハイレベルな海外人材を擁し、様々な研究分野のリーダーや将来を担う若手人材として育成中。

学部教育

学際情報学部・学際情報学研究科には現在、学部生266名、大学院生195名の約400名のフルタイム学生が在籍（世界各国からの10名の留学生を含む）。「量子情報教室」は、「コンピュータ科学実験教室」と「人工知能教室」が培った先進的な教育理念とマネジメント経験を融合させ、量子情報分野における国際的なトップ人材の育成を目指す。

5.3.8 北京量子情報科学研究院

(中:北京量子信息科学研究院、英:Beijing Academy of Quantum Information Sciences (BAQIS))^[55]

(1) 概要

2017年12月24日に設立された北京量子情報科学院（BAQIS）は、首都北京を代表する量子研究拠点として、北京市が清華大学、北京大学、中国科学院など、北京市内の複数のトップ学術機関と共同で設立した新しいタイプの研究開発機関。世界における量子物理学と量子情報科学技術の最前線に立ち、量子情報技術分野における国家の戦略的ニーズに応えるために、量子物質科学、量子コンピューティング、量子コミュニケーション、量子材料・デバイス、量子精密測定などの分野における北京の既存のリソースを統合し、量子情報科学技術の包括的な実験・研究開発プラットフォームを構築、世界中から優れた科学技術者とその革新的チームを集めるとしている。

(2) 組織

BAQISは5つの研究部（量子物性科学研究部、量子材料・デバイス研究部、量子計算研究部、量子通信研究部、量子精密測定研究部）と、各研究部を支援する2つのプラットフォーム（ナノ加工プラットフォーム、総合測量試験プラットフォーム）、および量子工学研究部とからなる。指導部は、理事会、評価委員会、監査委員会、院長、技術委員会等で構成されている。技術・産業開発センターは、産学連携、技術移転と実用化をミッションとしている。

(3) 主要な研究分野

BAQISは、「量子状態」「量子計算」「量子通信」「量子材料・デバイス」「量子精密測定」の5つの主要研究分野と、これらの研究を支援するための2つの実験プラットフォームに注力している。

- ① 量子科学の状態：トポロジカル量子材料と物理学、超伝導材料と物理学、量子磁性材料と効果、量子マイクロナノ構造処理
- ② 量子コンピューティングとコミュニケーション：トポロジカル量子コンピューティング、イオントラップ量子コンピューティング、カラーセンター量子コンピューティング、超伝導量子コンピューティング、冷原子量子コンピューティング、量子通信、コンピューティング理論

- ③ 量子材料とデバイス：量子電子デバイス、量子オプトエレクトロニクスデバイス、単一光子源および検出
- ④ 量子精密測定：超高感度慣性測定、超高精度磁場測定、高精度重力測定、時間周波数測定、量子ナビゲーション、量子センシングなど。
- ⑤ 先進ナノ加工プラットフォーム：材料の準備、デバイスの製造、チップの設計
- ⑥ 総合試験プラットフォーム：主に超伝導量子コンピューティング、量子通信、物性測定の分野で測定・制御を行っています。

(4) 研究体制

院長（President） 薛其坤（XUE Qikun）、向涛（XIANG Tao）

研究者 112名（うちPIは17名）

エンジニア 54名

ポスドク 49名

管理スタッフ 34名

(5) その他

連携機関

BAQISは設立の経緯から、清華大学、北京大学、中国科学院物理研究所（IOPCAS）、中国科学院半导体研究所（ISCAS）、中国科学院大学（UCAS）、Baidu Ltd. Co.などの協力機関と研究者の人的交流などで連携

理事会

理事会は、11人いる副市長の科学技術担当、靳偉（JIN Wei）が主宰。院長のほか、市政府副事務総長、量子アカデミー副会長、市立科学技術委員会党指導部グループ書記などが出席。中関村管理委員会、市立科学技術委員会、南科学技術大学、中国科学院物理研究所、軍事科学アカデミー、中国科学院工学物理学研究科などからも参加。

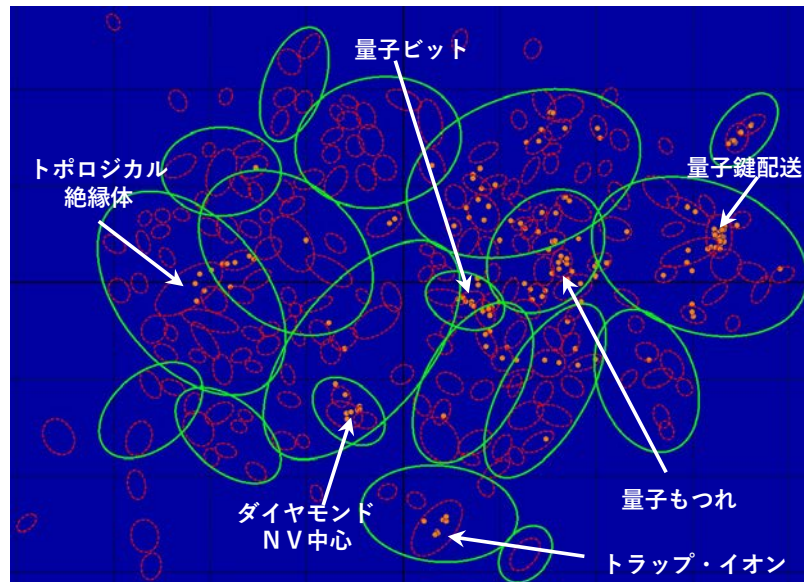
予算関連情報

北京市からの財政支援は6億元近くに達している。実験装置の価値は約3億元。

量子物理・量子情報科学に関する国際フォーラム

2021年12月に「第3回量子物理学と量子情報科学に関する国際フロンティアフォーラム」（QPQIS2021）を開催し、中国、米国、日本、ドイツ、オランダ、ベルギーを含む6か国19人の国際的に著名な学者が、「量子コンピューティングの基礎研究の最新動向」をテーマに議論。日本からは中村泰信、樽茶清悟、山本喜久各氏が参加。

(a) 清華大学学際情報学研究院



(b) 北京量子情報科学研究院

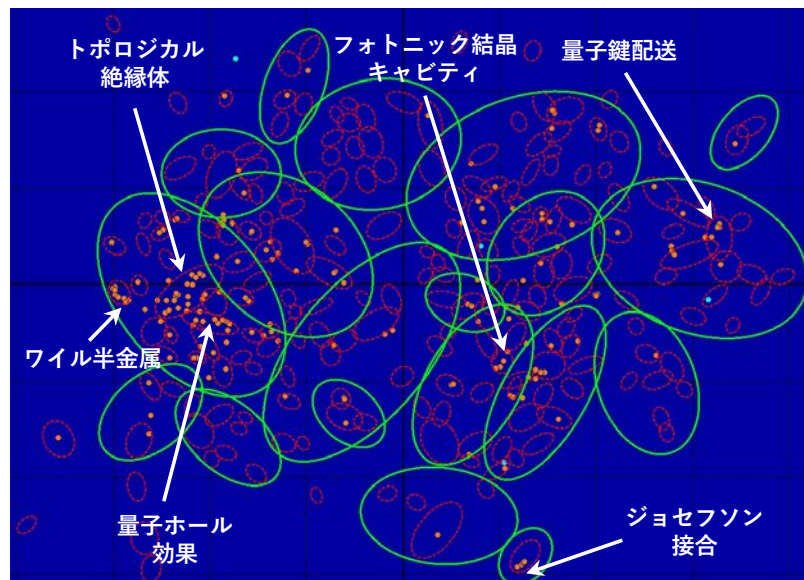


図 5-4 注目研究機関の論文・特許マップ (3)

5.3.9 北京大学量子材料科学センター

(中：北京大学量子材料科学中心、英：International Center for Quantum Materials, Peking University (ICQM PKU))^[56]

(1) 概要

北京大学量子材料科学センター (ICQM) は、物性物理学と量子材料科学のフロンティア問題を研究するため2010年に設立された。基礎研究のための学術基盤を築き、量子科学に基づく高度技術開発を促進するため、最先端の実験施設の導入など世界水準の技術を取り入れることで、国際的な影響力を持つ研究チームを育成することを目指している。

(2) 組織

ICQMでの研究は、研究関心と専門知識に応じて、①低温および量子輸送実験②スピントロニクスと低次元磁性実験③高分解能分光実験④AMO実験と精密測定⑤理論的な物性物理学⑥計算物理学の6部門に編成されている。傘下には17の実験研究所と、物理特性測定のための公的支援研究所、ナノ微細加工の公的実験プラットフォーム、ヘリウムセンターを有している。

(3) 主要な研究分野

量子材料科学センターは、物性物理学と量子材料科学を主な研究対象とし、上述の通り

- ① 低温および量子輸送実験
- ② スピントロニクスと低次元磁性実験
- ③ 分光法と高分解能検出実験
- ④ AMO実験と精密測定
- ⑤ 物性物理学理論
- ⑥ 計算物性物理学

の6分野に焦点を当てている。具体的な研究の方向性としては、量子ホール効果、物性物理学におけるトポロジ効果、関連する電子現象、低次元電子ガスにおける量子挙動、スピントロニクス、ヘテロ構造の物理的性質、メゾスコピック超伝導、高度な走査探針顕微鏡、中性子および光子散乱分光法、表面ダイナミクス、ナノ材料やデバイスの超高速ダイナミクス実験、超低温原子ガス、超高压条件下での物質物理学、水の特性の研究、軟質材料の研究などが挙げられている。

現在の研究活動のトピックとしては特に、量子輸送、強相関電子システム、低次元量子システム、物性物理学におけるトポロジ効果、メゾスコピック超伝導システム、スピントロニクス、高度な走査型トンネル顕微鏡、超高速分光法、中性子分光法、超低温などが強調されている。

(4) 研究体制

センター長 (Director) 王楠林 (WANG Nanlin)

教職員 41名 (教授14名、准教授6名、助教9名、研究員3名、関連教員9名)

研究技術スタッフ 2名

ポスドク 36名

管理スタッフ 13名

大学院生 29名 (2016)、29名 (2017)、30名 (2018)、34名 (2019)、42名 (2020)、39名 (2021)

(5) その他

北京大学ダニエルチーツイ研究所との連携

2012年6月、北京大学はノーベル物理学賞受賞者の崔琦（CUI Qi）教授（Daniel Chee Tsui、中国河南省出身、米国籍）を終身教授として採用し、教授の名にちなんでCuiQi研究所を設立。極端な条件下での低次元量子材料の研究に焦点。

対米連携

ライス大学、テキサス大学オースティン校、ペンシルバニア州立大学などの世界的に有名な機関との間で連携協定が結ばれている。

受賞

研究所メンバーのうち、2人がCAS院士に選出され、3人が中国教育部の「長江学者奨学金」に選ばれ、1人が「揚子江プログラム」に選出された。また、若手10名が全米科学アカデミー優秀若手奨学生に選ばれ、4名が国家資金委員会の優秀青年基金プロジェクト、2名が北京優秀青年基金、1名が組織部の「ヤングトップタレントサポートプログラム」に選出された。

若手のトレーニングを重視

量子材料科学センターは、ポスドクや大学院生など若い学者のトレーニングを重要視。現在14名のポスドク研究員がおり、その多くが関連分野で重要な進歩を遂げている。151名の大学院生は全員が国内の著名な大学から来ており、科学研究に高い熱意を持っている。センターは、学習、コミュニケーション、科学研究のための優れたプラットフォームを提供するだけでなく、サマーキャンプ、サマースクール、学術講演会などを通じて、物性物理学の最先端のトピックについて学ぶ機会を提供。

論文成果・資金受領・受賞

量子材料科学センターは設立以来、質の高い科学研究成果を数多く生み出しており、国際的に注目を集めている。2019年12月の時点で、センターは900を超えるSCI論文を発表しており、その多くはScience、Nature、Physical Review Lettersなどの主要な国際学術雑誌に発表されている。センター教員は、40以上の科学研究プロジェクトを主導し、科学技術部の「973プログラム」、NSFCなどから合計4億元以上の科学研究資金を得ている。センター教員の業績は、Ho Leung Ho Lee賞、アジア計算材料科学賞、Tan Kah Kee科学賞、中国物理学会業績賞、真実を求める優秀な若手研究者賞、サー・マーティン・ウッド・チャイナ物理科学賞、国際純粋応用物理学連盟の若手科学者賞など、内外の科学関連賞を受賞している。

5.3.10 南方科学技術大学深圳量子科学・工学研究院

(中: 深圳量子科学与工程研究院、英: Shenzhen Institute for Quantum Science and Engineering) ^[57]

(1) 概要

南方科学技術大学内に建設され、管理下にある研究機関。2017年初頭に発表された国家重点発展戦略で示された量子技術を扱う「十大基礎研究機関」の最初の3つとして2018年1月、深圳市に設置された。量子マテリアル研究の第一人者である俞大鵬を中心に、量子情報技術の研究と人材育成に注力している。

(2) 組織

施設設備の委託を南方科学技術大学に、意思決定を深圳市の基礎研究機関理事会に置いており、研究院院長はこの両者を統括する。科学研究部門に「量子マテリアル」「量子精密測定」「量子コンピューティング」「量子工学」の四つを置いている。

(3) 主要な研究分野

- ① 量子マテリアル
- ② 量子シミュレーション、量子計算
- ③ 量子トポロジカル状態理論
- ④ 量子精密測定、量子通信
- ⑤ 量子力学と量子制御：1. 超伝導量子コンピューティングとマルチビット量子システムの操作（省の主要プロジェクト）2. 量子ドットやビットの量子制御（深圳孔雀隊）

(4) 研究体制

院長（Director） 俞大鵬（YU Dapeng）

中国科学院院士 1名

教授 11名

助理教授・副教授・副研究員 39名

助理研究員・研究助理教授 30名

(5) その他

進行中の研究プロジェクトには下記がある。

- ① 2016年7月～2021年6月 中国科学技術部国家重点研究開発計画／量子制御・量子情報に関する重点特別プロジェクト：スピン波エレクトロニクス of 物理・材料・デバイス
- ② 2013年1月～2017年12月 中国国家自然科学基金の重点プロジェクト：曲げ歪みによる低次元人工マイクロ構造の電子構造、光学および電気特性の変調
- ③ 2017年7月～2022年6月（予定）「広創」チーム：量子科学・工学チーム
- ④ 2017年1月～2021年12月 広東自然科学基金の主要な基礎栽培：超伝導量子ビットに基づく量子コンピューティング、量子シミュレーションおよびアプリケーション
- ⑤ 2017年7月～2019年6月 深圳量子科学工学重点実験室
- ⑥ 2017年7月～2019年6月 Shenzhen Discipline Layout: 超伝導量子線に基づく量子コンピューティングと量子シミュレーションの研究

5.4 注目企業

5.4.1 浙江神州量子通信技术有限公司

(中：浙江神州量子通信技术有限公司)

(1) 概要

所在地 浙江省嘉兴市桐乡市高橋街道高橋大道1156号3幢18楼

資本金 8,500 万人民币元

法定代表人 裘高尧

会社規模 50人未満

起業年 2015/11/10

被保険者数 14人

(2) 組織・業務内容

業務内容として、量子通信のバックボーン、ウェブサイトの構築・運営、付加価値通信事業、量子通信技術、一般量子技術、情報システム技術の技術開発、技術サービス、技術相談、技術成果の移転、ネットワーク通信セキュリティのソフトウェア・ハードウェア製品の開発、コンピュータシステムインテグレーションサービス、量子通信エンジニアリングの構築・総合請負、量子通信、古典通信、ネットワークセキュリティのハードウェア・ソフトウェアシステムの販売、電子製品の販売、工業デザインがある。

(3) その他

株主

浙江东方金融控股集团股份有限公司、浙江神州量子网络科技有限公司、桐乡市科技创业园管理服务有限公司

役員

(董事长) 裘高尧、(经理) 丁伟千、(董事) 富尧、谈志彬、(监事) 钱欣、侯卫琴、(监事会主席) 陈博

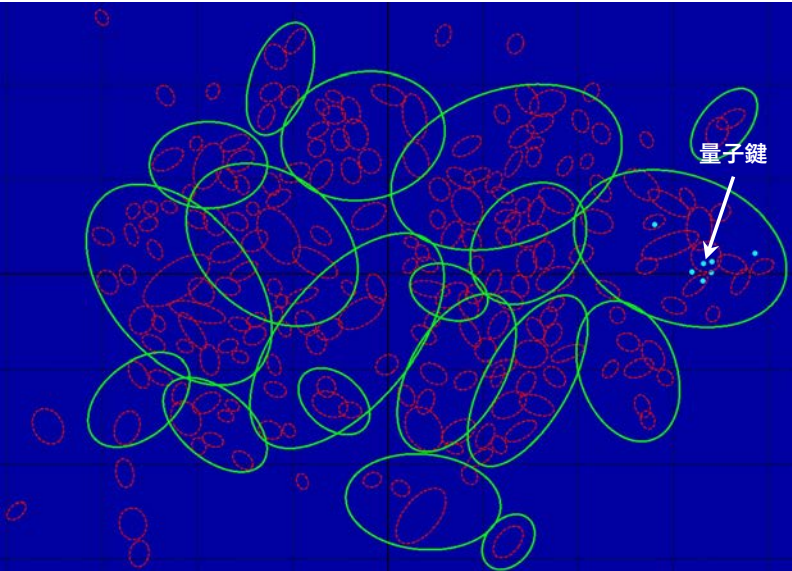
対外投資先

桐乡量启投资管理有限公司

訴訟案件

5

(a) 江神州量子通信技術有限公司



(b) 安徽問天量子科技株式会社

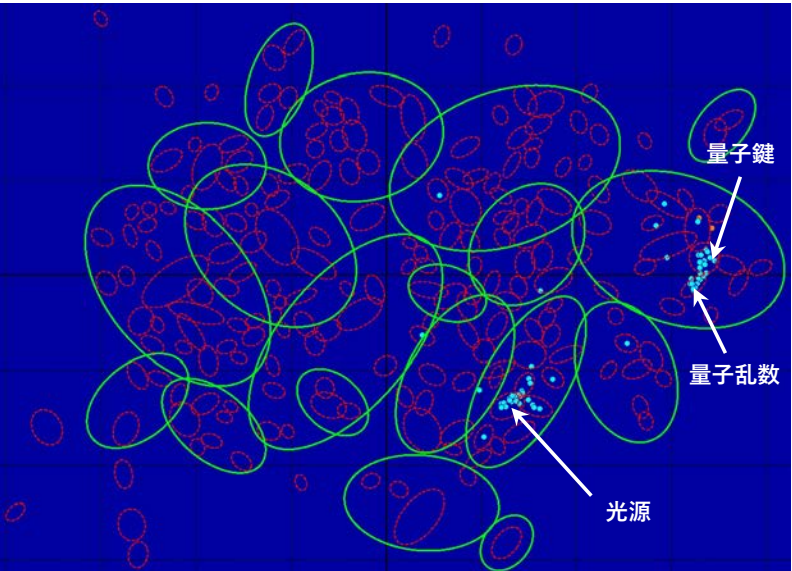


図5-5 注目企業の論文・特許マップ（1）

5.4.2 安徽問天量子科技株式会社（Qasky）

（中：安徽問天量子科技股份有限公司、英：Anhui Qasky Quantum Technology Co. Ltd.）

（1）概要

所在地 安徽省芜湖市高新技术产业开发区峨山路宇盛商务中心

資本金 5,854 万人民币元

法定代表人 韩正甫

会社規模 100-199 人

起業年 2009/7/15

被保険者数 114 人

（2）組織・業務内容

研究開発チーム

同社は郭光灿院士を筆頭とし、現在、アカデミックワークステーション、省の量子安全工学技術研究センター、蕪湖と合肥の2つの研究開発センター、量子情報イノベーションプラットフォームを構築しており、180人以上の従業員を擁している。その中には、アカデミックワークステーションの学術担当者1人、蕪湖と合肥の研究開発センターの90人以上の研究開発スタッフ、2人のポスドク、6人の博士号取得者、34人の修士号取得者以上の人材が含まれている。

テクニカルサポートチーム

中国科学院量子情報重点实验室：60名以上の教員とポスドク、180名以上の博士課程の学生、中国科学院院士1名、国家優秀青年8名、百人計画メンバー3名、青年千人メンバー1名、国家優秀青年13名、973プロジェクトの主任科学者4名、若い一流人材2名が研究と技術サポートを行っている。

（3）その他

株主

宁波梅山保税港区徽缘投资管理合伙企业（有限合伙）、中科大资产经营有限责任公司、芜湖远大创业投资有限公司、韩正甫、郭光灿、张楷、北京天融信网络安全技术有限公司、深圳润信新观察战略新兴产业私募股权投资基金合伙企业（有限合伙）、伊犁苏新投资基金合伙企业（有限合伙）、美石财富（北京）投资基金有限公司、张淑媛、深圳鼎盛金汇投资管理合伙企业（有限合伙）、杨祝芳、安徽安华创新风险投资基金有限公司、王雪芹、陈巍、刘云、南京道丰投资管理中心（普通合伙）

役員

（董事长）韩正甫、（董事）邢晖、喻敏、陈凌、郭光灿、刘云、张岚、（监事）王俊宝、伍运飞、黄敦锋

对外投资先

合肥量芯科技有限公司、安徽问天智能科技有限公司、中科问天量子科技（天津）有限公司、沈阳问天量子科技有限公司、问天中京（北京）科技有限公司、问天鼎讯量子科技（无锡）有限公司、江苏亨通问天量子信息研究院有限公司、问天燃阳量子（福州）科技有限公司、安徽中辰新能源科技股份有限公司

訴訟案件

8

5.4.3 国家電網有限公司

(中：国家电网有限公司、英：State Grid Corporation of China)

(1) 概要

所在地 北京市西城区西长安街86号

資本金 8,295 億人民元

法定代表人 辛保安

会社規模 900-999 人

起業年 2002/12/29

被保険者数 968 人

(2) 組織・業務内容

国家电网有限公司は、中央政府直轄の完全国有企業である。2021年には、「フォーチュン・グローバル500」の第2位に選ばれた。過去20年間、世界で最も長く安全なメガグリッドの記録を打ち立て続け、数々の超高压送電プロジェクトを建設し、送電容量では世界最強の電力網、新エネルギーの送電網接続では最大規模の送電網となった。フィリピン、ブラジル、ポルトガル、オーストラリア、イタリア、ギリシャ、オマーン、チリ、中国・香港など9つの国と地域で基幹エネルギーネットワークへの投資と運営を行っており、国務院国有資産監督管理委員会の業績評価では17年連続でAランク、国際的な3大格付機関であるスタンダード&プアーズ、ムーディーズ、フィッチの3社からは9年連続で国家ソブリン格付けを受けている。

(3) その他

株主

国务院国有资产监督管理委员会

役員

(董事长) 辛保安、(董事) 王丽丽、陈津恩、丁中智、刘广迎、黄德林、牛越生、(监事) 晏小刚、丁勇、金莹、刘光、周建军、(监事会主席) 李志群

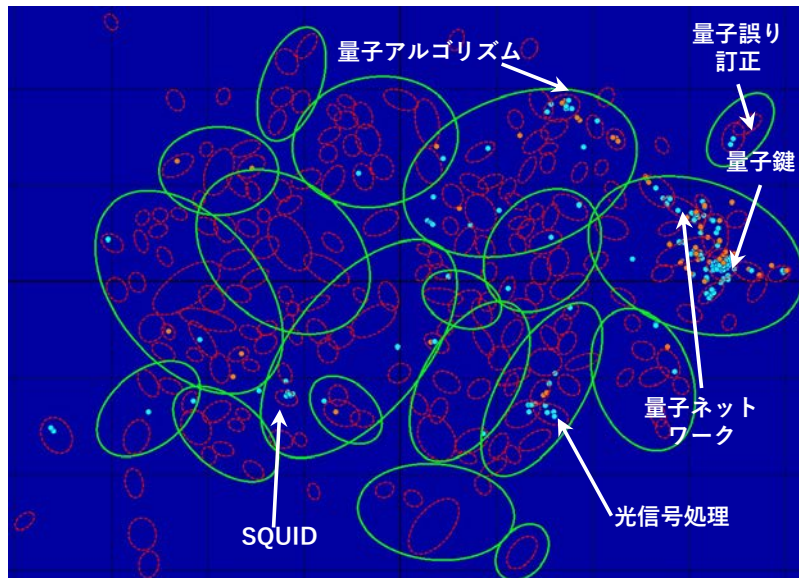
对外投资先

国网上海市电力公司、国网江苏省电力有限公司、华北电网有限公司、国网湖北省电力有限公司、国网山东省电力公司、国网辽宁省电力有限公司、国网四川省电力公司、国网浙江省电力有限公司、国网安徽省电力有限公司、国网重庆市电力公司、ほか全75社

訴訟案件

198

(a) 国家电网有限公司



(b) アリババグループ

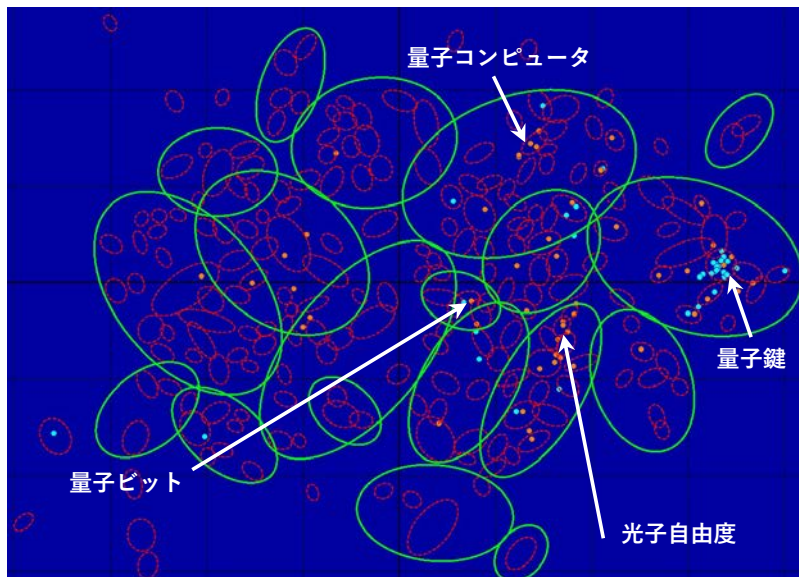


図5-6 注目企業の論文・特許マップ (2)

5.4.4 アリクラウド計算有限公司

(中：阿里云計算有限公司、英：Alibaba Cloud Computing)

(1) 概要

所在地 浙江省杭州市西湖区转塘科技经济区块12号

資本金 100,000万人民币元

法定代表人 张建锋

会社規模 1000-1999人

起業年 2008/4/8

被保険者数 1,112人

(2) 組織・業務内容

Alibaba Cloud Computingは、世界最大のeコマース企業の1つであるAlibaba Groupのビジネスである。また、エコシステム内の売り手やその他のサードパーティに包括的なクラウドコンピューティングサービスを提供している。2015年7月30日に中国科学院との量子分野における共同研究に関する署名を発表した。新しい研究所は、古典的なコンピューティングアルゴリズム、アーキテクチャ、クラウドコンピューティングにおける技術的利点と、量子コンピューティングとシミュレーション、および量子人工知能における中国科学院の利点を組み合わせて、次世代の超高速を探索するといったことを目的としている。

(3) その他

株主

杭州臻希投资管理有限公司

役員

(董事长兼总经理) 张建锋、(董事) 徐宏、蒋芳、(监事) 冯云乐

对外投资先

广州阿里云计算应用技术有限公司、浙江猫精人工智能科技有限公司、浙江数蜂科技有限公司、阿里云(上海)云计算有限公司、杭州阿里巴巴智慧城市信息技术有限公司、阿里云计算(海南)有限公司、深圳阿里云计算技术有限公司、杭州耘点科技有限公司、杭州端点网络科技有限公司、北京同桌游戏科技有限公司

訴訟案件

839

5.4.5 中国科学技術大学国盾量子技術有限公司

(中：科大国盾量子技術股份有限公司、英：QuantumCTek)

(1) 概要

所在地 安徽省合肥市高新区望江西路800创新产业园D3楼1、3、4、5、6、7层

資本金 8,000 万人民币元

法定代表人 彭承志

会社規模 (不明)

起業年 2009/5

被保険者数 232人

(2) 組織・業務内容

国盾量子は、商業化された量子情報技術（QIT）の中国のパイオニアかつリーダーであり、QIT対応のICTセキュリティ製品およびサービスの世界最大のメーカーおよびプロバイダーの1つになっている。国盾量子は、継続的なイノベーションと量子科学およびテクノロジーのオープンコラボレーションに基づいて、テレコムインフラストラクチャ、エンタープライズネットワーク、クラウドコンピューティング、およびビッグデータテクノロジーとサービスにおける量子セキュアソリューションの競争力のあるQITポートフォリオの提供に取り組んでいる。国盾量子のソリューション、製品、およびサービスは、政府、金融、エネルギー業界などで使用されており、多数のユーザーに長期的な量子安全性を保証している。これまでに1,000を超える量子セキュア製品が製造され、6000kmを超える通信リンクを保護している。

(3) その他

株主

中科大资产经营有限责任公司、潘建伟、中国科学院控股有限公司、安徽润丰投资集团有限公司、合肥琨腾股权投资合伙企业（有限合伙）、杭州兆富投资合伙企业（有限合伙）、程大涛、天津君联林海企业管理咨询合伙企业（有限合伙）、柳志伟、王根九、ほか

役員

(董事长) 彭承志、(副董事长) 王兵、赵勇、(董事) 应勇、张军、张莉、(独立董事) 徐枏巍、张珉、李姚矿、(监事会主席) 张爱辉、(监事) 张岚、耿双华、(总裁) 应勇、(董事会秘书, 副) 张军、(总裁, 财务总监) 唐世彪、(副总裁) 何炜、彭承志

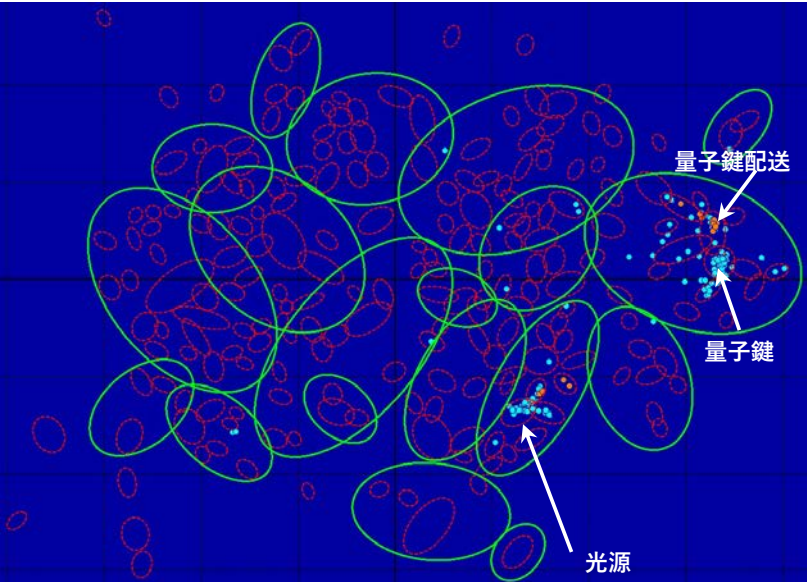
対外投資先

(不明)

訴訟案件

10

(a) 国盾量子



(b) 山東量子科学技術研究院有限公司

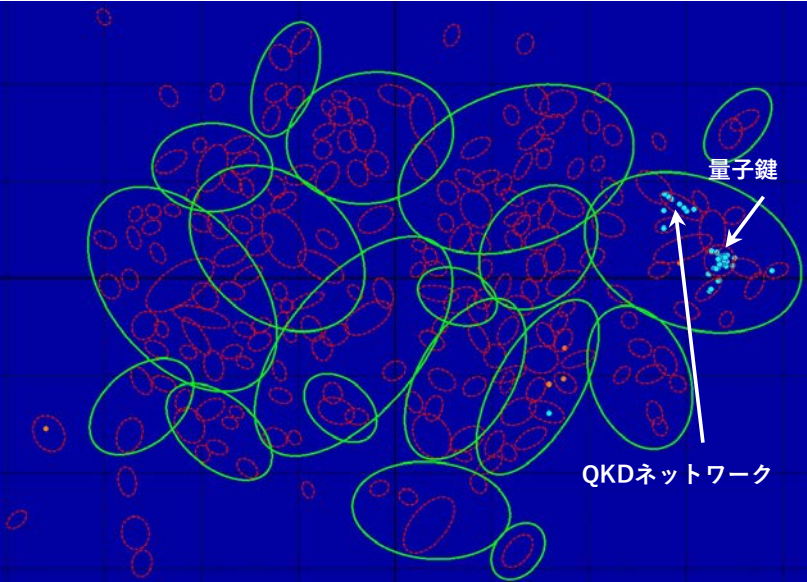


図5-7 注目企業の論文・特許マップ（3）

5.4.6 山東量子科学技術研究院有限公司

(中：山東量子科学技術研究院有限公司、英：Shandong Institute of Quantum Science and Technology Co., Ltd)

(1) 概要

所在地 山东省济南市高新区新泺大街1768号齐鲁软件园大厦B座7层

資本金 7,049.06万人民币元

法定代表人 赵勇

会社規模 50-99人

起業年 2010/3/2

被保険者数 65人

(2) 組織・業務内容

山東量子科学技術研究所は、山東省政府と中国科学技術大学の間の戦略的協力に基づいた機関である。自社開発の量子セキュア通信システムおよび光電子デバイスシリーズ製品は、政府、金融、政治の分野で広く使用されており、法律および情報セキュリティのニーズが高い電気、運輸、その他の業界にまで展開されている。現在、山東省企業アカデミックワークステーションと州工学技術研究センターを設立し、「ハイテク企業」、「ソフトウェア企業」、CMMI L4、品質管理システム、情報システム統合、サービスの3レベルの資格に合格している。多数の国家「863」計画、主要な州レベルの科学研究プロジェクト、州レベルの戦略的新興産業プロジェクト、および州レベルの科学技術革新プラットフォームの構築に着手しており、独立した知的財産権を持つ技術や製品の数、国内業界で一番多い。

関係機関には中華人民共和国科学技術部、中国科学技術大学、山東省科学技術部、山東情報通信技術研究所、済南量子技術大学、科学技術大学国盾量子技術株式会社がある。

(3) その他

株主

科大国盾量子技术股份有限公司

役員

(执行董事兼总经理) 赵赵勇、(监事) 张军

对外投資先

(不明)

訴訟案件

0

5.4.7 合肥本源量子計算科技有限公司

(中：合肥本源量子計算科技有限责任公司、英：Origin Quantum)

(1) 概要

所在地 合肥市高新区创新大道2800号创新产业园二期E2楼六层

資本金 627.3767 万人民币元

法定代表人 张辉

会社規模 100-199 人

起業年 2017/9/11

被保険者数 100 人

(2) 組織・業務内容

中国における量子コンピューティングのリーディングカンパニー。合肥ハイテクゾーンに本社を置き、北京、上海、成都、深圳に支社がある。同社の技術は、中国科学院量子情報重点実験室が起源。量子コンピュータの研究開発、普及、応用に焦点を当て、量子コンピュータのフルスタック、各種ソフトウェア、ハードウェア製品の開発に注力し、中国の技術指標をリード。400件以上の知的財産権の成果を上げている。2020年9月、量子コンピューティングの科学研究から工学実装までの第一目標を完成し、国内の独立制御可能な超伝導量子コンピューティングクラウドプラットフォームをリリースし、量子コンピューティング産業実装の目標に向かって進んでいる。関係者に郭光灿、郭国平、张辉、孔伟成、赵勇杰、贾志龙、陈昭昀、がいる。

(3) その他

株主

郭国平、中科大资产经营有限责任公司、合肥亿斯特立股权投资合伙企业（有限合伙）、郭光灿、陕西先导光电集成科技投资合伙企业（有限合伙）、合肥博瑞精思企业管理合伙企业（有限合伙）、中国互联网投资基金（有限合伙）、宁波保税区歆瑞企业管理合伙企业（有限合伙）、青岛中科科航基金管理中心（有限合伙）、天津中关村磐谷图灵股权投资基金合伙企业（有限合伙）、李海欧、曹刚、中金祺智（上海）股权投资中心（有限合伙）、南京哈工企赋科技有限公司、成都创新风险投资有限公司、合肥高新产业投资有限公司、建银国际产业投资（珠海）有限公司、佛山德盛天林股权投资合伙企业（有限合伙）、合肥聚高圣科技合伙企业（有限合伙）、珠海中以英飞新兴产业投资基金（有限合伙）、上海正枢量子科技有限公司、广西自贸区科创启园投资中心（有限合伙）、南京量硅股权投资合伙企业（有限合伙）、深圳市嘉远投资合伙企业（有限合伙）、深圳翼龙创业投资合伙企业（有限合伙）、济南山麒麟股权投资合伙企业（有限合伙）

役員

(董事长) 孔伟成、(总经理) 张辉、(董事) 赵勇杰、贾志龙、张涛、张超、喻敏、张岚、(监事) 周好好、朱美珍、陈静鹤、杨夏、吴江

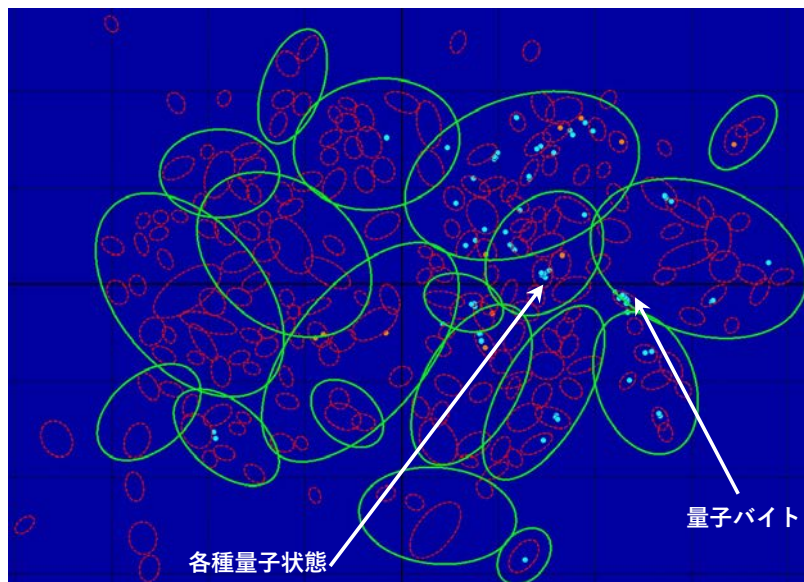
对外投资先

本源科仪（成都）科技有限公司、深圳本源量子云计算科技有限公司、合肥本源精密科技有限责任公司、合肥本源物联网科技有限公司

訴訟案件

(不明)

(a) 合肥本源量子計算科技有限公司



(b) 百度量子コンピューティング研究所

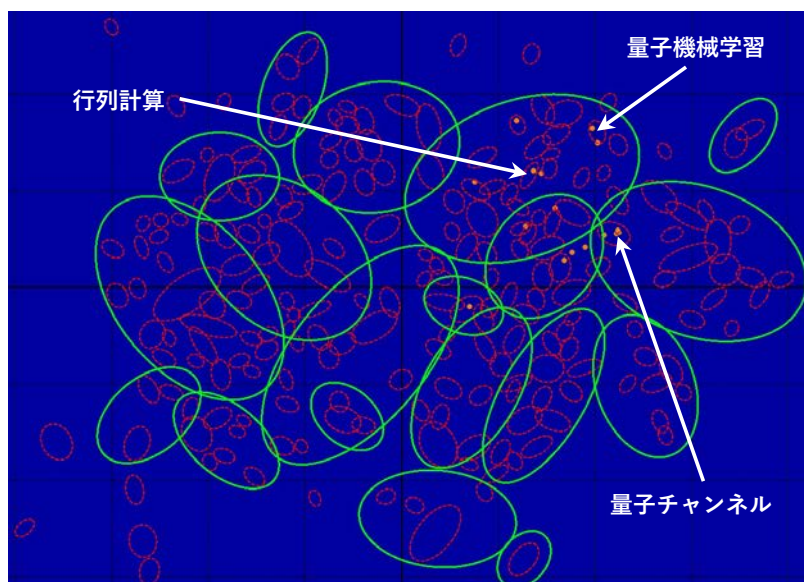


図5-8 注目企業の論文・特許マップ (4)

5.4.8 百度量子計算研究所

(中：百度量子計算研究所、英：Baidu Institute of Quantum Computing)

(1) 概要

所在地 (不明)

資本金 (不明)

法定代表人 (不明)

会社規模 (不明)

起業年 2018/3/8

被保険者数 (不明)

(2) 組織・業務内容

百度量子計算研究所は、量子コンピューティングの時代に備えて、量子技術の準備、量子人材の育成、新たな量子ビジネスの開拓を広範囲に展開し、量子人工知能の世界的な研究機関を構築するとともに、量子コンピューティングをBaiduのコア技術やビジネスと継続的に統合し、量子技術のイノベーションビジネスを模索している。Institute of Quantum Computingは、現在、Baidu Research Instituteの一部となっており、Quantum AI、Quantum Algorithm、Quantum Architectureを中心に、量子ソフトウェアや情報技術の応用に注力している。BaiduのQuantum Platformは、Quantum Pulse、Quantum Paddle、Quantum Easy Voltで構成されており、包括的なQuantum Infrastructure as a Serviceを提供するように設計されており、大学／研究機関との連携、トップカンファレンスの開催／スポンサー、関連産業の強化などを通じて、量子コンピューティング分野の発展と繁栄に貢献し、「Quantum for All」のビジョンを実現していく。

(3) その他

株主

(不明)

役員

(不明)

対外投資先

(不明)

訴訟案件

(不明)

5.4.9 中国電子科学技術集团公司 第14研究所

(中：中国電子科技集团公司 第十四研究所、英：14th Research Institute's Intelligent Sensing Technology Key Laboratory, China Electronics Technology Group Corporation's)

(1) 概要

所在地 北京市海淀区万寿路27号

資本金 2,000,000 万人民币元

法定代表人 陈肇雄

会社規模 (不明)

起業年 2002/2/25

被保険者数 199人

(2) 組織・業務内容

中国電子科技集团公司（CETC）は、中央政府が直接管理する重要な国有基幹企業であり、中国の軍用電子機器の主力、ネットワーク情報事業の国家チーム、国家戦略科学技術軍である。電子・情報分野の科学技術革新システムが比較的充実しているCETCは、軍用電子機器やネットワーク情報の分野で圧倒的な地位を占めており、科学技術の自立と向上を支援し、国防の近代化を促進し、デジタル経済の発展を加速させ、国民の生活に貢献するという重要な責任を担っている。現在、CETCには、47の国立研究機関と11の上場企業を含む500以上の企業・機関、11万人の研究者を含む20万人以上の従業員、35の国家重点研究室、研究センター、イノベーションセンターがある。長年にわたりFortune 500に掲載されており、2020年には381位にランクインしている（第14研究所のウェブサイトにはアクセスできないため、ここでは中国電子科技集团公司の紹介となっている）。

(3) その他

株主

国务院国有资产监督管理委员会

役員

(董事长) 陈肇雄、(总经理) 吴昊曼、(董事) 李李跃、李李庆、胡胡爱、张汝恩、吴晓根、史史坚、董学思、(监事) 张张文、刘刘伟、陈陈捷、苏苏俊、史史军、吴吴永、葛葛鹏、(监事会主席) 李东序

対外投資先

中电科核心技术研发投资有限公司、中国普天信息产业集团有限公司、中国电子科技网络信息安全有限公司、中电网络通信集团有限公司、中电科投资控股有限公司、中电科电子装备集团有限公司、中电科信控有限公司、天地信息网络有限公司、中电科资产经营有限公司、中电科数字科技（集团）有限公司、ほか48社

訴訟案件

(不明)

5.4.10 国开启科量子技術（北京）有限公司

（中：国开启科量子技術（北京）有限公司、英：QUDOOR / Qike Quantum）

（1）概要

所在地 北京市海淀区西北旺东路10号院东区5号楼1层108-1

資本金 3,500万人民币元

法定代表人 陈柳平

会社規模 50人未満

起業年 2016/4/14

被保険者数 26人

（2）組織・業務内容

国开启科量子技術（北京）有限公司は、量子情報技術分野における技術チームの20年にわたる優れた技術の蓄積と豊富な製品経験を活かして、量子通信機器の製造と量子コンピュータのフルスタック開発に注力している。また、量子コンピュータ、量子通信のコア技術の蓄積と製品開発能力を併せ持つ中国初の革新的技術企業となっている。

量子コンピュータの分野において、2020年に分散型イオントラップ量子コンピュータの研究開発を開始し、イオントラップチップ、精密レーザーシステム、量子ビット光電計測制御システム、高速電子タイミング制御システム、量子プログラミング言語、量子クラウド、量子アルゴリズムライブラリ、量子アプリケーションなどの各種システムの研究開発も進めており、2021年には中国初のイオントラップ量子コンピュータが登場する予定である。このプロジェクトでは、2021年に中国初のイオントラップ量子コンピュータAbaQ-1を立ち上げ、2023年に完成予定の量子量1億以上の100ビット分散型イオントラップ量子コンピュータの基礎を固めるとともに、中国国内の保険、証券、新薬研究開発、暗号・復号などの分野のトップ企業との協力関係を構築し、産業応用の深い束ね方を実現し、市場のエコロジーを構築している。

なお現在、100件以上のコア特許を申請・取得しており、年内には150件に達する見込み。また、非特許のコア技術も多数保有しており、10件の国家標準や業界標準、国家標準の研究作業を行っている。

（3）その他

株主

宁波航标企业管理合伙企业（有限合伙）、宁波京量信管理合伙企业（有限合伙）、宁波宏宙管理合伙企业（有限合伙）、陈柳平、李杨、金勇、罗乐、北京中关村发展前沿企业投资基金（有限合伙）、北京中发展金种子创业投资中心（有限合伙）

役員

（执行董事）李杨、（监事）裴丽、（经理）陈柳平

対外投資先

广东启科量子信息技术研究院有限公司

訴訟案件

（不明）

5.5 注目スタートアップ

量子技術関係のスタートアップは多数存在する（表5-2）。ここではとりわけ注目すべき5社を紹介する。

5.5.1 済量子技術研究院

（中：済量子技術研究院、英：JINAN INSTITUTE OF QUANTUM）

（1）概要

所在地 山东省济南市齐鲁软件园大厦B座A区508-509室

資本金 150万人民币元

法定代表人 王向斌

会社規模 50人未満

起業年 2011/5

被保険者数 （不明）

（2）組織・業務内容

当研究院は、済市の局レベルの機関である。主に、量子科学の基礎・応用研究を行い、量子科学技術の公共研究開発プラットフォームの構築と量子機密通信テストネットワークの構築を組織し、省内の量子科学技術人材の導入を担当している。研究所には61名のスタッフがおり、そのうち24名が博士号を持ち、6名が上級職に就いている。王小雲、王建宇など15名の学識経験者を含む学術委員会が結成され、学識経験者の潘建偉氏が学術委員会の責任者となっている。2018年12月には山東省のポストドク革新実践基地として承認され、2019年1月には量子コンピューティングと計測における国家標準化技術委員会（TC578）として承認され、9月には、量子情報技術に関する初の国際フォーカスグループ（FG-QIT4N）の設立を推進した。また、2020年8月には「山東省2020年科学教育基地」に認定された。

（3）その他

株主

（不明）

役員

（不明）

対外投資先

山东极量信息科技发展有限公司

訴訟案件

（不明）

5.5.2 深セン市云韬量子科学技術有限公司

（中：深圳市云韬量子科技有限公司、英：Shenzhen Yuntao Quantum Technology Co., Ltd.）

（1）概要

所在地 深圳市福田区沙头街道新洲社区福强路4013号天都世纪7C04

資本金 50 万人民币元
 法定代表人 王淑芳
 会社規模 50 人未満
 起業年 22018/4/5
 被保険者数 1 人

(2) 組織・業務内容

業務内容は、コンピュータ技術、量子コンピューティング、量子情報技術、知能技術、ソフトウェア技術、技術開発の分野に従事し、技術的助言、技術サービス、技術移転である。

(3) その他

株主

王淑芳

役員

(执行董事、总经理) 王淑芳、(监事) 朱星

対外投資先

(不明)

訴訟案件

(不明)

5.5.3 深セン市量子スピン科学技術有限公司

(中：深圳市量旋科技有限公司、英：Shenzhen Liangxuan Technology Co., Ltd. (SpinQ))

(1) 概要

所在地 深圳市福田区福保街道福保社区市花路创凌通科技大厦 A 座五层 508-509 室
 資本金 1175.00676 万人民币元
 法定代表人 项金根
 会社規模 50 人未満
 起業年 2018/8/27
 被保険者数 9 人

(2) 組織・業務内容

深圳市量旋科技有限公司は、清華大学、中国科学技術大学、ウォータールー大学、ワシントン大学の量子コンピューティングの専門家で構成されている。香港科学技術大学の Bei Zeng 教授がチーフサイエンティストを務めている。また、中国科学院院士やカナダ科学アカデミーのメンバー、世界的に著名な教授など、科学技術顧問の強力なチームを擁している。2019 年 12 月には、世界初のデスクトップ型 NMR 量子コンピュータ製品「Gemini」の開発に成功し、2020 年 10 月には、最新世代の汎用量子クラウド・プラットフォーム「Taurus」をリリースした。将来的には量子コンピューティング製品の反復と実用的な超伝導チップ量子コンピュータの開発を進め、安定性、使いやすさ、可用性の高い量子コンピューティングのソリューション一式をユーザーに提供していく。

(3) その他

株主

項金根、深圳量旋超导企业管理合伙企业（有限合伙）股权结构、南通晨源鸿策股权投资合伙企业（有限合伙）、邝邝中、深圳宇吉管理合伙企业（有限合伙）、柳志伟、嘉兴自知一号股权投资合伙企业（有限合伙）、深圳市高新投正轩天使创业投资合伙企业（有限合伙）、深圳市人才创新创业二号股权投资基金合伙企业（有限合伙）、深圳市高轩投资合伙企业（有限合伙）

役員

（董事长、总经理）项金根、（董事）孙翀、Bei Zeng、邹均庭、邝中、（监事）刘何蓉

对外投资先

量旋科技（金华）有限公司

訴訟案件

（不明）

5.5.4 浙江九州量子情報技術株式会社

（中：浙江九州量子信息技术股份有限公司、英：ZHEJIANG JIUZHOU QUANTUM TECHNOLOGIES CO., LTD.）

(1) 概要

所在地 浙江省杭州市萧山区经济技术开发区北塘路436号-1

資本金 42,021.3006万人民币元

法定代表人 熊国庆

会社規模 97人

起業年 2012/7/12

被保険者数 61人

(2) 組織・業務内容

電子技術、チップ、光通信、情報安全などの分野からの人材を集めており、通信運営設備の建設や端末製品開発の専門家も有し、科学研究成果の産業化を加速させることをモットーとし、量子技術産業の急速な発展を促すことが目的である。

許可されたプロジェクト：第二種付加価値通信事業、ビル・インテリジェント・エンジニアリングの建設（法律に基づく承認が必要なプロジェクトで、事業活動の開始前に関連部門の承認を受け、承認結果に従う特定の事業プロジェクト）。量子コンピューティング技術サービス、集積回路チップおよび製品製造、情報セキュリティ機器製造、通信機器製造、移動体通信機器製造、光通信機器製造、モノのインターネット機器製造、電子計測器製造、セキュリティ機器製造、電子特殊材料製造、新興エネルギー技術研究開発、電子特殊材料研究開発、ソフトウェア開発、モノのインターネット技術研究開発、知能ロボット工学 研究開発、セキュリティ機器販売、ネットワーク・情報セキュリティソフトウェア開発、インテリジェント制御システムインテグレーション、情報セキュリティ機器販売、モノのインターネット機器販売、電子特殊材料販売、光通信機器販売、通信機器販売、ネットワーク機器販売、衛星移動体通信端末販売、移動体通信機器販売、光ケーブル販売、集積回路チップ・製品販売、光ファイバ販売、産業用インターネットデータサービス ネットワーク技術サービス、情報技術コンサルティングサービス、工業デザインサービス、情報システムインテグレーションサービス、セキュリティ技術防止システム設計・構築サービス、5G通信技術サービス、インターネットセキュリティサービス、パークマネジメントサービス、コンピュータ・通信機器リース、非居住用不動産リース、商業用暗号製

品販売、物品の輸出入（法律で承認を受けなければならないものを除き、独立した事業を行うための事業許可を得ているもの。事業活動）を行っている。

(3) その他

株主

浙江九州量子控股有限公司股、徐珊

役員

（董事长）熊国庆、（董事兼总经理）吕洪新、（董事）包轶骏、陈伟星、杨义先、（监事会主席）章炜炜、（监事）方分分、李丹

对外投资先

长兴量卓投资管理有限公司、镇江量子网络投资合伙企业（有限合伙）、江苏九州量子信息技术有限公司、联通新沃（上海）创业投资合伙企业（有限合伙）、九州量子（北京）信息技术有限公司、新疆鼎盾量子信息技术有限公司、杭州沛卓投资管理有限公司、江西九州量子信息技术有限公司、天九量子（杭州）信息科技有限公司、南京元融信息技术有限公司、ほか全17社。

訴訟案件

23

5.5.5 成都天奥电子股份有限公司

（中：成都天奥电子股份有限公司、英：CHENGDU SPACEON ELECTRONICS CO., LTD.）

(1) 概要

所在地 成都市金牛区高科技产业开发区土桥村九组

資本金 20,800.65 万人民币元

法定代表人 赵晓虎

会社規模 500-999 人

起業年 2004/1/4

被保険者数 57 人

(2) 組織・業務内容

同社は、時間周波数製品と北斗衛星応用製品の研究開発、設計、製造、販売を行っており、国家企業技術センターを持ち、ハイテク企業として数多くの特許とコア技術を持つハイテク企業である。

中国における時間・周波数のリーディングカンパニーとして、同社は時間・周波数のシステム統合能力を備えた完全な時間・周波数製品群を有しており、顧客に完全な時間・周波数ソリューションを提供することができる。主な製品は、原子時計、水晶デバイス、周波数部品・機器、時刻・周波数ボード・モジュール、時刻同期機器・システムなどで、主に航空宇宙、衛星航法、民間・軍事通信、国防機器などの分野で使用されています。中国の有人宇宙飛行、月探査プロジェクト、北斗衛星航法システムなどの国家的な主要プロジェクトに主要な時刻・周波数機器・システムを提供し、建設に重要な貢献をしている。

同社は、民間部門および端末レベルで北斗ナビゲーションサービスを提供する資格を有しており、主な製品には、北斗衛星時計、北斗緊急警報通信端末およびシステムがある。北斗衛星時計は、衛星ナビゲーション技術と伝統的な時計技術の完璧な融合であり、CCTV から「2012 年世界の新技术トップ10」に選ばれた。

(3) その他

株主

张志刚、郑兴世、李河川、刘类骥、晏艺峰、杨林、陈斌、陈静、宋斌、徐白居、ほか全31人

役員

(董事长) 赵晓虎、(董事兼总经理) 刘江、(副董事长) 徐建平、(董事) 何子述、乐军、李正国、
张建华、(监事) 黄浩、任俊、杨英丽、叶静、张喆

对外投资先

—

訴訟案件

11

表 5-2 中国の量子スタートアップ

企業名	英名	所在地	会社規模	資本金 (万人民币)	起業年	法定代表人	被保険者数	技術分野	ウェブサイト
濟南量子技術研究院	JINAN INSTITUTE OF QUANTUM	濟南	50人未満	150	2011/5	王向斌	-	量子通信	http://www.jlqt.org/
國科量子通信ネットワーク有限公司		上海	50-99人	10,318	2016/11/29	戚巍	60	量子通信	
武漢星際量子情報技術有限公司	INTERSTELLAR QUANTUM	武漢	50人未満	3,000	2016/12/30	鄧磊	0	量子通信	http://www.wlqct.com/
武漢航太三江量子通信有限公司		武漢	50人未満	3,000	2017/3/28	王少鉄	15	量子通信	http://zhaopin.caasic.cn/
天恒量子 (厦門) 科学技術集団有限公司	Tianheng Quantum (XaMen) Technology Group	厦門	50人未満	20,000	2017/4/21	胡濱	13	量子通信	http://www.th-q.com/
広東同陸量子科技有限公司	National Quantum Communication(guangdong) Co., Ltd	深圳	-	1,000	2017/8/29	胡敏	-	量子通信	http://www.nqctek.com
如路量子科技有限公司		紹興	50人未満	5,000	2017/11/29	彭垠垚	8	量子通信	
安徽合共量子科学技術科技有限公司		合肥	-	3,600	2018/9/14	郭明	0	量子通信	
中電量子科学技術有限公司	China Telecom Quantum Technology Co., Ltd.	合肥	50人未満	5,000	2020/11/6	刘颖	5	量子通信	www.zdqlz.com
北京中創为量子通信技術株式会社	Beijing Zhongchuangwei Quantum Communication Technology Co., Ltd.	北京	50人未満	9,000	2014/3/14	沈方紅	33	量子通信	http://www.zcwei.com
北京中科院量子軟件技術有限公司	ARCLIGHT QUANTUM	北京	-	100	2020/11/20	应圣鋼	0	量子ソフトウェア	http://www.arclightquantum.com/
深圳南云緯量子科学技術有限公司	Shenzhen Yuntao Quantum Technology Co., Ltd.	深圳	50人未満	50	2018/4/5	王淑芳	1	量子コンピュータ	
深圳市量子スピンの科学技術有限公司	Shenzhen Liangxuan Technology Co., Ltd. (SpinQ)	深圳	50人未満	1,175	2018/8/27	項金根	9	量子コンピュータ	https://www.spinq.cn
上海思量量子科技有限公司	Qutronic	上海	50人未満	3,000	2019/4/1	金賢敏	5	量子コンピュータ	http://www.qutronic.com/
北京イム量子科学技術有限公司	Beijing Bose Quantum Technology Co., Ltd.	北京	50人未満	1,786	2020/11/16	文凱	1	量子コンピュータ	http://www.dboson.com
上海奕奕智算量子科技有限公司	Think Smart Technology (Shanghai) Co., Ltd.	上海	-	131	2021/2/19	金賢敏	-	量子コンピュータ	
成都圣奥电子股份有限公司	CHENGDU SPACEON ELECTRONICS CO., LTD.	成都	500-999人	20,801	2004/1/4	赵晓虎	57	原子時計	http://www.elecspn.com/
國収量子 (合肥) 技術有限公司	Guoyi Quantum (Hefe) Technology Co., Ltd.	合肥	100-199人	2,607	2016/12/26	賀羽	134	量子センシング	www.cqtek.com
國匯量子雷达科技有限公司	Groly China Quantum Lidar	上海	50人未満	10,001	2017/9/21	陶凤	5	量子センシング	www.lidarq.com
浙江九州量子情報技術株式会社	ZHEJIANG JIUZHOU QUANTUM TECHNOLOGIES CO., LTD.	杭州	97人	42,021	2012/7/12	熊国庆	61	光電子デバイス	http://www.qtec.cn
西安匯量量子科技有限公司	Waterchina Co., Ltd.	西安	50人未満	3,785	2017/11/17	GONG PING	15	光電子デバイス	http://www.waterchina.com
山東国迅量子芯科技有限公司		濟南	50人未満	2,000	2017/12/14	刘勵	2	光電子デバイス	
合肥量芯科技有限公司	Zhejiang Futong Technology Co., Ltd.	合肥	50人未満	500	2018/6/15	郝礼祥	21	光電子デバイス	
福同量子科技 (浙江) 有限公司		嘉興	50人未満	1,100	2017/3/31	章利球	20	単一光子検出器	https://www.cnphotec.com/
重慶星光电科技有限公司		重慶	50人未満	500	2018/8/20	马晓興	4	単一光子検出器	http://www.rccoe.com/
武漢光谷量子技术有限公司	Wuhan Optics Valley Quantum Technologies Co., Ltd.	武漢	50人未満	7,284	2016/1/25	史要涛	44	単一光子源	http://www.quantum-teck.com/
上海匯量量子科技有限公司	Shanghai Xuntai Information Technology Co., Ltd.	上海	50人未満	2,594	2017/3/2	汪超	20	量子技術	http://www.xtquantech.com
上海巨峰量子科技有限公司	KUNFENG	上海	50人未満	100	2018/12/27	徐华	7	量子技術	www.kfquantum.com
合肥机数量子科技有限公司	Hefei Jishu Technology Co., Ltd.	合肥	50人未満	553	2017/6/5	江俊	10	(AI材料開発)	http://www.mgbig.com/
潤澤量子ネットワーク有限公司		蘇坊	-	10,000	2016/1/12	周超男	0	(IT・コンサル)	
四川元匠科学技術有限公司		成都	50人未満	100	2016/12/1	李曉豫	3	(IT・コンサル)	http://yjtekin.ioccc.me/
成都中微达信科技有限公司		成都	50人未満	1,053	2017/5/2	罗雷	17	(IT・コンサル)	
上海正拓量子科技有限公司		上海	-	1,500	2017/6/17	赵霞	0	(IT・コンサル)	
山東极量信息科技发展有限公司		濟南	-	500	2021/6/8	王琳	-	(IT・コンサル)	
神州国信 (北京) 量子科学技術有限公司	Digital China Information Service Company Ltd.	北京	50人未満	1,200	2018/5/8	李鸿春	2	(金融)	http://www.dclts.com/

5.6 注目研究者

論文数・被引用数並びに、推定された研究者フェーズから注目すべき研究者10名を選定した。論文の指標および媒介中心性トレンドの値は表5-3にまとめた。

表5-3 中国の注目研究者

研究者名	著者ID	著者名	論文数	被引用数	被引用数 (常用対数)	媒介中心性 トレンド	研究者 フェーズ	区分
潘建偉 (PAN Jianwei)	7404098450	Pan, J.-W.	204	15937	4.2024338	0.00510867	大御所	量子基盤技術
薛其坤 (XUE Qikun)	7201986973	Xue, Q.-K.	107	7785	3.8913144	-0.00058798	大御所	量子マテリアル
郭光灿 (GUO Guangcan)	7402768124	Guo, G.-C.	598	14794	4.1701150	0.00065437	大御所	量子暗号・通信
郭国平 (GUO Guoping)	7402768103	Guo, G.-P.	72	1540	3.1878026	0.01963755	リーダー	量子基盤技術
俞大鹏 (YU Dapeng)	7404667022	Yu, D.	54	2866	3.4574277	0.10365202	リーダー	量子マテリアル
贾锁堂 (JIA Suotang)	7202860033	Jia, S.	65	794	2.9003671	0.01580720	リーダー	量子基盤技術
陆朝阳 (LU Chaoyang)	57207204970	Lu, C.-Y.	65	6191	3.7918309	0.07416451	リーダー	量子基盤技術
张强 (ZHANG Qiang)	55624488007	Zhang, Q.	69	4828	3.6838572	0.08976642	リーダー	量子暗号・通信
陈宇翱 (CHEN Yu-ao)	12802866400	Chen, Y.-A.	60	4721	3.6741260	0.00108277	大御所	量子基盤技術
王志俊 (WANG Zhijun)	8352937800	Wang, Z.	82	3178	3.5022905	0.04443943	リーダー	量子基盤技術

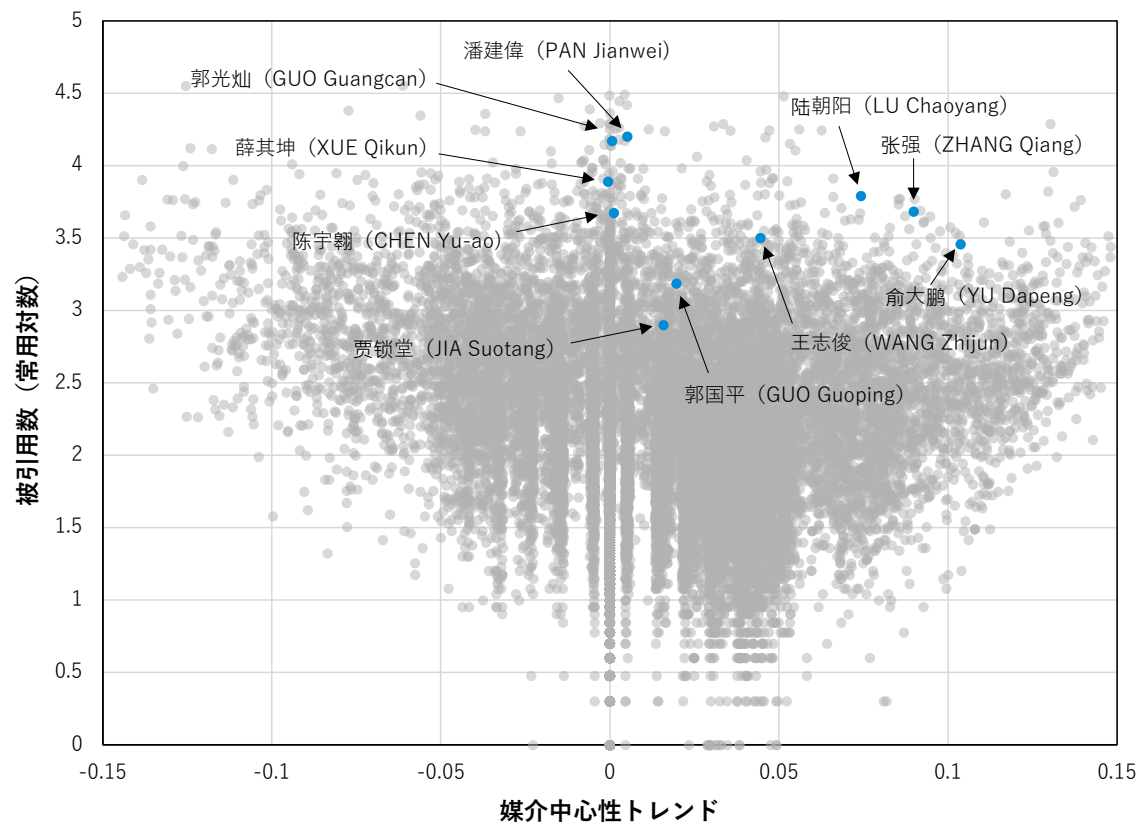


図5-9 研究者フェーズマップで見た注目研究者

潘建偉 (PAN Jianwei)

中国科学技術大学 量子物理・量子情報研究部長・教授、中国科学院量子情報・量子科学技術イノベーション研究院理事長・院長、中国科学院院士。1970年3月生、実験物理学博士。「中国量子の父」と呼ばれ、量子通信、量子コンピューティング、多光子エンタングルメント操作などにおける体系的・革新的な研究により、量子情報実験研究を最も急速な発展に導いた国際的先駆者の一人。99年、量子不可視化の研究で英科学誌Natureの「21世紀の物理学における古典的論文」の一つに、また「Top Ten Scientific Advances of the Year」、Science誌の「Top Ten Scientific Advances of the Year」、英国物理学会または米国物理学会の「Major Advances in Physics of the Year」、両学会学識者による「Top Ten Scientific Advances of the Year in China」にも選出。

2001年、オーストリア留学より帰国しUSTCに量子物理・量子情報の研究室を設立し、中国科学院より重点実験室の指定を受ける。2015年よりUSTC常務副学長。2016年8月25日、中国科学院量子情報・量子科学技術イノベーション研究院理事長・院長に就任。2019年6月、米国物理学会 Physical Review Research 誌の主任編集者に就任。

薛其坤 (XUE Qikun)

北京量子情報科学研究院院長、南方科学技術大学学長、中国科学院院士。国際的に有名な実験物理学者であり、走査型トンネル顕微鏡、表面物理学、スピントロニクス、トポロジカル絶縁量子状態、および高温超伝導を専門とする。研究チームは、量子異常ホール効果に関する研究を行っており、2012年末に磁気トポロジカル絶縁体膜で世界で初めて量子異常ホール効果を発見した。1984年に山東大学光学学部を卒業、94年に中国科学院の物理研究所で博士号を取得。92年から99年までは、日本の東北大学金属材料研究所と米ノースカロライナ州立大学に所属。99年から05年まで、中国科学院物理研究所の研究者であり、表面物理学の国家重点実験室の所長を務めた。2005年に清華大学物理学部教授となり、理学部長、物理学部長、副学長を歴任。17年からBAQIS院長を務め、20年11月から南部科学技術大学学長も務めている。17年教育部自然科学特別賞、18年全米自然科学一等賞、19年北京市科学技術賞の最高賞である中関村賞、20年 Filiz London Award 等を受賞。

郭光灿 (GUO Guangcan)

中国科学院量子情報重点実験室長、教授、中国科学院院士。1980年代から量子光学の研究に着手し、中国における量子通信・量子コンピューティングの理論と実践を拓いた第一人者。中国物理学会のエグゼクティブディレクター、中国光学学会会長。国際誌 International Journal of Quantum Information 編集長、安徽省の中長期計画の主要プロジェクト「量子制御」、中国建国技術革新グループの学術リーダー、「量子通信と量子コンピューティングの物理的実現」、中国科学アカデミーのクラスB、主要な特別プロジェクト「固体システムに基づく量子物理学と量子情報」の主任科学者。Anhui Qasky Quantum Technology 社で研究開発チーム長、当実験室の技術を起源とする合肥本源量子計算科技有限公司 (Origin Quantum) で研究開発グループの一員を務め、かつ両社の株主でもある。2021年10月より、中国計算機学会で設置した量子計算の専門家グループ長に就任。

近年の主な研究成果に、マルチモード量子リレーの初の実現、2つの固体メモリの量子もつれ実現 (2021年6月2日Nature誌掲載)、パラフェルミオンのゼロモード織り込み操作と魔法状態抽出に基づくトポロジカル量子コンピューティングを実現する方法を実験実証 (英国リーズ大学のJiannis Pachos教授と共同研究、2021年8月9日米国物理学会誌PRX Quantum誌掲載)。

過去、2009年第3回世界科学アカデミー学者、13年「CCTV技術イノベーター」に選出。中国科学院の自然科学の2等賞 (2001)、国立自然科学の2等賞「量子情報技術の基礎研究」(03)、安徽自然科学の1等賞 (06、14)、アチーブメントアワード (07)、文部省技術発明アワード (13) の最優秀賞、文部省自然

科学アワード（14）、中国科学院の上級労働者賞（02）、教育部の全国優秀教師賞（02）。

郭国平（GUO Guoping）

中国科学院量子情報重点実験室副室長、教授、マイクロエレクトロニクス学部副学部長。実践的な量子コンピュータの開発と応用。青年基金「1万人の才能プログラム」リーダー、揚子江ヤングスカラール教授。合肥本源量子公司首席科学者、USTC半導体量子ドット量子チップ研究リーダー。2010年以来、973 National Key Basic Research and Development Program（Class A）チーフサイエンティストとして、半導体量子デバイスの電子移転プロパティに焦点を当て、半導体量子チップの研究・開発、量子アルゴリズム研究、低温・強磁場の実験プラットフォーム、そして完全弱シグナル計測システムを開発してきた。合肥本源量子計算科技有限公司（Origin Quantum）で研究開発グループの一員を務め、同社の株主でもある。

俞大鹏（YU Dapeng）

南方科学技術大学教授、量子科学工学研究所所長、中国科学院院士。1993年、固体物理学博士（パリ南大学、パリ第11大学）。量子マテリアル研究を牽引する第一人者。低次元ナノ構造物理の研究に従事し、1次元半導体ナノワイヤの調製や2次元ディラック量子材料の特性評価のためのボトムアップ法を発見した最初の国際的なパイオニアの一人。1995年北京物理学部准教授、99年教授、2016年より現職。約2億元の研究費が投じられた「深圳量子科学工学研究所」の創設に携わり、2018年1月、600平方メートルの国際第一級の量子デバイスおよび量子チップ処理センターを同市に設立、量子コンピューティングの研究に従事。科学技術部の「Spin Wave Physics, Materials and Devices」の主要プロジェクト、中国国家自然科学基金（NSFC）の共同統合プロジェクト、および広東省重点分野研究開発プログラムを担当。

贾锁堂（JIA Suotang）

中北大学学長、山西大学学長・教授。レーザー分光、非線形光学、量子情報の研究に従事。中国で初めて、超低温分子の実験プラットフォームを構築、超低温同核分子の調製、異核分子の調製、精密分光測定などで目覚ましい成果を上げた。研究チームは、超低温リットベルグ原子、単一分子物理学、新しい光音響分光法、高感度分光法の応用などを研究し、多くの特徴的な研究成果を上げている。

1958年生、光学修士（1982年、山西大学）、光学博士（96年、華東師範大学）。2005年フランス国立科学研究センター（CNRS）客員研究員をはじめ、米メリーランド大学、イエール大学、コネティカット大学で共同研究。1994～2007年山西大学エレクトロニクス学部長、97年山西大学教授・教務部長、2007年山西大学副学長、2010年北中国大学学長、2012年1月から山西大学学長を兼任。

国家重点科学研究計画（973）の主任科学者、国家高等教育分野革新知能導入計画（「111計画」）のプロジェクトリーダー、中国科技部国際共同研究センター長を歴任。また、山西省にある「Collaborative Innovation Centre for Extreme Optics」の所長であり、中国教育部の「世紀を越えた優秀な人材育成プログラム」のメンバーにも選出。

陆朝阳（LU Chaoyang）

中国科学技術大学教授、九三会中央委員会青年工作委員会副主任。1982年生、物理学博士（ケンブリッジ大学）、専門分野は光量子情報科学、特に固体量子光源、量子テレポーテーション、光量子コンピューティングに関する研究。主な学会等では現在、国際量子通信・計測・計算学会（QCMC）の執行委員会メンバー、マーキュリー量子財団事務局長、Quantum-2020会長、米国光学会の量子コンピューティング・通信技術グループのディレクターなどを務める。英国物理学会Quantum Science and Technologyをはじめ、iScience、Advanced Quantum Technology、Advanced Photonicsなど各誌の編集委員を務める。17年にはアメリカ光学会フェローに選出。米国物理学会から「量子コンピューティングのためのランドール・ベ

ネット賞」(15年)、欧州物理学会からフレネル賞、第7回仁科アジア賞、黄昆賞、CAS 青年科学者賞 (18/19年)、アメリカ光学学会からアドルフ・ロンブ・メダル (20年) をそれぞれ受賞。中華全国青年連合会常務委員、中国人民政治協商会議安徽省委員会委員、上海青年連合会副会長を兼任。

张强 (ZHANG Qiang)

中国科学技術大学 (USTC) 合肥ナノ材料科学研究所教授、済南量子技術研究所常務理事。1979年生。研究テーマは、量子暗号や量子通信の実験的研究 (現実的な条件下での量子鍵配送の安全性)、コアデバイス開発、時間周波数伝送など。理学博士 (2006年、USTC)。米スタンフォード大学および日本の国立情報学研究所 (NII) で博士研究員および客員研究員 (2006～11年) を経て現職、国家重点研究開発プログラムの主任科学者 (18年) を務めた。

主な学会等では現在、International Conference on Quantum Cryptography 議長、ITU Focus Group on Network Oriented Quantum Information Technologies グループ長、National Technical Committee on Quantum Computing and Measurement Standardization 事務局長、英国物理学会 New Journal of Physics の諮問委員会メンバー、Quantum Science & Technology の編集委員。973人の若手主任科学者選出 (13年)、ジュネーブ発明フェア特別金メダル受賞 (17年)。

陈宇翱 (CHEN Yuao)

中国科学技術大学教授。2012年1月17日、USTCの潘建偉、彭承志ら研究チームの一員として、地上4600kmに及ぶ大規模なマルチユーザー量子鍵配送に初めて成功。啓東高校在学中に、第291回国際中等学校物理オリンピックで1位を獲得 (理論・実験)。フォトンクス、冷原子の量子操作、量子情報、量子シミュレーションの分野での優れた貢献が認められ、フレネル賞を受賞 (13年)。

王志俊 (WANG Zhijun)

中国科学院物理研究所 凝縮系理論・計算研究所特別研究員。応用物理学士 (中南大学)、CAS 物理研究所 (2009～14年)、米プリンストン大学物理学科ポスドク (14～18年) を経て現職 (18年12月～)。研究テーマはトポロジカル電子状態の研究と第一原理計算、磁性材料と関連する電子システム、トポロジカル超伝導。

参考文献

- [1] 科学技術振興機構研究開発戦略センター．(戦略プロポーザル) 量子2.0 ～量子科学技術が切り拓く新たな地平～．No. CRDS-FY2019-SP-03, 2020.
- [2] Y. A. Chen, et al. An integrated space-to-ground quantum communication network over 4,600kilometres. *Nature*, Vol. 589, pp. 214–219, 2021.
- [3] Yulin Wu, et al. Strong quantum computational advantage using a superconducting quantum processor. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 127, p. 180501, 2021.
- [4] Han-Sen Zhong, et al. Phase-programmable gaussian boson sampling using stimulated squeezedlight. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 127, p. 180502, 2021.
- [5] 統合イノベーション戦略推進会議．量子技術イノベーション戦略（最終報告）(令和2年1月21日)．<https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/ryoushisenryaku.pdf>.
- [6] 内閣府．量子技術イノベーション．<https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/ryoshigijutsu.html>.
- [7] 科学技術振興機構研究開発戦略センター．みんなの量子コンピューター～情報・数理・電子工学と拓く新しい量子アプリ～．No. CRDS-FY2018-SP-04, 2018.
- [8] T. Lubinski, et al. Application-oriented performance benchmarks for quantum computing. *arXiv:2110.03137*, 2021.
- [9] F. Arute, et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, Vol. 574, pp. 505–510, 2019.
- [10] M. Cerezo, et al. Variational quantum algorithms. *Nature Reviews Physics*, Vol. 3, pp. 625–644, 2021.
- [11] S. Wehner, D. Elkouss, and R. Hanson. Quantum internet: A vision for the road ahead. *Science*, Vol. 362, p. 6412, 2018.
- [12] Internet Research Task Force (IRTF) Quantum Internet Research Group (QIRG). Architectural Principles for a Quantum Internet. <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-irtf-qirg-principles/>.
- [13] M. Takamoto, et al. Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks. *Nature Photonics*, Vol. 14, pp. 411–415, 2020.
- [14] Z. J. Wang, et al. Hyperpolarized ¹³C MRI: State of the Art and Future Directions. *Radiology*, Vol. 291, No. 2, pp. 273–284, 2019.
- [15] 科学技術振興機構研究開発戦略センター．(研究開発の俯瞰報告書) ナノテクノロジー・材料分野(2021年)．No. CRDS-FY2020-FR-03, 2021.
- [16] F. Giustino, et al. The 2021 quantum materials roadmap. *Journal of Physics: Materials*, Vol. 3, p. 042006, 2021.
- [17] B. Zeng, X. Chen, D.-L. Zhou, and X.-G. Wen. *Quantum Information Meets Quantum Matter*. Springer, 2019.
- [18] R. Aguado and L. Kouwenhoven. Majorana qubits for topological quantum computing. *Physics Today*, Vol. 73, No. 6, p. 44, 2020.
- [19] J. Carrasquilla. Machine learning for quantum matter. *Advances in Physics: X*, Vol. 5, No. 1, p. 1797528, 2020.

- [20] Science Portal China. 中国の主要 800 大学. https://spc.jst.go.jp/education/univ/univ_000.html.
- [21] 中華人民共和国国家統計局. 2010 年第六次全国人口普查主要数据公报 (第 1 号). http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201104/t20110428_12705.html.
- [22] Q. Zhang, et al. Quantum information research in china. *Quantum Sci. Technol.*, Vol. 4, No. 4, p.040503, 2019.
- [23] 搜狐IT・搜狐科技. 我国启动四项重大科学研究计划缩短与国际差距 (2006 年 11 月 16 日). <https://it.sohu.com/20061116/n246419311.shtml>.
- [24] E. B. Kania and J. K. Costello. Quantum hegemony? china's ambitions and the challenge to u.s.innovation leadership (center for a new american security, september 12, 2018). <https://www.cnas.org/publications/reports/quantum-hegemony>.
- [25] JST Science Portal China. 量子制御研究国家重大科学研究計画『12・5』特定計画. https://spc.jst.go.jp/policy/science_policy/125plans/125field_13.html.
- [26] JST Science Portal China. 科学院、重大科学技術 15 任務を計画 (2012 年 1 月 17 日). https://spc.jst.go.jp/news/120103/topic_2_01.html.
- [27] JST 研究開発戦略センター. 「中国製造 2025」の公布に関する国務院の通知の全訳 (2015 年 7 月 25 日). <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/FU/CN20150725.pdf>.
- [28] 中国国務院. “十三五”国家科技创新规划 (2016 年 7 月 28 日). http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/08/content_5098072.htm.
- [29] 中国国務院. 中共中央国务院印发《国家创新驱动发展战略纲要》(2016 年 5 月 19 日). http://www.gov.cn/zhengce/2016-05/19/content_5074812.htm.
- [30] 中国新闻网. 百亿元安徽量子科学产业发展基金启动运营 (2017 年 12 月 12 日). <http://news.sina.com.cn/o/2017-12-12/doc-ifypsvkp2232889.shtml?zw=news>.
- [31] 山東省科学技術庁. 关于印发山东省量子技术创新发展规划 (2018-2025 年) 的通知 (2018 年 3 月 8 日). http://kjt.shandong.gov.cn/art/2018/3/5/art_103595_7751708.html?xxgkhide=1.
- [32] JST Science Portal China. 山東省済南市、複数の量子テクノロジー研究室を設立へ (2019 年 01 月 31 日). https://spc.jst.go.jp/news/190105/topic_4_01.html.
- [33] 人民日報. “十三五”科技军民融合发展专项规划发布 (2017 年 8 月 25 日). http://www.gov.cn/xinwen/2017-08/25/content_5220249.htm.
- [34] 山東省科学技術庁. 山東省量子技術革新発展計画. <http://kjt.shandong.gov.cn/uploadfiles/ueditor/file/20180305/1520236983429049573.pdf>.
- [35] 中国証券网. 安徽拟申报建设量子信息科学国家实验室总投资约 70 亿元 (2017 年 7 月 11 日). <http://finance.sina.com.cn/roll/2017-07-11/doc-ifyhweua4789944.shtml>.
- [36] 安徽日報. 中国科学院量子信息与量子科技创新研究院揭牌仪式在合肥举行李锦斌刘伟平共同揭牌 (2017 年 7 月 12 日). <http://cpc.people.com.cn/n1/2017/0712/c117005-29400687.html>.
- [37] 中国国防部. 军科院国防科技创新研究院多措并举凝聚创新力量 (2018 年 2 月 4 日). http://www.mod.gov.cn/mobilization/2018-02/04/content_4804117.htm.
- [38] 人民網. 北京成立量子信息科学研究院薛其坤当选院长 (2017 年 12 月 24 日). https://www.cas.cn/cm/201712/t20171225_4627880.shtml.
- [39] Edward Parker, et al. An assessment of the u.s. and chinese industrial bases in quantum technology. RAND Corporation.
- [40] U.S. Congressional Research Searvice. Federal quantum information science: An overview (july 2,2018). <https://sgp.fas.org/crs/misc/IF10872.pdf>.

- [41] G.Allison, et al. The great tech rivalry: China vs the u.s., belfer center for science and interna-international affairs, harvard kennedy school (december 2021). https://www.belfercenter.org/sites/default/files/GreatTechRivalry_ChinavsUS_211207.pdf.
- [42] JST Science Portal China. 中国の量子技術開発の方向性について (jst 北京事務所、北京便り、2021 年 02 月 25 日) . https://spc.jst.go.jp/experiences/beijing/bj21_011.html.
- [43] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要 (2021 年 3 月 23 日) . https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202103/t20210323_1270124.html?code=&state=123.
- [44] JST Science Portal China. 中華人民共和国国民経済・社会発展の第 14 次五カ年計画および 2035 年までの長期目標綱要. https://spc.jst.go.jp/policy/national_policy/downloads/r_gvm_2022.pdf.
- [45] 中国国務院. 国家标准化发展纲要 (2021 年 10 月 10 日) . <https://perma.cc/CB6V-VQDV>.
- [46] JETRO 香港事務所. 「国家標準化發展綱要」(いわゆる「中国標準 2035」) が公表 (2021 年 10 月 13 日) . https://www.jetro.go.jp/ext_library/1/world/asia/cn/ip/pdf/ip_20211013.pdf.
- [47] 中国国務院. 国务院关于印发计量发展规划 (2021-2035 年) 的通知 (2021 年 12 月 31 日) . http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/28/content_5670947.htm.
- [48] <https://quantum.ustc.edu.cn/web/>.
- [49] <http://apst.ustc.edu.cn/>.
- [50] <http://quantumcas.ac.cn/>.
- [51] <http://lqcc.ustc.edu.cn/>.
- [52] <https://kits.ucas.ac.cn/index.php>.
- [53] <https://cqi.tsinghua.edu.cn/en/>.
- [54] <https://iiis.tsinghua.edu.cn/zh/>.
- [55] <http://www.baqis.ac.cn/>.
- [56] <https://icqm.pku.edu.cn/index.htm>.
- [57] <https://siqse.sustech.edu.cn/Zh/Index/index?play=0>.

(ウェブサイトは 2022 年 3 月 7 日時点)

作成メンバー

赤木 浩	フェロー	CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット
嶋田 義皓	フェロー	CRDS システム・情報科学技術ユニット
眞子 隆志	フェロー	CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット
北場 林	室長	アジア・太平洋総合研究センター（APRC）
斎藤 至	フェロー	アジア・太平洋総合研究センター（APRC）
小松 義隆	フェロー	アジア・太平洋総合研究センター（APRC）

調査報告書

CRDS-FY2021-RR-08

論文・特許マップで見る量子技術の国際動向

令和 4 年 3 月 March 2022

ISBN 978-4-88890-787-3

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/>

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。

著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・複製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。

This publication is protected by copyright law and international treaties.

No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.

Any quotations must be appropriately acknowledged.

If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



<https://www.jst.go.jp/crds/>