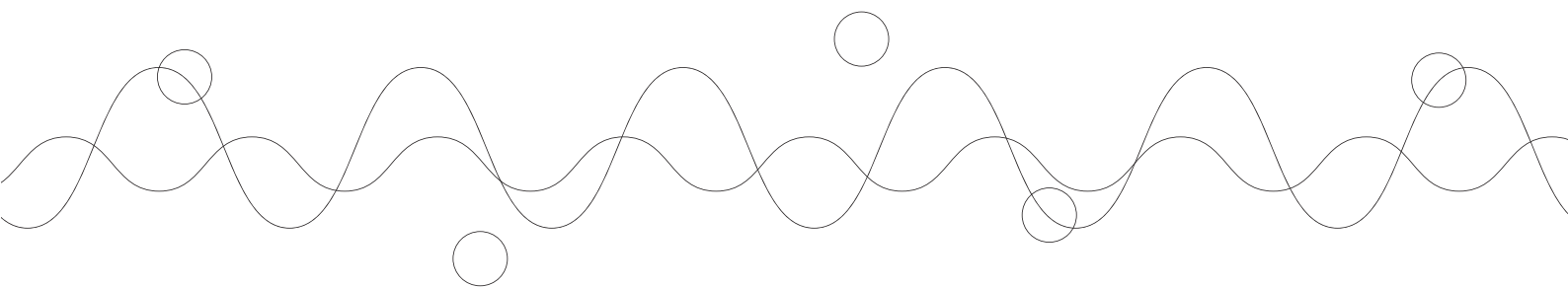


調査報告書

世界特許マップから見た量子技術 2.0



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 2.0」とも呼ばれる新技術の研究開発が世界中で活発化している。量子技術 2.0 の代表例は、量子センサ、量子通信、量子暗号、量子コンピュータ、量子シミュレータなどである。

米国、欧州、中国が量子技術 2.0 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、いよいよ量子技術への注力が始まった。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 2.0 を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。

我が国の科学政策・産業政策の方向性を判断する上では、知財空間における技術体系の客観的・定量的な俯瞰と、それに基づく各国・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 2.0 に関連する特許をクラスタリング・マッピングによって俯瞰的に分析することで、政策的含意を得ようとするものである。

調査の結果、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、「量子ビット共振器」や「量子回路・コンパイル」などが量子コンピュータと量子通信・量子暗号に共通する基盤的な技術概念として同定された。国別の時系列変化からは、中国における量子通信・量子暗号の特許公開の急激な伸びと、それとは対照的な日本での公開数の減少が確認された。また、出願人別の特許を特許マップにプロットすることで、それぞれの出願人の傾向を調査した。北米の企業を出願人とする米国での特許は、「量子コンピュータ」「量子ビット・ゲート」区分に分類される特許が多く、日本企業や中国の出願人による特許は「量子通信・量子暗号」区分が多数を占めるという傾向が見られた。

量子技術 2.0 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。量子コンピュータや量子センサが量子性を利用しない従来技術と比べ優れていることを確かめる「量子優位性」の実験実証は、それぞれの技術分野で重要なマイルストーンと認識されている。しかし、量子優位性が実証された後にも、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 2.0 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 2.0 の進歩を追跡するツールの一つとして、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

第1章 調査概要	3
1.1 背景	3
1.2 調査目的	3
1.3 データ前処理・母集団	4
1.4 トピックモデルによる文書分類	5
第2章 世界特許マップ	7
2.1 基本統計	7
2.2 技術区分と技術領域	8
2.3 特許マップで見るホットな技術領域の遷移	12
2.4 発行国・機関別の特許公開件数の推移	15
第3章 出願人別の特許分布	18
3.1 主な出願人	18
3.2 セグメント別の出願動向	23
第4章 まとめ	28

1. 調査概要

1.1 背景

量子力学の原理を利用した「量子技術」の代表例は集積回路や光通信である。これらは、とくにコンピューター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、量子状態をさらに精密制御し、量子もつれや量子干渉などの量子特有の性質を最大限に活かす「量子技術 2.0」とも呼ばれる新技術の研究開発が世界中で活発化している。量子技術の代表例は、量子センサ、量子通信、量子コンピュータ、量子シミュレータなどである。

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。中国も国を挙げて量子技術に注力している。とりわけ、量子通信分野では、北京と上海を結ぶ全長 2000km 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、世界からその技術に耳目が集まっている。危機感を募らせた米国では、2018 年 6 月に「国家量子イニシアティブ法」案が下院に、「量子コンピューティング研究法」案が上院にそれぞれ提出され、政府の動きが活発化している（2018 年 12 月に下院法案は成立した）。「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。

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 2.0 への注力が始まった。

量子暗号鍵配送のような社会実装フェーズの競争から、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 2.0 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と言えよう。

我が国の科学政策・産業政策の方向性を判断する上では、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。国において量子技術 2.0 をどのように推進すべきか、岐路に立たされていると言えよう。を抽出し、マッピングして分析することで、政策的含意を得ようとするものである。

1.2 調査目的

本調査は主要国における量子技術 2.0 の開発動向を特許の公開情報から把握・分析することを目的とする。特に、近年とりわけ注目が集まり国際的に開発競争が激化している量子コンピュータ、量子通信・量子暗号などに焦点を当て、関連特許の公開数の変化や出願人の動向、マッピングによる関連技術どうしの関係性や構造について分析する。また、特許ではハードウェア関連の権利化が中心と推測されるが、ソフトウェア関連技術も含めて、その開発動向を明らかにすることを目的とする。

この目的のため、本調査では「量子」を名称・要約・請求項・明細書などに顕に含む特許公報を広く収集したうえで、「量子化」や「量子効率」など、量子技術 2.0 と関連の薄い技術に関する特許を母集団から除外した上で、クラスター分析によるマップ調査を行う。

1.3 データ前処理・母集団

LexisNexis 社の TotalPatent を用い量子技術のうち情報処理に関連する技術に関する世界特許の収集・集計・分析を行った。対象としたのは表 1.1 に示すとおり、1990 年以降に主要国及び特許発行機関で公開された公開公報である。

表 1.2 に具体的な検索式と検索件数を示す。検索の結果得られた 7756 件のうち、ファミリー特許の重複を削除し、更に発明の名称・要約・請求項・明細書本文の収録に欠損のない 5526 件を一次母集団とした。この一次母集団中には量子技術 2.0 とは関連が薄く、本調査の目的には適さない技術公報も含まれている。

表 1.1：検索範囲

項目	条件
公報種別	公開公報
発行国・機関	米国、欧州、WIPO、中国、日本、韓国、ドイツ、フランス、英国、カナダ
公開日	1990年以降
キーワード検索対象	発明の名称、要約、請求項

表 1.2：検索式

グループ	内容・検索式	検索件数
S1	“quantum”と“qubit”が前後5ワード以内 quantum¥w*?¥s([¥s]*?¥s){0,5}qubit qubit¥w*?¥s([¥s]*?¥s){0,5}quantum	816
S2	“quantum”と“Qbit”が前後5ワード以内 quantum¥w*?¥s([¥s]*?¥s){0,5}Qbit Qbit¥w*?¥s([¥s]*?¥s){0,5}quantum	5
S3	“quantum”と“informat”が前後5ワード以内 quantum¥w*?¥s([¥s]*?¥s){0,5}informat informat¥w*?¥s([¥s]*?¥s){0,5}quantum	1879
S4	“quantum”と“comput”が前後5ワード以内 quantum¥w*?¥s([¥s]*?¥s){0,5}comput comput¥w*?¥s([¥s]*?¥s){0,5}quantum	2070
S5	“quantum”と“control”が前後5ワード以内 quantum¥w*?¥s([¥s]*?¥s){0,5}control control¥w*?¥s([¥s]*?¥s){0,5}quantum	3432
S6	“quantum”と“communicat”が前後5ワード以内 quantum¥w*?¥s([¥s]*?¥s){0,5}communicat communicat¥w*?¥s([¥s]*?¥s){0,5}quantum	1722
S7	“quantum”と“simulat”が前後5ワード以内 quantum¥w*?¥s([¥s]*?¥s){0,5}simulat simulat¥w*?¥s([¥s]*?¥s){0,5}quantum	237
全母集団	上記合計 S1 or S2 or S3 or S4 or S5 or S6 or S7	7756

一次母集団 5526 件を類似度に基づいてクラスタリングを行い（方法の詳細は後述する）、「量子コンピュータ」「量子通信」「量子暗号」「量子ドット・半導体」などの 10 区分に大別した。抽出された特徴語や名称・要約・請求項などの内容に基づいて、図 1.1 の青点線で囲まれたクラスターならびに、マップの外周部にある複数の特許を調査対象外として除外した。除外した特許は、「量子ドット・半導体」「光デバイス」「量子ドットの製造」と分類される多数の特許のほか、「音声・画像データの量子化圧縮」（“quantum”の検索ノイズ）、「量子ドット標識抗体・クロマトグラフィー」「量子井戸構造を有するレーザー」などの特許である。最終的に抽出された 4088 件を本調査の分析対象とした。

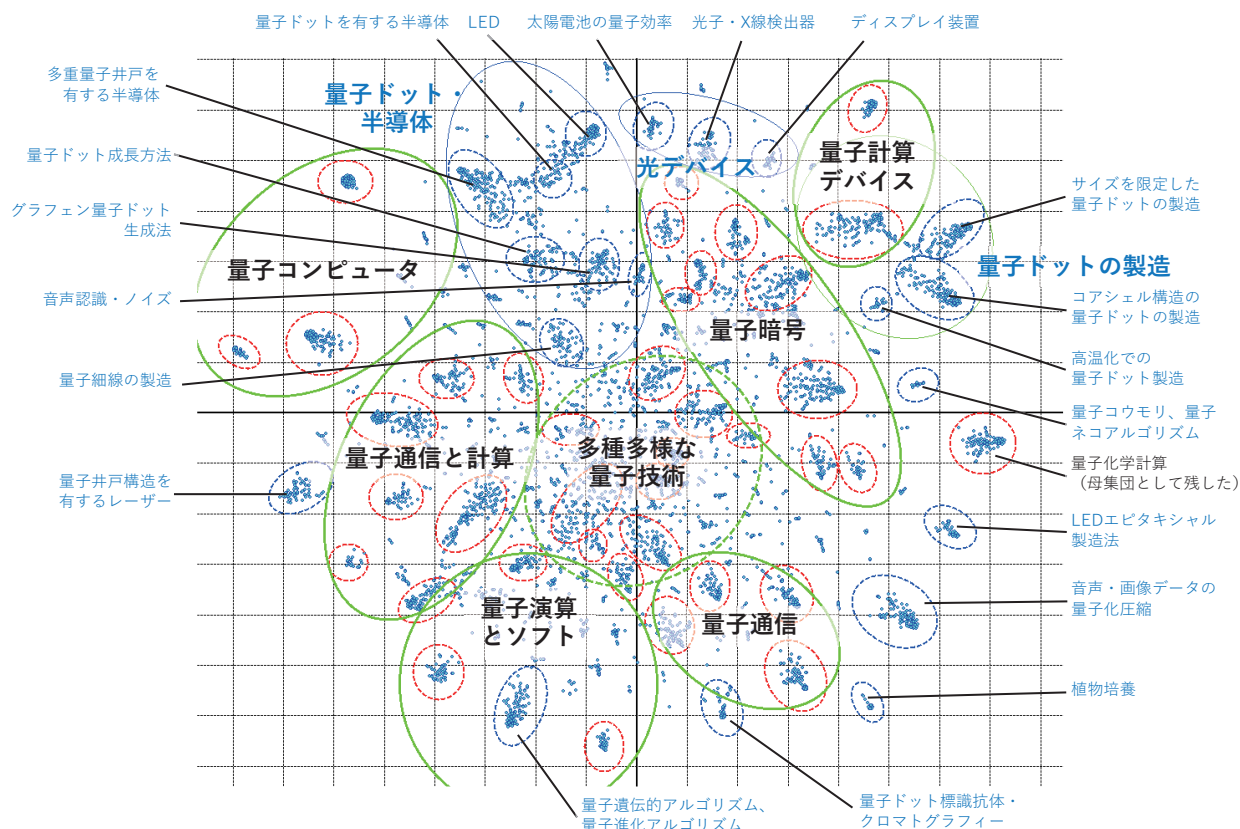


図 1.1：不要な技術領域の設定

1.4 トピックモデルによる文書分類

本調査では、トピックモデル（LDA：Latent Dirichlet Allocation）によって特許文書の分類を行った。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うが、どの単位でトピック(=文書のカテゴリ)を考えるかにより「ユニグラムモデル」「混合ユニグラムモデル」「トピックモデル」などモデル選択の自由度がある(図 1.2)。ユニグラムモデルでは、全ての文書の単語は、1つのトピックから生成されたと仮定する。混合ユニグラムモデルでは、文書ごとに1つのトピックから単語の生成が行われると仮定する。トピックモデルでは、各文章は複数のトピックで校正され、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る。

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。

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（平均的な）概念を意味する。今回の場合では、母集団中に最多の概念であった量子通信・量子暗号に関する基本技術が中心となった。原点からの動径方向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。また、各文書間の相対距離も同様に文書間の差異を表しており、距離に近い文書同士は類似した概念を含む文章であるといえる。便宜上 X 軸と Y 軸を描いたが、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、特許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（後述するように 30 の「技術領域」として命名した）。

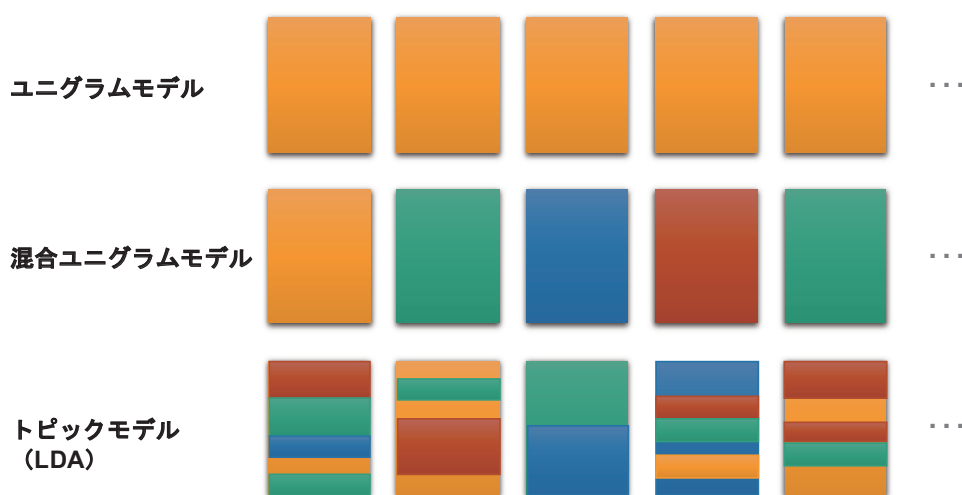


図 1.2：文書分類のモデル

2. 世界特許マップ

2.1 基本統計

量子技術 2.0 関連の特許 4088 件データの年次数や発行国・機関別件数など基本統計を図 2.1 に示す。図 2.1(a) に示すとおり、世界での特許公開件数の合計は 2010 年頃から急激に増加しており、発行国・機関別に見た図 2.1(b) から、中国における発行数の急増が主な背景であることがわかる。2018 年の公開件数はデータベースの収録途中の値であり、急減しているわけではない点に注意が必要である（参考としてプロットした）。

図 2.1(b) に示したように、中国での 2008 年以降の特許公開件数の増加が著しい。米国も 2000 年の公開制度開始以来、継続的に増加しているが、中国の急峻な変化と比べるとその伸びは緩慢である。日本では関連する特許が 1990 年代から積極的に公開されてきているものの、2005 年頃をピークに減少に転じ、近年では件数は伸びていない。WIPO（世界知的所有権機関）での公開数は日米中に比べて多くないが、増加傾向にある。

母集団における発行国・機関別の公開件数では、中国が首位、2 位が米国、日本は 3 位となった。その後、WIPO、韓国と続き、欧州関連の件数は少ない（図 2.2）。

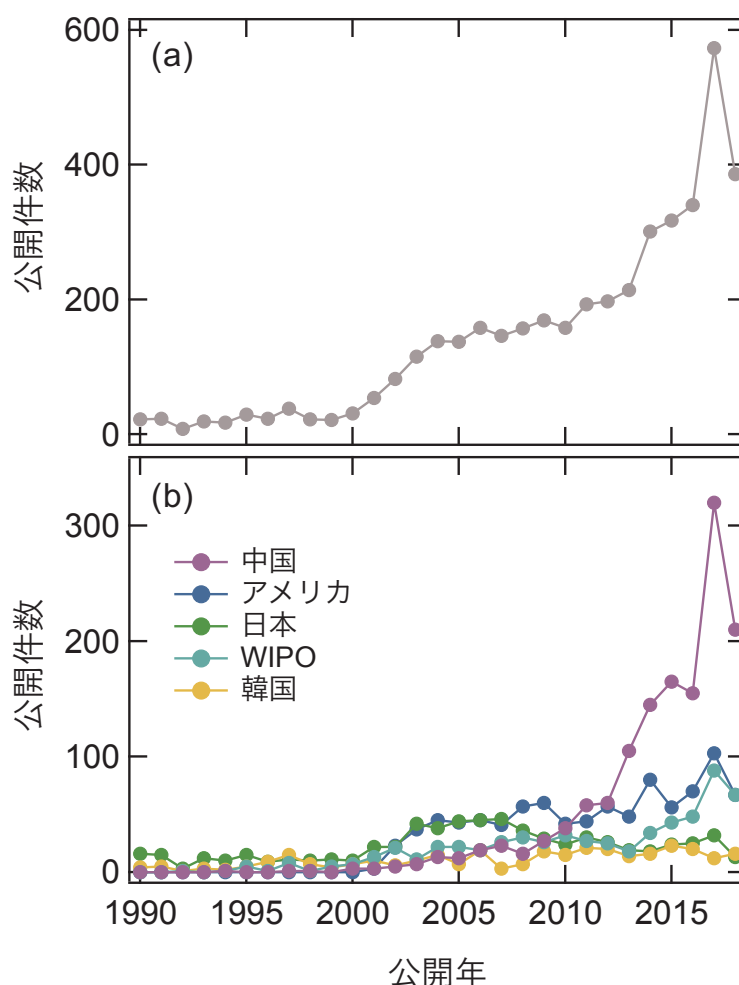


図 2.1：公開年別件数

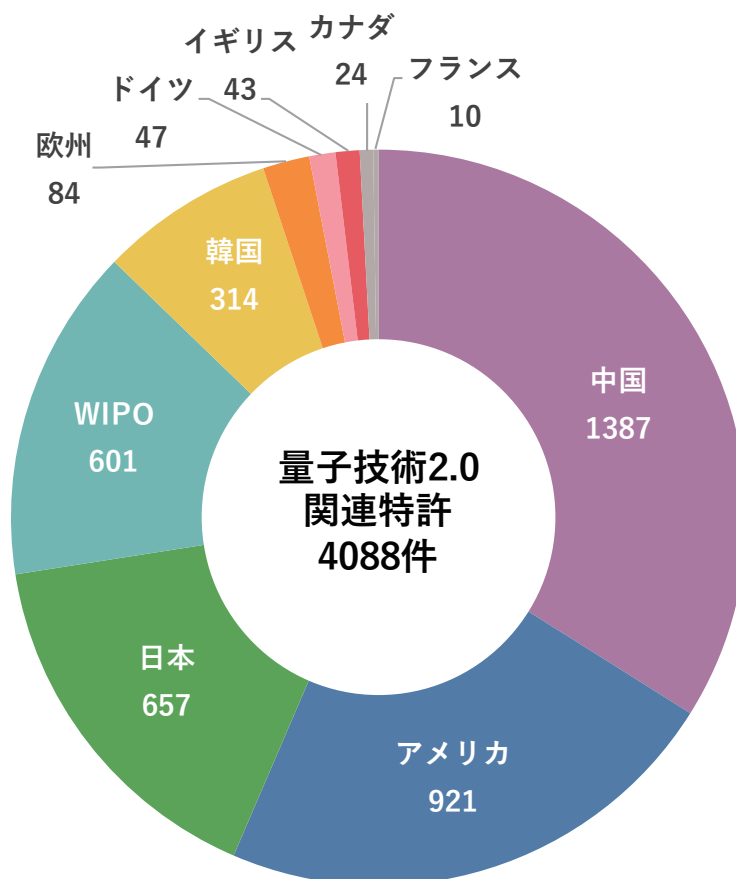


図 2.2：発行国・機関別件数

2.2 技術区分と技術領域

量子技術 2.0 関連特許 4088 件をトピックモデルによって類似度を評価し、多様体学習により二次元平面にマッピングした可視化結果を図 2.3 に示す。図中の点ひとつひとつは特許文書である。類似度に基づいて赤い点線で示したような 30 個のクラスター（以降、「技術領域」と呼ぶ）を特定した。

さらに大域的な構造として、特徴語や名称・要約・請求項などに基づいて 30 個の技術領域を、実線で示した「量子コンピュータ」「量子ビット・ゲート」「量子暗号」「量子通信」「量子デバイス」に大別した。ただし、量子通信と量子暗号は重なり部分が大きいため、以降では「量子コンピュータ」「量子ビット・ゲート」「量子通信・量子暗号」「量子デバイス」の 4 つを「技術区分」として扱う。

特許マップの中心部分（すなわち本調査で対象とした 4088 件の特許に頻出する概念）は、量子通信・量子暗号関連の技術が占めた。その外周右側に「量子回路・コンパイル」「量子ビット共振器」領域を含む「量子ビット・ゲート」区分、更にその右側に「量子演算装置」「超伝導量子コンピュータ」といった技術領域を含む「量子コンピュータ」区分が形成されている。「量子通信・量子暗号」区分の左側に位置する「量子デバイス」区分は、「量子ドット素子」「量子ドット素子の製造方法」など、必ずしも量子情報処理との関連性は高くない技術領域も含まれるが、相対的な位置関係を見るための参照点として、以降はそのまま分析した。なお、「量子デバイス」

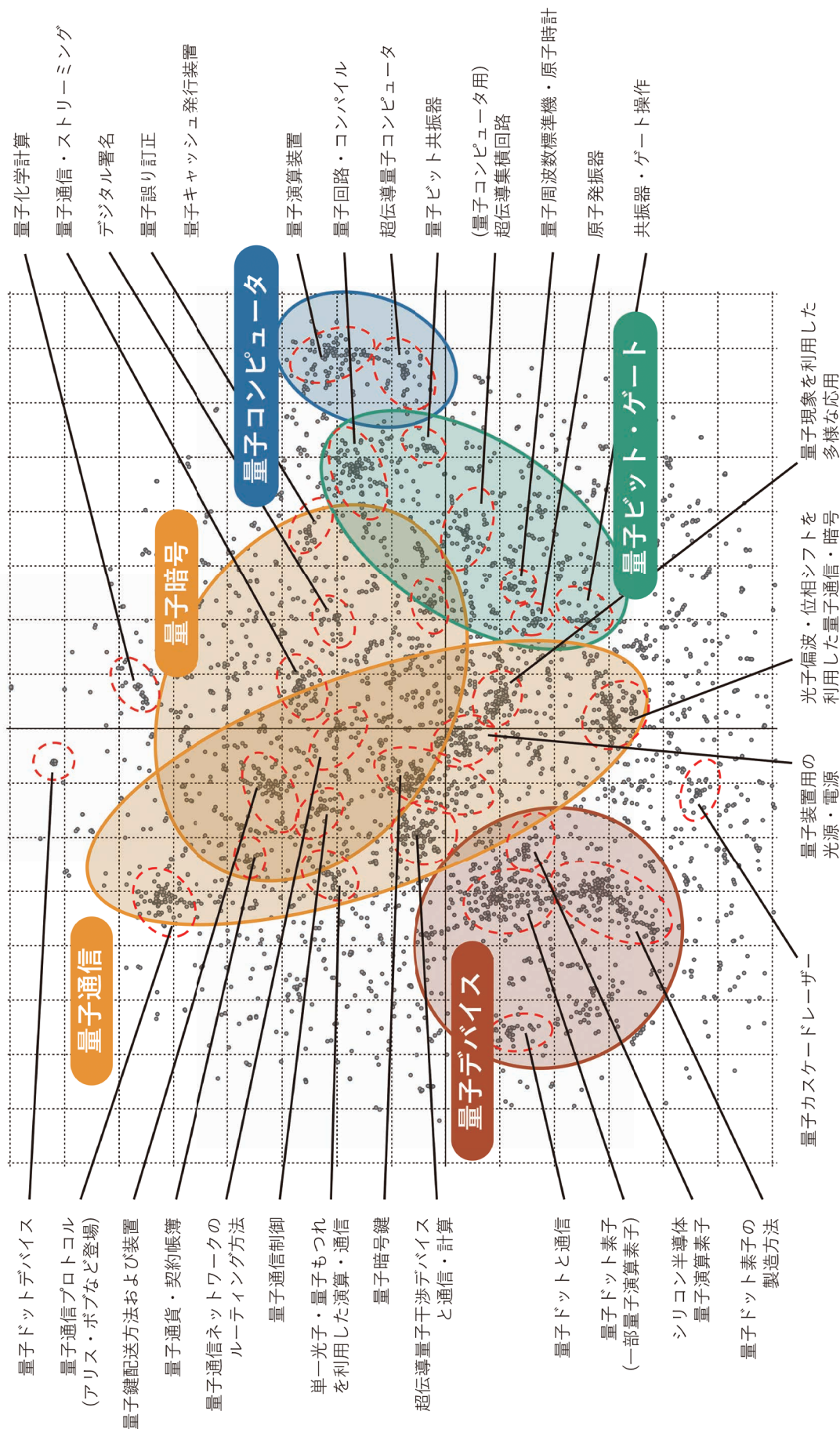


図 2.3：量子技術 2.0 特許マップ

表 2.1：技術区分と技術領域

区分	領域	件数
量子コンピュータ		173
	量子演算装置	88
	超伝導量子コンピュータ	56
	その他	29
量子ビット・ゲート		529
	量子回路・コンパイル	97
	量子ビット共振器	22
	(量子コンピュータ用)超伝導集積回路	57
	量子周波数標準器・原子時計	28
	原子発振器	31
	共振器・ゲート操作	26
	その他	268
量子通信・量子暗号		1653
	量子暗号鍵	139
	量子鍵配送方法および装置	64
	デジタル署名	32
	量子通貨・契約帳簿	19
	量子誤り訂正	27
	量子通信プロトコル(アリス・ボブなど登場)	76
	量子通信制御	37
	超伝導量子干渉デバイスと通信・計算	97
	量子通信・ストリーミング	69
	量子通信ネットワークのルーティング手法	42
	量子キャッシュ発行装置	33
	単一光子・量子もつれを利用した演算・通信	32
	光子偏波・位相シフトを利用した量子通信・暗号	91
	量子現象を利用した多様な応用	61
	量子装置用の光源・電源	77
	その他	757
量子デバイス		636
	量子ドットデバイス(一部量子演算素子)	143
	シリコン半導体量子演算素子	29
	量子ドットと通信	36
	量子ドット素子の製造法	175
	その他	253
その他		1097
	量子化学計算	26
	量子ドットデバイス	21
	量子カスケードレーザー	28
	その他	1022
総計		4088

区分に分類される特許の中にも、量子コンピュータ用途を含む「量子ドット素子（一部量子演算素子）」技術領域も存在している。

同定した技術区分と技術領域を表 2.1 にまとめた。図 2.3 にあるとおり、「量子キャッシュ発行装置」領域や「量子回路・コンパイル」領域などは複数の技術区分に跨がるような技術領域であるが、ここでは「量子通信・量子暗号」か「量子コンピュータ」のどちらか一方の技術区分に排他的に含まれるように便宜上分類した。また、各技術区分には、技術領域には含まれない特許（図 2.3 で点線（＝技術領域）の外側だが実線（＝技術区分）の内側にある点）も一定数あり、それぞれの技術区分において「その他」と分類した。また、「量子化学計算」「量子ドットデバイス」「量子カスケードレーザー」領域に分類される特許など、4 つの技術区分のいずれにも含まれないような特許が全体のおよそ 4 分の 1 を占めているが、それらは「その他」区分として集計した。

「量子コンピュータ」区分は、173 件の情報処理や計算機などのキーワードを頭わに含む特許から成り、大きく「量子演算装置」と「超伝導量子コンピュータ」に分けられた。量子コンピュータ用途の量子ビット・量子ゲート技術に関する特許であっても、頭わにコンピュータ等を含まないものは後述する「量子ビット・ゲート」区分に含めた。

「量子ビット・ゲート」区分の中心は、「(量子コンピュータ用) 超伝導集積回路」領域である。そこから「量子コンピュータ」区分寄りに「量子ビット共振器」「量子回路・コンパイル」領域があり、これらの技術が重要なブリッジ技術となっている可能性が示唆される。また、「量子通信・量子暗号」区分寄りに「量子周波数標準機・原子時計」「原子発振器」「共振器・ゲート操作」などが並び、「量子コンピュータ」区分の「超伝導量子コンピュータ」領域からやや距離があるものの、量子コンピュータや量子通信に基盤的な技術概念を含む特許と判断される。件数は 529 件であった。

「量子通信・量子暗号」区分には 1653 件の特許が含まれ、その中心は「量子暗号鍵」「量子鍵配送方法および装置」「超伝導量子干渉デバイスと通信・計算」「量子通信制御」「量子通信ネットワークのルーティング方法」などの領域である。この周辺に「量子通信」寄りの「単一光子・量子もつれを利用した演算・通信」「光子偏波・位相シフトを利用した量子通信・暗号」「量子通信プロトコル」領域や、「量子暗号」寄りの「量子通信・ストリーミング」「デジタル署名」領域などが現れた。「量子誤り訂正」領域は、「量子ビット・ゲート」区分と「量子通信・量子暗号」区分の境界に位置している。

「量子デバイス」区分は、「量子ドット素子の製造方法」「量子ドット素子（一部量子演算素子）」領域が大半を占めるが、「シリコン半導体量子演算素子」領域や「量子ドットと通信」領域など、量子技術 2.0 関連の特許の集積も見られた。

図 2.4 にカーネル確率密度推定によるマッピングを示した。この可視化方法では、「量子コンピュータ」区分と中央の「量子通信・量子暗号」区分との間のギャップが浮き彫りとなる。また、「量子回路・コンパイル」領域は「量子コンピュータ」区分にかなり近い概念で、かつ、同じ「量子ビット・ゲート」区分の「(量子コンピュータ用) 超伝導集積回路」や「量子周波数標準機・原子時計」領域とは距離がある様子も窺える。

「量子通信・量子暗号」区分では、「量子暗号鍵」や「超伝導量子干渉デバイスと通信・計算」区分が高密度であることがわかる。そこから図の上方に向かってやや離れて、「量子通信制御」「量子鍵配送方法および装置」「量子通信・ストリーミング」領域などが並ぶ。また、図の左上にある「量子通信プロトコル」領域は、当該区分の中ではやや独立した技術であるようにプロットされる。

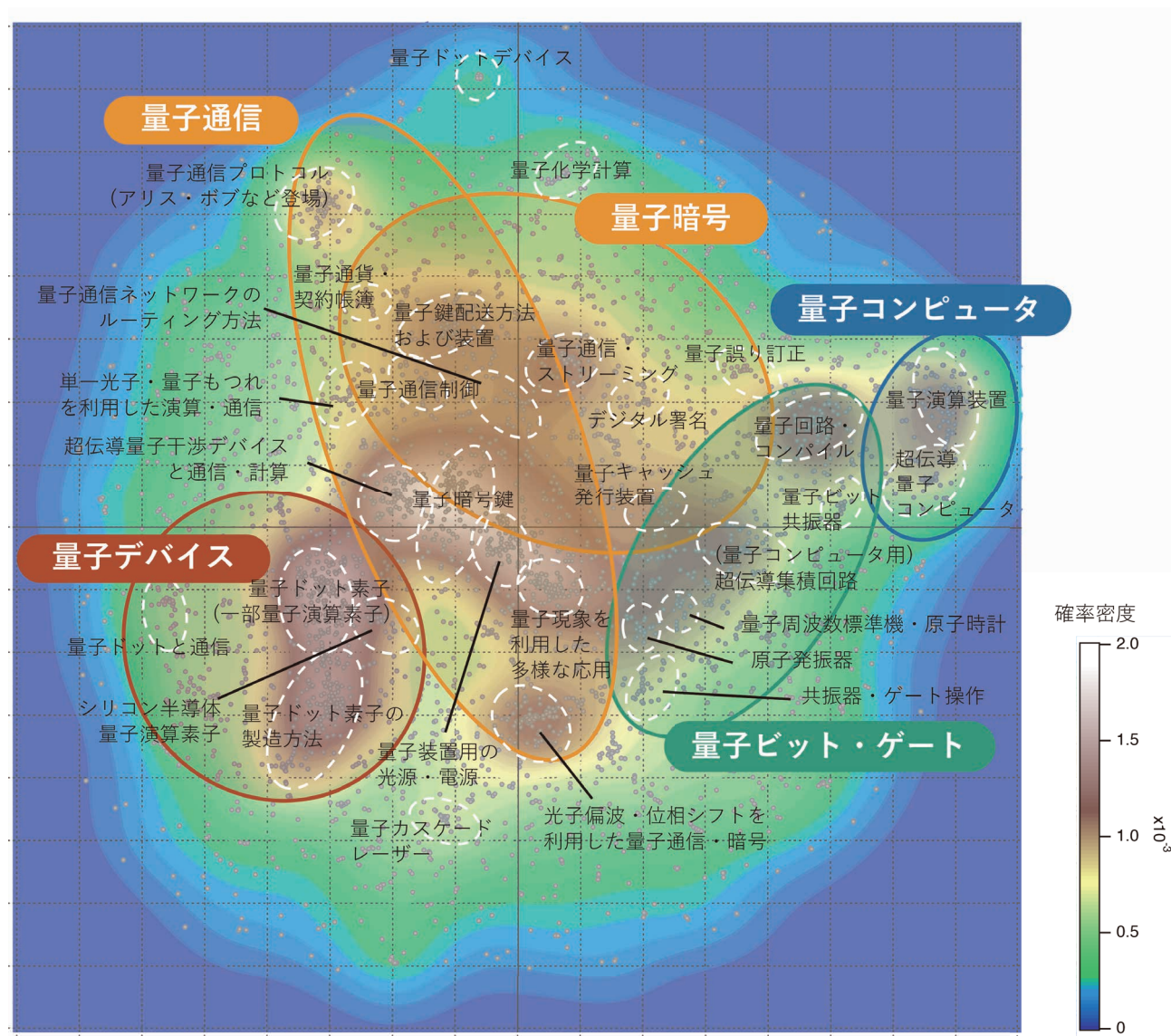


図 2.4：量子 ICT 特許マップ（カーネル確率密度推定）

2.3 特許マップで見るホットな技術領域の遷移

特許マップの時系列変化から、5年ごとの技術遷移を見る。図 2.5 には、1990 年以降 2018 年までの 29 年間で 6 期間に分けて、それぞれの期間内で公開された特許の確率密度をプロットした。技術領域別の公開件数の推移は図 2.6 に示した。

1990～94 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。1992 年の超高密度符号化、量子暗号実験、半導体共振器ポラリトン観測などの発表のほか、続く 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（1994 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が、特許マップには顕わな関連はない。

1995～99 年では「超伝導量子干渉デバイスと通信・計算」領域が引き続き高い密度を示している。量子情報科学の研究としては、量子もつれ光子対の生成（1995 年）、冷却原子における

ボーズアインシュタイン凝縮（1995 年）Grover の検索アルゴリズム（1996 年）、誤り耐性量子計算の提案（1996 年）、Zeilinger らの量子テレポーテーション実験検証（1997 年）、NMR 量子計算（1997 年）、中村・蔡らの超伝導量子ビットの提案・実験（1999 年）など華やかな成果が並ぶ時期であったが特許ではそこまでの盛り上がりは見えない。また、1999 年にはカナダの D-wave Systems 社が創業しているが、「量子コンピュータ」区分には動きはない。

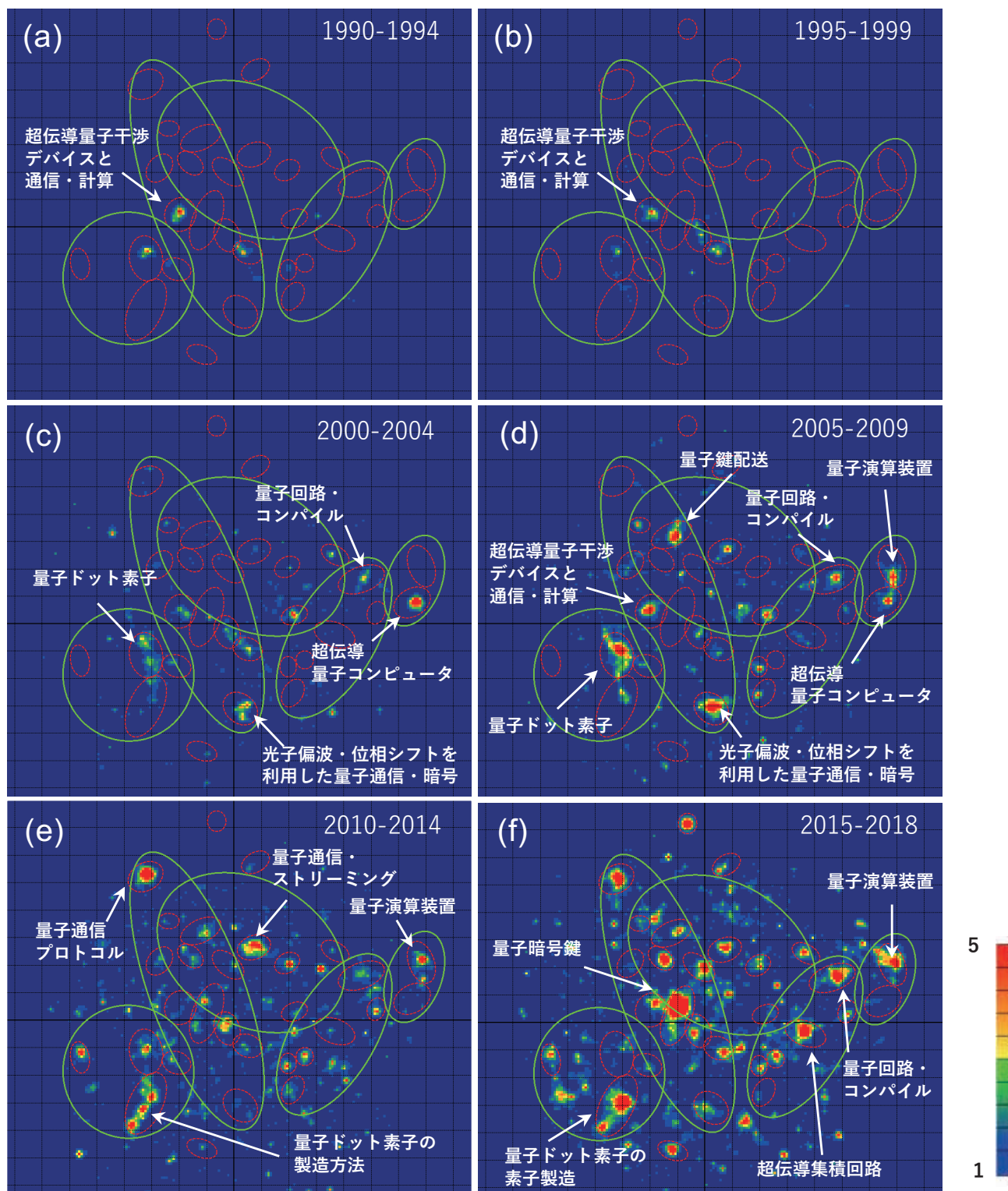


図 2.5：特許マップの年次推移

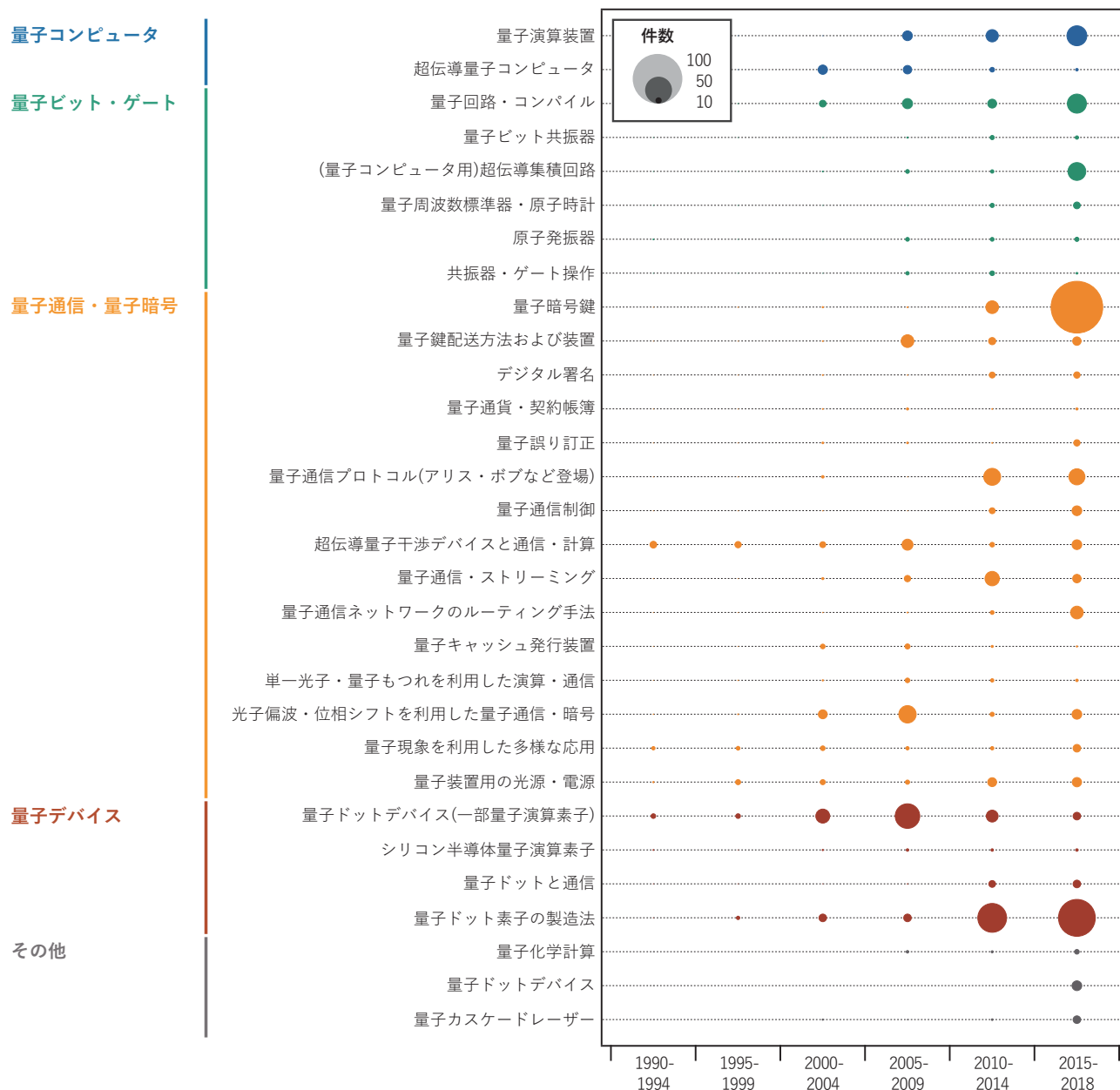


図 2.6：技術領域別の公開件数の推移

2000～04 年になると、「量子コンピュータ」区分の「超伝導量子コンピュータ」領域に極めて高い集積が見られるようになる。また、「量子回路・コンパイル」「光子偏波・位相シフトを利用した量子通信・暗号」領域も顕在化した。この間、超伝導素子を中心とした量子エレクトロニクス分野では、Martinis ら超伝導位相量子ビットにおけるラビ振動の観測（2002 年）や Schoelkopf らによる共振器による回路 QED の提案・実験（2004 年）のほか、固体単一光子源（2000 年）やダイヤモンド NV センターによる量子ビット（2004 年）など重要な進展があり、幾分は特許にも反映されていると考えられる。今後、論文と特許のサイエンスリンク調査を行えば、有意義な結果が得られると思われる。

ただし、2000 年以前と 2000 年以降との比較には注意を要する。2.1 節で言及したとおり、本調査で用いたデータベースに収録されている米国の特許は、2000 年の公開制度開始以降に公開

された特許のみである。そのため、米国での特許が多数を占める「量子コンピュータ」区分の特許の公開数が図 2.6 のように 2000 年を境に急に現れて増加したように見えているのは、データベース収録の影響が大きいと考えられる。

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（2000 年）、超シャノン限界符号化の原理実証（2003 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（2003 年）、MagiQ 社による商用量子暗号鍵配送（QKD）装置の発表（2003 年）など、応用面での動きが活発化した時期でもあるが、特許マップでの「量子通信・量子暗号」区分での集積は明確ではない。

2005～09 年にはそれまでホットな領域であった「超伝導量子コンピュータ」「量子回路・コンパイル」「光子偏波・位相シフトを利用した量子通信・暗号」「量子ドット素子」「超伝導量子干渉デバイスと通信・計算」領域に加えて、「量子通信・量子暗号」区分の「量子鍵配送」領域に顕著な集積が見られるようになる。この様子は図 2.6 にも示されている。また、特許マップ上の「量子コンピュータ」区分内では、「量子演算装置」領域が「超伝導量子コンピュータ」領域のすぐ隣に現れ、D-wave Systems 社による 16 量子ビットの計算機システムの発表（2007 年）との関連が示唆される。量的には「超伝導量子コンピュータ」領域の公開数の減少に平行して「量子演算装置」領域の特許が増えている（図 2.6）。

2010～14 年の機関で最も顕著な技術領域は「量子通信プロトコル」「量子通信・ストリーミング」「量子暗号鍵」領域である。このような量子暗号・量子通信分野での特許動向は、後に図 2.8(a) で見るように、中国における特許の動向を多分に反映していると考えられる。我が国でもこの時期には 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（2010 年）が、特許数の急増への影響は小さいと推測される。

また、「量子コンピュータ」区分の「量子演算装置」領域は前期間に引き続き多数の特許が公開され、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重なる。「量子デバイス」区分では「量子ドット素子の製造方法」領域がホットなエリアになるのもこの時期である。

2015～18 年は他期間と比べて年数が短いにもかかわらず、公開件数としてはどの技術区分でも期間中最多となっている。特許マップでは「量子暗号鍵」領域を代表として「量子通信・量子暗号」区分で極めて活発な特許公開活動が行われたことが窺えるほか、「量子演算装置」「量子回路・コンパイル」「超伝導集積回路」など「量子コンピュータ」区分においても精力的に特許は公開された様子が窺える。

2.4 発行国・機関別の特許公開件数の推移

全体の特許公開件数の推移を図 2.7 に、発行国・機関別の特許公開件数を図 2.8 に技術区分ごとに示した。これらの棒グラフは、先述した 5 年毎の期間（1990～94、1995～99、2000～04、2005～09、2010～14、2015～18 年（途中））中における件数の期間内の合計件数を表している。

世界全体で見ると、どの技術区分も公開件数は増加しつづけており、2015～2018 年（途中）の期間は他の期間と比べ短いにもかかわらず、公開数が全期間中の最大値となっている。

発行国別に見ると中国（図 2.8(a)）は全体的な公開数が他国に比べて多く（Y 軸のスケールが図 2.8(b)、(c)、(d) と異なる点に注意）、とくに「量子通信・量子暗号」区分の特許公開数の多さと近年の急増が顕著である。また、「量子コンピュータ」区分に分類される特許がないという特徴をもつ。

米国は中国とは対照的に「量子通信・量子暗号」区分の公開数はそれほど多くなく、公開数もほとんど伸びていない（図 2.8(b)）。一方で、「量子コンピュータ」「量子ビット・ゲート」区分での公開が多い。今回対象とした特許のうち「量子コンピュータ」区分に分類される特許の大半は米国における D-wave Systems 社を出願人とする特許である。また、米国における特許出願のもう一つの特徴として、「量子ビット・ゲート」が「量子通信・量子暗号」区分と同程度であることである。このような特徴は WIPO（図 2.8(d)）にも見られ、「量子通信・量子暗号」への偏重が見られる中国、日本、韓国などと対照的である。我が国は「量子コンピュータ」区分に分類される特許の公開は無く、「量子通信・量子暗号」区分が相対的に多い（図 2.8(c)）。「量子通信・量子暗号」「量子デバイス」「その他」のいずれの区分においても、特許公開数が 1990～94 年期から 2005～09 年期まで増加傾向にあったものの、続く 2010～14 年期中で大幅に減少しており、研究開発活動の失速が危惧される。ここで対象となっている特許の出願人の多くは、3 章で挙げるような代表的な大企業である。図 2.8(d) および (e) に示すとおり、WIPO や韓国においても緩慢ではあるものの全体としてはどの区分も特許公開数は伸び傾向にあり、我が国だけが減少傾向である。

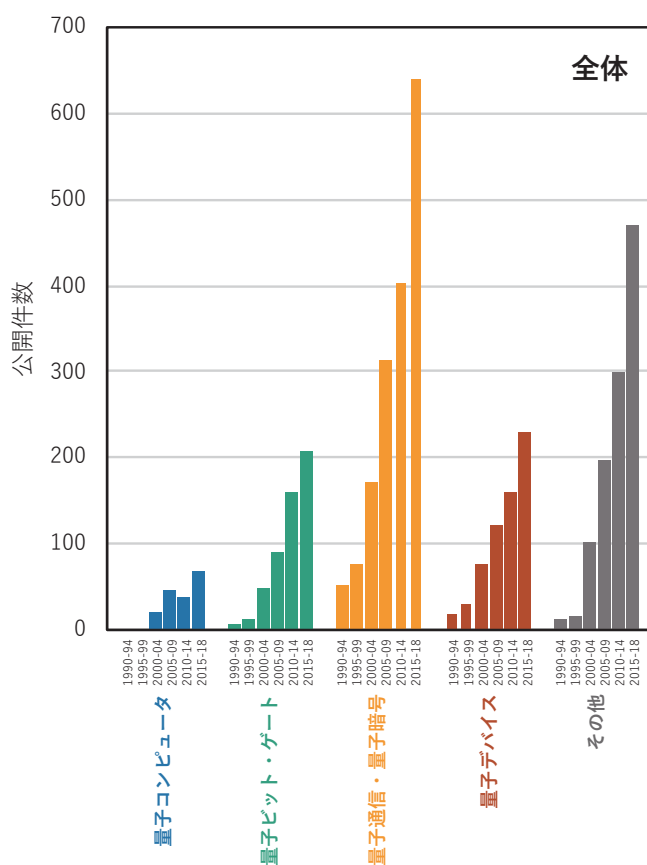


図 2.7：技術区分別の公開件数の推移

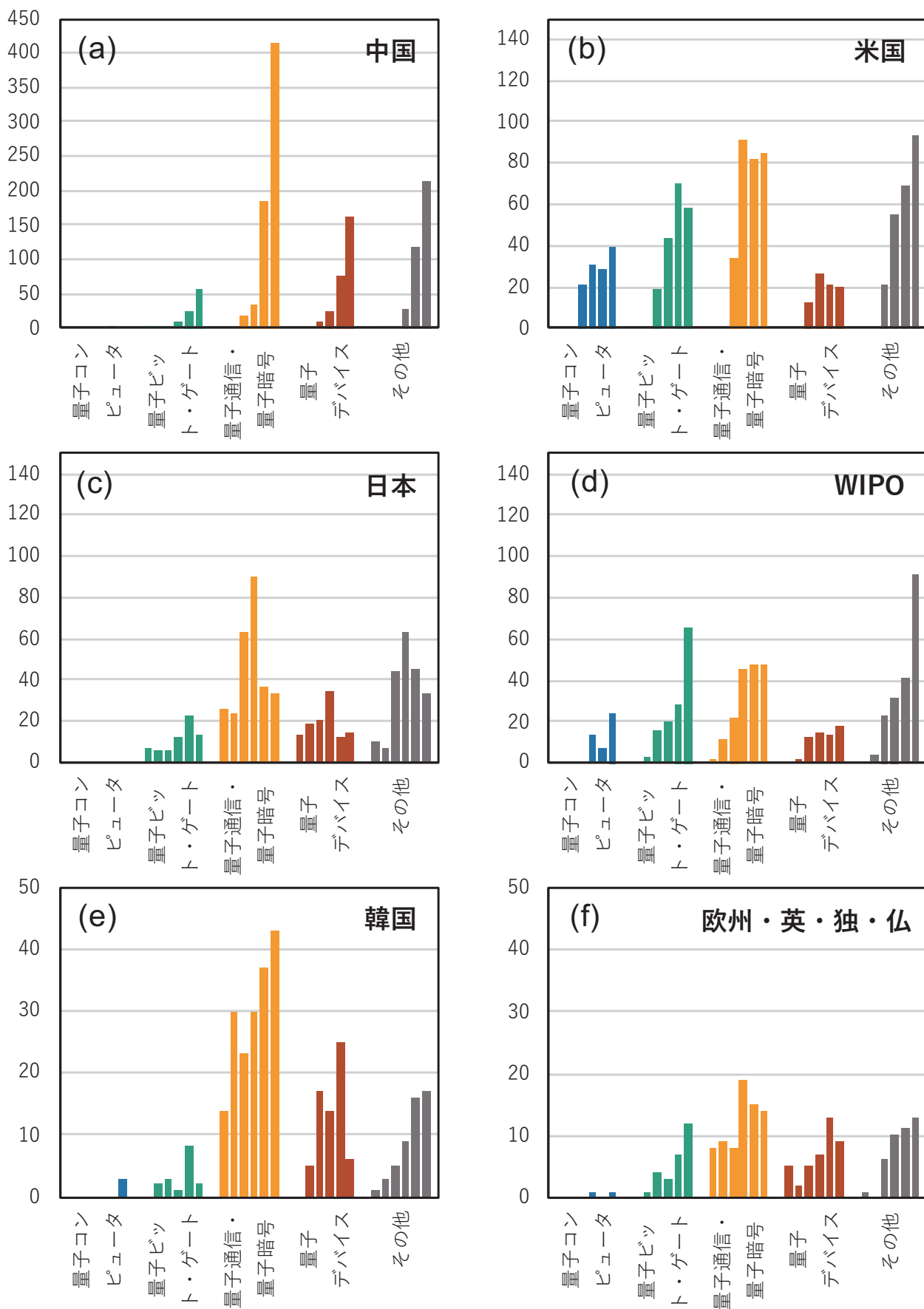


図 2.8：技術区分別の公開件数の国際比較

3. 出願人別の特許分布

3.1 主な出願人

収集した量子技術 2.0 関連技術の世界特許 4088 件の出願件数上位 50 位のランキングを図 3.1 に、技術区分ごとのそれぞれの出願人の公開特許数の推移を図 3.2 に示す。出願人名の横に併記したカッコ内の数字は公開件数の合計値（整数カウント¹）である。

首位はカナダの D-Wave Systems 社であり、技術区分ごとの内訳を見ると「量子コンピュータ」関連が大半である。このような「量子コンピュータ」区分に特化した特徴をもつ企業には他には見られない²。2 位以降には我が国の電機メーカーが並ぶ。技術区分ごとの内訳を見ると日本企業の公開特許の多くは「量子通信・量子暗号」「量子デバイス」区分の特許である。

4 位に Microsoft、8 位に Intel、10 位に IBM と米国の IT 企業がランクインしている。これらの企業においては「量子通信・量子暗号」のウエイトはそれほど高くなく、相対的には「量子コンピュータ」「量子ビット・ゲート」区分の特許を重視している様子が窺える。

図 2.1 に示した中国における特許数の増加の実態として、中国科学院、浙江神州量子通信技術有限公司、北京郵電大学、QASKY、中国科学技術大学、国家电网公司、華南師範大学など、多数の出願人がランキング上位に入っている。これらの中国の出願人のうち中国科学院のみ「量子デバイス」区分の特許出願が多い特徴を持つが、その他の中国の出願人による出願は「量子通信・量子暗号」区分に分類される技術領域の特許が大半である。

トップ 12 位までの出願人それぞれの特許をマップ上にプロットした（図 3.3、図 3.4）。D-wave Systems 社（図 3.3(a)）は、「量子演算装置」「超伝導量子コンピュータ」領域に多数の特許を保有していることがわかる。NTT（図 3.3(b)）、東芝（図 3.3(c)）、NEC（図 3.3(f)）は「量子通信・量子暗号」区分の特許出願が多く「共振器・ゲート操作」「光子偏波・位相シフトを利用した量子通信・暗号など」領域での特許が多いなど、保有技術区分のウエイトは全体的に似た傾向を持っていることがわかる。NTT と NEC は「超伝導量子干渉デバイスと通信・計算」領域にも特許集積が見られる点でも共通している。日立製作所（図 3.3(e)）は上記日本企業 3 社とはやや傾向を異にし、「シリコン半導体量子演算素子」領域での出願が目立つ。三菱電機（図 3.4(i)）も似た傾向であるが、「量子現象を利用した多様な応用」領域に特許が多い。

Microsoft（図 3.3(d)）と IBM（図 3.3(j)）は「量子ビット・ゲート」「量子コンピュータ」区分に多くの特許を有している。Microsoft は「量子回路・コンパイル」領域を中心としたソフトウェア関係に、IBM は「量子ビット共振器」「（量子コンピュータ用）超伝導集積回路」領域などのハードウェア関係に強みがあることが窺える。一方、Intel（図 3.4(g)）を出願人とする特許の多くは量子技術 2.0 との関連が薄い「量子ドットデバイス」に分類される特許が大半であり、一部が「（量子コンピュータ用）超伝導集積回路」領域などの特許が見られる程度である。

中国科学院（図 3.4(h)）は「量子ドット素子」「量子ドット素子の製造方法」領域の特許が多く、学術論文の発表数から推定されるほどには量子技術 2.0（量子コンピュータ、量子暗号・量子通信、量子センサ）との関連は高くはないように見える。「量子ビット・ゲート」区分にもいくつかの特許出願があるが、「量子デバイス」区分と比べ少ない。

¹ 複数の出願人による特許は、それぞれの出願人で 1 件とカウントする。そのため、整数カウントによる特許数の合計値は、本調査で扱った特許文書数 4088 件とは一致しない。

² Venture Lending & Leasing VII 社は D-Wave Systems 社に投資するベンチャーキャピタル。

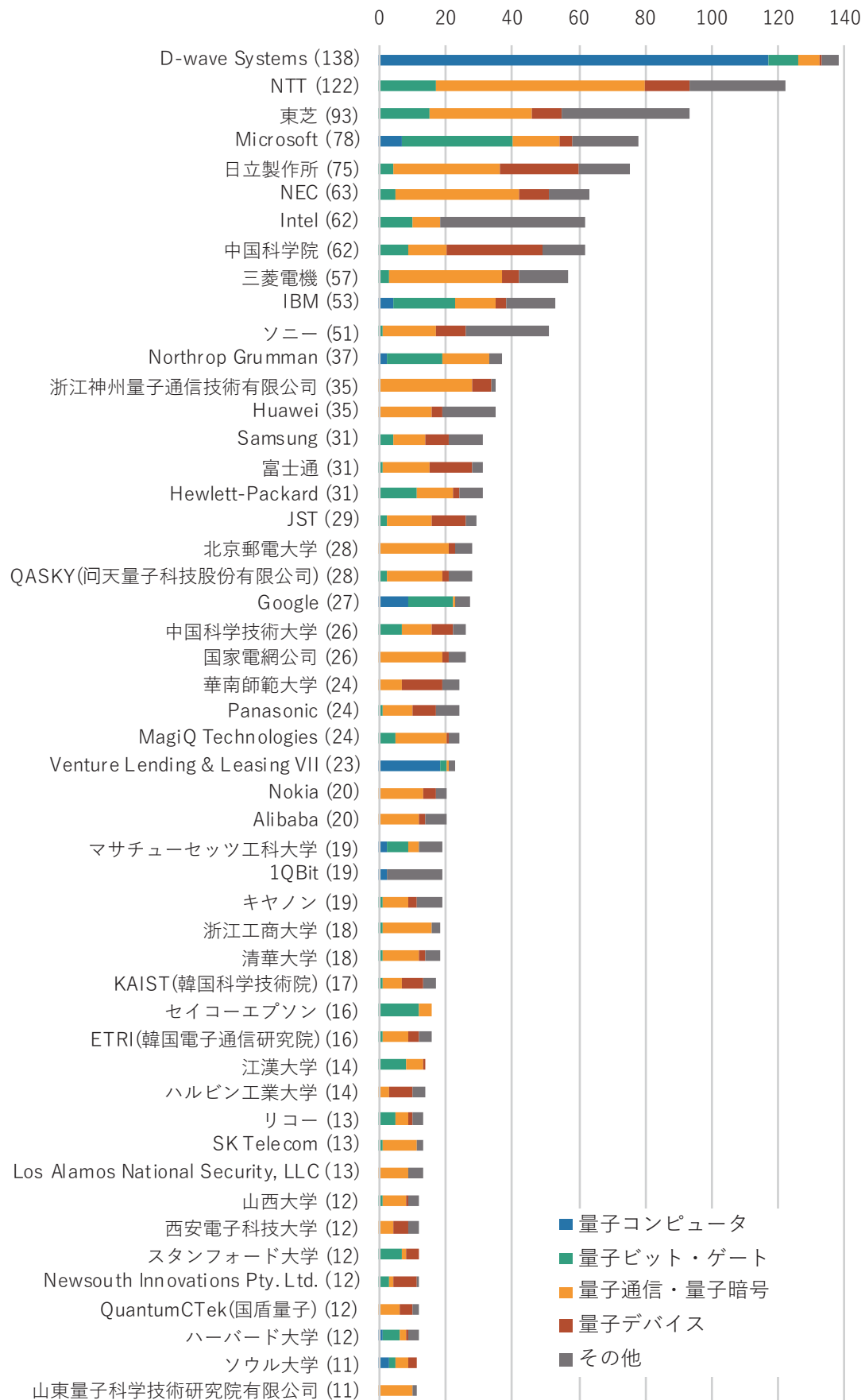
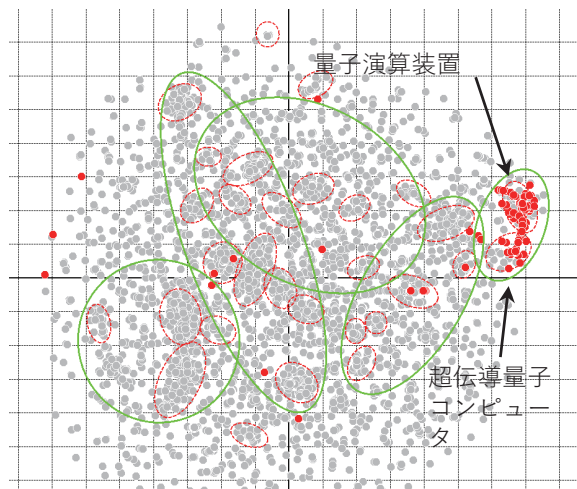


図 3.1：出願件数ランキング（上位 50 件）

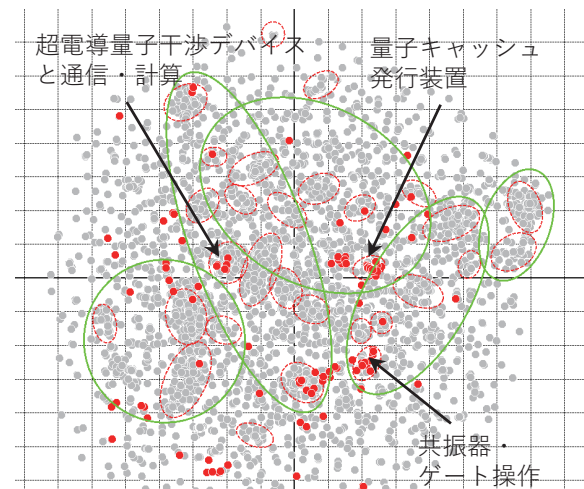
	量子コンピュータ					量子ビット・ゲート					量子通信・量子暗号					量子デバイス					その他									
D-wave Systems (138)		19	40	28	30		2	2	2	3		2	2	2		1							2	1	2					
NTT (122)						1			5	7	4	5	3	15	31	6	3	2	7	2	2		4	9	12	4				
東芝 (93)							2	4	5	4		1	3	3	8	7	9		1	1	2	5	2	1	5	9	3	18		
Microsoft (78)		1	3	3					3	13	17			1	3	7	3				2	2	1			8	7	4		
日立製作所 (75)						1	1				2	10	5	2	9	4	2	5	2	2	4	8	3	2	4		5	2	2	
NEC (63)							1		2	2		4	1	3	21	7	1		1	2	5	1			2	4	5	1		
Intel (62)											10			1	2	3	2							2			42			
中国科学院 (62)							1			3	5					6	5		1	5	14	9				1	8	4		
三菱電機 (57)						2		1				1	5	13	9	3	3	2		1	1	1	1		1	3	7	3	1	
IBM (53)		3	1				1	3	3	12		1			1	2	8		1			2				1	4	10		
ソニー (51)										1		1	5	6	4			3	4		1	1		2	2	11	9	1		
Northrop Grumman (37)			2				1	1	10	5					2	3	9							1	2			1		
浙江神州量子通信技術有限公司 (35)																28					6							1		
Huawei (35)													1	5	4	6					3			2	12			2		
Samsung (31)							1		3			2			1	3	4		1	5		1		1	1	3	3	2		
富士通 (31)						1						4	1	1	2	1	5	2	2	3	2		4			2	1			
Hewlett-Packard (31)							2	7	2				1	1	9						2			1	3	3				
JST (29)							1		1					8	6				7	2	1				3					
北京郵電大学 (28)																11	10				1		1			2	3			
QASKY(問天量子科技股份有限公司) (28)										2							6	11			2					3	4			
Google (27)			9							13							1									1	3			
中国科学技術大学 (26)							2	5							5	4			1		1	4				1	3			
国家電網公司 (26)															8	11					2					1	4			
華南師範大学 (24)																7			1		3	8				1	4			
Panasonic (24)							1					1	3	1	2	2		2	4	1				1	2	4				
MagiQ Technologies (24)							4	1					2	13						1				1	2					
Venture Lending & Leasing VII (23)		1	1	16				1	1							1										2				
Nokia (20)															4	9					4					1	2			
Alibaba (20)																12					2					1	5			
マサチューセッツ工科大学 (19)				2				1		6						3								3		1	3			
1QBit (19)				2																							17			
キャノン (19)							1					2		3	2	1			1	1			1		2	4	1			
浙江工商大学 (18)										1					12	3											2			
清華大学 (18)									1				3		1	7					2						4			
KAIST(韓国科学技術院) (17)								1							2	4			1	1	3	1					4			
セイコーエプソン (16)								5	7				1		3															
ETRI(韓国電子通信研究院) (16)								1						5	3				1		1	1		1		2	1			
江漢大学 (14)								3	5						1	4					1									
ハルビン工業大学 (14)															2	1					7					2	2			
リコー (13)				1	3	1						1		2	1					1				1	1	1	1			
SK Telecom (13)								1							1	4	5									1	1			
Los Alamos National Security, LLC (13)																7	2										2	2		
山西大学 (12)								1						1	2	4					1					3				
西安電子科技大学 (12)																1	3				5						3			
スタンフォード大学 (12)							1	2	2	2				1					1		2	1								
Newsouth Innovations Pty. Ltd. (12)								2	1						1						7						1			
QuantumCTek(国盾量子) (12)															3	3				3	1						2			
ハーバード大学 (12)				1				3	2					2						1				1	1	1				
ソウル大学 (11)				3				2								4				1	1									
山東量子科学技術研究院有限公司 (11)															4	6										1				
	1990-94	1995-99	2000-04	2005-09	2010-14	2015-18	1990-94	1995-99	2000-04	2005-09	2010-14	2015-18	1990-94	1995-99	2000-04	2005-09	2010-14	2015-18	1990-94	1995-99	2000-04	2005-09	2010-14	2015-18	1990-94	1995-99	2000-04	2005-09	2010-14	2015-18

図 3.2 : 出願人別の公開特許数推移

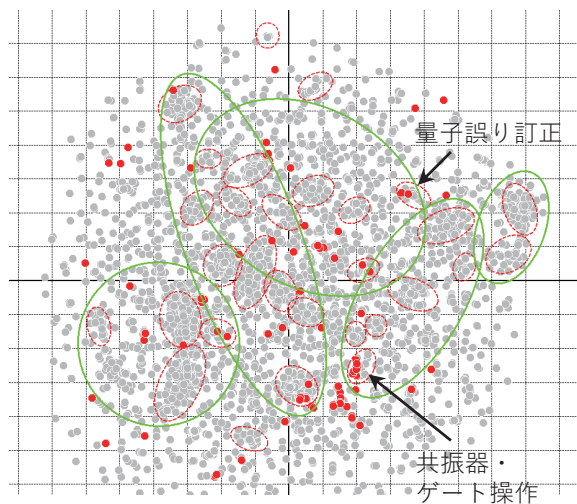
(a) D-wave Systems



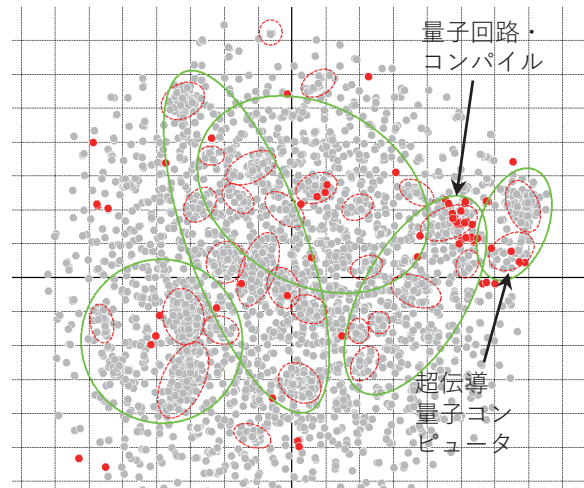
(b) NTT



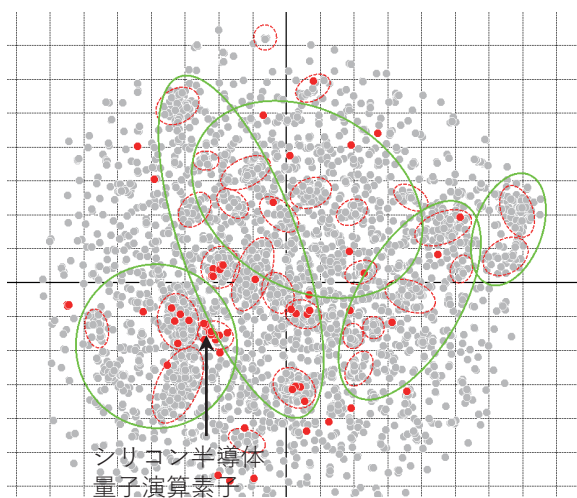
(c) 東芝



(d) Microsoft



(e) 日立製作所



(f) NEC

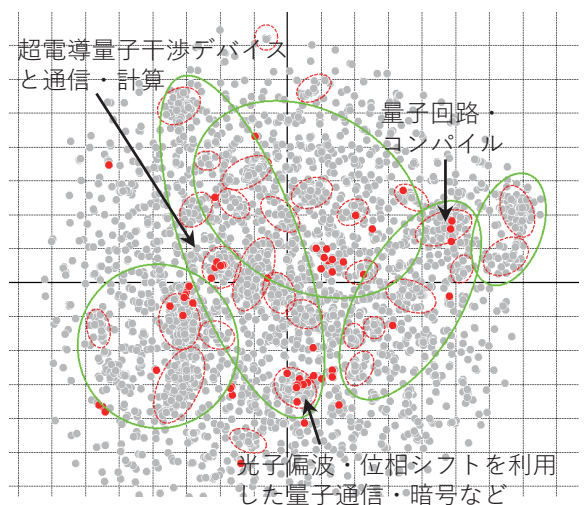
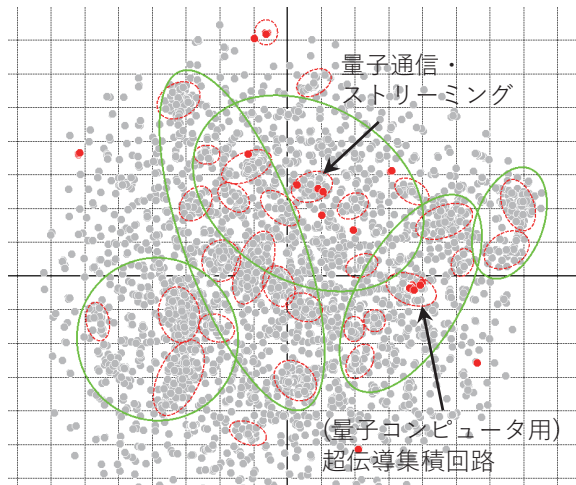
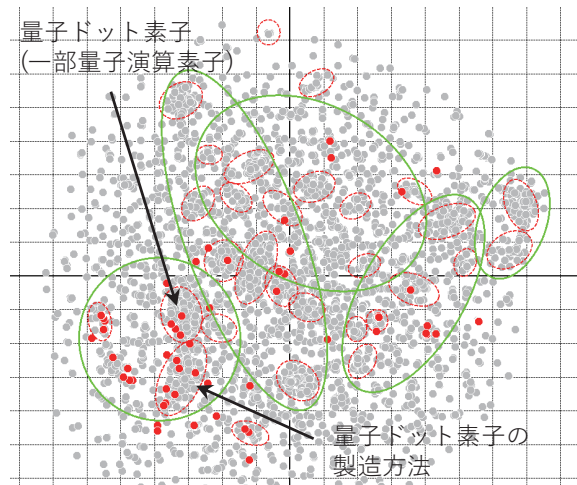


図 3.3 : 出願人別の特許マップ (1 ~ 6 位)

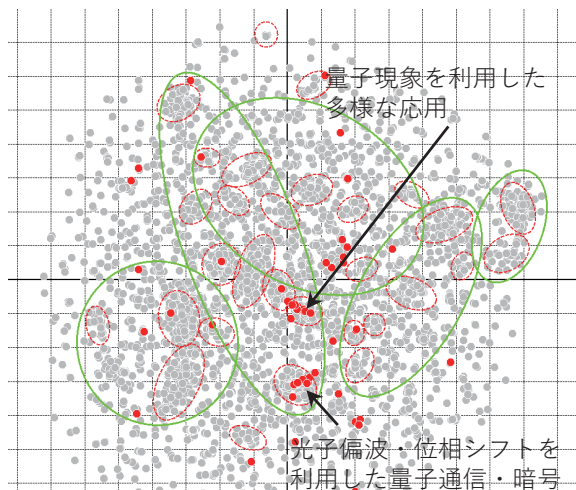
(g) Intel



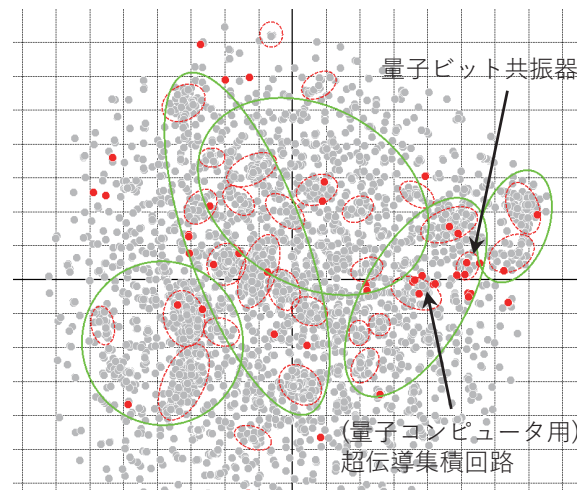
(h) 中国科学院



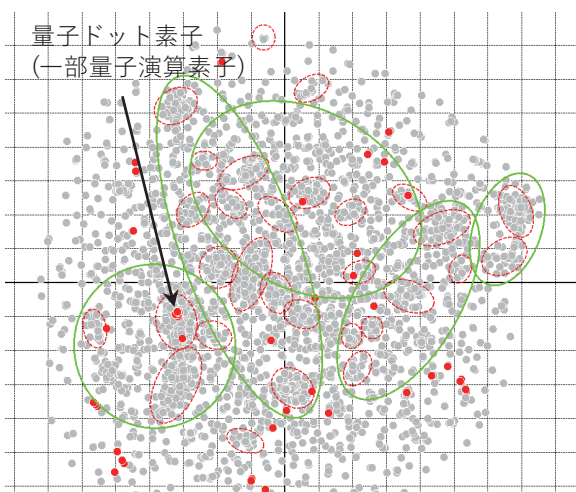
(i) 三菱電機



(j) IBM



(k) ソニー



(l) Northrop Grumman

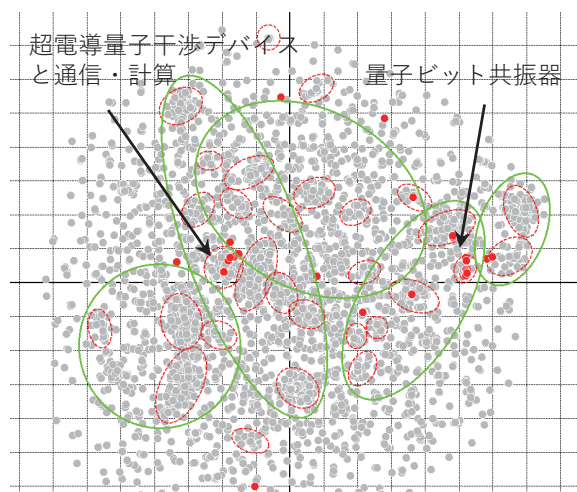


図 3.4 : 出願人別の特許マップ (7 ~ 12 位)

3.2 セグメント別の出願動向

出願人を「海外企業」「日本企業」「スタートアップ」「大学」の4つのセグメントに分け、それぞれ代表的な出願人を選んで特許マップ上にプロットした（図 3.5～3.8）。凡例に示したカッコ内の数字は、それぞれの出願人の公開特許数である。

米国の代表的な IT 企業である Microsoft、IBM、Intel は量子コンピュータ開発のニュースが報道され一定程度認知されているが、図 3.5 に示したとおり、特許マップにおいても「量子コンピュータ」「量子ビット・ゲート」区分での存在感がある。同様に、超伝導量子コンピュータ開発に乗り出した Google も、「(量子コンピュータ用) 超伝導集積回路」「量子演算装置」「量子回路・コンパイル」「量子ビット共振器」など量子コンピュータ開発に必要な技術領域に満遍なく出願している。

Alibaba、Huawei は「量子通信・量子暗号」区分の特許出願がほとんどであり、「量子コンピュータ」「量子ビット・ゲート」区分に分類される特許を持たない。Huawei は「量子通信・ストリーミング」「量子通信制御」などの量子通信関係の特許が多く、Alibaba は「量子暗号鍵」領域にやや集積が見られるが、その他は比較的散発的である。

日本企業は先述のとおり「光子偏波・位相シフトを利用した量子通信・暗号」や「共振器・ゲート操作」が多く、「量子コンピュータ」区分に特許を持たない点が共通する特徴である。

スタートアップ企業（図 3.7）は、出願人それぞれで特徴ある傾向を示している。量子コンピュータの代表的な企業である D-wave Systems は極めて多数の特許を「量子演算装置」「超伝導量子コンピュータ」の2つの技術領域に集中して出願しており、その他の技術領域にはほとんど出願がない。なお本調査では、これらの特許が対象としている超伝導量子ビットが現在商用提供している量子アニーリングマシン（量子アニーラー）用なのか、将来的なゲート型量子コンピュータでの利用まで見据えたものなのかは区別できなかった。

D-wave Systems と類似した特許出願傾向をもつスタートアップが、超伝導量子コンピュータのフルスタック開発を進める Rigetti Computing である。数は D-wave Systems に劣るものの、「量子演算装置」「超伝導量子コンピュータ」に特許を保有している。また、「(量子コンピュータ用) 超伝導集積回路」「超伝導量子干渉デバイスと通信・計算」領域にも複数の特許を持つ。

量子コンピュータ向けのソフトウェア開発を行う QC Ware や 1QBit の保有する特許は「量子演算装置」領域の周辺にプロットされる。「量子演算装置」領域に分類されている特許の大半は出願人を D-wave Systems とする超伝導量子ビット実装ハードウェアに関する特許であり、トピックモデルによってハードウェア関連とソフトウェア関連の特許文書が区別されていることを示している。カナダ発のスタートアップ Quantum Benchmark は近年注目されているが、特許としては「量子回路・コンパイル」領域に1件の特許を保有しているに留まった。

量子暗号鍵配送装置の市販で知られる MagiQ Technologies は、比較的早くからあるスタートアップである（1999 年創業）。「量子鍵配送方法および装置」領域に集中して特許を出願している他、「量子回路・コンパイル」領域にも複数の特許が見られる。

大学（図 3.8）セグメントの出願人はそれぞれ特許の集積を見るに至らないものの、中国科学技術大学やマサチューセッツ工科大学などは数的には民間企業と見劣りしない規模の特許を出願している。中国科学技術大学は他の中国系の出願人と比べて「量子通信・量子暗号」区分の特許への偏重傾向が緩やかであり、「量子ビット・ゲート」区分に比較的多数の特許を持つ。また米国の大学は「量子ビット・ゲート」「量子コンピュータ」区分に比較的ウエイトを置いていると言って良いだろう。

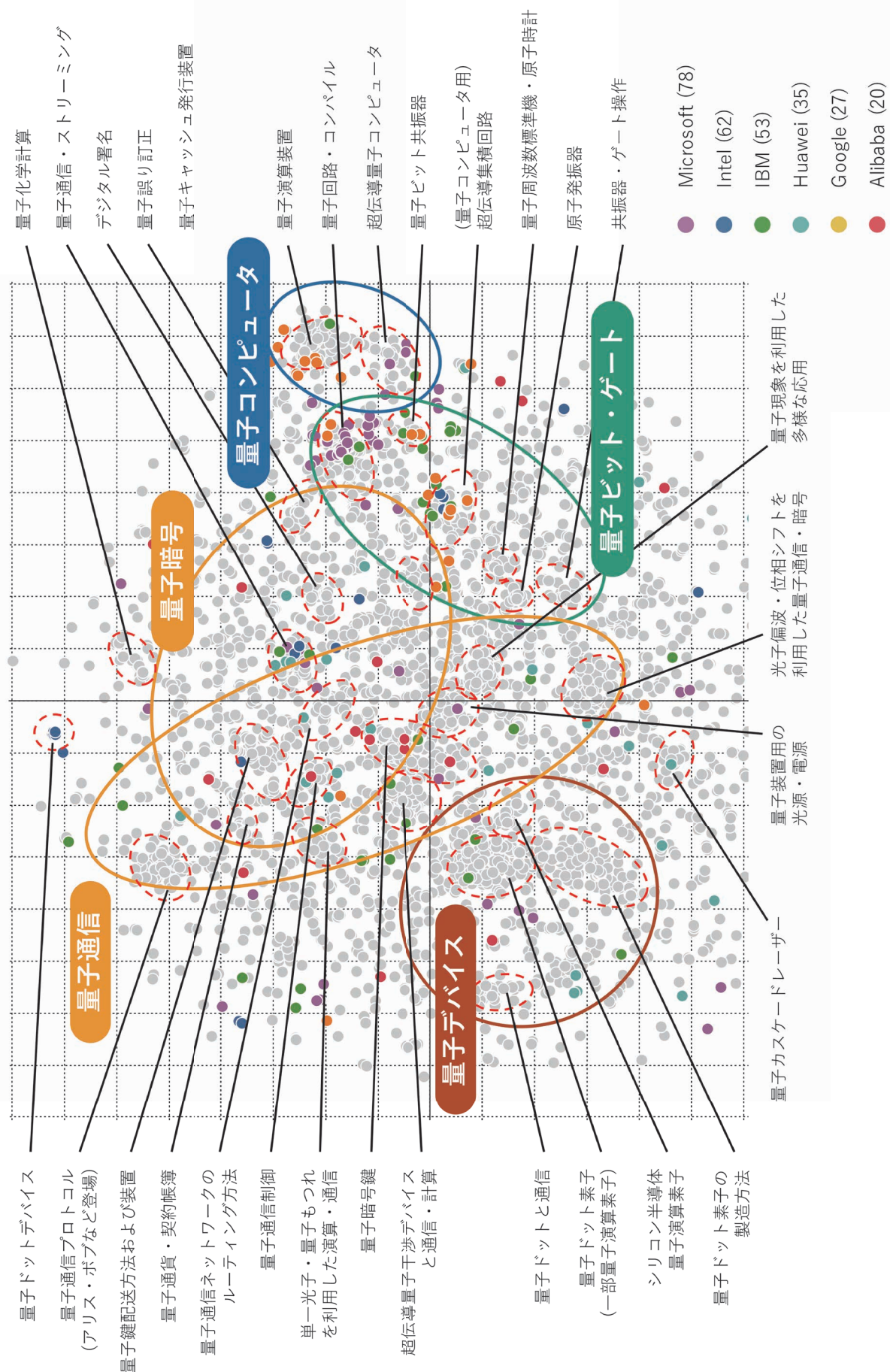


図 3.5 : 出願人セグメント別の特許マップ (海外企業)

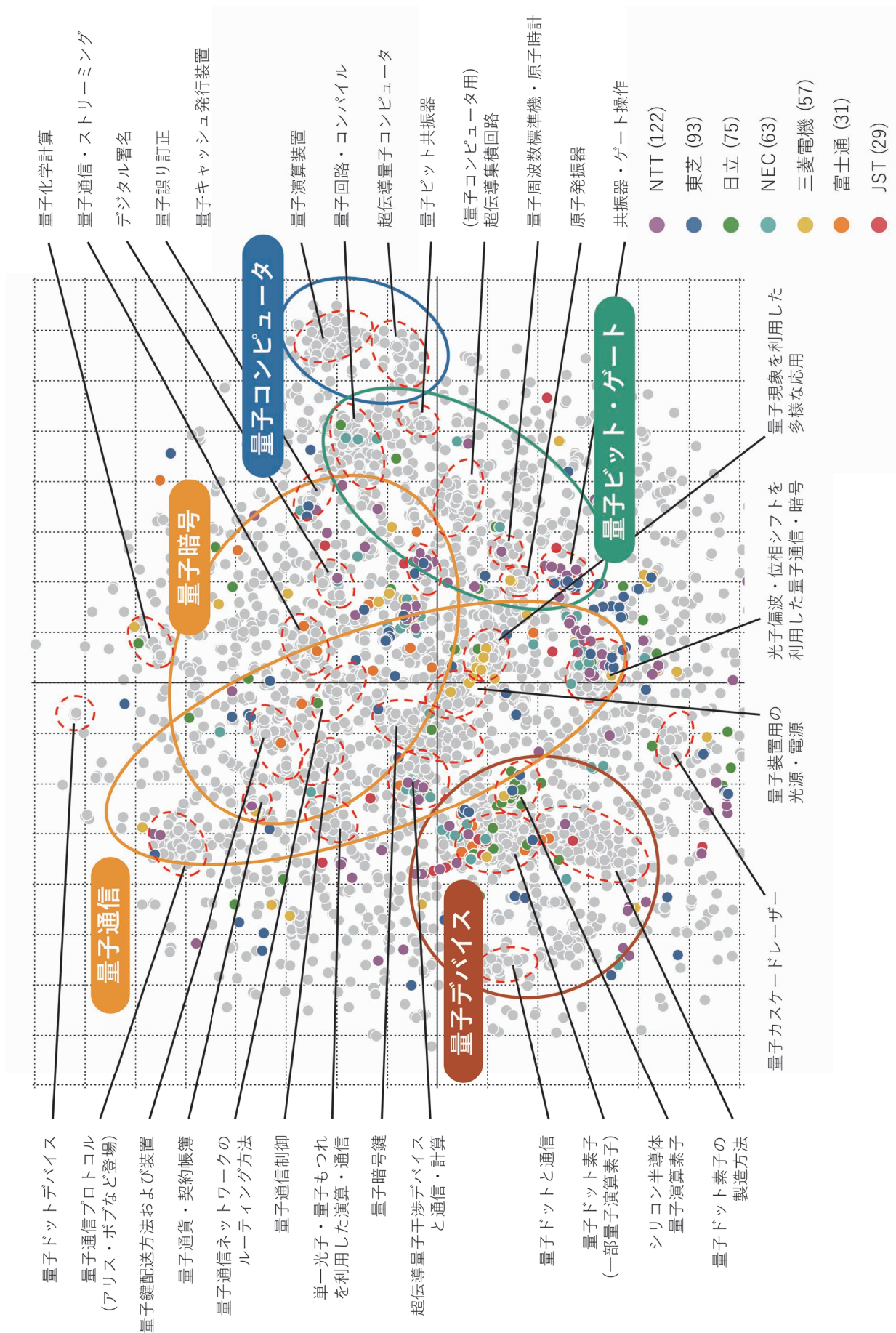


図 3.6：出願人セグメント別の特許マップ（日本企業）

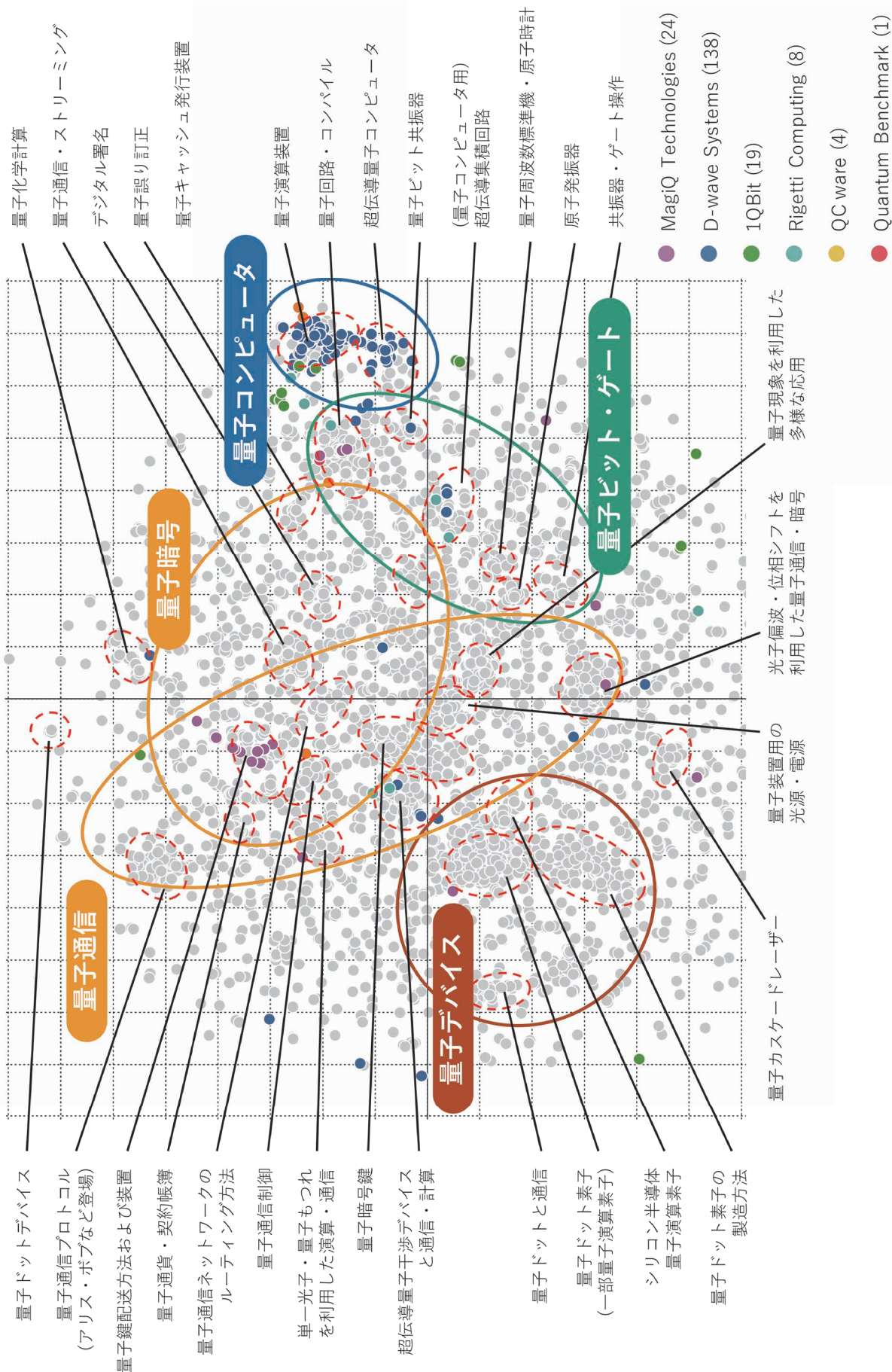


図 3.7：出願人セグメント別の特許マップ（スタートアップ）

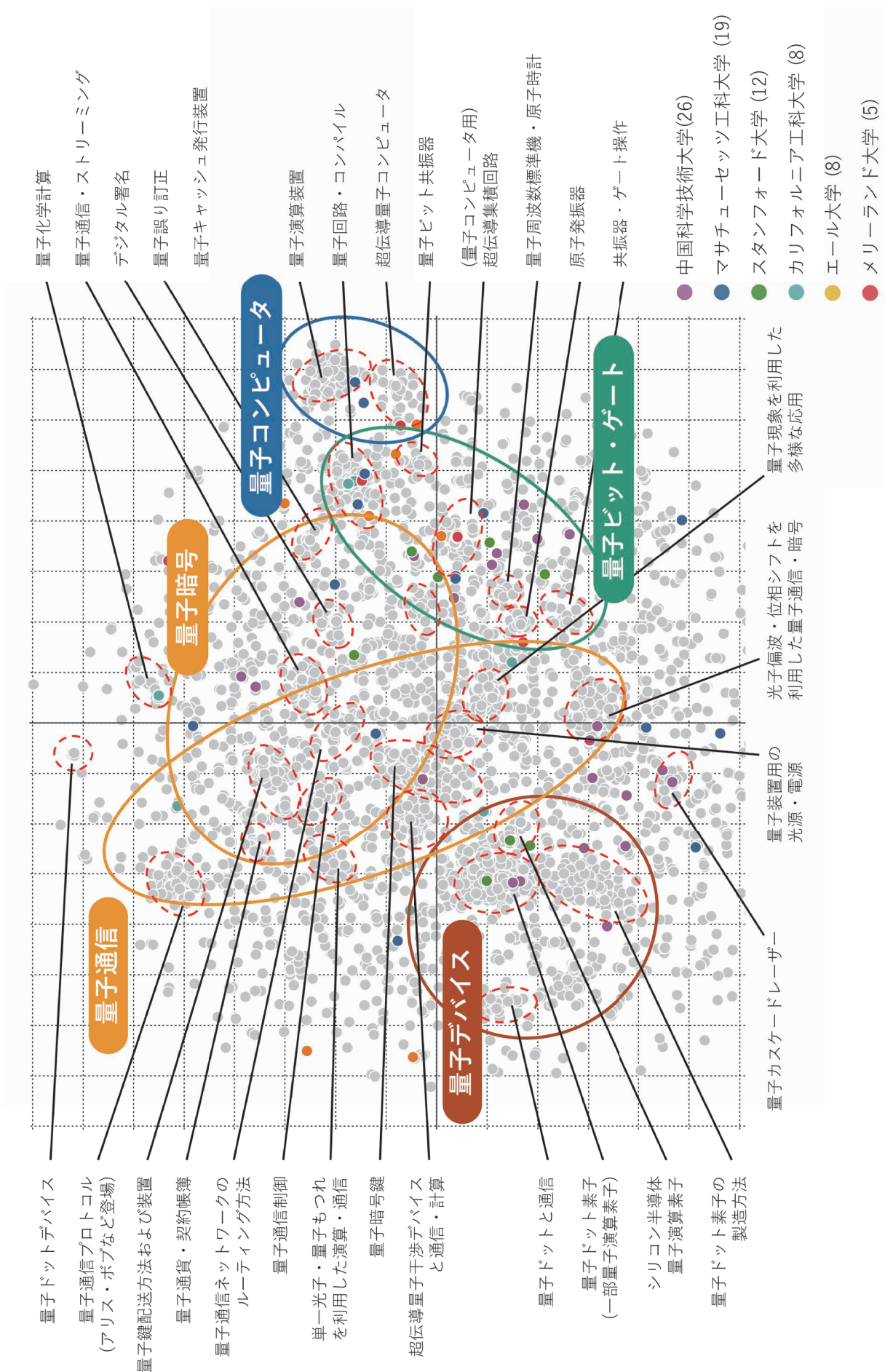


図 3.8：出願人セグメント別の特許マップ（大学）

4. まとめ

本調査は、量子技術 2.0 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 2.0 に関連する特許を抽出し、クラスタリング・マッピングによって俯瞰的な分析を行った。

内容の類似度に基づいて 4088 件の特許文書をマッピングした結果、「量子シミュレータ」や「量子センサ」は顕わにはクラスターとして現れなかったものの、「量子コンピュータ」および「量子通信・量子暗号」に関しては一定程度納得感のある構造が得られた。とくに、「量子ビット・ゲート」「量子デバイス」区分を媒介として互いに接している様子が窺えた。これらの区分に分類されている特許の内容は、情報処理用途にも通信用途にも使える共通基盤的な技術を数多く含んでいた。

発行国・機関別、および出願人別の動向では、全体としては中国における出願の急増が極めて特徴的であった。3 章で分析したように、中国における多数の出願人による多数の特許出願状況が浮き彫りとなった。技術区分ごとの動向では「量子通信・量子暗号」区分での特許数の急増が見られ、出願人とのクロス集計により中国の出願人による寄与が大きいことが分かった。また、本調査が対象としている期間においては、「量子コンピュータ」区分での特許数の増加率は「量子通信・量子暗号」区分での伸び率には及ばないことも分かった。

日本の出願人は「量子ビット・ゲート」「量子デバイス」「量子通信・量子暗号」区分に手広く、かつ比較的早期から特許を発表しているものの、近年の減少が見られ、研究開発戦略上あるいは産業政策立案上、考慮すべき点であると思われる。

「量子コンピュータ」区分では、3 章で見たように、現状では「超伝導量子ビット」に関連する D-wave Systems を出願人とする特許が大多数を占めていた。基礎研究としてはイオントラップ方式や Si 量子ドットなど超伝導回路以外の様々な方法による実装が提案されているが、特許マップにはそれほど顕著には表れていない。関連特許は本調査に含まれているが技術領域としてクラスターを形成するほどには出願されていないと理解される。ハードウェアに関する特許とソフトウェアに関する特許の分離は一定程度確認できたが、ソフトウェアに関する特許の集積は、ハードウェア関連の特許に比べて数が少ないこともあり、クラスターとして取り出すまでには至っていない。

クラスターとして抽出されず十分に取り扱えなかった量子アルゴリズム・量子コンパイラ・量子ソフトウェア開発環境に関する技術動向や、ダイヤモンド NV 中心・動的核偏極 NMR 法などの量子センシング技術の生命科学・医療への応用動向については、今後より詳細な調査を進めるべきであろう。また、計算機システムとして構築する上で重要となる要素技術領域は「量子回路・コンパイル」や「量子ビット共振器」領域などとして確認されたが、この共通基盤技術についてはさらなる深掘り調査を進めるべきであろう。

また、今後も続く量子技術 2.0 の幅広い研究開発の発展を定量的に定点観測する意味で、本調査の特許マップを白地図として、更新情報を書き込んでゆくような使い方ができれば計算機システムとして構築する上で重要となる要素技術領域は「量子回路・コンパイル」や「量子ビット共振器」領域などとして確認されたが、今後より詳細な構造調査や、定点観測的な調査を進めるべきであろう。

■調査報告書編纂メンバー■

木村 康則	(CRDS システム・情報科学技術ユニット 上席フェロー)
嶋田 義皓	(CRDS システム・情報科学技術ユニット フェロー)
本多 克也	(VALUENEX 株式会社 取締役 研究開発本部長)
大崎 敏郎	(VALUENEX 株式会社 研究開発本部 マネジャー)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2018-RR-04

調査報告書

世界特許マップから見た量子技術 2.0

2019 年 3 月 March 2019

ISBN 978-4-88890-629-6

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
システム・情報科学技術ユニット

Systems and Information Science and Technology Unit

Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 番地

電 話 03-5214-7481 (代表)

ファックス 03-5214-7385

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

©2019 JST/CRDS

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。

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

