



政策研究大学院大学
NATIONAL GRADUATE INSTITUTE
FOR POLICY STUDIES

政策研究大学院大学 科学技術イノベーション政策研究センター ワーキングペーパー (SciREX-WP)
National Graduate Institute for Policy Studies, Science for RE-Designing Science,
Technology and Innovation Policy Center (SciREX Center) Working Paper

[SciREX-WP-2022-#03]

論文・特許クラスター分析を用いた量子コンピュータの学術研究・技術開発動向調査

Investigation of Academic Research and Technology Development Trends of Quantum computers Using Paper and Patent Cluster Analysis

2022/07

Tatsuo Sasaki (National Graduate Institute for Policy Studies)

佐々木達郎(政策研究大学院大学 専門職)



SciREX Center
WORKING PAPER

政策研究大学院大学科学技術イノベーション政策研究センター (SciREX センター)
ワーキングペーパー SciREX-WP-2022-#03

政策研究大学院大学

科学技術イノベーション政策研究センター (SciREX センター)
ワーキングペーパー SciREX-WP-2022-#03

[SciREX-WP-2022-#03]

論文・特許クラスター分析を用いた量子コンピュータの学術研究・技術開発動向調査

Investigation of Academic Research and Technology Development Trends of Quantum computers Using Paper and Patent Cluster Analysis

2022年7月

佐々木 達郎

政策研究大学院大学SciREXセンター 専門職

※. 本ワーキングペーパーの著作権は、著者もしくは政策研究大学院大学科学技術イノベーション政策研究センターに帰属しています。本ワーキングペーパーに含まれる情報を、個人利用の範囲を超えて転載、またはコピーを行う場合には、政策研究大学院大学科学技術イノベーション政策研究センターによる事前の承諾が必要となりますので、以下までご連絡ください。

【連絡先】政策研究大学院大学科学技術イノベーション政策研究センター
TEL: 03-6439-6318 / E-Mail: scirex-center@grips.ac.jp

目次

Abstract	4
エグゼクティブサマリー	5
1 イントロダクション	6
2 分析手法.....	7
3 分析結果.....	7
3.1 分析データの抽出.....	7
3.2 対象データの二次元可視化.....	9
3.3 基本統計.....	13
3.4 時系列変化.....	19
3.5 国・地域、機関別集計.....	25
4 まとめ	40
謝辞	41
参考文献	41

Abstract

We extracted 32,895 papers and 3,780 patents related to quantum computers and visualized them by clustering analysis using text data such as titles and abstracts. It was confirmed that there are nine areas centered on [Quantum Fundamentals], which is the foundation of quantum computers: [Quantum Bit], [Optical Quantum], [Spin and Phase Transition], [Quantum Circuits], [Quantum Computing], [Quantum Error Correction], [Quantum Cryptography] and [Quantum Chemical Computation].

From the paper data since 2001, academic research on quantum computing started with research on "ion trapping" and "quantum error correction," etc. From 2016, when the number of papers increased rapidly, research in the areas of "quantum optimization and annealing," "quantum neural networks," "quantum keys," and "diamond NV centers" became active. It was confirmed that the number of research papers in the area of "Quantum Optimization Annealer", "Quantum Neural Networks", "Quantum Key", and "Diamond NV Center" became active.

In terms of patents, it was confirmed that applications were active in the areas of "quantum keys," "quantum dot cellular automata," "quantum optimization and annealing," "classical quantum hybrid computation," "superconducting qubits," etc., beginning with the development of technologies related to "quantum data processing" and "quantum key delivery" and most recently in 2019 and beyond.

The number of papers and patent applications in the area of "quantum optimization and annealing," which is expected to be used for industrial applications such as logistics optimization and new material synthesis, and the area of "quantum keys" related to quantum cryptography have both increased, indicating that academic research and technological development are active. It is thought that considering the impact of these applied technologies on industry when they are realized will be an important technique in the calculation of economic effects.

エグゼクティブサマリー

量子コンピュータに関連する論文32,895件と特許3,780件を抽出し、タイトル・アブストラクト等のテキストデータを用いたクラスタリング分析による可視化を行った。量子コンピュータの基盤となる【量子基礎】を中心に【量子ビット】【光量子】【スピン・相転移】【量子回路】【量子コンピューティング】【量子誤り訂正】【量子暗号】【量子化学計算】の9領域が存在していることが確認された。

2001年以降の論文データから、量子コンピュータに関する学術研究が「イオントラップ」や「量子誤り訂正」等の研究から始まり、論文数が急増した2016年からは「量子最適化・アニーラ」「量子ニューラルネット」「量子鍵」「ダイヤモンドNV中心」領域での研究が活発となったことが確認された。

特許においては「量子データ処理」「量子鍵配送」に関する技術開発から始まり、直近の2019年以降では「量子鍵」「量子ドットセルラーオートマトン」「量子最適化・アニーラ」「古典量子ハイブリッド計算」「超伝導量子ビット」等の領域で出願が活発であることが確認された。

物流の最適化や新規材料合成等の産業応用が期待されている「量子最適化・アニーラ」領域や量子暗号に関する「量子鍵」領域では論文数および特許出願数とも増加しており、学術研究と技術開発が活発となっていることが明らかとなった。これらの応用技術が実現したときに産業に及ぼす影響を考察することが、経済効果算出において重要な技術になると考えられる。

1 イントロダクション

科学技術・イノベーション(STI: Science, Technology and Innovation)が経済・社会システムの中でどのような影響をもたらしているかを明らかにすることは、政策と研究の両面から重要な課題である。特に、第6期科学技術・イノベーション基本計画では、人文・社会科学も含む「総合知」の概念も導入され、科学技術・イノベーションと経済社会システムの関係性を理解し、政策に実装することが重要な課題となっている。

我々は2011年に開始された科学技術・イノベーション(STI)政策における「政策のための科学」推進事業 (Science for RE-designing Science Technology and Innovation Policy: SciREX事業)の中で科学技術・イノベーション政策の経済社会効果評価を中核的な課題と位置付けて研究に取り組んできた。2021年度からは共進化実現プログラムの研究プロジェクト(科学技術・イノベーション政策の経済社会効果分析の政策形成プロセスへの実装)にて、研究開発投資戦略の文書の内容(科学技術シナリオ)を経済モデルに投入するパラメータに変換するためのプロトコル開発に取り組んでいる。

経済パラメータへの変換を行うためには、着目する研究開発分野において、①どのような学術研究がなされているか、②学術研究からどのような技術が生まれているのか、③新しい技術を採用した新製品・サービスとして社会に普及すると産業にどのような影響を及ぼすのか、の3つの要素を明らかにすることが重要である。我々は研究開発投資に関わる政策文書や論文・特許データを用いてこれらの関係性を求め、技術ロードマップの形で整理した上で経済モデルベースのシミュレーター(黒田ら、2016; CRDS,2016)に投入していく予定である。

本稿では上記①②の要素を明らかにするため、近年注目が集まっている量子コンピュータ技術を事例として採用し、論文・特許データを用いて分析した結果を示す。具体的には量子コンピュータの要素技術ごとに学術研究および技術開発動向を可視化し、国・地域・機関ごとの特徴を明らかにするため、論文・特許の俯瞰分析を実施した結果を報告する。

量子コンピュータとは「量子コヒーレンス、量子もつれなどの量子特有の性質」を利用した計算機である。従来の計算機では現実的な時間内で解けない問題に対し、新たなアルゴリズムによって並列情報処理を行うことで問題を解くことが可能となる。超伝導量子ビット、イントラップ、トポロジカル量子、光量子など量子コンピューティングを実行するハードウェアデバイスの開発の進展に伴い、計算アルゴリズム等のソフトウェア開発も盛んに行われている。近年は量子アニーリングマシンを用いた最適化問題対応が社会実装に向けて進み、最終的には誤り耐性量子コンピュータの実現を目標としている(CRDS, 2020)。

分析の結果、量子コンピュータに関しては要素技術が9領域で構成されていた。2016年ごろから論文数・特許出願数が急増しており、研究開発が活性化している様子がうかがえた。俯瞰図においては量子に関する基盤的な研究を中心に、周囲に量子コンピュータを実現するハードウェア基盤技

術やデータ処理アルゴリズムに関する技術が配置されていた。【量子化学計算】【量子暗号】領域については比較的独立性が高い状況で研究開発が進んでいる様子が見えられた。

2章で分析手法の流れを示し、3章で分析データについて解説を行い、4章で全体の総括を行った。

2 分析手法

科学技術・イノベーション投資が経済効果を生み出すまでのプロセスを検討する上で、“新製品・サービスの普及が産業に及ぼす影響は、採用されている技術の質によっても大きく変動する”という性質は重要な意味を持つ。すなわち研究開発分野の全体像に加えて、要素技術毎に学術研究・技術開発の動向を明らかにしていく必要がある。

そこで本調査においては量子コンピュータに関連する論文・特許を分析対象として抽出し、自然言語処理によって類似する文献群(クラスター)を作成して集計・可視化を行った。

主な分析の流れを下記に示す。

1. 分析データの抽出: 検索キーワードを設定し、論文(Web of Science: 1980年-2020年収録2021年6月調達)および特許(TotalPatentOne)を用いて検索することで関連する論文・特許を抽出した。
2. 対象データの2次元可視化: 論文・特許の抽象化等のテキストデータを用いてトピックモデル(LDA: Latent Dirichlet Allocation; 潜在的ディリクレ配分法)による類似度評価を行い、トピック配分が類似する文献が近くに配置されるように2次元可視化することで研究・技術俯瞰図を作成した。
3. 基本統計: 抽出した論文・特許全体の文献数推移および国別文献数推移を作成した。
4. 時系列変化: 全体の年次推移を参考にして期間を分割し、期間毎に研究・技術俯瞰図を作成した。文献数および文献数の伸び率に基づいてヒートマップを作成し、研究開発が盛んな領域の可視化を行った。
5. 国・地域別、機関別統計: 論文・特許の国・地域別、機関別文献数推移を集計し、それぞれの研究・技術俯瞰図を作成した。

3 分析結果

3.1 分析データの抽出

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～」(CRDS, 2020) の記述を参考に検索キーワードを設定し、論文(Web of Science)、特許(TotalPatentOne)のデータベースにて検索を実施した。検索条件と検索された文献数を表1に示す。量子コンピュータに関連する論文のうち、重複・酷似・記載の短いものを除外して32,895件、特許をファミリーの重複・英語機械翻訳欠損・記載の短いものを除外して5,008件抽出した。

表 1 量子コンピュータ 母集団検索式と件数

No.	分類	WoS正規表現*	WoS件数	特許検索式†	特許件数
1	キュービット	quantum[^¥s]*?¥s+?([^¥s]+?¥s+?){0,5}(qubit Qbit) (qubit Qbit)[^¥s]*?¥s+?([^¥s]+?¥s+?){0,5}quantum	6927	TAC:(quantum NEAR5 (qubit OR Qbit)) AND (IPC:(G06) OR CPC:(G06))	1992
2	量子コンピューティング	quantum[^¥s]*?¥s+?([^¥s]+?¥s+?){0,5}comput comput[^¥s]*?¥s+?([^¥s]+?¥s+?){0,5}quantum	20397	((TAC:(quantum NEAR5 comput*) AND (IPC:(G06) OR CPC:(G06)))) OR IPC:(G06N10) OR CPC:(G06N10))	9372
3	量子計算機	quantum[^¥s]*?¥s+?([^¥s]+?¥s+?){0,5}(processor processing) (processor processing)[^¥s]*?¥s+?([^¥s]+?¥s+?){0,5}quantum	7307	TAC:(quantum NEAR5 (processor* OR processing*)) AND (IPC:(G06) OR CPC:(G06))	2830
4	量子と機械学習	quantum[^¥s]*?¥s+?([^¥s]+?¥s+?){0,5}(neural.{0,2}network learning artificial.{0,2}intelligence) (neural.{0,2}network learning artificial.{0,2}intelligence)[^¥s]*?¥s+?([^¥s]+?¥s+?){0,5}quantum	1456	TAC:(quantum NEAR5 ((neural PRE0 network*) OR learning* OR AI OR (artificial PRE0 intelligence*))) AND (IPC:(G06) OR CPC:(G06))	508
5	量子誤り訂正	(fault error noise)[^¥s]*?¥s+?([^¥s]+?¥s+?){0,2}(detect correct robust threshold tolerant reduct compensat redundan) (detect correct robust threshold tolerant reduct compensat redundan)[^¥s]*?¥s+?([^¥s]+?¥s+?){0,2}(fault error noise)	3825	TAC:(quantum* AND ((fault* OR error* OR noise*) NEAR2 (detect* OR correct* OR robust* OR threshold* OR tolerant* OR reduct* OR compensat* OR redundan*))) AND (IPC:(G06 OR H04) OR CPC:(G06 OR H04))	1863

*Web of Scienceで全ての分類に共通する論文検索条件は「2001 ≤ pubyear ≤ 2020、doctype1=Article or Proceedings Paper、has_abstract=Y」である。

†TotalPatent Oneで全ての分類に共通する特許検索条件は、PG:(Application) AND PD:[2001-01-01 TO *] AND PC:(CN OR EP OR JP OR KR OR US OR WO OR CA OR DE OR FR OR GB OR TW)である。

3.2 対象データの二次元可視化

量子コンピュータに関する論文32,895件について、タイトルとアブストラクトの文章を対象として、トピックモデルを用い1000次元弱のトピックを抽出した。その上で各テキストのトピックデータについて、多様体学習により2次元に圧縮して可視化した。図1中、赤破線楕円は筆頭トピックが共通である文献をまとめた。KW(Keyword)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。更に目視により、関連する上位概念的技術を紫色の楕円で囲った。各領域の名称は、以下のデータの順で、参考にして決定した。①トピックのキーワード、②RAKE(Rapid Automatic Keyword Extraction)によるキーフレーズ、③WoSのkeyword、④WoSのkeyword_plus、⑤タイトル、要約のテキスト。

なお、本稿では筆頭トピックが共通する文献群を赤破線で囲った領域キーワードを「」で、上位概念である紫色で囲った領域キーワードを【】で示す。

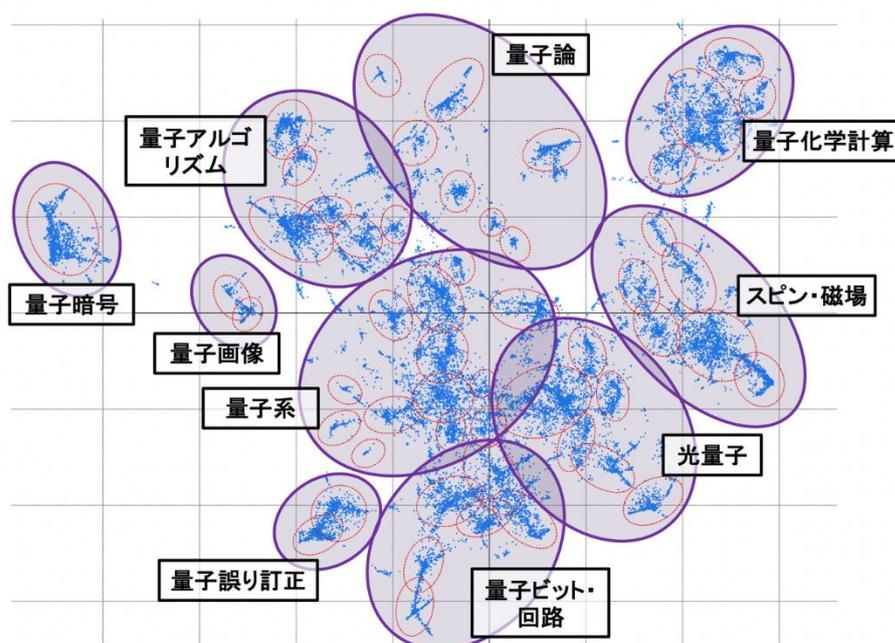


図1 量子コンピュータ論文トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化

俯瞰図中心部に量子コンピュータの基礎技術、その周辺に実現系としての光・スピンなどの物理系技術やアルゴリズム、周辺部には関連の低い量子暗号、量子化学計算などの領域が配置された。

紫線で囲った領域内で、筆頭トピックに含まれる上位5キーワードを図2に示す。

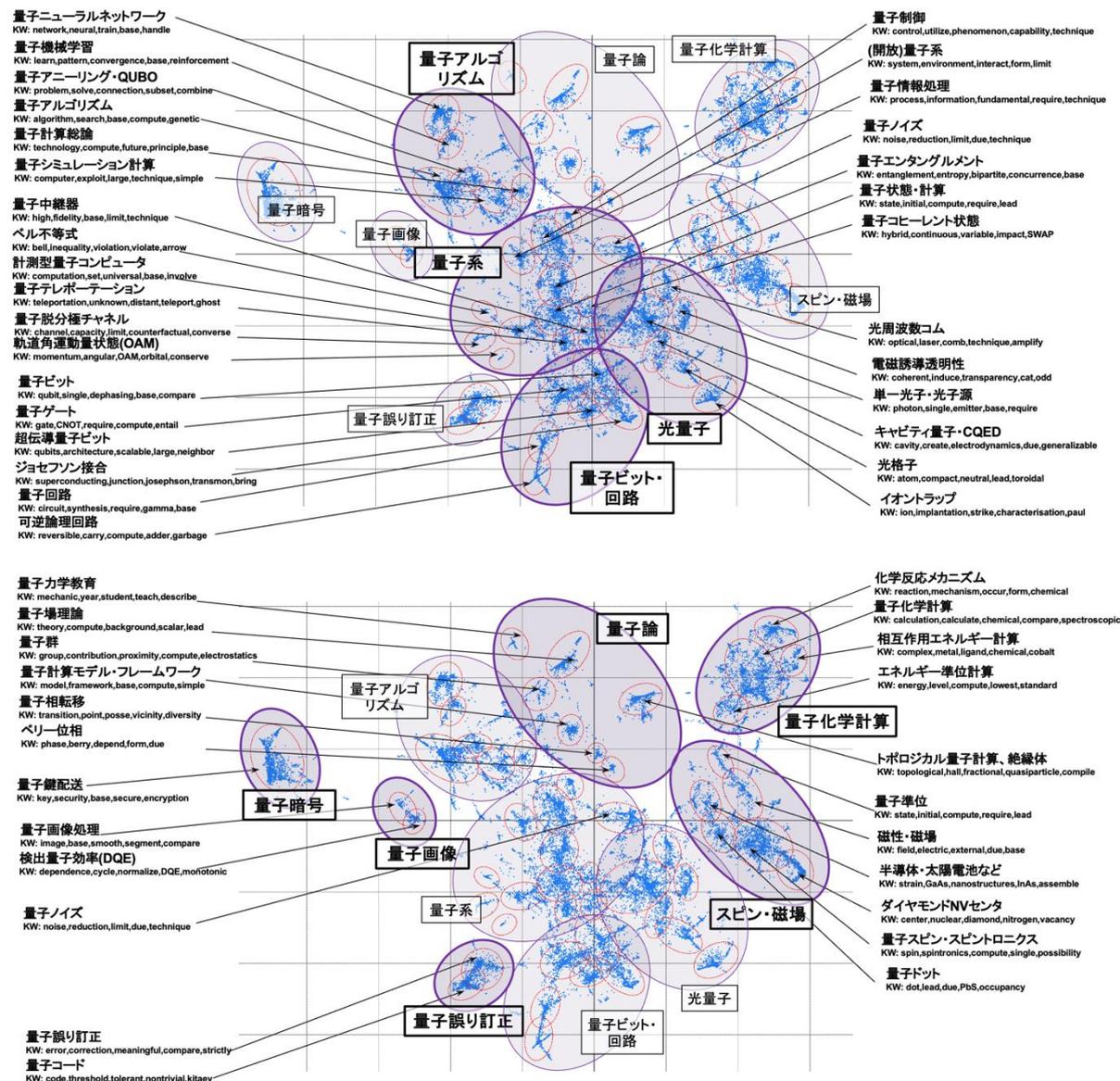


図2 量子コンピュータ論文トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化 上段:【量子系】
 【量子アルゴリズム】【量子ビット・回路】【光量子】領域詳細、下段:【量子論】【量子暗号】【量子画像】
 【量子誤り訂正】【量子化学計算】【スピン・磁場】領域詳細

俯瞰図中心部の【量子系】には「量子エンタングルメント」「量子コヒーレント」「量子テレポーテーション」など中心的概念が集積している。その周囲の【量子ビット・回路】【光量子】なども全て必要な概念と言える。【スピン・磁場】にも主要な技術が存在し、最端部に「ダイヤモンドNVセンタ」が配置されている。俯瞰図両端にある【量子化学計算】【量子暗号】は中心部とは直接の関連性が低いと考えられる。

次に量子コンピュータに関する特許5,008件について、アブストラクトの文章を用いて、論文同様に分析を行った結果を図3に示す。

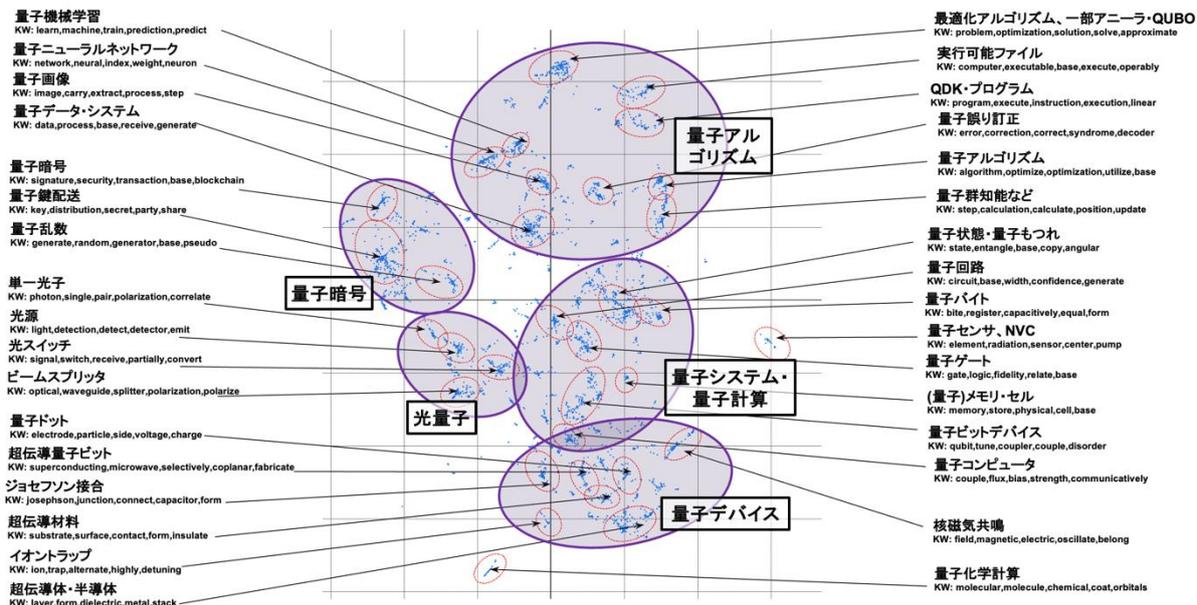


図3 量子コンピュータ 特許トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化

特許では、論文との整合性を得るために、2021年以降のデータを除外した3,780件を分析対象とした。

最後に、量子コンピュータに関する論文32,895件と特許3,780件を合計した36,675件について、同様に分析した。結果を図4に、文献数のヒートマップを図5に示す。

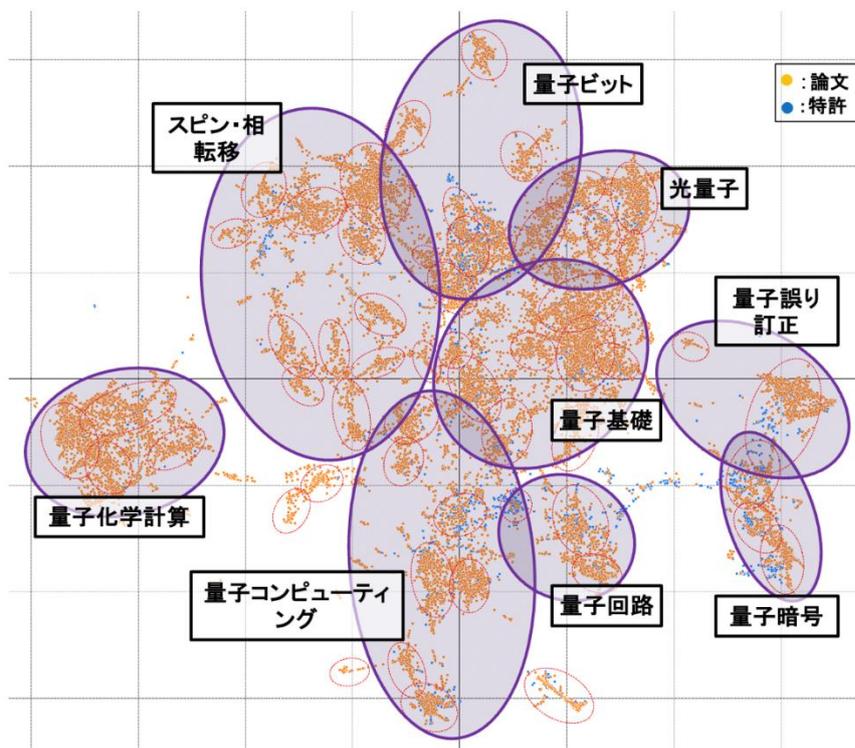


図4 量子コンピュータ 論文+特許トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化

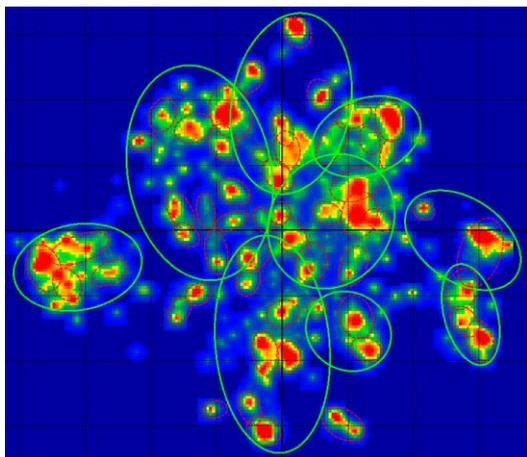


図 5 量子コンピュータ 論文+特許トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化(ヒートマップ)

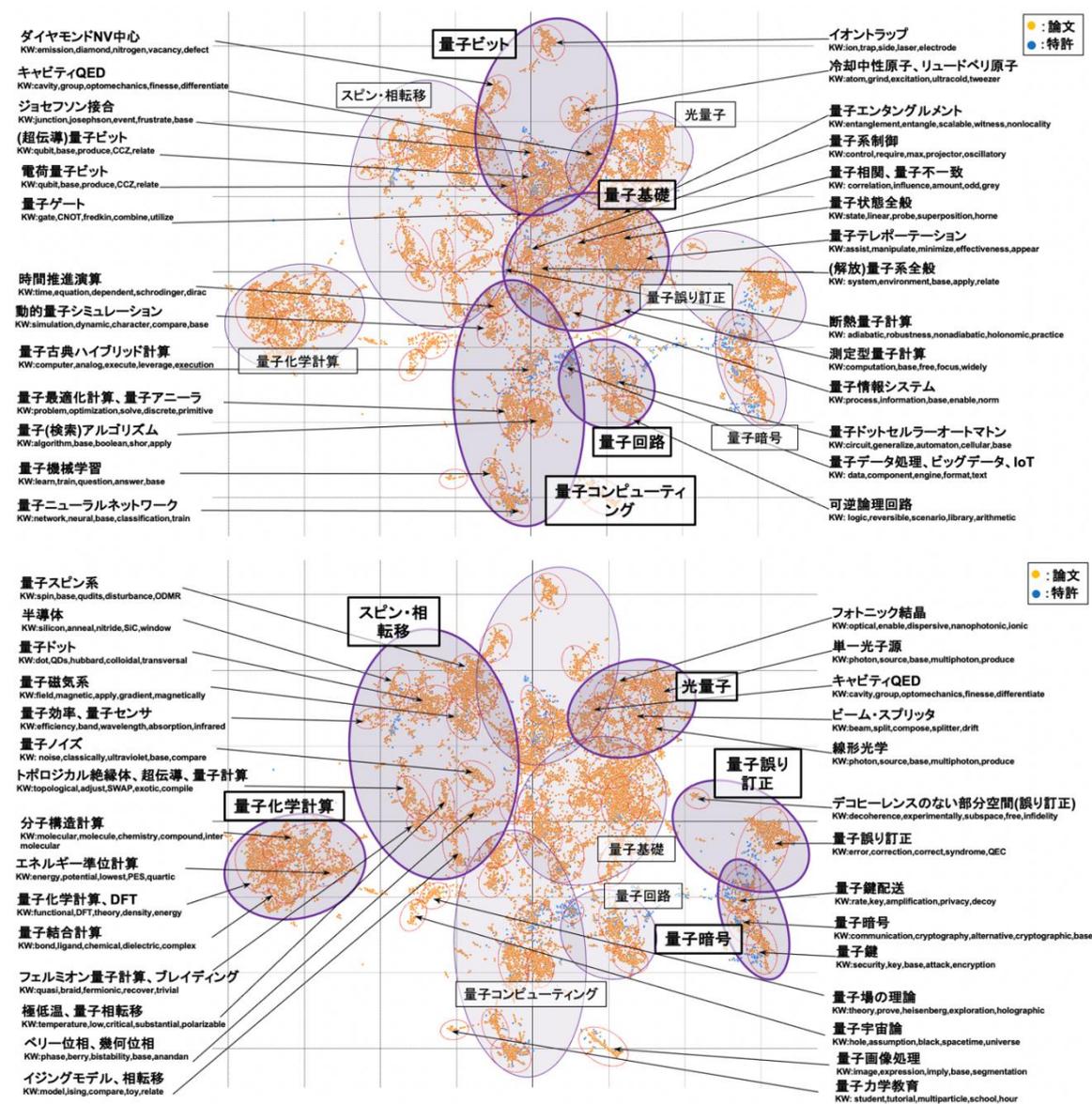


図 6 量子コンピュータ 論文+特許トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化 上段:【量子基礎】【量子回路】【量子ビット】【量子コンピューティング】領域詳細、下段:【光子学】【量子暗号】【量子誤り訂正】【量子化学計算】【スピン・相転移】領域詳細

俯瞰図において、量子コンピュータの基盤となる【量子基礎】の周囲に【量子ビット】【光量子】【スピン・相転移】が位置している。俯瞰図下側にはソフトウェア的観点のある【量子コンピューティング】と、その周辺に【量子回路】【量子誤り訂正】【量子暗号】【量子化学計算】が位置している。また、各領域に特許が存在していることが確認された。

俯瞰図中心部の【量子基礎】には「量子状態全般」「量子エンタングルメント」「量子相関」「量子テレポーテーション」「量子系制御」など中心的概念が集積している。その上側に接している【量子ビット】領域には「超伝導量子ビット」を中心に「ジョセフソン接合」「キャビティQED」「ダイヤモンドNV中心」「冷却中性原子」「イオントラップ」などの各種量子ビット実現系が集積した。マイクロソフトが開発しているトポロジカル超伝導は【スピン・相転移】領域に含まれた。その周囲の【量子回路】【光量子】なども全て必要な概念と言える。【量子コンピューティング】領域では、俯瞰図中心側に「時間推進演算」「量子古典ハイブリッド計算」「量子最適化計算・量子アニーラ」「量子機械学習」「量子ニューラルネットワーク」と分かれた。【量子回路】領域には「量子ドットセルラーオートマトン」「可逆論理回路」などが集積した。

【スピン・相転移】領域には上側にスピンに関する「量子ドット」「量子磁気系」が配置され、下側には相転移に関する「イジングモデル、相転移」「ペリー位相、幾何位相」「極低温、量子相転移」が配置され、その中心に「トポロジカル絶縁体」や「フェルミオン量子計算・ブレイディング(粒子交換)」で量子計算に関わる。【光量子】領域には「単一光子源」を中心に「フォトニック結晶」「ビーム・スプリッタ」「キャビティQED」に分かれた。【量子誤り訂正】領域は「量子誤り訂正」「デコヒーレンスのない部分空間」に分かれた。【量子暗号】領域では「量子暗号」を中心に前後に「量子鍵配送」と「量子鍵」が配置された。【量子化学計算】領域には「量子化学計算、DFT」「量子結合計算」「分子構造計算」などの観点で分かれた。

3.3 基本統計

量子コンピュータに関する世界の論文・特許についての基本統計を以下に示す。なお、Web of Science (2021年6月調達)のデータにおいて、2020年分の論文収録状況に約1割程度の欠損が確認された。これは論文バルクデータ調達時期による収録の差異による影響と考えられる。特許はファミリー重複削除を行っているため、登録年はファミリー内の登録特許中の最古年を採用した。また、特許の国籍は発行国でなく、優先権主張先国とした。但しEPOに直接出願した特許などはEPのままとして特定の国に加算せずにEPとして集計した。

論文と特許を合計した文献数推移を図7に示す。量子コンピュータに関連する文献総数は増加傾向を示している。論文数は2001年当初より増加傾向であったが、2012年以降増加の割合が上がっている。特許(公開)は2013年まで一定であったのがその後増加傾向となり、2016年から更に増加の割合が上がった。恐らく2015年前後に量子技術の実用化が明確になったと言える。特許(登録)もやや遅れて増加傾向にある。論文と特許の合計も増加傾向である。

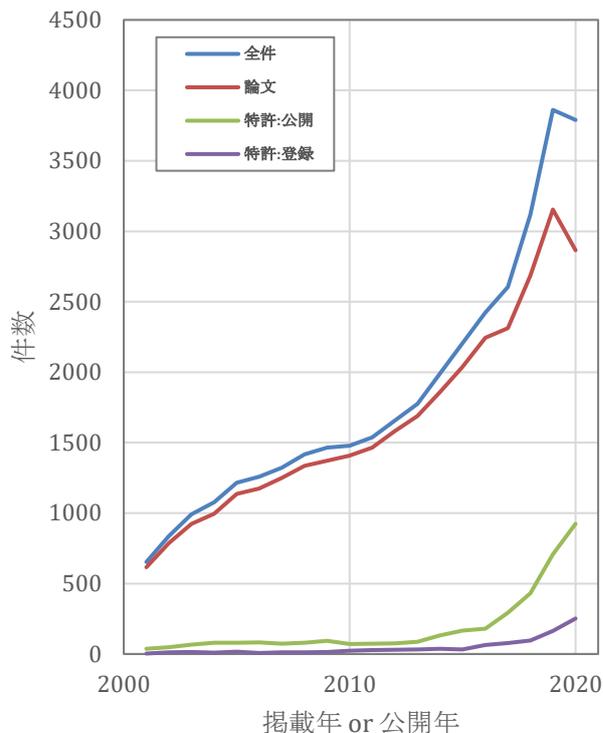


図7 量子コンピュータ 論文+特許 全体文献数推移

国・地域別の文献数を図8に示す。米国と中国が際立って多く、以下、ドイツ・日本・英国・カナダと続いている。

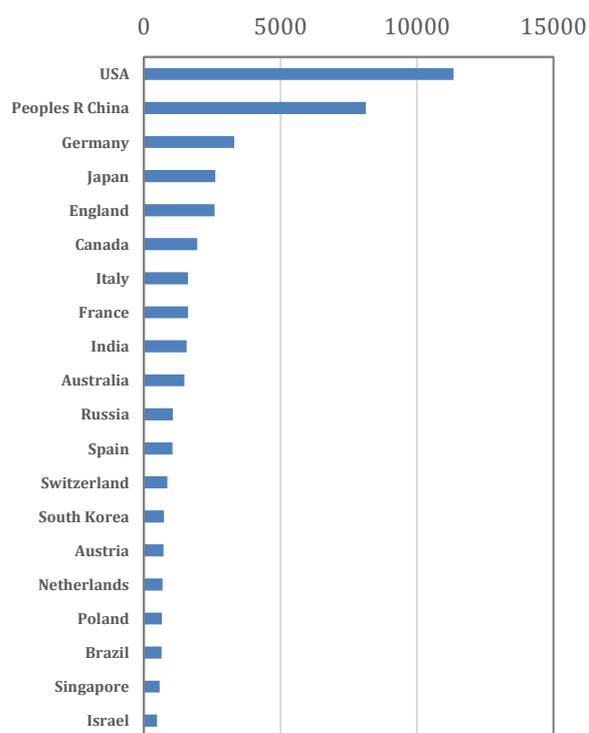


図8 量子コンピュータ 論文+特許 国・地域別文献数

文献数上位6カ国の年次推移を図9に示す。2011年以降中国の増加が著しく、直近では首位米国と同等にまで迫っている。3位以下の国も全て増加傾向にあるが2強に比べて緩やかである。その中でも4位日本が最も緩慢となっている。

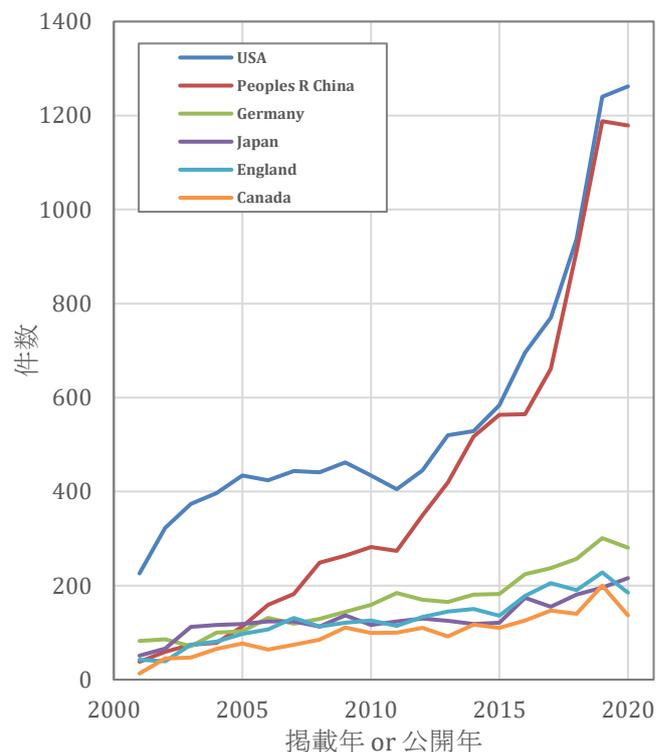


図9 量子コンピュータ 論文+特許 国・地域別文献数推移(文献数上位6カ国)

論文・特許が集中している領域の差異を求めため、量子コンピュータについて、論文・特許の全体、論文のみ、特許のみの3パターンについて分布を求めた。ヒートマップによる可視化結果を図10に示す。

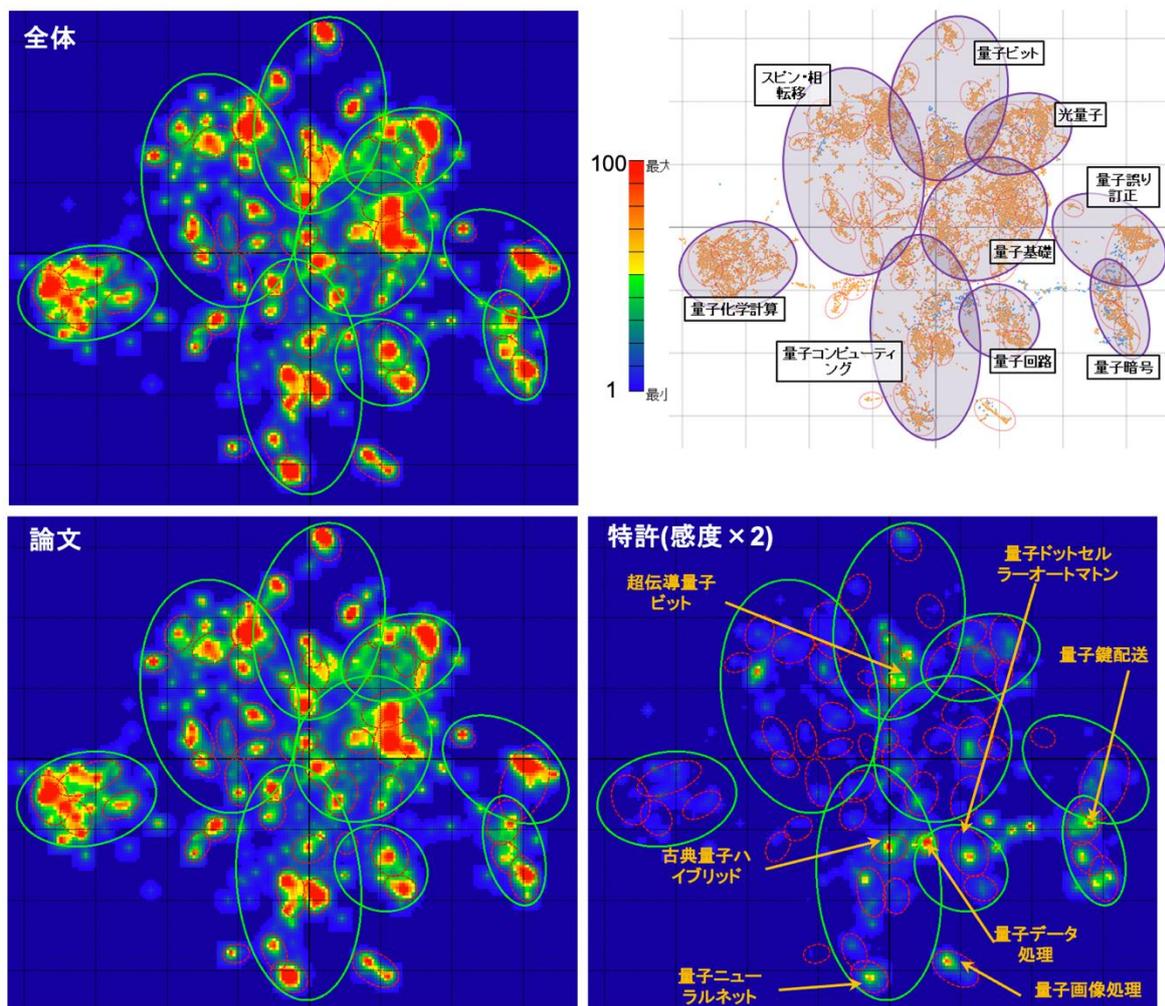


図 10 量子コンピュータ 論文+特許 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化：論文、特許別分布

全体文件数の89.6%を論文が占めるため、全体分布と論文のみの分布はほぼ似た分布となった。

特許が多く集積している領域は「超伝導量子ビット」「量子鍵配送」「量子データ処理」「古典量子ハイブリッド計算」である。俯瞰図の中心より少し離れた領域に分布している様子が確認された。

次に研究領域において学術研究(論文)と技術開発(特許)のどちらが活発に進んでいるかを可視化するため、俯瞰図を縦横0.5×0.5のメッシュに分割して、各メッシュ内の論文の割合を求めた。論文の割合を20%ごとに分割して可視化結果を図11に、論文割合を偏差値化して可視化した結果を図12に示す。

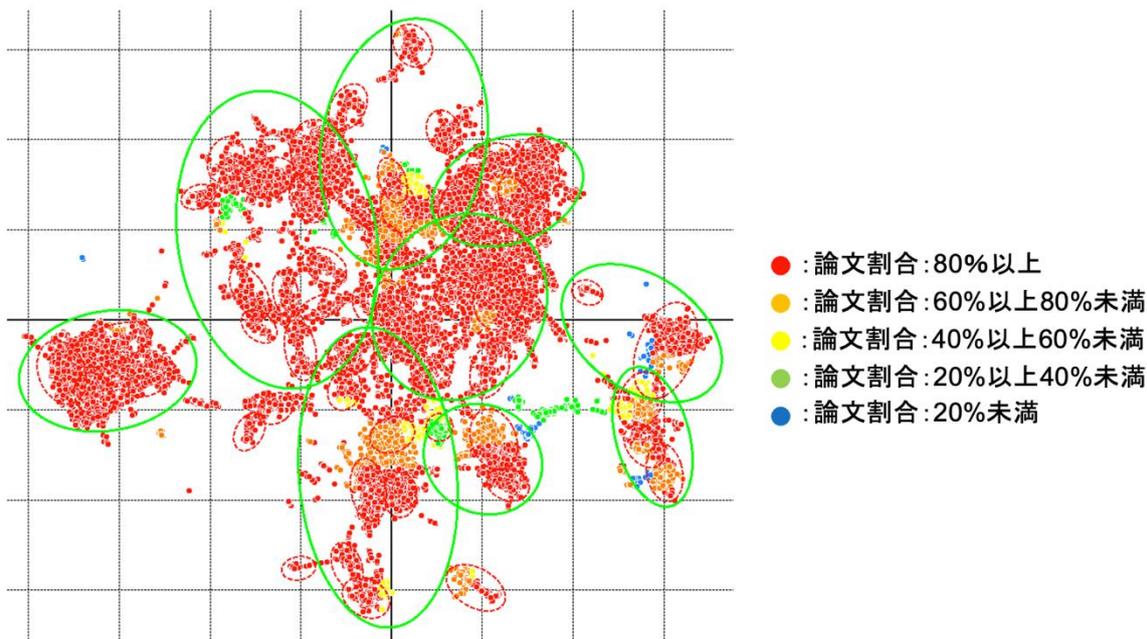


図 11 量子コンピュータ 論文+特許 : 論文と特許の割合分布(論文割合)

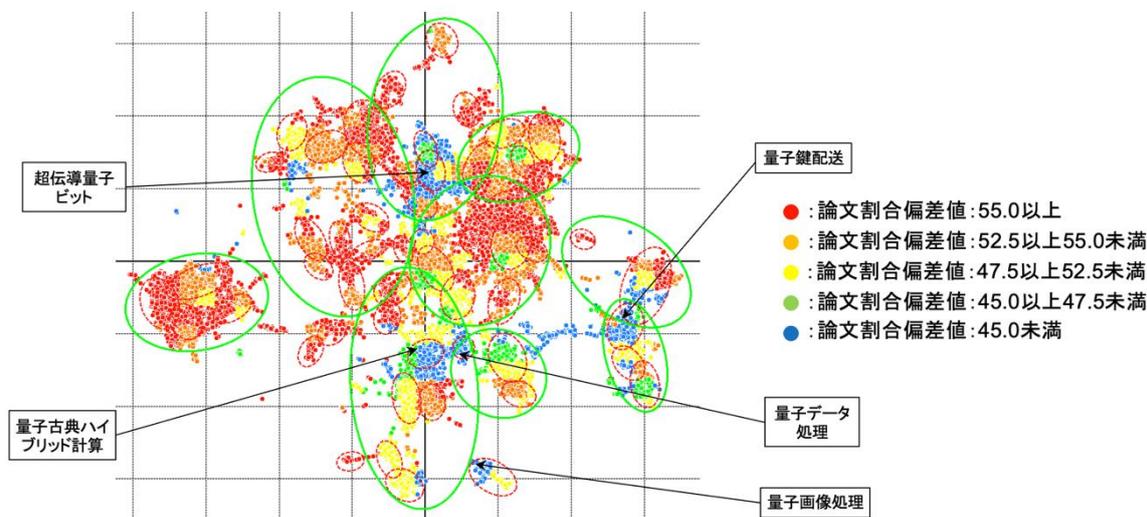


図 12 量子コンピュータ 論文+特許 : 論文と特許の割合分布(論文割合偏差値)

全体的にどの領域においても論文数の割合が高く、偏差値化した結果(図12)によって領域間の相対的な違いを可視化した。

量子コンピュータではどの領域も論文数の割合が極めて高く、基礎的な理解が進められている分野と考えられる。「超伝導量子ビット」「量子鍵配送」「量子データ処理」「古典量子ハイブリッド計算」「量子画像処理」では領域内で文献全体に対して特許が占める割合が比較的高く、応用技術開発が進んでいる分野と考えられる。

トピックモデルで計算された俯瞰図において、特定のトピックのウェイトが大きい論文が集まって密集領域を形成する。この局所的な集積の原因となる特徴的なトピックを主要トピックと呼ぶ。俯瞰

図を縦横0.5×0.5のメッシュに分割し、各メッシュ内のトピック群に対して主要トピックが占める割合を算出し、各研究分野の独立性・関連性を評価した。主要トピック割合が高い領域は、他の領域では使われていない特徴的なトピックが集中的に存在していることになるため、独立性の高い技術と判断できる。一方で主要トピック割合が低い領域は、他の領域でも使われているトピックを多く含むことから、広範囲に応用されている適用先の広い技術と考えることができる。主要トピック割合に応じて色分けしてプロットした結果を図13に示す。

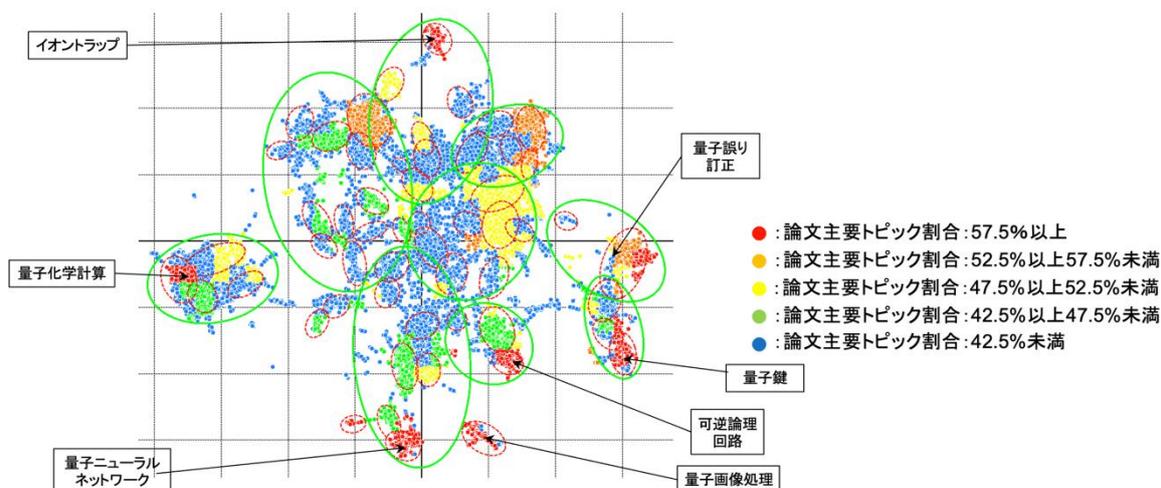


図 13 量子コンピュータ 論文+特許 : 論文主要トピック(ウェイト3.5%以上のトピック)割合プロット

俯瞰図中心の「量子基礎」領域は主要トピック割合が低い結果となっており、基礎理論が他領域の研究・技術開発に関与していることと整合的である。一方、俯瞰図辺縁部では基本的概念から離れて特定の応用を想定した特殊性の高いトピックが配置される可能性が高いため、主要トピック割合が高い領域になっていると考えられる。

次に特許に関して主要トピック割合に応じて色分けしてプロットした結果を図14に示す。各メッシュにおける主要トピック割合が低いほど、他領域においても広くトピックが使われており、応用への普及がなされていると解釈することができる。

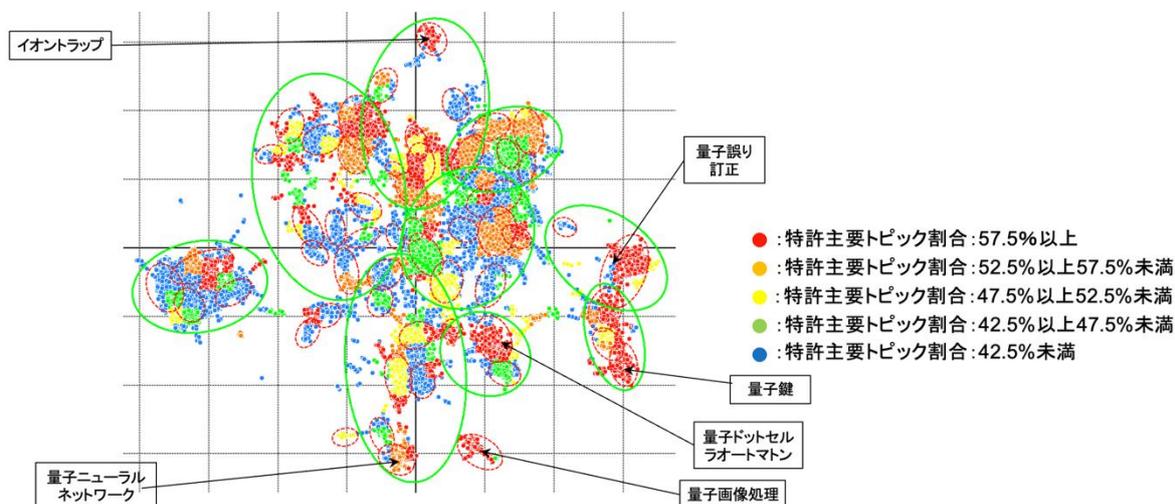


図 14 量子コンピュータ 論文+特許 : 特許主要トピック(ウェイト3.5%以上のトピック)割合プロット

全文献数に対して特許数の割合が低い場合、分析精度は論文より劣る点に留意する必要がある。

3.4 時系列変化

量子コンピュータの研究が時系列を追ってどのような分野で研究が進んできたかを明らかにするため、文献数の年次推移(図7)に基づいて4つの期間に分割して設定して可視化を行った。文献数は当初緩慢に増加した後直近で急激に増加しているため、2001-2010(10年間)、2011-2015(5年間)、2016-2018(3年間)、2019-2020(2年間)と最近になるほど間隔を狭めた。どの期間においても2年当たりのファイル数が色として表示されるようにヒートマップの感度を調整して可視化した結果を図15に示す。

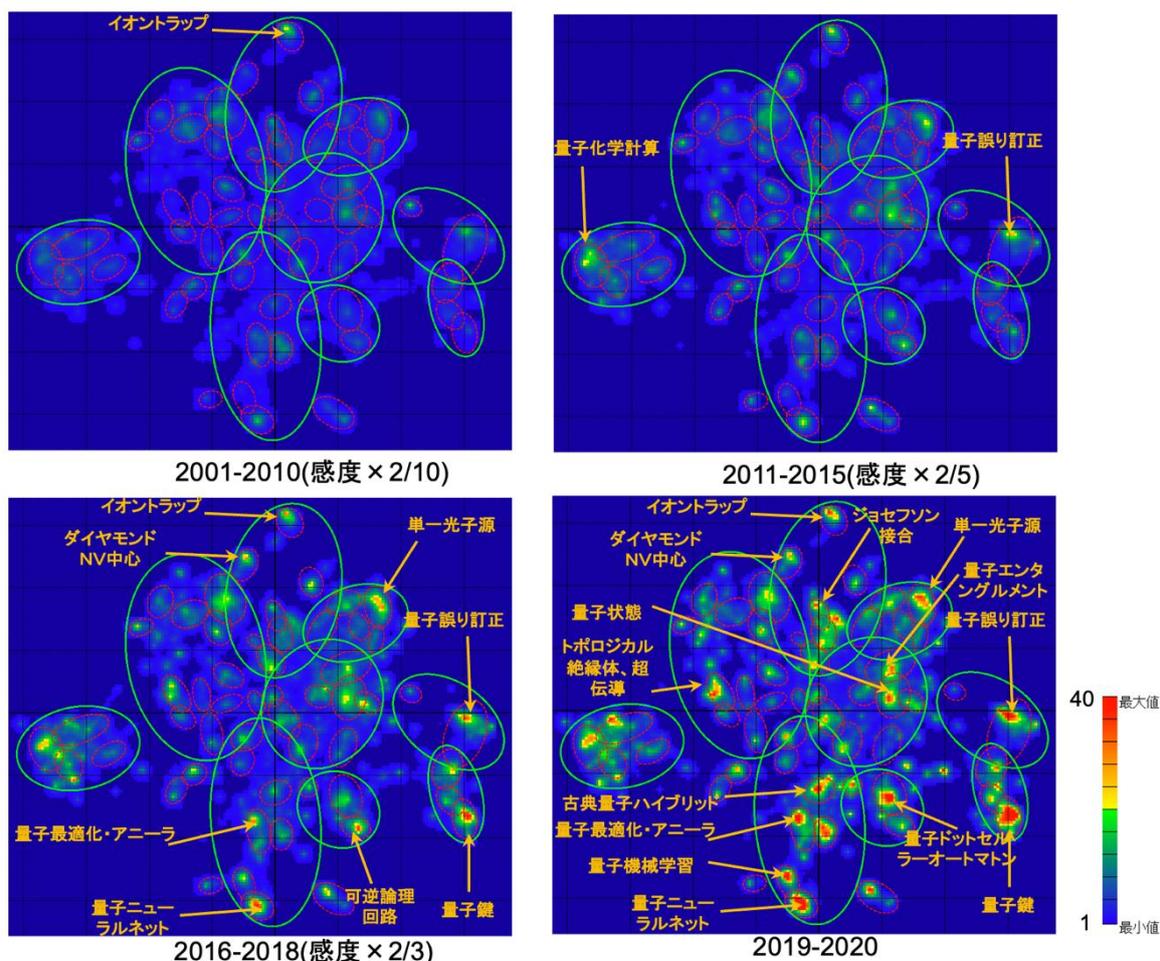


図 15 量子コンピュータ 論文+特許 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化：4期間ごと

「イオントラップ」や「量子誤り訂正」等の研究は2001年から現在まで継続的に研究が実施されている。文献件数の増加が始まった2016年からは「量子最適化・アニーラ」「量子ニューラルネットワーク」

「量子鍵」「ダイヤモンドNV中心」等が活発である。直近の2019年以降では、新たに「トポロジカル絶縁体」「量子機械学習」「古典量子ハイブリッド計算」など更に多くの研究が注力されている。

次に量子コンピュータについて、論文32,895件に限定して図15と同様の可視化を行った結果を図16に、特許3,780件に限定して可視化を行った結果を図17に示す。

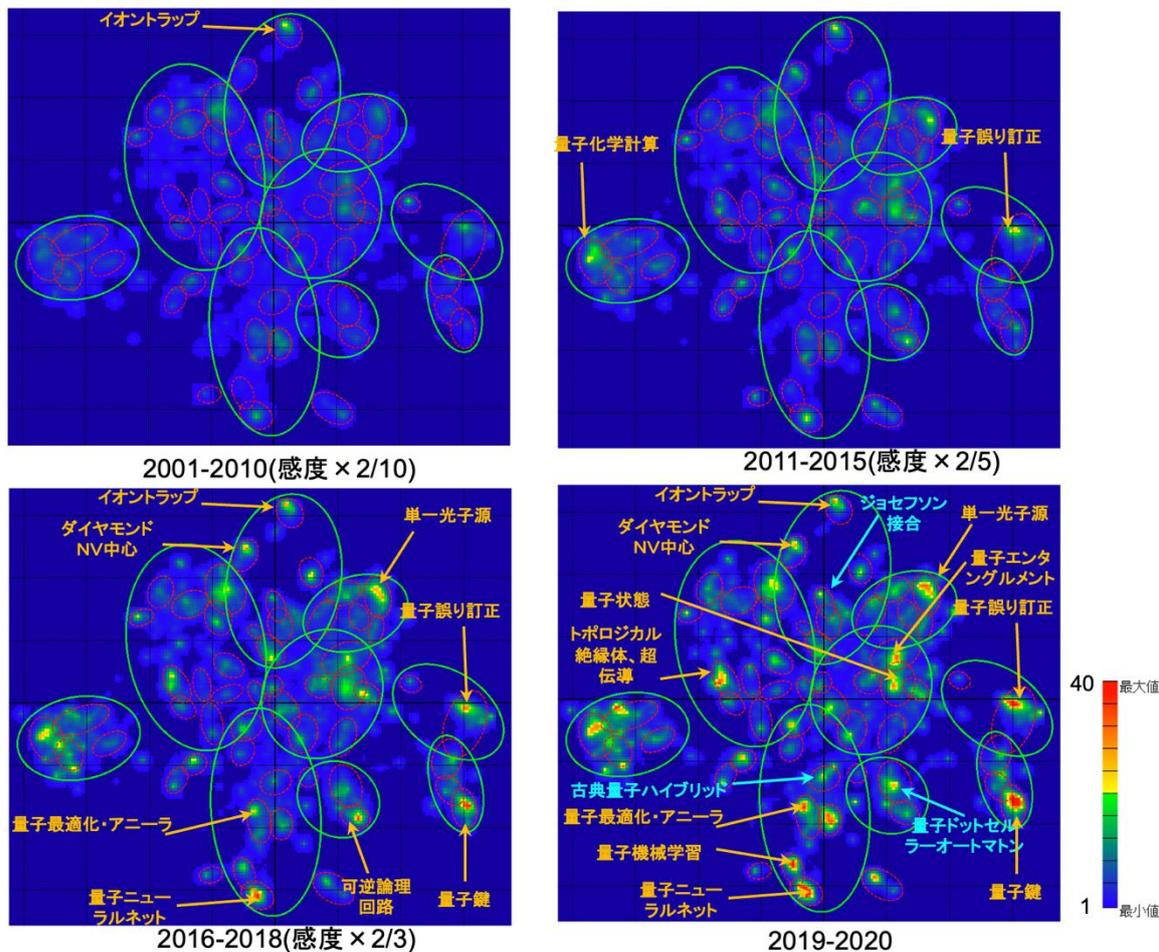


図 16 量子コンピュータ 論文 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化：期間ごと

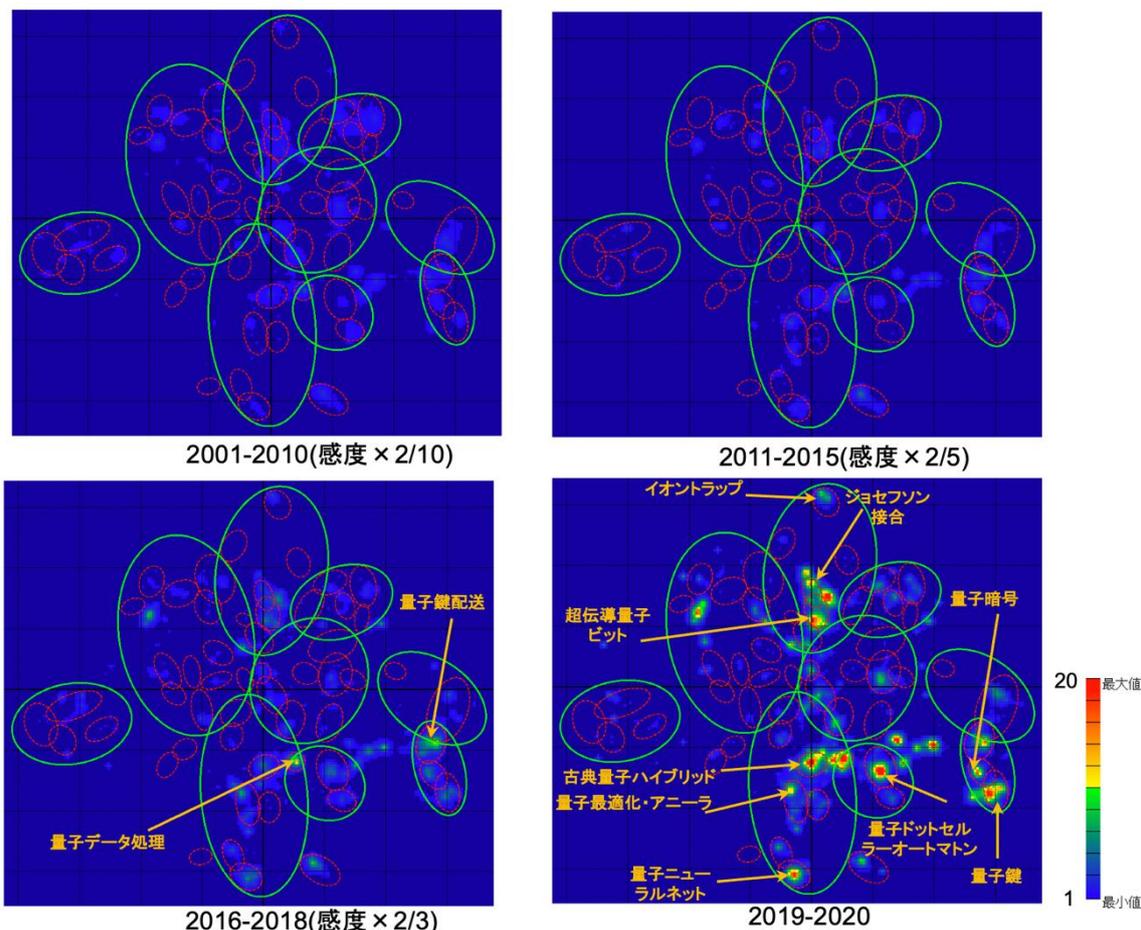


図 17 量子コンピュータ 特許 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化：期間ごと

量子コンピュータ関連の特許は2016年以降に増加しており、それまではほぼ論文中心であるため、2016年までは全体分布も論文分布もほぼ変化がない。直近の2019年以降になると全体と論文のみの差異が顕著になり、「古典量子ハイブリッド計算」や「量子ドットセルラーオートマトン」などで特許中心の技術化が進んでおり、論文としてはあまり研究されていない。

特許における量子コンピュータ関連開発は2016年頃から増加が始まっているが、当初は「量子データ処理」のような漠然とした技術と「量子鍵配送」で始まっていた。直近の2019年以降では「量子鍵」「量子ドットセルラーオートマトン」「量子最適化・アニーラ」「古典量子ハイブリッド計算」「超伝導量子ビット」など中心からやや離れた周辺部領域で開発が注力されている。

研究開発が今後も活発に続き、論文や特許が増加しているエマージング領域を明らかにするため、文献数の増加度合いに着目して可視化を行った。俯瞰図を縦横0.5×0.5のメッシュに分割して、メッシュ毎に成長曲線(ロジスティック関数)フィッティングを行い、立ち上り年を求めた。領域ごとに立ち上がり年に基づいて可視化を行った結果を図18に示す。立ち上がり年が新しい(暖色系で表示)と今後の文献数の増加が予測され、立ち上がり年が古い(寒色系で表示)と増加ピークを過ぎたことを示している。ここでは論文バルクデータの収録状況を鑑みて2019年までのデータを用いて可視化を行った。量子コンピュータ全般で文献数が増加傾向にあるため、全域的に今後の成長が見込まれる(立ち上がり年が2015年以降)結果となった。

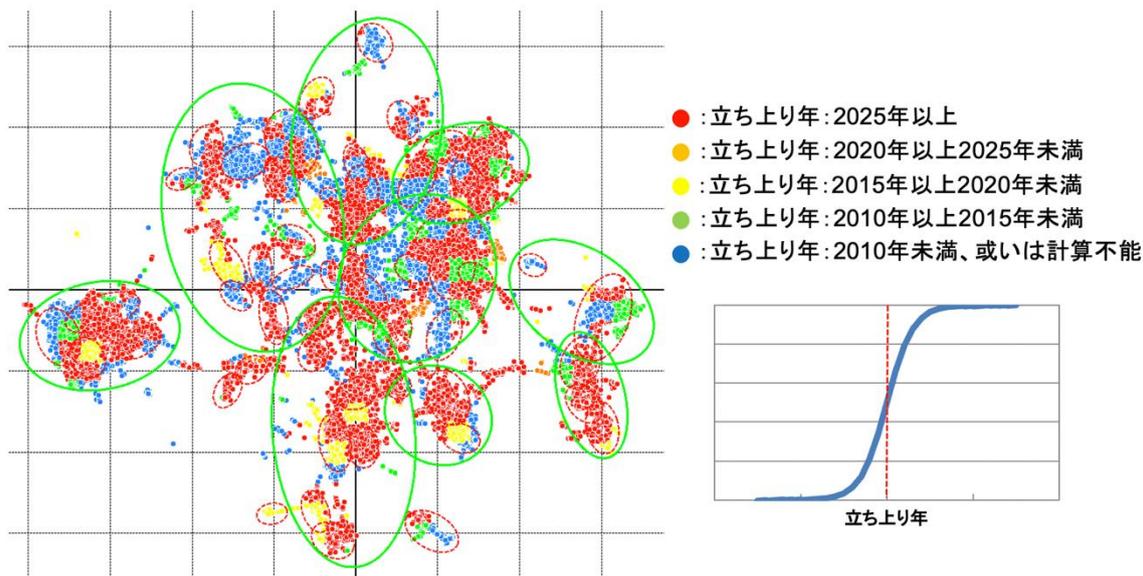


図 18 量子コンピュータ 論文+特許 成長曲線フィッティングによる立ち上がり年評価 絶対件数：全体

次に、論文・特許の文献数を全体平均で除して相対化することで、2020年の論文データも分析に使用して図18と同様の可視化を行った。単に文献数が増加しているだけでなく、全体平均以上に文献数が増加している領域を求めた結果を図19に示す。

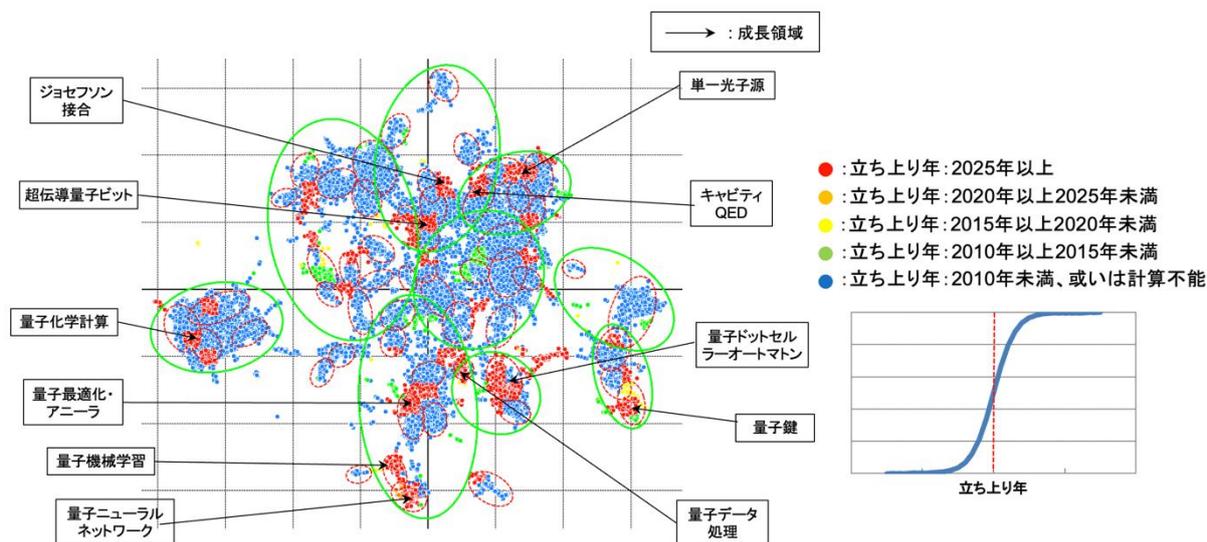


図 19 量子コンピュータ 論文+特許 成長曲線フィッティングによる立ち上がり年評価 相対件数：全体

基礎的な技術が多い俯瞰図中心部では成長領域が少なく、やや周辺の領域が成長している様子が確認された。密集領域の周辺部や複数の領域にまたがる接合部において成長領域が見られた。これは技術が改良・応用されて文献数が増加していることを示唆している。主な成長領域は「量子機械学習」「量子ニューラルネットワーク」「量子鍵」「量子ドットセルラーオートマトン」「量子データ処理」である。

論文データのみで図19と同様の成長評価と可視化を行った結果を図20に示す。

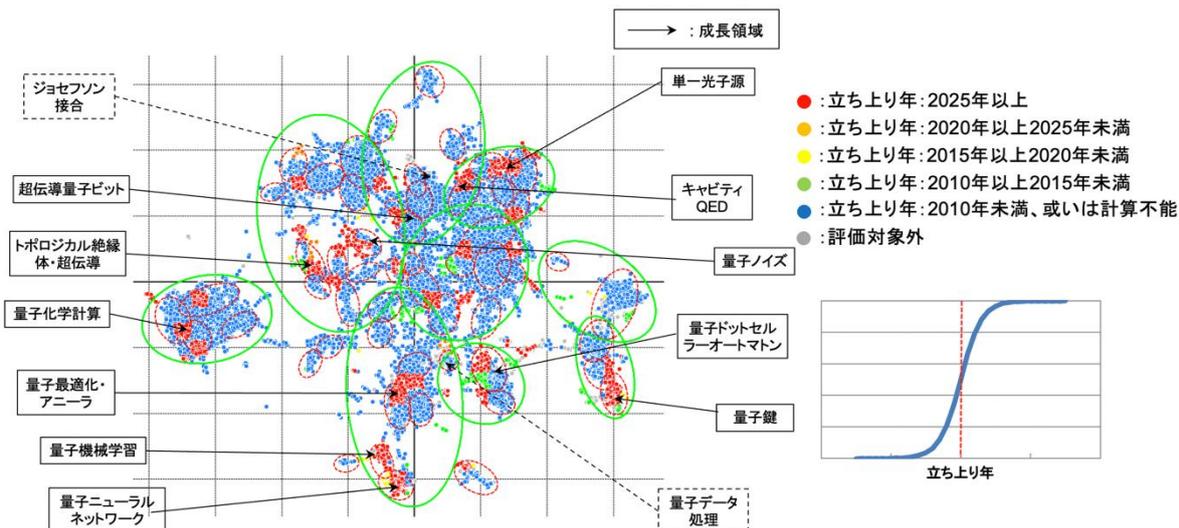


図 20 量子コンピュータ 論文 成長曲線フィッティングによる立ち上り年評価 相対件数：全体

論文のみで評価を行うと「量子データ処理」「ジョセフソン接合」「量子ドットセルラーオートマトン」の領域では相対的に文献数の伸びが小さくなった。これらは特許からの寄与が大きいと思われる。逆にエマージング領域と判定された領域は「トポロジカル絶縁体・超伝導」「量子ノイズ」である。

特許データのみで図20と同様の成長評価と可視化を行った結果を図21に示す。特許出願件数が伸びている領域は限定的であり「量子ニューラルネットワーク」「量子データ処理」「ジョセフソン接合」「量子ドットセルラーオートマトン」「量子古典ハイブリッド計算」「量子鍵」となった。

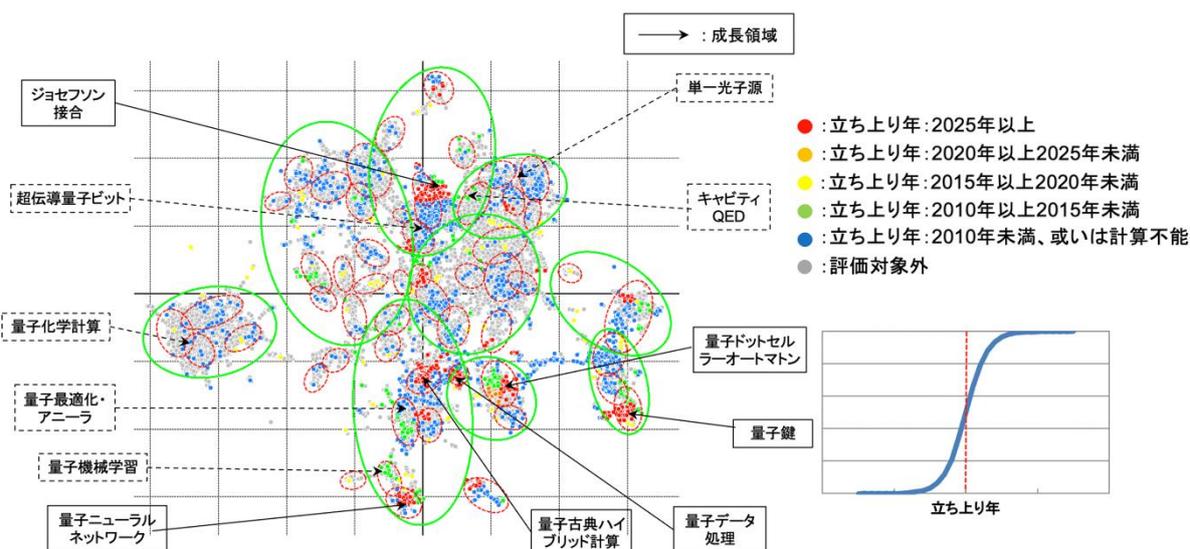


図 21 量子コンピュータ 特許 成長曲線フィッティングによる立ち上り年評価 相対件数：全体

ここまでエマージング領域を論文・特許数に基づいて可視化してきたが、研究に参入して論文を出版する研究機関が増加する領域においては、成長しているエマージング領域と判断することができる。そこで論文を出版した研究機関数の年次増加割合を指標として評価を行った。参入する研究

機関数が多い領域を求めた結果を図22に示す。なお、論文の研究機関名の同定には、WoSのorganization1を用いた。

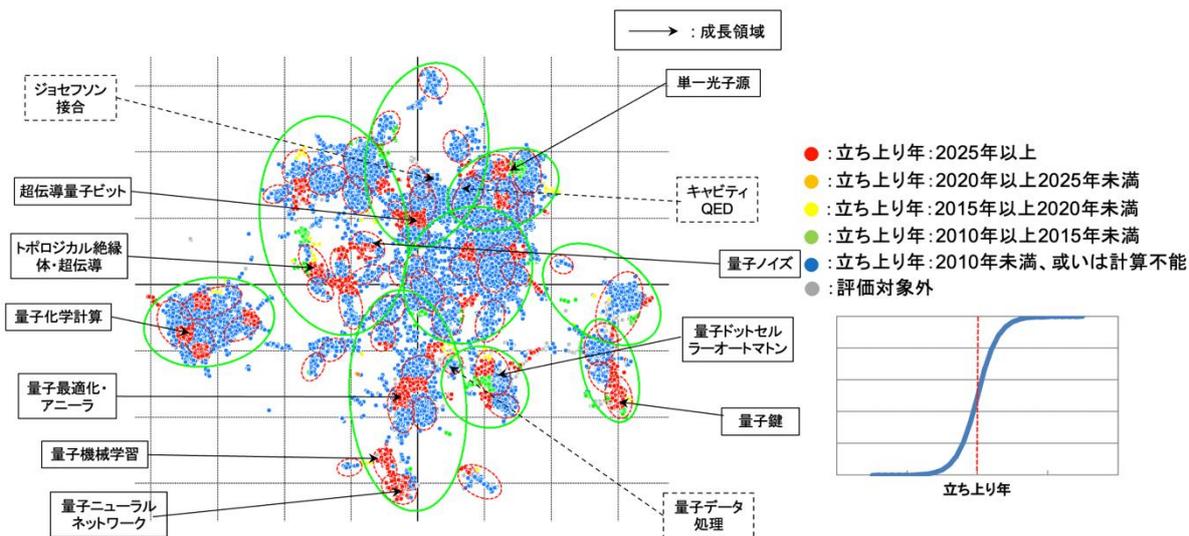


図 22 量子コンピュータ 論文 エマージングな研究領域の探索:成長曲線フィッティングによる立ち上り年評価 相対件数 : 論文 研究機関

論文数を指標とした場合にエマージング領域と判定された「キャビティQED」において、ユニークな研究機関数を指標とした場合には論文数の割合ほど増加していない結果となった。

次に特許に関してユニークな特許出願人の年次増減を用いて評価を行った。参入する出願人数が多い領域を求めた結果を図23に示す。

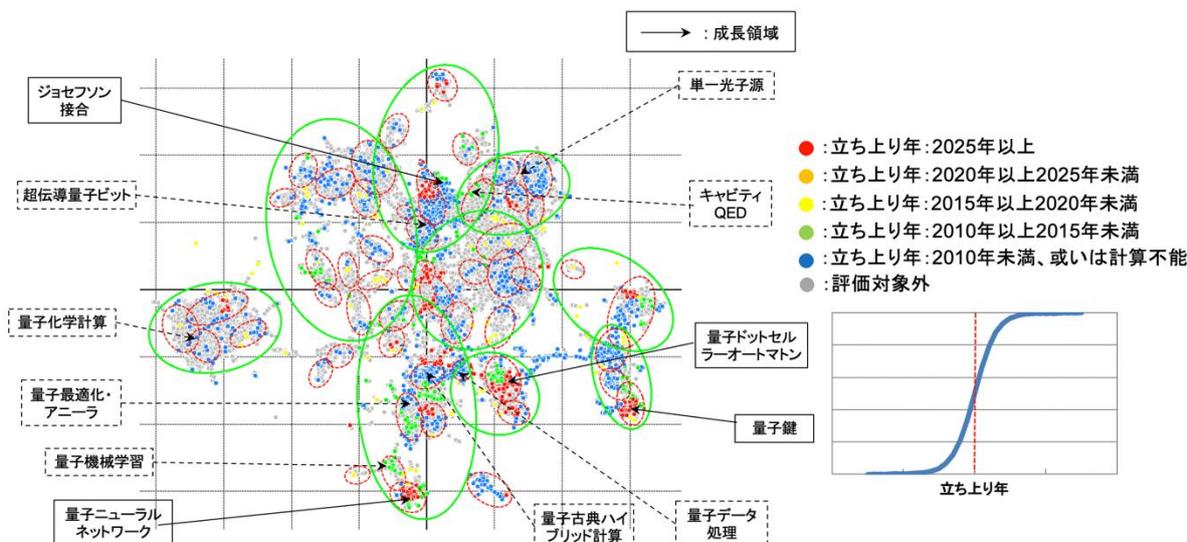


図 23 量子コンピュータ 特許 エマージングな研究領域の探索:成長曲線フィッティングによる立ち上り年評価 相対件数 : 特許 出願人

ユニークな出願人数での評価は、特許件数による評価(図21)と大きな差が無い評価となったが、全体的に成長領域と判定された領域が狭くなる傾向が見られた。「量子古典ハイブリッド計算」「量子データ処理」の領域では、ユニークな出願人の数の伸びは特許件数の伸びより低い結果となった。

次に論文を出版したユニークな論文著者数の年次増減をエマージング指標に用いて評価を行った。人的資源をより投入している領域を求めた結果を図24に示す。なお、論文著者の同定には、WoS付与のfull_name(roleはauthorに限定)を用いた。

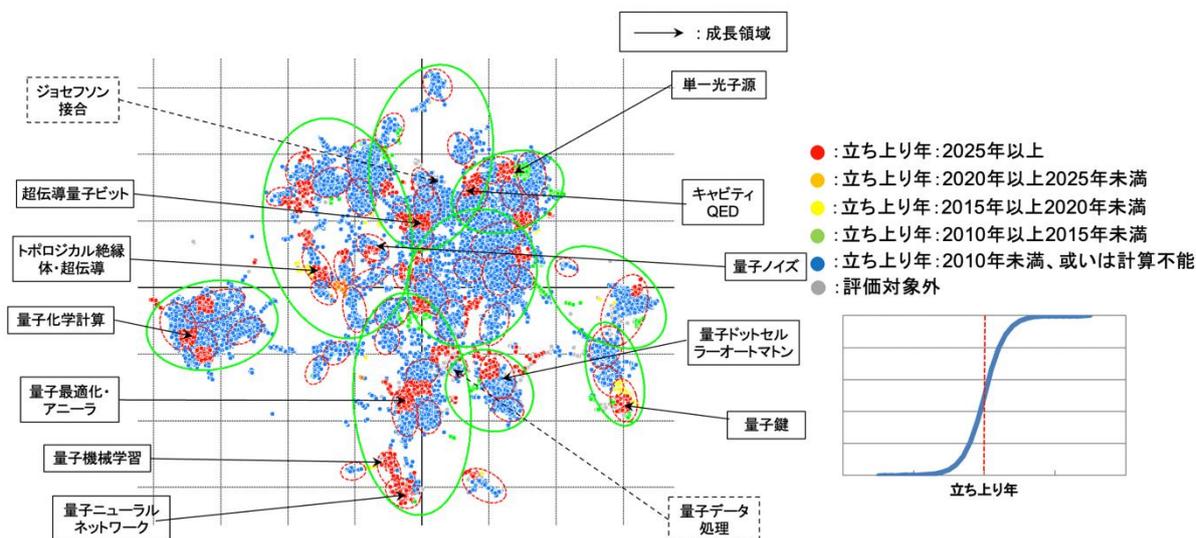


図 24 量子コンピュータ論文 エマージングな研究領域の探索:成長曲線フィッティングによる立ち上がり年評価 相対件数:論文著者

論文のユニークな著者数で評価を行ったところ、論文数による評価(図20)と大きな差が無い評価となったが、全体的に成長領域と判定された領域が狭くなる傾向が見られた。

3.5 国・地域、機関別集計

量子コンピュータに関する論文について、国・地域別の出版件数を集計した。国・地域別の出版件数を図25(A)に、上位6カ国の論文数の推移を図26(A)に示す。European Patent Organisationに属する38カ国をまとめて欧州として集計した結果を図25(B)および図26(B)に示す。

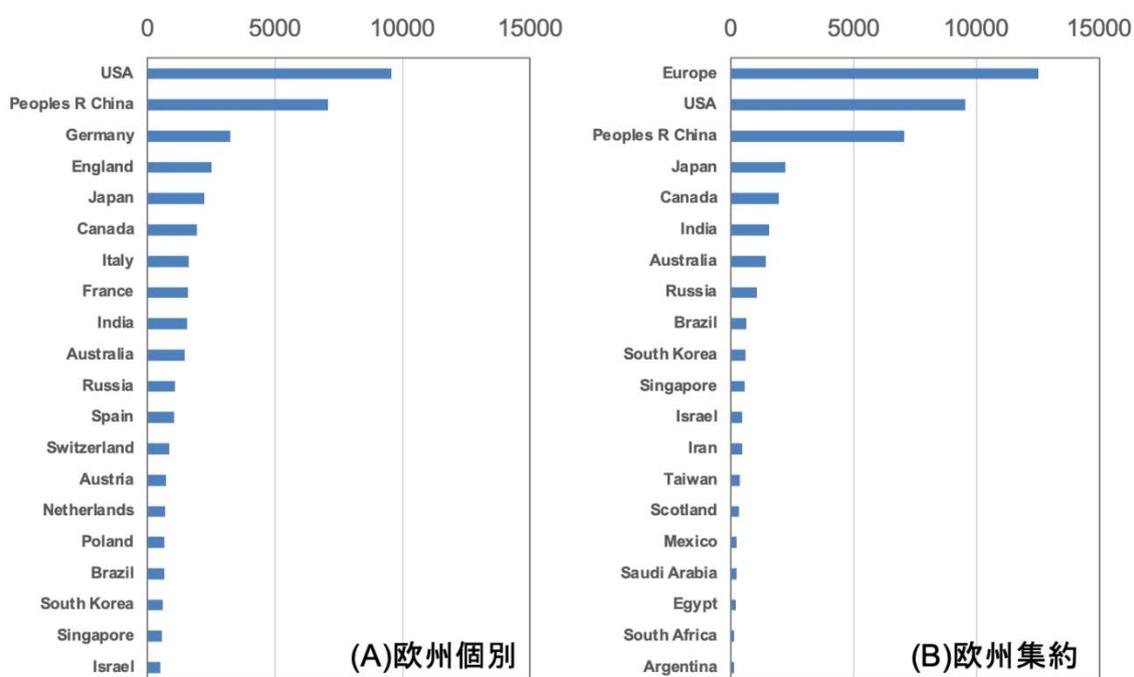


図 25 量子コンピュータ論文 国・地域別件数:(A)欧州各国を個別に集計 (B)欧州を合算して集計

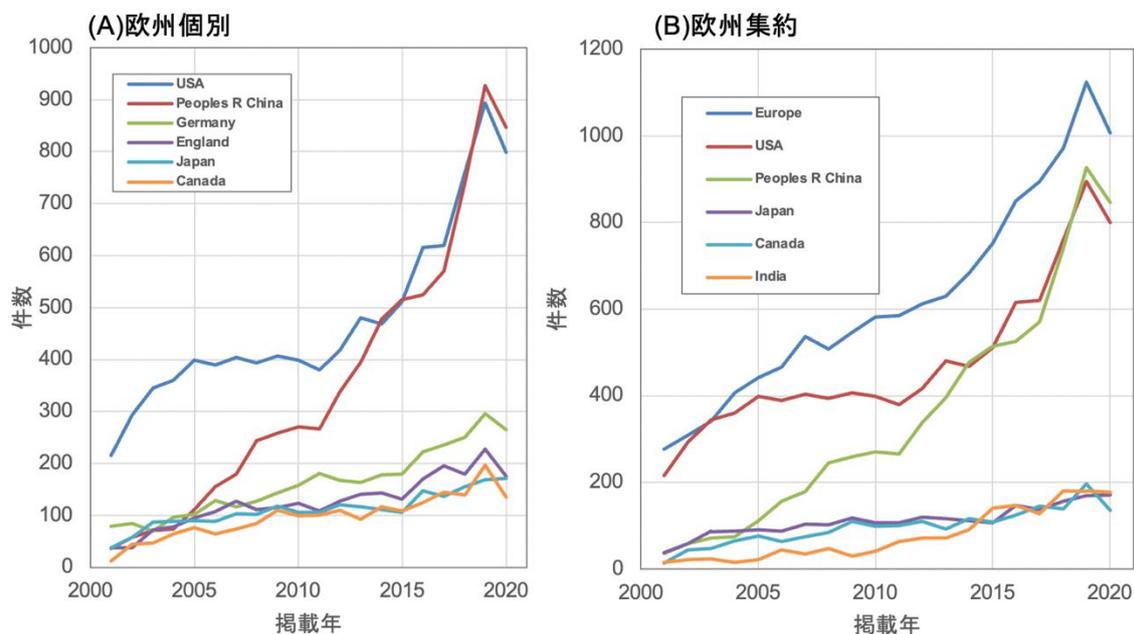


図 26 量子コンピュータ論文 国・地域別件数推移:(A)欧州各国を個別に集計 (B)欧州を合算して集計

同様に量子コンピュータに関する特許について、国・地域別の特許出願件数を図27(A)に、上位6カ国の出願数の推移を図28(A)に示す。European Patent Organisationに属する38カ国をまとめて欧州として集計した結果を図27(B)および図28(B)に示す。

なお、特許の国籍は発行国でなく優先権主張先国とし、EPOに直接出願した特許などはEPのままとして特定の国に加算せずにEPとして集計した。

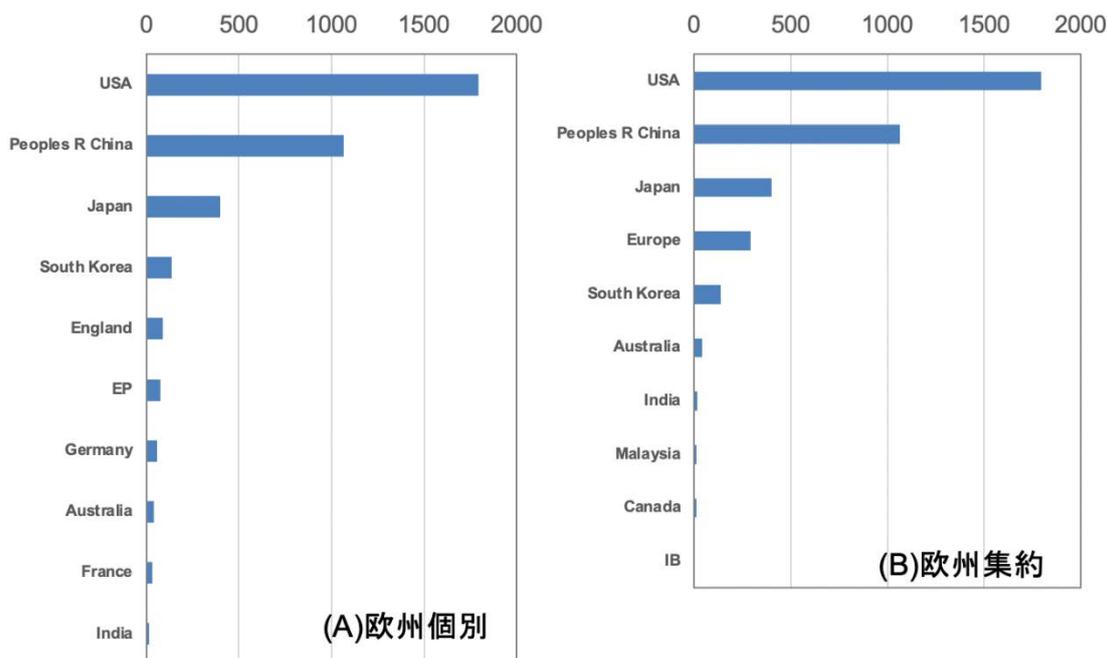


図 27 量子コンピュータ 特許 国・地域別件数:(A)欧州各国を個別に集計 (B)欧州を合算して集計

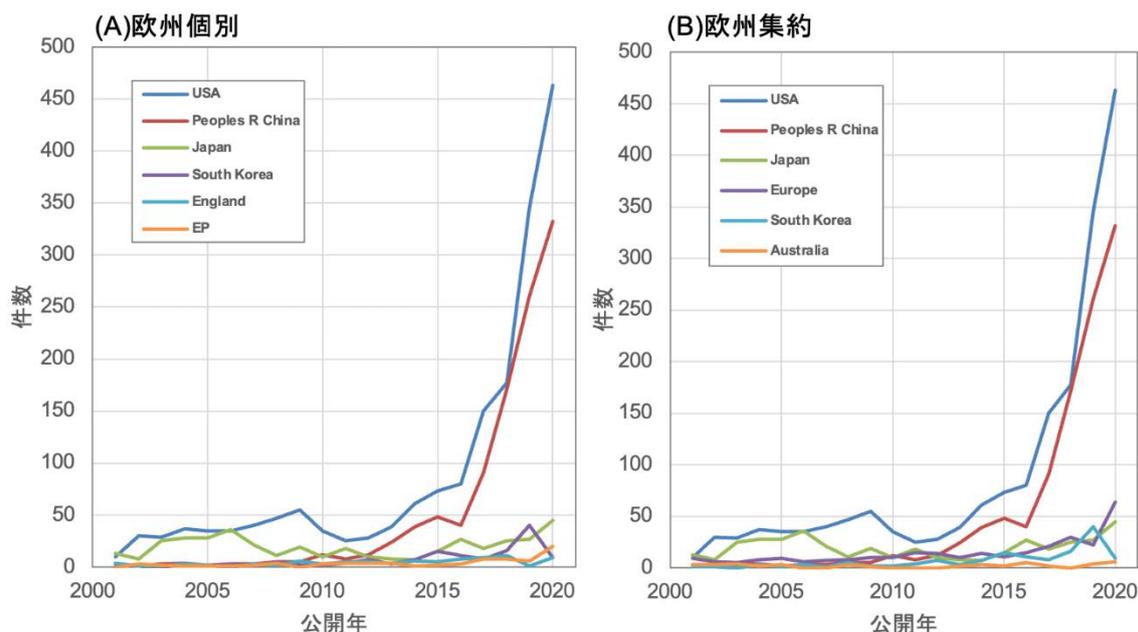


図 28 量子コンピュータ 特許 国・地域別件数推移:(A)欧州各国を個別に集計 (B)欧州を合算して集計

米国・中国の論文数が2011年以降、特許数が2016年以降急激に増加している。欧州としてまとめて集計すると2013年から論文数が増加しているが、特許数は4位に留まっている。

日本は他国と比較して特許件数割合が高いが、日本の特許は国内特許割合が高いことに留意が必要である。韓国は論文数で18位であるが、特許では4位となっており、日本以上に特許依存度が高い。

量子コンピュータで論文数・特許数の多かった米国・中国・欧州・日本について、国ごとに論文出版・特許出願が多い領域を明らかにするため、論文及び特許からなる技術俯瞰図においてヒートマップによる可視化を行った。結果を図29に示す。

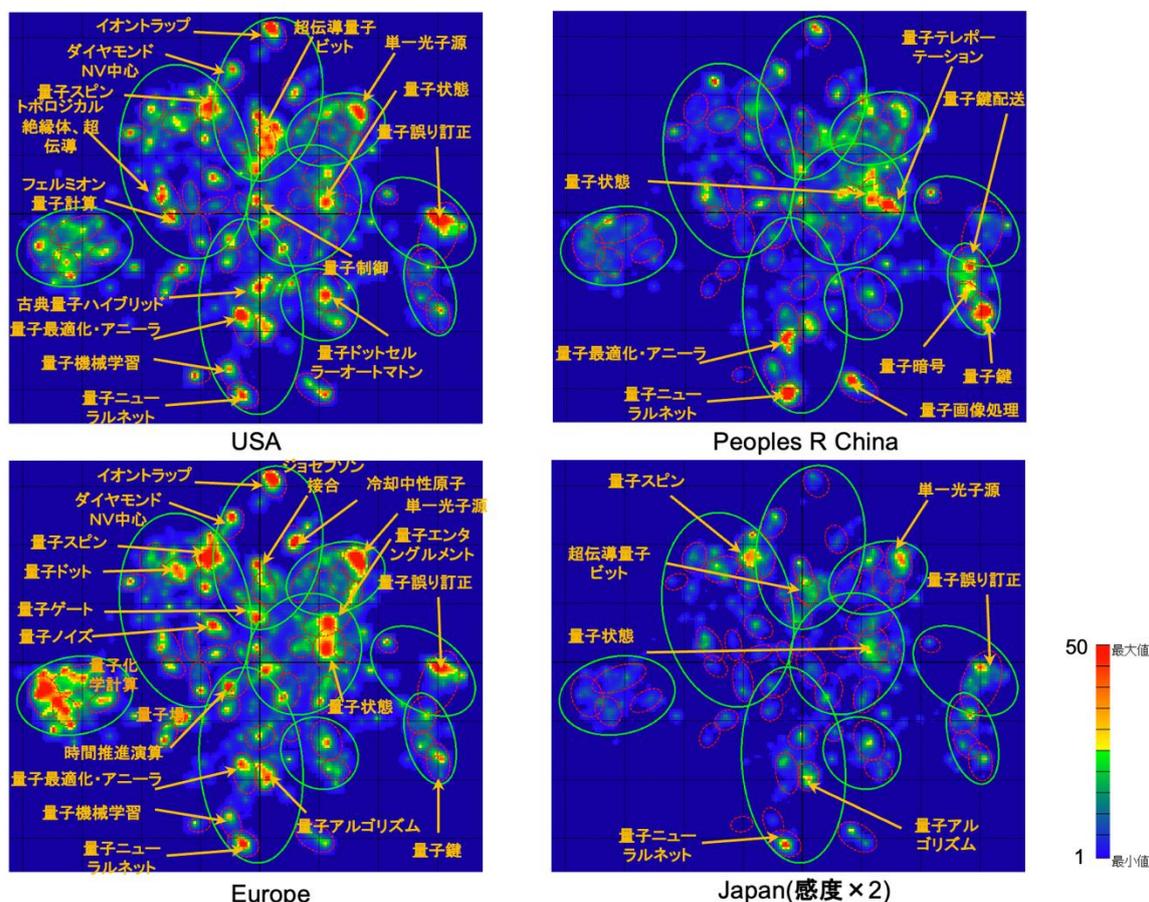


図 29 量子コンピュータ 論文+特許 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化 :国・地域ごと

図29で赤く表示される文献数が多い領域の分布を比較すると、国・地域によって文献数が多い領域が異なっている。米国と欧州はほぼ全領域で文献が存在しているが、米国は「超伝導量子ビット」「トポロジカル絶縁体」「量子最適化・アニーラ」が多く、欧州は「冷却中性原子」「量子ドット」「量子エンタングルメント」が多い傾向が見られた。中国は米国・欧州と比較すると明らかに集中領域が限定されて「量子鍵」「量子テレポーテーション」「量子ニューラルネットワーク」「量子画像処理」などソフト的技術に多く存在する傾向が見られる。日本はさらに限定的であり「単一光子源」「量子スピン」等の中国があまり有していないハード的な技術と、「量子誤り訂正」や「量子ニューラルネットワーク」のようなソフト的技術に文献が存在している。

同様に論文のみからなる技術俯瞰図においてヒートマップによる可視化を行った結果を図30に、特許のみからなる結果を図31に示す。

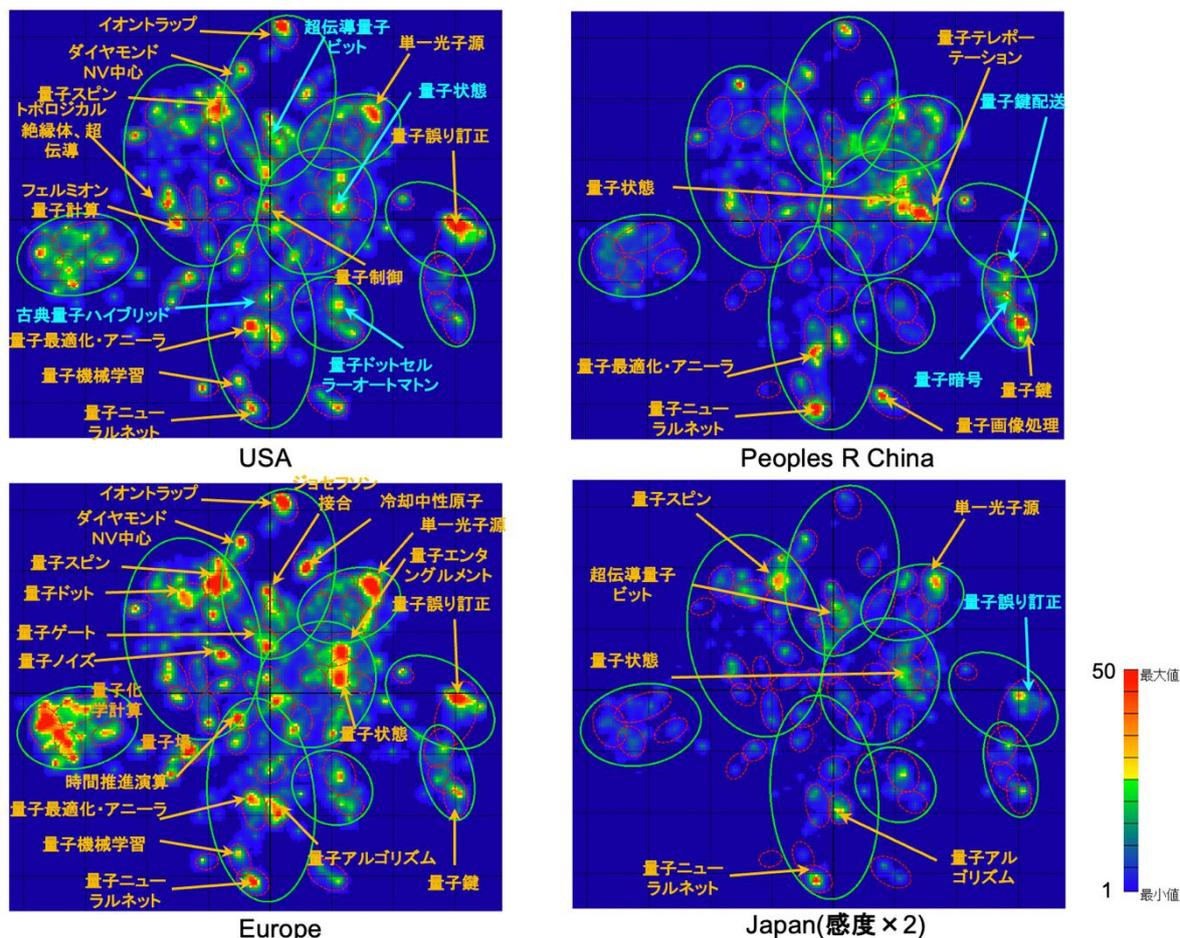


図 30 量子コンピュータ 論文 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化 :国・地域ごと

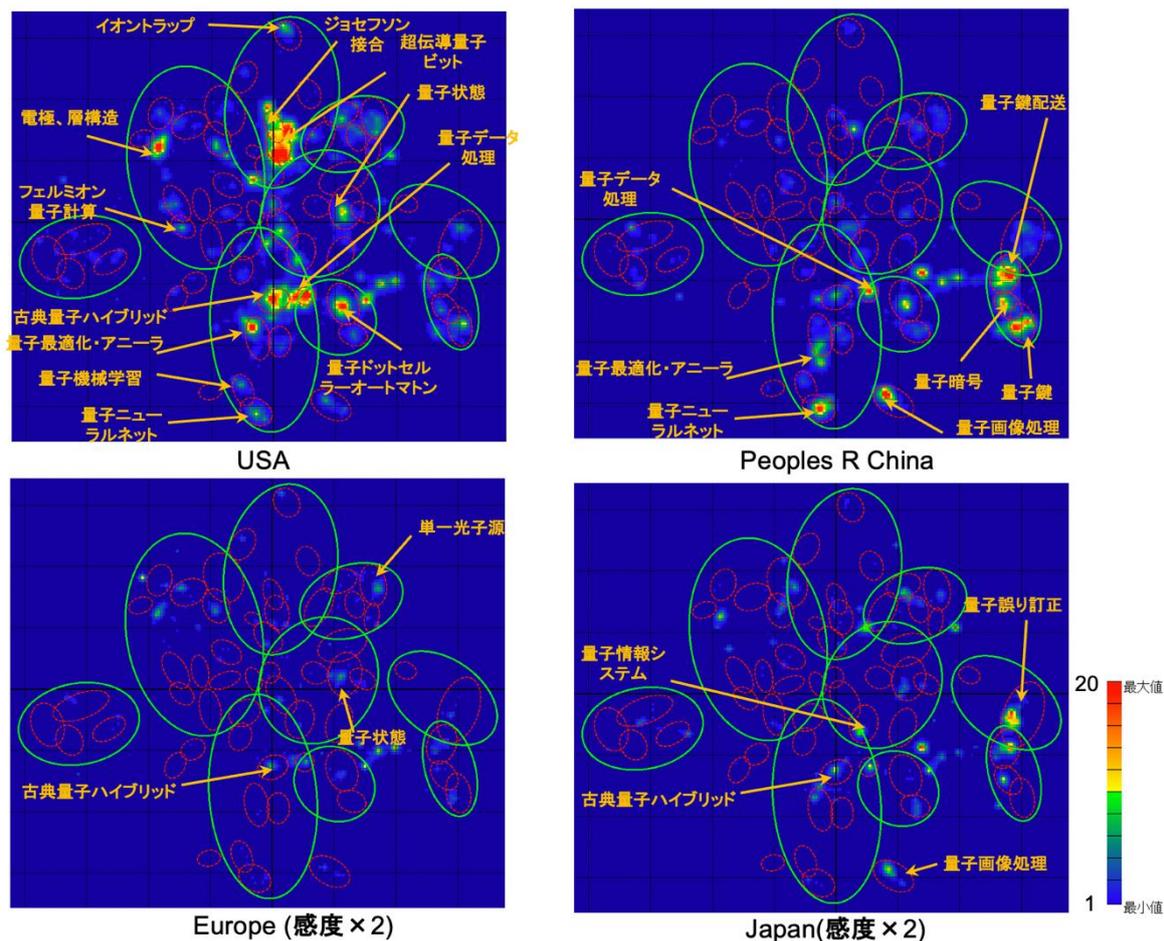


図 31 量子コンピュータ 特許 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化 :国・地域ごと

論文と特許を分けて可視化を行った結果、米国では「超伝導量子ビット」「古典量子ハイブリッド計算」「量子ドットセルラオートマトン」等の領域で特許件数が多いことが確認できた。「量子最適化・アニーラ」では論文・特許共に多い傾向が見られた。中国では「量子鍵配送」「量子暗号」「量子ニューラルネットワーク」で特許の件数が多い。欧州は論文件数と比較して特許件数の割合が小さく、「古典量子ハイブリッド計算」「単一光子源」「量子状態」に限られる。日本では「量子誤り訂正」「量子画像処理」「古典量子ハイブリッド計算」において特許が出ている。

量子コンピュータに関する論文について、出版した研究組織毎に出版数の集計を行った。なお、今回分析に用いたWeb of Scienceのバルクデータでは収録状況の影響により2020年において約1割程度の欠損が確認されている。論文出版数の集計結果を図32に、論文出版数の推移を図33に示す。

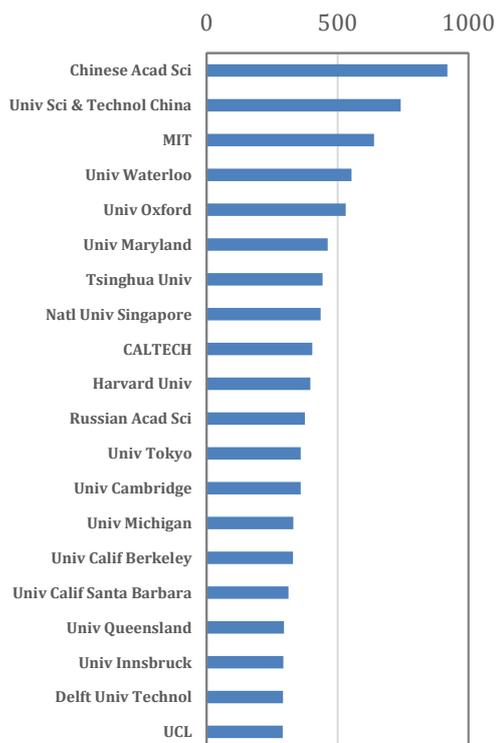


図 32 量子コンピュータ論文 研究機関別件数

最も論文出版数の多い国は米国であったが、研究組織としては中国の中国科学院が最多であった。次いで、中国科学技術大学、マサチューセッツ工科大学、カナダのウォータールー大学、オックスフォード大と続く。日本の最高位は東京大学で12位であった。

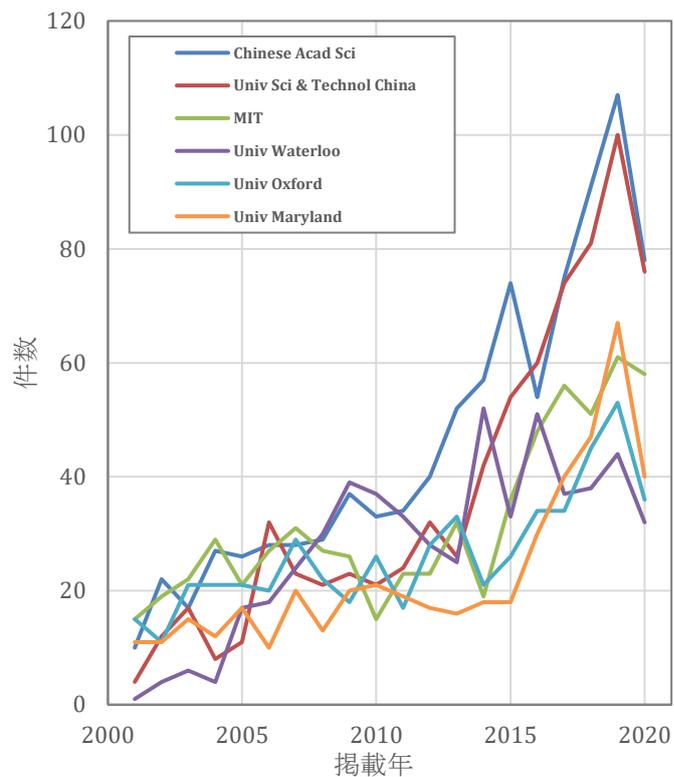


図 33 量子コンピュータ論文 研究機関別件数推移

首位の中国科学院や2位の中国科学技術大学など、中国勢の増加が著しい。アメリカ メリーランド大も増加が著しい。

技術俯瞰図において12の研究機関毎に論文分布の可視化を行った。結果を図34～図36に示す。

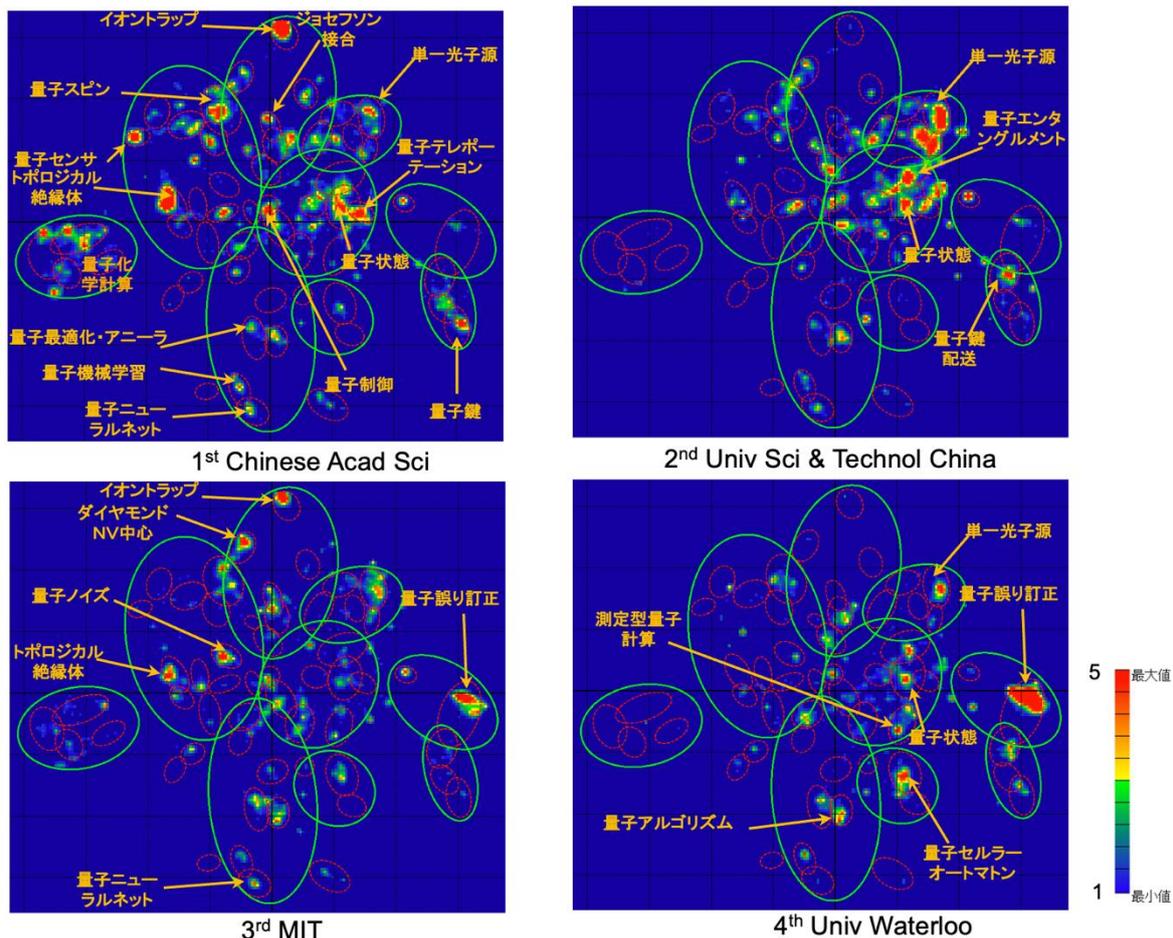


図 34 量子コンピュータ論文トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化:研究機関ごと論文数1位~4位

1位の中国科学院は「量子ビット」や「スピン・相転移」のような材料的な研究が多く、2位の中国科学技術大学では「量子基礎」や「光量子」が多く、両者は「量子暗号」領域でも重なりがない。組織として研究分野の棲み分けが行われていると推測される。3位のMITは「イオントラップ」「ダイヤモンドNV中心」「トポジカル絶縁体」など超伝導でない量子ビットに注力している。他に「量子誤り訂正」などで文献数が多い。4位のウォータールー大学は「量子誤り訂正」に集中しており、他にも「単一光子源」や「量子セルラーオートマトン」に注力している。

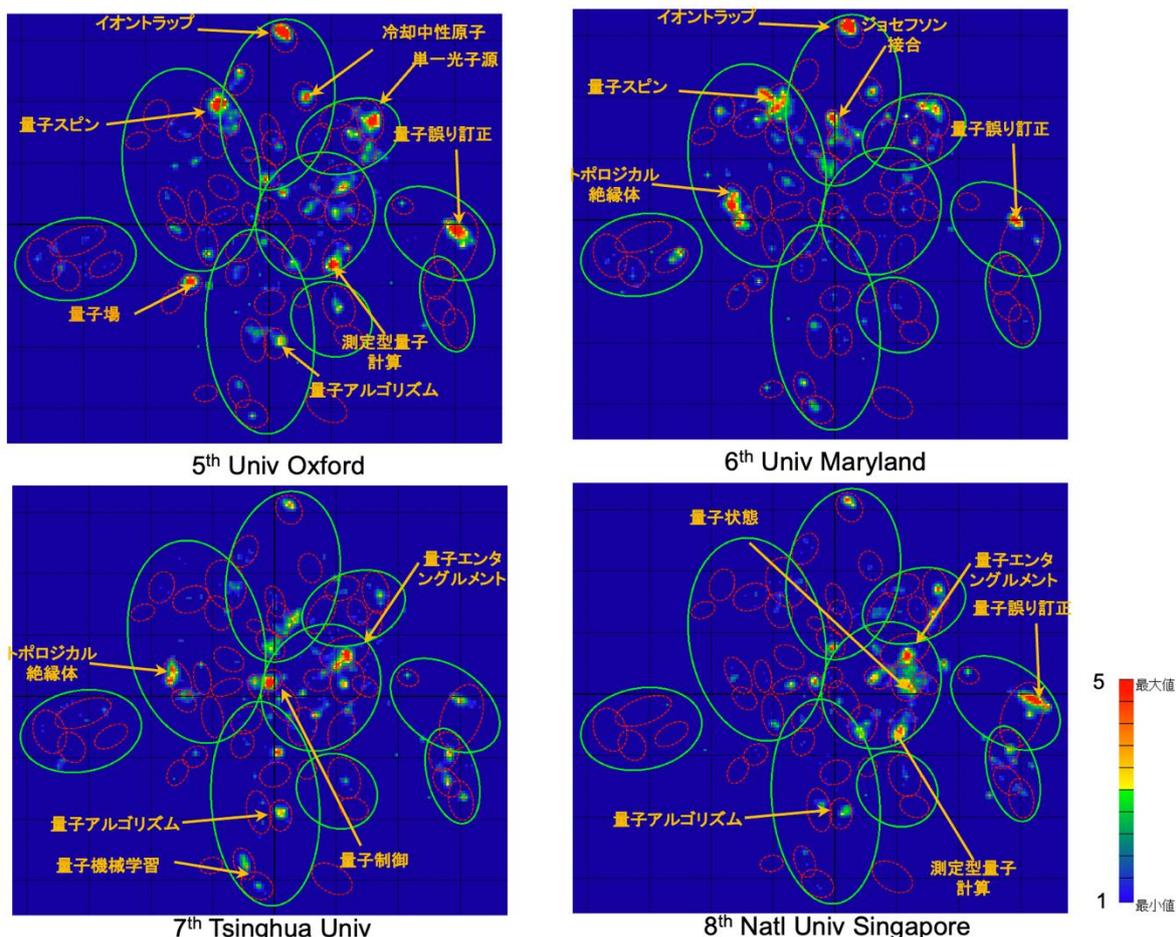


図 35 量子コンピュータ論文 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化 :研究機関ごと論文数5位~8位

5位のオックスフォード大学もMITと同様に超伝導でない「量子ビット」に関心が高く、「イオントラップ」や「冷却中性原子」に注力している。他にも「量子誤り訂正」や「測定型量子計算」に多い。6位のマリーランド大学は「イオントラップ」「トポロジカル絶縁体」「ジョセフソン接合」などの量子ビット系や「量子誤り訂正」に多い。7位の精華大は「量子制御」「トポロジカル絶縁体」「量子エンタングルメント」と量子ビット以外に集中している。8位のシンガポール国立大学は「量子誤り訂正」や「測定型量子計算」に集中している。

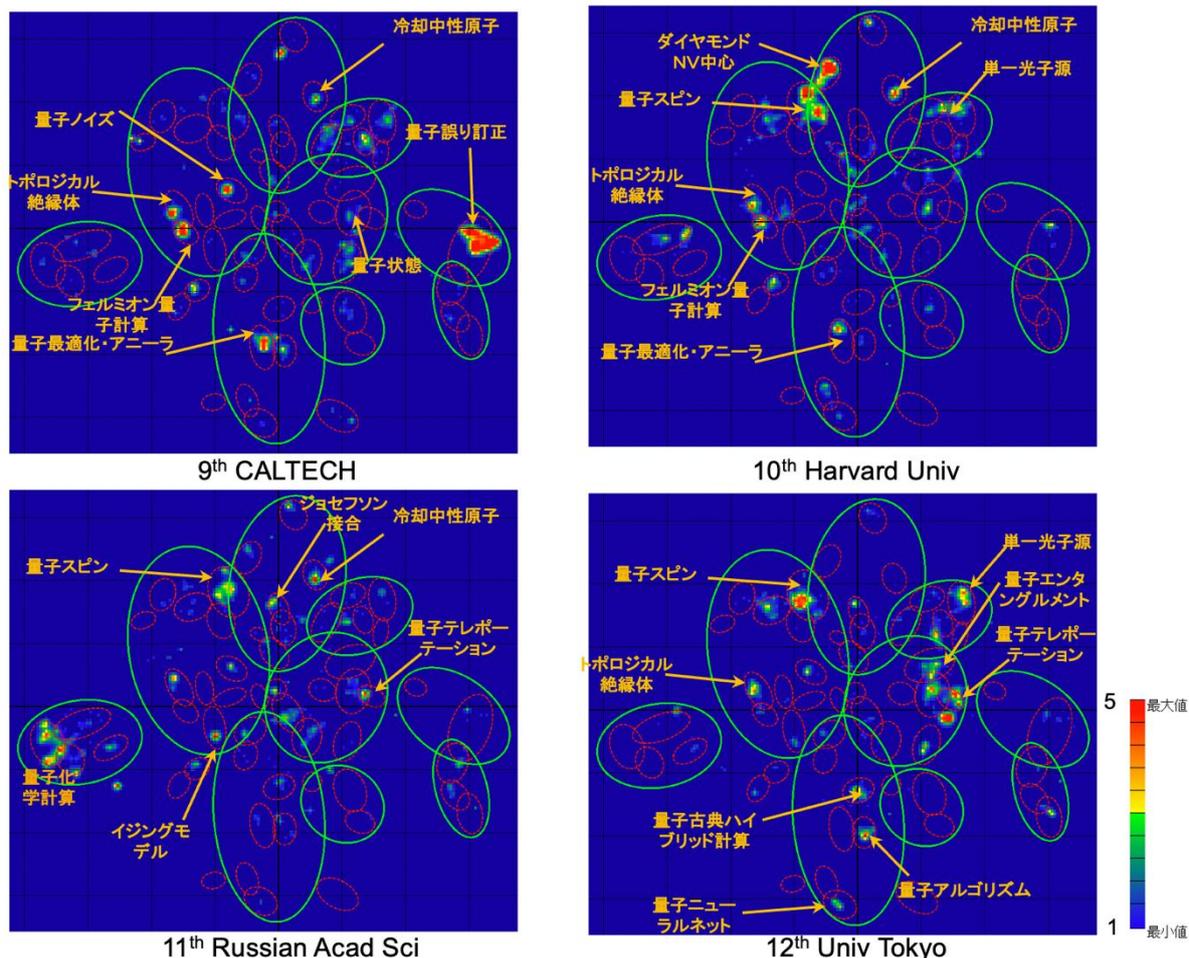


図 36 量子コンピュータ 論文 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化 :研究機関ごと論文数9位~12位

9位のカリフォルニア工科大学は「トポロジカル絶縁体」「フェルミオン量子計算」「冷却中性原子」「量子誤り訂正」に研究が多い。10位のハーバード大学は「ダイヤモンドNV中心」「冷却中性原子」「トポロジカル絶縁体」に集中している。11位のロシア科学アカデミーは「冷却中性原子」「量子スピン」「イジングモデル」などに多く、欧米と大きくパターンが異なる。12位の東京大学は「量子スピン」「単一光子源」「トポロジカル絶縁体」などに多いほか、「量子アルゴリズム」「量子ニューラルネットワーク」にも集中している。

量子コンピュータに関する特許について、出願人毎に特許出願数の集計を行った。特許はファミリー重複削除を行っているため、登録年はファミリー内の登録特許中の最古年を採用した。特許出願数の集計結果を図37に、特許出願数の推移を図38に示す。

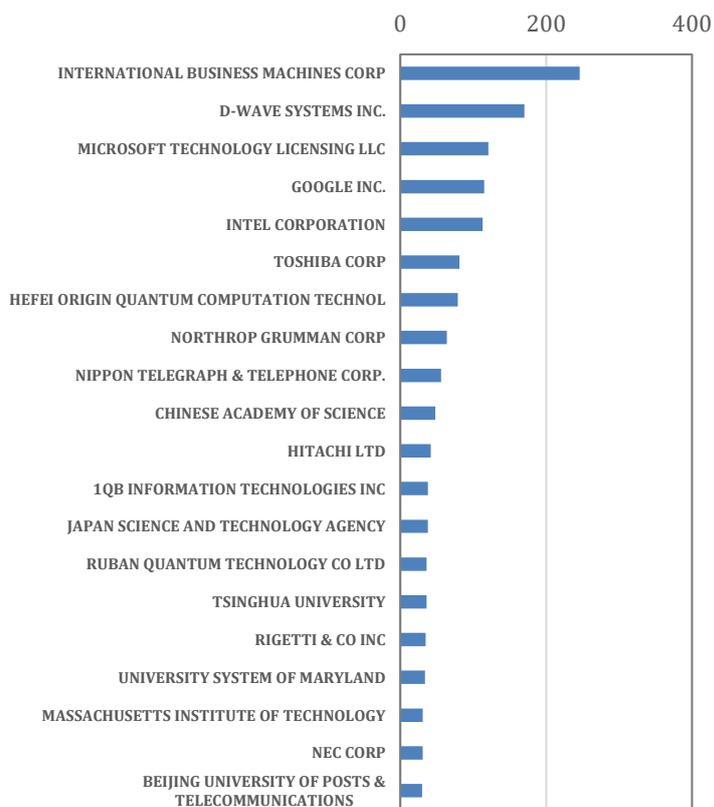


図 37 量子コンピュータ 特許 出願人別件数

特許の国別首位は米国であり、出願人別でもIBMとなった。2位はカナダのD-Waveであるが、3位からはマイクロソフト、グーグル、インテルと米国の企業が続く。日本の東芝が6位、軍需企業のノースロップ・グラマンが8位につけている。

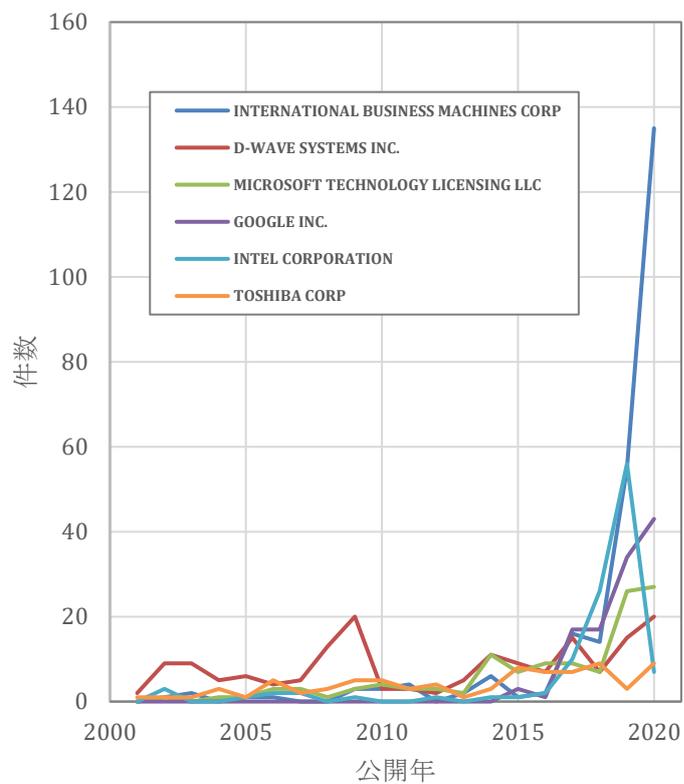


図 38 量子コンピュータ 特許 出願人別件数推移

首位IBMの近年の増加が著しく、2020年の特許件数は突出している。グーグルの増加も顕著である他、東芝も増加している。

技術俯瞰図において、12の機関毎に特許分布の可視化を行った。結果を図39～図41に示す。

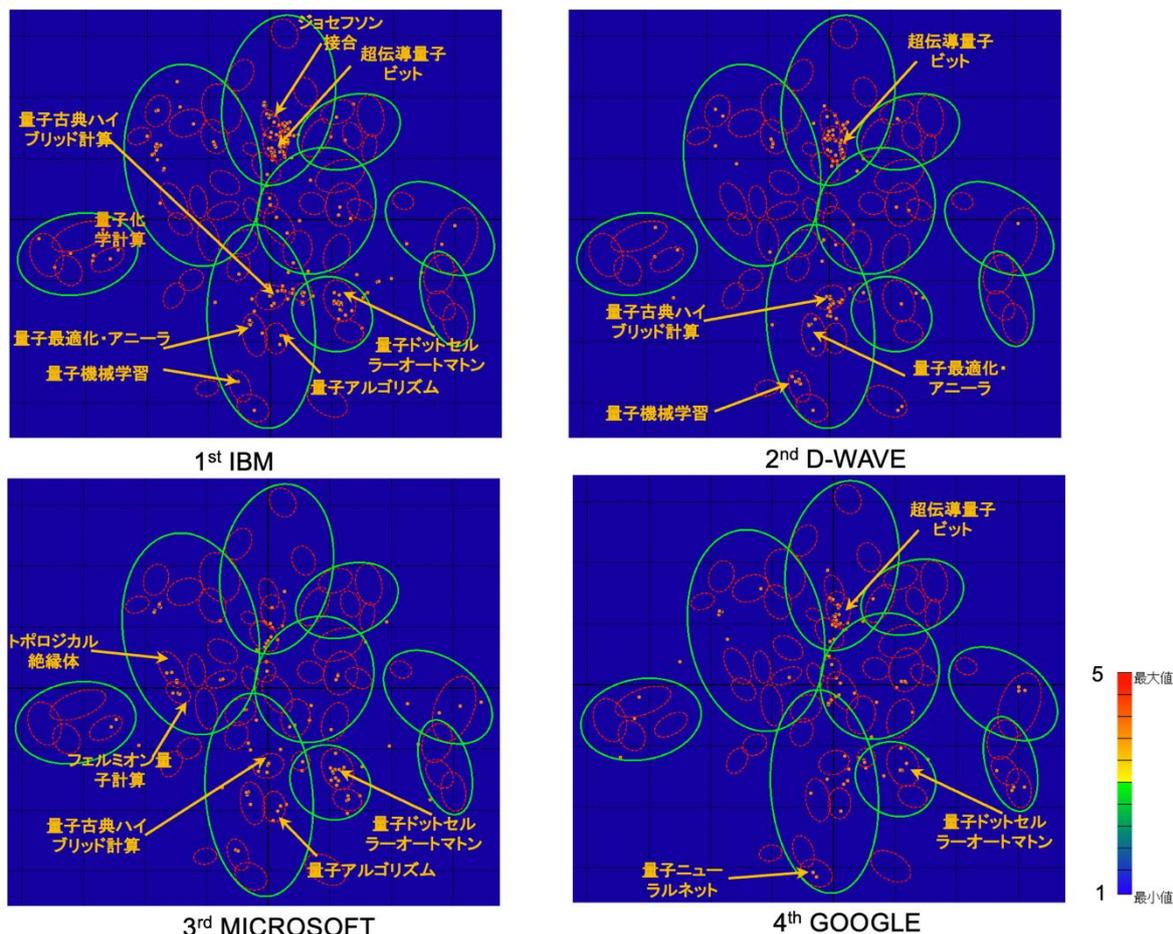


図 39 量子コンピュータ 特許 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化 :研究機関ごと特許出願数1位~4位

超伝導型量子コンピュータIBM Qを有する首位のIBMは「超伝導量子ビット」と「ジョセフソン接合」が多く、他にも「量子ドットセルラーオートマトン」「量子古典ハイブリッド計算」に多い。2位D-waveも「超伝導量子ビット」「量子最適化・アニーラ」「量子古典ハイブリッド計算」に特許を有している。3位のマイクロソフトは「トポロジカル絶縁体」「フェルミオン量子計算」「量子ドットセルラーオートマトン」に集中している。4位のグーグルは「超伝導量子ビット」などに特許を有している。

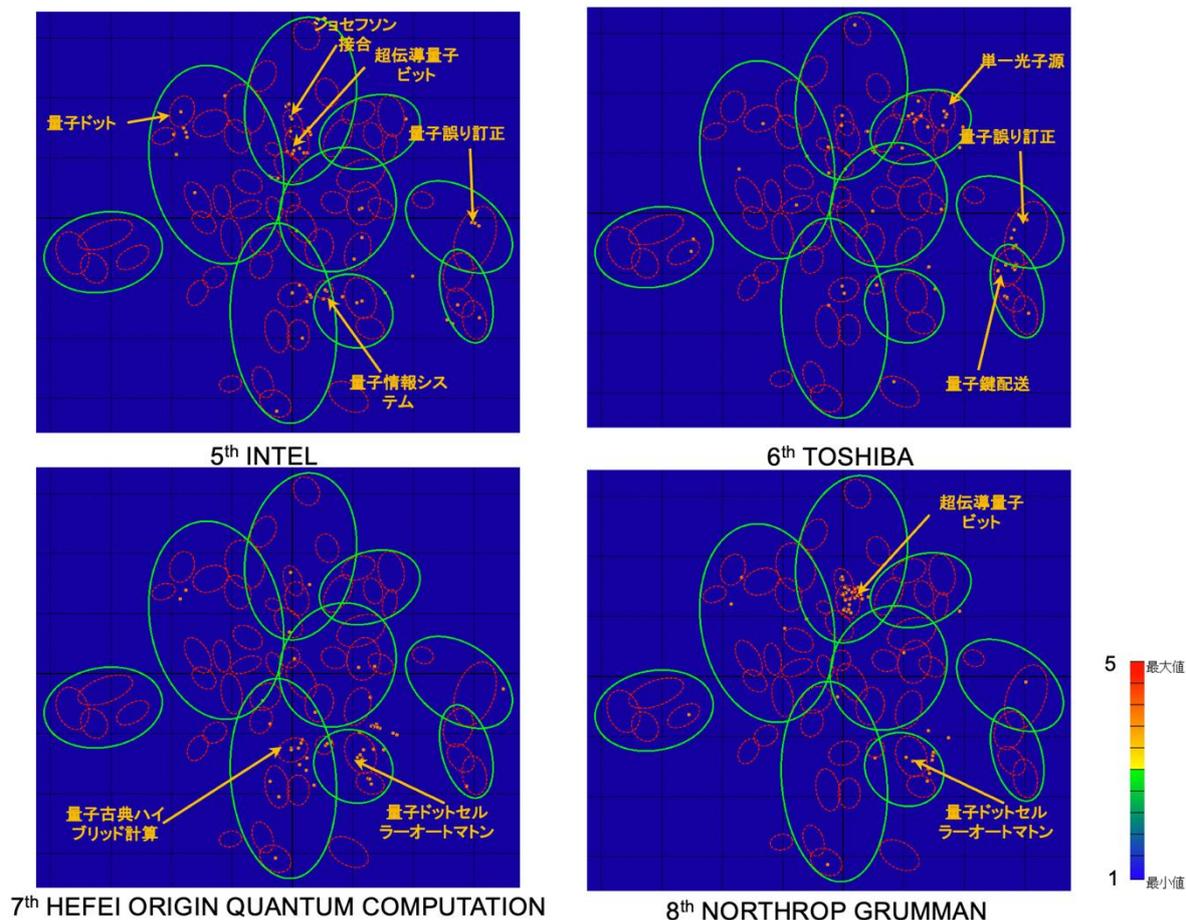


図 40 量子コンピュータ 特許 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化 :研究機関ごと特許出願数5位~8位

5位のインテルは「超伝導量子ビット」や「ジョセフソン接合」に特許が多い。6位の東芝は「単一光子源」や「量子誤り訂正」などに集中しており、欧米系企業と異なり「超伝導量子ビット」関連の特許出願がない。7位のHEFEI ORIGIN QUANTUM COMPUTATIONは「量子ドットセルラーオートマトン」や「量子古典ハイブリッド計算」領域で特許を出願している。8位のノースロップ・グラマンは「超伝導量子ビット」に集中している。

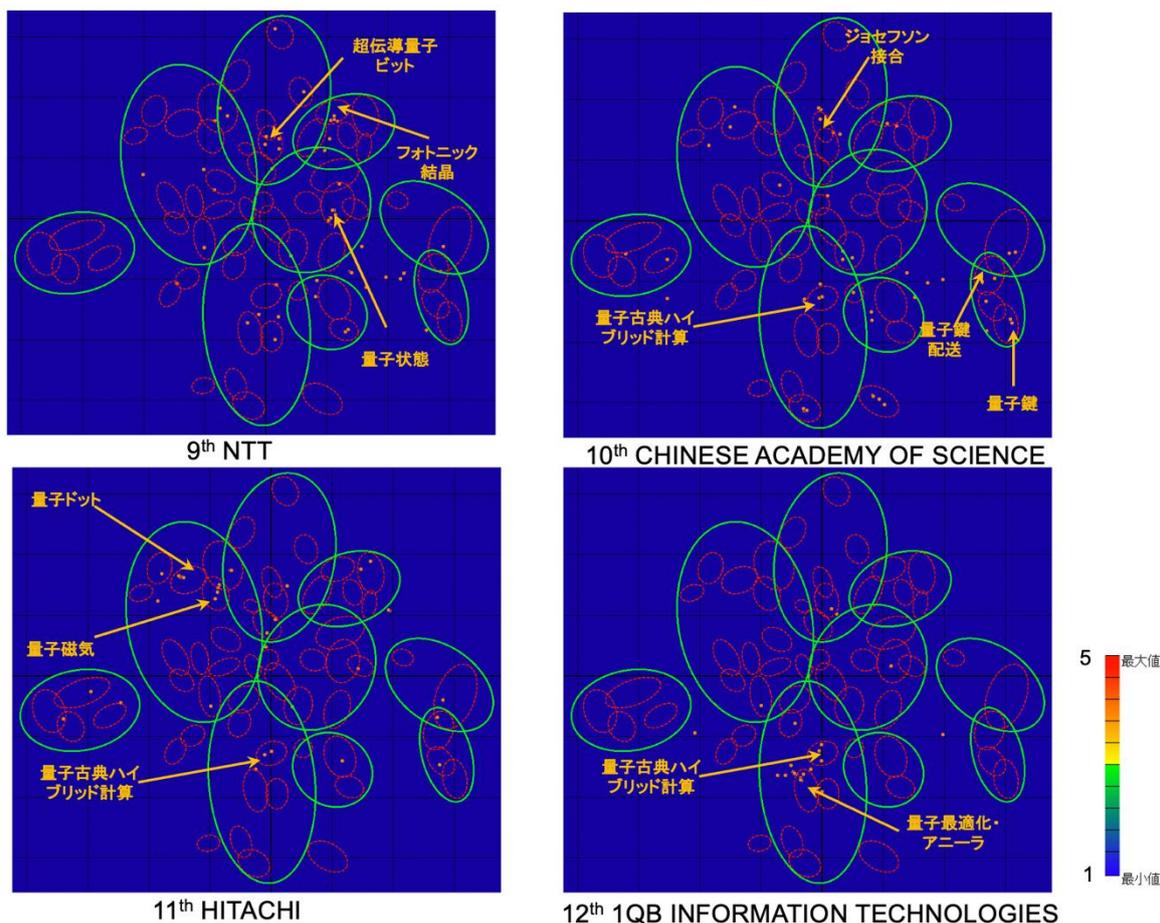


図 41 量子コンピュータ 特許 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化 :研究機関ごと特許出願数9位~12位

9位のNTTは「フォトニック結晶」や「超伝導量子ビット」にやや集中して特許を有している。10位の中国科学院は広範に特許を有しているものの、「ジョセフソン接合」等に集中している様子が見られた。11位の日立は「量子磁気」「量子ドット」「量子古典ハイブリッド計算」で特許を出願している。12位の1Qbitは「量子最適化・アニーラ」「量子古典ハイブリッド計算」に特許を有している。

4 まとめ

量子コンピュータに関連する論文・特許を抽出し、タイトル・アブストラクト等のテキストデータを用いたクラスタリング分析を行うことで、学術研究および技術開発の動向を二次元的に可視化した俯瞰図を作成した。

論文32,895件と特許3,780件から作成した俯瞰図から、量子コンピュータの基盤となる【量子基礎】を中心に【量子ビット】【光量子】【スピン・相転移】【量子回路】【量子コンピューティング】【量子誤り訂正】【量子暗号】【量子化学計算】の9領域が存在していることが確認された。

2001年以降の論文データから、量子コンピュータに関する学術研究が「イオントラップ」や「量子誤り訂正」等の研究から始まり、論文数が急増した2016年からは「量子最適化・アニーラ」「量子ニューラルネット」「量子鍵」「ダイヤモンドNV中心」領域での研究が活発となったことが確認された。

論文数と、論文を出版した研究機関・研究者数の大きな増加が予測されるエマージングな研究領域として「トポロジカル絶縁体・超伝導」「量子ノイズ」「超伝導量子ビット」「量子化学計算」「量子最適化・アニーラ」「量子機械学習」「量子ニューラルネットワーク」「単一光子源」「量子ドットセルラーオートマトン」「量子鍵」が抽出された。

特許においては「量子データ処理」「量子鍵配送」に関する技術開発から始まり、直近の2019年以降では「量子鍵」「量子ドットセルラーオートマトン」「量子最適化・アニーラ」「古典量子ハイブリッド計算」「超伝導量子ビット」等の領域で出願が活発であることが確認された。

特許数と特許出願人数の大きな増加が予測されるエマージングな研究領域として「量子ニューラルネットワーク」「量子データ処理」「ジョセフソン接合」「量子ドットセルラーオートマトン」「量子鍵」が抽出された。

物流の最適化や新規材料合成等の産業応用が期待されている「量子最適化・アニーラ」領域や量子暗号に関する「量子鍵」領域では論文数および特許出願数とも増加しており、学術研究と技術開発が活発となっていることが明らかとなった。これらの応用技術が実現したときに産業に及ぼす影響を考察することが、経済効果算出において重要な技術になると考えられる。

謝辞

本研究は文部科学省共進化実現プログラム池内プロジェクト「科学技術・イノベーション政策の経済社会効果分析の政策形成プロセスへの実装」の助成を受けて実施された。

参考文献

黒田 昌裕, 池内 健太, 原 泰史

2016.「科学技術イノベーション政策における政策オプションの作成 -政策シミュレーターの構築- (モデル構築編)」, 政策研究大学院大学 科学技術イノベーション政策研究センター SciREX Working Paper 2016-#01, <http://doi.org/10.24545/00001570>

CRDS調査報告書

2016.「科学技術イノベーション政策の科学における政策オプションの作成～ICT分野の政策オプション作成プロセス～」, CRDS-FY2015-RR-07, 2016年3月

CRDS戦略プロポーザル

2020.「量子2.0 ～量子科学技術が切り拓く新たな地平～」, CRDS-FY2019-SP-03, 2020年1月



SciREX Center



政策研究大学院大学
NATIONAL GRADUATE INSTITUTE
FOR POLICY STUDIES

科学技術イノベーション政策研究センター

Science for RE-Designing Science, Technology and Innovation Policy Center (SciREX Center)

〒106-8677 東京都港区六本木 7-22-1 / Tel 03-6439-6318/ Fax 03-6439-6260

7-22-1 Roppongi, Minato-Ku, Tokyo 106-8677 JAPAN

Tel +81-(0)3-6439-6318 / Fax +81-(0)3-6439-6260