

俯瞰解析を用いた先端的技術分野の 開発動向把握

—量子コンピューター—

Grasping development trends in cutting-edge technological fields using Panoramic view analysis :
Quantum Computing



VALUENEX 株式会社 代表取締役社長 CEO

中村 達生

早稲田大学大学院理工学研究科を修了後、三菱総合研究所入社、途中、東京大学工学部助手に就任。2005年に工学博士取得。2006年に株式会社創知（現 VALUENEX）を設立、代表取締役社長 CEO に就任（現任）。2014年2月米国シリコンバレーに当社現地法人を設立、President に就任（現任）。2018年、当社東証マザーズに IPO。現在、早大大学院理工学術院非常勤講師も兼務。2018年度特許情報普及活動功労者受章。2019年スタンフォード大学より Japan-US Innovation Award 企業に選定。

✉ nakamura@valuenex.com ☎ 03-6902-9833

要約

本報では量子コンピュータを事例に、研究と応用が同時並行的に進行する分野における開発動向をいち早く把握するための俯瞰解析の適用方法を紹介することを目的とする。母集団は目的に応じて、精度と範囲を適切に考慮する。特に量子コンピュータのような新しい分野は定義が曖昧である。既知の情報を頼りに全体構造をつかみ、関心のある部分を特定し、関連する周辺技術領域を広げてゆく。

社会インフラやセキュリティに影響を伴うようなイノベーションが予想されるなか、いち早く俯瞰的かつ客観的な動向を把握することは、国家間の競争戦略を策定する上でも大きな利点となりうる。また、創薬への適用により、難病や変化するウイルスへの迅速な対応、都市内交通の最適化による省エネと安全性の確保など、量子コンピュータの実用化は私たちの生活を快適かつ安全にする可能性を秘めている。そのために適切な技術に適切な額の投資をする必要があり、定期的に俯瞰して時事刻々と変わる開発状況を把握してゆくことが望ましい。

1 はじめに

2020年を境に私たちをとりまく社会環境は一変した。まぎれもない新型コロナウイルス（COVID-19）の世界蔓延である。同様の世界規模の感染症として1918年にアメリカカンザス州で最初に確認されたスペイン風邪（H1N1 influenza A virus）が引き合いに出されるが、実に100年振りのパンデミックであ

る。スペイン風邪が1920年に終焉したとされるのに対して、COVID-19はすでに第7波が世界を一巡しており、100年に一回の出来事を、2年5ヶ月で7回も体験したことになる。当時と現在では、人の往来の範囲、情報の拡散速度と流通量が格段に異なるため、影響も甚大になる。ムーアの法則が限界に達すると言われていた2020年が、皮肉にもさらなる変化点となっている。気候変動においても、従来の統計値から逸脱する記録的な事象が続いているように思われる。世界を駆け巡る情報量がゼタバイト級に拡大した2022年の現在で、地球の大気状態を完全にシミュレートして、気象を正確に予測するための計算機は存在しない。したがって、私たちが身近に利用する天気予報は確率で示されている。しかし、この先の10年は、過去の100年に匹敵する技術進展が起こる可能性がある。機械学習を筆頭とした世の中への浸透が急速に進む人工知能により描かれた絵が、絵画コンクールで1位を取得した¹のは私たちの予想の範囲内の出来事であろう。すでに基礎研究の域から実用化にむけて舵をきり始めている、少し前まではSFもの扱いだった分野に、核融合発電や量子コンピュータがある。研究が実用技術へ、そして社会に浸透するサービス・プロダクトへの昇華する速度が早い場合は、統一的な定義が明確に定まらず、また、過去の分類コードの利用は期待できない。このような先端的な研究が継続さ

1 ジェイソン・アレン (Jason Allen) の AI 生成作品「Théâtre D'opéra Spatial」は、コロラド州フェアのデジタル部門で1位を獲得した。2022/09/03 <https://www.cnn.com/2022/09/03/tech/ai-art-fair-winner-controversy/index.html>

れるなか、実用サービスが見えてきた分野の技術動向分析を行うためには、ランドマークとなるような既知の研究成果や主要組織の位置関係を俯瞰し、それらの周辺技術を混合することにより俯瞰図を作成し、技術トピックの抽出と時系列的な変化を捉えることにより開発の現状を可視化することができる。本報では、材料、新薬の開発、スマートシティの物流と交通流の最適化など、幅広い分野への期待がもたれている量子コンピュータを対象に俯瞰解析を用いた技術動向分析の事例を紹介する。

2 俯瞰解析を用いた技術動向分析の実施フロー

量子コンピュータは、私たちが利用している古典コンピュータとは、仕組みが異なるだけでなく、用途も限定されているため、将来は陰の存在として徐々に浸透してゆくことになる。銀行やインターネットショッピングなどあるゆるとところで利用されているRSA暗号²は、古典コンピュータで解くには数万年もかかる計算複雑性のNP完全問題³をベースにしており、実質的に解くことができないということを基に安全性が担保されているが、量子コンピュータにより短時間で解くことができ

る。したがって、量子コンピュータの実用化にともなう情報社会インフラへの影響は甚大である。しかし、量子メカニズムは基礎物理学においても未だに解明されていない。量子コンピュータでは「0でもあり1でもある重ね合わせ状態」を何らかの方法で実現し、計算途中の観察を経ず⁴に、結果を得るといふ、私たちの経験とは相容れにくいプロセスが存在する。このように当該分野の研究が未解明の現象を用いながら、実用機の開発と商用サービスの実現という本来ならば直列に進む異なる段階が、量子コンピュータの開発では並列に行われている。このため、単に量子コンピュータと称しても様々な方式があり、定義も曖昧であり、ましてや、完成機を想定したアルゴリズム開発とサービス開発も存在するため、これまで当該分野の全体像を掴み、開発の方向性や競合状態を即時的に語られることは皆無であった⁵。そこで、本報では判明している既知の組織やその組織の技術、量子コンピュータと直接関係するキーワードを含む文献を足掛かりに文献母集団を作成し、さらに、概念検索を用いて、類似する技術を周辺（または関連）技術として母集団に結合し俯瞰図を作成した（図1）。

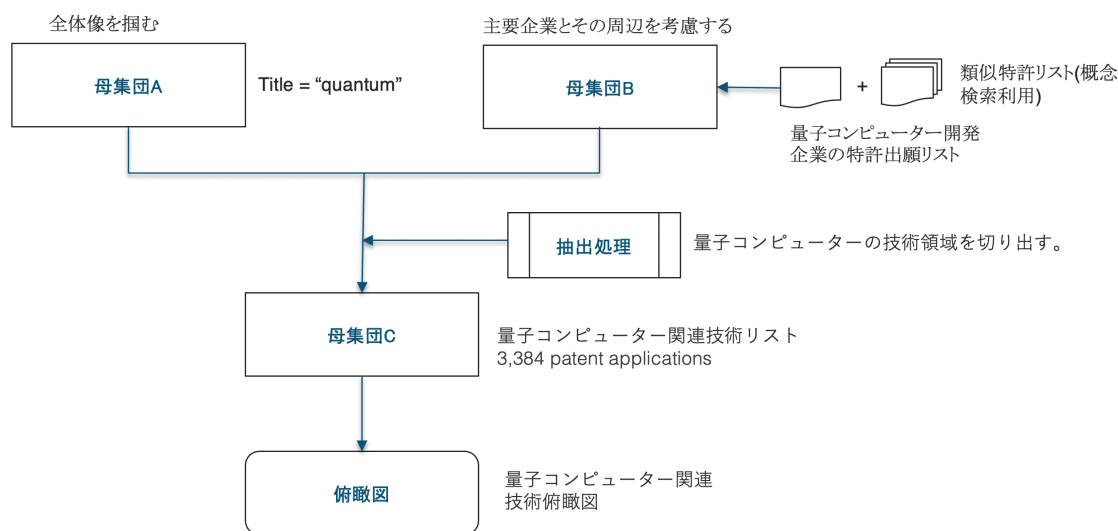


図1 未定義分野の技術俯瞰図作成フロー

2 1977年、ロナルド・リベスト、アディ・シャミア、レオナルド・エーデルマンが発明した、公開鍵暗号方式。原語表記の頭文字をつなげてRSAと呼ばれる

3 Non-deterministic Polynomial

4 微小な世界では、観察するという行為事態が、量子もつれを崩壊させてしまうという摩訶不思議な現象が起きている。

5 日経 XTECH「世界で始まった量子技術の社会実装、先行する米国に学ぶべき4点」<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/02140/072500002/>

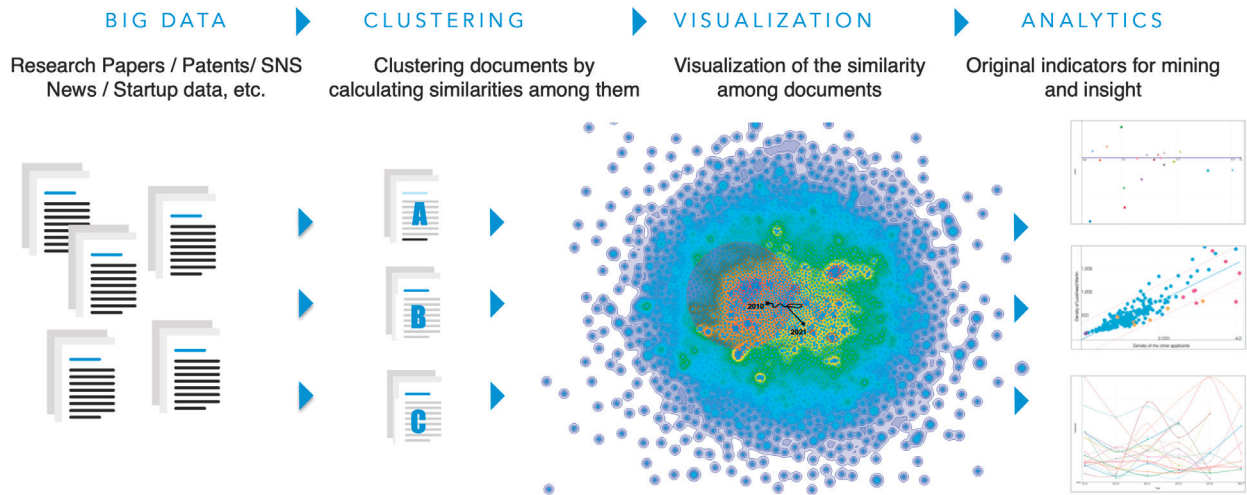


図2 俯瞰解析の手順

3 俯瞰解析とその用途

3-1 俯瞰解析とは

本報のタイトルでもあり文中に頻出する「俯瞰解析」は筆者の造語である。俯瞰解析とは、直接的な関連はないが間接的に関係する情報も含めて、客観的、かつ、精度高く可視化し、その位置付けから、関連性を探り出し、時間軸の変遷から、近い将来に起きる出来事を定量的に予測することを目的とした解析手法である。分野として確定していない新しい技術について、今後の見通し、すなわち、開発動向を把握する場合、当該技術を表すキーワード、分類コードなどを組み合わせてゆくと、定義が曖昧であるため、関連する文書数が途端に膨れ上がってゆくことになる。特許文献であれば1000件を超えるあたりから、人手で解読することは困難にいたる。そこで、文書間の類似性を計算し、文書間の関係を二次元の地図に写像すれば、すべての文書を読まずとも、全体の関係性や、注目している領域を即座に見つけることができる。ここに既知のキーワードや組織名を使ってフィルタリングを行うと、自分が把握している情報の分布の偏りや、知らない領域も特定することができる。この地図のことを俯瞰図と呼び、アルゴリズムにより可能な限り正確に配置することにより、空白領域を特定し、集積密度や時間変化によると開発中心の動きを捉えることが可能になる(図2)。

3-2 俯瞰解析の主要な用途

客観性、俯瞰性、高精度をバランスよく保ち、俯瞰解析は事業戦略の各段階にて適用される。自社の現状把握では、過去も含めて自社の技術を俯瞰することにより、部門間の連携状況、中心的な技術領域、開発トレンドの推移の型などを捉える。複数の部門間で重複した開発が行われている、隣接する部門の間に隙間が存在する、過去に行われていた開発を再び行おうとしているなどといった事象が俯瞰図から顕在化する。自社の開発の重心が市場ニーズに合わせて年々変化してゆく進展型なのか、コア領域を深掘りし、重心が動かない深耕型なのかを把握すると、研究開発戦略を策定する際に、新規開発の拡張範囲を判断する際に有用である。

競合分析では、自社を中心とした自社優位な技術領域のデータセットを用いて分析が行われがちであるが、類似する技術を広く収集することにより、他分野ではあるが、類似する技術をもつ潜在的な競合他社の発見も可能になる。また、自社の中では当たり前となっていて、強みとしての認識がない技術も、集積密度が高い、他社が周りに存在しないなどの理由で定量的に見分けることができる。

本報では、量子コンピュータ分野全体の開発動向を踏まえるために、業界全体の現状把握と競合の動向を俯瞰図から外層的に抽出する。

表1 俯瞰解析の主要な用途

No.	目的	アウトプット	俯瞰図のポイント
1	自社の現状把握	強み/弱み	広く可視化。自己領域の周辺領域も含める。
2	競合他社の動向	驚異/チャンス	客観的に可視化する。
3	次世代サービス・プロダクト創出	アイデア発掘	ホワイトスペースに着目し、あらたなチャンスを見出す。
4	自社開発と他社依存の線引き	スタートアップ探索/アライアンス先探索	事業、領域の垣根・壁を取り払う。
5	無形資産の評価・棚卸し	ライセンス、譲渡・マネタイズ	相対的な位置づけを読み解く。 ・ユニーク→ 他にはない ・オンリーワン→ 絶対的な優位 ・メジャー→ デファクト（標準化） ・イマージング→ 先取り

4 量子コンピュータの開発動向

4-1 量子コンピュータ開発の概要

(1) 基本的な原理

「1 でもあり 0 でもある状態」という重ね合わせや量子もつれの現象を利用し、従来の古典コンピューターでは計算時間が膨大にかかってしまう問題を解けるようになる並列コンピューターである。実験室の環境下において、特定の組み合わせ最適化問題については、量子超越性を実現したという発表が、Google や中国からなされているが、現状では、汎用的な実用化フェーズには至っていない。電気抵抗がなくなる超伝導を実現する冷却装置が必要であり、その状態になってはじめて電子が重ね合わせ状態になる。当初はクラウド型のサービス展開が主流になると考えられ、すでに、Google、IBM、Microsoft、Amazon がインターネットを通じて小規模な計算が可能な量子コンピュータの利用サービスを開始している。持ち運びが可能な量子コンピュータの小型化は遠い将来となる。また実用化のためには Q ビット数の増大、誤り耐性が大きな課題として立ちだかっている。

(2) 大企業の道楽分野から一気に注目の領域に

量子コンピュータは IBM、ヒューレット・パッカード、ハネウェルのような大企業の一研究として 1990 年代にはすでに行われていたが、せいぜい数 Q ビットであり、実用に耐える量子ビット数は実現できていなかった。そもそも、量子コンピュータは理論上の計算機であり、実用化できると本気で考えていた研究者は少なかったのではないだろうか。そのため配分される予算額も研究から開発に至る臨界点を越えるには至らなかった。カナダのベンチャー企業 D-wave が 2011 年に量子アニーリング方式を用いて 128 量子ビットというこれまでの大

企業を凌駕するビット数を実現し、D-wave のマシンを Google が採用したことから、一気に開発競争に火がついたと言われている。量子重ね合わせの方式は、量子ゲートが主流だが、様々な方式が存在している。IBM はトランズモン型の超伝導量子ビットにより 2021 年 127 量子ビットを実現した。量子を真空中にとじこめてレーザーで制御するイオントラップ量子ビットは、米国のスタートアップ企業の IonQ が先行している。Microsoft はトポロジーを応用した方式を採用している。D-wave は量子アニーリング方式を用いて 2020 年に 5000 量子ビットを実現するに至っている。

(3) 各国が力を入れる理由

米国は 2018 年に国家量子イニシアティブ法を施行して積極的な研究開発費を投じ、バイデン政権発足後もクリーンテック、5G、AI、量子情報科学などの先端技術に巨費を投じる計画を実行に移している。一方、2020 年に中国の研究チームは光量子コンピュータを用いた量子超越性を実現したと発表している。量子コンピュータが実現すると、現在の RSA 暗号方式に依存したセキュリティに大きなインパクトを与える。中国、米国などサイバーセキュリティを重視している超大国は量子情報科学を国家重点計画に組み込み、巨額の研究予算を掲げている。量子コンピュータ、量子暗号、量子センサー、量子通信、量子レーダーなどは軍事に転用可能な技術でもある。巨額の投資が可能な富める国と、そうではない国の間に安全上の格差が広がることが懸念される。日本政府は内閣府科学技術・イノベーション推進事務局が、量子技術イノベーション戦略⁶を打ち出している。

6 内閣府 量子技術イノベーション (<https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/ryoshigijutsu.html>)

4-2 量子コンピュータに関連する技術領域

量子コンピュータに関連する 3,384 件の米国特許公開情報を内容の類似性に基づき俯瞰図にすると図 3 のようになる。各文献はドットで表示され、ドット間の距離は類似度を示している。ドットの集積密度に即して等高線を描画し、山の高さを色で示すヒートマップ表現をしている。色の濃い領域は文献が集中していて、研究開発活動が活発であり、複数の会社が出願している場合は、競争が激しい領域と捉えることができる。一方、色の薄い領域は文献が少なく、すなわち、まだ開発がまばらであり、出願が進んでいない状態とみることができる。

俯瞰図の右下に Superconducting qubits (超伝導量子ビット) に関連するものが大きく分布している。その構成要素として、Quantum chips (量子チップ), Supercouductor (超伝導体), Electrode (電極), Resonator (共振器), Quantum processor cell (量子プロセッサセル) などの技術領域の密度が高く、研究開発が集中していることがわかる。周辺には Neutral atoms (中性原子)、Topological Qubits (トポロジカルキュービッツ)、Quantum Dots (量子ドット)、Ion Trap (イオントラップ) などを用いた方

式の独立した技術領域が存在する。俯瞰図の中心付近よりやや左上には Quantum Annealing の技術領域があり、ハードウェアとソフトウェア (応用) を繋ぐ位置に近い。量子コンピュータを構成する他の重要なパーツとして、Stabilizer、Error correction (誤り訂正)、Calibration などの特許が見られ、また Hybrid Quantum-Classical Computer、Generation & Compilation of Quantum Circuits、Tensor network など古典コンピュータとのハイブリッド型の技術が、俯瞰図の中心近くに存在することから、方式にかかわらず共通する課題をもつ技術であることが窺える。俯瞰図の左上には、主にソフトウェアの領域があり、Machine Learning、Simulation、Optimization の 3 つの主な技術領域が含まれ、Machine learning 分野の出願が堅調に見える。

俯瞰図をさらに左上に進むと、ローカルエッジデバイスを使った Quantum Computing Service の領域が存在し、この領域にはアマゾンが出願しており、2020 年にサービスを開始した Amazon Braket に関連すると思われる。

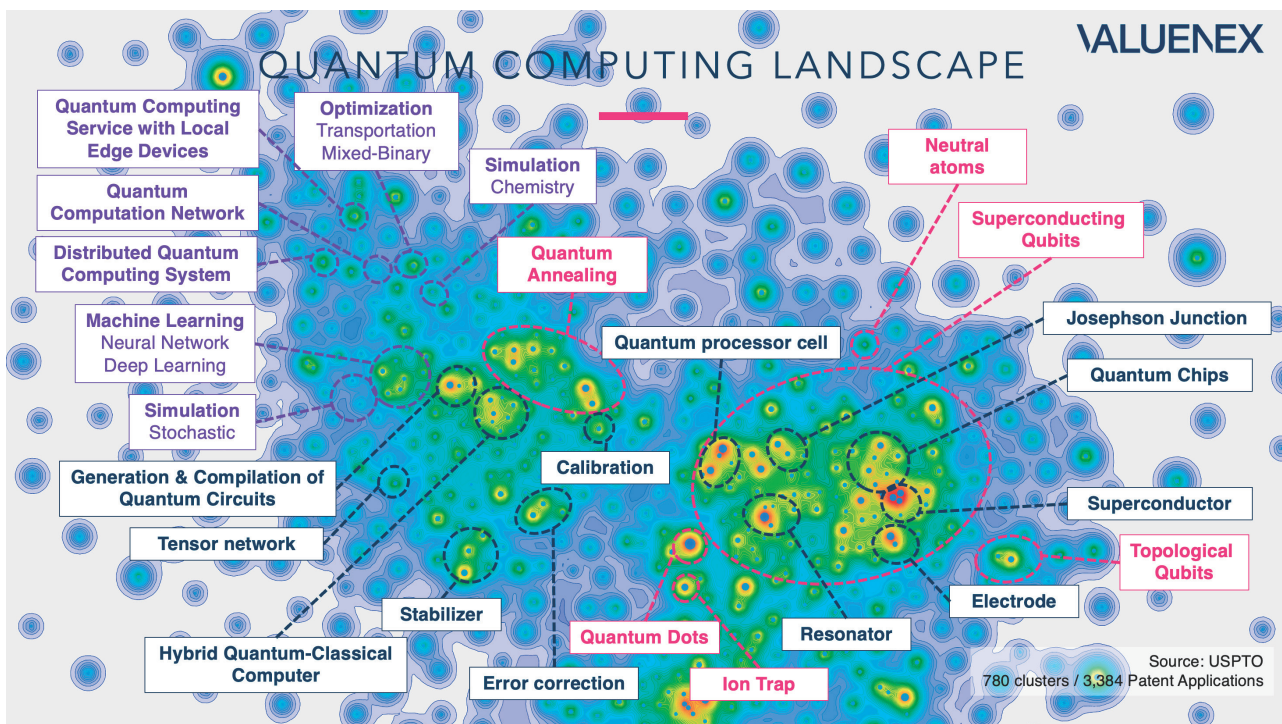


図 3 量子コンピュータの俯瞰図 (米国公開情報)

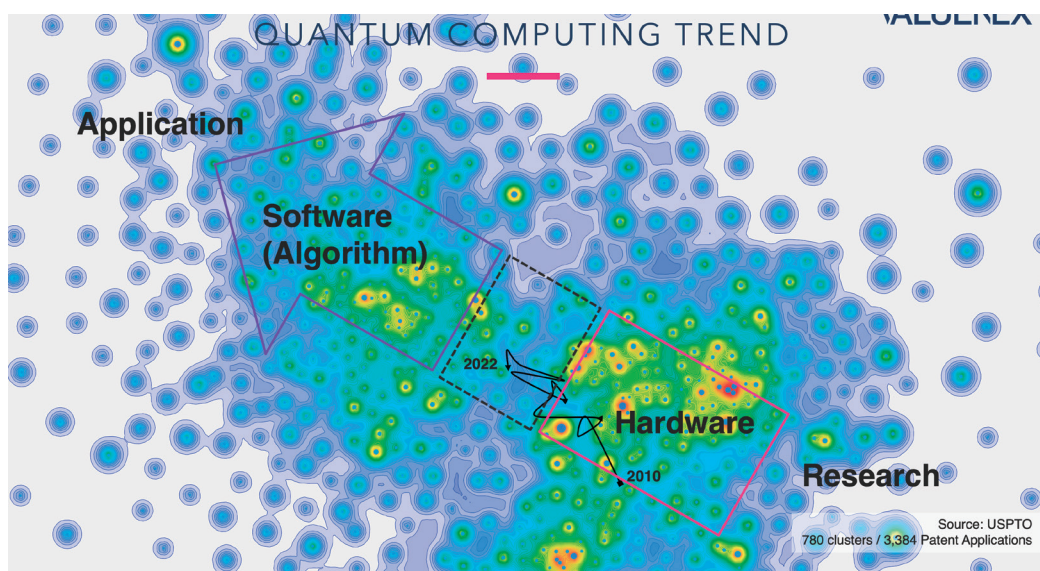


図4 量子コンピュータの開発トレンド

4-3 量子コンピュータの開発トレンド

俯瞰図を総括すると、右下に量子コンピュータのハードウェアに関する特許が分布し、左上に量子コンピュータの応用分野に関する特許が分布していることがわかる(図4)。量子コンピュータのランドスケープの大きなトレンドは右下の量子コンピュータのハードウェアからその応用分野(左上)へと取組領域がシフトしている。ソフトウェアとハードウェアをつなぐミドルウェアが完成しておらず、量子コンピュータがまだ未完の分野であることが再確認できる。Micro LEDや自動運転(Autonomous driving)などの過去の例に照らして判断すると、当該ミドルウェア技術を実用化させた企業が量子コンピュータ分野を主導することになる可能性がある。この場合、汎用性ではなく、何かの目的に特化した専用量子コンピュータから実現され则认为される。

4-4 主要開発企業の位置付けと棲み分け

注目される企業を俯瞰図に色づけして、各社の開発における位置付けを可視化すると、独自性を出して開発を進めている企業と、競争が激しい技術領域に進出する企業の姿が見えてくる(図5)。

IBMは競争が激しいSuperconductor(超伝導体)と呼ばれるハードウェアと、Generation & Compilation of Quantum Circuits(量子回路の生成とコンパイル)の二つが集中的な技術領域となっている。IBMのこの分野における著名な発明者である

Gambetta Jay氏は、Generation & Compilation of Quantum Circuits(量子回路の生成とコンパイル)の専門であり、ソフトウェアの分野で独自性を出そうとしているのではないかと推察される。

Googleはいち早くD-waveの実用機を取り入れて、量子超越性を実現したと対外発表したが、現在はD-waveとは異なる方式を採用していると見られている。GoogleはCalibration(誤り補正)とMachine Learning(機械学習)に力を入れていることが読み取れる。IBMの量子コンピュータ開発者が2013年に独立して起業したRigettiの取組領域はQuantum processor cellであり、応用分野として化学化合物のシミュレーションの特許を抑えている。Microsoftは俯瞰図右下にやや独立して位置するTopological Qubits(位相量子ビット)に特化している。ただし、共同研究者の発表論文の取り下げなどもあり、当該方式への信用はまだ確立されていない。研究の領域から脱し切れておらず、むしろ、他の方式も含めた量子コンピュータのクラウドサービス化を目指すと考えられる。先出のD-WaveはQuantum annealingを中心にコアを構築、周辺に広げており、ハードウェアとソフトウェアを繋ぐもっとも適切なポジションに近いと言える。

競争が激しく開発が集中している分野は、機械学習:Machine Learning(Deep Learning, Neural Network)、古典コンピューターとのハイブリッドシステム:Hybrid Quantum-Classical Computer、超伝導

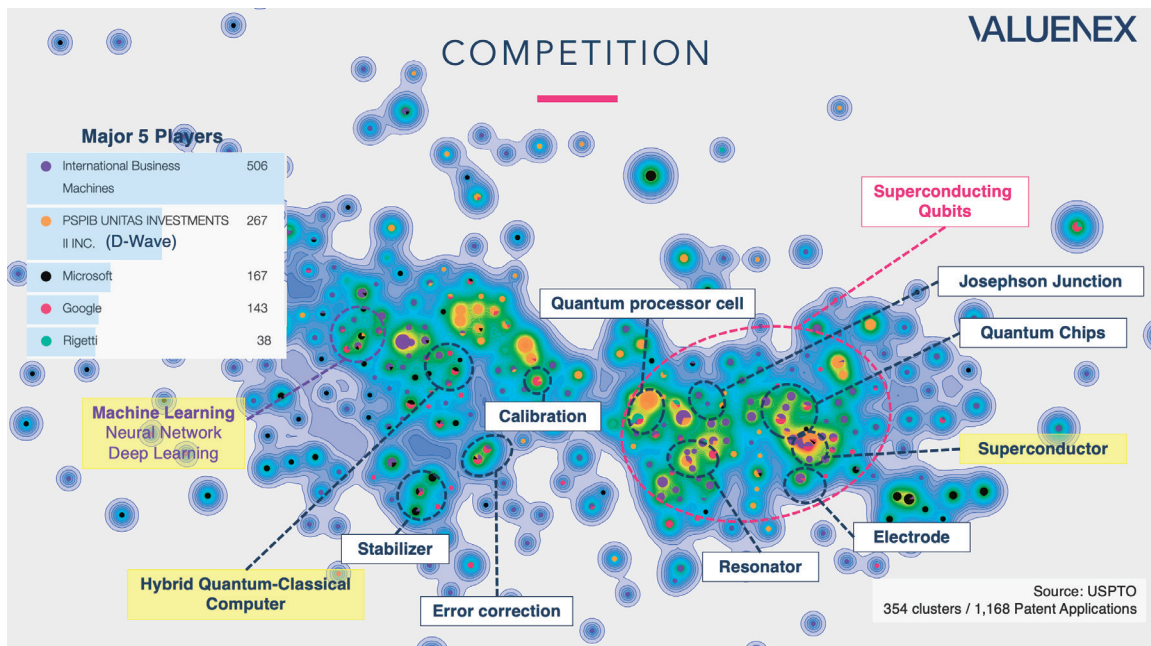


図5 主要企業による量子コンピュータ開発における競合状況

体：Superconductor (Superconducting integrated circuits) であり、量子コンピュータの応用が期待されている分野は機械学習：Machine Learning (Deep Learning, Neural Network)、シミュレーション：Simulation (Chemistry, Stochastic simulation/ Finance)、最適化問題：Optimization (Transportation, Mixed-Binary constrained optimization)、量子コンピュータネットワーク：Quantum Computation Network、分散型量子コンピュータシステム：Distributed Quantum Computing System、量子コンピュータのエッジコンピューティング：Quantum Computing Service with Local Edge Devicesである。

5 おわりに

本報では量子コンピュータを事例に、研究と応用が同時並行的に進行する分野における開発動向をいち早く把握することを目的とする俯瞰解析の適用方法を紹介した。社会インフラやセキュリティに影響を及ぼすようなイノベーションが予想されるなか、いち早く俯瞰的かつ客観的な動向を把握することは、国家間の競争戦略を策定する上でも大きな利点となりうる。また、創薬への適用により、難病や変化するウイルスへの迅速な対応、都市内交通の最適化による省エネと安全性の確保など、量子コンピュータの実用化は私たちの生活を快適かつ安全に

する可能性を秘めている。そのために適切な技術に適切な額の投資をする必要があり、定期的に俯瞰して時事刻々と変わる開発状況を把握してゆくことが望ましい。量子かさね合わせが、観察することにより状態が確定するように、俯瞰解析により開発状況を同定して、叡智を積み上げてゆきたい。

参考文献

- 1) 小林雅一「ゼロからわかる量子コンピュータ」, 講談社現代新書, 2022,3
- 2) 中村達生, “DX時代における俯瞰解析を用いた公平・公正な未来社会の実現にむけて” “法とコンピューター学会「法とコンピューター」No.40, 2022,7
- 3) 中村達生, “俯瞰図を用いた技術動向分析とその活用方法”, 株式会社情報機構「特許調査へのAI導入と業務効率化および特許情報の有効活用方法」発行 2022年9月

