

2023年に注目すべき技術

(4) 量子通信—量子インターネット実現を目指して—

三井物産戦略研究所 技術・イノベーション情報部 コンシューマーイノベーション室 辻 理絵子

2022年のノーベル物理学賞が「量子もつれ」という不思議な現象の存在を示した研究者3名に与えられた。量子通信とはこの量子もつれを利用して行う通信のことであり、その安全性の高さから、高レベルのセキュリティが求められる領域での活用が期待されている。加えて、量子関連技術をつなぐ量子インターネットを支える基盤としての役割も想定されている。日本では、メルカリ等の企業での研究も進み、今後20～30年程度での実用化を目指しており、今、注目すべき技術といえる。

量子通信とは

(1) 量子通信と古典通信の違い～量子ビットとデジタル～

我々が現在使用しているネットワークは古典通信と呼ばれ、0か1の値のビットを送受信するデジタル通信網である。スマートフォン等でのモバイル通信、衛星を利用した通信、光ファイバーを利用した有線通信等はすべてこの古典通信に分類される。対して量子通信は、0か1のビットではなく量子ビット¹を送受信し、ネットワーク上はEnd-to-Endで量子的な通信を行える。そのため、今までとは全く異なる通信システムとして機能することが期待されている。次節で説明する量子もつれが利用されており、現在、この量子通信の各要素技術の検証が進んでいる。

(2) 量子の特性～量子の重ね合わせと量子もつれ～

量子とは、極々小さな物質やエネルギーのことをいう。具体的には、原子、電子、光の最小単位である光子、物質を構成する最小の要素である素粒子の一つであるニュートリノ等のことだ。量子は、物質としての性質（粒子性）と波としての性質（波動性）を併せ持つなど、我々の目に見える世界の物理法則とは全く異なる振る舞いをする。その特殊な振る舞いとして量子の重ね合わせと量子もつれがある。

量子の重ね合わせとは、2つまたはそれ以上の状態を同時に取りうる性質のことである。従って、従来のコンピュータが0か1のどちらかの状態をとるのに対し、重ね合わせを利用する量子コンピュータは0と1のどちらも取りうる。また量子の状態は、観測することで決定する。

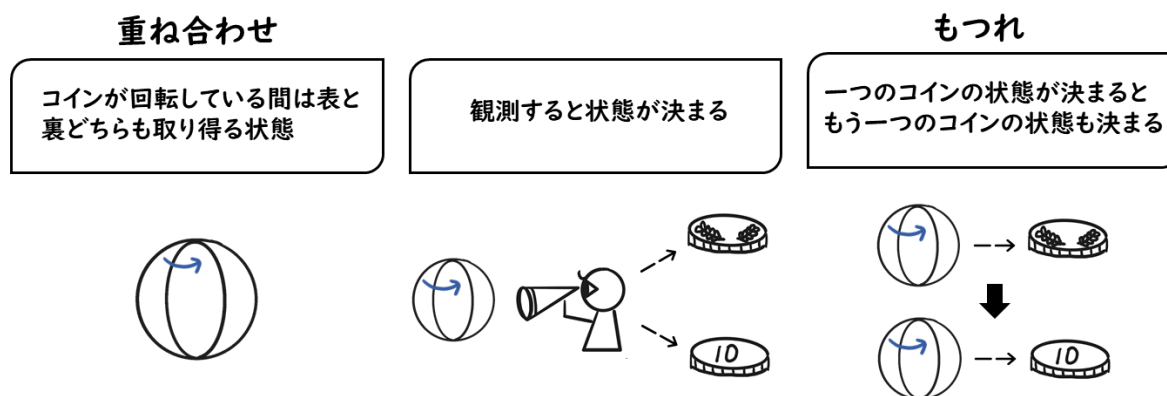
量子もつれとは、複数の量子同士が強い相互関係にある状態のことで、ある量子の状態が変化するとともつれ関係にある量子の状態も瞬時に変化する。そしてその関係はどれだけ距離が離れていても（例えば銀河の端から端であっても）保たれる。

例えば、コインを回転させると、回転中は表と裏どちらの状態になるかはわからない。言い換えれば、

¹ 量子コンピュータによる計算の基本となる単位。量子の特性で0と1の両方の状態を同時にもつ。

どちらの可能性もとりうる状態ということである。これが重ね合わせだ。次に、2枚のコインを回転させるとする。この時、片方のコインが倒れて裏表が決まった瞬間、もう片方のコインも同時に裏表が決まる。これがもつれだ（図表1）。

図表1：量子の特性

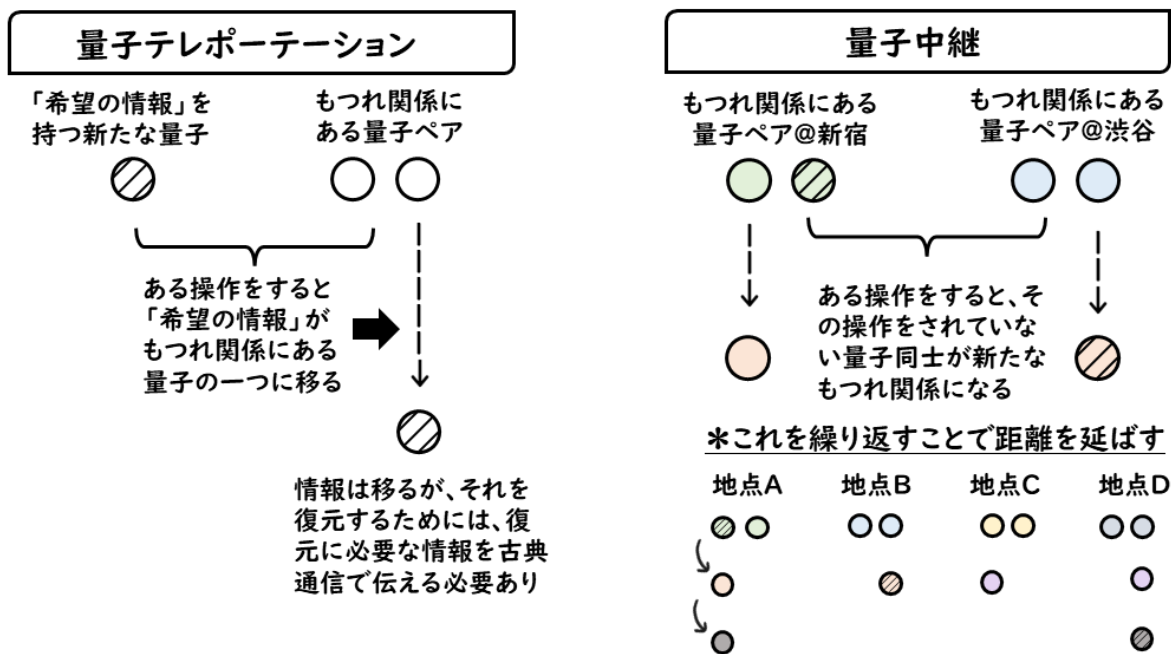


出所：三井物産戦略研究所作成

(3) 量子もつれを利用する量子通信～その仕組みと技術、課題～

量子もつれでは、自分の手元にあるコインの情報は遠く離れた場所にあるコインにも一瞬にして伝わるが、もつれだけでは希望の情報は送信できない。自分の手元にあるコインを観測したときの状態は、自分が観測したことで決定したのか、あるいは他者がもう一つのコインを観測したことで決定したのかがわからないからだ。そこで登場するのが量子テレポーテーションと言われる手法で、これにより、もつれ関係にある量子のペアと希望の情報をもつ量子にある操作を行い、情報を移転させる。ただし、もつれ関係は非常に壊れやすく、遠隔地間で安定した関係性を保つことが困難であるため、少し工夫が必要となる。現在、遠隔地間で量子もつれを作る方法として、量子テレポーテーションを応用した量子中継が有望視されている。これは、もつれ状態にある2組の量子ペアにある操作を行うことで新たなもつれを作り出し、それを繰り返して距離を延ばしていくというものである（図表2）。

図表2：量子テレポーテーションと量子中継



出所：三井物産戦略研究所作成

量子通信では、既存の光ファイバー設備のルーター等を除いたファイバーを流用できる。また、通信媒体には、電子等と比べてもつれが壊れにくく長距離を飛ばしやすいことから光子を活用することが想定されているが、実用化するには依然として距離が不足している。光子による中継については、量子メモリ間の操作で中継する方式と、光子間の操作で中継する方式の2通りある。前者であれば、100%の確率で中継が可能であるが、後者は100%の確率では中継できない。それぞれ利点・欠点があり研究が進む。後者では中継1回約33kmの距離を飛ばすことに成功したとの報告もあるが、まだまだ十分な距離には至っていない。

量子中継に必要な要素技術のうち、代表的なものを2つ紹介する。1つは、光子をもつれ状態にするための量子もつれ光源、もう1つが量子の状態を保存する量子メモリである。特に量子メモリについては、量子状態の長時間保存、エラー確率の低下、光子の放出・吸収の成功確率向上など、光子のもつれを遠くまで中継するためにはさらなる改善が必要だ。より優れたメモリ開発に向けて、ダイヤモンドや希土類元素を添加物とする物質等、材質の研究や、量子メモリを必要としない全光中継方式の研究も進んでいる。

中国の研究チームが、量子中継ではなく量子もつれの配送ではあるが、人工衛星とレーザー光によって地上・衛星間において1000km以上の配送を、またドローンを用いて100m程度の配送に成功したとの報告もある。

(4) 量子通信の特徴～安全性と計算処理速度の向上～

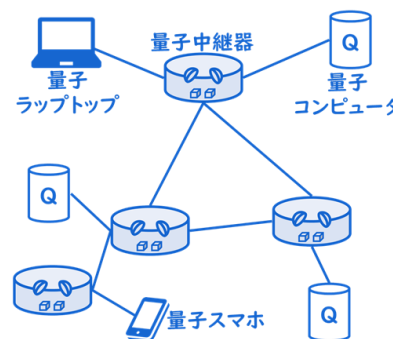
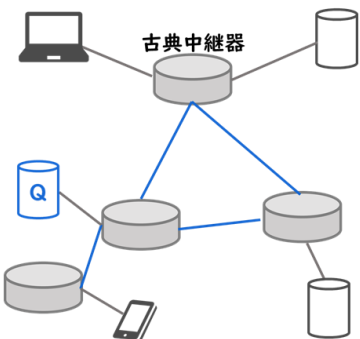
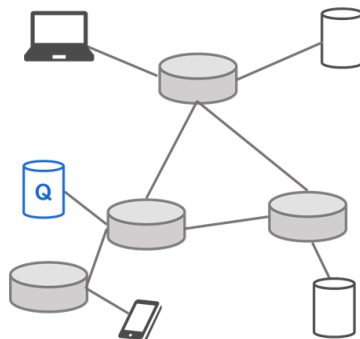
量子通信の特徴の一つに高い安全性がある。End-to-Endで量子もつれを実現できるので、通信の端と端

だけで暗号の鍵を生成すればよく、また、鍵は観測した時点で壊れてしまうため、盗聴があれば必ずその痕跡が残り、理論的にはハッキングが不可能となる。

量子通信と似た通信方式に量子暗号通信がある。この通信方式では、送信する情報自体は古典通信での情報と変わらないが、情報の暗号化には量子の仕組みを利用する。量子暗号通信は量子通信と同様、セキュリティ的には安全であるとされているが、通信の中継地点には古典通信と同様の仕組みが採用されているため、ファイバーの中を通る通信以外、安全性は古典通信と変わらないことに注意すべきだ。

もう一つの特徴は、計算処理の速さだ。遠隔地にある複数の量子コンピュータ²をつなぐことで、量子ビット数に対して指数関数的に大きな計算能力を生み出せるので、将来的に、膨大なリソースを必要とする計算をより短時間で処理できるようになることが考えられる。これまで述べてきた量子通信とその他の通信の違いを図表3に示す。

図表3：量子通信とその他の通信の違い

通信種別	量子通信	量子暗号通信	古典通信
概要	量子ビットの送受信が可能で、量子もつれを利用	情報自体は既存のビット（0か1）で送受信し、暗号化部分にのみ量子の仕組みを利用	既存のビット（0か1）を送受信
活用原理	量子もつれ	量子もつれてはない	—
ネットワークイメージ	 <p>・ネットワーク上すべてで量子ビットを取り扱える ・ネットワークにつながるデバイスは量子情報入出力できる</p>	 <p>・中継器をつなぐネットワークに量子の仕組みを利用 ・中継器そのもの、また中継器からデバイスまでは古典通信</p>	 <p>・ネットワーク上すべてでデジタル情報を取り扱う</p>
備考	量子通信基盤上で量子暗号通信を行うことも可能	—	光ファイバー、衛星、モバイル通信等がある

出所：各種資料を基に三井物産戦略研究所作成

有望な活用分野

(1) 高い安全性が必要とされる分野～国家機密、金融、医療・ゲノム分野等～

現在の暗号化技術の安全性は、解読に必要な計算が現実的な時間内に終わられないようにすることで担保している（計算量的安全性）。しかし、量子コンピュータの実用化が進めば、計算量的安全性はたやす

² 量子コンピュータは、0でも1でもある情報、量子ビットを取り扱えるコンピュータのこと。現在のコンピュータとは全く異なる計算の仕組みを持ち、例えば、今のスーパーコンピュータが1万年かかる計算を量子コンピュータは4分で解くことができる。

く破られ、盗聴が横行することが考えられる。そのため国家レベルの情報通信においては、量子通信技術を持つことが安全保障における超重要項目となると言われている。

まずは、特にセキュリティが重視される外交機密などの国家情報をはじめ、金融情報、個人のゲノム・生体・医療情報等の分野で活用され、その後、個人レベルのネットワークへと広まっていくことが見込まれる。ちなみに、中国ではすでに量子暗号通信を実現しており、政府が活用していると言われている。

(2) さらなる未来での可能性～巨大な量子コンピュータの実現～

量子通信によって地域・国を超えて量子コンピュータがつながり、量子ビットで情報のやり取りができれば、多数の量子コンピュータがリアルタイムで協調して膨大な計算を行うことが可能となる。つまり、巨大な量子コンピューティング能力がどこからでも利用できるのだ。

これにより、次のような未来が考えられる。例えば、量子コンピュータは配送ルート等を最適化するための計算を得意とするが、より高度になれば、渋滞が一切ない都市交通が実現するかもしれない。創薬においては、さまざまなシミュレーションが一瞬に行え、新種のウィルス感染症などが発生しても、すぐに治療薬を開発できるかもしれない。高精度な気象予報により天災を予測できれば、事前対策を講じて被害を最小限に食い止めることができる。さらに先の未来に、自動運転との組み合わせで事故確率が低下すれば、車のボディには人命を守るための硬い素材を使う必要はなくなり、柔らかい素材を用いたより自由な発想のデザインの車が登場するかもしれない。また、個人所有のデバイスでも量子通信を行えるようになれば、さらに多くの可能性が広がる。現行のインターネットが、初期の構想段階では現在展開されているような世界を予想できなかったように、量子通信がネットワーク基盤として確立すれば、そこから生み出されるアプリケーションは無限の可能性をもつだろう。

今後の展望

(1) 各国の動向

米国では2020年に、量子通信により実現する量子インターネット³関連の支援を手厚くする法案が提出されるなど、近年、量子通信の活用に積極的な動きを見せている。同国エネルギー省は全国規模の量子インターネット構築を推進しており、この政策には6100万ドルの予算がついた。このプロジェクトには、シカゴ大学等の研究機関が中心となって研究にあたる。また同年、米国立科学財団（NSF）も同研究開発プロジェクトを発表し、2025年までの5年間で2600万ドルの予算が分配されている。どちらの研究プロジェクトも基礎研究からテストベッドまでサポートされる。

欧州では、動きだしがより早く、各地の大学や企業などによる量子関連技術のアライアンス、Quantum

³ 量子通信によりさまざまなデバイスがつながることでネットワークになり、さらにネットワーク同士が繋がるとインターネットになる。

Internet Alliance (QIA) を組み、2018年から量子インターネットのテストベッドの構築を開始している。さらに、2022年から7年間で大都市間を結ぶ量子ネットワークを構築するプロジェクトがスタートしている。同プロジェクトには始めの3年半で2400万ユーロという過去のプロジェクトとよりも多額の予算が割り当てられるなど、その力の入れようがうかがえる。また、スペイン、ドイツなど各国の研究機関でも独自の研究が進む。

中国では、量子インターネットに関する大型プロジェクトは見当たらないものの、量子技術全般に多額の資金を投じて研究開発を行っている。例えば、量子もつれ配送や衛星量子暗号通信を世界で初めて実証するなど、量子暗号通信における先進的な研究結果を多く公表している。2022年のノーベル物理学賞を受賞したツァイリッガー氏の弟子である潘建偉氏が同国の量子研究をけん引しており、上述の世界初の量子暗号通信の実証についても、ツァイリッガー氏の協力のもと、潘氏が実行したとみられる。

日本では、特に量子暗号通信の研究が盛んであるが、量子通信の研究プロジェクトもスタートしている。国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）が先進的な研究の助成を目的に立ち上げたムーンショット型開発事業においては、量子インターネットも見据えた量子通信の要素技術やアーキテクチャの検討、テストベッド構築がなされている。これらの研究活動は、大学などの研究機関が中心となり行っているが、メルカリが設立した研究開発組織、R4Dに所属する研究者も参加するなど、民間でも開始されている。

量子技術の研究開発において国際的に連携する目立った動きはないものの、各国でAI等に並ぶ超重要技術に位置付けられていることもあり、日米欧では個人レベルでの研究者の交流は進んでいる。

図表4：量子通信に関する各国の動き

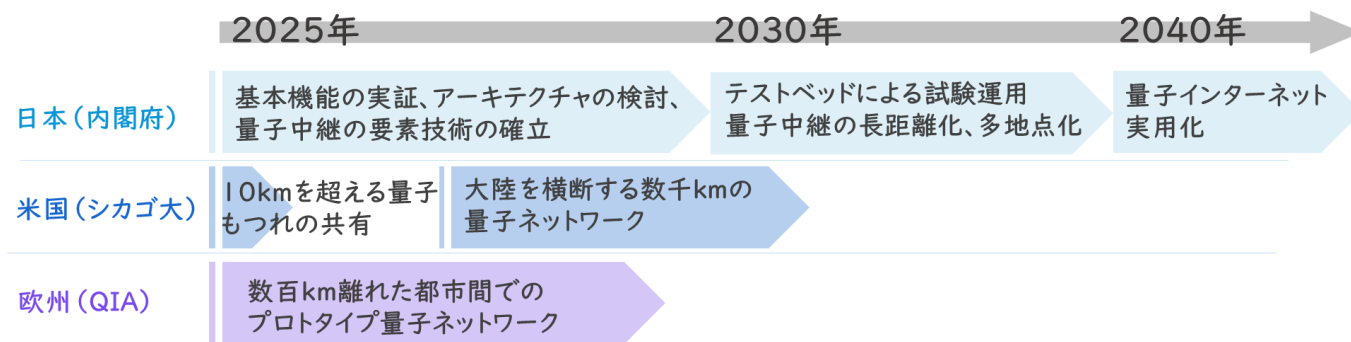
国	日本	米国	欧州	中国
代表的な支援機関	JST:科学技術振興機構	DOE:米国エネルギー省	QIA:Quantum Internet Alliance	—
支援概要	ムーンショット目標6「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用コンピュータを実現」における複数のプロジェクトの中に関連研究あり。 量子中継の要素技術研究、量子通信ネットワークのテストベッド構築やアーキテクチャの実証など。	同省が管轄する17の国立研究所すべてを量子インターネットの基幹ネットワークとして接続することを目指し、複数の研究開発プロジェクトを支援。	大都市間を結ぶ量子ネットワークの構築を目指す7年間のプロジェクト。	量子インターネット構築を掲げる大型プロジェクトは見当たらないものの、量子暗号通信の研究においては先行する。量子中継など、量子通信の基盤技術に関する実験を実施。
支援予算	(参考)目標6以外の目標も含むムーンショット型研究全体で、令和3年度の補正予算は680億円。量子通信関連の研究はその中の一部。	61Mドル(およそ83億円)	24Mユーロ(およそ35億円) *2022年10月から3年半の予算額 *QIAによる2022年までの過去3年間の予算は10Mユーロ(およそ14億円)だったため、額は倍以上に増えた。	(参考)2016年から5年年間で量子技術関連に約70億元(およそ1400億円)の研究を計画、別途量子研究拠点を整備している。量子暗号通信関連予算はその中の一部。
関連組織	慶応義塾大学、大阪大学、早稲田大学など	- 研究機関: University of Chicago, Caltech, Cornell University等 - 企業: Boeing, IBM, Intel, Google等	- Qutech(オランダの量子技術研究機関) - ICFO(スペインのフォトニクス等の研究機関) - University of Innsbruck(オーストリア) - Paris Centre for Quantum Computing(フランスの量子技術研究機関)を中心とした40の研究機関、企業、スタートアップなど	- 中国科学技術大学、中国科学院大学など
その他の取り組み	- 量子インターネットの実現が見込まれる20~30年後も現役世代の研究者を中心に量子インターネットタスクフォースを組成。2021年にホワイトペーパーを公表。メルカリ、大阪大学、横浜国立大学、東京大学などの研究者が参画。 - 2020年には大学発ベンチャーとしてLQUOMが設立されるなど、スタートアップでの動きもある。	- NSF(アメリカ国立科学財団)による、アリゾナ州でのテストベッド構築等に5年で26Mドル(およそ35億)の予算 - AWSが量子ネットワークと量子インターネットを研究するAWS Center for Quantum Networkingを発表	- ICFOが在カタルーニャの研究機関とともに、ソフト・ハードの両面において量子通信関連技術の研究予算に15Mユーロ(およそ22億円)を予定。 - Q.Link.X(ドイツの量子技術の発展を目指す研究機関と企業の共同プロジェクト)に連邦教育科学研究技術省が2018年から3年間でおよそ15Mユーロ(およそ22億円)の資金提供。	- 中国科学技術大学の潘建偉氏率いる研究チームが人工衛星による量子もつれ配送に成功 - 2025年までに量子暗号通信の全国規模のネットワークを構築予定

出所：各種資料を基に三井物産戦略研究所作成

(2) 量子インターネット実現に向けたロードマップ

内閣府によれば、量子インターネットは2040年頃に実用化される見込みである(図表5)。それまでに、要素技術の確立、テストベッドによる試験運用や量子中継の長距離化実現などが予定されている。米エネルギー省のプロジェクトに参画するシカゴ大学が掲げるロードマップでは、今後10年のうちに大陸間を横断する数千キロの量子ネットワークの構築を目標としている。欧州では上述のとおり、QIAが2022年から7年間で数百キロ離れた都市間での量子ネットワーク構築を目指す。中国については、量子暗号通信についての研究は進むものの、量子インターネットについてのロードマップは見当たらない。

図表5：各国の量子インターネット実現に向けたロードマップ



出所：各種資料を基に三井物産戦略研究所作成

(3) まとめ

現在はまだ、要素技術の検討や小規模な範囲での実証実験にとどまっているが、量子通信、量子コンピュータ、量子暗号等の量子関連技術が有機的につながり、安全で高速、高度な計算処理能力をもつ情報インフラとして量子インターネットが実現すれば、経済界に与えるインパクトは大きい。欧米では今後さらに研究が進み、日本でも若手研究者を中心に連携の動きがみられ、本分野への注目が徐々に高まっているが、人、モノ、金、全てにおける支援がまだ不十分だ。想定より早く到来するかもしれない量子インターネット時代に備え、ビジネスパーソンとしても、技術とアプリケーションの両面の動向に注目していくべきである。

「量子通信」に関する知財レポート

三井物産戦略研究所 技術・イノベーション情報部 知的財産室 松浦 由依

本稿では、「2023年に注目すべき技術」で取り上げた「量子通信」について知財の国際動向を調査・分析しレポートする。すべての調査・分析はPatSnap社が提供するグローバル特許検索・分析ツールであるPatSnap Analyticsおよび各種技術情報検索ツールであるPatSnap Discoveryを利用して実施した。各種データの取得日は2022年12月5日である。

各図表の見方

【図表1】 関連特許の出願動向

縦軸は特許ファミリー件数、横軸は出願年であり、2006年から2022年の年ごとの出願件数推移を示している。特許ファミリーとは、同一の特許出願に由来して各国へ出願された一群の出願グループを指す。たとえば、米国にした特許出願を中国にも出願した場合、これらは2件の特許出願としてカウントせず、1件の特許ファミリーとしてカウントしている。

特許出願は、原則として出願日から1年6月経過後に公開される。そのため2023年1月現在、2021年以降の特許出願の一部は公開されていない。しかし、本レポートの性質上、最新の特許出願状況を参照することが好ましいと考え、2021年以降の特許出願件数については予測値として掲載している。

【図表2】 出願人の国 上位ランキング

2003年から2022年までの特許出願につき、どの国の出願人が何件出願しているか、すなわち発明の出所（国）のランキングを示している。バブルの大きさは出願件数に比例する。

【図表3】 特許権者 上位ランキング

2003年から2022年までの特許出願につき、現在有効な特許を所有する上位特許権者のランキングを示している。

量子通信

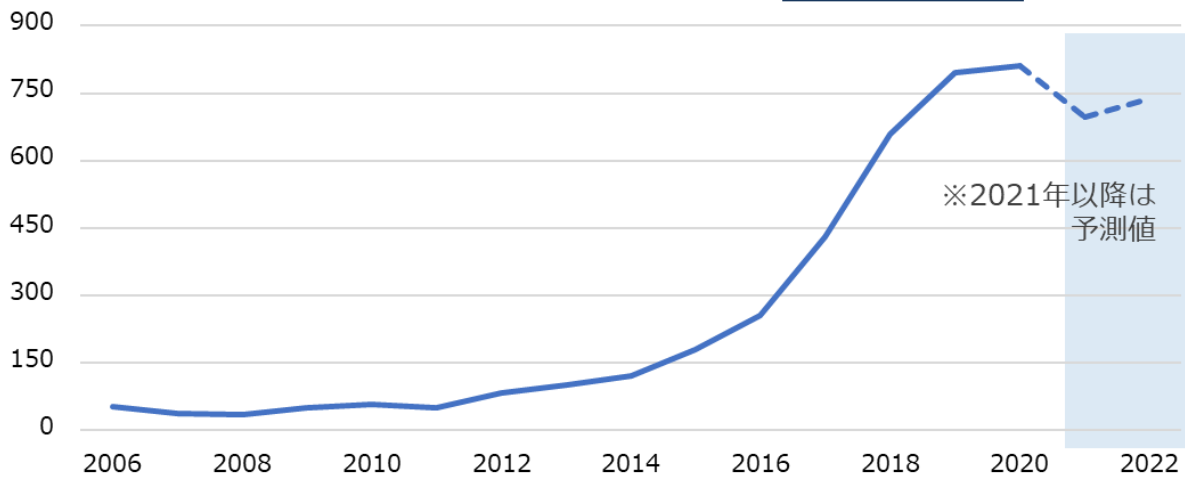
2023/01

【図表1】 量子通信関連特許の出願動向

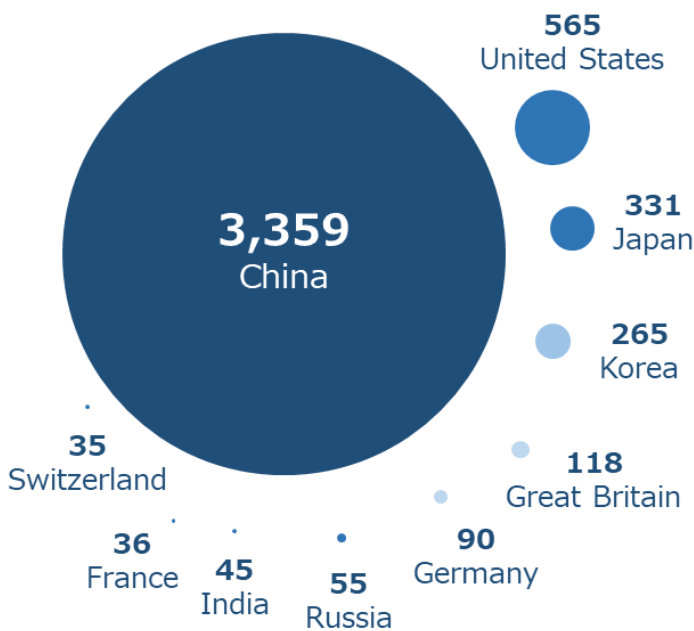
全出願件数 (2003-2022)

5,172

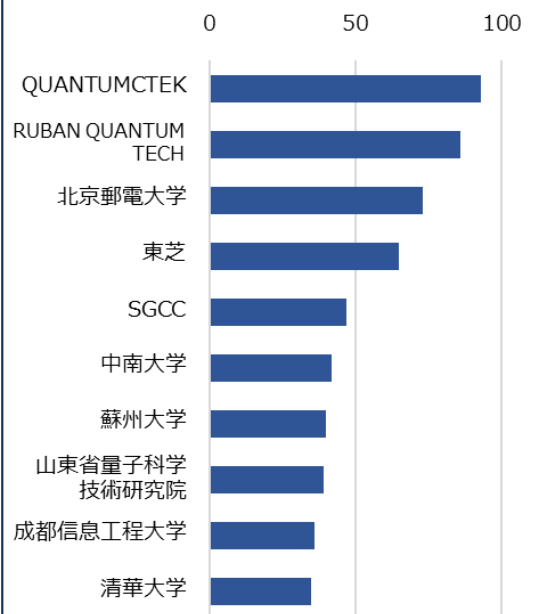
特許ファミリー



【図表2】 出願人の国 Top 10



【図表3】 特許権者 Top 10



学術論文件数
(2017-2022)

7,753

資金調達額
(2017-2022)

950M (USD)



「2023年に注目すべき技術」（フルレポート）はこちら

当レポートに掲載されているあらゆる内容は無断転載・複製を禁じます。当レポートは信頼できると思われる情報ソースから入手した情報・データに基づき作成していますが、当社はその正確性、完全性、信頼性等を保証するものではありません。当レポートは執筆者の見解に基づき作成されたものであり、当社及び三井物産グループの統一的な見解を示すものではありません。また、当レポートのご利用により、直接的あるいは間接的な不利益・損害が発生したとしても、当社及び三井物産グループは一切責任を負いません。レポートに掲載された内容は予告なしに変更することがあります。

