

Title	インドの量子技術育成とスタートアップ支援について
Author(s)	藤原, 孝男
Citation	年次学術大会講演要旨集, 40: 708-713
Issue Date	2025-11-08
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	https://hdl.handle.net/10119/20254
Rights	本著作物は研究・イノベーション学会の許可のもとに掲載するものです。This material is posted here with permission of the Japan Society for Research Policy and Innovation Management.
Description	一般講演要旨



○藤原孝男(豊橋技術科学大学)

fujiwara.takao.tp@tut.ac.jp

1. はじめに

次世代イノベーションに関して, March(1991) [1], は基礎研究の社会実装化, Ehlers(1998) [2]は「死の谷」克服の必要性, Porter(1990) [3], Saxenian(1994) [4]はスタートアップエコシステムの構築を提案している。

世界的な量子技術への投資ブームとスタートアップ創業の要因として, 量子技術の成熟化の兆し, サプライチェーン最適化・金融・創薬・通信安全性, 地政学的には宇宙探索・安全保障などへの可能性が挙げられる。例えば, 日本政府は補正予算で 2025 年に次世代チップと量子コンピューティング研究で 1.05 兆円の投資を決定している (Quantum Insider, 01, 2025 [5])。さらに, IBM, Google, Microsoft のような大企業による既存投資の拡張オプションだけでなく, 技術の多様性, 研究者スピノフ, 機動力・リスク許容度, 多産多死型革新志向によって米 IonQ (トラップドイオン), PsiQuantum (光子), 仏 Pasqal (中性原子)などのスタートアップによる探索的オプションの行使が産官学にて行われている。

2022 年の科学論文数で世界第 3 位 (Scopus) や IISc・IIT の人材で注目されるインドでは 2023 年の \$750M 投資の国家量子ミッション (National Quantum Mission: NQM) にて, 2031 年までに量子技術での世界的リーダーになることを目標にしている (DST: 科学技術省, 2023 [6])。インドにおいても, 国家・大学・大企業に加えてスタートアップに期待が寄せられている。

問題意識として, 先ず, インドの量子科学・技術での現状の水準から, \$750M の国家投資を契機に今後, 米・中へのキャッチアップを目指す冒険的な NQM の戦略的仕掛けとは何か? 第 2 に, 特に量子技術では, 事業化への道のりが遠く, 過酷な「死の谷」にも関わらず, 何故, NQM のスキームに, 敢えて, 資源制約の大きなスタートアップを組み込むのであろうか?

鍵概念として, 量子スタートアップとは, 量子技術のアイデアの事業化での投資機会としてのリ

アルオプションのポートフォリオとして定義する。

研究の枠組みとしては, NQM のような産業化までの期間が長い大型国家プロジェクトでは i) 固定的な NPV 評価よりも不確実性下での柔軟な意思決定や, ii) 政府の基盤投資, 大学・研究機関の基礎研究, スタートアップによる社会実装, 政府・大企業による需要創出, VC・PE による投資, 国外インド系研究者との連携や帰国誘引などエコシステムにおける連携の意思決定を評価できる手法が不可欠なため, リアルオプションとゲーム理論とを統合したオプションゲーム的視点での検討を試みる。データは主に ITES(2025) [7] を参照する。

研究目的として, 世界の中でのインドの量子技術の位置付けや国内での技術革新の進捗を, 科学論文・特許・スタートアップなどのデータに基づき, 量子計算, 量子通信・暗号, 量子センシング・計測, 量子材料・デバイスなどの技術領域での各プレイヤーの活動状況を基礎に, i) 米中に対するキャッチアップ志向の戦略的機構, ii) スタートアップ・エコシステムの社会実装化の機能について, オプションゲームの視点から調査・検討する。

2. 先行研究

先ず, NQM(DST, 2023 [6]) が戦略・資金配分の設計図及び政策評価の基準として公式的なインド政府計画と実装枠組みとして公表されている。次に, NITI Aayog 等の各種政策ブリーフがインドの国家戦略と産業化ロードマップに関する分析を行い, 技術移転や産業投資の必要性を論じている

(Quantum Insider, 03, 2025 [8])。さらに, Menon et al. (2023) [9] は, インドでの研究動向と産業化を技術管理上の課題として整理している。

他方, 本稿の研究手法としては, NQM のようなエコシステムにおける量子スタートアップの i) 不確実性に対するリアルオプション (Dixit & Pindyck, 1994 [10]) と, ii) 連携戦略へのゲーム理論との組み合わせとしてのオプションゲームに依拠する (Grenadier, 2000 [11])。

3. 論文の世界的動向とインドの位置付け

論文は基礎研究の水準の測定尺度の1つである。先ず、量子計算の論文数トップ10カ国における論文数とトップ10学術誌の比率に関するプロットでは、論文数では米・中が突出して多いが、上位雑誌の比率による質尺度では若干中国が低い(図1)。第2グループとしては、独・英・加・豪・仏の先進国が論文数・質で集団を形成している。日・伊が第2グループとほぼ同じ論文数ながらも質の低位で第3グループを形成している。さらに第4の位置にインドが第2・3グループとほぼ同じ論文数ながらも、上位雑誌の比率が第3グループよりも低い状態で追随している。

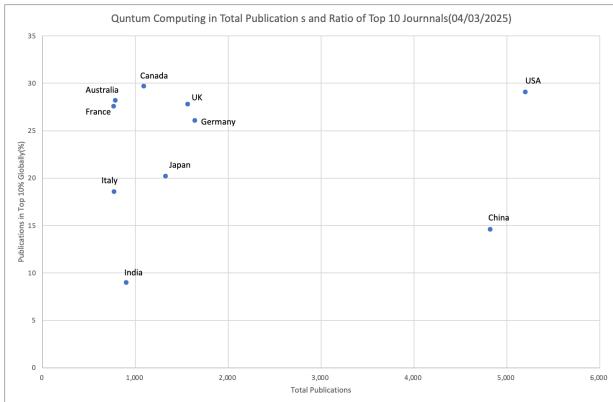


図1.上位10カ国の量子計算論文の数・質

第2に、量子通信の論文数では圧倒的に中国が単独トップであるが、論文の質では後続の米・欧・日の水準よりも低い(図2)。軍事・経済の安全保障の観点からも重視している可能性が高い。第2位の米国は、論文数では中国に水を空けられ、第3位の欧州よりも多いが、質は欧州の水準よりも低い。第3グループは、英・独・加・仏の先進国圏を反映して論文数・質がほぼ同じである。第4グループは西・日・伊であり、論文数は第3グループとは変わらないが質水準が少し低い。インドは第3・4グループと同じ論文数ではあるが、質は中国よりも若干低い水準にあると言える。

第3に、量子センシング・計測の論文では、第1グループは米・中であるが、論文数は中国が、質では米国が優位である(図3)。第2グループは、英・独で、質では英国が、論文数では独国が優っている。第3グループは、西・加・仏・豪で、スペインの質が高い。スペインでは、バスク地域において、量子干渉法やエンタングル状態を用いた高精度センサーの開発がなされている。第4グループとして伊・日が続き、インドは上位10カ国には含まれていない。

第4に、量子材料・デバイスの論文では、中国は論文数では圧倒的に、質でもほぼ第1位である(図4)。第2位の米国は論文数での大きな差にもか

かわらず僅差で質が中国を超え、欧州を中心とする第3グループよりも論文数・質で上まっている。第3グループは、英・独・仏の欧州を中心に、日本の他に韓国・イラン・インドが加わっている。半導体に強い韓国が仏国よりも上位で、原子炉に関心のあるイランも日本よりも質が高く、日本に近接して論文数の多いインドが加わっている。故に、インフラとしての基盤技術については、理論先行の欧米よりも、中国・韓国・イラン・インドが社会実装に向けて準備を整えていると言える。

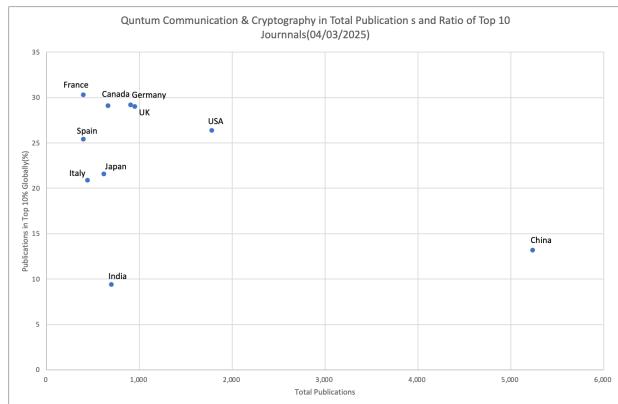


図2.上位10カ国の量子通信・暗号論文の数・質

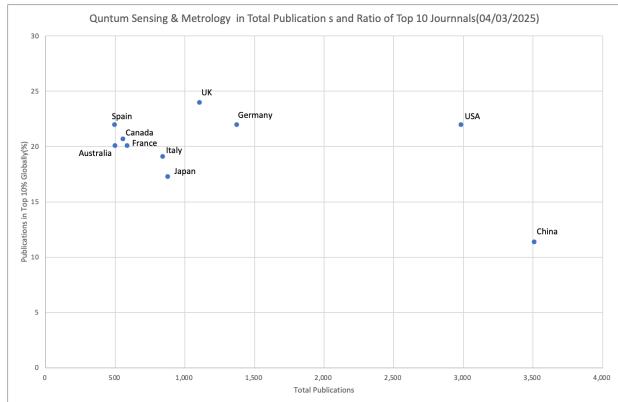


図3.上位10カ国の量子センシング・計測の数・質

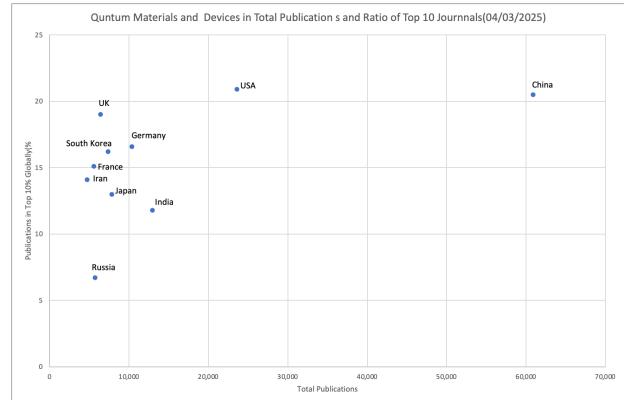


図4.上位10カ国の量子材料・デバイス論文の数・質

こうして、インドは近年の論文数増にも関わらず、現状では、量子の計算・通信・材料の分野では 10 位以内の下位にあり、センシングでは 10 位圏外で、今後の躍進が待たれる状態にある。

4. インド政府によるエコシステムの設計

このような状況下で、国家量子ミッション(NQM)として、2023年4月から31年3月までの8年間で\$750Mの国家投資、各政府機関の支援に加え、国内主要大学・研究機関がハブ・スクールの体制で基礎研究を行い、さらに大企業ユーザー、投資家の支援を伴い、駆動力としてのスタートアップを介した社会実装促進のエコシステムとして国家戦略を立案している（表1）。数値目標としては、8年計画で50～1,000量子ビット規模の量子コンピュータの開発を目指に掲げている。このエコシステムの設計思想は、オプションゲームの概念との適合性を感じさせる。

表 1. インドの量子エコシステム

NQW での 4 テーマハブ (T-Hub) の内の「量子材料・デバイス」や「量子計算」に関連した基礎研究機関によるハードウェア開発では、TIFR (タタ基礎研究所) と DRDO (国防研究開発機構)との共同で、超伝導型 6 量子ビット量子プロセッサが 2024 年に試作されている。制御系は DRDO 下部組織の DYSL-QT (Young Scientist Laboratory-Quantum Technologies) が担当し、クラウド経由で量子回路実行が可能な初の国産量子デバイスである。他に、IISc, IIT Madras, IIT Bombay などは、光量子・原子量子ビット、量子材料といった多様なプラットフォームの研究にも注力している。スタートアップでは、QPaiAI (バンガロール) が超伝導 25 量子ビット量子コンピュータ「Indus」、Dimira Technologies (IIT Bombay 発) が量子用クライオ用ケーブル、Prenishq (IIT Delhi 発) が精密レーザーシステム、Quanastra (デリー) がクライオジエニクスと超伝導検出器、Pristine Diamonds (アーメダバード) がダイヤモンド材料による量子センシング、Quan2D (バンガロール) がナノワイヤー光子検出器をそれぞれ開発している。

しかし、インドは現在、多くのハードウェア・構成部品を海外依存のため、量子ビットの製造・試験施設、クライオ電子機器などのインフラ整備が

課題として浮上し、NQM の下での投資・開発が期待されている。

むしろ、ソフトウェア開発では、NQM の 4T-Hub での開発強化に加え、MeitY (電子・IT 省)・AWS 共同設立の Quantum Computing Applications Lab により、クラウド上での量子開発環境が提供され、研究者や開発者が Quantum-as-a-Service 型で開発できる体制が整えられている。国内大手 IT 企業として、TCS が量子アルゴリズム (最適化、ML、材料・輸送など) や AWS 上での量子サービス開発に、Infosys・HCL・Tech Mahindra が社内 R&D 体制を整え、サプライチェーンやセキュリティなどへ量子技術適用を試行し、IBM India が IISc, TIFR, IIT 各校 (Madras, Kanpur, Kharagpur など) と提携し、クラウド経由での量子コンピュータアクセス経由のオープンソースソース Qiskit による 1,400 名超の学生に研修・教育の機会を提供している。スタートアップとして、BosonQ Psi が量子シミュレーション用 CAE ソフトウェア、Qulabs が量子通信・Blind computing プロトコル・QT×AI 応用ソフトウェア、QpiAI が量子コンピュタを含む AI 統合の量子ソフトウェア・フルスタック、QNu Labs が QRNG, QKD, Post-Quantum 暗号などのセキュリティウェア、Quanfluence・BQP (Bounded-error Quantum Polynomial time) が金融・製造領域での量子最適化アルゴリズムやデジタルツインなどをそれぞれ開発している。

こうして、NQM の国家投資に加え、研究機関でのハードウェア開発、IT 大手によるインフラ整備の支援（オプション・プレミアム）の上で、スタートアップが、需要（原資産）の大きさに合わせて、主に量子技術用のソフトウェア開発（オプション行使）に専念していると言える。

5. インド国内の論文・特許・スタートアップの状況

5.1 量子論文

(1) 刊行トレンド

(c) 刊行トレンド
量子論文の刊行トレンドとしては、2016年の一時的な低下を除けば、順調に増加している(図5)。領域別の量子論文の刊行上昇率としては、2013～23年の10年間に第1位量子計算では13→208報と16.0倍、第2位量子通信・暗号では21→150報と7.1倍、第3位量子センシング・計測では16→89報と5.6倍、第4位量子材料・デバイスでは567→2,034報と3.6倍に其々増加しており、政府の国家量子ミッションでの各領域の参加機関数と連動した比率となっている。

量子計算の分野の伸びの理由としては、2020 年以降の NM-QTA(National Mission on Quantum Technologies & Applications)発表、2023 年の

NQM 施行により資金が集中的に投入され、IISc, IIT Bombay, TIFR などが中心になり、量子アルゴリズム・機械学習応用の研究が急速に拡大している。また、米国・中国・欧州での量子計算が「旗艦プロジェクト」として推進される国際潮流との同調も挙げられる。

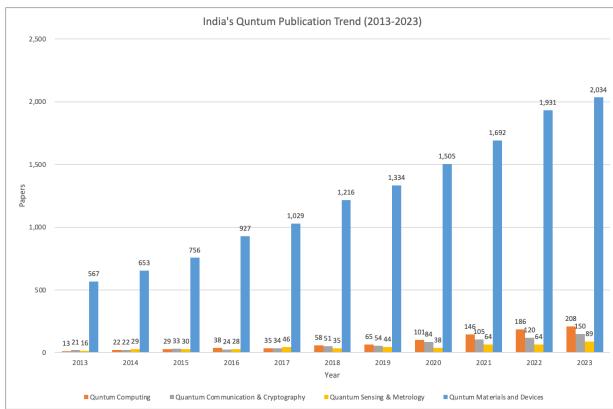


図 5. インドの量子分野別論文刊行トレンド

量子通信・暗号については、安全保障・通信インフラの文脈で DRDO や ISRO(インド宇宙研究機関)が主導し、軍事・宇宙通信での需要が強い。しかし、実用化には衛星・光通信インフラが必要で、大規模な国家プロジェクトに依存するため成長速度は量子計算より緩やかであるが、地上～宇宙間 QKD(量子鍵配達) の実験が進み、国際的にも注目されている。

量子センシング・計測については、応用研究主導で、原子時計、磁場・重力センサーなどを応用物理研究所(RRI, PRL, IUCAA)が牽引しているが、センサー応用は民生産業との連携がまだ弱いため、宇宙・防衛用途(測地・ナビゲーション・潜水艦探知)での狭い研究需要に支えられている。量子材料・デバイスについては、2010 年代初期から材料科学(半導体、トポロジカル材料、超伝導体、スピントロニクス)での研究者層が厚く、論文数は他分野より桁違いに多いので成長率は低めに見える。特に、米・独・日との共同研究で研究水準を維持・拡大している。

(2) インドの量子論文領域別分布

2023 年までの 20,082 報の論文の領域別内訳としては、第 1 位量子材料・デバイス 13,644 報(87%)、第 2 位量子計算 901 報(6%)、第 3 位量子通信・暗号 695 報(4%)、第 4 位量子センシング・計測 483 報(3%) であり、圧倒的に量子材料・デバイスの論文数が多い。

全体として、量子論文は、安全保障の領域を除き、以前から研究機関での量子材料・デバイスのコンスタントな増加傾向に加え、NQM 開始後に量子計

算アルゴリズムを中心に大学等にて急上昇する「探索オプション」の機能を果たしている。

5.2 インドの量子特許

(1) インドの量子特許の申請・取得トレンド

特許は基礎研究成果の技術移転の 1 つの手段である。インドの量子特許の申請は 2015 年頃、一時的に増えたものの、2017~20 年の停滞後、2021 年になってから急増しているが、特許取得は依然として低迷状態にあると言える(図 6)。

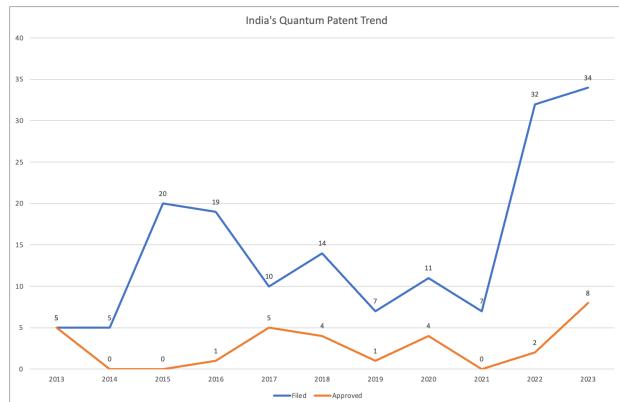


図 6. インドの量子特許の申請・取得分布

2012~17 年はインドの第 12 次五カ年計画にあたり、科学技術(DST, DRDO, ISRO)への投資の拡大に伴い、特に量子通信・暗号、量子材料(超伝導・スピントロニクス)などの研究プロジェクトに予算がつき始めたため、一時的に特許申請が増えた。しかし、米国(2018 年: National Quantum Initiative Act), 中国(2016 年: 国家量子通信衛星「墨子号」), EU(2016 年: Quantum Flagship)に比べ、インドが本格的に NQM を打ち出したのは 2023 年であり、2017~20 年は国家的資金・ロードマップが欠如していたため、研究は進んでも特許出願に結びつく仕組みが弱かった。また、産業界の関与としても、この時期、TCS や Infosys など IT 企業は量子研究に既に着手しても試験的 PoC(proof-of-concept: 概念実証) レベルと量子産業エコシステムが未形成で、特許出願をリードする企業主体が少なかったと言える。

(2) インドの量子特許の領域別分布

2023 年での合計 164 件の内訳は、第 1 位量子材料・デバイスが 104 件で 65% と、同文献の比率 87% に比べると 22% 低く、量子科学技術のインフラにも関わらず文献と特許の間には乖離が見られる。理由としては、研究の特徴として、主に、量子材料(超伝導体・トポロジカル材料・2D 材料など)の研究は、まだ基礎物性解明や合成・測定技術の段階が多く、論文にはなり易いが、「製品化に直

結する発明」まで到達していないため、特許に結びつきにくい点がある。

第2位の量子計算は41件で26%であり、同文献の比率6%に比較すると20%も高い。理由として材料やデバイス研究が基礎物理寄りで論文中心の傾向に対して、量子計算はアルゴリズム・応用・システム設計といったインドが得意なソフトウェア的な応用分野で特許化しやすい特徴がある。

第3位の量子通信・暗号は11件で7%であり、少ない中でも同文献の比率4%よりも多い。理由として、量子通信・暗号（特にQKD：量子鍵配送）は、安全保障や軍事通信に直結する技術であり、インド政府・DRDO（国防研究開発機構）・ISRO

（インド宇宙研究機関）も、戦略技術を論文より特許・秘密保持で保護する方針をとることが多い。

第4位の量子センシング・計測は4件と2%であり、同文献の比率3%よりも低い。理由として、量子材料・デバイスと似た構図であり、基礎研究・PoC段階が多く、量子センシング・計測は高感度磁気センサー・量子イメージング・原子干渉計などを含むが、多くが基礎物理実験やPoCの段階であり、論文としては成果になり易いが、ニッチ市場対象で、且つ商業利用・特許化できる完成度の高いデバイスやシステムまでには至っていない。全体として、論文に比べ特許件数は少なく、研究所の量子材料・デバイスの比重が大きい中で、NQMの影響もあり大学等での量子計算アルゴリズム領域での増加が見られ、他のプレイヤーへの技術移転意欲の「シグナリング」機能を果たしている。

5.3 インドの量子スタートアップ

(1) 量子スタートアップ創業トレンド

スタートアップは、基礎研究成果の迅速・柔軟な社会実装の手段である。インドの量子スタートアップ年間創業件数は2016～23年に2社から9社に増加している。但し、2017年と2022年には一時的に低下している（図7）。

その後、2023年から回復した理由としては、第1に、国家量子ミッションの本格始動として、2020年に発表されたNM-QTA（National Mission on Quantum Technologies and Applications）の資金配分や研究センター設置が、2022年後半～2023年にかけて具体化し（2023年4月にはNQM7.3億ドルの内閣決定）、DSTやMeitYが大学・スタートアップと連携する形で研究開発拠点を整備し、政府の長期的支援が明確になり、投資家の信頼回復につながったことがある。第2に、投資環境の改善として、パンデミック後に停滞していたVC投資が2022年後半から回復し、特にリスク分散型のAI・量子計算の融合領域（量子機械学習、最適

化、シミュレーション）に投資が集中し、2023年には新規創業を後押し、グローバル投資家（Google, IBM, AWS, Microsoftなど）のインド人材への注目も高まったことが理由である。

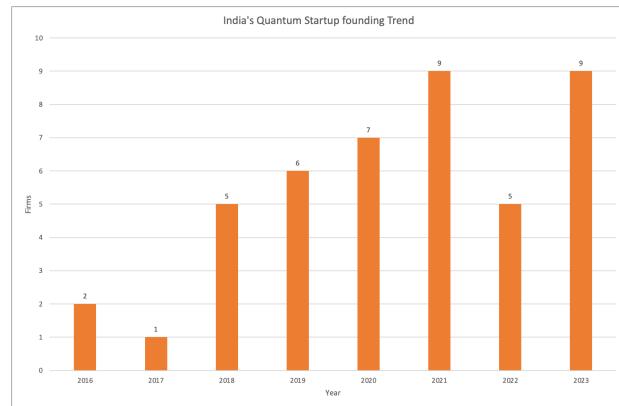


図7.インドの量子スタートアップ創業トレンド

(2) 量子スタートアップ資金調達トレンド

インドの量子スタートアップの資金調達トレンドとして、2018～21年は低迷気味で、2022年からの急激な増加の後に、2023年には一時的に低下したが、翌年からは増加に転じている（図8）。2022年から急激な増加に転じた理由としては、先ず、NM-QTA予算（10億ドル）の実働開始として大学・研究所・スタートアップへの助成金や共同研究資金が流れ始め、投資家の信頼感が回復し、第2に、欧米のスタートアップ（PsiQuantum, IonQ, Rigettiなど）の大型調達がニュースとなり、インドでも量子市場の成長期待が強まったこと、そして、産業界の需要顕在化として、Indian Oil, Tata, Infosys, Wiproなど大企業が量子応用を検討し、スタートアップと連携することで投資機会が拡大したと考えられる。

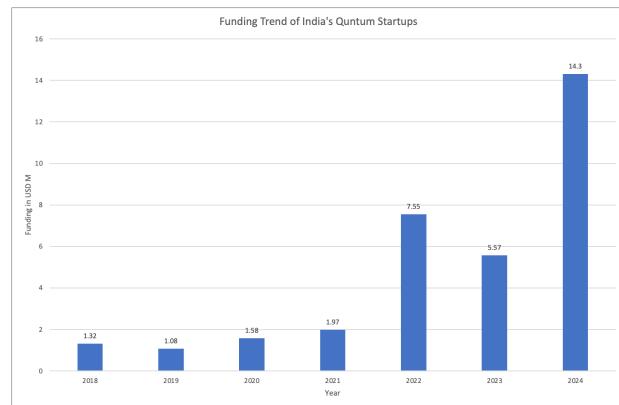


図8.インド量子スタートアップの資金調達トレンド

2024年以降に再び増加した理由としては、第1に、量子実証の進展として、量子暗号通信（QKD）、量子クラウドサービスの国内実証が成功し、技術の現実性が高まったこと、第2に、産業界との連携

が強化し、製薬・化学・金融・エネルギー企業が量子応用を試行しスタートアップへのPoC投資が増加したこと、第3に、政策支援の継続によって、NQM資金が本格化し、さらに新規プログラム（人材育成・国際連携）が動き出したこと、第4に、投資市場の回復によって、世界的にディープテック投資が再加速し、インドもその恩恵を受けたことなどが考えられる。

(3) インド量子スタートアップの領域・段階別分布

図9から、先ず、圧倒的に多いのは量子計算スタートアップ（Ideation 24社、Validation 13社）であり、ソフトウェア系（量子アルゴリズム、シミュレーション、最適化）の参入障壁が低いため、実際にアイデア段階の数が突出している。次に、量子通信・暗号は次点であり、インドでは国家安全保障上、量子通信・QKDの関心が高いけれども、事業化（Early Traction, Scaling）はまだ非常に少ないと言える。さらに、材料・デバイス、センシングは弱く、理由として、ハードウェア系では研究コスト・人材・装置投資が大きいため、スタートアップとしては参入が難しく、主にCSIR, IISc, RRCATなど国立研究所・大学主体で進んでおり、民間スタートアップは少数となりがちである。こうして、スケーリング（Scaling：拡大段階）に到達しているのは量子計算のみで、これにはQpiAI（SaaS型プラットフォーム、AIと量子の融合）、QNu Labs（暗号通信寄りだが早期商用化）、BosonQ Psi（量子シミュレーションSaaS）などが代表的事例である。

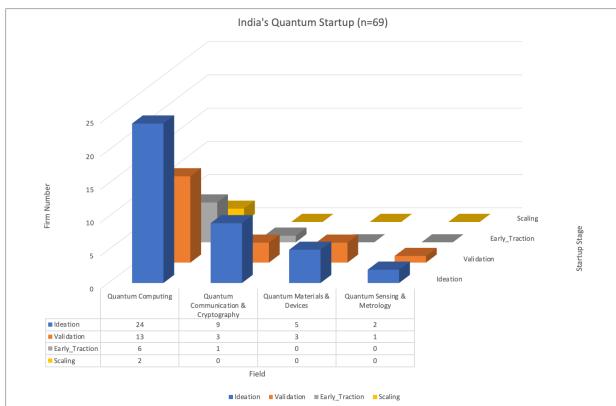


図9. インド量子スタートアップの領域・段階別分布

量子計算での投資リスク低減型の量子AI融合、SaaS型サービスの領域でスタートアップのスケーリング段階への到達の兆候が見られ、今後、事業現場から大学・研究機関へのフィードバックを含め、好循環形成の契機となる可能性がある。

6. 結び

先ず、問題意識1に対して、NQMの枠内で「死の谷」の深い量子技術の社会実装化というリスクプロジェクトに対するオプションゲームの観点から、政府補助金を初期オプション料（プレミアム）とすることで、政府は「失敗許容の」オプション投資家となり得る。VC・PEを後期オプション行使者とすることで、政府の初期投資や大学・スタートアップの進捗を観測し、リスク低下を確認後に参入できる。産業顧客は実需の保証人として、PoC発注でオプションの実行確率を高める役割を果たせる。海外インド系人材の動向は情報シグナルとして、欧米での評価がインド国内の投資判断に影響する。こうして、NQMのようなエコシステムはそれ自体がリアルオプションのポートフォリオの機能を果たすと考えられる。

第2に、問題意識2に対して、既に、量子計算での投資リスク低減型の量子AI融合や、SaaS型サービスの領域でのスタートアップでスケーリング段階に到達し、先駆的・機動的に挑戦する企業が資金調達に成功し始めている。特に、画期的技術とニッチ市場との融合には、スピード・コスト・柔軟性においてスタートアップは優れているが、反面、「死の谷」を克服するNQMエコシステムのようなオプションゲーム的戦略を必要とする。

参考文献

- [1] March, J.G., "Exploration and exploitation in organizational learning," *Organ. Sci.*, 2(1): 71–87, 1991.
- [2] Ehlers, V.J., *Unlocking Our Future: Toward a New National Science Policy*, Washington, DC, USA: U.S. House of Representatives Committee on Science, 1998.
- [3] Porter, M.E., *The Competitive Advantage of Nations*, New York, NY: Free Press, 1990.
- [4] Saxonian, A. *Regional advantage: Culture and Competition in Silicon Valley and Route 128*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1994.
- [5] Quantum Insider, 2025.01.16, https://thequantuminsider.com/2025/01/16/japan-boasts-semiconductor-quantum-rd-with-trillion-yen-budget/?utm_source=chatgpt.com
- [6] DST, 2023, NQM: https://dst.gov.in/national-quantum-mission-nqm?utm_source=chatgpt.com
- [7] ITES, Quantum, 2025: https://psa.gov.in/CMS/web/sites/default/files/publication/ITES_QWEBSITE1.pdf
- [8] Quantum Insider, 2025.03.06, https://thequantuminsider.com/2025/03/06/india-risks-falling-behind-without-a-multi-pronged-approach-to-quantum-computing-niti-aayog-report-says/?utm_source=chatgpt.com
- [9] Menon, V.G., Adhikari, M., "Quantum computing in India: Recent developments and future," *IET Quantum Communication*, 4(2): 93–95, 2023.
- [10] Dixit, A.K., Pindyck, R.S., *Investment under Uncertainty*, Princeton, NJ: Princeton University Press, 1994.
- [11] Grenadier, S., "Option exercise games: The intersection of real options and game theory," *J. Appl. Corp. Finance*, 13(2), 99-107, 2000.