



RIETI Policy Discussion Paper Series 22-P-007

日米中の科学技術力比較と経済安全保障問題に対する インプリケーション

元橋 一之
経済産業研究所



Research Institute of Economy, Trade & Industry, IAA

独立行政法人経済産業研究所

<https://www.rieti.go.jp/jp/>

日米中の科学技術力比較と経済安全保障問題に対するインプリケーション¹

元橋一之（経済産業研究所）

要旨

日本政府としては、経済安全保障に係る国としての大きな方向性として、①自立性の向上（基幹インフラやサプライチェーン等の脆弱性解消）、②優位性ひいては不可欠性の確保（研究開発強化等による技術・産業競争力向上や技術流出の防止）及び③基本的価値やルールに基づく国際秩序の維持・強化の3点を挙げている。ここでは、日米中の科学技術力の比較を論文情報で行い、上記②のハイテク技術の振興と技術流出の防止に関するバランスに関する政策インプリケーションについて述べる。

米中と比較して、日本の公的研究開発投資の停滞を背景として、研究論文で見た日本の相対的な科学技術力は大きく後退している。また、米中両国が、先端技術についてもデカップリングの動きを見せる一方で、研究者レベルでは密接な連携が見られる一方で、日本のアカデミックは国際化が遅れている。このような状況において、日本においては先端技術、特に遅れが見られる AI・機械学習を含むコンピュータ科学分野で国際化を進める必要がある。

一方で、サイエンスとイノベーションの距離が短くなるサイエンス経済時代において、科学的知見をイノベーションにつなげていくサイエンスイノベーションの段階において、安全保障上問題となる技術流出を防ぐ対策を考える必要がある。そのためには日々科学的フロンティアが拡大しているアカデミックな研究成果をフォローし、安全保障上問題となる技術シーズをピンポイントで拾い上げることができ体制（研究者データベース、目利き人材、シンクタンク機能等）を国内において整備することが重要である。

キーワード：経済安全保障、論文情報、科学技術競争力

JEL classification: F52、O31

RIETI ポリシー・ディスカッション・ペーパーは、RIETI の研究に関連して作成され、政策をめぐる議論にタイムリーに貢献することを目的としています。論文に述べられている見解は執筆者個人の責任で発表するものであり、所属する組織及び（独）経済産業研究所としての見解を示すものではありません。

¹ 本稿は、独立行政法人経済産業研究所（RIETI）におけるプロジェクト「イノベーションエコシステムの生成プロセスに関する研究」の成果の一部である。また、本稿の内容は令和3年度防衛省委託調査「経済安全保障戦略の動向」において作成した調査報告書における内容をベースにしたものである。RIETI 及び防衛省からの財政的支援に対して感謝したい。RIETI における DP 検討会においては、長岡教授他参加者から有益なコメントを頂いた。また、論文情報の自然言語処理について協力を得た Zhu Chen 氏（RIETI-RA、東京大学博士課程学生）の協力を得た。ここに感謝の意を表したい。ただし、本稿における記述は、著者のものであり、上記機関並びに著者の所属する機関のものではない。

1. はじめに

日本政府としては、経済安全保障に係る国としての大きな方向性として、①自立性の向上（基幹インフラやサプライチェーン等の脆弱性解消）、②優位性ひいては不可欠性の確保（研究開発強化等による技術・産業競争力向上や技術流出の防止）及び③基本的価値やルールに基づく国際秩序の維持・強化の3点を挙げている。ここでは、上記の②にフォーカスして、特に経済安全保障と科学技術政策との関係について述べる。

米国の外交問題評議会（Council on Foreign Relations）における Blackwill 氏は、経済安全保障（Geoeconomics and Statecraft）を、「経済的活動・制度によって外交上有利な立場を築き国益を守ること」と定義している（Blackwill and Harris, 2016）。本書のタイトルである“War by Other Means”、つまり軍事以外の手段による国の安全保障という視点から見ると、経済活動のグローバル化が進展する中で、あらゆる経済制度が関連しうる。同書において経済安全保障を確保するための手段としては、貿易・投資に関する規制の他、経済制裁や経済援助等様々な政策について議論されている。これまで国際性、オープン性を基軸とする科学技術に関する制度・政策について、安全保障の観点から議論されることは少なかった。しかし、最先端の画像処理技術や制御技術が無人戦闘機に活用されていることに見られるように、先端技術開発は安全保障が密接な関係を持つようになっている。

この点については、安全保障との関係でも、中国や米国が打ち出してきている輸出規制対象の重点技術リスト（AI・機械学習、量子コンピュータなど）にその傾向は明らか見てとれる。日本においても安全貿易管理の観点から、機微に触れる先端科学技術情報（論文や特許）の非公開化や留学生・外国人研究者の受け入れ審査の厳格化などの方向性が打ち出されている。しかし、科学技術の発展はニュートンの格言（Standing on the shoulders of giants）にもあるように、日々積み重ねられる研究成果がベースになっている。研究活動に関する国際活動の制約は、科学技術の進歩の遅れにつながる。根本的な問題として、政府目標である「技術・産業競争力向上」と「技術流出の防止」は相反するものなのである。従って、この両者のバランスを取るためにどのような技術分野を特定するか、また、技術流出の防止のためにどのような対策が効果的なのかについて検討することが必要となっている。

更に、先端的な技術は目覚ましいスピードで進展していることにも留意が必要である。米国における安全保障上の重点技術リストに、エマージングテクノロジーとして量子コンピュータがリストアップされている。この技術はコンピュータの情報処理スピードを飛躍的に向上させるものとして注目されているが、民間企業や公的研究機関等がその開発にしのぎを削っているところで、実用化は2030年ごろと見込まれている。量子コンピュータは暗号解読に有用であるという観点から、安全保障との関係でリストアップされていると考えられるが、次世代のコンピュータ技術を確立、基幹技術の確保という観点からも検討が必要である。

ここでは、経済安全保障の観点から見た重要技術に関する考え方とその保護手段につい

て検討する。そのためには、日本の科学技術力についての相対的な国際競争力の現状について整理する必要がある。そこで、論文や特許等の技術書誌情報を用いて、米中との比較における日本の科学技術力について評価を行った。具体的には Clarivate 社の Web of Science から 2010 年～2019 年までに出版された日米中の著者を含む学術論文、約 850 万本（Science Citation Index Expanded に収録されている学術誌の論文）を抽出して、論文の数量、質（被引用件数）の学術領域別比較を行った。また、先端技術の投資・輸出規制などで特に機微性が高いと考えられるコンピュータサイエンスの分野にフォーカスした詳細な分析を行った。

更に、この分析結果を基に、経済安全保障問題への政策インプリケーションについて述べる。昨今、イノベーションにおける科学技術的な知見の重要性が高まりつつある（元橋、2014）。日本企業が現場のモノづくり競争力をベースに世界市場を席捲してきた「モノ中心モデル」は、韓国や中国などの新興国企業の技術的キャッチアップによって通用しなくなってきた。その一方で、インターネットの普及、ヒトゲノムの解読、AI・機械学習の進展など、21 世紀に入って多くの科学的ブレークスルーが見られ、これらの活用によるサイエンスベースのイノベーションが可能となった。更に、2004 年の国立大学法人改革をはじめとした科学システムの改革によって、産学連携が深化するとともに、大学発ベンチャーにみられるように、大学研究成果がイノベーションに直結することが多くなった。

その結果として、オープンイノベーションやイノベーションのエコシステム戦略が重要となり、技術と安全保障をめぐる問題も影響を受けている。米中で激化するハイテク貿易摩擦が、アカデミックな研究や量子コンピュータのように実用化に至っていない超最先端科学も対象としているのは、この科学とイノベーションの距離が縮まったことによる。

サイエンス経済における新しいイノベーションモデルは、アカデミック部門等による基礎研究の結果としての科学的知見からイノベーション（新製品・サービス）のための技術シーズとして抽出・改良するサイエンスイノベーションとエコシステムを通じて技術シーズをイノベーションとして結実させるビジネスイノベーションの組み合わせで構成される。このアカデミック部門における科学知の創出（科学フロンティアの拡大）、サイエンスイノベーション及びビジネスイノベーションのそれぞれのプロセスにおいて、経済安全保障を確保するための対応策について検討する。

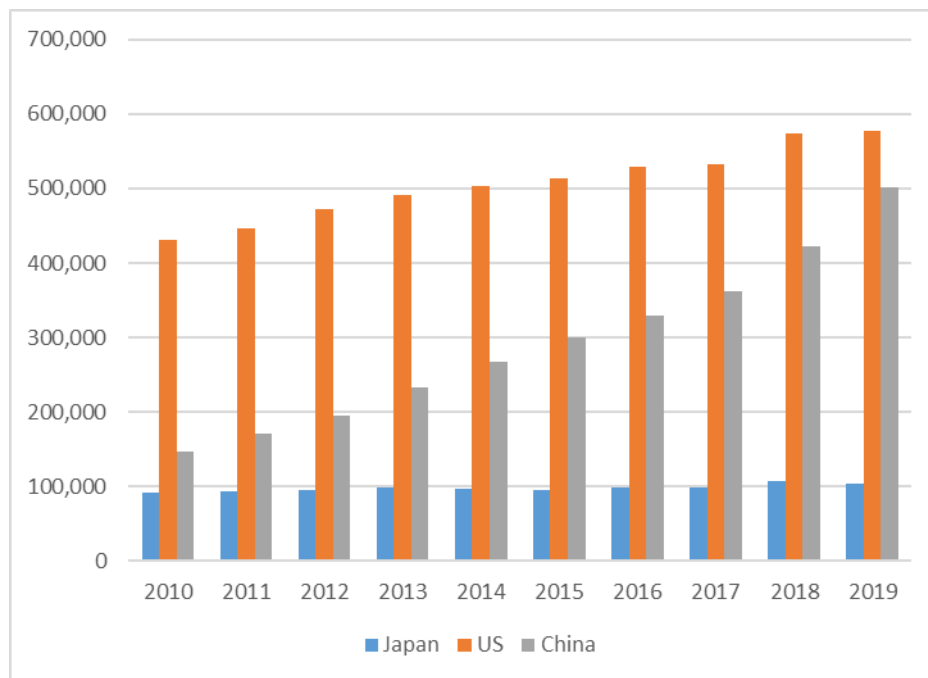
2. 論文情報で見た日米中の科学技術力

ここでは、論文情報を用いて日米中の科学技術力の比較を行う。論文については、その量（出版数）だけでなく、質（被引用回数等）の情報も重要である。ここでは Clarivate 社の Web of Science における SCIE（Science Citation Index Expanded）に収録された論文を用いた分析結果を述べる。なお、SCIE とは、Clarivate 社（旧 Thomson 社）が理工系の学術誌について、学術的に一定以上のレベルを満たしているものを集めたものであり、ここでは査読プロセスがしっかりした質の高い論文情報をベースとした分析となっている。

ここではこの SCIE 論文のすべてから、一人でも日本、米国又は中国に住所を有する著者を含む論文で、出版年が 2010 年～2019 年のものを抽出した。なお、論文データベースには、著者の国籍に関する情報は存在しない。従って、著者の所属機関の所在国の情報から国別の科学技術力を分析することになる。例えば、米国籍の研究者が東京大学に所属している場合は、この研究者の論文は日本論文としてカウントされる。なお、同一の研究者でも所属機関が国を超えて移動する場合は、論文の出版年によって、それぞれのタイミングで所属した機関の所在地としてカウントされる。例えば、中国は 1000 人計画によって、多数の海外の専門家を潤沢な研究資金を与えて、自国に招聘しているが、この研究者については、中国滞在中は、中国の受け入れ機関のアフィリエートになっているはずなので、中国の論文としてカウントされる。

論文総数 8,478,668 件のうち、日本著者のものが 972,721 件、米国著者によるものが 5,070,972 件、中国著者によるものが 2,927,428 件となっている（複数国の共著論文が存在するので、これらの合計が総数と一致しないことに留意）。図 1 はこれを出版年に別に見たものであるが、中国著者の論文の伸びが著しい。2010 年の約 15 万件から、2019 年は 50 万件にここ 10 年程度で 3 倍近く伸びており、2019 年は米国著者論文の約 59 万件に肉薄している。一方日本著者論文は、微増傾向となっており毎年約 10 万件に留まっている。このように論文数でみると、日本は米国や中国の約 5 分の 1 に留まっており、量的な側面では、米中を大きく下回っている。なお、欧州諸国を加えた世界の状況を見ても、中国の論文数の伸びは際立っており、最近では米中の 2 か国が突出して、日本同様、他国がこれらの 2 か国に大きく差をつけられている状況になっている。

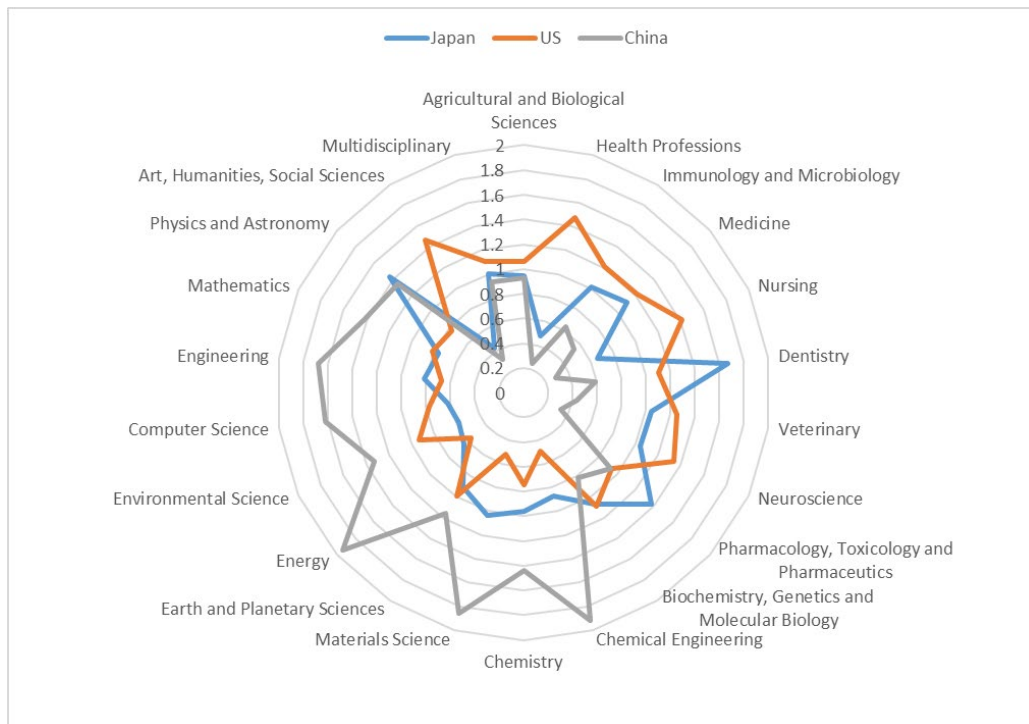
また、引用件数でみた論文の質についてみても、日本の状況は芳しくない。それぞれの出版年において被引用回数でトップ 10% のシェアを見てみると、日本の割合は 7.77% であるのに対して、米国は 11.83%、中国は 12.63% となっている。また、トップ 1% の論文シェアは、日本が 0.66%、米国が 1.21%、中国が 1.15% と、両者とも米中二国の割合を下回っている。論文の引用については、著者の社会的ネットワークの影響を受ける（以前の共著者とか知人の引用割合が高い）ことが分かっており、1 国において論文数の増加は引用数の増加をもたらすことが分かっている。従って、論文数が多い米中 2 か国と比べて、日本著者論文の被引用数が少なくなるのは自然であるが、質の面で日本の論文が特段高いものとなっていないという認識を持つべきである。



(図1)日米中の出版年別論文数（S C I E 論文）

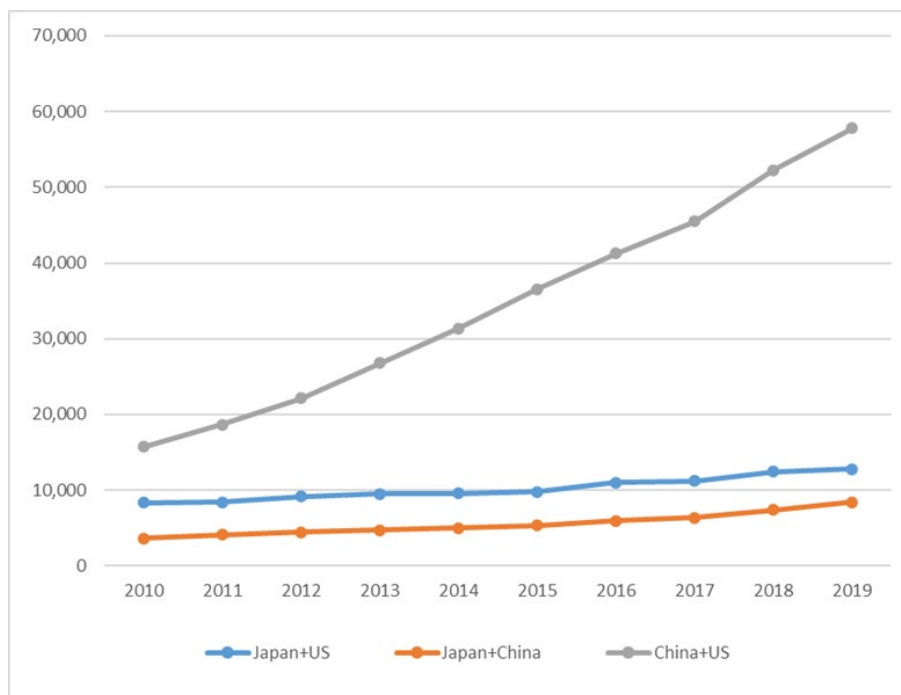
最後に学術領域別に日本の相対的競争力についてみる。ここでは論文数でみるとすべて分野において日本著者の論文数は米中を下回っている。そこで顕示競争力指数（Revealed Competitive Index：それぞれの国の学術領域別のシェアをそれぞれの国の総論文シェアで乗じたもの：個々の学術領域別のシェアが全体のシェアを一致する1を基準とした指数によって相対的な競争力を示したもの）を用いた相対的な競争力を見ることとした（図2）。

日本において競争力が高い分野は、歯科学（Dentistry）や薬学（Pharmacology, Toxicology and Pharmaceutics）、物理学・天文学（Physics and Astronomy）などである。一方で競争力が低い分野は、環境学（Environmental Science）、人文社会学（Arts, Humanities, Social Science）、コンピュータ科学（Computer Science）となっている。ちなみに米国において競争力が高い分野は、医療関係（Health Professions, Nursing）、神経科学（Neuroscience）、人文社会学（Arts, Humanities, Social Science）等であり、中国において競争力が高い分野は、化学関係（Chemistry, Chemical Engineering）、材料科学（Material Science）、エネルギー環境分野、コンピュータ科学などである。なお、中国においては、医療や生命関係の研究が遅れている一方で、上記の化学、材料、コンピュータ関係が非常に進んでおり、偏った論文ポートフォリオを有する。その一方で、日本と米国は比較的バランスが取れた形状となっている。



(図 2) 日米中の学術領域別の論文数顕示競争力指数

また、国際共著についても米中 2 か国に対して日本は遅れている(図 3)。米中の共著論文が 2019 年に約 5.5 万件であるのに対して、日米は約 1 万件、日中は約 6 千件である（日米中の 3 か国共著論文約 2 千件を除く）。また、米中の共著論文は、2010 年の約 1.5 万件から一定して伸びてきている。米国の前トランプ大統領が中国とのデカップリング政策を打ち出した 2018 年以降もアカデミックな米中のつながりは密接さを増しているのである。一方で、日本におけるアカデミックな国際交流は従来から遅れており、世界的な学術的潮流に乗り遅れる可能性がある。経済安全保障の側面からアカデミックな国際交流についても制限を加えるべきという議論があるが（米国については対中政策ですでに実施済）、国際化に遅れているという日本の現状に鑑みて検討する必要がある。



(図 3) 国際共著論文の推移

3. コンピュータ科学論文に関する詳細分析

3-1. テキスト分析による論文内容別競争力の状況

米中と比較した日本の科学技術力の現状を把握するためには、上記の 22 の学術領域の内容についてそれぞれ詳細に検討する必要があるが、ここでは、経済安全保障問題を考えるうえで重要と思われるコンピュータ科学を取り上げて分析を行う。

米国における経済安全保障政策のうち、機微技術管理として輸出管理の対象とされている重要エマージングテクノロジーとしては、先端コンピューティング、先端材料、3D プリンター・ロボティクス、AI、バイオテクノロジー、データ分析、ブレインコンピュータインターフェース、量子コンピュータなどの 14 分野が挙げられている（詳細については別添 1 参照）。

これらの技術のうち、先端材料、3D プリンター・ロボティクス、バイオテクノロジー以外の 11 分野はコンピュータサイエンスの領域に含まれる。また、中国においては 2020 年 12 月施行の輸出管理法に基づいて、より詳細な分類で輸出制限品目としての技術を列挙しているが、その多くはコンピュータサイエンスに関連するものとなっている（別添 2 参照）。従って、この分野における日本の科学技術競争力を分析する意義が大きいと考えた。

前節で用いた論文データベースのうち、コンピュータサイエンスに分類される論文は、163,613 件（全体の 1.9%）、そのうち日本著者の論文数は 11,717 件であるのに対して、米国著者のものは 75,339 件、中国著者のものは 91,639 件である。論文の本数でいうと日本

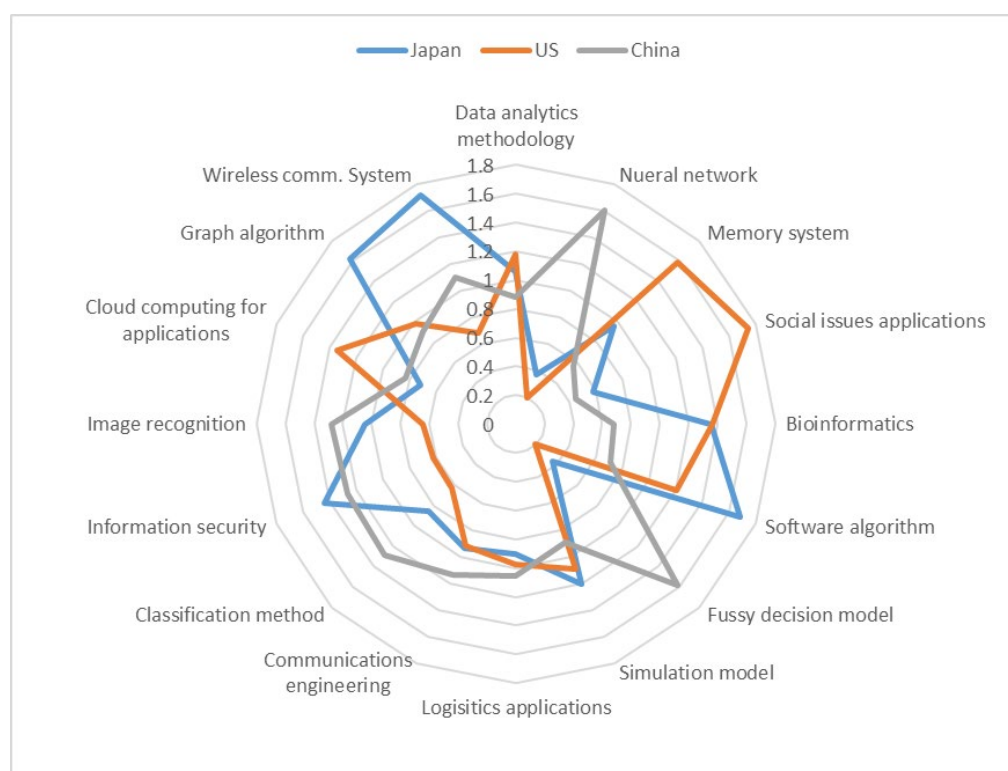
は米中に大きく遅れており、前述した顕示競争力指数でみても日本は 0.624 となり、相対的に競争力の低い分野といえる。

ここではコンピュータサイエンスの内容についてより詳細に検討するために、論文アブストラクトを用いたテキスト分析を行った。具体的には、Word2Vec を用いて、アブストラクト（英文）の情報から単語ごとの分散表現を獲得し、それを文書（論文）ごとに集約することで文書の内容を反映した数値情報（300 次元のベクトル情報）に変換した。その上で K-Means++ 法 (Arthur, 2007) を用いたクラスタリングを実施し、16 に分割されたそれぞれの特徴を示す Word Cloud を作成し、クラスター毎のラベリングを行った。その結果、以下の内容にコンピュータサイエンスを分割することができた（各クラスター毎のワードクラウドについては別添 3 参照）。

1. データアナリティクス (Data analytics methodology)
2. ニューラルネットワーク (Neural network)
3. 画像認識 (Image recognition)
4. 分類問題 (Classification method)
5. ファジー理論の適用 (Fussy decision model)
6. メモリシステム (Memory System)
7. 社会的問題への応用 (Social issues applications)
8. バイオインフォマティクス (Bioinformatics)
9. ソフトウェアアルゴリズム (Software algorithm)
10. シミュレーションモデル (Simulation model)
11. ロジスティック関係応用 (Logistics applications)
12. 通信工学 (Communications engineering)
13. 情報セキュリティ (Information security)
14. クラウドコンピュータの応用 (Cloud computing for applications)
15. グラフアルゴリズム (Graph algorithm)
16. 無線通信システム (Wireless comm. System)

図 4 はこれらの再分類における日米中の論文数に関する顕示競争力指数を示したものである。コンピュータサイエンスの分野において論文数でみると日本の科学技術力は全体的に低いですが、論文シェアによる他国と比較した相対的な強み・弱みを把握することが可能である。日本が比較的強みを持っている分野は、無線通信システム、情報セキュリティ、グラフアルゴリズム、ソフトウェアアルゴリズムの分野である。一方で弱い分野としては、ニューラルネットワーク、ファジー理論の応用、社会的問題への応用の分野である。なお、米国はメモリシステム、社会問題への応用、クラウドコンピュータの応用において強みを持っており、中国はニューラルネットワーク、ファジー理論の適用、分類問題、画像処理に強みを持っている。これらの中国が強みを持っている分野はいずれも機械学習（教師付き学習、教師なし学習の双方）の手法や適用に関するものであり、中国においては AI

関連の研究が活発に行われていることがうかがえる。一方で、バイオインフォメトリクスといった生命科学関係への応用についての科学技術力は弱い。この点は図2で学術領域全体を見た競争力分析で、中国は生命科学分野で弱いことと符合する。



(図4) 日米中の学術領域別の論文数顕示競争力指数(コンピュータサイエンス分野)

これまでの議論は論文の数をベースにした分析をもとに展開してきた。分析の対象とした論文は、Clarivate社のSCIE掲載論文をベースにしていることから、査読システムがしっかりした一定の水準以上にあるものと考えられる。しかし、個々の論文の質には格差があるので、上記の競争力分析にはこの質に関する違いを盛り込む必要がある。また、日本独自の科学技術力という観点では、複数国間の共著関係についても調べる必要がある(上記の分析においては、日本論文は日本著者が含まれている論文ということで、米国や中国における著者との共著論文も含まれている。米国論文は中国論文についても同様)。

まず、質については、論文の被引用を用いることが多い。他の論文により多く引用されているものはそれだけ論文としての質が高いという考え方である。しかし、他の論文の被引用件数はその出版年の影響を大きく受ける。最新の論文ほど他の論文に引用されるチャンスが少なくなり、分野によって異なるが、最も多くの引用を受けるようになるのは、論文出版後5年~10年といわれている。つまり、最新の論文についてはその論文の質を判断するための十分な材料がそろっていない、ある程度過去の論文でないと評価指標として用いることができないという問題がある。また、論文の被引用数は偏った分布になることも知

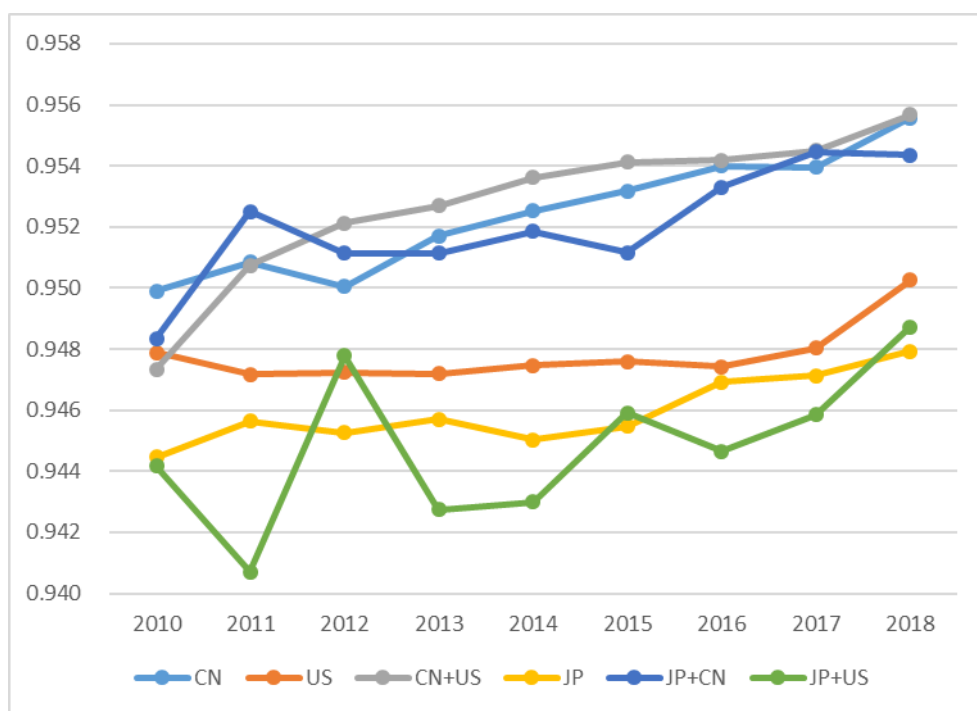
られている。多くの論文は全く引用されないか、ごく少数の被引用数にしかないのに対して、ごく少数の論文は数百件や場合によっては数千件といった大量の論文に引用されることになる。従って、被引用数の平均値は、大量の引用論文をもつ外れ値の影響を受けやすいので、中央値（ミディアン）を見ることが多い。

今回対象としている日米中のコンピュータサイエンス分野の論文について被引用数の中央値を見ると例えば 2010 年に出版された論文については、日本論文は 1 件、米国論文は 4 件、中国論文は 5 件と中国の論文が最も大きくなっている。ただし、被引用数の最大値は米国が 964 年、中国は 337 件（日本は 261 件）と米国の方が高くなっている。論文の引用は著者の主観的な判断に従って行われるものなので、自分の論文（自己引用）の他、自分と関係が深い研究者（同じ研究チームや学会での知人など）の論文を引用する傾向がある。従って、中国のように急速に論文数を伸ばしてきており、かつ全体的な論文数が多い国の論文は、より多くの論文に引用される傾向がある。このように中国論文の被引用件数の大きさはある程度割り引いて考える必要があるが（この点では論文数が多い米国論文も同様）、日本の論文の質がとりわけ高いということでもない。ここではコンピュータサイエンス全体の論文の被引用件数について述べたが、前述した 16 分野のそれぞれについてみた結果についても、日本の論文においてとりわけ被引用件数が高いものは見当たらなかった。

この点について更に詳細に検討するために、個々の論文の意味解析（Semantic Analysis）を行い、日米中のそれぞれの論文の特性についてみた。具体的には、論文の要約文を W2V（Word to Vector、グーグルが開発した分散表現技法）を用いてベクトル化し、論文間のコサイン類似度（正規化されたベクトルの内積）を調べた。コサイン類似度が 1 に近づくほど、その論文ペアは意味的に類似の内容となっていることとなる。更に、この論文について、上記の意味空間における近傍 200 番目の論文とのコサイン類似度を算出した（近傍文書の取得については高次元ベクトル近傍探索 NGT（Neighborhood Graph and Tree、：岩崎，2013）を用い処理を高速化）。このコサイン類似度が大きい論文については、意味的に近傍論文が密集している分野のもの、逆にコサイン類似度が小さい論文は意味空間においてより粗な分布状態の位置に存在する論文であることを示す。なお、文書の分散表現を用いた意味空間における技術分析については、特許情報を用いた研究成果（元橋・小柴・池内，2019）が存在し、ここではその手法を踏襲している。

図 5 はこの結果を論文の出版年別、国別の平均で示したものである。なお、国別の状況については、複数国間の共著の論文が区別できるようにした（日本、米国、中国の 3 か国の著者の共著論文は除く）。全体的に、コサイン類似度が上昇しているのは、時間の経過とともに論文数が増えて意味空間が密になっていることを示している。国別にみると中国単独論文、米中論文、日中論文のコサイン類似度が高くなっており、一方で、日本単独、米国単独、日米論文のものが低くなっている。つまり、中国関係の論文は相互の類似性が高い意味空間において密集した分野に出されており、日米はその逆となっている。特に日

本単独論文は、コサイン類似度が低くなっており、ある意味オリジナリティが比較的高いものとなっているということもできる。技術領域別に見た状況(図 4)では、中国の論文はニューラルネットワークやファジー理論応用モデル、分類問題など機械学習の分野に集中していることを示したが、個々の論文についてもいわゆるホットな領域に集中的に研究が行われていることが見て取れる。



(図 5) 近傍論文 (200 番目) との間のコサイン類似度・国別平均値

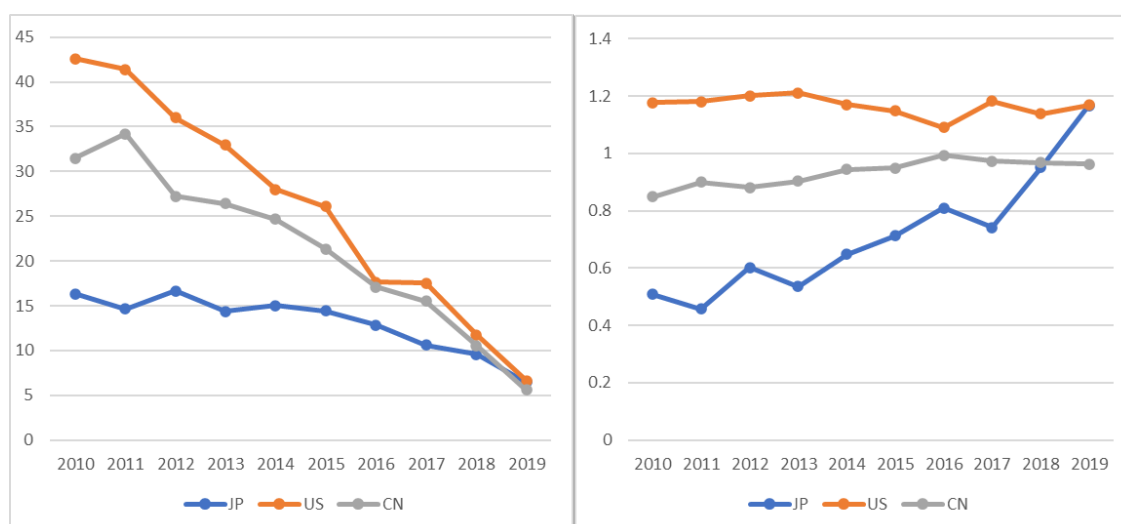
3-2. 国際共著と被引用件数の関係に関する分析

科学技術に関する競争力については論文の量だけでなく、その質についても検討することが必要である。被引用件数が多い著者は、学術的にインパクトの大きい実績を有しており、国際的にも注目を集めている研究者の存在は、優秀な研究者を集めるための求心力となりうる。一方で、インパクトの大きい研究者との共同研究によって、自身の研究成果の質も高まるというスピルオーバー効果を期待することができる。経済安全保障の観点から、国際的な研究者の交流の阻害は、このような国際的な研究拠点の形成やスピルオーバー効果の観点からはマイナスの影響を及ぼす。2019 年までの状況を見ると米中のハイテク技術に関するデカップリングは、国際共著に影響を与えているようには見えない。しかし、今後の両国の対応によってはその状況も不透明である。一方、論文数でみた日本の科学技術力は相対的に低下しているが、米中デカップリングに対する対応を検討する上でも、研究内容の質と国際的なネットワークについて押さえておくことが重要である。

ここでは、コンピュータサイエンスの分野について、研究者単位でみた研究の質（論文

被引用件数)と国際共同研究の関係について見ることにする。これまで日米中の著者を含む論文情報をベースに分析を行ってきたが、被引用件数については、この3か国以外の論文についても見ないといけないので、ここではこれまでの Web of Science データに MAG (Microsoft Academic Graph) を接続したデータを用いた。なお、MAG を用いることのメリットとしては、無料でバルクデータが入手可能であること、また同一著者に関する同定(disambiguation)が行われていることがあげられる。なお、MAG は、論文のカバレッジにおいて Web of Science より幅広く、出版年、著者数、引用情報などについては Web of Science と同様の商用データである Scopus と同様のデータクオリティを有していることが分かっている(塚田・元橋、2018)

具体的なデータの作成方法としては、前節で用いた Web of Science のコンピュータサイエンス分野の SCIE 論文 163,613 件について、DOI を用いて MAG 論文情報を論文単位で接続し、かつ引用に関する情報が利用可能となる論文として 115,373 件を取り出した。図 6 左図は日米中の著者が関与する論文の出版年別の平均被引用件数を示したものである。また、被引用変数は出版年や分野によっても影響を受けるので、右には標準化後の平均被引用件数を示した(出版年別・分野(クラスター分類による 16 分野)別の平均値で割り戻した指標)。絶対数でみると被引用件数は米国、中国、日本の順であるが、標準化された指標でみると、日本の論文の平均的な質は上昇してきており、直近でみると米国と同等のレベルまで上昇している。前述したとおり中国の論文は AI などの特定分野に集中する傾向があり、論文が集中する分野においては総じて論文間の引用が大きくなるが、このような分野間の違いを標準化すると米国の論文の質がそれを上回っていることが分かった。また、日本においては、論文数は伸びていないが、その質については上昇傾向にある。



(図 6) コンピュータサイエンス分野における論文の国別平均被引用件数

次に著者(研究者)別の状況について見る。表 1 は 115,373 件の論文について、それら

の著者の状況について整理したものである。全体で 173,124 名の著者が確認でき、著者タイプとは、個々の著者の所属機関の所在国を示したものである。例えば、日本+米国+中国とは、2010 年～2019 年の間にすべての国における機関に所属したことがある研究者である。標準化後の被引用件数は、上記の論文毎の情報を著者毎に合計したものであり、表 1 はこの被引用件数で降順にソートしている。複数国の機関の所属したことがある著者は全体の約 1.5%と数としては少ないが、相対的に被引用件数は大きく、国際的な流動性と研究の質には正の相関関係があることを示唆している。なお、論文あたりの平均著者数は 4 名～5 名程度で著者のタイプによって大きな違いはない。

(表 1) 著者タイプ別論文情報

著者タイプ	著者数	標準化後被引用件数	論文あたり平均著者数
日本+米国+中国	16	17.73	4.51
米国+中国	2,399	9.15	5.11
日本+中国	161	8.40	4.68
日本+米国	178	4.65	4.47
米国のみ	68,511	2.19	4.79
中国のみ	92,891	1.66	4.48
日本のみ	8,968	1.11	4.16

最後に著者毎の平均被引用件数と国際的な共著関係の関係について回帰分析を行った。データとしては、著者別、論文出版年別のパネルデータを作成し、固定効果モデルを用いて推計を行った（結果は表 2、被説明変数は被引用件数）。国際共著の関係については、何等かの国際共著を行っているか否か（Intl Co-author）、日本、米国、中国のそれぞれの研究者と国際共著を行っているか否か（Japan Co-author、US Co-author、China Co-author）の合計 4 つのダミー変数を作成した。また、論文の平均共著者数（# of co-authors）をコントロール変数としている。なお、被引用件数と国際共著の関係については、それぞれの年における累積データを算出し、固定効果モデルで推計しているので、新たな国際共著関係と被引用件数の変化を見ていることになる。更に、複数国の所属機関を有する著者を除外し、表 1 の米国のみ、中国のみ、日本のみの著者について見ている。

すべてのサンプルを用いた分析の結果、何等かの国際共著の関係は、被引用件数に対して正の影響があることが分かった。また、日本著者、米国著者、中国著者のそれぞれのサブサンプルについて、他の 2 国との国際共著は、やはり被引用件数と概ね正の関係を有するが、米国著者が日本著者と共著を行う場合のみ負で統計的有意となった。表 1 において、日本のみの著者の被引用件数は、米国のみの著者のものの半分程度である。つまり、米国著者にとっては、日本著者と共著関係にあるより、米国内での共著関係の方が被引用

の観点からはメリットが大きいということになる。

更に国別分析結果は R2 乗値を見ると、米国においては 1% であり、国際共著（+平均共著数）は研究者毎の論文被引用件数にほとんど影響していない。一方で、中国においては 16% となっており、米国や日本の著者との共著の影響が大きい。つまり、米中におけるコンピュータサイエンス分野の論文数はほぼ同等であるが、米国における研究は国内の研究者で完結している一方で、中国については国際的な共同研究に依存している割合が高いということを示している。なお、ここでの回帰分析は、必ずしも国際共著→被引用数の増加という因果関係を示したものではないが、当該分野において競争力の低い日本において、国際共同研究を進めることは、科学技術力向上のために必要と考えられる。

（表 2）被引用件数に関する回帰分析結果

	All samples	Japan samples	US samples	China samples
Intl co-author	0.234 (38.24)**			
Japan co-author			-0.230 (6.03)**	0.413 (37.22)**
US co-author		0.260 (14.46)**		0.218 (69.97)**
China co-author		0.430 (27.22)**	0.178 (16.98)**	
# of co-author	0.083 (214.66)**	0.023 (7.54)**	0.058 (94.40)**	0.202 (395.73)**
constant	0.101 (89.06)**	0.072 (54.73)**	0.147 (58.70)**	0.011 (13.22)**
R^2	0.03	0.05	0.01	0.16
N	1,874,070	98,648	753,621	1,021,801

$p < 0.05$; ** $p < 0.01$

4. 論文分析結果の評価とインプリケーション

Web of Science の学術論文情報を用いた日米中の比較を行った結果、論文数でみると日本は米国や中国に大きく水をあけられており、特に中国の論文数の伸びは著しい、また、緊張する米中関係とは裏腹に、少なくとも 2019 年までは日米の共著論文数は伸びてきており、両国のアカデミックな結びつきは強化の方向にあることが分かった。一方で、日本の学術界の国際化は遅れており、国際共著論文の伸びは見られるが、そのペースは遅い。

また、経済安全保障の面から重要と考えられる技術を多く含むコンピュータサイエンスの分野にフォーカスした詳細分析も行った。論文アブストラクトを用いたクラスター分析

によって16の学術領域に分割し、日本において比較的競争力が高い分野は、無線通信、情報セキュリティ、ソフトウェアアルゴリズム等であることが分かった。特にソフトウェアアルゴリズムは中国において相対的に競争力が低い分野なので、中国を念頭においた経済安全保障という面では重要技術といえる。一方で、米国が安全保障の観点から重要技術としているAI・機械学習の分野は、中国著者の論文が大量に生産されており、この分野の研究者の層の厚さをうかがえる。日本として、AI分野においては中国における人材を取り込んでいく方策を考えることが有効であると考えられる。

これらの書誌情報による分析結果は、専門領域ごとの専門家の意見も参照しながら技術力分析を行っていくことが望ましい。日本においては、文部科学省科学技術学術政策研究所において、デルファイ法（専門家に対するアンケート、インタビューを行いながら学術領域ごとの技術トレンドを確定する手法）による科学技術予測調査（S&T Foresight）が定期的に行われている。最新のものは2019年に公表された第11回調査（NISTEP, 2019）であるが、アカデミック研究者を中心とした450名程度を巻き込んだワークショップや6,000名以上の参加によるアンケート調査の結果をベースに7つの技術分野ごとの技術予測がまとめられている。この報告書においては、技術予測を主眼として、技術分野ごとの詳細な技術項目ごとの重要性和競争力に関する今後の見通しについて取りまとめられている。

デルファイ法の調査においては、「健康・医療・生命科学分野」、「農林水産・食品・バイオテクノロジー分野」、「環境・資源・エネルギー分野」、「ICT・アナリティクス・サービス分野」、「マテリアル・デバイス・プロセス分野」、「都市・建築・土木・交通分野」、「宇宙・海洋・地球・科学基盤分野」の7つの分野において、合計702の科学技術トピック（例えばエネルギー分野における「太陽熱等を利用した水素製造技術」、データサイエンスにおける「非定形の文章・会話から所望の情報を抽出できる自然言語処理技術」など）が設定されている。それぞれのトピックについて、重要度、国際競争力、科学技術的実現の見通し、同実現に向けた政策手段、社会的実現の見通し、同実現に向けた政策手段について調査されている。

ICT・アナリティクス・サービス分野は、全体的に国際競争力のスコアは低く、前述した科学論文を用いた分析結果と整合的な結果となっている。ただし、その中でも日本の国際競争力が強い分野としては、「ネットワークインフラ」、「IoT・ロボティクス」、「コンピュータシステム」、「インタラクション」といった基礎に近いトピックであり、また、ロボット関連のトピックは特に多い傾向にあるとしている。より詳細に技術分野を見るとネットワークインフラについて、日本の学術界は光通信ネットワークに高い競争力を有している。論文情報分析の結果として、日本が競争力を有する分野として、無線ネットワークやグラフ理論を含んだソフトウェアアルゴリズムが抽出されたことと符合している。

ただし、ロボティクスについては、前節における科学論文分析においては、コンピュータサイエンスではなくエンジニアリングに分類されるものが多いと考えられ、論文情報分

析からは抽出できなかった。コンピュータサイエンスは、ロボティクスの他、材料やライフサイエンス分野など幅広い分野との学際的な研究が進んでいる分野なので、分析対象とする論文情報の抽出方法について更なる検討が必要である。

論文情報による日本の科学技術力は主に学術的な面から評価してものであり、経済安全保障の観点から評価するためには、その評価軸を明確化する必要である。政府が目標として掲げている「研究開発強化等による技術・産業競争力向上や技術流出の防止」はより実用化に近い産業技術を含むものであり、科学、技術、産業を含めたイノベーションプロセス全体に関して評価する必要がある。この点については次節で論じることとする。

また、安全保障という観点からは、デュアルユース、つまり軍事転用が可能なものとして、機微技術分野を特定するという考え方もある。例えば、ブルッキングス研究所の技術予測は、様々な技術のエキスパートの意見を集約する形態で機微技術の特定を行っている(O'Hanlon, 2019)。具体的には、軍用技術を「センサー」、「コンピュータ通信技術」、「弾丸・戦闘機技術」、「その他兵器技術」に分類しており、それぞれの分野の詳細技術毎に 2020 年～2040 年の間の進歩について、moderate, high, revolutionary の 3 段階で評価している。

特に、revolutionary については今後 20 年間で当該分野の技術進歩によって、現状の技術が完全に陳腐化する可能性がある技術分野で、安全保障上特に注視する必要がある分野である。Revolutionary には、Computer hardware, Computer software, Offensive cyber operation, System of systems/Internet of things, Artificial Intelligence/Big data が該当し、「弾丸・戦闘機技術」では Robotics and autonomous systems が該当している。逆に、センサー技術や Robotics and autonomous systems 以外の「弾丸・戦闘機技術」、「その他の兵器技術」においては、その技術進歩は moderate か high とされている。

このレポートにおいても、軍用技術との関係で注視すべき技術領域については、コンピュータ通信技術に集中しており、その背景としてムーアの法則に従ったコンピュータ性能の向上とビッグデータの収集・活用、AI・機械学習の進展（ソフトウェア技術の向上）を指摘している。また、IoT の進展によってさまざまなシステムが接続され、システムの複雑化を招く一方でサイバー攻撃などに対するシステムの脆弱性についても指摘されている。そのための system of systems に関する技術について、安全保障上の重要性が高まっている。

科学論文情報による分析結果でも述べたように、AI・機械学習の分野は米国において盛んにおこなわれているが、中国はその競争力で米国を猛追しており、画像認識等の一部の分野においては米国を凌駕しているものもある。AI・機械学習は民生需要も含めて様々な分野で応用可能な General Purpose Technology である。従って、経済安全保障によって重要な AI・機械学習技術とは何なのか？それが特定できたとしたら、機微にかかる技術として国境移動に対する制限を設けるためにはどのような方策がありうるのか（データに対する制約、人材に対する制約等）検討する必要がある。この点については次章以降で検討す

ることとする。

5. イノベーションの質的变化と経済安全保障の見方

5-1. 米中ハイテク摩擦の背景としてのサイエンス経済の進展

一国の経済力や産業競争力が外交上有意な立場につながり、それがひいては諸外国との間の安全保障の砦となるというように、経済安全保障の問題を広くとらえようとすると、日本のイノベーションシステムをどのように考えるかという論点から解きほぐす必要がある。また、経済安全保障上重要な技術が特定できたとして、その技術流出をどう防ぐかといった観点からもイノベーションの成り立ちについて押さえておく必要がある。技術は単独でイノベーションとして結実するのではなく、複数の技術が組み合わさり、また企業間や産学間の連携といった様々なプレイヤーで構成されるシステムの中で生まれるものであるからである。

国レベルのイノベーションシステムの特徴に関する比較分析の結果によると、日本のイノベーションシステムは大企業を中心とする自前主義が特徴であるといわれている。その背景には、安定的な労使関係やメインバンク制などの長期的視点からの資金調達、長期的な企業間取引慣行などの日本に特徴的な経済システムの存在がある。また、日本企業が得意としてきた競争力のある製品を作り出す「モノ中心モデル」の原点は現場におけるモノづくり能力にある。自前主義で現場におけるカイゼンを続け、生産性の高い製造技術で世界市場を切り開いてきた。また、新たな技術を欧米企業から取り入れて、それを製品として具体化する開発能力によって輸出競争力を高めた。しかし、日本企業が技術的にも世界のフロンティアに立ち、逆に新興国企業に追い上げられる立場となった。自ら新しい技術を切り開き、新たなビジネスモデルを構築するためにはオープン戦略が必要となる。

一方で世界的なイノベーションを巡る動向に目をやると、1990年代後半から急速に広まったインターネットや2003年のヒトゲノムの解読と遺伝子機能に基づく医薬品開発など、科学的知見をベースにした画期的な技術が経済社会に大きな影響を及ぼすようになった。つまり、イノベーションのサイエンス化、サイエンスとイノベーションの協創が見られるようになったのである。筆者は、この工業経済からサイエンス経済への転換点を21世紀初頭とみているが、2000年に入って、モバイルインターネット技術の確立、ヒトゲノム構造解読、量子コンピュータのプロトタイプ開発など、米中の重要技術リスト項目の多くに科学的なブレイクスルーがみられた。また、基礎研究とイノベーションの近接化は、データアナリティクスの高度化、特にAI・機械学習の進展によって更に加速する様相を呈している。

現場のモノづくり力を基礎とした日本企業の競争力は、産業革命から続く工業経済時代のイノベーションモデルに基づくものである。ここでは、個々の製品を開発するプロダクトイノベーションとその製品の品質を損ねず低価格で生産するプロセスイノベーションの組み合わせで他社との差別化を可能とする。これらのイノベーションのプロセス全体は、個々の企業が有する技術力、知財、関連企業とのネットワークによって効率的にマネージするこ

とができる。つまり、自社（及び関連企業）で完結しており、ベンチャー企業や大学等の他の機関を巻き込んだオープンイノベーションを必要としない。日本企業はエレクトロニクス製品や自動車などの分野で、高品質で低価格製品を提供することで世界市場を席捲した。

しかし、これらの日本企業の「モノ中心モデル」は韓国や中国の技術的キャッチアップによって、立ち行かなくなった。半導体や家電製品をはじめとしたエレクトロニクス製品については、世界市場で日本企業の見影はない。自動車については、技術的キャッチアップが比較的難しい統合型（インテグラル）製品アーキテクチャの特徴を有するので、日本企業は製品競争力を有し続けている。しかし、車体の駆動構造が比較的簡単で部品点数が圧倒的に少なくなる電気自動車の分野では、日本企業もエレクトロニクス製品の二の舞に陥る可能性が高い。

このような状況のもとでの 2000 年前後から始まったサイエンス革命（インターネット、ヒトゲノムの解読等）とそれに伴うサイエンスとイノベーションの協創は、日本企業が「モノ中心モデル」から転換し、オープンイノベーションやエコシステムをベースとした「ソリューションモデル」を実現する礎となっている。つまり、工業経済時代のイノベーションモデル（プロダクトイノベーション＋プロセスイノベーション）とことなり、サイエンス経済時代のモデルは、サイエンスイノベーションとビジネスイノベーションの組み合わせによって成立する。サイエンスイノベーションは、科学的知見を新しい製品やサービスの元となる技術要素の転換するプロセスをいう。また、ビジネスイノベーションはこの技術要素を具体的な製品・サービスとして提供し、イノベーションを結実させる過程である。

例えば、医薬品の分野においては、工業経済時代は、製薬企業が自社のリソースで新しい医薬品候補化合物を探索し、生物実験や治験によってそれを新薬として開発する作業を行っていた。これがサイエンス経済時代においては、ゲノム科学によって、特定の疾病やその治療・予防のメカニズムの解明が進むことで、新薬開発の試行錯誤のプロセスをより科学的で合理的な仮説の下で行うことが可能になった。ただし、ゲノム科学の研究は、大学等の公的研究機関における科学的研究をベースに進んでいる。従って、製薬企業としてはこれらの知見を新薬開発に取り込むことが必要である。しかし、企業においては科学的知見をそのまま自社の研究開発に取り込む能力に欠けるので、大学などの研究者がスピンアウトして、バイオベンチャー企業が生まれ、製薬企業はこれらのベンチャー企業と協業するスタイルが一般的になった。つまり、この場合のベンチャー企業が上記のサイエンスイノベーションを、製薬企業がビジネスイノベーションを担っていることになる。重要なのは、イノベーションは製薬企業の自前主義によって行われるのではなく、ベンチャー企業（あるいは大学）との協業、つまりオープンイノベーションによって完結する点である。

米中間のハイテク貿易摩擦は、AI・機械学習や量子コンピュータといった先端技術を含むものになっており、また大学等のアカデミック人材を通じた技術流出が問題視されているのは、このサイエンスとイノベーションの距離が縮まっていることの現れである。これは 1980 年代における日米貿易摩擦における様相と比較すると理解しやすい。当時は、日本企

業の半導体や自動車、産業用ロボットといった製品の米国におけるシェアが高まり、米国内で日本企業はダンピングなどの不公正な商取引を行っているのではないかという批判が高まった。また、超 LSI 半導体技術補助金などの当時通産省からの補助金が公正な貿易取引条件を歪めているということも指摘された。それに対して、日本としては業界における輸出自主規制などで事態の収束を図ったわけであるが、同時に日本の技術ただのり論（日本企業は米国における先端技術にフリーライドして商品化しているという論調）に対応するために日本政府は基礎研究重視の、例えば世界的な Center of Excellence を設立して世界の科学技術の進展に貢献するといった政策を打ち出した。これは、科学と産業技術は異なるものであり、科学→産業技術→産業化というイノベーションのリニアモデルに立脚したものといえる。

しかし、これまで述べてきたように、科学→産業技術→産業化のサイクルが短縮化され、場合によっては、サイエンスとイノベーションが相互に影響しあう協創（コエボリューション）の形態に進むようになってきた。その結果として、戦略的貿易理論が示す産業技術の囲い込みが自国の経済的厚生を高めるというというロジックが、科学の部分にまで及ぶようになったのである。

また、科学的進歩は、斬新的な技術進歩ではなく、イノベーションのプロセスを一新させるような革新的な変化を引き起こす。前述したヒトゲノムの解読は、製薬企業の新薬の研究開発プロセスを、自社の化合物ライブラリーから試行錯誤で探索する形態から、大学等における遺伝子機能に関する知見等を活用して、合理的に新薬を開発する（Rational Drug Development）プロセスに変化させた。また、AI やデータサイエンスの進展は、自動運転による自動車技術、医療現場での画像診断システム、製造現場におけるロボット技術など幅広い分野の革新的なイノベーションを引き起こしている。この影響は、軍用技術にも及んでおり、前述したブルッキングス研究所における軍用技術に変革をもたらす領域（Revolutionary field、Computer hardware、Computer software、Offensive cyber operation、System of systems/Internet of things、Artificial Intelligence/Big data 及び Robotics and autonomous systems）についても、同様のコンセプトから抽出されたものである。

その結果、昨今の米中ハイテク貿易摩擦は、量子コンピュータのように産業技術として確立されていない超最先端の科学分野も含めて保護すべき対象としてリストアップされているのである。このような貿易や投資に対する制限措置が取られている分野が科学の領域にまで及ぶことによって、日米貿易摩擦が企業レベルの競争力（産業競争力）の議論に終始していたのに対して、米中ハイテク摩擦は大学等における研究成果の取り扱いも含んだものとなっている。大学等における研究成果は公的研究資金をベースとしたものが多いので、経済安全保障の観点からは、国の科学技術政策のあり方にも直結する問題となっている。

5-2. イノベーションプロセスの変化とその影響

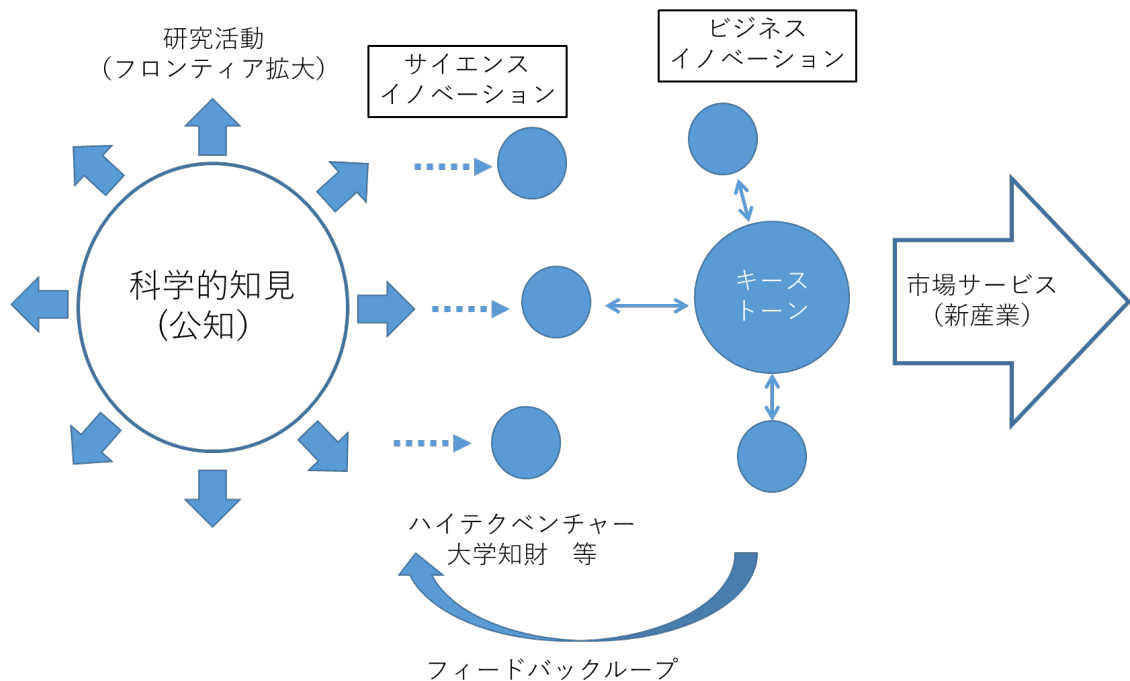
経済安全保障を War by other means や Economic Statecraft（Blackwill and Harris, 2016;

国分, 2020) といった幅広い観点からとらえると、科学技術政策も一つの相対的な国力、競争力を高めるための means として捉えるということになる。つまり、政策目標を、自国の科学技術力向上といった絶対的な尺度ではなく、自国の経済力向上のための手段であり、かつその活動のコントロールによって他国を利さないこととして捉えるということである。

一方で、アカデミックな科学研究においては、その研究成果を科学論文という形態で公開することが規範となっている。科学研究の過程で得られたデータや研究試料についても、なるべく一般に公開し他の研究者による利用を促すオープンサイエンスの考え方が、科学の発展によって重要であるという認識が共有されている。先端的な世の中にとっての新しい知見は、過去の知見をベースとして得られるものであり、その探索について世界の研究者がしのぎを削ることによって進歩するものであるからである。

また、科学的活動は、一国の経済力や国力とは切り離されたものとして考えられてきた。イノベーションのプロセスとして科学→技術・産業（イノベーション）というリニアモデルで考えると、科学の部分、いわゆる基礎研究に対する投資は、他社に対するスピルオーバー効果が大きく、経済外部性が大きいとされている。このような投資については、Social Rate of Return（社会的投資効率）に対して、Private Rate of Return(私的投資効率)が小さくなり、市場においては過少投資となる。従って、公的な資金が投資されて、私的な利益を目的としない大学等のアカデミック機関の活動となっている。

しかし、前章で述べたように、この科学とイノベーションの距離が短くなり、エコシステムの中での協創によってイノベーションが生まれるというモデルが広がることによって、先端科学に関する競争力が、経済的パフォーマンスをベースとした国力、外交力を左右するという見方につながっている。つまり、下図のサイエンス経済時代のイノベーションプロセスにおいて、研究活動による新たな科学的知見がサイエンスイノベーションとビジネスイノベーションによって新しいサービスや新産業の創出に対して重要な役割を担っているということである。米中におけるハイテク技術摩擦はこのコンテキストで理解することができるが、問題はオープンサイエンスを規範とする科学研究に関する国際的取引をコントロールすることによって、自国の経済力についての相対的な優位性を築くことができるかという点である。この問題は次の2段階に分類することができる。一つは、「アカデミックな基礎研究をコントロールすることができるかどうか？」という問題で、もう一つは、「科学的な知見を産業技術のシーズとして取り込むサイエンスイノベーション、あるいはビジネスイノベーションのプロセスをコントロールできるのか？」といった問題である。



(図 7)サイエンス経済時代のイノベーションプロセス

最初の点については、何等かの先端技術についての研究を行う以上、特に公的資金による研究成果の場合、その結果を科学論文として公表することが前提となる。一国としての相対的な科学技術力向上という観点からは、経済安全保障上、重要と考えられる分野においては研究活動を活発化させる必要がある。その結果としての科学論文は、科学的知見に関する客観性ととともに再現性が問われるので、論文として発表される以上、論文を介してその情報は内外に周知されると考えるのが自然である（現在のグローバル化社会において国内のみの開示ということの実現性はない）。また、先端的な科学研究については国際的な最先端の研究成果を取り入れて、世界初の研究成果を目指していく必要がある。自身の研究成果を論文として世界的に公表することで、同じ分野で先端的な研究活動を行っている研究者との交流が生まれ、そこから次の画期的な研究につながると考えられる。情報をクローズにすることは、例えそれができたとしても、逆に世界の研究潮流から遮断され、1国としての相対的な科学技術力の低下を招く可能性が高い。また、世界から一流の研究者を集めるということも困難になる。

また、大学等の公的研究機関における研究活動は、学術的な新規性、つまりこれまで分かっていない科学的なメカニズムの発見（アカデミックネットコントリビューション）を目的とするので、そのテーマは研究者の数だけ存在するといっている。大きな研究領域としては、第2節の分析結果のように分類わけできるが、個々の研究者のテーマはそれぞれ異質性があり、かつそれぞれのテーマは相互連関が存在する。異なる分野の研究者が共同で研究を行うことで、新規性の高い研究成果が得られる可能性が高いので、研究者間のネ

ットワークも密である。もちろんこの研究者間ネットワークは国境を越えて広がっている。更にその研究内容やネットワークは日々更新されるので、特定の研究者や細かい研究領域を特定して、それらの研究者、領域を国内のネットワークから排除するという考え方は非現実的である。

次の「科学的な知見を産業技術のシーズとして取り込むサイエンスイノベーション、あるいはビジネスイノベーションのプロセスをコントロールできるのか？」について考える。ここでのポイントはサイエンスイノベーション→ビジネスイノベーションというリニアモデルで進むのではなく、ビジネスイノベーションにおけるエコシステムの重要なコンポーネント(ニッチプレイヤーや重要な知財等)として、サイエンスイノベーションが生まれるというフィードバックループの存在である。つまりこの両者は最終的な市場の動向に対応して一体的に考える必要がある。

何等かの形態でサイエンスイノベーションが実現した段階において、その前段の一般的な科学的知見(科学研究活動の成果)はかなり特定される。従って、ここで経済安全保障上重要なイノベーションの中間的なアウトプット(ベンチャー企業、人材、知財など)を特定して何等かの措置を講じることの可能性が存在する。更にここでは2種類の措置について考える。一つはサイエンスイノベーションとして結実した時点での対策。つまり、経済安全保障上重要と考えられる技術シーズを貿易制限や投資制限などの措置によって国外に流出しないようにする対策である。もう一つはビジネスエコシステムのフォーメーションに関する措置。最初の点と重複するところがあるが、エコシステムのアウトプットである新しい製品・サービスからの収益化をなるべく自国(企業)のものとする方策である。もう少し具体的にいうと自国企業を中心とする(キーストーン企業とする)エコシステムの構築に対する政策的支援を行う、ということである。

ただし、何度も強調するようにサイエンスイノベーションとビジネスイノベーションはフィードバックループによって一体的なものと考えべきであり、サイエンスイノベーションが結実する段階において、すでにビジネスイノベーションとしてのエコシステムや最終的なアウトプットが見えている状態が想定される。例えば、ハイテクベンチャーのアライアンス(エコシステムへの参加含む)活動を安全保障の観点から制限するとしたら、それなりの補償を考えないといけない。サイエンスイノベーションの段階での安全保障対策は、特許等の知的財産権として技術の範囲が明確化されており、かつその事業化プラン(ビジネスモデル)が明確化されていないものを対象とすることが現実的である。

同じ理由によって、ビジネスイノベーションの段階においてはエコシステムができあがった、あるいは立ち上がりつつある段階でビジネス上の制約を加えることは現実的ではない。従って、サイエンスイノベーションをベースとしてビジネスが立ち上がりつつある段階において安全保障上問題となりうるものについて予見的な対策が必要となる。

これまでの議論は、サイエンススペースの技術シーズの事業化がかなり早い段階で予見できることを前提としている。しかし、現実的にはそれが非常に困難である。ここでベンチ

チャー企業シャフトの事例について取り上げたい。シャフトは東京大学発の人工知能とロボティクスの技術ベースのハイテクベンチャーである。2013年にGoogleXに買収されたが、その前に国内のベンチャーキャピタルや産業革新機構等から資金調達ができなかったということで話題となった。公的研究資金によって開発された技術が、国内における目利き人材がいなかったことによって、海外企業の手に移ったという観点からマスコミが取り上げたのである。もし、この技術をGoogleが事業化し、事業収益を上げることができたとすると、日本における科学技術投資が米国経済を利する、つまり日本の米国に対する相対的経済力を低下させる方向に働いた、ということで広い意味での経済安全保障の面では投資規制対象とすべきであったのではないかと議論もありうる。

しかし、結果としてGoogleは当該技術を事業化することはできず、当該事業の売却対象を検討したが、売却もかなわず事業終了、従業員の社内配置転換で対応したとのことである。もちろん、これはあくまで結果論であり、かつGoogleはシャフトを含めたロボティクス事業の活動によって、他の事業分野とのシナジー効果によって事業収益を上げることができたのかもしれない。ただ、ここで言えることは先端分野の事業化は常にリスクがつきまとうものであり、更にその目利きというのは言葉で言うほど簡単ではないということである。つまり、事業化前の技術を予防的な観点から制限することは困難であり、むしろその制限措置を加えることのダメージの方が大きい場合が多い。先端技術にかかる輸出制限や投資規制は、安全保障との関係が明確に立証できるものに対して限定的に行うことが必要と考える。

更に、この目利きを行うのは人材である。前述したように、サイエンス経済において国の競争力の源泉となるのは、このような人材プールとエコシステムの実現するための制度的な環境である。人材としては、サイエンスイノベーションにおいて、科学的知見をイノベーションのシーズとして発掘する目利き能力、ビジネスイノベーションについては、これらの技術シーズをオープンイノベーションや多数のプレイヤーを巻き込んだエコシステムを形成しながら社会実装することができるネットワーク人材である。

サイエンスイノベーションに必要な人材は、昨今の大学発ベンチャーの隆盛を見るように、大学等の研究部門においても見られるようになっている。図5においては、サイエンスフロンティアの拡大を担うアカデミック部門を中心とした研究者においても、図5のイノベーションプロセス全体を見通して、研究活動を行うことができる人材も増えてきている。また、技術シーズの経済的価値を判断する目利き人材はベンチャーキャピタルに存在する。これらの人材を国全体として育成し、経済安全保障の観点から個々の技術シーズについての目利き、必要な対策にインボルブする仕組みが必要となる。

6. 政策インプリケーション

これまでの議論をベースに経済安全保障の観点から、日本における政策について考えてみたい。まず、科学技術政策についてであるが、科学的知見がイノベーションの源泉とし

て重要となるサイエンス経済において、基礎研究に対する公的研究投資を充実することが必要である。日本における科学技術予算は、ここ 20 年間で 40% 増（2000 年と 2019 年の比較、以下同様）となっているが、これは他の OECD 諸国である米国の 110% 増、ドイツの 110% 増、英国の 80% 増、韓国は 5.6 倍（460% 増）と比較して低い伸びにとどまっている（NISTEP、2021）。ちなみに、中国は 18.6 倍となっており、総額で既に日本を上回っている。

基礎研究に対する研究開発の成果である科学的知見は、研究論文の形式で公開されることが一般的である。その内容については、世界的な研究者による研究成果としてアクセスすることは基本的に可能である。また、実用化するためのノウハウが必要な産業技術と異なり、研究成果は自然科学等の原理、原則に踏み込んだ内容のものであり、科学論文における客観性、再現性等が確保された状態での情報入手が可能である。いわゆる形式知としてそのまま理解、実証可能なものであることから、自国におけるアウトプットを高める必要があるのかという議論がある。

しかし、サイエンス経済で重要なのは、公知の科学的知見ではあるが、よりフロンティアに近い領域、つまり日々ダイナミックに研究が進んでいる内容の知見である。この情報をいち早く入手し、サイエンスイノベーションにつなげていく活動には、やはり地理的な近接性が重要である。また、研究活動やその中からイノベーションを担う人材を育成するという意味でも日本において先端研究の拠点を設けることの意義は大きい。

第 2 章で見た科学論文による書誌情報分析によると、米中と比較した日本の相対的な競争力は低下している。これは日本における基礎研究に対する公的資金の伸びが低迷している、つまり科学研究のインプット面から説明できる。また、米中のハイテク摩擦の激化とは裏腹に、この両国は先端研究で密接に関係しており、国際化という面でも日本は遅れている。従って、先端科学技術分野においては、世界から優秀な研究者を集める意味でも公的研究投資の充実が必要であり、米中で行っているアカデミック研究におけるデカップリングを行うような状況にはない。むしろ国内研究者の海外派遣や海外研究者の招聘等の国際交流事業を充実させることが必要であると考ええる。

公的研究投資を行う分野については、バランスの取れた資金配分を行うことが望ましい。第 2 章の日米中の競争力比較分析によると、研究領域において日米は相対的にバランスのとれたものとなっているのに対して、中国はコンピュータ科学、エネルギー関係、エンジニアリング分野等が偏重される傾向にある（一方で、ライフサイエンス分野が弱い）。他国と比較して相対的な科学技術分野の存在は、その結果として経済安全保障上の脆弱性として影響することがありうるので、すべての分野において一定の科学力を有することが望ましい。

その上で重点的に支援すべき研究領域としては、科学的知見の応用に関する汎用性・一般性（Generality）に注目すべきであると考ええる。例えば AI・機械学習は General Purpose Technology として幅広い分野に活用されている。当該分野を中心としてデータサ

イエンスに関する領域は、他の科学技術領域とも密接に関係しており（例えば、バイオインフォマティクス等）、当該分野における科学技術人材を育成するという観点からも重要である。なお、データサイエンスの分野で日本が競争力を有しているのは、スマートファクトリーや自動運転などのリアルデータを活用する領域である。ただし、リアルデータを保有しているのは企業であり、これらの企業は競争戦略上、データの囲い込みによる自社利用を基本としがちである。従って、産学連携を支援することで、データの特性に応じた機械学習手法の研究等のより基盤的で科学的な研究につなげていくことも重要である。なお、AI・機械学習の学術的な競争力について、日本は米中に大きく後れをとっている。従って、このような分野については国際化を進めて、日本の研究者が世界で最先端の研究に触れられるチャンスを増やすことが重要と考える。

また、科学的な研究と実用化の距離が近い領域についても、サイエンスイノベーションの推進も含めた重点的な支援が必要と考える。具体的にはライフサイエンスに関する各分野が考えられる。また、アカデミックな研究現場でも、エンジニアリング（工学）関係は企業における実用化研究や開発と深い関連を有している。このような分野においては、大学における研究が、ビジネスイノベーションによりエコシステムを通じての実用化に直接つながる可能性がある。従って、これらの領域における研究の推進は、サイエンス経済時代で重要となるイノベーション人材の育成という観点から重要である。

ただし、実用化に近い研究領域においては、アカデミックな研究といえども安全保障に関する検討をより慎重に行う必要がある。大学における特許や大学発ベンチャーといったサイエンスイノベーションを通じた技術シーズが生まれやすい領域である。特許等による知的財産権の保護とノウハウ（トレードシークレット）を組み合わせることで、技術保護の必要性について注意が必要である（産学連携による成果の場合は、相手方の企業との取り扱いに関する協議も必要）。各大学には大学研究の知財化や産学連携に関する部門が存在するが、それぞれの大学としてのポリシーの共通的な考え方について、国レベルでガイドラインを示すことが必要と考える。

図7でサイエンスイノベーションとビジネスイノベーションについては基本的に企業活動に関する領域となる（サイエンスイノベーションに関する大学等のアカデミック部門に関する部分は上記の記述のとおり）。主に公的研究資金によって研究活動を行っているアカデミック部門と異なり、企業におけるイノベーション活動は主に民間の企業活動の一環として民間資金で賄われている。企業はその株主をはじめとしたステークホルダーの利益最大化を目的として行動しているので、政府介入は国の安全保障上の問題等のその合理性が明確に示される場合にのみ可能となる。現行の制度としては、外国為替及び外国貿易法（外為法）に基づいて、安全保障の観点からの投資や貿易に関するルールが定められている。ただし、米国における ECRA などの輸出管理規定は、米国においてビジネスを行っている日本企業の中国企業との関係にも適用される可能性がある（第3国適用）、日本企業は国内ルールだけでなく、グローバルビジネスにおいては国外の規制の影響を受ける

ことにも留意する必要がある。

このような状況において政策的に重要なのは、安全保障の観点からのビジネスの予見性を高めることである。高齢化による人口減少で国内マーケットが縮小する中、ビジネス拡大のためには企業活動のグローバル化は避けられない方向性である。昨今の米中摩擦は日本企業にとっても大きなマーケットにおけるビジネス環境の不確実性を増大させるものとして、影を落としている。日本政府としては、まず、国内ルールの整備として、外為法上問題となりうる技術分野を明確化することが必要である。また、米中における貿易・投資規制の動きに対しては、米中以外の第3国との連携やマルチのレジーム（WTO、各種地域協定）を活用した米中への影響力の行使が必要となる。特に中国において見え隠れする国際的に許容できるルールを超えて運用される強制技術移転や技術情報に対する政府アクセスへの対応は特に重要であり、米国の協力のもと対応を進めていくことが必要であろう。同時にデータサーバーの国内設置規制への対応、情報セキュリティの強化（技術面、運用面）、とともに、米中等の国外の各種規制に関しては、民間企業に対する情報収集・提供を行うことが必要である。

企業サイドについて見ると、日本企業は海外進出の歴史は古く、世界各地に拠点を設け、グローバル企業と呼べる企業は多い。しかし、その多くは製造拠点としての現地法人であり、研究開発に関する国際化は欧米と比べて遅れている（Motohashi, 2018）。特に海外市場をターゲットとしたビジネスイノベーションを実現するためには、現地法人とのアライアンスを組むことが重要である。更に、米中の技術的な摩擦が高まる中で、かつコロナショックによって先行きが不透明になる中、日本企業がイノベーションに関するエコシステム形成についてグローバルレベルでの活動にどこまで踏み出すことができるかについては疑問が残る。特に米中摩擦の関係では、ルールが日本の外で決まっていくので、事前リスクを洗い出して対応策を準備する通常のリスクマネジメントのみでは不十分である。むしろ、不確実性をそのものとして受け入れて、事後のダメージを最小化するレジリエンス的な発想が必要である。いずれにしても、サイエンスベースのイノベーションが進展する中で、グローバルにエコシステムが形成されるスピードに乗り遅れることは、日本企業のイノベーション、海外企業との競争という観点からは致命的となりうることに注意すべきである。

上記のように米中間のハイテク摩擦が過熱する中で、先端技術とイノベーションの距離が縮まり、国際的なサイエンスイノベーション、ビジネスイノベーションに関する競争が激化する中で、官民両面においてインテリジェンス機能を充実させることが必要となっている。外為法等における安全保障上問題となる技術取引に関する制限措置を有効に機能させ、かつより幅広い経済安全保障の観点から必要となる対策を実現するためには、科学研究の動向やサイエンスイノベーションに関する動きをモニタリングする調査機関の設置が必要となる。科学技術イノベーション政策に関しては、総合科学技術イノベーション会議が存在し、また科学技術に関する動向や予測は文部科学省の科学技術・学術政策研究所が

調査を行っている。しかし、安全保障の観点からの検討やサイエンスイノベーションとの関係も含めた経済活動との関係に踏み込んだ分析については不十分である。経済産業省関係の研究機関も巻き込んだ、政府全体としてのシンクタンク機能が必要であると考え。

また、企業サイドにおいてはレジリエンス的な発想も含めたリスク対応能力を高めることが重要である。また、米国における貿易・投資規制のように第3国リスクに対する対応としては、国際的なネットワークを構築して企業活動に大きな影響を与える規制制度等各種要因についての情報収集を継続的に行い、ビジネス上のリスク分析に生かす機能を設けることが必要である。日本企業は、欧米企業と比較してこのコンペティティブ・インテリジェンスに対する認識が遅れている（土本、2018）。ビジネス環境がダイナミックに変化し、特に大きなリスクとして安全保障上の規制が明確になりつつある中、個々の企業において国際的なインテリジェンス機能を高めることは必須であると考え。

参考文献

- イアンシティ、マルコ・ロイ、レベーン（2007）『キーストーン戦略 イノベーションを持続させるビジネスエコシステム』、杉本 幸太郎（翻訳）、翔泳社
- 科学技術・学術政策研究所(2021)、科学技術指標 2021、NISTEP 調査資料-311、2021 年 8 月
- 科学技術・学術政策研究所(2019)、第 11 回科学技術予測調査 S&T Foresight2019 総合報告書、NISTEP Report No. 183、2019 年 11 月
- 国分俊史(2020)、『エコノミック・ステートクラフト：経済安全保障の戦い』、日本経済新聞社、2020 年 5 月
- 塚田尚稔、元橋一之（2018）、Microsoft Academic Graph の書誌情報データとしての評価 NISTEP Discussion Paper, No.162, NISTEP, 2018/10
- 土本一郎（2018）、日本企業の競争力強化に向けた戦略的な調査分析機能と外部知識吸収のあり方：コンペティティブ・インテリジェンスに関するインタビュー調査、RIETI Policy Discussion Paper 18-P-015
- 元橋一之(2020)、デジタルプラットフォームの進展と産業競争力への影響、RIETI Policy Discussion Paper 20-P-029
- 元橋一之(2014)、『日はまた高く：産業競争力の構想』日本経済新聞社、2014 年 2 月
- Blackwill, R. D. and J. M. Harris (2016), War by Other Means: Geoeconomics and Statecraft, Belknap Press, 2016
- Motohashi, K. (2015), Measuring Multinationals' R&D Activities in China on the Basis of Patent Database: Comparing European, Japanese and US Firms, China and World Economy, 23(6), 1-23
- O`Hanlon, M. E. (2019), Forecasting Change in Military Technology, 2020-2040,

Brookings Institutions, Washington D.C.
van Alstyne, M., Parker, G. G. Choudary, S. P. (2016), Pipelines, Platforms and the New
Rules of Strategy, Harvard Business Review, April 2016

別添 1：米国輸出規制（EAR）で規制対象とされる 14 分野(デュアルユース技術)

- ① バイオテクノロジー：ナノバイオロジー、合成生物学、遺伝子工学、神経工学
- ② A I ・機械学習：ニューラルネットワークと深層学習、進化的計算・遺伝アルゴリズム、強化学習、コンピュータビジョン、エキスパートシステム、スピーチ・音声プロセッシング、自然言語処理、プランニング、音声・動画操作技術、A I クラウド技術、A I チップ
- ③ 測位技術
- ④ マイクロプロセッサ：システムオンチップ、オンチップ積層メモリ
- ⑤ 先端コンピューティング：メモリセントリックロジック
- ⑥ データ分析：可視化、自動分析アルゴリズム、コンテキスト・アウェア・コンピューティング
- ⑦ 量子情報・量子センシング：量子コンピューティング、量子暗号化、量子センシング
- ⑧ 輸送技術：移動式電力、モデリングとシミュレーション、Total Asset Visibility、D B L S
- ⑨ 付加製造技術（3 D プリンティング）
- ⑩ ロボット工学：マイクロドローン、群集技術、自己組織化ロボット、分子ロボティクス、ロボットコンパイラ、スマートダスト
- ⑪ 脳コンピュータインターフェース：神経制御アルゴリズム、マインド・マシン・インターフェース、ダイレクト神経インターフェース
- ⑫ 極超音速：飛行制御アルゴリズム、推進技術、熱保護システム、特殊材料（構造用・センサー用等）
- ⑬ 先端材料：光学迷彩、機能性繊維製品、生体材料
- ⑭ 先進監視技術：顔認証・声紋認証技術

別添 2：中国輸出入管理令における制限技術リスト（2020 年 12 月追加）

■輸出禁止品目に追加

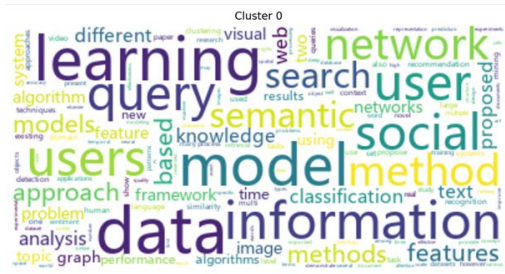
宇宙船トラッキング技術／直接入力縮尺が 10 万分の 1 以上の精密な中国地図衛星データ暗号化技術／北斗衛星によるナビゲーションシステムの情報伝送暗号化技術

■輸出制限品目に追加・拡充

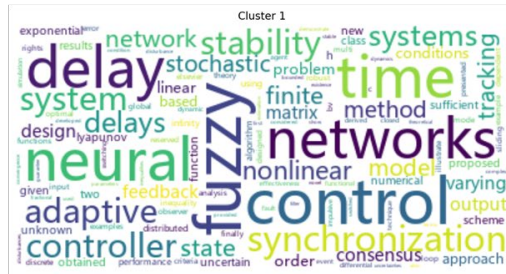
バイオ医薬品製造技術／KBBF 結晶成長及びプリズム結合デバイス処理 技術／3D プリンター技術／建設機械の応用技術／工作機械の革新的設計等の基礎技術／大規模高速風洞の設計・建設技術／大型振動プラットフォーム設計建設技術／石油専用設備核心部品設計製造技術／大型石化設備基礎工業技術／重機業界戦略性新製品設計技術／海上島嶼利用・安全保障専用設備技術（メガフロート基地、衛星発射プラットフォーム等）／航空宇宙用軸受技術／無人機技術／レーザー技術／大型電力設備設計技術／宇宙材料生産技術／音声合成技術／AI 相互インターフェース技術（音声認識・音声起動・相互理解技術等）／暗号安全技術（暗号チップ設計、量子暗号技術など）／高性能検査技術（高速インターネット環境下での DPI 検査、未知のネット攻撃行為の分析技術等）／情報防御技術（情報秘匿保存と発見技術等）／情報対抗技術（流量捕捉分析技術、情報偽装技術、ネット攻撃源追跡技術等）／基礎的ソフト安全増強技術／超高真空生成技術／宇宙リモートセンシング画像獲得技術

別添3：クラスター毎のワードクラウド

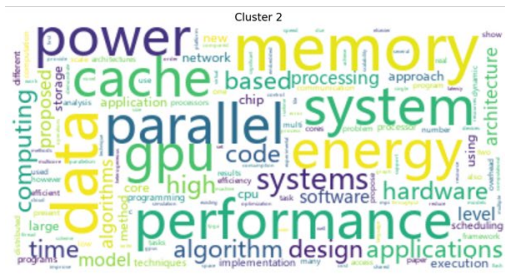
Data analytics methodology



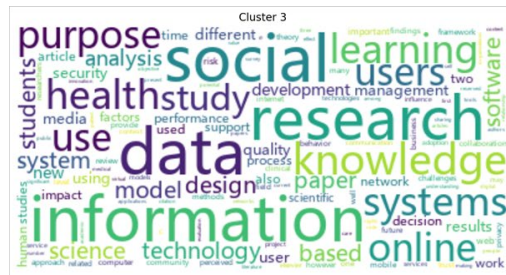
Neural network



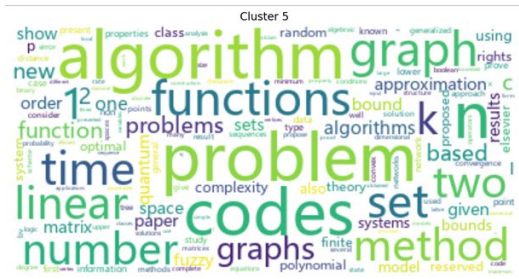
Memory system



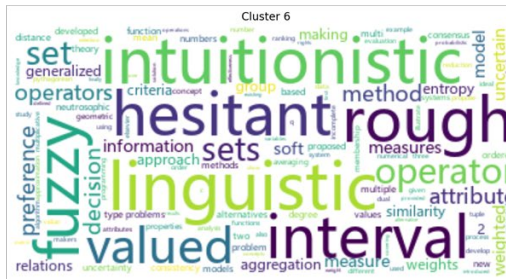
Social issues applications



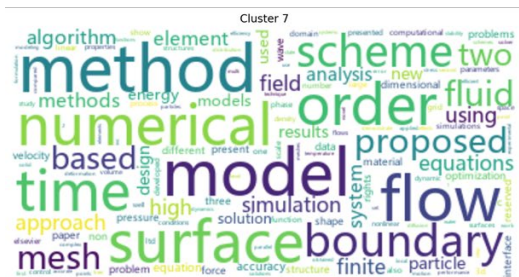
Software algorithm



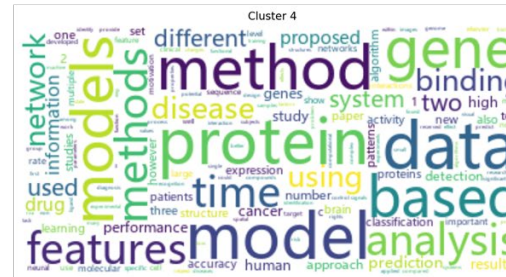
Fuzzy decision model



Simulation mode



Protein and gene engineering



[illegible][illegible]

Cluster 8

method, model, system, time, data, algorithm, network, process, analysis, performance, detection, evaluation, study, real, problems, large, scale, framework, quality, efficiency, power, cost, approach, simulation, new, fast, multi, learning, information, optimization, based, design, traffic, used, interface, optimal, wasting, reliability, measuring, meeting, models, fuzzy, complex, size, small, applications, number, reserved, show, development, phase, level, stage, algorithms, behavior, usage, dynamic, two, different, prediction, one, test, accuracy, set, using, 350, based, models, software, decision, results, major, order, error, time, scale, large, small, measuring, meeting, reliability, learning, information, optimization, based, design, traffic, used, interface, optimal, wasting, reliability, measuring, meeting, models, fuzzy, complex, size, small, applications, number, reserved, show, development, phase, level, stage, algorithms, behavior, usage, dynamic, two, different, prediction, one, test, accuracy, set, using, 350, based, models

[illegible][illegible]

Cluster 13

[illegible]