

エネルギー環境分野におけるイノベーション政策

大橋 弘*

<要旨>

本稿では、地球温暖化における緩和策に焦点を当てつつ、GX（グリーン・トランスフォーメーション）に向けてわが国に求められるイノベーションとイノベーションを促すために求められる政策の考え方について、文献を選択的にサーベイしつつ論じる。まずGXに共通するイノベーションのもつ性質を説明し、イノベーション政策の必要性について検討する。同時に、研究開発において求められる視点についても、経済学の文献を踏まえて解説する。その上で、イノベーションを促進するのに必要な4つの視点を提供し、それぞれについてGXの観点から政策に求められる検討事項について触れる。特に、市場競争の観点からは、温室効果ガスの可視化の重要性、消費ベースでの温室効果ガス排出量計測の必要性、そしてエンゲージメントの重要性について指摘する。

JEL Classification Codes : D85, H23, H32, L52, O33

Keywords : 温室効果ガス、イノベーション、科学、市場規模、技術機会、専有可能性、市場競争

* 大橋 弘：東京大学大学院経済学研究科教授、同大公共政策大学院教授、同大副学長。

Innovation Policies for Green Innovation in Japan

By Hiroshi OHASHI

Abstract

This paper discusses the innovation required for GX and the policy approach required to encourage innovation, with a focus on mitigation measures in global warming. First, the nature of innovation that GX possesses will be examined and the necessity of policy will be discussed. At the same time, the perspective required in R&D will be explained based on the economic literature. We then provide four perspectives necessary to promote innovation, and touch on the policy considerations necessary from a GX perspective for each of them. In particular, from the perspective of market competition, we will point out the importance of GHG (Greenhouse emission) visualization, the need to measure GHG emissions on a consumption basis, and the importance of engagement.

JEL Classification Codes: D85, H23, H32, L52, O33

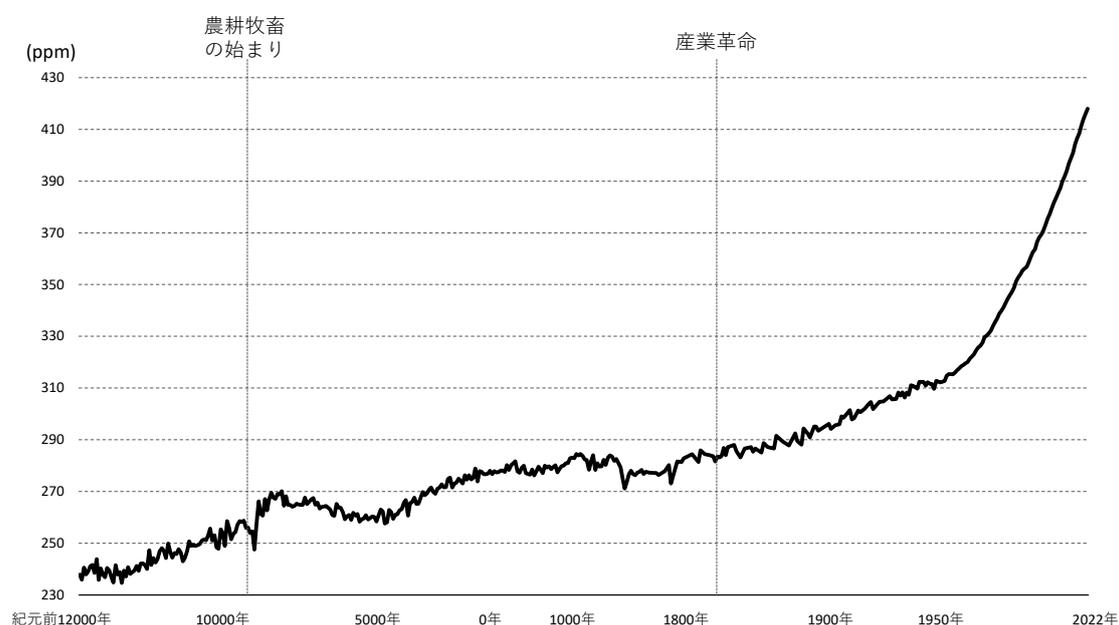
Keywords: Greenhouse Gas Emission, Innovation, Science, Market Size, Technological Opportunity, Appropriability, Market Competition

1. はじめに

1.1 地球温暖化を取り巻く状況

大気中の二酸化炭素（CO₂）濃度は、2022年で420ppmに達しており、産業革命が始まった19世紀半ば以降、最大値を更新し続けている（図表1）。農耕牧畜が始まったとされる紀元前1万年頃にCO₂濃度が若干上昇した以外は、1850年頃まで大気中のCO₂濃度はほぼ280ppmの水準で目立った動きはなかった。その点で、産業革命以降のCO₂濃度の高まりは顕著である。

図表1 大気中のCO₂濃度の推移



出典: Our World in Data, CO₂ and Greenhouse Gas Emissions (<https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>) と NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration (<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>)) より作成。

過去の大気中のCO₂濃度は、南極などの氷床をボーリング掘削して得られた氷のサンプルに含まれる気泡から推定しているとされる。正確な時期の特定や気密性に関する仮定などには留意が必要とされるが、人間活動によって増加した他の主な温室効果ガス（GHG¹）であるメタン（CH₄）や一酸化二窒素（N₂O）の大気中濃度も同様の傾向を示している（Tol², 2019）。

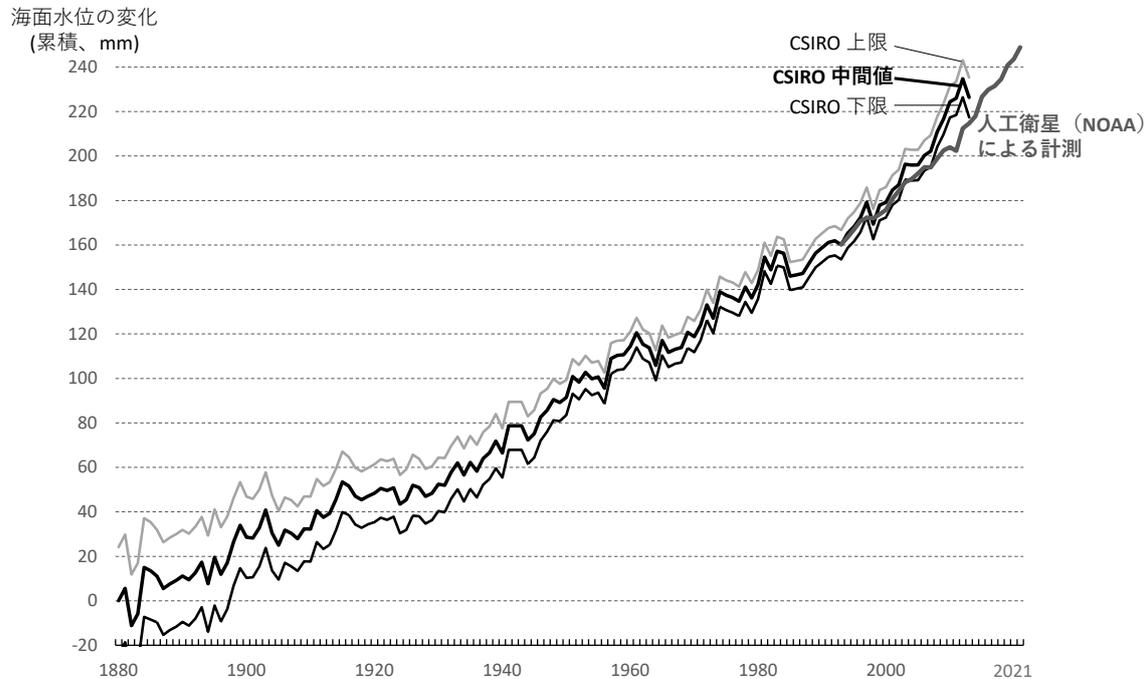
このCO₂濃度の高まりに伴って、世界の気温や海面の高さも上昇している。海面の高さの上昇は、本論文で入手可能であった1880年以降、一貫した上昇トレンドを示している（図表2）。海面上昇に比較すると、気温上昇には遅行性が認められるものの、1970年頃か

¹ 以下では特に断らない限り、CO₂とGHGを同義として用いる。

² Tol (2019) を参照。

らは一貫したトレンドとして上昇傾向が見いだせる。また本稿には掲載しないが、北極海の氷の体積も一貫して減少している³。それぞれ一定の仮定のもとでデータが作成されているとはいえ、どの指標もおしなべて地球温暖化の影響を示唆している点は、注目に値する。

図表2 世界の海面水位の変化 1880-2021



出典: 米国環境保護庁, Climate Change Indicator: Sea Level

<https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-sea-level> (アクセス: 2022年12月28日)

データ元:

1880-2013年: 豪国家科学産業調査機構海洋研究部 (CSIRO: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation). Originally published in Church, J.A., and N.J. White (2011) "Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century," *Surv. Geophys.* 32:585-602, www.cmar.csiro.au/sealevel/sl_data_cmar.html

1993-2021: 人工衛星NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)による計測
https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lsa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries_global.php

地球温暖化の進行と並行して、これまで見られなかったような様々な影響が地球環境に顕れ始めている。実際に、気候変動に伴う自然災害の件数は、1995年以降顕著に増えている。わが国でも、豪雨の頻発化・激甚化により、氾濫危険水位（河川が氾濫する恐れのある水位）を超過した河川数は増加傾向となっており、人命被害の増加に加え、経済被害の増大、またこれらに伴う保険料の支払額が増加するなど、経済的な被害も増加している（国土交通省, 2020）。高温が原因で、水稲においては品質の劣化した白未熟粒が増えたり、リンゴでは成熟期における着色不良や着色遅延が起きたりしている（農林水産省, 2021）。

1.2 エネルギーと環境⁴

エネルギーに関する最初の発明は、帆船と水車と言われている。ともに、人力という運

³ Polar Science Center, Arctic Sea Ice Volume Data (<http://psc.apl.uw.edu/>) を参照。

⁴ 本章は主に Malm (2016)、大橋 (2021) 及び古舘 (2021) を参考にしている。

動エネルギーに代えて、風や水の循環という運動エネルギーを活用した発明である。運動エネルギーへの変換方法を抜本的に変えたのが、19世紀半ばに登場した蒸気機関だった。

蒸気機関は、熱源（はじめは薪や木炭、のちには石炭）を燃やして水を熱することで水蒸気を発生させて熱エネルギーを生み出し、その熱エネルギーでピストンを動かして運動エネルギーを取り出すことを可能にした。

運動エネルギーを熱エネルギーから生み出すという、エネルギー転換の発想は、熱源は全て動力に転換できるようになったことを意味する。蒸気機関が薪や木炭から石炭へと熱源を変えるようになったのは、森林資源の枯渇などの理由もさることながら、石炭のもつ熱量の大きさに魅力があったからだといわれる。その後の技術革新は、いかに投入する熱エネルギーを大きくしつつ、エネルギーの転換の損失を小さくするかに注がれた。なお、この技術改良の先に、現在の原子力発電も存在している。

蒸気機関の登場は、同時に運動エネルギーの活用を土地から解放（アンバンドル）することになった。運動エネルギーが自然から得られる、風況の良い場所や川やダムのあるところにしか、動力を置くことができなかった時代から、熱源さえ輸送できれば、場所を問わず動力を使える時代が到来したことを意味する。その典型は、蒸気機関車の登場である。移動する鉄道車両に動力を載せて、移動しながら熱源の利用が可能になったのである。

なお、今日までに実装された多くのイノベーションは、アンバンドル化から生まれている（大橋, 2021）。例えば、モバイル通信は、場所に縛られていたコミュニケーションを開放し、移動しながら通話やデータ通信を行えるようになった。新型コロナウイルス感染拡大でやや低迷した AirBnB などのシェアリングも、インターネット上でのマッチングプラットフォームが、所有と利用のアンバンドルを可能にしたからこそ、生まれたサービスである。本稿で対象とするグリーン経済におけるイノベーションも、同様の性格を有している点は興味深い。

なお産業革命の時点において、蒸気機関が地球温暖化につながると気づいていたかは疑わしい。温室効果ガスを最初に指摘したのは、1860年代の John Tyndall だといわれており、その後に Svante Arrhenius が石炭を燃焼することが、大気中の CO₂ の濃度を上昇させ、地球温暖化につながることを導出したのが 1896年と言われているが、これ以降、他の研究者に研究が発展的に引き継がれることはなかったようだ。

この点は、CO₂ を計測する技術が十分に発展していなかったことが大きいのではないかと思われる。いつの時代も、可視化されることで社会的な関心を呼び、技術開発も進む側面がある。

こうした背景を経て、2021年8月9日に国連の「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」において、第6次評価報告書の第1作業部会報告書が発表され、地球温暖化が人間活動によるものであると結論づけられた。

この IPCC 第6次評価報告書のインパクトを、1972年にローマ・クラブから発表された報告書『成長の限界』になぞらえる指摘がある。ローマ・クラブは、地球規模の経済活動

をモデル化し、100年間にわたってシミュレーションをすることで、人口と経済のゼロ成長を実現しなければ、地球と人類は破局を迎えると結論づけた。IPCC報告書は、GHGを意識せずに経済活動の拡大を続けてきた人類に対する警告と捉えられている。人口と経済の拡大を放置すれば人類が危機的な状況に陥ると主張した、ローマ・クラブ報告書の内容と軌を一にするのである。

なおローマ・クラブの報告書の結論については、イギリスの古典派経済学者であるマルサス(1766-1834)の主張に類似する点が指摘されている。マルサスは『人口論』において、人口の指数関数的な増加に対して、食料生産の増加は線形的であるために、人々は貧困に陥ると結論づけた。自然環境が制約となり、人口増大と経済成長を同時に達成することはできないというマルサスの予見は、ローマ・クラブの『成長の限界』での主張と似ている。

マルサスの予見は、必ずしも的中しなかった。その理由として少なくとも2つの点を指摘できる。1つは、本節で前述したように、マルサスの死後に訪れた産業革命と蒸気機関の登場によって、大量・長距離輸送が可能になった点。第二には、蒸気機関の登場に並ぶエネルギー革命とも称される、ハーバー・ボッシュ法(空気中の窒素(N)を3つの水素(H)と直接反応させてアンモニアを合成する技術であり、化学肥料を工業化することが可能になった方法)によって、食料生産の効率性が大幅に向上した点である。

こうしてローマ・クラブの報告書とその後の経緯を振り返ると、地球環境問題を考える上で、既存技術のみを前提にした議論は、人類が対応する余地を狭めてしまうことが分かる。地球温暖化という課題に対して、課題を乗り越えるための「イノベーション」をどのように誘発するかも議論の俎上に載せて考えるべきということだ。こうした点を踏まえて、本稿ではグリーン経済に向けての「イノベーション」政策を取り上げることにした。

尤も、「イノベーション」を誘発するために政府や政策が必要かどうかについては、一度立ち止まって考える必要がある。人口を一定もしくは減らすか、経済成長を低くするかしなければ、地球が破滅して人類が滅亡するという危機に直面するならば、政府の政策が発動されなくとも、その危機を回避するための取り組みが自主的になされ、「イノベーション」が活性化するだろうからだ。

1.3 本稿の構成

上記の問題意識を踏まえて、IPCC第6次評価報告書の結論を所与としたもとので、地球温暖化に対して政策が果たせる役割を論じてみたい。

なおIPCC第6次評価報告書の結論を所与にすると言うのは、気候変動は、今の人類の最高の知見をもってしても、不確実な要素が大いに残る現象と考えるからである。温暖化の最悪の結果がどの程度の確率でいつ生じるかは誰も経験したことのない、ファット・テールの事象である。そうした事象に対して、緩和策と適応策とのバランスをどのように採るかについては相当程度の不確実性のもとで判断せざるを得ない。

本稿では、適応策の重要性を認識しつつ、地球温暖化対策に対する緩和策に重点を置い

て、定性的な観点から日本がとるべき方向性について論じることにはしたい。緩和策にも様々な観点があるが、ここではとりわけ「イノベーション」に関わる論点に焦点を当てる。

なお「イノベーション」は民間企業が主体となって行うことを前提とすると、地球温暖化対策のなかで、市場メカニズムをどのように位置づけるかを論じる必要がある。本稿では、「イノベーション」を市場競争の観点からも論じることにする。

本稿の構成は以下のとおりである。第2章では、「イノベーション」と市場の失敗について振り返ることにする。「イノベーション」の持つ性格を説明しつつ、「イノベーション」に市場の失敗があることを指摘する。この市場の失敗が政策的な対応を必要とする根拠となる。この章では科学についても論じ、研究開発プログラムのあり方についても検討する。第3章は、「イノベーション」に影響を与える4つの要素について触れる。その要素とは、市場規模(3.1)、技術機会(3.2)、専有可能性(3.3)、そして市場競争(3.4)である。このそれぞれについて、GX投資の観点から検討を加える。第4章は結語である。

2. イノベーションと市場の失敗⁵

ここでは前章にてカッコづけをしてきた「イノベーション」を定義する(2.1)。地球温暖化対策におけるイノベーションをGX(グリーン・トランスフォーメーション)という。2.2節ではイノベーションが有する市場の失敗について論じる。

2.1 イノベーションとは

イノベーションとは、社会の生産可能フロンティアを拡大する活動と定義できる。具体的には、シュンペータが新結合の例として挙げた4類型のうち、プロダクト・イノベーション(新しい財貨の生産)とプロセス・イノベーション(新しい生産方法の導入)がしばしば注目される⁶。こうした活動がインセンティブ(誘因)によって影響を受ける点で、イノベーションは経済学上の問題の範疇であるといえる(Schmookler, 1966)。

イノベーションの定量化を初めて試みたのは、Solow(1957)である。Solowは、生産に必要なとされる主要な生産要素(労働や資本など)を勘案した上で、それらの生産要素が生み出す生産量の増加以外の要素を量的に表した指標として全要素生産性(TFP)を定義した。TFPとは、一般的には、資本や労働の質、イノベーションなどといった、生産要素としてデータで捉えられていないが、生産増に貢献するような因子を総合したものである。

Solow(1957)では、TFPが米国の長期経済成長の要因の85%を占めることになったと報告し、そのTFPの大きさに物議をかもしることになった。もし経済成長が主にTFPによって

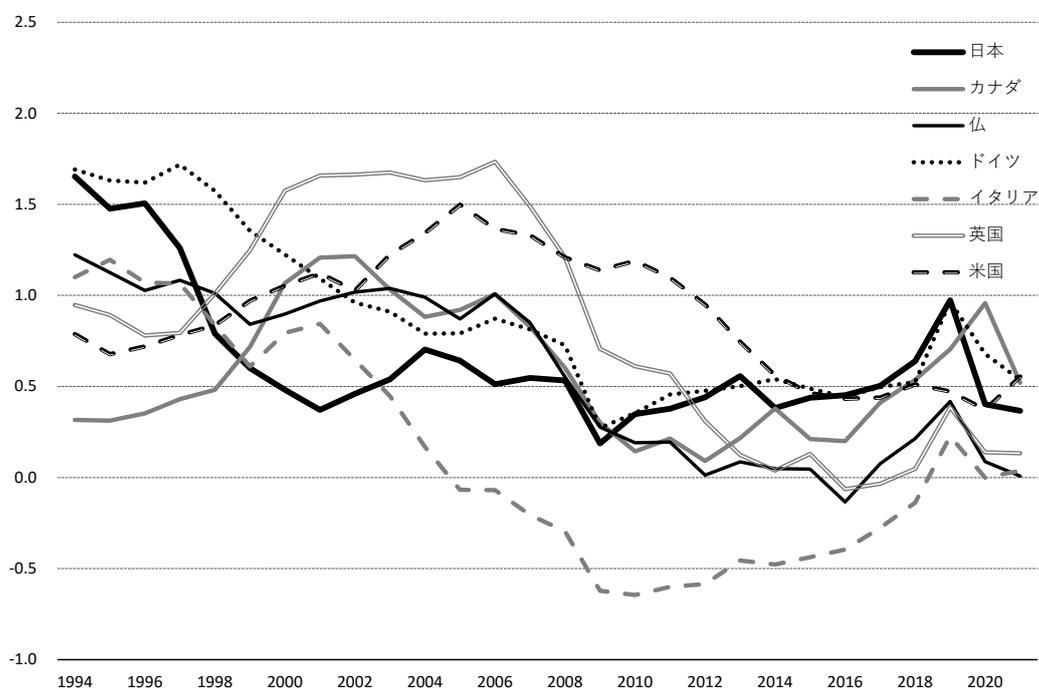
⁵ 本章は大橋(2013, 2014, 2018, 2022)を参考にしている。

⁶ そのほかの2類型はマーケティング・イノベーション(新しい販売先の開拓・新しい仕入先の獲得)、そして組織イノベーション(新しい組織の実現)である。

引き起こされ、また TFP がインセンティブによって動機づけられているとするならば、TFP の背後にあるイノベーションの理解は極めて重要となる。

なお全要素生産性は必ずしもイノベーションの程度を示しているわけではないことは留意すべきである。Gordon (2016) は空調、抗生物質、高品位テレビや家電機器といった過去の画期的な発明を取り上げながら、こうした画期的な技術発明がなされた 1870 年から 1970 年の 100 年余りが特殊な世紀であり、今後は社会・生活を大きく変えるようなイノベーションを生み出すことは難しいとの主張を展開している。この主張の根拠は、1970 年代以降の TFP が伸び悩んでいるためであり、それは図表 3 から読み取れる。

図表 3 全要素生産性の伸び率



出典: OECD(2023) Multifactor Productivity (indicator). doi: 10.1787/a40c5025-en (アクセス: 2023年1月23日) より作成。10年移動平均。

なおこの図表から日本の TFP は低下の傾向を示しているものの、その傾向は海外諸国も同様であり、また日本の TFP は必ずしも海外諸国と比較して低いわけではないことがわかる。

もちろん TFP はイノベーション以外の要素で変化しうることも、また事実である。例えば、Hsieh and Klenow (2009) は、資源配分を最適化するだけで (イノベーションの創出とは関係なく)、中国・インド各々で 40% 以上の TFP の上昇が起こりうることを示している。このように、TFP の動きをもって、イノベーションの程度を評価するには限界があることが分かるだろう。

2.2 イノベーションと市場の失敗

イノベーションには3つの市場の失敗があることが知られている (Arrow, 1962)。ここではイノベーションを新しい知識を生み出すことと表現して議論を進めたい。

第1に、知識を生み出すためには固定費がかかるが、一度生み出された知識は、ほぼ限界費用ゼロで模倣ができるという点である。これは生産可能な集合が非凹性を持つことを意味する。この点が問題であることは、価格が限界費用と等しいとき、固定費の存在からイノベーションを生み出すインセンティブが存在しなくなることからも明らかだろう。つまり完全競争市場では、新たな知識を生み出す誘因が存在しないということになる。

第2は、イノベーションが外部性を有する点である。この外部性には、静学的と動学的との2つの側面がある。

静学的な側面とは、研究者による学会発表や公的・私的を含めた交流によって、研究成果が対価を伴わず、他者に伝搬する効果である。これは知識の波及効果（正の外部性）として、R&D活動において従来から指摘をされていた点である。

動学的な側面について、ここでは2つの点を指摘する。ひとつはイノベーションの連続的・累積的な側面である。イノベーションは巨人の肩の上に立っている (standing on the shoulders of giants) と言われるように、あるイノベーションが生まれれば、それを生み出した知見を活用して更に改良したイノベーションがもたらされ、それがまた新たな知見を生み出してより改良を推し進めたイノベーションの源になる。これをフォローオン・イノベーションと呼ぶ⁷。

イノベーションが動学的な面をもつ2つ目は、イノベーションのライフサイクルにおいて求められる補完性にある。イノベーションのライフサイクルには、研究・開発・事業化・産業化の過程があるといわれる。それぞれの過程においては、人材の質や層の厚みが求められる。この人材供給は、イノベーション活動における人材需要と補完的な関係にある。つまりイノベーションが活性化する領域には人材が集積し、人材が集積するところに様々なアイデアが生まれてイノベーションが活性化するという関係にある。ここにネットワーク効果が存在することが分かる。

同様に、イノベーションの普及には、補完的なインフラが併せて必要である。例えば電気自動車 (EV) を取り上げてみよう⁸。EVには充電器が必要だが、EVの普及に伴って移動範囲が拡大するにつれて、EV用急速充電器も地理的に広い範囲で設置される必要が出てくる。EVの普及が進めば充電器の設置範囲も広がり、その設置範囲が広がれば、EVの普及も促される。ここにもネットワーク効果が存在する。

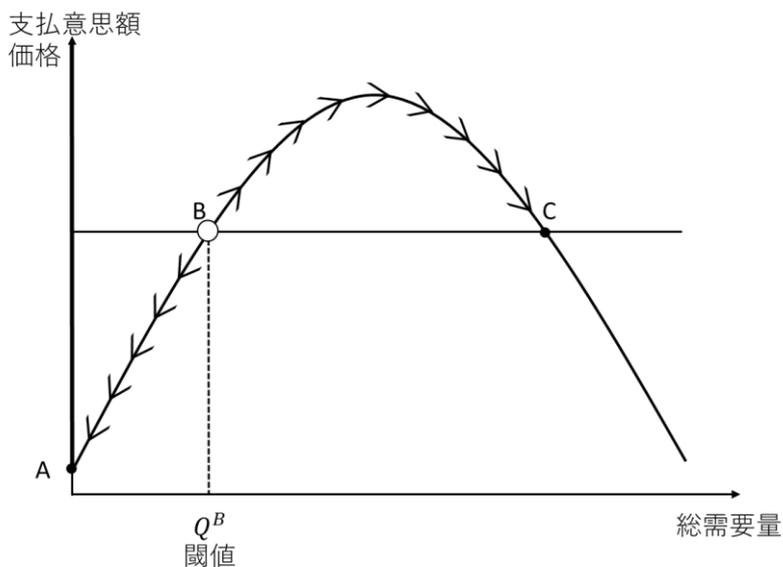
⁷ Rogers (2003) では、re-invention (再発明) や secondary innovation (2次的なイノベーション) と表現している。大橋 (2014, 第6章) では、脂質異常症治療薬について連続的・累積的イノベーションの重要性を定量的に明らかにしている。

⁸ 大橋 (2014, 第5章) では、ハイビジョンテレビにおいて補完財の存在の重要性を定量的に明らかにしている。

ネットワーク効果が強く働く市場では、需要量が増えるに従って限界的な消費者の支払意思額が高まるので、需要関数が右上がりになる。もちろんネットワークが一定程度の規模以上に達すると、混雑の不利益がネットワーク効果を上回ることから、需要関数は右下がりになるものとも考えられ、ネットワークの便益にはトレードオフがあることがわかる。

なおネットワーク効果の見られる需要関数のもとの、複数の市場均衡が表れることが知られている。図表4のように、価格を一定にした下で、市場均衡はA, B, Cの3つが表れる。このうち、○で示したBは不安定な均衡であるのに対してA, Cは安定的な均衡であり、需要量が Q^B よりも多ければC、小さければAの均衡へと市場規模が推移する様子が矢印で示されている。つまり Q^B は閾値（クリティカルマス）となっている。

図表4 ネットワーク効果の特徴（概念図）



ネットワークに関する文献においては、いかに市場規模を閾値に達せさせるかが1つの論点になる。赤字を覚悟してコスト割れで販売し、消費者数を閾値までいち早く確立して、ネットワーク効果が働き始めたら、赤字を回収するといった戦略も取られることが多い⁹。

また規格の異なるネットワークが閾値に達しない場合には、競合する企画と互換性を確立することで生き残りを図る場合もある。互換性のあるネットワークは、たとえ規格が異なっても同一のネットワークと需要家から見なされうる。もちろん閾値に達したネットワークの側からすれば、互換性を確立することのメリットは相対的に小さいことが予想される。そこで、ネットワーク産業においてはその産業立ち上がり期にいかにシステムの標準化を図るかが重要になる。システムの標準化を国などの上位機関が主導して行うようなデジュールスタンダードや、市場競争の中で標準化を図るようなデファクトスタンダー

⁹ もちろんこの戦略は、閾値に達しない場合は、赤字を回収できずに事業を止めざるを得ないというリスクを伴っている。

ドなど標準化を確立するための経路は複数存在しうが、どちらの標準化のやり方も一長一短があることが知られている。

ネットワークが一度閾値を超えてしまうと、たとえそれが社会的に非効率な状態であってもなかなか解消されない。たとえば電力を例に取れば、わが国では静岡県浜松市より西では 60 Hz、東では 50 Hz となっているが、それは明治時代に東日本では東京電灯浅草発電所がドイツの発電機を購入し、西日本では大阪電灯幸町発電所が米国製 60 Hz 発電機を導入したことがきっかけといわれている。この発電機の導入がその後の日本の周波数の標準を決めることになり、現在では東西で電力融通を行う際には、直流に電気をいったん戻したうえで周波数をそれぞれの地域に合わせて変換している。なお、こうした周波数変換の処理の限界が、東日本大震災において電力の不足した東日本へ西日本から電力を十分に送れない理由との指摘を受けた。ネットワーク効果に、スイッチング・コストがあることの典型的な事例である。このコストは、ある規格から別の規格へ乗り移る際のコストを捉えて表現したものであり、動学的な側面を持つイノベーションは、過去の歴史が現在および将来のイノベーションの方向性を決めるという点で、経路依存性をもつことが分かるだろう。

最後に、イノベーションが情報の非対称性を持つことに市場の失敗が起因する点である。イノベーションに費やされる努力が第三者から観測・立証不可能なために（すなわち情報の非対称性が存在するために）、イノベーションを生み出すことに対して伴う不確実性を市場でヘッジすることができない。回避できない不確実性が大きければ、リスク回避的な発明者ほど、イノベーションを生み出す誘因が減ることになる。とりわけ GX は後述の通り、産業構造の転換も含むイノベーションを指すことが一般的であり、そのような巨額な投資を伴うイノベーションに対しては、企業が単独で取り組む誘因が減少もしくは消失する可能性がある。

またイノベーションという新たに生み出される「知識」は、当事者以外にその「知識」の内容を知ることができない（つまり情報に非対称性が存在する）とき、内容の分からない「知識」を市場で購入しようと思う人は恐らくいない。他方で、知識の内容を事前に知らせてしまうと、知識の価値はなくなり市場での価格はゼロとなってしまう。つまりイノベーションによって生み出された知識は、自由に無料で利用されることが社会的に望ましいが、自由に無料で利用されるようになると知識を生み出す誘因が削がれ、知識の供給が過少になってしまう。イノベーションの供給に市場がうまく機能しないことになるのだ。

上記3つの市場の失敗は、どれもイノベーションが社会的に望ましい水準と比較して、過少供給になることを示唆している。

なお、こうしたイノベーションの外部不経済性に対して、いくつかの反論が存在する。1つには、イノベーションには顧客奪取効果（business stealing effects）が存在するというも

のである (Mankiw and Whinston, 1986)。例えば、社会的に既存新薬と比較してほぼ同じ効果のジェネリック薬があったとしても、既存新薬から大きなシェアを奪うことができれば、そうしたジェネリック薬を開発する私的誘因が存在する。この場合、イノベーションに社会的な厚生観点からは、過大な供給誘因が与えられていることになる。

Bryan and Williams (2021) のサーベイによると、これまでの実証分析では、イノベーションの社会的な便益は私的な便益よりも大きいとのエビデンスが示されており、市場の失敗による過少供給が支持されているようである。ここにイノベーションにおける政策の必要性が認められることになる。

2.3 科学とインセンティブ

イノベーションという用語は、「科学技術」と並列して語られることが多い。「科学技術」とは、知識獲得や学理構築のために知識を生み出す「科学」と、社会の利益に直結するような実用可能な応用研究を行う「技術」とを融合させた概念である。しかし明治維新期に学問体系をヨーロッパから移入した日本は、欧米の脅威の前に国家基盤を短期間に固めなければならぬ局面にあったことから、研究成果がすぐ利用可能となるような「技術」を重視する形で科学技術の振興がはかられた歴史がある¹⁰。

他方で、GX で求められるイノベーションには、まだ技術的に確立していない「科学」に属する領域も多く存在する。科学的な知識を生み出すための研究者の誘因がどのように形成されているかの分析も経済学では徐々に知見が蓄積されている。ここでは「科学」に特有のインセンティブについて簡単に触れておきたい。

わが国の GX においては、国家プロジェクトとしてテーマを公的部門が示し、それに応募した大学や民間企業がプロジェクト評価を受けながら研究を進める形態が多くの場合とられているようだ。NEDO (国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構) における GI (グリーンイノベーション) 基金や JST (国立研究開発法人 科学技術振興機構) が助成をする研究プロジェクトがその典型である。

こうした研究助成機関による特定のテーマに焦点を当てた研究プロジェクトは、民間企業での研究開発にその形態に似ているといわれている。他方で大学等の研究機関では、研究者の自律性のなかで学術研究が行われることが一般的である (学術研究の助成機関の代表は JSPS (独立行政法人 日本学術振興会) である)。

Murray, Aghion, Dewatripont, Kolev and Stern (2016) は、大学の研究者は自分の興味本位で研究をする自律性に重きを置いており、社会的に重要とされる国家プロジェクトに参加させるためには、相応の報酬対価を支払う必要があるという Aghion, Dewatripont and Stein

¹⁰ 例えば村上陽一郎 (2010) はわが国が技術偏重であることを指摘している。中山茂 (1995) はわが国が「市場目当ての、いわば金儲けの科学技術に徹してきた」(p1) としているが、技術的な応用研究を重視してきたという点で同様の指摘と考えられる。

(2008) の理論的な含意を米国のデータを使って検証している。

もっともこの結果は、大学研究者が国家プロジェクトに参加しない場合の選択肢は何かに大きく依存しているものと思われる。日本のように、学術研究の予算が減少しているなかでの判断ということになれば、それほどの追加的な報酬対価を要することなく大学の研究者の国家プロジェクトへの参画を促すことができるかもしれない。

また Jones (2009) の調査によると、科学者が最初の研究成果を発表するまでの年齢が上昇しており、それは一人前の研究者になるまでに学ぶべき内容が急速に増大しているためだと結論付けている。この結果として、研究者の専門分野は過去と比較しても、狭くなってきているとともに、共同研究の件数及び共同研究者の数が増えているとの結果も報告されている。これらは米国のデータを用いたものだが、恐らく日本における実状に照らしても、当てはまる点が多いと肌感覚で思われる。

他方で、共同研究は、どのように参加する個々の研究者の評価を行うかが難しい。個々の研究者の評価をしっかりと行わないと、タダ乗りをするようなモラルハザードを引き起こす可能性がある一方で、質的に同じ評価をすべき 1 本の論文が、1 人で書かれた場合と複数の共同で書かれた場合で、異なる評価がなされることは不当と考えられる。実際に、多数の共著者で書かれた論文には、パラダイム転換を迫るような大きなアイデアを含む論文が少ない点が報告されており、モラルハザードの存在と整合的である (Wu, Wang and Evans, 2019)。

わが国では、SIP やムーンショットなど、多く研究開発プログラムが次々と打ち出されてきた。しかし過去のプログラムの事後評価をしっかりと行われたように見えないままに、新規のプログラムが立ち上がる状況が往々にして認められる。研究開発プログラムの良い点や悪い点を評価したうえで、新たなプログラムに学びを反映していきながら、わが国の研究開発プログラムをより良いものにしていくという PDCA が必要だが、そうした点が、システムとして構築されていない点に、わが国の研究開発の問題点があるように思われる。EBPM (エビデンスを活用した政策立案) の視点から、どのような PDCA をシステムとして作り上げるのか、そろそろ実装に向けての議論に、一定の方向性を出すべき時期に来ているのではないか。

以降では、科学について明示的に取り上げることをせず、2.1 節や 2.2 節で想定したような、イノベーションの社会実装に焦点をあてて議論したい。

3. イノベーションを決める要因¹¹

イノベーション活動を左右する要因として、市場規模の大きさ、技術機会の存在、そしてイノベーションから得られる利潤の専有可能性、そして市場構造の 4 つの要素が挙げられることが多い (例えば Cohen (2010) を参照)。

¹¹ 本章は大橋 (2013, 2014) をもとにしている。

経済学の分析枠組みを用いれば、イノベーション活動の水準は、その需要の大きさを規定する「市場規模」と、どの程度容易に供給がなされうるかを左右する「技術機会」によって決まる。そしてこのイノベーション活動における需要と供給をシフトさせるような要因として、「専有可能性」と「市場競争」があるという関係にある。本章では、4つの点についてGXの観点から簡単に見ていくことにしたい。

3.1 市場規模

イノベーションは、対象とする市場規模が大きいほど促進されやすい。対象となる需要が大きければ、その分だけイノベーションによる利益を見込めやすいということである。新薬開発においても、希少疾病の医薬品（orphan drugs）の研究開発は、特定疾病患者の必要性が高いにも市場規模に基づく収益性のみで頼ると開発が進みにくくなるのは、主にこの点に因るといえよう。

GXにおいては、各産業・各企業の直面する課題に応じて、様々な投資を必要とする。例えば、製造過程において化石燃料の直接燃焼を行っている企業においては、電化しつつカーボンフリー電気を購入することで、スコープ1¹²のGHG排出量を大幅に減らすことができる。電化は同時に、製造におけるデジタル制御も可能になるために、DX（デジタル・トランスフォーメーション）化にもつながる。化学・セメント産業においても、燃料・原料転換を通じて、リサイクルによる炭素循環やCO₂回収型の製造プロセスに製造プロセスを変革する必要もあるだろう¹³。

2030年度にGHGを2013年度比46%削減することや2050年のカーボンニュートラル（GHG排出量をネットでゼロにすること。以下、CN）を国際公約するわが国において、こうしたGX投資は不可欠であるものの、民間企業にとって大規模な投資を要するGXの取り組みが、どの程度の市場規模を将来に生み出すのかについて、不確実性が大変高い状況となっている。

こうした取り組みに対して民間企業的意思決定を促すためには、政府が民間企業と共にその政策に中長期に亘ってコミットしていることを示すことが求められる。財政支出の見通しとともに、規制・制度的な措置の見通しを示すことで、国の本気度が民間企業にも伝われば、関連分野における投資や人材が集まることとなり、2.2節におけるイノベーションのネットワーク効果の好循環を生み出すための大きな一助ともなるだろう。

3.2 技術機会

GXが可能となるのは、旧技術から乗り換える先となる脱炭素技術など、新技術のイノベーションが実用可能であることが前提になる。そうした技術機会が存在する場合は、旧技

¹² スコープとはCO₂排出量の測定範囲の考え方。スコープ1とは、自社での製造プロセス等からの直接排出する範囲を指す。

¹³ Isogawa, Ohashi and Anai (2022) では、産業用電力の需要抑制について論じている。

術から新技術に移行するための補助や課税（例えば、カーボンプライシング）が有効となる。

他方で、脱炭素新技術がまだ実用化されていないなかでは、新技術を生み出すための研究開発が優先されるべきである。先に触れた製造業における燃料・原料転換には、まだ実用化されていない技術が多く、そうした技術が実用化されていない中で高額なカーボンプライシングの導入は、GX に向けての企業の取り組みを加速化するというよりは、リーケージ（国内企業の海外移転）を誘発し、雇用や経済成長にマイナスに働く懸念もある。企業の投資意欲を高めることを通じて GX に取り組むための技術機会をしっかりと整えることが、まずは求められるだろう。

GX に資する脱炭素新技術は、産業や企業に共通する取り組みであり、また国の目標達成のためにも不可欠である。他方で、産業横断的なイノベーションであるからこそ、企業はフリーライドされることを恐れて、単独での取り組みに躊躇しがちになることが予想される。官民が将来に向けてのロードマップやビジョンを共有しつつ、市場の失敗を補完する形で政府が規制や支援を総合的にパッケージ化¹⁴するなど、民間投資を促すことが求められるだろう。

なおイノベーションの経路依存性を鑑みると、上記の GX への取り組みは、初動が遅ればそれだけ、GX 移行への社会的コストが累積的に高まることになる。図表 4 にある閾値をなるべく早く乗り越えることで、複数均衡でもグリーン経済の均衡 (C) へ向かうよう初動での取り組みの加速化がカギとなる点を肝に銘じるべきだろう¹⁵。

3.3 専有可能性

民間の持続的な GX 投資を促すためには、GX 投資から得られる便益が投資主体にどの程度還元されるのかがカギになる。これを専有可能性 (appropriability) という。仮に、投資主体が利益の大半を専有できず、その利益は競合他社にフリーライドされてしまうようなことがあれば、民間で自ら GX 投資を行う誘因がなくなってしまう、わが国の GX の取り組みが前に進まないことになる。

GX 投資から生まれるイノベーションの収益がしっかり投資主体に専有されるためには、GX 投資から生み出される GHG 排出量削減が、規制支援制度のなかでしっかり評価される仕組みが必要である。そうした規制支援制度のひとつに、国内における排出量取引制度 (GX-ETS) が位置づけられる。規制支援制度は、各産業を取り巻く脱炭素技術の進展度合いの評価を踏まえたうえでの、透明性 (transparency) ・公平性 (fairness) が担保されている必要がある。また国際的な技術・制度の動向に併せて、規制支援制度が柔軟に対応できる

¹⁴ 米国におけるイノベーション政策の規制支援制度は、例えば Bloom, Van Reenen and Williams (2019) に整理されている。

¹⁵ Golosov, Hasseler, Krusell and Tsyvinski (2014 ; 以下 GHKT (2014)) は、最適炭素税を時間とともに低下させていくべきとしている。この点は本稿における初動の重要性と整合的である。なお GHKT (2014) では技術選択の内生性について取り扱っておらず、よって本節が関心を持つ技術機会については検討の射程に入っていない。もし技術機会を検討の射程に入れるとすれば、GHKT (2014) の最適炭素税の時間的な推移は異なったものになると想定される。

よう制度の頑強性 (resilience) も求められる。なによりも規制支援制度に対する民間の信頼と、官民で GX を進めていくという方向性に対する連帯感 (solidarity) が不可欠である。

いずれにしても GX の取り組みにおいて、市場の失敗による政策の必要性はあるものの (2.2)、政府が行えることは、民間の GX 投資に向けて、初動における呼び水を与えることであり、中長期的には民間活動の補完的な役割しか果たせない。こうした民間の取り組みを最大限生かせるように、これまで個別の事業法として運用されている GHG に関わる制度 (高度化法義務達成市場、省エネ法、運輸における乗用車燃費基準等) を排出量取引制度に統合させつつ、炭素中立的な取引制度を目指していくべきだろう。

わが国では、GHG 排出量 1 トンあたりに限界的に課せられる地球温暖化対策税 (温対税) が炭素税としてよく知られているが、GHG 排出量に限界的に比例していないが、地球温暖化対策に貢献する公租公課も存在する。例えば、高度化法や省エネ法による規制がそれに相当する。こうした規制は、限界的に GHG の排出量と比例していないので、暗示的な炭素税とも呼ばれることがある (対して温対税は明示的な炭素税とよばれる)。わが国の GHG における国民負担は、温対税のような限界的な公租公課だけに表れているわけではなく、非価格的手段を含む暗示的な炭素税でも実効的に規制されていることも念頭におく必要がある。GHG に対する国民負担をしっかりと可視化して、公租公課全体をグリーン税制として翻訳できるようにしておくことが国益のためにも重要だろう¹⁶。こうした取り組みは、わが国に立地する企業が、自国で雇用を生み出しながら、リーケージを起こすことなく、他国に立地する企業と同じ競争条件で競争をしていくうえでも不可欠な政策的な措置となる。

同様に、わが国における GHG 排出量は世界全体の 3% に過ぎないことを思えば、GX における研究開発の成果は、国内のみならず、海外諸国にも使えるようにすることが地球温暖化対策としては望ましい姿だろう。そうした誘因を企業に持たせるためにも、海外での GHG 削減に対して、自国でのカウントをできるようにするなど、民間にもメリットがある形の制度措置を深掘りできることが望ましい。

3.4 市場競争

GX 投資は民間企業が主体となる点では、市場メカニズムが十全に機能することが前提になる。3.1 節における市場規模がイノベーションの方向性や誘因に大きな影響を与える点も市場メカニズムの機能が暗黙裡に前提になっていた。

この節では、3つの点を論じることとする。3.4.1 節では、市場構造とイノベーションとの関係について伝統的な理論を紹介するとともに、最近の実証分析の結果についても議論する。3.4.2 節では価格効果について触れる。技術のトランジションにおいて、価格効果が技術の動向に影響を与える可能性があり、そのためにも政策が果たす役割がある点を改

¹⁶ なお不確実性下においては、数量よりも価格での規制が社会厚生上望ましいことが知られている (例えば Pizer, 1998)。他方で、わが国の企業は数量での経営管理を得意とする傾向があるように思われる。この点については別稿にて論じられればと思う。

めて強調する。3.4.3 節では、GX 投資を通じたグリーン経済の実現に向けて、消費者主権による変革が求められる点を指摘する。

3.4.1 市場競争とイノベーションとの関係

市場競争とイノベーションとの関係には、以前から2つの見方が存在する。1つは完全競争が望ましいとする見方¹⁷であり、もう1つは独占が望ましいとの見方である。ともにシュンペータによって提起されたものである。

シュンペータは、まず『経済発展の理論』（1911）にて、「起業家と小規模企業による競争がイノベーションを生み出す」とし、イノベーションを生み出すうえでの独占のデメリットと競争の重要性に言及した。興味深いことに、その後になって『資本、社会主義、民主主義』（1942）において、「市場支配力をもつ大企業の存在がイノベーションを促すために必要」という指摘をし、独占がイノベーションを生み出すうえで望ましいとした¹⁸。

では独占と競争といずれがイノベーションを促進するのか。伝統的に経済学では、市場競争とイノベーション活動との関係は活発に実証分析された。しかし、過去の実証研究の中には市場構造とイノベーション活動の成果との間に明確な関係が見てとれなかったことから、市場構造は市場規模と技術機会によって説明されるのではないかとの見方もあった¹⁹。

その後、Aghion, Bloom, Blundell, Griffith, and Howitt (2005) らは特許件数をイノベーションの代替変数をみなすことで、競争の程度とイノベーションの間には逆U字型の関係があることを実証的に指摘している。イノベーションを最も促す競争形態は、独占と完全競争との間に位置するというわけである。この逆U字型は、日本でも大橋・明城・西川 (2010) によって全国イノベーション調査のデータを使って裏付けられたことが報告されている。

他方で、異なる業種を横断面（クロス・セクション）のデータでの比較は、業種などの属性の違いがコントロールされていない。ハードディスク産業においてシミュレーションによって企業数のみを変化させた場合における内生的なイノベーションの水準を計算した Igami and Uetake (2020) は、企業数が増えるほどイノベーションが活性化するという線形の関係を見出している。イノベーションを活性化させるために、保護と競争のバランスをどう取るか、まだ研究の決着がついていないといえる。

いずれにしても、イノベーションと市場構造とが相互に影響を与えあうことから、イノベーションと市場構造との関係は一様に定まるわけではなく、市場や技術の特性などの要因によってその関係は異なりうる。イノベーションの観点から市場の競争性を判断するときには、注目するGXの事例ごとに潜在的な企業の存在も考慮に入れた分析を行うことが求められるのではないかと思われる。

¹⁷ この点を指摘したのは Arrow (1962) である。

¹⁸ 理論的な詳細の検討については大橋 (2013) を参照のこと。

¹⁹ 代表的には Levin, Cohen and Mowery (1985)。

3.4.2 価格効果の重要性と政府の役割

イノベーションの方向性を決める上で、価格が重要な役割を果たすことは実証分析からも明らかにされてきた。例えば、Newell, Jaffe and Stavins (1999) は空調におけるイノベーションの方向性について分析を行い、エネルギー価格が安定しているときは価格を下げるイノベーションが発達したものの、1970年代のオイルショックで電気代が上がると、エネルギー効率を高めるイノベーションが進んだことを指摘した。同様に Popp (2002) は1970年から1994年までにおける化石燃料価格とエネルギー効率との間に正の相関関係があることを示した。

このように市場メカニズムにおいて、価格がイノベーションの方向性に与える影響は大きい。地球温暖化対策を世界の各国が進めるなかで、化石燃料など限りある資源への開発が減少していくことが予想される。また地政学的なリスクによっても、化石燃料の価格が高止まりすることが近年みられている。

資源価格の高騰によって、イノベーションの方向は2つの可能性がある (Acemoglu, Aghion, Bursztyn and Hemous (2012))。1つは、GXに向けて脱炭素新技術への投資が進むことである。もう1つは、Newell, Jaffe and Stavins (1999) や Popp (2002) が示すように、既存技術の効率性を向上させる取り組みを民間企業が行う可能性である。後者については、市場規模 (3.1) と技術機会 (3.2) との相対的な規模によって、市場メカニズムに任せておくと、価格効果によって既存技術のイノベーションが活性化され、地球温暖化対策とは逆行する方向にイノベーションが向かいかねないことを意味する。

もちろん炭素税の導入によって、イノベーションの方向が既存技術に向かう誘因を薄めることはあっても、その誘因を完全になくすことはできない。そこで技術のトランジションにおいては、3.1節で論じたように、GXの方向性における政府が研究開発補助や税制措置を駆使して、イノベーションの方向づけを明確にコミットすることが重要だろう。

3.4.3 消費者主権と技術選択

この節では3つの互いに関連しつつも異なる論点を列記したいと思う。

(1) カーボンフットプリント

市場メカニズムは消費者主権に基づいて成り立っている。消費者による自由な意思に基づく購買行動によって、企業は消費者の選択にかなうよう、競争を繰り広げているからである。

そこでCNを市場メカニズムにおいて実現するには、消費者がGHGを意識して購買行動を行うことが不可欠となる。その前提には、GHGの可視化(見える化)が必要である。

カーボンフットプリント(CFP)は、原材料調達から輸送・製造を経て、消費者の手に届くまでに排出されるGHGを積算し表示するものだ。政策的には2009年頃からCFPは取り組まれたが、CFPの表示が消費者に浸透せず、企業側での認証コストもかさんだために

うまくいかなかった。

他方で、デジタル化によって企業のサプライチェーンを見える化させるための素地が整ってきたこと、そして2050年のCNに向けての取り組みが日本でも加速化していることを踏まえると、改めてCFPに挑戦することの意義がある。

もちろん消費者のなかには、どれだけGHGが高かろうが、安い商品を選択する人がいる。他方で、同じ消費者のなかには、若干高い価格を支払ってでも、GHG排出の低減に貢献しようという思いのある人もいるはずだ。

デジタル化によって、自らの購買行動がどれだけのGHG排出を生み出しているのかが分かれば、こうした多様な消費者のニーズに応えることができ、消費者主権のもとで、CN社会への第一歩を踏み出すことができる。

(2) 消費ベースでのGHG排出量

GHGの国別の比較は、生産ベースでのGHG排出量で見るのが一般的だ。これはサプライチェーンの上流における排出量を計測しやすいことが一因に挙げられる。

他方で、市場経済に基づく資本主義社会が、消費者主権であることを踏まえると、GHGの比較は、サプライチェーンの上流で行うのではなく、下流である消費ベースにおいて行うべきと考えられる。CFPによってGHGを見える化し、消費者が自ら購入するGHGをしっかり補足すること、それによってCN社会の実現のために意識変革を促すことできるのではないか。

GHG排出量を生産ベースでなく消費ベースで捕捉することの議論は機が熟しておらず、現在のところ、技術的にも困難のようだ。しかしいま論じても意味がないことでも、将来には消費ベースでGHG排出量を補足することが技術的に可能な時が来るかもしれない。

実現可能な次善策を用意しつつも、本来あるべき最善策は何かを常に意識し続けておくことは、経済学を政策立案の現場に定着させるうえで大切な姿勢であろう²⁰。

(3) Exit and Voice

GX投資には市場の失敗により政策の役割が重要であるものの、持続可能なGXを進めていくためには民間事業者が主体になる必要がある。そのためには市場メカニズムの機能を十全に活用しながら、政策がその機能を補完する形で経済誘因がグリーン経済の実現に向かうようにGX投資を進めていくことが必要である。

市場メカニズムとは、消費者主権のもとで購買の可否(exit)を通じて、企業のインセンティブ付けを図るということと一般に考えられる。しかしBroccardo, Hart and Zingales (2022)は、コーポレートガバナンスの文脈において、企業や投資家がESG(環境・社会・ガバナンス)に少しでも関心を持っているのであれば、市場メカニズムに依存するexitで

²⁰ López and Leighton (2012)では、アイデアが政策や現実に反映するには相当の時間がかかることも多く、他方でそのタイミングは意外な形で訪れることを論じている。

はなく、voice（対話・エンゲージメント等を通じて経営陣に改善を要求する）の方が、より効果的であり、社会厚生も高いことを示している。

GX 投資においても、本稿でも触れたように、規制支援制度を使って市場メカニズムを生かした取り組みが進んでいる。こうした取り組みと並行して、金融セクターによるエンゲージメントも行われているが、その取り組みのすそ野を多面的なステークホルダーにまで広げていくことが求められるのではないかと。今後のGXの進展に向けて、新たな官民連携の果たす役割やその方法論を模索することは、検討に値するのではないかとと思われる。

4. おわりに

カーボンニュートラル（GHG 排出量をネットでゼロにすること）を2050年に達成できたとしても、過去に排出された蓄積があるために地球温暖化に対して即効性はなく、その効果が継続的なカーボンニュートラルが続けられた場合の21世紀後半になるといわれている。つまり地球温暖化に対する政策の効果が出るのは、私たちの後の世代になる。

こうした点を踏まえたうえで、本稿ではイノベーションの観点からグリーン経済に向けての政策のあり方について論じた。

時間が経つと、いまは未知だが、これまでの努力を一掃するようなイノベーションが登場する可能性もないとは言えない。さらに地球規模の問題なために、他国がフリーライドすれば、一国の努力は水泡に帰すことになる。本論文では地球温暖化の取り組みについて、緩和策を念頭に置きながら、政策の果たす役割を国内施策に重点を置いて論じた。しかし地球温暖化に対しては、国際的協調の観点が欠かせず、それは本論文で述べた炭素国境措置のみに限らない。今後成長が見込まれるアジアにおいて、日本がどのような貢献を果たせるかも大きな論点である。消費ベースでのGHG排出量の計測・評価への取り組みなど、企業立地に中立的な制度を作っていくことがまずは大きな一歩になるのではないかと。

最後に、地球温暖化対策が生物多様性戦略にどのように位置づけられるかの議論が早晩必要であると思われる。2010年に生物多様性条約第10回締約国会議がわが国で開催され、これに先立つカルタヘナ議定書第5回締約国会合では、名古屋・クアラルンプール補足議定書が採択された。国内では「生物多様性基本法」（平成20年）や「地域における多様な主体の連携による生物の多様性の保全のための活動の促進等に関する法律」（平成22年）等に関連する法律の制定・改正が行われ、2022年の昆明・モンテリオール生物多様性枠組みを踏まえ、2030年のネイチャーポジティブ（自然再興）の実現に向けた5つの戦略も策定される。地球温暖化対策は生物多様性に寄与するところも大であるが、必ずしも両者が整合的であるわけではない²¹。こうした背景を踏まえた幅広い視点での政策議論が必要であろう。

²¹ 例えば地球温暖化の観点からは、水田の畦畔における多種多様な生物の生息は抑制すべきと考えられるかもしれないが、生物多様性の観点からは、必ずしもそのようには結論づけられない。

参考文献

- 大橋弘 (2013) 「イノベーションと市場構造」『公正取引』, 748, pp.48-54.
- 大橋弘編著 (2014) 『プロダクト・イノベーションの経済分析』, 東京大学出版会.
- 大橋弘・財務総合政策研究所編著 (2018) 『イノベーションの研究－生産性向上の本質とは何か』, 金融財政事情研究会.
- 大橋弘 (2021) 『競争政策の経済学』 日本経済新聞出版.
- 大橋弘 (2022) 「ネットワーク産業と経済学」, 宿利正史・軸丸真二 (編) 『国際交通論：政策・産業とその展望』 第1部 第2章, 東京大学出版会.
- 大橋弘・明城聡・西川浩平 (2010) 『第2回全国イノベーション調査報告』, NISTEP REPORT 144.
- シュンペータ, J. A. (1911) *Theory of Economic Development*. (塩野谷祐一、東畑精一、中山伊知郎・訳、(1977) 『経済発展の理論』, 岩波文庫.)
- シュンペータ, J. A. (1942) *Capitalism, Socialism and Democracy* (東畑精一、中山伊知郎・訳 (1995) 『新装版 資本、社会主義、民主主義』, 東洋経済新報社.)
- 国土交通省 社会資本整備審議会 (2020) 「気候変動を踏まえた「流水治水」対策のあり方について～河川・下水道管理者等による治水に加え、あらゆる関係者が流域全体で行う持続可能な「流域治水」への転換～」答申.
- 中山茂 (1995) 『科学技術の戦後史』, 岩波新書.
- 農林水産省 (2021) 『みどりの食料システム戦略～食料・農林水産業の生産力向上と持続性の両立をイノベーションで実現～』 (令和3年5月) 参考資料 P2.
- 古舘恒介 (2021) 『エネルギーをめぐる旅：文明の歴史と私たちの未来』, 英治出版.
- 村上陽一郎 (2010) 『人間にとって科学とは何か』, 新潮新書.
- メンドウズ, D.H., D.L.メンドウズ, J.ラーンダス, W.W.ベアランズ三世・著、大木佐武郎・監訳 (1972) 『成長の限界』, ダイヤモンド社.
- Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztyn, and D. Hemous, (2012), “The Environment and Directed Technical Change,” *American Economic Review* 102(1): pp.131-66.
- Aghion, P., C. Hepburn, A. Teytelboym, and D. Zenghelis, (2014), “Path Dependence, Innovation and the Economics of Climate Change,” *Centre for Climate Change Economics and Policy and Gratham Research Institute on Climate Change and the Environment*.
- Aghion, P., N. Bloom, R. Blundell, R. Griffith, and P. Howitt, (2005), “Competition and Innovation: An Inverted-U Relationship,” *Quarterly Journal of Economics* 120 (2): pp.701–28.
- Aghion, P., M. Dewatripont and J. C, Stein, (2008), “Academic Freedom, Private Sector Focus, and the Process of Innovation,” *Rand Journal of Economics* 39 (3): pp.617–635.
- Arrow, K., (1962), “Economic Welfare and the Allocation of Resources for Inventions,” In: Nelson, R.R. (Ed.), *The Rate and Direction of Inventive Activity: Economic and Social Factors*, Princeton University Press, Princeton.

- Bloom, N., J. Van Reenen and H. Williams, (2019), “A Toolkit of Policies to Promote Innovation,” *Journal of Economic Perspectives* 33(3): pp.163-84.
- Broccardo, E., O. Hart, and L. Zingales, (2022), “Exit versus Voice,” *Journal of Political Economy* 130(12): pp.3101-45.
- Bryan, K. A., and H. L. Williams, (2021), “Innovation: Market Failures and Public Policies,” In: Ho, K., A. Hortascu, and A. Lizzeri, *Handbook of Industrial Organization*, Vol.5, No.1: pp.281-388, Elsevier.
- Cohen, W. M., (2010), “Fifty Years of Empirical Studies of Innovative Activity and Performance,” *Handbook of the Economics of Innovation* (1): pp.129-213.
- Golosov, M., J. Hasseler, P. Krusell, and A. Tsyvinski, (2014), “Optimal Taxes on Fossil Fuel in General Equilibrium,” *Econometrica* 82(1): pp.41-88.
- Gordon, R. J. (2016), *The Rise and Fall of American Growth*, Princeton University Press.
- Hsieh, C. T., and P. J. Klenow, (2009), “Misallocation and Manufacturing TFP in China and India,” *Quarterly Journal of Economics*, 124(4): pp.1403-48.
- Igami, M., and K. Uetake, (2020), “Mergers, Innovation, and Entry-exit Dynamics: Consolidation of the Hard Disk Drive Industry, 1996–2016,” *Review of Economic Studies* 87 (6): pp.2672–702.
- Isogawa, D., H. Ohashi, and T. Anai, (2022), “Role of Advance Notice on High-priced Hours: Critical-Peak Pricing on Industrial Demand,” RIETI 22-E-068.
- Jones, B. F., (2009), “The Burden of Knowledge and the “Death of the Renaissance Man”: Is Innovation Getting Harder?” *Review of Economic Studies* 76 (1): pp.283–317.
- Levin, R. C., W. M. Cohen, and D. C. Mowery, (1985), “R&D Appropriability, Opportunity, and Market Structure: New Evidence on Some Schumpeterian Hypotheses,” *American Economic Review*, 75(2): pp.20-24.
- Edward, L. and W. A. Leighton, (2012), *Madmen, Intellectuals, and Academic Scribblers: The Economic Engine of Political Change*, Stanford University Press.
- Malm, A. (2016), *Fossil Capital: The Rise of Steam Power and the Roots of Global Warming*, Verso Books.
- Mankiw, N. G., and M. D. Whinston, (1986), “Free Entry and Social Inefficiency,” *RAND Journal of Economics*, pp.48-58.
- Murray, F., P. Aghion, M. Dewatripont, J. Kolev and S. Stern, (2016) Of mice and academics: examining the effect of openness on innovation. *American Economic Journal: Economic Policy*, 8 (1): pp.212–252.
- Newell, R., A. Jaffe, and R. Stavins, (1999) “The Induced Innovation Hypothesis and Energy-Saving Innovation,” *Quarterly Journal of Economics*, 114 (3): pp.941-975.
- Pizer, W., (1998), “The Optimal Choice of Climate Change Policy in the Presence of Uncertainty,” *Resource and Energy Economics* 21: pp.255-87.

- Popp, D., (2002), “Induced Innovation and Energy Prices,” *American Economic Review*, 92 (1): pp.160-180.
- Rogers, E. M., (2003), *Diffusion of Innovations*, 5th Edition, Free Press.
- Shapiro, C., (2012), “Competition and Innovation: Did Arrow Hit Bull’s Eye?” In: Lerner, J, and S. Stern (eds), *The Rate and Direction of Innovative Activity Revisited*, NBER, University of Chicago Press.
- Schmookler, J., (1966), *Invention and Economic Growth. In Invention and Economic Growth*, Harvard University Press.
- Solow, R. M., (1957) “Technical Change and the Aggregate Production Function,” *Review of Economics and Statistics* 39(3): pp.312-20.
- Tol, R. S. J., (2019), *Climate Economics: Economic Analysis of Climate, Climate Change and Climate Policy*, Second Edition.
- Wu, L., D. Wang and J. A. Evans., (2019), “Large Teams Develop and Small Teams Disrupt Science and Technology,” *Nature* 566 (7744): pp.378–82.