

サステナビリティへ向けたイノベーション・システムの国際比較分析 International Comparative Analysis of Innovation Systems for Sustainability

鎗目 雅*
YARIME Masaru

サステナビリティ、イノベーション、企業戦略、制度設計、太陽電池
Sustainability, Innovation, Corporate Strategy, Institutional Design, Solar Cells

要旨

本研究では、経済的及び社会的な価値を両立するような形で、サステナビリティへ向けたイノベーションを創成していくメカニズムについて、太陽電池をケースとして日本とドイツなどの国際比較分析を行う。科学技術、企業戦略、公共政策、制度設計の観点を含めて、定量的なデータを活用し、自然科学、工学、社会科学を包摂した新しい学融合的な方法論を開発し、イノベーション・システムの機能・構造・進化を分析することを目指す。

はじめに

近年、産学官連携の進展に顕著に見られるように、知識が各領域・組織内で閉じた形で独立に生産・活用される様式から、行動主体が個別の境界を越えて共同作業を行なうネットワーク化が極めて重要な役割を担いつつある (Yarime and Baba, 2005; 馬場 and 鎗目, 2007)。特に地球環境問題のように極めて複雑な現象に対しては、個人・組織がそれぞれ単独で対処していくことが非常に困難であり、ネットワークを通じて多様な主体が共創的に取り組むことにより、従来得られなかったイノベーションを創出できる可能性がある。関連するアクターの間での有機的な連携を通じて、科学技術的知識をユーザーのニーズと組み合わせることで新しい機能を生みだし、それを広く社会において活用していくというサステナブル・イノベーションのプロセス全体を正確に理解することが求められている。地球レベルでの持続可能な社会の構築に当たっては、如何にして長期的な観点から環境保護と経済発展の両者のバランスを図っていくかが大きな課題となっている。従来、環境的な価値と商業的な価値は本質的に対立するものと捉えられてきたが、最近いくつかの先進的な領域においては、大学・企業・公的機関などが自ら戦略的な取り組みを行うことにより、サステナビリティに向けたイノベーションの創出に成功を収めるものも出てきている。

本研究では、サステナブル・イノベーションを通じて、経済的及び社会的な価値を両立するよう

な形で創成していくメカニズムについて、太陽電池をケースとして日本とドイツなどの国際比較分析を行う。科学技術、企業戦略、公共政策、制度設計の観点を含めて、定量的なデータを活用し、自然科学、工学、社会科学を包摂した新しい学融合的な方法論を開発し、イノベーション・システムの機能・構造・進化を分析することを目指す。

環境規制とイノベーション

環境規制とイノベーションの関係に関しては、マイケル・ポーターが企業競争力の分析の観点から、厳しい環境規制は従来言われているように産業の競争力を妨げるのではなく、むしろイノベーションを促すことにより長期的には競争力を増大させるという、いわゆる「ポーター仮説」を提唱している (Porter and van der Linde, 1995)。しかしながら、いくつかの事例は挙げられているものの、どのような政策・制度の下で企業はどのような戦略を取る必要があるのか、一般的なフレームからの詳細な分析はなされていない。ポーター仮説がいかなる条件の下で成り立つのか、そのためにはどのような企業戦略、公共政策、制度設計を選択すべきかを具体的に検証する必要がある。それは、従来の環境経済学における議論のように、環境政策として直接規制と税・課徴金を想定し、主に静学的な観点から効率性を比較する手法に対して、環境イノベーションの創出における企業戦略と政策・制度のネットワークを通じた共進化のダイナミック分析という新たな視点を提

* 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 准教授

* Associate Professor, Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo

供することにつながる。これまで組織・マネジメント研究では、戦略的アライアンスに関していくつか既存研究があるが、イノベーション・ネットワークの視点は希薄で、実証研究の対象が比較的少なく、構造の静的な分析が主であった。

例えば化学産業では、環境規制を導入する際、エンド・オブ・パイプ技術ではなくクリーン技術へ向けた研究開発活動を促進するような形が望ましい。一方で、技術変化の過程には不確実性、多様性、及び硬直性が不可避的に存在しており、不適切な技術を早まって選択してしまうのを避ける必要がある(Yarime, 2007)。こうした状況では、環境負荷の大きい既存技術を廃止するという目標を長期的な観点から明確にすることで、クリーン技術に対する需要を喚起し、革新的なイノベーションにつながる研究開発活動を企業に対して促す一方、最新の技術開発の動向に関する正確で詳細な情報の交換と共有を通じて、学習効果による技術進歩を顕在化させるような制度的枠組みを作り出すことが必要となる。

マクロ・レベルの定量分析とマイクロ・レベルの具体的な情報を組み合わせることにより、イノベーションの創出において研究開発ネットワークがどのようなメカニズムで形成され、制度との相互作用を通じて共進化するのか、国際比較の観点から研究がなされている。産学官連携に関わる多くの組織・個人を分析対象とし、分析手法もマクロ構造のネットワーク分析の定量分析を中心に、個別分野の詳細な情報の定性分析も行われてきている。鉛フリーはんだの開発のケースでは、日本の大学研究者は、技術的可能性を中立的な立場から評価し、研究者間の国際的なネットワークを通じて世界に積極的に情報発信をし、鉛フリーはんだに関する材料規格の策定、試験方法の統一化など制度的な枠組みが国際的に整備され、技術変化を促進した(鎗目 and 馬場, 2007)。産学官に渡る研究開発ネットワークが技術変化と制度形成に与える影響は国と地域によって多様性が認められるが、大学や公的機関の研究者が主導する研究開発ネットワークが国際的に展開するに伴い、それぞれの国と地域の制度が長期的に収斂していく可能性が高いと考えられる。研究開発ネットワークがそれぞれの国と地域、また、国境を越えてどのような形で技術変化と制度形成に貢献できるか、国際比較によって分析を行った結果、質の高い学術研究を行うという従来から要請されてきた役割に加え、積極的に社会と連携することによっ

て社会的課題を解決するという大学に課された新しい役割が実現可能であることが確認された。地球環境問題など、ステーク・ホルダー間の利害が簡単に一致しない社会的課題において、技術変化の方向性と速度に関する調整役として、学識と中立性を期待される大学研究者が果たす役割は大きい。それぞれの研究開発ネットワークの果たす機能は、その置かれた国や地域のイノベーション・システムの特性によって制約されることが示唆された。日本のイノベーション・システムにおいて、研究開発ネットワークは日本国内の技術開発を促進し市場形成と技術普及に貢献した反面、環境規制に関わる制度形成に対する影響力は極めて限定的であった。それぞれの国家・地域において、技術変化と制度形成を共進化させて技術の社会に対する貢献を最大化するためには、大学を中核とする研究開発ネットワークと分析対象となる国や地域におけるイノベーション・システムの相互作用をより深く理解することが必要であり、将来に残された研究課題となっている。

サステナビリティ・サイエンス

地球レベルでの持続可能性を考えていく上で、新しい学問的アプローチとしてのサステナビリティ・サイエンスが探求されている(Kates, Clark, Corell, Hall, Jaeger, Lowe, McCarthy, Schellnhuber, Bolin, Dickson, Faucheux, Gallopin, Grubler, Huntley, Jager, Jodha, Kasperson, Mabogunje, Matson, Mooney, Moore, O'Riordan, and Svedin, 2001; Komiyama and Takeuchi, 2006)。そこでは、自然システムと社会システムとの相互作用に関する基本的な性質を理解することが重要となっている。対象とする空間が広範囲に亘る、次世代を含む長期間に関わる、要素間の相互依存関係が複雑である、そして不確実性が極めて大きいという特徴から、自然科学、工学、社会科学を含めた学融合の観点からの共創が必要不可欠となっている。サステナビリティ・イノベーションを創出するにあたっては、自然システムと社会システムの間で物質・エネルギーが移動・循環する物理的な流れがあると同時に、産学官を含めた行動主体間に発生する複雑なネットワークが知識を生み出し、社会において伝達・活用される。その過程において自然システムと社会システムが共進化しながらその構造・機能をダイナミックに進化させていく過程を分析することが重要となっている。自然システムと社会システムとの間の複雑な相互作用の

解明においては、物質・エネルギー、金融、情報・知識などが生産・伝達・利用されるプロセスを統合的に理解することで、その過程で経済的及び社会的な様々な価値が創出され、流通し、分配されるメカニズムを解明することが期待される。既存の学問体系で蓄積されてきた研究手法を相補的に取り入れ、自然科学、工学、社会科学の学融合的な手法を開発することによって、イノベーション・システムの機能・構造・進化を明らかにすることが求められる。

自然システムと社会システムの間での相互作用において交換・循環されるものとしては、物質・エネルギー、人、金融、情報・知識などが考えられる(鎗目, 2008)。物質・エネルギーに関しては、マテリアル・フロー、エネルギー・フローの分析について、ライフ・サイクル・アセスメント(LCA)の観点から主に工学の分野で研究がなされてきている。一方、金融の流れに関しては、経済学・経営学の分野での研究が行われている。それに対して、情報・知識の流れに関しては、まだ研究の蓄積がそれほど進んでおらず、近年イノベーション研究においてネットワーク分析などを用いて、研究開発における情報・知識の移転について分析がなされつつある。

太陽電池のケース

サステイナブル・イノベーションにおいて、どのようにして経済的価値及び社会的価値が創出され、流通・分配されるのか、太陽電池の開発・普及をケースとして統合的な分析を行う。現在太陽電池は、持続可能なエネルギー技術として世界的な注目を集めている。これまで日本は、エレクトロニクス産業の強固な基盤を背景として、太陽電池に関する技術開発・導入において世界をリードしてきたが、最近では欧州、特にドイツにおける導入が急激に進み、累積導入量ではついに日本を抜いて世界一となるに至っている。特に、2007年に太陽電池産業で世界一になったドイツ企業 Q-Cells は、実質6年で世界一の生産量を誇る地位になり、また同じくドイツの企業である First Solar は極めて短期間の間に世界3位にまで上り詰めており、現在のプライス・リーダーとも言われている。この企業はカドミウム・テルルという太陽電池を製造販売しているが、バンド・ギャップも太陽光とマッチングが取れており、光電変換効率も製品レベルで10-11%に達しており、アモルファス・シリコンより優れた技術ではないかと言われている。しかし、製品をリサイクルする必要

がある、また酸性雨で溶ける可能性があるという問題点もあり、日本では商業化には至らなかった。松下電池が NEDO 委託研究で世界最高の技術を開発したと言われているが、松下グループ全体の環境政策のために撤退している。

First Solar は、もともとアメリカの会社で、当初は低迷していたが、ドイツにおいて Feed-in-Tariff 政策によって太陽電池による発電を高値で買い支えることで太陽電池の導入が拡大し、また太陽電池用シリコンの供給不足問題が重なったこともあり、急激な成長を遂げた。今後2009年までに年産810MWにまで生産量を拡大する計画を持っており、マレーシアには480MWの工場を建設する計画もあるといわれている。カドミウムという有害物質を集積させること、またマレーシア政府は税制の優遇策でそうした企業を誘致することの是非に関する問題も指摘されているが、そうした懸念に対して、カドミウムは毒性が高いため取り扱いに苦慮するが、製錬の副生物として必ず生産される金属であり、完全に回収リサイクルすることで、永久に太陽電池として閉じたサイクルの中で利用している。環境面にも配慮し、エネルギーに関するサステイナビリティ・イノベーションのビジネス・モデルを構築することで、社会的な認知を獲得しつつある。

金融面では、最近の海外メーカーの急速な成長は、豊富な資金に支えられたことが非常に大きな役割を果たしている(張谷, 2008)。欧州では、太陽電池向けの投資ファンドの設立を通して、一般向けの金融商品が開発されており、投資家から資金を集めて太陽光電池設備に投資し、その後太陽電池で発電した電力を電力会社に売って、その収入を投資家に戻す仕組みとなっている。またアジアでは、株式公開によって資金を集め、他社の買収や設備投資などに活用することで、中国などのメーカーが急激に生産量を増やしつつある。一方米国においては、特に近年太陽電池を始めとしてクリーン・テクノロジーへの民間投資が急激に増えている状況がある。従来日本における太陽電池の開発では、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)を中心としたコンソーシアムを通じて研究開発が進められ、着実な成果を上げてきたが、近年は特にドイツにおける市場が立ち上がり、欧州、米国、中国などのベンチャー企業が、多くの出資者によるファンドを通じた大規模な投資を基にして、太陽電池の生産量を急増させている状況である。すなわち、イノベーション・プ

ロセスにおいて、公的機関による研究開発の着実なサポートが重要な初期段階から、民間部門による積極的な投資を通じた社会一般への普及段階へと質的に異なったフェーズに移行しつつあると言える。

おわりに

物質・エネルギーが移動・循環する物理的な流れによって自然環境に影響を与えると同時に、金融を含めた経済的な価値が取引を通じて流通することで社会的な影響を及ぼす。そうした自然環境、人工物、経済社会に関する様々な情報・知識が、産学官を含めたアクターの間で形成されたネットワークを通じて創出・伝達・活用される。知識の社会的循環の構造・機能がダイナミックに進化していくプロセスを包括的な観点から分析することは、サステイナビリティ・イノベーションの中心的な問題であると考えられる(吉川, 2006)。これは一面において、産業エコロジーと産業ダイナミクスを知識の社会的循環という観点から統合する試みと言える。

持続性に配慮した科学技術を創出し活用するための制度・仕組み(広い意味でのビジネス・モデル)を如何にして構築していくことができるか、そのメカニズムを学問的に分析することができる方法論を開発し、その成果を大学・企業・政府・市民の効率的な連携を通じて社会において実現することが求められている。太陽電池を対象として、サステイナビリティ・サイエンスが取り組む自然システムと社会システムの相互作用の観点から、社会的かつ経済的な価値を創成するようなビジネス・モデルを構築するというのは非常に重要であると考えられる。

今後、金融的な流通を促進するチャンネルがどのようにして形成されてきたのか分析するとともに、科学的知識について、太陽電池に関わる科学論文の共著、特許の共願、研究開発コンソーシアムへの参加に関するデータベースを基に、組織間でのネットワーク構造を分析して、情報・知識の生産・伝達・活用のプロセスを検証する予定である。これまで行った化学産業、自動車産業(Yarime, Shiroyama, and Kuroki, 2008)、電機電子産業に関する研究結果を総合的に検討し、サステイナブル・イノベーションの創出についての一般化可能なフレームワークの構築を行うことを目指す。

参考文献

Kates, Robert W., Clark, William C., Corell, Robert, Hall, J.

Michael, Jaeger, Carlo C., Lowe, Ian, McCarthy, James J., Schellnhuber, Hans Joachim, Bolin, Bert, Dickson, Nancy M., Faucheux, Sylvie, Gallopin, Gilberto C., Grubler, Arnulf, Huntley, Brian, Jager, Jill, Jodha, Narpat S., Kasperson, Roger E., Mabogunje, Akin, Matson, Pamela, Mooney, Harold, Moore, Berrien III, O'Riordan, Timothy, and Svedin, Uno (2001). "Sustainability Science." *Science*, **292** (5517), 641-642.

Komiyama, Hiroshi and Takeuchi, Kazuhiro (2006). "Sustainability Science: Building a New Discipline." *Sustainability Science*, **1** (1), 1-6.

Porter, Michael and van der Linde, Claas (1995). "Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship." *Journal of Economic Perspectives*, **9** (4), 97-118.

Yarime, Masaru (2007). "Promoting Green Innovation or Prolonging the Existing Technology: Regulation and Technological Change in the Chlor-Alkali Industry in Japan and Europe." *Journal of Industrial Ecology*, **11** (4), 117-139.

Yarime, Masaru and Baba, Yasunori (2005). "Dynamics of Embedded Software Development: Coevolution of OS Standards and Community Networks in Japan." *Revista de Comercio Exterior*, **55** (9), 776-787.

Yarime, Masaru, Shiroyama, Hideaki, and Kuroki, Yusuke (2008). "The Strategies of the Japanese Auto Industry in Developing Hybrid and Fuel Cell Vehicles," Mytelka, Lynn K., Boyle, Grant, eds. *Making Choices about Hydrogen: Transport Issues for Developing Countries*. Ottawa and Tokyo: IDRC Press and United Nations University Press.

吉川, 弘之 (2006). "学問改革と大学改革: Sustainability Science." *IDE-現代の高等教育*, (5月号), 24-32.

鎗目, 雅 (2008). "サステイナビリティ・サイエンスの可能性と課題: IR3S, AAAS, GPSS." *サステナ*, **8**, 92-98.

鎗目, 雅 and 馬場, 靖憲 (2007). "地球環境問題の解決に向けた新しい産学官連携: 技術変化と制度形成に関する日米欧比較," 馬場, 靖憲, 後藤, 晃, eds. *産学連携の実証研究*. 東京: 東京大学出版会.

張谷, 幸一 (2008). "好調な太陽電池産業に死角あり: アナリストの視点から." *日経マイクロデバイス*, (2), 69-75.

馬場, 靖憲 and 鎗目, 雅 (2007). "緊密な産学連携によるイノベーションへの貢献: 企業の人材育成に関する分析," 馬場, 靖憲, 後藤, 晃, eds. *産学連携の実証研究*. 東京: 東京大学出版会.

(2008年9月30日原稿受理, 2008年11月4日採用決定)