

# イノベーション、経済成長、環境技術

杉山 大志 (すぎやま たいし) キヤノングローバル戦略研究所 研究主幹

イノベーションとは何か、経済成長とは何か。環境技術とは、どのようにすれば生まれるのか。その為の政府の役割は何か？セザー・ヒダルゴの「経済複雑性」理論を紹介し、政策の在り方を論じよう。

## 1. 経済成長とは何か？

経済学者は経済がなぜ成長するのか良く分かっていなかった。資本が蓄積され労働が投入されると経済は成長するが、それだけではなぜ長期的に目覚ましい経済発展をするか、理解できなかった。その差を埋め合わせるために「全要素生産性」という項が発明されて、時間と共に増加するとされたが、辻褄合わせに過ぎず、「無知の尺度」と経済学者クズネッツは自嘲した<sup>1</sup>。

やがて2018年のノーベル経済学賞を獲ったポール・ローマーが現れ、研究開発投資によって知識が増えていくという定式化をした(Romer, 1990)。だが相変わらず、肝心のこの「知識」の中身はブラックボックスのままであった。他にも人的資本や社会関係資本等によって経済成長を説明する試みもなされたが、不完全なものだった(セザー・ヒダルゴ, 2017)。

他方でブライアン・アーサーやスチュアート・カウフマンが創始した複雑系理論では、新しい知識とは既存の知識が組み合わせられて出来るものであり、その結果、生物の進化と同様に、知識の表現型である技術も進化し複雑性を増すものであるとした(スチュアート・カウフマン, 2002)(ブライアン・アーサー, 2011)。

その上でアーサーは、経済は技術の表現型に他ならない、経済も進化する複雑系である、とした。だがそれを現実に測定するには至らなかった。これを成し遂げたのがヒダルゴである。

以下、本稿では、まずヒダルゴの理論を紹介する(ただし概略なので、詳しくは文献を参照されたい<sup>2</sup>)。次いで、その政策的な意味合いについて議論をしよう。

<sup>1</sup> GDPの生みの親であるクズネッツはノーベル賞受賞スピーチで全要素生産性を「無知の指標」とであると述べた。(セザー・ヒダルゴ, 2017) p192

<sup>2</sup> ヒダルゴの理論について邦文での平易な解説は(セザー・ヒダルゴ, 2017)を参照されたい。本格的には、英文で数学的になるが(Ricardo Hausmann et al, 2014)を参照されたい。なおこの書籍は高価であるが、無料で全文を<https://atlas.media.mit.edu/static/pdf/atlas/AtlasOfEconomicComplexity.pdf>でダウンロードできる。なおヒダルゴの理論に関するデータ・図表集としてはMITホームページ<https://atlas.media.mit.edu/>もある。

## 2. 経済の複雑性指標

ヒダルゴは、諸国の「経済の複雑性指標(Economic Complexity Index, ECI)」を定義し測定してみせた。

概略を述べると、まず諸国の輸出品目の「多様性」を測定し、次いで高度な生産技術を要する品目を輸出している場合には加点した。正確に言えばこれは「輸出の複雑性」だけれども、ヒダルゴはこれを「経済の複雑性」の代替変数と考えた。

以下、より詳しく紹介しよう。

複雑な経済であれば、多様な製品を生産しているので、それは輸出製品の多様性にも現れているはずである。そこで「経済の複雑性」を指標化するための第一近似として、輸出製品の「多様性 Diversity」を測定する。これはその経済が輸出している品目の種類を数えるだけで機械的に出来る。

但し、単に多様な製品を生産しているというだけでは、それがローテクなのかハイテクなのかは区別が付かない。複雑な経済であれば、より難易度が高く、加工度の高い製品、即ち複雑な製品を生産しているはずである。

では、「製品の複雑性」はどのように計算するか。

▶ Graphical representation of Diversity and ubiquity

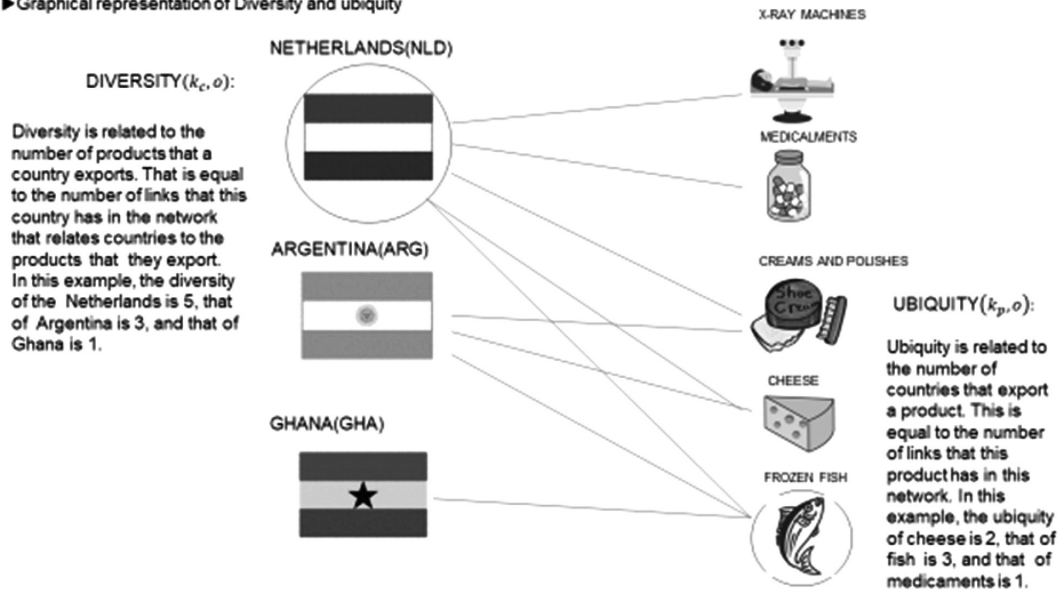


図1 多様性と普遍性の概念図

出典：(Ricardo Hausmann et al, 2014) より筆者作成。

原図は <https://atlas.media.mit.edu/static/pdf/atlas/AtlasOfEconomicComplexity.pdf>

その準備として、製品の「普遍性 Ubiquity」という概念を導入する。ある製品が、多くの国から輸出されている場合はその製品の普遍性は高いが、輸出している国が少なければその普遍性は低い、とする。

以上については、ポンチ絵で分かり易い説明がなされている。

図1において、多様性 Diversity はある国が輸出する製品の種類の数である。この例では、オランダの多様性は5であり、アルゼンチンは3、ガーナは1となっている。普遍性 Ubiquity はある製品を輸出する国の数である。この例では、チーズの普遍性は2であり、冷凍魚は3、医薬品は1である。

さて「経済の複雑性指標」ECI (Economic Complexity Index) は、以上の「多様性」と「普遍性」を用いて計算される。

ECI は、まずは、多様な製品を輸出している国ほど高いとする。ただし、単に多様であるだけでなく、より複雑な製品を輸出している国の方をより高くしたい。そこで「製品の複雑性指標 PCI (Product Complexity Index)」という考え方を導入する。そして、ECI は、PCI が高い製品については加点することにする。さて他方で、PCI は、第一近似としては、普遍性から始める。しかし、単に普遍性が高いだけでは誰でも作れるようなローテクも交じってしまうので、PCI は、より複雑な経済、つまり ECI の高い国で生産している場合については、高くなるように加点する。こうして、ECI は PCI を用いて加点し、PCI は ECI

を用いて加点する、ということを繰り返すことを、収束するまで行うことで、ECI と PCI が同時に得られる。(なお、加点する際には、適宜規格化して数値が収束するようにしている。詳しい導出は補遺2を参照)

この「経済の複雑性指標 ECI」は、1人当たり GDP とほぼ比例することが分かった<sup>3</sup>。そしてヒダルゴはこの ECI を、潜在的な経済成長力の指標である、と論じた。

しかしそれ以上に、筆者が思うに、ヒダルゴの偉業は、まず何よりも、経済の複雑性を実際に指標化して測定してみせたこと自体にあり、そしてそれが、1人当たり GDP という別の独立な測定による指標と比例関係にあることを示したことにある。ここには「無知の指標」である全要素生産性も、ローマーの導入した抽象的な「知識」も入ってこない。

<sup>3</sup> なお、より正確に言えば、ヒダルゴは資源輸出による GDP の増分については補正した上で相関関係を見出している。

### 3. プロダクト・スペース (製品空間)

ヒダルゴは更に、「経済の複雑性」を可視化してみた。

この目的のために、製品間に「距離」を導入した。2つの製品の間「距離」を、その2つの製品が同じ国から輸出される傾向が高い場合には「近い」、とな

FIGURE 5.1:  
▶ The product space.

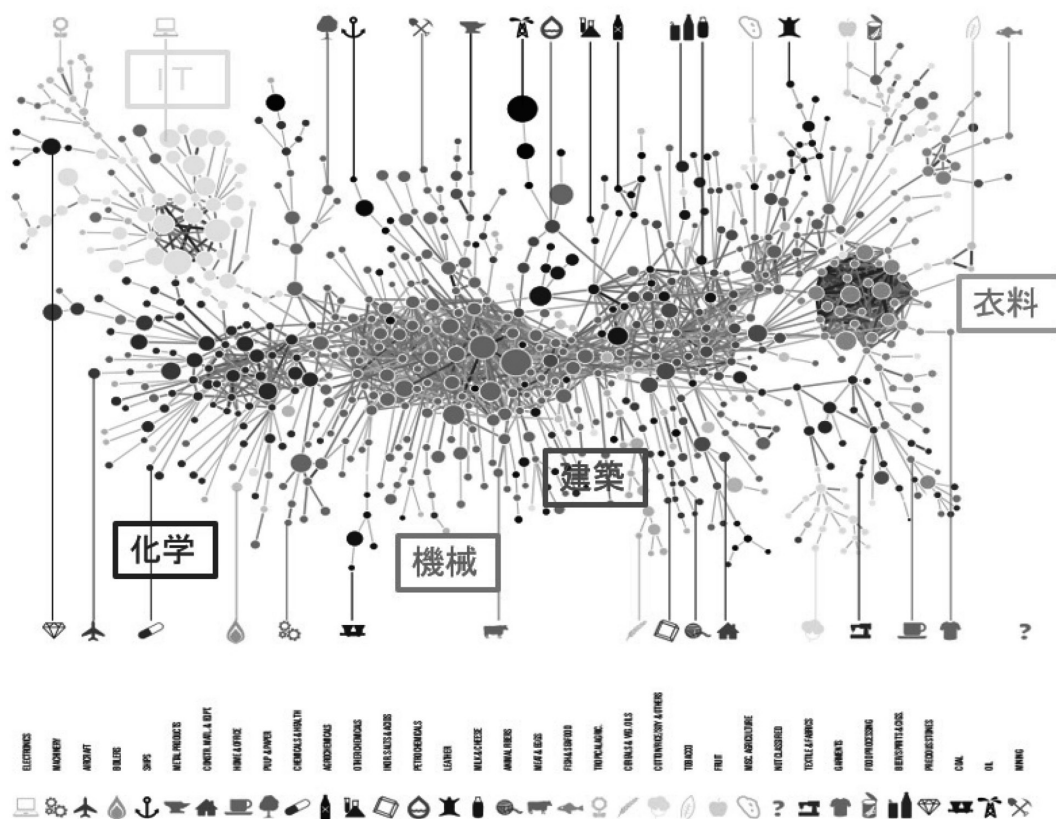


図2 プロダクト・スペース (製品空間)

出典：(Ricardo Hausmann et al, 2014)

<https://atlas.media.mit.edu/static/pdf/atlas/AtlasOfEconomicComplexity.pdf>

日本語のみ筆者加筆。

るように定義する。このようにする理由は、同じ国から輸出されることが多い場合には、その製品を造るために似たような産業基盤が必要だと考えられるからである。このようにして測定された距離を用いると世界で輸出されているあらゆる製品の相関図を描くことが出来て、図2のようになった。これはプロダクト・スペース (製品空間) と命名された。

図全体は世界経済における諸製品の距離が織りなす構造を示している。点は製品、線は製品間の距離を表す。点の大きさはその製品の市場規模である。わかりやすいように、クラスターごとに色を付けて塗り分けてある。主なクラスターとして、衣料、建築、機械、化学、ITが見て取れる。

この図自体は製品に関するものだけでも、この背後には、それを生産する産業、都市圏などの地域的な蓄積、人的能力基盤、人的なネットワーク、それに法律制度等の社会関係資本の蓄積が隠れている。全てを代理する変数として、最も精度の高い測定が体系的に出来る輸出製品に着目することで、このように分解能の

高い経済複雑性の描像が得られた訳である。

この図2を国ごとに時系列で作成すると、図3のように、ある国にどのような産業があって、どのように成長してきたか、その過程を見ることができる。

例えばタイを見てみよう。タイでは、1975年までは衣料ぐらいしか生産していなかったが、1990年以降は、機械産業や電子産業での産業集積が進んでいったことが分かる。これは自動車関連産業が発達したことを反映している。(そしてこれには日本からの技術移転が主要な役割を果たした)。

ヒダルゴは、図3を、国の経済開発の指針に活用することを提案している。図中で、ある製品を作っている産業の蓄積があれば、そこに隣接している製品を作る産業への進出が成功する可能性が高い、と考えられるからだ。ヒダルゴは、これを「隣接可能性のある」製品ないし産業への進出と呼んでいる。このような考え方に基づいた開発途上国の産業政策についての検討の試みが行われている。<sup>4</sup>

<sup>4</sup> 開発途上国における隣接可能性のある産業への進出の検

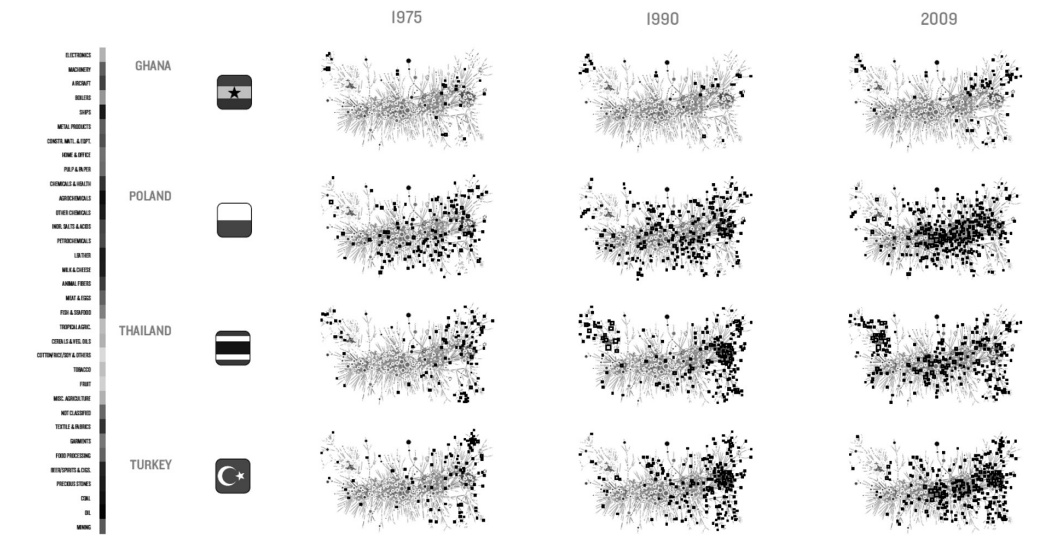


図3 プロダクト・スペースの時間変化の例。ガーナ、ポーランド、タイ、トルコの例。

出典：(Ricardo Hausmann et al, 2014)

<https://atlas.media.mit.edu/static/pdf/atlas/AtlasOfEconomicComplexity.pdf>

討としては <http://atlas.cid.harvard.edu/publications>

#### 4. 経済成長とイノベーションの関係

これ以降は、ヒダルゴ自身は述べていないけれども、筆者が重要と思うことを述べる。まずは経済成長とイノベーションの関係について。

ヒダルゴの理論は経済成長とイノベーションの关系到洞察を与えている。伝統的な経済成長の理論では、いわゆる成長会計を

$$Q = A \times f(K,L)$$

としてきた。ここで  $Q$  は GDP、 $f$  は生産関数、 $K$  は資本、 $L$  は労働で、 $A$  が全要素生産性である。全要素生産性  $A$  は技術進歩を表すとされた。

ここで、技術進歩により  $A$  が大きくなれば、GDP を成長させることについては幅広く同意されていた。ただし  $A$  の中身はよく理解されてこなかった。

他方で、この逆向き、つまり、「GDP の成長率が高ければ技術進歩を速まる」という主張については、直感的には明らかなようであり、意外なことにはっきりした裏付けが無かった。経済規模の大きさ自体は、技術進歩とは直接の相関は乏しかった。例えば、明代の中国は、当時としては世界最大規模の経済であったが、技術進歩は極めて遅かった。経済成長率が高いことがイノベーションをもたらすという主張は、都市の集積、汎用目的技術の進歩、活発な市場経済では技術の組み合わせが頻繁に試されること等の、ミクロかつ間接的

な観点からの断片的な証拠によって支持されるに過ぎなかった。これに物足りず、生物の生態系が高温多湿であれば進化が速く多様性も高いこととのアナロジーで、経済成長率が高い方がイノベーションが進む傾向にあることを説明できるのではないかと筆者は提案したが、これも未だ数学的な定式化は誰もしていないし、未だ多数の支持を獲得してもない。<sup>5</sup>

ヒダルゴの述べていることは、この課題への解決策を与えているように思う。ヒダルゴの見方では、一つの経済システムが進化しているのであって、「経済の複雑性」も GDP も、それを測定する方法が異なるに過ぎない。

式で書いてみよう。システム  $S(t)$  が時間  $t$  とともに進化するとして、ある測定  $f_Q$  をすれば GDP である  $Q$  が得られる：

$$Q = f_Q(S)$$

これとは別の測定として経済の複雑性の測定  $f_C$  をすれば経済の複雑性  $C$  が得られる。

$$C = f_C(S)$$

このような描像に立脚するとき、経済成長と技術進歩の関係はどのように理解できるだろうか？ヒダルゴが見出したことは、 $Q$  と  $C$  はだいたい比例関係にあることであった。これを象徴的に書いてしまうと：

$$Q = C$$

この式はつまらない式に見えるが、実は、既存の成長会計  $Q = A \times f(K,L)$  を置き換える偉大な式である。ヒダルゴの言っていることは、経済の複雑性の増大こそが所得の上昇であり、経済成長とは、すなわち経済

が複雑性を増す過程に他ならない、ということだ。これは全要素生産性 A を残渣として扱う「無知の指標」の理論（ローマーも似たり寄ったりで、研究開発投資の中身についてはブラックボックスになってしまっている）とは根本的に異なる。

このヒダルゴの観点からは、技術進歩が経済成長をもたらすか、あるいは、経済成長が技術進歩をもたらすか、という問いは、それ自体があまり意味を持たなくなる。意味をもつのは、ある政策介入  $\Delta p$  が存在するときに、それが経済成長  $\Delta Q$  と技術進歩  $\Delta C$  の双方を同時に果たすか、否か、ということだけである。<sup>6</sup>

例えば技術進歩を妨げるような規制  $\Delta p$  があつたとすれば、それは経済成長にもマイナスの影響を与えるし、技術進歩にもマイナスの影響を与える。あるいは、財政・金融などのマクロ経済管理が安定していれば、それは経済成長にプラスの影響を与える一方で、経済の複雑性も増大させる。

このような議論が可能になったのは、全要素生産性という「無知の指標」を議論から一切排除して、経済の複雑性という形で、技術進歩を直接に測定するようになったからである。

ただし、ヒダルゴの経済の複雑性の測定は、データの制約を受けている。本稿で一貫して用いてきた貿易統計は、他の国際経済統計に比べれば整備されているものの、それでも標準的な製品分類である HS6 桁コード<sup>7</sup>では、経済の複雑性を捉える分解能を十分に有しているとは言えない。理想を言えば HS10 桁や、あるいは未だ見ぬ詳細なコードを用いて測定すれば、より優れた指標を作ることが出来るかもしれないが、データの整備状況が追いついていない。このデータの粗さは、具体的な問題を考えるときに避けて通れない。このことは、次章で応用問題を解くときに考慮に入れる必要がある。

<sup>5</sup> 経済成長がイノベーションをもたらすか否かということについてのここでの議論について詳しくは（杉山大志、2018）第9章5を参照。

<sup>6</sup> ここでの議論は、反証可能である。もしも経済成長率と経済複雑性に逆相関があるということが（頻繁に）あるならば、ここでの議論は崩壊する。

<sup>7</sup> HSとは Harmonized Commodity Description and Coding System の略である。

## 5. 環境技術政策への示唆

最後になったが、環境技術の技術移転とイノベー

ション政策への示唆を考えてみよう。

### 環境技術とは何か

APECでは補遺2のリストを環境技術であるとして、関税の自主的引き下げの対象としている。このリストを見ると、おおむね1) 再エネ発電設備及びその部品、2) 廃棄物・汚染処理設備及びその部品、3) 環境測定機器、が対象になっている。

以上の環境技術リストが図2のヒダルゴのプロダクト・スペースのどこに存在するかと考えると、おそらく「機械」クラスター、「化学」クラスター等に「埋め込まれて」散在しているだろう。つまり補遺2のリストを図2に埋め込むと、図4のようなものが得られると思われる<sup>8</sup>。

ここで重要なことは、「環境技術」などというクラスターは（おそらく）存在しないことである<sup>9</sup>。

このことは、環境技術を自国の産業としたければ、機械・化学などの幅広い産業の蓄積が必要である、ということの意味する。

何故か。前述したように、プロダクト・スペースで表現されているのは飽くまでも輸出の構造だけれども、それは産業構造はもちろん、人的ネットワーク、地理的ネットワーク、社会関係資本、政策・制度・規制など、その国のあらゆる経済開発の能力を反映している。図4のようなエクササイズが示唆することは、もしも環境技術を得たいと思ったら、周辺の技術の蓄積がないと駄目であるし、そのためには、それを可能にするあらゆるハード、ソフトのインフラが整っていないなければならない、ということである。

なお、APECのリストにも、前述した分解能の問題がある。リストはいわゆる環境技術およびその半製品を対象としているけれども、それをさらに分解すれば多くの部品・素材が存在し、またそれら製品を製造するためには、設計・加工・計測技術や計算機技術も幅広く必要になる。これらもすべてリストアップして図4に書き込むと、ますます、環境技術は単独ではなく、幅広い産業基盤があつて初めて隣接可能性が成立してくるものである、ということが理解できると想像される。

<sup>8</sup> この作業、自分でもやりたいが、いま余裕がない。どなたか、やってみて下さい。必要なデータは <https://atlas.media.mit.edu/> に整備されています。

<sup>9</sup> なお付言すれば、環境技術のみならず、エネルギー技術ですら、クラスターになっていないだろう。図4においては、石油・石炭はクラスターになっているが、ボイラーは遠いところにある。その他の「エネルギー技術」は、おそらく、環境技術同様に、定義は難しく、また機械・

FIGURE 5.1:  
▶ The product space.

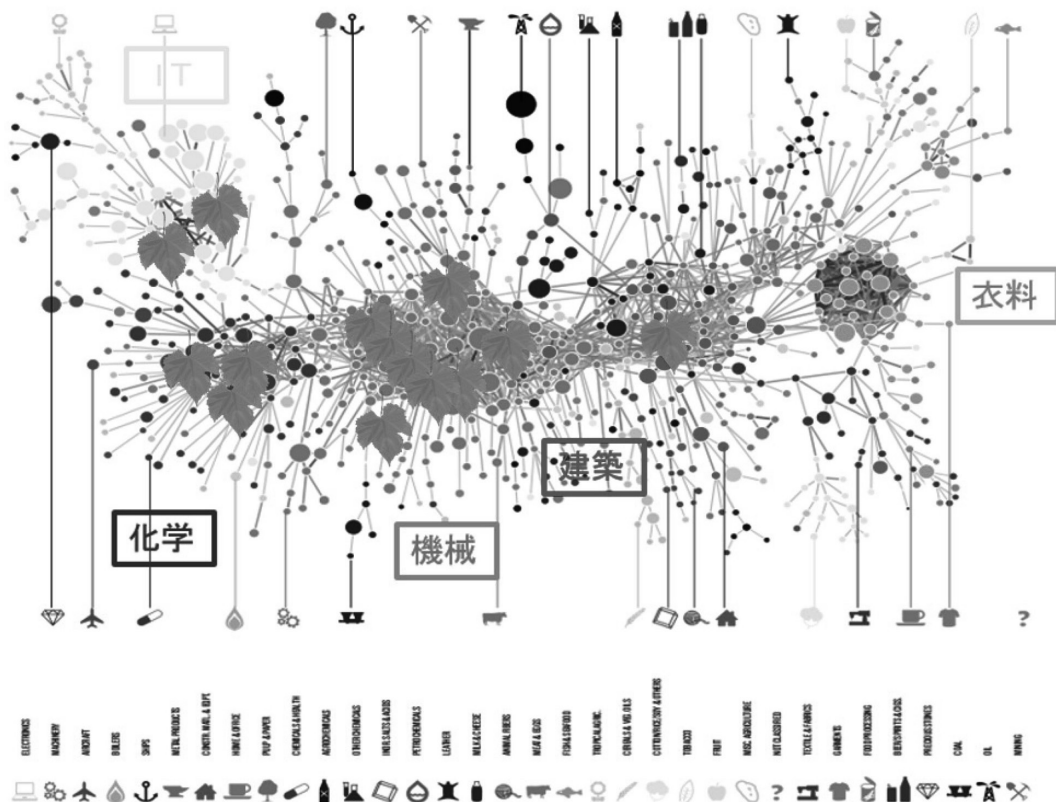


図4 APECの環境技術リストをヒダルゴのプロダクトスペース上で葉のマークで表すどのような絵になるだろうか（注意：この図は想像図で、正確な作業に基づくものではない）。

化学をはじめとして、プロダクト・スペース全体に散在していると想像される。この作業もいつかやってみたい。

### 環境技術の技術移転政策への示唆

以上のことは、環境技術移転の政策についてどのような意味合いを持つか。

図3で可視化されているように、経済成長とは、産業の蓄積のネットワークが強化していく過程であることであり、またそれは、漸進的に、隣接可能領域を徐々に拡大することで発達するものである、ということである。このことから、技術移転とは、当該の技術を受容し産業化していくための能力が当該の国に備わっていないならば成功は難しい、ということが理解できる。言い換えれば、技術移転が成功するための条件は、その技術がホスト国の「隣接可能領域」に入っていることである。これは一般的な話であるけれども、環境技術にも、もちろん当てはまる。

このことは、環境技術を自ら製造できるようになりたいと願う開発途上国にとっても、あるいは、環境技術のイノベーションを通じて世界に貢献したいと考える日本にとっても、重要な点である。いずれにせよ、「環境技術クラスター」なるものが存在しない以上、機械

や化学などの製造業基盤を発展させる以外に、環境技術を生み出す近道はない。

このことから、開発途上国への技術移転政策については、隣接可能性を満たしていないような高嶺の花をいきなり移転しようという試みは、失敗に終わる可能性が高い、ということが示唆される。

### 日本の環境技術イノベーション政策への示唆

ヒダルゴの理論は、日本がイノベーションを通じて経済成長するために、どのような指針を与えているだろうか。それは、経済の複雑性指標を高めれば良い、ということになる。ではその政策は何か？企業が付加価値の高い新製品を次々に世に問えるような経済環境を造ることだ。つまりは、マクロ経済環境を整え、研究開発を支援し、過不足無く制度・規制を整備し、都市や産業での知の蓄積を支援することである。これが国の役割となる。

では日本の環境政策への含意は何か。環境規制や環境税が、企業活動への足かせとなり、経済の複雑性の深化の妨げになるならば、それは環境技術開発にとってもは逆効果である、と分かる。そうではなく、機械や化学などの産業蓄積全般を活性化させることで、複

雑な産業のネットワークを発達させて、新たな環境技術の隣接可能性を高めることが、環境技術についてもイノベーションを促進する方法であることが示唆される。<sup>10</sup>

環境規制や環境税が有益であるためには、それが企業活動の足かせや産業基盤の毀損にならないよう注意しつつ、隣接可能領域にある環境技術の技術開発ないし普及を狙うものである必要がある。かつての公害対策や省エネ規制はおおむねそのような範囲で実施されてきた。国は環境技術の研究開発に投資をすべきであり、かつ、アフォーダブルになった技術を普及させる政策を実施すべきであるが、コストが高い環境対策を強制することには慎重になった方がよい。

<sup>10</sup> ここで述べたことは貿易統計のデータによって実証的に裏付けていくことも可能と思われる。ただし前述したように、HS6 桁コードでは分解能として限界があるかもしれない。HS6 桁コードは、貿易統計としては標準的であり、国際的な調和も取られていて、関税の実務などには有益であるが、「環境技術」を分離して取り出すという目的のためにはかなり粗い。例えば APEC の環境技術リストには省エネ関係が全く入っていないが、これは HS6 桁では分離できなかったことによると思われる。6 桁ではなく、HS7 桁から 10 桁で環境技術を切り出す試み（貿易管理の世界では ex-outs といわれる）も行われているが、国ごとにばらばらで、調和はとられていない。また、どこまでコードを細かくしても、例えばある化学工程で用いられる触媒を環境技術と呼ぶべきかどうか、自動車の軽量化に資する技術がすべて環境技術なのかどうか、といった、そもそも論まで踏み込んだ議論になってしまい、すべての環境技術をコード化するという試み自体が不毛になりそうだ。HS コードに基づいて環境技術を定義した分析の先駆的事例は（残念ながらあまり成功していないと筆者は思うが）以下がある（環境技術の定義の難しさ、悩ましさについても考察があって参考になる）。

Penny Mealy & Alexander Teytelboym, ECONOMIC COMPLEXITY AND THE GREEN ECONOMY, INET Oxford Working Paper No. 2018-03, Complexity Economics & Economics of Sustainability Programmes 31st January 2018  
[https://www.inet.ox.ac.uk/files/green\\_complexity\\_draft\\_30\\_jan\\_2018.pdf](https://www.inet.ox.ac.uk/files/green_complexity_draft_30_jan_2018.pdf)

## 補遺 1 APEC 環境物品リスト

APEC 環境物品リストは以下の 54 品目にわたる。コードは HS6 桁コードである：

1. 4418.72 竹製品（床パネル）
2. 8402.90 ボイラー発電機（バイオマス等）の部

分品

3. 8404.10 ボイラー用補助機器
4. 8404.20 蒸気原動機用復水器
5. 8404.90 ボイラー用補助機器の部分品
6. 8406.90 蒸気タービンの部分品
7. 8411.82 大型発電用ガスタービン（5,000kW 超）
8. 8411.99 発電用ガスタービンの部分品
9. 8412.90 風力発電の羽と軸
10. 8417.80 焼却炉（大気汚染物資）
11. 8417.90 焼却炉（大気汚染物資）の部分品
12. 8419.19 太陽熱温水器（ソーラーヒーター）
13. 8419.39 乾燥機（排水処理に伴う汚泥等の処理）
14. 8419.60 気体液化装置（汚染物資の分離・除去）
15. 8419.89 乾燥機（排水処理による汚染物資の分離・除去）
16. 8419.90 太陽熱温水器（ソーラーヒーター）の部分品
17. 8421.21 液体の濾過機（排水処理）
18. 8421.29 液体の濾過機（排水処理）
19. 8421.39 気体の濾過機（ガス・フィルター等）
20. 8421.99 液体の濾過機の部分品
21. 8474.20 リサイクル用選別破碎機
22. 8479.82 リサイクル用選別破碎機
23. 8479.89 選別破碎機関連機器
24. 8479.90 選別破碎機の部分品
25. 8501.64 交流発電機（750KVA 超）
26. 8502.31 風力発電機
27. 8502.39 発電関連機器（太陽光、バイオマス、潮力等）
28. 8503.00 発電機の部分品
29. 8504.90 太陽光発電等に用いるインバーター、コンバーター、トランスフォーマー等の部分品
30. 8514.10 焼却炉（抵抗加熱炉）
31. 8514.20 焼却炉（電磁誘導炉）
32. 8514.30 焼却炉（その他の電気炉）
33. 8514.90 焼却炉（電気炉）の部分品
34. 8541.40 太陽光パネル、セル
35. 8543.90 殺菌用オゾン生成用紫外線システム等
36. 9013.80 太陽光反射鏡
37. 9013.90 太陽光反射鏡の部分品
38. 9015.80 環境計測機器（土地、水路、海洋等の測量）
39. 9026.10 環境計測機器（大気モニタリング用）
40. 9026.20 環境計測機器（圧力計測計）
41. 9026.80 環境計測機器（熱計測計等）
42. 9026.90 環境計測機器（熱計測計等の部分品）
43. 9027.10 環境計測機器（ガス・煙の分析機器）

44. 9027.20 環境計測機器 (クロマトグラフ等)
  45. 9027.30 環境計測機器 (分光計等)
  46. 9027.50 環境計測機器 (物理・化学分析用)
  47. 9027.80 環境計測機器 (気体、液体、電気用)
  48. 9027.90 環境計測機器 (ガス・煙の分析機器等の部分品)
  49. 9031.49 環境計測機器 (光学式)
  50. 9031.80 環境計測機器 (電気式)
  51. 9031.90 環境計測機器 (光学式の部分品)
  52. 9032.89 環境計測機器 (自動調整機器の部分品)
  53. 9032.90 環境計測機器 (自動調整機器の部分品)
  54. 9033.00 環境計測機器 (光学機器等の部分品)
- 出典：経産省ホームページを基に筆者作成  
[http://www.meti.go.jp/policy/trade\\_policy/apec/about/pdf/2012kakuryou/egs\\_list.pdf](http://www.meti.go.jp/policy/trade_policy/apec/about/pdf/2012kakuryou/egs_list.pdf)

## 補遺 2 ECI および PCI の導出

$M_{cp}$  という行列を考える。この成分は、国  $c$  が製品  $p$  を輸出している場合は 1、そうでない場合は 0 である。すると、国  $c$  の多様性 Diversity と製品  $p$  の普遍性は、以下の式で計算できる：

$$Diversity = k_{c,0} = \sum_p M_{cp} \quad (1)$$

$$Ubiquity = k_{p,0} = \sum_c M_{cp} \quad (2)$$

さて、ある国の経済の能力や、ある製品を造るために必要な能力をより正確に示す指標を作るためには、多様性と普遍性は互いの情報で補正してやる必要がある。

そこで、ある国の複雑性を、その国の輸出する製品の複雑性の平均値と考える。同様に、ある製品の複雑性を、その製品を輸出する国の複雑性の平均値と考える。

この計算は、一度にやらずに、再帰的に計算するという方針をとる。すなわち 1 から  $N$  段階までステップがあるとして、ステップ  $N$  での国の複雑性  $k_{c,N}$  をステップ  $N-1$  の製品の複雑性  $k_{p,N-1}$  の平均値を用いて計算する。同様にステップ  $N$  での製品の複雑性  $k_{c,N}$  をステップ  $N-1$  の国の複雑性  $k_{c,N-1}$  の平均値を用いて計算する：

$$k_{c,N} = \frac{1}{k_{c,0}} \sum_p M_{cp} \cdot k_{p,N-1} \quad (3)$$

$$k_{p,N} = \frac{1}{k_{p,0}} \sum_c M_{cp} \cdot k_{c,N-1} \quad (4)$$

(4) を (3) に代入して

$$k_{c,N} = \frac{1}{k_{c,0}} \sum_p M_{cp} \sum_{c'} M_{c'p} - k_{c,N-2} \quad (5)$$

$$k_{c,N} = \sum_{c'} k_{c',N-2} - \sum_p \frac{M_{cp} M_{c'p}}{k_{c,0} k_{p,0}} \quad (6)$$

これは下記のように書きかえられる

$$k_{c,N} = \sum_{c'} \tilde{M}_{cc'} k_{c',N-2} \quad (7)$$

但し

$$\tilde{M}_{cc'} = \sum_p \frac{M_{cp} M_{c'p}}{k_{c,0} k_{p,0}} \quad (8)$$

と定義した。

さて、(7) は解として  $k_{c,N} = k_{c',N-2}=1$  を持つが、これは何の意味も無い自明な解である。これは行列  $\tilde{M}_{cc'}$  の最大の固有値に対応する。意味があるのは、2 番目に大きな固有値を持つ固有ベクトルで ( $N$  を大きくすると 3 番目以下の固有値を持つ固有ベクトルは小さくなる)、これを規格化して ECI が得られる。

$$ECI = \frac{\vec{K} - \langle \vec{K} \rangle}{stdev(\vec{K})}$$

但し、 $\vec{K}$  は  $\tilde{M}_{cc'}$  の 2 番目に大きな固有値を持つ固有ベクトルである。 $\langle \vec{K} \rangle$  は  $\vec{K}$  の平均値、 $stdev$  は標準偏差の意味である。

PCI も同様に求まる。  $c$  と  $p$  を対称的に書いておいたおかげで計算は ECI の場合と同じで

$$PCI = \frac{\vec{Q} - \langle \vec{Q} \rangle}{stdev(\vec{Q})}$$

但し、 $\vec{Q}$  は  $\tilde{M}_{pp}$  の 2 番目に大きな固有値を持つ固有ベクトルである。

出典： (Ricardo Hausmann et al, 2014)

## 文献

- Ricardo Hausmann et al. (2014). *The Atlas of Economic Complexity: Mapping Paths to Prosperity*. The MIT Press.
- Romer, P. M. (1990). Endogenous technological change. *Journal of Political Economy*, 98(5), 71-102.
- スチュアート・カウフマン. (2002). カウフマン、生命と宇宙を語る一複雑系からみた進化の仕組み. 日本経済新聞社.
- セザー・ヒダルゴ. (2017). 情報と秩序：原子から経済までを動かす根本原理を求めて. 早川書房.
- ブライアン・アーサー. (2011). テクノロジーとイノベーション - 進化 / 生成の理論. みすず書房.
- 杉山大志. (2018). 地球温暖化問題の探究：リスクを見極め、イノベーションで解決する. デジタルパブリッシングサービス. Retrieved from [www.amazon.co.jp/dp/B07L3YVHDZ](http://www.amazon.co.jp/dp/B07L3YVHDZ)