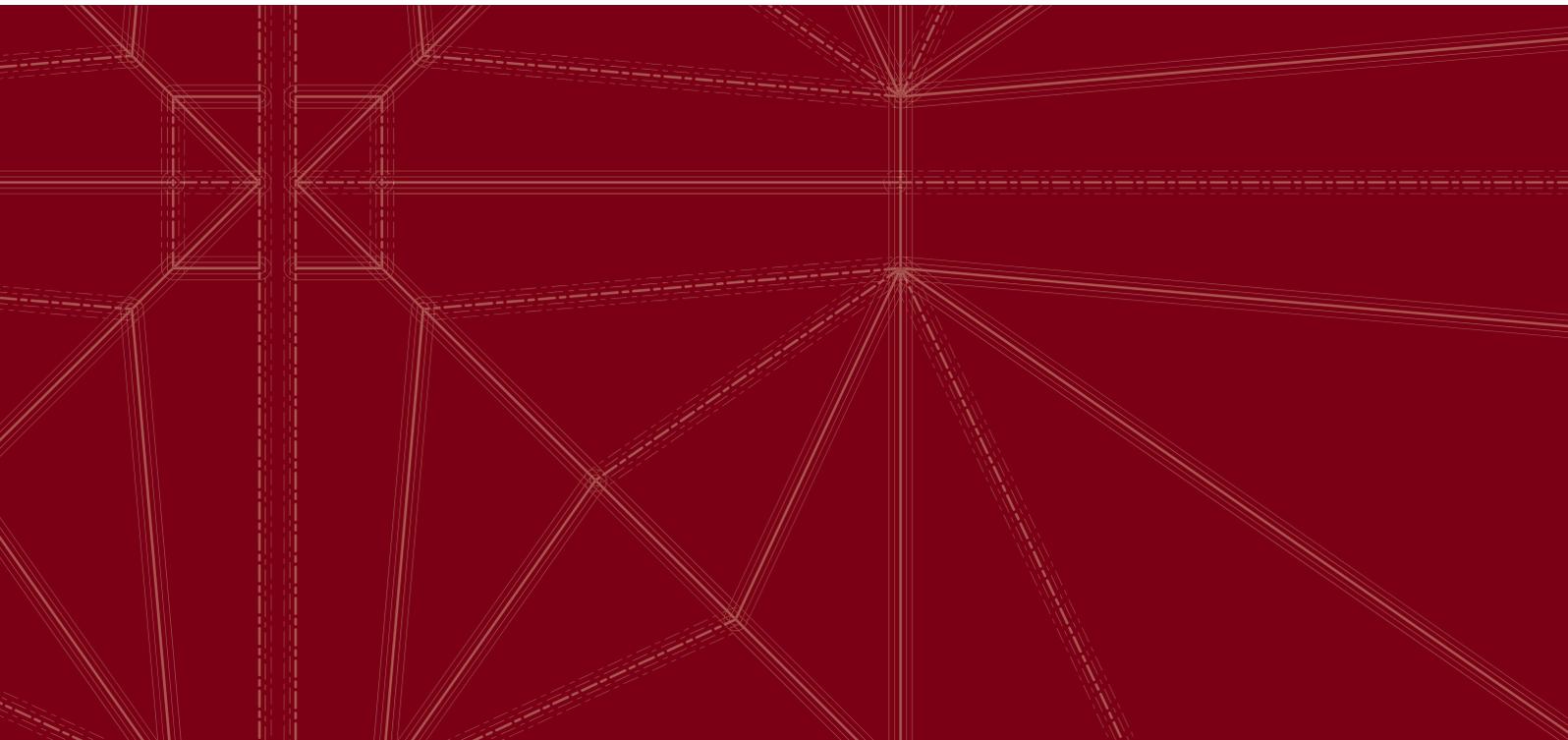


アジアの奇跡と新成長モデルの時代

坂田一郎 東京大学政策ビジョン研究センター教授

佐々木一 東京大学政策ビジョン研究センター特任研究員



アジアの奇跡と新成長モデルの時代

政策ビジョン研究センター教授 坂田一郎
(知財とイノベーションユニット共同代表)
同特任研究員 佐々木一

要旨

近年、アジア諸国の経済発展のパターンに大きな構造変化がみられる。本稿では、その構造変化を明らかにするため、太陽電池に関する約4万本の論文データと計量書誌学的手法を用いて科学技術に関するキャッチアップの実態について分析した。その結果、アジア諸国によるキャッチアップが急速に進んでいること、中国、台湾等は、太陽電池の中でもフロンティア領域（有機、色素増感太陽電池）において、成熟領域（シリコン、化合物）以上に大きな論文シェアを持っていること、フロンティア領域ではまだ国際的な提携関係が未成熟な状況にあること、アジアの中でも国により戦略が大きく異なっていることが明らかになった。

開発経済学においては、「雁行型発展形態論」が著名であるが、アジアの先行国間においては、既に雁行形態は過去のものとなりつつあり、「並走型成長モデル」が出現しつつある。新型太陽電池に代表される次世代の先端技術製品においては、「並走」は、生産プロセスだけでなく、製品開発の基盤となる科学技術にまで及ぶ可能性が高い。研究開発と初期の生産は日本で行い、その後にアジアに量産工程を展開するというモデルは必ずしも妥当しなくなる。我が国には、こうした構造変化を前提とした成長戦略や技術経営戦略が求められる。また、国際競争上は、科学技術研究のフェーズからアジア主要国とより水平な協力を指向し、欧米に先んじてアジアの活力を取り込む体制を作ることが重要である。

情報量の爆発的増加と変化の加速に伴って、既存の手法による状況の把握は困難になりつつある。本稿のような議論を含め、政策や技術経営戦略の立案をする上で、情報・ウェブ工学を高度活用して、大量の情報をもとに客観的に世界の状況（国や機関の競争優位性、競争や協調の構図、技術間の優位劣位の関係の変化、研究の萌芽など）を把握することが不可欠になってくるものと考えられる。

キーワード：並走型成長モデル、キャッチアップ、太陽電池、技術経営

1. 問題意識と研究目的—アジアにおける発展モデルの構造変化

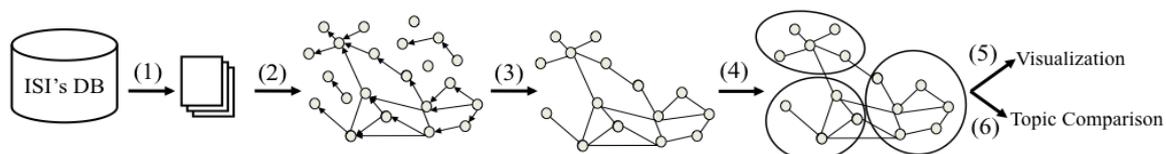
発展途上国による先進国へのキャッチアップ及び それらの間の格差の収斂 (convergence) については、開発経済学、政治学、イノベーション研究の分野で多数の研究がなされている。特に東アジアが研究対象の中心地域となっている [例えば, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]。それらは、分析・対象別に、生産能力、イノベーション能力及びそうした能力に影響を与える基礎的な条件や政策関する研究に分類をすることが出来る。これらの研究の大半は、途上国途上国が先進国の後を追って、先進国と同じ発展プロセスをたどりながら徐々に高度化していくモデルを描いている。その典型は、「雁行型発展形態論 (lying goose pattern of industrialization)」である [例えば、10, 11]。また、イノベーション能力に焦点をあてた論文の多くは特許データを用いた産業技術の移転や高度化に関する研究であり、科学面でのキャッチアップを議論した研究は少ない。しかしながら、21 世紀に入り、液晶テレビ、太陽電池、携帯電話のように、製品の登場から非常に短い期間で発展途上国が世界の生産の中心となる事例がみられている。また、科学の面では、中国、インドの著者による論文が劇的に増加しており、科学的な知見やその創造力について地理的な分布の構造が大きく変化している [12]。このような状況に関して、既存研究は、その推進要因、メカニズムに関して十分な説明力を持たない。従って、今日、こうした新しいタイプの経済発展を精緻に観察し、モデル化することが求められている。本ペーパーでは、アジア内の先進国による科学に関するキャッチアップに焦点をあててその実態を客観的に明らかにし、新たな成長モデルを予測するとともに、それに基づいた政策の提案をすることを目的とする。また、国別の差異とそれを生み出した要因について議論する。

本ペーパーでは、太陽電池を分析の対象とする。それは、地球のサステナビリティに貢献する技術であるとして広く認知をされており、世界 100 カ国以上で広く研究開発が行われている。太陽光の cell に関する方式は、シリコン (silicon)、化合物 (compounds)、有機 (organics)、色素増感 (dye-dye-sensitized) の 4 つに分類をされる。これらのうち、シリコン、薄膜シリコンは、HIT のような新興技術を含むものの、市場化が進んでいる最も成熟した技術であり、一方、有機と色素増感太陽電池は、市場化前の新興の技術であることがよく知られている。従って、太陽光は、技術の成熟度によって、開発戦略の差異があるかどうかを議論するのに適したテーマである。

2. 分析手法—膨大な知識の構造化

大量の論文データを用いて、太陽電池の領域で、主要な方式別に、主要な発展途上国が持つ研究能力と国境を超えた研究協力の俯瞰的な状況について明らかにする。その後、成熟度が異なる太陽電池の4方式間の比較を行う。

本ペーパーでは、2つの分析手法を利用する。これらは、情報工学、計量書誌学又は知識の構造化と呼ばれる領域に含まれるものである。一つは論文の「引用ネットワーク分析」である。これは、論文に付いている“引用”が論文の著者による“被引用論文と引用論文とが内容的に関連性が深い”ことの意志表示であることに着目して、内容的に近い論文群をグループ化しようとするものである。我々はこれを「学術俯瞰」と名付けている。大量の論文等の知識が存在する場合、人の読解能力の物理的限界から、それらの全体像を見渡すことはほとんど不可能となる。本手法は、情報工学の活用により、そうした限界を乗り越える手法である。この手法は6つのステップに分かれる。ステップ(1)では、トムソンロイター社の提供する論文データベース(web of science)から、“solar cell”を検索語として用いて、太陽電池に関連した研究論文を抽出する。この結果は、我々は2009年半ばまでに出版された論文41,795本を特定した。なお、トムソンロイター社のデータベースは、主要な国際学会誌に掲載された英文の論文を収録しており、我々の分析の対象は一定以上の質を有する論文群だけであるといえる。ステップ(2)では、取得した論文の書誌情報をもとに引用ネットワークを構築する。この場合、一つひとつの論文がノードとなり、論文間の引用関係がリンク(つながり)として表される。先のステップでは互いにつながりが無いネットワークが複数できることがあるが、次のステップ(3)では、それらのうち、もっとも規模の大きなネットワークを特定し、それだけを分析対象とする。この過程で内容的に関係の薄い、又は、重要度の相対的に低い論文群は、除外される。ステップ(4)では、ネットワーク化された論文群について、クラスタリングの手法[15]を用いて、内容的に近いもののグループ化を行う。ここでは、引用関係が特に濃密な論文群を内容的に近いグループであるとみなす。また、グループごとに、平均の出版年(研究の新しさ)を計算する。ステップ(5)では、ばねモデルという考え方[16]に基づいて、ネットワークの可視化を行う。これは、太陽電池に関する知識の構造の直感的な理解を助ける。ステップ(6)では、太陽電池の専門家の助言を受けて、各グループの研究内容を特定し、それらに名前を付ける。

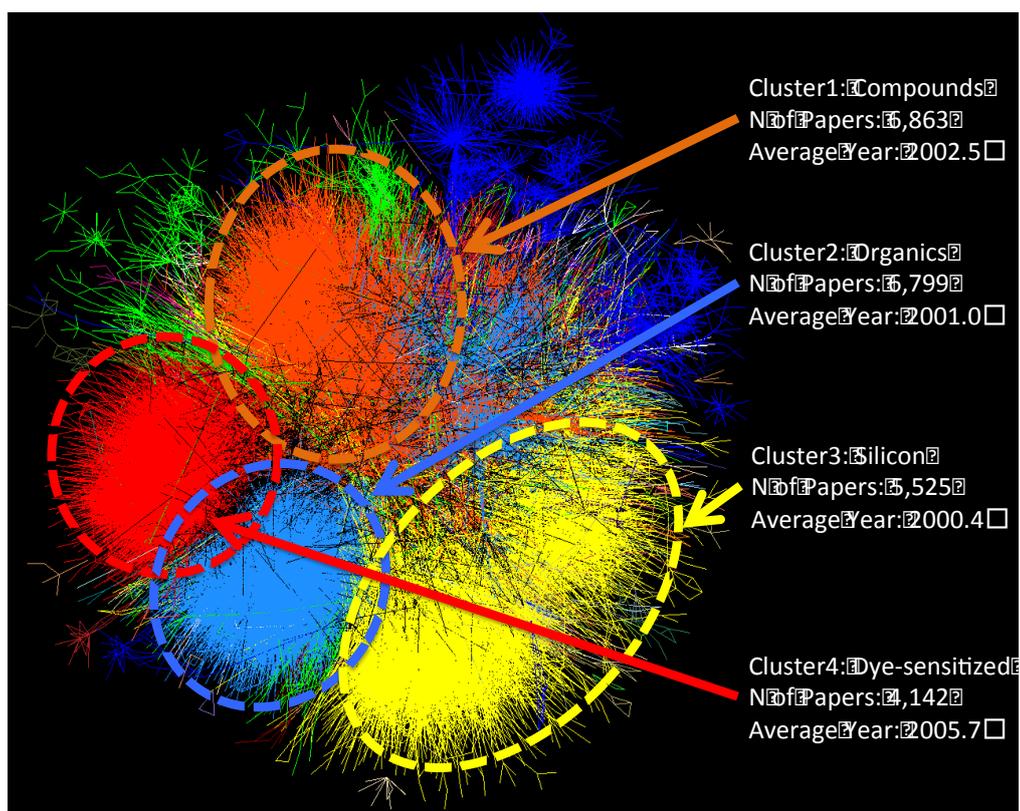


(図1) 引用ネットワーク分析の手順

二つ目の手法は、同じデータベースから得られる著者情報（共著者、著者の所属する研究機関や当該研究機関の立地する国）を用いて、先のグループごとの共著構造の分析を行うものである。ここでは、著者の所属する機関や国をノードとし、共著の関係をリンク（つながり）と考える。例えば、ある論文が4人の共著であり、それら4人が全て異なる国の機関に属しているとする、国又は機関の間に6本のリンク（ $4 \times 3 \div 2$ ）があると計算される。共著するということは、一つの研究テーマに対し共同で取り組んだことを意味しており、そこには、単なる情報交換を超えた、比較的強い関係が存在している。従って、この手法で構築する共著ネットワークは、比較強いつながりを集めたネットワークであるといえる。次に、このネットワークを可視化することで、我々が「研究協力ダイアグラム」と呼ぶものを作成する。この場合、ノードとして、研究者個人、機関、国の3つが考えられるが、本ペーパーでは、国間の研究協力の状況や国家レベルの科学技術政策の議論を行うため、国を用いた。国の研究能力は、当該国に立地する研究機関に所属する研究者が著者となっている論文の数であり、ある2カ国間の研究協力は、当該2国に立地する研究機関に所属する研究者同士が共著をした論文の数として計算される。

3. 分析の結果—国別・方式別の競争力と国際研究協力の構造

図2は、太陽電池の引用ネットワークを可視化したものある。同じ知識グループに属する論文群には、同じ色を付けてある。これをみると、大きな知識グループとして4つが切りだされることがわかる。専門家の助言も受けてこれらの内容を特定すると、グループ1は化合物（Compound）、グループ2は有機（Organics）、グループ3はシリコン（Silicon）、グループ4は色素増感（Dye-sensitized）太陽電池の研究である。太陽電池に関する知識は、主要な材料又は方式別にグループ化されていることがわかる。

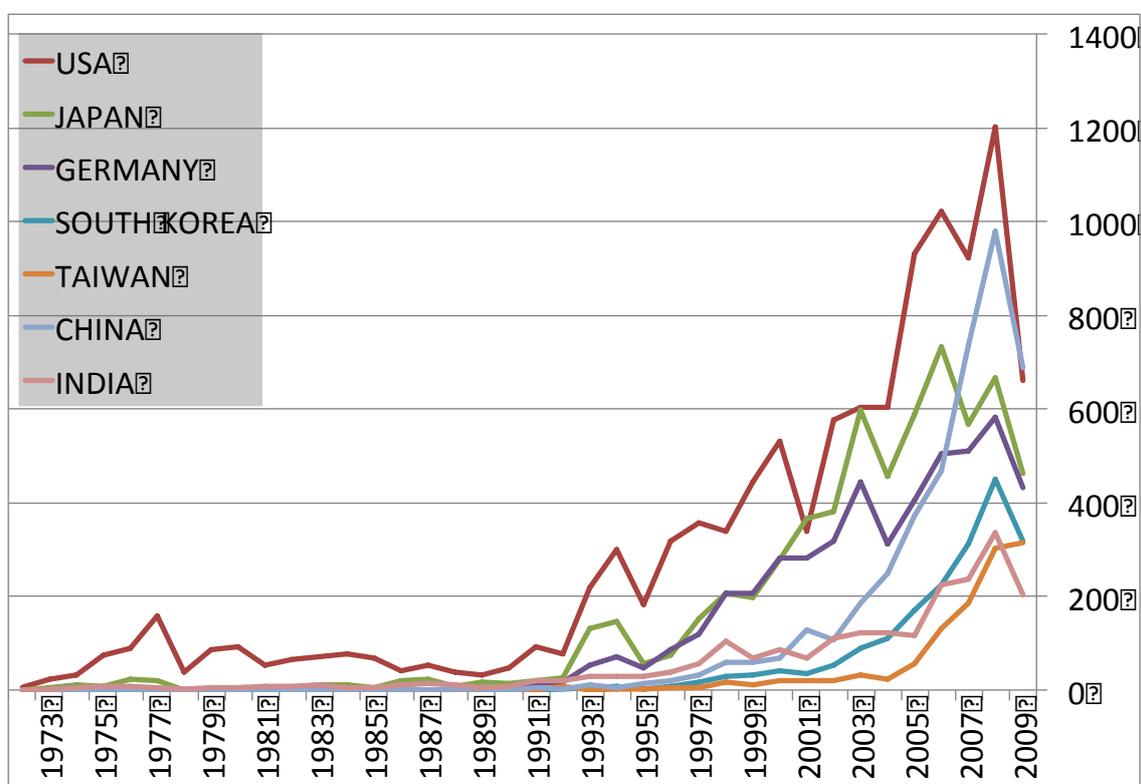


(図2) 太陽電池の学術俯瞰マップ

それぞれのグループの知識の新しさをみてみると(図2中に付記)、シリコン太陽電池の平均出版年が最も古く、色素増感型電池のそれが最も新しい。有機太陽電池は、非常に古い論文が少数存在するため、平均出版年がシリコン、化合物とほぼ等しくなっている。それら非常に古い論文を除くと、色素増感の次に新しくなる。また、近年、有機と色素増感太陽電池の論文数が急増したことから、4つのクラスター(論文グループ)に属する論文数はほぼ同じ規模となっている。

次に4つのクラスターごとに、主要国の論文数とその全体に占めるシェアを計算した。論文出版数の上位国は、アメリカ、日本、ドイツ、中国、インド、フランス、イギリス、韓国、台湾である。上位国に中国、インド、韓国、台湾が入っており、アジア諸国が産業技術だけでなく、学術面でのキャッチアップを達成していることが明確である(図3)。国別にクラスター内の論文数シェアをみると(表1)、中国は有機と色素増感の知識グループ(論文クラスター)で10%を超えるシェアを有している。特に、色素増感のクラスターにおける論文数は世界トップである。一方、シリコンと有機のクラスターでは、そのシェアは5%にとどまっている。未成熟な先端領域において、高い競争力を有してい

ることがわかる。予想に反して現在、中国が世界最大の生産シェアを誇るシリコン太陽電池の基盤強化に重点を置くという戦略はとっていない。一方、インドは、シリコンクラスターにおけるシェアが高く、有機と色素増感では低い。中国とは逆に、成熟した領域で相対的に強みを持っているといえる。韓国は、色素増感系で高いシェアを持っているが、同じ新興分野である有機系では、シェアは高くない。台湾は、中国と同様に、有機と色素増感系で相対的に高いシェアを持っている。以上のことから、技術の成熟度別にみたアジア諸国の位置取りは、新興分野に相対的に強みを持つ中国、台湾、成熟分野に強みを持つインド、それらの中間の韓国の3つに分けられることがわかる。



(図3) 国別の論文数の推移

(表1) 各グループ (クラスター) 別論文数シェア

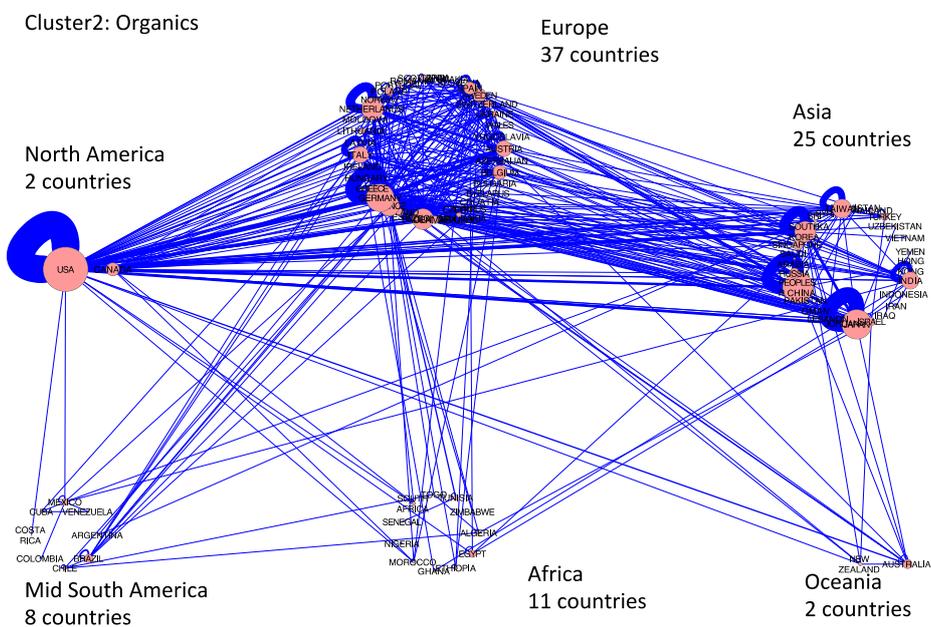
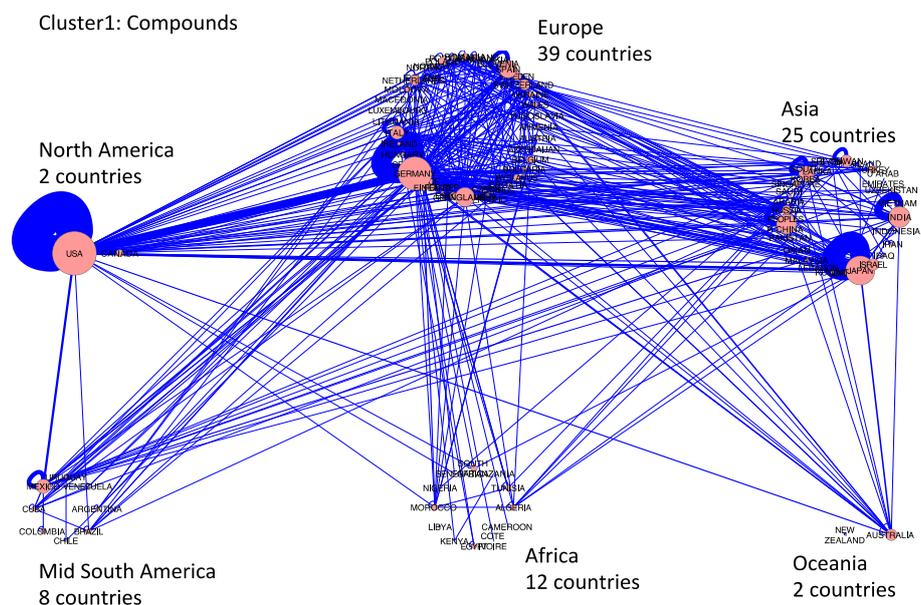
| Cluster1: Compounds | | | Cluster2: Organics | | |
|---------------------|-------------|-------|--------------------|-------------|-------|
| COUNTRY | N of PAPERS | SHARE | COUNTRY | N of PAPERS | SHARE |
| USA | 2442 | 23% | USA | 2435 | 21% |
| GERMANY | 1421 | 13% | CHINA | 1136 | 10% |
| JAPAN | 1073 | 10% | JAPAN | 1073 | 9% |
| INDIA | 570 | 5% | GERMANY | 942 | 8% |
| CHINA | 504 | 5% | NETHERLANDS | 593 | 5% |
| ENGLAND | 468 | 4% | ENGLAND | 545 | 5% |
| FRANCE | 438 | 4% | SOUTH KOREA | 522 | 4% |
| SPAIN | 393 | 4% | FRANCE | 512 | 4% |
| SOUTH KOREA | 304 | 3% | TAIWAN | 443 | 4% |
| MEXICO | 260 | 2% | INDIA | 370 | 3% |

| Cluster3: Silicon | | | Cluster4: Dye-sensitized | | |
|-------------------|-------------|-------|--------------------------|-------------|-------|
| COUNTRY | N of PAPERS | SHARE | COUNTRY | N of PAPERS | SHARE |
| USA | 1344 | 19% | CHINA | 1383 | 18% |
| JAPAN | 980 | 14% | JAPAN | 1277 | 16% |
| GERMANY | 940 | 13% | USA | 957 | 12% |
| FRANCE | 381 | 5% | SOUTH KOREA | 642 | 8% |
| PEOPLES R CHINA | 368 | 5% | GERMANY | 499 | 6% |
| NETHERLANDS | 332 | 5% | SWITZERLAND | 310 | 4% |
| INDIA | 315 | 4% | TAIWAN | 305 | 4% |
| AUSTRALIA | 271 | 4% | SWEDEN | 268 | 3% |
| ITALY | 252 | 4% | ENGLAND | 265 | 3% |
| SOUTH KOREA | 234 | 3% | SPAIN | 219 | 3% |

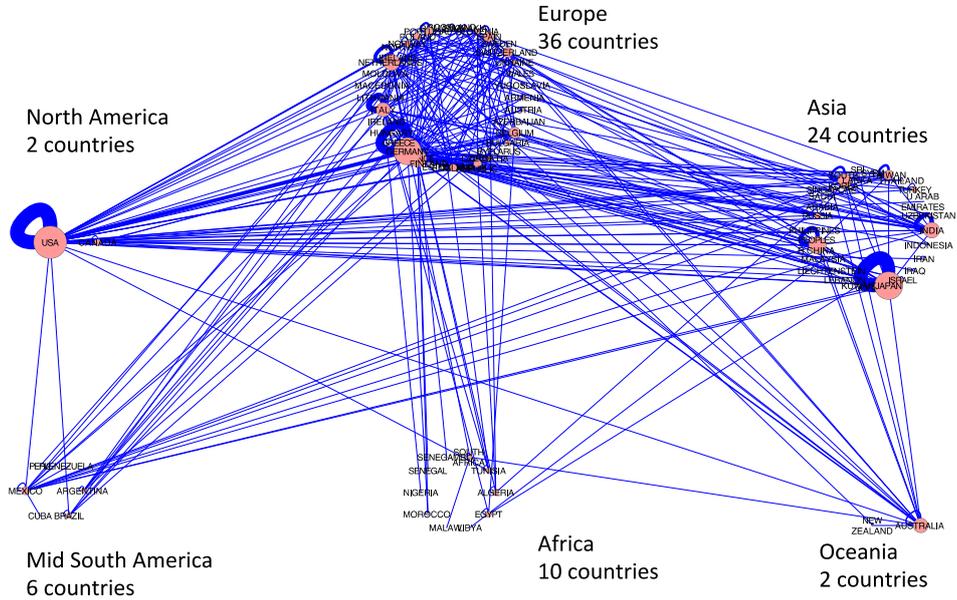
知識グループ (論文クラスター) ごとに国際研究協力のパターンを可視化したものが図4.である。欧州、北米、アジアの3極の間で、共同研究が進みつつあることがわかる。グループ別にみると、シリコンと、化合物については、先進国での国際協力が中心である。協力数で最も多いのは、アメリカ-ドイツ間の179件である。ドイツが国際協力のハブとなっている。有機系では、やはりドイツが国際協力のハブとなっている。ドイツ以外では、アメリカと韓国の間で73件の協力が行われているのが目立つ。これらの研究協力の進展の背景には、欧州における多国間研究協力プログラムであるフレームワークプログラムの存在がある。同プログラムの第5期及び第6期では、太陽電池が重点助成対象となっており、アメリカを筆頭に欧州以外の諸国が多数参加していた。

一方、色素増感系では、全体として国際協力の数や比率が少なく研究のグローバル化が遅れているが、中国と日本との国際協力が最多(62)となっている。他に、ドイツ-スイス(39)、スイス-イギリス (34)が多い。アジア諸国について、

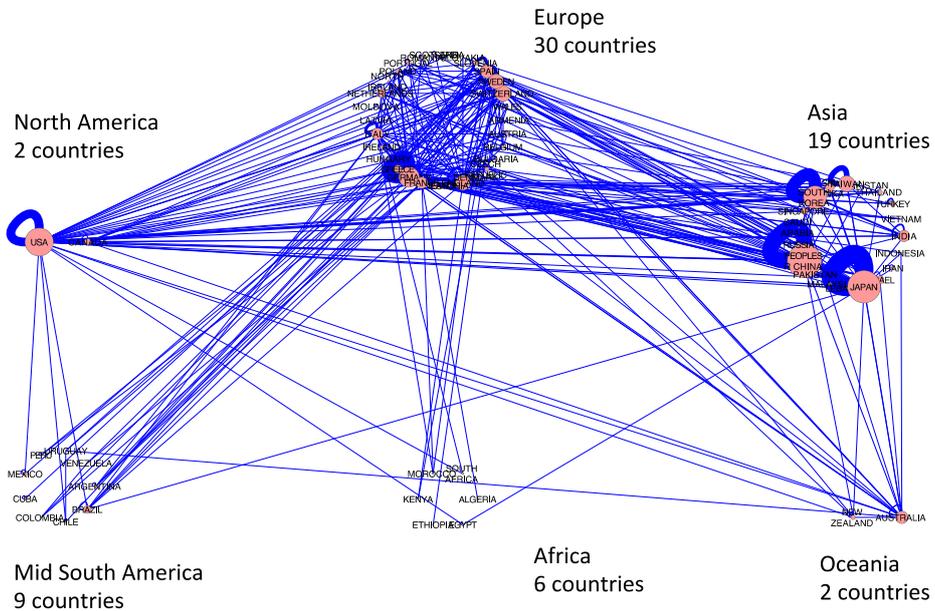
国別にみると、中国は色素増感系における日本との協力、韓国は有機系におけるアメリカとの協力、インドはシリコン系におけるフランスとの協力が多いことがわかる。



Cluster3: Silicon



Cluster4:Dye-sensitized



(図4) 知識グループ (クラスター) 別の研究協力ダイアグラム

4. 分析結果の考察—知識の森を探る

発展途上国における技術進歩については、開発政策学の領域において、これまで、技術のライセンス、直接投資、ODAを通じた技術移転、財やサービスの貿易、国境を超えた技術者の移動の5つの手段を通じた技術移転が主な要因と認識されてきた。実際、中国のシリコン太陽電池産業の急成長も、製造装置の輸入や海外からの幹部技術者の受け入れによって支えられたものであった[6, 17]。

太陽電池に関する我々の分析結果は、有機や色素増感系のような次世代を担うことが期待されている新興技術領域において、先進国からの先端知識の吸収だけでなく、科学領域における自主開発がアジア諸国の競争力の源泉となり得ることを示した。それら領域では、製造設備や素材に関しても、シリコンとは異なり、アジア諸国において学術知識を基盤に自主開発が行われ、市場化の初期から、上流から下流まで一貫して国内で生産が行なわれる可能性がある。

現在、シリコン太陽電池の下流の生産工程においては、市場競争が激しくなったことと欧州市場の縮小により収益を上げにくくなっている。有機や色素増感系太陽電池に関しては、技術の性格上、下流の生産工程の付加価値はさらに小さくなり、生産設備や素材（生産工程の上流）の重要性が増すことが予想される。中国、台湾、韓国の3カ国は、こうした利益構造の変化を踏まえ、新興分野における学術研究と国際提携に力を入れている可能性がある。いま一つ考えられる要因は、産業技術の科学への依存度、すなわちサイエンスリンケージの上昇である。有機、色素増感型では、その可能性が指摘されている[18]。これら諸国は、将来の産業競争力に対し、科学力がシリコン以上に影響を与えると考えて、新興領域における科学に対し大きな投資を行っている可能性がある。一方、インドは、成熟した技術と新興技術の双方でバランスよく研究を行っており、これら諸国とは異なる戦略を採用していることがわかる。中国、台湾が国内に大規模な生産拠点を持っている一方、インドには存在しない。インドは太陽光の技術を活かす有望な市場として、幅広い知識を必要としている。太陽電池に関する産業立地や産業政策の違いが学術研究に対する重点の差異を生んでいる可能性がある。従来、太陽電池を含めた再生可能エネルギーに関するアジア諸国の政策研究は多数行われているが[例えば、6,17,19,20]、電池の方式別の政策の差異や投資戦略についてまで踏み込んで議論しているものはほとんど存在しない。本ペーパーのように情報工学的な手法を用いることで、科学技術戦略における隠された政策意図や投資の重点対象について推測すること—知識の森の植生をみいだすこと—が可能となったといえる。

5. 結論—並走型発展モデルへの備えと水平協力

科学技術研究が技術主導型のイノベーションに対して基盤を提供するということは広く認知されている。科学は、先端的な技術シーズを生み出し、企業はそれらを育て、市場化する。そうした技術開拓から製品化までに至るリニア型の説明に批判は多いが、技術主導型のイノベーションが科学的な研究成果に大きく依存していること否定できない事実であろう[21]。また、イノベーションサイクルが短くなり、かつ、革新的なイノベーションが求められるようになるなかで、科学と産業技術の距離は接近しつつある[22][23]。

我々はそうしたイノベーションのモデルの変化を踏まえた新たな開発モデル可能性について、情報工学、計量書誌学の手法を用いて検討した。その結果、アジアにおいて、科学面でのキャッチアップが実現しており、また、次世代の太陽電池については、中国、台湾、韓国が製造技術だけでなく、科学面でも日米欧と競合する可能性が高いことを客観的に示した。

現在、製造面では、アジアの主要国の間では、「雁行型発展モデル」は既に過去のものとなり、太陽電池、液晶テレビ、携帯電話、タブレット端末等の主要商品では、日米欧とアジア主要国が並走する状況にある。次世代の先端技術商品については、科学面も含めた「並走型モデル」がみられる可能性が高い。我が国としては、そうした構造変化を予測した上で、政策や技術経営戦略を立案する必要がある。

同時に、アジアの成長の活力を我が国が積極的に取り込む方策も必要である。幸い、色素増感系では、日本と中国の間に比較的太い協力関係が存在する。今後は、知財管理等の不安要素を乗り越え、科学面でより水平な研究協力を積極的に進めていくことが必要である。アジア環太平洋協力(APEC)では、日本の主導により”オープン・イノベーション・プラットフォーム・イニシャティブ(open Innovation Platform Initiative)”が開始されている。これは本年6月4－5日にカザンで開催されたAPEC貿易大臣会合の声明(項目38及び39)にも掲げられている。このイニシャティブが日本、アメリカ及びアジアの主要国による基礎研究段階での水平協力を促すとともに、これら諸国が連帯して、後発発展途上国における技術の受容やイノベーションの基礎的能力(absorptive capability building)の向上に協力する仕組みとなることを期待したい。

(参考文献)

- [1] World Bank, *The East Asian Miracle: Economic Growth and Public Policy*, World Bank Policy Research Report, 1993.
- [2] J. A. Mathews, "Enhancing the role of universities in building national innovative capacity in Asia," *World Development*, vol.35, pp.1005-1020, 2007.
- [3] T. Altenburg, H. Hubert and A. Stamm, "Breakthrough ? China's and India's Transition from production and innovation," *World Development*, vol.36, no.2, pp.325-344, 2008
- [4] C. Kenny, "What's not converging? East Asia's relative performance in income, health and education," *Asian Economic Policy review*, vol.3, pp.19-37, 2008.
- [5] F. Berkhout, D. Angel, A. J. Wieczorek, "Asian Development pathways and sustainable socio-technical regimes," *Technological Forecasting and Social Change*, vol.76, 218-228, 2009
- [6] A. Tour, M. Glachant and Y. Meniere, "Innovation and international technology transfer: the case of the Chinese photovoltaic industry," *Energy Policy*, vol.39, 761-770, 2011.
- [7] Y. H. Lee and M. Y. Cheng, "Catching-up and technological progress of the ASEAN economies," *Pacific Economic Review*, vol.16, no.2, 236-254, 2011.
- [8] M. C. Hu, "Technological innovation capabilities in the thin film transistor-liquid crystal display industries of Japan, Korea, and Taiwan," *Research policy*, vol.41, 541-555, 2012.
- [9] S.L., Jang, S. Lo, W.H. Chang, "How do latecomers catch up with forerunners? Analysis of patent and patent citations in the field of flat panel display technologies," *Scientometrics*, vol.79, no.3, 563-591, 2009.
- [10] G. Linden, J Hart, S.A. Lenway, T.P. Murtha, "Flying geese as moving target: are Korea and Taiwan catching up with Japan in advanced displays?," *Industry and Innovation*, vol.5, no.1, 11-34, 1998.
- [11] A. Schrank, "Foreign investors, flying geese, and the limits to export-led industrialization in the Dominican Republic," *Theory and Society*, vol.32, 415-443, 2003.
- [12] I. Sakata, H. Sasaki, N. Nakamura and Y. Kajikawa
"Maps of international research collaboration in renewable energy, " proc. of the 6th Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, in Dubrovnik, Croatia (September 25-29,2011)
- [13] P. Hennick and M. Fishedick "Towards sustainable energy systems: the related role of hydrogen," *Energy Policy*, vol. 34, pp. 1260-1270, 2006.
- [14] N. Shibata, Y. Kajikawa, Y. Takeda, and K. Matsushima,, "Comparative study on methods of detecting research fronts using different types of citation," *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, vol.60, no.3, pp. 571-580, 2009.

- [15]M.E.J. Newman, "Fast algorithm for detecting community structure in networks," *Physical Review*, E.69, 066133, 2004
- [16]A.T. Adai, S.V. Date, S. Wieland, E.M. Marcotte, LGL, "Creating a map of protein function with an algorithm for visualizing very large biological networks," *Journal of Molecular Biology*, vol. 340, no.1,179-190, 2004.
- [17]H. Yang, H. Wang, Y.H. Yu, J. Xi ,R. cui and G. Chen, "Status of photovoltaic industry in China," *Energy Policy*, vol.31, pp.703-707, 2003.
- [18]N.Shibata, Y. Kajikawa and I. Sakata, "Extracting the commercialization gap between science and technology- case study of a solar cell," *Technological Forecasting and Social Change*, vol.77, pp.1147-1155, 2010.
- [19]Q. Chai and X. Zhang, "Technologies and policies for the transition to a sustainable energy system in China," *Energy*, vol.35, pp.3995-4002, 2010.
- [20]A. Kumar, K. Kumar, N. Kaushik, S. Sharma and S. Morshra,, "Renewable energy in India: Current status and future potentials," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.14, pp.2434-2442, 2010.
- [21] L. Fleming and O. Sorenson, "Science as a map in technological search,," *Strategic Management Journal*, vol. 25, pp. 909-928, 2004.
- [22] F. Narin, K. Hamilton and D. Olivastro,"The increasing linkage between U.S. technology and public science," *Research Policy*, vol. 26, pp. 317-330, 1997.
- [23]F. Narin and D. Olivastro, "Status report: Linkage between technology and science," *Research Policy*, vol. 21, pp. 237-249, 1992.