

## やさしい経済学

## ネットワーク理論でみた技術革新

ネットワークとはノードとリンクで構成されるものの総称である。ノードとは個別の要素、リンクとはノードとノードをつなぐ何らかの関係性のことをいう。ノードとリンクの定義を変えれば、様々なものをネットワークとしてとらえることができる。例えば個人をノード、友達関係をリンクとすると友人ネットワークとなり、空港をノード、空路をリンクとすると航空路線のネットワークとなる。

ネットワークは、原子や分子、生物、人工物のように実体を伴っているわけではなく、世間の様々なものをモデル化するための一つ

の視点と考えるべきだろう。そうしたバーチャルな存在を扱うネットワーク理論は、18世紀の数学者、L・オイラーが創始したグラフ理論を源流の一つとして、長い歴史をもつ。

ネットワークに関する研究は、主に社会学と数学の分野で進んできた。社会学では、個人や集団の交友関係やコミュニケーションを扱い、それら社会ネットワークと社会現象(例えば夫婦の関係、高校生の退学、昇進や給与)との因果関係や関連性を解明してきた。他方数学の分野では、現実への適用より数学的な美しさの追求に重点が置かれ、ノード間にリ

### 1 幅広い分野に応用

東京大学教授 坂田 一郎



ンクがランダムに存在すると仮定したランダムネットワークやノードが全ノードとの間にリンクをもつと仮定する完全ネットワークが研究の中心だった。

ネットワーク理論が急激に進化し、幅広い分野の研究に応用されるようになったのは、この10年ほどのことだ。その契機は米コーネル大学に所属していたD・ワッツとS・ストロガッツ両氏の1998年の英ネイチャー誌の論文だった。両氏は、映画俳優の共演関係、電力

送電網、線虫の神経細胞という3つの全く異なる種類のネットワークに着目。それらすべてに共通する特性を「スモールワールド」と呼んで見事に定量的に表現し、理論に多様な応用の可能性があることを世間に知らしめた。

今後の成長の原動力として、気候変動や高齢化など地球的課題を解決する技術革新が注目されているが、それを効果的に進めるには技術革新の制御手法の高度化が必要だ。本連載ではネットワーク理論の応用が期待される分野の代表として技術革新を取り上げ、最新の研究成果もまじえ、新しい潮流を示したい。

さかた・いちろう 66年生まれ。東大経卒、ブランドイスマグサイエンス修士。東大博士(工学)

## やさしい経済学

## ネットワーク理論でみた技術革新

東京大学教授 坂田 一郎

### 2 知識の爆発・細分化

ことや個々の知識間の関係を把握することを著しく困難にしているといえるだろう。

D・ピーターズ米ノースダコタ大教授らの投稿実験(1982年)は、こうした状況を浮かび上がらせるものだった。これは著名な学術誌に一度、採録された12本の論文を選び、著者名などを変更した上で、もともと掲載されていた学術誌に再び投稿するという実験だ。編集者やレビュー者が一度掲載された論文だと気づいたのは3件だけで、残り9件は、本来必要のない査読プロセスに回された。このことは、著名な論文誌の熟練した専門家であ

っても、物理的な限界に直面しているという意味では例外ではないことを明示している。

知識の爆発と細分化は、社会的な課題解決の可能性を高めるという面では、本来、積極的に評価すべきだろう。だが先に述べたような状況の結果、政府や企業の技術開発戦略の立案、すなわち知識の有効活用に向けた方策の立案が難しくなっていることも否めない。知識の全体像や関係が見えなくなると、先を読むことも困難になり、有望な技術を見誤るリスクは高まる。組み合わせれば有為な技術を見いだすことも難しくなろう。そこで、ネットワーク理論を応用し、戦略立案に対して構造化された知識環境を提供する手法が必要になってくるのである。

今日、新たにつくり出され社会に発信される知識の量が急増している。東京大学の小宮山宏前総長はこれを「知識の爆発」と呼んだ。例えばDNA(デオキシリボ核酸)に関する主要な研究論文は、分子生物学の祖、J・ワトソンとF・クリックが二重らせん構造を発見した1953年当時は年間100本程度にすぎなかった。この程度なら、全部に目を通しその領域の研究の流れ全体を見渡せただろう。

ところが現在では、それは年間10万本を下らないのではないかとされている。どんなに頭がよくて勤勉な研究者でもその1割にで

も目を通すことは物理的に不可能である。この状況下では全体像がどんどん見えなくなっている。こうした現象は、21世紀に入り、地球温暖化対策として注目をされているグリーンテクノロジーの分野でも顕著である。

一方、知識の爆発と同時に起きているのが「知識の細分化」である。先端研究における研究テーマは細分化が進み、また、研究開発競争の激化とともに研究者たちが周囲を見渡す余裕がなくなっている。知識の爆発と細分化は、人間の読解や認識能力の限界を認知させ、知識領域の全体像を俯瞰(ふかん)する

## やさしい経済学

### ネットワーク理論でみた技術革新

前回述べたように、急増し、細分化する知識を社会的な課題解決へと結びつける戦略の立案は、ますます難しくなっている。そうした技術のマネジメントを支援する手法として注目されるのが、ネットワーク理論と情報技術、それに専門家による判断とを組み合わせた「学術俯瞰（ふかん）」とよばれるものだ。

この手法を簡単に紹介しよう。論文をノードとし、論文間の引用関係をリンクと定義すると、引用関係を軸に関連づけられた学術知識の引用ネットワークが構築できる。先に出版された論文を引用するということは、自分

の論文と被引用論文との間の内容的な関連性が強いという著者の意思表示で、引用ネットワークは内容的な類似性によってつながったネットワークであると考えることができる。

今日、主な学術雑誌に掲載された論文群の書誌情報は、デジタルデータ化され、取り出したい知識内容に合致した検索語を入れれば容易に取り出せる。数万から数十万件規模の論文やその数倍の引用関係であっても、コンピューターを利用すれば、比較的短時間で引用ネットワークを構築することが可能である。

次に、一般にリンクマイニングと呼ばれる

東京大学教授 坂田 一郎

技法で、このネットワークの分析を行う。この技法は主に図書館情報学の分野でよく用いられてきたものだ。その代表的手法には、ランキング、クラスタリング、構造予測の3つがある。ランキングは、ノード（この場合は論文）に対し、目的に応じた順位を付けることである。これによって、ユーザーが膨大な論文群の中から、目的に応じて適切な論文を探しだすことが可能になる。ランキングにはネットワーク特徴量と呼ばれる指標が用いられる。よく知られた指標としては、被引用回数、ページランク、各種の中心性（ノードが

### 3 「学術俯瞰」とは

ネットワークの中でどの程度中心的な存在であるかを示すもの）がある。

クラスタリングとはネットワークを部分集合に切り分ける手法だ。学術俯瞰においては、引用関係の密なグループ、つまり内容的に関連性が特に深い論文群が部分集合として切り出される。これによって大きな知識領域をその部分集合群とそれらの間のつながりの束として分解できる。最後の構造予測とはネットワークの構造の既知の部分を手掛かりに未知の部分予測することだ。例えば特定の論文の将来の引用数、すなわち成長性を予測することなどが行われている。これらには情報技術が要るが、意味の判別に専門家の助けを借りる必要がある。次回は実例を紹介する。



## やさしい経済学

### ネットワーク理論でみた技術革新

東京大学教授 坂田 一郎

サステナビリティ学への今の知識体系は、持続可能とすることを目指す対象別に構成されているといえる。現行体系を基に教科書を書けば、対象別に章立てをすることになる。

以上のことは、サステナビリティの研究に多様な学問領域に属する研究者が参加していることを示す一方、対象間にトレードオフがあるような課題への対応には弱点があることを意味する。例えばトウモロコシなどからバイオ燃料を製造する場合、食糧生産への影響、森林破壊や大量の水の使用という環境負荷を考慮する必要があるが、知識体系においては、エネルギー、農村、森林、水という知識集合の間につながりの谷が存在している。この谷に橋を架けるのが今後の課題である。

#### 4 研究の「見える化」

サステナビリティという用語を要旨などに含む論文を検索すると、4万本以上の論文が既に出版され、毎年6千本のペースで急増している。また、それらの掲載論文誌の種類も多い。こうしたことから、従来、その全体像や知識間の関係性について知ることは困難で、課題解決への応用も制限を受けてきた。

そこで、前回示した学術俯瞰の手法が力を発揮する。第1段階として、ネットワークを構築すると引用関係でつながった最大で約1万本の論文群が得られる。次にそれを対象にクラスタリング、つまり引用関係で密につな

がった部分集合の切り出しを行うと、15の主要な知識の集合体を特定できる。第3段階として、各集合体に多く含まれる特徴的な言葉、論文誌の名称、重要な論文の要旨などを参考に、専門家が個々の集合体がどんな特性を持った集まりであるか判定する。最後にこれらの情報全体をマップとして「見える化」する。

その結果15の知識集合体は、含まれる論文数の順に、農業、漁業、環境経済、森林、熱帯雨林、ビジネス、ツーリズム、水、生物多様性、都市計画、農村、エネルギー、健康、土壌、野生生物の領域であることがわかった。

「学術俯瞰（ふかん）」は、情報技術を利用した各種の技法と専門家が持つ俯瞰能力や経験知とを組み合わせることで、技術革新のマネジメントに必要な知識ベースを提供するものである。今回は、東京大学の梶川裕矢特任講師らが行ったサステナビリティ学に関する学術俯瞰の一部を紹介しよう。

地球のサステナビリティ（持続可能性）は、世界的な課題として認識されている。サステナビリティ学はこの課題を解決しようとするもので、膨大な知識量が蓄積されている。代表的な論文データベースを用いてサス

## やさしい経済学

### ネットワーク理論でみた技術革新

東京大学教授 坂田 一郎

#### 5 技術ロードマップ

今回は、学術俯瞰（ふかん）の技術ロードマップへの応用について考えよう。L・ブランスコム米ハーバード大名誉教授は技術ロードマップを「科学的知見に基づいた技術の将来に対する合意」と定義している。技術革新は多数の企業や大学が分業し、政府の政策介入も影響を与える。変化の方向性やスピードといった技術の将来像に関し、技術革新への参加者に何らかの合意が形成できれば、参加者による集合投資が行われるようになり、革新のスピードが加速する。例えば世界の半導体メーカーの業界団体が策定した「国際半導

体技術ロードマップ」は、目標と要求される技術的課題などの共有を通じ、「半導体の集積度は約2年ごとに倍増する」というムーアの法則の維持に貢献しているといわれる。

ロードマップづくりの場でよく利用されるのは、英ケンブリッジ大のR・ファール博士が提案したTプラン法だ。これは専門家によるワークショップを繰り返し合意を形成するものだ。だが知識が爆発・細分化し、専門家でも技術の全体像が見えにくくなると、限られた数の専門家を集めただけでは適切な判断が難しくなる。また急激に進歩するようにな

った技術に対応して、合意の更新を頻繁に行うのも物理的に困難だ。人的な知識の集約だけに依存した手法では限界に直面している。

学術俯瞰の手法は、ロードマップの策定に関し、3つの角度から貢献ができる。第一は、技術領域の現状について、体系的で客観的な見取り図を示すことである。第二は、急成長している技術分野や反対に成長が鈍っている技術分野を漏れなく特定することである。第三は、重要な研究を探し出すことである。また、こうした情報については、少ないコストで頻繁に更新することが可能である。

具体例を挙げよう。太陽電池に関する約3万本の論文情報を基に東京大学の梶川裕矢特任講師らによる学術俯瞰では、太陽電池の知の世界は、シリコン系、化合物系、色素増感型、有機系と、材料の種類で4つに分かれる。そのうち急成長しているのは有機系と色素増感型で、それらに含まれる論文の出版からの平均経過年数はそれぞれ4.0年、3.4年と非常に短い。さらに例えば有機系の集団の内部を精査するとプラスチック基板や共役系高分子などの新材料が注目されていることまでわかる。学術俯瞰が提供するこれら知識ベースは、あくまで従来手法を補完するものだ。専門家の能力と組み合わせればより高度で実用的なロードマップの策定が可能になるろう。



## やさしい経済学

## ネットワーク理論でみた技術革新

東京大学教授 坂田 一郎

アジア太平洋経済協力会議（APEC）や経済協力開発機構（OECD）では、グリーンテクノロジーなどに関する国際協力の重要性がうたわれている。資源制約のような難題を解決するには、世界の英知を集める必要があると考えられているわけだ。今回は学術に関する国際協力をネットワークとしてとらえ、そこから得られる示唆について考えたい。

研究機関をノード、論文の共著関係をリンクと定義すると論文の共著ネットワークが得られる。2つの異なる研究機関に属する研究者たちが論文を共著していたとすると、それ

ら2つの研究機関の間に協力関係が存在すると考えるわけだ。論文の著者名は、その作成に対し知的な貢献があった者のリストで、そこに複数の著者が挙げられている場合、彼らの中で知的な協力があったと考えるのが普通である。こうした論文の共著分析は、国境を越えた研究協力を積極的に進めている欧州連合（EU）を対象に多く行われている。

太陽電池と燃料電池という2つの再生可能エネルギーを対象に、東京大学の佐々木一特任研究員らが作成した世界研究ネットワークを紹介しよう。まず2つの技術、それぞれ約

3万本の論文作成に参加した研究機関（ノード）を数えると、両分野とも6千を超えていた。知識が広く分散していることを示している。国別の総論文数では、米国、中国、日本、ドイツの順で、これに太陽電池ではインド、燃料電池では韓国が加わる。大陸別では、アジアの研究能力の急成長に伴い、北米、アジア、欧州の三極構造ができている。

次に、本題の国際的な共著、すなわち異なる国の機関に属する研究者の共著に着目すると、欧州域内での国際共著が圧倒的に多いことがわかる。太陽電池では4100件、燃料電池

でも2300件に上り、次に欧州、北米、アジアの3大陸間での国際共著が多かった。アジアを起点とすると、太陽電池では欧州との協力が多く、燃料電池では北米との協力が多。一方、アジア域内での国際共著は、それよりも少なく、特に太陽電池に関する共著は、欧州域内に比べわずか5分の1にすぎない。

以上のことから、両分野における国際協力は、欧州内において最も盛んであり、さらに3大陸に散らばる知識間のつながりが拡大している一方、アジア域内に協力の谷間ができているという構図がみえてきた。5月の日中韓首脳会談でも、3カ国間での科学イノベーション協力の強化が打ち出されたが、そうした政策の必要性を示唆しているといえる。

### 6 研究協力の実像

## やさしい経済学

## ネットワーク理論でみた技術革新

東京大学教授 坂田 一郎

### 7 学術と産業技術

地球的な課題解決を目指す今日の技術革新において、前回取り上げた国際協力と並び重要になっているのは、学術と産業技術との間の距離を縮めることだ。再生可能エネルギーや医療などの革新では、基本的原理に立ち戻らないとブレークスルーにつながらないことも多く、産学連携への期待が高まっている。

従来、学術と産業技術とのつながりは、「サイエンスリンケージ」という指標で測られてきた。特許にも論文と同様に、引用文献が記載されているが、この指標は、特許1本当たりいくつの論文を引用しているかを計算した

ものだ。その計算方法は単純明快で、また、分野や国を超えた比較も容易であるとの利点を持つため、広く利用されている。

一方、弱点も存在する。特に問題なのは、この指標が持つ情報量が少ないという点だ。つながりの強弱について、時系列や分野・地域間を比較するにとどまり、どんな領域で関係が深いのか、逆につながりの空白がどの領域にあるのかといったつながりの内容に踏み込む情報は得られない。意味的な情報がないと、現実の産学の橋渡し活動には生かせない。

こうした問題意識の下、東京大学の柴田尚

樹特任助教らは、ネットワーク理論を用い、学術と産業技術とのつながりを情報量豊かに表現する手法を開拓した。この手法の考え方は、次のとおりである。最初に、世界中の論文と特許それぞれについて、引用ネットワークを構築し、学術と産業技術の2つのレイヤー（層）について知識の見取り図を得る。なおこの場合、特許の分析法は論文と基本的に同じだが、同じ内容の特許が各国で出願されているため、それらを一つとして扱う必要がある。次に専門家をまじえて、2つの異なる見取り図を比較するというものである。

この手法を2次電池に適用したところ、双方のレイヤーに共通する知識群として、リチウム電池、メタルハイドロイド、電解質の3者が現れた。それらが産学をつなぐ知識の流路となっているわけだ。このうち特に学術レイヤーにおけるリチウム電池の研究は近年、非常に活発で、産業応用の可能性がある技術シーズ（種）が次々生まれている。電解質については、電解質の液漏れを防ぐとの目標は共有されているが、解決方法は両レイヤーで全く異なる。学術レイヤーで議論されているより根本的な解決方法を産業界に移転する余地があることがみえてきた。このようにネットワーク理論を用いれば、産学の橋渡しを体系的・効果的に立案できるようになってくる。

## やさしい経済学

### ネットワーク理論でみた技術革新

これまで技術革新のマネジメントに関連してネットワーク理論の適用例をいくつか眺め、ノードとリンクの定義を変えることでネットワーク理論に様々な応用の可能性があることを紹介した。ほかにも、ノードを企業や大学とし、リンクを取引や共同研究とすれば、地域のイノベーションネットワークを見える化できる。また、ネットワーク内における特定の論文の位置取り、例えば、知識集団の中心に近いか遠いか、を指標化すれば、論文の評価に対し、現在多用されている引用数とは異なる視点が提供できるだろう。

ネットワーク理論の応用が生み出した本質的な価値とは、ミッシングリンク、すなわち普段は埋もれて気づかない事象の発見に貢献したことだ。学術俯瞰（ふかん）からは知識同士の関連性や個々の知識と知識領域全体との関係性が、共著分析からは世界的な知のつながりの構図が、論文と特許の2つのネットワークの比較分析からは学術と産業技術の間の知的なつながり関係が、それぞれ見いだされた。こうしたミッシングリンクの発見は、ネットワークという分析の枠組みが、飛行機からナスカの地上絵全体を見渡すような「眼

#### 8 ミッシングリンク

東京大学教授 坂田 一郎

を我々に与えてくれたことで可能になった。今後、本理論の応用が最も期待されるのはどのような分野であろうか。それは医療の技術革新である。政府や地域も、検診結果や診療のプロセスといった医療情報の価値に気づき、その蓄積を促す方向に動き始めている。医療情報の大半は、これまで院内で患者個人の治療に使われるほかは利用されないまま保管されてきた。今後、情報と情報を間違いなくつなげるためのIDの導入と個人情報への二次的利用のためのルール整備が実現すれば、膨大な医療情報が本理論を用いた知識の構造

化の本格的な対象となり、様々なミッシングリンクの発見につながる可能性がある。

例えば、塩酸アマタジンは、A型インフルエンザとパーキンソン病の治療薬という2つの顔を持つことが知られている。この薬はもともとインフルエンザウイルスに対する抗ウイルス薬として開発されたが、インフルエンザにかかったパーキンソン病の患者に処方したところ、症状が改善したことから、パーキンソン病に効くことが発見された。これは偶然の結果だが、大量の医療情報を分析すれば、体系的にこうした関連性が見いだせるようになると思われる。＝この項おわり（次回からは桑原進・政策研究大学院大学准教授が財政の持続可能性に関し執筆します）