

著者の移動を用いた学術分野の相互的な変動の特定

吉岡 龍弥^{a)} 大知 正直 坂田 一郎

概要：本研究では、学術研究における論文の著者の移動を用いて学術分野間の相互的な変動を特定する手法を提案する。企業の持続的成長において重要な課題として挙げられる研究開発においては新規技術の出現だけでなく、新規技術の既存技術に対する影響の大きさを把握することが不可欠になると考えられる。本稿ではその第一歩として学術論文の著者の分野移動を特定することで、一方で成長する分野とそれによって他方で衰退する分野を抽出することを目指す。実際に「エネルギー」に関する研究を元に分析を行った結果、著者の移動によって各著者の研究内容の変化を特定し、一見無関係に見える分野間の相互関係を把握ことはできた一方で、実際に企業の研究開発・投資に貢献するためには技術分野の分類をより明確にし、著者に限らない移動を抽出することが求められると考えられる。

Identifying interactions among academic fields based on author movements

YOSHIOKA RYUYA^{a)} OCHI MASANAO SAKATA ICHIRO

1. はじめに

企業経営において、持続的成長が重要な課題の一つとして挙げられる。それには特にイノベーションや企業の研究開発への投資が効果的であると報告されている [15], [16]. 実際には、企業は技術開発や新規事業の立ち上げ、事業再編といった経営戦略を持続的成長のために策定する必要がある。企業がこのような経営戦略を効果的に実現するために、新しい技術の出現や技術同士の相互関係を分析し、成長する技術、衰退する技術についての将来の動向を把握することは必要であろう。

企業がそのような状況下にある中で、技術経営の分野においては、新規技術の出現を予測し、企業経営に役立てるような研究がもどくなされてきた [3], [4], [11]. 一方で、技術同士の相互関係に関する研究も数多く報告されている。例えば、新規技術と既存技術の入れ替わり自体を把握する研究 [17] や、技術の入れ替わりを社会的な側面から捉えた研究 [6] である。しかし、技術的側面から、新規技術が出現し

成長した際にそれが既存技術に対して与える影響を明らかにした研究はこれまであまりされていない。例えば、フィルムカメラ技術とデジタルカメラ技術の相互作用は代表的な例として挙げられるだろう。デジタルカメラ技術の成長によって、フィルムカメラ技術は大きな影響を受け、カメラ市場で根本的な入れ替えが行われた。この時、デジタルカメラ技術の成長性を見誤り経営破綻に陥ったコダック社は、既存技術を置き換えるような新規技術の成長性を見誤り、企業の存続に関わる間違った経営判断を行ったと言えるだろう。このように既存技術と新規技術の相互作用は、企業成長の持続性において決定的である。

そこで、本研究ではある技術の成長と、それに伴う他の技術の動向について捉える手法の提案し、検証することを目指す。これによって、企業は今後出現する新規技術に対して資源を集中させるかどうかの判断だけでなく、幅広い分野における新規技術の成長に対し、自社の既存技術をどのように扱うかの意思決定が可能になる。

本研究を進めるにあたっては、技術分野を正しく分類し、分類した技術分野において複数の分野で相互的に作用する指標を抽出し、その指標の変化を元に分野間の相互作用を定量的に理解する必要がある。さらにその相互作用の動向

¹ 東京大学大学院工学系研究科技術経営戦略学専攻
UT, 〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

^{a)} yoshioka@ipr-ctr.t.u-tokyo.ac.jp

を捉えるためには、抽出した指標の現状の相互作用の関係性だけでなく、作用する際の兆候となる変化も把握することが必要となる。

本稿ではその第一歩として、新規技術と既存技術の関係性を捉える上で、学術論文の著者の研究分野移動の抽出という手法に関する報告を行う。学術論文は分野としての拡大・縮小の要因が限定的であり、分野間の相互関係を把握しやすく、また、学術研究が企業の技術開発に結びついていることは Sorenson の研究によって示されている [14]。学術論文を分類し、著者の移動を学術分野間の相互的な指標として扱うことで、その変化を定量的に理解することが可能になると考えられる。

実際に技術分野の分類、著者の移動という指標によって特定できる分野の特性を把握することで、本研究で技術分野の分類、抽出すべき指標が満たすべき条件を考えることが可能になる。

本稿ではまず、エネルギーに関連する学術論文を用いて著者の分野間の移動を抽出し、その後著者の移動が抽出できた分野において、その著者の研究内容から学術的な相互関係について把握する。著者の移動に着目することで、定量的に分野間の直接的な関係性の有無を特定することができるに加え、著者の分野移動を著者の研究関心の変化と捉えた時に、定性的に分野間の相互関係を把握することが可能となる。

実験においては Web of Science^{*1} のデータから “energy AND resource” をクエリーとして、2011 年までの 6340 の論文を抽出し、分析を行った。分析の結果、著者の移動が相対的に多く起こっている 7 組のクラスタのペアを特定することができた。7 組のクラスタのペアについてクラスタのノードの変化率を算出すると、実際に移動前のクラスタが縮小し、移動先のクラスタが拡大していたクラスタのペアは 2 組存在していた。7 組のクラスタのペアにおいて、移動した著者の研究内容の変遷を辿ると、クラスタの特徴語が類似しているかに関わらず、同様のモデルを用いた分析によって、既存の研究対象を拡張するといった形で研究内容を変化させていることが分かった。

本稿での提案手法では、著者の移動を指標とするだけではクラスタ拡大・縮小といった傾向を捉えることはできず、クラスタのノード数の変化率などと組み合わせた評価が必要となる。その上で、手法が類似し、それまでの既存の知見を活かせる範囲での分野間の相互作用を特定することが可能であった。

本稿によって、以下の貢献が得られると考えられる。

- 移動を指標とすることによる特定分野間の相互作用の特徴の把握
- 特徴語からだけでは把握できない分野間の相互関係の

特定

本稿においては著者の移動に着目することで、著者の研究内容の変化を捉えることができ、同時に一見無関係に思える分野間の関係の有無を特定することができた。一方で、実際に特定した著者の移動については “energy AND resource” というクエリーを用いて実験しか行われておらず、他のデータセットを用いた際にどのような分野間の相互関係を特定できるかについては検証の余地がある。また、本提案手法では研究手法や分野が比較的近い分野間の相互作用を特定したが、今後の企業経営においては類似していない分野同士の関係性の特定についても研究を行うことが有効であると考えられる。

本稿は以下のように構成される。まず、2 章で関連する研究について述べ、本研究の位置づけを明らかにする。次に 3 章で提案手法について説明する。4 章では実際に使用したデータと行った実験について明らかにし、その考察について 5 章で議論する。最後に結論と今後の展望について述べる。

2. 関連研究

本稿では著者の研究分野移動を抽出することで、学術分野の相互作用、特に拡大する分野とそれによって縮小する分野を特定し、企業の持続的成長のための研究開発に役立てることを目的としている。

企業の研究開発に焦点を当てるという点においては、これまでは Lee, Rotolo, Shibata のように、新たに出現する分野の特定についての研究が多くなされてきていた [3], [4], [11]。

本研究で着目する技術分野間の相互作用については、Zhang は記事のデータを解析し、単語のベクトルの位置関係を捉えることで、ある特徴を持つモノの代表格の時系列での移り変わりを捉える手法を提案している [17]。また、Kungl は自身の論文においてドイツのエネルギー産業における変化を元に、内部の競合に限らない外的要因が産業に及ぼす影響を評価した [6]。しかしながら、制度やその他の関係者といった外的要因は企業の立場から操作するのは難しく、企業としては内部の技術に対して資源をどのように分配するかを決定するのが重要になると考えられる。

以上のことから、本稿では学術論文のデータを用いてより技術的側面に近い部分で技術の入れ替わりを捉える事で、企業の意思決定に役立てることを目指す。特に、本稿では学術論文をクラスタリングによって分析し、著者のクラスタ間移動を抽出することである分野の拡大と、それによって縮小する分野を同時に特定することに焦点を当てている。

学術論文のクラスタリングにおいては、Small らの研究において論文の共引用関係に基づいたクラスタリングを行っている [8]。本稿では、そのような論文の共引用関係を用いての Newman 法によるクラスタリングを行う [12]。これによって、より密な引用関係を持つクラスタへの分類を

^{*1} Web of Science: <https://clarivate.jp/products/web-of-science/>

行う。同時に、分類をしたクラスタにおいては、Braam らの研究に沿って、索引付け単語の出現頻度によるクラスタのトピックの抽出を行う [13]。

分野の拡大・縮小について、本稿では著者に着目してその動向を捉えることを目指している。ある分野の成長性を特定する研究は、論文や特許、ニュース記事のデータを用いてこれまでも行われてきた。Kleinberg は文献数から、特定の分野の拡大を予測するモデルを提案し [9], Abercrombie は特許やインターネット記事を利用した予測を行なっている [1]。そのような中で Bettencourt や Guo のように文献の著者の増加が分野の拡大に作用していることを示している研究 [2], [7] や、de Rassenfosse のように特許申請時の開発者に着目して分野の成長を捉えているような論文も存在している [5]。

最後に、本研究においては技術分野の相互作用を特定することを企業の研究開発・投資の判断に役立てることを目的としているが、企業の活動に直接的に関わる特許のデータではなく、学術的な論文のデータを用いている。学術論文の知見が特許にとって良い効果をもたらすことは Sorenson の研究によって明らかにされており [14], Shibata の研究においては学術論文と特許のデータを用いることによって、新しい研究分野の可能性を提示している [10]。

3. 提案手法

本章では、2つの研究分野間での論文著者の移動を元にした相互作用の検出を行う手法を提案する。

3.1 提案手法の概要

本稿における提案手法について、概略を図1に示す。本提案手法では、まず始めに特定のテーマに対する論文データを取得し、データセットを作成する (I)。次に、取得した論文を Newman 法によってクラスタリングする (II) [12]。データセットをクラスタに分類した後は、論文の著者に着目し、所属クラスタとその移動を記録する。全体を複数の期間に分割し、各著者がそれぞれの期間において、最も多く論文を投稿したクラスタを著者の所属するクラスタと定義し、期間を跨いで所属クラスタが変化する事象を、著者の移動とする (III)。最後に著者の所属クラスタを集計し、2つの期間で比較した時に、前期間と同じクラスタに所属している著者よりも移動した著者の方が多く場合に、移動前と移動後のクラスタを抽出する (IV)。

3.2 提案手法の詳細

提案手法の詳細については、まず、I について、クエリー q を用いて論文データを取得し、データセットを作成する。データセットには、論文集合 $\mathbf{V}$ と各論文の引用集合 $\mathbf{E}$ が含まれている。これらを用いて、論文引用のグラフ $\mathbf{G}$ は以下のように表すことができる。

$$\mathbf{G} = (\mathbf{V}, \mathbf{E}) \quad (1)$$

次に II において取得した論文をクラスタリングする。得られた論文引用のグラフ $\mathbf{G}$ をモジュラリティ最大化を行う手法 (本稿では、特に Newman 法 [12] を用いた) によって、クラスタ $\mathbf{C}$ に分割する。

$$\mathbf{G} = \bigcup_{i=1}^K \mathbf{C}_i (\mathbf{C}_i : \{V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{i|\mathbf{C}_i|}\}) \quad (2)$$

ここで、 K はクラスタ数、 i はクラスタ番号、 $|\mathbf{C}_i|$ はクラスタ i に所属する論文数、 V_{ij} はクラスタ i に所属する j 番目の論文を示すものとする。

論文データをクラスタリングした後は、III において、論文の著者 a の所属するクラスタと、クラスタの移動を記録する。著者の所属するクラスタと、その移動を捉えるにあたって、全体の期間 $\mathbf{T}$ を L 個の期間に分割する。

$$\mathbf{T} : (t_1, t_2, \dots, t_L) \quad (3)$$

このように分割して期間 t において、著者 a が期間 t に所属するクラスタ $\mathbf{C}_{a,t}$ を以下の式で表す。

$$\mathbf{C}_{a,t} = \arg \max_{\mathbf{C}_k} \text{Freq}(a, t, \mathbf{C}_k) \quad (4)$$

ここで、 $\text{Freq}(a, t, \mathbf{C}_k)$ は著者 a が期間 t に出版したクラスタ $\mathbf{C}_k$ に所属する論文数を計算する関数を表すものとする。

上の式を満たす $\mathbf{C}_{a,t}$ において、

$$\mathbf{C}_{a,t} \neq \mathbf{C}_{a,t'} \quad (5)$$

となる場合、著者 a は t から t' において、クラスタを移動したと定義する。ただし、 $t < t'$ とする。

各著者の移動を捉えた後は、IV においてそれらを集計し、移動が多いクラスタのペアを抽出する。

まず、ある論文 V の著者集合を $\mathbf{V}^a$ で表す。この時、クラスタ i に所属する論文の著者集合を $\mathbf{C}_i^a : \{V_{i1}^a, V_{i2}^a, \dots, V_{i|\mathbf{C}_i|}^a\}$ で表すすると、著者の研究分野の移動割合を以下のように計算することができる。

$$M_{\mathbf{C}_{k,t}, \mathbf{C}_{k',t'}} = \frac{|\mathbf{C}_{k',t'}^a \cap \mathbf{C}_{k,t}^a|}{|\mathbf{C}_{k,t}^a|} \quad (6)$$

上式の移動割合において、

$$M_{\mathbf{C}_{k,t}, \mathbf{C}_{k',t'}} \geq M_{\mathbf{C}_{k,t}, \mathbf{C}_{k',t'}} (k \neq k') \quad (7)$$

となる場合に、 $\mathbf{C}_k$ と $\mathbf{C}_{k'}$ を移動が多くみられたクラスタのペアとして抽出する。

3.3 提案手法の検証

本稿では、提案手法に沿って分析をし、その検証を行う。検証にあたっては、分析結果において実際に拡大・縮小しているクラスタのペアの有無と、そのようなクラスタのペア間の関係性の定性的な評価を行う。

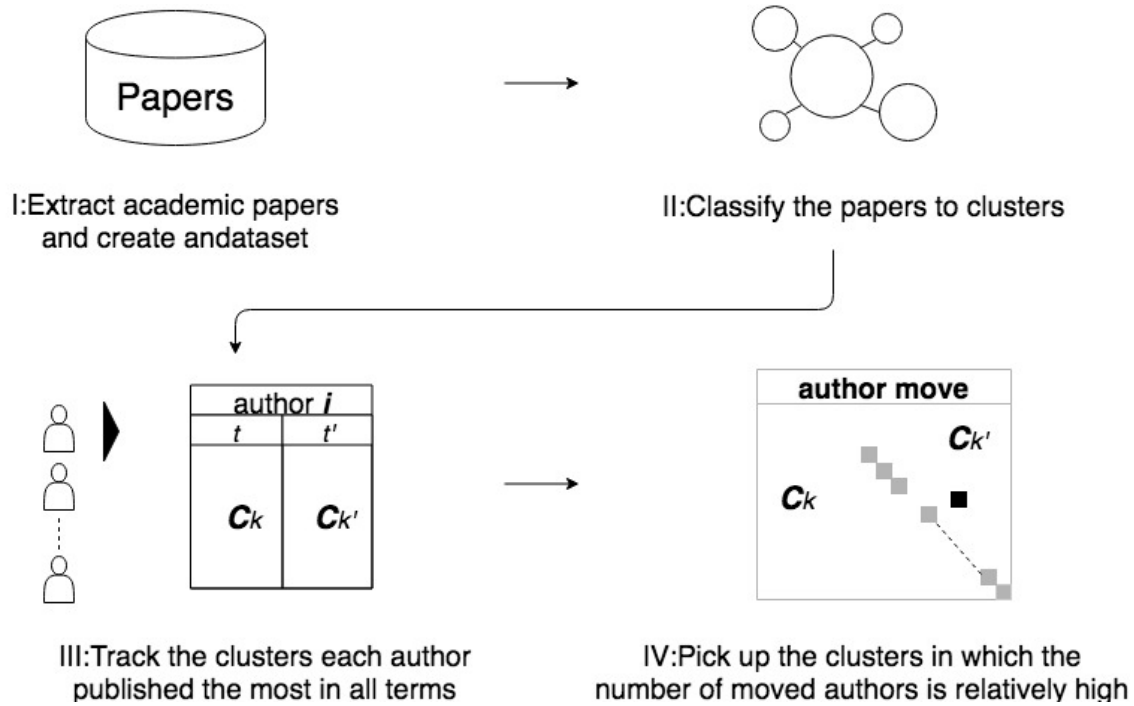


図 1 提案手法の概要

まず、実際に拡大・縮小しているペアの有無については、クラスターのノード数の変化からの検証を行う。

ある論文集合 V の期間 t から t' における論文数の変化率を r_V とし、

$$r_V = \frac{|V_{t'}|}{|V_t|} \quad (8)$$

と表す。これをもとにクラスター k に所属する論文の集合 C_{kt} について、その期間の全論文集合 V と比較をし、 $r_{C_{kt}} > r_V$ となる場合、そのクラスターは成長しているクラスター C_{grow} 、逆に $r_{C_{kt}} < r_V$ は縮小しているクラスター C_{shrink} と捉える。

この際に、

$$C_k = C_{shrink} \cap C_{k'} = C_{grow} \quad (9)$$

となる場合に、実際に著者の移動に沿ってクラスターが拡大・縮小しているクラスターのペアと判断する。

次に、特定された拡大・縮小しているクラスターのペアについて、その内容の定性的な評価を行う。定性的な評価にあたっては、実際に特定されたペアの分野特性を把握することで、本稿における提案手法が実際に適応され得る分野の特性を抽出する。

4. 実験

使用したデータ、実験の条件について説明を行う。

実験において、データとしては Web of Science に掲載されている論文を使用した。実際に抽出したデータははじめにも述べたように「エネルギー」をテーマとする論文に

ついて 2011 年までに公開されている論文のデータからクエリー q を”energy AND resource”として論文を抽出し、データセットを作成した。論文数は全部で 6,340 であった。

”energy AND resource”を q として設定することで、環境問題に直面する中で化石燃料のみならず、他の再生可能エネルギーの利用など様々な変化が求められる研究分野において、実際に分野としての相互作用があるかどうかを検証する。

これをクラスタリング分析にかけた結果、79 のクラスターに分類された。そのうち 18 のクラスターがノード数 100 以上となり、これらのクラスターを分析対象とした。

著者の移動を計測する際は期間として t_1 :1996_2001, t_2 :2002_2006, t_3 :2007_2011 の 3 期間において分析を行った。

5. 結果と考察

実験を通じて著者の移動をみると、 t_1 から t_3 の比較において著者の移動が抽出でき、図 2 のようになった。図 2 では t_1 においてクラスター C_{t1} に所属していた著者（横軸）が t_3 において各クラスター C_{t3} に移動した割合を表している。クラスターの移動が生じていない場合は t_1, t_3 において同じクラスターに所属するため、もし著者の移動が少ない場合は、図の対角成分の値が大きくなるが、図 2 においては他の部分の値が大きくなっているため、著者の移動が多く生じていることが分かる。

次に、著者の移動が多く存在していたクラスターのペアの

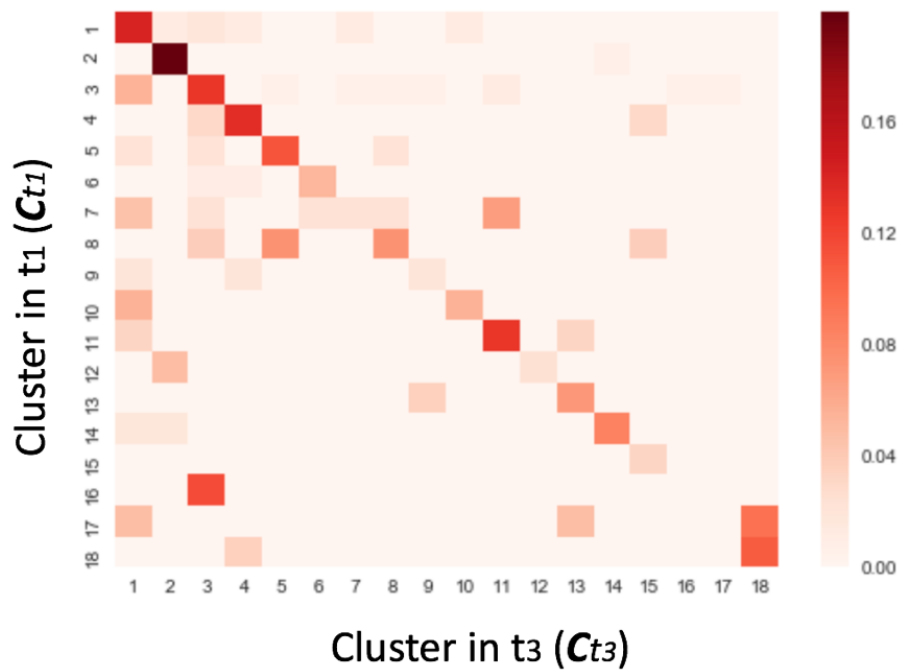


図 2 t_1 から t_3 における著者の移動

番号と、各クラスターの論文群の特徴語、期間 t から t' におけるクラスター内の論文数の変化は表 1 のようになった。

表 1 について、まずクラスター内の論文数の変化率に目を向けると、 C_{17}, C_{18} のペアを除いては、移動先のクラスター C_{t_3} の方が移動前のクラスター C_{t_1} よりも論文の増加率が高いことがわかる。また論文全体の増加率については、 $r_V = 4.82$ となった、これを考慮すると、実際にクラスターの拡大・縮小が検出されたペアは C_9, C_1 と C_{16}, C_3 となった。

それぞれのクラスターのペアについて実際に移動した著者の研究内容に着目すると、まず t_1 に C_9 に所属していた著者は、太陽光や水素エネルギーの効率性をモデルを用いて評価し、既存の化石燃料に対する代替可能性について研究していたのに対し、 t_3 では C_1 においてモデルを拡大し、それらのエネルギー源を実際に導入するためのプロセスについて論じている。 C_9 は海水の淡水化についての論文のクラスターであるが、海水の淡水化においては社会における生活水の供給ににおいて必須事項である一方で、一連のプロセスにおけるエネルギーの効率化が課題とされていた。 C_9 から C_1 に移動した著者は初めから海水の淡水化のエネルギー効率化について詳細に研究していた訳ではなく、社会全体における再生可能エネルギーの効率性について扱っており、そのため t_1 の時点で C_9 に所属していたと考えられる。

次に、 C_{16} に所属していた著者に着目すると、期間 t_1 においてはエネルギー資源の転換のための政策について研究していたが、 t_3 においては政策以外の方法を含む総合的な視点から、資源利用における持続可能な社会の実現についての研究を行っていた。総合的な視点としては、特定の政策が

もたらす効果の検証や再生可能エネルギーに対する官民の連携体制の構築といった政策的な視点に加え、貧困の解消や、地方の開発などの経済的な視点や、再生可能エネルギーの導入による環境面への影響といった環境的な視点を含めた議論から、持続可能な社会の実現について論じていた。

これらの変化は、ある特定の研究対象から別の研究対象への移行ではなく、研究対象の拡張を表していると考えられる。対象の拡張とは、前の期間 t_1 において研究していた内容について十分に知見を得た上で、その知見を含めたより広義の内容についての研究を行うということである。

一方、表 1 においてこれらの 2 つ以外のクラスターのペアに着目すると、それらのペアにおいても移動した著者の研究内容の変化は研究対象の変化ではなく、研究対象の拡張によるものであった。実際にそれらのペアに着目すると、 C_7 と C_{11} においては固形廃棄物の処理における環境影響の評価から、同様の手法を用いて農作物における総合的なライフサイクルアセスメントに研究内容を変化させていたり、 C_8 と C_5 においては化石燃料に代わる風力や太陽光といったエネルギー資源の効率性についての研究から、それらのエネルギー資源の導入といった内容へと研究内容を変化したりしている。

以上のように、本稿における実験では、著者の移動割合の大きいクラスターのペアを特定することに成功した。次に、実際に特定したクラスターのペアの特性に関する考察を行う。

まず、著者の移動割合が大きかったクラスターのペアにおいて、各クラスターのノード数の変化率に着目すると、必ずしも移動前のクラスターが縮小し、移動先のクラスターが拡大している訳ではなかった。クラスター間の相互作用を特定する

表 1 抽出された著者の移動

	C_{t_1}	Keywords(C_{t_1})	$r_{C_{t_1}}$	C_{t_2}	Keywords(C_{t_2})	$r_{C_{t_2}}$
1	C_7	building,incineration,life cycle,recycling,lca	5.68	C_{11}	aquaculture,lca,life cycle,reuse,fish	8.09
2	C_8	wind,wind energy,wind speed,speed,wind resource	6.19	C_5	wave,wind,tidal,wave energy,power	9.75
3	C_9	desalination,osmosis,reverse osmosis,seawater,water	3.00	C_1	turkey,biomass,geothermal,ethanol,hydrogen	4.70
4	C_9	desalination,osmosis,reverse osmosis,seawater,water	3.00	C_4	oil,coal,hubbert,price,technology	8.51
5	C_{12}	richness,specie richness specie,hummingbird,bird	2.45	C_2	food web, body, web, food, female	2.64
6	C_{16}	biomass,renewable energy ,malaysia,renewable,policy	3.12	C_3	energy,exergy,sustainability,ecological,wind	5.35
7	C_{17}	biodiesel,alcohol,oil,surfactant,coconut	5.55	C_{18}	rebound,rebound effect,plastic,iron,steel	2.42

際には、本稿では提案手法の検証のために用いた、クラスタ自体のノード数の変化率のような別の指標を同時に用いることが必要になると考えられる。

また、今回の実験で特定できたクラスタのペアの関係性に着目すると、クラスタのペアの拡大・縮小関係に関わらず、研究の手法と、研究の対象の2つが類似しているクラスタのペアが特定できていると考えられる。まず、研究の手法について、本稿においてはクエリー q を”energy AND resource” として実験を行ったが、この分野において実際にクラスタを移動していた著者は、特定の環境における影響を評価するモデルを作成し、そのモデルに沿った評価をするといった形で研究を進めており、研究内容の変化に対して研究の手法の抜本的な変化は起こっていなかった。次に、研究内容の変化については、クラスタの移動によって研究対象を全く別のものに变化させるのではなく、従来の研究対象を拡張させたより広義の研究対象を選択していた。これは、研究期間が限られ、特定の分野のみに対して高い専門性を持つといった研究者の特性によるものであると考えられる。このようなクラスタ間の類似性については、各クラスタの特徴語の重複からは判断することができなかったが今回の手法を用いることで、そのような、一見無関係に思えるクラスタ間の関係性を把握することが可能になったと考えられる。

6. 結論と今後の展望

本稿では企業の持続的成長のために必要な研究開発や投資の質を向上させるために、著者の研究分野移動を用いて学術分野間での相互関係を捉えることで、ある分野の拡大とそれによって縮小する別の分野を捉えることを目的とした。実際に実験を通じて「エネルギー」に関する分野の研究について分析をすると、著者の移動を抽出しただけでは分野の拡大・縮小の相互作用を特定することはできなかったが、その上でクラスタのノード数の変化率を考慮することで、分野として拡大・縮小しているクラスタのペアを定量的に特定することができた。

本稿で提案した、著者の移動によって特定された分野間の関係性は研究の手法と対象が類似した範囲のみという点で限定的ではあった。しかし、このような類似性については、クラスタの特徴語だけでは判定できないような分野間の類似性を特定することができたという点において有用で

あると考えられる。実際に、これによって縮小している研究分野において研究活動を行っている研究者は、自身の知見や研究の手法を活かせる新たな研究分野を特定し、持続的に研究活動を行うことが可能となる。このような分野間の相互作用を、企業にとっても自社の研究における人的資源の有効活用という点においては役立つと考えられる。

一方で、本稿においてはクエリー q を”energy AND resource” とした場合のみについての実験しか行っていない。他のクエリー q を用いた場合にどのような結果になるかについては、今後検証する余地があると考えられる。また、企業経営においては、本稿で提案したような手法や対象が比較的近い範囲での分野間の関係性を捉えるだけでなく、分野として類似していないような分野間の相互的な関係性の特定も必要になると考えられる。

参考文献

- [1] Abercrombie, R. K., Udoeyop, A. W. and Schlicher, B. G.: A study of scientometric methods to identify emerging technologies via modeling of milestones, *Scientometrics*, 91, pp. 327–342 (online), DOI: 10.1007/s11192-011-0614-4 (2002).
- [2] Bettencourt, L. M. A., Kaiser, D. I., Kaur, J., Castillo-Chávez, C. and Wojick, D. E.: Population modeling of the emergence and development of scientific fields, *Scientometrics*, 75, pp. 495–518 (online), DOI: 10.1007/s11192-007-1888-4 (2008).
- [3] Changyong, L., Ohjin, K., Myeongjung, K. and Kwon, D.: Early identification of emerging technologies: A machine learning approach using multiple patent indicators, *Technological Forecasting & Social Change* 127, pp. 291–303 (online), DOI: 10.1016/j.techfore.2017.10.002 (2018).
- [4] Daniele, R., Diana, H. and Ben, R.: What is an emerging technology?, *Research policy* 44, pp. 1827–1843 (online), DOI: 10.1016/j.respol.2015.06.006 (2018).
- [5] de Rassenfosse, G., Dernis, H., Guellec, D., Picci, L. and van Pottelsberghe de la Potterie, B.: The worldwide count of priority patents: A new indicator of inventive activity, *Research Policy*, 42, pp. 720–737 (online), DOI: 10.1016/j.respol.2012.11.002 (2013).
- [6] Gregor, K. and Frank, W.: Sequence and alignment of external pressures in industry destabilisation: Understanding the downfall of incumbent utilities in the German energy transition (1998–2015), *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 26, pp. 78–100 (online), DOI: 10.1016/j.eist.2017.05.003 (2018).
- [7] Guo, H., Weingart, S. and Börner, K.: Mixed-indicators model for identifying emerging research areas, *scientometrics*, 89, pp. 421–435 (online), DOI: 10.1007/s11192-

- 011-0433-7 (2011).
- [8] Henry, S. and Belver, C. G.: The Structure of Scientific Literatures I: Identifying and Graphing Specialties, *Science Studies*, 4, pp. 17–40 (online), DOI: stable/284536 (1974).
 - [9] Kleinberg, J.: Bursty and Hierarchical Structure in Streams, *Proceedings of the Eighth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, KDD '02, pp. 91–101 (online), DOI: 10.1145/775047.775061 (2002).
 - [10] Naoki, S., Yuya, K. and Ichiro, S.: Extracting the commercialization gap between science and technology — Case study of a solar cell, *Technological Forecasting & Social Change*, 77, pp. 1147–1155 (オンライン), DOI: 10.1016/j.techfore.2010.03.008 (2010).
 - [11] Naoki, S., Yuya, K., Yoshiyuki, T. and Katsumori, M.: Detecting emerging research fronts based on topological measures in citation networks of scientific publications, *Technovation*, 28, pp. 758–775 (online), DOI: 10.1016/j.technovation.2008.03.009 (2008).
 - [12] Newman, M. E. J.: Fast algorithm for detecting community structure in networks, *Phys. Rev. E*, Vol. 69, p. 066133 (online), DOI: 10.1103/PhysRevE.69.066133 (2004).
 - [13] Robert R., B., Henk F., M. and Anthony F. J., v. R.: Mapping of science by combined co-citation and word analysis. I. Structural aspects, *Journal of the American Society for Information Science*, 42, pp. 233–251 (オンライン), DOI: 10.1002/(SICI)1097-4571(199105)42:4<233::AID-ASIJ3.0.CO;2-I (1991).
 - [14] Sorenson, O. and Fleming, L.: Science and the diffusion of knowledge, *Research Policy*, 33, pp. 1615–1634 (online), DOI: 10.1016/j.respol.2004.09.008 (2004).
 - [15] Stephen, R., Jun, D. and Zhang, James, H.: Modelling the innovation value chain, *Research Policy* 37, International World Wide Web Conferences Steering Committee, pp. 961–977 (online), DOI: 10.1016/j.respol.2008.04.005 (2008).
 - [16] Taiyuan, W. and Stewart, T.: R&D investment and financing choices: A comprehensive perspective, *Research Policy* 39, pp. 1148–1159 (online), DOI: 10.1016/j.respol.2010.07.004 (2010).
 - [17] Yating, Z., Adam, J., Sourav, S. B. and Katsumi, T.: The Past is Not a Foreign Country: Detecting Semantically Similar Terms across Time, *IEEE TRANSACTIONS ON KNOWLEDGE AND DATA ENGINEERING*, VOL 28, pp. 2973–2807 (online), DOI: 10.1109/TKDE.2016.2591008 (2016).