

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26740056

研究課題名(和文) 環境・資源・リスクに対する強靱性と持続性を備えた産業構造解析モデルの構築

研究課題名(英文) Construction of industrial analysis model with resiliency and sustainability for environment, resource and risk

研究代表者

尾下 優子(Oshita, Yuko)

神戸大学・海事科学研究科・講師

研究者番号：50709227

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、産業連関理論とグラフ理論などを組み合わせた新たな産業構造解析モデルの構築を行い、様々な応用研究を行った。その結果、産業の複雑な連関構造・波及構造の中から、資源や環境負荷集約的な産業構造や、特徴的な産業構造を定量的に解析し、可視化することは、持続可能かつ強靱な産業システムの構築のための技術開発・導入戦略、資源獲得・利用戦略、負荷削減対策、リスクマネジメントを議論するための有効な情報かつ判断材料になりうるということがわかった。また、結果を定量的・視覚的に示すことにより、産業間や利害関係者間の議論や合意形成を容易にし、技術や対策の導入の援助も可能である。

研究成果の概要(英文)：We proposed an industrial structure analysis model combined input-output analysis with a spectral graph analysis etc., and performed applied studies. From the results, it became clear that analyzing and visualizing the resource intensive, environmental footprint intensive and characteristic industrial structure from industrial complicated linkage structure, influence structure can be useful information and decision materials for technology development and introduction strategy, resource acquisition and use strategy, emission reduction measures, risk management. It can also facilitate discussion and agreement between industries or stakeholders, and support introductions of technologies and measures.

研究分野：環境経済学

キーワード：産業クラスター フロー解析 バイオマス 二酸化炭素

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化問題、資源問題、災害など、多地域の多産業が関わる問題を解決するためには、産業の複雑な連関構造・波及構造を把握し、問題を効果的に解決するポテンシャルを持つ異業種間の連携やステークホルダーの特定が不可欠である。この複雑な産業の連関構造・波及構造は、産業連関分析¹⁾を用いて把握することができるが、従来の産業クラスターや構造解析研究は、地理的距離や生産技術の類似性を評価基準としたものであり、排出削減・資源使用削減ポテンシャルを評価基準とした産業クラスターの研究は行われていない。そこで申請者はこれまで、産業連関分析などの経済統計分野の手法と、スペクトラルグラフ分析^{2,3)}などの数理計画分野の手法を組み合わせることにより、キーセクター検出法の開発⁴⁾、重要なサプライチェーンの特定手法の開発⁵⁾、新たな産業クラスター検出法の開発⁶⁾とそれを応用した構造変化分析法の開発⁷⁾などを行ってきた。これらの研究により、新たな産業構造解析モデルが構築されつつある。また、申請者は、上記の手法を用い、局地的生産停止に対するサプライチェーンの強靱性を評価する手法の開発も進めている⁸⁾。

しかし、上記のモデルは統計学・数理計画的にも未だ開発段階であるとともに、資源や災害の分析を行うためには、産業連関表から得られる産業のデータより、もっと細かい企業・工場レベルのプロセスデータが必要となる。より頑健かつ包括的、現実反映性の高いモデルを構築するためには、応用分野を広げ、工学等他分野の知見と連結可能なモデルを作り上げる必要がある。このようなモデルを構築することにより、統計と技術に基づいた『高い削減ポテンシャルを持つ産業グループ』を単位とした、戦略的な負荷削減策、資源管理・獲得政策、産業配置・生産計画を提案することができ、持続発展可能かつ強靱な産業システムの構築を援助することができる。

2. 研究の目的

本研究では、モデルの構築・発展と応用分野の拡充によって、持続発展可能かつ強靱な産業システム構築への戦略的な提案を行うために以下の課題に取り組む。

(1) 他のクラスタリング手法や構造解析手法との比較や検討を行うことにより、経済的・環境的・災害リスクに対して重要な産業構造（産業クラスター、サプライチェーン、キーセクター）を抽出するための頑健な統計手法を開発する。さらに、詳細なプロセスデータ等との連結を行うことにより、製品・企業・工場ごとの詳細な分析や、技術の評価、代替の可能性などの情報を反映したより現実に則した分析を可能とする包括的なモデルを開発する。

(2) 環境負荷集約的・資源集約的・災害リス

ク集約的な産業構造を検出し、環境負荷物質の排出構造や資源の使用構造、災害等の影響の経済的波及構造を解明する。また、シナリオ分析などを行うことにより、重点的対策が必要な技術や経済取引、産業配置などを特定し、具体的な技術や産業システム、サプライチェーンの改善提案など、効果的な負荷削減策や資源管理戦略、産業間連携、災害等のリスクに対応できる産業配置などの在り方を提案する。また、この分析結果をモデルにフィードバックし、より頑健かつ包括的なモデルの構築を達成することにより、戦略的な負荷削減政策、資源管理・獲得戦略、災害等のリスクに強いサプライチェーン構造を提案する。

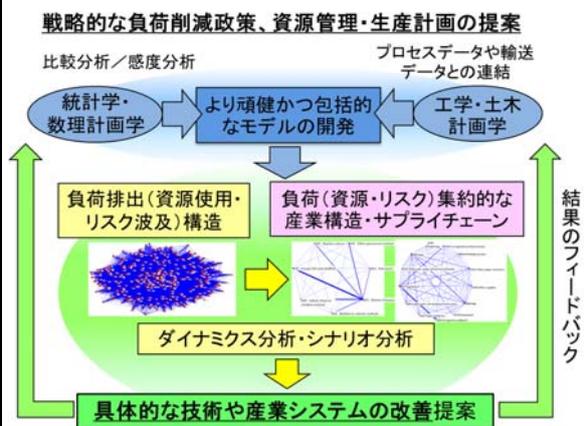


図1 本研究のフレームワーク

3. 研究の方法

申請者がこれまで開発してきた産業連関法とグラフ分析法を組み合わせた産業構造解析手法を用いた応用分析を行い、より頑健な手法の確立を目指す。さらに、工学分野、特にマテリアルフロー分析、プロセス評価・設計分野、災害の経済的影響分野の研究者の協力を得ながら、製品の詳細な生産プロセス情報との連結モデルを構築する。

(1) 産業クラスターの解析研究

産業連関理論とスペクトラルグラフ理論を組み合わせた産業構造解析手法を用いた応用分析として、アメリカのCO₂集約的な産業クラスターの解析研究等を行い、産業構造や規模の差が手法に与える影響分析や、アメリカの産業構造から排出される環境負荷に関わる先行研究の結果との比較分析などを行った。Newman-Girvan モジュラリティ指数⁹⁾を用いて産業クラスターの数を決定する方法の検証を行った。

(2) サプライチェーン、フロー解析手法の研究

産業連関的構造経路分析⁵⁾の手法を応用し、バイオマス資源の供給元である1次産業の製品のフロー解析、バイオマス由来の樹脂から生み出されるフローや付加価値の分析などの応用分析を行い、手法の発展と検討・強化を行った。

(3) 生産プロセスを反映可能な産業構造解

析方法の研究

ケーススタディの対象地域を種子島に設定し、生産プロセスの詳細な情報を産業構造の情報と連結するための、産業連関表の作成方法や部門分割・新設方法についての研究を行った。

4. 研究成果

(1) 産業クラスターの解析研究

産業連関理論とスペクトラルグラフ理論を組み合わせた産業構造解析手法と、Newman-Girvan モジュラリティ指数、アメリカの環境分析用産業連関表である“Comprehensive Environmental Data Archive”¹⁰⁾ (以下、CEDA) の 2002 年表を用いて分析した結果、検出されたアメリカの CO₂ 集約的な産業クラスターは、6 つであった。この CO₂ 集約的な産業クラスターは、産業間取引により直接間接的に誘発(排出)している CO₂ が集約的である産業クラスターである。CEDA の部門数は約 400 部門であるが、特に電力クラスター、石油製品クラスター、鉄鋼クラスターは 100 以上の部門から構成される巨大なクラスターであり、2002 年のアメリカの CO₂ 排出量の 26.9% が電力クラスターから、18.0% が石油製品クラスターから排出されている。電力クラスターは、電力部門を中心に食品産業、電気機械、サービス部門からなるクラスターであるが、その多くはサービス部門が占めている。さらに、クラスターを構成するエッジのうち、直接間接 CO₂ 排出が 10 Mt CO₂-eq. 以下のものを削除すると、卸売、小売、不動産、情報通信、医療・介護、教育、飲食業、自動車修理などのサービス部門と電力部門間のエッジのみが残り、これらのサービス部門の電力使用により、アメリカの全 CO₂ 排出量の約 13% が排出されていることが分かった (図 2 参照)。これは、Suh (2006)¹¹⁾ の結果同様、アメリカにおいて、サービス部門が CO₂ 排出において、大きな位置を占めていることがわかる。また、石油製品クラスターは、石油製品部門を中心に、工業製品、輸送、サービス部門からなるクラスターであり、直接間接 CO₂ 排出が 5 Mt CO₂-eq. 以下のものを削除すると、天然ガスや原油、有機化学基礎製品、航空、トラック、パイプラインなどの輸送部門、公務や国防などの部門のみが残り、これらの部門が石油製品を使用することで集約的に CO₂ が排出されていることがわかった。その他のクラスターには、農業、酪農、食品産業、容器製造部門からなる畜、食肉加工クラスター、綿栽培、布製造、衣類産業部門からなる人口・合成繊維、フィラメント製造クラスター、建設材料、建設部門からなるセメントクラスターが検出された。特に、と畜、食品加工クラスターは、日本の CO₂ 排出構造からは検出されないアメリカ特有のクラスターである。また、100 以上の部門からなる巨大なクラスターが多く検出された点や、電力使用を通してサービス部門が多く

の CO₂ を排出しているというアメリカの産業による CO₂ 排出構造を定量的かつ明確に明らかにした点において、日本だけでなく様々な国や地域の産業構造の解析に適用可能であることを確認した。

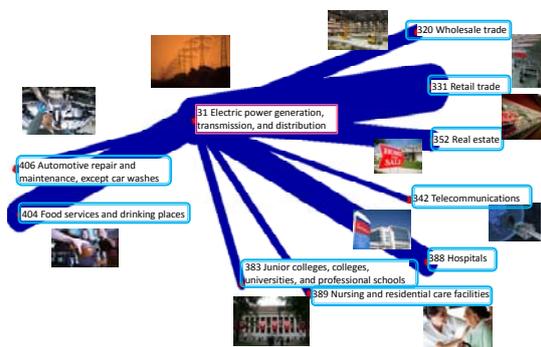


図 2 アメリカの電力クラスター (>10 Mt CO₂-eq.)

(2) 農産物のフロー分析

持続可能な社会の実現のためには、エネルギーのみしか生産できない太陽光や風力といった自然エネルギーとは違い、エネルギーも物質も生産可能なバイオマス資源を有効に活用することが重要である。しかしながら、賦存密度が低く、バイオマスのみの生産だけでは成り立たないことが現状であり、高付加価値な 1 次産業の主製品の副産物や残渣、廃棄物などのカスケード利用が望ましい。しかし、その場合、1 次産業の主製品などとの生産バランスを考える必要があり、さらに 1 次産業の副産物は既に地域資源として利用されている可能性もある。また、1 次製品の副産物をバイオマスとして、エネルギーや燃料などに利用する場合、産業構造が変化し、影響を受ける利害関係者も明らかになっていない。そこで、1 次産業の製品が生産されて、加工され、最終消費者の元に届くまでのフローを産業連関的構造経路分析法を応用して解析した。また、フロー構造の複雑度を企業の市場独占度を測る指数であるハーフィンダール・ハーシュマン指数 (以下、HHI) を用いて計る方法を提案した。HHI が高い場合は特定のフローの独占度が高く、構造が比較的シンプルであり、HHI が低い場合は独占度の高いフローが存在せず、比較的複雑な構造である。さらに、当該製品が最終消費されるまでに、産業にどれだけ需要されたかを表す循環指数も提案した。

米、いも類、野菜、果実、砂糖原料作物、素材を対象に金額フローを解析した結果、米、野菜、果実は直接、最終消費される割合が多く (米は精穀を経て最終消費)、その他は食品や飲食業に供給されたのちに最終消費される形で、HHI は高く、比較的シンプルであると示している。一方、いも類、砂糖原料作物、素材は多くの産業を経て最終消費されるため、HHI は低く、フロー構造が複雑であることがわかった。特にいも類は、いもか

ら生産されるでん粉が工業用にも利用されているため、1次産業の製品でありながら、フロー構造に多くの工業部門が存在する（図3参照）。同じく素材（木材の素材）から作られる木材チップや端材などが電力生産に利用されていることから、多くの工業部門がフロー構造に内包されている。これらの1次産業の製品の副産物を活用する場合、フロー構造に存在する部門に影響を与える可能性もある。一方、比較的シンプルなフロー構造を持つ製品の副産物を活用することにより、利用フローを増やし、1次産業の基盤を強化することもできる。さらに循環指数を分析すると、直接消費の多い野菜や果実は低く、多くの産業に利用される砂糖原料作物や素材は高い値であることもわかった。副産物の利活用により、この循環額を上昇させることも可能である。

一方、産業連関表の物量表を利用して物量フローを分析した結果、価格が低いため、金額フローには存在しない、もしくは小さなフローが、物量フローでは検出されたり、大きなフローとして検出されるという結果がでた。例えば、金額フローではいも類からでん粉への供給はごくわずかであるが、物量フローでは30%以上がでん粉に供給されている。また、米の副産物である稲わらは、金額フローではほとんど検出されないが、物量フローでは家畜や飼料・有機質肥料に供給されている。このように安価であるが大量にまどまって発生するバイオマスを、既に利用している産業や主製品のフロー構造への負の影響を最小化する方法で利活用していくべきである。

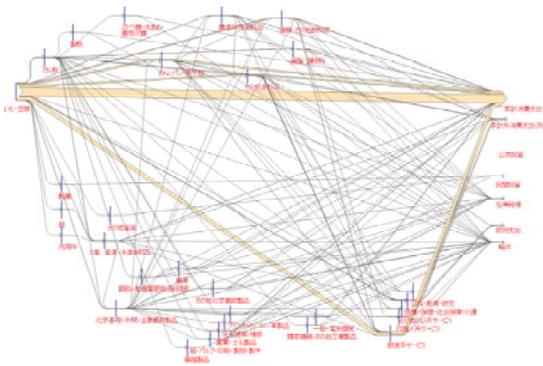


図3 いも類の金額フロー

(3) 樹脂のフローと付加価値の分析

バイオマス由来の樹脂を生産し、利用する際、化石資源由来のどの樹脂と代替し、どのような製品を生産すべきかという問題がある。その判断指標の1つとして、より多くの付加価値を国内に生み出せるかという指標を提案する。この観点から、従来の化石資源由来の樹脂とそれから生産される各プラスチック製品のフロー構造と、そこから生み出

される付加価値についての分析を行った。さらに、フロー構造から、バイオマス由来の樹脂の導入に対する適正について検討を行った。バイオマス資源から生産可能なポリエチレンとポリプロピレンについての分析を行った結果、それぞれに大きな差はないことが分かったが、同じくバイオマスから生産されるガソリンと比較すると生み出す付加価値や循環指数が高いことがわかった。これは、ガソリンはそのほとんどが最終消費者に直接消費される一方、樹脂は様々な産業に材料製品として使用されるためである。また両樹脂から生産されるプラスチックフィルム・シート、プラスチック容器、プラスチック板・管・棒、工業用プラスチック製品、プラスチック製日用雑貨・食卓用品、その他のプラスチック製品のフロー構造とそこから生み出される付加価値を分析すると、各製品のフロー構造に特徴があることがわかった。プラスチック製日用雑貨・食卓用品は、あまり多くの産業を経由することなく最終消費者に消費されるため、HHIは高く（フロー構造は比較的シンプル）、循環指数は低い。一方で、工業用プラスチック製品やプラスチックフィルム・シートは、HHIが低く、独占的なフローが比較的存在せず、循環指数と生み出す付加価値は高い。また両製品は、様々な製品に材料として利用され、間接的に輸出される割合が高いことも特徴である。このような結果やそれぞれの産業規模、消費者の受容性、環境性などからどの樹脂、プラスチック製品にバイオマス製品を導入していくべきかを判断すべきであるが、その判断材料として、各製品がどのような産業に材料として利用され、どのような最終消費者の元に直接間接的に届くのか、またそこから生み出される付加価値を定量的に可視化することは、重要であることを確認した。

(4) 生産プロセスを反映可能な産業構造解析方法の研究

生産プロセスの変化や新技術・システムの導入に対する分析を可能とする産業・経済構造解析手法を構築するために、鹿児島県の種子島を対象地域とし、種子島の産業構造の特徴を反映した種子島版の産業連関表を作成した。この産業連関表を用いて、種子島の特産品であるサトウキビの搾りかすであるバガス燃料としたバイオマス発電や熱供給業、バイオエタノール生産を導入した場合のサトウキビのフローの変化（図4参照）や島内経済への影響などを、実際に種子島島内の利害関係者と共有・議論することで、意思決定において有用な情報とその可視化方法について検討を行い、実用化と可視化という方面での手法の発展を行った。

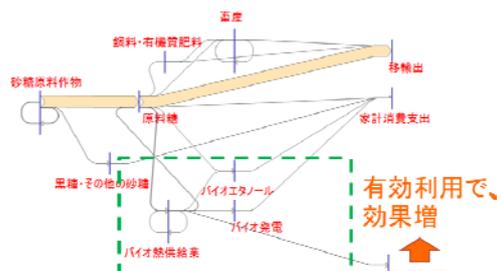


図4 新技術導入後のサトウキビのフロー

(5) まとめと今後の展望

本研究では、産業連関理論とグラフ理論などを組み合わせた新たな産業構造解析モデルの構築を行い、様々な応用研究を行った。その結果、産業の複雑な連関構造・波及構造の中から、資源や環境負荷集約的な産業構造や、特徴的な産業構造を定量的に解析し、可視化することは、持続可能かつ強靱な産業システムの構築のための技術開発・導入戦略、資源獲得・利用戦略、負荷削減対策、リスクマネジメントを議論するための有効な情報かつ判断材料になりうるということがわかった。また、結果を定量的・視覚的に示すことにより、産業間や利害関係者間の議論や合意形成を容易にし、技術や対策の導入を援助できると確信している。今後は、さらに頑健な手法の構築と、さらなる応用分野の拡充、分析結果の是非を判断するための地域でのケーススタディ、他分野との連携による多角的な産業構造や技術の分析を進め、強靱で持続的な産業構造の構築に寄与していきたい。

<参考文献>

- 1) 例えば、Leontief, W. W., The Structure of American Economy, 1919-1939. An Empirical Application of Equilibrium Analysis, Oxford University Press, New York, 1951.
- 2) Chung, F.R.K., Spectral Graph Theory, American Mathematical Society, 1997.
- 3) Shi, J. and Malik, J., IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22 (8), 888-905, 2000.
- 4) Kagawa, S., Oshita, Y., Nansai, K. and Suh, S., Environmental Science & Technology, 43 (2), 245-252, 2009.
- 5) Oshita, Y., Energy Economics, 34 (4), 1041-1050, 2012.
- 6) 尾下優子, 産業連関 イノベーション& I-Oテクニック, 20 (1), 103-114, 2012.
- 7) Oshita, Y., Proceedings of 20th International Input-Output Conference, Kitakyushu (Japan), web, 2013.
- 8) Oshita, Y., Kagawa, S., Hasegawa, R. and Suh, S., Proceedings of 20th International Input-Output Conference, Kitakyushu (Japan), web, 2013.
- 9) Newman, M.E.J. and Girvan, M., Physical Review E, 69 (2), 026113, 2004.

- 10) Suh, S., Economic Systems Research, 17, 449-469, 2005.
- 11) Suh, S., Environmental Science & Technology, 40 (21), 6555-6560, 2006.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① 菊池 康紀、尾下 優子、福島 康裕、帰結的ライフサイクル思考に基づく離島地域のエネルギーシステム設計、PETROTECH、査読有、第39巻、第6号、2016、pp.461-467
- ② 菊池 康紀、尾下 優子、地域資源利活用のための統合的情報基盤の要件定義、人工知能、査読無(解説)、第30巻、第2号、2015、pp.157-162
- ③ Keisuke Nansai, Shigemi Kagawa, Kenichi Nakajima, Yasushi Kondo, Sangwon Suh, Yosuke Shigetomi, Yuko Oshita, Global Flows of Critical Metals Necessary for Low-Carbon Technologies: The Case of Neodymium, Cobalt, and Platinum, Environmental Science & Technology, 査読有, vol.48, no.3, 2014, pp. 1391-1400. DOI: 10.1021/es4033452

[学会発表] (計8件)

- ① 菊池 康紀、尾下 優子、兵法 彩、兼松 祐一郎、平尾 雅彦、大久保 達也、環境性と社会経済性の分析に基づくバイオマス由来製品製造プロセス設計:汎用樹脂の例、化学工学会第82年会、2017年3月7日、芝浦工業大学 豊洲キャンパス(東京)。
- ② 菊池 康紀、尾下 優子、福島 康裕、ライフサイクル思考の社会実装:種子島の例、第12回日本LCA学会研究発表会、2017年3月2日、産業技術総合研究所 つくばセンター(つくば)。
- ③ 兵法 彩、尾下 優子、大野 肇、中井 美和、福島康裕、菊池康紀、産業連関表を用いた技術導入の社会経済性分析—種子島を例に—、第12回日本LCA学会研究発表会、2017年3月2日、産業技術総合研究所 つくばセンター(つくば)。※ポスター発表
- ④ 尾下 優子、菊池 康紀、国内農産物の金額・物量フローの解析、第10回日本LCA学会研究発表会、2015年3月10日、神戸大学(神戸)。
- ⑤ Yuko Oshita and Yasunori Kikuchi, Monetary and Physically Flow Analyses on Products of Agriculture, 11th International Conference on EcoBalance, 2014.10.28, Tsukuba (Japan),
- ⑥ Yuko Oshita, Yasunori Kikuchi, “Flow Analysis on Products of Agriculture, Forestry, Fisheries Industry using Structural Path Analysis”, 22nd International

Input-Output Conference, Lisbon (Portugal),
2014. 7.

- ⑦ 尾下 優子、菊池 康紀、構造経路分析を用いた農産物のフロー分析、第9回日本LCA学会研究発表会、2014年3月5日、芝浦工業大学 豊洲キャンパス（東京）。
- ⑧ 尾下 優子、加河 茂美、Sangwon Suh、CO₂集約的なアメリカの産業クラスターの特定、第9回日本LCA学会研究発表会、2014年3月5日、芝浦工業大学 豊洲キャンパス（東京）。

[その他]

<アウトリーチ活動>

- ① 尾下優子、「最先端技術を社会導入するための経済の考え方・仕組み作り」、第1回理科特別講座、2016年6月、仙台市立仙台青陵中等教育学校（宮城県仙台市）。

6. 研究組織

(1)研究代表者

尾下 優子 (OSHITA, Yuko)
神戸大学・大学院海事科学研究科・講師
研究者番号：50709227

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし

(4)研究協力者

菊池 康紀 (KIKUCHI, Yasunori)
東京大学・総括プロジェクト機構・特任准教授
研究者番号：70545649

福島 康裕 (FUKUSHIMA, Yasuhiro)
東北大学・工学研究科・准教授
研究者番号：40345096

兵法 彩 (HEIHO, Aya)
東京大学・総括プロジェクト機構・日本学術振興会 特別研究員(PD)
研究者番号：30790216