

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510059

研究課題名(和文) ライフサイクル分析におけるサプライチェーンの可視化手法に関する研究

研究課題名(英文) Method for visualizing supply chains in life-cycle analysis

研究代表者

近藤 康之 (Kondo, Yasushi)

早稲田大学・政治経済学術院・教授

研究者番号：80313584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：温室効果ガス排出量の効果的削減に向けて、ステークホルダーによる意見交換と意思決定の際に活用可能なサプライチェーンの可視化を行うことを目的として、数理モデル開発と応用分析を行った。数理モデルの開発は、温室効果ガスの総排出量をサプライチェーンの構成要素へと分解する産業連関分析の手法(構造経路解析)を拡張することにより実施した。さらに、産業構造分析とサプライチェーンの可視化に活用できる分析手法(産業連関表の三角化)について、従来の手法を改良し、応用分析を通してその有用性を示した。

研究成果の概要(英文)：We developed a mathematical model and applied it to visualization of supply chains, which encourages exchange of views among stakeholders and facilitates decision making to promote an effective reduction of greenhouse gas emission. The developed model is an extension of a well-known method of input-output economics, called structural path analysis, with which a total emission can be disaggregated into the contributions of parts constituting a supply chain. Moreover, we improved an existing method for triangulating input-output tables, the results of which can be used to analyze economic structures and visualize supply chains, and demonstrated the usefulness of the improved method through empirical analyses.

研究分野：計量経済学、産業エコロジー

キーワード：サンキー図 可視化 構造経路解析(SPA) 産業連関

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化問題の解決に向けて、グローバルな温室効果ガス (GHG) 排出量の削減が急務である。そのため、低炭素社会の実現に向けた取組の進んだ国と、そうでない国の産業構造の実態を把握したうえで、後者の国々に対して具体的な政策提言をしていく必要がある。また、企業の環境マネジメント、とりわけ温室効果ガス排出量の算定においては、GHGプロトコルイニシアティブのスコープ3への対応が求められることから、広範な情報収集と解析を行う必要がある。いずれの文脈においても、サプライチェーン全体を対象とした分析、すなわち、ライフサイクル分析が必要とされる。とくに、ライフサイクル分析の専門家だけでなく、様々なステークホルダーに分析結果を提示し、それを意見交換と意思決定の過程に活かすことが、今後ますます求められると考えられる。結果を分かりやすい図として示す手法が必要となる。

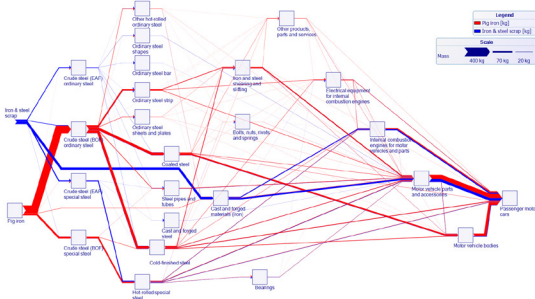


図1：鉄鉄・鉄鋼くずのフローをあらわすサンキー図
出所：Nakamura et al. (2011)

ライフサイクル分析の結果を図として示すには、サンキー図 (Sankey diagram) が標準的可視化手法として定着している。図1は、日本における乗用車1台の生産に係る鉄鉄・鉄鋼くずの産業間フロー (廃棄物等の発生と再資源化を除く) を、サンキー図として示したものである。サンキー図の長所としては、ネットワークをそのまま図示しているために、専門家でもなくとも理解しやすいこと、サプライチェーンにおけるステークホルダーの位置 (図1では産業部門の位置) を把握できること、を挙げることができる。他方、サンキー図の短所としては、図中のプロセスの数 (産業部門の数) が増加すると、膨大な情報が提示されてしまうために可視性が極めて低く結果の解釈が容易ではないこと、分かりやすい図を描くためには基本的には手作業で作図する必要があるために、そもそも作図すること自体が不可能になること、が挙げられる。このような短所を克服するためには、情報の取捨選択が必要である。

本課題研究代表者は、これまでに産業連関分析の方法を経済学および環境システム分析分野で応用し、また必要な方法を開発する研究を進めてきた。上述のサプライチェーンの構造把握を数理的に行うためには、産業連

関分析の理論を応用することが有用と考えられる。このような背景から、ライフサイクル分析におけるサプライチェーンの可視化手法に関する研究を着想するに至った。

2. 研究の目的

図2は、図1に示した鉄鉄のフローを本課題研究代表者らが共同研究により開発した手法 (UPIOM 図) として示したものである。図の可視性を向上するために、本課題研究代表者が開発したアルゴリズムによって産業部門の序列を並び替えて三角化してある。この三角化によって得られた部門序列についての情報は、図1のサンキー図における部門の位置を決定する際に活用されている。

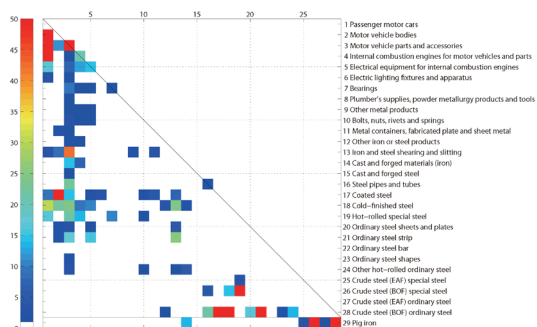


図2：鉄鉄のフローをあらわすUPIOM図

出所：Nakamura et al. (2011)

サンキー図における部門の位置を変更するだけでは、可視性の向上に限界があるので、情報の取捨選択を行うために「主要な部分」とその他の部分への分解を要する。部門間フローは産業連関表と同じ形式の行列として整理できるから、この行列形式のデータを、需要が生産を誘発するという産業連関モデルの基本構造を活かして分解する。より具体的には、産業連関分析の手法として環境分野への多くの応用実績がある構造経路解析 (structural path analysis, SPA) (Peters and Hertwich, 2006) を拡張した数理モデルを構築して、行列形式のデータを分解する。分解された行列の一部を「主要な部分」として図示することで、可視性の高いサンキー図の作図が可能になる。

以上のように、SPAに基づく数理モデルを開発・精緻化し、分かりやすいサンキー図の作図に応用することを最初の目標とした。次いで、精緻化された数理モデルに基づく様々な分解の定義を試行し、諸々の検討を経てサプライチェーンの可視化手法として確立することを方法論の観点からの目的とした。実証分析としては、部門別温室効果ガス排出量の整備された産業連関表を用いて、GHG排出量の効果的削減に向けた意見交換と意思決定の際に活用可能なサプライチェーンの可視化を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) SPA に基づく数理モデルの開発：従来の

SPA では、評価対象システムのライフサイクルにおける環境負荷総量を、どの産業部門で実際に排出された負荷物質なのか、その産業の活動はどのような経路を通じて誘発されたのか、が明らかにされる。言い換えれば、環境負荷総量を経路ごとに分解する作業が分析の出発点である。Peters and Hertwich (2006)をはじめとして、既存の SPA 研究において分解の対象とされたのは、ただ1つの数値（スカラー）であらわされる環境負荷総量であった。本研究では、産業部門間の取引に内包される環境負荷量（そのサプライチェーンの上流で排出された環境負荷総量、embodied emission）を行列形式のデータとして整理したうえで、その行列を分解の対象とする。

(2)開発した数理モデルの応用：日本の産業連関表、アジア地域の主要国を含む地球規模の国際産業連関表を主たるデータベースとして、開発した数理モデルを実証分析に応用する。

4. 研究成果

(1) SPA に基づく数理モデルの開発：産業部門間の取引を、それに内包される環境負荷量で測った行列を定義した。この行列は、標準的な産業連関モデル（レオンチェフ・モデル）の枠組みにおいて、任意に与えられた最終需要、および最終需要によって誘発される生産と整合的に定義されるようにモデルを構築した。この行列を分解の対象として、SPA をスカラーから行列に拡張した手法（Path-based Matrix Decomposition Analysis, PMDA）を開発した。

PMDA により分解される行列は、中間取引に係る正方行列だけでなく、環境負荷直接排出および最終需要を含む。直接排出をあらわす行ベクトルの要素は、生産者責任（producer responsibility）と関連した生産者基準の環境負荷勘定（production-based accounting）に相当する。また、最終需要をあらわす列ベクトルの要素は、消費者責任（consumer responsibility）と関連した消費者基準の環境負荷勘定（consumption-based accounting）に相当する。PMDA によれば、従来の SPA と同様に、環境負荷の総排出量を個々の経路に分解できる。したがって、PMDA の結果を生産者責任と消費者責任の中間にあたる分担責任（shared responsibility）（Lenzen et al., 2007）の分析へと応用することも可能である。

(2) PMDA を応用したサプライチェーンの可視化：開発した分析手法（PMDA）を国際産業連関表データベース WIOD（Timmer et al., 2015）の 2009 年表に応用して、各国の家計消費を支える国際サプライチェーンの主要部分を抽出して可視化した。図3は、日本の家計消費が直接間接に誘発する産業部門間取引と GHG 排出の主要部分を、国ごとに集

計して可視化した結果である。日本の家計消費により誘発される GHG 排出は、日本国内で多く生じているが、それを除くと、中国、米国、オーストラリア、ロシアからの輸入の寄与が大きいことが分かる。WIOD の対象 40 か国以外の国々を集計した地域（Rest of the World, ROW）からの輸入の寄与が大きいこと、より詳細な地域分類の国際産業連関表を用いた分析が残された課題である。

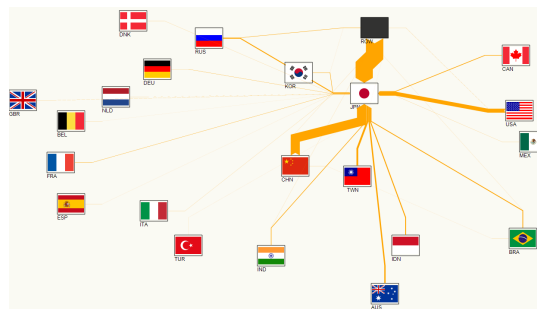


図3：日本の家計消費を支えるサプライチェーン

独自の計算、作図による。

データの出所：Timmer et al. (2015)

(3)産業連関表を三角化するアルゴリズムの開発：産業連関表を図2のように三角化すると、加工度の高いものから低いものへと順に部門が並べ替えられる。産業連関表を三角化する部門の序列は、サンキー図における部門の位置を決定する際にも活用できる。また、三角化それ自体が、産業構造を分析するための手法として古くから用いられてきた。

産業連関表を三角化する序列は、組合せ最適化問題あるいは整数計画問題の最適解として求められる。しかし、その最適解が一意に定まらないことが多いために、地域間比較や時系列比較に活用しにくいという問題点が指摘されてきた。この問題点を克服する三角化手法を混合整数計画問題として定式化し、その有用性を検討した。日本の接続産業連関表（102 部門表）から得た 1995 年と 2005 年の時系列比較において、三角化のための部門序列のケンドール順位相関係数は、従来の方法では 0.73 であったのに対して、新しく開発した方法では 0.90 まで向上した。この結果は、投入係数行列であらわされる産業構造（部門序列）が時間を通じて安定的であったと解釈できる。また、WIOD（35 部門表）から得た 2009 年の日本、米国、中国の地域間比較において、部門序列のケンドール順位相関係数は、従来の方法では 0.56 程度であったのに対して、新しく開発した方法により三角化の程度の 1%ポイントの減少を許容することで、0.86 まで向上した。3 か国の産業構造は、各産業部門の活動水準の影響を取り除いて、技術構造と産業間連携の構造のみに着目して投入係数行列を用いた比較によれば、相当程度類似しているとの結果が得られた。いずれの結果も、従来の方法で容易には見出し得なかったものである。

<引用文献>

- Kondo, Y. (2014) "Triangulation of Input-Output Tables Based on Mixed Integer Programs for Inter-temporal and Inter-regional Comparison of Production Structures," *Journal of Economic Structures* 3:2.
DOI: 10.1186/2193-2409-3-2
- Lenzen, M., Murray, J., Sack, F., Wiedmann, T. (2007) "Shared Producer and Consumer Responsibility: Theory and Practice," *Ecological Economics* 61(1), 27-42.
- Nakamura, S., Kondo, Y., Matsubae, K., Nakajima, K., Nagasaka, T. (2011) "UPIOM: A New Tool of MFA and Its Application to the Flow of Iron and Steel Associated with Car Production," *Environmental Science and Technology* 45(3), 1114-1120.
- Peters, G.P., Hertwich, E.G. (2006) "Structural Analysis of International Trade: Environmental Impacts of Norway," *Economic Systems Research* 18(2), 155-181.
- Timmer, M.P., Dietzenbacher, E., Los, B., Stehrer, R., Vries, G.J. (2015) "An Illustrated User Guide to the World Input-Output Database: The Case of Global Automotive Production," *Review of International Economics*.
DOI: 10.1111/roie.12178

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 1件)

- ① Yasushi Kondo. "Triangulation of Input-Output Tables Based on Mixed Integer Programs for Inter-temporal and Inter-regional Comparison of Production Structures," *Journal of Economic Structures* 3:2, 2014.
DOI: 10.1186/2193-2409-3-2

[学会発表] (計 9件)

- ② 興石拓真、佐藤邦光、近藤康之「産業連関表に基づく環境負荷原単位算定における自家輸送マトリックスの利用」第10回日本LCA学会研究発表会、2015年3月9～11日、神戸大学(兵庫県神戸市)
- ③ Yasushi Kondo. "Visualizing Core Structure of International Carbon Network Associated with Household Consumption," EcoBalance 2014 (The 11th International Conference on EcoBalance). 2014年10月27～30日、つくば国際会議場(茨城県つくば市)
- ④ Yasushi Kondo. "Visualizing Core Structure of International Carbon Network for Understanding of Shared Responsibility," ILCM 2014 (Indian Conference on Life Cycle Management). 2014年9月29～30日, New Delhi, India
- ⑤ Yasushi Kondo. "Visualizing Core Structure

of International Carbon Network Associated with Household Consumption," The 22nd International Input-Output Conference. 2014年7月15～18日, Lisbon, Portugal.

- ⑥ Yasushi Kondo, Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima, Shigemi Kagawa. "Visualizing International Bilateral Material Flow of Neodymium, Platinum and Cobalt Associated with Use of Durable Goods in Japan," 3R International Conference on Material Cycles and Waste Management. 2014年3月10～12日, 京都大学(京都府京都市)
- ⑦ Yasushi Kondo. "Extracting and Visualizing Core Structure from International Carbon Network Associated with Household Consumption," The 19th SETAC LCA Case Study Symposium. 2013年11月11～13日, Rome, Italy.
- ⑧ Yasushi Kondo, Anders H. Strømman, Shigemi Kagawa, Keisuke Nansai. "Structural Understanding of Production Network by Visualizing Inter-sector Carbon Flow: A Path-based Matrix Decomposition Analysis," EcoBalance 2012 (The 10th International Conference on EcoBalance). 2012年11月20～23日, 慶應義塾大学(神奈川県横浜市)
- ⑨ Yasushi Kondo, Anders H. Strømman, Shigemi Kagawa, Keisuke Nansai. "Path-based Matrix Decomposition Analysis: Theory and Application," The 20th International Input-Output Conference. 2012年6月25～29日, Bratislava, Slovakia.
- ⑩ Yasushi Kondo. "Path-based Matrix Decomposition Analysis and Its Application," Gordon Research Conference on Industrial Ecology. 2012年6月17～22日, Les Diablerets, Switzerland.

6. 研究組織

(1)研究代表者

近藤 康之 (KONDO, Yasushi)

早稲田大学・政治経済学術院・教授

研究者番号: 80313584