

奨励金No.1437

グローバルサプライチェーンにおける汚染物質排出構造の解明

土中 哲秀
九州大学 准教授

A study on the emission structure in global supply chains

Tesshu Hanaka,
Kyushu University, Associate Professor



本研究では、産業連関分析とネットワーク理論を組み合わせることにより、グローバルサプライチェーンを幾十にも重なるネットワークとして捉えて、サプライチェーン構造、及びそれに伴う排出構造を解析する手法に関する研究を行なった。本研究は、環境負荷に関する産業特性や産業構造等を把握することが困難になってきているグローバルサプライチェーンに対して、適切な環境政策を議論するための分析基盤構築に寄与した。

In this study, we developed a method for analyzing supply chain structure and associated emission structure by combining Input-Output analysis and Network Theory in order to understand global supply chains, which can be interpreted as overlapping networks. This study contributed to building an analytical foundation for discussing appropriate environmental policies for global supply chains, which are becoming increasingly more complex, and hence are more difficult to grasp industrial characteristics and supply chain structures with respect to environmental burdens.

1. 研究目的

環境保護と社会経済発展の同時達成は現代社会で最も重要な課題の一つであり、環境・経済・社会の三側面から地球規模の目標に取り組んでいくことが求められている。近年では Sustainable Development Goals (SDGs、持続可能な開発目標)をはじめとする国際目標も広く認識されつつある。生産消費活動においては、サプライチェーン全体を通じた環境負荷の軽減が不可欠となっており、各国各企業はカーボンニュートラル等の達成に向けて様々な環境保全対策に取り組んでいる。

環境保護と経済活動の両立を目指す動きが進む一方、経済活動のグローバル化に伴うサプライチェーンネットワークの複雑化により、環境負荷に対する産業特性や産業構造等を把握することが困難になってきている。例えば、環境負荷が高い

企業として最も想像しやすいのは、製品を作り出す時に汚染物質を多く排出する企業である。しかし、製品製造時には汚染物質の排出は少ないものの、汚染物質を多く排出する企業の生産物を原料にして製造する企業も同様に環境負荷を与えていると考えられる。このように、各企業は様々な立場で環境負荷を与えているが、サプライチェーンの複雑化に伴い、各産業・企業によるサプライチェーン上の環境負荷がどのように生じているのかを把握することは容易ではない。これらの課題を解決するために、本研究では、ネットワーク理論と産業連関理論を融合させた分析フレームワークを用いてサプライチェーンにおける排出構造を詳細かつ多面的に解析することを目的とした。

2. 研究内容

産業連関分析は、国や地域ごとに作成される産業連関表と呼ばれる産業間取引データを用いてサプライチェーン上の取引を近似的にトレースすることにより、複雑に絡み合うサプライチェーン構造を解析することができる。一方、産業連関表は取引データであるため、それ自体をネットワークと見做すことができる。[R1, R2]において、代表研究者は、ネットワーク構造を産業連関モデルに取り込むことによって、ネットワーク構造を反映させる産業連関指標を開発した。本研究では、[R1, R2]の分析手法を拡張・発展させることによって、サプライチェーンにおける排出構造を解析した。

(1) サプライチェーンにおける産業・取引の特徴解析 ([J1, C3])

産業数 n の環境産業連関表において、生産ベクトルを $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_n]$ 、排出係数ベクトルを $\mathbf{e} = [e_1, \dots, e_n]$ 、投入係数行列を $\mathbf{A} = \{a_{ij}\}$ 、最終需要ベクトルを $\mathbf{f} = [f_1, \dots, f_n]$ とする。このとき、 $HEM_p = \mathbf{e}(\mathbf{I} - \overline{\mathbf{L}}^p)\mathbf{f}$ は産業 p を少なくとも一度は経由するサプライチェーンパスの環境負荷を表す。ただし、

$\mathbf{L} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} = \{l_{ij}\}$ は、 j 部門の製品を1単位生産に必要なとなる直接間接的な i 部門の中間投入量を表し、レオンチェフ逆行列と呼ばれる。 $\overline{\mathbf{L}}^p$ は \mathbf{A} から産業 p を取り除いたときの逆行列である。同様に、 $\overline{\mathbf{L}}^{pq}$ を \mathbf{A} から取引 pq を取り除いたときの逆行列であるとする、 $HEM_{pq} = \mathbf{e}(\mathbf{I} - \overline{\mathbf{L}}^{pq})\mathbf{f}$ は取引 (p, q) を少なくとも一度は経由するサプライチェーンパスの環境負荷を表す。[R1]では、サプライチェーンパスの種類によって、 HEM_p を7つの要素に分解し、その後、生産・媒介・消費の3つの性質に基づいて統合することにより、産業 p がサプライチェーンのどの位置で環境負荷を掛けているのかを表す指標を開発した。本研究では、[R1]の分解法を HEM_{pq} に適用することにより、取引 pq がサプライチェーンのどの位置で環境負荷を掛けているのかを表す指標を開発した。さらに、[R1]で開発された産業に対する位置指標と本研究で開発した取引に対する位置指標を多地域間産業連関表に対して計算し、グローバルサプライチェーンにおける排出構造を解析した。

図1は、グローバルサプライチェーンにおける各国各産業の位置を示している。円の大きさはグローバルサプライチェーン上で主要国の当該産業

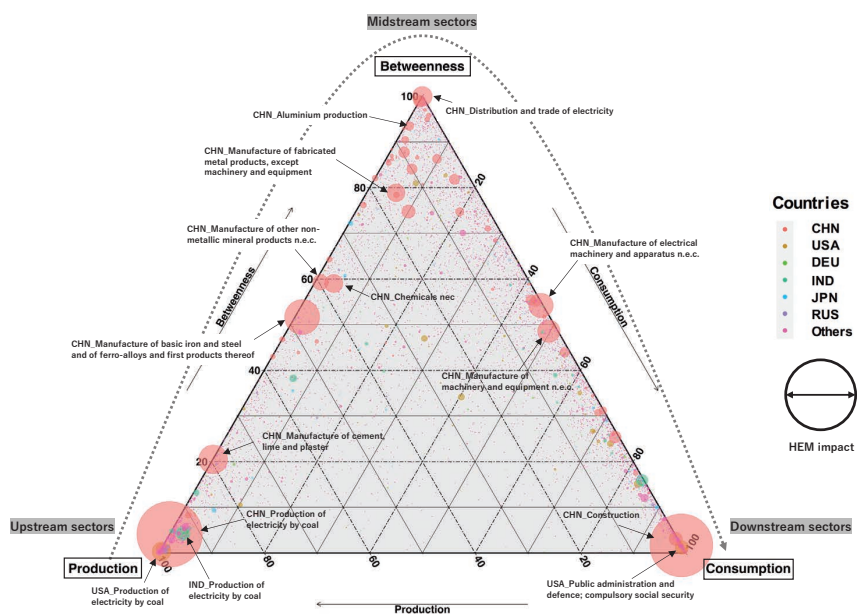


図1. グローバルサプライチェーンにおける排出構造の可視化

に関わる総排出量の大きさを表す。図1によると、グローバルサプライチェーンにおける中国産業の排出関与が非常に大きいことがわかる。また、電力産業はサプライチェーン上の上流に位置し、化学産業は上流寄りの中流に位置していることなどがわかる。本研究では、排出量とサプライチェーンの構造的位置の観点から効率的な排出削減のために、どのような政策が効果的であるかを包括的に議論した。

(2) サプライチェーンの平均波及回数指標の開発 ([C1, C2])

環境経済ネットワーク指標である産業連関媒介中心性 [R3]、および取引連関媒介中心性 [R2] の概念を元に、各創出産業から各最終産業へ伸びるサプライチェーンが当該産業、および当該取引をどれだけ経由しているのかを表すネットワーク指標を開発した。この指標は「平均経由回数」と呼ばれ、以下で定義される。

$$f_{(t)ij} = \frac{[\mathbf{L}\mathbf{J}_{(t)}\mathbf{L} - \mathbf{J}_{(t)}]_{ij}}{[\mathbf{L} - \mathbf{I}]_{ij}}$$

$f_{(t)ij}$ は、創出産業 i から最終産業 j への全てのサプライチェーンが中間産業 t をどれだけ経由しているのかを表す。すなわち、各サプライチェーンにおける中間産業 t への依存度・集中度と見なすことができる。本研究では、多地域間産業連関表に対して平均経由回数指標に基づくサプライチェーン集中度を計算し、サプライチェーンネットワーク構造を解析した。本研究は、サプライチェーンの排出負荷の集中点やグローバルバリューチェーンの価値の集中点を議論する指標としての利用が期待できると考えている。

3. まとめ

本研究では、産業連関分析とネットワーク理論を組み合わせることにより、グローバルサプライチェーンを幾十にも重なるネットワークとして捉えて、サプライチェーン構造、及びそれに伴う排

出構造を解析する手法を開発した。本研究は、サプライチェーンにおける産業の「位置」やサプライチェーンの「集中度」という観点から、適切な環境政策を議論するための分析基盤構築に寄与した。今後の研究では、分析手法を洗練させるとともに、様々な経済データへの応用可能性を議論していく予定である。

[参考文献]

- [R1] Tesshu Hanaka, Keiichiro Kanemoto, Shigemi Kagawa: “Multi-perspective Structural Analysis of Supply Chain Networks”, *Economic Systems Research*, Routledge, 34: 2, pp. 199–214, Routledge, 2022.
- [R2] Tesshu Hanaka, Shigemi Kagawa, Hirotaka Ono, Keiichiro Kanemoto: “Finding Environmentally Critical Transmission Sectors, Transactions and Paths in Global Supply Chain Networks”, *Energy Economics*, 68, pp. 44–52, Elsevier, 2017.
- [R3] Sai Liang, Shen Qu, and Ming Xu: “Betweenness-Based Method to Identify Critical Transmission Sectors for Supply Chain Environmental Pressure Mitigation”, *Environ. Sci. Technol.*, 50: 3, pp. 1330–1337, ACS Publications, 2016.

4. 発表（研究成果の発表）

[学術論文]

- [J1] Shohei Tokito, Tesshu Hanaka, Fumiya Nagashima: “Structural Attribution of Emissions along the Global Supply Chain and implications for Climate Policy”, *Journal of Industrial Ecology*, Wiley, 採録決定.

[学会発表]

- [C1] 土中 哲秀、猪俣 哲史: “ネットワーク理論に基づくサプライチェーン集中度指標”、第 33

回環太平洋産業連関分析学会、大阪、10/2022.

[C2] Satoshi Inomata, Tesshu Hanaka: “A Risk Analysis on the Network Concentration of Global Supply Chains”, The 28th International Input-Output Conference (IIOA2022), Langkawi Island, 9/2022.

[C3] 土中 哲秀、時任 翔平、永島 史弥：“サプライチェーンにおける位置を考慮した環境負荷分析”、第32回回環太平洋産業連関分析学会、東京、10/2021.