

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月21日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21710048

研究課題名（和文） 産業連関分析に基づく物質フロー解析と可視化手法に関する研究

研究課題名（英文） Material flow analysis and methods for visualization based on input-output 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

研究成果の概要（和文）：

産業部門間（生産プロセス間）の物質フローを可視化する手法として、既に普及している Sankey 図を改善するための手法、補完的に利用可能な可視化手法（UPIOM 図）を開発した。効果的な可視化のためには、情報の取捨選択、図における産業部門（プロセス）の位置を適切に決定することが重要である。適切な位置を決定するために利用可能な産業連関分析の手法（三角化、構造経路解析法（SPA）、PMDA）を開発し、我が国における金属および炭素フローに関する応用分析を行った。

研究成果の概要（英文）：

A new method for material flow analysis (MFA), termed the unit physical input-output by material (UPIOM), was developed. The UPIOM diagram can effectively visualize inter-sector material flow, in particular, when there are a lot of sectors and loops. The UPIOM diagram can be complementary to the Sankey diagram, which is well-known in the literature of MFA. In constructing the UPIOM and Sankey diagrams, it is vital to reduce information and/or place boxes representing sectors at appropriate positions. New methods for carrying out these vital steps were developed. These methods are triangulation of input-output tables, structural path analysis, and path-based matrix decomposition analysis (PMDA). These methods were applied to MFA of metal species and carbon in Japanese economy.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境影響評価・環境政策

キーワード：

- (1) 物質フロー勘定
- (2) MFA
- (3) 環境分析

- (4) 経済統計学
- (5) 産業連関表
- (6) PMDA

### 1. 研究開始当初の背景

わが国政府による循環型社会形成推進基本計画において3つの物質フロー指標（資源生産性、循環利用率、最終処分量）の数値目標が設定されるなど、物質フローへの関心が高まっており、既に研究段階から政策実務段階に移っていると言える状況であった。何が（どのような物質が）、どこに（どの地域に、どの産業に）、どのような形態で（他のどのような物質と一緒に）存在するかを把握することは、とくに物質循環（使用済み製品からの素材回収と再資源化）の観点から、物質フロー解析（material flow analysis, MFA）の重要な目的のひとつである。しかし、上述の循環基本計画で数値目標が設定されたような、国レベルでの（把握可能な）すべての物質の合計重量を対象とした勘定では、この目的に資することができない。海外における先端的研究グループの動向を見ても「どこに」および「どのような形態で」の把握は依然として研究段階にあると思われる状況であった。わが国においては、高精度の産業連関表が整備されてきたことも手伝って、産業レベルの物質フロー勘定の整備について、わが国の研究レベルは世界最高水準にあり「どこに」の把握が進められてきた。その中でも、早稲田大学の中村愼一郎氏らによって開発された廃棄物産業連関（WIO）に基づくMFA（WIO-MFA）の枠組み（Nakamura et al., 2007, *J. Ind. Ecol.*）は「どのような形態で」の把握をも可能にした産業レベルの物質フロー勘定を提供するものであり、今後の方法的拡張とデータの整備、およびその普及が期待される。

MFAによる結果の提示方法としては、表形式などで数値を示すものに加えて、Sankey図が広く普及している。しかし、例えば、わが国の産業連関表に基づいて約400の産業間の物質フローをこの方法で提示した場合、膨大な情報が提示されてしまい可視性が極めて低いために、結果の解釈が容易ではない。そのため、改善された別の可視化手法が必要とされる状況であった。

### 2. 研究の目的

物質フロー解析（MFA）による結果を提示するために普及しているSankey図の持つ欠点を克服するためには、物質フローから見た産業ネットワークについて、情報の取捨選択を行うこと、重要な産業グループを抽出する

こと（産業のクラスタリング）および、産業間の序列を再整理すること（産業連関表を三角化すること）など、可視性を向上するためのいくつかの選択肢が考えられる。とくに、これらの手順を再現性の確保に留意しつつ行うこと、すなわち、客観的基準に基づいて機械的に行うことが重要である。

産業連関表における産業部門は、伝統的に一次産業から三次産業という順序にならべられている。これを産業連関表の三角化によって加工度の高い部門から低い部門へと並べ替えることができる。産業連関表によってあらわされる産業間取引の関係には、ループが含まれることが多い。例えば、発電部門において石炭等を燃料として投入する一方で、石炭の製造プロセスで電力を投入する、といった関係が含まれる。しかし、とくに物質フローについて議論する場合には、主要な取引関係として、ループを含まない序列を想定することは、MFAの結果を図示した場合の可視性向上に貢献するところが大きいと言える。さらに、WIO-MFAの手法によって通常の貨幣表示産業連関表から物量表示産業連関表（PIOT）を生成することができるが、その結果を三角化した場合には、質量を持たない製品・サービスの部門を始点とする物質フローはないため、さらに鮮明な産業間の序列と物質フローが可視化されることが期待できる。

以上のように、準備段階で開発を進めていた産業連関表三角化のためのアルゴリズムを完成させることを最初の目標とする。次いで、開発する三角化アルゴリズムおよび関連する手法をWIO-MFAにより生成したPIOTに適用し、諸々の検討を経て産業レベルの物質フロー解析の結果を可視化する手法として確立することを目的とする。

### 3. 研究の方法

産業連関表の三角化は、Chenery and Watanabe (*Econometrica* 1958) および Simpson and Tsukui (*Review of Economics and Statistics* 1965) による、産業構造に関する国際比較研究以来の歴史を持つ。約400の産業からなる日本の産業連関表の場合、投入係数行列は約16万個の数値からなる行列であるが、産業間の技術的連関関係の性質から、多くの要素がゼロの疎行列である。この産業連関表の特質を利用し、Simpson and Tsukui (1965) や Fukui (*Econometrica*

1986) は正方行列の下三角和(対角要素よりも左下に位置する要素の総和)を最大化するような産業部門の序列を探索する最適化問題として三角化問題を定式化し、最適化のためのアルゴリズムを提案した。

これまでに開発された三角化アルゴリズムのほとんどは、三角化問題のための特殊な発見的アルゴリズム(heuristic algorithm)である。それに対して、本課題においては、三角化問題を整数計画問題として表現し、整数計画問題のための普及した一般的アルゴリズムを適用する方針でアルゴリズムの開発を進めた。

#### 4. 研究成果

三角化のための手法開発に関しては、既存の手法を地域間・時点間比較のために拡張した。三角化に基づく国際比較では、産業構造の類似性の指標として、各国の産業連関表を三角化した最適解(産業部門の序列)の順位相関係数が広く用いられてきた。しかし、三角化問題の最適解は一意に定まらないことが多いため、(潜在的な)産業構造が非常によく似ている場合であっても、小さい相関係数が得られることがある。この問題点を克服するため、2つの産業連関表を三角化し、同時に部門序列の順位相関係数を最大化する混合整数計画問題(MIP)を定式化した。さらに、三角化に基づいて産業構造を分析する上で重要な、ブロック性および産業クラスタを検討するための手法を開発した。先行研究では、専門的知識に基づいてブロックがあらかじめ与えられていた。それに対して、専門的知識を用いる枠組みは維持しながらも、客観的基準に基づいてブロックを抽出するMIPを定式化した。これらのMIPを日本の接続産業連関表から得られる投入係数行列に対して適用し、産業構造の時点間比較と産業クラスタの抽出を行った。得られた成果を国際産業連関学会において発表した(学会発表(4))。

既存のMFA研究の多くは、分析対象経済システムにおいて観察される物質フローをそのまま把握して解析したものである。また、MFAにはLCA等のシステム分析のための基礎情報を提供する役割も期待される。したがって、現状のフローをそのまま把握するだけでなく、LCAにおける機能単位等の変化に応じて、分析対象システムにおけるフローが変化する様子を分析可能なモデルを構築することが求められる。この要求に応える手法として、製品1台の生産に伴う物質ごとのフローを算出し、可視化する手法(UPIOM)を開発した。UPIOM図における産業部門の序列を決定するために、三角化手法を適用した。

開発した手法により、乗用車1台の生産に伴う物質フローの解析を行った(雑誌論文(3))。

上述の三角化に基づく時点間比較・国際比較および産業クラスタ抽出の手法は、複数の物質を考慮した物質フロー解析にも応用可能である。例えば金属は、多くの場合に、各元素が単体ではなく、合金として利用されることが多い。したがって、複数の金属元素のフローを同時に考慮した解析が必要である。乗用車1台の生産に伴う銑鉄、鉄鋼くず、銅、銅くずのフローについてのUPIOMを拡張した手法としてUPIOM Cubeを開発した。この成果をEnviroInfo Ispra 2011国際会議で報告した(学会発表(2))。

産業連関分析の文脈において、需要が生産を誘発する波及効果を詳細に分析するための手法として、構造経路解析法(structural path analysis, SPA)が知られている。本研究では、SPAに基づいて産業連関表を分解するための新しい手法(Path-based Matrix Decomposition Analysis, PMDA)を開発した。産業部門間(生産プロセス間)の物質フローを可視化する手法としては、Sankey図がよく用いられているが、物質フローをSankey図に描くためにはデータを産業連関表の形式で整理すると効率的である。また、Sankey図は非常に有用かつ分かりやすい可視化手法であるが、リサイクル等のループが含まれる場合、あるいは非常に多くの産業部門が分析対象のシステムに含まれる場合には、図が非常に複雑になり、効果的な可視化が困難になる傾向がある。そこで、情報の取捨選択により、図を簡潔なものにする手法が必要となる。従来のSPAは、1つの数値(スカラ)としてあらわされる環境負荷の総量を経路ごとの寄与に分解する手法と見なすことができるが、この手法を拡張して、産業連関表を経路ごとの寄与をあらわす行列に分解する手法PMDAを開発した。これにより、生産ネットワークの基本構造を産業連関分析に基づいて維持しつつ、情報を取捨選択するための基本的な枠組みが提供される。この成果の一部を国際産業エコロジー学会および日本LCA学会において報告した(学会発表(1), (5))。

#### 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) Yasushi Kondo, Further extension of environmentally extended input-output analysis: Descriptive

accounting and analytical modeling, *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 15, No. 5, 2011, pp. 671-673, 査読有.

- (2) Kenichi Nakajima, Keisuke Nansai, Kazuyo Matsubae, Yasushi Kondo, Shigemi Kagawa, Rokuta Inaba, Shinichiro Nakamura, and Tetsuya Nagasaka, Identifying the substance flow of metals embedded in Japanese international trade by use of WIO-MFA model, *ISIJ International*, Vol. 51, No. 11, 2011, pp. 1934-1939, 査読有.
- (3) Shinichiro Nakamura, Yasushi Kondo, Kazuyo Matsubae, Kenichi Nakajima, and Tetsuya Nagasaka, UPIOM: A new tool of MFA and its application to the flow of iron and steel associated with car production, *Environmental Science & Technology*, Vol. 45, No. 3, 2011, pp. 1114-1120, 査読有.

[学会発表] (計 9 件)

- (1) 近藤康之、アンネシュ H.シュトゥルマン、加河茂美、南斉規介、構造経路分解法(SPA)を用いた産業ハイアラーキーの抽出と可視化、第 7 回日本 LCA 学会研究発表会、東京理科大学、2012 年 3 月 7 日～9 日.
- (2) Yasushi Kondo and Shinichiro Nakamura, UPIOM cube: A new tool for visualization of inter-industry flow of various types of material with its application to car production, *EnviroInfo Ispra 2011*, JRC Ispra, Italy, 5-7 October 2011.
- (3) Yasushi Kondo, Shinichiro Nakamura, Kenichi Nakajima, Kazuyo Matsubae, Shigemi Kagawa, Yuki Kudoh, and Tetsuya Nagasaka, Visualization of inter-industry material flow and impurities in iron and steel scrap along the supply chain of a passenger car, *World Resources Forum 2011 Congress*, Davos, Switzerland, 19-21 September 2011.
- (4) Yasushi Kondo, A new method for triangulation of input-output tables for comparing industrial structures and investigating clusters of industries, *The 19th International Input-Output Conference (IIOA 2011 Conference)*, Alexandria, USA, 13-17 June 2011.
- (5) Yasushi Kondo, Anders Hammer Stromman, Shigemi Kagawa, and Keisuke Nansai, Extracting tree-like

structure from complex production network based on structural path analysis and triangulation of input-output table, *The 6th International Conference on Industrial Ecology (ISIE 2011 Conference)*, University of California, Berkeley, USA, 7-10 June 2011.

- (6) Yasushi Kondo, Anders Hammer Stromman, and Shigemi Kagawa, Structural path analysis and triangularization of input-output table for understanding carbon footprint, *EcoBalance 2010*, Tokyo, Japan, 10-12 November 2010.
- (7) 近藤康之、廃棄物と資源循環、特別セッション II 「環境規制の政策評価：経済学の役割」、日本経済学会 2010 年度秋季大会、関西学院大学、2010 年 9 月.
- (8) Yasushi Kondo and Koji Takase, Best attainable eco-efficiency of consumers lifestyle: Feasibility and acceptability of change in lifestyle, *The 3rd International Conference on Eco-Efficiency*, Egmond aan Zee, Netherlands, 9-11 June 2010.
- (9) Yasushi Kondo, Kenichi Nakajima, and Shinichiro Nakamura, Visualization of inter-industry material flow based on triangularization of physical input-output tables, *The 5th Meeting of the International Society for Industrial Ecology (ISIE 2009 Conference)*, Calouste Gulbenkian Foundation, Lisboa, Portugal, 21-24 June 2009.

## 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