

特別講演

□第165回春季講演大会浅田賞受賞記念特別講演
(平成25年3月29日)

鉄と鋼と産業連関

Iron & Steel and Input-Output Analysis

中村慎一郎

早稲田大学 政治経済学術院 教授(産業エコロジー)

Shinichiro Nakamura



*脚注に略歴

1 はじめに

栄えある浅田賞を頂戴した。評価頂いた「鉄鋼業の周辺及び境界領域における学術上の業績」は、一貫して産業連関分析(Input-Output Analysis)に関わって得られたものである。そこで、この希有な機会に、私が関わった産業連関分析について述べておく。ところで、私は経済学出身であるから、文理の区別では文系と分類される。(一社)日本鉄鋼協会は理系であるから、今回の受賞につながった私の研究は文理融合・連携の成功例でもある。文理融合の必要性は各方面で叫ばれているが、成功例は多くないようである。本稿が、生産的な文理融合の参考になれば幸いである。

2 経済学と産業連関分析

物理や化学など理系では定量分析は自明である。しかし、経済学では左様ではない。定量分析を行う経済学の分野を、わざわざ計量経済学と呼称して区別しているほどである(近年、計量経済学も定性的理論的研究に重心が移行してきたので、定量的なそれを応用計量経済学と呼ぶ方が増えているようである)。この中にあって、例外的なのが産業連関分析である。それは、数理的分析モデルと定量分析のためのデータが、はじめから一組になっているからである。ちなみに、日本の産業連関表(産業連関データ)は世界最高水準の解像度と精度をもつが、その解説には数理的分析モデルの説明があるし、基本的な応用結果も紹介されている。アメリカなど同程度の産業連関表を持つ国でも、事情は同様である。

経済学の教科書では産業連関表を経済統計の枠組みで扱い、その延長として産業連関分析を紹介するのが普通であ

る¹⁾。しかし、この仕方は国民所得の三面等価などに詳しくない人にはわかりにくい。産業連関分析はLCAインベントリ分析の方法として広く使われているが、その関連を見るにも回りくどい仕方だと私は思う。

その方が分かりやすだろうと私が思うのは、生産プロセス(部門)を元にした説明である。生産プロセスは、原材料・エネルギー・中間製品などの入力と出力たる生産物で表される。経済は入出力を異にする多くの生産プロセスから構成される。これらプロセスの入出力を通じ、経済全体の相互依存関係をとらえようとするのが産業連関分析に他ならない²⁾。Fig.1に3プロセスからなる簡単な場合を示す。日本の産業連関データではプロセス(部門)数は400を優に越えている。鉄鋼を例にとれば、高炉は典型的な一つのプロセスであり、鉄鉱石・コークス・石灰石が入力、銑鉄が出力である。実際、我が国の産業連関表では銑鉄生産部門がこのように計上されている。更に、鉄スクラップの主要な変換プロセスである電炉も、独立した部門として計上されている。

プロセスは実プロセスであり、その入出力は計測可能であ

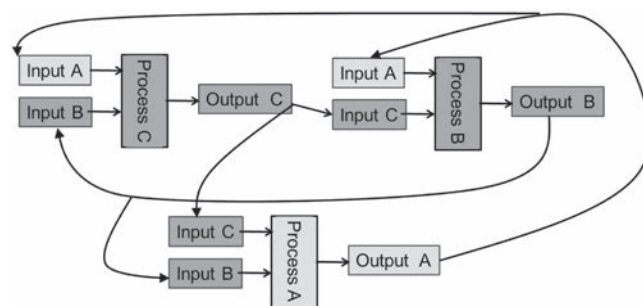


Fig.1 Interdependence of processes via the flow of inputs and outputs

* 昭和49年慶應大卒、54～60年ボン大学研究員、58年博士号取得、60年早大政治経済学部講師、62年同助教授、62年～平成2年トロント大学客員准教授を経て平成4年から現職。平成17年から24年まで名古屋大学エコトピア科学研究所客員教授を兼任。

る。すなわち、産業連関分析は優れて定量的であり、その意味で定性的性格の強い経済学において異色の存在である。

きちんとしたデータ体系なしに闇雲にデータを集めるのは不毛である。他方、データがあってもそれを有効に使う整合的な分析ツールがなければ、それは単なる記述統計に過ぎず、眺めてる以上は期待できないし、新たな知見を得ることも限られている。LCAの普及と拡張に伴い、LCAデータベースの開発が多方面で行われている。しかし、整合的なデータ格納を担保しつつ十分な一般性と拡張性をもつ枠組みについて十分な議論がされているか、懸念される³⁾。産業連関分析の持つ優れた性質を、LCAデータベースの設計で参考にすることは益があるだろう。

3 廃棄物産業連関分析 WIO

Fig.1では各プロセスの出力はひとつの主力製品に限られている、環境分析を考えるなら、入力に化石燃料の場合、出力にはCO₂が計上されるべきである。この点で産業連関分析を拡張し、データとして公開し、LCAインベントリ分析のデータとしてひろく使われているのが国立環境研究所の3EIDである⁴⁾。

Fig.1が見落としているもう一つの重要な点は、屑・副産物・廃棄物の発生である。歩留まり100%の生産プロセスはあり得ないから、加工屑は必ず発生する。廃棄物は適正な処理を経て最終処分されたり、リサイクルされたりする。我が国で典型的な都市ゴミ処理プロセスである焼却プロセスは、入力した都市ゴミを灰とCO₂に変換し、その過程で発電も行う。灰はセメント材料としてリサイクル可能である。又、家計も消費財を廃棄物・屎尿に変換するプロセスと見なすことができる。Fig.2に、これらのフローとプロセスを加えて拡張した例を示す。

既存産業連関分析・表の体系を一般的な形で拡張し、屑・

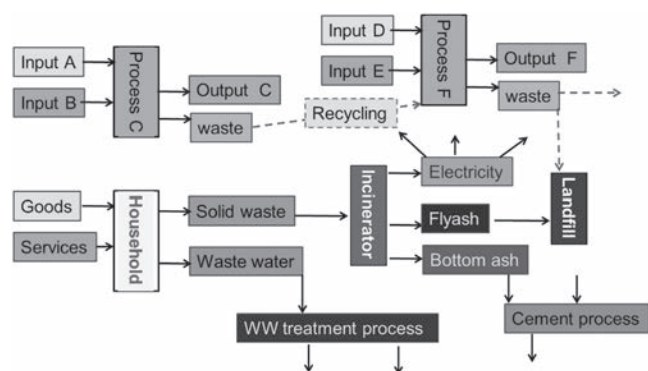


Fig.2 The flow of inputs and outputs extended with waste, waste management, and recycling

副産物・廃棄物の発生と処理・処分・リサイクルを考慮すべく開発したのが廃棄物産業連関分析 (WIO) である^{5,6)}。WIOによって生産・使用・廃棄からなる製品ライフサイクルの全段階を産業連関分析の枠組みで一般的にとらえることが可能になった。Fig.3にWIOの模式図を示す。

4 マテリアルフロー分析：WIO-MFAとUPIOM

マテリアルフロー分析 (MFA) はLCAと並び産業エコロジー (Industrial Ecology, IE) の主要分析ツールの一つであり、国際的には例えばGraedelらのYale大学⁷⁾、Müllerらのノルウェー工科大学 (NTNU, Trondheim)⁸⁾、足立、松野、醍醐らの東京大学⁹⁾などが特に金属関連分野で多くの業績を挙げてきた。一方、国内ではJOGMECにより鋼種別のMFAが定期的に調査・公開されている。これらの既存研究に共通するのは、鋼種毎に別々にフローを追跡していることである。現実には、金属が単体で使われている場合は極めて限定され、一般には様々な鋼種が化学的・物理的に結合されて製品となっている。そしてリサイクルにおいてはこの異なる鋼種の結合が問題となる¹⁰⁾。この点を適切に考慮するには複数鋼種の同時フローを解析する仕掛けが必要である。

関連するが、使用済み複合製品を効率的にリサイクルするには、その組成を知ることが大事である。もちろん、製品組成を厳密に調べるには、酸で解かしたり原子吸光分析装置などを使えばよい。しかし、全経済的な枠組みでそれを実行するのは現実的には困難であろう。そこで産業連関分析を用いて製品のマテリアル組成をトップダウン式にモデル推定する

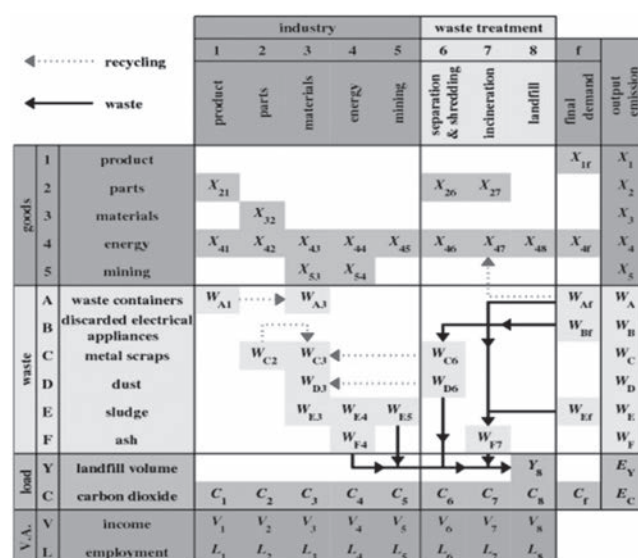


Fig.3 A prototype of Waste Input-Output (WIO)

方法を考えた。WIO-MFAである^{11,12)}。

モデルの数理は既報を見て頂くとして基本的な考え方のみ述べておく。自動車など最終製品は、鉱石など天然資源を素材に変換し、それを更に加工して部品・中間製品とし、最後にそれらを組み立てて生産される。加工度が順次高まるので、Fig.4にあるようなピラミッドでこの原料から製品への変換過程を表すことができる。

この加工段階を通じる序列性を産業連関表の枠組みで模式化するとFig.5のようになる。生産過程で加工度はエントロピーと同じで一方向にしか進まないから、部門分類を加工度の順に低い方から高い方へ並べ替えると、産業連関表は対角線より上の要素が全てゼロの下三角行列の形をとる。

この性質を利用して製品のマテリアル組成を計算するのがWIO-MFAである。現実には、産業連関表はサービス・エネルギーなど質量を持たない投入フロー、質量は持っていない研磨剤など補助的に使われる投入、さらには歩留まり落ちするフローなどノイズを含んでいるので、下三角化を実現するにはそれらノイズを除去する工夫（フィルター）が必要である。この除去フィルターと下三角行列の利用にWIO-MFAの独創性がある。

従来のMFAは数理モデルに基礎をおくのではなく、公表されているデータを積み上げて行われることがほとんどである。従って、特定の製品に付帯するフローを別個に抽出して求めることはできない。しかし、WIO-MFAを用いると、この製品毎のフローを同定することができる。このフローをFig.5の様に加工段階で序列化し、並び替える事もできる。この方法がUPIOM (Unit Physical Input-Output by Materials) である¹³⁾。

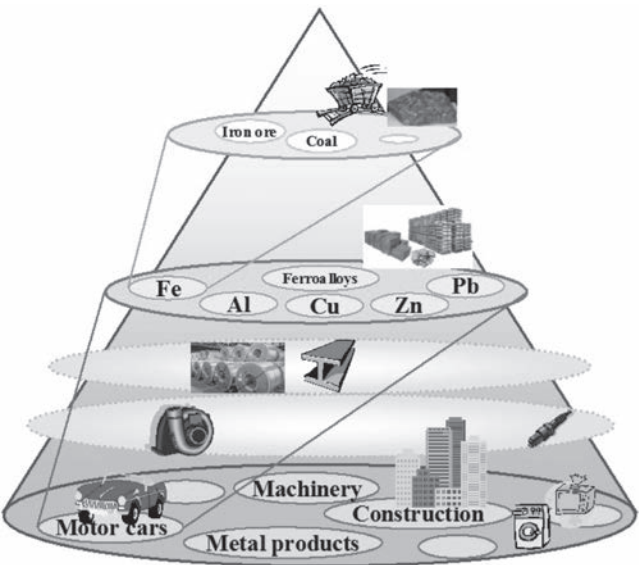


Fig.4 Stages of fabrication

Fig.5で模式化した下三角行列表現を、自動車生産に関わる銑鉄（炭素鋼）フローについて実際に求めた結果をFig.6に示す。最下行にある銑鉄が、転炉に投入され普通鋼、メッキ鋼板、ボディを経て自動車に組み立てられる経路を見て取ることができる。

使用済み自動車などから回収される老廃スクラップの利用は、資源有効利用や温暖化ガス対策の観点から広く注目されている¹⁴⁾。そこで、WIO-MFA/UPIOMを用い、銑鉄（炭素鋼）、プロセススクラップ（銑屑、自家発生屑、加工屑）、老廃スクラップ（ヘビー、シュレッダー、プレス）の3種類の鉄源について自動車生産に関わる複合フローを解析した。その結果をFig.7に示す。

図は最下段のBOF/EAF普通鋼が鋼材、部品、中間製品を経て最上段の自動車に変換されていく過程を3種の鉄源について示している。自動車に使われる鉄源にしめるスクラップはたかだか30%であり、老廃スクラップに限れば10%に過ぎない。すなわち、使用済み自動車から回収された鉄鋼材料について、閉鎖系リサイクルが成り立っていない事を示している。これはBirat等の研究結果とも一致している^{15,16)}。

WIO-MFA/UPIOMは我々が世界に先駆けて開発した手法である。従来のMFAはもっぱらSankey図を用いてフローを表現していた。WIO-MFA/UPIOMという強力な分析ツールを用いることで、分析と表現の可能性を格段に広げることができたのである。ちなみに、Fig.7から閉鎖型リサイクルがなぜ成立しないのかを容易に見て取れる。老廃系回収鉄源がBOFへの入力とならないからである。

今後の課題のいくつかを述べておく。閉鎖型リサイクル実現には回収物の無秩序な混合をなるべく避けなくてはならない¹⁷⁾。そのためには混合を避けるべき素材の結合方法、化学結合か物理的結合、を知ることが必要である。どの加工段階で異なる素材が結合されるのか、Fig.7を更に精緻化することが有用であろう。鉄鋼には多種多量の合金元素が使われているから、そのなかでも希少性の高いものから同時フローを見

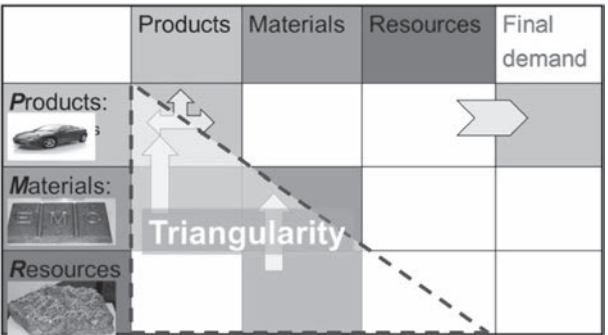


Fig.5 Triangulation of the flow matrix

ていく必要がある(関連する最新研究として¹⁸⁾が挙げられる)。

私自身が最大関心事項として取り組んでいるのが、マテリアル時間経路の追跡である。この手法(MaTrace)は一応の目処がついており、先のTMS2013(San Antonio, TX)で一部を発表している。折を見て本誌でも紹介したい。

5 おわりに

文理融合研究に欠かせないものは何か？共通の言語を会得すること、相互に敬意を払うことではないだろうか。文は理の最低限の知識を持つことが必要であるし、何よりも現場・

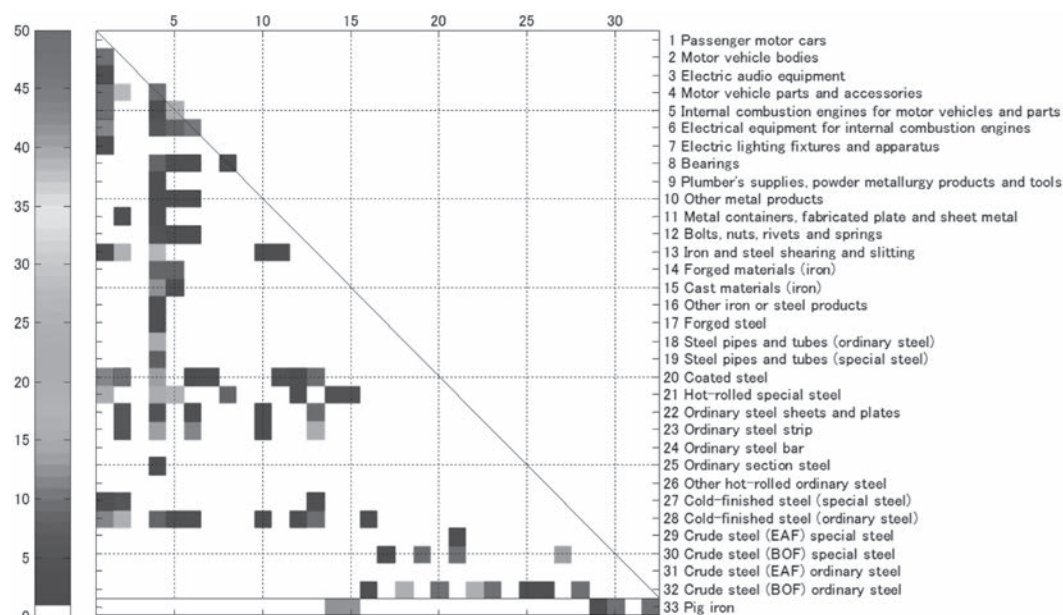


Fig.6 The triangulated flow of primary iron induced by car production
Source : 13)

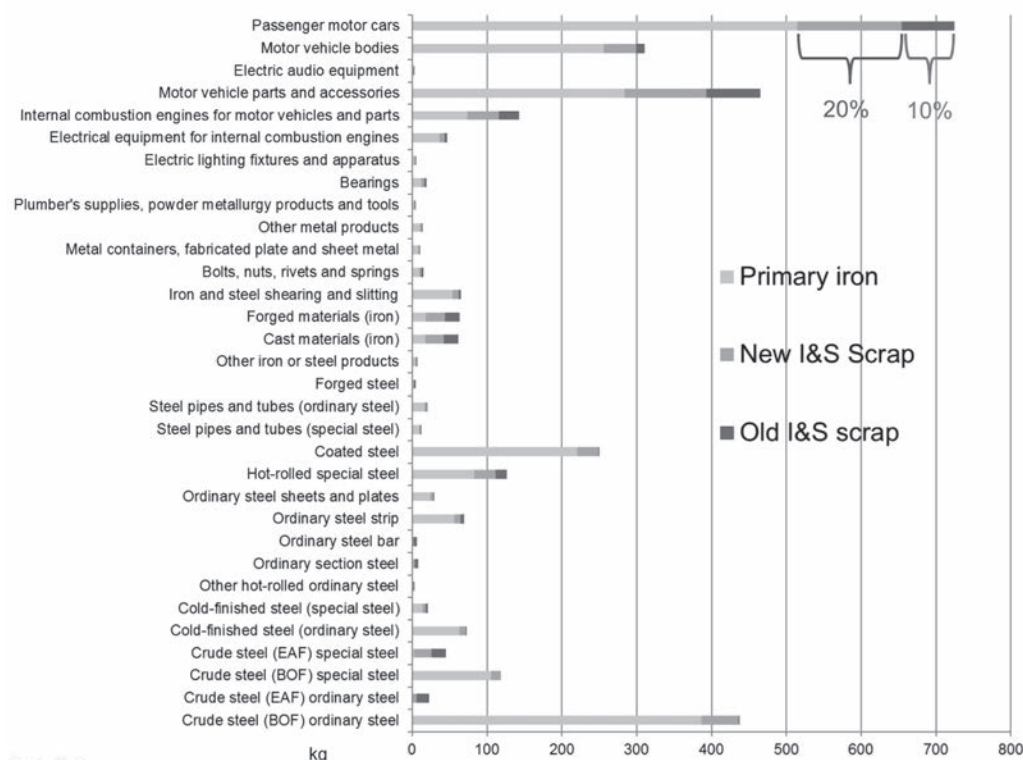


Fig.7 The flow of ferrous materials associated with car production
Source : 17)

実物を知ることが大事である。産業連関分析の数理にいくら精通しても、現実の知見を反映したデータによる肉付けがなければ、それは空虚な数式に過ぎない¹⁹⁾。新しい現実の知見が無ければ、新しい理論的拡張も生まれないだろう。

私が、このたびの受賞につながる鉄鋼・金属関連の知見を得る事ができたのは、参入を試みた門外漢の私を寛大に受け入れ、様々な支援と貴重な機会を惜しみなく提供すると同時に、私の研究に理解と関心を持って頂いた多くの素晴らしい人々との出会いがあったからである。深く御礼を申し上げたい。最後に、多忙な専門職に有りながら、私の研究生活を深く理解し、常に励ましを与えてくれた妻みゆきに感謝する。

参考文献

- 1) R E Miller and Pf D Blair : Input-Output Analysis. Cambridge University Press, (1985)
- 2) S.Nakamura and Y.Kondo : Waste Input-Output Analysis, Concepts and Application to Industrial Ecology. Eco-Efficiency in Industry and Science. Springer, (2009)
- 3) F.Mathieux : Data quality requirements and impact categories of the product environmental footprint. In International Workshop for LCA Database, METI and AIST, Tokyo, (2013)
- 4) National Institute for Environmental Studies. Embodied energy and emission intensity data for japan using input-output tables (3eid) ., (2005)
- 5) S.Nakamura and Y.Kondo : Input-output analysis of waste management. J. Ind. Ecol., 6 (2002) 1, 39.
- 6) S.Nakamura : Input-output analysis of waste cycles. In Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 1999. Proceedings. EcoDesign'99, First International Symposium On, IEEE, (1999) , 475.
- 7) T.E.Graedel, J.Allwood, J.P.Birat, M.Buchert, C.Hagelüken, B.K.Reck, S.F.Sibley and G.Sonnemann : What do we know about metal recycling rates?, J. Ind. Ecol., 15 (2011) , 355.
- 8) T.Wang, D.B.Müller and T.E.Graedel : Forging the anthropogenic iron cycle. Environ. Sci. Technol., 41 (2007) , 5120.
- 9) H.Hatayama, I.Daigo, Y.Matsuno and Y. Adachi : Outlook of the world steel cycle based on the stock and flow dynamics. Environ. Sci. Technol, 44 (2010) , 6457.
- 10) M.Reuter, K.Hiskannen, U.Boin, A.van Schaik, E.Verhoef, Y.Yang and G.Georgalli : The Metrics of Material and Metal Ecology. Developments in Mineral Processing 16. Elsevier, (2005)
- 11) S.Nakamura and K.Nakajima : Waste input-output material flow analysis of metals in the Japanese economy. Mater. Trans., 46 (2005) , 2550.
- 12) S.Nakamura, K.Nakajima, Y.Kondo and T.Nagasaka : The waste input-output approach to materials flow analysis. J. Ind. Ecol., 11 (2007) 4, 50.
- 13) S.Nakamura, K.Kondo, Y.na d Matsubae, K.Nakajima and T.Nagasaka : Upiom, A new tool of mfa and its application to the flow of iron and steel associated with car production. Environ. Sci. Technol., 45 (2011) , 1114.
- 14) Y.Igarashi, I.Daigo, Y.Matsuno and Y.Adachi : Dynamic Material Flow Analysis for Stainless Steels in Japan-Reductions Potential of CO₂ Emissions by Promoting Closed Loop Recycling Of Stainless Steel. ISIJ Int., 47 (2007) 5, 758.
- 15) JP Birat : Sustainable steelmaking paradigms for growth and development in the early 21st century. Revue de Métallurgie, 98 (2001) 1, 19.
- 16) C.Houpert, V.Lanteri, JM Jolivet, M.Guttmann, JP Birat, M.Jallon and M.Confente : Influence of tramp elements in the production of high quality steel using the scrap/electric arc furnace route. Revue de Métallurgie, 94 (1997) 11, 1369.
- 17) S.Nakamura, Y.Kondo, K.Matsubae, K.Nakajima, T.Tasaki and T.Nagasaka : Quality-and dilution losses in the recycling of ferrous materials from end-of-life passenger cars : Input-output analysis under explicit consideration of scrap quality. Environ. Sci. Technol., 46 (2012) 17, 9266.
- 18) K.Nakajima, H.Ohno, Y.Kondo, K.Matsubae, O.Takeda, T.Miki, S.Nakamura and T.Nagasaka : Simultaneous mfa of nickel, chromium and molybdenum used in alloy steel by means of input-output analysis. Environ. Sci. Technol., 47 (2013) 9, 4653.
- 19) S.Nakamura : Hybrid input-output analysis as a tool for communication among scientists of different disciplines. J. Ind. Ecol., 15 (2011) 5, 661.

(2013年4月3日受付)