

## 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25年 5月 27 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360386

研究課題名（和文） 金属資源利用・散逸時間経路及びその温暖化ガス排出の廃棄物産業連関分析

研究課題名（英文） Waste Input-Output Analysis of the Dynamic Path of the Use and Dissipation of Metal Resources and the Associated GHG Emissions

## 研究代表者

中村 慎一郎（NAKAMURA Shinichiro）

早稲田大学・政治経済学術院・教授

研究者番号：20180367

## 研究成果の概要（和文）：

金属資源の持続可能な保全にはリサイクルが重要である。元の用途へのリサイクルが望ましいが、解体時の異種金属混合のため、元より要求の低い用途に使われることが少なくない。その結果、追加的な温暖化ガスなどの環境負荷が発生する。この環境負荷を推定する手法を開発し、自動車に使われる鉄鋼に応用した。破碎・選別技術の高度化によるスクラップ品質向上が自動車生産に関わる温暖化ガスを少なからず低減できることを定量的に明らかにした。関連し、金属素材が廃棄・回収・リサイクルを経て用途を変遷していく過程を定量的に説明する数学モデルを開発した。

## 研究成果の概要（英文）：

Recycling is vital for sustainable management of metal resources. While closed-loop recycling is desirable, open loop recycling is more common due to the mixing of different metal-species in the end of life process. This is associated with losses in quality, and additional environmental burdens such as GHG emissions, as well. A tool was developed that makes possible to estimate the environmental burdens associated with these quality losses. Application to ferrous materials used in passenger cars showed the significance of improvement in end-of-life separation technologies in mitigating the nation-wide GHG emissions. Furthermore, a mathematical model was developed that is capable of tracing the fate of materials over time across products under explicit consideration of products lives, recovery, refining, and use.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2011年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2012年度	3,100,000	930,000	4,030,000
年度			
年度			
総計	10,400,000	3,120,000	13,520,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：リサイクル工学

キーワード：再資源化・資源回収・産業連関分析

### 1. 研究開始当初の背景

(1)今日の製品は将来の廃棄物であるから、前者の組成は将来の回収資源品質を大きく左右する。回収資源品質はリサイクル可能性及びそれを通じる環境負荷に大きな影響を持つ。好例が銅や錫など「トランプエレメント」の混入による鉄スクラップの品質低下である。老廃製品のマテリアル組成は過去に製造された製品の組成とその蓄積・寿命密度を反映している。今後、我が国経済の成熟化に伴って老廃屑起源の金属スクラップなどの資源にしめる割合増加が予想される中、こうした異時点間マテリアルフローへの対応が資源管理・環境負荷軽減の観点から極めて重要である。

(2)金属は元素であることから、高分子材料と異なり劣化が無く、閉鎖系リサイクルが容易であると思われる事が少なくない。しかし、現実には回収工程における異種金属混合により前述「トランプエレメント」による汚染などの結果品質劣化が生じ、閉鎖系リサイクルへの制約となっている。産業連関分析はLCAにおいても広範に使われているが、この異種金属混合に伴う資源損失の発生を明示的に考慮するに至っていない。

(3) 産業連関分析の手法に基づいて製品のマテリアル組成を推定する方法としてWIO-MFAを開発。応用してきた。(1)(2)を踏まえ、老廃製品の発生過程を通じて異時点間マテリアルフローを説明するため、WIO-MFAを動的に拡張する着想に至った。更に、このモデルでは、異種金属混合に伴う資源損失(希釈・品質損失など)の評価も行えることとする。

### 2. 研究の目的

これまで我々の研究グループが開発・応用してきたWIO-MFAモデルに基づき、老廃製品の廃棄過程を通じた異時点間マテリアルフローを説明する動学MFAモデルを開発する。このモデルは、(1)製品寿命モデルのパラメータに依拠した「動学化」、(2)破碎・選別工程のパラメータとスクラップ品質の定量的記述、(3)(2)に基づいた希釈・品質損失の定量評価、(4)老廃品の回収損失、リサイクルにおけるスクラップ回収損失、更に電炉などにおける精練損失定量評価、ができるものとする。同時に、このモデルを実装するためのデータベースを特に鉄源に関して高い解像度で開発する。

### 3. 研究の方法

(1)製品寿命モデルのパラメータに依拠した「動学化」：製品寿命をワイブル分布で記述しパラメータ化する。これまでのWIOにおいては老廃製品の発生は所与としていたが、これにより内生化する。開放系リサイクルを念頭に、回収資源の利用先を素材別最終需要構成により推定する。

(2)破碎・選別工程とスクラップ品質：トランプエレメントのうち、特に銅に着目し、使用済み自動車の組成と破碎・選別工程から回収されるスクラップの組成をモデル化する。

(3)希釈・品質損失のモデル化：Nakamura and Yamasue *Env. Sci & Technol.* 44, 2010において用いた方法を更に一般化する。

(4)老廃品の回収損失、スクラップ回収損失、精練損失のモデル化：Nakamura and Yamasue *Env. Sci & Technol.* 44, 2010において用いた方法を参考に、更に一般化することで対応する。

(4)データベース開発：これまで行ってきた最終鋼材の生産炉別分類に基づくデータベースの整備を更に発展させる

### 4. 研究成果

(1)スクラップの製錬熱力学制約を考慮した希釈を含むリサイクル可能性の同定：使用済み自動車から回収した鉄スクラップの汚染源である銅混入について様々なシナリオを設定し、リサイクルにおける希釈損失(希釈による新規鉄源投入)と品質損失(品質劣化により本来の機能を発揮できない事による新規材料投入)を定量評価した(図1)。その結果、自動車製生産に関わる温暖化ガスを、電炉における希釈損失回避により約10%削減できる可能性のあること、更にダウンサイクリングに伴う品質損失回避により約20%削減する可能性のあること、が見いだされた。

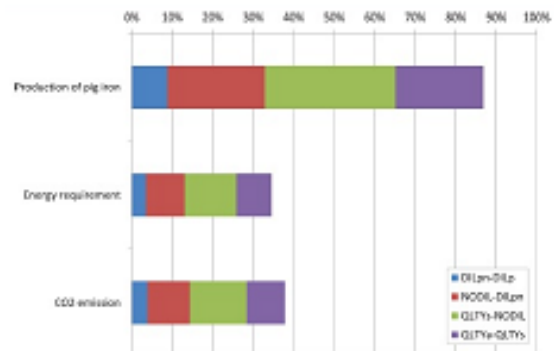


図1:使用済み自動車から回収した鉄スクラップにおける希釈・品質損失回避効果

(Nakamura 他, Env. Sci. Technol 46, 2012)

この結果を毎年我が国で発生する 400 万台の使用済み自動車の全てにあてはめると、我が国が排出する温暖化ガスの約 1%削減が可能になる。金属スクラップの希釈・品質損失が大きな環境影響を持つことが定量的に示された。

(2) 動学 WIO-MFA 数理モデルの開発: (1) で同定した損失を回避し、資源保全に貢献する効率的なリサイクルを実現するには、対象とする各種材料(マテリアル)が「どの製品に」「どのような形で」「どのくらい」マテリアルフローとして存在しているのかを定量的に同定することが必要である。これまで開発し(1)でも用いたスクラップ回収・リサイクルモデル、WIO-MFA モデルとワイブル分布を統合し、製品寿命に基礎をおく多部門動学 MFA 数理モデル(MaTrace)を開発した。これまでも多くの「dynamic MFA model」が開発されているが、その多くは外部から与えた GDP 等の経済動向を「動学」の根拠としており、モデルそれ自体として内在的に時間経路を説明していない。又、(1)で対象とした損失の存在により、多くの場合に「閉鎖系リサイクル」ではなく、「開放系リサイクル」が妥当することも十分に考慮していない。これに対し MaTrace は、①ワイブル寿命分布により時間経路を説明している、②回収スクラップ品質に基づき開放系リサイクルを明示的に考慮している、③回収・リサイクル損失を明示的に考慮している、点において内外におけるこれまでの動学 MFA 研究には無い際だった特徴を兼ね備えている。このモデルは研究の最終段階で開発にこぎ着けたものであるため、その結果は公刊には至っていないが、REWAS2013 では概要を発表している。

MaTrace 応用の一例を図 2 に示す。これは自動車に使われていたハイテンなど高級鉄源(100kg)が時間と共に廃棄・回収され、いかなる製品(自動車・建設・土木・機械・容器・その他)として利用されるかを試算・推定したものである。又、回収・リサイクル損失も推定している。MaTrace の最も重要な点である「いかなる製品として利用されるか」の同定を WIO-MFA による製品素材構成に基づく最終需要の素材構成により行っている。最終需要の時間的変化に関する情報があるならば、それを活用することは容易である。図 2 では一定の最終需要と素材構成を仮定している。図から、自転車からの鉄源に関する閉鎖系リサイクルが極めて限定されていること、大半を占める開放系リサイクルの行く先が建築・土木であること、建築・土木が寿命を迎えるとされる 40 から 50 年後について回収損失の大

きいことが課題となり得ること、が見て取れる。

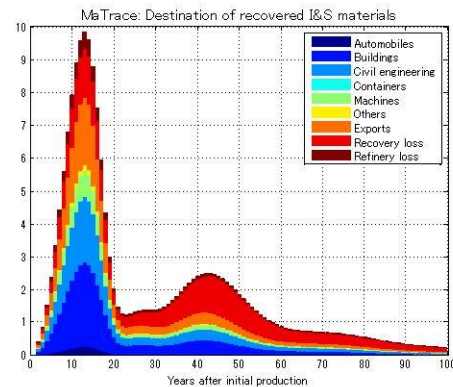


図 2: MaTrace (material trace)モデルにより推定した自動車から回収した鉄源利用形態(使用製品)と金属損失(回収・リサイクルロス)の時間的推移

(3) 今後の展望: 本研究が得た最大の理論的成果は MaTrace である。金属資源においても混合により閉鎖系リサイクルが多くの場合に困難なことは、最近公刊された UNEP 報告書(中村・中島・長坂も作成に参画)

Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure においても強調されている事である。しかし、これまでこの問題に対応できる産業連関分析の数理に基づいた透明性・拡張性の高い動学 MFA モデルは存在していなかった。MaTrace は分析における新境地を開くものである。特に、希少金属を含む合金元素についてこれを用いた時間経路の推定、および回収・精練・生産などに関わる各種技術パラメータがそれに及ぼす効果を同定することは、金属資源保全の観点から今後極めて重要な研究課題である。

##### 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 8 件)

- ① Nakajima K., Ohno H., Kondo Y., Matsubae K., Takeda O., Miki T., Nakamura S., Nagasaka T. (2013) Simultaneous MFA of nickel, chromium and molybdenum used in alloy steel by means of input-output analysis, Environmental Science and Technology 査読有 47, 2013, pp. 4653 - 4660. DOI: 10.1021/es3043559is
- ② Shinichiro Nakamura, Yasushi Kondo, Kazuyo Matsubae, Kenichi Nakajima, Tasaki Tomohiro and Tetsuya Nagasaka.: Quality- and dilution losses in the recycling of ferrous materials from end-of-life passenger

cars, Environmental Science & Technology, 査読有 2012, 46 (17), pp. 9266 - 9273  
doi.org/10.1021/es3013529

- ③ Nakajima, K., Nansai, K., Matsubae, K., Kondo, Y., Kagawa, S., Inaba, R., Nakamura, S., and Nagasaka, T., Identifying the substance flow of metals embedded in Japanese international trade by use of Waste Input-Output Material Flow Analysis (WIO-MFA) model, ISIJ International 査読有 51, 2011, pp.1934-1939, DOI :10.2355/isijinternational.51.1934
- ④ Shinichiro Nakamura, Yasushi Kondo, Kazuyo Matsubae, Kenichi Nakajima, 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 査読有 45, 2010, pp. 1114 - 1120, DOI: 10.1021/es1024299

[学会発表] (計 15 件)

- ① S Nakamura: Toward a closed loop society: The fate of metals over time across products, REWAS2013, 2013, USA
- ② Nakajima K., Matsubae K., Kondo Y., Nakamura S., Nagasaka T. (2013) IO MFA and Thermodynamic Approach for Metal Recycling. REWAS2013, USA
- ③ Ohno H., Matsubae K., Nakajima K., Nakamura S., Nagasaka T. (2013) Development of Efficient Recycling System for Steel Alloying Elements in End of Life Vehicles. REWAS2013, 2013, USA
- ④ S Nakamura, Y Kondo, K Matsubae, K Nakajima, T Tasaki and T Nagasaka: Hybrid LCA towards sustainable management of metals: quality- and dilution losses in recycling, SETAC 18th LCA Case Study Symposium, 2012, Denmark
- ⑤ S Nakamura, Y Kondo, K Matsubae, K Nakajima, T Tasaki and T Nagasaka: Input-output analysis of the quality and dilution losses associated with recycling of ferrous materials embedded in passenger vehicles, MFA - ConAccount Section Conference 2012, Germany.
- ⑥ Kagawa, S., Kondo, Y., Matsubae, K., Nagasaka, T. and Nakamura, S.,

Dynamic Waste Input Output Analysis of Durable Goods: A Case Study of the Automobile Use, 20th International Input output Conference, 2012, Slovakia.

- ⑦ Y Kondo and S Nakamura: Visualization of Inter-industry Material Flow and Impurities in Iron and Steel Scrap along the Supply Chain of a Passenger Car, World Resource Forum 2011, Switzerland
- ⑧ S Nakamura, Y Kondo, K Matsubae, K Nakajima, T Tasaki and T Nagasaka: Hybrid Life-Cycle MFA of Ferrous Materials Embedded in Passenger Cars under Explicit Consideration of Grades of Secondary Materials, LCM2011, Germany
- ⑨ S Nakamura, Y Kondo, K, Matsubae, , K Nakajima, T. Nagasaka., UPIOM: A new tool of MFA and its Application to Primary and Secondary Metals Associated with Construction and Car Manufacturing, ISIE 2011, USA
- ⑩ S Nakamura, Kondo, Y, Matsubae, K, Nakajima, K., T. Nagasaka., UPIOM: A ew tool of MFA with application to the flow of iron & steel associated with car production, ISIE MFA-ConAccount Meeting, 2010, Tokyo
- ⑪ S Nakamura and E. Yamasue: Hybrid LCA of a new technology for design of disassembly based on smart materials, 18th International Input-Output Conference, 2010, Australia

[図書] (計 1 件)

- ① Markus Reuter, Christian Hudson, Antoinette van Schaik, Kari Heiskanen, Christina Meskers, Christian Hagelüken, Contributors: Helmut Antrekowitsch, Diran Apelian, Bo Bjorkman, Bart Blanpain, Françoise Bodenan, Mieke Campforts, Amélia Enríquez, Bernd Friedrich, Stefan Gössling-Reisemann, Daniel Froelich, Tom Jones, Yasushi Kondo, Jinhui Li, Hans-Rainer Lotz, Stefan Luidold, Elisabeth Maris, Kazuyo Matsubae, Nourredine Menad, Shinsuke Murakami, Kenichi Nakajima, Tetsuya Nagasaka, Shinichiro Nakamura, Sheraz Neffati, Shuji Owada, Jim Petrie, Georg Rombach, Susanne Rotter, Mathias Schluep, Guido Sonnemann, Philip

Strothmann, Pia Tanskanen, Karel van Acker, Jacques Villeneuve, Harro von Blottnitz, Patrick Waeger, Philippe Wavrer, Rolf Widmer, Patrick Wollants, Guomei Zhou

Metal Recycling Opportunities, Limits, Infrastructure Report 2b of the Global Metal Flows Working Group of the International Resource Panel of UNEP.  
[http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metal\\_Recycling\\_Full\\_Report.pdf](http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metal_Recycling_Full_Report.pdf)

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 慎一郎 (NAKAMURA SHINICHIRO)

早稲田大学・政治経済学術院・教授

研究者番号：20180367

### (2) 研究分担者

加河 茂美 (KAGAWA SHIGEMI)

九州大学・経済学研究科・准教授

研究者番号：20353534

中島 謙一 (NAKAJIMA KENICHI)

独立行政法人国立環境研究所・特別研究員

90400457

### (3) 連携研究者

長坂 徹也 (NAGASAKA TETSUYA)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：30180467