

## 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 31 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360218

研究課題名（和文）：地域の鉄鋼業・非鉄金属製錬業を基軸としたレアメタル回収システム

研究課題名（英文）：Recovery systems of minor metals based on local steel and nonferrous metal industries

## 研究代表者

橋本 征二（HASHIMOTO SEIJI）

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：30353543

## 研究成果の概要（和文）：

地域の鉄鋼業・非鉄金属製錬業を基軸としたレアメタル回収システムについて検討するため、地域ごとのレアメタルの発生ポテンシャルの推計、これを効率的に収集するためのシミュレーション、自治体の廃棄物処理におけるレアメタルのフローの状況把握、地域の鉄鋼業・非鉄金属製錬業におけるレアメタル需要の推計等を行った。その結果、レアメタルの発生が集中する地域、収集運搬費用の削減に効果的な対策、レアメタルリサイクルの基軸とすべき地域などを同定した。

## 研究成果の概要（英文）：

Recovery systems of minor metals based on local steel and nonferrous metal industries were examined. For this purpose, the potential local generation of minor metals was estimated. Their efficient collection systems were simulated. Material flows of minor metals in municipal waste treatment processes were ascertained. Then demands for minor metals in local steel and nonferrous metal industries were estimated. Results identified regions generating large amounts of minor metals, effective measures for reducing collection and transportation costs, and key regions for minor metals recycling.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2011年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2012年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	9,000,000	2,700,000	11,700,000

研究分野：産業生態学

科研費の分科・細目：土木工学・土木環境システム

キーワード：都市鉱山、レアメタル、収集システム、鉄鋼業、非鉄金属製錬業

## 1. 研究開始当初の背景

近年、「都市鉱山」という言葉が注目を浴びようになっている。これまで経済社会の中に蓄積されてきた基礎素材や電気・電子製

品には、多くのレアメタルが含まれており、日本も資源大国であるとのメッセージには大きなインパクトがある。しかしながら、天然鉱物においてもそれが経済的に回収でき

なければ「埋蔵量」とならないように、都市鉱山もそこから経済的に有用な金属が回収できなければ資源が埋蔵しているとは言えない。経済社会における金属蓄積量を推計する研究は増えているものの未だ断片的な情報しかなく、ましてやその二次資源としての評価はほとんどなされていないのが現状である。申請者らは、都市鉱山を適正に評価するために、天然鉱物資源の分類表に整合的な二次資源の分類表を提案しているが、このような分類をもとに様々な二次資源の利用可能性を適正に評価していくことが求められている。

一方、「都市鉱山」の有効な活用を目指して、環境省や経済産業省の助成のもと、E-waste等からレアメタルを回収するモデル事業が行われている。レアメタルの約9割は鉄鋼用途であるが、冶金学的には個別元素の回収が困難であるため、鉄鋼材に含まれるレアメタルについては合金ごとに分別回収するシステムを構築していく必要がある。また、製錬プロセスごとに回収できる金属が異なるため、利用する製錬プロセスに合った回収システムを構築していく必要がある。しかしながら、既存の鉄鋼業・非鉄金属精錬業を有効に活用し、効率的にレアメタルを回収するための技術システムについてはほとんど検討がなされていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、非鉄金属製錬業を基軸とした製錬プロセスごとのレアメタル回収システムと鉄鋼業を基軸とした循環利用(スクラップのフェオアロイ代替等)によるレアメタル回収システムについて検討する。このため、まず、地域ごとにレアメタルの発生ポテンシャルを推計し、これを効率的に収集するためのシステムを構築するための方法論の開発とその適用を行う。次に、上記の成果、各自治体でのレアメタルのフローの状況、全国の鉄鋼業・非鉄金属精錬業の立地状況などをもとに、これら地域の産業を基軸としたレアメタル回収システムについて検討する。

## 3. 研究の方法

(1) レアメタルを含む使用済み小型家電を対象として、その都道府県別蓄積量・廃棄量、及びこれらの小型家電に含まれるレアメタルの都道府県別蓄積量・廃棄量の推計を行う。具体的には、小型家電の都道府県別需要量と各小型家電の寿命、重量、レアメタル含有量等から推計する。一方、自治体における使用済み小型家電の排出実態調査結果に基づき、一般廃棄物として自治体へ排出される小型家電の排出原単位を推計し、これを上記と比較する。

(2) 鉄鋼材に添加されるレアメタルを対象

として、その国内フローの推計を行う。具体的には、廃棄物産業連関表を利用した物質フロー分析(WIO-MFA)により、鉄鋼材(特に特殊鋼)中に含まれるレアメタルの国内フローを推計する。

(3) レアメタルを含む使用済み小型家電の廃棄物としての排出量、すなわち資源としての回収量は消費者の意思決定に大きく左右されることから、消費者に対するアンケート調査を基に、インフォーマルルートへの流出も含めたマルチエージェントシミュレーションを行って、個別の政策導入による各ルートへの排出量の変化を検討する。

(4) 既存の一般廃棄物収集運搬モデル(GCM-GIS)を精緻化し、使用済み小型家電の収集運搬費用の推計を行う。使用したモデルは国勢調査から得られる1kmメッシュの人口データ等を基に収集運搬をシミュレーションするものであり、本研究ではモデル作成以降公開された町丁目データを用いることでより現実に即したモデルを作成する。

(5) 使用済み電気電子機器(WEEE)の収集・処理実態アンケート調査結果による自治体ごとのWEEE収集区分や処理方法に基づき、一般廃棄物処理におけるWEEEの収集・処理フローを推計する。さらに、粗大ごみ破碎選別や焼却溶融処理における物質収支と金属元素の分配挙動調査結果および一般廃棄物として排出されるWEEEの素材構成比や金属元素含有量を適用し、WEEE含有金属元素の一般廃棄物処理におけるフローを推計する。

(6) 金属精錬各社の情報をもとに、金属製錬施設等の地理情報を整備した上で、GISソフト(Mandara)を用いて、地域ごとのレアメタルの需給バランスを可視化し、これをもとに適切なレアメタル回収システムについて検討する。

(7) これらリサイクルの効果を明らかにするための手法開発を行う。具体的には、関与物質総量(Total Material Requirement, TMR)を指標とした評価手法について、鉄鋼業からのリン回収システムを対象に、単位量のリン酸を天然リン鉱石から得る場合と都市鉱石(鉄鋼スラグ)からリサイクルする場合についての比較を行う。

## 4. 研究成果

(1) 小型家電の都道府県別の蓄積量・廃棄量を推計したところ、人口の多い東京都、神奈川県、大阪府において多くの小型家電の蓄積と廃棄があると推計された。これを可住地面積あたりで見ると、図1に示すように、これらの自治体が際立って大きく、また、世帯あたりで見ると、中日本が北日本・南日本より若干大きい傾向にあった。図1から、収集効率の観点では、東京都、神奈川県、大阪府において他の自治体より効率的な回収が見

込めると考えられた。一方、推計された廃棄量と自治体への排出量を比較すると大きな開きがあり、家庭内で保管されている使用済み小型家電が多くあることが示唆された。

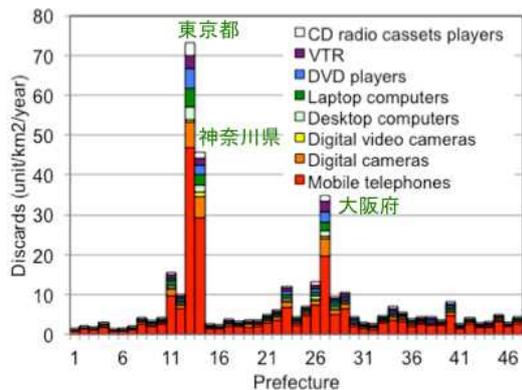


図1 都道府県別可住地面積あたりの主要小型家電発生量の推計結果（横軸の番号は47都道府県を表す）

(2) 国内における特殊鋼の用途別利用状況や鋼材別組成情報等から、特殊鋼の加工スクラップに含まれるレアメタル回収ポテンシャルをWIO-MFAにより推計したところ、クロム35.9千トン、ニッケル9.6千トン、モリブデン1.4千トンと推計された。このうち、価格が高いステンレスはレアメタルを含めた有効利用がなされていると考えられるが、その他多くの構造用鋼については随伴レアメタルが散逸していると考えられた。またクロム・ニッケル・モリブデンのいずれについても、国内で発生する特殊鋼加工スクラップの約2割を愛知県が占めており、そのうちの約3~4割が自動車用鋼であることがわかった。これらの情報は、国内レアメタルの回収システムの拠点設置に重要な情報である。

(3) 廃棄物の排出に関する消費者行動の分析を行ったところ、正規ルートに流すかどうかの最大の要因は、消費者の環境意識の高低にあり、またその背景にはどの程度の頻度で関連する情報に触れているかが影響していた。そこで、家電リサイクル法を対象として、環境意識をパラメータとして消費者に与え、不適正な回収業者については犯罪心理学的なモデルをあてはめたマルチエージェントシミュレーションを実施したところ、例えば料金の支払いを前払い制に移行することで2~3割程度回収量が増加することが明らかとなった。また、シミュレーションは実施していないが携帯電話リサイクルについても消費者行動分析を行ったところ、制度を認知していてもリサイクルには応じない消費者がいることが明らかになった。この議論に際しては、制度の認知度の低さだけが指摘されがちであるが、これらの結果から、消費者に対

してリサイクルに対する協力を直接的に動機付けるような施策を講じることが重要であることが明らかになった。

(4) 改良したモデルを用いて収集運搬費用を推計したところ、小型家電の廃棄量が非常に少ないために、自治体ごとの収集運搬費用の違いが大きく、1kgあたり1円未満の自治体から1000円以上になる自治体までが存在する推計結果となった。また、これに対する対処として収集対象地域の広域化の効果を検討したものの、広域化すれば良いと一概に言えるものではなく、むしろ混合収集などの収集運搬方式の変更による効果が高いことが明らかとなった。この検討の初期段階での計算結果は実際の小型家電リサイクル法の検討の場における資料として活用された。

(5) 一般廃棄物収集・処理におけるWEEEフローを推計したところ、自治体へ排出されるWEEEのほとんどが粗大ごみまたは不燃ごみとして収集され、その8割程度が破碎選別処理されていると推計された。破碎選別において鉄系部品はその多くが回収されているが、非鉄金属はアルミニウムの一部が回収されているに留まると考えられた。人口ベースで25%程度の自治体において電源ケーブル等の事前取外しが行われているために、全国合計でWEEEに含まれる銅の1割程度が回収されていると推計された。一方、貴金属やレアメタルについてはそのほとんどが最終的に最終処分されていると推計された。灰溶融施設を持つ自治体においては破碎選別可燃残渣の焼却溶融を通じて溶融メタルに濃縮した貴金属の資源化が行われているが、全国合計ではWEEE含有量の数%にすぎないと考えられた。貴金属やレアメタルはその多くが破碎選別の不燃残渣として最終処分されていると推計される。仮想的に不燃残渣の焼却溶融を行った場合の金属フローを試算すると、貴金属等の多くは溶融メタルに移行し、非鉄金属製錬を通じてより多くの貴金属等を回収できる可能性が示された。しかし、不燃残渣の焼却によってWEEEに含まれる他の有害金属のフローも同時に変化する（例えば鉛はほとんどが溶融飛灰へ移行する）ことから、その管理も同時に考慮すべきであると考えられた。

(6) 特殊鋼の製造施設の賦存状況および生産量からニッケルおよびクロムの地域別需要量を推計したところ、図2に示すような結果となった。これは、ステンレス鋼等の生産鋼種を反映した結果となっている。クロムおよびニッケルの需要は、関西、関東、中部地方に集中しており、これらの地域を基軸とした合金種ごとのリサイクルシステムの構築が、合金元素の散逸の回避と天然資源投入量の削減に効果的であると考えられた。本研究では、レアメタル全体についてこのような像

を描くところまでは到達しなかったが、今後の課題として継続的に研究を進める。

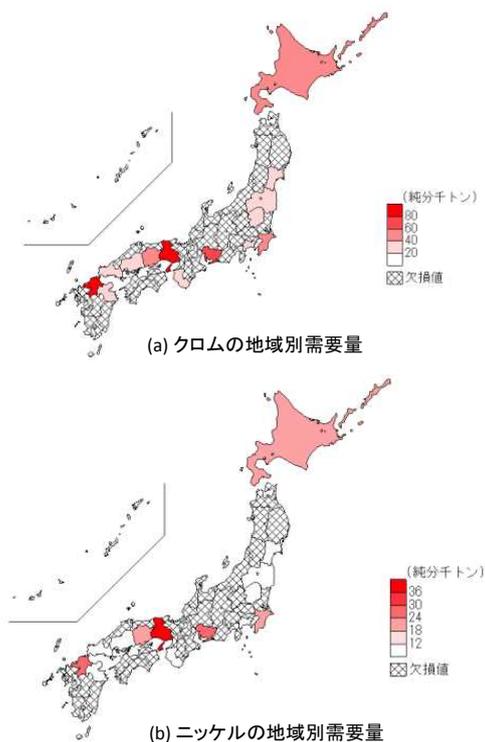


図2 ニッケルおよびクロムの地域別需要量

(7) 都市鉱山活用の効果について、鉄鋼スラグからのリン回収を対象に分析を行ったところ、ほとんどのケースにおいて鉄鋼スラグ（脱リンスラグ）からリン酸を回収することは天然リン鉱石から得るより関与物質総量が低くなることが明らかになった。また、リン酸回収時に同時に得られる鉄を多く含む相を高炉に再投入することが効果的であることも分かった。また、プリコンシューマー型である鉄鋼スラグの評価において、銑鉄に対するスラグの価値（価格）は重要な鍵であり、この値が小さくなるとリン酸のリサイクルの効果が大きく評価されることとなった。

#### 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 16 件)

- ① E.Yamasue, K.Matsubae, K.Nakajima, S.Hashimoto, T.Nagasaka, *Recyclability of phosphorous from steelmaking slag in terms of total material requirement*, *Journal of Industrial Ecology*, 査読有, 2013, in press

- ② M.Oguchi, H.Sakanakura, A.Terazono, *Toxic metals in WEEE: Characterization and substance flow analysis in waste treatment processes*, *Science of the Total Environment*, 査読有, 2013, in press  
DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.07.078
- ③ M.Oguchi, H.Sakanakura, A.Terazono, H.Takigami, *Fate of metals contained in waste electrical and electronic equipment in a municipal waste treatment process*, *Waste Management*, 査読有, Vol.32, 2012, 96-103  
DOI: 10.1016/j.wasman.2011.09.012
- ④ 村上進亮, *小型家電のフローと回収・収集・運搬、廃棄物資源循環学会誌*, 査読無, Vol.23, 2012, 303-310
- ⑤ K.Nakajima, O.Takeda, T.Miki, K.Matsubae, T.Nagasaka, *Thermodynamic analysis for the controllability of elements in the recycling process of metals*, *Environmental Science & Technology*, 査読有, Vol.45, 2011, 4929-4936  
DOI: 10.1021/es104231n
- ⑥ K.Nakajima, O.Takeda, T.Miki, K.Matsubae, S.Nakamura, T.Nagasaka, *Thermodynamic analysis of contamination by alloying elements in aluminum recycling*, *Environmental Science & Technology*, 査読有, Vol.44, 2010, 5594-5600  
DOI: 10.1021/es9038769

[学会発表] (計 28 件)

- ① 発表者名: K.Nakajima、発表タイトル: *Combined application of MFA with thermodynamic analysis for sustainable resource use*、学会名等: The 10th International Conference on EcoBalance、発表年月日: 2012年11月22日、発表場所: 慶應義塾大学(神奈川県)
- ② 発表者名: 小口正弘、発表タイトル: *自治体の廃棄物処理における廃電気電子機器と含有金属のフロー* (招待講演)、学会名等: 国際協力シンポジウム眠る都市鉱山、発表年月日: 2012年10月1日~2日、発表場所: 京都テルサ(京都府)
- ③ 発表者名: S.Hashimoto、発表タイトル: *Estimation of local stocks and discards of small-size electric and electronic equipment and their content metals to establish efficient collection systems in Japan*、学会名等: ISIE MFA-ConAccount Section Conference 2012、発表年月日:

2012年9月27日、発表場所：Darmstadt (Germany)

- ④ 発表者名：鍋田有希、発表標題：日本国内における使用済み製品の回収シミュレーション、学会名等：資源・素材学会平成24年度(2012年)春季大会、発表年月日：2012年3月28日、発表場所：東京大学（東京都）
- ⑤ 発表者名：E.Yamasue、発表標題：Recyclability evaluation of phosphorous from steel making slag in terms of Total Materials Requirement、学会名等：6th International Conference on Industrial Ecology、発表年月日：2011年6月1日、発表場所：Berkeley (USA)
- ⑥ 発表者名：平木岳人、発表標題：マグネシウム合金からの合金成分除去に関する熱力学的解析、学会名等：日本金属学会 第147回大会、発表年月日：2010年9月26日、発表場所：北海道大学（北海道）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

橋本 征二 (HASHIMOTO SEIJI)  
立命館大学・理工学部・教授  
研究者番号：30353543

### (2) 研究分担者

中島 謙一 (NAKAJIMA KEN-ICHI)  
独立行政法人国立環境研究所・資源循環・  
廃棄物研究センター・主任研究員  
研究者番号：90400457

小口 正弘 (OGUCHI MASAHIRO)  
独立行政法人国立環境研究所・資源循環・  
廃棄物研究センター・研究員  
研究者番号：20463630

村上 進亮 (MURAKAMI SHINSUKE)  
東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
研究者番号：40414388

山末 英嗣 (YAMASUE EIJI)  
京都大学・大学院エネルギー科学研究科・  
助教  
研究者番号：90324673

平木 岳人 (HIRAKI TAKEHITO)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：60550069

### (3) 連携研究者

醍醐 市朗 (DAIGO ICHIRO)  
東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
研究者番号：20396774

布施 正暁 (FUSE MASA AKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・安全科学  
研究部門・研究員  
研究者番号：70415743