

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6月1日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究B

研究期間：2010～2012

課題番号：22710008

研究課題名（和文） 関与物質総量を用いた都市鉱山の「質」に関する新規評価手法の開発と応用
研究課題名（英文）

Novel Evaluation Method of Quality of Material in Urban Ore in terms of Total Material Requirement.

研究代表者

山末英嗣 (YAMASUE EIJI)

京都大学・エネルギー科学研究科・助教

研究者番号：90324673

研究成果の概要（和文）：本研究では、都市鉱山からある素材 1kg をリサイクルするために必要な関与物質総量(TMR)を「都市鉱石 TMR」と定義し、それを自然鉱山からある素材 1kg を製錬するために必要な TMR「自然鉱石 TMR」と比較することで、都市鉱山に含まれる元素・素材の「質」を「拡張した粗鉱品位」として評価できる手法を確立した。この指標を用い、レアメタルについてはリサイクルすべき元素の選定と新規リサイクル手法の提案、ベースメタルについてはカスケードリサイクルの最適化を示すことを目的として研究を進めた。まず都市鉱石 TMR の持つ指標としての意味を明らかにし、その解釈を基に、使用済み家電製品から得られるレアメタル、使用済み建築物から得られるベースメタルについての評価を行った。さらに、TMR が資源端の重量で有り、推算した自然鉱石 TMR と都市鉱石 TMR の内訳を国別に分解することで、ある素材の資源端利用の国外依存性を定量的に評価できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this study, the total materials requirement (TMR) to recycle chemical elements from the urban ore by recycling (urban ore TMR, UOTMR) has been compared with the TMR to extract the element from the natural ore by smelting (natural ore TMR, NO-TMR) in order to evaluate the urban ore grade on an equal footing with the natural ore. A framework of UO-TMR based on the NO-TMR framework is developed. The UO-TMR for end-of-life electric home appliances have been first estimated and evaluated. The estimation were carried out using scenario analyses, in which the number of recycled elements and/or materials was changed considering additional energy for advanced recycling. The TMRs for the recycling of materials from four types of Japanese buildings have been also estimated and the trade-off between the increase in function of recycled materials such as steel made from scrap and the additional inputs of energy and materials required to create the increase in function were evaluated. A novel method to evaluate an integrated indicator for resource dependency by using TMR has been finally developed from the country-by-country breakdown analyses of TMR.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：都市鉱山，資源枯渇，関与物質総量，リサイクル，都市鉱石 TMR

1. 研究開始当初の背景

都市鉱山と呼ばれる使用済み建築物，自動車，電子機器などに含まれる元素・素材の有効利用は日本のような資源に乏しい国々にとって重要な課題である。原田によると，日本の都市鉱山には世界埋蔵量の一割を超える金属が多数含まれることが分かっている。（原田幸明：“わが国の都市鉱山は世界有数の資源国に匹敵”，NIMS プレスリリース，2008 年 1 月 11 日）。これは都市鉱山の「量」的な評価であり，そのポテンシャルを測る上で大変重要な結果である。しかし，自然界における希土類元素のように，量は存在してもその希薄性と元素分離の困難さから，最終的に単体を得るまでに大量のエネルギー・コストがかかることを鑑みると，都市鉱山においても，「量」だけでなくその「質」に注目した評価方法の開発が重要である。しかし，都市鉱山に含まれる元素・素材の質に関する評価はこれまでにほとんどされていないのが現状であった。

2. 研究の目的

以上のような状況により，本研究では，都市鉱山に含まれる元素・素材のリサイクル性を TMR の観点から精査し，レアメタルについてはリサイクルすべき元素の選定と新規リサイクル手法の提案，ベースメタルについてはカスケードリサイクルの最適化を示し，最終的には資源管理戦略についての提言を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では，使用済みとなった電子機器から回収されるレアメタル，建築物から回収される鉄スクラップやアルミニウムスクラップのリサイクル性を TMR の観点から評価した。

まず，各使用済み製品の組成およびリサイクルの際に混入する不純物についてできるだけ詳細に調査する。組成は，文献調査，実測，ヒアリング調査を併用して行う。また，鉄やアルミニウムはトランプエレメントの混入が問題になるため，それらの混入濃度も詳細に調査した。

次の段階として，種々の使用済み製品からリサイクルされる元素・素材の都市鉱石 TMR を推算した。得られたデータは計算及び解析の基礎データとする。推算した都市鉱石 TMR は，基本的に自然鉱石 TMR と比較することで評価する。ただし，リサイクルされる元素・素材の特徴によって大きく以下のような 2 種類の評価方法を用いる。

1. 金，銀，銅などのようにリサイクルによって得られる元素の品質と自然鉱石から製錬して得られる元素の品質がほぼ同程度である場合，都市鉱石 TMR と自然鉱石 TMR を直接比較し，その多寡でリサイクル性を評価する
2. 鉄やアルミスクラップのように，トランプエレメントの混入によって自然鉱石から製錬する場合に比べ品質が低くなるような素材を対象とする場合，品質向上のための追加プロセスとそれによって得られる品質とのトレードオフを評価する。

4. 研究成果

まず，1. のケースとして，使用済み家電製品（CRT テレビ，液晶テレビ，冷蔵庫，洗濯機，エアコン，電子レンジ）から素材をリサイクルする際の関与物質総量（都市鉱石 TMR）を推算した。推算に関して，自然鉱石 TMR と MI の関係を一部用いた。推算の結果，金，銀，銅，プラスチックの都市鉱石 TMR は全てのシナリオ，全ての家電製品について自然鉱石 TMR より小さくなった。TMR の観点では，アルミニウムスクラップは展伸材ではなくダイカストしてリサイクルする方が良く，これは現在のリサイクル状況と同じであることが分かった。鉄スクラップからステンレス鋼，またはアルミニウムスクラップからダイカストを選別するには追加的なエネルギー投入が必要であるが，ステンレス鋼やダイカストの都市鉱石 TMR は自然鉱石 TMR より潜在的に小さくなる可能性が高いことを示した。自然鉱石換算元素濃度の観点からみた鉱石の品位は $Au \sim Cu > Ag > Fe \sim Al$ の順となっていることが分かった。

また，ノート PC と携帯電話に含まれる素材の都市鉱石 TMR を算出し，自然鉱石との比較を行った。自然鉱石から得られる素材とほぼ同質であると考えられる金，銀，銅， tantalum，インジウムについて都市鉱石 TMR と自然鉱石 TMR を比較した結果，ノート PC，携帯電話共に，プラスチック回収の有無によらず，インジウムを除く金属素材の都市鉱石 TMR は自然鉱石 TMR を下回った。そして，プラスチックを回収することにより都市鉱石 TMR は減少することが分かった。また，インジウムはプラスチック回収をしてもなお，都市鉱石 TMR が自然鉱石 TMR を上回った。インジウムは自然鉱石よりもノート PC と携帯電話の方が元素濃度が高いにもかかわらず，都市鉱石 TMR は自然鉱石 TMR より大きいことが

分かった。

また、研究方法における 2. のケースとして、鉄スクラップのリサイクル性の評価を行った。鉄スクラップの特性は発生源によって大きく異なる。例えば、使用済み自動車から回収される鉄スクラップは、比較的簡便に大量を得ることができ、かつ混入する銅濃度も低い。一方で、建築物から得られる鉄スクラップはさらに大量であるが、元々使用されている鋼材が銅を多く含む棒鋼であり、さらに配線に起因する銅が追加的に混入する。具体的には、建築物、都市インフラ、自動車、また家電製品などから回収される鉄スクラップの希釈プロセスによる不純物濃度の低減と TMR 増加とのトレードオフについて評価をおこなった。まず、種々の鉄スクラップの都市鉱石 TMR を推算した。鉄スクラップの TMR と鉄スクラップ中の銅濃度に注目すると、バージン鉄と鉄スクラップは対極的な関係にあることが分かった。また、希釈プロセスに伴う鉄スクラップの品質向上と環境影響増加のトレードオフを評価するための手法を提案した(図 1)。この手法によると、鉄筋コンクリート建築物から得られた鉄スクラップは棒鋼まで、家電製品(7種の平均)、携帯電話、鉄骨構造建築物から得られた鉄スクラップは形鋼まで、自動車から得られる鉄スクラップ(A プレス)は圧延鋼まで、A シュレッダーは深絞り鋼板までリサイクルできるが、木造住宅から得られる鉄スクラップは木材をリサイクルしない限り、棒鋼としてもリサイクルすべきでないことが分かった。本報告では評価指標として TMR を用いたが、二酸化炭素やコストといった指標にも応用可能と考えられる。

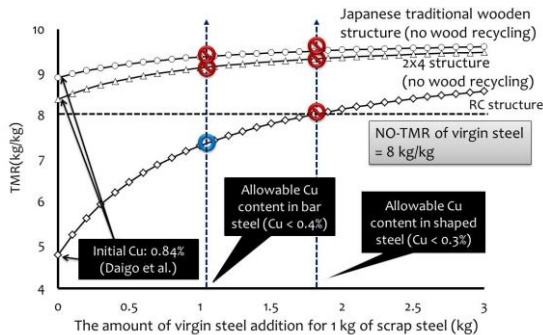


図 1 希釈に伴う TMR の変化とリサイクル性

さらに、上図を基にしたリサイクル性判定図を作成した。

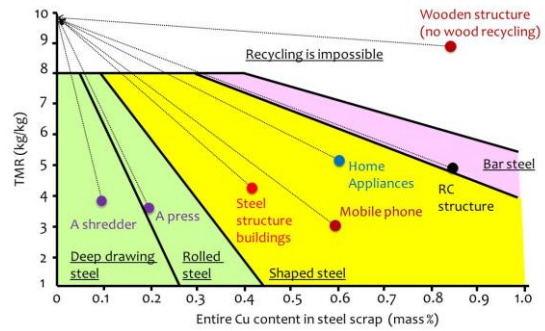


図 2 TMR を基にしたリサイクル性判定図

図中の●は、鉄スクラップの TMR (希釈前) を鋼材中の初期 Cu 濃度に対してプロットしたものである。そこから出ている破線は、鉄スクラップの希釈に伴う銅濃度の低下と鉄スクラップの TMR の変化を示したものである。ここで図中の 3 つの領域は、圧延鋼、形鋼、棒鋼の許容銅濃度がそれぞれ 0.1, 0.3, 0.4mass%であることを考慮して決定したリサイクル上限である。すなわち、種々の鉄スクラップの TMR と銅濃度のプロット(●)の位置により、リサイクル上限が判定できる。

さらに本研究では TMR を用いて包括的な資源依存性を評価する手法を構築した。その結果、ほぼ単一の原料(鉱石)から生産され、かつその TMR が支配的である場合は、本手法で得られた包括的な資源自給率(依存率)と鉱石の自給率(依存率)はほとんど同じ値となるが、複数の原料から生産される場合、各国の資源端における開発を考慮して資源自給率(依存率)を評価できることが分かった。

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 5 件)

- ① Eiji Yamasue, Ryota Minamino, Ichiro Daigo, Hiroki Tanikawa, Hideyuki Okumura, Keiichi N. Ishihara and Paul. H Brunner: "Quality Evaluation of Scrap Materials from Urban Buildings by means of Total Materials Requirement", Journal of Industrial Ecology, (2013), DOI: 10.1111/jiec.12014
- ② 山末英嗣:「都市鉱山リサイクルの資源端重量」, 金属, Vol. 82, No. 2, (2012), pp. 115-121
- ③ 山末英嗣:「関与物質総量を用いた都市鉱山の評価」, 検査技術, Vol. 11, (2012), pp. 57-64

④ 山末英嗣, 南埜良太, 奥村英之, 石原慶一:「都市鉱山に含まれる素材の品位評価～リサイクルの関与物質総量(資源端重量)～」, 廃棄物資源循環学会誌, 第21巻, 1号, (2011), pp.11-18

⑤ 山末英嗣, 南埜良太, 醍醐市朗, 奥村英之, 石原慶一:「使用済み家電製品からの素材リサイクルに伴う関与物質総量(都市鉱石 TMR) の推算と評価」, 日本金属学会誌, 第74巻, 12号, (2010), pp. 811-819

[学会発表] (計7件)

① Eiji Yamasue, Keiichiro Morotomi, Shinsuke Murakami, Hideyuki Okumura and Keiichi N. Ishihara: "Integrated Indicator for Resource Dependency by TMR", Ecobalance 2012, Yokohama, Japan, 20-22, November 2012

② Eiji Yamasue, Kazuyo Matsubae, Kenichi Nakaima and Ichiro Daigo: "Activity of Material Flow Analyses in Japan Considering Recycling Processes", International Cooperation Symposium TOSHIKOHZAN "Urban Mine" - Its Potential Resources, Kyoto TERRSA, 1-2 October 2012

③ Eiji Yamasue, Shinsuke Murakami, Yoshihisa Sugimura, Takahiro Ukai and Ryota Ohshiro: "Evaluation of Recycling of Small Home Appliances in Japan on TMR Reduction", MFA2012, Conaccount Section, Darmstadt, Germany, 26-28 September 2012

④ Eiji Yamasue, Keiichiro Morotomi, Shinsuke Murakami, Hideyuki Okumura and Keiichi N. Ishihara: "Novel Evaluation Method of Resource Dependency on Foreign Countries of Material and Product in terms of Total Materials Requirement", MFA2012, Conaccount Section, Darmstadt, Germany, 26-28 September 2012

⑤ 山末英嗣, 醍醐市朗, 谷川寛樹, 石原慶一:「鉄スクラップのリサイクルに伴う品質向上と環境影響のトレードオフ評価～関与物質総量の観点からみた鉄スクラップのリサイクル性」, 日本鉄鋼協会春季大会, 横浜, 横浜国立大学, 2012年3月28-30日

⑥ 山末英嗣, 醍醐市朗, 谷川寛樹, 石原慶一:「関与物質総量の観点から見た種々の

鉄スクラップのリサイクル性評価」, 日本鉄鋼協会, 大阪大学, 2011年9月21日

⑦ 山末英嗣:「関与物質総量を用いた都市鉱山の「質」に関する新規評価手法」, 廃棄物循環資源学会研究部会合同講演会(招待講演), 日本大学理工学部駿河台校舎1号館6階 CSTホール, 2010年7月9日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山末英嗣 (YAMASUE EIJI)

京都大学・エネルギー科学研究科・助教

研究者番号: 90324673