

## 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 28 日現在

機関番号：82626

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23860075

研究課題名（和文）天然鉱山と都市鉱山の利用可能性に関する統合的評価手法の開発

研究課題名（英文）Developing an integrated approach for evaluating availability of metals in geological and urban mines

研究代表者

畑山 博樹 (HATAYAMA HIROKI)

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：30612733

研究成果の概要（和文）：

本研究では、金属の天然資源と再生資源の利用可能性を包括的に評価する手法を開発することで、金属資源の持続的な利用を検討する新たな枠組みの提案をおこなった。本研究によって、持続可能な資源利用に向けた様々な方策について、その有効性を定量的に示すことが可能となった。また、開発した手法を用いて、主要 7 金属を対象として、2000 年時点における主要金属の利用可能性を評価した。その結果、可採年数が同程度に短い銅、鉛、亜鉛、銀といった金属の中では、リサイクル促進によって持続性の向上の効果が大きく得られるのは鉛であることが明らかになった。本研究で提案した枠組みを動的に展開することで、それぞれの金属の持続的な利用に必要な技術開発の対象や時期を推定し、長期的な資源利用戦略を検討することが可能である。

研究成果の概要（英文）：

We developed a novel concept for sustainability of metals that assesses the availability of both primary and secondary resources. Our concept can evaluate the effectiveness of different technologies and policies for comprehensively increasing the sustainability of metal use. We used the concept to evaluate the sustainability of seven major metals around the year 2000. We show that promoting the recycling of lead is potentially more effective for increasing its sustainable use than other metals having short duration times, such as copper, zinc and silver. The concept developed in this work provides a basic framework for long-term resource management that employs the right technologies and policies in the right place at the right time.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・リサイクル工学

キーワード：持続可能な社会、資源循環、環境システム、産業エコロジー

1. 研究開始当初の背景

20 世紀後半以降の金属消費量の増加によ

って天然資源の枯渇が懸念されるようになり、都市鉱山の利用が推進されている。そのためには社会での物質のマクロなフローを把握することが必要であり、マテリアルフロー分析 (Material Flow Analysis, MFA) が米国、欧州、日本を中心に広くおこなわれている。なかでも Yale University の研究グループを中心とした STAF (Stocks and Flows) Project では、金属十数種について天然鉱山から採掘され人工圏で使用されている金属のフローの分析を 2003 年頃よりおこなってきた。しかしこれらのフローはある特定の年についてのみ静的に示されており、また都市鉱山としての金属資源量すなわち社会で使用中の製品に含まれている蓄積量 (以下、蓄積量) は推計されていない。蓄積量の推計には各フローの時間変化を考慮した動的な分析が有効であり、国内外の研究者がそれぞれの国や地域レベルでの推計をおこなっている。その中で研究代表者らは、年間消費量の大きい鉄鋼とアルミニウムを対象として世界レベルでの動的 MFA をおこない、長期的 (~2050 年) な利用動向を示した。

これら既往研究では、金属の蓄積量や使用済み製品に含まれる社会からの排出量 (以下、排出量) が時系列で推計されている。しかし、排出量のうち実際に回収されてリサイクル可能な量はリサイクル技術やコストの制約により限られているのが現状であり、むやみな再生資源の利用の拡大は非効率的にエネルギーやコストを消費する恐れがある。すなわち、天然鉱山と都市鉱山の資源量や、関連技術、資源価格の変化に応じて天然資源と再生資源をバランスよく利用することが長期的な資源利用においてもとめられている。しかしながら、これまでは天然鉱山と都市鉱山の利用可能性は別々の分野で分析されており、両者を含めた総合的な金属資源の持続的な利用は十分に検討されてこなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、都市鉱山における金属資源蓄積量と排出量、リサイクル可能量のバランスから都市鉱山の利用可能性を示す指標を開発し、天然鉱山を含めた金属資源全体の利用可能性を評価する手法を開発する。都市鉱山での蓄積量は回収のしやすさが異なる製品用途ごとに分類することで、技術開発による利用可能性の拡大を評価可能であることを示す。

### (1) 都市鉱山の利用可能性を示す新指標の開発

天然鉱山の利用可能性を示す指標として、可採埋蔵量を年間生産量で除した可採年数 (耐用年数) などがある。そこで、このような天然鉱山の利用可能性を示す指標との組

み合わせによる評価が可能な指標を、都市鉱山に関して開発する。

### (2) 開発した新指標の主要金属への適用

これまでの MFA の研究では各金属の蓄積量と排出量を中心に推計がなされているが、これらのデータのみから前項 (1) で開発した指標を導出できるとは限らない。そこで、新指標の導出に必要なデータについて、必要に応じて従来の MFA の枠組みを拡張しつつ推計する。そしてこれらの値を用いて、現存の都市鉱山が有する資源ポテンシャルを示す。

### (3) 金属資源の利用可能性の統合的評価と持続性向上のための方策の検討

金属の利用可能性を、天然資源と再生資源それぞれに関する指標から総合的に評価し、資源確保のための技術開発や政策導入が特に必要と考えられる金属を明らかにする。そして、都市鉱山からの金属資源回収の促進による金属資源全体の持続性の向上を評価することで、今後必要とされるリサイクル技術や資源循環システムを示す。

## 3. 研究の方法

統合的評価のための指標開発では、金属資源の利用可能性への都市鉱山の寄与を測る指標 (Latency of secondary resources reclamation: 以下 Latency) を開発した。各金属の天然資源の相対的な利用可能性の大きさは利用可能量 (埋蔵量) を年間生産量で除した可採年数で示すことができる。一方で、都市鉱山からの再生資源の利用を促進することで、天然資源の生産量を低減し可採年数を大きくすることができる。この可採年数の最大値の、現状の可採年数に対する比を Latency と定義することで、金属資源の利用可能性に対する都市鉱山の寄与のポテンシャルを示した。また、可採年数と Latency を乗じることで得られる可採年数の最大値によって、都市鉱山が有する資源ポテンシャルを含めた包括的な金属資源利用可能性の評価を可能とした。

このような評価の枠組みをもって、鉄、アルミニウム、銅、亜鉛、鉛、ニッケル、銀の 7 金属について、2000 年時点での世界レベルでの利用可能性の評価をおこなった。

## 4. 研究成果

### (1) 金属資源の利用可能性への都市鉱山の寄与を測る指標の開発

本研究では、金属資源の包括的な利用可能性を、天然資源と都市鉱山の利用可能性から評価する概念を提唱した (図 1)。これにより、天然鉱山および都市鉱山に存在する金属資源の利用可能性について統合的に評価可能となるだけでなく、金属ごとにどのような対

策がその持続的な利用に有効であるかを判断可能である。

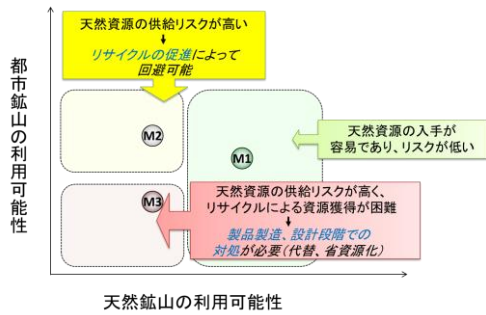


図1 金属資源の利用可能性評価の概念

世界レベルでの金属資源の持続可能性を考えるとき、鉱物資源の可採埋蔵量を年間の一次生産量で除した可採年数が目安として考えられてきた。この可採年数は、リサイクルの促進によって現状活用できていない都市鉱山のポテンシャルを活かすことで大きくすることができる。そこで、使用済み製品からの金属回収が最大限行われた場合（すなわちリサイクル率=1）の可採年数を限界可採年数、可採年数に対する限界可採年数の比をLatencyとして定義した。これにより、図1の横軸を可採年数、縦軸をLatencyで表すことで、金属資源の利用可能性を検討することを可能とした。限界可採年数やLatencyといった指標は、式(1)-(3)のように表される。

$$\text{可採年数} = R/P = R / (C - rD) \quad (1)$$

$$\text{限界可採年数} = R / (C - D) \quad (2)$$

$$\text{Latency} = \frac{\text{可採年数}}{\text{限界可採年数}} = \frac{C - rD}{C - D} \quad (3)$$

式(1)-(3)において、Rは可採埋蔵量、Pは年間一次生産量、Cは消費量（需要量）、Dは使用済み製品に含まれている金属の廃棄量、rは現状のリサイクル率である。式(3)から、Latencyの大きい、すなわちリサイクルの促進が持続性の向上に大きく寄与する金属は、廃棄量が大きく、また現状のリサイクル率が低い金属である。Latencyが小さい金属については、リサイクル率を向上させても、天然資源消費の削減効果は小さい。このような金属については、リサイクルの促進といったライフサイクルの静脈側での対策よりも、素材代替や加工歩留の向上といった動脈側での対策が必要となる。

このように、都市鉱山の利用可能性を表す指標であるLatencyを用いることで、図1に示されるような金属資源の利用可能性の記述が可能となり、持続性の向上に向けて有効な方策を示すことが可能となった。また、可採年数の比較が都市鉱山の利用ポテンシ

ルを考慮しない持続可能性を示しているのに対し、限界可採年数を用いることで都市鉱山が有するポテンシャルを考慮した持続可能性の比較が可能となった。

## (2) 主要7金属を対象とした利用可能性の評価

(1)で開発した手法に基づいて、2000年時点における世界レベルでの利用可能性を、鉄、アルミニウム、銅、鉛、亜鉛、ニッケル、銀を対象として評価した。その結果、可採年数が20年前後である銅、鉛、亜鉛、銀の中でも、鉛についてそのLatencyが大きく評価された。鉛は主にバッテリーに使用されており、その使用年数は4年程度と短い。そのため、近年の消費量の増加に廃棄量の増加も追従しており、これらのリサイクルをおこなうことで天然資源消費を大きく削減できる。一方で亜鉛は使用年数が10年程度の自動車や数十年の建築物に多く使用されており、これらの大部分は未だ使用済み製品として発生していない。したがって、亜鉛のリサイクル率は15%と低いものの、2000年の時点ではリサイクル率の向上は天然資源消費の削減に大きく寄与しない。

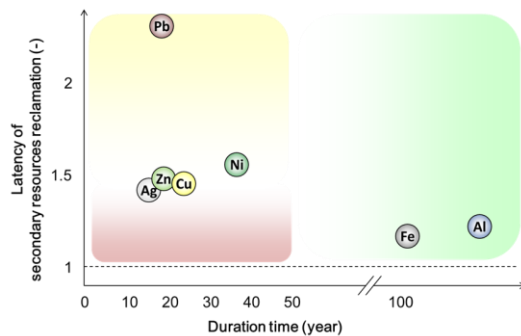


図2 主要金属の利用可能性評価（2000年）

図2に示されている各金属の可採年数、Latency、そして限界可採年数を表1に示す。鉛の限界可採年数は銅、亜鉛、銀に比べ10年以上長く推計されており、都市鉱山ポテンシャルを考慮することで、金属資源の利用可能性は従来の可採年数とは異なる傾向を示した。

表1 可採年数、Latency、限界可採年数の比較

	可採年数 (年)	Latency	限界可採 年数(年)
Fe	102	1.14	117
Al	132	1.18	156
Cu	23	1.47	33
Zn	19	1.49	29
Pb	18	2.34	43
Ni	37	1.52	56
Ag	14	1.42	20

Latency および限界可採年数は、都市鉱山が有する資源ポテンシャルの最大値を反映している。しかし一方で、リサイクルに関する技術開発やシステム整備の未熟さ、コストの制約などから、都市鉱山のポテンシャルをすべて活かすことは現実には困難である。リサイクルのしやすさは金属によって異なり、鉄鋼やアルミニウムといったベースメタルに比べるとニッケルや亜鉛といった合金元素、メッキ材の回収は難しい。また、それぞれの国における技術力やリサイクルコストなどに依存するところも大きい。そこで、現状において実現しうる持続性の向上余地の推計をおこなった。各金属のそれぞれの国におけるリサイクル率を計算し、その中で最も高いリサイクル率の水準まで世界全体が都市鉱山利用を進めた場合の可採年数を算出した(図3)。

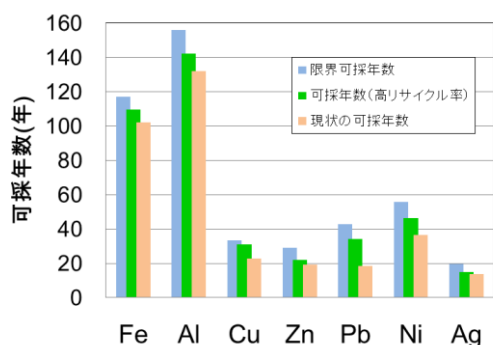


図3 リサイクル率による可採年数の違い

銅や鉛については、活用されていない都市鉱山中の資源の大部分は、現存する優れたリサイクル技術およびシステムを普及することで利用可能となり、可採年数の増大に貢献する。一方で亜鉛は、現在の技術ではメッキとして使用されている亜鉛の犠牲散逸や電炉でのダストとしてのロスをも十分に回収することができない。したがって、都市鉱山のポテンシャルを活かすうえでは新たな技術

開発が必要となる。

### (3) 評価手法の応用と展開に関する検討

本研究では、天然鉱山と都市鉱山に存在する金属資源の利用可能性を評価することで、各金属の持続的な利用に向けた有効な方策の提案を可能とした。また、開発した評価手法を用いて、主要金属を対象として世界レベルでの評価を実施した。持続的な金属資源の利用は世界全体で取り組むべき課題である一方で、天然資源へのアクセスのしやすさや都市鉱山の規模は国ごとに異なっており、各国で資源利用戦略が検討されている。本研究で開発した手法は、国レベルの解析に適用することで、それぞれの国での持続的な資源利用に対して示唆を与えるものである。

また、金属消費量や廃棄量の長期的な変化については、動的な物質フロー分析による推計が数多く行われている。これらの分析との融合によって本研究で提案した枠組みを動的に展開することで、それぞれの金属の持続的な利用に必要な技術開発の対象や時期を推定し、長期的な資源利用戦略を検討することが可能である。

## 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)

[学会発表] (計3件)

- ① 畑山博樹, 産業から見た都市鉱山の資源供給ポテンシャルの比較検討, 第8回日本LCA学会研究発表会, 2013年3月6日, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス(滋賀県)
- ② 畑山博樹, Sustainability of metals throughout the primary and secondary resources, The 10th International Conference on EcoBalance, 2012年11月22日, 慶應義塾大学日吉キャンパス(神奈川県)
- ③ 畑山博樹, Availability of metal resources above and below the ground, MFA-ConAccount Section Conference 2012, 2012年9月28日, ダルムシュタット, ドイツ

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

畑山 博樹 (HATAYAMA HIROKI)  
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: 30612733