

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22686084

研究課題名(和文)都市鉱山の可採埋蔵量推計手法の構築

研究課題名(英文)Development of methodology for estimating recoverable reserves of urban mine

研究代表者

醍醐 市朗(DAIGO, ICHIRO)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20396774

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円、(間接経費) 3,750,000円

研究成果の概要(和文)：都市鉱山の可採量は、将来の回収可能量であるとし、過去の各素材の使用済み回収率を時系列で評価した。評価年により20%以上の違いがあるとわかった。この違いは、残置される使用済み製品によると考えられ、素材価格が高い時期に回収率が高くなる傾向が見られた。天然資源の資源区分を参考に、都市鉱山を回収性により、可採分、既に散逸したものの2区分の他に、製品と素材それぞれの回収可能性によりもう2区分の4つに分類した。製品として回収されるが素材として回収されないものとして、鉄鋼材に貴金属が混入していることを把握した。これらの知見を総合して、都市鉱山のリサイクル性を阻害している条件が抽出できるツールを作成した。

研究成果の概要(英文)：Recoverable urban mine was defined as the amounts of material stock which can be going to be recycled. End-of-life recycling rates of metallic materials for each year in the past two decades were evaluated. The time-series EoL-RR showed a deviation of more than twenty percent. High EoL-RRs were shown during a period when prices of the material are high, which were expected to be caused by hibernating behavior of material stock. Four category of Urban mine were classified in terms of recoverability; such as materials to be recovered, dissipated materials, materials embedded in EoL products not to be recovered and materials not to be liberated from recovered EoL products. The evidence of the fourth category was found as precious metals in electric arc furnace steel. As summarizing knowledge of recyclability of urban mine, the tree of conditions which required for conducting processes in the chain of recycling from EoL products.

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：使用済み回収率 non-functional recycling hibernating stock 物質ストック 物質フロー分析 トランプエレメント 鋼材中微量元素 観測時点基準使用年数分布

1. 研究開始当初の背景

(1) 鉱物資源の制約は気候変動問題と同様に重要な環境問題として世界的に認識されている。いくつかの元素では、社会中の物質ストック(都市鉱山)量は、地中の可採埋蔵量より既に多いと推計されている。一方で、実際に使用済み製品からリサイクルされている元素はあまり多くない。これは、天然資源の可採埋蔵量と同様、経済性に見合っていないことを意味しており、物質ストックのリサイクル性に関する議論が待たれる。

(2) そのためには、物質ストックの存在形態が把握されなければならない。物質フロー分析(MFA/SFA: material flow analysis/substance flow analysis)によって物質のライフサイクルを通じた把握が有効である。いくつかの素材や物質のMFA/SFAが行われているが、いずれも廃棄時の散逸が考慮されていないか、粗い推計を行っており、物質ストックの把握はされていない。実際に物質ストック量や廃棄時の散逸量を直接観測することが困難であるため、使用済み製品の回収以降の物質フローに関する情報が十分でない。そのため、関連する統計値や周辺データの観測から推定する手法の構築が望まれる。

2. 研究の目的

本研究では、都市鉱山の可採埋蔵量とも言うべきリサイクル可能量と散逸量を、関連する統計値や周辺データの観測から推定する手法の構築を目的とする。これにより、各元素フローの鳥瞰から有効なリサイクル促進方を指摘でき、そのための技術開発や政策提言につながると考える。

3. 研究の方法

(1) 都市鉱山の量を可採(リサイクル)性により区分するため、天然資源の区分を参考に分類を定義した。その中でも、可採な(リサイクル可能な)量を評価するために、動的MFA/SFAにより、過去における各素材の使用済み回収率を推計した。ただ、使用済み回収率は、動的物質フロー分析により推計し、より精緻な推計のために、製品使用年数の時系列変化についても分析した。観測時点基準使用年数分布による表現についても新たな知見を得た。

(2) 近年、non-functional recyclingとも言われる、他素材に混入することで、その元素の機能を果たさずにリサイクルされることがある。その中でも混入先の素材として最も可能性が高いものは鋼材である。そこで、他素材の混入が最も許容される電気炉棒鋼を対象に、鋼材中の微量元素分析により、その実態を把握した。ただし、一般的に鋼中に合金化されていない微量元素を定量分析することは困難であったため、フェムト秒レーザーアブレーションマススペクトル分析により、その存在を確認した。さらに、異なる相に濃

化して存在することも考えられたため、電炉棒鋼におけるCu偏析の実態の把握と、偏析箇所に限った分析を実施した。

(3) これらの知見を総合して、都市鉱山の可採性を向上させるためのボトルネックになっている要因を抽出できるツールを作成した。

4. 研究成果

(1) McKelvyの天然資源に対する資源区分を参考に、都市鉱山の回収性による区分を4つに分類し定義した。ただし、天然資源において区分されていた地質学的確実度の区分に対しては、都市鉱山に対してはMFAを実施することで全て確認できると考え区分しなかった。4分類は、既に散逸したものの、回収可能なもの(可採埋蔵量)、製品として回収されるが素材として回収困難なもの、製品としても回収困難なものとして定義した。

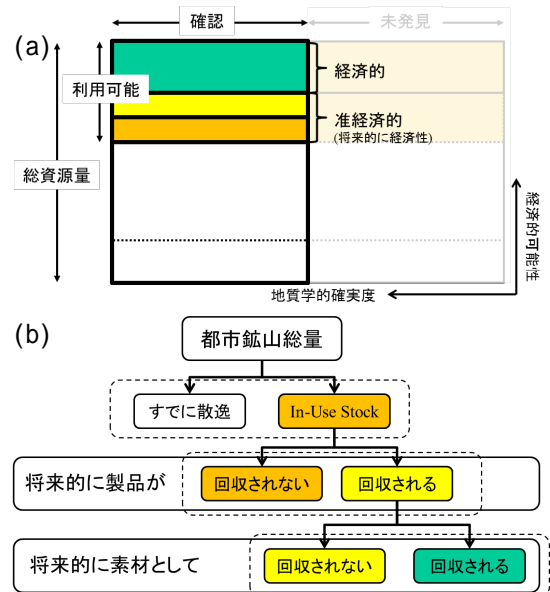


図1 都市鉱山の資源区分の(a)天然資源の区分との対比と(b)都市鉱山からのフローに従った定義

(2) 都市鉱山の可採性は、使用済み製品からの各素材の回収率によるため、使用済み回収率(End-of-life recycling rate)を、動的MFAを用いて推計した。ベースメタルを中心とした素材を対象とし、直近の約20年間について、各年の使用済み回収率を評価した。評価した期間を通して、素材の使用済み回収率は、鉄鋼材、銅素材、アルミニウム素材の順に高かった。それぞれの素材について、評価する年により20%以上もの大きな違いがあることが明らかになった。その他の素材については、評価できた期間が短かったり、用いたデータの確からしさが低かったり、推計された結果が妥当ではないと考えられた。また、動的分析において用いた製品使用年数が不確実性を持つ要因と考えられたため、感度分析をおこなった。各用途区分に含まれる製品に対する法定耐用年数の最大値と最小値

を幅に設定し、各用途区分の平均使用年数を設定した幅の中でランダムになるようモンテカルロ法により、回収率の取りうる幅を確認した。その結果、3素材それぞれに±約10%ポイントの不確実性があることがわかった。(3) 使用済み回収率が、評価年により大きく異なった理由には、素材(スクラップ)価格の変動が考えられた。素材価格が高い時期には、大きな回収率が観測される傾向が見られた。この他にも、素材価格が高騰した2007年や2008年の評価年では、鉄鋼材や銅素材において回収率が100%を超えると推計された。これは、その年に使用済みとなった製品に含まれる素材量以上のスクラップが回収されたことを意味する。1つの理由として、hibernating stockによる時間バッファ効果が挙げられた。価格が高騰することで、平常時には回収されずに残置されている使用済み素材まで回収されたと考えられた。この結果は、今まで理論的に指摘されてきたhibernating stockが、マクロ的にも重要な挙動であることを確かめた初めての成果と言える。

(4) 使用済み回収率について感度分析も実施したが、それ以前に、より精緻に動的物質フロー分析により推計するために、製品使用年数の時系列変化についても分析した。具体的には、建築物について、構造別に時系列での平均使用年数の変化を分析し、動的分析に反映した。この分析に際しては、観測時点基準使用年数分布(図2参照)を用いた。今まで、この分布は、製品の使用年数分布の表現方法として使われてこなかったが、廃棄時点の経済状況が廃棄に対して支配的な決定要因となる製品に対しては有効な表現方法であることを示した。

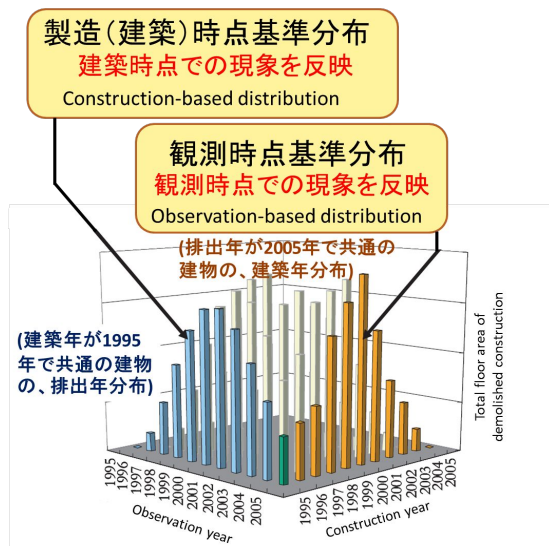


図2 観測時点基準使用年数分布の概念図

(5) 使用済み製品として回収されるものの、素材として単体分離されなかったもののうちの一部は、他素材に混入することが考えられる。実際に鉄鋼材中の銅含有量の半分近く

は、リサイクル時に混入した銅素材由来であると推計された。そこで、銅素材以外の混入可能性についても考えられるため、鋼材中の微量元素分析により、その実態を把握した。電炉棒鋼をフェムト秒レーザーアブレーションによりマススペクトル分析した結果、多くのサンプルにAgとCeが混入していることが明らかになった。また、Cu偏析箇所に限って分析した結果、Auが検出された。Ag, Au, Ceの混入源の特定には、鋼材の元素分析ではなく、原料のスクラップについて、さらなる調査が必要と考えられた。

(6) 推計された素材の使用済み回収率と別途得られた製品回収率を用い、都市鉱山の回収性による4区分の別に、それらの量を推計した。図3に、日本におけるネオジムのケースとして評価した結果を示した。

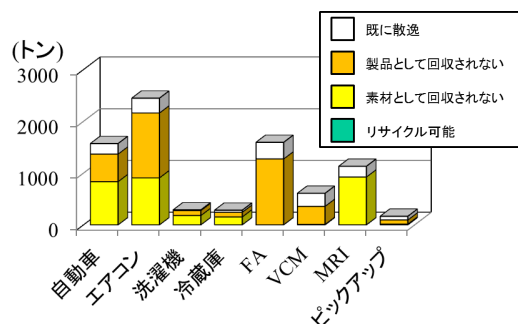


図3 日本におけるネオジムの4区分に従った使用製品別の都市鉱山量

(7) これらの知見を総合して、都市鉱山の可採性を向上させるための条件ツリーを作成した。条件ツリーは、使用済み製品の排出を始点、リサイクルの実行を終点とし、その間の必要なプロセスが大枠になり、各プロセスが実行されるために必要な条件を、条件間のAND/OR性をそれぞれ直列/並列として表現した。それにより、使用済み製品と回収したい素材や物質を与えたときに、その素材や物質がリサイクルされるためには、始点から終点までクリアされる条件が繋がるが必要であるツリー図となった。ツリー内の条件は、物性値等の不変の条件、素材の価格等の外生的に変化する条件、操業条件等の主体的に変更できる条件の3種類を区別した。これにより、各条件の状況を把握し、リサイクルするためには、どの条件がボトルネックになっているか抽出できるツールが作成できた。なお、各条件がクリアされているかどうかを判断するためには、条件によっては容易に判断できるが、条件によっては評価モデルを準備する必要もある。一部の条件においては、判断するための知識が現状では不足していることも明らかになった。これらは、今後の本研究分野の今後の課題が抽出できたとも言えよう。また、図4に示した条件ツリーには、今まで把握した条件を入れ込んだが、網羅性は担保されていない。条件ツリーは冗長性を有しており、評価対象の必要に応じて、

プロセスや条件を追加することができる。

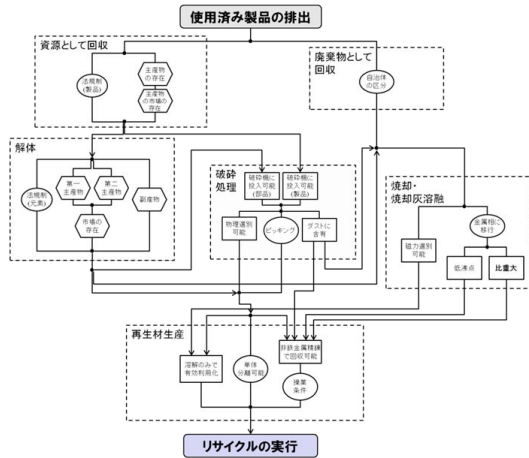


図 4 特定の使用済み製品中の特定の素材 / 物質に対するリサイクル実行のための条件ツリー

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 18 件)

- 1) I. Daigo, Y. Matsuno, Y. Adachi: Substance Flow Analysis of Chromium and Nickel in the Material Flow of Stainless Steel in Japan, *Resour. Conserv. Recycl.*, 54(11), 851-863, (2010)
- 2) H. Hatayama, I. Daigo, Y. Matsuno, Y. Adachi: Outlook of the world steel cycle based on the stock and flow dynamics, *Env. Sci. Tech.*, 44 (16), 6457-6463, 2010
- 3) 許峰旗, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛: 衛星画像を用いた建築・土木における鋼材ストック推計, *鉄と鋼*, 96(8), 517-523, (2010)
- 4) 醍醐市朗, 佐々木正憲, 藤崎克己, 松野泰也, 足立芳寛: 易解体設計の導入による環境負荷削減効果の評価手法の構築, *廃棄物資源循環学会論文誌*, 21(5), 178-191, (2010)
- 5) 張庚玄, 醍醐市朗, 松野泰也: マテリアルフロー分析による日本におけるガラスのリサイクル可能性評価, *日本 LCA 学会誌*, 6(4), 288-294, 2010
- 6) 施維, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛: 日本におけるディスプレイの物質フロー分析, *日本金属学会誌*, 74(11), 758-765, 2010
- 7) 栗木辰悟, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛: 日本における白金族金属のリサイクルポテンシャル評価, *日本金属学会誌*, 74(12), 801-805, 2010
- 8) 醍醐市朗, 張庚玄, 松野泰也: 使用済み自動車からの板ガラスリサイクルの環境性および事業採算性評価, *日本 LCA 学会誌*, 7(1), 72-78, 2011
- 9) F-C Hsu, I. Daigo, Y. Matsuno, Y. Adachi: Estimation of Steel Stock in Building and Civil Construction by Satellite Images, *ISIJ Int.*, 51(2), 313-319, 2011
- 10) 川原健吾, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛: 銅スクラップの回収に対する素材価格の影響分析, *日本金属学会誌*, 75(6), 327-331, 2011
- 11) 吉村彰大, 醍醐市朗, 松野泰也: 鉱石から始まるインジウムの世界における物質フローの構築, *日本金属学会誌*, 75(9), 493-501, 2011
- 12) 川原健吾, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛: 世界における船舶向け鋼材蓄積量と需要量の推計, *鉄と鋼*, 98(4), 135-142, 2012
- 13) H. Hatayama, I. Daigo, Y. Matsuno: Evolution of aluminum recycling initiated by the introduction of next generation vehicles, *Resour. Conserv. Recycl.*, 66, 2012, 8-14
- 14) A. Yoshimura, I. Daigo, Y. Matsuno: Global Substance Flow Analysis of Indium. *Mater. Trans.*, 54(1), 102-109, (2013)
- 15) E. Yamasue, R. Minamino, H. Tanikawa, I. Daigo, H. Okumura, K.N. Ishihara, P.H. Brunner: Quality Evaluation of Steel, Aluminum, and Road Material Recycled from End-of-Life Urban Buildings in Japan in Terms of Total Material Requirement. *J. Ind. Ecol.* 17 (4), 555-565, 2013
- 16) I. Daigo, S. Osako, Y. Adachi, Y. Matsuno: Time-series analysis of global zinc demand associated with steel. *Resour. Conserv. Recycl.*, 82, 2014, 35-40
- 17) H. Hatayama, I. Daigo, K. Tahara: Tracking effective measures for closed-loop recycling of automobile steel in China. *Resour. Conserv. Recycl.* 87, 2014, 65-71.
- 18) 醍醐市朗, 後藤芳一: 鉄鋼材における不純物元素濃度の日中間比較. *鉄と鋼* 100(6), 756-760, 2014

〔学会発表〕(計 30 件)

- 醍醐市朗: 物質フロー分析による鉄鋼材におけるトランプエレメントの濃化可能性評価. 日本鉄鋼協会 第 160 回秋季講演大会, 2010.Sep.25-27. 札幌. 446.
- I. Daigo, W. Shi, Y. Matsuno, Y. Adachi: Substance flow analysis of Dysprosium in Japan. ISIE MFA-ConAccount Meeting 2010. 7-9, Nov. 2010, Tokyo, Japan. I-206
- H. Hatayama, I. Daigo, Y. Matsuno, Y. Adachi: Outlook of the world steel cycle based on the stock and flow dynamics. ISIE MFA-ConAccount

- Meeting 2010. 7-9, Nov. 2010, Tokyo, Japan. B-208
- H. Hatayama, I. Daigo, Y. Matsuno, Y. Adachi: Transition of the Global Material Cycle Induced by the Introduction of Next-generation Vehicles. 9<sup>th</sup> International Conference on EcoBalance. 9-12, Nov.2010. Tokyo, Japan. A3-1350
  - F-C Hsu, I. Daigo, Y. Matsuno, Y. Adachi: Estimation of Steel Stock in Building and Civil Construction by Satellite Image. 9<sup>th</sup> International Conference on EcoBalance. 9-12, Nov.2010. Tokyo, Japan. P-094
  - 斉藤敦己, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛: 亜鉛を考慮した世界大でのカドミウムの物質フロー分析, 第 6 回 日本 LCA 学会研究発表会, 2011.3.2-3.4, 仙台, A2-19 (P3-08)
  - 畑山博樹, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛: 次世代自動車の導入を考慮したアルミニウムの循環利用の評価, 第 6 回 日本 LCA 学会研究発表会, 2011.3.2-3.4, 仙台, A2-20
  - 糸貴博, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛: 次世代自動車普及によるマテリアルフローへの影響と CO2 削減効果評価モデルの構築, 第 6 回 日本 LCA 学会研究発表会, 2011.3.2-3.4, 仙台, A2-26 (P3-53)
  - 吉村彰大, 足立芳寛, 松野泰也, 醍醐市朗: 世界大でのインジウムマテリアルフローの構築, 第 6 回 日本 LCA 学会研究発表会, 2011.3.2-3.4, 仙台, P3-09
  - 松永邦俊, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛: マグネシウムによる他素材の代替を考慮した物質フロー分析, 第 6 回 日本 LCA 学会研究発表会, 2011.3.2-3.4, 仙台, BP3-10
  - 醍醐市朗: 鉄鋼材料と随伴元素のマテリアルフロー分析. 日本鉄鋼協会 第 161 回春季講演大会「資源・環境制約下における鉄鋼材料開発」シンポジウム, 2011.Mar.25-27. 東京.
  - 醍醐市朗: 物質フロー分析によるトランブエレメントの濃化可能性評. 日本鉄鋼協会 第 161 回春季講演大会「資源節減・循環型社会へ向けた素材設計・創製プロセスの展望と課題」シンポジウム, 2011.Mar.25-27. 東京.
  - T. Kume, H. Hatayama, I. Daigo, Y. Matsuno, Y. Adachi: Dynamic modelling of material flow and CO2 emission induced by introducing next-generation vehicles. Life Cycle Management Conference LCM 2011, Berlin, Germany, August 28th-31st, 2011
  - 大方郁巳, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛: 経済状況による廃棄確率の変化を考慮した使用済み素材回収率の推計, 第 7 回 日本 LCA 学会研究発表会, 2012.3.7-3.9, 千葉, 104-105
  - 藤埴新菜, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛: 鉄鋼材スクラップにおける銅濃度分布の推計, 日本鉄鋼協会 第 163 回春季講演大会, 2012.3.28-3.30, 神奈川, 88-90
  - 高橋優人, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛: 使用済み自動車からの素材回収可能性評価, 日本鉄鋼協会 第 163 回春季講演大会, 2012.3.28-3.30, 神奈川, 91-94
  - 大迫 隼, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛: 世界における鉄鋼材に随伴する亜鉛の動的物質フロー分析, 日本鉄鋼協会 第 163 回春季講演大会, 2012.3.28-3.30, 神奈川, PS-13
  - 川原健吾, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛: 世界における船舶および機械向け鉄鋼材需要量の将来推計, 日本鉄鋼協会 第 163 回春季講演大会, 2012.3.28-3.30, 神奈川, PS-14
  - 田口現貴, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛: 夜間光衛星画像と GIS を用いた建築用鋼材蓄積量の推計, 日本鉄鋼協会 第 163 回春季講演大会, 2012.3.28-3.30, 神奈川, PS-19
  - 藤埴世界, 醍醐市朗, 松野泰也, 後藤芳一: の鋼材のダイナミックマテリアルフロー分析, 日本鉄鋼協会 第 165 回春季講演大会, 2012.3.7-3.9, 千葉, PS-25
  - 大方郁巳, 醍醐市朗, 松野泰也, 後藤芳一: 日本における時系列での主要金属素材の回収率の推計, 日本鉄鋼協会 第 165 回春季講演大会, 2012.3.7-3.9, 千葉, 104-105
  - I. Daigo, S. Aoki, H. Okuyama: Possibility of Natural Resource Reduction by Improvement of Closed-Loop Recycling. The Third International Society for Industrial Ecology Asia-Pacific Meeting, October 20-21, 2012, Beijing, China
  - I. Okata, I. Daigo, Y. Adachi, Y. Matsuno: Time-Series Analysis on End-of-Life Recycling Rate of Common Metals in Japan. The Third International Society for Industrial Ecology Asia-Pacific Meeting, October 20-21, 2012, Beijing, China
  - 醍醐市朗, 大方郁巳, 松野泰也, 後藤芳一: 使用済み製品からの鉄鋼材回収率の時系列推計. 日本鉄鋼協会 第 165 回春季講演大会, 2013.Mar.27-29. 東京.
  - I. Daigo, I. Okata, Y. Matsuno, Y. Goto: Time-series Analysis of End-of-life Recycling Rates on Common Metals in Japan. The 7<sup>th</sup> International Society for Industrial Ecology Biennial Conference, Ulsan, Korea, Jun 25-28, 2013.
  - N. Sekine, I. Daigo, Y. Matsuno, Y. Goto:

Dynamic substance flow analysis of neodymium and dysprosium associated with Nd magnets in Japan. The 6th International Conference on Life Cycle Management – LCM 2013. Gothenburg, Sweden. 25-28 August 2013.

- N. Fujitsuka, L. Daigo, Y. Goto, K. Nakajima, Y. Matsuno: Dynamic modeling of World Steel cycle toward 2050. The 6th International Conference on Life Cycle Management – LCM 2013. Gothenburg, Sweden. 25-28 August 2013.
- 醍醐市朗、後藤芳一: 鉄鋼材におけるトランプエレメント濃度の日中間比較. 日本鉄鋼協会 第166回秋季講演大会, 金沢, 2013.Sep.17-19.
- 岩田康平、大方郁巳、醍醐市朗、後藤芳一: 観測児を基準とした使用年数分布を用いた建築物の平均使用年数の時系列変化推計手法の構築. 廃棄物資源循環学会 第24回研究発表会, 札幌, 2013.Nov. 2-4.

〔図書〕(計 1件)

- 原田幸明, 醍醐市朗: 「都市鉱山」開発 – レアメタルリサイクルが拓く資源大国への道, 日刊工業, 東京, 2011

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0件)

取得状況 (計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

醍醐 市朗 (DAIGO, Ichiro)

東京大学・大学院工学系研究科・特任准教授

研究者番号: 20396774

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし