

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760405

研究課題名(和文)都市鉱山開発のためのロバスト最適化に基づくリサイクルモデルに関する研究

研究課題名(英文)A study on recycling model based on robust optimization

研究代表者

大窪 和明 (OKUBO, Kazuaki)

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号：50546744

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,300,000円、(間接経費) 390,000円

研究成果の概要(和文)：将来の使用済み製品の回収量に不確実性がある状況下において、ロバスト最適化手法を応用したリサイクル促進方法を提案した。具体的には、リサイクル企業が将来の回収量に関して、ロバスト最適化に基づいたシナリオ設定を用いることにより、より高い利潤を確保しながら、環境負荷の低減が可能であることを確認した。また、自治体とリサイクル企業とが取引を行う入札市場に、ロバスト最適化の考え方を援用した取引制度を提案し、高い技術(高付加価値な再生資源にリサイクルできるが導入費用が高い技術)を持つリサイクル企業が入札市場で勝てる可能性を高め、社会厚生を改善につなげることを理論的に示した。

研究成果の概要(英文)：The recycling industries face significant uncertainty in quantity of collected used products. Some studies point out variation of collection amount and such uncertainties create disincentives for recycling. We propose a recycler model of small size home electrical appliance with uncertainty in the amount of collection and examine the performance of robust optimization. We confirmed that applying robust optimization increases average profit of recycler. Next, we focused on the possibility that a recycler with more advanced technology will be less likely to be assigned a contract in auction, because their bid will reflect its high fixed cost. We propose an auction model and showed that if a recycler has advanced technology with high fixed cost they will be less likely to be assigned a contract. We proposed a new mechanism based on robust optimization and showed that the proposed mechanism increases the possibility that a recycler with advanced technology will be assigned a contract.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木計画学・交通工学

キーワード：静脈物流計画

1. 研究開始当初の背景

都市鉱山の中でも携帯電話やデジタルカメラなど小型家電製品のリサイクル促進に向けた政策的取り組みは、まだ始まったばかりである。2011年に政府が発表した小型家電製品のリサイクルの促進に関する新制度案においては、入札市場を通して中間処理業者が選ばれ、自治体と契約を結ぶことになっている。再生資源の価格や使用済み製品の回収量には不確実性があり、リサイクルの促進や技術の導入に悪影響をもたらす可能性があるため、新たな制度には、再生資源の価格や回収の変動に対して頑健な制度を考える必要がある。そのためには、これらの不確実性に対するリサイクル企業の反応を明らかにし、不確実性によって生じる問題を確認した上で、効率的な政策的取り組みを明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、使用済み製品の回収量やリサイクル後の再生資源の価格が変動する状況下において、新技術の導入を促進する対策を考える上で有用となる理論的基盤を提供することである。具体的には、不確実性下における最適手法として知られているロバスト最適手法を、本研究の問題意識に援用し、リサイクル企業が、標準的な最適手法とロバスト最適手法のそれぞれに従って行動した場合で最適解の比較を行い、どのような再生資源の価格想定の下に行動することが望ましいか明らかにする。また、リサイクル企業が再生資源を抽出するときに新たに技術を導入する場合を考え、自発的な技術導入を行うための条件を明らかにする。

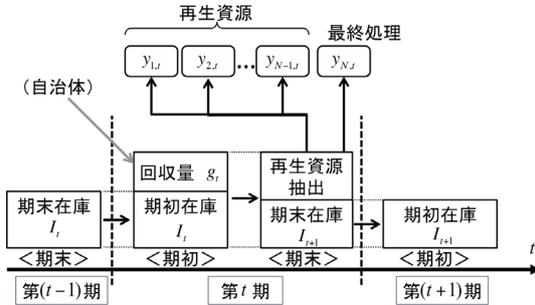
3. 研究の方法

はじめに使用済み製品の回収量変動する状況においてリサイクル企業が、1つの使用済み製品から複数の再生資源を抽出し、販売している基本モデルを考える。具体的には図1(a)に示すように、地方自治体から小型家電リサイクル企業に使用済みの小型家電が引き渡される。小型家電リサイクル企業は、抽出した再生資源は金属メーカーへ、リサイクルできない残渣の部分最終処分場へ運ぶという枠組みを考え、小型家電リサイクル企業の利潤最大化行動を最適化問題として記述する。このとき、使用済み小型家電製品の回収量に不確実性があるとし、不確実性に対する小型家電リサイクル企業の行動を分析する。小型家電リサイクル企業は図1(b)に示すように、1つの使用済み製品から複数の再生資源を抽出し、各再生資源市場へ販売している企業を考えた。その上で、実データを用いた数値シミュレーションを行い、標準的な最適手法を用いて計算した最適解とロバスト最適手法から得られる最適解を比較し、その性質を明らかにする。

次に未だ確立していないリサイクル技術



(a) 回収システムの想定



(b) t期における中間処理業者の行動

図1 モデルの枠組み(発表論文③: 図4)

の導入を考える。小型家電リサイクルの促進に向けた新制度案においては、入札市場を通して中間処理業者が選ばれ、自治体と契約を結ぶことになっていることを考慮し、図1(a)のうち、地方自治体と小型家電リサイクル企業との間の取引制度に着目し、不確実性下における望ましい取引制度について分析する。

4. 研究成果

発表論文③では、図1のような枠組みにおいて小型家電リサイクル企業の行動を定式化した。最初に回収量を名目値で想定した名目値最適化モデルをベンチマークとして、ロバスト最適化手法から得られる最適解と比較した。

本研究では、Bertsimas and Thiele(*Operations Research*, Vol.54, No.1, pp.150-168, 2006)のモデルを小型家電リサイクル企業の行動に応用した。このモデルの特徴は、不確実性に対して最適解が頑健になるように回収量の想定を決める点にある。具体的には、不確実性を伴う変数の将来のシナリオを特徴づける **Budget of Uncertainty** と呼ばれるパラメータを用いて、回収量のシナリオを決め、そのシナリオに従って最適化を行う点が、この手法の特徴である。**Budget of Uncertainty** が大きいほど、将来に対して悲観的なシナリオを想定することになり、将来の回収量が少なく、品切れコストが生じやすい状況を考えて行動することに対応している。逆に、**Budget of Uncertainty** が小さい場合には、楽観的なシナリオを想定しており、将来の回収量が多くなり、品切れが、ほとんど起きないシナリオを想定して行動することに対応している。

前述の名目値最適化手法とロバスト最適化手法を用いて最適解を計算し、得られた計算結果の一部を図2に示す。図2は **Budget of Uncertainty** と小型家電リサイクル企業の利

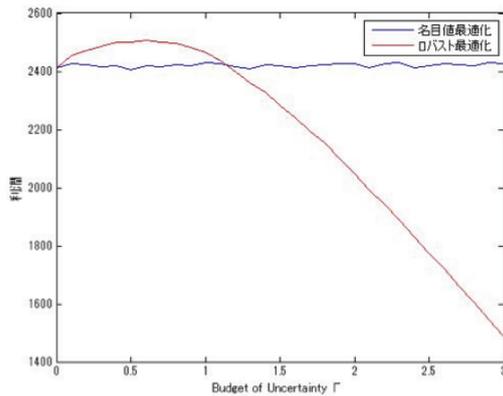


図2 Budget of Uncertainty と利潤の平均値 (発表論文③：図11)

潤との関係を示したものであり、企業が名目値最適化、ロバスト最適化のそれぞれに従って行動したときの利潤を示してある。ただし、実データを参考に数値を設定した上で、回収量の乱数を発生させたシミュレーションを行い、そのときの利潤の平均値を示している。

図2から、名目値最適化においては Budget of Uncertainty を想定していないため、発生させた乱数の違いによる多少のバラツキはあるものの、Budget of Uncertainty に関わらず、一定の利潤が得られていることがわかる。一方、ロバスト最適化から得られる利潤は、Budget of Uncertainty に対して上に凸の形状をしており、利潤の平均値を最大にするような Budget of Uncertainty の水準があることを意味している。すなわち、Budget of Uncertainty を適切に設定することによって、小型家電リサイクル企業は、標準的な名目値最適化よりも、より高い利潤を確保することが出来ることを意味している。また Budget of Uncertainty を大きく設定し、より悲観的なシナリオを想定して行動した場合には、低い利潤しか得られないことがわかる。

また、代表的なリスク指標である Value at Risk (VaR)、Conditional Value at Risk (CVaR) を用いてロバスト最適化を評価した場合にも、利潤の場合と同様に、Budget of Uncertainty に関して凸の形状が見られ、リスクを最小にするような Budget of Uncertainty が存在することが確認された。すなわち、標準的なロバスト最適化で用いられているように最も悲観的な最悪ケースを考慮することが、必ずしもリスクを最小にするわけではないことが明らかになった。

図2の場合の最終処理された量の平均値を見てみると、図3のようになる。図3から、ロバスト最適化モデルの最終処理量は下に凸の形をしており、最終処理量が最も小さくなるような Budget of Uncertainty の水準が存在し、環境負荷を低減させることが可能であることが明らかになった。これは、将来の回収量の変動に備えて抽出量を減らし、在庫量を増やそうとするため、最終処理量も減少するためである。この結果は、回収量の不確実

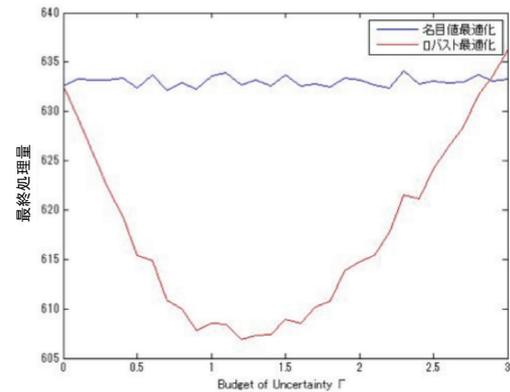


図3 Budget of Uncertainty と最終処理量の平均値 (発表論文③：図13)

性に対して機会制約条件を用いて最適化した場合にリサイクルから排出される残差が減ることを確認した Gaustad et al. (Gaustad, G., Li, P., and Kirchain, R.: Modeling methods for managing raw material compositional uncertainty in alloy production, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol.52, Issue 2, pp.180-207, 2007.) による研究成果と一致する。Gaustad et al. で用いられた手法は機会制約条件式を用いており、関数形が複雑になってしまうため、扱いにくいことや、不確実性のある事象に対して確率分布を把握する必要があるため、本研究で用いているロバスト最適化手法の方が多くの事例に適用しやすいというメリットがある。以上をまとめると、本研究の成果は、次の3点のようにまとめることができる。

- 回収量の不確実性が大きい場合には、回収量を少なく想定することによって、平均的な利潤を大きくできることを確認した。
- 回収量を少なく想定することによって、リサイクルから排出される残渣の最終処理量も少なくなる。
- 標準的なロバスト最適化手法で用いられている最小の回収量（最悪ケース）の想定では、必ずしもリスクが最小になっているわけではなく、より望ましい回収量の想定が存在することが明らかになった。

これらの結果の内、1点目と2点目は、回収量を少なく想定することによって、将来の回収量の減少に備えて在庫を増やし、品切れによる損失を回避したためである。そのため、残渣の最終処理量が少なくなっているが、再生資源の抽出量も少なくなっている。これは、より多くの再生資源を有効活用するという観点から見た場合には問題であり、回収量の変動によって生じる損失を抑えつつ、より多くの有効資源を回収できるような仕組みの提案が今後の課題となった。

そこで、学会発表②の研究を行った。小型家電や PET ボトルなどのリサイクルにおいては、自治体が回収し、再生処理事業者がリサイクルをする形態がとられており、自治体

は入札において、最も高い買い取り価格（または最も低い処理費用）を提示した再生処理事業者と契約する状況にある。また廃棄物の回収量には不確実性があり、入札時に契約した契約量と契約後の実績量との間に乖離が生じる場合がある。学会発表②の研究は、自治体と再生処理事業者との間の取引制度に着目し、この取引制度の改善が、不確実性に対する頑健性や、再生資源の抽出量の増加にもたらす影響を分析した。具体的には、ロバスト最適化手法を援用した取引制度を提案し、自治体とリサイクル企業との間に用いることの効果を分析した。またリサイクル企業が再生資源を抽出するときに技術導入が必要な状況を考えて、リサイクル企業が導入することのできる技術は、企業ごとに異質であり、学会発表②では、

- 企業 H: リサイクル後の製品の付加価値は高いが、大きな固定費用が必要となる高度な技術を導入するリサイクル企業。
- 企業 L: リサイクル後の製品の付加価値は比較的低いが、小さな固定費用しか必要としない技術を導入するリサイクル企業。

の2種類のリサイクル企業が自治体から廃棄物を買取る入札市場に参加しており、自治体は最も高い買い取り価格を提示したリサイクル企業と契約する状況を考える。このとき各リサイクル企業は、自分の持っている技術に応じた期待利潤を最大化するように入札額を決めるものとする。

はじめに、本研究で提案する取引制度を導入していない入札市場を考える。この場合、自治体が最も高い買い取り額を入札したリサイクル企業に廃棄物を引き渡す状況下においては、リサイクル企業 H（高い付加価値を持つが大きな固定費用を必要とする）は、企業 L に比べて、低い入札額を入札する傾向にあり、たとえ企業 L よりも高い付加価値を持つ再生資源を生み出すとしても、企業 H が入札市場において勝てる可能性が小さいことを示した。具体的に、図 4 は学会発表②の研究成果の一例であり、横軸に企業 H の付加価値、縦軸に企業 L の付加価値を示した。図中の 45 度線は2つの企業の付加価値が等しい状況を示しており、45 度線よりも右下の範囲が、今回の企業 H と企業 L との関係に該当する。リサイクル企業 H が入札市場において、自治体に選ばれる範囲は、それぞれの企業の付加価値が図 4 中の CDFE の範囲にあるときであり、図中の OCD の範囲では、例えば、企業 L に比べて高付加価値であっても企業 H は入札において勝つことが出来ない。

次に、本研究で提案したロバスト最適化を援用した取引制度を導入する。具体的には、回収量の不確実性があることによって、契約量と実績量が乖離する場合に、実績量が最小契約量を下回った場合には、最小契約量から乖離した分だけ補助金を支払うという条件を契約に組み込んだ取引制度である。ロバス

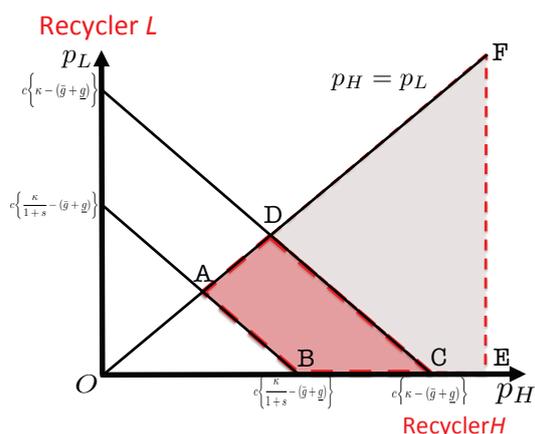


図 4 企業の付加価値と企業 H が勝つ範囲との関係

ト最適化において回収量のシナリオを決めた Budget of Uncertainty が、このモデルにおける最小契約量に当たり、最小契約量はリサイクル企業が契約後に想定する回収量のシナリオを決める役割を持つ。このロバスト最適化を援用した取引制度を用いることによって、高付加価値ではあるが、固定費用の高い再生処理事業者が契約を結べる可能性を高めることができる。具体的には、図 4 中の CDFE に加えて、この取引制度を用いることによって ABCD の範囲でも、企業 H が入札で勝てるようになる。また、このような取引制度は、リサイクルされる廃棄物の量を増やす効果があることが理論的に示された。この研究成果から、ロバスト最適化手法を援用し、本研究で提案した取引制度を導入することによって、高付加価値な技術を持つリサイクル企業が契約をとりやすい状況になり、リサイクル産業として高付加価値な技術の開発が促進されることが期待される。

また、発表論文①、②、④では、人口減少社会において、都市鉱山を利用していく上では、既存の社会基盤を活用していく必要があることを考え、既存の廃棄物処理施設の維持管理更新計画モデルを提案した。このモデルの特徴は、技術や施設の老朽化・陳腐化を維持・管理費用の増大として定量的に表し、新たな施設で用いる技術を選択した上で、更新または廃止するタイミングを内生化した動的な混合整数計画問題として定式化した点にある。また人口や処理技術、維持管理費用などが変動に対する最適解の頑健性を調べた。提案したモデルの頑健性を調べるため、豊富なデータ蓄積を持つ日本の廃棄物処理施設に適用した。その結果、宮城県南部の廃棄物処理群においては、将来の人口変動や処理費用、割引率、計画期間等に対して、更新する施設の順番は頑健であり、10 年程度の計画期間であれば、計画方針の策定のために十分な信頼性を持つことが示された。今後、小型家電のリサイクル技術や実績に関するデータが蓄積されれば、この研究で提案した方

法論から、リサイクル技術促進を考慮した計画方針の策定に有用な情報が提供できるものと期待できる。

また発表論文⑤では、リサイクル企業の都合によって調整できない廃棄物の回収量を外生的回収量として、外生的回収量や再生資源の需要の変動に対して頑健な回収形態を分析した。具体的には、使用済み製品の集荷を行う中間処理業者が市場を通じて回収する場合(市場回収システム)と直接回収する場合(直接回収システム)について、外生的回収量および中間処理業者の販売市場における需要変動が回収量にもたらす影響を明らかにした。具体的には、外生的回収量や需要量の変動に対して、市場回収システムと直接回収システムには次の共通の性質が見られることが確認された。

・外生的回収量の変動によって、販売量よりも総回収量の方が大きく変動する。

・需要変動によって、総回収量よりも販売量の方が大きく変動する。

また2つの回収システムの比較から、次の点が明らかになった。

・市場回収システムよりも直接回収システムの方が、需要変動や外生的回収量の変動に対して総回収量、需要量は大きく変動する傾向がある。

・中間処理業者よりも回収業者の方が低コストで回収できる条件においては、市場回収システムの方が、より多くかつ安定した総回収量が達成できることが明らかになった。

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 7 件)

- ① 吾妻 樹, 大窪和明, 奥村誠, 多時点最適配置モデルに基づく廃棄物焼却施設の更新・廃止戦略の安定性, 土木計画学研究・講演集 [CD-ROM], 査読無, Vol.49, 2014.
- ② 吾妻 樹, 奥村 誠, 大窪和明, 金 進英, 維持・廃止計画のための多時点最適施設配置モデル, 平成 25 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集 [CD-ROM], Vol.50, 査読無, 2014.
- ③ 大窪和明・奥村誠・平聖也, 小型家電回収システムへのロバスト最適化アプローチ, 土木学会論文集 D3, 査読有, Vol. 69, no.5, [CD-ROM], 2013.
- ④ 大窪和明・奥村誠・吾妻樹, 施設の更新を考慮した施設配置モデルの提案と災害廃棄物処理への適用, 土木計画学研究・講演集, [CD-ROM], Vol.47, 2013. 査読無
- ⑤ 大窪和明, 奥村誠, 使用済み製品回収システムの外生的回収量と市場の変動に対する反応, 土木計画学会論文集 D3, 査読有, Vol.68, no.5, [CD-ROM], 2012.

⑥ 大窪和明, 奥村誠, 平聖也, 使用済み小型家電製品に対するロバスト在庫計画アプローチ, 土木計画学研究・講演集, 査読無, Vol.46, [CD-ROM], 2012.

⑦ 平聖也, 奥村誠, 大窪和明, 小型家電リサイクルに対するロバスト在庫計画アプローチ平成 23 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集 [CD-ROM], 査読無, Vol.48, 2012.

[学会発表] (計 7 件)

- ① 吾妻 樹, 奥村 誠, 大窪和明, 金 進英, 維持・廃止計画のための多時点最適施設配置モデル, 平成 25 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 青森県, 八戸市, 2014 年 3 月 8 日,
- ② 大窪和明, 奥村誠, 廃棄物リサイクルにおけるロバスト最適化手法を応用した契約形態, 応用地域学会第 27 回研究発表大会, 京都府, 京都市, 2013 年 12 月 15 日.
- ③ 奥村誠, 大窪和明, 維持・廃止計画のための多時点最適施設配置モデル, 応用地域学会第 27 回研究発表大会, 京都府, 京都市, 2013 年 12 月 15 日.
- ④ 大窪和明, 奥村誠, 吾妻樹, 施設の更新を考慮した施設配置モデルの提案と災害廃棄物処理への適用, 第 47 回土木計画学研究発表会, 広島県, 広島市, 2013 年 6 月 2 日.
- ⑤ 大窪和明, 奥村誠, 平聖也, 使用済み小型家電製品に対するロバスト在庫計画アプローチ, 第 46 回土木計画学研究発表会, さいたま市, 埼玉県, 2012 年 11 月 4 日.
- ⑥ Okubo, K., Okumura, M. Taira, S. A robust optimization approach for small home appliance, MFA Con-Account Section Conference 2012, 概要査読有, Darmstadt, Germany, 2012 年 9 月 27 日.
- ⑦ Okubo, K., A dynamic model for waste management, The infrastructure planning and management association -3rd forum, 2012, Arizona, USA, 2012 年 9 月 5 日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大窪和明 (OKUBO, Kazuaki)

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号: 50546744

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者