

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 28 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420510

研究課題名(和文) 静脈物流における入札市場構造の解明とメカニズム・デザイン

研究課題名(英文) Analyzing market structure and mechanism design in reverse logistics

## 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) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：日本においてペットボトルなどの廃棄物は、自治体が分別・回収し、入札市場を通して契約するリサイクル事業者が選ばれ、リサイクルがなされる。本研究では、この入札市場に着目し、より効率的な静脈物流システムの構築に向けて、市場構造の定量的な把握や入札制度の提案に関する研究を実施した。具体的には、自治体やリサイクル事業者の空間的な位置や廃棄物の特徴が入札額にもたらす影響の定量的な把握、入札市場への条件付き補助金の導入、入札方式の変更や競争条件の変化が、自治体の収入や事業者の入札行動にもたらす影響の分析および最適配分モデルを用いた入札市場の潜在的な収入の把握に関する研究を実施した。

研究成果の概要(英文)：A large amount of used products is recycled by municipalities and recyclers in Japan. Municipality collects and delivers used products to a contracted recycler. Contracts are awarded to recyclers who submit the highest bid for the used products at auction. This study analyzes the used products auctions. First, we estimated the effect of spatial distances between municipalities and recyclers to the valuation of recyclers in the polyethylene terephthalate (PET) bottle auctions by applying structural estimation. Second, we developed models to examine the effect of changes in auction format and introduction of conditional subsidy on the auction with asymmetric recyclers. Third, we examined an efficient resource allocation to maximize Japanese municipalities' revenues from PET bottle recycling auctions and the potential revenue of municipalities by formulating mixed integer programming model.

研究分野：土木計画学

キーワード：静脈物流 入札 リサイクル

### 1. 研究開始当初の背景

ガラスびんなど容器包装や携帯電話など小型家電のリサイクル制度においては、自治体が廃棄物を分別・回収し、入札市場において最も低い受注額（または高い買取額）を入札したリサイクル事業者と契約し、リサイクルが行われる。この制度の下では、自治体の分別・回収にかかる費用負担が重すぎることが課題であり、入札市場を適切に設計し、より効率的な静脈物流を構築する必要がある。

例えば、図1に示すように、容器包装リサイクル法におけるPETボトルはリサイクル事業者が料金を支払うことによって自治体から廃棄物を買って、リサイクルされている。自治体は入札において、最も高い入札額を提示した再生処理事業者と契約する。このとき、廃棄物の回収量には不確実性があり、入札時の契約量と契約後の実績量との間に乖離が生じることが多い。このような状況下では、契約後の実績量が少なくなる可能性も考えられるため、より高度な技術を持つ再生処理事業者が契約しにくい状況にある可能性がある。

近年、入札市場に関する研究は国内外を含めて活発な研究分野の一つである。また海外においては、入札市場の設計に学識経験者が関わり政府に多大な収入をもたらした事例もあり、実務的な重要性も増している。交通計画においては交通渋滞の解消に向けた入札市場の活用に関する理論研究や、物流の供給者を選ぶ際に新たな入札方式を用いることによって物流費用の大幅な削減が期待できることなど数多くの研究成果が蓄積されている。また実証研究も進展しており、同様の入札方式であっても、時間や場所などの条件が異なれば、設計者の意図に反する結果をもたらされることが指摘されてきた。そのため、適切な入札市場の設計のためには、市場構造の把握が必要であるにも関わらず、静脈物流の市場構造は未だ明らかになっていない。

廃棄物は発生しただけ回収されるため、供給量の調整が困難であり不確実性があるという特徴があり、古紙や鉄スクラップの価格変動の大きな要因であることが示されてきた。また、これらの特徴がリサイクル事業者の利潤を低下させており、事業者が将来の回収量を適切に想定することによって利潤の期待値が高まることが示されている。しかし、これらの特徴が入札市場にもたらす影響については未解明であるだけでなく、不確実性に対して頑健な処理計画を導くような入札市場の設計が重要な課題として残されている。

### 2. 研究の目的

(1) 静脈物流における入札市場構造の解明：廃棄物を扱う静脈物流特有の入札市場構造を明らかにする。

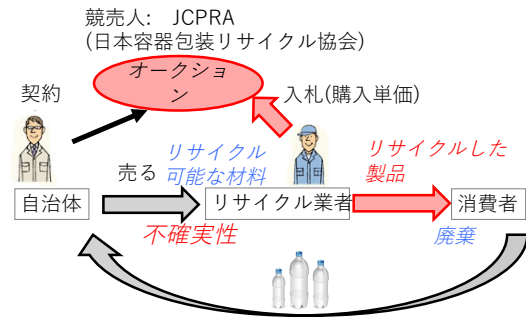


図1 容器包装廃棄物のリサイクルシステム

(2) 実証結果に基づく理論モデルの開発：目的(1)の成果を基にミクロ経済学的な基礎を持つモデルを開発し、入札市場参加者の非対称性や入札制度の変更が落札価格にもたらす影響を明らかにする。

(3) 持続可能な入札市場の設計：入札市場参加者の技術開発や費用削減の努力を促進し、社会的費用を最小にするような入札方式を明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) 静脈物流における入札市場構造の解明：廃棄物を扱う静脈物流特有の入札市場構造を明らかにする。我が国における廃棄物のリサイクルに関するデータは豊富であり、特に容器包装リサイクルに関しては、日本容器包装リサイクル協会がホームページ上で入札に関わるデータを公表している。そこで本研究では、平成22年度から平成26年度下期にかけての市町村の落札額、落札量、実績量、企業の事業数、契約企業の工場数のデータを用いて、ペットボトルの入札額にもたらす要因を定量的に把握する。廃棄物の特徴として、落札時における自治体とリサイクル事業者との契約量と、契約期間終了後に初めて明らかになる実績量との乖離が、廃棄物の供給量の調整が困難であるという特徴を表していると考え、入札額に与える影響を定量的に明らかにする。

入札市場においては、入札制度も入札額に影響をもたらす。ペットボトルの入札市場においては、第一価格封印入札が用いられている。こうした状況を考慮するため、入札者となるリサイクル事業者についてミクロ経済学的な基礎を持つモデルを用いて入札行動を記述し、第一価格封印入札を通して入札額が決まると考えた状況において、シミュレーションを用いた非線形最小二乗法（Simulated Non Linear Least Squares）などを適用し、構造推定を行う。

はじめに、東北地方と関東地方を対象として構造推定を適用する。次に、対象地域を拡大し、日本全国の自治体とリサイクル事業者のペットボトルリサイクルの入札市場を対象に構造推定を適用する。リサイクル事業者

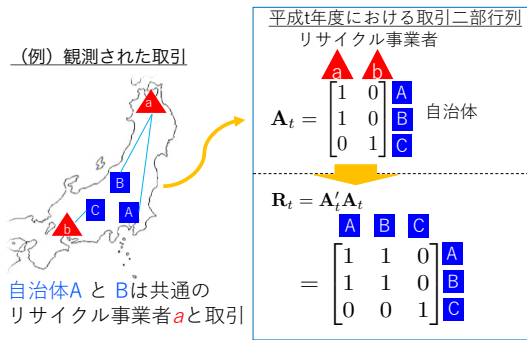


図2 リサイクル事業者と自治体との取引関係からの隣接行列の作成

計算負荷を軽減するために、ネットワーク科学の分野で用いられているコミュニティ抽出法を用いて、取引の関係性が強い事業者と自治体を抽出し、構造推定を適用した。具体的には、図2に示すように各年度におけるリサイクル事業者と自治体との取引関係を2部グラフとして表し、事業者と自治体が取引している場合には1、それ以外の場合を0とするような隣接行列を考える。この隣接行列は図2の行列  $A_t$  として表される。図2の例においては自治体1と2は同一の事業者が落札しているのに対して、自治体3は異なる事業者が落札している。したがって自治体1と2は同じ事業者と契約をしているので関係性が強いといえ、自治体3は関係性が弱いと言える。この隣接行列に  $A_t$  の転置行列をかけると、図2の  $R_t$  のようなネットワークとして表現でき、関係性の強い自治体1と2の間にリンクができ、弱い3にはリンクがないグラフが作成される。このグラフに対して Newman のコミュニティ抽出法を用いて自治体を分割し、関係性の経年的な変化を把握するとともに、分割したコミュニティに対して構造推定を適用する。

(2) 実証結果に基づく理論モデルの開発：

入札額に影響をもたらす要因として、廃棄物の回収量には不確実性により入札時の契約量と契約後の実績量との間に生じる乖離や、リサイクル事業者と自治体との空間的な距離に着目し理論モデルを構築する。特に、契約後の実績量が少なくなった場合には、最低限の利潤が確保できず、より高度な技術を持つ再生処理事業者が契約しにくい状況にある可能性がある。そこで実際のリサイクルシステムを簡略化した図3のようなモデルの枠組みを考え、リサイクル事業者の行動を記述し、実績量がある一定の回収量を下回った場合のみ、補助金で利潤を補償する仕組みを考える。すなわち、リサイクル後の製品の付加価値が高いものの、リサイクル技術導入のための固定費用も高いリサイクル事業者と、製品の付加価値は比較的低いが、小さな固定費用で導入

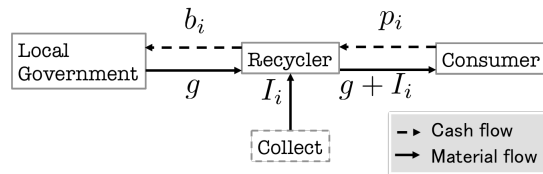


図3 リサイクル事業者の技術に異質性を考慮したモデルの枠組み

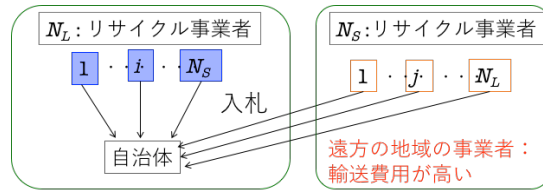


図4 リサイクル事業者の空間的な非対称性を考慮したモデルの枠組み

可能な技術を持つ事業者を考慮し、それぞれの事業者が入札において落札する条件を整理する。これにより、リサイクル事業者のリサイクル後の製品の生み出す単位当たりの利益が他事業者の付加価値より高かったとしても、固定費用が大きいため、入札で勝てない条件を示す。また、実績量がある一定量を下回りリサイクル事業者が計画した利潤を確保できなかった場合に、補助金を出すような条件付き補助金の導入が、固定費用が高く、リサイクル製品の付加価値も高いリサイクル事業者が落札できる確率が高くなることを示す。

また、入札市場を通じた取引が全国的に行われていることを考慮し、図4のように自治体との距離が比較的近いリサイクル事業者と遠い事業者がいる場合に、入札行動に見られる特徴を明らかにする。また、入札者を増やし、競争を促進するような政策が売り手となる自治体の収入にもたらす影響を明らかにするために、自治体からの距離が遠い入札者と近い入札者のそれぞれの数の増減が自治体の期待収入にもたらす影響を明らかにする。また、現状で見られる第一価格封印入札に加えて、第二価格封印入札の下で、入札を実施した場合の期待収入と比較する。

(3) 持続可能な入札市場の設計：

入札方式の変更が、自治体の期待収入や自治体とリサイクル事業者との契約にもたらす影響を明らかにする。ここでは、入札するリサイクル事業者が、その他の事業者の入札額を知らないために、事業者が経営に必要な契約量を確保するために、近隣の自治体で落札できない可能性も考えてより多くの自治体に入札していると考え、リサイクル事業者の全ての入札額が分かったとして、自治体の収入が最大になるように自治体と企業とを組み合わせる場合の自治体の期待収入を

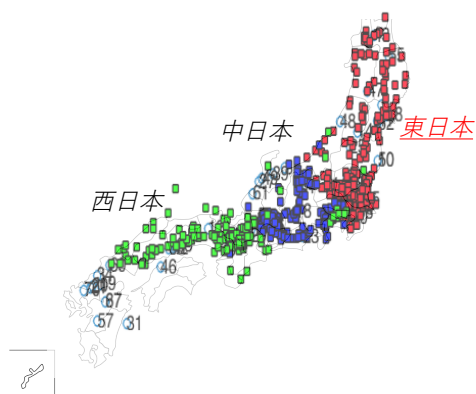


図5 コミュニティ抽出の結果

推計し、入札方式の変更による自治体とリサイクル事業者との契約の組み合わせ変更によって、実現可能な期待収入の増加分を明らかにする。

具体的には各リサイクル事業者の入札額は公表されておらず、落札額と契約した自治体のみが観測されている状況を考慮し、日本全国を対象として、観測されている落札額を被説明変数とする重回帰モデルを推定し、実際に観測されている自治体と事業者以外の組み合わせで契約が実現したときの落札額を推計する。この推定結果を用いて、全ての落札額がわかった下で、自治体の総収入が最大になるように自治体と事業者を組み合わせる混合整数計画問題を定式化し、契約関係のネットワークの特徴を示す。

#### 4. 研究成果

(1) 静脈物流における入札市場構造の解明：  
使用済みペットボトルの収集量を調整することが困難であるために、入札時に市町村によって提示された契約量と、契約期間後にリサイクル企業が実際に引き取った実績量との間に生じた差異が、個々のリサイクル企業の入札額にもたらす影響を定量的に把握した。その結果、関東地方、東北地方について前年度の実績量が契約量を下回ることが、リサイクル事業者が今年度に自治体が販売するペットボトルの評価値を下げていることが明らかになった。また、市町村と企業との空間的な距離が遠くなるほど、リサイクル事業者がペットボトルにつける評価額が低くなることが明らかになった。

次にコミュニティの抽出結果を図5に示す。空間的に離れている自治体と事業者との間も取引が行われており、年度に応じて各コミュニティに含まれる自治体が異なることがわかった。特に、落札後の契約期間が1年間だった平成24年度に比べて、契約期間が半年間に短縮された平成26年度に顕著な違いが見られた。すなわち平成24年度は遠く離れた自治体に対しても落札しているリサイクル事業者が多く見られたのに比べて、平成26年度には比較的、近隣の自治体と事業者と

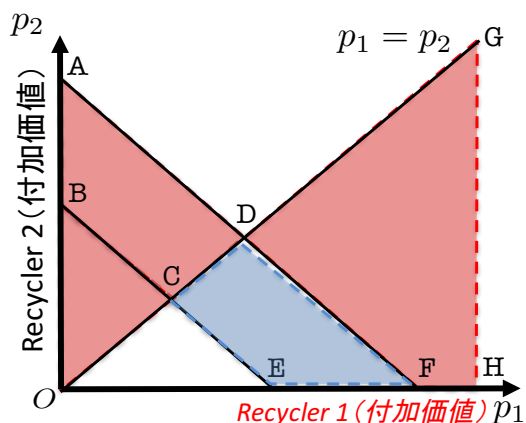


図6 リサイクル事業者の付加価値と事業者1が落札する範囲との関係

の間で取引が行われている傾向が見られた。コミュニティ抽出法の適用から得られたコミュニティの中から、埼玉県内の自治体を含むコミュニティに対して、シミュレーションを用いた構造推定手法を適用し、リサイクル事業者の入札額に影響をもたらす要因を調べた。その結果、平成24年度は距離が長くなるほど、入札額が低くなる傾向が見られた。その一報で、企業規模が大きくなるほど入札額が高くなる傾向があり、規模の経済の存在によってリサイクル処理が効率化されている可能性が示唆された。また、平成26年度の推定結果からは、契約量が大きくなる自治体ほどより高い入札額が提示されている傾向が見られた。これは、契約期間が平成25年度までは1年間であったのが、平成26年度から半年になり、契約期間が短縮されたことによって、平均的な契約量が減少したため、より大きな契約量を提示する自治体の魅力が高まっていたものと思われる。

(2) 実証結果に基づく理論モデルの開発：  
リサイクル後の製品の利益と固定費用がリサイクル事業者によって異なる状況を考える。ここでは、リサイクル事業者1と2が製品のリサイクルによって生み出すことのできる付加価値を、図6中のそれぞれx軸、y軸にとる。本研究で提案した補助金を導入しない場合にリサイクル事業者1が落札する範囲は、図6中の三角形AODと四角形DGHFで表される。すなわち、事業者1が事業者2よりも付加価値が高い場合には、事業者1が落札する(四角形DGHF)。また、ここでは事業者が生み出す付加価値に比例して固定費用も高くなる状況を考えており、事業者2よりも事業者1の生み出す付加価値が高くても、十分に差別化できていない場合には落札できず(三角形ODF)、逆に事業者2の方が付加価値が高い状況でも事業者1は落札することができる(三角形OAD)。次に、実績量がある一定量を下回ったときにだけ、補助金で利潤を補償する場合を考えた場合、事業者1

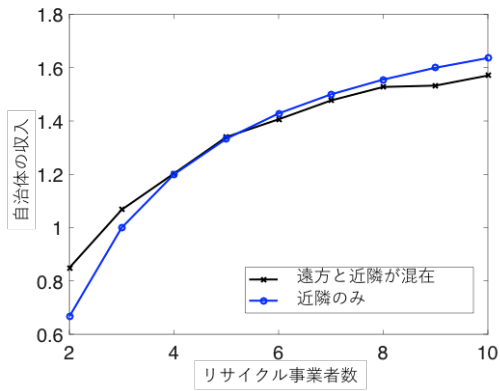


図 7 遠方と近隣の事業者が混在している場合の自治体の期待収入

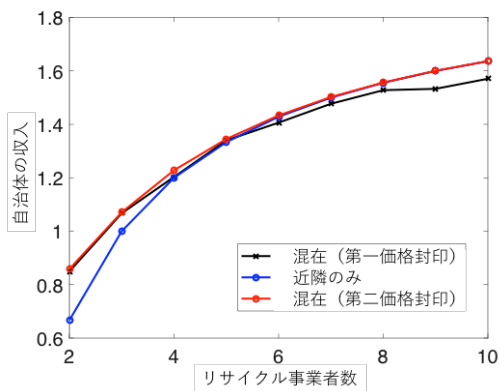


図 8 第一価格封印入札と第二価格封印入札における自治体の期待収入の比較

が落札する範囲は、三角形 OBC と四角形 CEHG となる。このとき、事業者 1 が落札する範囲として、四角形 ABCD が消え、四角形 CDFE が新たに加わり、付加価値の高い状況下において落札できる範囲が広がる。このとき補助金の導入によって、廃棄物の回収量で見た環境負荷は低下することが明らかになった。

(1) の実証結果から、リサイクル事業者と自治体との距離が事業者間で大きく異なるなど事業者間での差異が、自治体（売り手）の期待収入にもたらす影響が明らかになった。そこで、距離が近く入札に有利な条件にあるリサイクル事業者と、そうでない事業者の二種類の事業者が、それぞれ複数存在するものとして、事業者数の変化に対する自治体の期待収入の変化を把握した。また、入札制度を第一価格封印入札、第二価格封印入札のそれぞれに設定したときについて、収入の変化を調べた。その結果、遠方に位置するために輸送費用が大きく、落札額が比較的低くなりしがちな入札者は、評価額に対して比較的高い積極的な入札をすることが確認された。また、第一価格封印入札において、入札者の総数が少ない場合には、遠方であるか近距離であるかにかかわらず入札者を増やすことによって自治体の期待収入を増やすことができるが、ある程度、入札者数が多くなった

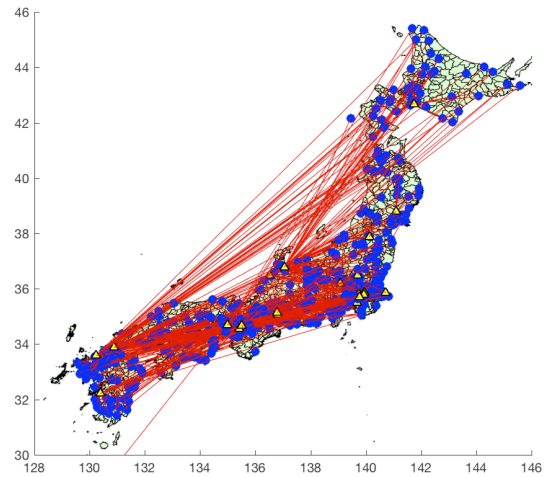


図 9 観測された取引ネットワーク（平成 27 年度上半期）

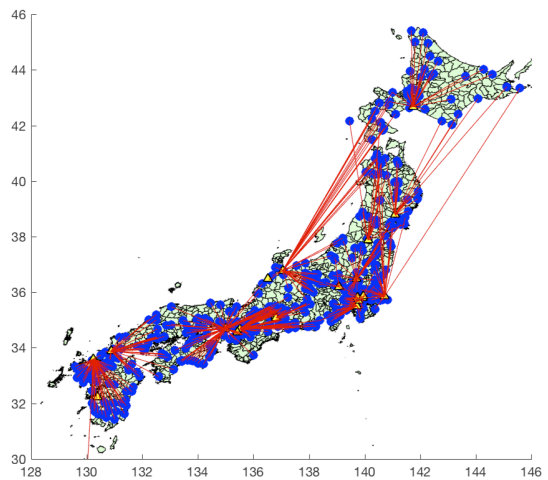


図 10 最適化された取引ネットワーク（平成 27 年度上半期）

場合には、入札額の比較的低い遠方の事業者をあえて入札に含めないことも、自治体の期待収入を増加させる方法として有効であることが明らかになった（図 7）。また、第一価格封印入札よりも第二価格封印入札の方が高い期待収入を期待できる可能性が示された（図 8）。

### (3) 持続可能な入札市場の設計

現在の第一価格封印入札から入札の仕組みを変えることによって期待される自治体の収入の増加を明らかにした。具体的には、離島を除く日本全国を対象として観測されている落札額を被説明変数とした重回帰分析によって落札単価推定モデルを作成し、実際には取引していない自治体とリサイクル事業者が仮に取引した場合の落札単価を推計した。その結果、自治体とリサイクル事業者との緯度・経度から算出した直線距離は、どの推定においても有意水準 5% で有意であり、平成 26 年度上半期を除いて、距離が遠

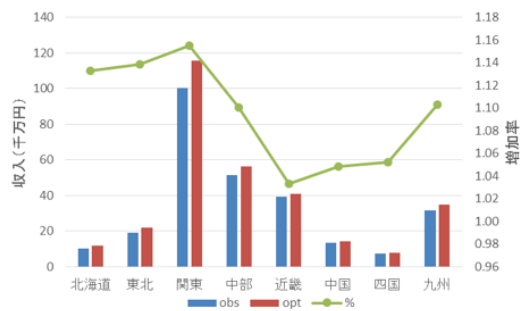


図 11 地方ごとの自治体収入(平成 27 年度上半期)

くなるほど落札単価は低くなることがわかる。また、東北地方・中日本・西日本を表すダミー変数が有意であり、東北地方の自治体は全国的に、低い落札額でペットボトルが販売されていることがわかった。

次に推計された落札額を既知とした下で自治体の収入を最大にするように自治体とリサイクル事業者の取引の組み合わせを決める最適配分モデルを定式化し、年度ごとに適用した結果、全ての年度において自治体収入は増加していることが確認された。特に収入が最も改善した平成 27 年上半期に着目して、観測された契約ネットワークと最適配分上での契約ネットワークを図 9 および図 10 に示した。観測された契約ネットワークでは北海道と近畿、東北と九州のような遠方での取引が多く見られるが、最適化された取引ネットワークでは比較的近隣での取引が多くなっている。これは、取引距離の増加による落札単価の下落を防いだ結果であると考えられる。また、これらの取引ネットワークを比較すると大都市圏に取引が集中していることがわかる。図 11 には観測値と最適化された取引ネットワークの地域ごとの自治体収入を比較したものであり、関東地方の収入が最も多くなっている。これは関東地方では企業数が多く、競争が激しいため、最低限の取引量を確保するため広範囲の取引が観測される。一方、最適配分結果では狭い範囲での取引で、観測値と同等の取引量を維持することが可能になっている。その結果、輸送費の節約が可能になり、関東地方に存在する自治体の収入を上げることに繋がったと考えられる。

## 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)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① 大窪和明, 矢ヶ崎美香, ペットボトルリサイクルオークションにおける効率的資源配分の検討, 土木計画学研究・講演集 (CD-ROM), 査読無, Vol.55, 2017.

- ② 大窪和明, 金子賢太, ペットボトルリサイクルの入札市場における構造推定, 土木計画学研究・講演集 (CD-ROM), 査読無, Vol.52, 2015.

- ③ 大窪和明, 奥村誠, 吾妻樹, 将来予測値の誤差に対する廃棄物焼却施設更新・廃止戦略の安定性-多時点施設配置モデルによる分析-, 土木学会論文集 G(環境), 査読有, Vol.71, 2015.

- ④ 大窪和明, 奥村誠, 吾妻樹, 更新・廃止計画のための多時点最適施設配置モデル, 土木学会論文集, 査読有, Vol.48, 2014.

[学会発表] (計 5 件)

- ① Okubo, K., Mechanism Design In Pet Bottle Recycling Auction, INFORMS Annual Meeting 2016, 2016.11.13-16, Nashville, USA.

- ② Okubo, K., Community Structure and Evaluating the Performance of the Pet Bottle Recycling Auctions in Japan, INFORMS International Meeting 2016, 2016.6.12-15, Hawaii, USA.

- ③ Okubo, K., An empirical study on recyclers' valuation of plastic bottle recycling in auctions in Japan, INFORMS Annual Meeting 2015, 2015.11.1-4, Philadelphia, USA.

- ④ 大窪和明・金子賢太, ペットボトルリサイクルの入札市場における構造推定, 第 52 回 土木計画学研究発表会, 2015.11.18-29, 秋田大学 (秋田県秋田市)

- ⑤ Okubo, K. and Okumura M., Application of robust optimization to mechanism design in waste recycling, INFORMS Annual Meeting 2014, 2014.11.9-12, San Francisco, USA.

## 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

### (4) 研究協力者

織田澤 利守 (OTAZAWA, Toshimori)  
神戸大学大学院・工学研究科・准教授  
研究者番号: 30374987