

災害発生物の頑健な在庫管理方策に関する研究

大窪和明¹・奥村誠²・平聖也³

¹東北大学 東北アジア研究センター 助教 (〒 980-8576 仙台市青葉区川内 41 番地)

E-mail: okubo@cneas.tohoku.ac.jp

²東北大学 東北アジア研究センター 教授 (〒 980-8576 仙台市青葉区川内 41 番地)

E-mail: mokmr@m.tohoku.ac.jp

³東北大学 工学研究科 (〒 980-8576 仙台市青葉区川内 41 番地)

E-mail: s-taira@cneas.tohoku.ac.jp

2011年3月11日の東日本大震災によって発生した膨大な災害廃棄物の処理が問題となっている。災害廃棄物の早急な処理が望まれている中で、有用な資源を含みながらもリサイクル技術の水準が低いため最終処理されていくものも多い。本研究では、将来的に有効利用されそうな災害廃棄物を災害発生物とみなし、リサイクル技術、再生資源価格などの不確実性に対して頑健な災害発生物の在庫管理方策を明らかにする。はじめに自動車、家電に関するリサイクル技術の動向から、将来、資源として有効利用が見込める災害発生物を把握する。さらに将来の不確実性に対するリサイクル企業の見通しや知識に着目し、貴重な資源の在庫を未来に残すための条件を明らかにする。

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災は多くの人命を奪い、膨大な家屋やインフラを破壊した。今回の震災で発生した災害廃棄物は宮城県だけでも1,582万トンと推計されており⁷⁾、宮城県が2007年度に処理した産業廃棄物1,117万トンの約1.4倍にも及ぶ。震災から4ヶ月が経過した現在でも、全ての災害廃棄物を仮置き場に移動できた自治体は少数であり⁷⁾、早急な処理が望まれている。例えば、**図-1**(a)は今年の5月に石巻市の日和山から海側を撮影した様子であり、街の至る所に災害廃棄物が散乱していることがわかる。今年の7月には、街中に散乱していたものが海沿いの道路脇に運ばれ、大きな瓦礫の山となって積み上がっている。

膨大な災害廃棄物の中にはレアメタルなどの有用な資源を含んでいるものも多く、将来、有効利用できる可能性の高いものについては在庫として保管しておく必要がある。しかし、災害廃棄物が処理されていく中で、家電リサイクル法の対象外である小型電子製品のように有用な資源を含みながらも焼却・埋立など最終処理されていくものは多い。これは現在のリサイクル技術の水準が低いことや膨大な災害廃棄物の処理を急ぐため安価な処理方法が選択されているためであると考えられる。また環境省の定める災害廃棄物の処理の指針⁷⁾において、将来のリサイクルの技術水準の高まりによって有効利用できる可能性の高い災害廃棄物に対する十分な考慮がなされているとはいえない。

使用済み家電製品のように、自然鉱石に比べて高い

図-1 石巻市の様子



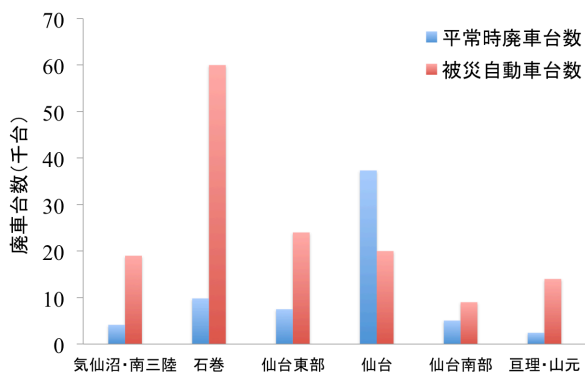
(a)2011年5月の石巻市の様子(筆者撮影)



(b)2011年7月の石巻市の様子(筆者撮影)

濃度でレアメタルなどの資源を含んでいるが、一製品当たりの含有量が少ない廃棄物は、採算のとれる回収方法や数量の確保が課題となっている。災害で発生した使用済み家電製品のような廃棄物を保管し、リサイクル企業が原料を調達しやすくなることによって、更なるリサイクルの促進が期待できる。そこで本研究では、将来的に有効利用できそうな災害廃棄物を災害発生物とみなし、貴重な資源の在庫として未来に残すた

図-2 平常時の廃車台数と被災自動車台数



めの方法を提案する。

災害発生物を在庫として保管していく上で、災害発生物から抽出された再生資源の価格変動やリサイクル技術の開発・普及には不確実性があり、在庫として残した発生物が全てリサイクルされるとは限らない。これらの不確実性に対して不要な災害発生物が増えないように頑健な在庫管理を行い、安定したリサイクルが行われる必要がある。そこで本研究では、再生資源の価格変動やリサイクル技術の開発・普及といった将来の不確実性に対して頑健な災害発生物の在庫管理方を明らかにする。はじめに自動車、家電についてリサイクル技術に関する現在の動向から、将来、資源として有効利用できそうな災害発生物を把握する。さらに、これらの不確実性と在庫方策との関係を考慮した頑健な在庫管理方を求める理論的枠組みを提示し、将来の不確実性に関する知識や見通しの観点から災害発生物を未来に残すための条件を明らかにする。

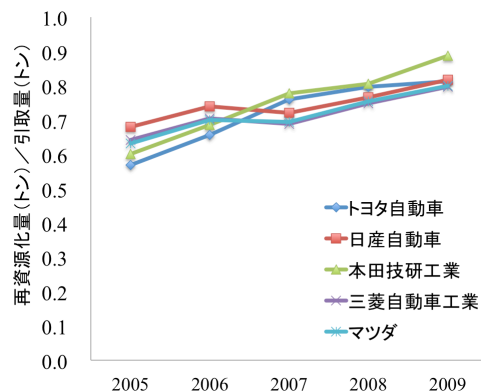
本論文の構成は以下の通りである。第2章において、震災によって発生した災害廃棄物の現状と、将来のリサイクル可能性について述べる。ここでは震災によって発生した自動車、家電の2種類を取り上げる。第3章において、ロバスト最適化を扱った既存研究と問題点について述べた上で、モデルの定式化を行う。

2. 災害廃棄物の現状とリサイクル技術の動向

(1) 被災自動車数と自動車リサイクルの動向

今回の震災で被災した自動車の数は宮城県内だけでも146,000台と推計されている¹⁶⁾。図-2は平常時における1年間の廃車台数と、宮城県が公表した地域別の被災自動車数の推計値¹⁶⁾とを比較したものである。ただし、平常時における1年間の廃車台数は国土交通省東北運輸局が公表している市町村別自動車保有台数¹²⁾

図-3 シュレッダーダスト再資源化率(自動車メーカー別)：シュレッダーダストの引取量に占める再資源化量の割合



に、2009年度における全国の廃車率(6.39%)¹⁴⁾をかけて推計している。図-2からわかるように、仙台を除く全ての地域で平常時における1年間の廃車台数をはるかに超える被災自動車が発生している。

これらの被災自動車は、県が処理主体となって処理が進められることになっており、所有者の確認から廃車手続きまでの作業を県が行う⁸⁾。この間、廃自動車の保管場所は県、市町村が確保し、廃車手続き後は、自動車リサイクル法に従って処分されることになっている。自動車リサイクル法に従った場合、廃自動車は、はじめにフロン類が回収され、その後、解体業者によってエアバッグ類、再利用部品、廃車ガラに分別される。再利用部品等は有用部品として市場で販売される。廃車ガラは破砕業者によって、金属とシュレッダーダストに分けられ鉄スクラップとなる。シュレッダーダストのリサイクルは、各自動車メーカーごとに詳細なデータが公表されており、年々リサイクル率が上昇していることがわかる¹⁴⁾(図-3)。

シュレッダーダストは鉄スクラップになり、電炉メーカーの原料として需要される。東北地方にある全ての電炉メーカー、伊藤製鐵所・石巻工場、JFE条鋼・仙台製造所、東北スチール、東京鉄鋼・八戸工場¹⁴⁾は津波被害を受けた。東京鉄鋼・八戸工場では4月4日の時点で通常通り稼働しているが、JFE条鋼・仙台製造所、伊藤製鐵所・石巻工場では震災から4ヶ月が経過した今でも復旧・復興活動が続けられている。今後、これらの電炉メーカーの生産が再開され、復興需要による需要が伸びることを考えると、自動車のシュレッダーダストは災害発生物とみなすことができる。

(2) 被災家電と家電リサイクルの動向

家電リサイクル法の対象となっている家電4品目(テレビ、エアコン、冷蔵庫・冷凍庫、洗濯機・衣類乾燥機)については、環境省の定めた処理方針に基づいて処理することとなっている⁹⁾。具体的には、自治体が被災した家電のリサイクル可能性を判断した上で、家電

リサイクル法で定められた指定引き取り場所に搬入し、家電メーカーがリサイクルを実施する。リサイクルができないと判断したものについては、災害廃棄物として他の廃棄物と一緒に処理することとなっている。

家電リサイクル法の対象となっていない家電4品目以外の小型電子製品については、PC、有害・危険物を除いては、破碎後、鉄分が回収可能な場合は回収し、焼却が基本となっている¹⁵⁾。しかし、使用済小型家電からのレアメタルの回収及び適正処理に関する研究会による最近の調査¹⁰⁾から、携帯電話、デジタルカメラ、ビデオカメラ、リモコン、DVDプレーヤーにも多くのレアメタルが含まれていることがわかっている。これらの小型電子製品では、自然鉱石に比べてレアメタルの含有濃度が高いものの製品1単位あたりの含有量が少ないため、一度に多くの製品を集めてリサイクルする必要がある。また、上述の研究会では、我が国においては採算性のあるレアメタルの抽出技術が確立されておらず、特に、これまであまり技術開発の行われてこなかった破碎や解体・選別などの中間処理技術に関する検討が必要であると述べており、今後の技術開発の余地はあると思われる。将来、膨大な災害廃棄物から効率良く小型電子製品を回収する技術と合わせて、中間処理技術が発展することによって、小型電子製品は有用な資源になり得ると考えられる。

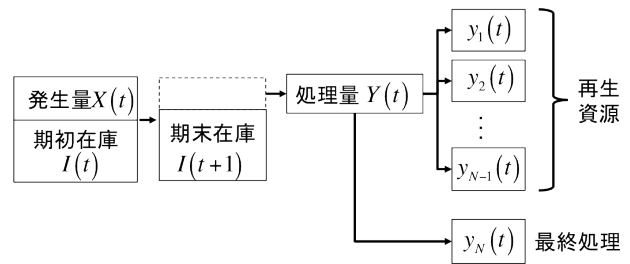
3. 既存研究

リサイクル技術の発展・普及には様々な要因が影響するため、将来的に利用可能なリサイクル技術を正確に把握することは困難である。そのため、将来の利用可能性を考えて災害発生物を在庫として貯蔵する場合、リサイクル技術の進展に関する不確実性に対して頑健な在庫方策を考える必要がある。Ben-Tal and Nemirovski³⁾による研究では、パラメータに不確実性がある中で名目値に基づいて最適化した場合、パラメータの微小な変化に対して最適解が大きく変わることを指摘し、頑健な最適解が得られる計算方法を提案している。

より頑健性のある最適解を得ようとするとき、目的関数の値は低くなるというように最適解の頑健性と目的関数の性能にはトレードオフの関係がある。Bertismas and Sim⁵⁾では、最適解の頑健性の水準を制約条件として与えて最適化が可能なモデルの枠組みを提案し、最適解の頑健性と目的関数の性能との関係を明らかにした。具体的には、不確実性を持つパラメータが複数ある場合に、いくつかのパラメータにどれくらいの頑健性を保持するかという条件を制約として与え、最適化する手法を提案している。

近年、この頑健性を保持する程度を制約条件として

図-4 モデルの枠組み



与え、最適化するという方法は、Adida and Perakis¹⁾²⁾や Bertismas and Thiele⁶⁾によって、在庫を扱った動学モデルに対して適用されている。Bertismas and Thieleでは需要量が外生的に変動し不確実性があるときの頑健な在庫方策を分析している。Bertismas and Thieleでは価格が外生的に与えられていたのに対して、Adida and Perakisでは価格を内生化した場合の解法を提案し、在庫政策と価格との関係について分析している。Adida and Perakis¹⁾が本文中で認めているように、不確実性パラメータと操作変数との積を含む問題に対する計算方法は提示していない。そのため価格やリサイクル費用が不確実性を持ち、不確実性パラメータと操作変数が掛け合わされている場合に頑健性のある最適化という本研究には適用できない。

4. モデルの定式化

(1) モデルの枠組み

本研究では有限かつ連続時間の計画期間 $[0, T]$ を考える。 t 期においてリサイクル企業は、災害発生物の期初在庫量 $I(t)$ と発生量 $X(t)$ の合計から処理量 $Y(t)$ を決める (図-4)。このとき、在庫量 $I(t)$ の時間的変化は、

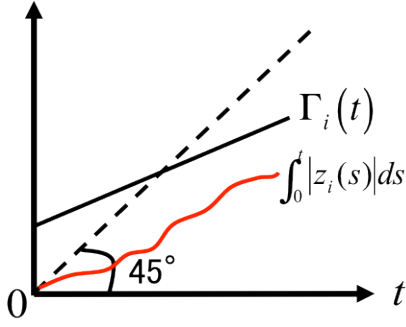
$$\frac{dI(t)}{dt} = X(t) - Y(t) \quad \forall t \in T \quad (1)$$

となる。ここでは発生した災害発生物をリサイクル企業が全て受け入れるため、発生量 $X(t)$ は外生的に決まるとする。 t 期に処理可能な廃棄物が無くなった場合 (期末在庫量 $I(t+1) = 0$)、バックオーダーは生じないとする。また災害発生物の在庫には容量制限があるものとし、 t 期において最大在庫量 $\bar{I}(t)$ だけの在庫量が保管できるとする。以上をまとめると、在庫量 $I(t)$ に関する制約条件式は、

$$0 \leq I(t) \leq \bar{I}(t) \quad \forall t \in T \quad (2)$$

となる。ここで最大在庫量 $\bar{I}(t)$ は計画期間を通じて外生的に変化するとし、現在、仮置き場として使用されている場所が、将来的に使用できなくなるといったことを表現できる。

図-5 $\Gamma_i(t)$ と $z_i(t)$ の関係



次に対象とする災害発生物には、 $N-1$ 種類の再生資源が含まれているとし、処理量 $Y(t)$ から各再生資源 i の抽出量 $y_i(t)$ を決める。ただし、 $y_N(t)$ は焼却、埋め立てなどの最終処理される量とし、再生資源として抽出されなかった全ての部分が含まれるとする。すなわち、

$$\sum_{i=1}^N y_i(t) = Y(t) \quad \forall t \in T \quad (3)$$

とし、全ての種類の再生資源と最終処理量 $y_N(t)$ を足したものが、処理量に等しいとする。このとき、災害発生物に含まれる各再生資源は上限があるものとし、

$$0 \leq y_i(t) \leq s_i Y(t) \quad \forall i \in N, \forall t \in T \quad (4)$$

とおく。ただし $s_N = 1$ とし、全ての再生資源の抽出量がゼロであったときには処理量の全てをリサイクルでなく最終処理すると仮定する。

t 期に災害発生物から抽出された再生資源 i の価格を $p'_i(t)$ とおく。ここで多くのレアメタルに見られるようにリサイクル企業に価格支配力はないものとし、再生資源の価格は外生的に決まると仮定する。また規模に関して収穫一定の技術を考え、抽出費用は抽出量の変化に対して線形に変化すると仮定すると、再生資源 i を $y_i(t)$ だけ売ることによって得られる単位収益は、 $p_i(t)y_i(t)$ となる。ただし、 $p_i = p'_i(t) - c_i(t)$ とし、 $c_i(t)$ は抽出費用である。ここではリサイクル技術の進展が抽出費用の低下として表され、技術の進展については不確実性があるとし単位収益 $p_i(t)$ は外生的に変動すると仮定する。再生資源 i の単位収益 $p_i(t)$ が変動する範囲を $[\bar{p}_i(t) - \hat{p}_i(t), \bar{p}_i(t) + \hat{p}_i(t)]$ と仮定する。ここで再生資源 i の単位収益 $p_i(t)$ を基準化した

$$z_i(t) = \frac{p_i(t) - \bar{p}_i(t)}{\hat{p}_i(t)} \quad \forall i \in N, \forall t \in T \quad (5)$$

を考える。ただし、 $z_i(t) \in [-1, 1]$ である。ここで $z_i(t)$ を

$$\int_0^t |z_i(s)| ds \leq \Gamma_i(t) \quad \forall i \in N, \forall t \in T \quad (6)$$

とおく。ただし、パラメータ $\Gamma_i(t)$ は既存研究で不確実性予算 (budgets of uncertainty) と呼ばれているパラ

メータであり¹⁾、 $\Gamma_i(t) \leq 1$ とする。式 (6) の概念図を図-5 に示す。

計画開始期間 0 期から t 期まで全ての期において最も極端なケースが続けて起こった場合は $|z_i(s)| = 1$ であるため、図-5 中の 45 度線上を動き、式 (6) の左辺は t となる。しかし実際には極端なケースばかりが起きるのは稀であり、不確実性パラメータの値は図-5 中の赤線で示したように 45 度線の下をとることが多いと考えられる。このとき時間が経つにつれて、不確実性パラメータがとる値は 45 度線から離れていくため、不確実性予算 $\Gamma_i(t)$ を考えることによって、頑健性の程度を調整することができる。現実には、現在から時間が経過するにつれて、リサイクル技術開発に関する見通しや再生資源の価格変動に関する知識が獲得でき、不確実性が減少することに対応する。

以上から、リサイクル企業の利潤最大化行動は次の最適化問題 [P] となる。

$$\max_{\mathbf{y}, \mathbf{Y}, \mathbf{I}} \sum_{i=1}^N \int_0^T p_i(t) y_i(t) dt - \int_0^T h I(t) dt \quad (7)$$

subject to

$$\frac{dI(t)}{dt} = X(t) - Y(t) \quad \forall t \in T \quad (8)$$

$$0 \leq I(t) \leq \bar{I}(t) \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^N y_i(t) = Y(t) \quad \forall t \in T \quad (10)$$

$$0 \leq y_i(t) \leq s_i Y(t) \quad \forall i \in N, \forall t \in T \quad (11)$$

ただし、 $\mathbf{y} = (y_i(t))_{i \in N, t \in T}$ 、 $\mathbf{Y} = (Y(t))_{t \in T}$ 、 $\mathbf{I} = (I(t))_{t \in T}$ であり、 h は在庫費用を表すパラメータである。式 (7) は N 種類の再生資源を売ることによって得られる収益から、在庫費用 $I(t)$ を引いた利潤であり、これを全期間について足したものを最大化するように行動する。式 (8) 中の発生量 $X(t)$ は、発生した災害発生物を全て引き取るとし、外生的に決まる。意志決定はオープンループで行われるとし、計画開始期 $t = 0$ のときに、0 期から T 期まで各期の在庫方策、廃棄物の処理量、再生資源の抽出量を決める。

Adida and Perakis¹⁾では、操作変数と不確実性パラメータが分離できる場合について計算している。しかし最適化問題 [P] のままでは、リサイクル企業の操作変数である抽出量 $y_i(t)$ と、不確実性パラメータである再生資源の単位収益 $p_i(t)$ との積で表されるため、これらを分離することはできない。また (6) で定義される不確実性予算が最適化にどう関わってくるかについても明確ではないため、次節では式 (6) を明示的に制約条件に含む問題 [P] のロバスト最適化問題を導く。

(2) ロバスト最適化モデル

問題 [P] の双対問題 [D] は、

$$\min_{\lambda, \rho, \mu, \phi} \int_0^T (\rho(t)\bar{I}(t) + \lambda(t)X(t))dt - [\lambda(t)I(t)]_0^T \quad (12)$$

subject to

$$\frac{d\lambda(t)}{dt} \leq \rho(t) + h \quad \forall t \in T \quad (13)$$

$$\mu(t) + \sum_{i=1}^N s_i \phi_i(t) \leq \lambda(t) \quad \forall t \in T \quad (14)$$

$$p_i(t) \leq \phi_i(t) + \mu(t) \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (15)$$

$$\rho(t) \geq 0 \quad \forall t \in T \quad (16)$$

$$\phi_i(t) \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (17)$$

となる。ここで $\lambda = (\lambda(t))_{t \in T}$ は式 (8) に対応するラグランジュ乗数であり、災害発生物の発生によって生じる費用と解釈できる。 $\rho = (\rho(t))_{t \in T}$ は式 (9) に対応し最大在庫の費用、 $\mu = (\mu(t))_{t \in T}$ は式 (10) に対応し処理することの潜在価値、 $\phi = (\phi_i(t))_{i \in N, t \in T}$ は式 (11) に対応し災害発生物に含まれる再生資源の潜在価値と解釈できる。

目的関数 (12) は最大在庫と発生による費用と解釈できる。制約条件式 (13) に対応するラグランジュ乗数は在庫量 $I(t)$ であり、最大在庫の費用と在庫費用の和が発生によって生じる費用の時間変化よりも大きいとき在庫量はゼロとなる。制約式 (14) に対応するラグランジュ乗数は処理量 $Y(t)$ であり、災害発生物を処理して再生資源を抽出することの潜在価値が、災害発生物の発生によって生じる費用 $\lambda(t)$ よりも小さければ、処理量はゼロである。制約式 (16) に対応するラグランジュ乗数は再生資源の抽出量 $y_i(t)$ であり、再生資源 i の単位収益 $p_i(t)$ が処理と再生資源 i の含有量の潜在価値の合計よりも単位収益が小さい場合に再生資源は抽出されないが、それ以外の場合には抽出される条件を表している。

次に、再生資源の価格 $p_i(t)$ が含まれている式 (15) について頑健性を考える。式 (15) に式 (5) を代入して、 $[0, t]$ 期間で積分すると

$$\int_0^t z_i(s)\hat{p}_i(t)ds \leq \int_0^t (\phi_i(s) + \mu(s) - \bar{p}_i(t))ds \quad \forall i \in N, \forall t \in T \quad (18)$$

となる。式 (18) の左辺は不確実性パラメータを含む項であり、左辺が最も大きくなったときに式 (18) を満たすことができれば良い。そこで式 (18) の左辺を最大化するような $z_i(s)$ を見つけるためのサブ問題 [S-P] を考える。

$$\max_{z_i(s)} \int_0^t z_i(s)\hat{p}_i(t)ds \quad (19)$$

subject to

$$\int_0^t z_i(s)ds \leq \Gamma_i(t) \quad (20)$$

$$0 \leq z_i(s) \leq 1 \quad \forall s \in [0, t] \quad (21)$$

$$(22)$$

サブ問題 [S-P] の双対問題 [S-D] は、

$$\min_{\omega_i(t), r_i(s, t)} \omega_i(t)\Gamma_i(t) + \int_0^t r_i(s, t)ds \quad (23)$$

subject to

$$\hat{p}_i(t) \leq \omega_i(t) + r_i(s, t)ds \quad \forall s \in [0, t] \quad (24)$$

$$\omega_i(t) \geq 0 \quad (25)$$

$$r_i(s, t) \geq 0 \quad \forall s \in [0, t] \quad (26)$$

となる。双対定理よりサブ問題の双対問題 [S-D] の最適解における目的関数 (23) の値は、主問題 [S-P] の目的関数 (19) の値に等しいことを利用すると、最適化問題 [D] に式 (6) の不確実性予算を考えたロバスト最適化問題 [R] は次のように定式化できる。

$$\min_{\lambda, \rho, \mu, \phi} \int_0^T (\rho(t)\bar{I}(t) + \lambda(t)X(t))dt - [\lambda(t)I(t)]_0^T \quad (27)$$

subject to

$$\frac{d\lambda(t)}{dt} \leq \rho(t) + h \quad \forall t \in T \quad (28)$$

$$\mu(t) + \sum_{i=1}^N s_i \phi_i(t) \leq \lambda(t) \quad \forall t \in T \quad (29)$$

$$p_i(t) \leq \phi_i(t) + \mu(t) \quad \forall i \in N, \forall t \in T \quad (30)$$

$$J_i(t) \leq \int_0^t (\phi_i(s) + \mu(s) - \bar{p}_i(t))ds \quad \forall i \in N, \forall t \in T \quad (31)$$

$$J_i(t) = \omega_i(t)\Gamma_i(t) + \int_0^t r_i(s, t)ds \quad (32)$$

$$\rho(t) \geq 0 \quad \forall t \in T \quad (33)$$

$$\phi_i(t) \geq 0 \quad \forall i \in N, \forall t \in T \quad (34)$$

$$\omega_i(t) \geq 0 \quad \forall i \in N, \forall t \in [0, T] \quad (35)$$

$$r_i(s, t) \geq 0 \quad \forall i \in N, \forall s \in [0, t], \forall t \in [0, T] \quad (36)$$

ただし $\lambda \in (\lambda(t))_{t \in T}, \mu \in (\mu(t))_{t \in T}, \rho = (\rho(t))_{t \in T}, \phi = (\phi(t))_{t \in T}$ とする。ロバスト最適化問題 [R] では、式 (31) によって頑健性を調整することが可能であり、時間が経過するにつれてリサイクル企業が技術に関する見通しや再生資源の価格変動に関する知識の獲得と在庫方策との関係を明らかにすることができる。

5. おわりに

本研究では、東日本大震災で発生した災害廃棄物の現状およびリサイクル技術の動向を整理した。これにより、最終需要先が被災したシュレッダーダストや家電リサイクル法の対象外である小型家電製品は今後のリサイクル可能性が高く、膨大な災害廃棄物の中から効率的に分別する技術の開発と合わせて考えれば、将来的に有用な資源になり得ると考えられる。また一度に膨大な災害発生物が発生したため、多くの災害発生物が有効活用されないまま処理されていく中で、将来の不確実性に関する知識や見通しの観点から、災害発生物が在庫として貯蔵され、将来に有効活用されるための条件を明らかにする。本論文ではそのための理論的枠組みを提案した。研究発表会では、具体的な分析、および数値計算例について発表する。

謝辞： 本研究の一部は学術振興会、科学研究費補助金、若手研究（B）（課題番号:22760381）を受けた研究の一部である。記して感謝の念を表します。

参考文献

- 1) Adida, E. Perakis, G.: A robust optimization approach to dynamic pricing and inventory control with no backorders, *Mathematical Programming*, Vol. 107, pp.97-129, 2006.
- 2) Adida, E. Perakis, G.: Dynamic pricing and inventory control: robust vs. stochastic uncertainty models ? computational study, *Annals of Operations Research*, Vol. 181, pp.125-157, 2010.
- 3) Ben-Tal, A. Nemirovski, A.: Robust convex optimization, *Mathematics of Operations Research*, Vol. 23, No.4, pp769-805, 1998.
- 4) Ben-Tal, A. Nemirovski, A.: Selected topics in robust convex optimization, *Mathematical Programming*, Vol. 112, No.1, pp.125-158, 2008.
- 5) Bertsimas, D. Sim, M.: The price of robustness, *Operations Research*, Vol. 52, pp.35-53, 2004.
- 6) Bertsimas, D. Thiele, A.: A robust approach to inventory theory, *Operations Research*, Vol. 54, pp.150-168, 2006.
- 7) 環境省：東日本大震災について（平成 23 年 7 月 29 日 15 時現在）、2011. (<http://www.env.go.jp/jishin/index.html>)
- 8) 環境省：東北地方太平洋沖地震により被災した自動車の処理について、2011. (<http://www.env.go.jp/jishin/index.html>)
- 9) 環境省：被災した家電リサイクル法対象品目の処理について、2011. (<http://www.env.go.jp/jishin/index.html>)
- 10) 環境省、経済産業省：使用済小型家電からのレアメタルの回収及び適正処理に関する研究会 とりまとめ、2011.
- 11) 環境省：平成 22 年版環境循環型社会生物多様性白書、2010.
- 12) 国土交通省 東北運輸局ホームページ；市町村別保有車両数 (<http://www.pref.miyagi.jp/haitai/kyougikai/index.htm>)
- 13) 武田朗子：不確実性下での最適化—ロバスト最適化を中

心に一、オペレーションズ・リサーチ：経営の科学, 51 巻 7 号, pp420-423, 2006.

- 14) 日刊市況通信社：鉄スクラップ関連資料集 (2010 年版), 2010.
- 15) 廃棄物資源循環学会, 災害廃棄物対策復興タスクチーム：災害廃棄物分別処理マニュアル Ver2, 2011.
- 16) 宮城県 宮城県災害廃棄物処理対策協議会ホームページ, (<http://www.pref.miyagi.jp/haitai/kyougikai/index.htm>)

(2011.8.5 受付)