

# 回収インセンティブを考慮した閉ループ型 ロジスティクスシステムにおける回収方策

若尾 良男

## 1. はじめに

近年、閉ループサプライチェーンマネジメント (Closed Loop Supply Chain Management) が産業界や研究分野で大いに関心がもたれている。閉ループサプライチェーンは、原材料の調達、製造、流通というチェーンの順向的なフローをもつロジスティクスと使用済み製品や部品を回収し処理して再利用するという逆向的なフローをもつリバースロジスティクスを含んだ閉じたループを形成するサプライチェーンである。このような閉ループサプライチェーンシステムに対する管理は持続可能な社会実現の潮流の中で重要性を増しており、製造と再製造を結合した製造システムの管理を含めた統一的な管理が求められている。さらに、リバースロジスティクスを考えると、回収品を再製造に値する製品にするための処理費用や、市場に出回っている中古品を回収するための回収費用の管理も閉ループサプライチェーンマネジメントを考える上で重要となる。

製品や部品の回収費用に関する研究については、Savaskan ら (2004) が製造者、リテイラー、サードパーティーからなる中古品回収のためのリバースチャネルの構造の選択問題を考察したことに注目される。ここでは中古品回収において、製造者が顧客から直接回収する場合、販売チャネルをもつリテイラーに適切なインセンティブを与えて回収する場合、そして、サードパーティーに回収活動を外注する場合という3つの回収オプションを選択できると仮定して、製造者を Stackelberg 戦略のリーダーとする分散型意思決定システムとしてモデル化した。その結果、リテイラーのような顧客に近い業者が製品回収活動にもっとも効果的な業者であることを示した。さらに、Savaskan ら (2006) は中古品を消費者から直接回収するシステムと間接的に製品回収するシステムをモデル化し、製造者が複数の競争的リテイラーを通して新製品を流通し再利用するときの製造者のリバースロジスティクスチャネル構造の選択を考えた。

また、Dobos ら (2011) は、供給業者が購入業者に製品を供給し、購入業者は譲渡されたデポジットと引き換えに、再製造のために使用済みの製品を供給業者に戻すというリバースロジスティクスシステムにもとづく経済的ロットサイズの問題を研究した。このシステム

に関連するコストと需要、製造率や発注率を与えて得られるコスト最小発注サイズと再製造率が購入業者と供給業者に対して決定され、供給業者が新規製品の製造の後に中古品の再製造を行う場合と製造の前に再製造を行う場合の最適ロットサイズと最適再製造（回収）率の決定を考えた。さらに、供給業者と購入業者を含む全体システムにおけるリバースロジスティクスシステムに関連する費用の総費用を最小化する、購入業者の最適発注サイズに見合うデポジット額と回収率を求めた。供給業者はデポジット額と再製造率を提供し、購入業者は発注ロットを設定することによって対応する交渉方法を考えた。さらに、Dobosら（2013）は、上述の研究を拡張し、再製造可能な中古品の逆フローを統合した結合経済的ロットサイズ（JELS: joint economic lot size）を考察した。そこでは、購入業者が供給業者に製品を発注し、使用後に再製造可能な品を回収し、一方、供給業者は需要に見合うように新規製品の製造や購入業者から受け取る中古品の再製造を行うサプライチェーンシステムを考察対象とし、総費用を最小にする供給業者と購入業者の最適結合ロットサイズと中古品の最適回収率を決定する問題を考えた。その際、購入業者の購入費用は発注量に応じた割引契約に従って支払われる状況を考え、その契約の下で供給業者と購入業者のNash均衡決定によって割引契約の最適パラメータを求めた。

また、Pishchulovら（2012）は、供給業者と購入業者を含むリバースロジスティクスシステムの枠組みの中で、Dobosら（2011）と同様に供給業者と購入業者のそれぞれに関連する総費用と供給業者と購入業者の両者を考慮した全体システムの総費用を最小にするような最適なロットサイズと再製造率を決定し、量的割引によるサプライチェーンの協調問題を考察した。さらに、Pishchulovら（2014）は、供給業者と購入業者を含むリバースロジスティクス閉ループサプライチェーンの下で供給業者と購入業者の量的割引をとまなう契約による協調関係を考察した。そこでは、購入業者の支払い可能額をDolan（1987）における2つの費用要素と3つの要素をもつ量的割引について考察した。

リバースロジスティクス（Reverse Logistics）の問題においては、経済的発注量（EOQ: economic order quantity）問題の枠組みで考察したRichter（1994）の先駆的研究が有名である。若尾（2009）はDobos・Richterモデル（2004）を適用して、リサイクル品を利用した製造が終了しても新規材料・部品による製造が引き続き継続する場合に、回収されたりリサイクル可能な中古品の貯蔵施設での貯蔵を許し、新規材料・部品による製造量とリサイクルによる製造量を決定するために、関連する諸費用の総和を最小にする、リサイクル可能な中古品からどの程度の割合で製造工程に回すかの最適リサイクル率を求めた。

本論文では、若尾（2009）が考察したEOQの枠組みでのリバースロジスティクスシステムにおいて、製造部門とリサイクル部門をもつ一製造企業体で、単一の製品を製造し、市場に供給し、そこから中古品を回収し再製造する製造リサイクルシステムを考え、このシステムに回収活動を促進するためのインセンティブを導入する。2節で、本論文で考える製造部

門とリサイクル部門をもつ企業のリバースロジスティクスシステムをモデル化し、このシステムで考えるシステムパラメータと費用パラメータを設定する。さらに、回収率をインセンティブ量の線形的な効果として定式化する。3節では、製造部門とリサイクル部門で生ずる費用を求め、インセンティブ率を含む総費用を求める。4節で製造・再製造に関わる総費用を最小とする最適なインセンティブ率を導出し、いくつかの数値例を示す。5節でむすびを述べる。

## 2. 製造リサイクルシステム

### 2.1 製造リサイクルシステムの概要と仮定

市場の需要を満たすために単一の製品について新規材料・部品を用いて製造するとともに、リサイクル部門で市場から回収した中古品から新規材料・部品と同等な品質をもつリサイクル可能品に処理し部品を用いて再製造している製造部門と、回収促進のためのインセンティブ費を費やし、市場に出回っている中古品を回収し再製造のために回収品を処理するリサイクル部門とからなる製造企業における閉ループ型ロジスティクスシステムを考える。製造された製品は市場に投入される前に製品貯蔵施設  $S_p$  に保存された後、市場に投入される。製品の中古品は市場から回収されるが、この際、製造部門はリサイクル品の利用の増大のために中古品の回収を促進するためのインセンティブな費用を投入し回収を促す。回収された中古品は中古品貯蔵施設  $S_U$  に一時保存され、リサイクル処理により、リサイクル可能なりサイクル品はリサイクル品貯蔵施設  $S_R$  に保存され、そうでない中古品は廃棄される (図1)。このような製造リサイクルシステムにおいて以下のような製造システムパラメータを考える。

$P$  (ユニット/時) : 製造率,

$D$  (ユニット/時) : 需要率 ( $P > D$ ),

$T_m$  (時間) : 新規材料・部品を用いて製造する時間 (製造時間),

$T_r$  (時間) : 新品と同等の品質をもつリサイクル品を用いて製品を製造する時間 (再製造時間),

$T_c$  (時間) : 製造終了後製品在庫がなくなるまでの時間,

$T$  (時間) : 製造時間と再製造時間と製品在庫がなくなるまでの時間の総和 (全製造リサイクル時間),

$\delta$  ( $0 \leq \delta \leq 1$ ) (ユニット/時) : 回収中古品をリサイクル可能品に処理する割合 (リサイクル処理率),

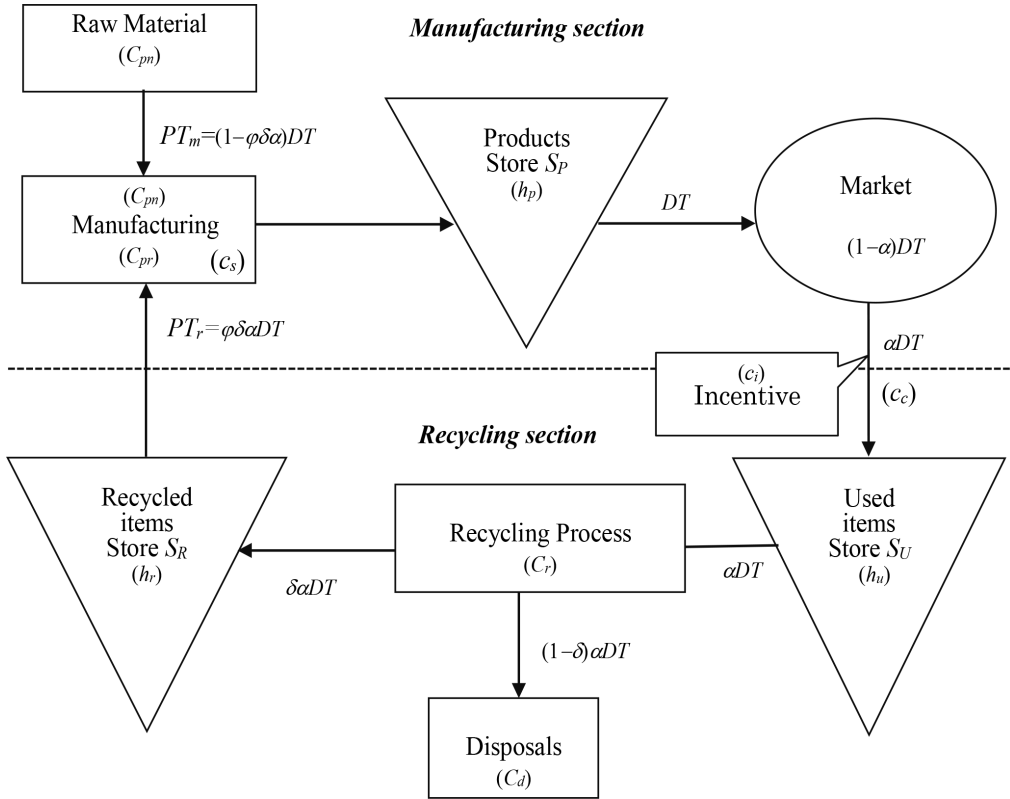
$\varphi$  ( $0 \leq \varphi \leq 1$ ) (ユニット/時) : リサイクル可能品を利用する割合 (リサイクル利用率),

$\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) (ユニット/時) : リサイクルのために市場から回収される中古品の回収率。

このとき、中古品回収において、広報費やデポジットなどの支出による回収を促進する回

回収インセンティブを考慮した閉ループ型ロジステックスシステムにおける回収方策

図 1 回収インセンティブを考慮した製造リサイクルシステム



収促進費（インセンティブ費）の額に応じて回収率が高くなると仮定する。

また、本論文で考える費用パラメータとして、製造部門においては、以下のような費用を考える。

$c_{pn}$  (円/ユニット)：新規の原材料を用いて製造したときの製品 1 単位当たりの製造費用（原材料費と調達費用を含む），

$c_{pr}$  (円/ユニット)：リサイクル部門から調達したリサイクル品を用いて製造したときの製品 1 単位当たりの製造費用（リサイクル品材料費と調達費用を含む），

$c_r$  (円/ユニット)：製造リサイクル時間中に新規原材料と同等の品質をもつように処理するための 1 単位当たりの処理費用（製造部門への配送費用を含む），ここで， $c_{pn} > c_{pr} + c_r$  とする，

$c_s$  (円/ユニット)：製造リサイクル時間中にリサイクル品による製造から新材料による製造に切り替える際の段取り費用，

$h_p$  (円/ユニット)：製造した製品 1 単位を貯蔵する製造品貯蔵施設  $S_p$  で保管するときの在庫保持費用。

一方、リサイクル部門においては、以下の費用を考えることにする。

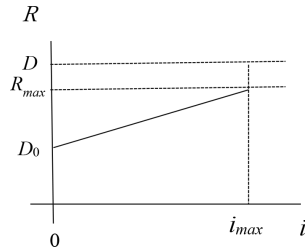
- $c_c$  (円/ユニット) : リサイクル可能な中古製品 1 単位を市場から回収するための費用,
- $c_i$  (円/ユニット) : リサイクル可能な中古製品 1 単位を市場から回収する際のインセンティブ費用,
- $c_d$  (円/ユニット) : 市場から回収したりサイクル不可能な中古製品 1 単位を廃棄する費用,
- $h_u$  (円/ユニット) : 市場から回収した中古品 1 単位のリサイクル部門の貯蔵施設  $S_U$  での貯蔵費用,
- $h_r$  (円/ユニット) : 再利用可能なリサイクル可能品 1 単位のリサイクル部門の貯蔵施設  $S_R$  での貯蔵費用。

## 2.2 回収費用と回収率

Savaskan ら (2004) は顧客から回収される中古品の回収率をリバースチャネルの性能と捉え、回収率を製品回収における努力の関数としてモデル化した。その回収率  $\tau$  は、回収活動に対する投資を  $I$ 、 $C_L$  をスケーリングパラメータと表したとき、 $\tau = \sqrt{I/C_L}$  と表した。さらに、回収品を回収し処理するための単位変動費を  $A$ 、市場での新製品に対する需要を  $D(p)$ 、小売製品価格を  $p$  と表したとき、総回収費用  $C(\tau)$  を、 $C(\tau) = I + A\tau D(p) = C_L\tau^2 + A\tau D(p)$  と表すことによって中古品の回収率の関数を特徴づけた。このとき、 $\tau D(p)$  は顧客から回収されて製品に再製造される総数となる。Wei ら (2015) は、獲得努力と獲得量や質との関係の特徴づける獲得関数 (acquisition function) を考えたとき、獲得努力と関わりなく回収率が一定の関係をもつ消極的リターン (passive return)、獲得量が獲得努力の一次関係をもつ線形関係、より一般的に、獲得量が獲得努力とともに増加する凸関数の非線形関係をもつ関数に分類している。線形関係では獲得努力  $p$  として、 $p_0$  を最小獲得価格、 $\alpha$  を価格感度係数として、獲得量を  $R$  または回収率を  $r$  としたとき、 $R(p) = \alpha(p - p_0)$  あるいは  $r(p) = \alpha(p - p_0)$  の関係として表している。Pishchulov ら (2014) も、同様に購入者の回収努力の関数として回収率  $\beta$  を仮定し、簡便性のため回収努力と回収率の関係を  $\beta = I/k$  のように線形と仮定した。彼らは脚注において、 $\beta = I/k$  の代わりに、 $\beta = I/k + b$  の一般形に拡張し、何の回収努力もない場合にでも回収される一定の中古品の割合  $b$  に言及している。Ke ら (2015) は、Savaskan ら (2004) が指摘した回収総費用の関数を適用し、中古品をリサイクルするための固定費用  $k\tau^2$  ( $\tau$  は弾力性パラメータ)、 $\tau q$  を再製造される中古品の総数、 $\bar{p}_c$  を中古品の単位回収費用としたときに回収費用  $c(\tau)$  を  $c(\tau) = k\tau^2 + \bar{p}_c\tau q$  と表した。

本論文では、製品価格に預かり金を上乗せして製品返却の際に返金して回収率を高めるデポジット (預託金) のように、リサイクルを促進するインセンティブ (奨励金)  $i$  によって市場に出回っている製品の中古品の回収が増進することを考え、結果として需要に対する回

図2 インセンティブ量と回収量の関係



回収された中古品の割合（回収率）が高くなると仮定する。なお，再製造費用と回収率の関係は明確に示されないが，回収率が高まれば，再製造可能な中古品が多くなり，量的効果により，再製造費用の低減も考えられ，リサイクル効果がさらに促進することが期待されるが，ここでは考えないことにする。

したがって，回収率  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) はリサイクルを促すインセンティブの額によって高くなると仮定する。そこで，1 ユニット当たりのインセンティブの額は当然ユニット当たりの製品費用を超えないので，最大限の額が存在し，その最大額を  $i_{max}$  と表すと，インセンティブの額は  $0 \leq i \leq i_{max}$  の範囲となり，インセンティブの最大額のときに回収される量を最大回収量  $R_{max}$  とする（図2）。一方，そのようなインセンティブのない場合に通常期待される回収量を  $D_0 T$  と表す。市場より回収される量を  $RT$  で表すと，以下の関係が成り立つ。

$$RT = D_0 T + (R_{max} - D_0) T \left( \frac{i}{i_{max}} \right)$$

さらに， $\theta = i/i_{max}$ , ( $0 \leq \theta \leq 1$ ) とおき，この  $\theta$  を，回収を促すインセンティブの割合を表すインセンティブ率として，回収率が回収を促すインセンティブ率  $\theta$  の一次関係で表される。こうして，回収率  $\alpha$  を，回収インセンティブパラメータ  $a$  と  $b$  によって以下のように表す。

$$\alpha(\theta) = a\theta + b \tag{1}$$

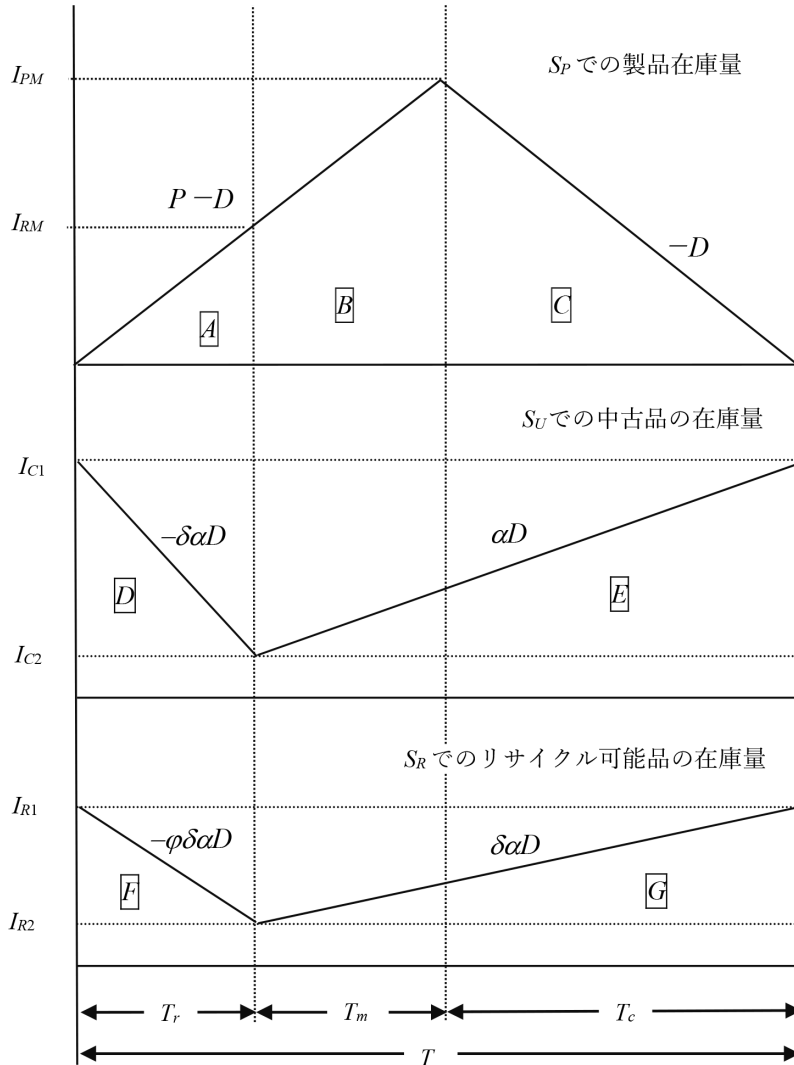
なお， $a$  と  $b$  は，それぞれ  $a = (R_{max} - D_0)/D$ ,  $b = D_0/D$ , ( $a + b = R_{max}/D$ ,  $0 \leq a, b \leq 1$ ) と表せられる。インセンティブ率  $\theta = 1$  のとき，すなわち，インセンティブの額が  $i_{max}$  であるとき，回収量は最大回収量  $R_{max}$  となり，回収率は， $\alpha(1) = R_{max}/D$  となる。最大回収量  $R_{max} = D$  とすれば，最大限のインセンティブに対して中古品はすべて回収できることになる。

### 2.3 各貯蔵施設の在庫量の推移

本論文で考える製造リサイクルモデルにおける，製造部門の製品貯蔵施設  $S_P$  の製品在庫の在庫量，リサイクル部門の回収品貯蔵施設  $S_U$  の回収された中古品の在庫量，およびリサイクル部門のリサイクル可能品貯蔵施設  $S_R$  の再利用可能なリサイクル品の在庫量の推移を



図 3 貯蔵施設  $S_P$  での製品在庫量・貯蔵施設  $S_U$  での中古品在庫量・貯蔵施設  $S_R$  でのリサイクル可能品在庫量の推移



$I_{RM}$ : リサイクル品による製造による最大在庫量,  $I_{PM}$ : 新規材料・部品による製造の最大在庫量  
 $I_{C1}$ : 回収された回収品の最大在庫量,  $I_{C2}$ : 未処理回収品の最小在庫量  
 $I_{R1}$ : 再製造可能なリサイクル品の最大在庫量,  $I_{R2}$ : 再製造可能なリサイクル品の最小在庫量

示したのが図 3 である (若尾 2009)。この図で、 $A$  の部分は製造部門の貯蔵施設でのリサイクル材料を用いて製造した製造時間での製品在庫量の変化、図中の  $B$  の部分は新規材料・部品による製造時間に製造された製品の在庫量の変化、図中の  $C$  の部分は製造終了後に製品が需要に回される期間の在庫量の変化を、図中の  $D$  の部分はリサイクル品を用いた製造時間内でのリサイクル部門の貯蔵施設  $S_U$  における市場から回収された中古品の在庫量の変

回収インセンティブを考慮した閉ループ型ロジステックスシステムにおける回収方策

化、図中の  $E$  の部分はそれ以降の時間で市場から回収される中古品の在庫量の変化を表している。また、図中の  $F$  の部分はリサイクル品を用いた製造時間内でのリサイクル部門の貯蔵施設でのリサイクル可能に処理されたりサイクル品の在庫の変化を、 $G$  の部分はそれ以降の時間で市場から回収されるリサイクル可能品の在庫の変化を表している。

### 3. 製造部門とリサイクル部門での諸費用と総費用

#### 3.1 製造部門における費用

本論文で考える製造リサイクルモデルにおける製造部門に関わる費用は、前述の費用パラメータを用いて以下のように求められる。

##### (1) 製造リサイクル時間中における製造部門の貯蔵施設における在庫保持費用

この費用を  $C_{hp}$  (円×時間) と表すと、図3に示される製造部門の貯蔵施設  $S_p$  におけるリサイクル品使用による製造時間での製品の在庫量  $I_A$ 、新規材料・部品によって製造された製品の在庫量  $I_B$ 、製造終了後に製品が需要に回される期間の在庫量  $I_C$  と、製造した製品1単位を貯蔵する製造品貯蔵施設  $S_P$  で保管するときの在庫保持費用  $h_p$  (円/ユニット) から、以下のように求められる。

$$C_{hp} = h_p \times (I_A + I_B + I_C) = h_p \left( \frac{(P-D)D}{2P} \right) T^2 \quad (2)$$

##### (2) 製造リサイクル時間中に新規原材料を用いて製造するための費用（原材料費と調達費用を含む）

この費用を  $C_{pn}$  (円×時間) と表すと、新規の原材料を用いて製造したときの製品1単位当たりの製造費用  $c_{pn}$  (円/ユニット) を用いると、以下のように求められる。

$$C_{pn} = c_{pn} \int_{T_r}^{T_m} P t dt = c_{pn} \left( \frac{D^2}{2P} - \frac{D^2}{2P} \varphi^2 \delta^2 \alpha(\theta)^2 \right) T^2$$

これに、 $\alpha(\theta) = a\theta + b$  の関係を代入すると、以下のように表される。

$$C_{pn} = c_{pn} \left( \frac{D^2}{2P} - \frac{D^2}{2P} \varphi^2 \delta^2 (a\theta + b)^2 \right) T^2 \quad (3)$$

##### (3) 製造リサイクル時間中にリサイクル品を用いて製造するための費用

この費用を  $C_{pr}$  (円×時間) と表すと、リサイクル部門から調達したりサイクル品を用いて製造したときの製品1単位当たりの製造費用  $c_{pr}$  (円/ユニット) を用いて、

$$C_{pr} = c_{pr} \int_0^{T_r} P t dt = c_{pr} \left( \frac{D^2}{2P} \varphi^2 \delta^2 \alpha(\theta)^2 \right) T^2$$

と求まり、 $\alpha(\theta) = a\theta + b$  の関係を代入して、以下のように表される。



$$C_{pr} = c_{pr} \left( \frac{D^2}{2P} \varphi^2 \delta^2 (a\theta + b)^2 \right) T^2 \quad (4)$$

(4) 製造リサイクル時間中にリサイクル品による製造から新規品による製造に切り替える際の段取り費用

この費用を  $C_s$  (円×時間) と表すと、以下のように表される。

$$C_s = c_s \quad (5)$$

### 3.2 リサイクル部門における費用

(1) 製造リサイクル時間中の未処理の回収品を貯蔵するための保持費用

この費用を  $C_{hu}$  (円×時間) と表すと、図3におけるリサイクル部門の貯蔵施設  $S_U$  でのリサイクル時間での回収された中古品 (リサイクル可能品) の在庫量  $I_D$ 、市場から回収される中古品の在庫量  $I_E$ 、市場から回収した未処理の中古品1単位のリサイクル部門の貯蔵施設  $S_U$  での貯蔵費用  $h_u$  (円/ユニット) を用いて以下のように求められる。

$$C_{hu} = h_u \times (I_D + I_E) = h_u \left( \frac{\varphi^2 \delta^2 (\delta + 1) D^3}{2P^2} \alpha(\theta)^3 - \frac{\varphi \delta D^2}{P} \alpha(\theta)^2 + \frac{D}{2} \alpha(\theta) \right) T^2$$

これに  $\alpha(\theta) = a\theta + b$  の関係を代入すると、リサイクルのための未処理の回収品を貯蔵するための保持費用は以下ようになる。

$$C_{hu} = h_u \left( \frac{\varphi^2 \delta^2 (\delta + 1) D^3}{2P^2} (a\theta + b)^3 - \frac{\varphi \delta D^2}{P} (a\theta + b)^2 + \frac{D}{2} (a\theta + b) \right) T^2 \quad (6)$$

(2) 製造リサイクル時間中に未処理回収品を新規原材料と同等の品質をもつように処理するための費用

この費用を  $C_r$  (円×時間) と表し、 $\alpha(\theta) = a\theta + b$  の関係を用いて以下のように求められる。

$$C_r = c_r \int_0^T \delta \alpha(\theta) D dt = c_r \frac{D}{2} \delta (a\theta + b) T^2 \quad (7)$$

(3) 製造リサイクル時間中のリサイクル可能品を貯蔵するための保持費用

この費用を  $C_{hr}$  (円×時間) と表すと、図3におけるリサイクル部門の貯蔵施設  $S_R$  でのリサイクル時間での処理されたりリサイクル可能品の在庫量  $I_F$ 、処理されたりリサイクル可能品の在庫量  $I_G$ 、再利用可能なりサイクル可能品1単位のリサイクル部門の貯蔵施設  $S_R$  での貯蔵費用  $h_r$  (円/ユニット) を用いて以下のように求められる。

$$C_{hr} = h_r \times (I_F + I_G) = h_r \left( \frac{\varphi^2 \delta^3 (\varphi + 1) D^3}{2P^2} \alpha(\theta)^3 - \frac{\varphi \delta^2 D^2}{P} \alpha(\theta)^2 + \frac{\delta D}{2} \alpha(\theta) \right) T^2$$

さらに、これに  $\alpha(\theta) = a\theta + b$  の関係を代入すると、製造リサイクル時間中のリサイクル可

回収インセンティブを考慮した閉ループ型ロジステックスシステムにおける回収方策

能品を貯蔵するための保持費用は以下のように表される。

$$C_{hr} = h_r \left( \frac{\varphi^2 \delta^3 (\varphi + 1) D^3}{2P^2} (a\theta + b)^3 - \frac{\varphi \delta^2 D^2}{P} (a\theta + b)^2 + \frac{\delta D}{2} (a\theta + b) \right) T^2 \quad (8)$$

(4) リサイクル部門が負担する回収を促すインセンティブに関する回収関連費用

この費用を  $C_i$  (円×時間) と表し、 $\theta = i/i_{max}$ ,  $i = i_{max}\theta$  の関係と  $\alpha(\theta) = a\theta + b$  の関係を用いて、以下のように求められる。

$$C_i = c_i \int_0^T \alpha(\theta) D t dt = i \left( \frac{D}{2} (a\theta + b) \right) T^2 = i_{max} \left( \frac{D}{2} (a\theta^2 + b\theta) \right) T^2 \quad (9)$$

(5) 製造リサイクル時間中に市場から中古品を回収するための費用

この費用を  $C_c$  (円×時間) と表し、 $\alpha(\theta) = a\theta + b$  の関係を用いて、以下のように求められる。

$$C_c = c_c \int_0^T \alpha(\theta) D t dt = c_c \frac{D}{2} (a\theta + b) T^2 \quad (10)$$

(6) 製造リサイクル時間中に利用不可能として中古品を廃棄するための費用

この費用を  $C_d$  (円×時間) と表し、 $\alpha(\theta) = a\theta + b$  の関係を用いて、以下のように求められる。

$$C_d = c_d \int_0^T \alpha(\theta) (1 - \delta) D t dt = c_d \frac{D}{2} (1 - \delta) (a\theta + b) T^2 \quad (11)$$

### 3.3 製造・リサイクル部門における総費用

前節の費用項目から製造部門およびリサイクル部門の単位時間当たりの総費用  $C_T(\theta, \varphi, \delta, a, b, T)$  は次のように求められる。

$$\begin{aligned} C_T(\theta, \varphi, \delta, a, b, T) &= \frac{C_{pn} + C_{pr} + C_{hp} + C_{hu} + C_{hr} + C_r + C_c + C_d + C_i + C_s}{T} \\ &= (K(\varphi, \delta, a)\theta^3 + L(\varphi, \delta, a, b)\theta^2 + M(\varphi, \delta, a, b)\theta + N(\varphi, \delta, b)) T \\ &\quad + \frac{C_s}{T} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 $K(\varphi, \delta, a)$ ,  $L(\varphi, \delta, a, b)$ ,  $M(\varphi, \delta, a, b)$ ,  $N(\varphi, \delta, b)$  はそれぞれ以下のようなものを表す。

$$K(\varphi, \delta, a) = h_u \left\{ \frac{\varphi^2 \delta^2 (\delta + 1) D^3}{2P^2} \right\} a^3 + h_r \left\{ \frac{\varphi^2 \delta^3 (\varphi + 1) D^3}{2P^2} \right\} a^3 \quad (13a)$$

$$\begin{aligned} L(\varphi, \delta, a, b) &= \left\{ -\frac{\varphi \delta c_{pn}}{2} + \frac{\varphi \delta c_{pr}}{2} - h_u - \delta h_r \right\} \left\{ \frac{\varphi \delta D^2}{P} \right\} a^2 \\ &\quad + \{3(\delta + 1)h_u + 3\delta(\varphi + 1)h_r\} \left\{ \frac{\varphi^2 \delta^2 D^3}{2P^2} \right\} a^2 b + i_{max} \left\{ \frac{D}{2} \right\} a \end{aligned} \quad (13b)$$

$$\begin{aligned}
M(\varphi, \delta, a, b) = & \{\varphi\delta(c_{pr} - c_{pn}) - 2(h_u + \delta h_r)\} \left\{ \frac{\varphi\delta D^2}{P} \right\} ab \\
& + 3((\delta+1)h_u + (\varphi+1)\delta h_r) \left\{ \frac{\varphi^2\delta^2 D^3}{2P^2} \right\} ab^2 + (h_u + \delta h_r) \left\{ \frac{D}{2} \right\} a \\
& + c_r \left\{ \frac{D}{2} \delta \right\} a + c_c \left\{ \frac{D}{2} \right\} a + c_a \left\{ \frac{D}{2} (1-\delta) \right\} a + i_{max} \left\{ \frac{D}{2} \right\} b \quad (13c)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N(\varphi, \delta, b) = & c_{pn} \left\{ \frac{D^2}{2P} - \frac{D^2}{2P} \varphi^2 \delta^2 b^2 \right\} + c_{pr} \left\{ \frac{D^2}{2P} \varphi^2 \delta^2 b^2 \right\} + h_p \left\{ \frac{(P-D)D}{2P} \right\} \\
& + h_u \left\{ \frac{\varphi^2 \delta^2 (\delta+1) D^3}{2P^2} b^3 - \frac{\varphi\delta D^2}{P} b^2 + \frac{D}{2} b \right\} \\
& + h_r \left\{ \frac{\varphi^2 \delta^3 (\varphi+1) D^3}{2P^2} b^3 - \frac{\varphi\delta^2 D^2}{P} b^2 + \frac{\delta D}{2} b \right\} \\
& + c_r \left\{ \frac{D}{2} \delta \right\} b + c_c \left\{ \frac{D}{2} \right\} b + c_a \left\{ \frac{D}{2} (1-\delta) \right\} b \quad (13d)
\end{aligned}$$

このとき、(12)式の単位時間当たりの総費用  $C_T(\theta, \varphi, \delta, a, b, T)$  の第1項を、

$$A(\theta, \varphi, \delta, a, b) = K(\varphi, \delta, a)\theta^3 + L(\varphi, \delta, a, b)\theta^2 + M(\varphi, \delta, a, b)\theta + N(\varphi, \delta, b) \quad (14)$$

と表すと、単位時間当たりの総費用は

$$C_T(\theta, \varphi, \delta, a, b, T) = A(\theta, \varphi, \delta, a, b)T + \frac{C_s}{T} \geq 2\sqrt{C_s A(\theta, \varphi, \delta, a, b)} \quad (15)$$

と表され、この総費用を最小にする最適製造リサイクル時間  $T^*$  は次のようになる。

$$T^* = \sqrt{C_s / A(\theta, \varphi, \delta, a, b)} \quad (16)$$

また、この最適製造リサイクル時間  $T^*$  を与えたときの製造・リサイクル部門における単位時間当たりの総費用の最小値は、

$$C_T^*(\theta, \varphi, \delta, a, b, T^*) = 2\sqrt{C_s A(\theta, \varphi, \delta, a, b)} \quad (17)$$

となる。

## 4. 回収方策の決定

### 4.1 インセンティブ率の最適方策

製造部門とリサイクル部門での総費用は、製造部門がリサイクル可能品を利用する割合であるリサイクル利用率とリサイクル部門が回収品をリサイクル可能品として加工する割合で

回収インセンティブを考慮した閉ループ型ロジステックスシステムにおける回収方策

あるリサイクル処理率の関数となるが、本論文では、このリサイクル利用率とリサイクル処理率については考察の対象としていないので、いま、単位時間当たりの総費用  $C_T(\theta, \varphi, \delta, a, b, T)$  において、リサイクル利用率とリサイクル処理率は所与として考えて、それぞれ定数  $\varphi^+$  と  $\delta^+$  とし、また、回収率  $\alpha(\theta) = a\theta + b$  のパラメータをそれぞれ許容範囲内の値  $a^+, b^+$  に指定して考察することとする。

製造部門による回収促進のためのインセンティブ率  $\theta$  の最適方策は、(12) 式の製造・リサイクル部門の単位時間当たりの総費用  $C_T^*(\theta, \varphi^+, \delta^+, a^+, b^+, T^*)$ 、すなわち、

$$A(\theta, \varphi^+, \delta^+, a^+, b^+) = K(\varphi^+, \delta^+, a^+) \theta^3 + L(\varphi^+, \delta^+, a^+, b^+) \theta^2 + M(\varphi^+, \delta^+, a^+, b^+) \theta + N(\varphi^+, \delta^+, b^+)$$

を最小にするインセンティブ率  $\theta$  を決定することとなる。ここで表記を簡便にするために、 $A(\theta, \varphi^+, \delta^+, a^+, b^+)$  を  $\theta$  の関数を明示するため、 $A^+(\theta)$  と表記し、以下のように表す。

$$A^+(\theta) = K^+ \theta^3 + L^+ \theta^2 + M^+ \theta + N^+ \quad (18)$$

この  $A^+(\theta)$  は  $\theta$  に関して 3 次関数であり、問題は、 $\theta$  が  $0 \leq \theta \leq 1$  の範囲にあるときのこの関数の最小化を考えることになる。そこで、 $A^+(\theta)$  のグラフを考えるために導関数  $A^{+'}$  を求めると、 $A^{+'} = 3K^+ \theta^2 + 2L^+ \theta + M^+$  となり、 $\theta$  に関する 2 次関数となる。この 2 次関数の解によって  $A^+(\theta)$  のグラフが変化する。 $A^+(\theta)$  が単調増加か単調減少となるかは、 $A^+(\theta)$  の導関数の判別式の値による。この判別式が非負であるならば、実数解をもつ。この判別式が正のとき、2 つの実数解を  $p$  と  $q$  ( $p < q$ ) と表すと、 $A^+(\theta)' = 3K^+(\theta - p)(\theta - q) = 0$  より、それぞれ、 $p = (-L^+ - \sqrt{L^{+2} - 3K^+M^+})/3K^+$  と  $q = (-L^+ + \sqrt{L^{+2} - 3K^+M^+})/3K^+$  と求められる。 $K^+$  は常に正となるので、 $A^+(\theta)$  の導関数のグラフは判別式が正ならば、値  $p$  と値  $q$  を挟んで、正からゼロ、負、ゼロ、正となる。判別式がゼロならば、正からゼロ、正となる。したがって、 $\theta$  の 3 次関数  $A^+(\theta)$  のグラフは、値  $p$  と値  $q$  を挟んで、増加関数から減少関数、増加関数となる。そこで、減少関数から増加関数に変わる値  $q$  の位置と  $0 \leq \theta \leq 1$  の範囲の関係に注目しなければならない。また、値  $q$  は、 $L^+$  や  $M^+$  の正負によって移動するので、それらの値との関係も導かなければならない。

本論文では、最適なインセンティブ率を求めることに関心があるので、問題を簡単にするため、製造部門がリサイクル可能品を利用する割合であるリサイクル利用率  $\varphi$  を 1、リサイクル部門が回収品をリサイクル可能品として加工する割合であるリサイクル処理率  $\delta$  を 1 とする。さらに、単位時間当たりの総費用  $C_T(\theta, 1, 1, a, b, T)$  における回収率  $\alpha(\theta)$  のパラメータも、 $\bar{a}, \bar{b}$  ( $0 \leq \bar{a} \leq 1, 0 \leq \bar{b} \leq 1$ ) の定数に固定する。ここで、製造部門の回収促進のためのインセンティブ率の最適方策は、(12) 式の製造・リサイクル部門の単位時間当たりの総費用  $C_T(\theta, 1, 1, \bar{a}, \bar{b}, T^*)$ 、すなわち、

$$C_T(\theta, 1, 1, \bar{a}, \bar{b}, T^*) = (K(1, 1, \bar{a})\theta^3 + L(1, 1, \bar{a}, \bar{b})\theta^2 + M(1, 1, \bar{a}, \bar{b})\theta + N(1, 1, \bar{b}))T + \frac{C_s}{T} \quad (19)$$

として、この費用を最小にするインセンティブ率  $\theta$  を決定することにする。このことは、さらに、(19) 式中の回収率パラメータ係数  $\bar{a}, \bar{b}$  に関連する第1項を、 $\tilde{A}(\theta)$  とおく。

$$\tilde{A}(\theta) = \tilde{K}\theta^3 + \tilde{L}\theta^2 + \tilde{M}\theta + \tilde{N}$$

ただし、 $\tilde{K}, \tilde{L}, \tilde{M}, \tilde{N}$  は以下のとおりである。

$$\tilde{K} = K(1, 1, \bar{a}) = h_u \left\{ \frac{D^3}{P^2} \right\} \bar{a}^3 + h_r \left\{ \frac{D^3}{P^2} \right\} \bar{a}^3 > 0$$

$$\tilde{L} = L(1, 1, \bar{a}, \bar{b}) = \{(c_{pr} - c_{pn}) - 2(h_u + h_r)\} \left\{ \frac{D^2}{2P} \right\} \bar{a}^2 + 3(h_u + h_r) \left\{ \frac{D^3}{P^2} \right\} \bar{a}^2 \bar{b} + i_{max} \left\{ \frac{D}{2} \right\} \bar{a}$$

$$\tilde{M} = M(1, 1, \bar{a}, \bar{b}) = \{(c_{pr} - c_{pn}) - 2(h_u + h_r)\} \left\{ \frac{D^2}{P} \right\} \bar{a} \bar{b} + 3(h_u + h_r) \left\{ \frac{D^3}{P^2} \right\} \bar{a} \bar{b}^2$$

$$+ (h_u + h_r) \left\{ \frac{D}{2} \right\} \bar{a} + c_r \left\{ \frac{D}{2} \right\} \bar{a} + c_c \left\{ \frac{D}{2} \right\} \bar{a} + i_{max} \left\{ \frac{D}{2} \right\} \bar{b}$$

$$\tilde{N} = N(1, 1, \bar{b}) = c_{pn} \left\{ \frac{D^2}{2P} - \frac{D^2}{2P} \bar{b}^2 \right\} + c_{pr} \left\{ \frac{D^2}{2P} \bar{b}^2 \right\} + h_p \left\{ \frac{(P-D)D}{2P} \right\}$$

$$+ h_u \left\{ \frac{D^3}{P^2} \bar{b}^3 - \frac{D^2}{P} \bar{b}^2 + \frac{D}{2} \bar{b} \right\} + h_r \left\{ \frac{D^3}{P^2} \bar{b}^3 - \frac{D^2}{P} \bar{b}^2 + \frac{D}{2} \bar{b} \right\} + c_r \left\{ \frac{D}{2} \right\} \bar{b} + c_c \left\{ \frac{D}{2} \right\} \bar{b} > 0$$

問題は、この  $\tilde{A}(\theta)$  について、インセンティブ率  $\theta$  が  $0 \leq \theta \leq 1$  の範囲にあるときのこの関数を最小にする  $\theta$  を決定することとなる。

まず、この関数のグラフを考えるために、 $\tilde{A}(\theta)$  の導関数  $\tilde{A}(\theta)'$  を求めると、 $\tilde{A}(\theta)' = 3\tilde{K}\theta^2 + 2\tilde{L}\theta + \tilde{M}$  となる。この導関数の判別式  $D$  は、 $D = \tilde{L}^2 - 3\tilde{K}\tilde{M}$  となり、判別式  $D$  の正負により、 $\tilde{A}(\theta)$  の極値の個数が変わる。判別式の正、ゼロ、負の場合について以下のように考える。

1)  $D < 0$  の場合は、 $\tilde{A}(\theta)'$  は実数解がないので、極値をもたず、常に、 $\tilde{A}(\theta)' > 0$  である。さらに、 $\tilde{K} > 0$  であるので、 $\theta$  の定義域において、 $\tilde{A}(\theta)$  のグラフは常に正であり、 $\theta$  に関して単調増加関数である。しかも、 $\tilde{N} > 0$  であるので、 $\theta = 0$  のとき、 $C_T(0, 1, 1, \bar{a}, \bar{b}, T^*) = N(1, 1, \bar{b})T + C_s/T > 0$  となる。したがって、 $\theta$  が  $0 \leq \theta \leq 1$  の範囲で、 $\tilde{A}(\theta)$  が最小値をとるインセンティブ率  $\theta^*$  は、 $\theta^* = 0$  のときである。

2)  $D = 0$  の場合は、 $\tilde{A}(\theta)'$  は重解をもつ。この解を  $p$  とすると、 $p = -\tilde{L}/3\tilde{K}$  となる。 $\tilde{A}(\theta)'$  はこの  $p$  でゼロとなるが、それ以外の区間では正となる。したがって、 $\tilde{K} > 0$  であるので、 $\theta$  の定義域において  $\tilde{A}(\theta)$  のグラフは単調増加関数となる。 $\theta = 0$  のときに、 $C_T(0, 1,$

回収インセンティブを考慮した閉ループ型ロジステックスシステムにおける回収方策

1,  $\bar{a}, \bar{b}, T^*) = N(1, 1, \bar{b})T + C_s/T > 0$  であるので,  $\tilde{L}$  の正負に関わらず,  $\theta$  が  $0 \leq \theta \leq 1$  の範囲で,  $\tilde{A}(\theta)$  が最小値をとるのは,  $\theta^* = 0$  のときとなる。

3)  $D > 0$  の場合,  $\tilde{A}(\theta)'$  は以下のような2つの実数解  $p$  と  $q$  ( $p < q$ ) をもつ。

$$p = (-\tilde{L} - \sqrt{\tilde{L}^2 - 3\tilde{K}\tilde{M}})/3\tilde{K}, \quad q = (-\tilde{L} + \sqrt{\tilde{L}^2 - 3\tilde{K}\tilde{M}})/3\tilde{K}$$

$\tilde{A}(\theta)'$  はこれらの2つの値を挟んで, 正, 負, 正となる。したがって,  $\tilde{A}(\theta)$  のグラフは,  $\tilde{K} > 0$  であるので,  $\theta$  の値が  $\theta < p$  までは増加関数であり,  $p < \theta < q$  の区間では減少関数,  $q < \theta$  では増加関数となり, 値  $q$  で下に凸の曲線をもつことになる。また,  $\tilde{L}$  と  $\tilde{M}$  の正負により,  $p$  と  $q$  は正または負となる。そこで,  $0 \leq \theta \leq 1$  の範囲中で,  $\tilde{L}$  と  $\tilde{M}$  の正負と,  $p$  と  $q$  の正負との関係から以下のような場合における最適なインセンティブ率を考えることとなる。

①  $\tilde{L} > 0$  かつ  $\tilde{M} \geq 0$  の場合は,  $p < q \leq 0$  ( $\sqrt{\tilde{L}^2 - 3\tilde{K}\tilde{M}} \leq \tilde{L}$ ) となる。ただし,  $\tilde{M} = 0$  のとき,  $q = 0$  となる。このとき,  $\tilde{A}(\theta)$  がグラフは第一象限で単調増加関数となるので,  $\theta$  が  $0 \leq \theta \leq 1$  の範囲で,  $\tilde{A}(\theta)$  が最小値をとるのは,  $\theta^* = 0$  のときである。

②  $\tilde{L} > 0$  かつ  $\tilde{M} \leq 0$  の場合,  $p < 0$  で  $0 \leq q$  ( $q = 0$  となるのは  $\tilde{M} = 0$  のとき) となる。この場合は,  $-\sqrt{\tilde{L}^2 - 3\tilde{K}\tilde{M}} < \tilde{L} \leq \sqrt{\tilde{L}^2 - 3\tilde{K}\tilde{M}}$  である。 $\tilde{A}(\theta)$  のグラフは第一象限で  $\theta$  の値が  $q$  になるまで単調減少関数であり,  $q$  より大きくなると単調増加関数に変わる。このとき, 以下のような2つの場合がある。

a)  $0 \leq q \leq 1$  ( $\tilde{L} \leq \sqrt{\tilde{L}^2 - 3\tilde{K}\tilde{M}} \leq \tilde{L} + 3\tilde{K}$ ) のとき,  $\tilde{A}(\theta)$  が最小値をとるのは,  $\theta^* = q$  のときである。

b)  $1 \leq q$  ( $\tilde{L} + 3\tilde{K} \leq \sqrt{\tilde{L}^2 - 3\tilde{K}\tilde{M}}$ ) のとき,  $\theta^* = 1$  のとき,  $\tilde{A}(\theta)$  は最小値をとる。

③  $\tilde{L} < 0$  かつ  $\tilde{M} \leq 0$  の場合は,  $p \leq 0$  で  $0 < q$  となる。この場合は,  $-\sqrt{\tilde{L}^2 - 3\tilde{K}\tilde{M}} \leq \tilde{L} < \sqrt{\tilde{L}^2 - 3\tilde{K}\tilde{M}}$  である。この場合も②と同様に次のような2つの場合がある。

a)  $0 \leq q \leq 1$  ( $\tilde{L} \leq \sqrt{\tilde{L}^2 - 3\tilde{K}\tilde{M}} \leq \tilde{L} + 3\tilde{K}$ ) のとき,  $\tilde{A}(\theta)$  が最小値をとるのは,  $\theta^* = q$  のときである。

b)  $1 \leq q$  ( $\tilde{L} + 3\tilde{K} \leq \sqrt{\tilde{L}^2 - 3\tilde{K}\tilde{M}}$ ) のとき,  $\theta^* = 1$  のとき,  $\tilde{A}(\theta)$  は最小値をとる。

④  $\tilde{L} < 0$  かつ  $\tilde{M} \geq 0$  の場合は,  $0 \leq p < q$  ( $p = 0$  となるのは  $\tilde{M} = 0$  のとき) となる。この場合は,  $-\tilde{L} \geq \sqrt{\tilde{L}^2 - 3\tilde{K}\tilde{M}}$  のときである。 $\tilde{A}(\theta)$  のグラフは第一象限で,  $\theta = p$  で極大値,  $\theta = q$  で極小値をもつ。 $\theta$  の値が  $p$  になるまで単調増加であり,  $p$  より大きくなると単調減少となり,  $\theta$  の値が  $q$  を超えると単調増加関数に変化する。この場合, 以下のような3つの場合がある。

a)  $0 \leq p \leq 1$  ( $\tilde{L} \leq -\sqrt{\tilde{L}^2 - 3\tilde{K}\tilde{M}} \leq \tilde{L} + 3\tilde{K}$ ) かつ  $0 < q \leq 1$  ( $\tilde{L} < \sqrt{\tilde{L}^2 - 3\tilde{K}\tilde{M}} \leq \tilde{L} + 3\tilde{K}$ ) のときには, すなわち,  $\tilde{L} < -\sqrt{\tilde{L}^2 - 3\tilde{K}\tilde{M}} < \sqrt{\tilde{L}^2 - 3\tilde{K}\tilde{M}} \leq \tilde{L} + 3\tilde{K}$  のとき,  $\theta$  が  $0 \leq \theta \leq 1$  の範囲で,  $\tilde{A}(\theta)$  が最小値をとるのは,  $\theta^* = q$  のときである。

b)  $0 \leq p \leq 1$  ( $\tilde{L} \leq -\sqrt{\tilde{L}^2 - 3\tilde{K}\tilde{M}} \leq \tilde{L} + 3\tilde{K}$ ) かつ  $1 \leq q$  ( $\tilde{L} + 3\tilde{K} \leq \sqrt{\tilde{L}^2 - 3\tilde{K}\tilde{M}}$ ) のときには,



すなわち、 $-\sqrt{\tilde{L}^2-3\tilde{K}\tilde{M}} \leq \tilde{L}+3\tilde{K} \leq \sqrt{\tilde{L}^2-3\tilde{K}\tilde{M}}$  のときには、 $\theta$ が $0 \leq \theta \leq 1$ の範囲で、 $\tilde{A}(\theta)$ が最小値をとるのは、 $\theta^*=0$ または $\theta^*=1$ のときである。 $C_T(1, 1, 1, \tilde{a}, \tilde{b}, T^*) - C_T(0, 1, 1, \tilde{a}, \tilde{b}, T^*) = K(1, 1, \tilde{a}) + L(1, 1, \tilde{a}, \tilde{b}) + M(1, 1, \tilde{a}, \tilde{b}) \geq 0$ ならば、 $\theta^*=0$ であり、 $C_T(1, 1, 1, \tilde{a}, \tilde{b}, T^*) - C_T(0, 1, 1, \tilde{a}, \tilde{b}, T^*) \leq 0$ ならば、 $\theta^*=1$ である。

c)  $1 \leq p < q$  ( $\tilde{L}+3\tilde{K} \leq -\sqrt{\tilde{L}^2-3\tilde{K}\tilde{M}}$ ) のとき、 $\theta$ が $0 \leq \theta \leq 1$ の範囲で、 $\tilde{A}(\theta)$ が最小値をとるのは、 $\theta^*=0$ のときである。

以上の結果をまとめると、リサイクル部門が回収品をすべてリサイクル可能品として処理し、製造部門においてすべてのリサイクル可能品を再製造に利用する場合、製造・リサイクル部門の総費用を最小にする最適なインセンティブ率は費用項目の値の大小によって、 $\theta^*=0$ ,  $\theta^*=1$ ,  $\theta^* = (-\tilde{L} + \sqrt{\tilde{L}^2 - 3\tilde{K}\tilde{M}}) / 3\tilde{K}$  の3つの値のいずれかの値となる。すなわち、中古品の回収率を高めるインセンティブ量がゼロ、つまり回収率を高めるインセンティブをしない場合と、中古品の回収率をできるだけ高めるためにインセンティブ量を最大に施す場合と、さらに、回収のためのインセンティブ量を最大に用いなくとも製造・リサイクル部門の総費用が最小となるインセンティブ量が存在する場合があることを示している。

## 4.2 数値例

本研究で導出した最適インセンティブ率と各費用パラメータとの関係を調べるために、いくつかの数値例を示す。この数値例では、各費用とインセンティブ率との関係を調べるために、リサイクル処理率 $\delta=1$ 、リサイクル利用率 $\varphi=1$ の場合、すなわち、回収された中古品がすべてリサイクル可能品となり、そのすべてが再製造工程に回されリサイクル品となる場合（回収した中古品の廃棄処理費はゼロとなる）を考える。製造パラメータを $P=10$ ,  $D=5$ ,  $D_0=0.5$ ,  $R_{max}=5$ として、回収インセンティブパラメータを $a=0.90$ ,  $b=0.10$ となる、回収率にインセンティブ効果が強く関与する場合（ケース1）と、 $P=10$ ,  $D=5$ ,  $D_0=0.5$ ,  $R_{max}=3$ として、 $a=0.50$ ,  $b=0.10$ となる、回収率にインセンティブ効果があまり効かない場合（ケース2）の2つの場合を調べる。変動させる製造費用パラメータは、 $c_{pn}$ ,  $c_{pr}$ と在庫費用パラメータ $h_p$ ,  $h_u$ ,  $h_r$ を考える。他の費用パラメータの値は、 $c_r=0.5$ ,  $c_c=0.05$ ,  $c_s=1.0$ として固定する。なお、最大インセンティブ量は $i_{max}=2$ とする。

(1) ケース1における $c_{pn}$ の効果 ( $c_{pr}=1.0$ ,  $h_p=0.2$ ,  $h_u=0.1$ ,  $h_r=0.1$ )

表1より、回収率に対してインセンティブの効果が高い場合、費用要素によってインセンティブ費用を最大に投入 ( $\theta=1$ ) しなくとも、総費用を最小にする最適なインセンティブ率が存在することがある。また、新規材料・部品による製造費用が高くなると、積極的にインセンティブ費用を用いて回収率を高めることによって総費用の最小化を図っていく傾向が示されている。

表 1 ケース 1 における  $c_{pn}$  の効果

| $c_{pn}$ | $C_{pn}$ | $C_{pr}$ | $C_{hp}$ | $C_{hu}$ | $C_{hr}$ | $C_r$  | $C_c$ | $C_i$      | $C_T^*$ | $T^*$    |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|-------|------------|---------|----------|
| 1.0      | 0.735    | 0.007    | 0.149    | 0.013    | 0.013    | 0.074  | 0.007 | 0.000      | 2.594   | 0.771    |
|          | $K$      | $L$      | $M$      | $N$      | 判別式 $D$  | $p$    | $q$   | $\theta^*$ | $i^*$   | $\alpha$ |
|          | 0.18     | 4.16     | 1.29     | 1.68     | 16.56    | -15.04 | -0.16 | 0.000      | 0.000   | 0.100    |
| 2.0      | 0.829    | 0.024    | 0.088    | 0.016    | 0.016    | 0.103  | 0.010 | 0.062      | 3.375   | 0.592    |
|          | $K$      | $L$      | $M$      | $N$      | 判別式 $D$  | $p$    | $q$   | $\theta^*$ | $i^*$   | $\alpha$ |
|          | 0.18     | 3.14     | -0.96    | 2.92     | 10.40    | -11.65 | 0.15  | 0.150      | 0.300   | 0.235    |
| 3.0      | 0.595    | 0.216    | 0.083    | 0.032    | 0.032    | 0.299  | 0.030 | 0.826      | 3.476   | 0.575    |
|          | $K$      | $L$      | $M$      | $N$      | 判別式 $D$  | $p$    | $q$   | $\theta^*$ | $i^*$   | $\alpha$ |
|          | 0.18     | 2.13     | -3.21    | 4.16     | 6.29     | -8.49  | 0.69  | 0.691      | 1.382   | 0.722    |
| 4.0      | 0.000    | 1.008    | 0.202    | 0.101    | 0.101    | 1.008  | 0.101 | 4.032      | 2.227   | 0.898    |
|          | $K$      | $L$      | $M$      | $N$      | 判別式 $D$  | $p$    | $q$   | $\theta^*$ | $i^*$   | $\alpha$ |
|          | 0.18     | 1.12     | -5.46    | 5.40     | 4.23     | -5.81  | 1.72  | 1.000      | 2.000   | 1.000    |

(2) ケース 1 における  $c_{pr}$  の効果 ( $c_{pn}=3.0, h_p=0.2, h_u=0.1, h_r=0.1$ )

表 2 より,  $c_{pn}$  と  $c_{pr}$  の差が少なくなると, インセンティブの効果は弱くなる傾向が示されている。 $c_{pn}$  に比べて  $c_{pr}$  が高くなると, インセンティブの効果は弱くなり, 回収率は低くなる傾向がみられる。新規材料・部品による製造費用が中古品の処理費を含めりサイクル品による製造費よりかなり高いときにインセンティブ効果が高くなる傾向がみられる。

(3) ケース 2 における  $c_{pn}$  の効果 ( $c_{pr}=1.0, h_p=0.2, h_u=0.1, h_r=0.1$ )

表 3 から, ケース 2 でインセンティブの効果は回収率の向上にあまり寄与しない場合は, ケース 1 に比べ, 明らかにインセンティブ効果は低い傾向にあり, 新規材料・部品による製造費用が高くなるにつれて回収率が向上するという効果も弱い傾向を示している。

(4) ケース 1 における  $h_u$  の効果 ( $c_{pn}=3.0, c_{pr}=1.0, h_p=0.2, h_r=0.1$ )

表 4 より,  $h_u$  が高くなるにつれて, 回収率は高くなる傾向がある。この傾向は  $h_r$  においても同様である。

(5) ケース 1 における  $h_u$  の効果 ( $c_{pn}=3.0, c_{pr}=1.0, h_u=0.1, h_r=0.1$ )

表 2 ケース 1 における  $c_{pr}$  の効果

| $c_{pr}$ | $C_{pn}$ | $C_{pr}$ | $C_{hp}$ | $C_{hu}$ | $C_{hr}$ | $C_r$  | $C_c$ | $C_i$      | $C_T^*$ | $T^*$    |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|-------|------------|---------|----------|
| 2.0      | 0.864    | 0.034    | 0.061    | 0.011    | 0.011    | 0.072  | 0.007 | 0.043      | 4.049   | 0.494    |
|          | $K$      | $L$      | $M$      | $N$      | 判別式 $D$  | $p$    | $q$   | $\theta^*$ | $i^*$   | $\alpha$ |
|          | 0.18     | 3.14     | -0.96    | 4.17     | 10.40    | -11.65 | 0.15  | 0.150      | 0.300   | 0.235    |
| $c_{pr}$ | $C_{pn}$ | $C_{pr}$ | $C_{hp}$ | $C_{hu}$ | $C_{hr}$ | $C_r$  | $C_c$ | $C_i$      | $C_T^*$ | $T^*$    |
| 2.2      | 0.877    | 0.019    | 0.060    | 0.009    | 0.009    | 0.050  | 0.005 | 0.015      | 4.076   | 0.491    |
|          | $K$      | $L$      | $M$      | $N$      | 判別式 $D$  | $p$    | $q$   | $\theta^*$ | $i^*$   | $\alpha$ |
|          | 0.18     | 3.35     | -0.51    | 4.17     | 11.47    | -12.31 | 0.08  | 0.075      | 0.150   | 0.168    |
| $c_{pr}$ | $C_{pn}$ | $C_{pr}$ | $C_{hp}$ | $C_{hu}$ | $C_{hr}$ | $C_r$  | $C_c$ | $C_i$      | $C_T^*$ | $T^*$    |
| 3.0      | 0.888    | 0.009    | 0.060    | 0.005    | 0.005    | 0.030  | 0.003 | 0.000      | 4.090   | 0.489    |
|          | $K$      | $L$      | $M$      | $N$      | 判別式 $D$  | $p$    | $q$   | $\theta^*$ | $i^*$   | $\alpha$ |
|          | 0.18     | 4.16     | 1.29     | 4.18     | 16.56    | -15.04 | -0.16 | 0.000      | 0.000   | 0.100    |

表 3 ケース 2 における  $c_{pn}$  の効果

| $c_{pn}$ | $C_{pn}$ | $C_{pr}$ | $C_{hp}$ | $C_{hu}$ | $C_{hr}$ | $C_r$  | $C_c$ | $C_i$      | $C_T^*$ | $T^*$    |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|-------|------------|---------|----------|
| 1.0      | 0.735    | 0.007    | 0.149    | 0.013    | 0.013    | 0.074  | 0.007 | 0.000      | 2.594   | 0.771    |
|          | $K$      | $L$      | $M$      | $N$      | 判別式 $D$  | $p$    | $q$   | $\theta^*$ | $i^*$   | $\alpha$ |
|          | 0.03     | 2.39     | 0.94     | 1.68     | 5.64     | -50.87 | -0.20 | 0.000      | 0.000   | 0.100    |
| $c_{pn}$ | $C_{pn}$ | $C_{pr}$ | $C_{hp}$ | $C_{hu}$ | $C_{hr}$ | $C_r$  | $C_c$ | $C_i$      | $C_T^*$ | $T^*$    |
| 2.0      | 0.843    | 0.008    | 0.086    | 0.010    | 0.010    | 0.059  | 0.006 | 0.017      | 3.411   | 0.586    |
|          | $K$      | $L$      | $M$      | $N$      | 判別式 $D$  | $p$    | $q$   | $\theta^*$ | $i^*$   | $\alpha$ |
|          | 0.03     | 2.08     | -0.31    | 2.92     | 4.36     | -44.47 | 0.07  | 0.074      | 0.148   | 0.137    |
| $c_{pn}$ | $C_{pn}$ | $C_{pr}$ | $C_{hp}$ | $C_{hu}$ | $C_{hr}$ | $C_r$  | $C_c$ | $C_i$      | $C_T^*$ | $T^*$    |
| 3.0      | 0.883    | 0.033    | 0.065    | 0.015    | 0.015    | 0.104  | 0.010 | 0.181      | 3.907   | 0.512    |
|          | $K$      | $L$      | $M$      | $N$      | 判別式 $D$  | $p$    | $q$   | $\theta^*$ | $i^*$   | $\alpha$ |
|          | 0.03     | 1.77     | -1.56    | 4.16     | 3.27     | -38.17 | 0.44  | 0.436      | 0.871   | 0.318    |
| $c_{pn}$ | $C_{pn}$ | $C_{pr}$ | $C_{hp}$ | $C_{hu}$ | $C_{hr}$ | $C_r$  | $C_c$ | $C_i$      | $C_T^*$ | $T^*$    |
| 4.0      | 0.833    | 0.099    | 0.061    | 0.021    | 0.021    | 0.175  | 0.017 | 0.654      | 4.034   | 0.496    |
|          | $K$      | $L$      | $M$      | $N$      | 判別式 $D$  | $p$    | $q$   | $\theta^*$ | $i^*$   | $\alpha$ |
|          | 0.03     | 1.46     | -2.81    | 5.40     | 2.38     | -32.00 | 0.94  | 0.936      | 1.872   | 0.568    |

表4 ケース1における  $h_u$  と  $h_r$  の効果

| $h_u$ | $C_{pn}$ | $C_{pr}$ | $C_{hp}$ | $C_{hu}$ | $C_{hr}$ | $C_r$ | $C_c$ | $C_i$      | $C_T^*$ | $T^*$    |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|-------|------------|---------|----------|
| 0.1   | 0.595    | 0.216    | 0.083    | 0.032    | 0.032    | 0.299 | 0.030 | 0.826      | 3.476   | 0.575    |
|       | $K$      | $L$      | $M$      | $N$      | 判別式 $D$  | $p$   | $q$   | $\theta^*$ | $i^*$   | $\alpha$ |
|       | 0.18     | 2.13     | -3.21    | 4.16     | 6.29     | -8.49 | 0.69  | 0.691      | 1.382   | 0.722    |
| $h_u$ | $C_{pn}$ | $C_{pr}$ | $C_{hp}$ | $C_{hu}$ | $C_{hr}$ | $C_r$ | $C_c$ | $C_i$      | $C_T^*$ | $T^*$    |
| 0.15  | 0.558    | 0.241    | 0.085    | 0.051    | 0.034    | 0.321 | 0.032 | 0.929      | 3.421   | 0.585    |
|       | $K$      | $L$      | $M$      | $N$      | 判別式 $D$  | $p$   | $q$   | $\theta^*$ | $i^*$   | $\alpha$ |
|       | 0.23     | 2.04     | -3.32    | 4.17     | 6.45     | -6.71 | 0.72  | 0.724      | 1.447   | 0.751    |
| $h_u$ | $C_{pn}$ | $C_{pr}$ | $C_{hp}$ | $C_{hu}$ | $C_{hr}$ | $C_r$ | $C_c$ | $C_i$      | $C_T^*$ | $T^*$    |
| 0.3   | 0.434    | 0.334    | 0.096    | 0.123    | 0.041    | 0.400 | 0.040 | 1.306      | 3.233   | 0.619    |
|       | $K$      | $L$      | $M$      | $N$      | 判別式 $D$  | $p$   | $q$   | $\theta^*$ | $i^*$   | $\alpha$ |
|       | 0.36     | 1.79     | -3.65    | 4.20     | 7.18     | -4.08 | 0.82  | 0.817      | 1.634   | 0.835    |

| $h_r$ | $C_{pn}$ | $C_{pr}$ | $C_{hp}$ | $C_{hu}$ | $C_{hr}$ | $C_r$ | $C_c$ | $C_i$      | $C_T^*$ | $T^*$    |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|-------|------------|---------|----------|
| 0.15  | 0.558    | 0.241    | 0.085    | 0.034    | 0.051    | 0.321 | 0.032 | 0.929      | 3.421   | 0.585    |
|       | $K$      | $L$      | $M$      | $N$      | 判別式 $D$  | $p$   | $q$   | $\theta^*$ | $i^*$   | $\alpha$ |
|       | 0.23     | 2.04     | -3.32    | 4.17     | 6.45     | -6.71 | 0.72  | 0.724      | 1.447   | 0.751    |
| $h_r$ | $C_{pn}$ | $C_{pr}$ | $C_{hp}$ | $C_{hu}$ | $C_{hr}$ | $C_r$ | $C_c$ | $C_i$      | $C_T^*$ | $T^*$    |
| 0.3   | 0.434    | 0.334    | 0.096    | 0.041    | 0.123    | 0.400 | 0.040 | 1.306      | 3.233   | 0.619    |
|       | $K$      | $L$      | $M$      | $N$      | 判別式 $D$  | $p$   | $q$   | $\theta^*$ | $i^*$   | $\alpha$ |
|       | 0.36     | 1.79     | -3.65    | 4.20     | 7.18     | -4.08 | 0.82  | 0.817      | 1.634   | 0.835    |

表5より、 $h_p$ の高低は総費用には影響するが、回収率には影響しない傾向がみられる。

## 5. むすび

本論文ではEOQ型の閉ループロジスティクスシステムモデルにおいて製造部門とリサイクル部門をもつ製造企業を考え、単一の製品を製造し、市場に供給し、そこから中古品を回収し再製造する閉ループ製造リサイクルシステムを考えた。このとき、市場に出回っている中古品を用いて再製造するというリサイクルを考えると、中古品を回収する活動にインセンティブを与えることによって回収を促進し、結果として回収率が高まり、製造・再製造のリサイクルを促進するような閉ループ製造リサイクルシステムのモデル化を考えた。本論文では、回収のためのインセンティブの効果について、回収量とインセンティブ率の関係に

表 5 ケース 1 における  $h_u$  と  $h_p$  の効果

| $h_p$ | $C_{pn}$ | $C_{pr}$ | $C_{hp}$ | $C_{hu}$ | $C_{hr}$ | $C_r$ | $C_c$ | $C_i$      | $C_T^*$ | $T^*$    |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|-------|------------|---------|----------|
| 0.2   | 0.595    | 0.216    | 0.083    | 0.032    | 0.032    | 0.299 | 0.030 | 0.826      | 3.476   | 0.575    |
|       | $K$      | $L$      | $M$      | $N$      | 判別式 $D$  | $p$   | $q$   | $\theta^*$ | $i^*$   | $\alpha$ |
|       | 0.18     | 2.13     | -3.21    | 4.16     | 6.29     | -8.49 | 0.69  | 0.691      | 1.382   | 0.722    |
| $h_p$ | $C_{pn}$ | $C_{pr}$ | $C_{hp}$ | $C_{hu}$ | $C_{hr}$ | $C_r$ | $C_c$ | $C_i$      | $C_T^*$ | $T^*$    |
| 0.5   | 0.529    | 0.192    | 0.184    | 0.029    | 0.029    | 0.266 | 0.027 | 0.735      | 3.685   | 0.543    |
|       | $K$      | $L$      | $M$      | $N$      | 判別式 $D$  | $p$   | $q$   | $\theta^*$ | $i^*$   | $\alpha$ |
|       | 0.18     | 2.13     | -3.21    | 4.53     | 6.29     | -8.49 | 0.69  | 0.691      | 1.382   | 0.722    |
| $h_p$ | $C_{pn}$ | $C_{pr}$ | $C_{hp}$ | $C_{hu}$ | $C_{hr}$ | $C_r$ | $C_c$ | $C_i$      | $C_T^*$ | $T^*$    |
| 0.8   | 0.476    | 0.173    | 0.265    | 0.026    | 0.026    | 0.239 | 0.024 | 0.662      | 3.883   | 0.515    |
|       | $K$      | $L$      | $M$      | $N$      | 判別式 $D$  | $p$   | $q$   | $\theta^*$ | $i^*$   | $\alpha$ |
|       | 0.18     | 2.13     | -3.21    | 4.91     | 6.29     | -8.49 | 0.69  | 0.691      | 1.382   | 0.722    |

線形関係がある場合に、製造部門とリサイクル部門における製造・再製造に関わる総費用を最小にする最適なインセンティブ率を導出した。数値例として、回収中古品がすべてリサイクル可能品となり、そのすべてが再製造工程に回されリサイクル品となる場合について数値実験を行なった結果、費用パラメータの値によっては必ずしも最大のインセンティブ費用を投下しなくとも、総費用を最小にするような最適なインセンティブ費が存在することがわかった。新規材料・部品による製造費が高いときに、インセンティブ効果が高く、インセンティブ費用を用いて回収率を高める場合がみられた。

本論文では、回収量とインセンティブ率の関係が線形的である場合を考察したが、他の関係の場合も考察する必要があるであろう。また、本論文では、回収活動におけるインセンティブに着目し、リサイクル処理率やリサイクル利用率との関係については考察しなかったが、それらの率が回収活動におけるインセンティブによって向上するかどうか、また、回収活動におけるインセンティブによってそれらの最適な率が存在するかどうかなどについても調べる必要である。また、回収率が上がるとともにリサイクル可能品の増加による量的効果によってリサイクル処理費の低減、さらには、リサイクル再製造費の低減も考えられる。それらのコストの低減によるリサイクル処理率やリサイクル利用率への効果も考察の対象となろう。さらに、製造部門とリサイクル部門をもつ一企業体における製造リサイクルシステムについて考察したが、それぞれが独立した企業体として、一つの製造企業と複数の回収リサイクル企業からなるようなより一般的なリバーシブル構造をもつ閉ループ製造リサイクルシステムに拡張することも意味があろう。また、Savaskanら(2004)の回収のためのリバーシブル構造の選択問題における考察と同様に、製造部門とリサイクル部門をもつ一企業

回収インセンティブを考慮した閉ループ型ロジスティクスシステムにおける回収方策

体か、回収リサイクル企業か、また公的組織かなど、どの組織がインセンティブ費を負担するかという問題についての考察も意味があろう。

#### 参考文献

- (1) Dobos, I., Gobsch, B., Pakhomova, N., Pishchulov, G. and Richter, K. (2011), "A Vendor-purchaser Economic Lot Size Problem with Remanufacturing and Deposit", *European University Viadrina Frankfurt (Oder), Department of Business Administration and Economics, Discussion Paper*, 304.
- (2) Dobos, I., Gobsch, B., Pakhomova, N., Pishchulov, G., Richter, K. (2013), "Design of contract parameters in a closed-loop supply chain", *Central European Journal of Operations Research*, Vol. 21, 713-727
- (3) Dolan, R. (1987), "Quantity discounts: managerial issues and research opportunities", *Marketing Science*, 6 (1), 1-22
- (4) Ke, H., Li, Y., Huang, H. (2015), "Uncertain Pricing Decision Problem in Closed-Loop Supply Chain with Risk-Averse Retailer", *Journal of Uncertainty Analysis and Applications*, 3: 14, 1-14
- (5) Pishchulov, G., Dobos, I., Gobsch, B., Pakhomova, N., Richter, K., (2014), "A Vendor-purchaser Economic Lot Size Problem with Remanufacturing", *Journal of Business Economics*, 84 (4), 749-791.
- (6) Savaskan, R. C. (2001), "Channel Choice and Coordination in a Remanufacturing Environment", *Discussion paper*, No. 1328, Center for Mathematical Studies in Economics and Management Science, Kellogg School of Management, Northwestern University
- (7) Savaskan, R. C., Bhattacharya, S. and Van Wassenhove, L. N. (2004), "Closed-Loop Supply Chain Models with Product Remanufacturing", *Management Science*, 50 (2), 239-252
- (8) Savaskan, R. C., Van Wassenhove, L. N., (2006), "Reverse Channel Design: The Case of Competing Retailers", *Management Science*, 52 (1), 1-14.
- (9) Wei, S., Tang, O., Sundin, E. (2015), "Core (product) Acquisition Management for Remanufacturing: A review", *Journal of Remanufacturing*, 5 (4), 1-27
- (10) 若尾良男 (2009), "EOQ 型リバースロジスティクスシステムにおける製造リサイクル方策", 東京経大会誌 264