

回収率が回収品処理費に影響する場合の 閉ループ型ロジステックスシステムの 回収インセンティブ率の決定

若尾良男

1. はじめに

リバースロジステックス (Reverse Logistics) の過程を、経済的発注量 (Economic Order Quantity) 問題の枠組みで考察した若尾 (2009) の製造・リサイクルシステムにおいては、最初にリサイクル品を利用した製造が開始・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を考え、回収されたり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・部品による製造と新規品と同等に処理されたりサイクル品による製造を行う製造・リサイクルシステムに関連する諸費用の総和を最小にする、リサイクル可能な回収品からどの程度の割合で製造工程に供給するかの最適なりサイクル率を求めた。さらに、若尾 (2020) では、市場にある中古品の回収活動を促進するインセンティブを導入したモデルにおいて、回収インセンティブと回収率の関係を線形関係と仮定して、インセンティブの効果により回収率が高まる場合の最適なインセンティブ率を求めた。

本稿では、若尾 (2020) における回収活動を促進するためのインセンティブを導入した製造・リサイクルシステムにインセンティブの効果により、回収率の向上とともに単位ユニット当たりの回収品処理費が線型的に低減する場合を考察する。2節で、本稿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ックスシステムにおける製造システムパラメータと費用パラメータを説明する。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。製造・リサイクル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、インセンティブによる回収率と単位ユニット当たりの回収品処理費への効果をいくつかの数値例で示す。4節でむすびを述べる。

2. 製造・リサイクルシステム

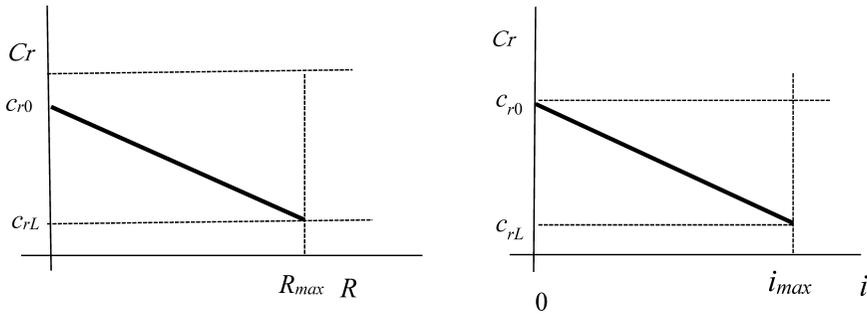
2.1 製造・リサイクルシステムの概要と製造と費用パラメータ

一つの製品について市場の需要を満たすために製造している企業において、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を新規材料・部品と同等な品質をもつように処理したリサイクル品を用いて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投入して、市場に出回っている中古品を効率よく回収しリサイクル可能な材料・部品として回収品を処理するリサイクル部門とからなる閉ループ型ロジスティクスシステムを考える。製造された製品は製造後、製品貯蔵施設 S_p に保管され、その後市場に投入される。企業は市場にある中古品を回収して、リサイクルを考える。この際、企業はできるだけ多くのリサイクル品を利用したいと考え、インセンティブな費用を投入してでも中古品の回収の促進を図ることを考えるであろう。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、リサイクル部門での処理により、リサイクル可能なリサイクル品としてリサイクル品貯蔵施設 S_R に保存され、そうでない回収品は廃棄されるとする。

このような製造・リサイクルシステムにおける製造システムに関するパラメータとして、製造率 $\{P$ (ユニット/時) $\}$ 、需要率 $\{D$ (ユニット/時) $\}$ ($D < P$)、新規材料・部品を用いて製造する時間 (製造時間) $\{T_m$ (時間) $\}$ 、新品と同等の品質をもつリサイクル品を用いて製造する時間 (再製造時間) $\{T_r$ (時間) $\}$ 、製造終了後製品在庫がなくなるまでの時間 $\{T_c$ (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総時間 (全製造・リサイクル時間) $\{T$ (時間) $\}$ 、回収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) $\{\delta(0 \leq \delta \leq 1)\}$ 、リサイクル可能品を利用する割合 (リサイクル利用率) $\{\varphi(0 \leq \varphi \leq 1)\}$ を考える。回収活動に関わるパラメータとして、需要に対して市場から回収される中古品の割合を示す回収率 $\{\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)\}$ と、回収活動を促進する活動費としてインセンティブ費 i を考え、その出費程度を表す回収インセンティブ率を、 $\{\theta = i/i_{max}, (0 \leq \theta \leq 1), i_{max}$ は最大インセンティブ費を表す) $\}$ として導入する。

また、費用に関しては、製造部門では、新規の原材料を用いて製造したときの原材料費と調達費用を含む製品 1 単位ユニット当たりの製造費用 $\{c_{pm}$ (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 単位ユニット当たりの製造費用 $\{c_{pr}$ (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 $\{c_s$ (円/ユニット) $\}$ 、製造した製品 1 単位を貯蔵する製品貯蔵施設 S_p での在庫保持費用 $\{h_p$ (円/ユニット) $\}$ を考え、リサイクル部門では、リサイクル可能な中古品 1 単位を市場から回収する際のインセンティブ費用 $\{c_i$ (円/ユニット) $\}$ 、リサイクル可能な回収品 1 単位を市場から回収するための費用 $\{c_c$ (円/ユニット) $\}$ 、製造部門への配送費用を含む、製造・リサイクル時間中に新規品

図 1 インセンティブ量と単位ユニット当たりの回収品処理費用の関係



と同等の品質をもつように回収品に施される 1 単位ユニット当たりの処理費用 $\{c_r$ (円/ユニット) $c_{pn} > c_{pr} + c_r\}$, リサイクルとして不適な回収品 1 単位を廃棄する費用 $\{c_d$ (円/ユニット) $\}$, 回収品 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) $\}$, 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) $\}$ を考える。

2.2 回収インセンティブによる単位ユニット当たりの回収品処理費の低減効果

若尾 (2020) では, インセンティブの効果が中古品の回収率に影響する場合を考えた。リサイクルを促進するために回収インセンティブ費用 i を回収活動に投入することにより市場に出回っている中古品の回収が増進することを考え, 回収インセンティブ費と回収率の線型的関係を導入し, 結果として回収率が向上するモデルを考えた。そのような製造・リサイクルシステムに対して, さらに, 本稿では, 回収率の上昇が回収品の量の増加をもたらし, リサイクルのために新規品と同等の品質をもつように回収品に施す回収品処理工程の処理効率上がることにより, 規模の経済性による単位あたりの回収品処理費用の低減が期待されると考える。そこで, 若尾 (2020) の製造・リサイクルシステムにおけるインセンティブの効果を中古品の回収率に影響する場合に加え, インセンティブの効果が単位ユニット当たりの回収品処理費の低減に寄与する場合を考えることにする。

そこで, 回収品を新規品と同等の品質をもつように処理するための回収品処理費 c_r はインセンティブがないときの単位ユニット当たりの回収品処理費 c_{r0} からインセンティブ費用の額が $0 \leq i \leq i_{max}$ の範囲で増大するとともに線型的に低減し, その額が最大額 i_{max} のときに, 回収品の量は最大回収量 R_{max} となり, このときの単位ユニット当たりの回収処理費が最低回収品処理費 c_{rL} ($c_{r0} > c_{rL}$) まで低減するものとする (図 1)。

回収を促進するインセンティブの割合を表すインセンティブ率を, $\theta = \frac{i}{i_{max}}$, ($0 \leq \theta \leq 1$) とすると, 単位ユニット当たりの回収品処理費 c_r との関係は以下のように表すことができる。

回収率が回収品処理費に影響する場合の閉ループ型ロジステックスシステムの…

$$c_r DT = c_{r0} DT - (c_{r0} - c_{rL}) DT \left(\frac{i}{i_{max}} \right) \quad \text{より}$$

$$c_r(\theta) = c_{r0} - c_{r0} \left(1 - \frac{c_{rL}}{c_{r0}} \right) \theta = d - c\theta \quad (1)$$

なお、 c と d は、それぞれ、 $c = c_{r0}(1 - c_{rL}/c_{r0})$ と $d = c_{r0}(-c + d = c_{rL})$ を表す。インセンティブ率が $\theta=1$ のとき、すなわち、インセンティブ費の額が i_{max} であるとき、回収品処理費は最低回収品処理費 c_{rL} となり、回収率は、 $\alpha(1) = R_{max}/D$ となる。最大回収量を $R_{max} = D$ 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、その時の回収品処理費は最低費用 c_{rL} となる。

3. 製造・リサイクル部門での総費用と回収インセンティブ率の決定

3.1 製造・リサイクル部門での諸費用と総費用

本稿で考える製造・リサイクルモデルにおける費用は、前述の費用パラメータを用いて次のように求められる。製造・リサイクル時間中の製造部門の貯蔵施設での在庫保持費用 C_{hp} (円×時間) は以下のように求められる。

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

製造・リサイクル時間中に原材料費と調達費用を含む新規材料を用いて製造するための費用 C_{pn} (円×時間) は、 $\alpha(\theta) = a\theta + b$ の関係を用いて以下のように表される。

$$\begin{aligned} C_{pn} &= c_{pn} \int_{T_r}^{T_m} P t dt = c_{pn} \left(\frac{D^2}{2P} - \frac{D^2}{2P} \varphi^2 \delta^2 \alpha(\theta)^2 \right) T^2 \\ &= c_{pn} \left(\frac{D^2}{2P} - \frac{D^2}{2P} \varphi^2 \delta^2 (a\theta + b)^2 \right) T^2 \end{aligned} \quad (3)$$

製造・リサイクル時間中にリサイクル可能品を用いて製造するときの費用 C_{pr} (円×時間) は以下のように表される。

$$\begin{aligned} C_{pr} &= c_{pr} \int_0^{T_r} P t dt = c_{pr} \left(\frac{D^2}{2P} \varphi^2 \delta^2 \alpha(\theta)^2 \right) T^2 \\ &= c_{pr} \left(\frac{D^2}{2P} \varphi^2 \delta^2 (a\theta + b)^2 \right) T^2 \end{aligned} \quad (4)$$

製造・リサイクル時間中にリサイクル可能品による製造から新規品による製造に切り替えるときの段取り費用 C_s (円×時間) は以下のように表される。

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

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 C_{hu} (円×時間) は以下のように表される。

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

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 C_r (円×時間) は、 $\alpha(\theta) = a\theta + b$ と $c_r(\theta) = -c\theta + d$ の関係を用いて以下のように表される。

$$\begin{aligned} C_r &= c_r(\theta) \int_0^T \delta \alpha(\theta) D t dt = \frac{D}{2} \delta (-c\theta + d) (a\theta + b) T^2 \\ &= \frac{D}{2} \delta (-ac\theta^2 + (ad - bc)\theta + bd) T^2 \end{aligned} \quad (7)$$

製造・リサイクル時間中にリサイクル可能品を貯蔵するための保持費用 C_{hr} (円×時間) は以下のように表される。

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

リサイクル部門が負担する回収インセンティブ費用 C_i (円×時間) は、 $\theta = i/i_{max}$, $i = i_{max}\theta$ の関係と $\alpha(\theta) = a\theta + b$ の関係を用いて、以下のように表される。

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

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 C_c (円×時間) は以下のように表される。

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

製造・リサイクル時間中にリサイクルに不適として回収品を廃棄するための費用 C_d (円×時間) は以下のように表される。

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

以上の各費用項目から製造・リサイクル部門の総費用の単位時間当たりの費用 $C_T(\theta, \varphi, \delta, a, b, c, d, T)$ は次のようになる。

$$C_T(\theta, \varphi, \delta, a, b, c, d, T) = \frac{C_{pm} + C_{pr} + C_{hp} + C_{hu} + C_{hr} + C_r + C_c + C_d + C_i + C_s}{T}$$

回収率が回収品処理費に影響する場合の閉ループ型ロジステックシステムの…

$$= (K(\varphi, \delta, a)\theta^3 + L(\varphi, \delta, a, b, c)\theta^2 + M(\varphi, \delta, a, b, c, d)\theta + N(\varphi, \delta, b, d))T + \frac{C_s}{T} \quad (12)$$

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

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

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

$$M(\varphi, \delta, a, b, c, d) = \{\varphi \delta (c_{pr} - c_{pn}) - 2(h_u + \delta h_r)\} \left\{ \frac{\varphi \delta D^2}{P} \right\} ab + 3((\delta + 1)h_u + (\varphi + 1)\delta h_r) \left\{ \frac{\varphi^2 \delta^2 D^3}{2P^2} \right\} ab^2 + (h_u + \delta h_r) \left\{ \frac{D}{2} \right\} a + c_c \left\{ \frac{D}{2} \right\} a + c_d \left\{ \frac{D}{2} (1 - \delta) \right\} a + i_{max} \left\{ \frac{D}{2} \right\} b + \left\{ \frac{\delta D}{2} \right\} (ad - bc) \quad (13c)$$

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

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

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

と表すと、総費用は

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

と表され、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。

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

さらに、この最適製造・リサイクル時間 T^* を与えたときの製造部門における総費用の最小値 $C_{T^*}(\theta, \varphi, \delta, a, b, c, d, T^*)$ は、

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

となる。

3.2 回収率が回収品処理費に影響する場合の回収インセンティブ率の決定

製造部門とリサイクル部門での総費用 $C_T(\theta, \varphi, \delta, a, b, c, d, T)$ は、リサイクル利用率とリサイクル処理率の関数となるが、これらの率については本稿では考察の対象としていないので、所与としてそれぞれを定数 φ^+ と δ^+ とする。さらに、単位時間当たりの総費用において、回収率 $\alpha(\theta) = a\theta + b$ のパラメータを許容範囲内の任意の値 a^+, b^+ に指定し、同時に、単位ユニット当たりの回収品処理費 $c_r(\theta) = -c\theta + d$ のパラメータも許容範囲の任意の値、 c^+, d^+ に指定する。これにより、製造・リサイクル部門による回収促進のためのインセンティブ率 θ の決定は、(12) 式の製造・リサイクル部門の総費用のパラメータを $C_{T^*}(\theta, \varphi^+, \delta^+, a^+, b^+, c^+, d^+, T^*)$ として、この関数を構成する費用関数、

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

を最小にするインセンティブ率 θ を決定することとなる。ここで、この関数の表記を簡便にするために、 $A^+(\theta)$ と表記し、以下のように表す。

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

θ の関数である $A^+(\theta)$ は θ に関して3次関数であるが、問題は、 θ 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。この $A^+(\theta)$ は、若尾 (2020) における総費用の各係数と定数項に回収品処理費のパラメータ c^+ と d^+ に関する項が付加されたものとなるので、同様の仕方で最適な θ が求められる。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、リサイクル利用率 φ を1、リサイクル処理率 δ を1として、問題を単純化する。さらに、単位時間当たりの総費用 $C_T(\theta, 1, 1, a, b, c, d, T)$ における回収率 $\alpha(\theta)$ のパラメータを \bar{a}, \bar{b} ($0 \leq \bar{a} \leq 1, 0 \leq \bar{b} \leq 1$)、回収品処理費 $c_r(\theta)$ のパラメータの値を \bar{c}, \bar{d} として固定する。すると、製造・リサイクル部門の単位時間当たりの総費用 $C_T(\theta, 1, 1, \bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}, T^*)$ は以下のように表される。

回収率が回収品処理費に影響する場合の閉ループ型ロジステックスシステムの…

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

さらに、(19) 式の第1項を、 $\bar{A}(\theta)$ とおくと、

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

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

$$\begin{aligned} \bar{K} &= K(1, 1, \bar{a}) = h_u \left\{ \frac{D^3}{P^2} \right\} \bar{a}^3 + h_r \left\{ \frac{D^3}{P^2} \right\} \bar{a}^3 > 0 \\ \bar{L} &= L(1, 1, \bar{a}, \bar{b}, \bar{c}) \\ &= \{(c_{pr} - c_{pn}) - 2(h_u + h_r)\} \left\{ \frac{D^2}{2P} \right\} \bar{a}^2 + 3(h_u + h_r) \left\{ \frac{D^3}{P^2} \right\} \bar{a}^2 \bar{b} + i_{max} \left\{ \frac{D}{2} \right\} \bar{a} - \frac{D}{2} \bar{a} \bar{c} \\ \bar{M} &= M(1, 1, \bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}) = \{(c_{pr} - c_{pn}) - 2(h_u + h_r)\} \left\{ \frac{D^2}{P} \right\} \bar{a} \bar{b} + 3(h_u + h_r) \left\{ \frac{D^3}{P^2} \right\} \bar{a} \bar{b}^2 \\ &\quad + (h_u + h_r) \left\{ \frac{D}{2} \right\} \bar{a} + \left\{ \frac{D}{2} \right\} (\bar{a} \bar{d} - \bar{b} \bar{c}) + c_c \left\{ \frac{D}{2} \right\} \bar{a} + i_{max} \left\{ \frac{D}{2} \right\} \bar{b} \\ \bar{N} &= N(1, 1, \bar{b}, \bar{d}) = c_{pn} \left\{ \frac{D^2}{2P} - \frac{D^2}{2P} \bar{b}^2 \right\} + c_{pr} \left\{ \frac{D^2}{2P} \bar{b}^2 \right\} + h_p \left\{ \frac{(P-D)D}{2P} \right\} \\ &\quad + h_u \left\{ \frac{D^3}{P^2} \bar{b}^3 - \frac{D^2}{P} \bar{b}^2 + \frac{D}{2} \bar{b} \right\} + h_r \left\{ \frac{D^3}{P^2} \bar{b}^3 - \frac{D^2}{P} \bar{b}^2 + \frac{D}{2} \bar{b} \right\} + c_c \left\{ \frac{D}{2} \right\} \bar{b} + \left\{ \frac{D}{2} \right\} \bar{b} \bar{d} > 0 \end{aligned}$$

この費用関数 $\bar{A}(\theta)$ について、インセンティブ率 θ が $0 \leq \theta \leq 1$ の範囲にあるときの $\bar{A}(\theta)$ を最小にする θ を決定することができる。若尾 (2020) により、製造・リサイクル総費用を最小にする最適なインセンティブ率は費用パラメータの値によって、 $\theta^* = 0, \theta^* = 1, \theta^* = (-\bar{L} + \sqrt{\bar{L}^2 - 3\bar{K}\bar{M}})/3\bar{K}$ の3つの値のいずれかの値となり、回収のためのインセンティブ量を最大に消費しなくとも製造・リサイクル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た。本稿で提案した単位当たりのリサイクル処理費が回収インセンティブ費を導入したモデルにおいて、単位当たりのリサイクル処理費に回収インセンティブに関わる費用パラメータ c と d が総費用関数の項の $\bar{L}, \bar{M}, \bar{N}$ に付加されるだけであるので、若尾 (2020) と同様に最適な回収インセンティブ費が求められる。

3.3 数値例

本稿で考察したインセンティブ率が回収率と単位ユニット当たりの回収品処理費の低減に寄与する場合の回収方策を考えたが、インセンティブ率が回収率のみに寄与する場合の方策 (若尾 (2020)) と比較検討するために、いくつかの数値実験を行うことにする。この実験では、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

表 1 ケース 1 におけるインセンティブ率の単位ユニット当たりの回収品処理費に対する効果

回収品処理費に対してインセンティブ率が影響しない場合：A, 影響する場合：B													
	c_{pn}	c_{pr}	c_{r0}	c_{rL}	c_r	C_r	C_T^*	T^*	θ^*	i^*	α		
A	1.0	0.25	0.5	-	0.500	0.124	2.480	0.807	0.058	0.115	0.152		
B			0.5	0.2	0.469	0.139	2.558	0.782	0.104	0.208	0.194		
A		0.5	0.5	-	0.500	0.081	2.491	0.803	0.000	0.000	0.100		
B			0.5	0.2	0.496	0.084	2.589	0.772	0.014	0.029	0.113		
A		2.0	1.0	0.5	-	0.500	0.108	3.300	0.606	0.150	0.300	0.235	
B				0.5	0.2	0.428	0.122	3.331	0.600	0.239	0.478	0.315	
A				0.7	-	0.700	0.106	3.362	0.595	0.080	0.160	0.172	
B				0.7	0.2	0.592	0.149	3.419	0.585	0.217	0.434	0.295	
A	1.5		0.5	-	0.500	0.045	3.348	0.600	0.000	0.000	0.100		
B			0.5	0.2	0.496	0.048	3.421	0.585	0.014	0.029	0.113		
A			3.0	1.0	0.5	-	0.500	0.312	3.403	0.588	0.691	1.382	0.722
B					0.5	0.2	0.200	0.214	3.056	0.654	1.000	2.000	1.000
A	0.7	-			0.700	0.346	3.598	0.556	0.600	1.201	0.640		
B	0.7	0.2			0.200	0.218	3.030	0.660	1.000	2.000	1.000		
A	1.5	0.5		-	0.500	0.152	3.815	0.524	0.380	0.759	0.442		
B		0.5		0.2	0.334	0.142	3.743	0.534	0.553	1.105	0.597		
A		0.7		-	0.700	0.168	3.920	0.510	0.300	0.600	0.370		
B		0.7		0.2	0.398	0.176	3.812	0.525	0.604	1.208	0.644		

クル利用率 $\varphi=1$ の場合を考える。製造パラメータを $P=10, D=5, D_0=0.5, R_{max}=5$ とし、回収インセンティブパラメータを $a=0.90, b=0.10$ とする、回収率にインセンティブ効果が高く関与する場合（ケース 1）と、 $P=10, D=5, D_0=0.5, R_{max}=3$ とし、 $a=0.50, b=0.10$ とす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）の二つの場合を考える。それぞれの場合において、単位ユニット当たりの回収品処理費の費用パラメータである c と d （初期回収品処理費 c_{r0} と最低回収品処理費 c_{rL} の値）を、 $\{c_{r0}=0.5: c_{rL}=0.2\}$ と $\{c_{r0}=0.5: c_{rL}=0.2\}$ の二つの場合を考え、インセンティブ率と単位ユニット当たりの回収品処理費に対する低減効果を調べることにする。その他の費用パラメータについては、 $h_p=0.1, h_u=0.1, h_r=0.1$ と $c_c=0.05, c_s=1.0$ とし固定する。なお、最大インセンティブ量は $i_{max}=2$ とする。

表 1 と表 2 より、インセンティブ率が回収率のみに寄与する方策（表中 A）に比べると、

表2 ケース2におけるインセンティブ率の単位ユニット当たりの回収品処理費に対する効果

回収品処理費に対してインセンティブ率が影響しない場合：A, 影響する場合：B													
	c_{pn}	c_{pr}	c_{r0}	c_{rL}	c_r	C_r	C_{T^*}	T^*	θ^*	i^*	α		
A	1.0	0.25	0.5	-	0.500	0.081	2.489	0.804	0.000	0.000	0.100		
B			0.5	0.2	0.465	0.112	2.568	0.779	0.112	0.235	0.159		
A		0.5	0.5	-	0.500	0.081	2.491	0.803	0.000	0.000	0.100		
B			0.5	0.2	0.491	0.084	2.588	0.773	0.029	0.058	0.115		
A		2.0	1.0	0.5	-	0.500	0.062	3.337	0.599	0.074	0.148	0.137	
B				0.5	0.2	0.436	0.079	3.371	0.593	0.207	0.428	0.207	
A				0.7	-	0.700	0.066	3.373	0.593	0.014	0.028	0.107	
B				0.7	0.2	0.583	0.107	3.430	0.583	0.233	0.466	0.217	
A	1.5		0.5	-	0.500	0.045	3.348	0.597	0.000	0.000	0.100		
B			0.5	0.2	0.491	0.048	3.420	0.585	0.029	0.058	0.115		
A			3.0	1.0	0.5	-	0.500	0.108	3.843	0.520	0.436	0.871	0.318
B					0.5	0.2	0.291	0.094	3.722	0.537	0.695	1.391	0.448
A	0.7	-			0.700	0.129	3.920	0.510	0.366	0.733	0.283		
B	0.7	0.2			0.291	0.107	3.719	0.538	0.818	1.636	0.509		
A	1.5	0.5		-	0.500	0.070	3.963	0.505	0.241	0.482	0.221		
B		0.5		0.2	0.370	0.076	3.934	0.508	0.433	0.865	0.316		
A		0.7		-	0.700	0.082	4.014	0.498	0.177	0.354	0.188		
B		0.7		0.2	0.453	0.100	3.969	0.504	0.495	0.989	0.347		

本稿で提案したインセンティブ率が回収率と回収品処理費に寄与する方策（表中B）ではインセンティブ率 θ^* が高くなり、回収率 α が高まる傾向を示した。結果としてインセンティブ費や総回収品処理費 C_r が高くなり、単位ユニット当たりの新規品による製造費 c_{pn} とリサイクル品の製造費 c_{pr} の差が小さい場合に総費用が高くなる場合もみられるが、総じてインセンティブ費が増加するにもかかわらず、総費用 C_{T^*} は低くなる傾向を示している。しかも、単位ユニット当たりの回収品処理費 c_r は、回収率の向上とともに、規模の経済性による効果として低減する傾向がみられる。それらの効果は回収品処理費の低減率が大きくなるにつれてインセンティブの効果により大きくなること示している。また、ケース1とケース2を比較すると、回収率にインセンティブ効果が強く関与する場合のケース1の方が上述の傾向が強くみられることがわかる。

4. むすび

本稿では EOQ 型の閉ループロジスティクスシステムモデルの枠組みの中で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、結果として回収率を高め、リサイクル部門での回収品の処理工程における回収品の処理量の増加に伴う規模の経済性の効果をインセンティブ率と単位ユニット当たりの回収品処理費との線型的関係を総費用に組み込むことにより、製造・リサイクル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求めた。数値例によると、インセンティブの効果が回収率のみの場合よりインセンティブの効果が大きくなり、インセンティブ費を含めた総製造リサイクル費用が低減し回収率も高まることがわかった。

参 考 文 献

- (1) 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”, 東京経学会誌 264
- (2) 若尾良男 (2020), “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”, 東京経学会誌 306