

廃棄物リサイクル財市場における動的価格均衡と問屋の在庫行動*

Price Dynamics and Inventory Behavior in Supply Push Market*

大窪和明** 稲村肇***

By Kazuaki OKUBO**, Hajime INAMURA***

1. はじめに

近年、アジア諸国への廃棄物リサイクル財の輸出が急拡大している。同時に、我が国における廃棄物リサイクル財の市場は海外における不確実性の影響を受けやすくなっている。例えば、2008年に世界景気の減速を受け、鉄スクラップの価格が急激に下落し、余剰鉄スクラップが発生したことは記憶に新しい。廃棄物リサイクル財の輸出を通じて海外とのつながりが強まることにより、我が国の廃棄物リサイクル財市場はより多くの不確実性の影響を受け、変動しやすくなった。こうした変動は、廃棄物を排出する家計や企業の排出行動にも、影響している。安定したリサイクルシステムを構築するためには、廃棄物リサイクル財市場における変動特性を把握し、リサイクルポートの整備などの政策がこれらの変動に及ぼす影響を把握する必要がある。

ほとんどの廃棄物リサイクル財は問屋が輸出する。そのため問屋は海外と国内の両方の販売市場において生じた変動に直面している。廃棄物リサイクル財の発生源となる国内の家計や企業は、問屋が廃棄物リサイクル財を買入れる市場の買入れ価格の決定行動を通じて販売市場に生じた変動の影響を受ける。したがって、廃棄物リサイクル財の販売市場における変動が排出主体に与える影響を把握するためには、問屋の販売市場と買入れ市場という垂直的に連鎖する二つの市場を考慮する必要がある。

垂直的に連鎖している二つの市場の関係性を調べた研究には、多くの蓄積がある。(例えば、Humphreys et al¹⁾など)しかし、これらのほとんどの研究において価格は外生的に扱われている。特に、買入れ市場と販売市場におけるそれぞれの価格を同時に内生化した研究は数少ない。また廃棄物リサイクル財市場における特徴である Supply-Push 型の供給構造を考慮した上で、垂直的に連鎖した二つの市場を対象とした研究には、大窪ら²⁾によ

る研究がある。大窪らは古紙市場を対象に競争在庫モデルを拡張し、問屋の在庫量推移を推計した。その結果、拡張モデルの実データに対する説明力が確認された。しかし、モデルから得られる買入れ価格と販売価格の変動特性や、経済環境の変化との関係については明らかにされていない。そこで本研究では、大窪らのモデルを用いて、買入れ価格と販売価格の変動に関する理論的な性質を明らかにする。また輸出の拡大によって、廃棄物リサイクル財に対する需要量や変動が増大した状況において、需要が減少したときに市場や問屋の在庫に見られる変動特性の変化を明らかにする。

2. モデル

(1) モデル全体の枠組み

本モデルで考慮する主体は回収業者と問屋であり、それぞれ代表の一社を考える。回収業者は市中に排出された廃棄物リサイクル財を回収し、問屋の買入れ市場において売り手として行動する。廃棄物リサイクル財特有の Supply-Push 型の供給構造を示すために、回収形態の違いから回収量を二種類に分類して考える。一つめは、問屋の買入れ価格の水準に応じて回収業者が自由に調整可能な自発的回収量を考え、 t 期の値を x_t^S とする。二つめは問屋の買入れ価格に影響を受けない硬直的回収量を考え、Supply-Push 型の供給構造を表す。ここで t 期の硬直的回収量を z_t^S で表す。硬直的回収量として、例えば、家計からの回収の依頼や行政からの補助金の支給を回収業者が受けることによって生じる回収量のことを示す。これは廃棄物の持つ負の外部性により、発生源となる家計が費用を支払ってでも処理したいと考えるために行われる回収であり、廃棄物リサイクル財の特徴を表す。

問屋は、買入れ市場と販売市場で同時に取引を行う。買入れ市場は問屋の需要独占市場とする。これは回収業者に比べて問屋は少数であるため問屋の市場支配力は強いためである。回収業者から買入れた廃棄物リサイクル財の一部は、販売市場において当該期に問屋からリサイクル企業に販売される。ここで、国内の市場価格と輸送費用を除いた海外の市場価格が同一であるととし、国内と海外の販売市場を区別せず、一つの販売市場で取引され

*キーワード：環境計画，物流計画

** 正員 博士(学術) 東北大学東北アジア研究センター

*** F会員 工博 東北大学大学院情報科学研究科

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区川内41

TEL: 022-795-7568, E-mail: okubo@cneas.tohoku.ac.jp

るとする。当該期に販売されなかった分は在庫として問屋が保管する。問屋の在庫に関する意思決定は、販売市場における現時点での価格と将来の期待価格を下に合理的に行われるとする。ここで販売市場は競争的な市場であり、問屋は価格受容者として行動する場合を考える。

本モデルでは、買入れ市場と販売市場のそれぞれにおいて、確率的変動が生じる。具体的には、買入れ市場においては発生源からの依頼が、回収業者や問屋の意思とは無関係に確率的に発生することによる硬直的供給量の変動を考える。また販売市場において、リサイクル企業からの需要量が景気や流行などの外生的な要因の影響を受け、確率的に変動する場合を考える。

(2) 回収業者の行動

t 期において回収業者は、廃棄物リサイクル財を問屋に販売することによって得られる収益と発生源に回収サービスを提供することによって得られる収益の和から、回収費用 $C(x_t^g, z_t^g)$ をひいた利潤 π_t^c を最大化するように自発的回収量 x_t^g を決める。このとき回収業者は、問屋の買入れ価格 p_t^g と単位当りの回収料金 d を与件として行動する。したがって、t 期における回収業者の利潤最大化行動は、自発的回収量 x_t^g を制御変数として

$$\pi_t^c = p_t^g (x_t^g + z_t^g) + dz_t^g - \left\{ c_0 (x_t^g + z_t^g) + \frac{1}{2} c_1 (x_t^g)^2 \right\} \quad (1)$$

となる。ただし c_0, c_1 は非負のパラメータである。式(3.1)の右辺第一項は問屋への販売によって得られる収益を表しており、自発的回収量 x_t^g であるか硬直的回収量 z_t^g であるかに関わらず、買入れ価格 p_t^g で販売可能であることを意味している。右辺第二項は、全ての硬直的回収量 z_t^g が発生源からの依頼によって生じ、単位当り d の回収料金で回収サービスを提供していることを意味している。硬直的回収量 z_t^g は確率的に変動するとし、

$$z_t^g \equiv z^g(\varepsilon_t^g) = \mu + \varepsilon_t^g \quad \varepsilon_t^g \sim \text{i.i.d. } N(0, \sigma_g^2) \quad (2)$$

とする。ここで μ は非負の定数とする。また ε_t^g は平均がゼロ、分散が σ_g^2 の独立同一分布の正規分布に従う確率変数とし、回収変動を表す。回収業者は t 期の期初に、

その期における発生源からの全ての依頼を受けるとし、供給変動 ε_t^g は t 期の期初に既知になるとする。したがって t+1 期以降の硬直的供給量に関しては、確率分布で把握している。第三項は回収費用を表し、限界回収費用が、硬直的回収 z_t^g の規模に関して一定であり、自発的回収量 x_t^g の規模に関しては逓増する場合を考えている。な

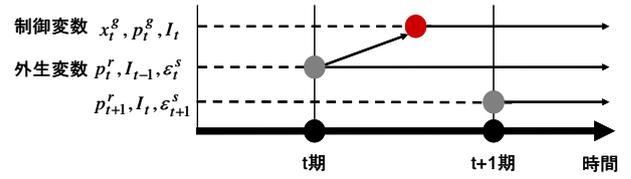


図1 回収業者と問屋の意思決定タイミング

ぜなら、発生源からの依頼による硬直的回収 z_t^g は回収場所が明確であるのに対して、市中を巡回することによる自発的回収は回収量 x_t^g が増えるに従って追加的な廃棄物リサイクル財を見つけにくくなるためである。

式(1)から得られる t 期の最適な総回収量 $X(p_t^g, \varepsilon_t^g)$ は、

$$X(p_t^g, \varepsilon_t^g) \equiv x(p_t^g) + z_t^g = \frac{1}{c_1} p_t^g + \left(\mu - \frac{c_0}{c_1} \right) + \varepsilon_t^g \quad (3)$$

と表される。式(3)から買入れ価格 p_t^g がゼロの場合でも、硬直的回収量 $z_t^g (= \mu + \varepsilon_t^g)$ が十分に大きければ、問屋への供給量がゼロにならないという廃棄物リサイクル財特有の現象を表現することができる。

(3) 問屋の行動

t 期の問屋は期待利潤の割引現在価値を無限期間にわたって合計した値を最大化するように買入れ価格 p_t^g 、期末在庫量 I_t を決める。ただし問屋の利潤は、廃棄物リサイクル財の販売による収益から買入れ費用と在庫費用をひいたもので定義される。このとき問屋は t-1 期の期末在庫量 I_{t-1} 、供給変動 ε_t^g および販売価格 p_t^r を与件とした上で意思決定を行い、以下の問題を解く。

$$V(p_t^r, I_{t-1}, \varepsilon_t^g) = \max_{p_t^g, I_t} E_t \left[\sum_{\tau=t}^{\infty} \beta^{\tau-t} \left\{ p_\tau^r \left\{ I_{\tau-1} + X(p_\tau^g, \varepsilon_\tau^g) \right\} - I_\tau \right\} - p_\tau^g X(p_\tau^g, \varepsilon_\tau^g) - c I_\tau \right] \quad (4a)$$

$$\text{Subject to} \quad I_t \geq 0 \quad (4b)$$

ここで $E_t[\cdot]$ は t 期における期待オペレータとする。また β は割引率であり $0 < \beta < 1$ を満たし、 c は期末在庫量単位当りにかかる在庫費用を表す非負のパラメータである。式(4a)の右辺第一項はリサイクル企業に廃棄物リサイクル財を販売することによって得られる収益を表している。ここで t 期の期初在庫量 (t-1 期の期末在庫量) に t 期の買入れ量を足した値 $I_{t-1} + X(p_t^g, \varepsilon_t^g)$ は、t 期に販売可能な量を表している。したがって式(4a)の右辺第一項に含まれる $I_{t-1} + X(p_t^g, \varepsilon_t^g)$ から t 期の期末在庫量 I_t をひいた値は t 期におけるリサイクル企業への販売量を表している。右辺第二項は、買入れ費用を表し、前節で導いた式(3.7)に買入れ価格をかけた値である。右辺第三

項は、在庫費用を表し、線形の在庫費用関数を考える。式(4b)は在庫量の非負制約であり、 $I_t = 0$ のとき在庫切れが生じ、超過需要分は販売できないとする。

以上から本モデルにおける t 期の回収業者と問屋の制御変数 x_t^s , p_t^s , I_t に関する意思決定と外生変数 p_t^r , I_{t-1} , ε_t^s が既知となるタイミングをまとめると図 1 のようになる。図 1 は t 期の期初に既知となる外生変数 p_t^r , I_{t-1} , ε_t^s を与件として、回収業者と問屋の制御変数 x_t^s , p_t^s , I_t が決まり、期末在庫量 I_t が $t+1$ 期の外生変数となることを意味している。このとき $t+1$ 期の販売価格 p_{t+1}^r , 供給変動 ε_{t+1}^s は未知であり、 $t+1$ 期の期初に初めて既知になるものとする。

t 期の販売市場における需給均衡条件式を定義する。販売価格 p_t^r は、問屋の販売量とリサイクル企業の需要量 D_t^r が等しくなるように決まるとし、販売市場の需給均衡条件式を、

$$I_{t-1} + X(p_t^r, \varepsilon_t^s) - I_t = d(p_t^r) + \varepsilon_t^d, \varepsilon_t^d \stackrel{\text{i.i.d.}}{\sim} N(0, \sigma_d^2) \quad (5)$$

とする。ここで左辺は問屋の販売量を表し、 t 期の期初在庫量と買入量(式(3))との和 $I_{t-1} + X(p_t^r, \varepsilon_t^s)$ から期末在庫量 I_t をひいたものとして定義される。右辺は、リサイクル企業の需要量が、販売価格に依存する確定的な需要量 $d(p_t^r)$ と依存しない需要変動 ε_t^d の和として下式のように表されると仮定する。ここで、 ε_t^d は平均が 0 で分散が σ_d^2 の独立同一分布の正規分布に従うとする。ただし t 期における需要変動 ε_t^d の値は t 期の期初に既知になるものとする。

式(4)の一階条件式と式(3), (5)から、以下の条件式を導くことができる。

$$\begin{cases} A > s_t - I_t - \beta E_t[s_{t+1} - I_{t+1}] & \text{if } I_t = 0 \\ A = s_t - I_t - \beta E_t[s_{t+1} - I_{t+1}] & \text{if } I_t > 0 \end{cases} \quad (6a)$$

ただし、

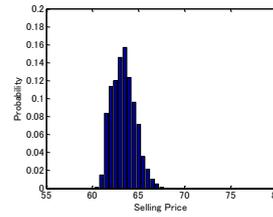
$$A = (1 - \beta) \left\{ \frac{d_0}{d_1} - \frac{1}{2} \left(\mu - \frac{c_0}{c_1} \right) \right\} + \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{2c_1} \right) c \quad (6b)$$

$$s_t = I_{t-1} + \frac{1}{2} \varepsilon_t^s - \varepsilon_t^d \quad (6c)$$

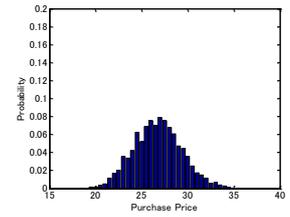
とおいた。式(6)は販売市場のみを考慮している既存の競争在庫モデルにおける均衡条件式と等しく⁴⁾、解の一意性が保証される。買入市場と販売市場を同時に考慮することによる特徴は、式(6b)のパラメータに現れている。具体的には式(6b)で表されるパラメータ A は、回収業者から問屋への供給関数(式(3))とリサイクル企業からの需要関数の情報とを集約したパラメータとなり、問屋の買入量と販売量の確定的な需給バランスを示す一つ

表1 パラメータの基本設定

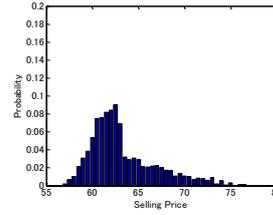
			変数	パラメータ
回収業者	自発的 回収量	限界回収 費用	c_0	10.0
			c_1	1.0
	硬直的 回収量	平均値	μ	20.0
			標準偏差	σ_s
問屋	割引率		β	0.98
	在庫費用		c	0.2
リサイクル企業	需要 関数	切片	d_0	100
		傾き	d_1	1.0
	確率的 変動	共分散	σ_{sd}	0
		標準偏差	σ_d	0



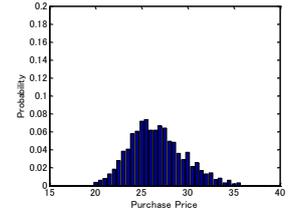
(a) 販売価格： $\sigma_d = 0$



(b) 買入れ価格： $\sigma_d = 0$



(c) 販売価格： $\sigma_d = 8.0$



(d) 買入れ価格： $\sigma_d = 8.0$

図2 販売価格、買入れ価格の定常分布

の指標となっている。例えば、式(6b)の右辺第一項の d_0 に比べて S_0 が大きく、リサイクル企業の需要量に対して回収業者からの供給量が多いほどパラメータ A は小さな値を取る。逆にリサイクル企業からの需要量が大きく (d_0 が大きく)、回収業者の供給量が小さく (S_0 が小さく) なるほど、パラメータ A の値は大きくなる。パラメータ A の変化に対する期末在庫量 I_t の変化は、式(6a)は解析解を導出することが困難であるため数値実験によって明らかにする。

3. 数値実験

(1) 販売価格と買入れ価格の変動特性

本研究では、Projection 法を用いて、式(6)を解く(具体的な解法は、Judd³⁾を参照されたい。)。はじめに、問屋の販売市場における需要変動の違いによる販売価格、買入れ価格の変動特性の違いを明らかにする。

図 2 は、表 1 のパラメータ設定のもとで、需要変動の標準偏差を $\sigma_d = 0$ または $\sigma_d = 8.0$ としたときに、

2000 回のモンテカルロシミュレーションを行って計算した販売価格、買入れ価格の頻度分布を示したものである。図 1(a), (c), 図 1(b), (d)の横軸がそれぞれ販売価格、買入れ価格となっている。図 2(a)から、販売価格の確率分布は右側の裾が広く、左側の裾の幅は狭くなっていることがわかる。これは販売価格の上昇幅が下降幅よりも大きいことを示している。このような非対称性が見られる原因は、在庫の非負制約によるものである。一方で、図 2(b)の買入れ価格の確率分布から、買入れ価格の上昇幅と下降幅には、顕著な非対称性が見られない。この販売価格と買入れ価格に見られる変動特性の違いは、需要変動の標準偏差が大きくなるほど顕著になる。図 2(a), (c)からわかるように $\sigma_d = 0$ のときに比べて、 $\sigma_d = 8.0$ としたときの販売価格の上昇幅は著しく大きくなっている。一方、図 2(b) (d)から買入れ価格の確率分布は、需要変動の大きさによって、販売価格ほど変化していないことがわかる。これは販売市場における需要の変動が、問屋の持つ在庫によって緩和されて買入れ市場に伝播したためであると考えられる。

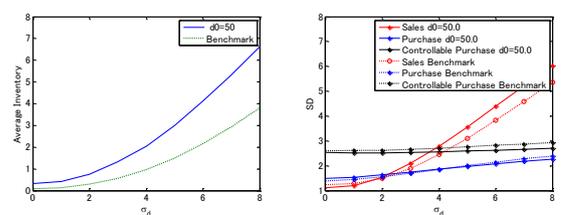
(2) 販売市場における需要構造の変化の影響

販売市場における需要構造の変化が販売市場と買入れ市場の変動にもたらす影響を明らかにする。ここではリサイクル企業の逆需要関数の切片 d_0 が、表 1 の $d_0 = 100$ から $d_0 = 50$ になり、需要が減少した場合を考える。図 3 に、横軸に需要変動の標準偏差の大きさを、縦軸に(a)問屋の在庫量の平均値、(b)販売量、買入れ量の標準偏差、(c)販売価格、買入れ価格の標準偏差、(d)販売価格、買入れ価格の変動係数をとったものを示す。図 3 の各値は、300 期間 2000 回のモンテカルロシミュレーションにおいて、初期値に依存している可能性の小さい 100 期から 300 期の期間を対象に平均値、標準偏差を計測し、各シミュレーションの値を平均した値である。

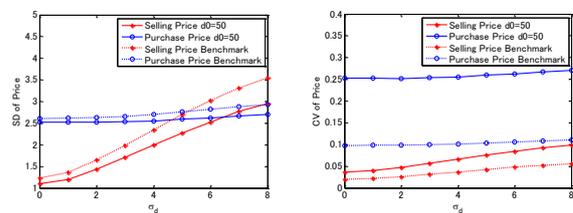
図 3(a)から、需要変動の標準偏差 σ_d が大きくなるほど、在庫量が増加していることがわかる。また需要量が減少することによって、図 3(a)の点線から実線にシフトし、在庫量が増加している。これは需要量の減少分が在庫として貯蓄される状況を表し、硬直的供給量 μ が大きくなるほど、このシフト幅は大きくなると考えられる。

図 3(b)から、 σ_d が大きくなるほど、販売量、買入れ量の標準偏差は大きくなっていることがわかる。また販売市場における需要が減少することによって、販売量と買入れ量との差が大きくなっていることがわかる。具体的には、 σ_d が小さい場合は、需要の減少によって販売量の変動は小さく、買入れ量の変動は大きくなっている。一方、 σ_d が大きい場合には、需要の減少は販売量と買入れ量の変動それぞれに逆の影響を及ぼしている。

販売価格、買入れ価格は σ_d が大きくなるほど標準偏



(a) 在庫量の平均値 (b) 販売量,買入れ量の標準偏差



(c) 価格の標準偏差 (d) 価格の変動係数

図 3 問屋の在庫, 販売市場, 買入れ市場の変動

差が大きくなっていることが図 3(c)からわかる。すなわち需要が減少することによって、それぞれの価格の変動は小さくなっている。しかし需要が減少することによってそれぞれの価格の平均値も下がるため、図 3(d)のように変動係数の値は上昇し、特に買入れ価格の変動係数が著しく上昇している。これらの結果から、近年見られる様々な廃棄物リサイクル財の市場価格の世界的な下落は、問屋の在庫量を増やし、特に買入れ市場における変動を大きくしたと推測される。

4. 結論

本研究では、垂直的に連鎖している買入れ市場と販売市場の二つの市場の相互関係を考慮したモデルを用いて、市場の変動の性質と経済環境の変化との関係を明らかにした。また販売市場における需要の減少が問屋の在庫や買入れ市場の変動に与える影響が明らかとなった。本モデルからは、回収システムの効率化や在庫設備の改善が、二つの市場の変動に与える影響が分析可能である。

参考文献

- 1) Humphreys, B. R., Maccini L. J., and Schuh, S. 2001. Input and Output Inventories. *Journal of Monetary Economics* 47, 347-375.
- 2) 大窪和明, 買入れ市場と販売市場を考慮した古紙問屋の在庫決定モデルの開発, 土木計画学研究・講演集, Vol.38, 2008.
- 3) Judd, K, 1992. Projection Methods for Solving Aggregate Growth Models. *Journal of Economic Theory* 58, 410-452.
- 4) Newbery, M., and Stiglitz, J. E. 1982. Optimal Commodity Stock Piling Rules *Oxford Economic Papers* 34, no. 3, 403-427.