排出量変動を考慮した施設配置モデルによる生産・リサイクル施設配置の分析*

An Analysis of the Closed-Loop Facility Location, Considering the Variability of Used Products*

大窪和明**・奥村誠***
By Kazuaki OKUBO**・Makoto OKUMURA***

1. はじめに

将来的に枯渇が予想されているレアメタルなどの希少資源の安定的な確保が課題であるが，希少資源を確保する手段の一つに使用済み製品のリサイクルが挙げられる．我が国の「都市鉱山」に蓄積された金属は，世界の埋蔵量の数%から数十%を占めるといわれ[1]，一次資源のほとんどを海外に頼る我が国においてはこれらの資源を有効活用していく必要がある．リサイクルの促進は，資源の有効活用に貢献するだけでなく，生産施設の国内立地を通して雇用効果も期待できる．そのためリサイクル産業を含めた企業立地を考慮に入れた地域振興策の立案が望まれる．

リサイクルを促進するために，2000年の循環型社会形成推進基本法をはじめとした様々な取り組みがなされてきた．特に，自動車リサイクル法，家電リサイクル法などの各種リサイクル法は，拡大生産者責任の考え方に基づき，企業に対して製品の製造，販売(動脈物流)だけでなく，使用済み製品の回収，処理(静脈物流)を義務づけた．こうした法的規制は，リサイクルの促進に効果的に見える一方で，企業のリサイクル技術の水準がそれほど高くない段階で強い規制をかけた場合，生産の縮小や環境規制の弱い発展途上国などの海外への生産施設の配置をもたらす可能性がある．動脈物流と静脈物流との関係性が強まっている中，企業のリサイクル技術の水準をふまえて適切なタイミングで環境規制をかけていく必要がある．そのためには，企業のリサイクル技術の水準と環境規制に応じて，どのような施設配置が起こりうるかを議論できる理論的基盤が必要となる．

近年，クローズド・ループと呼ばれる動脈物流と静脈物流の施設配置を同時に考慮した研究がなされるようになってきた(包括的な文献調査として，例えばMeloら[2]が詳しい．) 例えばFleishmann[3]では生産施設とリサイクル施設の配置を同時に計画する問題を，ヨーロッパのコピー機製造企業や製紙企業に適用して感度分析を行った．またLu and Bostel[4]はFleishmannらと類似の問題に対して効率的な解法アルゴリズムを提案した．ただし，上述したような既存研究では尹[5]が指摘したような使用済み製品の排出量変動といった特徴は考慮されていない．動脈物流が生産施設から多数の消費者への販売という分散型輸送であるのに対して，静脈物流は複数の使用済み製品の排出源となる消費者から少数のリサイクル施設への集中型輸送である．このとき，ほとんどの消費者の排出行動は，企業の生産計画に依存しないため，使用済み製品の排出量には変動が生じる．

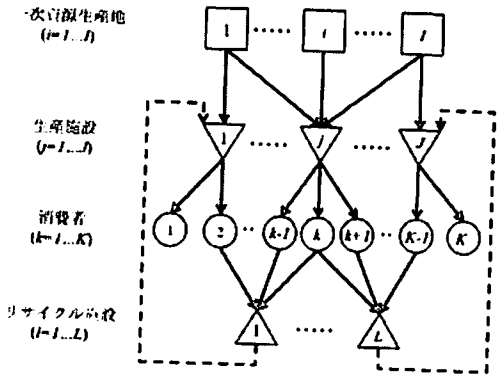

図1 モデルの枠組み

本研究では，リサイクル技術の向上や環境規制の変化が生産施設，リサイクル施設の配置にもたらす変化を明らかにする．このとき静脈物流の特徴である使用済み製品の変動に着目し，変動の大きさが施設配置の変化にもたらす影響を明らかにする．

2. モデルの定式化

1企業が図1のように製品の生産から販売，使用済み製品の回収，分解，リサイクル，再利用するまでの費用を最小化するように，生産施設とリサイクル施設を配置する問題を考える．モデル全体の枠組みはFleishmannと同様であるが，本モデルの製品の生産においては一次資

*キーワード：地域計画，産業立地，物流計画
**正会員,博(学術),東北大学東北アジア研究センター
(仙台市青葉区川内41番地,
TEL022-795-7568, FAX022-795-7477)
(E-mail: okubo@cneas.tohoku.ac.jp)
***正会員，博(工),東北大学東北アジア研究センター

源と再生資源との代替を考え，技術的な制約のもとで配合率を自由に変えられるとしている点が異なる．

地域 j への生産施設の配置には固定費用が f_j^f かかるものとし，生産施設の配置の有無を操作変数 $Y_j^f \in \{0,1\}$ で表す．地域 l へのリサイクル施設の配置には固定費用が f_l^r かかるものとし，施設配置の有無を操作変数 $Y_l^r \in \{0,1\}$ で表す．

施設配置を計画する段階では使用済み製品の排出量を事前に把握することが困難であり，確率的にしか把握できないものとする．使用済み製品の排出量に変動が生じる可能性として2つの状況を考える．1つは，リサイクル料金の上昇などの外的な要因により，使用済み製品が中古品市場や最終処理のルートに乗り，販売量よりも少ない回収量しか得られない状況である．2つ目は，他企業の使用済み製品がリサイクル施設へ供給され，製品の販売量以上の使用済み製品の回収が得られる場合である．ここでは地域 k における標準的な排出量 r_k に対して，確率 p^u $(0 \le p^u \le 1)$ で排出量は $\varepsilon^u r_k$ になるものとする．ただし，ε^u はシナリオ $u \in U$ の排出量変動幅を表すパラメータであり，地域 k の使用済み製品の標準的な排出量 r_k から，どれくらい乖離しているかを示している．例えば，$\varepsilon^u = 0.10$ とすることによって，r_k の1割ほど増える場合と減る場合がある状況を考える．

シナリオ u における操作変数は，地域 i の一次資源 v_i を地域 j の生産施設に輸送する割合 $X_{ij}^{v,u}$，地域 j の生産施設が地域 k の顧客の需要 d_k を満たす割合 $X_{jk}^{f,u}$，地域 k の顧客から排出される使用済み製品 $\varepsilon^u r_k$ のうち地域 l のリサイクル施設を経由して地域 j の生産施設に輸送される割合 $X_{klj}^{r,u}$ とする．このとき，地域 i から地域 j への一次資源の輸送，地域 j から地域 k への製品の輸送，地域 k から地域 l への使用済み製品の輸送，地域 k から地域 l への使用済み製品の輸送，地域 l から地域 j への再生資源の輸送には，それぞれ単位当り c_{ij}^v，c_{jk}^f，c_{kl}^{rp}，c_{li}^{rm} の輸送費用がかかるものとする．

以上から施設配置問題は以下のように定義できる．

$$\min_{\mathbf{Y},\mathbf{X}} \sum_{j\in J} f_j^f Y_j^f + \sum_{l\in L} f_l^r Y_l^r + \sum_{u\in U} p^u \left[\begin{array}{l} \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} c_{ij}^v v_i X_{ij}^{v,u} + \sum_{j\in J}\sum_{k\in K} c_{jk}^f d_k X_{jk}^{f,u} \\ +c^u \sum_{k\in K} d_k \left(1 - X_{jk}^{f,u}\right) \\ +\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{l\in L} \left(c_{kl}^{rp} + c_{lj}^{rm}\right) \varepsilon^u r_k X_{klj}^{r,u} \\ +\sum_{k\in K} c_k^w \varepsilon^u r_k \left(1 - \sum_{j\in J}\sum_{l\in L} X_{klj}^{r,u}\right) \end{array} \right] \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{k\in K} d_k X_{jk}^{f,u} = \sum_{k\in K}\sum_{l\in L} r_k X_{klj}^{r,u} + \sum_{i\in I} v_i X_{ij}^{v,u}, \quad \forall j \in J, \forall u \in U \quad (2)$$

$$\delta \sum_{k\in K} d_k X_{jk}^{f,u} \le \sum_{i\in I} v_i X_{ij}^{v,u}, \quad \forall j \in J, \forall u \in U \quad (3)$$

$$\gamma \sum_{j\in J}\sum_{k\in K} d_k X_{jk}^{f,u} \le \sum_{l\in L}\sum_{k\in K}\sum_{l\in L} r_k X_{klj}^{r,u} \quad (4)$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{l\in L} r_k X_{klj}^{r,u} \le \sum_{j\in J} d_k X_{jk}^{f,u}, \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$X_{ij}^{v,u} \le Y_j^f, \forall u \in U, i \in I, j \in J \quad (6)$$

$$X_{jk}^{f,u} \le Y_j^f, \forall u \in U, j \in J, k \in K \quad (7)$$

$$X_{klj}^{r,u} \le Y_l^r, \forall u \in U, k \in K, l \in L, j \in J \quad (8)$$

$$\sum_{j\in J} v_i X_{ij}^{v,u} \le v_i, \forall u \in U, i \in I \quad (9)$$

$$\sum_{j\in J} d_k X_{jk}^{f,u} \le d_k, \forall u \in U, k \in K \quad (10)$$

$$\sum_{l\in L}\sum_{j\in J} \varepsilon^u r_k X_{klj}^{r,u} \le \varepsilon^u r_k, \forall u \in U, k \in K \quad (11)$$

$$Y_j^f, Y_j^r \in \{0,1\} \quad (12)$$

ただし操作変数 $\mathbf{Y}, \mathbf{X}$ は $\mathbf{Y} = \left\{ Y_i^f, Y_l^r \middle| \forall j \in J, \forall l \in L \right\}$，$\mathbf{X} = \left\{ X_{ij}^{v,u}, X_{jk}^{f,u}, X_{klj}^{r,u} \middle| \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall l \in L, \forall u \in U \right\}$ を表す．また，δ：製品に含有可能なリサイクル物質の最小割合(技術制約係数)，γ：産業全体にかけられた最小の回収率(回収量規制)，c^u：品切れペナルティ，c^w：最終処分費用である．

目的関数(式(1))の第1項と第2項はそれぞれ生産施設とリサイクル施設の配置にかかる固定費用を表している．第3項，第4項はそれぞれ一次資源，製品の輸送費用を表す．このとき企業は，必ずしも消費者の需要量の全てを満たす必要はないが，満たされなかった需要量に応じて第5項で示す品切れペナルティがかかるものとする．消費者からの使用済み製品は企業が回収するものとし，消費者からリサイクル施設を経由して生産施設までのルートごとの輸送費用を第6項で表す．企業がある地域で排出された使用済み製品の全てを回収しなかった場合，残

った使用済み製品は当該地域で埋め立てや焼却処理を行っている業者に最終処理サービスに委託するものと考え，その最終処理費用を第7項で表す．

式(2)は一次資源と再生資源の輸送量を合計したものと製品の販売量が等しくなるという制約を示す．式(3)は生産施設ごとの技術制約であり，地域jの生産施設が各地域の消費者に販売する製品の生産には，技術制約係数δだけの一次資源を必要とすることを意味する．使用済み製品から抽出する際の不純物により，再生資源の品質は一次資源の品質よりも劣っている場合が多い．そのため，製品の品質を確保するために，一次資源を含めなければいけない量が技術的に決まってくる．これはガラスの生産においてガラス瓶カレットと一次資源(珪砂，ソーダ灰，石灰石)の間に実際にみられる関係である．リサイクル技術が発展することによって，再生資源と一次資源との質的な差が縮小し，一次資源の割合を低くすることが可能となる．したがって技術制約係数δの減少はリサイクル技術の進展による一次資源に対する再生資源の代替性の向上を表す．式(4)は，1企業全体に対してかけられる環境規制を表しており，1企業において販売した製品に対して最低でも回収率γの使用済み製品の回収を行わなくてはならないことを示す．式(5)は地域kの使用済み製品の発生量が，その地域で販売された製品の総量を超えないことを示す条件式である．式(6)は地域jに生産施設が配置されない場合($Y_j^f=0$)，地域jへの一次資源の輸送が行われないことを示す制約条件式である．式(7)は地域jに生産施設が配置されない場合($Y_j^f=0$)，地域jからの製品の輸送が行われないという制約である．同様に，式(8)は地域lにリサイクル施設が配置されない場合，地域lのリサイクル施設を中心とした使用済み製品の回収，再生資源の輸送は行われないということを示している．式(9)は地域iから輸送できる一次資源が当該地域の賦存量を超えないことを示す制約である．式(10)は地域kにおける消費者の需要量より多い製品を販売することができないことを示している．式(11)は地域kから回収できる使用済み製品が，当該地域での排出量を超えないことを示す制約式である．式(12)は，各施設における生産施設，またはリサイクル施設の配置に関する操作変数が2値変数であることを示す．次章の数値計算では施設ごとの技術制約パラメータδ，環境規制パラメータγを変えたときに生産施設，リサイクル施設の配置パターンがどのように変化するのかを明らかにする．

3．数値計算

(1) 数値計算の設定

本研究では図2のような直線上に並んだ5つの地域を考える．各地域の一次資源賦存量，製品の需要量，使用済み製品の標準的な排出量は等しいとする(表1)．地域iから地域jまでの一次資源単位当たりの輸送費用を表2に示す．ここでは地域内の輸送にも費用がかかるものとする．地域間の輸送には，地域内の輸送費用に加えて地域間のリンク数に応じた輸送費用がかかるとし，1リンクあたりの輸送費用は全て等しいとする．この設定は，国内の輸送は海外への輸送に比べて短距離でトラックなどの陸送を利用する一方で，海外への長距離の輸送には距離当りの費用が安い海上輸送が使われることを考慮したものである．また，大都市圏港湾から直接船舶で海外

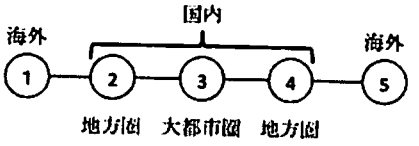

図2　対象地域の設定

表1　各地域の一次資源，製品，使用済み製品量の設定

地域	1	2	3	4	5
一次資源賦存量	20	20	20	20	20
製品需要量	20	20	20	20	20
使用済み製品標準的排出量	20	20	20	20	20

表2　一次資源の単位当たり地域間輸送費用

地域名	1	2	3	4	5
1	5	15	25	35	45
2	15	5	15	25	35
3	25	15	5	15	25
4	35	25	15	5	15
5	45	35	25	15	5

表3　数値解析結果における生産，リサイクル施設の配置パターン

施設名		生産施設					リサイクル施設				
地域番号		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
施設配置パターン	2-0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
	2-1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0
	1-1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
	2-2b	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1
	2-2a	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0

表4　技術制約係数δおよび使用済み製品排出量変動幅εに対する施設配置($\gamma=0.00$)

技術制約(δ) \ 変動幅(ε)	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.00	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b
0.05	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b
0.10	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b
0.15	2-2b	2-2b	2-2b	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b
0.20	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b
0.25	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	1-1
0.30	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	1-1	1-1
0.35	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1	1-1
0.40	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1	1-1	2-1
0.45	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	2-1
0.50	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2a	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	2-1	2-1
0.55	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	2-1	2-1	2-1
0.60	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	2-1	2-1	2-1	2-1
0.65	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1
0.70	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-0	2-0
0.75	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-0	[illegible]	[illegible]	2-0	2-0
0.80	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	[illegible]	[illegible]	2-0	2-0
0.85	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	[illegible]	[illegible]	2-0	2-0
0.90	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	[illegible]	[illegible]	2-0	2-0
0.95	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	[illegible]	[illegible]	2-0	2-0
1.00	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0	2-0

表5　技術制約係数δおよび使用済み製品排出量変動幅εに対する施設配置($\gamma=0.20$)

技術制約(δ) \ 変動幅(ε)	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.00	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1
0.05	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1
0.10	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1
0.15	2-2b	2-2b	2-2b	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1
0.20	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1
0.25	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1
0.30	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1	1-1
0.35	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1	1-1
0.40	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
0.45	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
0.50	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2a	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
0.55	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
0.60	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
0.65	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
0.70	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	2-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
0.75	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	1-1	1-1	1-1	1-1
0.80	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	1-1	1-1	1-1	1-1
0.85	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
0.90	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
0.95	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
1.00	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0

表6　技術制約係数δおよび使用済み製品排出量変動幅εに対する施設配置($\gamma=0.70$)

技術制約(δ) \ 変動幅(ε)	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.00	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
0.05	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	1-1	1-1	2-2b	1-1	1-1	1-1	[illegible]	[illegible]	1-1
0.10	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	[illegible]	[illegible]	1-1
0.15	2-2b	2-2b	2-2b	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	[illegible]	[illegible]	1-1
0.20	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	[illegible]	[illegible]	1-1
0.25	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2a	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	[illegible]	[illegible]	1-1
0.30	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b	2-2a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
0.35	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
0.40	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
0.45	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
0.50	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
0.55	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
0.60	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
0.65	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
0.70	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
0.75	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
0.80	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
0.85	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
0.90	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
0.95	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
1.00	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0

に輸出する場合，ある一定の輸送量を確保するための大規模な集積場が必要であり，地価の高い大都市圏での確保には費用がかかることから，大都市圏からの輸出は地方部を経由する場合と同等の費用がかかると設定した．

ここでは製品の輸送に品質管理が必要な場合を考え，一次資源の輸送費用よりも高いと仮定する．製品は不特

定多数の消費者に販売され，そこから使用済み製品を探して回収を行わなければならない．さらに途中で分別，分解が必要な場合もあるため，使用済み製品の輸送費用は製品の輸送費用よりも高めに設定する．再生資源には，一次資源と同じだけの輸送費用がかかるものとする．具体的には製品，使用済み製品，再生資源の輸送費用は，一次資源の輸送費用をそれぞれ，1.5倍，3.5倍,1倍した値を用いる．

生産施設の配置にかかる固定費用は，国内の地域2,3,4よりも海外の地域1，5の施設配置費用の方が安い状況を考え，地域2,3,4を1000($f_2^f = f_3^f = f_4^f = 1000$)，地域1,5を900($f_1^f = f_5^f = 900$)とした．つまり地域3が我が国の大都市圏，地域2,4が我が国の地方圏に相当し，地域1,5は海外に相当する．リサイクル施設の配置にかかる費用も国内の地域2,3,4で高く($f_2^r = f_3^r = f_4^r = 1200$)，海外の地域1，5で低いとする($f_1^r = f_5^r = 900$)．

このとき製品を生産するよりも分解して再生資源を取り出す方が技術的に難しいとし，生産施設よりもリサイクル施設の方が配置にかかる固定費用は高いと仮定した．製品の品切れペナルティを$c^u = 200$，使用済み製品を回収しなかった場合の最終処理費用を全ての地域で等しく，$c^w = 100$と仮定した．

(2) 技術変化と排出量の変動がもたらす立地変化

まず回収量規制が設定されていない$\gamma = 0.00$の状況を考える．技術制約係数δと使用済み製品排出量変動幅εを変化させてモデルを解いた結果，全部で5つの施設配置パターンが見られた(表 3)．表 3 では施設配置のパターン名と施設が配置された地域を 1，それ以外を 0 として表している．例えば，施設配置パターン「2-0」のときには，生産施設は地域 2 と 4 に 1 件ずつ配置され，リサイクル施設は配置されないというパターンが生じることを表している．

表 3 から生産施設，リサイクル施設は最大で 2 施設ずつ配置される．より詳しく見ると，国内地方圏の地域 2, 4 に 1 施設ずつ配置される「2-2a」パターンと，海外に当たる地域 1, 5 に 1 施設ずつ配置される「2-2b」パターンが見られる．

技術制約係数δおよび使用済み製品排出量変動εに対する表 3 の施設配置パターンの変化を表 4 に示す．技術水準が低く排出量の変動が大きいためにリサイクルが普及していない表 4 の A の状態を初期状態として，技術水準が向上し，排出量の変動が小さくなることに伴う施設配置の変化を確認する．まず技術水準が低く，一次資の代わりとして再生資源をほとんど使用できない範囲においては，どの地域にもリサイクル施設は配置されない「2-0」パターンとなる．この状態から技術が改善していくにつれて，施設配置は「2-0」パターンから，リサイクル施設が大都市圏に 1 件配置される「2-1」パターン(状態 B)へと変化する．このとき，排出量の変動幅が小さい場合($\varepsilon \le 0.50$)は，一次資源の製品に占める最低含有量が 8 割で製品を作ることが可能となれば($\delta = 0.80$)リサイクル施設が配置されるが，変動幅が大きい場合($0.95 \le \varepsilon$)は，一次資源の最低含有量が 7 割($\gamma = 0.70$)に改善されるまでリサイクル施設は配置されない．このように，使用済み製品の排出量の変動が大きいほどリサイクル施設が配置されるタイミングは遅れることがわかる．

リサイクル技術がさらに向上していくと，生産施設，リサイクル施設がともに国内大都市圏(地域 3)に配置される「1-1」パターンが見られるようになる(状態 C)．これは技術水準の向上により，一次資源と再生資源の代替が進み，再生資源の重要性が増すことによって，生産施設の立地がリサイクル施設に引き寄せられたことを意味する．使用済み製品の変動が大きいほど，技術の向上に対して「2-1」パターンから「1-1」パターンに変化するタイミングが遅れることがわかる．

$0.00 \le \varepsilon \le 0.45$ と $0.60 \le \varepsilon \le 1.00$ の範囲では，技術水準が向上するにつれて，「1-1」パターンから，海外に 1 件ずつ生産施設，リサイクル施設が配置される「2-2b」パターンへと変化する．技術水準の向上による再生資源の利用可能量の増加がリサイクル施設を増やす方向に働いた結果，施設配置費用の安い海外に引き寄せられたことが，その原因であると考えられる．

排出量変動が a) $0.00 \le \varepsilon \le 0.45$ のときと b) $0.60 \le \varepsilon \le 1.00$ のときの施設配置は同じ「2-2b」パターンであるが，使用済み製品の回収量には大きな違いが見られる．図 3 は技術制約係数δおよび使用済み製品排出量変動幅εに対する総回収量の変化を示したものである．図 3 において，色が明るいほど総回収量の合計が大きく，

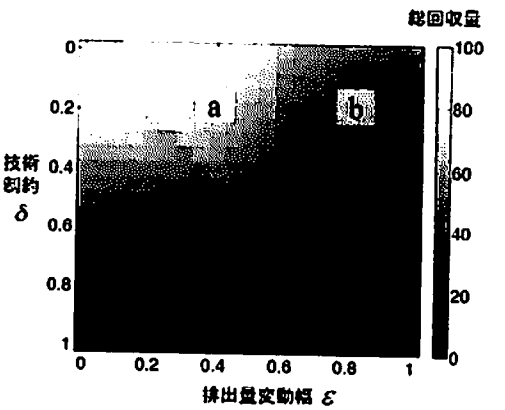

図 3　技術制約係数δおよび使用済み製品排出量変動幅εに対する総回収量の変化($\gamma = 0.00$)

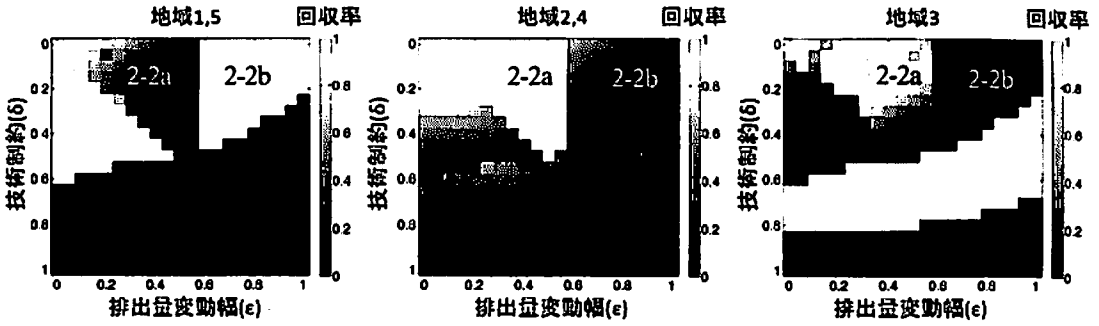

図4　技術制約および排出量変動幅に対する各地域の使用済み製品の回収率の変化($\gamma = 0.00$)

リサイクルされる量が多いことを示している．図3中から技術制約と排出量の変動幅が，ともに小さくなるほど総回収量が大きくなることがわかる．例えば，$\delta = 0.00$ かつ$\varepsilon = 0.00$のとき総回収量は 100 であり，全地域の使用済み製品の全てが回収されていることを意味する．

図 3 から，技術制約が同じでも排出量変動の大きい状態 b) における総回収量は，排出量変動の小さい状態 a)よりも小さくなることがわかる．これは排出量の変動が大きいことによって，リサイクルが促進されずに多くの使用済み製品が利用されない状況を表している．

技術水準が高い場合($0.00 \le \delta \le 0.45$)，排出量変動が$0.00 \le \varepsilon \le 0.40$のように小さい範囲では海外立地の「2-2b」パターンから国内立地の「2-2a」パターンに変化する．このとき排出量変動が大きいほど，技術発展に対して「2-2b」パターンから「2-2a」パターンに変化するタイミングが早い．これは排出量に変動が大きいほど，使用済みの製品を回収するためには中心地域の方が有利であることから，地域 1, 5 といった海外から地域 2, 4 といった国内地方圏へ施設が移動しやすいためと考えられる．

「2-2a」パターンと「2-2b」パターンでは地域別の回収率に違いが見られる．図4は，環境規制がない状態における使用済み製品の変動幅および，技術制約に対する回収率の変化を示したものである．図4は色が明るいほど，回収率が高い状態を表している．図4からわかるように「2-2a」パターンでは地域 1, 5 の回収率が低いのに対して，地域 2,3,4 の回収率が高くなっていることがわかる．逆に「2-2b」パターンでは，地域 1,5 の回収率が高いのに比べて，地域 2,3,4 の回収率が低いことがわかる．特に「2-2a」パターンでは，全ての地域で回収，リサイクルが行われるのに対して，「2-2b」パターンにおいていくら技術水準が改善したとしても国内大都市圏(地域 3)における使用済み製品の回収，リサイクルの促進効果は見られなかった．したがって，リサイクルを促進し，使用済み製品からより多くの再生資源を抽出するためには「2-2a」パターンが望ましいといえる．「2-2a」パターンは国内地方圏に生産施設とリサイクル施設が集中して配置される場合であり，地方圏における企業誘致政策による雇用促進，産業振興策と両立すると考えられる．

(3) 回収量規制下での立地

回収量規制をγ=0.00の状態から規制を強めていった場合(γ=0.20，γ=0.70)の施設変化から，回収量規制，排出量変動の軽減といった政策と企業の技術制約との関係を明らかにする．これにより企業の持つリサイクル技術の水準に応じて取り得るべき政策について議論する．

表5に企業が製品の全販売量の2割を回収しなければならないとしたとき(γ=0.20)の，技術制約δおよび排出量変動εに対する施設配置の変化を示す．回収量規制がなかった場合(γ=0.00，表4)と比較して2点の違いが見られる．1つ目は技術制約が$0.80 \le \delta \le 1.00$の範囲において生産施設，リサイクル施設が1つも配置されないことである．これは，回収した使用済み製品から抽出した再生資源を全て使用して製品を生産することが技術的に不可能な状況を表す．2つ目は技術水準が高く，排出量変動が大きい場合($0.00 \le \delta \le 0.80, 0.90 \le \varepsilon \le 1.00$)に生産施設とリサイクル施設がともに国内大都市圏(地域3)に配置される「1-1」パターンの施設配置が見られることである．このとき，生産施設が配置されていない国内地方圏，海外(地域1,2,4,5)において，需要が全て満たされていない状況が生じ，品切れペナルティが発生する．すなわち企業は製品の販売量を減らし，製品の生産を縮小することによって，規制された回収率を達成しようとする．

表6に，さらに回収量規制を強めたγ=0.70の場合の技術制約および排出量変動に対する施設配置の変化を示す．表6では再生資源を使用した製品の生産が技術的に不可能な範囲が拡大し，7割以上が再生資源で製品を生産できる場合($0.00 \le \delta \le 0.30$)においてのみ，生産施設，リサイクル施設が配置され，生産が行われる．このとき回収量規制が弱いγ=0.20の場合に比べると，より排出量変動が小さいケースにおいても「2-2b」パターンが実現し，生産施設，リサイクル施設が海外部に配置される

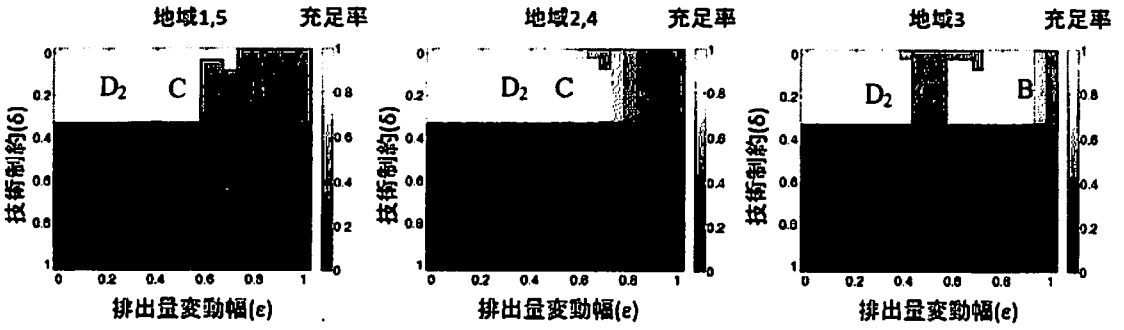

図5 技術制約および排出量変動幅に対する各地域の製品需要の充足率の変化($\gamma = 0.70$)

ようになる．このとき，大都市圏の需要は半分だけが満たされるだけであり，生産の萎縮の影響は国内に強く現れるという結果が得られた．

(4)政策的インプリケーション

ここで技術水準が低く，排出量の変動が大きいためにリサイクルが普及していない表4の状態Aを初期状態として，国内の需要量が全て満たされ，使用済み製品の回収率も高い「2-2a」パターン(表4中の状態D_1または表6中のD_2)を達成させるために，使用済み製品の排出量の変動の緩和，回収率規制，リサイクル技術の促進に関して，政府のとるべき政策について議論する．

使用済み製品の排出量が不安定であり，技術水準の低い状態において回収量規制を強めてしまう(γ=0.70)と，表4の状態Aから表6の状態Bに変化し，企業の製品の生産量を萎縮させてしまう．その後，表6の状態Bから使用済み製品の排出量の変動を減少させる政策を行ったとしても，海外への施設配置を促してしまう(表6の状態C)こととなる．回収量規制が強い場合において(γ=0.70)，製品の需要に対する販売量の比率である需要充足率を地域ごとに求めた値を図5に示す．図5は，色が明るいほど需要の充足率は高く，白い部分は当該地域における全ての需要量が満たされていることを示している．図5のB, C, D_2は表6の状態B, C, D_2に対応しており，状態Cにおける地域2,3,4の需要充足率は状態 D_2よりも低い．すなわち，海外への生産施設の移転により，国内の大都市圏，地方圏において満たされる需要量は低い水準となってしまう．

次に使用済み製品の排出量変動を減少させた上で，回収量規制をかける場合を考える．例えば，表4において排出量変動が最も大きい状態Aから，まず変動を約半分に減らせれば，その後企業の技術向上を待つことによって，「2-2a」パターンの施設配置(状態D_1)が達成できる．このとき，変動幅εを減らしすぎると，施設配置にかかる費用の安い海外部に配置してしまい表4の状態Eの「2-2b」パターンが実現してしまう可能性が高い．

4. おわりに

本研究では，使用済み製品の排出量変動を考慮した生産施設とリサイクル施設の配置モデルを構築した．その結果，次の4点が明らかになった．

1) 使用済み製品の排出量の変動が大きいほど，リサイクル技術の向上による施設配置の変化タイミングが遅れる傾向にある．
2) 排出量の変動が大きく，リサイクル技術が未発達な段階で環境規制をかけると，国内地方圏において生産の萎縮が発生する．
3) 排出量の変動は，リサイクル技術の向上によるリサイクル促進を阻害する要因となり得る．
4) リサイクル促進のためには，回収量の規制を行うよりも排出量の変動を減少させる政策を先行して行う方が効果的である．

本研究では，仮想的な設定の下で数値実験を行い，モデルの基本的な性質を把握した．今後の課題として，製品需要，使用済み製品排出量，輸送費用，施設配置費用に関する数値設定をより現実的な値に設定して実証的分析を行う必要がある．

謝辞：本研究の一部は財団法人 建設工学研究振興会の奨励金の補助を受けている．ここに深く感謝の意を表する．

参考文献

1) 環境省： 環境・循環型社会・生物多様性白書, 2009.
2) Melo, M.T., Nickelm, S. and Gama, F.S., Facility location and supply chain management – A review, *European Journal of Operational Research*, pp401-412, 2009.
3) Fleishmann, M., Quantitative Models for Reverse Logistics, *Lecture Notes in Economics and*

Mathematical Systems, Ch.5, 2001.
4) Zhiqiang Lu, Nathalie Bostel: A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities, *Computers & Operations Research*, Vol.34, pp.299-323, 2007.
5) 尹 鍾進：静脈物流の現状分析に基づいた静脈物流の効率化方案に関する研究，土木学会論文集 G, Vol.63, pp.332-344, 2007.

排出量変動を考慮した施設配置モデルによる生産・リサイクル施設配置の分析*

大窪和明**・奥村誠***

本研究では静脈物流の特徴として使用済み製品の排出量の変動に着目し，リサイクル技術の向上や環境規制の変化が生産施設，リサイクル施設の配置にもたらす変化を分析した．その結果，使用済み製品の排出量の変動が大きい程，リサイクル技術の向上による施設配置の変化タイミングが遅れることが明らかとなった．また排出量の変動が大きい場合の回収量規制は，国内地方圏において生産の萎縮を発生させる可能性が示された．これらの結果から，リサイクル促進のためには，回収量の規制を行うよりも排出量の変動を減少させる政策を先行して行う方が，効果的であることがわかった．

An Analysis of the Closed-Loop Facility Location, Considering the Variability of Used Products*

By Kazuaki OKUBO**・Makoto OKUMURA***

This paper presents a location model of manufacturing facilities and recycling facilities, considering the variability of the amount of used products. We analyzed the effect of the recycling technology improvement and the environmental regulation to the facility location. We found that when the variation of the used products amount is large, they become reluctant to locate a recycling facility. We also found that too strict environmental regulation leads to decrease production in domestic regions. We show that the reduction of the variation of used products amount is effective for the promotion of recycling.