

動脈/静脈物流統合型施設配置のモデル分析*

An Integrated Facility Location Model for Closed-Loop Network Design *

大窪和明**・奥村誠**

By Kazuaki OKUBO**・Makoto OKUMURA***

1. はじめに

レアメタルなどの資源は将来的に枯渇することが予想され、資源供給の安定化が重要となってくる。資源小国である我が国が安定した資源供給を維持するためには、使用済み製品から枯渇資源を抽出することが必要となってくる。我が国のリサイクル技術は先進国各国と比較しても高度であり、安定的でかつ安全なリサイクルが可能である。しかし近年では、我が国で発生した枯渇資源を含む使用済みパソコンなどが、労働賃金の安いアジア各国に流出している。そのような国々では技術的な問題から資源の抽出量は少なく、リサイクルを行う地域の環境汚染を引き起こしている。そこで複数の地域に対してリサイクル施設をどのように配置すべきかという問題が生じてくる。また近年のリサイクルポートなど静脈物流インフラの整備をより効果的なものにするためには、今後のリサイクル技術の進展が、既存の施設配置をどのように変えるかを明らかにする必要がある。

溝本らは廃棄物が発生してからリサイクルまたは最終処分されるまでの静脈物流を対象として、リサイクル施設の配置問題を考えた。しかし、静脈物流を含む施設配置問題の包括的な文献調査を行ったMelo. et. alにおいて指摘されているように、動脈物流と静脈物流の性質の違いを考慮するためには、静脈物流のみを考えるのではなく、動脈物流と静脈物流を統合した枠組みのもとで施設配置を考える必要がある。動脈・静脈物流を統合したモデルを用いたリサイクル施設の配置については近年になってから様々な研究がなされている(例えばLee and Dongなど)。これらの多くは、動脈・静脈物流を統合した複雑なモデルを大規模なネットワークに適用した場合の効率的解法の開発に主な関心があり、動脈・静脈物流を同時に考慮した場合の施設配置パターンが動脈物流のみの施設配置とどのような質的な違いを持つのかは議論さ

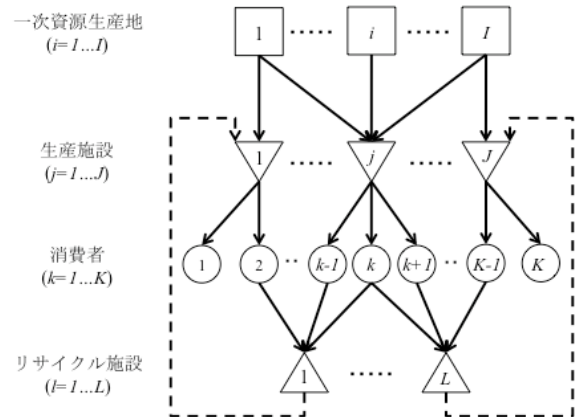


図1 モデルの枠組み

れていない。また経年的なリサイクルの進展を扱った研究の多くは、空間的な要素が捨象され、技術発展と施設配置との関係については不明確である。

そこで本研究では、動脈物流と静脈物流を同時に考慮した場合の施設配置パターンの特性を解明することを目的とする。具体的には、動脈・静脈物流統合型の施設配置モデルを構築し、リサイクル技術の発展により最終製品の原材料に使用可能なリサイクル資源が増加した場合の生産施設とリサイクル施設の配置パターンの変化を明らかにする。次に、動脈物流のみを考慮した施設配置モデルを用いて、リサイクル技術が発展した場合と同程度に一次資源が増加した場合の生産施設配置の変化を明らかにする。最後に、これら二つのモデルから得られる施設配置パターンの違いから、動脈物流と静脈物流を統合した施設配置の特性を解明する。

2. モデルの定式化

(1) 動脈/静脈物流型施設配置モデル

本研究では1企業が最終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場合を考える。モデル全体の枠組みはFishmanと同様であるが、本モデルの最終製品の生産においては一次資源とリサイクル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。企業は費用を最小化するように、生産施

*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

設とリサイクル施設を配置する地域を選択する。同時に生産施設、リサイクル施設の配置パターンおよび一次資源生産地、生産施設、消費者、リサイクル施設のそれぞれの間の輸送量を決定し、費用を最小化する。ここで生産施設は一次資源とリサイクル資源から最終製品を生産する施設である。リサイクル施設は、消費者から回収した使用済み製品から最終製品の原材料を抽出する施設である。本研究における動脈/静脈物流統合型施設配置モデルは、以下の混合整数計画問題として定式化できる。

[MILP-1]

$$\begin{aligned}
\min. \quad & \sum_{i \in I, j \in J, k \in K, l \in L} Y_j^f X_{ij}^v X_{jk}^f X_{kl}^r X_{lj}^r \\
& f^f \sum_{j \in J} Y_j^f + f^r \sum_{l \in L} Y_l^r \\
& + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij}^v v_i X_{ij}^v + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{jk}^f d_k X_{jk}^f \\
& + c^u \sum_{k \in K} d_k \left(1 - \sum_{j \in J} X_{jk}^f \right) \\
& + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} (c_{kl}^r + c_{lj}^r) r_k X_{klj}^r \\
& + c^w \sum_{k \in K} r_k \left(1 - \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} X_{klj}^r \right)
\end{aligned} \tag{1}$$

s.t.

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

$$\delta \sum_{k \in K} d_k X_{jk}^f \leq \sum_{i \in I} v_i X_{ij}^v, \quad \forall j \tag{3}$$

$$\gamma \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} d_k X_{jk}^f \leq \sum_{l \in L} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} r_k X_{klj}^r \tag{4}$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in L} r_k X_{klj}^r \leq \sum_{j \in J} d_k X_{jk}^f, \quad \forall k \tag{5}$$

$$0 \leq X_{ij}^v, X_{jk}^f, X_{klj}^r \leq 1 \tag{6}$$

$$Y_j^f, Y_l^r \in \{0, 1\} \tag{7}$$

ただし、パラメータは、 f^f : 生産施設固定費用、 f^r : リサイクル施設固定費用、 c_{ij}^v : 地域*i*から地域*j*への一次資源の輸送費用、 v_i : 地域*i*の一次資源賦存量、 c_{jk}^f : 地域*j*から地域*k*への最終製品の輸送費用、 d_k : 地域*k*の需要量、 c^u : 最終製品の品切れ費用、 c_{kl}^r : 地域*k*から地域*l*への使用済み製品の輸送費用、 c_{lj}^r : 地域*l*から地域*j*へのリサイクル資源の輸送費用、 r_k : 地域*k*での使用済み製品の発生量、 c^w : 使用済み製品を回収しなかった場合のペナルティ費用、 δ : 最終製品に含有可能なリサイクル物質の最小割合、 γ : 産業全体にかけられたリサイクル率とする。また操作変数は、 Y_j^f : 地域*j*の生産施設配置を示す0-1変数、 Y_l^r : 地域*l*のリサイクル施設配置を示す

0-1変数、 X_{ij}^v : 地域*i*の一次資源を地域*j*に配分する割合、 X_{jk}^f : 地域*k*の需要に占める地域*j*の生産施設から輸送された最終製品の割合、 X_{klj}^r : 地域*l*のリサイクル施設から地域*j*の生産施設に運ばれるルートに地域*k*で発生した使用済み製品が配分される割合、である。

目的関数(式(1))の第一項と第二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。第三項、第四項はそれぞれ一次資源、最終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、需要が満たされなかった場合には、第五項で示すような品切れ費用がかかるものとする。消費者によって使用された最終製品は企業が回収するものとし、消費者から生産施設までのルートごとの物流量にかかる費用を第六項で表す。このとき企業は全ての使用済み製品を回収する必要はないが、使用済み製品が消費者の存在する地域に残る場合には、第七項で示す費用がかかるものとする。

制約条件式(2)は質量保存則であり、一次資源とリサイクル資源の輸送量を足したものと最終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最終製品の生産には、 δ だけの一次資源を必要とすることを意味する。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、リサイクル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。つまり δ の減少がリサイクル技術の発展を表している。制約条件式(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ある一定割合 γ 以上の使用済み製品の回収を行わなくてはならない。式(5)は地域*k*の使用済み製品の発生量が、その地域で購入した最終製品の量を超えないという条件式である。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かを明らかにする。

(2) 動脈型施設配置モデル

リサイクル技術の発展による利用可能なリサイクル資源の増加は、生産施設にとっては最終製品の原材料の増加と見ることができる。またリサイクルの促進よりも一次資源の購入そのものを多くする方が、費用の面で有利な場合もある。ここでは利用可能な一次資源が増えた場合の施設配置パターンの変化の関係を明らかにするために確認するために、動脈物流のみを対象とし、一次資源の賦存量を増やして行った場合の生産施設配置モデルを定式化する。具体的には図1の一次

資源生産地から消費者までの動脈物流を考え、1企業が生産施設の配置と、一次資源および最終製品の輸送量を決定する問題として、2章1節と同様の記号を用いて、以下のような混合整数計画問題として定式化することができる。

[MILP-2]

$$\begin{aligned} \min_{Y_j^f, X_{ij}^v, X_{jk}^f} & f^f \sum_{i \in I} Y_j^f \\ & + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij}^v v_i^f X_{ij}^v + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{jk}^f d_k X_{jk}^f \\ & + c^u \sum_{k \in K} d_k \left(1 - \sum_{j \in J} X_{jk}^f \right) \end{aligned} \quad (8)$$

s.t.

$$\sum_{k \in K} d_k X_{jk}^f = \sum_{i \in I} v_i X_{ij}^v \quad (9)$$

$$0 \leq X_{ij}^v, X_{jk}^f \leq 1 \quad (10)$$

$$Y_j^f \in \{0, 1\} \quad (11)$$

$$v_i^f = v_i + \beta d_i, \quad 0 \leq \beta \leq 1 \quad (12)$$

[MILP-2]では、[MILP-1]における静脈物流に関する項、操作変数を考慮していない。それ以外の[MILP-1]と[MILP-2]との違いは、各地域の一次資源賦存量 v_i を v_i^f として式(12)のように書き直したことにある。これは[MILP-2]における地域 i の一次資源賦存量 v_i^f がその地域の最終製品に対する需要量に比例して増加すると仮定している。

3. 数値計算例

(1) 数値計算の設定

本研究では図2に示すように5つの地域が一直線上に並んでいる場合を考える。企業は各地域に生産施設、リサイクル施設をそれぞれ配置するかどうかを決める。

各地域の一次資源賦存量、最終製品に対する需要量、使用済み製品の発生量を表1にまとめる。周辺地域ほど一次資源の賦存量は多く、最終製品の需要量は少なく分布していると仮定する。また各地域において需要量と等しい量の使用済み製品が発生するものとする。ここでは地域3を中心として対称となるように数値を設定する。

表2に地域 i から地域 j までの一次資源単位当たりの輸送費用を示す。ここでは同じ地域内での輸送よりも地域間での輸送の方が高い費用がかかると仮定する。また中心に位置する地域2, 3, 4のそれぞれの間の輸送費用は、地域1-2および4-5間の輸送費用よりも高いものとする。この設定は中心に位置する地域は陸送がほとんどであ

るのに対して、周辺地域は陸送よりも安価な海上輸送を利用できるような場合に相当する。

最終製品、使用済み製品、リサイクル資源の輸送費用は、表2の値に、それぞれ1.5倍、3.5倍、1倍した値を用いる。これは一次資源に比べて最終製品の輸送管理には費用がかかると仮定している。また使用済み製品の輸送には途中での分別、分解費用も含まれるとし高めに設定する。リサイクル資源の輸送費用は一次資源の輸送費用と変わらないものとする。生産施設、リサイクル施設の固定費用はそれぞれ $f^f = 1000$ 、 $f^r = 1200$ とした。これにより最終製品を生産するよりも分解してリサイクル資源を取り出す方が難しいと仮定する。また最終製品の品切れ費用と使用済み製品を回収しなかった場合の費用をそれぞれ $c_u = 200$ 、 $c_w = 100$ とした。

(2) 数値計算結果

表3に技術制約を変化させて[MILP-1]を解いたときの最小費用、生産施設とリサイクル施設の配置パターンの変化を示す。表3から δ が減少し、技術が発展していきリサイクル資源と一次資源との質的な差が縮まるまで施設配置パターンは5つの段階に分けられることがわかる。具体的には、技術的に未熟であり、最終製品の生産にリサイクル資源がほとんど利用できない場合($\delta \geq 0.9$)は、リサイクル施設は配置されず生産施設が中心地域と周辺地域に配置される。技術が発展すると($0.85 \geq \delta \geq 0.6$)、リサイクル施設はまず使用済み製品の発生量が多も中心地域に配置され、生産施設は中間地域に配置される。さらなる技術の進展により($0.55 \geq \delta \geq 0.25$)リサイクル資源に対する需要が増加することによって、リサイクル施設は2つの地域に配置される。さらにリサイクル技術が発展すると($0.2 \geq \delta \geq 0$)中心地域と中間地域に生産施設、リサイクル施設の双方が配置される。このと



図2 対象地域の設定

表1 一次資源賦存量、最終製品需要量、廃棄物発生量

地域名	1	2	3	4	5
一次資源賦存量	40	20	0	20	40
最終製品需要量	10	20	30	20	10
廃棄物発生量	10	20	30	20	10

表2 一次資源一単位当たりの輸送費用の設定

地域名	1	2	3	4	5
1	5	15	30	45	55
2	15	5	20	35	45
3	30	20	5	20	30
4	45	35	20	5	15
5	55	45	30	15	5

表3 動脈/静脈物流型施設配置モデル

δ	1	0.95	0.9	0.85	0.8	0.75	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1	0.05	0	
最小費用	14375	14375	14375	14237	13883	13528	13174	12938	12938	12729	12544	12358	12253	12157	12125	12125	11945	11849	11719	11578	11438	
動脈物流	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
静脈物流	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表4 動脈型施設配置モデル

β	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1
最小費用	5375	5362	5348	5332	5295	5262	5222	5175	5121	5000	4850	4850	4844	4754	4650	4594	4560	4526	4493	4459	4425
動脈物流	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	4	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0

きのネットワークを図3に示す。図3で生産施設とリサイクル施設がそれぞれ地域2,3,4に配置されていることが確認できる。また地域1と5からの一次資源の移入がないことがわかる。すなわち地域2,3,4からの一次資源だけで全ての地域の需要を満たせる。ただし、リサイクル施設のない地域1と5の使用済み製品の一部が回収されないという結果になっている。

表4に β を大きくし、一次資源賦存量を増やしていった場合、[MILP-2]を解いた場合の最小費用、生産施設立地パターンを示す。表4から一次資源賦存量が少ないとき($0 \leq \beta \leq 0.1$)には、リサイクル資源がほとんど利用できない場合と同様の立地パターンを示していることがわかる。次に $0.2 \leq \beta$ の範囲においては、[MILP-2]と[MILP-1]の生産施設配置パターンは異なる。具体的には $0.2 \leq \beta \leq 0.4$ のとき、それまでは周辺地域に配置されていた生産施設が中間地域に配置されるようになる。その後、 $0.45 \leq \beta \leq 0.55$ においては周辺地域にのみ生産施設が立地することがわかる。その後、 $\beta \geq 0.6$ の場合、生産施設は中心となる3つの地域に配置されたまま移動しなくなる。このとき[MILP-1]において技術が発展し、多くのリサイクル資源が利用できる場合の施設配置パターンと同じになる。

4. おわりに

本研究では、動脈物流と静脈物流を統合した施設配置モデルを構築し、動脈物流のみを考慮したモデルによる施設配置パターンとの違いを明らかにした。その結果、リサイクル技術が未熟な場合と、技術が発展して一次資源とリサイクル資源がほとんど無差別に利用可能になった場合の生産施設の配置パターンは、動脈物流モデルの

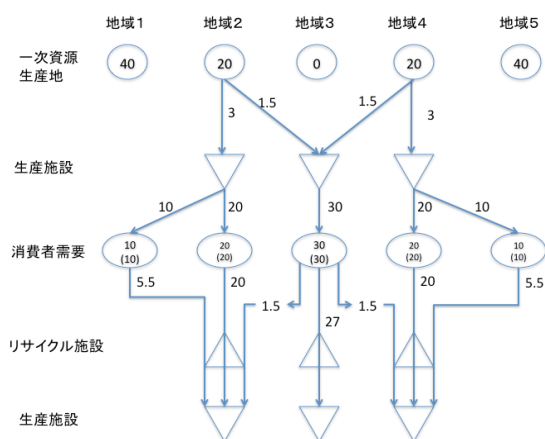


図3 技術進展後($\delta \leq 0.1$)でのネットワーク

配置パターンと同じになる。しかし、その中間においては、動脈物流と静脈物流を同時に考えた場合と、動脈物流のみを考えた場合の施設配置との間には、明確に違いが見られることがわかった。

参考文献

- 1) 溝本剛志・塚井誠人・奥村誠： ネットワーク型施設配置モデルによる廃棄物リサイクル施設計画の分析，都市計画論文集, No.39-3, pp.565-570, 2004.
- 2) Melo, M.T., Nickel, S. and Gama, F.S., Facility location and supply chain management – A review, European Journal of Operational Research, pp401-412, 2009.
- 3) Fleishman, M., Quantitative Models for Reverse Logistics, *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Ch.5, 2001.
- 4) Lee, D.H. and Dong, M., Dynamic Network Design for Reverse Logistics Operations under Uncertainty, *Transportation Research Part E*, Vol.45., pp.61-71, 2009.