

# 輸送用梱包材リユースシステムを対象とした 多期間配送計画に関する研究

石原 良晃・平木 秀作・坂口 通則

(受付 2006年5月9日)

## 1. はじめに

近年、地球環境保護の観点から、廃棄物のリサイクル、循環型社会の形成が強く叫ばれ、製造業に対しても拡大生産者責任の考えに基づく対応が求められている。また、法的規制も強化され、「循環型社会形成推進基本法」(平成13年1月施行)をはじめ、「廃棄物処理法」(平成15年12月改正施行)、「資源有効利用推進法」(平成13年4月施行)、「グリーン購入法」(平成13年4月施行)、「容器包装リサイクル法」(平成12年4月施行)、「家電リサイクル法」(平成13年4月施行)、「建設資材リサイクル法」(平成14年5月施行)、「食品リサイクル法」(平成13年5月施行)、「自動車リサイクル法」(平成17年1月)などが、制定・施行されている<sup>1)</sup>。これらに対応して、各製造業は、リユース・リサイクルシステムを構築し稼働している。それに伴い、消費者から企業へ廃棄された製品を返す静脈物流が注目を集めている。自動車産業では、有価金属などを再利用するシステムは従来から構築されていたが、シュレッダーダストとして処分されていた樹脂部品のリサイクルを促進するため、破損したバンパーのリサイクルシステムを構築している<sup>2,3)</sup>。輸送用梱包材では、金属製およびプラスチック製のコンテナが通い箱として繰り返し使用されていたが、ダンボール、フレコンバック、ポピン等の輸送用梱包材は、一部紙製品が古紙としてマテリアル・リサイクルされるのを除くと、一度使用された後かなりの部分が廃棄されていた<sup>4)</sup>。そのような輸送用梱包材を回収し再生処理後使用メーカーに納入するリユースシステムを構築している企業も出てきている<sup>5)</sup>。輸送用梱包材リユースシステムでは、使用済み輸送用梱包材(以下、使用済み梱包材と呼ぶ。)を回収拠点で回収・選別後、納入先を担当する再生拠点に配送して再生し、使用メーカーに納入している。これまでの研究で、輸送用梱包材リユースシステムを対象とした単一期間の配送計画および多期間配送計画の基本的な立案方法について検討している<sup>6-8)</sup>。本研究は、回収・再生拠点間の配送に輸送機器の帰り便等の空きスペースを有効に利用する多期間配送計画を立案するためにローリング方式を採用して優先度を調節する手法を提案し、その有効性を明らかにすることを目的とする。

## 2. 輸送用梱包材リユースシステムを対象とした多期間配送計画モデルの構築

### 2.1 対象とするリユースシステム

回収・再生拠点間の使用済み梱包材の配送は、輸送機器の空きスペースを使用し、輸送機器本来の輸送目的（目的地、輸送量、納期等）に影響を及ぼさないように配送を割り当てる。輸送機器の種類により輸送費が変動しないものとし、システム全体における配送量を最大化するように、輸送機器に配送を割り当てることを考える。図1に本研究で対象とする回収・再生拠点間の配送計画モデルの概念図を示す。各拠点は、回収および再生の機能を持ち、各拠点の担当する地域から使用済み梱包材を回収し、再生品を使用する納入先を担当する拠点に配送する。再生された使用済み梱包材は、担当拠点から納入先に納入される。例えば、拠点1、拠点2で回収された納入先Cの使用済み梱包材は、納入先Cを担当する拠点3に配送される。本研究では、この拠点間の使用済み梱包材の配送を対象としている。図2に輸送機器の配送経路と拠点間の配送の例を示す。空きスペースのある輸送機器が現在地から目的

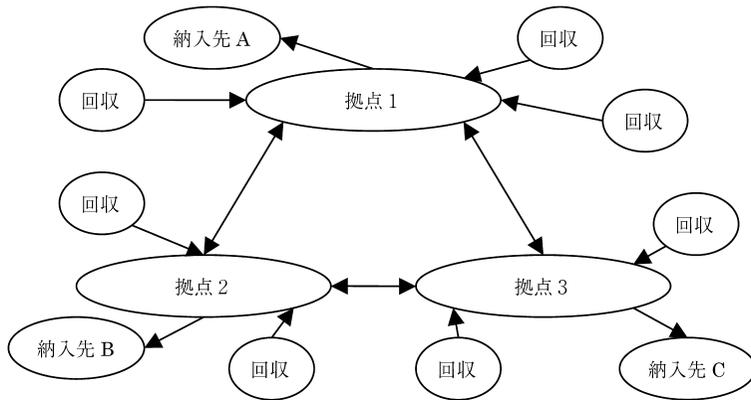


図1 回収・再生拠点間の配送計画モデルの概念図

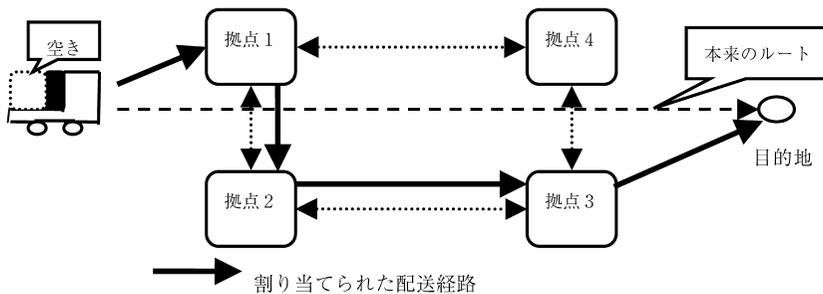


図2 輸送機器の配送経路と拠点間の配送の例

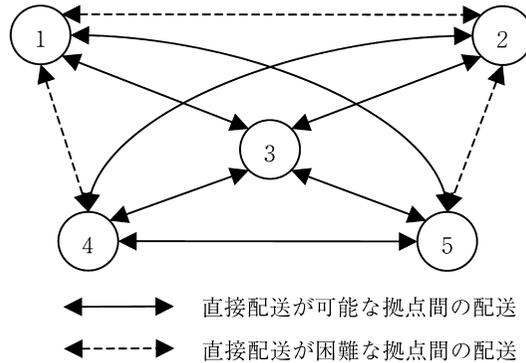


図3 中継拠点を考慮した回収・再生拠点間の配送計画モデルの概念図  
(中継拠点が拠点3の場合)

地に向かい移動する場合に、輸送機器が利用可能時間内に目的地に到着できる範囲で、その移動途中にある回収・再生拠点間の配送を割り当てる。図2では、輸送機器が拠点1、拠点2、拠点3を経由し、拠点1から拠点2、拠点1から拠点3、拠点2から拠点3への使用済み梱包材の配送が可能になる様子を示している。

輸送用梱包材リユースシステムでは輸送機器の帰り便等の空きスペースを利用した配送を前提としている。利用する輸送機器には幹線輸送を行う定期便等も含まれるため、多期間にわたる輸送機器に関する情報を得ることが可能である。そこで、本研究では、中継拠点を利用した配送を考慮した多期間配送計画について検討する。図3に本研究で対象とする中継拠点を考慮した回収・再生拠点間の配送計画モデルの概念図を示す。直接配送することが困難な回収・再生拠点間の配送に対して、中継拠点を設定し、中継拠点まで配送された使用済み梱包材は、次期以降の配送計画で中継拠点から再生拠点への配送として配送待ち梱包材の量に含める。図3では、拠点1と拠点2のように直接配送可能な輸送機器の出現が困難な場合に、中継拠点として拠点3を使用し、中継拠点までの配送と中継拠点からの配送を違う輸送機器に担当させて配送を実現する。

## 2.2 モデルの前提条件

輸送用梱包材リユースシステムを対象とした配送計画モデルを構築するにあたり、以下のような前提条件をおく。

- (1) 対象とする計画期間は  $L$  期間とする。
- (2) 回収・再生拠点間の配送待ち梱包材の量を所与とする。
- (3) 輸送費は、配送量と配送距離によって決定され、使用する輸送機器によって輸送費は変化しない。

- (4) 輸送機器の空きスペースを使用して可能な限り配送する。
- (5) 輸送機器の本来の出発時間および到着時間を遵守する。
- (6) 配送待ち梱包材の量を分割し、複数の輸送機器が同一拠点間の配送を行なうことを認める。
- (7) 拠点間の移動時間に関するデータはデータベース化されており、予め輸送機器の配送経路を求めることが可能である。

### 2.3 記号の説明

$L$  : 計画期数

$n$  : 回収・再生拠点数

$N$  : 回収・再生拠点の集合

$H_{ij}$  : 拠点  $i$  から拠点  $j$  への配送に対して設定された中継拠点の集合

$t_{ij}$  : 拠点  $i$  から拠点  $j$  への移動に必要な時間

$W_{ij,l}^1$  :  $l$  期における拠点  $i$  から拠点  $j$  へ運搬することに対する単位あたりの優先度を示すウェイト

$W_{ihj,l}^2$  :  $l$  期における拠点  $i$  から拠点  $j$  へ運搬する梱包材を中継拠点  $h$  まで配送することに対する優先度を示すウェイト

$W_{ihj,l}^3$  :  $l$  期における拠点  $i$  から拠点  $j$  へ運搬する梱包材を中継拠点  $h$  から配送することに対する優先度を示すウェイト

$TK$  : 計画期間中に利用可能な輸送機器の総台数

$K$  : 輸送機器の集合

$T^k$  : 輸送機器  $k$  の利用可能時間

$C^k$  : 輸送機器  $k$  の積載可能量

$TK_l$  :  $l$  期中に利用可能な輸送機器数,

$LK_l$  :  $l$  期までに利用可能な輸送機器数

$$LK_l = \sum_{i=1}^l TK_i \quad (l=1, \dots, L) \quad (1)$$

$K_l$  :  $l$  期中に利用可能な輸送機器の集合,

$$K_l = \{LK_{l-1} + 1, \dots, LK_l\} \quad (l=1, \dots, L)$$

$R^k$  : 輸送機器  $k$  の配送経路数

$NR^k$  : 輸送機器  $k$  の配送経路の番号の集合

$\bar{M}_r^k$  : 輸送機器  $k$  が  $r$  番目の経路を採用した場合に訪れる拠点数

$v_i^{k,r}$  : 輸送機器  $k$  が  $r$  番目の経路を採用して配送した場合に  $i$  番目に訪問する拠点

$\langle n+k, v_1^{k,r}, \dots, v_{\bar{M}_r^k}^{k,r}, n+TK+k \rangle$  : 輸送機器  $k$  が  $r$  番目の経路を採用した場合の配送経路で,

輸送機器の現在地から各拠点  $v_i^{k,r}$  を経由し、目的地に向かう配送経路を示している。

$Q^k$  : 輸送機器  $k$  の配送経路の集合

$$Q^k = \left\{ \left\langle n+k, v_1^{k,1}, \dots, v_{M_1^k}^{k,1}, n+TK+1 \right\rangle, \left\langle n+k, v_1^{k,2}, \dots, v_{M_2^k}^{k,2}, n+TK+1 \right\rangle, \dots, \left\langle n+k, v_1^{k,R^k}, \dots, v_{M_{R^k}^k}^{k,R^k}, n+TK+k \right\rangle \right\} \quad (k \in K) \quad (2)$$

$(i, j)$  : 拠点  $i$  から拠点  $j$  への拠点間の配送

$S_r^k$  : 輸送機器  $k$  が  $r$  番目の経路を採用した場合に配送可能となる拠点間の配送の集合

$$S_r^k = \{(v_1^{k,r}, v_2^{k,r}), \dots, (v_1^{k,r}, v_{M_1^k}^{k,r}), (v_2^{k,r}, v_3^{k,r}), \dots, (v_2^{k,r}, v_{M_2^k}^{k,r}), \dots, (v_{M_{r-1}^k}^{k,r}, v_{M_r^k}^{k,r})\} \quad (k \in K, r \in NR^k) \quad (3)$$

$BD$  : 拠点間の配送の集合

$\delta_{ij}^{k,r}$  : 輸送機器  $k$  が  $r$  番目の経路を採用した場合に配送可能となる拠点間の配送を示す係数、つまり、

$$\delta_{ij}^{k,r} = \begin{cases} 1 & (i, j) \in S_r^k \\ 0 & (i, j) \notin S_r^k \end{cases} \quad (k = 1, \dots, K, r = 1, \dots, R^k) \quad (4)$$

$D_l^{(i,j)}$  : 拠点  $i$  から拠点  $j$  へ配送する梱包材の  $l$  期中の回収量

$P_{ij}^{k,r}$  : 輸送機器  $k$  が  $r$  番目の経路を採用して配送した場合の拠点  $i$  から拠点  $j$  への配送量 (変数)

$X_r^k$  : 輸送機器  $k$  が  $r$  番目の経路を採用して配送するとき 1, 配送しないとき 0 となる 0-1 変数。

$B_l^{(i,h,j)}$  : 拠点  $i$  から拠点  $j$  へ配送する梱包材の中継拠点  $h$  における  $l$  期首の配送待ち梱包材の量 (変数)

$I_l^{(i,j)}$  : 拠点  $i$  から拠点  $j$  へ配送する梱包材の拠点  $i$  における  $l$  期首の配送待ち梱包材の量 (変数)

$O_l^{1(i,j)}$  : 拠点  $i$  から拠点  $j$  へ配送する梱包材の  $l$  期中の配送量 (変数)

$O_l^{2(i,h,j)}$  : 拠点  $i$  から拠点  $j$  へ配送する梱包材の拠点  $i$  から中継拠点  $h$  まで配送された  $l$  期中の配送量 (変数)

$O_i^{3(i,h,j)}$  : 拠点  $i$  から拠点  $j$  へ配送する梱包材の中継拠点  $h$  から拠点  $j$  まで配送された  $l$  期中の配送量 (変数)

以上の記号を用いて、回収・再生拠点間の中継拠点を考慮した多期間配送計画モデルを構築する。

## 2.4 中継拠点を考慮した多期間配送計画モデルの定式化

各輸送機器が限られた時間内にできるだけ多くの配送を実施するため、拠点間移動時間データベースから抽出された配送経路の中から優先度を考慮した総配送量を最大化するように配

送経路を選択することを考え、以下のように定式化する<sup>6-8)</sup>。

(1) 目的関数

$$Z = \sum_{l=1}^L \left( \sum_{(i,j) \in RD} W_{ij,l}^1 \cdot O_l^{1(i,j)} + \sum_{(i,j) \in RD} \sum_{h \in H_{ij}} W_{ihj,l}^2 \cdot O_l^{2(i,h,j)} + \sum_{(i,j) \in RD} \sum_{h \in H_{ij}} W_{ihj,l}^3 \cdot O_l^{3(i,h,j)} \right) \longrightarrow \max \quad (5)$$

式(5)は、計画期間中の優先度を考慮した総配送量を最大にするものである。

(2) 配送待ち梱包材の量に関する制約条件

$$O_l^{1(i,j)} + \sum_{h \in H_{ij}} O_l^{2(i,h,j)} \leq I_l^{(i,j)} \quad (l = 1, \dots, L, (i,j) \in RD) \quad (6)$$

$$O_l^{3(i,h,j)} \leq B_l^{(i,h,j)} \quad (l = 1, \dots, L, (i,j) \in RD, h \in H_{ij}) \quad (7)$$

$$O_l^{1(i,j)} + \sum_{j \in H_{ih}} O_l^{2(i,j,h)} + \sum_{j \in H_{ij}} O_l^{3(h,i,j)} = \sum_{k \in K_l} \sum_{r \in NR^k} \delta_{ij}^{k,r} P_{ij}^{k,r} \quad (l = 1, \dots, L, (i,j) \in RD) \quad (8)$$

$$I_{l+1}^{(i,j)} = I_l^{(i,j)} + D_l^{(i,j)} - O_l^{1(i,j)} - \sum_{h \in H_{ij}} O_l^{2(i,h,j)} \quad (l = 1, \dots, L-1, (i,j) \in RD) \quad (9)$$

$$B_{l+1}^{(i,h,j)} = B_l^{(i,h,j)} + O_l^{2(i,h,j)} - O_l^{3(i,h,j)} \quad (l = 1, \dots, L-1, (i,j) \in RD, h \in H_{ij}) \quad (10)$$

式(6)および式(7)は、各期の配送量が各期首の配送待ち梱包材の量以下であることを示す。式(8)は、各期の拠点間の配送量が輸送機器の配送量の和に等しいことを示す。式(9)および式(10)は、各拠点における配送待ち梱包材の量のバランス式である。

(3) 輸送機器の積載可能量に関する制約条件

$$\sum_{i=1}^{\bar{j}} \sum_{j=\bar{j}+1}^{\bar{M}_r^k} \delta_{ij}^{k,r} v_i^{k,r} v_j^{k,r} \cdot P_{ij}^{k,r} \leq C^k \cdot X_r^k \quad \left( k \in K, r \in NR^k, (v_i^{k,r}, v_j^{k,r}) \in S_r^k \right) \quad (11)$$

式(11)は、各輸送機器の選択した配送経路上の各拠点で使用済み梱包材の積載量が輸送機器の積載可能量以下でなければならないことを示す。

(4) 輸送機器の利用可能な配送経路に関する制約条件

$$\delta_{ij}^{k,r} \cdot P_{ij}^{k,r} \leq V \cdot X_r^k \quad (k \in K, r \in NR^k, (i,j) \in S_r^k) \quad (12)$$

$$\sum_{r=1}^{R^k} X_r^k = 1 \quad (k \in K) \quad (13)$$

$$X_r^k \in \{0,1\} \quad (k \in K, r \in NR^k) \quad (14)$$

式(12)は、各輸送機器が選択した利用可能な配送経路上の配送量が非負の値をとることを示す。ここで、 $V$ は非常に大きな正数である。式(13)、式(14)は、各輸送機器がデータベースから抽出された利用可能な配送経路の中からひとつだけ選択することを示す。

(5) 配送量および配送待ち梱包材の量の非負制約

$$P_{ij}^{k,r} \geq 0 \quad (k \in K, r \in NR^k, (i, j) \in S_r^k) \quad (15)$$

$$O_l^{1(i,j)} \geq 0 \quad (l=1, \dots, L, (i, j) \in RD) \quad (16)$$

$$O_l^{2(i,h,j)} \geq 0 \quad (l=1, \dots, L, (i, j) \in RD, h \in H_{ij}) \quad (17)$$

$$O_l^{3(i,h,j)} \geq 0 \quad (l=1, \dots, L, (i, j) \in RD, h \in H_{ij}) \quad (18)$$

$$I_l^{(i,j)} \geq 0 \quad (l=2, \dots, L, (i, j) \in RD) \quad (19)$$

$$B_l^{(i,h,j)} \geq 0 \quad (l=2, \dots, L, (i, j) \in RD, h \in H_{ij}) \quad (20)$$

式(6)–式(20)を制約条件として式(5)を最大にする問題を、中継拠点を考慮した多期間配送計画モデルと呼ぶ。

## 2.5 ローリング方式を用いた多期間配送計画における優先度の設定

本研究では、各拠点間の配送の優先度を設定し、使用済み梱包材の配送計画を立案する。各拠点間の優先度は、配送待ち梱包材を輸送機器へ割り当てる機会を増やすために増加させる。回収された使用済み梱包材の配送が一定期間を経過しても輸送機器に割り当てられない場合、その使用済み梱包材の配送を輸送機器へ優先的に割り当てるため、該当する拠点間の配送に対する優先度を大きくする。

また、拠点間の優先度は、計画期間内で変化させる。できるだけ早い時期に梱包材を配送することを考え、計画期が早いほど優先度を高く設定する。

$$W_{ij,\ell}^1 = W_{ij,1}^1 \cdot (1 - \alpha \cdot \ell) \quad (21)$$

ここで、 $\alpha$ は、優先度の減少の程度を示すパラメータである。また、中継拠点を利用した配送の優先度は、式(22)で設定する。

$$W_{ihj,\ell}^2 = W_{ihj,\ell}^3 = W_{ij,1}^1 \cdot \beta / 2 \quad (22)$$

ここで、 $\beta$ は、中継拠点を利用した配送の優先度の程度を示すパラメータである。

毎期末に次期以降の多期間配送計画をローリング方式<sup>9)</sup>により立案した場合の効果について考察する。ローリング方式を採用するに際して拠点間の配送の優先度を以下の基準で修正しながら每期配送計画を立案するものとする。

(1) 前期の配送計画の第1期目で直接配送が行われた拠点間配送の優先度

$W_{ij,1}^1$ を1.0に設定し、式(21)、式(22)より  $W_{ij,\ell}^1, W_{ihj,\ell}^2, W_{ihj,\ell}^3$ を設定する。

(2) 前期の配送計画の第1期目で中継拠点  $\bar{h}$  までの配送が行われた拠点間の配送

$W_{ij,1}^1$ を1.0に設定し、式(21)、式(22)より  $W_{ij,\ell}^1, W_{ihj,\ell}^2, W_{ihj,\ell}^3 (h \neq \bar{h})$ を設定し、 $W_{i\bar{h},\ell}^3$ は、前

期の配送計画における中継拠点  $\bar{h}$  までの拠点間の優先度  $\bar{W}_{ihj,\ell}^2$  に設定する。

(3) 前期の配送計画の第 1 期目で中継拠点からの配送が行われた拠点間の配送

式(22)より設定する。ただし、第 1 期目に中継拠点までの配送が行われた場合は、中継拠点からの配送の優先度を変更しない。

(4) 前期の配送計画の第 1 期目で配送が行われなかった拠点間の配送

$W_{ij,1}^1$  を  $\bar{W}_{ij,1}^1 + 1.0$  に設定し、式(21)、式(22)より  $W_{ij,\ell}^1, W_{ihj,\ell}^2, W_{ihj,\ell}^3$  を設定する。

### 3. ローリング方式を用いた多期間配送計画の数値例による評価

#### 3.1 入力データ

2.4で示した回収・再生拠点間の多期間配送計画モデルを用いて提案した多期間配送計画の立案の有用性を示す。入力データは、T社のフレコンバックのリユースシステムのデータを使用する。

(1) 拠点の位置

図4にT社の回収・再生拠点を示す。T社のフレコンバックのリユースシステムでは、18拠点が対象となる。回収・再生拠点としては、千葉(C1)、埼玉(C2)、静岡(C4)、横浜(C5)、愛知(C6)、姫路(C10)、岡山(C11)、山口(C13)、愛媛(C14)、北九州(C15)、回収のみ行う拠点としては、東京(C3)、京都(C7)、大阪(C8)、尼崎(C9)、広島(C12)、福岡(C16)、熊本(C17)、鹿児島(C18)である。

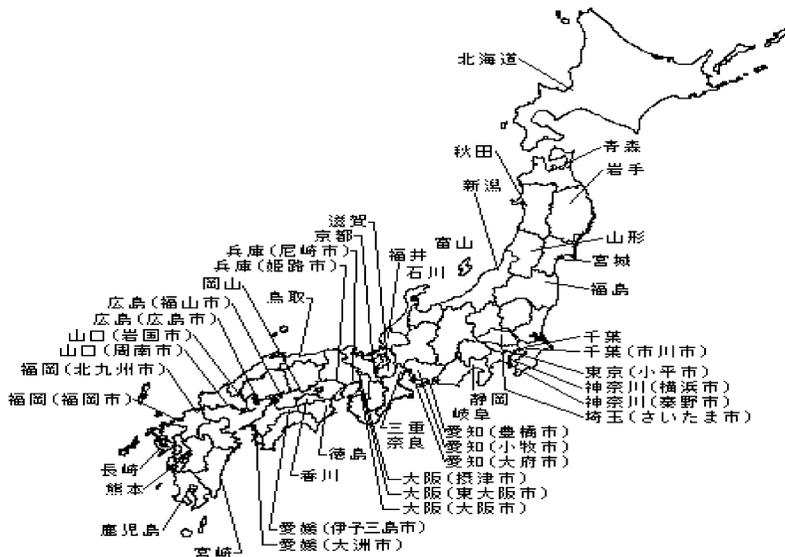


図4 T社の回収・再生拠点

(2) 拠点間の移動時間と配送待ち梱包材の量

表1に拠点間の移動時間  $t_{ij}$  (単位：時間)，表2に第1期首の配送待ち梱包材の量  $I_\ell^{(i,j)}$  を示す。また，每期各拠点で新たに回収される梱包材の量  $D_\ell^{(i,j)}$  は，すべて1とする。

表1 拠点間の移動時間 (単位：時間)

|     | C1   | C2   | C3   | C4   | C5   | C6   | C7   | C8   | C9   | C10 | C11 | C12  | C13  | C14  | C15  | C16  | C17  | C18  |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| C1  | 0.0  | 0.6  | 0.5  | 0.7  | 1.2  | 4.1  | 5.3  | 6.3  | 6.6  | 7.3 | 8.4 | 10.4 | 11.8 | 11.6 | 13.0 | 13.9 | 14.6 | 16.6 |
| C2  | 0.6  | 0.0  | 0.4  | 0.7  | 1.9  | 4.0  | 5.3  | 6.3  | 6.6  | 7.3 | 8.4 | 10.4 | 11.8 | 11.6 | 13.0 | 13.8 | 14.6 | 16.6 |
| C3  | 0.5  | 0.4  | 0.0  | 0.3  | 1.4  | 3.6  | 4.8  | 5.8  | 6.1  | 6.8 | 7.9 | 9.9  | 11.3 | 11.1 | 12.5 | 13.5 | 14.1 | 16.1 |
| C4  | 0.7  | 0.7  | 0.3  | 0.0  | 1.1  | 3.4  | 4.6  | 5.6  | 5.9  | 6.6 | 7.8 | 9.8  | 11.1 | 10.9 | 12.3 | 13.2 | 13.9 | 15.9 |
| C5  | 1.2  | 1.9  | 1.4  | 1.1  | 0.0  | 2.2  | 3.4  | 4.4  | 4.7  | 5.4 | 6.4 | 8.6  | 9.9  | 9.7  | 11.1 | 12.0 | 12.7 | 14.8 |
| C6  | 4.1  | 4.0  | 3.6  | 3.4  | 2.2  | 0.0  | 1.3  | 2.3  | 2.5  | 3.2 | 4.4 | 6.4  | 7.7  | 7.9  | 9.3  | 10.1 | 10.9 | 12.9 |
| C7  | 5.3  | 5.3  | 4.8  | 4.6  | 3.4  | 1.3  | 0.0  | 1.0  | 1.3  | 1.9 | 3.1 | 5.1  | 6.4  | 6.6  | 8.1  | 8.8  | 9.6  | 11.7 |
| C8  | 6.3  | 6.3  | 5.8  | 5.6  | 4.4  | 2.3  | 1.0  | 0.0  | 0.3  | 0.9 | 2.1 | 4.1  | 5.4  | 5.6  | 7.1  | 7.8  | 8.6  | 10.7 |
| C9  | 6.6  | 6.6  | 6.1  | 5.9  | 4.7  | 2.5  | 1.3  | 0.3  | 0.0  | 0.9 | 1.9 | 3.9  | 5.2  | 5.0  | 6.4  | 7.3  | 8.0  | 10.1 |
| C10 | 7.3  | 7.3  | 6.8  | 6.6  | 5.4  | 3.2  | 1.9  | 0.9  | 0.9  | 0.0 | 1.1 | 3.2  | 4.5  | 4.3  | 5.8  | 6.6  | 7.3  | 9.4  |
| C11 | 8.4  | 8.4  | 7.9  | 7.8  | 6.4  | 4.4  | 3.1  | 2.1  | 1.9  | 1.1 | 0.0 | 2.0  | 3.2  | 3.0  | 4.4  | 5.3  | 6.0  | 8.1  |
| C12 | 10.4 | 10.4 | 9.9  | 9.8  | 8.6  | 6.4  | 5.1  | 4.1  | 3.9  | 3.2 | 2.0 | 0.0  | 1.3  | 1.4  | 2.6  | 3.4  | 4.1  | 6.2  |
| C13 | 11.8 | 11.8 | 11.3 | 11.1 | 9.9  | 7.7  | 6.4  | 5.4  | 5.2  | 4.5 | 3.2 | 1.3  | 0.0  | 2.7  | 1.3  | 2.1  | 2.8  | 4.9  |
| C14 | 11.6 | 11.6 | 11.1 | 10.9 | 9.7  | 7.9  | 6.6  | 5.6  | 5.0  | 4.3 | 3.0 | 1.4  | 2.7  | 0.0  | 3.9  | 4.8  | 5.5  | 7.6  |
| C15 | 13.0 | 13.0 | 12.5 | 12.3 | 11.1 | 9.3  | 8.1  | 7.1  | 6.4  | 5.8 | 4.4 | 2.6  | 1.3  | 3.9  | 0.0  | 0.9  | 1.6  | 3.6  |
| C16 | 13.9 | 13.8 | 13.5 | 13.2 | 12.0 | 10.1 | 8.8  | 7.8  | 7.3  | 6.6 | 5.3 | 3.4  | 2.1  | 4.8  | 0.9  | 0.0  | 0.8  | 2.8  |
| C17 | 14.6 | 14.6 | 14.1 | 13.9 | 12.7 | 10.9 | 9.6  | 8.6  | 8.0  | 7.3 | 6.0 | 4.1  | 2.8  | 5.5  | 1.6  | 0.8  | 0.0  | 2.1  |
| C18 | 16.6 | 16.6 | 16.1 | 15.9 | 14.8 | 12.9 | 11.7 | 10.7 | 10.1 | 9.4 | 8.1 | 6.2  | 4.9  | 7.6  | 3.6  | 2.8  | 2.1  | 0.0  |

表2 第1期首の配送待ち梱包材の量

|     | C1 | C2 | C4 | C5 | C6 | C10 | C11 | C13 | C14 | C15 | 計   |
|-----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| C1  | 0  | 3  | 2  | 1  | 2  | 3   | 2   | 1   | 2   | 2   | 18  |
| C2  | 2  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1   | 3   | 2   | 3   | 3   | 17  |
| C3  | 1  | 1  | 2  | 1  | 1  | 3   | 1   | 3   | 1   | 3   | 17  |
| C4  | 2  | 3  | 0  | 1  | 2  | 1   | 3   | 2   | 2   | 1   | 17  |
| C5  | 2  | 2  | 2  | 0  | 1  | 3   | 1   | 2   | 3   | 2   | 18  |
| C6  | 2  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1   | 3   | 3   | 2   | 3   | 17  |
| C7  | 2  | 1  | 2  | 2  | 2  | 3   | 1   | 2   | 2   | 2   | 19  |
| C8  | 2  | 3  | 1  | 2  | 1  | 1   | 3   | 2   | 1   | 2   | 18  |
| C9  | 3  | 2  | 2  | 2  | 2  | 1   | 2   | 3   | 1   | 1   | 19  |
| C10 | 2  | 1  | 2  | 2  | 2  | 0   | 3   | 2   | 2   | 2   | 18  |
| C11 | 1  | 3  | 2  | 1  | 1  | 3   | 0   | 1   | 3   | 2   | 17  |
| C12 | 2  | 3  | 1  | 1  | 1  | 3   | 1   | 2   | 2   | 2   | 18  |
| C13 | 1  | 1  | 2  | 1  | 2  | 1   | 3   | 0   | 3   | 3   | 17  |
| C14 | 2  | 1  | 3  | 1  | 1  | 3   | 1   | 3   | 0   | 2   | 17  |
| C15 | 1  | 1  | 2  | 3  | 1  | 1   | 3   | 3   | 2   | 0   | 17  |
| C16 | 2  | 1  | 1  | 1  | 2  | 3   | 1   | 2   | 3   | 2   | 18  |
| C17 | 2  | 3  | 2  | 2  | 1  | 1   | 3   | 2   | 2   | 2   | 20  |
| C18 | 2  | 1  | 3  | 2  | 1  | 3   | 2   | 1   | 1   | 2   | 18  |
| 計   | 31 | 31 | 31 | 25 | 24 | 35  | 36  | 36  | 35  | 36  | 320 |

表3 第1期の拠点間の配送の優先度

|     | C1 | C2 | C4 | C5 | C6 | C10 | C11 | C13 | C14 | C15 |
|-----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| C1  |    | 2  | 1  | 1  | 1  | 1   | 4   | 1   | 1   | 1   |
| C2  | 1  |    | 1  | 4  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   |
| C3  | 1  | 1  | 2  | 2  | 1  | 1   | 2   | 1   | 1   | 1   |
| C4  | 1  | 2  |    | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 2   | 1   |
| C5  | 1  | 2  | 4  |    | 1  | 1   | 2   | 1   | 3   | 2   |
| C6  | 1  | 1  | 1  | 1  |    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   |
| C7  | 2  | 2  | 1  | 2  | 1  | 1   | 1   | 1   | 4   | 1   |
| C8  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 3   |
| C9  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   |
| C10 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |     | 1   | 1   | 1   | 1   |
| C11 | 3  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2   |     | 1   | 1   | 1   |
| C12 | 1  | 3  | 1  | 2  | 1  | 3   | 1   | 2   | 1   | 1   |
| C13 | 1  | 1  | 1  | 3  | 1  | 1   | 1   |     | 1   | 1   |
| C14 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   |     | 2   |
| C15 | 1  | 1  | 3  | 1  | 1  | 5   | 1   | 1   | 1   |     |
| C16 | 1  | 1  | 1  | 3  | 1  | 1   | 1   | 2   | 1   | 1   |
| C17 | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 3   | 1   | 1   | 1   | 1   |
| C18 | 2  | 1  | 1  | 2  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 2   |

(3) 拠点間の配送の優先度

表3に第1期の拠点間の配送の優先度  $W_{ij,1}^1$  を示す。

(4) 拠点間移動時間データベース

拠点間移動時間データベースは、経路拠点数の最大値が4拠点の場合で、総配送経路数は3007である。

(5) 輸送機器の利用可能時間、積載可能量、現在地、目的地

輸送機器の台数を60台とし、表4に輸送機器（第1期 M1～M40、第2期 M41～M50、第3期 M51～M60）の現在地および目的地の最寄の拠点、利用可能時間  $T^k$ （単位：時間）と積載可能量  $C^k$  を示す。また、表5に次期で利用可能な輸送機器（第2期 M41～M50、M61-M90、第3期 M51～M60、第4期 M91～M100）の現在地および目的地の最寄の拠点、利用可能時間  $T^k$ （単位：時間）と積載可能量  $C^k$  を示す。

(6) 輸送機器の各拠点における作業時間

各拠点における作業時間は、0.5時間と設定した。

### 3.2 計算結果

数理計画ソフトウェア Xpress-MP<sup>10)</sup> を用いて数値例を計算した。表1～表4の入力データに基づく多期間配送計画を立案し、1期経過後、前期に実施された配送を考慮し、表5に示した新たな輸送機器に関する情報（次期 M61～M90、3期先 M91-M100）と、前期末まで

表 4 輸送機器の現在地および目的地の最寄の拠点、利用可能時間と積載可能量

| 機器  | 出発  | 到着  | 可能時間 | 積載可能量 | 機器  | 出発  | 到着  | 可能時間 | 積載可能量 |
|-----|-----|-----|------|-------|-----|-----|-----|------|-------|
| M1  | C1  | C18 | 19.6 | 2     | M31 | C3  | C14 | 13.3 | 2     |
| M2  | C18 | C1  | 19.6 | 4     | M32 | C14 | C3  | 13.3 | 2     |
| M3  | C2  | C18 | 19.6 | 2     | M33 | C3  | C15 | 15.0 | 1     |
| M4  | C18 | C2  | 19.6 | 2     | M34 | C15 | C3  | 15.0 | 1     |
| M5  | C1  | C16 | 16.7 | 4     | M35 | C3  | C16 | 16.1 | 4     |
| M6  | C16 | C1  | 16.7 | 4     | M36 | C16 | C3  | 16.1 | 2     |
| M7  | C2  | C16 | 16.5 | 2     | M37 | C3  | C18 | 19.1 | 2     |
| M8  | C16 | C2  | 16.5 | 3     | M38 | C18 | C3  | 19.1 | 1     |
| M9  | C1  | C6  | 4.9  | 1     | M39 | C8  | C18 | 12.8 | 2     |
| M10 | C6  | C1  | 4.9  | 2     | M40 | C18 | C8  | 12.8 | 1     |
| M11 | C1  | C10 | 8.7  | 2     | M41 | C1  | C18 | 19.6 | 3     |
| M12 | C10 | C1  | 8.7  | 1     | M42 | C18 | C1  | 19.6 | 1     |
| M13 | C2  | C10 | 8.7  | 2     | M43 | C2  | C18 | 19.6 | 2     |
| M14 | C10 | C2  | 8.7  | 4     | M44 | C18 | C2  | 19.6 | 4     |
| M15 | C1  | C11 | 10.1 | 3     | M45 | C1  | C16 | 16.7 | 4     |
| M16 | C11 | C1  | 10.1 | 1     | M46 | C16 | C1  | 16.7 | 2     |
| M17 | C2  | C11 | 10.1 | 3     | M47 | C2  | C16 | 16.5 | 2     |
| M18 | C11 | C2  | 10.1 | 2     | M48 | C16 | C2  | 16.5 | 1     |
| M19 | C1  | C12 | 12.5 | 4     | M49 | C1  | C6  | 4.9  | 3     |
| M20 | C12 | C1  | 12.5 | 2     | M50 | C6  | C1  | 4.9  | 3     |
| M21 | C2  | C12 | 12.5 | 2     | M51 | C1  | C10 | 8.7  | 1     |
| M22 | C12 | C2  | 12.5 | 2     | M52 | C10 | C1  | 8.7  | 2     |
| M23 | C1  | C14 | 13.9 | 3     | M53 | C2  | C10 | 8.7  | 4     |
| M24 | C14 | C1  | 13.9 | 1     | M54 | C10 | C2  | 8.7  | 2     |
| M25 | C2  | C14 | 13.9 | 2     | M55 | C1  | C11 | 10.1 | 2     |
| M26 | C14 | C2  | 13.9 | 3     | M56 | C11 | C1  | 10.1 | 1     |
| M27 | C2  | C15 | 15.6 | 3     | M57 | C2  | C11 | 10.1 | 2     |
| M28 | C15 | C2  | 15.6 | 4     | M58 | C11 | C2  | 10.1 | 3     |
| M29 | C3  | C8  | 7.0  | 4     | M59 | C1  | C12 | 12.5 | 3     |
| M30 | C8  | C3  | 7.0  | 1     | M60 | C12 | C1  | 12.5 | 2     |

表5 輸送機器の現在地および目的地の最寄の拠点、利用可能時間と積載可能量

| 機器  | 出発  | 到着  | 可能時間 | 積載可能量 | 機器   | 出発  | 到着  | 可能時間 | 積載可能量 |
|-----|-----|-----|------|-------|------|-----|-----|------|-------|
| M41 | C1  | C18 | 19.6 | 3     | M81  | C3  | C16 | 16.1 | 4     |
| M42 | C18 | C1  | 19.6 | 1     | M82  | C16 | C3  | 16.1 | 2     |
| M43 | C2  | C18 | 19.6 | 2     | M83  | C1  | C15 | 15.6 | 1     |
| M44 | C18 | C2  | 19.6 | 4     | M84  | C15 | C1  | 15.6 | 2     |
| M45 | C1  | C16 | 16.7 | 4     | M85  | C3  | C16 | 16.1 | 2     |
| M46 | C16 | C1  | 16.7 | 2     | M86  | C16 | C3  | 16.1 | 1     |
| M47 | C2  | C16 | 16.5 | 2     | M87  | C3  | C18 | 19.1 | 3     |
| M48 | C16 | C2  | 16.5 | 3     | M88  | C18 | C3  | 19.1 | 1     |
| M49 | C1  | C6  | 4.9  | 3     | M89  | C8  | C18 | 12.8 | 2     |
| M50 | C6  | C1  | 4.9  | 3     | M90  | C18 | C8  | 12.8 | 2     |
| M61 | C1  | C10 | 12.5 | 2     | M51  | C1  | C10 | 8.7  | 1     |
| M62 | C10 | C1  | 12.5 | 1     | M52  | C10 | C1  | 8.7  | 2     |
| M63 | C2  | C10 | 13.9 | 2     | M53  | C2  | C10 | 8.7  | 4     |
| M64 | C10 | C2  | 13.9 | 4     | M54  | C10 | C2  | 8.7  | 2     |
| M65 | C1  | C11 | 13.9 | 3     | M55  | C1  | C11 | 10.1 | 2     |
| M66 | C11 | C1  | 13.9 | 1     | M56  | C11 | C1  | 10.1 | 1     |
| M67 | C2  | C11 | 15.6 | 3     | M57  | C2  | C11 | 10.1 | 2     |
| M68 | C11 | C2  | 15.6 | 2     | M58  | C11 | C2  | 10.1 | 3     |
| M69 | C1  | C12 | 7.0  | 4     | M59  | C1  | C12 | 12.5 | 3     |
| M70 | C12 | C1  | 7.0  | 2     | M60  | C12 | C1  | 12.5 | 2     |
| M71 | C2  | C14 | 13.3 | 1     | M91  | C1  | C18 | 19.6 | 1     |
| M72 | C14 | C2  | 13.3 | 2     | M92  | C18 | C1  | 19.6 | 3     |
| M73 | C1  | C12 | 15.0 | 3     | M93  | C2  | C18 | 19.6 | 3     |
| M74 | C12 | C1  | 15.0 | 2     | M94  | C18 | C2  | 19.6 | 4     |
| M75 | C2  | C17 | 16.1 | 1     | M95  | C1  | C16 | 16.7 | 2     |
| M76 | C17 | C2  | 16.1 | 4     | M96  | C16 | C1  | 16.7 | 1     |
| M77 | C2  | C10 | 19.1 | 2     | M97  | C2  | C16 | 16.5 | 3     |
| M78 | C10 | C3  | 19.1 | 1     | M98  | C16 | C2  | 16.5 | 3     |
| M79 | C3  | C11 | 12.8 | 2     | M99  | C1  | C6  | 4.9  | 2     |
| M80 | C11 | C3  | 12.8 | 3     | M100 | C6  | C1  | 4.9  | 2     |

表6 ローリング方式を採用した場合の拠点間の配送量

| 拠点間<br>配送 |    | 1回目の配送計画<br>(2期目) |                  |                  | 2回目の配送計画<br>(優先度調整なし) |                  |                  | 2回目の配送計画<br>(優先度調整) |                  |                  |
|-----------|----|-------------------|------------------|------------------|-----------------------|------------------|------------------|---------------------|------------------|------------------|
|           |    | $O_i^{1(i,j)}$    | $O_i^{2(i,h,j)}$ | $O_i^{3(i,h,j)}$ | $O_i^{1(i,j)}$        | $O_i^{2(i,h,j)}$ | $O_i^{3(i,h,j)}$ | $O_i^{1(i,j)}$      | $O_i^{2(i,h,j)}$ | $O_i^{3(i,h,j)}$ |
| 1         | 2  | 2                 |                  |                  | 2                     |                  |                  | 2                   |                  |                  |
| 1         | 4  | 3                 |                  |                  | 3                     |                  |                  | 2                   |                  |                  |
| 1         | 11 |                   | 2                | 2                |                       | 2                | 2                |                     | 1                | 2                |
| 1         | 15 |                   | 1                |                  | 1                     |                  |                  |                     |                  |                  |
| 2         | 1  | 2                 |                  |                  | 1                     |                  |                  |                     |                  |                  |
| 2         | 5  | 2                 |                  |                  | 2                     |                  |                  | 2                   |                  |                  |
| 2         | 15 | 1                 |                  |                  | 2                     |                  | 1                |                     |                  | 1                |
| 3         | 4  | 2                 |                  |                  | 2                     |                  |                  | 2                   |                  |                  |
| 4         | 2  | 2                 |                  |                  | 2                     |                  |                  |                     |                  |                  |
| 4         | 11 | 1                 |                  |                  | 1                     | 1                |                  |                     | 2                |                  |
| 4         | 14 |                   | 2                |                  |                       | 2                |                  |                     |                  |                  |
| 5         | 2  | 1                 |                  |                  | 2                     |                  |                  | 2                   |                  |                  |
| 5         | 4  | 2                 |                  |                  | 2                     |                  |                  | 2                   |                  |                  |
| 5         | 11 |                   | 2                | 1                | 1                     | 1                | 1                |                     | 2                | 1                |
| 5         | 14 |                   | 1                |                  |                       | 2                | 1                |                     | 1                |                  |
| 5         | 15 | 2                 |                  |                  |                       | 2                |                  |                     | 2                |                  |
| 6         | 5  | 2                 |                  |                  | 2                     |                  |                  | 2                   |                  |                  |
| 6         | 11 | 2                 |                  |                  | 2                     |                  |                  | 2                   |                  |                  |
| 8         | 15 | 2                 |                  |                  | 2                     |                  |                  |                     |                  |                  |
| 10        | 4  | 1                 |                  |                  |                       |                  |                  |                     |                  |                  |
| 10        | 5  | 2                 |                  | 2                | 2                     |                  |                  |                     |                  |                  |
| 12        | 2  | 1                 | 1                |                  |                       | 4                |                  |                     |                  |                  |
| 12        | 10 | 2                 |                  |                  |                       |                  |                  |                     |                  |                  |
| 13        | 5  |                   |                  | 1                |                       | 2                | 1                |                     |                  | 1                |
| 15        | 4  |                   | 2                | 1                |                       | 2                | 2                |                     |                  | 2                |
| 15        | 10 | 2                 |                  |                  | 2                     |                  |                  |                     |                  |                  |
| 16        | 5  |                   |                  | 1                |                       | 2                | 1                |                     |                  | 1                |
| 18        | 15 | 1                 |                  |                  | 2                     |                  |                  |                     |                  |                  |

にわかっていた輸送機器に関する情報（次期 M41-M50, 2期先 M51-M60）から新たに多期間配送計画を立案する。表6にローリング方式を採用した場合の拠点間の配送量を示す。ローリング方式を採用することにより、前期末に計画され実施された多期間配送計画の2期目以降の計画に変更が生じる。新たな輸送機器に関する情報により、すでに輸送機器に割り当てられていた配送が変更される。また、拠点間の優先度を調整することにより、大きな変更が生じる。表7にローリング方式を採用することによる輸送機器の配送経路と配送量の変化を示す。新たに利用可能となった輸送機器および優先度の調整により、配送経路および配送量に変化していることがわかる。拠点間の配送の優先度は、配送待ち梱包材の回収時期により

表7 ローリング方式を採用した場合の輸送機器の配送経路と配送量の変化

| 機器 No. | 1 回目の配送計画<br>(2 期目) |     | 2 回目の配送計画<br>(優先度調整なし) |     | 2 回目の配送計画<br>(優先度調整) |     |
|--------|---------------------|-----|------------------------|-----|----------------------|-----|
|        | 配送経路                | 配送量 | 配送経路                   | 配送量 | 配送経路                 | 配送量 |
| M41    | 1,2,5,15            | 7   | 1,2,4,13               | 6   | 1,2,4,13             | 6   |
| M42    | 18,15,10,2          | 3   | 16,6,2,1               | 2   | 18,13,6,2            | 3   |
| M43    | 2,1,6,11            | 6   | 3,2,15                 | 4   | 3,1,4,13             | 4   |
| M44    | 12,10,4,2           | 9   | 17,15,13,6             | 7   | 17,13,6,1            | 9   |
| M45    | 1,4,6,11            | 10  | 8,10,13,15             | 7   | 2,6,15               | 8   |
| M46    | 15,10,5,4           | 6   | 16,13,6                | 3   | 16,13,6              | 4   |
| M47    | 3,4,8,15            | 4   | 2,5,10,15              | 6   | 2,5,10,15            | 6   |
| M48    | 15,10,5,2           | 3   | 16,13,6,2              | 3   | 16,15,6,4            | 3   |
| M49    | 5,6                 | 3   | 5,6                    | 3   | 5,6                  | 3   |
| M50    | 6,5                 | 3   | 6,5                    | 3   | なし                   | 0   |
| 計      |                     | 54  |                        | 44  |                      | 46  |

決定されているため、前期末の配送計画の実施により、優先度の変更をする必要がある。ローリング方式を採用することにより、拠点間の配送の優先度の変更に対応した多期間配送計画を立案することができる。

以上のことから、本研究で提案した多期間配送計画の立案方法を利用することで、輸送業者から見れば、輸送機器の空きスペースを有効に利用し、適切な配送待ち梱包材の割り当てを受けることが可能になる。また、輸送用梱包材リユースシステムでは、直接配送することが困難な拠点間の配送待ち梱包材を考慮した配送を輸送機器の空きスペースを有効に利用して低コストで実現することが可能になる。

#### 4. ま と め

本研究では、輸送用梱包材リユースシステムを対象とした多期間配送計画の立案に関して以下のことを明らかにした。

- (1) 輸送用梱包材リユースシステムを対象とした多期間配送計画モデルを混合整数計画問題に定式化した。
- (2) 多期間配送計画においてローリング方式を採用する際の拠点間の配送の優先度の設定方法について提案した。
- (3) ローリング方式を採用することにより、輸送機器を有効に利用し、適切な配送を実現

することが可能になることを示した。

今後の課題としては、輸送用梱包材リユースシステムの回収拠点における使用済み梱包材の回収計画の立案等が挙げられる。

## 参 考 文 献

- 1) 環境省総合環境政策局環境計画課, 「循環型社会白書 (平成17年版)」 (2005)
- 2) 財団法人中国産業活性化センター, 「循環型社会の構築を目的とした自動車静脈系システム調査報告書」 (1999)
- 3) トヨタ自動車: 「環境報告書 (2003年度版)」 (2003)
- 4) 新田茂雄: 「図解リサイクル・省資源包装」, 日刊工業新聞社 (2001)
- 5) オリオンテック株式会社ホームページ, <http://www.oriontec.jp/>
- 6) 石原良晃, 平木秀作: “輸送用梱包材のリユースシステムにおける配送計画の立案”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 56, No. 1, pp. 54–63 (2005).
- 7) 石原良晃, 平木秀作: “輸送用梱包材リユースシステムにおける配送計画への列生成法の適用”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 57, No. 1, pp. 59–67 (2006).
- 8) 石原良晃, 平木秀作, 坂口通則: “輸送用梱包材のリユースシステムにおける多期間配送計画の立案”, 日本生産管理学会論文誌, Vol. 12, No. 2, pp. 43–52 (2006).
- 9) 日本経営工学会編: 「経営工学便覧」, pp. 109–112, 丸善 (1994)
- 10) Dash Optimization Ltd.: Application of Optimization with Xpress-MP (2000)