

# 使用済み梱包材の回収計画の立案への ACO の適用

胡 拓弥\*, 石原 良晃\*\*, 新谷 浩一\*\*\*

## Designing a vehicle routing problem for collection of reusable packages by an ant colony optimization

Takuya EBISU\*, Yoshiaki ISHIHARA\*\*, Koichi SHINTANI\*\*\*

### Abstract

This paper aims to design a vehicle routing problem for collection of reusable packages. With the operations of reuse and/or recycling systems, effective systems for reverse logistics which disposed products are collected from customers are needed. In this paper, a vehicle routing problem is simultaneously considered for pickup and delivery goods with time windows and for collection of reusable package without time windows. In this paper, we formulate a vehicle routing problem with time windows, propose the heuristics using ACO, and clarify the effectiveness of our proposed method from some numerical examples.

Keyword: Vehicle Routing Problem, Reuse System, Transport Package, Ant Colony Optimization

### 1 まえがき

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、法的にも強化され、「循環型社会形成推進基本法」(平成 20 年 3 月改正)、「廃棄物処理法」(平成 22 年 5 月改正)、「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)、「家電リサイクル法」(平成 21 年 4 月改正)、「建設リサイクル法」(平成 14 年 5 月施行)、「食品リサイクル法」(平成 19 年 6 月改正)、「自動車リサイクル法」(平成 17 年 1 月施行)、「容器包装リサイクル法」(平成 18 年 6 月改正施行)などが施行および改正・制定された。それらに対応して、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[1]。

輸送用梱包材においては、ダンボールによる包装の省資源化、ダンボール等の一部紙製品の古紙リサイクルが行われている。また、金属製・プラスチック製コンテナが繰り返し利用される通い箱化が顕著化している[2]。それらを除くと一度利用された後、かなりの部分が廃棄さ

れていた。そのような輸送用梱包材を回収し再生処理後、使用メーカーに再度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[3]。

輸送用梱包材リユースシステムでは、使用済み梱包材を回収拠点で回収・分別し、再生品を使用するメーカーに配送する。各回収・再生拠点では、担当する地域で発生する使用済みの梱包材を回収し、納入先を担当する拠点ごとに分類する。分類された梱包材は、輸送費用を削減するため、輸送機器の帰り便などの空きスペースを使用し、納入先を担当する回収・再生拠点に配送する。各再生拠点は再生された梱包材を使用メーカーに納入する。回収・再生拠点は通常、輸送事業者であり、各回収拠点における使用済み梱包材の回収は回収拠点に所属する輸送機器の空きスペースを用いて行われる。しかし、使用済み梱包材の回収は効率的に行われていない。

そこで、本研究では、輸送用梱包材リユースシステムを対象として、回収拠点における使用済み梱包材を回収するための回収計画を立案するために、メタヒューリスティック解法の一つである Ant Colony Optimization (ACO) を使った手法を提案する。

## 2 輸送用梱包材リユースシステムの概要

### 2.1 輸送用梱包材リユースシステム

輸送用梱包材リユースシステムとは、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・分別し、再生品を使用するメーカーに納入するシステムである。T社では、ZE（Zero Emission）ソリューションシステムと呼ばれる輸送用梱包材を回収し、再生処理を施しリユースするシステムを構築している。各回収・再生拠点では、担当する地域で発生する使用済み梱包材の回収及び、使用メーカーごとに梱包材の分類を行う。分類された梱包材は、輸送費用を削減するため、輸送機器の帰り便等の空きスペースを利用し、納入先を担当とする回収・再生拠点に配送される。各再生拠点は再生された梱包材を使用メーカーに納入する。各回収拠点における使用済み梱包材の回収は、回収拠点に所属する輸送機器の空きスペースを用いて行われる。

### 2.2 使用済み梱包材の回収

回収拠点での使用済み梱包材の回収は輸送機器の空きスペースを使用し、輸送業者の通常業務（顧客への荷物の配送、顧客からの荷物の収集）と同時に実施される。

図1に輸送用梱包材リユースシステムにおける回収拠点の回収計画モデルの概念図を示す。輸送機器は、通常業務に加えて、使用済み梱包材の回収を行う。ただし、使用済み梱包材の回収は、輸送機器の空きスペースを用いて実施するため、効率的な回収ができない場合には次期の計画に持ち越すことが可能である。本研究で対象とする回収計画モデルでは必ず訪問すべき拠点とそうでない拠点が存在し、通常業務で訪問する拠点には時間枠が存在するものとする[4]。

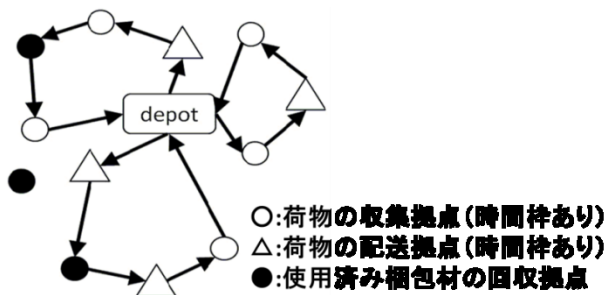


図1 使用済み梱包材の回収計画モデルの概念図

## 3 運搬経路問題

運搬経路問題(Vehicle Routing Problem, VRP)は基本的に以下のような仮定を持つ。

- (1) デポと呼ばれる特定の地点を出発した運搬車が顧客を経由し、再びデポに戻る。
- (2) デポに待機している運搬車の台数、最大稼働時間、最大積載量は既知である。
- (3) 各顧客の位置は既知であり、各顧客の需要も事前に与えられている。
- (4) 各顧客の需要は、1台の運搬車によって処理される。
- (5) 地点間の移動時間、移動距離、移動費用は既知である。
- (6) 1つのルートに含まれる顧客の需要量の合計は、運搬車の最大積載量を超えない。
- (7) 運搬車の台数、各運搬車の稼働時間は、それぞれの上限を超えない。

これら仮定の下で、移動費用、移動時間、運搬車の台数などを最小にする運搬車のルートを決める問題である。運搬経路問題の解法としては、分枝限定法、Lagrange緩和法、動的計画法などの厳密解法と、大規模問題を解くための構築法、ルート先クラスター後法、クラスター先ルート後法、改善法、メタヒューリスティック解法（遺伝アルゴリズム（GA）、シミュレーティッド・アニーリング法（SA）、タブーサーチ、Ant Colony Optimizationなど）を用いた近似解法が数多く提案されている。

本研究で対象とする回収計画問題は、運搬経路問題の一種であり、各拠点における荷物の収集と配送を同時に考慮し、なおかつ時間枠のある運搬経路問題である。そのため、本研究では、回収計画問題に今回はACOを適用することを考える。

## 4 使用済み梱包材の回収計画モデルの構築

### 4.1 回収計画モデルの前提条件

輸送用梱包材リユースシステムを対象とした回収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) 輸送機器は、顧客への荷物の配送、顧客からの荷物の収集、および、使用済み梱包材の回収を同時に行う。
- (2) 輸送機器は、デポで顧客への荷物を積載して出発し、顧客から収集した荷物と使用済み梱包材を積載してデポへ帰る。
- (3) 顧客への荷物の配送と、顧客からの荷物の収集は、すべて行う必要がある。
- (4) 顧客への荷物の配送量、顧客からの荷物の収集量及び、梱包材の回収待ち量は所与とする。

- (5) 顧客への荷物の配送、顧客からの荷物の収集、および、回収待ち梱包材の回収は、1台の輸送機器により行われる。
- (6) 回収待ち梱包材を回収することによる利益は所与とする。
- (7) 回収待ち梱包材の回収残を認める。

## 4.2 記号の説明

輸送用梱包材リユースシステムにおける回収計画モデルを構築するにあたり、以下の記号を設定する。

$n_1$ : 荷物を収集する拠点

$N_1$ : 荷物を収集する拠点の集合で以下のように定義する。

$$N_1 = \{1, 2, \dots, n_1\}$$

$n_2$ : 荷物を配送する拠点

$N_2$ : 荷物を配送する拠点の集合で以下のように定義する。

$$N_2 = \{n_1 + 1, n_1 + 2, \dots, n_1 + n_2\}$$

$n_3$ : 使用済み梱包材の回収点の数

$N_3$ : 使用済み梱包材の回収点の集合で以下のように定義する。

$$N_3 = \{n_1 + n_2 + 1, n_1 + n_2 + 2, \dots, n_1 + n_2 + n_3\}$$

$n$ : 収集、配送、および使用済み梱包材の回収を行うすべての拠点数

$N$ : すべての配送・収集拠点の集合を以下に定義する。

$N = N_1 \cup N_2 \cup N_3$  また、 $\{0\}, \{n+1\}$ は、ともにデブを表す。

$E_i$ : 拠点*i*の最早作業開始時刻

$L_i$ : 拠点*i*の最遅作業開始時刻

$D_j^1$ : 回収拠点*j*における荷物の量

$D_j^2$ : 配送拠点*j*への荷物の量

$R_j$ : 回収点*j*における使用済み梱包材の回収待ち量

$C_{ij}$ : 拠点*i*から拠点*j*へ移動するためのコスト

$P_j$ : 使用済み梱包材の回収点*j*で使用済み梱包材を回収したことにより得られる利益

$t_{ij}$ : 拠点*i*から拠点*j*への移動に必要な時間

$d_j$ : 拠点*j*における作業時間

$T_j$ : 輸送機器が拠点*j*へ到着した時間

$TK$ : 輸送機器の台数

$K$ : 輸送機器の集合で以下のように定義する。

$$K = \{1, 2, \dots, TK\}$$

$S^k$ : 輸送機器*k*の積載可能量

$Y_j^{k(1)}$ : 輸送機器*k*が拠点*j*までに収集する荷物の量

$Y_j^{k(2)}$ : 輸送機器*k*が拠点*j*以降に配送する荷物の量

$Y_j^{k(3)}$ : 輸送機器*k*が回収点*j*までに回収する使用済み梱包材の量

$X_{ij}^k$ : 輸送機器*k*が拠点*i*から拠点*j*へ移動するかを示す

0-1 変数。

以上の記号を用いて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モデルを構築する。

## 4.3 回収計画モデルの定式化

輸送機器の移動距離を最小にし、かつ、回収待ち梱包材の効率的な回収を行うために以下のように定式化する[4][5]。

### (1) 目的関数

すべての輸送機器が拠点間を移動するための移動コストから使用済み梱包材を回収することによって得られる利益を差引きその値を最小にすることを考える。

$$W = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in NU\{0\} \times NU\{n+1\}} C_{ij}^k \cdot X_{ij}^k - \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in N_1 \times NU\{n+1\}} P_i \cdot X_{ij}^k \quad (1)$$

→ Min

### (2) 荷物の収集拠点及び配送拠点に関する制約

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in NU\{0\}} X_{ij}^k = 1 \quad (j \in N_1 \cup N_2) \quad (2)$$

荷物の収集または配送する拠点に必ず訪問することを示す。

### (3) 使用済み梱包材の回収点に関する制約

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in NU\{0\}} X_{ij}^k \leq 1 \quad (j \in N_3) \quad (3)$$

使用済み梱包材の回収点には必ずしも輸送機器が訪問しなくてもよいことを示す。

### (4) 輸送機器の移動に関する制約

$$\sum_{j \in NU\{n+1\}} X_{ij}^k - \sum_{j \in NU\{0\}} X_{ji}^k = 0 \quad (i \in N, k \in K) \quad (4)$$

$$\sum_{j \in NU\{n+1\}} X_{0j}^k = 1 \quad (k \in K) \quad (5)$$

$$\sum_{i \in NU\{0\}} X_{i,n+1}^k = 1 \quad (k \in K) \quad (6)$$

輸送機器がある拠点に訪問したら、その輸送機器がまた必ずどこかの拠点に出発しなければならないことを示す。

(5) 輸送機器の積載可能量に関する制約

$$X_{ij}^k = 1 \Rightarrow \begin{cases} Y_i^{k(1)} + D_j^1 = Y_j^{k(1)} \\ Y_i^{k(2)} = Y_j^{k(2)} \\ Y_i^{k(3)} = Y_j^{k(3)} \end{cases} \quad (7)$$

$$(i \in N \cup \{0\}, j \in N_1, k \in K)$$

拠点*i*から拠点*j*まで輸送機器*k*が移動した場合、拠点*j*が荷物を収集する拠点であれば収集量だけ積載量が増えることを示す。

$$X_{ij}^k = 1 \Rightarrow \begin{cases} Y_i^{k(1)} = Y_j^{k(1)} \\ Y_i^{k(2)} - D_j^2 = Y_j^{k(2)} \\ Y_i^{k(3)} = Y_j^{k(3)} \end{cases} \quad (8)$$

$$(i \in N \cup \{0\}, j \in N_2, k \in K)$$

拠点*i*から拠点*j*まで輸送機器*k*が移動した場合、拠点*j*が荷物を配送する拠点であれば配送量だけ積載量が減少することを示す。

$$X_{ij}^k = 1 \Rightarrow \begin{cases} Y_i^{k(1)} = Y_j^{k(1)} \\ Y_i^{k(2)} = Y_j^{k(2)} \\ Y_i^{k(3)} + R_j = Y_j^{k(3)} \end{cases} \quad (9)$$

$$(i \in N \cup \{0\}, j \in N_3, k \in K)$$

拠点*i*から拠点*j*まで輸送機器*k*が移動した場合、拠点*j*が使用済み梱包材の回収点であれば回収量だけ積載量が増えることを示す。

$$Y_j^{k(1)} + Y_j^{k(2)} + Y_j^{k(3)} \leq S^k \quad (j \in N_0, k \in K) \quad (10)$$

輸送機器が収集した荷物、配送する荷物および、回収する梱包材の量は、経路する各拠点において輸送機器の積載可能量以下にならねばならない。

(6) 輸送機器の拠点への訪問時間に関する制約

$$X_{ij}^k = 1 \Rightarrow T_i + t_{ij} + d_i \leq T_j \quad (11)$$

$$(i \in N \cup \{0\}, j \in N \cup \{n+1\}, k \in K)$$

各輸送機器は拠点*i*から拠点*j*へ移動する時、拠点*j*の到着時間が拠点*i*への到着時間に拠点*i*での作業時間と移動時間を加えたものより大きいことを示す。

$$E_i \leq T_i \leq L_i \quad (i \in N_1 \cup N_2) \quad (12)$$

各輸送機器は最早作業開始時刻と最遅作業開始時刻の間に到着しなければならない。

(7) 0-1 変数

$$X_{ij}^k \in \{0,1\} \quad (13)$$

$$(k \in K, i \in N \cup \{0\}, j \in N \cup \{n+1\})$$

輸送機器が拠点*i*と拠点*j*の間を移動するかどうかを示す。1であれば拠点*i*と拠点*j*の間を移動する。

0であれば移動しないことを示す。

(8) 非負条件

$$Y_j^{k(1)} \geq 0 \quad (k \in K, j \in N \cup \{0\}) \quad (14)$$

$$Y_j^{k(2)} \geq 0 \quad (k \in K, j \in N \cup \{0\}) \quad (15)$$

$$Y_j^{k(3)} \geq 0 \quad (k \in K, j \in N \cup \{0\}) \quad (16)$$

$$T_j \geq 0$$

$$(k \in K, j \in N \cup \{0\} \cup \{n+1\}) \quad (17)$$

上記の式(2)-(17)を制約条件とし、式(1)を最小にする混合0-1計画問題を使用済み梱包材の回収計画モデルと呼ぶ。

## 5 回収計画モデルへのACOの適用

### 5.1 Ant Colony Optimization

Ant Colony Optimization (ACO)とは、Dorigoらによって提案された最適化法である[6],[7]。その特徴は、“フェロモン”と呼ばれる探索領域の評価値を用いた過去の探索情報の蓄積と利用にあり、他のメタヒューリスティックと比較して、より大域的な探索情報を保持・利用できる、制約条件を満たさないような解候補を作りにくい、といった利点を持つ。ACOはこれまで、TSP(巡回セールスマン問題)を始めとした様々な問題に適用され、その有効性が確認されている。ACOはアリの餌を探す行動のメカニズムに基づいている。以下にACOの基本となるAS(Ant System)のアルゴリズムを示す。

- |      |                        |
|------|------------------------|
| I.   | 初期化                    |
| II.  | 終了条件(ループ回数)を満たすまでループ   |
|      | [i]. 全てのエージェントについて     |
|      | 解(経路)を取得するまで           |
|      | A) 確率的な枝の選択            |
|      | B) 過去の行動の記憶を更新         |
|      | [ii]. 解を評価しフェロモンの情報を更新 |
| III. | 最良解を出力して終了             |

しかし、ACOは一度局所解に収束してしまうと、そこから脱出することができなくなってしまう。GAは突然変

異による染色体操作を行い、SA では温度パラメータの調節で局所解から脱出できる。ACO は局所解へ収束するのは探索を繰り返すうちに与えられるフェロモン量が一定の値に収束してしまうためである。

本研究では、局所解からの脱出方法を加えた改良型ACO を提案する。

### 5.2 回収計画モデルへの ACO の適用

回収計画モデルへの ACO を適用する際の手順を示す。図 2 は回収計画システム全体の流れ図である。①初期設定、②回収計画の立案、③回収計画の評価という手順に大きく分けられる。また、本研究では③回収計画の評価の中に、④局所探索、⑤フェロモンの上塗り組み込まれている。それぞれの手順を示したものが図 4～図 7 である。

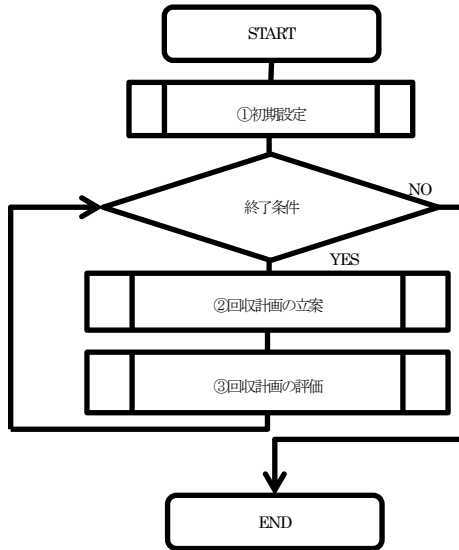


図 2 回収計画システム

図 3 に初期設定の手順を示す。初期設定では、まず、輸送機器の情報入力（台数・積載可能量）を入力する。次に各拠点情報（拠点位置・拠点間距離・時間枠・収集量・配送量・梱包材回収量）を入力する。拠点間距離は拠点間のユークリッド距離に従う。最後にフェロモン量の初期値設定とヒューリスティック値の設定を行う。本研究では、ヒューリスティック値として拠点間移動コストの逆数を用いる。

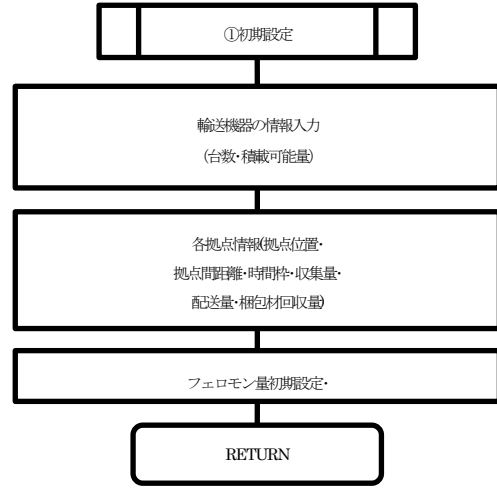


図 3 初期設定

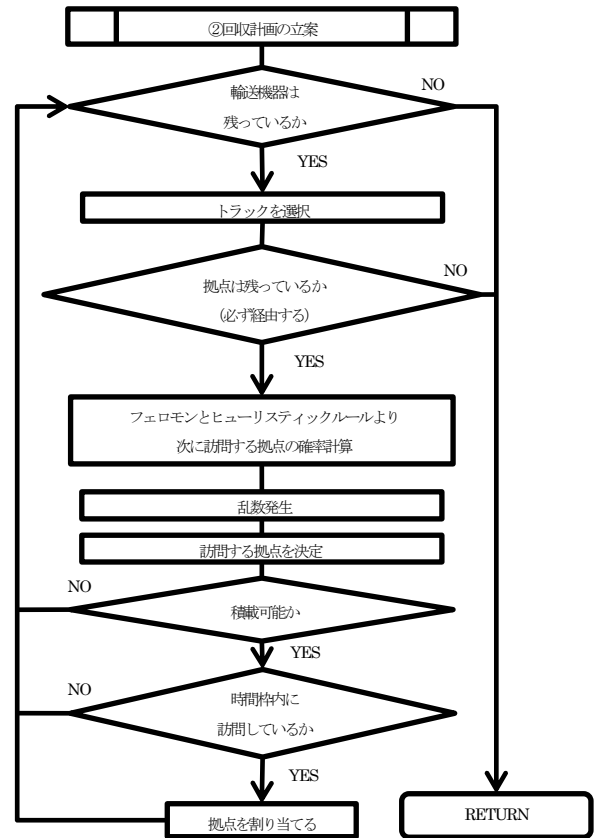


図 4 回収計画の立案

図 4 に回収計画の立案の手順を示す。回収計画の立案では、輸送機器に順次拠点を割り当てる。残っている輸送機器を乱数で決定する。次に、フェロモン表とヒューリスティック値より次に訪問することが可能な拠点に対して確率を求める。確率は式(18)を使って求める。

$$P_{ij}^k = \frac{[PH_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{h \in J_i^k} [PH_{ih}]^\alpha [\eta_{ih}]^\beta} \quad (18)$$

ここで、

$P_{ij}^k$  : 輸送機器  $k$  が顧客  $i$  から顧客  $j$  へ移動する確率  
 $PH_{ij}$  : 顧客  $i, j$  間のフェロモン量  
 $\alpha, \beta$  : 制御パラメータ  
 $\eta_{ij}$  :  $1/C_{ij}$  (ヒューリスティック値)  
 $PH_{ih}$  : 顧客  $i$  から移動可能な拠点間のフェロモン量  
 $\eta_{ih}$  : 顧客  $i$  から移動可能な拠点間のヒューリスティック値  
 $\sum_{h \in J_i^k} [PH_{ih}]^\alpha [\eta_{ih}]^\beta$  : 顧客  $i$  から移動可能な拠点へのフェロモン量とヒューリスティック値をかけた数値の総和

次に、その確率に従って次に訪問する拠点を決定する。その後、積載可能であり、かつ時間枠内に訪問できるかを判断する。条件を満たしていれば、その輸送機器に拠点を割り当てる。条件を満たしていなければ、再び輸送機器の選択に戻る。これを繰り返し、すべての通常荷物（荷物の収集・配送）の割り当てが完了した時点で回収計画を立案したとする。

図5に回収計画の評価の手順を示す。回収計画の評価では、まず、目的関数値をこれまで求めた最良解と比較し、小さければ最良解として更新する。

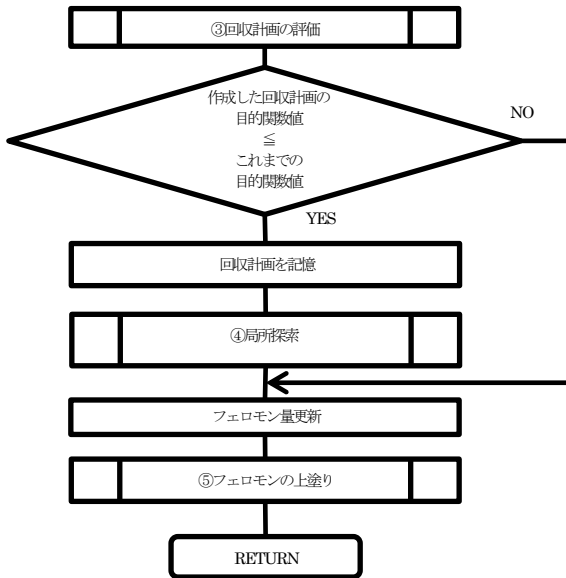


図5 回収計画の評価

図6の局所探索では、回収計画で通った経路の局所探索を行う。局所探索は、最良解が更新されない場合の経路でも行う。その後式(19)を使ってフェロモン表を更新する。

$$Ph_{ij}^k \leftarrow (1 - \gamma) \cdot Ph_{ij}^k + \frac{1}{W} \quad (19)$$

$\gamma$  : 蒸発係数  
 $W$  : 目的関数

なお、フェロモンは回収計画で使用された経路のみで増加し、その量は、回収計画の目的関数の逆数とする。

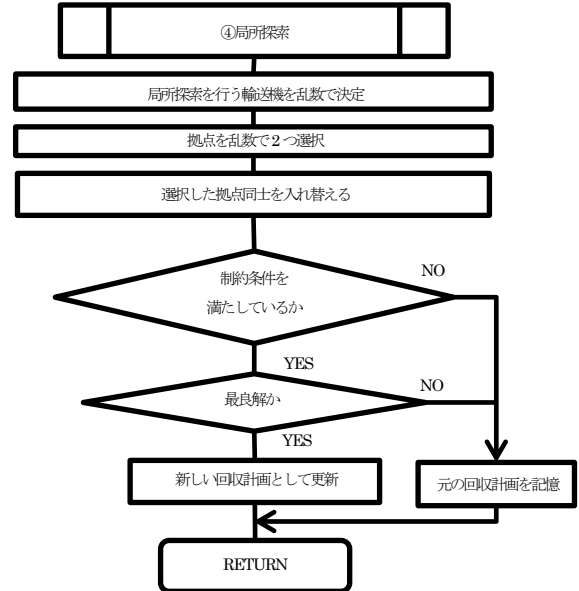


図6 局所探索

またACOは探索を繰り返すと、回収計画で使用された経路のみフェロモンが増加していき、それ以外のフェロモン量が減少してしまうため、最終的にフェロモン量が非常に薄くなってしまいます。したがって、他の拠点を選択しなくなり局所解に陥ってしまう。そこで、局所解から脱出するために、フェロモンの上塗りを行う。図7にフェロモンの上塗りの手順を表1にその具体例を示す。

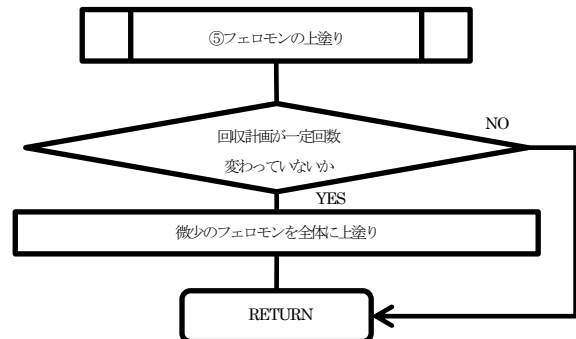


図7 フェロモンの上塗り

表1 フェロモンの上塗り具体例

a)フェロモン上塗り前											b)フェロモン上塗り後												
拠点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	拠点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	4.1	0
1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
2	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	2	0.1	0	0.1	0.1	0.1	3.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3.1	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	4	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	5.1
5	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	5	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0.1	2.1	0.1	0.1	0.1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
7	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0.1	0.1	4.1	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0.1
8	0	0	0	2	0	0	0	0	3	0	0	8	0.1	0.1	0.1	2.1	0.1	0.1	0.1	0	3.1	0.1	0.1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0.1
10	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	4.1	0.1	0.1	0	0.1



6 性能評価

6.1 数値条件

ACO を用いた回収計画の有効性を明らかにするために、数値例を示す。

- (1) 拠点数 10、輸送機器 2 台とする。
- (2) 各拠点の位置は、平面上に一樣乱数を発生させ、各拠点間の距離はユークリッド距離によって求める。表 2 に拠点間距離の一例を示す。
- (3) 移動コストには移動距離を用いる。

- (4) 各拠点の荷物量は表 3 に示す。
- (5) 時間枠は既知とする。
- (6) 輸送機器の積載可能量は表 4 に示す。
- (7) 作業時間は 5.0 とする。
- (8) 蒸発係数は 0.00001 とする。
- (9) 繰り返し回数は 0.1 万回、1 万回、10 万回、100 万回とする。

表 2 拠点間距離の一例（拠点数 10）

拠点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	1005.1	869.75	174.64	845.63	811.83	968.45	421.86	1046.2	860.77	971.21	0
1	0	622.54	1178.9	963.38	1682.3	683.97	1421.5	1252.8	436.81	846.93	1005.1
2	622.54	0	1022.1	358.99	1264.1	106.98	1190.5	1602.3	911.13	1288.3	869.75
3	1178.9	1022.1	0	954.21	713.94	1116.7	259.79	1086.6	1013.7	1077	174.64
4	963.38	358.99	954.21	0	989.92	359.69	1049.8	1763.5	1181.6	1514.4	845.63
5	1682.3	1264.1	713.94	989.92	0	1315.2	517.04	1793.3	1649.6	1780.6	811.83
6	683.97	106.98	1116.7	359.69	1315.2	0	1274.9	1706.8	1001.9	1386.1	968.45
7	1421.5	1190.5	259.79	1049.8	517.04	1274.9	0	1286.5	1273.4	1323.2	421.86
8	1252.8	1602.3	1086.6	1763.5	1793.3	1706.8	1286.5	0	818.06	434.94	1046.2
9	436.81	911.13	1013.7	1181.6	1649.6	1001.9	1273.4	818.06	0	412.5	860.77
10	846.93	1288.3	1077	1514.4	1780.6	1386.1	1323.2	434.94	412.5	0	971.21

表 3 各拠点の荷物量

拠点 No	回収量	拠点 No	回収量	拠点 No	回収量	梱包材回収量
1	50	5	50	9	60	
2	70	6	50	10	60	
3	40	7	70			
4	60	8	80			

表 4 輸送機器の積載可能量

輸送機器	積載可能量
1	200
2	250

6.2 数値実験の結果

まず、ACO 及び改良型 ACO で得られた結果と数値計画ソフトウェア Xpress で得られた結果と計算時間について考察する[8]。ACO の結果は、処理を 10 回繰り返し、目的関数および計算時間の平均を求める。数値計画ソフトウェア Xpress の実行結果を表 5 に示す。表 5 より、目的関数値は 6987.95、計算時間は 0.6 秒だった。次に、

ACO 及び各改良型 ACO の目的関数値、目的関数値と Xpress (最適解) との誤差率(%), 計算時間の各平均及び、最良解を表 6 に示す。各改良型 ACO は、繰り返し回数が 10 万回を超えると、最適解に近い目的関数値を得ることができている。また、繰り返し回数が 10 万回を超えると ACO+フェロモンの上塗りを行う手法と ACO+局所探索+フェロモンの上塗りを行う手法の誤差率が 3%以

内になり、毎回安定した最良解が得られていることがわかる。そして、ACOでも最良解として Xpress と同じ結果を得ることができている。次に、効率的な回収が行われているか考察する。各輸送機器の動きを表 7 に示す。表 7 より各輸送機器は、通常業務（荷物の配送・荷物の収集）を行いながら輸送機器の空きスペースを使用して使用済み梱包材を回収していることがわかる。また、使用済み梱包材の回収を行う拠点位置が遠く、回収しても利益にならない回収拠点には訪問せず、使用済み梱包材を回収していないことがわかる。今回の実験では、未回収拠点番号 10 がそれにあたる。しかし、ACO+局所探索を行う手法は、目的関数の誤差率が他の改良型 ACO の手法に比べて悪かった。原因としては、この問題が荷物の積み下ろしを同時に考慮しかつ、時間枠を考慮した運搬経路問題であるため、局所探索を行っても実行可能解を上手く求めることができず局所解から上手く脱出することができなかつたと考えられる。

そこで、時間枠の制約条件を外して ACO と ACO+局所探索を行う手法を比較する。数理計画ソフトウェア

Xpress の結果を表 8 に示す。目的関数値は 5846.60、計算時間は、8.70 秒だった。次に、ACO と ACO+局所探索の目的関数値、目的関数値と Xpress（最適解）との誤差率、計算時間の各平均及び、最良解を表 9 に示す。ACO は最適解と同じ答えを得ることができなかつたが、ACO+局所探索を行う手法は最適解と同じ答えを得ることができた。また、ACO よりも ACO+局所探索を行う手法の方が誤差率も低く毎回安定して最良解を得られていることがわかる。

本研究で定式化した回収計画モデルは、拠点数の増加に伴い、Xpress で最適解を求めることができない。そこで、毎回安定した最良解を得ることができるとした ACO+局所探索+フェロモンの上塗りの手法で、さらに大規模な問題による計算を行った結果を表 10 に示す。実行時間は 169.82 秒、目的関数は 12836.0 となった。このように、大規模な問題でもこの手法なら解を得ることができる。そのため、この手法を用いることで、実用的な回収計画を立案することができると考えられる。

表 5 Xpress の結果(実行時間[s])

	輸送機器	移動経路	目的関数	実行時間
最適解	1 2	[0]->[3]->[7]->[5]->[11] [0]->[8]->[9]->[6]->[2]->[1]->[4]->[11]	6987.95	0.6

表 6 数値計算結果(誤差率[%],実行時間[s])

	ACO			ACO+ フェロモンの上塗り			ACO+ 局所探索			ACO+局所探索+ フェロモンの上塗り		
	目的関数	誤差率	実行時間	目的関数	誤差率	実行時間	目的関数	誤差率	実行時間	目的関数	誤差率	実行時間
0.1 万回												
最良解	7718.69	10.46	0.02	7207.71	3.14	0.02	8336.17	19.29	0.02	7727.19	10.58	0.02
平均	8420.40	20.50	0.02	8616.47	23.30	0.02	8851.36	26.67	0.02	8567.37	22.60	0.02
1 万回												
最良解	7831.22	12.07	0.06	7274.57	4.10	0.06	6989.03	0.02	0.06	7054.81	0.96	0.06
平均	8766.38	25.45	0.06	7836.42	12.14	0.06	7930.22	13.48	0.06	8002.83	14.52	0.06
10 万回												
最良解	7207.71	3.14	0.42	6987.95	0.00	0.38	6987.95	0.00	0.45	6987.95	0.00	0.37
平均	8188.16	17.18	0.42	7144.02	2.23	0.38	7662.75	9.66	0.45	7083.08	1.36	0.39
100 万回												
最良解	7207.71	3.14	4.45	6987.95	0.00	3.80	7207.71	3.14	4.84	6987.95	0.00	3.73
平均	8425.56	20.57	4.71	7028.62	0.58	3.67	7809.79	11.76	4.72	7050.15	0.89	3.75

## 7 まとめ

本研究では、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を対象として以下のことを明らかにした。

- (1) 時間枠を考慮した輸送用梱包材リユースシステムの回収計画モデルを定式化した。
- (2) フェロモンの上塗りをすることで従来の ACO よりも良い結果が得られた。

- (3) 時間枠がない場合、局所探索を組み込んだ ACO の有効性を示した。

今後の課題として、相対誤差をより低くするため、今回提案した局所探索を行う手法を改良することなどが挙げられる。



参考文献

- [1] 環境省総合環境政策局環境系計画課：「環境白書/循環型社会白書/生物多様性白書(平成 23 年度)」(2011)
- [2] 新田茂夫：「図解リサイクル・省資源包装」, 日刊工業新聞社 (2001)
- [3] オリオンテック株式会社のホームページ,  
<http://www.orion-tec.co.jp/>
- [4] 石原良晃,平木秀作,徐祝洪,宿元明：「輸送用梱包材リユースシステムにおける使用済み梱包材の回収計画立案への Ant Colony Optimization の適用」,日本ロジスティクスシステム学会第 14 回全国大会予稿集, pp33-36 (2011)
- [5] 田中美緒,石原良晃,“ACO を用いた使用済み梱包材の回収計画の立案”, 大島商船高等専門学校紀要, 第 40 号, pp59-66 (2007)
- [6] 川上浩司：「進化技術ハンドブック」,近代科学社 (2010)
- [7] Marco Dorigo, Thomas Stützle : Ant Colony Optimization, The MIT Press (2003)
- [8] Dash Optimization Ltd : Xpress Getting Started (2003)

表 7 各輸送機器の動き

No. 1	0	3	7	5			
最早		43	33	143			
最遅		63	53	163			
到着時刻		43	51.25	143			
収集		40	40	40			
配送	120	120	50	0			
回収		0	0	0			
積載	120	160	90	40			
No. 2	0	8	9	6	2	1	4
最早		13	なし	43	63	133	153
最遅		33	なし	63	83	153	173
到着時刻		13.08	23.3	43	63	133	153
収集		0	0	0	70	120	180
配送	130	50	50	0	0	0	0
回収		0	60	60	60	60	60
積載	130	50	110	60	130	180	240
未回収拠点				10			

収集拠点
配送拠点
梱包材回収拠点

表 8 Xpress の結果（時間枠なし）

	輸送機器	移動経路	目的関数	実行時間
最適解	1 2	[0]->[3]->[7]->[5]->[11] [0]->[8]->[10]->[9]->[1]->[2]->[6]->[4]->[11]	5848.60	8.7

表 9 数値計算結果（時間枠なし）（単位：誤差率[%],実行時間[s]）

	ACO			ACO+局所探索		
	目的関数	計算時間	誤差率	目的関数	計算時間	誤差率
500 万回						
最良解	5999.23	6.55	2.58	5848.60	8.97	0.00
平均	6359.28	6.45	8.73	6084.79	8.99	4.04

表 10 数値実験結果（収集拠点数：7,配送拠点数：7,使用済み梱包材回収拠点：6）

	輸送機器	移動経路	目的関数	実行時間
最良解	1 2 3 4	[0]->[14]->[21] [0]->[12]->[10]->[17]->[8]->[20]->[15]->[4]->[21] [0]->[3]->[7]->[11]->[19]->[5]->[21] [0]->[1]->[13]->[6]->[2]->[16]->[9]->[18]->[21]	12836.0	169.82

