

ACO を用いた使用済み梱包材の回収計画の立案

田中 美緒*, 石原 良晃**

A Heuristics on a Vehicle Routing Problem for Collection of Reusable Packages by Ant Colony Optimization

Mio TANAKA* and Yoshiaki ISHIHARA**

Abstract

This paper aims to propose a heuristics on a vehicle routing problem for collection of reusable packages by ant colony optimization (ACO). With the operations of reuse and/or recycling systems, effective systems for reverse logistics are needed. Disposed transport packages are collected from customers by filling empty capacities of many vehicles which fulfill normal delivery and collection. This paper clarifies the effectiveness of our proposed heuristics form some numerical examples.

Key words: Reuse system, Transport package, Vehicle routing problem, ACO.

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 15 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・施行された。それらに対応して、各製造業は、リユースシステムおよびリサイクルシステムを構築し始めている。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],[2]。

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、金属製およびプラスチック製の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 [3]。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 [4]。

輸送用梱包材リユースシステムでは、使用済みの梱包材を回収拠点で回収・分別し、再生品を使用する納入先を担当する拠点に配送する。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毎に分類する。分類された梱包材は、輸送費用を削減するため、輸送機器の帰り便等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。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(回収拠点は、通常輸送業者が兼ねている)が、使用済み梱包材の回収が効率的に出来ていない。

そこで、本研究では、輸送用梱包材の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数理計画モデルに定式化した上で、メタヒューリスティクス解法の一つであるACO(Ant Colony Optimization)を適用する方法を提案し、数値例により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

包装材については、「容器包装リサイクル法」により、空き瓶、空き缶、ペットボトル等の分別排出、分別回収が進められている。しかし、各種ダンボール、フレキシブルコンテナ等の輸送用梱包材については、廃棄物ではなく再利用可能な資源と位置づけられ、容器包装リサイクル法の対象から外されている。輸送用梱包材については、省資源化、リサイクルが一般的に行われ、段ボールによる包装の省資源化、および段ボール等の古紙リサイクルが行われている。また、繰り返し利用される通い箱化が顕著化している。

本研究で対象とするシステムは、輸送用梱包材リユースシステムである。T社では、ZE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行いリユースするシステムを構築している[4]。対象とする輸送用梱包材リユースシステムは、全国に約50の回収・再生拠点を設置し、廃棄された梱包材を顧客から回収、再生し、各メーカーに納入している。輸送コストを削減するため、ZEマッチングシステムというトラックの空きスペースを利用するシステムを提案している。この方法は、従来の求車求荷システムとは輸送費に関する点で違いがあり、空きスペースを使用する際の費用は、距離、重量により決定される変動費の部分のみである。このシステムは、従来各メーカーが自社で使用していた通いかごのように自社の輸送ルートの帰り便で使用済み梱包材を回収するのではなく、数多くの輸送用梱包材用メー

カー、輸送業者が参加し運用されるオープンなシステムである。使用済み梱包材のメーカーへの再納入期間は、回収依頼後約1ヶ月を目処に実施されている。図1に輸送用梱包材リユースシステムの概念図を示す。本研究では市場で発生する使用済み梱包材を拠点で回収するための回収計画の立案を研究対象とする。

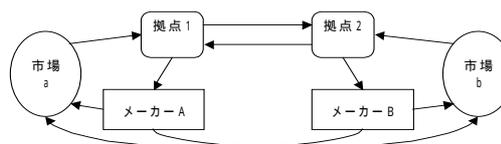


図1 梱包材のリユースシステムの概念図

3. 配送計画問題

配送計画立案に関する研究は、従来から盛んに行われており、主として、輸送機器の経由ルートを決めるための手法が数多く提案されている。配送計画は基本的に以下のような仮定の持つ[3]。

- (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。この基本形の配送計画問題に実際の問題を解くときに発生するさまざまな条件を付加した配送計画問題も数多く存在する。配送計画問題の解

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、シミュレーテッド・アニーリング法、タブーサーチ、ACO)などの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、各拠点における荷物の回収と配送を同時に考慮した配送計画問題であるため、回収計画問題にACOを適用する。

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) 対象とする計画期間は1期間とする。
- (2) 輸送機器は、顧客への荷物の配送、顧客からの荷物の収集及び、回収待ち梱包材の回収を同時に行う。
- (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費用、顧客からの荷物の収集費用及び、回収待ち梱包材の回収の輸送費用は、配送量と輸送距離によって決定される。
- (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

回収・再生拠点に関して以下のような記号を設定する。

- P_i : i 拠点における梱包材の回収に伴う利益
- R_i : i 拠点における梱包材の回収待ち量
- D_i^1 : i 拠点の顧客から収集する荷物の量
- D_i^2 : i 拠点の顧客へ配送する荷物の量

- N_1 : 荷物を収集する顧客の集合
- N_2 : 荷物を配送する顧客の集合
- N_3 : 梱包材の回収拠点の集合
- N : すべての顧客の集合 $N = N_1 \cup N_2 \cup N_3$
- N_0 : すべての拠点の集合 $N_0 = N \cup \{0\}$

ここで、 $\{0\}$ はデポ

C_{ij} : 拠点 i から j へ移動するためのコスト

K : 輸送機器の集合

S^k : 輸送機器 k の積載可能量

X_{ij}^k : 輸送機器 k が拠点 i から拠点 j へ移動するかどうかを示す0-1変数、($X_{ij}^k = 1$ のとき、輸送機器 k が拠点 i から拠点 j へ移動することを示す)

以上の記号を用いて、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

梱包材の回収は、通常の配達、収集の空時間、空スペースを利用して行われるため、通常の運搬経路に効率的に組み込まれる必要がある。つまり、梱包材の回収より利益が確保されるような運搬経路を作成しなければならない。そこで、本研究では、以下のような考えのもとで梱包材の回収を行うとする。

図2に梱包材の回収の概念図を示す。

図2で輸送機器は拠点1から拠点3に拠点2を経由し移動するとする。この時拠点1と拠点2は必ず回らなければならない拠点で移動コストが C_{13} と C_{32} だけかかる。また、拠点3は、可能であれば回る拠点で梱包材を回収し、利益を得る拠点である。拠点1から拠点2へ移動するための移動コスト C_{12} + C_{32} から拠点3へ回ることによる利益 P_3 を引いた値が負であれば輸送が行われる。

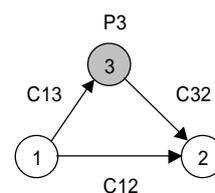


図2 梱包材の回収の概念図

輸送機器の移動距離を最小化にし、かつ、回収待ち梱包材の効率的な収集（利益を生み出す）をするため、以下のように定式化する。

(1) 目的関数

目的関数は、すべての輸送機器が拠点間を移動するための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引いてその値が最小とするものとするため、次のような式となる。

$$W = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in N_0 \times N_0} C_{ij} \cdot X_{ij}^k - \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in N_3 \times N_0} P_i \cdot X_{ij}^k \Rightarrow \text{最小化} \quad (1)$$

(2) 動脈物流の拠点に関する制約

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N_0} X_{ij}^k = 1 \quad (j \in N_1 \cup N_2) \quad (2)$$

必ず回らなければならない拠点には必ず輸送機器が訪問し、荷物の収集または配送を示す。

(3) 使用済み梱包材の回収拠点に関する制約

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N_0} X_{ij}^k \leq 1 \quad (j \in N_3) \quad (3)$$

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条件

$$\sum_{j \in N_0} X_{ij}^k - \sum_{j \in N_0} X_{ji}^k = 0 \quad (i \in N_0, k \in K) \quad (4)$$

$$X_{ii}^k = 0 \quad (i \in N_0, k \in K) \quad (5)$$

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

$$X_{ij}^k = 1 \Rightarrow Y_i^{k(1)} - D_j^1 = Y_j^{k(1)} \quad (i \in N_0, j \in N_1, k \in K) \quad (6)$$

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。

$$X_{ij}^k = 1 \Rightarrow Y_i^{k(2)} + D_j^2 = Y_j^{k(2)} \quad (i \in N_0, j \in N_2, k \in K) \quad (7)$$

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。

$$X_{ij}^k = 1 \Rightarrow Y_i^{k(3)} + R_j = Y_j^{k(3)} \quad (i \in N_0, j \in N_3, k \in K) \quad (8)$$

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が使用済み梱包材を回収する拠点であれば回収量だけ積載量が増えることを示す。

$$Y_j^{k(1)} + Y_j^{k(2)} + Y_j^{k(3)} \leq S^k \quad (j \in N_0, k \in K) \quad (9)$$

輸送機器が回収した荷物、配送する荷物及び、回収する梱包材の量は、経由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) 0-1変数

$$X_{ij}^k \in \{0,1\} \quad (k \in K, i \in N_0, j \in N_0) \quad (10)$$

輸送機器が拠点i,j間を移動するかどうかを示す。1であれば、拠点i,j間を移動し、0であれば移動しないことを示す。

上記の式(2)-(6)を制約条件として、式(1)を最小にする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. Ant Colony Optimization

Ant Colony Optimization (ACO) とは、グラフを使ってよい経路を探すことで単純化できるような計算問題の確率的解法である。これは、自然界の蟻の採取行動を模範にしたものである[7],[8],[9]。

5.1 概要

蟻の群生は、ほとんど盲目であるにもかかわらず、探索行動の試行錯誤により、巣から餌までの最短経路を発見することができる。蟻は餌を発見すると揮発的のフェロモンを分泌しながら巣に帰還し、他の蟻がフェロモンの軌跡をたどることで迷うことなく餌に到達できる。しかし、時間とともにフェロモンの痕跡は蒸発しはじめ、その吸引力がなくなっていく。その経路が長いほどフェロモンは蒸発しやすい。それに対して、経路が短ければ行進時間もかからず、フェロモンが蒸発するよりも早く補強されるため、フェロモン濃度は高いまま保たれる。従って、ある蟻が最短経路を見つけると、他の蟻もその経路を辿ることになる。このような蟻の原理を用いて解くの

が ACO である。

以下に、ACO の基本となる AS (Ant System) のアルゴリズムを示す。

1. 初期化
2. 終了条件 (反復回数) を満たすまでループ
 - 2.1 全てのエージェントについて
 - 2.1.1 解 (巡回路) を獲得するまで
 - 確率的な枝選択
 - 過去の行動の記憶の更新
 - 2.2 解を評価しフェロモンの情報を更新
3. 最良解を出力し終了

5.2 回収計画モデルへのACOの適用

図3～図6に回収計画モデルへのACOを適用する際の基本適用手順を示す。

図3は回収計画立案システム全体の流れ図である。初期設定、回収計画の立案、回収計画の評価という手順に大きく分けられる。それぞれの流れを詳しく示したものが図4～図6である。

初期設定(図4)では、まず、輸送機器の情報(台数、積載可能量)を入力する。次に、各拠点の位置及び荷物の量、回収か配送かをを入力する。各拠点の位置から各拠点間の距離を計算する。拠点の平面座標からユークリッド距離を求めるものとする。初期のフェロモン表を作成する。

回収計画の立案(図5)では、輸送機器に対して順次拠点を割り当てる。まず、フェロモン表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。確率はフェロモン表により式(11)を用いて求める。

$$p_{ij}^k = \frac{[PH_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{h \in J_i^k} [PH_{ih}]^\alpha [\eta_{ih}]^\beta} \quad (11)$$

ここで、 PH_{ij} : 拠点 i, j 間のフェロモン量

$$\eta_{ij} = 1/d_{ij}$$

d_{ij} : 都市 ij 間の距離

次に、その確率に従って次の訪問する拠点の候補を決定する(乱数による)。その後、積載可能かどうかを判断し積載可能であれば次の拠点の決定を行い、

そうでなければ輸送機器のルートを終了させ、新しい機器への割当を始める。すべての通常荷物の割当が終了した時点で回収計画を立案したとする。

回収計画の評価(図6)では、で作成した回収計画の目的関数値をそれまでに求まっている回収計画と比較し最良解であれば記憶する。その上で、式(12)に従ってフェロモン表を更新する。

$$PH_{ij}(t+1) = (1-\rho)PH_{ij}(t) + \Delta PH_{ij}(t) \quad (12)$$

ここで、 t : サイクル

ρ : 蒸発係数 ($0 < \rho < 1$)

ΔPH_{ij} : 都市 ij 間のフェロモン増加量

なお、フェロモンは回収計画で使用された経路のみで経路のみで増加し、その量は回収計画の総移動距離の逆数とする。

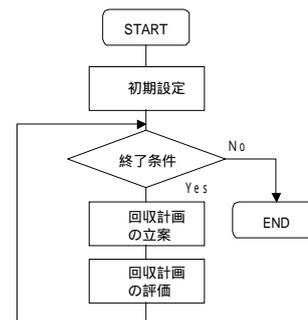


図3 回収計画立案モデル

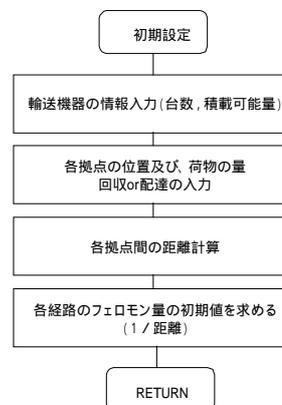


図4 初期設定

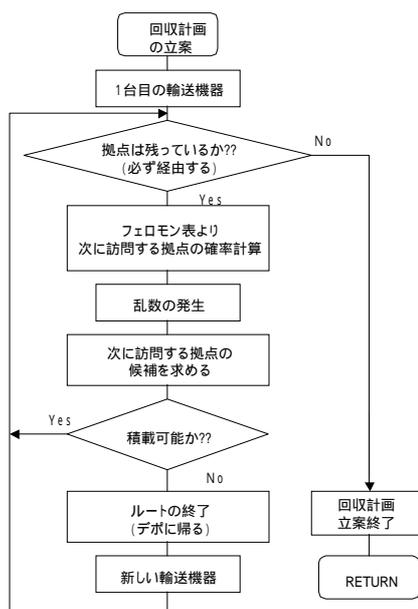


図5 回収計画の立案

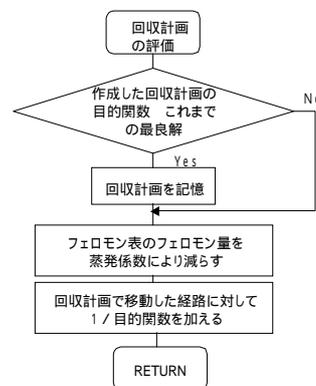


図6 回収計画の評価

表1 拠点間の距離の一例（拠点数が10の場合）

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	デポ
デポ	19.7	51.24	32.02	30.36	19.85	44.18	38.83	43.68	46.53	25.55	
1		67.36	51.31	38.08	21.21	42.19	56.57	31.24	59.51	34.01	19.7
2	67.36		42.44	72.8	69.86	53.54	54.2	94.92	74.06	36.67	51.24
3	51.31	42.44		35.17	40.61	67.36	12.37	67.48	31.62	43.68	32.02
4	38.08	72.8	35.17		17.09	74.15	31.14	37.12	23.35	55.54	30.36
5	21.21	69.86	40.61	17.09		60.08	41.59	27.02	39.66	44.82	19.85
6	42.19	53.54	67.36	74.15	60.08		78.1	72.47	90.05	23.77	44.18
7	56.57	54.2	12.37	31.14	41.59	78.1		67.05	20.52	54.74	38.83
8	31.24	94.92	67.48	37.12	27.02	72.47	67.05		59.64	64.66	43.68
9	59.51	74.06	31.62	23.35	39.66	90.05	20.52	59.64		68.26	46.53
10	34.01	36.67	43.68	55.54	44.82	23.77	54.74	64.66	68.26		25.55

表2 各拠点の回収量、配達量の一例

拠点 No	回収量	拠点 No	配達量	拠点 No	梱包材の回収量
1	22	5	23	8	27
2	15	6	13	9	29
3	13	7	12	10	26
4	24				

表3 輸送機器の積載可能量の一例

機器 No	積載可能量
No.1	148
No.2	127
No.3	122

6. 数値例

ACO を用いた回収計画の立案の有効性を明らかにするために、数値例を示す。

6.1 数値条件

以下のような条件のもとで、数値実験を行った。

- (1) 各拠点の位置は、平面上一様乱数で発生させ、各拠点間の距離はユークリッド距離により求める。(表1に拠点数が10の場合の一例を示す)
- (2) 各拠点の荷物量は一様乱数により生成する。(表2)
- (3) 輸送機器の積載可能量は、一様乱数により生成する。(表3)
- (4) 蒸発係数は0.1、0.05、0.01に設定する。

6.2 数値実験の結果

以上のような条件のもとで、数値実験を行った。計算に使用したパーソナルコンピュータは、CPU (Pentium 3.2GHz メモリ 2GB) である。

表1～表3を入力データとした場合の拠点数10、輸送機器3の計算結果を表4に示す。また、拠点数15、輸送機器数5の場合の計算結果を表5に示す。表4、表5に示された最適解は数理計画ソフトウェア Xpress - MP[10]を用いたものである。

表4、表5ともに、各輸送機器の積載可能量を満たした状態で、各拠点を回り、梱包材の回収も行われている様子が分かる。

また、表4における拠点10の問題では、短時間で最適解を求められた。

表5におけるACOによる解と最適解を比較すると、梱包材の回収に伴い発生する利益はすべて同じであるため利益の得られる梱包材の回収に確実に計画されている様子が分かる。また、移動距離に対しても、相対誤差が数%程度の経路が求められている。計算時間については、最適解を求めるためにかかった時間と比較して短時間であるため実用性があると言える。また、本研究では、蒸発係数0.05の場合が最も良い解が得られた。

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) 回収拠点における梱包材の回収計画問題を混合0-1計画問題に定式化した。
- (2) ACO を用いた回収計画問題のメタヒューリスティクス解法を提案し、数値例よりその有効性を明らかにした。

今後の課題としては、計算時間を短縮するため、ACO と他の解法を組み合わせた手法を提案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計画課：「環境白書（平成17年度版）」, (2005)
- [2]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年度）」, (2005)
- [3]新田茂雄：「図解リサイクル・省資源包装」, 日刊工業新聞社（2001）
- [4]オリオンテック株式会社のホームページ, <http://www.orientec.jp/>
- [5]財団法人日本容器包装リサイクル協会 <http://www.jcpra.or.jp/01horei/houritsu003.html>
- [6]久保幹雄, 田村明久, 松井知己：「応用数理計画ハンドブック」, 朝倉書店（2002）
- [7]金指正和：「ACOによるJSPの解法」, 日本ロジスティックスシステム学会中国四国支部講演資料（2007）
- [8]筒井茂義：「カニングアントを用いたACOの構成について」, 2006年度人工知能学会全国大会（2006）
- [9]筒井茂義：「関数最適化向き探索アルゴリズム集合フェロモンシステムについて」, 情報処理学会研究報告（2004）
- [10]Dash Optimization Ltd. : Application of Optimization with Xpress-MP（2000）

表4 数値計算結果の一例(拠点数が10の場合)

	計算回数	蒸発係数	機器 No	移動経路	距離	利益	計算時間
近似解	50万回	0.001	No.1	5 8 4 9 7 3 2 6 10 デポ	324.93	410	9.2
			No.2	1 デポ			
"	"	0.0005	No.1	5 8 4 9 7 3 2 6 10 デポ	324.93	410	8.9
			No.2	1 デポ			
"	"	0.0001	No.1	5 8 4 9 7 3 2 6 10 デポ	324.93	410	8.9
			No.2	1 デポ			
最適解			No.1	5 8 4 9 7 3 2 6 10 デポ	324.93	410	47.5
			No.2	1 デポ			

表5 数値計算結果の一例(拠点数が15の場合)

	計算回数	蒸発係数	機器 No	移動経路	距離	利益	計算時間
近似解	500万回	0.001	No.1	7 11 3 2 14 10 1 デポ	504.82	485	139.3
			No.2	6 12 15 8 13 9 4 5 デポ			
"	"	0.0005	No.1	8 13 4 9 11 7 3 5 デポ	488.59	485	138.7
			No.2	10 2 14 6 12 15 1 デポ			
"	"	0.0001	No.1	10 14 2 12 6 15 1 デポ	505.56	485	138.6
			No.2	5 8 13 9 11 7 3 4 デポ			
"	1000万回	0.001	No.1	5 13 8 15 6 12 1 デポ	490.5	485	277.8
			No.2	10 14 2 3 7 11 9 4 デポ			
"	"	0.0005	No.1	8 13 4 9 11 7 3 5 デポ	488.59	485	276.8
			No.2	10 2 14 6 12 15 1 デポ			
"	"	0.0001	No.1	8 13 5 4 9 11 7 3 デポ	489.06	485	276.4
			No.2	10 14 2 6 12 15 1 デポ			
最適解			No.1	1 15 12 6 14 2 10 デポ	463.01	485	4465.2
			No.2	5 8 13 4 9 7 11 3 デポ			