

専用船による完成車の配送計画への ACO の適用

西山 知沙* 石原 良晃**

Transportation Plan of Finished Cars by Pure Car Carriers

Chisa NISHIYAMA*, Yoshiaki ISHIHARA**

Abstract

This paper aims to propose a heuristic method for a transportation plan of finished cars by pure car carriers. In automobile manufacturers, finished cars are transported by trailers and pure car carriers. In this paper, we propose a heuristic method an ant colony optimization (ACO), and clarify the effectiveness of our proposed method.

Key words: Pure car carriers, Transportation plan, Ant colony optimization

1. 緒論

完成車の輸送には、海上輸送と陸上輸送の二種類がある。海上輸送に用いる専用船には自動車運搬船、RO-RO 船 (Roll On Roll Off ship) などがあり、陸上輸送で用いる専用車はキャリアカーなどがある。特に専用船による完成車の輸送では、一度に大量の完成車を遠方にある目的地へ運ぶことができるため、海外への輸送だけでなく国内での輸送でも活発に用いられている。専用船を用いて完成車を輸送する場合、一度に大量の完成車を低コストで運ぶことが出来る。しかしその反面、速度が遅い、海沿いの港でしか荷役が出来ないという欠点もある。

広島に本社がある M 社では、完成車を輸送する際、瀬戸内海に面した 2 つの工場から全国に 8 ヶ所あるサービスセンターのある港に完成車を輸送する。そして、そのサービスセンターでオプションを架装し、全国各地にある営業所へ輸送している^[1]。本研究では、専用船を用いて工場からサービスセンターのある港に完成車を輸送するための配送計画を立案することを目的としている。そのため、メタヒューリスティクス手法の一つである Ant Colony Optimization (ACO) を用いて配送計画を立案する手法を提案する。

2. 専用船による完成車の配送計画モデルの構築

2.1 対象とするシステム

本研究では以下のようなシステムを対象とする^[2]。

- (1) 輸送は専用船による輸送のみを対象とする。
完成車の配送手段はいくつか考えられるが、本研究では専用船による輸送のみを対象とする。
- (2) 各船の積載量や輸送費用は異なるものとする。
- (3) 完成車の種類を 1 種類とする。
実際に配送される完成車はいろいろな種類があるが、これを 1 種類とする。また、船の積載量は車体の重量とサイズなどを考慮して、完成車の積載台数で表す。
- (4) 費用は変動費用のみを考慮する。
船の費用には、船を所有することによって生じる固定費用と、船を稼働することによって生じる燃料代等の変動費用がある。本研究では、変動費用のみを考慮する。
- (5) 荷役時間帯を考慮する。
各港で 1 日 24 時間荷役を続けると、夜の電気代や人件費などの追加費用がかかる。そのため、現実では各港にそれぞれ荷役時間帯があり、それを考慮する。
本研究では、1 つの生産地から複数の目的地まで、積載量・輸送費用の異なる船を輸送手段とした、時間枠制約のある完成車の輸送システムを対象とする。図 1 に対象とする輸送システムの概念図を示す。

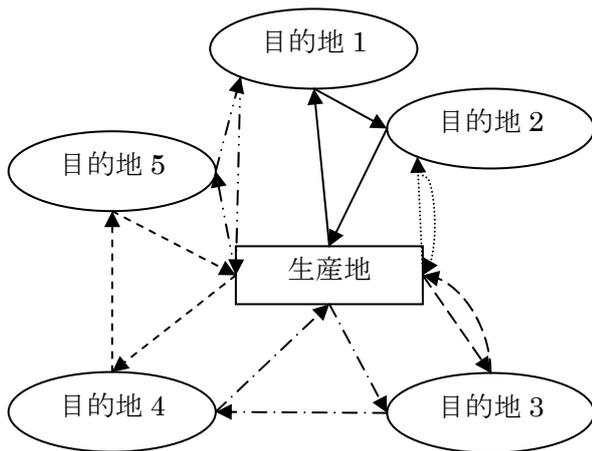


図 1 対象とする輸送システムの概念図
([2]を参考に作成)

2.2 モデルの前提条件

以下の条件を、モデルの前提条件とする。

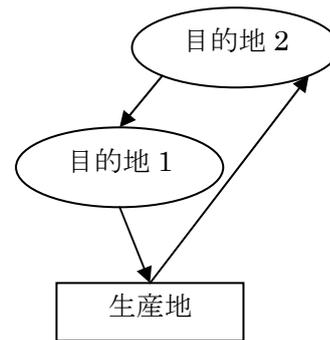
- (1) 計画期間は所与とする。
- (2) 生産地は一カ所とする。
- (3) 各目的地の需要量，生産地・目的地間の移動時間，変動費用は所与とする。
- (4) 計画期間の終了時間及び荷役時間帯を厳守する。
- (5) 目的地には 1 日 1 隻しか停泊出来ない。
- (6) 船は荷役する完成車の台数に関係なく目的地に行くとき一定時間停泊する。
- (7) 船の速度は積載量に係わらず，一定とする。
- (8) 配送経路パターン及びその配送経路パターンの変動費用は所与とする。
- (9) 配送ルートは配送経路パターンから生成され，データベースにあらかじめ登録されているものとする。

2.3 配送経路パターンと配送ルート

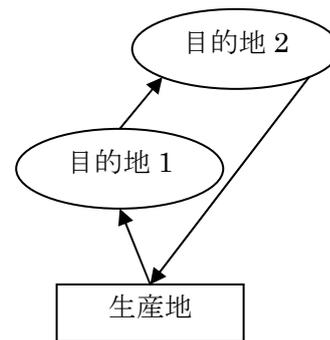
本研究で以下のような用語を用いる。

配送経路パターンとは，生産地から出発して目的地を経由し，再び生産地に戻るまでの目的地の通過順のパターンのことを表す。複数の目的地へ配送する場合，大量の完成車を積載した状態で遠くの目的地から荷役を行う（図 2(a)）より，近くの目的地から順に荷役を行いつつ通過する順番（図 2(b)）を選ぶと考えられる。そのため，本研究では配送経路パターンとして，生産地から出発して目的地を経由し，再び生産地に戻るまでの目的地の通過順をあらかじめ設定している。

配送ルートとは，計画期間中の専用船が目的地を通過する順番を表し，船が選択した配送経路パターンを順に繋いだものである。



(a) 目的地の通過順 1



(b) 目的地の通過順 2

図 2 配送経路パターン

2.4 記号の説明

以下のような記号を設定する。

- I : 専用船の数を表す. ($i = 1, \dots, I$: 船を表す.)
- J : 目的地の数を表す. ($j = 1, \dots, J$: 目的地, $j = 0$: 生産地)
- Q_i : 船 i の最大積載量を表す.
- O_j : 目的地 j の需要量を表す.
- K_i : 船 i が計画期間中に移動できる最大回数を表す.
($k_i = 1, \dots, K_i$: 船 i の移動回数を表す.)
- Ptn : 配送経路パターンの数を表す.
($pn = 1, \dots, Ptn$: 配送経路パターンの番号を表す.)
- $root^i$: 配送ルートの数を表す.
- $Tday$: 計画期間の終了時間[日]を表す.
- C_{pn}^i : 船 i が配送ルート pn を選択した場合にかかる変動費用を表す.
- $\delta_{j,t}^{i,pn}$: 船 i が配送ルート pn を選択した場合に， t 日にデポから目的地 j へ配送することを示す係数を示す.
- $\gamma_{j,t}^{i,pn}$: 船 i が配送ルート pn を選択した場合に， t 日にデポから目的地 j へ到着することを示す係数を示す.
- D_t^j : t 日中に完成する目的地 j 向けの完成車の量を示す.

x_{pn}^i : 船 i が配送ルート pn を選択するかどうかを示す 0-1 変数.

$y_{j,t}^{i,pn}$: 船 i が配送ルート pn を選択した場合に, t 日に目的地 j への配送する量を示す.

2.5 専用船による完成車の配送計画モデル

本研究では, 総変動費用を最小にするように経路を作成する. そのため, 以下のような式を用いる.

(1) 目的関数

$$Z = \sum_{i=1}^I \sum_{r^i=1}^{root^i} C_{r^i}^i \cdot x_{r^i}^i \longrightarrow Min \quad (1)$$

総変動費用を最小にする目的関数を設定する. 各船の変動費用の総和を全て合わせた総変動費用を最小にする.

(2) 目的地の需要量に関する制約

$$O_j = \sum_{i=1}^I \sum_{r^i=1}^{root^i} \sum_{t=1}^{Tday} \delta_{j,t}^{i,r^i} \cdot y_{j,t}^{i,r^i} \quad (2)$$

$(j = 1, \dots, J)$

(3) 各専用船の積載量に関する条件

$$\delta_{j,t}^{i,r^i} \cdot y_{j,t}^{i,r^i} \leq Q^i \cdot x_{r^i}^i \quad (3)$$

$(i = 1, \dots, I, r^i = 1, \dots, root^i,$
 $j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, Tday)$

(4) 目的地における専用船の入港制約

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r^i=1}^{root^i} \gamma_{j,t}^{i,r^i} \cdot x_{r^i}^i \leq 1 \quad (4)$$

$(j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, Tday)$

(5) 移動経路に関する制約

$$\sum_{r^i=1}^{root^i} x_{r^i}^i = 1 \quad (i = 1, \dots, I) \quad (5)$$

$$x_{r^i}^i \in \{0, 1\} \quad (6)$$

$(i = 1, \dots, I, r^i = 1, \dots, root^i)$

上記の式 (2) ~ 式 (6) を制約条件とし, 式 (1) 最小にする問題を「専用船による完成車の配送計画モデル」と呼ぶ.

しかし, 全ての配送ルートを検討して最適解を求めるには, 膨大な時間が必要となる. そのため, ACO を用いて近似解を求める手法を提案する.

3. 専用船による完成車の配送計画モデルへの ACO の適用

3.1 Ant Colony Optimization (ACO) の概要

ACO とは, 餌を探す時の蟻の行動に類似させたメタヒューリスティクス解法である. 蟻はランダムに地表を動き回って餌を探し, 餌を見つけると, 経路にフェロモンという揮発性の物質を分泌しながら巣

に戻る. 他の蟻達はフェロモンを見つけると, それを辿って餌を見つけ, 同じように経路にフェロモンを分泌しながら巣に戻る. この経路のフェロモン量が, 他の蟻に有望な経路であるかどうかを示す⁹⁾.

フェロモンは揮発性の物質であるため, 時間が経過するにつれて薄くなっていく. そのため, 餌と巣の距離が短い経路と長い経路では蒸発量が異なる. 距離が短い経路は移動時間が少ないため, フェロモンの蒸発量が少ない. そのため, フェロモンが濃く, その経路が選択される確率が高い. 従って, 経路を選択する蟻が多くなり, フェロモンの分泌がより活発になる. 逆に, 距離が長い経路は移動時間が大きいため, フェロモンの蒸発量が多くなる. そのため, フェロモンが希薄で, その経路が選択される確率が低くなるため, 益々フェロモンが蒸発して減少し, 最終的にフェロモンが消滅する. 最終的に全ての蟻が同一の短い経路を選択するようになり, その経路が最良解となる.

3.2 専用船による完成車の配送計画モデルへの ACO の適用

図 3~図 6 に専用船による完成車の配送計画モデルに ACO の適用をした基本手順を示す.

図 3 に専用船による完成車の配送計画システム全体の流れを示す. 配送計画システムは①初期設定, ②配送計画の立案, ③配送計画の評価の 3 つの手順に分けられる.

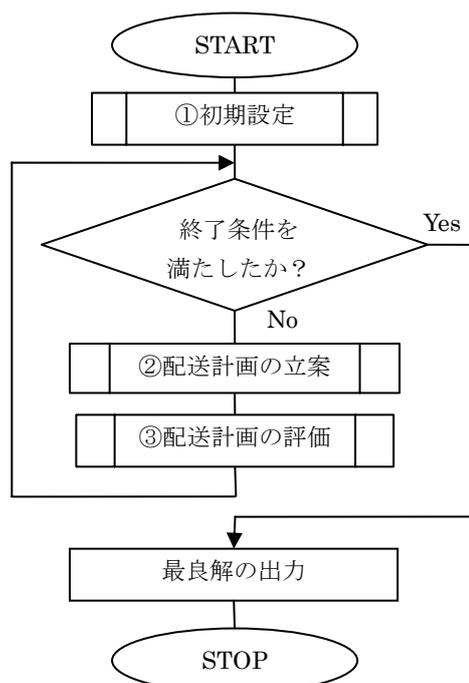


図 3 専用船による完成車の配送計画システム

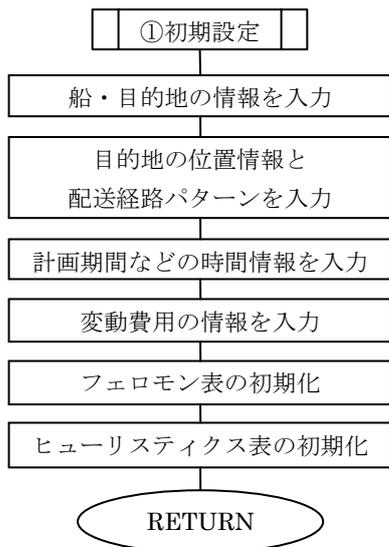


図 4 初期設定

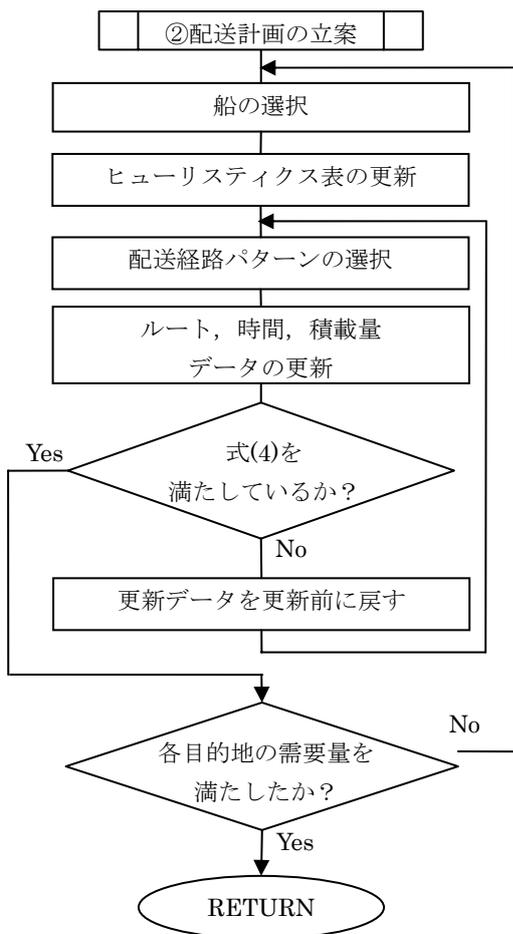


図 5 配送計画の立案

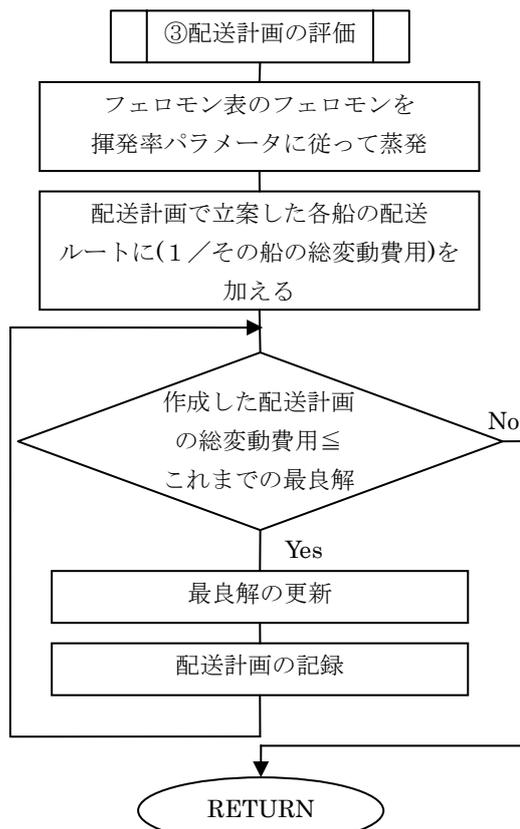


図 6 配送計画の評価

図 4 に初期設定の流れを示す。まず、船の情報（船の数，最大積載量，最大使用回数）と目的地の情報（目的地の数，需要量）を入力する。次に目的地の位置情報，配送経路パターン，目的地間の移動時間，計画期間，荷役時間帯，各船の荷役時間，変動費用などのデータを入力する。次に，フェロモン表の初期化とヒューリスティクス表の初期化を行う。フェロモン表とヒューリスティクス表は船ごとに用意する。

図 5 に配送計画の立案の流れを示す。ここでは，各船の配送ルートの順番を決定する。まず，配送を行う船を選択する。船の選択では，選択可能な船の中で，デポで積み込みを行う日が最も早い日の船を選択する。次に，各目的地の需要量の残りを算出し，選択した船 i のヒューリスティクス表を更新する。ヒューリスティクス値は，以下の式 (7) によって算出する。

$$\eta_{k_i, pn}^i = \frac{\text{配送経路パターン } pn \text{ の各目的地の残っている需要量の総和}}{\text{船 } i \text{ の最大積載量}} \quad (pn = 1, \dots, Ptn) \quad (7)$$

ここで、 $\eta_{k_i, pn}^i$: 船 i の k_i 番目の配送経路パターン pn のヒューリスティクス値である。

ヒューリスティクス値は、値が1以上になる場合は1とし、配送経路パターン pn に含まれる目的地の内、残っている需要量が0の目的地含まれている場合は0とする。

次に、配送経路パターンを選択する。まず、次に選択可能な配送経路パターンに対して確率を求める。確率は式(8)を用いて算出する。次にその確率に従って、選択する配送経路パターンを決める。

$$P_{k_i, pn}^i = \frac{[ph_{k_i, pn}^i]^\alpha [\eta_{k_i, pn}^i]^\beta}{\sum_{z \notin Tabu^i} [ph_{k_i, z}^i]^\alpha [\eta_{k_i, z}^i]^\beta} \quad (8)$$

ここで、

$P_{k_i, pn}^i$: 船 i が k_i 番目に配送経路パターン pn を選択する確率

$ph_{k_i, pn}^i$: 船 i の k_i 番目の配送経路パターン pn のフェロモン量

α, β : フェロモン量とヒューリスティクス値の重みを表すパラメータ

$Tabu^i$: 船 i が選択出来ない配送経路パターンの集合

次に、船への積載量と各目的地の荷降ろしの量を決める。船の積載量と目的地での荷降ろしの量は、式(9)を用いて選択された配送経路パターンに含まれる各目的地の船の最大積載量に対する荷降ろしの量の割合を計算し、式(10)を用いて各目的地での降荷役量を算出する。

$$\text{目的地の割合} = \frac{\text{目的地の残っている需要量}}{\text{選択された配送経路パターンの総需要量}} \quad (9)$$

目的地 j の荷降ろしの量

$$= \text{船 } i \text{ の最大積載量} \times \text{目的地 } j \text{ の割合} \quad (10)$$

ここで、 j : 選択された配送経路パターン内の目的地
次に、ルート・時間・積載量データを更新する。この時、制約条件を満たすことが出来なければ、配送経路パターンを選択し直す。

最後に、全ての目的地の需要量を満たしているか調べ、満たされていない場合は立案を続ける。全ての目的地の需要量が満たされた時点で、配送計画の立案を終了したとする。

図6に配送計画の評価の流れを示す。ここでは、フェロモン表の更新と最良解の更新を行う。まず、フェロモンの蒸発を行う。フェロモンの蒸発はフェロモンの揮発率パラメータに従い、式(11)を用いて算出する。

$$ph_{k_i, pn}^i = (1 - \rho) ph_{k_i, pn}^i \quad (11)$$

ここで、 ρ : フェロモンの揮発率パラメータ ($0 < \rho < 1$)

次に、フェロモンの追加を行う。フェロモンの追加は、配送計画の立案で各船の選択された配送経路パターンのみ増加し、その量は各船の総移動費用の逆数とする。フェロモンの追加は、以下の式(12)を用いて行う。

$$ph_{k_i, pn}^i = ph_{k_i, pn}^i + \frac{1}{w_i} \quad (12)$$

ここで、 w_i : 船 i の総変動費用

求められた総変動費用(目的関数)を今までの最良解と比較し、値が小さければ最良解として更新する。

4. 数値例による評価

4.1 入力データ

以下に入力データを示す。計画期間は1週間とした。揮発率パラメータは、0.01, 0.005, 0.001の3種類を用いた。

船の数を2隻、目的地の数を3ヵ所とし、生産地・目的地の荷役可能時間帯を8時~18時とする。

表1 船の最大積載量と配送経路パターンの最大回数

船	No.1	No.2
最大積載量	100	200
最大回数	5	5
荷役時間	1	2

表2 目的地の需要量

目的地	1	2	3
需要量	500	450	350

表3 配送経路パターン

パターン番号	0	1	2	3
配送経路パターン	1	2	3	1→2
パターン番号	4	5	6	
配送経路パターン	2→3	1→3	1→2→3	

表4 目的地間の片道にかかる時間

	生産地	1	2	3
生産地		4	6	8
1	4		2	4
2	6	2		2
3	8	4	2	

表5 船1の目的地間の片道の変動費用

	生産地	1	2	3
生産地		4	6	8
1	4		2	4
2	6	2		2
3	8	4	2	

表6 船2の目的地間の片道の変動費用

	生産地	1	2	3
生産地		6	8	10
1	6		4	6
2	8	4		4
3	10	6	4	

表7 0~Tday日の目的地の追加される需要量

日	0	1	2	3
1	100	50	150	100
2	150	100	50	50
3	50	100	50	100
日	4	5	6	7
1	100			
2	100			
3	50			

4.2 計算結果

表1~表7に示したような入力データを用いて、数値計算を行った。計算に使用したパーソナルコンピュータは、CPUがCeleron 440 2GHzで、メモリ2GBである。0.01, 0.005, 0.001の3通りの揮発率パラメータを用いて実験を行った。その結果の一例を表8に示す。表8に示した最適解は、全ての配送ルートを検討して算出した結果である。

性能の評価を行うため、揮発率パラメータごとに、20回の計算の相対誤差の平均と平均計算時間を算出した。表9に計算結果の一例を示す。相対誤差は式(13)を用いて算出した。

表9 相対誤差と計算時間の平均

揮発率パラメータ	相対誤差の平均	平均計算時間 [s]
0.01	0.0206	67.45
0.005	0.0048	38.95
0.001	0.0016	19.65

表8 計算結果の一例

	試行回数	揮発率パラメータ	船	配送経路 (0:生産地)	変動費用	計算時間 [秒]
ACOによる解	20万回	0.01	No.1	0→2→0→1→0→1→0→1→0→1→0	126	67
			No.2	0→1→2→3→0→2→3→0→2→0→3→0		
"	"	0.005	No.1	0→1→0→2→3→0→2→3→0→1→0→1→0	126	38
			No.2	0→2→3→0→1→0→3→0→2→0		
"	"	0.001	No.1	0→1→0→2→3→0→2→3→0→1→0→1→0	126	19
			No.2	0→2→3→0→1→0→2→0→3→0		
最適解			No.1	0→1→0→2→0→1→0→1→0→2→0	126	5188
			No.2	0→2→3→0→2→3→0→1→0→2→3→0		

$$\text{相対誤差} = \frac{\text{ACOで得た解} - \text{最適解}}{\text{最適解}} \quad (13)$$

表9を見ると、揮発率パラメータ0.01では2.0%程度の誤差、0.005では0.4%程度の誤差、0.001では0.2%程度の誤差が出たことがわかる。また、計算時間は短くなっている。

5. 結論

本研究では、ACOを用いた専用船による完成車の配送計画の立案を行い、相対誤差が2.0%程度の解を短時間で得られることを明らかにした。

今後の課題として、生産地を2カ所以上にするなどが挙げられる。

参考文献

- [1] マツダ株式会社, 2006/会社概要, マツダ株式会社広報渉外本部(2006)
- [2] 李妍丹, 平木秀作, 長村俊則, “専用船による時間枠制約付き輸送計画問題に関する一研究”, 日本ロジスティクスシステム学会誌, Vol2-No.2 (2001), pp57-67
- [3] Silvia Mazzeo, Irene Loiseau, “An Ant Colony Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing”, Discrete Mathematics, vol.8, No.1, December 2004, pp.181-186