

専用船による完成車の輸送計画の一解法

反田健太郎* 石原良晃**

A Heuristics for Transportation Plan of Finished Cars by Pure Car Carriers

Kentaro SORITA*, 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 using an ant colony optimization (ACO), and clarify the effectiveness of our proposed method.

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

1. 序論

自動車工業における完成車の輸送は、専用船を用いた海上輸送とトレーラーを用いた陸上輸送の2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)などがある。専用船による完成車の輸送は、一度に大量の完成車を遠い目的地へと運ぶことができるため、海外への輸送のみならず国内での輸送でもよく用いられている。また、一度に大量に完成車を輸送するために陸上輸送に比べ、低コストで輸送することができる。

本研究では、海上輸送部分にあたる専用船を用いて工場から各サービスセンターへ完成車を輸送するための輸送計画の立案を目的としている。本研究では比較的短時間で近似解を得ることが出来るメタヒューリスティクス解法の一つである、Ant Colony Optimization (ACO)を用いて輸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輸送

わが国の自動車製造会社の多くは、製品の大半を輸出しているため、臨海部に最終組み立て工場を設けている。その場合、完成車の輸送は、海外はもとより国内向けもその多くを専用船による海上輸送に依存している。国内での専用船による完成車の輸送

事例を示すと、T海運は、図1に示すような日本各地に点在する寄港地を次の5つの航路に分割して輸送している。[1][2]



図1 T海運の海上輸送寄港地[2]

- (1) 北海道・東北航路 (3経路)
- (2) 東北・関東航路 (2経路)
- (3) 関東航路 (3経路)

(4) 関東・中四国・九州航路 (5 経路)

(5) 鹿児島・沖縄経路 (1 経路)

例えば、北海道・東北経路には次の3つの経路がある。

①名古屋→仙台→苫小牧→仙台→名古屋

(1 便/2 日)

②名古屋→仙台→苫小牧→八戸→名古屋

(1 便/4 日)

③名古屋→仙台→釧路→名古屋 (1 便/4 日)

また、M社では、海に面した2つの工場から、全国に7か所あるサービスセンターに完成車を海上輸送している。各サービスセンターでは、オプションを架装が行われ、トレーラーにより、全国にある営業所へ輸送している[3]。

3. 専用船による完成車の輸送計画モデルの構築

3.1 対象とするシステム

以下のようなシステムを対象とする。[4]

- (1) 専用船による輸送のみを対象とする。
- (2) 各船の積載量は異なるものとする。
- (3) 完成車の種類を1種類とする。
- (4) 荷役時間帯を考慮する。

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。

3.2 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) 各期のサービスセンター向け完成車の生産量を所与とする。
- (2) 使用する専用船によって輸送費は変化しない。
- (3) 生産地および目的地には荷役可能時間帯がある。
- (4) 各専用船の速度(能力)は、すべて同一とする。
- (5) 各専用船の積載可能能力は異なるものとする。
- (6) 生産地を1箇所とし、各地域への輸送は、生産地と目的地の往復により行われる。
- (7) 専用船の輸送経路は、輸送経路データベースから基本経路が抽出される。また、専用船は計画期間中のある期の途中で利用可能になる場合には、次期から利用するものとする。

3.3 記号の説明

以下のような記号を用いる。

K : 専用船の数

R^k : 専用船 K の輸送経路数

L : 目的地の数

t_l : 生産地～目的地 l への配送するのに必要な時間

T : 計画奇数

E_l : 目的地 l に同じ期に入港できる専用船の数

Q^k : 専用船 K の積載可能量

T^k : 輸送機器 k の利用開始可能時刻

S_j : 生産地および目的地 j における荷役時間

D_t^l : t 期中に完成する目的地 l 向けの完成車の量

$\delta_{l,t}^{k,r}$: 専用船 k が輸送経路 r を選択した場合に、 t 期に生産地から目的地 l へ配送することを示す係数

$\gamma_{l,t}^{k,r}$: 専用船 k が輸送経路 r を選択した場合に、 t 期に目的地 l に到着することを示す係数。

$P_{l,t}^{k,r}$: 専用船 k が輸送経路 r を選択した場合に、 t 期に拠点 l への輸送する量

X_r^k : 専用船 k が輸送経路 r を選択するかどうかを示す 0-1 変数

I_t^l : t 期首に生産地にある目的地 l 向けの完成車の在庫量

3.4 輸送計画モデルの定式化

本研究では、各専用船による輸送量が最大になるように完成車を割り当てることを考える。そのために、以下の式(1)から式(9)を用いる。

(1) 目的関数

$$Z = \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^{R^k} \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^t \delta_{l,t}^{k,r} \cdot P_{l,t}^{k,r} \rightarrow \text{Max} \quad (1)$$

(2) 完成車の在庫量に関する条件

$$I_{t+1}^l = I_t^l + D_t^l - \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^{R^k} \delta_{l,t}^{k,r} \cdot P_{l,t}^{k,r} \quad (2)$$

($l = 1, \dots, L, t = 1, \dots, T$)

$$\sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^{R^k} \delta_{l,t}^{k,r} \cdot P_{l,t}^{k,r} \leq I_t^l \quad (3)$$

($l = 1, \dots, L, t = 1, \dots, T$)

(3) 各専用船の積載可能量に関する条件

$$P_{l,t}^{k,r} \leq Q^k \cdot X_r^k \quad (4)$$

$$(k = 1, \dots, K, r = 1, \dots, R^k, l = 1, \dots, L, t = 1, \dots, T)$$

(4) 目的地における専用船の同時入港制約

$$\sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^{R^k} Y_{l,t}^{k,r} \cdot X_r^k \leq E_l \quad (5)$$

$$(l = 1, \dots, L, t = 1, \dots, T)$$

(5) 輸送経路に関する制約

$$\sum_{r=1}^{R^k} X_r^k = 1 \quad (k = 1, \dots, K) \quad (6)$$

$$X_r^k \in \{0,1\} \quad (7)$$

$$(k = 1, \dots, K, r = 1, \dots, R^k)$$

(6) 変数の非負条件

$$P_{l,t}^{k,r} \geq 0 \quad (8)$$

$$(k = 1, \dots, K, r = 1, \dots, R^k, l = 1, \dots, L, t = 1, \dots, T)$$

$$I_t^l \geq 0 \quad (l = 1, \dots, L, t = 1, \dots, T) \quad (9)$$

上記の式 (2) ~ 式 (9) を制約条件とし、式 (1) 最大にする問題を「専用船による完成車の輸送計画モデル」と呼ぶ。

4. 輸送モデルへのACOの適用

4.1 Ant Colony Optimization(ACO)

海上輸送による完成車の輸送を対象として、専用船による完成車の輸送計画モデルを構築した。しかし、提案した数理計画モデルでは、複数のサービスセンターへの輸送を考慮していない。また、計画期間が長くなると、輸送経路の候補数が増大し、数理計画ソフトウェアを用いて解くのが困難となる。そこで本研究では、ACOを用いたヒューリスティックス解法を提案する。

ACOとは、餌を探すときの蟻の行動に類似させたメタヒューリスティックス解法である。蟻はランダムに地表を動き回って餌を探す。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。他の蟻たちはそのフェロモンを見つけ、たどって餌を見つける。その蟻たちも同様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かどうかを示す[5]。

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薄くなっていく。そのため、餌と巣の距離によって蒸発量が異なる。距離が短い経路の場合は、移動時間が短く、フェロモンの蒸発量が少なくなる。そのため、フェロモンが濃くなり、その経路が選択される確率が高くなる。従って、その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、距離が長い経路の場合は、移動

時間が長くなる為に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り、よりフェロモンが蒸発して減少し、いずれフェロモンが消滅する。図2ではフェロモンと経路の関係を表している。直線の経路の方が曲線の経路よりも短いため、フェロモンが濃く、選択されやすくなる。

最終的にすべての蟻が同一の短い経路を選択するようになり、その経路が最適解となる。

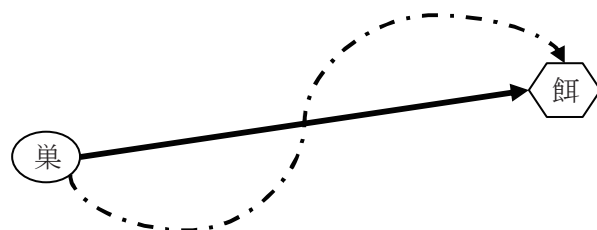


図2 フェロモンと経路の関係

4.2 輸送経路パターンと輸送ルート

本研究で用いている輸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経路パターンのことを表す。複数の目的地へ輸送する場合、大量の完成車を積載した状態では、遠くの目的地から荷役を行うより、近くの目的地から順に荷役を行いながら通過する順番を選択すると考える。なぜなら、積載量の多いときの方が燃料を多く使うため、輸送距離が長くなるとその分費用が高くなるからである。そのため、本研究では、あらかじめ輸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基本経路をデータベース化している。このデータベースに記録されている輸送経路は、荷役時間帯を考慮して作成されている。

次に輸送ルートとは、計画期間中の専用船が目的地を通過する順番を表し、各船が選択した輸送経路パターンを順につないだものである。

4.3 輸送計画モデルへのACOの適用

ACOを用いた解法を提案するため、以下の記号を設定する。

M : 輸送経路パターンの数

C^k : 専用船 K の最大積載量

$Ph_{l,m}^k$: フェロモン量 (専用船 k が輸送経路パターン m を選択する)

$Pr_{l,m}^k$: 確率 (専用船 k が輸送経路パターン m を選択する)

$\eta_{l,m}^k$: ヒューリスティック値 (専用船 k が輸送経路パターン m を選択する)

$SS_{l,m}$: l 期における輸送経路パターン m 上のサービスセンター向けの自動車の在庫量

$SP_{l,m}^k$: l 期に専用船 k が輸送経路パターン m を選択した時の輸送量

SP_Max^k : 計画期間中に専用船 k が輸送できる最大量

専用船 k が輸送経路パターン m を選択する確率は以下の式で求める。

$$Pr_{l,m}^k = \frac{(Ph_{l,m}^k)^{\alpha} (\eta_{l,m}^k)^{\beta}}{\sum_{i_1}^T \sum_{j_1}^M (Ph_{l,j_1}^k)^{\alpha} (\eta_{l,j_1}^k)^{\beta}} \quad (10)$$

ここで、 α 、 β は、フェロモン量とヒューリスティック値の影響の程度を示すパラメータである。

専用船 k が輸送経路パターン m を選択した場合の積載率を以下の式で求める。

$$\lambda_{l,m}^k = \frac{SS_{l,m}}{C^k} \quad (11)$$

ヒューリスティック値は、積載率をもとにして以下の式で求める。

$$\eta_{l,m}^k = \begin{cases} \lambda_{l,m}^k & \\ 1 & (\text{初めて 1 を超えた時}) \\ 0 & (\text{それ以降のとき}) \end{cases} \quad (12)$$

表1 ヒューリスティック値の例 (最大積載量 350)

	1	2	3	4	5
在庫量	20	50	150	220	330
heuristic 値	0.06	0.14	0.43	0.63	0.94
	6	7	8	9	10
在庫量	360	400	450	480	500
heuristic 値	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0

表1は最大積載量350の専用船を用いた時のヒューリスティック値である。式(11)を用いてヒューリスティック値を計算し、その値が初めて1を超えたところのヒューリスティック値を1とする。それ以降は、その船が選択されないようにヒューリスティック値を0.0とする。

この値をフェロモン表と対応させることにより専

用船 k の経路を決定させる。

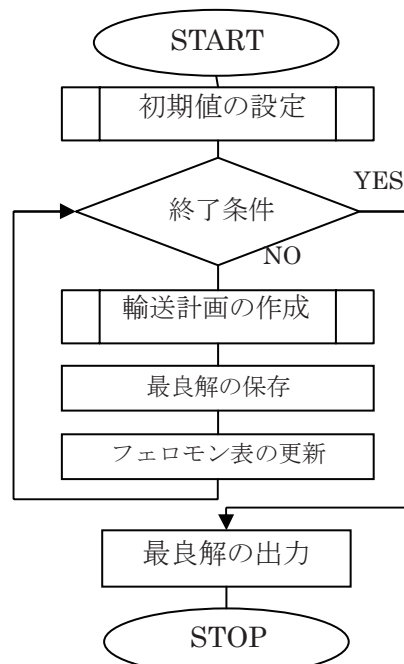


図3 配送計画システム

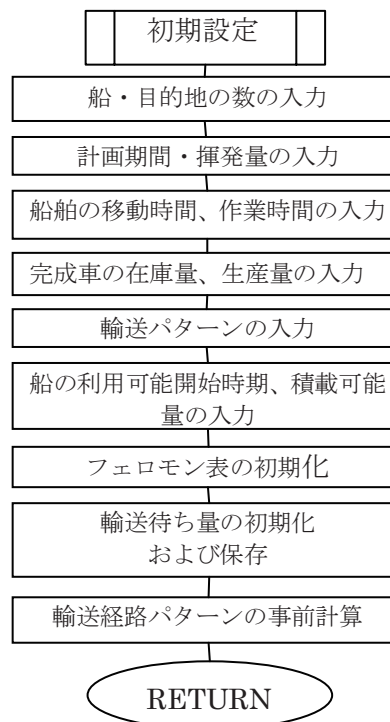


図4 初期設定

図3に専用船による完成車の輸送計画システムの全体の流れ図を示す。初めに初期値を設定し、ACOにより最良解が出るまで、輸送計画の作成・最良解の保存・フェロモン表の更新を繰り返す。

図4に初期設定の流れ図を示す。初めに船と目的地の数、計画期間、揮発量を入力する。次に船舶の移動時間、作業時間、完成車の在庫量と生産量、配送パターン、船の利用可能開始時期、積載可能量を入力する。そして、フェロモン表、輸送待ち量を初期化し、配送経路パターンを事前に計算する。フェロモン表は各船に用意する。

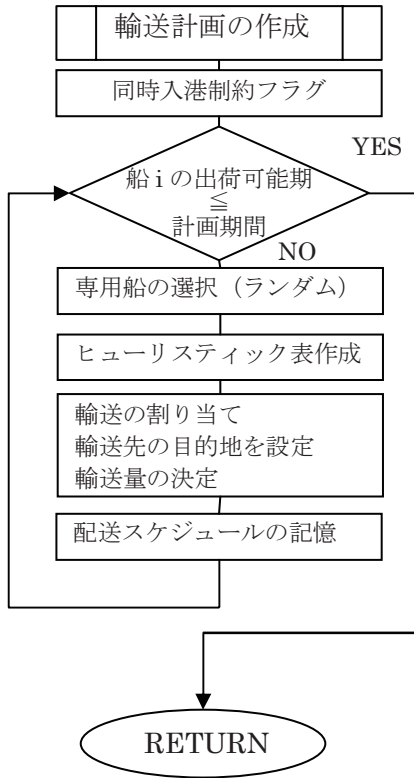


図5 輸送計画の作成

図5には輸送計画の作成の流れ図を示す。専用船の選択では、利用可能な船があるかどうかを調べ、あればランダムで専用船を選択する。その後ヒューリスティック表を作成し、更新する。選択された専用船は、式(4.1)によって求められる確率に従って、移動経路パターンを選択する。すべての専用船が計画終了時点で移動するまでこの手順が繰り返される。

輸送計画が立案された後、輸送経路パターンと輸送量に従って、フェロモン量を調整する。

$$P_{l,i,m}^k \leftarrow (1 - \gamma) \cdot P_{l,i,m}^k + \frac{SP_{l,i,m}^k}{SP_Max^k} \quad (13)$$

ここで、 γ は蒸発係数である。

5. 輸送計画システムの性能評価

5.1 使用データ

本研究で作成した専用船による完成車の輸送計画を、数値例を用いて性能評価をする。以下に使用した数値例を示す。

- (1) 目的地の数 5

- (2) 専用船の数 10

- (3) 計画期間 10

- (4) 目的地への移動時間は表2に示す。

- (5) 各船の最大積載量と出港可能期は表3に示す。

- (6) 各期間の完成車の生産量は表4に示す。

- (7) 各目的地への完成車在庫量は表5に示す。

表2 移動時間

目的地	1	2	3	4	5
移動時間	48	36	24	12	16

表3 専用船の最大積載量と出港可能期

	1	2	3	4	5
最大積載量	300	300	550	300	250
出港可能期	2	1	2	3	2
	6	7	8	9	10
最大積載量	250	300	550	250	300
出港可能期	1	3	1	3	1

表4 各期間の完成車の生産量

目的地	1	2	3	4	5
1	50	100	50	100	50
2	150	100	150	100	150
3	200	150	100	100	150
4	200	100	150	100	250
5	50	100	50	50	150
目的地	6	7	8	9	10
1	50	100	50	100	50
2	150	100	150	100	150
3	200	150	100	100	150
4	200	100	150	100	250
5	150	100	50	100	50

表5 各目的地への完成車在庫量

目的地	1	2	3	4	5
在庫量	100	200	100	0	100

5.2 実行結果

5.1の入力データを用いて数値実験を行った。使用したコンピュータは、CPUがDual-Core 2.50GHzで、メモリは3GBである。プログラミング言語はVisual C++2008を使用した。

表6は実行結果である。本研究で提案した解法で求めた解は数理計画ソフトウェア Xpress-MPを用いて求めた最適解と同じ目的関数値が得られた。このことから問題の規模が大きくなっても、比較的良い解が得られると考える。

6. 結論

本研究では、自動車工業における完成車の輸送において、海上輸送部分にあたる専用船による輸送に焦点を置き、工場から各サービスセンターへ完成車を輸送するための、専用船による完成車の輸送計画の立案についてACOを用いて次のことを明らかにした。

- ①専用船による完成車の輸送計画を立案するための輸送計画モデルを構築した。
- ②輸送計画モデルへACOを適用させ、数値例を用いてその性能を評価し、有効性を明らかにした。今後の課題として、より大規模な問題を使用し性能を評価することが挙げられる。

参考文献

- [1] 張敏, 平木秀作, 石原良晃, ”環境負荷を考慮した完成車輸送システムに関する研究”, 日本ロジスティクスシステム学会, 第13回全国大会予稿集, pp.89-92 (2010)
- [2] <http://www.toyofuji.co.jp/index.html>
- [3] 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)
- [4] 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, Vol.12, No. 2, pp57-67 (2001)
- [5] Silvia Mazzeo, Irene Loiseau, “An Ant Colony Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing”, Discrete Mathematics, vol.8, No.1, pp.181-186 (2004)

表6 輸送計画の実行結果

専用船	最大積載量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	300										3 200
2	300						5 200				5 150
3	550					3 100		3 500			2 150
4	300								2 300		
5	250								1 100		
6	250								5 250		
7	300				5 300			4 300			1 150
8	550		2 350					3 550		2 550	
9	250			1 250				1 250			
10	300		4 200				4 300		4 300		4 250