

# 輸送時間と納期を考慮した完成車の輸送計画の立案

石原良晃\* 相田裕貴\*\* 新谷浩一\*\*\*

## A Transportation Plan of Finished Cars Considering Transportation Time and Due Date

Yoshiaki ISHIHARA, Yuki AIDA and Koichi SHINTANI

### Abstract

This paper propose a method for making a transportation plan by pure car carriers considering total transportation time and due date. In automobile manufacturers, finished cars are transported by trailers and pure car carriers. In this paper, we propose a transportation model by pure car carriers and clarify the characteristics of our proposed model.

Key words: Transportation plan, Pure car carriers, Multi-objective mathematical programming

### 1. はじめに

本研究は、専用船による完成車の輸送計画を立案することを目的とする。自動車産業における完成車の輸送には、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く離れた目的地へ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、専用船を用いて組立工場から各地域のサービスセンター(配送センター)へ完成車を輸送するための輸送計画を立案するため、輸送時間とサービスセンターへの納期を考慮した輸送計画を立案する。

### 2. 自動車産業における完成車の輸送

完成車の輸送は以下のような手順で行われている。図1に完成車輸送の概念図を示す[1]。

- (1) 組立工場から積出港へ輸送
- (2) 専用船を用いてサービスセンターへ輸送
- (3) サービスセンターで完成車にオプションの架装
- (4) 完成車を各営業所へ輸送

組立工場で生産された完成車は、専用船により各エリアを担当するサービスセンターへ輸送される。M社では、4か所のサービスセンターへ専用船を輸送している。完成車の輸送のための専用船の経路は、各サービスセンターの需要量、積出・積降港の荷役可能時間帯を考慮して決定する。

サービスセンターは従来、各販売代理店がそれぞれ行なっている新車の納車整備を一括して行うもので、自動洗車設備、用品組み付け工程、モーターポール等が設置されている[2]。各代理店にとって業務の簡素化や納車整備コストの削減、製品完成度の向上が計れるばかりでなく、整備済み車両が各営業拠点へ直送されることで拠点間での物流コストの削減や車両保管に使用していたスペースの有効利用などを促進することが可能になる。専用船によって輸送された完成車は、サービスセンターでオプションを架装した後、トレーラーに積載されディーラーへ配送される。トレーラーによる完成車の配送計画は通常、オプション架装順序の計画を立案する前に計画される。トレーラーに積載する自動車の種類や台数は配送計画によって決められ、完成車へのオプション架装順序はこの配送計画に従って検討される。

本研究では、完成車を組立工場からサービスセンターへ専用船を用いて輸送計画を対象として研究を進める。

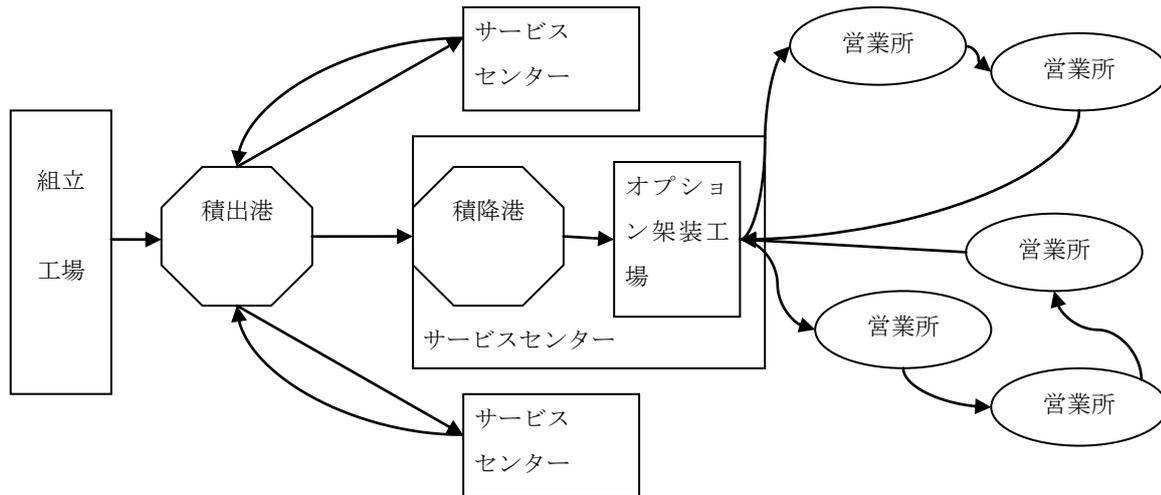


図1 完成車の輸送

### 3. 専用船による完成車の輸送計画モデルの構築

#### 3.1 前提条件

専用船による完成車の輸送計画モデルを構築するにあたり以下の前提条件をおく。

- (1) 完成車の種類は1車種とする。
- (2) 各期のサービスセンター向け完成車の生産量、サービスセンターへの納期を所与とする。
- (3) 納期が早い自動車から生産され、輸送待ちの完成車は先に生産された完成車から輸送される。
- (4) 使用する専用船によって輸送費は変化しない。
- (5) 積出港およびサービスセンターには荷役可能時間帯がある。
- (6) 各専用船の速度(能力)は、すべて同一とする。
- (7) 各専用船の積載可能能力は異なる。
- (8) 積出港は1か所とする。
- (9) 計画期間中の専用船の輸送経路は、輸送経路パターンを組み合わせて作成される。

#### 3.2 輸送経路パターン

輸送経路パターンはあらかじめ設定されており、すべての専用船は輸送経路パターンを選択することを繰り返し、専用船の輸送経路が生成される [3]。表1に輸送経路パターンの一例を示す。たとえば、輸送経路パターンをNo. 1, No. 3, No. 7, No. 2と順に選択したとすれば、輸送経路は、0-1-0-3-0-2-3-0-2-0となる。

#### 3.3 記号の説明

専用船による輸送計画モデルを構築するため、以下の記号を設定する。

表1 輸送経路パターンの一例

パターン	拠点の訪問順序			
1	0	1		
2	0	2		
3	0	3		
4	0	4		
5	0	1	2	
6	0	1	3	
7	0	2	3	
8	0	1	2	3

$N$  : 拠点の集合

$$N = \{0, 1, 2, \dots, n\}$$

$K$  : 専用船の集合

$u^k$  : 専用船  $k$  の最大航海数

$S_{ij}$  : 拠点間の移動時間

$\alpha_1$  : 完成車1台の積込時間

$\alpha_2$  : 完成車1台の荷降し時間

$T$  : 計画期間

$R$  : 輸送経路パターンの集合

$m_l$  : 輸送経路パターン  $l$  で移動する拠点数

$p_i^l$  : 輸送経路パターン  $l$  で  $i$  番目に訪問する拠点

$NA_l$  : 輸送経路パターン  $l$  に含まれる拠点の集合

$M_i$  : 拠点  $i$  の同時入港可能数

$D_i^l$  :  $l$  期首に生産が終了した拠点  $i$  に輸送される完成車の台数

$B_i^l$  : 納期が  $l$  期になっている拠点  $i$  に輸送される完

成車の台数

$L_i^l$  : 納期が  $l$  期になっている拠点  $i$  に輸送される完成車の納期までに輸送されない台数

$Z_r^{k,v}$  : 専用船  $k$  が第  $v$  回目の航海で輸送経路パターン  $r$  を採用したかどうかを示す 0-1 変数

$X_i^{k,v,r}$  : 専用船  $k$  が第  $v$  回目の航海で輸送経路パターン  $r$  を採用し、拠点  $i$  に到着した時の積載量

$O_i^{k,v,r}$  : 専用船  $k$  が第  $v$  回目の航海で輸送経路パターン  $r$  を採用し、拠点  $i$  に輸送した輸送量

$t_i^{k,v,r}$  : 専用船  $k$  が第  $v$  回目の航海で輸送経路パターン  $r$  を採用し、拠点  $i$  に到着する時間

$I_{i,l}^{k,v,r}$  : 専用船  $k$  が第  $v$  回目の航海で輸送経路パターン  $r$  を採用し、拠点  $i$  で  $l$  期に作業を開始したかどうかを示す 0-1 変数

$y_{ij}^{k,v,r}$  : 専用船  $k$  が第  $v$  回目の航海で輸送経路パターン  $r$  を採用し、拠点  $i$  から拠点  $j$  に移動するかどうかを示す 0-1 変数

$\bar{y}_{ij}^{k,v}$  : 専用船  $k$  が第  $v$  回目の航海を拠点  $i$  で終了し、新たな輸送経路パターンの起点である拠点  $j$  に移動することを示す 0-1 変数

### 3.4 専用船による完成車の輸送計画モデル

専用船による完成車の輸送計画モデルを多目的計画モデルとして定式化する [4].

(1) 目的関数

$$TD = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T L_i^t \quad (1)$$

$$TL = \sum_{k \in K} \sum_{v=1}^{u^k} \sum_{r \in R} \sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} S_{ij} \cdot y_{ij}^{k,v,r} \quad (2)$$

$$+ \sum_{k \in K} \sum_{v=1}^{u^k} \sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} S_{ij} \cdot \bar{y}_{ij}^{k,v}$$

目的関数(1)は、納期遅れの完成車台数の最小化、目的関数(2)は、総輸送時間の最小化を示している。

(2) 輸送経路パターンに関する制約条件

$$\sum_{r \in R} Z_r^{k,v} \leq 1 \quad (k \in K, v = 1, \dots, u^k) \quad (3)$$

$$\sum_{r \in R} Z_r^{k,v} \geq \sum_{r \in R} Z_r^{k,v+1} \quad (k \in K, v = 1, \dots, u^k - 1) \quad (4)$$

(3) 移動経路に関する制約条件

$$y_{p_i^r, p_{i+1}^r}^{k,v,r} = \begin{cases} 1 & (\text{if } Z_r^{k,v} = 1) \\ 0 & (\text{if } Z_r^{k,v} = 0) \end{cases} \quad (5)$$

$$(k \in K, v = 1, \dots, u^k, r \in R, i = 1, \dots, m_r)$$

$$\bar{y}_{p_{m_{r1}}^r, p_{r2}^r}^{k,v} = \begin{cases} 1 & (\text{if } Z_{r1}^{k,v} = 1 \text{ and } Z_{r2}^{k,v} = 1) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases} \quad (6)$$

$$(k \in K, v = 1, \dots, u^k, r1, r2 \in R)$$

(3) 輸送量に関する制約条件

$$X_i^{k,v,r} \leq W^k \quad (\text{if } Z_r^{k,v} = 1) \quad (7)$$

$$(k \in K, v = 1, \dots, u^k, r \in R, i \in NA_r)$$

$$X_{p_i^r}^{k,v,r} = \sum_{i \in NA_r} O_i^{k,v,r} \quad (\text{if } Z_r^{k,v} = 1) \quad (8)$$

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

$$X_{p_i^r}^{k,v,r} - \sum_{h \in NA_r} O_h^{k,v,r} = X_{p_{i+1}^r}^{k,v,r} \quad (\text{if } Z_r^{k,v} = 1) \quad (9)$$

$$(k \in K, i = 1, \dots, u^k, r \in R, i = 1, \dots, m_r - 1)$$

(4) 到着時間に関する制約条件

$$t_{p_i^r}^{k,v,r} + \alpha_1 \cdot \sum_{h \in NA_r} O_h^{k,v,r} + S_{p_i^r p_2^r} \leq t_{p_2^r}^{k,v,r} \quad (\text{if } Z_r^{k,v} = 1) \quad (10)$$

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

$$t_{p_i^r}^{k,v,r} + \alpha_2 \cdot O_{p_i^r}^{k,v,r} + S_{p_i^r p_{i+1}^r} \leq t_{p_{i+1}^r}^{k,v,r} \quad (\text{if } Z_r^{k,v} = 1) \quad (11)$$

$$(k \in K, v = 1, \dots, u^k, r \in R, i = 2, \dots, m_r - 1)$$

$$t_{p_{m_{r1}}^r}^{k,v_1,r_1} + \alpha_2 \cdot O_{p_{m_{r1}}^r}^{k,v_1,r_1} + S_{p_{m_{r1}}^r p_{r2}^r} \leq t_{p_{r2}^r}^{k,v_2,r_2} \quad (12)$$

$$(\text{if } Z_{r_1}^{k,v_1} = 1 \text{ and } Z_{r_2}^{k,v_2} = 1)$$

$$(k \in K, v_1 = 1, \dots, u^k, v_2 = 1, \dots, u^k, r \in R, i = 1, \dots, m_r - 1)$$

(6) 時間枠に関する制約条件

$$\sum_{l=1}^T ET_l^i \cdot I_{i,l}^{k,v,r} \leq t_i^{k,v,r} \leq \sum_{l=1}^T LT_l^i \cdot I_{i,l}^{k,v,r} \quad (13)$$

$$(k \in K, v = 1, \dots, u^k, r \in R, i \in NA_r)$$

(7) 同時入港制約

$$\sum_{k \in K} \sum_{v=1}^{u^k} \sum_{r \in R} I_{i,l}^{k,v,r} = M_i \quad (i \in N, l=1, \dots, T) \quad (14)$$

(8) 輸送待ち完成車台数に関する制約

$$\sum_{k \in K} \sum_{v=1}^{u^k} \sum_{r \in R} O_i^{k,v,r} = \sum_{l=1}^T D_i^l \quad (i \in N,) \quad (15)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{v=1}^{u^k} \sum_{r \in R} \sum_{l=1}^{tt} I_{i,l}^{k,v,r} \cdot O_i^{k,v,r} \leq \sum_{l=1}^{tt} D_i^l \quad (16)$$

$(i \in N, tt=1, \dots, T)$

$$L_i^t \geq \sum_{tt=1}^t B_i^{tt} - \sum_{tt=1}^t \sum_{k \in K} \sum_{v=1}^{u^k} \sum_{r \in R} I_{i,tt}^{k,v,r} \cdot O_i^{k,v,r} \quad (17)$$

$(i=1, \dots, n, t=1, \dots, T)$

(9) 変数

$$\begin{cases} O_{p_i}^{k,v,r} \geq 0 & (\text{if } Z_r^{k,v} = 1) \\ O_{p_i}^{k,v,r} = 0 & (\text{if } Z_r^{k,v} = 0) \end{cases} \quad (18)$$

$(k \in K, v=1, \dots, u^k, r \in R, i=2, \dots, m_r)$

$$\begin{cases} X_{p_i}^{k,v,r} \geq 0 & (\text{if } Z_r^{k,v} = 1) \\ X_{p_i}^{k,v,r} = 0 & (\text{if } Z_r^{k,v} = 0) \end{cases} \quad (19)$$

$(k \in K, v=1, \dots, u^k, r \in R, i=1, \dots, m_r)$

$$\begin{cases} t_{p_i}^{k,v,r} \geq 0 & (\text{if } Z_r^{k,v} = 1) \\ t_{p_i}^{k,v,r} = 0 & (\text{if } Z_r^{k,v} = 0) \end{cases} \quad (20)$$

$(k \in K, v=1, \dots, u^k, r \in R, i=1, \dots, m_r)$

$$I_{i,l}^{k,v,r} \in \{0,1\} \quad (21)$$

$(k \in K, v=1, \dots, u^k, r \in R, i \in NA, l=1, \dots, T)$

$$L_i^l \geq 0 \quad (i=1, \dots, n, l=1, \dots, T) \quad (22)$$

$$\begin{cases} \sum_{l=1}^T I_{p_i,l}^{k,v,r} = 1 & (\text{if } Z_r^{k,v} = 1) \\ \sum_{l=1}^T I_{p_i,l}^{k,v,r} = 0 & (\text{if } Z_r^{k,v} = 0) \end{cases} \quad (23)$$

$(k \in K, v=1, \dots, u^k, r \in R, i=1, \dots, m_r, l=1, \dots, T)$

#### 4. 輸送計画モデルの解法

本研究で定式化した輸送計画モデルを解くため、目的関数を制約条件に変換するヒューリスティックな手法を提案する[5]。まず、制約条件(3)-(23)のもとで目的関数(1)を最小化する問題の解を求める。次に、求めた目的関数値を用いて、納期遅れの上限值を設定し、目的関数(1)を制約条件に変換する。新たに作成した制約条件と制約条件(3)-(23)のもとで目的関数(2)を最小化する。

#### 5. 数値例

##### 5.1 使用データ

本研究で定式化した輸送計画モデルの特徴を明らかにするために、以下のような数値例を用いる。

(1) 拠点の集合

$$N = \{0, 1, \dots, 4\}$$

(2) 輸送機器の集合

$$K = \{1, 2, 3\}$$

(3) 計画期間

$$T = 10$$

(4) 積み込みおよび積降時間

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.0075$$

(5) 専用船の積載可能量

$$W^1 = 20Q, W^2 = 30Q, W^3 = 20Q$$

(6) 港間の移動時間

各港間の移動時間を表2に示す。

表2 各港間の移動時間

	0	1	2	3	4
0	0.0	23.6	16.1	8.4	8.4
1	23.6	0.0	10.2	18.5	30.7
2	16.1	10.2	0.0	11.0	23.2
3	8.4	18.5	11.0	0.0	15.5
4	8.4	30.7	23.2	15.5	0.0

(7) 積出港および積降港の時間枠

各拠点の時間枠を表3に示す。

表3 各港の時間枠

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
最早	8	32	56	80	104	128	152	176	200	224
最遅	16	40	64	88	112	136	160	184	208	232

(8) 各サービスセンターへの完成車の生産量と納入台数

表4に各サービスセンターへの完成車の生産量と表5に各サービスセンターへの必要納入台数を示す。

表 4 完成車の生産量

港	1	2	3	4	5	6	7	8
1	400			200				
2	200		200		100			
3	200		200			200		
4	100		100		100			

表 5 サービスセンターへの必要納入台数

港	3	4	5	6	7	8	9	10
1	400					200		
2		200			200			100
3	200		200					200
4	100		100		100			

本研究で対象とする輸送計画モデルを解くため、数理計画ソフトウェア FICO Xpress7.3 を用いた [6]。数値計算に使用したパーソナルコンピュータは、Intel Core i7(3.20GHz)、RAM(24GB)である。

表 6 に数値例の計算結果を示す。この表より、各サービスセンターへの完成車の納期を守り、輸送リードタイムが最小となる輸送計画を立案することができる。

## 6. まとめ

本研究では、専用船による完成車の輸送計画を立案することを考え、以下のことを明らかにした。

- (1) 輸送時間と納期を考慮した輸送計画モデルを構築した。
- (2) 数値例を用いて提案したモデルの特徴を明らかにした。

今後の課題としては、ヒューリスティックな解法を提案することなどが挙げられる。

表 6 数値例の計算結果

専用船	期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	港	①	③	①	①	①	①				
	台数	200	-200	200	-200	200	-200				
2	港	①④		①	②	①③	②	①③	①	②	
	台数	100 -100		300	-300	300 -200	-100	200 -200	100	-100	
3	港	①	①			①④					
	台数	200	-200			200 -200					

**謝辞** 本研究は、平成 24 年度科学研究費補助金基盤研究 (C) (課題番号 24510218) の助成による研究成果の一部であることを付記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] マツダ株式会社, 環境に配慮した車づくり 地球温暖化防止 (生産・物流), [http://www.mazda.co.jp/csr/download/pdf/2011/2011\\_d\\_p34.pdf](http://www.mazda.co.jp/csr/download/pdf/2011/2011_d_p34.pdf) (2011)
- [2] スズキ株式会社, ニュースリリース, <http://www.suzuki.co.jp/release/d/d020903b.html>
- [3] Ishihara, Y., Hiraki, S., Xu, Z., Su Y., and Zhang, M., "A Heuristics on Transportation Plan by Pure Car Carriers from Plural Ports", The 5th

International Supply Chain Management Symposium and Workshop (2012)

- [4] Zhang, M., Hiraki, S. and Ishihara, Y., "Ship Scheduling by Pure Car Carriers within Time Windows Considering Multi-objective Functions", 日本ロジスティクスシステム学会誌, Vol.11, No.1, pp.53-62 (2011)
- [5] Ishihara, Y., Hiraki, S., Xu, Z., and Su Y., "A Multi-period Vehicle Routing Problem for Reuse Systems Considering Plural Reuse Bases", Asia-Pacific Journal of Industrial Management, Vol.2, No.2, pp1-10 (2009)
- [6] FICO, Xpress を使用した最適化アプリケーション問題集, MSI 株式会社 (2012)

