

# 石炭ふ頭における荷役運搬システムのORに基づく最適設計

## — モンテカルロ法によるシミュレーション解析 —

阿部 雅二朗\*・伊藤 廣\*

The Optimum Design Based on OR for Materials Handling-Carrying System in Coaling Wharf  
— Simulation Analysis by Monte Carlo Method —

Masajiro ABE and Hiroshi ITO

With the increase of the demand for coal, it has been important to establish the optimum design method for materials handling-carrying system in coaling wharf. In this study, the fundamental theory to find out the optimum design method and the management and operation method for overall materials handling-carrying system in coaling wharf is constructed. This system includes ships, unloader, belt conveyor, stacker and various equipments in coal yard and so on.

In this report, as the first step, an analysis model was made from the investigation results of actual coaling wharf, and a simulation analysis method for materials handling-carrying system was established on the basis of OR theory. In the analysis, Monte Carlo method was used and ships were made to arrive at berth uncertainly. By this method, the arrival and departure state of ships, the working state of materials handling-carrying machines and the storage and transportation state of coal were simulated. The conditions taken into consideration especially in the simulation are the restriction to arrival and departure time of ships, the restriction to operating time of materials handling-carrying machines and the maximum coal storage capacity in yard. Besides, the analysis results were dealt with statistically because materials handling-carrying system in coaling wharf includes many probable factors. From these results, the average number of ships staying in berth, the average waiting time of ships in berth etc. are obtained.

By using this analysis method, the guide to make the distribution plan of ships and the performance and arrangement of materials handling-carrying machines and so on most suitably may be given.

**Key words:** Coaling wharf/Optimum design/Materials handling-carrying system/OR/Monte Carlo method

## 1. 結 言

石炭需要の増大に伴い、石炭を取扱うふ頭の荷役運搬システムに関する最適設計法を確立することが重要となってきている。本研究は、石炭ふ頭において、船舶、アンローダ、コンベア、スタッカリクレーマ、貯炭場内各種施設などを包括した総合的な物流システムの最適設計法及び管理運営方法を見出すための基礎理

論を構築することを目的としている。

本報では、その第一段階として実際の石炭ふ頭の調査結果を基に解析モデルを設定し、ORに基づく荷役運搬システムのシミュレーション解析手法を確立した。解析にはモンテカルロ法を用い、船舶を不確定に到着させることによって、船舶の入出港状況、荷役運搬機械の作動状況及びヤード内における貯炭状況のシミュレーションが行えるようにした。シミュレーションに際して特に考慮される条件は、船舶の入出港時間規制、荷役運搬機械の運転時間規制、ヤードの最大貯炭容量である。なお、石炭ふ頭の物流システムは確率的要因を数多く含むので、解析結果は統計的に処理される。このようにして、船舶の平均在港隻数や平均バー

原稿受付：平成3年5月31日

\*長岡技術科学大学機械系

ス待ち時間などを求めることができる。

本解析手法を用いれば、配船計画や荷役運搬機械の性能及び配置などを最適にするための指針を与えることが可能となる。

## 2. 解析手法

### 2.1 従来のORによるふ頭設計

ふ頭の設計は、従来よりORの基礎理論に基づき行われてきた。これらは通常、船舶を客、バースを窓口とする待ち合わせモデルを用いている。この手法から、設計された石炭ふ頭の評価指標である平均在港隻数  $L$  や平均在港時間  $W$  が理論的に求められる<sup>1)</sup>。待ち合わせモデルの条件が、ポアソン到着・指数分布サービス・バース数を  $S$  としケンドールの記号  $M/M/S$  で表記される場合、平均バース待ち隻数  $Lq$  は

$$Lq = \frac{S^s \rho^{s+1}}{S!(1-\rho)^2} P_0 \quad (1)$$

平均在港隻数  $L$  は

$$L = Lq + a \quad (2)$$

で与えられる。ここで  $P_0$ ,  $\rho$ ,  $a$  は次のように定義される。

$$P_0 = \left\{ \sum_{n=0}^{S-1} \frac{a^n}{n!} + \frac{a^S}{(S-1)!(S-a)} \right\}^{-1} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{a}{S} \quad (4)$$

$$a = \frac{\lambda}{\mu} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{Na \cdot Qa}{Ms} \quad (6)$$

$\rho$  : バース利用率

$\lambda$  : 平均到着率

$\mu$  : 荷役率

$S$  : バースの数

$Ms$  : 1隻あたりの平均石炭積載量

$Qa$  : アンローダの石炭処理能力

$Na$  : 1バースのアンローダ基数

また、平均バース待ち時間  $Wq$ , 平均在港時間  $W$  は、

$$\left. \begin{aligned} Wq &= \frac{1}{\lambda} Lq \\ W &= \frac{1}{\lambda} L \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

で与えられる<sup>2)</sup>。これらの石炭ふ頭の評価指標は、ふ頭設計を左右する大きな因子である。しかし、前述の計

算ではヤードの貯炭容量  $Ym$ , ふ頭構造の特性、荷役時間規制  $\sigma$  などの石炭ふ頭固有の特性は考慮されていないので、十分な解析手法とはいえない。このような場合、モンテカルロ法<sup>3)</sup>は、石炭ふ頭の制限を考慮すると生じる不連続な現象を、挙動を支配する微分方程式の導出をせずに、とらえることができる。このため、モンテカルロ法を用いたシミュレーション解析は、これまでも行われている<sup>4)</sup>が、ヤードの貯炭容量制限を考慮していない場合が多い。そこで、本報ではモンテカルロ法を用い、ヤードの貯炭容量制限を加えて総合的な物流システムを解析できるようにした。

### 2.2 モンテカルロ法によるふ頭設計

図1にモンテカルロ法に基づくシミュレーションの解析フローチャートを示す。図中の(1)~(5)の船舶の挙動について説明する。

#### (1) 石炭運搬船の到着

石炭運搬船は、ポアソン到着すると考える。船舶が時間  $t_i$  の間に  $Ns$  隻到着するならば単位時間 ( $\Delta t$ ) に到着する確率は、平均到着率  $\lambda$  として次式で表現される。

$$\lambda = \frac{Ns}{t_i} \Delta t \quad (8)$$

モンテカルロ法では、単位時間 ( $\Delta t$ ) に船舶が到着したかどうかを次のように判定している。単位時間 ( $\Delta t$ ) ごとに  $1 \sim (t_i/\Delta t)$  の範囲にある乱数を発生させ、その数が  $1 \sim Ns$  の間にある場合、船舶が到着したものととして取扱う。これにより時間  $t_i$  の間に  $\lambda$  の確率で船舶が到着することになる。

#### (2) 入港

入出港が許される時間帯を設定し、それ以外の時間帯  $Tbs$  (時) ~  $Tbf$  (時) に船舶が到着した場合は、入港待ちとして待ち時間  $ta$  を加算する。

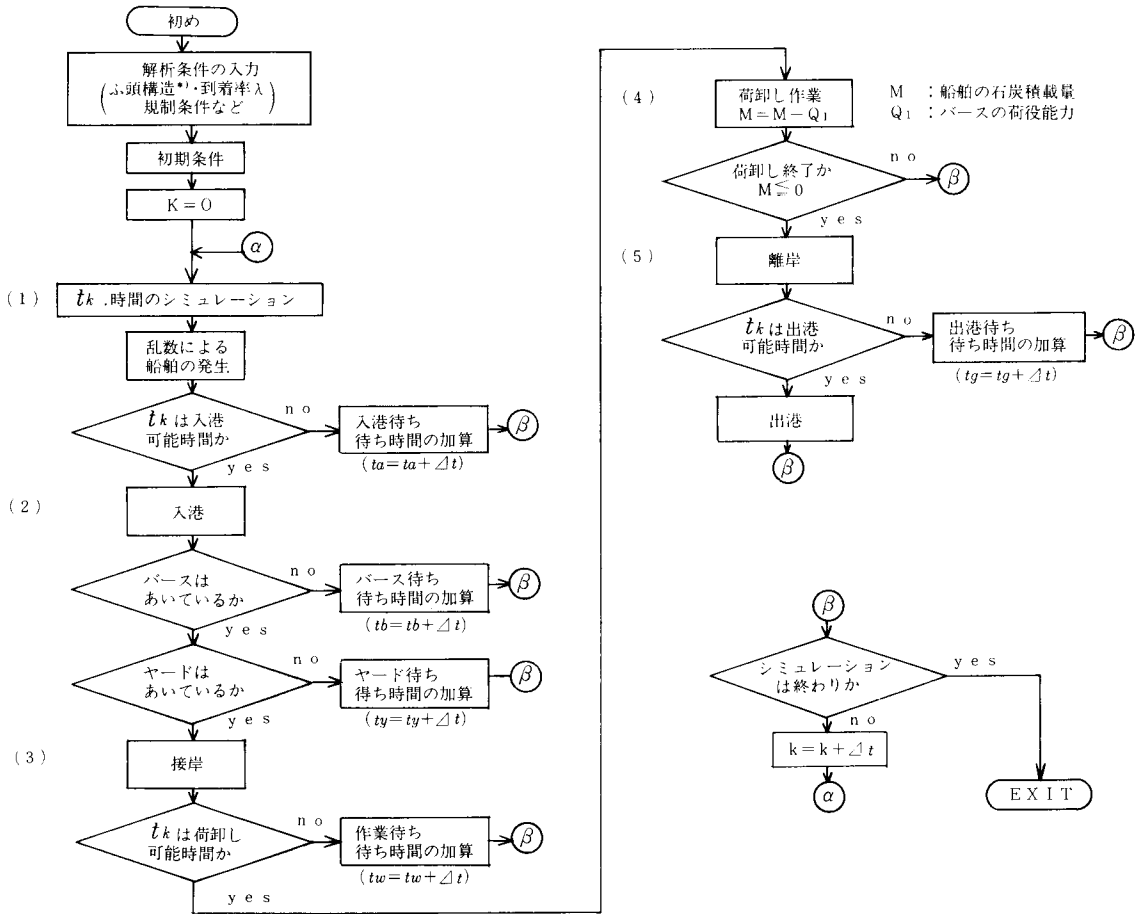
#### (3) 接岸

バースの空きとヤードの空きを確認し、両者が共に空いていない場合には、船舶を接岸待ちとし、待ち時間  $t_b$  と  $t_y$  を加算する。また、両者が共に空いている場合、船舶は接岸する。

#### (4) 荷役作業

石炭の荷卸しが許される時間帯を1日のうち、 $Tms$  (時) ~  $Tmf$  (時) とする。その時間内はバースの単位荷役能力  $Qi$  によって揚炭を行なう。また、 $Tms \sim Tmf$  以外の時間帯、すなわち荷卸しが許されない時間帯は荷役作業待ちとし、待ち時間  $tw$  を加算する。

#### (5) 離岸・出港



\* 各荷役運搬機械の数と処理能力、ヤードの数と貯炭容量

Fig. 1 Simulation analysis flow on the basis of Monte Carlo method

荷役作業が終了したら離岸する。その後、入出港時間規制に基づき出港する。規制時間内ならば出港待ちとし、待ち時間  $t_k$  を加算する。

### 3. 石炭ふ頭設計における主要パラメータ

石炭ふ頭設計に欠かせない主要なパラメータとして次の3項目がある<sup>3)</sup>。

- (1) サービス条件
- (2) ふ頭荷役能力
- (3) ヤードの最大貯炭容量

各項目について説明すると次のようになる。

- (1) サービス条件  
サービス条件とはふ頭オペレータが船舶や払出し先

に対して行う規制である。サービス条件として、1日の入出港規制時間  $T_b$ 、荷役作業規制時間  $T_m$  を用いて入出港時間規制率  $\sigma_b$ 、荷役時間規制率  $\sigma_m$  を次のように表現する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_b &= \frac{T_b}{24} \\ \sigma_m &= \frac{T_m}{24} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

この入出港時間規制率  $\sigma_b$  と荷役時間規制率  $\sigma_m$  は、石炭輸送システムに大きく影響を与えるものである。

- (2) ふ頭荷役能力

ふ頭荷役能力  $Q$  はバースの性能を評価する上で大きな因子である。ふ頭荷役能力  $Q$  は、1バースの単位

時間あたりの荷役能力  $Q_i$  とバース数  $S$  で次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} Q &= Q_i S \\ Q_i &= Q_a N_a \end{aligned} \right\} (10)$$

ふ頭荷役能力  $Q$  は石炭輸送システムで、船舶に対するサービスすなわち待ち時間と在港隻数に影響を与える。

(3) 最大貯炭容量

貯炭容量が小さすぎると、船舶が接岸しても揚炭作業が行えなくなる。石炭の受入れは最大貯炭容量  $Y_m$  によって制限を受ける。

本報では、これらの石炭ふ頭設計の主要なパラメータを与え、それに対する荷役運搬システムの状態を動的に解析する。

4. 解析例

図2は我が国の石炭ふ頭における調査結果をもとに作成したモデルである。ここでは、従来から用いられている待合せモデルで解析できるように条件を単純化し、本報で確立した解析手法を用いて解析する。また、得られたシミュレーション解析値とORの基礎理論による理論値を比較検討することによって、確立した手法の妥当性を検証する。なお、解析条件は次のように単純化する。

- (1) バースに入港可能な船舶のサイズ制限なし
- (2) ヤードの貯炭容量規制なし
- (3) 荷役時間規制なし

(2)の条件については、図2に示す解析モデルを設定する際に代表例として選んだ実際の石炭ふ頭の最大貯炭容量  $0.55 \times 10^6$  [t] を考慮して、 $4.00 \times 10^6$  [t] とすることで対処した。また、解析時間は1年とし、解析時間刻み  $\Delta t$  は1時間とした。同一の条件に対して20回のシミュレーションを行い、それらの平均値を解析値とした。なお、入出港時間規制は  $T_{bs} 17:00 \sim T_{bf} 6:00$  とし、この間入出港できないものとした。シミュレーションは、年間船舶入港隻数と石炭取扱量を入力し実行させた。

表1は、船舶がバースに到着する割合を表すバース利用率  $\rho$  を0.05~0.5まで変化させたときの平均バース待ち時間のシミュレーション解析値と理論値を比較したものである。なお、バース利用率  $\rho$  は式(4)より得られる。表1において、年間入港隻数  $N_s$  と年間揚炭量  $Y_c$  については、前者は入力に対し確率的に正しく船舶が発生しているかを、後者は入力値と一致しているかを検証するために求めたものであり、問題がないことを確認した。最後に示されている平均バース待ち時間が、石炭ふ頭設計評価の指標となる船舶へのサービス状態を示す値である。解析値と理論値はほぼ一致しており、本解析手法を発展させればより複雑なシステム設計に対して有効となるものと考えられる。

5. 結 言

本報ではモンテカルロ法に基づくシミュレーション解析手法を確立した。本手法の特徴は、ヤードの貯炭容量、荷役運搬システムの能力、及び運転計画を考慮できることである。また、本解析手法の妥当性を検証するため単純な条件下で解析を行い、従来用いられて

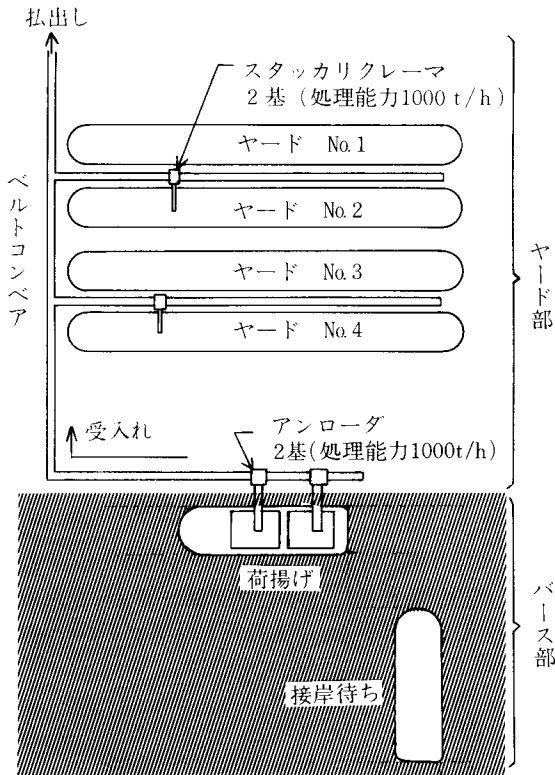


Fig. 2 Coal wharf model

Table 1. The comparison between analytical values and theoretical values

バース 利用率	年間入出港隻数 $N_s$ [隻]		年間揚炭量 $Y_c \times 10^3$ [t]		平均バース待ち時間 $W_q$ [h]	
	解析値	理論値	解析値	理論値	解析値	理論値
0.05	15	15	900	876	1.52	1.58
0.1	29	29	1740	1752	2.94	3.33
0.2	62	58	3720	3504	7.09	7.50
0.3	89	88	5340	5256	11.98	12.86
0.4	115	117	6916	7008	18.81	20.00
0.5	146	146	8776	8760	30.14	30.00

きた OR の基礎理論に基づく理論値と比較し、その有効性を確認した。今後は本解析手法を発展させ、配船及びふ頭設備計画、さらにシステムの管理運営方法などについて検討を行っていく予定である。

最後に、本研究は平成 2 年度文部省科学研究費（国際学術研究・大学間協力研究課題番号 02045016）の助成のもとに実施されたことを付記し、ここに謝意を表す。また、石炭ふ頭の現地調査を快諾いただき貴重な資料を提供していただいた苦東コールセンタ（株）、出光バルクターミナル（株）、中部電力（株）碧南火力発電所、九州電力（株）松浦発電所、宇部興産（株）沖の山コールセンタ、住友重機械工業（株）搬送物流

システム事業部各位の皆様には厚くお礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 牧野都治, 数学ライブラリ 5・OR 入門, pp 129-131, 森北出版 (1979)
- 2) 奥山育英, 笹島博, 早藤能伸, 中井典倫子, 「ポアソン到着待合せモデルの数表」, 港湾技術研究報告書第 13 巻 1 号, (1974)
- 3) 山谷弘幸, 「ふ頭に関する一考察」, 港湾技研資料 No.646 (1989.3)
- 4) 小林竜一, OR 概論, pp 121-122, 共立出版, (1977)