

コンテナ埠頭の最適荷役容量と荷役システムの改善効果*

Optimization of the Capacity of Handling in a Container Terminal for Establishing Efficient Handling Systems

吉澤源太郎**・山田忠史***

By Gentaro YOSHIZAWA and Tadashi YAMADA

1. はじめに

国際海上物流において、コンテナ化と船舶の大型化が進展している。東アジアの海上物流市場の競争は激しく、香港・シンガポールが世界有数の国際港湾に成長した一方で、これら近隣アジア諸国における港湾関連費用が低廉なことなどが原因で、わが国の港湾の相対的な地位低下が危惧されている。わが国の港湾がハブ港湾として今後も発展していくためには、港湾利用者へのサービス水準に配慮しながら、効率的な荷役システムのもとで港湾関連費用を低減させる必要がある。本研究では、コンテナ埠頭の荷役能力を定義し、埠頭で消費される総費用の最小化を評価基準とした最適荷役容量の算定法を提示する。さらに、荷役効率の向上と費用節減の観点から、埠頭における適正な荷役システムについて考察する。

2. 埠頭荷役容量

コンテナ埠頭の荷役システムを評価するためには、埠頭の荷役能力を表す指標を定める必要がある。本研究では、その指標を埠頭荷役容量 ψ (TEU/日)と表現し、式(1)のように定義する。

$$\psi = \xi S \quad (1)$$

ここに、

ξ : バース荷役容量 (TEU/日・バース)

S : 埠頭のバース数

である。なお、 ξ は、式(2)のように定義される。

$$\xi = q\mu = \alpha\eta t_p r X \quad (2)$$

ここに、

q : コンテナ船の平均取扱貨物量 (TEU/隻)

μ : コンテナ船の平均係留率 (隻/日・バース)

α : 20 フィート換算コンテナ個数への変換係数 (TEU/個)

η : クレーンの平均取扱コンテナ数 (個/時間・基)

t_p : バース1日あたりの係留可能時間 (時間/日)

r : 荷役時間率 (=コンテナ船の係留時間に対する荷役時間の比率)

X : バースあたりの稼動クレーン数 (基/バース)

である。したがって、バース荷役容量 ξ は、『平均係留時間 $1/\mu$ のコンテナ船が、バースに係留し続けたときのバース1日あたりの取扱可能貨物量』を意味する。式(1)、(2)から、コンテナ埠頭の荷役能力の向上には η, t_p, r, X, S が関係することがわかる。

3. 最適荷役容量

本研究では、港湾関連費用の抑制に留意し、埠頭荷役容量の最適化基準を、考察対象期間内において埠頭で消費される総費用の最小化とする。埠頭総費用は、バースに関係する費用 (建設費・修繕費・管理費・人件費) と入港して荷役を行うコンテナ船に関係する費用 (建造費・修繕費・燃料費・人件費) の総和とする。これら両費用は、バース数に関してトレードオフの関係にある。埠頭で消費される総費用は次の式から求められる¹⁾。

$$\text{Minimize } C(\psi) = C(\eta, r, S, X)$$

$$= C_b + C_c = c_b S T + c_c \bar{n}(S) T \quad (3)$$

$$\text{Subject to } \eta > 0, S > 0, X > 0, 0 < r \leq 1 \quad (4)$$

$$S \geq \text{現状値 (専用埠頭の場合)} \quad (5)$$

ここに、

C : 埠頭で消費される総費用 (千円)

C_b : 総バース費用 (千円)

*キーワード：ターミナル計画、港湾計画、物資流動

**学生会員、関西大学大学院博士前期課程土木工学専攻

(〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35, TEL/FAX 06-6368-0964, E-MAIL gj0m523@ipc.ku.kansai-u.ac.jp)

***正会員、博士(工学)、広島大学大学院工学研究科

(〒739-8527 広島県市鏡山 1-4-1, TEL 0824-24-7812, FAX 0824-22-7194, E-MAIL yamada@naoe.hiroshima-u.ac.jp)

C_c : 総コンテナ船費用 (千円)

c_b : 1日あたりのバース費用 (千円/日・バース)

c_c : 1日あたりのコンテナ船費用 (千円/日・隻)

T : 考察対象期間 (日)

$\bar{n}(S)$: バース数 S のときの平均在港隻数

なお、式(5)は、各バースの保有船社間の提携を考慮していないために設けられた制約式である。後の計算例で用いられる大阪港のように、専用埠頭が1社あたり1バース保有の場合には、式(5)のように表すことができる。

式(3)の c_b は、次式から求められる。

$$c_b = c_{b1} + c_{b2}X \quad (6)$$

ここに、

c_{b1} : バース1日あたりの整備・管理費用 (千円/日・バース)

c_{b2} : クレーン1基あたりの費用 (千円/日・基)

c_{b2} は、 η の増加に伴って大きくなるものと考えられる。よって、 c_{b2} と η の間には線形関係が成り立っているものと仮定して、港湾クレーンに関するデータを用いて回帰分析を行った。その結果、式(7)に示される関係が成り立つことがわかった。

$$c_{b2} = 5.1\eta + 60.2 \quad (7)$$

以上より、 c_b は、 η, X を説明変数、 c_{b1} をパラメータとする関数で表現できる。 c_{b1} は、バースの計画水深とヤード長が与えられれば算出できる。また、 c_c についても、これらのバース規模が与えられれば、対象船型が規定されるので算定可能となる。

$\bar{n}(S)$ の決定には、待ち行列理論を用いる。その際、船の係留順には First-Come-First-Served(FCFS)ルールを仮定し、分析対象埠頭の各バースは同規模とみなす。大阪港における調査結果から、埠頭内でのコンテナ船の係留行動は、公共埠頭において $M/E_i/S(\infty)$ タイプであること、専用埠頭において $E_k/E_i/S(\infty)$ タイプであることが明らかとなった。したがって、公共埠頭の場合、 $\bar{n}(S)$ は、Cosmetatos²⁾の近似式から、

$$\begin{aligned} \bar{n}(S) = & \frac{a^{S+1}}{(S-1)!(S-a)^2} \left\{ \sum_{n=0}^{S-1} \frac{a^n}{n!} + \frac{a^S}{(S-1)!(S-a)} \right\}^{-1} \\ & \times \left\{ \frac{1+1/l}{2} + \left(1 - \frac{1}{l} \right) \left(1 - \frac{a}{S} \right) (S-1) \frac{\sqrt{4+5S}-2}{16a} \right\} + a \quad (8) \end{aligned}$$

ここに、

a : トラフィック密度

l : 係留時間分布のアーラン次数

と表すことができる。また、専用埠頭の場合、 $\bar{n}(S)$ は、Brumelle³⁾の限界式を用いて、次のように表される。

$$\begin{aligned} \bar{n}(S) \geq & \frac{k(m-l)a^2 + 2kla + l(m-k)}{2klm(1-a)} - \frac{(S-1)(l+1)a}{2lS} + a \\ \bar{n}(S) \leq & \frac{1/kS + \{1/l + (S-1)/S\}a^2}{2(S-a)} + a \quad (9) \end{aligned}$$

ここに、

k : 到着時間間隔分布のアーラン次数

m : バースの遊休時間分布のアーラン次数

である。なお、式(8)、(9)を用いるに際して、次のような平衡条件が成立していなければならない。

$$a/S < 1 \quad (10)$$

また、コンテナ埠頭の取扱貨物量 Q (TEU) と $\bar{n}(S)$ は、次式によって関連づけられる。

$$a = \lambda/\mu = (Q/T)/q/\mu = Q/\xi T \quad (11)$$

ここに、

λ : コンテナ船の平均到着率 (隻/日・バース)

である。上述のモデルにおいて、計算に必要なパラメータは c_{b1}, c_c, k, l, Q, m である。これらの値を入力した上で、バース数 S 、クレーンの平均取扱コンテナ数 η 、稼働クレーン数 X を順次変化させることにより、総費用 C を最小とする S, η, X において得られた埠頭容量が最適埠頭容量である。

待ち行列理論に基づくモデル (理論モデル) は、計算に必要なパラメータが少なく、埠頭計画において実用的であると言えよう。しかし、コンテナ船の各特性値を平均化していることなどから、実際の係留現象を的確に表現できていない可能性がある。そのため、コンテナ船の動態を考慮した待ち行列シミュレーションモデルを構築して、理論モデルの結果と比較する。シミュレーションモデルでは、各コンテナ船 i の係留時間 t_{si} (日) が、式(2)に基づいて、以下の式から、決定される。

$$t_{si} (= 1/\mu) = q_i/\alpha \eta t_p r X \quad (12)$$

ここに、

q_i : 各コンテナ船の取扱貨物量 (TEU/隻)

である。式(12)は、バース荷役容量の向上が係留時間の短縮に繋がることを示している。大阪港における調査結果から、取扱貨物量分布は正規分布に従うことが確認された。よって、 q_i については、大阪港の取扱貨物量分布に基づき、正規乱数を用いて決定することとした。

シミュレーションモデルでは、式(3)に示された総費用式が、次のように表される。

$$C(\psi) = c_b ST + c_c \sum_i^n \{(t_{bi} - t_{ai}) + t_{si}\} \quad (13)$$

ここに、

t_{bi} : コンテナ船*i*の係留開始時刻

t_{ai} : コンテナ船*i*の到着時刻

このとき、制約条件式は次のようになる。

$$t_{si} \geq 0, \quad t_{bi} - t_{ai} \geq 0, \quad S > 0 \quad (14)$$

コンテナ船のバース到着時刻と接岸時間は、同定されたそれぞれの確率分布を基にして、乱数を用いて決定される。シミュレーションモデルの乱数発生回数は100回であり、計算結果にはそれらの平均値を用いることとした。

4. 効率的な荷役システム

理論モデル、および、シミュレーションモデルを大阪港の専用埠頭（専用埠頭1＝単独船社利用、専用埠頭2＝複数船社利用）と公共埠頭に適用した。その際、 $t_p = 24$ （時間）、 $c_{bi} = 708$ （千円／日・バース）（ただし、水深13m、ヤード長300mとする。）、 $c_c = 5,260$ （千円／日・隻）（ただし、対象船型35,000DWT）、 $T = 91$ （日）、 $Q = 42,558$ （TEU）（専用埠頭1）、41,328（TEU）（専用埠頭2）、297,477（TEU）（公共埠頭）とした。また、大阪港のデータより、計算に必要な、コンテナ船の到着特性と係留特性は、表-1の通りである。

表-2は、クレーンの平均取扱コンテナ数 η 、稼働クレーン数 X 、および、荷役時間率 r を現状値に設定して、大阪港の各埠頭の最適バース数を求めた結果である。このとき、現状の埠頭荷役容量は、専用埠頭において2,965（TEU／日、専用埠頭1）、2,545（TEU／日、専用埠頭2）、公共埠頭において8,466（TEU／日）と算定された。

専用埠頭では、最適バース数は現状のバース数に一致した。しかし、現地調査では、専用埠頭において遊休に伴う非効率的なバース利用が確認されている。この計算結果には、式(5)の制約条件が影響を及ぼしているものと推察される。

一方、公共埠頭においては、現状では7バース設置されているが、最適バース数は、理論モデルで5

表-1 コンテナ船の到着・サービス特性

	専用埠頭1	専用埠頭2	公共埠頭
λ （隻／12.5時間）	0.49	0.60	3.87
k	2	3	1
μ （隻／4時間・バース）	0.37	0.58	0.42
l	2	9	7
m	1	2	1

表-2 現状の η, X, r における最適バース数

		専用埠頭 1	専用埠頭 2	公共埠頭
η (個/時間・基)		30		
X (基/バース)		2		1.4
r		0.480	0.618	0.839
S	現状	3	2	7
	最適 (理論モデル)	3	2	5
	最適 (シミュレーション)	3	2	6

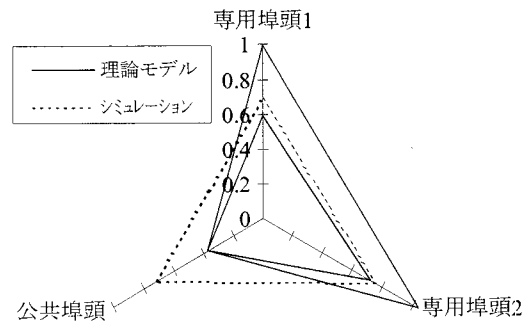


図-1 埠頭総費用の節減効果

バース、シミュレーションモデルで6バースであると算定された。公共埠頭では、すべてのバースでいつでも荷役が行われているわけではなく、時間帯によってはバースが遊休状態であることが現地調査によって確認された。そのことを考慮すれば、モデルによって算定された最適バース数は、ほぼ妥当な結果であると考えられる。

次に、埠頭容量が最適になるような荷役システムを調べることにした。表-3は、埠頭荷役容量が最適化されたときの η, X, S を示しており、図-1は、そのときの費用節減効果を視覚的に示したものである。図-1では、現状の総費用を1としたときの相対的な値が示されている。なお、現実的な設定下において計算を行うために、 $\eta \leq 40, X \leq 3$ とした。

表-3 最適埠頭荷役容量における荷役システム

		専用埠頭1	専用埠頭2	公共埠頭
η	現状	30		
	最適解	理論モデル	40	40
		シミュレーション	40	40
X	現状	2		1.4
	最適解	理論モデル	3	3
		シミュレーション	3	3
S	現状	3	2	7
	最適解	理論モデル	3	2
		シミュレーション	3	4

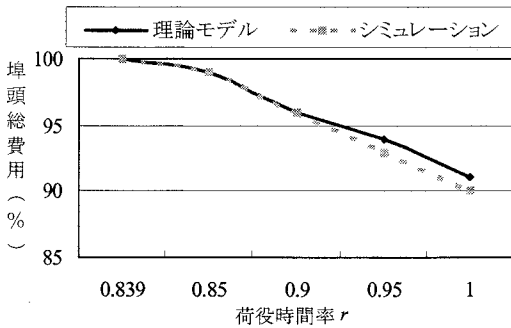


図-2 荷役時間率による埠頭総費用の変化

表-3および図-1より、最も高性能なバースクレ-ンを十分に稼働させた上で、バース数を削減することが、費用節減に効果的であることが窺える。このとき、埠頭荷役容量を現状と比較すると、専用埠頭1において2.0倍、専用埠頭2において2.0倍、公共埠頭において1.6倍(シミュレーションモデル)、0.8倍(理論モデル)であった。

式(2)、(3)から、荷役時間率 r が1に近づくほど、荷役容量が増加することが推察される。 r を増大させる要因は、夜間の荷役規制解除や燃料補給作業の短縮など様々である。本研究では、現在、特に整備の重要性が指摘されている貿易手続きのEDI(Electronic Data Interchange)化に焦点を当て、荷役時間率が上昇することの効果について考察する。

c_b はEDI導入に伴い変化する。その変化量を Δc_{EDI} (千円/日・バース)と表すと、 c_b は次のように表される。

$$c_b = c_{b1} + c_{b2}X + \Delta c_{EDI} \quad (15)$$

なお、 Δc_{EDI} は、具体的には次のように概算される⁴⁾。

$$\Delta c_{EDI} = +8.5 \quad (16)$$

実際には、 r の値と Δc_{EDI} の関係は明確でない。よ

って、本稿では、 r の大きさによらず Δc_{EDI} が一定であるとして、EDIの導入効果を調べた。

図-2は、EDI導入に伴う r の変化と費用節減効果を示したものである。 r が現状値の時の埠頭総費用を100とした場合の、 r の変化に対する埠頭総費用の変動が示されている。なお、ここでは、EDIの整備が立ち遅れている公共埠頭を対象とし、 η, X, S は現状のままであると仮定している。また、EDIシステムを導入した場合の接岸時間分布が明確でないので、分析に際しては、導入しない場合の分布型を代用した。図-2は、 r の増大により総費用が減少すること、 r が1になると総費用が約10%抑制されることを示している。なお、 $r=1$ のとき、埠頭荷役容量を現状と比較すると、専用埠頭1において2.1倍、専用埠頭2において1.6倍、公共埠頭において1.2倍であった。

5. おわりに

本研究では、埠頭の荷役容量に注目し、適正な荷役能力を決定する方法を提案した。また、発生費用の抑制に留意しながら、コンテナ埠頭の荷役効率向上に寄与する荷役機能についても考察した。

ただし、計算に際して、クレーン能力を向上させるための開発費、クレーン設置・撤去の初期投資費用を考慮していないため、クレーンによる荷役システムを過大評価している点是否めない。

また、公共埠頭において、最適荷役容量および最適バース数が、理論モデルとシミュレーションモデルで相違した。この理由については、 $\bar{n}(s)$ を決定する際に利用する近似式が専用埠頭の場合と異なることも踏まえて、今後の検討課題としたい。

最後に、本研究は、故則武通彦先生の長年に渡る研究成果に着想を得たものである。ここに記して、先生のご冥福をお祈りいたします。

【参考文献】

- 1) 則武通彦：公共埠頭における最適バース数の決定に関する研究，土木学会論文集，No.278，pp.113-122，1978。
- 2) Cosmetatos, G.P : Some approximate equilibrium results for multi-server queue (M/G/r), Operational Research Quarterly, Vol.27, No3, i, pp.615-620, 1976。
- 3) Kleinrock, L.: Computer applications -Queuing systems-, Wiley, 1976。
- 4) 水尻正英：物流EDI—大競争時代を生き残るために—，運輸政策研究機構，1998。