

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*

Optimising the Handling Capacity in a Container Terminal for Establishing Efficient Handling Systems*

山田忠史**・吉澤源太郎***

By Tadashi YAMADA・Gentaro YOSHIZAWA

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。わが国の港湾の機能維持と発展に向けて、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。また、東アジア諸国では、大型国際港湾において、より効率的な港湾運営が必要とされており、国際港湾の未整備国では、国際コンテナ港湾の整備が計画されており、港湾荷役の効率化の必要性は高い^[1]。

このような状況を踏まえ、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。この手法を用いて、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。

コンテナ埠頭計画に関する研究は、バーススケジューリング、ヤード荷役、岸壁荷役などについて、これまで行われてきた。本研究は、この中で、岸壁荷役の研究に相当する。岸壁荷役システムについて検討した既存研究は数多い。その代表的な方法論は、港湾における入港船の到着および係留現象を、待ち行列モデルに基づいて記述するものである。その先駆的な研究は、長尾ら^[1]の研究まで遡り、奥山ら^[2]、則武ら^[3,4]、山谷^[5]、Daganzo^[6]、Pasquale et al.^[7]などが発展させてきた。これらの既往研究は、コンテナ船の係留行動をモデル化し、港湾内の発生費用の抑制に留意した公共ターミナルにおける最適バース数決定法を開発した点などで、大きな成果を残したといえる。しかし、これらの既往研究にはいくつかの問題点が含まれている。それらを踏まえた上で、本研究の特色を列挙すれば、①埠頭の荷役能力を明示し、その最適点を求めていること、②クレーン数や荷役時間率など、コンテナバースの荷役能力特性をモデルに内包していること、③

コンテナ船の到着について、指数到着以外の到着特性を考慮していること、④待ち行列解析の際に使用する近似式を見直していること、⑤入力変数が少なく計算が容易な、待ち行列理論に基づくモデル（以下、理論モデルと称する）と、入力変数が多いが、操作性が高く分析範囲の広い待ち行列シミュレーションに基づくモデル（以下、シミュレーションモデルと称する）の双方を構築し、結果を比較していることが挙げられる。

また、近年、本船の寄港や国際港湾の取扱貨物量を予測する手法^[8-11]が提案されているが、これらの研究において、港湾内の船舶行動が十分に考慮されているとは言えない。本研究で提案する手法は、国際コンテナ航路モデルに組み込まれることで、国際コンテナ航路の予測にも寄与する可能性を有する。

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 : コンテナ埠頭のバース数

である。なお、 ξ は、式(2)のように定義される。

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

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 : 20ft換算コンテナ個数への変換係数 (TEU/個)

η : ガントリークレーンの単位時間あたりの平均取扱コンテナ数 (個/時間・基)

t_p : バースの係留可能時間 (時間/日)

r : 荷役時間率 (=係留可能時間に対する荷役時間の比率)

X_u : 稼動ガントリークレーン数 (基/バース)

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

*Keywords : 港湾計画, ターミナル計画, 物流計画

**正会員, 博士 (工学), 広島大学大学院工学研究科

(東広島市鏡山 1-4-1, TEL/FAX:0824-24-7812,

E-mail: yamada@naoehiroshima-u.ac.jp)

***正会員, 修士 (工学), 大阪市

取扱可能貨物量』を意味する。

3. 最適荷役容量

本研究では、埠頭荷役容量の最適化基準を、港湾関連費用の抑制に留意し、考察対象期間内において埠頭で消費される総費用²⁾の最小化³⁾とする。埠頭総費用は、バースに関係する費用（バースや荷役システムの建設費・修繕費・管理費・人件費など）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・人件費など）の総和とする。これら両費用は、バース数や荷役システムに関してトレードオフの関係にある。

埠頭総費用は、次の式から求められる。

$$\begin{aligned} \text{Minimize } C(\eta) &= C(\xi, S, \eta, X) \\ &= C_b + C_c = c_b(\eta, X)ST + c_c \bar{n}(\xi, S)T \quad (3) \\ \text{Subject to } S &\geq \text{現状値 (公社ターミナルの場合)} \quad (4) \\ [X_u] + 1 &\leq X \quad (5) \\ \eta > 0, S > 0, X_u > 0, 0 < r &\leq 1 \quad (6) \end{aligned}$$

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)

C_c : 総コンテナ船費用 (千円)

c_b : 単位バース費用 (千円/日・バース)

c_c : 単位コンテナ船費用 (千円/日・隻)

T : 考察対象期間 (日)

$\bar{n}$: コンテナ船の平均在港隻数

X : 設置ガントリークレーン数 (基/バース)

コンテナ埠頭は、特定の船社に専用貸しされている公社ターミナルと不特定多数の船社が利用する公共ターミナルの2種に大別できる。式(4)は、各バースの利用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、公社ターミナルが1社あたり1バース保有の場合には、式(4)のように表すことができる。また、式(5)は、ガントリークレーンの移動数が設置数を上回らないための制約式である。

式(3)~(6)で表された数理計画問題において、 η, r, X_u, S を順次変化させることにより、最適な荷役システム、すなわち、総コスト C を最小とする η, r, X_u, S が求まる。これらの最適値より得られた荷役容量が最適荷役容量である。なお、 c_b は、次式から求められる。

$$c_b = c_{b1} + c_{b2}X \quad (7)$$

ここに、

c_{b1} : バースの整備・管理費用 (千円/日・バース)

c_{b2} : ガントリークレーン費用 (千円/日・基)

c_{b2} は、 η の増加に伴って増大するものと考えられる。よって、港湾クレーンに関するデータ^{12,13)}を用いて線形回帰分析を行った結果、 c_{b2} と η の間には、式(8)のような

関係が明らかになった。

$$c_{b2} = 5.1\eta + 60.2 \quad (8)$$

以上より、 c_b は、 η, X と c_{b1} を用いて表現できる。 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、対象船型が規定されれば、算定可能である。

4. 平均在港隻数の導出

式(3)の平均在港隻数 $\bar{n}$ 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。 $\bar{n}$ は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \bar{n}(\xi, S) &= \sum_{n=0}^{\infty} n P_n(\xi, S) = \sum_{n=0}^S n P_n(\xi, S) + S \sum_{n=S+1}^{\infty} P_n(\xi, S) \\ &\quad + \sum_{n=S+1}^{\infty} (n-S) P_n(\xi, S) = \bar{n}_m(\xi, S) + \bar{n}_w(\xi, S) \quad (9) \end{aligned}$$

ここに、

n : コンテナ船の到着隻数

P_n : n 隻のコンテナ船が在港する確率

$\bar{n}_m$: コンテナ船の平均係留隻数 (隻)

$\bar{n}_w$: コンテナ船の平均係留待ち隻数 (隻)

トラフィック密度と平均係留隻数には、次のような関係がある。

$$\begin{aligned} a(\xi) &= \lambda/\mu = (Q/T)/q/\mu = Q/\xi T \\ &= \xi T \left\{ \sum_{n=0}^S n P_n(\xi, S) + S \sum_{n=S+1}^{\infty} P_n(\xi, S) \right\} / \xi T = \bar{n}_m(\xi, S) \quad (10) \end{aligned}$$

ここに、

a : トラフィック密度

λ : コンテナ船の平均到着率 (隻/日・バース)

Q : 考察対象期間内の埠頭取扱貨物量 (TEU)

したがって、 $\bar{n}$ は、次のように表される。

$$\bar{n}(\xi, S) = a(\xi) + \bar{n}_w(\xi, S) \quad (11)$$

式(10)、(11)は、コンテナ埠頭の取扱貨物量と平均在港隻数の関係も表している¹³⁾。

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、公共ターミナルにおいて $M/E_1/S(\infty)$ 型¹⁴⁾であること、公社ターミナルにおいて $E_k/E_1/S(\infty)$ 型であることが明らかとなった。既存の研究^{3,4,14)}においては、 $M/E_1/S(\infty)$ タイプの場合、 $\bar{n}_w$ の算定に Lee-Longton¹⁵⁾の近似式や Cosmetatos¹⁶⁾の近似式が採用されており、Cosmetatosの近似式の精度が高いことが示されている³⁾。

$$\begin{aligned} \text{Cosmetatos の近似式を用いた場合、} \bar{n}_w^{[15]} \text{は、} \\ \bar{n}_w(\xi, S) &= \frac{a^{S+1}}{(S-1)!(S-a)^2} \left\{ \sum_{n=0}^{S-1} \frac{a^n}{n!} + \frac{a^S}{(S-1)!(S-a)} \right\}^{-1} \\ &\quad \times \left\{ \frac{1+1/l}{2} + \left(1 - \frac{1}{l} \right) \left(1 - \frac{a}{S} \right) (S-1) \frac{\sqrt{4+5S-2}}{16a} \right\} \quad (12) \end{aligned}$$

ここに、

l : コンテナ船の係留時間分布のアーラン次数
 となる。しかし、式(12)は、 $E_k/E_l/S(\infty)$ タイプの $\bar{n}_w$ の算定には使用できない。そこで本研究では、 $E_k/E_l/S(\infty)$ 型における $\bar{n}_w$ の算定に、Kimura^{17,18)} の近似式を使用する。Kimura^{17,18)} の近似式を用いると、 $\bar{n}_w$ は次のように表される。なお、 $\bar{n}_w[\cdot]$ は、各待ち行列型における平均係留待ち隻数を表す。

$$\bar{n}_w(\xi, S) \equiv \frac{b(1/k + 1/l)}{\frac{2(1/k + 1/l - 1)}{\bar{n}_w[M/M/S]} + \frac{1 - 1/l}{\bar{n}_w[M/D/S]} + \frac{b_{01}(1 - 1/k)}{\bar{n}_w[D/M/S]}} \quad (13)$$

$$b \equiv b\left(S, a, \frac{1}{k}, \frac{1}{l}\right) = \exp\left\{-\frac{2(S-a)}{3a} \cdot \frac{l(k-1)^2}{k(k+l)}\right\} \quad (14)$$

$$b_{01} \equiv b_{01}(S, a, 0, 1) = \exp\left\{-\frac{2(S-a)}{3a}\right\} \quad (15)$$

$$\bar{n}_w[M/M/S] = \begin{cases} \frac{a^{S+1}}{(S-1)!(S-a)^2} \left\{ \sum_{n=0}^{S-1} \frac{a^n}{n!} + \frac{a^S}{(S-1)!(S-a)} \right\}^{-1}, & S \geq 2 \\ \frac{a^2}{1-a}, & S=1 \end{cases} \quad (16)$$

$$\bar{n}_w[M/D/S] = \begin{cases} \frac{1}{2} \{1 + f(S)g(S, a)h(S, a)\} \bar{n}_w[M/M/S], & S \geq 2 \\ \frac{1}{2} \bar{n}_w[M/M/1] & S=1 \end{cases} \quad (17)$$

$$f(S) = \frac{(S-1)(\sqrt{4+5S}-2)}{16S} \quad (18)$$

$$g(S, a) = (S-a)/a \quad (19)$$

$$h(S, a) = \sqrt{1 - \exp\left\{-\frac{2\beta(S, a)}{S-1}\right\}} \left\{1 - \exp\left\{-\frac{\gamma(S)}{g(S, a)}\right\}\right\} \quad (20)$$

$$\beta(S, a) = \frac{25.6}{\{g(S, a)\}^2 \left\{1 - \exp\left\{-\frac{1}{g(S, a)} \sqrt{\frac{25.6}{\theta}}\right\}\right\}^2} \quad (21)$$

$$\gamma(S) = \frac{S-1}{(S+1)f(S) \sqrt{1 - \exp\left\{-\frac{2\theta}{S-1}\right\}}} \quad (22)$$

$$\bar{n}_w[D/M/S] \equiv \frac{1}{2} \max\{(1-4f(S)g(S, a))b_{01}, 10^{-6}\} \bar{n}_w[M/M/S] \quad (23)$$

ここに、

k : コンテナ船の到着時間間隔分布のアーラン次数

なお、式(21)、(22)において $\theta = 2.2$ である^{17,18)}。Kimura の近似式は、バース数 S 、トラフィック密度 a 、到着分布のアーラン次数 k 、係留時間分布のアーラン次数 l の陽関数で表現されているので、実際には、算定が容易である。

本研究では、Kimura の近似式の精度を確かめるために、比較対象として、 $\bar{n}_w$ を区間推定する Brumelle¹⁹⁾ の限界式を取り上げる。Brumelle¹⁹⁾ の限界式を用いれば、 $\bar{n}_w$ は次のように表される。

$$\begin{aligned} \bar{n}_w(\xi, S) &\geq \frac{k(d-l)a^2 + 2kla + l(d-k)}{2kla(1-a)} - \frac{(S-1)(l+1)a}{2lS} \\ \bar{n}_w(\xi, S) &\leq \frac{1/kS + \{1/l + (S-1)/S\}a^2}{2(S-a)} \end{aligned} \quad (24)$$

ここに、

d : バースの遊休時間分布のアーラン次数

なお、 $\bar{n}_w$ に関して、いずれの式を用いても、次の平衡条件が成立していなければならない。

$$a/S < 1 \quad (25)$$

Kimura の近似式を用いた理論モデルの場合、最適荷役容量を求めるのに必要な入力変数は、 $\alpha, t_p, r, c_b, c_c, l, k, Q$ のみである。理論モデルは、計算に必要なパラメータが少ないので、特に、計算資源に乏しい場合や、入力データの確保が多岐には期待できない場合¹⁰⁾ には、埠頭整備計画において実用的であると考えられる。

5. シミュレーションモデル

理論モデルでは、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。理論モデルの妥当性を調べるには、待ち特性量の実測値と推計値を比較する必要があるが、現地調査では、現状のコンテナ船の待ち特性量を計測することはできなかった。そのため、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した⁷⁾。理論モデルと比較して、シミュレーションモデルの利点は、a) コンテナ船の到着や係留に関して分布型の制約を受けないこと、b) 到着率や係留時間の期間変動を考慮できること、c) 式(25)に示された平衡状態を満たさない過渡的な状況を考慮できることなどがある。シミュレーションモデルの計算手順は、次の通りである。

- ① バースへの各コンテナ船の到着時刻を、外生的に与えた確率分布を基にして、乱数を用いて決定する。
- ② 各コンテナ船の係留時間 t_{si} は、バース荷役容量の定義式(2)に基づいて、以下の式から決定される。

$$t_{mi} = \frac{q_i}{\xi} = \frac{q_i}{\alpha \eta t_p r_i X_{ui}} \quad (26)$$

ここに、

i : コンテナ船番号

t_{mi} : コンテナ船 i の係留時間 (日)

q_i : コンテナ船 i の取扱貨物量 (TEU/隻)

r_i : コンテナ船 i の荷役時間率

X_{ui} : コンテナ船 i に対する稼働ガントリークレーン数 (基/バース)

- ③ コンテナ船の到着時刻以前にバースが使用可能ならば、到着時刻をコンテナ船の係留開始時刻とする。
- ④ コンテナ船の到着時刻以前にバースが使用不可能ならば、バースが使用可能となる時刻をコンテナ船の係留開始時刻とする。
- ⑤ コンテナ船が係留していないバースがあれば、コンテナ船は直ちに、先着順に係留する。空きバースがなければ 1 列に待ち行列を形成する。
- ⑥ コンテナ船の係留終了時刻を、そのバースの使用可能

時刻に設定する。

- ⑦ 係留後のコンテナ船は、直ちにバースを離れる。

シミュレーションモデルの乱数発生回数は 100 回であり、100 回の各計算の平均値を計算結果として用いた。なお、大阪港における調査結果から、取扱貨物量分布はアーラン分布（次数を j で表す）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、アーラン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。

$$C(y) = c_b(\eta, X)ST + c_c \sum_{i=1}^n \{(t_{bi}(\xi, S) - t_{ai}) + t_{mi}(\xi, S)\} \quad (27)$$

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。

$$t_{mi} > 0, t_{bi} - t_{ai} \geq 0, \eta > 0, S > 0, X_u > 0, 0 < r \leq 1 \quad (28)$$

シミュレーションモデルに必要な入力変数は、 $\alpha, t_p, c_b, c_c, k, q_i, r_i, X_{ui}, j$ である。

6. 現状再現性

理論モデル、および、シミュレーションモデルを大阪港の公社ターミナル（単独船社への専用貸しバースのみで構成される埠頭を公社ターミナル 1 とし、複数船社への専用貸しバースのみで構成される埠頭を公社ターミナル 2 として、以下に区別する。）と公共ターミナルに適用した。1999 年の大阪港のデータより、コンテナ船の到着特性と係留特性は、表-1 の通りである。また、大阪港のデータと既存の研究²⁰⁾を利用して、 $\alpha=1.43, t_p=24$ (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。), $c_c=1714$ (千円/日・隻) (ただし、対象船型 3000(TEU)), $T=91$ (日), $Q=128$ (千 TEU) (公社ターミナル 1), 83 (千 TEU) (公社ターミナル 2), 297 (千 TEU) (公共ターミナル) と設定した。

はじめに、理論モデルの比較対象となるシミュレーションモデルの現状再現性を調べる。コンテナ船の到着隻数と係留時間²¹⁾について、実測値と推定値（100 回の計算の平均値）を比較した結果が、それぞれ図-1 と図-2 である。現状値とシミュレーションによる推定値がほぼ一致している。また、他のターミナルについても同様の結果が得られている。これらのことから、シミュレーションモデルは、コンテナ船の待ち特性量の再現に優れていることが推察される。

次に、理論モデルの現状再現性を調べるために、理論モデルとシミュレーションモデルから算出される平均係留待ち時間を比較する。また、 $\bar{n}_w$ に Kimura の近似式を用いることの妥当性を調べるために、 $\bar{n}_w$ に Brumelle の限界式や Cosmetatos の近似式を用いた場合と比較する。

平均係留待ち時間の算定結果（表-2）から、Kimura

表-1 コンテナ船の到着・サービス特性

	公社 ターミナル1	公社 ターミナル2	公共 ターミナル
λ (隻/12.5 時間)	1.47	1.2	3.87
j	3	9	7
k	2	3	1
μ (隻/4 時間・バース)	0.37	0.58	0.42
l	2	9	7
d	1	2	1

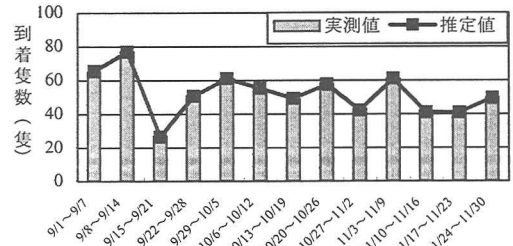


図-1 到着隻数の推移（公共ターミナル）

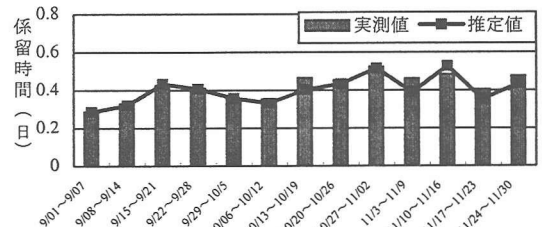


図-2 係留時間の推移（公共ターミナル）

表-2 平均係留待ち時間の比較（単位：日）

	Kimura	Cosmetatos	Brumelle		シミュレーション
			上限値	下限値	
公共	0.018	0.013	0.226	1.850	0.053
公社1	0.139	—	0.250	0.589	0.133
公社2	0.011	—	0.082	0.225	0.090

の近似式を用いた結果が、相対的にシミュレーション値に近いことが窺える。公社ターミナル 2 や公共ターミナルの結果が、シミュレーション値とやや乖離しているが、その原因は、これらのターミナルでは、コンテナ船到着の期間変動が激しいことが考えられる。

一方、Brumelle の限界式は、上下限の幅が広く、シミュレーション値が上下限の範囲内に収まっていないターミナルもある。また、既往の研究³⁴⁾で使用されてきた Cosmetatos の近似式は、平均係留待ち時間を過小に算定する傾向にある。これらの結果と入力変数の少なさを考慮すれば、Kimura の近似式を用いた理論モデルは十分な実用性があると言える。

7. 効率的な荷役システム

埠頭荷役システムの効率化について検討するために、

表-3 最適埠頭荷役容量における荷役システム

		公社 ターミナル1	公社 ターミナル2	公共 ターミナル
η	現状	30		
	最適解	40		
X_u	現状	2	1.98	1.33
	最適解	2		3
S	現状	3	2	7
	最適解			2

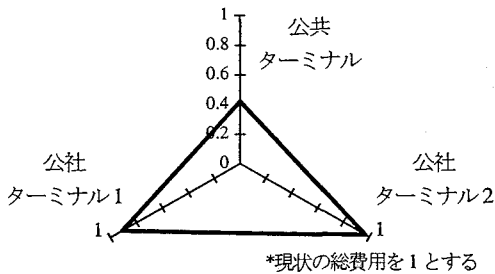


図-3 埠頭総費用の節減効果

Kimuraの近似式を採用した理論モデルを用いて、埠頭容量が最適になるような、大阪港の荷役システムを調べた。このとき、 r は現状値とし、現実的な設定下において計算を行うために、 $\eta \leq 40$ 、 $X_u \leq 3$ とした。

表-3は、埠頭荷役容量が最適化されたときの η 、 X_u 、 S を示しており、図-3は、そのときの費用節減効果を示している。表-3および図-3より、高性能なガントリークレー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。特に公共ターミナルでは、現状において7バース設置されているが、最適バース数は2バースと算定された。バース数が大幅に削減される結果となったが、ガントリークレーンが高性能化していること、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確認されていることを考慮すれば、算出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。

一方、公社ターミナルでは、バース数は現状のままとなり、費用抑制効果も小さい。この結果には、式(4)の制約条件、すなわち、バースの専用利用形式に強く影響されている。公社ターミナルが、公共ターミナルと同じく共同利用方式になれば、最適バース数が減少し、費用がさらに抑制されるものと推測される。

表-4は、このときのバース荷役容量 ξ と埠頭荷役容量 ψ を示している。荷役システムの改善により、どのターミナルでもバース荷役容量が増大している。公共ターミナルでは、バース数の大幅な削減のために埠頭荷役容量は減少しているが、バース荷役容量は大幅に増加している。バースの遊休を考慮すれば、現状の荷役能力は過

表-4 バース荷役容量と埠頭荷役容量

		公社 ターミナル1	公社 ターミナル2	公共 ターミナル
ξ	現状	1.10	1.31	1.10
	最適解	1.46	1.77	3.30
ψ	現状	3.29	2.63	7.68
	最適解	4.38	3.54	6.60

表-5 港湾EDI化に伴う荷役時間率の変化

		公社 ターミナル1	公社 ターミナル2	公共 ターミナル
現状		0.532	0.644	0.801
EDI導入後		0.693	0.884	0.923

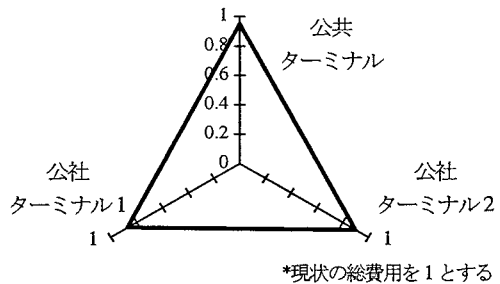


図-4 EDIの導入による埠頭総費用の変化

剩気味であること、バースの荷役能力向上が荷役システム効率化に有効であることを、この結果は示している。

ところで、式(2)、(3)から、荷役時間率 r が1に近づけば、荷役容量が増加することがわかる。そこで、 r を増大させる要因として、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) 化に注目し、荷役時間率の上昇効果について考察する。

単位バース費用 c_b はEDIの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。

$$c_b = c_{b1} + c_{b2}X + \Delta c_{EDI} \quad (29)$$

なお、以降の計算において、 $\Delta c_{EDI} = 8.5^{(2)}$ とする。

EDIの導入による荷役時間率の増大の一因として、出港手続きの円滑化に伴う離岸待ち時間の減少が考えられる。表-5には、現状の係留時間の実測値を基にして、離岸待ち時間を減じた場合の荷役時間率の算出結果が示されている。

図-4は、表-5に示されたEDI導入後の荷役時間率を用いて、式(3)に示された総費用を計算した場合の、費用節減効果を示したものである。荷役時間率の増分に準じて、公社ターミナル1では約13%、公社ターミナル2では約10%、公共ターミナルでは約5%の費用節減効果が得られている。公社ターミナルの荷役時間率の増大、および、それに伴う費用の節減は、公社ターミナルでの離岸待ちに伴う非効率性の存在を示唆している。なお、このとき、バース荷役容量と埠頭荷役容量は、荷役時間率の上昇分だけ増大することになる。

8. おわりに

本研究では、コンテナ埠頭の荷役容量に注目し、埠頭で消費される総費用の最小化を評価基準とした、適正な荷役システムを決定する方法を提案した。この手法を用いて、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方策についても検討した。入力変数が少なく計算が容易な、待ち行列理論を適用したモデルを構築し、計算精度をシミュレーションモデルと比較することにより、その妥当性を確認した。この手法を既存の港湾に適用した結果、荷役システムを効率化するためには、バース数を削減し、高性能なガントリークレーンを十分に稼働させることが有効であるとの知見を得た。また、港湾 EDI の導入により、離岸待ち時間が抑制されれば、コスト削減に効果的であることを示した。

本研究では、今後の港湾整備に関するケーススタディが十分に行われていない。分析シナリオに応じて、本研究で示した理論モデルとシミュレーションモデルを適宜、適用することにより、例えば、公社ターミナルの共同利用、港湾利用料金の低廉化、寄港船舶の大型化などの影響について検討する必要がある。

本研究は、故則武通彦先生（関西大学教授）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。また、吉川和広先生（京都大学名誉教授）のご助言と、大阪市港湾局各位の多大なるご協力に対して、深謝いたします。なお、本研究の成果の一部は、日本学術振興会科学研究費基盤研究(A)(2)の助成に基づくものであり、ここに記して、謝意を表します。

【補注】

- [1] 激しい国際競争の中で、荷役システムの効率化を図ることは、間違いなく重要である。しかし、コンテナ埠頭の計画が荷役容量のみによって規定されるわけではない。実際のコンテナ埠頭の計画に際しては、マーシャリングヤードやトランスファーヤードの整備についても検討する必要がある。
- [2] コンテナ埠頭で消費される費用には本来、ヤード荷役も含まれるべきであろう。したがって、本研究の場合、正確には、“岸壁荷役関連の総コスト”である。ただし、既存の岸壁荷役の研究に倣い、本研究では、“埠頭で消費される総費用”と記述した。
- [3] つまり、本研究では、取扱貨物量を与件として、最適な荷役システムを算定しているので、本手法から得られた荷役システムの算定値の精度は、取扱貨物量の推定精度に影響を受ける。したがって、取扱貨物量の推定精度に関する情報を得ることが、算定値の妥当性を示す上で重要となる。

- [4] 本研究では、待ち行列のタイプをケンドール記号で表している。すなわち、 $A/B/c$ について、 A は到着間隔の分布、 B はサービス時間の分布、 c は窓口数を意味する。本文中の M は指数分布を、 D は一定分布や単位分布を、 E_r はアーラン分布を表す。なお、添字 r は、アーラン分布の次数（フェーズ）を意味し、次数が大きくなるほど、ランダム性が弱まり規則性が高まることになる。
- [5] 式(12)～(25)では、式の表記を簡単にするために、 $a(\xi, S)$ を a と簡略化している。
- [6] このような状況は、開発途上国の港湾整備計画において、十分に起こり得る。
- [7] 当然ながら、シミュレーションモデルの役割はこれだけにとどまらない。シミュレーションモデルは、理論モデルと比較して入力変数が多く、その中には数値設定に経時的な観測を要するものもあるが、広範な分析が可能であり、汎用性も高い。わが国やシンガポールなど、港湾整備が一定のレベルまで進展しており、港湾関連のデータが十分に収集されている場合には、港湾整備・運営に関する多様なシナリオ分析が可能であるシミュレーションモデルの有用性が高いであろう。
- [8] 待ち特性量の再現性を期待するなら、平均待ち隻数や平均待ち時間を用いるのが妥当であろう。しかし、これらの数値の実測値を入手することができなかった。そのため、本研究では係留時間を用いて再現性を検討した。

参考文献

- 1) 長尾義三：港湾技術の発展に関する方法論的研究，第三港湾建設局，1959。
- 2) 奥山育英，田口登：待ち合せ理論による最適バース数の決定，港湾技研，Vol.16，No.3，pp.101-117，1977。
- 3) 則武通彦：公共ふ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。
- 4) 則武通彦，木村作郎：公共ターミナルにおける最適バース容量の決定に関する研究，土木学論文集，No.301，pp.115-123，1980。
- 5) 山谷弘幸：ふ頭特性に関する一考察—荷役時間規制を加味した待ち合わせモデルの図表—，港湾技研資料，No.646，1989。
- 6) Daganzo, C.F.: The productivity of multipurpose seaport terminals, *Transportation Science* 24, No.3, pp.205-216, 1990。
- 7) Pasquale L. and R.M. Mazza: Berth planning and resources optimisation at a container terminal via discrete event simulation, *European Journal of Operational Research*, Vol.133, No.3, pp.537-547, 2001。
- 8) 家田仁，柴崎隆一，内藤智樹，三島大輔：アジア域コンテナ流動モデルの構築とその配分仮説に応じた特性分析，土木計画学研究・論文集，No.15，pp.469-480，1998。
- 9) 渡部富博，善見正和，石橋宏典：船社の寄港挙動モデル

- による国際コンテナ航路体系の分析～東アジア～北米西岸航路について～, 土木計画学研究・論文集 No.16, pp.743-752, 1999.
- 10) 黒川久幸, 鶴田三郎, 嶋邦彦: 海上コンテナ輸送ネットワークの設計に関する研究～東・東南アジアを中心として～, 日本航海学会論文集, 第101号, pp.259-269, 1999.
 - 11) 黒田勝彦, 竹林幹雄, 武藤雅浩, 大久保岳史, 辻俊昭: 外航定期コンテナ流動予測モデルの構築とアジア基幹航路への適用, 土木学会論文集, No.653/IV-48, pp.117-131, 2000.
 - 12) 通商産業省大臣官房調査統計部: 機械統計年報, 通商産業調査会出版部, 1996.
 - 13) 遠藤健児, 秋庭雅夫: 物流システム総合シリーズⅡ－物流機器・選択と活用－, 現代工学社, 1995.
 - 14) 黄文吉・樗木武・廣国権: コンテナターミナルシステムの最適計画に関する研究, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集, pp.248-249, 1994.
 - 15) Lee, A.M. and P.A. Longton: Queuing processes associated with airline passenger check-in, *Operational Research Quarterly*, Vol.10, No.1, pp.56-71, 1959.
 - 16) Cosmetatos, G.P.: Some approximate equilibrium results for multi-server queue (M/G/s), *Operational Research Quarterly*, Vol.27, No3, i, pp.615-620, 1976.
 - 17) Kimura, T.: Approximations for the waiting time in the GI/G/s queue, *Journal of the Operations Research Society of Japan*, Vol.34, pp.173-186, 1991.
 - 18) 木村俊一: 拡散近似—離散と連続のはざまで—, オペレーションズ・リサーチ Vol.40, pp.540-546, 1997.
 - 19) Brumelle, S.L.: Some Inequalities for Parallel Server Queues, *Operations Research* 19, pp.402-413, 1971.
 - 20) 大和裕幸, 角田智弘, 小山健夫, 伏見彬: 数理計画手法によるコンテナ船航路の設計手法について, 日本造船学会論文集, 第184号, pp.607-615, 694-695, 1999.
 - 21) 水浦正英: 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.

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*

山田忠史**・吉澤源太郎***

港湾間の国際競争が激しい国際コンテナ物流においては、港湾の整備・運営に要する費用を抑制し、荷役システムを効率化する必要がある。本研究では、コンテナ埠頭の荷役容量に注目し、発生費用の抑制に留意して、適正な荷役能力を決定する方法を提案した。この手法を用いて、コンテナ埠頭の荷役効率向上に寄与する荷役システムについても考察した。待ち行列理論を応用したモデルを構築し、その計算精度をシミュレーションモデルと比較することにより、その妥当性・実用性を確認した。モデルを実際の港湾に適用した結果、荷役システムの効率化には、パース数の削減、高性能なガントリークレーンの活用、港湾 EDI の導入が有効であることを示した。

Optimising the Handling Capacity in a Container Terminal for Establishing Efficient Handling Systems*

By Tadashi YAMADA**・Gentaro YOSHIZAWA***

This paper presents a mathematical model using the queuing theory for optimising the handling capacity in a container terminal. This model determines an optimal solution such that the total cost incurred in a container terminal can be minimised. The results obtained from this model were consistent with those from a simulation model also developed in this paper. Applications of the mathematical model to an actual container terminal indicated that the performance of handling systems in a container terminal could be considerably improved by the reduced number of berths, the efficient use of gantry cranes and the implementation of Port EDI systems.