

関西大学大学院工学研究科 学生員 ○吉澤 源太郎
 関西大学工学部 正会員 則武 通彦

関西大学工学部 正会員 山田 忠史
 関西大学工学部 学生員 江間 好紘

1. はじめに

近隣アジア諸国における港湾関連費用が低廉ことが一因となり、我が国の港湾におけるハブ機能が低下しつつある。我が国の港湾がハブ港湾として発展していくためには、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、港湾利用者へのサービス水準を向上させることが重要である。本研究では、コンテナ埠頭の荷役能力の決定手法を提示し、荷役効率の向上と費用節減効果に関して分析する。

2. 埠頭荷役容量

コンテナ埠頭の荷役効率の向上に寄与する荷役機能を明らかにするためには、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。

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

S : 埠頭のパース数[パース]

ξ : パース荷役容量[TEU/日・パース]

なお、 ξ は、式(2)のように定義される。

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

q : コンテナ船1隻あたりの取扱貨物量[TEU/隻]

μ : コンテナ船の平均サービス率[隻/日・パース]

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 : パース1日あたりの係留可能時間[時間/日]、本研究では、 $t_p = 24$ とする。

r : コンテナ船の係留時間に対する荷役時間の比率

X : パースあたりの稼動クレーン数[基/パース]

パース荷役容量 ξ は、『平均サービス（係留）時間 $1/\mu$ のコンテナ船が、パースに係留し続けたときのパース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、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。最適な荷役容量は、以下の式から求められる。

$$\text{Minimize } C(\psi) = C(\eta, r, S, X) \quad (3)$$

$$= C_b + C_c = c_b ST + c_c \bar{n}(S)T \quad (4)$$

$$\text{Subject to } \eta > 0, S > 0, X > 0, 0 < r \leq 1 \quad (5)$$

$$S \geq \text{現状値 (専用埠頭の場合)} \quad (6)$$

C : 埠頭で消費される総費用[千円]

C_b : 埠頭に建設・整備されるパース関係費用 [千円]

C_c : 埠頭に在港するコンテナ船関係費用 [千円]

c_b : 1日あたりのパース関係費用[千円/日・パース]

c_c : コンテナ船の1日あたり費用[千円/日・隻]

$\bar{n}(S)$: パース数 S のときの平均在港隻数

T : 考察対象期間[日]

なお、式(6)は、各パ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る制約式である。

c_b は、次式のように表される。

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

c_{b1} : パース1日あたり建設整備費用[千円/日・パース]

c_{b2} : クレーン1基あたりの費用 [千円/時間・基]

c_{b2} は、 η の増加に伴って高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(8)に示される関係が成り立つことがわかった。

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

以上より、 c_b は、 η 、 X を説明変数、 c_{b1} をパラメーターとする関数で表現できる。 c_{b1} の具体的な数値は、パ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、パースの規模が与えられれば対象船型が規定されるので、 c_c も算定可能となる。

$\bar{n}(S)$ 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、分析対象埠頭の各パースは同規模とみなす。大阪港における調査結果から、コンテナ船の係留待ち現象は、公共埠頭において $M/E_k/S(\infty)$ タイプであること、専用埠頭において $E_k/E_l/S(\infty)$ 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、Cosmetatos¹⁾の近似式から、

$$\bar{n}(S) = \frac{a^{S+1}}{(S-1)!(S-a)^2} \left\{ \sum_{n=0}^{S-1} \frac{a^n}{n!} + \frac{a^S}{(S-1)!(S-a)} \right\}^{-1} \\ \times \left\{ \frac{1+1/l}{2} + \left(1 - \frac{1}{l}\right) \left(1 - \frac{a}{S}\right) (S-1) \frac{\sqrt{4+5S-2}}{16a} \right\} + a \quad (9)$$

a : トラフィック密度

と表すことができる。また、専用埠頭の場合、 $\bar{n}(S)$ は、Brumelle²⁾の限界式を用いて、次のように表される。

$$\bar{n}(S) \geq \frac{k(m-l)a^2 + 2kla + l(m-k)}{2klm(1-a)} - \frac{(S-1)(l+1)a}{2lS} + a$$

$$\bar{n}(S) \leq \frac{1/kS + \{1/l + (S-1)/S\}a^2}{2(S-a)} + a \quad (10)$$

m : パースの遊休時間分布のアーラン位相

なお、式(9),(10)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。

$$a/S < 1 \quad (11)$$

計画目標となるコンテナ埠頭の取扱貨物量 Q [TEU]と $\bar{n}(S)$ は、次式から関係づけられる。

$$a = \lambda/\mu = (Q/T)/q/\mu = Q/\xi T \quad (12)$$

上述のモデルの場合、必要なパラメーター値は、計画目標年において予測可能な c_{bl}, c_c, k, l, Q, m のみとなる。

待ち行列理論に基づくモデルは、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。そのため、待ち行列シミュレーションモデルを構築してコンテナ船の動態を表し、理論モデルから得られる結果と比較する。シミュレーションモデルでは、以下の式から、各コンテナ船 i の係留時間 t_{ui} [日]が決定される。

$$t_{ui} (=1/\mu) = q_i/\alpha\eta t_p rX \quad (13)$$

q_i : 各コンテナ船の取扱貨物量[TEU/隻]

q_i は、取扱貨物量分布に基づき、正規乱数を用いて決定した。式(13)は、パ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。

4. モデルの適用例

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(C-1, C-3)と公共埠頭に適用した。その際、 $c_{bl}=708$ [千円/日・パース] (水深13m, ヤード長300m), $c_c=5,260$ [千円/日・隻] (対象船型35,000DWT), $Q=42,558$ (C-1埠頭), 41,328(C-3埠頭), 297,477(公共埠頭) [TEU]とした。表-1は、最適埠頭荷役容量下における η, X, S を示し、図-1は、そのときの費用節減効果を示している。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-1 最適埠頭荷役容量下における諸量

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

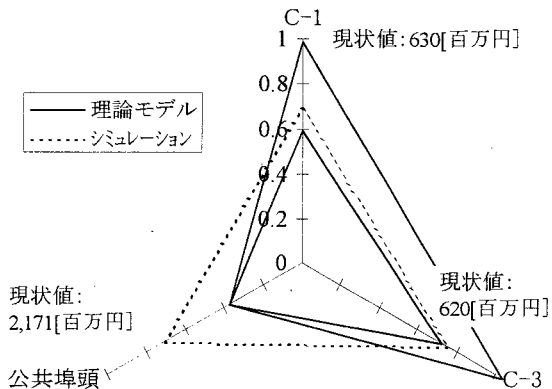


図-1 埠頭総費用の節減効果

これらの結果より、最も高性能なバースクレーンをフル稼働させ、バース数を減らすことが経済的であると言える。そのときの埠頭費用節減効果も大きい。また、理論モデルとシミュレーションモデルの結果を比較すると、埠頭総費用において多少の差異は生じたものの、ほぼ同様の結果が得られた。

5. おわりに

本研究では、埠頭荷役容量を定義し、適正な荷役能力の決定方法を提案した。また、コンテナ埠頭の荷役効率を向上させる荷役機能も明確にした。本稿では、埠頭荷役容量 ψ と r の関係には言及していないが、 $r \rightarrow 1$ が有効であるのは明白であり、その方策として港湾物流のEDI化が挙げられる。我が国の港湾計画において、寄港船舶の獲得が重要課題であることを踏まれば、今後は、このモデルを船舶寄港モデルに組み込んで分析を行うのが有用であると考えられる。

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ヒントを得て、着手したものである。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) Cosmetatos, G.P. : Some approximate equilibrium results for multi-server queue (M/G/r), *Operational Research Quarterly*, Vol.27, No.3, p.615-620, 1976
- 2) Kleinrock, L. : *Computer applications - Queueing systems*, Wiley, 1976.