

土木学会論文報告集  
第301号・1980年9月

## 【論文】

## 公共埠頭における最適バース容量の決定に関する研究

# A STUDY ON OPTIMUM CAPACITY OF BERTHS IN PUBLIC WHARF

則 武 通 彥\*・木 村 作 郎\*\*

*By Michihiko NORITAKE and Sakuo KIMURA*

## 1. 序 論

公共一般雑貨埠頭には、不特定多數の荷主、荷受人、船社などが所有する船舶が多數来港する。そのため、公共埠頭に要請される機能は、それらの船舶が輸送する貨物を公的基盤に立って効率的に処理することである。すなわち、公共埠頭は港湾に到着する船舶に対して十分な埠頭能力を有し、しかも港湾における貨物の陸揚げ、および船積みの活動に付随して生じるすべての費用の総計が最小になるように計画・設計されることが必要となる。

則武<sup>1)</sup>は、そのような公共一般雑貨埠頭において消費される費用について分析し、国民経済的な評価基準に基づいて公共埠頭の最適バース数を決定するための統一的な方法論を提示した。すなわち、その研究においては、与件として設定される考察対象期間における港湾取扱貨物量、バース1日当りの平均荷役率、バースおよび船舶の1日当りの費用を用いて公共埠頭の最適バース数を決定する手順が明確に示された。

しかしながら、公共一般雑貨埠頭において取扱うべき貨物需要量は、国の経済計画、その港湾の立地条件、商習慣、背後地域の経済条件、土地利用計画などによりダイナミックに変化する。したがって、公共埠頭に建設、整備されるべき最適なバース数は、そのような港湾取扱貨物量の時系列的な変動に対して迅速に求められる必要がある。そのためには、あるバース数で処理することが最適な港湾取扱貨物量の範囲（本研究では、以下、最適バース容量と名づける）をあらかじめ求めて図式化しておけばバース計画を行ううえで非常に有用となるであろう。本研究においては、まずそのような目的に対して利用できる図表の作成とその利用方法について検討する。

また、従来の多数の研究<sup>2)~13)</sup>により、港湾における船舶の動態を分析するためには、待ち行列理論に基づいたいくつかのタイプのモデルが有用であることが立証されてきた。しかしながら、それらのモデルのタイプ間の差違、さらにはバースと船舶の間の費用比率のようなシステムパラメーターのレベル値が公共埠頭の最適バース数と最適港湾システムの決定に及ぼす影響や感度についての分析が不足していた。本研究においては、その点に関しても若干の考察を行う。

## 2. 最適バース容量決定のための評価基準

公共埠頭におけるバース数が  $S$  のとき、考察対象期間において港湾で消費される総費用は、港湾に建設、整備されるバースに関係する費用と港湾に在港する船舶に關係する費用の和であり、次のように表される<sup>1)</sup>。

三

$C_S^T$ : バース数  $S$  のときの、期間  $T$  における港湾総費用 (円)

$c_b$ : バースの1日当たり費用(円/日)

$c_s$ : 船舶の 1 目当たり費用 (円/目)

$T$ : 考察の対象とされる港湾オペレーションの期間, 通常は 1 年 = 365 日

$\bar{n}_S$ : バース数が  $S$  のとき、期間  $T$  の間の船舶の平均在港隻数

である。よって、考察対象期間  $T$  における港湾取扱貨物量が計画目標として与えられておれば、その貨物需要量を取扱うことが可能な多数の代替案のうち、式(1)で示される港湾総費用  $C_S^T$  を最小とするバース数  $S$  が最適となる。すなわち、 $C_S^T$  は港湾システムの最適性を評価するための基準としての要件を満たしている。

いま、パラメーターの数を減らすために、式(1)の両辺を  $c_s T$  で割れば、

\* 正会員 工博 関西大学助教授 工学部土木工学科教室  
 \*\* 正会員 工修 関西大学助手 工学部土木工学科教室

\*\* 正会員 工修 関西大学助手 工学部土木工学教室





$$\cdot \left(1 - \frac{a}{S}\right) (S-1) \frac{\sqrt{4+5S}-2}{32a} \} + a \quad \dots \dots \dots (16)$$

が得られる。上式(16)において、バース・船舶費用比率  $r_{bs}$ 、バース数  $S$  および船舶サービス時間分布のアーラン次数  $k$  の値を設定すると、総費用比率  $r_{ss}^T$  はトラフィック密度  $a$  のみの関数となることがわかる。

#### 4. 最適バース容量の決定方法

本章においては、前章で求められた評価式(16)を用いて、あるバース数  $S$  が最適となるバース容量すなわちトラフィック密度  $a$  の範囲を決定する。前章で述べたように、もしバース容量として港湾取扱貨物量  $Q$  を使用する場合には、式(3)の関係を考慮すればよい。

##### (1) 最適バース容量曲線の作成

式(16)より明らかのように、総費用比率  $r_{ss}^T$  はバース・船舶費用比率  $r_{bs}$ 、バース数  $S$  および  $M/E_k/S(\infty)$  モデルのアーラン次数  $k$  を設定すると、トラフィック密度  $a$  のみの関数となる。たとえば、 $r_{bs}=0.25$ ,  $k=1$  とすれば、 $r_{ss}^T$  と  $a$  の間の関係は  $S$  をパラメーターとして図-1 のように描かれる。図-1 は、微小なきざみ間隔で設定された  $a$  の値に対する  $r_{ss}^T$  の値をコンピューターで順次計算し、それに XY プロッターを用いたアプリケーションプログラムを使用すれば容易に得られる。

図-1において、バース数  $S$  が最適となるトラフィック密度  $a$  の範囲の上限値を求めるには、バース数  $S$  のときの港湾総費用  $C_S^T$  がバース数  $(S+1)$  のときの港湾総費用  $C_{S+1}^T$  と等しくなる  $a$  の値を見つければよい。そのためには、式(1)あるいは(2)のいずれかを使う必要がある。よって、いま式(2)を用いれば、バース数  $(S+1)$  と  $S$  のときの総費用比率の差は、

$$r_{bs}(S+1) + \bar{n}_{S+1} - (r_{bs}S + \bar{n}_S) \\ = r_{bs} + \bar{n}_{S+1} - \bar{n}_S = 0 \dots \dots \dots (17)$$

となるので、上式(17)を満足する  $a$  の値を探すことになる。上式(17)は、バース数を  $S$  から  $(S+1)$  に増加するときのバース増設限界費用 ( $c_b$ ) と限界便益 (在港船費の低減分、 $c_s(\bar{n}_S - \bar{n}_{S+1})$ ) とが等しくなるという条件を意味している。さらに、式(4)を考慮すると式(17)はトラフィック密度  $a$  を独立変数とする高次方程式で

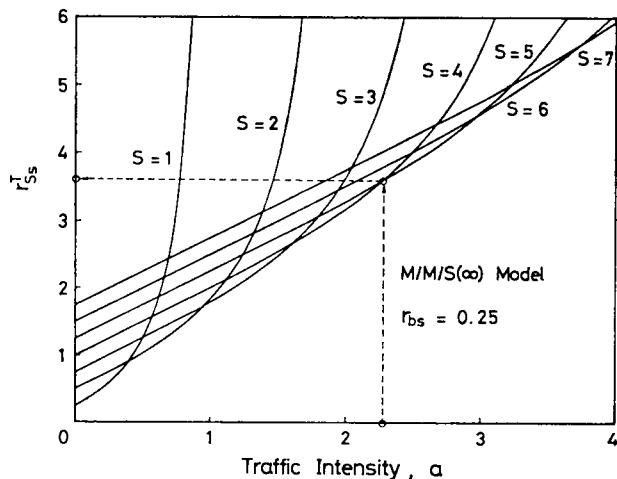


図-1 最適バース容量曲線 ( $M/M/S(\infty)$  モデル)

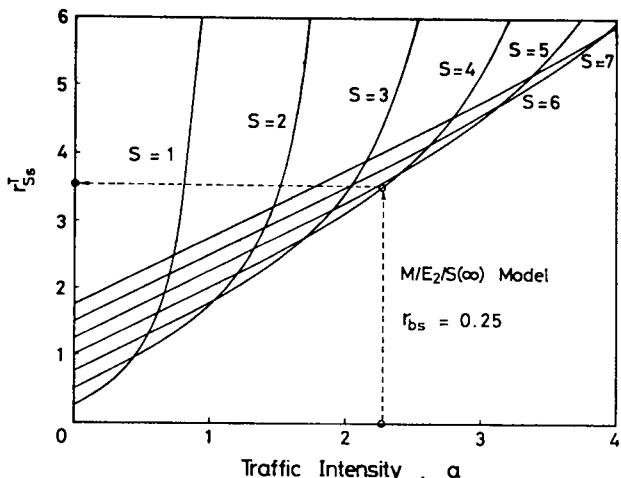


図-2 最適バース容量曲線 ( $M/E_2/S(\infty)$  モデル)

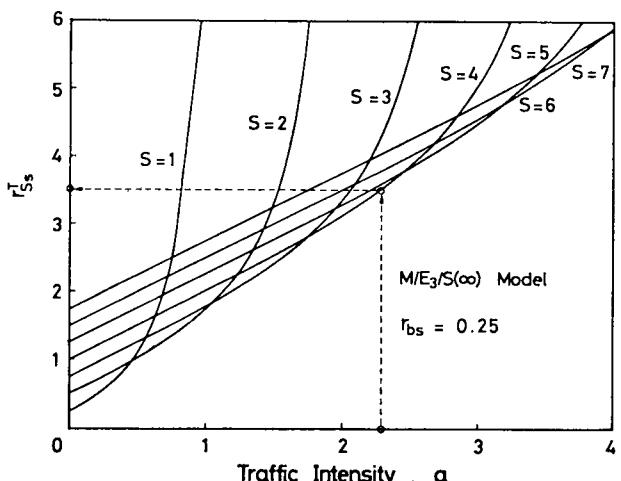


図-3 最適バース容量曲線 ( $M/E_3/S(\infty)$  モデル)

あることがわかる。したがって、実際の計算にあたっては、

$$f(a) = r_{bs} + \bar{n}_{S+1} - \bar{n}_S = 0 \quad \dots\dots\dots (18)$$

とおいて、レギュラファルシ法 (regula falsi method) によりコンピューターを用いて根  $a$  を求めればよい。その際レギュラファルシ法では根の存在範囲をあらかじめセットしておく必要がある。そのためには、バース数が  $S$  と  $(S+1)$  の場合に対するバース容量曲線の交点は、バース数が  $(S-1)$  と  $S$  の場合に対するバース容量曲線の交点を下限値とし、他方  $a=S$  なる直線を上限値とする範囲内に存在するという情報を使うことができる。この上限値に関する情報は、式(5)より得られるものである。以上のことから、一般にバース数  $S$  の場合の最適バース容量は、バース数  $(S-1)$  と  $S$  に関するバース容量曲線の交点における  $a$  の値を下限とし、一方バース数  $S$  と  $(S+1)$  に関するバース容量曲線の交点に対応した  $a$  の値を上限とする  $a$  の範囲で示される。

図-1 と同様な最適バース容量曲線は、 $M/E_2/S(\infty)$  および  $M/E_3/S(\infty)$  モデルに対しても描くことができ、それらはそれぞれ 図-2, 3 に示されている。図-2, 3 においても、 $r_{bs}=0.25$  に設定されている。また、図-4, 5 および 6 は、 $M/M/S(\infty)$ ,  $M/E_2/S(\infty)$  および  $M/E_3/S(\infty)$  モデルに関して、バース・船舶費用比率  $r_{bs}$  の値が 0.10, 0.20, 0.25, 0.30 および 0.40 の場合の最適バース容量曲線を示したものである。図-4, 5 および 6 においては、破線によって区分された各区間において最適となるバース数  $S$  の値が記されている。

## (2) 最適バース容量曲線の特徴

前節においては、公共埠頭のバース計画を容易に行うための最適バース容量曲線を開発した。最適バース容量曲線の作成によって明らかになった事項は、次のとおりである。

① 図-1, 2 および 3 に示されるように、トラフィック密度  $a=0$  のときは各バース数  $S$  に対する総費用比率  $r_{ss}^T$  の値がバース数 1 に対するその値の  $S$  倍になっている。このことは、式(4)および(15)より明らかのように、 $a=0$  のときは各バース数  $S$  に関して船舶の平均在港隻数が 0 となり、よって式(2)より  $r_{ss}^T = r_{bs}S$  となるからである。この値は、船舶 1 日当たりの費用を単位 (unit, 1) として計測した  $S$  バース全部の 1 日当たりの費用 (この値は、トラフィック密

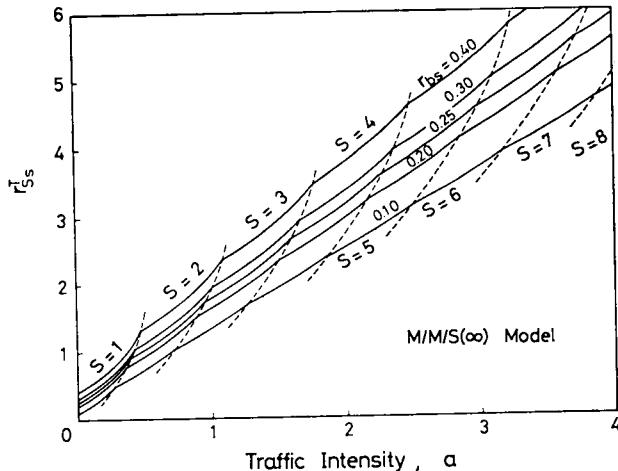


図-4 最適バス容量曲線 ( $M/M/S(\infty)$  モデル)

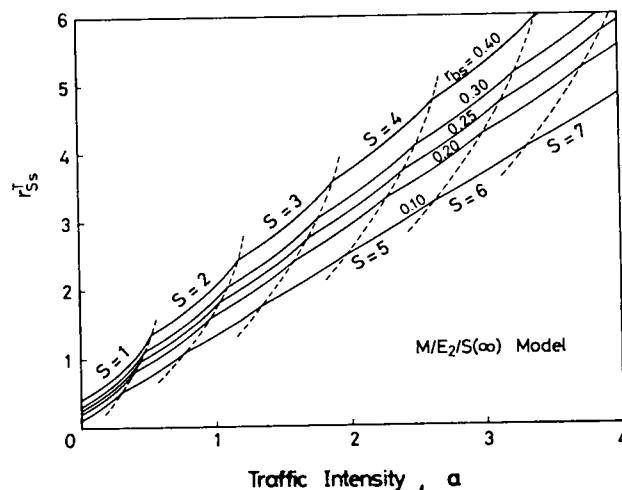


図-5 最適バース容量曲線 ( $M/E_i/S(\infty)$  モデル)

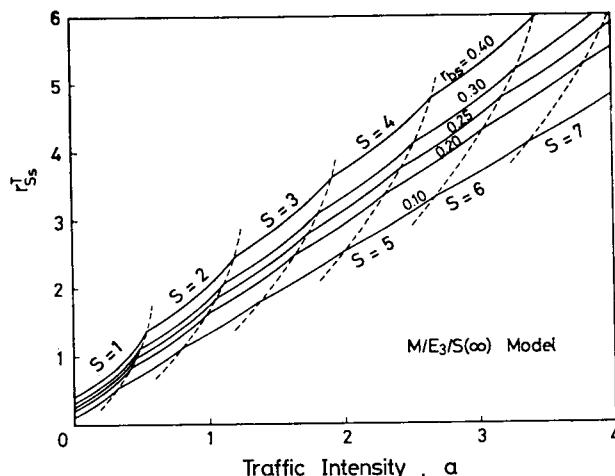


図-6 最適バース容量曲線 ( $M/E_s/S(\infty)$  モデル)

表-2 最適バース容量 ( $a$ ) の範囲 ( $r_{bs}=0.25$ )

Model \ S	1	2	3	4	5	6
$M/M/S(\infty)$	$0 \leftarrow \rightarrow 0.400 \leftarrow \rightarrow 0.961 \leftarrow \rightarrow 1.596 \leftarrow \rightarrow 2.277 \leftarrow \rightarrow 2.989 \leftarrow \rightarrow 3.725$ (0.400) (0.561) (0.635) (0.681) (0.712) (0.736)					
$M/E_2/S(\infty)$	$0 \leftarrow \rightarrow 0.445 \leftarrow \rightarrow 1.037 \leftarrow \rightarrow 1.696 \leftarrow \rightarrow 2.398 \leftarrow \rightarrow 3.129 \leftarrow \rightarrow 3.882$ (0.445) (0.592) (0.659) (0.702) (0.731) (0.753)					
$M/E_3/S(\infty)$	$0 \leftarrow \rightarrow 0.464 \leftarrow \rightarrow 1.068 \leftarrow \rightarrow 1.738 \leftarrow \rightarrow 2.448 \leftarrow \rightarrow 3.187 \leftarrow \rightarrow 3.947$ (0.464) (0.604) (0.669) (0.710) (0.739) (0.760)					

表-3 最適バース容量 ( $a$ ) の範囲 ( $M/M/S(\infty)$  モデル)

Model \ S	1	2	3	4	5	6
$r_{bs}$						
0.10	$0 \leftarrow \rightarrow 0.276 \leftarrow \rightarrow 0.732 \leftarrow \rightarrow 1.277 \leftarrow \rightarrow 1.878 \leftarrow \rightarrow 2.517 \leftarrow \rightarrow 3.187$ (0.276) (0.456) (0.545) (0.601) (0.639) (0.670)					
0.20	$0 \leftarrow \rightarrow 0.367 \leftarrow \rightarrow 0.902 \leftarrow \rightarrow 1.515 \leftarrow \rightarrow 2.175 \leftarrow \rightarrow 2.870 \leftarrow \rightarrow 3.589$ (0.367) (0.535) (0.613) (0.660) (0.695) (0.719)					
0.25	$0 \leftarrow \rightarrow 0.400 \leftarrow \rightarrow 0.961 \leftarrow \rightarrow 1.596 \leftarrow \rightarrow 2.277 \leftarrow \rightarrow 2.989 \leftarrow \rightarrow 3.725$ (0.400) (0.561) (0.635) (0.681) (0.712) (0.736)					
0.30	$0 \leftarrow \rightarrow 0.428 \leftarrow \rightarrow 1.011 \leftarrow \rightarrow 1.665 \leftarrow \rightarrow 2.361 \leftarrow \rightarrow 3.088 \leftarrow \rightarrow 3.838$ (0.428) (0.583) (0.654) (0.696) (0.727) (0.750)					
0.40	$0 \leftarrow \rightarrow 0.474 \leftarrow \rightarrow 1.092 \leftarrow \rightarrow 1.775 \leftarrow \rightarrow 2.497 \leftarrow \rightarrow 3.246 \leftarrow \rightarrow 4.017$ (0.474) (0.618) (0.683) (0.722) (0.749) (0.771)					

度  $a$  には影響されない固定費用である) の相対的な大きさを意味している。よって、バース・船舶費用比率  $r_{bs}$  の値が同一であれば、港湾における船舶動態分析モデル(待ち行列理論モデル)のタイプとは独立に、最適バース容量曲線は常に  $a=0$  で  $r_{ss}^T = r_{bs}S$  という同一の値をとる。そして、図-4, 5 および 6 より明らかなように、 $r_{bs}$  の値が異なる場合は当然  $a=0$  における  $r_{ss}^T$  の値も異なる。

② 図-1, 2 および 3 からわかるように、各バース数  $S$  に対応するバース容量曲線には直線  $a=S$  が漸近線になっている。これは、式(5)の条件より明らかのように、 $a=S$  のときは港湾においてバース待ちする船舶隻数が無限大になり、それにつれて港湾総費用も無限大になることを反映している。

③ 表-2 は、バース・船舶費用比率  $r_{bs}=0.25$  の場合における  $M/M/S(\infty)$ ,  $M/E_2/S(\infty)$  および  $M/E_3/S(\infty)$  モデルに関して、各バース数  $S$  で取扱うのが最適となるバース容量の範囲をトラフィック密度  $a$  によって表示したものである。表-2において、かっこ内の数値は各バース数  $S$  に対する最適バース容量の上限値と下限値の差を示している。表-2 より、船舶のサービス時間分布に規則性が加わるにつれて、同一バース数で取扱うことが最適となる貨物量の範囲は増大することがわかる。換言すれば、ある与えられた貨物量を取扱うには、船舶のサービス時間分布のアーラン次数が増大するにつれて、港湾に建設しなければならない最適バース数は減少する傾向にあることがわかる。

④ 表-2において、いずれのモデルに関しても、バース数  $S$  が増大するにつれて最適バース容量 ( $a$ ) の範囲も広くなっている。これは、港湾取扱貨物量に関して、バース数  $S$  の規模の経済 (economies of scale) が働いていることを示している。

⑤ 表-3 は、 $M/M/S(\infty)$  モデルの場合におけるバース・船舶費用比率  $r_{bs}$  のいくつかのレベル値に関して、各バース数  $S$  で取扱うのが最適となるバース容量 ( $a$ ) の範囲を示している。表-3 における表示方法は、表-2 におけるそれとまったく同様である。表-3 より、同一バース数  $S$  の場合、 $r_{bs}$  の値が大きくなるほどトラフィック密度  $a$  の範囲も増大することがわかる。すなわち、船舶関係費用に比してバース

関係費用が相対的に高くなれば、同一バース数で取扱うことが最適となる貨物量の範囲も大きくなっている。このことは、相対的に高価になるバースの利用率を高めるためには、相対的に安価になった船舶のバース待ちを犠牲にしなければならないということを意味している。

⑥ 表-3において、バース・船舶費用比率  $r_{bs}$  のいずれのレベル値に関しても、バース数  $S$  が増大するにつれて最適バース容量 ( $a$ ) の範囲も広くなっている。これも前述④と同様、港湾取扱貨物量に関するバース数  $S$  の規模の経済を反映している。なお、⑤, ⑥で述べたことが  $M/E_2/S(\infty)$  および  $M/E_3/S(\infty)$  モデルの場合に関しても成立していることは、図-5 および 6 より確かめられる。

⑦ 図-4, 5 および 6 に示されているように、いずれのモデルに関しても、同一のトラフィック密度  $a$ においては、バース・船舶費用比率  $r_{bs}$  の値が大きいほど総費用比率  $r_{ss}^T$  の値も増大することがわかる。これは、式(2)において船舶関係費用を基準値(分母値)として採用したことによる。

## 5. 最適バース容量曲線の使用手順と適用例

本章においては、前章で得られた最適バース容量曲線を現実の公共埠頭計画に際して使用するための統一的なアルゴリズムを提示し、さらにいくつかのパラメーターに実際的な数値を与えて計算を実行し、計算結果に対して考察を加える。

### (1) 使用手順

前章までに述べられたことから、最適バース容量曲線の使用方法は以下のように標準化される。

与件:  $Q, R, T, c_b, c_s, k$

ステップ 1——与えられた  $c_b, c_s$  より、バース・船舶費用比率の値  $r_{bs}$  を求める。

ステップ 2——式(3)により、トラフィック密度  $a$  の値を決定する。

ステップ 3—— $k, r_{bs}$  および  $a$  のそれぞれの値を用いて、該当する最適バース容量曲線から、最適バース数  $S$  と総費用比率  $r_{ss}^T$  を求める。

ステップ 4——式(2)より、港湾総費用  $C_s^T$  と船舶の平均在港隻数  $(\bar{n}_S)_k$  を求める。

ステップ 5——式(15)より、船舶の平均バース待ち隻数  $(\bar{n}_{w,S})_k$  を求める。この値を現実の観測データと比較することにより、計算結果の妥当性を検証することができる。

### (2) 適用例と結果の考察

本研究において提案された最適バース容量曲線の有効性を示すため、本節では実際にいくつかのパラメーターに数値を与えて、さらに前節で示されたアルゴリズムに従って計算を遂行する。

#### a) 適用例

まず、与件として次のものが与えられる。

$$T=365 \text{ 日}, Q=1.0 \times 10^6 \text{ t}$$

$$R=1.2 \times 10^3 \text{ t}/\text{日}, c_b=600 \text{ ドル}/\text{日}$$

$$c_s=2400 \text{ ドル}/\text{日}$$

$$\text{ステップ 1---} r_{bs}=600/2400=0.250$$

$$\text{ステップ 2---式(3)より, } a=1.0 \times 10^6/(1.2 \times 10^3)(365)=2.28$$

ステップ 3——図-1, 2 および 3 を用いることにより、 $M/M/S(\infty)$ ,  $M/E_2/S(\infty)$  および  $M/E_3/S(\infty)$  モデルに対して、最適バース数  $S$  と総費用比率  $r_{ss}^T$  はそれぞれ表-4 の (2), (3) 欄に示す値が得られる（使用手順は、各図中に破線で示されている）。

ステップ 4——式(2)より、各モデルに対して、港湾総費用  $C_s^T$  と船舶の平均在港隻数  $(\bar{n}_S)_k$  はそれぞれ表-4 の (4), (5) 欄に示す値となる。

ステップ 5——式(15)より、各モデルに対して、船

舶の平均バース待ち隻数  $(\bar{n}_{w,S})_k$  の値は表-4 の (6) 欄に示すように計算される。

なお、筆者らは Lee-Longton の公式を用いた最適バース容量曲線も作成し、さらに、その場合に対しても本適用例と同一の与件値を設定して同様の計算を行った。得られた結果は、表-4 のかっこ内に示されている。

#### b) 結果の考察

前項で述べられた適用例に対する計算結果より、次の事項が実証された。

①  $M/M/S(\infty)$  モデルによって算定された最適バース数は 5 であるのに対し、 $M/E_2/S(\infty)$  および  $M/E_3/S(\infty)$  モデルによるそれは 4 となっている。このことは、同一の貨物需要量を取扱う場合にも、船舶のサービス時間分布の規則性が増大すれば埠頭の最適バース数は減少するケースがあることを示している。

② 船舶のサービス時間分布のアーラン次数  $k$  が増大するに従って総費用比率  $r_{ss}^T$  の値は減少し、よって港湾総費用  $C_s^T$  の値も低下する。特に、本計算例では  $M/M/S(\infty)$  モデルと  $M/E_2/S(\infty)$  モデルとの間で最適バース数が変化するので、両モデル間での  $r_{ss}^T$  および  $C_s^T$  における減少量の差違はかなり大きい。

③  $M/M/S(\infty)$  モデルの場合に対する船舶の平均バース待ち隻数および平均在港隻数は、 $M/E_2/S(\infty)$  および  $M/E_3/S(\infty)$  モデルに対するそれらの値よりもかなり小さい。その理由は、 $M/M/S(\infty)$  モデルの場合に対する最適バース数が、他のモデルに対するそれよりも 1 バースだけ大きいことに起因している。すなわち、本適用例においては、船舶の動態が  $M/M/S(\infty)$  モデルのパターンに従う港湾では他のモデルパターンに従う港湾とは異なり、係船施設を 1 バース増設して船舶のバース待ち隻数を減らした方が国民経済的には有利になることを意味している。

④  $M/E_2/S(\infty)$  モデルと  $M/E_3/S(\infty)$  モデルを比較すると、最適バース数は同じであるにもかかわらず、 $(\bar{n}_{w,S})_k$  および  $(\bar{n}_S)_k$  の値は後者の場合の方が前者の場合よりも大きい。この事実は、船舶のサービス時間分布に規則性が加われば船舶の平均バース待ち隻数あるいは平均在港隻数が減少するということであり、その理由は待ち行列理論より明らかである。

⑤ Lee-Longton の公式および Cosmetatos の公式を用いて作成した最適バース容量曲線の間には顕著な差違はみられなかった。そのため、表-4 に示されるように、本適用例に対して両公式から得られた計算結果は非常に接近していた。このことから、ある程度の正確さは犠牲にしても迅速に埠頭のバース

表-4 適用例に対する結果

(1) Model	(2) $S$	(3) $r_{ss}^T$	(4) $C_s^T (\times 10^6 \$)$	(5) $(\bar{n}_S)_k$	(6) $(\bar{n}_{w,S})_k$
$M/M/S(\infty)$	5	3.61	3.16	2.36	0.08
$M/E_2/S(\infty)$	4(4)	3.54(3.53)	3.10(3.09)	2.54(2.53)	0.26(0.25)
$M/E_3/S(\infty)$	4(4)	3.52(3.51)	3.08(3.07)	2.52(2.51)	0.24(0.23)

注) かっこ内の数値は、Lee-Longton の公式による結果を示す。

計画を行う必要があるときには、式の形が簡明な Lee-Longton の公式を使用してもさほど支障はないものと考えられる。ただし、Lee-Longton および Cosmetatos の近似公式は、いずれも港湾における船舶の平均バース待ち時間（前述の表-1による）および平均バース待ち隻数（表-4による）を過小評価する傾向にあるので、その点には注意しなければならない。

## 6. 結 論

本研究においては、待ち行列理論を用いて公共一般雑貨埠頭における最適バース容量を決定した。本研究によって得られた主要な結論は、以下のとおりである。

(1) 公共埠頭の最適バース計画は、考察対象期間に取扱わなければならない港湾貨物需要量を最小の港湾総費用で処理することによって達成される。そして、その港湾総費用はバース関係費用と船舶関係費用から構成されるが、本研究では船舶1隻当たりの年費用に対する港湾の年間総費用の比率  $r_{ss}^T$  という評価基準を導入することによって港湾システムのパラメーターの数を減らすことができ、以後の分析が容易になった。

(2) (1)で定義された港湾システムの最適性の評価基準  $r_{ss}^T$  には船舶の平均在港隻数が含まれているが、その値を推定するに際しては  $M/M/S(\infty)$ ,  $M/E_2/S(\infty)$  および  $M/E_3/S(\infty)$  のタイプの待ち行列理論を使用することができる。特に、船舶のサービス時間がアーラン分布する場合には、Cosmetatos の近似公式の適用が有用である。

(3)  $M/G/S(\infty)$  のタイプの待ち行列理論モデルにおいて船舶の平均バース待ち時間を推定するためには、従来から Lee-Longton の近似公式がよく知られている。しかし、いくつかの数値例に対する計算結果によると、Lee-Longton の公式は船舶の平均バース待ち時間をかなり過小評価し、近年提案された Cosmetatos の近似公式の方が理論値により近いことが確かめられた。したがって、公共埠頭における最適バース数をより正確に決定するためには、Cosmetatos の公式を用いる必要がある。

(4) 最適バース数決定のための評価式を用いることにより、最適バース容量曲線を描くことができる。その作業にはコンピューターの XY プロッターを用いたアプリケーションプログラムを使用することができる。その場合、最適バース数が  $S$  から  $(S+1)$  に遷移する臨界バース容量の値を決定するには、その臨界点でバースの増設による限界便益と限界費用とが等しくなるという条件を使えばよく、また実際の数値計算にはレギュラーフルシ法の適用が有効である。

(5) 得られた最適バース容量曲線の特徴から、次の事項が確かめられた。

① トライフィック密度  $a=0$  のときの総費用比率  $r_{ss}^T$  の値は、船舶の1日当り費用を基準単位 (=1)とした全バースの1日当り費用の相対的な大きさを示している。

② 各バース数  $S$  に対するバース容量曲線は、直線  $a=S$  なる漸近線をもつ。これは、利用率  $\rho=a/S < 1$  の条件による。

③ 船舶のサービス時間分布の規則性が増大するにつれて、同一バース数で取扱うことが最適となる貨物量の範囲は広くなる。

④ 埠頭のバース数に関しては、規模の経済が働く。すなわち、公共埠頭に建設されるバース数が増大するにつれて、1バース当たりで取扱うことが最適な貨物量も増加する。

⑤ 船舶関係費用に比してバース関係費用が相対的に大きくなれば、船舶のバース待ちを犠牲にしてバースの利用率を高めなければならない。したがって、ある与えられたバース数で取扱うことが最適な貨物量の範囲は広くなる。

(6) 最適バース容量曲線の有用性は、実際的な例題を解くことによって実証された。すなわち港湾取扱貨物量  $Q$ 、バースの平均荷役率  $R$ 、考察対象期間  $T$ 、バースの1日当り費用  $c_b$ 、船舶の1日当り費用  $c_s$  および船舶のサービス時間分布のアーラン次数  $k$  が与件として与えられたとき、最適バース容量曲線を用いて最適バース数  $S$ 、港湾総費用  $C_s^T$ 、船舶の平均在港隻数  $(\bar{n}_s)_k$  および船舶の平均バース待ち隻数  $(\bar{n}_{w,S})_k$  の値は容易に求められた。特に、船舶のサービス時間分布に規則性が加われば、公共埠頭における最適バース数や港湾における船舶の平均バース待ち隻数が減少して、究極的には港湾総費用の低減という結果をもたらすことが理解された。

## 参 考 文 献

- 1) 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、土木学会論文報告集、No. 278, pp. 113~122, 1978.
- 2) 工藤和男・高野聖三・奥山育英：埠頭の貨物取扱い能力についての研究、港湾技研報告、Vol. 4, No. 8, pp. 1~66, 1965.
- 3) 吉川和広・香川一男・小山計三：公共ふ頭のライナーバース計画に関する研究、土木学会論文集、No. 126, pp. 9~15, 1966.
- 4) Mettam, J.D. : Forecasting delays to ships in port, The Dock and Harbour Authority, Vol. 47, pp. 380 ~382, Apr., 1967.
- 5) 長尾義三：外貿定期船雑貨ふ頭の能力評価について、経営科学、Vol. 10, No. 4, pp. 1~19, 1967.
- 6) Jones, J.H. and W.R. Blunden : Ship turn-around time at the Port of Bangkok, Proc. of ASCE, Vol.

- 94, No. WW 2, pp. 135~148, May, 1968.
- 7) Agerschou, H. and J. Korsgaard : Systems analysis for port planning, The Dock and Harbour Authority, Vol. 49, pp. 411~415, Mar., 1969.
  - 8) 工藤和男：港湾計画における最適化手法，第4回土木計画学講習会テキスト，土木学会，pp. 107~136, 1971.
  - 9) Kudo, K. : A practical approach to the average waiting time of  $M/G/S$  type queueing models, Report of Port and Harbour Research Institute, Vol. 11, No. 1, pp. 3~21, Mar., 1972.
  - 10) Hansen, J.B. : Optimizing ports through computer simulation-sensitivity analysis of pertinent parameters, Operational Research Quarterly, Vol. 23, No. 4, pp. 519~530, 1972.
  - 11) 奥山育英・篠嶋 博・早藤能伸・中井典倫子：ボアソン到着待ち合せモデルの数表—埠頭の数および泊地規模の決定，港湾技研報告，Vol. 13, No. 1, pp. 87~151, 1974.
  - 12) 奥山育英・口田 登：待ち合せ理論による最適バース数の決定，港湾技研報告，Vol. 16, No. 3, pp. 101~117, 1977.
  - 13) Noritake, M. and S. Kimura : Stochastic models to analyze ships' activities in seaport, Technology Reports of Kansai University, No. 21, pp. 179~197, Mar., 1980.
  - 14) Fratar, T.J., A.S. Goodman and A.E. Brant : Prediction of maximum practical berth occupancy, Trans. of ASCE, Vol. 126, Part IV, pp. 632~643, 1961.
  - 15) Plumlee, C.H. : Optimum size seaport, Proc. of ASCE, Vol. 92, No. WW 3, pp. 1~24, Aug., 1966.
  - 16) Nicolaou, S.N. : Berth planning by evaluation of congestion and cost, Proc. of ASCE, Vol. 93, No. WW 4, pp. 107~132, Nov., 1967.
  - 17) Wanhill, S.R.C. : Further analysis of optimum size seaport, Proc. of ASCE, Vol. 100, No. WW 4, pp. 377~383, Nov., 1974.
  - 18) Morse, P.M. : Queues, Inventories and Maintenance, John Wiley, pp. 102~115, 1958.
  - 19) Lee, A.M. and P.A. Longton : Queueing processes associated with airline passenger check-in, Operational Research Quarterly, Vol. 10, No. 1, pp. 56~71, 1959.
  - 20) Cosmetatos, G.P. : Some approximate equilibrium results for the multi-server queue ( $M/G/r$ ), Operational Research Quarterly, Vol. 27, No. 3, i, pp. 615~620, 1976.
  - 21) 本間鶴千代：待ち行列の理論，理工学社，p. 24, 1966.
  - 22) クラインロック, L. (手塚・真田・中西訳)：待ち行列システム理論(上)，マグロウヒル好学社，p. 17, 1979.

(1979.5.9・受付)