

# 港口における閘門の適正規模決定法に関する研究

## STUDY ON OPTIMUM CAPACITIES OF ENTRANCE LOCKS

吉川 和 広\*・木 俣 昇\*\*

By Kazuhiro Yoshikawa and Noboru Kimata

### 1. 緒 言

従来わが国においては、港湾は自然条件の有利な場所に立地し、閘門を有する閉口港はあまり問題にされなかった。しかし加工貿易に支えられて、わが国経済が高度に成長するにつれ、わが国経済に占める臨海工業地帯の比重はますます高くなってきた。自然的制約のきびしいわが国土において、さらに経済の高度成長を維持するためには、自然条件の不利な地域にも外国貿易の門戸としての港湾を建設することの必要性が生じてきた。

さらに既存の臨海工業地帯においては、地盤沈下にもなって劣悪化した工業立地条件を回復し、高潮から工業地帯および港湾を防御するため、閘門を有する防潮堤の建造が必要になってきている。またわが国の地形上の特徴として潮流のはげしい海峡部が多数存在するが、船舶航行の安全上の見地から、これら海峡部に閘門を有する縮切堤を建設することの必要性が急速に高まってきた。

以上のように、社会的、経済的条件の変化、加えるに土木技術の進歩により、港口に閘門を設置する閉口港の検討の必要性が新たな時代的要求として生じてきた。

港口および海峡部に閘門を設置することによって、港の内外水位差および潮流の影響を減少させ、港内荷役等、港湾機能の向上および船舶運航の安全性を向上させることが可能となる。一方閘門は、輸送活動チェーンのあい路となる可能性があり、その結果の輸送経済におよぼす影響は非常に大きいといわねばならない。したがって、港口に閘門を有する閉口港の計画にあたっては、輸送経済的にみて閘門の適正規模を決定するための研究が、今後非常に重要になってくると考えられる。

本研究は、輸送経済的観点より閘門の適正規模を定義するとともに、合目的性を測定しうる目的関数を設定し、さらに閘門における船舶の輻輳現象を Bulk-Service Queuing Model によって解析することにより、閘門の適正規模決定法に関するシステムアプローチを行なったものである。

### 2. 適正規模決定の評価の方法

本節では、閘門計画策定の立場を述べ、その規模の最適性を評価する基準の設定を行なう。

#### (1) 最適規模の定義

港湾の輸送経済にはたす役割として、公共性の追求が強く認識され、港湾施設の整備計画は、公共の福祉増進を目的とし、国民経済的立場で策定すべきであるといわれている。閘門計画も港湾施設計画の一環である以上、その計画策定にあたっては、他の港湾計画と同様国民経済的立場で評価すべきであろう。

一般港湾における計画は、港湾施設の不備、非体系的な労働事情に起因した港湾機能の低下に対してなされるが、閉口港の場合は、自然的制約条件に起因した港湾機能低下を閘門建設によって向上させようとする計画である。しかし、閘門設置は港湾荷役、船舶運航等の港湾機能の一面を向上させるが、輸送活動チェーン全体からみれば、流通機構のあい路を構成する要素と考えられ、その規模が輸送経済におよぼす影響は、非常に大きいといわねばならない。したがって、国民経済的立場で計画するにあたっては、上述したような観点で閘門の規模を決定する必要がある。

一般に、交通施設の投資により、輸送活動チェーンの結節点が改良された結果発生する効果は、輸送対象の結節点通過時間の節約、施設を利用しなかったならば発生したであろうと推定される費用の節約、事故の減少、さらに施設建設投資にともなう背後地の経済開発等の直接・間接の効果がある。逆に施設建設にともなう種々の損失も生じる。閘門建設にともなう効果は、

#### a) 潮流潮位差緩和による便益

- (i) 潮待ちが大幅に減少し、輸送時間を節約することができる。
- (ii) その結果、入港船舶の入港可能時間帯が増大し、入港船の集中が少なくなり、港内の船舶航行の安全性が高まる。
- (iii) 港内での潮流の不規則な流れが減少し、泊地面積の増大、碇泊船舶の安全性および荷役能力の向上が期待される。

\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

\*\* 正会員 京都大学助手 工学部土木工学教室

- (iv) 航路の増深, 拡幅が容易となり, 港湾の管理・運営費用が減少する。
  - (v) 埋立造成が可能になり, それによって既存施設における港湾機能の再開発や既存市街地における再開発が著しく容易になる。
  - (vi) 潮位差が減少することによって, 干潮時においても基準水面を保持することができ, その結果, 航路や泊地さらに岸壁などの実質的水深を増大させえる。
  - (vii) 高潮に対する災害より, 港湾の背後地を防護する。その結果, 背後地の工業立地条件を向上させ, 産業・経済の再開発, 発展に大きな貢献をする。
- などの効果が考えられる。

**b) 閘門建設にともなう損失**

- (i) 閘門を利用するため待ち現象が生じ, 船舶の待ち損失が生じる。
- (ii) 閉口港にすることにより港内の海水の流れが阻害されることにともなう港内の汚染等の公害が生じる。

などが具体的に考えられる。

計画を策定する場合, 常に評価という問題がともなう。その場合, その現象が定量的に測定されていなければならない。しかるに, 現段階でわれわれが, 科学的・定量的に測定可能な効果は, 上述の効果のうちで施設改良にともなう時間節約のみであり, 他の要素は, 推定の域を脱していない。このような効果の定量的な測定法に関しては, 将来の研究に待たねばならない。

本研究では, 一応問題を輸送活動チェーンのあい路打開の問題にしばって閘門計画を考察することとする。このため, 輸送経済に対する閘門設置の直接効果のみを考慮することとし, 以下に述べるような閘門の適正規模を評価する基準としての費用関数を設定する。

すなわち,

$C_A$ : 船舶関係の単位時間当りの費用 (円/日)

$C_B(S)$ : 閘門の最大収容隻数を  $S$  隻とした場合の施設関係の単位時間当りの費用 (円/日)

とすれば, 費用関数  $C_i$  は,

$$C_i = C_{Ai} + C_{Bi}$$

$$= B \lambda \left( t_w(S) + \frac{k}{\mu} \right) T + \left( t_w'(S) + \frac{1}{\mu'} \right) (1-T) + C_B(S) \dots \dots \dots (1)$$

となる。

ただし,

$B$ : 1船の単位時間当りの船舶関係の費用 (円/日・隻)

$\lambda$ : 単位時間当りの平均到着隻数 (隻/日)

$t_w(S)$ : 最大収容隻数を  $S$  としたときの閘門操作時

の船舶の平均待ち時間 (日)

$k/\mu$ : 閘門の平均サービス時間 (日)

$t_w'(S)$ : 閘門開放時の船舶の平均待ち時間 (日)

$1/\mu'$ : 閘門開放時の閘門のサービス時間 (日)

$T$ : 1日の平均閘門操作時間割合

$i$ : 入閘対象船舶と閘門の組合せの番号

である。

与えられた  $i$  に対して,  $S$  を独立変数として, 式(1)を最小にする閘門の収容隻数  $S$  を  $S_i^*$  と記せば, 最適閘門規模は, 目的関数

$$C^* = \min_{(i)} \{C_i(S_i^*)\} \dots \dots \dots (2)$$

を満足する  $S_i^*$  で決定される閘門規模であると定義される。

**(2) 費用関数の係数算出法**

式(1)で定義される費用関数の係数  $B, C_B(S)$  は, 以下のようにして算出することができる。

**(i)  $B$  の算出法**

船舶関係の費用は, 船舶の費用と積載貨物の金利で構成されている。船舶の費用は, 船費, 運航直接経費および港湾費用に分けられる。船費は, 償却費, 保険料および船舶税等の間接船費と, 船員給料, 修繕費および船舶用品等の直接船費に分けられる。港湾費用は, 閘門使用

図-1 閘門側面図 (500GT Dock) (単位: m)

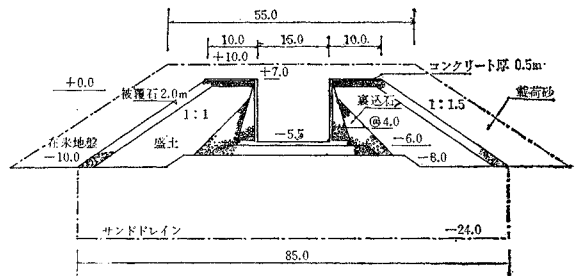


図-2 閘門平面図

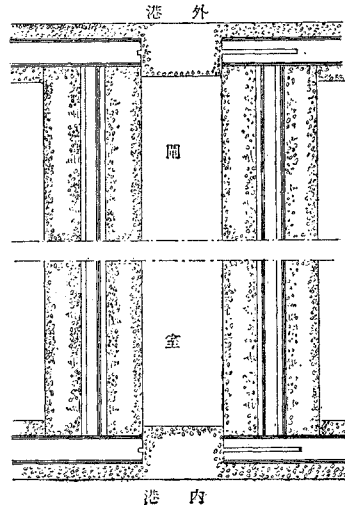
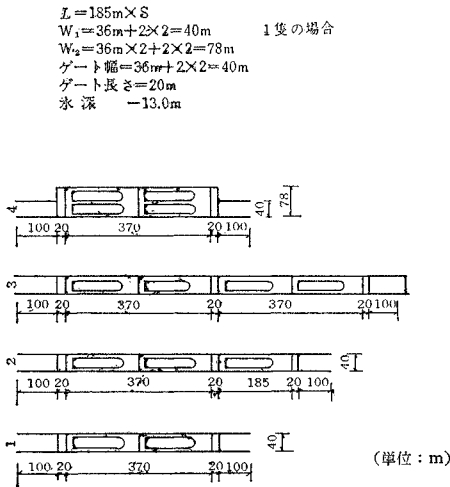


図-3 開門の形状



料が考えられるが、本研究では考慮しない。一方積載貨物の金利は、一船あたりの平均積載貨物量とその単価を用いて求める。

(ii)  $C_B(S)$  の算定法

$C_B(S)$  は、開門建設費の償却費と開門の修理・運営費等の管理・運営費に分けられる。開門建設費の償却費  $C_1(S)$  は、図-1、図-2 のような構造物に対して、最大収容隻数  $S$  を図-3 のように配列した場合について概算した建設費  $C(S)$  を用いて算出する。一方、管理・運営費  $C_2(S)$  は、一般に建設費の償却に対する比率  $\eta$  で示される。

$C_B(S)$  は、次式のようになる。

$$C_B(S) = C_1(S) + C_2(S) = (1 + \eta) C_1(S) \dots (3)$$

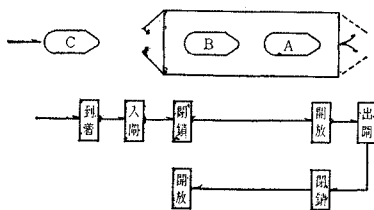
3. 開門における船舶輻輳現象の解析

いままで潮位差、潮流の影響で、入出港に支障を受けていた船舶は、開門建設でその影響を受けなくなるかわりに、あらたに開門通過のための待ち現象に出会うこととなる。その結果、開門の規模が輸送活動のあい路となり、輸送経済におよぼす影響は非常に大きい。このことを明らかにするため、この船舶の輻輳現象をモデル化し、数学モデルで表現し、解析することとする。

(1) 開門操作の概要

上述したような船舶の開門での待ち現象は、つぎのようなモデルによって表現できる(図-4 参照)。入出港船

図-4 開門開閉操作図



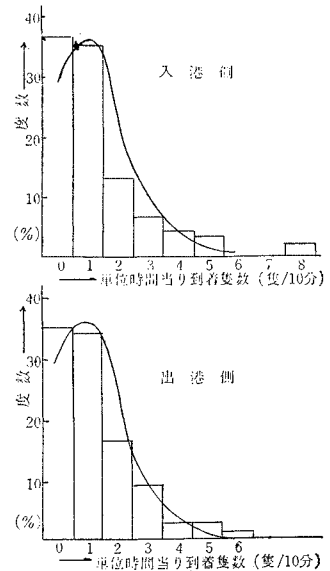
船は、縮切堤のため生じた内・外潮位差のため、開門において水位調節を受けねばならない。通開船舶数の少ないときは1つの開門を利用して、船舶の入出港の両方を行なうことが可能であるが、多数通開の場合には、開門における船舶の輻輳を緩和するため、また船舶通開の安全性を確保するために、複数個の開門を建設し、それぞれの開門を入港用と出港用とに分けて使用するほうがよい。図-4 のように、入開扉前面に到着した船舶は、入開扉が閉鎖されているときは、入開扉前で待ち行列をつくる。入開扉が開放されると、待ち行列の先頭より入開可能最大隻数 ( $S$  隻)、待ち行列が最大隻数に満たない場合は、全隻一度に入開する。つぎに入開扉を閉鎖し、内外の水位調節を行ない出開扉を開放し、入開船舶が出開する。つぎに出開扉を閉鎖し、入開扉を開放して一開門操作を完了する。この操作がくり返し行なわれる。

一方、内・外潮位差、流速が小さい場合は、開門の入出開扉はともに開放されていて、入出港船舶は開室内を通過するだけである。

(2) 入出港船舶の到着分布

一般に港湾への船舶の到着は、ポアソン分布にしたがうといわれている。尼崎開門での調査結果によれば、入出港別船舶の到着分布は図-5 となり、ポアソン分布を仮定してもさしつかえないことが判明した。

図-5 尼崎港到着分布



(3) 開門のサービス時間

a) サービス時間の定義

本研究においては、開門は一方通行とし、流速が3ノット以上に達した場合にのみ、開門操作を行なうとする。開門での船舶のサービス時間は開門操作時間である。すなわち、ここでは開門のサービス時間は、入開扉閉鎖開始時刻より入開扉開放完了時刻までであると定義する。

一方、このように定義された開門のサービス時間  $S(t)$  は、開門操作モデル図より明らかのように、

$$S(t) = \{a + b - 2c + 2(d + e) + f\} / \{1 - 2\lambda c\} \dots (4)$$

となる。

ここに;

- $\lambda$ : 単位時間当りの平均到着隻数 (隻/時間)
- $a$ : 入閘より停止までの時間 (時間/集団)
- $b$ : 始動より出閘までの時間 (時間/集団)
- $c$ : 船舶安全間隔時間 (時間/隻)
- $d$ : 入閘扉開閉時間 (時間/集団)
- $e$ : 出閘扉開閉時間 (時間/集団)
- $f$ : 水位調節時間 (時間/集団)

である。

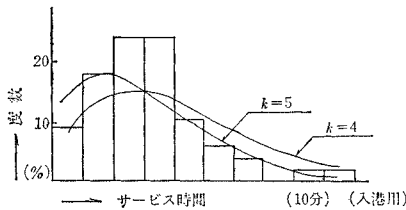
一方、閘門開放時におけるサービス時間  $S'(t)$  は、閘門通過時間、または船舶航行安全間隔時間である。

#### b) サービス時間分布

わが国には閘門を有する閉口港の例は少なく、尼崎港・三池港等 2, 3 の港湾に見られる程度である。昭和 41 年 10 月 24 日~26 日尼崎閘門で、閘門のサービス時間に関する種々の調査を行なった。

サービス開始時間間隔の分布は、図-6 に示すように低次のアーラン分布にしたがっている。

図-6 サービス時間分布 (尼崎港)



わが国には、大型船舶用の閘門が存在しないため、大型閘門のサービス時間分布は実測できない。したがって、式(4)の各変量を他の資料、たとえば造船所のドックの入・出時間、注・出水時間、またタグボートによる航行速度、船舶安全間隔時間等を用いることにより推定し、式(4)にしたがって各変量をコンポリュートすることにより、大型閘門のサービス時間分布を算出する必要がある。

本研究では、中・大型船舶に対する  $a \sim f$  の資料は、収集できなかったため、中・大型閘門のサービス時間はパラメーターとして変動させている。

#### (3) 現象のモデル化

閘門の構造的規模は、入閘対象船舶の最大船型のきつ水、船幅、および標準船舶の船長で決定される。構造的にみれば、きつ水が深くなれば、閘室の側壁の構造強度が、また船幅が大きくなればゲートの構造的強度が問題になる。このためきつ水、船幅の変化が、閘門の建設費に大きく影響してくる。

したがって、本研究では、閘門の建設費が、最大収容隻数のみの関数となるよう、入閘対象船舶の船型をきつ水と船幅でわけ、つぎのような組合せについて解析することとした。

すなわち、閘門は入出港に対しておのおの、

- 1) 1000 G/T 以下の小型船舶用閘門 2基
- 2) 1000 G/T~6000 G/T の中型船舶用閘門 1基
- 3) 6000 G/T 以上の大型船舶用閘門 1基

を設置するとした場合である。

船舶の輻輳現象は、(1)で述べたようにモデル的に、つぎのように表現できる。

#### a) 閘門操作時

##### (A) 小型船舶用閘門

- (i) 船舶は、閘門へ平均値  $\lambda$  のポアソン分布で到着する。
- (ii) 到着した船舶は、先着順に閘門の前面で1列に待ち行列を構成する。
- (iii) サービス時間は、サービス開始時間間隔であるとし、その分布は、平均値  $1/\mu$  の指数分布であると仮定する。

[注] 図-6のように、サービス時間は、低次のアーラン分布にしたがっているが、解析の容易さのためと安全側であるという理由より、本研究では、上述のように仮定した。

- (iv) 1閘門操作で最大  $S$  隻一度に先着順にサービスを実施するものとし、サービス開始時に待ち行列が  $S$  以下であれば、全隻一度にサービスするものとする。

##### (B) 中・大型船舶用閘門

サービス時間は、平均値  $k/\mu$  の  $k$  次のアーラン分布と仮定する。その他は(A)の仮定と同一である。

#### b) 開放時

- (i) 船舶は、平均値  $\lambda$  のポアソン分布にしたがって到着すると仮定する。
- (ii) サービス時間は、平均値  $1/\mu'$  の指数分布にしたがうものと仮定する。
- (iii) 到着船舶は、1隻ずつ先着順に閘門を通過する。ここでは、構造的規模の異なる閘門に到着する船舶の母集団は、それぞれ互いに異なる独立な母集団であるとする。さらに各モデルでは、共通して到着船舶を標準船舶に換算して計算を行なうこととした。

#### i) 小型船舶用閘門の数学モデル

条件(A)(i)~(iv)を満足するシステムは、数学的には窓口数2でバルクサービスの待ち合せモデル(Two-Server Bulk Service Queues Model)として記述できる。

2基の閘門は、それぞれ最大収容隻数  $S_1, S_2$  であり、船舶は単独で平均値  $\lambda$  のポアソン分布にしたがって到着する。待ち行列のない時に到着した船舶は、第1の閘門の前で待ち行列をつくる。第1, 第2の閘門は、それぞれ平均値  $1/\mu_1, 1/\mu_2$  の指数分布であるとする。このシステムの状態は、つぎのような確率を導入することにより記述される。

すなわち、

$E(t)$  : 時刻  $t$  で両閘門が空で、待ち船舶がない確率

$Q(t)$  : 時刻  $t$  で第 1 の閘門がサービス中で、第 2 の閘門が空である確率

$R(t)$  : 時刻  $t$  で第 1 の閘門が空で、第 2 の閘門がサービス中である確率

$P_n(t)$  : 時刻  $t$  で両閘門がサービス中で、 $n (\geq 0)$  隻の船舶が待っている確率

さらに、 $P_n(t)$  の母関数を  $F(x, t)$  と定義する。そうすれば、

$$F(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} P_n(t) x^n \dots\dots\dots (5)$$

である。このシステムの状態方程式は、

$$\frac{dE(t)}{dt} = -\lambda E(t) + \mu_1 Q(t) + \mu_2 R(t) \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{dQ(t)}{dt} = -(\lambda + \mu_1) Q(t) + \lambda E(t) + \mu_2 P_0(t) \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = -(\lambda + \mu_2) R(t) + \mu_1 P_0(t) \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -(\lambda + \mu_1 + \mu_2) P_0(t) + \mu_1 \sum_{m=1}^{S_1} P_m(t) + \mu_2 \sum_{k=1}^{S_2} P_k(t) + \lambda [Q(t) + R(t)] \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = -(\lambda + \mu_1 + \mu_2) P_n(t) + \lambda P_{n-1}(t) + \mu_1 P_{n+S_1}(t) + \mu_2 P_{n+S_2}(t) \dots\dots\dots (10)$$

とかける。

システムの初期状態を閘門に船舶が入ってない空の状態であるとすれば、

$$\left. \begin{aligned} E(0) &= 1 \\ Q(0) &= 0 \\ R(0) &= 0 \\ P_n(0) &= 0 \quad (n \geq 0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

が成立する。

ラプラス換算を  $\bar{f}(s) = L[f(t)]$  と表現すれば、式 (6)~式 (10) を式 (11) の条件のもとでラプラス変換し、式 (5) のラプラス変換を用いれば、

$$-(s + \lambda) \bar{E}(s) + 1 + \mu_1 \bar{Q}(s) + \mu_2 \bar{R}(s) = 0 \dots\dots (12)$$

$$-(s + \lambda + \mu_1) \bar{Q}(s) + \lambda \bar{E}(s) + \mu_2 \bar{P}_0(s) = 0 \dots (13)$$

$$-(s + \lambda + \mu_2) \bar{R}(s) + \mu_1 \bar{P}_0(s) = 0 \dots\dots\dots (14)$$

$$\begin{aligned} \bar{F}(x, s) &= x^{S_1} \left\{ \mu_1 \sum_{m=0}^{S_1-1} (1 - x^{m-S_1}) \bar{P}_m(s) \right. \\ &\quad + \mu_2 \sum_{k=0}^{S_2-1} (1 - x^{k-S_2}) \bar{P}_k(s) - (\mu_1 + \mu_2) \bar{P}_0(s) \\ &\quad \left. + \lambda [\bar{Q}(s) + \bar{R}(s)] \right\} / \left\{ -\lambda x^{S_1} + 1 + (s + \lambda + \mu_1 + \mu_2) \right. \\ &\quad \left. \times x^{S_1 - \mu_2 x^{S_1 - S_2} - \mu_1} \right\} \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

$\bar{F}(x, y)$  の分母を零ならしめる式

$$\lambda x^{S_1+1} - (s + \lambda + \mu_1 + \mu_2) x^{S_1} + \mu_2 x^{S_1 - S_2} + \mu_1 = 0 \dots\dots\dots (16)$$

は、ルーチエ (Rouché) の定理を用いれば、単位円内に  $S_1$  個の根、 $x_i(s)$   $\{i=1, 2, \dots, S_1\}$  と単位円外に 1 個の根  $x_0(s)$  を有することが容易に示される。

さらに、 $\bar{F}(x, s)$  が単位円内で正則であるという条件より、

$$\bar{F}(x, s) = A(s) / [x_0(s) - x] \dots\dots\dots (17)$$

とかけ、待ち行列が  $n$  隻である確率のラプラス変換は

$$\bar{P}_n(s) = A(s) / x_0^{n+1}(s) \dots\dots\dots (18)$$

と求まる。ここで  $A(s)$  は、

$$\begin{aligned} A(s) &= [\lambda^2 x_0 (x_0 - 1) (s + \lambda + \mu_2)] / \{s x_0 (s + \lambda + \mu_2) \\ &\quad \times [(s + x) (s + \lambda + \mu_1) - \lambda \mu_1] - (x_0 - 1) \lambda (s + \lambda) \\ &\quad \times [\mu_1 (s + \lambda + \mu_1) + \mu_2 (s + \lambda + \mu_2)] - \lambda^2 \mu_1 (\mu_1 - \mu_2) \\ &\quad - (\mu_1 + \mu_2) (s + \lambda + \mu_2) [(s + x) (s + \lambda + \mu_1) \\ &\quad - \lambda \mu_1]\} \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

である。

とくに、

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \mu_2 = \mu \\ S_1 &= S_2 = S \end{aligned}$$

とすれば、平均待ち行列  $L_q$  は、

$$\begin{aligned} L_q &= \sum_{n=1}^{\infty} n \{s \bar{P}_n(s)\}_{s=0} = 2 \rho^2 y_0 / (y_0 - 1) \\ &\quad \times [2 \rho^2 y_0 + (1 + 2 \rho) (y_0 - 1)] \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} y_0 &= x_0(s) |_{s=0} \\ \rho &= \lambda / 2 \mu \end{aligned}$$

したがって、平均待ち時間  $t_{\bar{w}}(S)$  は、

$$t_{\bar{w}}(S) = L_q / \lambda \dots\dots\dots (21)$$

と求まる。

ii) 中・大型船舶用閘門の数学モデル

このモデルは、窓口 (閘門) が 1 個で、サービス時間が  $k$  次のアーラン分布である。このシステムは、 $\chi^2$ -バルク サービスの待ち合せモデル ( $\chi^2$ -Bulk Service Queue Model) として解析できる。すなわち、サービス機構をおのおの独立な平均値  $1/\mu$  の指数サービスの位相 (phase) に分解する手法を用いて解析される。各位相にサービス順序とは逆の番号をつけておく。つぎのような確率を導入する。

$C_r$  :  $r$  番目の位相より、サービスが開始される確率

$P_n, r$  : 待ち行列が  $n$  隻で、サービスが  $r$  番目の位相内にある確率

$P_0$  : 閘門が空である確率

このシステムの定常状態での状態方程式は

$$\begin{aligned} &-(\lambda + \mu) P_n, r + \lambda P_{n-1, r} + \mu P_n, r+1 \\ &\quad + \mu C_r P_{n+s, 1} = 0 \\ &\quad (n > 0, 1 \leq r < j) \\ &-(\lambda + \mu) P_n, j + \lambda P_{n-1, j} + \mu C_j P_{n+S_1, 1} = 0 \\ &\quad (n > 0) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} & -(\lambda + \mu)P_{0,r} + \mu P_{0,r+1} + \mu C_r \sum_{m=1}^S P_{m,1} \\ & + \lambda C_j P_{0,0} = 0 \\ & (1 \leq r < j) \\ & -(\lambda + \mu)P_{0,j} + \mu C_j \sum_{m=1}^S P_{m,1} + \lambda C_j P_{0,0} = 0 \\ & -\lambda P_{0,0} + \mu P_{0,1} = 0 \\ & \dots\dots\dots(22) \end{aligned} \right\}$$

平均待ち行列  $L_q$  は、

$$L_q = \sum_{i=S}^{S+k-1} (y_i - 1)^{-1} \dots\dots\dots(28)$$

と求まる。同様にして、平均待ち時間  $t_{\bar{w}}(S)$  は、

$$t_{\bar{w}}(S) = \sum_{i=S}^{S+k-1} (y_i - 1)^{-1} - (k-1)/2\mu \dots\dots\dots(29)$$

と求まる。  
iii) 閘門開放時の数学モデル

このモデルは、ポアソン到着、指数サービスの待ち合せモデルであり、ケンドール (Kendall) の記号を用いれば、 $M/M/C$  として解析できる。結果のみを記せば、サービス中の船舶をも含めて、船舶の待ち行列が  $n$  隻である確率  $P_n$  は、閘門の数を  $C$  とすれば、

$$\left. \begin{aligned} P_n &= \frac{a^n}{n!} P_0 & (n < C) \\ &= \frac{C^C}{C!} \rho^n P_0 & (n \geq C) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(30)$$

$$P = \left\{ \sum_{n=0}^{C-1} \frac{a^n}{n!} + \frac{a^C}{C!(1-\rho)} \right\}^{-1}$$

と求まる。  
ただし、

$$\rho = \frac{\lambda}{C\mu}, a = \frac{\lambda}{\mu'} \dots\dots\dots(31)$$

平均待ち時間  $t_{\bar{w}}$  は、

$$t_{\bar{w}} = \frac{\rho^C}{C \cdot C! \mu' (1-\rho)^2} P_0 \dots\dots\dots(32)$$

と求まる。

4. 適正閘門規模算定例

(1) 費用関数の係数算定

(i) 船費

船費は、船種、船型によってまちまちであり、一意的に決定するのは困難である。本研究では、清水港で行なった調査結果を用いることとした。小型、中型および大型船舶の標準船型を、500 G/T, 3000 G/T および 10000 G/T とすれば、船費はおのおの 7 万円/日、30 万円/日 および 80 万円/日となる。

(ii) 貨物の金利

年利率  $r$  を 0.1、貨物 1 トン当りの平均原価  $k$  を 10 万円とし、一船あたりの平均積載貨物量を  $\xi$  とすれば、1 日あたりの貨物の金利  $C_3$  は、

$$C_3 = \frac{r}{365} \times \xi k \dots\dots\dots(33)$$

で求められる。本研究では、平均積載貨物量  $\xi$  を 400 トン (500 G/T), 2000 トン (3000 G/T), 6000 トン (10000 G/T) と仮定する。

(iii) 閘門建設費の償却費および管理・運営費

閘門は 図-1, 図-2 に示すような構造とし、その建設費  $C(S)$  は表-1 のように与えられている。表-1 は第四港湾建設局調査設計事務所 で積算されたものであり、

となる。  
つぎに三つの母関数を定義する。

$$\left. \begin{aligned} Q_n(x) &= \sum_{r=1}^j x^r P_{n,r} \\ F_p(x, y) &= \sum_{q=0}^{S-1} y^q Q_{pS+q}(x) \\ H(x, y, z) &= \sum_{p=0}^{\infty} Z^p F_p(x, y) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(23)$$

式 (23) の母関数を用いて式 (22) を変形し、サービス時間分布のラプラス変換

$$\beta(s) = \sum_{r=1}^j C_r \left(1 + \frac{s}{\mu}\right)^{-r}$$

を用いれば、

$$G(y) \equiv \sum_{n=0}^{\infty} y^n P_{n,1} = \sum_{q=0}^{S-1} P_{q,1} \times (y^S - y^q) / (y^S/k(y) - 1) \dots\dots\dots(24)$$

なる関係式が成立する。ここに

$$k(y) = \beta[\lambda(1-y)] = \sum_{r=1}^j C_r [\mu/(\mu + \lambda - \lambda y)]^r \dots\dots\dots(25)$$

一方、本モデルではサービス時間分布が、平均値  $k/\mu$  の  $k$  次のアーラン分布であるから、

$$C_k = 1, C_r = 0 \quad (r \neq k)$$

となる。サービス時間の確率密度関数は、

$$\{\mu^k t^{k-1} e^{-\mu t}\} / (k-1)! \quad (t \geq 0)$$

であるから、式 (25) の  $k(y)$  は、

$$k(y) = [\mu/(\mu + \lambda - \lambda y)]^k$$

となり、式 (24) の  $G(y)$  の分母を零ならしめる特性方程式

$$g \equiv y^S / [\mu/(\mu + \lambda - \lambda y)]^k - 1 \equiv 0 \dots\dots\dots(26)$$

は、ルーチエ (Rouché) の定理より  $\lambda k/\mu < S$  のとき、単位円内に  $S$  個の相異なる根  $y_i$  ( $i=1, \dots, S-1$ ) および 1 を有することが示される。

一方、式 (24) の  $G(y)$  は単位円内で正則であるから、分子にも  $(y-1) \prod_{i=1}^{S-1} (y-y_i)$  なる因数を有しているから、分母、分子からこの因数を約して、

$$G(1-0) = 0$$

を用いれば、

$$G(y) = \frac{S+k-1}{\prod_{i=S}^{S+k-1} (1-y_i)} (y-y_i) \dots\dots\dots(27)$$

となる。ここに  $y_i$  ( $i=S, \dots, S+k-1$ ) は式 (26) の単位円外の根である。したがって、式 (27) を用いれば、

表-1 開門の建設費

	開門の形状寸法					建設費 (千円)				
	入開隻数	長さ m	水深 m	幅 m	ゲート数	開室部	堤外開口部	堤内開口部	ゲート部	合計
10 000 GT 級	2 隻	370	-13.5	40	2	2 550 000	704 000	608 000	120 000	3 982 000
	3	575	"	40	3	3 962 000	704 000	608 000	240 000	5 514 000
	4	760	"	40	3	5 237 000	704 000	608 000	240 000	6 789 000
	4	370	"	78	2	3 391 000	1 190 000	1 028 000	120 000	5 729 000
3 000 GT 級	2	310	"	23	2	1 491 000	456 000	381 000	44 000	2 372 000
	3	485	"	23	3	2 332 000	456 000	381 000	88 000	3 257 000
	4	640	"	23	3	3 078 000	456 000	381 000	88 000	4 003 000
	4	310	"	44	2	1 783 000	630 000	526 000	44 000	2 983 000
	6	330+310	"	44	23	3 389 000	630 000	381 000	88 000	4 488 000
	6	485	"	44	2	2 789 000	630 000	526 000	44 000	3 989 000
500 GT 級	2	140	-5.5	15	2	474 000	174 000	154 000	20 000	822 000
	3	210	"	15	2	712 000	174 000	154 000	20 000	1 060 000
	4	280	"	15	2	949 000	174 000	154 000	20 000	1 297 000
	4	140	"	28	2	539 000	202 000	180 000	20 000	941 000
	6	210	"	28	2	808 000	202 000	180 000	20 000	1 210 000
	6	140+140	"	28	15	1 013 000	202 000	154 000	20 000	1 389 000
	7	140+140	"	28	15	1 251 000	202 000	154 000	20 000	1 627 000
	8	280	"	28	2	1 077 000	202 000	180 000	20 000	1 479 000
	9	210	"	41	2	904 000	230 000	205 000	20 000	1 359 000
	10	350	"	28	2	1 347 000	202 000	180 000	20 000	1 749 000
	11	420	"	28	2	1 616 000	202 000	180 000	20 000	2 018 000
	12	280	"	41	2	1 206 000	230 000	205 000	20 000	1 661 000

開門部、堤内、外開口部およびゲート部に分けて積算されている。開門の償却年数  $n$  を 50 年、年利率  $i$  を 0.06 として、

$$C_1(S) = \frac{1}{365} \times \frac{i}{1 - \left(\frac{i}{1+i}\right)^n} C(S) \dots\dots\dots (34)$$

より償却費を算出する。

開門管理、運営費を算出するための  $\eta$  に関しては、開門に対する  $\eta$  の資料が得られなかった。しかし、一般の港湾構造物に対しては、 $\eta=0.7$  といわれている。本研究では、安全側に考えて、 $\eta=1.0$  と仮定することとした。

(2) 船舶の平均待ち時間の算出

小型船舶用開門のサービス時間は、尼崎開門のサービス時間より推定した。また中・大型船舶用開門のサービス時間に関しては、実測が不可能であるので、(3) で述べたように、サービス時間を構成する各変量の実測値を用いて式 (4) を計算するとともに、パナマ運河のペドロ・ミゲル開門 (1 段引揚式) の平均サービス時間が 35 分であるということ等を考慮して、推定した。

一方、開門開放時のサービス時間は、小型船舶に対しては、尼崎開門の通開状況より約 1 分程度であると推定した。さらに中・大型船舶の航行安全間隔時間は 5~10 分程度であろうと考えた。この場合、式 (32) より平均待ち時間を求めると、1 分以下となった。

開門操作時間の平均待ち時間  $t_w(S)$  は、平均到着隻数  $\lambda$ 、平均サービス時間  $k/\mu$  を表-2 のように与えて、式 (21)、(29) を用いて算定した。 $S$  を横軸にとり、開

表-2  $\lambda, k/\mu$  および  $k$  の値

a) 小型船舶用						
$\lambda$ (隻/分)	$k/\mu$ (分)					$k$
3/10	12	15	18	20		1
6/10	12	15	18	20	25	1
b) 中・大型船舶用						
$\lambda$ (隻/分)	$k/\mu$ (分)					$k$
2/60	30	35	40	45		3.4
3/60	30	35	40	45	50	3.4
4/60	30	35	40	45		3.4
	50	55				

門サービス時間を種々に与えて、平均待ち時間の変化を図示したが、その一例を示すと図-7, 8 のとおりである。

(3) 費用関数の算出

(1)、(2) で求めた各値を用いて、式 (1) で求め

図-7 バルク サービス (窓口数 2) における平均待ち時間

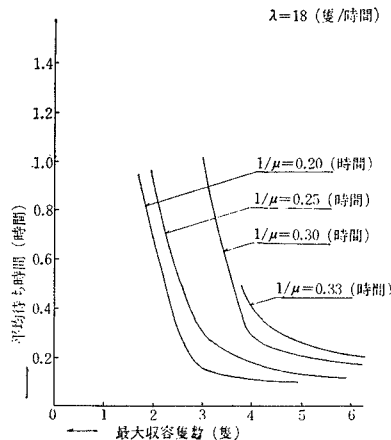


図-8  $\chi^2$ -バルク サービスにおける  
平均待ち行列時間

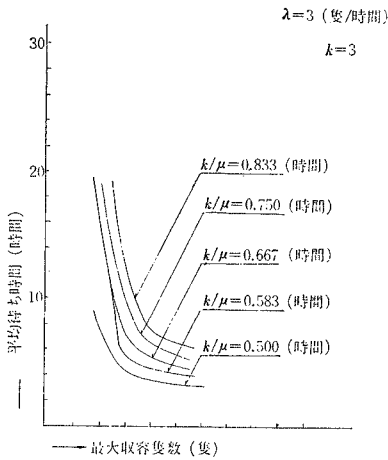
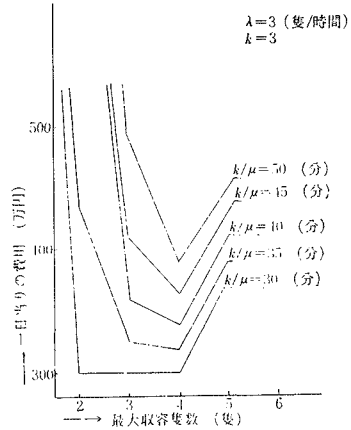


図-10 大型閘門の費用関数



た費用関数を計算することにより、1日あたりの閘門の費用と最大収容隻数との関係を図示することができる。一例を示すと小型船の  $\lambda=18$  のときには図-9、大型船  $\lambda=2$  の場合は図-10 のようになる。

図-9、図-10 より、 $\lambda, \mu$  の組み合わせのそれぞれに対して、費用関数  $C_i(S)$  が最小となる  $S$  を読みとることにより、最適閘門規模を与える閘室の最大収容隻数が決定される。

その結果の一例を表示すれば、最適規模は表-3 のように算定される。

(4) 計算例に関する考察

図-9、図-10 の費用関数をみれば、最大収容隻数  $S$  の変化に関して1日当りの費用が不連続に変化している。これは、表-1 に示されるように、閘門の建設費が  $S$  の単調増加関数ではなく、入閘船舶を閘室に配列する方法で大きく変化するためである。表-1 より、設計する場合には入閘船の配列も長方形になるような  $S$  の場合のみを考慮すればよいことが判明する。一方、図-7、

図-9 小型船舶用閘門における  
費用関数

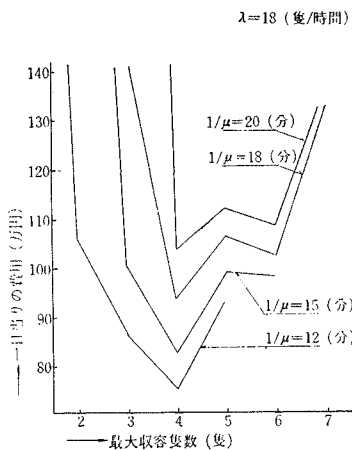


図-8 の平均待ち時間のグラフより、サービス時間が少々変化しても、平均待ち時間があまり変化しない。さらに、 $\chi^2$ -バルク サービスの平均待ち時間は、サービスの次数が  $(k+1)$  に変化してもあまり変化しない。したがって、サービス時間の少しの変化では、最適規模が変化しないことが判明する。このことより、このモデルを適用するにあたっては、式(4)に用いられる各変量を実測し、推定した値をサービス時間として用いても十分実用的であることが判明した。

表-3 最適規模算定例

		中型船舶用閘門		大型船舶用閘門	
		$k=3$	$k=4$	$k=3$	$k=4$
$\lambda$ (隻/時)	$k/\mu$ (時)	$S$ (隻)	$S$ (隻)	$S$ (隻)	$S$ (隻)
2	0.500	2	2	2	2
	0.583	2	2	2	2
	0.667	2	2	2	2
	0.750	4	2	2	2
3	0.500	4	4	2	4
	0.583	4	4	4	4
	0.667	4	4	4	4
	0.750	4	4	4	4
	0.833	4	4	4	4
4	0.500	4	4	4	4
	0.583	4	4	4	4
	0.667	4	4	4	4
	0.750	4	4	4	4
	0.833	6	6	6	4
	0.917	6	7	6	4

小型船舶用閘門		
$\lambda$ (隻/時)	$1/\mu$ (時)	$S$ (隻)
18	0.200	4
	0.250	4
	0.300	4
	0.333	6
36	0.200	6
	0.250	6
	0.300	9
	0.333	9
	0.417	12



船舶の待ち時間の減少は、最大収容隻数  $S$  の増加と、サービス時間  $k/\mu$  の減少の両者により期待される。本研究では、 $S$  のみを独立変数として考えたが、 $S$  を変化させると、当然開室の容量が変化する。注出水能力が  $S$  の変化前と同一であれば、注出水時間が変化し、したがって、サービス時間が変化する。本研究では、 $S$  の変化とともに注出水能力も変化し、サービス時間が一定であると考えている。しかし、このために注出水機構に費用がかかるが、ここではその費用は管理運営費として建設費の  $\eta$  倍に含ませている。しかし、注出水能力を変化させるために、その機構を本質的に変えることが必要となる  $S$  の値で、その費用は不連続に変化する。さらに、到着隻数  $\lambda$  の時間変動が強い場合、その到着隻数  $\lambda$  の変化を考慮してサービス時間をアダプティブに変化させることにより、船舶の待ち時間を減少させ、費用を最小にするような管理運営の方法に関する研究も重要であろう。このためにも、サービス時間の変化にもなる開門の費用の変化の関係を解析する必要がある。

以上より、開門を計画するにあたっては、長期間の  $\lambda$  の変動を予測しておくことが必要であり、 $\lambda$  の最大値に対応して開門の規模、すなわち最大収容隻数  $S$  を決定することが重要である。それとともに、開門に複数個のゲートを設けることにより、開門への到着隻数  $\lambda$  の関数として開門の収容隻数を変動させ、これによってサービス時間の減少をはかるという管理方式の採用が考えられる。この案は今後検討するに値するものであろう。

## 5. 結 言

本研究は、わが国経済の高度成長を維持するための臨海工業地帯の開発、また現存の臨海工業地帯における地盤沈下に起因する高潮防災として、新たな時代的要求としてクローズ アップされてきた防潮堤の建造にもなって提起された開門の適正規模決定法に関するシステムアプローチを行なったものである。

このような防潮堤は、一面においては、港湾機能の向上をもたらすが、反面、開門を通過しての船舶の入出港は、輸送活動チェーンのあい路となる。このような輸送活動のあい路が輸送経済におよぼす影響は非常に大きい。本研究においては、輸送経済的な観点より、開門の適正規模を定義するとともに合目的性を測定しうる目的関数を設定した。ついで、開門における船舶の輻輳現象を、Bulk-Service Queuing Model によって解析することにより、開門での船舶の平均待ち時間、平均待ち隻数に関する正確な情報が獲得できることを示した。さらに、開門の適正規模はこの情報を用い、さきに設定した目的関数の値を計算することによって決定することができるということを示した。計算結果より、

(1) 入開船舶の配列により、開門建設費は大きく変

化し、 $S$  の単調増大とはならない。船舶の許容平均待ち時間を与え、必要な  $S$  を決定しようとする方法論においては、 $S$  を連続的に変化させることは適切でなく、開門建設費が単調増大となる  $S$  についてのみ行なう必要がある。

(2) サービス時間が少々変化しても適正規模は変化しない。

(3) アーラン分布の次数  $k$  が少々変化しても適正規模は変化しない。  
ということが明らかになった。

一方、輸送活動は公共的性格が強いので、輸送施設の建設整備の経済効果に関しては、一般に直接効果より間接効果の方が大きいといわれている。しかし、この種の間接効果の科学的測定法はいまだ確立されていない。したがって、本研究においても、開門の適正規模は、輸送経済的直接効果という側面より評価しているにすぎない。さらに、輸送の目的および入港船舶の動態という現象に注目して港湾をみた場合、港湾計画の中心はバース等のけい岸施設である。したがって港湾計画においては、船舶の港湾での動態を一貫して解析し、他の港湾諸施設計画との有機的な関連において、これを策定しなければ、その効果を十分発揮することが期待できない。このように他の港湾施設との関連を考慮し、さらに間接効果をも含めた総合的評価による適正開門規模決定に関する問題が今後に残された研究課題である。終りにのぞみ、本研究に対し終始ご指導たまわった京都大学長尾義三教授、運輸省第四港湾建設局財木調査設計事務所長浦江恭知企画課長、資料収集・計算その他の労をわずらわした京都大学細見 隆君に対し心から感謝の意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 長尾義三：最近における港湾計画の手法について、港湾協会、昭和 35 年
- 2) 運輸省第四港湾建設局編：開門海峡縮切堤の構想、昭和 41 年
- 3) 建設省編：ドイツ内水路の概要、昭和 41 年
- 4) 建設省計画局地域計画編：パナマ地峡における運河輸送に関する長期計画策定報告書、昭和 41 年
- 5) 運輸省第四港湾建設局小倉調査設計事務所：開門海峡潮流模型実験報告書（海峡内埋立の場合）、昭和 41 年
- 6) 日本交通学会編：地域開発と交通、昭和 39 年
- 7) 森村英典・大前義次：待ち行列の理論と実際、日科技連、昭和 37 年
- 8) K. L. Arora : "Two-Server Bulk Service Queuing Process", J.O.R.S.A. Vol. 12. 1964.
- 9) N. K. Jaiswal : "Time-Dependent Solution of the Bulk-Service Queuing Problem", J.O.R.S.A. Vol. 8. 1960.
- 10) 本間鶴千代：待ち行列の理論、理工学社、昭和 41 年
- 11) D.T. Steer : A.C.C. Page : "Feasibility and Financial Studies of a Port Installation", Operational Research Quarterly, Vol. 12. 1961.
- 12) 第三港湾建設局・兵庫県・尾崎市：尾崎港開門増設計画について、昭和 37 年 (1967.8.11・受付)