閘門施設における交通管理の研究

三 木 楯 彦*

A Study on Traffic Control at the Locks

Tatehiko MIKI

Abstract

Author investigated the traffic characteristics of ships passing through the Nakaura Locks which were constructed under the project of reclamation and water-refreshening of Nakaumi, Simane prefecture. There are three lock chambers of different dimensions, one of which was designed so that a ship with maximum size of 3,000 GT may pass through.

A computer simulation of bulk service type queueing model has been developed from a base of detailed data collected over a five-month period. The various arrival patterns and serving patterns by ship types, sizes, and so on, together with the simulated lock conditions are then used to generate delay distributions throughout the various stages of the system. Subsequently, the model was used to test alternative strategies in order to improve both the lock performance and ship passing time.

1. は し が き

運河は元来水運のための人工水路の意味に用いられる語であると考えられる。歴史的には、運河は交通を便ならしめるため、またかんがい、排水、給水のために発達したが、内陸水路としての運河の発達を見たのは14～15世紀ころ、閘門(lock gate)が考案された後のことである。

閘門は水面の高さの違った二つの水域の間に船舶を通すことを目的としてつくられた門である。閘門には2種あって、その一つはヨーロッパの河港に多く見られるふ頭用のドックの入口につくられるものと、他は高さの違う水面をいつでも船を通せるようにしたもので、河川・運河などに広くつくられている。

運河や閘門における船舶交通の研究はさほど多くはないようであるが、例えば Griffiths⁽²⁾ は全長 160 km のスエズ運河をその両端から数組の大きな船団を通航させる場合の最大通航容量を求めている。また、Wilson⁽³⁾ は米国の内水におけるはしけ運送の混雑が主として閘門において発生している点に着目し、待ち行列理論の適用可能性を論じている。

さて、本研究で対象とする中浦閘門は農林水産省中海干拓事務所が中海と宍道湖を淡水化するために設けた中浦水門施設の一部である。従来、外海から境水道を通して中海へ出入する船舶は図1に見るように大根島の西側(森山地区)を航行して松江、米子、安来の各港に寄港していた。しかし、この森山地区の干拓工事が進み、現存では上記の船舶はすべて中浦閘門を利用している。

筆者らは数年前より我国では初めての大規模な閘門の管理運営に関する調査をする機会をえた^{**}。中浦閘門は表1および図2に示すように三基の閘門を有し閘門施設の中央部に操作室があって、そこで閘門の出入口にラジアルゲイト(開けるときにゲイトが回転して閘門底に没する方式)があり、その前面には船舶の衝突を防止する

* 正会員 神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

** これらの研究の一部として下記がある。

本田, 三木, 原: 閘門通航容量の事例研究, 神戸商船大学紀要第24号(昭和51年10月)

図 1, 図 2 中浦水道, 中浦閘門設備

表 1 中浦閘門の大きさ

区 分	有効長	有効幅	敷 高	壁 高
中央閘門(大)	150 m	20m	(-) 7.5m	+3m
西 閘 門(中)	103.5	14	(-) 5.5	+3
東 閘 門(小)	70	12	(-) 5.0	+3

注) 敷高は水面下閘門側壁の水底までの深さをいう

しいが、一応以下のようにまとめられよう。

(1) 閘門施設利用者の問題

(a) 船舶の通閘利用 (閘門の混雑による遅れ, 船舶の待機場所の不足)。

(b) 陸上交通の道路橋利用 (車両・歩行者・自転車利用者の遅れ, 不規則な運行, 長すぎる運行間隔)。

(2) 環境に関する問題

(a) 閘門の開閉回数増加による淡水化事業の遅れ。

(b) 騒音, 振動, 排ガス。

(3) 安全に関する問題

船舶, 車両, 歩行者, 自転車の安全。

上記の諸問題に対処するための交通管理上の個々の手段もまた非常に多岐にわたるが, 便宜上, 次のようにまとめられよう。

(1) 交通需要発生に影響を及ぼす手段

防衝チェーンがある。中央の閘門の両先端に長さ 144m の誘導棧橋があり船舶の安全な運航を確保している。閘室内で導船をするために牽引用キャリア, キャプスタンがあり, 他に信号設備, 照明設備, レーダ等が航行を支援する。

閘門の幅方向の両翼に幅 32m の水門が 5 基ずつ設けられており, 中海の水位が外海に比べて必要以上に高くなると水門を操作して水位を調節し, あるいは洪水のときは全開して放水させる。この水門からの流れによって閘門の先端部付近でふつう 1 ノット程度の流速がある。この閘門を横断するための道路橋(幅 7m)があり, 船舶が閘門を航行中は道路橋をはね上げるので道路交通がその間, 遮断される。

以上は中浦閘門の概要であるが, 本来の中海の干拓事業の推進と並行して中浦水道の海上交通およびこれに関連するさまざまな交通管理上の諸問題がある。交通管理という語は一般的には非常に広い意味を持つものであり, 既存交通施設を交通需要に応じて処理するソフトの手段の総称である。ここでの考察は, 中浦閘門施設の増設・改修等のハードの側面には触れずに本施設において将来本格的な施設整備が完成するまでの過渡的措置として既存施設の有効適切な利用を図るために短期的に実施しうる手段を見出すことを目的とする。

中浦閘門の交通管理上の諸問題は非常に多岐にわたり, 問題の単純な分類は難

時間帯交通規制、船舶への牽引等の補助作業の夜間休止。

(2) 交通流の円滑化を図るための手段

一方通行、中央線変移（リバーシブル・レーン。現在、中央閘門の使用は北向船または南向船のいずれにも先着優先に従って許容されている）、信号制御の高度化、経路誘導制御など。

(3) 交通の安全を主目的とする手段

(4) 環境改善（殊に淡水化の促進）を主たる目的とする手段

(5) 船舶の係留・停泊・停留の許容又は制限

2. 閘門を利用する船舶の交通量

中浦閘門は未だ淡水化のための本格稼働を実施していないが、既に昭和 53 年 7 月以来、中海および宍道湖に至る 50 総トン程度以上の船舶の唯一の通路であることから詳細な通閘船の実績資料が入手できる。閘門施設の本格稼働に先立ち、本施設の有効適切な利用を図るために通閘シミュレーションを実施したが、実績にもとづく交通量の特性は次のとおりである。

現在、外海から境水道経由で中海へ航行する船舶は 5 箇月間 153 日の平均によれば、南航船（中海向き）26.74 隻/日、北航船（外向き）31.75 隻/日である（図 3）。出入する隻数に小差があるのは筏と曳船のカウントのしかたの相違による。到着船の毎時刻の到着確率は南航、北航ともほとんど同じで、正午を境にして午前中に北航が多く、午後には南航が上回る。この傾向は船型が大きくなると逆の傾向がある。いわゆるラッシュ・アワーは午前 7～9 時と、午後 4～6 時に見られる。

便宜上、現地での慣行に従って船種を次の 6 種に定めた。

船種 1（50 総トン未満） 船種 2（50～100 吨） 船種 3（100～300 吨）

船種 4（300～400 吨） 船種 5（500 吨以上） 船種 6（筏等）

通閘船の 85% は船種 1 で、船種 2 は 1.6%、船種 3 は 3.4%、船種 4 は 4%、船種 5 は 2%、船種 6 は 4% である。船種 4～6 の船舶は中央閘門をもっぱら通行するが、5 箇月の平均で 1 日当り南航、北航それぞれ 1.8 隻にすぎない。なお、筏は常時南航（1 日当り 2.5 隻）で、ごく稀に北航がある。

表 2 通航船舶の大きさの限界

区 分	船 幅	喫 水
中央閘門(大)	16.5m	6.7m
西 閘 門(中)	11.5	4.9
東 閘 門(小)	9.9	4.5

図 3 閘門別月平均および 5 カ月平均交通量

現在、船舶を閘門通過させる方式は概略次のとおりである。

閘門を通航できる船舶の大きさは表 1 に示した閘室 (lock chamber) の幾何的形狀により制限されるので余裕水深と離岸距離といった操船上の安全上から、表 2 の寸法を通航船の大きさの上限としている。

閘門付近は海上交通の原則である右側航行として東閘門（小）は中海から外向き、西閘門（中）は外海から中海へ向かう際に使用する。東西閘門は慣行として 300 総トン以下の船舶が通行に利用している。中央閘門を船舶が航行する場合は原則として閘門に配備されるドックマスターが誘導する。その手順は入口ゲートを開放しておき、船舶の到着順に閘室に導く。閘室内収容隻数は船舶を一縦列係留をする慣行上、東西閘門には船種 1 で 5 隻、船種 2 で 3 隻、船種 3 で 2 隻、船種 4 以上は 1 隻で、大小の船種の船を同一時に収容する場合は上記の大きさの占有比率の合計をもって最大収容隻数としている。中央閘門では通常船種 4 以上の中大型船が通航しているが、小型船が輻輳する場合に中央閘門をリバーシブル・レーンとして利用することがある。曳船の使用や綱取りのような補助作業を要する船舶（便宜上、これを「要補助船」と呼ぶことにする）は 1 度に 1 隻のみを通航させている。補助の内容はキャリアで牽引し、通航船

の船尾をタグボートで制動する方式である。なお、現在は陸上作業者の当直体制の制約から補助作業中の他閘門の操作と夜間の補助作業を実施していない。

通閘所要時間は閘門前方から船舶が閘門進入、通過ののち、当該閘門が次に入閘する船舶に対する受入れ準備を完了するまでの時間と解されるが、自航船で 20 ± 5 分、要補助船で 40 ± 5 分であるとされている。

3. 閘門通行の分析

3.1 待ち行列理論の適用

効果的な閘門の運営は十分な閘門設備や船舶の通閘支援設備および多方面に訓練のゆきとどいた陸上人員があつてこそ可能である。現在、中浦閘門ではゲート操作こそ行われていないが、操業以来1箇年間の通閘隻数の詳細な資料がある。近い将来、淡水化のための本格的なゲート操作が行なわれるに先立ち、閘門のさまざまな運営基準に対して船舶の通行能力がどのように変化するかを研究する。

この閘門施設の利用形態は典型的な待ち行列過程であつて、閘門通過というサービスをもとめて到着する船とサービス提供側との間に発生する待ち行列に関するさまざまな性質を含んだ確率過程である。この施設の利用形態からモデルの特徴が集団サービス (bulk service) となる点が分析を比較的難しくしている。集団サービスではエレベータやバスなどに見られるように、客を1人ずつサービスする代りに幾人かを一緒にサービスする。閘門モデルの場合、集団サービスの集団の大きさは通行船の大きさに従って一定数をこえない。したがってサービスの始点で待ち船全部がサービスをいっしょに受けるか、その中の一定隻数がサービスを受けることになる。

4カ月の通行船の実績から1日平均通行量は65隻であるが、東・中央・西閘門にそれぞれ平均27, 7, 32隻の船が通過する。毎日の通行船の隻数は最小32隻ないし102隻の範囲内で変動しているが、現在の交通量に対して中浦閘門の通行容量 (例えば1日あたりの) の標準値を求めたい。

第一近似として通行船のすべてが補助作業を要しないものとし、かつすべての船が船種1 (実際には85%が船種1) で一定の到着率のポアソン到着であると仮定して、集団サービスの待ち行列モデルを作ると、1船あたりの待ち時間は図5のようになる。縦軸は待ち時間 (単位: 分)、横軸は船の平均到着率、図中の曲線は1回の集団サービスで処理しうる船の隻数である。

1時間あたりの到着率を現在の交通量2.5隻とすれば、1度に3隻までまとめて通行させる ($c=3$) のとき、待ち時間は約24分となる。しかし、 $c=4$ 隻で12分、 $c \geq 5$ 隻で待ち時間10分と急激に減少する。

図4 航行方向別の交通量日変化 (5カ月平均)

図5 集団サービスにおける通行船の平均待ち時間
ここで λ : 通行船の平均到着率 (鎖線は現在の交通量)

C : 1回あたりの集団サービスの大きさ

なお、図5は次式に基づいて作成されている。すなわち、集団サービスにおける船の平均待ち時間 W は⁽⁴⁾⁽⁵⁾

$$W = \frac{1}{2} + \frac{1}{\lambda} \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{x=1} \quad (1)$$

ここで $F(x)$ は各サービス当初の客の待ちが r 人である確率 f_r の母関数である。

$$F(x) = \frac{\sum_{i=0}^{c-1} (x^c - x^i) g_i}{x^c - e^{-\lambda(1-x)}} \quad (2)$$

ここで、

c : c を超えない隻数の船舶を集団サービスで処理する。

λ : 船の到着率 ($\lambda < c$)

g_i : サービス期間の終了時に待ち船が i 隻である確率 ($i=1, 2, \dots, c-1$)

x : 母関数の変換変数

(2) 式にて c 個の確率 $g_1, g_2, \dots, g_{c-1}$ がきまれば $F(x)$ が求まる。 $e^{-\lambda(1-x)}$ が $|x| < 1 + \delta$ ($\delta > 0$) で正則で、かつこの領域内で分母の零点が一致するように最初の c 個の g_i を選べば $F(x)$ も正則であるから $x=1$ で絶対収束する幅級数に展開できて、これから g_i がすべて定まる。

現実には通行船の 10% 程度が要補助船であるから、その船が通過中は本施設の陸上作業要員の制約もあって東西の開門は閉鎖される。要補助船の到着またはサービス開始を待ち行列システムの故障であると解すれば、待ち行列理論でいわゆる「割込みのある」待ち行列のモデルが利用できる⁽⁴⁾。図6は縦軸に通過船(要補助船を除く)の平均待ち時間、横軸に補助作業を要する船の到着率(すなわち東西開門の閉鎖の発生率) ν をとり、自航船の到着率 λ をパラメータとして次式に基いて画かれている。

自航船の平均待ち時間 W は

$$W = \frac{\lambda \{1 + \nu(2T + T^2) + \nu^2 T^2\}}{2(1 - \lambda - \lambda \nu T)}$$

λ, ν : 自航船および要補助船の到着率

T : 要補助船の平均サービス時間

この式は優先権のある待ち行列系において、行列中での客の平均待ち時間を表わすもので、要補助船の到着は窓口業務の故障等による中断と解釈できる。

現在交通量において $\lambda=2.5$ 隻/時、 $\nu=0.25$ 隻/時、 $T=40$ 分であり、平均待ち時間が8時間に及ぶことが判る。ただし、このモデルは集団サービスでなくて、1回に1隻の通過を仮定しているの、現実に集団サービスが行われるとき待ち時間は図5に見られるように曲線は右に移行するものと推察される。残念ながら、集団サービスにおいて割込み優先権を持つ船(要補助船)の到着がある場合の理論解がえられないので、今回はシミュレーションによって待ち時間を推定した。

3.2 シミュレーションによる分析

通門モデルの実際面の要求に応じた複雑な機構をもった待ち行列の研究で現在、利用できるものがないこととあわせて、サービスを受ける船舶の属性(船種や通行上の手続き)が一樣でないためにシミュレーションを解析に採用した。このシミュレーションは船舶が開門への到着順に、船種(総屯数)、通行方向、使用開門(東、西、中央の三つ)、タグボート等による補助作業の有無に従って通航船を処理するしくみを持つ。主たるモデルは汎用言語である BASIC によって作成した。しかし、システム・シミュレーションの妥当性を確認するための適当な検証が困難であるので、基本モデルにつきシミュレーション言語 GPSS で独立にモデルを作成した。両者の言語の相違から、これらは同一のロジックを構成するものではないし、まして完全に現実の性質を記述することはできないが、後述するようにシミュレーション・モデルから得られた結果は管理上の施策を立案する上で支障

図6 割込み優先権を持つ船(要補助船)の到着
曲線は個別サービスの場合の計算値、×印は集団サービスのシミュレーション結果の待ち時間の上限を示し、下方の線分は変動幅である

がない範囲に収まった(図 6 参照)。

開門システムの計算機モデルを作製するさいの仮定は概略、次のとおりである。

- (1) 既存施設の有効適切な利用を図るために短期的に実施しうる手段を見出すことであるから、研究の対象期間に開門施設の増設等の変化はないものとした。
- (2) 南行船と北行船の到着隻数は一定の日変化を持つものとする。ただし、各時間帯(1時間きざみ)の中での船舶は一定の平均到着間隔をもち、互いに独立な指数分布をもつと仮定する。
- (3) 本研究では開門の運営に従事する陸上要員の人数に一定の制約を設けた。しかし、この制限もモデルを少し修正すれば人数の増強等の効果を容易に考察できる。
- (4) 3基の開室の運営は第2節で述べたように、小型船は東西開門を、そして300総トン以上の船舶は中央開門を通行することを前提にした。
- (5) 開室の収容隻数は種々の船型の船舶の組合わせに対して第2章で触れた一定の格付(rating)を用い、サービス基準は先着順、すなわち先入先出(FIFO)の集団サービスとした。

複数窓口(ゲート)の集団サービスの待ち行列系のシミュレーション・モデルは概略、次の構成である。システムの状態に変化をもたらす事象(イベント)を未来事象表ともいうべき事象の一覧表として主プログラムに用意し、主プログラムは未来事象表の中で最も早い時刻に起こる事象を選び出し、シミュレーション実行中の時刻を示している時計をこの事象が起こる時刻まで進め、それからその事象ルーチンと呼び出す形式の可変時間増加法による離散系モデルである。

開門システムの状態に変化をもたらす事象は、(a)船舶の到着、(b)サービス開始、(c)サービス終了、(d)開門の開閉、(e)グラフの出力、以上5つの事象である。サービス開始という事象は到着という事象が起こった時点、あるいはサービス終了という事象が起こった時点のいずれかで起こる。しかもサービス開始または終了が開門の開閉に関連しているが、集団サービスであることにより常に両者が同時に起こるとは限らない。

主プログラムの冒頭にはシミュレーションに先立つ初期値の設定、時刻別・向き別の毎時刻平均到着率、平均サービス時間などの読み込みといった前処理がある。シミュレーションの進行をコントロールする開門運営のロジックに引続いて、シミュレーション終了時の後処理がある。

3.3 シミュレーション結果とその分析

開門の有効適切な利用法を案出するには交通管理の多様な手法(第1章参照)の組合わせに対してシミュレーションを実施してみることである。なぜならこれらの交通管理の手法のうち定量的効果が知られているものは少なく、大部分はその効果の予測が難しい。また、交通管理の個々の手法単独では十分な効果が期待できず、副作用ともいうべき好ましくない効果が発生することがある。そこで、いくつかの手段を組合わせて適用し、弱点を打消し合ったり、相互に補強し合うことを考慮する必要がある。

シミュレーションを実施したモデルの数は上記の意味での運営水準の相違に応じて10数個に及ぶ。運営水準として次の3項目につき2ないし3個のレベルを設けた。

A. 開門の開閉

A0 当直体制による制約から要補助船通行中は他開門を操作しない。自航船の場合のみ2開門同時に操作できる。

A1 通行船のあるかぎり3開門同時操作できる。但し要補助船はたかだか1隻の通行を許す。

B. 開閉間隔

B0 60分ごとに定時に開門する。

B1 30分ごとに定時に開門する。

B2 船が到着するごとに開門する。

C. 後続船の待ち許容時間

C0 後続船が10分以内に到着する場合には開門操作を遅らせる。

C1 後続船が5分以内に到着する場合には開門操作を遅らせる。

これらの組合せにより開門の運営水準は一般に $A_i B_j C_k$ のように書くことができる。添字 i, j, k のそれぞれの数が増えるほど陸上作業の負担の水準も増大すると考えてよい。例えば $A0 B2 C0$ は「一度にたかだか2

閘門同時操作する。船が到着するごとに開門するが、後続船が 10 分以内に到着する場合には操作を遅らせる」等々という運営形態を持つモデルを意味している。実行可能な作業水準は 12 通りあるが、これらの運営水準に対するシミュレーション結果から現在の交通量や陸上作業要員の制約の下では適切でないものを除去した。この点に関しては前報⁽⁴⁾参照。

以下では現在および将来の交通量に対応できる作業水域をもつ有力なモデル A 0 B 2 C 0, A 0 B 2 C 1 について述べる。

(1) 閘門の開閉回数と待ち時間

実績による平均通開量である 65 隻を通過させるために各閘門をそれぞれ平均 20 回, 7 回, 19 回ずつ開閉している。毎日の通行船の隻数は最小 32 隻ないし 102 隻の範囲で変動しているとはいえ、東西の閘門の利用効率は低く集団サービスが効を奏していない。

閘門の開閉は 1 日の通開隻数と密接な関連があり、現在交通量により 2 週間, 910 隻のシミュレーション結果から

$$y = 0.60x + 7.40 \quad (\rho = 0.957)$$

ここで y : 閘門の開閉数, x : 1 日の通開隻数, ρ : 相関係数

3.1 節で掲げた図 6 から判るように要補助船の存在はきわめて通開の能率を低下させる。モデル A 0 B 2 C 0 の場合,

$$y = 4.44x - 1.79 \quad (\rho = 0.847)$$

ここで y : 待ちの発生した船の平均待ち時間, x : 要補助船の隻数, ρ : 相関係数

補助作業中は陸上支援要員の制約があり、当該閘門以外での船の通行ができない。補助作業船の多い日には 1 隻の平均待ち時間が 2 時間を越えることがある。現在の交通量に対しては要補助船の隻数も少なく、ほとんど待ち時間は問題にならないが、閘門の 1 回の開閉あたりの利用効率が低いことはこの施設に固有の淡水化の促進という目的からいって好ましくない。それゆえ、補助作業の省力化、要補助船の通開のスケジュール化、陸上支援要員の増強のいずれかの方策が急務であるように思われる。

(2) 後続船の待ち許容時間の効果

1 回当りの閘室への収容隻数を増し、閘門の開閉回数を少なくさせ、ひいては通行船の平均待ち時間を小さくする意味で、後続船の待ち許容時間 5 分および 10 分の 2 例 (モデル A 0 B 2 C 0 と A 0 B 2 C 1) を比較する。

シミュレーション結果は図 6 に×印で示される通りであるが、10 日間の平均待ち時間の変動のレンジを垂直の実線で示してある。要補助船の到着率 μ が 1/12 から 4/12 (隻/時) に増大するにつれて、集団サービスを実施しているにもかかわらず自航船の待ち時間は 1 時間から 4 時間に増える。

同じモデルにつき交通量を増した場合にも同様の結果がえられたが、待ち許容時間を増すにつれて待ち時間と待ち行列に関する統計量と閘門の開閉回数の相関が不明確になる。しかし、船の通開時間と閘門の開閉回数が待ち許容時間を大きくすることにより、ともに改善される傾向にあることから、次のようにして管理方式の最適化を試みた。すなわち、船の通開時間の短縮は待ち許容時間を大きくしてもきわめて僅か (2 分以下) の改善しか見られないので、もっぱら開門の開閉回数の最も少なくなるような待ち許容時間を設定することにした。

待ち許容時間を 5 分, 10 分, 15 分の 3 通りに対してシミュレーションを実施した結果、東西閘門に一定の隻数の船 (327 隻) を通過させるのに要した閘門の開閉回数は 188 回, 174 回, 186 回となり待ち許容 10 分程度を一応の運営のめやすと定めた。なお、中央閘門を考慮しなかったのは、この閘門を利用する船舶のほとんどすべてが要補助船であるから閘門の開閉回数の増減への影響が無視できるからである。なお、10 分の待ち許容時間は南航船が視野の中にあるので実用上閘門運営に有効であることが分かっている。

(3) 将来交通量の比較

将来の交通量に対して現有施設の処理能力 (パフォーマンス) の限界がどの程度であるかという点は、施設管理者により関心のある問題である。しかし現在実行可能な運営基準では現在の交通量のピークロードに対処できないことが今回のシミュレーション結果から明白になったので、通開隻数の増加の影響をしらべることはあまり意味がなく割愛する。

4. 結 論

閘門というきわめて制約された一種の航路の通航容量をシミュレーションにより研究した。モデルの単純化により待ち行列理論の適用の余地はあるが、今回は閘門の運営方法や管制方式等の船舶通航上の見地から検討を加える必要性からシミュレーション技法によって一応の成果を得た。

中浦閘門における現在の交通量に対して中海の淡水化の目的でゲート操作を開始しても当面、問題はない。しかし稀に補助作業を要する船が集中する日には数時間におよぶ待ちが発生する。

将来交通量が現在の1.5倍程度に増大した時点では、補助作業の省力化、要補助船の通航のスケジュール化、あるいは陸上当直要員の増強等の方策によって改善を図らない限り、中浦閘門は船舶通航のあい路となろう。

この研究を行うに際し詳細な交通量観測資料を提供して載いた中浦閘門詰所の方々と研究の便宜を与えられた新日本検定協会の河野博氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 本田, 三木, 原: 閘門通航容量の事例的研究, 神戸商船大学紀要第 24 号 (昭 51. 10)
- (2) Griffiths, J.D. and E.M. Hassen: Increasing the Shipping Capacity of the Suez Canal, *J. Nav.*, 31 [2], 1978
- (3) Wilson, H.G.: On the Applicability of Queuing Theory to Lock Capacity Analysis, *Transpn. Res.*, 12 [3], 1978
- (4) L. Kosten; *Stochastic Theory of Service Systems*, Pergamon Press, 1973, p.117, p.97.
- (5) 国沢清典, 本間鶴千代監修: 応用待ち行列事典, 広川書店 (昭46), p91.