

N-393

港湾システム計画のため評価指標に関する一考察

九州大学 学生員 ○黄 文吉

九州大学 正 員 橋木 武

九州大学 学生員 鷹 国権

九州大学 学生員 施 文雄

1. 序論

港湾計画では、埠頭容量の分析、バース数や荷役機械台数の決定及び港湾サービス水準の設定などを港湾システムに関する評価指標を用いて判断している。従来の研究によれば、港湾システムの評価指標を待ち行列に関する指標とするかコスト関数とするかといった視点の相違による2通りの議論がある。また、コスト関数を用いるにしてもその内容をどうするか、あるいは待ち行列においてそのモデルにいかなるものを用いるかなどの点でまだ結論を得るに至っていない。以上を踏まえ本研究では、港湾システムにおける、待ち行列にもとづく評価指標とコストにもとづく評価指標とを整理し、それぞれの特性を比較検討するものである。

2. 待ち行列にもとづく評価指標

港湾システムの計画問題を待ち行列理論にもとづいて、とらえることができる。すなわち、(M/M/N)型あるいは(M/Ek/N)型待ち行列モデルを適用し、その結果えられる諸指標を評価指標として用いるが、このことは、港湾への船舶の到着がポアソン分布、バースでのサービス時間が指数分布或低次のアーラン分布に従うとするものである。

いま、 λ = 船舶の到着率 (船/時)、 μ = バースの平均サービス率 (船/時)、 N = バース数、 $P_N(j)$ = バース数が N の時、期間 T の間で j 隻の船舶が在港する確率、 AWT = 平均待ち時間 (Wq)、 AST = 平均サービス時間 ($1/\mu$; 船舶繫岸時間: 時/船) とすると、待ち行列モデルにもとづく評価指標として次の諸内容が定義できる。

1) 混雑率(DC)は、船舶が港湾に到着するときに、バース待ちが生じる確率である。

$$DC = \sum_{j=N+1}^{\infty} P_N(j) = 1 - \sum_{j=0}^N P_N(0)(\lambda/\mu)^j / j! \quad (1)$$

2) 利用率(ρ)は、バースのサービス時間と利用可能な時間との比である。

$$\begin{aligned} \rho &= 1 - \left(\sum_{j=0}^{N-1} (N-j) P_N(0)(\lambda/\mu)^j / j! / N \right) \\ &= \left(\sum_{j=1}^N j \cdot P_N(j) / N \right) + DC \end{aligned} \quad (2)$$

3) 平均在港隻数(L)は、期間 T の間に船舶の平均在港隻数である。

$$L = \sum_{j=0}^{\infty} j \cdot P_N(j) \quad (3)$$

4) 平均在港待ち隻数 (Lq) は、期間 T の間にバース待ちする平均隻数である。

$$\begin{aligned} Lq &= \sum_{j=N+1}^{\infty} (j-N) \cdot P_N(j) = L - \left(\frac{\lambda}{\mu} \right) \\ &= P_N(0)(\lambda/\mu)^j \rho / j! / (1-\rho)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

5) 平均待ち時間 (Wq) は、期間 T の間にバース待ちする船舶の平均待ち時間である。

$$Wq = Lq / \lambda = P_N(0)(\lambda/\mu)^j \rho / j! / (1-\rho)^2 / \lambda \quad (5)$$

6) 待ち時間係数 ($Wq \cdot \mu$) は、バース待ちする船舶の平均待ち時間 (AWT) とバースでの平均サービス時間 (AST) との比である。

$$Wq \cdot \mu = \frac{AWT}{AST} = P_N(0)(\lambda/\mu)^j / j! / (1-\rho)^2 / N \quad (6)$$

上記待ち行列にもとづく評価指標は、①確率型指標(DC; ρ) ②待ち行列長さ型指標($Lq; Wq$) ③無次元化型指標($Wq \cdot \mu$) の3タイプにわけることができる。なお、全体的なこととして、DC や ρ などの評価指標は、船舶が港湾システムに在港する状態しか表わすことができず、待ち行列に船舶の待ち時間の状況が明示できない難点がある。一方、平均待ち時間、待ち時間係数などは、船舶の種類とト数およびバースでのサービス時間の長さなどの時間価値により変動するので、その具体的な評価とそれにもとづく港湾計画の内容を決定することが難しいと言える。なお、多くの研究の中で使用されてきた参考文献 2) の図-7に、本研究と比較すれば、DC を計算する際に、到着確率がシステムの状態確率と誤用されてきたという点で問題があることが指摘できる。

3. コスト関数にもとづく評価指標

港湾システムに関する従来多くの研究の中には、船舶が在港する費用の総計を最小にするという概念によるものがあるが、コスト関数を構成する内容はそれぞれで異なる。これまで提案されたコスト関数のうち次の3種類が主要なものである。すなわち、1966年頃に、船舶及びバースの遊休コスト(SWC, BWC)にもとづき、次式が提案されている^{1,2)}。

$$TC1 = Us \cdot \lambda \cdot Wq + Ub \cdot (1-\rho) \cdot N \quad (7)$$

また、別の研究では、バースについては遊休時と稼働時の費用を考慮し、船舶についてはバースを待つ時のコスト(SWC)を考慮した次式が提案されている³⁾。

$$TC2 = Us \cdot \lambda \cdot Wq + Ub \cdot N \quad (8)$$

さらに、1974年頃になると、船舶とバースの遊休コスト及びバースでの稼働時の費用(BSC)に船舶のサービス・コスト(SSC)を加えたものが提案され^{4,5)}、今日でも広く利用されている。この評価指標をTC3とすれば、

$$TC3 = U_s \cdot \lambda \cdot (W_q + 1/\mu) + U_b \cdot N \quad (9)$$

ここに、 U_s ：船舶時間あたりのコスト、 λ ：船舶の到着率(船/時)、 W_q ：船舶の平均待ち時間、 N ：バース数、 $1/\mu = Q/SH/R = V/R$ ：バースの平均サービス時間、 Q ：年間取り扱う貨物量、 SH ：年間到着船舶の隻数、 R ：1バース時間当たりの平均荷役量、 V ：船舶当たり平均荷役量、 $U_b \cdot N$ ：バースのコスト(BC)、 $1 - \rho$ ：バースの遊休率、 $BWC+BSC=BC$ 、 BWC ：バースの遊休コスト、 BSC ：バースでの稼働時費用、 SWC ：船舶の遊休コスト、 SSC ：船舶のサービス・コスト。

4. 諸評価指標相互の比較検討

待ち行列にもとづく評価指標と従来汎用されているコスト関数による評価指標相互の特性を比較するために、台湾基隆港の最近20年間のコンテナ取扱量をデータとして、それにふさわしいバース数(N^*)の決定問題を検討すれば以下のとおりである。

(1) 待ち行列による評価指標を利用する場合

$DC \leq 20\%$ 、 $W_q \leq 4hr$ 、 $W_q \cdot \mu \leq 15\%$ を基準とした場合の、計算結果は表-1の中段に示すとおりである。これより以

表-1 基隆港データにもとづくコンテナ埠頭最適バース数の計算結果

	1975	1980	1985	1987	1990	1993
基 $Q(10^4)$	24016.3	68845.3	118490.3	118854.3	184794.3	188426.3
埠 $V/SH(10^4/隻)$	278/885	374/1763	361/3384	511/3792	425/4331	412/4483
テ $US(1/時)$	4011\$	4011\$	5011\$	7011\$	8011\$	8011\$
イ $y(10^4/時)$	20	20	22	22	24	24
ダ $IX(時)$	3	4	4	6	6	6
C/μ	1.00; 0.082	1.167; 0.047	1.25; 0.04	1.16; 0.036	1.38; 0.03	1.58; 0.03
待 $DC \leq 20\%$	3	7	10	5	12	13
DC/ρ	0.180; 0.589	0.091; 0.580	0.114; 0.665	0.194; 0.768	0.158; 0.731	0.158; 0.731
$W_q; W_q \cdot \mu$	2.883; 0.169	0.794; 0.039	0.651; 0.037	1.357; 0.051	1.049; 0.033	0.736; 0.034
行 $W_q \leq 4hrs$	3	5	9	14	12	12
列 DC/ρ	0.180; 0.589	0.219; 0.669	0.228; 0.738	0.322; 0.823	0.320; 0.811	0.278; 0.792
$W_q; W_q \cdot \mu$	2.883; 0.169	2.432; 0.118	1.627; 0.082	2.917; 0.110	2.375; 0.121	1.779; 0.088
$W_q \leq 15\%$	4	5	9	14	12	12
DC/ρ	0.047; 0.427	0.219; 0.669	0.228; 0.738	0.322; 0.823	0.320; 0.811	0.278; 0.792
$W_q; W_q \cdot \mu$	0.580; 0.035	2.432; 0.118	1.627; 0.082	2.917; 0.110	2.375; 0.121	1.779; 0.088
MinTC1 N^*	3	7	10	5	12	13
コ $TC1(1/時)$	227.4	35.3	50.8	95.1	104.3	112.1
ス $MinTC2N^*$	3	7	10	5	11	13
ト $TC2(1/時)$	38.2	50.1	144.5	254.1	280.9	321.5
関 $MinTC3N^*$	3	7	10	5	11	13
数 $TC3(1/時)$	98.7	247.8	447.4	1085.6	1022.1	1128.9
DC/ρ	0.180; 0.589	0.091; 0.580	0.114; 0.665	0.113; 0.720	0.102; 0.665	0.157; 0.731
$W_q; W_q \cdot \mu$	2.883; 0.169	0.800; 0.039	0.650; 0.037	0.683; 0.035	0.490; 0.035	0.800; 0.044

下のことがいえる。① N^* について、各評価指標が各期間の輸送量とバース数の増加に伴い大きく変動し、安定した傾向はみられなかった。② 1987年から1993年の間にコンテナの輸送量は5%程度の減少であるが、これに對

する必要バース数(N^*)は15から13あるいは14から12への変化である。③しかし、コストを考えていない評価指標($DC, W_q, W_q \cdot \mu$)について、どの位の数値が最適化か、それぞれの決定には問題が残っている。

(2) トータル・コスト(TCi)を利用する場合

同じ輸送量のもとで、コスト関数にもとづく所要バース数を求めれば表-1の下段に示すとおりである。①必要バース数を計算すると、いずれのTCiに対しても同じ結果が得られる。②1987年から1993年の間に、コンテナ輸送量が約5%の減少であるが、これに対するバース数(N^*)は16から13に変わる。③港湾で消費されるトータル・コストは輸送量によって増加する。

5. あとがき

本研究では待ち行列理論とコスト関数を用いて、港湾システム分析のための各評価指標を検討した。得られた主な結果は次のとおりである。1) 経済性からみると、港湾システムにおける最適な計画は、コストを考えた評価指標を用いることがより合理的な判断であると言える。すなわち、二種類の評価指標はそれぞれの役割を持っているといえるが、まず、待ち行列にもとづく評価指標を利用して、初期値、可能解等を理解した上で、次にコストを考えた評価指標を利用し、最適解を探すという内容が提案できる。2) 待ち行列にもとづく評価指標には、確率型指標、待ち行列長さ型指標と無次元化型指標を含む。これらの指標は、港湾システムの施設規模やサービス時間の確率分布、利用率などにより変動する。従って、港湾計画にあたっては、これら評価指標による解は概略の判断にしか活用できないが、その中で待ち時間係数は混雑率や平均待ち時間を用いるよりも意義があるといえよう。3) サービス率が定常のもとで所要バース数(N^*)を決定する場合、従来のコストによる評価指標(TC1, TC2, TC3)は同じ結果となる。これはバースでの稼働時の費用と船舶のサービス・コスト成分が含まれないことによる。なお、サービス率が非定常で、所要バース数や荷役機械台数を決定する場合には結果は異なり、その安定性はTC1が最もよく、次いでTC2である。

<参考文献>

- 1) C.H.Plumlee; Optimum Size Seaport, Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE. Vol. 92, No. WW3, pp. 1-24, Aug. 1966.
- 2) S.N.Nicolau; Berth Planning by Evaluation of Congestion and Cost, Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE. Vol. 93, No. WW 4, pp. 107-132, Nov. 1967.
- 3) 吉川和広, 香川一男, 小由計三; 公共埠頭のライナーバース計画に関する研究, 港湾技術研究報告, Vol. 4, No. 8, pp. 1-66, 1966.
- 4) S.R.C.Wanhill; Further Analysis of Optimum Size Seaport, Proc. of ASCE, Vol. 100, No. WW4, pp. 377-383, Nov. 1974.
- 5) Michihiko Noritake and Sakuo Kimura; Optimum Number and Capacity of Seaport Berths, Journal of ASCE. Vol. 109, No. 3 Aug., 1983.