IV-15　　雑貨埠頭の上屋・倉庫のシステム設計（オ1報）

運輸省港湾技術研究所　正員　工藤和男
〃　○早藤能伸

1 概要

雑貨埠頭の上屋，倉庫の必要容量（規模）の算定はシミュレーションによる方法も提案されているが，年間平均回転率を用いる方法が一般的である。ここでは雑貨埠頭の上屋（倉庫）の在庫量の変動を，①バースへの本船到着がポアッソン分布にしたがう。②貨物の上屋への搬入は本船到着予定日に100％の搬入が終るような指数分布にしたがう到着（搬入）分布をもつ。③本船より揚荷された貨物は，指数分布にしたがう搬出分布をもつ。と仮定して確率過程として捉え，荷役速度 ∞ としたケースについて解析的に解くと同時にバース待ちの影響，荷役時間の効果など解析的に求めにくい側面についてシミュレーションをおこなってシステムとしての詳細な挙動を調べた。

2 解析解と在庫量の特性

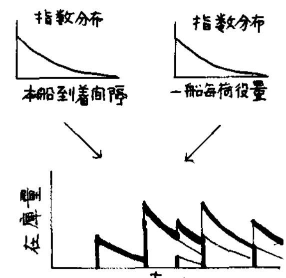

図1 解析解の在庫モデル

在庫量のモデルとして，本船がバースにランダムに到着し，一船の荷役量が指数分布にしたがい，到着すると同時に全貨物は上屋に揚げられ，上屋での貨物の滞留分布が指数分布にしたがうと仮定すれば，在庫量の時間の経過と共に変わる様子は例えば図1のようになる。

いま，u_k を時刻 $t=t_k$ に到着した本船に関する荷役量，$\Phi(t)$ を滞留分布関数とすれば，任意の時刻 t での在庫量は，$Z(t)=\sum_{t=0}^{t} u_k \Phi(t-t_k)$ で表わされる。区間 $[0, t]$ を n 個の小区間に分け，$Z(t)$ の平均値は $E(Z)=\sum_{i=1}^{n}(X_{t_i}-X_{t_{i-1}})\cdot\Phi(t-t_i)$ となるが，$E(u_k)=A$ とすると $E(X_{t_i}-X_{t_{i-1}})=(A/h)(t_i-t_{i-1})$ となるから $n\to\infty$ では $E(Z)=\int_0^t \frac{A}{h}\Phi(t)dt$，分散についても同様にして，$V(Z)=E(Z^2(t))-E^2(Z(t))$ のオ1項を $E\left[\sum_{i=1}^{n}\Phi^2(t-t_i)(X_{t_i}-X_{t_{i-1}})^2+\sum_{i\neq k}\Phi(t-t_i)\Phi(t-t_k)(X_{t_i}-X_{t_{i-1}})(X_{t_k}-X_{t_{k-1}})\right]$ に分解し、このうち $E(X_{t_i}-X_{t_{i-1}})^2=V(X_{t_i}-X_{t_{i-1}})+E^2(X_{t_i}-X_{t_{i-1}})$ は V を求めることによって，結局，オ1項は $\frac{B}{h}\sum_{i=1}^{n}\Phi^2(t-t_i)(t_i-t_{i-1})+\left(\frac{A}{h}\right)^2\left[\sum_{i=1}^{n}\Phi(t-t_i)(t_i-t_{i-1})\right]^2$ となり $n\to\infty$ では分散は $V(Z)=\frac{B}{h}\int_0^t\Phi^2(t)dt$，但し $B=E(u_k^2)$ とした。特に $\Phi(t)=\frac{1}{T}e^{-\frac{t}{T}}$ で与えられるときはそれぞれ $\frac{AT}{h}(1-e^{-\frac{1}{T}t})$，$\frac{BT}{h}(1-e^{-\frac{2}{T}t})$ となり，$t\to\infty$ 且つ N上屋共用にすると $E=NAT/h$，$\sigma^2=NA^2T/h$ で表わせる。ただしAは荷役量の平均，hは平均到着間隔，Tは平均滞留時間である。

平均在庫量を表わす式は $\frac{A}{h}$ を時間あたり貨物取扱量，$\frac{1}{T}$ を回転率と読み替えれば，在来の平均回転率によるものと一致する。このことから在来の設計法の限界もまた明らかになる。

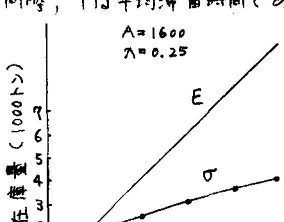

図2 平均滞留時間と特性

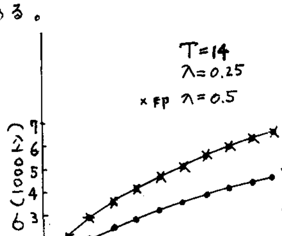

図3 ロットと特性

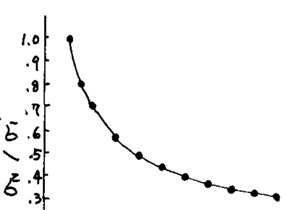

図4 上屋の共用数と特性

以上の定式化によって在庫量の一般的特性として次の事が推定できる。一定の貨物需要量の下に，i)在庫量を減らす最も効果的な方法は平均滞留時間を小さくとることである。ii)変動を小さく押えるためには本船の平均到着間隔と一船の平均荷役量を同じ割り合いで小さくとる。iii)横持によるロスを無視すれば，複数上屋共用による

効果はバースと上屋を対で使用した場合の在庫量の標準偏差に対して $\frac{1}{\sqrt{N}}$ の減少が期待できる。

3　シミュレーションによる計算

前述の解析解で設定したモデルとの違いは，貨物の流れを本船↔バース↔上屋の一連のチェインとして捉え，バースサービスについてはG/G/S（一般型の到着分布／一般型のサービス分布／バース数）タイプの待ち合せモデルとし，また入港時を目標に指数分布にしたがって搬入される積貨物を含む揚積貨物について，一定荷役能率の下で揚積貨物量に比例した荷役時間を与える。この場合，揚積同時荷役を行なわないものと仮定した。また荷役量とサービス時間の分布型は同じと仮定した。ここでは$M/E_2/S$（ランダム到着／位相2のアーランサービス／Sバース）タイプを主として演算を行ない，在庫量の時系列，平均，分散，度数分布などを求めた。

この結果，バース待ちによる影響は，バース占有率に対応する最適バース数を与える限りでは，平均滞留時間が3.5日のときに最大でこれが3.7%以下となり影響は小さい。荷役時間については，解析解では第1次近似として0日と取り扱ったが，この場合に比べ，荷役時間を2日とした場合，平均滞留時間Tにも関係して$T=14$日の場合，在庫量の増加は平均値で11%標準偏差が15%であったが$T=3.5$日にとるとそれぞれ44%と50%の増加であった。次に貨物取扱量を一定に保ったまま一船の平均荷役量を変えると，解析解によると在庫量の標準偏差が平均荷役量の平方根に比例するが，モデルの違いによって平均値そのものが荷役量の2倍の変化で10%増加した。また，本船の平均到着率，平均荷役量，平均荷役時間，平均滞留時間を一定に保ったまま分布型を変え，次の四ケースについて計算したところ在庫量の平均値Eと分散σ^2に関して次の傾向があった。E：$M/M/S > D/M/S > M/E_2/S > M/D/S$，$\sigma$：$M/M/S > M/D/S > D/M/S > M/E_2/S$　$S=10$とした場合で，単純に$E+2\sigma$について比較すると，$E+2\sigma$：$M/M/10 > D/M/10 > M/E_2/10 > M/D/10$ となって最も差の大きい$M/D/10$と$M/M/10$の比は0.83であった。

4　溢れ危険率と在庫量の推定

シミュレーションの演算結果による在庫量の度数分布は図5のようになったが，専用上屋の$M/E_2/1$に比べ共用上屋の$M/E_2/10$と共用バース専用上屋の$M/E_2/10$の1の分布形は対称形をなしている。この図から累積分布をつくり，貨物が上屋から溢れる危険率を20, 10, 5, 3%の各段階で推定した容量を求めると表1のようになった。

いまαをTに応じた在庫量の平均値Eの修正係数，βをσの補正係数とするとき，解析解で得られる $E=N\lambda AT$ および $\sigma^2=N\frac{3}{4}\lambda A^2T$ を使ってシミュレーション結果に合わせると，待ちの発生しない範囲では$\alpha=1.1$になりこれに対応したβの値は各危険率に応じ$M/E_2/10$では$\beta=0.6, 0.9, 1.33, 1.76$であった。したがって$M/E_2/10$の場合97%の信頼度を保つためには，$1.1E+1.76\sigma$程度に設定すれば良い。

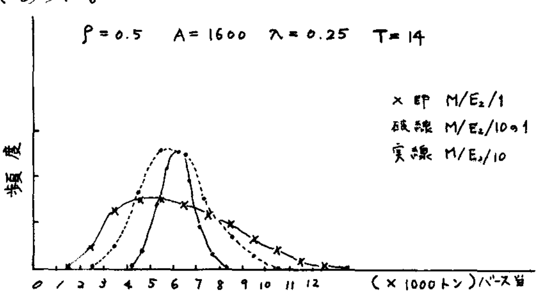

図5　シミュレーションによる在庫量の頻度分布

$M/E_2/1$ （$S=N=1$）

E	σ	20%	10%	5%	3%
6444	2550	8100	9300	10500	11500

$M/E_2/10$の1 （$S=10, N=1$）

E	σ	20%	10%	5%	3%
6100	1453	6900	7600	8300	8900

$M/E_2/10$ （$S=N=10$）

E	σ	20%	10%	5%	3%
6200	710	6600	6900	7250	7600

$\rho=0.5$　$A=1600$　$\lambda=0.25$　$T=14$

表1　溢れ危険率と推定在庫量

5　あとがき

$M/E_2/1$と$M/E_2/S$との違いは$S=10$位にとって34%程度の上屋の利用効率向上がみられる反面，共用上屋にした場合，貨物の上屋間での横持のコストを考える必要があるものと思う。今回のモデル設定では本船到着の月末集中や日変動を考慮しなかった為，この影響を調べることができなかった。また紙面の都合で時系列については割合させていただいた。

参考文献：工藤和男「雑貨埠頭の上屋倉庫のシステム設計」港研報告11巻4号