

京都大学工学部

正・員 長尾義三

学生員 ○則武通彦

1. はじめに

生産地点から消費地点に至る輸送対象の輸送過程が、多数のリンクおよびノードの結合として説明されることが多い。このような多重リンク系の輸送動態は、1つのリンクの挙動解析の解の総和として把握することができず、一般にはシミュレーションによって解くほかはないが、ノードの容量もしくは分割リンク系の結合因子を適当に選ぶことによって単一リンクもしくは2リンクの結合系として近似的に解くことができる。単一リンク系は従来持ち合せ問題として理論解も容易であるが、本考察では2リンク系で実際によく生じるケースについて、拡張した持ち合せ理論による理論解析とシミュレーション解析を行ない、両者の結果を比較することによりそれぞれの差異と適用限界を明らかにした。さらにこれらの解析結果にもとづき、適当な評価関数を設定することにより多重リンク系の輸送基盤施設計画を合目的に行なえることを海上コンテナ碼頭について例示した。

2. 2リンク輸送系の動態解析

1) 輸送対象が1方向に流れる場合

いまリンク1の輸送機関数を1、リンク2の輸送機関数を N とし、積みこみあるいは卸しのためのサービス時間を t_s 、リンク1の残りの時間を t_c 、リンク2の残りの時間を t_t とすれば、 t_c 、 t_t が指数分布で t_c が近似的にアーラン分布の場合の定常状態における状態方程式は以下のように書くことができる。(図-1)

図-1. 1方向流れのモデル

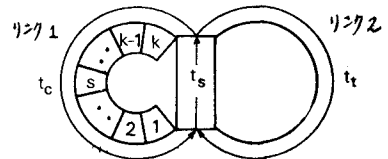


表-1. 輸送機関の時間分布 (1方向)

項目	要素時間	平均値(秒)	アーラン次数(k)
クレーン	t_c	87	14
	t_s	13	3
ドレラチャシー	t_t	401	37

$$\begin{cases}
 P_1^b = \frac{\lambda_0}{k\gamma} P_0^c \\
 P_{s+1}^b = (1 + \frac{\lambda_0}{k\gamma}) P_s^b, (1 \leq s < k) \\
 P_k^a = \frac{k\gamma + \lambda_0}{\mu} P_k^b \\
 P_{k+1}^b = \frac{\mu + \lambda_1}{k\gamma} P_k^a - \frac{\lambda_0}{k\gamma} P_0^c \\
 P_{nkt+s+1}^b = (1 + \frac{\lambda_n}{k\gamma}) P_{nkt+s}^b - \frac{\lambda_{n-1}}{k\gamma} P_{(n-1)kt+s}^b, (n=1, \dots, N; 1 \leq s < k) \\
 P_{(n+1)k}^a = \frac{k\gamma + \lambda_n}{\mu} P_{(n+1)k}^b - \frac{\lambda_{n-1}}{\mu} P_{nkt}^b, (n=1, \dots, N-1) \\
 P_{nkt+1}^b = \frac{\mu + \lambda_n}{k\gamma} P_{nkt}^a - \frac{\lambda_{n-1}}{k\gamma} P_{(n-1)k}^a, (n=2, 3, \dots, N) \\
 P_{(N+1)k}^b = \frac{\lambda_{N-1}}{k\gamma + \lambda_N} P_{Nkt}^b \\
 \text{確率条件: } \sum_{i=1}^k P_{ik}^a + \sum_{i=1}^k P_{ik}^b = 1, \text{ ただし, } \lambda = \frac{1}{t_c}, \mu = \frac{1}{t_s}, \gamma = \frac{1}{t_c}, \rho = \frac{t_c}{t_c + t_s}, \lambda_n = \lambda(N-n); (n=1, 2, \dots, N)
 \end{cases}$$

ここに、 P_0^c : リンク1の輸送機関が遊休する確率、 P_{nk}^a : リンク2の輸送機関が n 台到着しており、リンク1の輸送機関は t_s stage にいる確率、 P_{nkt+s}^b : リンク2の輸送機関が n 台到着しており、リンク1の輸送機関は t_c stage の s phase にいる確率である。神戸のコンテナ碼頭においてクレーンとトラクタ-チャシーの各時間分布を調査し、5%の有意水準で適合度検定をしたものが表-1に示してある。これをもとに、 t_c 、 t_s 、 t_t を指数分布と仮定した場合の理論解(I)、 t_c のみをアーラン分布と仮定した場合の理論解(II)およびすべてをアーラン分布とした場合のシミュレーション解(III)を示すと図-2、

図-3のとおりである。(γ = $\frac{\mu_2}{\mu_1} = 0.15$)

(2) 輸送対象が2方向に流れる場合

この場合は、有限母集団のサイクルクレーンキューの簡単な場合に相当する。リンク1およびリンク2のサービス時間の平均遊休率をそれぞれ $1/\mu_1$, $1/\mu_2$ とすれば、リンク1が位相 k_1 のアーラン分布、リンク2が指数分布のケースは次のように書くことができる。(図-4)

$$\begin{cases} P_1 = \frac{N\mu_2}{k_1\mu_1} P_0 \\ P_{s+1} = \left\{ 1 + \frac{(N-1)\mu_2}{k_1\mu_1} \right\} P_s, (1 \leq s < k_1) \\ P_{nk_1+1} = \left\{ 1 + \frac{(N-1)\mu_2}{k_1\mu_1} \right\} P_{nk_1} \\ \quad - \frac{(N-n+1)\mu_2}{k_1\mu_1} P_{(n-1)k_1}, (n=1, \dots, N-1) \\ P_{nk_1+s+1} = \left\{ 1 + \frac{(N-n+1)\mu_2}{k_1\mu_1} \right\} P_{nk_1+s} \\ \quad - \frac{(N-n)\mu_2}{k_1\mu_1} P_{(n-1)k_1+s}, (n=1, \dots, N-1; 1 \leq s < k_1) \\ P_{nk_1} = \frac{\mu_2}{k_1\mu_1} P_{(N-1)k_1} \\ \text{確率条件: } \sum_{i=1}^N P_i = 1, \text{ また } \rho = \mu_2/\mu_1 \end{cases}$$

ここに、 P_0 : リンク1の輸送機関が遊休

する確率, P_{nk_1+s} : リンク2の輸送機関が n 台待ち行列に入っており、他に s 台はサービス中で S phase にいる確率である。前と同様に、神戸のコンテナふ頭で同一のクレーンとトラクターシャーシの時間分布を調査し、5%の有意水準で適合度検定をして得られた結果が表-2に示してある。これをもとに、両方とも指数分布とした場合の理論解(A)、リンク1のみをアーラン分布とした場合の理論解(B)および両方ともアーラン分布とした場合のシミュレーション解(C)を図-5、図-6に示す。

3. 2リンク輸送系の評価

以上の動態解析結果をもとにし、コンテナ搬送システムにおけるシャーシ-形式コンテナふ頭の最適荷役システムの設計を試算的に行なう。すなわち、コンテナ船がけい岸して荷役中りケースの最適荷役機械の組み合わせを決定しようとするもので、船型はコンテナ500個積、1,000個積および2,000個積の3つを想定する。荷役中のコンテナ1個あたり費用 C_H (円/個) は、次式で表わされる。

図-2 1方向流れの場合のクレーン遊休率, P_0^c

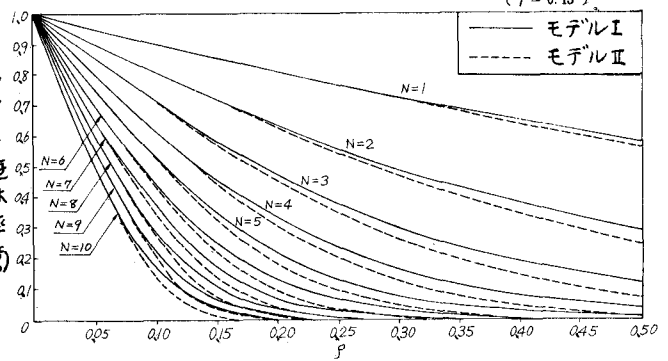


図-3 1方向流れの場合のクレーン遊休率, P_0^c ($\gamma = 0.15$)

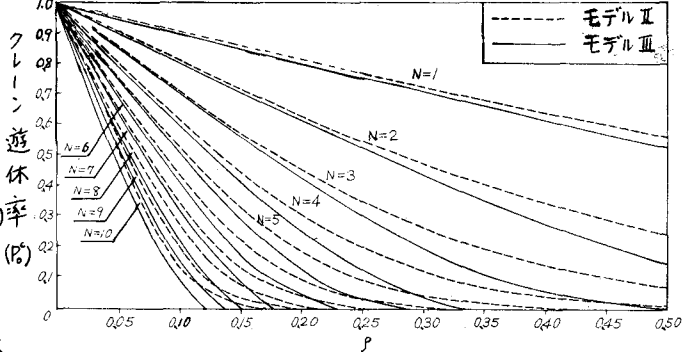


図-4 2方向流れのモデル

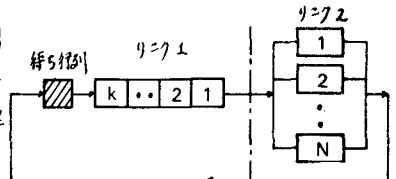
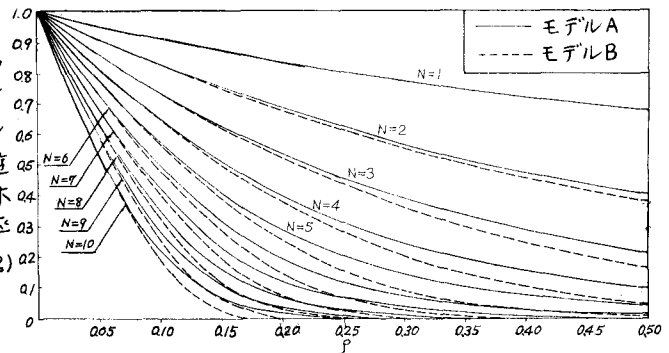


表-2 輸送機関の時間分布(2方向)

輸送機関	項目	調査結果	平均値(秒)	アーラン次数(k)
クレーン		$1/\mu_1$	171	66
トラクターシャーシ		$1/\mu_2$	410	26

図-5 2方向流れの場合のクレーン遊休率, P_0



$$C_H = \frac{m_4(m_3 \cdot C_3 + C_4) + C_5 + C_6 + C_7}{m_4 \cdot m(1 - P_0)}$$

ここに、 m : クレーン荷役能力(個/時間)、 P_0 : クレーン遊休率、 m_3 : クレーン1基あたりのトラクターシャーシー使用台数(台)、 m_4 : 使用クレーン基数(基)、 C_3 : トラクターシャーシー関係費用(円/時間・基)、 C_4 : クレーン関係費用(円/時間・基)、 C_5 : コンテナ船関係費用(円/時間)、 C_6 : 岸壁関係費用(円/時間)、 C_7 : ヤード関係費用(円/時間)である。表-3は、従来から稼働しているクレーンと現在改良を計画しているクレーンの荷役能力と時間あたりコストを算定したものである。表-4には、 C_3 と C_7 の時間あたり費用を記す。また、表-5には船舶関係費用および岸壁関係費用を示す。

図-7、図-8は、以上の費用をもとに式から算出したコンテナ1個あたりの費用を、それぞれ1方向流れと2方向流れの場合について図示したものである。

4. 結果の考察

(1) $N=1$ の場合、2方向流れでは P の各値に対していずれの解析方法でも P_0 の値が等しくなっている。しかし、1方向流れでは差異を生ずる。すなわち、前者は各要素時間の平均値のみによって一意的に決定され分布形には影響されないが、後者はその両方により変化する。

(2) 1方向流れの場合、モデルⅠを基準にとるとモデルⅡおよびモデルⅢの P_0 の値はそれぞれ0.5、0.14%小さい。また2方向流れの場合、モデルAを基準にとればモデルBおよびCの P_0 はそれぞれ0.5、0.1%小さい。これらは各要素時間の規則性によるもので、実際のオペレーションを反映していることは言うまでもない。

(3) これは各要素時間の平均値およびアーラン次数とも関係するが、上記諸条件設定のもとでは1方向流れではモデルⅡの P_0 はモデルⅢよりもむしろⅠに近く、また2方向流れではモデルBはモデルAとCの中間的な値を示している。前者の場合、モデルⅡでは α をも指数分布と仮定していることから、モデルⅢとのかい離が累加したためと考えられる。

(4) P_0 の値は1方向流れの場合 $PN < 0.5$ および $PN > 2.0$ の範囲、2方向流れの場合は $PN < 0.7$ 、 $PN > 2.0$

図-6 2方向流れの場合のクレーン遊休率、 P

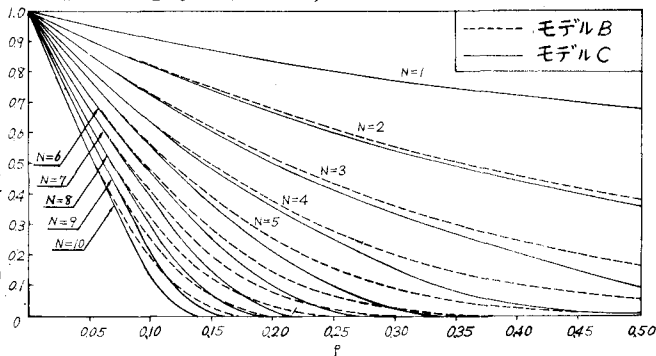


表-3 クレーンの能力と時間費用

項 目	ケ ー ス	m (個/時間)	C_4 (円/時間)	摘 要
従 来 の も の	1方向の場合	36	6.340	原 価 240,000千円 基礎設計 72,000千円 残存価格 1割 年 利 率 0.1 耐用年数 15年 他に運転手給与、維持修理費、 燃料費、一般管理費を含む。費 用と能力は線形関係としている。
	2方向の場合	42		
計 画 中 の も の	1方向の場合	45	7.470	
	2方向の場合	53		

表-4 トラクターシャーシーとヤードの時間費用

項 目	時間費用 (円/時間)	摘 要
C_3	774	原価5,500千円、残存価格1割、年利率0.1、耐用年数7年にて計算。他に運転手給与、維持修理費、燃料費、一般管理費を含む。
C_7	19,400	ふ頭用地(98,000㎡)の建設費1,088,167千円、年利率7%、ヤード舗装(85,200㎡)は建設費365,960千円、耐用年数10年、年利率7%、その他施設は建設費68,600千円、耐用年数45年、年利率7%にて計算。

表-5 船舶とバースの時間費用

船 型	C_5 (円/時間)	C_6 (円/時間)	摘 要
500 個積	32,600	4,120	船舶関係費用は減価償却、金利、乗員賃金、保険費、維持修理費、食料費、店賃、船用品費からなるものとした。 船価は、$y = 4.55x - 950$ という式から算出(ここにy(船価:百万円)、x(積載可能コンテナ数、20') 耐用年数30年、残存率30%、年利率7%。 金利は原価の7%とした。 乗員は船型に関係なく1船あたり35人とした。 C_6にはケーソン岸壁費用と泊地しゅんせつ費用を含む($C_6 = 1.034 \times$ 岸壁建設費)。 バースは船型500個積、1,000個積、2,000個積に対し水深10.5m、11.2m、12.6m、バース長は225m、250m、300mとし単価は214(万円/㎡)、218、221とした。 耐用年数50年、年利率7%とした。
1,000 個積	71,000	4,660	
2,000 個積	148,000	5,660	

の範囲で各モデル間の差異が比較的小さい。いずれの場合においても、前者はリンク1の輸送機関が一時的に待つケース、後者はリンク2の輸送機関が待つケースである。以上より、実際面への適用にあたっては各モデルの仮定、PNの値、適用対象の許容精度、トータルシステム中の位置づけ等に注意する必要がある。

(5) 船型については、大型船より小型船の方が有利になっている。これは、船価、岸壁等のコンテナ1個あたりコストが大きくなるためである。

(6) 限界費用の減少(限界効用の発生)は、シャシー台数が1台から2台の所で最大になっており、後は限界効用逓減の法則にしたがっていることが明らかである。費用関数は凸形を示し極点をもつ。

(7) 2方向流れの荷役方式では、シャシーを5台配備したシステムが常に費用極小となる。一方、1方向流れの場合には現行のクレーンには6台のシャシーを、また計画中のクレーンについては7台配車したシステムが費用極小となる。

(8) クレーン基数、船型を同一にした場合、現行クレーンから計画中のクレーンにとりかえることにより、1方向および2方向の場合いずれも最大約20%のコスト低減が可能となる。しかし、特に1方向の場合にあつては、投入するシャシー台数が1台から2台のケースで逆にコストが高くなっている場合がある。これは、クレーンの性能が向上しても荷役

能率があまり上がらず、クレーン改良に要する費用がこの段階では能率増加による荷役費用の節約を上回るためである。

(9) クレーンのタイプおよび船型が同一の場合、クレーン基数を1基から2基に増設することにより、約39%~48%のコスト低減が達成される。

参考文献
①長尾剛武:多重リンク系の輸送動態に関する考察,土木学会論文集(投稿中)

図-7. コンテナ個あたりの相対的コスト(1方向の場合)

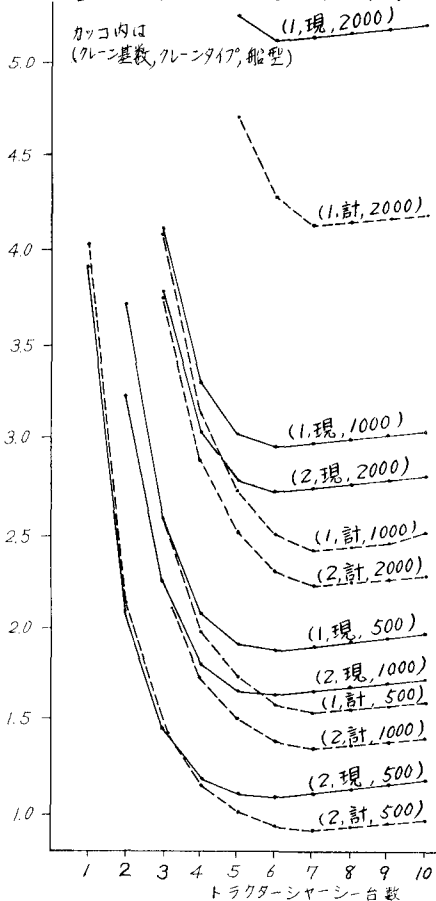


図-8. コンテナ個あたりの相対的コスト(2方向の場合)

