

1. はじめに

採土から捨土に至る土砂の運搬機械、協同一貫輸送によるコンテナ輸送系のように、多数のリンクおよびノードの結合として輸送系が説明されるものがある。これの解は一般にシミュレーションによるほかはないが、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、2リンクもしくは3リンクの結合系として近似的に解くことができる。単一リンク系は待ち合わせ問題として理論解も容易であるが、本研究では2リンク系で実際によく生じる2~3の場合について待ち合わせ解法の拡張を試みるとともに、シミュレーション解との比較を試みそれぞれの差異と適用限界を考察した。

2. ものの1方向流れの場合

いまリンク1の輸送機関数を1台、リンク2の輸送機関数をN台とする。積みあま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_s 、 t_c が指数分布で t_t が位相長のアラン分布の場合の状態方程式は以下のよう書ける。(図-1参照)

図-1. 1方向流れのモデル

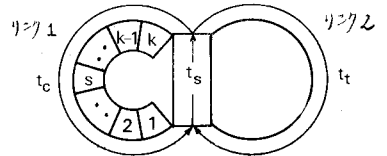


表-1. 輸送機関の時間分布 (1方向)

輸送機関	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
ドレーヤーシ		t_t	401	37

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

ここに、 P_0^c : リンク1の輸送機関が遊休する確率、 P_{n+k}^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_{n+k+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。いま、神戸のコンテナ埠頭においてクレーンとドレーヤーシの各時間分布を調査し、5%の有意水準で適合度検定したものが表-1である。これをもとに、 t_c 、 t_s 、 t_t を指数分布と仮定した場合(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)を示すと表-2のとおりである。(I^{*}= $\frac{\gamma}{\mu}$ =0.15)

表-2. 1方向流れの計算結果, P_0^c (I^{*}=0.15のケース)

P	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.1	I	0.90	0.81	0.72	0.63	0.54	0.45	0.37	0.29	0.23	0.17
	II	0.90	0.81	0.71	0.62	0.53	0.43	0.35	0.27	0.21	0.15
	III	0.89	0.79	0.69	0.59	0.50	0.41	0.32	0.23	0.15	0.09
0.2	I	0.81	0.63	0.47	0.33	0.22	0.13	0.07	0.04	0.02	
	II	0.81	0.62	0.46	0.31	0.19	0.10	0.04	0.01	0	0
	III	0.80	0.61	0.42	0.25	0.13	0.04	0	0	0	0
0.3	I	0.73	0.49	0.30	0.16	0.08	0.03	0.01			
	II	0.72	0.47	0.26	0.12	0.05	0.01	0	0	0	0
	III	0.70	0.43	0.20	0.03	0	0	0			
0.4	I	0.65	0.38	0.19	0.08	0.03	0.01				
	II	0.64	0.34	0.14	0.04	0.01	0	0	0	0	0
	III	0.61	0.27	0.06	0	0	0				
0.5	I	0.58	0.29	0.12	0.04	0.01					
	II	0.56	0.25	0.08	0.01	0	0	0	0	0	0
	III	0.52	0.15	0.01	0	0					

3. ものの2方向流れの場合

この場合は、有限母集団のサイクル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値をそれぞれ $1/\mu_1$, $1/\mu_2$ とすれば、リンク1がポアソン分布、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-2参照)

図-2. 2方向流れのモデル

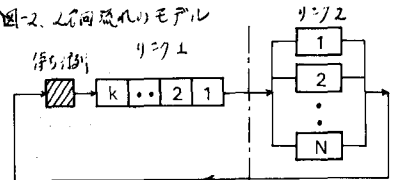


表-3. 輸送機関の時間分布 (2方向)

輸送機関	項目	到着時間	平均値 (秒)	アーラン次数 (k)
クレーン		$1/\mu_1$	171	66
トレウミャーシ		$1/\mu_2$	410	26

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \frac{N\mu_2}{k\mu_1} P_0 \\
 P_{s+1} &= \left\{ 1 + \frac{(N-1)\mu_2}{k\mu_1} \right\} P_s, \quad (1 \leq s < k_1) \\
 P_{nk_1+1} &= \left\{ 1 + \frac{(N-n)\mu_2}{k\mu_1} \right\} P_{nk_1} - \frac{(N-n+1)\mu_2}{k\mu_1} P_{(n-1)k_1}, \quad (n=1, 2, \dots, N-1) \\
 P_{nk_1+s+1} &= \left\{ 1 + \frac{(N-n)\mu_2}{k\mu_1} \right\} P_{nk_1+s} - \frac{(N-n+1)\mu_2}{k\mu_1} P_{(n-1)k_1+s}, \quad (n=1, 2, \dots, N-1; 1 \leq s < k_1) \\
 P_{nk_1} &= \frac{\mu_2}{k\mu_1} P_{(N-1)k_1} \\
 \text{確率条件: } \sum_{i=1}^{Nk_1} P_i &= 1, \text{ また } \rho = \mu_2/\mu_1
 \end{aligned}$$

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、神戸のコンテナ碼頭で同一のクレーンとトレウミ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-3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)を表-4に示す。

表-4. 2方向流れの計算結果, P_0

ρ	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.1	A		0.82	0.73	0.64	0.56	0.48	0.41	0.34	0.27	0.21
	B	0.91	0.81	0.73	0.64	0.56	0.47	0.39	0.32	0.24	0.18
	C		0.81	0.72	0.63	0.55	0.47	0.37	0.29	0.20	0.13
0.2	A		0.68	0.53	0.40	0.28	0.19	0.12	0.07	0.04	0.02
	B	0.83	0.67	0.52	0.38	0.25	0.15	0.07	0.03	0.01	0
	C		0.66	0.51	0.36	0.21	0.10	0.01	0	0	0
0.3	A		0.56	0.38	0.24	0.14	0.07	0.03	0.01	0.01	
	B	0.77	0.55	0.36	0.20	0.09	0.03	0.01	0	0	0
	C		0.54	0.34	0.16	0.03	0	0	0	0	0
0.4	A		0.47	0.28	0.15	0.07	0.03	0.01			
	B	0.71	0.46	0.24	0.10	0.03	0.01	0	0	0	0
	C		0.44	0.20	0.04	0	0	0			
0.5	A		0.40	0.21	0.10	0.04	0.01				
	B	0.67	0.38	0.16	0.05	0.01	0	0	0	0	0
	C		0.35	0.09	0	0	0				

4. 考察

(1) $N=1$ の場合、2方向流れでは P_0 の各値に對していずれの解析方法でも P_0 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IIIの P_0 の値はそれぞれ0.05, 0.04%小さい。また2方向流れの場合、モデルAを基準にとれば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 μ_2 をも指数と仮定していることから、モデルIIIとの乖離が相乗的に加わっ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 $PN < 0.7$, $PN > 2.0$ 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。

参考文献: (1) O'Neill, Russell R. "Simulation of Cargo Handling Systems", University of California, Los Angeles, September, 1956.