

## 多重リンク系の輸送動態に関する一考察

A CONSIDERATION ON TRANSPORT CHARACTERISTICS  
IN THE MULTI-LINKS SYSTEM

長尾 義三\*・則武 通彦\*\*

By Yoshimi Nagao and Michihiko Noritake

### 1. 緒 言

生産および消費活動の中間に位置しそれらを連結する輸送活動は、原理的には複数のリンクおよびノードから構成された多重リンク系として把握できる場合が多い。各リンクにおける輸送活動は、リンク上を運行する輸送機関の数量、容量、速度ならびにそれらのばらつきにより影響されるが、またリンクの両端にあるノードの数量、規模、ノード間距離ならびに隣接するリンクのそれら固有値によっても影響をうける。すなわち、Fig. 1 にみられるように、各リンクにおける挙動は中間ノードを通して隣接するリンクに影響し、また逆にそのリンクが影響されることになる。この多重リンク系全体の解を一度求めることは容易でない。この場合、系を 1 つあるいは 2~3 リンクユニットの複合系として考察し、系全体の解を求めることはできる。その分割には、一般に次の 2 つの方法が考えられる。1 つはリンク間に位置するノードの貯留容量が十分大きい場合で、これはその容量が大きければ大きいほど経験的に他のリンク系への影響が小さくなるという理由に基づく。他の 1 つは、リンク相互間の入力および出力、すなわち媒介変数を適宜設けることによって処理する方法である。これらいずれかの方法により分割が可能になれば、複雑な多重リンク系の輸送動態把握は、その基本系の解明と複合系としての処理の問題に帰着される。一般に 1 リンクユニットの問題は、各種の待ち合せ問題として多くの解をみている。

以上のような考え方に基づき、本論文においてはまず基本系となる 2 リンク系の輸送動態を究明した。この場合、拡張した待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

り理論解析の適用限界を明らかにした。さらに、多重リンク系の輸送動態に若干の考察を加えた。これらの解析結果に基づき、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の方法論への適用ができるこことを述べた。さらに本論では、海上コンテナふ頭について実証を試みた。

### 2. 2 リンク系のパターン

2 リンク系を次の 4 つの要素に着目してパターン分類することができる。

その 1 は、中間ノードにおける一時貯留機能の有無であり、たとえば地山の掘削工事の際にパワーショベルとダンプトラックの間にホッパーを設置すること、工事現場に資材の仮置場を設けることなどはノードに貯留機能を付与した例である。一方、しゅんせつ工事においてしゅんせつ船が土運船に直接土砂を積み込む場合などは、一時貯留機能のない例である。中間ノードに一時貯留機能が与えられると、4.(2) で考察されるように一般に各リンクの輸送機関のサイクルタイムがサイクルごとに変動してもそれが隣接リンクにおよぼす影響は緩和され、ものの流れはそのリンクの固有値にのみ影響されるようになる。特に、貯留容量を無限大にしたときには、多重リンク系を通過するものの流れは単位時間あたりの平均輸送量のもっとも小さいリンクの効率によって規定されてしまう。

2 番目は、各リンクで活動する輸送機関の数量であり、これには単数の場合と複数の場合とがある。輸送活動をながめてみると、往々にして一方のリンクの輸送機関がノードにおいて他方のリンクの輸送機関の到着を待つという現象を見うけるが、これには各リンクに配置された輸送機関の数量の不均衡がその一因となっている。すなわち、この決定が適正なものでなければ輸送系の効率が低下し、系を通過するものの流れは制限される。ま

\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学教室

\*\* 学生会員 工修 京都大学大学院工学研究科 土木工学専攻  
博士課程

た、特にベルトコンベアのようなシステムは、巨視的には一方のリンクの輸送機関の数量が無限大の場合とみなしてもよいであろう。

3番目は、系を流れるもののユニット（単位）の相対的な大きさである。前の例を再度引用すれば、パワーショベルの数ユニットがダンプトラックの1ユニットに相当し、グラブバケットの数ユニットが土運船の1ユニットとなっている。逆にコンテナふ頭の一般荷役方式では、クレーンは1回に1個のコンテナを荷役し、トラクターシャシーも1個のコンテナを運搬するから両方とも1ユニットずつを扱っている例である。一般にユニットの大きさが変化するのはノードにおいてであるが、両端リンクのユニットが異なっているとユニットの大きい（すなわち、1サイクルあたりの運搬能力の大きい）方の輸送機関は隣接リンクの輸送機関の到着を数回待たなければならぬので、それだけノードでの滞留時間が長くなる。パレチゼーション、コンテナリゼーションなどに代表されるユニットロードシステムが考案されてきた背景には、ノードにおけるこのような滞留時間を減らすことでも1つの目的として存在している。

最後に、ものの流れが1方向であるか2方向であるかにより分けられる。前者はものの流れが一方的であり、土運船を使用するしゅんせつ工事などはその典型である。この場合、往航においては捨土を運搬しているが、帰航の際は空荷で帰ってくる。他方、後者は往復いずれの経路においてもものを運搬する場合であり、定期便に従事する船舶、車両、航空機などが該当する。クレーンがコンテナ船の揚げ荷役と積み荷役を並行して行なう場合（デュアル方式とよばれる）もこの典型である。一般的に、2方向流れのケースのほうが、単位時間あたりにより多量のものを移動することができるので、輸送系の効率面では有利となることが多いことはいうまでもない。

### 3. 2 リンク系の理論解析

前章で述べたように、2リンク系にも種々のタイプが考えられる。本論文においては、以下基本系として中間ノードには貯留機能がなく、一方のリンクの輸送機関の

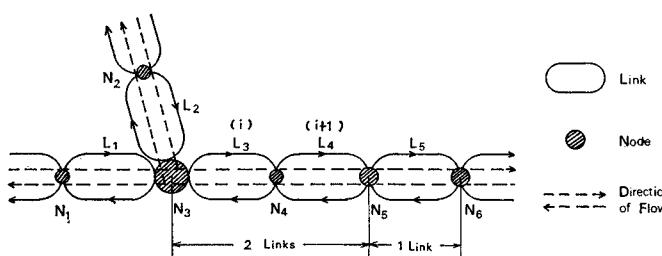


Fig. 1 Transportation in Multi-Links System

数量は1台で、かつ系を流れるもののユニットの相対的な大きさが等しい場合に限定して考察を加えていく。この種の解析手法は、いざれも待ち合せ理論のうちのサイクルキューのタイプを基礎として展開されうる。

#### (1) ものの2方向流れの場合

このケースについては、サイクルキューもしくは有限個の供給源からの待ち合せ問題として解くことが可能である。いま簡単のため、 $i+1$ 番目のリンクの輸送機関が複数でそれらの運行時間が指数的に分布しているものとすれば、 $i$ 番目のリンク、すなわち輸送機関が1台のほうのリンクのサイクルタイムの分布形の相違により、次の2ケースに分けられる。

##### a) サイクルタイムが指指数分布のとき

いま Fig. 1において、 $i$ 番目のリンクの輸送機関が1台、 $i+1$ 番目のリンクの輸送機関が $N$ 台いるものとする。これは、従来から解かれている有限母集団のサイクルキューの簡単な場合に相当する<sup>1)</sup>。リンク( $i$ )においては積み卸しを含めたサイクルタイムの平均値を $1/\mu_i$ とし、一方リンク( $i+1$ )においては積み卸しのため必要とする時間を除いたもの、すなわち運行時間の平均値を $1/\mu_{i+1}$ と定義する。これらがおのおの指指数分布しているケースについては、

$$P_n = \frac{N!}{(N-n)!} \rho^n P_0, \quad (n=0, 1, \dots, N) \dots\dots\dots (1)$$

$$P_0 = 1/F(\rho, N) \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここに

$P_0$ ：リンク( $i$ )の輸送機関が遊休する確率

$P_n$ ：リンク( $i+1$ )の待ち行列が $n$ 台である確率

また、

$$\rho = \mu_{i+1}/\mu_i \dots\dots\dots (3)$$

$$F(\rho, N) = \sum_{n=0}^N \frac{N!}{(N-n)!} \rho^n = 1 + N\rho + \dots + N!\rho^N \dots\dots\dots (4)$$

である。 $\rho, N$ をパラメータとして、 $P_0$ は Fig. 2に実線で示されている。なお、本モデルをモデルIと名づける。

##### b) サイクルタイムに規則性が加わったとき

a)においては、両方のリンクともそのサイクルタイムおよび運行時間が、指指数分布をしているケースを取り扱ったが、現実にはなんらかの規則性が加味された運行挙動をもつことが多い。Fig. 3, Fig. 4は、K港のAコンテナふ頭における船積み荷役の動態調査を行なった結果である。この場合リンク( $i$ )の輸送機関にはクレーンが相当し、リンク( $i+1$ )の輸送機関にはシャーシーが相当する。それによると、それぞれ有意水

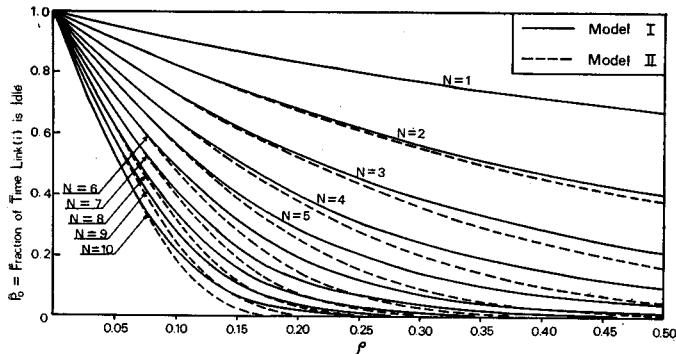
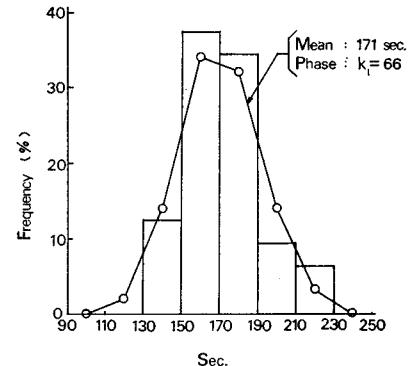
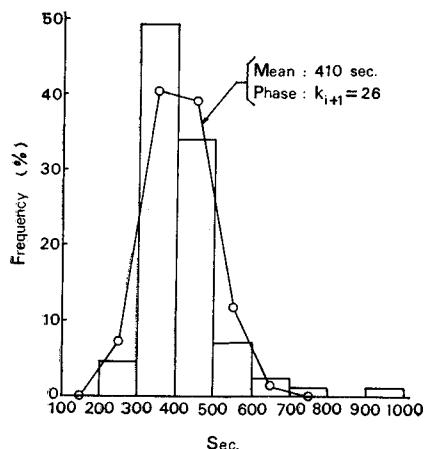


Fig. 2 Fraction of Time Link ( $i$ ) is Idle vs.  $\rho = \mu_{i+1}/\mu_i$  and  $N$   
(Case of 2-directional Flow)



Note : Data were observed at K Container Terminal, Aug.-Sept., 1970

Fig. 3 Example Field Data for Cycle Time of Crane (Case of 2-directional Flow)



Note : Data were observed at K Container Terminal, Aug.-Sept., 1970

Fig. 4 Example Field Data for Travel Time of Tractor-chassis  
(Case of 2-directional Flow)

準 5% で 平均 値  $1/\mu_i = 171$  秒, 位相  $k_i = 66$ ,  $1/\mu_{i+1} = 410$  秒,  $k_{i+1} = 26$  のアーラン分布をしていることがわかる。そこで a) の解析方法に基づき, アーラン次数の高いリンク ( $i$ ) のみをアーラン分布としたモデル, すなわち Fig. 5 のようなモデルを考えると状態方程式は定常状態において次のようになる。

$$P_1 = \frac{N \mu_{i+1}}{k_i \mu_i} P_0 \quad (5)$$

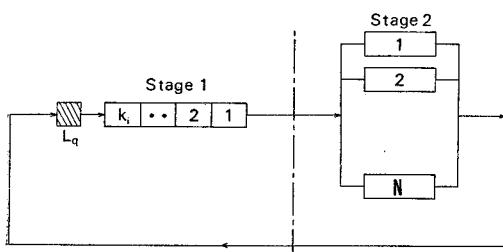


Fig. 5 Profile of Model of 2-directional Flow

$$P_{s+1} = \left\{ 1 + \frac{(N-1) \mu_{i+1}}{k_i \mu_i} \right\} P_s, \quad (1 \leq s < k_i) \quad (6)$$

$$P_{nk_i+1} = \left\{ 1 + \frac{(N-n) \mu_{i+1}}{k_i \mu_i} \right\} P_{nk_i} - \frac{(N-n+1) \mu_{i+1}}{k_i \mu_i} P_{(n-1)k_i}, \quad (n=1, 2, \dots, N-1) \quad (7)$$

$$P_{nk_i+s+1} = \left\{ 1 + \frac{(N-n-1) \mu_{i+1}}{k_i \mu_i} \right\} P_{nk_i+s} - \frac{(N-n) \mu_{i+1}}{k_i \mu_i} P_{(n-1)k_i+s}, \quad (n=1, 2, \dots, N-1; 1 \leq s < k_i) \quad (8)$$

$$P_{Nk_i} = \frac{\mu_{i+1}}{k_i \mu_i} P_{(N-1)k_i} \quad (9)$$

この解は,  $\sum_{j=0}^{Nk_i} P_j = 1$  の条件式を加えて求めるがで  
きる。いま,  $N=1$  のときは,

$$F(\rho, 1) = 1 + \rho \quad (10)$$

すなわち,

$$P_0 = 1/(1+\rho) \quad (11)$$

となって, それぞれ式 (4) ならびに式 (2) と同じになる。しかし,  $N > 1$  のときは位相の影響が入る。たとえば,  $N=2$ ,  $k_i=3$  のとき,

$$F = 1 + 2\rho \{1 + (\rho/3)\}^3$$

$$= 1 + 2\rho + 2\rho^2 + 2(\rho^3/3) + 2(\rho^4/3^3) \quad (12)$$

となる。これは第3項までは式 (4) と同じであるが, 第4項以下に位相の影響が入る。リンク ( $i$ ) の位相  $k_i$  を66としたとき,  $\rho$  と  $N$  をパラメータとしてその遊休率を Fig. 2 に破線で示した。以下, 本モデルをモデルIIとよぶ。 $\rho=0.4$  のとき,  $N=1$  では  $P_0=0.72$  でモデルIとモデルIIは同じ結果を示すが,  $N=4$  ではそれぞれ 0.15 と 0.10 になりモデルIIの結果はモデルIより 5% の低下を示す。このように, アーラン分布を仮定した解析値のほうが指數分布を仮定した場合の値より小さくなることは経験とも一致している。

## (2) ものの1方向流れの場合

$i+1$  番目のリンクの輸送活動において、その受け渡し時間が  $i$  番目のリンクのサイクルタイムと一致しないことがある。この現象は1方向流れの場合によく生じる。たとえば、トラックにパワーショベルが土砂を投入したらトラックはただちにサイクル運行を始め、パワーショベルのサイクルの終了を待たないような場合で、コンテナふ頭ではコンテナ船のデッキを荷役するときに主として採用される。本節でとり扱うモデルでは、おのおのの輸送機関はそれぞれ積み込みあるいは卸しのためのサービス時間だけとどまり、その後立ち去っていく。いま、サービス時間の平均値を  $t_s$  とし、リンク ( $i$ ) のサイクルタイムとの差をリンク ( $i$ ) の運行時間と名づけ、その平均値を  $t_c$  と定義する。同様に、リンク ( $i+1$ ) の残りの運行時間の平均値を  $t_t$  とする。サービス時間、リンク ( $i+1$ ) の運行時間がともに指数的に分布しているものと考えれば、リンク ( $i$ ) の運行時間の分布形の相違により次の2ケースに分けられる。

a) リンク ( $i$ ) の運行時間が指指数分布のとき

この場合については、Paul Teicholz や James Douglas らによってすでに解かれている。その結果のみを略述すれば、次のようになる<sup>1)</sup>。いま、

$P_0^b$ ：リンク ( $i+1$ ) の輸送機関が1台も到着していないで、リンク ( $i$ ) の輸送機関がサービス終了後サイクルをしあげている確率

$P_0^c$ ：リンク ( $i+1$ ) の輸送機関が1台も到着していないで、リンク ( $i$ ) の輸送機関が待っている確率

$P_n^a$ ：リンク ( $i+1$ ) の輸送機関が  $n$  台到着していて、1台がサービスされている確率

$P_n^b$ ：リンク ( $i+1$ ) の輸送機関が  $n$  台到着していって、リンク ( $i$ ) の輸送機関はサイクルをしあげている確率

ここに、 $n=1, 2, \dots, N$  と定義する。さらに、 $r=1/t_c$ ,  $\mu=1/t_s$ ,  $\lambda=1/t_t$ ,  $\lambda_n=(N-n)\lambda$ ,  $P_0=P_0^b+P_0^c$  とすれば、

$$P_0^b = \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + r} P_0 \quad (13)$$

$$P_0^c = \frac{r}{\lambda_0 + r} P_0 \quad (14)$$

$$P_1^a = \frac{\lambda_0}{\mu} P_0 \quad (15)$$

$$P_1^b = \frac{\mu + \lambda_1}{r} P_1^a - \frac{\lambda_0}{r} P_0^c \quad (16)$$

$$P_n^a = \frac{r + \lambda_{n-1}}{\mu} P_{n-1}^b - \frac{\lambda_{n-2}}{\mu} P_{n-2}^b, \quad (n=2, 3, \dots, N) \quad (17)$$

$$P_n^b = \frac{\mu + \lambda_n}{r} P_n^a - \frac{\lambda_{n-1}}{r} P_{n-1}^a, \quad (n=2, 3, \dots, N) \quad (18)$$

となる。これらの確率は、連続的に代入していくことによりすべて  $P_0$  の項で表わすことができ、さらに確率条件

$$P_0^b + P_0^c + \sum_{n=1}^N (P_n^a + P_n^b) = 1 \quad (19)$$

に代入すればまず  $P_0$  が求まり、逐次他の確率も求められる。上述の理論展開ではパラメータとして  $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $r$  および  $N$  を含んでいるので、新たに  $\lambda^*=\lambda/\mu$ ,  $r^*=r/\mu$  なる変数を設定して正規化すると、パラメータを1個減らすことができる。Fig. 6 の実線は、 $r^*=0.15$  として  $\rho=(t_c+t_s)/t_t$  に対する  $P_0^c$  の値を  $N=1, 2, \dots, 10$  に対応して図示したものである。以下、本モデルをモデルAと名づける。

b) リンク ( $i$ ) の運行時間に規則性が加わったとき

Fig. 7 は、同じく K港の A コンテナふ頭における陸

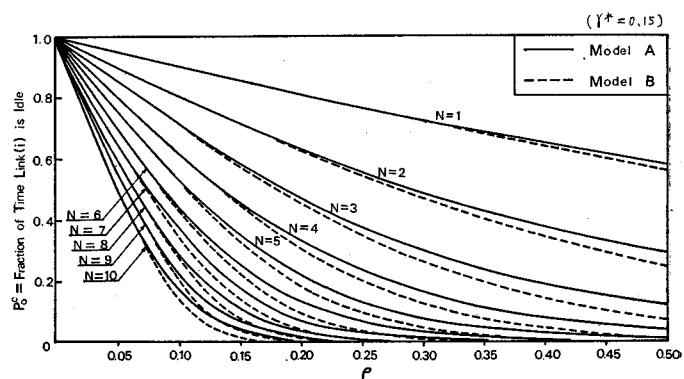


Fig. 6 Fraction of Time Link ( $i$ ) is Idle vs.  $\rho=(t_c+t_s)/t_t$  and  $N$   
(Case of 1-directional Flow)

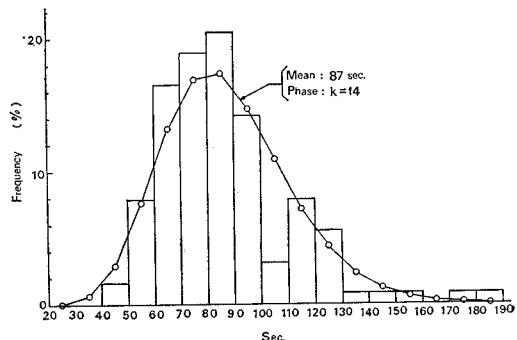


Fig. 7 Example Field Data for Travel Time of Crane (Case of 1-directional Flow)

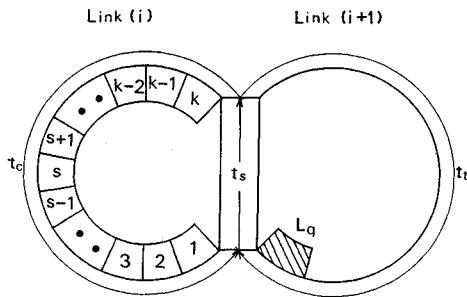


Fig. 8 Profile of Model of 1-directional Flow

揚げおよび船積み荷役のクレーンの動態調査を行なった結果であるが、それをみるとリンク(i)の運行時間は5%の有意水準で平均87秒、位相k=14のアーラン分布にしたがっていることがわかる。よって、リンク(i)の運行時間がアーラン分布である一般の場合について考察を加える。これについては、i, i+1のリンクで輸送機関が稼動している状態のケースに関して奥山らが考察を加えたが<sup>5)</sup>、しかし i+1 のリンクで輸送機関が待ちに入っているときでもこのような状態が発生するわけであるから、この場合は Fig. 8 に示すようなモデルを考える。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。

$$P_i^b = \frac{\lambda_0}{k r} P_0^c \dots \quad (20)$$

$$P_{s+1}^b = \left(1 + \frac{\lambda_0}{k r}\right) P_s^b, (1 \leq s < k) \dots \quad (21)$$

$$P_k^a = \frac{k r + \lambda_0}{\mu} P_k^b \dots \quad (22)$$

$$P_{k+1}^b = \frac{\mu + \lambda_1}{k r} P_k^a - \frac{\lambda_0}{k r} P_0^c \dots \quad (23)$$

$$P_{nk+s+1}^b = \left(1 + \frac{\lambda_n}{k r}\right) P_{nk+s}^b - \frac{\lambda_{n-1}}{k r} P_{(n-1)k+s}^b, \\ (n=1, 2, \dots, N; 1 \leq s < k) \dots \quad (24)$$

$$P_{(n+1)k}^a = \frac{k r + \lambda_n}{\mu} P_{(n+1)k}^b - \frac{\lambda_{n-1}}{\mu} P_{nk}^b, \\ (n=1, 2, \dots, N-1) \dots \quad (25)$$

$$P_{nk+1}^b = \frac{\mu + \lambda_n}{k r} P_{nk}^a - \frac{\lambda_{n-1}}{k r} P_{(n-1)k}^a, (n=2, 3, \dots, N) \dots \quad (26)$$

$$P_{(N+1)k}^b = \frac{\lambda_{N-1}}{k r + \lambda_N} P_{Nk}^b \dots \quad (27)$$

これらの式も前と同様にすべて  $P_0^c$  の項によって表わすことができ、確率条件

$$P_0^c + \sum_{i=1}^N P_{ik}^a + \sum_{i=1}^{(N+1)k} P_i^b = 1 \dots \quad (28)$$

に代入すると、順次すべての確率が得られる。Fig. 6 には、 $r^*=0.15$  のときの  $P_0^c$  と  $\rho$  の関係を  $N$  をパラメータにして破線で示した。以下、本モデルをモデルBとよぶ。リンク(i)の遊休率は2方向流れの場合と異

なり、 $N=1$  のときでもモデルAと異なる値をとるが、 $N$  の値が大きくなるにつれてアーラン分布の位相の影響が現われる。すなわち、リンク(i)の効率はよくなっている。

奥山らの研究<sup>5)</sup>によると、両方のリンクがアーラン分布の場合は、いずれか一方の運行時間の分布形が指数もしくは低次のアーランでないとその解を求めるることは困難となる。よって、われわれはK港Aふ頭で得られた分布形がコンテナふ頭における一般的な定常分布であるものと仮定してシミュレーション解を求め、以上のモデル解との遊離を検討してみることとする。

#### 4. 多重リンク系のシミュレーション解析

シミュレーション解析は汎用性をもたない欠点をもつが、各リンクの要素時間がどのような分布形をしていても、また輸送機関の数量がどのように変化してもそれに対応でき、アルゴリズムのくふうによってきめ細かい解析ができる点ですぐれている。本章においては、この要請に答えることのできる解析方法として、電子計算機を利用したモンテカルロ・シミュレーションのモデルを提示する。

##### (1) 2リンク系の輸送動態

モンテカルロ法は、乱数を用いて十分多数回のランダムな実験を行ない、所要の解を近似的に求めようとするものである。当面、われわれにとって興味があるのは、複数の輸送機関をもつリンクの要素時間を指標分布と仮定して導き出した待ち合せ理論の解が、現実のオペレーションとどの程度のかい離を生じているかを定量的に把握することである。シミュレーションにおいては、各リンクの要素時間をどのようにして決定するかが問題になる。そこで、この場合は過去の資料すなわち実際のオペレーションから得られたデータを基にして、一度それらをアーラン分布に適合させて位相を決定し、さらにその分布からランダムに抽出する方法を採用了<sup>4)</sup>。

この方法を利用すれば、サイクルタイムの累積分布関数の逆関数が得られなくても、一様乱数を用いて乱数化された要素時間のモデルを作り出すことができる。すなわち、アーラン分布の確率密度は、

$$f(t) = \begin{cases} \frac{(\lambda k)^k}{(k-1)!} t^{k-1} e^{-\lambda k t}, & t \geq 0, (k \geq 1, \lambda > 0) \\ 0, & t < 0, \text{ 平均} = 1/\lambda, \text{ 分散} = 1/k \lambda^2 \end{cases} \dots \quad (29)$$

であるから、この累積分布の値をあらかじめ  $t$  の各値に対して計算し、それを計算機内部に記憶させておく。そうすれば、一様乱数に対応する  $f(t)$  の乱数を求める

ことができる。以下、各ケースについてシミュレーションモデルとその結果について考察を加える。

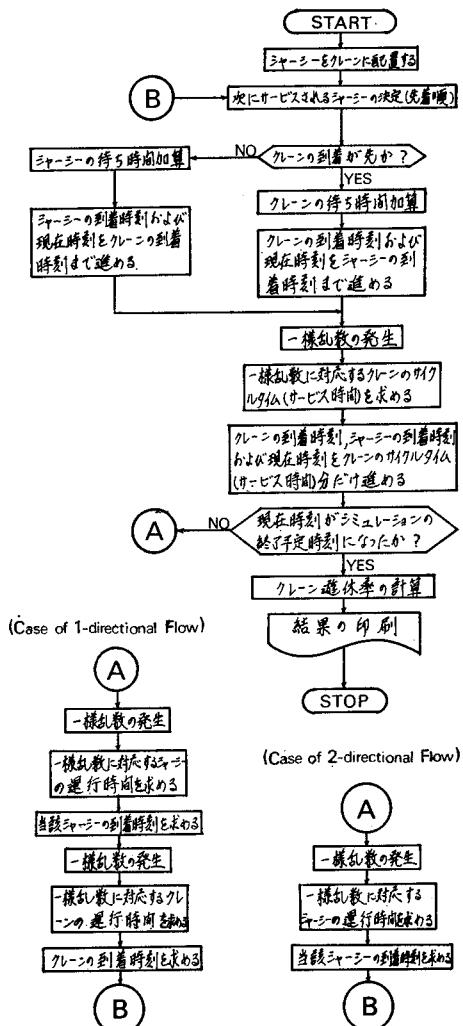


Fig. 9 Simplified Flow Diagram Routine for Simulation of Container Handling System

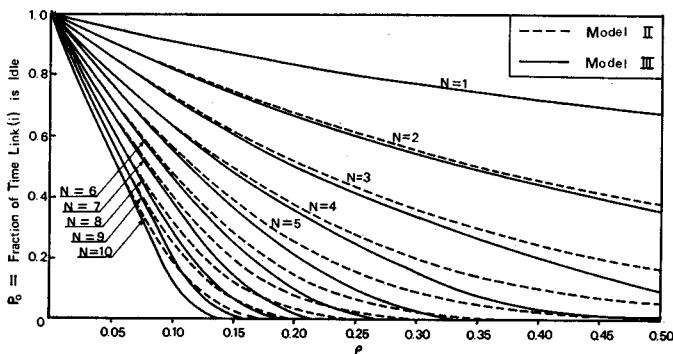


Fig. 10 Fraction of Time Link ( $i$ ) is Idle vs.  $\rho = \mu_{i+1}/\mu_i$  and  $N$  (Case of 2-directional Flow)

### a) ものの 2 方向流れの場合

この場合は、 $i+1$  番目のリンクには輸送機関が  $N$  台いるものとし、それは先着順サービスをうけるものとする。そして、 $i$  および  $i+1$  番目のリンクの輸送機関の到着時刻を比較し、早く到着した輸送機関には待ち時間を加えシミュレーションの現在時刻も進めておく。次に一様乱数を発生し、上述の方法によりクレーンのサイクルタイムを決定する。この場合、理論解析と比較する際の精度も考え、サイクルタイムは 1 秒単位で決定した。さらに、各輸送機関の到着時刻、現在時刻をその分だけ進め、シミュレーション終了予定時刻になったかどうか判断する。終了時刻は、テスト・ランでの解の収束状況を基にし、さらに若干の余裕を加えて 27 時間程度とした。再び一様乱数を発生し、それに対応する  $i+1$  番目のリンクの運行時間を決定し、当該輸送機関の到着時刻を求め、次にサービスされる輸送機関を先着順サービスの規律にしたがって指定する。以後は、この操作手順を十分多数回繰り返すわけである。Fig. 9 は、コンテナふ頭における荷役動態のシミュレーション・フローチャートを示したものである。一方、Fig. 10 は  $1/\mu_i$  のみを変化させ、他の変数は  $k_i=66$ ,  $1/\mu_{i+1}=410$  秒,  $k_{i+1}=26$  に固定したシミュレーション結果を実線で図示したものである。以下、本モデルをモデル III と名づける。なお、図中の破線はモデル II による解析結果を示している。Fig. 10 を Fig. 2 と比較、検討することにより、次のように結論される。

i) 当然のことではあるが、 $N=1$  の場合は  $\rho$  の各値に対して、いずれの解析方法でも  $P_0$  が等しくなっている。すなわち、各リンクの輸送機関の数量がともに 1 台の場合は、 $P_0$  は各リンクの要素時間の平均値（したがって  $\rho$ ）のみによって一意的に求められ、分布形には影響されない。

ii) モデル I の解よりもモデル II の解、モデル II の解よりもモデル III の解のほうが  $P_0$  の値を小さく計算している。このことは、要素時間に規則性が加わるにつれて輸送機関の遊休率が低下するという実際のオペレーションの経験を実証している。

iii) これは  $k_{i+1}=26$  の場合についていえることであるが、モデル II の  $P_0$  の値はモデル I およびモデル III のほぼ中間の値を示している。 $k_{i+1}$  がより大きくなるにしたがって、モデル II の理論解とモデル III の解とのかい離はもっと大きくなるものと考えられる。また、逆にもし  $k_{i+1}$  が小さな値であればあるほど、それだけ理論解の適用可能な範囲も広くなる。したがって、各モデルの適用にあ

たっては、モデルを使用する対象の重要性および  $k_{i+1}$  が結果に及ぼす感度を十分考慮して決定すべき問題であろう。

iv)  $\rho N < 0.7$  および  $\rho N > 2.0$  の範囲にあっては、 $P_0^c$  に及ぼす各モデル間の差異が比較的小さい。前者はリンク ( $i$ ) の輸送機関が一方的に待つ場合であり、後者はリンク ( $i+1$ ) の輸送機関が一方的に待つ場合に相当する。よって、各モデルの取捨選択にあたっては、対象とする輸送システムの  $\rho N$  の値がどの範囲に入っているかを十分見定め、ケースバイケースで決定する必要がある。

#### b) ものの1方向流れの場合

この場合も a) と同様、 $i+1$  番目のリンクの輸送機

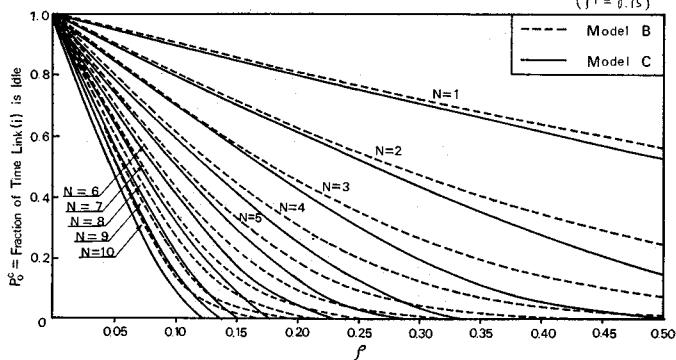


Fig. 11 Fraction of Time Link ( $i$ ) is Idle vs.  $\rho = (t_c + t_s)/t_t$  and  $N$   
(Case of 1-directional Flow)

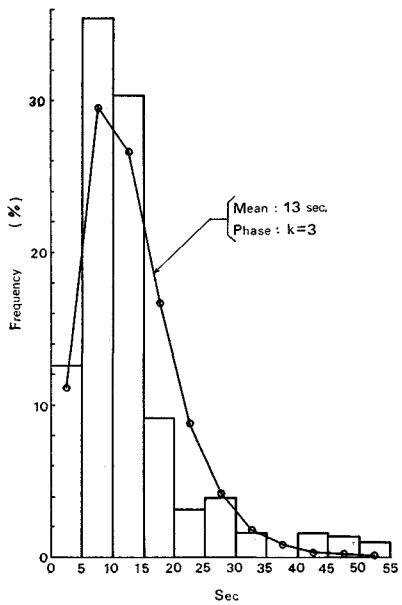


Fig. 12 Example Field Data for Service Time of Crane (Case of 1-directional Flow)

関は先着順サービスをうけるものとする。シミュレーションの操作手順も a) とまったく同様で、異なるところは要素時間の数の増加に伴い乱数発生の機会が1度多くなることだけである。Fig. 9 には、1方向流れのシミュレーション・フロー・チャートも示している。同じく、Fig. 11 には  $\gamma^* = 0.15$  の場合の  $P_0^c$  の値を  $N$  と  $\rho$  をパラメータとして図示している。この場合、サービス時間、リンク ( $i+1$ ) の運行時間の実測値は Fig. 12、Fig. 13 に示すようにそれぞれ平均値 13 秒、401 秒、位相  $k$  は 3, 37 であった。そこで  $t_t = 401$  秒、各時間分布の位相はそれぞれ 14, 3, 37 に固定し、 $t_c$  を変化させた。したがって、 $t_s$  の値は  $\gamma^* = 0.15$  の関係を保ったまま変化している。また、本モデルをモデルCと名づけている。なお、Fig. 11 の中の破線はモデルBによる解析結果を示している。Fig. 11 を Fig. 6 と比較すれば、次のことが明らかになる。

i) a) と異なり、 $N=1$  の場合においても各解析方法により得られたリンク ( $i$ ) の遊休率  $P_0^c$  の値に差異を生ずる。これは  $\rho$ 、 $\lambda^*$ 、 $\gamma^*$  すなわちリンク ( $i$ )、( $i+1$ ) の運行時間およびサービス時間の平均値とそれらの分布形とにより、 $P_0^c$  も変化することを示している。

ii) a) と同様、モデルAの解よりもモデルBの解、モデルBの解よりもモデルCの解のほうが  $P_0^c$  の値は小さい。これが、実際

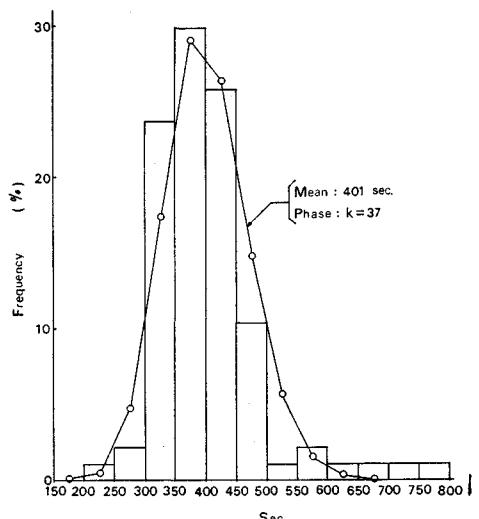


Fig. 13 Example Field Data for Travel Time of Tractor-chassis (Case of 1-directional Flow)

のオペレーションを反映していることはいうまでもない。

iii) モデルA, BおよびCの3つのモデルを  $P_0^c$ について比較してみると、モデルBはモデルCよりもむしろモデルAに近い。これはモデルBの場合、a)と異なる新たにサービス時間も指指数分布を仮定したことにより、シミュレーション値とのかい離が累加したためと考えられる。もちろん、このかい離の大きさの定量的なとり扱いは、サービス時間、リンク  $(i+1)$  の運行時間の平均値およびそれらのアーラン次数の大きさに影響されるので一般的に論することはできないが、モデルA, モデルBは a)の場合よりリンク  $(i)$  の遊休率を過大評価するものと考えられる。

iv)  $\rho N < 0.5$  および  $\rho N > 2.0$  の範囲にあっては、各モデル間の差異が比較的小さい。その理由は、a)の場合と同様である。

以上のことから明らかのように、モデルA, BおよびCはそれぞれ特徴をもっている。すなわち、モデルAは計算上のとり扱いが容易であり、また  $\rho N$  のある範囲においてはモデルCとのかい離も少ないので十分適用可能である。しかし、普通問題となるのは上述の3つのモデル間でかい離が大きく現われたようなケースが多いので、この場合は各モデルで採用された仮定、適用する対象の許容精度、各モデルのトータルシステム中に占める位置等を十分勘案して、適切な適用を行なうことが必要であろう。

## (2) 多重リンク系の輸送動態

緒言で述べたように、輸送活動は Fig. 1 に示されるような多重リンク系として把握できる場合が多いが、系全体の解を一度に求めることは容易でない。しかしながら、モンテカルロ・シミュレーションの手法を使えばこのことが可能になる。ここでは、Russel R. O'Neill が港湾荷役システムを例にとって行なったシミュレーションの主要な結果について略述する<sup>2)</sup>。

### a) 多重リンク系の効率

この研究においては、輸送機関の活動はつみとり ( $P$ )、積荷輸送 ( $L$ )、おろし ( $R$ )、空荷輸送 ( $E$ ) の4つの活動時間と遅れの時間 ( $D$ ) からなっているとしている。ここに  $D$  は、あるリンクの輸送機関が隣接するリンクの輸送機関の到着を待つときに発生する遅れを意味している。多重リンク輸送系を移動するものは、ノードから次のノードへ同じ割合で動いている。なぜなら、もしその割合が各リンク間で異なるならば、1つ以上のノードには無限の滞貨が生じるからである。よって、システムの生産性はあるリンクの効率 (effectiveness) によって測られるとしている。効率  $e$  は、前記の各時間

の平均値を使えば次式によって示される。

$$e = \frac{\bar{P} + \bar{L} + \bar{R} + \bar{E}}{\bar{P} + \bar{L} + \bar{R} + \bar{E} + \bar{D}} \quad \dots\dots\dots(30)$$

### b) リンクとノードの影響

多重リンク系の効率は、リンクおよびノードを形成する次の5個の変数によって影響されるとしている。

すなわち、まず第1に系に付加されるリンク数が増加すればするほど Fig. 14 に示すように効率は低下し、ある極限値に接近する。したがって、ある系に付加されたリンクの影響は、その前に付加されたリンクが系に及ぼす影響よりも小さくなっている。第2に、系に一時貯留機能を付与することが系の効率に及ぼす影響は、3リンクからなる輸送系について検討され、その効率は Fig. 15 に示すように貯留機能設備の増大とともにふえ、最終的には1になっている。したがって、ノードの貯留容量を大きく設計することは、その点でリンク系を分割しうる根拠を与えることになる。第3に、特定のリンク内で活動する輸送機関の数量が増加するにつれて Fig. 16 に示すように効率は減少し、もし輸送機関数が

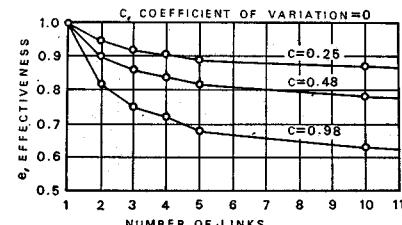


Fig. 14 Influence of Number of Links, Log-Normal Density-No Storage, One Transporting Agent

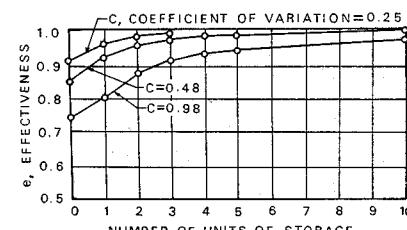


Fig. 15 Influence of Amount of Storage, Log-Normal Density-Three Links, One Transporting Agent

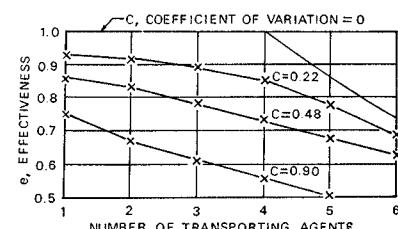


Fig. 16 Influence of Number of Transporting Agents-Three Links, No Storage

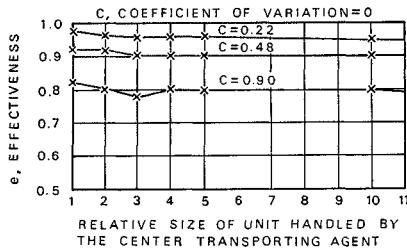


Fig. 17 Influence of Relative Size of Unit, Balanced System-Three Links, No Storage

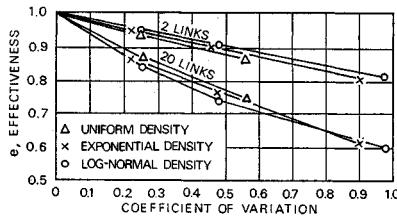


Fig. 18 Influence of Distribution Function-Variable Number of Links, No Storage

無限大になれば効率は 0 となる。第 4 に、ユニットの相対的大きさが効率におよぼす影響については、3 リンクシステムの中間リンクの輸送機関が 1 度に輸送するユニット数を種々変化させて検討している。それによるとユニット数の増大につれ Fig. 17 に示すように効率は減少するが、それはきわめてわずかである。第 5 に、 $P, L, R, E$  の変動係数が増大するにつれて、Fig. 18 に示すように効率は顕著に減少する。したがって、効率は  $P, L, R, E$  の分布の平均値および標準偏差によって、非常に影響されると結論づけられている。

## 5. 多重リンク系の評価

前章までにおいて、われわれは多重リンク系からなる輸送活動について種々検討を加えてきた。本章では、これらの結果を用いて最適な輸送系の設計を行なう方法について考察を試みる。

### (1) 評価関数の設定

本研究においては、ある 2 地域間での（輸送対象）を輸送する場合、ものの単位あたりにかかる費用  $C$  を

Table 1 Elements of Links and Nodes

Link No. ( $i$ )	1	2	3	4	5
Number of Transporting Agents	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$
Unit Cost (Yen/Year)	$C_{L1}$	$C_{L2}$	$C_{L3}$	$C_{L4}$	$C_{L5}$

Node No. ( $j$ )	1	2	3	4	5	6
Area or Capacity ( $m^2$ )	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$
Unit Cost (Yen/Year)	$C_{N1}$	$C_{N2}$	$C_{N3}$	$C_{N4}$	$C_{N5}$	$C_{N6}$

最小とすることが、すなわち最適な輸送系の設計であると定義する。いま Fig. 1 において、2 地域間には 5 個のリンクと 6 個のノードが存在するとし、一定期間中に輸送されるものを  $Q$ 、そして各リンクおよびノードは Table 1 に示される輸送機関数、規模、単位あたり費用から構成されているものとする。そうすると、目的関数、

$$C = \frac{\sum_{i=1}^5 (n_i \cdot C_{Li}) + \sum_{j=1}^6 (S_j \cdot C_{Nj})}{Q} \quad \dots \dots \dots (31)$$

を最小化することが必要になる。この場合、前章までに述べてきたような各リンクおよびノードの操作により、 $n_i, C_{Li}, S_j, C_{Nj}$  が変化することはいうまでもない。

### (2) 多段評価のアルゴリズム

式 (31) を最小化することが多重リンク系の最適性を保証することであるが、すでに緒言でも述べたように系全体の解を一度に求めることは容易でない。したがって、系をいくつかのサブシステムに分割し、基本系へのインプットおよびアウトプットが変化してもただちにそれに対応できるようなサブシステムの表示法をとっておけば、トータルシステムの解明も可能となる。Fig. 19 は、コンテナ一貫輸送システムを多重リンク系とみなしその分割モデルおよび各モデル相互間の連結因子を概念的に示したものである。すなわち、高次の地域貿易需要モデルにより寄港を仮定した特定の港の年間取扱貨物量が予測され、船型、隻数、入港間隔分布および内陸へのコンテナ発着分布が与えられれば、ヤード規模決定

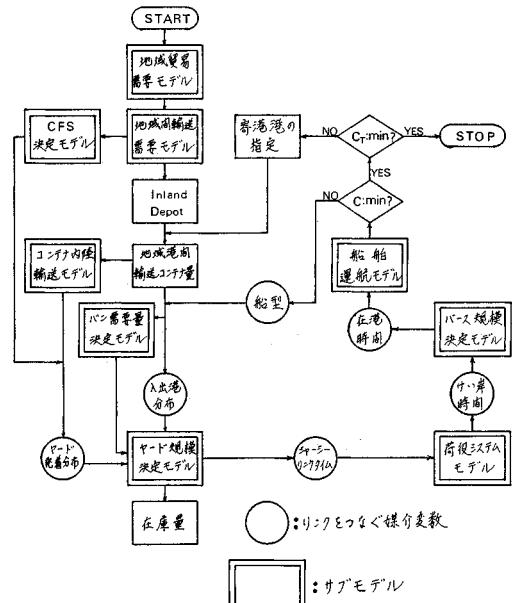


Fig. 19 Partition to Sub-models of Container Transportation System

モデルにより適正なヤード規模を決定できる。その結果得られるトラクターシャーシーのリンクタイムを媒介変数として荷役システムモデルを結びつけ適正な荷役システムが決定される。これらがわかれれば、けい岸時間と媒介としてバース数を決定できる。このとき待ち時間もわかるので、在港時間が求まる。さらに、港におけるノードの費用と運航リンクの費用を含めた船舶運航モデルをこれに加えて、コンテナ船輸送に関する多重リンク系のモデルを構成することが可能となる。以上のような考えに基づき、寄港港の指定を変化させて生産地から消費地にいたるプロセスで費される総費用  $C_T$  を最小にするトータルシステムの最適設計は、ヒューリスティックな手法を用いることにより解析が可能となる。すなわち、コンテナ一貫輸送のような大規模で複雑な多重リンク系の輸送活動を把握するためには、システムをより簡単な基本系に分割しその基本系の解明とそれらの複合系の処理の問題に転換させることが必要である。

### (3) コンテナふ頭における荷役システムへの適用

以上述べてきた多段評価の概念を想定しつつ、本節ではコンテナ一貫輸送システムにおけるシャーシ方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、この場合コンテナ船がけい岸して荷役中のケースの最適な荷役機械の組み合せを決定しようとするもので、一般にはヤードの規模およびけい岸している船舶の船型はより高次の段階すでにわかっている。しかし、ここでは船型がコンテナ 500 個積、1 000 個積および 2 000 個積の場合について試算を行なう。

荷役中のコンテナ 1 個あたり費用  $C_H$  (円/個) は、式 (31) にならって次式で表わされる。

$$C_H = \frac{n_4(n_3 \cdot C_3 + C_4) + C_5 + C_B + C_Y}{n_4 \cdot m(1 - P_0)} \quad \dots \dots \dots (32)$$

ここに、

$m$  : クレーン荷役能力 (個/基・時間)

$P_0$  : クレーン遊休率

$n_3$  : 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/基)

$n_4$  : 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・台)

$C_4$  : 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)

$C_B$  : 岸壁関係費用 (円/時間)

$C_Y$  : ヤード関係費用 (円/時間)

パンのセット数は船型、船舶運航および内陸輸送パターンの変数としてとらえられるが、本例では不变量としてとり扱っている。

Table 2 は、従来から稼動しているクレーンと現在

Table 2 Capacity and Cost of Crane

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 (従来のもの) 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
	2 方向の場合	42		他に運転手給与、維持修理費、燃料費、一般管理費を含む。運転手給与を除く費用と能力は線形関係としている。
計画中のもの	1 方向の場合	45	7 470	
	2 方向の場合	53		

Table 3 Cost of Tractor-chassis and Container Yard

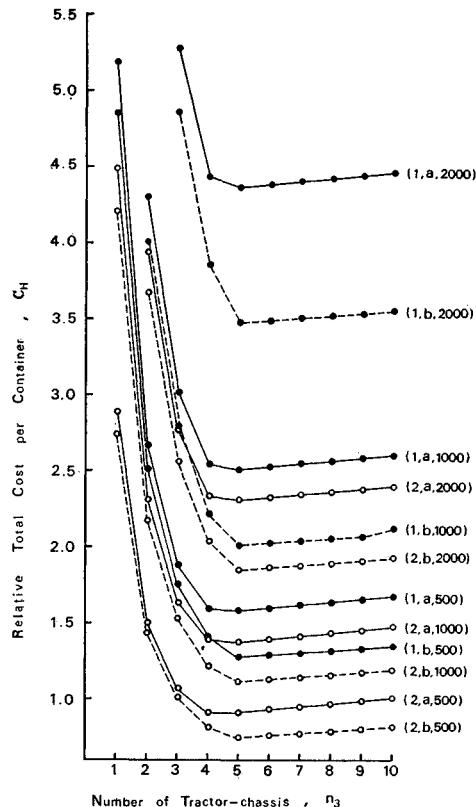
項目	時間費用 (円/時間)	摘要
$C_3$	774	原価 5 500 千円、残存価格 1 割、年利率 0.1、耐用年数 7 年にて計算。他に運転手給与、維持修理費、燃料費、一般管理費を含む。
$C_Y$	19 400	ふ頭用地 (93 000 m <sup>2</sup> ) の建設費 1 088 157 千円、年利率 7%、ヤード舗装 (85 200 m <sup>2</sup> ) は建設費 365 960 千円、耐用年数 10 年、年利率 7%，その他施設は建設費 568 600 千円、耐用年数 45 年、年利率 7% にて計算。

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。クレーンの費用  $C_4$  は、減価償却、運転手給与、維持修理費、燃料費および一般管理費より構成されている。Table 3 には、 $C_3$  と  $C_Y$  の時間あたり費用を記す。 $C_3$  の費用構成はクレーンの場合と同様であるが、 $C_Y$  は 93 000 m<sup>2</sup> のふ頭用地造成費、ヤード舗装費およびその他施設からなる。Table 4 には船舶関係費用と岸壁関係費用を示しており、 $C_5$  は減価償却、金利、乗員給与、船舶保険費、維持修繕費、食料費、店費、船用品費などから構成され、運航燃料費は含まれない。岸壁関係費用には、岸壁建設費と泊地しゅんせつ費用を算入している。これらは船型により変化する。なお、クレーンの遊休率については 1 方向および 2 方向流れのいずれのケースにおいても、もっとも精度の高いものとしてシミュレーションから得られた値を使用する。

Fig. 20 および Fig. 21 は、以上の費用をもとにして式 (32) から算出したコンテナ 1 個あたりの費用を、

Table 4 Cost of Container-ship and Berth

船型 (個積)	$C_5$ (円/時間)	$C_B$ (円/時間)	摘要
500	32 600	4 120	1. 船舶関係費用は減価償却、金利、乗員賃金、保険費、維持修繕費、食料費、店費、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 201)
1 000	71 000	4 660	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。
2 000	148 000	5 660	2. $C_B$ にはケーソン岸壁費用と泊地しゅんせつ費用を含む ( $C_B = 1 034 \times$ 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 10.5 m, 11.2 m, 12.6 m, バース長は 225 m, 250 m, 300 m とし単価は 214 (万円/m), 218, 221 とした。 耐用年数 50 年、年利率 7% とした。



Note : The number and symbol in parentheses mean as follows; the first means the number of cranes, the second the type of cranes (a : traditional one, b : planned type with 125% capacity of type a) and the last the number of capable loaded containers on one ship.

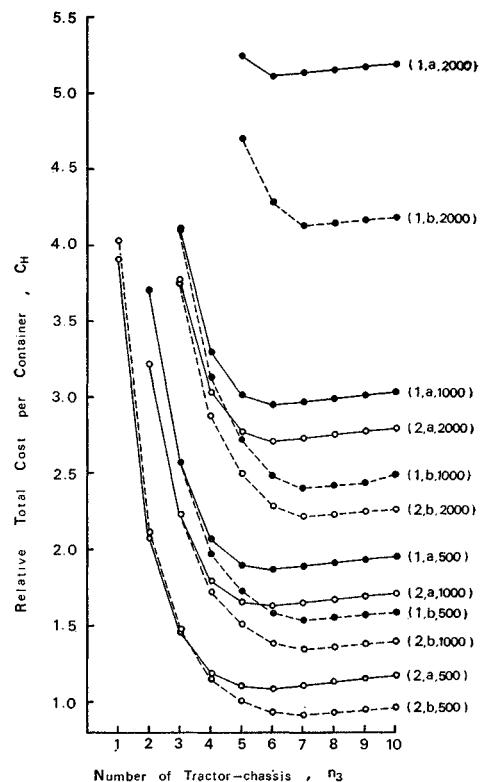
Fig. 20 Relationship between Relative Total Unit Cost,  $C_H$ , and Number of Tractor-chassis (Case of 2-directional Flow)

それぞれ2方向流れと1方向流れの場合について図示したものである。これらの図より、次のように結論することができる。

- 船型については、大型船より小型船のほうが有利になっている。これは、船価、岸壁費用等のコンテナ1個あたりコストが大きくなるためである。
- 限界費用の減少(限界効用の発生)は、シャーシ台数が1台から2台の所で最大になっており、後は限界効用遞減の法則にしたがっていることが明らかである。また、費用関数は凸形を示し極点をもつことがわかる。

iii) 2方向流れの荷役方式では、常にシャーシを5台配備したシステムが費用極小となる。一方、1方向流れの場合には現行のクレーンには6台のシャーシを、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。

- クレーン基數、船型を同一にした場合、現行ク



Note : The numbers and symbol in parentheses mean as follows; the first means the number of cranes, the second the type of cranes (a : traditional one, b : planned type with 125% capacity of type a) and the last the number of capable loaded containers on one ship.

Fig. 21 Relationship between Relative Total Unit Cost,  $C_H$ , and Number of Tractor-chassis (Case of 1-directional Flow)

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方向の場合にあっては、投入するシャーシー台数が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りらず、クレーンの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。

v) クレーンのタイプおよび船型が同一の場合、クレーン基數を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。

## 6. 結 語

本研究においては、生産地点から消費地点にいたるもののが流れを多重リンクから構成される1つのシステムと考え、その基本系となる2リンク系について待ち合せモデルによる解析とシミュレーションモデルによる解析を

行ない、各モデル間の仮定の相違から生ずる結果の差異について検討した。すなわち、 $\rho N$  のある範囲内においては、モデル間の差異がリンク ( $i$ ) の遊休率に与える影響は 0.05~0.14 にもよぶが、その範囲外においては比較的小さい。したがって、対象とするシステムの精度と重要性に応じて、各モデルの選択をする必要があることを明らかにした。次に、それら動態解析モデルを用いて多重リンク輸送系の最適設計を行なうためのヒューリスティックなアルゴリズムについて考察し、国民経済的視点にたった評価関数を呈示した。さらにこれら方法論の適用例としてコンテナ埠頭の荷役システムをとりあげ、最適な荷役機械の配備計画を決定した。この場合、クレーンのタイプ、基數、船型にそれぞれレベルを設け、各レベルに対応した最適解を導くことができることを実証した。

しかし、本研究においては Fig. 19 に示したすべてのサブシステムを包含したトータルシステムの解として最適解を導いていない。また、費用のレベルのとり方にも考察を加える必要がある。そして、各サブシステムの

全体に及ぼす影響すなわち感度分析を行なったうえで、各輸送施設の規模決定モデルへと発展させる必要がある。本研究は、そのような研究に対して基本的な問題を提起し、サブシステムへの分割可能性を示してそのパーソナルテストを行なったことになる。

#### 参考文献

- 1) Teicholz, P. and J. Douglas : An Analysis of Two-Link Material Handling Systems with One Carrier in One of the Links, Stanford University, Stanford, Department of Civil Eng., Technical Report No. 29, pp. 44~57, Aug., 1963.
- 2) O'Neill, Russell R. : Simulation of Cargo Handling Systems, University of California, Los Angeles, Department of Eng., Report 56-37, pp. 33~94, Sept., 1956.
- 3) 富脇一男・長岡崇雄・毛利悦造：待合せ理論とその応用，日刊工業新聞社，pp. 130~141，昭和 36 年。
- 4) 米谷栄二・河上省吾：しゅんせつ工事計画に関する一考察，土木学会論文集 No. 125, pp. 1~11, 昭和 41 年。
- 5) 奥山育英・中井典倫子・久保重美：コンテナ埠頭の規模および荷役方式に関する考察，港湾技研報告，10巻 3 号，pp. 159~236, 1971.

(1972.5.30・受付)