

しゅんせつ工事計画に関する一考察*

ON AN OPTIMAL PLAN OF ORGANIZING A FLEET OF DREDGERS

米谷 栄二**・河上 省吾***
By Eiji Kometani and Shogo Kawakami

要 旨 本論文はしゅんせつ船、ひき船、土運船からなる船団を組んでしゅんせつ工事を行なう際に問題となる最適船団構成の決定方法について検討したものである。ここでは総しゅんせつ費が最小となる船団が最適船団であると考えて考察を進めた。まず、能力が異なるしゅんせつ船およびひき船からなる船団について待合せ理論を用いて検討し、つぎにシミュレーションによる方法を試みた。この結果を用いて、同種施設の能力が等しい場合について、しゅんせつ船隻数が 1, 2, 3 隻のときの最適船団構成を決定した。

1. はじめに

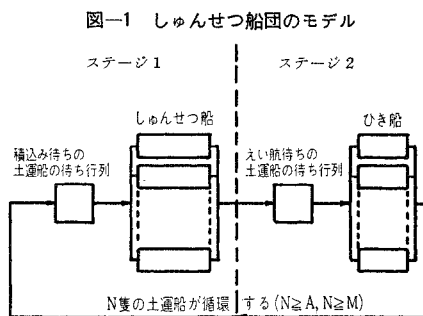
施工計画を作成する際に、工事の目的に対して最適の施工施設の組合せを求める必要がある。たとえばしゅんせつ船に対して何隻の土運船とひき船を配属させればよいか、土砂掘削機または土砂積み装置に対し何台のダンプカーを配車すればよいかといった問題である。また数台の機械を使用する際に、当然故障があるので、その機械に対して運転員と修理工を何人ずつ配置するのが最適かという問題がある。これらの問題はいずれもオペレーションズ リサーチの一手法である待合せ理論を適用することができる。本研究ではこれらの問題解決に適用できる 2 段階のサービス施設のある、循環する待合せモデルについて考察する。ここではしゅんせつ船団を例にとって検討し、施設のサービス時間の分布が指数分布であるとき、各段階の施設の能力に差がある場合のモデルの定常状態確率を求めた。このモデルで、各施設の能力の等しい場合についてはすでに検討されているが、著者らは各施設の能力の異なる場合について検討した。そしてその解析結果を用いてしゅんせつ船団の最適構成を決める方法を示した。また、施設のサービス時間が指数分布でない場合は待合せ理論による解析が困難なので、サービス時間の分布に無関係に適用可能な、電子計算機を活用するモンテカルロ シミュレーションによって解析を行なう方法を示した。

2. 待合せ理論による方法

ここで取り扱う待合せシステムにおいては、各サービス段はサービス時間がそれぞれ異なった指数分布である並列複数チャンネルを持ち、すべて先着順サービスである。また個々の能力の異なった並列複数チャンネルのサービス率として、同種チャンネルのサービス率の平均値を用いた場合に、各施設の平均遊休数量に現われる誤差について検討する。

(1) システムの解析

しゅんせつ船団の作業は 2 段階のサービス段からなる閉鎖循環システムとして取り扱うことができる。すなわち、土運船はまずしゅんせつ船から土砂の積み込みというサービスを受け、つぎにひき船により土捨場までえい航され土砂を捨て（この作業は短時間で終了する）、ふたたびしゅんせつ船の所までえい航されるというサービスを受ける。このような作業をくり返し行なうことによりしゅんせつ作業が遂行されるのである。この様子をモデル化すると図-1 のようになる。この 2 段階のステージの



ある閉鎖システムにおいて、1 段目を積み込みステージ、2 段目をえい航ステージと考えれば明らかにこれは循環するシステムである。この船団には M 隻のしゅんせつ船と A 隻のひき船と、容量の等しい N 隻の土運船があるものとする。しゅんせつ船には $1, 2, \dots, i, \dots, M$ なる番号を、またひき船には $1, 2, \dots, j, \dots, A$ なる番号を付ける。そして各しゅんせつ船の積み込み時間および各ひき船の往復えい航時間（土砂を捨てる時間を含む）はともに指数分布をなし、その平均値はそれぞれ $1/\mu_{1i}$, $1/\mu_{2j}$ であるとする。また積み込みおよびえい航作業は先着順に行ない、ひき船は 1 回に 1 隻の土運船をえい航するものとする。いま指標 a_i, b_j によって作業中のしゅん

* 土木学会第 17 回および第 18 回年次学術講演会（昭 37. 5 および昭 38.5）にて発表したものをとりまとめたものである。

** 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 博 士 課 程 学 生

せつ船およびひき船を表わし、船団の状態を

$$(a_1, \dots, a_i, \dots, a_r; b_1, \dots, b_j, \dots, b_q | n_1, n_2)$$

のように表わす。ここに n_1 は積込みステージにある土運船隻数を、また n_2 はえい航ステージにある土運船隻数を示し、つねに $n_1 + n_2 = N$ である。このように指標を用いて定義された状態を指標付き状態とよぶ。各ステージにある土運船隻数がそのステージの施設(しゅんせつ船またはひき船)の隻数以上となるか、あるいは0のときには、そのステージでの施設の指標付けは不要となるので、この場合はそのステージの指標を省略し、土運船隻数のみでシステムの状態を表わす。船団の指標付き定常状態確率を $P(a_1, \dots, a_i, \dots, a_r; b_1, \dots, b_j, \dots, b_q | n_1, n_2)$ で表わすと、この指標付き状態確率から船団の状態が (n_1, n_2) である確率 $P_s(n_1, n_2)$ を次式により求めることができる。

$$P_s(n_1, n_2) = \sum_d P(a_1, \dots, a_i, \dots, a_r; b_1, \dots, b_j, \dots, b_q | n_1, n_2) \dots \dots \dots (1)$$

ここに d は船団の状態が (n_1, n_2) となる指標付き状態の総数を表わし、式(1)の右辺は (n_1, n_2) となる指標付き状態確率の総和を意味する。

これらの記号を用いると時刻 t における状態方程式はつぎのように書ける。

a) $n_1=0$ のとき

$$P_{t+\Delta t}(0, N) = P_t(0, N)(1 - \mu_{2s}\Delta t) + \sum_{i=1}^M P_t(a_i | 1, N-1)\mu_{i1}\Delta t \dots (2)$$

$$\frac{dP_t(0, N)}{dt} = -\mu_{2s}P_t(0, N) + \sum_{i=1}^M \mu_{i1}P_t(a_i | 1, N-1) \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $\mu_{2s} = \sum_{j=1}^A \mu_{2j}$

d) $M > n_1 > N-A$ のとき

$$P_{t+\Delta t}(a_1, \dots, a_{n_1}; b_1, \dots, b_{N-n_1} | n_1, N-n_1) = P_t(a_1, \dots, a_{n_1}; b_1, \dots, b_{N-n_1} | n_1, N-n_1) \times \{1 - (\sum_{f=1}^{n_1} \mu_{1f} + \sum_{g=1}^{N-n_1} \mu_{2g})\Delta t\} + \frac{1}{M-n_1+1} \sum_{j=1}^{A-N+n_1} \sum_{k=1}^{n_1} P_t(a_1, \dots, \hat{a}_k, \dots, a_{n_1}; b_1, \dots, b_{N-n_1}, b_j | n_1-1, N-n_1+1)\mu_{2j}\Delta t + \frac{1}{A-N+n_1+1} \sum_{k=1}^{N-n_1} \sum_{i=1}^{M-n_1} P_t(a_1, \dots, a_{n_1}, a_i; b_1, \dots, \hat{b}_k, \dots, b_{N-n_1} | n_1+1, N-n_1-1)\mu_{i1}\Delta t \dots \dots \dots (8)$$

$$\frac{dP_t(a_1, \dots, a_{n_1}; b_1, \dots, b_{N-n_1} | n_1, N-n_1)}{dt} = -(\sum_{f=1}^{n_1} \mu_{1f} + \sum_{g=1}^{N-n_1} \mu_{2g})P_t(a_1, \dots, a_{n_1}; b_1, \dots, b_{N-n_1} | n_1, N-n_1) + \frac{1}{M-n_1+1} \sum_{j=1}^{A-N+n_1} \sum_{k=1}^{n_1} P_t(a_1, \dots, \hat{a}_k, \dots, a_{n_1}; b_1, \dots, b_{N-n_1}, b_j | n_1-1, N-n_1+1)\mu_{2j} + \frac{1}{A-N+n_1+1} \sum_{k=1}^{N-n_1} \sum_{i=1}^{M-n_1} P_t(a_1, \dots, a_{n_1}, a_i; b_1, \dots, \hat{b}_k, \dots, b_{N-n_1} | n_1+1, N-n_1-1)\mu_{i1} \dots \dots \dots (9)$$

e) $M < n_1, N-A < n_1$ のとき

b) $M > n_1, N-A > n_1$ のとき

$$P_{t+\Delta t}(a_1, \dots, a_{n_1} | n_1, N-n_1) = P_t(a_1, \dots, a_{n_1} | n_1, N-n_1) \{1 - (\mu_{2s} + \sum_{f=1}^{n_1} \mu_{1f})\Delta t\} + \frac{1}{M-n_1+1} \times \sum_{k=1}^{n_1} P_t(a_1, \dots, \hat{a}_k, \dots, a_{n_1} | n_1-1, N-n_1+1)\mu_{2s}\Delta t + \sum_{i=1}^{M-n_1} P_t(a_1, \dots, a_{n_1}, a_i | n_1+1, N-n_1-1)\mu_{i1}\Delta t \dots \dots \dots (4)$$

$$\frac{dP_t(a_1, \dots, a_{n_1} | n_1, N-n_1)}{dt} = -(\mu_{2s} + \sum_{f=1}^{n_1} \mu_{1f})P_t(a_1, \dots, a_{n_1} | n_1, N-n_1) + \frac{1}{M-n_1+1} \times \sum_{k=1}^{n_1} P_t(a_1, \dots, \hat{a}_k, \dots, a_{n_1} | n_1-1, N-n_1+1)\mu_{2s} + \sum_{i=1}^{M-n_1} P_t(a_1, \dots, a_{n_1}, a_i | n_1+1, N-n_1-1)\mu_{i1} \dots \dots \dots (5)$$

c) $M < n_1 < N-A$ のとき

$$P_{t+\Delta t}(n_1, N-n_1) = P_t(n_1, N-n_1) \{1 - (\mu_{2s} + \mu_{1s})\Delta t\} + P_t(n_1-1, N-n_1+1)\mu_{2s}\Delta t + P_t(n_1+1, N-n_1-1)\mu_{1s}\Delta t \dots \dots \dots (6)$$

$$\frac{dP_t(n_1, N-n_1)}{dt} = -(\mu_{2s} + \mu_{1s})P_t(n_1, N-n_1) + \mu_{2s}P_t(n_1-1, N-n_1+1) + \mu_{1s}P_t(n_1+1, N-n_1-1) = 0 \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 $\mu_{1s} = \sum_{i=1}^M \mu_{i1}$

$$\begin{aligned}
P_{t+dt}(b_1, \dots, b_{N-n_1} | n_1, N-n_1) &= P_t(b_1, \dots, b_{N-n_1} | n_1, N-n_1) \{1 - (\mu_{1s} + \sum_{g=1}^{N-n_1} \mu_{2g}) dt\} \\
&\quad + \sum_{j=1}^{A-N+n_1} P_t(b_1, \dots, b_{N-n_1}, b_j | n_1-1, N-n_1+1) \mu_{2j} dt \\
&\quad + \frac{1}{A-N+n_1+1} \sum_{k=1}^{N-n_1} P_t(b_1, \dots, \hat{b}_k, \dots, b_{N-n_1} | n_1+1, N-n_1-1) \mu_{1s} dt \dots (10)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{dP_t(b_1, \dots, b_{N-n_1} | n_1, N-n_1)}{dt} &= -(\mu_{1s} + \sum_{g=1}^{N-n_1} \mu_{2g}) P_t(b_1, \dots, b_{N-n_1} | n_1, N-n_1) \\
&\quad + \sum_{j=1}^{A-N+n_1} P_t(b_1, \dots, b_{N-n_1}, b_j | n_1-1, N-n_1+1) \mu_{2j} \\
&\quad + \frac{1}{A-N+n_1+1} \sum_{k=1}^{N-n_1} P_t(b_1, \dots, \hat{b}_k, \dots, b_{N-n_1} | n_1+1, N-n_1-1) \mu_{1s} \dots (11)
\end{aligned}$$

なお、 $N-A \neq M=n_1$, $N-A=M=n_1$, $N-A=M \neq n_1$ の各場合もまったく同様にして状態方程式を作ることができ、ここでは省略する。

定常状態では、時間についての微係数が 0 となるので、定常状態平衡式はつぎのように書ける。ここでは、 $M \leq N$, $A \leq N$ の場合について考える。

$$-\mu_{2s} P(0, N) + \sum_{i=1}^M \mu_{1i} P(a_i | 1, N-1) = 0 \dots (12)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\mu_{2s}}{M-n_1+1} \sum_{k=1}^{n_1} P(a_1, \dots, \hat{a}_k, \dots, a_{n_1} | n_1-1, N-n_1-1) - (\mu_{2s} + \sum_{f=1}^{n_1} \mu_{1f}) P(a_1, \dots, a_{n_1} | n_1, N-n_1) \\
+ \sum_{i=1}^{M-n_1} P(a_1, \dots, a_{n_1}, a_i | n_1+1, N-n_1-1) \mu_{1i} = 0 \quad (M > n_1, N-A > n_1) \dots (13)
\end{aligned}$$

$$\mu_{2s} P(n_1-1, N-n_1+1) - (\mu_{2s} + \mu_{1s}) P(n_1, N-n_1) + \mu_{1s} P(n_1+1, N-n_1-1) = 0 \quad (M < n_1 < N-A) \dots (14)$$

$$\begin{aligned}
\frac{1}{M-n_1+1} \sum_{j=1}^{A-N+n_1} \sum_{k=1}^{n_1} P(a_1, \dots, \hat{a}_k, \dots, a_{n_1}; b_1, \dots, b_{N-n_1}, b_j | n_1-1, N-n_1+1) \mu_{2j} \\
- (\sum_{f=1}^{n_1} \mu_{1f} + \sum_{g=1}^{N-n_1} \mu_{2g}) P(a_1, \dots, a_{n_1}; b_1, \dots, b_{N-n_1} | n_1, N-n_1) \\
+ \frac{1}{A-N+n_1+1} \sum_{k=1}^{N-n_1} \sum_{i=1}^{M-n_1} P(a_1, \dots, a_{n_1}, a_i; b_1, \dots, \hat{b}_k, \dots, b_{N-n_1} | n_1+1, N-n_1-1) \mu_{1i} = 0, \\
(M > n_1 > N-A) \dots (15)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{j=1}^{A-N+n_1} P(b_1, \dots, b_{N-n_1}, b_j | n_1-1, N-n_1+1) \mu_{2j} - (\mu_{1s} + \sum_{g=1}^{N-n_1} \mu_{2g}) P(b_1, \dots, b_{N-n_1} | n_1, N-n_1) \\
+ \frac{\mu_{1s}}{A-N+n_1+1} \sum_{k=1}^{N-n_1} P(b_1, \dots, \hat{b}_k, \dots, b_{N-n_1} | n_1+1, N-n_1-1) = 0, \quad (M < n_1, N-A < n_1) \dots (16)
\end{aligned}$$

ここに、 $P(a_1, \dots, \hat{a}_k, \dots, a_r; b_1, \dots, b_q | n_1, n_2)$ は施設 $(a_1, \dots, a_k, \dots, a_r, b_1, \dots, b_q)$ において a_k を除くすべての施設 $(a_1, \dots, a_r, b_1, \dots, b_q)$ が作業中で、 $a_k \in (a_1, \dots, a_r)$, かつこのシステムの $(a_1, \dots, a_k, \dots, a_r, b_1, \dots, b_q)$ に属さない施設はどれも遊休中である状態の確率である。また $P(a_1, \dots, a_r; b_1, \dots, \hat{b}_k, \dots, b_q | n_1, n_2)$ も全く同様に施設 $(a_1, \dots, a_r, b_1, \dots, b_k, \dots, b_q)$ において b_k を除くすべての施設 $(a_1, \dots, a_r, b_1, \dots, b_q)$ が作業中で、 $b_k \in (b_1, \dots, b_q)$, かつこのシステムの $(a_1, \dots, a_r, b_1, \dots, b_k, \dots, b_q)$ に属さない施設はどれも遊休中である状態の確率を表わす。なお、 $\sum_{f=1}^{n_1} \mu_{1f}$, $\sum_{g=1}^{N-n_1} \mu_{2g}$ はそれぞれ作業中のしゅんせつ船、ひき船について和を求めることを意味する。

各方程式を μ_{2s} で割り、 $\mu_{1i}/\mu_{2s} = m_{1i}$, $\mu_{2j}/\mu_{2s} = m_{2j}$ とおくとつぎのようにして状態確率の解を求めることができる。

式 (12) より

$$-P(0, N) + \sum_{i=1}^M m_{1i} P(a_i | 1, N-1) = 0 \dots (17)$$

ここで

$$P(a_i | 1, N-1) = \frac{P(0, N)}{M m_{1i}} \dots (18)$$

とおくと式 (17) は満足され、式 (18) が $P(a_i | 1, N-1)$ の解であることがわかる。つぎに $n_1 = 1 < M < N-A$ のとき、式 (13) を m_{1i}, m_{2j} を用いて書き直し、式 (18) を用いると次式を得る。

$$\begin{aligned}
\frac{1}{M} P(0, N) - (1 + m_{1r}) \frac{P(0, N)}{M m_{1r}} \\
+ \sum_{i=1}^{M-1} m_{1i} P(a_r, a_i | 2, N-2) = 0 \\
- \frac{1}{M m_{1r}} P(0, N) + \sum_{i=1}^{M-1} m_{1i} P(a_r, a_i | 2, N-2) = 0 \\
\dots (19)
\end{aligned}$$

いま、

$$P(a_r, a_i | 2, N-2) = \frac{P(0, N)}{M(M-1)m_{1r}m_{1i}} \dots (20) \quad \text{の解であることがわかる。以下 } n_1=2, 3, \dots, N \text{ を順次代入していくとつぎのような解を得る。}$$

とおくと、式(19)が満足され、式(20)が $P(a_i, a_r | 2, N-2)$ ① $N-A \geq M$ の場合

$$P(a_1, \dots, a_{n_1} | n_1, N-n_1) = \frac{(M-n_1)! P(0, N)}{M! m_{11} \dots m_{1n_1}}, \quad (n_1 \leq M \leq N-A) \dots (21)$$

$$P(n_1, N-n_1) = \frac{P(0, N)}{M! m_{11} \dots m_{1M} (m_s)^{n_1-M}}, \quad (M < n_1 \leq N-A) \dots (22)$$

$$P(b_1, \dots, b_{N-n_1} | n_1, N-n_1) = \frac{(n_1+A-N)! m_{21} \dots m_{2(n_1-N+A)} P(0, N)}{M! m_{11} \dots m_{1M} (m_s)^{n_1-M}}, \quad (M \leq N-A < n_1) \dots (23)$$

$$m_s = \sum_{i=1}^M m_{1i}$$

② $N-A < M$ の場合

$$P(a_1, \dots, a_{n_1} | n_1, N-n_1) = \frac{(M-n_1)! P(0, N)}{M! m_{11} \dots m_{1n_1}}, \quad (n_1 \leq N-A < M) \dots (24)$$

$$P(a_1, \dots, a_{n_1}; b_1, \dots, b_{N-n_1} | n_1, N-n_1) = \frac{(M-n_1)! (n_1+A-N)! m_{21} \dots m_{2(n_1+A-N)} P(0, N)}{M! m_{11} \dots m_{1n_1}}, \quad (N-A < n_1 \leq M) \dots (25)$$

$$P(b_1, \dots, b_{N-n_1} | n_1, N-n_1) = \frac{(n_1+A-N)! m_{21} \dots m_{2(n_1+A-N)} P(0, N)}{M! m_{11} \dots m_{1M} (m_s)^{n_1-M}}, \quad (N-A < M < n_1) \dots (26)$$

これらの各指標付き状態確率より、式(1)で与えられる指標に関係のない状態確率 $P_s(n_1, N-n_1)$ を求めるとつぎようになる。

① $N-A \geq M$ の場合

$$P_s(n_1, N-n_1) = \frac{(M-n_1)! P(0, N)}{M! m_{11} \dots m_{1M}} \binom{\sum m_{1(n_1+1)} \dots m_{1M}}{M-n_1}, \quad (n_1 \leq M \leq N-A) \dots (27)$$

$$P_s(n_1, N-n_1) = \frac{P(0, N)}{M! m_{11} \dots m_{1M} (m_s)^{n_1-M}}, \quad (M \leq n_1 \leq N-A) \dots (28)$$

$$P_s(n_1, N-n_1) = \frac{(n_1+A-N)! P(0, N)}{M! m_{11} \dots m_{1M} (m_s)^{n_1-M}} \binom{\sum m_{21} \dots m_{2(n_1+A-N)}}{n_1+A-N}, \quad (M \leq N-A < n_1) \dots (29)$$

② $N-A < M$ の場合

$$P_s(n_1, N-n_1) = \frac{(M-n_1)! P(0, N)}{M! m_{11} \dots m_{1M}} \binom{\sum m_{1(n_1+1)} \dots m_{1M}}{M-n_1}, \quad (n_1 \leq N-A < M) \dots (30)$$

$$P_s(n_1, N-n_1) = \frac{(M-n_1)! (n_1+A-N)! P(0, N)}{M! m_{11} \dots m_{1M}} \times \left\{ \binom{\sum m_{1(n_1+1)} \dots m_{1M}}{M-n_1} \left\{ \binom{\sum m_{21} \dots m_{2(n_1+A-N)}}{n_1+A-N} \right\} \right\}, \quad (N-A < n_1 \leq M) \dots (31)$$

$$P_s(n_1, N-n_1) = \frac{(n_1+A-N)! P(0, N)}{M! m_{11} \dots m_{1M} (m_s)^{n_1-M}} \binom{\sum m_{21} \dots m_{2(n_1+A-N)}}{n_1+A-N}, \quad (N-A < M < n_1) \dots (32)$$

ここに、 $\sum_{i=1}^c m_{1i} m_{12} \dots m_{1h}$ は c 個の $m_{1x}; \{m_{11}, m_{12}, \dots, m_{1c}\}$ のうちから選んだ h 個の m_{1y} の積を、 c 個の m_{1x} から h 個を選ぶには $\binom{c}{h} = c! / (c-h)! h!$ 通りの選び方があり、これらのすべての場合について加え合せることを意味する。

ここで iC_h^c を c 個の m_{1x} からの h 個の m_{1y} の組合せの積の和、すなわち

$$iC_h^c = \sum_{a_1=1}^{c-h+1} \sum_{a_2=a_1+1}^{c-h+2} \dots \sum_{a_{h-1}=a_{h-2}+1}^{c-h+h-1} \sum_{a_h=a_{h-1}+1}^c m_{1a_1} m_{1a_2} \dots m_{1a_h} \dots (33)$$

とし、 $iC_c^c = \prod_{x=1}^c m_{1x}$ 、 $iC_1^c = \sum_{x=1}^c m_{1x}$ 、 $iC_0^c = 1$ と定義すると(ここに $l=1$ or 2)、各状態確率はつぎのように書き表わすことができる。

① $N-A \geq M$ の場合

$$P_s(n_1, N-n_1) = \frac{(M-n_1)! iC_{M-n_1}^M}{M! iC_M^M} P(0, N), \quad (n_1 \leq M \leq N-A) \dots (34)$$

$$P_s(n_1, N-n_1) = \frac{P(0, N)}{M! iC_M^M (iC_1^M)^{n_1-M}}, \quad (M < n_1 \leq N-A) \dots (35)$$

$$P_s(n_1, N-n_1) = \frac{(n_1+A-N)! {}_2C^A_{n_1+A-N}}{M! {}_1C_M^M ({}_1C_1^M)^{n_1-M}} P(0, N), \quad (M \leq N-A < n_1) \dots\dots\dots (36)$$

なお

$$\sum_{n_1=0}^N P_s(n_1, N-n_1) = 1 \dots\dots\dots (37)$$

であることから

$$P(0, N) = M! {}_1C_M^M \left[\sum_{n_1=0}^M (M-n_1)! {}_1C_{M-n_1}^M + \sum_{n_1=M+1}^{N-A} \frac{1}{({}_1C_1^M)^{n_1-M}} + \sum_{n_1=N-A+1}^N \frac{(n_1+A-N)! {}_2C^A_{n_1+A-N}}{({}_1C_1^M)^{n_1-M}} \right]^{-1} \dots\dots\dots (38)$$

が得られる。

② $N-A < M$ の場合

$$P_s(n_1, N-n_1) = \frac{(M-n_1)! {}_1C_M^M}{M! {}_1C_M^M} P(0, N), \quad (n_1 \leq N-A < M) \dots\dots\dots (39)$$

$$P_s(n_1, N-n_1) = \frac{(M-n_1)! (n_1+A-N)! {}_1C_{M-n_1}^M {}_2C^A_{n_1+A-N}}{M! {}_1C_M^M} P(0, N), \quad (N-A < n_1 \leq M) \dots\dots\dots (40)$$

$$P_s(n_1, N-n_1) = \frac{(n_1+A-N)! {}_2C^A_{n_1+A-N}}{M! {}_1C_M^M ({}_1C_1^M)^{n_1-M}} P(0, N), \quad (N-A < M < n_1) \dots\dots\dots (41)$$

$$P(0, N) = M! {}_1C_M^M \left[\sum_{n_1=0}^{N-A} (M-n_1)! {}_1C_{M-n_1}^M + \sum_{n_1=N-A+1}^M (M-n_1)! (n_1+A-N)! {}_1C_{M-n_1}^M {}_2C^A_{n_1+A-N} + \sum_{n_1=M+1}^N \frac{(n_1+A-N)! {}_2C^A_{n_1+A-N}}{({}_1C_1^M)^{n_1-M}} \right]^{-1} \dots\dots\dots (42)$$

ここに、定常状態におけるしゅんせつ船団の状態確率が得られたので、これらを用いるとこの船団における平均遊休止しゅんせつ船隻数 M_i 、平均遊休ひき船隻数 A_i 、平均積込み待ち土運船隻数 L_{q1} 、平均えい航待ち土運船隻数 L_{q2} をつぎの各式により計算することができる。

$$M_i = \sum_{n_1=0}^{M-1} (M-n_1) P_s(n_1, N-n_1) \dots\dots\dots (43)$$

$$A_i = \sum_{n_1=N-A+1}^N (A-N+n_1) P_s(n_1, N-n_1) \dots\dots\dots (44)$$

$$L_{q1} = \sum_{n_1=M+1}^N (n_1-M) P_s(n_1, N-n_1) \dots\dots\dots (45)$$

$$L_{q2} = \sum_{n_1=0}^{N-A-1} (N-A-n_1) P_s(n_1, N-n_1) \dots\dots\dots (46)$$

(2) 最適しゅんせつ船団構成の決定

ここでは工期の制限はないものとして、総しゅんせつ費が最小となる船団が最適船団であると考えて考察を進める。

しゅんせつ船団による総しゅんせつ費は単位時間当りのしゅんせつ費に工事完了に要する時間を乗ずることにより得られる。単位時間当たりのしゅんせつ費は、1隻のしゅんせつ船、ひき船、土運船の単位時間当たりの運転費をそれぞれ C_m, C_a, C_l とする（もし同種施設間で単位時間当たりの運転費が異なる場合は平均値を用いる）と、 $C_m M + C_a A + C_l N$ と表わせる。また工事完了までに要する時間はつぎのように求められる。

1隻のしゅんせつ船の平均しゅんせつ能力を $Q(\text{m}^3/\text{hr})$ とすると、しゅんせつ船の遊休により生ずる能力の低下を考慮したときのしゅんせつ船団の能力は、 $(M-M_i)Q(\text{m}^3/\text{hr})$ となる（ただし、各しゅんせつ船の遊休状態となる割合がほぼ等しいことが前提条件となる）。こ

のとき総しゅんせつ土量を $R(\text{m}^3)$ とするならば、工事に要する時間 T は次式で与えられる。

$$T = \frac{R}{(M-M_i)Q} \dots\dots\dots (47)$$

したがって、総しゅんせつ費 $D(M, A, N)$ は

$$D(M, A, N) = (C_m M + C_a A + C_l N) \frac{R}{(M-M_i)Q} \dots\dots\dots (48)$$

となる。式 (48) を用いて、 M, A, N のいろいろの組合せの船団の総しゅんせつ費を計算し、その値が最小となるものを最適船団として採用すればよい。

つぎにここに述べた方法を用いて実際に最適船団構成を決定した例を示す。

いま、各しゅんせつ船およびひき船はそれぞれ能力が等しく、 $\mu_i = \mu_1, \mu_2 = \mu_2$ とすると、式 (48) で与えられる総しゅんせつ費は M, N, A の値と μ_2/μ_1 の値によって決まる。このとき各しゅんせつ船が遊休状態となる割合は等しく、式 (48) は正確な総しゅんせつ費を与えている。

ここではしゅんせつ船の隻数が 1, 2, 3 隻の場合について、 $\mu_2/\mu_1 = 0.2, 0.6, 1.0, 1.4, 1.8$ のときの最適船団の構成を決定した。

ここで用いた各船舶の運転費は人件費、償却費、定期整備費、燃料費、材料費などを考慮して計算したもので、その値は $C_m = 6832 \text{ yen/hr}$ 、 $C_a = 2708 \text{ yen/hr}$ 、 $C_l = 984 \text{ yen/hr}$ である。これらの数値は運輸省第二港湾建設局の資料より算出したものである。

式 (48) で計算した総しゅんせつ費が最小となる船団構成とそのときの総しゅんせつ費を表-1 に示した。

また施設の遊休による総損失 $F(M, A, N)$ を総しゅん

表-1 最適船団の構成

しゅんせつ船 (隻)	1			2			3		
	ひき船 (隻)	土運船 (隻)	総しゅんせつ費 (R/Q.yen)	ひき船 (隻)	土運船 (隻)	総しゅんせつ費 (R/Q.yen)	ひき船 (隻)	土運船 (隻)	総しゅんせつ費 (R/Q.yen)
μ_2/μ_1									
0.2	5	7	33 305	9	13	30 914	14	19	29 974
0.6	2	4	19 178	4	7	17 576	5	10	16 911
1.0	1	3	16 656	3	6	14 756	4	8	14 025
1.4	1	3	14 539	2	5	13 206	3	7	12 682
1.8	1	3	13 641	2	5	12 562	2	7	12 032

せつ費と同様の考え方で求めると次式のようになる。

$$F(M, A, N)$$

$$= \{C_m' M_i + C_a' A_i + C_l' (L_{q1} + L_{q2})\} \frac{R}{(M - \bar{M}_i) Q} \dots\dots\dots (49)$$

ただし、 C_m', C_a', C_l' はしゅんせつ船、ひき船、土運船の遊休状態における単位時間当たりの運転費を表わす。

表-1 より、最適船団における総しゅんせつ費は、 μ_2/μ_1 が一定の場合 $M \leq 3$ のとき、しゅんせつ船隻数が多くなるほど小さくなることわかる。また、しゅんせつ船隻数が一定の場合、 μ_2/μ_1 の値が大きくなるほど総しゅんせつ費が小さくなることわかる。

したがって $M \leq 3$ ではしゅんせつ船が多いほど、また土捨場が近い（すなわち μ_2 が大きくなる）ほど経済的に工事を行なうことができる。しかし、実際の工事現場では保有しゅんせつ船隻数に限度がある上に、しゅんせつ現場の広さからも使用できるしゅんせつ船隻数に制限が加えられるので、使用可能なしゅんせつ船隻数が3隻以下の場合には許される範囲内で最大のしゅんせつ船隻数を採用し、そのときの最適船団を構成するとともに、土捨場をできるだけ近くに選ぶようにすべきであろう。

(3) 平均値を用いた場合の誤差

本研究では、各しゅんせつ船およびひき船の能力（サービス率）がそれぞれ異なっているものとして、システムの解析を行なったのであるが、この解析結果は先に示したように施設の能力がそれぞれ等しい場合にも適用できる。この場合は E. Koenigsberg によって解かれているが、その結果は、ここで求めた式に $\mu_{1i} = \mu_1, \mu_{2j} = \mu_2$ を代入した場合と一致している。

つぎに、しゅんせつ船団の各施設の能力の総和が等しいとき、同種施設の能力が異なる場合と等しい場合の解析結果における差について考察してみよう。

ここでは、しゅんせつ船団の特性量である平均遊休止しゅんせつ船隻数 M_i 、平均遊休止ひき船隻数 A_i 、積込み待ちおよびえい航待ちの平均土運船隻数 L_{q1}, L_{q2} について、各同種施設の能力をその平均値で代用した場合に生ずる誤差を計算する。各施設の能力をその平均値で代用した場合の特性値を $\bar{M}_i, \bar{A}_i, \bar{L}_{q1}, \bar{L}_{q2}$ とすると、これらを基準とした各特性値の誤差率 R_m, R_a, R_1, R_2 はつぎの式で表わされる。

$$M_i = \bar{M}_i (1 + R_m) \dots\dots\dots (50)$$

$$A_i = \bar{A}_i (1 + R_a) \dots\dots\dots (51)$$

$$L_{q1} = \bar{L}_{q1} (1 + R_1) \dots\dots\dots (52)$$

$$L_{q2} = \bar{L}_{q2} (1 + R_2) \dots\dots\dots (53)$$

これらの誤差率の値をいろいろのばらつきをもった m_{1i}, m_{2j} について計算すれば、個々の施設の能力をその平均値で代用した場合の誤差と能力のばらつきとの関係を知ることができる。

ここでは $N - A \geq M$ の場合の船団で、しゅんせつ船の能力に差があるときの誤差率を実際に計算してみる。そのためには、まず $\bar{M}_i, \bar{A}_i, \bar{L}_{q1}, \bar{L}_{q2}$ および M_i, A_i, L_{q1}, L_{q2} を計算しなければならない。これらは式 (43), (44), (45), (46) で計算することができる。ただし $\bar{M}_i, \bar{A}_i, \bar{L}_{q1}, \bar{L}_{q2}$ を求めるには m_{1i} として $m_{1i} = \frac{\sum_{i=1}^M m_{1i}}{M}$ を、また m_{2j} として $m_{2j} = \frac{\sum_{j=1}^A m_{2j}}{A}$ を用いる。

いま、しゅんせつ船とひき船が各4隻で土運船10隻からなる船団において、 m_{2j} がすべて等しく、 m_{1i} のみばらつきのあるとき（すなわち、ひき船の能力はすべて等しく、しゅんせつ船の能力に差があるとき）の誤差率 R_m, R_a, R_1, R_2 を計算し、しゅんせつ船の能力のばらつきと誤差率の関係を図に示すと図-2, 3, 4 のようになる。ここでしゅんせつ船の能力のばらつき尺度としては、

$$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^4 (m_{1i} - m_1)^2}}{M m_1}$$

図-2 平均遊休止しゅんせつ船隻数 M_i の誤差率 R_m

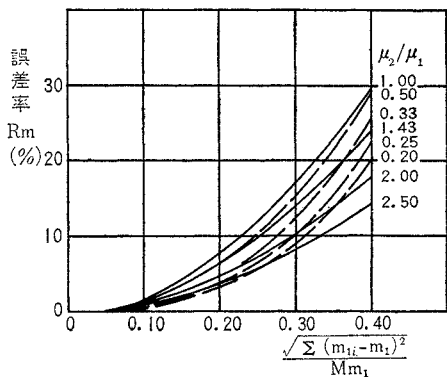


図-3 平均遊休ひき船隻数 A_i および平均積み待ち土運船隻数 L_{q1} の誤差率 R_a および R_1

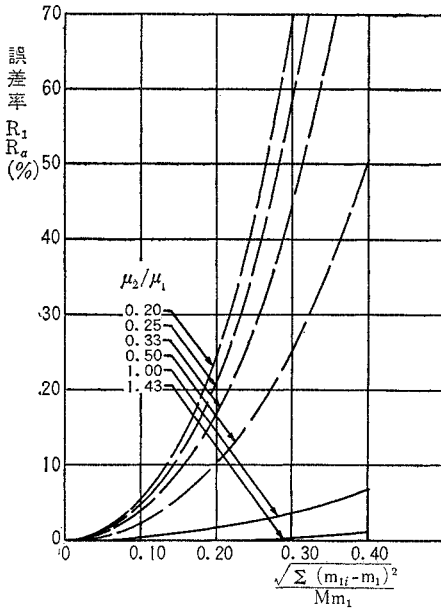
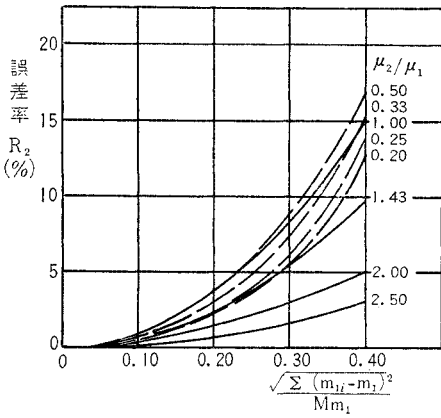


図-4 平均えい航待ち土運船隻数 L_{q2} の誤差率 R_2



ここに、 $m_1 = \frac{4}{\sum_{i=1}^4 m_{1i}} M$

を用い、また誤差率はパーセントで表示した。誤差率が負数となる L_{q2} , M_i については、その絶対値を示した。そして、誤差率は m_{1i} の平均値 m_1 の値の大きさによって異なるので、これをいろいろ変えて計算し、 m_1 の値が変わることは μ_2/μ_1 (ここに、 $\mu_1 = \sum \mu_{1i}/M$, $\mu_2 = \sum \mu_{2j}/A$) の値が変わることに等しいから図に μ_2/μ_1 の値を示しておいた。

これらの図から、ひき船の能力はすべて等しく、しゅんせつ船の能力にばらつきがある場合には、つぎのようなことがいえる。

L_{q1} と A_i の誤差率はしゅんせつ船の能力のばらつきおよび μ_2/μ_1 の値の変化に関係なくまったく等しい。

しゅんせつ船の能力のばらつきが大きくなるにしたがって、 L_{q1} と A_i は、各しゅんせつ船の能力が等しい場合よりも大きくなる。一方 L_{q2} および M_i はしゅんせつ船の能力のばらつきが大きくなるにしたがって、能力が等しい場合よりも小さくなる。

またしゅんせつ船の能力のばらつきの尺度が0から0.4までの間においては以下のことがいえる。図-2から M_i の誤差率は μ_2/μ_1 が1.00のとき最大で、1.00より離れていくにしたがって小さくなり、 μ_2/μ_1 に関係なく30%以下である。図-3から A_i および L_{q1} の誤差率は μ_2/μ_1 の値が1.00以上ではともに7%以下である。図-4から L_{q2} の誤差率は μ_2/μ_1 が0.50のとき最大で、0.50より離れるにしたがって小さくなり、 μ_2/μ_1 に関係なく17%以下である。

これらの事実から、しゅんせつ船の能力のばらつきが比較的小さいときには、その能力を能力の算術平均でおきかえて、船団の特性値を計算してもその誤差は小さいことがわかる。たとえば、この例で μ_2/μ_1 の値が0.50以上のとき、しゅんせつ船のばらつきの尺度が0から0.15の間では、 M_i, A_i, L_{q1}, L_{q2} の誤差はいずれも5%以下である。また、ばらつきの尺度が0.10以下であれば、 μ_2/μ_1 の値に関係なく M_i, A_i, L_{q1}, L_{q2} の誤差はほとんど10%以内におさまる。

3. シミュレーションによる方法

以上では、しゅんせつ船の積み込み時間およびひき船の往復えい航時間が指数分布にしたがう場合について、待ち合せ理論によるしゅんせつ船団の解析を進めてきた。しかし、一般には積み込み時間およびえい航時間は指数分布をしない場合が多く、そういう場合の待ち合せ理論による数学的解析はむずかしい。そこで、サービス時間がどのような分布をしていても、モデルの解析が行なえるような方法が必要となってくる。このような要請に答えることのできる解析方法として、モンテカルロ法を応用した電子計算機によるシミュレーションが考えられる。ここでは、シミュレーションによって、最適船団の構成を決定する方法について述べる。

(1) モンテカルロ法

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の結果を求めようとする解、あるいは法則を近似的に得ようとするものである。すなわち、机上で乱数によって現実の姿を再現するというのがこの方法の特徴である。

モンテカルロ法を待ち合せ問題の解析に用いるとつぎのような利点がある。到着あるいはサービス時間(作業時間)の分布が数式によってはっきりと表現できないときでさえも、過去のシステムの状態がそのまま将来にも続く場合、またはサービス単位の到着間隔およびサービス時

間の分布がひん度分布図として与えられている場合にはモンテカルロ法は使用可能であり、したがって解析的な方法の最も主要な仕事である、モデルの数式化あるいはその数式化された方程式を解くということとは必要でなくなる。

しかし、モンテカルロ法によって安定した解を得るためには、実験を多数回試みる必要がある。このために、モンテカルロ法によって問題の解を得ようとするときは、電子計算機が非常に有力な武器となる。すなわち、解析したい実際の状況を分析し、実状に即したモデルを作成し、そのモデルの動作を電子計算機内で追跡すれば、電子計算機の演算速度は非常に速いので、きわめて短時間のうちに多数回のモデルの実験を行なうことも可能となる。

シミュレーションにおいては到着時間間隔とかサービス時間などをどのようにして決定するかということが問題になる。このような問題の解決方法には2つあり、1つは仮定された到着時間間隔あるいはサービス時間の分布からランダム抽出によって決める方法であり、他の1つは、ある期間を通して実際のオペレーションを抽出することすなわち過去の資料をそのまま使用する方法である。つぎに前者について説明する。いま、サービス時間 t の分布の確率密度が $f(t)$ であるとすると区間 $(0, 1)$ の一様乱数 r を与えるならば、次式 (54) によって確率密度 $f(t)$ にしたがう乱数 t を得ることができる。

$$r = \int_0^t f(t) dt \dots\dots\dots (54)$$

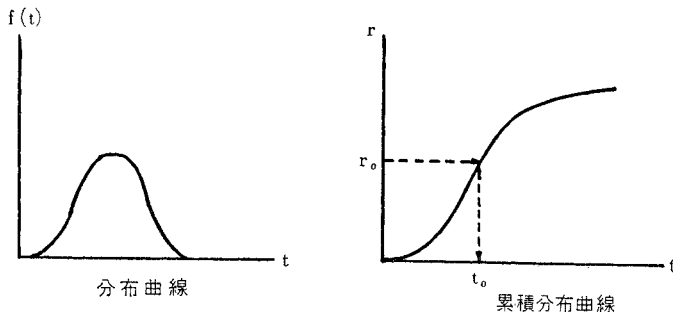
すなわち、この t はその分布が所要の確率密度 $f(t)$ にしたがうサービス時間を与える。この方法を利用すれば、サービス時間の分布を数式により表現できなくても、その累積分布から一様乱数を用いて乱数化されたサービス時間のモデルを作りだすことができる。式 (54) において、 $f(t) \geq 0$ であるから r は t の増加関数であり、 r の t に対する曲線は累積分布曲線である。したがって、確率密度が $f(t)$ である分布の累積分布関数の値をあらかじめ t の各値に対して計算し、表またはグラフに表わしておけば 図-5 に示したようにして、一様乱数 r_0 に対応する $f(t)$ -乱数 t_0 を容易に求めることができる。

(2) シミュレーション モデルの作成

さきに 2.(1) で、しゅんせつ船団の作業を単純化すると 図-1 のようになることを示した。ここでは、すこしくわしく各作業について考察し、シミュレーションで採用する作業方法について述べる。

しゅんせつ船団において、積込みステージに入

図-5



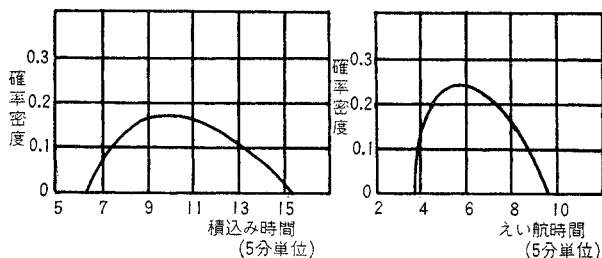
ってくる土運船は、各しゅんせつ船ごとに待ち行列を作り、数隻あるしゅんせつ船のうちで、積込み待ちの土運船の最も短かいしゅんせつ船の待ち行列に加わるものとする。待ち行列の長さが最短のものに等しいしゅんせつ船が2隻以上ある場合は、それらのいずれかにランダムに(すなわち等しい確率で)加わるものとする。

各しゅんせつ船の積込み時間の分布はすべて等しいものとする。本研究では、積込み時間の分布を運輸省第三港湾建設局神戸港工事事務所の大型グラブしゅんせつ船“播磨号”が摩耶ふ頭建設のために行なったしゅんせつ作業の運転日報(昭和37年4月~6月)から抽出した資料より求めた。このときの積込み時間の分布曲線を 図-6 に示す。ただし土運船容量は 100 m³ である。

土砂の積込みを終わった土運船はえい航ステージに入る。ここでえい航待ちの土運船は1列に並ぶものとする。積込み待ちのときは、土運船が各しゅんせつ船ごとに並んで待つとしたのに、えい航待ちのときは1列に並んで待つとしたのは、しゅんせつ船は1カ所に定置されているが、ひき船は一定の場所に定置されていないので、個々のひき船について待ち行列が生ずるということとはほとんどないからである。またひき船は先着順に土運船を1隻ずつえい航するものとする。ひき船の往復えい航時間の分布はすべて等しく、 図-7 に示すようなものであるとする。この往復えい航時間の分布は、しゅんせつ船の場合と同じく、運輸省神戸港工事事務所のひき船“六甲丸”の運転日報(昭和37年4月~6月)から抽出した資料より求めた。ひき船により土捨場までえい航された土運船は、土砂を捨て、ふたたびしゅんせつ船の

図-6

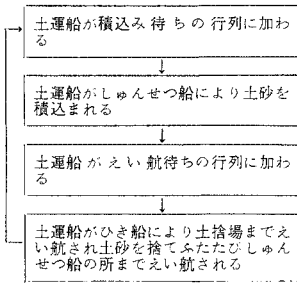
図-7



所までえい航され積込み待ちの行列に加わる。

以上に述べたしゅんせつ船団の作業をフローチャートに書くと図-8 のようになる。この作業の流れを電子計算機内で再現し、船団が実際

図-8 しゅんせつ作業のフローチャート



に作業を行なう場合の積込み待ち、えい航待ちなどにより生ずる土運船、しゅんせつ船およびひき船の遊休状態を知るのがシミュレーションの目的である。したがって、計算機内でしゅんせつ作業を再現する場合は、図-8 の各段階で、土運船の積込みおよびえい航待ち時間、しゅんせつ船およびひき船の遊休時間などをそれぞれ加算するようにしておき、作業中の各施設の延遊休時間を計算できるようにしておく必要がある。

一般に、シミュレーションで実際の現象を再現する場合には、連続的に現象を再現することはほとんど不可能なので、まずある時刻 t における現象をとらえてそれを再現し、つぎに微小時間後の $(t + \Delta t)$ における現象を再現するという操作をくり返す。すなわち、この微小時間 Δt の間は時刻 t の状態が継続すると考える。理論的には、時間間隔 Δt を小さくすればするほど実際の現象に近い状態を再現することができるわけである。

本研究においても上に述べた方法を用いる。すなわち、ある時刻 t におけるしゅんせつ船団の状態を再現し、シミュレーション時間間隔 Δt の間はこの状態が続くものとする。したがって、時刻 t における各施設の状態を検討し、もし施設が遊休状態にあれば、その状態はさらに Δt 時間継続するものとして、その施設の遊休時間に Δt を加算するという操作を行なう。各施設の状態の検討が終わると、 Δt 時間経過した後の船団の状態を再現し、そのときの各施設の状態について上と同様の検討をくり返すことによってシミュレーションを進めていく。

シミュレーションにおいては、積込みおよびえい航時間を Δt を単位として表わしておけば、演算およびシステムの解析においていろいろ有利な点（システムの状態の変化する時点と作業時間を単位時間ごとに区切った場合の区分点とを一致させることができることなど）があるので、すべての時間を Δt で表わすことにする。また、 Δt をいくらにするかということはきわめて重要なことである。なぜなら、その値により、シミュレーションの所要時間とその精度が決まるからである。一般にシミュレーションに要する時間は、 Δt を大きくすれば短くなり、小さくすれば長くなる。一方、シミュレーションの精度は、 Δt を大きくすれば悪くなり、小さくすれ

ばよくなる。ゆえに、シミュレーションに際しては必要な精度を得ることができる最大の Δt を採用するのが望ましい。また理論上は、 Δt を小さくすればするほど現象を忠実に再現できるわけだが、実際には、シミュレーションモデルそのものの精度により Δt を小さくしてもそれに比例して精度が上がるとは限らず、シミュレーションを行なうための演算時間が長くなることによる損失の方が大きいことがあるから注意を要する。

ここでは、積込みおよびえい航時間それにシミュレーションに要する時間を考慮して、 Δt として5分を採用する。

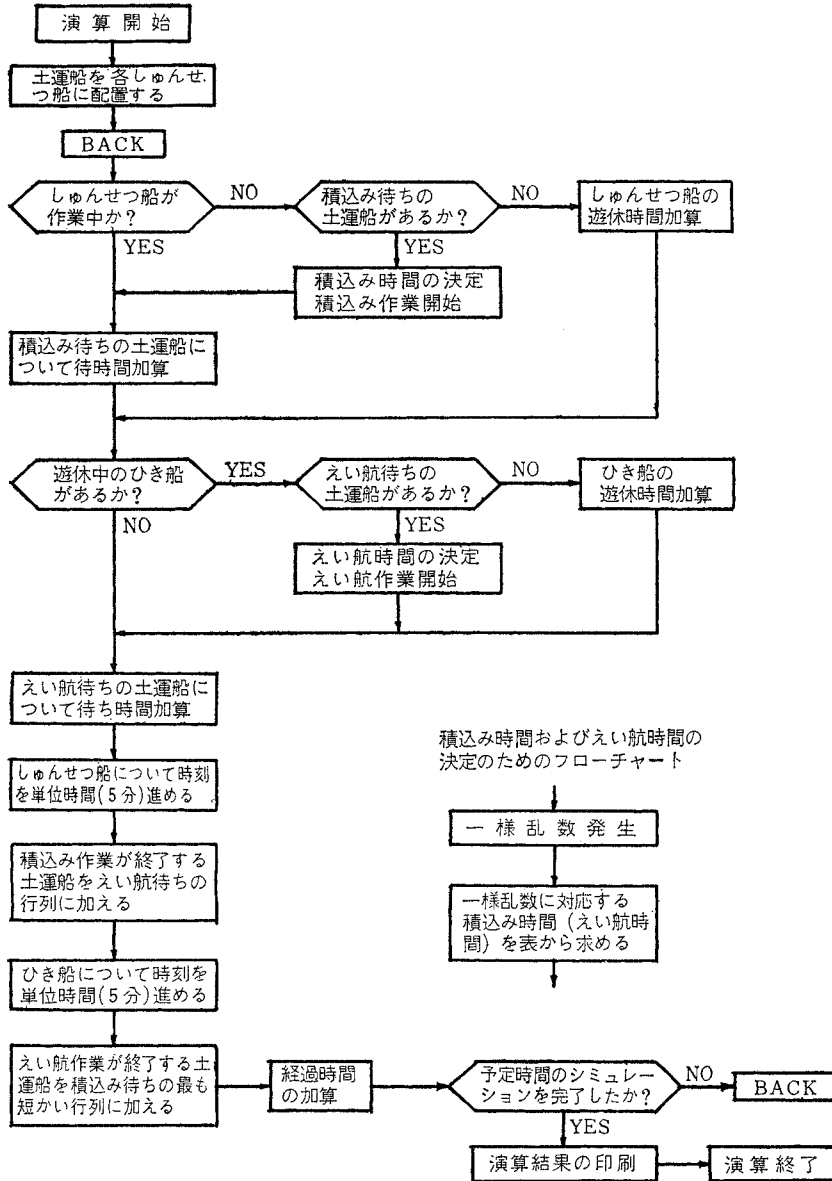
しゅんせつ作業は1日8時間行なうものと考えて、シミュレーションにおいても8時間分(96 Δt)の動作を再現する。したがって連続8時間のしゅんせつ作業中に生ずる各施設の遊休状態により、船団構成が適切であるかどうかを判断するわけである。8時間の現象の再現では船団の作業状態が定常状態となっていないので、同じ船団構成で与える乱数を変えて数回シミュレーションを行ない、その平均値を求める必要がある。

シミュレーションモデルができ上がると、その動作を計算機内で再現させるために、モデルとその動作を計算機が記憶できるように変換する必要がある。この変換操作がいわゆるプログラムを組むことである。プログラムを作成するためには、その構成内容をフローチャートとして表わす必要がある。しゅんせつ船団のシミュレーションモデルのフローチャートを、さきに示したしゅんせつ作業のフローチャート(図-8)を参考にして書くと図-9 のようになる。これによって計算機のためのプログラムを作成する。本研究においては計算機として京都大学に設置されているKDC-1を利用した。

(3) 演算結果の解析

しゅんせつ船団が M 隻のしゅんせつ船と A 隻のひき船と N 隻の土運船からなるものと仮定して、そのときのシミュレーションモデルの1日分の演算を行なうと、船団が1日の作業を行なったときの各施設の遊休時間を求めることができる。いまシミュレーションを行なった T 時間中の、しゅんせつ船およびひき船の総遊休時間がそれぞれ I_1, I_2 で、土運船の総遊休時間(総積込み待ち時間と総えい航待ち時間の和)が W であったとすると、この船団のしゅんせつ船、ひき船、土運船の単位時間当たりの遊休時間はそれぞれ $I_1/T, I_2/T, W/T$ となる。1隻のしゅんせつ船の単位時間当たりの能力を $Q(\text{m}^3/\text{hr})$ とすると、しゅんせつ船の遊休時間を考慮した場合のしゅんせつ能力は、1隻について $Q(1 - I_1/MT)$ (m^3/hr) となる。そして総しゅんせつ土量を $R(\text{m}^3)$ とすると工事完了までの総しゅんせつ時間は $R/MQ(1 - I_1/MT)$ で与えられる。したがって 2.(2) の記号 $C_m, C_a, C_t, C_m', C_a', C_t'$ を用いると総しゅんせつ費

図-9 しゅんせつ作業のシミュレーションのフローチャート



$D(M, A, N)$ および総損失 $F(M, A, N)$ はつぎのようになる。

$$D(M, A, N) = (C_m M + C_a A + C_l N) \times \frac{R}{MQ(1 - I_1/MT)} \dots\dots(55)$$

$$F(M, A, N) = \left(C_m' \frac{I_1}{T} + C_a' \frac{I_2}{T} + C_l' \frac{W}{T} \right) \times \frac{R}{MQ(1 - I_1/MT)} \dots\dots(56)$$

ただし、ここでは各施設の費用は同種施設間で等しいものとした。

2. の場合と同様に上に求めた総しゅんせつ費が最小

となる船団を最適船団と考え、各船団構成ごとにシミュレーションを行ない、総しゅんせつ費を計算し、その値が最小となる船団をさがすことによって最適船団の構成を決定することができる。本研究では、各施設の運転費として 2. で用いたものを採用し、その値は使用隻数に無関係に一定であるとした。シミュレーションを行なった船団の構成と総しゅんせつ費の関係を 図-10 に示す。1 船団の 8 時間のシミュレーション演算に要する時間は船団構成により多少変動があり、KDC-1 を使用した場合 3~5 分間である。

図-10 から、しゅんせつ船の積み時間分布およびひき船の往復えい航時間分布がそれぞれ 図-6 および

図-10

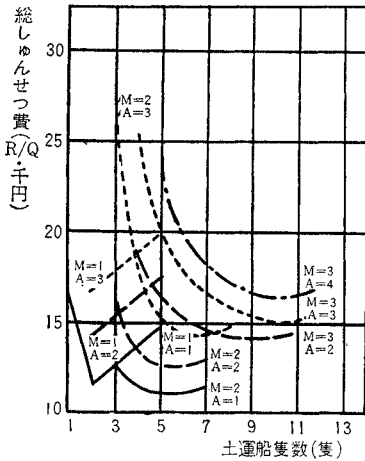


図-7 で与えられ、3隻までのしゅんせつ船が使用できる場合は、2隻のしゅんせつ船と1隻のひき船と5隻の土運船からなる船団が最適船団であることがわかる。

ところで、ここに述べたものはしゅんせつ作業を1日ごとに区切って行なう場合のシミュレーションで、連続8時間作業した後は一時全作業を中止し、つぎの日あらたに作業をくり返すという作業方式の場合である。もし、作業を昼夜兼行で連続的に行なう場合には、作業の流れが定常状態となるまでシミュレーションを行なったときの、各施設の遊休時間を求め、それより最適船団構成を決定すればよい。このように連続的に作業を行なう場合と1日ごとに作業を中止する場合とでは、最適船団の構成が多少異なることもありうる。

4. む す び

以上、図-1 で表わされるモデルの解析を、しゅんせつ船団を例にとり行ない、その結果を用いてしゅんせつ船団の最適構成を決める方法を示した。

このモデルにおいて、しゅんせつ船団の積み込みおよびえい航作業時間が指数分布の場合は待合せ理論により解析を行なった。この場合には、いろいろの船団構成に対する平均遊休しゅんせつ船隻数を計算して表にしておけば、これを用いて最適船団の構成を容易に決定することができるという利点がある。また、各施設の作業時間が指数分布以外のときは、シミュレーションにより解析を行なった。この方法は、作業時間分布がどんな場合でも解析できるという利点があるが、電子計算機を必要とするため、船団構成を決定する作業が多少めんどうになる。したがって、最適船団の構成を決定したいときは、まず各施設の作業時間が指数分布かどうかを検討し、指数分布と見なせる場合は待合せ理論によりまたそうでない場合は、シミュレーションによって最適船団の構成を決定すればよいことがわかる。シミュレーションを用いれば、個々の施設の作業時間分布が異なる場合はもちろん、ひき船が同時に2隻以上の土運船をえい航するような場合の解析を行なうことも可能である。

おわりに、本研究を進めるにあたっていろいろとご支援下さった京都大学 佐佐木 綱助教授、同吉川和広助教授および資料収集などお世話になった運輸省第二港湾建設局、同第三港湾建設局の方々に深く感謝するものである。

参 考 文 献

- 1) E. Koenigsberg : Finite Queues and Cyclic Queues, Operations Research, Vol. 8, pp. 246, 1960
- 2) H. Gumbel : Waiting Lines with Heterogeneous Servers, Operations Research, Vol. 8, p. 504, 1960
- 3) 宮脇一男・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, 昭.36.
- 4) 宮武 修・中山 隆 : モンテカルロ法, 日刊工業新聞社, 昭.35.
- 5) 運輸省第二港湾建設局 : 電子計算機の港湾技術への導入 (第12回直轄港湾技術研究会資料), 昭.36.
- 6) 経営科学研究会編 : シミュレーション入門, 日刊工業新聞社, 昭.36.

(1965.5.2・受付)