

サイクルキューモデルによるしゅんせつ船団 計画に関する研究

——サービス時間がアーラン分布に従う場合——

STUDY ON AN OPTIMAL ARRANGEMENT A FLEET OF DREDGERS
BY MEANS OF CYCLIC QUEUES TECHNIQUE

——Where Service Time has Erlang Distribution——

竹内 益 雄*

By Masuo Takeuchi

1. 緒 言

最近、船舶の大型化に対応して航路、泊地の拡幅、増深が計画され、瀬戸内海航路を始めとして大規模なしゅんせつ工事が実施されている。

一方、最近の臨海土地造成工事では、従来のような遠浅で良質土砂の得られる適地が少なくなりつつある。また水深の増大、軟弱地盤等の悪条件に対処して、使用目的にあった土地造成をすることの必要性が増大してきている。そのため遠方の土取場から良質土砂を大量でしかも廉価に入手するための経済的な輸送方式の採用が重要となってきた。

この方式として各作業船の各機能を区分し、掘削機能をしゅんせつ船、運搬機能を押船と土運船にもたせるといふいわゆるバージラインシステムの採用がさかんになってきた。この場合、しゅんせつ船によってしゅんせつされた土砂は直接バージに積込まれるため、排送距離がほとんどなくきわめて低揚程のポンプを使用できるので、含砂率を一般のポンプ船よりはるかに高めることができ、したがってその経済性をいっそう高めることができる。

この工法においては、各作業船の性能の向上を計ることの重要性はいままでもないが、そのほかにこれらの作業船の船団構成がその経済性を大きく支配するという点については特に重視しなければならない。このような問題を究明すべく、京都大学 米谷教授、および河上氏は各作業船のサービス時間が指数分布にしたがうとしてサイクルキューモデルによるしゅんせつ工事計画の策定方法について研究し、その成果を「しゅんせつ工事計画に関する一考察」と題して土木学会論文集第125号に発表している。本研究においては、このような研究成果を基礎とし、さらに実際の現場におけるしゅんせつ船団の動態をくわしく分析することにより、実際の現場によりそくしたモデルの策定をはかった。すなわち、備讃瀬戸

* 正会員 (株)臨海土木工業所技術部長常務取締役

航路しゅんせつ工事および番の州土地造成工事現場を例にとり、各作業船のサービス時間がアーラン分布に従うものとしてサイクルキューモデルを作成し、最適しゅんせつ船団計画の策定、およびその時の稼働率、施工土量の算出を科学的に行なったものである。この場合本研究においては、最適しゅんせつ船団の定義を明らかにするとともに、合目的性を測定しうる目的関数の作成について特に留意した。

2. 最適船団構成を求めるためのモデルの作成

(1) 計画の目的

一般にしゅんせつ工期を各作業船に注目して分類すると、各作業船の稼働時間と遊休時間と休止時間によって構成されている。ただし、ここでいう遊休とは、ある船団構成から生じる必然的な待ち現象を意味し、休止とは、故障、天候等により偶発的に生じる待ち現象を意味する。各作業船の稼働にともなう必要経費を一定と考えれば、しゅんせつ工事費を最小にするためには各作業船の遊休および休止状態にともなう費用を最小にすればよい。しかし休止状態は理論的に一般化して取り扱おうことが困難であるので、本研究においてはしゅんせつ工期は稼働時間と遊休時間とで構成されるものとして解析を行なうこととした。各作業船の遊休状態のもとではその間工事の進捗が停止するので、これを損失状態と考えることができる。したがって遊休にともなう費用をここでは損失費用と定義した。つぎに本研究においては、単位時間においてしゅんせつ土量 1 m^3 あたりの各作業船の遊休による総損失費用が最小になるような船団構成をもって最適船団と定義した。

しゅんせつ船団計画のための評価関数としては、計画の目的すなわち単位時間においてしゅんせつ土量 1 m^3 あたりの各作業船の遊休による総損失費用を最小にするという評価基準にもとづいて定式化され、しかも定量的な取り扱いの可能な目的関数として数学的に表示されなければならない。さらにこの評価関数は、各作業船の

遊休状態のおこる現象すなわち待ち現象解析をインプリシットにとり入れたものでなければならない。

(2) サイクルキュー モデルによる各作業船の待ち現象の解析

いま一般的に考えて、それぞれ能力の等しいしゅんせつ船が M 隻、押船が A 隻、土運船が N 隻いるものとし、しゅんせつ船団の動態を図式化すると 図-1 のよう

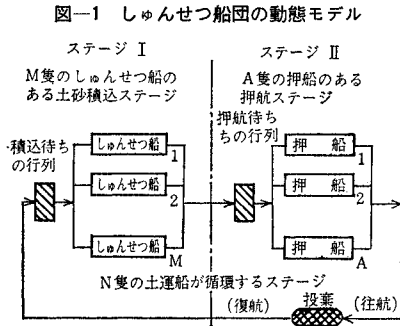


表-1 しゅんせつ船のサービス時間の頻度分布とアーラン分布の確率密度

サービス時間		頻度数	確率 (%)	アーラン分布の確率密度 (%)
区間	中央値			
5~14	10	1	0.1	0.0
15~24	20	11	0.6	1.6
25~34	30	213	11.4	11.1
35~44	40	521	27.9	23.5
45~54	50	478	25.7	26.1
55~64	60	322	17.2	19.3
65~74	70	165	8.8	10.7
75~84	80	67	3.6	4.9
85~94	90	36	1.9	1.9
95~104	100	23	1.2	0.6
105~114	110	14	0.7	0.2
115~124	120	16	0.9	0.1

総度数 1867, 平均値 $1/\mu_1=51.7$ 分
アーラン分布の相 $k_1=11$

表-2 押船のサービス時間の頻度分布とアーラン分布の確率密度

サービス時間		頻度数	確率 (%)	アーラン分布の確率密度 (%)
区間	中央値			
~184	180	10	1.2	1.6
185~194	190	35	4.1	4.4
195~204	200	82	9.6	8.8
205~214	210	130	15.1	13.7
215~224	220	156	18.1	17.1
225~234	230	150	17.4	17.3
235~244	240	127	14.8	14.7
245~254	250	74	8.6	10.3
255~264	260	44	5.2	6.3
265~274	270	18	2.1	3.3
275~284	280	16	1.9	1.5
285~294	290	8	0.9	0.6
295~304	300	8	0.9	0.2
305~314	310	0	0.0	0.1
315~324	320	2	0.1	0.0

運航距離 $d=22$ km
総度数 860, 平均値 $1/\mu_2=228.0$ 分
アーラン分布の相 $k_2=100$

に有限母集団のサイクルキューの問題となる。

土運船の循環に要する所要時間、しゅんせつ船の積込時間等は一定ではなく、ある分布形に従うとして把握する方がより現実的である。備讃瀬戸航路しゅんせつ工事におけるしゅんせつ船団の動態分析を行なった結果、しゅんせつ船のサービス時間は平均値 $1/\mu_1$ 、相 k_1 のアーラン分布に、押船のサービス時間は平均値 $1/\mu_2$ 、相 k_2 のアーラン分布に従うと仮定してさしつかえないことがわかった。つぎにそのあてはめの例として、表-1, 2 にしゅんせつ船および押船のサービス時間の頻度分布とアーラン分布の確率密度をそれぞれ相 $k_1=11$, $k_2=100$ の場合を、また 図-2, 3 にそれらを図示した。

土運船はステージ I, II において先着順にサービスを受けるものと仮定する。このシステムを $[M, A, N]$ とすると、これは n_1, n_2 によって表わすことができる。ここに

図-2 しゅんせつ船のサービス時間の確率分布およびアーラン分布

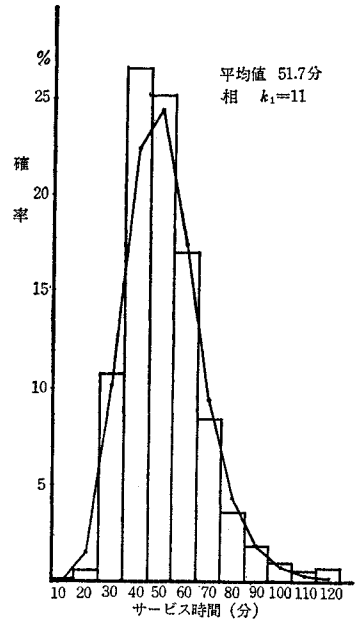
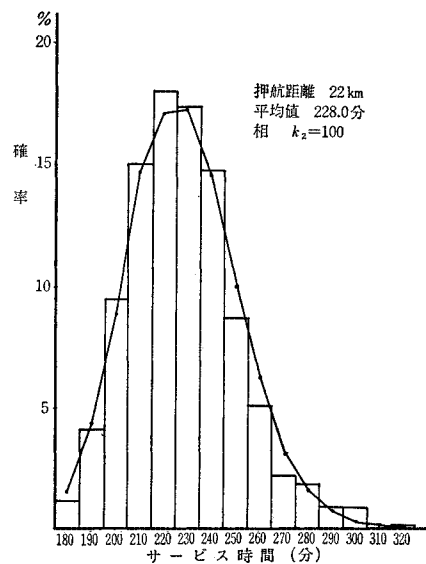


図-3 押船のサービス時間の確率分布およびアーラン分布



n_1, n_2 はステージ **I, II** における土運船の隻数であり、 $N=n_1+n_2$ と表わされる。

いまシステムの状態が (n_1, n_2) のときの状態確率を $P(n_1, n_2)$ とし、状態方程式を求めることとする。

いまシステムの状態が $(0, N)$ のときの時刻 $t+\Delta t$ における状態確率を $P_{0,N}(t+\Delta t)$ 、ステージ **II** におけるアーランの各仮想窓口における状態確率を ${}_iP_{0,N}(t+\Delta t)$ とすると、

$$P_{0,N}(t+\Delta t) = \sum_{i=1}^{k_2} {}_iP_{0,N}(t+\Delta t) \dots\dots\dots(1)$$

と表わされる。

時刻 $t+\Delta t$ においてシステムの状態が $(0, N)$ であるということは、時刻 t においてステージ **I** のアーランの最終仮想窓口でサービス中の土運船が、 Δt 時間にサービスを終了してステージ **II** に向つるか、ステージ **II** でサービス中の土運船サービスが Δt 時間に終了しないかのいずれかである。したがって、それぞれの仮想窓口における状態確率は、

$$(d/dt)P(0, N) = k_1\mu_1P_{k_1}(1, N-1) - Ak_2\mu_2P_{k_2}(0, N) \dots\dots\dots(4)$$

$$(d/dt)P(N, 0) = Mk_1\mu_1P_{k_1}(N, 0) - k_2\mu_2P_{k_2}(N-1, 1) \dots\dots\dots(5)$$

$$(d/dt)P(n_1, N-n_1) = -n_1k_1\mu_1P_{k_1}(n_1, N-n_1) - Ak_2\mu_2P_{k_2}(n_1, N-n_1) + (n_1+1)k_1\mu_1P_{k_1}(n_1+1, N-n_1-1) + Ak_2\mu_2P_{k_2}(n_1-1, N-n_1+1) \quad (M > n_1, N-A > n_1) \dots\dots\dots(6)$$

$$(d/dt)P(n_1, N-n_1) = -Mk_1\mu_1P_{k_1}(n_1, N-n_1) - Ak_2\mu_2P_{k_2}(n_1, N-n_1) + Mk_1\mu_1P_{k_1}(n_1+1, N-n_1-1) + Ak_2\mu_2P_{k_2}(n_1-1, N-n_1+1) \quad (M \leq n_1 \leq N-A) \dots\dots\dots(7)$$

$$(d/dt)P(n_1, N-n_1) = -n_1k_1\mu_1P_{k_1}(n_1, N-n_1) - (N-n_1)k_2\mu_2P_{k_2}(n_1, N-n_1) + (n_1+1)k_1\mu_1P_{k_1}(n_1+1, N-n_1-1) + (N-n_1+1)k_2\mu_2P_{k_2}(n_1-1, N-n_1+1) \quad (M > n_1 > N-A) \dots\dots\dots(8)$$

$$(d/dt)P(n_1, N-n_1) = -Mk_1\mu_1P_{k_1}(n_1, N-n_1) - (N-n_1)k_2\mu_2P_{k_2}(n_1, N-n_1) + Mk_1\mu_1P_{k_1}(n_1+1, N-n_1-1) + (N-n_1+1)k_2\mu_2P_{k_2}(n_1-1, N-n_1+1) \quad (M \leq n_1, N-A < n_1) \dots\dots\dots(9)$$

となる。

つぎに相 k のアーラン サービスとは、サービス速度が $k\mu$ の指数サービス窓口が k 個直列に配置されており、土運船はある指数サービス窓口（サービス速度 $k\mu$ ）でサービスを終了すればただちにつぎの指数サービス窓口（サービス速度 $k\mu$ ）に向つりサービスをうけ、 k 個の指数サービス窓口でサービスを終了したときはじめてアーラン サービスを終了したと考えることができる。そしてシステム内の土運船の数が $(0, N)$ あるいは一般的に $(n_1, N-n_1)$ というように有限個一定数の場合には、

$$P_{i-1}(n_1, N-n_1) = P_i(n_1, N-n_1) \dots\dots\dots(10)$$

となる。すなわち上述のアーラン サービスの考え方に

$$(d/dt)P(0, N) = \mu_1P(1, N-1) - A\mu_2P(0, N) \dots\dots\dots(13)$$

$$(d/dt)P(N, 0) = M\mu_1P(N, 0) - \mu_2P(N-1, 1) \dots\dots\dots(14)$$

$$(d/dt)P(n_1, N-n_1) = -n_1\mu_1P(n_1, N-n_1) - A\mu_2P(n_1, N-n_1) + (n_1+1)\mu_1P(n_1+1, N-n_1-1) + A\mu_2P(n_1-1, N-n_1+1) \quad (M > n_1, N-A > n_1) \dots\dots\dots(15)$$

$$(d/dt)P(n_1, N-n_1) = -M\mu_1P(n_1, N-n_1) - A\mu_2P(n_1, N-n_1) + M\mu_1P(n_1+1, N-n_1-1) + A\mu_2P(n_1-1, N-n_1+1) \quad (M \leq n_1 \leq N-A) \dots\dots\dots(16)$$

$$(d/dt)P(n_1, N-n_1) = -n_1\mu_1P(n_1, N-n_1) - (N-n_1)\mu_2P(n_1, N-n_1)$$

$$\left. \begin{aligned} &{}_1P_{0,N}(t+\Delta t) = k_1P_{1,N-1}(t)k_1\mu_1\Delta t \\ &\quad + {}_1P_{0,N}(t)(1-Ak_2\mu_2\Delta t) \\ &\quad \dots\dots\dots \\ &{}_iP_{0,N}(t+\Delta t) = {}_iP_{0,N}(t)Ak_2\mu_2\Delta t \\ &\quad + {}_iP_{0,N}(t)(1-Ak_2\mu_2\Delta t) \\ &\quad \dots\dots\dots \\ &{}_{k_2}P_{0,N}(t+\Delta t) = {}_{k_2-1}P_{0,N}(t)Ak_2\mu_2\Delta t \\ &\quad + {}_{k_2}P_{0,N}(t)(1-Ak_2\mu_2\Delta t) \end{aligned} \right\} \dots\dots(2)$$

と表わされる。

したがって式 (1), (2) より

$$\frac{P_{0,N}(t+\Delta t) - P_{0,N}(t)}{\Delta t} = k_1P_{1,N-1}(t)k_1\mu_1 - k_2P_{0,N}(t)k_2\mu_2 \dots\dots\dots(3)$$

と表わされ、このシステムの状態方程式にはいずれも最終段階のアーランの仮想窓口の状態確率のみが影響するということがわかる。

式 (3) における $k_2P_{0,N}(t)k_2\mu_2$ を $P_{k_2}(0, N)k_2\mu_2$ という表現に書きあらため、以下同様にして状態方程式を求めると

もとづき、式 (2) を変形することにより

$$\frac{{}_iP_{0,N}(t+\Delta t) - {}_iP_{0,N}(t)}{\Delta t} = {}_iP_{0,N}(t)Ak_2\mu_2\Delta t - {}_iP_{0,N}(t)k_2\mu_2\Delta t = 0$$

$${}_iP_{0,N}(t) = {}_iP_{0,N}(t) \dots\dots\dots(11)$$

が求められる。

式 (10) より

$$\left. \begin{aligned} &k_1P_{k_1}(n_1, N-n_1) = P(n_1, N-n_1) \\ &k_2P_{k_2}(n_1, N-n_1) = P(n_1, N-n_1) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(12)$$

と書き表わされるので、この関係を用いて式 (4)~(9) を書き改めると以下のようになり、指数サービスの場合の状態方程式と一致することがわかる。

$$+(n_1+1)\mu_1 P(n_1+1, N-n_1-1) + (N-n_1+1)\mu_2 P(n_1-1, N-n_1+1) \quad (M > n_1 > N-A) \dots\dots\dots(17)$$

$$(d/dt)P(n_1, N-n_1) = -M\mu_1 P(n_1, N-n_1) - (N-n_1)\mu_2 P(n_1, N-n_1)$$

$$+ M\mu_1 P(n_1+1, N-n_1-1) + (N-n_1+1)\mu_2 P(n_1-1, N-n_1+1) \quad (M \leq n_1, N-A < n_1) \dots\dots\dots(18)$$

$N-A \geq M$ の場合には式 (13), (14), (15), (16), (18) および (12), $N-A < M$ の場合には式 (13), (14), (15), (17), (18) および (12) を用いると, アーランの相 k_1, k_2 には無関係につきの結果が得られる。

$N-A \geq M$ の場合には

$$P(n_1, N-n_1) = (A^{n_1}/n_1!)(\mu_2/\mu_1)^{n_1} P(0, N) \quad (n_1 < M \leq N-A) \dots\dots\dots(19)$$

$$P(n_1, N-n_1) = (A^{n_1}/M!M^{n_1-M})(\mu_2/\mu_1)^{n_1} P(0, N) \quad (M \leq n_1 \leq N-A) \dots\dots\dots(20)$$

$$P(n_1, N-n_1) = [A!A^{N-A}/(N-n_1)!M!M^{n_1-M}](\mu_2/\mu_1)^{n_1} P(0, N) \quad (M \leq N-A < n_1) \dots\dots\dots(21)$$

ここに

$$P(0, N) = \left[\sum_{n_1=0}^{M-1} (A^{n_1}/n_1!)(\mu_2/\mu_1)^{n_1} + \sum_{n_1=M}^{N-A} (A^{n_1}/M!M^{n_1-M})(\mu_2/\mu_1)^{n_1} + \sum_{n_1=N-A+1}^N (A!A^{N-A}/(N-n_1)!M!M^{n_1-M})(\mu_2/\mu_1)^{n_1} \right]^{-1} \dots\dots\dots(22)$$

$N-A < M$ の場合

$$P(n_1, N-n_1) = (A!/n_1!)(\mu_2/\mu_1)^{n_1} P(0, N) \quad (n_1 \leq N-A < M) \dots\dots\dots(23)$$

$$P(n_1, N-n_1) = [A!A^{N-A}/(N-n_1)!n_1!](\mu_2/\mu_1)^{n_1} P(0, N) \quad (N-A < n_1 < M) \dots\dots\dots(24)$$

$$P(n_1, N-n_1) = [A!A^{N-A}/(N-n_1)!M!M^{n_1-M}](\mu_2/\mu_1)^{n_1} P(0, N) \quad (N-A < M \leq n_1) \dots\dots\dots(25)$$

ここに

$$P(0, N) = \left[\sum_{n_1=0}^{N-A-1} (A^{n_1}/n_1!)(\mu_2/\mu_1)^{n_1} + \sum_{n_1=N-A}^{M-1} (A!A^{N-A}/(N-n_1)!n_1!)(\mu_2/\mu_1)^{n_1} + \sum_{n_1=M}^N (A!A^{N-A}/(N-n_1)!M!M^{n_1-M})(\mu_2/\mu_1)^{n_1} \right]^{-1} \dots\dots\dots(26)$$

つぎに H_i をステージ i ($i = \text{I, II}$) においてサービスを受けている (サービスをしている) 船の隻数とすると,

$$H_I = \sum_{n_1=0}^{M-1} n_1 P(n_1, N-n_1) + M \sum_{n_1=M}^{N-A} P(n_1, N-n_1) + M \sum_{n_1=N-A+1}^N P(n_1, N-n_1) \dots\dots\dots(27)$$

$$H_{II} = A \sum_{n_1=0}^{M-1} P(n_1, N-n_1) + A \sum_{n_1=M}^{N-A} P(n_1, N-n_1) + \sum_{n_1=N-A+1}^N (N-n_1) P(n_1, N-n_1) \dots\dots\dots(28)$$

となる。したがって, 式 (27), (28) を $M, A, N, 1/\mu_1, 1/\mu_2$ の関数として書き表わせば

$N-A \geq M$ の場合には

$$H_I = \frac{\sum_{n_1=0}^{M-1} n_1 (A^{n_1}/n_1!)(\mu_2/\mu_1)^{n_1} + M \sum_{n_1=M}^{N-A} (A^{n_1}/M!M^{n_1-M})(\mu_2/\mu_1)^{n_1}}{\sum_{n_1=0}^{M-1} (A^{n_1}/n_1!)(\mu_2/\mu_1)^{n_1} + \sum_{n_1=M}^{N-A} (A^{n_1}/M!M^{n_1-M})(\mu_2/\mu_1)^{n_1}} + \frac{M \sum_{n_1=N-A+1}^N [A!A^{N-A}/(N-n_1)!M!M^{n_1-M}](\mu_2/\mu_1)^{n_1}}{\sum_{n_1=N-A+1}^N [A!A^{N-A}/(N-n_1)!M!M^{n_1-M}](\mu_2/\mu_1)^{n_1}} \dots\dots\dots(29)$$

$$H_{II} = \frac{A \sum_{n_1=0}^{M-1} (A^{n_1}/n_1!)(\mu_2/\mu_1)^{n_1} + A \sum_{n_1=M}^{N-A} (A^{n_1}/M!M^{n_1-M})(\mu_2/\mu_1)^{n_1}}{\sum_{n_1=0}^{M-1} (A^{n_1}/n_1!)(\mu_2/\mu_1)^{n_1} + \sum_{n_1=M}^{N-A} (A^{n_1}/M!M^{n_1-M})(\mu_2/\mu_1)^{n_1}} + \frac{\sum_{n_1=N-A+1}^N (N-n_1) [A!A^{N-A}/(N-n_1)!M!M^{n_1-M}](\mu_2/\mu_1)^{n_1}}{\sum_{n_1=N-A+1}^N [A!A^{N-A}/(N-n_1)!M!M^{n_1-M}](\mu_2/\mu_1)^{n_1}} \dots\dots\dots(30)$$

$N-A < M$ の場合には

$$H_I = \frac{\sum_{n_1=0}^{N-A} n_1 (A^{n_1}/n_1!)(\mu_2/\mu_1)^{n_1} + \sum_{n_1=N-A+1}^M n_1 [A!A^{N-A}/(N-n_1)!n_1!](\mu_2/\mu_1)^{n_1}}{\sum_{n_1=0}^{N-A} (A^{n_1}/n_1!)(\mu_2/\mu_1)^{n_1} + \sum_{n_1=N-A+1}^M [A!A^{N-A}/(N-n_1)!n_1!](\mu_2/\mu_1)^{n_1}} + \frac{M \sum_{n_1=M+1}^N [A!A^{N-A}/(N-n_1)!M!M^{n_1-M}](\mu_2/\mu_1)^{n_1}}{\sum_{n_1=M+1}^N [A!A^{N-A}/(N-n_1)!M!M^{n_1-M}](\mu_2/\mu_1)^{n_1}} \dots\dots\dots(31)$$

$$H_{II} = \frac{A \sum_{n_1=0}^{N-A} (A^{n_1}/n_1!) (\mu_2/\mu_1)^{n_1} + \sum_{n_1=N-A+1}^M (N-n_1) [A! A^{N-A}/(N-n_1)! n_1!] (\mu_2/\mu_1)^{n_1}}{\sum_{n_1=0}^{N-A} (A^{n_1}/n_1!) (\mu_2/\mu_1)^{n_1} + \sum_{n_1=N-A+1}^M [A! A^{N-A}/(N-n_1)! n_1!] (\mu_2/\mu_1)^{n_1}} + \frac{\sum_{n_1=M+1}^N (N-n_1) [A! A^{N-A}/(N-n_1)! M! M^{n_1-M}] (\mu_2/\mu_1)^{n_1}}{\sum_{n_1=M+1}^N [A! A^{N-A}/(N-n_1)! M! M^{n_1-M}] (\mu_2/\mu_1)^{n_1}} \dots (32)$$

となる。

また、しゅんせつ船、押船および土運船の稼働率は、それぞれ以下になる。

$$\left. \begin{aligned} U_M &= H_I/M \\ U_A &= H_{II}/A \\ U_N &= (H_I + H_{II})/N \end{aligned} \right\} \dots (33)$$

つぎにしゅんせつ船 M 隻、押船 A 隻および土運船 N 隻の 1 日あたりの平均総遊休時間 (単位: 日) を T_W^M , T_W^A , T_W^N とすると、それぞれ

$$\left. \begin{aligned} \text{しゅんせつ船: } T_W^M &= M(1-U_M) = M-H_I \\ \text{押船: } T_W^A &= A(1-U_A) = A-H_{II} \\ \text{土運船: } T_W^N &= N(1-U_N) \\ &= N-(H_I+H_{II}) \end{aligned} \right\} \dots (34)$$

と表わされる。

(3) 最適船団計画のための評価関数の決定

さきに本研究において単位時間におけるしゅんせつ土量 1 m^3 あたりの各作業船の遊休による総損失費用を最小にするしゅんせつ船の構成をもって最適船団と定義した。

いましゅんせつ船、押船および土運船の運転一時休止による損失費用 (1 日あたり) をそれぞれ C_M , C_A , C_N 1 日あたりの遊休時間による総損失費用を C' とすれば、

$$C' = C_M(M-H_I) + C_A(A-H_{II}) + C_N(N-H_I-H_{II}) \dots (35)$$

となる。

また、土運船 1 隻に 1 回で積込む土量の平均値を R とし、しゅんせつ船の稼働率 U_M のうち rU_M がしゅんせつのための実稼働率とすれば $rU_M \cdot M = r \cdot H_I$ であるから、1 日の平均総しゅんせつ土量を Q とすれば、

$$Q = 24 r H_I \mu_1 \cdot R \dots (36)$$

と表わされる。

したがってしゅんせつ土量 1 m^3 あたり、1 日あたりの遊休による損失費用 C は

$$C = \frac{C_M(M-H_I) + C_A(A-H_{II}) + C_N(N-H_I-H_{II})}{24 \cdot r \cdot H_I \cdot \mu_1 \cdot R} \dots (37)$$

となる。したがって式 (37) の C の値を最小にするようなしゅんせつ船団の構成 $[M, A, N]$ を求めればよいことになる。

(4) 休止時間を考慮した場合のモデル

以上はしゅんせつ船団の動態をもとにして待ち時間に

よる損失のみを対象とし、理論的な解析を行なったものであるが、実際の現場においてはしゅんせつ船、押船および土運船の故障・測量・天候・アンカー打替え等による作業の休止時間が生じてくる。

これらによる作業休止時間および 1 日あたりの遊休隻数は過去の資料をもとにして統計的に処理していくこととする。

τ 期間中の故障その他による休止時間および休止隻数は、

$$\left. \begin{aligned} 1) \text{ しゅんせつ船 (} M \text{ 隻)} \\ \text{休止時間 (単位: 日)} \quad W_M &= \sum \tau w_{M\tau} / 24 \tau \\ \text{休止隻数 (単位: 隻/日)} \quad H_M &= M \cdot W_M \end{aligned} \right\} (38)$$

$$\left. \begin{aligned} 2) \text{ 押船 (} A \text{ 隻)} \\ \text{休止時間 (単位: 日)} \quad W_A &= \sum \tau w_{A\tau} / 24 \tau \\ \text{休止隻数 (単位: 隻/日)} \quad H_A &= A \cdot W_A \end{aligned} \right\} (39)$$

$$\left. \begin{aligned} 3) \text{ 土運船 (} N \text{ 隻)} \\ \text{休止時間 (単位: 日)} \quad W_N &= \sum \tau w_{N\tau} / 24 \tau \\ \text{休止隻数 (単位: 隻/日)} \quad H_N &= N \cdot W_N \end{aligned} \right\} (40)$$

と表わされる。

したがって各作業船の稼働率はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} U_M^* &= (H_I - H_M) / M \\ U_A^* &= (H_{II} - H_A) / A \\ U_N^* &= (H_I + H_{II} - H_N) / N \end{aligned} \right\} \dots (41)$$

となる。またしゅんせつ船 M 隻、押船 A 隻および土運船 N 隻の 1 日あたりの平均総待ち時間 (単位: 日) は

$$\left. \begin{aligned} \text{しゅんせつ船:} \\ T_W^{M*} &= M[1 - (H_I - H_M) / M] \\ &= M - H_I + H_M \\ \text{押船:} \\ T_W^{A*} &= A[1 - (H_{II} - H_A) / A] \\ &= A - H_{II} + H_A \\ \text{土運船:} \\ T_W^{N*} &= N[1 - (H_I + H_{II} - H_N) / N] \\ &= N - H_I - H_{II} + H_N \end{aligned} \right\} (42)$$

また、式 (38)~(40) で求めた H_M , H_A , H_N は運転中の 1 時休止ですむものと、長期休止しなければならぬものによって構成されている。そしてそれぞれの場合について費用がことなるため、これを式 (43) のようにわけることが必要である。

$$\left. \begin{aligned} H_M &= H_M^* + H_M^{**} \\ H_A &= H_A^* + H_A^{**} \\ H_N &= H_N^* + H_N^{**} \end{aligned} \right\} \dots (43)$$

ここに * は運転中一時休止, ** は長期休止の場合の作業船隻数を表わす。そして D_M, D_A, D_N を各作業船の長期休止中の所要経費とすると, 1日あたりの総待ち時間による総損失費用 C^{**} は,

$$C^{**} = C_M(M - H_I + H_M^*) + C_A(A - H_{II} + H_A^*) + C_N(N - H_I - H_{II} + H_N^*) + D_M H_M^{**} + D_A H_A^{**} + D_N H_N^{**} \dots \dots \dots (44)$$

と表わされる。また1日あたりの施工量 Q^* は

$$Q^* = 24 R \mu_1 (r H_I - H_M) \dots \dots \dots (45)$$

となるから, 1日 $1m^3$ あたりの総損失費用 C^* は

$$C^* = \frac{C^{**}}{Q^*} = \frac{C_M(M - H_I + H_M^*) + C_A(A - H_{II} + H_A^*) + C_N(N - H_I - H_{II} + H_N^*) + D_M H_M^{**} + D_A H_A^{**} + D_N H_N^{**}}{24 R \mu_1 (r H_I - H_M)} \dots \dots \dots (46)$$

と表わされる。

式(46)は長年月にわたる正確な統計データが得られたときに計算することが可能である。現実には式(37)により待ち時間による損失費用 C を理論的に算出しておき, これをもとにして現場経験によって補正した方が式(46)を計算するよりはより有効であると考えられる。したがって本研究においては, 以下の計算はすべて式(37)で表わされる目的関数を用いることとする。

3. モデルの実証例

前節までで策定した最適船団計画のためのモデルが, 現実の施工状態に適合するか否かを検討することは, 土木計画の立場上きわめて重要である。その方法として, 現実に施工されているある工事現場の条件を数学モデルに与え, 休止時間を考慮したうえでその時の稼働率から遊休率をもとめる。一方施工実績(作業日報等)からしゅんせつ船, 押船および土運船の遊休率を求める。この両者の比較差が小さいほど, 理論式の実作業への適応度が高いことになる。

いま 実在の工事現場として, (株)臨海土木工業所が施工担当している瀬戸内海備讃瀬戸航路しゅんせつ工事を例として採用した。この工事はカッター付ポンプ式バージローディングしゅんせつ船相生丸1隻, 押船3隻(明石丸, 鳴門丸, 早鞆丸), 土運船4隻(備讃1, 2, 3, 5号)にて構成された船団が使用されている。

本工法は, しゅんせつ船にて海底の土砂をしゅんせつし, これを舷側に接触した大型土運船に積み込み, この土運船はいわゆるバージ ラインを構成し数 10 km までの中距離土砂輸送を能率的かつ経済的におこなおうとするものである。図-4 に工法の概要を示す。

このモデルの計算に際して採用した条件はつぎに示すとおりである。またこの条件によって計算した結果を一括表示すると表-3 が得られた。

$$M=1, A=3, N=4$$

$$1/\mu_1 = 0.86 \text{ 時間}$$

$$1/\mu_2 = \begin{cases} 3.80 \text{ 時間 (押航距離 22 km)} \\ 4.04 \text{ 時間 (押航距離 23 km)} \\ 4.07 \text{ 時間 (押航距離 24 km)} \end{cases}$$

施工実績より求めた遊休率の値は, 工事期間全体を対

図-4 工法の概要図

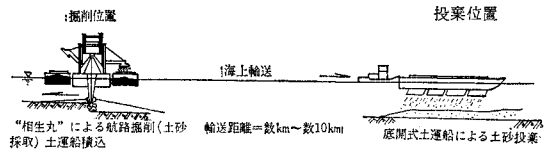


表-3 モデルの計算結果と遊休率の比較誤差

		22 km	23 km	24 km
モデルによる計算値	$1/\mu_1$ (時間)	0.86	0.86	0.86
	$1/\mu_2$ (時間)	3.80	4.04	4.07
	H_I	0.583	0.558	0.558
	H_{II}	2.575	2.614	2.620
	稼働率 U_M	0.583	0.558	0.558
	" U_A	0.858	0.872	0.873
	" U_N	0.789	0.793	0.797
	遊休率 T_M	0.299	0.323	0.326
	" T_A	0.117	0.104	0.102
	" T_N	0.192	0.188	0.187
施工実績	遊休率 T_M	0.320	0.320	0.320
	" T_A	0.090	0.090	0.090
	" T_N	0.138	0.138	0.138
誤差	しゅんせつ船	0.021	0.003	0.006
	押船	0.027	0.014	0.012
	土運船	0.054	0.050	0.049

象としたので距離別には求まっていない。したがってこれと数学モデルとを厳密に比較するためには, このモデルの計算値を距離と施工量を考慮して荷重平均しなければならない。しかし表-3をみて明らかのように, モデルの計算値と実績値との誤差は非常に小さい値を示している。したがって本研究において策定した数学モデルは現実の施工現場における現象を十分に再現しているということが明らかとなった。このため本研究においては, $M, A, N, 1/\mu_1, 1/\mu_2, C_M, C_A, C_N$ の値を種々に変化させてモデルの計算をおこなうことにより, 以下に最適船団計画を求めるための計画図表を作成することとする。

4. 計画図表の作成

通常, 工事計画のための理論式モデルが策定されているならば, 随時設計条件を与えて計算することにより, 科学的な工事計画の策定が可能となる。しかしこのための計算には時間を要し, またそのつど電子計算機を使用

図-5 1日あたり損失費用 c と距離 d の関係

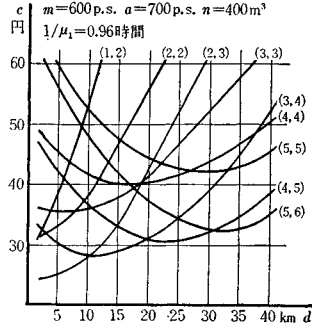


図-6 1日あたり損失費用 c と距離 d の関係

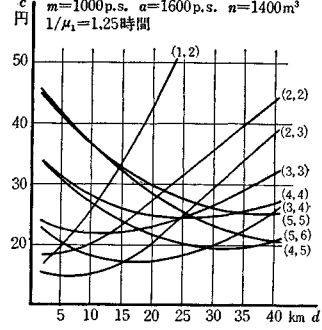


図-7 (a) 稼働率 (しゅんせつ船) U_M と距離 d の関係

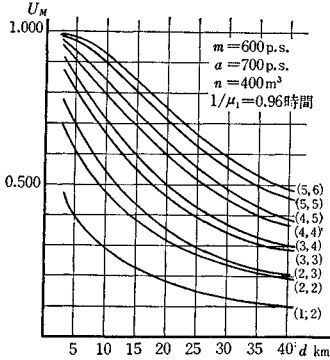


図-7 (b) 稼働率 (押船) U_A と距離 d の関係

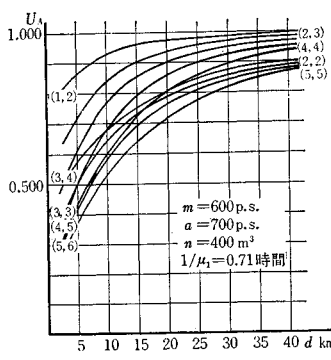


図-7 (c) 稼働率 (土運船) U_N と距離 d の関係

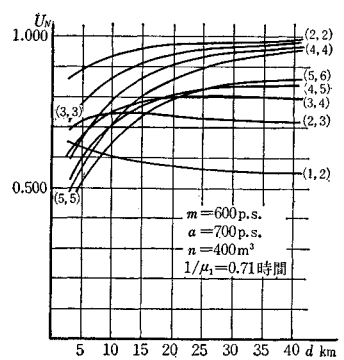


図-8 (a) 稼働率 (しゅんせつ船) U_M と距離 d の関係

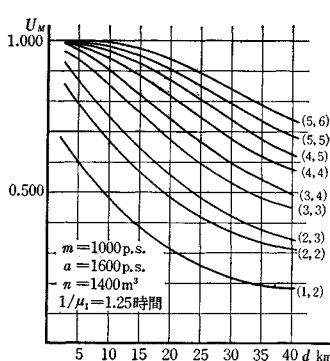


図-8 (b) 稼働率 (押船) U_A と距離 d の関係

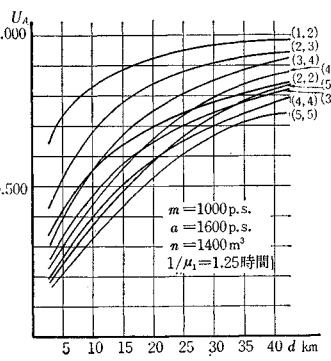


図-8 (c) 稼働率 (土運船) U_N と距離 d の関係

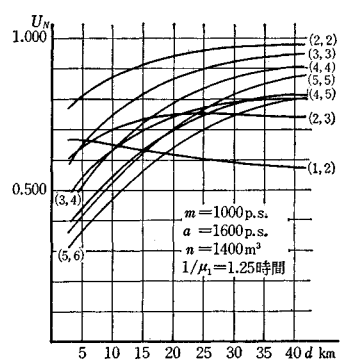


図-9 施工量 Q と距離 d との関係

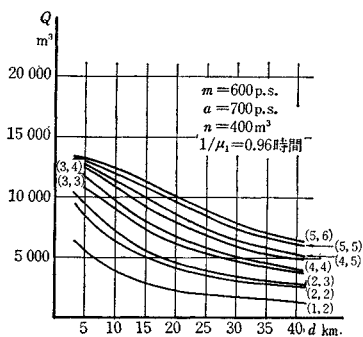
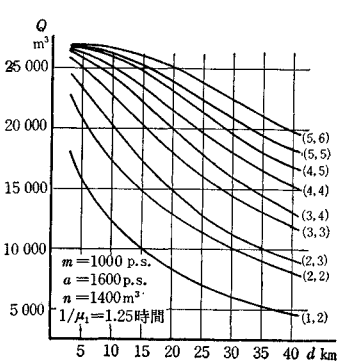


図-10 施工量 Q と距離 d との関係



すれば費用も高くつく。したがって適応頻度の高い範囲を定めてあらかじめ計算しておけば、そのような手数を省くことができ、しかも他との比較も容易に行なえるので、諸種の条件を与えて計算をおこなった。

この場合式(37)の C の値を最小にする船団数を計算より求めるとともに、その時の稼働率、施工量もあわせて計算した。なお、実際の計算にあたっては電子計算機FACOM 222を使用した。

つぎに計算結果の2, 3の例として $m=600$ ps (主ポンプが600 psのカッターレス式しゅんせつ船, 以下同様), $a=700$ ps (主機関が700 psの押船, 以下同様), $n=400$ m³ (満載積込量が400 m³の土運船, 以下同様)の場合と, $m=1000$ ps, $a=1600$ ps, $n=1400$ psの場合をあげた。図-5, 6に1日あたり損失費用と距離の関係, 図-7(a)~(c), 図-8(a)~(c)にしゅんせつ船・押船・土運船のそれぞれの稼働率と距離の関係, 図-9, 10に施工量と距離の関係を示す。ただしこの場合の船団はすべてしゅんせつ船は1隻とし, (A, N) で押船, 土運船の隻数の組み合わせを示すものとする。

5. 結 言

本研究においては、大規模なしゅんせつ工事をしゅんせつ船・押船・土運船よりなるしゅんせつ船団で施工する場合の最適船団計画を策定することを目的とし、基礎理論的な考察を行なったものである。この場合本研究においては、単位時間においてしゅんせつ土量1 m³あたりの各作業船の遊休による総損失費用を最小にするしゅんせつ船団の構成をもって最適船団と定義した。

つぎにしゅんせつ船・押船・土運船の待ち現象をサービス時間がアーラン分布に従う場合のサイクルキューモデルとして定式化し、各作業船の稼働率を算出した。

つぎに最適船団の定義にしたがって目的関数を設定

し、エンジニアリングエコノミーの立場にたって解析を行なった。

この場合(株)臨海土木工業所が施工担当している瀬戸内海備讃瀬戸航路しゅんせつ工事を例にとってこのモデルの妥当性を実証するとともに、さらに研究を一步前進させ、各作業船の隻数・経費・サービス時間を種々に変化させてこのモデルを計算することにより、最適船団計画を求めるための計画図表の作成を行なった。

しかし以上の研究はあくまでもしゅんせつ船団計画への1つのアプローチを科学的・定量的に1つのモデルとして取り扱ったものである。したがって実際のしゅんせつ船団の動態をかなり大たんに数学的に定式化しているので、このモデルを実際に利用する場合、計算結果の数値を用いてただちにデシジョン・メイキングを行なうことはきわめて危険である。本研究で提案した数学モデルはデシジョン・メイキングを行なう際の1つの科学的な判断の材料を提供するものであり、この計算結果を基礎とし、長年の実務経験を加味するならばさらに高度なデシジョン・メイキングが可能になると確信する。

終りにのぞみ、この研究を進めるにあたって終始ご指導を賜わった京都大学工学部教授 石原藤次郎博士、同長尾義三博士、助教授 吉川和広博士、さらにこの研究に協力された(株)臨海土木工業所の植山幸雄企画課長および河田和己企画課員に心から感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 本荘秀一：最近の臨海土地造成工法に関する研究
- 2) 米谷栄二・河上省吾：土木学会論文集，第125号，p. 1
- 3) Koenigsberg, E.: Finite Queues and Cyclic Queues, Operations Research, Vol. 8, p. 246, 1960
- 4) 森村英典・大前義次：待ち行列の理論と実際，日本科学技術連盟

(1966. 4. 4・受付)