

# 大規模土工の施工計画プロセスの システム化に関する研究

## STUDY ON A SYSTEMS APPROACH TO CONSTRUCTION PLANNING PROCESS OF LARGE-SCALE EARTH-MOVING

吉川 和 広\*・山本 幸 司\*\*

By Kazuhiro YOSHIKAWA and Koshi YAMAMOTO

### 1. 結 言

近年、工事規模の拡大および工事内容の多様化・複雑化に対処するため、特殊工法の開発や大規模な機械化施工の導入に代表される施工技術（いわばハード・テクノロジー）はめざましい進展をみせているが、工事施工の確実性・迅速性・経済性を詳細に検討する施工計画・管理方法の確立をめざすソフト・テクノロジーの立ち遅れが指摘され、その充実化が叫ばれている。しかしながら、注文生産・属地生産・一品生産という土木工事の特殊性<sup>1)</sup>は標準的・汎用的なソフト・テクノロジーの開発を遅らせ、技術者個人の経験・勘に基づく主観的判断に依存するところが大きであったのが従来の傾向である。

そこで、筆者らは、基本的な作業の連続にもかかわらず関連する計画要素が複雑かつ多様なために、体系化・標準化が遅れている大規模機械化土工を事例として取上げ、その施工計画作成プロセスのシステム化を試み、「整地工事計画システム」(旧システム)を提案した<sup>2)</sup>。本研究はこれを修正・発展させた成果を「大規模土工の施工計画システム」(新システム)として提案するものである。

前述したような土木工事の特殊性を考慮すれば、大規模土工の施工計画に含まれるすべてのプロセスをハード化(電算化)することは不可能であり、全体としてはマン・マシン・システムのソフトな計画システムとして開発せざるをえないが、客観的かつシステムティックな評価体系を備えた計画システムとするためには、技術者個人の経験あるいは勘に依存していた計画策定手順に対して各種 OR 手法の導入を試み、できる限りハード化していくことを考えなければならない。この意図から、旧システムでは、線形計画法、モンテカルロ・シミュレーション手法、ネットワーク手法の導入を試みた

が、作業計画および工程計画のプロセスに関しては技術者個人の主観的判断に基づく試行錯誤的なアプローチの域を脱しきれず、計画システム全体としての整合性の追求および客観的評価体系の確立という目的に対しては不十分であった。

そこで本研究では、作業計画プロセスのうちの単位作業(実施工の作業ユニット)の決定プロセスに対してクラスター分析の適用を、また土工機械系の割付けプロセスに対しては拡張型輸送問題の適用を試みた。その結果、新システムでは各計画プロセス相互間のインプット情報とアウトプット情報が有機的に結合し、計画システムとしての整合性をかなり改善することができた。

以下、2. では旧システムと比較しながら新システムの概要を述べ、3. では作業計画および工程計画の対象となる作業単位の決定ならびに施工区割りに対してクラスター分析を適用する方法を提案し、4. では各作業単位への土工機械系の割付けプロセスに対して拡張型輸送問題を適用する方法論を提案する。

### 2. 大規模土工の施工計画システム

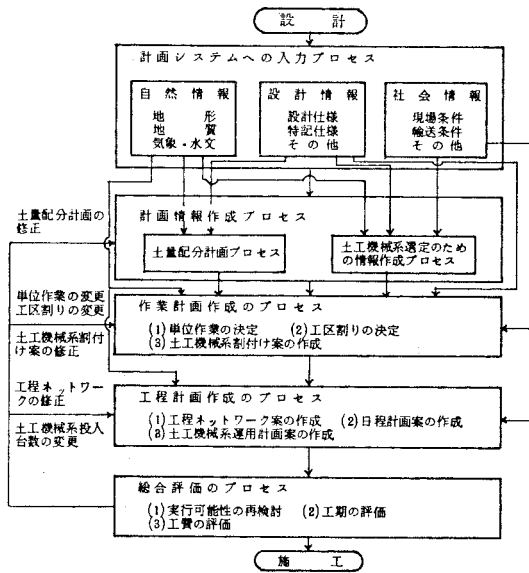
本研究で提案する大規模土工の施工計画システムは図-1 に示すように、設計仕様および現場施工条件などを入力情報とし、土量配分方法、土工機械系の割付け方法、工程ネットワークの作成方法などを操作変数として、施工手順、工事所要日数、工事所要費用など、工事を具体的に実施するために必要な諸情報を出力するシステムであり、その概要は以下に示すとおりである。

#### (1) 計画への入力プロセス

これは、本システムへの入力情報として自然情報・設計情報・社会情報を作成し、その内容を検討するプロセスであるが、本研究では工事発注者と工事受注者が別組織体に属する場合を想定し、施工計画作成段階ではこれ

\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

\*\* 正会員 工博 京都大学助手 工学部土木工学教室



図一 大規模土工の施工計画システムのプロセスフロー

らの内容を与件として扱うことにする。したがって、総合評価のプロセスからのフィードバックも考慮しない。

(2) 計画情報作成のプロセス

これは本システムの核となる作業計画と工程計画に対する計画情報を作成するプロセスで、土量配分計画プロセスと土工機械系の選定情報作成プロセスとによって構成される。

a) 土量配分計画プロセス

本研究では、大規模土工に不可欠なブルドーザの稼働特性を考慮して施工区域を一辺 50~80 m 程度の施工ブロックに分割し、次のような土量配分計画モデルによって搬土計画を策定するとともに、距離別運土量、土質別運土量などをアウトプットするプロセスを考えた。

$$z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^n x_{ij} &= C_i a_i \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} &= b_j \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} &= \sum_{i=1}^m C_i a_i = \sum_{j=1}^n b_j \\ x_{ij} &\geq 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $d_{ij}$ : 切土ブロック  $i$  から盛土ブロック  $j$  までの運土距離 (m),  $x_{ij}$ : 締固め状態に換算した運土量 ( $m^3$ ),  $C_i$ : 切土ブロック  $i$  の土量変化率  $C$ ,  $a_i$ : 地山状態での切土ブロック  $i$  の切土量 ( $m^3$ ),  $b_j$ : 締固め状態での盛土ブロック  $j$  の盛土量 ( $m^3$ ) であり、 $m$  は切土ブロック数、 $n$  は盛土ブロック数である。

式 (1), (2) によって仕事量  $z$  を最小とする搬土計画  $\{x_{ij}\}$  が得られるが、実際の積載運土量 (ほぐした状態の土量)  $v_{ij}$  は、

$$v_{ij} = (L_i / C_i) \times x_{ij} \dots\dots\dots (3)$$

として算定される。ここに、 $L_i$ : 切土ブロック  $i$  の土量変化率  $L$  である。

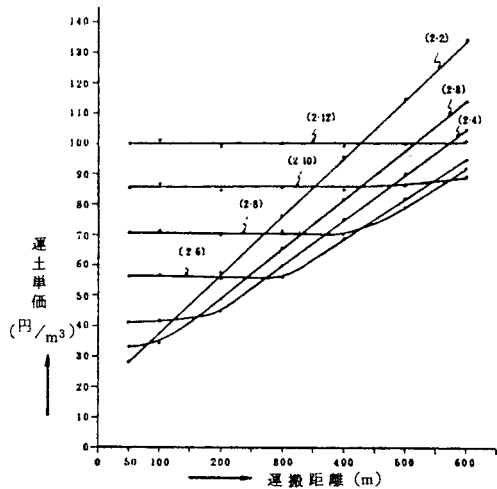
なお、運土費用を目的関数とする考え方もあるが<sup>3)</sup>、土工機械系の運用スケジュールを考慮できない土量配分計画の段階で各運土作業に対して特定の土工機械系を割付けなければならない土量配分計画モデルは、結果的に工期の遅延や工費の増大を招く可能性が大きく、あまり合理的な方法とはいえない。

また、ほぐした状態の土量を直接変数とする土量配分計画モデルも可能であるが、この場合には式 (1), (2) のような古典的輸送問題ではなく拡張型輸送問題としての定式化となる。

b) 土工機械系の選定情報作成プロセス

これは各運土作業に対して最も経済的な土工機械系を選定するために、当該工事の施工条件と各種土工機械系の稼働特性との関係を分析するプロセスである。

土工機械系の稼働状況を分析する方法としては、待ち合わせ理論 (特にサイクルキューモデル) を適用する方法とシステムシミュレーションによる方法とが考えられた。前者に関しては作業時間をアーラン分布で近似するアーランサービスサイクルキューモデルの解析法を提案したが<sup>4)</sup>、本論文で対象とする土工工事では土工機械系の稼働状況が複雑で、待ち合わせ理論では十分にモデル化しえないことが明らかとなったため、モンテカルロシミュレーション手法を採用した。その結果、いくつかの土工機械系について運土距離と運土単価との関係、運土距離と所要作業時間との関係などが得られたが<sup>5)</sup>、その



図二 運土距離と運土単価との関係

一例を示したのが 図-2 である。

### (3) 作業計画作成のプロセス

これは土量配分計画の結果を利用して実施工の対象となる単位作業を決定し、それらに土工機械系を割付け、さらに単位作業ごとの所要工事費用および所要工事日数を概算するプロセスである。

土工機械系の稼働特性を考慮すれば、土量配分計画として得られる個々の運土作業を作業単位として扱うには土工量が少なすぎ、このままでは作業工程が非常に複雑なものになる。そこで、施工条件が類似した隣接作業のある程度の大きさに統合することを考え、これを実施工の作業単位（以下では単位作業とよぶ）として扱うことにした。

この問題に関して旧システムでは必要な諸要件（土量配分計画、工事障害物、計画地形の概要など）を記載した原地形図上で運土作業の作業状況をシミュレートしながら試行錯誤的に単位作業を想定し、ついで 図-2 のような土工機械系の選定情報を利用して各単位作業ごとに最適な土工機械系を割付け、その所要時間および所要費用を算定する方法を提案した。しかしこのような方法では、

① 図上でのシミュレーションであるため計画担当者の主観的判断が働きやすく、計画代替案を具体的に記述し、客観的に評価検討するのが困難であること、

② 土工機械系の割付けにあたって、投入可能な土工機械台数の制約を直接考慮することができないこと、

③ 1つの単位作業は必ず1つの土工機械系で施工しなければならないこと、

などの問題点を生じた。そこで新システムではこれらの問題点を解決するために、単位作業の決定に関してはクラスター分析の導入を、また土工機械系の割付けに関しては拡張型輸送問題による機械系割付けモデルの導入を提案する。

### (4) 工程計画作成のプロセス

これは単位作業をアクティビティとする工程ネットワーク代替案を作成し、それに対して日程計画および土工機械系の運用計画などを策定するプロセスである。

旧システムでは PERT/MANPOWER によって日程計画を作成したが、新システムではクラスター分析や拡張型輸送問題を導入した作業計画のプロセスと一体化した工程計画作成プロセスを考える。

### (5) 総合評価のプロセス

一般に、施工計画の評価基準としては 確実性・迅速性・経済性が考えられるが、施工計画を作成する段階では確実性を表現する計画要素の定量化およびその具体的

な評価検討が困難であり、施工計画作成の段階よりもむしろ実施工の段階で詳細に検討すべきであることを考慮して、本研究では確実性を取り扱わないこととする。

したがって、本プロセスでは、(i) 土工工事の実行可能性が十分に保証されるかどうかを検討し、続いて (ii) 工事所要日数が所与の工期内に十分納まるか、(iii) 工事所要費用が十分に低廉か、という3つの評価基準によって計画代替案を総合的に評価し、最終的に1つの実施計画案を選択することになる。そして、作成した代替案の目的達成度が低いと判断される場合には、その内容に応じて 図-1 に示したように各計画プロセスへのフィードバックを考えるものとする。

なお、式 (1), (2) のような土量配分計画モデルを前提とし、設計情報や土質条件等の入力プロセスからの情報を与件とする限り、土量配分計画プロセスへフィードバックする必要性は少ないが、たとえば部分的に生じた長距離土工が工費の増大化の一因となっている場合には、関連する運土作業の運土距離に制限を設けて土量配分計画を修正することも考慮しなければならない。

## 3. クラスター分析を導入した単位作業の決定<sup>9)</sup>

### (1) 概 説

土量配分計画プロセスでは仕事量が最小となる搬土計画が得られるが、土量配分計画を作成する段階では運搬経路や施工順序、作業段取りなどを計画情報として具体的かつ十分に検討することが困難であるため、土量配分計画の結果を直接用いて実施工程計画を作成するという計画作成方法は問題が多いといわざるを得ない。また、工程計画の作成において、土工機械系の輻輳の軽減、作業段取り手順および機械系運用計画の簡略化などを目的とすれば、すでに述べたようにもう少し大きな作業ユニットを計画対象とすることが望ましいと考えられる。

そこで、土量配分計画として得られる各運土作業の作業特性をいくつかの要因によって客観的に記述し、それを用いて運土作業間の類似度を定量的に把握すれば、類似度の高い運土作業を順次統合することによって実施工の対象となる作業ユニット（単位作業）を決定することができる。本研究ではこのような計画プロセスに対してクラスター分析手法の導入を試みる。これによって土量配分計画と作業計画・工程計画との間の整合性を保つことが可能となるとともに、クラスター分析のデンドログラムは当該工事区域を工区分割するための計画情報として有効に利用することができる。

### (2) クラスター分析モデルの作成

クラスター分析は因子分析の前処理プロセスとしてホールジンガーによって提案された数値分類法であるが、分析対象の各個体（ここでは運土作業）の特性を表現するいくつかの要因を抽出し、その特性値によって個体を分類するという機能に着目すれば、「似た者どうし」を統合する手法としても有効である<sup>7)</sup>。

そこで、まず運土作業の作業特性を表わす要因について検討した結果、① 当該運土作業の切土地点の座標（始点座標）、② 盛土地点の座標（終点座標）、③ 運土方向、④ 運土距離、⑤ 運土量という5項目を考えていくことにした。なお、これら以外にも土質条件（盛土材として適さない土質を含む場合）や障害物の有無、運土勾配などが考えられたが、これらはクラスター分析モデルから除外し必要に応じて別途に検討することにした。

このような5要因を記述するためには各運土作業  $i$  を次式のような特性値  $P_i$  で表わせば十分である。

$$P_i = (x_{i1}, y_{i1}, x_{i2}, y_{i2}, v_i) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $x_{i1}, y_{i1}$ ：運土作業  $i$  の始点の  $x$  座標および  $y$  座標、 $x_{i2}, y_{i2}$ ：終点の  $x$  座標および  $y$  座標、 $v_i$ ：運土量であり、その値はすべて土量配分計画のアウトプットとして得られる。これらの変数を用いることにより、任意の運土作業  $i, j$  間の各要因間距離、すなわち始点間距離  $SD_{ij}$ 、終点間距離  $ED_{ij}$ 、方向間距離  $WD_{ij}$ 、運土距離間距離  $DD_{ij}$ 、および運土量間距離  $VD_{ij}$  は次式によって算出することができる（図-3 参照）。

$$SD_{ij} = \sqrt{(x_{i1} - x_{j1})^2 + (y_{i1} - y_{j1})^2} \dots\dots\dots (5)$$

$$ED_{ij} = \sqrt{(x_{i2} - x_{j2})^2 + (y_{i2} - y_{j2})^2} \dots\dots\dots (6)$$

$$WD_{ij} = 2 \arcsin \left( \frac{\sqrt{(r_{i1} - r_{j1})^2 + (r_{i2} - r_{j2})^2}}{2} \right)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} r_{\cdot 1} &= \frac{x_{\cdot 2} - x_{\cdot 1}}{\sqrt{(x_{\cdot 1} - x_{\cdot 2})^2 + (y_{\cdot 1} - y_{\cdot 2})^2}} \\ r_{\cdot 2} &= \frac{y_{\cdot 2} - y_{\cdot 1}}{\sqrt{(x_{\cdot 1} - x_{\cdot 2})^2 + (y_{\cdot 1} - y_{\cdot 2})^2}} \\ &\dots\dots\dots (7) \end{aligned} \right\}$$

$$DD_{ij} = \left| \sqrt{(x_{i1} - x_{i2})^2 + (y_{i1} - y_{i2})^2} - \sqrt{(x_{j1} - x_{j2})^2 + (y_{j1} - y_{j2})^2} \right| \dots\dots\dots (8)$$

$$VD_{ij} = \min\{v_i, v_j\} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、方向間距離  $WD_{ij}$  は、運土作業  $i$  と  $j$  の始

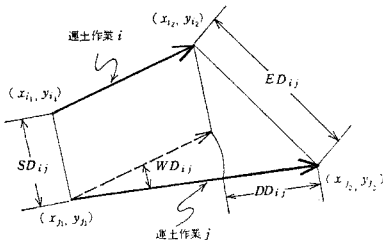


図-3 各要因間距離

点を一致させたのち運土距離を正規化したときの終点間座標が運土作業  $i$  と  $j$  の運土方向の夾角と一致することを利用して求めた値である。また運土量間距離  $VD_{ij}$  は運土量の少ない運土作業をできるだけ他の運土作業に統合させ、作業段取りを簡略化することを考慮したものである。

以上の結果を利用すれば、運土作業  $i$  と  $j$  の類似度を次のような距離  $d_{ij}$  として表わすことができる。

$$d_{ij} = k_1 \cdot SD_{ij} + k_2 \cdot ED_{ij} + k_3 \cdot WD_{ij} + k_4 \cdot DD_{ij} + k_5 \cdot VD_{ij} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 $k$  は各要因間距離の相対的重み係数であり、これを正確に表現するためには上式の右辺各項をそれぞれの最大距離で割って正規化しておくことが望ましい。

さて、具体的なクラスター形成方法に関しては数多くの手法が提案されているが、ここでは、

① 単位作業の決定上、1つのクラスターとして結合した個体が次段階以降に当該クラスターからとび出して他のクラスターと結合することは好ましくないことから階層的な手法であること、

② 単位作業間の施工順序づけに必要な情報を得るためには、多くの個体が同時に1つのクラスターとして結合する方法は好ましくないこと、

などを考慮した結果、WPG法を導入することにした。

WPG法とは、個体（もしくはクラスター、以下同様） $i$  から最短距離にある要素が個体  $j$  であるときに、同じく個体  $j$  から最短距離にある要素が個体  $i$  であるとき、 $i$  と  $j$  を1つのクラスターとして結合させる方法である<sup>8)</sup>。実際の計算過程では、クラスター形成サイクルが終了するごとに各個体間の距離を修正する必要があるが、その前処理として、本研究では新しく形成されたクラスターの特性を表わす要因として運土量を重みとする重みつき平均を考えた。すなわち、個体  $\alpha$  と  $\beta$  が1つのクラスター  $r$  として結合したとき、 $r$  の始点座標  $(x_{r1}, y_{r1})$  は、

$$\left. \begin{aligned} x_{r1} &= \frac{v_\alpha x_{\alpha 1} + v_\beta x_{\beta 1}}{v_\alpha + v_\beta} \\ y_{r1} &= \frac{v_\alpha y_{\alpha 1} + v_\beta y_{\beta 1}}{v_\alpha + v_\beta} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

となる。なお、終点座標  $(x_{r2}, y_{r2})$  に関しても同様である。

(3) 単位作業および工区分割の決定

クラスター分析モデルによって単位作業を決定し、さらに施工工区分割を検討するためには以下のような2つの問題点について十分に考察しておく必要がある。

そのひとつは式(10)の重み係数の決定方法に関する問題である。これに関しては理論的な算定方法が存在しないため、各要因の重み係数をパラメトリックに変更し

て計算を実行し、その結果得られるクラスター形成過程を検討することによって経験的、恣意的に決定せざるを得ない。本研究は過去の経験や勘に頼るのではなく、客観的かつシステムティックな評価に基づく意志決定を研究目的とするものであるが、重み係数の決定に関しては現場技術者の経験・勘を計画情報として利用することとした。その方法については次節で述べることにする。

他方はどの段階のクラスターを基準として単位作業ならびに工区割りを決定すればよいかという問題である。しかしこれに関しても理論的な判断基準が存在しないため、まず現場技術者にヒヤリング調査を実施したところ、一辺 50 m の施工ブロックを対象とする土量配分計画の場合には作業管理上たかだか 2~4 個の運土作業を統合した程度の作業単位が適当であると判断された。そこで、本研究では第 2 サイクルまでにおいて形成されるクラスターを基準として単位作業を決定することにした。これは、第  $n$  サイクルではたかだか  $2^n$  個の個体がひとつのクラスターを形成しようという WPG 法の特徴に基づく結果である。

なお、工区分割に関しては、まず工事規模や総土工量を考慮して工事区域を何工区に分割すべきかを判断し、その個数に合ったクラスターを生成するサイクルに着目すればよいことになる。

(4) 適用事例とその考察

本節では、クラスター分析モデルを用いて単位作業を決定する計画プロセスの適用事例として表-1 に示す

表-1 適用事例工事の概要

工事面積	約 39 万 m <sup>2</sup>
総運土量	約 130 万 m <sup>3</sup>
土量変化率	C=1.0, L=1.25
原地盤最大高低差	40 m
施工ブロックサイズ	50 m × 50 m
切土ブロック数	77 個
盛土ブロック数	87 個

ような内容の土工工事を取上げ、実証的考察を行うこととする。なお、当該工事の土量配分計画図を示したのが図-4 である。

まず、当該現場の施工技術者に対してヒヤリング調査を実施した結果、実施の作業単位を決定する際には始点間距離および終点間距離を特に重視する必要があるなどの情報が得られたため、これをもとにして重み係数の組合せパターンをパラメーターとしてクラスター分析を行った。そしてこれとは別に、数人の施工技術者に適用事例工事の内容を示し、各人の経験に基づいて単位作業を決定してもらったところ、その内容は  $(k_1 : k_2 : k_3 : k_4 : k_5) = (25 : 10 : 3 : 1 : 1)$  という重み係数パターンによる分析結果と一致することが明らかとなった。

ここでは、クラスター分析モデルのインプットデータ

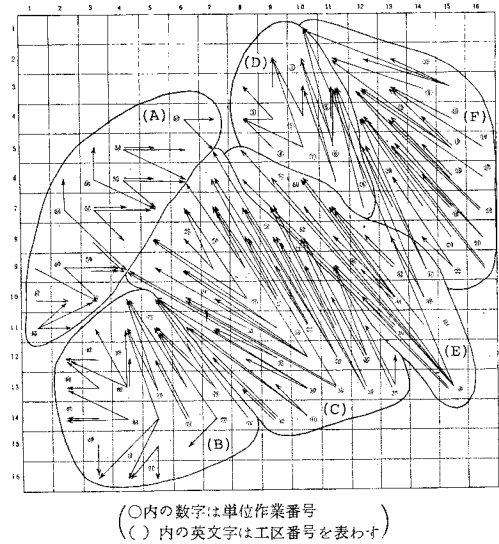


図-4 土量配分計画図 (単位作業および工区割り案)

および計算結果のデンドログラムの記述を割愛し、単位作業の構成状況および工区分割の結果を図-4 上に示すにとどめる。なお、当該工事では機械化土工の障害となる物件は存在しなかった。

本研究では当該工事とは施工条件の異なる数現場に対してもクラスター分析の適用を試みたが、その結果次のような事柄が明らかとなった。

- ① 土質条件、障害物の有無、運土勾配をクラスター分析モデルの要因として盛り込まなければ、工事条件の異なる現場に対しても (25 : 10 : 3 : 1 : 1) という重み係数パターンが適当である。したがって始点間距離および終点間距離に対するウエイトが非常に大きいといえる。
- ② 土量配分計画として得られる各運土作業の仕事量の総和 (目的関数値) とクラスター分析モデルによって作成した各単位作業の仕事量の総和との差異は 0.01% 以下であった。このことから、土量配分計画と単位作業決定プロセスとの間の整合性がある程度保証できるものと考えられる。

以上の結果より、本クラスター分析モデルは土量配分計画との整合性を保ちつつ、実施の作業単位を客観的かつシステムティックに決定するための手段として有効に機能することが明らかとなった。

4. 拡張型輸送問題による土工機械系の割付け計画<sup>9)</sup>

(i) 概 説

経済性および迅速性の追求、作業効率の向上等は機械化施工導入の主要目的と考えられるが、機械経費が全工

事費に占める比率が大きな大規模土工ではとりわけ経済性の追求が重要視される。したがって、大規模土工の施工計画システムとしても機械経費を極力低減化するような計画策定方法を提案する必要がある。一般に機械化土工の機械経費  $z$  (円) は、式 (12) に示すように稼働時間に比例する経費と、供用日数に比例する経費、およびこれらに無関係な固定経費によって構成される<sup>10)</sup>。

$$z = (\sum_i c_i h_i + \sum_i d_i t_i + \sum_i P_i + q) \cdot (1 + S/100) \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 $c_i$ ：土工機械系  $i$  の稼働時間当り機械経費(円/時)、 $h_i$ ：総稼働時間(時)、 $d_i$ ：供用日当りの機械経費(円/日)、 $t_i$ ：供用日数(日)、 $P_i$ ：輸送費等の固定経費(円)、 $q$ ：仮設備等の固定経費(円)、 $S$ ：工事諸経費率(%)である。このうち  $c_i$  および  $d_i$  は、

$$c_i = \{ \text{購入価格} \times (0.5 \times \text{償却費} + \text{定期整備費率} + \text{現場修理費率}) / \text{耐用時間} \} + \text{運転経費} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$d_i = \{ \text{購入価格} \times (0.5 \times \text{償却費} + \text{年間機械管理費率} \times \text{耐用年数}) / (\text{年間標準供用日数} \times \text{耐用年数}) \} \quad \dots\dots\dots (14)$$

と算定されるのが一般的である<sup>11)</sup>

式 (12) において、 $c_i$ ,  $d_i$ ,  $P_i$  は投入する機械系の機種および台数に固有な値であり、 $q$ ,  $S$  は当該工事に固有な値であることから、機械経費  $z$  の最小化は次式の機械経費  $z'$  の最小化と同義となる。

$$z' = \sum_i (c_i h_i + d_i t_i) \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 $D_i$ ：土工機械系  $i$  の稼働日当りの標準稼働時間(時間/日)、 $\hat{t}_i$ ：供用日数  $t_i$  のうちの実稼働日数(日)、 $\bar{t}_i$ ： $t_i$  のうちの作業不能日数(現場整備日数や休日および天候の影響など)(日)、 $r_i$ ： $t_i$  のうちの遊休日数(日)、 $\alpha_i$ ：作業不能日数率、 $\beta_i$ ：遊休日数率を考えると、 $h_i$  および  $t_i$  は次のように表わすことができる。

$$h_i = D_i \cdot \hat{t}_i \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$t_i = \hat{t}_i + \bar{t}_i + r_i = \hat{t}_i (1 + \alpha_i + \beta_i) \quad \dots\dots\dots (17)$$

式 (15), (17) より  $r_i$  を極力小さくするような土工機械系割付け計画および日程計画が望ましいことは明らかであるが、現実には工事現場の規模や地形条件、施工上の技術的条件、投入土工機械系の性能および台数などが影響して必然的な遊休日数  $r_i$  が発生する。そこで、土工機械系割付け計画のプロセスにおいて遊休日数  $r_i$  をどの程度考慮すべきかという問題が生じるが、この値は土工機械系割付け計画をもとにして日程計画案を策定した後において初めて明らかになるため、式 (15) の  $z'$  を直接評価基準とする土工機械系割付け計画は不合理である。そこで、次節では日程計画と有機的に結合する土工機械系割付け計画を考えていくことにする。

(2) 拡張型輸送問題による土工機械系割付け計画

a) 機械系割付けモデル

いま、すべての投入機械系  $i(i \in I)$  に対して遊休日数  $r_i$  を 0 と仮定すれば、式 (16), (17) より、

$$t_i = (1 + \alpha_i) \hat{t}_i = (1 + \alpha_i) h_i / D_i \quad \dots\dots\dots (18)$$

となる。このような条件下での機械経費  $z'$  を新たに  $z_1$  とおくと、式 (18) を式 (15) へ代入することによって、

$$z_1 = \sum_i \{ c_i + (1 + \alpha_i) d_i / D_i \} h_i \quad \dots\dots\dots (19)$$

となる。したがって、各機械系  $i$  の遊休日数  $r_i$  を無視したときの土工機械系割付け計画は次のように定式化できる。以下ではこれを機械系割付けモデルとよぶ。

$$z_1 = \sum_{i=1}^m \{ c_i + (1 + \alpha_i) d_i / D_i \} h_i = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{ c_i + (1 + \alpha_i) d_i / D_i \} (n_{ij} / N_{ij}) \rightarrow \min \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^n (n_{ij} / N_{ij}) &\leq H_i \\ \sum_{i=1}^m Q_{ij} n_{ij} &= W_j \\ n_{ij} &\geq 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (21)$$

ここに、 $n_{ij}$ ：単位作業  $j$  のうち土工機械系  $i$  で施工する運土回数(回)、 $N_{ij}$ ：その時間当り運土回数(回/時)、 $Q_{ij}$ ：その積載容量(m<sup>3</sup>/回)、 $H_i$ ：土工機械系  $i$  の総稼働可能時間(時間)、 $W_j$ ：単位作業  $j$  の運土量、 $m$ ：投入機械系数、 $n$ ：単位作業数である。

条件式 (21) の第 1 式は各土工機械系の総稼働時間に関する制約であり、第 2 式は各单位作業の土工量に関する制約である。また条件式 (21) に着目すれば、この機械系割付けモデルは拡張型輸送問題と考えられるため、拡張型飛び石伝い法によって効率よく解くことができる<sup>12)~14)</sup>。

ところで、運土回数  $n_{ij}$  は本来整数型変数であるが、この定式化では便宜上実数型変数として扱ったため、このような処置が土工機械系割付け計画におよぼす影響について検討する必要がある。これに関しては、 $[n_{ij}]$ ： $n_{ij}$  の整数部(回)、 $Q_{ij}'$ ：積土板等の設置による超過積載可能量(m<sup>3</sup>/回)を考えたとき、

$$Q_{ij} \times (n_{ij} - [n_{ij}]) \leq Q_{ij}' \times [n_{ij}] \quad \dots\dots\dots (22)$$

が成立すれば、 $n_{ij}$  回分の運土量を  $[n_{ij}]$  回の運土作業で処理できることを意味する。そこで、いま  $Q_{ij}' = 0.2 Q_{ij}$  と仮定すれば式 (22) は、

$$[n_{ij}] \geq n_{ij} / 1.2 \quad \dots\dots\dots (23)$$

となり、これより  $n_{ij} \geq 5.0$  ならば必ず式 (22) が成立する。本研究で対象とするような大規模土工では式 (23) が十分に成立すると判断できるため、本研究では式

(20), (21) の機械系割付けモデルの最適解の少数部分を切捨てることによって土工機械系割付け計画  $\{n_{ij}^o\}$  を策定することにする。このとき、土工機械系  $i$  の稼働時間  $h_i^o$  および供用日数  $t_i^o$  は次式によって算定される。

$$\left. \begin{aligned} h_i^o &= n_{ij}^o / N_{ij} \\ t_i^o &= (1 + \alpha_i) h_i^o / D_i = h_i^o / D_i + \bar{t}_i^o = \hat{t}_i^o + \bar{t}_i^o \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(24)$$

**b) 単位作業をアクティビティとする日程計画**

前節で示した機械系割付けモデルは、便宜上遊休日数  $r_i$  を 0 と仮定するものであった。したがって、この結果をそのまま用いて日程計画を作成すると必然的に遊休日数が発生するため、工期的に実行不可能となる場合も考えられる。そこで、本節では土工機械系割付け計画の計算結果を利用して実行可能な日程計画を策定する方法を提案することとする。

まず、工程ネットワークの作成に関しては、各単位作業の施工順序決定上の自由度が大きすぎるため 2 段階に分け、最初に施工工区レベルでの施工順序関係を検討しつつ土工機械系の運用を十分に考慮しながら個々の施工工区内の各単位作業に対する順序関係を検討する方法を考えた。その内容に関しては次節で触れることとし、本節では 1 つの日程計画代替案が策定できたものとして以下の議論を行う。

一般に、土工機械系  $i$  の供用日数と供用可能日数との間には 図-5 に示すような関係が存在する。図中、 $\hat{T}_i$  : 土工機械系  $i$  の実稼働可能日数、 $\bar{T}_i$  :  $\hat{T}_i$  と同様の考え方に基づく作業不能日数 (=  $\alpha_i \hat{T}_i$ )、 $T_i$  : 土工機械系  $i$  の遊休に対する余裕日数  $R_i$  を含む供用可能日数、 $\tilde{T}_i$  : 工事着工日から土工機械系  $i$  の現場搬入日までの日数、 $T^*$  : 当該工事の機械化土工実施可能日数である。

したがって、いま土工機械系割付け計画案  $\{n_{ij}^o\}$  を用いて策定した日程計画案に基づいて、各土工機械系  $i$  の運用計画を策定したときに生じる遊休日数を  $r_i^o$  とおいたとき、まず土工機械系  $i$  が供用可能であるためには、

$$t_i = (t_i^o + r_i^o) \leq T_i \quad (\text{ただし、} t_i^o = \hat{t}_i^o + \bar{t}_i^o) \dots\dots\dots(25)$$

を満足する必要がある。また、得られた日程計画案が工期的に実行可能であるためには、

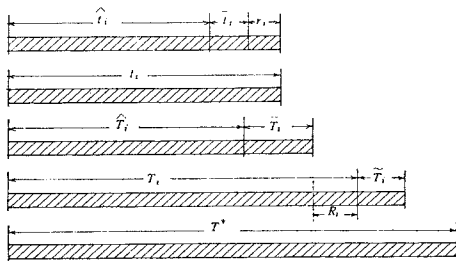


図-5 供用日数と土工工期との関係

$$\max_i \{t_i^o + r_i^o + \tilde{T}_i\} \leq T^* \dots\dots\dots(26)$$

が成立しなければならない。

これらを満足しない場合には、まず土工機械系の運用計画を十分考慮しながら遊休日数  $r_i^o$  を減少させるように工程ネットワークの修正を検討する。しかしこのような手順のみではもはや式 (25), (26) を満足する日程計画案が得られないときは、条件式 (21) の  $H_i$  値を少し小さく変更してもう一度機械系割付けモデルを解き直す。

一方、式 (25), (26) を満足する日程計画代替案は工期的な実行可能性こそ保証されたが、供用日数が  $t_i^o$  から  $t_i^o + r_i^o$  に増加したため遊休日数率  $\beta_i$  を新たに考慮する必要が生じ、結局機械系割付けモデルの目的関数式は式 (16), (17) より、

$$z_i (= z') = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{c_i + (1 + \alpha_i + \beta_i) d_{ij} / D_i\} \times (n_{ij} / N_{ij}) \dots\dots\dots(27)$$

と変化するため、土工機械系割付け計画としての最適性を保証できなくなる場合が生じる。しかし、目的関数式を式 (27) のように変更し、改めて機械系割付けモデルを解き直すことは日程計画との整合性を欠くことになるため、ここでは最適性が大きくくずれる場合のみ工程ネットワークの修正を検討することにする。以上に述べた土工機械系割付け計画のプロセスをフロー図で示したのが 図-6 である。

**(3) 適用事例とその考察**

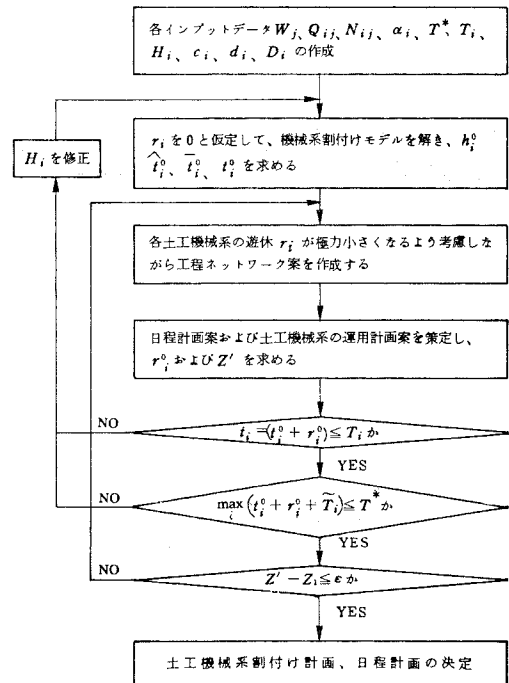


図-6 土工機械系割付け計画のフロー図

表-2 投入土工機械系

機械系番号	1	2	3	4	5	6
機械系の機種・台数	22m <sup>3</sup> 級 CS 3台	12m <sup>3</sup> 級 CS 3台	30t 級 BD 1台	21t 級 BD 3台	25m <sup>3</sup> 級 MS 1台	16m <sup>3</sup> 級 MS 1台
時間当り機械経費 $c_i$ (円/時)	15 210	9 120	12 700	7 900	32 600	22 610
供用日当り機械経費 $d_i$ (円/日)	29 451	15 944	22 410	12 456	61 471	38 691

注) CS: キャリオールスクレーパ, BD: ブルドーザ, MS: モータスクレーパ  
CS の経費にはけん引用 BD を含み, MS の経費にはブッシャ用 BD を含む

a) 土工機械系割付け計画代替案の作成

ここでは前節で提案した機械系割付けモデルを実際の大規模土工に適用し, このような方法論の妥当性について検討する. なお, 適用事例としては 3. と同一工事を取上げることにする.

まず, クラスタ分析モデルを適用した結果, 当該工事は 図-4 に示すように 77 個の単位作業によって構成され, 大部分が 50~300m の短・中距離土工 (平均運土距離は 179m) であることが明らかとなった. そこで本事例では 表-2 に示すような 6 種類の土工機械系を想定することとし, 以下では機械系割付けモデルのインプットデータの作成方法について説明する.

① 機械経費  $c_i$  および  $d_i$ : これらは式 (13), (14) によって容易に求められる. その結果を示したのが 表-2 である.

② 時間当り運土回数  $N_{ij}$ : 土工機械系  $i$  で単位作業  $j$  を施工するときのサイクルタイムを  $t_{ij}$  (分/回), 作業効率を  $E_{ij}$  とすれば, 一般的に  $N_{ij}$  は,

$$N_{ij} = 60 \times E_{ij} / t_{ij} \dots \dots \dots (28)$$

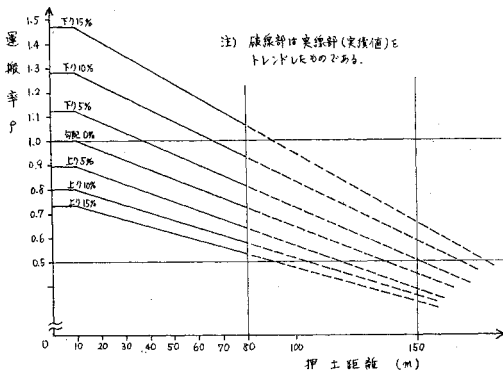


図-7 ブルドーザの運搬率  $\rho$

として求まる. ここでは,  $E_{ij}$  として標準的な 0.6 という値を用い,  $t_{ij}$  に関しては一般的なサイクルタイム算定式を用いた<sup>15)</sup>.

③ 総運土量  $W_j$ : これは単位作業  $j$  を構成する各運土作業の運土量とであり, 式 (3) によってほぐした状態に換算した値とする.

④ 積載容量  $Q_{ij}$ : スクレーパの積載容量  $Q_{ij}$  は運土距離や運土勾配の影響を受けないが, ブルドーザでは押土板容量  $Q_{ij}$  が運土距離や運土勾配の影響を受けることを考慮して次式のようにその値を計算した<sup>10)</sup>.

$$Q_{ij} = \rho_{ij} \times B \times H^2 / 2 \tan \varphi \dots \dots \dots (29)$$

ここに,  $B$ : 押土板幅 (m),  $H$ : 押土板高 (m),  $\varphi$ : 土の安息角 (40 度とする) であり,  $\rho_{ij}$  は 図-7 で得られる運搬率である.

⑤ 作業不能日数率  $\alpha_i$  および総稼働可能時間  $H_i$ : ここでは作業不能日数  $\bar{T}_i$  が 0 という理想的な状態を考え,  $\alpha_i$  を 0 と仮定する. 次に  $H_i$  は 図-5 および式 (16) から,

$$H_i = \hat{T}_i \cdot D_i = (T_i - R_i - \bar{T}_i) \cdot D_i \dots \dots \dots (30)$$

によって算定される. いま, 図-5 において  $T_i$  を 220 日,  $R_i$  を 40 日と仮定すれば  $\hat{T}_i$  は 180 日となる. したがって,  $D_i$  を 8 時間とすれば, 結局, 式 (30) より  $H_i$  は 1 440 時間となる. なお, 本事例では  $T^*$  を 280 日と想定する. これによって工期的には,

$$T^* - (T_i + \hat{T}_i) = 60 - \hat{T}_i \dots \dots \dots (31)$$

の余裕日数をもつものと考えた.

以上のようなインプットデータを用いて機械系割付けモデルを解いたところ, 表-3 のような結果を得た.

b) 工程計画代替案の作成

本適用例では, クラスタ分析モデルによって 図-4 に示したような単位作業構成および施工工区分割案が得られ, ついで機械系割付けモデルによって 表-3 のよ

表-3 土工機械系割付け計画案

機械系番号	1	2	3	4	5	6
機械系の機種・台数	22m <sup>3</sup> 級 CS 3台	12m <sup>3</sup> 級 CS 3台	30t 級 BD 1台	21t 級 BD 3台	25m <sup>3</sup> 級 MS 1台	16m <sup>3</sup> 級 MS 1台
総稼働可能時間 $H_i$ (時)	1 440	1 440	1 440	1 440	1 440	1 440
総稼働時間 $h_i^0$ (時)	1 440	1 227	0	1 107	584	182
実稼働時間 $t_i^0$ (日)	180.0	153.4	0.0	138.4	73.0	22.8
機械経費 $z_i$ (万円)	18 239					



表-4 日程計画代替案の特性値

機械系番号	1	2	3	4	5	6
機械系の機種・台数	22m <sup>3</sup> 級 CS 3台	12m <sup>3</sup> 級 CS 3台	30t級 BD 1台	21t級 BD 3台	25m <sup>3</sup> 級 MS 1台	16m <sup>3</sup> 級 MS 1台
実供用日数 $t_i^o$ (日)	180.0	153.4	0.0	138.4	73.0	22.8
遊休日数 $r_i^o$ (日)	37.0	3.6	0.0	45.6	1.0	1.2
調達日数 $\bar{T}_i$ (日)	7.0	34.0	0.0	0.0	187.0	179.0
工事所要日数 (日)	261					
機械経費 $z'$ (万円)	18770					

注) 本事例では  $\bar{T}_i=0$ , すなわち  $E_i=0$  と考えているので,  $t_i^o=t_i^p$  となる(式(25)のカッコ内参照)

うな土工機械系割付け計画を得た。そこで、以下では図-6のフローに従って工程計画案の作成を試みる。

(i) 工区レベルの工程ネットワークの作成

まず、取付け道路に面した工区Aもしくは工区Bを第1工区と考え、次に作業段取り上隣接する工区へ順次移行すべきことから図-4の左下方から右上方への B→C, C→E, A→D, D→F という施工順序関係を想定した。さらに土工機械系の輻輳を防ぐために、工区Eに関しては運土方向が工区Cと交錯する単位作業群 E<sub>1</sub> とそれ以外の E<sub>2</sub> に分割し, C→E<sub>1</sub>, D→F→E<sub>2</sub> という施工順序が妥当であると判断した。以上によって工区レベルでの施工順序関係がある程度明らかになったが、ここでは工期をできるだけ短縮することを目的として、図-8のような並列型の工程ネットワーク代替案を作成した。

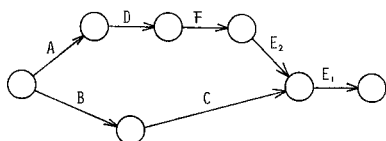


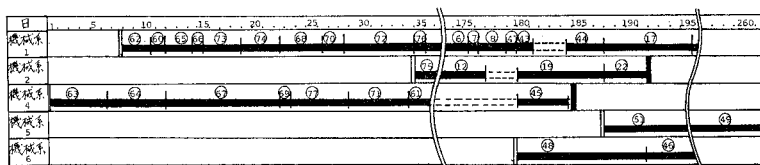
図-8 工区レベルの工程ネットワーク案

(ii) 単位作業レベルの工程ネットワークの作成

遊休日数  $r_i$  を減少することを目的として、① 技術的に可能な限り同一工区内に複数の土工機械系を投入する、② 施工中の工区内のすべての単位作業が完了しなくても次工区が着手可能ならばその単位作業を着工する、という前提を設け、単位作業をアクティビティとする工程ネットワーク代替案を作成した。このようにして得られた工程ネットワークに対して日程計画代替案を作成し、土工機械系の運用計画の形で示した結果の一部を表わしたのが図-9である。また、このときの  $t_i^o, r_i^o, \bar{T}_i$  の各値および工事所要日数ならびに機械経費  $z'$  を示したのが表-4である。

(iii) 実行可能性の検討および結果の考察

表-4より明らかなように、すべての土工機械系に対



(○内の数字は単位作業番号, ||は当該機械系の工事着工年月, |は工事終了日を表わす)

図-9 日程計画案(土工機械系運用計画案)の一部

して式(25), (26)が成立するため、本日程計画代替案は工期的に実行可能であることが明らかとなった。さらに、表-3, 4より、日程計画作成の段階で発生した遊休日数に関する機械経費の増加は531万円(= $z'-z_1$ )、その増加率は2.9%である。本研究では、これを計画目的達成上の許容範囲と判断することにする。

以上に述べた適用事例結果から次のような事柄が明らかとなった。

① 土工機械系3は当該工事には不必要である。また土工機械系5, 6は施工すべき単位作業数が少なく、それらを連続的に施工することが可能であるため遊休日数も短かいが、土工機械系1, 2, 4はほとんどすべての工区の数多くの単位作業に投入されるため、必然的に実稼働日数、遊休日数が長くなっている。

② 表-3では土工機械系1の総稼働時間  $h_1^o$  が総稼働可能時間  $H_1$  と一致するが、これは土工機械系1のセット数を増加することが可能である場合には機械経費  $z_1$  をさらに低減できることを意味するものである。事実土工機械系1を4セットにすれば  $z_1$  が18091万円に減少した。

以上の適用事例およびその考察をとおして、作業計画および工程計画を客観的かつシステムティックに立案し、評価検討することを目的とした本研究の計画プロセスの有効性が実証しえたものと判断する。

5. 結 言

本研究は、近年ますます大規模化、複雑化する傾向にありながら、その計画構成要素を客観的に記述することが困難であったために合理的な施工計画の作成方法が確立していなかった大規模土工をとりあげて、その施工計

画作成プロセスのシステム化に関するひとつのアプローチを示したものである。

すなわち、まず大規模土工の施工計画作成プロセスを図-1のようなプロセスフローとして表現し、次にその中でも特にシステムズアプローチの遅れていた作業計画および工程計画のプロセスに対して、クラスター分析および拡張型輸送問題を適用することにより、できるだけ客観的で、かつシステムティックな計画代替案の立案ならびに評価検討が可能となるような方法を提案した。

図-1 に示した大規模土工の施工計画システムのうち、土量配分計画に関しては各方面でシステム化が進んでおり、また土工機械系選定情報の作成に関しても筆者らはモンテカルロ・シミュレーションによる土工機械系の稼働分析を試みている。したがって、これらの結果と本研究の成果とを総合すれば大規模土工の施工計画システムに含まれるほとんどすべての計画プロセスがシステム化できたことになり、大型電子計算機を利用した効率的な計画策定処理が可能になると考えられる。

しかし今後、本研究を発展させるためには次のような課題を考えていく必要がある。

(1) 従来の工事実績ならびに現場技術者の経験・勘を計画情報として効率よくシステム内部に組込んでいく。

(2) 各計画プロセスの最適化に固執することは計画レベルとしての整合性を劣化させる可能性が強いため、計画プロセス間の整合性を十分考慮しながら計画策定手順を簡略化していくことを重視する。

(3) 大規模土工では単位作業間の施工順序関係の決定方法に関する自由度が大きいため、本研究で提案した工程ネットワークの作成プロセスは試行錯誤的な方法の域を脱しきれなかった。そこで今後はこのプロセスに対してコンピュータの援用を前提とするグラフ理論などの OR 手法の導入を検討する。

本研究を遂行するにあたり有益なご助言をいただいた京都大学工学部 春名 攻助教授に謝意を表します。また

本研究は長尾正平氏（現在、東洋建設勤務）ならびに見波 潔氏（現在、建設省勤務）の労に負うところが大有りあり、両君に衷心より感謝いたします。なお、本稿は京都大学審査学位論文の一部を要約したものである。

#### 参 考 文 献

- 1) 石川六郎：システムズアプローチによる工事管理，鹿島出版会，pp. 1～6，1977。
- 2) 春名 攻・山本幸司：大規模整地工事計画のシステム化に関する研究，土木学会論文報告集，第 227 号，pp. 71～84，1974。
- 3) 石川六郎：システムズアプローチによる工事管理，鹿島出版会，pp. 112～140，1977。
- 4) 吉川和広・山本幸司：アーランサービスクル待ち合わせ系の解析法に関する一考察，土木学会論文報告集，第 243 号，pp. 71～80，1975。
- 5) 春名 攻・山本幸司：大規模整地工事計画のシステム化に関する研究，土木学会論文報告集，第 227 号，pp. 71～84，1974。
- 6) 吉川和広・山本幸司・長尾正平：大規模運土作業計画のシステム化に関する研究，土木学会関西支部年次学術講演会概要，IV-36，1976。
- 7) 奥野忠一ほか：多変量解析法，日科技連，pp. 391～411，1971。
- 8) 特別講座：「クラスターアナリシス」(1)～(5)，オペレーションズリサーチ，7月号～11月号，1971。
- 9) 吉川和広・山本幸司・見波 潔：拡張型輸送問題を導入した機械化土工計画システム，土木学会全国大会年次学術講演会概要，IV-147，1971。
- 10) 特集記事：「建設機械はこのように使われる」，建設機械，1970年9月号～1971年9月号。
- 11) 建設省大臣官房建設機械課編：建設機械等損料算定表 昭和 48 年度版，日本建設機械化協会，1973。
- 12) 成久洋之：拡張型輸送問題，経営科学，第 18 卷，3,4 号，pp. 111～124，1974。
- 13) Lourie, J.R. : Topology and Computation of the Generalized Transportation Problem, Management Science, Vol. 11, No. 1, pp. 177～187, 1964.
- 14) Eisemann, K. : The Generalized Stepping Stone Method for the Machine Loading Model, Management Science, Vol. 11, No. 1, pp. 154～176, 1964.
- 15) 佐用泰司：機械化施工合理化の研究，鹿島出版会，pp. 132～177，1963。
- 16) 特集記事：「建設機械はこのように使われる」，建設機械，1970年9月号～1971年9月号。

(1978.1.19・受付)