

(Ⅲ-2)

情報システム・CAD化手法を用いた土工 工程計画のシステム化に関する研究

A Study on System Development of Large-scale Earth-moving Construction
Planning by Methodology of CAD Based on Information System

立命館大学 正員 春名 攻*
立命館大学大学院 学生員 堀 元治**
立命館大学大学院 学生員 ○ 北岡 英基**

By Mamoru HARUNA, Motoharu HORI, Hideki KITAOKA

土地開発事業における造成工事では、陽的に垂直（標高）方向に広がる施工空間を考慮せず、工事を平面的な方向のみの工事施工として取扱って工程計画を作成してきた。しかし、近年におけるように、土地開発事業が山間部において、盛んに展開されるようになってくると、その急峻な地形、複数の土質構成、さらには、時間的な地形の変化、等々の施工条件が、工程計画に対し、非常に大きな影響を与えることとなると考えられる。

そこで、本研究においては、山間部の運土作業における運土ルートの重要性に着目し、土工における施工ブロックの大きさや運土ルートの設定方法をいかに効果的に設計していくかという点を考察した。すなわち、ここでは施工空間の3次元的な拡がりや土質構成に対応するため、施工空間を垂直（標高）方向も加えた3次元的なものとして捉え運土計画の策定方法を検討することとした。また、工事進捗にともなうそれらの施工条件の変化効果的に考慮したり、さらには運搬機械の走行性や安定性を確保するための仮設道路の設定を、コンピュータ・グラフィックスを用いて検討が可能となるよう配慮することとした。すなわち、本研究は、運土ルートの設定方法を中心に、施工条件を先取的に検討することが可能な運土計画の実験モデルの開発を行うて実証的に検討したものである。

【キーワード】 土量配分計画、運土計画、運土ルート

1. はじめに

従来、土地開発事業は、主として都市周辺の丘陵地において行われてきていた。しかし、都市部における大規模な土地確保が根本的な土地不足より非常に困難であるため、土地開発事業の対象地が、急峻な地形を有する山間部へと移行しているのが最近の傾向であり、これらは、バブル経済の崩壊後も変わ

らない状況で進展している。

さて、従来の大規模造成工事は、郊外部の比較的平坦な地域を対象とすることが多かったためか、平面的なものとして捉え、計画が行われてきた。しかし、山間部の大規模造成工事においては急峻で複雑な地形の造成工事を有することから、平面かつ垂直（標高）方向にも広がりを持つ工事と考えた方が実際である。つまり、実施工においても時間軸に沿って造成地形が複雑に変化して行くため、施工空間や施工条件などの把握が非常に困難となり、それらの環境変化による機械の施工効率の影響を考慮することが不可能であるので、平面として捉えることには限界があると考えられる。そのため、現状におい

* 正員 工博 理工学部土木工学科教授
(075-465-1111 EX3701)

** 学生員 理工学研究科土木工学専攻
(同上)

ては、あまり効果的な工程計画立案のための方策がとられておらず、造成工事の工程計画立案の作成が非常に困難である。このようなことを背景として、工程計画策定においては経験工学的な熟練技術者の経験や勘に多く依存しており、計画案作成のための作業が非常に多く、明確でわかりやすい単純な方法による検討が行われていないのが現状である。

そこで、本研究においては、造成工事の中心的工事である土工事を取り上げ、特にその「土の動き」に着目することにより次のように新しい工程計画の方法について考察を行った。すなわち、3次元施工空間における適切な土量配分案の策定方法や時間軸における施工条件の変化状況の情報を、コンピュータグラフィックスを用いて、先取的に予測し、計画者の施工（計画）に対する意思を反映することができるようヒューリスティックな運土計画の実験モデルの開発について検討することとしたのである。

2. 山間部における大規模土工事の特徴

（1）土量配分計画の問題点

土量配分計画において、従来は対象地を適当なブロックに分割した後、そのブロックを施工の単位として切土ブロック盛土ブロック間の直線距離を運土距離として算出し、目的関数を

$$(\text{仕事量}) = (\text{運土距離}) \times (\text{運土量})$$

として総仕事量最小化を目的関数する線形計画法輸送問題として解いて計画案を求める方法が用いられてきた。しかし、山間部の工事では、この仕事量最小化では、上り勾配や下り勾配などによる機械の施工性の検討が不足したり、時間軸に沿って変化する地形にともなって運土ルートや運土距離も変化するといったことに対する検討も不足する。また、対象地内に、運土ルートの制約を受けることも多く、タイヤ形重機のための工事用の仮設道路に対応した運土距離の算出方法も再検討する必要があると考えられる。

これらのことより、山間部における造成工事では、これらのブロック間の勾配やルートの運土距離を評価基準にした仕事量最小化では必ずしも最適な土量配分であるとは考えにくく、より実施工における運土ルートに近い運土距離を考えることによって、よりリアリティの大きな土量配分計画を検討する必要

があると考えられる。

（2）機械性能の向上による運土作業の変化

従来の運土作業では、運土距離に応じてブルドーザー（短距離運土）、モータースクレーパー（中距離運土）、ダンプトラック（長距離運土）等々を使用してきた。しかし、近年における、土工量の増加や機械の大型化による性能の向上などにともない、ダンプトラックの使用が多くなってきている。一般にタイヤ系重機は、他の運土機械に比べ勾配やルートが施工効率に与える影響が大きいいため、大型のタイヤ系重機に対しての走行路確保の問題が重要視されるようになってきた。一般にこの種の機械の施工性を考慮すると、運土ルートに直線ルートをとることは少なく、地形形状に応じたルートの設定方法が重要となる。しかし、現在、運土計画段階におけるこれらの検討は不足し、主任技術者などの経験工学的な熟練技術や勘に大きく依存している。

（3）時間的に変化する施工条件

先にも述べたように、山間部の土工事では、施工の自由度が極めて大きく、運土ルート、施工順序等々の不確定要素が多い。このため、計画の検討においても試行錯誤的な方法が一般的となっており、定型的な処理プロセスが存在していないのが現状である。さらに、山間部における造成工事では、原地形の山部と谷部の高低差が丘陵地の造成工事と比較すると非常に大きくなっている。そして、切土高・盛土高が大きくなるにともない、1つの平面ブロック内の土工量も増大するだけでなく、土質・地質の種類も増加する。そして、これに起因して、盛土部分の適正土質を確保する上での土質間のマッチングや、力学的な土質安定条件の確保など、重要度を増す検討項目が各時間断面において変化することになる。そのため、造成工事の経済性、迅速性、要求された質といった総合的なバランスのとれた最適運土計画の策定方法や定型的な処理プロセスの開発が、非常に困難とされているのである。

3. 運土ルートを考慮した運土計画作成のための実験モデルの開発

先に述べたように、山間部における大規模土工事では、急峻・複雑な地形、時間的な地形変化や複数の土質構成など高さ方向も考慮した3次元的な検

討を加えた運土計画を立案していく必要がある。

また、造成工事は、①対象地の地形及び土質状態を把握するための地形分析、②その地形より「土」の最適配分を行う土量配分、③それらの拘束条件のもとに施工法などを設定する機械の能力計算などを行なう運土計画段階、また、④それらをもとに資源山積み図の評価を行なう評価・検討段階、等々のように、計画化の作業を各段階で区別して捉えることができる。

これに対し、本研究においては、まず、3次元施工空間地形モデル、すなわち、の多種類の土質構成を把握することが可能な形での対象地のモデル化を行い、さらに、土量配分計画段階において土の動きをマクロに捉えることにより、施工過程をととして時間的に変化する施工条件を考慮することとした。これは、従来のようにメッシュ土量を基準として、運土ルートを直線的に取りミクロに検討しようとした場合におこる対象地外を通るルートや高低差による垂直方向の移動距離、さらには、施工順序による

ルートの違いなど、計画段階と実施工段階における運土ルートに関わる検討上の様々な矛盾に対し、土の動きをマクロに考えることで、適切な対応がはかられると考えた。すなわち、ここでは、検討可能な施工条件のみ考慮して運土ルートの設定を行えば、上述したような実施工と矛盾しない土量配分計画案を策定することが可能となると考えられた。また、ブロックの大きさや工事用仮設道路による迂回ルート、急勾配地における迂回ルート等をはじめとする勾配に対する施工効率の変化を目的関数に取り入れることにより、線形計画法輸送問題としても十分適切な土量配分計画案の策定が可能であると考えられる。

また、マクロな土の配分として算出された配分計画案を土の理想的な配分と考え時間的に変化する施工条件を各段階において検討し、機械の台数や能力算定を運土計画段階においても検討することとした。さらに、マクロな土量配分案を運土計画として取りまとめるためには、運土ブロックの施工順序や投入機械の種類・台数・組み合わせ・施工能力等々の設定を行い、それらをもとにスケジュール計算を行ったり、工程表を出力するというようなプロセスについても検討していく必要がある。

また、山間部における土工事では、運土作業が進むにつれ地形形状が変化し、それにともない切土ブロックや盛土ブロックの土質や施工面積あるいは運土ルートの勾配等々の施工条件が異なってくるため、合理的な投入機械の種類・台数・組み合わせの設定および運土ルートの設定については、これらの施工条件の把握、検討が必要である。しかし、計画段階でその地形変化の把握が困難であることから、運土計画策定に効果的な方策が取られておらず、運土計画そのものの検討が非常に困難となっているのが現状である。

以上のような考察に基づいて、コンピュータ・グラフィックスを用いて計画者に対してのビジュアルな情報提供するという方法を用いることにより、施工過程での不確定要素の発生の可能性を先取的に把握し、その検討を加えることを可能とする運土計画のモデルを実論的に開発することとした。つまり、図-1に示すような工程計画策定プロセスをデザインしたものである。

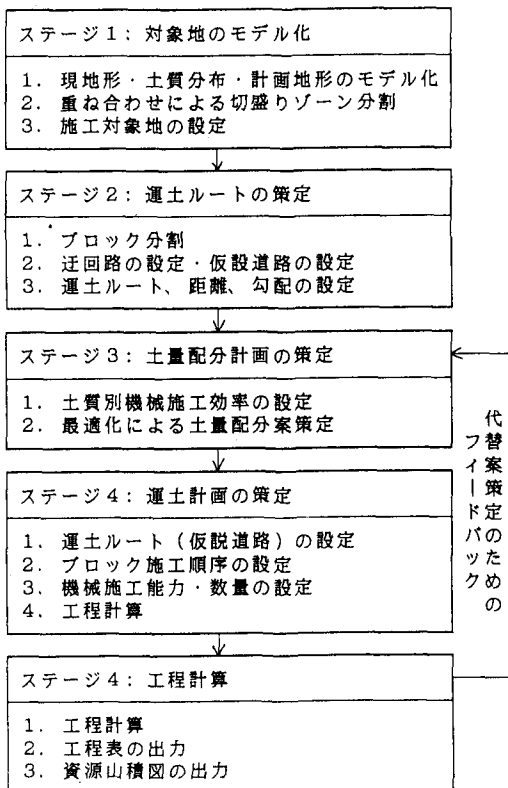


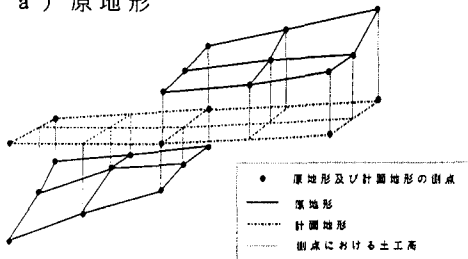
図-1

(1) 対象地のモデル化

本モデルでは、どの土が何処にどのような地形状態で存在するかといった現地形における土に対する諸情報や、計画地形を構成するための土に関する諸情報を3次元座標をベースに容易に把握できる方法が必要である。そこで本研究においては、地形測量の測点を有効に利用でき土量も把握し易いメッシュ法による地形表現の方法を用いることとした。すなわち、土の大きさの最小単位として、図-2に示すように適切な大きさのメッシュを設定し、対象地のモデル化を行うこととした。

①土質別にモデル化を行い、データ化を行なう。

a) 原地形



b) 原地形のモデル化

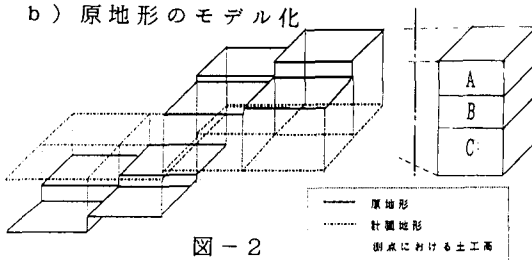


図-2

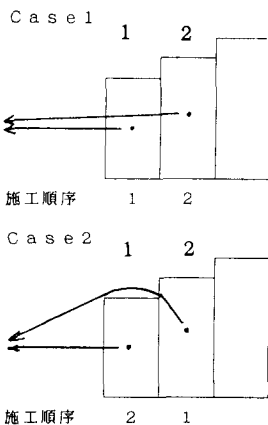


図-3

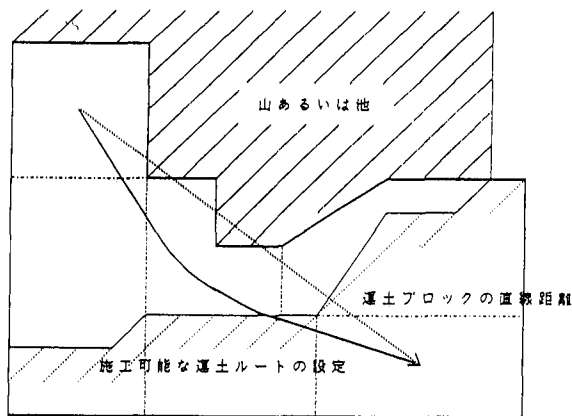


図-4

②現地形データ、計画地形データを使って、切盛り状態のグラフィック表示を行う。

③施工対象地の把握をグラフィックス表示結果を用いて確認し、ブロック分割、運土ルート設定の予測のための与件情報を出力する。

(2) 運土ルートの策定

土量配分を適切に行うためには、現実的な運土距離の設定が重要となる。しかし、先にも述べたように従来の方法ではこの段階において、時間的に地形が変化することを予測することができない。すなわち、土の運搬をミクロに考えすぎると、図-3で示すようにブロック1、2の間に、case1とcase2のように施工順序及び運土距離に制約をつけてしまうことになる。そのため、実施工段階と計画段階において矛盾が生じる。このことはこのような検討上の矛盾を避けるために、土の動きをマクロに捉える必要があるという次のような考え方に到着する。すなわち、本研究においては、大きなブロックで対象地をマクロに分割することにより、予測不可能な地形条件の影響をできるだけ無視した形で、運土ブロック間の運土ルートが求められるような方法を検討した。また、運土ブロック間に土運搬上の制約がある場合、その平均勾配も考慮しつつ、図-4に示すようにそのルートを制約に合わせて迂回させて設定する必要がある。

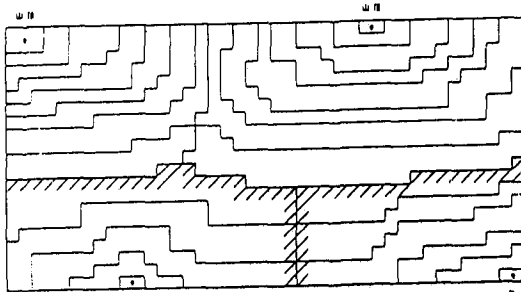
また、切土・盛土作業が、サイクルとして捉えられるため、運土計画立案で、サイクルの把握が容易に行えるようにする必要がある。また、実施工考慮

した場合、一度切り崩した山は水を含みやすくなるため、ある程度の切り崩しが完了するまで連続施工する必要がある。以上の考察に基づき、ここでは、対象地を従来と同様に切土地域・

盛土地域に分割した後、それぞれの地域において切土ブロックは山単位で、盛土ブロックについては谷単位で分割することとし、これをマクロな土量配分における基本的単位とすることとした。すなわち、

- ①山単位、谷単位で対象地を分割する。
- ②工事前仮設道路の設置という土運搬上の制約がある場合には、運土ブロック間ルートを迂回させて設

a) 対象地の平面図



b) 造成ブロック分割 (断面図)

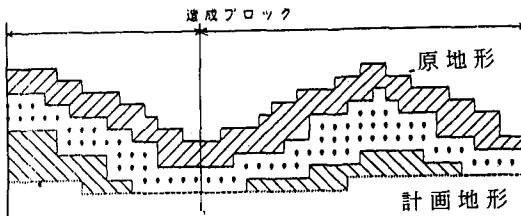


図 - 5

表 - 1

○ 目的関数	
$F(x) = (1 + a \tan \theta) \times L_{ijk} \times W \times x_{ijk} \rightarrow \min$	
○ 制約条件	
・ 盛土ブロック土量	$\sum x_{ijk} = \alpha_k$
・ 切土ブロック土量	$\sum x_{ijk} = \beta_{ij} \times C_{ij}$
・ 運土量	$x_{ijk} \geq 0$
	$\sum \alpha_k = \sum (\beta_{ij} \times C_{ij})$
○ 変数及び定数の定義	
a	: 勾配による施工効率係数
α_k	: kブロックの盛土量 (m ³)
β_{ij}	: iブロックのj層目の切土量 (m ³)
C_{ij}	: 締固めた土量/地山状態の土量
L_{ijk}	: 運土距離 (m)
x_{ijk}	: 運土量 (m ³)
$\tan \theta$	: 勾配
w	: 土の単位体積重量 (kg/m ³)

定する。またそのような制約のない場合においては、基本的に土運搬ルートを直線として求めるが、そのルートが工事対象地外や走行不能場所を通る場合においては、その土運搬ルートがあまり延長しないような迂回路を設定し、より実施に近いルート算出を行なう。

- ③運土距離、勾配、ルートのデータ化を行う。

(3) 土量配分計画案の策定

先にものべたように、山間部における土工事に対して従来の仕事量最化を適用した場合、高さ方向の検討が不足するため技術上いくつかの問題が生じる。つまり、機械的に求められた解には、地形的変化を捉えた施工性に関する検討が不足することになる。

そこで、土量配分計画を、土の理想的配分という観点から、そのブロック分割の方法、運土距離算出方法を検討することにより土量配分計画を捉え直し、運土計画の段階で時間軸上での具体的検討を行いつつ計画化していくこととしている。また、上り勾配では施工効率が低下し、下り勾配では施工効率が向上するといった機械の施工性に着目し、表-1に示すような土量配分計画モデルの定式化を行い、次のような手順を設定した。

- ①運土作業機械について、勾配による土質別の施工効率を算出する。

- ②ステージ2で求めた運土距離、平均勾配、ブロック土量より線形計画法輸送問題により土量配分案を算出する。

(4) 運土実験モデルの開発

マクロに計画された土量配分計画案をベースとして、概略の運土計画をとりまとめていくためには、運土ブロックの施工順序や投入機械の設定と、スケジュール計算、工程表の出力というプロセスについても検討しておく必要がある。

山間部においては、運土作業が進展するにつれて地形形状が変化し、その変化に応じた切土ブロックや、運土ルートの決定を検討することが重要である。しかし、現状では、その地形変化の把握は決して容易ではなく、運土計画そのものの検討が非常に困難となっている。そこで、本研究ではこれらの把握が可能となるように図-6に示すような運土計画策定プロセスをデザインした。

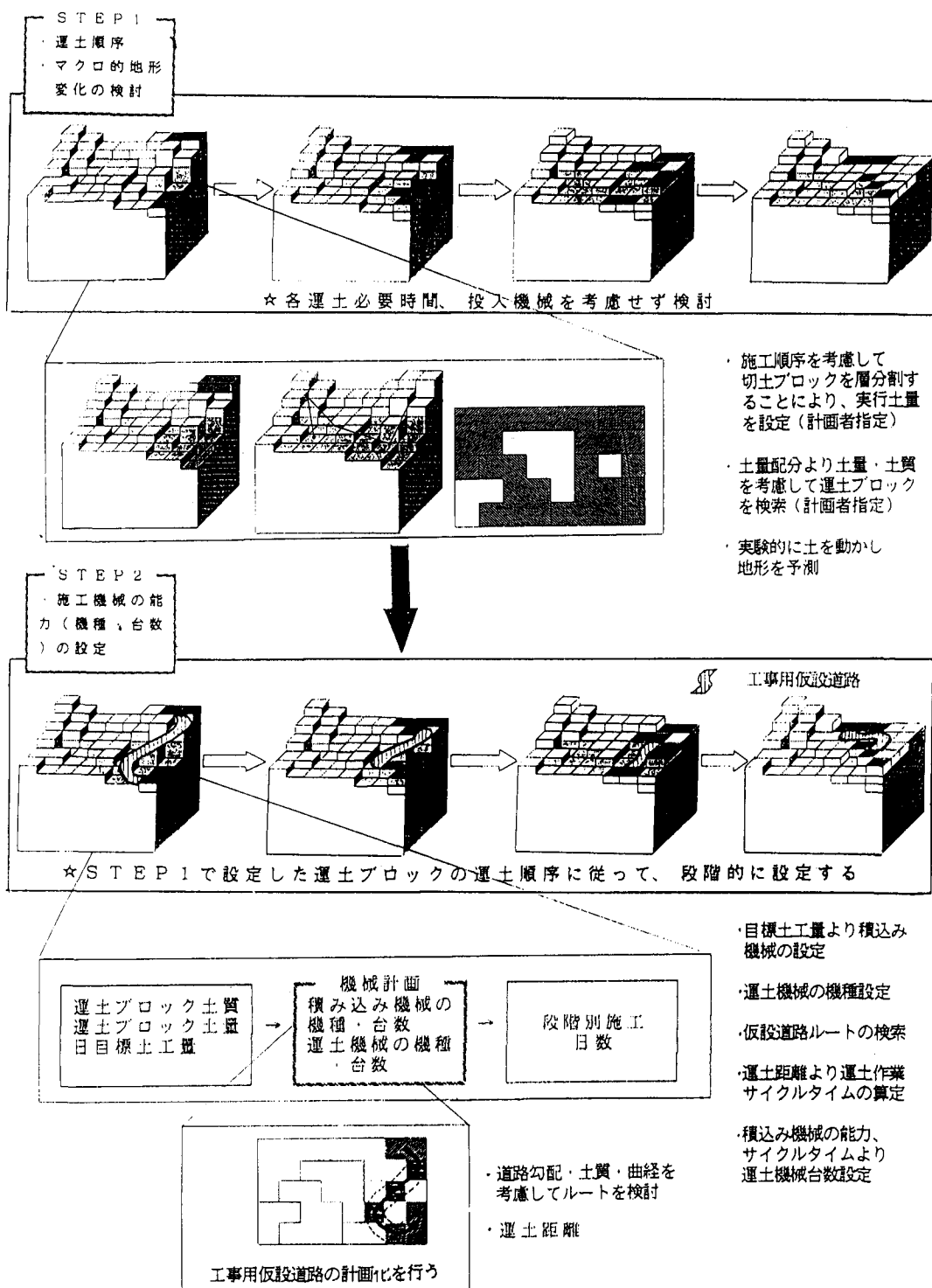


図 - 6

ここでは、まず、施工開始運土ブロックの指定を行う。ついで切土ブロックにおけるブロック内の土質を考慮して層分割を行う。そして地形の形状から仮設道路の設定を行うこととしている。

次に、投入機械の機種・台数についての選定を行うこととしている。まずここでは、一般的に、運搬機械の待ち時間を低減するよりは、積み込み機械の待ち時間を低減することが、効率的な運土作業につながることから、積み込み機械を運土作業の支配的機械と考えることとしている。従って、制約工期、総土工量より算出される日目標土工量にもとづき、各ブロックでの積み込み機械の機種・台数の設定と積み込み作業のサイクルタイムを早期の段階で算出することとした。そして、それをもとに、運土機械の機種・台数の設定を行い、各運土ブロックの所要日数を算出するという方法を採用することとしている。

これらの作業を施工終了となるブロックまで繰り返し行うことにより、運土計画案を作成していくこととした。なお、運土計画案の策定にあたっては、工期、資源山積み図から制約工期、投入資源などの評価・検討を行い、代替案を作成することとしている。

4. 運土計画モデルの実証的検討

(1) 運土ルートの考慮に対する検討

この実事例における検討においては、まず、土量配分段階における運土ルートの設定の方法による土量配分案の違いについて検討してみた。

図-7に示す配分案Aは、この対象地における運土ルートの制約を考慮したものであり、B案は、ブロック重心間の直線距離によるものである。ここで見られるように、運土ルートを考慮することにより、より実施に近い土量配分計画案の設定が可能であると考えられる。

(2) 運土計画モデルの検討

この対象地は、かなり急峻な地形と、盛土の土質設計のなされている山間部の大規模土工のものである。図-8-3は、この対象地のブロック分割であり、切土地域は山単位、盛土ブロックは谷単位で分割している。また、図-8-1と表-8は、この対象地の土質設計がすでになされているので、ここでは各対応土質ごとに土量配分を行った矢線図およ

び土量配分表を求めた。ここで、運土ルートとしてはブロック間の直線ルートが対象地外を通る場合のみに対し、迂回路の設定を行っている。

図-9は、切土ブロック1を盛土ブロック1に土運搬し施工した場合の地形変化の図とその時の施工土量の表を表している。これにより、施工段階における地形条件や施工土質、土量を算出している。また、この地形条件の変化状況にもとづき工事用仮設道路を設定しているが、これと先に述べた、目標土工量の設定を考え合わせれば、投入する施工機種と台数を計画することが可能である。

5. 施工管理段階への適用方法

本研究においては、計画検討作業の迅速化と効率化を中心に検討を行ってきた。そして、この方法によれば施工段階においても本モデルを適用した検討が有効であると考えている。すなわち、予測外の土質、資源の制約の変更など計画段階と実施段階での施工条件の違いにより計画の修正を余儀なくされた場合、各計画のどの段階において修正を加えるかといった検討も容易に行うことができる。さらに、実施施工段階の地形をその実績データにもとづきコンピュータ・グラフィックスで表示し、それを計画段階における予測地形と比較することにより、工事の進捗情報・機械の適合正などを迅速に確認することができるので、より実務レベルに近い管理システムの構築が可能であると考えられる。

6. おわりに

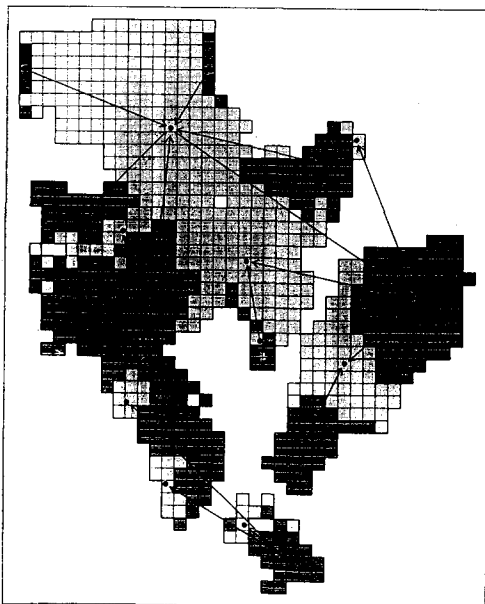
本研究では、大規模土工の運土計画に対して、計画化の各プロセスを通して、一貫性や整合性を図れることを目的とした支援情報システムの開発研究を行った。さらに、コンピュータ・グラフィックスを活用した運土計画モデルの手法を開発することにより、垂直（標高）方向の検討も加えた3次元的な地形、あるいは時間的に変化する地形・施工条件等の把握が可能となり全般的に、施工効率を考慮した運土ルートの検討を行えると考えられる。

今後の課題としては、土量配分計画における土質を考慮した施工順序に対する考慮や、運土ルートの走行性に対する考慮を組込んだ目的関数の定式化の方法、さらには、運土計画における仮設道路の安定

性、仮設道路の整備の問題、等々に関して検討を加えていく必要があると考えているので、今後、これらの検討を行うことにより、システムのさらなる向上を図りたいと考えている。

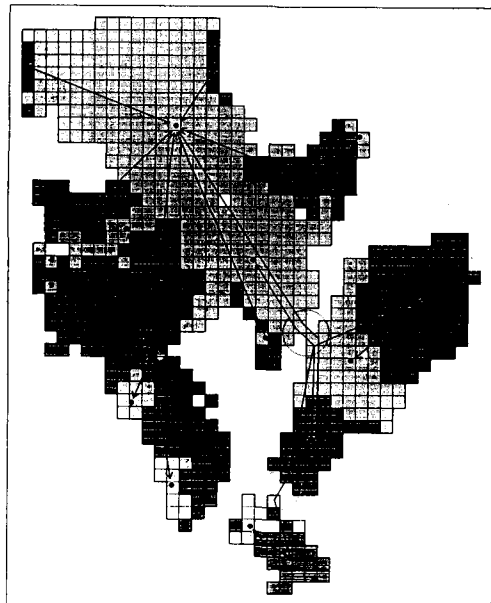
[参考文献]

- 1) 春名 攻：建設工事における施工管理に関するシステム論的研究、学位論文（京都大学工学博士）1971年7月
- 2) 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 1977年7月



	掘土1	掘土2	掘土3	掘土4	掘土5	掘土6	掘土7	掘土8
切土1	3940.00							
切土2	1750.00							
切土3	85290.00							
切土4	32560.00		10400.00					
切土5				14000.00	12000.00	5600.00		
切土6							57640.00	
切土7	9860.00	187220.00					34230.00	1200.00
切土8	99900.00							
切土9		4380.00						

- ・ 迂回路なし
- ・ 重心間の直線距離
- ・ 勾配による施工効率考慮



	掘土1	掘土2	掘土3	掘土4	掘土5	掘土6	掘土7	掘土8
切土1	3940.00							
切土2	1750.00							
切土3	85290.00							
切土4	209680.00		10400.00	14000.00	12000.00			
切土5		30330.00				5600.00		
切土6	32680.00	25190.00						
切土7		116110.00					96400.00	
切土8	98700.00							1200.00
切土9	4380.00							

- ・ 運土ルートは対象地内のみ
- ・ 印運土ルートの制約あり
- ・ 工事用仮設道路の制約無し
- ・ 勾配による施工効率考慮

図-7

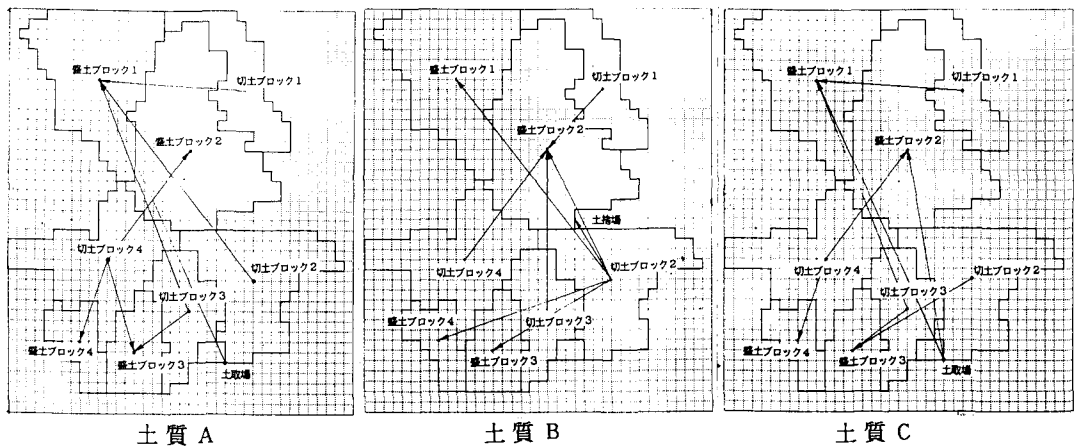


図 - 8 - 1 運土図

表 - 8 土量配分表

土量配分結果(土質A) 単位: m³

	盛土ブロックNo.1	盛土ブロックNo.2	盛土ブロックNo.3	盛土ブロックNo.4
切土ブロックNo.1	121160.0	0.0	0.0	0.0
切土ブロックNo.2	14170.0	0.0	0.0	0.0
切土ブロックNo.3	14690.0	0.0	32760.0	0.0
切土ブロックNo.4	0.0	5700.0	73340.0	101100.0
土取り場	780680.0	0.0	0.0	0.0

土量配分結果(土質B) 単位: m³

	盛土ブロックNo.1	盛土ブロックNo.2	盛土ブロックNo.3	盛土ブロックNo.4	土捨て場
切土ブロックNo.1	0.0	130525.0	0.0	0.0	0.0
切土ブロックNo.2	179900.0	181675.0	43800.0	200.0	358350.0
切土ブロックNo.3	0.0	473455.0	0.0	0.0	0.0
切土ブロックNo.4	0.0	632845.0	0.0	0.0	0.0

土量配分結果(土質C) 単位: m³

	盛土ブロックNo.1	盛土ブロックNo.2	盛土ブロックNo.3	盛土ブロックNo.4
切土ブロックNo.1	58700.0	0.0	0.0	0.0
切土ブロックNo.2	0.0	0.0	127100.0	0.0
切土ブロックNo.3	46600.0	0.0	15000.0	0.0
切土ブロックNo.4	0.0	122400.0	0.0	1400.0
土取り場	306000.0	472700.0	0.0	0.0

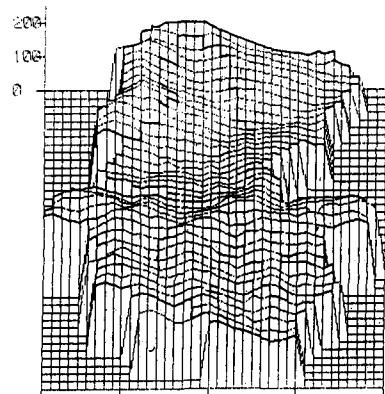
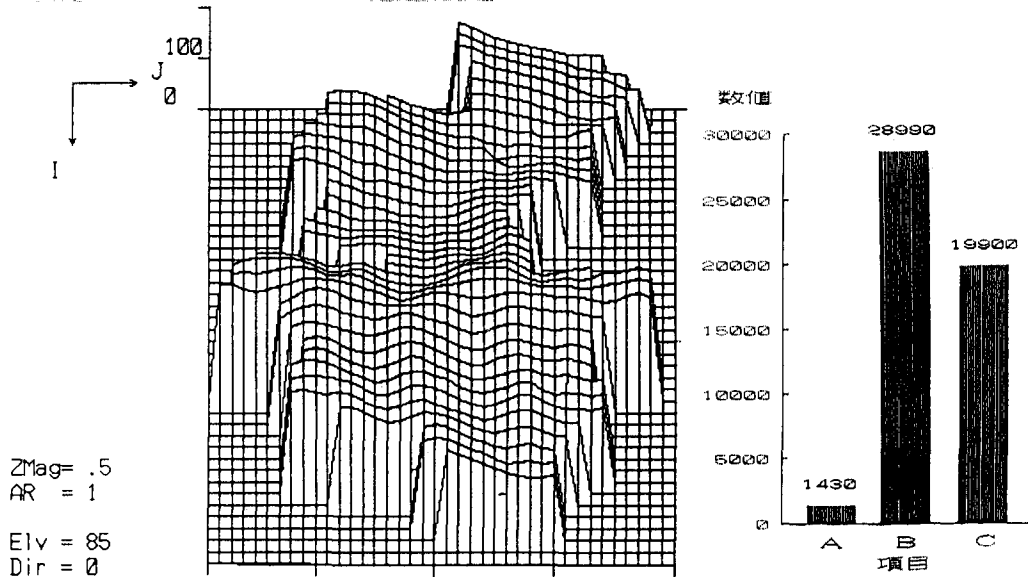


図 - 8 - 3
地形及びブロック分割図

- ・ 運土ルート対象地内のみ迂回路設定
- ・ 対象地内において、重心間の直線距離
- ・ 勾配による施工効率考慮
- ・ 土質別の施工効率考慮
- ・ 土質構成は中硬岩、軟岩1, 2、土砂
- ・ 盛土土質設計

切土ブロック 1 204.5m施工段階 1



切土ブロック 1 194.5m施工段階 2

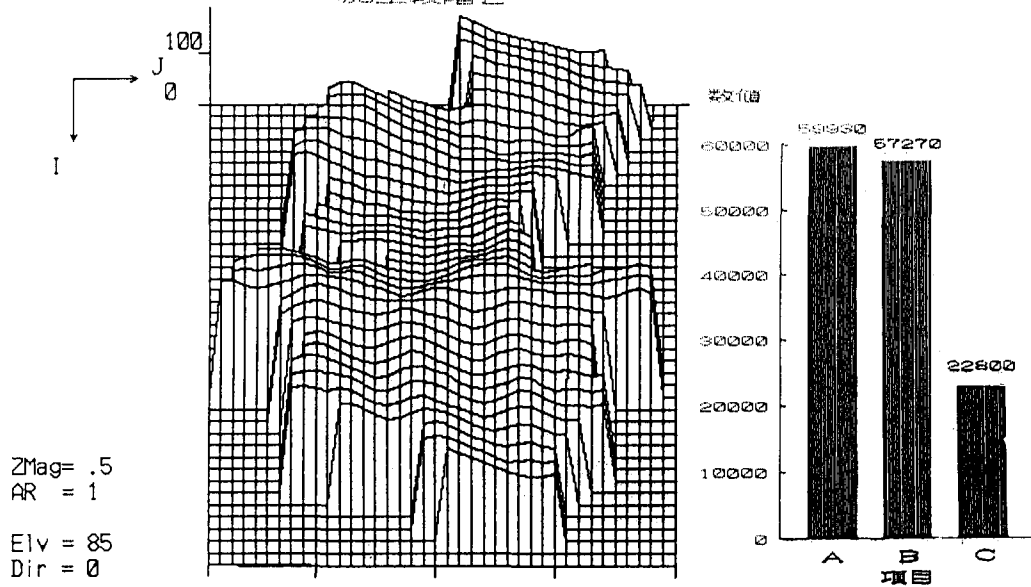


図 - 9 施工段階データの出力図