

施工シミュレーションモデルを導入した大規模整地工事の 最適工程計画策定方法に関する研究

A Study on Development of Scheduling Method for Optimal Planning of Large-Scale Earth-Moving Project Utilizing Simulation Model

春名 攻*, 滑川 達**, 伊藤壮央***

Mamoru HARUNA*, Susumu NAMERIKAWA** and Takeo ITOH***

1. はじめに

本研究では、大規模整地工事計画を対象として、概略計画レベルにおける最適な工程計画の策定をめざした研究を行った。すなわち、ここでは土量配分計画ならびに土工機械系の種類とそれらの投入量が既に決定されているとともに、単位作業として「掘削→積込→運搬→敷均」という一連のサイクリックな作業の流れによって構成される1組の施工ブロック間の運土作業を設定し、これらの技術的な施工順序が代替案的に与えられている場合を取り上げている。ここで、運土作業間の技術的な施工順序とは、例えば工事の実行性を考えて表面の土から切土を行うといった物理的な問題、工事施工の移動性を向上するために、運搬機械の積載走行時の運搬路に上り勾配が生じないよう谷部の盛土を先行的に実施していくといった経験的な問題、さらには住宅の販売方針等から要請される政策的な問題などから決定される施工順序を意味する。

そして、本研究においては、以上のような前提条件のもとで計画変数を各運土作業の実施順序と投入する資源量として、指定された工期内で工事を終了することができる工程案の中で最も費用が安価となる工事用資源の運用計画と作業スケジュールを求めることのできる工程計画策定の方法を提案する。

2. 工程計画策定方法の基本方針

本研究では、これまで「任意の時間断面での状態を計画変数として取扱えない」というPERT系ネットワ

ーク手法の理論的特徴からくる課題を取り上げ、その解決方法として、ある特定の条件を満たすカット集合とその集合間の順序関係構造に着目してきた。すなわち、工程ネットワークにおけるすべての結合点を、始点を含む結合点集合と、終点を含む残りの結合点集合とに2分するカットのうち、始点から終点に向かう順方向の作業のみを含むカットを求めた。このような特定の条件を満たすカット集合の中には、図-1のように、互いに交差のない形で始点から終点まで各結合点を一つ一つ越えていくようなカットの配列が有限個存在しており、この「異なるカットの時間的配列」が図-1のように各作業の実施過程として表現できることを示した。そして、本研究では、以上のようなカットの配列を「カット間順序関係」として規定し、このカット間順序関係を構造化することにより、各カットを結合点にもつ新たなカットネットワークが図-2のように求められるとともに、このカットネットワークの一つの経路が作業実施過程の代替案として表現されていることを明らかにしてきた。このように考えると、各種の工程計画問題は、カットネットワークにおける最適経路探索と、その経路上での最適資源配分問題として変換が可能となり、本研究が過去に行ったPERT/MANPOWER問題では、各カットにおける資源配分とそれの伴う各作業の実施状態がCutting-Stock問題として表現可能となり、この問題をカットネットワークの経路探索を行いながら順次解いていくことにより、確実に最適解が求められることを報告している。

以上のようなこれまでの研究成果を鑑み、ここでの整地工事を対象とした最適工程計画策定方法の開発においても、上述のようなカット概念を導入することを考える。すなわち、今回のケースにおいて前述の特定のカットは各運土作業の同時実施状態を表しており、

キーワード：計画手法論，施工計画・管理

* 正会員，工博 立命館大学理工学部環境システム工学科教授

(〒525-8577 滋賀県草津市町路東1-1-1 TEL 077-561-2736, FAX 077-561-2667)

** 正会員，工博 立命館大学総合理工学研究機構システムストラクチャー（同上）

*** 学生員，立命館大学大学院理工学研究科環境社会工学専攻（同上）

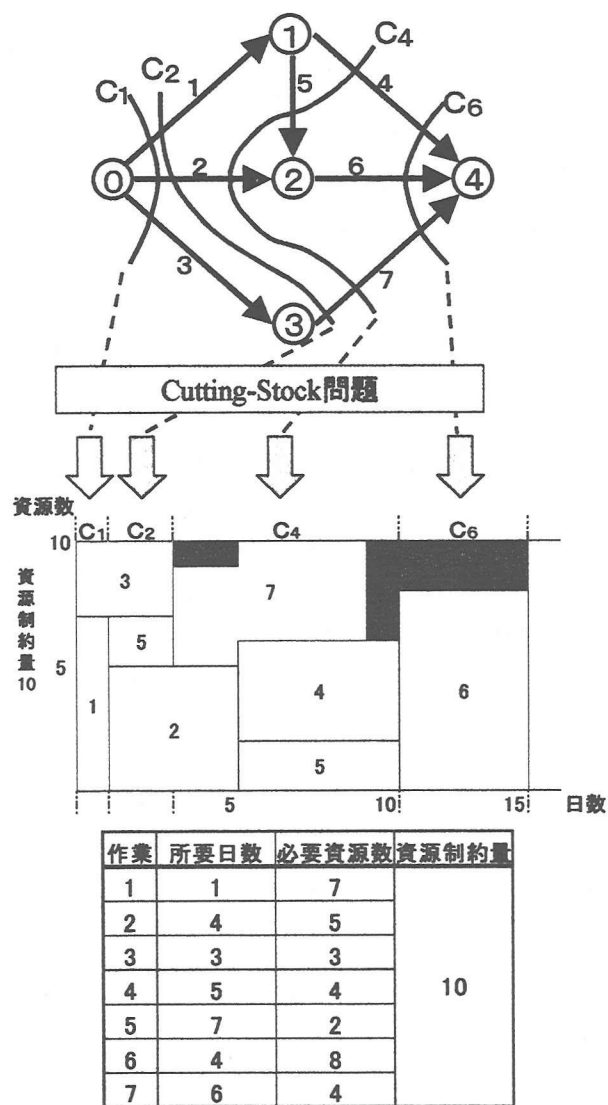


図-1 異なるカットの時間的配列

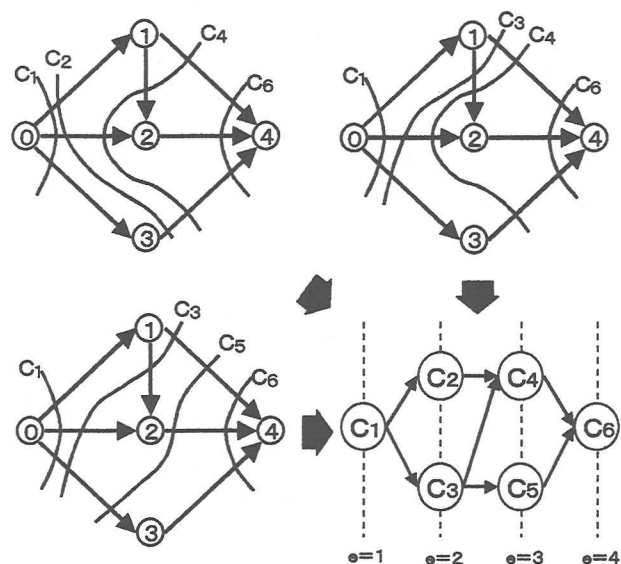


図-2 カットネットワーク

計画変数としての各運土作業への資源配分パターンと一致する。しかし、運土作業では、土工機械系の待ち時間などの存在により各作業への資源の投入量と所要時間・費用との関係を単純な算定式によって求めることが困難であるため、本研究では、この運土作業の同時実施状態（カット）を土工シミュレーションモデルを用いてリアルに表現してみることににより、このカットにおいて検討すべきすべての意味ある資源配分パターンの所要日数や土工機械系の移動状況とそれにもとづく移動費用を求めることを考えた。さらに、このような「異なるカットの時間的な配列」として求められるカットネットワークの表すカット間順序関係にしたがって、費用が最小となる最適経路の探索とその経路上における最適な資源配分パターンの選定を上述のようなシミュレーションモデルによるリアルな運土作業の同時実施状態表現を行いながら、図-3のような考え方で進めていくことにより、現実の計画検討に十分な精度をもつ最適な運土作業の実施スケジュールを求めていこうというのが本研究の基本姿勢である。

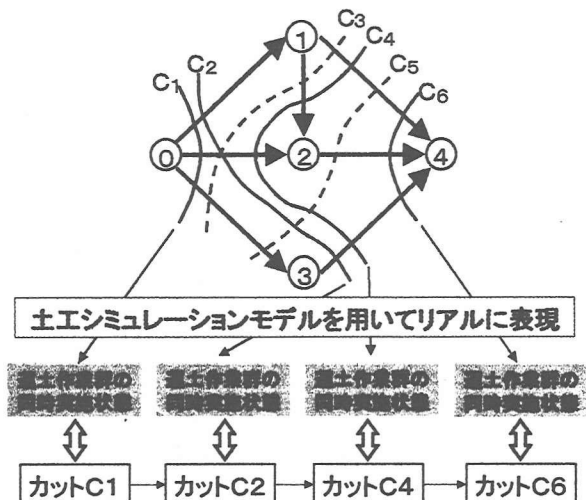


図-3 シミュレーションモデルによる同時実施状態表現

3. 土工シミュレーションモデルの構築

ここでは、まず土の運搬を行う土工における運土作業を実施する機械系の移動状況や所要時間をリアルに表現することのできるシミュレーションモデルの構築について述べる。なお、具体的な土工機械としては、ブルドーザおよびモータスクレーパが選定されている場合を取り上げ、図-4のような考え方でシミュレー

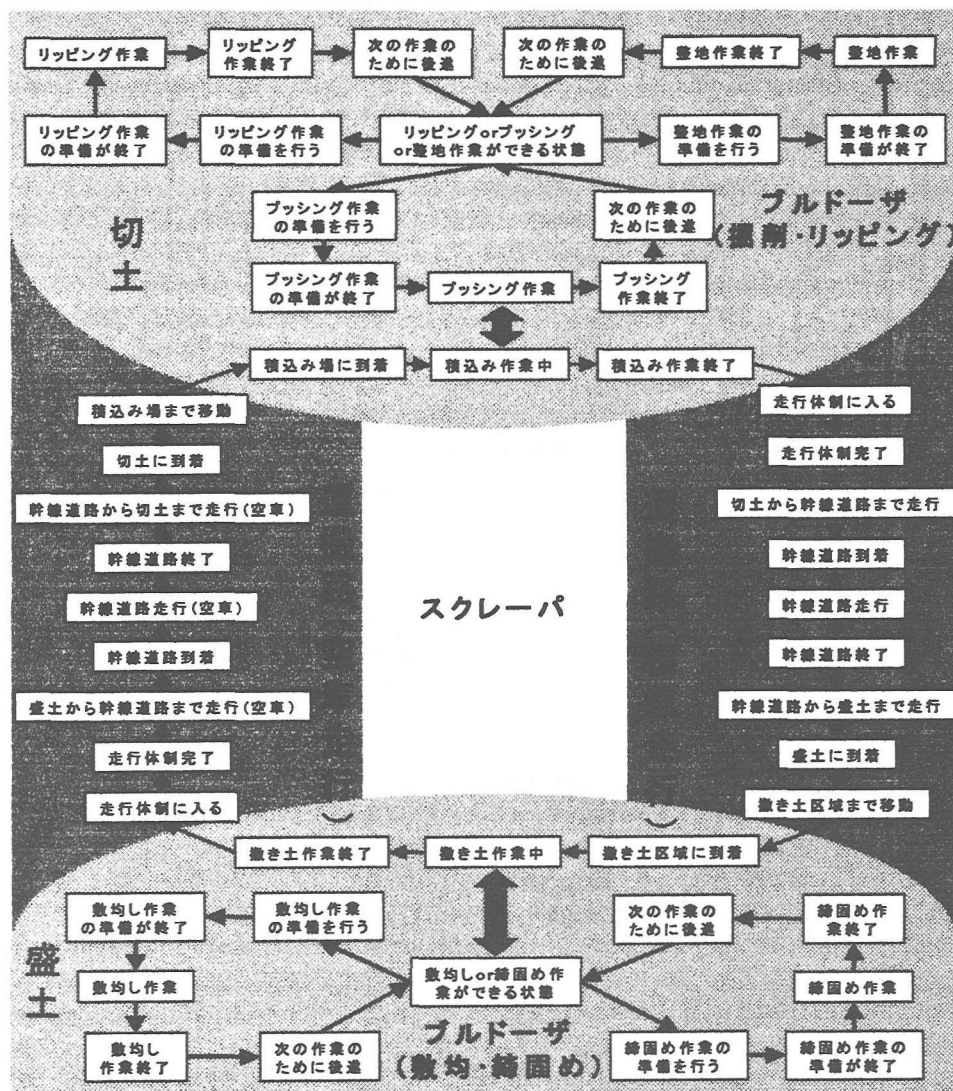


図-4 シミュレーションモデルの基本構造

シミュレーションモデル全体を構築していくこととした。なお、ここで構築するシミュレーションモデルは、基本的に参考文献3)に準拠したものであるが、参考文献3)ではイベント・シーケンス型のGPSSを用いているのに対して、本研究では、後の土工機械系の配分問題を含むスケジューリング問題との結合を考慮し、これをタイム・スライシング型に書き換え、C言語によるプログラミングを行っている。

(1) モデルの前提とインプット・アウトプットデータ

本土工シミュレーションモデルでは、次のような前提条件のもとで構築した。

- ①各機械の作業時間は平均値を与え一定値とする。ただし、モータスクレーパの運搬時間や空走時間は勾配、土質の違いによって変化するものとし、それぞ

れ係数を与えることとする。

②実際の工事では運土ブロック内において積み込み区域および撒き土区域が徐々に変化するため、それに伴い運搬距離も変化していく。しかし、この変化については運土ルート上の運搬距離と比べると微小であると判断して、平均運搬距離を一律で与えることとする

③現場において運土作業を行う場合には昼休みやオペレータ同士の打合せの時間などが存在し、連続的に作業が行える訳ではないが、それらは各現場作業で異なることや1つのまとまった作業は連続して行われることが多いため、本シミュレーションモデルでは、作業の途中休止については考慮せず、一日あたりの稼働時間を一

律8時間として与えることとした。

また、以上のような前提のもとで、本シミュレーションモデルのインプットデータおよびアウトプットデータは表-1のように整理できる。

(2) モータスクレーパの

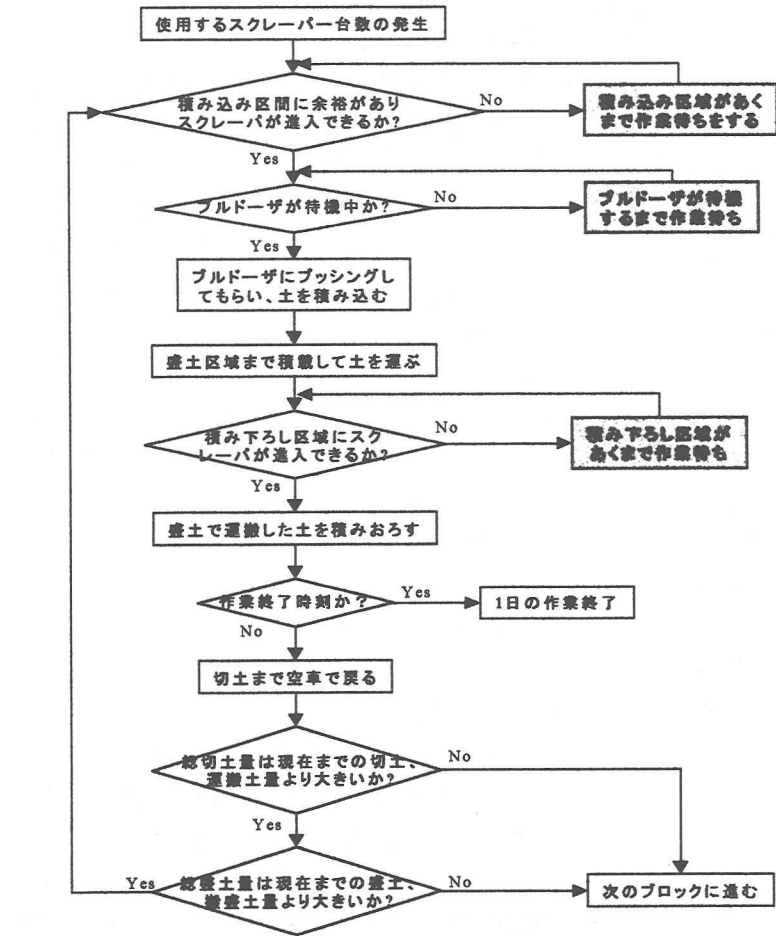
シミュレーションモデル (図-5)

シミュレーションの開始にあたっては、投入するモータスクレーパの施工能力および台数を指定し、さらに、適当なインデックスを付加することによりそれぞれの機械を識別しておく。各モータスクレーパは積込区域が開いていて、かつスクレーパの積込容量分の土がほぐされている場合は直ちに進入し、すでにほかのモータスクレーパが積込作業中のため、新たに進入する余裕がなければ、区域外で待機する。積込区域へ進入したモータスクレーパは、ブルドーザが待機中かど

表—1 シミュレーションモデルにおける
インプットデータおよびアウトプットデータ

インプットデータ		
ブルドーザ (掘削)	スクレーパ	ブルドーザ (敷均・締固)
積み込み作業準備時間	積み込み作業準備時間	敷均し作業準備時間
プッシング作業時間	積み込み作業時間	敷均作業時間
リッピング作業準備時間	積載走行時間	転圧時間
リッピング作業時間	撒土作業準備時間	
整地作業準備時間	撒土作業時間	
整地作業時間	空車走行時間	
各後進時間	1 回当り積み込み量	
・ 地形条件、土質条件、各作業の総土工量、各作業への配分機械台数、各機械の使用・存置費用		

アウトプットデータ
各機械の稼動状態および稼動費用
各作業の所要時間
工期
総費用



図—5 モータスクレーパのシミュレーションフロー

うか判断し、待機中であれば積込作業に移る。ブルドーザが待機していなければ、その場で待機する。所定の土量を積載したモータスクレーパは走行体制に入り、撒土区域まで積載走行作業をし、撒き土作業を行うが

他のスクレーパが撒き土作業中のため、新たに進入する余裕がなければ待機する。また、進入する余裕があるならば、進入し、撒き土作業を行う。撒き土作業が終了した後は、その時点で切土区域にまだ運搬土が存在しているか否かを判断し、まだ存在していれば空車走行し再び積込区域に引き返す。

(3) 切土区域でのブルドーザのシミュレーションモデル (図—6)

ブルドーザについても、モータスクレーパと同様、まず投入台数と施工能力を指定し、リッピング作業が必要か否かを判断し、必要ならばリッピング作業を行い、その後、後進する。そこで、ほぐされた土がスクレーパの積込容量分の土量に達したならば、スクレーパの進入を許し、プッシング作業の準備を行う。ほぐされた土がスクレーパの積込容量分の土量に達していなければ、再びリッピング作業を行う。リッピング作業が必要でなければ、モータスクレーパが積込区域に到着しているか否かを判断し、到着している場合はプッシング作業を行う。そしてモータスクレーパの施工能力に応じたプッシング時間を経過した後、方向転換や後進を行い、次の作業に備える。モータスクレーパが到着していないときは、積込作業後の路面を整備したり、次のプッシング作業の段取りを行い、モータスクレーパが到着するまで待機する。

(4) 盛土区域でのブルドーザのシミュレーションモデル (図—7)

上記同様、まず、ブルドーザの投入台数と施工能力を指定し、モータスクレーパによって積載運搬され、撒かれた

土があるか否かを判断し、撒かれた土がある場合は敷均し作業を行う。そして、その撒かれた土を敷均すまで敷均し作業を行い、終了すれば方向転換や

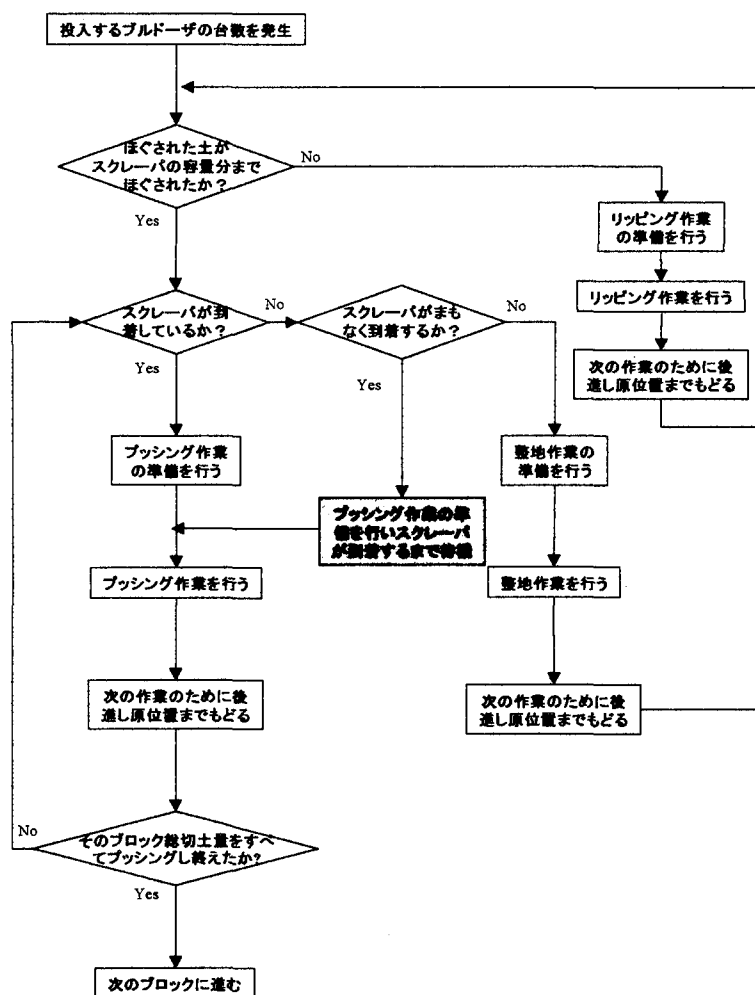


図-6 切土区域でのブルドーザのシミュレーションフロー

後進を行い、次の作業に備える。また、撒かれた土がない場合には、締固めなければならない土があるか否かを判断し、締固めなければならない土があるならば締固め作業を行う。締固めなければならない土がなければ、次の敷均し作業の段取りを行うか、または、土がスクレーパによって積載運搬されて、撒かれるまでそのまま待機する。

4. 土工シミュレーションモデルを導入した工程計画策定方法に関する検討

以上のように構築したシミュレーションモデルを用いて、各運土作業の実施スケジュールを検討するためには、各作業への土工機械系の配分計画の代替案を作成し、代替案それぞれのシミュレーション結果を比較することが必要である。なお、ここでの評価基準としては、工事費用をとりあげ、より安価な工程計画の策定をめざすこととしている。しかし、この配分計画の

代替案は膨大な数が考えられるため、すべての代替案に対してシミュレーション計算を実施することは不可能である。このため、各運土作業ごとに投入量を決定した上で、山崩し法などによって資源運用の実行可能性を確保する発見的なアプローチが採られていた。

以上のような問題認識のもと、本研究では、実行可能な計算量で概略レベルではあるが最適な計画案を作成できるモデル分析の方法を提案する。そこでは、2. で論述したカットネットワークの性質、すなわちここでの工程計画問題がカットネットワークにおける最適経路探索とその経路上における最適資源配分問題として変換できるという性質を活用することにより、新たな工程計画の策定方法を開発した。なお、その内容を各ステップごとに示せば、以下のようである。

ステップ1：カットネットワーク上で、現在検討しているカットに含まれている作業を対象として、投入可能な土工機械系の配分パターンを作成する。このとき、カット内での配分パターンは次のカットへ移るまで一定であるものと仮定する。また、配分パターン作成の原則として、次のようなルールを設定することとした。

①配分する土工機械系の単位としては、切土用ブルドーザ・運搬用モータスクレーパ・盛土用ブルドーザから構成される施工パーティを採用する。②投入可能な施工パーティの遊休は考慮せず、すべての施工パーティを配分する。③前のカットで既に実施されている作業の休止およびそこに配分されている施工パーティの移動は考慮せず、どの作業にも配分されていない施工パーティのみの移動を考え配分パターンを作成する。

ステップ2：ステップ1で作成した配分パターンそれぞれについて、後続するカット群のいずれかへの移行を決定する作業（群）が終了するまでシミュレーションを実行する。

ステップ3：ステップ2のシミュレーション結果により、現在検討しているカットにおける配分パターン p

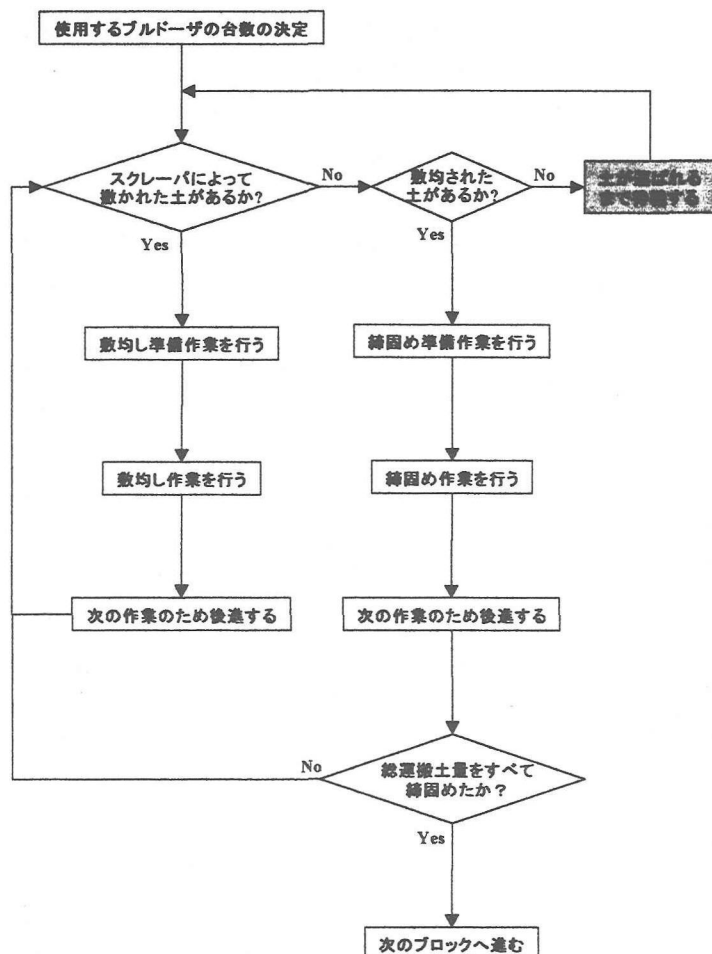


図-7 盛土区域でのブルドーザのシミュレーションフロー

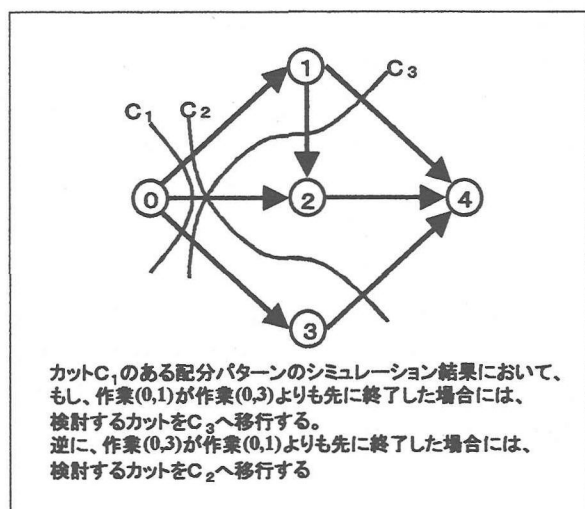


図-8 次へ移行するカットの決定

の所要費用 C_k^p を次式によって求める。

$$C_k^p = c^1 \sum_{i=1}^W t_{ik}^p + T_k^p \cdot W \cdot c^2$$

ここで c^1 ; 1日あたりの施工パーティの運転損料、 c^2 ; 1日あたりの施工パーティの供用損料、 W ; 投入可能な施工パーティ数、 t_{ik}^p ; カット k における配分パターン p での施工パーティ i の移動日数、 T_k^p ; カット k における配分パターン p の実施日数である。なお、 t_{ik}^p および T_k^p はステップ2でのシミュレーション結果から与えられる値である。そして、この所要費用を前のカットまでの費用に加算して、カット k までの所要費用を求める。また、工事の実施日数についても同様に求め、もし指定工期をオーバーしている場合には以降の探索を終了する。

ステップ4 ; カット k における配分パターン p のシミュレーションの終了を決定した作業 (群) がカット k に後続するどのカットへの移行を決定する作業 (群) であるかを調べ、移行すべきカットを決定する (図-8)。なお、このように各配分パターンそれぞれの後続カットを一意に決定することは、できる限り施工パーティの遊休を生じさせない運用計画のみを検討することを意味している。

以上のようなステップを運土作業間の技術的な順序すなわちカットネットワークおよび全体工事への投入施工パーティ数 W 等の各種の設定のともでカットネットワークの始点カットから終点カットに至るまで繰り返し、最も費用が安価となる配分パターンの時間的配列を求めるとともに、そのときのシミュレーション結果からこれまで設定してきた条件下での最適な作業実施スケジュールを作成する。

5. 例題工事への適用

ここでは、図-9のような、13の運土作業をもつ整地工事を対象として、本研究で開発した工程計画策定方法の適用を図る。なお、各運土作業の総土工量を表す土量配分計画は表-2のように求められているものとし、モータスクレーパならびにブルドーザに関する各種インプットデータとしては表-3～表-5のようなものを用いて適用計算を行った。

その結果、最小費用 70,320 (万円) が算出され、その時のカットネットワークの最適経路が図-10のように求められた。さらにこの時の作業実施スケジュールをバーチャート工程表ならびに資源山積み図として

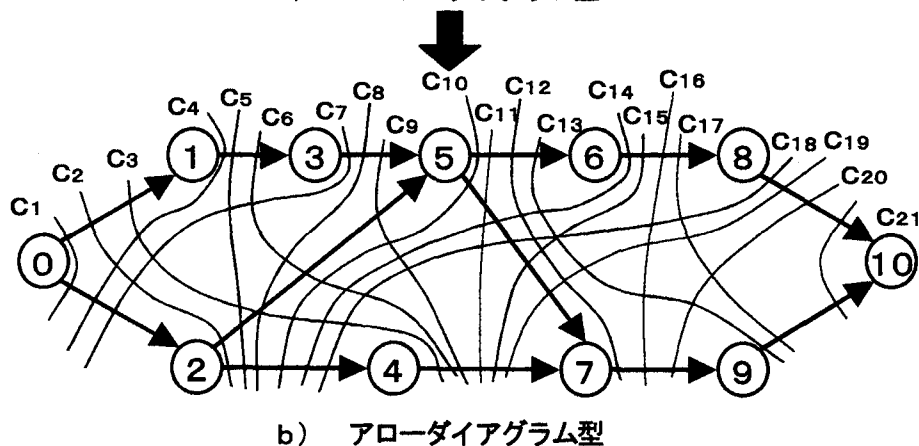
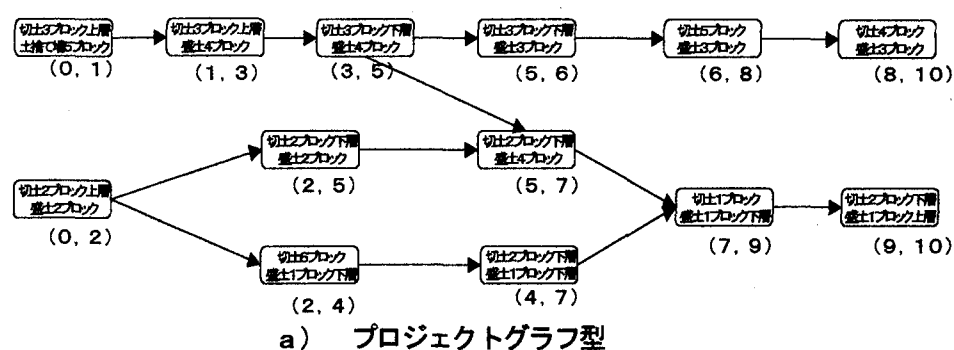


図-9 例題ネットワーク

表-2 土量配分計画

表一-2 工區配分計画				上段:運土量(m ³) 中段:運土距離(m) 下段:勾配(tan θ)					
		盛土1ブロック		盛土2ブロック	盛土3ブロック	盛土4ブロック	盛土5ブロック 土捨て場	各切土ブロック土量	
		上層ブロック	下層ブロック					各層の土量	
切土1ブロック			59200 243.00 0.1568					59200.00	
切土2 ブロック	上層ブロック			55570.00 151.00 0.1599				55570.00	118830.00
		3156.00	6302.00	38439.00	15363.00			63260.00	
	下層ブロック	261.00 0.0661	264.00 0.0988	108.00 0.0946	162.00 0.1241				
		切土3 ブロック	上層ブロック				41964.00 326.00 0.0983	36071.00 879.00 0.0595	
下層ブロック					1613.00 177.00 0.1023	19042.00 272.00 0.0855		20655.00	
	切土4ブロック					54845 165.00 0.14			54845.00
切土5ブロック						72080.00 278.00 0.0946			72080.00
		切土6ブロック		22600.00 429.00 0.0864					22600.00
	[各層の土量]		23591.00	67667.00	94009.00	12538.00	76369.00	36071.00	426245.00
各盛土ブロック土量			91258.00						

示したものが図-11と図-12である。

ここで、本システムの実際工事への適用上の問題を考察すれば、次のようなことが挙げられよう。まず第一に、本システムでは、所要費用を施工パーティの運転損料と共用損料のみで求めているため、算出結果の精度に問題がある。このため、今後においては、シミ

ュレートする現場動態に対応し、より現実的な費用を計算できる積算システムの構築と、その本システムへの統合化が必要と考える。第二としては、シミュレーションモデルにおいて各施工機械に与える走行速度や動作時間等のパラメータの精度の問題が挙げられる。これについては、今後、実際現場の調査を数多く行い、

表—3 モータスクレーパのインプットデータ

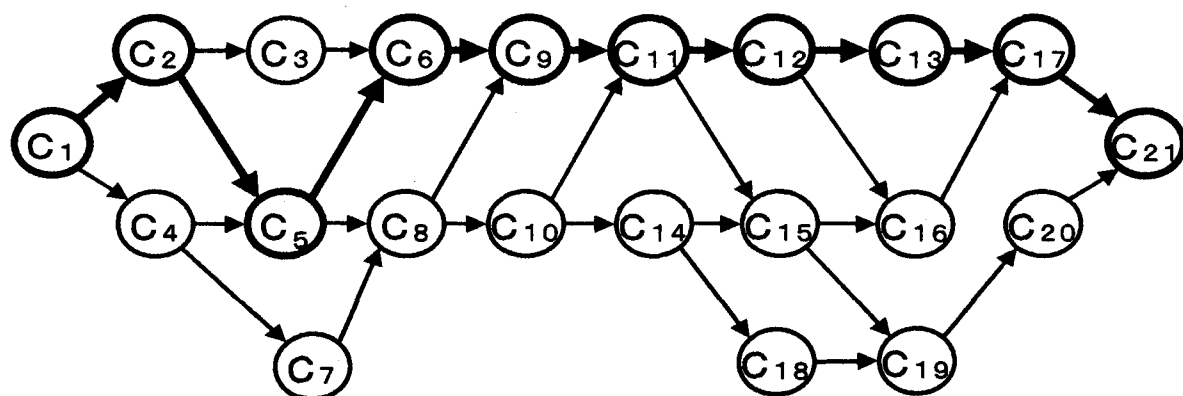
モータスクレーパ	11m ³ スクレーパ	16m ³ スクレーパ
積込み土量(m ³ /5sec)	1.286	1.583
撒き土土量(m ³ /5sec)	4.5	6.25
積載時速度(m/5sec)	各ブロックの運搬距離より計算	
空車時速度(m/5sec)		
積込み・撒き土体制に入る時間(5sec)	4	4
走行状態になる時間(5sec)	4	4
撒き土時間(5sec)	4	5
積込み時間(5sec)	14	16
1時間当り使用費用(円)	9,510	14,100
1日当りの存置費用(円)	44,600	66,200

表—4 掘削・リッピング用ブルドーザのインプットデータ

掘削・リッピングブルドーザ	21t	32t
プッシング準備(sec)	3	3
プッシング(sec)	スクレーパの機種により決定	
プッシング後進(sec)	3	4
1サイクルあたりプッシング土量(m ³)	スクレーパの機種により決定	
リッピング準備(sec)	3	3
リッピング(sec)	7	8
リッピング後進(sec)	3	4
1サイクルあたりリッピング土量(m ³)	1.143	1.25
整地準備	3	3
整地時間	5	6
整地後進	3	4
1時間当り使用費用(円)	5,680	7,180
1日当りの存置費用(円)	22,900	26,400

表—5 敷均し・締め固め用ブルドーザのインプットデータ

敷均し・締め固めブルドーザ	11tブルドーザ	21tブルドーザ
敷き均し準備(sec)	3	3
敷き均し(sec)	6	8
敷き均し後進(sec)	3	3
1サイクルあたりの敷き均し土量(m ³)	0.334	0.375
締め固め準備(sec)	3	3
締め固め(sec)	6	7
締め固め後進(sec)	3	3
1サイクルあたりの締め固め土量(m ³)	0.5	0.572
1時間当り使用費用(円)	2,330	4,640
1日当りの存置費用(円)	10,600	21,100



図—10 カットネットワークの最適経路

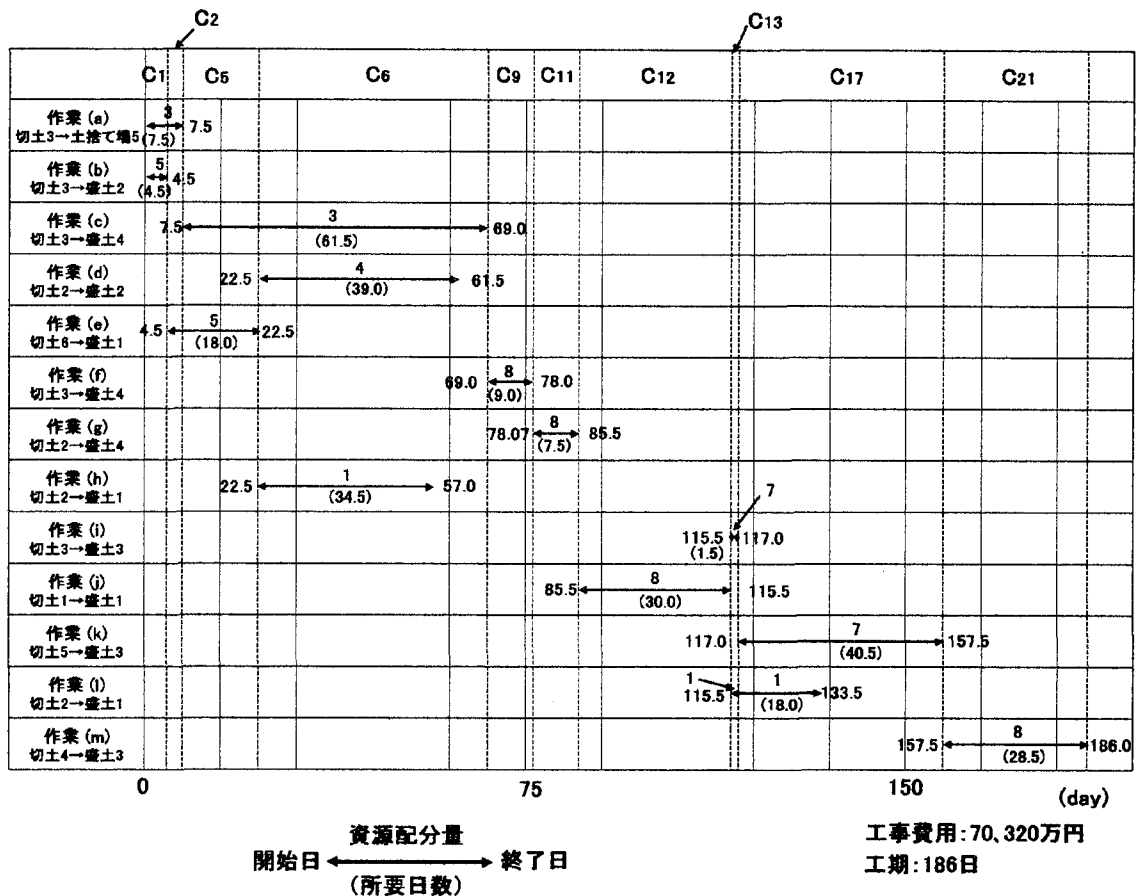


図-11 バーチャート図

(party)

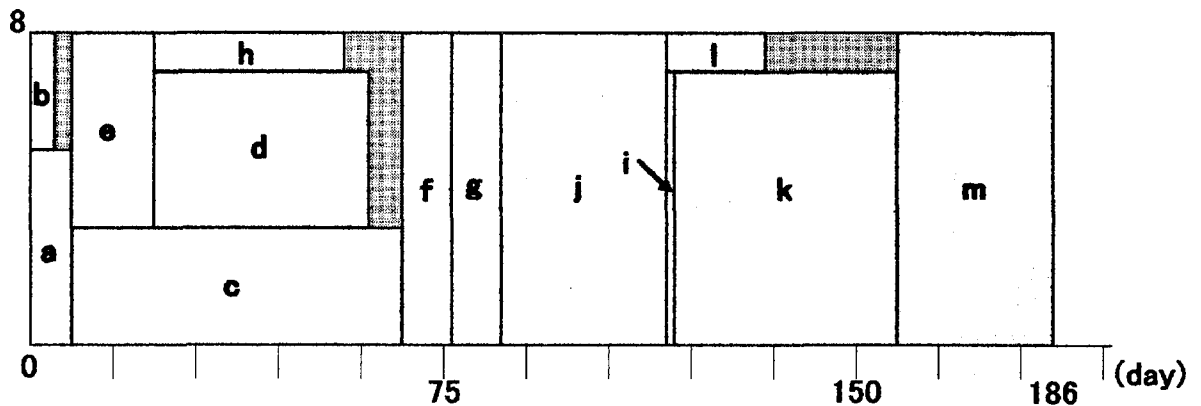


図-12 資源山積図

各機種の施工能力と現場条件の関係を分析し、より精度の高いパラメータ設定方法を確立していく必要があると考えている。

6. おわりに

本研究では、大規模整地工事を対象として、指定さ

れた工期内で工事を完了することのできる工程案の中で最も費用が安価となる、現有の土工機械系の運用計画と作業スケジュールを求めることのできる工程計画の策定方法を開発した。そこでは、問題をカットネットワークにおける最適経路探索とその経路上での最適な土工機械系の配分問題として捉えるとともに、ここでの単位作業である各運土作業の同時実施状態として

求められる各カットの状態を、土工シミュレーションモデルを導入することで、よりリアルに表現しながら解探索を進めることにより、所与の目的を達成し得る計画案の導出を試みている。

今後の課題としては、今回、前提条件として設定した土量配分計画、土工機械系の種類及びその投入量の変更が及ぼす、費用や工期への影響を数多くの適用計算とその結果の分析を通して明らかにしていく必要がある。また、シミュレーションモデルにおける運土作業表現の詳細化を図り、工事の進捗に伴う地形変化の時系列的表現ならびその変化に基づく運土ルートの設定が可能となるようなシステム化をめざしていくこととする。

参考文献

- 1) 春名攻, 滑川達: ネットワーク工程表の構造特性分析と最適工程計画モデル構築に関する理論研究, 建設マネジメント研究・論文集 vol.4, 1996
- 2) 春名攻, 滑川達: PERT/MANPOWER 問題の最適解法の開発研究—カットネットワークにおける最適資源配分問題への変換を用いた新しい解法—, 土木計画学研究・論文集 No. 15, 1998, pp41-48
- 3) 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, 1974, pp71-84
- 4) Wiest, J.D.: A Heuristic Model for Scheduling Large Project with Limited Resource, Management Science, Vol. 13 No. 6, 1967, pp. B-359-B-377
- 5) 坂本実: プロジェクト・ネットワーク上の資源配分問題—ヒューリスティック・プログラミングによる解—, IE, Vol. 14, No. 3, 197, pp. 101-108
- 6) 河原畑良弘他: PERT/Manpower プログラムの開発について, 奥村組技術研究年報, 第 1 号, 1975, pp41-50
- 7) 関根智明: PERT・CPM, 日科技連, 1975, 2
- 8) 山本幸司: 土木工事における施工計画のシステム化に関する研究, 京都大学学位論文, 1978, 11.
- 9) 石川六郎: システムズアプローチによる工事管理—主として土工工事について—, 鹿島出版会, 1977

施工シミュレーションモデルを導入した大規模整地工事の最適工程計画策定方法に関する研究

春名 攻, 滑川 達, 伊藤壮史

本研究では、大規模整地工事を対象として、指定された工期内で工事を完了することのできる工程案の中で最も費用が安価となる、現有の土工機械系の運用計画と作業スケジュールを求めることのできる工程計画の策定方法を開発した。そこでは、本研究でのこれまでの研究成果であるカットネットワークによる工程計画問題の変換方法を理論的基礎として、ここでの単位作業である各運土作業の同時実施状態として求められる各カットの状態を、土工シミュレーションモデルを導入してよりリアルな形で表現しながら、この同時実施状態（カット）の時間的連続構造として求められるカットネットワークの径路探索を進めることにより、所与の目的を達成し得る計画案を導出することを試みている。

A Study on Development of Scheduling Method for Optimal Planning of Large-Scale Earth-Moving Project Utilizing Simulation Model

Mamoru HARUNA, Susumu NAMERIKAWA and Takeo ITOH

In this study, it is aimed to develop a new type method for obtaining project scheduling with minimum cost under restrictions such as project duration and recourses on the large-scale earth-moving project. In this method optimal route on the cut-network is searched through the calculation of simultaneous execution-state among multiple activities included in the arbitrary independent-cut utilizing simulation model.