

マルチ建設プロジェクト計画検討のための効果的シミュレーションツールの開発

Study on Development of Available Tool for System Approach to Multi-Project Planning of Construction Project

立命館大学理工学部 春名 攻*

立命館大学大学院 滑川 達**

立命館大学大学院 ○川上俊幸***

By Mamoru HARUNA, Susumu NAMERIKAWA and Toshiyuki KAWAKAMI

我が国の経済状況はバブル経済崩壊の影響を受けて、地域経済・財政における諸問題が顕在化しており、投資拡大政策のもと進められてきた公共事業や開発整備事業の在り方に対しても厳しい見直しが要請されてきた。このような状況のもとで地方都市の発展や活性化をめざすならば、非常に限られた財源のもとで、従来の枠組みに縛られない新たなアイディアの積極的な導入も検討しながら、効果的で実効性のある都市・地域開発を計画していくための方法論の開発が、従来にも増して重要となってくるものとする。

以上のような認識のもと、我々はこれまで地方都市における総合的都市開発・基盤整備における数多くの事業間スケジュールの問題を取り上げるとともに、その効果的検討ツールとしてマルチプロジェクトプランニング&スケジューリングモデル開発を進めている。本研究では、さらに問題の対象を各事業の建設段階にまで広げるとともに、マルチ建設プロジェクト計画として検討を加えることにより、十分な実行可能性を確保した上で、建設段階でのコスト低減化のための方策を先取りの取り入れた事業実施計画策定のための方法論の構想化とそこでの効果的シミュレーションツールとなるマルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデルの開発をめざしたものである。

キーワード：大規模土地開発事業 マルチ建設プロジェクト計画 シミュレーション

1. はじめに

従来の我が国の開発事業や公共施設の整備は、それぞれ独立した事業や施設建設として行われることが多かった。しかし、これら事業・建設の結果として開発される地区や施設を総合的に関係づけたり、利用計画を準備して人々や企業の多様なニーズに応えなければ、その開発効果や整備効果は小さなものに終わってしまうことも明らかになってきている。その意味で各都市・各地域で総合発展計画が作成され、総合効果（ある意味では相乗効果）を追求するようになってきている。しかし、現実の事業化の段階での財源の問題や計画化の調整の遅れのため、事業が同時に行われることが少なく、せっかくの総合計画も大きな効果をあげられないでいる状況である。

本研究では、以上のような認識のもと、これまで複数の基盤整備、都市施設プロジェクトを対象とし

て、それらプロジェクト群の実施順序如何によって変化する動的な都市の状態をシミュレートしながら、合理的でかつ効果的な事業実施スケジュールを求めることができるマルチプロジェクトプランニング&スケジューリングモデルを開発した。また、このようなマルチプロジェクト化の問題の中でも、建設段階の問題に着目したシミュレーション分析的な研究も行っている。そこでは、プロジェクト間の共同・協調のもとで、「建設土」を一体的に取り扱った場合の費用低減効果についての実証的な研究を行ってきた。

このため、本研究においては、ここでの研究目標を上記研究成果をふまえて以下のように設定することとした。すなわち、前述のマルチプロジェクトプランニング&スケジューリングモデルが対象としていような事業化レベルでの検討問題において、建設プロジェクト段階での問題解決への先取りの検討を合理的に行うことのできる効果的なシミュレーションツールの開発をめざすこととした。そこでは、まず事業化レベルを分析対象としたマルチプロジェクトプランニング&スケジューリングモデルと建設

*理工学部環境システム工学科 077-561-2736

**理工学研究科総合理工学専攻 077-561-2736

***理工学研究科環境社会工学専攻 077-561-2736

レベルを分析対象とする上記シミュレーションツールという異なる計画検討レベルの分析を混成したプロセス間によるハイブリッド型モデルの開発構想を明らかにする。さらに、このような建設プロジェクト段階のより具体的で先取りの分析検討機能をもたせることをねらったシミュレーションツールに対しては、各個別建設プロジェクト実施の実行可能性を十分に確保した形で、合理的かつ効果的に工事費用の低減化を追求することのできるマルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデルとして開発していくこととする。

2. 総合的システムアプローチの構想とこれまでの研究成果

(1) 都市施設・基盤整備計画問題を対象とした総合的システムアプローチの構想化

さて、本研究におけるアプローチの基本姿勢は、都市・地域計画における明確な計画化・事業計画・実施過程の認識と、下流部の実現化過程における課題の先取りの検討およびその情報の上流部での計画的検討への利用方法とそのシステムの構築にある。このため、本研究では、特に都市施設・基盤整備計画の問題を取り上げるとともに、都市・地域計画の計画的検討プロセスの流れに従いながら、都市施設・基盤整備計画の実現化のために構想された複数プロジェクト全体及びその構成要素となる各種個別プロジェクトそれぞれの事業化、建設段階での計画課題やプロジェクト間の関係に関する先取りの分析・検討機能を中核に据えた図-1のような総合的なシステムアプローチの方法論を構想化した。そして、現在、このようなシステムアプローチのもとに各種のシステムモデルの開発研究を実施中である。

以下においては、図-1におけるマルチプロジェクトプランニング&スケジューリングモデルおよび

マルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデルの開発に関係の深いこれまでの本研究における研究成果を簡単にとりまとめておくこととする。

(2) マルチプロジェクトプランニング&スケジューリングモデルの開発研究

ここでの研究では、まず複数の基盤整備、都市施設プロジェクトの実施とその実施順序如何によって大きく変化する各期の都市状態をシミュレートすることをめざした。ついで、それらの変化に十分対応した形での合理的でかつフィージブルな各種プロジェクトの実施順序を検討できる最適スケジューリングモデルの開発へと進んだ。また、このスケジューリングモデルに内蔵される都市状態のシミュレーション分析においては、「投資による都市社会・経済の活性化→それによる財政規模の拡大→さらなる効果的投資による都市環境の向上」という各種効果の循環のもとでの望ましい都市の成長過程を考察することとしている。さらに、地方債発行額や民間資金の導入などの各種政策とともに、シミュレートする成長過程の状況を総合的に検討することが可能となるシミュレーションモデルの構築をめざすこととした。以下においては、このような方針のもとに開発を試みたマルチプロジェクトスケジューリングモデルの内容を具体的に示していくこととする。

ここでは、まず図-2に示したような考え方のもとに設定される最も基本的な整備順序が、プロジェクトをアクティビティとしたネットワークとして与えられているものとしてここでの定式化が展開されている。

まず、各種プロジェクトの実施に際しては、全体としてのコストを最小にしたいという行政側の意図が存在するものと考えた。そして、このような問題は物価上昇等の関係より、すべてのプロジェクトを

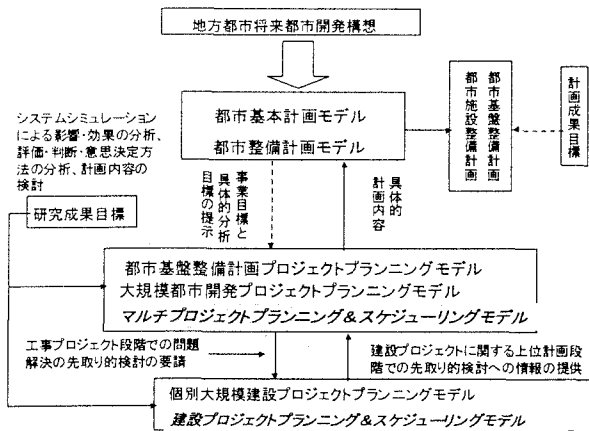


図-1 都市総合整備へのシステムアプローチ

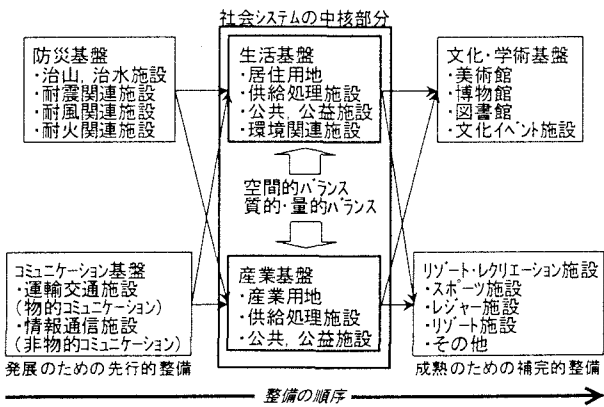


図-2 都市基盤施設の整備順序における基本方針

出来る限り早期に実施へと移していく問題と同義となり、結果として全体のプロジェクト期間の最小化問題に帰着することがわかる。しかし同時に、行政はそのときの財政規模に応じたプロジェクトへの投資を行わなければならないことはいうまでもなく、この場合問題となるのはその返済規模であることも明らかである。このため、ここでは単年度返済費用の上限を、当該年次の投資的財源との関係のもと十分考慮することとした。また、行政はこの他にもいくつかの計画達成目標を有しているものと考えられるが、ここでは「各年度ごとに目標人口規模があり、その際各産業の就業人口比率は、目標する最低構成比率以上でなければならない。また、各産業の分配所得は前年度に対して低下させない」という達成目標が存在するものと考え、これを制約化した。

ここで、プロジェクトネットワークスケジューリング問題として、以上の問題を定式化すると、以下のようにあらわせる。

$$\text{Minimize } \lambda(\delta_y^i) \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{y=1}^{\lambda} \delta_y^i = Z_i \text{ for all } i \quad (2)$$

$$\sum_{y'=1}^{\lambda} \delta_{y'}^u = z_i \text{ for all } i \quad (3)$$

$$\text{if } \delta_{y_1-1}^i = 0 \cap \delta_{y_1}^i = 1 \text{ and } \delta_{y_2}^i = 1 \cap \delta_{y_2+1}^i = 0$$

$$\text{then } \sum_{y=y_1}^{y_2} \delta_y^i = Z_i \text{ for all } i \quad (4)$$

$$\text{if } \delta_{y_1'-1}^u = 0 \cap \delta_{y_1'}^u = 1 \text{ and } \delta_{y_2'}^u = 1 \cap \delta_{y_2'+1}^u = 0$$

$$\text{then } \sum_{y'=y_1'}^{y_2'} \delta_{y'}^u = z_i \text{ for all } i \quad (5)$$

(但し、 $y_1 = y_1'$)

$$h(y) \geq aP(y) \text{ for all } y \quad (6)$$

$$\sum_i \delta_{y'}^u r_{y'}^i \leq M(y') \text{ for all } y' \quad (7)$$

$$r_{y'}^i = \{(1+e)^{z_i} (1+b)^{y'} C_i\} / z_i$$

$$\text{(但し、} \delta_{y_1'-1}^u = 0 \cap \delta_{y_1'}^u = 1) \quad (8)$$

$$P(y) \geq P_y \text{ for all } y \quad (9)$$

$$P_n(y) / \sum_n P_n(y) \geq \alpha_n \text{ for all } n, y \quad (10)$$

$$W_n(y) \geq W_n(y-1) \text{ for all } n, y \quad (11)$$

$$\text{if } \delta_y^i = 1 \cap \delta_{y+1}^i = 0$$

$$\text{then } Q_k(y) \geq q_{ik} \text{ for all } i, k, y \quad (12)$$

$$\text{if } \delta_y^i = 1 \cap \delta_{y+1}^i = 0$$

$$\text{then } P(y) \geq p_i \text{ for all } i, y \quad (13)$$

$$\text{if } \delta_y^i = 1 \cap \delta_{y'}^i = 1$$

$$\text{then } R_{ii'} = 0 \cap R_{i'i} = 0 \quad (14)$$

ここで、 $\lambda(\cdot)$ ：全プロジェクトを通しての実施期間、 δ_y^i ：プロジェクト*i*が*y*年次に実施していれば1、そうでなければ0を表すクロネッカーデルタ、 s ：プロジェクトの開始時期、 δ_y^i ：プロジェクト*i*が*y*年次に返済が必要であれば1、そうでなければ0を表すクロネッカーデルタ、 Z_i ：プロジェクト*i*の必要実施年数、 z_i ：プロジェクト*i*の設定返済年数、 $h(y)$ ：*y*年次における住宅資本ストック、 a ：1人当たりの平均住宅床面積、 $P(y)$ ：*y*年次の総人口、 $r_{y'}^i$ ：*y'*年次にプロジェクト*i*を開始した場合の単年度返済費用、 e ：利子率、 b ：物価上昇率、 C_i ：現在（0年次）価値で見積もったプロジェクト*i*の総費用、 $M(y')$ ：*y'*年次の投資的財源、 P_y ：*y*年次の達成目標人口、 $P_n(y)$ ：*y*年次における*n*業種（第*n*次産業）の就業人口、 α_n ：目標設定された全就業人口に対する第*n*次産業就業人口の最低構成比率、 $W_n(y)$ ：*y*年次における第*n*次産業就業者の分配所得、 $Q_k(y)$ ：*y*年次における*k*種類の社会資本ストック、 q_{ik} ：プロジェクト*i*の経営が成立するために最低限必要と予測される*k*種類の社会資本ストック、 p_i ：プロジェクト*i*の経営が成立するために最低限必要と予測される人口規模、 $R_{ii'}$ ：プロジェクトネットワークにおける可達行列の構成要素、を表す。

なお、上記定式化における $h(y)$ 、 $P(y)$ 、 $M(y')$ 、 $P_n(y)$ 、 $W_n(y)$ 、 $Q_k(y)$ の値は、概略的ではあるが図-3に示したフローにもとづくシミュレーションモデルによって求めることとしている。すなわち、本モデルは、多くの都市開発事業の実施計画を、それらの実施スケジュールも含めて総合的かつ計画論的・マネジメント論的に検討するために、最適スケジューリングモデルと計画内容に関連する都市状態を表すシミュレーションモデルとのハイブリッド型モデルとして構築されている。

さらに、上記定式化に対しては、我々がこれま

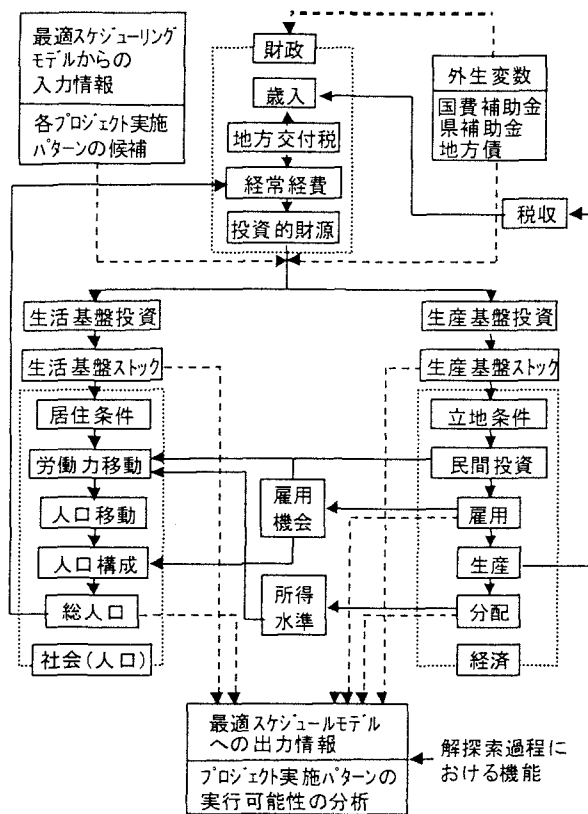


図-3 シミュレーションモデルの主要関連構造

で検討を重ねてきたネットワークのトポロジカルな特性に着目した構造分析に関する研究成果をベースとした最適解法も既に開発している。

なお、本研究では、このマルチプロジェクトプランニング&スケジューリングを滋賀県米原町都市計画マスタープランで構想されている60のプロジェクトに適用している。その結果求められた事業実施スケジュール案とそれにとまう人口変動予測を図-4および図-5に示しておく

(3) マルチ建設プロジェクト計画検討のための概略的シミュレーション実験

ここでは、図-1に示したマルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデルの開発研究を念頭に置いて行ってきた基礎分析の成果を示しておくこととする。なお、この基礎分析は、以下のような認識もと研究を進めたものである。

近年の社会・経済的な変化に伴い、都市基盤づくりに貢献してきた土木事業を取り巻く環境も大きく変化してきた。建設プロジェクトに対する国民の要求として、より低廉で高品質なものが望まれている。

このような状況の中で、建設会社各社は独自に生産性の向上やコストダウンといった課題に取り組んできた。しかし、現行の建設プロジェクトにおける

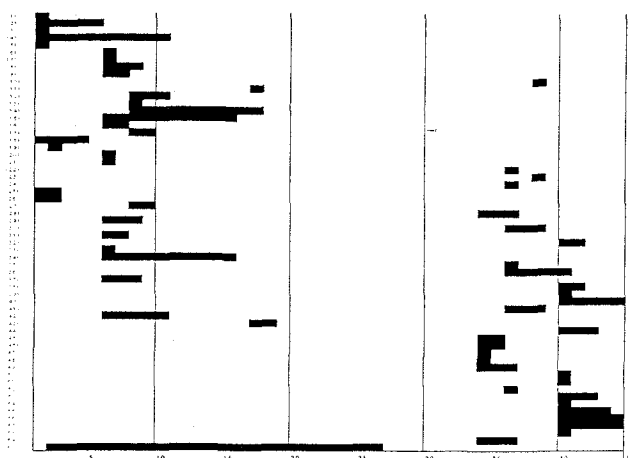


図-4 米原町におけるプロジェクトスケジュール

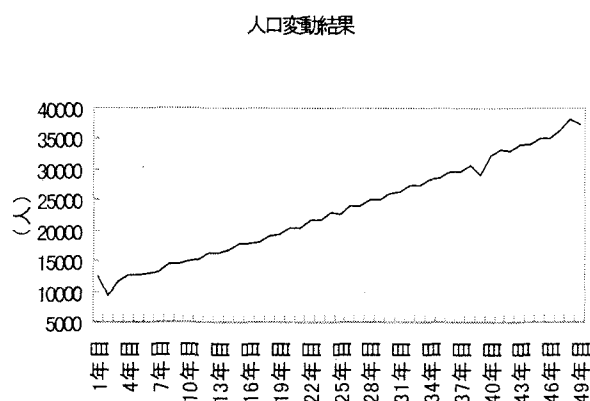


図-5 人口変動予測結果

個別での工事实施という枠組みの中では限界があるものと考えた。そこで、本研究では、総合的都市・地域開発事業における一連の事業を取り上げ、プロジェクト群トータルとしての効果を狙うマルチ建設プロジェクトマネジメントの方法についての研究を行った。

実際に、マルチ建設プロジェクトマネジメントとしての共同化・協調化を行う際の検討項目は非常に多岐にわたる。本研究では、このような研究の第一ステップとして考えられる建設プロジェクトの成否の鍵を握る建設事業費の低減の問題に着目し、この事業費の大半を占める建設工事費縮減の方策に焦点を当てて研究を進めることとした。

さて、建設プロジェクトの工事施工段階における共同化・協調対象は、「人」、「施工機械」、「建設土」、「建設情報」等々が考えられる。本研究では、地方部における大規模都市・地域開発を事例として取り上げることとしたため、特に問題の大きい「建設土」の処理問題に焦点を当てることとした。すなわち、各工事現場での盛土調達・残土処分に要する費用が総工事費用の中で大きな部分を占めるにもかかわらず

ず、これまで各プロジェクトごとに実施されてきた土量バランス調整を、プロジェクト全体で行うマルチ建設プロジェクト計画システムの開発研究を行った。そして、マルチ建設プロジェクト計画システムの開発にあたっては、プロジェクトスケジュール変更等をシミュレーションモデル的に取り扱い、プロジェクト個別の工事費用の算定までを可能とした。なお、このシステムフローを図-6に示しておく。また、このマルチ建設プロジェクト計画システムを前述のマルチプロジェクトプランニング&スケジューリングモデルと同様、滋賀県米原町に適用した結果を図-7に示しておくこととする。

3. 効果的シミュレーションツールとしてのマルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデルの開発方針

(1) マルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデル開発における基本的考え方

本研究で開発をめざすマルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデルは、前述の図-1に示したシステムアプローチの考え方にもとづいて行うこととする。

すなわち、事業化レベルでの検討問題において、工事プロジェクト段階での問題解決への先取り

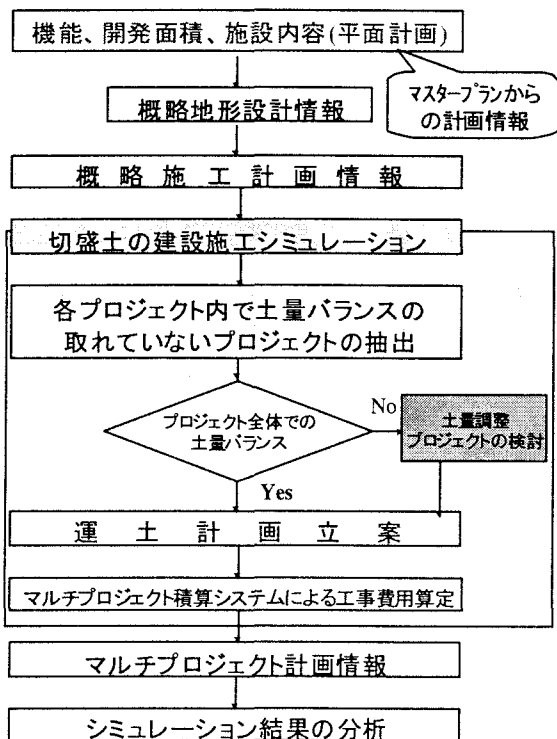


図-6 マルチ建設プロジェクト計画システムの構成

的な検討を合理的に行うことのできるシミュレーションツールの開発をめざすこととする。

特に、ここでは計画上流部としての事業化レベルを対象として開発した前述のマルチプロジェクトプランニング&スケジューリングモデルとの関係を十分に考慮してマルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデルの開発研究を行うこととした。

以上のような観点から本研究で開発したマルチプロジェクトプランニング&スケジューリングモデルのアウト・プットである事業実施スケジュール案を眺めてみれば建設段階の検討が十分にふくまれていないため、確実に実行可能性が確保されたスケジュール案になっているとはいえない。したがって、このような建設段階の先取的検討機能を有するシミュレーションツールを開発し計画上流部問題としてのマルチプロジェクトプランニング&スケジューリングモデルに統合化することが効果的であると考えた。以下に統合化に関する考え方を述べる。

ここに、事業化レベルの計画問題と建設レベルの計画問題は事業費(工事費)と実施期間(施工期間)の情報により密接な関係を構成している。すなわち建設レベルの検討の結果、具体的に明らかとなる工事費用は、事業費の大半を占めており、このため工事費用の変化は、当然個別事業計画に大きな影響を与える。そして、このことは事業化レベルの検討を行うマルチプロジェクトプランニング&スケジューリングモデルのインプットデータ(各プロジェクトの事業費・実施期間)が変化することを示しており、

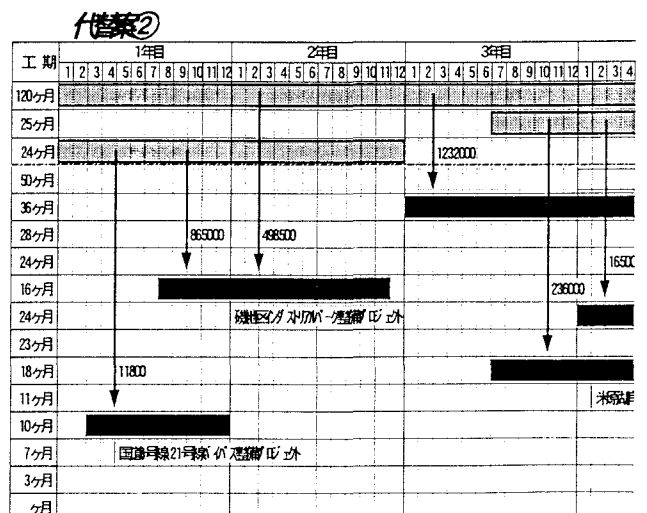


図-7 マルチプロジェクト計画システムの適用結果

その結果、建設レベルでのコストダウンの努力によって、アウトプットである全体事業スケジュールも変化することとなる。

このため、上述のモデル統合化のアプローチとしては、計画的検討プロセスにおける上流部・下流部間での計画情報のサイクリックなやりとりを中心とするハイブリッド型モデルの構築をめざすこととした。さらに、このような建設プロジェクト段階のより具体的で先取りの分析・検討においては、その実効性の確保のみならず、できる限りの工事費用の低減化を追求しておくことが重要と考える。このような工事費用低減化の問題に対しては、前述のマルチ建設プロジェクト計画システムによるシミュレーション分析の結果により、大きなコストダウン効果を検証することができたマルチ建設プロジェクト化の考え方を積極的に導入していくこととしている。図-8に、上述したハイブリッド型モデルの構成を図化したものを示しておく。図-8をみても容易に理解できるように、本論文において、以降開発を進めるマルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデルは、このハイブリッド型モデルのサブモデルとして位置づけられるものである。

またここでの、シミュレーション結果をもとに開発を行うモデルの対象は、土工事を伴い、大規模にプロジェクト内の土量バランスに不均衡が生じると同時に、マルチプロジェクト計画に参画することで高い費用低減効果が見込まれるプロジェクト群である。

ここで、開発をめざすマルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデルと前述のマルチプロジェクトプランニング&スケジ

ューリングモデルとの関係をより具体的に示せば以下のようなものである。

さて、マルチプロジェクトプランニング&スケジューリングモデルが対象としている個別プロジェクトの全体必要期間とマルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデルの操作対象区間の関係を示したものが図-9である。すなわち、個別プロジェクト全体の必要期間は、建設プロジェクト期間とそれ以外の施設運用準備期間などの期間から構成される。そして、このうち建設プロジェクト期間は、基本的に造成工事期間と構造物工事期間から構成されることができると考えることができる。さらに本研究では、建設土のプロジェクト間運用実施を前提としているため、この造成工事期間がプロジェクト内で土のやりとりを行う個別建設プロジェクトマネジメント期間と複数現場間で建設土の運用を検討する必要があるマルチ建設プロジェクトマネジメント期間に分割できるものと仮定した。そして、以降においては、マルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデルの操作対象区間をこのマルチ建設プロジェクトマネジメント期間として議論を進めていくこととする。したがって、マルチプロジェクトプランニング&スケジューリングモデルによるスケジュール案が求められたならば、このマルチ建設プロジェクトマネジメント期間のスケジュール枠が一意に設定できることとなる。

つづいて、マルチ建設プロジェクト計画問題における全体費用について考察を加えることとする。ここでは、上述したように問題の対象を複数工事間の建設土運用にかかわる期間に限定しているため、マルチ建設プロジェクト計画実

施に伴うトータルコストは以下のように構成されることができると考えることができる。

$$Z = \sum_j^N C_j^r(\lambda_j) + C^s(\lambda) + C^T \quad (15)$$

ここで、 $C_j^r(\lambda_j)$ ：個別建設プロジェクト j の工事費用、 $C^s(\lambda)$ ：ストックヤードの管理費用、 C^T ：建設土の運搬費用、 λ_j ：個別建設プロジェクト j の所要時間、 λ ：マルチ建設プロジェクト計画全体所要時間を表す。なお、ここでは $C_j^r(\lambda_j)$ および $C^s(\lambda)$ は各種所要時間に関する非減少の費用関数として既に求められているものと仮定している。これは、同時に各プロジェクトに投入する機械が既に決定し

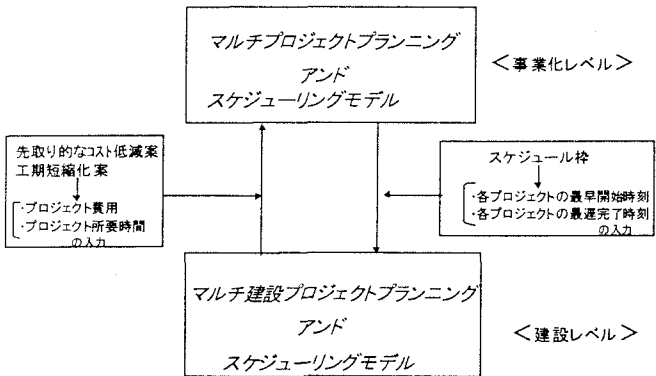


図-8 ハイブリッド型モデルの構成

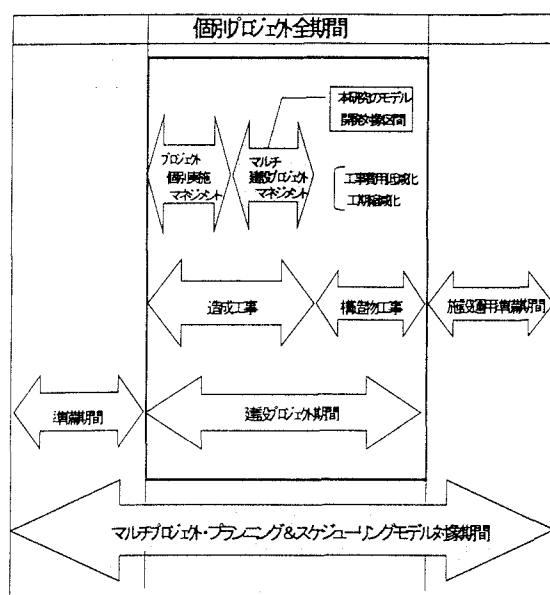


図-9 プロジェクト期間の構成

ており、その変更も考えないという仮定をおいていることを意味する。これにより時間短縮が費用低減化の方向に向かうと考えている。そして本研究では、マルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデルを上述のような非常に限定的な仮定のもとであるが、個別建設プロジェクト工期および全体工期の短縮を通して、このトータルコストを最小化するような建設土運搬スケジュールを求める数理計画モデルとして定式化していくこととする。また、以上示してきたモデル開発に関する基本方針は、建設プロジェクト段階の先取的分析・検討ツールの開発研究のための第一ステップとしての問題設定であることを断っておく。すなわち、今後の課題としては、図-1にも示した個別大規模建設プロジェクトプランニングモデルの開発と、マルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデルとの統合化を通して、図-9における建設プロジェクト期間全体を検討対象とし、そこでの機械選定も含めた、より詳細な建設プロジェクト情報を上位計画段階へ提供できるシミュレーションツールへと発展させていく必要があると考えるが、現状の数学的技術ではこのような最適解の探索を実施するのは困難であるため、ここでは、このような問題設定のもとで費用低減化の方向を目指すこととした。

(2) マルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデルの前提条件に関する検討

ここでは、マルチ建設プロジェクトプランニング&スケジュールリングモデルの定式化に先立ち、モデル開発上の前提条件を明確にしておくこととする。

a) 対象プロジェクト選定に対する考え方

マルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリング問題の中で対象となるプロジェクトは以下のような方針にもとづいて選定されているものとする。

すなわち、まず都市・地域計画の実現化のために、マルチプロジェクトプランニング&スケジューリングモデルで取り上げたプロジェクト群のうち、各プロジェクト独自の土量バランス調整計画の結果、大きなアンバランスが生じ、盛土調達・残土処分に要する費用が大きくなることが予想されるプロジェクトを抽出する。

b) 土量調整プロジェクト設定に対する考え方

マルチ建設プロジェクト化を行った際にもなお、運土スケジュール・土量等で土量バランスのとれていない場合が想定される。このため、ここでは土量調整プロジェクトの設定が既に検討されていることとする。すなわち、都市計画マスタープラン等の策定段階で、二次的に検討されているプロジェクトの導入により土量バランスがはかれる際には、これを土量調整機能を果たすプロジェクトとして計画化し、問題に追加設定されていることとしている。

c) スtockヤードの設定

建設土の運搬を行うプロジェクト間のスケジュールの不一致、単位時間当りの搬出・搬入土量の相違等により、対象地域内の土量バランスが確保されても、プロジェクト間で直接運搬を行うことが困難な場合が想定される。このような場合には、建設土の仮置き場としてのストックヤードを設定する。なお、後述するマルチプロジェクトプランニング&スケジューリングモデルにおいては、設定したストックヤードの位置やストック土量制約、単位時間当りの管理費用が既に与えられているものとする。

4. マルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデルの定式化

(1) 問題の定式化に関する検討

ここでは、これまで本論文において考察を加えてきたマルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデルの定式化を行うこととする。

まず、前述した各プロジェクトで使用する投入機械を変更しない仮定のもとマルチ建設プロジェクトに伴うトータルコスト最小化問題の目的とする。しかし、各プロジェクトで同時間に使用できる各種建設機械台数には施工空間などの関係による施工効率上の制限が存在する。また、マルチ建設プロジェクト化による工事間の建設土運搬に際しては、多くのダンプトラックが必要となることが考えられる。このため、このダンプトラックが対象地域内の交通状況に悪影響を与えないよう路線ごとにダンプトラックの混入量に制約を与える。なお、個別プロジェクトの造成工事の途中停止は認めず、工事実施のスケジュール枠は、上位計画問題であるマルチプロジェクトプランニング&スケジューリングモデルの計算結果から与えられているものとする。また、ここでの単位時間は、造成工事にかかわる現実の施工管理行為が実行可能な期間とし、1週間程度と仮定している。

以上の内容をプロジェクトネットワーク土量配分問題として定式化すれば、以下のように表すことができる。

Minimize

$$\begin{aligned} Z(KV_t^j, MV_t^j, \lambda_j, \lambda) \\ = C^P(KV_t^j, MV_t^j, \lambda_j) \\ + C^T(KV_t^j, MV_t^j) \\ + C^S(KV_t^j, MV_t^j, \lambda) \end{aligned} \quad (16)$$

subject to

$$\sum_{i=1}^k KV_i^j = KV^j \quad \text{for all } j \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^k MV_i^j = MV^j \quad \text{for all } j \quad (18)$$

$$\text{if } KV_{t_1}^j \neq 0 \cap KV_{t_1+1}^j = 0 \quad \text{then}$$

$$\sum_{i=1}^k KV_i^j = KV^j \cap t_1 \leq t_{end}^j \cap t_1 - \lambda_j \geq t_{start}^j \quad \text{for all } j \quad (19)$$

$$\text{if } MV_{t_2}^j \neq 0 \cap MV_{t_2+1}^j = 0 \quad \text{then}$$

$$\sum_{i=1}^k MV_i^j = MV^j \cap t_2 \leq t_{end}^j \cap t_2 - \lambda_j \geq t_{start}^j \quad \text{for all } j \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N KV_i^j = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N MV_i^j \quad (21)$$

$$0 \leq SV_t \leq SV \quad \text{for all } t \quad (22)$$

$$SV_t = (SV_{t-1} + \sum_{j=1}^k KV_t^j) - \sum_{j=1}^N MV_t^j \quad (23)$$

$$\sum_{b=1}^N M_t^{jb}(KV_t^j, MV_t^j) \leq M^{jb} \quad \text{for all } t, b \quad (24)$$

$$\sum_{j=1}^N D_{t,r}^j(KV_t^j, MV_t^j) \leq D_r \quad \text{for all } t, r \quad (25)$$

$$\lambda_j \leq P\lambda_j \quad \text{for all } j \quad (26)$$

$$\lambda \leq P\lambda \quad (27)$$

ここで、 $Z(\cdot)$ ：工事費用、 $C_j^P(\lambda_j)$ ：プロジェクト全体にかかる工事費用、 $C^T(\cdot)$ ：建設土の運搬にかかわる費用、ストックヤードにかかわる費用、 λ_j ：プロジェクト j の工期、 λ ：プロジェクト全体の工期、 $KV_{\max}^j$ ：プロジェクト j の単位時間当りの最大建設残土排出量、 $MV_{\max}^j$ ：プロジェクト j の単位時間当りの最大調達土処理量、 t_{start}^j ：プロジェクト j の開始時刻、 t_{end}^j ：プロジェクト j の終了時刻、 SV_t ：時間 t におけるストックヤード土量、 $M_t^{jb}(\cdot)$ ：時間 t におけるプロジェクト j の投入機械 b の台数、 M^{jb} ：対象地域において同時間に調達できる投入機械 b の制約台数、 M^{jb} ：プロジェクト j における投入機械 b の制約台数、 $D_{t,r}^j$ ：時間 t におけるプロジェクト j のルート r を通る大型車両台数、 D_r ：ルート r の大型車可能通過量、 $P\lambda_j$ ：個別建設プロジェクト j における制約工期、 $P\lambda$ ：マルチプロジェクト計画全体の制約実施期間を表す。また、 $C^T(\cdot)$ 、 M_t^{jb} 、 $D_{t,r}^j$ は後述するシミュレーションシステムによって求められることとなる。

なお、このように定式化されたマルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデルは、前述のマルチプロジェクトプランニング&スケジューリングモデル同様、ネットワークのトポロジカルな特性に着目した構造分析をベースとする上記定式化のカットネットワーク上での求解可能な最適資源

配分問題への変換方法を用いて、DP手法を適用した最適解法により最適解を求めることができる。このような最適解法については基本的に同様の理論展開が参考文献6)に詳しく示してあるので、参照していただきたい。

(2) 各種投入機械台数および建設土運搬費用算定シミュレーションシステムに関する検討

ここでは、上記定式化の解探索の過程で候補となる計画変数値、すなわち各プロジェクトの時間 t における建設残土排出量 KV_t^j 、必要調達土量 MV_t^j をインプットデータとして各種投入機械台数 $M_t^{jb}()$ および建設土運搬費用 $C^T()$ を算定するシミュレーションシステムについて述べることとする。

なお、本研究で開発したマルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデルでは、前述したように造成工事のみを取り扱っているため、ここでの投入機械としては、掘削用ブルドーザ、積込用バックホウ、運搬用ダンプトラック、敷均用ブルドーザ、締固用タイヤローラを考慮することとした。

a) 掘削用ブルドーザ台数の算定

掘削用ブルドーザの台数を以下のように求める。

掘削用ブルドーザ台数 = $\frac{KV_t^j}{8(\text{時間}) \times Q_a \times 6(\text{日})}$ (28)

$Q_a = \frac{60 \cdot q \cdot f \cdot E}{C_m}$ (29)

$C_m = 0.027l + 0.78$ (30)

ここで、 Q_a : 運転1時間当たり掘削押土土工量、 q : 1サイクル当たり押土距離、 f : 土量換算係数、 C_m : 1サイクルの所要時間、 l : 平均掘削押土距離、 E : 作業効率を表わす。

b) 積込用バックホウ台数の算定

積込用バックホウの台数を以下のように求める。

積込用バックホウ台数 = $\frac{KV_t^j}{Q_c \times 6(\text{日})}$ (31)

ここで、 Q_c : 日当り施工量 (表一1にもとづいて決定) を表わす。

表一1 日当り施工量 (バックホウ)

作業の種類	名称	規格	土質名	単位	数量	
					障害なし	障害あり
地山の掘削用積込	バックホウ運搬	排出ガス対策型油圧式ローラ型0.6m ³	け質土・砂・砂質土・粘性土	m ³	300	190
			岩塊玉石	m ³	230	140
		排出ガス対策型油圧式ローラ型1.0m ³	け質土・砂・砂質土・粘性土	m ³	500	320

様々な状態の積込	バックホウ運搬	排出ガス対策型油圧式ローラ型0.6m ³	け質土・砂・砂質土・粘性土	m ³	410	260
			岩塊玉石・岩 (破砕)	m ³	310	260
		排出ガス対策型油圧式ローラ型1.0m ³	け質土・砂・砂質土・粘性土	m ³	520	
			岩塊玉石・岩 (破砕)	m ³	440	
		排出ガス対策型油圧式ローラ型0.35m ³	け質土・砂・砂質土・粘性土	m ³	160	
			岩塊玉石・岩 (破砕)	m ³	130	
床掘 (作業土工)	バックホウ運搬	排出ガス対策型油圧式ローラ型0.6m ³	け質土・砂・砂質土・粘性土	m ³	220	180
			岩塊玉石	m ³	160	130
		排出ガス対策型油圧式ローラ型0.35m ³	け質土・砂・砂質土・粘性土	m ³	150	100
			岩塊玉石	m ³	110	70

(注) 現場条件の内容

- 1. 地山の掘削時込み込みおよび床掘 (作業土工)
障害なし : 構造物および建造物等の障害物や交通の影響により施工条件が制限されず、連続掘削作業ができる場合。
障害あり : 掘削作業において障害物等により施工条件に制限があり (たとえば作業障害が多い場合) 連続掘削作業ができない場合。
- 2. 床掘 (作業土工)
障害なし : ①構造物および建造物等の障害物や交通の影響により施工条件が制限されないオープン掘削の場合。
②構造物および建造物等の障害物や交通の影響により施工条件が制限されない矢板のみの土留・仮締切り工掘削の場合。
障害あり : ①床掘作業において障害物等により施工条件に制限がある場合 (たとえば作業障害が多い場合)。
②土留・仮締切り工の中に、切梁・腹起しまたは基礎杭等の障害物がある場合。
- 3. 掘削箇所地下水位等で排水をせず水中掘削作業 (溝掘、基礎掘削、床掘) を行う場合は障害ありを適用する。

c) 敷均用ブルドーザ台数の算定

敷均用ブルドーザの台数を以下のように求める。

敷均用ブルドーザ台数 = $\frac{MV_t^j}{Q_c \times 6(\text{日})}$ (32)

ここで Q_c : 日当り施工量 (表一2に基づいて決定) を表わす。

表一2 日当り施工量 (ブルドーザ)

作業	工種	機種	規格	単位	作業条件	
					標準	障害あり
敷均し・締固め	敷均	ブルドーザ	排出ガス対策型15t	m ³	690	350
			排出ガス対策型21t		980	570
			排出ガス対策型湿地16t		560	350
			排出ガス対策型15t		540	280
			排出ガス対策型21t		770	450
	締固め	タイヤローラ	8~20t	m ³	1,330	560
					580	160

(注) 作業条件は次の諸条件を考慮し、選択するものとする。

- 標準 : 作業現場が広く、かつ作業障害が少ない場合 (たとえば新設のバイパス工事、あるいは新設の築堤工事等)
- 障害あり : 作業現場が狭い、または作業障害が多い場合 (たとえば現道上の工事、一車線程度の現道拡幅工事、あるいは拡築 (腹付、嵩上) 工事等)

d) 締固用タイヤローラ台数の算定

締固用タイヤローラの台数を以下のように求める。

締固用タイヤローラ台数 = $\frac{MV_t^j}{Q_d \times 6(\text{日})}$ (33)

ここで、 Q_d ：日当り施工量（表—3にもとづいて決定）を表わす。

表—3 日当り施工量（タイヤローラ）

作業	工種	名称	規格	単位	数量	
					標準	障害あり
締固め	路体・築堤	タイヤローラ	8～20t	m ³	1,330	560
	路床				580	160

（注）作業条件は次の諸条件を考慮し、選択するものとする。

標準：作業現場が広く、かつ作業障害が少ない場合

（たとえば新設のバイパス工事、あるいは新設の築堤工事）

障害あり：作業現場が狭い、または作業障害が多い場合

（たとえば現道上の工事・一車線程度の現道拡幅工事、あるいは拡築（腹付、嵩上）工事等）

e) 工時間建設工運搬パターンの決定

任意の時間 t において、どのプロジェクトあるいはストックヤードの建設残工をどのプロジェクトあるいはストックヤードに運搬し、調達（仮置き）するかという工事間建設土運搬パターンの決定問題を次のようにして求める。すなわち、ここでは、時間 t における各プロジェクトの建設残土排出量 KV_t^j および調達必要土量 MV_t^j がインプットデータとして与えられており、各プロジェクト間の運搬ルート（距離）が、既に設定されているものと仮定しているため、工事間建設土運搬パターンの決定問題は、以下のような輸送問題を解くことによって求めることができる。

Minimize

$$\sum_k \sum_m L_{km} \cdot X_{km} \quad (34)$$

Subject to

$$\sum_k X_{km} = \sum_j KV_t^j \quad (35)$$

$$\sum_m X_{km} = \sum_j MV_t^j \quad (36)$$

$$\sum_k X_{km} = \sum_m X_{km} \quad (37)$$

$$X_{km} \geq 0 \quad (38)$$

ここで、 L_{km} ：建設残土処理必要プロジェクト k （ $\sum_j KV_t^j < \sum_j MV_t^j$ のときストックヤードも含まれる）と建設土調達必要プロジェクト m （ $\sum_j KV_t^j > \sum_j MV_t^j$ のときストックヤードも含まれる）との間の距離、

X_{km} ：プロジェクト間建設土運搬量を表わす。

f) 運搬用トラック台数の算定

e) によりプロジェクト間建設土運搬量 X_{km} が求められたならば、それに伴う運搬用ダンプトラックの台数を以下のように求める。

$$\text{運搬用ダンプトラック台数} = \frac{X_{km}}{8(\text{時間}) \times Q_f \times 6(\text{日})} \quad (39)$$

$$Q_f = \frac{60 \cdot q \cdot f \cdot E}{C_m} \quad (40)$$

$$C_m = \frac{4.8l}{1000} + 16 \quad (41)$$

ここで、 Q_f ：運転1時間当たり運搬土量、 q ：1サイクル当たり運搬土量、 f ：土量換算係数、 C_m ：1サイクルの所要時間、 l ：平均運搬距離、 E ：作業効率を表わす。

g) プロジェクト間運搬費用の算定

f) によりプロジェクト間の運搬用ダンプトラック台数が求められたならば、一組のプロジェクト間運搬費用を以下のように求める。

一組の工事間運搬費＝運搬用ダンプトラック台数×損料
損料＝運転1時間当たり損料×運転日数＋供用1日当たり損料×供用日数

なお、f) で求められたすべてのプロジェクト間に上式を適用し、その運搬費用をたし合せることによって、時間 t における全体の運搬費用を求めることができる。さらに、すべての時間区間の運搬費用の総和を求めることにより、 $C^T(\cdot)$ を算出する。

5. 例題ネットワークにおける適用計算

ここでは、以上に示したモデルを例題に適用し計算を行なった。まず、インプットデータを表—4、表—5のように与えることとする。表—4の変更可

表—4 プロジェクトスケジュール枠

期間(月)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
プロジェクト1	←→														
プロジェクト2		←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→
プロジェクト3				←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→
プロジェクト4					←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→
プロジェクト5						←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→

←→ 標準スケジュール 変更可能期間

能期間とは、プロジェクトスケジュールにおける施工スケジュール変更可能期間を示す。そこで、この施工スケジュール変更可能期間内で工期縮減化の方向で工事費用最小問題の解を算定した。

また、プロジェクト実施の順序関係を図-12のプロジェクトネットワークのように与え、同時実施可能なカット C1～C3を抽出し、カットネットワークの作成を行った。これをもとに、最適土量配分問題にDP手法を適用した。

なお、建設土のプロジェクト間及びプロジェクトとストックヤード間の運搬は図-13に示すルートを通るものと設定した。算定結果を表-6に示す。

6. おわりに

本研究においては、まず総合的都市・地域計画における計画的検討プロセスの流れに沿って構想化した都市施設・基盤整備計画のための総合的なシステムアプローチの考え方を示した。

また、本研究では、このシステムアプローチの考え方にもとづき、事業化レベルでの検討問題において、建設プロジ

表-5 与条件

	土量(m³)	機械投入量制約(台)					標準工期(月)
		ブルドーザ (掘削用)	バックホウ	ブルドーザ (敷均用)	タイヤローラ	ダンプトラック	
プロジェクト1	100000	7	7				12
プロジェクト2	-230000			8	7		20
プロジェクト3	160000	9	8				16
プロジェクト4	200000	10	5				20
プロジェクト5	-230000			8	7		20
合計	0	10	20	10	15	45	

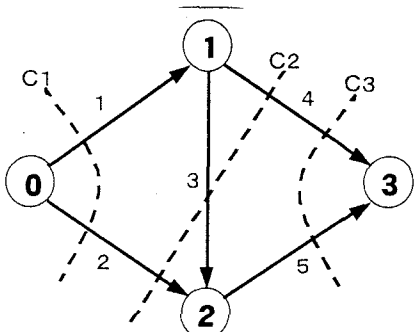


図-12 プロジェクトネットワーク

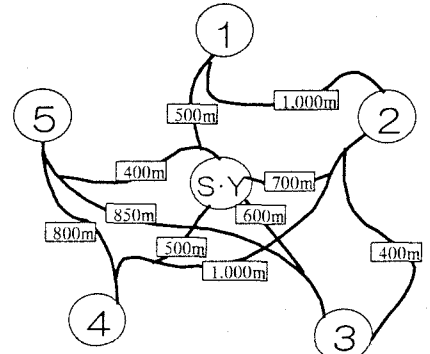


図-13 プロジェクト・ストックヤード間ルート

表-6 算定結果

時間(週)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
プロジェクト1土量(m³)	13020	13020	13020	13020	13020	13020	13020	8860		
プロジェクト2土量(m³)					24360	24360	24360	24360	17440	14880
プロジェクト3土量(m³)									14880	14880
プロジェクト4土量(m³)										
プロジェクト5土量(m³)										
ストックヤード搬入量(m³)	13020	13020	13020	13020						
ストックヤード搬出量(m³)					11340	11340	11340	15500	2560	
ストック土量(m³)	13020	26040	39060	52080	40740	29400	18060	2560	0	0
掘削機械合計(台)	4	4	4	4	4	4	4	3	5	5
積込機械合計(台)	8	8	8	8	8	8	8	5	9	9
敷均機械合計(台)	3	3	3	3	8	8	8	8	6	6
締固機械合計(台)	2	2	2	2	9	9	9	9	10	10
運搬機械合計(台)	16	16	16	16	32	32	32	31	21	17
機械費用合計(円)	2573820	2573820	2573820	2573820	5824260	5824260	5824260	5447950	5544590	5320390
個別プロジェクト工事費用(円)	99914	99914	99914	99914	106861	106861	106861	108899	108432	109454

時間(週)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
プロジェクト1土量(m³)										
プロジェクト2土量(m³)	14880	14880	14880	14880	14880	14880	10960			
プロジェクト3土量(m³)	14880	14880	14880	14880	14880	14880	14880	14880	11200	
プロジェクト4土量(m³)								18600	18600	18600
プロジェクト5土量(m³)										
ストックヤード搬入量(m³)							22520	33480	29800	18600
ストックヤード搬出量(m³)										
ストック土量(m³)	0	0	0	0	0	0	22520	56000	85800	104400
掘削機械合計(台)	5	5	5	5	5	5	11	11	10	6
積込機械合計(台)	9	9	9	9	9	9	19	19	18	11
敷均機械合計(台)	6	6	6	6	6	6	9	7	6	4
締固機械合計(台)	10	10	10	10	10	10	15	11	10	6
運搬機械合計(台)	17	17	17	17	17	17	40	40	36	22
機械費用合計(円)	5320390	5320390	5320390	5320390	5320390	5320390	9466820	8166300	7449760	4530900
個別プロジェクト工事費用(円)	109454	109454	109454	109454	109454	109454	62299	82717	91989	111226

時間(週)	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
プロジェクト1土量(m³)										
プロジェクト2土量(m³)										
プロジェクト3土量(m³)										
プロジェクト4土量(m³)	18600	18600	18600	18600	18600	18600	14000			
プロジェクト5土量(m³)	24360	24360	24360	24360	24360	24360	24360	24360	24360	10760
ストックヤード搬入量(m³)										
ストックヤード搬出量(m³)	5760	5760	5760	5760	5760	5760	10360	24360	24360	10760
ストック土量(m³)	98640	92880	87120	81360	75600	69840	59480	35120	10760	0
掘削機械合計(台)	6	6	6	6	6	6	4			
積込機械合計(台)	11	11	11	11	11	11	8			
敷均機械合計(台)	9	9	9	9	9	9	9	9	9	2
締固機械合計(台)	13	13	13	13	13	13	13	13	13	3
運搬機械合計(台)	31	31	31	31	31	31	30	28	28	13
機械費用合計(円)	7388990	7388990	7388990	7388990	7388990	7388990	6960860	5925640	5925640	1729950
個別プロジェクト工事費用(円)	92704	92704	92704	92704	92704	92704	97415	106214	106214	84954

ストックヤード費用(円)	237600000
全工事費用(円)	2421128014

エクト段階での問題解決への先取的な検討機能を担うマルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデル開発に関する研究を次のようにアプローチして行った。すなわち、まず事業化レベルを分析対象とする既開発のマルチプロジェクトプランニング&スケジューリングモデルと建設レベルを分析対象とするマルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデルとの関連関係を考察し、このような異なる計画検討レベルの分析を混成したプロセス間のハイブリッド型モデルの開発構想を示した。さらに、このハイブリッド型モデルのサブモデルとして位置付けられるマルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデル開発上の前提条件を整理するとともに、この問題を「建設土」の複数工事間運用や個別建設プロジェクト工期および全体工期の短縮などを通して、コストを最小化するような建設土運搬スケジュールを求める数理計画モデルとして定式化した。

今後の課題としては、このマルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデルをツールとし、本稿において構想化したハイブリッド型モデルの構築をめざしていくこととする。さらにマルチ建設プロジェクトプランニング&スケジューリングモデルを実際の都市総合整備へ適用し、大規模な実証研究を行っていく必要がある。

【参考文献】

- 1)春名攻, 竹林幹雄, 滑川達他; 総合的都市整備計画に関する効果的検討ツール開発をめざしたマルチプロジェクトスケジューリングモデル開発に関する研究, 土木学会関西支部年次学術講演会概要集, IV-22-1-IV-22-4, 1998.
- 2)Mikio Takebayashi and Mamoru Haruna, An Optimal Programming Model for Multiproject Planning of Regional Development and Its Application to Practical Regional Development, 15th Int'l Conference on PRSCO, 1997.
- 3)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, 土木学会建設マネジメント委員会, pp.99-pp.112, 1996.
- 4)春名攻, 玉井大吾, 川上俊幸; マルチプロジェクトの観点からみた広域における土地開発・土地造成工事に関する研究—土の工事間運用を中心として—, 建設マネジメント研究論文集, Vol.5, 土木学会建設マネジメント委員会, pp.211-pp.220, 1997.
- 5)春名攻, 玉井大吾, 川上俊幸; 効果的な土地開発計画をめざしたマルチプロジェクト計画に関するシステム論的研究, 土木学会関西支部年次学術講演会概要集, IV-15-1-IV-15-4, 1998.
- 6)春名攻, 滑川達, 櫻井義夫; 工事用資源の最適投入量決定問題に関する理論的研究, 建設マネジメント研究論文集 Vol.5, 土木学会建設マネジメント委員会, 1997.
- 7)建設機械経費積算研究会: 平成9年度版建設機械経費の経質, 財団法人経済調査会, 1997.

Study on Development of Available Tool for System Approach to Multi-Project Planning of Construction Project

In this study effective simulation tool for multi-construction-project planning is developed from the planning and managerial viewpoint as follows: At the first stage concept of integrated system approach for urban development is studied according to the planning process of integrated urban planning. At the second stage multi-construction-project planning and scheduling model located at system model of the system approach considered in the first stage is formulated from the viewpoint of cooperation is supply and demand relation considering balance of soil among multiple project. At the final stage hybrid model concept is studied through combining multi-project planning and scheduling model which had been already developed and multi-construction project planning and scheduling model formulated in the second stage.