

最適ネットワーク資源配分計画モデルを活用した一般工事中用資源配分計画システムの構築*

A System Approach to General Resource Allocation Problem for Determination of Total Resources Amount Allocated to Construction Project

春名 攻**・滑川 達***・伊藤壮央****

by Mamoru HARUNA**, Susumu NAMERIKAWA***, Takeo ITO****

1. はじめに

近年の建設界では、経験豊富な現場管理技術者や熟練労働者が不足気味の傾向にあり、工事中用資源(機械、資材、作業員等)の使用コストも増加の傾向が著しい。このため、建設工事のより一層の合理的実施をめざして、経済性や迅速性をより高いレベルで追求するための計画・管理技術の開発が、従来にも増して強く望まれている。しかしながら、従来のPERT系手法だけでは、工事中用資源の投入量を考慮した総合的なコストの低減化を体系的に検討できないのが現状である。

本研究グループでは、これまで、詳細工程計画レベルを対象とした工程計画問題として、各作業の所要日数、投入資源量を既値として与えたPERT/MANPOWER問題の最適解法の開発を行なった¹⁾。その後、我々は、各作業に必要な延べ投入必要資源量だけが与えられていて、日数と投入量は変化させることのできる問題に対して、次のようにアプローチした。即ち、工事費用が最小となる最適投入資源量と最適スケジュールの同時決定問題を最適化モデルとして定式化するとともに、この問題をナップサック問題として捉え、DP手法の適用を中心として効率的な解法の開発研究を行った。そこでは、工程ネットワークのトポロジカルな特性分析を効果的に活用し、工程ネットワークにおける最適資源配分問題を、従来の方法とは全く異なった方法で定式化するとともに、定式化したモデル構造に適した解法の開発を行ってきた²⁾。

以上のような研究成果を踏まえ、本研究では、今回さらに、上述の既開発モデルを効果的に活用するとともに、概略工程計画レベルのより一般的な工事中用資源配分問題を取り上げて、理論的・システム論的な

検討を行なった。即ち、概略工程計画レベルの計画要素である工事中用資源の種類の決定をも考慮した、より一般化した工事中用資源配分計画システムの開発をめざした。そこでは、現実的な計算量で計画要素と特性値の関連構造を把握することが可能な実験計画法の適用を中心とし分析を通して、計画者にとっての有効な情報となりうる工程・原価・工事中用資源の関連構造を把握し、工事費用の低減化をめざしている。

2. 最適資源配分問題の定式化とその解法²⁾

ここでは、まず開発する工事中用資源配分計画システムの中核的なシステムモデルとして位置づけている既開発の最適工程計画モデルについてその概要を取り纏めておくこととする。

(1) 工事費用構成に関するモデル構築上の考え方

ここでは、建設工事の施工過程が工程ネットワークで表現されており、それとともに工程ネットワークを構成する各作業に対しては、最適な工事中用資源の種類(機種・職種)は既に与えられているものとする。即ち、作業 j ($j=1, \dots, n$)に必要な資源 i ($i=1, \dots, m$)の延べ投入必要資源量 W_{ij} は、一義的に確定値として求められていると仮定する。このとき、資源投入に伴う必要コスト Z は、投入資源量が全工程を通して一定であると仮定することにより、式(2.1)に示すように、建設工事全体の延べ使用資源量に比例するコスト、建設工事全体に対する延べ投入資源量に比例するコスト、ならびに、これらに無関係な固定費用によって構成される、と考えることとした。

$$Z = \sum_i \sum_j W_{ij} \cdot c_i^1 + \sum_i S_i \cdot \lambda \cdot c_i^2 + q \quad (2.1)$$

c_i^1 : 単位資源量・単位時間あたりの資源 i の使用費用、 S_i : 単位時間あたりの資源 i の投入量、 λ : 工期、 c_i^2 : 単位資源量・単位時間あたりの資源 i の存置費用、 q : 仮設費等の固定費用

ここで、延べ使用資源量に比例するコストと固定費用は、スケジュールによって変化しない固有な値であ

* 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専攻

(〒525-0058 草津市野路東1-1-1, TEL 077-561-2736, FAX 077-561-2667)

*** 学生員、工修 立命館大学大学院理工学研究科総合理工学専攻(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)

るため、資源投入に伴う必要コスト Z の最小化は、延べ投入資源量に比例するコストの最小化と同義となる。また、延べ投入資源量は、延べ遊休資源量と、固有な値である延べ使用資源量の和であるから、延べ投入資源量に比例するコストの最小化は、式(2.2)に示すような延べ遊休資源量に比例するコスト Z' の最小化と同義となる。

$$Z' = \sum_i r_i \cdot c_i^2 \quad (2.2)$$

n ; 工程全体を通しての延べ遊休資源量

即ち、これまで示してきた問題は、結果として、総遊休費用を最小にする資源の最適投入量と最適スケジュールの同時決定問題に帰着することがわかる。

(2) モデルの定式化とその最適解法の開発

本研究グループでは、これまで、カット集合とルート集合との関係構造を求めてみた結果、両者の関係構造が、トポロジカルな関係として、元の工程ネットワークの作業間順序関係に変換されるメカニズムが存在することを明らかにした。このような関係は、以下に示すような最適解法の開発を可能とした。

即ち、カット間の順序関係を表した個々のカットを結合点とするカットネットワークを用いることにより、PERT系の各種の問題が、カットネットワーク上の最適時間配分問題として定式化できるようになり、さらにDPその他の手法の最適解法の開発も可能となったのである。

以下においては、上述の考え方に従って、遊休費用を最小化する工事用資源の最適投入量・最適スケジュールの同時決定問題を、カットネットワークにおける最適資源配分問題として定式化するとともに、DPを用いた最適解法について述べていくこととする。

いま、前述したカットネットワークに対してイニシャルレベルを設定し、式(2.2)に示した遊休費用を資源の投入量と工期の関数 $C^L(S, \lambda)$ と表すこととする。このとき、関数 $C^L(S, \lambda)$ は、カットネットワークにおけるレベルを用いて式(2.3)のように分解することができる。従って、遊休費用を最小化する資源の最適投入量・最適スケジュールの同時決定問題をカットネットワークにおける最適資源配分問題として、次のように定式化することができる。

Minimize

$$C^L(S, \lambda) = \sum_{e=1}^N c_e^L(\max_{1 \leq i \leq N} S_e, \lambda_e) \quad (2.3)$$

$$S_e = S_e(M_e^1, \dots, M_e^R) \quad (2.4)$$

Subject to

$$\max_{1 \leq i \leq N} S_e = S \quad (2.5)$$

$$\sum_{e=1}^N \lambda_e = \lambda \quad (\lambda^{\min} \leq \lambda \leq \lambda^{\max}) \quad (2.6)$$

$$\sum_{e=1}^N M_e^k = M^k \quad (k=1, \dots, R) \quad (2.7)$$

S ; 工事用資源の投入量ベクトル ($S = (S^1, \dots, S^m)$ S^i ; 資源 i の投入量)、 λ ; 工期、 $\lambda^{\min}$; 工期の下限值 (ここでは、すべての作業が最短で終了する所要日数でかつ最早開始時刻にスタートしたときの工期と考える)、 $\lambda^{\max}$; 工期の上限値 (ここでは、制約工期と考える)、 e ; カットネットワークにおけるレベル ($e=1, \dots, N$)、 $c_e^L(\cdot)$; レベル e のカットでの遊休費用、 S_e ; レベル e のカットにおいて最大の単位時間あたりの必要資源量ベクトル ($S_e = (S_e^1, \dots, S_e^m)$ S_e^i ; レベル e のカットにおいて最大の単位時間あたりの資源 i の必要資源量)、 λ_e ; レベル e のカットに配分される所要時間、 M_e^k ; レベル e のカットにおいてルート k に配分される投入資源量ベクトル ($M_e^k = (M_e^{k1}, \dots, M_e^{km})$ M_e^{kj} ; レベル e のカットにおいてルート k に配分される資源 i の資源量)、 M^k ; ルート k への延べ投入必要資源量ベクトル ($M^k = (M^{k1}, \dots, M^{km})$; ルート k への延べ投入必要資源量)

以上がモデルの定式化であるが、その内容からも明らかのように、この問題を解くためには、式(2.4)の値 S_e を求める必要がある。いま、上述の定式化を上位ユニットと考えれば、 S_e の値を求める機能をもつ下位ユニットに上位ユニットが与えられる情報は $(M_e^1, \dots, M_e^R)$ および λ_e となる。ここで $(M_e^1, \dots, M_e^R)$ ならびに λ_e は、

$$j \in C_e \cap j \notin C_{e+1} \quad (C_e < C_{e+1}) \quad (2.8)$$

の条件を満たすような作業(群)が現在カット C_e までに確実に終了する範囲で与えられる。

このとき、明らかに下位ユニットでは、必要資源量 $(M_e^1, \dots, M_e^R)$ と所要時間 λ_e として与えられた入力情報のもとで、現在のカット C_e に含まれる作業の実施を保証できる最小の投入量を求めるため、以下のような部分問題を解くことが要求される。即ち、ここでは、この部分問題を各ルートの資源量を各単位時間にわりつけるための最適資源配分問題として、次のように定式化する。

Minimize

$$S_e(M_1^k, \dots, M_R^k) = \max_{1 \leq t \leq L_e} s_{et}(M_1^k, \dots, M_R^k) \quad (2.9)$$

Subject to

$$\sum_{t=1}^{L_e} M_{et}^k = M_1^k \quad (k=1, \dots, R) \quad (2.10)$$

s_{et} ; レベル e のカットにおける単位時間 t の必要資源量ベクトル ($s_{et} = (s_{et}^1, \dots, s_{et}^n)$); s_{et}^i ; レベル e のカットにおける単位時間 t の資源 i の必要資源量、 M_{et}^k ; レベル e のカットにおける単位時間 t においてルート k に配分される投入資源量ベクトル ($M_{et}^k = (M_{et}^{k1}, \dots, M_{et}^{kn})$); M_{et}^{ki} ; レベル e のカットにおける単位時間 t においてルート k に配分される投入資源量

さらに、この部分問題の定式化における資源配分問題としての分解が、カット C_e では次のような状態になる。つまり、カット C_e が工程ネットワークの始点から終点への順方向(同一方向)に向かう作業のみで構成されており、作業の実施がカット C_e 上の時間の流れに沿って行われているため、この部分問題は、DPの基本原理である最適性の原理が適用でき、評価関数を次のような繰返しの関数方程式に変換することができる。

$$S_{ek}(M_1^k, \dots, M_R^k) = s_{ek}(M_1^k, \dots, M_R^k) \quad (2.11)$$

$$S_{ek}(M_1^k, \dots, M_R^k) = \min_{0 \leq M_{ek}^i \leq M_1^k} [\max \{s_{ek}(M_1^k, \dots, M_{ek}^i, \dots, M_R^k), S_{ek-1}(M_1^k - M_{ek}^1, \dots, M_R^k - M_{ek}^R)\}] \quad (2.12)$$

ここで、全体問題は、この問題がフィードバックのないシステムとしてのカットネットワークでの資源配分問題として設定されているので、上述の部分問題の場合と同様に、最適性の原理を適用することができ、次のような繰返しの関数方程式として変換することができる。

$$C_N^L(S, \lambda) = c_N^L(S, \lambda) \quad (2.13)$$

$$C_N^L(S, \lambda) = \min_{\substack{0 \leq S_N \leq S \\ 0 \leq \lambda_N \leq \lambda \\ \lambda_N^{\min} \leq \lambda \leq \lambda_N^{\max} \\ 0 \leq M_N^k \leq M^k}} \{c_N(S_N(M_1^1, \dots, M_N^R), \lambda_N) + C_{N-1}^L(\max\{S_N(M_1^1, \dots, M_N^R), S_{N-1}(M_1^1 - M_N^1, \dots, M_N^R - M_N^R)\}, \lambda - \lambda_N)\} \quad (2.14)$$

以上に述べてきたように、最適解法としてDPを適

用することにより、最小遊休費用ならびに資源の最適投入量、最適工期を厳密に求めることができる。さらにそのときのスケジュールは、全体問題で最適解となった部分問題の決定変数ベクトルの合成を行なうことによって、容易に表現できる。

本論文ではさらに、例題ネットワークを用いて最適解法の適用計算を行い本モデルの有効性を確認しているが、紙面の都合上、その内容については発表時に示すこととする。

3. さらに一般化をめざした工事用資源配分計画システムの開発

以上のような研究成果を踏まえ、本研究では、図-1に示したように前述の詳細工程計画レベルを検討対象とする最適工程計画モデルを効果的な先取り的検討ツールとして活用して、施工対象のブロック分割や工事用資源の種類などの概略工程計画レベルの検討を行なうことを目指している。そして、本稿では、このうち特に工事用資源の種類に関する検討を取り上げることとした。

即ち、図-2に示すような実験計画法の適用を中心として、概略工程計画レベルの計画要素である工事

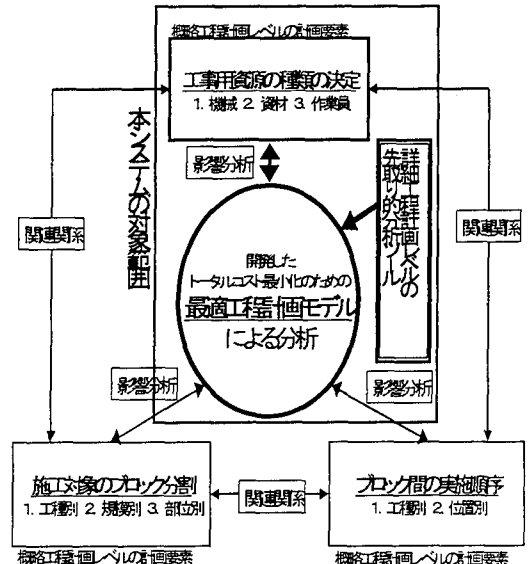


図-1 本研究におけるシステムアプローチの考え方

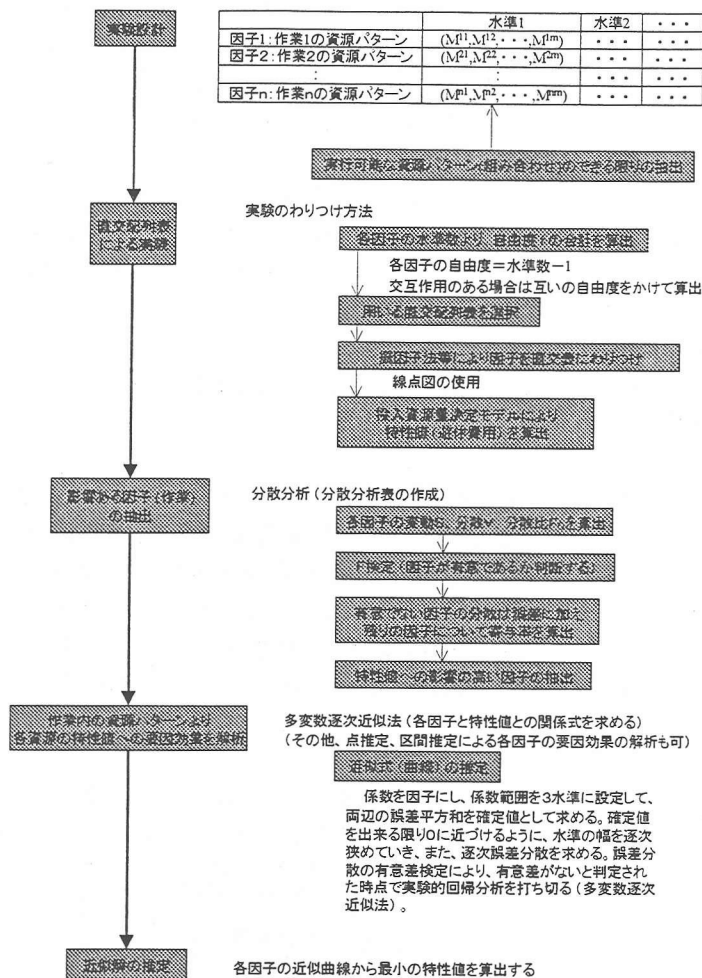


図-2 システムの概要

用資源の種類の決定をも考慮した、より一般化した工事用資源配分計画システムの開発を行うこととした。そこでは、まず、実行可能な資源パターン(組み合わせ)のできる限りの抽出を行ない、直行配列表に実験をわりつけることから始める。この直行配列表を用いることにより、現実的な実験回数で計画要素と特性値の関連構造を把握することが可能となる。次に、2章に示した工事費用が最小となる最適投入資源量決定モデルより、特性値として選んだ工事費用を算出し、分散分析を行なうとともに、特性値への影響の高い因子に対して、多変数逐次近似法を用いて、近似式(曲線)の推定を行なう。そして、これにより各因子の近似曲線から最小の特性値を算出することとしている。

5. おわりに

本研究では、概略工程計画レベルのより一般的な工事用資源配分問題を取り上げて、理論的・システム論的な検討を行なった。即ち、概略工程計画レベルの計画要素である工事用資源の種類の決定をも考慮した、より一般化した工事用資源配分計画システムの構築を行なっている。そこでは、現実的な計算量で計画要素と特性値の関連構造を把握することが可能な実験計画法による分析を中心として、計画者にとっての有効な情報となりうる工程・原価・工事用資源の関連構造を把握し、工事費用の低減化をめざした。

今後は、工事用資源の種類の決定だけでなく、施工対象のブロック分割やブロック間順序関係が工事費用に与える影響の分析を行ない、三者の関連関係の分析も行なっていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 春名 孜, 滑川 達; P ERT/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・講演集 vol.1, 20(1), 土木学会, 1998
- 1) 春名 孜, 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.1, 土木学会建設マネジメント委員会, 1997, 12