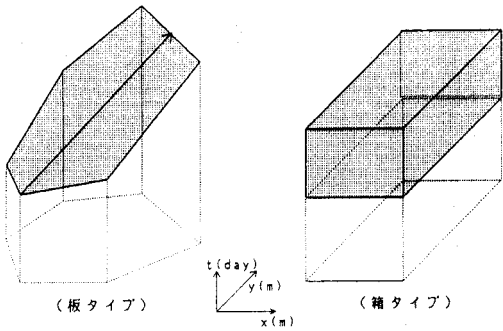


工事施工空間の干渉問題と効率的資源運用問題を考慮したスケジューリングモデル開発

立命館大学 正員 春名 攻  
（株）大林組 正員 ○原田 満  
立命館大学大学院 学生員 荒川 和久  
（株）奥村組 正員 黒田 忠司

1. はじめに

本研究では、現場マネジメント業務の中でも中核的業務として位置づけられる工程業務に着目し、より合理的で合目的な建設工事施工の実現化を目的とした工事計画のシステム化に関する検討を行った。本研究グループでは、これまでに、マネジメント情報の有効的活用をはかった支援情報システムの開発を中心にして、機能の高度化をはかった座標式工程モデルや最適工程短縮モデルの開発・提案を行ってきたが、本論文においては、新たに開発を行った、



$RP_{ir}$ : アクティビティ $i$ の施工空間指定点 ( $r=1 \sim n_i$ )  
 $DP_i$ : アクティビティ $i$ の施工方向指定点  
 $DP1_i = (x1_i, y1_i) \dots$  開始点、 $DP2_i = (x2_i, y2_i) \dots$  終了点  
 $d_i$ : アクティビティ $i$ の所要日数  
 $\vec{N}_i$ : アクティビティ $i$ の施工方向ベクトル  
 $\vec{N}_i = (\alpha_i, \beta_i, \gamma_i) = (x2_i - x1_i, y2_i - y1_i, d_i)$   
 $t_i(x, y)$ : アクティビティ $i$ の任意の施工位置 $(x, y)$ における施工時刻  
$$\begin{vmatrix} (x-x1_i) & (y-y1_i) & (t-t1_i) \\ \alpha_i & \beta_i & \gamma_i \\ -\beta_i & \alpha_i & 0 \end{vmatrix} = 0$$
  
 $t_i(x, y) = t1_i + d_i \{ \alpha_i(x-x1_i) + \beta_i(y-y1_i) \} / (\alpha_i^2 + \beta_i^2)$   
 $t1_i$ : アクティビティ $i$ の施工開始時刻  $t1_i = t(x1_i, y1_i)$   
 $t2_i$ : アクティビティ $i$ の施工終了時刻  $t2_i = t(x2_i, y2_i)$

図-1 3次元座標空間における工程の定義

面的な施工空間の干渉問題を考慮した3次元座標式工程モデルと、効率的な資源の運・転用順序を決定することが可能な管理的順序決定モデルに関する検討成果を取りまとめている。

2. 3次元座標式工程モデルの開発

(1) 空間干渉問題に対する基本的認識

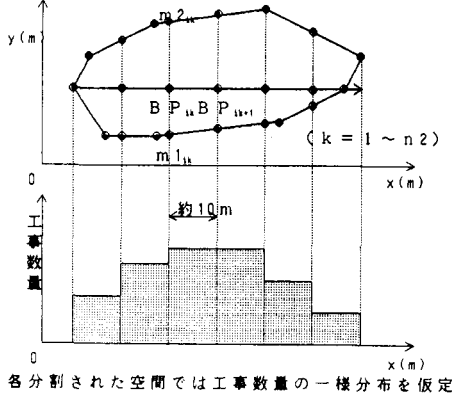
近年、都市土木の増加等にもともなって、安全空間の確保をはじめとする施工空間に対する制約も一段と厳しいものとなっている。本研究では、最も一般的な工程管理手法となっているPERTと比較して、座標式工程表の幾何学的な特性を活用した座標式工程モデルが、空間干渉問題の検討には非常に有効であることをこれまでに検証してきた(文献1))。しかし、その適用はあくまでも施工延長方向に工事数量が一樣に分布している線形構造物工事に限定され、平面工事への適用が困難であった。これら問題の根本となっているのは、座標式工程表の出力イメージに合わせて、あくまでも、面的空間を1軸の線的空間として表現しようとしているためである。視覚的な評価にこだわった無理な変換こそが、空間干渉問題の解決という本来の目的を見失わせている原因であると考ええる。確かに、計画・管理者にとって視覚的検討や評価の容易な工程表の出力は重要な機能であるが、より総括的な工程計画体系(の方法)の確立とは、本来異なる問題・機能である。

このような認識から、本研究では、 $x, y$ 平面と施工時刻 $t$ の3軸からなる3次元座標空間に対して、座標式工程モデルの拡張を行った。

(2) 3次元座標空間における工程の定義

座標式工程表では、施工開始位置と終了位置

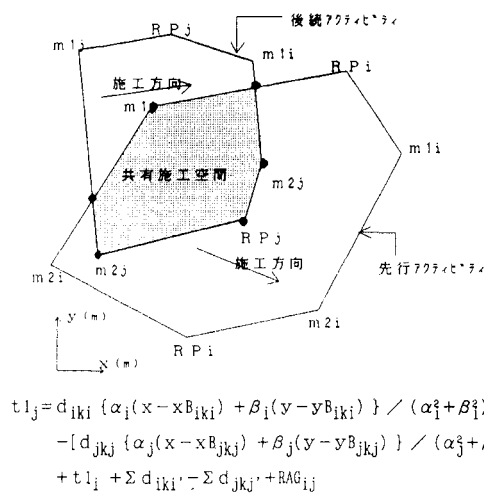
の2点間の距離を施工空間として捉えていた。一方、面的な施工空間の場合では、1つの図形情報的な性格を持ち、アクティビティ $i$ は $n1$ 個の点、 $RP_{ir}$ に囲まれた領域・閉空間として定義することができる。また、 $360^\circ$ の方向が想定される面的な施工空間



各分割された空間では工事数量の一樣分布を仮定

- $BP_{ik}$ : アクティビティ $i$ の施工空間分割基準点  $BP_{ik} = (x_{B_{ik}}, y_{B_{ik}})$   
 $n2$ : アクティビティ $i$ の施工空間分割数  
 $m$ : 施工方向ベクトル $\vec{n}_i$ と直行し施工空間分割基準点 $BP_{ik}$ をとる直線と、施工空間指定点 $PR_{ir}$ ,  $PR_{ir+1}$ を含む直線との交点  
 $Q_{ik}$ :  $BP_{ik}$ と $BP_{ik+1}$ によって分割された、第 $k$ 分割施工空間の工事数量  
 $Q_{ik} = Q_{ik} \times S_{ik} / \sum S_{ik}$  ( $S_{ik}$ : 第 $k$ 分割施工空間の施工面積)  
 $d_{ik} = Q_{ik} / a_i$  ( $d_{ik}$ : 第 $k$ 分割施工空間の所要日数)  
 $t_i$ : 第 $k$ 分割施工空間での、任意の施工位置 $(x, y)$ における施工時刻  
 $t_i(x, y) = d_{ik} \{ \alpha_i(x - x_{B_{ik}}) + \beta_i(y - y_{B_{ik}}) \} / (\alpha_i^2 + \beta_i^2) + t_{li} + \sum d_{ik'}$

図-2 面的な施工空間における工事数量分布の仮定



$$t_{lj} = d_{lji} \{ \alpha_j(x - x_{B_{lji}}) + \beta_j(y - y_{B_{lji}}) \} / (\alpha_j^2 + \beta_j^2) - [d_{jkj} \{ \alpha_j(x - x_{B_{jkj}}) + \beta_j(y - y_{B_{jkj}}) \} / (\alpha_j^2 + \beta_j^2)] + t_{li} + \sum d_{lki} - \sum d_{jkj} + RAG_{ij}$$

図-3 工程の第K分割空間における接点の対象

間での施工方向を、施工開始点と終了点の2点によって定義されるベクトルによって表現することとした。したがって、空間 $(x, y)$ と時間 $(t)$ の3軸により示される3次元座標空間では、日々施工位置を変化させる特性を持つ作業は「施工能力と対応したある傾きを持った”板”」、積み上げ的に施工が進捗する特性を持つ作業は「所要日数と等しい高さを持った”箱(立体的)”」として定義することが可能である。そして、これらは、それぞれ2次元座標での、”線”および”箱(平面的)”に相当する。

任意の位置 $(x, y)$ における施工時刻は、座標式工程モデルと同様に $t(x, y)$ として定義されるが、板で表現される作業の場合には工事着手位置から終了位置に向かって施工が連続的に進捗することから平面方程式を適用することとした。なお、面的な空間を持つ場合には、施工方向に工事数量が一樣に分布していることは少ないものと考え、施工方向ベクトルと直交する直線によって約10m間隔で施工空間をさらに分割した。そして、各分割された施工空間の中では、工事数量が一樣に分布しているものと仮定を行い、連続した板の連なりとして捉えることとした。

また、施工禁止空間は、施工方向と平行な方向と直交する方向の2方向に分けて禁止距離を設定することとしている。

### (3) 工程の錯綜を禁止した工程計算方法

定義された各工程が錯綜しないためには、ある位置 $(x, y)$ で先行と後続アクティビティが接点を持ち、均衡状態を保っているものと考えることが出来る。すなわち、時間的な遅れを $RAG_{ij}$ とおけば、

$t_j(x, y) = t_i(x, y) + RAG_{ij}$ として、座標式モデルと同様な関係式が成立する。このような接点は、先行・後続アクティビティの共有する施工空間の輪郭線上の端点群に存在している。したがって、複数個の端点の中から、後続アクティビティの開始時刻が最大となる点を接点として求めればよいことになる。

また、施工禁止空間が設定されている場合についても、基本的には同様の接点関係式を適用することが可能である。しかし、施工方向と平行な方向に禁止距離 $L1m$ が設定される場合には、施工開始位置が

進捗と逆方向に11m平行移動した領域と、進捗方向に施工時刻が一定な領域の2つの面によって工程が表現されるため、個別に接点を求める必要があるが、ここでは、詳細については割愛することとする。

3. 投入資源制約をかけた管理的順序決定モデル

(1) 技術的順序と管理的順序に関する考察

建設工事においては、技術上の問題から工事施工に関わる基本的な順序関係として一意的に与えられる技術的順序と、工期の短縮や資源の効率的運用を考えて計画者が任意に設定を行う管理的順序の2種の順序関係が存在している。この管理的順序関係は施工空間上横方向の関係を持つブロックの順序関係に代表されるが、新たな順序関係を設定しない限りは、施工ブロックの同時施工を許可することになり、工期短縮を実行することができても使用資源が集中するといったリスクを負うことになる。工程計画・管理では、契約工期と資源の量的制約が課された状態で、主要資源の投入効率を最大にすることが要求されるが、順序関係の問題はこの管理的順序関係に他ならず、その設定及び決定の方法は今日の課題として残されている。

(2) ネットワークトポロジーの考えを用いた順序組合せ問題へのブランチ・バウンド法の適用

工程の時間的设计にもとづき、工事資源を媒介することによって工事費用は発生するものと考えられるが、工事費用に大きく影響を与える管理的順序の設定にあたっては、これまで熟練技術者の現場経験則に依存するところが多い。しかし、あくまでもこの方法で求められる計画案には最適性の保証が無く、実務上最適に近い近似解を求めているに過ぎない。本研究では、工事費用の最小化・利益率の向上という観点からも最適化という問題に対して検討を加える必要があるものと考えた。

管理的順序関係の決定問題は、順列組合せの探索問題であると言えるが、工程ネットワークが大きくなるにしたがって、新たに付加される順序の組合せも膨大な数になる。このため、本研究では、組合せ問題の解法に有効な手法であるブランチ・バウンド法を適用することとした。最も効果的な資源投入が行われている場合には、各施工パーティの手待ちが少なく連続稼働している必要がある

が、これらの稼働状態と対応して工期入も小さくなっているものと考えられるので、本研究では、資源投入量に制約をかけた工期最小化問題として定式化を行った。

また、カットは、これまで工期短縮問題のツールとして捉えられがちであったが、同時施工が可能な作業（ブロック）の集合として再認識することにより、順序づけ問題にもネットワークトポロジーの考えを活用することが可能である。つまり、新たな管理的順序の設定

は、任意のカットに含まれる作業群に対して行う必要があり、各カットに対して競合作業数に関する評価を行うことができる。さらに、もとの工程ネットワークにおける順序

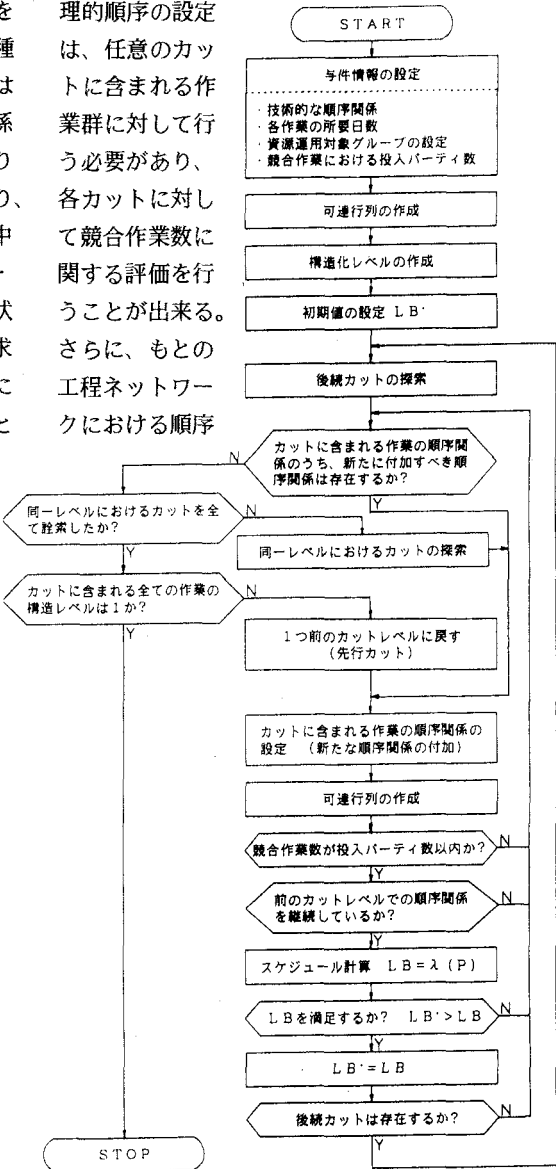


図-4 管理的順序決定モデルの解法のフロー

関係は、作業を集約したカット群においても保存さ

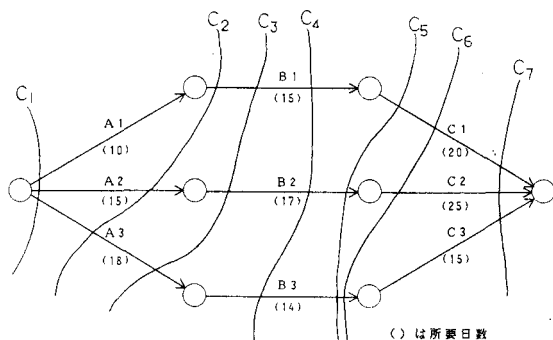


図-5 例題ネットワークにおけるカット経路の一例

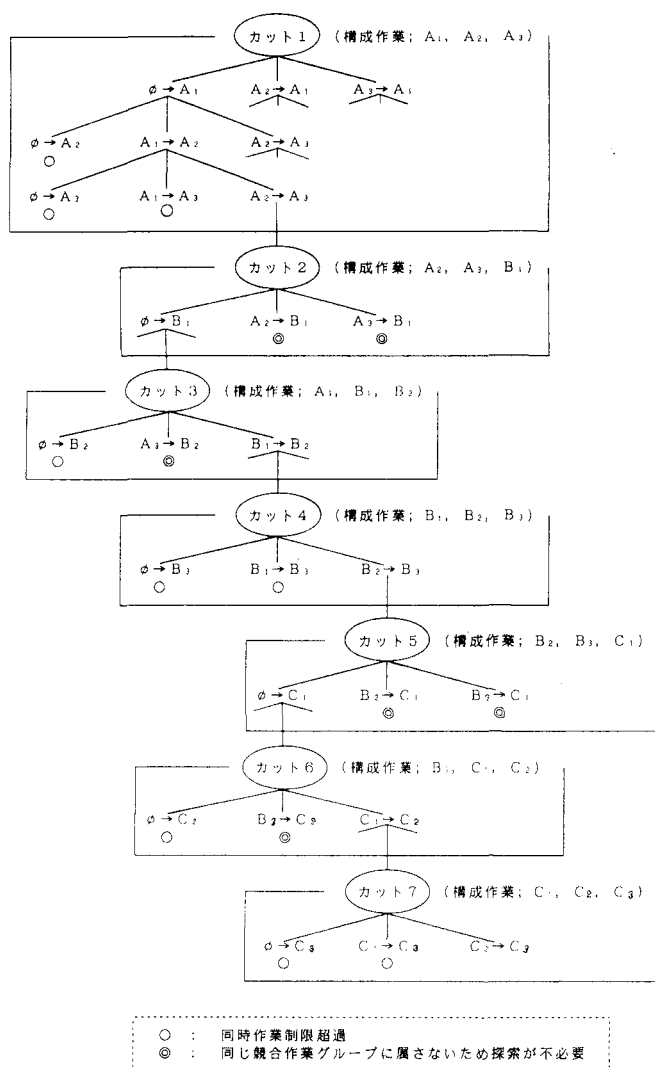


図-6 最適順序探索過程の一例 (ブランチ図)

れているので、カットをアクティビティとするカットネットワークに等価変換することが出来る (文献2))。

本研究では、このような特性を持ったカットを、決定すべき管理的順序の探索ツールとして活用することによって、工程ネットワークの始点から段階的に順序付けを行う後戻りの少ない探索プロセスを実現した。探索過程を示すブランチ図において、本解法はカット探索とカットに含まれる作業間の順序づけとして表現されており、早期の段階から不必要な順序関係を探索の対象とはせず、最適順序の探索過程を大幅に減少していることが容易に理解出来る。また、前の段階で決定された順序関係は、その後の探索過程においても継続されるため、サイクルを構成するような順序関係を予め排除することができ、効率的に解の探索を実施することを可能にした。

#### 4. 終わりに

本論文では、紙面の関係上、面的施工空間への適用が可能な3次元座標式工程モデルと、資源運用問題を捉えた管理的順序決定モデルの概要を述べるにとどまったが、実際工事への適用結果等については講演当日に発表することとする。

#### [参考文献]

- 1) 春名 攻, 原田 満: 座表式工程表を用いた概略工程計画システムの開発研究, 第8回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集, 1990, 12
- 2) 春名 攻, 原田 満, 荒川 和久: 最適工程計画を目指したスケジューリングモデルの開発研究, 第9回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集, 1991, 12
- 3) 尾崎 弘, 白川 功: グラフとネットワークの理論, コロナ社, 1973, 10