

空間的干渉を考慮した最適スケジューリング ネットワーク作成方法の開発

A STUDY ON THE OPTIMAL SCHEDULING NETWORK IN CONSIDERATION OF SPATIAL INTERVENTION

湯沢 昭*・須田 熙**・平田克英***・長尾 毅****

By Akira YUZAWA, Hiroshi SUDA, Katsuhide HIRATA and Takashi NAGAO

A schedule planning such as PERT can find out optimal solution for a given network. This paper discusses the optimization method together with some related techniques which involves a determination of a network itself based on the optimal network planning. Spatial intervention between activities is defined as a fact that will occur when a number of activities need to be carried out in a same site. It was found that the travelling salesperson problem can be applicable to determine the predecessor-successor relationship among those activities.

The optimal solution was found using the method for the network having various spatial interference.

Keywords : travelling salesperson problem, network, PERT

1. 緒 言

建設工事を取り巻く環境は、高度情報化、国際化等過去に例をみない急速なテンポで変容しつつあり、これに対応すべき業務の合理化と生産性の向上が強く求められている。そのためには施工技術の進展はもちろんのこと、それを支えるための計画・管理技法の研究が必要である。特に建設工事の大規模化、複雑化が進む中での急速施工、資源の有効利用、作業安全性の確保等、その条件はより厳しくなっている。

建設マネジメントの観点からは、調査・企画から維持・管理に至る建設プロセスにおける膨大な情報の処理および適切な評価が要求されている。また情報機器の発達とその低廉化によりコンピュータによる管理は、建設現場においても急速に普及し、生産性の向上に寄与している。したがって、科学的かつシステムティックな計画・管理

技法の開発への要請は強い。工程計画の分野では、従来の数値計画に代表されるネットワーク理論はもちろんのこと、近年はエキスパートシステム¹⁾、ファジ理論²⁾等の導入により、現実に即した理論の開発・応用が進められている。

現在、計画または建設が実施されている大規模空港建設においては、多くの工種が限られた空間内で複雑に交差しており、施工の順序を決定するうえで工種間の空間的干渉を考慮できるような工程計画手法が必要とされている。本研究は、ネットワーク理論を用いて複数の工種が互いに空間的干渉を及ぼし合う場合の、最適スケジューリングネットワークの作成³⁾ (OPTimal Network Technique : 以下OPT-NETとよぶ) を目的としている。ただし、OPT-NETはそのシステムの一部においてヒューリスティック・アプローチを採用しているために、結果が必ずしも最適解を構成している保証はない。

空間的干渉を考慮したネットワークを作成するにあたり、各工種にその空間的位置(作業位置)の情報を付加しておく必要がある。それにより従来のようにスケジューリングの計画・管理だけではなく、工種間の空間的關係やその出来形状も視覚にて容易に判断可能となる。なお、本研究で提案するOPT-NETは、現場にて使用可能なシステムとするため、パソコンの機能を前提と

* 正会員 工博 東北大学助手 工学部土木工学科
(〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
(同上)

*** 正会員 工修 鹿島建設(株)開発事業本部
(〒107 港区元赤坂1-2-7)

**** 工修 (前)運輸省第二港湾建設局 工事専門官 横浜調査設計事務所
(〒220 横浜市西区高島1-2-5)

したものである。

2. スケジューリング理論に関する従来研究

本研究で考慮する工種の空間的干渉には、図-1に示すような種々の形態がある。ここで、(a)は工種AとBが同一平面内での作業であり同時には着工できない。(b)は作業の安全上から工種Aに保安距離(保安空間)が設定されており、それが工種Bと干渉し合うケースである。また(c)は工種A、B同一の仮施設を使用するが、その容量の問題から同時には使用できない場合であり、(d)は地表と地下の工事の例である。これらの状況において工種A、B間に技術的な順序関係が存在する場合には、空間的干渉問題は生じないのは明らかである。

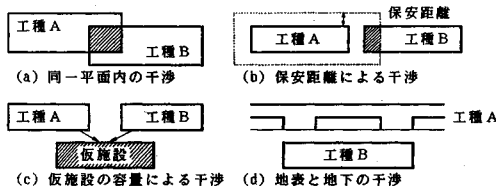


図-1 空間的干渉の例

このような工種の作業空間を考慮した工程計画手法として最も一般的なものが座標式工程計画^{4),5)}である。座標式は、横軸に工事期間、縦軸に工事量や進捗状況をおき、座標により工程を表現するものである。これは、道路工事や護岸工事のように線形的に表現できる工事に対しては、作業位置を明示することが可能であり、保安距離や先行距離を考慮した工程計画を作成することができる。また、折田・山本・村林⁶⁾は、座標式的表示方法である「線」と併せて「箱」の概念を導入することにより、座標式の拡張とネットワーク理論との結合を図り、PERT計算を可能とした。このように座標式は、作業空間を表現する実用的な方法であるが、作業空間が干渉し合う場合の工種間の順序関係を理論的に展開するには至っていない。

著者ら⁷⁾は、作業空間の表示方法としてメッシュ式工程計画手法を提案している。これは全体の工事を多層のメッシュ構造に分割し、工種間に保安距離、先行距離、および工種間の時間間隔(PERTのFSに相当する)の制約下で、スケジューリングを行うものである。この方法は、工事領域が平面的で同じ工種を繰り返し行うような工事に対しては有効であるが、多くの工種が局部的に行われる工事に対しては、データ作成とその処理に問題がある。また本方法は、空間的干渉を及ぼし合っている工種の優先順位をアプリオリに与えているため、その最適性は保障されない。

わが国における最適ネットワーク作成法に関する先駆

的な研究として、吉川・春名⁸⁾の研究がある。これは、ネットワークを作成する場合、施工技術や管理技術の組合せにより、さまざまなスケジューリングネットワークが存在するとして、DPとBABを適用した方法を提案している。すなわち、工種間の先行後続関係を技術的順序関係と管理的順序関係とに分け、前者は対象工事により一意的に決定される先決的な順序関係であり、後者は施設や機械等の資源により決定されるものとしている。最適ネットワークは、技術的順序関係で記述されたネットワークに対し、工事の工期の延長を最小とするような管理的順序関係を付加する問題となっている。

本研究では、数理計画の適用性および一般性を考慮し、スケジューリング手法としてネットワーク理論を採用した。吉川・春名と同様に工種間に一意的に決定される順序関係を技術的順序関係、空間的干渉を生じる工種間に付加するものを管理的順序関係とする。本論文で使用するネットワークの定義は以下のとおりである。

- (1) 原始ネットワーク：技術的順序関係のみで構成されているネットワーク
- (2) サブネットワーク：原始ネットワークから同一空間で干渉している工種のみを取り出して作成したネットワーク
- (3) 擬似原始ネットワーク：あるサブネットワークで採択された管理的順序関係を技術的順序関係として原始ネットワークに付け加えたネットワーク
- (4) トータルネットワーク：技術的および管理的順序関係を満足している最終的なネットワーク

なお、各ネットワークの表現方法としては、Precedence Network (以下PNとする)を採用するが、サブネットワーク上で管理的順序関係を付加する問題においては、PNをアロー型のネットワークに変換し、数理計画の適用を図る。この点に関する詳細は後述する。

3. 単一空間における複数工種の空間的干渉問題

- (1) 巡回セールスマン問題の適用

図-2(a)は原始ネットワークを表わしており、ここで工種①、②、③が空間的干渉を及ぼし合っているものとすれば、(b)のようなサブネットワークが抽出できる。(b)のサブネットワークにおいて、工種①→③の間には

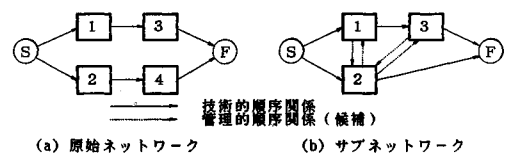


図-2 単一空間での空間的干渉

技術的順序関係が決定されているため、付加すべき管理的順序関係の候補リンクとしては、 $[1] \rightarrow [2]$ 、 $[2] \rightarrow [3]$ が考えられる。付加すべき順序関係の決定に関しては、次の条件を満足させる必要がある。

- (条件1) 付加したリンクによりループを構成しない
- (条件2) サブネットワーク上のすべての工種を直列構造に変換する
- (条件3) リンクを付加することによる全体工期の延長を最小にする

たとえば、図-2(b)で $[2] \rightarrow [1]$ 、 $[3] \rightarrow [2]$ と管理的順序関係を付加したとすれば、 $[1] \rightarrow [3] \rightarrow [2] \rightarrow [1]$ と明らかにループを構成するため、PERTの計算が不可能となる(条件1)。条件2は、工種 $[1]$ 、 $[2]$ 、 $[3]$ が同時には作業ができないため、必ず直列構造にする必要があることを意味する。条件3は、条件1、条件2を満足するネットワークの中で全体の工期の延長が最小となるものを選択することであり、この場合は目的となる。したがって、これらは以下のように定式化される。

$$Z = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} C_{ij} X_{ij} \rightarrow \text{Min} \dots \dots \dots (1)$$

sub to

$$\sum_{j \in N} X_{ij} = 1 \quad \forall i \in N, i \neq j$$

$$\sum_{i \in N} X_{ij} = 1 \quad \forall j \in N, j \neq s$$

$$\sum_{i \in N} X_{is} = \sum_{j \in N} X_{fs} = 0 \quad s, f \in N$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\}$$

C_{ij} : ノード i, j 間の所要時間

式(1)は、始点 s からすべてのノードを1回だけ通過し、終点 f に至る最短経路問題であることがわかる。つまり、空間的干渉を受ける工種間に管理的順序関係を付加する問題は、サブネットワーク上において最短経路となるような順序関係を付加する問題となる。したがって式(1)において $X_{ij}=1$ となるリンクが最短経路を構成することになる。ここで式(1)の条件式を次のように変更する。

$$\sum_{j \in N} X_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \dots \dots \dots (2 \cdot a)$$

$$\sum_{i \in N} X_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \dots \dots \dots (2 \cdot b)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N \setminus V} X_{ij} \geq 1 \quad \forall V \subset N (V \neq \phi, V \neq N) \dots \dots \dots (2 \cdot c)$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\}$$

C_{ij} : ノード i, j 間の所要時間

式(2・a)、(2・b)の制約条件は、すべてのノードは必ず1本の出力と入力があることを示している。式(2・c)の制約条件はノード集合 N を2つの空でない部分集合 V と $N \setminus V$ (N から V を除いた差集合) に分割したとき、巡

回路を形成するためには $X_{ij}=1$ となる $i \in V$ と $j \in N \setminus V$ が少なくとも一対は存在することを示している。つまり部分的なループを生じさせないようにするための制約である。

これは、式(1)において f から s に至るグミーリンクを付加することにより、式(1)の最短経路問題が s からすべてのノードを通過し (f も含む)、 s に至るハミルトン閉路(巡回路)となることを示している。したがって、ハミルトン閉路上での最短経路問題は、巡回セールスマン問題となることは明らかである。つまり、サブネットワーク上で管理的順序関係を付加する問題が、巡回セールスマン問題(以下SP問題とする)と同値であることが判明したことになる。ただし、サブネットワークにSP問題を適用する場合、原始ネットワーク上にはあらかじめ技術的順序関係が付加されているため、前述した条件1、2、3を満足するような管理的順序関係を付加する必要がある。また、図-2(b)に示したサブネットワークにSP問題を適用するためには、PNからアロー型ネットワークに変換する必要がある。

(2) PNからアロー型ネットワークへの変換

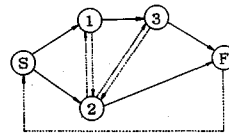


図-3 ハミルトン閉路 (図-2(b)参照)

図-4に示す原始ネットワークを例に、空間的干渉問題にSP問題を適用するため、PNからアロー型ネットワークへの変換方法を説明する。いま、図-4の工種2、3、4が空間的干渉を及ぼし合っているものとする、図-5のようなサブネットワークが抽出される。ただし、リンク (i, j) 上の数値は FS_{ij} (Finish-Start) の値を、ノード内の数値はその工種の所要時間を表わしているものとする。

図-4の原始ネットワークからサブネットワークを抽

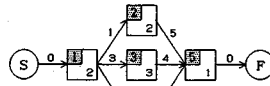


図-4 原始ネットワーク

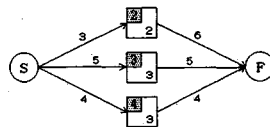


図-5 サブネットワーク

出する場合、原始ネットワークで除去されたノード（工種）の所要時間をおおののリンクの値（FS 値）に加算し、サブネットワークの新たなリンクの値とする。この場合、サブネットワークのノード間に複数のリンクが存在するときは、その中の最長リンクを選定することになる。次に図-5のサブネットワークにSP問題を適用するため、アロー型ネットワークを次の手順で作成する。

- (1) ノード i, j 間に技術的順序関係が存在する場合は、 $(FS_{ij} + t_j)$ の値を、そのリンクの所要時間とする（ただし、 t_j はノード j の所要時間）。
- (2) ノード i, j 間に管理的順序関係の候補リンクが存在する場合は、 t_j の値をそのリンクの所要時間とする。

したがって、図-5のサブネットワークは、図-6のようなアロー型ネットワークに変換されることになる。

以上の操作により得られた図-6のネットワークにSP問題を適用し、管理的順序関係を決定することになる。図-6の例では、①→②、②→③に管理的順序関係が付加され、その結果トータルネットワークは図-7のようになる。

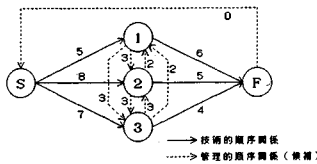


図-6 SP問題適用のためのアロー型ネットワーク

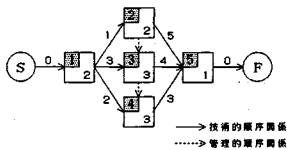


図-7 トータルネットワーク（図-4参照）

サブネットワークにSP問題を適用する場合、その工種数が多くなるとSP問題の解を求めるための処理時間が問題となる。しかし、本論文で考慮している原始ネットワークの工種数は数百から数千に及ぶこともあるが、その中で空間的干渉を考慮する工種数、つまりサブネットワークにおける工種数は、数個から多くとも数十個程度であるため、その処理には全く問題がない。またSP問題を解くパソコン用のプログラムも多く発表されているため、それらを利用することにより本研究で提案しているOPT-NETは容易に作成可能である。

(3) 時間的干渉を考慮したSP問題の適用

サブネットワーク上の工種には、技術的順序関係があらかじめ付加されているため、必ずしもすべての工種間

に管理的順序関係を付加する必要はない。逆にSP問題により管理的順序関係を付加することにより最適解を構成しなくなる場合がある。図-8はその典型的な例である。図-8のネットワークにおいて、同一空間内で干渉する工種間にSP問題を適用し、管理的順序関係を付加すると、④→③、③→⑥、⑥→⑤、⑤→⑧、⑧→⑦となることは明らかである（この場合の工期は180日となる）。しかし、⑧→③とただ1本の管理的順序関係を付加することが最適解になることがわかる（工期は140日）。

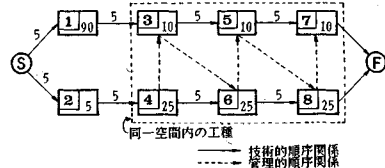


図-8 SP問題が直接適用できない例

このような問題が生じる原因は、SP問題が最短経路問題として定式化されているために各工種の着手可能時期（最早開始時刻）を考慮に入れていないことに起因する。このことよりサブネットワーク上のすべての工種に管理的順序関係を付加する場合、工期が干渉し合っている工種のみに着目する必要がある。この場合、サブネットワーク上の各工種はフロートをもっているため、工期の干渉問題は、最早開始状態において考慮することになる。なぜならすべての工種とも、最早開始以前に着手することは不可能であるし、またそれらに管理的順序関係を付加することにより、必ず最早開始時期が遅れることになるからである（当然、変化しない場合もある）。つまりサブネットワーク上のすべての工種が最早開始状況において時間的に干渉し合っていないければ、管理的順序関係は最早開始の最も早い工種から順次付加されることになる。

以上のことを図-9を用いて説明する。図に示したサブネットワークより最早開始状態における各工種の状況をバーチャート形式で図示すると、(1)の初期状態のようになる。ここで工種①は他の工種と時間的な干渉は発生せず、かつ最早開始時期が最も早いため、最初に着手されることになる。時間的に干渉している工種は、②と③、③と④であるが、最初に②と③の工種に対してSP問題を適用し、管理的順序関係を決定する。その結果、第1段階のようになり、次に工種③と④との間で検討を行うことになる。ここで問題となるのは、工種③と④の管理的順序関係を検討するにあたって、工種②を考慮する必要があるかどうかである。これは図から明らかのように、工種④の後に工種②を続けると、工種①が終了してから20日間の時間的間隔が空いてしまうことにな

る。しかし、工種④を③の前に着工させると工種②が終了してから5日間の間隔で開始可能となる。このことより、工種④は③の前後のいずれかに挿入することが適切であることがわかる。つまり工種③と④の順序関係を決定するにあたっては、工種②を考慮する必要はない。したがって、工種③と④との間でSP問題を適用し、管理的順序関係を決定する。以上の操作を繰り返すことにより、(4)のような最終結果が得られる(①→②→④→⑤→③)。

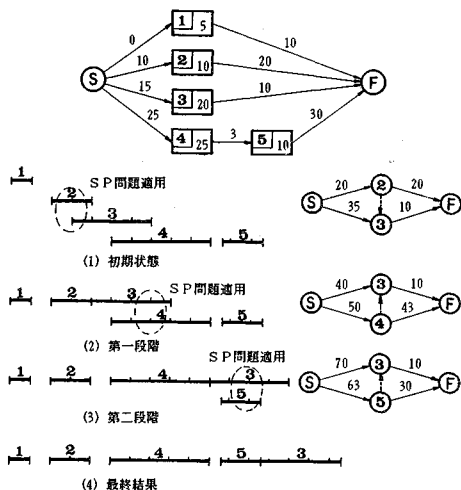


図-9 段階的 SP 問題の適用

以上のことを整理すると、図-10 のようになる。すなわち、サブネットワーク上において各工種の最早開始状態を求め、その結果時間的に干渉し合っている工種を抽出し、SP問題を適用し管理的順序関係を付加する。その結果、新たに別の工種との間に時間的な干渉が発生する場合は、以上の操作を繰り返し、すべての工種間に管理的順序関係を付加する。

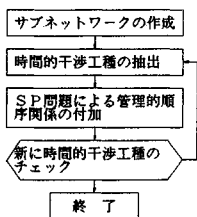


図-10 SP 問題適用のフロー

(4) 管理的順序関係の候補リンクの設定方法

サブネットワーク上のノードの結合状態を表わす行列を X とすると、行列 X はサブネットワークの技術的順序関係による隣接行列を構成することになる。

$$X = |X_{ij}| \dots\dots\dots (3)$$

$X_{ij}=1$: ノード i はノード j の先行作業である

$X_{ij}=0$: ノード i はノード j の先行作業でない

次にこの隣接行列 X の X^2, X^3, \dots, X^N の値を求めて、それぞれを加えて得られる行列 P は、式(4)のようになる。

$$P = |P_{ij}| = X + X^2 + \dots + X^N \dots\dots\dots (4)$$

$P_{ij} > 0$: ノード i から j に至る N ステップ以内のパスが存在する

$P_{ij} = 0$: ノード i から j に至る N ステップ以内のパスが存在しない

式(4)で $P_{ij} > 0$ の場合、ノード i と j の間には技術的順序関係があるため、その間に管理的順序関係を付加する必要はない。つまり、管理的順序関係を付加する候補リンクとしては、 $P_{ij} = 0$ のリンクに着目すればよいことになる。しかし、式(4)の方法では行列 X の積を幾度も繰り返し計算を行う必要があるため、式(4)を以下のように変形する。

$$P = X + X^2 + \dots + X^N = (I - X)^{-1} - I \dots\dots\dots (5)$$

式(5)より管理的順序関係が付加可能なリンクを表わす行列 $W = |W_{ij}|$ は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} P_{ij} = 0 \text{ のとき } & W_{ij} = 1 \\ P_{ij} > 0 \text{ のとき } & W_{ij} = 0 \\ W_{ij} = W_{ji} & W_{ii} = 0 \quad (i \neq j) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

よって、サブネットワーク上における管理的順序関係を付加する候補リンクとしては、 $W_{ij} = 1$ のリンクとなる。

4. 複数空間における複数工種の空間的干渉問題

前章においては、単一空間で複数の工種が空間的干渉を受ける場合の問題が、巡回セールスマン問題に帰着することを示した。本章では、これを一般的な複数空間における複数工種の空間的干渉問題に拡張する。ここで複数空間とは、図-11 に示すように複数の工種が複数の空間に及んでいる場合である。

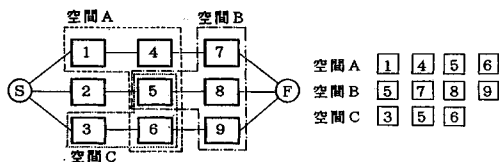


図-11 複数空間の複数工種の例

複数空間における複数工種の空間的干渉問題は、複数のサブネットワークをおのおの独立した問題として考えることにより、SP問題を適用することが可能である。しかし、ある工種が複数のサブネットワークに影響を与えている場合は、その順序を一意的に決定することはでき

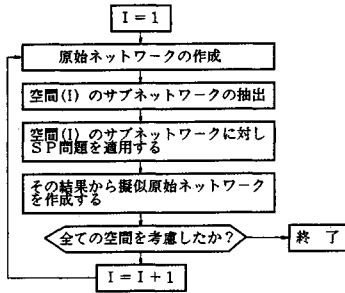


図-12 複数空間の干渉問題のフロー

ない。したがって、本論文では、図-12に示すようなフローに従って複数空間の干渉問題の検討を行う。

つまり原始ネットワークから、あるサブネットワークを抽出、それにSP問題を適用し、管理的順序関係を決定する。その結果を原始ネットワークに戻し(擬似原始ネットワークを作成する)、それを改めて原始ネットワークとし、その結果から次のサブネットワークを抽出、SP問題の適用の操作をサブネットワークの種類だけ繰り返すことにより、すべての管理的順序関係を決定する方法を採用している。したがって、すべてのサブネットワークの重ね合わせが終了した段階において初めて空間的干渉を考慮した実行可能なトータルネットワークが作成できることになる。しかし、以上の操作により得られるトータルネットワークが必ずしも最適である保障はない。なぜなら考慮するサブネットワークの順序により、トータルネットワークの結果(全体の工期)が変化することは明らかであるため、その重ね合わせの順序が問題となる。本研究では、サブネットワークの重ね合わせの方法として以下に示す2つの方法を採用している。

(1) 辞書的探索法

この方法は、図-13に示すように考慮する空間数のすべての組合せを考慮するものであり、(レベル3)において初めて実行可能な解が得られることになる。しかし、本方法は考慮すべき空間数が多くなると、その組合せ数が指数的に増大するため、その計算処理に多大の時間を要することになる。著者の検討結果では、その処理にパソコンを使用するとすれば、同時に考慮できる空間数と

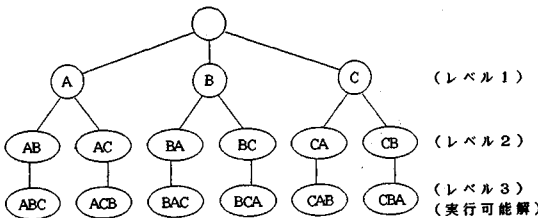


図-13 辞書的探索法の組合せ(空間数3)

しては10程度が限界と考えられる。

(2) B A B 法

辞書的探索法のようにすべての可能解を調べるのではなく、可能解の部分集合を系統的に求める方法にBAB法がある。図-14は、BAB法による探索手順の例を示しており、始めに(レベル1)での目的関数の値(工期)の最小値を求め、最小値を示す節点において次々に分枝操作を繰り返し、暫定解(図-14の例では、BA) $f^*=12$ を求める。次に、その暫定解より小さい値の上位レベルの節点(例ではC $f=11$)の分枝操作を行うことにより、目的となる数値が最小となる組合せの接点を求めるものである。この場合、辞書的探索法と同様に(レベル3)まで到達して初めて実行可能なトータルネットワークが構成されることになる。

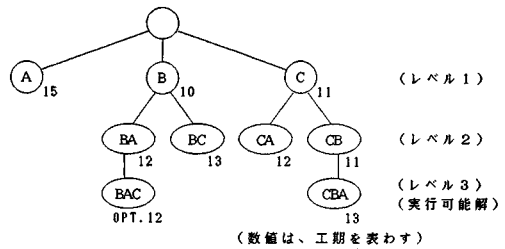


図-14 BAB法による接点探索手順の例

この方法は、前述した辞書的探索法に比較して計算時間は短くなるが、考慮すべき空間数が多くなるとパソコンレベルの計算機ではその能力に限界がある。そこでBAB法による計算時間の削減のための改良策として次の2つの方法が考えられる。

a) 同じ分枝の除去

BAB法による分枝の途中において、たとえばサブネットワーク $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow \dots$ の順序で重ね合わせ、暫定解が求まったものとし、別の枝で $B \rightarrow A$ の順序で重ね合わせた擬似原始ネットワークが、先程決定された $A \rightarrow B$ の順序の擬似原始ネットワークと全く同じであれば、 $B \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow \dots$ (C以後は同じ)は当然 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow \dots$ の解以上の改善は起こり得ないため以後の分枝操作を中止する。

b) 相対誤差の導入(改良BAB法)

BAB法において任意時点での実行可能解 f^* を近似値として選んだときの最適値 f_0 (未知)に対する相対誤差PRE(%)は、次のように表わされる。

$PRE = (f^* - f_0) / f_0 \times 100 \dots\dots\dots (7)$

次に前述したBAB法による節点の探索基準では、暫定解 f^* より小さい節点(i)へ戻る基準として、 $f_i < f^*$ となるように節点を選択している。そこで除去条件 f^* の代わりに

$$LB = \frac{f^*}{1 + \alpha/100} \quad (100 > \alpha \geq 0) \dots\dots\dots(8)$$

を用いることに変更すれば、最終的にすべての未探索節点の f_i の値が LB 以上になったとき、その時点での f^* を与える実行可能解が $PRE \leq \alpha$ (%) の誤差を許容した近似解を与えることになる。この場合、 α の値を大きくすれば、BAB 法による探索節点の数は少なくなり、計算処理時間も短くなるが、解の信頼性が低下していくことになる。式(8)で $\alpha=0$ とした場合には、前述した BAB 法と一致する。

以上、空間数が多くなった場合の BAB 法の改良策として 2 つの方法を提案した。同じ分枝の除去は問題ないが、2 番目の相対誤差の導入は α の値の設定基準が問題である。これは考慮すべき空間数とネットワークの質により一意的に決定できないが、著者の検討によると $\alpha=1$ としただけでも、かなりの効果（計算時間の短縮）が認められた。これは図-14 に示した同レベルの節点において同一の工期を与えるものが多く存在するため、以後の分枝操作を行わないことによる。ただし、同一の工期を与える節点の場合は、フリーフロートの合計値の大きい方の節点の値を保存することにする。

(3) OPT-NET の妥当性

OPT-NET は、空間的干渉を生じている工種のみからなるサブネットワークに対し、管理的順序関係を付加する方法として、巡回セールスマン問題の適用を図り、その解を求めている。この場合、単一空間への適用に関しては、その定式化から最適解が得られるが、複数空間への適用にあたっては、その解が最適解を保障しているかの疑問が残る。つまり、本研究で提案している方法は、個々のサブネットワークの管理的順序関係を順次決定し、その結果を重ね合わせることにより最終的な結果を得ている。その結果が真の意味での最適解を構成しているかを理論的に判断することは困難であるため、本論文では数種の仮想ネットワークに適用し、実証的な検証を行った。

図-15 は、検証に用いた原始ネットワークの一例を示している。ここでは 3 つの空間的干渉を考えており、おのおのサブネットワーク別の工種は図に示すとおりである。図-15(2)、(3)、(4) は、各サブネットワークを単一空間として SP 問題を適用し、管理的順序関係を求めた結果を表わしている。次におのおのサブネットワークを前述した BAB 法（同じ分枝の除去）を用いて、その最適解を求めた結果、図-16 のようなトータルネットワークが決定された（工期 62 日）。図-15 と比較すると空間 B の管理的順序関係が単一空間の場合と異なっていることがわかる。この解の妥当性を検討するため、総当たり法による結果との比較を行った。つまり、空間

的干渉を受ける工種間に付加可能なリンクを取り出すと、 $3 \leftrightarrow 4$, $3 \leftrightarrow 11$, $4 \leftrightarrow 7$, $5 \leftrightarrow 6$, $5 \leftrightarrow 8$, $6 \leftrightarrow 7$, $6 \leftrightarrow 9$, $7 \leftrightarrow 8$, $7 \leftrightarrow 11$, および $8 \leftrightarrow 9$ の 10 個ある。これらの 10 個のリンクにどちらかの向きを与え、すべての組合せを行う総当たりを実施した（組合せ総数 $2^{10} = 1024$ ）。その結果を表-1 に示す。表-1 で Loop とあるのは、結果的にネットワークがループを構成し、実行不可能なものであり、全体の 85% を占めている。実行可能なネットワークは、その工期が 62 日から 108 日まで分布しており、その大部分が 70~97 日に集中している。また最短期（62 日）を与えるネットワークが 3 種類あった。

その他の仮想ネットワークに対しても検討を行ったところ、同様に OPT-NET が最短期を与えることがわかった。ただし、表-1 のように複数のネットワークが最短期をもつ場合には、OPT-NET ではそれらのネットワークの中で、フリーフロートの合計が最大となるようなネットワークをトータルネットワークとして決定するようにプログラム化されている。

参考として、相対誤差 (α) を導入した結果、 $\alpha=10$ の場合は最適解と一致（工期 62 日）し、 $\alpha=20$ 以上にすると工期が 72 日となったが、計算時間は $\alpha=0$ の場合の 1/3 程度に短縮された。

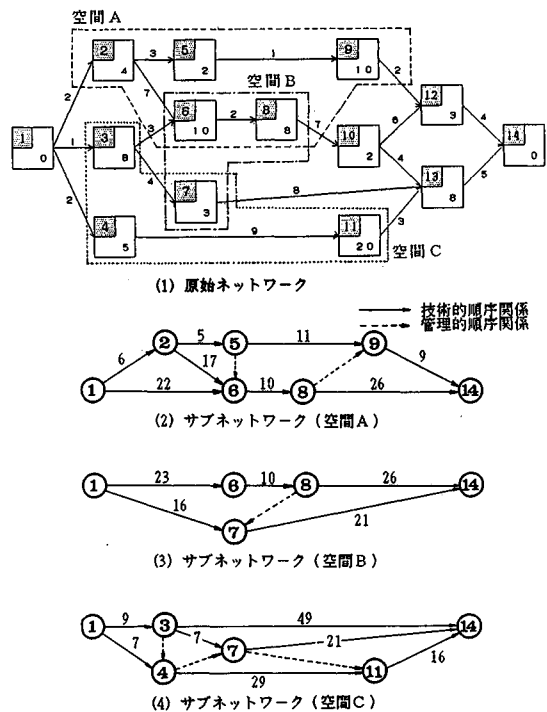


図-15 原始ネットワークおよびサブネットワークの例

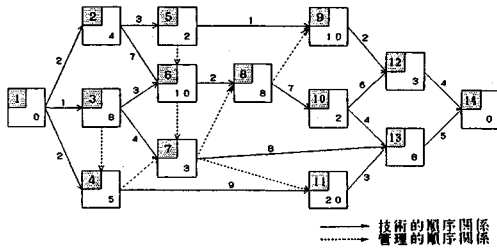


図-16 トータルネットワーク (図-15(1)参照)

表-1 総当たり法による結果

工期	62	63	64	66	67	68	70-79
度数	3	3	3	3	8	8	31
工期	80-88	92-97	100-108	Loop			
度数	20	21	8	916			

5. OPT-NET の適用例

OPT-NET による空間的干渉を考慮したスケジューリングネットワーク作成の事例として、H 空港のターミナル地区の工事を取り上げる。同地区にはモノレール(地下)、地下鉄、共同溝、立体駐車場、ターミナル施設等(図-17 参照)の施設が平面的・立体的に輻輳しており、現在その一部の工事が行われている。ただし、本論文で考慮する工種やその期間、工種の順序関係、工種間の空間的干渉に関しては、同地区のデータをもとに著者が作成したものであり、必ずしも現実的なものではないが、OPT-NET を適用するには適切な事例であると考えられる。なお、計算は BAB 法(同じ分枝の除去)を採用した。

表-2 は、図-17 より抽出された 42 の工種(s, f を含め 44 工種)とその作業内容、各工種の工期、および技術的順序関係(後続作業番号)を表わしている。なお、本事例は概略工程を作成することを目的としているため、各工種の工期は月単位となっている。図-18 は、すべての工種の位置を平面的に表示したものであり、ここから各工種の作業位置が干渉し合っているかを判断することができる。

始めに、作業空間が干渉し合っている工種を選び出し、1 つずつグループ化していく。すべてのグループが抽出された後、それらのグループから管理的順序関係を付加し得ないグループ、つまり技術的順序関係がすでに付加されているものを削除すると、最終的に表-3 に示すような 6 つのグループが残った。したがって、OPT-NET を適用するための考慮すべき空間数としては 6 個とし、BAB 法による重ね合わせにより、管理的順序関係を付加することにする。

ここで、たとえば、表-3 の空間 A では 4 つの工種の

表-2 原始ネットワークの各工種別内容

No	工種	作業	工期	後続作業番号
1	START			2, 3, 4, 5, 16, 17, 18, 19, 20
2	モノレール 北側	鋼矢板	1	6
3	モノレール 南側	鋼矢板	1	7
4	地下鉄山留工	鋼管矢板	2	8
5	地下鉄躯体工	改良1	2	9
6	モノレール 北側	改良	1	10, 11
7	モノレール 南側	改良	2	12, 13
8	地下鉄山留工	改良	3	14
9	地下鉄躯体工	鋼管矢板	1	15
10	モノレール 北側	N-5	7	44
11	モノレール 北側	N-2	7	44
12	モノレール 南側	S-15	8	44
13	モノレール 南側	S-2	7	44
14	地下鉄山留工	K-4	7	44
15	地下鉄躯体工	改良2	2	21
16	地下鉄躯体工交差部	改良	3	22
17	建築西ターミナル	杭打ち	3	23
18	共同溝	C-1	6	35
19	モノレール 北側	鋼管矢板	4	24
20	モノレール 南側	鋼管矢板	1	25, 26
21	地下鉄躯体工	K-2	5	27
22	地下鉄躯体工交差部	K-1	8	27, 28, 29, 39
23	建築西ターミナル	掘削	2	34
24	モノレール 北側	改良1	1	30
25	モノレール 南側	改良1	1	31
26	モノレール 南側	ソイル壁	2	31
27	地下鉄躯体工	通路	3	44
28	地下鉄躯体工交差部	通路	3	32, 44
29	モノレール	埋め戻し	1	33
30	モノレール 北側	N-12	8	35, 44
31	モノレール 南側	改良2	2	36
32	建築立体駐車場	杭打ち	2	37
33	モノレール	N-1・S-1	2	38
34	建築西ターミナル	鉄骨躯体1	7	39, 40, 44
35	共同溝	B-1	4	40
36	モノレール 南側	S-13	7	44
37	建築立体駐車場	躯体	14	41
38	モノレール	通路	3	44
39	建築西ターミナル	鉄骨躯体2	8	42
40	共同溝	C-2	3	44
41	建築立体駐車場	舗装	2	44
42	建築西ターミナル	内装設備	10	43
43	建築西ターミナル	仕上げ	8	44
44	FINISH			

(工期は1カ月単位)

同一空間内での作業であるが、図-19 から明らかなように、2 → 6、6 → 10、6 → 11 にはすでに技術的順序関係が付加されているために、管理的順序関係(SP 問題の適用)は、工種 10 と 11 との間で検討されることになる。また工種 10 と 11 は最早開始状態において時間的にも干渉しているため、管理的順序関係を付加する必要がある。

図-19 は、表-2 より作成された原始ネットワークを表わしている(クリティカルパスの長さ 38 か月)。ただし各工種間の FS 値はすべて零とする。以上の作成したデータを用いて、OPT-NET により空間的干渉を受ける工種間に管理的順序関係を付加すると、表-4 に示すような結果となった。このときのグループの重ね合わせの順序は、A → B → F → D → C → E となり、最短期間 38 か月が得られた。そのときの各グループでの工種間の作業順序は図-20 に示すとおりである。

以上、H 空港のターミナル地区の工事を事例に OPT-NET の適用を図り、その実用性の検討を行った。事例では、原始ネットワークの工期が 38 か月であり、空間的干渉を考慮してもその工期の延長は生じなかった。これは原始ネットワークにおけるクリティカルパスが、西

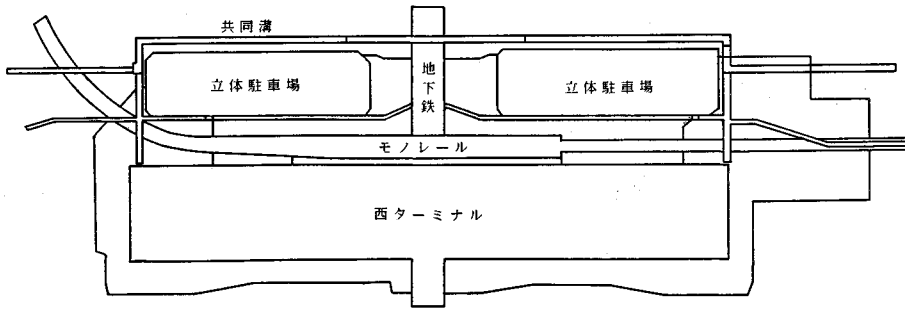


図-17 H空港ターミナル地区の概略平面図

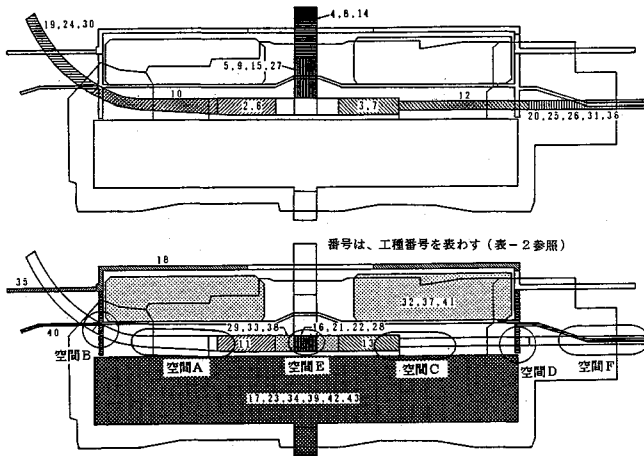


図-18 工種別位置図

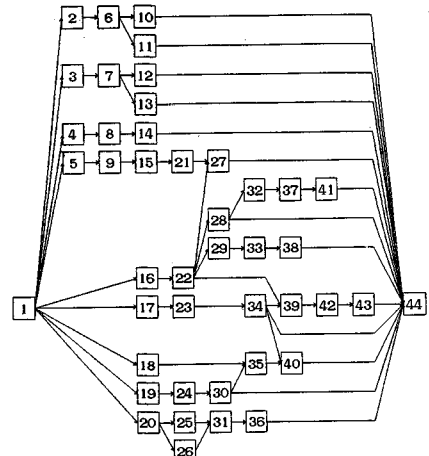


図-19 原始ネットワーク

表-3 空間的干渉を及ぼし合う工種のグループ

作業グループ番号	作業ノード番号
空間 A	2, 6, 10, 11
空間 B	2, 6, 10, 40
空間 C	3, 7, 12, 13
空間 D	3, 7, 12, 40
空間 E	16, 21, 22, 28
空間 F	20, 25, 26, 31, 36, 40

表-4 付加すべき管理的順序関係

i → j に管理的順序関係を付加する			
11 → 10	10 → 40	25 → 26	36 → 40
13 → 12	12 → 40	21 → 28	

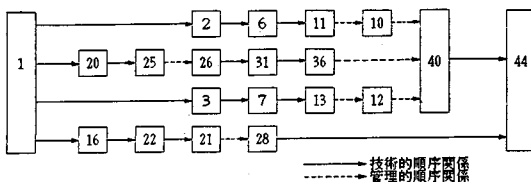


図-20 各空間での作業順序

ターミナルの建築に関連する工種 (1 → 17 → 23 → … → 43 → 44) を通過しており、今回考慮した空間的干渉の影響を直接受けなかったこと、クリティカルパス以外の工種のフリーフロートが大きかったことによる。

6. 結論と今後の課題

本論文は、空間的干渉を受ける工種間に管理的順序関係を付加する手法として、OPT-NETを開発し、その適用性についての検討を行ったものである。OPT-NETは、技術的順序関係のみで記述された原始ネットワークから同一空間からなるサブネットワークを抽出し、それに巡回セールスマン問題を適用、管理的順序関係を付加する方法である。また考慮すべき空間が複数の場合の処理として、BAB法による方法を用いているが、その空間数がさらに多くなった場合には、計算処理時間の問題から改良BAB法を提案した。以上の結果から得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) 空間的干渉を受ける工種間に管理的順序関係を付加する問題が、ハミルトン閉路上の最短経路問題と同

値であり、またその解が巡回セールスマン問題により求められることを示した。ただし、SP問題の適用は空間的かつ時間的（最早開始状態）にも干渉している工種のみに着目すれば良いことが明らかとなった。

(2) 巡回セールスマン問題を解くためのプログラムは、その解法は異なるものの多く発表されているため、それを利用することにより、OPT-NETは容易に作成可能である。

(3) 各工種に空間的位置のデータを付加しておくことにより、OPT-NETの適用はもちろんのこと、スケジューリングの計画・管理だけではなく、工種間の空間的關係や出来形状況も容易に判断可能となる。

(4) OPT-NETを空港工事に適用し、その実用性の検討を行い満足すべき結果を得た。しかし、OPT-NETの実用化にあたっては、工種の画面表示の問題とその結果をもとにした工種間の空間的干渉の把握の自動化を進める必要がある。

(5) 本論文で事例として採用したH空港は、多くの工事が狭い空間内で複雑に輻輳しており、また工事期間も限定されていることから、適切な施工管理が要求されている。しかし、一般的にわが国においては、受注者側において工事の工程管理が行われていることが多いため、各建設会社が施設全体の工程管理や各種の調整を行うことが困難となっている。したがって、このような業務は発注者側や全体を管理するようなコンサルタントにより行われる必要があるが、必ずしも十分な体制が整っているとは考えにくい状況にある。本論文で提案したシステムは、このような大規模工事において各工事間の調整を空間的干渉といった側面から整合性のある工程作成を目的として実施したものである。そのため表一2に示したように工種分類も非常に粗いものとなっている。今

後は、搬入資材の制約等も考慮できるようなシステムの拡張を行うことにより、より実際のシステムとすることが不可欠であると思われる。

最後に本研究の実施にあたり、適切な助言をいただいた東北大学 稲村 肇助教授、資料の提供と種々の便宜を受けた運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所に対して深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 池田将明：知識工学を適用した工程計画案方法に関する研究，土木計画学研究論文集，No. 7，pp.59～66，1989.12.
- 2) Ayyub, B.M. and Haidar, A.: Project Scheduling Using Fuzzy Set Concepts, J. of Const. Eng. and Mana., Vol. 110, No. 2, pp.189～204, 1984.6.
- 3) 平田・湯沢：空間的干渉を考慮した最適ネットワーク作成方法の開発，土木計画学研究講演集，No. 12，pp. 191～198，1989.12.
- 4) 奥山・佐藤：座標式工程表による工程計画手法の開発，港湾技術研究所報告，Vol. 23, No. 3, 1984.9.
- 5) Selinger, S.: Construction Planning for Linear Projects, J. of the Const. Div., Vol. 106, No. C02, pp.195～205, 1984.9.
- 6) 折田・山本・村林：作業空間を考慮した工程計画立案支援システムについて，土木計画学研究論文集，No. 7，pp. 51～58，1989.12.
- 7) 須田・湯沢：メッシュ式工程管理モデルによる港湾工事の工程管理，土木学会論文集，No. 359，pp.71～80，1985.7.
- 8) 吉川・春名：施工計画における最適ネットワークの作成法に関する一考察，土木学会論文報告集，No. 182，pp. 41～58，1970.10.
- 9) 古林 隆：ネットワーク計画法，pp.112～116，1984.
(1990.3.16・受付)