

知識工学の配管ルーティングCADへの応用

Application of Knowledge Engineering to Computer-Aided Pipe Route Planning

プラントの配管の経路は、設計者が自分の頭の中にある設計基準やノウハウを用い試行錯誤によって決めており、設計工数が多いこと、簡単には最適な経路が求まらないことなどの問題があった。これらの問題を解決するため、知識工学を応用して、クライテリアと称する設計基準やノウハウに基づいて自動的に最適経路を決定する手法を開発した。

本手法では、初めに、知識ベースに格納したクライテリアを用いて、知識工学の推論の手法により、経路決定問題の解決手順や個々の経路が満たすべき制約条件を導く。次に、この解決手順や制約条件のもとで、数え上げによる最短経路探索手法に基づき経路を決定する。本手法を、原子力プラントのタービン建屋に試験的に適用し、手法の有効性を確認した。

小林康弘* Yasuhiro Kobayashi

木口高志* Takashi Kiguchi

満田 透** Tôru Mitsuta

和田 裕** Yutaka Wada

好永俊昭*** Toshiaki Yoshinaga

1 緒 言

現在、プラントの配管ルーティング(経路計画設計)は、計算機シミュレーションモデルやプラスチックモデルを用いた対話的な処理が主体である¹⁾²⁾。この理由の一つは、配管ルーティングでは、(a)経路が満たすべき仕様が配管ごとに異なり画一的に定まらず、(b)その仕様が設計者のもつルーティングクライテリア(設計基準、ノウハウなど)から決まるため、設計者の介入が必要となることにある。その結果、配管の経路は、クライテリアに基づいて試行錯誤的に計画することになり、設計工数が多いこと、簡単には最適な経路が求まらないことなどの問題があった。

本研究の目標は、知識工学の方法³⁾⁴⁾を応用することにより、クライテリアのような形の知識を計算機で取り扱うことができることに注目して、クライテリアを反映した自動ルーティング手法を開発することにある。この手法を実現するための技術的課題は、クライテリアを反映する知識工学的手法と3次元経路を自動的に求める最適化アルゴリズムを開発し、両者を結合することである。

2 自動ルーティングの手法の概要

自動ルーティング手法の基本構成を図1に示す。全体の構成は3階層のモデルで表わしてある。上の階層は、最適化アルゴリズムによる経路探索のステップを含んでおり、レイアウトの空間を領域分割し、領域要素を数え上げる探索手法により経路を決定する手順に対応する。下の階層は、知識ベースに格納したクライテリアを用いて、上の階層で経路探索を行なう上で指針となる条件を設定する。ステップ③の「経路探索条件の設定」では、上の階層の最適化アルゴリズムと下の階層の知識ベース利用を中間の階層により結合する。この階層は、フレーム⁵⁾という階層的なデータ構造を記述するのに適したダイナミックなテーブル形式であり、ここでは問題解決手順、制約条件・評価基準という形の知識を表現している。

基本構成の図は、クライテリアの反映には、二つのフェーズがあることを示している。第一のフェーズはルール⁶⁾の形で表現したクライテリアを用いて推論により経路探索条件を求

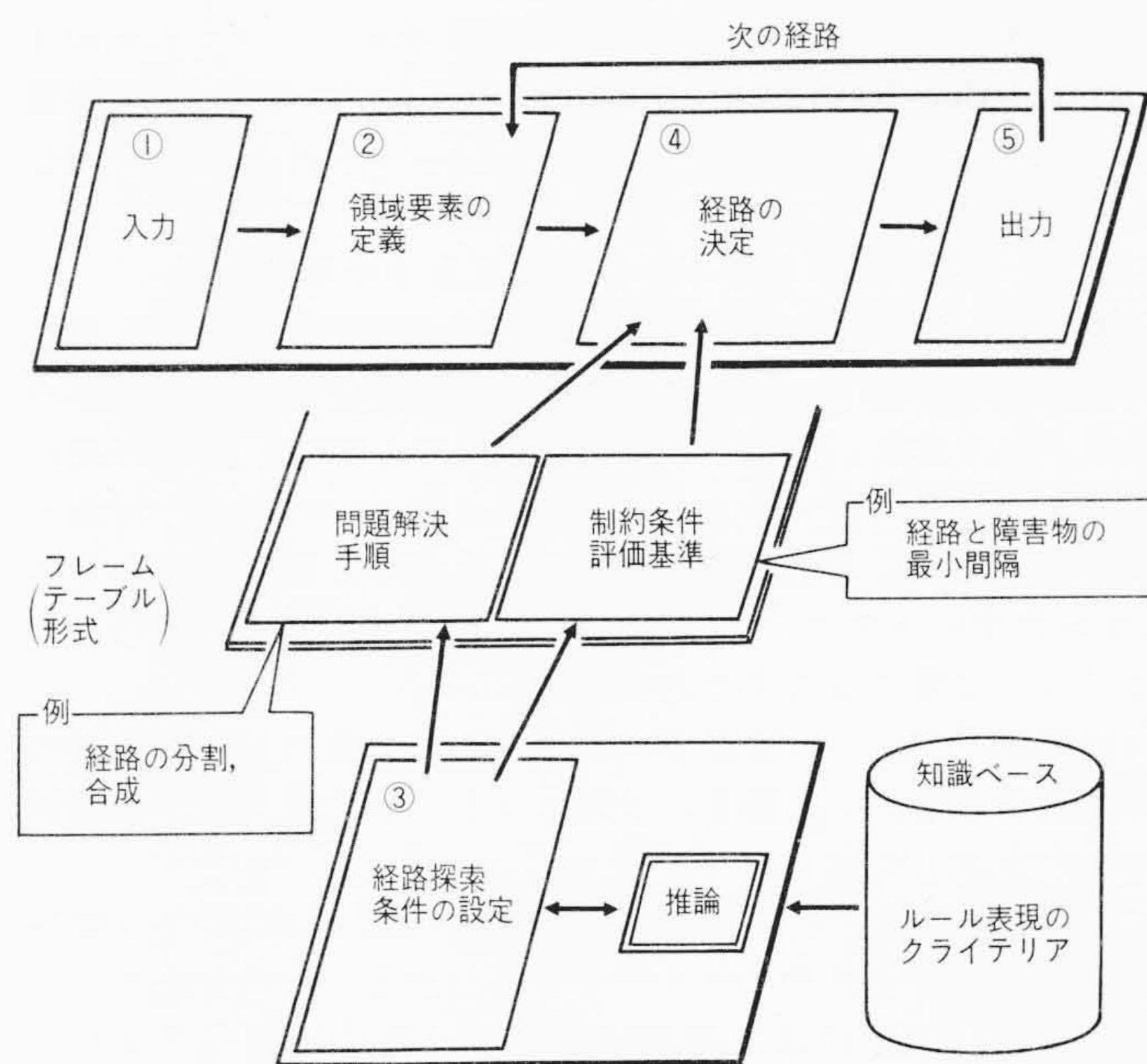


図1 自動ルーティング手法の基本構成 ○囲みアラビア数字は処理ステップを、→は情報の流れを表す。本手法は、最適化アルゴリズム(上の階層)、クライテリアを利用するための推論(下の階層)、及びこの両者を結合するデータ構造(中間の階層)から成る。

め、この結果をフレームに表現することである。これは、下の階層と中間の階層を関係づけるものである。第二のフェーズは、フレーム表現した情報を指針として最適化アルゴリズムで利用することである。これは、中間の階層と上の階層を関係づけるものである。すなわち、クライテリアのルーティングへの反映は、クライテリアの内容をフレーム表現に抽出し、フレーム表現からの情報を経路探索アルゴリズムでの処理に反映するという二つのフェーズにより実現する。

自動ルーティングの処理フローは、図1に示すように、上の階層でのアルゴリズムと下の階層での推論が組み合わされた処理となる。

* 日立製作所エネルギー研究所 工学博士

** 日立製作所エネルギー研究所

*** 日立製作所日立工場

3 推論によるクライテリアの反映

3.1 クライテリア

従来の配管ルーチングの手順が試行錯誤的な対話処理主体となり、自動化が困難となる理由は、ルーチング クライテリアの存在にある。計算機シミュレーションモデルの場合、ルーチング対象の位置関係の記述を計算機化することには成功している。しかし、設計者の頭の中にあるクライテリアを計算機化することは、数値演算を主体とする従来の方法では困難であった。

代表的なルーチング クライテリアの例を図2に示す。これは、次のように、それぞれ典型的なクライテリアのタイプを示している。

- (1) ルーチングの対象区画内で、配管の種類、特徴によっては経路設定が不可となる空間領域(エリア)が存在すること。
- (2) 配管の種類や特徴、機器あるいはエリアの種類や特徴に従って、適切な最小間隔を保持する必要があること。
- (3) 配管内の流体の種類(区分)によっては、経路の設定が不可となる方向が存在すること。

このようなクライテリアを表現したり、クライテリアの間の関連をチェックするため、知識表現推論プログラムKRIT (Knowledge Representation and Inference Tool)⁶⁾を知識ベースの管理に用いている。本稿では、クライテリアの例として上記(2)を取り上げて、方法の説明に用いることにする。

3.2 クライテリアをルーチングに反映させる手順

図3は、クライテリアの反映の手順を説明した図である。この手順は、図1の基本構成のステップ③「経路探索条件の設定」を主体として実行される。図3で左側は、処理の流れを、右側は経路フレーム、クライテリアという処理の対象を示している。ここで説明に取り上げた例は、配管と他のく体(コンクリートブロック)、機器との最小間隔についてのクライテリアに関するものである。

経路は、フレーム表現でスロットとその値の組み合わせの形で表わしておく。図3にはスロット、値の組の形で代表的なものを示してある。

図3では、ステップ③の中の小ステップで経路Lの最小間隔に関する情報をクライテリアから抽出する。そのためステップ③では、図1の基本構成にあるように、知識ベースを用

クライテリアの例	模式図
経路設定不可の領域 ●薬品系配管は、通路スペースの上を通さない。	
経路の最小間隔 ●低線量配管は、分解作業スペースから2,500mm以上間隔をおく。 ●大口径配管は、機器、く体、他の配管から300mm以上間隔をおく。	
経路の方向 ●蒸気ドレン配管は、下った後の直管部の後に上昇部を設けない。	

図2 配管ルーチング クライテリアの例 設計者が配管ルーチングに用いるクライテリア(設計基準、ノウハウなど)の代表的な例である。このようなクライテリアを図1の知識ベースに格納する。

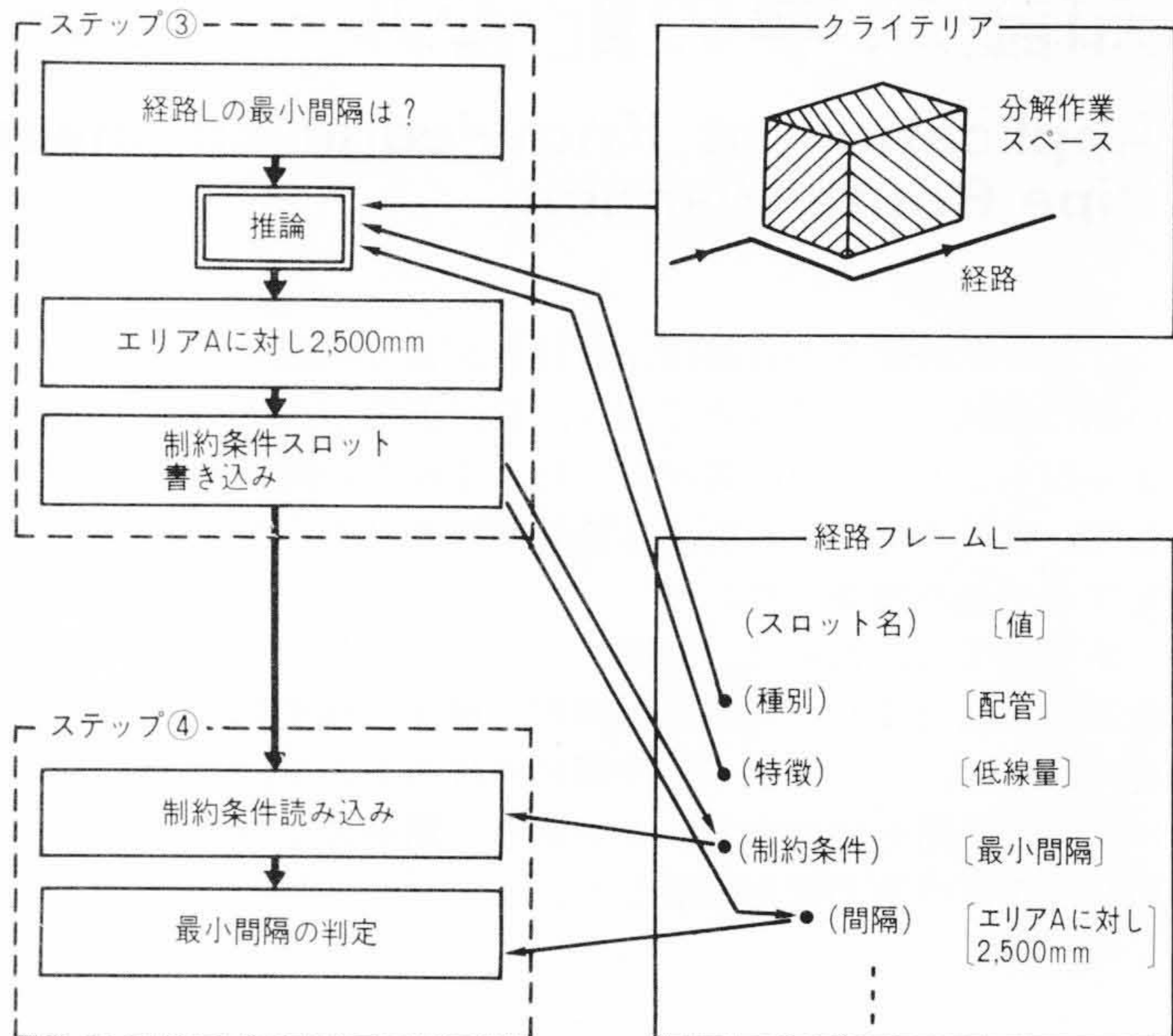


図3 経路探索条件の設定 黒丸は処理の詳細な流れを、→は情報の流れを示す。図1のステップ③で、クライテリアの内容はフレームというテーブル形式に整理され、ステップ④で配管の経路に反映される。

いて経路Lの最小間隔に関し推論を実行する。このときの推論は、「経路Lに対する最小間隔は何か」という質問に回答する形で行なう。例としているクライテリアは、図2で紹介したものである。ここで、経路Lは経路特徴のスロットから分かるように「低線量配管」であり、エリアAはフレーム表現の上でエリア種類スロットの値として「分解作業スペース」をもっている。知識ベースのクライテリアとフレーム表現に含まれている情報を組み合わせて推論することにより、「エリアAに対しては2,500mmの最小間隔をとる」という推論結果が得られる。この結果を経路フレームに追加記入する。図3に示すように、制約条件スロットに「最小間隔」と書き込み、間隔スロットを設け、値「エリアAに対し2,500mm」を書き込む。このようにしてステップ③では、知識ベースを用いて経路を特徴づける経路フレームの種々のスロットにクライテリアを反映させる。

ステップ④の「経路の決定」には、制約条件のチェックの小ステップが含まれる。このときの処理の流れは、ルーチング対象に関しどのような制約条件が含まれるかを経路フレームについて調べ、対象となる制約条件をチェックする関数を呼び出し、フレームの制限値を用いて制約条件の成否を判定するという手順をとる。このようにして、フレームの形で表現した経路探索条件に基づいて経路探索のための最適化アルゴリズムをガイドすることにより、クライテリアをルーチングに反映することが可能となる。

4 最適化アルゴリズムによる経路の探索

4.1 領域要素の定義

図1の基本構成のステップ②「領域要素の定義」では、ステップ④で数え上げにより経路探索を行なうために、空間をメッシュに分割し、領域要素を定義する。

本手法では、領域要素に関連して、自動ルーチングに必要なデータ記憶容量の縮小や計算時間の短縮を図るため、次のような工夫を行なっている。

- (1) 空間のX,Y,Z軸に平行な図形による障害物、経路の表現

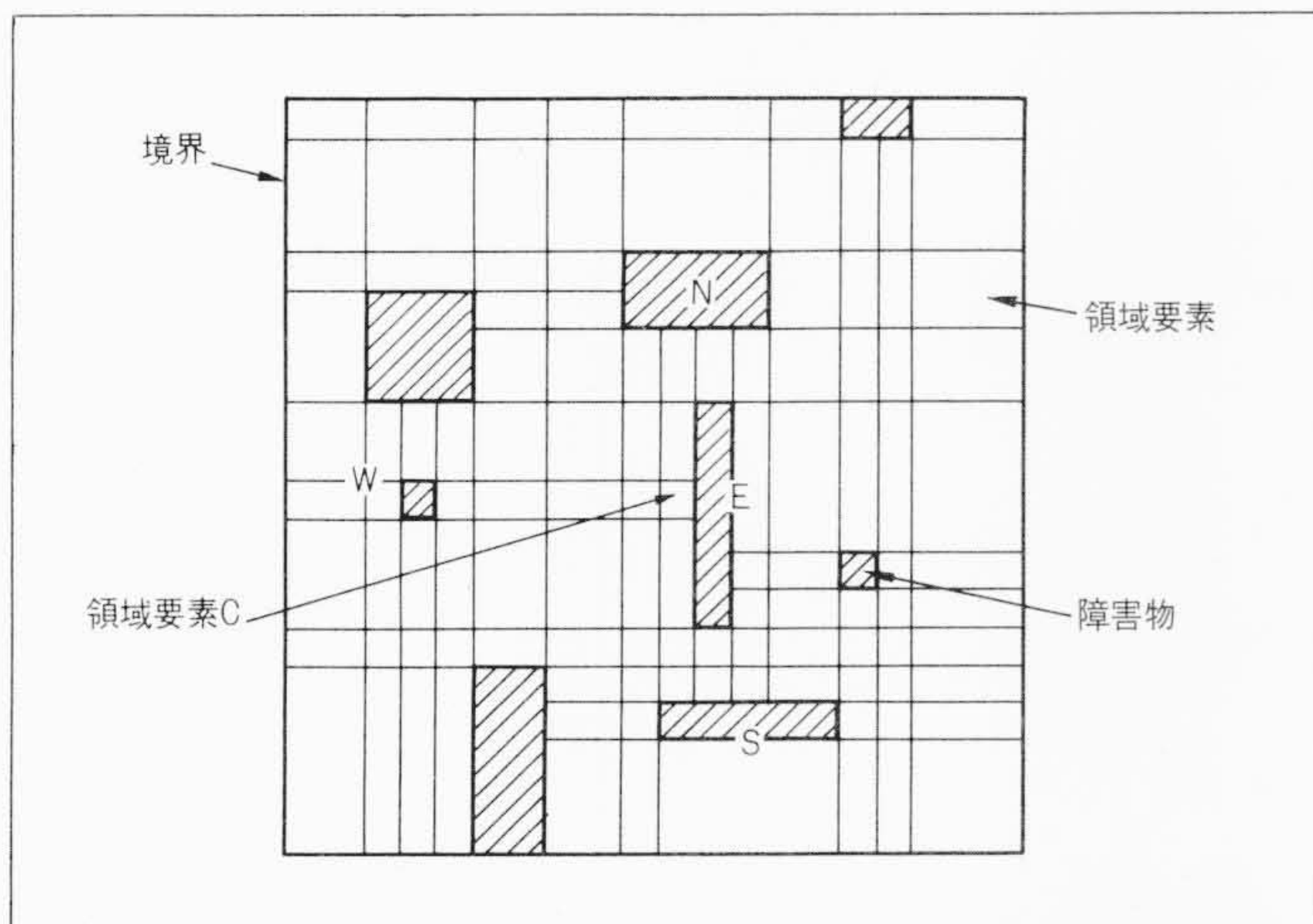


図4 領域要素の定義 図1のステップ②では、障害物の間の位置関係に基づいて空間にメッシュを切り、経路探索の単位となる領域要素を定義する。要素Cは障害物N, S, E, Wのすべてに面する最大の要素である。

(2) 障害物の配置に対応した領域要素の採用

図4は、自動ルーチング手法で用いた領域要素を説明したものである。ここでは、2次元の場合を例として、障害物の配置に対応した領域要素⁷⁾に関し説明する。同図で領域要素Cに注目する。領域要素Cは、上方に障害物N、下方に障害物S、右側に障害物E、左側に障害物Wを見通す位置関係にある。しかも、領域要素Cは、このような位置関係をもつ領域要素として最大のものである。このように、障害物の位置関係に基づいて、領域要素を分割することにより、比較的少数のデータによって、空間での基本的な位置関係を表わすことが可能となる。

ここで領域要素には、属性として位置座標、隣接の領域要素、隣接の障害物を定義している。領域要素は、このような属性に対応したスロットをもつフレームとして、空間の位置関係に関する知識を表現している。

今回開発した自動ルーチング手法では、対象とする空間は3次元であり、領域要素も3次元となる。

4.2 経路の決定

図1の基本構成のステップ④「経路の決定」では、ステップ②で定義した領域要素に基づいて、最適化アルゴリズムにより経路を決定する。知識ベースに格納したクライテリアを最終的に反映するのは、このステップ④である。ここでは、経路決定のアルゴリズムとしては、プリント基板、LSIの配線に用いられている迷路法^{8),9)}に注目した。このアルゴリズムは、最短経路が存在する場合には、確実に解を求めることができるという特長をもつ。これは、配管ルーチングで、自動化を追求する上で重要である。他の簡便な手法では必ずしも確実に経路が見つからないという難点がある。迷路法は、信頼性の高い経路探索の方法であり、この特徴を生かした上で、処理効率の改良を図ることにした。

ステップ④の最適化アルゴリズムとして、この迷路法を拡張して使用している¹⁰⁾。図5は、拡張迷路法を説明するためのものである。

(1) 迷路法の原理

迷路法の原理について、2次元の簡単な例を用いて説明する。図5の例で、上及び中の図は、迷路法による探索の初期を、下の図は末期の状況を示している。図5で斜線を施した部分は障害物、Sはスタート、○はゴールを示している。領域

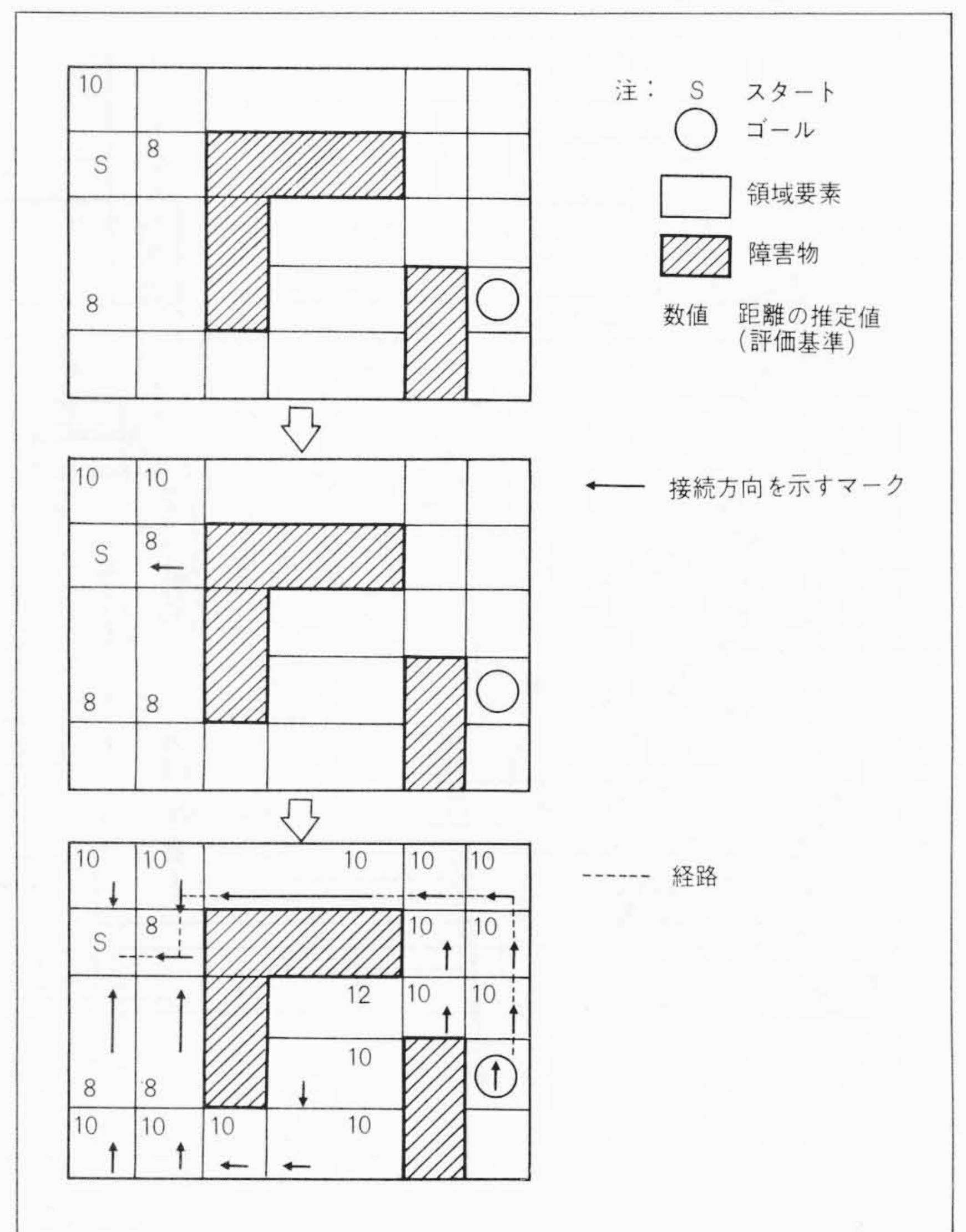


図5 経路の決定 図1のステップ④で用いた経路探索法の原理を示すため、2次元の簡単な例について経路探索のプロセスを示したものである。本図の上部は、スタートを基点とした探索の結果を、中央部はスタートの右の要素を基点とした探索の結果を、下部は探索終了時の結果を表わす。

要素として、障害物の配置に対応したものをを用いている。

迷路法は、スタートから波紋が周囲に広がっていくように、領域要素を数え上げて、ゴールまでの最短経路を求める最適化アルゴリズムである。図5の上の図では、スタートから上下右の要素に対しゴールまでの距離の推定値を評価基準(コスト)として、数値10, 8を求めている。距離の推定値とは、スタートから領域要素までの距離と、領域要素からゴールまでの障害物を無視した距離の和である。これら3件の領域要素の中から、最も見込みのありそうなスタートの右側の要素(コスト8)が選ばれる。この要素からスタートに方向マーク(矢印)が付けられる。次にこのコスト8の要素から、周囲の上下にある要素を数え上げる。このとき、上側の要素のコストが10、下側のコストが8となるので、下方向に探索が進んでいく。しかし、同図の下図のように、下の方向に探索が進んでもコスト12の要素が出現するので、最終的には探索は上方向に転じゴールに到達する。探索の過程でつけた方向マークを逆方向にたどり、破線で示したスタートからゴールまでの最短経路が求まる。

(2) 迷路法の拡張点

迷路法を自動ルーチングに適用するに当たって、次の2点に関し拡張を図った。

(a) 複雑な制約条件を反映可能としたこと。

具体的には、アルゴリズムの中で制約条件を満たす要素だけを数え上げの候補に追加するようにすることにより実現した。

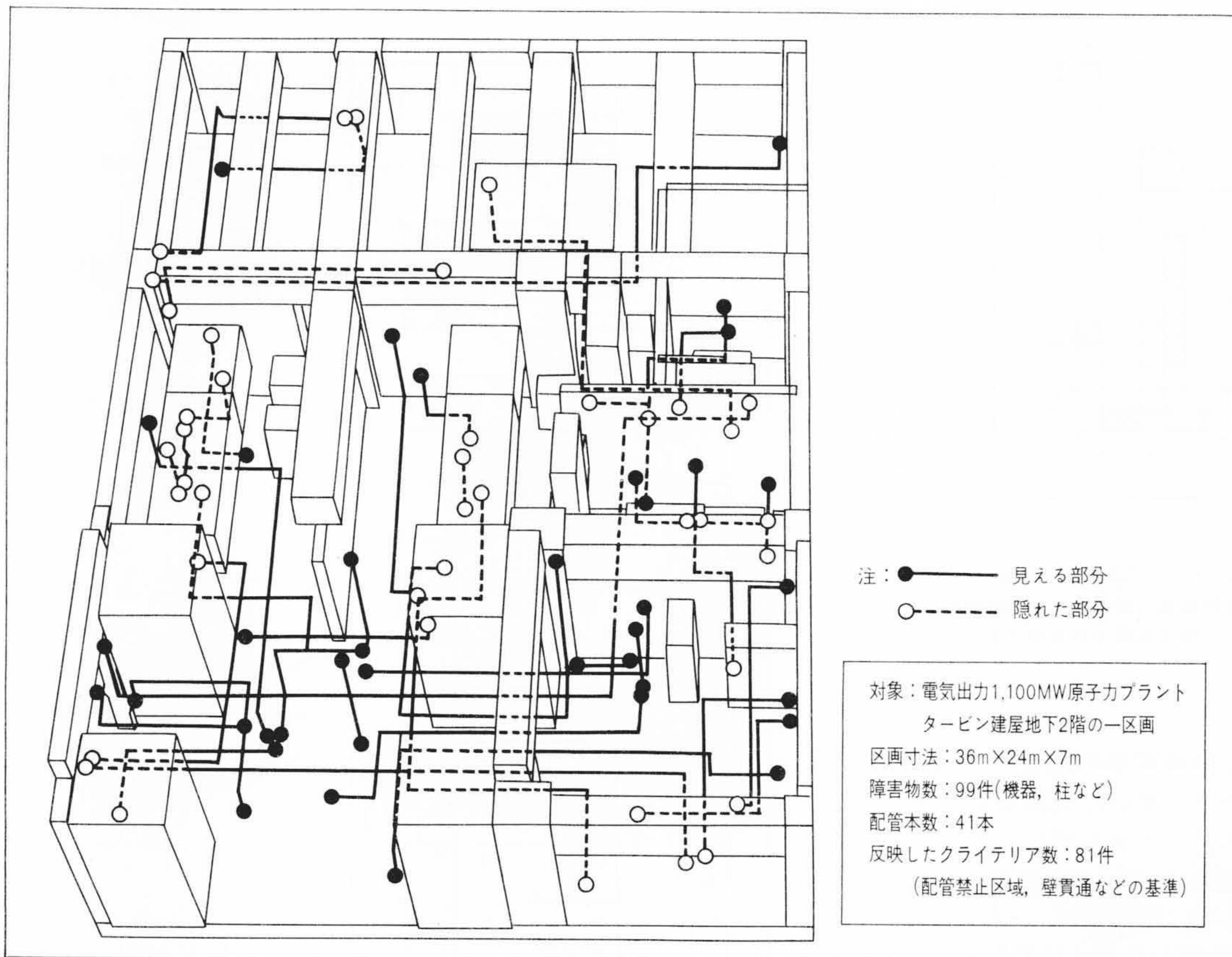


図6 3次元経路探索の結果
図中で、丸は配管の始・終点を、丸を結ぶ線は自動ルーチング手法により求めた配管の経路を示す。障害物は直方体で表わしている。

(b) 単純な距離以外の複合的な評価基準(コスト)に対応可能としたこと。

具体的には、領域要素が方向マーク済みであってもコストが有利となるような場合、方向マークを付け替えるようにすることによって実現した。

本手法では、最適化のための評価基準として、幾つかのパラメータを組み合わせたものを採用することもできる。例えば、簡単な評価基準の例として、(1)経路の長さの最小化を主体とし、(2)経路の曲り点の数の最小化も考慮するというものがある。

拡張迷路法による最適化アルゴリズムは、3次元の領域要素に基づく3次元の経路探索アルゴリズムとして使用している。

5 適用例

本手法を、電気出力1,100MW級の原子力プラントのタービン建屋に試験的に適用した結果を図6に示す。この図で、丸で示した始・終点を結ぶ線が自動ルーチングにより求めた配管経路である。ここで用いた評価基準は、ルート長さの最小化、曲りの数の最小化であり、制約条件は、最小間隔、禁止区域などに関するものである。この結果、(1)従来の試行錯誤的な対話処理を削減することにより、設計のスピードを2倍にでき、(2)配管延べ長さを従来よりも短縮できる、見通しを得た。

6 結 言

知識工学的手法と最適化アルゴリズムを結合することにより、クライテリアを反映した最適経路を求める3次元自動ルーチング手法を開発した。

本手法の手順は、(1)クライテリアを表わした知識ベースを

用いて、推論により、配管経路が満たすべき諸条件(経路探索条件)を導出し、(2)拡張した迷路法により、これらの条件を反映した経路を決定する。このとき、経路探索条件の記述には、フレーム表現を用いる。

本手法を、原子力プラントのタービン建屋に試験的に適用し、手法の有効性を確認した。

参考文献

- 1) 化学協会：プロセス機器構造設計シリーズ3 配管，丸善(昭46)
- 2) 野末，外：モデルエンジニアリングと原子力，日本原子力学会誌，第27巻，第3号，pp. 203～214(昭60)
- 3) E. A. Feigenbaum：The Art of Artificial Intelligence：Themes and Case Studies of Knowledge Engineering，Proc. IJCAI-77 pp. 1014～1029(1977)
- 4) N. J. Nilsson：Principles of Artificial Intelligence，Tioga(1980)
- 5) M. Minsky：A Framework for Representing Knowledge，in the Psychology of Computer Vision，edited by H. Winston，McGraw-Hill，pp. 211～277(1975)
- 6) 増位，外：知識処理のための推論ソフトウェア，日立評論，67，12，939～944(昭60-12)
- 7) 小林，外：最適経路探索における空間位置情報の知識表現と利用，情報処理学会第28回全国大会6H-3(昭59)
- 8) Lee, C. Y：An Algorithm for Path Connections and Its Applications，IRE Electric Computers，EC-10，p. 346(1961)
- 9) 小澤：VLSIレイアウト設計における配置配線，情報処理，22巻，8号 pp. 778～782(昭56)
- 10) 満田，外：3次元迷路法における空間分割とルート探索法の開発，情報処理学会第30回全国大会2K-5(昭60)