

# 自動経路探索システムにおける複数本配管への対応

学正員 安藤 悠人\* 正会員 木村 元\*\*

Automatic Routing System for Multiple Pipe-lines

by Yuto Ando, *Student Member* Hajime Kimura, *Member*

## Summary

During the ship design, designers have to deal with all pipe-routes in order to generate practical piping layouts composed by the minimum cost value (i.e. interference with obstacles, the length of each pipe-parts, etc.). However, the routing task requires huge work hours because there are many regulations and functional design rules in the field. In this paper, we propose an automatic routing system for multiple pipe-routes. The proposed system aims to solve the complicated multiple routing problems and to improve the design work efficiency. In the routing problem for pipes, there are two major factors having the significant influence to final routing designs: the order of routing search and the selection from candidates of pipe-routes. The routing system is capable of handling these two factors by adopting Touch and Cross method and simulated annealing method. Touch and Cross method is routing algorithm to find candidates including no interference with each path. Simulated annealing method is one of the optimization methods to find a global optimum of a given function in a large search space. By combining these two methods, the routing system can reduce the influence of the search order and the selection problem. Therefore, it is able to find suitable pipe-routes automatically though there are no guarantees to find the best layouts. The routing system also uses Dijkstra's method as a routing method to find the optimal route efficiently. The performance of the system is demonstrated through several simulations.

## 1. 緒言

船舶の建造過程において、配管艤装の設計には膨大な作業時間が必要である。近年では情報処理技術を利用することで作業の省力化に努めているが、未だに設計作業を自動化できていないというのが配管設計の現状である。この主な原因として設計問題の複雑さが挙げられる。配管艤装を設計する場合、設計対象となる空間内に存在する各機器の配置、およびそれらを接続する妥当な配管経路を検討しなければならない。すなわち配管設計問題は、各機器の最適な配置の決定、および最適な配管経路の設定等を含む多目的最適化問題であると考えられる。現在では熟練技術者の豊富な経験に頼ることで設計作業の解決を図っている。しかし近年、熟練作業者の減少が続いており、若手技術者への技術伝承問題等も発生している。よって配管設計作業を自動的に解決するシス

テムの必要性は日増しに高まっていると考えられる。

そこで本研究では、配管設計における経路設定作業の自動化を目指し、設計者の作業の支援を行うシステムを検討している。とくに本論文では、配管経路が複数本存在する場合を想定した探索手法の提案を行う。本手法では設計者が作業中に配慮している項目（障害物との干渉、配管長、曲りの数など）をコストとして定式化し、獲得される経路の実用性を向上させている。また、本手法の特徴として経路の干渉回避方法の一つであるタッチアンドクロス法に焼きなまし法を組み合わせていることが挙げられる。これにより獲得される解は最適である保証はないが、膨大に存在する解候補の中からコストの低い妥当な解を効率的に獲得することができる。

## 2. 配管設計問題

配管設計問題を取り扱う場合、すでに述べたように二つの最適化問題を取り扱う必要がある。設計者は初めに、設計対象空間内に存在するバルブやレデューサといった移動可能な機器の配置を検討しなければならない。この際、機器の配置場所はメンテナンス性や作業性が考慮されている必要が

\* 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻

\*\* 九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

ある。本論文ではこの問題を「機器配置問題」と呼称する。この問題を解決するために木村<sup>1)</sup>は、作業性を評価基準とする手法の提案を行っている。この提案手法では、船舶の操船を行う作業者の消費カロリーを基準にすることで作業性を評価している。また提案手法の特徴として、配置される機器としてバルブやレデューサといった一般的なものだけでなく、配管の分岐点も考慮している点が挙げられる。このアプローチにより、配管経路は始点・終点を一つずつ含んだ単純な経路となる。その結果、配管一本の経路探索に対して、ダイクストラ法などの最適解の獲得が保証されているアルゴリズムを使用することができる。木村<sup>1)</sup>の提案手法では、機器の配置を決定する方法として遺伝的アルゴリズム(GA)を使用することで問題の解決を図っている。しかし経路探索アルゴリズムとしては、経路中に含まれるエルボが3個までという制約条件のもとで直管を組み合わせたという手法を取り入れており、複雑な経路を探索できない場合が発生していた。そこで本論文では、この機器配置システムと組み合わせ使用することが想定された、迷路探索アルゴリズムを適用した新たな経路探索システムを提案する。詳細については後述する。

また、機器配置問題を考慮しているその他のシステムとして、Burdorfら<sup>2)</sup>が提案しているCAPDが挙げられる。このシステムでは機器配置を行うために、各機器に対して3段階に分類された配置条件を与えている。システムでは事前に設定された配置条件を可能な限り満足するような配置案を自動的に生成することができる。また、この手法では熟練作業員の知識や経験を配置条件として事前に入力することも可能となっている。

機器配置問題を考慮した後に検討しなければならないのが「配管経路探索問題」である。これは配置された機器同士を結ぶ最適な配管経路を探索する問題である。ここで探索される配管経路には、可能な限り総延長が短いことや、曲りの数が少ないことが求められる。Asmaraら<sup>3)</sup>は、配管設計問題を解決するシステムとしてDelft-Pipeを提案している。このシステムでは空間をメッシュ状に分割し、作成された各セルに対して異なるコストを設定する。これにより、自動的に獲得される配管経路が通路空間と干渉することを防いだり、配管経路を壁際にまとめたりすることが可能となっている。ただし、メッシュの分割幅がパイプ径に大きく依存してしまうという問題がシステム内には存在していた。また、経路探索手法としては迷路探索アルゴリズムを使用している。さらに配管経路探索問題を取り扱っているその他の先行研究として、伊藤ら<sup>4)</sup>、Pauloら<sup>5)</sup>の研究も挙げられる。これらの研究でも、経路探索が行われる空間をメッシュ状に分割することで、探索領域を限定している。ただし、これらの提

案手法では、探索アルゴリズムとしてGAが使用されている。

筆者らによる先行研究<sup>6)</sup>では、空間を局所的に斜めに通過するベンドや、配管が可能な限り通過してほしいパイプラック空間を考慮した経路探索手法を提案している。この手法では、空間を分割するメッシュの幅がパイプ径に依存せず、また場所によってメッシュ幅は可変であることが特徴である。さらに先行研究<sup>7)</sup>では、パイプが高さ方向にU字となっている「鳥居配管」についても考慮されている。鳥居配管では内部の流体や気体が管内に溜まってしまうため、通常的设计現場では可能な限り避けるべきものと考えられている。そのため提案手法ではこのような鳥居配管をできるだけ避けた実用的な配管経路が自動的に獲得可能となっている。しかし、この手法では、設計対象となる配管が1本の場合は最適な経路を確実に獲得することが可能であったが、設計対象の配管が複数本になった場合において、好ましくない配管経路案が獲得されてしまうケースが存在していた。

船内には通常、複数の配管経路が複雑に配置されている。これらの複数の経路案を設計する場合、既に設定された配管経路を障害物とみなしつつ、1本ずつ順次経路探索を進めていくことで最終的な設計案を作成するのが一般的である。既に記した配管経路の自動探索における先行研究でもこのアプローチが採用されている。しかし、このように順次経路探索を行う場合、どの配管経路から経路探索を行うかによって最終的な経路案が大きく変化する。経路探索を行う順序による影響を考慮している先行研究であるPauloら<sup>5)</sup>は、設計順序による影響への対処手段として、すべての順序において経路探索を行う手法を提案している。しかし、狭い区画だけでも数十本以上存在している配管経路を全順序で経路探索することは組合せ爆発を引き起こし、現実的ではない。

また経路探索を1本ずつ進めていく場合、獲得される妥当な経路として複数の解候補が出現する場合がある。すなわち経路中のエルボの個数は同じだが、その位置などが異なる設計案が複数存在するケースである。そのような複数の解が発生している場合においても、どの解候補を選択するかによって、後の経路探索の結果に大きな影響を与える。しかし配管設計に関する先行研究では、解候補の選択による最終設計案の影響は未だ考慮されていない。

そこで本論文では配管経路探索問題の解決を目指し、複数本の配管を経路探索することを目的とした新しい経路探索手法を提案する。本手法では膨大なパターンが存在する経路の設計案の中から、妥当な設計案を自動的かつ効率的に見出すことが可能である。本システムで獲得される設計案は最適である保証はないが、設計者が現場で配慮している項目をコストとして考慮することにより、その実用性を高めている。

### 3. 配管経路探索問題のモデル化

本論文で提案する手法では、先行研究<sup>6)</sup>に引き続き配管経路探索問題をネットワーク上における始点・終点間の経路探索問題とみなしている。探索対象となる配管経路では以下の項目を前提条件としている。

【探索対象となる配管】始点・終点の一つずつ有しており、経路途中で分岐がなく、直径の変化もない配管経路。通常、船舶内の配管経路では数多くの分岐点が存在しているが、第2章でも述べたように、本手法では分岐点を機器の一種としてみなしている。このアプローチにより経路探索を行うシステムでは経路途中の分岐点を考慮する必要がなく、単純な探索アルゴリズムの使用が可能になっている。

また、自動的に探索される配管経路の形状として以下の3つのものがある。

【直管】真直ぐに伸びているパイプピース。

【エルボ】90度曲がっているパイプピース。曲率半径によって大きさが異なるため、経路探索を行う前にエルボに関するパラメータを設定する必要がある。

【バンド】空間を局部的に斜めに通過するパイプピース。経路中の微小なずれを吸収するために使用される。曲率半径等の値によって大きさが異なるため、事前にパラメータを設定しておく必要がある。

さらに配管以外にも、経路探索を行う前提条件として以下の項目を仮定する。

【設計対象空間】経路探索が行われる空間。サイズが予め設定されているものとする。本研究では設計対象空間の形状を直方体に限定している。

【配管経路の配置可能な方向】配管経路は、局部的に使用されているバンドの部分のをぞいて、設計対象空間の各辺に平行な方向にのみ配置されるものとする。

【障害物】設計対象空間内に存在する構造部材や機器などが配置されている空間。探索される配管経路がこれらの空間に干渉することは許容されない。形状としては、三角形平面および直方体に限定されている。

【通路空間】船舶の乗組員が通行することが想定されている空間。この領域内を配管経路が通過することは、機器の操作性に悪影響を及ぼすと考えられる。よって配管経路の通過が極力避けなければならない空間である。形状は直方体であり、位置とサイズが予め設定されているものとする。

【パイプブラック空間】予め配管経路の通過が想定されている空間。探索される配管経路は極度の迂回経路とならない限り、この空間内に設置されることが望ましい。なお、この空間の形状は直方体であり、位置とサイズおよび配管経路が通過してほしい方向が事前に設定されているものとする。

### 4. 配管経路探索アルゴリズム

#### 4.1 1本の配管経路に対する経路探索アルゴリズム

ここでは設計対象となる配管経路が1本の場合、どのようにして経路探索を行うかについて述べる。本手法では配管経路探索問題を重み付きグラフ(ネットワーク)上の経路探索問題とみなすことで問題の解決を図っており、経路探索の手法としては先行研究<sup>6)</sup>に引き続き、迷路探索アルゴリズムの一種であるダイクストラ法を使用している。なお経路探索のための前提条件は、第3章で記載されたものである。

Fig.1として配管経路が1本の場合における経路探索の簡易的な手順を示す。まず経路探索システムでは、設計対象空間の分割を行う。この際、メッシュ幅を細かく設定することで、より正確に最適な経路を探索することができる。また、システム内では図に示されているような均等なメッシュだけでなく、不均一なメッシュ幅にも対応可能である。障害物や始点・終点の周りにより細かなメッシュを配置することで、計算時間の増加を抑えつつ、妥当な配管経路が獲得可能となっている。

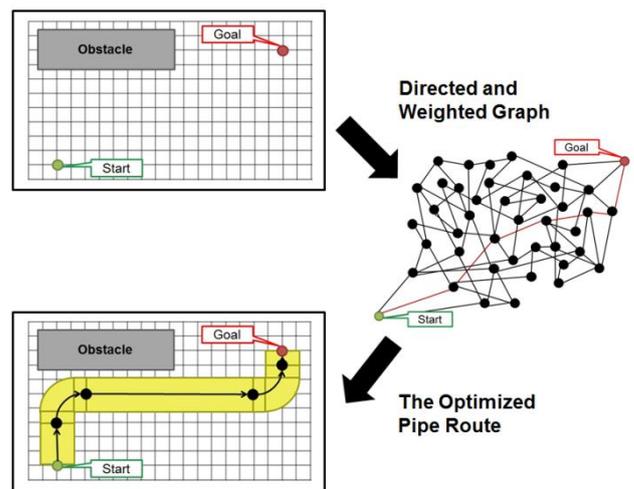


Fig.1 Process of routing for a pipe-route

空間の分割が終了すると、各格子点における配管経路の座標と向きを状態量とした重み付きグラフが作成される。グラフ内の各ノードを接続するリンクにおける重みは、直管、エルボ、バンドといったパイプ径に応じたパイプピースの使用コストに、通路空間やパイプブラック空間を通過した場合のコスト変化量が考慮されたものとなっている。すなわち経路の評価値となる総コストの値は、パイプブラック空間を通過すれば割引され、それとは逆に通路空間に干渉すれば割増される。また筆者らは先行研究<sup>7)</sup>で配管における溜りに着目している。溜りとは配管経路が高さ方向にU形状になっている箇所のことであり、内部流体の流れに対して悪影響を有しているパイプ形状である。よって溜りの生成を可能な限り避ける

ために、提案手法では高さ方向へ経路探索を進める場合、これらのノード間を結ぶリンクの重みにはコストの割増値が設定されている。これにより探索される経路は水平移動を優先したものとなる。ゆえに最終的に獲得される配管経路では、極端な迂回経路となる場合を除いて、経路中に鳥居配管は生成されない。このように、ネットワークの各リンクには空間や配管形状を考慮した重み関数が設定されている。

ネットワークの作成が終了すると、始点・終点間を結ぶ最適な経路の探索が行われる。ここで最適な経路とはコストが最小となるものを意味している。すなわち始点から終点までを結ぶリンクの重みをすべて足し合わせたものが最小となる経路が探索される。このような最適経路を探索するために、本システムではダイクストラ法が使用されている。ダイクストラ法とはネットワーク上の任意の2点間を結ぶ最短経路を効率よく且つ確実に探索することができる手法である。

ダイクストラ法によるネットワーク上の最適経路の探索が終了すると、獲得された経路を設計対象空間内の配管経路へ変換する。以上の探索処理を経ることで、本システムでは最適な1本の配管経路を獲得することが可能となっている。なお、獲得される経路は以下の6つの条件を満たしたものとなっており、実用性の高い配管経路となっている。

- 1) パイプ長が短いこと。
- 2) エルボおよびバンドの数が少ないこと。
- 3) 通路空間を極力回避すること。
- 4) パイプラック空間を可能な限り通過すること。
- 5) 高さ方向へ極力移動しないこと。
- 6) その他の配管経路と可干渉しないこと。

(ただし探索のステージに応じて干渉を許す。)

$$C_{Parts} = C_{PartsX,Y} + C_{PartsZ} \times R_Z \quad (1)$$

ここで、式(1)として高さ方向への移動と各パイプピースの使用コストの関係性を示す。ただしXもしくはY方向に設置されているパイプピースの使用コストを  $C_{PartsX,Y}$  とし、Z方向に伸びているパイプピースを  $C_{PartsZ}$  とする。そしてZ方向への遷移によるコストの変化率を  $R_Z$  とする。

$$C_{Pipe} = C_{Parts} \times R_{Space} + C_{Interference} \quad (2)$$

また式(2)として6つの条件が考慮された探索コストの計算式を示す。1本の配管経路の探索コストを  $C_{Pipe}$ 、通路空間等との干渉によるコストの変化率を  $R_{Space}$ 、パイプとの干渉コストを  $C_{Interference}$  として示す。 $C_{Interference}$  は経路探索中に変化する値となり、その詳細は4.5, 4.6節で述べる。

システム内では最適な経路案として  $C_{Pipe}$  が最小となる経路が獲得される。また、 $C_{Pipe}$  の値が等しい経路案が複数ある場合はその中からランダムで一つが選択される。

## 4.2 複数本の経路探索における二つの問題点

船内では通常、複数の配管経路が複雑に絡み合っている。すなわち、配管経路探索システムには、複数本の配管経路を探索しつつ、尚且つ妥当な設計案を生成する能力が必要となる。しかし複数本の経路探索を考慮する場合、第2章にて記したように、最終的に獲得される経路案が以下の二つの原因によって大きく変化する。

まず一つ目の原因として、最終的に生成される経路案が、配管経路の探索順序に大きく依存している点が挙げられる。この問題に関する詳細を4.3節にて述べる。さらに、もう一つの原因として、1本の配管経路中に複数の最適解が存在した場合、その中からどの解を選択するかによって最終的に得られる経路案が大きく変化してしまうといった問題がある。これに関する詳細は4.4節で述べる。

## 4.3 探索順序による設計案への影響

配管設計の現場では一般的に、高価値な配管経路から設計作業が進められている。すなわち管の材料が等価な場合、径の大きな配管から経路設計が行われる。既存の経路探索システムでも同様の手順で経路設計が行われていたが、径が同じ配管が複数存在する場合は、その中からランダムに探索順序を決定していた。すなわち既存のシステムを、実際の配管設計のように同じ径の配管が数多く存在する問題へ適用すると、経路探索を行うたびに異なる探索順序で探索が実行されることとなる。しかし、この探索手法では既に配置された配管経路を障害物とみなしているため、探索順序の変化によって最終的な経路案が大きく影響を受けると考えられる。

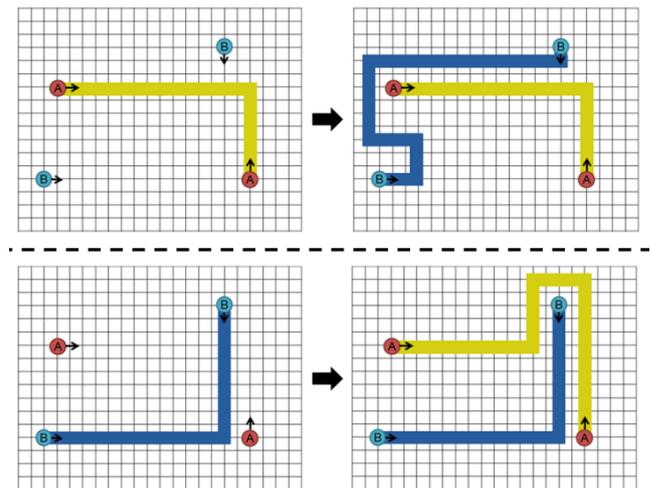


Fig.2 Influence of routing search order

Fig.2は探索順序によって最終的に獲得される配管経路が異なっている例を示している。ここでは径の等しい2本の配管経路(パイプA, パイプB)の経路探索を行う場合を想定している。ただし図中では例を分かりやすいものとするた

めに、2次元平面内での経路探索を示している。この場合、既存のシステムの手順に従うなら、2本のパイプの径は等しいため、Fig.2の上のようにパイプAから探索を始める場合と、下のようにパイプBから探索する場合の2通りの順序が考えられる。しかし図中で示されているように、最終的に獲得される経路案は、探索順序が異なると全く違うものになっていることが分かる。よって探索順序とは、最終設計案に対して非常に大きな影響力を有している要素である。

#### 4.4 解の選択による設計案への影響

1本の配管経路探索を行う場合、設計対象空間内にある障害物の配置によっては、経路の最適解として複数の解が存在する場合が考えられる。特に障害物が少なく、設計空間に余裕がある場合、エルボやベンドといった曲りの位置が少しだけ異なる経路案が複数存在するが、それらの経路すべてが最適解の候補となってしまうことがある。そのような場合、経路探索システムでは複数個存在する最適な経路候補の中からランダムで一つの解を選択している。しかし、既存のシステムのように経路探索を複数回繰り返さない場合では、どの経路を選択するかによって、最終的に得られる経路案が大きく変わってしまう場合がある。解の選択によって最終設計案が異なっている例として Fig.3 を示す。

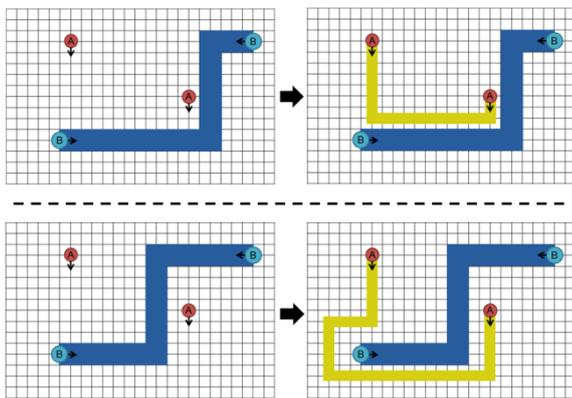


Fig.3 Influence of optimal routing selection

Fig.3では径の大きなパイプBと径の小さなパイプAの経路探索を2次元平面で行う場合を示している。ここで、パイプBの最適な経路候補としては図中の上のような経路と、下のような経路が考えられる。しかし、Fig.3下図ではパイプBの経路の影響によって、後に経路探索されるパイプAが大きく迂回してしまっていることが確認できる。このように経路探索の序盤では設計対象空間内に障害物となるものが少ないため、より多くの経路案が発生してしまう。しかし、エルボの設置場所等が少しだけ異なる経路案の中からどの経路を選ぶかによって、後の探索結果が大きく変化していることが分かる。ゆえに経路中における解の選択は、経

路探索の順序同様に、最終設計案に対して大きな影響力を有している要素であると考えられる。

#### 4.5 タッチアンドクロス法を利用した探索アルゴリズム

4.3節および4.4節で述べた、複数本の配管経路探索における二つの問題点を解決するために、本論文ではタッチアンドクロス法と焼きなまし法を組み合わせた新たな経路探索手法の提案を行う。ここではタッチアンドクロス法の適用法について述べる。

タッチアンドクロス法とは、集積回路の配線問題を解決するために、松岡ら<sup>9)</sup>によって提案された経路探索手法であり、ペナルティ関数法における外点法的一种である。ペナルティ関数法とは、制約条件を満たしていない状態をペナルティ値として評価し、その値を加えた目的関数(拡張目的関数)を探索することで、制約条件を満たした最適解を探索する手法である。また外点法とは、加えられるペナルティ値を探索の過程で徐々に大きくすることで、制約条件を満たした状態における拡張目的関数の最小値を探索する手法である<sup>9)</sup>。

タッチアンドクロス法では、タッチ(配線同士の接触)とクロス(配線同士の交差)という二つの制約違反状態をペナルティ値として表現し、目的関数にその値を加えている。さらに、経路探索処理を複数回反復して行いつつ、設定された制約違反コストの値を徐々に上昇させることで、最終的に経路同士が干渉していない解を獲得する。また、反復して行われる経路探索の過程では、複数ある経路の中から1本を選び再度経路を探索し、その経路が設定されると、他の経路を選択し同様の経路探索処理を行う。このように複数本の経路探索過程では、すべての経路を同時に探索するのではなく、経路1本ずつに焦点を当てているので、既存のダイクストラ法を利用した経路探索手法と容易に組み合わせることができる。

次にタッチアンドクロス法を適用した配管経路探索システムについて述べる。上記のように、タッチアンドクロス法では経路同士の干渉にコストを設定している。よって配管経路探索問題でも、配管同士の経路干渉を意味する制約違反コスト(ペナルティ値)を設定する。式(3)として経路探索システム内での経路干渉コストを記す。

$$C_{Interference} = V_{Pipe} \times R_{Interference} \quad (3)$$

ただし、経路同士の干渉コストを  $C_{Interference}$ 、干渉している部分の配管が外接する直方体の体積を  $V_{Pipe}$ 、コストの割増率を  $R_{Interference}$  とする。式(3)のように設定された干渉コストは、パイプピースの使用コストのように、経路探索過程で作成されるネットワークにおけるリンクの重みとして換算される。

また、複数の配管経路を含んだ設計案を評価するパラメータとしては式(2)で示された各経路の探索コストをすべて足し合わせたものを使用している。式(4)としてN本の配管経路を含んだ設計案の評価パラメータを示し、これがペナルティ関数法における拡張目的関数を意味する。ただし設計案の評価パラメータを総コスト  $C_{Total}$  として示す。

$$C_{Total} = \sum_{i=1}^N C_{Pipe, i} \quad (4)$$

タッチアンドクロス法を組み合わせた経路探索システムでは、経路探索を複数回繰り返しながら行う。それに伴い徐々に配管同士の干渉コストを増加させることで、次第に干渉のない配管経路案を獲得することが可能になっている。

Fig.4として提案手法による経路探索を2次元でイメージ化したものを示す。この図で示されているように、経路探索の序盤では干渉コストが小さい値のため、経路同士が干渉を無視した単純な最短経路となっていることが確認できる。しかし、探索回数がすすむにつれて干渉コストが増大していき、徐々に経路同士の干渉が少なくなり、最終的に経路干渉のない妥当な設計案が獲得されていることが分かる。

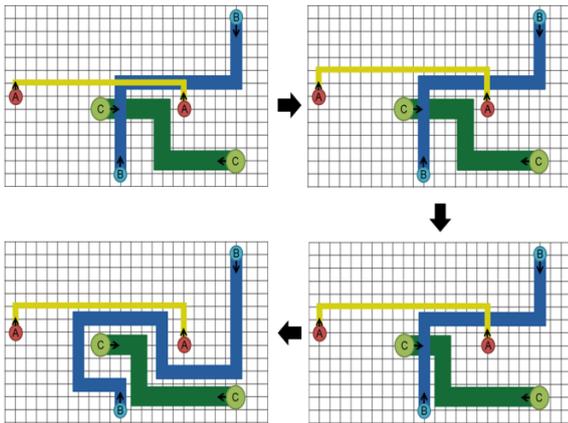


Fig.4 Process of routing with Touch and Cross method

#### 4.6 タッチアンドクロス法における焼きなまし法の導入

前節で示したように、タッチアンドクロス法では経路を一本ずつ順次引き直して改善を繰り返すことで探索を進めていく。しかし、常に改善を繰り返すだけでは、最適解へ到達するまえに探索が行き詰ってしまうケースが考えられる。このように最終設計案が局所解へ陥ってしまうことを防ぐために、本研究ではタッチアンドクロス法のプロセス中に、焼きなまし法を導入する。これにより、最終的に獲得される設計案が局所解に陥ることを防ぎ、より実用的な経路案の獲得が可能となる。

焼きなまし法とは局所解にとらわれず、大域的な解候補を探索するための最適化手法である。この手法では、現在の解候補  $x$  の近傍  $x'$  を生成し、それぞれの評価値、 $f(x)$ ,  $f(x')$  の

値を比較することで、 $x$  から  $x'$  へ遷移するかどうかを確率的に選択する。探索過程では温度関数を定義し、温度関数および解候補の評価値より遷移確率を計算する。そして計算された遷移確率に従い、解の改善と改悪を確率的に繰り返すことで探索を進めていく。なお温度関数は探索が繰り返されるにつれて徐々に小さな値となり、解の変動幅もそれに伴い収束していく。

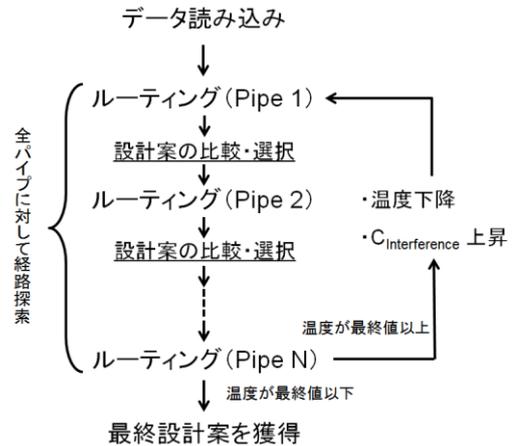


Fig.5 Process of routing by the proposed method

次に提案手法における焼きなまし法の導入方法について述べる。まず Fig.5として配管経路がN本ある場合での、本手法による経路探索プロセスを示す。図中に示されているように、提案手法では全パイプに対する経路探索を1本ずつ繰り返し行い、以前に獲得された経路との比較・選択を焼きなまし法に従って行っていく。

また、設計案の比較・選択の過程で解の遷移確率を計算するために、温度関数を設定する必要がある。本手法で設定された温度関数を式(5)として示す。

$$T_{k+1} = T_k \times 1/k^\beta \quad (5)$$

ここでは探索  $k$  回目の温度を  $T_k$  として表す。また、パラメータ  $\beta$  は冷却率をコントロールするパラメータであり、本システムでは 0.01 を代入している。さらに、獲得解の改善、改悪を決定する遷移確率は式(6)で計算される。遷移確率を  $P$ 、新しく探索された解の総コストと以前に探索された解の総コストとの差を  $\Delta C$  とする。

$$P = \exp(\Delta C / T_k) \quad (6)$$

また、提案手法では焼きなまし法をタッチアンドクロス法と組み合わせて使用しているため、温度関数の値が遷移確率だけでなく、経路の干渉コストにも影響を与える。このアプローチにより、探索が繰り返されるたびに温度関数の値を低下させ、それと同時に干渉コストを上昇させることが可能となっている。式(7)として干渉コストに影響を与えるコスト

の割増率と温度関数の関係性を示す。なお  $T_0$  は温度関数の初期値を示している。

$$R_{Interference} = T_0 / T_k \quad (7)$$

提案手法では、式(1)~(7)で示されている関係性を考慮することで、タッチアンドクロス法および焼きなまし法を経路探索に組み込んでいる。このアプローチによって配管経路が複数本ある場合でも、最終的に生成される設計案が 4.3 節、4.4 節で述べたような影響を受けにくいものとなっている。

以上のような比較・選択過程を取り入れることで、獲得される解が局所解に留まることを避けることができる。また、経路探索を行う順序が妥当な設計案を発見する探索時間や探索精度に対して重要な要素となっている。これに関する考察は 6.1 節で行う。

## 5. 計算機シミュレーション実験

### 5.1 シミュレーション実験 1

提案手法の動作を確認するために二つのシミュレーション実験を行った。実験 1 ではバラストポンプルームを想定した各辺 6[m]の直方体を用意し、その中に障害物 3 個、通路空間 3 個、パイプバック空間 2 個を設定した。また、経路探索を行う配管 13 本あり、パイプ径 0.8[m]が 1 本、0.6[m]が 2 本、0.4[m]が 4 本、0.3[m]が 6 本となっている。また温度関数の初期値を 100、最終値を 1 とし、 $R_z$  の値は 2.0 とした。その他の各パラメータの数値を Appendix に示す。計算環境は、OS に Windows7 を使用し、CPU は Intel Core i7 3.4Ghz、メモリーは 8.00GB、プログラム言語は Java version 1.7 を用いた。

### 5.2 実験結果 1

Fig.6 に本実験で最終的に獲得された経路案を示す。最終的な設計案を獲得するために要した時間は約 18 時間であった。各経路は干渉なく接続されており、尚且つ可能な限りパイプバック空間を通過し、通路空間を避けたものとなっている。また鳥居配管についても可能な限り避けたものとなっている。同様の実験条件で 10 回シミュレーションを繰り返したところ、すべての実験結果で Fig.6 で示された経路案が獲得された。さらに同様の実験条件の下で、先行研究のシステムを動作させたところ、実験を繰り返すたびに異なる設計案が獲得されることが確認されている。本実験を 10 回行い獲得された総コスト  $C_{Total}$  の平均値を比較すると、先行研究のシステムでは平均で 40.2、本システムでは平均で 38.6 となっている。また以前のシステムでは設計案に平均で 1.4 個の溜りが確認され、パイプバックを通過する配管の数も平均

2.6 本であったが、本システムでは溜り 1.0 個、パイプバックを通過する配管も 4.0 本となり、溜りの発生を抑え、パイプバックを可能な限り通過させる設計案の生成に成功している。よって、タッチアンドクロス法と焼きなまし法を適用した提案手法は、配管経路が複数本ある場合でも、妥当な設計案を高確率で獲得することが可能であることが確認された。ただし、提案手法では経路探索を繰り返し行っていることから、繰り返し探索を行っていない先行研究のシステムと比べて探索時間は大幅に増加している。探索時間に関する考察は次章で行う。

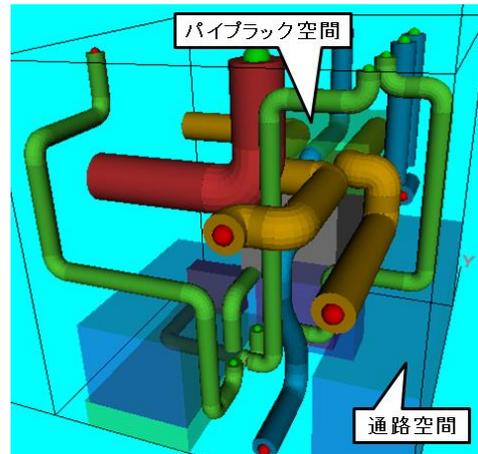


Fig.6 Final result of the simulation 1

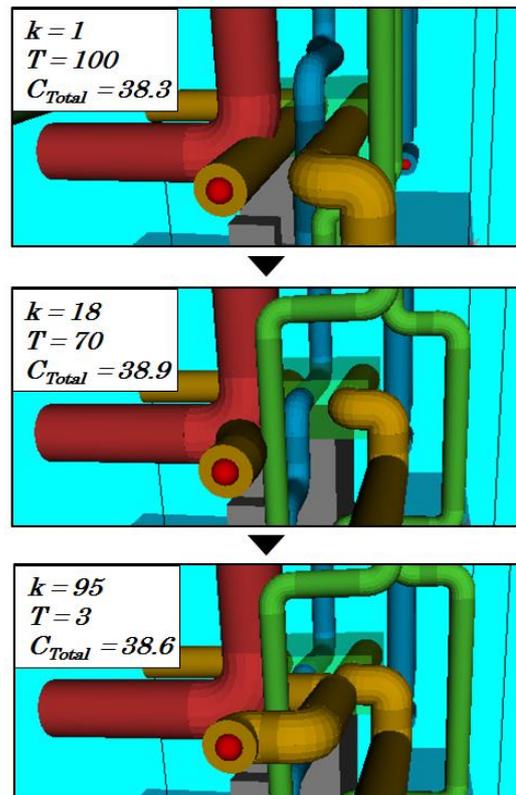


Fig.7 Obtained pipe-routes during the simulation 1

また Fig.7 として探索途中で獲得された経路を示す。なお、図中の  $k$  が探索回数、 $T$  がその時点での温度関数の値をそれぞれ示している。ここでの探索回数では、すべての配管について経路探索を行うことを一単位としている。さらに表示されている経路案の総コストを  $C_{Total}$  として示す。探索回数が小さい時点では温度関数の値が高く、干渉コストの値が小さいため、獲得された設計案は経路同士を無視した単純な最短経路群になっていることがわかる。しかし探索回数が増加するにつれて温度関数の値は小さくなり、それに伴って干渉コストが増大していくことで経路同士の干渉が徐々に少なくなっていく。最終的には図中下段で示されているような干渉のない妥当な設計案が獲得されていることが確認できる。また、Fig.6 での経路は配管同士が複雑に絡み合った経路が確認できる。実際の施工現場では設計された経路を管割によって分断して施工するため、ある程度複雑な経路でも実現可能である。ただし本システムでは施工性を一切考慮に入れておらず、その取扱いは今後必要になってくると考えられる。よって施工性の考察について次章にて記す。

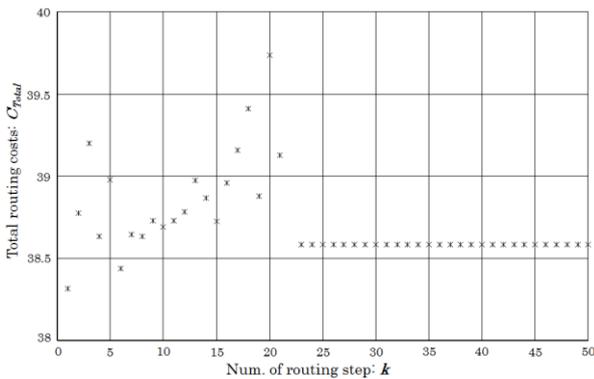


Fig.8 Total results of the simulation1

Fig.8 として横軸に探索回数  $k$ 、縦軸に総コスト  $C_{Total}$  を表したグラフを示す。このグラフでは本システムを同じ実験条件で 10 回繰り返した後に得られた総コストの平均値を表示している。Fig.8 から探索回数が増加するにつれて総コストが徐々に増加していることが分かる。これは干渉コストが探索回数に伴い徐々に増加するという提案手法の特徴によるものである。また本実験では探索回数が約 22 回前後で妥当な解に収束していた。ここで、解が収束するとき総コストの下降が確認できるが、これは妥当な設計案では配管同士の干渉が無くなることやパイプラックの通過による影響であると考えられる。

### 5.3 シミュレーション実験 2

実験 2 では船舶のデッキ裏の空間を想定した細長い直方体を用意した。設計対象空間のサイズは X, Y, Z 方向にそれぞれ 8[m], 12[m], 4[m] となっている。経路探索を行う配管

は 4 本あり、パイプ径 0.9[m], 0.7[m], 0.5[m], 0.3[m] がそれぞれ 1 本ずつである。温度関数の初期値を 100、最終値を 1 とし、 $R_z$  の値は 4.0 とした。その他のパラメータの値は Appendix で示す。計算環境は実験 1 と同様である。

### 5.4 実験結果 2

Fig.9 として最終的に生成された経路案を示す。本実験での探索時間はおよそ 18 時間であり、最終経路案として妥当な設計案を獲得することができた。各配管経路は探索序盤では干渉していたが、探索が繰り返されるにつれて徐々に変化していき、最終的に図で示すような経路案が獲得された。

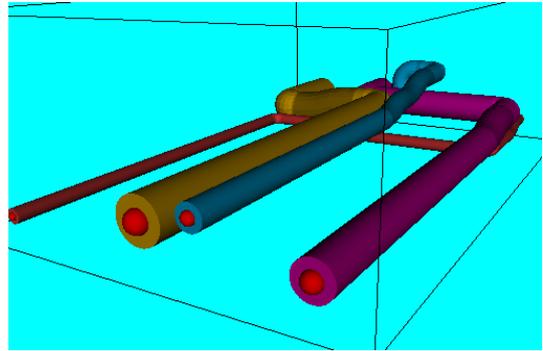


Fig.9 Final result of the simulation2

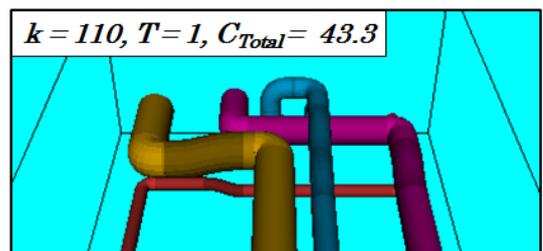
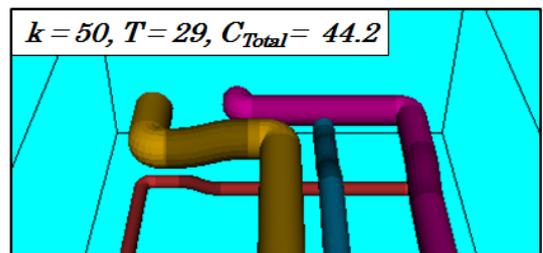
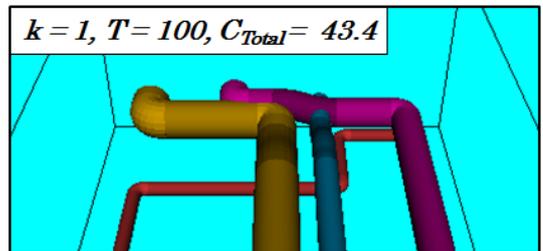


Fig.10 Obtained pipe-routes during the simulation2

Fig.10 として探索過程で獲得されている経路案をそれぞれ示す。本実験でも温度関数の値が減少するにつれて干渉コストが増大し、その結果として徐々に干渉の無い経路が獲得されている。先行研究でのシステムと比較すると、総コストは 44.7 から 43.3 へ変化しており、改善が確認できた。また Fig.11 として横軸に探索回数  $k$ 、縦軸に総コスト  $C_{Total}$  を表したグラフを示す。このグラフで示されている総コストは、本実験を 3 回繰り返した平均値である。グラフより総コストは探索回数が増加するにつれて徐々に増大し、探索回数がおおよそ 30 回で妥当な最終設計案を生成していることが分かる。ただし本実験ではパイプ同士が絡み合ったまま探索が終了してしまうケースが確認された。これは始点・終点付近にエルボが集中してしまう場合に発生しており、今後、干渉コストや温度関数をさらに検討する必要がある。

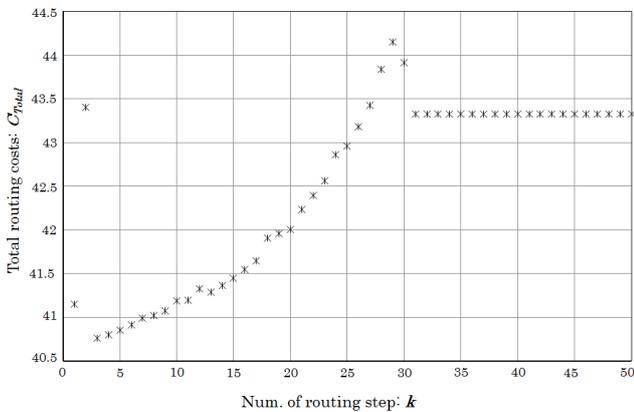


Fig.11 Total results of the simulation2

## 6. 考察

### 6.1 反復過程における経路探索順序の影響

提案手法では第 4 章で述べたように、複数本の配管の中から 1 本ずつ配管を選択し経路探索を行っている。さらにこの処理をすべての配管経路について繰り返すことにより、設計案の生成を行っている。この反復される経路探索過程の中で、どの順序で経路を選んでいけばよいかという問題が発生する。すなわち、実際の設計者と同様に径の大きな配管から順で設計を繰り返すべきなのか、ランダムで探索を繰り返すのか、もしくはその他の順序なのかといった問題である。そこで本研究では、径の大きいもの順、小さいもの順、ランダムな順序、そして始点・終点距離の短いもの順、長いもの順の 5 つのパターンでそれぞれ探索を繰り返す予備実験を行い、定性的な比較を行った。その結果、始点・終点距離の短いもの順で経路探索を反復させることが最も効率的に妥当な設計案を獲得できることが確認された。これは始点・終点距離が短い経路は、経路中に最適解のパターンが少なく、それらを先に配置させておくことで、後の経路探索における最

適解の選択幅が減少するためであると考えられる。よって第 6 章で示したシミュレーション実験では、距離が短い配管経路から探索を繰り返している。今後、この手法がどれほど有効であるかどうかを確認するためには、さらなるシミュレーション実験および検討が必要である。

### 6.2 探索時間に関する考察

第 6 章で示した実験では最終的な解を獲得するための計算時間としてそれぞれ 18 時間を要している。これは実験設定で記した計算機を使用した場合の探索時間であるが、今後さらに計算時間を短縮する必要があると考えられる。

提案手法では、設計対象空間のサイズ、空間を分割するメッシュの数、そして探索される配管の数、焼きなまし法における温度関数の冷却速度などによって計算時間が変化する。特に船舶の機関室へ本システムを導入し、正確な配管経路を自動設計する場合を考えると、メッシュの数はある程度細かく設定する必要があり、尚且つ探索が必要な配管経路は数百本に及ぶ。よってそのような場合、探索時間が爆発的に増加することが考えられる。そこで探索時間を短縮するためには、複数の計算機を同時に使用することが必要となってくる。ただし提案手法では、1 本ずつの経路探索を複数回繰り返していることから、探索中の経路が設定されないと次の配管の経路探索を行うことができない。よって複数の計算機を単純に並列使用するだけでは、探索時間を短縮する有効な手段とはならない。そこで本研究では今後の方針として、始点・終点を結ぶ解として最適経路が複数ある場合に、すべての経路パターンをそれぞれの計算機で事前に獲得しておき、後にそれらをパズルのように組み合わせる手法を検討している。

### 6.3 施工性、安全性の評価手法の組み込み

提案手法では、獲得される配管経路の評価基準として、経路の総延長や曲りの数等を考慮した総コストを使用している。しかし実際の配管設計の現場では、設計している配管経路の施工性や安全性等の検討も行っており、これらは配管設計において重要な問題であると考えられる。本論文の提案手法では施工性や安全性の評価問題は取り扱っていないが、これらの問題を考慮した配管自動設計システムの構築が将来的に必要となってくると考えられる。安全性をシステム内で評価する手法として、電装機器周辺に通路空間や既に探索された配管経路の上の空間のような配管経路の通過が望ましくない空間をコストが割り増される空間として自動的に設置することが考えられる。一方で施工性の評価については、配管のフランジ割問題も含んでいることから、設計者の意見を今後さらに収集し、新しい手法を検討する必要があると考えられる。

## 7. 結言

本論文では配管設計作業の自動化へ向けて、配管経路が設計空間内に複数本存在する場合を想定した自動経路探索手法の提案を行った。提案手法では、経路探索手法としてダイクストラ法を使用し、複数本の経路探索を効率よく行うためにタッチアンドクロス法と焼きなまし法を組み合わせている。これにより、複数本の経路探索を行う際に問題となっていた経路探索の順序や、経路探索中における解の選択による影響を緩和することが可能となる。よって複数の配管経路を探索する場合でも、提案した経路探索システムでは妥当な設計案を自動的に生成することができる。また本論文では、提案手法を java プログラムに実装し、実際の設計現場を想定した問題でのシミュレーション実験を行うことで、その設計能力に関する検証を行った。

## 謝 辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (B) 課題番号 23360388 より一部補助を受けた。

## 参 考 文 献

- 1) 木村 元: 機器配置およびパイプの分岐を扱う配管自動設計システム, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 14 号, 2011, pp.165 - 173.
- 2) A. Burdorf, B. Kampczyk, M. Lederhose, H. Shmidt-Traub: CAPD – computer-aided plant design, Computers and Chemical Engineering 28, 2004, pp.73 – 81.
- 3) A. Asmara, U. Nienhuis: Automatic piping system in ship,

proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Computer and IT Application (COMPIT), Mar. Ind. 2006. Leiden.

- 4) 伊藤 照明, 福田 収一: 遺伝的アルゴリズムを用いた配管経路探索法の検討, 人工知能学会誌, Vol.13, No.5, pp.791-802 (1998 年)
- 5) T. M. Paulo, and V. J. A. S Lobo: A Tool for Automatic Routing of Auxiliary Circuits in Ships, Proceedings of 14<sup>th</sup> Portuguese Conference on Artificial Intelligence (EPIA 2009), Aveiro ( Oct. 2009)
- 6) 安藤 悠人, 木村 元: エルボおよびベンドを考慮した配管設計アルゴリズム, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 15 号, 2012, pp.219 - 226.
- 7) 安藤 悠人, 木村 元: 溜りの影響を考慮した自動配管設計, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第 16 号, 2013, pp.179 - 182.
- 8) 松岡 英俊, 新田 泉: 大規模配線システム: GRP, FUJITSU, 50, 6, 1999, pp.372 - 377.
- 9) 今野 浩, 山下 浩: 非線形計画法, 日科技連出版社, 1978.

## Appendix

実験 1, 2 で使用された各パラメータの値.

Variable	Type	Value
C <sub>parts</sub>	Straight	1.0/m
	Elbow	Manhattan Distance + 0.1
	Bend	Manhattan Distance + 0.3
R <sub>space</sub>	Pipe-rack	0.4
	Aisle	2.0