

# パイプサポートや曲がり船殻に対応した 配管自動設計に関する研究

正会員 木村 元\*

Automatic Piping Arrangement Design Considering Piping Supports and Curved Surfaces  
of Building Blocks

by Hajime Kimura, Member

**Key Words:** Automatic Piping Design, Automatic Pipe Routing, Piping Supports, Curved Surface

## 1. 緒 言

船舶の建造工程において、艤装設計には膨大な作業時間を要する。作業時間の短縮のため、近年では発達した情報処理技術を利用することで設計作業の省力化が図られてきた。特に3次元CADの導入により、3次元データを取り扱った設計・解析・生産技術が普及しつつある。艤装設計の分野では、機器配置や配管経路を3次元空間中で可視化することで設計案の修正が容易となり、作業の効率化が進められている。しかし設計作業そのものは未だに熟練者に頼っている。近年では熟練者の確保が困難になってきており、若手技術者への技術伝承問題も発生している。特に配管経路の設計作業は艤装設計における作業時間の多くの割合を占めており、船舶の設計作業全体の効率化を検討するうえで重要な課題である。本研究では、配管設計作業の自動化を目指す。

配管設計においては、パイプをパイプラックや構造部材から適切にサポートで支持するため、パイプを通す位置と方向について配慮が必要である。本研究では、パイプサポートや曲がり船殻に対応した配管設計を自動化するため、パイプラックやサポート等の都合からパイプを通すべき位置と方向の候補を予め経由候補点として与え、それらを適切に自動選択して配管設計案を作成する方法を提案する。提案手法を計算機プログラムに実装し、通路や曲がり船殻を模した例題において、パイプサポートを想定した箇所と方向に予めパイプ経由候補点を配置することで、より実問題に沿った配管設計案が自動生成される様子をシミュレーション実験により示す。

## 2. 配管設計問題

配管設計問題へ取り組む場合、まず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ある<sup>1)</sup>。本論文ではこの問題を「機器配置問題」と呼び、ここでは扱わないものとする。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、配管の分岐点も機器として扱う。このアプローチにより、配管経路は始点・終点の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<sup>2)</sup>。詳細については後述するが、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るが、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する。

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。しかし、このように順次経路探索を行う場合、どのパイプ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。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、その位置が異なる設計案が複数存在する場合である。そのような場合においても、どの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。本論文では、最初はパイプ同士の干渉を無視してパイプの最短経路を求め、徐々に干渉コストを引き上げつつ1本ずつパイプの引き直しを行う「タッチアンドクロス法」を用いる。

## 3. 配管経路探索問題

### 3.1 パイプの制約条件と構成要素

対象とする配管経路では以下の項目を前提とする：

【分岐無し配管】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を対象とする。通常、配管経路には分岐点が存在するが、第2章で述べたとおり本手法では分岐点を機器の一種とみなす。これにより、単純な経路探索アルゴリズムの使用が可能となる。また、経路を構成するパイプ部材の形状として以下の3つを考慮しなければならない：

【直管】真直ぐに伸びているパイプピース。

【バンド】任意の角度で曲げられたパイプピース。曲げ半径は一般にパイプ径の2, 3, 4倍など離散的な値をとる。また、パイプバンドによる加工の都合上、バンドピースの前後には、つかみ代として十分な長さの直管部分がある。圧力損失を減らすため、曲げ半径は大きいほうが好ましいが、障害物や他パイプとの干渉を避けるには曲げ半径が小さいほうが都合が良い。曲げ半径のとりうる値や曲がり部前後の直管部の長さについては、事前にパラメータとして設定しておく必要がある。

\* 九州大学 大学院工学研究院海洋システム工学部門

原稿受付（学会にて記入します）

秋季講演会において講演（学会にて記入します）

©日本船舶海洋工学会

【エルボ】90度に曲がっているパイプピース。ベンドの特別な場合と、曲げ加工ではなく鋳物で作られる場合がある。角度が90度である以外はベンドと同様である。

【経路候補点】パイプを配置する位置と方向の制約は、パイプのサポートやパイプラックに固定する都合により発生する場合が最も多い。本研究では、サポート等によりパイプを固定することが想定される箇所の座標と方向を規定するローカル座標系を「経路候補点」として予め与える。パイプの中心は、いずれかの経路候補点の座標を通り、その点を通るパイプの方向は、その経路候補点に定義された局所座標系のx,y,z軸のいずれかの方向に平行になる。この局所座標系は、サポート材のベースとなる構造部材等の方向に合わせてナナメなど任意の方向へ自由に設定可能である。

### 3.2 パイプ以外の制約条件と構成要素

さらにパイプ以外に、経路探索を行う前提条件として以下の項目を設定する：

【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る空間。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、三角形平面の組合せ、円筒、球および直方体などを想定している。

## 4. 配管経路探索アルゴリズム

### 4.1 一本の配管経路に対する経路探索アルゴリズム

本研究では1本の配管経路探索問題を「重み付きグラフ上の最小コストの経路探索問題」に帰着して解決を図っており、アルゴリズムとしてダイクストラ法を用いる。Fig.1に本経路探索の手順概略を示す<sup>3)</sup>。

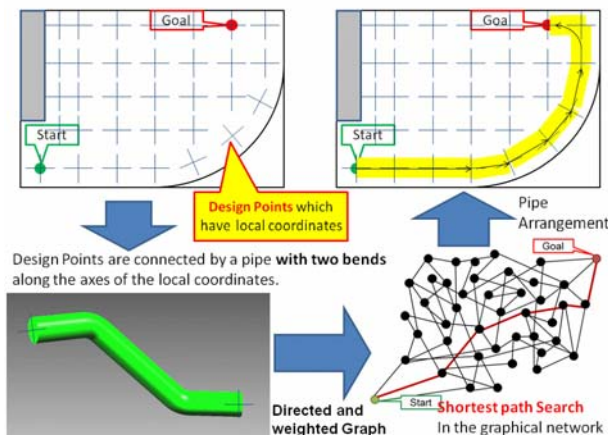


Fig. 1 Process of routing for a pipe-route.

まず設計対象空間において3.1節で説明したパイプの経路候補点を配置する。本論文では、この経路候補点は、構造部材やサポートの位置、パイプ径を考慮して予め与えることを前提とするが、効果的な経路候補点の位置と方向を自動計算で与える方法についても検討中<sup>4)</sup>である。

次に、各経路候補点に定義された局所座標軸方向（6方向）から、別の経路候補点の局所座標軸方向へベンド2個以下のパイプで接続できるかどうかをチェックする。数学的には、ベンド曲げ角度制約およびつかみ代のような直管部の長さ制約がなければ、あらゆる位置と方向の経路候補点はベンド2個以下のパイプで接続できる。本研究では、2つの経路候補点A、Bを接続するとき、注目する局所座標軸の方向へ屈曲点まで伸ばした点をA'、

B'と表すと、 $AA':A'B':BB'=1:2:1$ となるような長さの比率で折れ線を生成し、この折れ線に沿ってベンドを生成する。ただし、ベンドは曲げ半径を持つのでパイプ中心は屈曲点A'およびB'を通らない。Fig.2の左側は、2つの経路候補点をベンド2個のパイプで接続した例を示す。また、施工やパイプの制約によっては曲げ角度が90度に限定されたエルボしか使用できない場合がある。数学的には、パイプの直管の長さ制約が無ければ90度のエルボ2個以下であればあらゆる位置と方向の経路候補点を接続可能である。Fig.2の右側は、左側と同じ2つの経路候補点を90度のエルボ2個のパイプで接続した例を示す。

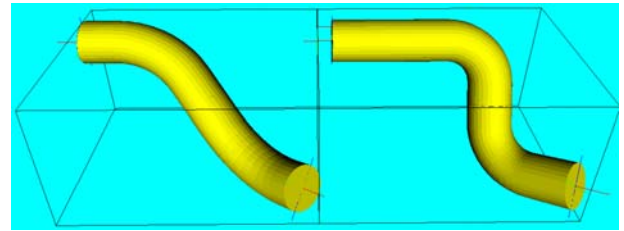


Fig.2 Left: A piping example between two waypoints with two bends. Right: A piping example in the same waypoints with two 90-degree elbows.

数学的には、ベンド2個以下あるいは90度エルボ2個以下のパイプであればあらゆる経路候補同士を接続可能だが、実際にはベンドの曲げ半径や最大曲げ角度、曲げ部分同士をつなぐ直管部分長さの最小値などの制約条件が存在するため、接続できない場合がある。また、障害物との干渉のために接続できない場合もある。本研究では、全経路候補の局所座標軸方向（6方向）をそれぞれグラフのノードとし、それら同士を上記のベンド2個またはエルボ2個以下のパイプで障害物との干渉無しに接続可能かどうかをチェックし、接続可能ならノード間にエッジ（リンク）を生成してそのエッジにパイプのコストを重みとして設定してグラフを生成する。ただし、グラフが無駄に大きくなることを防止するため、エッジ生成候補となるノードは、元ノードの局所座標軸方向に位置するものに限定し、さらに元ノードの位置からユークリッド距離の近いものを優先してエッジ生成していき、またエッジ生成個数には上限を設ける。また、パイプの種類によっては重力流下可能な配管とするため配管経路の途中がU字型になる鳥居配管が許されない場合があり、このような条件からもエッジ生成を制約して対応する。ポンプ圧送を想定したパイプなど、鳥居配管は可能だが避けるべき場合には、重力方向への配管長さ成分に対してコストを追加することで対応する。

ノードとエッジによる重み付きグラフの作成が終了すると、始点・終点間を結ぶ最適経路の探索が行われる。ここで最適経路とは始点から終点までを結ぶエッジの重みを全て足し合わせたものが最小の経路である。本システムではダイクストラ法を使用して求めている。

重み付きグラフ上の最適経路探索が終了すると、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本の配管経路の獲得を可能としている。なお、獲得される経路は以下の5つの条件をコスト最小化により満たすものとなり、実用性の高い配管経路を得ることができる：

- 1) パイプ全長が短い.
- 2) エルボおよびベンドの数が少ない.
- 3) 障害物や他の配管と干渉しない.
- 4) パイプラックやサポートを通過する.
- 5) 鳥居配管を(極力)回避する.

#### 4.2 複数本の経路探索における2つの問題点

配管設備では通常、複数の配管経路が複雑に絡み合っ存在する。しかし複数本のパイプを前節の方法で1本ずつ配置した場合、最終的な経路案が以下の2つの原因によって大きく変化することがある。

##### (1) 探索順序による設計案への影響

配管設計の現場では、一般に高価なパイプ順に経路設計が行われる。すなわち管の材料が等価な場合、径の大きなパイプから設計が行われる。しかし、径が同じパイプが複数存在する場合、設計順序に任意性が生じ、順序変化によって最終的な経路案が大きく影響を受ける。

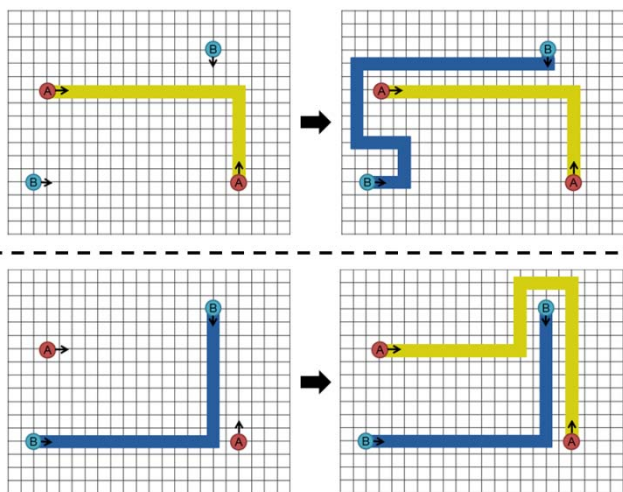


Fig.3 Influence of routing search order

Fig.3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る例を示す。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す。この場合、既存の手順に従うなら、2本のパイプの径は等しいため、Fig.3の上のようにパイプAから探索する場合と、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。しかし図で示すように、最終的に獲得される経路案は、パイプの探索順序によって全く違うものになる。

##### (2) 解の選択による設計案への影響

1本の配管経路探索では、経路の最適解として複数の解が存在する場合がある。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に一つの解を選択するが、既存の配管手順では、どの最適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。Fig.4に例を示す。Fig.4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す。ここで、パイプBの最適な経路候補としては図中の上の経路と、下のよう経路が考えられる。しかし、Fig.4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う。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、より多くの最適経路案が存在する。しかし、これらの経路案の中からどれを選ぶかによって、後のパイプ配置結果が大きく変化していることが分かる。

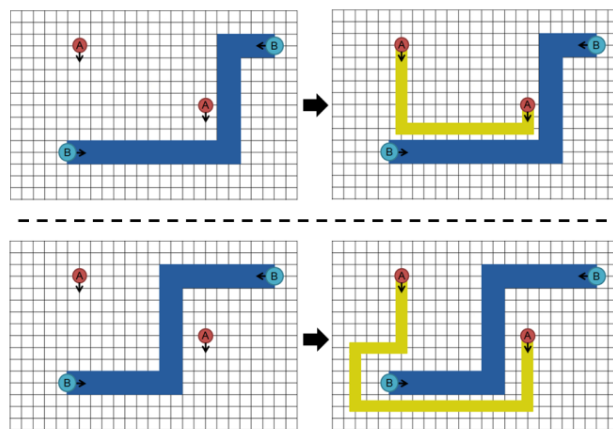


Fig.4 Influence of selection of optimum routing.

#### 4.3 タッチアンドクロス法による複数同時経路探索

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、松岡ら<sup>5)</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の一形態である。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、次第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<sup>6)</sup>。

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(1)として経路探索システム内での経路干渉コストを記す：

$$C_{Interference} = V_{Pipe} \times R_{Interference} \quad (1)$$

ただし、経路同士の干渉コストを  $C_{Interference}$ 、干渉部分の体積を  $V_{Pipe}$ 、コストの割増率を  $R_{Interference}$  とする。式(1)で設定された干渉コストは、エッジのコストのように、経路探索過程で作成される重み付きグラフにおけるエッジの重みとして加算される。

また、複数の配管経路を含んだ設計案の評価値としては4.1節で示した各パイプの経路コストをすべて足し合わせたものを使う。パイプ*i*のコストを  $C_{pipe,i}$  と表すとき、式(2)に*N*本の配管経路の設計案の評価値  $C_{Total}$  を示す：

$$C_{Total} = \sum_{i=1}^N C_{Pipe,i} \quad (2)$$

Fig.5にタッチアンドクロス法による2次元平面上での経



路探索の例を示す。探索序盤では干渉コストが小さいため、全経路は干渉を無視した単純な最短経路となっている。しかし、探索回数が進むにつれて干渉コストが増大し、徐々に経路同士の干渉が少なくなり、最終的に干渉のない妥当な設計案を獲得している。

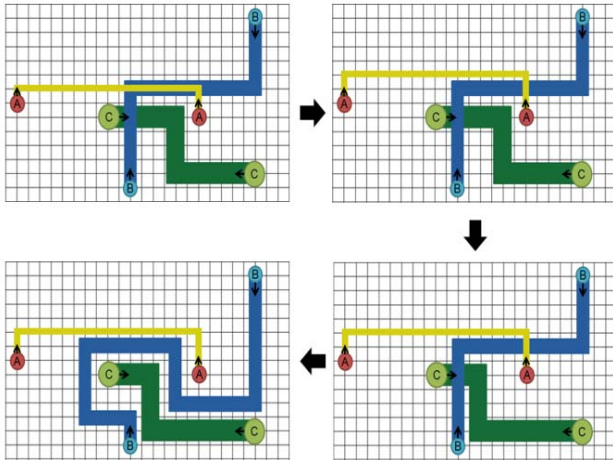


Fig.5 Process of routing by Touch and Cross method.

しかし、タッチアンドクロス法においても初期解の形状がその後に獲得する設計案の形状を大きく支配する要因になっている。先行研究<sup>9)</sup>では、タッチアンドクロス法に焼きなまし法を組み合わせることで探索の後戻りを許容することにより探索の行き詰りを回避する方法が提案されているが、本研究の予備実験で検討したところ、焼きなまし法で長時間かけて解を探すよりも、探索が行き詰る度に干渉を無視した各パイプの最適経路をランダムに選択して初期解を生成し直してタッチアンドクロス法を適用したほうが短時間で優れた解を見出す傾向が見られたので、本研究の実験ではこの方法を採用した。

## 5. シミュレーション実験

### 5.1 天井および壁へのサポートを配慮した配管

#### (1) 実験設定

幅 1500 奥行き 4000 高さ 2000 の通路状の空間内部に  $\phi 200$  のパイプ 2 本、 $\phi 150$  のパイプ 1 本、 $\phi 100$  のパイプ 1 本を天井に並んだ状態から片側の壁に沿って並んだ状態へと配管する設計案の自動生成を試みる。ただし、天井から 100 および 400 の水平位置 2 段のパイプサポートと、片方の壁側より 100 および 400 の垂直方向に 2 段のパイプサポートが奥行き方向に 500 間隔で設置されていると想定し、各径のパイプ探索においてはこのパイプサポートを利用することを想定して経路候補点を生成する。また、サポートの反対側の壁際より幅 800 床より高さ 1300 奥行き 4000 の直方体の領域を仮想的な通路空間として設定し、ここへパイプが干渉することを禁止した。また、全てのパイプはパイプと障害物またはパイプ同士の干渉判定においてクリアランスとして 30 以上の距離を確保することを制約とした。

Fig.6,7,8 はそれぞれ  $\phi 200$ ,  $\phi 150$ ,  $\phi 100$  のパイプが経路探索の際に用いる経路候補点の位置と障害物の配置を表す。半透明の赤みがかったグレーの直方体は通路空間、全体を覆う半透明のグレーの平面は壁面や天井を構成す

る構造部材を示す。天井部分に 2 段、図の左側面部分に 2 段のパイプサポートを想定しているため、パイプの経路候補点もそのサポートの設置位置と対象とするパイプの径に合わせて位置が調整されている。 $\phi 200$  のパイプでは  $16 \times 7 = 112$  個、 $\phi 150$  のパイプも  $16 \times 7 = 112$  個、 $\phi 100$  のパイプでは  $30 \times 7 = 210$  個の経路候補点を用いている。

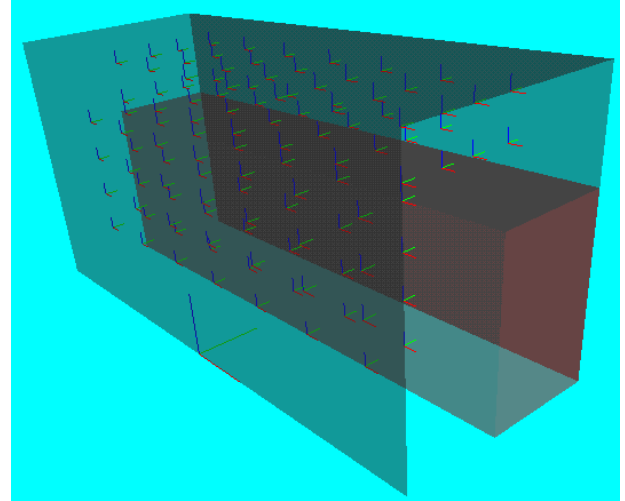


Fig.6 Candidates of waypoints for  $\phi 200$  pipes.

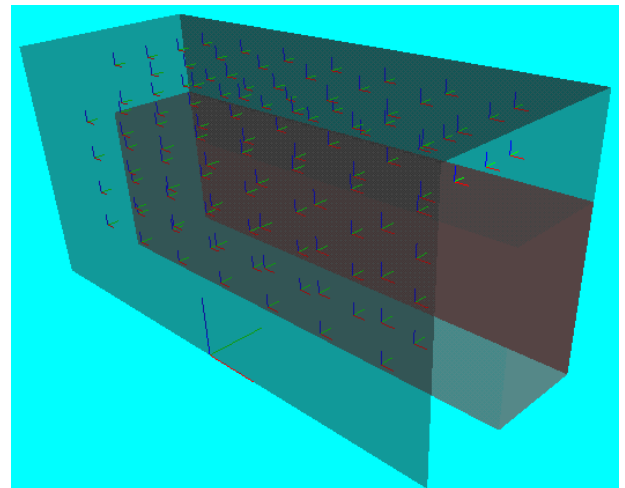


Fig.7 Candidates of waypoints for the  $\phi 150$  pipe.

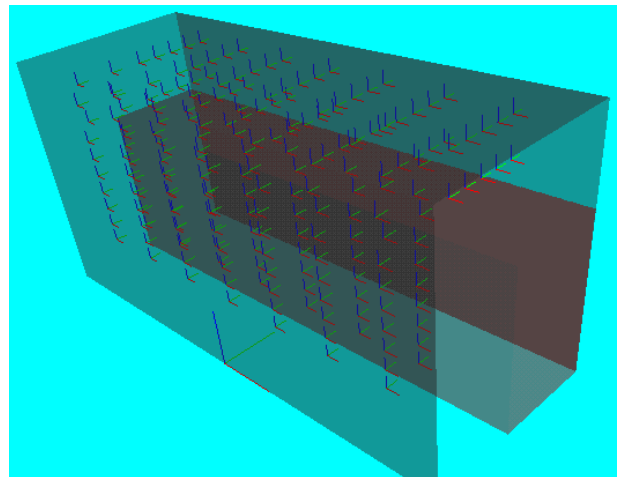


Fig.8 Candidates of waypoints for  $\phi 100$  pipes.

## (2) 実験結果

Fig.9,10,11,12 はベンドを用いた場合の自動計算で得た配管設計案の例を示す。φ200 のベンド半径は400 または300, φ150 のベンド半径は300 または150, φ100 のベンド半径は200 または100 のどちらかを選択できるものとした。また、ベンド部分同士をつなぐ直管部分は、どの径でも長さ100以上を条件としている。ベンド角度は90度を最大角度としている。パイプの単位長さあたりのコストはφ200では40, φ150では22.5, φ100では10, ベンド一か所あたりのコストは径や角度によらず一律1000とした。試行の度に異なる設計案を獲得した。

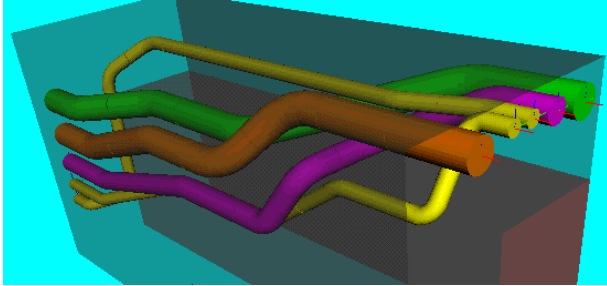


Fig.9 A result with bends. Cost=1370167.

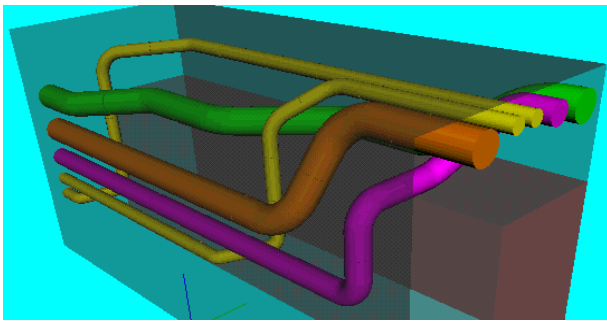


Fig.10 A result with bends. Cost=1171743.

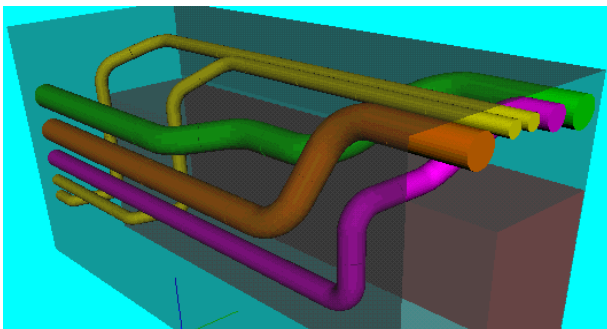


Fig.11 A result with bends. Cost=1192755.

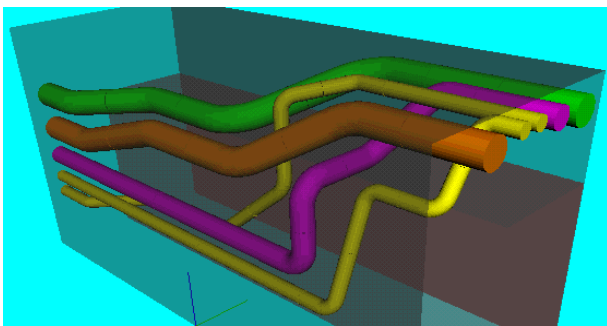


Fig.12 A result with bends. Cost=1318435.

Fig.13,14,15,16 は任意角度のベンドを用いず、全て90度のエルボを用いた場合の自動計算結果である。エルボの曲げ半径やコストの設定はベンドの場合と同じである。やはり試行の度に異なる設計案を獲得した。また、10試行中3~4回は干渉を解消できず、4分ほど計算を行った時点で探索を打ち切った。Fig.13,14,15,16の設計案のうちFig.16のみが迂回路のない設計案であった。

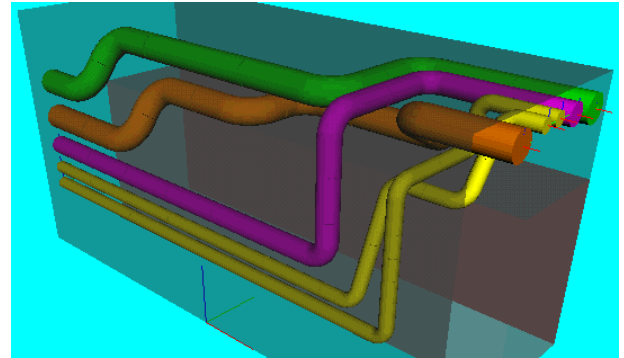


Fig.13 A result with 90 degree elbows. Cost=1368599.

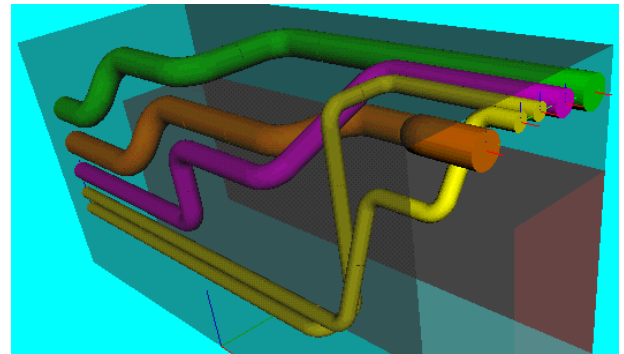


Fig.14 A result with 90 degree elbows. Cost=1320220.

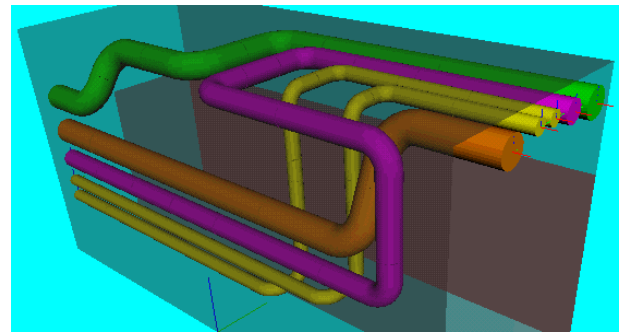


Fig.15 A result with 90 degree elbows. Cost=1281864.

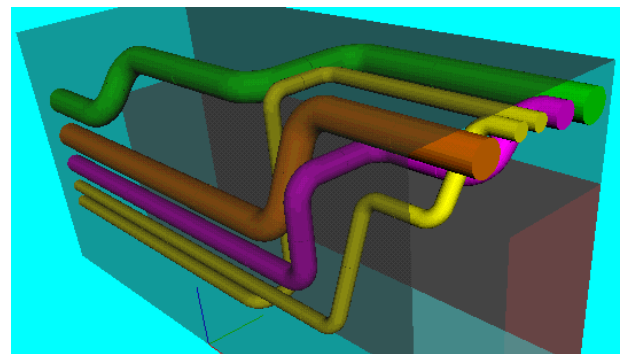


Fig.16 A result with 90 degree elbows. Cost=1181384.

Fig.17 は Fig.16 の設計案で壁部分に並んでいるパイプ群を横に表示して拡大したものである。パイプ毎に経路候補点を与えているため、同一のパイプサポートで複数のパイプを支えられる配置になっていることが分かる。

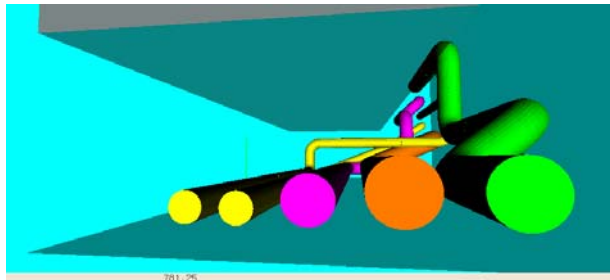


Fig.17 Another view of the solution in Fig.16.

## 5.2 曲面を有する構造部材に沿った配管

### (1) 実験設定

φ300, φ400, φ600 のパイプを半径 3000 の半円筒および長さ 2000 の平面部からなる壁状の構造物に沿って配置する。経路候補点は高さ方向に 400 間隔、半円筒の半径方向に壁から 200 離れた場所から 400 間隔、円周方向に 180 度を 20 分割し、合計 725 個配置した。ベンドの曲げ半径については、φ600 のパイプでは 2400 または 1200, φ400 では 1600 または 1200, φ300 では 600 または 300 としたが、φ300 のパイプについては 90 度のエルボのみ使用する制約をかけた。パイプの曲がり部同士をつなぐ直管部の長さは全てのパイプで 200 以上とした。

### (2) 実験結果

Fig.18,19 に自動計算で得た同一の配管設計案を示す。OS は 64bit Windows7, プロセッサは IntelCOREi7-2.7GHz, メモリ 16G を搭載した標準的なノート PC 上で Java-1.8.0 のプログラムで計算を実行し、3 分程度を要した。

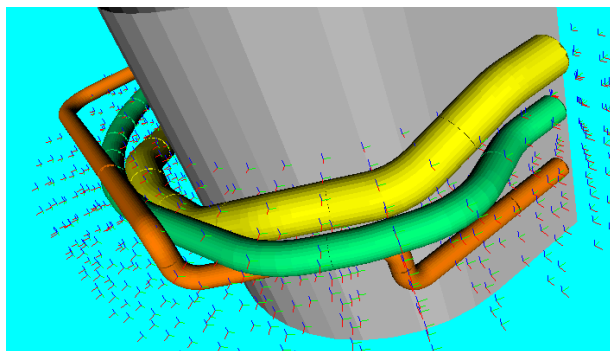


Fig.18 Result of the routing in a curved structure.

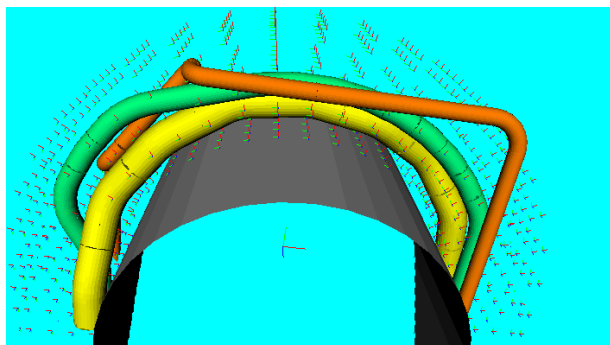


Fig.19 Result of the routing in a curved structure.

## 6. 考察

**【経路候補点の数】** 5.1 節の実験では奥行き方向に 500 間隔で 7 か所のサポートを想定して経路候補点を設置して自動計算により設計案を得たが、奥行き方向に 1000 間隔で 3 か所というサポートを想定して経路候補点の数を減らして配置した場合には、パイプ同士の干渉を解消する設計案は得られなかった。経路候補点を手で配置するのは手間がかかるし、やみくもに配置すれば経路探索に膨大な時間とメモリがかかるので、適切な個数で適切な位置へ経路候補点を配置するよう検討を要する。

**【試行毎に異なる解】** 初期解に依存して様々な設計案となり、最適解が出るとは限らないので、タッチアンドクロス法を改善していく必要がある。

**【90 度エルボ制約】** 全て 90 度のエルボを用いるよう限定しても、空間中を直管がななめに走ったり曲面構造物に沿って配管するような設計案が出てくるのは興味深い。

**【サポートとの干渉】** 各パイプの配置にはクリアランスを設けて障害物や他のパイプとの干渉を検出しているため、パイプに接するサポート材を障害物にしてしまうとその位置にパイプが配置できない。さりとてサポート材を消去してしまうと、サポート材とパイプが干渉するケースが出るので扱いが難しく、今後の課題である。

## 7. 結言

本稿では、パイプサポートや曲がり船殻に対応した配管設計を自動化するため、パイプラックやサポート等の都合からパイプを通すべき位置と方向の候補を予め経路候補点として与え、それら同士をベンド 2 個以下のパイプで繋いだ経路を適切に自動選択して配管設計案を作成する方法を提案した。本手法を計算機プログラムに実装し、通路や曲がり船殻を模した例題において、パイプサポートを想定した箇所と方向に予め経路候補点を配置することで、より実問題に沿った配管設計案が自動生成される様子をシミュレーション実験により示した。

## 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，pp.165 - 173, 2011.
- 2) A. Asmara, U. Nienhuis: Automatic piping system in ship, proceedings of the 5th International Conference on Computer and IT Application (COMPIT), Mar. Ind. 2006. Leiden.
- 3) 木村 元，安藤 悠人：配管経路の自動設計システム，第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI'15) 2015 年 5 月 20 日～22 日，大阪。
- 4) 木村 元，慶田 航，佐多 広海：Voxel 図形の塗り潰しと細線化による配管自動設計に関する研究，日本船舶海洋工学会講演会論文集 Vol.22 (2016 年 5 月 26～27 日，福岡県中小企業センター，福岡市) 講演予定。
- 5) 松岡 英俊，新田 泉：大規模配線システム：GRP, FUJITSU, 50, 6, pp.372 - 377, 1999.
- 6) 安藤 悠人，木村 元：自動経路探索システムにおける複数本配管への対応，日本船舶海洋工学会論文集，第 20 号，pp.221-230, 2014.