

# 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

—パイプ材料コストおよびバルブ操作性評価の多目的最適化—

正員 木村 元\*

Automatic Designing System for Piping and Instruments Arrangement including Branches of Pipes: Multi-objective Optimization of Piping Material Costs and Valve Operability

by Hajime Kimura, *Member*

## Summary

Automatic designing of piping layout is challenging since it is composed of several numerical and/or combinational optimization problems, e.g., routing problems of pipes including branches, and arrangement problems of equipments. This paper presents a new approach based on a simple idea that the branches of pipes are considered to be a variety of equipment. Accordingly, the pipe routing problems are fairly simplified by removing the branches, and it derives a lot of efficient algorithms to solve the pipe arrangement problems. One is a multi-objective genetic algorithm (MOGA) in which the gene represents both the locations of the equipments and the arrangement of the pipes. And a new simple and efficient crossover operation which appropriately merges two different piping layouts (but of course the PID is the same) is proposed. In order to provide a fairly good initial population for the MOGA, a new heuristics making use of self-organization techniques to arrange equipments is proposed. The efficiency of the proposed approach is demonstrated through two experiments, one is a designing problem including five valves, one pump, and five branches, and the other includes seven valves, one pump, and six branches. The objective of the optimization in the experiments is to minimize the length of the pipes, the number of elbows, and the valve operability cost. The algorithms are programmed using Java language. Although the automatic arrangement system used in the experiments is academic, the concept of the proposed approach will be accepted in practical systems.

## 1. 緒 言

造船業界では、情報処理技術の発達に伴い、これを利用することで作業の省力化を図ってきた。さらに近年ではこの情報処理技術を駆使して熟練技能労働者の不足や若年層の労働価値観の変化に対応していく試みがなされつつある。詳細設計の現場においては、3次元CADの発達により、3次元データを扱った設計から解析・生産が普及してきた。本研究の対象としている配管設計作業においては、2次元平面図では熟練技術者でない限り困難だった空間上での配管のイメージを視覚化することで、容易に配管経路を確認できるようになり、作業の効率向上につながっている。しかし配管設計作業そのものは未だ熟練技術者の経験に頼る部分が大きく、設計作業の自動化には至っていない。この原因としては、配管設計問題が複雑過ぎて問題を定式化することが困難であることがまず挙げられるが、配管設計問題に限らず、システ

ムを自動化する上で解決しなければならない共通する課題が存在する。本研究では、配管設計作業の自動化へ向けて、配管設計問題を単純な形式へ定式化する方法や、より設計現場で使いやすくユーザ自身により設定変更やメンテナンス可能で、商用CADと連携可能な自動配管プログラムのあり方について考察し、新しい提案を行う。

配管自動設計における先行研究では、進化計算を適用する手法がいくつか提案されている。伊藤らの研究<sup>1)</sup>およびAsmaraらの研究<sup>2,3)</sup>では空間をメッシュ分割し、セルに配管経路の位置情報を保持させ、遺伝的アルゴリズム(GA)により経路の最適化を行っている。しかしパイプの分岐またはバルブが考慮されておらず、扱えるパイプの径はメッシュの大きさに依存する問題がある。また蔦らの研究<sup>4)</sup>ではクラスタ分析を用いて同じような経路となるべきパイプを集めて配管束とし、これら同士の交差を考慮して配管束の経路を決める方法を提案しているが、パイプの分岐が考慮されていなかった。一方で池平らの手法<sup>5)</sup>および三隅らの手法<sup>6)</sup>では、パイプの分岐およびバルブも考慮した配管設計を行っている。池平らの方法ではバルブの位置と方向のみをGAにより遺伝させ、パイプの経路の探索は各個体でランダムサーチに近い方法で行っているため、パイプ経路に関して良い形質が次世代へ持ち越せず、十分な探索が行えていない問題があった。そこで三隅らの方法では、熟練設計者の行う作業と同様に、

\* 九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

原稿受理 平成23年6月10日

まずバルブを無視して分岐を含む配管経路を決定し、その後で適切な位置にバルブを挿入するという新しい方法を提案した。しかし、この方法はバルブを挿入しようとするパイプの周囲に十分な空間が確保されていないと実行不能解になるため、ほとんどの解が実行不能になってしまうことから探索効率が悪い問題があった。また池平らの方法および三隅らの方法における実装では、T分岐において系統図で示された枝が出ている方向を考慮することができず、T分岐から各機器への繋がり方を指示することができないという重大な問題があった。

そこで本研究では、バルブと分岐を含む配管設計問題において「T分岐」もバルブ等と同等な機器の一種とすることにより、配管設計問題を機器の配置問題と分岐の無い単純なパイプ配置問題という2つの単純な複合問題として定式化する方法を提案する。次に遺伝的アルゴリズムを適用するため、機器の位置と方向およびこれらを繋ぐ分岐の無い単純なパイプのエルボの位置を設計パラメータとするコード化方法を提案し、遺伝的アルゴリズムのための効果的な交叉方法や初期解生成方法、さらに定量化が困難だったバルブ操作性の新しい数値化方法を提案し、シミュレーション実験を通じて有効性を検証する。

## 2. 配管設計問題の定式化

配管自動設計を行うにあたり、まず以下の情報が予め与えられていなければならない：

- 1) 【設計対象空間】バルブ等の機器やパイプを配置可能な空間の範囲。本研究では直方体とする。
- 2) 【機器の幾何情報】本研究ではバルブ・ポンプ・T分岐および設計対象空間と外部との接続点などを機器と定義する。これら機器の大きさを直方体で表し、機器へパイプを接続する位置と方向およびパイプ直径を与える。また、機器の設置可能な方向（姿勢）を指示する。ポンプや外部との接続点など、予め設置場所が決まっている機器については、その座標も指示する。
- 3) 【機器同士の接続情報】各機器のパイプ接続部分が互いにどのように接続しているのかについての情報である。本研究ではパイプの分岐部分を機器としているので、接続先の機器は必ず1つだけとなる。
- 4) 【障害物の幾何情報】設計対象空間内に存在する構造部材や設計対象外の機器などの位置と大きさを直方体および三角形の集合として表現する。
- 5) 【通路空間】乗組員用通路として使用するであろう設

計対象空間内での領域を直方体の集合として表す。この領域では機器は配置しない。またこの領域でのパイプの配置は極力回避しなければならない。

- 6) 【機器・エルボ配置候補座標点】機器やパイプのエルボ設置座標の候補をメッシュ状の点に限定する。

以上の情報を基にして、本研究の自動配管設計システムは以下の設計パラメータを探索し出力する：

- 1) 【機器の位置と方向】予め設置場所が決めていない機器の設置位置座標と設置方向（姿勢）
- 2) 【パイプの経路】本研究ではパイプの分岐は無く、単に2つの機器同士を結ぶものとする。接続先の機器の座標を始点および終点とし、途中のエルボの座標リストでパイプ1本分の経路を表わす。

ただし、本研究では設計対象空間の直方体の各辺に平行な座標軸方向のみに全てのパイプが引かれ、これら座標軸に対してパイプが斜めに引かれることは無い。

本システムでは、設計パラメータは後述の多目的最適化アルゴリズムを用いて探索され、その最適化目標は配管材料コスト（パイプ長×パイプ径・エルボの個数）およびバルブ操作性コストであるが、この部分は任意に設定可能である。バルブ操作性コストの計算方法については既存研究の方法<sup>7)</sup>を改善したものを用いる。詳細は3.3節で説明する。

## 3. 新しい配管自動設計システムの提案

### 3.1 GAのためのコード化・交叉

#### 3.1.1 コード化方法

前章で述べたとおり、探索すべき設計パラメータは機器の位置座標と設置方向、およびそれらに繋がる全パイプの経路を示すエルボの座標リストであり、これらパラメータ集合を遺伝子とする。ただし、機器の座標と方向パラメータは、各機器の座標と設置方向を遺伝子1単位とする。また、パイプの始点と終点の座標はそれぞれに繋がる機器の位置座標と設置方向に依存することから、パイプ経路パラメータは各機器の遺伝子に付属する可変長の遺伝子とする。

#### 3.1.2 交叉オペレーション

交叉オペレーションにより親個体AおよびBの遺伝子から子個体Cの遺伝子を生成する。子個体Cにおける機器の座標と設置方向は、対応する機器の座標と設置方向を親AまたはBのどちらかより確率50%で継承する。このとき、機器同士の位置が干渉せず、また少なくとも1つ以上の機器を異

なるほうの親個体から継承した機器の組合せが見つかるまで処理をやり直す。条件を満たす機器配置と方向の組合せが見つかったら、これら機器同士を結ぶ配管経路を以下の手順で生成する。まず、親Aから継承された機器同士を結ぶ配管経路は、親Aの対応する配管経路を子個体Cへそのまま継承する。同様に親Bから継承された機器同士を結ぶ配管経路は、親Bのものを子個体Cへそのまま継承する。親Aから継承した機器と親Bから継承した機器を結ぶ配管経路は、親Aからの機器に接続されている親Aのパイプを途中の任意のエルボで切断し、親Bから継承した機器に接続されている親Bのパイプも途中の任意のエルボで切断し、切断された部分同士を新しいパイプでエルボ3個以下を用いて接続する。パイプ同士あるいはパイプと機器が干渉する場合は、親から継承するパイプの切断位置をランダムに変えてパイプ経路を引き直す。このとき、他の要素との干渉箇所が多いパイプから優先的に引き直す。

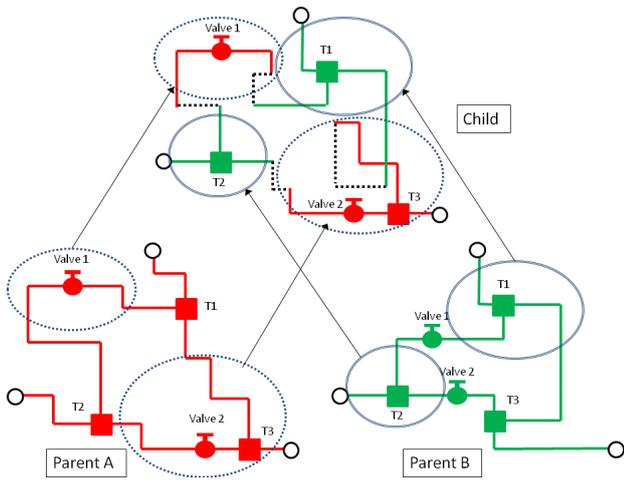


Fig.1 A sample of crossover operation

Fig.1 に交叉オペレーションの例を示す。子個体は、親Aからバルブ1とバルブ2およびT分岐3を受け継ぎ、親BからT分岐1と2を受け継いでいる。パイプについてはそれぞれの親から引き継いだ機器に接続されているパイプ経路を引き継ぐが、途切れている部分についてはFig.1の点線で示されている部分のように新しく引き直す。本手法では、処理が無限ループへ陥ることを回避するため、子個体Cの生成時に、機器配置の処理のやり直しを500回またはパイプの引き直しを100回行っても実行可能解を得られない場合は交叉失敗として親個体の選択からやり直しを行うものとしている。

### 3.1.3 突然変異オペレーション

本研究では、ランダムに機器を1つ選び、この機器の配置座標に対してのみ突然変異オペレーションを作用させる。ま

た、ほとんどの場合、ランダムな位置への機器の移動は解の劣化をもたらすことから、元の位置の近傍にある座標候補点へ50%の確率でランダムに移動、残りの確率で該当機器と接続先の全機器との間を接続しているパイプ長が最短になる位置へ移動する。また、この突然変異オペレーションを適用された機器は、この機器と接続先の全機器とのパイプ長が最小になるよう姿勢を変更する。もし機器を移動および姿勢を変化させた結果、パイプや機器が干渉した場合は、機器をランダムに一つ選ぶ処理から再度やり直す。

## 3.2 GAの初期解集合の生成

GAでは、前節で説明した交叉・突然変異オペレーションを用いて解候補を改善していくが、それに先立ち実行可能な(致死解ではない)初期解候補を生成しておかなければならない。本システムにおける最適化目標の一つであるバルブ操作性コストの小さい解を生成するヒューリスティクスは存在しないため、これに対してはランダムに解候補を生成するしか無いが、材料コストの小さい解を生成する方法については、以下に説明するヒューリスティクスによる機器配置法が有効である。以下、本手法で使用している2種類の初期解生成法を説明する。

### 3.2.1 解候補のランダム生成

まず全ての機器の座標を、機器・エルボ座標候補点集合からランダムに選び、姿勢もランダムに選ぶ。このとき機器と障害物あるいは機器同士が干渉している場合は、該当する機器を再度ランダムに配置し直す。全ての機器が配置できたら、機器同士を繋ぐ全てのパイプをエルボ3個以下の単純な経路で結ぶ。このとき、他の機器やパイプと干渉しているパイプのうち、最も干渉している箇所の多いパイプの両端に位置している機器の位置をランダムに配置し直してから再び全てのパイプをエルボ3個以下の単純な経路で結ぶ処理からやり直す。この処理を全ての機器やパイプが互いに干渉しなくなるまで繰り返す。Fig.2に本方法で生成した機器配置図の例を示す。

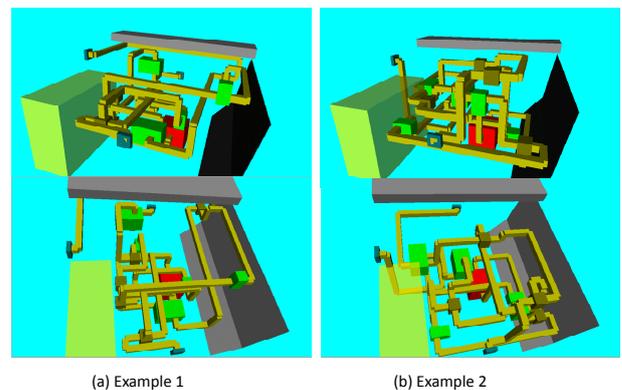


Fig.2 Randomly generated PlotPlans

### 3.2.2 総パイプ長を短縮する自己組織化機器配置法

前述の方法により解候補を生成すると、Fig.2 のように設計対象空間一杯にパイプが張り巡らされる傾向があり、材料コストを考えると大変無駄の多い設計案ばかりが生成されやすい。そこで以下の自己組織化アルゴリズムにより、配管経路長をなるべく短く、かつ機器同士が干渉しにくいように機器を配置する方法を提案する。

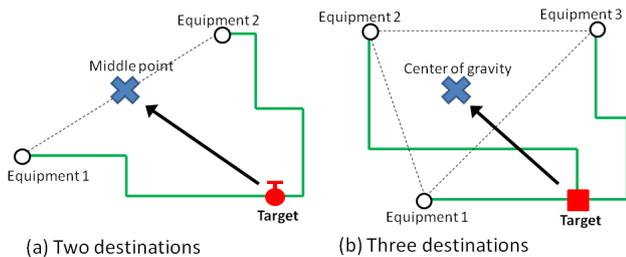


Fig.3 A basic concept of the self-organization arrangement

Fig.3 に示すように、まず任意の移動可能な機器を1つ選択し、その機器と接続された相手先機器の位置座標を調べ、注目している機器の位置座標をそれら接続先機器の位置座標の midpoint に最も近い配置可能な座標点候補へ修正する(実際にはパイプの太さも考慮するため、接続相手先座標をパイプ径で重み付けする)。このとき注目する機器の設置方向は、接続するパイプ長が最小になる方向に修正される。このような処理を全ての移動可能な機器についてランダムに選択して適用することにより、全体として配管経路に無駄のないすっきりした機器配置が自発的に形成される。ただしこのままではデザイン対象空間内に多数の障害物が存在する場合には対処が困難であり、またバルブ操作性などについては考慮できないなどの問題があるため、あくまでも遺伝的アルゴリズムの初期解として使用する。Fig.4 に本手法で得られた機器配置図の例を示す。Fig.2 のランダム配置と比べ、明らかにパイプの無駄な引き回しが減っている。

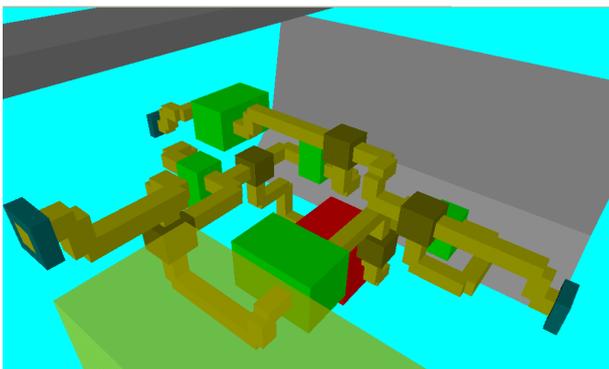


Fig.4 An example of the self-organization operation

### 3.3 バルブ操作性評価の定量化

本研究では、作業員が移動することが可能な空間を「アクセス可能空間」と呼び、既存研究の再帰格子塗り潰しアルゴリズム<sup>7)</sup>を拡張して、立った姿勢のまま移動できる場所としゃがんだ姿勢でしか移動できない場所を区別する。Fig.5 に2次元平面を用いて模式的に説明する。まず設計対象の空間を等間隔の格子状に分割する。次に通路として定義された領域内の格子から作業員のしゃがんだ姿勢を反映する形状の格子集合図形 (Worker segment matrix (a)) をペイントのブラシのような要領で平行移動させて領域を塗り潰す (Fig.5 左上図および右上図) ことにより、しゃがんだ姿勢で通過できる空間を識別する。さらに、そのしゃがんだ姿勢で塗りつぶした空間に対して、作業員の立ち姿勢を反映する形状の格子集合図形 (Worker segment matrix (b)) を移動させて領域を塗り潰すことにより、立った姿勢で通過できる空間を識別する (Fig.5 右下図)。以上の処理によりアクセス可能空間を識別する。

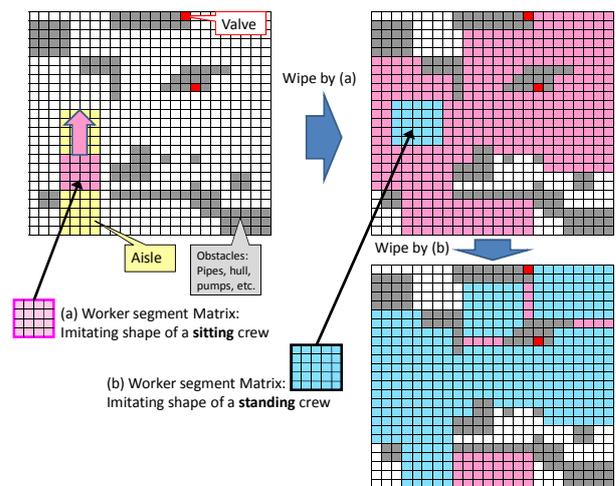


Fig.5 Recursive Fill algorithm to find accessible space

次に、バルブへの移動コストについて評価する。まず作業員がバルブを操作するための立ち位置上に存在する格子の存在を確認する。次に、注目するバルブから通路空間、あるいは別のバルブの立ち位置上の格子まで移動するための経路探索を行う。この経路探索の方法として、ダイクストラ法を用いる。移動にかかるコストとして、人間の消費エネルギーを求める係数であるRMRを利用する。立った姿勢での移動合としゃがんだ姿勢での移動では消費エネルギーが異なるため、例えば Fig.6 のように2通りの経路が存在する場合はしゃがんで移動する区間の短い右側の経路のほうが良い。

これらアクセス可能空間の識別及びバルブへの経路探索については、実際には3次元空間上で行われ、上下方向への移動コストについても考慮する。バルブへアクセス不可能な場合は、大きなペナルティを与える。

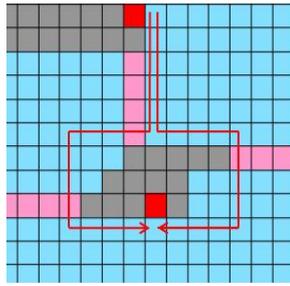


Fig.6 Two routes to a valve

### 3.4 ルール等のXMLによる指示とCADとの連携

本研究のシステムでは、情報の入力形式や設計案の出力形式としてXML (extensive markup language) ファイルを使用している。XMLはデータの構造や形式が明示的に宣言されており、比較的人間が解読しやすいと同時にコンピュータでも扱いやすく、また様々な別のデータ形式への変換も容易であるなどの優れた特徴を持つため、単にデータをテーブル状に羅列したようなCSV形式に代わり、近年広く用いられているデータ表現方法で、先行研究<sup>2,3,4)</sup>でも使用されている。本研究では、システムが出力した機器配置(PlotPlan)を人間がより理解しやすいように3次元表示するため、出力されたXMLファイルをX3Dと呼ばれる3Dモデル表現言語へと変換し、これをX3D表示用汎用ソフトを用いて表示している。このX3DもXMLの一種である。また、様々なCADシステムを簡単なカスタマイズによって本研究のシステムとの間でデータのやりとりができるよう、本研究のXML入出力ファイルの書式をWebサイトにて公開を予定している。

本システムでは、機器の取りうる姿勢について、機器によっては設置可能な方向が重力などの方向に依存して制約を受ける場合があるため、機器の幾何情報の一部としてXMLの記述によって簡単に指示できるようになっている。また、本実験ではバルブ、ポンプ、T分岐、および外部へのパイプ接続部の4種類を「機器」として用いたが、形状やパイプ接続本数の異なる任意の機器をXMLによって定義・記述が可能である。径違いのT分岐やクロス分岐、同心/偏心レデューサ、ストレーナなど、最適化プログラム本体を修正することなく、これらの機器の形状や姿勢の制約をXMLによって定義・記述することにより本システムを利用できる。本論文の付録にT分岐T-000を表したXMLの記述例を示す。

## 4. 計算機シミュレーションによる検証

### 4.1 実験設定

本システムの動作を確認するため、Fig.7およびFig.8に示すバラストポンプルームの系統図に基づく配管設計を試みた。Fig.7の系統図は文献<sup>5,7)</sup>と同じであるが、デザイン対象空間は5m×5m×高さ2mであり文献<sup>5,7)</sup>の設定より高さが

3mほど低く、CP0からT-000、T-004およびValve-003を経由してCP1へ至るパイプの径が他の箇所比べて2倍であり、配管の際の空間制約が厳しくなっている。Fig.8の系統図では、先の系統図にバルブ2個、T分岐1個、外部への接続点を1ヶ所追加した、より複雑な問題設定となっている。

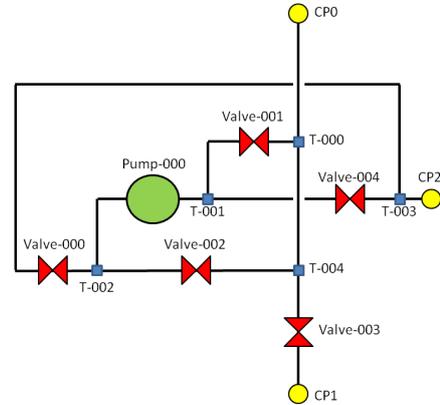


Fig. 7 Piping and instrument diagram (PID) of 5 valves

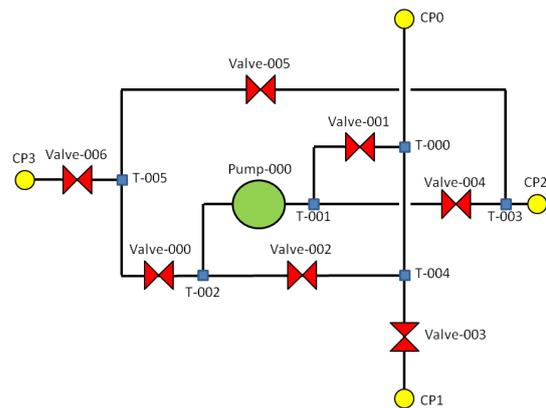


Fig. 8 Piping and instrument diagram (PID) of 7 valves

本実験では「パイプ材料コスト」「エルボの数」および「バルブ操作性」の3つのコスト関数を最小化する3目的の最適化問題とした。パイプ材料コストについては文献<sup>7)</sup>、バルブ操作性の計算方法は提案手法を用いるが、各バルブから通路空間までの移動コストのみを考え、バルブ間の移動については考慮しない。多目的最適化であるので、GAの世代交代方法として文献<sup>7)</sup>で使用されているNSGA-IIを用いた。予備実験によりFig.7の問題では集団サイズは80個体、Fig.8の問題では200個体とした。

### 4.2 実験結果

計算環境は、OSにWindows-XPを使用し、CPUはIntel Core2 Quad 2.664GHz、メモリーは2GB、プログラム言語はJava 1.6を用いた。Fig.7のバルブ5個の問題において評価回数18880回に要した時間は約10日、うち80個体分の初期解生成に要した時間は3日半であった。Fig.8のバルブ7個の

問題において評価回数20000回に要した計算時間は約1週間、うち200個体分の初期解生成に要した時間は約2日であった。本手法では初期解生成において機器をランダムに配置した解候補の生成を試みているが、本実験の設定のように狭い空間に機器やパイプを詰め込んで配置する場合、ランダム配置では実行可能解の生成が大変難しく、そのために初期解生成に多くの時間を要した。

Fig.9はFig.7のバルブ5個の問題で評価回数18880回におけるパレート解の1つで、エルボ個数が最小の13個で構成されている。パレート解集合の全てにおいて太いパイプに繋がる機器が直線状に配置された設計案を得た。しかし、Fig.9のように紫色の小さな立方体で示される移動経路をパイプの上やバルブの上に見出すケースが多く、グレーチングの設置コストやバルブを操作する時の姿勢をコストとして考慮する必要がある。

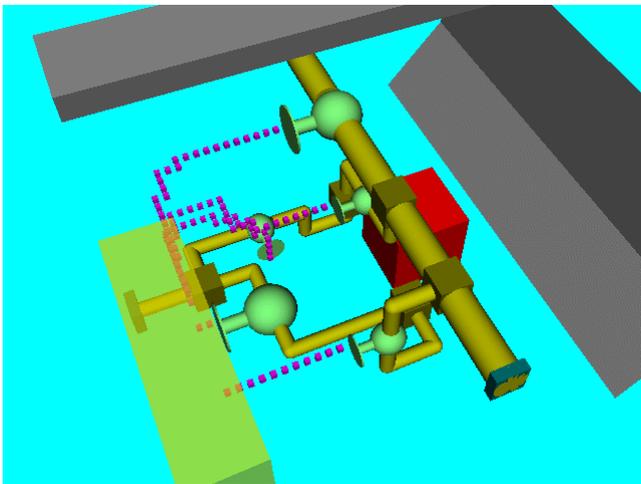


Fig.9 An obtained solution in the problem of 5-valves

Fig.10およびFig.11はFig.8のバルブ7個の系統図の問題において評価回数20000回で観察されたパレート解を2つ選んだものである。紫色の小さな立方体はバルブ操作時の最小コスト移動経路を示す。Fig.10は材料コスト2.7975、バルブ操作性コスト270.8、エルボ数24である。Fig.11の解では材料コスト2.6475、バルブ操作性コスト286.0、エルボ数22である。よって数字の上ではFig.10の設計案がバルブ操作性に優れるが、立体的に表示された設計案を感覚的・主観的に評価すると、作業員が通る空間が広く確保されているという意味ではFig.11の解候補のほうが好ましいとも考えられ、今後評価法に検討を要する。

また紙面の都合上詳細は説明できないが、本手法は3目的のパレート解集合を保持しており、Fig.9, 10, 11に示した以外にも多様で有用と思われる解を生成した。

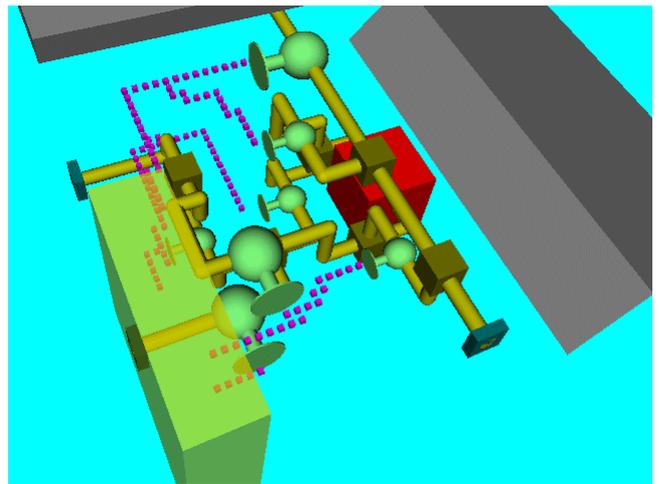


Fig.10 An obtained solution in the problem of 7-valves

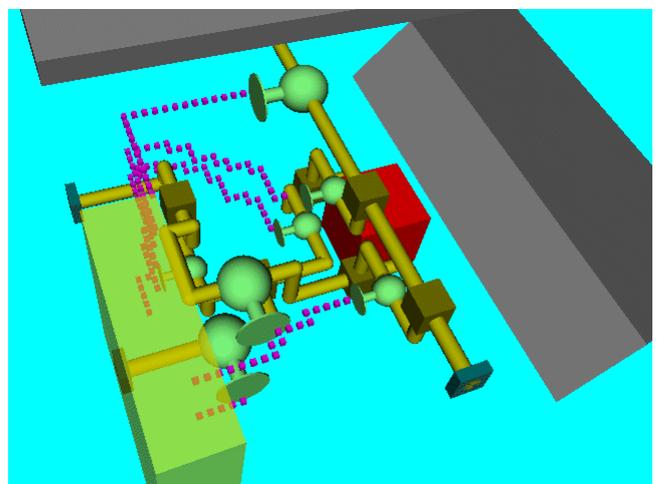


Fig.11 An obtained solution in the problem of 7-valves

Fig.12, 13, 14は、Fig.8のバルブ7個の問題において遺伝的アルゴリズムの集団中でのパイプ材料コストの最小値、エルボの個数の最小値、およびバルブ操作性コストが探索の進行とともに変化していく様子を示す。

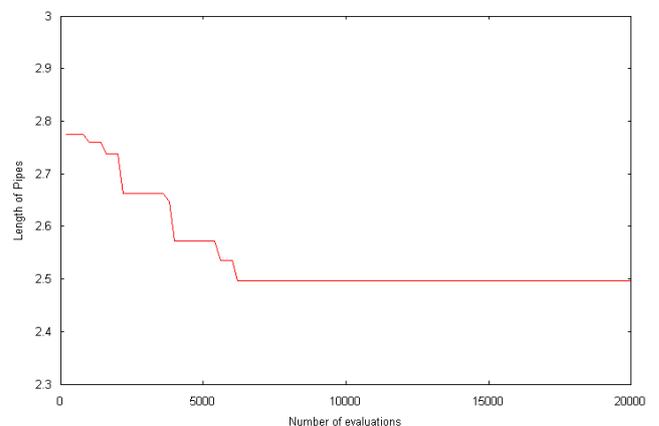


Fig.12 Best solution of material cost in GA population

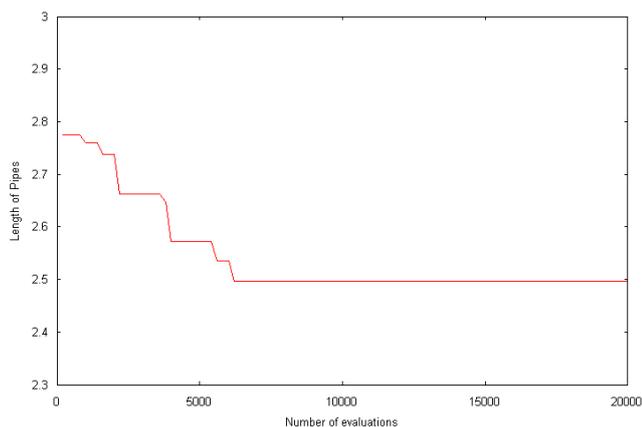


Fig.13 Best solution of number of elbows in GA population

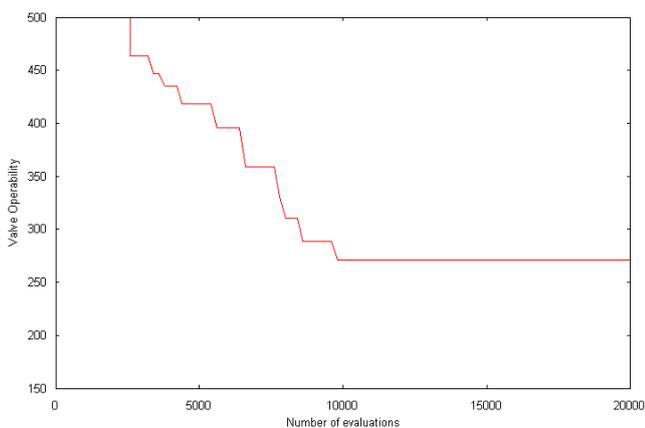


Fig.14 Best solution of valve operability in GA population

本実験は3目的の多目的最適化なので3次元評価空間におけるパレート解の分布の図示が困難だが、Fig.15はバルブ操作性コスト（Valve operability cost）と材料コスト（Length of pipes）の2つの評価において、Fig.8の問題における評価回数が増加し探索が進むと遺伝的アルゴリズムの個体集団中のパレート解が進化していく様子を示す。Fig.15中の各プロットは遺伝的アルゴリズム中での解候補の評価回数、すなわち探索の進み具合を表わす。Fig.16は探索進行に伴い変化するパレート解の個数を示す。

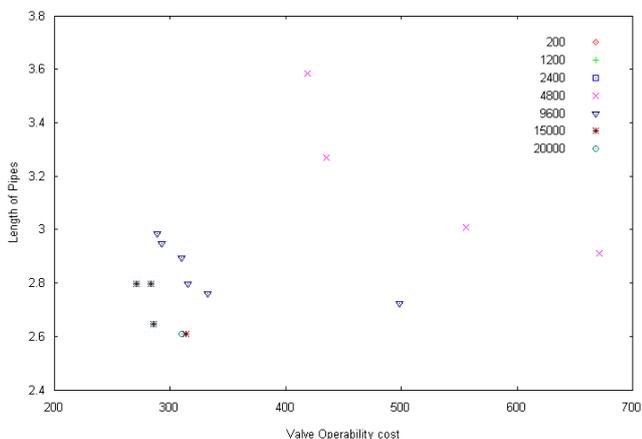


Fig.15 Pareto solutions at each search stage

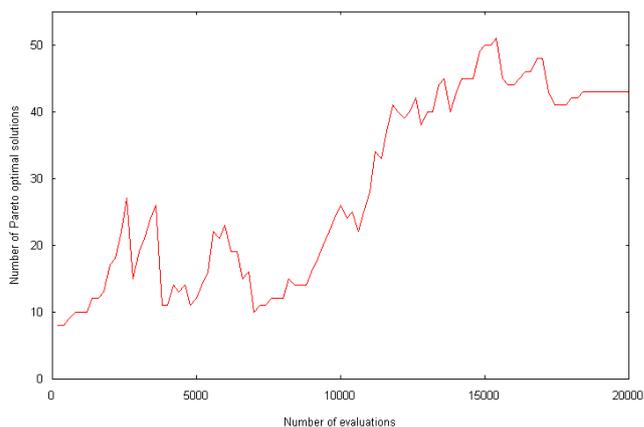


Fig.16 Number of pareto solutions

Fig.12, 13, 14 の評価回数とその時点で得られた各評価関数での最良解の評価値との関係を見ると、評価回数 15000 回付近ではほぼ最適解を得ているが、Fig.16 よりその後も新しいパレート解を発見していることが観察される。本手法では、設計パラメータが完全に同じ（重複する）解候補を許容していないため、これは評価値は同じだが異なる設計案となっている解候補を多数見出していることを意味している。具体的にはバルブの方向が異なっているだけというケースが多い。

## 5. 考察

### 5.1 探索性能について

本実験設定は先行研究<sup>5,7)</sup>の設定とは異なるため直接比較することには無理があるが、評価回数 1/3 程度で材料コストが半分以下の優れた解を見出すことができるなど、探索性能は飛躍的に向上した。しかし、Fig.9~11 の機器配置図を見ると、機器の配置やパイプの引回しを少し変えるだけで、パイプ長そのままエルボ数を減らせる余地が残っている。これは機器を配置した後のパイプ接続法や、「自己組織化機器配置法」のロジックに問題が残っていることに原因がある。まず機器へのパイプ接続に関し、本文中に説明していないが機器への無理なパイプ取付を避けるため、機器へのパイプ接続部分はある程度の長さの直線パイプを取り付けるように制約している。また、自己組織化機器配置法に関して、注目した機器の配置をパイプの接続先機器の座標の重心へ持ってくるというロジックは、探索序盤では有効に働くが、探索後半では探索の足を引っ張る場合がある。なぜなら、この自己組織化ロジックは全ての機器をおおよそ等間隔に並べる方向へと設計案を修正していくが、最適な機器配置が全ての機器を等間隔に配置することとは限らないからである。この部分のロジックの改善が必要である。

また、本システムで用いているパイプの経路生成方法については、基本的にエルボ 3 個以下の単純な接続を基本として

いる。例えば、初期解の生成や自己組織化機器配置法において、機器間をパイプで接続する際、それらのパイプは全てエルボ3個以下で構成される。また、GAの交叉オペレーションにおいては、エルボの位置で切断されたパイプ同士を繋ぐために新たにパイプを追加するが、この追加されるパイプもエルボ3個以下で構成される。そのため、上記のような新たなパイプ引き直しの際において機器間に複雑な形状の障害物が存在したり、機器同士が離れすぎている場合はパイプ経路が生成できないという問題がある。そこで、間に障害物が存在する機器同士をエルボの個数の制約無しで確実にしかも最小コストでパイプを引くため、経路探索法であるダイクストラ法を利用する新しい方法<sup>8,9)</sup>について検討中である。

## 5.2 最適な複数設計案の提示の実現

本システムで用いている多目的遺伝的アルゴリズムでは、探索集団中において解候補の重複、すなわち同じ設計案の重複を許していないが、評価値が同じになる解候補の存在は許容している。このため、Fig.10~11で示したように評価値はどれも最適でバルブの方向などが異なる設計案が複数提示された。設計現場では、設計案の評価を明示的に数値で表せない場合があるため、複数の最適な設計案を提示するシステムはより実用的であると考えられる。

## 5.3 サポートを考慮したパイプや機器配置について

本システムでは、作業員用通路として使用する領域を直方体の集合として予め指示することにより、ここへの機器の配置を回避しパイプの配置も極力回避している。しかし、バルブ取り付け位置については、作業員が到達・操作可能であることがコストとして評価されているが、操作しやすい高さや方向になっているかどうかは考慮されていないという問題がある。これは、作業員用の通路領域を指示したのと類似の仕組みを導入することにより、作業員が操作しやすい高さへバルブの配置を誘導したり、サポートを設置しやすい壁沿いへ機器やパイプの配置を誘導することが可能である。しかし、このような空間を設計者が予め直方体の集合として本システムへ全て与えたとすると、逆にユーザ設計者の負担となかなかねない。そこで、壁沿いや天井沿い空間など比較的自明な空間の指示を自動化し、それ以外のパイプラック等の領域の指示をユーザが個別に行うようなシステムにすべきかどうかなどの検討を要する。

## 5.4 XMLによるルール等の指示

本システムでは、3.4節で説明したように情報の入力形式や設計案の出力形式としてXML (extensive markup language) ファイルを使用し、機器の取りうる姿勢についての制約を機器の幾何情報の一部としてXMLの記述によって簡単に指示できるようになっている。また前述の通路として使用する領

域やパイプラックを想定した領域の指示なども同様にXMLによって簡単に指示できる。これは、システムのソースコードを直接修正することなく比較的複雑なルールをXMLによって指示する柔軟なシステム構築の可能性を示している。

配管に関するさらに一般的な設計指針として、例えばパイプ内部の液体を重力によって流すため「たまり」を作らないための上下方向への配管に対する制約や、電気機器の上に配管しないといったルール、また熱収縮を吸収するフレキシビリティを持たせるため、わざとベンドを有する経路にするなどの知識・ルールなどが挙げられる。将来的なルール変更や設計指針の変更に対処していくためには、これらの制約条件や設計指針をXMLで記述してシステムへ指示することが望ましい。このようなルールや設計指針をどのようにしてXMLで表現すべきかについては今後の課題である。

## 6. 結言

本論文では、配管設計作業の自動化へ向けて、以下の提案を行った。まず配管設計問題を分岐の無い単純なパイプの経路設計問題とパイプ以外の機器(分岐を含む)の配置問題の複合問題という単純な形式へ定式化した。次に、この問題を解くための方法として多目的遺伝的アルゴリズムを採用し、2つの親となる設計案から、それらの特徴を継承する子の設計案を生成するための新しい交叉オペレーションを提案した。遺伝的アルゴリズムで使用するための優れた初期解を生成するための方法として自己組織化機器配置法を提案した。定量化が困難だったバルブ操作性評価について既存の方法を改良し、移動に要するカロリーを考慮する方法を提案した。模式化したバラストポンプルームの配管設計問題へ本手法を適用し、自動設計能力について検証した。より設計現場で使いやすくCADと連携し、かつユーザ自身により設定変更やメンテナンス可能なシステムの実現のため、XMLを活用する方法について考察を行った。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、エス・イー・エー創研の松尾様ならびに大山様より配管設計についての貴重な教示およびコメントをいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。また、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) 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の検討, 人工知能学会誌, Vol.13, No.5, 1998, pp.791-802.

- 2) Asmara, A. and 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.
- 3) Asmara, A. and U. Nienhuis: Automatic Piping System Implementation: A Real Case, proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Computer and IT Application (COMPIT), Mar. Ind. 2007.
- 4) 蔦敏和, 山口太朗: 機器配置・配管の自動化と3次元表示, 情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, Vol.27, 2004年12月, pp.327-330.
- 5) 池平怜史, 木村元: 機器配置図・系統図に基づく配管自動設計手法の開発, 日本船舶海洋工学会論文集, 第9号, 2009, pp.223-229.
- 6) 三隅壮太, 木村元: 配管経路の形質を重視したGAによる配管設計自動化に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, Vol.9W, 2009年11月, pp.63-66.
- 7) 池平怜史, 木村元: バルブ操作性を考慮した配管自動設計手法の開発, 日本船舶海洋工学会論文集, 第9号, 2009, pp.231-236.
- 8) 木村元: ダイクストラ法を用いた配管設計アルゴリズム, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 Vol.11, pp.121-124 (2010年11月4-5日, 長崎県佐世保市アルカス佐世保).
- 9) 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講演会論文集 Vol.12, pp.339-342 (2011年5月19-20日, 福岡県中小企業センター, 福岡市).

## 付 録

本文3.4節においてシステムが用いている機器同士の接続や幾何情報のXMLによる表現について、T分岐 (T-000) を例に挙げる。

```

<!--T-branch 0-->
<Equipment pid="T-000">
<Specification>T-branch-000_0.15-0.15-0.15</Specification>
<EquipmentType>T-branch</EquipmentType>
<Connector number ="0">
<Diameter>0.15</Diameter>
<DestinationEquipmentType>PipelnOutPoint</DestinationEquipmentType>
<DestinationEquipmentID>PipelnOutPoint-000</DestinationEquipmentID>
</Connector>
<Connector number ="1">
<Diameter>0.15</Diameter>
<DestinationEquipmentType>T-branch</DestinationEquipmentType>
<DestinationEquipmentID>T-004</DestinationEquipmentID>
</Connector>
<Connector number ="2"> <!-- 枝 -->
<Diameter>0.15</Diameter>
<DestinationEquipmentType>Valve</DestinationEquipmentType>
<DestinationEquipmentID>Valve-001</DestinationEquipmentID>
</Connector>

```

```

<!--T-branch の設置可能な方向および各幾何形状の列挙-->
&T-branchGeometry0.15-0.15-0.15;
</Equipment>

```

以上が PID を表す XML 中の分岐 T-000 のみを抽出したもののだが、この分岐の幾何情報については、別ファイルの T-branchGeometry0.15-0.15-0.15.xml に記述されている。幾何情報としては、機器の中心座標を原点とした機器の大きさや各パイプとの接続座標と方向が示されている。以下の例は1つの姿勢パターンのみ示すが、実際には設置可能な姿勢のパターンを全て列挙する。例えばこのT分岐の場合、姿勢に制約が無ければ24パターン列挙する必要があるし、枝の部分が常に下を向くという制約なら4パターンとなる。

```

<!--T-branchGeometry0.15-0.15-0.15.xml-->
<RelativeEquipmentGeometry>
<BoundingBox>
<x_min> -0.15 </x_min> <x_max> 0.15 </x_max>
<y_min> -0.15 </y_min> <y_max> 0.15 </y_max>
<z_min> -0.15 </z_min> <z_max> 0.15 </z_max>
</BoundingBox>
<PipeConnectingPoint>
<ConnectorNumber> 0 </ConnectorNumber>
<Coordinate>
<x_coordinate> -0.15 </x_coordinate>
<y_coordinate> 0.0 </y_coordinate>
<z_coordinate> 0.0 </z_coordinate>
</Coordinate>
<Direction>
<x_axis> -1.0 </x_axis>
<y_axis> 0.0 </y_axis>
<z_axis> 0.0 </z_axis>
</Direction>
</PipeConnectingPoint>
<PipeConnectingPoint>
<ConnectorNumber> 1 </ConnectorNumber>
<Coordinate>
<x_coordinate> 0.15 </x_coordinate>
<y_coordinate> 0.0 </y_coordinate>
<z_coordinate> 0.0 </z_coordinate>
</Coordinate>
<Direction>
<x_axis> 1.0 </x_axis>
<y_axis> 0.0 </y_axis>
<z_axis> 0.0 </z_axis>
</Direction>
</PipeConnectingPoint>
<PipeConnectingPoint>
<ConnectorNumber> 2 </ConnectorNumber>
<Coordinate>
<x_coordinate> 0.0 </x_coordinate>
<y_coordinate> 0.15 </y_coordinate>
<z_coordinate> 0.0 </z_coordinate>
</Coordinate>
<Direction>
<x_axis> 0.0 </x_axis>
<y_axis> 1.0 </y_axis>
<z_axis> 0.0 </z_axis>
</Direction>
</PipeConnectingPoint>
<CenterCoordinate>
<x_coordinate> 0.0 </x_coordinate>
<y_coordinate> 0.0 </y_coordinate>
<z_coordinate> 0.0 </z_coordinate>
</CenterCoordinate>
<HandleDirection>
<x_axis> 0.0 </x_axis>
<y_axis> 0.0 </y_axis>
<z_axis> 0.0 </z_axis>
</HandleDirection>
</RelativeEquipmentGeometry>

```