

# 機器配置およびパイプの分岐を含む配管自動設計システム

○木村 元 (九州大学)

## An Automatic Designing System for Piping and Instruments Arrangement including Branches of Pipes

\* H. Kimura (Kyushu University)

**Abstract**— This paper proposes a new algorithm for arranging pipes and instruments to minimize material costs and valve operability costs. In general, since treating pipe's branches in pipe arrangement problems is too complicated, there are few pipe arrangement methods including branches. In this paper, the pipe branches are treated as a kind of equipment, and piping and instruments design plans are described using parameters of the locations (and directions) of the equipments and the elbows of the pipes. Using this expression, a crossover operation for GA is easily derived. Experimental results show the efficiency of the proposed method.

**Key Words:** Pipe arrangement design, Genetic Algorithm, Self-organization, crossover operation

### 1 はじめに

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の課題が存在する。本研究では、配管設計作業自動化へ向け、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な自動配管システ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、遺伝的アルゴリズム (GA) 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、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。また鷹らの研究<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、探索性能の点で問題があった。

そこで三隅らの方法<sup>6)</sup>では、熟練設計者の行う作業と同様に、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。特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法を提案する。

### 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1つに限られる。
- 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する。
- 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、その最適化目標は材料コスト・バルブ操作性コスト・エルボの個数などであるが、この部分は要求に応じて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>5)</sup>をそのまま用いる。

### 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・交叉方法

##### (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。

##### (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、また少なくとも一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の多いパイプから優先的に引き直す。

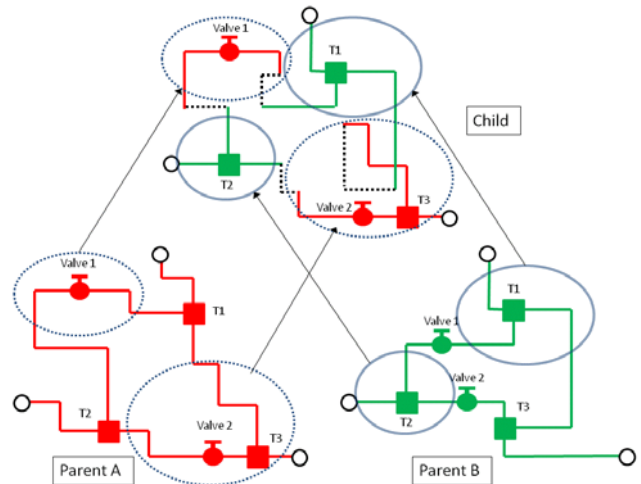


Fig.1 A sample of the crossover operation

交叉オペレーションの例を Fig.1 に示す。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っている。

### (3) 突然変異オペレーション

本研究では、ランダムに機器を一つ選び、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。

### (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が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 に本手法で生成した機器配置図の例を示す。

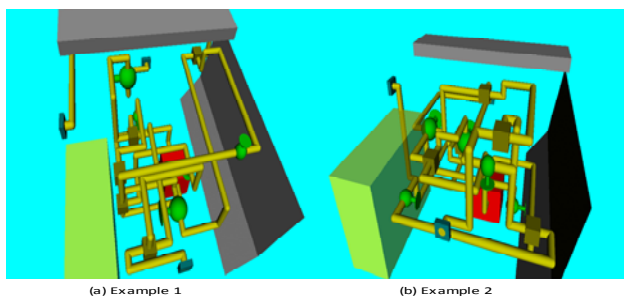


Fig.2 Randomly generated plot-plan arrangements

### (2) 総パイプ長を短く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。

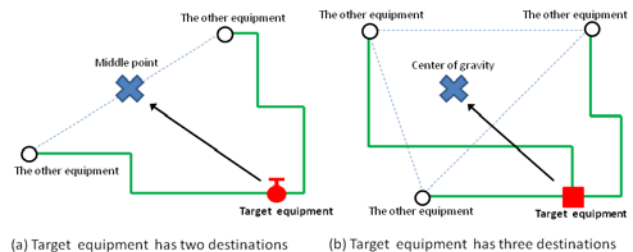


Fig.3 A basic concept of self-organization operation

Fig.3 に示すように、まず任意の移動可能な機器を一つ選択し、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中心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。

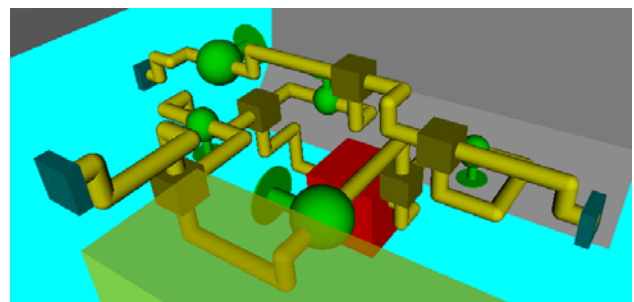


Fig.4 An example of the self-organization operation

## 4 計算機シミュレーション実験

### 4.1 実験設定

本システムの動作を確認するため、Fig.5 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。この系統図は文献<sup>5,6,7</sup>の実験で使用されたものと同じであるが、デザイン対象空間は 5m×5m×高さ 3m であり文献<sup>5</sup>の設定より高さが 2m ほど低く、箱状の障害物と板状の障害物が追加されている。また、機器のうちポンプの位置およびパイプがデザイン空間の外へ接続する位置が予め与えられている点は文献<sup>5,6,7</sup>と同じだが、デザイン対象空間の大きさを変更した関係で位置座標や方向は文献<sup>5,6,7</sup>とは異なる。障害物が存在し、より狭い空間での配管設計であるため、文献の設定よりやや困難な問題である。本実験では「パイプ材料コスト」「エルボの数」および「バルブ操作性コスト」の3つのコスト関数を最小化する3目的最適化問題とした。パイプ材料コストについては文献<sup>5</sup>、バルブ操作性コストの計算方法は文献<sup>7</sup>の方法を用いた。多目的最適化であるので、遺伝的アルゴリズム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。予備実験により集団サイズは 80 個体とした。1 回の世代交代において交叉オペレーションにより 40 の子個体、突然変異により 40 の子個体を生成し、もとの親個体と合わせて 160 個体から NSGA-II の非優劣ソートにより集団サイズの 80 個体へ淘汰する。また、突然変異オペレーションを施す個体のうち半数は位置を動かさず任意の 1 機器の方向をパイプ長が小さくなるよう修正し、1/3 は任意の 1 機器の位置を「自己組織化機器配置法」によって配置し直して方向をパイプ長が小さくなる方向へ修正、残り 1/6 は任意の 1 機器を近傍のランダムな位置へ移動して方向をパイプ長が小さくなる方向へ修正する。この突然変異オペレーションは「品種改良」をイメージしている。

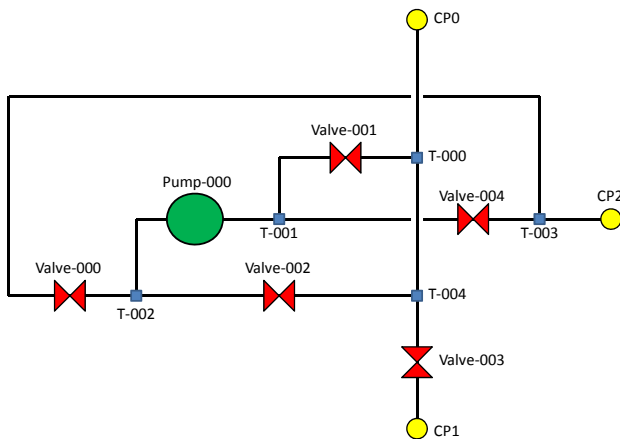


Fig.5 Piping and Instruments Diagram (PID)

### 4.2 実験結果

計算環境は、OS に Windows-XP を使用し、CPU は Intel Core2 Duo 1.4Ghz、メモリーは 1.91GB、プログラム言語は Java version 1.6 を用いた。Fig.6 および Fig.7 に遺伝的アルゴリズムの集団中でパイプ材料コストの最小値およびエルボの個数の最小値が探索の進行とともに変化していく様子を示す。評価回数 6000 回に要した計算時間はおおよそ 47 時間である。また図示しないが、バルブ操作性コストについては、初期解候補を生成した時点でコスト最小の解（全てのバルブが直接操作可能）がすでに得られていた。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.8 に材料コスト (Length of pipes) とエルボの個数の 2 つの評価において、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.8 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し、80 のプロットは初期解候補群、6000 のプロットは 47 時間後に最終的に得た解候補群を示す。

Fig.6,7,8 の評価回数とその時点で得られた最良解の評価値との関係を見ると、評価回数3000回付近でほぼ最適解を得られていることが観察できる。しかし、評価回数3120回の段階で、パレート解の評価値の種類は4種類でそれぞれ1個体、計4個体であるのに対し、評価回数6000回の段階では評価値だけを見た種類は2パターンなのにパレート解を構成する個体は34パターンも存在していた。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。よってこの実験結果は、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向きなどが異なっているだけというケースが多かった。

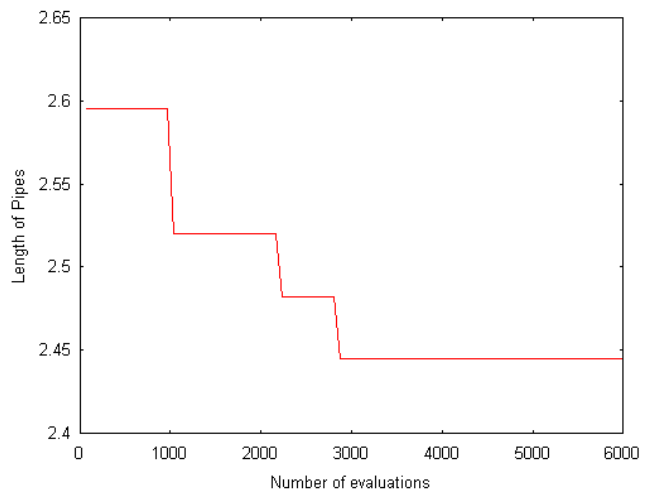


Fig.6 Best solutions of material cost in GA population

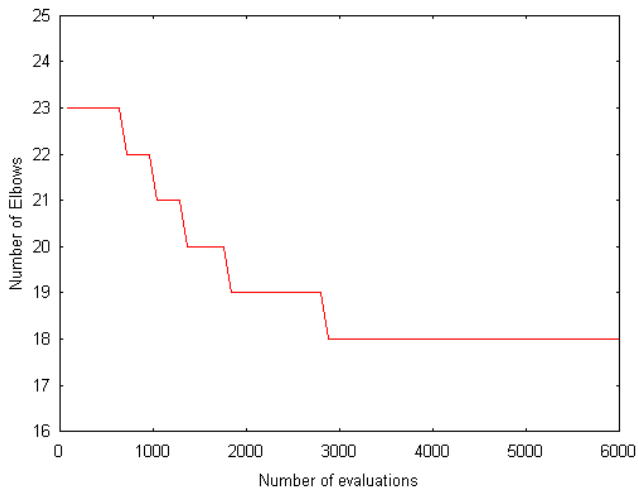


Fig.7 Best solutions of number of elbows in GA population

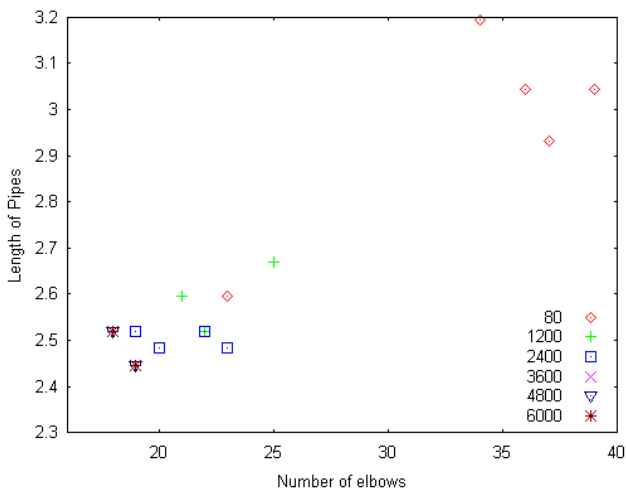


Fig.8 Pareto solutions at each search stage

Fig.9, 10, 11 は、評価回数 6000 回の段階において得られた材料コスト 2.445, エルボの個数 19 個, バルブ操作性コスト 0 (全バルブ直接操作可能) のパレート解の例を 3 つ挙げている。緑色の箱はバルブを表し, パイプが接続されたのとは反対側の正方形の底面側がハンドルになっている。また赤色で示された箱はポンプを表わし, この位置は予め固定されている。やや暗い黄色の箱は T 分岐を表わす。図より, 得られたパイプの引回しはほぼ同じであるが一部のバルブの方向や T 分岐の方向に違いがみられる。Fig.12 はエルボの個数が 1 個少ない代わりにパイプ材料コストがやや多いパレート解である。やはり Fig.9~11 の解候補と類似した設計案だが, T 分岐の位置が 1 ヶ所だけ異なっている。Fig.9~12 に共通して, バルブや T 分岐が一直線に並ぶ配置が得られている。

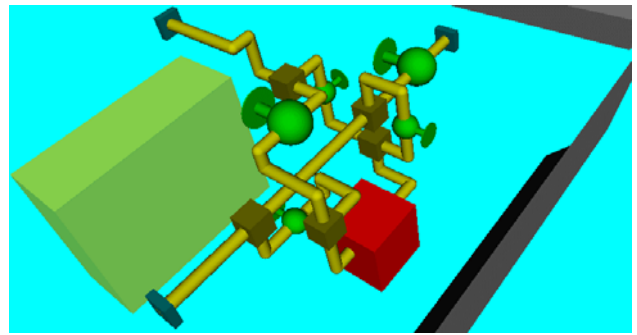


Fig.9 A pareto solution of material cost = 2.445, and the number of elbows = 19

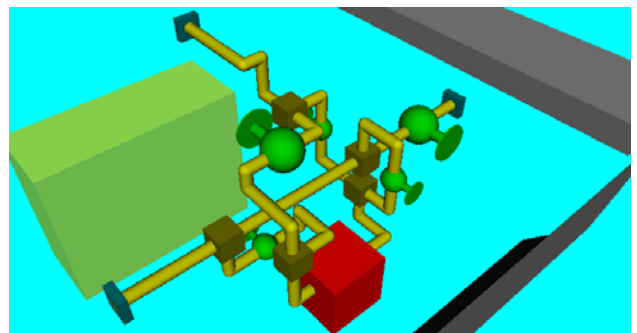


Fig.10 A pareto solution of material cost =2.445, and the number of elbows = 19

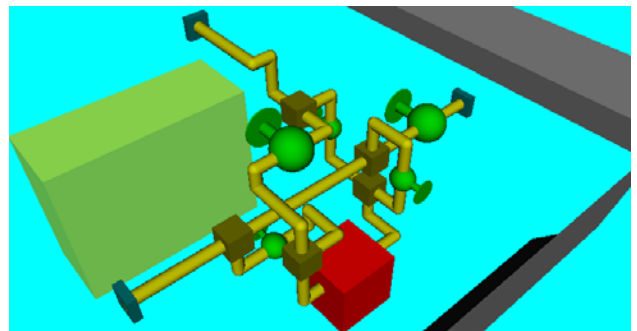


Fig.11 A pareto solution of material cost = 2.445, and the number of elbows = 19

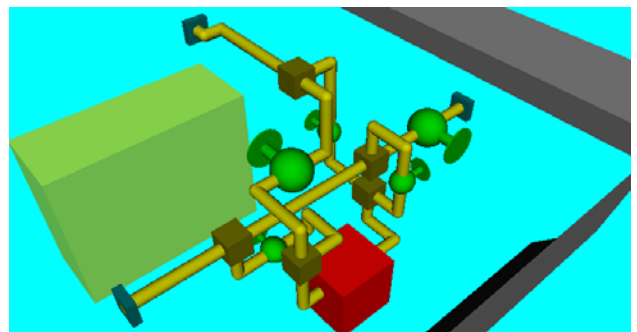


Fig.12 A pareto solution of material cost = 2.52 and the number of elbows = 18

## 5 考察

本実験設定は参考文献<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た。また最終的に得られたパレート解集合は全てバルブ操作可能であるなど、探索性能は飛躍的に向上した。しかし、Fig.9~12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、パイプ長そのままで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ロジックや、「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つ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にバイアスをかけるが、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。例えばFig.9~12の機器配置に関して、図の下方手前のT分岐はもっと手前側に配置すれば、赤いポンプの方向へと伸びるパイプやバルブの配置に余裕ができて設計案を改善できるはずだが、突然変異オペレーション中の自己組織化のロジックにより、上記の改善が期待される方向へのT分岐の移動が阻害されていると考えられる。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ため、初期解生成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パイプで結ぶため、ダイクストラ法を利用して経路を生成する新しい方法を開発中である<sup>8)</sup>。

## 6 おわりに

本稿では、分岐を含むパイプおよびバルブ等の機器配置を設計する問題を取り上げ、分岐部分を機器の一種と考えて機器の位置と方向およびパイプのエルボ部分の位置を設計パラメータとする方法を提案した。この定式化により、遺伝的アルゴリズムでの交叉オペレーション方法や初期解候補生成方法が極めて合理的になる。バルブ5個を含む船舶用バラストポンプルームの例題へ提案手法を適用し、従来手法では得ることができなかった良質な解を得られることを示した。

本稿では紹介できなかったが、本例題よりもやや規模の大きなバルブ7個を含む例題に対しても、本手法は良好な解を得ている。今後の課題として、単に作業員がバルブを操作可能な設計案を提示するだけでなく、作業員がバルブ間を移動するコストや、バルブの設置高さなどに由来するバルブ操作性コストを考慮した設計案を提示することが挙げられる。

## 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, pp.791-802 (1998)
- 2) Asmara, A. and U. Nienhuis: Automatic piping system in ship, proceedings of the 5th International Conference. on Computer and IT Application (COMPIT), Mar. Ind. Leiden. (2006)
- 3) Asmara, A. and U. Nienhuis: Automatic Piping System Implementation: A Real Case, proceedings of the 6th 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**, pp.327-330 (2004)
- 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**, pp.223-229, (2009).
- 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**, pp.63-66, (2009).
- 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**, pp.231-236 (2009)
- 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).