

機器配置図・系統図に基づく配管自動設計手法の開発

学生員 池 平 怜 史* 正員 木 村 元**

Automatic Design Algorithm for Pipe Arrangement based on Equipment Arrangement Figure and Pipe Diagram

by Satoshi Ikehira, Student Member Hajime Kimura, Member

Summary

This paper presents an automatic design algorithm for pipe arrangement based on equipment arrangement figure and pipe diagram. Firstly, a pipe arrangement design problem is proposed for a space in which pipes and objects co-exist considering branches of the pipes and valve arrangement. This problem includes large-scale numerical optimization and combinatorial optimization problems, as well as peculiar characters of pipe arrangement design. For these reasons, it is difficult to optimize the problem using usual optimization techniques such as Random Search. Therefore, secondarily, a genetic algorithm (GA) suitable for this problem is developed. Lastly, the proposed method for optimizing a pipe arrangement efficiently is demonstrated through computational experiments, and remarks are provided for applying this methodology to a practical pipe arrangement design.

1. 緒 言

日本造船業界は、新興国向けの海上輸送の拡大を受け、受注ラッシュに沸いており、既に2010年前後までの受注残を抱えているとのことである。しかし、向こう数年で、長らく続いた需要拡大期は終焉を迎え、久々の活況に沸き立つ業界も、生き残りに向けた競争の時代を迎えようとしている。競争力を維持するために一層の設計・製造の効率化を図ることが必然となってきている。近年、情報処理技術の発達に伴い、設計現場においては、3次元CAD (Computer-Aided Design : コンピューター支援設計) の発達により、3次元データを取り扱った設計～解析～生産が普及してきた。特に配管設計においては、3次元CADの導入により、2次元平面図ではなかなか困難であった空間上での配管のイメージを視覚化できることで、容易に配管経路を試行錯誤でき、作業の効率化・省力化に繋がっている。

しかし、配管設計での3次元CADの開発に関して、主にインターフェースの改良・部材注文書の自動生成など従来労

働効率の低い領域を省力化していくことを目的としており、3次元CADの導入はベテランの技能やノウハウの次世代への引継ぎ問題の根本的な解決とはなっておらず、また計算機の知能化によって優れた設計案を自動生成するという意味での“配管設計の自動化”も対象とされていない。

著者らの研究チームでは、近年「配管設計の自動化」というテーマで研究を行ってきた[1][2][3][4]。これまでの研究では、パイプが密に存在し、障害物を避けて配管しなければならない空間での配管設計問題を対象に、始点・終点を結ぶ3次元経路探索の多目的最適化問題として定式化を行い、問題に適した最適化アルゴリズムを開発してきたが、以下の問題点が挙げられている。

- 配管設計を行う際の重要な要素である“バルブ”が考慮されていない。
- 配管経路の“分岐”が考慮されていない。

本研究では、直接的に3次元CADへ組み込むものではなく、おおよその機器配置や配管経路をCADオペレータへ示すための指示書のような配管設計案データを自動生成するシステムの開発を目指して、第一に、バルブの配置とパイプの分岐を含んだ配管設計問題の定式化を行う。第二に、本問題は数値最適化と組合せ最適化に加え、配管設計問題特有の構造を含んだ複合問題であるので、これらを考慮した新しい最適化アルゴリズムの提案を行い、計算シミュレーションにより

*九州大学大学院工学府
**九州大学大学院工学研究院

その有効性を示す。

2. 配管設計問題の定式化

2.1 設計変数：バルブ

バルブは制御系の操作部として機能し、船舶運用には欠かせない機器である。船舶を適正かつ完全に操業するには、運転状態を測定して、それを所定の条件に一致させる操作（制御）が不可欠であり、所定の条件に一致させるために、配管に設けられたバルブの開きを調節する操作を行うが、バルブを作業者が操作し易い位置に配置するように設計を行う必要がある[5]。また、バルブ・機器間を結ぶパイプの全経路長もバルブの配置に大きく依存することから、バルブの配置を設計変数として、バルブの適切な配置を探索する。

ここで、「バルブ配置を設計する」ということは「バルブの位置座標・方向を決定する」と言い換えることができる。

【バルブの設計変数1：バルブの位置座標】

Fig. 1 に示されるように、ハンドル軸と配管経路の中心線との交差点の座標をバルブの位置座標と定める。

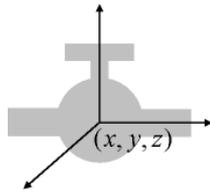


Fig. 1 Location of Valve

【バルブの設計変数2：バルブの方向】

配管経路の方向とハンドルの方向によってバルブの方向を定める。その組み合わせは、Fig. 2 に示されるように、全部で12通り存在する。

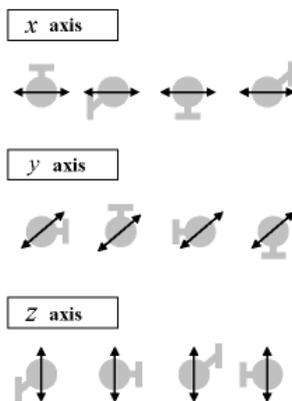


Fig. 2 Angle of Valve

2.2 設計変数：配管経路

バルブを配置した後、バルブ・機器・内外空間接続点を結ぶ配管経路を、機器配置図・系統図に基づいて設計する。まず、配管経路に関する設計規約として以下のように定める。

【配管経路の設計規約】

- 配管経路は直線部とエルボのみから構成され、曲線部は無いものとする。
- エルボ部分は必ず直角に曲がるものとする。（配管経路が曲がる点を屈曲点と呼ぶ）

1つ目の規約については、パイプの特徴を考えれば当然である。2つ目の規約については、設計変数を減らして問題を単純化するためである。実際の配管設計では、配管経路に傾斜をつけて設計することがある（配管経路を任意の角度に曲げて設計する）が、配管の傾斜を考慮すると、傾斜の角度を決定する必要があり、配管経路の設計を単純化する為、配管経路の傾斜は考慮しない。

2.3 配管経路のパターン化

配管経路は、前に述べた設計規約を考慮すると、始点・終点を結ぶように線分を組み合わせるものであると考えることができる。ここで、配管経路の始点・終点は、位置座標と経路の延びる方向（方向ベクトルと呼ぶ）を持つ。始点・終点を結ぶことができる線分の長さ・数と屈曲点数の組み合わせは無限に存在することになるが、組み合わせの自由度を限定するために、配管経路の形をパターン化することを考える。言い換えるならば、始点・終点を結ぶための線分と屈曲点数・位置関係をいくつかのパターンに限定することを考える。まず、始点・終点の方向ベクトルの関係から、Fig. 3 に示すように、6つのパターンに分類する。平行に向かい合う場合を pattern-1, 平行に逆を向く場合を pattern-2, 平行に同じ方向を向く場合を pattern-3, 直角に向かい合う場合を pattern-4, 直角に逆を向く場合を pattern-5, 直角に同じ方向を向く場合を pattern-6 とする。

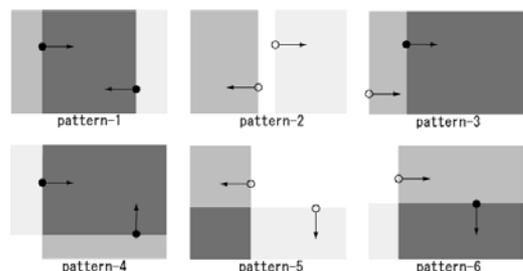


Fig. 3 Classification of Each Pattern

【曲がり生成シェイプ】

次に、それぞれのパターンについて、屈曲点の数を考慮して分類すると、始点・終点を結ぶ配管経路の形を定めることができる。ここで、この配管経路の形を曲がり生成シェイプと呼ぶ。

屈曲点の数の定め方に関して、屈曲点の数が増加するとそれだけ配管経路の自由度が増加し、それだけさまざまな形をとることができることになるが、探索するパラメータも増加することになる。また、工作性の観点から考えても屈曲点の数はできるだけ少ないほうが好ましい。そこで、パイプ同士の交わり、機器・バルブとの交わりを避ける配管経路を生成できると考えられる最小限の屈曲点の数に限定する。この曲がり生成シェイプを選択し、パイプ直線部長さを定める実数パラメータの集合を与えることで、配管経路を生成することが可能となる。始点・終点の方向ベクトルの関係から分類した6つのパターンそれぞれについて、曲がり生成シェイプをFig. 4に示す。

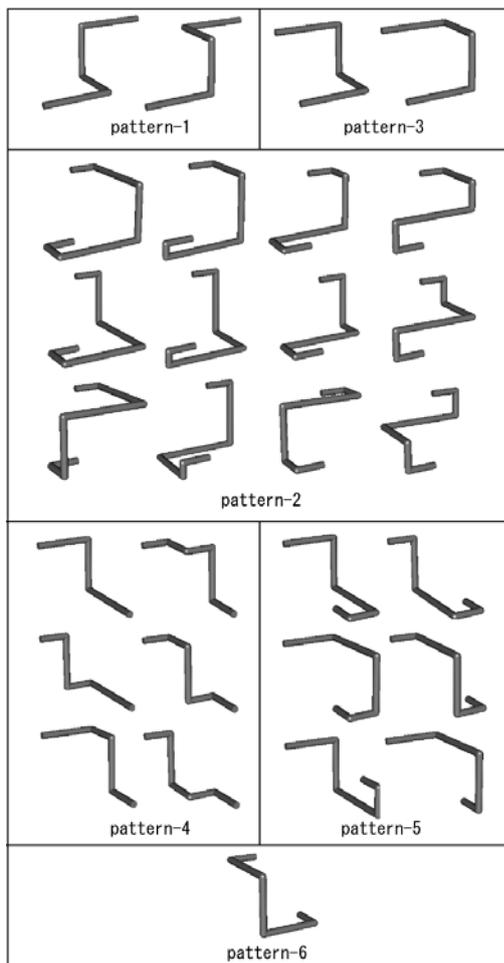


Fig. 4 Generation shape

2.4 配管経路の分岐

前節で開発した配管経路生成アルゴリズムは、2つの接続点（1つの始点と1つの終点）を結ぶアルゴリズムである。しかし、配管経路上に分岐点が存在する場合（1つのパイプライン上に3つ以上の接続点が存在する場合）は、そのまま配管経路生成アルゴリズムを適用することは不可能であり、配管経路の分岐を考慮した配管経路生成方法を考えなければならない。

【配管分岐経路生成アルゴリズム】

基本的な考え方は、まず接続点の中から始点として1点選択し、それ以外の接続点を全て終点とする。そして、それぞれ始点・終点を結ぶ配管経路を生成することにより、分岐を考慮した配管経路を生成することができる。しかし、このアルゴリズムでは、Fig. 5に示すように、屈曲点が増加し工作性の観点から好ましくない配管経路が生成される可能性が高い（左図）。また、実際には制約上設計できない配管経路を生成する可能性がある（右図）。そこで、Fig. 6に示すように、配管経路の屈曲点を新たに始点として残りの終点との間を結ぶ配管経路を生成することで、これらの問題点を完全に解決できる。次に、配管分岐経路生成アルゴリズムについて説明する。

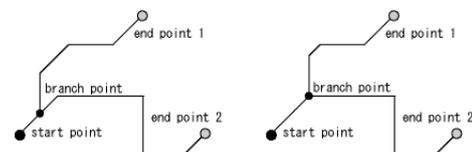


Fig. 5 Bad Branch Generation

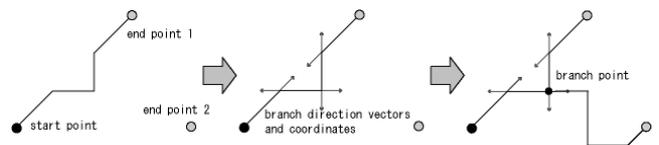


Fig. 6 Branch Generation Algorithm

【配管分岐経路生成アルゴリズム】

1. 接続点の中から始点として1点ランダムに選択し、それ以外の接続点は全て終点とし、終点群に格納する
2. 終点群から1点ランダムに選択し、その点と始点を結ぶ配管経路を生成する
 - 生成した配管経路の全ての屈曲点に対して、分岐座標・分岐方向ベクトルを生成し、分岐候補点群に格納する

- 選択した終点を終点群から削除する
3. 終点群から1点,分岐候補点群から1点それぞれランダムに選択する
- 選択した2点を結び配管経路を生成する
 - 生成した配管経路の全ての屈曲点に対して,分岐座標・分岐方向ベクトルを生成し,分岐点候補群に格納する
 - 選択した終点,分岐候補点をそれぞれ終点群,分岐候補点群から削除する
4. Step-3を終点群が空集合になるまで続ける

2.5 評価関数：材料コスト

船舶設計では, 建造コスト全体に占める配管コストの比率が大きいため, 配管コストは更に配管材料と配管工事に分けて積算されることが多いが, 本研究では配管工事に関する配管コストは考慮せず, 配管材料費を評価関数として以下のように定義する。

【材料コスト関数】

$$f_{material} = \sum_{k=1}^{n_p} W_k L_k D_k$$

k : パイプの番号

W_k : パイプ- l のパイプの材質・メッキ手法から算出される重み

L_k : パイプ- l のパイプの長さ

D_k : パイプ- l のパイプの直径

n_p : パイプ- l の本数

尚, パイプを直角に曲げるための部材 (以下, エルボー) も材料コストに含めることは容易にできるが, 本研究では材料コストを単純に評価するために, エルボーは考慮しない。

3. 最適化アルゴリズムの設計

3.1 遺伝的アルゴリズム

第2章にて, 配管設計問題に関して, バルブの位置座標・方向, 及び配管経路のパターンと長さを設計変数, 材料コストを評価関数として定式化した。本問題は, 数値最適化問題と組合せ最適化問題の複合問題であり, かつ, 多変数の大規模最適化問題である為, 設計変数をスカラーに限ることなく任意の解構造体を対象に解探索ができる最適化手法である遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) を用いて解

探索を行う[6]。GAは, 生物の進化による環境への適応過程にヒントを得た最適化の枠組みであり, GAにおける根本的な考え方は, Darwinの自然淘汰説 (natural selection) にある。自然淘汰説は, 個体 (生物) 間で交配と突然変異が繰り返されて, 世代が進むと環境に適応したものの子孫が増えていき, 種として進化が行われるというものである。

3.2 コード化／交叉設計

Fig.7に示すように, バルブの位置座標 (x, y, z) ・方向 θ を個体の形質 (バルブ遺伝子と呼ぶ) としてコード化する。本問題では, バルブの配置が最も重要であり, また, 配管経路のパラメータ (曲がり生成シェイプ, 実数パラメータ) はバルブの配置に依存するので, バルブ配置の異なる個体間で配管経路パラメータを子個体へ継承しても意味がない為, GAでコード化して子個体へ継承されるのはバルブの設計変数のみで, 配管経路の設計変数についてはGAで探索しないものとする。

また, 交叉方法として, 1点交叉 (One Point Crossover) に基づく交叉を提案する。1点交叉とは, Fig.8に示すように, 染色体の切断箇所をランダムに1カ所指定し, その箇所で親の遺伝子を交叉させる。そして, 交叉によって得られたバルブの位置座標・方向に基づき配管経路をランダムに生成する。

$$\begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \cdots & \theta_n \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_n \end{bmatrix}$$

Fig.7 encoding

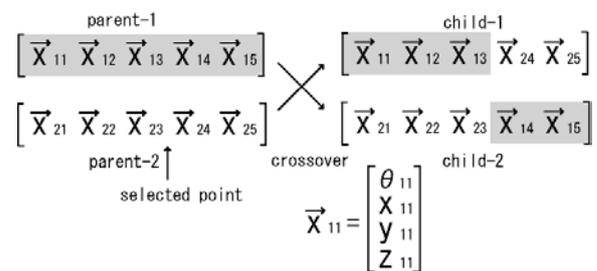


Fig.8 One point crossover

3.3 突然変異設計 :

1点交叉では, 遺伝子をそのまま引き継ぐので, 探索序盤における初期収束, 探索終盤においてはその時の最良解から抜け出せない可能性がある。そこで, 集団の多様性の維持, また探索終盤における探索空間外の解候補を生成するため

に、すでに獲得されている形質をなるべく破壊することなく、新しい形質を生成できるような突然変異 (mutation) を設計する。まず2つの親のどちらかが選ばれ、選ばれた親に対し、ある突然変異率 (mutation rate) で定められた一定確率で突然変異が各遺伝子に適用され、新たにバルブ遺伝子がランダムに生成される。

3.4 修正オペレータ

GA は多様な実行可能解を生成し、交叉・突然変異・選択を繰り返すことで、解を改善していく。GA の配管問題への適用においては、機器、バルブ、そしてパイプ本数の増加につれて、実行可能な (お互いに交わっていない) 解候補の生成が急激に困難になるという問題が生じる。そこで、できるだけ短時間に、実行不可能な解候補をもとの形質をできるだけ残したまま実行可能な解へ修正する工夫が望まれる。

3.4.1 バルブ修正オペレータ :

(Modification Operator for Valve (MOV))

生成されたバルブ配置案 (解候補) に対して、全てのバルブが他のバルブと機器に対して交わっていない実行可能解へ修正するバルブ修正オペレータ (Modification Operator for Valve : MOV) を提案する。MOV は、インデックスが最小のバルブから順に他のバルブとの交わりを判断し、もし交わりがあれば、他のバルブとの交わりがなくなるまで、ランダムに修正していき、最後のインデックスのバルブまでこの手順を繰り返す。

以下にそのアルゴリズムを示す。

【Modification Operator for Valve (MOV) 】

1. Index-1 のバルブに対して、他のバルブとの交わりを判断し、他のバルブに対して交わりがなくなるまで、ランダムに生成する
2. Index-2 のバルブに対して、他のバルブとの交わりを判断し、他のバルブに対して交わりがなくなるまで、ランダムに生成する
3. 同様の手順を index-(n-1)のバルブまで繰り返す

3.4.2 パイプ修正オペレータ :

(Modification Operator for Pipe (MOP))

生成された配管経路案 (解候補) に対して、全てのパイプが他のパイプと機器・バルブに対して交わっていない実行可能解へ修正するパイプ修正オペレータ (Modification Operator for Pipe : MOP) を提案する。MOP は、パイプ同士の交差点の数を保持し、交差点を持つパイプを再生成することで、パイプ同士と機器・バルブとの交わりを避ける修正オペレータである。交わりのあるパイプを同時に全て再生成するのでは

なく、交差点の多いパイプを優先的に再生成することで、元の形質をできるだけ残す工夫がされている。この時、何本のパイプを同時に再生成するかは、脱却回数 α というパラメータを用いて判断する。尚 2.3 節、で述べたように、ある1本の配管経路を修正すると、それに付随して分岐点も同時に修正されることになる。分岐点は他の配管経路の始点・終点となっているので、1本のパイプのみ修正した場合、修正前と修正後では始点・終点が一致しない配管経路が存在する可能性がある。そこで、修正候補となったパイプが属するパイプラインに属するパイプを全て同時に再生成する。

以下にそのアルゴリズムを示す。

【Modification Operator for Pipe (MOP) 】

1. 交差点の数が多い順にパイプに順番をつける
 2. 1 番目に交差点の数が多いパイプの属するパイプラインをランダムに再生成し、ステップ 1 へ戻る。
この時、 α 回連続で同じパイプの場合ステップ 3 へ進む
 3. 2 番目に交差点の数が多いパイプの属するパイプラインをランダムに再生成し、ステップ 1 へ戻る。
この時、1 番目と 2 番目のパイプが α 回連続で同じパイプの場合ステップ 4 へ進む
 4. ステップ 2, 3 と同様に最後のパイプまで繰り返す
 5. 全てのパイプが他のパイプと機器・バルブとの交わりがなくなるまで、ステップ 1 からステップ 4 まで繰り返す
- 上記の手順は、生成された解候補に対して、全てのパイプが他のパイプと機器・バルブとの交わりがなければ何も実行されない。一般に、個体が実行不可能な解だった場合、本修正操作により生成される解候補は一意には定まらない。

3.5 実験および結果

3.5.1 問題設定

Fig. 9 に示すようなバラストポンプルームの系統図に基づく配管設計を対象として、問題設定を行った。Fig. 10, Fig. 11 はそれぞれ、機器配置図に基づく機器位置情報・機器の仕様、及び系統図に基づく機器の繋がり・配管の仕様を表したものである。

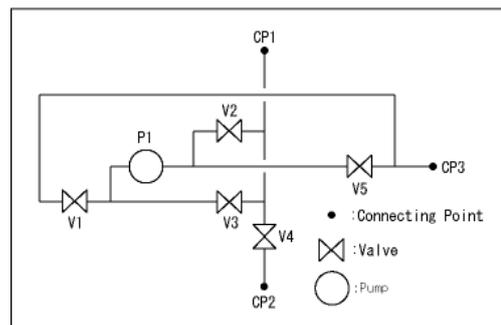


Fig. 9 Pipe diagram

Input: Equipment List												
EQUIP_NO	CATEGORY	TYPE	X	Y	Z	DIR	AFTER	FORWARD				
P1	PUMP	RH2	1.5	2.0	0.0	90.0	V1	V3	V2	V5	-	-

Input: From-to List												
LINE_NO	FLUID	SIZE	CLASS	FROM TO								
P-001	S	150	-	V1	P1	V2	-	-	-	-	-	-
P-002	S	150	-	V1	V5	CP3	-	-	-	-	-	-
P-003	F	150	-	P1	V2	V5	-	-	-	-	-	-
P-004	F	150	-	V2	CP1	V3	V4	-	-	-	-	-
P-005	D	150	-	V4	CP2	-	-	-	-	-	-	-

VALVE_NO	SIZE L	SIZE D	SIZE H	CLASS	AFTER	FORWARD						
V1	0.3	0.3	0.5	-	V5	CP3	P1	V2	-	-	-	-
V2	0.3	0.3	0.5	-	P1	V5	-	V3	V4	CP1	-	-
V3	0.3	0.3	0.5	-	P1	V1	-	V2	V4	CP1	-	-
V4	0.3	0.5	0.8	-	CP2	-	V2	V3	CP1	-	-	-
V5	0.3	0.5	0.8	-	P1	V2	-	V1	CP3	-	-	-

Fig. 10 Equip List (Equipment Arrangement Figure)

Input: From-to List												
LINE_NO	FLUID	SIZE	CLASS	FROM TO								
P-001	S	150	-	V1	P1	V2	-	-	-	-	-	-
P-002	S	150	-	V1	V5	CP3	-	-	-	-	-	-
P-003	F	150	-	P1	V2	V5	-	-	-	-	-	-
P-004	F	150	-	V2	CP1	V3	V4	-	-	-	-	-
P-005	D	150	-	V4	CP2	-	-	-	-	-	-	-

VALVE_NO	SIZE L	SIZE D	SIZE H	CLASS	AFTER	FORWARD						
V1	0.3	0.3	0.5	-	V5	CP3	P1	V2	-	-	-	-
V2	0.3	0.3	0.5	-	P1	V5	-	V3	V4	CP1	-	-
V3	0.3	0.3	0.5	-	P1	V1	-	V2	V4	CP1	-	-
V4	0.3	0.5	0.8	-	CP2	-	V2	V3	CP1	-	-	-
V5	0.3	0.5	0.8	-	P1	V2	-	V1	CP3	-	-	-

Fig. 11 From-To List (Pipeline List)

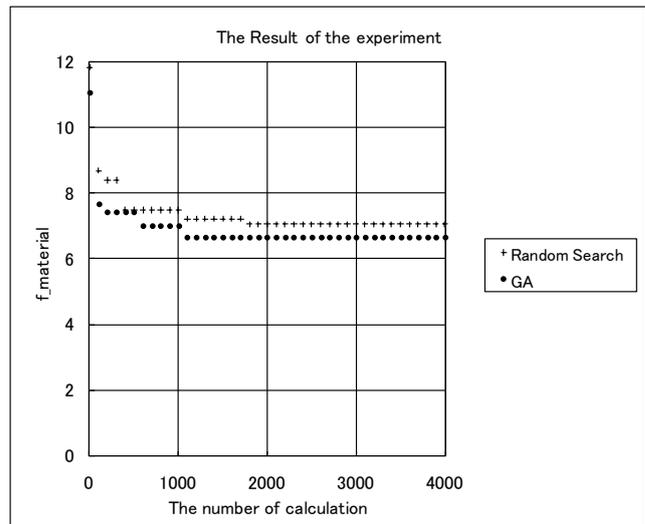


Fig. 12 The result of the experiment

3.5.2 実験及び結果

提案手法の有効性を確認するために、GAによる手法とランダムに生成する手法 (Random search) との比較実験を行った。予備実験により、修正オペレータ MOP の α を 10 とし、GA の各パラメータについては、集団サイズを 10、突然変異率は 0.1 とした。計算環境は、OS に WindowsXP を使用し、CPU は PentiumM (1.10GHz)、メモリー 760MB、プログラム言語は Java を用いた。Fig.12 は縦軸に材料に材料コスト ($f_{material}$)、横軸に解候補を生成した回数を示す。

Fig.13、Fig.14 は、GA を利用して生成した初期解と 10000 回生成した時点での最適解の自動配管結果のそれぞれ 3D モデルである。白のワイヤーフレームが配管すべき空間の大きさ、半透明の立方体が通路、黒の直方体がポンプを表し、同じ色のパイプはそれぞれ同じパイプラインとなっている。

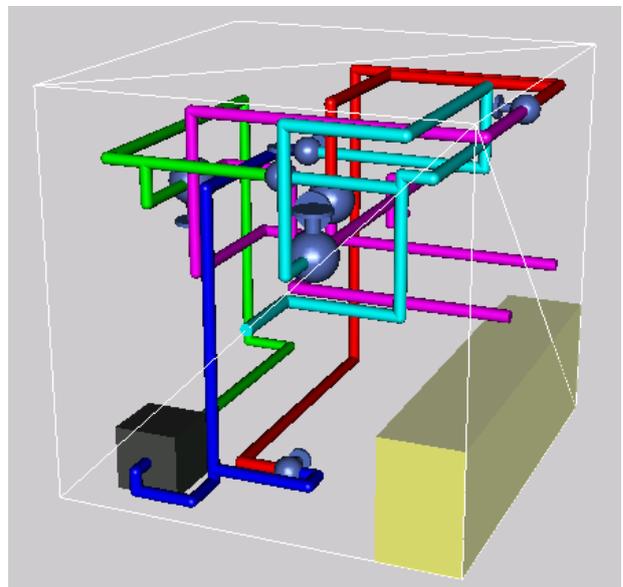


Fig. 13 The result of the initial solution candidate

3.5.3 考察

Fig. 12 より、Random Search による手法、GA を利用した手法共に探索が進んでいくと材料コストが改善された解が発見できており、ある程度探索が進むと一定の値に収束していることが分かる。しかし、収束した値を比較すると、GA を利用した手法による探索結果のほうが優れた解を発見できていることが分かる。これは、GA を利用した手法の場合、有効なバルブ遺伝子に対して繰り返しランダムに配管経路を生成するので、ランダムサーチに比べ、有効なバルブ位置座標・方向を持つ解が存在する領域で、重点的に解を探索できているからであると考えられる。また、Fig. 13、Fig. 14 を比較すると、視覚的にも、Fig. 14 の方が、配管経路の全長が短い (=材料コストが少ない) 優れた設計案であることが分かる。

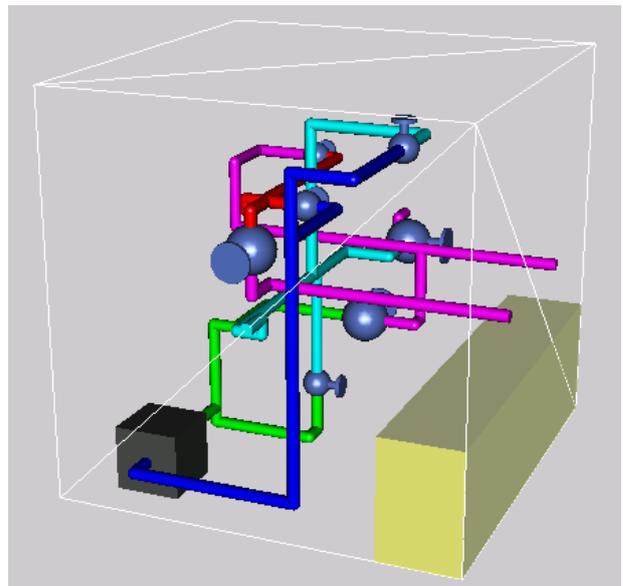


Fig. 14 The result of the optimal solution candidate

5. 結言

本論文の成果は、以下の3点に分けられる。

- 機器配置図・配管系統図より、バルブの配置と配管経路を設計変数として、従来の研究では実現できていなかった配管経路の分岐も考慮した配管設計案の自動生成手法を開発した。
- 生成した配管の設計案に対し、材料コストを評価関数として定義し、本問題を配管設計問題として定式化した。
- 本問題は、数値最適化と組合せ最適化に加え、配管設計問題特有の構造を含んだ複合問題である為、本問題に適した遺伝的アルゴリズムを用いた最適化アルゴリズムを提案し、バラストポンプの系統図に基づく計算シミュレーションにより有効性を確認した。

今後の課題としては、第一に、バルブの操作性を評価する評価関数の開発が挙げられる。本論文では、材料コストのみを評価関数として設計案の解探索を行ったが、実際の設計においては、「バルブの操作し易さ(バルブの操作性)」、「施工容易性」、「メンテナンス容易性」等の要素を考慮して設計する必要がある為、それらの要素を評価する評価関数を開発する必要がある。

第二に、「バルブの操作し易さ(バルブの操作性)」、「施工容易性」、「メンテナンス容易性」等の要素を評価する評価関数を含めて解探索を行う場合、複数の評価関数を同時に最適化する必要があり多目的最適化問題となる為、本問題に適した最適化アルゴリズムを開発する必要がある。

第三に、本論文にて提案しGAのコード化について、実際のベテラン技術が行っている設計手順とは異なる為、その設計手順を考慮した最適化アルゴリズムの改良が挙げられる。また、バルブの数・配管の数が増加すると指数関数的に計算時間が増加する為、最適化アルゴリズムの高速化も今後の課題である。

参考文献

- 1) 池平 怜史、木村 元、池崎 英介、梶原 宏之：多目的遺伝的アルゴリズムを用いた配管自動設計、日本船舶海洋工学会論文集, Vol.2, pp.155-160, 2005.
- 2) S. Ikehira, H. Kimura, H. Kajiwara : Automatic Design for Pipe Arrangement using Multi-objective Genetic Algorithms, 12th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS), Vol.2, pp.97-110,

2005.

- 3) S. Ikehira, Hajime Kimura : Multi-objective Genetic Algorithms for Pipe Arrangement Design, Proceedings of the 2006 Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2006), pp.1869-1870, 2006.
- 4) 池平怜史, 木村 元, 梶原宏之：バルブ操作性を考慮した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.4, pp.335—338, 2007.
- 5) 相良 紘：入門 化学プラント設計 基本設計の進め方と実際, 培風館, 2006.
- 6) 小野 功：形質遺伝を重視した遺伝的アルゴリズムによる最適化, 東京工業大学, 博士論文, 1997