

バルブ操作性を考慮した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 considering valve operability

by Satoshi Ikehira, Student Member Hajime Kimura, Member

Summary

Our current research has developed an automatic design algorithm for pipe arrangement based on equipment arrangement figure and pipe diagram. This paper firstly presents an evaluation method of valve operability for the automatically designed pipe arrangement. Secondly, a pipe arrangement design problem is proposed as multi-objective optimization problem, and multi-objective genetic algorithms (GAs) suitable for this problem are developed. Finally, the proposed method for optimizing a pipe arrangement efficiently is demonstrated through computational experiment, and remarks are provided for applying this methodology to a practical pipe arrangement design.

1. 緒 言

近年、団塊世代の大量退職によるベテラン技術者の技能継承問題が顕著化しており、その解決は急務である。船舶の配管設計においては、設計手順などをマニュアル化するなどの取り組みが行われており、最終的にはベテラン技術者が行っていることと同等の設計作業を、コンピュータにより自動的に行わせ、技能継承問題を解決することが期待されている。ところが、最適設計作業の自動化は大変困難である。その大きな原因は、設計案の評価項目が複雑多岐にわたり、さらにそれらの評価が明確に数値化されていない点にあると考えられる。そこで、

- 1) 設計案に対するあいまいな評価を全て数値化する。
- 2) 設計問題を多目的最適化問題として定式化する。

以上により、配管設計を最適化問題として定式化を行い、その問題に多目的最適化アルゴリズムを適用することで、ベテランの設計作業をコンピュータに代行させることが可能になるであろうというのが著者らの基本的なアイデアである。

船舶における配管設計では、単にパイプやバルブ同士がぶつからないよう配置するだけでなく、配管が施された空間へ作業員が入ってバルブを操作できるように出入口からバルブまで空間を適切に空けるなど、設計作業には高度な熟練を要し、設計の自動化については全く進んでいなかった。この設計ノウハウは暗黙知であり、バルブ操作性などを含め、一般に評価を数値化することは困難と考えられていた。これまでの著者らの研究では、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、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った[1][2][3][4][5]。また、材料コストの数値化手法を提案し、配管設計を単目的関数の最適化問題として、最適化アルゴリズムの開発を行った。本研究では、これまでの研究結果に基づき、第一に、機器配置図と系統図より自動的に生成された配管設計案に対してバルブの操作性の数値化方法を提案し、配管設計を多目的最適化問題として定式化する。第二に、本問題が数値最適化と組合せ最適化問題かつ多目的最適化問題である為、本問題に適した遺伝的手法による多目的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その有用性を示す。

*九州大学大学院工学府
**九州大学大学院工学研究院

2. バルブ操作性評価の数値化アルゴリズム

2.1 バルブ操作性

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[6]。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）が不可欠となるからである。ここで運転状態の測定とは、温度、圧力、流量、液面などを知ることである。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。バルブの操作は、精密かつ効果的に制御するために調節計を使用して自動制御を行う方法があるが、それらの装置を設置するコストを考慮すると、自動制御ではなく、バルブを手動で操作することが多い。ここで、作業員がバルブを操作できるように出入り口からバルブ操作部までに十分な空間があるかどうかの評価を「バルブ操作性」と呼ぶ。

【可アクセス性】

作業員がバルブ位置までは移動できないが、道具を使ってハンドルを回すことができる位置まで移動できる場合、作業員が通路からバルブ位置までアクセスできるかということである。設計案は、全てのバルブにおいて“アクセス可能”でなければならない。

ここで、以下の2つの場合、バルブに対して“アクセス可能である”と定義する。

- ハンドルを直接手で回せる位置まで作業員が移動できる場合
- 作業員がバルブ位置までは移動できないが、「道具を使ってハンドルを回せる位置」まで移動できる場合

【可ハンドル性】

バルブの操作のしやすさを定義する。バルブに対して“アクセス可能”であっても、上に述べた2つのケースではバルブを直接操作できる設計案のほうが望ましいのは明らかであり、このとき可ハンドル性に優れると定義する。

2.2 バルブ操作性評価の数値化アルゴリズム

前節で述べた、バルブの“可アクセス性”“可ハンドル性”を数値的に評価するための方法を提案する。

2.2.1 評価手順

バルブ操作性を評価するためには、バルブの周囲にどれくらい作業可能スペースがあるかを認識する必要がある。そこで、空間を格子状に区切り、格子の状態（障害物が存在する範囲にある格子は塗りつぶされる）を見て、作業員が移動できるか、バルブを操作できるか、バルブを操作しやすいかを評価する。まず、障害物（ここでは機器・バルブ・パイプ）

が存在する範囲にある格子を“障害物格子（obstacle segment）”として認識する。次に、通路が存在する範囲にある格子を“通路格子（aisle segment）”として認識する。そして、作業員の大きさを格子数で定義し、これを作業員格子配列（worker segment matrix）と呼ぶ。作業員格子配列が通路格子の1つを出発点として、その位置から障害物格子に交わることなく移動できる（塗りつぶすことができる）範囲を“アクセス可能格子（accessible segment）”として認識する。最後に、バルブのハンドルが存在する格子から最短位置に存在するアクセス可能格子までの格子距離（格子の数）をそのバルブの操作性評価値とする。（バルブのハンドルが存在する格子からいずれの方向にもアクセス可能格子が存在しない場合、バルブの操作性評価値は ∞ とする。）

Fig.1は、バルブ操作性評価手順を図で示したものである。

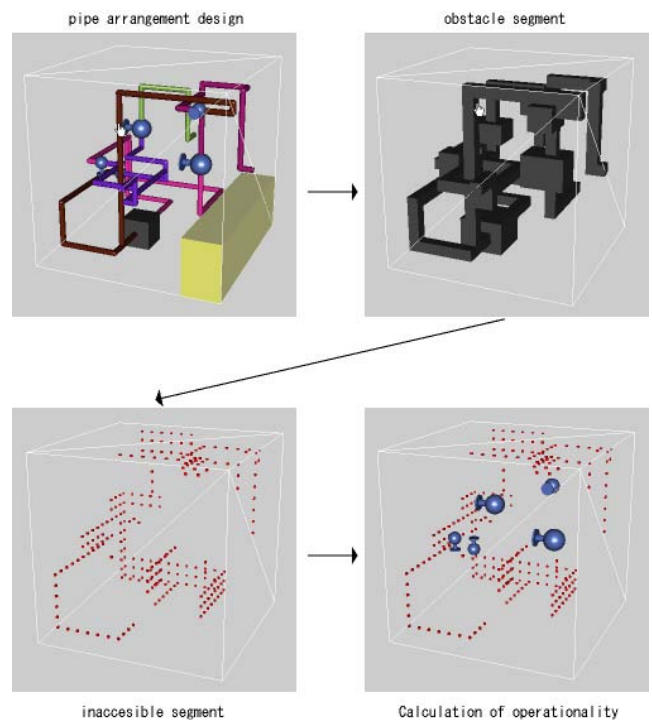


Fig.1 Procedure of calculation of valve operability

2.2.2 数値化アルゴリズム

前項にて説明したバルブ操作性評価手順のアルゴリズムを次に述べる。

【バルブ操作性の評価アルゴリズム】

1. 空間を格子間隔 k で格子状に区切る
2. 機器・バルブ・パイプと交わっている格子を障害物格子として認識する
3. 通路の存在する範囲にある格子を通路格子として認識する
4. 作業員の大きさを $(l \times m \times n)$ とする（作業員格子配列の定義）

5. 「再帰塗りつぶしアルゴリズム」を適用する（アクセス可能格子を認識する。詳細は次項参照。）
6. 各バルブについて、ハンドル位置と 5 方向（軸方向と軸に対して垂直な 4 方向）にあるアクセス可能格子の中から最短距離（ただし、ハンドル位置から認識した格子の間に障害物が存在する場合は認めない）を求め、それらの総和を評価値とする

2.2.3 再帰塗りつぶしアルゴリズム

再帰塗りつぶしアルゴリズム (Recursive Fill Algorithm) は、上に述べたようにアクセス可能格子を認識するためのアルゴリズムである。処理手順を以下に示す。

まず、通路格子の中から、作業格子配列が障害物格子に交わることなく配置できる格子を 1 つ選択する。次にその格子を始点(x0,y0,z0)として、メソッド fill(x0,y0,z0) を実行する。メソッド fill(x,y,z) は、まず指示された格子(x,y,z)が「アクセス可能」かどうかすでにラベル付けがされているかどうか判定する。ラベル付けがまだされていない場合、その格子に作業格子を障害物格子と干渉することなく置くかどうかを判定する。置く場合にはその格子の前後左右上下の 6 方向の隣接格子に対してメソッド fill を再帰的に適用する。メソッド fill(x,y,z) は、C 言語的な表現を用いると以下のようになる。

```
fill(int x , int y , int z){
    if(segment[x][y][z]==NotLabeled){
        if( WorkerSegmentMatrix_intersects_with_ObstacleSegment_at(
            segment[x][y][z]) == false ){
            segment[x][y][z] = AccessibleSegment ;
            fill( x+1 , y , z );
            fill( x-1 , y , z );
            fill( x , y+1 , z );
            fill( x , y-1 , z );
            fill( x , y , z+1 );
            fill( x , y , z-1 );
        }else{
            segment[x][y][z] = InaccessibleSegment ;
        }
    }else{
        return;
    }
}
```

ただし、(x,y,z) : 選択した作業格子配列の格子座標

WorkerSegmentMatrix_intersects_with_ObstacleSegment_at(segment[x][y][z]) : segment[x][y][z]を含んだ作業格子配列が障害物格子に交わることなく配置できるとき false を返す関数。

3. バルブ操作性を考慮した配管設計案の自動生成手法

3.1 多目的最適化問題として定式化

著者らはこれまでの研究にて、バルブの位置座標・方向と配管経路を設計変数、材料コストを目的関数として、配管設計問題を単一目的最適化問題として定式化を行った。

本研究では、前章で提案したバルブ操作性の評価関数と材料コストの評価関数を目的関数とし(配管設計問題を多目的最適化問題として定式化)、本問題に適した最適化アルゴリズムの開発を行う。

3.2 NSGA-II : Nondominated Sorting Genetic Algorithms II

多目的最適化では、トレードオフの関係にある複数の目的関数を同時に扱う必要があり、多目的遺伝的アルゴリズムの設計においては、トレードオフの関係を考慮した世代交代モデルの設計が重要である[7]。

本研究では、多目的最適化問題に遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm:GA) を適用した多目的遺伝的アルゴリズム (Multi-Objective Genetic Algorithms:MOGA) の有効な手法として Deb らによる NSGA-II [8] や Zitzler らによる SPEA-II [9] が提案されているが、本研究では NSGA-II を利用して本問題に適したアルゴリズムを開発する。

3.2.2 コード化

本問題では、設計変数がバルブの位置座標・方向、パイプ経路の曲がり生成パターン・直線部の長さとなるので、組合せ最適化と数値最適化の複合問題となっており、従来の研究で提案されているバイナリコーディング、グレイコーディング、実数値ベクトルを用いたコード化方法は、任意の解構造を取り扱うことが出来ない為そのまま採用することは困難である。そこで、全ての設計変数を何らかの配列に格納し、それらを遺伝子型として用いることも考えられるが、元の解のバルブ位置座標・方向の値が変われば、パイプ経路の始点・終点の位置座標、方向ベクトルも同時に変わることになり、元のパイプ経路は実行不可能となってしまう。また、バルブ位置座標・方向が適した配置でなければ、そもそも材料コスト・バルブ操作性の評価値の改善も制限される。これらの理由により、本研究では、バルブ位置・方向を解個体の遺伝子型としてコード化し、各遺伝子をバルブ遺伝子と呼ぶ。あるバルブ i の位置を x_i, y_i, z_i (ただし各要素は連続値をとる) および方向を θ_i (ただし 12 種類の離散値をとる) と表し、全てのバルブの位置と方向を以下の行列で表す。

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

3.2.3 交叉設計

交叉方法として、1点交叉 (One Point Crossover) に基づく交叉を用いる。1点交叉とは、Fig.2 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、その箇所ですべての遺伝子を交叉させる。上で述べたように、染色体はバルブ位置座標・方向の情報だけ持っているため、1点交叉後、始点・終点の位置座標、方向ベクトルを生成し、配管経路はランダムに生成する

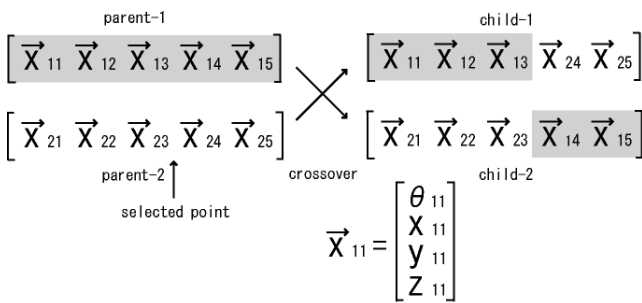


Fig.2 One-Point Crossover

3.2.4 突然変異設計

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。

3.2.5 修正オペレータ

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) 、及び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) を用いる[5]。

3.3 実験および結果

3.3.1 問題設定

Fig. 3 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. 4, Fig. 5 はそれぞれ、系統図・機器配置図からそれぞれ機器の繋がり、幾何学情報を表にしたもので、Fig. 4 は機器 (本問題ではポンプ) の配置・大きさ・バルブとの繋がり、Fig. 5 は機器・バルブを結ぶパイプの種類・大きさ、及びバルブ毎

に他バルブとの繋がりを表したものである。

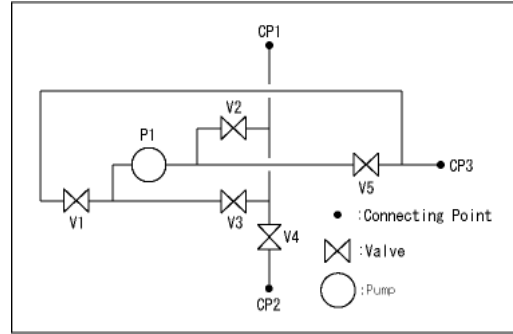


Fig. 3 Pipe diagram

Input : Equipment list										
EQUIP. NO.	CATEGORY	TYPE	X	Y	Z	DR	CLASS	AFTER	FORWARD	
P1	PUMP	PK2	1.5	2.0	0.0	90.0	V1	V2	V3	V5

Input : From-to list										
LINE NO.	FLUID	SIZE	CLASS	FROM-TO						
P-001	S	150	-	V1	P1	V3	-	-	-	-
P-002	S	150	-	V1	V3	CP3	-	-	-	-
P-003	P	150	-	P1	V2	V5	-	-	-	-
P-004	P	150	-	V2	CP1	V3	V4	-	-	-
P-005	D	150	-	V4	CP2	-	-	-	-	-

Fig. 4 Equip List (Equipment Arrangement Figure)

Input : From-to list												
VALVE NO.	SIZE L	SIZE D	SIZE H	CLASS	AFTER						FORWARD	
V1	0.3	0.3	0.5	-	V5	CP3	-	-	P1	V3	-	-
V2	0.3	0.3	0.5	-	P1	V3	-	-	V3	V4	CP1	-
V3	0.3	0.3	0.3	-	P1	V1	-	-	V2	V4	CP1	-
V4	0.5	0.5	0.8	-	CP2	-	-	-	V2	V3	CP1	-
V5	0.5	0.5	0.8	-	P1	V2	-	-	V1	CP3	-	-

Fig. 5 From-To List (Pipeline List)

3.3.2 結果

提案手法の有効性を確認するために、1点交叉 (One-point crossover) 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、集団サイズを10、修正オペレータ MOP の α 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Pentium4 (2.40GHz) 、メモリ512MB、プログラム言語はJavaを用いた。Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8 はそれぞれ、初期の解集団、400世代目 (4.0×10^3 個の個体を評価、探索に要した時間: 約60分) の解集団、450世代目 (4.5×10^3 個の個体を評価、探索に要した時間: 約70分) の解集団を示す。縦軸に材料コスト ($f_{material}$) 、横軸にバルブ操作性 ($f_{operationality}$) をとり、原点に近づくほど、優れた解を表す。(尚、 $f_{operationality} = 20$ にプロットされているものは、 $f_{operationality}$ が ∞ となった解を表す。)

また、Fig. 9, Fig. 10 は、一点交差を用いた450世代目の解集団の自動配管結果の3Dモデルである。白のワイヤフレームが配管すべき空間の大きさ、半透明の直方体が通路、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。

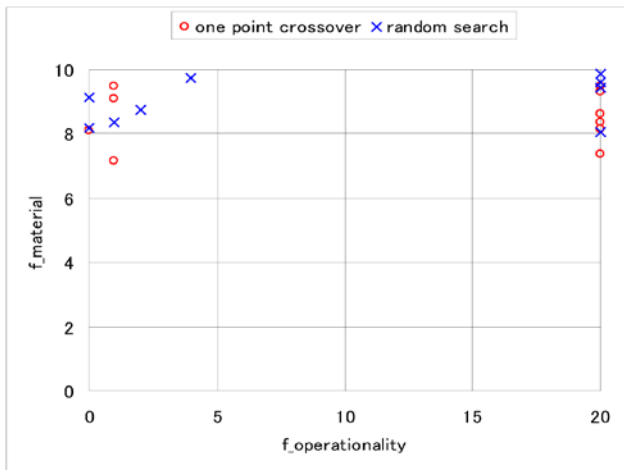


Fig.6 Solution candidates at initial population

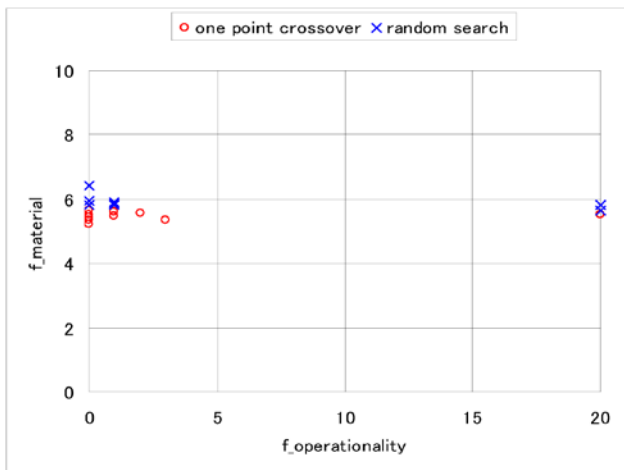


Fig.7 Solution candidates at 400th generation

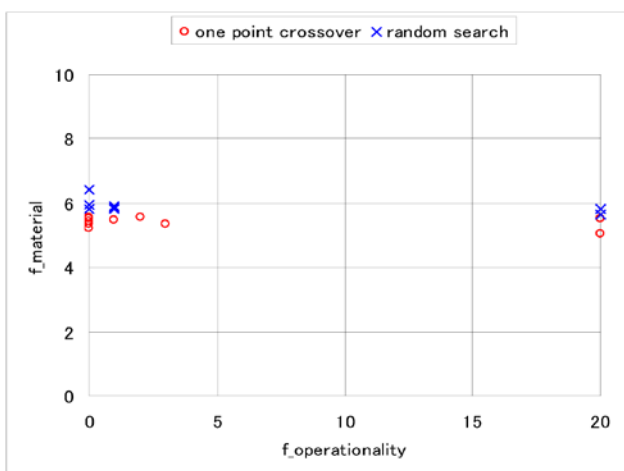


Fig.8 Solution candidates at 450th generation

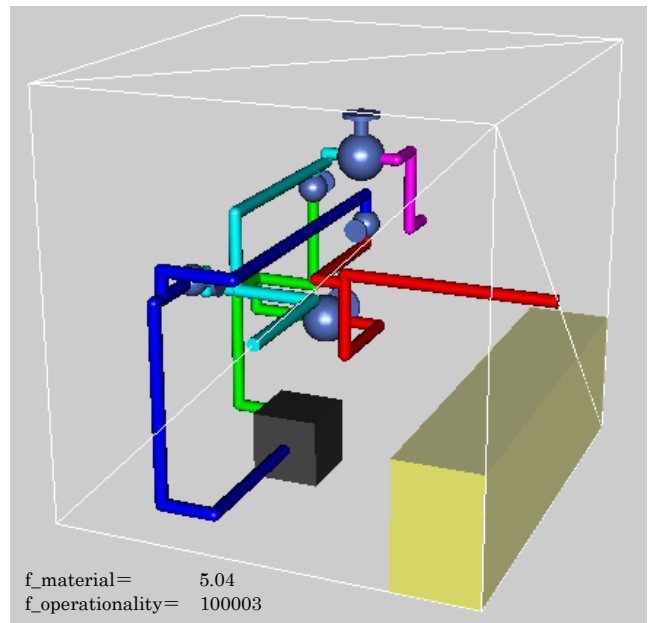


Fig. 9 The result of the best design in material costs

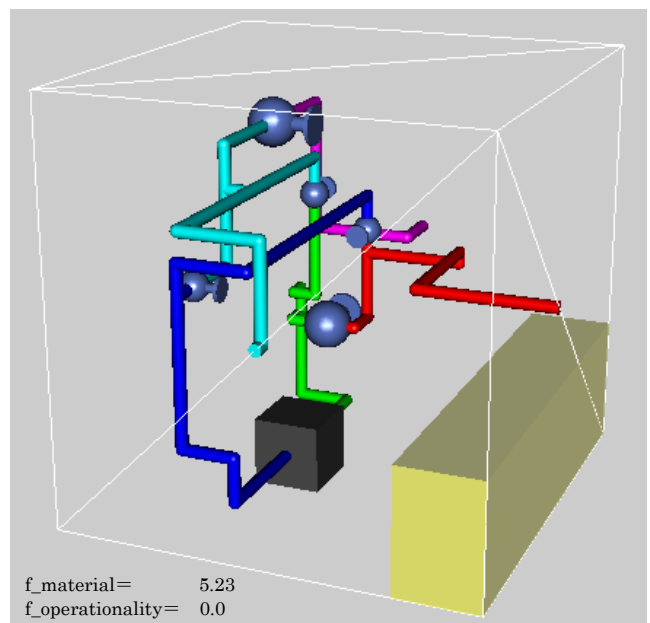


Fig.10 The result of the best design
in valve operativity

3.3.3 考察

Fig.6, Fig.7, Fig.8より、初期集団において、一点交叉・ランダムサーチ共に操作性に優れた解を探索できており、探索が進んでいくと材料コストも同時に改善されていくのが分かる。しかし、一点交叉とランダムサーチを操作性評価値が同じ個体と比較すると、一点交叉を用いた手法のほうが、より優れた材料コスト値となっている。また、解集団の分布を見ると、一点交叉を用いた手法のほうが、ランダムサーチを用いた解集団に比べ、全体的に優れた解が集まった集団となっていることが分かる。これは、一点交叉を用いた手法の

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・方向を持つ解が存在する領域で、優先的に解を探索できているからであると考えられる。また、400世代目と450世代目の解集団をそれぞれ比較すると、どちらの手法を用いた場合でも評価値の改善はわずかであり、400世代目で十分最良な解に収束していると考えられる。Fig. 9, Fig. 10より、多目的最適化を行うことで、バルブ操作性に優れた設計案、材料コストに優れた設計案を同時に生成することができている。

5. 結言

本研究では、今まで自動化が困難と考えられていた配管設計問題に対し、配管の設計案に対して人間がバルブまで到達して容易に操作できるかどうかという「操作性」という曖昧だった評価を初めて数値化し、操作性と材料コストという2目的の最適化問題に帰着して多目的最適化手法を適用することにより、ベテラン技術者の設計作業を自動化する試みを示した。また、バルブやパイプを設計変数とした場合に特化したコード化方法及び多目的GAを提案し、バラストポンプの系統図に基づいて配管自動設計を行い、有効性を示した。

しかしながら、遺伝的手法において子個体へ継承する形質としてバルブの位置座標と方向のみをコード化し、パイプの引き回しは個体が生成されるたびに新たに行う方法では、探索で得られた設計案のパイプ配置に無駄が多く残る問題点がある。また、ベテラン技術者からのコメントによると、実際の設計作業においてはまず系統図から3次元的なパイプの配置と分岐を決め、その後でパイプ途中の適切な箇所へバルブを配置するという作業を行っており、本研究のアプローチとはだいぶ異なる。パイプの引き回しを形質とするコード化方法の検討は今後の課題である。また、実際の配管設計問題では、材料コストや操作性の他、パイプの工作性・保守性の評価や様々な制約が存在する。よってこれらの評価を全て数値化することは今後の課題である。

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) 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 (投稿中)
- 6) 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.
- 7) 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
- 8) K. Deb, S. Agrawal, A. Pratab and T. Meyarivan : A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithms for multiobjective optimization: NSGA II, KanGAL report 200001, Indian Institute of Technology, Kanpur, India, 2000.
- 9) E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thiele. SPEA2: Improving the Performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm, In Technical Report 103, Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, 2001.