

[論文]

## 実数型遺伝的アルゴリズムを用いた小弦節比ディフューザの最適化設計

李 軍\*<sup>1</sup> 張 明\*<sup>1</sup> 塚本 寛\*<sup>2</sup> 岡村 共由\*<sup>3</sup>

### Optimization Design of Low Solidity Diffuser for Diffuser Pump Using a Real-Coded Genetic Algorithm

Jun LI, Ming ZHANG, Hiroshi TSUKAMOTO and Tomoyoshi OKAMURA

This paper presents a redesign of the conventional vaned diffuser into the low solidity diffuser for the maximum static pressure recovery for diffuser pump. A Bezier curve representation for profile description is coupled with a blade-to-blade flow calculation and a real-coded Genetic Algorithm. A low solidity vaned diffuser of 0.89 in solidity is obtained through the present optimization design method. Numerical analysis and experimental test are applied to evaluate the hydrodynamic performance of diffuser pump with the designed low solidity vaned diffuser and original vaned diffuser. The obtained results demonstrate that the diffuser pump with the optimized low solidity diffuser has compact size compared with the original one while ensuring the performance requirements.

**Keywords** : Low Solidity Diffuser, Diffuser Pump, Genetic Algorithm, Optimization, Design

#### 1. まえがき

高圧用ポンプには、遠心羽根車からの流れの速度ヘッドの一部を圧力ヘッドに変換するための案内羽根をもつディフューザポンプが多く用いられる。この種のディフューザ内に案内羽根が設置されているものは羽根付きディフューザと呼ばれ<sup>(1)</sup>、多重ポリュートに比べ、同等あるいはより高い圧力回復が期待できる。また、羽根付きディフューザはポンプサイズの縮減やディフューザ出口角の制御に有効であり、渦巻ケーシングや戻り流路との接続がしやすい。また半径方向推力を小さくできる。

一般的な、弦節比1.0以上の羽根付きディフューザの代わりに、弦節比が1.0以下の小弦節

比ディフューザ (Low Solidity Diffuser, LSD) を使用できれば、ポンプサイズの縮減につながる。妹尾<sup>(2)</sup>は小弦節比ディフューザの有用性を示し、小弦節比ディフューザを用いた遠心送風機は広い流量範囲で安定な運転と高い圧力回復率が得られることを示した<sup>(3)</sup>。速水<sup>(4)</sup>らは、これを遷音速遠心圧縮機ディフューザとして用い、弦節比0.69の羽根付きディフューザは羽根なしディフューザより圧縮機の性能向上が期待できることを示した。Japikse<sup>(1)</sup>は羽根なしディフューザや小弦節比ディフューザなど様々なディフューザ形状に対して同一遠心インペラで実験し、小弦節比ディフューザを用いた遠心圧縮機が広い流量範囲で安定かつ、サージ (surge) 限界を改善することを示した。

小弦節比ディフューザの最適化設計について、様々な最適化方法が考えられる。既存の設計に合わせて自動化された設計システムを構成

\* 1 九州工業大学 工学部

\* 2 九州工業大学大学院 生命体工学研究科

E-mail : tsukamoto@life.kyutech.ac.jp

\* 3 (株)日立インダストリイズ 開発研究所

原稿受付日 平成14年3月14日

することで、設計者による試行錯誤の回数や形状の決定に要する工数を減少し、開発にかかるコスト、時間を抑えることができ、開発競争において優位に立つことが期待できる<sup>(5)</sup>。

現在ではコンピュータシミュレーションによって具体的な形状に対する性能が得られることから、従来の解析や実験の代わりに数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) を多用する設計手法に変化しつつある。そこで、より積極的にCFDを最適化方法と組み合わせて利用すれば、形状を設計変数として、性能を最適化する小弦節比ディフューザ最適化問題を解くことが可能となる。小弦節比ディフューザ内の流れのシミュレーションと最適化アルゴリズムにより自動的に形状最適化を行うことでより低コストで効率の良い設計を行うことができると考えられる。

そこで、本研究では、従来設計による羽根付ディフューザを基準として高い圧力回復を最適目標とするLSDの設計を行った。羽根形状の設計、流れ場のCFD解析及び最適化方法を含む羽根付きディフューザの自動設計法を提案し、供試ディフューザポンプに対する弦節比0.89の羽根付きディフューザを設計した。設計されたLSDは従来の大弦節比ディフューザより高い圧力回復係数を得られることを明示し、さらに、CFD解析と実験両面から、得られたLSDと従来の大弦節比ディフューザとの比較を行った。

## 2. 記号

- $b$  : 突然変異オペレータの制御パラメータ、=6.0
- $b_2$  : 羽根車出口幅
- $C_p$  : 圧力係数、 $= (p - p_3^{static}) / (p_3^{total} - p_3^{static})$
- $c$  : 乱数、 $\in [0,1]$
- $D$  : 直径
- $D_2$  : 羽根車外径

- $g$  : 重力加速度
  - $H$  : ポンプ全揚程
  - $K$  : 最大世代数
  - $k$  : 世代数
  - $N$  : 回転数
  - $p$  : 圧力
  - $Q$  : 流量
  - $U_2$  : 羽根車周速度
  - $x, y$  : 平面座標
  - $Z$  : 羽根枚数
  - $\alpha$  : 交叉オペレータの制御パラメータ、=1.0
  - $\gamma_{parent}^i$  : 親の遺伝子
  - $\gamma_{child}^i$  : 子の遺伝子
  - $\gamma_{min}^i, \gamma_{max}^i$  : 遺伝子の限界
  - $\delta$  : 選択オペレータの制御パラメータ、=0.01
  - $\eta$  : 効率
  - $\lambda$  : 選択オペレータの制御パラメータ、=2.5
  - $\rho$  : 密度
  - $\sigma$  : 弦節比
  - $\phi$  : 流量係数、 $= Q / (\pi D_2 b_2 U_2)$
  - $\psi$  : 揚程係数、 $= 2gH / U_2^2$
- 添え字
- $d$  : ディフューザ
  - $r$  : 設計点
  - $static$  : 静圧
  - $total$  : 全圧
  - 3,4 : ディフューザ入口、出口

## 3. 遺伝的アルゴリズム

最適化方法として近年注目されているのが遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) である。これは、1970年代始めにJ. Hollandにより提案されたアルゴリズムで、遺伝子情報の子孫への伝達による生物の進化の過程に着想を得ている。GA<sup>(6)</sup>では、最適化対象は遺伝子 (設計変数) を持った個体として扱われ、その遺伝子を、探索空間内での生活環境に対する適応度が

より高い個体間で入れ替えたり、突然変異により変化させたりして、世代を構成する個体群を進化させてゆく。これらの世代更新の操作により、適応度の高い個体の遺伝子情報は新しい個体に引き継がれ、最終的に最適解を得ることになる。

最適化アルゴリズムとしてのGAの主な特徴としては、第一に個体の集合を用いて最適解を探索するという多点同時探索を行うという点が挙げられる。また、もう一つの特徴として、目的関数空間の勾配や分布の様子や制約条件などという対象問題に対する詳細な情報を必ずしも必要としないということも挙げられる。こう言ったことから、GAは非常にロバストな最適化方法であるということが出来る。実際、空力最適化に応用された例も最近になり多く見受けられるようになってきている<sup>(5)(7)(8)</sup>。

しかし、GAは多点同時探索であるため、最適解が得られるまでに非常に多くの計算時間を費やしてしまうという欠点がある。いかにして効率よく、速くするか、あるいは、GAの各オペレータを上手く工夫して最適解をいかに早く探索するが最重要課題であり、GAの欠点を克服する鍵となる。

### 3-1 コード化

GAを用いて最適化問題を解くとき、まず設計変数を遺伝子の形で表現しなければならない。変数を2進数に変換するとき、設計精度を保つには桁数の大なる2進数が必要である。実数を2進数に変換すると、連続設計空間は離散設計空間に変換され、GAの探索時間が長くなり探索効率が低くなる。また、実数を2進数に変換すると、精度が粗くなり、変化する量の大きさを遺伝的操作で制御するのは困難であるなどの問題が生じやすい。上記の問題を解決するために、本研究では、実数型GAを採用する。

### 3-2 選択

与えられた目的関数と制約条件のもとで、次世代解候補群である集団中の各個体の適応度を決める。評価の高い個体ほど、優れた個体として自分の遺伝子を次の世代に残すことのできる可能性が高いことになる。評価の良い個体間に行える子孫の方が、評価の悪い個体間に行える子孫よりも優れている可能性が高いと考えられる。このため、選択を行うときは確率的に評価の高い個体を選ばれるようにする。すなわち、Boltzmann選択<sup>(9)</sup>を用いて良い個体の選択を行う。この場合、ある個体*i*が選択される確率 *pselect<sub>i</sub>*は、

$$pselect_i = e^{f_i(\bar{x})/T} / \sum_j^n e^{f_j(\bar{x})/T} \quad \dots(1)$$

ここに、 $f_i(\bar{x})$ は目的関数で、 $\bar{x}$ は設計変数である。 $T = \max[(1 - e^{-(1-k/(k+1))\lambda})T_0, \delta]$ を用いて計算される。また、 $T_0$ は初期世代の最優秀個体の適応度である。

### 3-3 交叉と突然変異

交叉は、選択された二つの個体間で遺伝子を組み換えることによって新しい個体を生成するもので、両親の優れた部分形質をうまく組み合わせ、子孫に継承させることに成功すれば、探索が飛躍的に進む。本研究では、次式に示す Simulated Binary Crossover (SBX)<sup>(10)</sup>を用いて新たな個体の遺伝子を計算するようにしているので、探索の加速を期待することができる。すなわち、式(2)、(3)及び(4)に示すように、親1と親2の遺伝子部分形質が組み合わさり、新たな子孫の遺伝子が形成される。

$$\gamma_{child1}^i = \beta \cdot \gamma_{parent1}^i + (1 - \beta) \cdot \gamma_{parent2}^i \quad \dots(2)$$

$$\gamma_{parent2}^i = (1 - \beta) \cdot \gamma_{parent1}^i + \beta \cdot \gamma_{parent2}^i \quad \dots(3)$$

$$\beta = \begin{cases} 0.5 \cdot [1 + (2c)^{1/(\alpha+1)}] & \alpha \leq 0.5 \\ 0.5 \cdot [1 + (1/2(1-c))^{1/(\alpha+1)}] & \alpha > 0.5 \end{cases} \quad \dots(4)$$

また、突然変異は、個体中の遺伝子を強制的に操作することによって、交叉では得られないよ

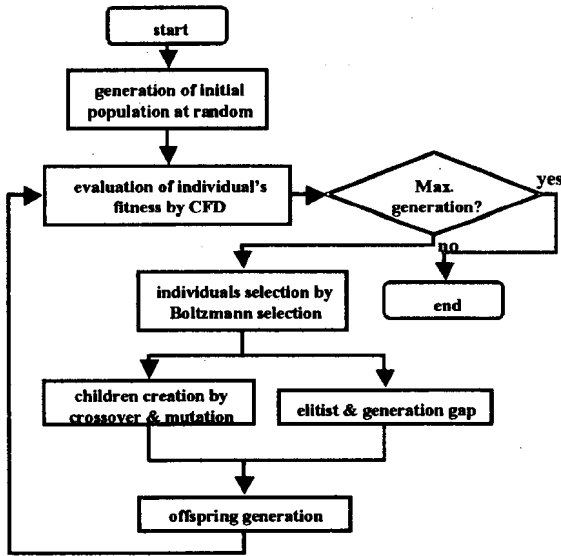


Fig. 1 Flowchart of process in real-coded GA's application

うな解を探索するために用いられる。本研究では、式(5)で示すような非一様突然変異 (Non-uniform Mutation)<sup>(1)</sup>を用いて新たな解を探索するようにしているので、適切な解が探索できる。

$$\gamma_{new}^i = \begin{cases} \gamma_{child}^i + (\gamma_{max}^i - \gamma_{child}^i) \cdot c \cdot (1 - k/K)^b & c \leq 0.5 \\ \gamma_{child}^i + (\gamma_{child}^i - \gamma_{min}^i) \cdot c \cdot (1 - k/K)^b & c > 0.5 \end{cases} \quad \dots(5)$$

### 3-4 GAの実施

Fig. 1は、本研究で提案された実数型GAのフローチャートである。設計変数を遺伝子として、初期設計の個体集団をランダムに生成し、各個体の目的関数に対する適応度を評価する。本研究では、後述のように、簡単のため、各世代の集団中の個体数は一定としている。適応度の良い個体ほど親として選択される可能性が高くなるように親を選択する。そして、交叉と突然変異で子孫を作る。GAオペレータ（評価・選択・交叉・突然変異）により、世代を繰り返すことで最適解を探索する。本研究では、簡単のため、最大世代数は固定されている。世代交代のモデルとして、各世代の集団中で最も優れた個体は交叉と突然変異をすることなく優先的

に次の世代に残すという手段、エリート戦略 (Elite Strategy) がとられている。つまり、評価の悪い個体間で作られた子孫よりも、評価の良い個体間で作られた子孫のほうが優れており、この遺伝子を次世代に残すことで、より評価の良い子孫が形成されるとする。

## 4. LSDの最適化設計

従来のディフューザポンプの羽根付きディフューザは、大弦節比であるために、その外径が大きくなり、全体形状が大型化してしまうという問題があった。そこで、これを弦節比が1.0以下のLSDで置き換えれば、小型で高性能なディフューザポンプが実現できる。ここでは、羽根付きディフューザ形状を設計変数として流れ場のCFD計算とGA最適化を併用して最適化設計する方法を提案する。これは、基準となる従来型の大弦節比ディフューザから可能な限り高い圧力回復係数のLSDを求めることを目標とする単目的最適化設計問題である。

### 4-1 羽根付きディフューザの性能予測

ディフューザ羽根列内の流れ場は、二次元非圧縮性ナビア・ストークス (Navier-Stokes) 方程式を基礎方程式として解析される。有限体積法を用いて離散された方程式はSIMPLE法によって数値計算される。流れ場の境界条件は、以下のように、基準ディフューザポンプに対する設計条件<sup>(2)</sup>に一致させている。

計算格子：翼列内流路のH型格子 (51×21)

流入流量：73.33kg/s

全揚程：33.7m

回転数：1500rpm

比速度：232m<sup>3</sup>/min、m、min<sup>-1</sup>

翼面上：滑り無し条件

解析のための計算格子と圧力係数分布の計算結果の一例をFig. 2とFig. 3に示す。

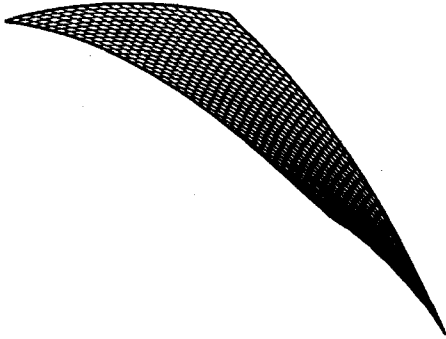


Fig. 2 Computational grid for diffuser passage

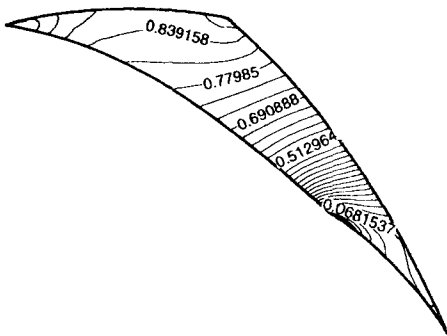


Fig. 3 Contours of computed pressure coefficient  $C_p$

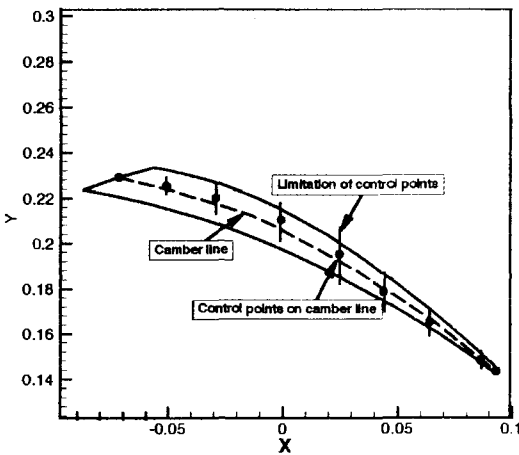


Fig. 4 Bezier curve function for diffuser geometry

#### 4-2 羽根形状の定義

求める羽根付きディフューザの翼形状を定義する。翼形は一般的に翼厚分布とキャンバー線 (Camber Line) で構成される。本研究でも、翼

厚分布とキャンバー線を組み合わせることにより翼形状を決定することとし、Fig. 4のように、キャンバー線上に9点の制御点  $(x_i, y_i); i=0 \sim 8$  を配置する。これらの制御点の座標  $(x, y)$  が設計変数となる。本研究では、制御点の  $x$  座標は固定し、 $y$  座標  $y_i; i=0 \sim 8$  のみを設計変数とする。

キャンバー線は、次式(6)(7)のように、制御点  $(x_i, y_i)$  から8次Bezier-Curve関数によって決定される。翼厚分布は基準翼形をそのまま与えることとし、これとキャンバー線を組み合わせて求める翼形状を定義する。

$$x(t) = \sum_{i=0}^8 C_8^i t^i (1-t)^{8-i} x_i \quad \dots(6)$$

$$y(t) = \sum_{i=0}^8 C_8^i t^i (1-t)^{8-i} y_i \quad \dots(7)$$

$$C_8^i = 8! / [i!(8-i)!], \quad t \in [0, 1]$$

キャンバー線の制御点の  $x$  座標を定数として、 $y$  座標  $(y_0, y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8)$  を遺伝子として表現し、この  $y$  座標を実数型データとしてそのまま用いて設計変数とする。これにより、最適な  $y$  座標を求めるだけで、簡単に最適な遺伝子を求めることができる。

#### 4-3 問題設定

羽根付きディフューザの設計目標の一つである「高い圧力回復係数」を目的関数：

$$C_p = (p_{static4} - p_{static3}) / (p_{total3} - p_{static3}) \quad \dots(8)$$

で表す。これは、羽根付きディフューザの入口と出口における静圧の差を入口の動圧で除して無次元表示したものである。この値が大なる程、羽根付きディフューザの機能である流れの動圧を静圧に回復させる機能が優れていることを意味する。

制約条件として、

- $\sigma \leq 1.0$
- $D_3 = 340\text{mm}$
- $D_4 = 460\text{mm}$
- $Z_d = 7$

を課す。また、GA計算において、適応度関数  $f$  として、 $f = 10.0 \cdot C_p$  を用いることにする。

#### 4-4 LSDの最適設計手順

LSDの圧力回復係数について、この項目ごとに最適化を行う。このとき、各世代における個体数及び最大世代数を次のように設定する。

個体数=60、最大世代数=60

また、各操作は次のように行う。

##### (1) コード化

翼型を定義するときの制御点の  $x$ 座標を定数として、 $y$ 座標を設計変数とする。このとき設計変数を2進数には変換せず、実数型データのまま遺伝子として扱う。ここでは、遺伝子の数は合計9個とする。そして、この遺伝子で表現できる翼型の中から無作為に60個体を選び出し、初期個体集団を形成する。

##### (2) 評価

性能を評価するとき、翼列内の流れ場は二次元元圧縮性Navier-Stokes方程式に従う。流れ場の条件は基準ディフューザポンプに対する設計条件になっている。GAを用いた最適化において、全計算時間のうちほとんどの部分を占めるのがこの評価である。

##### (3) 選択

Boltzmann選択方法を用いて親を選択する。

##### (4) 交叉と突然変異

SBXと非一様突然変異を用いて新しい個体を生成する。SBXの発生率として100%を設定し、非一様突然変異の発生率として2%を設定する。

##### (5) エリート戦略

ここでは、集団中で最も評価の良い個体を優先的に次世代に保存する。

### 5. 最適化結果及び考察

Fig. 5に最適計算の収束過程を示す。最適化設計の解を探索している様子が分かる。Fig. 6

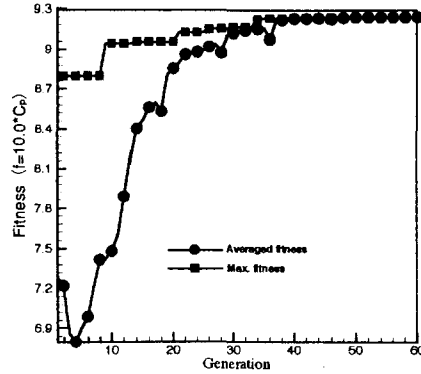


Fig. 5 Convergence history of the optimization process

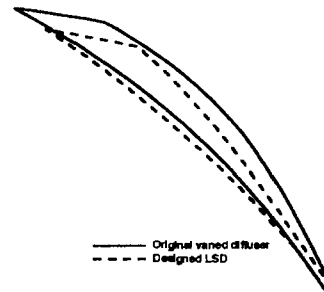


Fig. 6 Profiles of vane in original and designed vanned diffuser

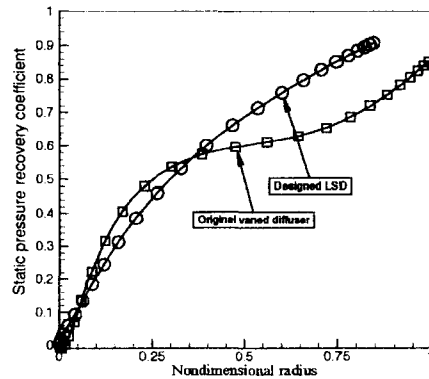


Fig. 7 Pressure recovery coefficients in original and designed vanned diffuser

及び7は、各々、60世代で最終的に得られたLSDの翼型と  $C_p$  の半径方向分布である。図中には、比較のため、基準となる大弦節比羽根付きディフューザの翼型とその  $C_p$  分布が記入されている。Fig. 7の横軸は基準羽根付きディフ

Table 1 Specifications of diffuser pump with the designed LSD and original vaned diffuser

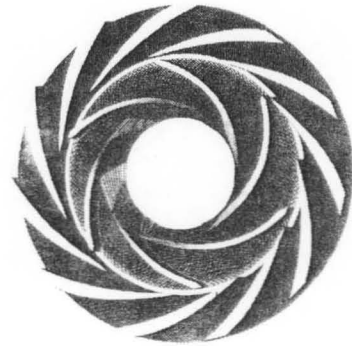
Rating :			
Flow rate	Q	4.4m <sup>3</sup> /min	
Total head	H	33.7m	
Rotational speed	N	1500rpm	
Specific speed	Ns	232rpm、m、m <sup>3</sup> /min	
Impeller :			
Outlet radius	R <sub>2</sub>	165mm	
Outlet width	b <sub>2</sub>	28mm	
Outlet angle	β <sub>2</sub>	24.3deg.	
Number of blades	Z <sub>i</sub>	6	
Original Vaned Diffuser :			
Inlet radius	R <sub>3</sub>	170mm	
Outlet radius	R <sub>4</sub>	240mm	
Passage width	b <sub>3</sub> 、b <sub>4</sub>	30mm	
Number of vanes	Z <sub>d</sub>	11	
Solidity	σ	1.25	
Static pressure rise	C <sub>p</sub>	0.83	
Designed LSD :			
Inlet radius	R <sub>3</sub>	170mm	
Outlet radius	R <sub>4</sub>	230mm	
Passage width	b <sub>3</sub> 、b <sub>4</sub>	30mm	
Number of vanes	Z <sub>d</sub>	7	
Solidity	σ	0.89	
Static pressure rise	C <sub>p</sub>	0.93	

ューザの入口半径と出口半径を用いて無次元化された半径であり、入口及び出口半径が、各々、0.0と1.0とされている。縦軸の圧力係数は周方向平均された静圧係数である。設計LSDの圧力係数はその50%翼弦位置で基準羽根付きディフューザより高い。設計LSDの単調増加する圧力係数は基準羽根付きディフューザより良い流体性能を示している。基準羽根付きディフューザ及び設計LSDの形状と性能パラメータはTable 1に示されている。

多くの適用例<sup>(30)</sup>によって信頼性の高い汎用流れ解析コードCFX-TASCflow<sup>(9)</sup>を用いて、設計LSD付きディフューザポンプと基準ディフューザポンプの性能の数値解析を行った。流れ場の基礎方程式は、連続の式とレイノルズ平均Navier-Stokes式であり、乱流モデルにはk-ε標



(a) Designed pump



(b) Original pump

Fig. 8 Computational grid for pump with designed LSD and original pump

準モデルを使用した。Fig. 8は、設計LSD付きディフューザポンプと基準ディフューザポンプの計算格子を示す。ポンプ性能の計算結果がFig. 9に示されている。比較のため、図中には基準ディフューザポンプの実験値が記入されている。基準ディフューザポンプの性能の計算値が実験値とよく一致していることから、数値計算の妥当性が知られる。計算結果から、設計LSD付きディフューザポンプは、基準ディフューザポンプに類似した性能を示すことがわかる。

Fig.10は、性能試験によって得られたディフューザポンプ及び設計されたLSD付きディフューザポンプの特性曲線である。設計されたLSD付きディフューザポンプは、基準ディフューザポンプに類似した特性曲線となっている。従っ

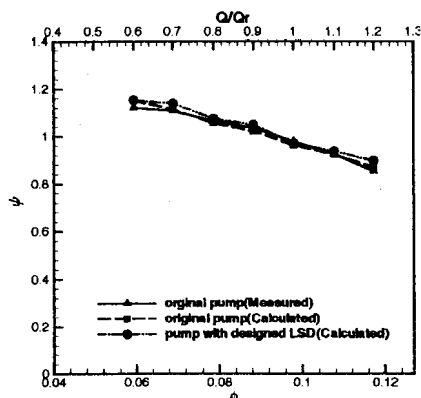


Fig. 9 Calculated characteristic curves of diffuser pump with original and LSD vaned diffuser

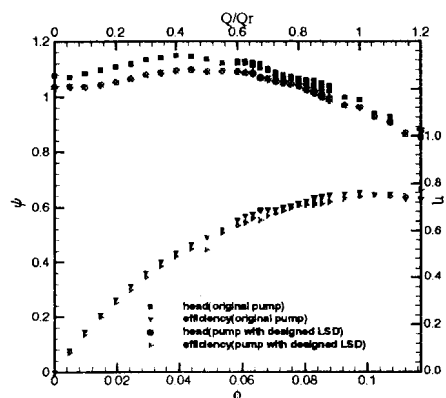


Fig.10 Measured characteristic curves of diffuser pump with original and LSD vaned diffuser

て、この最適化設計は仕様をほぼ満足するLSDを提供し、ポンプサイズの縮減を実現している。

## 6. あとがき

流れ解析とGAを組み合わせた最適化計算によって、小弦節比ディフューザ (LSD) のディフューザポンプへの適用を意図して、羽根付きディフューザの羽根形状を設計した。設計結果は基準ディフューザポンプと比較され、設計されたLSDによってディフューザポンプの寸法を縮減可能ことが示された。また、本研究で提案された設計方法は流体機械の最適化設計のための簡単、かつ信頼できるアルゴリズムである

ことが示された。

本研究の一部は日本学術振興会の外国人特別研究員プログラム (P99046) として行われたものであり、供試ディフューザポンプの製作には(株)日立インダストリイズより援助いただいた。ここに記して謝意を表す。

## 〈参考文献〉

- (1) Japikse, D., Centrifugal Pump Design and Performance, (1993), 3-1, Concepts ETI, Inc.
- (2) 妹尾泰利, 日本特許応用発表, (1978), 119411/78.
- (3) Senoo, Y., Low Solidity Cascade Diffuser for Wide Flow Range Centrifugal Blowers, Flow in Centrifugal Compressor, VKI Lecture Series, (1984), 1984-07.
- (4) Hayami, H.・他2名, Application of a Low Solidity Cascade Diffuser to Transonic Centrifugal Compressor, Trans. ASME Journal of Turbomachinery, 112, (1990), 25.
- (5) 金崎・他2名, 自動車エンジン排気系形状の多目的最適化, 機論, 67-663, B (2001), 2746.
- (6) Goldberg, D.E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, (1989), Addison-Wesley.
- (7) 大林・塚原, 進化アルゴリズムによる空力最適化 I, II, 数値流体力学, 6-2 (1998), 59.
- (8) Quagliarella, D., Vicini, A., Genetic Algorithms for Optimization in Aeronautics and Turbomachinery, 1999-2000 VKI Lecture Series (2000).
- (9) Michael, de la Maza, Practical Handbook of Genetic Algorithms, New Frontiers, Volume II, (1995), 111-138, CRC Press.
- (10) Deb, K., Agrawal, R.B., Simulated binary crossover for continuous search space, Complex Systems, 9, (1995), 115.
- (11) Michalewicz, Z., Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, (1996), Springer-Verlag.
- (12) 成松良高, ディフューザポンプの動静翼干渉に基づく圧力脈動, 九州工業大学, 修士論文, (1997), 10.
- (13) Kaupert, K. A.,・他2名, A First Analysis of Flow Field Hysteresis in a Pump Impeller, Trans. ASME, J. Fluids. Eng., 118 (1996), 685.
- (14) Gu, F. H.,・他3名, A Numerical Investigation on the Volute/Diffuser Interaction Due to the Axial Distortion at the Impeller Exit, Trans. ASME, J. Fluids. Eng., 123 (2001), 475.
- (15) TASCflow Version 2.11 User Manual, 2001, AEA Technology.