

## ポリュートケーシングの影響を考慮したねじ形遠心ポンプの 内部乱流の数値解析\*

韓 海<sup>\*1</sup>, 田中和博<sup>\*2</sup>  
谷口伸行<sup>\*3</sup>, 小林敏雄<sup>\*4</sup>

### Numerical Analysis of Turbulent Flow in a Screw-Type Centrifugal Pump Coupled with the Volute Casing

Hai HAN<sup>\*5</sup>, Kazuhiro TANAKA,  
Nobuyuki TANIGUCHI and Toshio KOBAYASHI

<sup>\*5</sup> AEA Technology ESW, CFX Japan, Plus Taria Bldg. 6F,  
3-1-4 Shin-Yokohama, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa, 222-0033 Japan

A three-dimensional Navier-Stokes code with a standard  $k-\varepsilon$  two-equation turbulence model in boundary-fitted coordinate system has been developed for a screw-type centrifugal pump. The approach of logarithmic wall function is employed to treat near-wall regions. The interaction between the impeller and the volute casing is remarkable in this pump type. In the present study, to catch up the interaction effect between the two flow fields, we have calculated the flow fields in a volute casing as well as in an impeller simultaneously by exchanging the calculated data between them at every iteration step. Two kinds of data exchange methods as the boundary condition in grids overlapped between impeller and volute casing are discussed. The simulation results show that only the calculation considering the effect of the volute casing can be predicted reasonably well. The measured pressure distributions and visualizes flow patterns are also compared.

**Key Words:** Computational Fluid Dynamics, Turbomachinery, Secondary Flow, Screw-Type Centrifugal Pump, Pressure Distribution, Turbulent Flow

#### 1. 緒 言

ねじ形遠心ポンプは、固形物の輸送のみならず、スラリー、雨水排水、泥水等の輸送にも広く利用されている。ねじ形遠心ポンプの羽根車は、固形物の輸送という目的に沿って流路閉そくしにくいように、三次元らせん状の一枚羽根が円すい状のハブコーンに巻き付いた特殊な形状をしている。また、ケーシングは吸込ケーシングとポリュートケーシングからなっている。この形式のポンプは大きな圧力上昇が実現される遠心ポンプとは異なり、ソフトポンピング作用と呼ばれる流路に沿った滑らかな圧力上昇の実現が可能である。しかしながら、その複雑な形状のため、内部流れの詳細は明らかになっておらず、設計指針も定まてはいないのが現状である。

多数の羽根をもつターボ機械では、数値解析におい

て一つの羽根間流路のみについて解析するのが一般的となっているが、ねじ形遠心ポンプでは羽根が一枚しかないために全領域を解析しなければならない。

ねじ形遠心ポンプの内部流れ解析については、これまで有限要素法<sup>(1)</sup>、差分法<sup>(2)</sup>、有限体積法<sup>(3)</sup>による研究報告がなされているが、そのいずれもが粘性を考慮していないポテンシャル流れ解析であり、また羽根車単体の解析である。

羽根車部のみ解析<sup>(4)</sup>においては、計算領域が狭い場合、流路出口面での一様流出の境界条件の影響が流路内部にまで強く影響を及ぼし、現実の流れとは違ったものになる。羽根車部のみ解析を行うには、計算領域を十分広くとる必要があるが、現実的な流動様式を実現できる出口面の境界条件の設定は困難である。したがって、現実的には流れを実現するためには、ポリュートケーシングまで考慮した計算解析が必要であると考えられる。

一方、実験結果<sup>(5)</sup>では、羽根車の回転に伴い、ポリュートケーシング内部の圧力に周期的な変動があることと、ポリュートケーシングの影響も羽根車内部まで及んでいることが確認されている。このため、ねじ形遠心ポンプ全体の数値解析においても、ポリュートケーシングの影響を考慮しなければならない。

\* 原稿受付 1999年8月20日。

<sup>\*1</sup> 正員, AEAテクノロジー ESW, CFX ジャパン(☎222-0033 横浜市港北区新横浜 3-1-4 プラスタリアビル 6F)。

<sup>\*2</sup> 正員, 九州工業大学情報工学部(☎820-8502 飯塚市川津 680-4)。

<sup>\*3</sup> 正員, 東京大学生産技術研究所(☎106-0032 東京都港区六本木 7-22-1)。

<sup>\*4</sup> 正員, 東京大学国際産学共同研究センター(☎106-0032 東京都港区六本木 7-22-1)。

E-mail: han@aeat.co.jp.

一般的には羽根車部とポリユートケーシング部の境界条件を接合して全領域の解析を行うことが望ましい。しかし、計算機の能力不足と動・静接合部の非定常性を的確にシミュレートするモデルがない<sup>(6)</sup>ため、非定常的な干渉を厳密に解析するのは困難である、本研究では従来用いられている定常干渉の仮定<sup>(7)</sup>を採用した。

そこで本報では、ポリユートケーシングの影響を考慮したポンプ全体の乱流解析を行うことのできる計算コードを開発した。また、数値解析を行う際の羽根車部とポリユートケーシング部のデータの受渡し方法を比較・検討した。さらに、数値解析結果の妥当性を検証するために、実機を用いた実験結果と比較した。

2. おもな記号

- $b_2$  : ポリユート流路幅
- $C_p$  : 圧力係数  $= (P_{imp} - \rho g Z_{imp} - P_s) / (1/2) \rho u_2^2$
- $d_{max}$  : 羽根車最大径  $= 2 \times R_{max}$
- $P_{imp}$  : ポンプ内圧力
- $P_s$  : ポンプ吸込圧力
- $Q$  : 流量
- $R_{max}$  : 羽根車最大半径
- $u_2$  :  $R_{max}$  での羽根車周速度
- $\theta_{imp}$  : 羽根車位相角
- $\rho$  : 密度
- $\omega$  : ポンプ回転角速度
- $\phi$  : 流量係数  $= Q / \pi b_2 d_{max} u_2$

3. 数値解析

3.1 基礎方程式 基礎方程式は、三次元定常の連続の式とレイノルズ平均 Navier-Stokes 方程式である。

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} + S_{ui} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $u_i$  は各座標軸方向の速度ベクトル成分を表している。 $S_{ui}$  は外力の項である。実効粘性  $\mu_{eff}$  は層流のときの分子運動による粘度  $\mu$  と乱流粘性係数  $\mu_t$  の和で表される。

乱流モデルには標準  $k-\epsilon$  モデル<sup>(8)</sup>を用いた。乱流エネルギー  $k$  は輸送方程式、

$$\rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_k - \rho \epsilon \dots\dots\dots (3)$$

により与えられ、 $k$  の散逸率  $\epsilon$  は輸送方程式で与えられる。

$$\rho U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} P_k - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \dots\dots\dots (4)$$

回転系を考える場合には、コリオリの力と遠心力の考慮が必要である。この場合、

$$\vec{S}_u = -2\vec{\omega} \times \vec{U} - \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) \dots\dots\dots (5)$$

となる。 $\times$  はベクトルの外積、 $\vec{\omega}$  は回転角速度である。

また、本研究では、羽根車部の運動方程式は、回転座標系に対するコリオリ力と遠心力を考慮した式を用いる。ポリユートケーシング部に対する式は静止座標系の運動方程式を用いる。

基礎方程式は一般座標系に変換されている。これらを離散化し数値計算を行う。

3.2 計算手法 計算格子はスタガード格子を用いる。離散化手法として運動量や質量の保存則を満たしやすいように、有限体積法を採用する。差分スキームとしては対流項に対してはハイブリッド差分を用い、粘性項には二次精度の中心差分を用いる。速度と圧力のカップリングは圧力補正式を作る SIMPLE 解法<sup>(9)</sup>を用いた。離散化された運動方程式、圧力補正式の代数方程式を効率的に算出するため、ADI<sup>(10)</sup>と緩和法の組合せを利用する。

3.3 計算格子 本研究で対象とするポンプ羽根車の写真と数値計算に用いた計算領域を図1に示す。また、使用した計算格子を図2に示す。本研究では、計算領域を羽根車部とポリユートケーシング部の二つに分割し、それぞれの領域において計算格子生成を行った。これは、回転物体である羽根車部と静止物体であるポリユートケーシング部では用いる基礎方程式が異なるためであり、境界条件や圧力の項にも違いが存在するためである。計算領域を分割して考えること

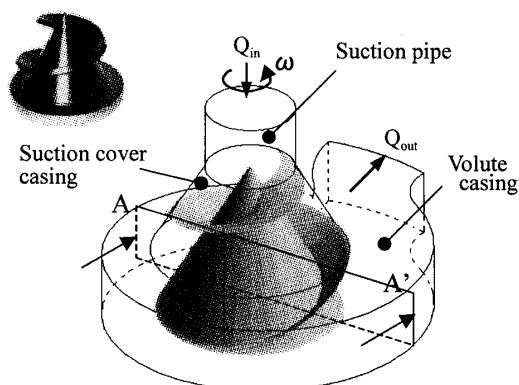


Fig.1 Computational domain

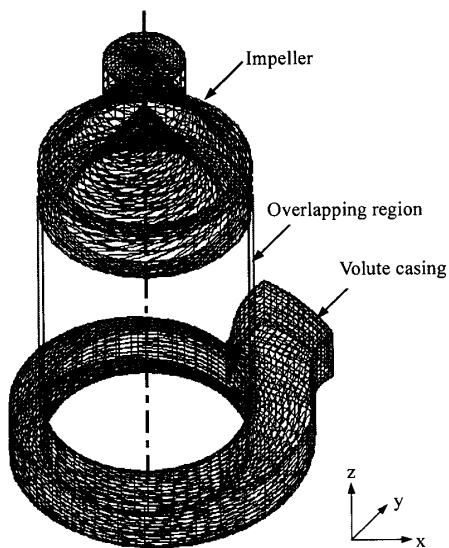


Fig. 2 Computational Grids

は、これらの問題を解決し、回転物体と静止物体を一体として計算を行うための便利な手法である。

羽根車の複雑な形状を忠実に表現し、計算格子を適切に分布させるために、以下のような独自の格子生成を行った。羽根車部の計算格子を生成する際には、まず子午面への正射影で考える。子午面上の計算格子は二次元であるため容易に生成することができる。この二次元計算格子を羽根に沿って分布させ、さらに、これを回転方向に一周回転させ、三次元の計算格子を生成する<sup>(4)</sup>。ただし、翼厚を考慮しているため、翼厚の中に計算格子を2面对称配置するように工夫がなされている。この二次元計算格子については、だ円形方程式を用いた境界適合法を利用して計算格子生成を行った。

ボリュートケーシング部の計算格子については、 $x$ - $y$ 平面上の二次元計算格子を生成し、これを $z$ 方向に積み重ねることによって計算格子を生成した。

これにより境界近くでは格子を密集させることができ、格子形状の欠陥がチェックできる。格子分割数は、羽根車部  $52 \times 15 \times 51$  (図2の上部)、ボリュートケーシング部  $23 \times 15 \times 51$  (図2の下部)である。格子点数の影響を調べるため、格子点数を2倍に増やした格子でも計算したが、結果は変わらなかった。

繰り返し計算の途中で、羽根車とボリュートケーシングの間で速度と圧力の計算値の受渡しを行いながら計算を進めていくために、羽根車部とボリュートケーシング部の計算格子にはオーバーラップする領域を設けている。

なお、本研究においては、ねじ形遠心ポンプ全体の流れ場の特徴を把握することを目的としているため、

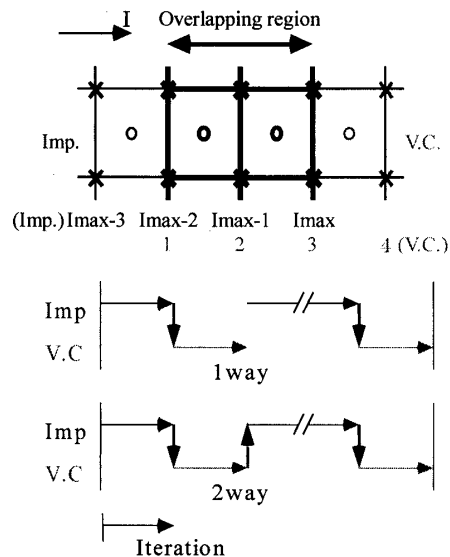


Fig. 3 Overlapping region and data exchange methods between Imp. and V. C. grid system

羽根車の羽根先端すきまの存在は考慮していない。

**3・4 境界条件** 入口境界条件は、吸込管断面における一定流入流量からの十分発達した管路乱流の速度値を与える。出口境界条件は、下流方向への速度成分の変化率を零とする外挿により与え、さらに連続の式を満たすように補正を行う。壁面境界については、壁近傍の格子点数を減らすために壁法則を利用した。

データの受渡しを行うために、図3に示すように、羽根車 (Imp.) 部とボリュートケーシング (V.C.) 部の計算格子は格子点三つ分をオーバーラップさせ、この領域で速度 ( $\times$ 印) と圧力 ( $\circ$ 印) の値の受渡しを行う。すなわち、羽根車部では  $I_{max}$  の点まで、ボリュートケーシング部では、1 の点から計算を行う。

これまででは、上流側から下流側へだけ (羽根車部 → ボリュートケーシング部：以下、1 way) データを受け渡すのが一般的であった。しかし、計算対象であるねじ形遠心ポンプは、ボリュートケーシング部の影響が羽根車部にまで及ぶと考えられるので、下流側から上流側へもデータの受渡しを行い (羽根車部 ⇄ ボリュートケーシング部：以下、2 way)、計算結果の信頼性を向上させる。本研究では、ボリュートケーシング側の流入境界条件は、流入境界 (図3中、1の点) とオーバーラップする羽根車側格子での値 (図3中、 $I_{max-2}$  の点) を速度の境界条件として与える。羽根車側の流出境界条件としての速度は、連続の式から自動的に決定される。圧力については、オーバーラップするボリュートケーシング側格子 (図3中、3の点) での値が羽根車側格子へ引き渡される。

Table 1 Specifications of the test impeller

Pipe	Suction pipe diameter	40 [mm]
	Discharge pipe diameter	30 [mm]
Impeller	Maximum radius	44 [mm]
	Location angle of Maximum radius	400[°]
	Contact angle of the blade	90[°]
	Total angle along the blade	540[°]
	Vertical angle of conical hub	60[°]
	Thickness of the blade	5 [mm]
	Height of the blade	17.3 [mm]
	Height of the impeller	71.4 [mm]
	Material	Aluminum
	Volute casing	Width (rectangular cross-section)

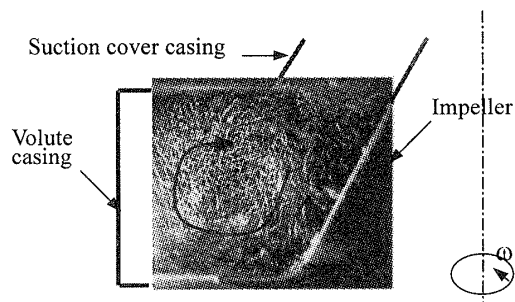
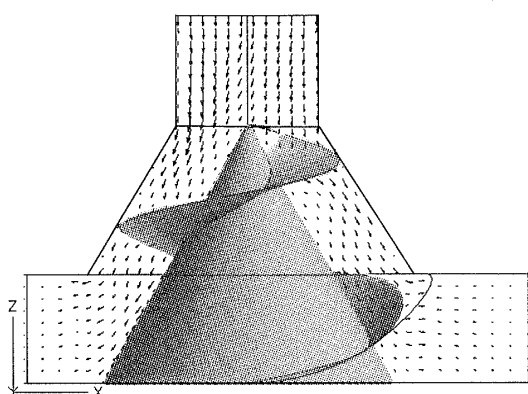
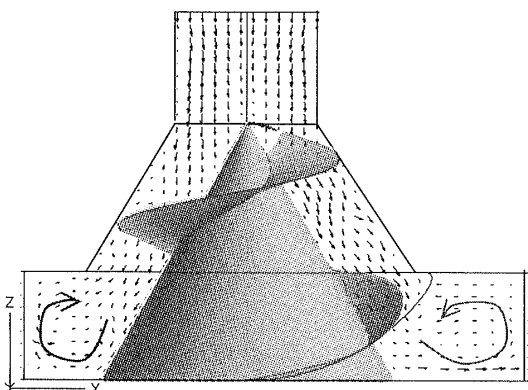


Fig. 5 Visualized flow pattern near outlet of impeller



(a) 1 way



(b) 2 way

Fig. 4 Velocity vectors distributions of Imp. and V. C at A-A' cross section

#### 4. 計算結果

本研究で計算の対象とするポンプ羽根車の仕様を表1に示す。羽根車は頂角 $60^\circ$ の円すい状のハブに三次元らせん状の一枚羽根が付加された形状となっており、羽根の巻き角 $540^\circ$ (巻き数1.5巻)、最大半径44 mm(羽根巻始め部から $400^\circ$ の位置)である。特記しない限り、流量は設計点流量(流量係数 $\phi_{BEP}=0.025$ )であり、羽根車回転数は3 000 rpmである。

**4・1 データ受渡し方の違いによる影響** 本研究では、二通りのデータの受渡し方法(1 way, 2 way)で解析を行った。A-A'断面(図1)で、同じ計算格子を用いてデータの受渡しを1 wayと2 wayで行った場合の速度分布を図4に示す。両者の解析結果は大きく異なっている。2 wayではポリユートケーシング左側においてポリユートケーシング内部下壁面付近で内側から外側へ、上壁面付近で外側から内側への逆流が存在することが確認できる。また、ポリユートケーシング右側において、同様の二次流れが見られる。一方、1 wayの場合では、ポリユートケーシング部内の逆流が弱くなり、羽根車出口下流の逆流領域がなくなるとともに流れ様式も変わる。これらの結果より、データの受渡し方法による違いが確認できる。

**4・2 実験結果との比較** 本研究で取扱っている羽根車とケーシングそのものを使用した実験装置を組んだ。その詳細は既報<sup>(11)</sup>に紹介されているので、ここでは省略する。図5に、A-A'断面左側のポリユートケーシング部内の可視化結果を示す。計算結果と同様に、時計方向の二次流れが発生しているのがわかる。これらの比較より、羽根車部とポリユートケーシング部の干渉を正確にとらえて流れ場を合理的に解析するには、データの受渡しを2 wayで行うのがよいことがわかった。

**4・3 違う位相での解析結果** 羽根車位相角 $\theta_{mp}$ は羽根車の巻始めがポンプ軸に対して鉛直上方にきたときを $0^\circ$ とし、反時計回りに増加するよう定義した。

図6に、設計点のときの $\theta_{mp}=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ の羽根車流路中央面上の相対速度、ポリユートケーシング流路中央面の絶対速度を示す。その速度分布より、流れ全体は流路に沿って滑らかに流れていることがわかる。違う位相での内部流れの速度ベクトル図の比較から、羽根車内の速度分布はほぼ同様であることがわかる。しかし、羽根車最大半径 $R_{max}$ 位置付近でのポリユートケーシング内の速度が大きくなり、ポリユートケーシング内部流れの様子は位相 $\theta_{mp}$ によって変

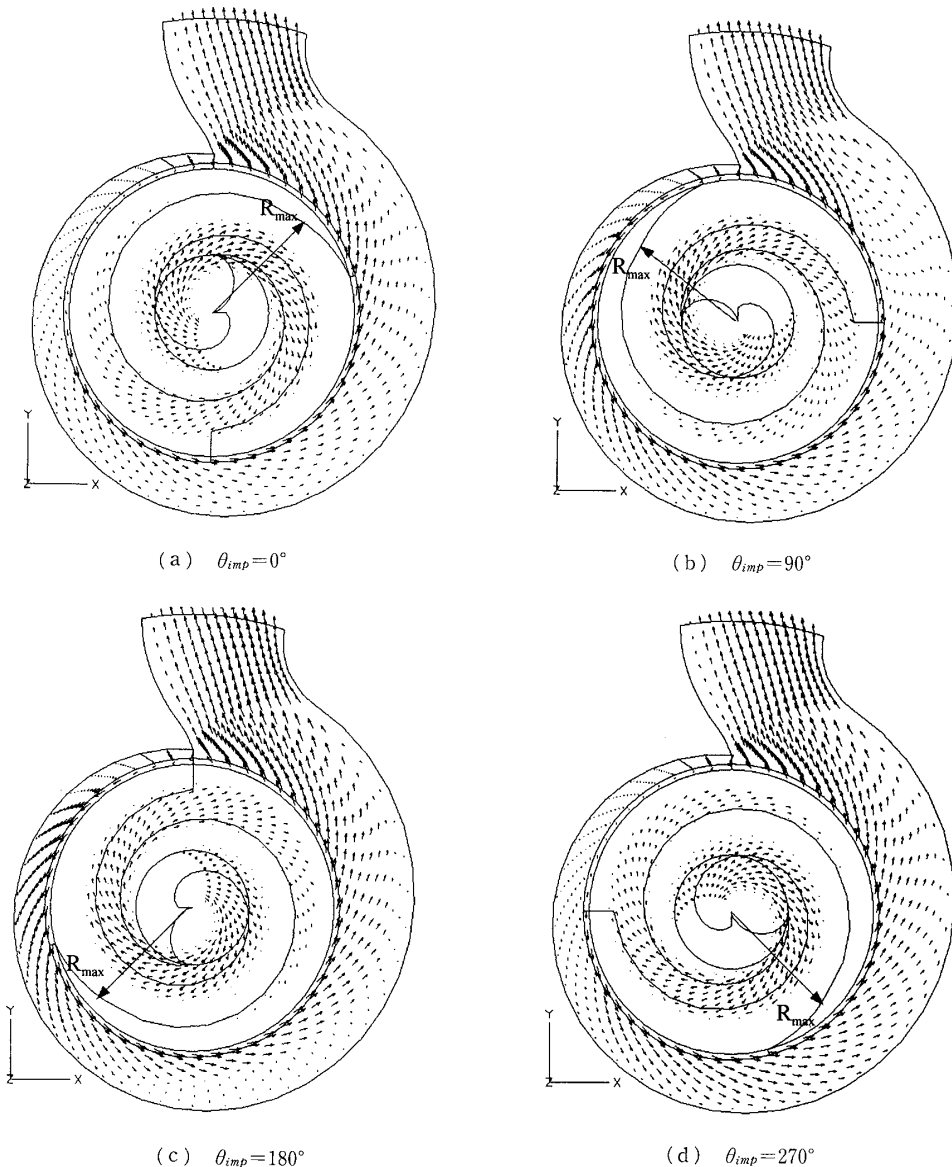


Fig. 6 Velocity vectors distributions on the mid-span of impeller and V. C. at different phases

動することも確認できる。また、ボリュートケーシング出口部分の速度分布については、羽根車位相の影響があまりないのが確認される。

**4・4 低流量域での速度分布** 低流量域におけるポンプ内部三次元流れに、本研究の数値解析コードの適用を試みる。ただし、羽根車回転数は  $n=3000$  rpm と一定に保たれている場合である。

$\phi/\phi_{BEP}=1.0$ ,  $\phi/\phi_{BEP}=0.8$ , および  $\phi/\phi_{BEP}=0.6$  におけるボリュートケーシング出口部の流路中央面の速度ベクトル分布をそれぞれ図7(a)~(c)の左側に示す。また、流れパターンを観察するために、可視化実験<sup>(11)</sup>で得られた流動写真をそれらの右側に示す。図6に示されるように、ボリュートケーシング出口部分の速度分布については羽根車位相の影響があまりないため、すべて位相  $\theta_{imp}=0^\circ$  での解析結果と可視化実験結果

の比較である。

設計流量の場合 [図7(a)] では、実験結果と同様に流れは流路に沿ってポンプ出口に向かって滑らかに流れていることがわかる。低流量域における流れ場 [図7(b)] では、舌部を通して再循環する流れが存在することが確認できる。さらに、流量係数が低くなるにつれて [図7(c)]、再循環する流れが多くなることがわかる。実験結果も同様の現象が現れている。

この比較より、低流量域で運転するとき、ボリュート舌部付近での巻き込みによって、ポンプ全体の性能が落ちていることがわかる。ねじ形遠心ポンプの設計を行うにあたっては、特にボリュート舌部形状に気をつける必要がある。

**4・5 吸込ケーシング内の圧力分布** 解析結果における吸込ケーシング内の圧力係数  $C_p$  の一例を図8

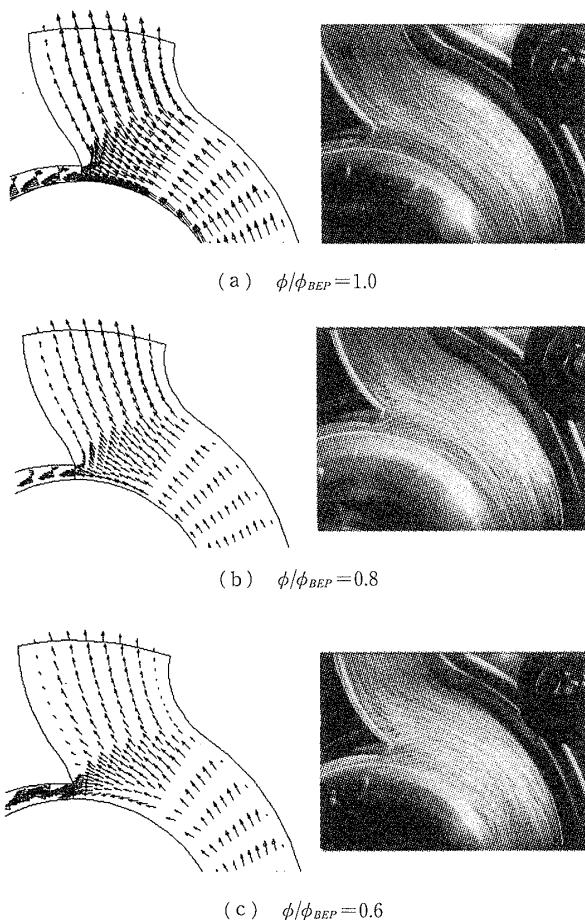


Fig. 7 Visualized flow pattern near the throat tongue of V. C. at different flow coefficient

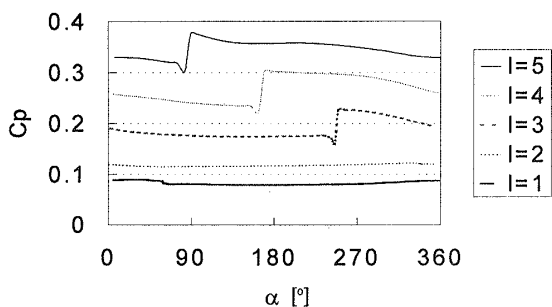


Fig. 8 Circumferential pressure distributions on different radius of suction casing ( $\theta_{imp}=90^\circ$ )

に示す ( $\theta_{imp}=90^\circ$ , 設計流量  $\phi_{BEP}=0.025$ )。これは、図9に示されているように、吸込ケーシング表面の5等分 ( $I=1$  は吸込管側,  $I=5$  はポリュートケーシング側) された箇所の一週圧力分布である。  $\alpha$  は垂直上方を始点とする。

$I=1, 2$  では羽根の影響が少なく、分布はほぼ水平である。  $I=3, 4, 5$  では羽根の影響を受けていることがわかる。ただし、ピーク点 ( $C_p$  最大の点) の右側は圧力面、左側は負圧面である。半径方向には、遠心力

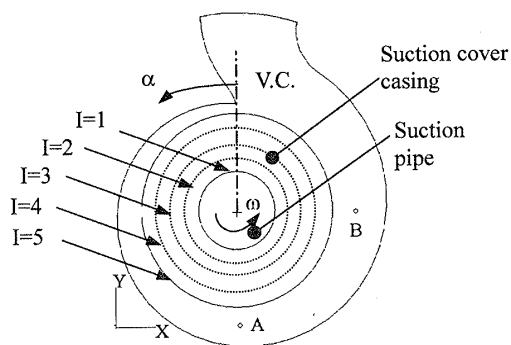
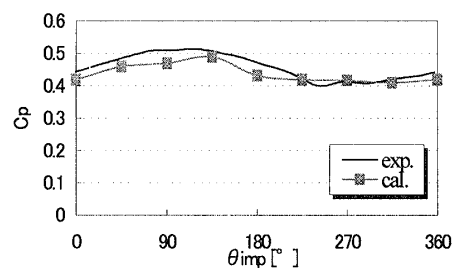
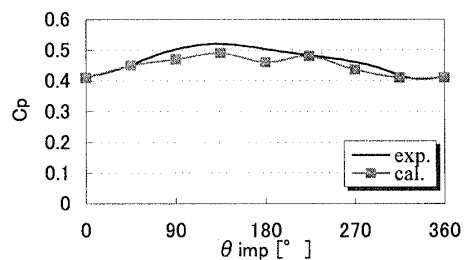


Fig. 9 Location of monitor points



(a) Point A



(b) Point B

Fig. 10 Measured and predicted Pressure distributions in the volute casing

の働きによって、  $C_p$  はポンプ吸込側から吐出し側へと滑らかに上昇していることがわかる。

4・6 ケーシング内の圧力分布 実験結果<sup>(11)</sup>と比較するために、図9に示されるねじ形遠心ポンプのポリュートケーシング部壁面上のモニタ点 A, B 上における、羽根車一回転につき得られた圧力変動を図10に示す。

ポリュートケーシング部においては、実験と計算結果は比較的良好に一致していることがわかる。また、羽根車一回転につき圧力変動のピークが1回表れている。これは、本研究で使用しているポンプが一枚羽根である影響がポリュート中央にまで及んでいることを意味しており、ねじ形羽根車をもつ遠心ポンプの特徴であるといえる。実験と計算は比較的一致しているため、本計算手法は、ねじ形遠心ポンプの特徴をうまくとらえていると考えられる。

## 5. 結 言

有限体積法に基づいて、ポリュートケーシング部の影響を考慮したねじ形遠心ポンプ全体の三次元乱流解析を行い、以下のことがわかった。

(1) 回転部の羽根車と静止部のポリュートケーシングの干渉を考慮に入れたねじ形遠心ポンプの解析においては、データの受渡しを2way方式で行うことにより、二次流れもとらえることができた。

(2) 羽根車の位相が違う場合のポリュートケーシング内の流れ場を解析し、位相による流れ場の違いがわかった。

(3) 低流量域におけるポンプ内部の舌部からの再循環流れを、本研究の数値解析コードにおいても確認した。

(4) 実験結果と解析結果の比較から、本解析コードにおいてはポリュートケーシング部内の圧力分布がよくとらえられていることを示した。

本研究より、複雑な形状をもつねじ形遠心ポンプ内の流れ場が予測可能となった。

本研究の遂行にあたり、平成8年度原田記念財団の

援助を受けた。ここに記して謝意を表する。

## 文 献

- (1) 峯村吉泰・ほか3名, 機論, 55-520, B(1989), 3636-3642.
- (2) 松井良雄・ほか2名, 機論, 58-547, B(1992), 791-798.
- (3) Matsuo S., Tanaka K., Nishijima K. and Kawabata N., Proc. JSME Centenn. Grand Congr. Int. Conf. Fluid Eng., (1997), 1759-1764.
- (4) Han, H., Tanaka, K., Kawabata, N., Taniguchi, N. and Kobayashi, T., Proc. 3rd Int. Conf. Pumps Fans, (1998), 381-392.
- (5) Tanaka, K., Yamada, I., Noma, H. and Kojo, M., Proc. JSME Centenn. Grand Congr. Int. Conf. Fluid Eng., (1997), 461-466.
- (6) Riedelbauch, S., ほか2名, Hydraul. Mach. Cav., (1996), 238-247.
- (7) Kobayashi, T., Taniguchi, N. and Tasaka, T., Proc. 8th Int. Pacific Conf. Autom. Eng., (1995), 317-321.
- (8) Launder, B. E. and Spalding, D. B., Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 3 (1974), 269-289.
- (9) Patankar, S. V. and Spalding, D. B., Int. J. Heat Mass Transf., 15 (1972), 1787-1806.
- (10) Douglas, J., Jr., Numerische Mathematik, 4 (1962), 41-63.
- (11) Kim, Y. T., Tanaka, K. and Matsumoto, Y., Proc. 3rd ASME-JSME Joint Fluids Eng. Conf., (1999), FEDSM 99-7207.