Jグループによるインデューサに生じる 旋回キャビテーションの抑制*

藤井 明^{*1}, 内海 政春^{*2}
黒川 淳一^{*3}, 辻本 良信^{*4}

Suppression of Rotating Cavitation in an Inducer by J-Groove

Akira FUJII^{*5}, Masaharu UCHIUMI,
Junichi KUROKAWA and Yoshinobu TSUJIMOTO

^{*5} Graduate School Engineering Science, Division of Mechanical Engineering, Osaka University,
1-3 Machikaneyama, Toyonaka-shi, Osaka, 560-8531 Japan

Shallow grooves "J-groove" formed on a casing wall can suppress the several anomalous phenomena in turbomachineries. In the present study, J-groove was applied to an inducer to suppress the rotating cavitation. Through the experiments under various conditions with and without J-groove, it was clarified that rotating cavitation can be almost suppressed by using J-groove. However, it was found that cavitation surge occurs at relatively high cavitation number. Flow field and cavity at tip were examined to clarify the effect of J-groove on the flow in an inducer.

Key Words: Inducer, Rotating Cavitation, Pre-Rotation, Performance Curve

1. 緒言

インデューサには旋回キャビテーションやキャビテーションサージなどの不安定現象がしばしば発生する⁽¹⁾⁽²⁾。これらの不安定現象は軸振動や翼の応力変動の原因となるため、その特性について多くの研究がなされている⁽³⁾⁽⁴⁾。また、これらの不安定現象の抑制方法がいくつか提案されており、実用化されているものもある⁽⁵⁾が、抑制機構が明確でないものや、完全には防止できないものが多い。そのため、抑制機構が明確であり、不安定現象を完全に抑制できる方法の開発が望まれる。

一方、斜流ポンプや軸流ポンプなどでは、低流量の場合に揚程が急低下して揚程曲線が右上がりとなり、サージや旋回失速などの不安定現象が発生することがある。黒川ら⁽⁶⁾はこの揚程曲線の右上がり領域を、入口ケーシングにJグループと呼ばれる浅い溝を主流圧力勾配の方向に設けることで抑制するこ

とに成功している。この方法は、損失の低下も少ないうえ、複雑な装置を取り付けることなく不安定を抑制できる利点がある。揚程曲線の右上がり勾配の抑制機構は、特に揚程が急低下するような低流量において、Jグループにより逆流の旋回成分を低減させ、それにより理論揚程を増加させるというものである。旋回キャビテーションの発生と揚程曲線の特性には直接的な関係はないが、旋回キャビテーションの発生と入口逆流との間には密接な関係があると考えられている⁽⁷⁾。そのため、インデューサの入口ケーシングにJグループを設けて入口流れを変化させることで旋回キャビテーションの発生が抑制される可能性がある。

本研究では、インデューサ入口のケーシングにJグループを設けて広範囲な条件で実験を行い、旋回キャビテーションの発生範囲の変化を調べた。また、Jグループを設けた場合のキャビティの発生状況や上流の流れ場などについても詳細に調べた。

2. 記号

D : インデューサ直径
 f : 変動周波数
 f_c : キャビテーションサージによる
変動周波数

* 原稿受付 2004年12月21日。

^{*1} 正員、日本学術振興会特別研究員、大阪大学大学院基礎工学研究科(☎560-8531 豊中市待兼山町1-3)。

^{*2} 宇宙航空研究開発機構(☎981-1526 角田市神次郎字高久蔵1)。

^{*3} 正員、フェロー、横浜国立大学大学院工学研究院(☎240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)。

^{*4} 正員、フェロー、大阪大学大学院基礎工学研究科。

E-mail: tujimoto@me.es.osaka-u.ac.jp

Fig. 1 Test facility

Fig. 2 Sketch of test inducer

- f_n : 軸回転周波数
 h : 翼端でのスペーシング(図2参照) $=\pi D/3$
 l : 翼端でのキャビティ長さ
 p_1 : 入口圧力
 p_u : 入口全圧
 p_2 : 出口圧力
 p_v : 飽和蒸気圧
 Δp : 圧力変動(片振幅)
 r : 半径方向位置
 R : インデューサ半径
 U_t : 翼端周速度 $=\pi D f_n$
 u_z : 軸方向流速
 u_θ : 周方向流速
 v_1 : インデューサ入口平均軸方向流速
 $= \text{流量}/\text{入口面積}$
 z : 軸方向位置(インデューサ翼端での前縁位置で $z=0$)

Table 1 Principal dimensions of test inducer

Number of blades	3
Tip diameter, D (mm)	149.8
Inlet tip blade angle, β_{i1}	7.5 deg.
Outlet tip blade angle, β_{i2}	9.0 deg.
Hub/tip ratio at inlet	0.25
Hub/tip ratio at outlet	0.51
Solidity at tip	1.91
Radial tip clearance, (mm)	0.5
Design flow coefficient, ϕ_d	0.078

- β : 羽根角度 (β_{i1} : 翼端羽根入口角,
 β_{i2} : 翼端羽根出口角)
 ρ : 流体の密度
 σ : キャビテーション数 $=(p_1-p_v)/(\rho U_t^2/2)$
 ϕ : 流量係数 $=v_1/U_t$
 ϕ_d : 設計流量係数
 ϕ_s : 静圧係数 $=(p_2-p_1)/(\rho U_t^2)$
 ϕ_u : 圧力係数 $=(p_2-p_v)/(\rho U_t^2)$
 $\Delta \phi$: 変動圧力係数 $=\Delta p/(\rho U_t^2)$

3. 実験装置及び実験方法

3.1. 実験装置及び供試インデューサ 図1に本研究で用いたキャビテーションタンネルを示す。このタンネルは閉ループであり、インデューサ上流にあるタンク上部の空気の圧力を調整することでキャビテーション数を調整する。また、作動流体は水であり、約 5 kPa まで圧力を下げた状態で 1 日保持して脱気した後実験を行った。

実験に用いたインデューサの形状及びその緒元をそれぞれ図2、表1に示す。インデューサの直径は 149.8mm、翼枚数は 3 枚、翼端部のソリディティは 1.91 であり、設計流量係数は $\phi_d = 0.078$ である。翼端での羽根入口角 β_{i1} 、出口角 β_{i2} はそれぞれ 7.5 度、9.0 度であり、半径方向の羽根角の分布 $\beta(r)$ は、 $r \times \tan(\beta) = R \times \tan(\beta_i)$ のヘリカル条件を満足している。また、前縁は後退角 95.5 度の後退スウィープ形状となっている。

J グループは、図3に示すようにインデューサ翼端での前縁を挟んで、軸方向長さ 40mm、幅 10mm、深さ 3mm の軸方向溝 32 本を、周方向に等間隔に設けた。図中に示すように、翼端半径隙間は 0.5mm である。また、比較のためにケーシングに J グループを設けない場合の実験も行ったが、この場合の翼端隙間も 0.5mm である。

3.2. 実験方法 図3に示すように、インデューサ上流 44mm ($z/D = -0.294$) のケーシング壁面にフラッシュマウントに 90 度間隔に取り付けた

Fig. 3 Inducer cross section and J-Groove

Fig. 4 Performance curves of test inducer with and without J-groove in non-cavitating condition (1500 rpm)

4 個の圧力センサにより、インデューサ入口での圧力変動を計測した。この信号をキャビテーション数と共にデータレコーダに記録して分析することで、インデューサに発生している非定常キャビテーションの種類を調べた。また、J グループを設けない場合には、インデューサの 3 枚の翼それぞれの翼前縁付根付近の圧力面に、翼の曲げ応力を検出する方向にひずみゲージを貼付することで、翼応力変動も計測している。

インデューサ付近のケーシングは、可視化観察や L. D. V. による流速計測が可能な透明アクリル製である。

(a) Without J-groove⁽¹⁰⁾

(b) With J-groove

Fig. 5 Spectra of inlet pressure fluctuation with and without J-groove, for $\phi=0.078$, 3000 rpm

4. 実験結果

4.1 圧力特性 図 4 に、本研究で用いたインデューサの、キャビテーションの発生がない場合 (1500rpm) の圧力特性を示す。特に、流量が少ない場合に、J グループを設けた場合の圧力係数が、J グループを設けない場合よりも高くなっている。

J グループを設けた場合には、特に低流量の場合に、J グループ内部に下流側から上流側への強い逆行流れが生じる。この流れは J グループの方向に沿ったものであるから、旋回成分をほとんど持たない。この逆行流れが入口逆流と混合する際に、入口逆流の旋回成分を低減させて理論揚程を増加させる。これが J グループによる揚程上昇の機構である⁹⁾。本研究においても、入口逆流が大きく発達する低流量

Fig. 6 Phase differences of various types of oscillations without J-groove, for $\phi=0.078, 3000\text{rpm}$

の場合に、J グループを設けることで圧力係数が増加している。但し、このインデューサでは設計流量 ($\phi=0.078$) 付近では逆流があまり発達していないため、両者に大きな違いは見られない。

4.2 非定常キャビテーションの発生範囲

図 5 に J グループを設けない場合と設けた場合の、設計流量 ($\phi=0.078$) での入口圧力変動のスペクトルを示す (実験回転数 3000 回転, 軸回転周波数 $f_n=50\text{Hz}$)。これらの図中において横軸は周波数 f 、高さは圧力変動の振幅 $\Delta\psi$ 、奥行きはキャビテーション数 σ を表している。図 5 (a) に示した J グループを設けない場合⁽¹⁰⁾のスペクトルからは、 $\sigma < 0.040$ において 3 枚の翼に大きさの違うキャビティが安定に生じる非対称キャビテーションによる変動成分 (50Hz) が確認できる。また、 $0.040 < \sigma < 0.060$ では、周方向に不均一な圧力場が軸回転よりも速く旋回する旋回キャビテーションによる変動成分 (約 60Hz) が、 $0.060 < \sigma < 0.080$ では高次の旋回キャビテーション (約 245Hz)、高次のキャビテーションサージ⁽¹¹⁾ (約 240Hz) といった高次のキャビテーション不安定⁽¹²⁾による変動成分が確認できる。これらの不安定現象の同定は、高速ビデオによる撮影画像の解析や不安定現象によって生じる翼応力変動の翼ごとの位相差を調べることにより行った。

これに対して図 5 (b) に示した J グループを設けた場合には、比較的高いキャビテーション数 ($0.078 < \sigma < 0.095$) でキャビテーションサージによる変動成分 (約 12Hz) が確認できる。しかし、それより低いキャビテーション数では翼通過周波数 ($3 \times f_n$) 以外には卓越した周波数成分はなく、旋回キャビテーションなどの不安定現象は抑制されていることが分かる。なお、これらの不安定モードの同

(a) Without J-groove

(b) With J-groove

Fig. 7 Spectra of inlet pressure fluctuation with and without J-groove, for $\phi=0.060, 3000\text{rpm}$

定は、周方向 4 箇所計測した入口圧力変動の位相差を調べることや、高速ビデオによる撮影画像の解析などにより行った。また、J グループを設けない場合については、不安定現象によって生じる翼応力変動の翼ごとの位相差についても確認した。

図 6 に、低流量 ($\phi=0.060$) の場合の入口圧力変動のスペクトルを示す。J グループを設けない場合 (図 6 (a)) には、旋回キャビテーションが広いキャビテーション数範囲で発生しているが、J グループを設けた場合 (図 6 (b)) には、旋回キャビテーションの発生が完全に抑制されている。また、

(a) Without J-groove

(b) With J-groove

Fig. 8 Spectra of inlet pressure fluctuation with and without J-groove, for $\phi=0.088$, 3000 rpm

設計流量 ($\phi=0.078$) で発生した様なキャビテーションサージ (図 5 (b) 参照) も発生していない。

図 7 に, 高流量 ($\phi=0.088$) の場合の入口圧力変動のスペクトルを示す. 高流量では, J グループを設けた場合にも旋回キャビテーションが発生していることが分かる. しかし, その発生範囲は図 7 (a) に示した J グループを設けない場合に比べて非常に小さい. また, 設計流量と同様, 比較的高いキャビテーション数でキャビテーションサージが発生している。

同様の実験を様々な流量係数に対して行った. その結果得られた非定常キャビテーションの発生範囲を, 図 8 の吸込み性能曲線上に示す. これより, J グループを設けた場合には, 比較的高いキャビテーション数でキャビテーションサージが発生していることが分かる. しかし, J グループを設けない場合において広範囲に渡って発生していた旋回キャビテーションや非対称キャビテーションは, J グループを設けることで, ほとんど抑制された。

(a) Without J-groove

(b) With J-groove

Fig. 9 Suction performances for various flow coefficient showing with occurrence regions of unsteady cavitation for 3000 rpm

J グループを設けた場合に生じたキャビテーションサージの特性を調べるために, 様々な軸回転数で実験を行った. その結果得られたキャビテーションサージの変動周波数の, 軸回転周波数に対する変化を図 9 に示す. これより, キャビテーションサージの周波数はおおむね軸回転周波数に比例している. これは通常観察されるキャビテーションサージの特徴の一つである⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾. 通常このような高いキャビテーション数ではキャビテーションサージは発生しないが, J グループを設けることでキャビテーションの発生形態が変化し, 通常より高いキャビテーション数で発生したものと考えられる。

Imamura ら⁽¹⁵⁾は, 入口ケーシング壁面に J グループを設けることでインデューサの吸込み性能が向上

Fig.10 Effect of shaft rotational frequency on frequency of cavitation surge with J-groove

することを明らかにしている。しかし本研究では、実験における最低キャビテーション数 ($\sigma \approx 0.025$) であっても、図 8 から分かるようにキャビテーションによる揚程低下が起こらないため、吸込性能の比較は行えなかった。

4.3 J グループによるインデューサ上流の流れ場とキャビティの変化

図 10 に、J グループを設けた場合と設けない場合での翼端での平均キャビティ長さ（翼前縁からキャビティ後縁までの翼弦方向長さ）を示す。旋回キャビテーションなどの非定常キャビテーションが発生している場合にはキャビティ長さの振幅値も示している（非対称キャビテーションの場合は最大キャビティ長さとし最小キャビティ長さを示している）。これより、J グループを設けた場合の方が、設けない場合よりもキャビティが長いことが分かる。但し、図 11(b) に示すように J グループを設けた場合にはグループ内部にもキャビティが生じており、翼端付近ではこのキャビティと翼端漏れ渦キャビテーションが混在しているが、翼前縁からこのようなキャビティが消滅している位置までの翼弦方向長さをキャビティ長さとして図 10 に示している（J グループを設けない場合には、翼端からの流れと翼間流れとの間の剪断流中のできるキャビテーションの長さを示している）。J グループを設けた場合には、強い漏れ流れによって J グループを設けない場合よりも強い翼端漏れ渦キャビテーションが発生することや、グループ内にキャビテーションが発生することによりキャビティ長さが長くなったものと考えられる。このように J グループを設けた場合と設けない場合でキャビティの形態は大きく異なるが、いずれの場合においてもキャビティ長さと翼スペーシングの比 l/h が 1 よりも少し小

(a) $\phi=0.060$

(b) $\phi=0.078$

(c) $\phi=0.088$

Fig. 11 Cavity length at tip for 3000rpm

さい場合に旋回キャビテーションやキャビテーションサージが発生し始めている。このように、キャビティの形態が大きく異なっている場合でも、不安定現象の発生は、翼端付近のキャビティ長さによって決定されるようである⁽¹⁹⁾。

図 12 に、インデューサ上流 44mm ($z/D = -0.294$, 図 3 参照) で計測した、低流量 ($\phi=0.060$) の場合の流速分布を示す。J グループを設けた場合の流速は L. D. V. で計測し、図 12 中の各計測位置で 1000 点のデータを取得してその平均値を示している。また、J グループを設けない場合のデータは前川⁽¹⁷⁾によって、3 孔ピトー管によって取得されたものであ

(a) Without J-groove
(Under rotating cavitation) (b) With J-groove

Fig. 12 Cavity shapes at tip, for $\sigma=0.050$, $\phi=0.078$, 3000 rpm

(a) Axial velocity

(b) Tangential velocity

Fig. 13 Velocity distributions at inducer inlet ($z/D=-0.294$) in non-cavitating condition, for $\phi=0.060$, 2000 rpm

る。なお、これらのデータはキャビテーションの発生がない場合のものである（軸回転数 2000rpm）。これより、低流量（ $\phi=0.060$ ）の場合には今回計測した軸方向位置（ $z/D=-0.294$ ）では、J グループを設けない場合には $r/R > 0.8$ の領域で逆流が生じているが、J グループを設けることで逆流が抑制されていることが分かる。また、J グループを設けない場合には周方向流速が見られるが、J グループを設けた場合にはほとんど 0 となっており、予旋回が抑制されていることが分かる。斜流ポンプや軸流ポンプに対して J グループを設けた場合には、揚程が急低下するような低流量において予旋回を防止するこ

(a) Without J-groove ($\sigma=0.030$)

(b) With J-groove ($\sigma=0.180$)

Fig. 14 Vortex structures at inducer inlet, for $\phi=0.060$, 3000rpm

とで理論揚程を増加させ、揚程曲線の右上がり勾配が抑制されている⁽⁷⁾⁽¹⁸⁾。インデューサに生じる旋回キャビテーションなどの不安定現象はキャビテーションの非定常特性にその発生原因がある⁽¹³⁾⁽¹⁹⁾ので、本研究では J グループによって予旋回を抑制することでインデューサ入口のキャビティの発生形態や非定常特性が変化し、その結果旋回キャビテーションの発生が抑制されたものと考えられる。

J グループによる旋回キャビテーションの抑制効果が大きい低流量（ $\phi=0.060$ ）の場合のキャビテーション発生状況を図 13 に示す。図 12 から分かるように J グループを設けない場合では逆流が発達しており、非常に強い旋回成分を持つ逆流と、旋回成分を持たない主流との間に、主に軸方向の渦度を持つ速度剪断層が生じる。この渦層が巻きあがって主に軸方向の強い渦（逆流渦）が周方向にいくつか生じ、軸回転と同方向に旋回することが知られている⁽⁹⁾。キャビテーション数が低い場合には、図 11(a),

(a) Without J-Groove

(b) With J-Groove

Fig. 15 Schematics of vortex structures at inducer inlet

図 13(a)に示すようにその渦芯にキャビティが生じる。これに対して J グループを設けた場合では、図 12 から分かるように逆流および予旋回が抑制されているため逆流渦は発生しない。しかし図 13 (b)に示すようにインデューサ入口には、環状の渦構造が確認できる。J グループを設けた場合には入口逆流はあまり上流まで発達しないが、グループ内部には旋回成分を持たない強い逆行流れが生じている。このため、J グループを設けた場合にはこの逆行流れと主流との間に周方向の渦度を持つ一つの環状の渦が形成されているようである。キャビテーション数が低い場合には、その渦芯を中心としてキャビテーションが発生し、安定な環状のキャビティがインデューサ上流に形成される。図 14 に、J グループを設けない場合と設けた場合でのインデューサ入口での渦構造の相違を模式的に示す。図 11(a)、図 13(a)に見られるように J グループを設けない場合には翼端からの流れの剪断流中にキャビテーション

(a) Without J-groove

(b) With J-groove

Fig. 16 Cavity on pressure side in the case with J-groove, for $\phi=0.078$, $\sigma=0.120$, 3000 rpm

(剪断渦キャビテーション)が発生するが、図 11(b)、図 13(b)に示されるように J グループを設けた場合には翼端流れ渦が巻きあがって生じる渦芯にキャビテーションが見られる(翼端流れ渦キャビテーション)。この流れ渦キャビテーションは図 13(b)に見られるように翼前縁から発生し上流に向かうが、環状渦がある軸方向位置に達すると周方向に方向を変えている。図 13(b)より分かるように前縁に近い位置では、翼端流れ渦と入口に生じた環状渦とは明確に区別できる。

図 11(b)は設計流量 ($\phi=0.078$) の場合においても、インデューサ入口で環状に近いキャビテーションが形成されていることを示唆している。図 10 に示したキャビティ長さから分かるように、図 11(b)のような環状のキャビティが形成される直前 ($lh \approx 0.8$) において不安定現象が発生するが、それよりもキャビテーション数が低下して環状のキャビティが形成されると、流れが安定になり不安定現象が発生しないことが分かる。高流量 ($\phi=0.088$) の場合には、環状の渦中のキャビテーションの体積が小さく、あまり明確には確認できない。これは、高流量ではグループ内の逆行流れが弱く、環状の渦が弱いためと考えられる。このために、高流量の場合には旋回キャビテーションの抑制効果が小さいと考えられる。

図 15 に、設計流量 ($\phi=0.078$) で、キャビテーション数 $\sigma=0.120$ の場合の、キャビティ発生状況を示す。図 15 (b) より、J グループを設けた場合には翼圧力面にキャビティが生じていることが分かる。J グループを設けない場合には図 15 (a) に示すように圧力面にキャビティは発生していない。翼端羽根入口角は 7.5 度であるため、設計流量 ($\phi=$

0.078) の場合には翼端での入射角は約 3 度である。

図 13 (b) より分かるように、J グループを設けた場合にはインデューサ入口に強い環状の渦が発達している (図 15(b) ではキャビテーション数が比較的高いため、環状の渦中にキャビティは生じていない)。そのため、この環状の渦よりも半径方向に内側の位置では、その誘起速度により軸方向流速が増加する。これによって、局所的に入射角が減少し (負値となり) 圧力面にキャビティが発生したものと考えられる。また、J グループを設けた場合には設計流量だけでなく、低流量 ($\phi = 0.060$)、高流量 ($\phi = 0.088$) においても、圧力面にキャビティが生じていることが確認された。これに対して J グループを設けない場合には、今回実験を行った全ての条件下で圧力面のキャビティは観察されなかった。

5. 結 言

インデューサに生じる旋回キャビテーションを抑制することを目的として、入口ケーシングに J グループを設けて実験を行った、その結果、以下の結論を得た。

(1) インデューサ入口のケーシングに J グループを設けた場合、比較的高いキャビテーション数でキャビテーションサージが発生するものの、旋回キャビテーションの発生はほぼ抑制された。

(2) J グループを設けることで、インデューサの入口逆流とそれに伴う予旋回が抑制され、特に低流量の場合に揚程が増加する。

(3) J グループを設けない場合には強い旋回を持った逆流と主流との間の速度剪断層が巻きあがって主として軸方向を向いた渦構造が見られるが、J グループを設けた場合には旋回を持たない逆流と主流の間に環状の渦が現れる。低キャビテーション数の場合にはその渦芯を中心としてインデューサ入口に安定な環状のキャビテーションが形成され、不安定現象の発生が抑制される。

本研究では J グループによって旋回キャビテーションの発生はほぼ抑制できたものの、比較的高いキャビテーション数でキャビテーションサージが発生している。不安定現象を完全に抑制できるようにするためには、グループ形状のなどについてさらなる研究が必要である。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、実験に尽力下さった大阪大学の四宮教行君、および実験装置の設計に尽力下さった横浜国立大学の伊藤正博君に感謝する。また、計測装置の使用に便宜を図っていただいた (株) 共和電業の藤田千代和氏に感謝する。本研究の一部には、文部科学省科学研究補助金が用いられている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) Kamijo, K. et al., *Technical Report of National Aerospace Laboratory*, TR-598, (1980).
- (2) Acosta, A. J., *Proceedings of the 2nd Symposium. on Naval Hydrodynamics*, ONR/ACR-38, (1958), pp. 537-557.
- (3) Tsujimoto, Y., et al., *Transactions of ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol. 119, (1997), 775-781.
- (4) Young, W. E., *NASA CR-123939* (1972).
- (5) Goirand, B. et al., *IMEchE*, C453-056(1992), pp. 263-269.
- (6) Kamijo, K., Yoshida, M., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.57, No.544(1991), pp. 4023-4028.
- (7) Kurokawa, J. et al., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.66, No. 642(2000), pp. 460-467.
- (8) Fujii, A., et al., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.70, No. 694(2004), pp. 1459-1466.
- (9) Kurahara, K., et al., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.64, No.622(1998), pp.1667-1674.
- (10) Azuma, S., Yoshida, Y., Tsujimoto, Y., *Turbomachinery*, Vol.29, No.3(2001), pp. 147-154.
- (11) Motoi, H. et al., *Proceedings of the 45th Meeting of Turbomachinery Society of Japan* (2000), pp. 118-123.
- (12) Fujii, A., et al., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.68, No.669(2002), pp. 1466-1473.
- (13) Tsujimoto, Y., Kamijo, K., Brennen, C. E., *AIJA Journal of Propulsion and Power*, Vol.17, No.3 (2001), pp. 636-643.
- (14) Brennen, C. E., *Hydrodynamics of Pumps*, (1994), pp. 192, Concepts ETI and Oxford Science Pub.
- (15) Imamura, H. et al., *Proceedings of the 5th International Symposium on Cavitation, Cav03-OS-4-006*, (2003)
- (16) Watanabe, S. et al., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.64, No.622(1998), pp. 1675-1682.
- (17) Mackawa, Y., *Osaka University, Engineering Science, Master's Thesis* (1996)
- (18) Nagahara, T., *Turbomachinery*, Vol.31, No.10(2003) pp. 614-622.
- (19) Tsujimoto, Y., Kamijo, K., Yoshida, Y., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.58, No. 551(1992), pp. 2052-2059.