

遠心ポンプキャビテーションの実験と流れ解析

能 見 基 彦^{*} 後 藤 彰^{**} 勝 俣 辰 善^{**}
伊 賀 由 佳^{**} 井小萩 利 明^{***}

Experiment and CFD of Cavitation in a Centrifugal Pump

by Motohiko NOHMI, Akira GOTO, Tatsuyoshi KATSUMATA, Yuka IGA, & Toshiaki IKOHAGI

The cavitation flow in a low specific speed centrifugal pump was measured in detail. Pressure transducers were installed in impeller vanes and unsteady pressure distribution over the pressure and suction sides was studied. Cavitation characteristics were photographed along the axial direction in the inlet volute casing and front shroud. Cavitation flow in the pump was numerically analyzed using a locally homogeneous cavitation model of a compressible air-vapor-liquid, two-phase medium. Under a BEP (Best Efficiency Point) flow rate, bubble cavitation increased along the suction side when decreasing the *NPSH*. When this bubble cavitation reached the throat, a wedge-like cavity appeared at the pressure side and a steep head breakdown occurred. This breakdown was found to be reasonably predictable by using cavitation CFD.

Keywords: Centrifugal pump, Cavitation breakdown, Pressure measurement, Cavitation CFD, Cavitation modeling

1. はじめに

1990年代の前半に、各企業においてターボ機械の設計業務に圧縮性・非圧縮性3次元乱流CFDが導入され始めた。当時は単相流主体であり、複雑な混相流の数値解析を設計レベルで使用するのには困難であった。各種の混相流のなかでもポンプ設計開発で最も解析の需要が大きいと考えられるのはキャビテーションである。キャビテーションは、基本の現象である気泡の発生消滅の時間空間スケールと、設計者が扱う装置（ポンプや水車）の時間空間スケールが極端に異なり、更に相変化が含まれるため、適切なモデル化を行わないと現状のコンピュータの能力でも解析が不可能である。このためキャビテーションモデルと呼ばれる各種の簡略化モデルが提唱・開発され、これを用いたキャビテーションの流れ解析が進展し、近年では水力機械の内部流れにも適用されつつある。特に1990年代の終わり頃から各種のキャビテーシ

ョンモデルが、市販流れ解析コードにも導入されるようになり、ユーザは容易にキャビテーション解析を実施できる時代が到来した。しかしながら解析精度を検証する詳細実験データは少ないのが現状である。市販コードの検証に広く用いられているのはShenとDimotakisの実験結果である¹⁾。キャビテーショントンネル内の二次元翼型周りの静圧分布を計測したものであり優れた研究であるが、圧力面の測定孔が一つしかなく、圧力面の静圧分布の解析精度検証が困難である。近年ではDreiとKosyna, FriedrichsとKosynaが詳細な計測を行っている^{2,3)}。彼らは、遠心ポンプの羽根にピエゾ抵抗効果を用いた圧力変換器を埋め込み、キャビテーション状態の翼面静圧分布を計測している。筆者等は彼らの実験装置を参考とし、キャビテーション流れ解析の検証のために遠心ポンプ実験装置を製作した。これを用い正確な予測が要求されるポンプの揚程低下現象に対し、キャビテーション流れ場の詳細計測と観察を行い、流れ解析の検証用データを取得した。また、諺荏原総合研究所と東北大学の共同研究で開発したキャビテーションモデルを用いたキャビテーション流れ解析の検証も実施した。

* 諺荏原総合研究所 機械研究室 工学博士
** 同 研究企画統括室 工学博士
** 同 機械研究室
*** 東北大学 流体科学研究所 工学博士 助手
*** 同 同 所長 工学博士 教授

2. 実験装置

実験装置は、3枚の2次元羽根をもつ比速度 180 (m, m³/min, min⁻¹) の遠心ポンプである⁴⁾。羽根車諸元を表1に、ポンプの断面構造図を図1に示す。ポンプの入口形状はポリュートに、出口形状はコレクタになっている。羽根車側板と入口ポリュート壁面を全面アクリル平板とすることで、羽根車前縁から後縁まで入口軸方向から容易に目視できる構造である。本実験装置において、ポンプ流路内のキャピテーションはハイスピードビデオ (PHOTORON ultima RGB3) とデジタルスチルカメラで撮影する。本実験の撮影速度は毎秒4500コマである。羽根車には小形圧力変換器とアンプが装備され、シリコンオイルが封入された入口径0.5 mmの受圧孔から圧力面8点、負圧面10点の非定常圧を同時計測する。

表1 ポンプ羽根車の諸元
Table 1 Design of impeller

羽根入口径 Impeller inlet radius	mm	91
羽根出口径 Impeller outlet radius	mm	174
羽根流路幅 Span width	mm	18
羽根入口角 Inlet blade angle	deg	8
羽根出口角 Outlet blade angle	deg	10
羽根枚数 Number of blades		3

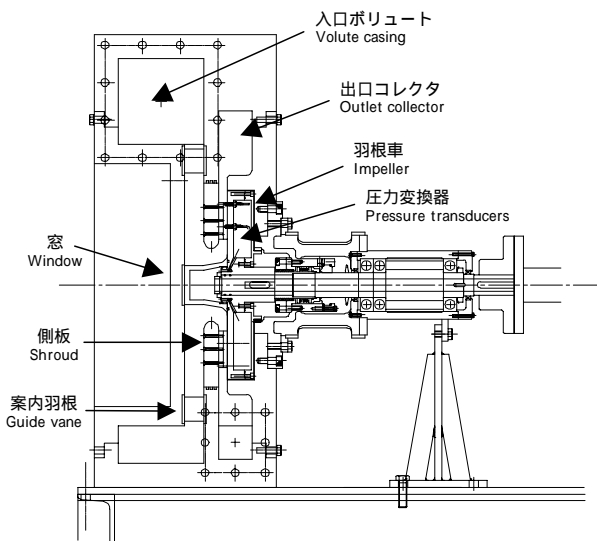


図1 ポンプの断面構造図
Fig. 1 Pump cross section

供試ポンプは、ブースタポンプ、流量調節用バルブ、タンク、電磁流量計、冷却装置を有する閉流路に取り付けられる。実験時にはタンクに接続された真空ポンプを動作させ、ポンプ入口のNPSH_{ava}を変えてキャピテーションを発生させる。

3. 数値解析

本研究においては、東北大学 井小萩教授との共同研究で開発したキャピテーションモデル (東北大 - 荏原モデル; 通称 TE モデル) を用いた。本モデルでは計算格子内に存在する有限個の気泡を無数の無限に微細な気泡粒子に近似し、密度 - 圧力の一価関数を仮定する、いわゆるパロトロピー流体のモデル化を行っている。キャピテーション気泡は水蒸気と微量な空気の混合気体からなり、圧力が変化する際に、気泡内の水蒸気分圧が常にその温度における飽和蒸気圧一定になると仮定して相変化を状態方程式中で考慮するのが本モデルの特徴である。その結果、次の状態方程式が導出される⁵⁾。

$$= \frac{(p + p_c)(p - p_v)}{(1 - Y)(p - p_v)K(T + T_0) - Y_v K(T + T_0)R_a T + Y(p + p_c)R_a T} \dots\dots\dots(1)$$

$$= 1 - \frac{(1 - Y - \frac{v}{a} Y)}{w} = \frac{Y}{a} = \frac{w}{w - a - v} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 p は圧力、 ρ は密度、 T は温度、 R は気体定数、添え字の w, a, v はそれぞれ水 (液相)、空気、水蒸気、 p_c, K, T_0 は水単相に成立する Tamman 型状態方程式の定数である。 α は均質媒体中の気体の体積分率 (ポイド率)、 Y は空気の質量分率 (一定値) である。この状態方程式を用い、キャピテーション流れ場を等温の圧縮性流体とみなして解析した。乱流モデルとして標準の $k-\epsilon$ モデルを適用し、定常解法を用いた。数値解析は、汎用 CFD コードの STAR-CD を用い、上記の状態方程式をユーザサブルーチンとして組み込み、SIMPLE 型定常解法を用いた。キャピテーション解析は煩雑であるため本研究では、ポンプの羽根周り流れだけに適用した。別途実施した入口ポリュート内の単相解析から、羽根車部に流入する流れ角を推定し、これをキャピテーション流れの入口境界条件に用いた。解析に用いた計算格子を子午面から見たものを図2に示す。解析の入口境界では流入質量流量と流れ角が、出口境界では一定静圧がそれぞれ規定される。

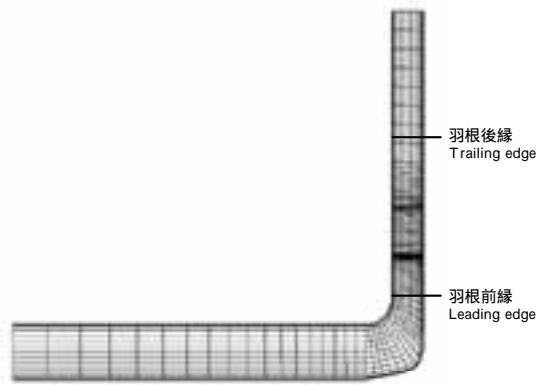


図2 数値解析格子
Fig. 2 Computational grids for impeller CFD

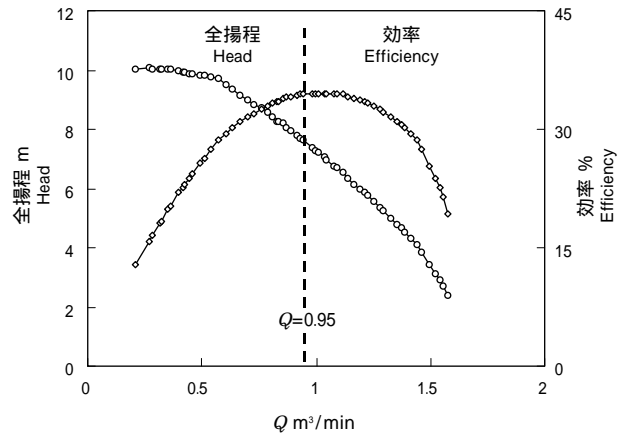


図3 ポンプ全揚程, 効率曲線
Fig. 3 Pump head and efficiency curves

4. 結果と考察

図3に本ポンプの全揚程曲線及び効率曲線を示す。図3から本ポンプの最高効率点流量は約 $Q=0.95 \text{ m}^3/\text{min}$ であることが分かる。キャビテーション流れ解析は、通常非圧縮性解析結果をキャビテーションの発生していない出発点として初期値に用いる。図4は、最高効率点流量 ($Q=0.95 \text{ m}^3/\text{min}$) の非キャビテーション状態での130回転分を時間平均した翼面圧力分布の実験値と非圧縮性解析の計算値を比較したものである。圧力分布から、よどみ点が羽根前縁に位置し、流れは羽根に対しほぼ無衝突で流入していることが分かる。最高効率点流量 $Q=0.95 \text{ m}^3/\text{min}$ 及び大流量 $1.25 \text{ m}^3/\text{min}$ の吸込性能曲線の実験値と計算値を図5に示す。図5から $NPSH$ の低下に応じ、最高効率点流量では全揚程が急しゅん(峻)に低下するが、大流量では、ゆるやかに低下していくことが分かる。図5から $Q=0.95 \text{ m}^3/\text{min}$ の揚程低下点は、流れ解析で、ほぼ妥当に予測されていることが分かる。 $Q=1.25 \text{ m}^3/\text{min}$ の場合、キャビティ内の密度が低下しすぎ計算が不安定となったが、全揚程が漸減する傾向は捉えられたと考える。

写真は実験で得られた、最高効率点流量 $Q=0.95 \text{ m}^3/\text{min}$ 及び大流量 $1.25 \text{ m}^3/\text{min}$ における揚程低下時のキャビテーションの写真である。 $Q=0.95 \text{ m}^3/\text{min}$ ではキャビティは負圧面の中程で発生し、これが下流に伸張しスロートに達すると、反対側の圧力面前縁付近からもくさび状のキャビティが発生し、揚程が急低下する。 $Q=1.25 \text{ m}^3/\text{min}$ では負の迎角となるため、圧力面の前縁下流(スロート部)が最低圧となる。キャビティもここから発生し、キャビティが成長するにつれ、全揚程は漸減する。スロート部圧力面側のキャビティが更に成長す

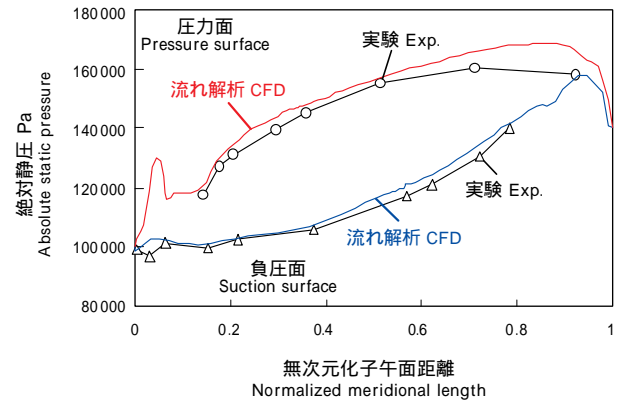


図4 最高効率点の翼面圧力分布 (非キャビテーション状態)
Fig. 4 Pressure distribution over blade surface at BEP point (Non cavitation)

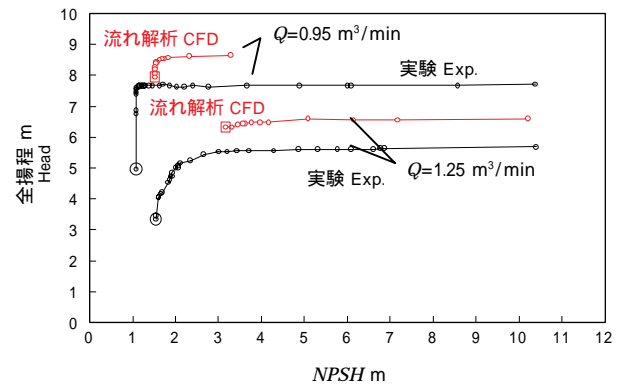


図5 吸込性能曲線の実験値と計算値
Fig. 5 Measured and computed suction performance curves

ると、くさび形の定在する気膜となる。この時、反対側の負圧面にもバブルキャビテーションが生じる。

図6は流れ解析の等ボイド率面表示で示したキャビテーションの発生状況は流れ解析の等ボイド率面表示で良

く表されている。負圧面のキャビティの後縁には密度の不連続があり、急峻に二相状態から単相の水に変化している（図6中の矢印）。また図6には羽根前縁のやや上流で流路の中程、チップ側に著しい低ボイド率の領域が生じている。これは側板の子午面上での曲がりの影響、及

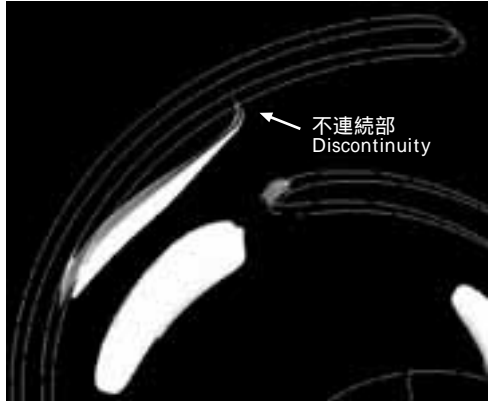
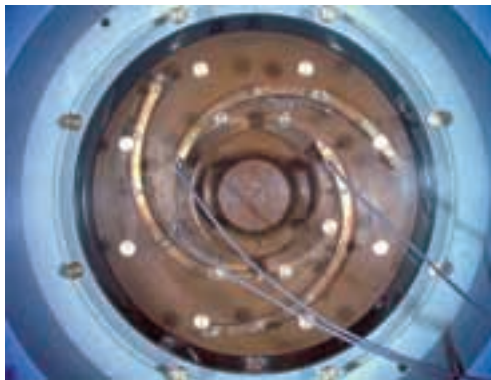
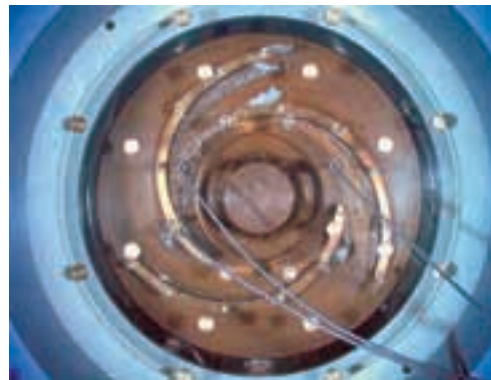


図6 流れ解析によるボイド率等値面, $Q=0.95 \text{ m}^3/\text{min}$, $NPSH=1.505 \text{ m}$, $\alpha=30\%$
 Fig. 6 Computed void fraction contour, $Q=0.95 \text{ m}^3/\text{min}$, $NPSH=1.505 \text{ m}$, $\alpha=30\%$

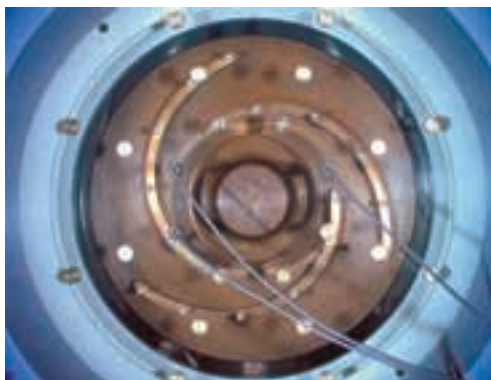
び翼列によって誘起される圧力場の相互作用により生じる低圧部に対応する。このような領域での気泡は実験でも観察される。余談であるが、この位置での気泡の発生は当社の先達の南らにより、早くも1959年に観察・報告されていることを付記しておく⁶⁾。図7は $Q=0.95 \text{ m}^3/\text{min}$ における揚程低下時の翼面圧力分布の時間平均実験値と計算値の比較である。図7(a)から、 $NPSH$ を低下させると負圧面側の分布は後縁側から平坦になっていき、圧力面側の分布は前縁側からへこんでいく。図7(b)の計算値では、図6の不連続部に対応し、負圧面の圧力分布が平坦にならず不連続（図中の矢印）が生じている。このような不連続は前述のShenらの実験値でも認められ、いわゆるキャビティの後縁部に相当すると考えられる。図7(a)では、負圧面の測定点数の不足と、時間平均処理が急峻な分布を鈍らせる影響で観察できていないものと推察している。図8は $Q=0.95 \text{ m}^3/\text{min}$ における非キャビテーション時及び揚程低下時の圧力面前縁近辺の流線の計算結果である。図8(b)から、キャビティが生じる圧力面前縁近辺には顕著なく離が生じている⁷⁾。



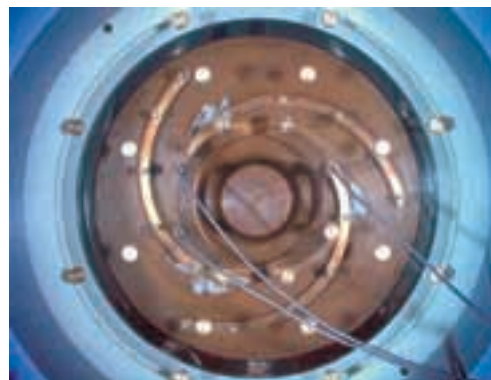
(a) $Q=0.95 \text{ m}^3/\text{min}$ $NPSH=1.081$, $H_{\text{drop}}=3.1\%$



(b) $Q=0.95 \text{ m}^3/\text{min}$ $NPSH=1.075$, $H_{\text{drop}}=36\%$



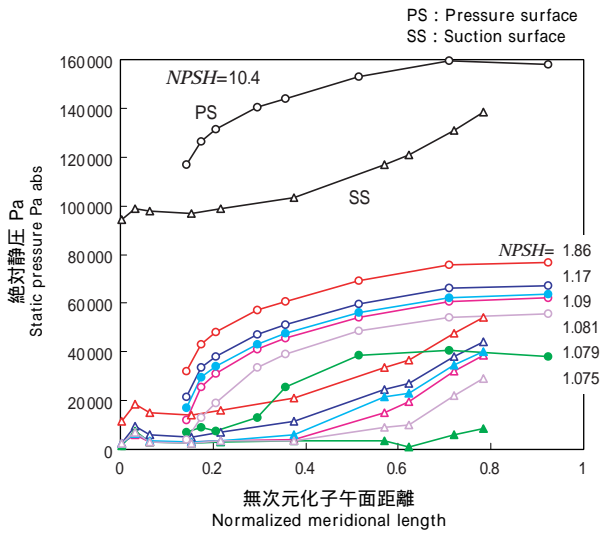
(c) $Q=1.25 \text{ m}^3/\text{min}$ $NPSH=2.67$, $H_{\text{drop}}=3.7\%$



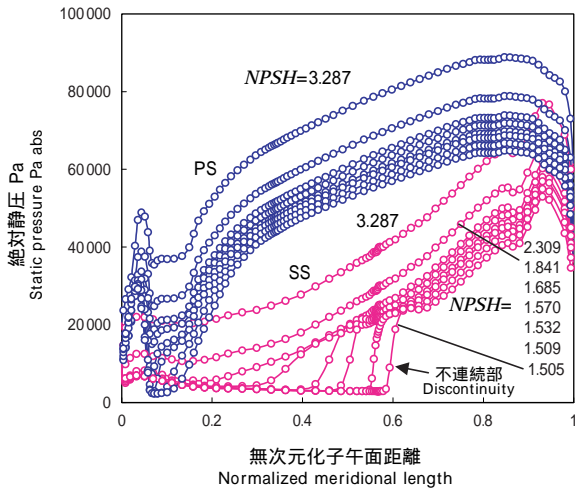
(d) $Q=1.25 \text{ m}^3/\text{min}$ $NPSH=1.53$, $H_{\text{drop}}=41\%$

04-111 01/204

写真 揚程低下時の様相
 Photo Cavitation photographs at head drop



(a) 実験
(a) Experiment



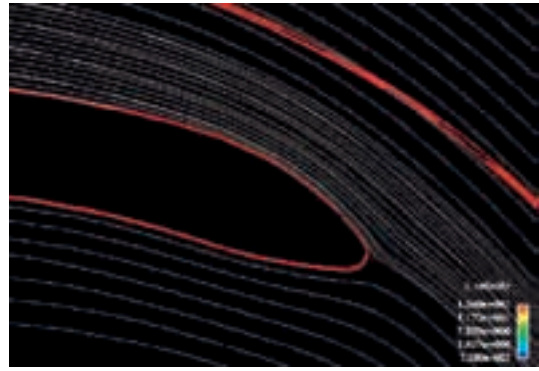
(b) 流れ解析
(b) CFD

図7 揚程低下時の翼面圧力分布, $Q=0.95 \text{ m}^3/\text{min}$

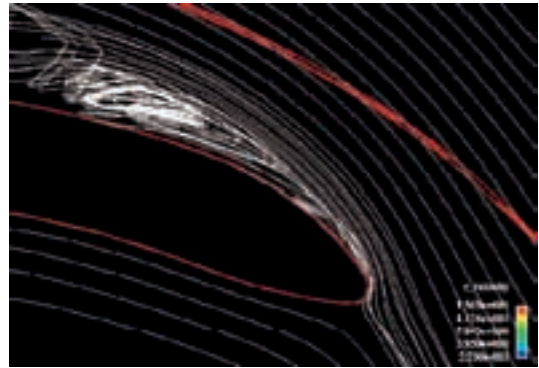
Fig. 7 Measured and computed blade pressure distribution at head drop, $Q=0.95 \text{ m}^3/\text{min}$

5. キャビテーション流れ解析の今後の課題

キャビテーションの流れ解析は未だ完成されたものではなく、更に高精度なキャビテーションモデルの開発や定量的な検証が不可欠である。しかしながら前節に示したように、有意にキャビテーションの物理現象を再現することが可能であり、ポンプの揚程低下の予測にある程度使用できるところまでできている。これを使いこなすには、一機種一運転点での検証にこだわりすぎず、ある程度実験結果とのずれが生じることを考慮しながらも、色々なケースに試すことが重要である。その結果、相対



(a) キャビテーション無しの流れ
(a) Flow without cavitation



(b) 揚程低下時の流れ
(b) Flow at head drop

図8 揚程低下時のはく離の発生, $Q=0.95 \text{ m}^3/\text{min}$
Fig. 8 Separation at head drop, $Q=0.95 \text{ m}^3/\text{min}$

比較の精度に関し十分なノウハウが積み重ねられれば、新設計羽根車の吸込性能の向上度合いが事前に予測でき、試作件数を減らすことが可能となるであろう。

参考文献

- 1) Shen, Y. T., Dimotakis, P. E., "The Influence of Surface Cavitation on Hydrodynamic Forces", Proc. 22nd ATTC, St. Johns, pp44-53 (1989)
- 2) Drei A., Kosyna, G., "Experimental Investigation of Cavitation-States in a Radial Pump Impeller", Proc. JSME CENTENIAL GRAND CONGRESS Intl.Conf. Fluid Eng., pp231-238 (1997)
- 3) Friedrichs, J., Kosyna, G., "Rotating Cavitation in a Centrifugal Pump impeller of Low Specific Speed", Trans ASME, J. Fluids Eng. Vol. 124, pp356-361 (2002)
- 4) Nohmi, M., Goto, A., Iga, Y. and Ikohagi, T., "Experimental and Numerical Study of Cavitation Breakdown in a Centrifugal Pump", Proc FEDSM '03, FEDSM2003-45409 (2003)
- 5) 能見, 後藤, 伊賀, 井小萩, 遠心ポンプのキャビテーション流れ解析, 日本機械学会流体工学部門講演会CD-ROM (2003)
- 6) 南, 川口, 本間, うず巻ポンプのキャビテーションに関する実験, 日本機械学会誌, 62巻, 485号, pp881-889 (1959)
- 7) 能見, 後藤, 伊賀, 井小萩, 江口, 古川, 遠心ポンプキャビテーションの詳細計測とCFD, キャビテーションに関するシンポジウム (第12回), pp139-142 (2004)