



インデューサの入口条件がキャビテーションに及ぼす影響に関する数値解析

メタデータ	言語: jpn 出版者: 宮崎大学工学部 公開日: 2020-10-29 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 韓, 竹, 若松, 祐亮, シン, B., Han, Zhu, Wakamatsu, Yusuke, Shin, B. メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10458/00010068">http://hdl.handle.net/10458/00010068</a>

# インデューサの入口条件がキャビテーションに及ぼす 影響に関する数値解析

韓 竹<sup>a)</sup>・若松 祐亮<sup>a)</sup>・B. シン<sup>b)</sup>

## Numerical Analysis of the Effect of Different Inlet Condition to Cavitation in an Turbopump Inducer

Zhu HAN, Yusuke WAKAMATSU, B. SHIN

### Abstract

Numerical simulation of cavitating flow was performed to investigate the effect of different inlet conditions for turbopump inducers with three blades with a backward sweep and different inlet blade angle. The computation was carried out by solving the Reynolds averaged Navier-Stokes equations with a homogenous cavitation model and  $k-\omega$  turbulence model. Numerical results concerning inducer characteristics and performance curves were compared with experimental results at difference flow coefficients and cavitation numbers. The occurrence of cavitation and its spatial distribution in each inducer were also investigated. As the result, at the inlet tip blade angle decreases, the occurrence of cavitation decreases in the cavitation regime, resulting in increasing the cavitation performance. Also, it was found that the present computation simulated well the complicate cavitating flow in inducer and gave a good estimation of inducer characteristics. Detailed observation and development of cavitation with respect to the cavitation number as well as the inlet blade angle are provided and discussed.

**Keywords:** Inducer, Cavitation, Blade angle, Flow rate

### 1. はじめに

ターボポンプインデューサにおいて、キャビテーションにより、様々な流れの非正常現象、ポンプの軸振動などの問題が発生するのはよく知られている<sup>1,2)</sup>。例えば、ロケットエンジンの燃料供給ポンプではインデューサが設置され、常にその吸込み性能の限界近くで作動している。そのため、ターボポンプはその高い回転速度により、羽根の負圧面における圧力の低下によりキャビテーション現象を伴って作動する。そのため、キャビテーションサージ、旋回キャビテーションのような様々な非正常現象が発生し、ポンプの信頼性の確保する上で重要な問題となる。キャビテーション不安定性はロケットエンジン用のターボポンプインデューサの設計における一つ避けなければならない問題であり、これまで、キャビテーションの不安定性を低減するいくつかの研究は実験的または数値的によって行われた<sup>3-5)</sup>。しかし、インデューサに発生する非正常現象に関してはまだ未知なことが多く、解明まではしていない。このインデューサの非正常現象は、その内部流れ場の状況、特にインデューサの入口で発生する逆流現象に関連する可能性があることも知られているが、これらに関する研究は比較的少ない。

本研究では、インデューサに対して、入口羽根角、流量(速度)のような条件が異なったキャビテーション流れの数値計算を行い、入口条件がインデューサの性能、キャビテーションに及ぼす影響について調べる。

### 2. インデューサの諸元及び数値モデル

本研究で用いたインデューサは、図 1 で示すように、95.2°の後退角が付いている 3 枚の羽根を持つ。また、その諸元については表 1 に示す<sup>4)</sup>。ここで流量係数は $\Phi = V_a/U_t$ で定義され、 $V_a$ は軸流速度で、 $U_t$ は回転速度である。本研究では、入口流量が異なる時の影響を調べるために、設計流量係数である $\Phi = 0.078$ の時と流量係数を $\Phi = 0.10$ にした場合の計算を行った。また、入口翼端側の羽根角 $\beta_{it}$ の影響を調べるために、 $\beta_{it} = 7.5^\circ$  (今後、インデューサ 7.5 と呼ぶ)、 $6.0^\circ$  (インデューサ 6.0)、 $5.0^\circ$  (インデューサ 5.0)、 $4.0^\circ$  (インデューサ 4.0)の場合の 4 種類のインデューサを表 1 のパラメータに基づいて設計した。一方、インデューサの前縁羽根角の半径方向分布は $\beta_b(r) = \tan^{-1}[R_t \tan \beta_{it} / r]$ に基づいて定義した。ここで $R_t$ は翼端半径、 $\beta_{it}$ は翼端 $r = R_t$ での羽根角である。

a)工学専攻 大学院生

b)機械設計システム工学科 教授

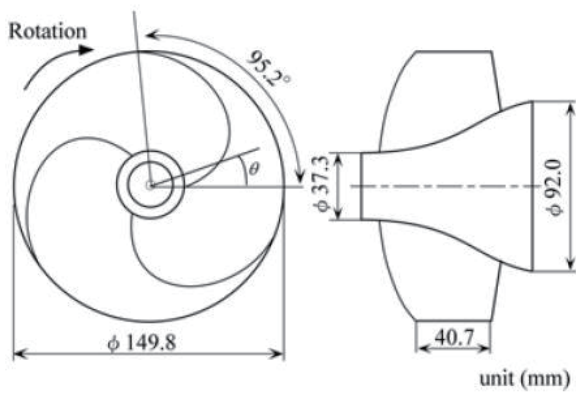


図1. インデューサモデル

表1. インデューサの諸元(インデューサ 7.5)

Tip diameter, mm	149.8
Tip clearance, mm	0.5
Sweep angle, deg	95.2
Inlet tip blade angle $\beta_{it}$ , deg	7.5
Outlet tip blade angle, deg	9.0
Hub/Tip ratio at inlet	0.25
Hub/Tip ratio at outlet	0.51
Solidity at tip	1.91
Design flow coefficient, $\phi$	0.078
Blade thickness, mm	2
Blade number	3

### 3. 計算方法

本研究ではすべての計算に対して、図2が示すように、二つの羽根間の一つの流路を3次元計算領域として考えた。インデューサの上流側と下流側にそれぞれ翼端側の直径の5.4倍と5.6倍の長さを持つ直管を設けた。すべての計算格子は六面体として形成され、羽根近傍の一部を図3に示す。計算方法としては、汎用のCFD解析ソフトANSYS-CFX<sup>6)</sup>を用いて、レイノルズ平均ナビエーストークスの方程式に対して有限体積法で解いた。また、乱流モデルは  $k-\omega$  モデルに適した。キャビテーション流れについては、Ratleigh-Plessetの式に基づいた均質キャビテーションモデルを利用した。境界条件に関しては、入口に全圧を与え、出口に質量流量を与えた。インデューサのハブ側とシュラウド側にすべりなしの壁として設定し、流路の境界面には周期条件を入れた。計算用の作動流体は25°Cの水であり、作動回転数は1500rpmと3000rpmである。すべての計算は速度や運動量などの残差が $1 \times 10^{-4}$ になるまで行った。

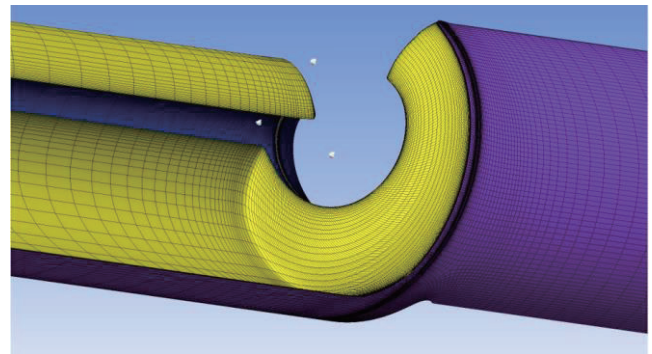


図3. 羽根周りの計算格子

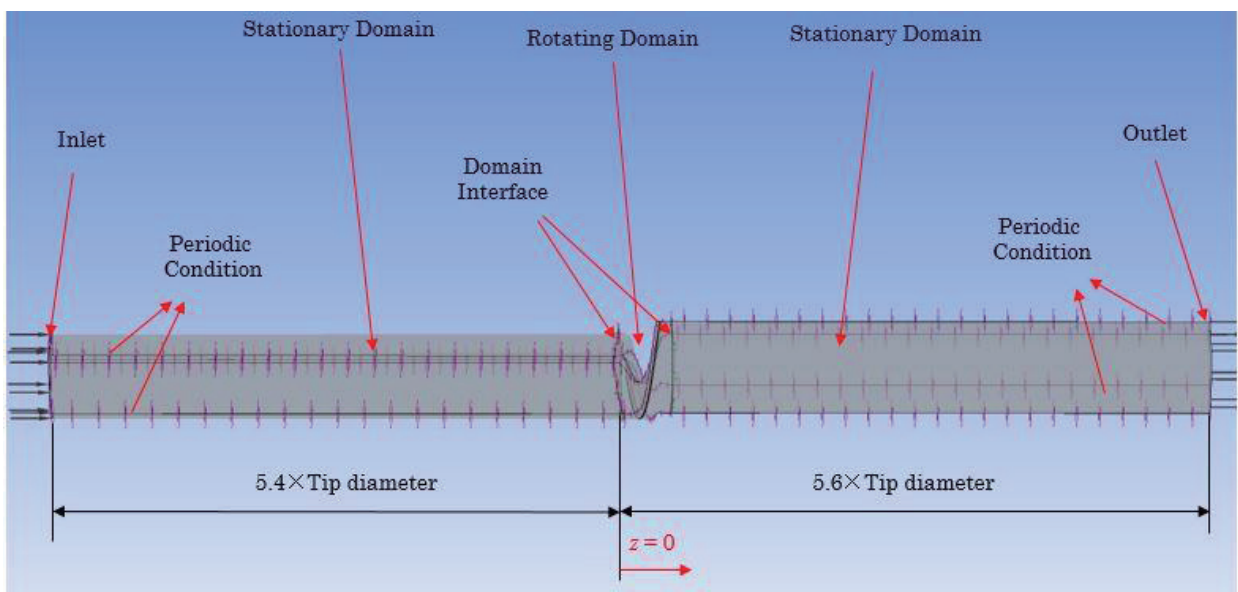


図2 計算領域と境界条件

## 4. 結果と考察

### 4.1 入口羽根角が異なるインデューサ

最初に、インデューサ内の非キャビテーション流れに対して、本計算手法について検証した。図4は1500rpmの時のインデューサ7.5に関する非キャビテーション時の性能曲線を示す。本研究結果は実験データ<sup>4)</sup>に精度よく一致した。ここで静圧係数 $\psi$ は $\psi = (p_2 - p_1) / (\rho U_1^2)$ で定義され、 $p_1$ 、 $p_2$ は入口と出口の圧力で、 $\rho$ は水の密度である。

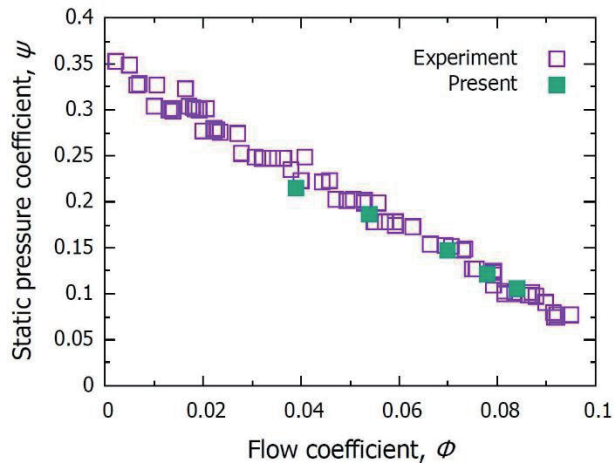


図4 非キャビテーション条件での性能曲線

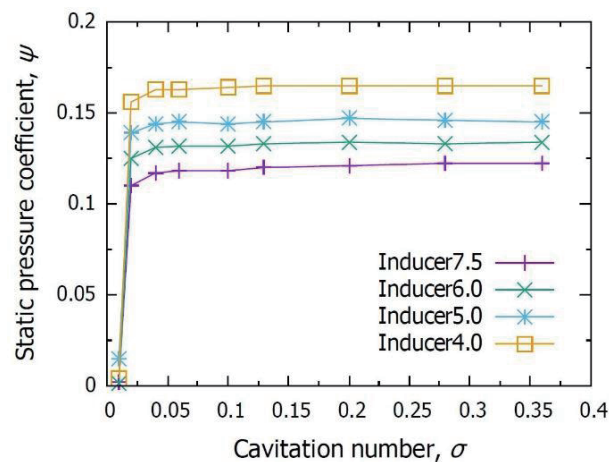
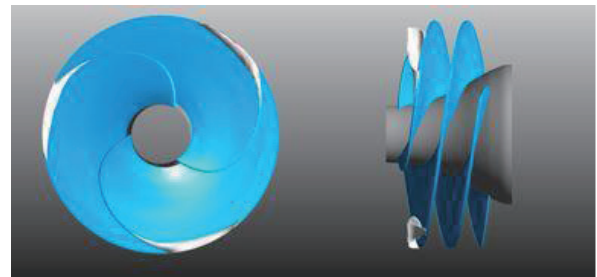


図5 キャビテーション条件での性能曲線

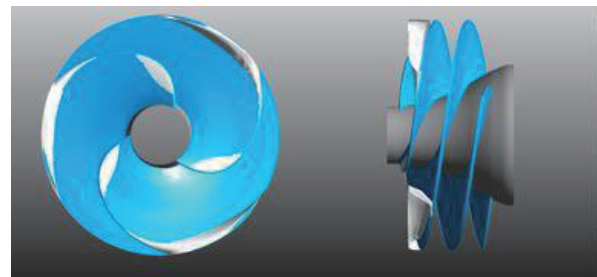
次は $\beta_{it}$ が異なる4つにインデューサに対して、3000rpmでの設計流量におけるキャビテーション発生時の性能曲線を図5に示す。図5より、羽根角の減少につれ静圧係数が上昇することが分かる。また、性能はキャビテーション係数 $\sigma$ が0.02になるまでほぼ一定に保っていたが、0.02より低くなると急減に低下し、ブレイクダウン現象を示している。

図6はインデューサ7.5の前縁翼端負圧面近傍に発生したキャビテーションの様子を示す。キャビテーションは蒸気の体積分率が0.01の等値面を表示した。翼端に発生したキャビテーションが、キャビテーション数の減少とともに、増大し下流側に延びていくのが分かる。また、 $\sigma=0.13$ からは、キャビテーションが前縁ハブ側にも現れてきた。

図5で説明したように、キャビテーション数が $\sigma=0.02$ より低くなるとブレイクダウンが発生する。



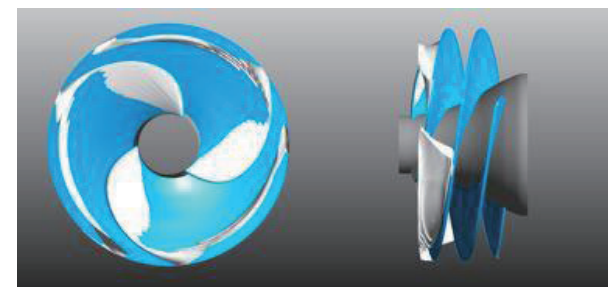
(a)  $\sigma = 0.20$



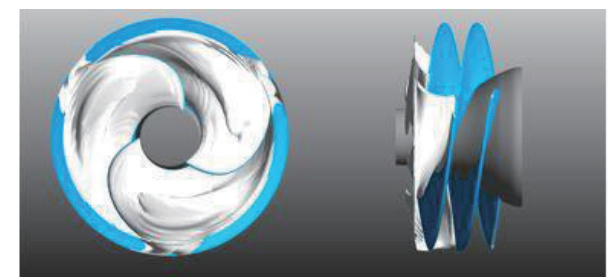
(b)  $\sigma = 0.13$



(c)  $\sigma = 0.10$



(d)  $\sigma = 0.06$



(e)  $\sigma = 0.02$

図6 キャビテーション係数とキャビテーションの発生

一方、図7は羽根角が異なる4つのインデューサに対して、 $\sigma = 0.13$ におけるキャビテーションの発生様子で、この図から、入口側の羽根角 $\beta_{it}$ の減少により、キャビテーションが発生しにくくなるのが分かる。図8はスパンが0.98の時の $\sigma = 0.13$ における蒸気の体積分率を子午面で示したものである。キャビティの大きさやキャビテーションの羽根に対する傾斜角度が入口羽根角の減少に比例し変化することが分かる。

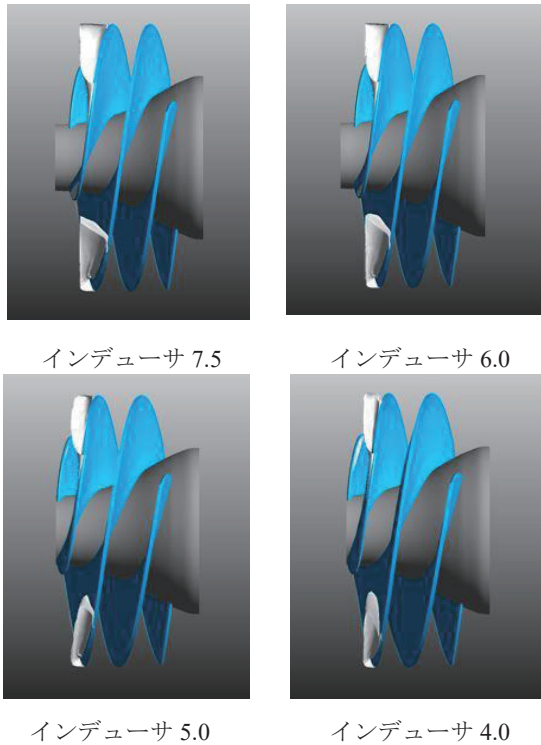


図7 羽根角によるインデューサ周りのキャビテーション発生様子( $\sigma = 0.13$ )

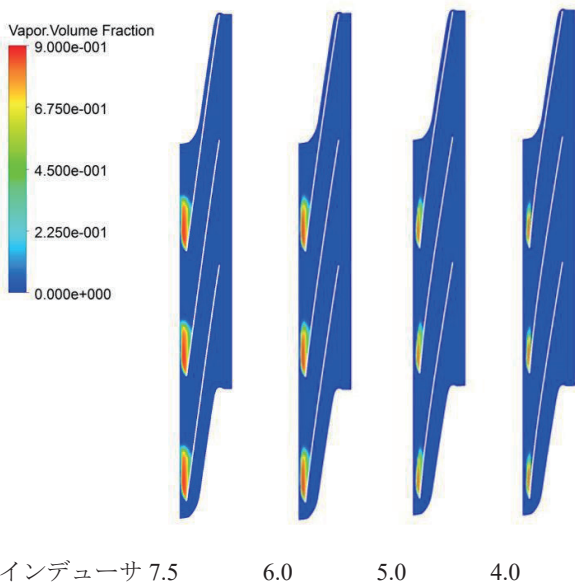


図8  $\sigma = 0.13$ におけるインデューサ周りの蒸気の体積分率、(子午面表示)

## 4.2 入口流量が異なる時の影響

4.1節では、入口羽根角を減少させることはキャビテーションの回避に有効であることを示した。それは、羽根に対する流れの衝突角を減らすことで入口翼端側に生ずる流れ渦を抑制することと考えられる。そのため、実際のポンプ(インデューサ)の運転において、ある程度衝突角を有する。それは衝突角がゼロになると、キャビテーションが負圧面と圧力面両方に発生したり、また交互に発生してしまうからである<sup>2)</sup>。従って、入口翼端羽根角が $4^\circ$ のインデューサ4.0では、流れに対する衝突角が小さすぎるため、実際の運転には不向きであろう。一方、入口翼端側の逆流は、ポンプの前後の圧力差により発生するので、この圧力差を適切に調節ことで逆流を抑え、キャビテーションの発生を抑制できると考えられる。そのため、本研究ではインデューサ5.0に対して、 $\Phi = 0.078$ の設計流量から $\Phi = 0.10$ に増やし計算を行った。図9にインデューサ5.0が流量係数 $\Phi = 0.100$ で運転した時のキャビテーション発生時の性能曲線を示す。図5と比べて入口流量の増大により、出口圧力が低下したことが分かる。

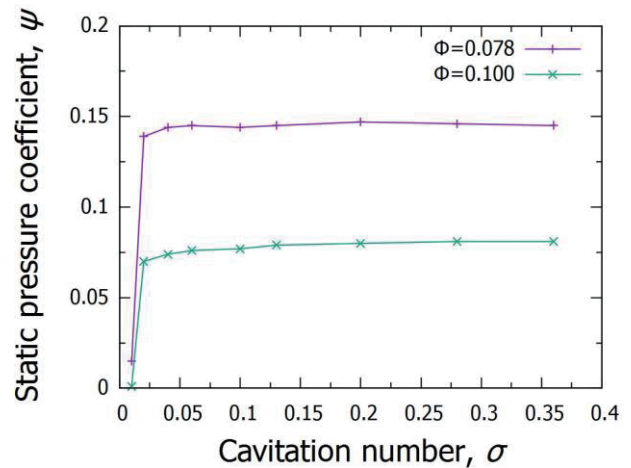
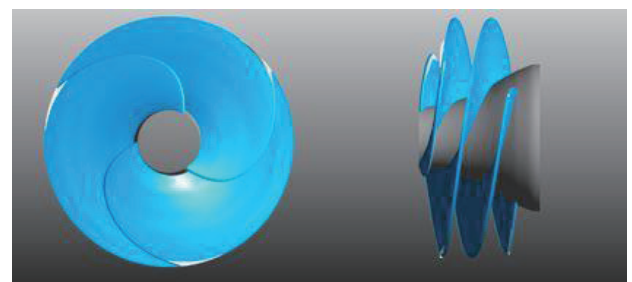


図9  $\Phi = 0.078, 0.10$ の時のキャビテーション条件での性能曲線(インデューサ5.0)

図10は $\Phi = 0.10$ の時、インデューサ5.0におけるキャビテーションの発生様子を示す。キャビテーションは高いキャビテーション係数ではほぼ抑制させているが、圧力面にもキャビテーションが発生した。



(a)  $\sigma = 0.20$

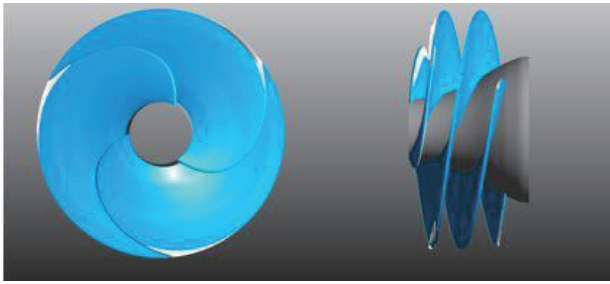
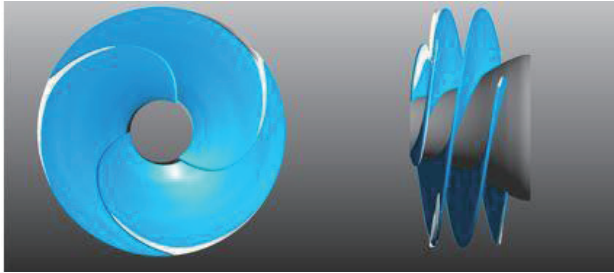
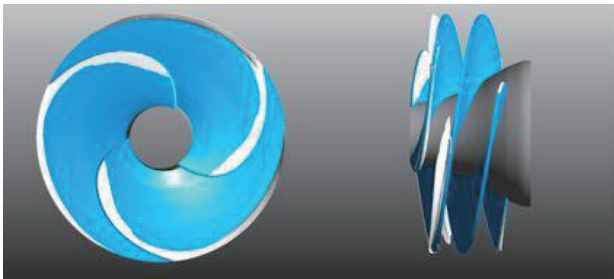
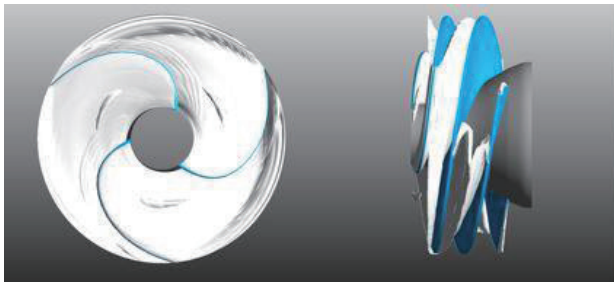
(b)  $\sigma = 0.13$ (c)  $\sigma = 0.10$ (d)  $\sigma = 0.06$ (e)  $\sigma = 0.02$ 

図10  $\Phi = 0.100$  におけるキャビテーションの発生様子、  
インデューサ 5.0

数では圧力面にもキャビテーションが発生した。なお、部分的ではあるが、本研究を通して、キャビテーション抑制に関する知見を広めることができ、また、異なる入口流動条件におけるインデューサの複雑なキャビテーション流れの非定常挙動とキャビテーション特性を明らかにした。

## 参考文献

- 1) 橋本知也：ロケットポンプインデューサの非定常特性に関する研究，東北大学博士学位論文，2002.
- 2) C. E. Brennen: Hydrodynamics of Pumps Concepts ETI, Inc. and Oxford University Press, 1994.
- 3) K. Kamijo, M. Yoshida and Y. Tsujimoto: Hydraulic and Mechanical performance of LE-7 LOX Pump Inducer, J. of Propulsion and Power, Vol.9, pp.819-826, 1993.
- 4) 姜, 渡邊, 米澤, 堀口, 川田, 辻本: キャビテーション不安定現象を抑制するインデューサインペラ形状に関する研究, ターボ機械, 第37巻, pp.45-58, 2009.
- 5) A. H. Dönmez, Z. Yumurtaci and L. Kavurmacioglu: The Effect of Inlet Blade Angle Variation on Cavitation Performance of a Centrifugal Pump: A Parametric Study, ASME J. of Fluids Eng. **141**, 021101-1~10 2019.
- 6) ANSYS Inc, CFX User's Manual 2013.

## 5. 結論

本研究では、まず本数値計算手法を非キャビテーション時の計算を通して、良い精度で計算できることを確認した。次に行ったキャビテーション発生時の計算では、入口翼端側の羽根角の変化が、キャビテーションの発生に大きく影響し、入口羽根角が小さいほど、キャビテーションを抑制できることを示した。さらに、低い羽根角を持つインデューサにおいて、キャビテーションをもっと抑制するため、入口流量を増やすことを試みた。その結果、出口圧力が減少するため、静圧係数が低下し、低いキャビテーション係