

翼列に発生するキャビテーション不安定現象と  
その抑制に関する数値解析\*伊賀 由佳<sup>\*1</sup>, 平沼 誠<sup>\*2</sup>  
吉田 義樹<sup>\*3</sup>, 井小萩 利明<sup>\*1</sup>Numerical Analysis of Cavitation Instabilities and  
the Suppression in CascadeYuka IGA<sup>\*4</sup>, Makoto HIRANUMA,  
Yoshiki YOSHIDA and Toshiaki IKOHAGI<sup>\*4</sup> Institute of Fluid Science, Tohoku University,  
2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8577 Japan

In this study, unsteady cavitation and cavitation instabilities are numerically analyzed around cascades in water/air working fluid. The numerical method employing a locally homogeneous model of compressible gas-liquid two-phase medium is applied, because it permits the entire flowfield inside and outside the cavity to be simulated easily through only one system of governing equations. Three types of cavitation instabilities, which are similar to "cavitation surge", "forward rotating cavitation" and "rotating-stall cavitation", are represented numerically in flat-plate cascade under three-blade cyclic condition. Additionally, flowfields around flat-plate cascade with slit on blade are analyzed in the conditions where the three types of cavitation instabilities arise in the cascade without slit. The effect of the slit on suppression of cavitation instabilities is confirmed from the present numerical results.

**Key Words:** Numerical Analysis, Cavitation, Cavitation Instabilities, Three-blade Flat-plate Cascade, Slit, Locally Homogeneous Model

## 1. 結 言

キャビテーションは、液流中の局所圧力が蒸気圧以下に低下した際に液相の一部が気相に相転移する現象である。流体機械中で発生する非定常キャビテーションは、振動・騒音を引き起こし、流体機械の性能低下や損傷の原因となる。また、キャビテーションの非定常特性が原因となって、キャビテーション不安定現象と呼ばれる振動現象が発生する場合もある。キャビテーション不安定現象には、管路系に脈動的な流体振動を引き起こすキャビテーションサージ<sup>(1)</sup>や、回転非同期の軸振動を引き起こす旋回キャビテーション<sup>(2)</sup>、および揚程低下時の流量/圧力特性が右上りとなった場合に発生する旋回失速キャビテーション<sup>(3)</sup>などがある。液体ロケットエンジン・ターボポンプでは、これらの

キャビテーション不安定現象が原因と考えられる事故例も報告されている。従って、キャビテーション不安定現象の発生予測およびその抑制手法の確立は、各国の高性能ターボポンプの設計開発者にとって共通の重要な課題となっている。

一方、非定常キャビテーション流れの数値解析では、その非定常挙動に制限を与えず、かつ長時間に渡る時系列計算が可能な数値解析モデルが必要不可欠である。著者らはこれまで非定常数値解析に適したキャビテーション数値解析手法を提案して<sup>(4)</sup>、翼列で発生するシートキャビテーション・ブレイクオフ現象の2種類の発生メカニズムを解明し<sup>(5)</sup>、さらに三枚周期翼列で発生する種々のキャビテーション不安定現象の数値的予測<sup>(6)</sup>を行ってきた。

本研究では、二次元翼列を用いた数値解析によって再現可能なキャビテーション不安定現象特性を解析する。計算対象となる流れ場は、作動流体を水-空気系とする三枚周期平板翼列流れであり、そこに発生する非定常キャビテーション流れおよびキャビテーション

\* 原稿受付 2005年10月24日。

<sup>\*1</sup> 正員, 東北大学流体科学研究所(☎980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)。<sup>\*2</sup> 東北大学大学院工学研究科。<sup>\*3</sup> 正員, 宇宙航空研究開発機構(JAXA)(☎981-1525 角田市君萱字小金沢1)。

E-mail: iga@ifs.tohoku.ac.jp

不安定現象の数値解析を行う。さらに、キャビテーション不安定現象が発生した条件下において、翼にスリットを設けることにより、キャビテーション不安定現象の抑制効果に対するスリットの有効性について検討し、そのメカニズムの解明を試みる。

## 2. 数値解析手法

**2・1 気液二相局所均質媒体モデル** 本研究に用いるキャビテーション数値解析モデルは「圧縮性気液二相局所均質媒体モデル」であり、気液二相媒体を擬似単相媒体と考え、1つの連続体として取り扱うことにより、キャビテーション流れに対してN-S方程式を直接適用することを可能とするものである。このとき支配方程式は、圧縮性N-S方程式と同様の形で気液二相媒体を表現し、さらに気相の質量保存の式を追加した「圧縮性気液二相N-S方程式<sup>(4)</sup>」となる。また、この支配方程式系は、圧縮性を考慮した液相と気相の局所平衡を仮定し、気相の質量分率で表現した「圧縮性気液二相局所均質媒体の状態方程式<sup>(4)</sup>」を用いて閉じられる。

状態方程式より求めた気液二相局所均質媒体の音速は、ボイド率（気相の体積分率）変化に対して実験値との良い一致が確かめられている<sup>(4)</sup>。よって本媒体モデルは、非定常キャビテーションとシステムとの干渉などの際に重要となる気液混合状態における圧力波の伝播を表現できる。

本数値解析手法では、密度不連続面であるキャビティ界面は、圧縮性流体の接触不連続問題と同様の手法で取り扱うことができる。よって、キャビティ界面の解像度が計算格子に依存するという欠点を持つ反面、キャビティの形状は制限を受けないという利点がある。これにより、初生近傍を除く広範囲のキャビテーション係数および流量係数の解析に適用可能である。

**2・2 数値解法** 支配方程式は有限差分法を用いて離散化し、気液界面のような密度不連続面における解の単調性を維持する必要があるため、TVDスキームを採用した。具体的には、時間・空間精度がともに2次精度であるTVD-MacCormack法<sup>(7)</sup>を用いた。さらに、大規模な非定常挙動を示すキャビテーション流れに対しては適切な乱流モデルがないため、本研究では層流解析を行った。

本数値解析手法は既に、キャビテーション未発生状態での翼列およびキャビテーション発生状態での単独翼の時間平均翼性能の評価に有効であること<sup>(4)</sup>、さらに非定常キャビテーションにおけるブレイクオフ現象

の振動特性予測および、ブレイクオフメカニズムの再現が可能であること等<sup>(5)</sup>が確かめられている。

**2・3 計算条件** 対象とする翼列はソリディティ  $C/h=2.0$ 、食違い角  $\gamma=75^\circ$  の厚みなし平板翼列である。一流路の計算格子数は  $261 \times 71$ 、計算領域入口境界は翼前縁から  $2C$  上流、出口境界は翼後縁から  $3C$  下流である。入口境界には流入角度、全圧およびボイド率一定の条件を、出口境界には静圧一定の条件、翼面上にはすべりなし条件を与えた。さらに、三流路ごとに周期境界条件を課すことにより、回転機械に発生する旋回キャビテーションのような周方向の伝播現象の解析を、翼列の数値解析において可能とした。

翼面翼にスリットを開けた計算では、図1に示すように、スリットを前縁から  $0.5C$  の位置から  $0.05C$  の幅で開けた。本翼列の翼列スロート入口は  $0.48C$  に位置し、本スリットはスロート入口の直後に位置していることになる。キャビテーション不安定現象の発生はキャビティ後端と翼列スロートとの干渉にその一因があることが知られていることより、スロート位置でのキャビティ後端の流れを制御することを目的として、この位置にスリットを設けた。以降、スリットの無い翼列を3枚周期翼列、スリットのある翼列をスリット3枚周期翼列と呼ぶ。また、どちらの翼列においても、三つの翼を翼列の反回転方向にブレード1、ブレード2、ブレード3と呼ぶ。

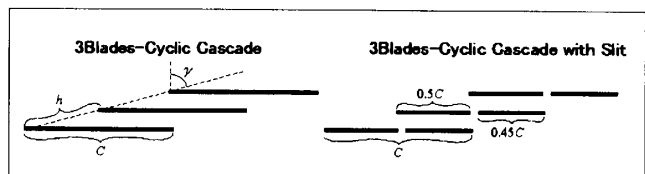


Fig. 1 Schematic diagram of present three-blade cascade with and without slit ( $c/h=2.0, \gamma=75^\circ$ )

流入条件は、迎角を  $\alpha_n=3, 5, 7\text{deg}$  で一定とし、流入速度は約  $U_n=12\text{m/s}$  とした。また、出口境界における静圧を変えることによってキャビテーション係数  $\sigma$  を変化させた。キャビテーション係数  $\sigma$ 、流量係数  $\phi$ 、および静圧係数  $\psi$  は次の様に算出される。

$$\text{キャビテーション数 } \sigma = \frac{P_m - P_v}{1/2 \rho_m U_n^2}$$

$$\text{流量係数 } \phi = \frac{U_a}{U_i}$$

$$\text{静圧係数 } \psi = \frac{P_{out} - P_m}{\rho_m U_i^2}$$

ここで、 $U_n$ ,  $U_a$  はそれぞれ  $U_n$  の翼列周方向成分および軸方向成分である。  $\phi$  は迎角により決定され、 $\alpha_n = 3, 5, 7 \text{deg}$  はそれぞれ  $\phi = 0.213, 0.176, 0.141$  に対応する。 また、 $\sigma$  と  $\psi$  は計算結果の時間平均値より算出した。

### 3. 結果および考察

**3・1 3枚周期翼列（スリットなし）の計算** まず始めに、3枚周期翼列とスリット3枚周期翼列の計算結果より、静圧係数で示したキャビテーション特性を図2に示す。ここでは3枚周期翼列に関して述べる。図中に色づけをしたケースではキャビテーション不安定現象が発生しており、オレンジ色はキャビテーションサージ、青色は前まわりの旋回キャビテーション、ピンク色は旋回失速キャビテーションを示している。三つの流量係数  $\phi = 0.141$ : $\Delta$ ,  $0.176$ : $\square$ ,  $0.213$ : $\circ$  の静圧係数曲線は、あるキャビテーション係数以下で高流量側と低流量側の特性曲線の上下が反転している。このときのキャビテーション係数で見ると  $\phi$ - $\phi$  性能曲線は右上がり特性となり旋回失速に対して不安定領域となる。本計算結果より、旋回キャビテーションはこういった  $\phi$ - $\phi$  性能曲線が右下がり特性の安定領域および右上がり特性の不安定領域のいずれでも発生し、旋回失速キャビテーションは右上がり特性の不安定領域

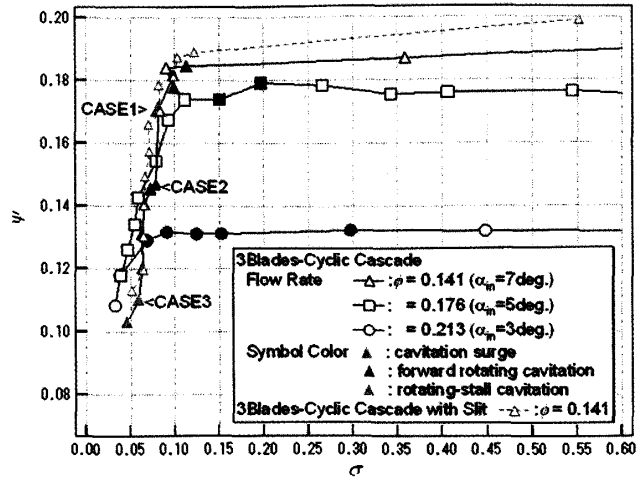


Fig.2 Time averaged static pressure coefficients of 3Blades-Cyclic Cascade and 3Blades-Cyclic Cascade with Slit versus cavitation number

で発生するということが示された。通常、食違い角の大きな翼列配置で右上がり特性が得られることは稀であるが、インデューサの実験 (Shimura, et. Al<sup>(6)</sup>) においても右上がり特性が得られており、本計算結果はそれと定性的に対応している。また、キャビテーションサージは  $\phi = 0.141$  で発生しており、キャビテーションサージが低流量条件で発生するという特性も計算結果から予測できた。次に、 $\phi = 0.141$  の計算結果の中から、図2中のCASE1~3で示す三種類のキャビテーション

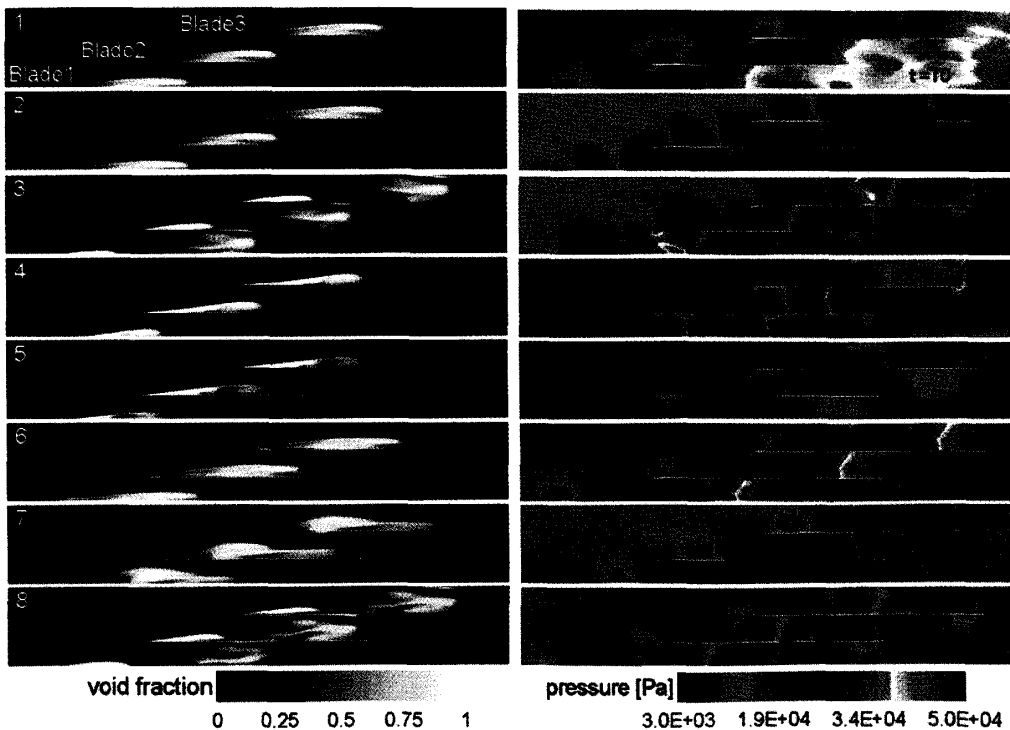


Fig. 3 Time evolutions of void fraction (left) and pressure (right) distributions around 3Blades-Cyclic Cascade (CASE1:  $\phi = 0.141, \sigma = 0.082, \psi = 0.171$ )

不安定現象における流れ場の様相を詳しく観察する。

図3に3枚周期翼列でキャビテーションサーージが発生したケース (CASE1:  $\phi=0.141, \sigma=0.082, \psi=0.171$ ) における流れ場の様相をボイド率分布 (左) および圧力分布 (右) の経時変化で示す。三つの翼前縁より発生した三つのシートキャビティは成長 (図3-1), 前縁から破断 (図3-2), クラウドキャビティを放出し (図3-3), クラウドキャビティが崩壊 (図3-4) する一連のブレイクオフ現象を, 翼三枚で同位相で繰り返している。また, この三つのクラウドキャビティの崩壊時には, 翼列下流域での圧力が急激に上昇する (図3(右)-4)。この圧力上昇がシステムの固有振動と干渉し, 規則正しく繰り返されることにより, 流れ場全体の圧力および流量が脈動的に振動するようになり, キャビテーションサーージが発生する。このとき, キャビティの挙動と対応して, 翼揚力変動 (図4上) は三つの翼で同位相で振動し, 翼列上流の圧力変動 (図4下) は脈動的に振動している。なお, 圧力変動は翼前縁から翼弦方向に2C上流の位置で求めた。

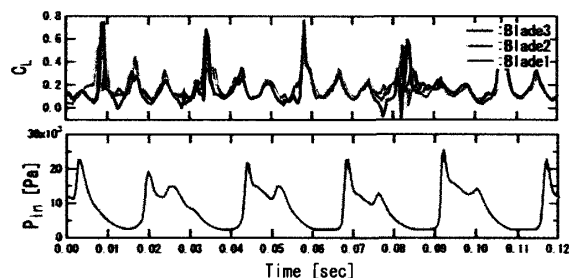


Fig. 4 Time variations of lifts and upstream static pressure in 3Blades-Cyclic Cascade (CASE1:  $\phi=0.141, \sigma=0.082, \psi=0.171$ )

次に, 前まわりの旋回キャビテーション (回転超同期) が発生したケース (CASE2:  $\phi=0.141, \sigma=0.079, \psi=0.147$ ) における流れ場の様相をボイド率分布の経時変化で図5に示す。三つの翼に不均一に発生したシートキャビティ

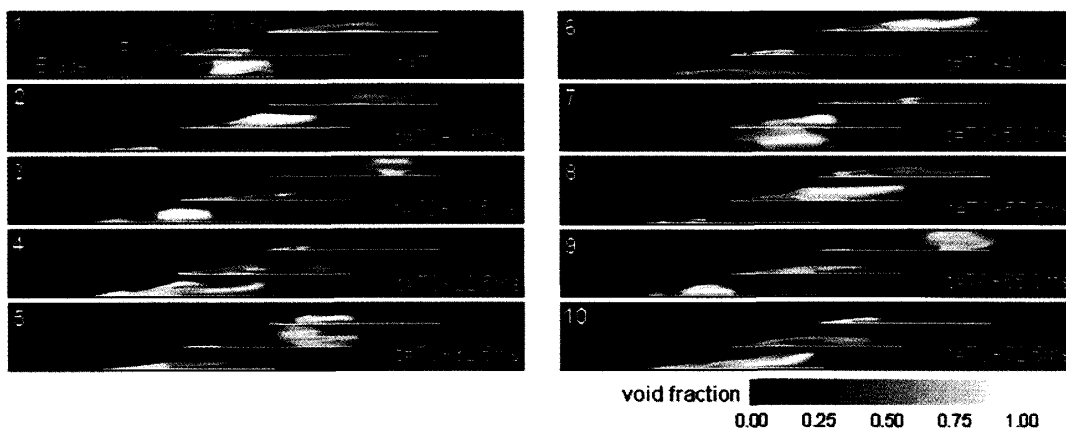


Fig. 5 Time evolution of void fraction distributions around 3Blades-Cyclic Cascade (CASE2:  $\phi=0.141, \sigma=0.079, \psi=0.147$ )

がそれぞれ非同期的にブレイクオフしている。その順序は, ブレード3 (図5-1), ブレード2 (図5-3), ブレード1 (図5-5), 再びブレード3 (図5-7) と, 翼列の回転方向の順にシートキャビティが破断していく。このとき, キャビティ体積の不均一が翼列の回転方向に伝播しているように見え, これが旋回キャビテーションと呼ばれる回転非同期の振動現象となる。このキャビティの挙動と対応して, 翼揚力変動 (図6上) はブレード3, 2, 1の順に低い値をとっている。また翼列上流の圧力変動 (図6下) では, キャビテーションサーージ発生時に見られた脈動的な振動は発生していない。本ケースでのキャビティ体積の伝播速度は, 翼列に対して  $3.04 \text{ m/s}$  であり, このときの翼列周方向の流速が  $11.9 \text{ m/s}$  であることより, 翼列外部の静止系からこの伝播現象を観察するとその伝播速度比は  $1.26(=(11.9+3.04)/11.9)$  と見積もられる。

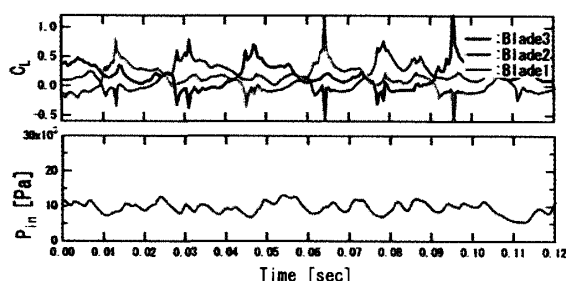


Fig. 6 Time variations of lifts and upstream static pressure in 3Blades-Cyclic Cascade (CASE2:  $\phi=0.141, \sigma=0.079, \psi=0.147$ )

次に, 旋回失速キャビテーションが発生したケース (CASE3:  $\phi=0.141, \sigma=0.059, \psi=0.110$ ) における流れ場の様相をボイド率分布の経時変化で図7に示す。本ケースでのブレイクオフは, ブレード2 (図7-2), ブレード3 (図7-4), ブレード1 (図7-5), 再びブレード2 (図7-8) と, 翼列の反回転方向の順にシートキャビティの破断が発生していく。このキャビティの挙動と対応して, 翼

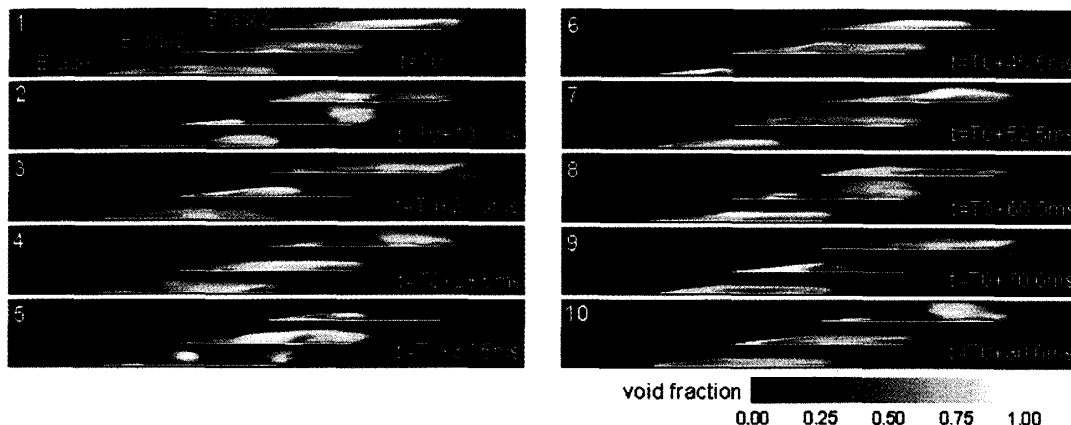


Fig. 7 Time evolution of void fraction distributions around 3Blades-Cyclic Cascade (CASE3:  $\phi=0.141, \sigma=0.059, \psi=0.110$ )

揚力変動 (図8上) は、前まわりの旋回キャビテーション発生時とは逆に、ブレード1, 2, 3の順に低い値をとる。本ケースでのキャビティ体積の伝播速度は、翼列に対して $-1.88 \text{ m/s}$ であり、翼列の周方向速度が $112 \text{ m/s}$ であることより、翼列外部の静止系からこの伝播現象を観察するとその伝播速度比は $0.83(=(112-1.88)/112)$ と見積もられる。ここで、旋回キャビテーションでは、翼列外部の静止系から観察した際の伝播速度比が1以上のものは「前まわりの超同期旋回キャビテーション」と呼ばれ、通常 $1.1\sim 1.3$ 程度の伝播速度比となることが知られている<sup>9)</sup>。一方、伝播速度比が $0.8\sim 0.9$ のものは「前まわりの亜同期旋回キャビテーション」と呼ばれ、これもわずかに報告されている<sup>9)</sup>。また、これらの旋回キャビテーションとは別に、低キャビテーション係数領域におけるキャビテーションによる揚程低下が原因となって $\phi$ - $\phi$ 特性が右上り特性となり、キャビテーション領域が失速領域と共に旋回する「旋回失速キャビテーション」が確認されており<sup>9)</sup>、この伝播速度比は一般に $0.5$ から $1$ の間となる。ここで、CASE3では伝播速度比が $0.83$ であるため、亜同期旋回キャビテーションと旋回失速キャビテーションの両方の可能性が考えられる。しかし、揚程が低下し $\phi$ - $\phi$ 特性が右上り特性となる領域で発生していることから、CASE3でのキャビティ不均一の伝播現象は旋回失速キャビテーションであるといえる。

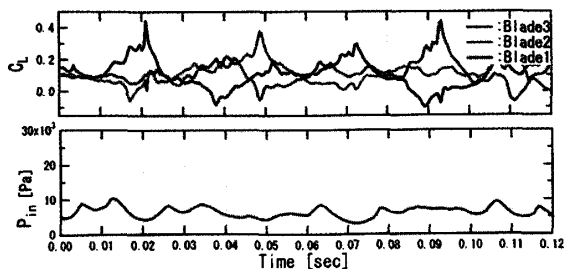


Fig. 8 Time variations of lifts and upstream static pressure in 3Blades-Cyclic Cascade (CASE3:  $\phi=0.141, \sigma=0.059, \psi=0.110$ )

**3・2 スリット3枚周期翼列の計算** 次に、スリット3枚周期翼列における計算結果を示す。3枚周期翼列の計算条件の中より、キャビテーションサージ (CASE1)、前まわり旋回キャビテーション (CASE2) および旋回失速キャビテーション (CASE3) が発生した三つの計算条件下において、スリット3枚周期翼列の計算を行った。その結果、いずれのケースでもキャビテーション不安定の発生が抑制され、不規則な周期性を持つキャビテーション流れとなった。また、全てのケースで観察されたことは、放出されたクラウドキャビティの形状が複雑で、いくつかに分裂して崩壊することであり、キャビティの構造がスリットからの流れの影響を強く受けていることがわかった。このキャビテーション不安定現象抑制のメカニズムについて次に考察する。

一例として、3枚周期翼列においてキャビテーションサージが発生したCASE1と同じ出口圧力および流入角条件において、スリット3枚周期翼列まわりのキャビテーション流れの数値解析を行った結果 (CASE1-S) を示す。以下では、スリットより上流の翼を前段翼、下流の翼を後段翼と呼ぶ。図9には、上から前段翼揚力、後段

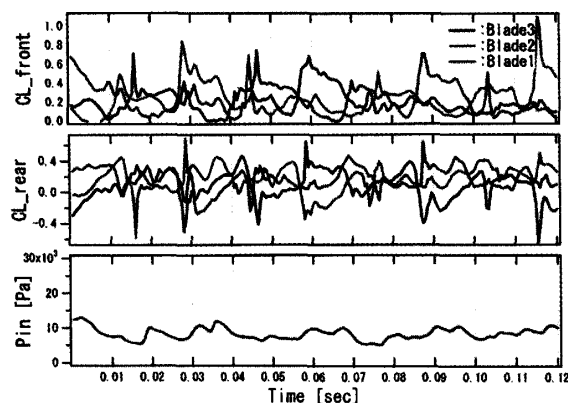


Fig. 9 Time variations of lifts and upstream static pressure in 3Blades-Cyclic Cascade with Slit (CASE1-S:  $\phi=0.141, \sigma=0.084, \psi=0.170$ )

翼揚力、および翼列上流圧力変動の各時間変動の様子を示す。3枚周期翼列でキャビテーションサージ(図4)や旋回現象(図6, 8)が発生した際と違い、翼揚力は前後段ともに、三つの翼で順不同に振動しているのがわかる。また、各翼における振動周期も周期ごとに変化している。さらに、CASE1で見られた翼列上流での圧力場の脈動的振動も、CASE1-Sでは完全に抑制されている。本ケースでの各翼の揚力変動のRMS値は、平均で0.219と見積もられた。一方、CASE1でのRMS値は0.210と見積もられ、その増加量は僅かであることより、翼に設けたスリットは翼に作用する変動流体力に対して、振幅を増加させるものではなく、周期の不規則性をもたらすものであることがわかった。

図10には、スリット近傍での様相を、ボイド率分布(左)、圧力分布(中)、速度ベクトル分布(右)の経時変化で示す。ある流路でクラウドキャビテーションが崩壊すると(図10-1 上段流路)、スリットにおける圧力勾配が負圧面側と圧力面側で逆転し、後段翼前縁局所迎角が負になる(図10-2)。その後、前段翼のシートキャビテーションがスリット位置まで成長すると、スリットでの圧力勾配が回復し、圧力面側の流体が負圧面側へと吸い込まれジェット流となる。(図10-3)このスリットからのジェット流と、成長したシートキャビテーション後端を翼面に沿って上流側へ向かう逆流によって、前段翼後縁負圧面側に渦が発生し、渦キャビテーションが発生する(図10-4)。同時に、増大した後段翼前縁迎角により、後段翼にシートキャビ

ティが発生・成長する(図10-4)。その後、前段翼より放出されたクラウドキャビテーション、前段翼後縁の渦キャビテーション、および後段翼のシートキャビテーションが干渉しながら、三つの渦構造からなるクラウドキャビテーションへと成長し(図10-5)、下流へと流され各渦構造ごとに崩壊する(図10-6, 7)。以上に述べたブレイクオフ現象は、流路や周期ごとにスリットでの圧力差が異なることによって、スリットからのジェット流の強さが変わり、キャビテーションの渦構造が変化し、その周期が不規則となる。以上より、スリット3枚周期翼列では、圧力面側から負圧面側へスリットを通して流出するジェット流がキャビテーションと干渉することにより、非定常キャビテーションの不規則性を増加させ、結果的に規則正しい周期性を持つキャビテーション不安定現象の発生が抑制できるものと考えられる。なお、本ケースでの静圧係数 $\psi=0.170$ は3枚周期翼列CASE1とほぼ同じ値であるが、図2に示すように高 $\sigma$ 領域ではスリット3枚周期翼列の静圧係数は3枚周期翼列のそれよりも上昇している。これはスリットにおける圧力面側と負圧面側の圧力差がキャビテーションの影響を受けないため、定常的に後段翼前縁局所迎角が正となり、後段翼列においても減速効果が得られるためである。一方低 $\sigma$ 領域では、先に述べたように後段翼前縁局所迎角が非定常的に正と負をとる影響で、スリット3枚周期翼列の静圧係数は3枚周期翼列のそれと大きな差は見られない。

次に、3枚周期翼列とスリット3枚周期翼列における流れ場の振動特性を比較する。3枚周期翼列においてキ

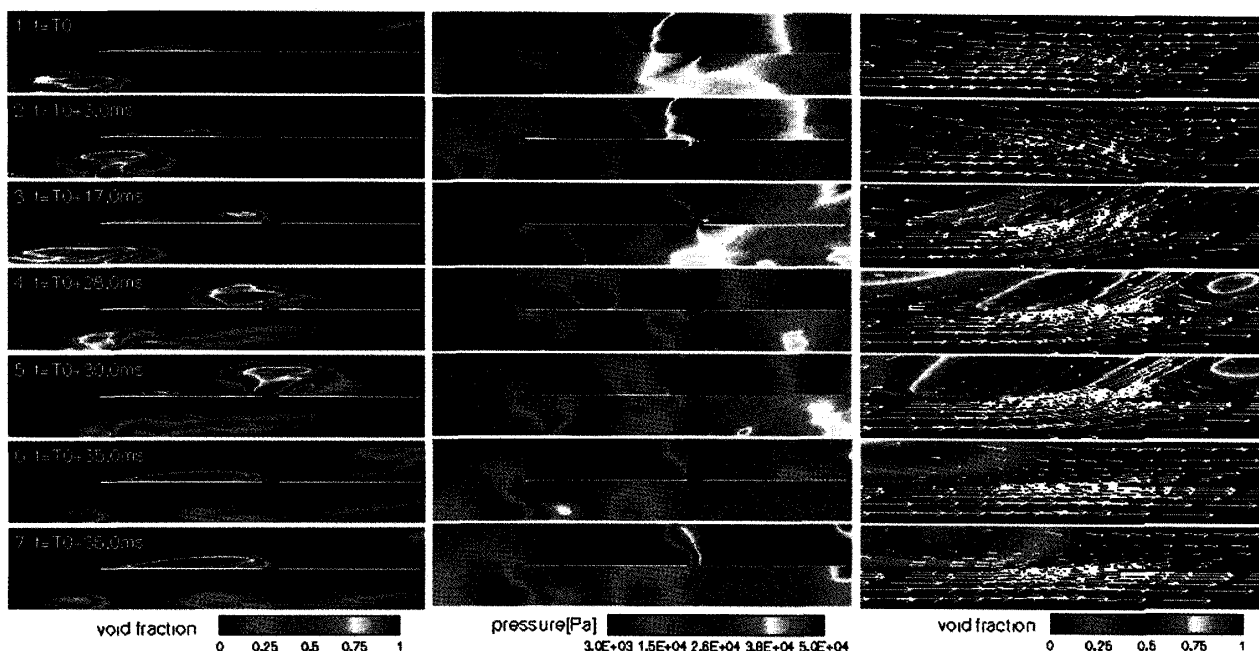


Fig.10 Time evolution of void fraction distribution (left), pressure distribution (center) and velocity vectors distribution (right) around 3Blades-Cyclic Cascade with Slit (CASE1-S:  $\phi=0.141$ ,  $\sigma=0.084$ ,  $\psi=0.170$ )

キャビテーションサージの発生した CASE1 と、スリット 3 枚周期翼列においてキャビテーションサージが抑制された CASE1-S において、ある翼列スロート入口および翼列上流での圧力変動を周波数分析し図 11 に比較する。キャビテーションサージの発生している 3 枚周期翼列では、図 4 の翼列上流圧力変動で見られた脈動周期 40 Hz 近傍で、翼列スロート入口、翼列上流ともに明確な卓越周波数が得られた。この卓越周波数は、流れ場の様相から読み取ったシートキャビティのブレイクオフ周期と一致する。これより、クラウドキャビティ崩壊に伴う圧力上昇と流れ場中の脈動的な圧力振動が共振していることが確認できる。一方、CASE1-S の翼列スロート入口では 40 Hz 近傍のパワースペクトルが低下し、低周波成分が上昇していることより、キャビティのブレイクオフ周期が不規則であることがわかる。また、翼列上流では卓越周波数が見られなくなっており、流れ場中の脈動的振動が完全に抑制されていると言える。以上より、翼にスリットを設けることによる、キャビテーションサージ発生時の流れ場中の流体振動の低減効果を定量的に確認できた。

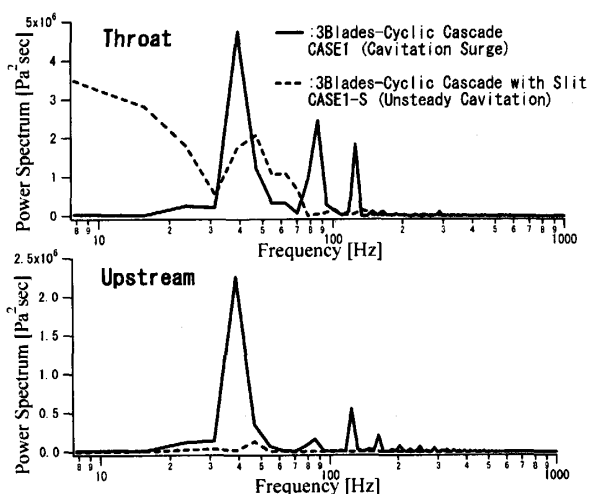


Fig.11 Power spectrums of pressure fluctuation in cascade throat and upstream of cascade

#### 4. 結 言

本研究では、三枚周期平板翼列に発生するキャビテーション不安定現象の数値解析を行った。また、キャビテーション不安定現象が発生した条件下において、翼にスリットを設けた場合の数値解析を行うことにより、スリットのキャビテーション不安定現象の抑制効果について検討した。得られた結果を要約すると以下のようになる。

- (1) 本数値解析手法により、広範囲の流量係数およびキャビテーション係数に対して、三枚周期平板翼列における種々のキャビテーション不安定現象の発生領域を示した。
- (2) 翼列のスロート入口直後にスリットを設けることにより、三種のキャビテーション不安定現象（キャビテーションサージ・前まわり旋回キャビテーション・旋回失速キャビテーション）の発生が抑制されることを示した。
- (3) 翼スリットによるキャビテーション不安定現象の抑制は、スリットを通過する圧力面側から負圧面側へのジェット流れにより、シートキャビティ後端の渦構造が変化し、キャビティ崩壊周期の不規則性が増加することに起因するものであることを明らかにした。

#### 文 献

- (1) Tsujimoto, Y., Yoshida, Y., Maekawa, Y., Watanabe, S., Hashimoto, T., 1997, "Observations of Oscillating Cavitation of an Inducer", *J. Fluids Engineering*, 199, pp.775-781
- (2) Hashimoto, T., Yoshida, M., Watanabe, M., 1997, "Experimental Study on Rotating Cavitation of Rocket Propellant Pump Inducer", *J. Propulsion and Power*, 13-4, pp.488-494
- (3) Shimura, T., Yoshida, M., Kamijyo, K., Uchiyumi, M., Yasutomi, Y., 2002, "A Rotating Stall Type Phenomenon Caused by Cavitation in LE-7A LH2 Turbopump", *JSME International Journal, Series B*, 45-1, pp. 41-46
- (4) Iga, Y., Nohmi, M., Goto, A., Shin, B. R., and Ikehagi, T., 2002, "Numerical Analysis of 2-D Unsteady Cavitating Flow Around Hydrofoils in Cascade", *JSME Trans. (Series B)*, 68-666, pp.368-374, in Japanese
- (5) Iga, Y., Nohmi, M., Goto, A., Shin, B. R., and Ikehagi, T., 2003, "Numerical Study of Sheet Cavitation Break-off Phenomenon on a Cascade Hydrofoil", *Journal of Fluids Engineering, Trans. ASME*, Vol. 125-4, pp. 643-651
- (6) Iga, Y., Nohmi, M., Goto, A., and Ikehagi, T., 2004, "Numerical Analysis of Cavitation Instabilities Arising in The Three-Blade Cascade", *Journal of Fluids Engineering, Trans. ASME* Vol. 126-3, pp. 419-429
- (7) Yee, H. C., 1987, "Upwind and Symmetric Shock-Capturing Schemes," NASA-TM, 89464
- (8) Yoshida, Y., and Shimagaki, M., 2004, "A Study of sub-Synchronous Rotating Cavitation", *Proc. JSME Fluids Eng. Div. Conf., Kyusyu, OS13-6*, in Japanese
- (9) Fujii, A., Semenov, Y., and Tsujimoto, Y., 2003, "Analysis of Rotating Choke in an Inducer", *JSME Trans. (Series B)*, 69-680, pp.764-771, in Japanese