

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

### 熱力学的効果がインデューサの吸込み性能と キャビテーション不安定に与える影響

吉田 義樹, 菊田 研吾, 渡邊 光男  
橋本 知之, 永浦 克司, 大平 勝秀

2006年12月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency



宇宙航空研究開発機構研究開発資料  
JAXA Research and Development Memorandum

熱力学的効果がインデューサの吸込み性能と  
キャビテーション不安定に与える影響

Thermodynamic Effects on Cavitation Performance  
and Instabilities in an Inducer

吉田 義樹<sup>\*1</sup>, 菊田 研吾<sup>\*2</sup>, 渡邊 光男<sup>\*1</sup>  
橋本 知之<sup>\*1</sup>, 永浦 克司<sup>\*3</sup>, 大平 勝秀<sup>\*4</sup>

Yoshiki YOSHIDA<sup>\*1</sup>, Kengo KIKUTA<sup>\*2</sup>, Mitsuo WATANABE<sup>\*1</sup>  
Tomoyuki HASHIMOTO<sup>\*1</sup>, Katsuji NAGAURA<sup>\*3</sup>, Katsuhide OHIRA<sup>\*4</sup>

- \* 1 : 総合技術研究本部ロケットエンジン技術センター  
Rocket Engine Technology Center, Institute  
of Aerospace Technology
- \* 2 : JAXA 技術研修生 (学籍 東北大学流体科学研究所)  
JAXA Research Student at Tohoku University
- \* 3 : 航空宇宙技術振興財団  
Foundation for Promotion of Japanese Aerospace Technology
- \* 4 : 東北大学流体科学研究所  
Institute of Fluid Science, Tohoku University

2006 年 12 月  
December 2006

宇宙航空研究開発機構  
Japan Aerospace Exploration Agency



# 熱力学的効果がインデューサの吸込み性能と キャビテーション不安定に与える影響\*

吉田 義樹\*<sup>1</sup>, 菊田 研吾\*<sup>2</sup>, 渡邊 光男\*<sup>1</sup>

橋本 知之\*<sup>1</sup>, 永浦 克司\*<sup>3</sup>, 大平 勝秀\*<sup>4</sup>

## Thermodynamic Effects on Cavitation Performance and Instabilities in an Inducer \*

Yoshiki YOSHIDA \*<sup>1</sup>, Kengo KIKUTA \*<sup>2</sup>, Mitsuo WATANABE \*<sup>1</sup>,

Tomoyuki HASHIMOTO \*<sup>1</sup>, Katsuji NAGAURA \*<sup>3</sup>, and Katsuhide OHIRA \*<sup>4</sup>

### ABSTRACT

In the present study, we focused on the length of the tip cavitation as a cavitation parameter for experimental investigations of the thermodynamic effect on a cavitating inducer. Comparison of the length of tip cavity in liquid nitrogen (76 K and 80 K) with that in cold water (296 K) allowed us to estimate the strength of the thermodynamic effect. In addition, unstable cavitation phenomena occur when the cavity length develops over the throat. Sub-synchronous rotating cavitation appears both in liquid nitrogen and in cold water. In contrast, cavitation surge appears only in cold water at a lower cavitation number. From these experimental results, thermodynamic effects on cavitation performance and instabilities were discussed.

**Keywords:** Thermodynamic Effect, Cavitating Inducer, Cavitation Instability, Cavity Length

### 1. 緒言

液体水素と液体酸素を推進剤とするロケットエンジンの比推力は高く、大型ロケットにはこの推進剤が用いられる。反面、大気圧下で液体水素は20K、液体酸素は90Kという極低温状態にあるので、その貯蔵やハンドリングには難点がある。一方、極低温流体の特徴として、大気圧付近においては温度に対する蒸気密度と、飽和蒸気圧の変化量が大きいことが主な要因となって、ターボポンプのインデューサに発生するキャビテーションには熱力学的効果が顕著に現れる<sup>(1)</sup>。

幸いにして、キャビテーションの熱力学的効果はキャビティの成長を抑制する方向に作用するので、インデューサの“等価”NPSH<sub>req</sub>は減少する方向、すなわち工学的には安全側に作用する。そのため、この効果は一見軽視されがちであるが、インデューサ翼列の流体設計によって発生するキャビテーションの形態が異なると、その形態に依存して期待される熱力学的効果の程度に差があるように考えられる。

そこで、極低温流体中で好ましいキャビテーションの熱力学的効果を効率よく引き出し、高い吸込み性能を得るためには、キャビテーションの熱力学的効果について

\* 平成 18 年 10 月 26 日受付 (received 26 October, 2006)

\*<sup>1</sup> 総合技術研究本部ロケットエンジン技術センター (Rocket Engine Technology Center, Institute of Aerospace Technology)

\*<sup>2</sup> JAXA 技術研修生 (学籍 東北大学流体科学研究所) (JAXA Research Student at Tohoku University)

\*<sup>3</sup> 航空宇宙技術振興財団 (Foundation for Promotion of Japanese Aerospace Technology)

\*<sup>4</sup> 東北大学流体科学研究所 (Institute of Fluid Science, Tohoku University)

熱力学／流体力学的解釈と、それに基づく設計指針というものが必要である。

前報<sup>(2)</sup>では作動流体として、水および液体窒素を用いて実験を行い、翼端に発生するキャビティ長さを比較することにより、(1) キャビティがスロートを超える位に成長し、非定常性が高まるあたりから熱力学的效果の程度が大きくなってキャビティの成長が抑制されること、(2) 揚程の低下は基本的にはキャビティ長さに依存し、キャビティ長さに熱力学的效果が現れることから“等価”吸込み性能が向上されること、(3) 推定される温度降下量でみると熱力学的效果が大きくなって、キャビティ内の温度が三重点に近づくとも温度降下率は鈍るようになり、インデューサ揚程が低下し始めること、等を明らかにした。

本研究では、前報<sup>(2)</sup>と同じ実験方法を用いて水(296K)、および液体窒素温度を意識的に4K変化させた実験(76K, 80K)を行い、液体窒素温度の温度変化による物性値の違いがキャビテーションの熱力学的效果に与える影響を調べる。一方、インデューサで問題となっているキャビテーション不安定(本研究では亜同期旋回キャビテーション<sup>(3)</sup>とキャビテーションサージ)に与える熱力学的效果についても考察する。

## 2. 記号

$C$	: 翼弦長
$C_{cl}$	: 無次元キャビティ長さ ( $L_c/h$ )
$C_{pL}$	: 液体の定圧比熱
$h$	: 翼列のスペーシング
$K$	: キャビテーションコンプライアンス
$L$	: 蒸発潜熱
$L_c$	: キャビティ長さ
$M$	: マスフローゲインファクター
$p_c$	: キャビティ内の圧力
$p_{ref}$	: 参照点の圧力
$p_v$	: 飽和蒸気圧
$Q$	: 流量 ( $Q_d$ : 設計流量)
$T_c$	: キャビティ内の温度、又は臨界点の温度
$T_t$	: 三重点の温度
$T_\infty$	: キャビティ遠方の液体温度
$\Delta T$	: 温度降下量 ( $= T_\infty - T_c$ )
$U$	: インデューサ周速
$V_c$	: キャビティ体積
$\alpha$	: 流量変動に対するキャビティ体積変動の応答遅れ
$\alpha_L$	: 熱拡散率
$\Lambda$	: flow property $= (U^3 \sigma / C)^{1/2}$
$\mu$	: ポンプゲイン

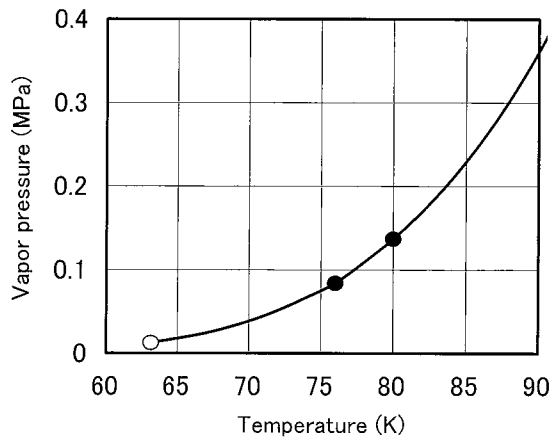
$\rho_L$	: 液体密度
$\rho_v$	: 蒸気密度
$\Sigma$	: thermodynamic function $= (\rho_v / \rho_L)^2 \cdot (L^2 / C_{pL} T) / \alpha_L^{1/2}$
$\sigma$	: キャビテーション数 式(1)
$\sigma_c$	: キャビテーション数 式(2)
$\tau$	: トルク係数 ( $\tau_0$ : 基準トルク係数)
$\phi$	: 流量係数
$\Psi$	: 圧力係数 ( $\Psi_0$ : 基準圧力係数)
$\Omega$	: 軸回転角速度

## 3. 実験方法

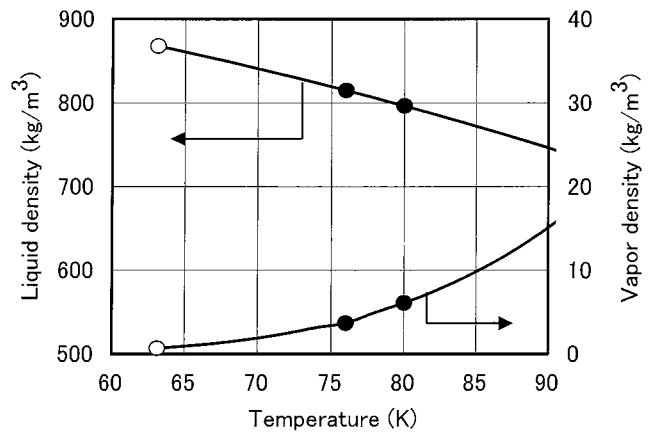
作動流体として熱力学的效果がほとんど無視できる常温の水を用いた実験(以下水試験と呼ぶ)と、熱力学的效果が顕著である液体窒素を作動流体とした実験(以下窒素試験と呼ぶ)の二種類を行い比較・検討する。実験装置および実験方法は前報<sup>(2)</sup>と同じであるのでその詳細は省略し、今回行った液体窒素の温度変化について以下に述べる。

### 3.1 液体窒素の物性

図1に液体窒素の温度に対する熱力学的效果に関係する物性値(液体密度( $\rho_L$ ), 蒸気密度( $\rho_v$ ), 飽和蒸気圧力( $p_v$ ))の温度に対する変化を示す。窒素の三重点温度 $T_t$ は、63.1Kであり、図1に示した温度範囲では蒸気密度と飽和蒸気圧の変化率が大きい。また、図2にBrennen<sup>(4)</sup>が流れの中にあるキャビテーション気泡の熱移動から示した、キャビティの成長に対する熱力学的效果の関与の大きさを示すthermodynamic function:  $\Sigma(T_\infty) = (\rho_v / \rho_L)^2 \cdot (L^2 / C_{pL} T_\infty \alpha_L^{1/2})$  [m/sec<sup>3/2</sup>]を水素、窒素、酸素、および水について、三重点温度( $T_t$ )と臨界点温度( $T_c$ )で規格化して示す。大気圧(約0.1MPa)であれば水素20K、窒素77K、酸素90K、水373Kが飽和温度であり、これを○印で示すと各 $\Sigma(T_\infty)$ は水素>>窒素>酸素>水>>水(●常温296K)の順となる。このことは、比喩として「極低温流体は冷たいけれど、ロケットエンジンで使われるような温度では冷水(常温)に比べて相対的に温かい(三重点から遠く、臨界点に近い)状態にある」と言える。 $\Sigma(T_\infty)$ は単一気泡のバブルダイナミクスから導き出された一つの指示値であり、これをインデューサに発生するような各種形態のキャビテーション群に適用するには定量的に無理があるが、経験的に実際のインデューサでも等価吸込み性能で見てこの順に熱力学的效果が大きく現れる。また、この図中に示すように窒素であっても74K程度に降温すると $\Sigma(T_\infty)$ の上からは酸素(90K)とほぼ同等の値に出来ることが分か



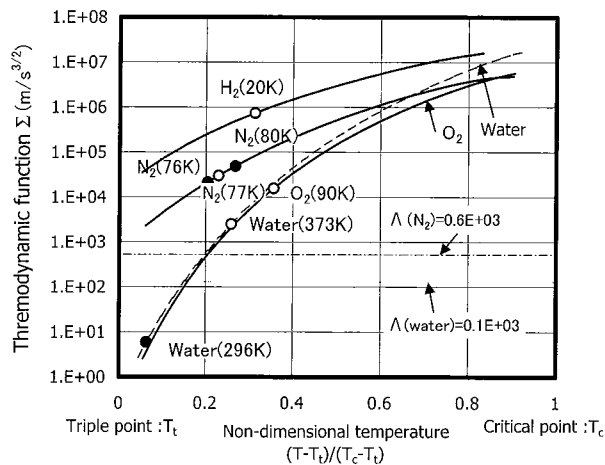
(a) Vapor pressure



(b) Liquid and vapor density

Fig. 1 Saturation properties of nitrogen as a function of temperature,

○: Triple point (63.1K), ●: Experiment conditions (76K, 80K)

Fig. 2 The thermodynamic function  $\Sigma$  (m/sec<sup>3/2</sup>) for hydrogen, nitrogen, oxygen, and water (○: at 1atm, ●: Experiment conditions of nitrogen (76K, 80K) and water (296K))

る。これが今回の窒素試験で降温した理由の一つである。

また、図2には同じく Brennen<sup>(4)</sup> がキャビティの成長に熱移動が関与する臨界時間を考察することによって提案した flow property  $\Lambda = (U^3 \sigma / C)^{1/2}$  [m/sec<sup>3/2</sup>] を今回の実験条件 (窒素試験で  $\Lambda = \text{約} 6 \times 10^2$ , 水試験で  $\text{約} 1 \times 10^2$ ,  $\sigma = 0.04$ ) に合わせて記載している。窒素試験では  $\Sigma \gg \Lambda$  であり、オーダ的に thermally controlled growth (キャビティの成長に熱力学的効果が関与する割合が大きい) 範囲であり、また水試験では  $\Sigma \ll \Lambda$  であり inertially controlled growth (キャビティの成長に熱力学的効果がほとんど影響しないで、力学的つり合いのみが支配的) の範囲であることがわかる。

### 3.2 液体窒素の降温方法

本研究に用いたJAXA極低温インデューサ試験設備<sup>(5)</sup>では、同一流体であっても温度を変えて熱力学的パラメータを変えた実験が出来るように、ランタンクに充填した液体窒素の温度を昇温、または降温する機能を有している。原理的には気体・液体間の相転移を利用し、ランタンク内の液体窒素を循環させながら、高圧窒素で加圧することによりその凝結熱で昇温させる、またはランタンクを真空ポンプで減圧することにより気化熱で降温させる。この機能により図1(a)に示す飽和圧力/温度線上に沿って、設定した圧力に対応する温度まで自在にタンク内の液体窒素の温度を変化させることが出来る。

### 3.3 実験条件

実験条件は、水試験では回転数 7500rpm (アクリル透視管を用いた可視観察実験は強度上の制限から 6000rpm)、流量比  $Q/Q_d = 1.06$  ( $Q_d$ : 設計流量) で、水温は 296K で行った。一方、窒素試験は回転数 18300rpm、流量比  $Q/Q_d = 1.05$  である。インデューサ上流の液体窒素温度 ( $T_\infty$ ) は実測値で 76K と 80K (液体窒素を用いて絶対校正した熱伝対温度計<sup>(6)</sup>で測定) であった。実験に用いたインデューサは水試験と窒素試験で同形同寸であり、インデューサの翼枚数は 3 で前縁にはスウィープがあり、設計流量係数は  $\phi_d = 0.0775$ , 入射角 3.3 度、翼端でのソリディティは 1.91 である<sup>(7)</sup>。

## 4. キャビテーションパラメータ

本研究では、前報<sup>(2)</sup>と同じくキャビテーションパラメータとしてキャビティ長さを採ることとする。しかし、窒素試験でインデューサに発生するキャビテーションを



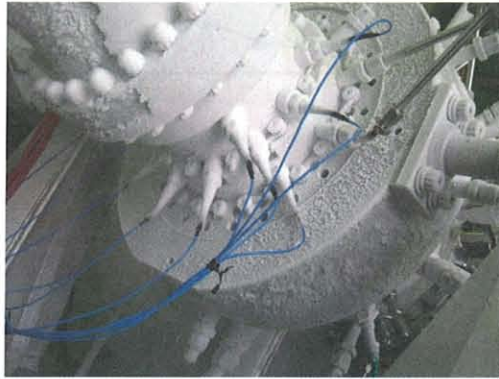
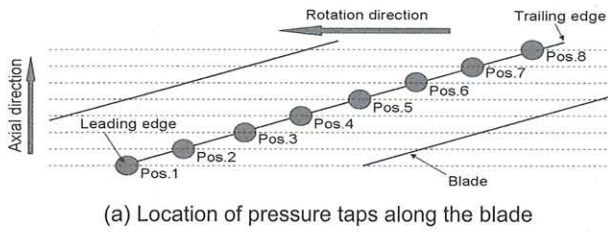


Fig. 3 Location of pressure taps, (a) Location of pressure taps along the blade, (b) Photograph of the pressure sensors on the casing wall just before the experiment

可視観察することは出来ないで、図3に示すようにインデューサケーシング壁に翼に沿って8ヶの変動圧センサを配置し、測定される圧力変動をもとに図4(a)に示すようにキャビテーションの発生領域を推定し、翼前縁からキャビテーション領域の後縁までの翼に沿った長さをキャビティ長さ ( $L_c$ ) として求めた。水試験において可視化観察により求めたキャビティ長さ、本方法を適用して同定したキャビティ長さが一致することは既に確認されている<sup>(2)</sup>。

しかし、圧力センサはケーシング壁に設置されるので、これらのセンサが検知するキャビテーションは、翼端に発生するキャビテーション（翼端渦キャビテーション、翼端漏れ流れと主流のせん断層に発生するキャビテーション、および翼面キャビテーションの一部）であり、図4(b)（水試験）で観察されるようなインデューサ上流に発生する逆流渦キャビテーションを検知することは出来ない。しかしインデューサの場合、翼端に発生するキャビテーションが吸込み性能やキャビテーション不安定の発生に大きな影響を与えることは既に明かであり翼端に発生するキャビテーションをインデューサに発生するキャビテーションの代表値とすることは、適切であるものと考えている。

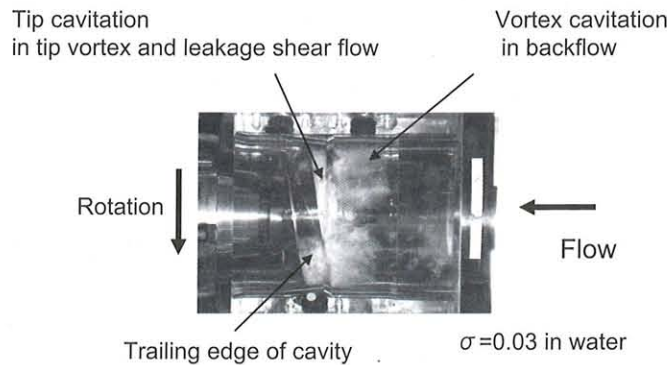
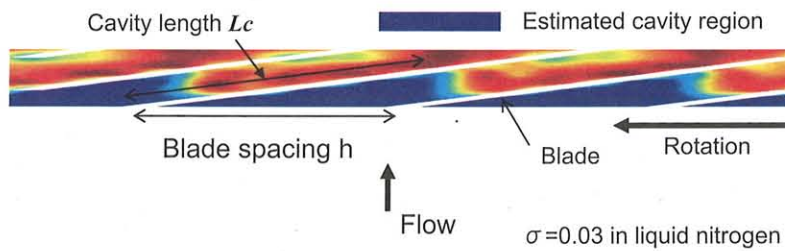


Fig. 4 Example of the cavitation, (a) Unsteady pressure distribution showing the estimated cavity region in nitrogen, (b) Visualization of the cavitating inducer in water



## 5. 実験結果

### 5.1 キャビテーション性能

図5(a), (b)に水試験, および窒素試験におけるキャビテーション性能曲線を示す。横軸にキャビテーション数 $\sigma$ , 縦軸に標準化した揚程係数( $\Psi/\Psi_0$ )をとっている。また図5(b)の窒素試験にはトルク特性( $\tau/\tau_0$ )も示す。残念ながら水試験では軸トルクは測定されていない。

図より窒素試験の方が小さなキャビテーション数まで揚程が低下しないことが分かる。これはStepanoff<sup>(8)</sup>が言う揚程低下をキャビテーションパラメータとする評価方法で見て, 熱力学的効果が現れていると言える。また, 窒素試験における揚程はキャビテーション数が減少するに従って漸増する傾向を示し, ポンプゲインが負( $\mu = \partial\Psi/\partial\sigma < 0$ )の傾向を示しているが, トルク特性はフラット

である。流量は一定に制御されているので, これはキャビテーションの発達とともに翼前縁負荷から翼後縁負荷へと翼負荷が最大となる位置が下流側に移動するに従って翼仕事が増大していることを示している<sup>(9)</sup>。一方, 水試験での揚程特性にも若干 $\mu = \partial\Psi/\partial\sigma < 0$ の傾向は認められるが, 窒素試験に比べてその程度は小さい。

### 5.2 キャビティ長さ

図5(a), (b)中にはキャビテーション数 $\sigma$ に対して, キャビティ長さ $C_d (=L_c/h, h$ :翼列のスペーシング)の変化を併せて示す。図5(a)の水試験の場合は, 図4(b)に示したような瞬時画像からキャビティ長さを読み取ったものであり, 多数の画像からキャビティ長さを読みとり, 全ての読み値を図にプロットしている。これはインデューサのキャビテーションは非定常性が強く一枚の画像デ

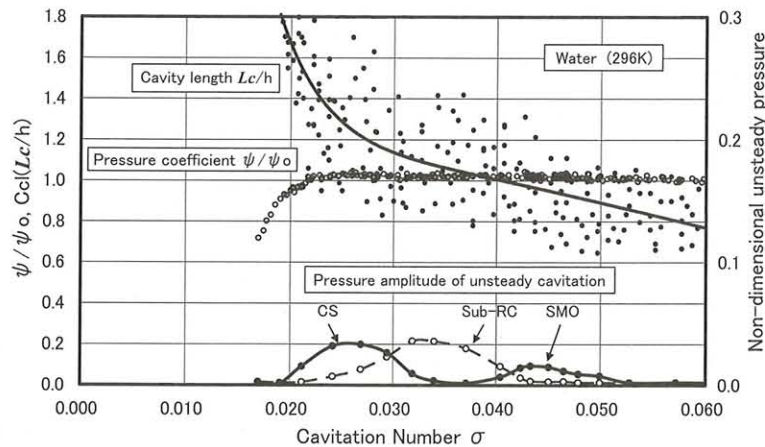


Fig. 5 (a) Cavitation performance  $\Psi/\Psi_0$ , cavity length  $L_c/h$ , pressure amplitude of the unsteady cavitation in water (296K)

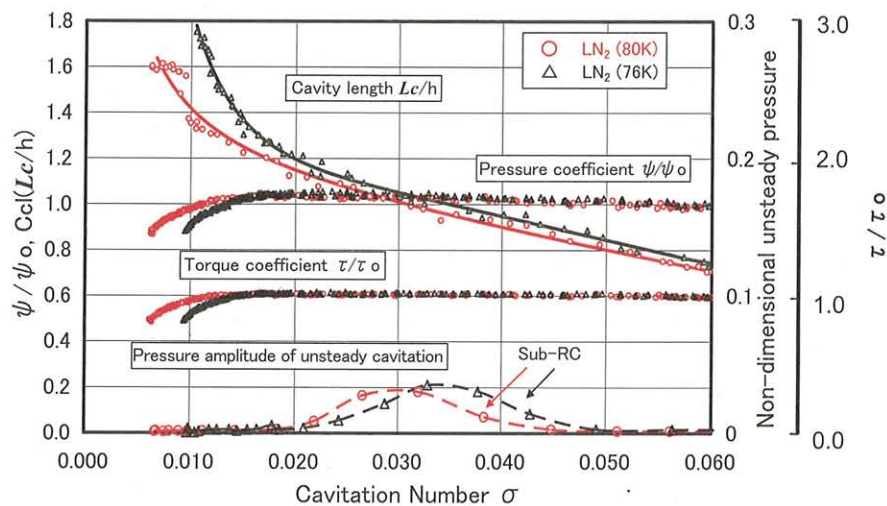


Fig. 5 (b) Cavitation performance  $\Psi/\Psi_0$ , cavity length  $L_c/h$ , torque property  $\tau/\tau_0$ , pressure amplitude of the unsteady cavitation in nitrogen (76K, 80K)

ータからキャビティ長さ同定することが困難であったためである。従って、プロット点の散らばりの幅はデータの読み取り誤差としてばらついているのではなく、キャビティ長さの変動幅を表していることを注意しておく。

一方、窒素試験の場合は、圧力変動波形に軸回転で50回転分の平均化処理を行い、この時間平均されたものを使って図4(a)に示した圧力分布を描きキャビティ長さを求めているのでキャビテーションの非定常性はこの段階で消去されていて、プロット点は平均化された定常長さで見なせるものとなっている。そのため図5(b)に示すキャビティ長さのプロットに大きな散らばりはない。

図にはそれぞれのキャビティ長さのデータを元に最小二乗法で求めたフィット曲線を描いている。このフィット曲線で両試験でのキャビティ長さを比べると、同じキャビテーション数では窒素試験の方がキャビティ長さが短くなっており、キャビティの成長を抑制すると言う本来の観点から熱力学的効果が現れていることが分かる。 $C_d < 1.0$ では両者（水、窒素）の差は比較的小さく、このあたりまでは熱力学的効果はまだ小さい。しかし、キャビティ長さが $C_d \approx 1.2$ を越える付近から両者の差は大きくなる。こういった傾向は液体窒素の温度差4Kの場合の両者（76K, 80K）のキャビティの伸長の差違にも同じ傾向が見てとれることが興味深い。

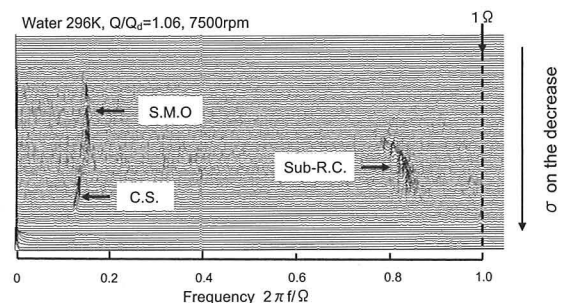
### 5.3 キャビテーション不安定

キャビテーション不安定の発生に関し、図6に翼間の圧力変動の周波数分析結果を示す（軸回転周波数に対する変動周波数の比を比較しやすいように、各々の実験回転数は違うが、周波数を軸回転周波数（ $\Omega$ ）で規格化して図に示した）。水試験（図5(a)）ではキャビテーション数の低下に伴って、先ずサージモードの振動（Surge）

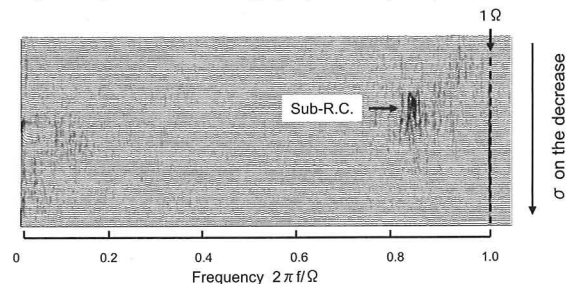
mode oscillation, 以下SMOと略す）が振動周波数約0.16  $\Omega$  で出現し、次に亜同期旋回キャビテーション<sup>(3)</sup>（Sub-synchronous rotating cavitation, 以下Sub-RCと略す）が振動数0.80～0.84  $\Omega$  で、最後にキャビテーションサージ（Cavitation surge, 以下CSと略す）が振動数0.12～0.14  $\Omega$  で発生した。これに対して、窒素試験（図5(b)）の80KではSub-RCが振動周波数0.82～0.84  $\Omega$  で発生した。また、76Kの場合も発生する振動周波数は殆ど同じであった（表1参照）。これらの発生範囲と振幅値を図5(a), (b)に併せて示す。CSの線形安定解析では、キャビテーションサージはキャビテーションの非定常特性（マスフローゲインファクター,  $M = -\partial V_c / \partial \phi$ ）とキャビテーションコンプライアンス,  $K = -\partial V_c / \partial \sigma$ 、およびポンプゲイン（ $\mu = \partial \Psi / \partial \sigma$ ）、システム（実験ループ）の特性と関係してその発散限界が決まる。今回の実験で発生するキャビテーション不安定の種類の違いおよび発生の有無が、作動流体の熱力学的効果がキャビテーションの非定常特性に影響して差を生んだものなのか、実験を行ったシステムの違いによるものなのか、その判断は難しい。しかし、著者らが行った他の実験、およびCervoneら<sup>(10)</sup>が同じ実験ループで行った常温水（293K）と熱水（343K）の試験結果（熱水ではCSの発生が抑制される）等から推定すると、熱力学的効果はCSを抑制する効果を持つものと考えている。このことについては6.2項で改めて検討する。

Table 1 Comparison of the frequency of unsteady cavitation in water (296K) with that in nitrogen (76K, 80K)

Test condition	Unsteady cavitation	Frequency $2\pi f / \Omega$
Nitrogen, 76K $Q/Q_d=1.05$ , $N=18300\text{rpm}$	Sub-RC	0.82 ~ 0.85
Nitrogen, 80K $Q/Q_d=1.05$ , $N=18300\text{rpm}$	Sub-RC	0.82 ~ 0.84
Water, 296K, $Q/Q_d=1.06$ , $N=7500\text{rpm}$	SMO	0.16
	Sub-RC	0.79 ~ 0.84
	CS	0.12 ~ 0.14



(a) Surge mode oscillation (SMO), sub-synchronous rotating cavitation (Sub-RC) and cavitation surge (CS) in water (296K)



(b) Sub-synchronous rotating cavitation (Sub-RC) in nitrogen (80K)

Fig. 6 Comparison of FFT analyses of unsteady pressure on the casing wall in water with that in nitrogen

## 6. 検討

### 6.1 温度降下に関する熱力学的効果

キャビテーションの熱力学的効果の程度を表す指標として次に述べる仮定から、推定されるキャビティ内の温度降下量 $\Delta T$ : 温度降下 ( $\Delta T = T_\infty - T_c$ : 遠方の流体 ( $T_\infty$ ) とキャビティ内 ( $T_c$ ) の温度差) を算出する<sup>(2)</sup> (11)。

まず、キャビティ内の飽和蒸気圧 ( $p_c$ ) をキャビティから遠く離れた温度が測定できる位置での液体の温度 ( $T_\infty$ ) における飽和蒸気圧 ( $p_v(T_\infty)$ ) と考えると、キャビテーション数  $\sigma$  は次式となる。

$$\sigma = \frac{p_{ref} - p_v(T_\infty)}{\frac{1}{2}\rho_L U^2} \quad (1)$$

( $p_{ref}$ : 参照点の圧力,  $p_v$ : 飽和蒸気圧,  $U$ : インデューサ周速)

一方、実際のキャビテーション現象を局所的に考えて、キャビティ内の温度 ( $T_c$  ( $< T_\infty$ )) における飽和蒸気圧  $p_c$  を用いると、キャビテーション数  $\sigma_c$  は次式となる。

$$\sigma_c = \frac{p_{ref} - p_c}{\frac{1}{2}\rho_L U^2} = \frac{p_{ref} - p_v(T_c)}{\frac{1}{2}\rho_L U^2} \quad (2)$$

( $p_c$ : キャビティ温度における飽和蒸気圧 ( $= p_v(T_c)$ ))

この二式より、遠方での温度 ( $T_\infty$ ) とキャビティ内の温度 ( $T_c$ ) の差  $\Delta T$  ( $= T_\infty - T_c$ , 温度降下量) は次式で表される。

$$\frac{1}{2}\rho_L U^2(\sigma_c - \sigma) = \int_{T_c}^{T_\infty} \frac{dp_v}{dT} dT \quad \Delta T = T_\infty - T_c \quad (3)$$

式 (3) の関係より、温度降下  $\Delta T$  は対応する2点のキャビテーション数の差 ( $\sigma_c - \sigma$ ) から求めることができる。本研究においては、図5(a), (b) に示したフィット曲線でのキャビティ長さが等しいときに水と液体窒素中で、キャビテーション流れの様相が同じになると考え、この時式 (3) の関係が成り立つものとして  $\Delta T$  を推定することにする。

図7は、図5(a), (b) から同じキャビティの長さに対する ( $\sigma_c - \sigma$ ) を求め、式 (3) より温度降下量  $\Delta T$  を計算しキャビティ長さに対してその変化を示したものである。なお、 $\Delta T$  の計算にはキャビテーション数の差 ( $\sigma_c - \sigma$ ) から求まる圧力差  $\Delta p_v$  が、インデューサ入口温度を基準として図1(a) に示した飽和圧力/温度線図上の飽和圧力差に等しくなる温度差を  $\Delta T$  として計算した。

前報<sup>(2)</sup> の  $Q/Q_d=1.00$  の場合と同様、80K の場合はキャビティ長さがスロート付近 ( $C_d = 1.0$ ) に達すると温度降下量  $\Delta T$  の増加の傾向が一度停滞し、キャビティがス

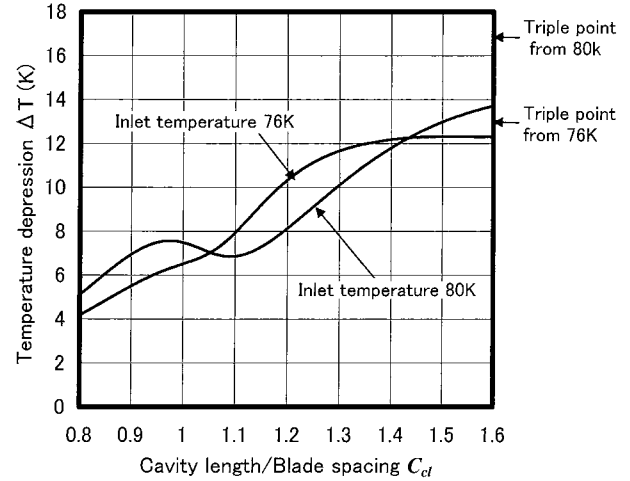


Fig. 7 Estimated temperature depression  $\Delta T$  as a function of the cavity length  $C_d$

ロートを越える ( $C_d > 1.1$ ) と温度降下量は再び増加し、その後 ( $C_d > 1.4$ ) は温度降下量の増加傾向が若干鈍って行く様相を示している。一方、76K の場合は  $C_d = 1.0$  付近で温度降下量  $\Delta T$  が一度停滞する傾向は小さいが、温度効果が増加する傾向は  $C_d > 1.3$  で頭打ちとなりそれ以上のキャビティ長さでは、 $\Delta T$  はほぼ横這いとなる。 $T_\infty=80K$  の場合ではキャビティ長さが  $C_d = 1.6$  の時に温度降下量 ( $\Delta T = T_\infty - T_c$ ) が約 14K であり、推定されるキャビティ内の温度  $T_c$  は  $T_c = T_\infty - \Delta T = 66K$  で窒素の三重点温度 ( $T_t$ ) = 63.1K に若干余裕を残す。一方、 $T_\infty=76K$  の場合にはキャビティ長さが  $C_d = 1.3$  付近から温度降下量は約 12K でほぼ一定となり、それ以上の温度降下はない。温度降下量が約 12K の場合に推定されるキャビティ内の温度  $T_c$  は  $T_c = T_\infty - \Delta T = 64K$  で窒素の三重点温度 ( $T_t$ ) = 63.1K にほぼ一致する。この結果から、図2に示したように降温した液体窒素のように作動温度が比較的三重点に近い場合には、三重点が温度降下の上限となるために熱力学的効果の大きさがそこで制限されるものと考えられる。このことは、熱力学的効果を考える場合に単に物性値から決まるような熱力学的なパラメータだけでなく、作動点と三重点までの温度降下量の余裕の大小を熱力学的効果の程度の差に考慮しておかなければならないことを示唆しており、渡邊ら<sup>(12)</sup> の理論解析においても同様のことが指摘されている。

### 6.2 キャビテーション不安定の熱力学的効果

5.3に述べたように水試験と窒素試験で異なるキャビテーション不安定の発生が見られた。それらの発生キャビテーション数範囲を図8に比較して示す。ここで水試験のみにSMOとCSが発生したが、文献(3)に示すように



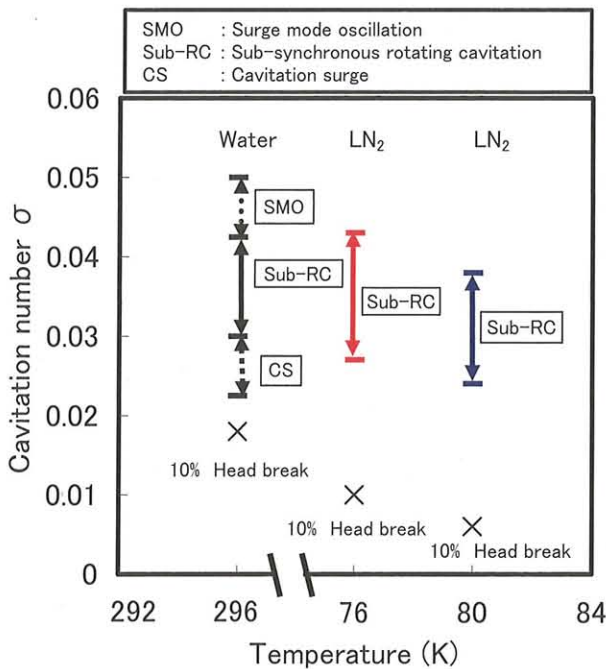


Fig. 8 Range of unsteady cavitations in water (296K) and in nitrogen (76K, 80K)

SMOとSub-RCは翼1枚のキャビティの振動から見ると非常に似通った特性を示す。つまりSMOは翼3枚で各々のキャビティが同相で振動するのに対して、Sub-RCは120度(3枚翼)づつ位相が異なってキャビティが振動していると見なせる。そのため近似的に“SMOの振動周波数+Sub-RCの振動周波数=軸回転周波数”という関係が多く、今回の場合も概略その関係が成り立っている。このことから、この2種を類似のキャビテーション不安定現象と考え、水試験と窒素試験(温度変化試験も含めて)でいずれも $C_d > 1.0$ 付近で発生しており、この種のキャビテーション不安定の発生は主にキャビティ長さに依存しており、熱力学的効果により平均長さの伸長が抑制される分だけキャビテーション不安定の発生範囲がキャビテーション数の小さい方へシフトしていると考えることが出来る。この結果からこれらのキャビテーション不安定は、熱力学的効果の影響よりも本質的にキャビティ長さに依存する流体力学的な不安定だと考えている。

次に、水試験の低キャビテーション数にのみ発生したディープなCSについてキャビテーションの非定常特性 $K$ ,  $M$ から考察する。そのために図9に、同じインデューサで流量比 $Q/Q_d = 1.00$ の場合<sup>(2)</sup>と今回の流量比 $Q/Q_d = 1.05$ (水試験では1.06)の場合の、キャビティ長さ(平均長さを見なすフィット曲線)を比較して示す。水試験におけるCSの発生範囲は $\sigma = 0.022 \sim 0.03$ であり、この時 $Q/Q_d = 1.00$ のキャビティ長さは $Q/Q_d = 1.06$ に比べてやや長い。つまり、キャビティ容積( $V_c$ )がキャビテ

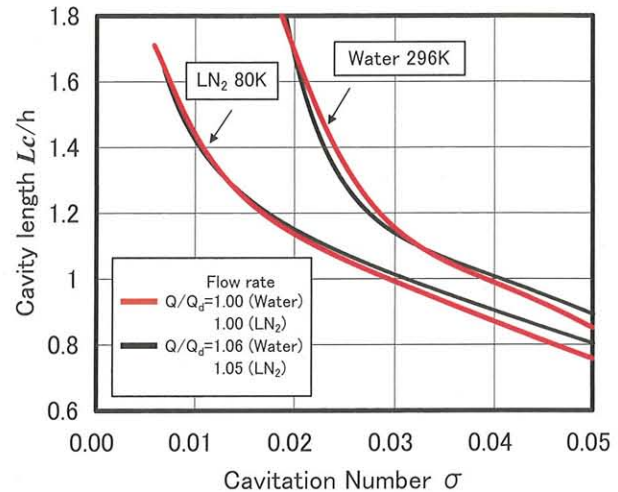


Fig. 9 Comparison of cavity length in nitrogen (80K,  $Q/Q_d = 1.00$  and  $1.05$ ) with that in water (296K,  $Q/Q_d = 1.00$  and  $1.06$ )

ィ長さ( $L_c$ )に比例すると仮定し準定常的に考えると、このキャビテーション数の範囲でマスフローゲインファクタ $M (= -\partial V_c / \partial \phi)$ が正で大きくなる。これは、線形安定解析<sup>(13)</sup>から見たキャビテーションサージの発生限界である、 $M > 2(1+\sigma)\phi K$ から見てもキャビテーションサージが発生しやすい方向となる。一方、液体窒素では $Q/Q_d = 1.00$ と $1.05$ でキャビテーション数全域で $M$ が正に大きくなる傾向はなく、窒素試験では $M$ は0に近い、もしくは負と推定され、キャビテーションサージは発生しにくい方向になっている。このように、実験で得られた翼端キャビテーションに限った推論ではあるが、水試験と窒素試験では $M$ が熱力学的効果によって影響されCSの抑制に影響しているものと考えている。

一方、他方の非定常キャビテーション特性、キャビテーションコンプライアンス $K (-\partial V_c / \partial \sigma)$ から見ると、熱力学的効果があるとキャビティの伸長が抑制されるので $K$ は小さくなる。このことは、 $M > 2(1+\sigma)\phi K$ から見ると熱力学的効果がある方がCSを発生させやすくなるが、前述のように $M$ が0に近いと考えればこれはさほど影響しない。

一方、今回の水試験に発生したキャビテーションサージは図10に示すように逆流渦キャビテーションを伴った振動であり、画像で見る限り翼端に発生するキャビテーションと逆流渦キャビテーションの変動には相関がある。以下では逆流渦キャビテーションを伴うサージに関する山本<sup>(14)</sup>の実験を元に考察を進めることにする。山本の実験結果によれば流量変動に対する逆流渦キャビティ体積変動の応答はその変動周波数が大きくなるほど遅れが大きくなり(これは、Murayamaら<sup>(15)</sup>の迎角変動に対

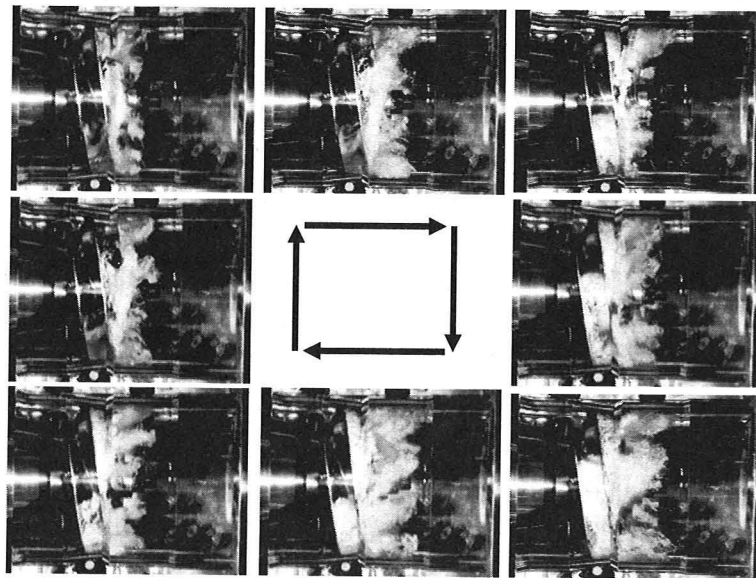


Fig. 10 Photograph under the cavitation surge (CS) in water (296K), showing the fluctuation both of back flow vortex cavitation and tip leakage vortex cavitation

する単独翼の翼端漏れ渦キャビテーションの体積変動の応答についても、同様な遅れが認められている。) この遅れ  $\alpha$  が  $-\pi/2$  となる限界周波数 (文献 (14) では  $f_{90}$ ) 以内に系の固有振動数 ( $f$ ) がある場合 ( $f < f_{90}$ ) にのみ、キャビティの排除仕事に系にエネルギーを与えることになって逆流渦キャビテーションの変動を伴うCSが発生するとされている。これから考えると、まず熱力学的効果により  $K$  が小さくなると、系の固有振動数は  $K^{-1/2}$  で高くなるので、熱力学的効果がある方が固有振動数は高くなる。またキャビティの成長を抑制するのが熱力学的効果であるから流量変動に対するキャビティ体積変動の応答は、熱力学的効果がある方が更にその遅れは大きくなり、 $f_{90}$  は小さくなるものと予想される。以上の2点は遅れ  $\alpha$  が  $-\pi/2$  となる限界周波数以内に系の固有振動数がある場合という発散条件に対して、それぞれ逆の方向に作用するので、熱力学的効果がある方が、キャビティの排除仕事に系にエネルギーを与えることにはなりにくくなり、窒素試験ではキャビテーションサージが発生しにくくなったものと考えられる。

以上の推論の確証を得るには、液体窒素中での逆流渦キャビテーションの非定常特性を調べることが必須であるが、それは容易なことではない。しかし、今後は吸込み性能だけでなく、キャビテーション不安定に熱力学的効果が与える影響を調べることは重要と考えており、数値解析や要素試験を通して引き続き研究を続けて行きたいと考えている。

## 7. 結言

水 (296K) と液体窒素 (76K, 80K) のインデューサの翼端に発生するキャビテーションの計測から、熱力学的効果が吸込み性能とキャビテーション不安定に与える影響について考察した。

- (1) 熱力学的効果によりキャビティ内の温度が三重点の温度に近づくと、温度降下の増加傾向は頭打ちとなり、それ以上の熱力学的効果は期待出来なくなる。
- (2) 亜同期旋回キャビテーション、サージモードの振動の発生範囲は、主にキャビティ長さにのみ依存しており、これらは熱力学的効果にさほど影響されない流体力学的不安定である。
- (3) 水試験ではキャビテーションサージが発生したが、窒素試験では発生しなかった。この原因は熱力学的効果がキャビテーションの非定常特性に影響し、キャビティの排除仕事にシステムにエネルギーを与えにくい方向になったためと考えられる。従って、キャビテーションサージは熱力学的効果に強く影響されるキャビテーション不安定の一種であると言える。

## 謝辞

インデューサ試験機の製作に尽力いただいた石川島播重工業株の安富義展氏に謝意を表す。また、極低温インデューサ試験施設の維持・運用に協力いただいた神戸製鋼所株山下重正氏、小倉康正氏に感謝する。



## 参考文献

- (1) Ruggeri, R. S., and Moore, R. D., "Method for Prediction of Pump Cavitation Performance for Various Liquid Temperatures and Rotative Speeds," NASA, (1969), TN D-5292.
- (2) 吉田義樹, 菊田研吾, 長谷川敏, 島垣 満, 中村憲明, 徳増 崇, "液体窒素中のインデューサに発生するキャビテーションの熱力学的効果", 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, (2006), JAXA-RR-05-020.
- (3) 吉田義樹, 橋本知之, 島垣 満, 渡邊 聡, "亜同期旋回キャビテーションについての論説", ターボ機械, Vol. 34, No. 3, (2006), pp.168-180.
- (4) Brennen C. E., "The Dynamic Behavior and Compliance of a Stream of Cavitating Bubbles," Journal of Fluids Engineering, Vol. 95, (1973), pp. 533-541.
- (5) 吉田義樹, 渡邊光男, 長谷川 敏, 橋本知之, 島垣 満, 山田 仁, 志村 隆, "JAXA 極低温インデューサ試験施設", 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, (2006), JAXA-RR-05-042
- (6) 渡邊光男, 長谷川敏, 特許第 2990276 号.
- (7) Uchiumi, M., Kamijo, K., Sakazume, N., and Mihara, R., "Fatigue Strength of Rocket Pump Inducers," (2006), AIAA 2006-5072
- (8) Stepanoff, A. J., "Cavitation Properties of Liquids," Journal of Engineering for Power," Vol. 86, (1964), pp. 195-200.
- (9) 吉田義樹, 木村俊哉, 内海政春, 山田 仁, 安富義展, "多段インデューサの意匠", ターボ機械, Vol. 34, No. 5, (2006), pp. 284-293.
- (10) Cervone, A., Testa, R., and d'Agostino, L., "Thermal Effects on Cavitation Instabilities in Helical Inducers," Journal of Propulsion and Power, Vol. 21, (2005), pp. 893-899.
- (11) Franc, J. P., Rebattet, C., and Coulon A., "An Experimental Investigation of Thermal Effect in a Cavitating Inducer," ASME J. Fluids Eng., Vol. 126, (2004), pp. 716-723.
- (12) 渡邊 聡, 古川明徳, 吉田義樹, "極低温インデューサに生じるキャビテーションの熱力学的効果の解析的検討", 第 83 期日本機械学会流体工学部門講演会, (2005), OS15, No.1512.
- (13) Tsujimoto, Y., Kamijo, K., and Brennen C. E., "Unified Treatment of Flow Instabilities of Turbomachines," Journal of Propulsion and Power, Vol. 17, (2001), pp. 893-899.
- (14) 山本和義, "遠心ポンプのキャビテーションに伴う脈動現象 (第3報)", 機論 B, 58-545, (1992), pp. 180-186.
- (15) Murayama, M., Yoshida, Y., and Tsujimoto, Y., "Unsteady Tip Leakage Vortex Cavitation Originating From the Tip Clearance of an Oscillating Hydrofoil," Journal of Fluids Engineering, Vol. 128, (2006), pp.421-429.

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-06-003

---

発行日 平成18年12月22日  
編集・発行 宇宙航空研究開発機構  
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1  
URL : <http://www.jaxa.jp/>  
印刷・製本 (株) 共 進

---

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。  
宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター  
〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1  
TEL : 029-868-2079 FAX : 029-868-2956

---

© 2006 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等加工することを禁じます。



本書は再生紙を使用しております。