

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

ノズルに発生するキャビテーション気泡群に作用する熱力学的効果

新井山 一樹, 長谷川 敏, 渡邊 光男, 吉田 義樹

2011年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# ノズルに発生するキャビテーション気泡群に作用する熱力学的効果\*

新井山 一樹<sup>\*1</sup>, 長谷川 敏<sup>\*1</sup>, 渡邊 光男<sup>\*1</sup>, 吉田 義樹<sup>\*1</sup>

## Thermodynamic Effects on Cavitation Bubble Cluster in a Nozzle<sup>\*</sup>

Kazuki NIIYAMA<sup>\*1</sup>, Satoshi HASEGAWA<sup>\*1</sup>, Mitsuo WATANABE<sup>\*1</sup> and Yoshiki YOSHIDA<sup>\*1</sup>

### Abstract

Thermodynamic effects on cavitation occurred in a nozzle flow were experimentally investigated with liquid nitrogen. The aspect visualization of cavitating flows shows that the quantity of cavity bubbles increased gradually with the decrease of cavitation number but the size of cavity bubbles did not so change then. And, the temperature measurement of cavitating flows shows that the temperature depression in the cavitating point increased with the decrease of cavitation number. It can be cleared that the temperature of the cavitating point decreases and decreases due to the evaporative latent heat of the increasing cavity bubbles. Furthermore, the size distribution obtained by image analysis on the visualized images shows that cavity bubbles did not grow up easily in the contracted section of the nozzle when the cavitation number is small. However, it also shows that the cavity bubbles did not shrink easily in the diverging section then. These features can be considered because the thermodynamic effects become strong due to the dramatic growth of bubbles at the beginning of cavitation.

**Key Words:** Cavitation, Thermodynamic effect, Cryogenic fluid, Nozzle flow, Flow visualization

### 1. 緒言

キャビテーションの熱力学的効果は、インデューサ性能を向上させ、インデューサに発生するキャビテーション不安定を抑制することが明らかになっている<sup>(1)-(2)</sup>。この熱力学的効果は極低温流体中で顕著であることから、液体水素・液体酸素を作動流体とするロケットエンジン用ターボポンプにおいて、好ましい熱力学的効果を適切に作用させることができれば、インデューサ性能を向上させることができる。このためには、キャビテーションに作用する熱力学的効果の程度を定量的に把握し、設計に適用しうる指針を確立することが必要となる。

“水”と“Thermo-sensible な流体”との吸い込み性能の差から、Stepanoff<sup>(3)</sup>はキャビテーションの熱力学的効果の指標として B ファクタを提案している。

$$B = \frac{\rho_L C_{p,L} \Delta T}{\rho_V L} = \frac{\Delta T}{T^*} \quad (1)$$

$$T^* = \frac{\rho_V L}{\rho_L C_{p,L}} \quad (2)$$

ここで、 $\rho_L$ 、 $\rho_V$ 、 $C_{p,L}$ 、 $L$ 、 $\Delta T$  はそれぞれ、液相密度[kg/m<sup>3</sup>]、気相密度[kg/m<sup>3</sup>]、液相定圧比熱[J/kg・K]、蒸発潜熱[J/kg]、温度降下量[K]を表す。 $T^*$ は流体の物性に対する特性温度[K]であり、表 1 に示すように、 $T^*$ は液体酸素で水の約 30 倍、液体水素では水の 50 倍以上程度となるため、極低温流体では熱力学的効果による温度降下が顕著となる。また、同一流体であれば温度が高いほど特性温度は大きく、熱力学的効果による温度降下が顕著となる。

Table 1 Thermodynamic parameter of several fluids

Fluid	$T$ [K]	$T^*$ [K]	$\Sigma$
Hydrogen (Normal boiling point)	20	0.80	779,440
Nitrogen (Experimental point)	86	1.25	135,240
Nitrogen (Normal boiling point)	77	0.54	25,670
Oxygen (Normal boiling point)	90	0.48	15680
Water (Room temperature)	300	0.015	8.16

一方で、Brennen<sup>(4)</sup>は Rayleigh-Plesset 方程式の圧力項に対して温度降下による飽和蒸気圧の変化を考

\* 平成 23 年 2 月 2 日受付 (Received 2 February, 2011)

\*1 宇宙輸送ミッション本部 宇宙輸送系推進技術研究開発センター (Space Transportation Propulsion Research and Development Center, Space Transportation Mission Directorate)

慮し、さらに気液界面近傍における熱伝導を考慮することで、 $\Sigma$  パラメータ [ $\text{m}^{3/2}/\text{s}$ ] を提案している。

$$\Sigma = \frac{\rho_v^2 L^2}{\rho_v^2 C_{p,L} T \sqrt{\alpha_L}} \quad (3)$$

ここで、 $\alpha_L$  は液相の温度拡散率 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] である。 $\Sigma$  パラメータは単一気泡の成長を抑制する程度を現す指標であり、 $T^*$  同様、液体水素などの極低温流体で大きく、同一流体では温度が高いほど大きくなる。さらに Kato<sup>(5)</sup> や Watanabe<sup>(6)</sup>、Franc<sup>(7)</sup> はそれぞれ、同様に気液界面周囲の熱伝導あるいは熱伝達を考慮し、周囲流体の流速の影響を考慮したパラメータを提案し、キャビテーション流れの流速が気泡の成長過程に影響することを明らかにしている。ここでは、Watanabe による  $\Sigma^*$  パラメータを式(4)として示す。

$$\Sigma^* = \frac{\rho_v^2 L^2}{\rho_v^2 C_{p,L} T \sqrt{\alpha_L}} \sqrt{\frac{D}{U^2}} \quad (4)$$

これらのことから、キャビテーションの熱力学的効果を定量化するためには、キャビテーション流れの温度降下量とキャビテーション気泡群の特徴量(気泡径、数、分布など)との相関性を実験的に把握する必要がある。こうした極低温キャビテーションの実験データとして Hord ら<sup>(8)</sup> が実施した液体水素・液体窒素の実験があるが、個々の気泡が判別できるレベルの可視化画像は得られない。そこで本研究では、ノズルを供試体とする極低温キャビテーション可視化実験を実施し、キャビテーションの温度降下量の直接計測とキャビテーションの可視化観察及び画像解析によって、キャビテーション気泡群の成長過程に対する熱力学的効果の程度を考察した。

## 2. 実験装置

図 1 に本研究で使用した極低温キャビテーションタンネル<sup>(9)</sup>のシステム概要図を示す。本設備では、作動流体である液体窒素をランタンクからキャッチタンクへと流動させ、途中に設置したテストセクションでキャビテーションを発生させる。作動流体の駆動には高圧の窒素ガスを用いている。また、ランタ

ンクに液体窒素を充填し、窒素ガスでランタンクを飽和蒸気圧以上に昇圧することで、凝縮熱を利用して液体窒素の温度を上昇させることができる。本実験では作動流体温度を 86 K とした。テストセクションの上流に設置した流量計と下流に設置した流量調節弁を用いて、供試部の流量や圧力を調節した。

図 2 には供試部の概要図を示す。本設備の主配管はステンレス管(内径 83.1 mm)を用いており、その配管に縮流部内径が 40.6 mm となるノズルを取り付けている。供試ノズルはキャビテーションの様相を可視化するため、透明ポリカーボネートで製作しており、さらに、低温による透視管への霜付きを防ぐため、ノズルを覆う真空断熱槽を設け、視界を確保している。

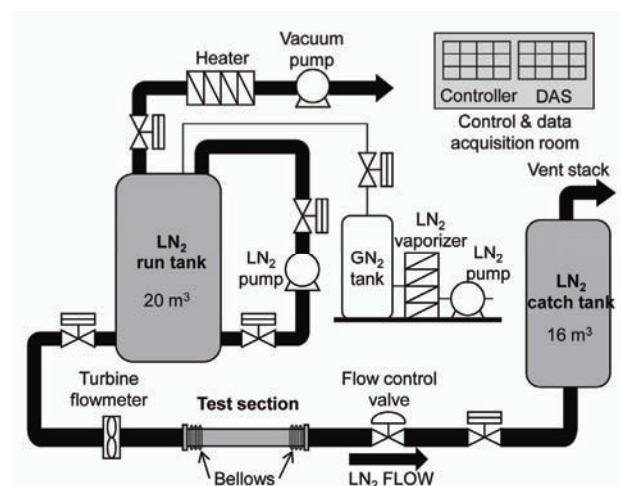


Fig.1 Schematic diagram of cryogenic cavitation tunnel

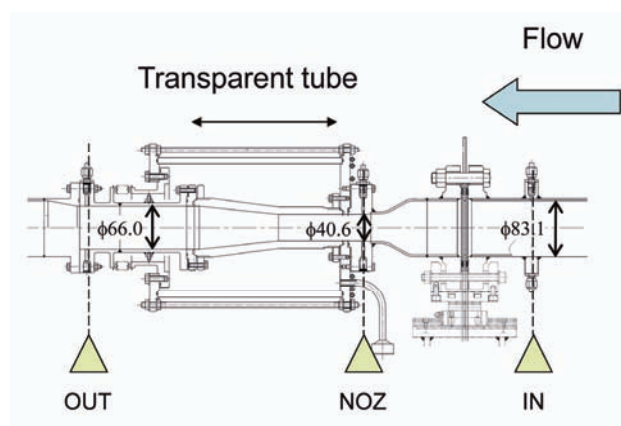


Fig.2 Schematic diagram of the test section

供試体であるノズルの上流(IN)、縮流部(NOZ)、下流(OUT)に圧力センサ及び温度センサを設置した。キャビテーション流れの温度降下量を高精度に計測す

るため、ノズル上流及び縮流部には図 3 に示す小型ダイオードセンサを用いた温度プローブを用いた。本ダイオードセンサ(Lakeshore DT-670-SD)は 77 K において、校正済の熱電対の誤差よりも約一けた小さい $\pm 23\text{mK}$ の誤差で計測が可能である。なお、温度プローブは、キャビティが発生する壁面近傍の温度を計測できるように差し込み深さを調節した。センサは発生するキャビティの気泡径に対して十分に大きいことから、キャビテーション発生部で計測する温度は、温度降下した境界層の局所時空間平均温度と考えられる。

キャビテーションの可視化観察には、デジタル一眼レフカメラ Nikon D300 を使用し、閃光時間  $9\mu\text{s}$  のフラッシュで撮影した。可視化画像より算出した撮影解像度は約  $45\mu\text{m}/\text{pixel}$  である。

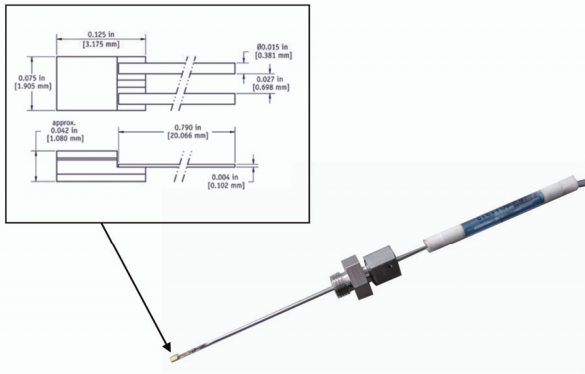


Fig.3 Temperature probe with cryogenic miniature diode sensor (Lakeshore DT-670-SD: height 1.1 mm, width 1.9 mm, length 3.2 mm).

### 3. 実験結果

実験時には、ランタンクを  $0.4\text{ MPa}$  に加圧した状態で液体窒素を流動させ、供試部下流の流調弁を段階的に開くことで供試部のキャビテーション数を降下させ、キャビテーションを発生させた。図 4 に実験時のランタンク ( $p_{\text{RUN}}$ )、キャッチタンク ( $p_{\text{CATCH}}$ ) の圧力及び流調弁開度 (FCV)、体積流量 ( $Q$ ) の時間履歴を示す。流調弁を段階的に開くことで徐々に流量が上昇していることが分かる。さらに、図 5 には供試部入口キャビテーション数  $\sigma_{\text{IN}}$  (式(5)), 入口-縮流部間の温度降下量  $\Delta T$  (式(6)) 並びに撮影時刻のマーカーを示している。 $p_{\text{IN}}$ ,  $p_{\text{SAT}}$ ,  $U_{\text{TH}}$ ,  $T_{\text{IN}}$ ,  $T_{\text{NOZ}}$  はそれぞれ、供試部入口圧、入口温度に対する飽和蒸気圧、

縮流部流速、入口温度、縮流部温度である。

図 4 と図 5 の比較から、流調弁を開き流量が上昇するにつれて、供試部入口キャビテーション数が降下し、それとともに温度降下量が増大していることが分かる。

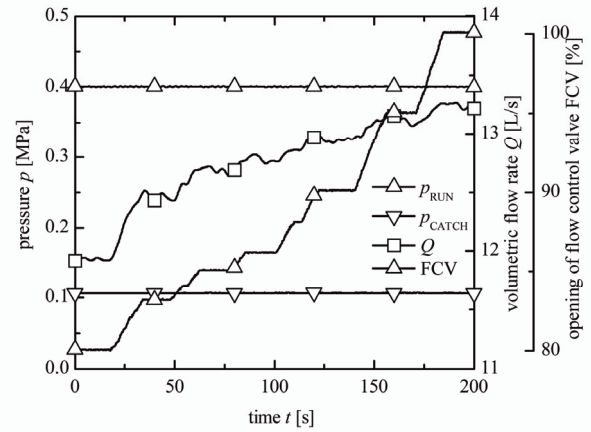


Fig.4 Time evolution of the pressures in run tank and catch tank, the opening of flow control valve and the volumetric flow rate.

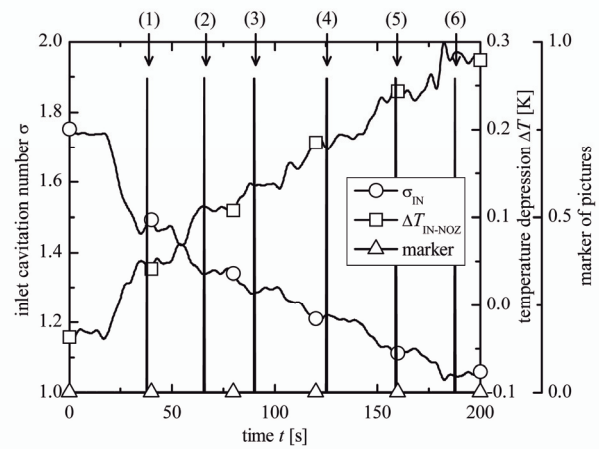


Fig.5 Time evolution of the inlet cavitation number and the temperature difference between the inlet flow and the nozzle throat.

$$\sigma_{\text{IN}} = \frac{2(p_{\text{IN}} - p_{\text{SAT}})}{\rho_L U_{\text{TH}}^2} \quad (5)$$

$$\Delta T = T_{\text{IN}} - T_{\text{NOZ}} \quad (6)$$

図 6 には代表的なキャビテーション流れの様相の

可視化写真を示す．写真の(a)，(b)はそれぞれ，図5における撮影時刻(1)および(6)に対応している．キャブレーションとして，各撮影時刻における入口キャビテーション数  $\sigma_{IN}$ ，式(4)の  $\Sigma^*$ パラメータ，式(1)のBファクタの時間平均値を示している．なお，Bファクタの計算には式(6)の温度降下量を用いている．図6(a)と(b)との比較から，キャビテーション数の降下に伴ってキャビティの発生量が増加してノズル全体に拡散し，かつ，Bファクタが増大していることが分かる．また，水で発生するキャビティ<sup>(10)</sup>に比べて液体窒素に発生するキャビティは細かな気泡で構成されていることが分かる．なお，キャビテーション数の降下とともに  $\Sigma^*$ パラメータは減少しているがその変化率が小さいことから，本実験結果における流速の影響は小さいと考えられる．

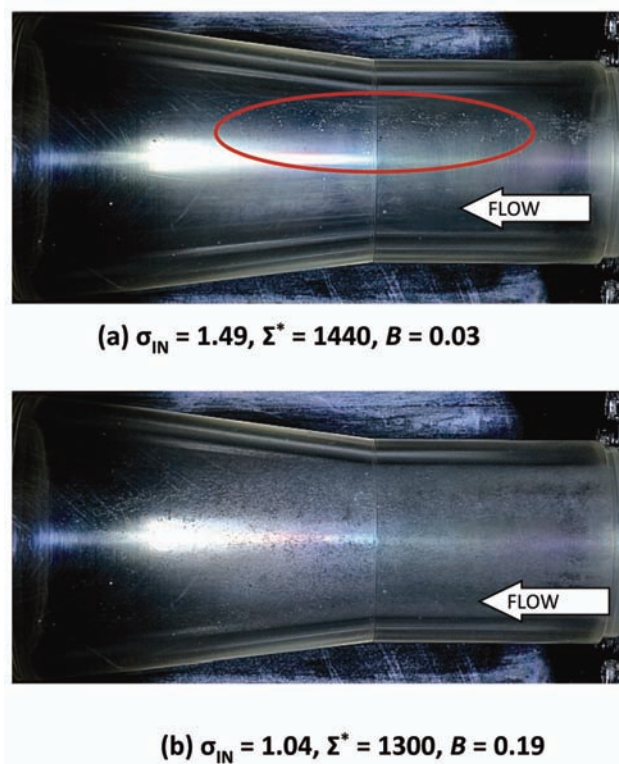


Fig.6 Typical aspect of the cavitating nozzle flows with the inlet cavitation number  $\sigma_{IN}$ , the thermodynamic parameter  $\Sigma^*$  and the Stepanoff's B-factor.

ここで，各時刻のキャビティの様相に着目すると，キャビテーション数の降下に伴いキャビティの発生量は増加しているものの，気泡サイズそのものは大きく変化していないことが画像から推測できる．そこで，キャビティの様相をより定量的に把握するた

め，可視化画像に対してデジタル処理を行い，キャビティの特徴量を抽出した．ただし，本報告では簡易的に，キャビテーションの可視化画像から背景画像を差分し，さらにその差分画像を適切に2値化することで気泡の特徴量を抽出する方法を採った．

図7は撮影時刻(1)と(6)における気泡半径の度数分布である．一般的な水の気泡数分布と同様，気泡径が小さくなるほど気泡数が多くなっている．撮影時刻による違いに着目し比較すると，時刻(1)から(6)になってキャビテーション数が降下することによって，全体的に気泡数が増加していることが分かる．なお， $125\mu\text{m}$ の区分に小さなピークがあるが，これは可視化画像から目視で判別した場合の代表的な気泡径とおおよそ一致しており，また，このピーク位置はキャビテーション数が変化しても変わらない．ただし，気泡数が増加する割合はこのピーク位置付近で高くなっている．

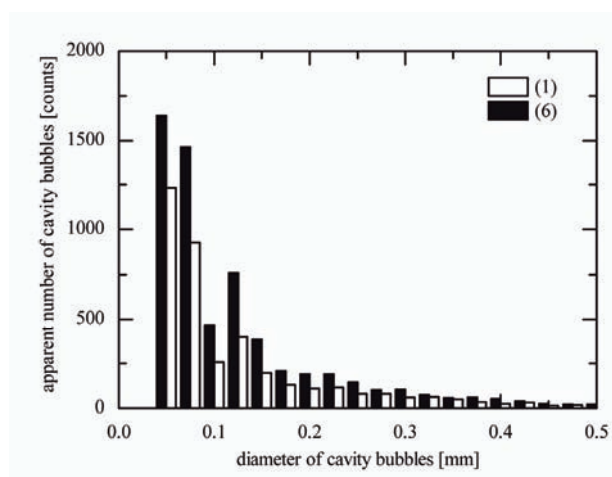


Fig.7 Typical histogram of the diameter of cavity bubbles estimated from the binarized image of (1) and (6) shown in Fig. 5.

図8はノズル内における平均気泡径の変化を示す．平均気泡径は，図9に示すようにノズル内を10個の領域に分割し，各領域における気泡数分布から空間的な平均気泡径を算出し，さらにその時間平均を取ったものである．

平均気泡径はノズルストレート部(A01～A05)では徐々に大きくなり，拡大部(A05～A10)に入ってから徐々に小さくなっていることが分かる．ただし，撮影時刻(1)～(3) ( $\sigma_{IN} = 1.49 \rightarrow 1.29$ )のキャビテーション数が大きい時には拡大部に入ると同時に気泡径



が小さくなり始めているのに対して、撮影時刻(4)～(6) ( $\sigma_{IN} = 1.22 \rightarrow 1.04$ )では徐々に平均気泡径が最大となる位置が下流側にシフトしている。また、平均気泡径はキャビテーション数の降下とともに全体的に小さくなっていることが分かる。

低キャビテーション数の場合に、平均気泡径が小さくなった原因は以下のように考えられる。まず、キャビテーション数が大きい場合には、Rayleigh-Plesset の式からノズルの気泡発生開始点におけるキャビティの成長速度が小さくなると考えられる。この結果、蒸発潜熱による温度降下量が小さくなり熱力学的効果の程度が弱くなるため、個々の気泡が大きく成長し、平均気泡径が大きくなったものと考えられる。一方、キャビテーション数が小さい時には、ノズルの気泡発生開始点におけるキャビティの発生・成長速度は大きくなる。この結果、温度降下量が大きくなり熱力学的効果の程度が強くなるため、個々の気泡の成長が抑制され、平均気泡径が小さくなったものと考えられる。図5や図6より、キャビテーション数が小さくなるにつれて熱力学的効果の指標となる温度降下量が增大していることから、熱力学的効果の程度が強くなっていることが分かる。本実験結果より、キャビテーションの熱力学的効果が顕著となる極低温流体においては、インデューサの入口でわずかなキャビティを意図的に発生させることで流体の温度を降下させ、過大なキャビティの成長を抑制できる可能性が示唆される。

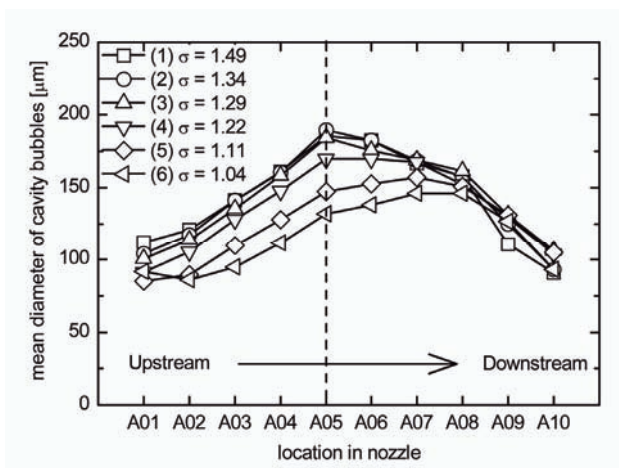


Fig.8 Mean diameter of cavity bubbles in each analyzed area at several inlet cavitation numbers.

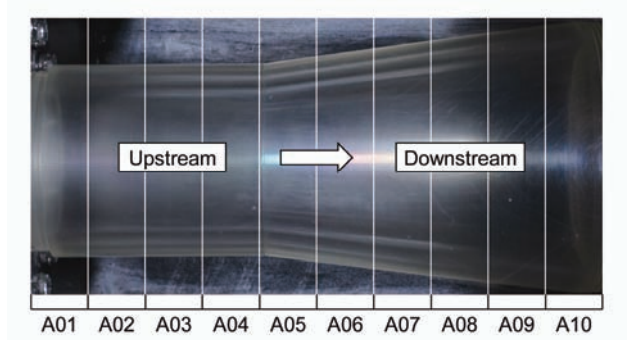


Fig.9 Locations of A01-A10 with the flip horizontal image.

#### 4. 結言

液体窒素を作動流体とするノズルキャビテーション可視化実験を実施し、キャビテーション流れにおける温度降下量と画像解析から以下の知見を得た。

- (1) キャビテーション数の降下に伴い、キャビティの発生量が増大し、キャビテーション流れの温度降下量は増大した。
- (2) キャビテーション数の降下とともに、発生するキャビティの気泡数は増大するものの、代表気泡径は大きく変化しない。
- (3) 低キャビテーション数の場合に平均気泡径が小さくなったのは、気泡の初期成長速度が大きいいためキャビティ発生開始点で温度降下量が大きくなり、ノズルにおける熱力学的効果の作用が強くなったことで、個々の気泡の成長が抑制されたためと考えられる。

#### 参考文献

- (1) Kikuta, K., et al., 2008, "Thermodynamic Effect on Cavitation Performances and Cavitation Instabilities in an Inducer," Trans. of ASME J Fluids Eng. 130, 111302.
- (2) Yoshida, Y., et al., 2009, "Thermodynamic Effect on Rotating Cavitation in an Inducer," Trans. of ASME J Fluids Eng. 131, 091302.
- (3) Stepanoff, A. J., 1964, "Cavitation Properties of Liquids," J Eng. Power, 86, pp.195-200.
- (4) Brennen, C.E., 1995, "Cavitation and Bubble Dynamics," Oxford University Press.
- (5) Kato, H., 1984, "Thermodynamic Effect on Incipient and Developed Sheet Cavitation," Proceedings of ASME FED-Vol.16, International Symposium on Cavitation, pp.127-136.
- (6) Watanabe, S., et al., 2007, "Steady Analysis of the

Thermodynamic Effect of Partial Cavitation Using the Singularity Method,” Trans. of ASME J. Fluids Eng., 129(2), pp.121-127.

- (7) Franc, J. P., 2004, "Fundamentals of Cavitation," Fluid Mechanics and its Applications, Vol.76, Kluwer Academic Publishers.
- (8) Hord, J., et al., 1972-1974, “Cavitation in Liquid Cryogens: I-Venturi, II-Hydrofoil, III-Ogives, IV-Combined Correlations for Venturi, Hydrofoil, Ogives, and Pumps,” NASA CR-2054, 2156, 2242, 2448.
- (9) Niiyama, K., et al., 2010, “Thermodynamic Effects on Cavitation in a Cryogenic Nozzle Flow,” Proceedings of the 7th International Conference on Multiphase Flow ICMF2010, Tampa, FL.
- (10) 大場ら, 1973, “ベンチュリのキャビテーション衝撃圧の解明(第2報), ” 速研報告 第33巻, 第326号, pp.37-50.