

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

JAXA極低温キャビテーショントンネルの 設備機能確認試験結果

Verification Test Results of the Cryogenic Cavitation Tunnel in JAXA

新井山 一樹^{*1}, 吉田 義樹^{*1}, 長谷川 敏^{*1}, 渡邊 光男^{*1},
橋本 知之^{*1}, 島垣 満^{*1}, 菊田 研吾^{*1}, 永浦 克司^{*2}, 田村 努^{*2}
Kazuki NIIYAMA^{*1}, Yoshiki YOSHIDA^{*1}, Satoshi HASEGAWA^{*1}, Mitsuo WATANABE^{*1},
Tomoyuki HASHIMOTO^{*1}, Mitsuru SHIMAGAKI^{*1}, Kengo KIKUTA^{*1},
Katsuji NAGAURA^{*2} and Tsutomu TAMURA^{*2}

- *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
- *2: 航空宇宙技術振興財団
Foundation for Promotion of Japanese Aerospace Technology

2009年2月
February 2009

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

JAXA 極低温キャビテーションタンネルの設備機能確認試験結果*

新井山 一樹*¹, 吉田 義樹*¹, 長谷川 敏*¹,
渡邊 光男*¹, 橋本 知之*¹, 島垣 満*¹,
菊田 研吾*¹, 永浦 克司*², 田村 努*²

Verification Test Results of the Cryogenic Cavitation Tunnel in JAXA*

Kazuki NIIYAMA*¹, Yoshiki YOSHIDA*¹, Satoshi HASEGAWA*¹,
Mitsuo WATANABE*¹, Tomoyuki HASHIMOTO*¹, Mitsuru SHIMAGAKI*¹,
Kengo KIKUTA*¹, Katsuji NAGAURA*² and Tsutomu TAMURA*²

ABSTRACT

To clarify the thermodynamic effects on cavitation in cryogenic propellants, new Cryogenic Cavitation Tunnel (CCT) was constructed in the Cryogenic Inducer Test Facility at the Kakuda Space Center of JAXA. Liquid nitrogen is used as the working fluid for experiments of the thermodynamic effects on cavitation. The performance of the tunnel was confirmed to be well-satisfied from the verification test by using a cavitating orifice. In this article, the results of the verification test and the future program are presented.

Key Words: Cavitation, Cryogenic Fluids, Thermodynamic Effect, Temperature Depression

1. 緒言

ロケットエンジン用ターボポンプのインデューサは作動流体が極低温流体であるため、作動流体が水の場合に比べてインデューサ性能が向上し⁽¹⁾⁽²⁾、また、キャビテーション不安定現象の発生領域が低キャビテーション数側にシフトする。これは、ロケットの推進剤である液体水素や液体酸素のような極低温流体中では、気泡の成長を抑制する熱力学的効果が非常に強く作用し、キャビテーションの成長が抑制されることに起因している。

ターボポンプの開発においては、初期設計段階でキャビテーション不安定現象の発生やインデューサ性能を正確に予測することが必要であり、こういったキャビテーションの熱力学的効果を考慮したインデューサ性能の予測手法の構築が求められる。現在、CFD によるインデューサ性能の解析⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾が試みられているが、極低温推進剤中の熱力学的効果の程度を正確に捉えるべき解析モデルに問題が残っており、インデューサ性能を十分な精度で予測するまでには至っていない。すなわち、キャビテー

ションに作用する熱力学的効果の定量的なモデル化が求められている。

現在のキャビテーションの熱力学的効果の理論は、単気泡の挙動や熱バランスを基に構築されており、インデューサに発生するクラウドキャビテーションのような気泡群は想定されていない。また、熱力学的効果に関する研究は、Hord⁽⁶⁾、Francら⁽⁷⁾、Katoら⁽⁸⁾によって行われているが、キャビテーションの形態に関わらず一般性があるような物理モデルの構築には至っていない。そこで角田宇宙センター極低温インデューサ試験施設 (Cryogenic Inducer Test Facility, CITF⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾) に極低温キャビテーションタンネル(Cryogenic Cavitation Tunnel, CCT⁽¹¹⁾)を増設し、キャビテーション (気泡群) に作用する熱力学的効果の定量的物理モデルの構築を目的とした研究を進めている。本資料では、この極低温キャビテーションタンネルの設備機能と、設備機能確認試験の結果の概要を報告する。

* 平成 20 年 12 月 11 日受付 (received 11 December, 2008)

*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)

*2 航空宇宙技術振興財団 (Foundation for Promotion of Japanese Aerospace Technology)

2. 試験装置

図1は極低温インデューサ試験施設の全体図である。極低温キャビテーションタンネルはこの極低温インデューサ試験施設の一部に増設され、極低温インデューサ試験設備のランタンク、キャッチタンクなど多くの部分を共用している。

図2には試験中の極低温キャビテーションタンネルを示す。右手側にランタンクが、奥にキャッチタンクがある。中央の配管が試験部であり、作動流体である液体窒素は奥から手前に向けて流れる。

図3は極低温キャビテーションタンネルの系統図を示す。作動流体である液体窒素はランタンクに充填され、気蓄器の高圧ガスによって加圧され、キャッチタンクに向けて流動する。タンク同士をつなぐ配管の途中で試験部があり、試験部は伸縮管によって接続され、交換できるようになっている。試験部上流にはタービン流量計、下流には流量調節弁が設置されている。

図4には、設備機能確認試験に用いた試験部を示す。試験部は、3B規格のステンレス配管に円孔オリフィス(絞り面積比25%)を設置したものである。オリフィスの入口側に1点(IN1)、出口側に4点(OUT1~OUT4)の計測ポートを設けている。各計測ポートはそれぞれ静圧(p)、変動圧(p')、流体温度(T)を計測している。

今回の試験は、極低温キャビテーションタンネルの健全性、運転性能を確認することが主目的であるため、安全を考慮しキャビテーションの可視化は行っていない。また、極低温インデューサ試験設備の機能として、液体窒素を充填したランタンクを加圧・減圧し、作動流体の温度を上昇、下降させることもできるが、今回の試験では $T=80\text{K}$ のみで試験を行った。



Figure 1 Overview of the Cryogenic Inducer Test Facility (CITF)



Figure 2 Overview of the Cryogenic Cavitation Tunnel (CCT)

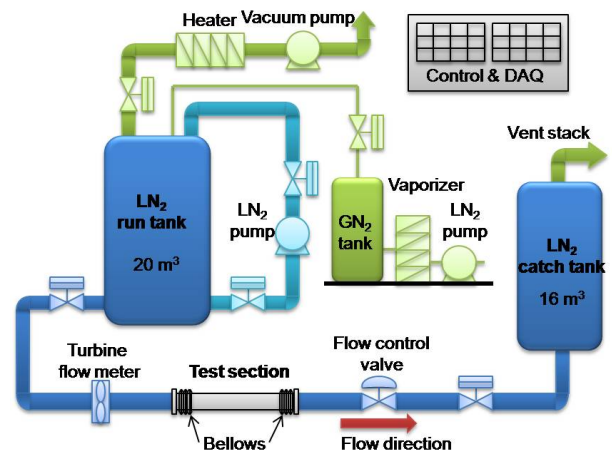


Figure 3 System diagram of the Cryogenic Cavitation Tunnel

3. 試験結果

3.1 到達キャビテーション数

本試験の目的は、試験部にてキャビテーションが十分に発生できることを確認することにある。しかしながら、安全性の観点からオリフィス出口部も含めてステンレス配管としたため、キャビテーションの発生を可視化観察することはできない。そこで、沼知ら⁽¹³⁾が水で行ったオリフィスのキャビテーション試験の結果を指標とした。沼知らの結果では、初生キャビテーション数は $\sigma_1=2.5$ 、キャビテーションが十分に発達し始めるキャビテーション数が $\sigma=1.0$ であると報告されている。なお、キャビテーション数 σ は式(1)から計算される。

$$\sigma = \frac{P_{\text{out1}} - P_s(T_{\text{in1}})}{\frac{1}{2} \rho_l U_{\text{th}}^2} \dots (1)$$

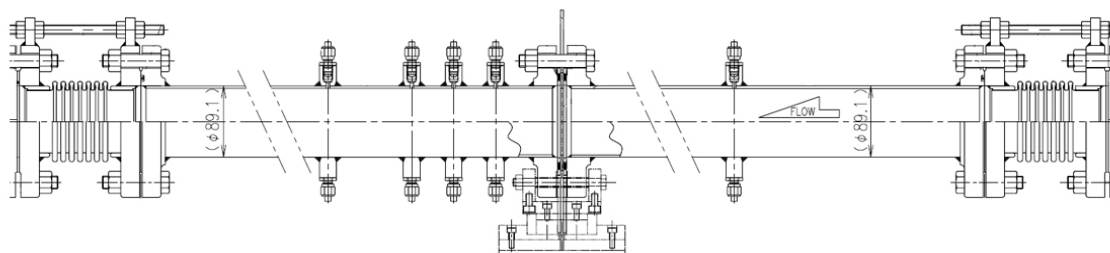


Figure 4 Schematic diagram of the test section for the function checkout test

ここで、 p_{out1} はオリフィス出口直近における圧力、 $p_s(T_{ini})$ はオリフィス入口温度での飽和蒸気圧、 ρ_l は液体密度、 U_{th} はオリフィスのスロートにおける流速である。

本試験では、ランタンク圧を一定とした後に流量調節弁を徐々に開いていく試験条件の下で、キャビテーション数が $\sigma < 1.0$ まで降下することを設備機能評価の基準とした。

図5に試験結果の一例を示す。本試験では、ランタンク圧力 (p_{run}) を 0.5MPa、キャッチタンク (p_{catch}) を 0.1MPa に保った状態で、流量調節弁を 35% から 100% まで徐々に開放した。横軸は試験開始時からの時間、縦軸はタンク圧力 (p_{run}, p_{catch})、流量調節弁開度 (ζ)、および体積流量 (Q) を示している。流量調節弁開度 100% の時の到達体積流量は 20.0 リットル毎秒、オリフィスのスロート流速で $U_{th} = 15.6 \text{ m/s}$ であった。図6に示すように、キャビテーション数は体積流量の増加とともに降下し、流量調節弁開度 100% の時で $\sigma = 0.81$ であった。上述の沼知らの結果と照合すると、本試験の最大流量時において、オリフィス出口ではキャビテーションが発生していると考えられる。さらに、圧力、流量を変えずに試験流体温度のみを変えた場合、仮に温度が +1 K 高く、オリフィス

出口圧力が変わらないことを仮定すると、キャビテーション数は $\sigma = 0.4$ まで達するため、この場合十分な規模のキャビテーションが発生することが予想される。以上の結果より、本トンネルはキャビテーションを発生する能力を有するものと判断出来る。

3.2 温度降下量

試験部におけるキャビテーション数が、キャビテーションが発生するのに十分な値まで降下することが確認できたため、オリフィス出口におけるキャビテーションの発生に伴う温度降下量の計測を行った。図6にはオリフィス出口 (OUT1) における温度の時間変化を示す。横軸は時間、左縦軸は入口と出口の温度差、右縦軸はキャビテーション数を示す。左縦軸の値が正に進むほど入口温度に対して出口温度が降下していることを示している。図6より、キャビテーション数が $\sigma = 1.01$ になった状態で、オリフィス出口の温度が急激に降下していることがわかる。さらに、キャビテーション数が $\sigma = 1.01$ から $\sigma = 0.81$ まで降下するに伴い、温度降下量も増大していることから、キャビテーションが発生し、その蒸発潜熱によって温度が降下したものと考えられる。本試験時における最

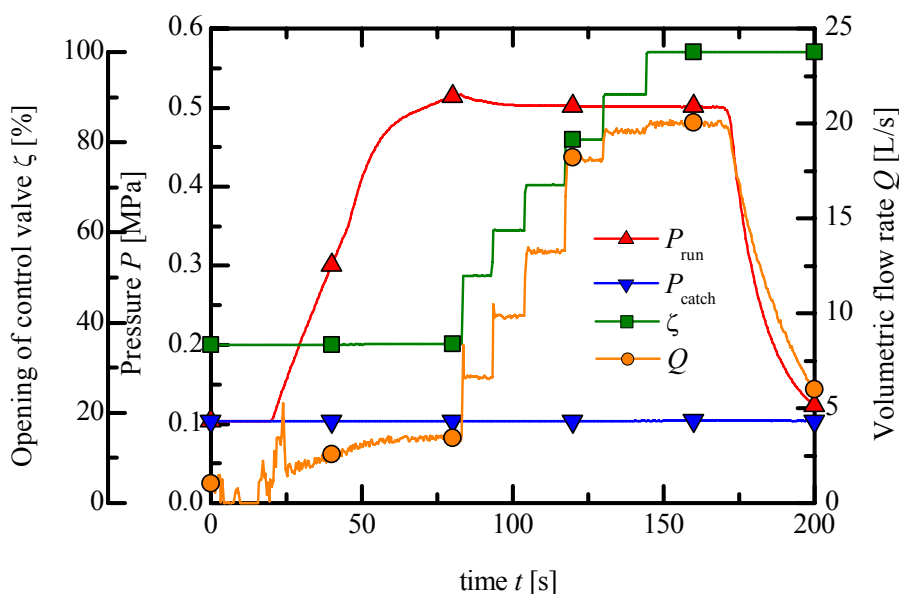


Figure 5 Variation of pressure in both tanks, opening of flow control valve, and volumetric flow rate

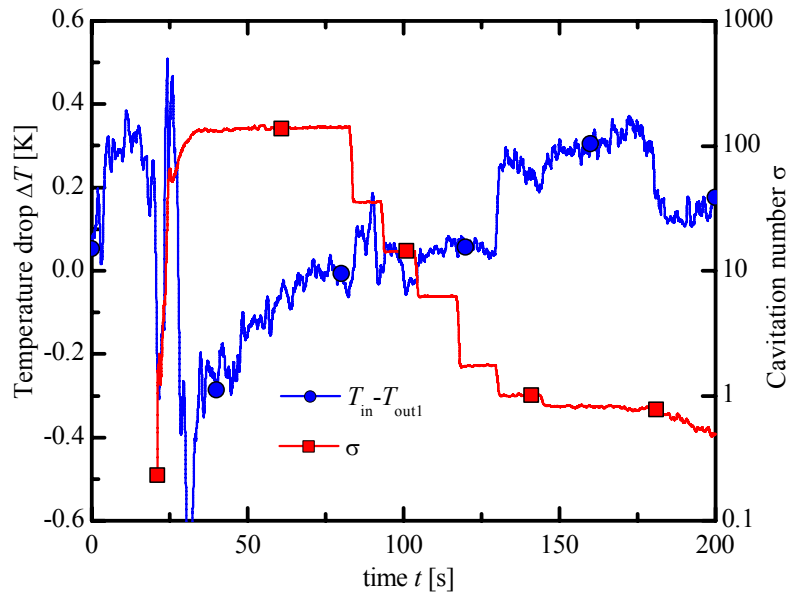


Figure 6 Variation of temperature depressions downstream of the orifice

大温度降下量は $\sigma=0.81$ で $\Delta T=0.29\text{K}$ であった。なお、この温度降下量から Stepanoph の B factor⁽¹³⁾を求めると $B=0.46$ 、この B factor から想定されるボイド率は $\alpha=0.31$ である。

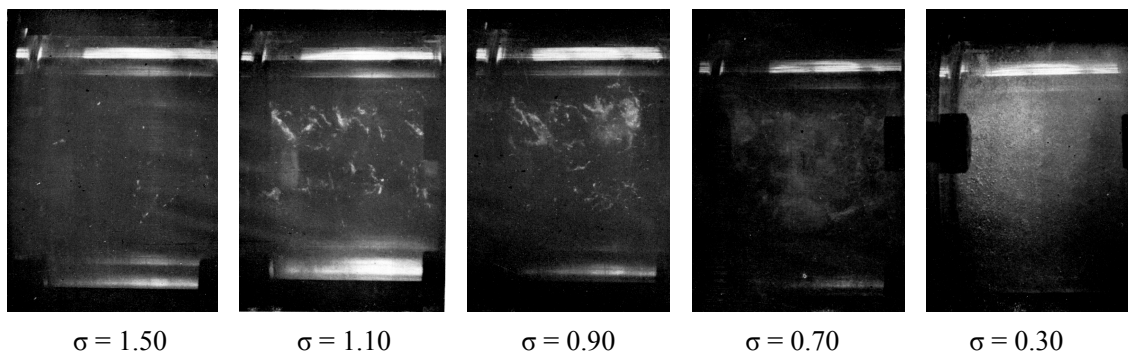
3.3 予想されるキャビテーションの様相

本試験ではキャビテーションの可視化を行っていないため、キャビテーションの様相と温度降下量を対応づけることはできない。しかしながら、得られたデータからどの程度のキャビテーションが発生しているのかを推測してみた。図7には、沼知らが水で行ったオリフィスキャビテーション試験の可視化画像⁽¹²⁾を示す。キャビテーション数が $\sigma=1.50$ までは僅かにキャビテーションの発生が認められる程度であるが、 $\sigma=1.10$ からキャビテーションが成長し始め、 $\sigma=0.30$ ではキャビテーションの気泡群が可視化部全域に拡散している様子がわかる。ここで、Francらと同様に、どのような液体であってもキャビテーションの様相はキャビテーション数のみの関数である⁽⁷⁾という仮定を採用し、式(2)を用いて本試験におけるキャビテーションの発生状態を推定する。

$$(\sigma_c - \sigma) \frac{1}{2} \rho_l U_{th}^2 = \left(\frac{\partial p_s}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2)$$

ここで、 σ_c は熱力学的効果がない場合のキャビテーション数、 σ は熱力学的効果が作用する場合のキャビテーション数、 ΔT は熱力学的効果による温度降下量である。ここでは、沼知らの水試験結果を熱力学的効果がない場合、今回の試験結果を熱力学的効果が作用する場合とみなす。

図6における温度降下量は、 $T=80.0\text{K}$ 、 $U_{th}=15.6\text{m/s}$ 、 $\sigma=0.81$ の時、 $\Delta T=0.3\text{K}$ であることから、熱力学的効果の有無によるキャビテーション数の差は $\Delta\sigma=0.05$ となる。このことから、本実験のキャビテーション数 $\sigma=0.81$ では、沼知らの実験の $\sigma=0.90$ の場合に近い様相のキャビテーションが発生しているものと考えられる。

Figure 7 Aspects of cavitating flow downstream of the orifice in water in relation to several cavitation number: $T=21.6^\circ\text{C}$, $A_{th}/A_{in}=0.197$ [13]

4. 温度降下量への熱力学的効果の影響

次に、前節において計測されたオリフィス出口における温度降下量を、熱力学的パラメータ Σ^* を用いて評価を行った。Brennen⁽¹⁴⁾や Watanabe ら⁽¹⁵⁾によって提案されている熱力学的パラメータ Σ^* は式 (3) で表される。

$$\Sigma^* = \frac{L^2}{C_{p,l} T_{inl} \sqrt{a_l}} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^2 \sqrt{\frac{D}{U_{th}^3}} \dots (3)$$

ここで、 L は蒸発潜熱、 $C_{p,l}$ は液相の定圧比熱、 T_{inl} は気液境界から十分離れた位置における液相の温度、 ρ_v は気相の密度、 D は代表長さ(オリフィス孔直径)、 a_l は液相の温度伝導率である。

図 8 には、熱力学的パラメータ Σ^* の変化に対する温度降下量 ΔT の変化を示す。横軸には熱力学的パラメータ Σ^* 、縦軸にはオリフィス出口直近(OUT1)での温度降下量 ΔT を示している。また、各点のラベルはキャビテーション数 σ を示している。図 8 では、前節で示したランタンク圧が $P=0.5\text{MPa}$ の時に加え、ランタンク圧が $P=0.9\text{MPa}$ の場合の結果も併せて示している。いずれの圧力条件においても、キャビテーション数が $\sigma < 1.0$ の時に、オリフィス出口における温度降下量が増大している。 $P=0.9\text{MPa}$ の場合、最終到達キャビテーション数は $P=0.5\text{MPa}$ の場合と同程度の $\sigma=0.88$ であった。しかしながら、 $P=0.9\text{MPa}$

の場合は最大流量時でスロート流速が $P=0.5\text{MPa}$ の場合に比べて 1.4 倍大きい。そのため、熱力学的パラメータ Σ^* でみると、0.4 倍まで小さくなる。このため、ランタンク圧が高い条件の方が、熱力学的効果の作用が小さくなり、温度降下量が小さくなったものと考えられる。また、試験結果をキャビテーション数がほぼ等しい条件で比較すると、 Σ^* が大きいランタンク圧 $P=0.5\text{MPa}$ のときの方がより温度降下量が大きくなっていることが判る。例えば、最大流量時 ($\sigma_{P=0.5\text{MPa}}=0.81$, $\sigma_{P=0.9\text{MPa}}=0.88$) で比較するとその差は約 0.13K となる。 Σ^* は熱物性 (温度) と流動特性 (時間) の関数であり、両試験では温度 (熱物性) は同一であるため、流速の変化による気泡成長に要する熱伝導の時間が変化した結果、温度降下量に変化したものと考えられる。

以上の検討結果より、熱力学的パラメータ Σ^* を用いることで、熱力学的効果の程度である温度変化の傾向を定性的には説明できることが示された。しかしながら、より定量的にキャビテーションに作用する熱力学的効果の程度を捉えるためには、可視化によってキャビテーションの様相を把握しつつ、温度変化量を計測することが必要であり、現在キャビテーションの可視化試験の準備を進めている。

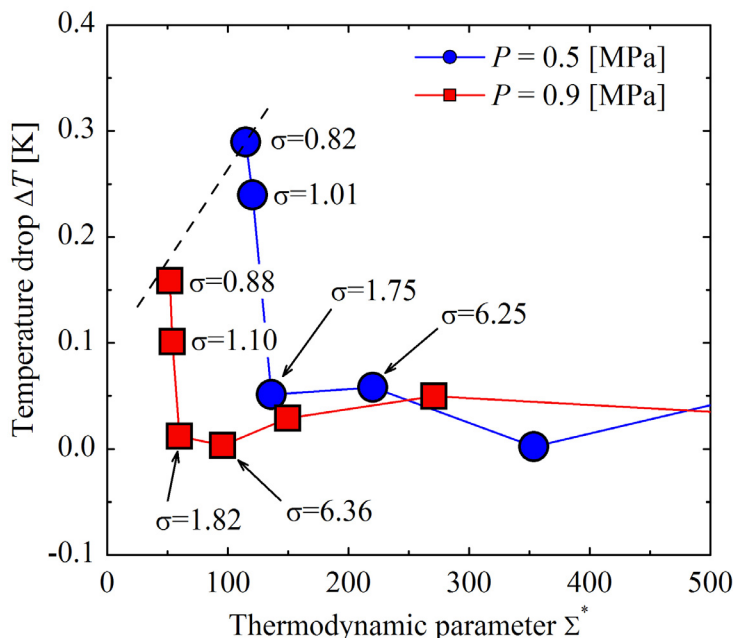


Figure 8 Variation of temperature depressions in relation to thermodynamic parameter Σ^* and cavitation number σ

5. 結言

本資料では、角田宇宙センターに新設した JAXA 極低温キャビテーショントンネルの設備機能およびその設備機能確認試験結果を紹介した。

機能確認試験では、オリフィス出口においてキャビテーション数 $\sigma < 1.0$ に達することを確認した。また、キャビテーションが発生していると推定される $\sigma < 1.0$ の状態では、オリフィス出口で最大で $\Delta T = 0.3\text{K}$ の温度降下が確

認された. 更に, 同じキャビテーション数で比較すると, 熱力学的パラメータ Σ^* が大きい程温度降下量が大きくなることが確認された.

謝 辞

本極低温キャビテーションタンネルの計画に当たって, 多くのご助言を頂きました東洋大学 加藤洋治教授に感謝いたします. また, 設備の製作にご尽力いただいた(株)神戸製鋼所の関係各位に感謝いたします.

参考文献

- (1) Yoshida, Y., Kikuta, K., Hasegawa, S., Shimagaki, M., and Tokumasu, T., 2007, "Thermodynamic Effect on a Cavitating Inducer in Liquid Nitrogen," *J. Fluids Engineering*, 130(3) pp.273-278.
- (2) Yoshida, Y., Sasao, Y., Okita, K., Hasegawa, S., Shimagaki, M., Ikohagi, T., 2007, "Influence of Thermodynamic Effect on Synchronous Rotating Cavitation," *J. Fluids Engineering*, 129(7) pp.871-876.
- (3) Hosangadi, A., Ahuja, V., and Ungewitter R. J., 2007, "Analysis of Thermal Effects in Cavitating Liquid Hydrogen Inducers," *J. Propulsion and Power* 23(6) pp.1225-1234.
- (4) Tani, N., and Nagashima, T., 2002, "Numerical Analysis of Cryogenic Cavitating Flow on Hydrofoil - Comparison between Water and Cryogenic Fluids," *4th International Conference on Launcher Technology "Space Launcher Liquid Propulsion"*.
- (5) Tokumasu, T., Sekino, Y., and Kamijo, K., 2003, "A New Modeling of Sheet Cavitation Considering the Thermodynamic Effects," *5th International Symposium on Cavitation, Cav03-GS-16-003*.
- (6) Hord, J., 1973, "Cavitation in Liquid Cryogenics: II Hydrofoil," NASA CR-2156.
- (7) Franc, J. P., Pellone, C., 2007, "Analysis of Thermal Effects in a Cavitating Inducer Using Rayleigh Equation," *J. Fluids Engineering*, 129(8) pp.974-983.
- (8) Kato, H., Yamaguchi, H., and Maeda, M., 1997, "Cavitation of Liquid Nitrogen Using A Blow-down Type Tunnel," *ASME FEDSM 97, FEDSM97-3259*.
- (9) 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, 2005, "JAXA 極低温インデューサ試験施設," *ターボ機械* 33(8) pp.468-475.
- (10) 吉田 義樹, 渡邊 光男, 長谷川 敏, 橋本 知之, 島垣 満, 木村 俊哉, 永浦 克司, 菊田 研吾, 笹尾 好史, 風見 佑介, 伊賀 由佳, 井小萩 利明, 加藤 洋治, 渡邊 聡, 2008, "JAXA 極低温インデューサ試験結果の概説," *ターボ機械*, 36(6) pp.321-330.
- (11) 新井山 一樹, 長谷川 敏, 吉田 義樹, 伊賀由佳, 大平勝秀, 井小萩利明, 2008, "JAXA 極低温キャビテーションタンネルの紹介," *日本機械学会 2008 年度年次大会*, 1721.
- (12) 沼知 福三郎, 山部 正博, 大場 利三郎, 1958, "管内オリフィスに対するキャビテーションの影響," *東北大学高速力学研究所報告*, 14(136) pp.127-136.
- (13) Stepanoff, A. J., 1964, "Cavitation Properties of Liquids," *J. Eng. Power*, pp.195-200.
- (14) Brennen, C. E., 1973, "The Dynamic Behavior and Compliance of a Stream of Cavitating Bubbles," *J. Fluids Engineering*, 95(4) pp.533-541.
- (15) Watanabe, S., Hidaka, T., Horiguchi, H., Furukawa, A., and Tsujimoto, Y., "Steady Analysis of the Thermodynamic Effect of Partial Cavitation Using the Singularity Method," *J. Fluids Engineering* 129(2) pp.121-127.