

平成 21 年 5 月 26 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760109
 研究課題名（和文）極低温気液二相／超臨界モデルを用いたキャビテーションと熱力学的効果に関する研究
 研究課題名（英文）Study of Cavitation and the Thermodynamic Effect by Using Cryogenic / Supercritical Gas-liquid Two-phase Model
 研究代表者
 伊賀 由佳（IGA YUKA）
 東北大学・流体科学研究所・助教
 研究者番号：50375119

研究成果の概要：極低温流体で発生するキャビテーション不安定現象は、その「熱力学的効果」により、常温の水試験で発生するそれと発生領域や種類が異なることが知られている。本研究では、独自に開発した極低温気液二相／超臨界数値解析モデルを用い、スーパーコンピューティングによってキャビテーションの挙動と熱力学的効果について解明することを目的とする。本研究により、極低温流体と水とで見られる熱力学的効果逆転現象を、三枚周期平板翼列流れにおいて再現した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	0	2,100,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	360,000	3,660,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：混相流，ターボポンプ，極低温流体，数値解析

1. 研究開始当初の背景

「キャビテーション現象」は、高速流体機械中の低圧部で液相が気相へと相転移する現象であり、その非定常性が流体機械の振動や騒音、性能低下などの原因となることで知られている。今日の流体機械の小型・高性能化に伴い、キャビテーションの発生はいたるところで見受けられる。特に国産の液体ロケットであるH2Aロケットに搭載されている液体酸素・液体水素ターボポンプは、ペイロード確保のため、超高馬力でありながらも極限まで小型軽量化がなされており、固体ブースター切離し時（圧力低下時）のターボポンプでのキャビテーション発生は避けては通れなくな

っている。液酸・液水ターボポンプの入口部に設置されているインデューサと呼ばれる軸流羽根車で発生するキャビテーションは、その非定常振動がターボポンプシステムの固有振動と相互に干渉しあうことにより、「キャビテーション不安定現象」へと変化することがある。液体ロケットエンジンで発生する代表的なキャビテーション不安定現象には、回転非同期の軸振動を伴う旋回キャビテーションや、配管系の流量・圧力の大規模な脈動を伴うキャビテーションサージなどがある。現在、実機の打ち上げに際しては、旋回キャビテーションに対してはインデューサ入口ケーシング径の拡大、キャビテーションサージに

対してはボゴサプレサ－の設置などの対応を行い、一応は不安定現象を抑止した設計で打ち上げている。しかしながら、過去にも巡回キャビテーションが原因となって打ち上げに失敗した例にもあるように、全ての不安定現象を完全に抑止できているわけではない。よって現在、キャビテーション不安定現象の抑制法についていくつかの実験的研究がなされているが、そもそも極低温流体である液体酸素および液体水素では、実験室内との温度差により、そこに発生するキャビテーション現象の可視化を行うことは非常に困難である。よって、極低温流体に発生するキャビテーション不安定現象の様相を観察した例はこれまでに存在せず、また、高速で回転する液体ロケット・ターボポンプではポンプ内部のデータ測定も困難であることより、その様相や発生メカニズム等などについて詳細な解析ができないのが現状である。さらに、極低温流体で発生するキャビテーション不安定現象は、その熱力学的効果により、常温の水試験で発生するそれと発生領域や種類が異なることが知られており、液体ロケットエンジン・ターボポンプの設計・開発に際しては実液である極低温流体を用いた試験が必要不可欠である。一方、近年のスーパーコンピュータの発達に伴い、キャビテーション流れの数値解析に関する研究は数多くなされてきた。しかしながら、作動気液二相流体を極低温流体としたモデルは極めて少なく、特に液酸・液水ターボポンプのような極低温環境下で作動する流体機械内部の非定常キャビテーション特性を数値解析した例は存在しない。一方、申請者はこれまでの研究において、ターボ機械内部に発生するキャビテーション不安定現象を空気-水系において系統的に解析し、世界に先駆けて公表した実績を持つ。申請者らの開発した数値解法は、特に、流れ場中に圧力波伝播を伴うような非定常キャビテーション流れの数値解析に有効であることが世界的にも認められている。以上のような背景より、申請者は流体機械内部に発生する非定常キャビテーション流れの数値解析を極低温環境下において実行しようと思ひ立ち、本研究課題「極低温気液二相／超臨界モデルを用いた熱力学的効果に関する研究」の着想に至った。

2. 研究の目的

(1) 何をどこまで明らかにしようとするのか

キャビテーション流れ中で液相が気相へ相変化する領域では、流体からは蒸発潜熱が奪われる。流体が液体水素や液体酸素などの極低温流体である場合、この潜熱が大きいために流体の温度低下量も大きくなる。この温度低下に伴い飽和蒸気圧が低下するため、相変化現象すなわちキャビテーション現象が起こ

りにくくなるのである。この効果のことを「熱力学的効果」と呼び、一般に極低温流体では大きいことが知られている。このような熱力学的効果によってその形状および変動周期の変化した非定常キャビテーションの挙動を実験的に可視化することは、先に示したように極低温流体では非常に困難であり、詳細な解析がなされていないのが現状である。よって、数値解析による極低温キャビテーション流れの可視化解析に、世界中の液体ロケット・ターボポンプ設計者から大きな期待が寄せられている。申請者は、先の研究で、ターボ機械の最も基本的な構成要素である二次元単独翼まわりにおいて、極低温キャビテーション流れの時間平均翼特性について解析を行った。しかしながらロケットエンジン・ターボポンプなど実際の流体機械で発生するキャビテーションではその非定常特性が重要となってくる。よって本研究課題では以下のような極低温キャビテーション流れの解析を行う。

①単独翼まわりの非定常キャビテーション流れにおいて温度低下場所を特定し、質量分率変化量や温度低下量など熱力学に関する詳細なデータを取得することによって、単独翼キャビテーション非定常特性に対する熱力学的効果について解明する。

②流れ場を三枚周期翼列流れへと拡張し、極低温環境下におけるキャビテーションサージ、巡回キャビテーションなどキャビテーション不安定現象の発生予測を行い、常温水での発生領域や振動特性との比較を行い、傾向を予測する。

③実際の液体ロケットエンジン・液体酸素・液体水素ターボポンプ解析へと発展させるために、計算コードの三次元非構造格子気液二相系への拡張を行う。

(2) 本研究の学術的な特色・独創的な点

従来の圧縮性流体の数値解析で用いられてきた熱力学パラメータは、基準温度もしくはその極近傍のみを表現可能なものであった。しかしながらそれでは、蒸発に伴い流体の温度が大幅に低下する極低温キャビテーション流れを取り扱うことは困難である。そこで申請者は、流体の状態方程式を極低温の液相・気相から高压高温の超臨界状態まで表現できる3次方程式型とし、そこから低压比熱や断熱音速などの熱力学パラメータを導出した。これらの単相状態のモデル式を結合することによって、極低温気液二相状態のみならず、流れ場中に気液二相状態と超臨界状態が混在するような流れ場も表現できる数値解析モデルを開発した。この「適用範囲の広さ」が圧縮性流体の数値流体力学の分野において本研究の極めて独創的な点である。

3. 研究の方法

(1) 気液二相系支配方程式

本研究に用いるキャビテーション数値解析モデル「圧縮性気液二相局所均質媒体モデル」は、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 方程式を適用可能としたものである。このとき支配方程式は、気液二相媒体を圧縮性 N-S 方程式と同様の形で表現し、さらに気相の質量保存の式を追加した、次の「圧縮性気液二相 N-S 方程式」となる。

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial (\mathbf{E} - \mathbf{E}_v)}{\partial x} + \frac{\partial (\mathbf{F} - \mathbf{F}_v)}{\partial y} = \mathbf{S}$$

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u_i \\ e \\ \rho Y \end{pmatrix} \quad \mathbf{E}_j = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u u_j + \delta_{ij} p \\ \rho u H \\ \rho u Y \end{pmatrix} \quad \mathbf{E}_v_j = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{ij} \\ -q + \tau_{jk} u_k \\ 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dot{m} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 ρ, p, e, H, u は気液二相媒体の密度、静圧、単位体積当たりの全エネルギー、全エンタルピー、および流速である。また、 Y は気相の質量分率である。応力テンソル τ の評価に用いる気液二相粘性係数 μ および熱流束 q に用いる気液二相熱伝導率 κ は以下のように評価した。

$$\mu = (1 - \alpha)(1 + 2.5\alpha)\mu_l + \alpha\mu_g \quad (2)$$

$$\kappa = (1 - \alpha)\kappa_l + \alpha\kappa_g$$

ここで、 α は気相の体積分率（ボイド率）、添え字 g, l はそれぞれ気相と液相を意味する。

(2) 気液二相系支配方程式

支配方程式は本研究課題で開発した極低温気液二相／超臨界局所均質媒体状態方程式およびそれに基づくエネルギー関係式を用いて閉じる。詳細は省略するが、状態方程式は、

$$\rho = \frac{1}{-2\sqrt{Q} \left\{ (1-Y) \cos \frac{\theta}{3} + Y \cos \frac{\theta + 2\pi}{3} \right\} - \frac{a}{3}} \quad (3)$$

および、

$$\rho = \frac{-E}{(1-Y)(E^2 + Q + \frac{a}{3}E) - Y(E^2 + Q - \frac{a}{3}E)} \quad (4)$$

$$E = (\sqrt{-D} + |R|)^{\frac{1}{3}} \quad D = Q^3 - R^2 \quad \theta = \cos^{-1} \frac{R}{\sqrt{Q^3}}$$

$$Q = \frac{1}{9} \left\{ \left(\frac{f_3 T}{p} + f_2 \right)^2 - \frac{3f_1}{p} \right\} \quad a = -f_2 - \frac{f_3 T}{p}$$

の形で、エネルギー関係式は

$$e = \rho \left\{ h + \frac{\mathbf{u}^2}{2} \right\} - p \quad (5)$$

$$h_m = (1 - Y)h_l + Yh_g \quad h_l = h(v_l, T) \quad h_g = h(v_g, T)$$

$$h(v, T) = \frac{1}{v} \left\{ T \left(\frac{\partial f_1}{\partial T} \right) - 2f_1 \right\} - \frac{f_3 T}{v - f_2} \left\{ T \left(\frac{\partial f_2}{\partial T} \right) - v \right\} + \int_{T_0}^T C_p^0(T) dT - R(T - T_0) + h_0$$

の形で表される。以上の各定数を例えば酸素について調整すると、(3)式は図1の青とピンクの線の逆数の Y による線形結合、

(4)式は緑の線となり、物性値と良く一致していることがわかる。また、状態方程式(3)から求めた音速の式を酸素に適用した際のボイド率に対する変化は図2のようになり、気液混合状態では単相よりも音速が低下するという一般的特性を再現できている。

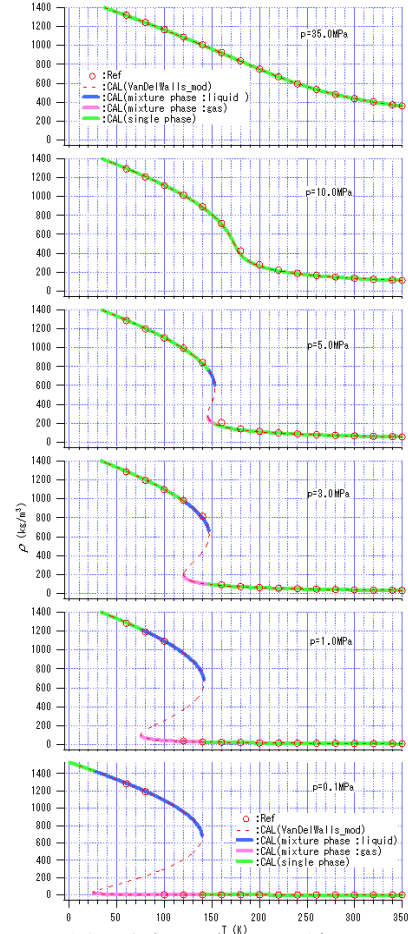


Fig.1 酸素の密度と温度の関係（青およびピンクは二相状態になり得る領域）

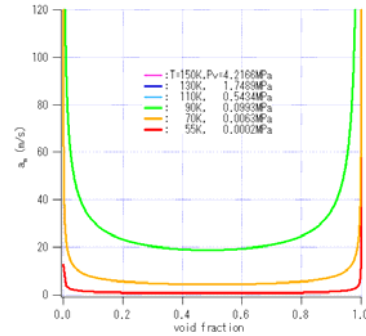


Fig.2 酸素の断熱音速のボイド率に対する変化

(3) 総変化モデル

支配方程式 (1) 生成項 \mathbf{S} 中の \dot{m} は相変化に伴う気相の質量変化量であり、次のような形で与える。

$$\dot{m} = C_{elc} A \alpha (1 - \alpha) \frac{p_v^*(T) - p}{\sqrt{2\pi RT}} \quad A = C_a \alpha^{-\frac{1}{3}} (1 - \alpha)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

ここで、 A は界面積率、 C_{elc} C_a は経験定数である。温度に対する飽和蒸気圧 p_v^* の変化には菅原の実験式を液体酸素用に修正したものをを用いた。

4. 研究成果

本研究では、上述の極低温気液二相／超臨

界数値解析モデルを独自に開発し、スーパーコンピューティングによって極低温流体中で発生するキャビテーションの挙動と熱力学的効果について解明することを目的とし研究を行ったが、方程式系を組み込んだ計算コードの安定化に時間を要したため、以下の研究成果は超臨界を除く気液二相系の簡易方程式を用いたものである。

本研究では、ターボポンプインデューサを周方向に展開し単純化した三枚周期平板翼列流れにおいて、高温水(340K)と常温水(290K)で発生するキャビテーションの数値解析を行い、その熱力学的効果について比較した。計算結果より時間平均キャビティ体積を求め、図3に示す。大きく破断しないスーパーキャビテーション状態では、高温水の方がキャビティ体積が小さくなっており、熱力学的順傾向を示している。一方、破断を繰り返すシートキャビ状態では常温水の方がキャビティ体積が小さくなっていることがわかる。このことより、本計算手法により、水における熱力学的効果の逆転現象を再現できたといえ、さらに、定常なキャビテーション状態では通常の熱力学的効果を示し、非定常性の強い状況下では熱力学的効果が逆転するのではないかと推測できる。図4には、常温水と高温水における非定常キャビテーシ

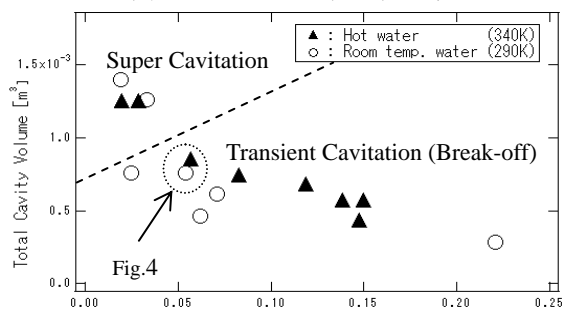


Fig. 3 Time averaged cavity volume at two temperatures versus cavitation number in three-blade cascade ($\alpha_{in}=7\text{deg}$, $C/h = 2.0$, $\gamma=75\text{deg}$)

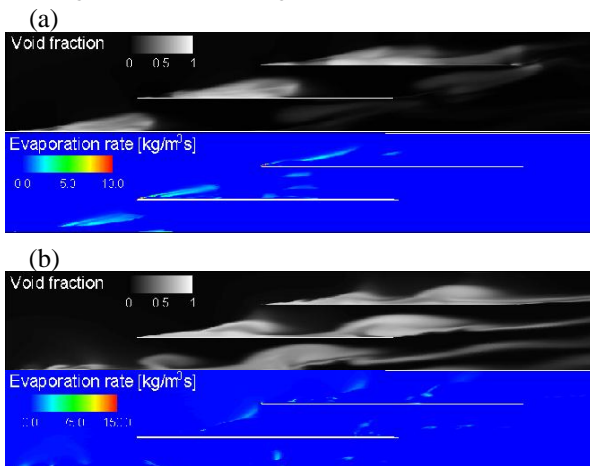


Fig. 4 Instantaneous void fraction (upper) and pressure (lower) distributions at room temperature water (a) and hot water (b) around 3-blade cascade ($\sigma=0.05$, (a)290K, (b)340K)

ョン流れ(熱力学的効果逆転時)の瞬時の流れ場の様相(ボイド率分布)と蒸発領域分布を示す。常温水では、翼前縁から延びるキャビティ界面で蒸発が集中しているのに対し、高温水ではキャビティ内全体に蒸発領域が点在しているように見える。以上より、熱力学的効果逆転時の流れ場中の蒸発・凝縮領域の分布やそれに伴う飽和蒸気圧分布について再現し、逆転現象のメカニズム解明の糸口をつかんだ。

また本研究では、本来、キャビティ気泡界面での蒸発・凝縮に伴う潜熱の移動によってキャビティの成長が抑制されると考えられている熱力学的効果を、キャビティ気泡やその気泡界面を粗視化し、流れ場全体を連続体としてモデル化した本モデルおよび計算手法に対して、いかにして表現するかを検討した。JAXA 角田宇宙センターの極低温インデューサ試験設備において行ったインデューサの液体窒素試験を参考に、キャビテーションの熱力学的効果が発生している実際の流れ場の情報から、熱力学的効果の均質媒体へのモデリングを検討した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

1)伊賀由佳, 橋爪圭, 吉田義樹, 井小萩利明, 「翼列キャビテーションサージの振動特性と脈動現象発生機構の解明」, 日本機械学会論文集 (B編), 74-741 (2008), 1058-1067 頁 (査読あり)

2)Yuka IGA, Makoto HIRANUMA, Yoshiaki YOSHIDA, Toshiaki IKOHAGI, "Numerical Analysis of Cavitation Instabilities and the Suppression in Cascade", Journal of Environment and Engineering, Vol.3-No.2 (2008), pp.240-249 (査読あり)

3)Yoshiaki YOSHIDA, Yusuke KAZAMI, Katsuki NAGAURA, Mitsuru SHIMAGAKI, Yuka IGA, Toshiaki IKOHAGI, "Interaction between Uneven Cavity Length and Shaft Vibration at the Inception of Synchronous Rotating Cavitation", International Journal of Rotating Machinery, Volume2008 (2008), (Article ID 218978), pp1-7 (査読あり)

4)吉田義樹, 笹尾好史, 渡邊光男, 橋本知之, 伊賀由佳, 井小萩利明, 「インデューサに発生する巡回キャビテーションの熱力学的効果」, 日本機械学会論文集 (B編), 74-746 (2008), 2091-2098 頁 (査読あり)

[学会発表] (計 20 件)

1)風見佑介, 伊賀由佳, 吉田義樹, 渡邊光男, 島垣満, 井小萩利明, 「熱力学的効果が亜同

期旋回キャビテーションに与える影響」, キャビテーションに関するシンポジウム (第 14 回), 仙台 (2009.3.20)

2)フアドヒル サムシール, 落合直哉, 伊賀由佳, 能見基彦, 井小萩利明, 「蒸気泡の挙動に及ぼす液温の影響に関する数値解析」, キャビテーションに関するシンポジウム (第 14 回), 仙台 (2009.3.20)

3)落合直哉, 伊賀由佳, 能見基彦, 井小萩利明, 「キャビテーションエロージョンの数値予測法の研究」, キャビテーションに関するシンポジウム (第 14 回), 仙台 (2009.3.19)

4)伊賀由佳, 吉田義樹, 井小萩利明, 「旋回キャビテーションの発生メカニズムに関する一提案」, キャビテーションに関するシンポジウム (第 14 回), 仙台 (2009.2.20)

5)Kei HASHIZUME, Yuka IGA, Yoshiaki YOSHIDA, Toshiaki IKOHAGI, “Influence of Inlet Pipe Length on Cavitation Instabilities in Cascade”, The Seventh JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC7), Hokkaido (2008.10.14)

6)Motohiko NOHMI, Yuka IGA, Toshiaki IKOHAGI, “Numerical Prediction method of Cavitation Erosion”, 2008 ASME Fluids Engineering Conference, Jacksonville, Florida USA, FEDSM2008-55126, (2008.8.11)

7)落合直哉, 伊賀由佳, 能見基彦, 井小萩利明, 「キャビテーション流れ中の気泡挙動解析と壊食性予測」, 混相流学会年次大会 2008, 会津(2008.8.10)

8)伊賀由佳, 橋爪圭, 吉田義樹, 井小萩利明, 「翼列キャビテーション流れにおける三種のサージ的振動」, 日本機械学会 2008 年度年次大会, 横浜 (2008.8.4)

9)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, 「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, 横浜 (2008.8.4)

10)吉田義樹, 永浦克司, 風見佑介, 笹尾好史, 伊賀由佳, 井小萩利明, 「熱力学的効果の差異による同期旋回キャビテーションの様相の違い」, 第 59 回ターボ機械協会総会講演会, 東京 (2008.5.16)

11)能見基彦, 井小萩利明, 伊賀由佳, 「数値解析によるキャビテーション壊食予測技術の開発」, 第 59 回ターボ機械協会総会講演会, 東京 (2008.5.16)

12)風見佑介, 伊賀由佳, 橋本知之, 島垣満, 吉田義樹, 井小萩利明, 「同期旋回キャビテーションのサージ的振動」, 日本機械学会東北支部第 43 期総会講演会, 仙台(2008.3.15)

13)Yoshiaki YOSHIDA, Yusuke KAZAMI, Katsuji NAGAURA, Mitsuru SHIMAGAKI, Yuka IGA, Toshiaki IKOHAGI, “Interaction between Uneven Cavity Length and Shaft Vibration at The Inception of Synchronous

Rotating Cavitation” 12th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Hawaii (2008.2.18)

14)Makiko ONOZAWA, Yuka IGA, Toshiya KIMURA, Toshiaki IKOHAGI, “Numerical Analysis of Internal Flow in Turbopump Inducer Using Gas-Liquid Homogeneous Model”, 7th International Symposium on Advanced Fluid Information and 4th International Symposium on Transdisciplinary Fluid Integration (AFI/TFI 2007), Sendai (2007.12.15)

15)Kentaro SHINBO, Yuka IGA, Motohiko NOHMI, Toshiaki IKOHAGI, “Propagating Behavior of Elastic Waves in Solid Caused by Bubble Collapse”, 7th International Symposium on Advanced Fluid Information and 4th International Symposium on Transdisciplinary Fluid Integration (AFI/TFI 2007), Sendai (2007.12.15),

16)Naoya OCHIALI, Yuka IGA, Motohiko NOHMI, Toshiaki IKOHAGI, “Numerical Analysis of Erosive -Bubble Behavior in Cavitating Flow”, The 9th ASIAN International Conference on Fluid Machinery /AICFM9, Jeju (2007.10.18),

17)Yuka IGA, Kei Kawai, Yoshiaki Yoshida, Toshiaki Ikohagi, “Numerical Analysis of Pressure Propagation and Oscillating Characteristics of Cavitation Surge in Cascade”, The 9th ASIAN International Conference on Fluid Machinery /AICFM9, Jeju (2007.10.14),

18)伊賀由佳, 吉田義樹, 井小萩利明, 「翼列のキャビテーション流れにおける熱力学的効果の数値解析」, 日本機械学会 2007 年度年次大会, 大阪 (2007.9.10)

19)風見佑介, 橋本知之, 島垣満, 伊賀由佳, 井小萩利明, 「同期旋回キャビテーション初生時のキャビティの挙動」, 日本機械学会 2007 年度年次大会, 大阪 (2007.9.10)

20)Yoshiaki YOSHIDA., Yoshifumi SASAO, Mitsuo WATANABE, Tomoyuki HASHIMOTO, Yuka IGA, Toshiaki IKOHAGI, “Thermodynamic Effect on Rotating Cavitation in Inducer”, ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, San Diego, FEDSM2007-37468, (2007.8.1)

6. 研究組織

(1)研究代表者

伊賀 由佳 (IGA YUKA)

東北大学・流体科学研究所・助教

研究者番号 : 50375119

(2)研究分担者

(3) 連携研究者

|