

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686023

研究課題名(和文)高温高圧水キャビテーション実験による熱力学的効果の解明

研究課題名(英文)Clarification of Thermodynamic Effect of Cavitation by High Temperature and High Pressure Water Cavitation Tunnel

研究代表者

伊賀 由佳 (IGA, Yuka)

東北大学・流体科学研究所・准教授

研究者番号：50375119

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,600,000円

研究成果の概要(和文)：熱力学的効果を伴うキャビテーションの基礎特性を明らかにすることを目的に、NACA0015翼形の高温水トンネル実験を行った。トンネル側壁からサーミスタプローブをキャビティ内部に直接挿入する温度計測手法により、熱力学的効果によるキャビティ体積の抑制が顕在化しないことが知られている80Kの水においても、キャビティ内部では0.3Kの温度低下が起こっていることが示された。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the thermodynamic effect on cavitation, high temperature cavitation tunnel experiment was done with NACA0015 single hydrofoil. By using temperature measurement in which thermistor probe was inserted from side wall to inside a cavity, it was clarified that temperature inside a cavity decreases about 0.3 K even though in a condition of 80 K where suppression effect on cavity volume by thermodynamic effect is well known to not appear.

研究分野：混相流

キーワード：キャビテーション 高温水 熱力学的効果 温度計測 翼形 トンネル実験

1. 研究開始当初の背景

キャピテーションの熱力学的効果は、キャピテーションの発生を抑制する好ましい効果として知られているが、その効果の程度や、逆転する条件等、未だ解明されていない点も多く、十分に制御できる効果とは言い難い。この効果は、クリーンエネルギーとして脚光をあびているLNG（液化天然ガス）の吸込みポンプや、高経年化対策が問題となっている原子力発電プラント等の高温高圧水系など、我々を取り巻くエネルギー環境に密接に関連した多くの流体機械において顕在化するため、エネルギー問題が深刻となっている現在、大変重要な現象であると言える。

キャピテーションの熱力学的効果とは、キャピテーション数（キャピティの発生度合いを表すパラメータ）が同じでも、主流の液体温度が高いほど（臨界温度に近いほど）、発生するキャピテーションが小さくなり、流体機械の性能低下点が低キャピテーション数側に移動する（作動可能範囲が広がる）という、流体機械にとって好ましい効果である。この熱力学的効果は、蒸発に伴う潜熱の移動により液体の温度が冷やされ、飽和蒸気圧が低下することにより、蒸発が起こりにくくなり、結果、キャピテーションの発生が抑えられると考えられており、臨界温度近くで用いられる極低温流体で顕在化することが知られている。しかしながら、流体機械のわずかな形状の相違により、同じ液温でも熱力学的効果が極めて有効に出現する場合もあれば、殆ど現れない場合もあり、十分に制御できる効果とは言い難い。さらに、常温から60度程度の水では、高温の方がキャピテーションが発生しやすい、すなわち熱力学的効果が逆転して出現するという実験結果もあり、今以て未解明な現象と言える。申請者は、この効果は、静的な蒸発量や熱移動量だけで説明できるものではなく、流動に伴う非平衡な相変化や熱伝達が密接に関連した効果であると考えている。

申請者は先の科学研究費補助金において、キャピテーションの熱力学的効果の独自のCFDモデルを開発してきた。このモデルは、従来の、液相がTamman型状態方程式、気相が理想気体の状態方程式に基づく常温水用気液均質媒体モデルを、液相・気相ともにファンデルワールス型に変更したものである。これにより、従来モデルで基準温度の一定値を用いていた物性値が、温度変化に対して方程式で現われ、流れ場中に比較的大きな温度分布が生じる熱力学的効果のCFDに有効であると考えている。また、別の熱力学的効果のCFDモデルを用い、液体窒素3枚周期平板翼列のキャピテーションのCFDを通じて、液温の上昇に伴うキャピティ体積の減少

と翼列キャピテーション性能の向上を数值的に再現した。これらの新しいモデルの有効性を定量的に確かめたいところであるが、対象となるような実験値が極めて少ない（古い実験が1例あるが、情報が少ないため、合わなかった場合なぜ合わないのかが検討できない）。また、先に述べたようにその現象自体が未解明であることより、申請者は、実際に熱力学的効果の出現する流れ場の実験を行うことによって現象解明に少しでも近付くとともに、詳細な実験データとの比較を通じてCFDモデルの検証を行いと数値予測精度の向上を図りたいと考え、本申請課題の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究課題では、キャピテーションの熱力学的効果の実験をキャピテーションタンネル（密閉型回流水槽）を用いて行う。その際、実用的極低温流体であるLNG（液化天然ガス）や液体水素などを用いた実験を行いたいところであるが、消防法などの関係で大学では容易ではない。また、極低温実験流体として汎用的な液体窒素は、後で説明する協力研究先であるJAXA角田宇宙センターに実験設備があり、それと異なる流体を用いた方が現象の解明に有効であると考え、本研究課題では、高温水のキャピテーションタンネルを製作することとした。作動流体は常温から160度程度までの水とするため、タンネルは高温高圧環境となる。この温度域では、熱力学的効果が逆傾向から順傾向に転じるため、流れ場の何が熱力学的効果の支配的要因となっているのかを抽出しやすいのではないかと期待している。さらに、160度の水は、臨界点に近い温度で用いられる極低温流体の熱力学的な状態を模擬できるとされている。

本研究課題では、液温とキャピテーション数を大きく変化させた際のキャピテーション流れ場中の温度分布とキャピティ体積（長さ）の関係はもちろんのこと、先の科学研究費補助金におけるCFDモデルの開発の際などに疑問として上がった以下の点について明らかとしたい。

- ・キャピテーション形態の相違（シートキャピティとバブルキャピティ、付着キャピティと遷移キャピティ、など）によって、同じキャピティ長さでも熱力学的効果の出現度合いが変わるのか？（非正常流れ場では非平衡性の影響が顕在化すると予想される）
- ・流れ場の乱れによって熱力学的効果の出現度合いが変わるのか？（流速を反映したパラメータは提案されているが、それだけでは相似性が得られないため、乱れも関係すると予想される）

- ・水温の上昇に伴い熱力学的効果が逆傾向から順傾向へと転じるのは何故か？
- ・液体窒素の実験ではシート状ではなく無数の微細な気泡からなるキャビティが観察され、これが熱力学的効果の特徴とされてきたが、熱力学的効果のみによるものか？気液の密度比や粘性の影響は？液体窒素特有のものなのでは？

3. 研究の方法

本研究では、主流温度、流速、および圧力を独立に変化させることが可能な密閉型回流式の高圧水キャビテーションタンネルを設計、製作し、キャビテーション実験を実行する。研究1年目はタンネルおよび試験体の製作を行う。高温でのキャビテーション未発生状態から、低温でのスーパーキャビテーション状態を再現するため、タンクにはコンプレッサーと真空タンクを接続し、電磁弁で切り替えを行う。2年目は試運転および主流温度と主流圧力の制御の確立、主流および試験部の計測系の確立を行う。研究最終年度の3年目は、主流の温度、流速、圧力を広範囲に変化させた高温高圧水キャビテーション実験を行う。試験体は2次元単独翼とし、の静圧、変動圧、温度を計測する。また可視化実験を行い、種々のキャビテーション形態におけるキャビティ体積、非定常性とキャビティ近傍温度の関係を求める。

4. 研究成果

熱力学的効果を伴うキャビテーションの基礎特性を明らかにすることを目的に、NACA0015 翼形および NACA161012 翼形まわりのキャビテーション流れの高温水タンネル実験を行った。キャビティ内部の温度の降下量を高精度に計測する必要があるため、翼面に温度センサを貼るのではなく、タンネル側壁からサーミスタプローブを挿入し、不確かさ 0.02K、熱進入による計測誤差が降下量の 4%以下となるような、高精度温度計測手法を開発した。

実験より、主流温度 80 度までの範囲では、熱力学的効果によるキャビテーション体積の抑制は確認されなかった。また、主流温度の上昇とともに、キャビティ内部温度は均一となることが確認された。主流温度 80 度では、キャビテーション数の低下に伴いキャビティ内部の温度降下量は増加し、キャビテーションが非定常から準定常へと遷移しても、温度降下量は連続的に増加することが示された。また、主流温度 80 度においては、主流速度はキャビティ内の温度に大きな影響を与えないことがわかった。さらに、Furuman のキャビティ内温度降下量の理論推定式を用い、本実験で得られた温度降下量を近似す

ることにより、主流温度 80 度以上のスーパーキャビテーション状態での温度降下量を定量的に予測できることを示した。

NACA16012 翼形に発生するキャビテーションの可視化実験では、翼迎角とキャビテーション数(主流圧力)に対するキャビテーション発生形態マップを作成した。その結果、レイノルズ数一定条件下で主流温度を上昇させると、境界層の影響を排除した状況で熱的影響のみを抽出することができ、このとき、迎角 4 deg から 8 deg でキャビティの発生に影響が現れ、発生領域が大幅に抑制された。また、 $\alpha_{in}=2$ deg で後方脱離キャビテーションがバブルキャビテーションへと変化し、熱的效果によるキャビティ形態の変化が捉えられた。一方、主流温度一定条件下でレイノルズ数を上昇させると、初生点が高キャビテーション数側へと移動するという通常の寸法効果が確認できた。以上を合わせると、主流速度一定条件下で主流温度を上昇させた際に出現する一般的な熱力学的効果では、熱的影響によるキャビティ体積抑制効果と寸法効果によるキャビティ発生促進効果の重ね合わせの結果が出現していることが本実験より示唆される。

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 2 件)

1. 伊賀由佳, 山口優貴, 「高温高圧水タンネル実験によるキャビティ内温度計測」, ターボ機械, 第 43 巻, 第 3 号(2015), 177-184 頁. 査読有り
2. Yuka IGA, "Numerical Analysis of Unsteady Cavitating Flow by Using a Modification Based on an Assumption of Apparent Phase Equilibrium", Earth and Environmental Science, 22 (2014) No. 052010, pp.1-11, doi:10.1088/1755-1315/22/5/052010. 査読有り

[学会発表](計 17 件)

1. 伊賀由佳, 古澤哲平, 「NACA16012 翼形のキャビテーション形態における主流温度とレイノルズ数の影響」, ターボ機械協会第 72 回総会講演会, 東京(2015.5.7)
2. 柏田峻, 伊賀由佳, 「溶存気体析出効果を考慮した相変化モデルによる非定常キャビテーション流れの数値解析」, 日本機械学会東北支部第 50 期総会・講演会, 仙台(2015.3.13), No. 204.
3. 古澤哲平, 山口優貴, 伊賀由佳, 「高温水キャビテーションの発生形態に及ぼす主流温度とレイノルズ数の影響」, 日本機械

- 学会東北支部第 50 期総会・講演会, 仙台 (2015.3.13), No. 203.
4. 柏田峻, 伊賀由佳, 「キャピティ体積の予測精度向上を目的とした相変化モデルの検討」, キャピテーションに関するシンポジウム(第 17 回)講演論文集, 東京 (2014.11.21), No. 00031.
 5. 古澤哲平, 山口優貴, 伊賀由佳, 「高温水キャピテーションの発生形態に及ぼす熱力学的効果の実験的研究」, キャピテーションに関するシンポジウム(第 17 回)講演論文集, 東京(2014.11.21), No. 00033
 6. Anh.D. LE, Yuki YAMAGUCHI, Motohiko NOHMI, Yuka IGA, “Effect of single-phase turbulence model on 3-D structure of cavitation inside a nozzle”, Eleventh International Conference on Flow Dynamics (ICFD2014), Sendai (2014.10.8), OS10-7.
 7. Yuka IGA, “Numerical Analysis of Unsteady Cavitating Flow by using a Modification based on an Assumption of Apparent Phase Equilibrium”, 27th IAHR Symposium Hydraulic Machinery and Systems, 2014.9.22-26, Montreal, Canada (2014.9.24), No. 6.3.2.
 8. Yuki YAMAGUCHI, Yuka IGA, “Thermodynamic Effect on Cavitation in High Temperature Water”, Proceedings of the ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting and 11th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels (FEDSM2014), Chicago, USA (2014.8.4), FEDSM2014-21433.
 9. 山口優貴, Le Dinh Anh, 大沼盛, 能見基彦, 伊賀由佳, 「2次元ノズル内のキャピティ界面に及ぼす流速の影響」, 第 42 回可視化情報シンポジウム, 東京(2014.7.21), Paper No. U00028.
 10. 伊賀由佳, 山口優貴, 「高温高圧水キャピテーショントンネル実験設備の概要」, ターボ機械協会第 71 回総会講演会, 東京 (2014.5.9), 1-6 頁.
 11. 辻田光宏, 中島隆広, 新井山一樹, 伊賀由佳, 杉本康弘, 佐藤恵一, 「液体窒素中の対称翼に発生するキャピテーションの数値解析」, 日本機械学会北陸信越学生会第 43 回学生員卒業研究発表講演会, 富山, (2014.3.7), No. 0103.
 12. Kazuki NIIYAMA, Yuka IGA, “Mechanism on thermodynamic effects in micro-bubble cavitation”, Proceedings of the 13th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration (AFI/TFI-2013), Sendai (2013.11.26), CRF7.
 13. 伊賀由佳, 新井山一樹, 「均質モデルによる極低温流体中の翼形まわりに発生するキャピテーションの数値解析」, キャピテーションに関するシンポジウム(第 16 回)講演論文集, 金沢(2012.11.24), No. S1-6, pp. 1-6.
 14. 新井山一樹, 伊賀由佳, 吉田義樹, 尾池守, 「キャピテーションの熱力学的効果に対する気泡周囲温度拡散の影響」, 日本機械学会流体工学部門講演会, 京都 (2012.11.17), No.0304, pp.133-134.
 15. 伊賀由佳, 「見掛けの相平衡を仮定した相変化モデルによる遷移キャピテーション流れの数値解析」, 日本機械学会東北支部第 48 期秋季講演会講演論文集, 八戸 (2012.9.22), pp.74-75.
 16. Yuka IGA, Kazuki NIIYAMA, “Mechanism of Thermal Effects in Micro-bubble Cavitation”, Proceedings of the 12th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration (AFI/TFI-2012), Sendai (2012.9.20), No. CRF-10, pp.40-41.
 17. Yuka IGA, “Phase Change Model based on the Idea of Apparent Phase Equilibrium in Unsteady Cavitating Flow”, The 8th International Symposium on Cavitation (CAV2012), Singapore (2012.8.15), No. 160, pp.691-695.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 取得年月日：
 国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

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・准教授
研究者番号：50375119

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：