

令和元年6月14日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04263

研究課題名(和文)高温水キャビテーション実験による熱力学的効果発現機構の解明

研究課題名(英文)Clarification of occurrence mechanism of thermodynamic effect of cavitation by hot water experiment

研究代表者

伊賀 由佳 (Yuka, Iga)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：50375119

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：熱力学的効果発現機構の解明のために、作動流体中の溶存気体量のその場計測と制御を行った。溶存酸素量のその場計測から、同じキャビティ領域を有する流れ場でも、キャビティの非定常性が強い方が溶存酸素の析出量が多いことが示された。これは、非定常キャビテーション流れ自身の局所的な流速および圧力の変動が溶存気体の析出を促進していることを示唆している。また、溶存酸素量のその場計測と同期して、主流温度の上昇に伴い上昇する溶存酸素濃度を一定に制御する脱気システムを導入し、寸法効果を排除して熱力学的効果の発現を抽出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

キャビテーションの熱力学的効果は、LNGで顕在化する。そのガス田採取から、大量輸送のための液化、運搬船による輸送、遠隔地の受入れ基地への供給という、一連のサプライチェーンにおいて使用される多くのポンプは、実液であるLNGを用いずに設計開発され、最終的な性能確認のみLNGを用いて行われている。よって、熱力学的効果を有効に利用できておらず、キャビテーション性能(作動範囲)に余裕のある設計となっていると想像できる。熱力学的効果を最適化できれば、高性能ポンプを用いたインフラ整備によって、一連のLNGサプライチェーンの低コスト化が実現し、安全・安心なクリーンエネルギーの普及が加速される。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify a mechanism of appearance of thermodynamic effect, in-situ measurement of dissolved gas and the control were done. From the measurement of dissolved oxygen, it was shown that liberation of dissolved gas is promoted when the unsteadiness of cavitation is strong in flow fields even with the same cavity area. This means that the localized flow acceleration and pressure fluctuations of the unsteady cavitation flow itself contributes to the liberation of dissolved gas. By adding degassed system was added which is synchronized with the in-situ measurement, dissolved oxygen ratio was kept constant though the mainstream temperature increases. Then scale effect was excluded and the thermodynamic effect was extracted.

研究分野：流体工学

キーワード：キャビテーション 溶存気体 析出 脱気 熱力学的効果 高温水 極低温流体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

キャビテーションの熱力学的効果とは、キャビテーション数(キャビ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)、発生するキャビ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ビ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キャビテーション近傍が冷やされ、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、キャビテーションの発生が抑えられるものと考えられており、臨界温度近くで用いられる液体水素や液化天然ガスなどの極低温流体や、高温水で顕在化することが知られている。熱力学的効果の大小を表すパラメータは、その特性から、作動流体の熱物性値を用いて求められている。

一方、実際の流体機械では、そのわずかな形状の相違により、同じ流体、同じ液温でもキャビティ体積が極めて有効に抑制される場合もあれば、それほど抑制されない場合もあり、熱力学的パラメータでは整理できない事例が多く経験されている。また、稀に、熱力学的効果が逆転する現象(主流温度を上げるとキャビティが成長する)も報告されている。よって、キャビテーションの熱力学的効果は、十分に制御できている効果とは言い難く、キャビティ体積抑制効果を最大限に利用し、流体機械の性能向上を目指すために、熱力学的効果のメカニズム解明と、顕在化する流動条件を定量的に明らかにすることが望まれている。

2. 研究の目的

本研究課題は、高温水キャビテーショントンネル実験を通じ、熱力学的効果を低減させてしまう原因と考えている寸法効果に強く影響を及ぼす溶存気体量の計測を通じ、キャビテーションの熱力学的効果が顕在化するメカニズムを解明し、キャビテーションの抑制効果を最大限に活用した流体機械高性能化の設計指針を示すことを目指すものである。これまで熱力学的効果の研究は、それが顕在化することが知られていた極低温流体である液体窒素や冷媒で行われてきたが、研究代表者の先行研究において、通常、熱力学的効果が出現しないと考えられてきた70°C程度の水でその効果を抽出することができたため、液体窒素や冷媒に比べて取り扱いが格段に容易な水を用いて実験を行う。また、これまでの研究では、熱力学的効果が強く現れる場合とそうでない場合を比較する際に、液体窒素の結果と室温水の結果が比較されており、異種流体の比較のために熱力学的効果以外の影響も含んだ比較となってしまうが、本研究課題では、水のみを用いて熱力学的効果の有無を比較することができるため、より厳密に熱力学的効果の影響を議論することができる。

3. 研究の方法

本研究課題は、東北大学流体科学研究所に設置されている高温水キャビテーショントンネルに溶存気体量をその場計測できるシステムを増設することによって実行された。本トンネルはポンプにより作動流体を循環させる回流式キャビテーショントンネルであり、圧力タンク、循環ポンプ、電気式ヒータ、試験部、および管路から構成されている。タンクと下部配管部の計三箇所に設置された電気式ヒータを操作することで、運転中の作動流体の温度を0.1°Cの精度で一定に保つことができ、主流温度を140°Cまで上昇させることができる。ポンプの回転数を変更することで主流速度を制御し、圧力タンクに真空ポンプとコンプレッサを接続することで圧力調整を行う。試験部流路形状は高さ30mm、幅20mmの矩形断面であり長さは330mmとなっている。試験部の可視化窓は側壁側のみである。本トンネルは通常のキャビテーショントンネルよりも大幅に小型に設計されており、短時間で主流温度を上昇させ、熱力学的効果の比較を行えるようになっている。さらに、脱気や吸気によって主流の溶存気体量を変化させやすいという点も本トンネルの特徴である。

本実験では、キャビテーション発生中の溶存酸素の析出量を、溶存気体析出の1つの指標として用いる。トンネル運転中に溶存酸素量を直接モニタリングできるように、循環ポンプを冷却するためのバイパスループ部に、溶存酸素計を導入した。溶存酸素計には、ビジファーム DO

アーク（ハミルトン）を用いた．本センサーは，蛍光式センサーであり，LED の光とそれを吸収，発光する蛍光体を用い，蛍光体が発する光が酸素に吸収される原理を用いて酸素濃度を 4ppb から 25ppm の範囲で測定できる．本溶存酸素計は高温高压状態では計測できないため，メインループから水をバイパスし，一旦，降温し計測した後，昇温してメインループへと水を戻している．また，その際に主流温度における目的の溶存酸素濃度となるよう制御を行っており，目的よりも高濃度である場合は，真空ポンプにより減圧した脱気膜を通過後にメインループへ戻し，目的よりも低濃度である場合はそのままメインループへ戻し，メインタンク内の空気溶解装置より空気を加圧したメインタンク内へ通気し，溶存気体量を増やす．

なお，研究申請時に予定していたキャピテーション核数計測装置の増設は，予算と期間の都合で実現できなかったため，実験結果に関しては，溶存空気量の指標である溶存酸素量を用いて整理することとした．

4．研究成果

主流から析出した溶存気体は残留気泡核となり，その後のキャピテーションの発生を促進することとなる．これがキャピテーションの抑制効果である熱力学的効果を打ち消す寸法効果の要因となる．そこで本研究ではまず，キャピテーション発生中の溶存気体析出量について計測を行った．流動による力学的刺激で析出が促進されていると考えれば，キャピテーションが非定常な様相を呈する場合，非定常性が自身の析出を促進することとなる．よって，同じ主流圧，主流温度，キャピティ体積で，非定常性の異なる 2 つのキャピテーション流れにおいて，流動中の溶存酸素の析出量を比較し，非定常キャピテーションにおける溶存酸素の析出量を評価するとともに，キャピテーションの非定常性が溶存気体の析出に与える影響について検討した．

試験体には翼弦長 30mm，スパン 20mm の NACA0015 翼形と，一辺 7.86mm，スパン 20mm の正三角柱を用い，正三角柱は頂点が上流側に向くように置いた．主流静圧が等しい条件下において，双方の平均キャピティ面積が概ね等しい条件で溶存酸素量の時間変化を計測する．具体的な条件は，温度 T ，上流圧力 p_{up} は両流れ場で等しく $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， 0.070 MPa とした．主流速度 U_{∞} ，迎角 α は NACA0015 では 13.3 m/s ($\sigma=0.66$) 8 deg. に定め，三角柱においては 7.8 m/s ($\sigma=2.0$) とした．このとき，三角柱では 43Hz 付近に強い卓越周波数の存在が確認され，可視化結果とも合わせるとこの周波数は，カルマン渦構造を有するクラウドキャピテーションの下流への放出による周波数である．また，NACA0015 では卓越周波数がみられず，キャピティは準定常的に翼形に発生しているものと考えられる．以上の周波数特性から，三角柱の方が非定常性および周期性が強いキャピテーションが発生していると言える．

30 分間連続運転した際に計測された溶存酸素量の時間変化を比較すると，NACA0015 では溶存酸素量の低下がほとんど見られず，一方で三角柱では初期溶存酸素量から約 17 % 程度低下したことが確認される．よって，同じキャピティ領域を有する流れ場でも，キャピティの非定常性が強い方が溶存酸素の析出が早いと言える．これら 2 つの流れ場で，主流の圧力および温度を等しい条件としていることより，本傾向は溶存気体の析出に非定常なキャピテーション流れでの局所的な流速および圧力の変動が寄与することを示唆するものである．また，三角柱流れで 30 分間に析出した酸素量は約 0.5 mg/L である．これは，例えば， 1 m^3 の水から析出した酸素量は，低圧部，例えば 0.01 MPa 下では 5 L 分の気体となる．トンネル全体の水量はさらに多く，また，溶存空気の一部である酸素のみで 5 L であるため，他の気体成分も含めると，さらに大きな体積が 30 分間で析出したものと予想される．以上の結果より，特に非定常キャピテーション状態では，寸法効果による発生促進効果が，抑制効果である熱力学的効果を打ち消す方向に働くことが示された．

次に，これまで制御できなかった高温条件下での溶存気体量を，低温条件と等しい溶存酸素飽和度となるよう制御することにより，析出すると予想される溶存気体量が等しくなるような二温度条件下でキャピテーション発生範囲を比較し，寸法効果を打ち消した状態で熱力学的効果を抽出する実験を行った．試験体には，迎角の増加に伴い負圧面境界層が層流境界層から遷移条件を経て乱流境界層へと変化する流速条件下で，付着シートキャピテーション，シートクラウドキャピテーション，スーパーキャピテーション，バブルキャピテーション，後縁キャピ

テーション, はく離せん断層渦キャビテーションと, 多くの形態のキャビテーションが発生することが知られている NACA16012 翼形で, 翼弦長 30mm, スパン 20mm とした. 迎角を 0 度から 12 度まで変化させ, 主流温度 30 と 60 で各種キャビテーション形態の発生範囲を比較したところ, 翼形の境界層が層流境界層もしくは遷移状態である比較的低迎角条件で熱力学的効果が顕在化し, キャビテーションの初生が大幅に遅れることが示された. また, 翼前縁から乱流境界層となる迎角以上では, 60 の温水では熱力学的効果は顕在化しないことも示された. 本結果より, これまで経験的に, 80°C 程度までの水では熱力学的効果は出現しないとされてきたが, 60 程度でも熱力学的効果が潜在していることが示された. またそれは流れ場が層流状態であるときであることが示され, これは, 熱物性値からなる熱力学的効果パラメータでは説明できない特性であり, 熱力学的効果を利用した流体機械の設計指針につながる重要な知見であると言える.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

1. Anh Dinh Le, Junnosuke Okajima, Yuka Iga
Numerical simulation study of cavitation in liquefied hydrogen
Cryogenics, 査読あり, 101 (2019), pp. 29-35.
2. Anh Dinh Le, Junosuke Okajima, Yuka Iga
“Modification of Energy Equation for Homogeneous Cavitation Simulation with Thermodynamic Effect”
Journal of Fluids Engineering, Trans. ASME, 査読あり, Vol. 141 (2019), pp. 081102-1 - 12.
3. 伊賀由佳, 古澤哲平
「温水キャビテーションにおける熱力学的効果の発現に関する実験的研究」
日本機械学会論文集, 査読あり, Vol.83, No.845(2017), p.16-00377.
4. 伊賀由佳, 山口優貴
「高温水中の翼形キャビテーションの内部温度」
日本機械学会論文集, 査読あり, Vol.82, No.837(2016), p.15-00548.

[学会発表](計16件)

1. Shumpei Takahashi, Tomohiko Usui, Yuka IGA
"Study on Gaseous Cavitation around a Hydrofoil in Oil Flow"
Fifteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2018), Sendai, Miyagi (2018.11.7-9(8)), Session Type : OS18 , Presentation No.41
2. Masaki Ito, Junnosuke Okajima, Hirotoishi Sasaki, Tomokazu Nomura, Yuka Iga
"Observation of Cavitating Flow on a Heated Hydrofoil"
Fifteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2018), Sendai, Miyagi (2018.11.7-9(7)), Session Type : OS18 , Presentation No.22
3. Anh Dinh Le, Yuka Iga
"Numerical Simulation of Cavitating Flow with Thermodynamic Effects of Cavitation"
The International Conference on Fluid Machinery and Automation Systems (ICFMAS2018), Hanoi, Vietnam (2018.10.27-28(28)), ICFMAS071
4. Anh Dinh Le, Yuka IGA
"A Simplified Thermodynamic Effect Model for Cavitating Flow in Hot Water"
29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Kyoto, Japan(2018.9.16-21(18)), No.171.
5. Yosuke IBATA, Yudai MATSUURA, Shunpei TAKAHASHI, Yuka IGA
"Development of gaseous cavitation model in hydraulic oil flow considering the effect of dynamic

- stimulation"
29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Kyoto, Japan(2018.9.16-21(18)),
No.314.
6. Yuka Iga, Teppei Furusawa, Hiritoshi Sasaki
"Interaction between Thermodynamic Suppression Effect and Reynolds Number Promotion Effect on Cavitation in Hot Water"
The 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018), Baltimore, USA (2018.5.14-16(16)),
No. Thermal effects-2.
 7. Yoshiki Odaira, Wakana Tsuru, Satoshi Watanabe, Yuka Iga
"Experimental Study of Disappearance Phenomenon of Unsteady Cavitation on NACA16-012"
The 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018), Baltimore, USA (2018.5.14-16(15)),
No. Cavitation in Fluid Machinery I -1.
 8. Yoshiki Odaira, Wakana Tsuru, Satoshi Watanabe, Yuka Iga
"A Fundamental Study of Disappearance Phenomenon of Partial Cavitation on the NACA 16012 Hydrofoil"
17th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC17), Maui (2017.12.16-21(19)), No.67. (pp.5 pages)
 9. Le Dinh Anh, Yuka Iga
"Simplified Modeling of Cavitating Flow with Thermodynamic Effect for Homogeneous Model"
17th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC17), Maui (2017.12.16-21(19)), No.404. (pp.7 pages)
 10. Donghyuk Kang, Yuka Iga
"Thermodynamic Effect on Tip Leakage Vortex Cavitation"
The 7th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2017), Sendai, Japan (2017.11.1-3(2)), No.CRF-58, pp.118-119.(Poster)
 11. Donghyuk KANG, Daichi NAKAI, Yuka IGA
"A Thermodynamic Effect in a Tip Leakage Vortex Cavitation around a Hydrofoil in Hot Water"
The 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference(TFEC9),
Okinawa(2017.10.27-30(29)), TFEC9-1471.
 12. Yudai Matsuura, Kento Kumagai, Yuka Iga
"Numerical Modeling of Gaseous Cavitation in CFD of Hydraulic Oil Flow Based on Dynamic Stimulation"
ASME/Bath Symposium on Fluid Power and Motion Control(FPMC2017), Sarasota, FL,
USA(2017.10.16-19(18)), Paper No. FPMC2017-4219.
 13. Donghyuk KANG, Daichi NAKAI, Yuka IGA
"Thermodynamic Effect on Tip Leakage Vortex Cavitation"
The 13th International Conference on Flow Dynamics(ICFD2016), Sendai(2016.10.10-12(11)),
OS17(Poster).
 14. Le Dinh Anh, Yuka Iga
"Influence of Cavitation Model on Cavity Surface Transition in a Nozzle"
The 13th International Conference on Flow Dynamics(ICFD2016), Sendai(2016.10.10-12(11)),
OS16(Poster).
 15. Sataro Tateishi, Kento Kumagai, Yuka Iga
"A Fundamental Research of Inception of Gaseous Cavitation in Hydraulic Oil"
The 13th International Conference on Flow Dynamics(ICFD2016), Sendai(2016.10.10-12(10)),
OS16(Poster).
 16. Daichi Nakai, Teppei Furusawa, Donghyuk Kang and Yuka Iga
"Experimental Study of Thermodynamic Effect of Tip Vortex Cavitation in Hot Water"
International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC2016), Hawaii, Honolulu(2016.4.10-15(15)), No.196.

〔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：

国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者 なし

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2)研究協力者 なし

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。