

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760118

研究課題名（和文） 再使用型液体ロケットターボポンプに向けて
—極低温キャビテーションの数値解析—研究課題名（英文） Effort to reuse of the liquid rocket turbopump
-Numerical analysis of cryogenic cavitation-

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（和文）：液体ロケットに搭載されている液体水素・酸素ターボポンプは、超高馬力かつ小型軽量化がなされており、ターボポンプ入口部では、キャビテーションが不可避免的に発生する。キャビテーションは、その非定常振動がポンプシステムと干渉することにより、「キャビテーション不安定現象」へと変化し、ポンプの性能低下や破損を引き起こす恐れがある。本研究課題では、液体ロケットの再使用化を目指し、極低温環境下におけるキャビテーション不安定現象およびキャビティ気泡崩壊の数値解析手法の確立を目指す。

研究成果の概要（英文）：Cavitation occurs inescapably in inlet of turbopump of liquid rocket engine, because the liquid oxygen and hydrogen turbopumps are downsized and made as high-horsepower to the utmost limit. The cavitation sometimes yields cavitation instability, which is undesirable oscillation of the pump induced by mutual interference between the unsteady characteristics of cavitation and the pump system. The cavitation instability induces the declaration of efficiency or damage in the pump. In the present study, in an effort to reuse of the liquid rocket, the numerical method for the cavitation instability and cavitation erosion is attempted to be develop especially in a cryogenic environment such as liquid hydrogen and oxygen.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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, キャビテーション

1. 研究開始当初の背景

液体ロケットターボポンプに発生するキャビテーション現象の解明を困難にしている要因はいくつかあるが、特に、その作動流体が極低温流体であることが第一要因であろう。極低温環境下におけるキャビテーション不安定現象の実験的研究はここ最近になって幾例か見られるよ

うになってきたものの、極低温であるがゆえにインデューサ内部を可視化できないことから、実験のみによる現象解明は困難である。一方、キャビテーションエロージョンに関する実験的研究は古くからなされており、作動流体を水とする知見は数多く存在するが、極低温環境下となると、それに関する実験的報告や理論はほと

んど存在しないと言っても過言ではない。キャビテーションが極低温流体で発生した際には、その熱力学的効果により、常温水での特性と大きく異なることが知られている。熱力学的効果とは、蒸発による潜熱の移動により液相温度が低下し、キャビティの成長（蒸発）が抑制されるという、ターボポンプにとっては好ましい効果であり、極低温流体では顕著に現れるとされている。しかしながら、熱力学的効果が大きく現われるインデューサがある一方、予想したほど効果の現れないインデューサがあることなどからもわかるように、熱力学的効果のメカニズムは未だ仮説の域を脱していない。また、極低温流体と同様に熱力学的効果が大きいとされる高温水での非定常キャビテーション流れにおいて、常温水に対してキャビティ体積が増えるという逆転現象の報告があり、それをメカニズム解明の突破口にできるのではないかと考えている。

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、研究代表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てきた。研究代表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。また、気液二相均質媒体モデルによるキャビテーション流れ場の巨視的解析と、気泡力学を用いたキャビティ気泡の微視的解析を連成することにより、非定常キャビテーション流れにおけるキャビテーションエロージョン分布の予測手法を現在開発中である。さらに、巨視的解析に用いた均質媒体モデルを単一気泡の非球形崩壊挙動の数値解析に適用し、構造解析との連成させることにより、壁面近傍におけるキャビティ気泡崩壊時の材料内応力波の伝播挙動の数値解析を行っている。

以上が、本研究課題の学術的背景である。

2. 研究の目的

本研究課題は、液体ロケットターボポンプの再使用化を目指し、極低温環境下におけるキャビテーション不安定現象およびキャビティ気泡崩壊の数値解析手法を開発し、それらの現象の理解とメカニズム解明を試みるものである。

本研究課題では、先の若手研究（B）で開発した極低温気液二相モデルによる液体窒素および液体水素の極低温キャビテーション流れの数値解析により、順傾向の熱力学的効果を再現し、先に示した高温水での逆転現象における流れ場との違いや、各熱力学的パラメータの関与などについて調査することにより、キャビテーションにおよぼす熱力学的効果の支配パラメータが何なのかを発見したいと考えている。同時に、本極低温モデル方程式系の安定性と精度について検証し、安定化および高精度化を図るとともに、その適用限界を見極める。同モデルを用いて、同様に極低温流体である液化天然ガス（LNG）におけるキャビテーションの数値解析の可能性について検討する。安定化・高精度化されたモデルを、キャビテーションエロージョン分布の予測手法や、気泡崩壊と構造の連成数値解析手法に適用し、極低温キャビテーションエロージョンのマクロ/ミクロな数値解析手法の開発を行う。

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るため、熱力学的効果のために主流温度を大きく変化させた流れ場を解析する際にはその都度パラメータを変えねばならず、また、蒸発に伴い温度が局所的に大きく低下すると予想される流れ場の解析では計算精度に不安があった。申請者が先の若手研究（B）で開発した極低温気液二相モデルでは、流体の状態方程式を極低温の液相・気相、過冷却状態から高压高温の超臨界状態まで表現できる三次方程式型とし、そこから定圧比熱や断熱音速などの熱力学パラメータを導出し、それらを二相系へと展開した。この「適用温度範囲の広さ」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。

本気液二相モデルを用いた数値解析により、極低温・超高速・気液二相流という極限環境下において実験や理論解析のみでは得難い情報を得ることができ、その結果、次のような貢献が期待できる。

- 1) キャビテーション振動およびキャビテーションエロージョンの予測による再使用型液体ロケットターボポンプ開発費の大幅コストダウン
- 2) 気液二相流と超臨界流の混在する流れ場の解析による超高加圧式新型液体ロケットターボポンプ開発の可能性
- 3) 液化天然ガス流中のキャビテーションおよび沸騰の発生予測によるLNGポンプの最適化技術

3. 研究の方法

本研究では、実際の液体ロケットエンジンで

起こっているキャビテーションの問題、ターボポンプの開発状況、キャビテーション数値解析に対する現場の要望をリアルタイムに抽出しながら数値解析を実行し、かつ、数値解析結果に対して現場の意見を聞く必要がある。そこで、研究体制として、宇宙航空研究開発機構（JAXA）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ターボポンプチームの研究者らとの密な連携を図りながら研究を進めた。また、本研究課題は次の様な手順で進めた。

1) 可視化データ処理システムの構築

本研究課題では、計算実行は東北大学流体科学研究所の有するスーパーコンピュータシステムを用いて実行する。一方、計算結果の可視化作業や振動波形の振動解析、および計算に用いるモデル方程式系の係数の調整は、本研究課題で購入する可視化データ処理システムを用いる。特に本研究で対象とするような非定常現象を対象とする場合、膨大なデータを扱うため、ネットワークでつながったスーパーコンピュータシステム中にある可視化サーバを用いるよりも、ワークステーション中のソフトウェアでローカルに処理を行う方が、格段に処理速度が速くなる。よって、研究初年度初旬に、ハイスペックのワークステーションや可視化および回帰演算ソフトウェア等を購入し、本研究課題専用の可視化データ処理システムを構築する。

2) 極低温気液二相方程式および熱力学パラメータの解の安定化

先の若手研究（B）でも確認されたように、本極低温気液二相方程式系には打ち切り誤差によって生じる解の不安定性が存在し、依然としてそれは解決されていない。よって、研究初年度には、方程式系の解の安定化について注力した。具体的には、二相混合状態になりうる領域と単相状態でしかありえない領域の境界近傍で各パラメータ間に数値誤差が存在し、計算機の打ち切り誤差によって解の不安定が発生していると予想されるため、対策として、境界近傍でのモデル式の近似精度の向上を回帰演算ソフトウェアを用いて試みた。

3) 熱力学的効果の顕在化する流れ場の計算
 実際の計算としては、1)において安定化を図った方程式系の係数を計算コードに反映し、その計算コードを用いて、3枚周期翼列まわりのキャビテーション流れの非定常計算を行った。対象流体は水と液体窒素で、それぞれ主流温度を変化させ、時間平均のキャビティ体積や揚程、翼列キャビテーション性能を比較することにより、熱力学的効果の出現と流れ場の非定常性の関係について議論した。

4) 熱力学的効果の簡易モデルの提案

2)での解の安定化の問題から、虚数解を持たない方程式系で、蒸発に伴う潜熱の移動を考慮した相変化モデルを構築し、キャビテーションの熱力学的効果を簡易的に表現できる計算を、先の4)と同じ流れ場において実行した。

4. 研究成果

蒸発に伴う潜熱の移動を考慮した相変化モデルを用いて、極低温流体として汎用的な液体窒素を対象とし、三枚羽根軸流ポンプを模擬した三枚周期平板翼列に発生するキャビテーションの数値解析を行った結果を示す。図1には液体窒素77.6Kに発生するキャビテーションの様相と、相変化に伴う液相の温度分布を示している。液体窒素における極低温キャビテーションの非定常な流れの再現と、相変化に伴う潜熱の移動による流れ場の非定常な温度分布の再現ができた。また、図2には、等温計算と、本モデルによる計算

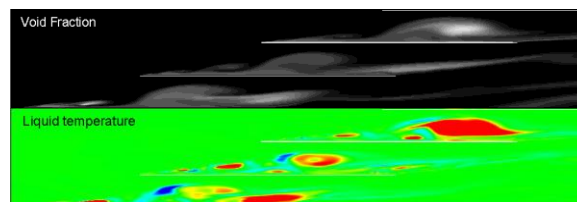


図1 液体窒素(77.6K)に発生するキャビテーションの様相（上）と相変化に伴う液相の温度分布

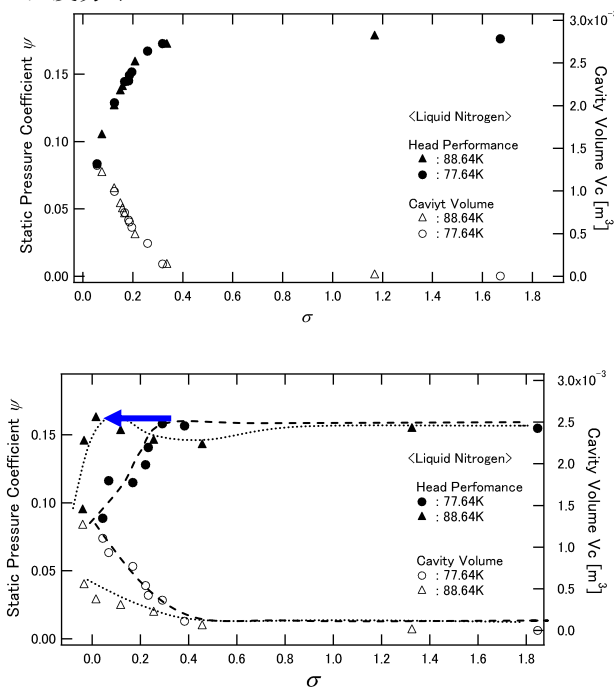


図2 時間平均翼列揚程とキャビティ体積変化の等温計算結果（上）と極低温相変化モデルによる結果（下）

によって得られた、3枚周期翼列の時間平均揚程と時間平均キャビティ体積の変化とを示す。流れ場の温度を一定として物性値のみを変化させた等温計算では熱力学的効果が全く現れなかったことより、レイノルズ数は熱力学的効果には影響しないことが示された。

次に、同様の熱力学的効果モデルを用いて、同流れ場での常温水と高温水に発生するキャビテーション流れを解析した。図3には水温によるキャビティ形状と蒸発領域の分布の違いを示す。常温水ではシート状のキャビテーションが発生し、一方高温水では、先の液体窒素と同様に比較的lowポイド率からなり複雑な形状をしたキャビティが発生している。蒸発領域もそれらのキャビティ形状に伴い、常温水ではシートキャビティの界面に沿って薄く長く分布しているが、高温水では波打った界面の一部に集中して分布していることがわかる。また、液体窒素と水における時間平均揚程とキャビティ体積の変化を図4に比較する。主流温度が高い方がキャビティ体積が抑制され揚程低下点が低 σ 側に

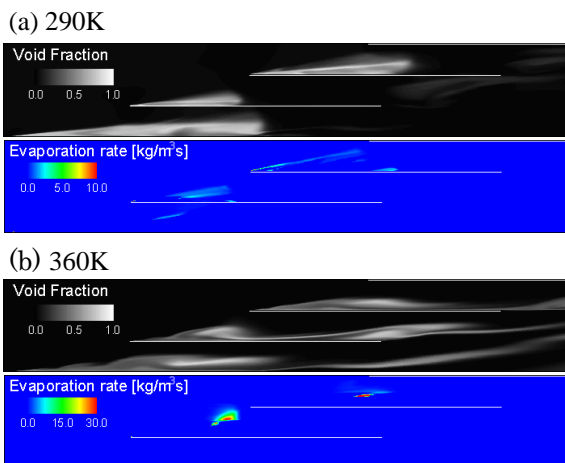


図3 水温によるキャビティ形状と蒸発領域の分布の違い

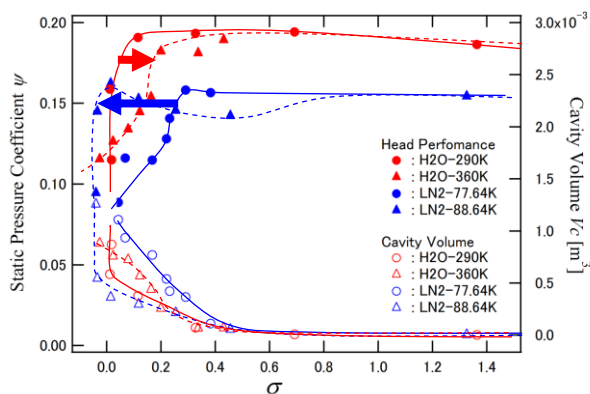


図4：液体窒素と水における時間平均翼列揚程とキャビティ体積の変化

シフトする液体窒素における順傾向の熱力学的効果に対して、水の計算結果では、高温水の方がキャビティ体積が大きくなり、揚程低下点が高 σ 側に移動しており、熱力学的効果の逆転現象が再現されている。また、この水における逆転現象は、非定常性が緩和される状態（スーパーキャビテーション状態）までキャビテーションが十分に発達すると、この順傾向へと転じる事が予測され、逆転現象と非定常性の関係が示された。

この他、同均質媒体モデルによって気液界面を格子スケールで捕えることにより、壁面近傍における単一気泡の非球形崩壊挙動過程の詳細な数値解析を行った。さらに、均質媒体モデルにより再現された非定常キャビテーション流れに気泡数密度部のを考慮した代表気泡を流し、その気泡の内部圧から壁面での衝撃圧分布を評価することによって、単独翼まわりにおける壊食危険箇所を予測した。ここでは、先の単一気泡の非球形崩壊の影響も考慮した。またここで、エロージョンを引き起こす可能性の高い、高迎角・中キャビテーション数状態における遷移キャビテーションの状態において、本解析手法ではキャビティ体積を過小評価することが判明した。これにより、キャビティ気泡の崩壊により引き起こされるエロージョン量を過小評価してしまった。これは、エロージョン量の予測手法の問題ではなく、非定常状態におけるキャビテーションの発生予測自体の問題である。本件に関しては、極低温流体ではないが、同じく熱力学的効果が顕著となる高温高压水におけるキャビテーションの実験的研究である次の研究課題において、流れ場中の乱れ成分の詳細なデータ取得および解析を通じ、遷移キャビテーションの数値予測精度の向上を図ることを計画している。

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7件)

1. Yoshiki YOSHIDA, Hideaki NANRI, Kengo KIKUTA, Yusuke KAZAMI, Yuka IGA, Toshiaki IKOHAGI, Thermodynamic Effect on Subsynchronous Rotating Cavitation and Surge Mode Oscillation in a Space Inducer, Journal of Fluids Engineering, Trans. ASME, 査読有, Vol.133, 2011, pp. 061301-1 - 061301-7.
2. Naoya OCHIAI, Yuka IGA, Motohiko NOHMI, Toshiaki IKOHAGI, Numerical Analysis of Nonspherical Bubble Collapse Behavior and Induced Impulsive Pressure during First and Second Collapses near the W

all Boundary, Journal of Fluid Science and Technology, 査読有, Vol.6 No.6, 2011, pp. 860-874.

3. Naoya OCHIAI, Yuka IGA, Motohiko NOHMI, Toshiaki IKOHAGI, Numerical Prediction of Cavitation Erosion Intensity in Cavitating Flows around a Clark Y 11.7% Hydrofoil, Journal of Fluid Science and Technology, 査読有, Vol.5 No.3, 2010, pp. 416-431.
4. 吉田義樹, 南里秀明, 菊田研吾, 風見佑介, 伊賀由佳, 井小萩利明, 熱力学的効果が合同期旋回キャビテーションとサージモードの振動に与える影響, 日本機械学会論文集 (B編), 査読有, Vol.76 No.762, 2010, pp. 179-185.
5. 吉田義樹, 南里秀明, 菊田健吾, 風見佑介, 伊賀由佳, 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, 宇宙航空研究開発機構研究開発資料, 査読無, JAXA-RM-09-005, 2009, pp.1-8.
6. Yoshiki YOSHIDA, Yoshifumi SASAO, Mitsuo WATANABE, Tomoyuki HASHIMOTO, Yuka IGA, Toshiaki IKOHAGI, Thermodynamic Effect on Rotating Cavitation in an Inducer, Journal of Fluids Engineering, 査読有, Vol.131 No.9, 2009, pp. 091302-1 - 091302-7.
7. Yuka IGA, Kei HASHIZUME, Yoshiki YOSHIDA, Toshiaki IKOHAGI, Occurrence Mechanism and Oscillation Characteristics of Pulsation Phenomenon Arising in Cavitation Surge in Cascade, Journal of Environment and Engineering, 査読有, Vol.4 No. 3, 2009, pp. 524-538.

[学会発表] (計 10 件)

1. 能見基彦, 井小萩利明, 伊賀由佳, 非定常キャビテーション流れ解析における境界条件の影響, キャビテーションに関するシンポジウム (第 15 回), 2010 年 11 月 23 日, 大阪.
2. Naoya OCHIAI, Yuka IGA, Motohiko NOHMI, Toshiaki IKOHAGI, Numerical Analysis of First and Second Collapse Behavior of a Bubble near Wall Boundary, The 7th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2010), 2010.11.2, Sendai.
- 3 落合 直哉, 伊賀由佳, 能見 基彦, 井小萩

利明, 壁面近傍での非球状気泡崩壊挙動に関する一考察, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2010 年 10 月 31 日, 山形.

4. Hirotohi SASAKI, Yuka IGA, Toshiaki IKOHAGI, Study of Droplet Impingement Phenomena by Fluid/Solid Coupled Simulation, Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2010 (SNA+MC2010), 2010.10.20, Tokyo.
5. Motohiko NOHMI, Naoya OCHIAI, Yuka IGA, Toshiaki IKOHAGI, A Detailed Observation of Hydrofoil Cavitation and a Proposal for Improving Cavitation Model, ASME 2010 Fluids Engineering Conference, 2010.8.2, Canada.
6. Yuka IGA, Yoshiki YOSHIDA, Numerical Analysis of Control of Cavitation Instabilities in Tandem Cascade, Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2010 (AJCPP2010), 2010.3.5, Miyazaki, Japan.
7. Yuka IGA, Yoshiki YOSHIDA, Toshiaki IKOHAGI, Influence of Inlet and Outlet Pipe Length on Cavitation Surge, 9th International Symposium on Advanced Fluid Information and 6th International Symposium on Transdisciplinary Fluid Integration (AFI/TFI 2009), 2009.11.5, Sendai, Japan.
8. Yuka IGA, Naoya OCHIAI, Yoshiki YOSHIDA, Toshiaki IKOHAGI, Numerical Investigation of Thermodynamic Effect on Unsteady Cavitation in Cascade, The 7th International Symposium on Cavitation (CAV2009), 2009.8.20, Michigan, USA.
9. Yuka IGA, Yoshiki YOSHIDA, A Study of Propagating Speed of Rotating Cavitation Based on Numerical Analysis, 2009 ASME Fluids Engineering Conference (FEDSM2009), 2009.8.5, Colorado, USA.
10. 伊賀由佳, 翼列に発生するキャビテーション不安定現象の数値解析, 日本混相流学会, 混相流流れのダイナミクス分科会 & 濡れ性と混相流分科会研究会, 2009 年 7 月 20 日, 富山.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況（計0件）

〔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・助教
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：