

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月20日現在

機関番号：31308

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560185

研究課題名（和文） 高密度過冷却液体酸素のキャビテーション不安定流動に関する研究

研究課題名（英文） Study on Instability of Densified Subcooled Liquid Oxygen Cavitating Flows

研究代表者

尾池 守 (OIKE MAMORU)

石巻専修大学・理工学部・教授

研究者番号：70292282

研究成果の概要（和文）：大気圧沸点以下に過冷却し高密度化した液体酸素のキャビテーション流動試験を行い、混入した異種気泡核がキャビテーションの熱力学的効果に及ぼす影響を定量的に把握した。その結果、過冷却状態では気泡の成長比率が急激に増加することを定量的に確認するとともに、この領域ではヘリウムガス混入によりキャビテーションの成長抑制効果が高くなることが判明した。また、下流部で発生する不安定流動への影響も定量的に明確化した。

研究成果の概要（英文）：Cryogenic rocket propellants such as liquid oxygen can be easily densified by subcooling, i.e., a reduction in fluid temperature below the normal boiling point. An investigation of subcooled liquid oxygen cavitating flow passing through an orifice was carried out to clarify influences of dissolved bubble nuclei on thermodynamic effects of cavitation. The results showed that the bubble growth ratio drastically increases in the subcooled condition and that helium bubble nuclei in the subcooled liquid oxygen promote to suppress the bubble growth. This fact was found to affect the instability of subcooled liquid oxygen cavitating flow.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
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・流体力学

キーワード：混相流

## 1. 研究開始当初の背景

ロケット輸送の効率化のためにロケットの推進剤である液体水素や液体酸素を過冷却高密度化することで、タンク容積を低減し構造重量を軽減化することが検討されている。たとえば、液体水素の温度を20 K から 15 K に下げることで密度を約7%高くすることができ、液体酸素も同様に高密度化することで、ロケットの乾燥重

量を約17%削減できることが報告されている。

通常の流体に比べて蒸発潜熱、粘性、表面張力あるいは気・液の密度比が小さいという特異な性質を有する低温流体の流れは、熱浸入や圧力降下により容易に気液二相流を形成する。この気液二相流は実用上功罪両面を有する。すなわち、気液二相流は浸入熱量が変化しても沸騰する気泡の

量が多くなるだけで、流体の温度は一定に保持されるという寒剤としては理想的な性質を示す。しかしその反面、気液二相流は管路系との相互作用によりしばしば圧力変動や密度変動を伴う不安定流体振動を発生させる。この種の不安定流体振動は単に低温機器の性能劣化を誘発するだけでなく、機器全体の致命的な損傷を引き起こす可能性が高い。大気圧沸点以下に過冷却した高密度低温流体は、標準状態の低温流体と同一圧力条件下で使用した場合、過冷却度が高いためにキャビテーションが発生し難いという利点を有している。しかしながら申請者等が液体窒素を対象とした研究によれば、高密度過冷却流体は確かに気液二相流化し難いが、配管中の絞り部にキャビテーションが発生すると以下のような特異な現象が観測された。

- (1) 液温の低下、すなわち高密度化の進展に伴い、絞り部におけるキャビテーションの発生状況は、連続的キャビテーション状態、境界的キャビテーション状態および間欠的キャビテーション状態の3種類に区分できる。
- (2) 図2に一例を示すように、境界的キャビテーション状態の発生時には不安定な大振幅圧力振動と流量変動を伴うキャビテーション不安定性が生じる。
- (3) 図3に示したように、境界的キャビテーション状態における圧力振動振幅は供給液温に対する強い依存性を有する。

このような現象が発生する原因は下記の3因子を考えることで定性的に説明可能ではあるが、定量的に理解できる段階に至っていないのが現状である。

- ① 絞り部でのキャビテーション発生に伴う音速の急激な低下によりチョーク流れが生じるが、同一のボイド率ならば高密度化（低温化）が進む程音速が低下すること。
- ② 高密度化、すなわちサブクール度が高くなる程、キャビテーション初生に必要な絞り部流速が速くなり、キャビテーションの連続的な発生に必要な流速も速くなること。
- ③ 低温、極低温流体は通常の流体に比べ気泡核の混入が少ないため、キャビテーションの初生には高加熱度状態を要すること。

このような観測結果は、高密度過冷却低温流体の配管中に一度キャビテーシ

ョンが発生すると、機器全体の致命的な損傷を引き起こす恐れが高いことを示唆している。特に、液体ロケットエンジン・ターボポンプのインデューサではキャビテーションの発生状態が吸込み性能を決定するため、高密度化したロケット用低温推進剤の実用化に向けては、高密度過冷却低温流体の管内気液二相流で生じるキャビテーション不安定性のメカニズムを定量的に解明し、設計及び運用指標となり得る緩和策を確立する必要がある。

## 2. 研究の目的

レイノルズ数が  $10^5$  オーダの高密度過冷却液体酸素の管内流を主対象にして、配管中に設けた絞り部で生じる静圧降下によりキャビテーションを発生させ、その発生状態を観測する。

具体的には、液体酸素を配管系に供給するための加圧ガスの種類と暴露時間を変えることで、高密度低温流体中に混入する異種気泡核をパラメータとしたキャビテーション流動試験を行い、キャビテーションの熱力学的効果に及ぼす影響を定量的に解明する。

さらに、実験結果と数値解析結果を比較検討することで高密度過冷却液体酸素のキャビテーション不安定流動に対する緩和策の定量化を図る。

## 3. 研究の方法

### (1) オリフィス流動試験

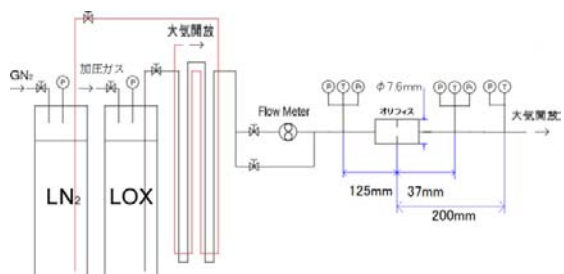


図1 実験装置概略図

図1に用いた実験装置の概略図を示す。実験装置は液体酸素（LOX）供給タンク、冷却用液体窒素（LN<sub>2</sub>）供給タンク、LOX冷却用熱交換器、オリフィス試験部、排出部から構成される。加圧ガスで昇圧されたLOXは同心2重円管の対向式熱交換器でLN<sub>2</sub>により冷却され、過冷却状態でオリフィス試験部に供給される。オリフィスの125 mm上流（添え字1）と37 mm下流（添え字2）で温度（ $T$ ）、静圧（ $P$ ）および変動圧（ $P_f$ ）を計測し、ノズル上流に設置したタービン流量計で体積流量（ $Q$ ）を計測した。またオリフィスの200 mm後方、配管内径が23 mmに拡大された位置（添え字2d）で同様に温度、静圧を計測した。オリフィス径の異なる3種類のオリフィスに

対して試験を行い、混入気泡核の影響を探る目的で、酸素、窒素およびヘリウムの3種類をLOXの加圧ガスとした。

実験中はオリフィス上流温度と圧力を変えることで、オリフィス部のキャビテーション数 $\sigma_{pi}$ と無次元熱力学的パラメータ $\Sigma^*$ を変化させた試験を行い、StepanoffのBファクタでキャビテーションの発生状態を評価した。また、キャビテーションの熱力学的効果による気泡成長抑制効果を定量化するため、成長抑制効果を表す指標として、オリフィス出口でのボイド率 $\alpha_{th}$ と $T_2$ 測定点でのボイド率 $\alpha_2$ の比を導入した。 $\alpha_{th}$ はBrennenによる気液相変化を考慮した音速の式よりRapposelliらの手法で算出し、 $\alpha_2$ はBファクタより算出した。

## (2) 可視化流動試験

Bファクタから求めたボイド率は流れのない準静的な過程を仮定した計算上のボイド率であるため、実際には高速の流れ場となっている下流のボイド率を正しく表しているかどうかを確かめる必要がある。そのため、画像データからキャビテーションの発生状況や流れ場に関する情報を収集する目的で、図2に示した可視化オリフィス試験部を、図1のオリフィス試験部に組み込んで、同様のキャビテーション流動試験を行った。オリフィス入り口の50 mm上流と出口の25~37 mm下流で温度を測定し、画像データは高速VTRで適宜収録した。

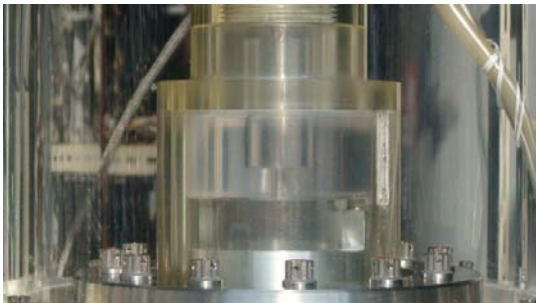


図2 可視化試験部外観

## 4. 研究成果

### (1) 画像解析とBファクタ

図3にオリフィス径3.0 mm、ヘリウム加圧で得られたキャビテーション数 $\sigma_{pi}$ とBファクタの関係を示す。冷却することでキャビテーション数は増加していき、それに伴ってBファクタも低下していく。そして過冷却状態において $\sigma_{pi} > 1.13$ となるとBは完全に負の値となった。図3中に示した $B > 0$ ,  $B = 0$ ,  $B < 0$ となる3点における高速VTR撮影画像について、画像解析を行った。オリフィス出口直後と下流温度センサー位置において縦、横共にオリフィス径長さにとった正方形で切り出し、撮影フレーム間の平均画像を求め、画

像の濃度を算出する。画像濃度は対象領域の0(黒)~255(白)のグレースケール(Gs)で表す。全フレーム間の時間平均GsとBファクタの関係を図4に示す。データはBファクタが減少するとGsが高くなる、すなわちキャビテーション存在割合が低下する傾向を示しており、特にBファクタがプラスの領域では定量的にも相関性が認められる。したがって、下流のキャビテーション発生状態をBファクタで評価することは妥当と考えられる。

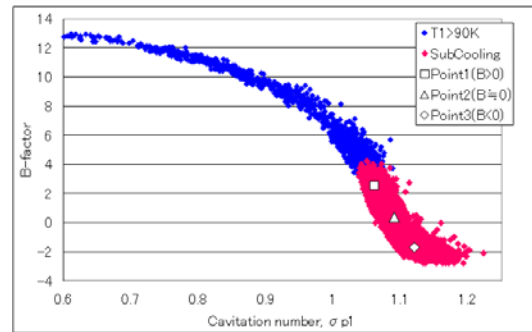


図3 過冷却化に伴うBファクタの変化

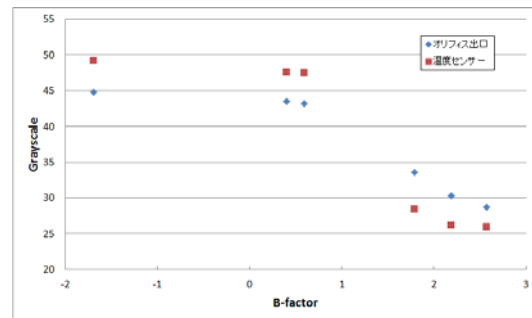


図4 画像のグレースケールとBファクタの対応

### (2) キャビテーションの熱力学的効果

上流温度、下流温度共に過冷却状態、 $\sigma_{pi} \approx 1.0$ におけるデータについて、オリフィススロート部ボイド率 $\alpha_{th}$ と37 mm下流のボイド率 $\alpha_2$ から求めたキャビテーションの成長比率 $\alpha_2/\alpha_{th}$ と無次元熱力学的パラメータ $\Sigma^*$ の相関性を調べた。オリフィス径の影響をまとめたものを図5に、オリフィス径1.8 mmにおける加圧ガスの影響をまとめたものを図6にそれぞれ示す。図を見ると $\Sigma^*$ の減少に伴い、ボイド率比 $\alpha_2/\alpha_{th}$ が増加することが分かる。この増加傾向は径が小さいほど急になっていた。また、使用する加圧ガスによりボイド率比の増加傾向に差があり、同一の $\Sigma^*$ で比較した場合、酸素加圧に比べてヘリウム加圧は成長比率が抑えられていた。このことは液体酸素中に混入したヘリウムガスが低 $\Sigma^*$ 領域での熱力学的効果に対する抑制作用を緩和する可能性があることを示唆している。このような結果となる一つの可能性

としてジュール・トムソン係数が+から-へ転じる逆転温度の違いが考えられる。酸素、窒素、ヘリウムの逆転温度を比較すると、ヘリウムの逆転温度は 43 K と極めて低く、液体酸素温度の 90 K 付近では、ジュール・トムソン係数は唯一負の値となる。したがって、オリフィス下流の圧力回復過程では混入したヘリウムが周囲流体に吸熱作用を及ぼし、キャビテーションの成長を抑制する可能性が考えられる。

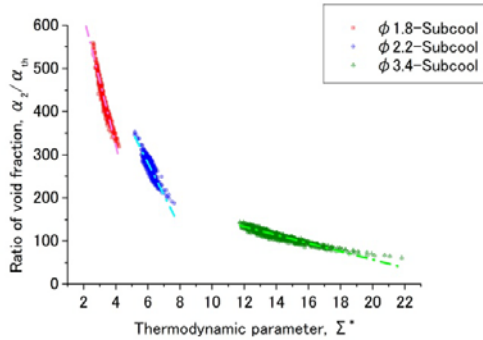


図 5 ボイド率比と無次元熱力学的パラメータの関係に及ぼすオリフィス径の影響

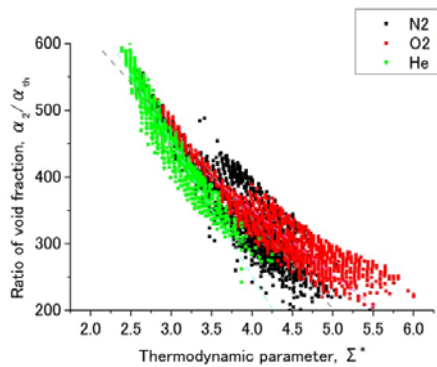


図 6 ボイド率比と無次元熱力学的パラメータの関係に及ぼす加圧ガスの影響

### (3) 不安定流動の誘発

図 7 に過冷却状態におけるオリフィス 37 mm 下流部の温度  $T_2$  と圧力  $P_2$ 、200 mm 下流部の温度  $T_{2d}$  と圧力  $P_{2d}$  の関係を示した。図を見ると  $P_2$  は  $P_{sat}$  で示す飽和曲線上で推移していたが、 $B$  ファクタがマイナスとなると圧力差 0.2 MPa 程度の圧力変動が発生している。この圧力変動はおおよそ  $P_{sat}$  が下限、 $P_{2d}$  が上限となっており、オリフィス径、加圧ガスの種類によらず  $B$  がマイナスとなると変動が誘発された。 $B < 0$  になることは、37 mm 下流ではキャビテーションが消失し液単相流れになるものと理解できる。したがって、200 mm 後方の管内径拡大部では中心部が液相状態で逆圧領域に流出するため、気液層状化や境界層はく離に起因する流動の不安定化が誘発されるものと推察される。

図 8 に下流圧力変動に及ぼす加圧ガスの影

響を示す。図を見ると加圧ガスにより圧力変動が発生を始める温度  $T_2$  が異なっており、ヘリウムが 86.5 K、窒素が 87 K、酸素が 87.5 K となっている。この結果もまたヘリウムガスの低  $\Sigma^*$  領域での熱力学的効果に対する抑制作用を緩和することに起因するものと考えられる。ヘリウム加圧では、低  $\Sigma^*$  でもキャビテーションの成長抑制効果が高いため、低温からキャビテーションの成長が抑制される。その結果、成長抑制効果によるオリフィス下流部のキャビテーションの消失はより低温で発生するため、キャビテーション消失に伴う不安定流動も低温から発生すると考えられる。

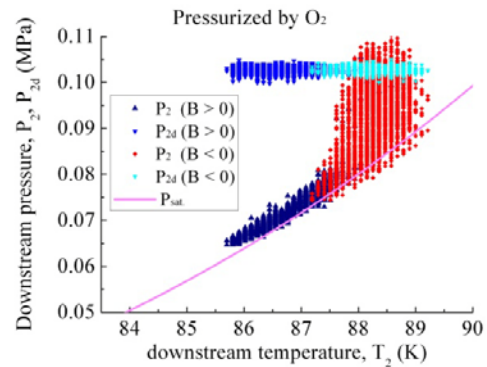


図 7 オリフィス下流部における圧力変動 ( $d_o=1.8$  mm,  $O_2$  加圧)

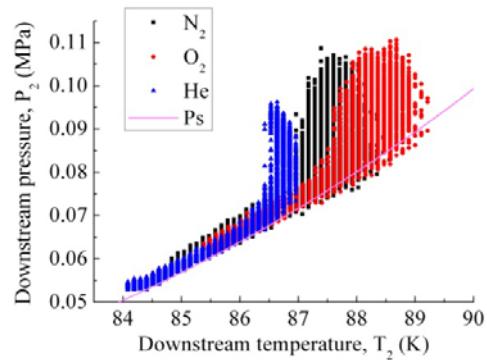


図 8 下流圧力変動に及ぼす加圧ガスの影響 ( $d_o=1.8$  mm)

以上の結果をまとめると、以下のことが明らかとなった。

- (1) 高速度撮影画像より、 $B$  ファクタとグレースケールで表すキャビテーション存在割合との定量的な相間性が確認された。
- (2) ボイド率比  $\alpha_2/\alpha_{th}$  を  $\Sigma^*$  に基づいて整理することで、過冷却状態の低  $\Sigma^*$  領域では気泡の成長比率が急激に増加することが明らかとなった。また、この領域では加圧ガスの影響が明確化し、ヘリウム

混入により気泡の成長抑制効果が高くなることが分かった。

- (3) 過冷却状態において、 $\sigma_{PI} > 1.05$ 、 $B < 0$  となると下流圧力の変動が大きくなる不安定流動が発生し、その発生温度は加压ガスの種類によって異なることが分かった。さらに、発生温度に及ぼす加压ガスの影響は、(2)の結果から合理的に説明できることが判明した。

したがって本研究により、高密度過冷却液体酸素のキャビテーション不安定流動に対する緩和策の定量化に資するデータを蓄積することができた。

## 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1件)

- ① M. Oike, T. Goto, M. Kikuchi, S. Takada and M. Yoshida, Thermodynamic Effects on Subcooled Liquid Oxygen Cavitating Flow, Proceedings of WIMRC Cavitation Forum 2011, 査読有, 2011, 1B-4, <https://files.warwick.ac.uk/shengcaili/browse/Proceedings+2011>

[学会発表] (計5件)

- ① 後藤 哲、過冷却液体酸素キャビテーション流動の特性、日本航空宇宙学会北部支部 2012年講演会ならびに第13回再利用型宇宙輸送系シンポジウム、2012年3月15日、室蘭工業大学(室蘭市)
- ② M. Oike, Thermodynamic Effects on Subcooled Liquid Oxygen Cavitating Flow, WIMRC 3<sup>rd</sup> International Cavitation Forum 2011, 2011年7月4日, University Warwick (UK)
- ③ 尾池 守、過冷却液体酸素キャビテーション流動に及ぼす熱力学的効果、日本航空宇宙学会北部支部 2011年講演会ならびに第12回再利用型宇宙輸送系シンポジウム、2011年3月11日、東北大学流体科学研究所(仙台市)
- ④ 尾池 守、過冷却液体酸素キャビテーション流動の基本特性、日本機械学会第88期流体工学部門講演会、2010年10月31日、山形大学工学部(米沢市)
- ⑤ 尾池 守、過冷却液体酸素キャビテーション流動に及ぼす加压ガスの影響、日本航空宇宙学会北部支部 2010年講演会ならびに第11回再利用型宇宙輸送系シンポジウム、2010年3月11日、東北大学工学研究科 青葉記念館(仙台市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

尾池 守 (OIKE MAMORU)  
石巻専修大学・理工学部・教授  
研究者番号：70292282

### (2) 研究分担者

吉田 誠 (YOSHIDA MAKOTO)  
宇宙航空研究開発機構・宇宙ミッション本部・主幹研究員  
研究者番号：10358567