過冷却液体酸素キャビテーション流動の熱力学的効果に及ぼす加圧ガスの影響

Influences of Pressurize Gas on Thermodynamic Effects of Subcooled Liquid Oxygen Cavitating Flow

○正 尾池 守 (石巻専大) 後藤 哲 (エジソン) 正 菊池正孝 (JAXA)
正 高田仁志 (JAXA) 正 吉田 誠 (JAXA) 高野智之 (JAST)

Mamoru OIKE, Ishinomaki Senshu University, 1 Shinmito Minamisaki, Ishinomaki-shi, Miyagi 986-8580
Tetu GOTO, Edison Co. Ltd, 3-9-2 Iwamoto-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0032
Masataka KIKUCHI, JAXA, 1 Koganesawa, Kimigaya, Kakuda-shi, Miyagi 981-1525
Satoshi TAKADA, JAXA, 1 Koganesawa, Kimigaya, Kakuda-shi, Miyagi 981-1525
Yoshida MAKOTO, JAXA, 1 Koganesawa, Kimigaya, Kakuda-shi, Miyagi 981-1525, Japan
Tomoyuki TAKANO, JAST, 1 Koganesawa, Kimigaya, Kakuda-shi, Miyagi 981-1525, Japan

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.

Key Words: Subcooled Liquid Oxygen, Cavitation, Orifice Flow, Pressurized Gas, Thermodynamic Effect

1. はじめに

ロケット推進剤である液体酸素を大気圧沸点の 20 K から 15 K まで冷却すると密度が 6% 増加し、液体酸素も同様に高密度化するとロケットの乾燥重量を約 17% 削減できると報告されている⁽¹⁾。このように極低温流体を大気圧下沸点から冷却することを過冷却化とよぶ。過冷却極低温流体では高密度化の他に、飽和蒸気圧が降下することでキャビテーションの発生が抑制される。しかし、キャビテーションの発生が抑えられるものの発生を完全に止めることはできない。また、極低温流体中で顕著に表れる熱力学的効果による気泡の成長抑制効果は過冷却化に伴い弱くなるため、一旦キャビテーションが発生すると急激に成長することも考えられる。新井山らは、広範囲な温度領域で過冷却液体酸素中に発生するキャビテーション挙動を実験的に解析し、スロートにおけるキャビテーション流れが過冷却化による音速の急激な変化によって不安定化することを報告している⁽²⁾。また尾池らの研究⁽³⁾により、液体酸素の過冷却状態では供給タンクの昇圧に用いる加圧ガスの影響が明確になることが分かった。

本研究では、過冷却液体酸素キャビテーション流動の実験結果に基づいて、熱力学的効果に及ぼす加圧ガスの影響を定量的に検討した。

2. 試験および評価方法

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 (LN₂) 供給タンク、LOX 冷却用熱交換器、オリフィス試験部および排出部から構成される。加圧ガスで昇圧された LOX は対向式熱交換器で LN₂ 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。表 1 に主要試験条件を示す。混入気泡核の影響を調べる目的で、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。T₁ と P₁ を変えることで、オリフィス部のキャビテーション数 σ_{p1} と熱力学的パラメータ $\Sigma^{(4)}$ を

変化させた試験を行い、計測値から求めた 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。式 (1) ~ (3) の $P_v, U_{ol}, \alpha_2, \rho_L, C_{p,L}, \rho_v, L, \alpha_L$ はそれぞれ上流温度の飽和圧力、オリフィス流速、下流温度測定点でのボイド率、液相密度、液相定圧比熱、気相密度、蒸発潜熱、液相温度拡散係数である。

$$\sigma_{p1} = \frac{P_1 - P_v}{P_1 - P_2} \quad (1)$$

$$\Sigma = \frac{L^2}{C_{p,L} T_1 \sqrt{\alpha_L}} \left(\frac{\rho_v}{\rho_L} \right)^2 \sqrt{\frac{d_0}{U_{ol}^3}} \quad (2)$$

$$B = \frac{\alpha_2}{1 - \alpha_2} = \frac{\Delta T}{T^*} = (T_1 - T_2) \frac{\rho_L C_{p,L}}{\rho_v L} \quad (3)$$

さらに熱力学的効果によるキャビテーションの成長抑制作用を調べるため、オリフィス出口でのボイド率 α_0 と T₂ 測定点でのボイド率 α_2 との比 α_2/α_0 を考える⁽³⁾。オリフィス出口でチョークしていると仮定して、Brennen の音速の式⁽⁵⁾より Rapposelli らの手法⁽⁶⁾ で出口音速を算出し、流量測定値を満足する α_0 を求めた。また、 α_2 は B ファクタより算出した。

Fig. 1 Schematic diagram of test apparatus

Table 1 Main test conditions

Orifice diameter, do (mm)	1.8, 2.2, 3.4
Orifice area ratio	0.056–0.200
Pressurized gas	O ₂ , N ₂ , He
Liquid oxygen inlet temperature, T ₁ (K)	86–106
Pressure difference of orifice, ΔPo (MPa)	0.2–1.3

Fig. 2 Thermodynamic effects on liquid oxygen

Fig. 3 Thermodynamic effects on subcooled liquid oxygen

Fig. 4 Influences of pressurize gas on thermodynamic effects of subcooled liquid oxygen

Fig. 5 Influences of pressurize gas on flow instability

3. 結果および考察

図2はオリフィス径 1.8 mm における加圧ガスの影響をまとめたものである。図2中には比較のため T_1 が 90 K 以上の場合と、 T_1 、 T_2 共に過冷却状態で $\sigma_{p1} \approx 1.0$ の場合 (図中には Subcooled と表示) の 2 種類の結果を示した。図を見ると Σ^* の減少に伴いボイド率比 α_2/α_0 が増加することが分かる。特に過冷却状態ではその増加傾向が顕著であり、熱力学的効果による気泡成長抑制作用が急激に損なわれるものと理解できる。また、過冷却状態では使用する加圧ガスによりボイド率比の増加傾向に差異が認められる。図3には過冷却状態の α_2/α_0 だけをプロットしたが、同一の Σ^* で比較した場合、酸素加圧に比べてヘリウム加圧ではボイド率比がより低い値に抑えられている。この点を定量的に明確化するため、各加圧ガスの α_2/α_0 データから回帰曲線を求め、酸素加圧に対するヘリウム加圧と窒素加圧での増減率を計算し、図4に示した。3 種類のデータが存在する $2.8 < \Sigma^* < 4.3$ の範囲では、ヘリウム加圧の場合酸素加圧に比べ $\Sigma^* = 3.8$ 付近で最大 12% 程度 α_2/α_0 値が減少することが分かる。これに対して窒素加圧では単純平均で約 1% 減少と、その影響はわずかであった。これらの結果は、液体酸素中に混入したヘリウムガスにより低 Σ^* 領域での熱力学的効果に対する抑制作用が緩和されることを示唆している。このような結果となる原因の一つとして、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・トムソン係数が唯一負の値となる。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に過冷却状態におけるオリフィス 37 mm 下流の温度 T_2 と圧力 P_2 の関係を示した。図に示したように P_2 は P_{sat} で示す飽和曲線上で推移していたが、 T_2 が上昇し B ファクタがマイナスとなると振幅 20 kPa 程度の圧力変動が発生した。この圧力変動はおおよそ P_{sat} が下限、ほぼ大気圧に等しい下流拡大部圧力 P_{2d} が上限となっており、加圧ガスの種類によらず $B < 0$ になると変動が誘発された。したがって、200 mm 後方の管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。また加圧ガスの影響に着目すると、圧力変動の発生開始温度 T_2 はヘリウム 86.5 K、窒素 87 K、酸素 87.5 K と加圧ガスに依存することが分かる。この依存性も低 Σ^* 領域での熱力学的効果抑制作用に及ぼす混入ガスの影響であると考えられる。ヘリウム加圧では、低 Σ^* でもキャビテーションの成長抑制効果が高いため、より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ものと考えられる。

3. まとめ

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を定量的に確認した。また、下流部で発生する不安定流動に対する加圧ガスの影響も明らかにした。

引用文献

- (1) Lak T., et al., AIAA-96-3132, 32nd Joint Propulsion Conf.
- (2) Niiyama K., et al., J. Fluid Sci. and Tech., 3-4(2008), 500-511.
- (3) Oike M., et al., WIMRC 2011, July (2011), IB-4.
- (4) Watanabe S., et al., J. Fluids Eng., 129(2) (2007), 121-127.
- (5) Brennen C.E., Cavitation and Bubble Dynamics, Ox. Uni. Press
- (6) Rapposelli E., et al., CAV2003, Nov (2003), Cav03-GS-16-004.