

308 液体窒素注入による過熱液体の加速性能向上に関する実験的研究

Experimental Study on Improvement Acceleration Performance of Superheated Liquid by Injection of Liquid Nitrogen

○ 原 聖一 (室工大院) 宮岡 秀樹 (室工大院)

正 花岡 裕 (室工大) 正 松本 大樹 (室工大)

Seiichi HARA, Hideki MIYAKO, Yutaka HANAOKA, Hiroki MATSUMOTO

Muroran Institute of Technology

27-1, Mizumoto, Muroran, Hokkaido

Abstract

Experiments injecting liquid nitrogen into the water jet, which focused on their differences between both of boiling temperatures, were carried out to improve the thrust from nozzle water flow. Effects of jet acceleration were evaluated by means of the measurements of thrust loads added on the convergent-divergent nozzle connecting with or without the parallel pipe submerged into the water tank. The characteristics of liquid-vapor two-phase nozzle flow appeared to be somewhat compressible fluid because of the explosive vaporization of liquid nitrogen, so that considerable increment of water acceleration at the part of divergent region of nozzle resulted in apparently higher thrust by exhaust jet from the nozzle.

Key Words : Liquid Nitrogen, Acceleration of Water, Superheated Liquid, Two-Phase flow, Convergent-Divergent Nozzle

1. まえがき

気液二相流は、日常よく見られる現象であるがその流動は複雑であり、気液の流量比などの条件によって流路内は様々な流動様式をとることが知られている。とくに沸騰や凝縮を伴う二相流は、多くのプラントや冷凍・空調装置に関係し、ボイラや各種の蒸発器等における主要な流動過程である。液体の沸騰挙動に関する研究は、今までに多くの研究がなされてきているが、現象の複雑さや特異な性質のために、二相流の流動機構に関して、未だ十分に解明されていない⁽¹⁾。

本実験は、低温度差熱源を利用した気液二相流推進システム⁽²⁾の構築を目的とし、その第一段階として低沸点の液体窒素(沸点77K)を高過熱度にある流水中に注入することにより、その沸騰による水の熱エネルギーが運動エネルギーに変換され推進力を得る機構解明を図る。すなわちノズルからの噴流の運動量変化を実験的に検討することにより流水の加速性能を調べる。

2. 実験装置及び実験方法

図1に実験装置の概略図を示す。実験装置は、先細末広ノズル(広がり角2.5°、スロート部直径15.7mm)，その後方に接続される着脱可能なパラレルパイプ(内径30mm、長さ350mm)から構成され、水槽内部に設置される。装置前方には荷重測定用のロードセルが水槽壁面に設置されている。使用する水槽は奥行き320mm、横1000mm、高さ420mmのアルミニウム製で、前面と後面にはアクリル板をはめこんである。

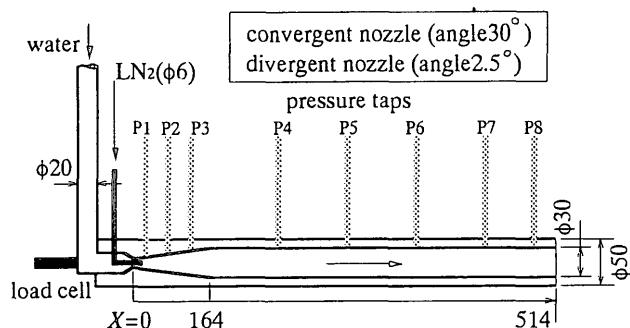


Fig.1 Schematic diagram of nozzle and parallel pipe

リル板をはめこんである。

実験方法は、リザーバータンクに貯えられた水をポンプにより装置内部のノズルに送り込む。ノズル喉部では液体窒素(以下LN₂)が内径6mmのパイプをとおしてノズルへ流れ方向に注入され、液体窒素の沸騰により水と窒素ガスの二成分気液二相流が水槽内に噴出される。噴流によって装置に加わる力はロードセルによって測定される。実験装置内部の静圧測定は拡大ノズル部に3箇所(P1～P3)、パラレルパイプ部に5箇所(P4～P8)の静圧孔をそれぞれ設け、水銀マノメータにより測定される。水槽中に噴出した水はリザーバータンクに再び貯えられる。液体窒素の供給量は液体窒素タンクの重量を実験毎に、その前後で測定し求めた。

本実験では水の流量を $Q_W = 6$ および $4 \text{m}^3/\text{h}$ の条件で実験を行い、それぞれの水温における荷重および静圧測定を行った。

3. 理 論

噴流の推力は、基本的にはノズル出口からの噴流の運動量より算出される。そのため本実験では実験値との比較のために、(1)LN₂が全く沸騰しなかった場合、(2)ノズル内部に注入されてから沸騰した場合、(3)注入前から完全に沸騰していた場合について、それぞれの推力を水のみを流した場合の推力 $F_0 = \rho_w Q_w A$ で除した無次元化推力値により算出し、それらをそれぞれ τ_1 , τ_2 , τ_3 に類別して次式により求めた⁽³⁾。なお各流体は理想流体とし、混合、摩擦損失は無視する。

$$\tau_1 = 1 + (\mu + 1)\beta + \mu\beta^2 \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

$$\tau_2 = 1 + (\mu' + 1)\beta' + \mu'\beta'^2 \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

$$\tau_3 = (1 + s A_N / A_w)(1 + \mu\beta) \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

ここで、 $\mu : \rho_{LN}/\rho_w$, $s : v_{LN}/v_w$ (スリップ比), $\beta : Q_{LN}/Q_w$,

A : 供給断面積, v : 流速, ρ : 密度

添字はそれぞれ、LN : 液体窒素, W : 水, (ダッシュ)は LN₂ が蒸発した状態を表す。

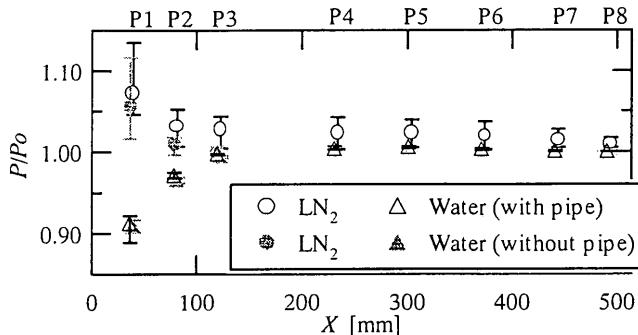


Fig.2 Pressure distribution in nozzle and parallel pipe

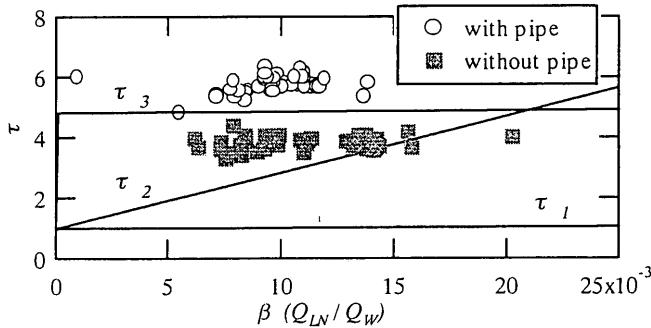


Fig.3 Relationship between load and volumetric flow of Nitrogen

4. 実験結果および考察

4.1 推力ノズル内流動の一般特性

図2は $Q_w=6 \text{ m}^3/\text{h}$ の場合についてパラレルパイプがある場合といふ場合の平均壁面静圧分布の比較を示す。図の縦軸は平均壁面静圧 P を大気圧 P_0 で除した無次元静圧であり、横軸はノズル喉部を起点とした流れ方向距離 $X[\text{mm}]$ である。 LN_2 供給の場合、最も圧力が高いのは喉部に最も近いP1であり、下流方向に次第に圧力が低下していることから、流体は LN_2 の蒸発沸騰に伴う気泡流となり、拡大ノズルで圧力降下する圧縮性流体の一般的な特性を示し、ノズルに供給された水は次第に加速されることが分かる。

4.2 LN_2 供給の効果

図3に推力と LN_2 流量の関係を示す。今回の実験では LN_2 供給側で LN_2 が水流との混合前に気化することを避けるために、 LN_2 の供給バルブを全開にし、とくに流量制御はしていない。そのため β の増加による無次元化推力 τ の増加はみられなかった。パラレルパイプなしの実験値は理論値 τ_2 と τ_3 の間に分布している。これは LN_2 が沸騰することにより気相と液相間の相対速度差増大のための気液間剪断力による損失と考えられる。しかし、パラレルパイプありの場合は水のみの推力 F_0 がパラレルパイプの重みなどの抵抗で小さくなり、 τ_2 、 τ_3 よりも大きな F_0 の5~6倍の値を得ていることが注目される。

4.3 パラレルパイプの有無による推力

図4に $Q_w=6 \text{ m}^3/\text{h}$ の場合におけるパラレルパイプの有無による水温と推力の関係を示す。無次元化推力 τ の値はパラレルパイプを取り付けない場合のそれよりも大きな値をとっている。これは前項でも触れたがパラレルパイプの設置により、取り付けない場合に比べて LN_2 の沸騰が促進されたためと考えられる。一方、図2の静圧分布をからは、パラレルパイプを設置した場合はP8で P/P_0 が1.0

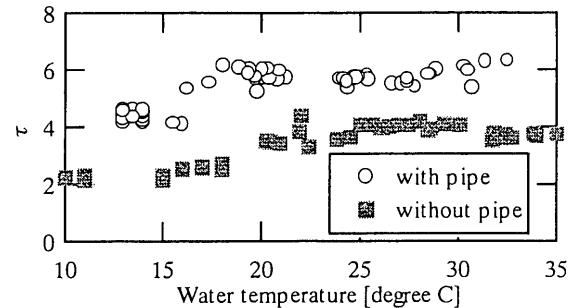


Fig.4 Comparison of thrust loads between with and without of pipe

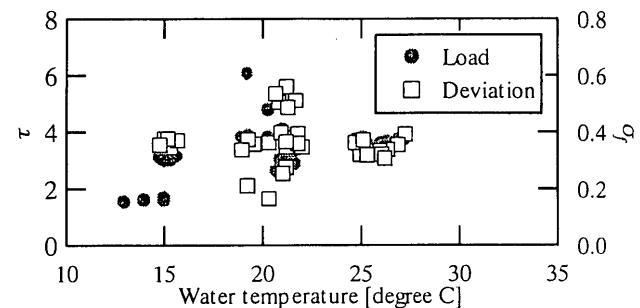


Fig.5 Relationship between load and water temperature

に達するが、設置しない場合はP3においてすでに1.0に達していることから、パラレルパイプを取り付けない場合のほうが水の加速性能は大きいといえる。これらの事実からパラレルパイプには適正な長さがあると考えられる。

4.4 水温変化による影響

図5に $Q_w=4 \text{ m}^3/\text{h}$ でパラレルパイプを設置しない場合の水温と推力および推力変動の関係を示す。 σ_f は測定荷重 F に対する標準偏差である。図4のパラレルパイプを設置しなかった場合と比較すると、 $Q_w=6 \text{ m}^3/\text{h}$ の場合は水温の上昇の伴い無次元化推力 τ の値も上昇しており、 LN_2 の沸騰が促進されている。しかし $Q_w=4 \text{ m}^3/\text{h}$ の場合は水温に関係なく τ の値が散らばっており、 σ_f の値は大きくばらついていることから、 LN_2 の沸騰による効果的な水の加速ができなかつたと考えられる。このことより、パラレルパイプなしの状態では、ある程度以上の水の流量が必要であると考えられる。

5. あとがき

本実験では、液体窒素注入による過熱液体の加速性能について、荷重および壁面静圧測定の観点により調べた。その結果を要約すると以下の通りである。

- (1) ノズル内部の二相流は圧縮性流体の特性を示しており、圧力降下と共に次第に流速が増している。
- (2) パラレルパイプは LN_2 沸騰促進のために必要であるが、加速性能は劣る。
- (3) 水流量が少ないと、 LN_2 を供給しても効果的な加速性能が得られない。

参考文献

- (1) 植田辰洋、気液二相流、養賢堂、(1989)
- (2) 斎藤・原・酒井、機論(B), 53-489 (1987-5), 1580-1584
- (3) 中山泰喜、流体の力学、養賢堂、(1994)