

2016 年度卒業論文

超臨界圧下における
伝熱流れ場の温度計測及び可視化

東京大学

工学部 航空宇宙工学科

指導教官: 寺本 進 准教授

学籍番号: 03-150325

金 輝溟

目次

図目次

表目次

主要記号一覧

主要添え字一覧

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 はじめに	1
1.1.2 超臨界流体の特徴	2
1.2 過去の研究動向	2
1.3 研究目的	5
第2章 実験	6
2.1 実験装置	6
2.1.1 概要及び系統図	6
2.1.2 高圧液化窒素予備実験装置	7
2.1.3 高圧可視化容器	7
2.1.4 チャネル系	9
2.1.5 流れ場条件	9
2.2 計測方法	10
2.2.1 流れ場条件の計測	10
2.2.2 アクリル管内流れの温度計測	13
2.2.3 画像取得	14
第3章 結果及び考察	15
3.1 温度計測結果	15
3.2 画像一覧	15
3.3 考察	24
3.3.1 混相流れに関する考察	24
3.3.2 流れ場のパターンに関する考察	27
3.3.3 熱流入に関する考察	29
3.3.4 壁面付近での温度と沸騰に関する考察	30
第4章 結論	33
参考文献	34
謝辞	35

図目次

- 1.1 LE-X and Schematic for a cooling channels for LRE
- 1.2 P-T Diagram in regenerative cooling channel
- 1.3 Thermodynamic Properties of Hydrogen at Several Pressures
- 1.4 Variation of HTC values of water flowing in the tube

- 2.1 Overview of Experimental Set-up
- 2.2 Flow System of High-Pressure Cryogenic N₂ Reservoir
- 2.3 Flow System of High-Pressure Chamber
- 2.4 Schematic of High-Pressure Chamber
- 2.5 Schematic of Channel
- 2.6 Averaged Pressure Difference and Standard Deviation of Temperature
- 2.7 Flow Channel with Implemented Thermocouples
- 2.8 Coordinates in the experiment

- 3.1 History of Temperature of Each Thermocouple
- 3.2 Images of Flow of Cryogenic N₂
- 3.3 History of Z-value
- 3.4 Quench Front Propagation in Flow of Cryogenic N₂
- 3.5 Flow Pattern Transition
- 3.6 Schematic of the Region of Interest
- 3.7 Boiling and Pseudo-Boiling around Thermocouple at (9.9, 0.9)

表目次

- 2.1 Flow Condition

- 3.1 Comparison of Quench Front Propagation Speed between Atmospheric and 1MPa
- 3.2 Heat Flux in the Region of Interest

主要記号一覧

A	:	断面積	[m ²]
c	:	定圧比熱	[J/(kg · K)]
D	:	管内径	[mm]
\dot{m}	:	質量流量	[kg/s]
Nu	:	ヌッセルト数	
P	:	圧力	[MPa]
Pr	:	プラントル数	
\dot{q}	:	熱流束	[W/m ²]
r	:	半径方向距離	[mm]
T	:	温度	[K]
t	:	時間	[s]
τ	:	サンプル時刻	[s]
Re	:	レイノルズ数	
x	:	流れ方向距離	[mm]

主要添え字一覧

b	:	バルク
f	:	流れ方向
in	:	入口
out	:	出口
w	:	壁面

第 1 章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 はじめに

宇宙探査を目指し、宇宙空間へ出る手段としてロケットが発明された以来、ロケットの推力を担うロケットエンジンは依然として盛んな研究開発の対象である。そして化学的燃焼で推力を生み出す化学推進ロケットは、地上の重力に逆らってロケットを打ち上げるための唯一の手段であることは変わっていない。そのため、化学推進ロケットエンジンは現在でも宇宙工学分野において大変重要な役割を占めている。

ロケット打ち上げの際、化学推進ロケットエンジンの燃焼室内部は、 3000°C 以上の高温かつ数～数十 MPa もの高圧状態となり、エンジン内で最も険しい環境に晒される。そのため、燃焼室の寿命はロケットエンジンの寿命を決定する肝要な要素である。故に、燃焼室の消耗を抑止するための冷却技術は、ロケットエンジンの安全性向上を図るうえで非常に重要な研究対象である。

ロケットエンジンの冷却システムは多様多色であるが、中でも再生冷却は、液体燃料ロケットエンジンで汎用される冷却機構である。Fig.1.1 に示すように、内側が燃焼室である銅製の内筒外周に数 mm オーダーの矩形の溝を数百本入れることで流路を形成し、そこに極低温の推進剤(液体水素なら約 20K)を冷却剤として流入することで冷却するシステムのことである。冷却で得た熱エネルギーはその冷却剤を燃焼室に投入することで推力に再生することから、再生冷却と呼ばれている。

前述した過酷な環境の中で燃焼室の壁面温度を許容温度以下に保つために、冷却剤に優れた熱伝達性能を持たせる必要がある。そのため冷却剤の流れ場は $10^5 \sim 10^7$ という高レイノルズ数流れとなっており、乱流熱輸送が促進されている。しかし、高レイノルズ数流れは大きな圧力損失を生じ、ターボポンプの負荷が加重する原因である。したがって再生冷却の

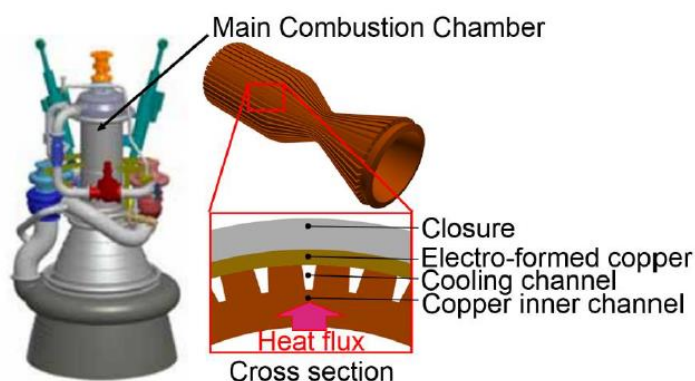


Fig.1.1 LE-X^[1] and Schematic for a cooling channels for LRE^[2]

設計には、伝熱性能の要求を満たしながらポンプの圧力損失を極力抑えるように最適化が必要であり、そのためには高精度の伝熱性能の予測が不可欠である。

1.1.2 超臨界流体の特徴

再生冷却に使われる冷却剤は様々な特徴を持っているが、一つとして冷却剤がターボポンプによって臨界圧以上に昇圧されており、Fig.1.2 の圧力(P)と温度(T)の状態図に示すような超臨界状態になっていることが挙げられる。そこでまずは超臨界状態とはどのような状態であるかを説明する。

常圧下にある液体は沸点で蒸発し、その温度を境に密度や粘性などの物性が不連続的に変化する。ところが、ある一定の圧力以上においては、このような物性の不連続な変化が見られなく、液相と気相の区別がつかなくなる。このような圧力のことは臨界圧力と言われ、臨界圧力以上の状態は超臨界状態と呼ばれる。

ロケットエンジンの再生冷却では、冷却チャンネルの入り口に数十 K の極低温の状態で流入した冷却剤は、流れる中で燃焼室から熱を受け取り、チャンネルの出口においては数百 K に至る。超臨界流体は近臨界条件において、Fig.1.3 のように温度に対して非常に大きな物性変化を持つことが知られている。その時のサンプル温度として定圧比熱が極大値をとる温度が擬臨界温度として定義されている。再生冷却設計において、この熱力学的性質の変化が再生冷却に及ぼす影響が懸念されているため、超臨界流体の伝熱特性を調査する必要性が提起されている。

1.2 過去の研究動向

超臨界流体の伝熱特性に関する研究は主に原子力発電の分野において盛んに行われ、超臨界状態の水や二酸化炭素を用いた加熱管の冷却実験が多数を占めている[4-9]。これらの実

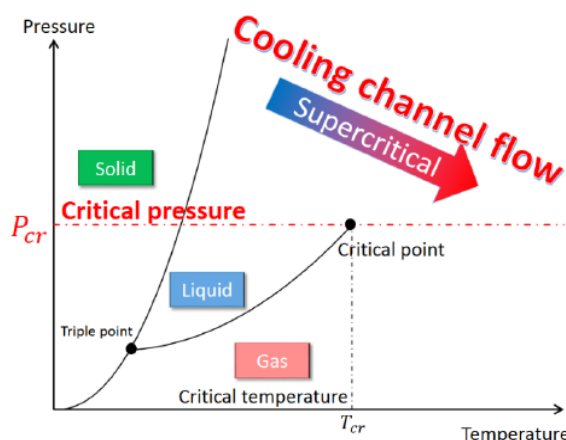


Fig.1.2 P-T Diagram in regenerative cooling channel^[2].

験から、流体のバルク温度が擬臨界温度に近づくにつれ、超臨界流体は特異な熱伝達特性を示すことが報告されている。一例として、Fig.1.4 に Styrikovich^[4]らの実験結果を示す。Styrikovich は円管に一定の熱流束を与え、その中に超臨界状態の水を流す実験を行った。そして管壁温度の計測及び流体のバルク温度の推算より、水の伝熱特性を調査した。この実験から超臨界流体は、バルク温度と壁面温度が擬臨界温度をまたぐ時、低熱流束の場合には熱伝達率の向上、高熱流束の場合には熱伝達率の劣化することが観察された。同様な結果は、他の加熱実験からも報告されている^[5-9]。

またこれらの実験結果をもって、従来の熱伝達率の予測式の精度が議論されている。まず、加熱される乱流円管流のヌッセルト数予測式として、(1.1)の Dittus-Boelter の式^[11]が多用されてきた。

$$Nu_{DB} = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (1.1)$$

しかし Dittus-Boelter の式は熱力学的物性が一定とみなせる流体に適用され、超臨界流体のような物性が激しく変化する流れ場では精度が悪い。そこでヌッセルト数予測式の研究では、式(1.1)から上記の加熱管実験の結果が当てはまるように補正された式が提案され

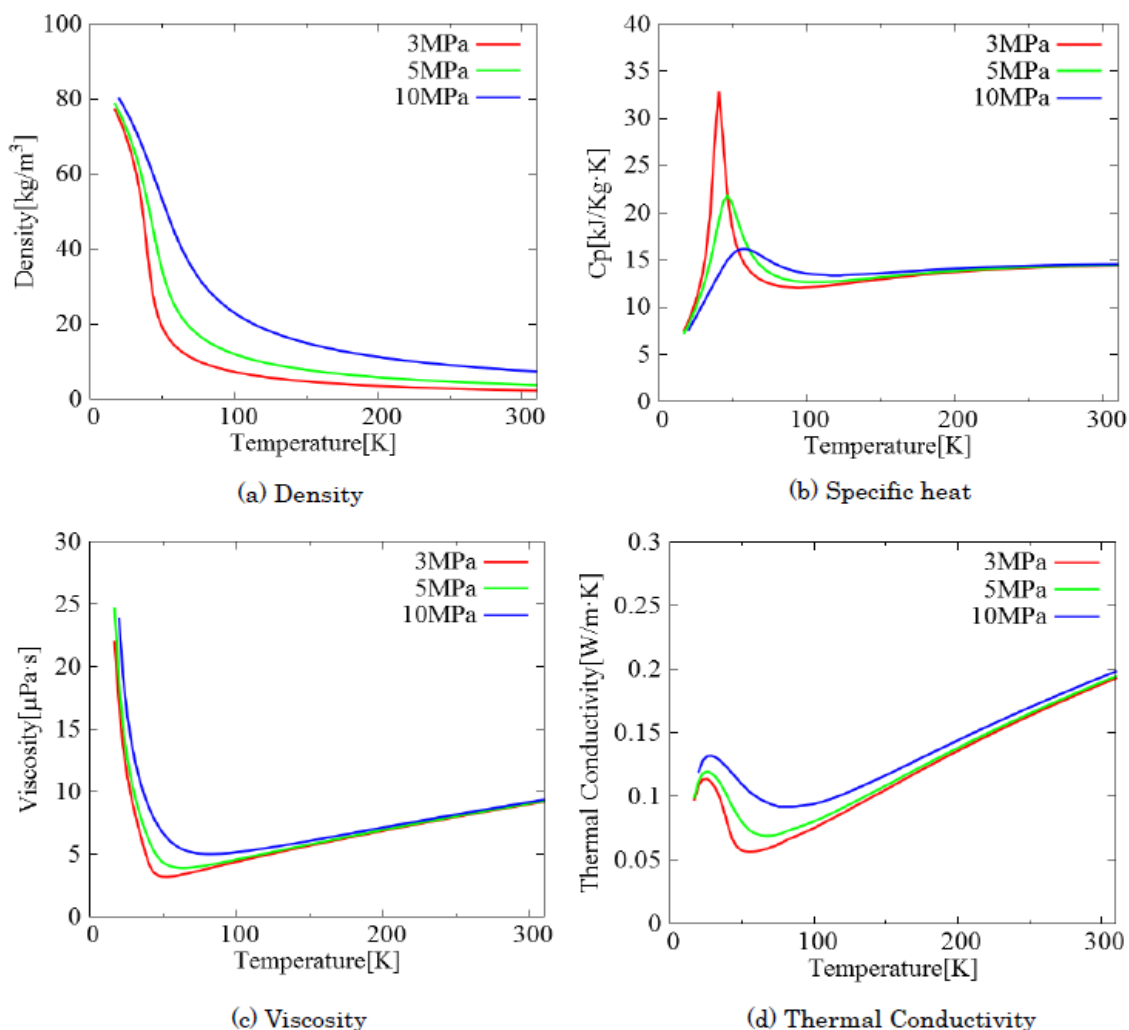


Fig.1.3 Thermodynamic Properties of Hydrogen at Several Pressures^[3].

てきた^[12]. その一例として, ここでは水素のヌッセルト数の予測によく用いられる Taylor の式^[13]がある.

$$Nu_T = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \times \left(\frac{T_w}{T_b}\right)^{-0.57} \quad (1.2)$$

Taylor の式は, Dittus-Boelter の式に壁面流体温度とバルク温度の比をかけることで, 物性の変化を考慮している. しかし近年の研究から, これらのヌッセルト数予測式は熱力学的物性の変化が激しい擬臨界温度付近においては大きい誤差を持つことが報告されている^[13].

以上の背景から, 擬臨界温度付近における超臨界流体に対して従来のヌッセルト数予測式の精度を悪化させる原因の究明が求められる. これを議論するために, 流れ場の温度及び速度分布データの取得が唱えられている. これを受け, 一部では超臨界流れ場の境界層温度計測及び可視化のためのコンセプトデザインが提案された. だが, 超臨界流体の流れ場における定量データの直接計測は未だに報告されていない.

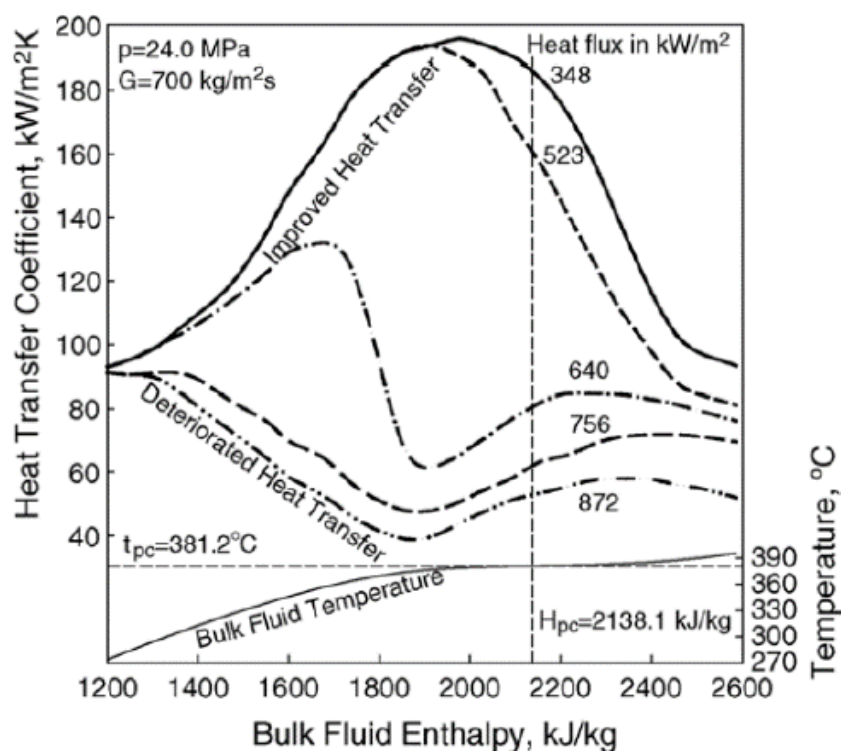


Fig.1.4 Variation of HTC values of water flowing in the tube^[4].

1.3 研究目的

以上をまとめると、現在のロケットエンジンの再生冷却設計を最適化における問題点は、超臨界流体が擬臨界温度付近で特異な伝熱特性を持つことは報告されているが、その時の物性変化が伝熱特性に如何に影響するかを議論するための流れ場内の定量データが得られていないことである。そこで本研究では次の点を研究目的とする。

目的(1) 超臨界圧下における伝熱流れ場の温度計測と可視化のできる基礎的装置を設計する。

目的(2) 同装置を用いて様々な高圧での伝熱流れ場の温度を計測し、流れ場の画像を取得取得する。

目的(3) (1), (2)の結果をもって高圧伝熱流れ場の特徴を明らかにする。

第 2 章 実験

2.1 実験装置

2.1.1 概要及び系統図

本研究では、東京大学工学部 7 号館に制作・設置された実験装置を用いて実験を行った。装置の写真を Fig.2.1 に示す。装置は大きく分けて高圧液化窒素予備実験装置、高圧可視化容器、チャンネル系の 3 つから構成される。作動流体である極低温窒素はエルフより高圧液化窒素予備実験装置に封入された後、窒素ガスポンベにつなぐことで所定の圧力 (0.8~4.8MPa) まで加圧される。

一方、高圧可視化容器を所定の圧力(常圧~4MPa)の窒素で充填し、スタートバルブを開けると、圧力差によって高圧液化窒素予備実験装置から可視化容器に極低温の窒素が流れ出し、容器内のチャンネル系の中で非定常的な伝熱現象を生じながら鉛直下向き (vertically downward) 流れ場を形成する。この時、窒素はオリフィス(絞り径比 1/10)を通り、オリフィス前後の差圧で流量が調整される。この状態で、チャンネル系のアクリル管内を流れる流体の

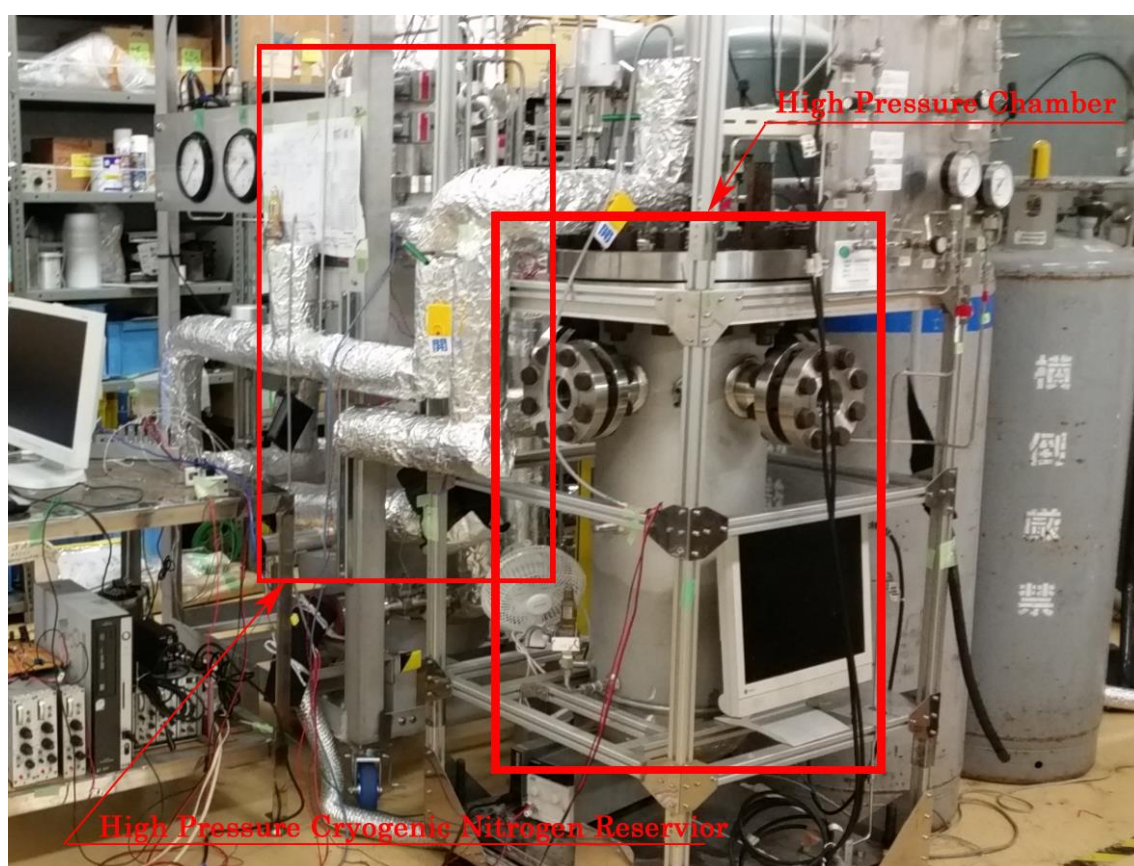


Fig.2.1 Overview of Experimental Set-up

温度を予め設けられた熱電対で計測する一方、容器の可視化窓に光を通して高速カメラで流れ場を撮影する。

2.1.2 高圧液化窒素予備実験装置

高圧液化窒素予備実験装置(以下、高圧窒素装置)は、以前 JAXA が本実験室で高圧液化窒素の漏洩実験の際用いられたものである。実験終了後は本研究室の管理の下で、使用が許可されている。装置の設計圧力は 11.5MPa であり、本実験では最大 4.8MPa まで加圧される。

Fig.2.2 に高圧窒素装置の系統図を示す。作動流体である液化窒素は、エルフより二つの液体窒素供給弁 V2、V7 を通って超臨界槽と過冷却槽に封入される。充填が完了すると V2、V7 を閉じて供給を止め、加圧弁 V1 を開くと超臨界槽は高圧窒素ガスによって所定の圧力まで加圧される。供給弁 V4 を開くと、Fig.2.2 の赤色で表した接続配管系に極低温窒素が流れ出す。だが、この時点で接続配管系は常温の状態にあるため、配管を通る液化窒素は高圧可視化容器に達する前に沸点(超臨界状態では擬臨界温度)以上までに加熱され、極低温窒素の安定的な流れ場の実現が困難である。したがって高圧可視化容器に極低温の窒素を供給するには、まず接続配管系の温度(T8)が予め十分下がっていないなければならない。そこで予冷排気弁 V8 を開放し、スタートバルブの V9 の直前までの流路を十分冷却することができる。

2.1.3 高圧可視化容器

高圧窒素装置で加圧された窒素は配管を通して高圧可視化容器に供給される。Fig.2.3 に

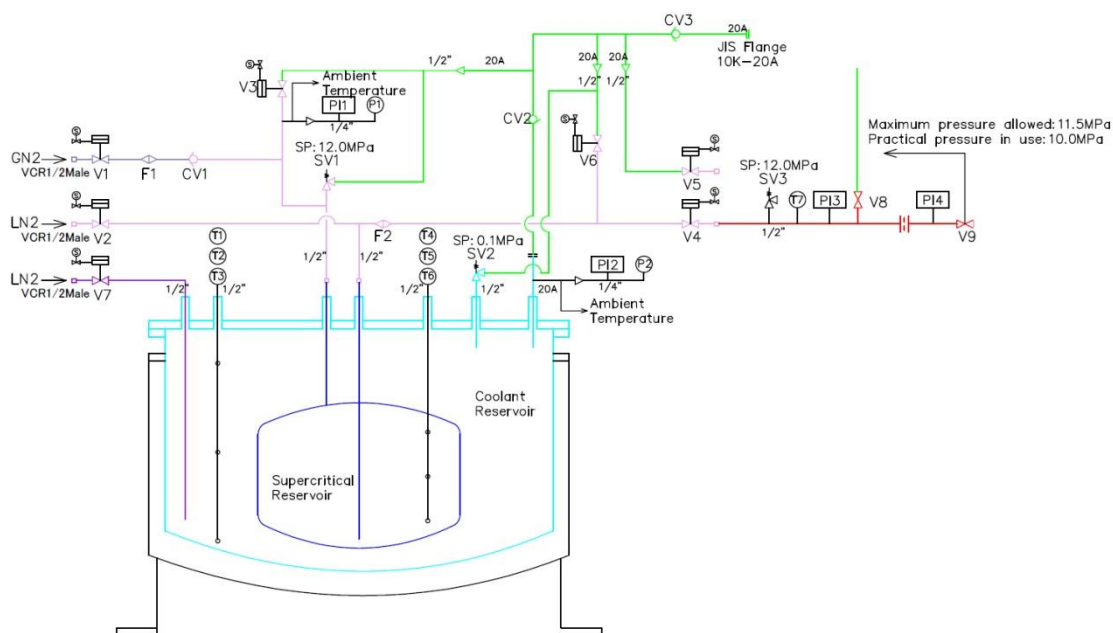


Fig.2.2 Flow System of High Pressure Cryogenic N₂ Reservoir

高圧可視化容器の系統図を、Fig.2.4 には断面図を示す。容器の上部から極低温の窒素が流入するため、アクリル管の温度は急激に低下すると思われる。これによってアクリル管の表面に水滴や霜が生じると、可視化画像の品質低下の原因となり得る。これを防ぐため、本実験を始める前に、まず真空ポンプで可視化容器内の空気を吸出し、密閉することで水蒸気を取り除いた。

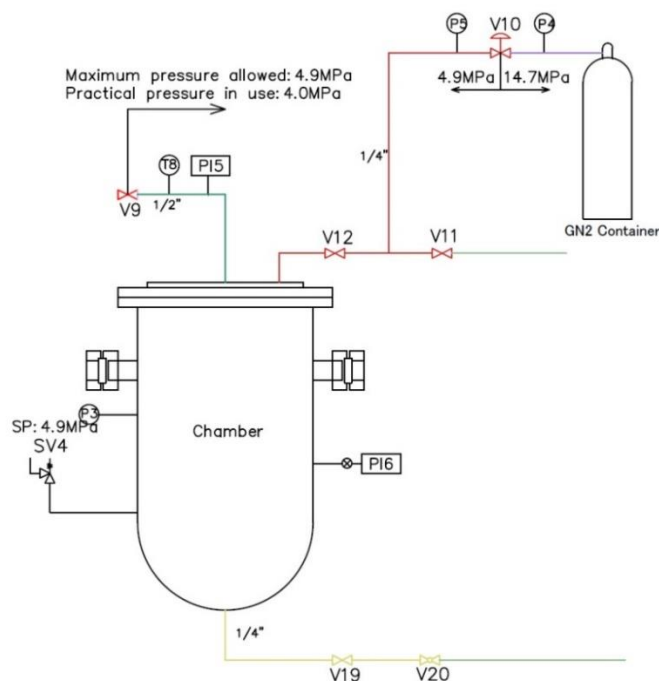


Fig.2.3 Flow System of High-Pressure Chamber

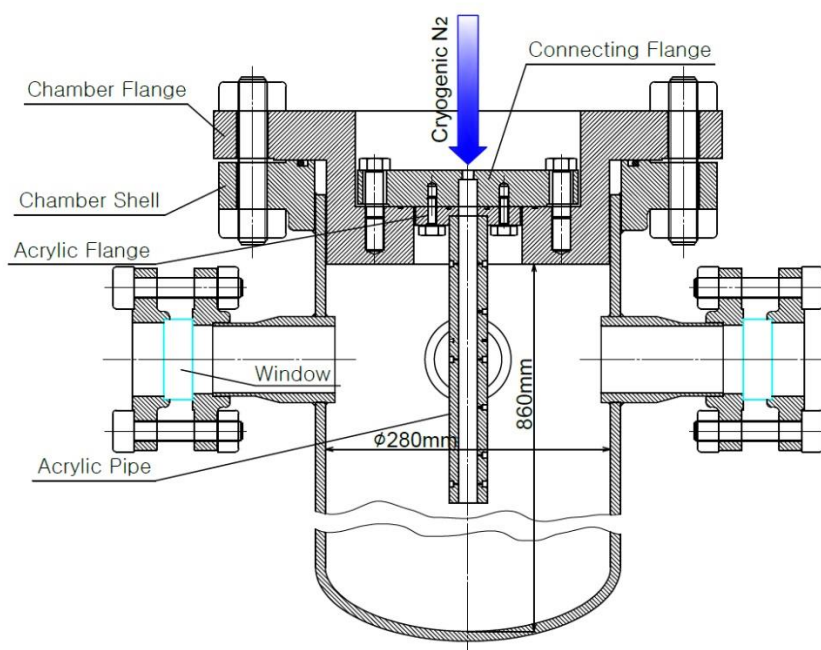


Fig.2.4 Schematic of High-Pressure Chamber

実験条件で設定した流れ場の圧力まで、高圧窒素ガスボンベで容器内を加圧する。スタートバルブを開けると、オリフィス下流から可視化容器内までに至る流れ場は同一圧力となるので、アクリル管内流れ場の圧力は可視化容器内圧で決められる。

2.1.4 チャンネル系

Fig.2.5 に示すのがチャンネル系の断面図である。チャンネル系はアクリル管と同材質の取付用フランジの二つから構成される。

アクリル管は外径 40mm, 内径 $D=19\text{mm}$, 流れ方向長さ 300mm のアクリル樹脂製円管である。アクリル管には外側表面温度を測る圧着端子型熱電対用の M3×5 のめねじが一ヶ所、管肉厚温度を測るためのシース型熱電対固定用穴が一ヶ所、そして内部流温度計測のためのシース型熱電対固定用穴が九ヶ所加工されている。シース型熱電対はアルミ製のコネクタに通してとめねじで固定し、コネクタを熱電対固定用穴の溝に押し込む。コネクタの管からの脱落を防止するために、両者の接続部をクリアシリコンで埋めた。

管取付用フランジは可視化容器のチャンネル取付用フランジとアクリル管の接続の役割を担っている。チャンネル取付用フランジとボルトで締結することで、両者の線膨張率の相違による応力の発生を防いでいる。管取付用フランジの中心にはアクリル管と同径の穴が空いており、管の一端をはめることのできる深さ 10mm の溝ができています。アクリル管はこの溝にはまってフランジと接続し、両者は接触面のアクリルダインによって接着されている。

2.1.5 流れ場条件

本実験での流れ場条件を Table 2.1 に示す。本実験において圧力は常圧, 1, 2, 3, 3.5, 4MPa の 6 通りのケースにて行った。窒素は常圧, 1, 2, 3MPa で亜臨界状態, 3.5, 4MPa

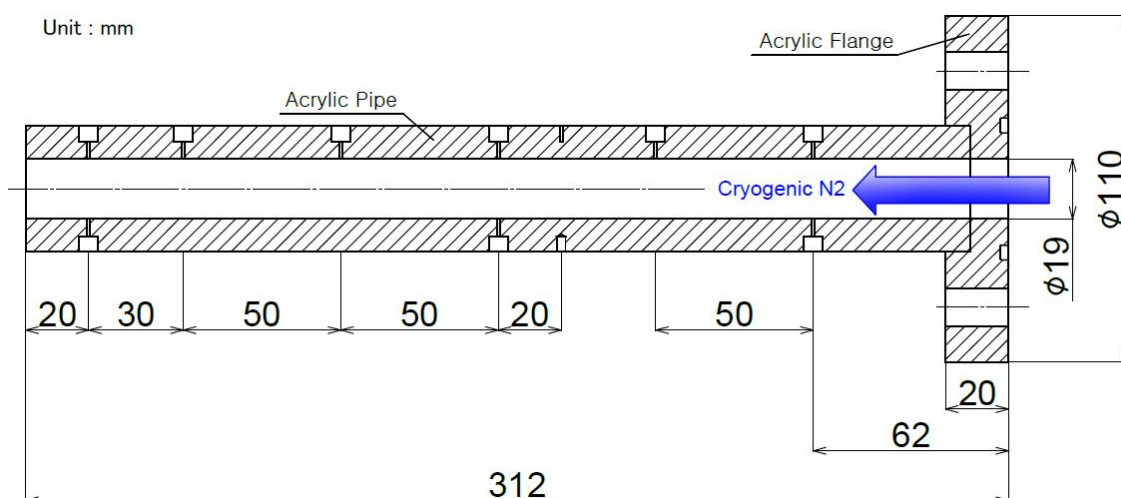


Fig.2.5 Schematic of Channel

で超臨界状態となっている。採用する流れ場データとして、各実験でオリフィス前後の差圧 h が $0.6 \pm 0.06 \text{ MPa}$ の範囲に収まる中、各管内熱電対の温度履歴が安定している連続した 4 秒間のものを選択した。流れ場条件計測の詳細は 2.2.1 節で説明する。

Table 2.1 Flow Condition

実験名称	常圧	1MPa	2MPa	3MPa	3.5MPa	4MPa
雰囲気圧 [MPa]	0.22	1.11	2.04	3.01	3.50	4.01
質量流量 [kg/s]	計測不可	計測不可	0.0212	0.0219	0.0197	0.0196
流入温度 [K]	118	110	112.6	111.5	117.5	114.6
Re /10 ⁵	計測不可	計測不可	2.73	2.58	2.79	2.43
サンプル時刻 τ [s]	13	32	20	20	20	20

2.2 計測方法

2.2.1 流れ場条件の計測

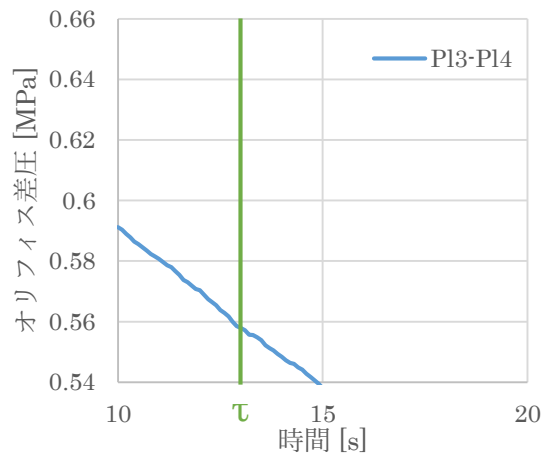
流れ場条件はオリフィス前後の差圧が基準値である 0.6 MPa に近く、アクリル管内流れからの温度出力が安定してる時におけるデータより決定した。各実験において、オリフィスにかかる差圧を $t \pm 2\text{s}$ の間で平均した値と、4本の管内熱電対の出力に対して $t \pm 2\text{s}$ の範囲における標準偏差を Fig.2.6 に示す。スタートバルブが開くタイミングを $t=0$ とし、(a)に平均差圧を、(b)には管内熱電対の標準偏差をプロットした。ここですべての実験に関して、オリフィスの平均差圧が $0.6 \pm 0.07 \text{ MPa}$ に収まり、かつ諸熱電対の標準偏差が 2K 以下となる統一したサンプル時刻 $t=\tau$ を選定したかったが、そのような時刻は存在しなかった。そのため、サンプル温度は常圧、 1 MPa 、そして $2 \sim 4 \text{ MPa}$ の3つのケースに対して別々に選定された。サンプル温度は常圧において $\tau=13$ 、 1 MPa において $\tau=32$ 、 $2 \sim 4 \text{ MPa}$ において $\tau=20$ と決定された。

流れ場条件は各実験の τ を中心にまたぐ 4 秒間 ($\tau-2 \sim \tau+2$) における容器内雰囲気圧、オリフィス差圧、予冷温度の平均値より算出された。質量流量は所定のオリフィス特性式と上記のオリフィス差圧及び窒素の熱力学的状態を用いて計算した。レイノルズ数は上述した質量流量と流体の状態、そしてアクリル管の断面積より求められた。

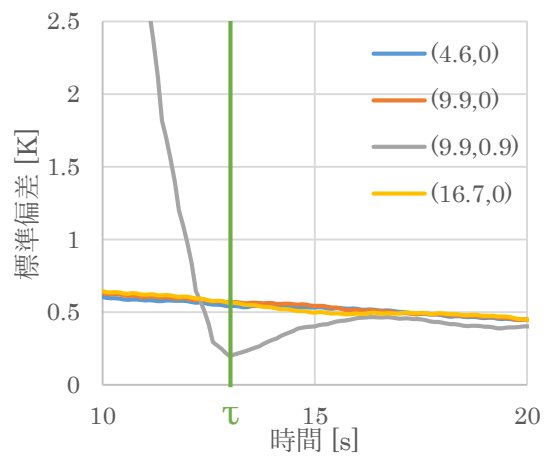
$t=0$ においてオリフィス上流圧力がそれより約 0.7 MPa 高い圧力であるように設定した。これは、アクリル管内の温度履歴が安定するまで、上流圧力がおよそ 0.1 MPa 下がる傾向が見られたため、設定差圧である 0.6 MPa に補償差圧 0.1 MPa を足した値である。

また、スタートバルブはオリフィス上流温度が $110 \sim 120 \text{ K}$ 、アクリル管に設けられた諸熱電対の出力が $260 \text{ K} \sim 280 \text{ K}$ の範囲に入っていることを確認してから開いた。実験中可視化容器は窒素の流入を受け、雰囲気圧が約 0.2 MPa/s のスピードで上昇することが予備実験よ

Atmospheric

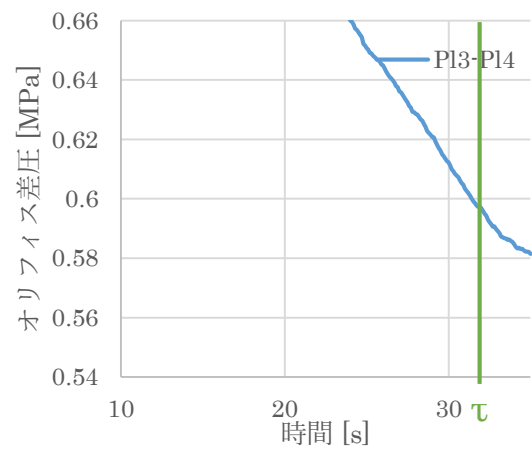


(a)

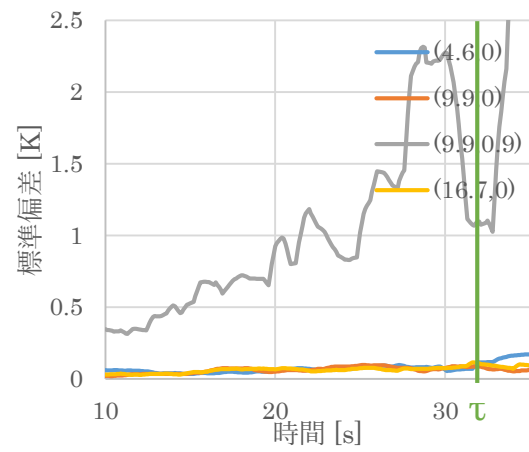


(b)

1 MPa

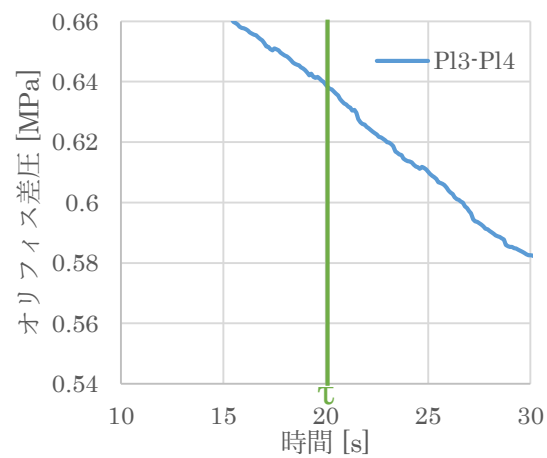


(a)

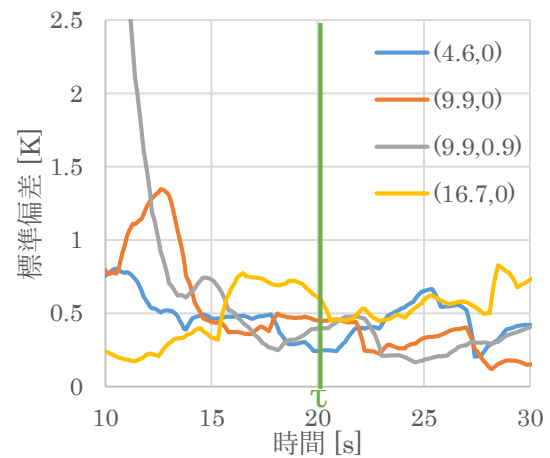


(b)

2 MPa

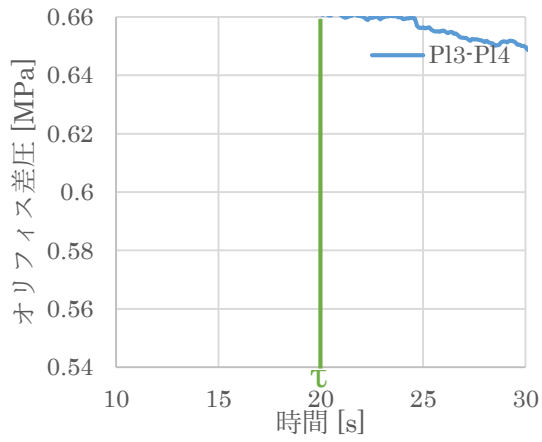


(a)

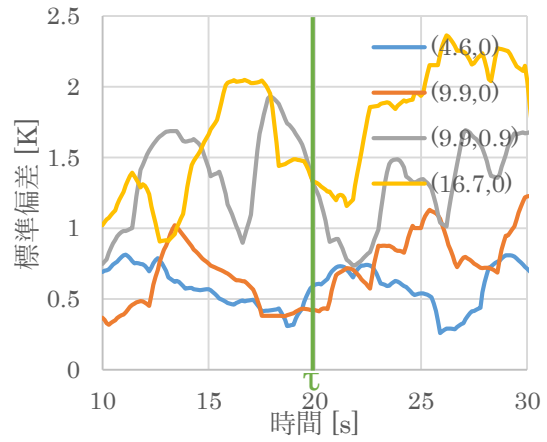


(b)

3MPa

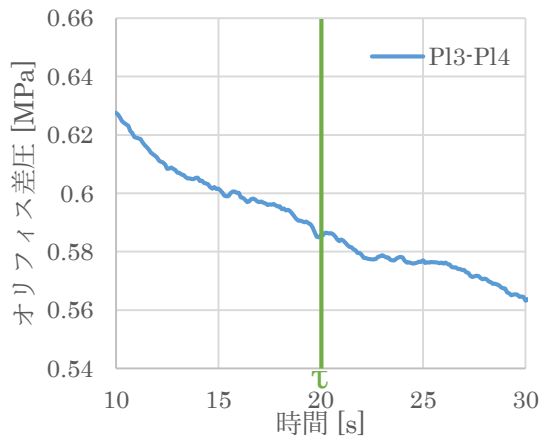


(a)

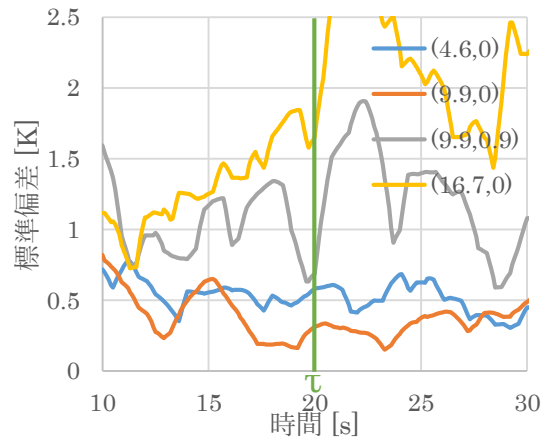


(b)

3.5MPa

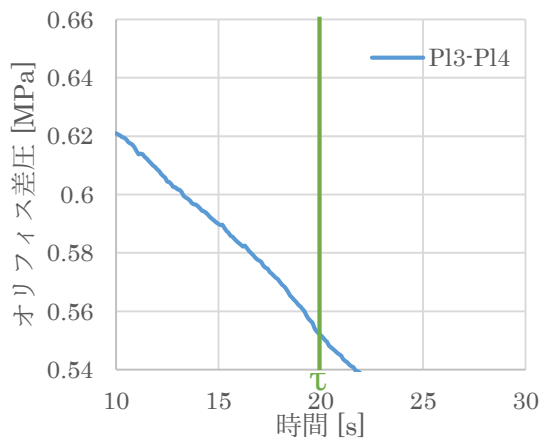


(a)

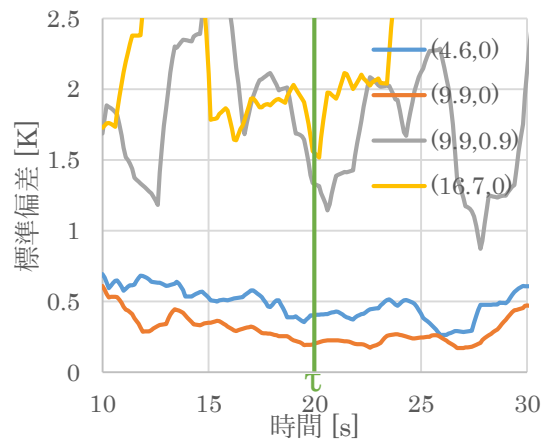


(b)

4MPa



(a)



(b)

Fig.2.6 Averaged Pressure Difference and Standard Deviation of Temperature

りわかった．そこで，逃し弁 V11 を開け，流入量と排気量を随時釣り合わせることで，容器内雰囲気圧が所定の圧力から $\pm 0.1\text{MPa}$ の範囲内に収まるようにした．

2.2.2 アクリル管内流れの温度計測

流れ場の温度計測には K 型熱電対を用いた．熱電対が設けられたアクリル管の写真を Fig.2.7 に示す．管内流れの温度を計測する熱電対のシースは直径 $\phi 1\text{mm}$ ，SUS316 製の非接地型である．本実験で取り扱う 100K 付近の極低温における熱電対の誤差範囲は定量的に把握されていないが，過去の経験よりおよそ $\pm 4\text{K}$ であると考えられる．シース型熱電対を通したコネクタはアクリル管に取り付けられ，接続部にはクリアシリコンで固定されている．コネクタが熱電対のリード線の荷重によって脱落することを防止するために，熱電対のスリーブをアダプタに固定させ，アダプタを可視化容器フランジとアクリル管に支持される 2 本の棒に固定した．これでほとんどのリード線の荷重は容器フランジとアクリル管が受けており，コネクタへの負担が低減されている．管内と雰囲気との差圧が僅かである本実験において，熱電対はアクリル管に固定されているとみなした．温度計測位置を説明するために，仮想の管内座標系を表す容器の断面図を Fig.2.8 に示す．(a)には実写の上に，(b)には断面図の上に座標系を表示した．座標系の原点 O は容器フランジ内の流路直径が $\phi 20\text{mm}$ に拡張される位置の中心とした．本実験で議論されるアクリル管内の 4 つの温度計測部の位置は $(x/D, 2r/D)=(4.6, 0)$ ， $(9.9, 0)$ ， $(9.9, 0.9)$ ， $(16.7, 0)$ である．この位置決めは目視で行われているため，最大 1mm の位置誤差があるとみなし， $(x/D, 2r/D)$ の誤差範

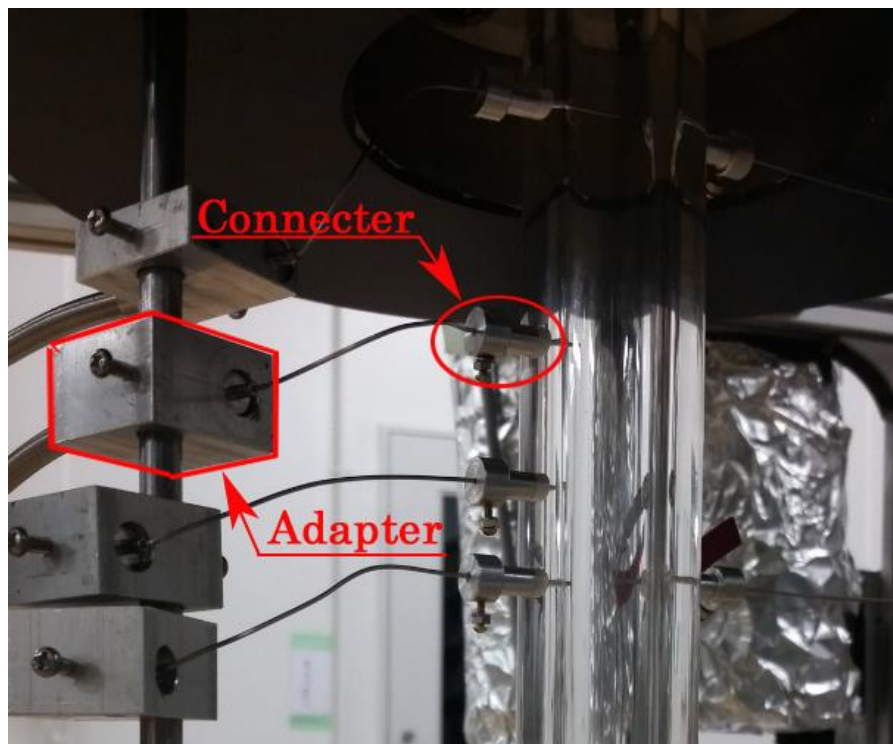


Fig.2.7 Flow Channel with Implemented Thermocouples

囲として(± 0.11 , ± 0.11)を与える。また、以下では上記の座標を用いて熱電対を指すことにする。熱電対の温度を実験同士に議論するために、各熱電対のサンプル温度が必要となる。そこで、管内熱電対の温度変化が小さいとみられる $t=t_{\pm 2}$ における各熱電対の出力の平均を、各実験における熱電対のサンプル温度とした。

2.2.3 画像取得

流れ場の画像取得には高速撮影機能付きデジタルカメラを用いた。画像はシャッター速度 210fps, 解像度 480*360 の条件下で、バックライト法で取得された。光源は白熱灯であり、光源と可視化窓の間にトレーシングペーパーを挟み、光を散乱させている。撮影は $t=3\sim 2s$ における任意のタイミングで開始し、およそ $t=40s$ で終了した。

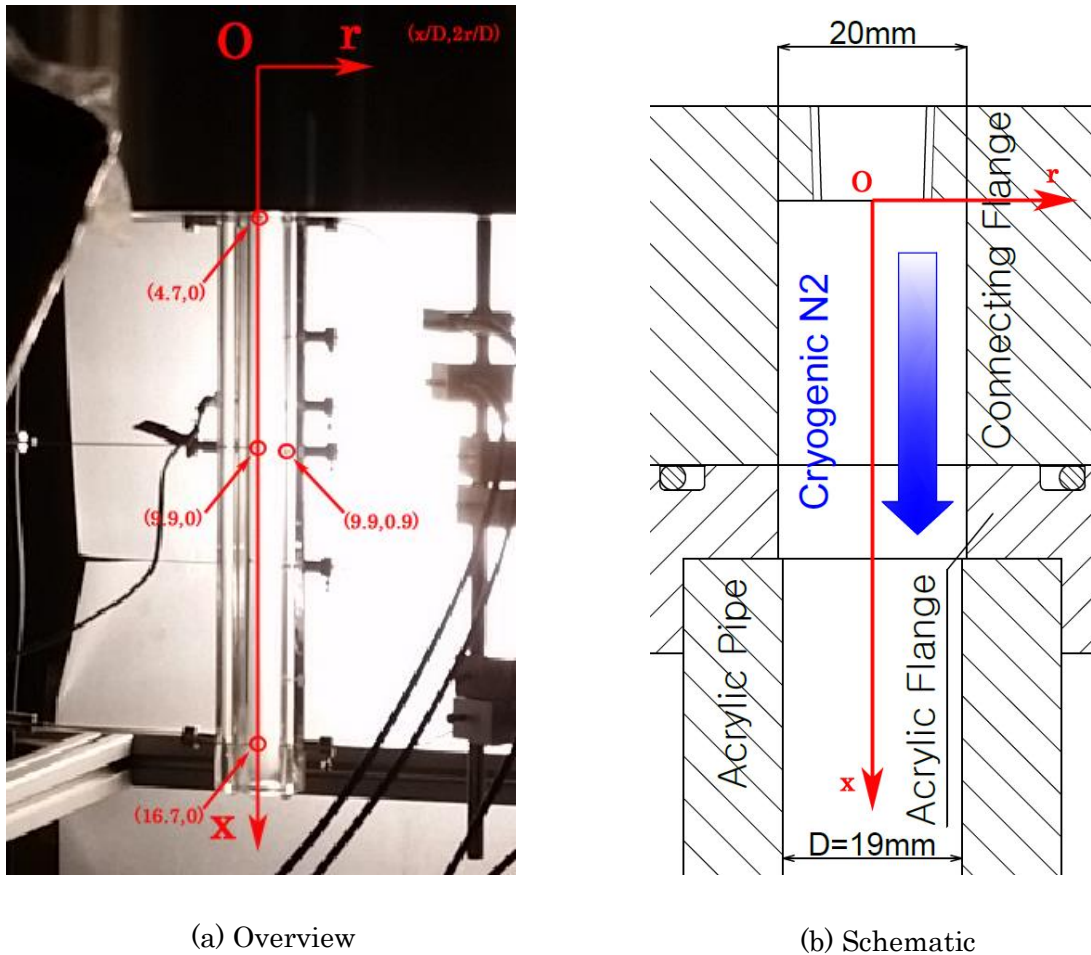


Fig.2.8 Coordinates in the Experiments

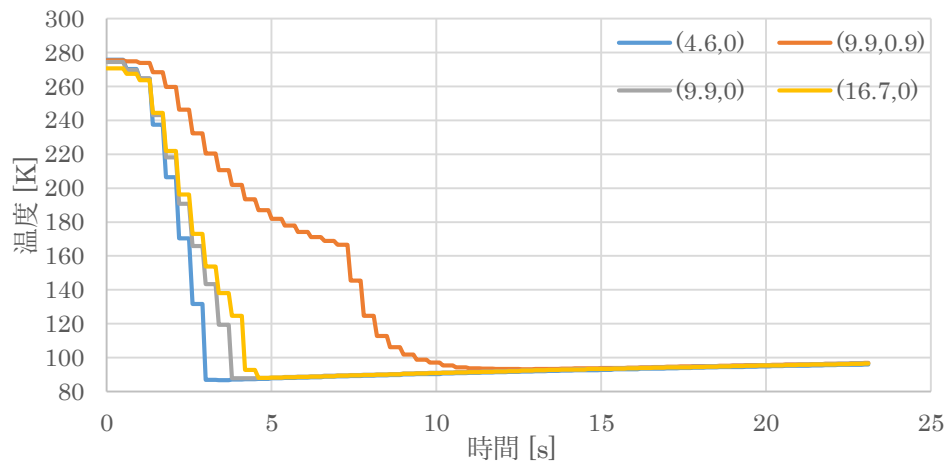
第 3 章 結果及び考察

3.1 温度計測結果

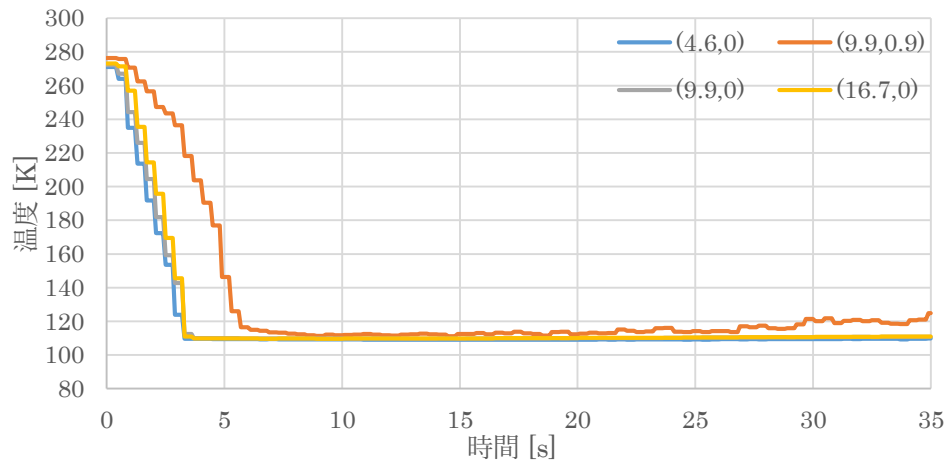
Fig.3.1 には、各実験で得られた熱電対の温度履歴を示す。ここで横軸の時間 t はスタートバルブを開いた時刻を $t=0$ とした。また熱電対のサンプリング周波数は 2.5Hz であり、サンプリングの間の温度は最後に更新された値にしている。

3.2 画像一覧

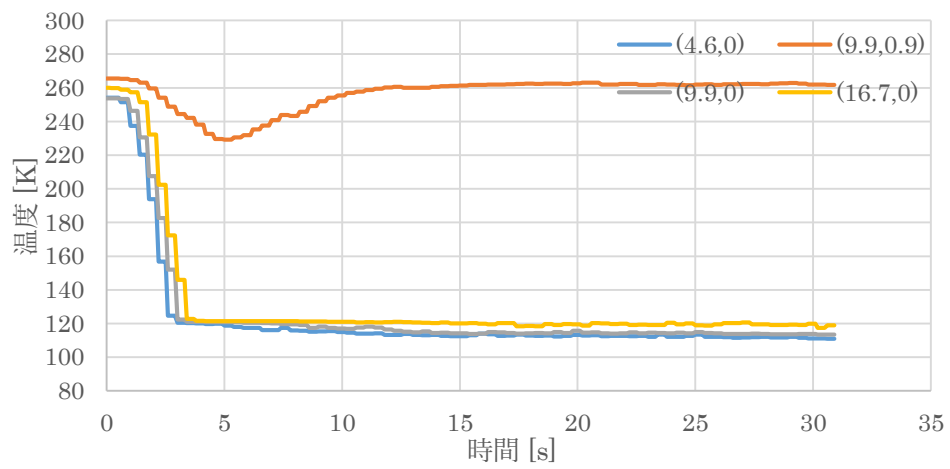
Fig.3.2 には各実験における $t=\tau$, $\tau+0.02$, $\tau+0.04$ での可視化画像を示す。実験における流れ方向は鉛直下向きであるが、すべての画像は時計回りに 90 度回転しており、右から左への流れになっていることに注意する。



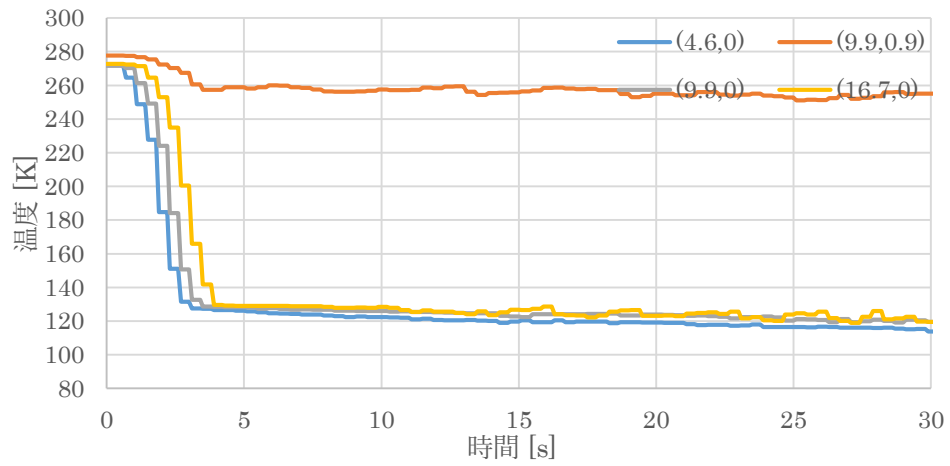
(a) Atmospheric ($\tau=13\text{s}$)



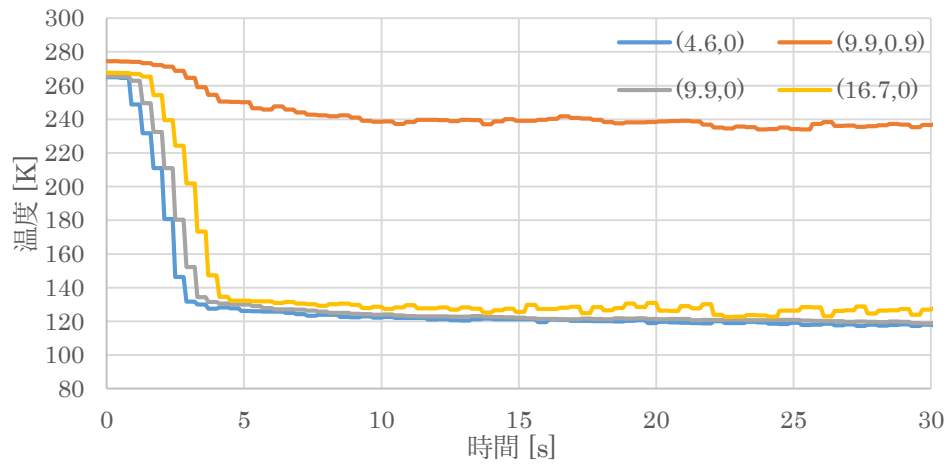
(b) 1MPa ($\tau=32\text{s}$)



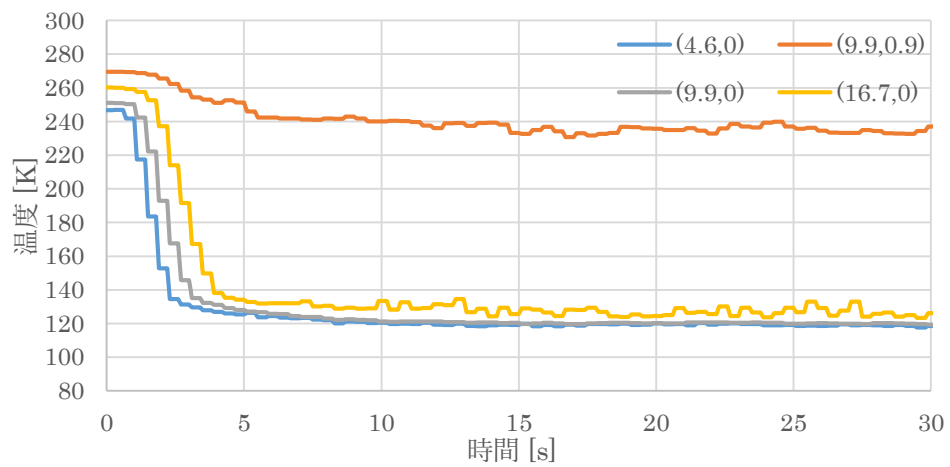
(c) 2MPa ($\tau=20\text{s}$)



(d) 3MPa ($\tau=20\text{s}$)



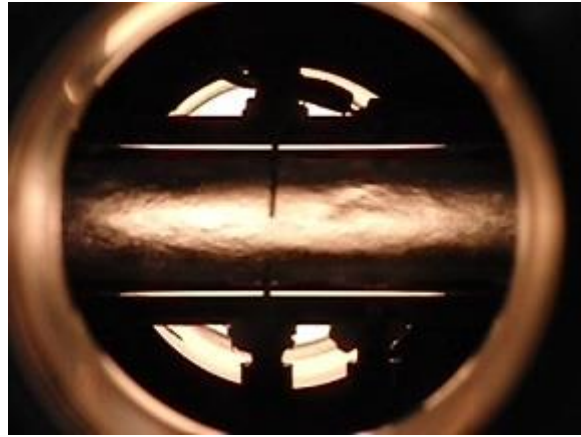
(e) 3.5MPa ($\tau=20\text{s}$)



(f) 4MPa ($\tau=20\text{s}$)

Fig.3.1 History of Temperature of Each Thermocouple

Atmospheric ($\tau=13s$)



(a) $t=\tau$

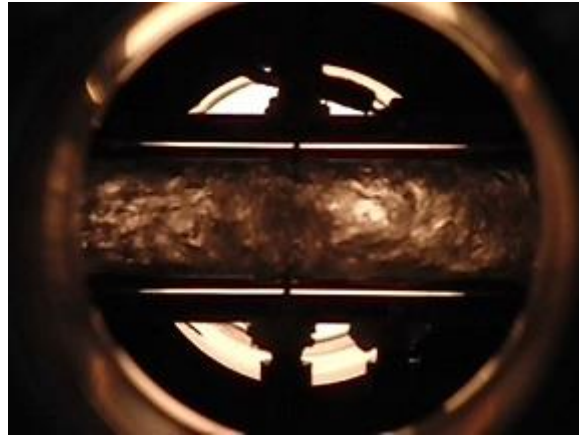


(b) $t=\tau+0.02s$

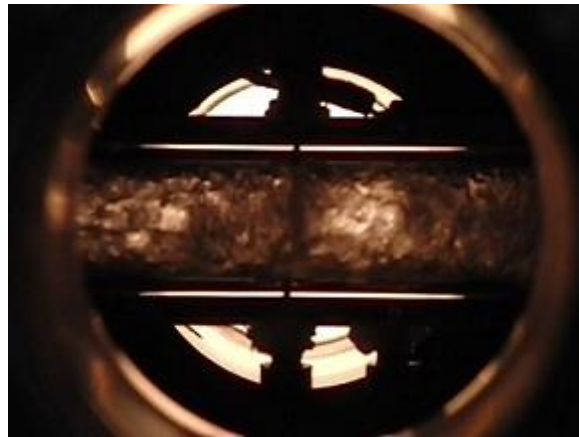


(c) $t=\tau+0.04s$

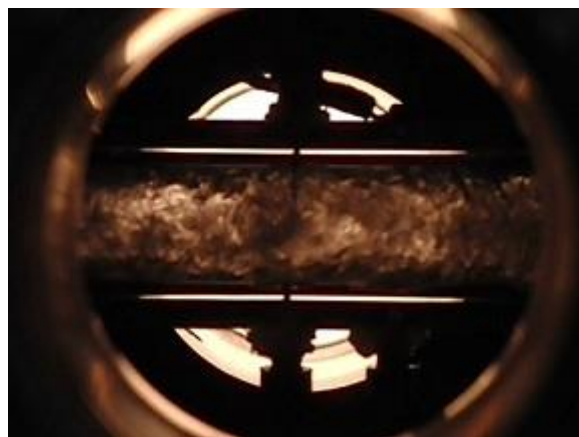
1MPa ($\tau=32s$)



(a) $t=\tau$

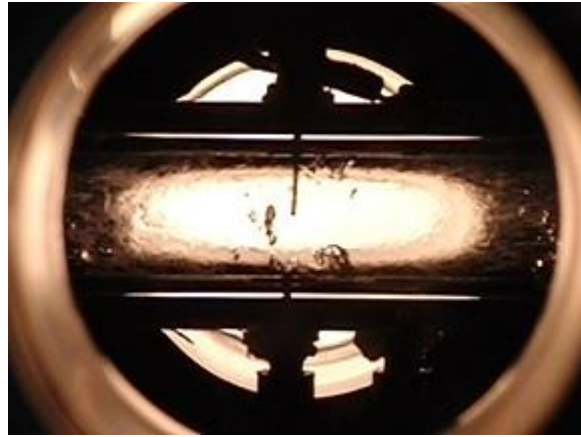


(b) $t=\tau+0.02s$

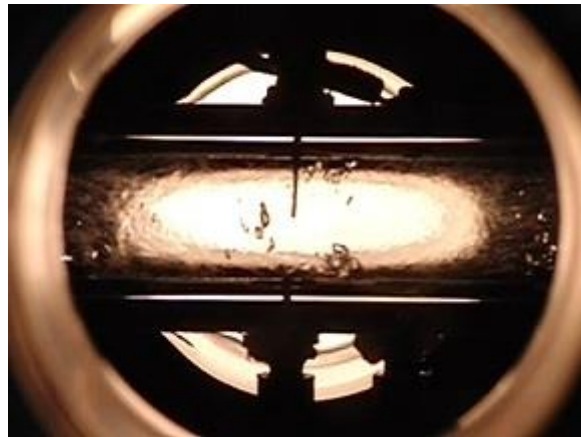


(c) $t=\tau+0.04s$

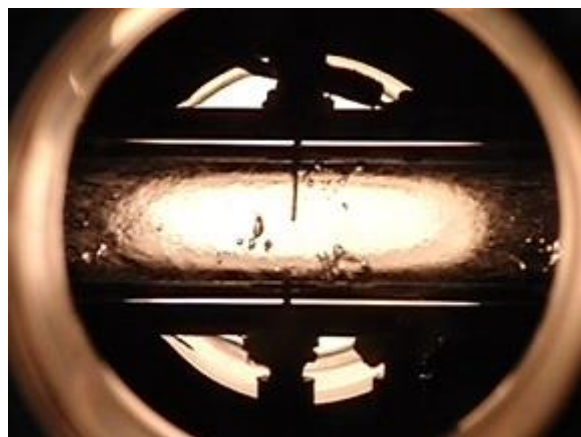
2MPa ($\tau=20s$)



(a) $t=\tau$

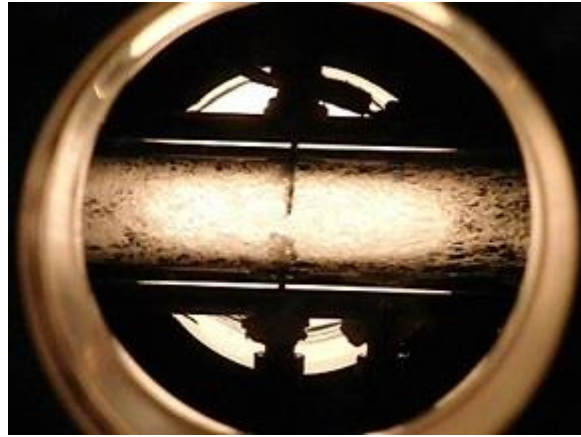


(b) $t=\tau+0.02s$

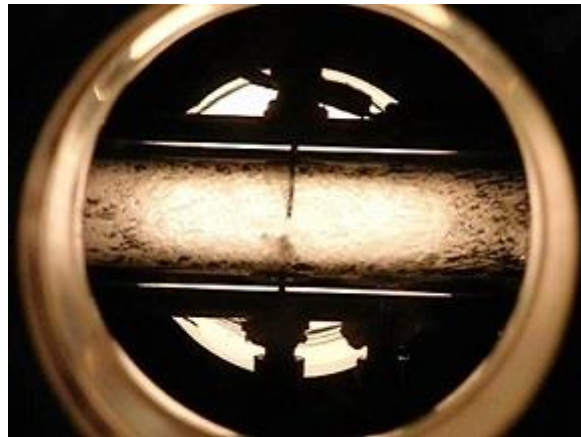


(c) $t=\tau+0.04s$

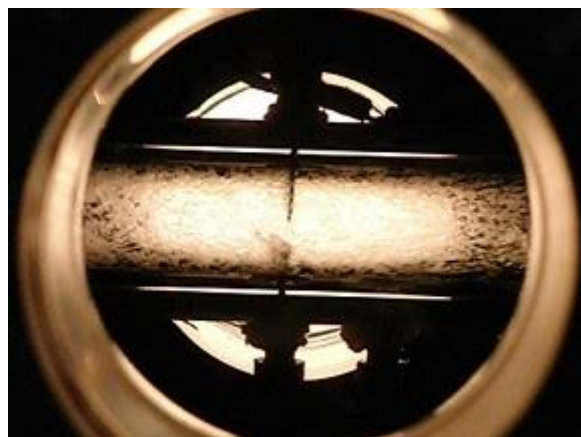
3MPa ($\tau=20s$)



(a) $t=\tau$

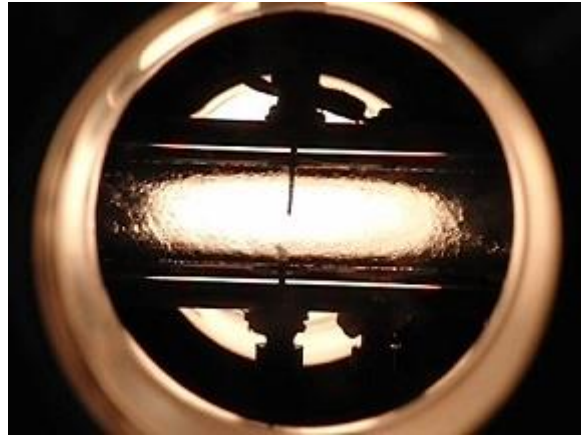


(b) $t=\tau+0.02s$

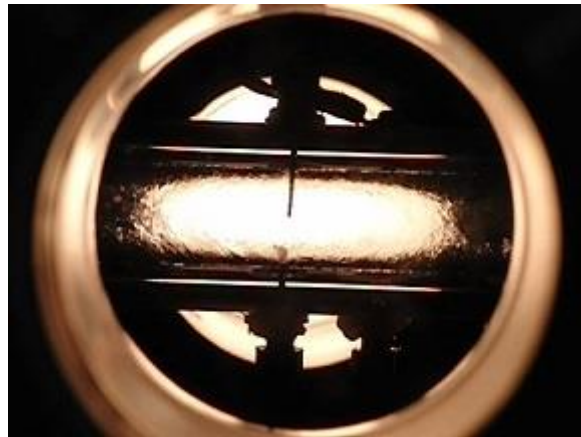


(c) $t=\tau+0.04s$

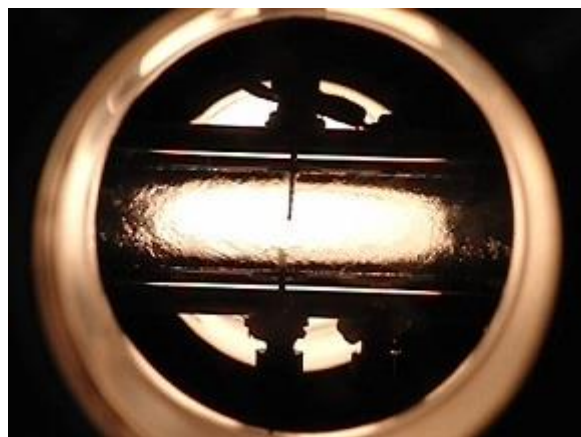
3.5MPa ($\tau=20s$)



(a) $t=\tau$

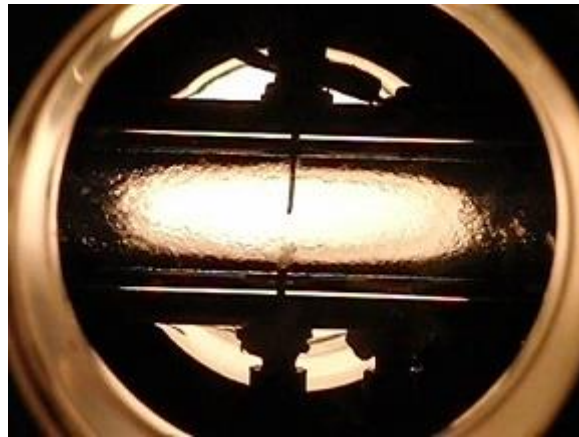


(b) $t=\tau+0.02s$

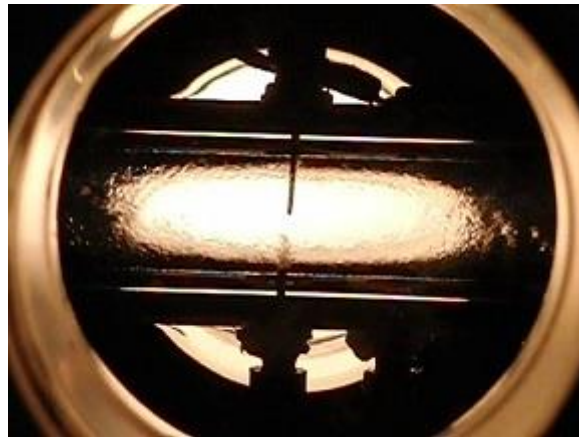


(c) $t=\tau+0.04s$

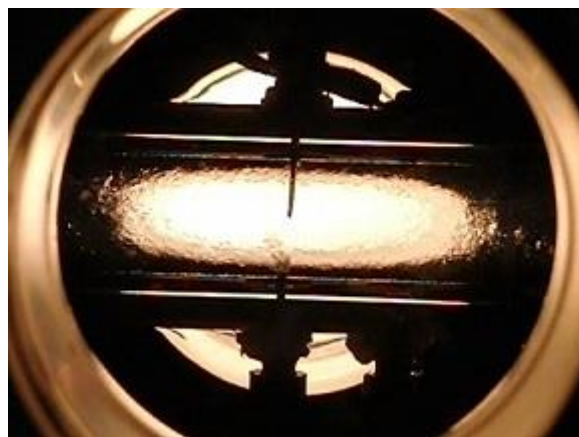
4MPa ($\tau=20s$)



(a) $t=\tau$



(b) $t=\tau+0.02s$



(c) $t=\tau+0.04s$

Fig.3.2 Images of Flow of Cryogenic N₂

3.3 考察

以上の結果をもとに，流れ場に関して考察を行った．

3.3.1 混相流れに関する考察

Fig.3.2 より，2MPa や 3MPa と比較して常圧と 1MPa の流れ場には顕著な明暗の分布が存在することは明らかである．これは 2, 3MPa の時の単相流れやとは異なり，常圧，1MPa では可視化領域に上流で一部の窒素が蒸発し，管内に気相と液相の窒素が混合した混相流れ(Two-phase flow)が現れていることに起因していると思われる．各実験での窒素の予冷温度と沸点の関係を見るために Fig.3.3 を示す．Fig.3.3 の縦軸には予冷温度と沸点の高低差を見積もるために，式(3.1)で定義される無次元数 Z をプロットした．

$$Z = \frac{T_p - T_B}{T_B} \quad (3.1)$$

T_p : 予冷温度 T_B : 沸点

すなわち予冷温度は， Z が正の値の時に沸点を上回っており， Z が負の値の時には沸点を下回っている．2MPa，3MPa では予冷温度が沸点以下になっていることに対して，常圧，1MPa では沸点を上回っていることがわかる．予冷温度が沸点を超えていることは，窒素がアクリル管に流入する時点で蒸発した窒素ガスが流れ込んで可能性を示唆する．

また Fig.3.4 には，常圧，1MPa で見られた Quench front の画像を示す．Quench front は物体の表面に沿って流れる冷却流体に覆われた寒冷領域と，蒸発した気体に覆われた温

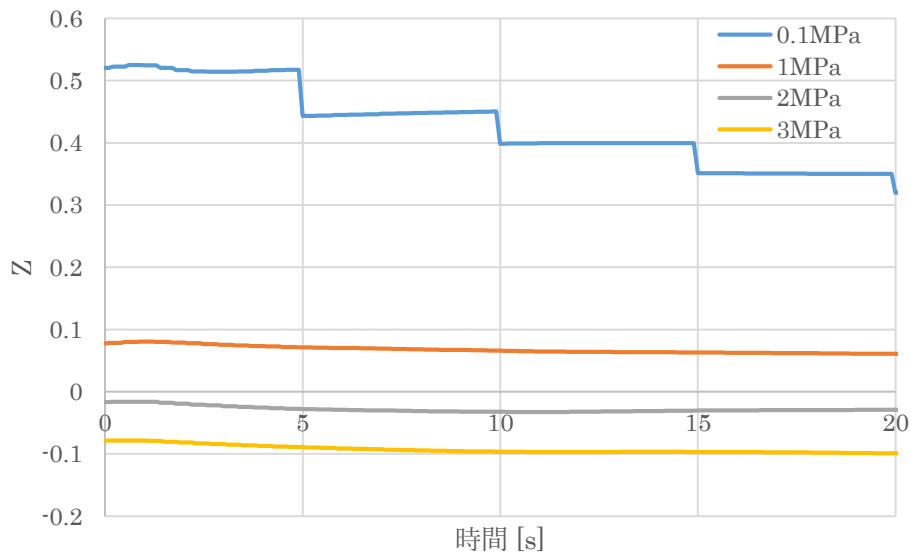


Fig.3.3 History of Z-value

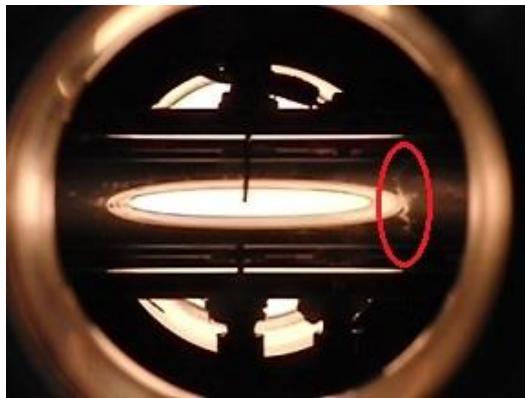
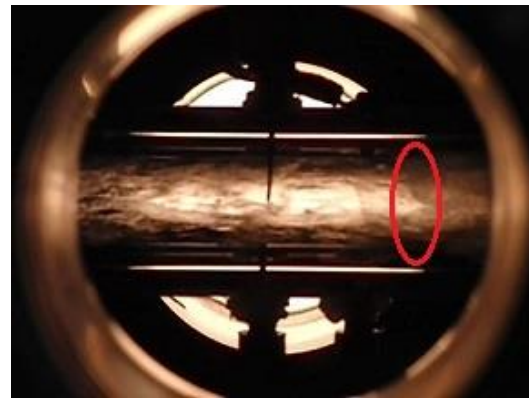
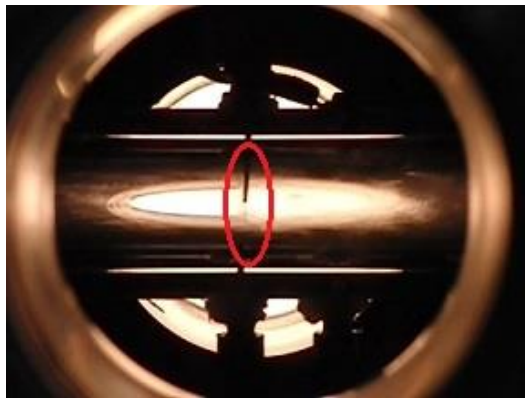
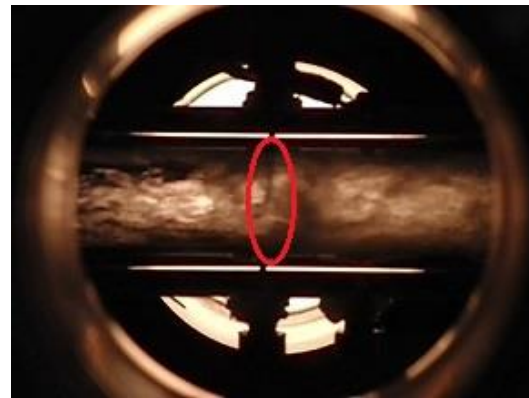
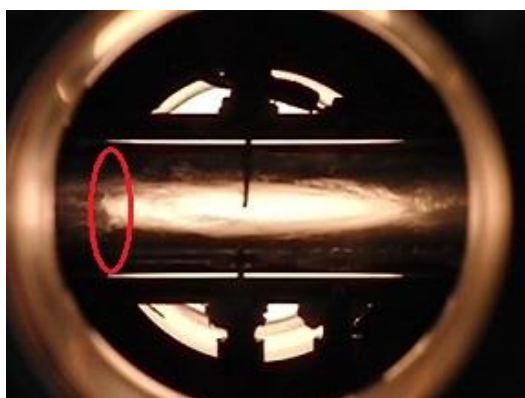
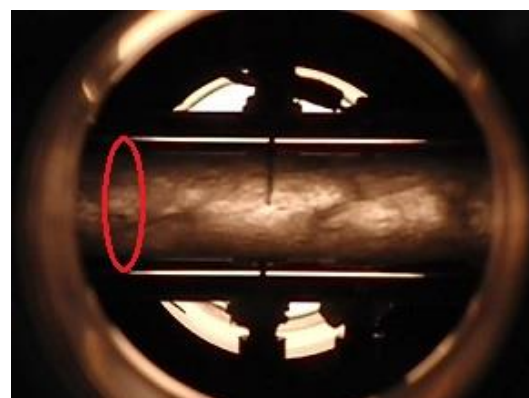
暖領域の境界のことであり^[15]，混相流の特徴の一つである．画像と撮影時間の対応より，**Quench front** の伝播速度を計算した結果を Table 3.1 に示す．伝播距離はバックライトがアクリル管に屈折して移る区間の距離とし，可視化窓の幅である 71cm とした．また，他の亜臨界圧力においても **Quench front** が一時存在した可能性があるが，本実験の撮影条件では明瞭に観測することはできなかった．

Table 3.1 Comparison of Quench Front Propagation
Speed between Atmospheric and 1MPa

	伝播距離 [cm]	所要時間 [s]	伝播速度 [cm/s]
常圧	71	2.37	30.0
1MPa		0.70	101.4

常压

1MPa

 $t=4.72$  $t=2.72$  $t=5.99$  $t=2.82$  $t=7.09$  $t=3.01$

(a) Atmospheric

(b) 1MPa

Fig.3.4 Quench Front Propagation in Flow of Cryogenic N₂

3.3.2 流れ場のパターンに関する考察

各実験の画像を時系列的に観察したところ、各実験で流れ場のパターンが遷移していく様子が見られた。中でも雰囲気気圧 2MPa 以上の流れ場からは、サンプル時刻までの時間を通して、流れ場パターンの遷移に類似性が見られた。Fig.3.5 には 2MPa, 3MPa, 4MPa における代表的な流れ場のパターンを時系列的に並べて示す。どの雰囲気気圧下においても、最初は(a)の低密度状態が支配的な流れが現れ、間もなく(b)の密度分布が顕著な流れに遷移する。そして(c)の高密度状態が支配的な流れ場を経て、(d)の準定常的な高密度流れ場を形成していると考えられる。2MPa, 3MPa の亜臨界流体では、(a), (b), (c)で気液混相流れを成しており、相の界面が表す明暗の分布が明瞭であり、密度分布の把握が容易である。一方、超臨界状態の 4MPa 下において流体の相は存在しないため、(a), (b), (c)を通して流れ場の明暗分布が亜臨界の場合より不明瞭であることがわかる。また、2MPa, 3MPa の(c)の赤い印のところでは、(9.9, 0)の熱電対のシースにて比較的安定した沸騰が起こっていることが確認できた。

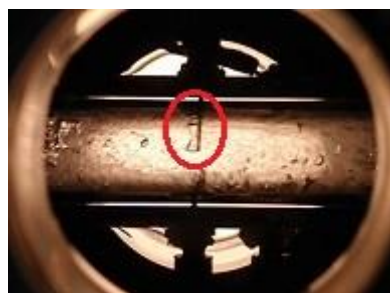
2MPa



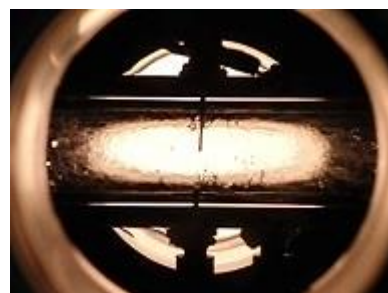
(a)



(b)



(c)



(d)

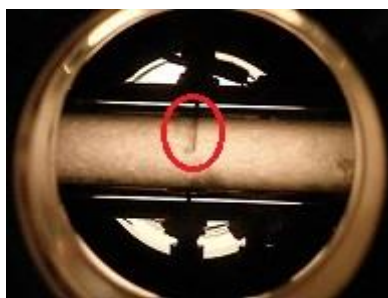
3MPa



(a)



(b)

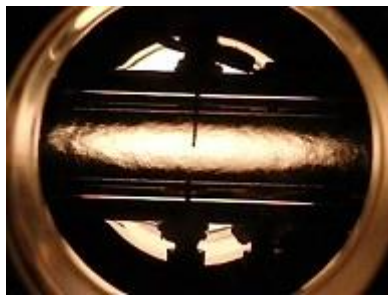


(c)

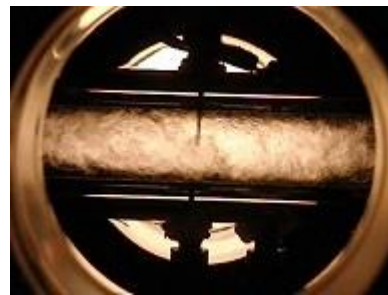


(d)

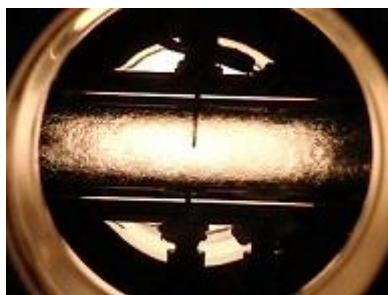
4MPa



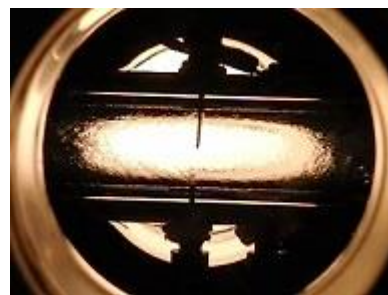
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.3.5 Flow Pattern Transition

3.3.3 熱流入に関する考察

アクリル管内の極低温窒素はアクリル管より熱を受け取り、上流と下流の温度差を生じている。またサンプル時刻 $t=\tau$ の近傍で熱電対の温度変化が小さいことから、流れ場の伝熱現象は定常状態に近いとみなせる。そこで、検査領域を出入りする質量流量と比熱、入口・出口におけるバルク温度を用いることで、式(3.2)に従って検査領域で流体が受け取る時間当たりの熱量が簡単に評価できる。

$$\dot{q} = \dot{m}c_b(T_{b, out} - T_{b, in})/A_f \quad (3.2)$$

しかし本実験では半径方向の流速と温度を定量的に計測していないため、バルク温度は計算できていない。ここでは温度境界層が十分小さいとの仮定の下で、流路中心軸上の(4.6, 0), (9.9, 0)で計測したサンプル温度を、その位置でのバルク温度とみなして熱流入を評価した。また、混相流れの比熱を計算するためには、気相と液相の質量流量比が必要であるが、本実験では計量が難しいため、常圧と 1MPa の実験は検査対象から外した。Fig.3.6 に流れ場の検査領域($x/D=4.6\sim 9.9$)を、Table 3.2 に検査領域の流量及び入口と出口におけるサンプル温度と比熱を示す。諸物性値は NIST のデータベース³⁾から取得し、熱流束の計算のバルク比熱には入口と出口比熱の単純平均値を用いた。これにより、アクリル管から流体への熱流束は、圧力によって数倍異なる結果が得られた。但し、3MPa の場合とその他の圧力下とは相違が著しいが、この原因は沸騰による温度計測部の温度上昇である可能性がある。Fig.3.2 の 3MPa における画像に注目すると、3MPa のみの(9.9, 0)のところで沸騰が起こっていることが見られる。画像を確認したところ、3MPa の(9.9, 0)における沸騰現象は $t=\tau\pm 10$ においてずっと続いていたことがわかった。したがって、Table 3.2 に載せてある 3MPa における(9.9, 0)での温度は、主流の正しい温度でない可能性がある。

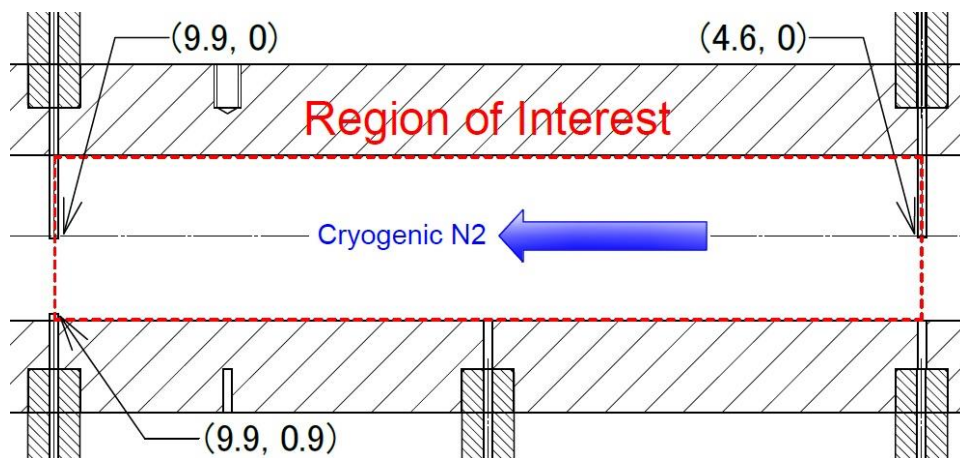


Fig.3.6 Schematic of the Region of Interest

尚、沸点もしくは擬臨界温度付近において流体の物性は大きく変化することは既知である。そのため、本実験で用いている管内熱電対の出力精度(誤差範囲 $\pm 4\text{K}$ 以上)で、検査領域での熱流入を正しく議論するには無理があると判断される。したがって、今後極低温流れ場の伝熱特性の調査にあたっては、予め熱電対の較正を行い、高精度を確保することが肝要であると思われる。

Table 3.2 Calculation of Heat Flux in the Region of Interest

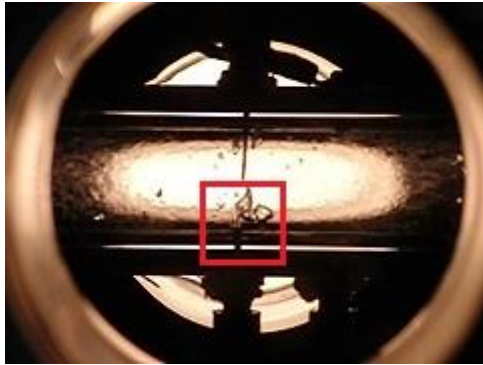
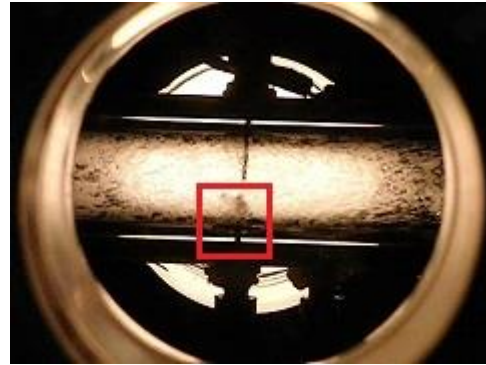
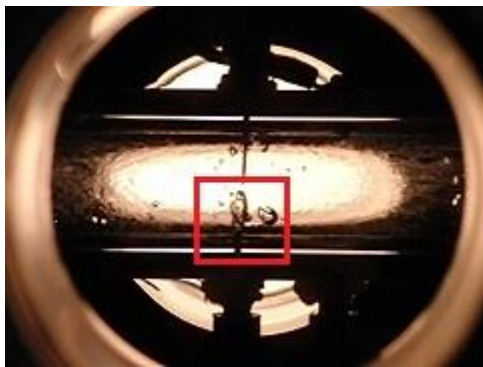
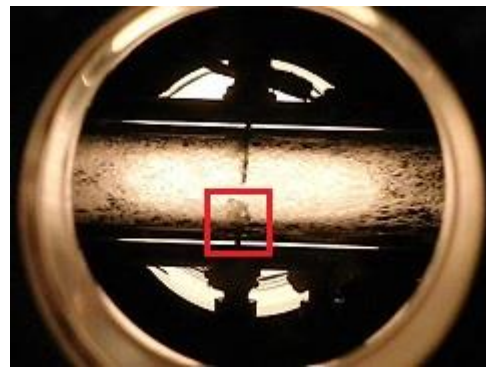
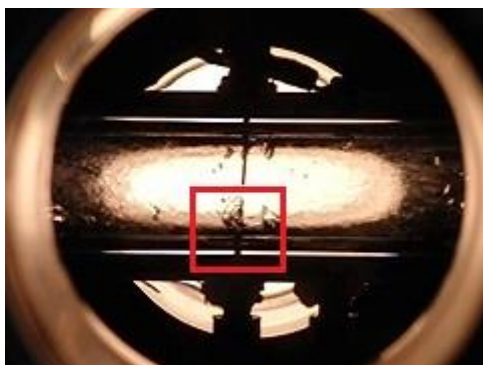
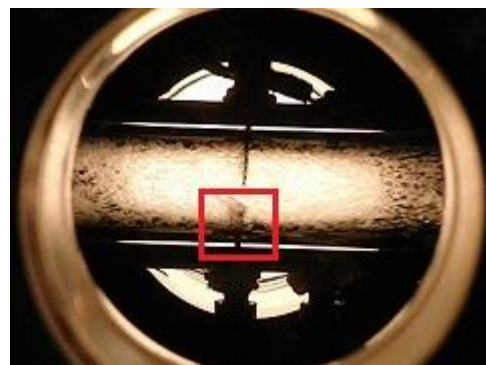
		2MPa	3MPa	3.5MPa	4MPa
\dot{m} [kg/s]		0.0212	0.0219	0.0197	0.0196
T_b [K]	in	112.7	118.9	119.6	119.6
	out	114.5	123.6	121.4	120.3
c_b [J/(kg · K)]	in	2874.0	3379.1	3239.9	3013.5
	out	3114.3	8020.8	3637.4	3116.2
\dot{q} [kW/m ²]		19.2	99.3	19.7	7.4

3.3.4 壁面付近での温度と沸騰に関する考察

各実験を通して(9.9, 0.9)に位置する熱電対の先端では猛烈な沸騰が起こっていたことが、可視化画像より分かった。Fig.3.7には2, 3, 3.5, 4MPa下での実験で、サンプル温度 $t=t_c$ 付近における流れ場の可視化画像を示す。赤い印の(9.9, 0.9)の位置で、亜臨界状態の2, 3MPaでは多量の気泡が、超臨界状態の3.5, 4MPaでは煙のような様子が確認できる。特にこの煙は密度の空間勾配が激しいことを暗示する。亜臨界で沸騰が起こっていることに照らし合わせて考えると、この煙は擬沸騰現象であると思われる。

熱電対は内壁より1.5mmくらい突出していることを考慮すると、これらの気泡は熱電対の先端を覆っている可能性が高い。すなわち亜臨界圧下における熱電対の計測部では、膜沸騰現象が起こっていると思われる。計測部の周りでのみ膜沸騰が起こっているため、Fig.3.1の2, 3MPa下での(9.9, 0.9)における温度は、壁付近での流れ場の温度を正しく計測していないと判断される。一方、流体がアクリル管に触れる領域ではこのような沸騰は見られていない。両者の相違は熱電対のシースとアクリル管からの熱流束の大差であると考えられ、それはSUS316とアクリル樹脂の熱伝導率に起因していると思われる。

一方亜臨界圧の2MPa, 3MPaにおいて、(9.9, 0.9)の温度が流体温度から高騰する理由としては、上述した膜沸騰現象で説明がつく。だが、相の区別が存在しない超臨界圧の3.5, 4MPaでは膜沸騰は定義されない。代わりに、既に上で触れたように3.5, 4MPaの(9.9, 0.9)では激しい擬沸騰が起こっていると思われる。著者の推察ではあるが、高熱流束が与えられる超臨界流れ場で見られる激しい擬沸騰現象と亜臨界流れ場における沸騰現象には、類似した伝熱特徴があるかもしれない。この点については、今後さらなる研究が期待される。

2MPa ($\tau=20$) $t=\tau+1.11$ 3MPa ($\tau=20$) $t=\tau$  $t=\tau+1.13$  $t=\tau+0.02$  $t=\tau+1.15$  $t=\tau+0.04$ (a) 2MPa ($\tau=20$)(b) 3MPa ($\tau=20$)

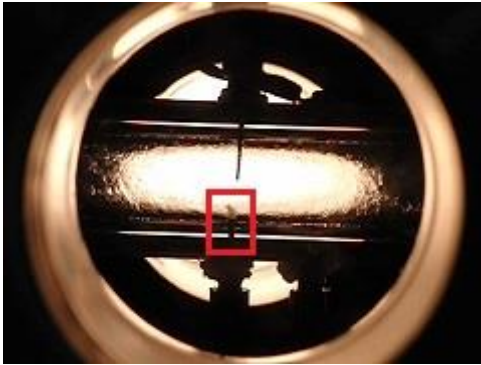
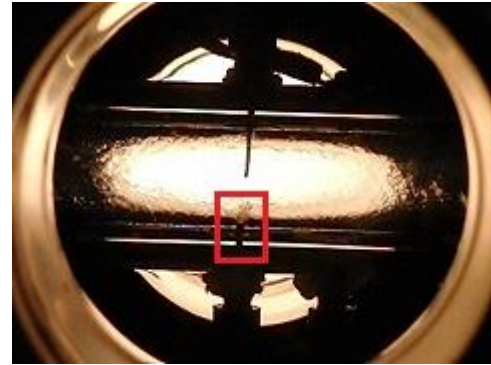
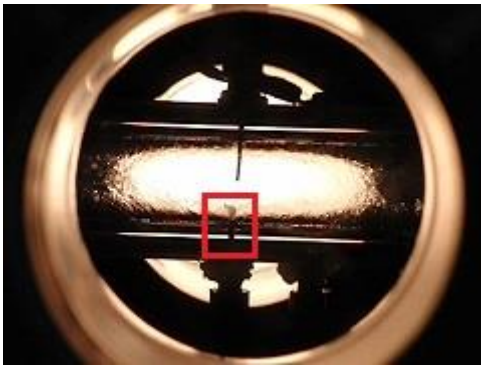
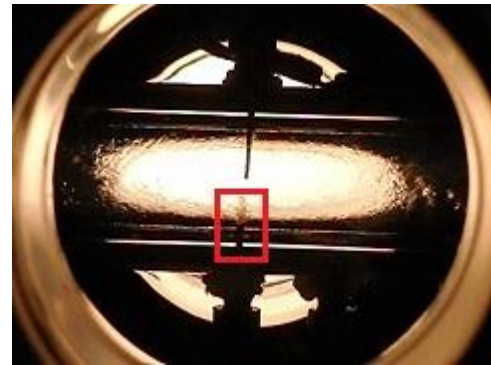
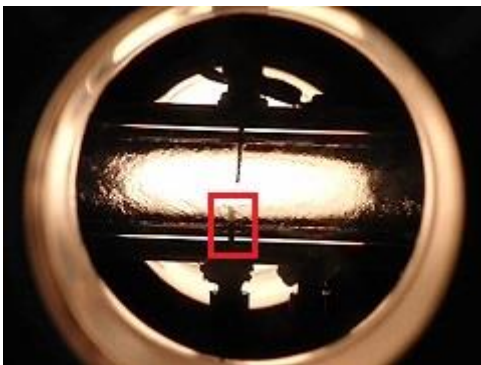
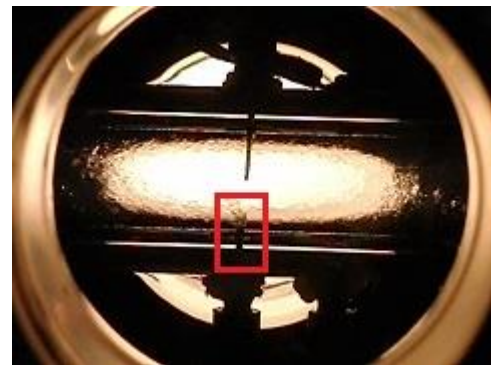
3.5MPa ($\tau=20$)4MPa ($\tau=20$) $t=\tau+1.16$  $t=\tau$  $t=\tau+1.18$  $t=\tau+0.02$  $t=\tau+1.20$  $t=\tau+0.04$ (c) 3.5MPa ($\tau=20$)(d) 4MPa ($\tau=20$)

Fig.3.7 Boiling and Pseudo-Boiling around Thermocouple at (9.9, 0.9)

第 4 章 結論

本研究では、超臨界状態の流れ場の温度直接計測及び可視化の実現を目的とし、基礎的装置を設計して基礎実験を行った。様々な圧力下における流れ場の温度データと可視化画像を取得し、両方を組み合わせながら流れ場の非定常的伝熱特性に関して考察を行った結果、以下のような知見を得た。

- 超臨界極低温管内流れ場の中心軸上温度を計測することができた。
- 同流れ場の一部を可視化し、画像を取得することができた。
- 管内混相流れにおける Quench front の伝播速度は、流れ場が高圧であるほど速い傾向がある。
- 混相流れから单相流れへの遷移において、圧力に関係なく類似した流れ場パターンが示された。遷移における視覚的特徴は、高圧であるほど不明瞭になる。
- 超臨界流れ場での活発な擬沸騰領域と亜臨界流れ場での沸騰領域には、類似した伝熱特性を有する可能性がある。

参考文献

- [1] Akihide Kurosu, et al., LE-X -Japanese Next Liquid Booster Engine-, *44th/AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, AIAA Paper 2008 – 4665, 2008.
- [2] 都木 貴彦 “熱伝達を伴う超臨界乱流チャンネル流れの DNS 解析” 2016 年度修士論文 東京大学.
- [3] Thermophysical Properties of Fluid Systems.<http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>.
- [4] Styrikovich, M.A., et al., Problems in the development of designs of supercritical boilers. *Therm. Eng.* 14(6), pp.5—9, 1967.
- [5] Igor L. Pioro. Et al., Heat transfer to supercritical fluids flowing in channels—empirical correlations (survey), *Nuclear Engineering and Design*, Vol.230, pp.69—91, 2004.
- [6] Igor L. Pioro. et al., Experimental heat transfer in supercritical water flowing inside channels (survey), *Nuclear Engineering and Design*, Vol.235, pp.2407—2430, 2005.
- [7] Romney B. Duffey. et al., Experimental heat transfer of supercritical carbon dioxide flowing inside channels (survey), *Nuclear Engineering and Design*, Vol.235, pp.913—924, 2005.
- [8] K. Yamagata et al., Forced convective heat transfer to supercritical water flowing in tubes, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.15, pp.2575—2593, 1972.
- [9] B. S. Shiralkar. Et al., Deterioration in heat transfer fluid at supercritical pressure and high heat fluxes, *Journal of Heat Transfer*, Feb, pp.27—36, 1969.
- [10] B. Youn, et al., Flow of supercritical hydrogen in a uniformly heated circular tube, *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol.24, pp.1—24, 1993.
- [11] F.W. Dittus, L.M.K. Boelter, 1930. Heat transfer in automobile radiators of the tubular type. *Univ. Calif. Publ. Eng.* 2 (13), pp.443—461.
- [12] 新野正之ら, 超臨界圧における液体水素の熱伝達特性(1)(直管における実験と既存整理式との比較), 航空宇宙技術研究所報告 583 号, pp.12, 1979.
- [13] J.M. Locke, and D.B. Landrum. Study of heat transfer correlations for supercritical hydrogen in regenerative cooling channels, *Journal of Heat Propulsion and Power*, Vol.24, No.1, pp.94—103, 2008.
- [14] Carmen I. Krau, D. Kuhn, T. Schulenberg, Heat transfer phenomena of supercritical fluids, *International Youth Nuclear Congress*, No. 352, 2008.
- [15] R.E. Caflisch, J.B. Keller, Quench front propagation, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.65, Issue1, pp.97—102, 1981.

謝辞

本研究を行うにあたり、大勢の方にお世話になりましたので、この場を借りてお礼を申し上げたいと思います。

寺本準教授には大変お世話になりました。研究室に入ってから、研究が行き止まりに遭った時には、いつも親切に相談に乗ってくださいました。また昼夜を問わず、私が実験をしている時には後ろで見守ってください、たくさんのアドバイスをいただきました。研究者としての資質が足りないにも関わらず本研究を完成したことは、先生のご指導なくては不可能なことでした。会話の時にはいつも優しい笑顔で話していただいたことは、研究を進める力になりました。心より感謝を申し上げます。

岡本準教授には毎回の輪講の際、自分の研究における盲点に関して、鋭いご指摘をいただきました。研究方向に関する問題点や、本実験に先立って気を使うべき様々な留意点を喚起させていただいたことは数えられません。研究には厳しく、人には優しい先生のおかげで、本研究を行う中、たくさんの関きがあったと思います。本当にありがとうございました。

山口助教からは、スパナを握ったこともない私に、たくさんの実用的な工学知識を教えてくださいました。ねじの描き方すら知らなかった私が、発注用図面を仕上げて業者に渡す時に感じた達成感は、すべて山口さんからのお教えのおかげです。また実験の追い込みの際は、少しの嫌味もなく毎日夜まで実験の準備を手伝ってくださったことに、深く感謝を致します。

研究室の先輩の都木さんには、いくら感謝してもしきれません。研究室に入った初日から、本論文を提出するこの日まで、傍で常いつも研究のことを一緒に考え、きめ細かいところまでアドバイスをくださいました。研究で行き詰った時は、私のあまりの至らなさに呆れることもなく、いつも親切に、真剣に相談に乗っていただきました。いつもお忙しいにも関わらず、私が弱音を吐く時には励まし、実験がうまくいかなかった時には慰めてくださいました。私の中の研究者の手本となっただき、誠にありがとうございます。

また研究室の愉快的な同期と先輩方のおかげで、温かくて楽しい雰囲気の中で研究を進めることができました。私が研究室で体力的に疲れている時に元気にしてくれたのは、彼らの声と笑顔でした。本当にありがとうございました。

最後に、日本での4年間の生活を陰で支えてくれた、かけがえのない家族に感謝致します。大洋を隔てているにも関わらず、彼らからの愛情は一瞬も途切れたことはありません。文章を書く今もこの温かい気持ちに恵まれながら、遠くにいる彼らに心の底から感謝しております。

2016年11月28日

金 輝 冥