

配管合流部の混合現象に関する研究

— 感温液晶シートによる配管内表面温度測定試験 —

(研究報告)

2004年3月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 4 9
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2004

配管合流部の混合現象に関する研究 — 感温液晶シートによる配管内表面温度測定試験 —

(研究報告)

田中正暁***、川島滋代**、五十嵐実*、
林謙二*、飛田昭*、上出英樹*

要旨

温度の異なる流体が混合することにより生じる温度変動が構造材に伝わると、構造材に高サイクル熱疲労（サーマルストライピング現象）が発生する場合がある。冷却材に液体金属ナトリウムを使用する高速炉では、水に比べてナトリウムの熱伝導率が高いことから液体の温度変動が構造に伝わり易く、本現象の評価は重要な課題である。

核燃料サイクル開発機構では、T字管体系の配管合流部におけるサーマルストライピング現象に着目し、T字管における混合現象及び実機プラントで観測されている長周期温度変動の原因を解明するために、長周期温度変動水流動試験を実施している。可視化試験の結果から、流入条件の違いにより噴流形態を（A）衝突噴流（B）偏向噴流（C）再付着噴流（D）壁面噴流に分類でき、各噴流形態は主／枝配管流体の運動量比により整理できることを明らかにした。

本研究では、主配管に枝配管が接続する合流部下流の主配管内表面に感温液晶シート貼り付け、配管表面温度の測定を試みた。配管表面温度は、感温液晶シートによる可視化画像から温度データに変換して定量的に取得する。画像解析による輝度値データから温度データへの変換にかかる不確かさについて検討し、感温液晶シートによる温度測定誤差は10°Cの感温範囲に対して平均±2°Cであることが分かった。

感温液晶試験の結果から、(A)衝突噴流条件及び(D)壁面噴流条件のケースでは枝配管下流の主配管内面に、枝配管からの低温流体によるコールド・スポットが形成され、このコールド・スポットは時間的に変動し、コールド・スポットの周辺では温度変動強度が高い値を示すことがわかった。これにより、(A)衝突噴流条件及び(D)壁面噴流条件が配管への熱疲労の観点から厳しい流动条件であることが分かった。壁面に設置した熱電対データとの比較から、感温液晶シートを用いた本手法による温度分布測定結果は熱電対による粗な空間分布を補間するものとして有用であることを確認した。

*大洗工学センター 要素技術開発部 新技術開発試験 Gr.

**株式会社N E S I

***大洗工学センター 要素技術開発部 流体計算工学研究 Gr.

**Study on Mixing Phenomena in T-Pipe Junction
- Temperature Measurement Test in Pipe by Liquid Crystal Sheet -**

(Research Document)

Masaaki TANAKA*, Shigeyo KAWASHIMA**, Minoru IGARASHI*,
Kenji HAYASHI*, Akira TOBITA* and Hideki KAMIDE*

Abstract

Temperature fluctuation due to mixing of hot and cold fluids gives thermal fatigue to the structure (thermal striping phenomena). Investigation of this phenomenon is significant for the safety of a fast breeder reactor, which uses liquid metal as a coolant.

In Japan Nuclear Cycle Development Institute, experiments and numerical analyses have been carried out to understand this phenomenon and also to construct the evaluation rule, which can be applied to the design. A water experiment of fluid mixing in T-pipe with long cycle fluctuation (WATLON), which notices thermal striping phenomena in the T-pipe junction, is performed to investigate the key factor of mixing phenomena by reason of long cycle fluctuation observed in a plant.

By the former visualization test, it was showed that the flow pattern of branch pipe jet could be classified into (A) impinging jet, (B) deflecting jet (C) re-attachment jet and (D) wall jet according to the inflow condition. It was confirmed that the each jet pattern could be predicted by the momentum ratio of the each piping fluid.

In this study, a thermo-chromic liquid crystal sheet was put on the inner wall in the main pipe, and temperature field on the wall surface was visualized. We established a new method to convert the color image data to temperature data. And measurement uncertainty of this method was evaluated \pm about 2.0 [°C], using by the typical picture in the temperature calibration test.

From the temperature fluctuation visualization test by liquid crystal sheet, the cold spot was formed in just downstream region from the outlet of the branch pipe in the cases of the wall jet and impinging jet. Since this cold spot moved in time, high value of temperature fluctuation intensity was shown around the cold spot. And the validity of this method was shown from the comparison of the thermocouple data installed in a wall surface with the temperature conversion result.

* New Technology Development Group, Advanced Technology Division,
O-arai Engineering Center

** NESI Incorporation

*** Thermal-Hydraulic Research Group, Advanced Technology Division,
O-arai Engineering Center

目 次

第1章 はじめに	1
第2章 試験装置	6
2. 1 試験部概要	6
2. 2 ループ構成	6
第3章 感温液晶シートの温度校正試験	9
3. 1 感温液晶シート	9
3. 2 温度校正試験方法	10
3. 3 温度データ変換方法	11
3. 4 温度校正結果	13
第4章 温度分布可視化試験	25
4. 1 試験条件	25
4. 2 感温液晶シートによる温度分布測定結果	25
第5章 熱電対による測定結果との比較	40
第6章 おわりに	48
謝辞	49
参考文献	50
付 錄	
A-1 可視化試験における配管の曲率の影響	52
A-2 色相 (Hue 値) を用いた温度変換方法	53

図・表 目 次

第1章

図1－1	枝配管噴流の可視化画像	4
図1－2	枝配管噴流の流動形態	5

第2章

表2－1	ループ仕様	7
表2－2	計装点リスト	7
図2－1	可視化試験体	8
図2－2	ループ構成概略図	8

第3章

表3－1	感温液晶シートの温度校正条件	15
表3－2	温度校正結果（下面）	16
表3－3	温度校正結果（上面）	17
図3－1	感温液晶の周波数応答線図	18
図3－2	可視化試験カメラ配置図	19
図3－3	感温液晶シート貼り付け位置	19
図3－4	感温液晶シートの基準色	20
図3－5	校正試験時の感温液晶シートの撮影画像例	20
図3－6	各位置での参照温度に対する輝度値	21
図3－7	RGB 温度範囲の決定法	22
図3－8	温度校正結果の一例（配管下面を撮影）	23
図3－9	温度校正結果の一例（配管上面を撮影）	24

第4章

表4－1	試験条件	28
図4－1 (1)	試験結果 ($W=1.0[m/s]$, $\Delta T=15[^\circ C]$)	29
図4－1 (2)	試験結果 ($W=1.0[m/s]$, $\Delta T=15[^\circ C]$)	30
図4－1 (3)	試験結果 ($W=1.0[m/s]$, $\Delta T=15[^\circ C]$)	31
図4－2 (1)	試験結果 ($W=0.5[m/s]$, $\Delta T=15[^\circ C]$)	32
図4－2 (2)	試験結果 ($W=0.5[m/s]$, $\Delta T=15[^\circ C]$)	33
図4－2 (3)	試験結果 ($W=0.5[m/s]$, $\Delta T=15[^\circ C]$)	34
図4－3 (1)	試験結果 ($W=1.0[m/s]$, $\Delta T=10[^\circ C]$)	35
図4－3 (2)	試験結果 ($W=1.0[m/s]$, $\Delta T=10[^\circ C]$)	36
図4－3 (3)	試験結果 ($W=1.0[m/s]$, $\Delta T=10[^\circ C]$)	37
図4－4 (1)	試験結果 ($W=2.0[m/s]$, $\Delta T=10[^\circ C]$)	38
図4－4 (2)	試験結果 ($W=2.0[m/s]$, $\Delta T=10[^\circ C]$)	39

第5章

図5-1	軸方向温度分布の比較 ($W=1.0[m/s]$)	42
図5-2	軸方向温度分布の比較 ($W=0.5[m/s]$)	43
図5-3	周方向温度分布の比較 ($1.0D_m$ 下流側, $W=1.0[m/s]$)	44
図5-4	周方向温度分布の比較 ($1.0D_m$ 下流側, $W=0.5[m/s]$)	45
図5-5	周方向温度分布の比較 ($2.0D_m$ 下流側, $W=1.0[m/s]$)	46
図5-6	周方向温度分布の比較 ($2.0D_m$ 下流側, $W=0.5[m/s]$)	47

付録

図A-1	格子線の貼り付け位置と輝度分布（赤色）	52
図A-2	推定位置と実位置との比較	52
図A-3	色相環	54
図A-4	色空間	54
図A-5	画像中心位置での Hue 値と輝度値の温度変化	55
図A-6 (1)	空間平均温度の比較	55
図A-6 (2)	標準偏差値の比較	55
図A-7	Hue 値による温度変換結果	56
表A-1	校正画像の温度変換結果（緑基準 Hue 値, 配管下面）	57
表A-2	校正画像の温度変換結果（緑基準 Hue 値, 配管上面）	58

第1章 はじめに

温度の異なる流体が流れる配管が垂直（T字状）に接続する配管合流部（以下、T字配管合流部）等では、流体の混合現象に伴って配管内の流体に温度変動が生じ、その温度変動が配管材（構造材）に伝達されると構造材内部では引っ張り・圧縮応力が繰り返し作用し、構造材は熱疲労によって破損に至る可能性がある（サーマルストライピング現象）。冷却材に液体金属（ナトリウム）を使用する高速炉においては、水に比べてナトリウムの熱伝導率が高いため、流体の温度変動が構造材に伝わり易く極めて重要な現象である。「もんじゅ」及び「常陽」では温度差の大きな冷却材が合流する部分に熱疲労に対して耐性のあるインコネル材を用い構造材強度を増す、配管合流部では「ミキシング・ティー」と呼ばれる枝配管の先を主配管の内部に90°曲げてL字状に挿入した構造を用いて配管内面近傍の温度振幅を低く抑える等の対策がとられている。

サーマルストライピングに関する評価基準としては、日本機械学会にて「熱荷重による構造物破損評価手法に関する研究会」が発足し、核燃料サイクル開発機構（以下サイクル機構）より評価基準の枠組みを提案してきた^{[1][2]}。特に、軽水炉については、この研究会の分科会として「軽水炉WG」が設けられ、高低温水合流部温度揺らぎ^[3]と閉塞分岐管の熱成層^[4]に関して評価基準に対する検討が実施された。そこで検討結果を受け「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針基準策定委員会」が発足し、水を内包する配管に対する高サイクル熱疲労評価指針^[5]が策定された。しかし、高速炉では冷却材にナトリウムを使用していること、冷却系配管に薄肉配管を使用していること等から、サーマルストライピングに対して高速炉固有の現象も考えられ、より詳細な評価手法まで整備しておく必要がある。

サイクル機構では、機構論に立脚したサーマルストライピング現象の評価基準を作成するために、水及びナトリウムを作動流体とする試験研究を行い、解析ツールの整備を実施しており、比較的短い周期（1[s]以下）の温度変動に対する研究が進められてきた。しかしながら、「PHENIX」や「常陽」の配管合流部において数[s]～数10[s]程度の長い周期の温度変動（以下、長周期温度変動）が計測されている。このような長周期の温度変動であっても構造物の熱膨張に対する拘束条件によっては応力が発生し得る。長周期温度変動が発生する要因としては、大きなスケールの渦流れが壁面に接触することにより流体の温度変動が壁面に作用する場合（時間変動）、または淀み領域の形成により局所的に高温または低温の領域（ホット／コールド・スポット）が生じ、その領域が空間的に変動する場合（空間変動）が考えられる。流動条件（主配管と枝配管の流量比、温度差、配管口径比など）によってT字配管内の流動は異なると考えられるため、時間変動と空間変動のどちらが支配的かということは一概には言えない。

そこで、主配管に枝配管が直角に合流するT字配管合流部における、構造健全性に影響を及ぼす可能性がある温度変動を把握するため、長周期温度変動水流動試験（WATLON : Water Experiment of Fluid Mixing in T-pipe with Long Cycle Fluctuation）を実施している。高速炉と同じくナトリウムを作動流体とすると、配管内の流体混合過程の可視化観察および流体温度計測が困難となり、得られる試験デ

ータは配管外表面温度などに限られる。現段階では配管内の現象を把握する実験データ（流速分布および温度分布）を取得することが重要であり、ナトリウムではなく可視化観測の容易な水を作動流体とした。長周期温度変動は、先に述べたように流体混合中の大きなスケールの渦、あるいはホット／コールド・スポットが空間的に揺らぐことによって生じる場合が主に考えられる。本研究の目的は、長周期温度変動の発生する条件とその現象を解明することにより、構造健全性評価手法の整備・検証に必要な実験データベースを構築すること、およびT字配管合流部におけるサーマルストライピング現象の評価基準の策定に資することである。

第1報^[6]では、配管合流部での混合の様子と流動条件（主／枝配管の流量比および温度差）との関係を明らかにするため、染料注入法による可視化試験（以下、枝配管噴流可視化試験）について報告した。主配管と小口径の枝配管がT字状に合流する配管合流部では、枝配管流れが主配管流れの中に噴流となって流入し混合する。合流後の混合過程は流動条件（主／枝配管の流量比、温度差、配管口径比など）に依存し、特に枝配管噴流の挙動が大きく異なることが考えられる。そこで、枝配管流に蛍光染料を注入し、配管合流部における枝配管噴流の挙動を調べた。図1-1に可視化画像を示す。その結果、図1-2に示すように、(A)衝突噴流、(B)偏向噴流、(C)再付着噴流、(D)壁面噴流の4つに分類できること、以下の式で定義される主／枝配管の運動量比を用いて分類できることが分かった。

$$\text{運動量比} : \quad M_R = \frac{M_{\text{main}} *}{M_{\text{branch}}} = \frac{\rho_{\text{main}} U^2 \cdot (D_{\text{main}} \times D_{\text{branch}})}{\rho_{\text{branch}} W^2 \cdot S_{\text{branch}}} \quad (4)$$

$$S_{\text{branch}} = \pi \left(\frac{D_{\text{branch}}}{2} \right)^2 \quad (5)$$

$$\text{衝突噴流} : \quad M_R < 0.35$$

$$\text{偏向噴流} : \quad 0.35 < M_R < 1.35$$

$$\text{再付着噴流} : \quad 1.35 < M_R < 4.0$$

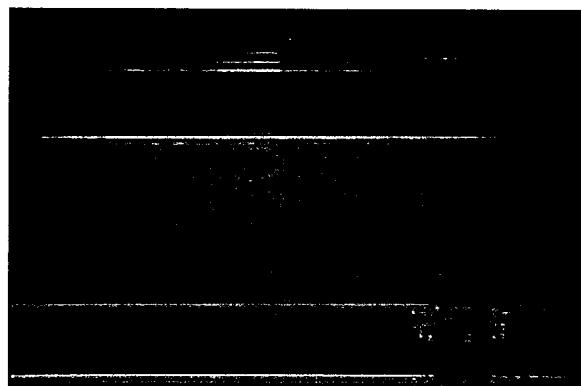
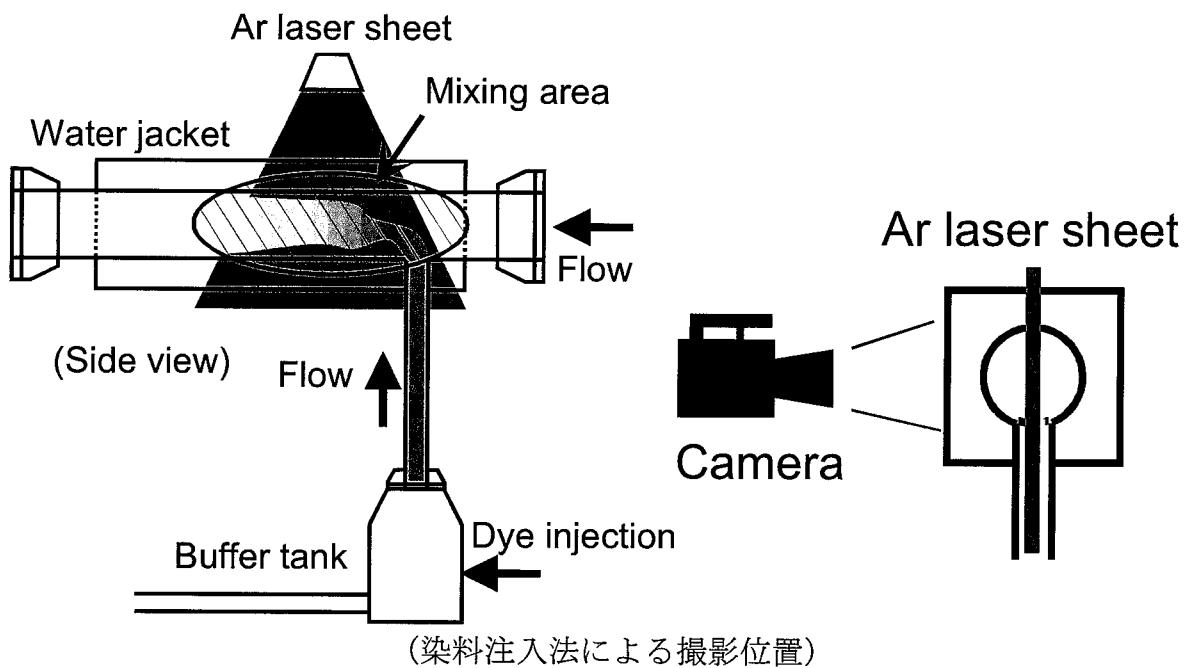
$$\text{壁面噴流} : \quad M_R > 4.0$$

ここで、 ρ ：密度、U：主配管流速、W：枝配管流速、D：配管口径である。

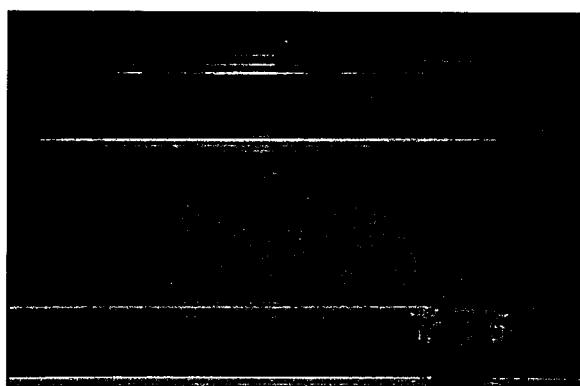
第2報^[7]では、可動式の熱電対ツリーによる配管内の流体温度計測の結果を報告した。温度変動強度の空間分布は主／枝配管の運動量比が同じであれば、ほぼ同様の分布を示すこと、枝配管噴流と主配管の流れが混合する境界面で高い値を示し、特に枝配管の背後にあたる位置では温度変動に卓越周波数が見られること。その周波数はSt（ストローハル数）=0.2となり、枝配管を柔な構造物とするカルマン渦的な大きなスケールの渦が発生することを示した。

本報では、枝配管噴流可視化試験で分類した噴流形態マップ（図1-2）をもとに試験条件を設定し、配管合流部下流の主配管内表面に感温液晶シートを張り付け、各

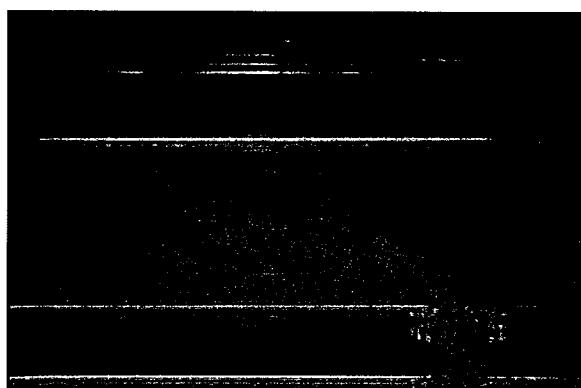
流動形態でのホット／コールド・スポットの発生の有無および温度分布の様子（温度分布の空間変動特性）を明らかにすることを目的とした、感温液晶シートを用いた温度分布測定試験（以下、温度変動可視化試験）結果について報告する。感温液晶シートは温度変化に応じて色が変化する（本試験で用いた感温液晶シートは、およそ赤（30[°C]）から青（40[°C]）に変化）。これにより、温度分布を色の分布として可視化観測することができる。ただし、感温液晶シートの色の変化は、熱電対のように温度変化に対して信号出力が一意に決定されない（出力が一対一の対応になっていない）。そのため色の変化から温度変化を定量的に評価するのが難しいとされている。ここでは、色データから温度データへの変換方法について、感温液晶シートの発色を色の3原色（赤、青、緑）に分離し、それぞれの色の変化から推定される温度値を局所的に補間することにより温度を同定する手法を考案した（詳細は第3章参照）。また、温度計測の不確かさについても検討した。感温液晶シートを用いて配管内表面温度を可視化観測し、壁面近傍における混合特性について明らかにした。また、熱電対による配管内壁面温度と、感温液晶シートによる温度分布とを比較し、温度変換手法の妥当性について評価した。



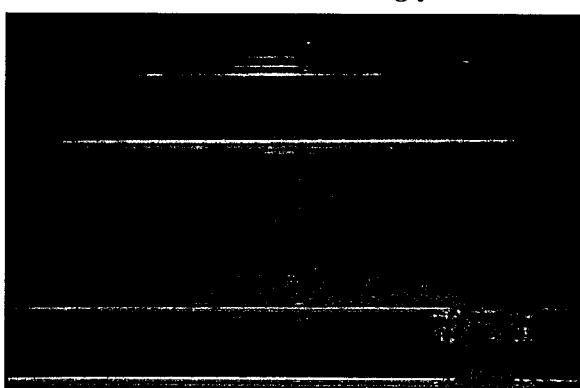
Region-A
衝突噴流 (Impinging jet)



Region-B
偏向噴流 (Deflecting jet)

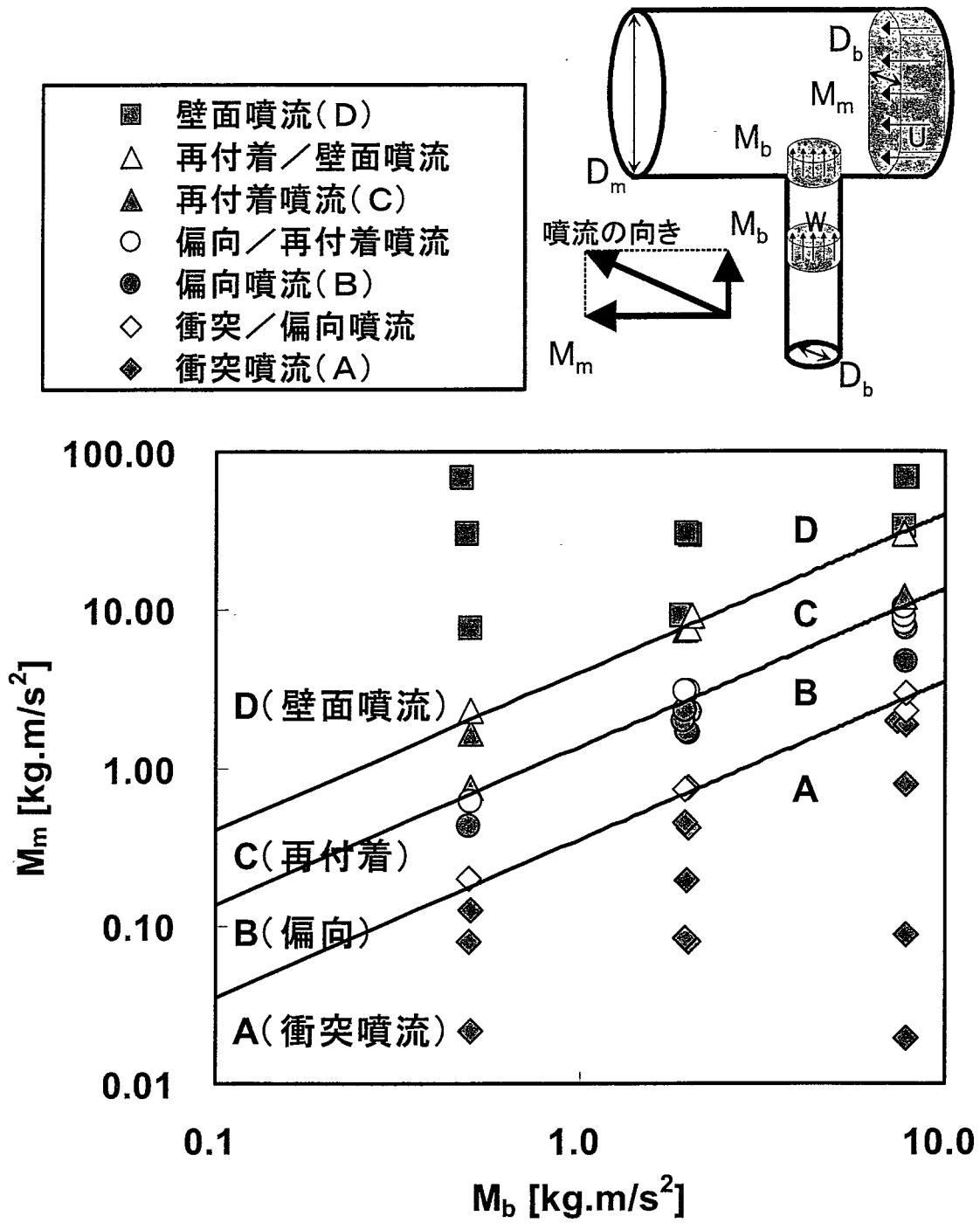


Region-C
再付着噴流 (Re-attachment jet)



Region-D
壁面噴流 (Wall jet)

図 1 - 1 枝配管噴流の可視化画像



$$M_m = \rho_m \cdot (D_m \cdot D_b) \cdot U^2, \quad M_b = \rho_b \cdot (\pi \cdot D_b^2 / 4) \cdot W^2$$

- Region-A: 衝突噴流 (Impinging jet)
- Region-B: 偏向噴流 (Deflecting jet)
- Region-C: 再付着噴流 (Re-attachment jet)
- Region-D: 壁面噴流 (Wall jet)

図 1-2 枝配管噴流の流動形態

第2章 試験装置

2. 1 試験部概要

試験部は、内径 150[mm]の主配管、内径 50[mm]の枝配管、合流部上流側および下流側の案内管（助走区間）および試験体上流側と下流側にある整流バッファで構成される。主配管内の流体は試験体上流（主配管側および枝配管側）の整流バッファで整流されほぼ一様流速分布で試験体に流入する。試験体下流側にも整流バッファが設置されており、下流の流れが混合部に影響を及ぼさないよう工夫されている。図2-1に可視化試験体を示す。テスト部は主配管に枝配管がT字状に接続する合流部から、その下流の整流バッファ入口までの約 1[m]である。テスト部は配管外部からの可視化観察・計測を可能とするため透明アクリル製となっている。さらに、可視化観測の際に、配管の曲率の影響を軽減し、観測を容易にするため、配管外側に矩形のウォータージャケットが設置されている。

2. 2 ループ構成

図2-2にループ構成の概略を示し、表2-1にループの仕様について示す。ループは貯水槽（容量 30[m³])、主配管用駆動ポンプ（最大吐出量 240[m³/h]）、枝配管用駆動ポンプ（最大吐出量 18[m³/h]）、流量調整弁、冷却系ライン等からなる。貯水槽には、流体温度を設定できるように5本の加熱ヒータ（総出力 200[kW]）が設置されており、貯水槽内の水温を制御することが出来る。本試験では、主配管側を高温流体（アクリル材の制限温度から 50[°C]以下）、枝配管を低温流体（冷却器の性能から 25[°C]以上）が流れ、試験体であるT字配管合流部で合流する。表2-2にループの計装点リストを示す。主配管側の温度はテスト部入口温度（TE-401）を参照してダンプタンク内の水温を制御して所定の温度に調整する。枝配管側にはポンプとテスト部入口との間に熱交換機（除熱量 362.8[kW]）を設置して、ダンプタンクからの高温の流体を冷却し、熱交換量を制御することにより枝配管側のテスト部入口温度（TE-402）を所定の温度に調整することができる。

表 2-1 ループ仕様

	主配管	枝配管
配管内径[mm]	150	50
最大流量[m ³ /h]	240	18
断面平均最大流速[m/s]	3.5	2.4
最大 Re 数 (25[°C])	6.3×10^5	1.4×10^5
最高使用温度[°C]*	50	
最高使用圧力[MPa]	0.3	
ヒータ出力[kW]	200 (5×40[kW])	
冷却器容量[kW]	500	

*設計最高温度は 60[°C]

表 2-2 計装点リスト

Channel	Sensor Tag No.	Sensor	Others
1ch	EMF101	主配管流量	
2ch	EMF104	枝配管流量	
3ch	TE102	主配管流量計前温度	
4ch	TE104	枝配管流量計前温度	
5ch	DP-1	差圧計1 (混合部配管上下差圧)	*1
6ch	DP-2	差圧計2 (主配管)	*1
7ch	DP-3	差圧計3 (枝配管)	*1
8ch	PE-401	主配管入口圧力	
9ch	PE-402	枝配管入口圧力	
10ch	TE6-1	混合前流体温度 (主配管)	
11ch	TE7-1	混合前流体温度 (枝配管)	*2
12ch	TE8-1	主配管整流バッファ内温度	
13ch	TE9-1	枝配管整流バッファ内温度	
14ch	TE-401	主配管入口温度	
15ch	TE-402	枝配管入口温度	
16ch	TE-403	出口配管温度	

*1 圧力については可視化試験では収録しない。

*2 可視化用試験体では混合前流体温度 (枝配管) を計測できない。

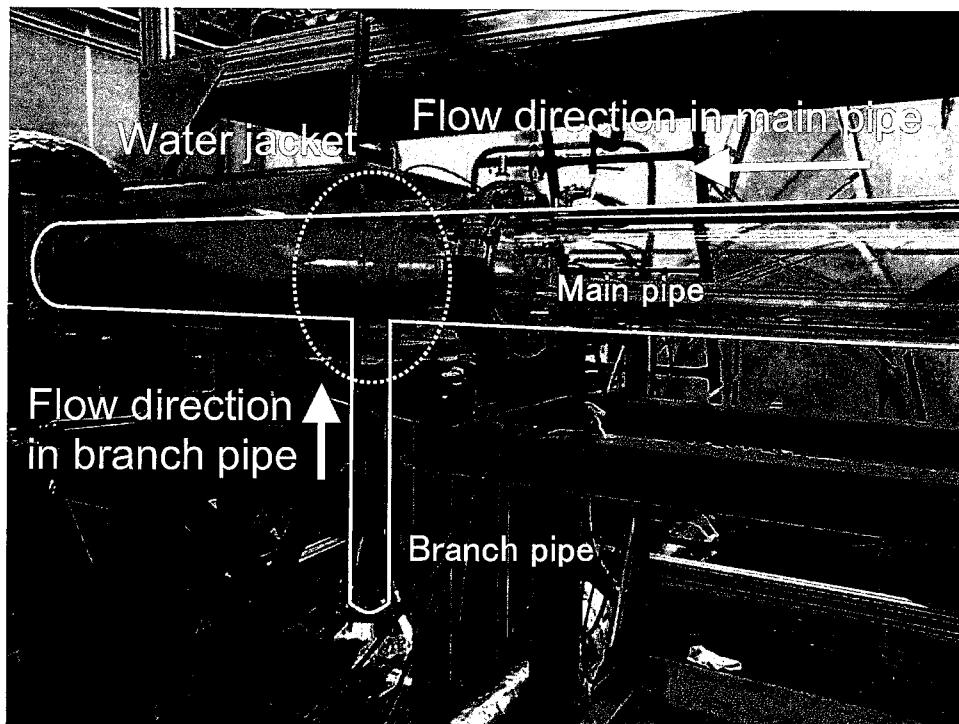


図 2－1 可視化試験体
(白い線は配管の外壁面を示している)

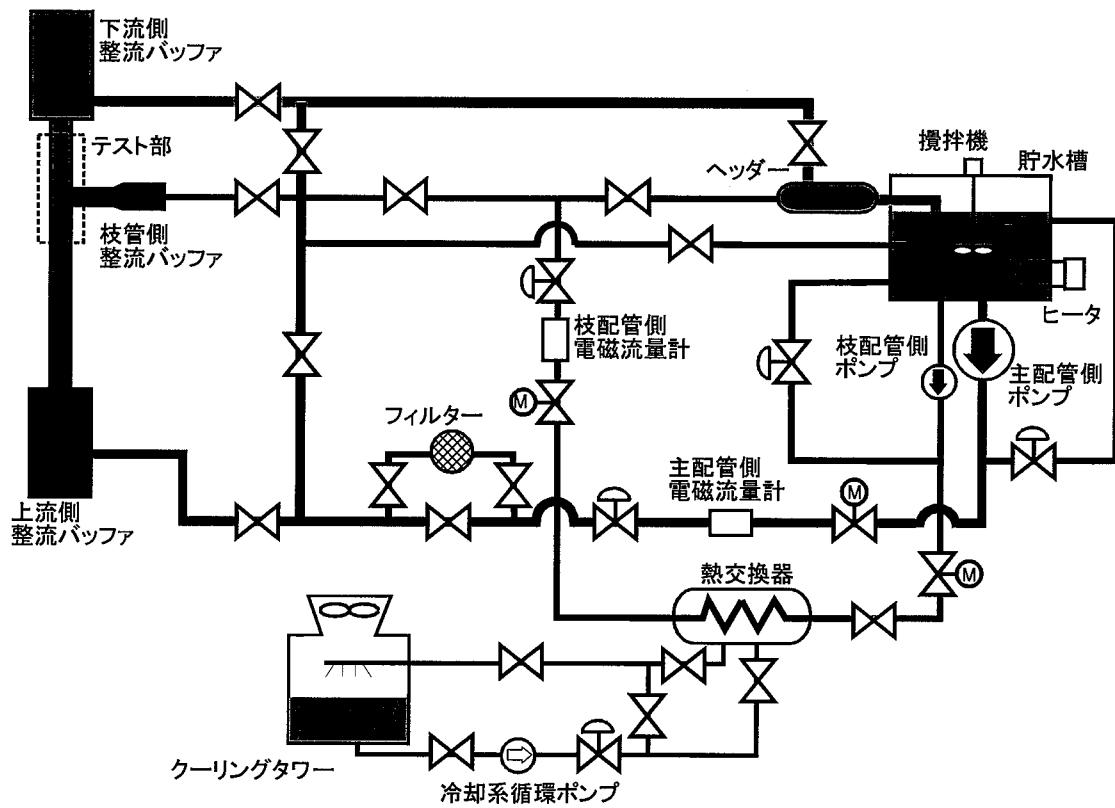


図 2－2 ループ構成概略図

第3章 感温液晶シートの温度校正試験

3. 1 感温液晶シート

本試験で用いた感温液晶シートはコレステロール誘導体液晶（コレステリック液晶）であり、複数のコレステロール誘導体を配合して、温度変化により赤色（30[°C]）から青色（40[°C]）に変化するように設計されている（日本カプセルプロダクツ社製、R-ELC）。コレステロール誘導体はゼラチンによりマイクロカプセル化（カプセル粒径 20[μm]）され水溶性バインダにより液晶インクとして、ポリエスチルフィルム製の基板（厚さ 100[μm]）上に塗布されている。また、コレステリック液晶の発色機構は、コレステロール誘導体の種類により特定波長が選択的に反射されることを応用したものである。液晶塗布面の背面には黒色塗装が施されている（背景の黒色塗装を含め液晶層厚さは約 50[μm]）。本試験では、配管内に感温液晶シートを浸漬させて使用することから、液晶を塗布した基板をポリエスチルフィルム（厚さ 100[μm]）にて挟み込み防水加工を施してある。本試験で使用した感温液晶シートの厚さは約 350[μm] であり、発色面と反対側の黒色塗装面を流体側に用いたため、感温部（液晶シート表面）から液晶部（発色層）までの距離はポリエスチルフィルム一枚分の 100[μm] となる。

本試験で用いた感温液晶シートは幅 235[mm]、流れ方向には 450[mm] であり、周方向に主配管内面の半分の領域（主配管径 150[mm]）を可視化することができる。

感温液晶シートは、計測する対象物（流体温度）の温度変化に応じて発色が変化し、カラー画像として温度分布を可視化できるという利点を持っている。しかしながら、感温液晶シートおよびその中の液晶分子の発色機構の構造上、対象物の温度が変化してから発色の変化が起こるまでの応答時間に若干の遅れが生じる。感温液晶シートの応答性について計測した例が幾つか報告されているが、感温液晶シートの構造（液晶を構成するコレステロール誘導体の種類、マイクロカプセル粒子径、基板の厚さ等）により応答性が異なるため、報告されている数値を本研究で用いた感温液晶シートに直接利用することは出来ない。従って、参考値としてのみ利用する。

Fergason^[8]は液晶の分子構造の解析から時間応答性を 0.1～0.2[s]（5～10[Hz]）と見積もっている。横堀ら^[9]は市販の液晶シートを用いて、二次元衝突噴流のよどみ領域に生じるコヒーレントな乱流構造を可視化している。使用した液晶シート（厚さ 100[μm]）の応答性について調べ、約 5[Hz]までの変動が認識可能であるとしている。ただし、位相遅れやゲインの低下についても同時に指摘している。入谷ら^[10]は、強制対流における平板乱流境界層での壁面温度場挙動と乱流構造との関係について、液晶シートを用いて温度場の挙動を可視化し調べている。その中で、現象に起因するパラメータを含む形で液晶シートの応答性を評価し 1.2[Hz]としている。小澤ら^[11]は感温液晶を用いて 0.3[Hz]程度の往復振動系で管内の温度分布を可視化し、良好な可視化画像が得られることを報告している。また、小澤ら^[12]はペルチェ素子上に感温液晶シート（日本カプセルプロダクツ社製 WW-30）を貼り付けて液晶シートの応答性を調べている。使用された感温液晶シートは、ポリエチレンテレフタレートフィルム（厚

さ約 100[μm]上に液晶接着用の 10[mm]プライマーでサンドイッチされた液晶層(約 50[μm])を置き、その上には黒色塗装を施したものである。図 3-1 に感温液晶シートの応答性について測定された結果を文献[12]から抜粋して示す。図より 0.1[Hz]程度の変動に対しては若干の位相遅れが存在するもののゲインの低下は少なく、比較的精度良く温度場を計測することが可能であることが分かる。

以上の調査結果から本試験で用いた感温液晶シートの応答性について推測する。本試験で使用した感温液晶シートは、小澤らが用いた液晶シートの両面に防水のため樹脂製のフィルム(厚さ約 100[μm])が貼り付けられた構造になっており、応答性は若干低下すると考えられる。よって、温度場の挙動を可視化画像から定性的に観察する場合、1[Hz]オーダーの現象を捉えることは可能であると考えられるが、可視化画像から得られる色の輝度データを温度データに変換して定量評価を行う場合は、0.1[Hz]オーダーの現象までと考えられる。

3. 2 温度校正試験方法

感温液晶シートの温度校正条件を表 3-1 に示す。感温液晶シートの温度範囲(30[°C]から 40[°C])を考慮して、主配管温度を 29.5[°C]から 40.5[°C]の範囲で約 0.5[°C]刻みとして温度校正を実施した。感温液晶シート上の発色は、観察方向および照明位置によって変化する。また、配管内面に感温液晶シートを貼り付け配管面を観察した場合、配管の中心部と端部では曲率の影響により、照明位置および流体温度が同じであっても観察する位置によって感温液晶シートの発色は異なる。よって、試験中は照明位置、可視化観察用のカメラの位置および撮影条件(シャッタースピード、明るさ等)を固定して使用した。

温度校正試験時には、配管内温度を一定とするために、主配管側のみ、所定の温度に設定した流体を約 1[m/s]の流速で流した。撮影は約 40 秒間(1 秒間 30[フレーム])行っている。温度校正試験では、T 字配管合流部の上流側にある上流側バッファ(上流側バッファ出口は合流部中心から 590[mm]上流側)内の流体温度を参考温度 T_{ref} とし、上流側バッファタンクより下流側で合流部中心から 350[mm]上流側に取り付けられた熱電対(この熱電対は流れを極力乱さないため壁面から数[cm]内側の流体温度を計測している)によって計測した流体温度との間で差がないことを確認して校正試験を実施した。温度校正試験中は主配管のみに流体を流しているため、自然放熱により冷やされた低温の枝配管流体が主配管流れに巻き込まれて温度校正結果に影響を及ぼすことを防ぐ必要がある。このため、温度校正時は主流のみであるが、所定の温度に調整(昇温・降温)している間は主配管および枝配管の 2 系統から上流側で分岐した同じ温度の流体を流し、枝配管の流体温度を主配管の流体温度と一致させておき自然放熱による温度の低下を極力防いだ。

図 3-2 に可視化試験時のカメラおよび照明の位置関係について示す。可視化観察にはデジタルビデオカメラ(SONY, DCR-VX1000)を用い、シャッタースピードを 1/60[s]に固定して撮影した。カメラの撮影位置は、枝配管噴流の流動形態によって、配管上面を観察する場合と配管下面を観察する場合の 2 パターンで行った。感温液晶

シートは、配管内流体の温度揺らぎ（温度変化による水の屈折率の変化）による画像の揺らぎ（歪み）を避けるため、感温液晶シートの発色面を配管外側に向けて配管内面に液晶シートを貼り付けて配管外側から可視化した。感温液晶シートの貼り付け位置を図3-3に示す。

図1-2に示した可視化観測結果より、(a) 枝配管噴流が衝突噴流（図1-2領域A）の場合、枝配管噴流は主配管中心を通過して反対側の壁面に衝突し、配管上面に大きな温度変動が生じると考えられる。そこで、主配管上面に感温液晶シートを貼り付け、カメラを配管上方に据え付けて配管上面の温度分布を撮影した。また、(b) 枝配管噴流が主配管中心部を主に流れる偏向噴流（図1-2領域B）の場合、温度変動が配管全周にわたって生じると考えられる。そこで、配管上方から主配管上面を観察した場合と、配管下方にカメラを設置し、配管下面に感温液晶シートを貼り付けて撮影した場合について実施した。(c) 再付着噴流（図1-2領域C）および(d) 壁面噴流（図1-2領域D）の場合、枝配管が接続する下流側の配管下面で大きな温度変動が生じると考えられるため、配管下面に感温液晶シートを貼り付けて配管下方から撮影した。

可視化を行う際の照明は、観察面に対して出来るだけ均一な明るさを保つため、枝配管近傍と合流部下流側に2本の棒状の白色蛍光灯を設置した。試験時には、感温液晶シートに当たる光量の時間的な変動を排除するため、試験体部を暗幕で囲い外部からの光を遮断した。また、暗幕内部では床面や部材等に黒色紙を貼り付けて構造材からの反射による外乱を抑えた。

可視化画像では、配管中心部は歪みが少ないが、配管上下は曲率の影響により観測することができない。可視化範囲を評価するために、液晶シート上に格子を書いたシートを張り付け、カメラ撮影画像と実位置との比較を行った。その結果、配管上面に液晶シートを設置した場合および下面に設置した場合ともに、配管中心から円周方向に80%の距離までは曲率の影響が少なく、良好な画像が撮影できることが分かった（付録A-1参照）。

図3-4に各温度での感温液晶シートの基準色を示し、図3-5に校正試験時の撮影画像の一例（瞬時の画像）を示す。図より、配管内温度は一定であっても、配管の中央部と上下の端部では曲率が異なり、照明の当たり方が異なるため、液晶の発色彩度および明度が異なって観察される。ただし、配管中央部における各温度での発色は、照明の明るさなどにより若干の違いはあるが基準色とほぼ一致している。

3. 3 温度データ変換方法

可視化画像から得られる色データを温度データへ変換するため、デジタルビデオカメラからパソコン・コンピュータへ録画画像を動画ファイル（AVI形式）として取り込んで処理する（画像取り込みボード：Canopus社製EZ-DV、取り込み可能画像サイズ：720×480[pixel]）。コンピュータ上に取り込まれたAVI形式の動画ファイルは静止画として切り分け、瞬時の画像をBitmap形式（24ビットフルカラー）として保存する。Bitmap形式の画像ファイルは、ファイルの構造データが書き込まれた

ヘッダ部と、赤（「R」）、緑（「G」）、青（「B」）の3原色からなる色データを格納した画像データ部によって構成されており、各ピクセル（画素）における「R」、「G」、「B」の輝度データが順番に格納されている。24ビットフルカラー形式では、それぞれの色が256階調（8ビット）となっている。

温度校正試験用の可視化画像は、40秒間（1200フレーム）に対して撮影開始5秒後から20秒間（フレーム番号151から750まで）を使用した。この600枚の画像について、それぞれBitmap形式の画像ファイルに変換し、画素毎に「R」、「G」、「B」の各色の時間平均輝度値と標準偏差を求め温度校正データとして利用する。

図3-6に撮影画像上の位置の違いによる「R」、「G」、「B」各色の参照温度に対する20秒間の平均輝度-温度特性曲線を示す。図3-6(a)にはほぼ画像の中心位置（図の矢印参照）、図3-6(b)には画像下端の曲率の大きい位置での特性曲線、図3-6(c)には流れ方向下流側での特性曲線を示す。画像上の位置によって、輝度値変化は異なっており、それぞれ観測位置ごと（画素ごと）に温度校正をする必要がある。また、「R」、「G」、「B」の各色で温度変化に対する輝度値変化は異なっており「B」および「R」では、ある輝度値に対して2つの温度値を示す。さらに、「R」は35[°C]以上では輝度変化が小さく温度校正データとして利用することは難しいことが分かる。特に図3-6(b)の画像下端では、温度変化に伴う輝度変化が小さく、温度データへの変換が難しいことを示している。

感温液晶シートにより得られた可視化画像（輝度データ）を、温度データに変換する方法として、ニューラルネットワークを用いて定式化する方法^[13]、色空間上で輝度値を整理して3次元的に補間して定式化する方法^[14]等が提案されている。また、一般的な方法として知られているのは、色相空間上で基準色からの偏りを求める方法である^[12]。また、簡便な方法として、輝度-温度特性曲線を局所的に補間して温度を求める方法があり、振動解に対する安定性では色空間上で3次元的に補間する方法よりも優れているとの報告がある^[11]。

本研究では周期的な温度変動を対象とすることから、局所補間により推定する方法を選択した。ただし、配管のような曲面の観察では、観察位置ごと（画素ごと）に温度-輝度特性曲線が異なり、画素ごとに温度校正曲線を多項式などで定式化し、それぞれに異なる温度校正曲線を当てはめることは現実的でないと判断した。そこで、輝度-温度特性曲線を局所的に補間する方法を基礎とし、「R」、「G」、「B」の各色に対して温度校正試験結果に沿ってあらかじめ温度区分（区分の数は参照温度の点数による）を定めておき、各色の輝度が共通して該当する温度区分の範囲内で、局所的に補間して温度を推定するという方法を考案した。以下に、温度データへの変換の手順について説明する（図3-7参照）。

- 1) 温度校正データとして、参照温度ごとに各画素での平均輝度値を読み込む。
- 2) 試験結果である温度分布に変換すべき瞬時の画像データ(Bitmap形式の画像ファイル)を読み込む。
- 3) 「R」、「G」、「B」各色に対して、画素ごとに輝度値がどの参照温度（平均輝度）区分にあるかを判別する。

本試験では、参照温度範囲が29.5[°C]から40.5[°C]まで0.5[°C]刻みで温度

校正試験を行ったので、22 の温度区分（ランク）となる。そこで、ランク 1 からランク 22 までの 22 個のビット並びを考え（Long-Integer のデータ幅 32 ビットを利用する）、輝度値が該当するランク（温度区分）に対応するビットを 1 とする。このとき平均輝度値の土 σ の幅で検定している。このように「R」、「G」、「B」に対して 22 桁の 0,1 配列が得られ、このビット並びに対して論理和（AND）をとると、共通するビット、つまり共通する温度区分を容易に探すことができ、輝度値に対して温度が 2 倍の関数であっても求めるべき輝度が存在する（正しい温度値を含む）温度区分を容易に決定することができる。（図 3-7 参照）

- 4) 求めるべき温度区分範囲内で温度校正データをもとに校正データを利用して線形補間することによって、輝度値に対応した温度を推定する。 $35.0[^\circ\text{C}]$ 以上では、「R」の輝度変化が小さいため、「B」、「G」の 2 色の輝度値変化から温度を求めた。

3. 4 温度校正結果

図 3-8 および図 3-9 に、温度校正試験で得られた瞬時の画像を例として用い、上述の手法で画像データ（輝度値）を温度値に変換した結果の一例を示す。図 3-8 に配管下面に感温液晶シートを貼り付けた場合の温度変換結果、図 3-9 に配管上面に感温液晶シートを貼り付けた場合の温度変換結果について示す。図には撮影画像から周囲を削除し、主配管部のみを抽出した範囲（計測範囲）を示している。

表 3-2 は、配管下面に感温液晶シートを貼り付けた場合の瞬時の可視化画像を変換した結果について、各画素の温度推定値を計測範囲内で空間平均した温度 T_{ave} 、空間平均温度 T_{ave} を基準として求めた標準偏差 σ_{ave} 、空間平均温度 T_{ave} と参照温度 T_{ref} との差 dT を示す。表 3-3 は、配管上面に感温液晶シートを貼り付けた場合の瞬時の可視化画像を変換した結果について同じく示している。ここで、添字 1 は全てのデータを使用した結果、添字 2 は $25[^\circ\text{C}]$ から $45[^\circ\text{C}]$ （本試験で用いた感温液晶シートの計測範囲の倍）の範囲外にあるデータを異常値であるとして排除して処理した結果である。全体数に対するこの温度範囲外にあるデータ（異常値）数の割合を「Error Ratio」として示している。

表 3-2 に示す配管下面に感温液晶シートを貼り付けた場合では、参照温度と平均温度推定値との温度差 dT_1 は平均 $0.16[^\circ\text{C}]$ （最大 $0.78[^\circ\text{C}]$ ）であったが、異常値を排除することにより温度差 dT_2 が平均 $0.04[^\circ\text{C}]$ （最大 $0.16[^\circ\text{C}]$ ）まで改善された。また標準偏差は、全データを用いた場合、最大値 $41[^\circ\text{C}]$ であったが、異常値を排除することにより最大値 $2.29[^\circ\text{C}]$ まで低下した。表 3-3 に示す配管上面に感温液晶シートを貼り付けた場合では、全データを用いた場合には標準偏差は、最大 $69[^\circ\text{C}]$ と大きな値を示しているが、異常値を排除した後は最大 $2.19[^\circ\text{C}]$ となっている。排除されたデータは全体の 1 割に満たない数であり、これら排除されたデータは主に曲率のきつい画像の上下端部にある。変換精度の悪い箇所（画素）は僅かであり、存在する場所もほ

ほぼ固定されている。従って、画像の中心部（枝配管の下流の領域で最も注視すべき領域）での温度分布の様子を把握する上で問題はないとの判断した。

標準偏差 σ_{ave} は、感温液晶の画像データを変換して得た温度推定値の空間的なばらつき（偶然誤差）を示す指標である。また、 dT は真値である参照温度 T_{ref} と変換後の推定温度との差であり温度変換により生じるかたより誤差と考えることができる。従って、これらを用いて、各参照温度での誤差 s と、全参照温度範囲における平均誤差 S を次式により評価する。

$$s = \pm \sqrt{(dT)^2 + (2 \times \sigma_{ave})^2}$$

$$S = \pm \sqrt{\frac{\sum s^2}{p}}$$

25[°C]から45[°C]のデータ範囲で誤差を評価すると、表3-2に示すデータからは $S=\pm 2.0[°C]$ 、表3-3に示すデータからは $S=\pm 2.2[°C]$ であった。異常値として排除する範囲をさらに広げ、変換範囲を感温液晶シートの計測範囲（30[°C]から40[°C]）に近づけることにより、この値はさらに向上すると考えられる。

全てのデータを使用して温度変換を実施した場合は、各温度における標準偏差は大きな値を示すが、一方で、特定の温度範囲以外にある異常値を排除した場合、平均最大でも2.29[°C]の偏差であり本手法による温度変換の有用性について確認することができる。Error Ratioを見ると、温度に対する輝度分布で赤色と緑色がピークとなる（頂点近傍で平坦な分布となる）32[°C]近傍及び全色の輝度値の勾配が平坦になる37[°C]以降が大きなError値を示していることが分かる。また、上面から撮影した場合と下面から撮影した場合など撮影条件によっても誤差は異なり、撮影画像の質によつても誤差は大きく左右される。変換誤差については、付録A-2に示すように、色の変化（「R」、「G」、「B」）ではなく、基準色からの傾きを示す（Hue）値を用いることにより改善することが可能である。

表3－1 感温液晶シートの温度校正条件

主配管下面を撮影した場合		主配管上面を撮影した場合	
試験ケース名	参照温度[°C] (上流側バッファ内)	試験ケース名	参照温度[°C] (上流側バッファ内)
CS_LT01	29.50	CS_LT30	29.65
CS_LT02	29.98	CS_LT31	30.03
CS_LT03	30.50	CS_LT32	30.53
CS_LT04	30.98	CS_LT33	31.01
CS_LT05	31.48	CS_LT34	31.43
CS_LT06	32.01	CS_LT35	32.08
CS_LT07	32.47	CS_LT36	32.56
CS_LT08	32.92	CS_LT37	33.04
CS_LT09	33.43	CS_LT38	33.44
CS_LT10	33.98	CS_LT39	33.97
CS_LT11	34.38	CS_LT40	34.38
CS_LT12	34.88	CS_LT41	34.94
CS_LT13	35.45	CS_LT42	35.47
CS_LT14	35.90	CS_LT43	35.81
CS_LT15	36.39	CS_LT44	36.66
CS_LT16	36.90	CS_LT45	36.94
CS_LT17	37.38	CS_LT46	37.38
CS_LT18	37.87	CS_LT47	37.84
CS_LT19	38.43	CS_LT48	38.47
CS_LT20	38.91	CS_LT49	38.94
CS_LT21	39.37	CS_LT50	39.44
CS_LT22	39.92	CS_LT51	39.91
CS_LT23	40.38	CS_LT52	40.32

表3-2 溫度校正結果
(感温液晶シートを配管下面に設置した場合)

CASE	T _{ref} [°C]	全画素を対象 [°C]			特定温度範囲の画素を 対象 (25.0 < T < 45.0) [°C]			Error Ratio*
		T _{ave1}	σ _{ave1}	dT ₁	T _{ave2}	σ _{ave2}	dT ₂	
CS_LT01	29.50	29.49	4.31	0.01	29.52	0.40	0.02	0.002
CS_LT02	29.98	29.90	1.57	0.08	29.96	0.38	0.02	0.002
CS_LT03	30.50	30.47	3.19	0.03	30.53	0.42	0.03	0.003
CS_LT04	30.98	30.89	1.75	0.09	30.96	0.35	0.02	0.002
CS_LT05	31.48	31.26	18.72	0.22	31.39	0.94	0.09	0.009
CS_LT06	32.01	32.40	23.61	0.39	32.07	1.84	0.06	0.043
CS_LT07	32.47	32.86	15.12	0.39	32.47	1.13	0.00	0.015
CS_LT08	32.92	32.77	9.06	0.15	32.88	0.94	0.04	0.010
CS_LT09	33.43	33.32	9.53	0.11	33.40	0.92	0.03	0.010
CS_LT10	33.98	33.82	10.25	0.16	33.96	0.80	0.02	0.007
CS_LT11	34.38	34.19	4.30	0.19	34.28	0.64	0.10	0.004
CS_LT12	34.88	34.82	1.74	0.06	34.88	0.32	0.00	0.002
CS_LT13	35.45	35.38	1.56	0.07	35.45	0.17	0.00	0.002
CS_LT14	35.90	35.84	1.59	0.06	35.90	0.17	0.00	0.002
CS_LT15	36.39	36.38	10.19	0.01	36.40	0.55	0.01	0.005
CS_LT16	36.90	36.12	41.74	0.78	36.87	2.29	0.03	0.066
CS_LT17	37.38	37.39	24.63	0.01	37.28	1.16	0.10	0.018
CS_LT18	37.87	37.82	18.93	0.05	37.85	0.87	0.02	0.012
CS_LT19	38.43	38.03	24.27	0.40	38.50	1.56	0.07	0.032
CS_LT20	38.91	38.73	18.94	0.18	38.87	1.28	0.04	0.018
CS_LT21	39.37	39.33	11.62	0.04	39.53	0.97	0.16	0.010
CS_LT22	39.92	39.83	11.59	0.09	39.99	0.96	0.07	0.010
CS_LT23	40.38	40.23	11.57	0.15	40.31	0.99	0.07	0.009

$$T_{avg1} = \sum(T_{i,j}) / N, \quad T_{avg2} = \sum(T_{i,j}) / M \quad \dots (25.0 < T_{i,j} < 45.0)$$

$$\sigma_1 = \{\sum(T_{i,j} - T_1)^2 / N\}^{1/2}, \quad \sigma_2 = \{\sum(T_{i,j} - T_2)^2 / M\}^{1/2} \quad \dots (25.0 < T_{i,j} < 45.0)$$

$$dT_1 = T_1 - T_{ref}, \quad dT_2 = T_2 - T_{ref} \quad \dots (25.0 < T_{i,j} < 45.0)$$

$$\text{Error ratio} = (N - M) / N$$

$$N = i \times j, \quad M = i \times j \quad (25.0 < T_{i,j} < 45.0)$$

表3-3 温度校正結果（上面）
 (感温液晶シートを配管上面に設置した場合)

CASE	T_{ref} [°C]	全画素を対象 [°C]			特定温度範囲の画素を 対象 (25.0 < T < 45.0) [°C]			Error Ratio*
		T_{ave1}	σ_{ave1}	$ dT_1 $	T_{ave2}	σ_{ave2}	$ dT_2 $	
CS_LT30	29.65	29.71	8.94	0.06	29.72	0.72	0.07	0.008
CS_LT31	30.03	29.96	5.55	0.07	29.99	0.52	0.04	0.004
CS_LT32	30.53	30.47	6.20	0.06	30.54	0.47	0.01	0.003
CS_LT33	31.01	30.91	10.48	0.10	31.01	0.76	0.00	0.007
CS_LT34	31.43	32.26	12.77	0.83	32.20	0.90	0.77	0.006
CS_LT35	32.08	33.00	35.14	0.92	32.31	1.25	0.23	0.018
CS_LT36	32.56	32.71	34.24	0.15	32.59	1.11	0.03	0.016
CS_LT37	33.04	33.16	39.06	0.12	32.96	1.08	0.08	0.015
CS_LT38	33.44	33.77	54.97	0.33	33.32	1.08	0.12	0.022
CS_LT39	33.97	34.08	69.00	0.11	33.65	1.44	0.32	0.015
CS_LT40	34.38	33.95	9.37	0.43	34.01	1.39	0.37	0.004
CS_LT41	34.94	34.89	2.88	0.05	34.94	0.36	0.00	0.002
CS_LT42	35.47	35.45	2.02	0.02	35.51	0.31	0.04	0.002
CS_LT43	35.81	35.72	1.52	0.09	35.78	0.23	0.03	0.002
CS_LT44	36.66	36.57	6.63	0.09	36.66	0.42	0.00	0.002
CS_LT45	36.94	36.78	8.52	0.16	36.82	0.41	0.12	0.003
CS_LT46	37.38	37.36	15.38	0.02	37.32	0.62	0.06	0.004
CS_LT47	37.84	37.86	19.89	0.02	37.80	0.87	0.04	0.007
CS_LT48	38.47	38.29	27.13	0.18	38.36	1.07	0.11	0.012
CS_LT49	38.94	39.09	36.32	0.15	38.77	1.41	0.17	0.026
CS_LT50	39.44	39.53	42.24	0.09	39.42	1.71	0.02	0.045
CS_LT51	39.91	39.80	49.04	0.11	39.71	2.01	0.20	0.067
CS_LT52	40.32	40.51	53.35	0.19	39.92	2.19	0.40	0.080

$$T_{avg1} = \sum(T_{i,j}) / N, \quad T_{avg2} = \sum(T_{i,j}) / M \quad \dots (25.0 < T_{i,j} < 45.0)$$

$$\sigma_1 = \{\sum(T_{i,j} - T_1)^2 / N\}^{1/2}, \quad \sigma_2 = \{\sum(T_{i,j} - T_2)^2 / M\}^{1/2} \quad \dots (25.0 < T_{i,j} < 45.0)$$

$$dT_1 = T_1 - T_{ref}, \quad dT_2 = T_2 - T_{ref} \quad \dots (25.0 < T_{i,j} < 45.0)$$

$$\text{Error ratio} = (N - M) / N$$

$$N = i \times j, \quad M = i \times j \quad (25.0 < T_{i,j} < 45.0)$$

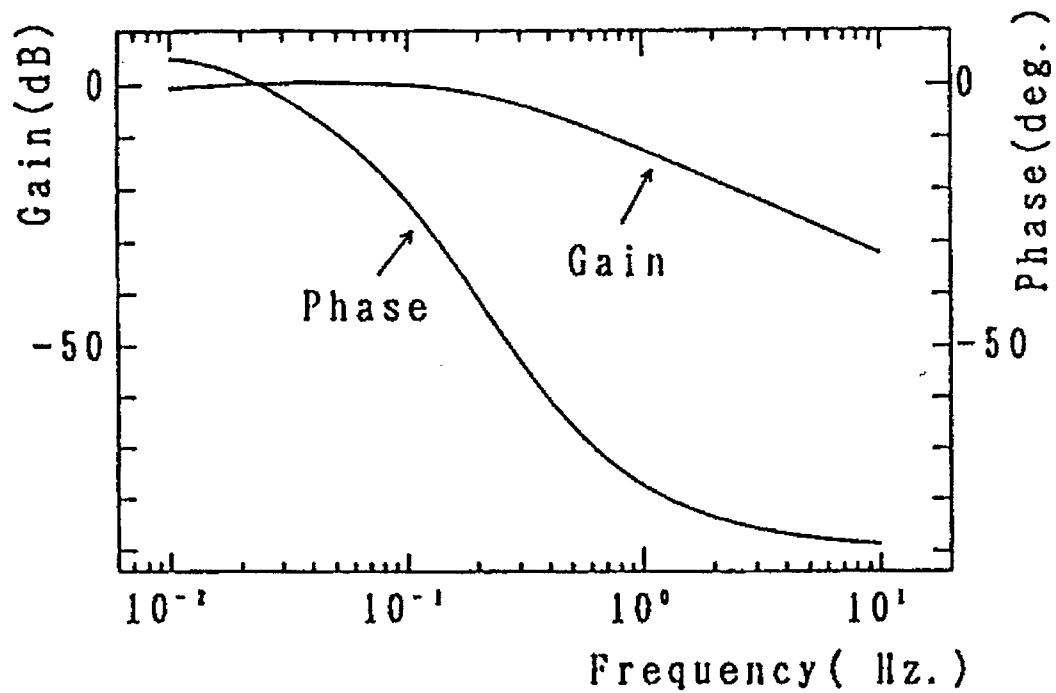


図3－1 感温液晶の周波数応答線図（文献[12]より抜粋）

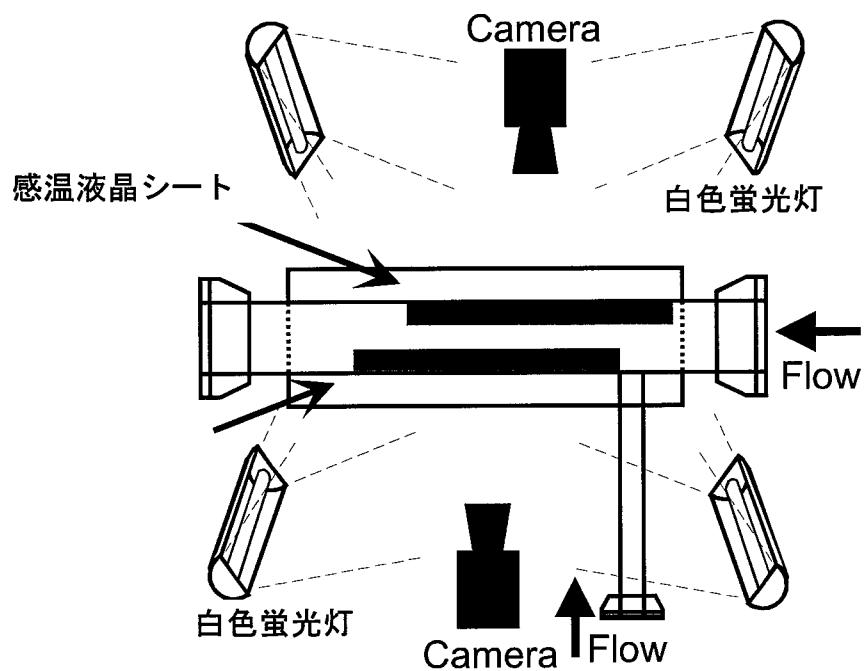
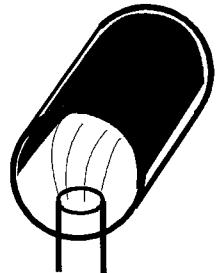


図3－2 可視化試験カメラ配置図

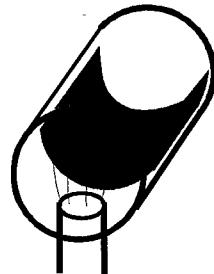
衝突噴流（A）および偏向噴流（B）

Region-A or B

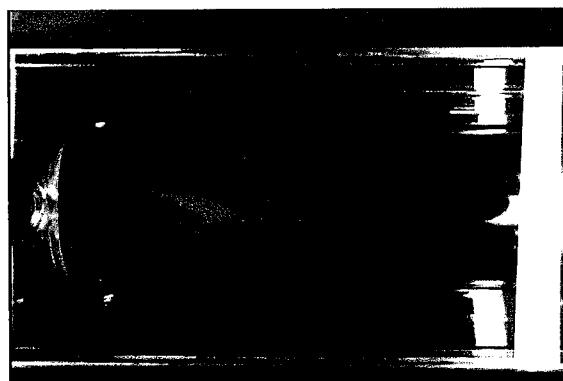


偏向噴流（B）から壁面噴流（D）

Region-B ~ D



(上面から撮影)



(下面から撮影)

図3－3 感温液晶シート貼り付け位置

RX3040	30.5	33.4	34.5	37.0	40.0

図 3-4 感温液晶シートの基準色

T_{ref} [°C]	撮影画像（下面）	撮影画像（上面）
30.5	 (CS_LT03)	 (CS_LT32)
33.4	 (CS_LT09)	 (CS_LT38)
34.4	 (CS_LT11)	 (CS_LT40)
36.9	 (CS_LT16)	 (CS_LT45)
39.9	 (CS_LT22)	 (CS_LT51)

図 3-5 校正試験時の感温液晶シートの撮影画像例

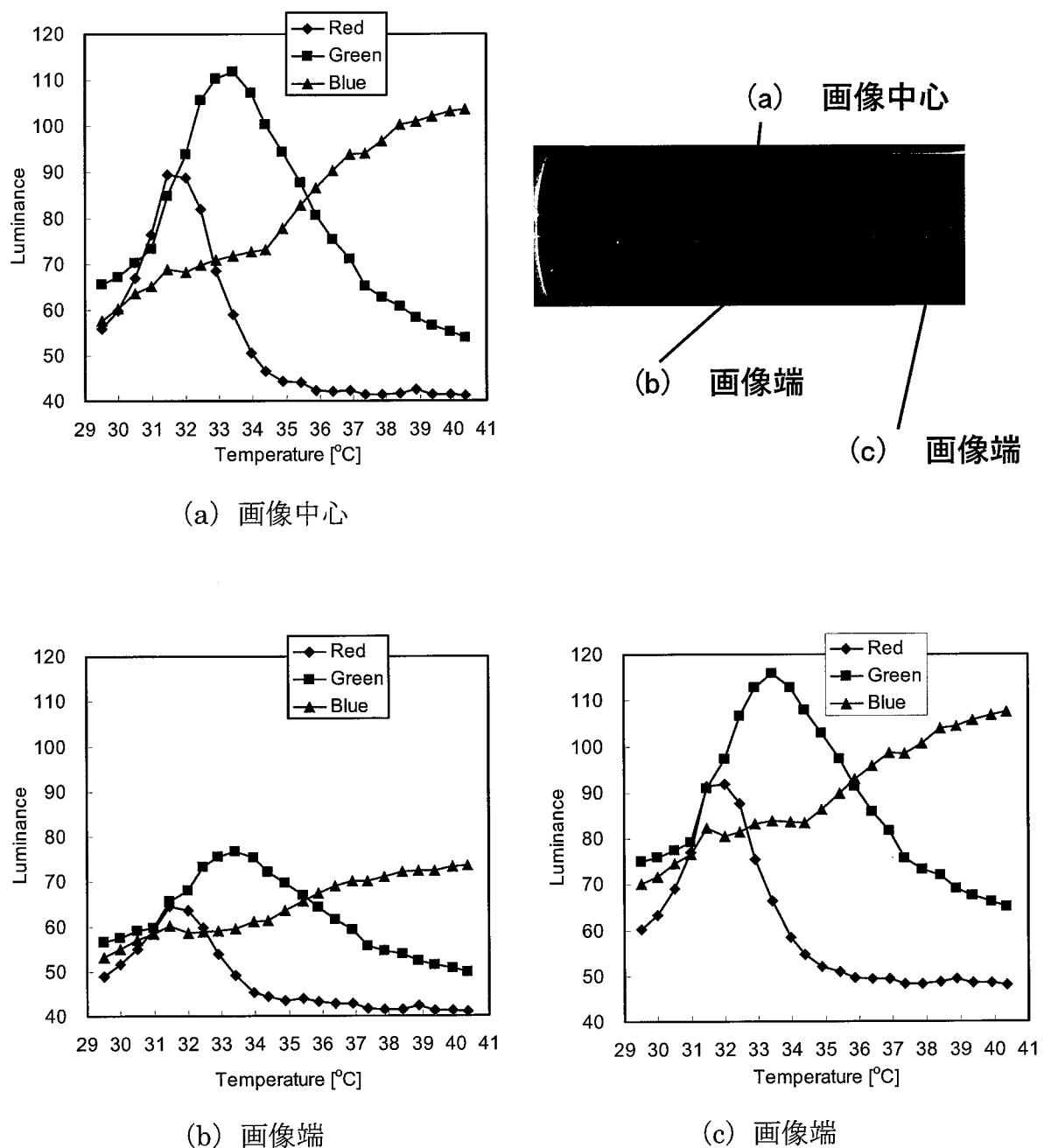


図 3-6 各位置での参照温度に対する輝度値

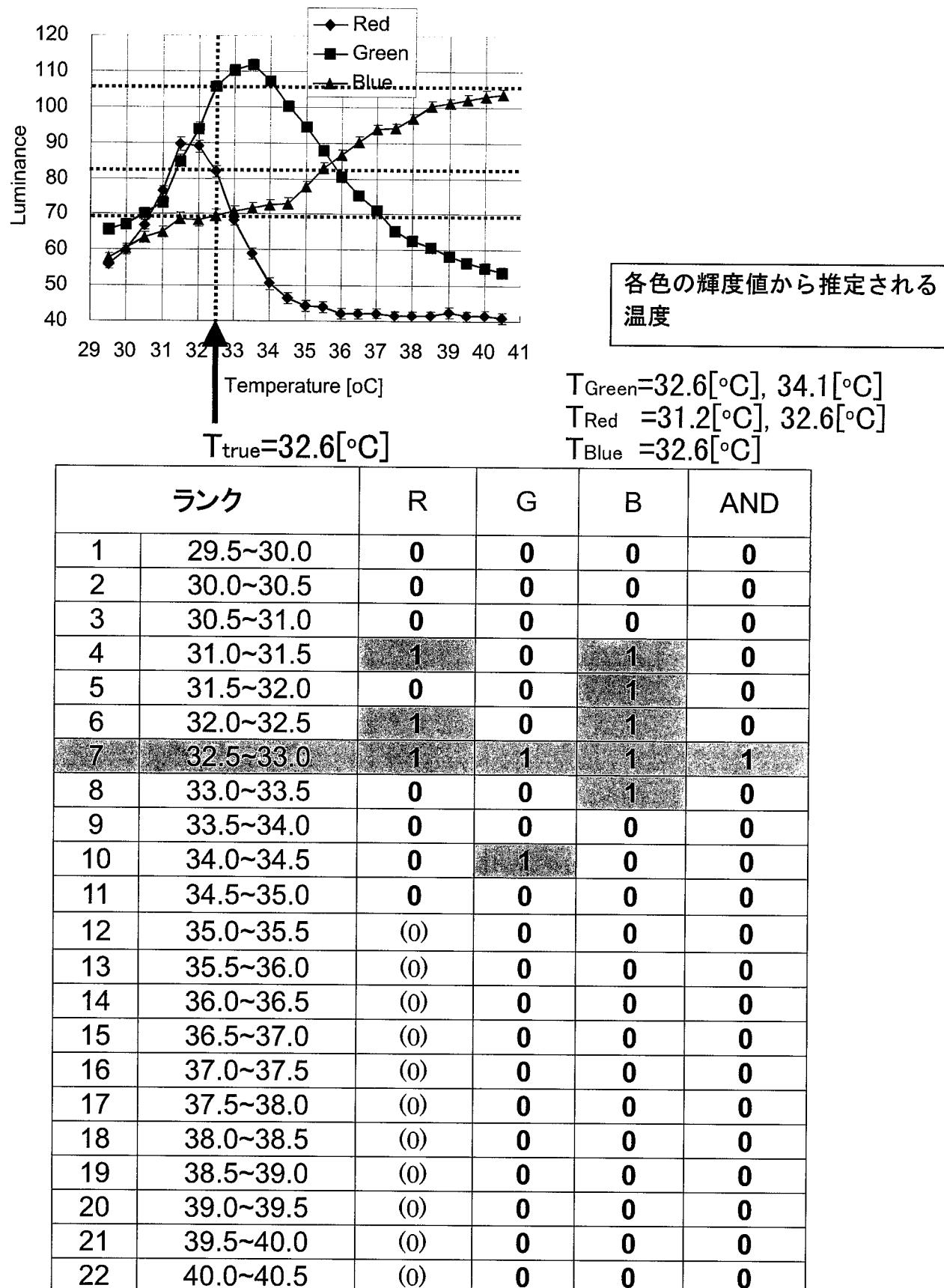


図3－7 RGB温度範囲の決定法

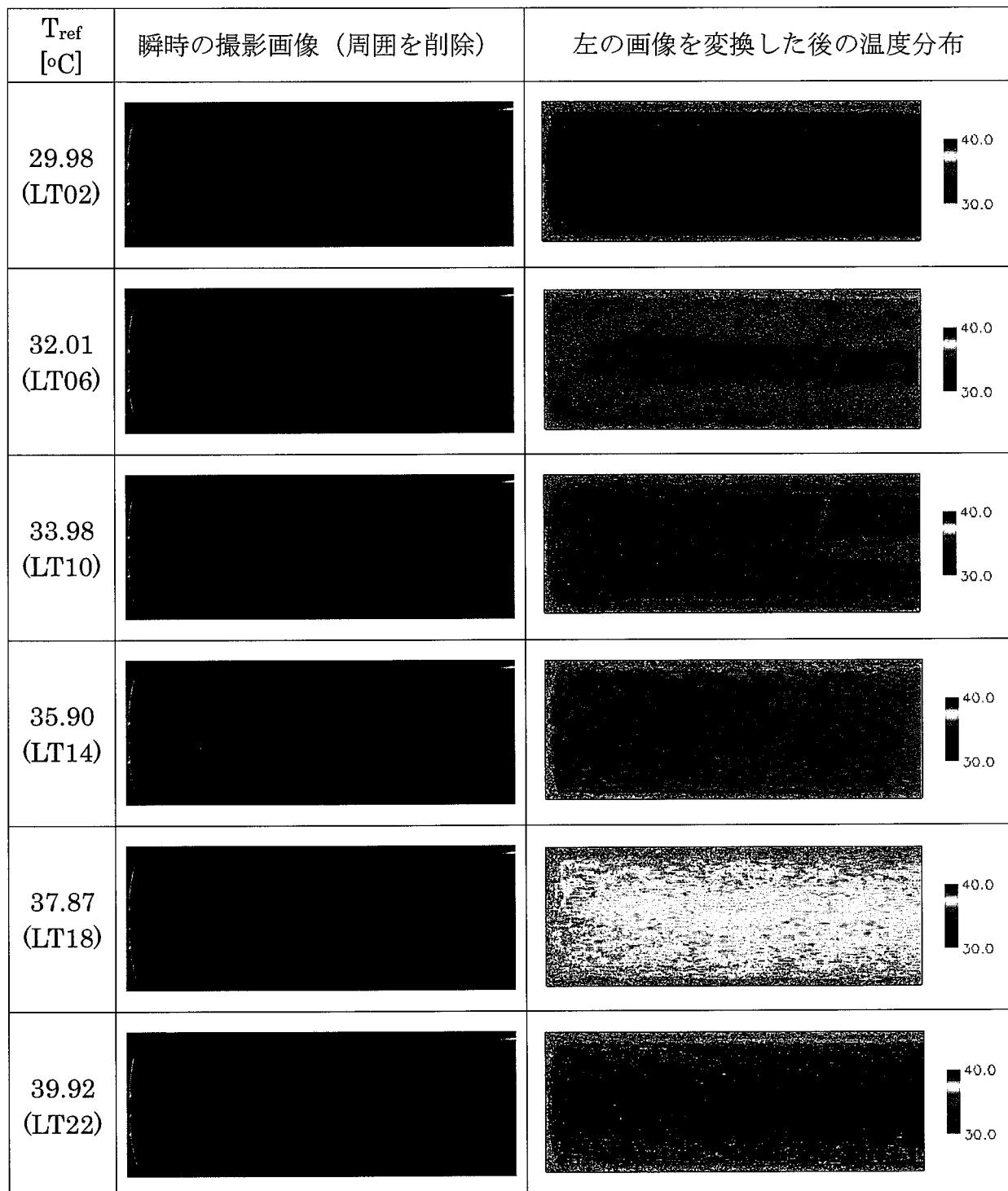


図3－8 溫度校正結果の一例（配管下面を撮影）

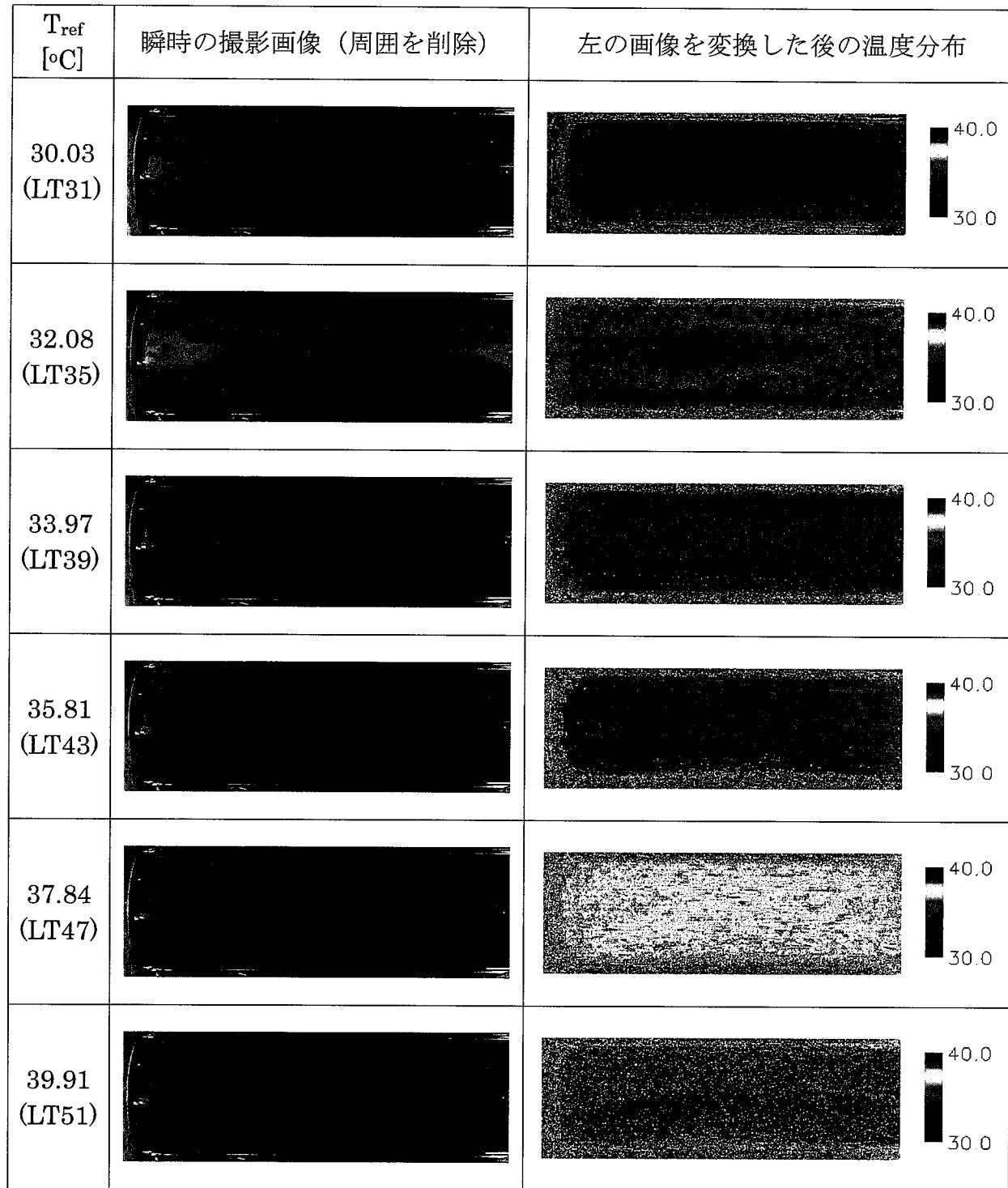


図 3-9 溫度校正結果の一例（配管上面を撮影）

第4章 溫度分布可視化試験

4. 1 試験条件

試験パラメータは、主配管と枝配管の（1）流体温度差、（2）断面平均流速比である。配管口径比は（主配管側内径 150[mm]）／（枝配管側内径 50[mm]）=3に固定されている。第1報^[3]では、染料を枝配管側バッファに注入し、Ar レーザビーム（出力約 1[W]）をシート状に広げたもの（レーザーシート）を光源として流れの断面を撮影し、枝配管噴流の挙動を可視化観察した。枝配管噴流可視化試験の結果、図1-2に示すように主／枝配管の運動量比により、（A）枝配管噴流が主配管中心を通過して反対側の壁面に衝突して下流に流れていく衝突噴流、（B）枝配管噴流が主配管中心部を主に流れる偏向噴流、（C）枝配管噴流は主配管の中心部まで到達するが、その下流で壁面に付着して流れる再付着噴流、（D）枝配管側の主配管壁面に沿って流れる壁面噴流、以上の4つの流動形態に分類できることを明らかにした。また、枝配管噴流は各流動形態で特異な挙動を示し、壁面に及ぼす温度変動特性が各流動形態で異なることを明らかにした。

表4-1に試験条件を示す。試験は枝配管流速 0.5[m/s]、1[m/s]、2[m/s]に対して主配管流速を 0.08[m/s]から 2.05[m/s]まで変化させて実施した。温度条件は主配管流入温度 40[°C]、枝配管流入温度 30[°C]としたが、コールドスポットの位置を明確にし、温度差の影響を調べるために、枝配管流入温度を 25[°C]として感温液晶シートの計測範囲を上回る温度差 15[°C]とした試験も実施した。試験中のカメラおよび照明等の位置は第3章で述べた通りで、温度校正試験と同様の方法で可視化画像を撮影した。撮影時間は約 2 分間（1 秒間 30 フレーム：画像－温度変換はこのうち 1 分間を使用）とした。時間平均温度および温度変動強度の評価には、画像データから温度データに変換した結果が、校正温度の範囲である 29.5[°C]から 40.5[°C]の範囲内にあるものを有効データとし、それ以外のものは異常値として評価から排除した。

4. 2 感温液晶シートによる温度分布測定結果

図4-1から図4-4に感温液晶シートによる可視化画像を温度データに変換した後の時間平均温度分布及び温度変動強度分布について示す。時間平均温度および温度変動強度は、以下の定義に従って主配管と枝配管の温度差で無次元化して示している。

$$T^* = \frac{T - T_{branch}}{T_{main} - T_{branch}} \quad (4)$$

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - T_{ave})^2}{N}} \quad (5)$$

$$T_{rms}^* = \frac{T_{rms}}{T_{main} - T_{branch}} \quad (6)$$

ここで、 T_{main} ：主配管温度、 T_{branch} ：枝配管温度、 T_{ave} ：時間平均温度、 N ：計測点数（1800点（60[s]））を示す。実験では枝配管の流速を固定して、主配管の流速を増加させた。枝配管噴流の流動形態は、主配管流速の増加に伴って、衝突噴流（図1-2領域A）から壁面噴流（図1-2領域D）へと移行する。

図4-1(1)から図4-1(3)に枝配管流速が1.0[m/s]、温度差15[°C]の場合について示す。主配管流速が増加する順に、試験ケース名はLC_23→LC_24→LC_25→LC_01→LC_02→LC_03→LC_04→LC_05→LC_06となる。

時間平均温度分布の結果から、LC_23（衝突噴流）のケースでは主配管上面に枝配管噴流からの低温流体によるコールド・スポットが形成されていることがわかる。温度変動強度はこのコールド・スポットの周辺で高い値を示している。LC_24（衝突噴流／偏向噴流）のケースではLC_23（衝突噴流）より主配管流速が速くなっているために、枝配管からの噴流が主配管上面に衝突する位置が下流側に移動している。しかし、LC_24（衝突噴流／偏向噴流）のケースではコールド・スポットを判別することができない。LC_25及びLC_01（偏向噴流）のケースは、同一の流動条件でそれぞれ上面から撮影したケースと下面から撮影したケースである。偏向噴流では、枝配管からの低温流体は主に主配管の中心部分を流れるが、LC_25（上面から撮影）とLC_01（下面から撮影）の時間平均温度分布を比較すると、LC_01（下面から撮影）における温度の方が低くなってしまい、温度変動強度分布に関してはLC_01（下面から撮影）の方が変動強度は大きくなっている。この原因としては、枝配管噴流の後方（下流側）に生じる後流域の影響と考えられ、偏向噴流では枝配管からの低温流体は主配管下面（枝配管接続側）から中心部にかけて流れるものと考えられる。LC_02（偏向噴流／再付着噴流）のケースでは、LC_01（偏向噴流）のケースより主配管下面での温度分布が明確に現れており、枝配管からの低温流体がより壁面付近を流れていることがわかる。また、温度変動強度は、LC_01に比べて、LC_02では、上下端部（図での位置）で変動が強く、中心部では弱いといった変動強度分布がより明確になっている。LC_03（再付着噴流）のケースでは、枝配管の近傍に低温部が現れており、枝配管噴流が壁面近傍を流れ、枝配管近傍と下流側とで流れ方向に比較的大きな温度勾配が生じていることがわかる。さらに主配管流速を増加させていくと、LC_04（再付着噴流／壁面噴流）のケースでは、低温部が明確に現れており、コールド・スポットの形成が考えられる。LC_05およびLC_06（壁面噴流）では、枝配管からの低温流体によるコールド・スポットが形成されている。温度変動強度は、衝突噴流条件と同様にコールドスポットの周辺で高い値を示している。同じ壁面噴流であって主配管流速条件の異なるLC_05とLC_06の結果を比較すると、主配管の流速が速くてもコールド・スポットの分布形状およびその広がり（面積）に変化が見られない。主配管の流

速が増加すれば、枝配管からの低温流体がより主配管下面に押しつけられるために、枝配管の流量が同じであれば、低温の領域（コールド・スポット）は下流方向へ伸びていくことが予想される。しかし、観測結果からはそのような傾向は見られず、コールド・スポットの分布形状の変化は見られなかった。本試験条件の範囲では、主配管流速の増加によって枝配管からの低温流体は主配管下面に押しつけられるが、同時に枝配管噴流の運動量が主配管の運動量に比べ相対的に小さくなり、強い主配管流れによって高温流体との混合が促進され、両方の効果がバランスした結果として分布形状の変化が見られなかったと考えられる。

衝突噴流条件（LC_23）と壁面噴流条件（LC_05 および LC_06）で形成されるコールド・スポットは、その周辺で温度変動強度が高くなっていることから、コールド・スポットの位置が変動していることが考えられる。感温液晶シートの撮影画像から、コールド・スポットが時間と共に不規則に流れ方向で左右に（図では上下に）移動していることを確認した。これは、サーマルストライピングにおける温度変動として従来から考えられていた配管構造材板厚方向の変動ではなく、配管構造材板厚方向を法線ベクトルとする主配管内壁面の温度変動を考慮しなければならないことを示している。

図4-2(1)から図4-2(3)に、運動量比と温度分布との関係を調べるために、図4-1に示したケースから枝配管の流速を 0.5[m/s]（図4-1のケースの半分）に変更し、運動量比と同じにして行った実験結果について示す（従って、主配管流速も半分になっている）。この場合、温度差は 15[°C]で変更はない。主配管流速が増加する順に、試験ケース名は LC_29→LC_30→LC_31→LC_13→LC_14→LC_15→LC_16→LC_17 となる。

図4-3から図4-4に、温度差の違いによる影響を調べるために、温度差を 10[°C]に変更した結果について示す。

図4-3(1)から図4-3(3)に枝配管流速が 1.0[m/s]、温度差 10[°C]の場合について示す。主配管流速が増加する順に、試験ケース名は LC_26→LC_27→LC_28→LC_07→LC_08→LC_09→LC_10→LC_11→LC_12 となる。

図4-4(1)から図4-4(2)に枝配管流速が 2.0[m/s]、温度差 10[°C]とした場合について示す。主配管流速が増加する順に、試験ケース名は LC_32→LC_33→LC_34→LC_18→LC_19→LC_20→LC_21 となる。ただし、枝配管流速を 2.0[m/s]とした場合では、壁面噴流条件となる試験境界条件を設定することができなかつたため再付着噴流／壁面噴流までの試験とした。

同じ運動量比の場合を比較すると、ほぼ同様の温度分布が得られていることがわかる。すなわち、今回実施した Re 数の範囲であれば、運動量比が等しければ絶対流速が異なっても枝配管噴流は同様の挙動を示し、時間平均温度および温度変動強度も同様の分布となることがわかった。

表 4 - 1 試験条件

Case	Flow region (Camera Position)	Momentum ratio M_m/M_b	Main pipe		Branch pipe				
			$Q_m[m^3/hr]$ ($U[m/s]$)	$T_m[^\circ C]$	$Q_b[m^3/hr]$ ($W[m/s]$)	$T_b[^\circ C]$			
CS_LC23	A (Above)	0.10	10.3 (0.16)	40.0	7.09 (1.0)	25.0			
CS_LC24	A/B(↑)	0.35	19.4 (0.30)						
CS_LC25	B (↑)	0.67	26.7 (0.42)						
CS_LC01	B (Below)								
CS_LC02	B/C(↑)	1.35	38.0 (0.60)						
CS_LC03	C (↑)	2.00	46.3 (0.73)						
CS_LC04	C/D(↑)	4.00	65.5 (1.03)						
CS_LC05	D (↑)	6.67	84.5 (1.33)						
CS_LC06		10.0	103.5 (1.63)						
CS_LC29	A (Above)	0.10	5.2 (0.08)	40.0	3.54 (0.5)	25.0			
CS_LC30	A/B(↑)	0.35	9.7 (0.15)						
CS_LC31	B (↑)	0.67	13.3 (0.21)						
CS_LC13	B (Below)								
CS_LC14	B/C(↑)	1.35	19.0 (0.30)						
CS_LC15	C (↑)	2.00	23.1 (0.36)						
CS_LC16	C/D(↑)	4.00	32.7 (0.51)						
CS_LC17	D (↑)	10.0	51.7 (0.81)						
CS_LC26	A (Above)	0.10	10.3 (0.16)	40.0	7.09 (1.0)	30.0			
CS_LC27	A/B(↑)	0.35	19.3 (0.30)						
CS_LC28	B (↑)	0.67	26.7 (0.42)						
CS_LC07	B (Below)								
CS_LC08	B/C(↑)	1.35	38.0 (0.60)						
CS_LC09	C (↑)	2.00	46.3 (0.73)						
CS_LC10	C/D(↑)	4.00	65.4 (1.03)						
CS_LC11	D (↑)	6.67	84.4 (1.33)						
CS_LC12		10.0	103.4 (1.63)						
CS_LC32	A (Above)	0.10	20.6 (0.32)	40.0	14.14 (2.0)	30.0			
CS_LC33	A/B(↑)	0.35	38.6 (0.61)						
CS_LC34	B (↑)	0.67	53.3 (0.84)						
CS_LC18	B (Below)								
CS_LC19	B/C(↑)	1.35	75.8 (1.19)						
CS_LC20	C (↑)	2.00	92.2 (1.45)						
CS_LC21	C/D(↑)	4.00	130.5 (2.05)						

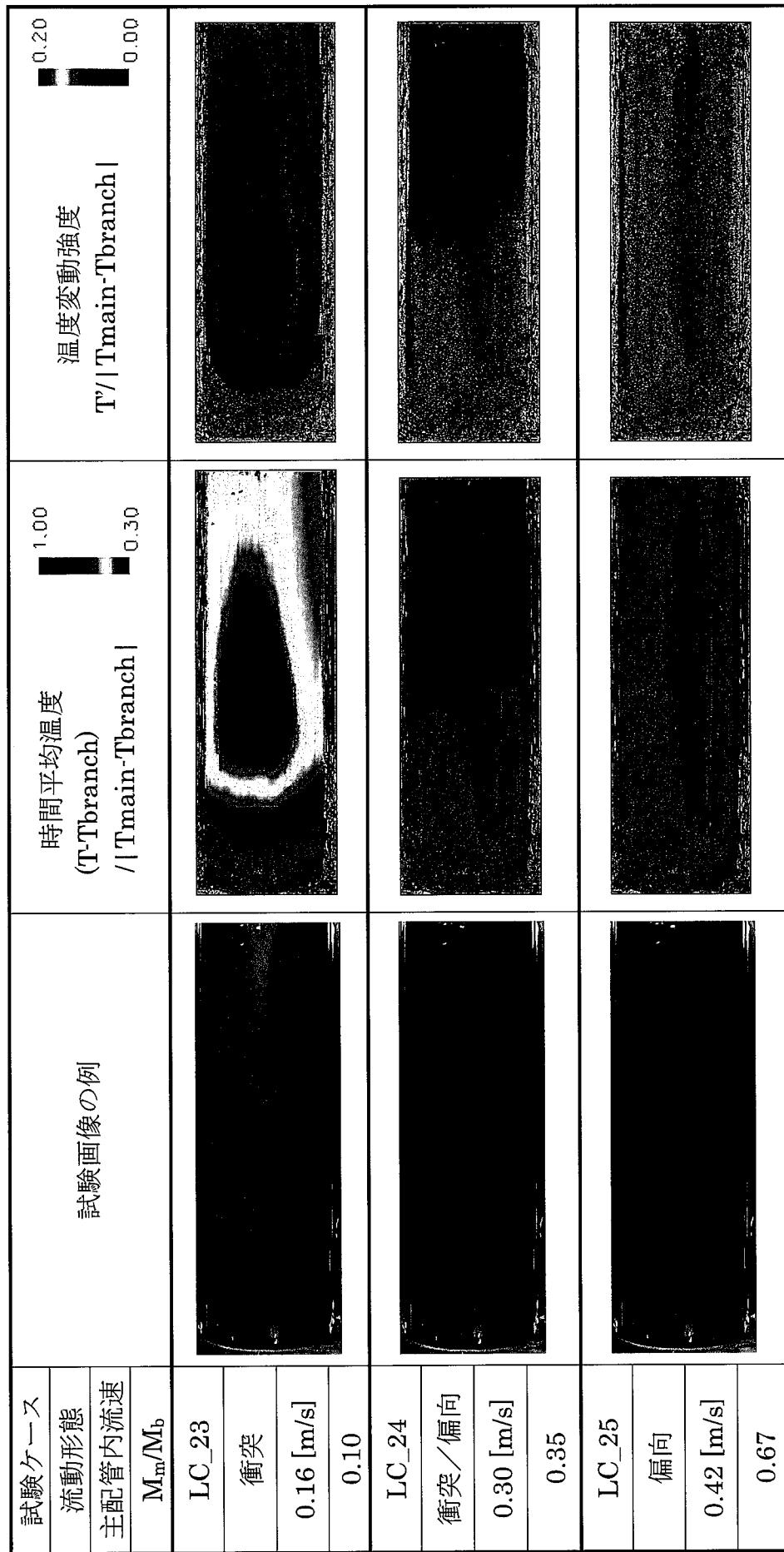


図 4-1 (1) 溫度変動可視化試験結果
(枝配管流速 : $W=1.0$ [m/s], 溫度差 : $\Delta T=15$ [°C])
(配管上面を撮影、計測範囲は合流点の上流側 $0.37D_m$ から下流側 $2.67D_m$)

試験ケース	試験画像の例	時間平均温度 (T-Tbranch)	時間平均温度 (T-Tbranch) / Tmain-Tbranch	温度変動強度 T' / Tmain-Tbranch
主配管内流速 M_m/M_b				
LC_01 偏向 0.42 [m/s] 0.67				
LC_02 偏向／再付着 0.60 [m/s] 1.35				
LC_03 再付着 0.73 [m/s] 2.00				

図4-1 (2) 溫度変動可視化試験結果
(枝配管流速: $W=1.0$ [m/s], 溫度差: $\Delta T=15$ [°C])
(配管下面を撮影、計測範囲は合流点の下流側 $0.65D_m$ から下流側 $3.4D_m$)

試験ケース	試験画像の例	時間平均温度 (T-Tbranch)	温度変動強度 $ T' - T_{main-Tbranch} $
流動形態		0.20	0.00
主配管内流速		0.30	0.00
M_m/M_b		0.40	0.00
LC_04		1.00	0.00
再付着／壁面		1.03 [m/s]	0.30
4.00		1.03 [m/s]	0.30
LC_05		1.33 [m/s]	0.30
壁面		1.33 [m/s]	0.30
6.67		1.33 [m/s]	0.30
LC_06		1.63 [m/s]	0.30
壁面		1.63 [m/s]	0.30
10.0		1.63 [m/s]	0.30

図 4-1 (3) 温度変動可視化試験結果
 (枝配管流速 : $W=1.0 \text{ [m/s]}$, 温度差 : $\Delta T=15 \text{ [^\circ C]}$)
 (配管下面を撮影、計測範囲は合流点の下流側 $0.65D_m$ から下流側 $3.4D_m$)

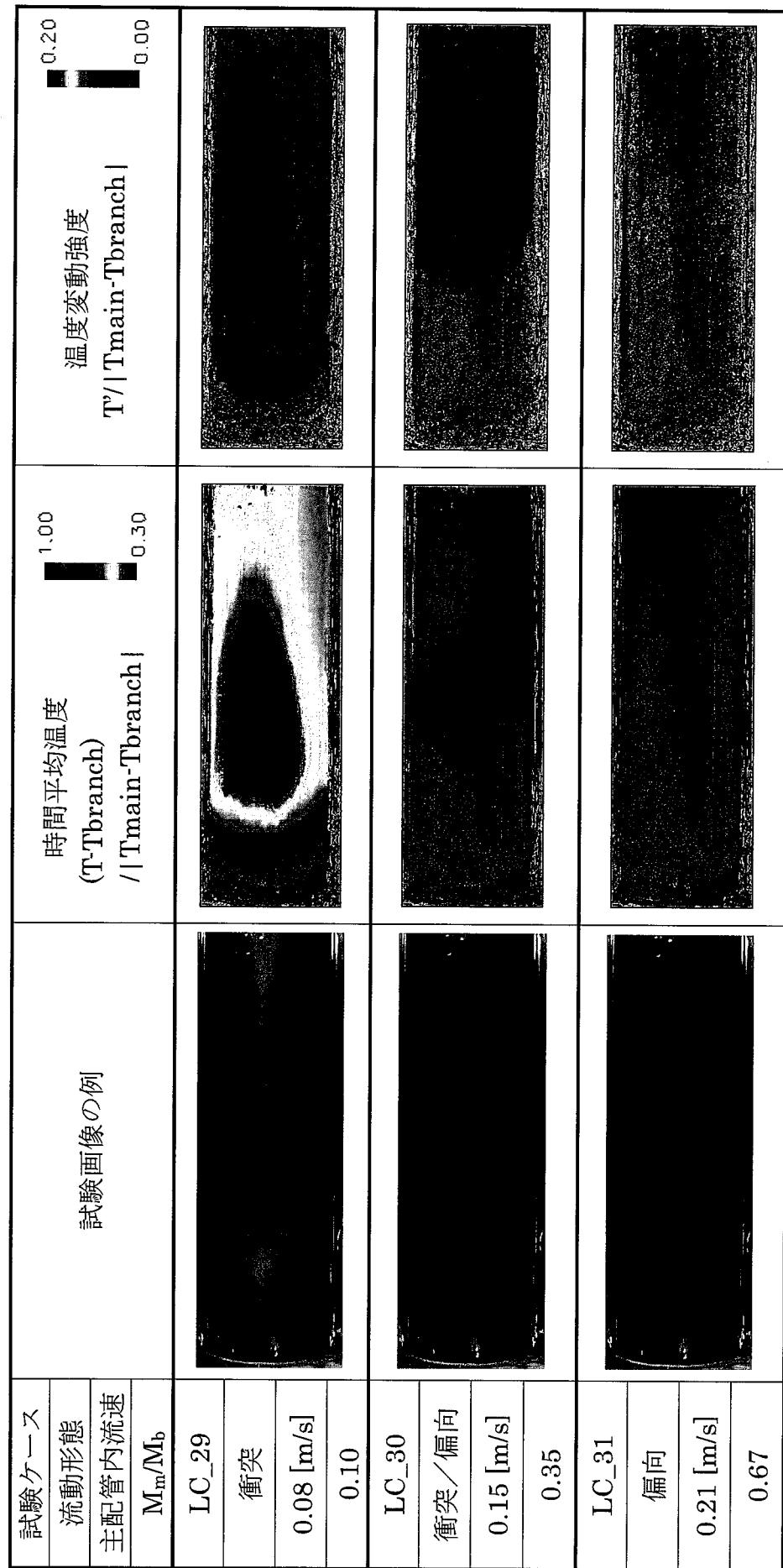


図4-2 (1) 溫度変動可視化試験結果
 (枝配管流速 : $W=0.5$ [m/s], 溫度差 : $\Delta T=15$ [°C])
 (配管上面を撮影、計測範囲は合流点の上流側 $0.37D_m$ から下流側 $2.67D_m$)

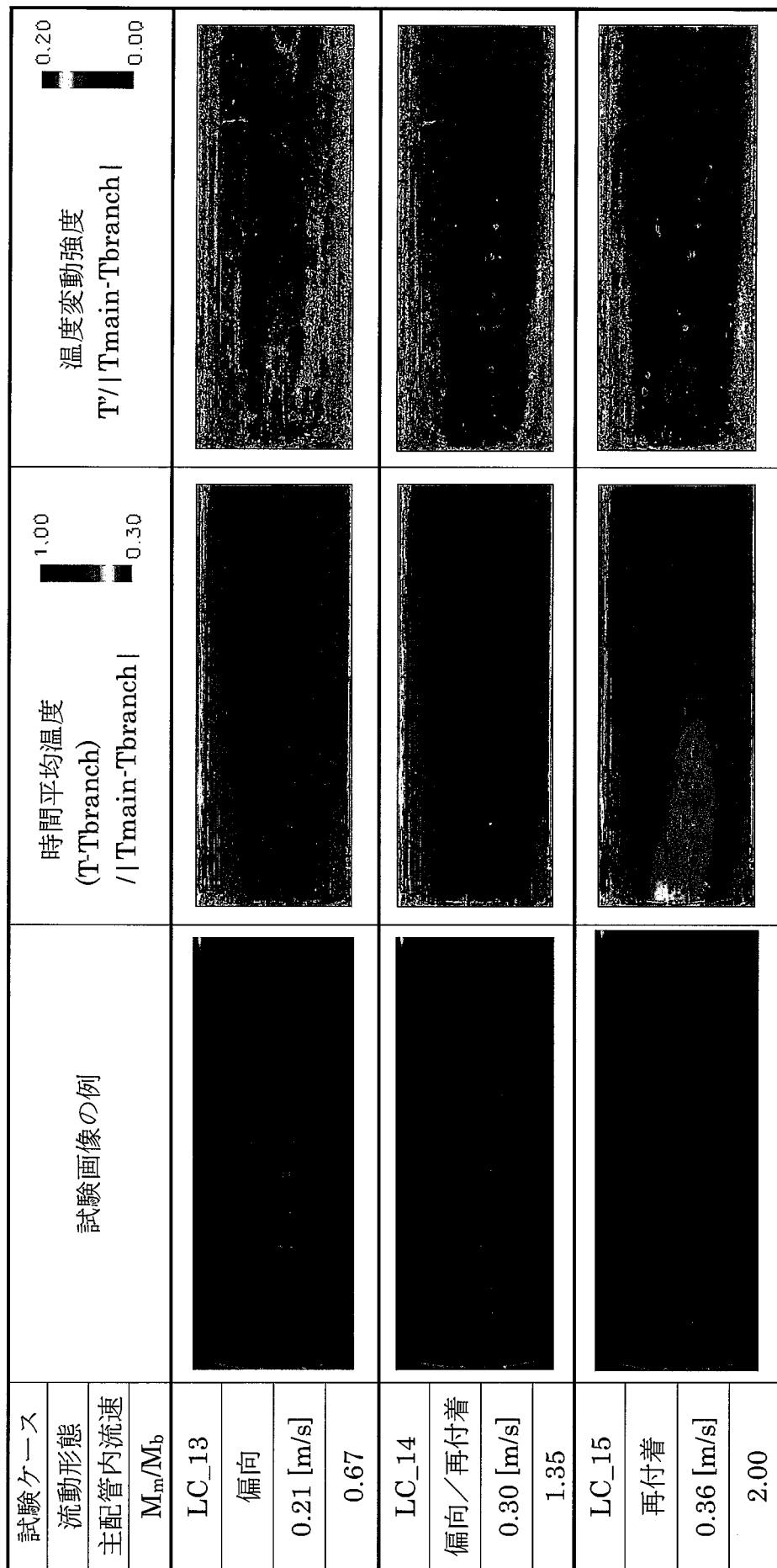


図4－2 (2) 溫度変動可視化試験結果
(枝配管流速 : $W=0.5 \text{ [m/s]}$, 溫度差 : $\Delta T=15 \text{ [}^{\circ}\text{C}]$)
(配管下面を撮影、計測範囲は合流点の下流側 $0.65D_m$ から下流側 $3.4D_m$)

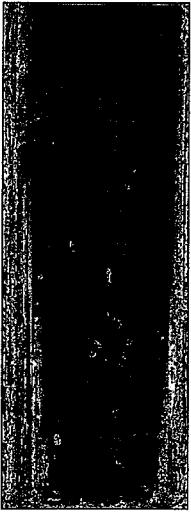
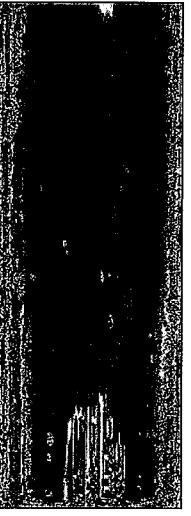
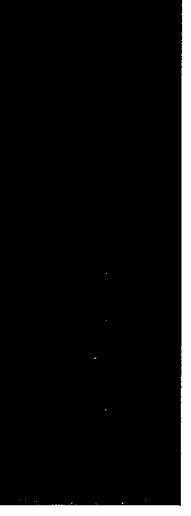
試験ケース	試験画像の例	時間平均温度 (T-Tbranch)	温度変動強度 $ T' / T_{main-Tbranch} $
流動形態			0.20 0.00
主配管内流速 M_m/M_b			
LC_16			1.00 0.30
再付着／壁面			
0.51 [m/s]			
4.00			
LC_17			
壁面			
0.81 [m/s]			
10.0			

図4－2 (3) 温度変動可視化試験結果
(枝配管流速 : $W=0.5$ [m/s], 溫度差 : $\Delta T=15$ [°C])
(配管下面を撮影、計測範囲は合流点の下流側 $0.65D_m$ から下流側 $3.4D_m$)

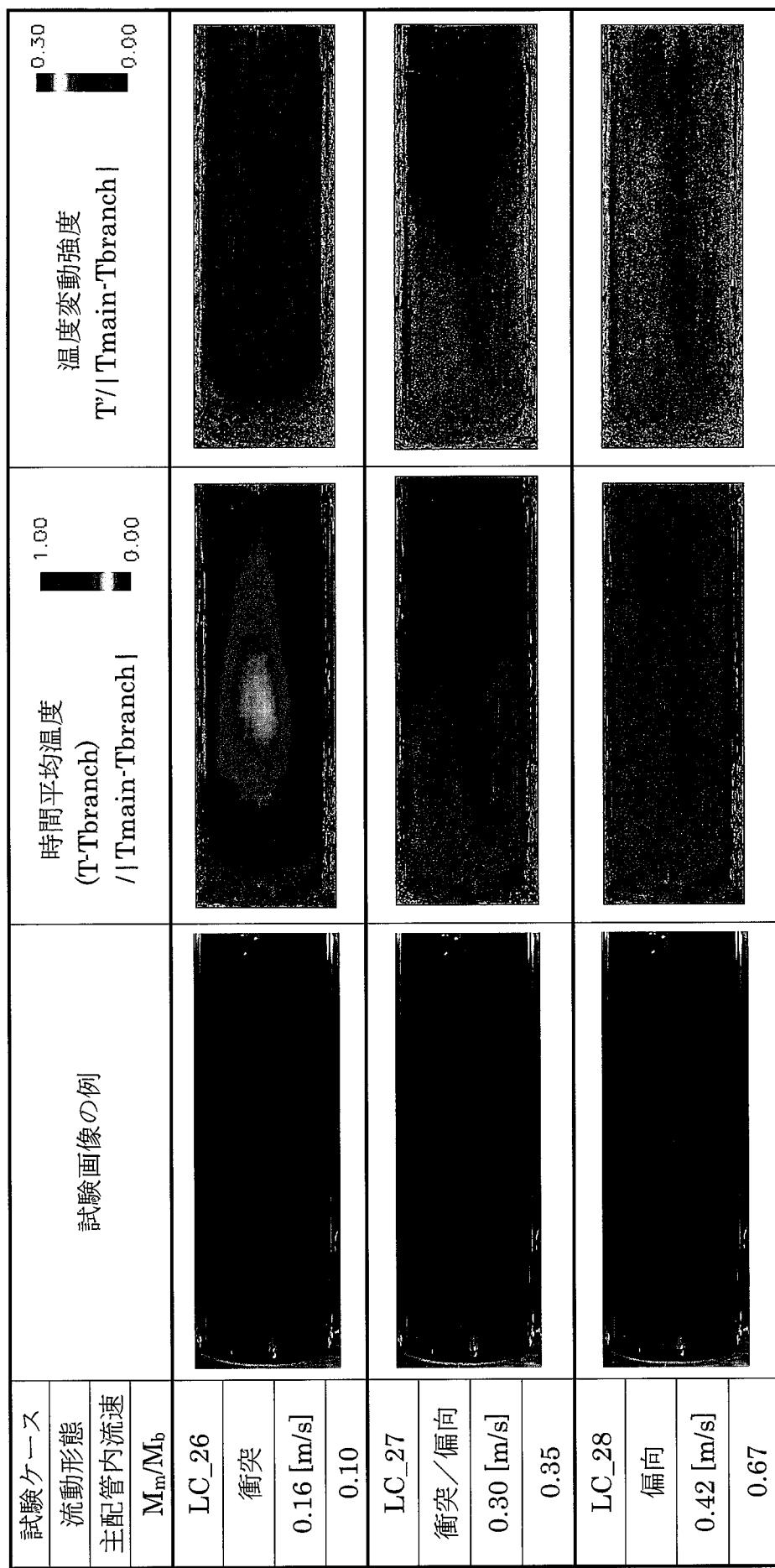


図 4-3 (1) 温度変動可視化試験結果
(枝配管流速 : $W=1.0 \text{ [m/s]}$, 温度差 : $\Delta T=10 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$)
(配管上面を撮影、計測範囲は合流点の上流側 $0.37D_m$ から下流側 $2.67D_m$)

試験ケース	試験画像の例	時間平均温度 (T-Tbranch)	温度変動強度 $ T' / T_{main-Tbranch} $
流動形態		1.00	0.30
主配管内流速		0.00	0.00
M_m/M_b			
LC_07			
偏向			
0.42 [m/s]			
0.67			
LC_08			
偏向／再付着			
0.60 [m/s]			
1.35			
LC_09			
再付着			
0.73 [m/s]			
2.00			

図4-3 (2) 温度変動可視化試験結果
(枝配管流速 : $W=1.0$ [m/s], 溫度差 : $\Delta T=10$ [°C])
(配管下面を撮影、計測範囲は合流点の下流側 $0.65D_m$ から 下流側 $3.4D_m$)

試験ケース	試験画像の例	時間平均温度 (T-Tbranch) / Tmain-Tbranch	時間平均温度 (T-Tbranch) / Tmain-Tbranch	温度変動強度 $T'/ T_{\text{main}}-T_{\text{branch}} $
流動形態				
主配管内流速				
M_m/M_b				
LC_10				
再付着／壁面				
1.03 [m/s]				
4.00				
LC_11				
壁面				
1.33 [m/s]				
6.67				
LC_12				
壁面				
1.63 [m/s]				
10.0				

図 4-3 (3) 温度変動可視化試験結果
(枝配管流速 : $W=1.0 \text{ [m/s]}$, 温度差 : $\Delta T=10 \text{ [^\circ C]}$)
(配管下面を撮影、計測範囲は合流点の下流側 $0.65D_m$ から下流側 $3.4D_m$)

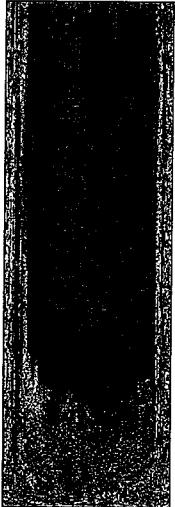
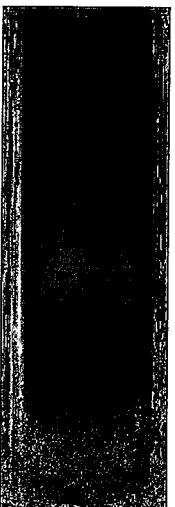
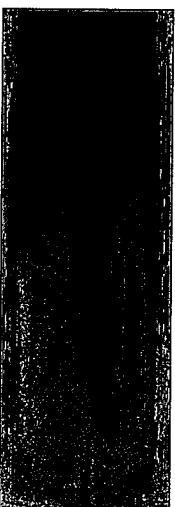
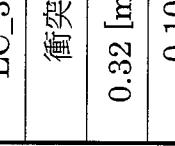
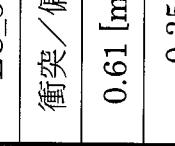
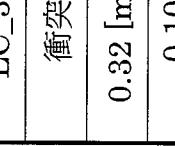
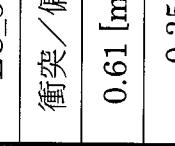
試験ケース	試験画像の例	時間平均温度 (T-Tbranch)	温 度 変 動 强 度 $ T' - T_{main-Tbranch} $
流動形態			0.30
主配管内流速 M_m/M_b			0.00
LC_32 衝突 0.32 [m/s]			
LC_33 衝突／偏 向 0.10			
LC_33 衝突／偏 向 0.61 [m/s]			
LC_18 偏 向 0.35			
LC_18 偏 向 0.84 [m/s]			
LC_18 偏 向 0.67			

図 4-4 (1) 温度変動可視化試験結果
(枝配管流速 : $W=2.0$ [m/s], 溫度差 : $\Delta T=10$ [°C])
(LC_32 よりび LC_33 : 配管上面を撮影、計測範囲は合流点の上流側 $0.37D_m$ から下流側 $2.67D_m$)
(LC_18 : 配管下面を撮影、計測範囲は合流点の下流側 $0.65D_m$ から下流側 $3.4D_m$)

試験ケース	試験画像の例	時間平均温度 (T-Tbranch)	時間変動強度 $ T - T_{main-Tbranch} $
流動形態		0.30	0.00
主配管内流速		0.00	0.00
M_{rm}/M_b		0.00	0.00
LC_19			
偏向／再付着			
1.19 [m/s]			
1.35			
LC_20			
再付着			
1.45 [m/s]			
2.00			
LC_21			
再付着／壁面			
2.05 [m/s]			
4.00			

図 4-4 (2) 溫度変動可視化試験結果
(枝配管流速 : $W=2.0$ [m/s], 溫度差 : $\Delta T=10$ [°C])
(配管下面を撮影、計測範囲は合流点の下流側 $0.65D_m$ から下流側 $3.4D_m$)

第5章 熱電対による測定結果との比較

図5-1から図5-6に、各噴流形態で代表的なケースの時間平均温度と温度変動強度について、熱電対を用いて測定した主配管内壁面における流体温度とを比較して示す。図の左側は時間平均温度分布であり、右側は温度変動強度を示している。熱電対による計測は、0.02[秒] (50[Hz]) の時間間隔で 120 秒間 (6000 点) 計測しており、感温液晶シートで計測不可能な高周波の温度変動も含んでいる。

図5-1に枝配管流速を 1.0[m/s]とした場合の主配管内表面の時間平均温度および温度変動強度の軸方向（主配管流れ方向）分布を示す。(a) 衝突噴流では主配管上面側、(b) 偏向噴流および(c) 再付着噴流、(d) 壁面噴流では主配管下面側にて比較した。また、図5-2には枝配管流速を 0.5[m/s]とした場合について示す。

図5-1 (a) および図5-2 (a) に示す衝突噴流のケースでは、熱電対と感温液晶との測定結果とで絶対値に差が見られるが、 $x=0.1[\text{mm}] \sim 0.3[\text{mm}]$ の範囲で時間平均温度に関して軸方向分布の傾向は一致している。温度変動強度は合流点 ($x=0.0[\text{mm}]$) の上流側で大きな値を示しており、下流側よりもコールド・スポットの前縁で大きな温度変動があり、注視すべき領域であることが分かる。図5-1 (b) および図5-2 (b) に示す偏向噴流では、時間平均温度分布は流れ方向にほぼ一定で変化は小さい。図5-1 (c) および図5-2 (c) に示す再付着噴流の場合と、図5-1 (d) および図5-2 (d) に示す壁面噴流の場合、感温液晶による測定では所々に温度変動強度のピークが見られる。これら温度変動のピークについては、再付着点あるいはコールド・スポットの後縁であることが考えられるが、感温液晶による測定では測定誤差が大きいことから必ずしも断定はできない。従って、実験解析から得られる流速分布や熱電対による温度分布測定結果等と併せて検討する。再付着噴流の場合と壁面噴流の場合では、時間平均温度分布に関して、 $x=0.2[\text{m}]$ から $0.5[\text{m}]$ にかけての温度勾配に差が見られる。再付着噴流よりも壁面噴流の方が温度勾配は急になっている。再付着噴流では、大きなスケールの渦により主配管側の高温流体が、枝配管噴流近傍の壁面に輸送されるため時間平均で評価した温度勾配は鈍ったものとなるが、壁面噴流では枝配管側の低温流体が壁面に沿って流れコールド・スポット後縁で急激に主配管流れと混合するため温度勾配は急峻になると考えられる。

ここで、コールド・スポットの定義について考える。コールド・スポットとは、直感的に、瞬時の温度分布で見た際に、周囲と大きな温度差のある低温の領域がある面積を占めて広がっている、その領域をいう。（領域内の温度が周囲に比べて高ければホット・スポットである。）感温液晶による温度変動可視化試験では、壁面噴流条件で、この領域が時間経過に対して継続的に形成され、流れ方向に対して垂直に（左右に）空間的に揺れ動く様子が観察された。枝配管噴流可視化試験および本温度変動可視化試験により、低温の枝配管噴流が壁面に沿って流れることにより、このコールド・スポットが形成されると考えられる。従って、時間平均温度分布において、周囲と大きな温度差のある低温の領域がある面積を占めて広がっている、その領域をコー

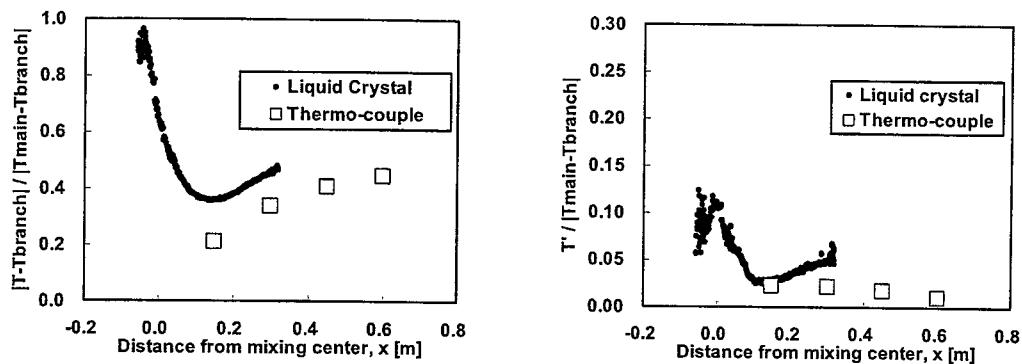
ルド・スポットの定義とする。ただし、ある一定の領域で空間的に一様に枝配管噴流が周期的に付着と離脱を繰り返すことによっても時間平均値では周囲と大きな温度勾配を持つ低温の領域が形成される。しかし、この場合、配管表面には枝配管側の低温流体 (T_{cold}) と主配管側の流体 (T_{hot}) とが交互に輸送されてくることから、時間平均温度はそれらの平均値に近い温度を示すことが考えられる。つまり、時間平均温度に枝配管側の流体温度に近い、ある適当なしきい値を設定することによって、コールド・スポットの発生の有無を確認することができる。

以上述べた枝配管噴流が壁面に沿って流れる場合が壁面噴流であり、枝配管噴流が周期的に付着と離脱を繰り返す場合が再付着噴流であったとも考えられる。しきい値については、熱電対による温度測定結果とも併せて検討する。

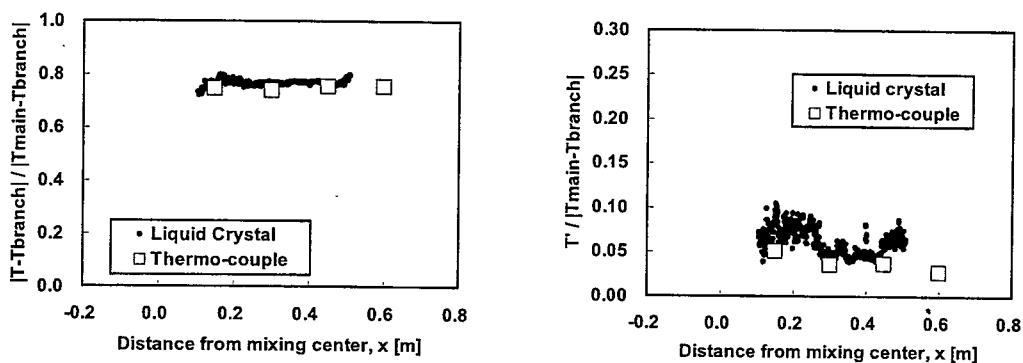
図5-3から図5-6に、温度変動特性の周方向分布について各噴流形態で代表的なケースにおける感温液晶シートの結果と主配管内壁面に設置した熱電対の結果とを比較して示す。横軸の $0[^\circ]$]は、(a) 衝突噴流のケースでは枝配管と反対側の主配管頂部を示しており、それ以外のケース (b) ~ (d) では枝配管が接続する主配管最下部を示している。図5-3および図5-4には合流部より $1.0D_m$ 下流側の分布を示し、図5-5および図5-6には合流部より $2.0D_m$ 下流側の分布を示す。

図5-3から図5-6における時間平均温度分布を比較すると、合流点から $1.0D_m$ および $2.0D_m$ 下流側での感温液晶シートによる測定結果と熱電対の結果とはほぼ同様の分布を示している。温度変動強度の分布は合流点から $1.0D_m$ 下流側（図5-1および図5-2）での感温液晶による測定結果はばらつきが大きいが、 $2.0D_m$ 下流側の結果は熱電対による測定結果とほぼ同様の分布を示している。時間平均温度の周方向分布に関しては、流動形態が (a) 衝突噴流から (d) 壁面噴流に移行するにつれ、低温の枝配管噴流が（枝配管側の）壁面に接するようになるため、枝配管後方の位置 ($0[^\circ]$]) 付近で、平坦な温度分布から次第にU字型の分布に変化し、横軸 $\pm 30[^\circ]$] から $\pm 60[^\circ]$] での温度勾配が次第に急になってくる。

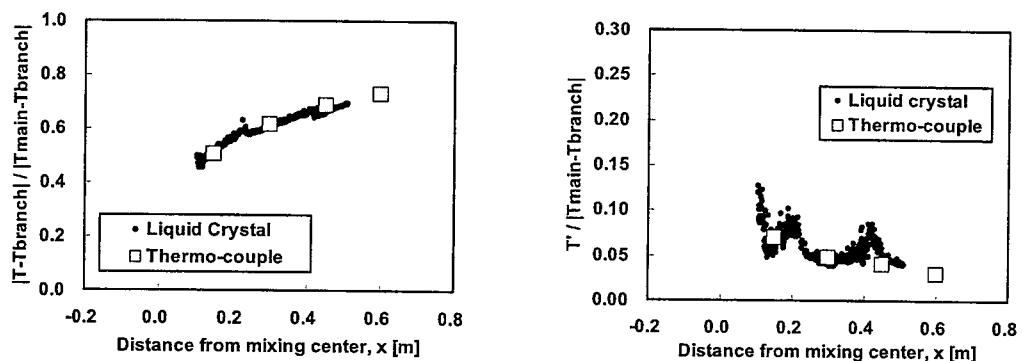
各ケースでの時間平均温度分布に関しては感温液晶の結果と熱電対による測定結果とはほぼ同様の傾向を示しており、感温液晶シートによる温度分布測定結果は、熱電対での粗い測定点間を補間するデータとして大変有用であることが分かる。また、温度変動強度については、流動形態によっては感温液晶による測定のバラつきが大きく定量的な評価が難しいケースもあるが、定性的な傾向とおおよその値を把握するには十分な結果が得られていると言える。これらの精度を向上するためには、付録A-2に示すように Hue 値を利用する方法の採用と撮影画像の質（照明を均一に当てるここと、色の変化が大きいことなど）を向上させることが必要である。



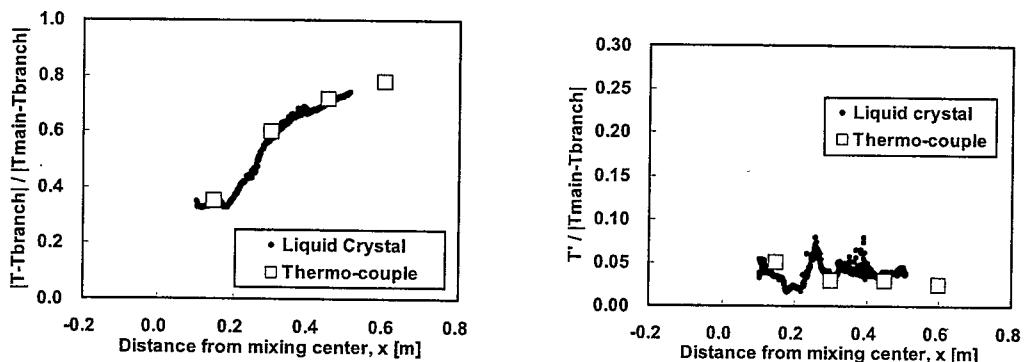
(a) 衝突噴流 (主配管流速 : $U=0.16[\text{m/s}]$)



(b) 側向噴流 (主配管流速 : $U=0.42[\text{m/s}]$)



(c) 再付着噴流 (主配管流速 : $U=0.73[\text{m/s}]$)

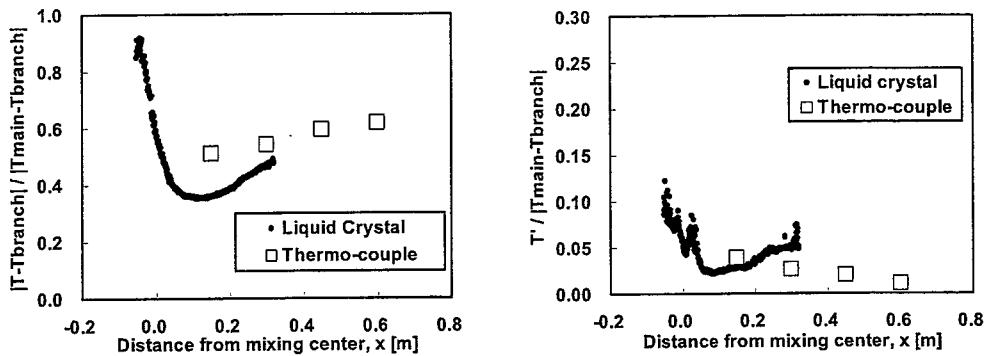


(d) 壁面噴流 (主配管流速 : $U=1.63[\text{m/s}]$)

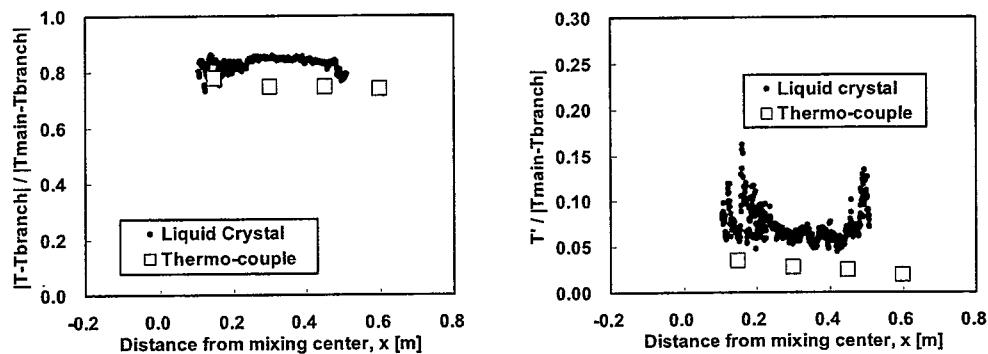
(時間平均温度)

(温度変動強度)

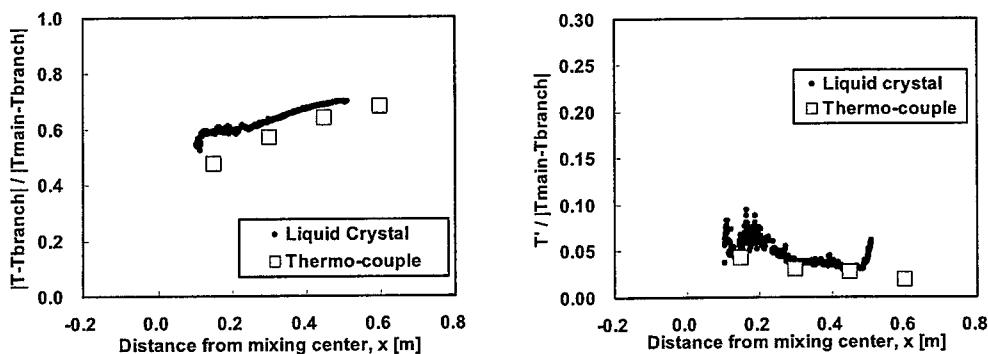
図 5-1 軸方向温度分布の比較 (枝配管流速 : $W=1.0[\text{m/s}]$)



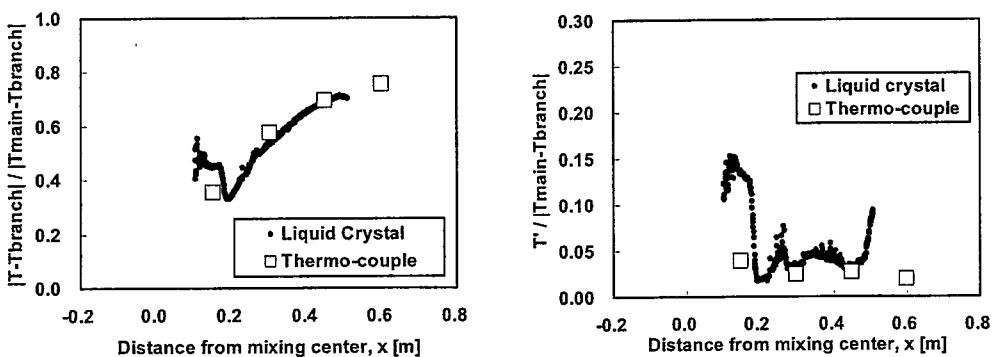
(a) 衝突噴流 (主配管流速 : $U=0.08[m/s]$)



(b) 偏向噴流 (主配管流速 : $U=0.21[m/s]$)



(c) 再付着噴流 (主配管流速 : $U=0.36[m/s]$)

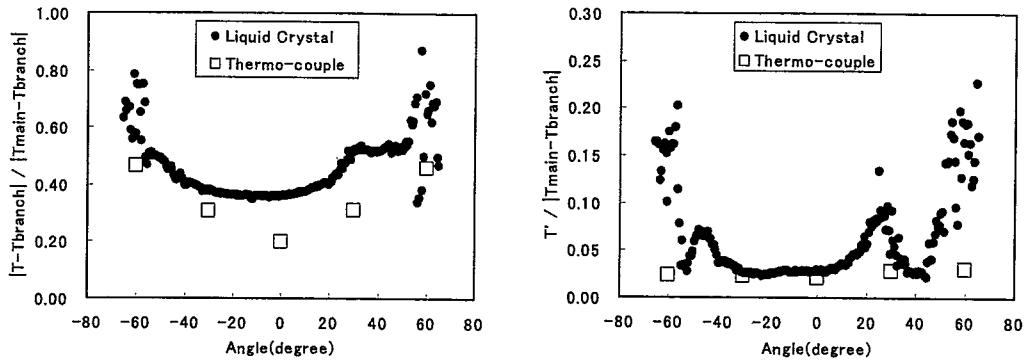
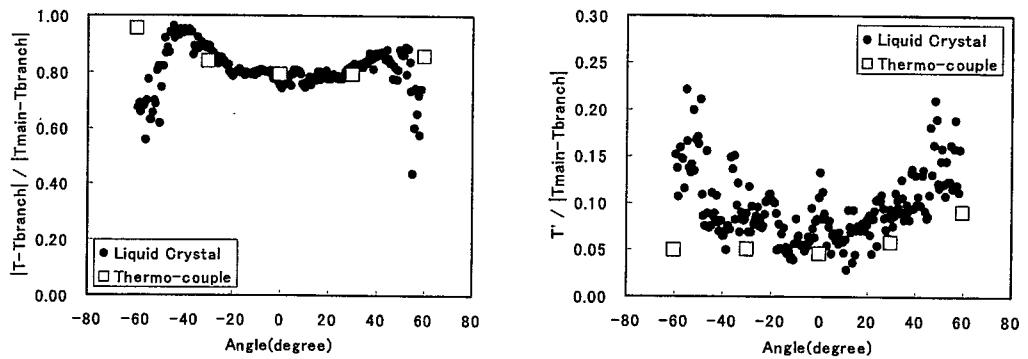
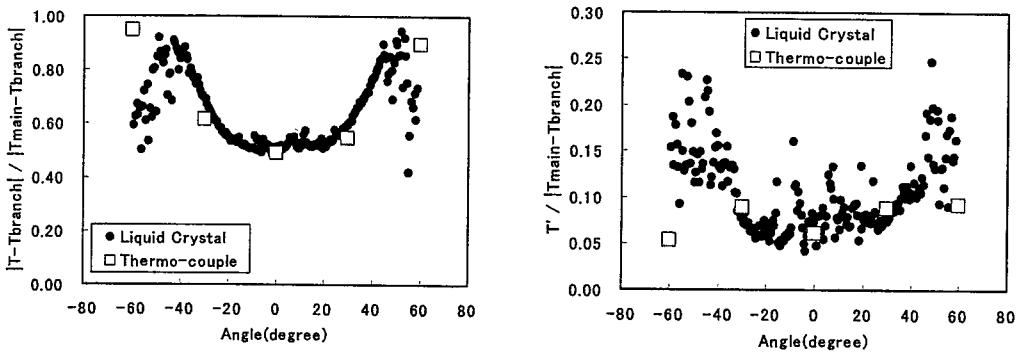
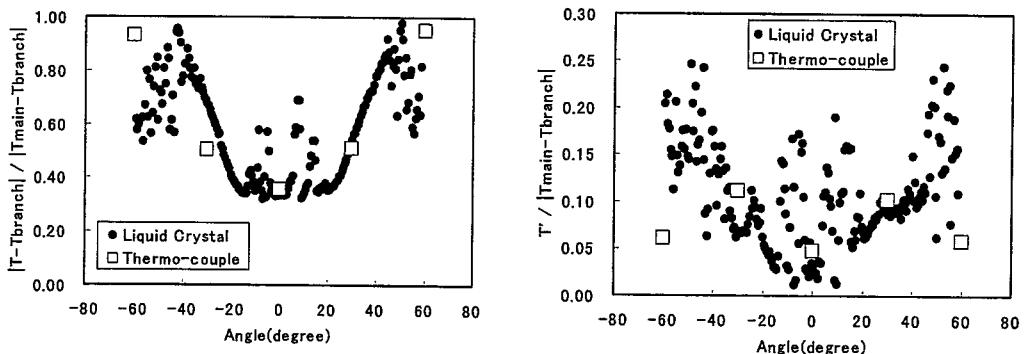


(d) 壁面噴流 (主配管流速 : $U=0.81[m/s]$)

(時間平均温度)

(温度変動強度)

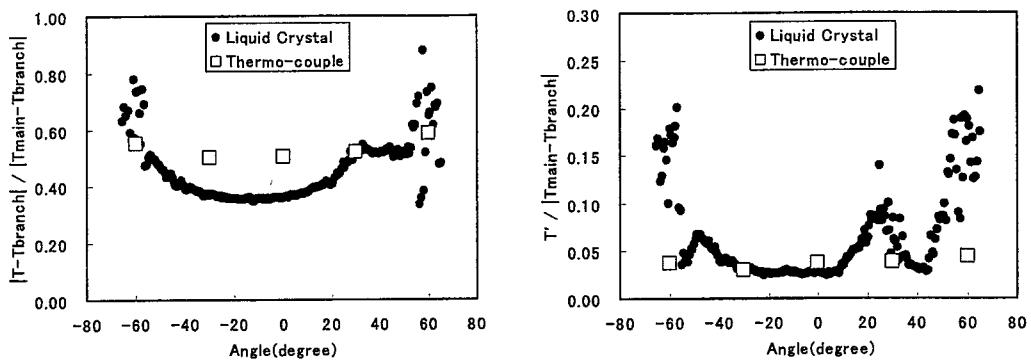
図 5-2 軸方向温度分布の比較 (枝配管流速 : $W=0.5[m/s]$)

(a) 衝突噴流 (主配管流速 : $U=0.16[\text{m/s}]$)(b) 偏向噴流 (主配管流速 : $U=0.42[\text{m/s}]$)(c) 再付着噴流 (主配管流速 : $U=0.73[\text{m/s}]$)(d) 壁面噴流 (主配管流速 : $U=1.63[\text{m/s}]$)

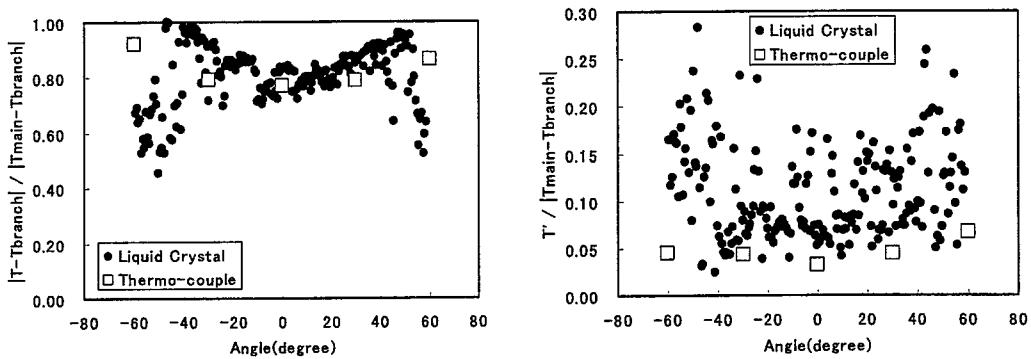
(時間平均温度)

(温度変動強度)

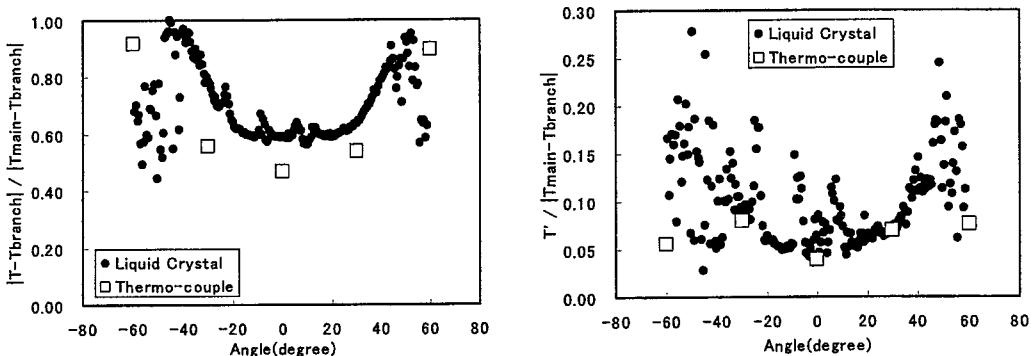
図 5-3 周方向温度分布の比較 (1.0D_m下流側, 枝配管流速 : W=1.0[m/s])



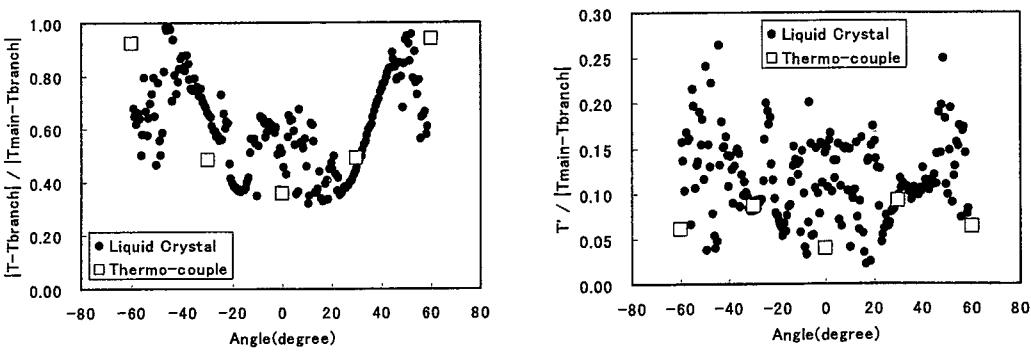
(a) 衝突噴流 (主配管流速 : $U=0.08[\text{m/s}]$)



(b) 偏向噴流 (主配管流速 : $U=0.21[\text{m/s}]$)



(c) 再付着噴流 (主配管流速 : $U=0.36[\text{m/s}]$)

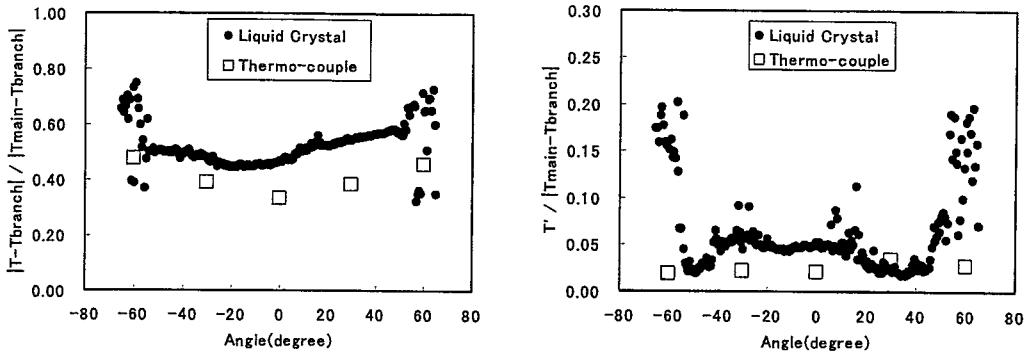


(d) 壁面噴流 (主配管流速 : $U=0.81[\text{m/s}]$)

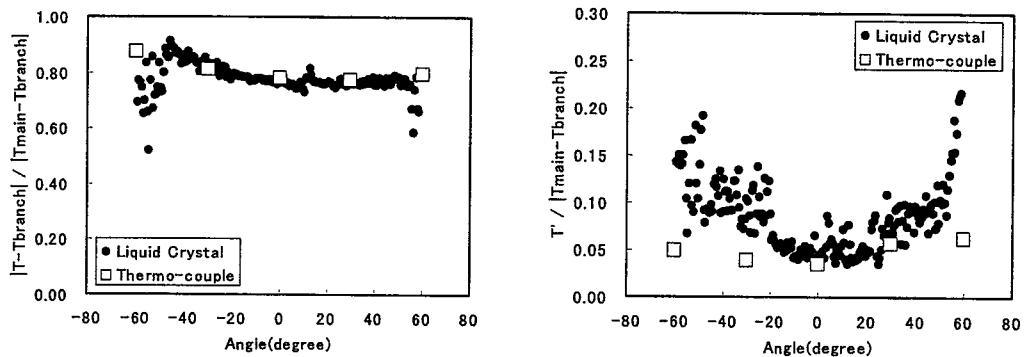
(時間平均温度)

(温度変動強度)

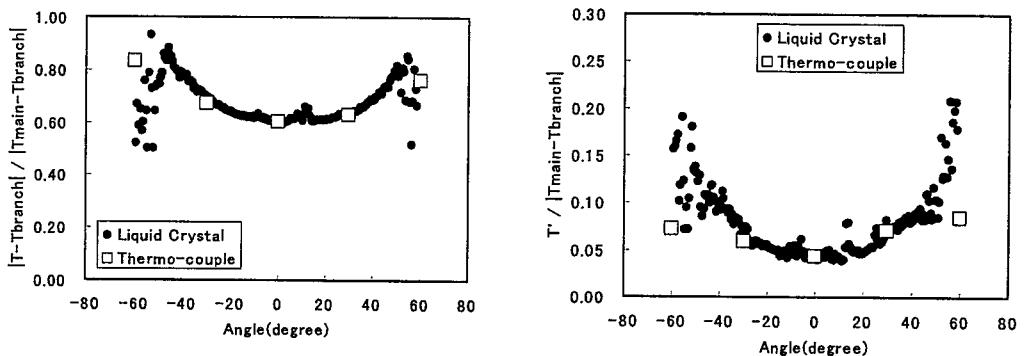
図 5-4 周方向温度分布の比較 (1.0D_m下流側, 枝配管流速 : W=0.5[m/s])



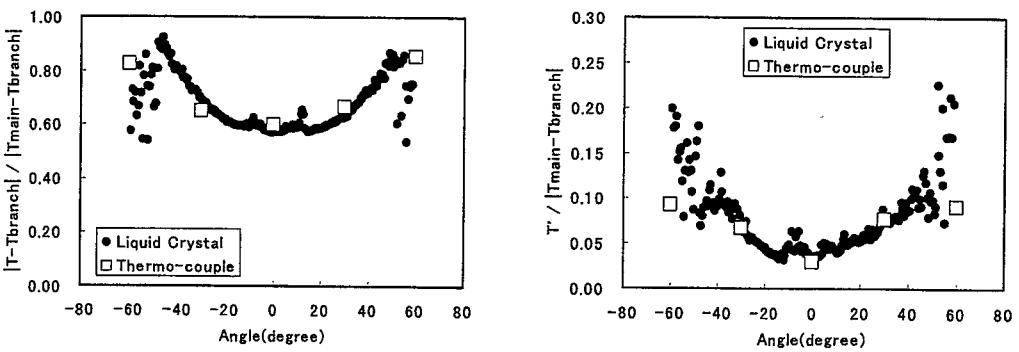
(a) 衝突噴流 (主配管流速 : $U=0.16[\text{m/s}]$)



(b) 偏向噴流 (主配管流速 : $U=0.42[\text{m/s}]$)

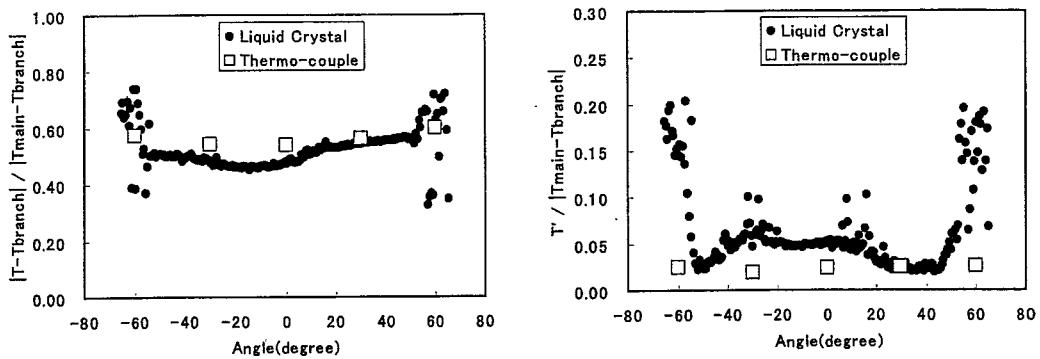


(c) 再付着噴流 (主配管流速 : $U=0.73[\text{m/s}]$)

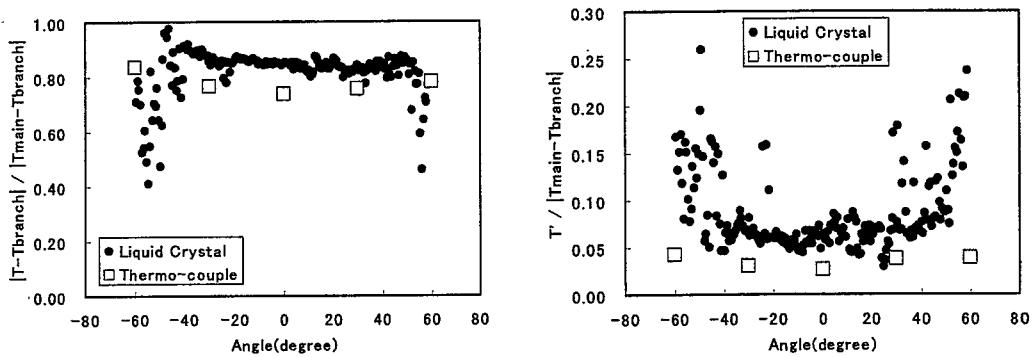


(d) 壁面噴流 (主配管流速 : $U=1.63[\text{m/s}]$)
(時間平均温度) (温度変動強度)

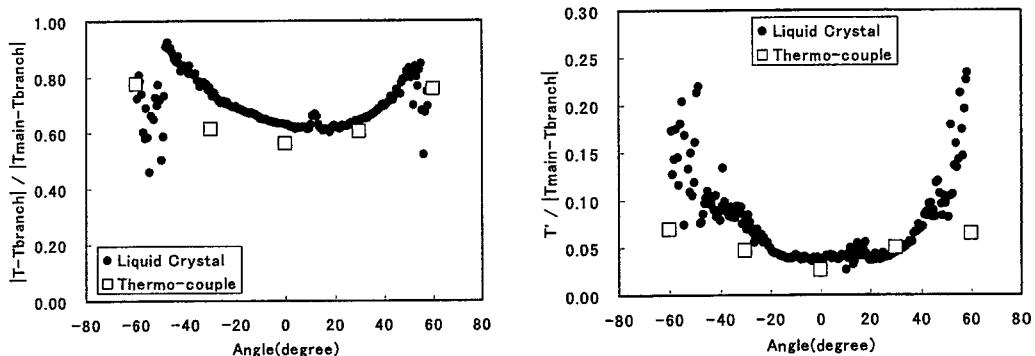
図 5-5 周方向温度分布の比較 (2.0D_m 下流側, 枝配管流速 : W=1.0[m/s])



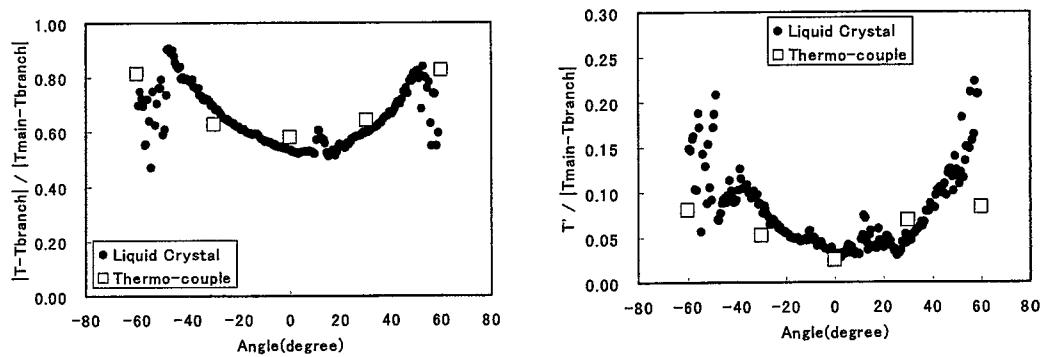
(a) 衝突噴流 (主配管流速 : $U=0.08[m/s]$)



(b) 偏向噴流 (主配管流速 : $U=0.21[m/s]$)



(c) 再付着噴流 (主配管流速 : $U=0.36[m/s]$)



(d) 壁面噴流 (主配管流速 : $U=0.81[m/s]$)

(時間平均温度)

(温度変動強度)

図 5-6 周方向温度分布の比較 (2.0D_m下流側, 枝配管流速 : W=0.5[m/s])

第6章 おわりに

配管合流部における主配管内表面の温度分布の空間変動特性を調べるため、感温液晶シートを用いて温度変動分布の可視化試験を行った。

- (1) 感温液晶シートの色データから温度データへの変換方法について検討し、局所的に輝度－温度特性曲線を補間して温度を求める方法を考案した。本手法では、各ピクセルの赤「R」、緑「G」および青「B」の各色に対して、それぞれの色の輝度値が含まれる参考温度範囲（ランク）を判別し、「R」、「G」、「B」に対して共通する温度範囲を同定する（論理和を取る方法）ことにより、輝度値に対して温度が2価の関数であっても、求めるべき温度範囲を決定することができる。実際に撮影した画像を用いて画像データ（色データ）を温度データへ変換し、誤差評価を行ったところ、本試験で用いた感温液晶シートでは、温度校正範囲で平均約 $\pm 2[^\circ\text{C}]$ であった。この誤差は、測定対象範囲を配管中心部に限定する、評価対象とする温度範囲を限定する、あるいは色相（Hue）値の採用などの対策により改善することができる。
- (2) 上記手法を用いて温度データへ変換した感温液晶シートによる温度測定結果と配管壁面に設置した熱電対による温度測定結果との比較を実施した。この結果、感温液晶シートを用いた温度測定結果は熱電対による温度測定結果とは、ほぼ同様の分布を示していることが確認され、感温液晶シートを用いた温度測定は、熱電対による粗な空間分布を補間する手段として大変有用であることが確認できた。
- (3) 感温液晶シートを用いた温度分布測定により、衝突噴流のケースでは主配管上面に、また、壁面噴流では主配管下面に枝配管からの低温噴流によるコールド・スポットが生成されることがわかった。温度変動強度は、コールド・スポットの境界（周囲）で高い値を示していることがわかった。なお、コールド・スポットとは、時間平均温度分布において、周囲と大きな温度差のある低温の領域がある面積を占めて広がっているとき、その領域を指す。
- (4) 枝配管噴流によって形成されるコールド・スポットは、衝突噴流のケースでは主配管流速が増加するに従って、位置は主配管下流側にシフトし、やがて消滅する（偏向噴流に移行）。一方、壁面噴流のケースでは、本実験条件の範囲では、主配管流速の増加に伴うコールド・スポットの形状および位置の変化は小さく、ほぼ一定の領域で観察された。

謝 辞

本研究にあたり、試験の実施に多大な協力をしていただきました常陽産業（株）伊藤真美氏、小沼英良氏および関根正氏に感謝いたします。

参考文献

- [1]村松壽晴、他：“サーマルストライピングに関する研究の現状と今後の研究開発”、JNC TN9400 2000-010、(2000)
- [2]上出英樹、木村暢之：“噴流間混合における温度変動特性に関する研究”、日本機械学会 2001 年度年次大会、福井、2001.9、講演資料集 Vol.VII F07-2-(4)、(2001)
- [3]川村慎一：“配管合流部での高低温水混合による荷重評価”、日本機械学会 2001 年度年次大会、福井、2001.9、講演資料集 Vol.VII F07-2-(2)、(2001)
- [4]守屋祥一：“閉塞分岐管の熱成層による熱荷重評価”、日本機械学会 2001 年度年次大会、福井、2001.9、講演資料集 Vol.VII F07-2-(3)、(2001)
- [5]配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針、日本機械学会、(2003)
- [6]五十嵐実、他：“配管合流部の混合現象に関する研究 —可視化試験結果と予測解析—”、JNC TN9400 2001-0124、(2000)
- [7]五十嵐実、他：“配管合流部の混合現象に関する研究 —流体内温度測定試験結果—”、JNC TN9400 2002-026、(2002)
- [8]Fergason, J. L., Appl. Optics, 7-9, p.1729, (1968)
- [9]横堀誠一、他：“二次元衝突噴流のよどみ領域における乱流輸送機構に関する研究”、日本機械学会論文集、49 卷 441 号、p.1029～1039、(1983)
- [10]入谷陽一郎、他：“強制対流平板乱流教会葬における輸送機構に関する研究”、日本機械学会論文集、48 卷 435 号、p.2284～2293、(1982)
- [11]Ozawa,M.、Kawamoto,A.、Int. J. Heat Mass Transfer, 34(12), p.3083、(1991)
- [12]小澤守、他：“カラー画像処理を援用した感温液晶シートによる非定常温度計測”、日本冷凍協会論文集、Trans. of the JAR, Vol.10, No.1, p.49～56、(1993)
- [13] 木村一郎、他：“感温液晶を用いた温度場の画像計測（ニューラルネットワークによる色／温度変換特性の改善）”、可視化情報、Vol.12, Suppl.No.1, p.7～10、(1992)
- [14]松田寿、他：“色空間補間を用いた感温液晶温度同定法”、第 33 会日本伝熱シンポジウム、講演論文集、Vol.III, p.871～872、(1996)

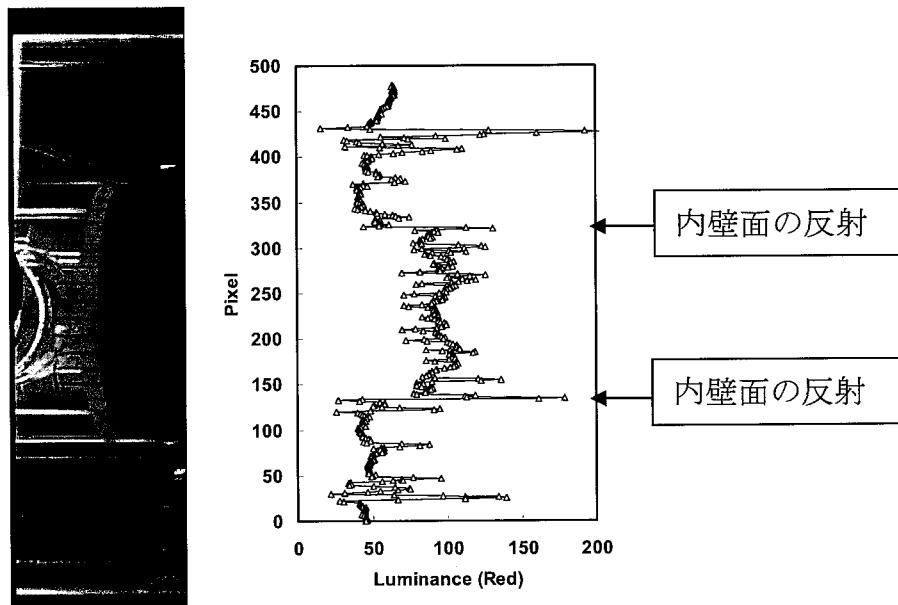
付 錄

- A-1 可視化試験における配管の曲率の影響
- A-2 色相（Hue 値）を用いた温度変換方法

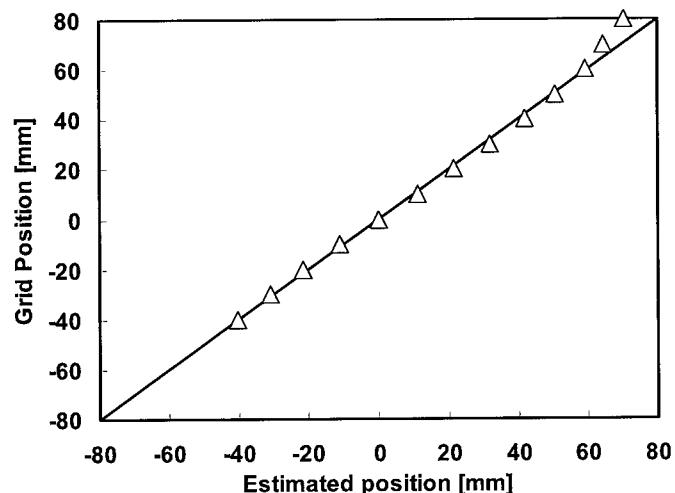
A-1 可視化試験における配管の曲率の影響

可視化試験において、配管内の流れ場を側面から観察する際には、配管の曲率の影響を緩和するため、配管の外側に水（配管内と同じ液体）を満たした矩形ジャケット（Water Jacket）を設置することが一般的である。これにより、配管のレンズ効果が緩和され、壁面近くを観測することが容易になる。しかしながら配管の上下端部では Water Jacket を用いたとしても曲率の影響を取り除くことはできない。

そこで、図A-1に示すように配管内面に感温液晶シートと同様に格子線を書いた透明シートを貼り付け、その格子線の間隔を読みとることにより、曲率の影響を調べた。その結果を図A-2に示す。本試験の場合、配管の約80%までは曲率の影響はないが、それよりも端部では曲率の影響から観察することが困難であることがわかった。



図A-1 格子線の貼り付け位置と輝度分布（赤色）



図A-2 推定位置と実位置との比較
(配管内径 150[mm])

A-2 色相 (Hue 値) を用いた温度変換方法

本文中の第3章で述べた温度変換手法により画像データ(色データ)から、赤「R」、緑「G」、青「B」の3色を用いて温度データに変換した場合、変換誤差は土約2[°C]と見積もられており、精度が高いとは言えない。これを改善する方法として、色相(Hue 値)を用いる場合を比較、検討した。色相とは図A-3に示すように「赤」～「緑」～「青」～「赤」の順番に色を並べた色相環として知られている。また、図A-4に示すように3原色(「R」、「G」、「B」)を座標軸にとった色空間上で表すことができる。色空間の(1, 1, 1)面と色ベクトル $Q=(R, G, B)$ の交点 $q=(r, g, b)$ の座標を色度座標と呼び、次式で与えられる。

$$r = \frac{R}{R+G+B} \quad g = \frac{G}{R+G+B} \quad b = \frac{B}{R+G+B}$$

この(1, 1, 1)面は色三角形と呼ばれており、重心は $w=(1/3, 1/3, 1/3)$ となる。赤を基準とする場合、 $w-R$ 線のベクトルを基準とし、そこから測った $w-q$ 線のベクトルの角度がHue 値(赤色基準)となる。

$$\vec{V}_1 = \left(r - \frac{1}{3}, g - \frac{1}{3}, b - \frac{1}{3} \right), \quad \vec{V}_2 = \left(1 - \frac{1}{3}, -\frac{1}{3}, -\frac{1}{3} \right)$$

$$H_R = \cos^{-1} \frac{2r-g-b}{\sqrt{6c^2}} \quad (b \leq g), \quad H_R = -\cos^{-1} \frac{2r-g-b}{\sqrt{6c^2}} \quad (b > g)$$

$$c = \sqrt{\left(r - \frac{1}{3}\right)^2 + \left(g - \frac{1}{3}\right)^2 + \left(b - \frac{1}{3}\right)^2}$$

同様に、緑色および青色を基準とするとHue 値は以下となる。

$$H_G = \cos^{-1} \frac{-r+2g-b}{\sqrt{6c^2}} \quad (r \leq b), \quad H_G = -\cos^{-1} \frac{-r+2g-b}{\sqrt{6c^2}} \quad (r > b)$$

$$H_B = \cos^{-1} \frac{-r-g+2b}{\sqrt{6c^2}} \quad (g \leq r), \quad H_B = -\cos^{-1} \frac{-r-g+2b}{\sqrt{6c^2}} \quad (g > r),$$

図A-5に温度校正試験時に撮影した画像の中心位置におけるHue 値の温度変化を示す。Hue 値は図A-4において各基準色から時計方向に土πとした。比較のため本文中の図3-6で示した輝度の温度変化も併せて示す。輝度値の場合は温度変化に伴って連続的に滑らかに変化するが、Hue 値の場合は、角度の定義にもよるが、値が不連続になる箇所がある。このような箇所での変換は誤差を生じる要因になる。さらに、赤色、緑色および青色を基準とした場合のHue 値のいずれも、全温度範囲で温度と一对一に対応しておらず、ある一つのHue 値に対して温度値を2つ持つ場合がある。Hue 値を利用する場合でも、「R」、「G」、「B」各色を基準とした3つのHue 値あるいは「R」、「G」、「B」各色の輝度値から本報で提案した温度範囲の場合分けを行い、共通する温度範囲を求める作業は必要である。この作業を行わない場合には、1対1の対応となる温度範囲でのみ計測が許されるため、測定可能な温度範囲を狭め

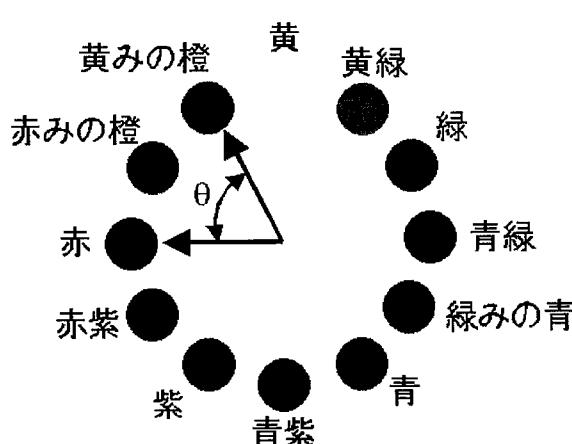
てしまうことになる。以下では、本報で構築した手法を適用し、画像から得られる「R」、「G」、「B」各色の輝度値により温度区分の範囲を判別し、その後に各基準色の Hue 値を用いて該当する温度範囲内で内挿することにより温度を決定した。

図A-6に「R」、「G」、「B」各色の輝度値のみを用いた場合と、各色を基準とした Hue 値を用いて温度変換した結果を比較して示す。図A-6(1)の横軸は基準温度、縦軸は各手法による温度変換値の空間平均値である。図A-6(2)の横軸は基準温度、縦軸は各手法による温度変換値の標準偏差である。ここでは、手法による違いを明確にするため、第3章で行った異常値の排除は行わず全データを用いて評価を行った。青色基準および赤色基準の Hue 値を用いて温度変換を行うと図A-5に見られる不連続点で誤差が大きくなっていることがわかる。一方、緑色基準の Hue 値は全温度範囲において良好な結果を示している。

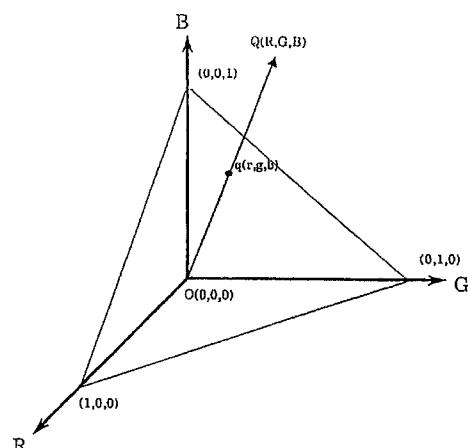
図A-7に「R」、「G」、「B」各色の輝度値のみを用いた結果（「手法1」）と「R」、「G」、「B」各色の輝度値を用いて温度範囲を定め、緑色を基準とした Hue 値を用いて内挿して求めた結果（「手法2」）を比較して示す。緑色基準の Hue 値を用いて温度変換した方が、一様な温度分布を示しており、変換精度が向上していることがわかる。

表A-1から表A-2に緑色を基準とした場合の Hue 値を使用して変換した温度変換結果を示す。ここでは、全データを用いた場合（添字1）と温度範囲を定め異常値を排除して評価した場合（添字2）を比較している。

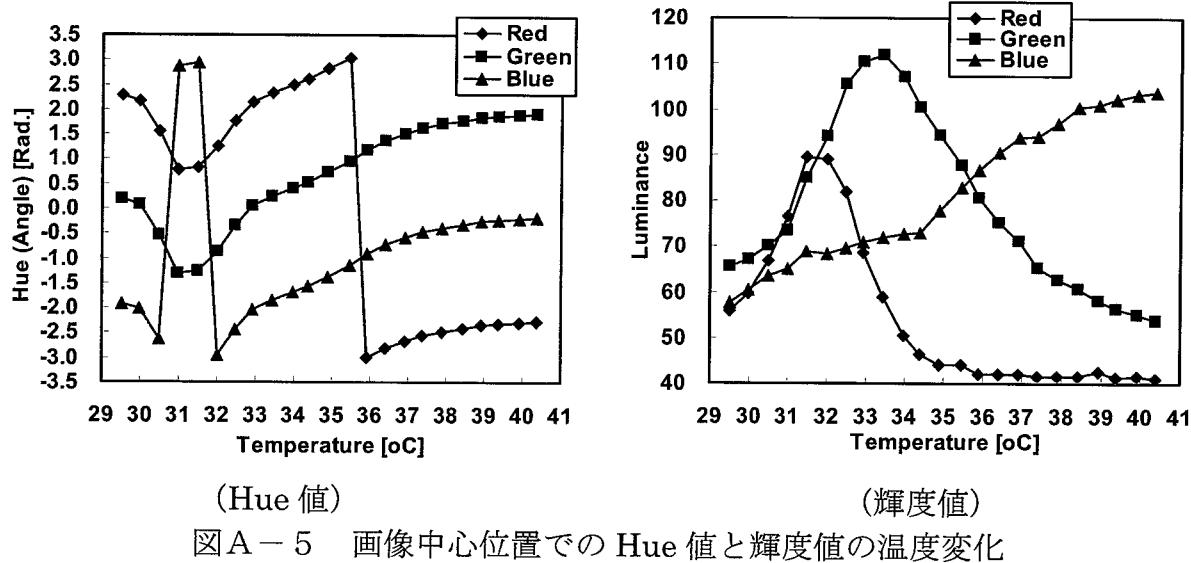
以上の検討から、本報で構築した、温度区分の範囲を判別し、その温度範囲内で内挿により決定するという温度変換手法は妥当であり、撮影画像から得られる「R」、「G」、「B」各色の輝度値のみを利用する場合に比べて、緑色基準の Hue 値を併用することにより、計測精度が向上する見通しが得られた。



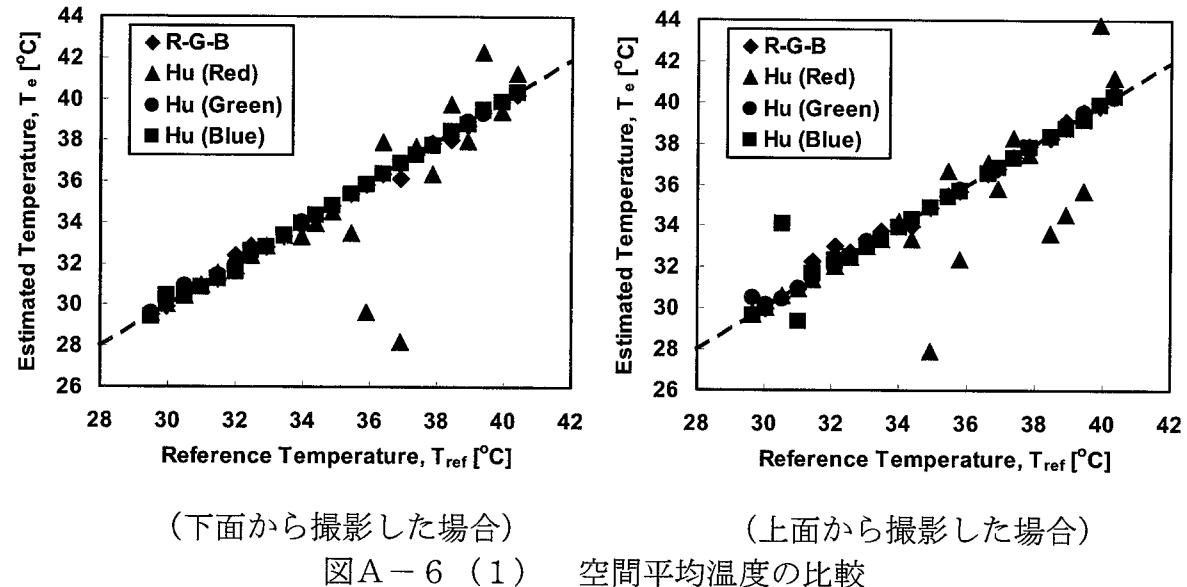
図A-3 色相環



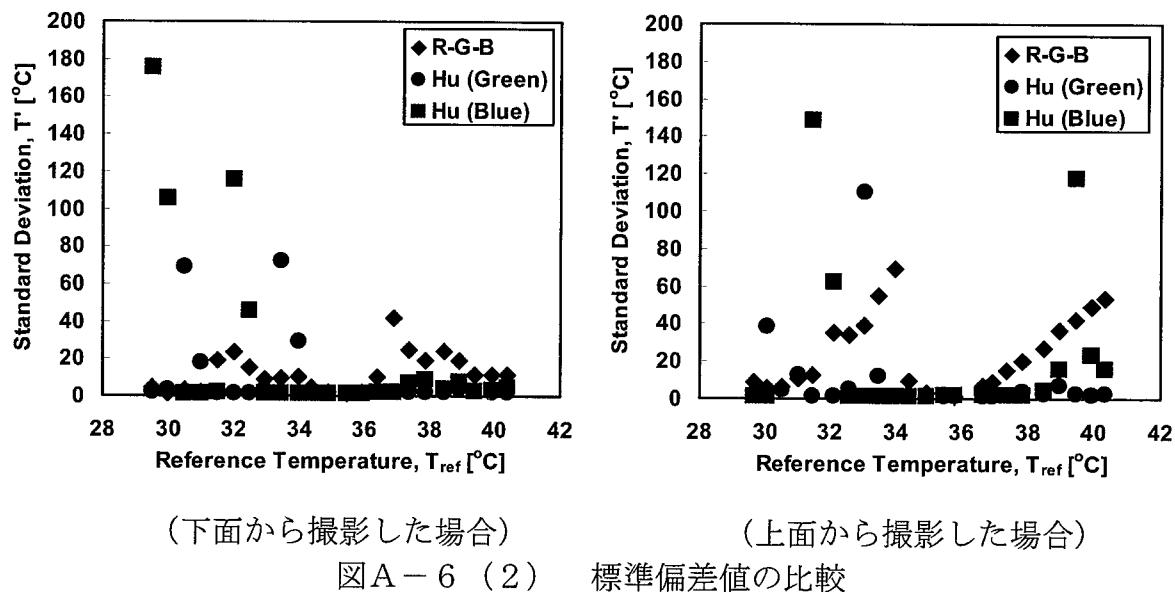
図A-4 色空間



(Hue 値) (輝度値)
図A-5 画像中心位置での Hue 値と輝度値の温度変化



(下から撮影した場合) 空間平均温度の比較
図A-6 (1)



(下から撮影した場合) 標準偏差値の比較
図A-6 (2)

T_{ref} [°C]	温度変換画像 (「手法 1」, R-G-B)	温度変換画像 (「手法 2」, 緑色基準の Hu 値)
30.5 (LT03)		A grayscale image showing a color calibration target with a vertical color bar on the right. The color bar has two labeled points: 40.0 at the top and 30.0 at the bottom.
34.4 (LT11)		
39.9 (LT22)		

T_{ref} [°C]	温度変換画像 (「手法 1」, R-G-B)	温度変換画像 (「手法 2」, 緑色基準の Hu 値)
30.5 (LT32)		A grayscale image showing a color calibration target with a vertical color bar on the right. The color bar has two labeled points: 40.0 at the top and 30.0 at the bottom.
34.4 (LT40)		
39.9 (LT51)		

図 A-7 Hue 値による温度変換結果

表A-1 校正画像の温度変換結果（緑基準 Hue 値、配管下面）

CASE	T _{ref}	全画素を対象			特定温度範囲の画素を対象 (25.0 < T < 45.0)			Error Ratio*
		T _{ave1}	σ _{ave1}	dT ₁	T _{ave2}	σ _{ave2}	dT ₂	
CS_LT01	29.501	29.556	1.708	0.056	29.611	0.745	0.111	0.002
CS_LT02	29.981	30.100	2.905	0.119	30.169	0.776	0.188	0.003
CS_LT03	30.497	30.883	68.593	0.386	30.778	1.427	0.280	0.024
CS_LT04	30.980	30.829	17.877	0.151	30.971	0.737	0.009	0.008
CS_LT05	31.480	31.400	1.388	0.080	31.460	0.182	0.020	0.002
CS_LT06	32.009	31.925	1.408	0.084	31.987	0.160	0.023	0.002
CS_LT07	32.469	32.368	1.532	0.101	32.440	0.511	0.029	0.003
CS_LT08	32.921	32.778	2.944	0.142	32.845	0.770	0.076	0.003
CS_LT09	33.434	33.276	71.945	0.157	33.470	1.219	0.036	0.016
CS_LT10	33.975	34.003	28.829	0.028	33.984	0.750	0.009	0.006
CS_LT11	34.375	34.338	1.513	0.037	34.404	0.163	0.029	0.002
CS_LT12	34.881	34.801	1.531	0.080	34.867	0.137	0.013	0.002
CS_LT13	35.447	35.378	1.555	0.069	35.446	0.130	0.001	0.002
CS_LT14	35.900	35.816	1.575	0.084	35.885	0.136	0.015	0.002
CS_LT15	36.387	36.332	1.601	0.055	36.401	0.171	0.015	0.002
CS_LT16	36.899	36.831	1.623	0.068	36.901	0.176	0.003	0.002
CS_LT17	37.375	37.292	1.659	0.083	37.364	0.267	0.011	0.002
CS_LT18	37.867	37.806	2.024	0.061	37.873	0.370	0.007	0.002
CS_LT19	38.428	38.272	2.025	0.156	38.345	0.408	0.083	0.002
CS_LT20	38.909	38.865	3.693	0.044	38.954	0.509	0.044	0.002
CS_LT21	39.369	39.303	2.261	0.066	39.380	0.575	0.011	0.003
CS_LT22	39.915	39.861	1.869	0.054	39.934	0.573	0.019	0.002
CS_LT23	40.378	40.293	1.907	0.085	40.369	0.550	0.009	0.002

$$T_{ave1} = \sum(T_{i,j}) / N,$$

$$\sigma_1 = \{\sum(T_{i,j} - T_1)^2 / N\}^{1/2},$$

$$dT_1 = T_1 - T_{ref},$$

$$\text{Error ratio} = (N - M) / N$$

$$N = i \times j, \quad M = i \times j \quad (25.0 < T_{i,j} < 45.0)$$

$$T_{ave2} = \sum(T_{i,j}) / M \quad \cdots (25.0 < T_{i,j} < 45.0)$$

$$\sigma_2 = \{\sum(T_{i,j} - T_2)^2 / M\}^{1/2} \quad \cdots (25.0 < T_{i,j} < 45.0)$$

$$dT_2 = T_2 - T_{ref} \quad \cdots (25.0 < T_{i,j} < 45.0)$$

表A-2 校正画像の温度変換結果（緑基準 Hue 値、配管上面）

CASE	T _{ref}	全画素を対象			特定温度範囲の画素を対象 (25.0 < T < 45.0)			Error Ratio*
		T _{ave1}	σ _{ave1}	dT ₁	T _{ave2}	σ _{ave2}	dT ₂	
CS_LT30	29.646	30.448	1121.0	0.802	29.861	1.346	0.215	0.021
CS_LT31	30.034	30.136	38.629	0.102	30.349	1.352	0.315	0.009
CS_LT32	30.526	30.400	4.590	0.126	30.460	0.579	0.066	0.003
CS_LT33	31.007	30.922	12.271	0.084	31.006	0.278	0.001	0.003
CS_LT34	31.431	31.376	1.334	0.055	31.430	0.337	0.002	0.002
CS_LT35	32.079	31.941	1.521	0.138	31.999	0.548	0.080	0.002
CS_LT36	32.559	32.502	4.935	0.057	32.548	0.430	0.011	0.002
CS_LT37	33.035	33.220	110.19	0.185	33.058	1.366	0.023	0.022
CS_LT38	33.443	33.352	12.132	0.091	33.456	0.757	0.012	0.008
CS_LT39	33.968	33.918	1.402	0.050	33.976	0.141	0.008	0.002
CS_LT40	34.380	34.305	1.418	0.074	34.363	0.135	0.016	0.002
CS_LT41	34.941	34.897	1.440	0.044	34.956	0.118	0.015	0.002
CS_LT42	35.469	35.421	1.461	0.048	35.481	0.098	0.012	0.002
CS_LT43	35.807	35.726	1.477	0.081	35.786	0.139	0.020	0.002
CS_LT44	36.660	36.584	1.523	0.076	36.646	0.178	0.015	0.002
CS_LT45	36.938	36.842	1.537	0.096	36.904	0.208	0.034	0.002
CS_LT46	37.382	37.278	1.577	0.104	37.341	0.269	0.041	0.002
CS_LT47	37.841	37.770	3.623	0.071	37.824	0.340	0.017	0.002
CS_LT48	38.473	38.342	2.203	0.131	38.397	0.409	0.076	0.002
CS_LT49	38.935	38.822	6.661	0.114	38.893	0.484	0.043	0.002
CS_LT50	39.441	39.446	2.755	0.005	39.507	0.512	0.066	0.002
CS_LT51	39.906	39.866	2.006	0.039	39.929	0.523	0.024	0.002
CS_LT52	40.318	40.201	2.750	0.117	40.268	0.541	0.050	0.002

$$T_{ave1} = \sum(T_{i,j}) / N, \quad T_{ave2} = \sum(T_{i,j}) / M \quad \cdots (25.0 < T_{i,j} < 45.0)$$

$$\sigma_1 = \{\sum(T_{i,j} - T_1)^2 / N\}^{1/2}, \quad \sigma_2 = \{\sum(T_{i,j} - T_2)^2 / M\}^{1/2} \quad \cdots (25.0 < T_{i,j} < 45.0)$$

$$dT_1 = T_1 - T_{ref}, \quad dT_2 = T_2 - T_{ref} \quad \cdots (25.0 < T_{i,j} < 45.0)$$

$$\text{Error ratio} = (N - M) / N$$

$$N = i \times j, \quad M = i \times j \quad (25.0 < T_{i,j} < 45.0)$$