JNC TN9400 2000-057

分類

炉心槽内流速分布測定への超音波流速計の適用性評価

― 粒子画像流速計測を含めた水試験への適用 ―

(研究報告)

2000年5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49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部　技術協力課

Inquires 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）
2000

Ⓢ

JNC TN9400 2000-057
2000年5月

炉心槽内流速分布測定への超音波流速計の適用性評価
－粒子画像流速計測を含めた水試験への適用－

木村　暢之[*1]、田中　正暁[*1]、林田　均[*1]、小林　順[*2]
上出　英樹[*1]、Tokuhiro Akira[*1]、菱田　公一[*3]

要旨

高速炉の実用化を目指した研究において、著しい進歩を遂げた数値解析手法を用いた熱流動現象の解明や設計が可能となってきている。熱流動に関する実験研究ではモックアップ試験装置による実証試験から要素を取り出した小規模試験による現象解明、解析手法の検証に重点が移りつつある。このような要求を満たす上で、実験データの質の向上が不可欠である。とくに流速場の測定においては速度の空間分布が時間経過とともに変化する過程を明らかにすることにより、これまで得られなかった情報を抽出し、現象の解明や解析手法の検証に大きく貢献できると考えられる。

本報告では、流速の瞬時の空間分布が得られる手法として超音波を用いた流速分布測定法（UDV）と粒子画像流速測定法（PIV）の２つを取り上げた。これらを水流動試験に適用し、計測手法としての適用性を評価した。UDVでは配管体系、平板状噴流体系、さらに高速炉の熱流動現象の要素を取り出した燃料集合体間の隙間流れ（炉心槽内の流れ）に関する水試験に適用した。既存のレーザー流速計やPIVとの比較を行った結果、妥当な測定結果を与えることを確認するとともに、その課題をナトリウム体系への適用を含めて明らかにした。PIVでは炉心槽内の流れに適用し、その課題を明らかにした。炉心槽のような複雑形状流路へ適用する上では、トレーサー粒子以外の画像ノイズを除去する手法を開発することで測定精度の向上を図ることができた。

1*　核燃料サイクル開発機構、大洗工学センター、要素技術開発部、原子炉工学グループ
2*　核燃料サイクル開発機構、大洗工学センター、システム技術開発部、FBRシステムグループ
3*　核燃料サイクル開発機構、大洗工学センター、要素技術開発部、原子炉工学グループ、客員研究員、慶応義塾大学、システムデザイン工学科、教授

JNC TN9400 2000-057
May, 2000

Applications of ultrasound technique to flow velocity measurement in water experiment of inter-wrapper flow
- Comparison with particle image velocimetry -

N. Kimura,[*1] M. Tanaka,[*1] H. Hayashida,[*1] J. Kobayashi,[*2]
H. Kamide,[*1] A. Tokuhiro,[*1] and K. Hishida[*3]

ABSTRACT

In experimental study for the thermohydraulics of fast reactor, a simple experiment with fine measurement has been desired for understanding of phenomena and for verification of computer code rather than mockup experiments of large scale. For such purposes quality of experimental data must be improved. In the velocity measurement, instantaneous velocity profile will have great advances for the understanding of phenomena and for the verification of computer code.

In this report two methods of the velocity profile measurement are discussed; one is ultrasound Doppler velocimetry (UDV) and the other is particle image velocimetry (PIV). These methods were applied to water experiments.

The UDV was applied to pipe flow, planer jet, and the inter-wrapper flow which is seen in the gap region between subassemblies of fast reactor core. Cross check with laser Doppler velocimetry showed proper measurement of the UDV. Problems including the application to sodium experiments are also discussed. The PIV was also applied to the inter-wrapper flow. For the application to complex flow geometry, noise reduction method was developed to improve the measurement accuracy.

---

*1 Reactor Engineering Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

*2 FBR System Design Group, System Engineering and Technology Division, O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

*3 Guest Researcher in Reactor Engineering Group, Department of System Design Engineering, Keio University, Professor

目次

1．序論 ---------- 1
2．超音波流速分布測定法 ---------- 3
2.1 測定手法 ---------- 3
2.2 配管体系への適用 ---------- 6
2.2.1 試験体系および試験条件 ---------- 6
2.2.2 試験結果 ---------- 7
2.3 単一噴流体系への適用 ---------- 9
2.3.1 試験体系および試験条件 ---------- 9
2.3.2 試験結果 ---------- 9
2.4 UDV 使用上の留意点 ---------- 11
2.4.1 超音波ビーム反射粒子に関する留意点 ---------- 11
2.4.2 計測位置と構造物に対する留意点 ---------- 12
2.5 ナトリウム中計測への適用 ---------- 14
3．粒子画像流速測定法 ---------- 15
3.1 計測原理 ---------- 15
3.2 計測システム ---------- 17
3.3 画像中のノイズ除去手法 ---------- 19
3.3.1 輝度の時間平均値を用いたノイズ除去手法 ---------- 19
3.3.2 輝度の最小値を用いたノイズ除去手法 ---------- 20
3.4 炉心槽内熱流動試験への適用と各計測手法のクロスチェック 22
3.4.1 試験装置 ---------- 22
3.4.2 LDV および UDV とのクロスチェック ---------- 23
3.4.3 集合体間ギャップの流速測定結果 ---------- 25
4．結論 ---------- 26

謝辞 ---------- 27

参考文献 ---------- 28

付録 LDV 測定データ中の異常値排除処理

図表リスト

表 2.1　本研究で用いた超音波流速計トランスデューサ仕様
表 3.1　PIV 計測構成機器の概要

図 2.1.1　UDV の測定原理
図 2.2.1　配管内流速分布測定試験部
図 2.2.2　配管内流れ方向流速と UDV における計測 Success Rate の水平方向分布
図 2.2.3　時間平均流速と速度変動強度に対する計測位置の影響
図 2.2.4　時系列データのヒストグラムにおける計測位置の影響（トランスデューサ側の配管内壁近傍; x/R=-1）
図 2.2.5　時系列データのヒストグラムにおける計測位置の影響（配管中央位置; x/R=0）
図 2.2.6　時系列データのヒストグラムにおける計測位置の影響（トランスデューサと反対側の配管内壁近傍; x/R=1）
図 2.3.1　単一噴流試験部
図 2.3.2　時間平均流速と速度変動強度の水平方向分布
図 2.3.3　半値幅の定義
図 2.3.4　半値幅の流れ方向変化の既往研究との比較
図 3.1.1　PIV の原理
図 3.2.1　PIV 計測機器接続構成
図 3.2.2　信号のタイミングチャート
図 3.3.1　時間平均輝度減算の原理
図 3.3.2　最小輝度減算法の原理
図 3.4.1　TRIF 試験体模式図
図 3.4.2　クロスチェック試験における各測定機器の計測範囲
図 3.4.3　LDV と PIV のクロスチェック結果
図 3.4.4　PIV の時系列データのヒストグラムにおけるノイズ処理の効果
図 3.4.5　UDV と PIV のクロスチェック結果
図 3.4.6　PIV と UDV の時系列データのヒストグラムの比較
図 3.4.7　集合体間ギャップの流況

記号リスト

<第2章>

f_T:	超音波の送信周波数
f_R:	超音波の受信周波数
c:	音速
V:	微細粒子の速度（流速）
Δf:	ドップラーシフト周波数
X:	超音波素子から微細粒子までの距離
t:	周波数の発信時刻と受信時刻の時間間隔
f_{smp}:	データのサンプリング周波数
X_{max}:	計測可能最大距離
Δf_{max}:	ドップラーシフト周波数の最大値
V_{max}:	計測可能な最大流速
V_{min}:	計測可能な最小流速
ΔX:	計測位置間隔
Re:	レイノルズ数
D:	配管内径、水力等価直径
U:	円管断面内の最大流速
$u(x)$:	円管断面内の流速分布
x:	配管中心からの断面方向距離
R:	配管の半径（=D/2）
u_{avg}:	配管断面平均流速
U_{max}:	流速の最大値
U_{min}:	流速の最小値
$r_{1/2}$:	半値幅
r_{∞}:	バルク流体の密度
r_{exit}:	噴流出口での流体密度
z_{UC}:	噴流核消滅の流れ方向位置
z:	流れ方向位置

<第3章>

N_s:	領域のピクセル数
$LA(k)$、$LB(k)$:	各位置の輝度
$LA_{s,avg}$、$LB_{s,avg}$:	領域の空間平均輝度値
$LA'(k)$、$LB'(k)$:	領域の空間輝度変動値

$LA_{s,rms}$、$LB_{s,rms}$:	領域の空間輝度変動値の平均（RMS 値）
R:	相互相関係数
D:	粒子群の移動距離
τ:	画像収録間隔
Δt:	垂直同期信号から画像収録開始までの遅れ時間
$\Delta\tau_1$、$\Delta\tau_2$:	垂直同期信号からトリガ信号までの遅れ時間
$L_t(k)$:	各ピクセルの輝度値
N_t:	時間的に連続する画像の枚数
$L_{t,avg}(k)$:	各ピクセルの時間平均輝度
$L_n(k)$:	ノイズの輝度値
$L_p(k)$:	トレーサの存在する時刻の輝度値
$L_b(k)$:	トレーサの存在しない時刻の輝度値
N_p:	ピクセルにトレーサが存在する画像の枚数
N_b:	ピクセルにトレーサが存在しない画像の枚数
$L_{min}(k)$:	各ピクセルの最小輝度

1．序論

近年の数値解析技術の発展、コンピューターの著しい計算能力向上に伴い、解析に基づく現象の解明や解析に基づく設計が可能となってきている。その一方で解析手法の検証のために詳細な計測がなされ境界条件を明確にした実験データの必要性が高まっている。原子炉のような大型プラントの設計・建設のためには、大型モックアップ装置による実規模試験（多くの現象が複合しており、形状も複雑で測定可能なデータも限られる）よりも、研究開発コスト削減の観点並びに検証された解析手法に基づく設計の観点から要素を取り出した小規模ながら詳細計測を可能とする試験、あるいは境界条件をよく制御した上での複合現象に関する試験の必要性が指摘されている。

このような実験研究を進めるためには、試験データの品質向上が求められる。速度場について考えると、これまで水を作動流体としてレーザードップラー流速計（Laser Doppler Velocimetry; LDV）などを用いて流速を測定してきたが、測定は空間上の１点に限られ空間分布を求めるには時間をずらし測定プローブを移動させて順に計測する必要がある。このため瞬時の空間速度分布の情報は得ることができなかった。しかし、現象の解明、解析モデルの構築、解析手法の検証の観点からは瞬時の空間速度分布が時間とともに変化する様子を測定する必要がある。たとえば、実プラントにおいて発生した漏洩事故の原因となっているサーマルストライピング現象（温度の異なる流体の混合により構造材に温度変動が繰り返し与えられ高サイクル疲労が発生する現象）については、流体側の温度変動挙動すなわち流体の混合挙動が壁面近傍で変化する特性を考慮することにより飛躍的に評価精度が向上することが指摘されている[1]。そのような現象の解明には空間速度分布の変動特性を詳細に把握することが必要である。

また、高速炉の研究開発を例にとるとナトリウム中の速度データは非常に限られている。ナトリウムは水に比べて熱伝導率が約 100 倍大きい、比熱が約 1/3 と小さく浮力が働きやすいなどの違いがあるため水試験で得られた速度データだけでは不十分な点が多い。ナトリウム中ではプローブ型の小型電磁流速計などが開発されてきているが、課題も多くやはり空間上のある点での測定となっている。

こうした中、超音波エコーを用いた空間速度分布の計測手法（Ultrasound Doppler Velocimetry; UDV）が開発されている[2]。また、流れの可視化画像から平面内の空間速度分布を求める粒子画像流速計測法（Particle Image Velocimetry; PIV）が様々な現象に適用されてきている[3]。超音波を用いた手法は、指向性の高い超音波ビームのパルスを流体中に打ち込み、流れに乗った散乱粒子からのエコーのドップラーシフトとフライトタイムから超音波ビームに沿った直線上

の流速分布を求めることができる。様々な場に適用されているが、流路壁からの反射の多い複雑な体系への応用はこれからと言える。また、超音波を利用することから不透明流体にも適用が可能であり、ナトリウム実験において速度分布を測定できる可能性がある。

一方、PIV は透明な流体に平板状のレーザーシート光を入射し、流れに乗ったトレーサー粒子の可視化画像から２次元平面内の瞬時速度場を計測する手法である。最近では３次元速度分布の計測に拡張が図られている[4]。PIV では詳細な瞬時の速度分布が計測可能であり、実験計測技術として高いポテンシャルを有している。しかし実プラントにあるような入り組んだ複雑な流路をもつ体系への適用は、画像中に写り込むトレーサー粒子以外の物体の影響などがあり、これからの課題である。

本報告書では平成 8 年度から平成 11 年度まで先行基礎工学研究として実施した研究成果に基づき、上記２つの計測技術を原子炉内の熱流動現象の評価にかかる実験研究に適用していく上でそれぞれの手法を紹介するとともに、複雑形状となることが多い実際の実験研究へ適用する上での課題と解決策の一部を示す。実験体系として、基礎的な配管内流れ、平板状噴流を取り上げこれまでの実験研究並びに LDV による計測結果との比較を行った。さらに、高速炉の熱流動現象の要素として自然循環除熱時の炉心槽内の流れ（炉心部集合体間ギャップ領域の隙間流れであり、ラッパー管壁を通した除熱能力が着目されている）に関する水試験に適用し、その流れ場を明らかにするとともに入り組んだ複雑体系への適用性を検討した。これにより今後の試験研究の展開、データ品質の向上へ資する。試験結果に基づく炉心槽内の熱流動現象の解明とその評価手法については既報[20]にて報告している。

また、LDV の計測データについて異常値を排除する手法を検討した結果を付録に示す。

2．超音波流速分布測定法

2.1 測定手法

超音波流速計[2]は、スイスのPSI（ポールシェラー研究所）にて開発され、超音波パルスの反射を利用して、空間的・時間的な流速分布についての情報を得ることができる。手法としては、医療分野において開発された技術を応用したものである。

UDVは、超音波の基本的特徴により様々な流体に対して適用できる。UDVの適用に対する唯一の必要条件は、測定に必要な音波を反射させる微細粒子（固体または気体）を流体中に含んでいることである。本条件を満たすことにより、UDVは、水、石油、フレオンを始めとして、液体金属等の不透明流体の瞬時の流速分布を時間を追って測定することができる。

UDVは、超音波パルスを使用している。鋭い指向性を持つ超音波振動子から超音波パルスを発射し、ある一定時間後にゲートを開いて反射波を受信する。その受信波は、振動子からある距離にある微細粒子からの反射波であり、送信ー受信の時間差と周波数変化（ドップラーシフト）を分析することにより微細粒子の位置と超音波の進行方向の流速成分を求めることが可能である。本UDVは、送受信を1つの超音波振動子によって行うことから、送受信素子が1個となり、素子の配置の自由度が大きくなる。そのため、流速計測が簡便かつ容易に行える反面、現実には密度変化に伴う音速の変化の影響や距離同定の不確かさのために精度確保に問題が生じるおそれがある。

図2.1.1にUDVの計測原理を示す。送信周波数f_Tで射出した超音波が速度Vの微細粒子により反射され、受信周波数f_Rで受信されたとすると、送信周波数と受信周波数の関係は、式(2.1)で表される。

$$f_R = \frac{c-V}{c+V} f_T \qquad (2.1)$$

ここで、cは音速である。従って、送信周波数と受信周波数のドップラーシフト周波数Δfは、以下のように表せる。

$$\Delta f = f_T - f_R = \frac{2V}{c+V} f_T \qquad (2.2)$$

一般に、$V \ll c$であるから、

$$\Delta f \approx \frac{2Vf_T}{c} \qquad (2.3)$$

とできる。

また、超音波振動子から微細粒子までの距離Xは、周波数パルスの発信時刻と反射波の受信時刻の時間間隔tから以下の式によって定められる。

$$X = \frac{tc}{2} \tag{2.4}$$

流速分布データの時系列を求めるサンプリング周波数 f_{smp}（超音波パルスの射出周期の逆数）は、計測可能な超音波振動子からの最大距離 X_{max} に依存する。ある時刻の速度分布を求めるための超音波パルスを射出し、最大距離 X_{max} からの反射波を検知した後に、次の時刻の分布のための超音波パルスを射出しなければならない。よって、計測可能な最大距離 X_{max} とサンプリング周波数 f_{smp} との間には、次の関係がある。

$$\frac{1}{f_{smp}} = \frac{2X_{max}}{c} \tag{2.5}$$

また、サンプリング定理を満たすために、ドップラーシフト周波数の最大値 Δf_{max} はサンプリング周波数 f_{smp} の半分以下でなくてはならない。

$$\Delta f_{max} < \frac{f_{smp}}{2} \tag{2.6}$$

式(2.3)より、ドップラーシフト周波数が最大となるときに、流速は最大となるので、計測可能な最大流速 V_{max} は、

$$V_{max} = \frac{c\Delta f_{max}}{2f_T} \tag{2.7}$$

式(2.6)と式(2.7)より、以下の式が導出できる。

$$V_{max} < \frac{cf_{smp}}{4f_T} \tag{2.8}$$

よって、計測可能な最大距離 X_{max} と計測可能な最大流速 V_{max} の関係は、以下の条件に従う。

$$X_{max}V_{max} < \frac{c^2}{8f_T} \tag{2.9}$$

本研究で使用している MET-FLOW 社製 UDV[5]は、超音波射出線上の空間を 128 点に分割し、各点毎の流速を計測する。また、本 UDV は、1 回の計測で 1024 回の超音波パルスを射出する。これにより流速分布の時系列データが 1024 点収録できる。

また、本計測器は、流速値を 1byte（符号：1bit、数値：7bit）で格納している。よって、最大流速 V_{max} を 128（$=2^7$）分割していることから、計測可能な最小流速（計測分解能）V_{min} は、

$$V_{min} = \frac{V_{max}}{128} \tag{2.10}$$

となる。

超音波パルスに沿った計測位置間隔は、超音波素子からの最小距離 X_{min}（予め設定可能）と測定したい最大流速で決まる最大距離 X_{max} の間隔を 128 分割した

値となる。

$$\Delta X = \frac{X_{max} - X_{min}}{128} \tag{2.11}$$

表 2.1 に本試験で用いた超音波流速計のトランスデューサの仕様を示す。詳細については、次節以降に記述する。

2.2 配管体系への適用

UDV による計測の妥当性を確認するために、発達した円管内流れの流速分布計測を実施した。本研究では Na 中での使用を目標の一つとしていることから、超音波素子として高温での特性に優れたニオブ酸リチウムのトランスデューサを用いて計測を行った。

2.2.1 試験体系および試験条件

図 2.2.1 に試験体系を示す。計測対象は、鉛直のアクリル製の円管（内径 D=106mm）である。超音波素子である UDV トランスデューサを、エルボー端より 1830mm（=17.3D）下流に設置した。トランスデューサは、トランスデューサ設置に伴う流れへの影響を回避するために、配管に対して 45.6° 傾けて固定し、上流側へ向けて超音波を射出するように設置した。配管内を可視化する上での屈折率の影響を低減させるため、配管まわりに矩形断面のウォータージャケットを設置している。

本試験では、ナトリウム体系への適用を考慮し、高温耐性のあるニオブ酸リチウム製の超音波素子をもつトランスデューサを使用した。トランスデューサの基本仕様としては、

最大印加電圧：160V
ノミナル周波数：4MHz
発振サイクル数：4~6 サイクル
（各超音波パルスについて 4~6 サイクルの波を射出）
繰り返し周波数：1~10kHz

である。

試験は、水温 25℃、配管内流量 190l/min（u_{avg}=0.36m/s、Re=4.2×10^4、配管内径を代表長さ）として行った。超音波の反射粒子として、平均粒子径 80μm のナイロン粒子を水に混入した。データ収録は、流量の安定を確認した後に行った。

本データ収録には、MET-FLOW 社製 X-1 モデル[5]を使用した。データは、トランスデューサから 5mm の位置から 1.5mm 間隔で 128 箇所（最大測定位置：トランスデューサから 195.5mm）を収録した。

空間上のある位置における全時系列データに対して、超音波反射波が検出できた割合をその位置での Success Rate と定義する。本 UDV 装置は、各位置毎に 1024 個の時系列データを収録するが、Success Rate が低い場合、時間平均データの信頼性が低下することから、同じ条件で 9 回（1024×9=9216 点）の時系列デ

ータを収録した。データのサンプリング周波数（超音波パルスを打ち出す時間間隔に対応）は25Hzとした。ドップラーシフト周波数を流速に変換するにあたり、水中での音速を1500m/sとした。

超音波発信部近傍での流速計測の妥当性を評価するために、試験パラメータとして、トランスデューサの超音波発信部（超音波素子）から配管内面までの距離（図2.2.1中のY）を10mm、20mm、30mmに変化させた。

2.2.2 試験結果

図2.2.2に配管内流れ方向流速とSuccess Rateの水平方向分布を示す。(1)～(3)は、それぞれトランスデューサの位置Y=10, 20, 30mmに対応する。UDVにより計測された流速は、1回の収録（時系列1024点）で得られたものを時間平均化している。UDVによる流速計測値は、UDVトランスデューサを配管に対して45°傾けて計測しているため、配管を横切る流速成分はゼロと仮定して、角度から流れ方向流速成分に変換した。また、一般に $2000<Re<10^5$ の範囲では、滑らかな円管内の流速分布（円管中央部付近を除く）は、以下の式で近似できる（1/7乗則）[6]。

$$u(x) = U\left(\frac{R-x}{R}\right)^{1/7} \qquad (2.12)$$

ここで、Uは配管内最大流速、Rは配管の半径（$R=D/2$）、xは配管中心からの径方向距離である。

Uは1/7乗則が成り立つ範囲では、断面内平均流速u_{avg}と以下の関係が成り立つ。

$$U = \frac{u_{avg}}{0.817} \qquad (2.13)$$

UDVによる計測は、ケース(1)~(3)ともに配管内面近傍を除いて、1/7乗則とよく一致していることがわかる。一方、トランスデューサから遠い側の配管壁面近傍は、1/7乗則による流速分布と異なっている。さらにこの位置では、他の箇所に比べてSuccess Rateが低くなっている。

図2.2.3に9回の計測結果（9216点）の時間平均流速と速度変動強度（速度変動のRMS値）のトランスデューサ位置（Y=10mmおよび30mm）の影響を示す。これによると、トランスデューサに近い側の配管壁面近傍において、Y=10mmのケースは、時間平均流速および速度変動強度がばらついていることがわかる。また、Y=10mmのケースは、x/R=0.4付近で流速分布が不連続になっている。一方、Y=30mmのケースでは、トランスデューサから遠い側の配管壁面近傍を除いてほぼ放物線上の流速分布となっていることがわかる。

トランスデューサの位置によらず、トランスデューサから遠い側の壁面近傍での流速計測値が 1/7 乗則による流速分布と大きく異なっている。流速計測のエラーの原因の一つとして、トランスデューサと微細粒子との距離が大きいために、粒子からの反射波がトランスデューサまで届かない（減衰する）ことが考えられる。しかし、ケース(1)~(3)では、トランスデューサの位置を変化させても、流速値のエラーは同じ位置に発生している。

図2.2.4～図2.2.6にトランスデューサの位置を変更した時の時系列計測データのヒストグラムを示す。図 2.2.4 はトランスデューサ側の配管壁面近傍、図 2.2.5 は配管中央、図 2.2.6 はトランスデューサから遠い側の配管壁面近傍である。(1)～(3)はそれぞれトランスデューサ位置 Y=10, 20, 30mm に対応している。

トランスデューサ側の配管近傍（図 2.2.4）では、トランスデューサ位置 Y=10mm のケースにおいて計測データが計測レンジの上限・下限に分布しており、データが取得できていないことがわかる。一方、Y=20、30mm のケースでは、計測データがほぼ平均値を中心に正規分布しており、トランスデューサ側の配管近傍の流速が計測されていることがわかる。

配管中央（図 2.2.5）では、トランスデューサの位置によらず時系列データのヒストグラムは正規分布となっており、有意な計測が行われていることがわかる。

トランスデューサから遠い側の配管近傍（図 2.2.6）では、各ケースとも流速がゼロに近い側に偏った分布形状となっている。これは、トランスデューサの位置による時系列データの分布形状の違いがないことから、壁面の影響と考えられる。

よって、トランスデューサから遠い側での配管近傍で発生する計測エラーは、配管壁面と計測点の相対位置が近いことにより、壁面からの反射波と微細粒子からの反射波を十分に分離できないことが原因と考えられる。

2.3 単一噴流体系への適用

計測領域内で大きな流速分布をもつ流れ場において、超音波流速計による計測の妥当性を評価するために、プレナム内噴流体系にUDVを適用した[7][8]。

2.3.1 試験体系および試験条件

図2.3.1に試験体系を示す。試験部は矩形タンク（2438mm（幅）×2438mm（高さ）×671mm（奥行き））内に設置している。上から見た図において、噴流を挟む２枚の板（Side Plate）は噴流を準２次元的な挙動に近づけるためである。また、試験部前面と後面にはアクリル窓を取り付け、観察できるようにしている。試験部下部に取り付けられた４つの矩形ブロックで構成されるスリットから、３本の矩形噴流が吐出可能な体系となっている。本試験では、中央の噴流吐出口のみ使用して、単一噴流を試験容器内へ吐出させた。噴流吐出口の形状は、20mm×169mmであり、水力等価直径D=35.8mmである。

流速測定は、超音波素子 Delrin-encased ピエゾ電圧素子トランスデューサ（4MHz作動）をMET-FLOW社製超音波流速分布測定装置モデルX-1[5]に接続することによって行った。トランスデューサ有効径は6mmである。

UDVトランスデューサを水平に対して10°傾けて駆動装置に取り付け、これを上下させることにより、流れ場の詳細な流速測定を行った。

試験条件は、噴流の断面内平均吐出流速を0.5m/sとし、温度は20℃（音速1480m/s）一定である。

UDVは、トランスデューサからの距離78.2mm～360mmまでを約2.2mmピッチに128分割した点で計測を行った。噴流の中心位置は、トランスデューサから220mmの位置である。このときのサンプリング周波数は14Hzであり、計測可能な最大流速は0.2m/s、最小流速は1.4mm/sである。

2.3.2 試験結果

図2.3.2に本試験により得られた時間平均流速および速度変動強度の水平方向分布を示す。流速は、水平に対して10°傾けたUDVトランスデューサから射出される超音波ビーム方向の成分が得られる。流速の符号は、トランスデューサに向かう方向が正、トランスデューサから遠ざかる方向を負として示している。横軸は、噴流の中央を原点として噴流出口の水力等価直径Dで規格化した水平位置、左の縦軸は時間平均流速、右の縦軸は速度変動強度（RMS値）である。

(1)~(3)は、噴流吐出高さを原点として水力等価直径で規格化した流れ方向位置 z/D=1.3, 7.0, 11.2 に対応している。(1)は噴流の核が存在している高さ位置であり、スリット幅に相当する|x|<0.3D に高い流速が測定されている。x>0.3D で 20mm/s の正の流速値、および x<-0.3D で 10mm/s の負の流速値を示している理由は、噴流が周辺の流体を巻き込んでいるためである。この位置では、噴流の両側に速度変動の大きい領域が存在しており、噴流の外側が周辺の流体と混合している様子を UDV で計測できていることがわかる。(2)(3)は噴流の核が消滅し、速度変動が噴流全体に広がっている。また、UDV により、噴流の最大流速が下流に向かうに従って徐々に低下している挙動が捉えられている。

UDV による計測の妥当性を評価するために、既往研究と比較する。本試験では、UDV トランスデューサの超音波ビーム方向の流速成分のみが得られている。そこで、単一噴流の対称性を仮定し、計測結果を軸方向流速に変換した。軸方向流速分布から噴流の半値幅を求め、既往研究で得られている半値幅との比較を行った。

図 2.3.3 に UDV 計測から求められた軸方向流速と半値幅の定義方法を示す。軸方向流速の最大値 U_{max} と最小値 U_{min} の中間値を求め、その流速値を示す水平方向位置と噴流の中心との距離を半値幅 $r_{1/2}$ と定義する。

図 2.3.4 に本試験で得られた半値幅と既往研究結果の流れ方向分布の比較を示す。既往研究として、Kataoka[9]の式と Hinze ら[10]の式を用いた。

Kataoka の式と Hinze らの式は以下のようになる。

＜Kataoka＞

$$\frac{r_{1/2}}{D} = 0.09\left\langle \frac{\rho_\infty}{\rho_{exit}} \right\rangle^{1/10} \frac{z - z_{UC}}{D} + 0.5 \qquad (2.14)$$

＜Hinze＞

$$\frac{r_{1/2}}{D} = 0.08\frac{z - z_{UC}}{D} + 0.5 \qquad (2.15)$$

ここで、ρ_∞はバルク流体の密度、ρ_{exit} は噴流出口での流体密度、z_{UC} は噴流核が消滅する流れ方向位置である。本試験は等温であるため、バルク流体と噴流出口での流体密度は同じである。

これによると、UDV により得られた結果と既往研究の結果はよく一致しており、UDV による計測結果が妥当であることがわかった。

次節に UDV を使用するための留意点について示す。

2.4 UDV 使用上の留意点

2.4.1 超音波ビーム反射粒子に関する留意点

流体とともに流れる粒子によって反射される超音波をトランスデューサが受信できなければUDVによる流速計測は不可能であるため、反射粒子の選定はUDVによる計測を成功させるための最も重要な要因となる。超音波ビームを反射させる粒子の径は80μm程度が最適であるといわれており、また、粒子の比重は計測対象流体の比重と一致していることが望ましい。条件に合う粒子の選定にあたっては、粒子径、比重の他に、計測対象流体に均一に溶けること（ダマにならないこと）にも留意して選定する必要がある。しかし、カタログスペック上で適切な粒子を選定してもその粒子本来の使用目的によっては非常に大きなばらつきを許容している製品もあり、以下に述べるような問題を引き起こす可能性がある。

粒子を流体に混入する際にどの程度の量を混入するか、すなわち粒子濃度も計測上重要な要因であるが、高濃度の場合は本来の流れに影響を与えない限り計測上の問題はない。しかし、ある濃度より濃度が低い場合は、当グループで使用しているMET-FLOW社製UDV計測システムの内部処理において強制的に流速を０とするアルゴリズムが用いられており、その計測点の流速が実際に０であるのか、粒子濃度が低すぎるために装置が０を示すのか、その判断が困難になる。したがって、計測にあたっては充分な粒子濃度が確保されていなければならない。

しかしながら、充分な量の粒子を混入しても状況によっては部分的に粒子濃度が低下する場合がある。考えられる状況として、超音波の反射に有効な粒子が沈殿してしまうことが挙げられる。実際に試験開始当初は良好に（高いサクセスレートで）データが得られていても、時間の経過とともにデータが得られなってしまうことがある。このような状況は特に低流量での試験で見られ、データが得られなくなった後に攪拌するなどして流れを乱すと再度良好にデータが得られるようになることから、有効な粒子が沈殿してしまうと判断するのが妥当である。流動状況を安定させるために長時間を要するような試験の場合はこの点に留意する必要がある。また、体系が複雑であるような場合、計測ポイントに超音波の反射に有効な粒子が流れ込んでこないような状況も考えられる。前述のように製品によっては大きなばらつきを持つものがあり、外観上は粒子によって濁ってしまっていて充分な濃度が確保されているように見えても、実際には有効な粒子がほとんど含まれていないような状況もあり得る。

以上のように粒子濃度は計測上重要な要因であるが、製品のばらつきまでを考慮すると計測精度を保証する具体的な濃度値を提示することは困難である。したがって、濃度値が低いために生じる上記のような問題に対しては、他の計測方法と併用して計測値の妥当性を確認するなどの対策が必要である。

2.4.2 計測位置と構造物に対する留意点

①構造物等に挟まれた狭い空間の流速分布を計測する場合

超音波ビームの照射方向のずれによってビームが障害物にあたるとそれ以降のデータは得られなくなる。しかし、超音波ビームは目視で確認できないため、適切な方向に超音波ビームが向けられていることを確認するには、オシロスコープを用いてトランスデューサが受信する超音波エコーの波形を観測する。

オシロスコープによって反射波の波形を表示させることができるが、超音波ビーム上に障害物（ボールペンなど）があると、その位置に対応して波形にピークが現れ、ビームがその位置まで到達していることの確認ができる。そこで計測線上に沿って障害物を移動させ、ビームの到達を確認することによって、適切な方向にビームが向けられているかの判断が可能となる。

②試験体外部から計測する場合の留意点

試験体外部から計測する場合、超音波トランスデューサが流れに影響を及ぼすことがないという利点があるが、試験体外壁の厚みによっては超音波の減衰が大きくなり、計測が困難になる。

試験体外部から計測する場合には計測部分の材料を薄くするか、計測部の材料の音響インピーダンスと計測対象流体の音響インピーダンスをできる限り近くする必要がある。

なお、水流動試験で最も普通に使用されるアクリルの場合は１ｃｍ以上になると計測は困難になり、ポリカーボネイトでは一層困難になることが経験上得られている。

③構造物の背面を計測する場合

試験体内部にトランスデューサを設置し、構造物前後の流速分布についても計測が可能であるが、このような体系に適用する場合の留意点について以下に述べる。

前述のように、流体の音響インピーダンスと近い音響インピーダンスを持つ構造物を選定し、オシロスコープによって構造物背面にまで超音波ビームが到達していることを確認することが必要であるが、さらに、超音波ビームと構造

物の交点を含む面における法線が超音波ビームと一致させないことが重要である。この理由は、構造物からの反射波と本来のエコーとの干渉を避けるためである。

2.2、2.3 節に示したように、UDV は瞬時の流速分布を時系列で測定できるという優れた特性を持ち、その測定値についても十分信頼できることがわかった。本手法を複雑な形状の流路や高温となるナトリウム中へ適用するための技術開発を進めていく必要がある。

次節にナトリウム中へ適用する上での検討結果を示す。

2.5 ナトリウム中計測への適用

ナトリウム中の超音波による流速分布計測を行うには、ナトリウム中の超音波散乱物質の確保と、計測に適した受信信号が得られることの２つが重要になる。

流速分布に対応した超音波の反射信号を得るには、ナトリウム中に超音波散乱物質が存在する必要があるが、水試験で散乱物質として用いるナイロン樹脂の粒子はナトリウム中では変質するので使用できない。そこでナトリウム試験ループにおいてナトリウム中に存在する酸化物や金属粉等の不純物を用いることができるか確認した。その結果、ナトリウム温度が３００℃強までは信号強度が小さいながらも流速分布に対応した散乱信号が得られた[11]。しかしながら、約４００℃を超えた温度では散乱信号が極端に減少し流速分布の計測が出来なくなった。この原因としては酸化物減少の可能性のほかに、試験で用いた超音波トランスデューサの感度が高温で低下した可能性が考えられる。

また、超音波受信信号の問題は、ナトリウム中の散乱物質の量が少なく、水中でナイロン樹脂の粒子を用いる時の様に良好な超音波散乱信号を得にくいことや、ナトリウム中で使用できる高温用超音波トランスデューサの感度が水用に比べて低いことなどがある。超音波散乱物質については前記したので、次に超音波トランスデューサについて述べる。高温用のトランスデューサは、ニオブ酸リチウムを圧電素子に用いたものについて５００℃以上の耐熱性があることを確認している。圧電素子にニオブ酸リチウムを用いた超音波トランスデューサは、圧電素子に大きな圧電効果を持つ PZT などを用いる水用の超音波トランスデューサに比べて変換効率が劣るために、超音波受信信号は小さくなる。また、超音波の流速分布測定のために良好な散乱信号を得るには、トランスデューサの指向特性やダンピング特性なども重要になる。そこで、出来るだけ変換効率を向上させるとともに、指向特性なども散乱波計測に適するように、ニオブ酸リチウム結晶のカッティング方向やサイズなどを変えた超音波トランスデューサを試作した。試作した超音波トランスデューサは現在水中基礎試験で超音波特性の評価を行っている。今後、流速分布計測性能について水試験にて評価する予定である。

3．粒子画像流速測定法

3.1 計測原理

粒子画像流速測定法（Particle Image Velocimetry; PIV）[12]は、流体の可視化画像を解析することにより流速を得る非接触光学計測手法であり、従来のレーザードップラー流速計や熱線流速計等の計測手法では得ることができない瞬時の２次元断面速度場情報を得ることが可能である。

図 3.1.1 にここで用いた輝度相関法に基づく PIV の基本的原理を示す。流動場に混入された流れに十分追従する粒子（トレーサ粒子）にレーザー等でシート状のパルス光（レーザーシート）を照射し、写真フィルムやビデオカメラ等でトレーサ群を微小時間間隔 τ で２枚撮影する。次に、２枚目画像において、１枚目の参照領域 A と同じパターンの領域を探索する。ここでは探索する手法として、２枚の画像領域間の空間相互相関処理を用いている。

参照領域 A のピクセル数を N_s、各位置の輝度を $LA(k)$、２枚目画像内の探索領域 B-x（x は探索領域の数）のピクセル数を N_s、各位置の輝度を $LB(k)$とする。領域 A,B-x の輝度値の空間平均値を $LA_{s,avg}$、$LB_{s,avg}$ とすると、

$$LA_{s,avg} = \frac{\sum_{k=1}^{N_s} LA(k)}{N_s}$$
$$LB_{s,avg} = \frac{\sum_{k=1}^{N_s} LB(k)}{N_s} \tag{3.1}$$

となる。また、領域 A,B-x の輝度変動値を

$$LA'(k) = LA(k) - LA_{s,avg}$$
$$LB'(k) = LB(k) - LB_{s,avg} \tag{3.2}$$

とすると、輝度変動の空間平均値(RMS 値) $LA_{s,rms}$、$LB_{s,rms}$ は、

$$LA_{s,rms} = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{N_s} (LA(k) - LA_{s,avg})^2}}{N_s}$$
$$LB_{s,rms} = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{N_s} (LB(k) - LB_{s,avg})^2}}{N_s} \tag{3.3}$$

となる。

これらの値により、相互相関係数 R は、以下のように定義される。

$$R = \frac{\frac{1}{N_s}\sum_{k=1}^{N_s} LA'(k)LB'(k)}{LA_{s,rms}LB_{s,rms}} \tag{3.4}$$

この相互相関係数は、輝度変動の空間平均値で規格化していることにより、全く同じ画像で1、輝度が反転している画像（ネガ・ポジ画像間など）では-1、完全に相関のない画像では0となる。

1枚目の参照領域Aに対して、探索領域B-xを2枚目の画像の中で移動させることにより、相互相関係数の最大となる位置を探索する。その位置の差が参照領域A内の粒子パターンの移動したピクセル単位の距離 D である。図3.1.1においては、参照領域Aと探索領域B-2が最大相関係数をとる位置となっている。

距離 D を画像中においた定規等との比較により有次元の距離に変換し、これを2枚の画像収録時間間隔 τ で割ることにより、流速を求めることができる。

参照領域Aの位置をずらして同様の計算を行うことによって、画像内各位置の流速を求める。参照領域の大きさは測定精度・分解能に影響があるが、640×480ピクセルの画像に対して20×20ピクセル程度の領域を設定することが多い。

ここで、画像の最小構成要素はピクセルであるから、上記の手法のみでは、距離 D の最小分解精度は、ピクセルの大きさ（ピクセル精度）である。この場合は流速に対する計測誤差が大きくなる（例えば、10ピクセルの移動量に対して、1ピクセルの誤差が生じることから、10%の誤差となる）。そこで、相関係数のピクセル単位での空間分布から最大相関係数をもつ位置を内挿することにより、精度を向上させる手法が用いられている（サブピクセル法）[13][14]。

サブピクセル法は、ピクセル精度により求められた最大相関係数とその周囲ピクセルの相関係数を用い、Gauss分布に当てはめることにより、実際の最大相関係数をもつ位置を内挿するものである。本手法により、計測精度は、0.2ピクセル程度となる。この場合にも、画像内の輝度値が0, 1しか持たないような2値化画像では相互相関係数分布がGauss分布をもたないため、サブピクセル法を用いても大きく精度向上を図ることはできない。サブピクセル法を適用するためには、個々の粒子単体での輝度分布がGauss分布となる程度の粒子径があり（3×3ピクセル以上）、画像の空間輝度分布が最小値から最大値までなめらかな分布をもつことが望ましい。すなわち、そのような条件を満たすようにレーザーシート光（厚み、強度）、レーザー粒子（直径、混入濃度）、カメラ（感度、倍率）などを調整する必要がある。

3.2 計測システム

図 3.2.1 に PIV 計測機器接続構成を示す。本研究では、PIV の計測のために図中(a)～(g)までの機器を使用している。使用機器は、以下の通りである。

(a)CCD カメラ
(b)CCD カメラ用電源
(c)信号発生器
(d)同期信号発生器
(e)YAG レーザー用電源×２台
(f)YAG レーザー発振管×２台（２台で 1unit）
(g)汎用 PC（画像収録ボード２枚が接続済）

表 3.1 に各機器の概要および収録時の動作について示す。また、図 3.2.2 に信号のタイミングチャートを示す。(a)の CCD カメラは、(b)の電源より DC12V とフレーム毎の同期信号（垂直同期信号：V-SYNC、60Hz~16.7ms）を受け、画像を収録する。画像収録は、垂直同期信号から遅れ時間 Δt=1.08~1.14ms をもって行われる。収録した画像は、NTSC 信号として奇数フレームと偶数フレーム毎に２本の BNC ケーブルにて、(g)汎用 PC の２枚の画像収録ボードへ 30Hz 毎に送られる。この時点では、PC 内のメモリには画像情報は蓄積しておらず、モニタのみが可能である。

また、(c)の信号発生器は、(b)の電源から出力される垂直同期信号（60Hz）を受けて、同時にトリガ信号を発生する。(b)から出力される垂直同期信号は信号伝達の過程で減衰するため、直接(b)の信号を(d)の同期信号発生器に入力することができない。よって、(c)の信号発生器を経由することにより、トリガ信号を整流化している。

(d)の同期信号発生器は、(c)からのトリガ信号（60Hz）を受け、カメラのフレーム間隔とレーザーの発光間隔を同期させるために一定の時間遅れを発生させて２つのトリガ信号を発生させる。画像間の相互相関によって流速を導出するためには、画像中に撮影されている粒子群のパターンが大きく変化してはならない。そこで、２枚の収録時間間隔を数 ms 以下にする必要がある。CCD カメラは 60Hz（16.7ms）で収録可能であるが、この CCD カメラを用いて数 ms 以下の時間差で画像データを収録するために、フレームの境界の前後で YAG レーザーを発光させる。１枚目画像の垂直同期信号の出力時刻を基準とすると、１枚目の画像は Δt～(Δt+1/60)s 間に収録される。よって、YAG レーザーを発光させるための２つのトリガ信号の垂直同期信号からの遅れ時刻は、以下の条件を満

たすように設定する必要がある。

$$\Delta\tau = \Delta\tau_2 - \Delta\tau_1 \tag{3.5}$$

$$\Delta\tau_1 < \Delta\tau + 1/60 \tag{3.6}$$

$$\Delta\tau_2 > \Delta\tau + 1/60 \tag{3.7}$$

ここで、$\Delta\tau$ は画像間の時間間隔(s)、$\Delta\tau_1$, $\Delta\tau_2$ は垂直同期信号から同期信号発生器で発生する２つのトリガ信号までの遅れ時間(s)である。

(e)の２つの YAG レーザー電源は、(d)の同期信号発生器からのトリガ信号を受けて、(f)の YAG レーザーを発光させる。

本システムで使用したダブルパルス YAG レーザーは、２つのレーザーの偏向面を一致させたシステムとなっている。２つのレーザーの偏向面がずれている場合、流体中に混入した微細粒子の径によっては、２つのレーザー間の反射輝度が大きく異なる場合がある。このような場合は、波長の 1/4 の偏向面をもった板を通すことによって、レーザー光が円偏向となり、２枚のレーザー間の偏向面の影響を除去することができる。

YAG レーザーは、Yttrium、Aluminum、Germanium の合金を励起させ、発光させている。この合金のまわりに蒸留水を流すことによって冷却を行っている。蒸留水を流さない状態で長期間（１週間以上）放置すると、合金表面に水垢が付着し、レーザーの性能に影響する。よって、長期間使用しない場合は、１週間に一度、15 分程度冷却水を循環させるか、あるいは、蒸留水を抜き取っておく必要がある。

以上の計測システム、PIV 解析手法は慶應義塾大学、前田・菱田研究室で開発されたシステムを基に構築したものである。

3.3 画像中のノイズ除去手法

PIV の原理については前節にて示したが、実際に PIV を用いる上で、種々の問題が存在する。

構造が単純な試験装置では、画像中に構造物が撮影されることは少なく、また、アクリル窓等の撮影窓にごみ等などが付着した場合においても、メンテナンスが容易に行えることが多い。しかし、実機を模擬した複雑な形状の模型試験や構造物近傍の流動場を対象とする場合、流体中に存在する構造物がトレーサ粒子と共に画像中に撮影される。また、構造が複雑な大規模試験装置では、頻繁に試験装置のメンテナンスを行うことができず、撮影窓に付着したごみが、画像中にトレーサ粒子と共に撮影されてしまう。これらの構造物や撮影窓のごみ、レーザー光が構造物に反射するハレーション（ノイズ）は、PIV の妨げとなり、収録データの信頼性を低下させる原因となる。

よって、収録した画像データから、信頼性の高い流速データを得るためには、このようなノイズを除去し、流れている粒子のみの画像を得る必要がある。

撮影画像中で、トレーサ粒子は時間経過と共に移動しているため、撮影時刻が異なる画像では、画像内の同一ピクセル（位置）の輝度値は、トレーサ粒子の存在の有無によって時間的に大きく変動する。一方、ノイズは時刻の異なる画像においても常に同位置に撮影されているため、輝度値の時間変動はほとんどない。このトレーサ粒子による信号とノイズの輝度値の時間変動が異なる特性を利用し、以下に示す２種類のノイズ除去手法を開発した。

3.3.1 輝度の時間平均値を用いたノイズ除去手法

本手法は、時間的に連続する画像の各ピクセルの輝度を時間平均し、各時刻の輝度から時間平均輝度を減算することにより、ノイズを除去するものである。

時間的に連続する画像の各ピクセルの輝度値を $L_t(k)$、時間的に連続する画像の枚数を N_t とすると、各ピクセルの時間平均輝度 $L_{t,avg}(k)$は以下の式で求められる。

$$L_{t,avg}(k) = \frac{1}{N_t}\sum_{t=1}^{N_t} L_t(k) \qquad (3.8)$$

ノイズの存在するピクセルは、照明強度一定の条件下において、輝度値の時間変動はないと考えられるので、式(3.8)は、以下のようになる。

$$L_{t,avg}(k) = \frac{1}{N_t}\sum_{t=1}^{N_t} L_t(k) = \frac{1}{N_t} L_t(k) \times N_t = L_n(k) \qquad (3.9)$$

ここで、$L_n(k)$はノイズの輝度値である。

一方、ノイズがないピクセルは、トレーサ粒子がある時刻とない時刻がある。そこで、トレーサ粒子の存在する時刻の輝度値を $L_p(k)$、存在しない時刻の輝度値（背景輝度値）を $L_b(k)$とすると、式(3.8)は、以下のようになる。

$$L_{t,avg}(k) = \frac{1}{N_t}\left[L_p(k) \times N_p + L_b(k) \times N_b\right] \qquad (3.10)$$

ここで、N_p はピクセルに粒子の存在する画像の枚数、N_b は粒子が存在しない画像の枚数であり、$N_t=N_p+N_b$ が成り立つ。

時系列画像の枚数が多く（N_t が大）、各ピクセルにトレーサ粒子がある時刻の頻度が少ない場合（$N_p \ll N_t$）、以下の近似が成り立つと仮定する。

$$N_b/N_t \fallingdotseq 1 \ , \quad N_p/N_t \fallingdotseq 0 \qquad (3.11)$$

これにより、式(3.10)は以下のようになる。

$$L_{t,avg}(k) \fallingdotseq L_b(k) \qquad (3.12)$$

また、ノイズとトレーサ粒子が重なっている箇所に関しては、式(3.12)より、$L_b(k)=L_n(k)$となるので、

$$L_{t,avg}(k) = L_n(k) \qquad (3.13)$$

が成り立つ。

すなわち時間平均輝度は、ノイズの輝度あるいは背景輝度となり、各時刻の画像からこれを減算することにより、ノイズを除去できる。

図 3.3.1 に本手法によるノイズ除去結果の一例を示す。横軸にフレーム数（時間軸と等価）、縦軸に輝度値（ここで用いたシステムでは 8bit のデータであり、0～255 の値をもつ）を示す。ノイズピクセルの輝度値は、時間平均輝度を減算することにより 0 近傍の値となることから、ノイズが除去できていることがわかる（図 3.3.1(a)）。一方、トレーサ粒子が撮影されているピクセルの輝度値は、時間平均輝度を減算しているために輝度が低下するが、トレーサ粒子の通過によるピークは再現されている（図 3.3.1(b)）。減算した結果の輝度が 0 未満である場合、輝度値を 0 に置き換えている。そのため、トレーサ粒子周りの微小な輝度分布や輝度値の小さいトレーサ粒子はノイズと共に除去され、画像は２値化画像に近くなる。

3.3.2 輝度の最小値を用いたノイズ除去手法

前節の時間平均輝度を用いたノイズ除去手法では、トレーサ粒子周りの微小な輝度分布や輝度値の小さいトレーサ粒子を再現することができなかった。そこで、ノイズを相互相関処理に与える影響がないレベルまで低下させた上で、輝度値情報の損失を最低限にするために、時系列画像から各ピクセルの時系列における最小輝度を減算するノイズ処理手法を開発した。

時系列画像の各ピクセル毎の最小輝度値は、以下の式で求められる。

$$L_{min}(k) = MIN\left[L_t(k), t = 1 \sim N_t\right] \qquad (3.14)$$

ノイズピクセルは、時系列画像において一定の輝度値、あるいはトレーサ粒子が重なった場合に輝度値が大きくなる。よって、

$$L_{min}(k) \fallingdotseq L_n(k) \qquad (3.15)$$

一方、トレーサ粒子が撮影されているピクセルでの最小輝度は、背景輝度と同じになる。

$$L_{min}(k) = L_b(k) \qquad (3.16)$$

求めた最小輝度値を時系列画像の輝度値から減算することにより、ノイズを除去した画像を作成する。

図 3.3.2 に本手法によるノイズ除去処理結果の一例を示す。グラフの座標系は図 3.3.1 と同じである。ノイズピクセルの場合、時系列画像から各ピクセルの最小輝度値を減算すると、輝度値は 0 近傍の値となり、ノイズが除去されていることがわかる（図 3.3.2(a)）。トレーサ粒子が通過するピクセルの場合、ノイズ除去により背景輝度が 0 程度に低下する。そのため、全体の輝度値は背景輝度分低下するが、最小輝度を減算することにより、失われた情報はなく、トレーサ粒子通過前後の微小な輝度変化も再現されている（図 3.3.2(b)）。

前節の時間平均輝度減算ノイズ除去法（Time-Averaged Light Intensity Subtraction method; TIS 法）と本節の最小輝度減算ノイズ除去法（Minimum Light Intensity Subtraction method; MIS 法）による原画像の再現性と流速計測データの検証は、別途報告した[15][16]。これにより、PIV による流速計測精度が最大 12 倍向上した。

3.4 炉心槽内熱流動試験への適用と各計測手法のクロスチェック

高速炉の固有の安全性を評価するにあたり、自然循環時の崩壊熱除去特性を定量的に評価することが必要である。崩壊熱除去システムとして、炉容器上部プレナム内に冷却器（Direct Heat Exchanger; DHX）を有する直接炉心補助冷却システム（Direct Rector Auxiliary Cooling System; DRACS）を採用した場合、自然循環時の一次系流量は定格の2%以下になることが予測されており、浮力と慣性力が相互作用を起こす複雑な熱流動現象が原子炉容器内で発生する。代表的な現象としては、DHXからの低温ナトリウムが炉心槽内の集合体間ギャップに入り込むインターラッパーフロー（Inter-wrapper flow; IWF）現象、低温ナトリウムが集合体の頂部から内部に潜り込む集合体内潜り込み現象が挙げられる。IWFは集合体外面からの冷却効果をもつ一方、集合体上部非発熱部の温度低下により自然循環ヘッドが減少し、炉心流量の低下をまねく可能性を有している。

核燃料サイクル開発機構では、PLANDTL-DHX 試験装置により炉内熱流動現象に関するナトリウム試験を実施し、集合体出力、集合体流量等がIWFに及ぼす影響を把握し、IWFによる炉内最高温度の低減効果を確認できた[17]-[19]。しかし、PLANDTL-DHX 試験装置の模擬炉心は7本の集合体で構成されており、実機体系に近い炉心形状でのIWFの空間特性は把握できない。また、作動流体がナトリウムであるために、炉内の流況把握およびIWFに対する幾何形状の影響を把握することが困難となる。

そこで、原子炉工学グループでは、水を作動流体とするIWF水流動試験装置（Test Rig for Inter-wrapper Flow; TRIF）を製作し、IWFの定量的な評価を試みている[20]。本試験体は透明部材で構成されており、PIVやLDVを用いた炉内の詳細な流況把握を可能としている。

3.4.1 試験装置

図3.4.1にTRIF試験体の模式図を示す。試験体は30°セクタで炉心を模擬しており、6列の模擬燃料集合体、2列の模擬遮蔽体から構成される。模擬集合体は対面間距離150mm、高さ1500mmであり、流況可視化が可能なようにアクリルで製作されている。燃料集合体を模擬するにあたっては、集合体内部の燃料ピンは模擬せず、パイレックスガラスに酸化錫を塗布した透明ガラスヒータをアクリル製の集合体外面に設置することによって集合体間ギャップ部に一様熱流束を与えることにし、IWF 特性のみを把握できるようにした。また、集合体間ギャップの間隔（6mm）を一定に保つために、集合体外面にボタン型パッドを設置した。

模擬上部プレナムは、透明塩化ビニル製で、DHX を模擬したパネル型熱交換器 4 基が装荷されている。DHX は水冷とし、二次系冷却水はチラーにより、一定温度に維持されている。

3.4.2 LDV および UDV とのクロスチェック

本試験装置を用いて、同じ流れ場における、PIV と LDV（レーザー流速計）および UDV を用いた計測を行った。比較試験は、流速計測部付近の集合体外面に設置した透明ガラスヒータに通電し、集合体ギャップ部の流体の浮力による上昇流を計測することにより実施した。

図 3.4.2 に本試験での各計測システムの計測範囲を示す。LDV と PIV のクロスチェックは Position-A、UDV と PIV のクロスチェックは Position-B にて実施した。Position-A は集合体間ギャップを上昇する流れが、上部プレナムへ流出するサーマルプルームをターゲットとし、Position-B は集合体外面のガラスヒータより加熱され上昇するギャップ部流れをターゲットとしている。

LDV はアルゴンレーザーを用いた２次元計測が可能なものであり、最小分解能は 10^{-5}m/s である。本 LDV はバースト信号が発生したときのみデータを収録するものであり、本試験でのサンプリング周波数の平均は 56Hz であった。PIV と UDV の計測条件を以下に示す。

＜Position-A＞

-PIV-

画像サイズ：	35mm×26mm
画像時間間隔：	8ms
画像枚数：	360 枚（180 組、6 秒間）
流速分解能：	1.4mm/s（サブピクセル精度 0.2pixel を仮定）
サンプリング周波数：	30Hz
レーザーシート幅（厚み）：	5mm

＜Position-B＞

-PIV-

画像サイズ：	43mm×31mm
画像時間間隔：	8ms
画像枚数：	360 枚（180 組、6 秒間）
流速分解能：	1.6mm/s（サブピクセル精度 0.2pixel を仮定）
サンプリング周波数：	30Hz
レーザーシート幅：	5mm

-UDV-

トランスデューサ径：	6mm
最小計測位置：	5mm（トランスデューサ端面を 0mm とする）
最大計測位置：	681.0mm （ 〃 ）
音速：	1510m/s
収録時系列データ数：	1024（145 秒間）
最大計測可能流速：	0.10m/s
流速分解能：	0.82mm/s
サンプリング周波数：	7Hz

図 3.4.3 に Position-A の位置で LDV と PIV のクロスチェックを行った結果を示す。(1)は時間平均値、(2)は流速変動の RMS 値を示す。LDV の結果と PIV の結果は大きく異なっている。これは、PIV の画像中に輝度の非常に高い LDV のレーザー光線が撮影されているため、画像の空間相関が正しく求められていないことによる。そこで、前節のノイズ処理手法を用いて、画像中から LDV レーザーを除去して流速を導出した。用いたノイズ除去手法は TIS 法（時間平均輝度減算法）である。この結果、時間平均流速は、LDV に対して 9%の誤差となり、PIV による計測が妥当であることがわかった。しかしながら、流速変動の RMS 値は、LDV の結果に対して PIV の結果が大きくなっている。これは、ノイズ除去処理を用いても完全に画像中のノイズが除去できなかったためと考えられる。

図 3.4.4 に時系列データのヒストグラムによるノイズ処理の効果を示す。(2)のノイズ処理を施さないケースでは、(1)の LDV のヒストグラムの分布形状と大きく異なっている。一方、(3)のノイズ処理を施したケースでは、ほぼ LDV のヒストグラムを再現しており、本ノイズ処理が有効であることがわかる。

図 3.4.5 に Position-B の位置での UDV と PIV のクロスチェックを行った結果を示す。前図と同様に(1)は時間平均値、(2)は流速変動の RMS 値を示す。UDV は一次元の流速値が求められるため、縦軸を鉛直方向位置として示した。横軸は流速値である。これによると、PIV による時間平均流速は UDV とほぼ一致し、その差は 9%程度であることが分かる。これにより超音波ビーム径程度の狭い流路にも UDV が適用可能であるという見通しが得られた。また、速度変動の RMS 値では、UDV と比較して、PIV の結果は約半分になっている。

図 3.4.6 に PIV と UDV の時系列データのヒストグラムの比較を示す。これによると、UDV の分布形状が PIV と比べて、裾が広がっていることがわかる。

この原因としては、UDV が流速値の時間変動特性に加え、超音波ビームの軸に垂直な断面内の空間分布をもった流速を収録していることが考えられる。PIV は 5mm のレーザーシート幅で収録しているが、レーザーシート内でのレーザー

強度分布を考慮すると、実際に計測に寄与している領域は2mm程度の幅であると考えられる。一方、UDVは超音波ビーム径が約6mmであり、6mmの集合体ギャップ幅全体を計測しているため、集合体間ギャップ内の水平方向速度分布をもった反射粒子のエコーを計測しているの影響を受けていると考えられる。UDVの時系列データの変動には、時間変動に加えて空間分布の影響が乗じているために、ヒストグラムの分布形状がPIVに比べて、裾が広がっていると考えられる。

今後、UDVとPIVにより得られた結果が集合体間ギャップ部のどの流速に対応するのか（例えば、断面平均流速、あるいは断面内最高流速など）を今後明らかにしていく必要がある。

3.4.3 集合体間ギャップの流速測定結果

図3.4.5にPIVを用いて集合体間ギャップの流況を計測した結果を示す。試験条件は、以下の通りである。

- ヒータ出力：2000W/m^2
- スペーサーパッド：ボタン型
- 形状パラメータ：フローホールなし、バイパスラインなし

また、PIVの収録条件は、以下の通りである。

- 画像サイズ：　80mm×60mm
- 画像時間間隔：　15ms
- 画像枚数：　120枚（60組）
- 流速分解能：　1.7mm/s（サブピクセル精度0.2pixelを仮定）
- サンプリング周波数：　30Hz
- レーザーシート幅：　5mm

P1からP4までは炉心槽内の水平方向位置に対応している。また、(a),(b),(c)は各集合体の垂直方向位置に対応している。画像中で一部欠けている領域は、可視化窓のフレームの位置である。集合体外面の透明ガラスヒータからの入熱により集合体間ギャップの流体が鉛直方向に徐々に加速されていることがわかる。また、水平方向位置によって流速が異なっていることも明らかになった。集合体頂部から上部プレナム内に流出する位置において、サーマルプルームによる非一様な流速分布となっている様子が観測された。水平方向流速は、全体として炉心中央部に向かう流れとなっている。また、炉心中央部での鉛直方向流速の方が炉心外側の流速に比べて大きくなっていることがわかる。集合体間ギャップ部の流速は最大4cm/sであった。

4. 結論

平成8年度から平成11年度まで、先行基礎工学研究として「炉心槽内流速分布測定への超音波流速計の適用性評価」を行った。炉心槽内の流れは炉心部集合体間の隙間流れであり、その除熱能力から自然循環時の炉心熱流動特性に大きな影響を与える現象として注目されている。本研究ではナトリウム流動場への適用可能性をもつ超音波流速計（UDV）と粒子画像流速測定法（PIV）を計測技術として選んだ。これらの手法は、瞬時の空間分布を計測することが可能であり、実験データの品質向上に寄与できる。UDV と PIV について基礎的な体系並びに高速炉の熱流動現象の要素として炉心槽内の流れを模擬した複雑形状の水試験に適用しその特性を評価した。以下に得られた結果を示す。

○配管内流れと平板状単一噴流に対してUDVによる流速測定を実施した結果、既往研究と一致する結果が得られた。UDV の有効性を確認するとともに有効な計測が行える空間範囲などの特性を把握した。
○瞬時の２次元流速分布が計測可能なシステムとして、YAG レーザー、CCD カメラ、同期信号発生器等を用いて PIV システムを構築した。カメラとパルスレーザーの制御技術、トレーサー粒子の選択などその特性を把握した。
○PIV 画像中のノイズ（トレーサー粒子以外の画像）を除去するシステムを開発・検証し、複雑形状流路をもつ体系に対して速度場の測定を可能にするとともに、計測精度を向上させることができた。
○LDV と PIV および UDV と PIV のクロスチェックを行った。時間平均流速は計測手法によらずほぼ一致し、PIV, UDV の計測精度を確認した。
○UDV と PIV を炉心槽内の流速測定に適用した結果、流速値としてほぼ一致した結果が得られ、両者が複雑形状流路に適用性をもつことがわかった。
○PIV を炉心槽内速度場計測に適用し、炉心槽全域での２次元流速分布を明らかにした。

また、以下の課題が明らかになった。
＜UDV＞
○トランスデューサ近傍での流速測定の信頼性の低下
○構造物近傍での流速測定の信頼性の低下
○トランスデューサから射出する超音波ビーム有効径内に流速分布が存在する場合の流速計測結果に対する影響
＜PIV＞
○開発したノイズ除去手法の適用範囲の定量化
○レーザーシート内に流速分布が存在する場合の流速計測結果に対する影響

謝辞

PIV計測システムの構築に際し、慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科前田・菱田研究室の皆様にご助言を頂きました。また、水流動試験実施において、常陽産業（株）の伊藤真美氏、小沼英良氏、関根正氏、および原子炉工学グループの安田明洋氏（現、京葉ガス）、並びに大木義久氏（現、NDC）に多大なるご尽力を頂きました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

[1]村松壽晴、冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発(XI) ー流体ー構造非定常熱的応答特性に係わる評価手法の検証ー、JNC 公開報告書、PNC TN9410 97-039、1997.

[2]Takeda, Y., Velocity measurement by ultrasound Doppler shift method, Fluid Control and Measurements, Pergamon, Tokyo, Japan, 1985.

[3]Proceedings of the Second International Workshop on PIV'97-Fukui, Fukui, Japan, July 8-11, the Visualization Society of Japan,1997.

[4]Okamoto, K., Hassan Y. A. and Schmidl, W. D., New Tracking Algorithm for Particle Image Velocimetry, Experimental in Fluids, Vol. 19, No. 5, pp. 342, 1995.

[5]Ultrasound Velocity Profile (UVP) monitor, Model X-1, Met-Flow SA, Lausanne, Switzerland, 1992.

[6]技術資料「管路・ダクトの流体抵抗」出版分科会編、技術資料 管路・ダクトの流体抵抗、日本機械学会、1979.

[7]A. T. Tokuhiro, N. Kimura and H. Miyakoshi, Thermal Striping -An experimental investigation on mixing of a vertical cooled jet with two adjacent heated jets. Part I: Some initial results of Ultrasound Doppler Velocimetry measurements-, JNC Report, PNC ZN9410 96-126, 1996.

[8]A. T. Tokuhiro, Experimental investigation of a vertical planar jet by ultrasound and laser Doppler velocimetry, J. nucl. Sci. and Technol., 36[6], June, 1999.

[9]K. Kataoka and T. Takami, Experimental study of eddy diffusion model for heated turbulent free jets, Am. Inst. Chem. Engrs. J., vol. 23, 889-896 November 1997.

[10]Hinze, J. O., van der Hegge Zijnen, B.G. :Appl. Sci. Res., 1A, 435 (1949)

[11]鴨志田洋、林謙二他、超音波流速分布測定装置（UVP）による配管内ナトリウム流速分布の計測、JNC 公開報告書、PNC ZN9410 95-126、1995.

[12]Adrian, R. J., Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 23, 261, 1991.

[13]榊原潤、菱田公一、前田昌信、二次元衝突噴流よどみ域における渦構造と熱伝達（DPIV と LIF による速度・温度場の同時計測）、日本機械学会論文集（B 編）60-573、1994.

[14]榊原潤、菱田公一、前田昌信、画像処理による流動場の速度・温度同時計測手法、Thermal Science & Eng., 2-4, p1-9, 1994.

[15]木村暢之、三宅康洋他、可視化画像による流速測定技術の開発 ーノイズ処理法を用いた計測精度の向上ー、JNC 公開報告書、JNC TN9400 99-078、1999.

[16]N. Kimura, Y. Miyake, et al., Noise Reduction Techniques for the Particle Image

Velocimetry -Application to an Experimental Study on Natural Convection in a Fast Reactor Core-, ICONE-8, Baltimore, MD, USA, April 2-6, ICONE-8405, 2000.

[17]H. Kamide, et al., Investigation of Inter-wrapper Flow in Fast Reactors During Natural Circulation Decay Heat Removal -Seven-subassembly Sodium Experiments-, Proc. Int. Mtg. on Advanced Reactors Safety (ARS '97), Orlando, Florida, June 1-5, p.1141, 1997.

[18]H. Kamide and K. Hayashi, et al., Experimental Study of Core Thermohydraulics in Fast Reactors during Transition from Forced to Natural Circulation -Influence of Inter-Wrapper Flow, Proc. 8th Int. Top. Mtg. on Nuclear Reactor Thermo-Hydraulics (NURETH-8), Kyoto, Japan, Sep. 30-Oct. 4, Vol. 2, p.922, 1997.

[19]H. Kamide, N. Kimura, et al., Experimental Study on Inter-wrapper flow during Natural Circulation in Fast Reactors - Influence on Natural Circulation Flow and Core Temperatures-, Proc. 6th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-6), San Diego, CA, USA, May 10-14, ICONE-6197, 1998.

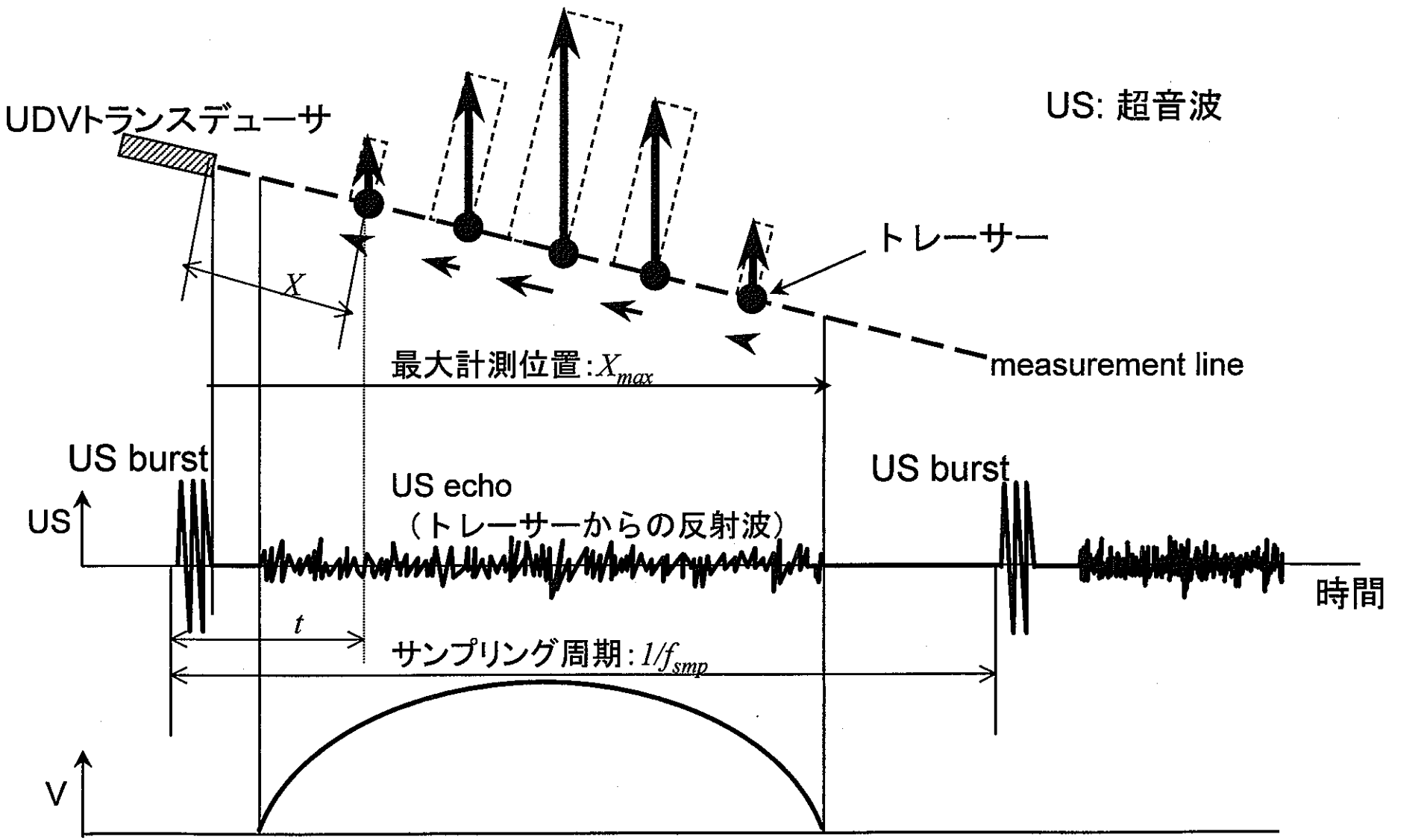
[20]安田明洋、宮越博幸他、インターラッパーフロー自然循環水流動可視化実験ーボタン型ラッパー管パッド形状における試験および解析結果ー、JNC 公開報告書、JNC TN9400 99-072, 1999.

表 2.1　　本研究で用いた超音波流速計トランスデューサ仕様

	トランスデューサ素子	最大印加電圧	ノミナル周波数	発振サイクル数	繰り返し周波数	使用最高温度	トランスデューサ有効径
配管内流速分布試験（2.2 節）	ニオブ酸リチウム	160V	4MHz	4~6	1~10kHz	500℃	10mm
単一噴流試験（2.3 節） 炉心槽内熱流動試験（3.4 節）	ピエゾ電圧素子	160V	4MHz	4~6	1~10kHz	80℃	6mm

表 3.1　　PIV 計測構成機器の概要

機器	役割	データ収録時の動作	機器仕様	
(a)CCD カメラ	デジタル画像の収録	(g)へ NTSC 信号を奇数フレーム・偶数フレームを２本に分けて出力	SONY 製 XC-7500	Progressive Scan CCD Camera 収録画像：640×480pixel 60Hz サンプリング
(b)CCD カメラ用電源	CCD カメラへの電源供給	(c)へフレーム毎にパルス（V-SYNC）を発信	SONY 製 DC-77RR	入力：AC100V、50/60Hz 出力：DC12V 水平／垂直同期信号入力／出力
(c)信号発生器	トリガ信号の整流	(b)からトリガを受信し、同時に(d)にトリガを発信	汎用 Function Generator	入力：1-5V(TTL) 出力：1-5V(TTL)
(d)同期信号発生器	画像の時間間隔の調整	(c)からトリガを受信し、調整した時間遅れで２つのトリガを発信	タイミングコントローラ	最小時間分解能：1μs 入力：1-5V(TTL) 出力：1-5VZ(TTL)
(e)Nd-YAG レーザー用電源	レーザーへの電源供給	(d)からトリガを受信し、同時に(f)へレーザーの発振指令	New Wave Research 製 Mini Lase II	入力：AC100V レーザー出力：最大 15mJ 発光時間：6ns 発光間隔：30Hz×２台
(f)Nd-YAG レーザー発振管	レーザーの発振	(e)からの信号を受け、レーザーを発信		
(g)収録用 PC	画像の保存	(a)からの NTSC 信号を受け、メモリに蓄積、収録後、ファイルに変換	汎用 PC 画像収録ボード： Data Translation 製 DT-3155 ×２枚	DOS/V PC PCI バス接続 入力：NTSC



位置：$X=ct/2$　　流速：$V=c\Delta f/2f_T$

Δf:Doppler shift frequency
f_T:Original frequency

図2.1.1　　UDVの測定原理

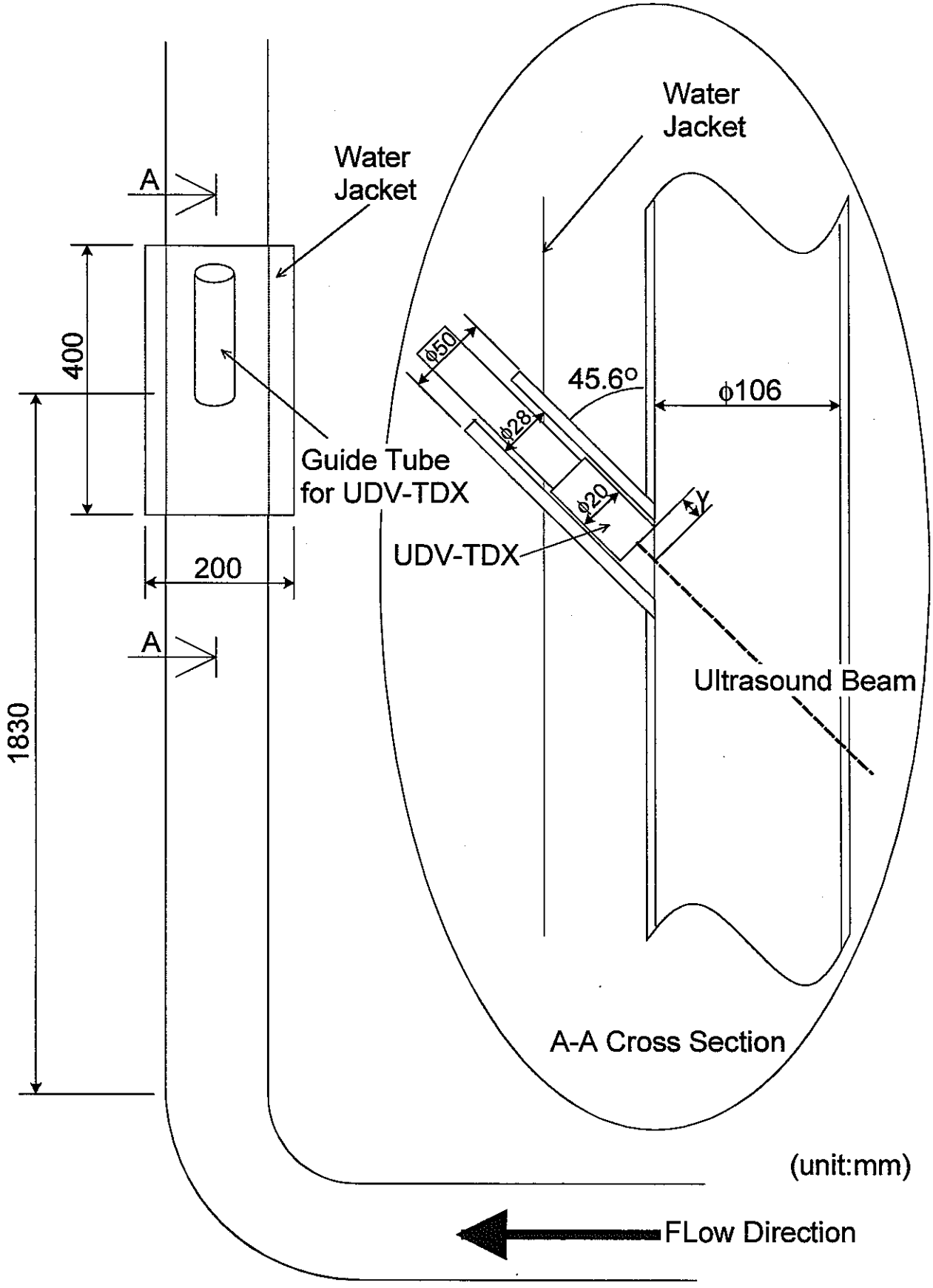
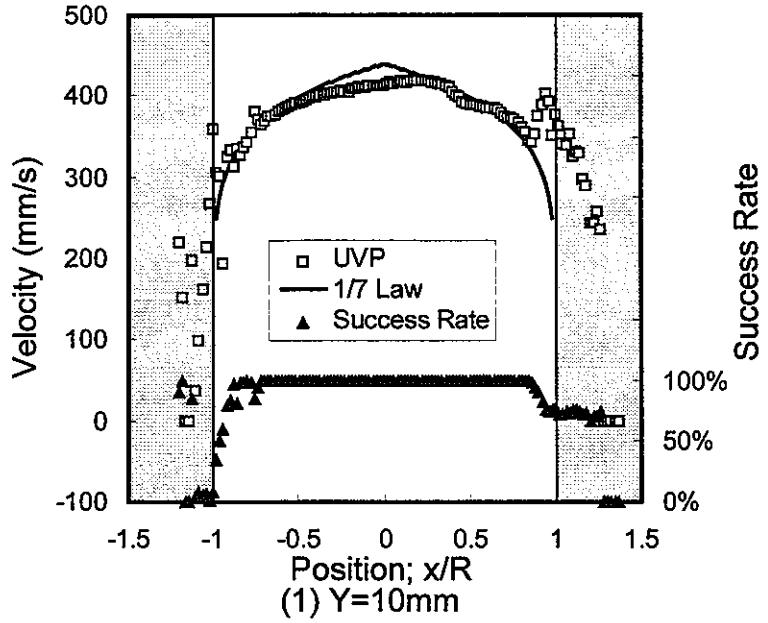
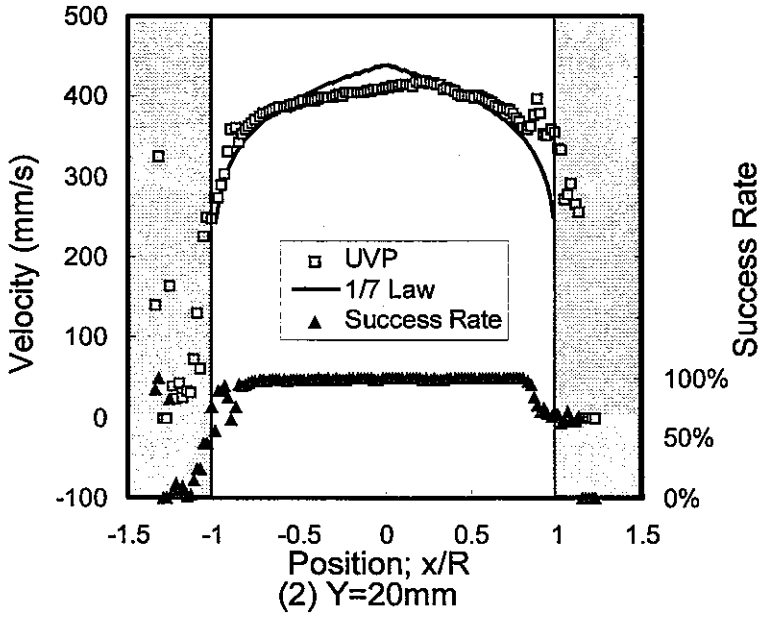


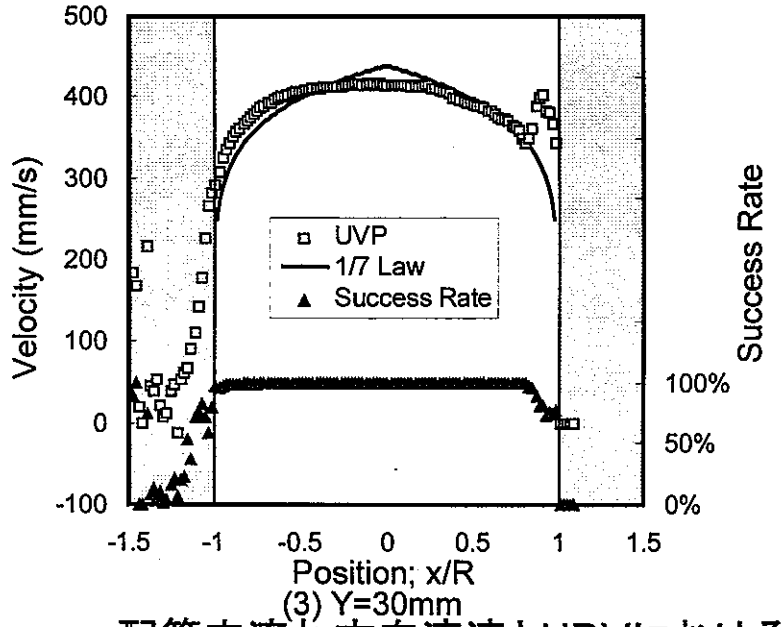
図2.2.1　　配管内流速分布測定試験部



(1) Y=10mm

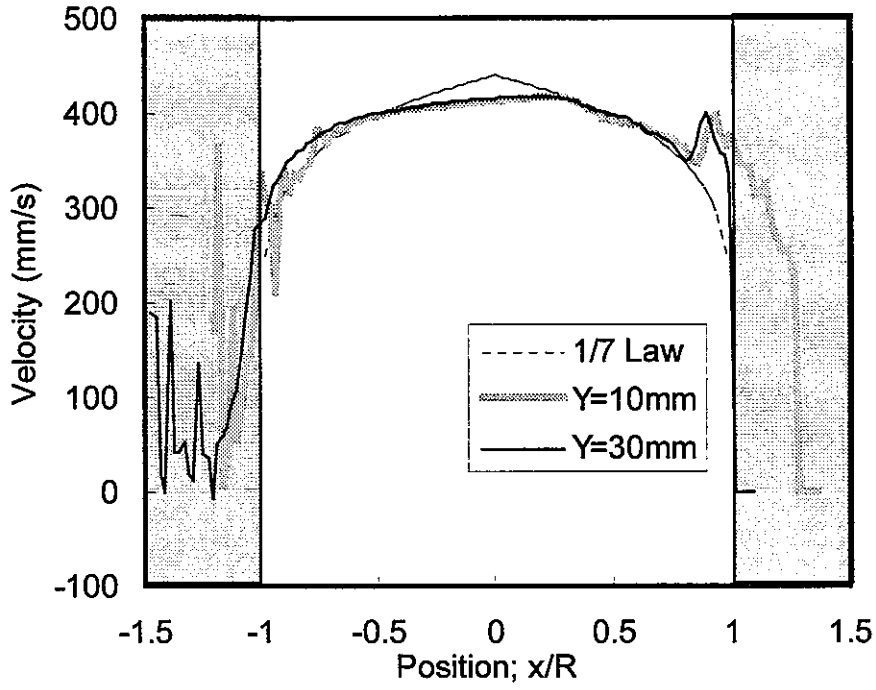


(2) Y=20mm

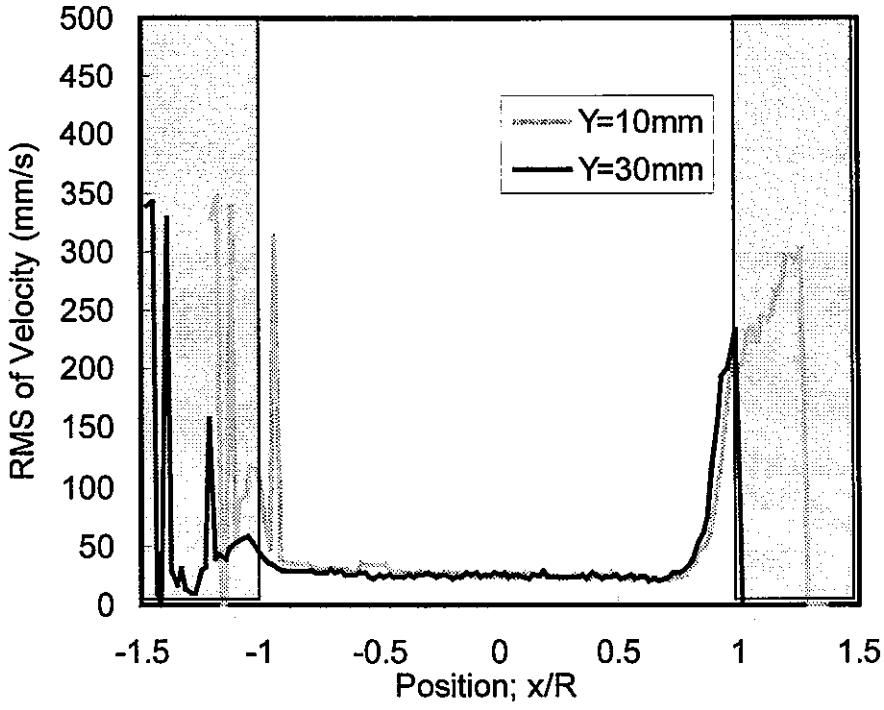


(3) Y=30mm

図2.2.2　配管内流れ方向流速とUDVにおける計測Success Rateの水平方向分布



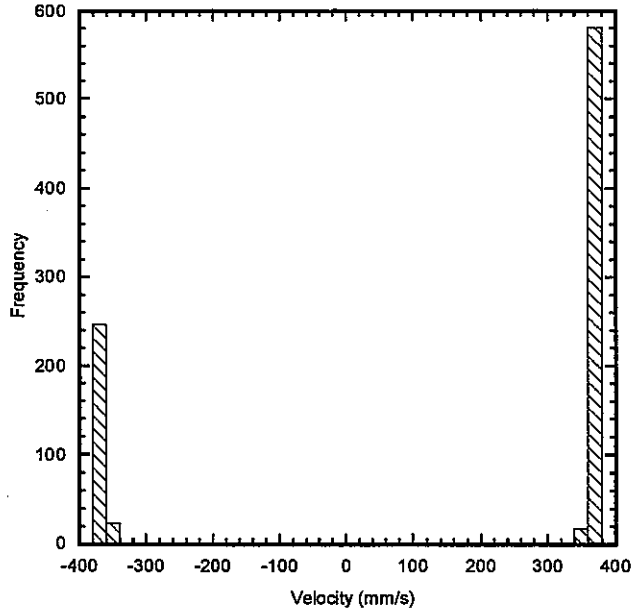
(1) 時間平均流速



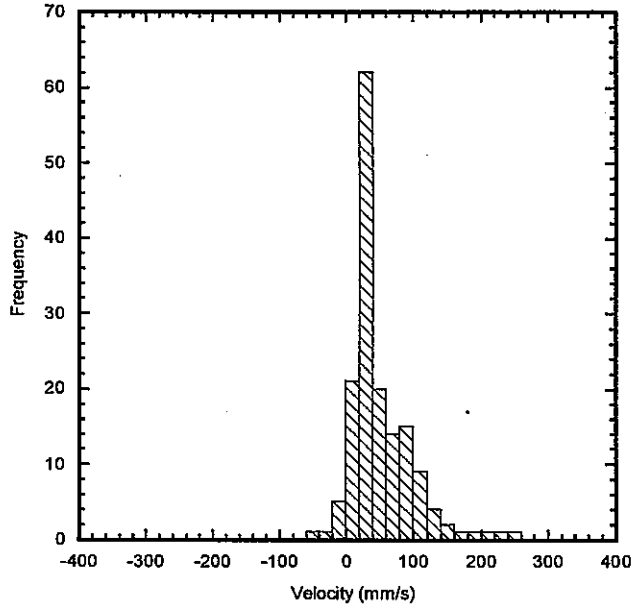
(2) 速度変動強度

図2.2.3　　時間平均流速と速度変動強度に対する計測位置の影響

(1) Y=10mm



(2) Y=20mm



(3) Y=30mm

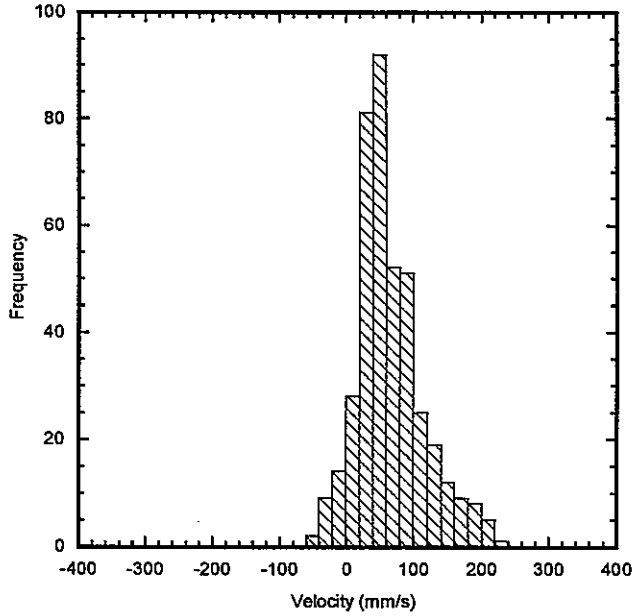
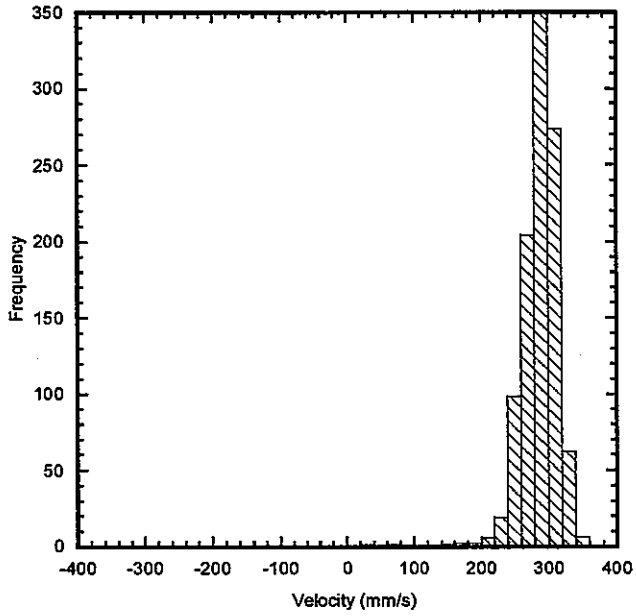
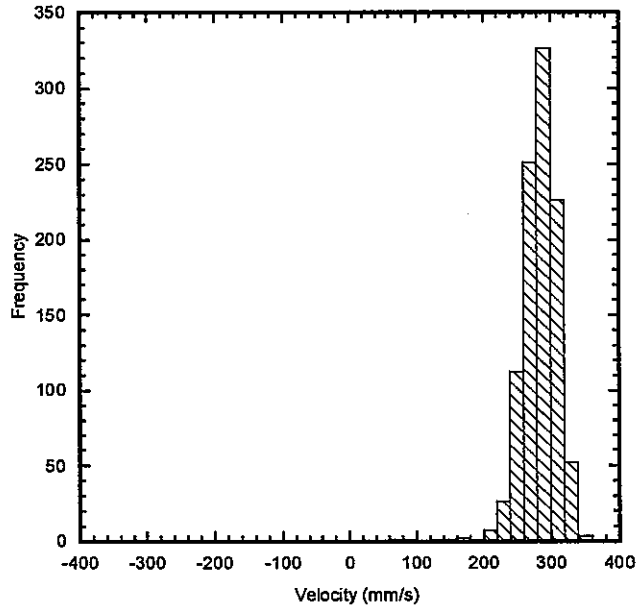


図2.2.4 時系列データのヒストグラムにおける計測位置の影響
(トランスデューサ側の配管内壁近傍; x/R=-1)

(1) Y=10mm



(2) Y=20mm



(3) Y=30mm

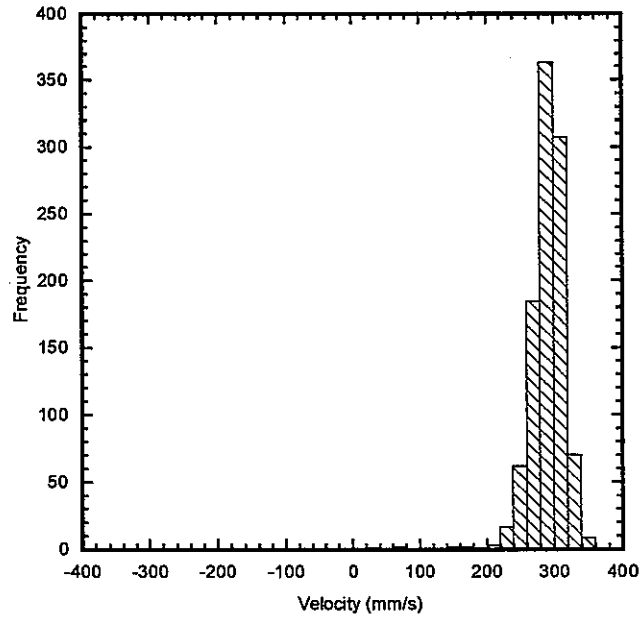
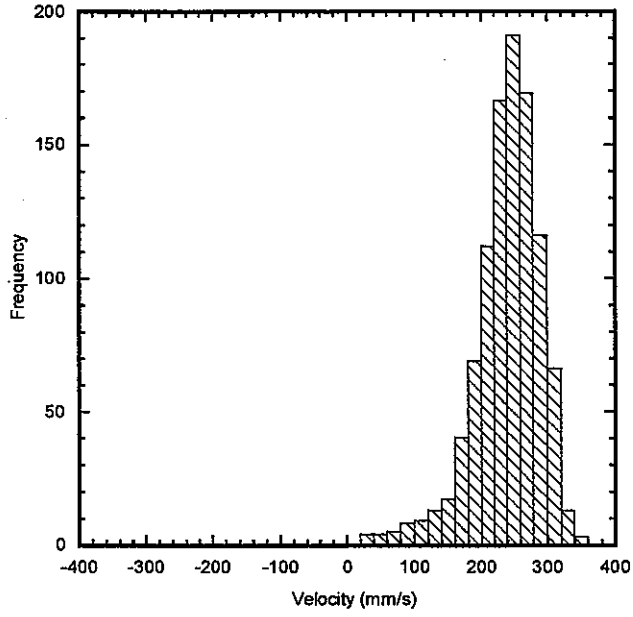
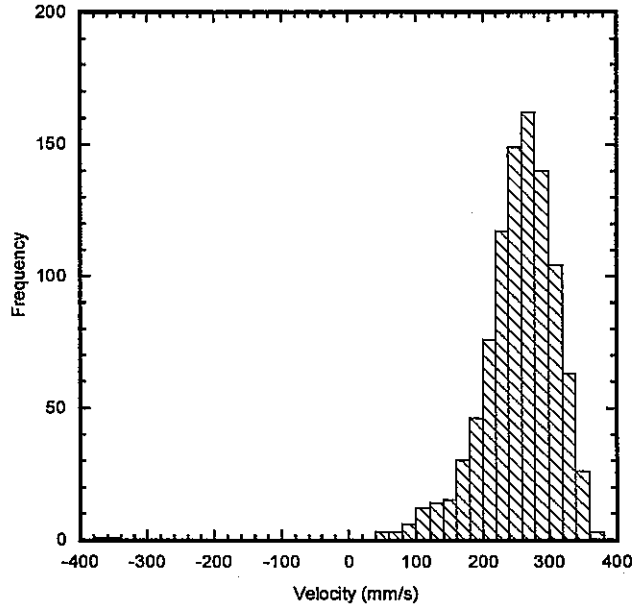


図2.2.5 時系列データのヒストグラムにおける計測位置の影響
(配管中央位置; x/R=0)

(1) Y=10mm



(2) Y=20mm



(3) Y=30mm

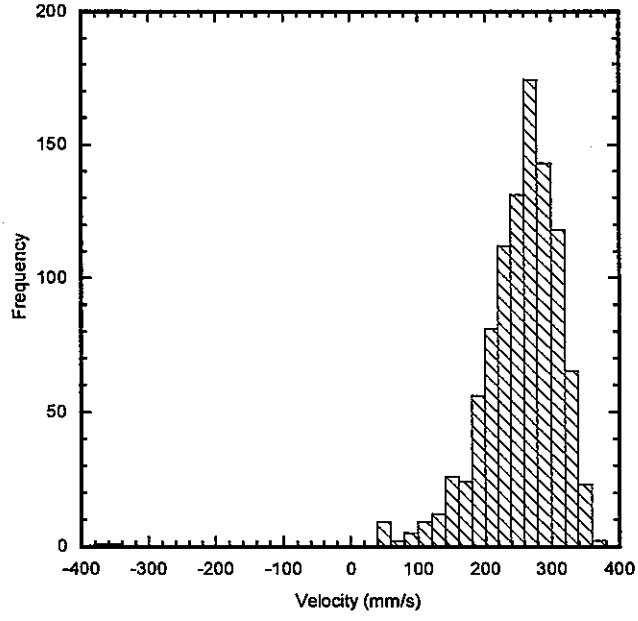


図2.2.6 時系列データのヒストグラムにおける計測位置の影響
(トランスデューサと反対側の配管内壁近傍; x/R=1)

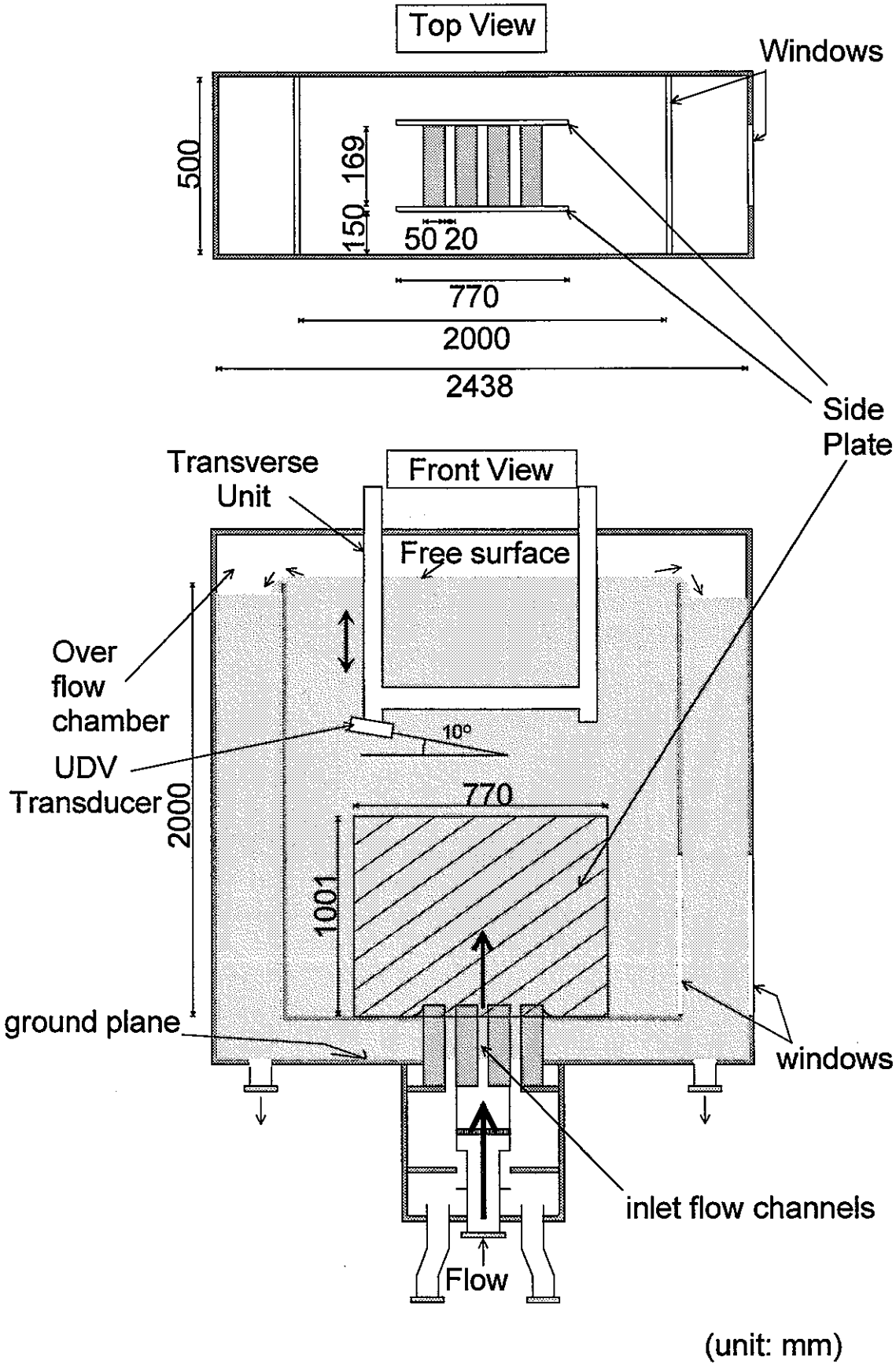
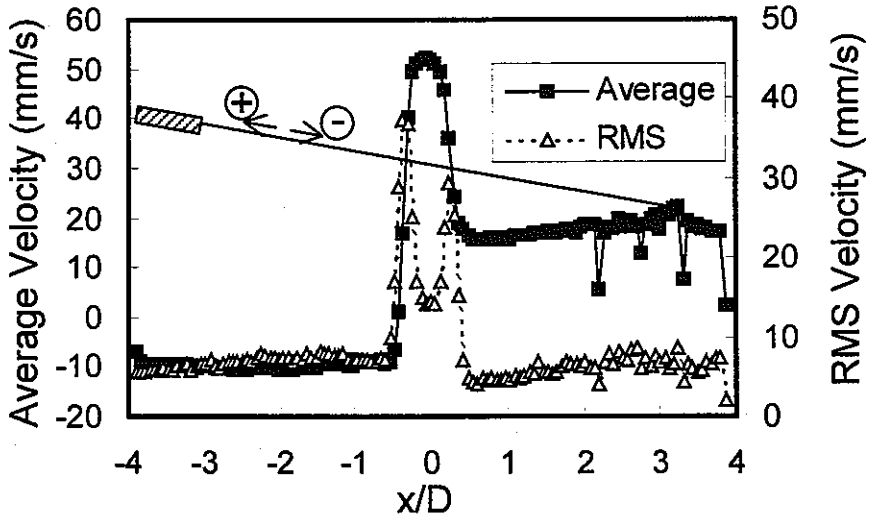
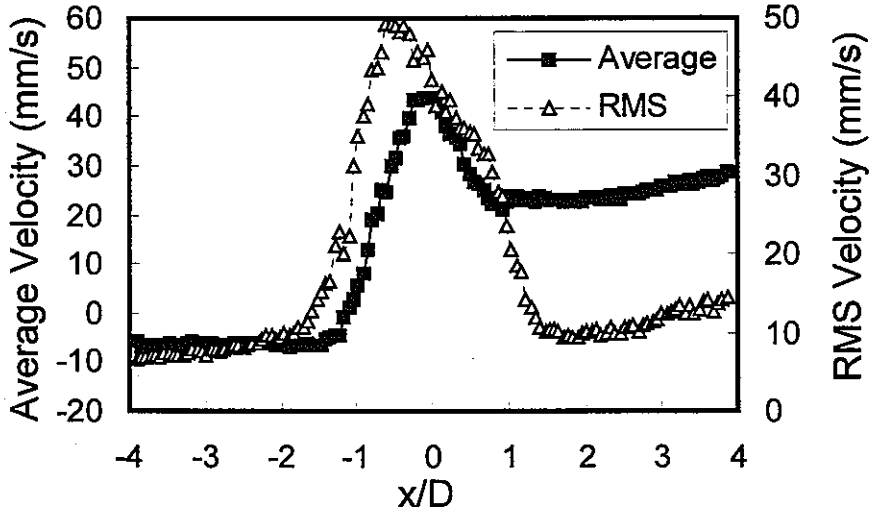


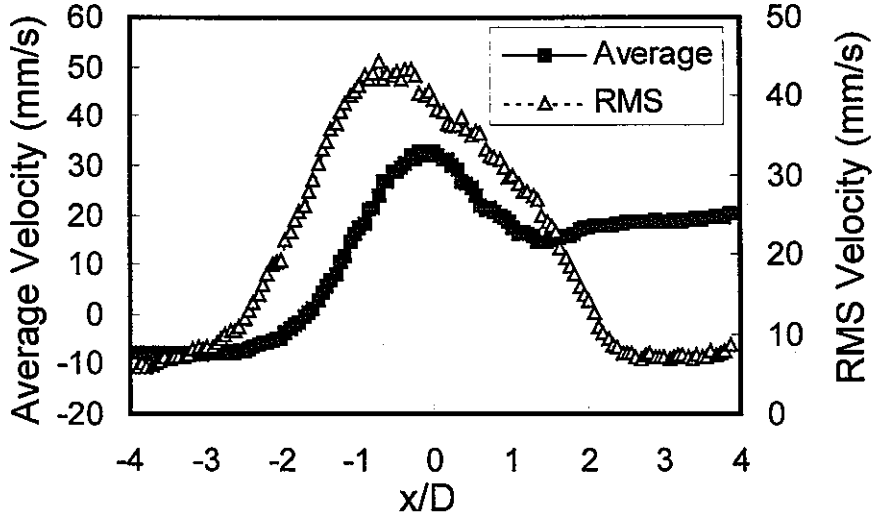
図2.3.1 単一噴流試験部



(1) z/D=1.3



(2) z/D=7.0



(3) z/D=11.2

図2.3.2　　時間平均流速と速度変動強度の水平方向分布

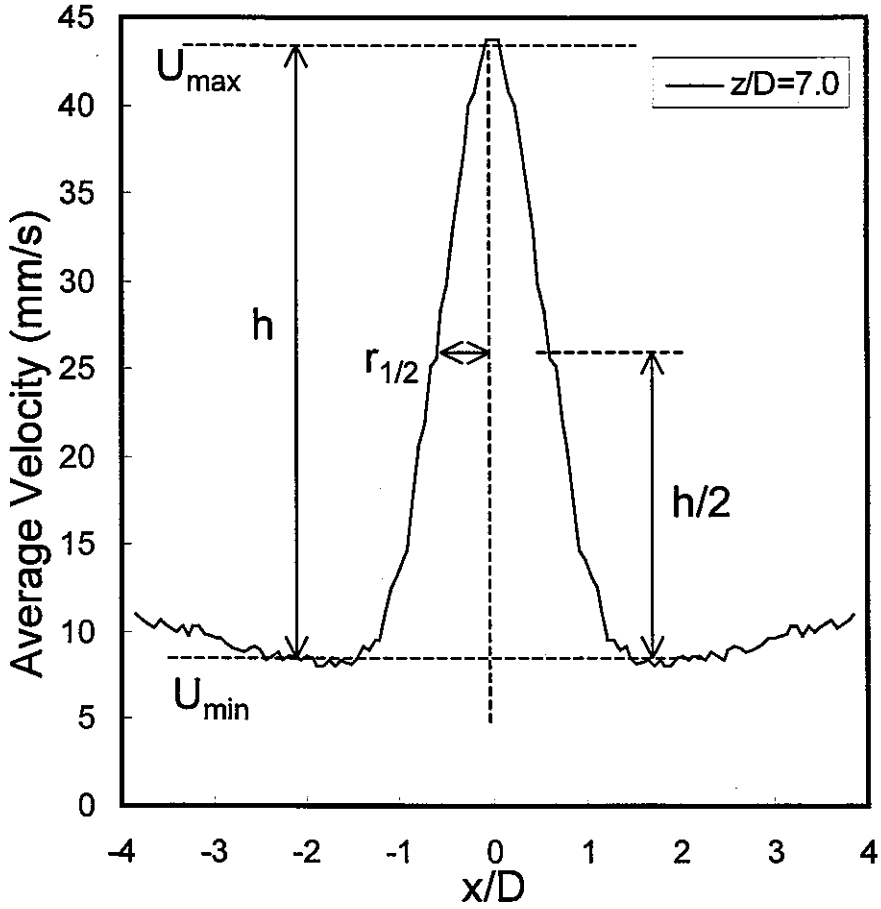


図2.3.3　半値幅の定義

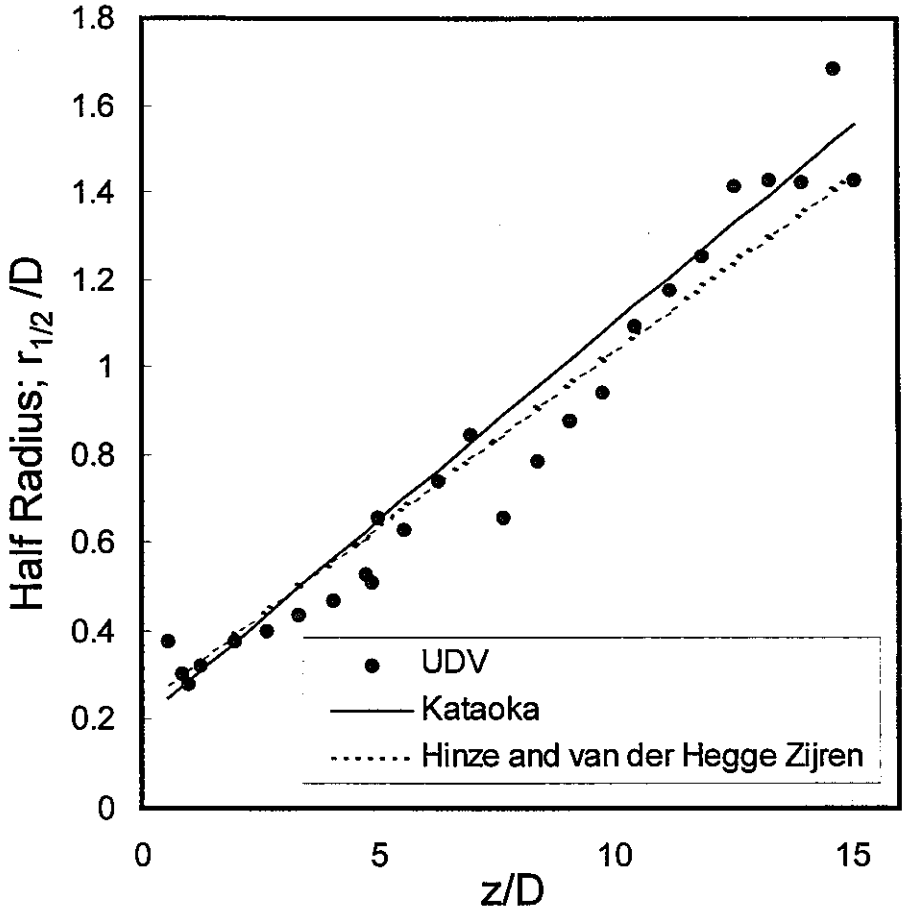


図2.3.4　半値幅の流れ方向変化の既往研究との比較

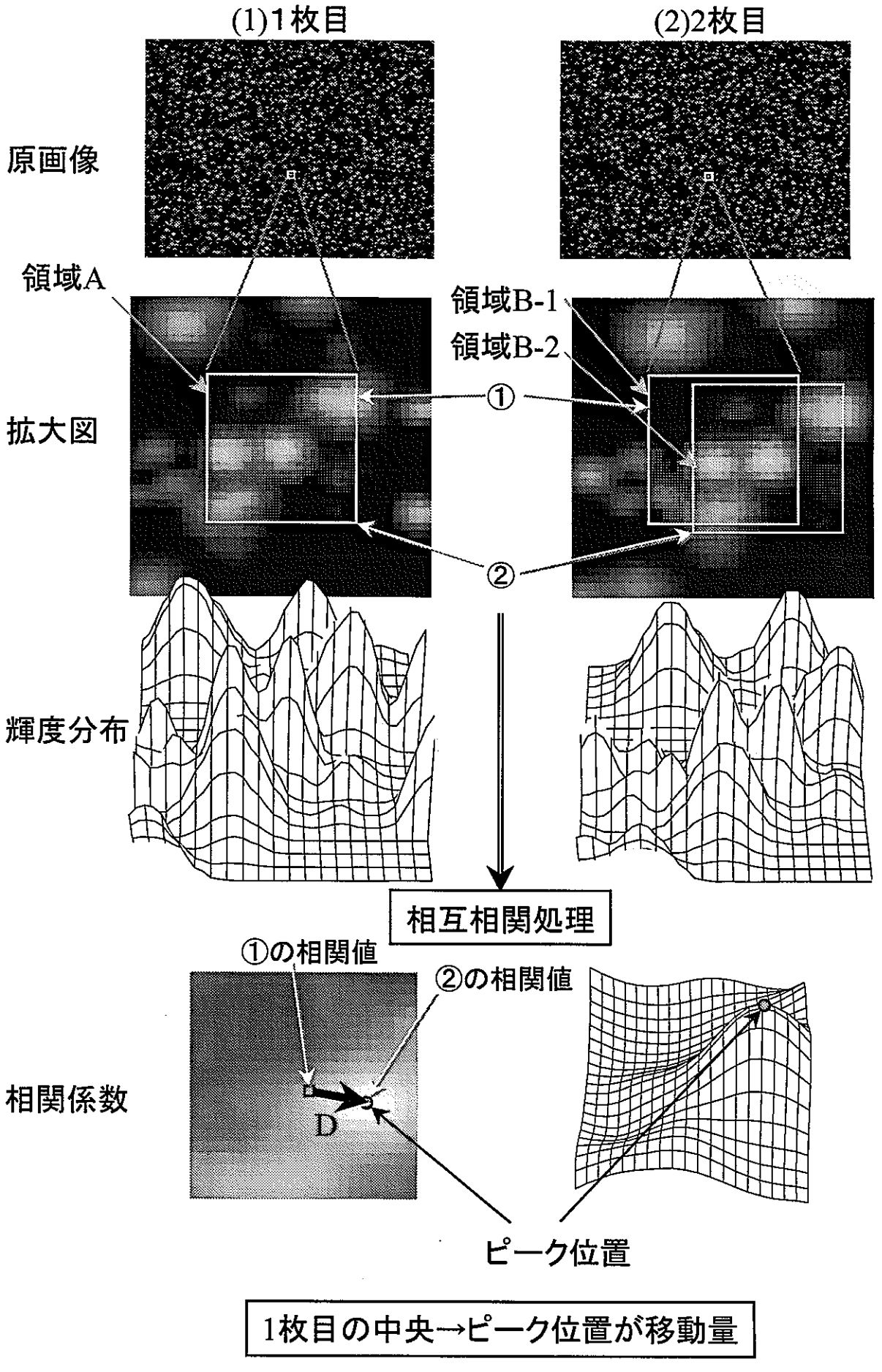

(1)1枚目
(2)2枚目
原画像
領域A
領域B-1
領域B-2
①
拡大図
②
輝度分布
相互相関処理
①の相関値
②の相関値
相関係数
D
ピーク位置
1枚目の中央→ピーク位置が移動量

図3.1.1 PIVの原理

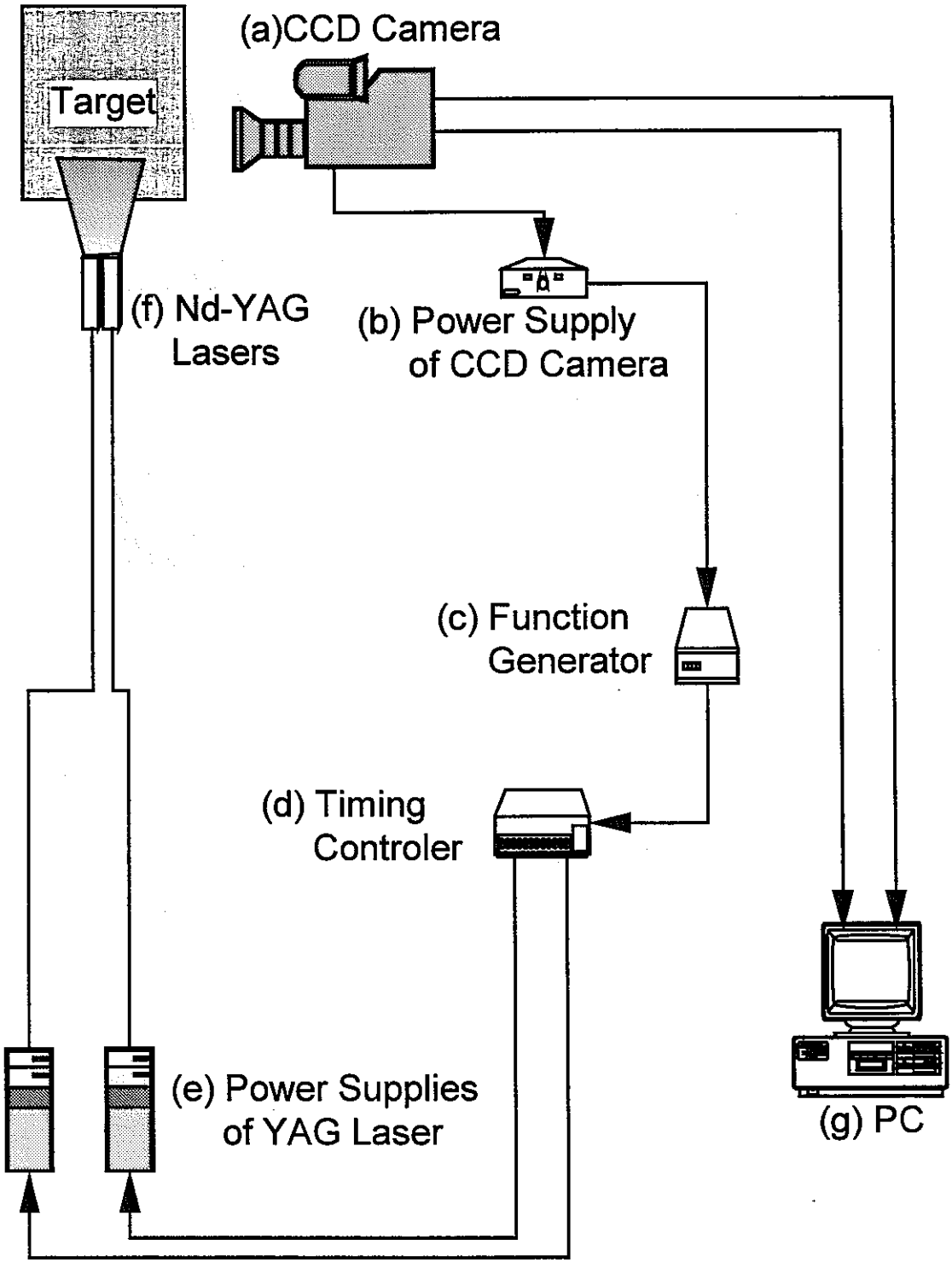


図3.2.1　　PIV計測機器接続構成

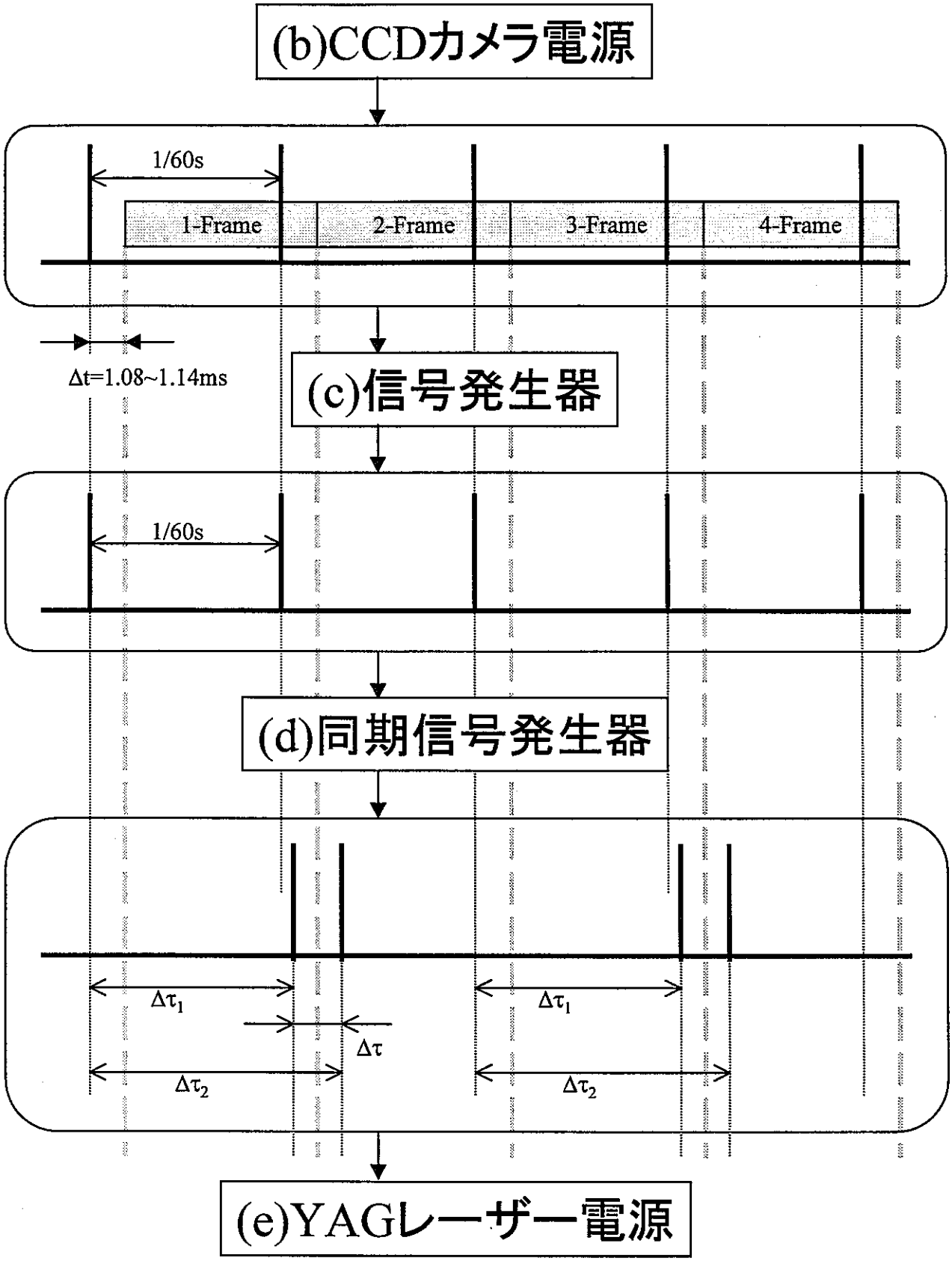
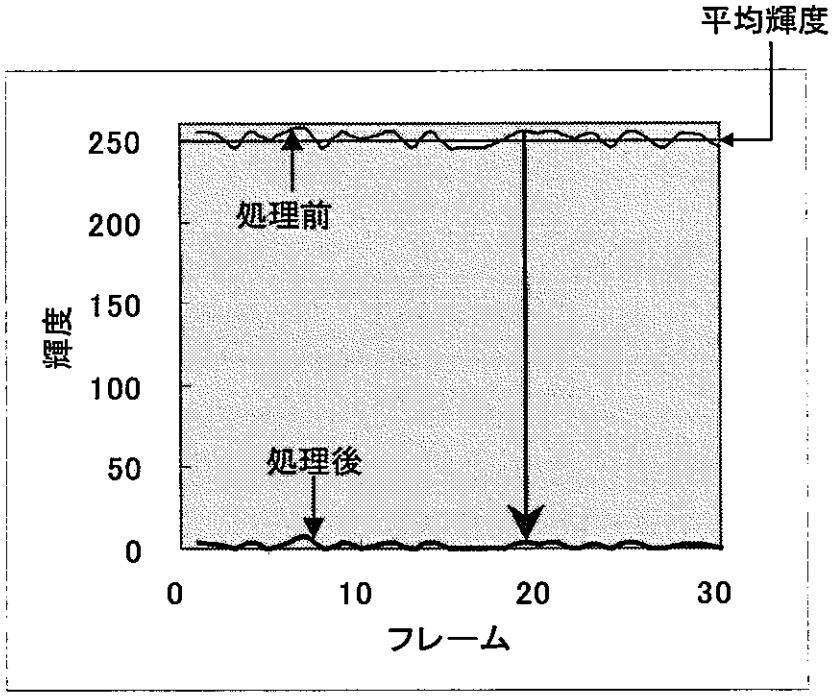
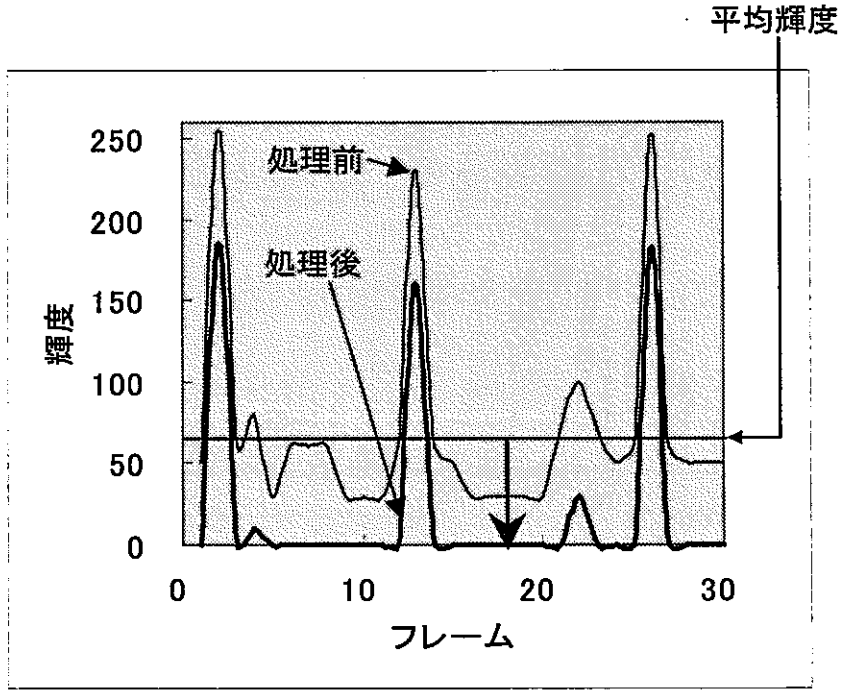


図3.2.2　信号のタイミングチャート

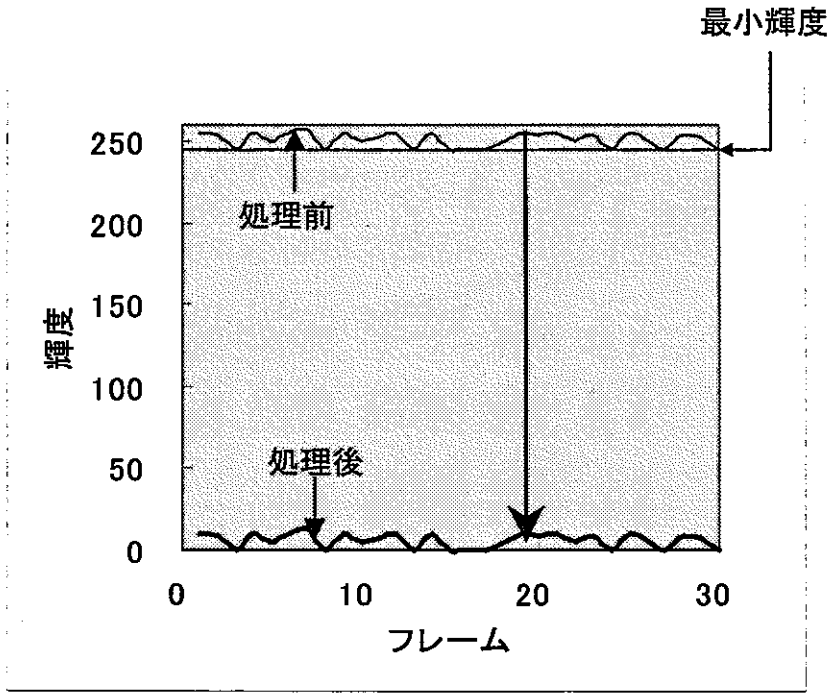


(a)ノイズピクセル

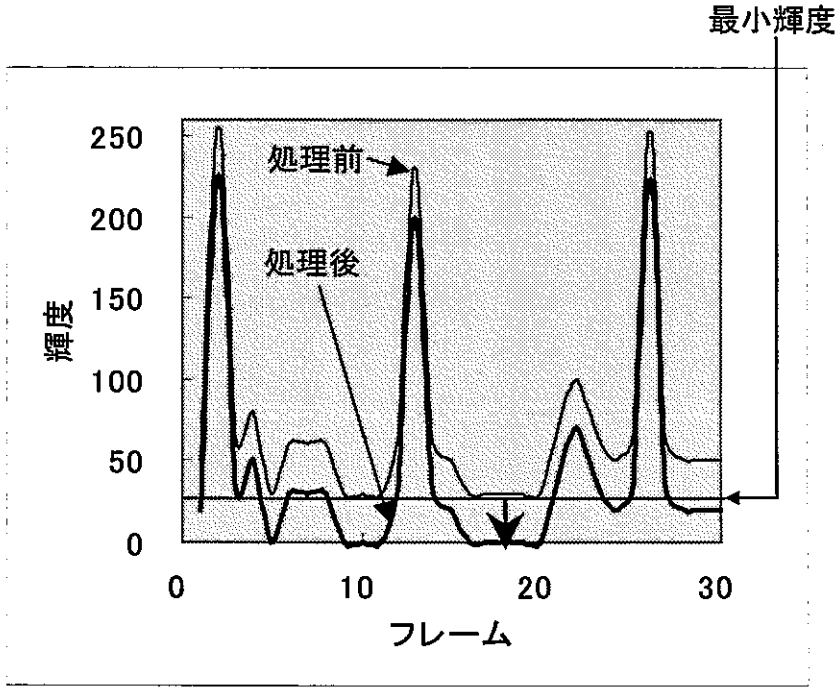


(b)粒子ピクセル

図3.3.1 時間平均輝度減算法の原理



(a)ノイズピクセル



(b)粒子ピクセル

図3.3.2 最小輝度減算法の原理

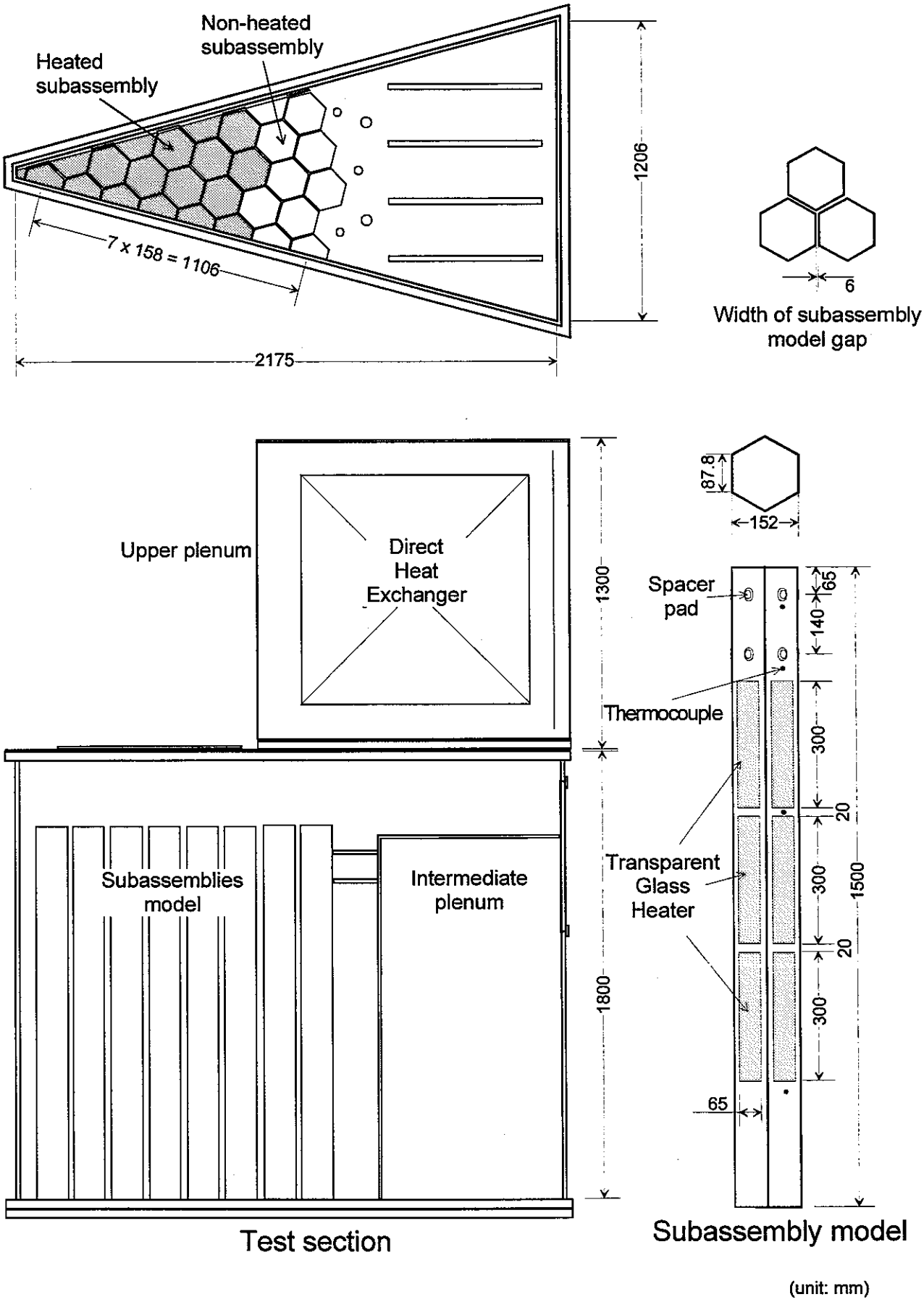


図3.4.1　TRIF試験体模式図

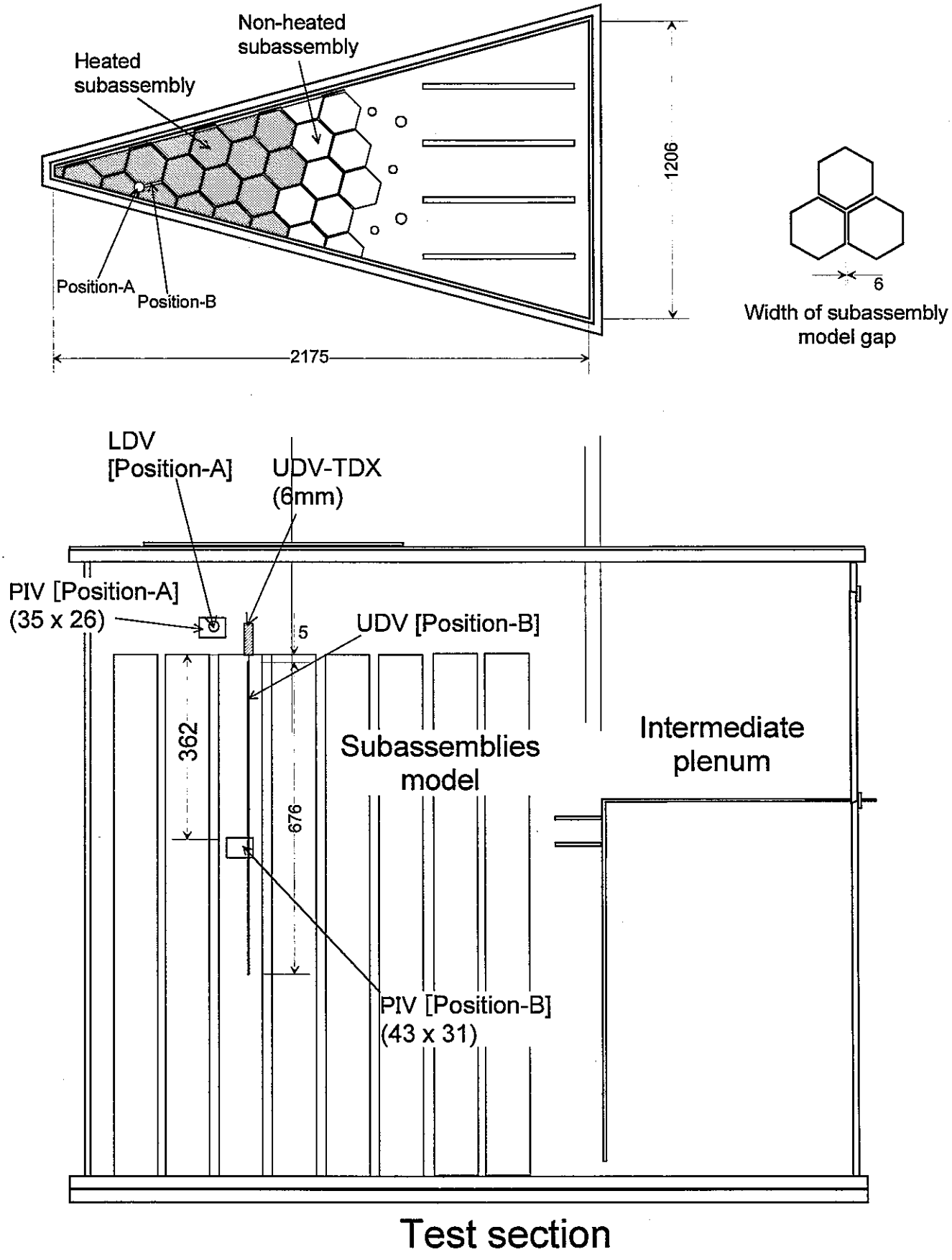
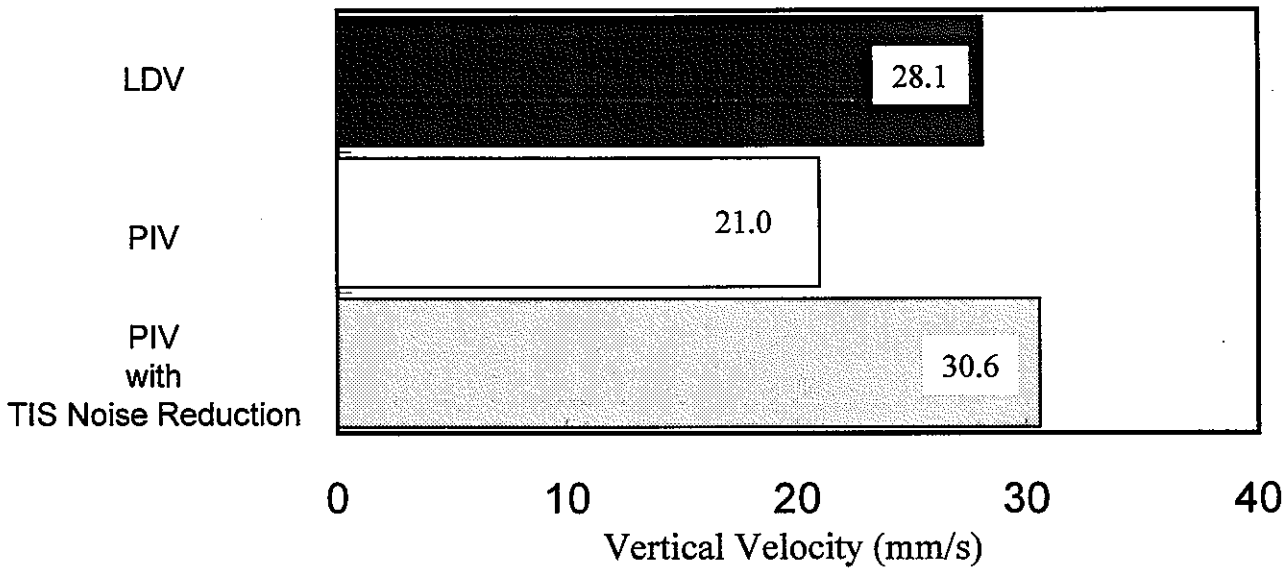
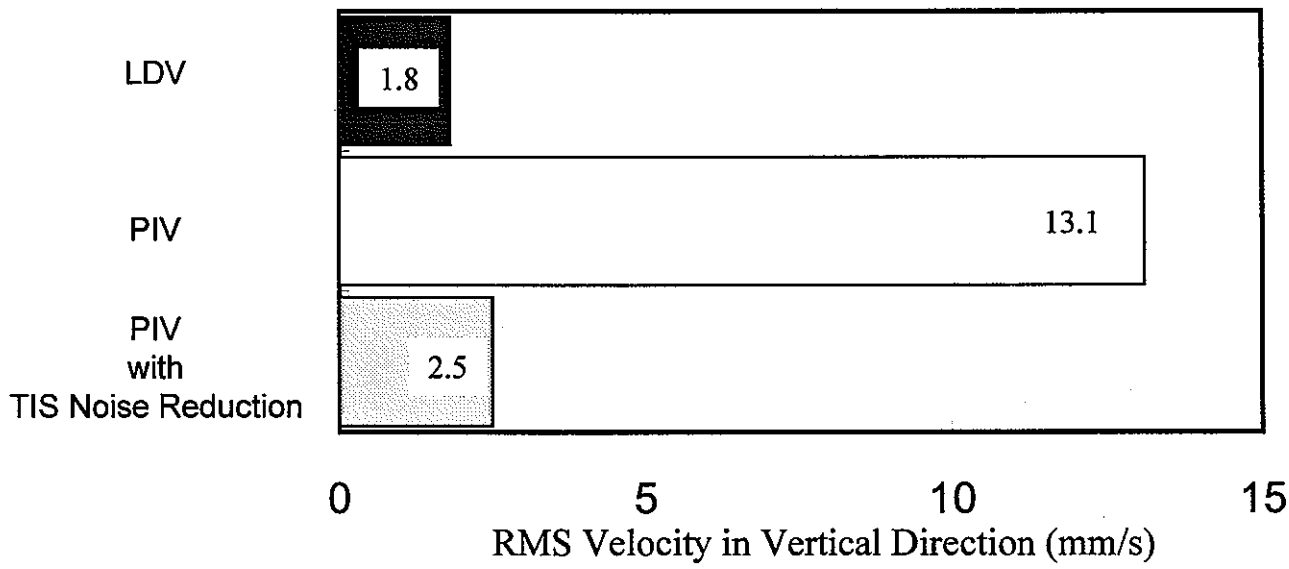


図3.4.2　　クロスチェック試験における各測定機器の計測範囲



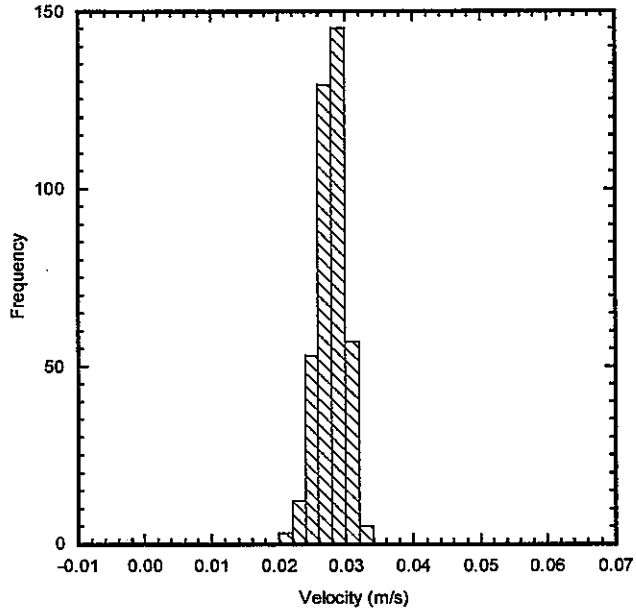
(1) Time-averaged Velocity



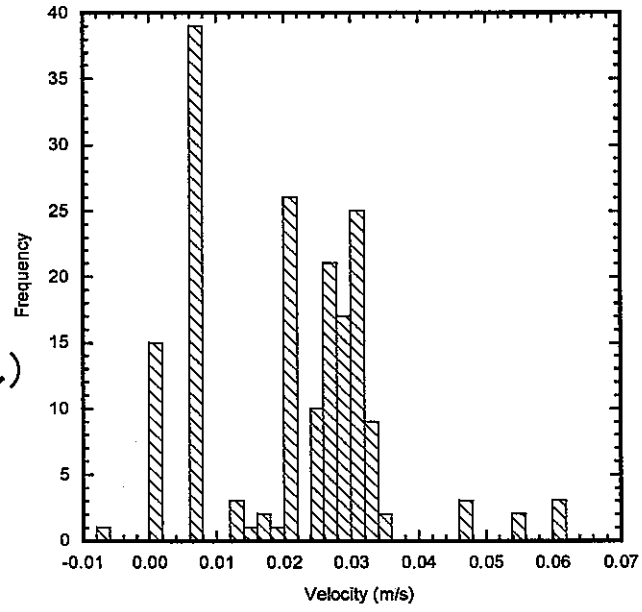
(2) RMS Velocity

図3.4.3　LDVとPIVのクロスチェック結果

(1) LDV



(2) PIV
（ノイズ処理なし）



(3) PIV
（ノイズ処理あり）

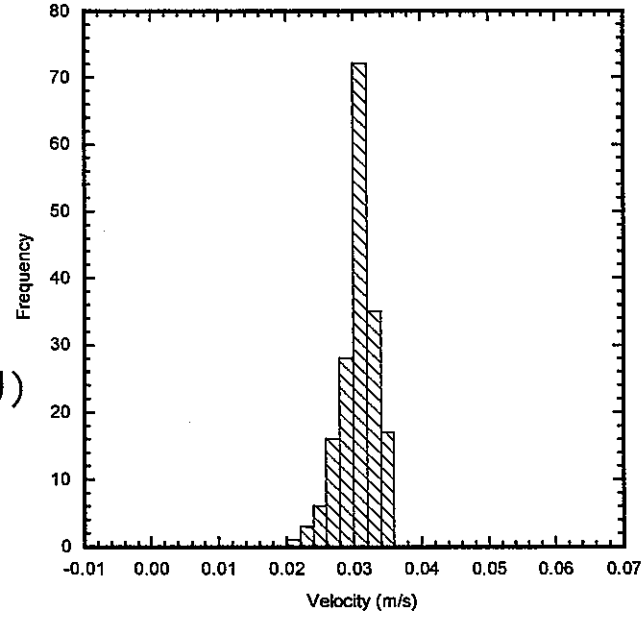
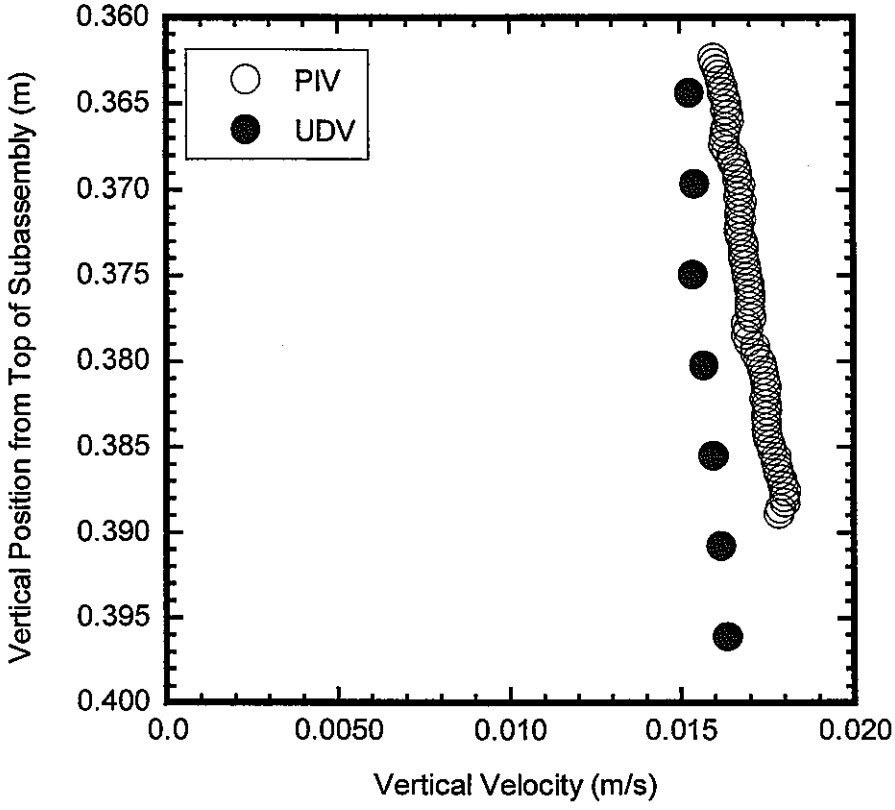
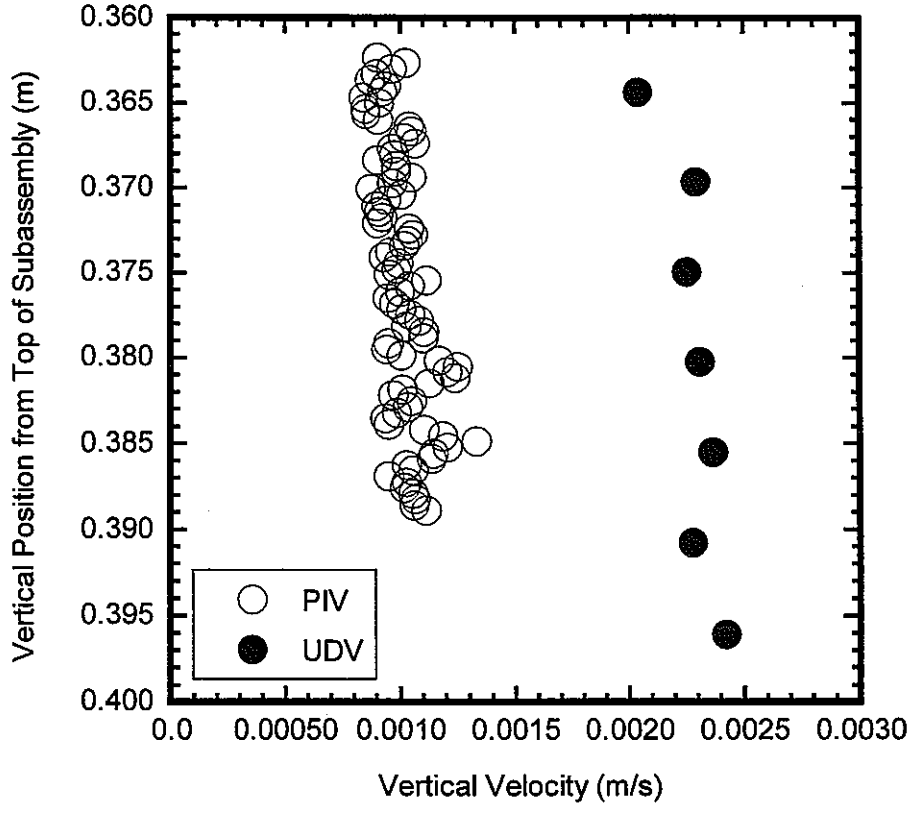


図3.4.4 PIVの時系列データのヒストグラムにおけるノイズ処理の効果

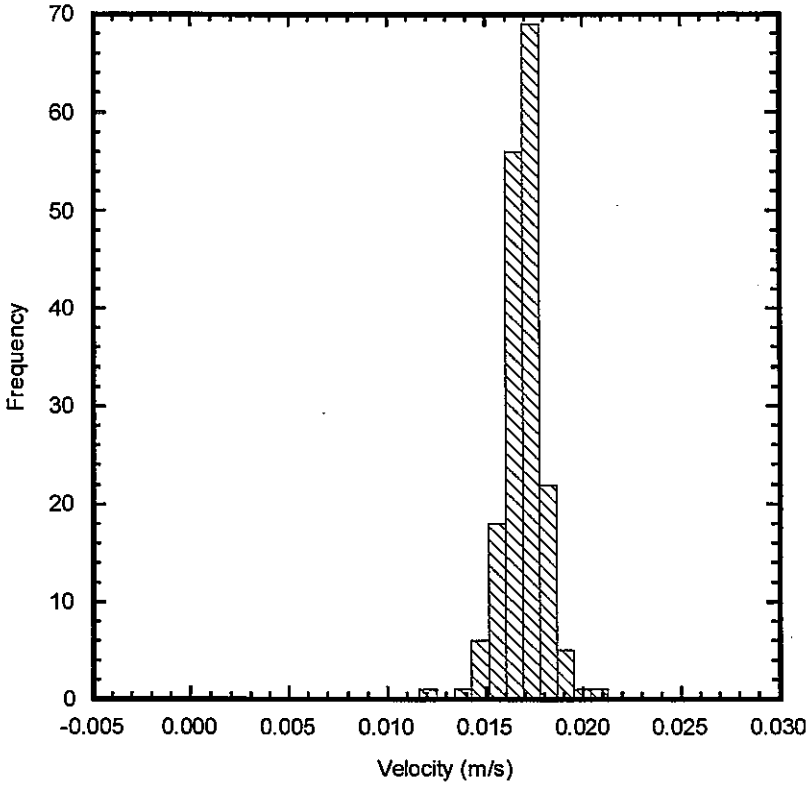


(1) Time-averaged Velocity

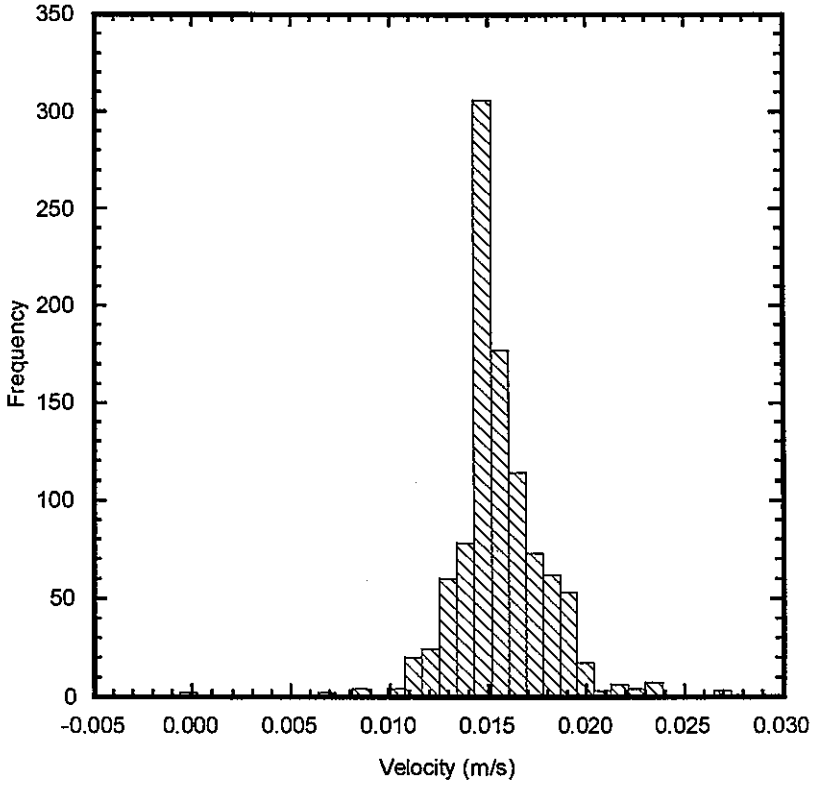


(2) RMS Velocity

図3.4.5　UDVとPIVのクロスチェック結果



(1) PIV



(2) UDV

図3.4.6　PIVとUDVの時系列データのヒストグラムの比較

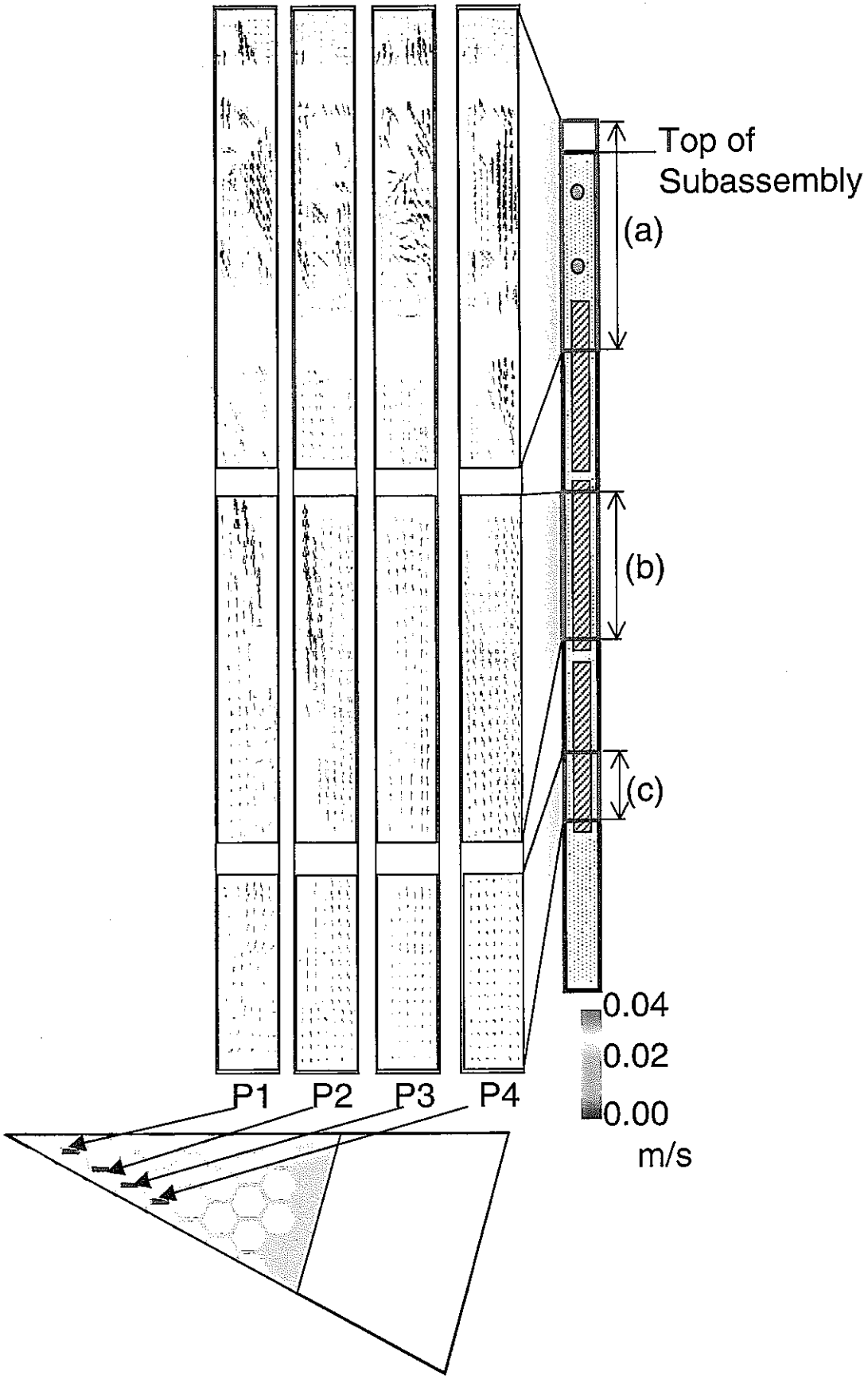


図3.4.7　　集合体間ギャップの流況

付録　LDV測定データ中の異常値排除処理

局所閉塞事象の研究を対象として，高速炉の炉心燃料集合体を３７本ピンバンドル体系で模擬した，３７本ピンバンドル水試験において、レーザードップラー流速計（LDV）を用いて閉塞物後流の流れ場を測定している。
このデータ処理の過程で、球体でないトレーサ粒子や流体中のゴミ等によるバースト信号が流速データに入り込み，定性的に考えられない流速値を示す場合がある。そこで，これら異常値を排除することが必要となる。測定により得られるデータは、流速の成分（ｕ，ｖ）の形である。通常の手法として，異常値の排除は、ｕ，ｖ各々の標準偏差（σ）を求め、平均値±２σより外側のデータを、異常値として排除していた。以下に計測結果からの異常値排除の処理方法を示す。

① ｕ，ｖ各々の標準偏差（σ_u，σ_v）をもとめる。
② ｕ，ｖともに、それぞれ、平均値±２σより外側のデータを、異常値として排除する。
③ １～２の処理を、異常値がなくなるまで繰り返す。

しかし、各測定値について平均値との差のデータ（ｕ’，ｖ’）は、グラフに表すと、ほぼ楕円状に分布しており、ｕ，ｖ各々について平均値±２σより外側のデータを異常値として排除する方法では、グラフ内の四角で囲まれる領域外の異常値について有効であり，十分に異常値を排除することができなかった。データの分布範囲に対応して異常値を排除するためには、この楕円体からはずれた値を異常値として排除しなければならない。

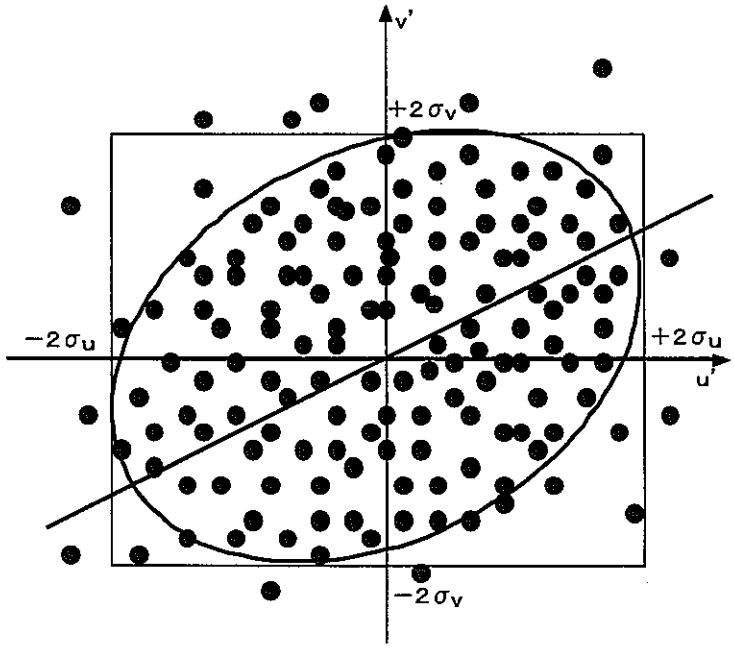


図１　u’とv’の分布の概念図

図１に示すように、各計測値（ｕ，ｖ）それぞれの平均値との差（ｕ’，ｖ’）は、ほぼ楕円体内に分布しているから、各点（ｕ’，ｖ’）と直線までの距離の総和が最小となるように回帰直線を求め、この直線を楕円の長軸とする楕円を用いて、異常値を排除する。これにより、データの分布範囲を正確に表すことが可能となり、異常値を

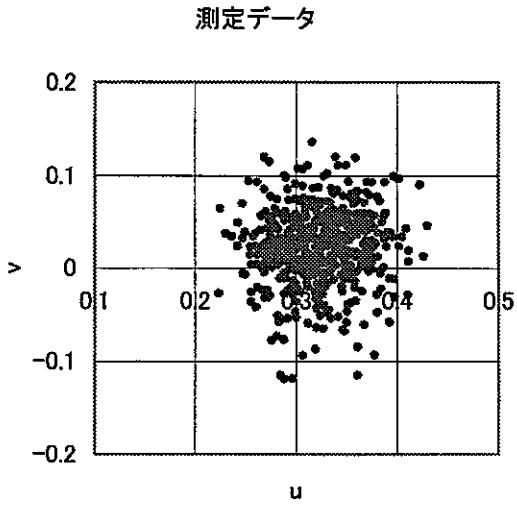
効率よく排除することが可能となる。この楕円を用いて異常値を排除する処理手順を以下に示す。

① u，v各々の平均値を求め、各計測値の平均値との差（u'，v'）を求める。
② 楕円体は長径に対して対称となることから、各点（u'，v'）から直線までの距離の総和が最小となるように、楕円の長径方向となる直線を求める。
③ 求めた直線を用いて、楕円の長径方向がx軸（u'軸）と一致するように、全データに対して回転移動を行う。
④ 回転移動したデータ（u"，v"）に対して新たに標準偏差を求め，楕円の短径および長径を求める。この楕円体の外側のデータを異常値として排除する。

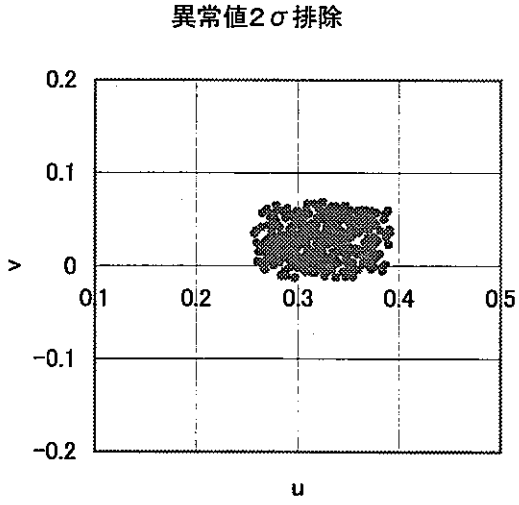
楕円 $$\frac{u''^2}{a^2}+\frac{v''^2}{b^2}=1,\quad a=2S_u\equiv 2\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}u''_i}{N-1}},\quad b=2S_v\equiv 2\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}v''_i}{N-1}}$$

⑤ 異常値の排除が終了したら，③で行った回転移動に対して逆写像を施し，異常値排除後の（u'，v'）に変換する。
⑥ ①～⑤の処理を、排除すべき異常値がなくなるまで繰り返す。

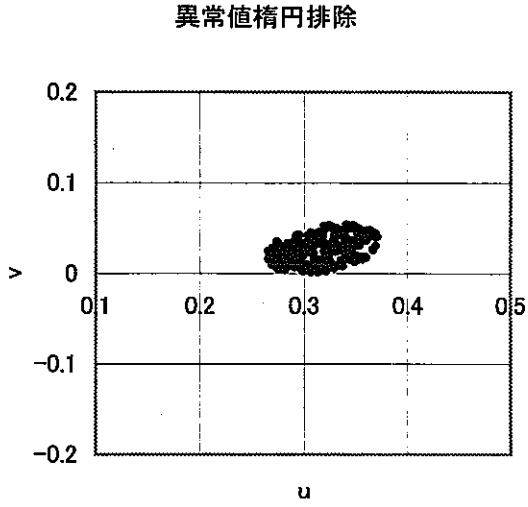
図１のように、平均値±２σより外側を異常値とした場合には、長方形の領域で、正常値の範囲を表すこととなり、異常値を十分に排除することができなかったが，データの分布を示す楕円体を求め、その楕円体の外側のデータを異常値として排除する方法を用いることにより、データの分布範囲を正確に表すことができ、図２および図３に示すように正常値と異常値を精度良く分別することが可能となった。



(a)　測定データ

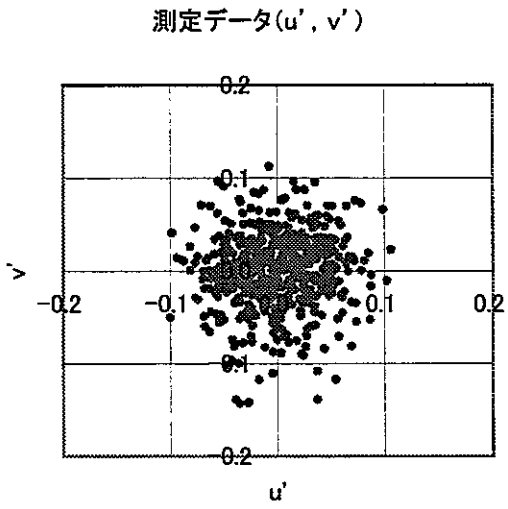


(b)　異常値排除後のデータ（矩形領域）

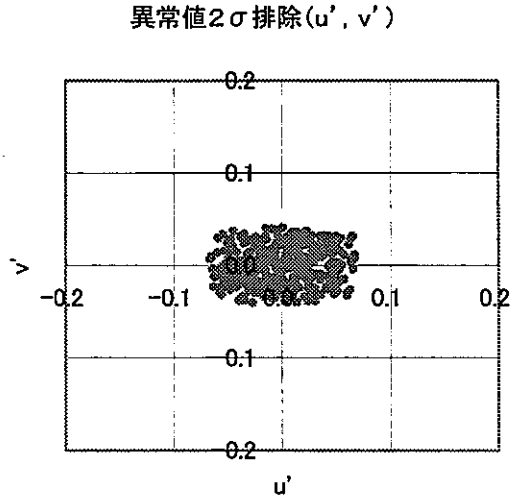


(c)　異常値排除後のデータ（楕円領域）

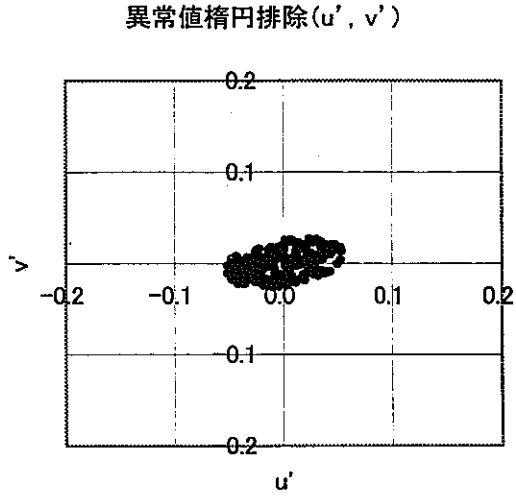
図２　各速度成分の相関図



(a)　測定データ



(b)　異常値排除後のデータ（矩形領域）



(c)　異常値排除後のデータ（楕円領域）

図３　各速度変動成分の相関図