

2005（平成 17）年度

高速回転フレキシブルノズルによる洗浄 に関する報告書

東京都立科学技術大学・首都大学東京大学院工学研究科

安井 智 操 洋二 松平晏明 小原弘道

目次

第 1 章	緒 言	p.1
第 2 章	主な記号	p.3
第 3 章	実験装置および方法	p.4
3-1	実験装置概要	p.4
3-2	供試洗浄器	p.4
3-2-1	供試洗浄器	p.5
3-2-2	コンプレッサー	p.7
3-3	圧力測定フィルム	p.8
3-4	圧力計測システム	p.11
3-4-1	圧力トランスデューサ	p.12
3-4-2	直流増幅器	p.13
3-4-3	A/D 変換ボード	p.13
3-5	PIV 計測システム	p.14
3-5-1	PIV 計測システム	p.14
3-5-2	ライトシート	p.16
3-5-3	CCD カメラ	p.16
3-5-4	PIV 制御処理装置	p.17
3-5-5	オーバーラップ法	p.17
3-5-6	PIV 計測による移動平均有効化処理法	p.17
3-6	実験方法	p.19
3-7	洗浄器基本性能	p.21
3-8	実験条件	p.23
第 4 章	実験結果および考察	p.24
4-1	感圧紙法による圧力分布評価	p.24
4-1-1	感圧紙の特性評価	p.24
4-1-2	感圧紙圧力分布に及ぼす受圧時間の影響	p.27
4-1-3	感圧紙圧力分布に及ぼす噴流長さの影響	p.32
4-1-4	圧力分布によるフレキシブルノズルの洗浄効果	p.37
4-2	圧力トランスデューサによる変動圧力計測結果	p.42
4-2-1	変動圧力波形とスペクトル	p.42
4-3	PIV 計測による噴流速度場	p.51
4-3-1	噴流の流速と渦度の可視化情報	p.51
4-3-2	噴流幅の変化	p.52
第 5 章	結 言	p.62
	参考文献	p.63

第1章 緒言

日常生活の中で、物が存在するところには必ず汚れも存在している。また、これらの物の製造過程においても汚れの発生は避けることはできない。このような汚れを除去し、きれいで衛生的な生活や信頼性の高い製品を得るためには洗浄は不可欠である。高度の洗浄が求められる近年の洗浄技術において、洗浄剤はもちろん洗浄機器の進歩はめざましいものがある。中でも半導体シリコンウエハの洗浄や自動車などの金属表面の洗浄など工業生産の過程で適用される洗浄技術は、製品の信頼性に直接関係するため、より高精度の洗浄が要求されている。一方、食器や衣類などの民生日常用品の洗浄や、清掃などのための壁面や床、構造物の洗浄など快適な生活のためにも新しい洗浄技術が求められている。さらに地球環境問題においても、洗浄剤に関しての規制が厳しくなっており、洗浄剤に頼らない環境に優しい洗浄の技術開発が進められている。

ここで産業用洗浄の洗浄技術は、超音波洗浄、超臨界流体による洗浄、電解水による洗浄、高圧噴射洗浄の4つに大きく分類される⁽¹⁾。その中でも特に最近では、超音波洗浄が半導体ウエハ洗浄に使用され注目を浴びてきている。超音波洗浄装置にはいくつかの種類がある。メガネ、時計、アクセサリなどの洗浄に使われる装置は、水槽に振動子を取り付け超音波キャビテーション現象を利用するものである。また機械部品や半導体に至るまで用いられている装置は、被洗浄物を水中に設置して高圧水を噴出して発生させた噴流まわりのキャビテーションを利用するものである。現在はこのような水槽を使ったシステムの超音波洗浄が主流となっている。しかしながら、水槽を用いる超音波洗浄には、洗浄対象の大型化に伴い必然的に水槽も大きくする必要があり、また、洗浄面以外も濡らしてしまうなどの問題点がある。

そこで、このように被洗浄物の大きさによらず、超音波洗浄可能な洗浄器が必然的に必要でありいくつかの新しい洗浄装置が提案されている。その中の一つに洗浄に水槽を使わずに、水を高速で吹き付けて汚れを落とす高圧噴射洗浄があるが、さらに洗浄能力の向上した洗浄装置が求められている。その中で、大気中で超音波を発生させることができると言われている洗浄装置スーパーソニックトルネーダーがある。この洗浄器の特性として「二段階ミキシングと高速回転フレキシブルノズルを組み合わせることで水槽という枠を取り払い、対象をほとんど濡らす事なく（洗浄面がしっとりと湿る程度）、超音波洗浄をより自由に手軽な機器へと飛躍させている。また、一般的な高圧洗浄器に比べ水の消費量が1/100とごく微量で、洗浄剤も必要なく水のみでの洗浄が可能である」⁽²⁾とされているものである。この超音波洗浄器の特徴は、自励的に回転する高速回転フレキシブルノズルから噴出される遠心力を伴う気液二相流噴流が、効果的な洗浄能力を発揮することである。この洗浄器は従来の洗浄装置と比べ、高い洗浄能力を有していると言われているが、なぜこの洗浄器の洗浄能力が優れているのかはまだ不明の点も多くその洗浄機構も解明されていない。

以上の背景を基に、超音波洗浄器の特性を解明するために、自励的に回転する噴流に着目した。これより、本報では超音波洗浄器の洗浄能力の解明を目指し、回転を持つ噴流と持たない噴流の比較を、圧力測定フィルムを用いた時間平均圧力分布と圧力

トランスデューサを用いた変動圧力の計測を行い，さらに PIV 計測を用いて変動速度計測によりフレキシブルノズル噴流の基本特性を明らかにすることを試みる．

第2章 主な記号

Δs	: 画像上のシーディング粒子移動量
Δt	: レーザ光パルス間隔
S	: 空間倍増率
q	: 速度ベクトル
S_o	: 計測領域
S_i	: 画像記録媒体
k_a	: しきい値
	: 渦度
t	: 計測時間 (受圧時間)
V	: タンク内水量
O	: 流量調整バルブ開度
Q	: 噴出流量
z	: ノズル 洗浄面間距離 (噴流長さ)
x	: ノズル水平方向位置
y	: ノズル垂直方向位置
D	: 固定ノズルの受圧部を円と仮定した受圧円領域の直径
D_0	: フレキシブルノズルの受圧環状領域の外径
D_i	: フレキシブルノズルの受圧環状領域の内径
p	: 圧力
S_S	: 固定ノズルの受圧部を円と仮定した受圧円領域の面積
S_F	: フレキシブルノズルの受圧環状領域の面積
p'	: 変動圧力
n	: フレキシブルノズルの回転数
v_θ	: 旋回速度
r	: フレキシブルノズル噴流の半径
t_H	: フレキシブルノズル噴流が測定点を通過する時間
T	: スパイク波発生周期
t_P	: スパイク波時間半値幅
f	: 周波数
t'	: 詳細変動圧力における時間
w	: 水平方向速度
v	: 垂直方向速度
q_{Max}	: 最高流速

第 3 章 実験装置および方法

3-1 実験装置概要

本実験は、以下の装置および器具を使用した。

- ・ 供試洗浄器
- ・ 圧力測定フィルム
- ・ 圧力計測システム
- ・ PIV 計測システム

次節以降それぞれの実験装置についての詳細を記述する。

3-2 供試洗浄器

本実験において用いた供試洗浄器は、図 3-1 に示すような以下のシステムにより構成されている。

- ・ 供試洗浄器（ガリユー社 スーパーソニックトルネーダー SPT-5T）
- ・ コンプレッサー（日立製作所）

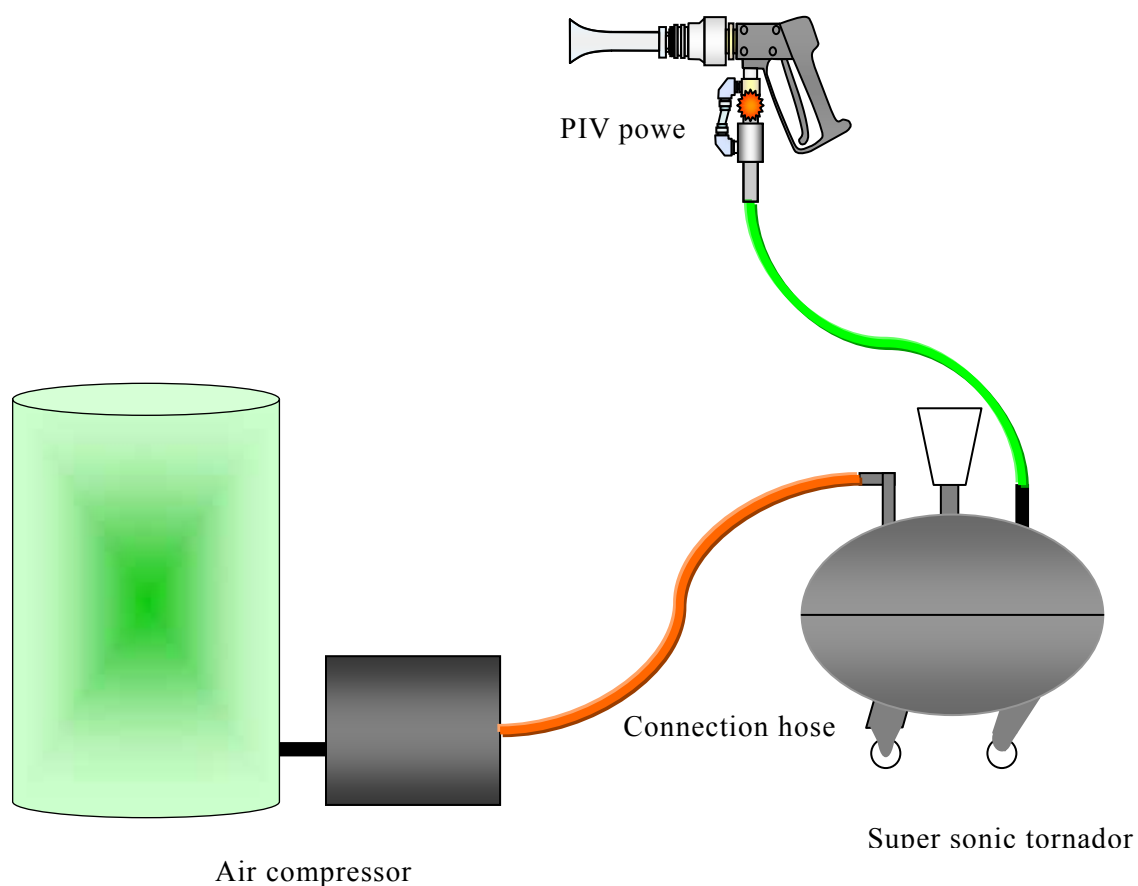
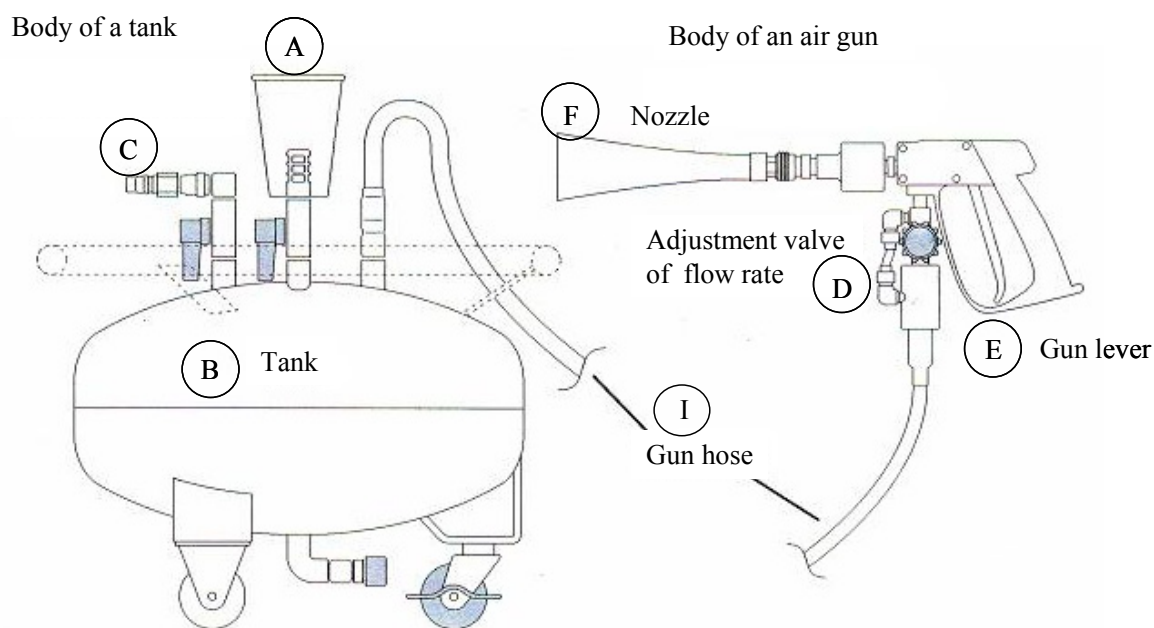


図 3-1 供試洗浄システム

3-2-1 供試洗浄器

図 3-2 にタンク部とエアガン部で構成された洗浄器（ガリユー社）を示す．タンク部は，B：タンクに接続された A：洗浄剤注入バルブ，C：エアー供給バルブ，G：圧力解放バルブの各バルブと昇圧用レギュレーターにより構成されている．エアガン部は，D：洗浄剤の流量調整バルブと ON/OFF 制御用の E：ガンレバーと F：ノズル部から構成されており，ノズル部は用途にあわせ交換可能となっている．またこのエアガン部で気液が混合され二相流噴流が形成される．なお，タンク部とエアガン部を接続する I：ガンホースは二重構造になっており，圧縮空気と洗浄剤（本実験では水を使用．）が一本のホースで供給されている．

表 3-1 にその仕様を示す．



The upper part of a tank

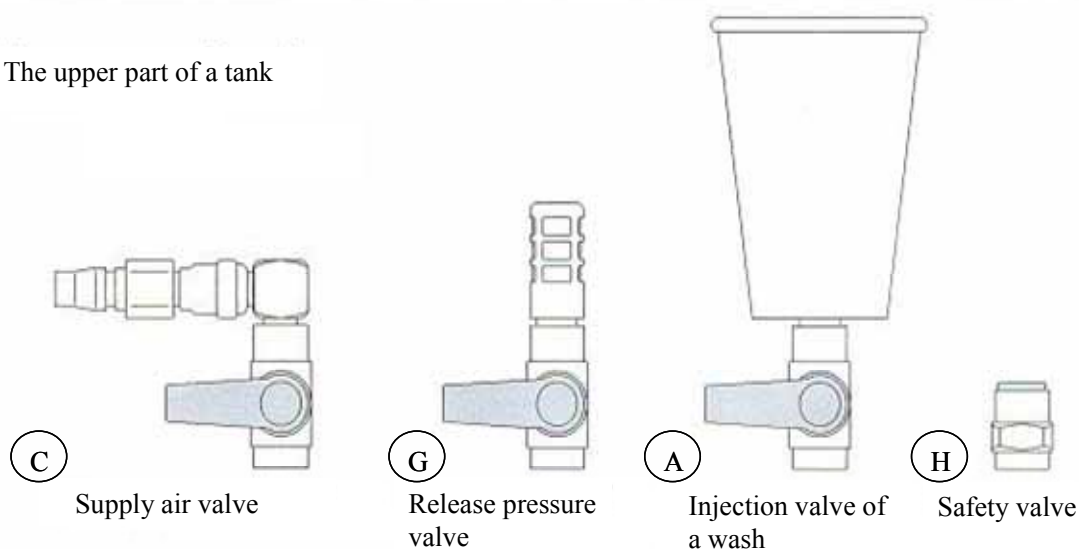


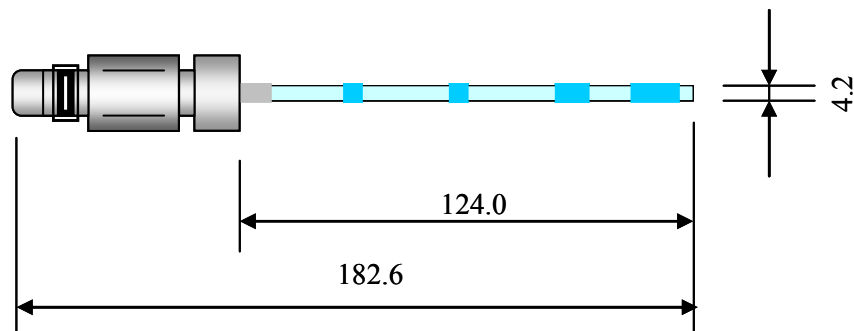
図 3-2 供試洗浄器各部名称

表 3-1 供試洗浄器仕様

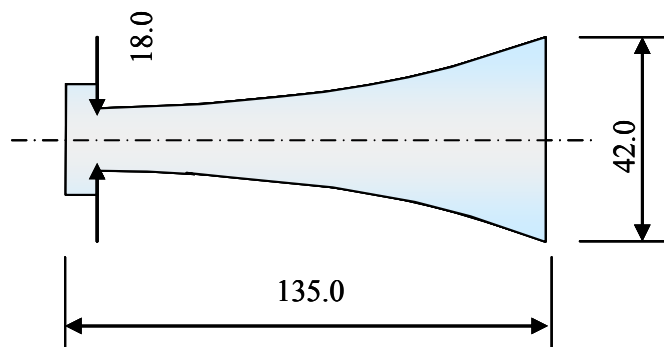
Name	Super sonic tornador
Model	SPT-5T
Size	W320 mm × D320 mm × H400 mm
Weight	Approx. 7 kg
Air pressure	0.8 MPa ~ 1.2 MPa
Air volume	400 ~ 600 ℓ/min.
Capacity	5 ℓ
Spray volume	50 ~ 500 cc/min.
Fluid	Air, spring water or neutral liquid medicine
Temperature range	10 ~ 50

エアガン本体に取り付ける高速回転フレキシブルノズルは、高速回転するフレキシブルホースとそれを囲む外筒ノズルにより構成されている。外筒ノズルは口径が大きいタイプのノズル(L),口径が標準タイプのノズル(M)がある。本実験においては、ノズルの回転による特性を調べるためにフレキシブルノズルと固定ノズルの2種類を使用した。フレキシブルノズルは、内部にあるフレキシブルホースとその外側に装着されるL型外筒ノズルとで構成されている。固定ノズルは、フレキシブルホースをその外径と同径のアクリル筒で固定し、回転しないようにしている。

フレキシブルノズル、固定ノズルの形状や寸法をそれぞれ図 3-3, 図 3-4 に示す。



(a) L ノズル内部のフレキシブルホース



(b) L ノズル外部の外筒ノズル

図 3-3 フレキシブルノズルの形状と寸法

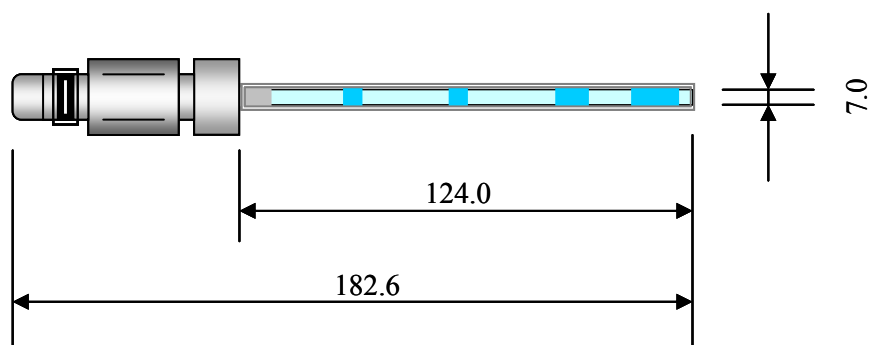


図 3-4 固定ノズルの形状と寸法

3-2-2 コンプレッサー

本実験では，供試洗浄器のエア供給バルブとコンプレッサーを接続ホースで接続し，タンク内を加圧した．以下にコンプレッサーの仕様を示す．

品名 5.5kW ベビコン 5.5P-9.5T
 社名 日立製作所（トキコ株式会社製造）
 仕様 圧縮機本体：シリンダ内径×行程×シリンダ数 低圧側 82 mm×85 mm×2
 高圧側 60 mm×85 mm×1

最高圧力 9.5 kgf/cm²

回転数 50 Hz 900 rpm

60 Hz 900 rpm

吐出し空気量 50 Hz 600 ℓ/min

60 Hz 600 ℓ/min

V ベルト 50 Hz B-79×3

60 Hz B-77×3

電動機：形式 EFOUP-KK

出力 5.5 kW

回転数 50 Hz 1440 rpm

60 Hz 1730/1740 rpm

極数 4

電圧 50 Hz 200 V

60 Hz 200/220 V

空気タンク：直径 385 mm

全長 1570 mm

全容量 170 ℓ

総重量：255 kg

3-3 圧力測定フィルム

【種類】

本実験での圧力の分布を観測するにあたっては、圧力測定フィルムプレスケール(富士フィルム株式会社)を使用した。プレスケールには極超低压用、超低压用、低压用、中圧用、高圧用の5種類があるが、本実験では測定可能圧力範囲が0.2~0.6 MPaである極超低压用と、0.5~2.5 MPaである超低压用を使用した。

【構造と原理】

プレスケールには、ツーシートタイプとモノシートタイプの2種類がある。本実験で使用するツーシートタイプは、図3-5に示すようにAフィルムとCフィルムの2種類のフィルムから構成されている。Aフィルムは支持体(PETベース)に発色剤(マイクロカプセル)が塗布されており、Cフィルムは支持体(PETベース)に顕色剤が塗布されている。ツーシートタイプは発色剤面と顕色剤面を合わせて使用する。

発色の原理は、発色剤層のマイクロカプセルが圧力によって破壊され、その中の発色剤が顕色剤に吸着した時の化学反応を利用したものであり、赤色の強度として圧力が測定可能なものである。

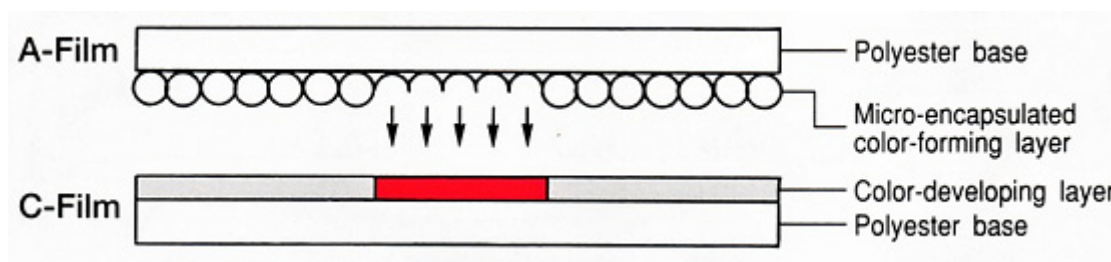


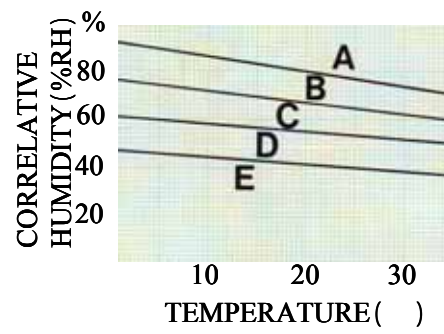
図 3-5 ツーシートタイプの構造

【性能】

ツーシートタイプの性能を表3-2に示す。また、図3-6、3-7に超極低压用・超低压用の性能特性を示す。

表 3-2 ツーシートタイプの性能

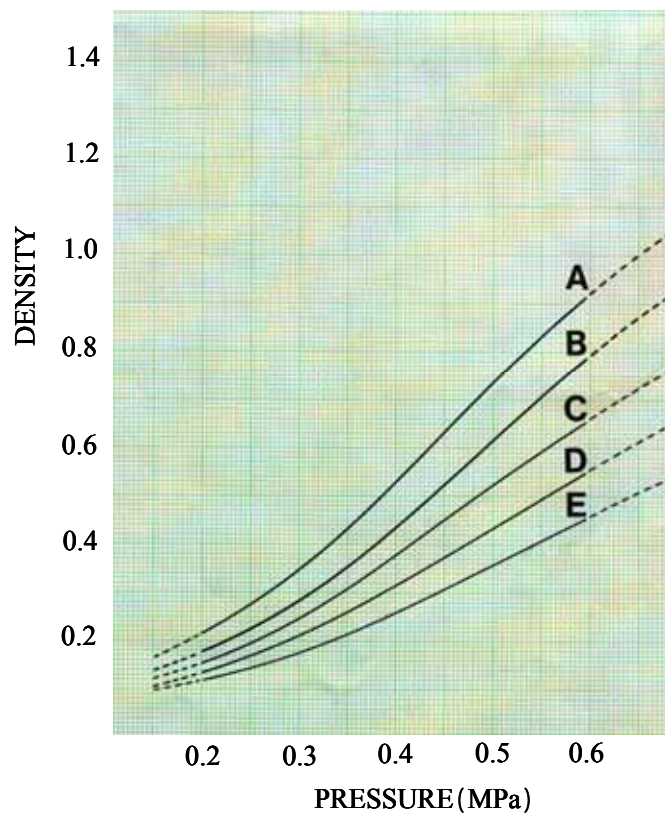
Precision	±10 % or less (measured by densitometer at 23 /73.4 °F, 65 % RH)
Recommended temperature range	20 ~ 35 (68 °F ~ 95 °F)
Recommended humidity range	35 %RH ~ 80 %RH



(a) 温湿度条件

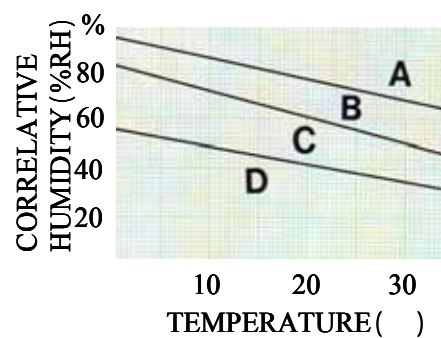


(b) 標準色見本



(c) 圧力較正曲線

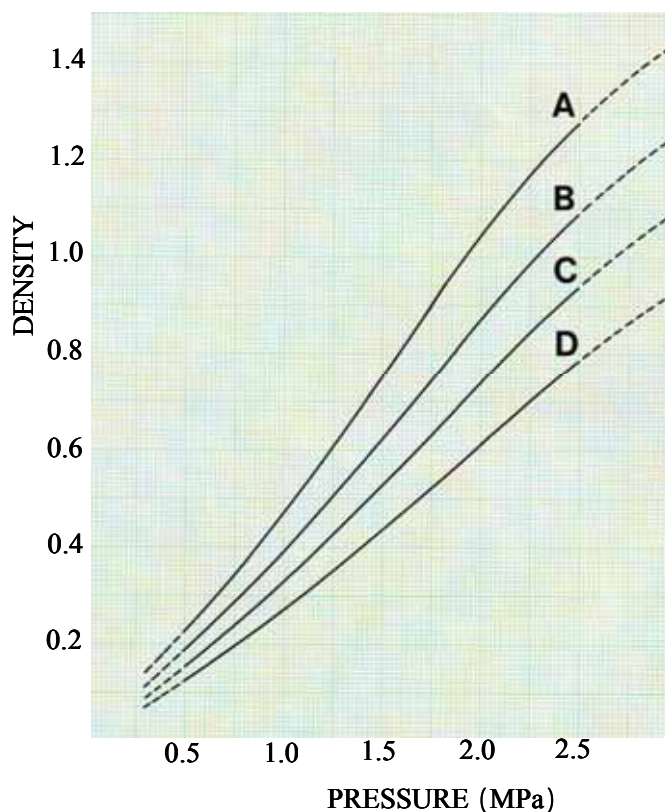
図 3-6 プレスケール性能曲線 (超極低圧用)



(a) 温湿度条件



(b) 標準色見本



(c) 圧力較正曲線

図 3-7 プレスケール性能曲線 (超低圧用)

3-4 圧力計測システム

本実験において，噴流の圧力値を測定するにあたっては半導体トランスデューサ，直流増幅器，A/D 変換ボード，パーソナルコンピュータを用いた．圧力計測システムの装置概要を図 3-8 に示す．

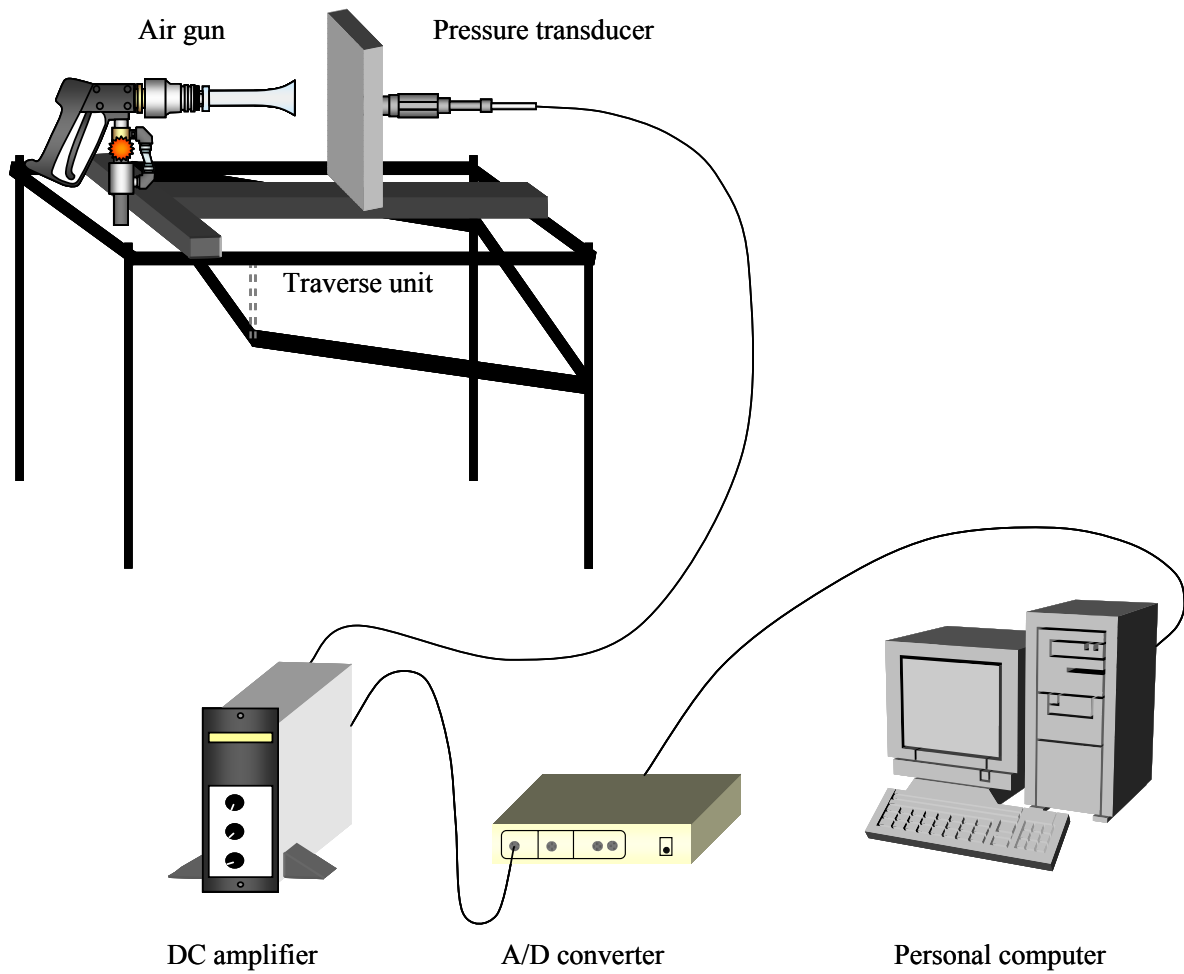


図 3-8 圧力計測システム

3-4-1 圧力トランスデューサ

本実験では，圧力計測を行うためにバルク型半導体圧力トランスデューサ（豊田工機株式会社）を使用した．その仕様を表 3-3 に，外形図を図 3-9 に示す．

表 3-3 トランスデューサ仕様

Model	PMS-5M-2
Class	2 M
Rated pressure	2 MPa
Measurement pressure range	-100 kPa ~ 2 MPa
Overload	150 %
Rated output	100 (minimum mV/min.)
Allowable temperature range	-30 ~ 100
Temperature compensation range	-10 ~ 60
Zero drift temperature characteristics	±0.05 (%F.S. bandwidth)
Non-linearity	±1 (%F.S.)
Hysteresis	±0.5 (%F.S.)
Repeatability	±0.5 (%F.S.)
Natural frequency	60 (minimum kHz/min.)
Gauge resistance	Approx. 1 k at 24
Excitation voltage	DC 9 V
Material	SUS303 (stainless steel)
Cable	1 m oil-resistant PVC shield cable (with connector)

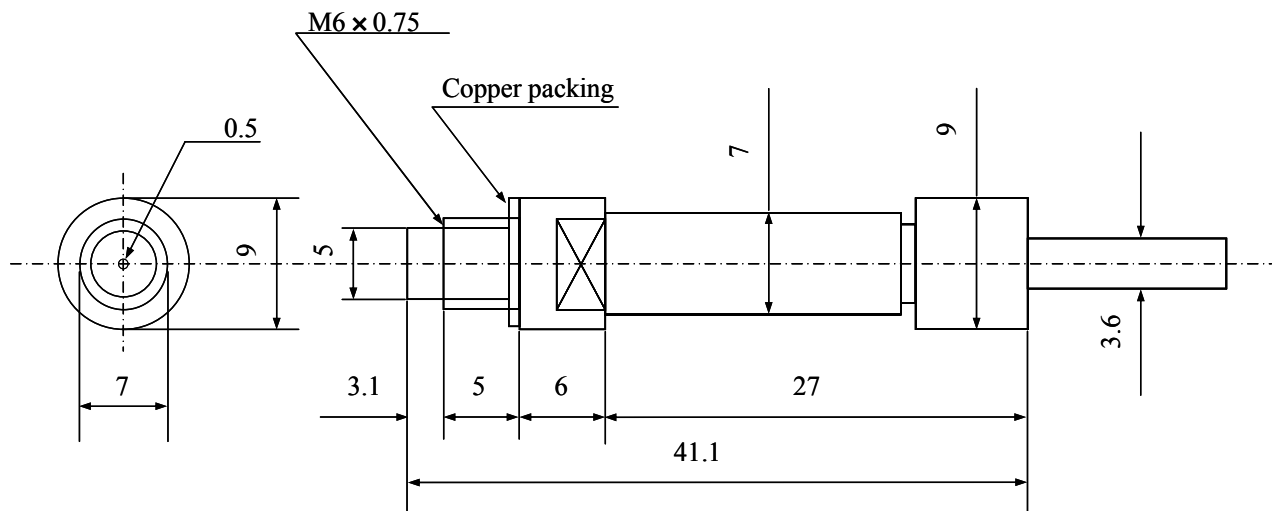


図 3-9 バルク型半導体圧力トランスデューサ PMS-5M-2

3-4-2 直流増幅器

本実験では，半導体トランスデューサで高精度に測定するために直流増幅器（豊田工機株式会社）を使用した．その仕様を表 3-4 に示す．

表 3-4 直流増幅器仕様

Model	AA6210
Input level	0 ~ ±0.5 V
Input resistance	More than 10 M
Max gain	×20/100/200/500/1000/2000 (selectable by switch, continuously variable)
Max. output	±10 V, ±50 mA
Non-linearity	±0.01
Frequency response	DC ~ 100 kHz (-3 dB)
Low-pass filter	10 Hz/100 Hz/1 kHz (-12 dB/OCT) (selectable by switch)
Stability	Gain (%F.S./ max.) ±0.01 (Converted into input ×2000 at input shorting) Zero-point stability (μV/ max.) ±1
Static voltage	15 (when DC CUT/PASS is selected)
Gauge excitation power supply	DC 2 V/ 6 V/ 9 V/ 10 V, 1 mA/ 4 mA (selectable by switch)
Calibration voltage	±1/±5/±10/±50/±100 (selectable by switch)
Zero-point tuning	Auto (battery backup)
Level meter	Tricolor 11-segment LED
Remote function	Remote AUTO ZERO (contact-point input), remote calibration
Operating temperature range	0 ~ 50 °C, max. 85 %RH (no condensation)
Power supply	AC 100 V ±10 V 50/60 Hz 15 VA
Dimensions	W39.5 mm × H149 mm × D250 mm
Weight	1.5 kg

3-4-3 A/D 変換ボード

A/D 変換ボードは，アナログ信号をデジタル信号に変換するものでパーソナルコンピュータに外部からアナログ信号を取り込むときに必要となる変換機である．仕様を表 3-5 に示す．

表 3-5 A/D 変換ボード仕様

A/D converter	
Name	AD12-16(PCI)E
Company	Contec
Specification	Input range: -10 ~ +10 V Digital resolution: 12 bit Input method: single end method

3-5 PIV 計測システム

3-5-1 PIV 計測システム

図 3-10 にPIV計測システムの原理を示す．局所の流れに追従性のある微細なシーディング粒子を混入させ，パルスレーザなどの光源をシリンドリカルレンズによりシート状に瞬間的に照射する．この照射は流れの面内で二時刻(時刻 t_0, t_1)にて行われる．粒子からの散乱光は，CCD素子などの撮影装置を介して記録媒体に二時刻の瞬間的な粒子画像として記録される．この二時刻の粒子画像上の移動量 s を求め，レーザ光パルス間隔 $t (=t_1-t_0)$ および空間倍増率 S (scale factor) より，流れ空間の局所速度 q を次式から求める．ここで空間倍増率 S は，計測領域 S_0 と画像記録媒体 S_i のスケール比である．

$$q = S \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

画像解析手法は，2 フレーム/単一露光の画像に輝度分布の類似性から相互相関法を用いて画像処理解析を行っている．処理手順としては，レーザ光パルス間隔 t の 2 時刻における画像をそれぞれ小さな領域に分割する．第 1 画像の 1 検査領域に着目し，第 2 画像に含まれるそれぞれの候補領域に対して相互相関演算処理を行うことにより，検査領域内の粒子の代表移動距離 s を算出する．ここで演算処理を高速化するために，FFT (高速フーリエ変換) を用いる．FFT 相互相関アルゴリズムにおいてはデータの周期性を仮定しているため窓関数を用いて積分範囲を限定している．また，空間周波数領域から空間時間領域へと逆高速フーリエ変換 (IFFT) の前段階で背景ノイズを除去するためにフィルタ関数を用いている．さらに粒子像の中心位置をより精度良く求めるために，サブピクセル補間を適用しており，粒子像の位置を 1/64 pixel まで分解可能である．これら t, s より検査領域を代表する速度ベクトル q を得る．

本計測においては，取得した画像情報 (1008×1018) における 1 検査領域のサイズを 32×32 pixel とした．レーザ光パルス間隔 t については，数々の予備実験より，画角 (計測領域) および局所流速に合わせて，それぞれ適切な値を選んでいる．

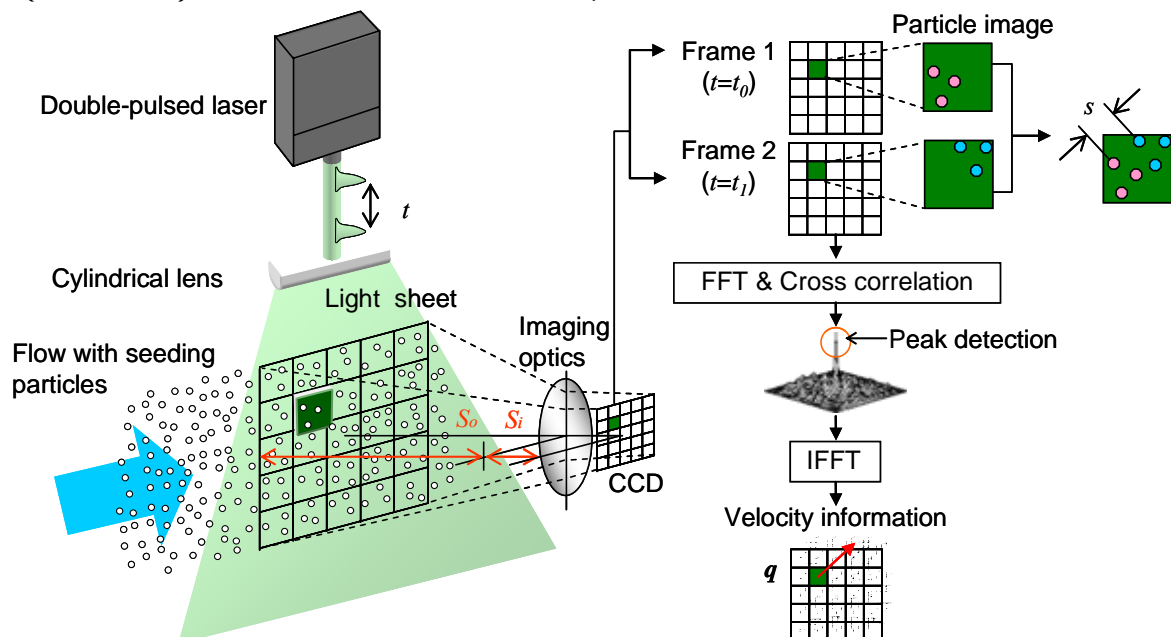


図 3-10 PIV 計測の原理

図 3-11 に PIV 計測システムを示す。ライトシート (Nd:YAG laser), プログレッシブスキャン CCD カメラ (Kodak, Megapluse ES1.0 camera), PIV 制御処理装置 (DANTEC A/S, Flow Map PIV2100 Processor), パーソナルコンピュータ (Gateway, Inc, GP7) ならびに粒子 (噴出される気液二相流噴流) の集合体として構成される。計測システムは, レーザ発振器 (New wave Research Minirase, Double pulsed Nd:YAG laser) とライトシート光学器 (New wave Research Minirase, 80×30/31) から構成されるレーザシステムにより, 流れ場を二次元的に光切断した。ここで CCD カメラは, レーザ発振器のパルス信号と同期がとれるよう PIV 制御処理装置の Synchronization unit により制御した。CCD カメラにより 2 時刻における画像を撮影し, PIV 制御処理装置において記録 (Input buffer) および解析 (Correlator unit) がなされ, 最終的にパーソナルコンピュータにデータが保存された。さらにパーソナルコンピュータにより PIV 制御処理装置を介してすべての計測操作を行った。CCD カメラは, トラバース装置に設置してあり, 微少な移動量の設定をすることが可能であるが, 移動量の選定は, PIV 計測システム外からの情報によって行った。以下に, PIV 計測システムを構成する製品の詳細な仕様を示す。

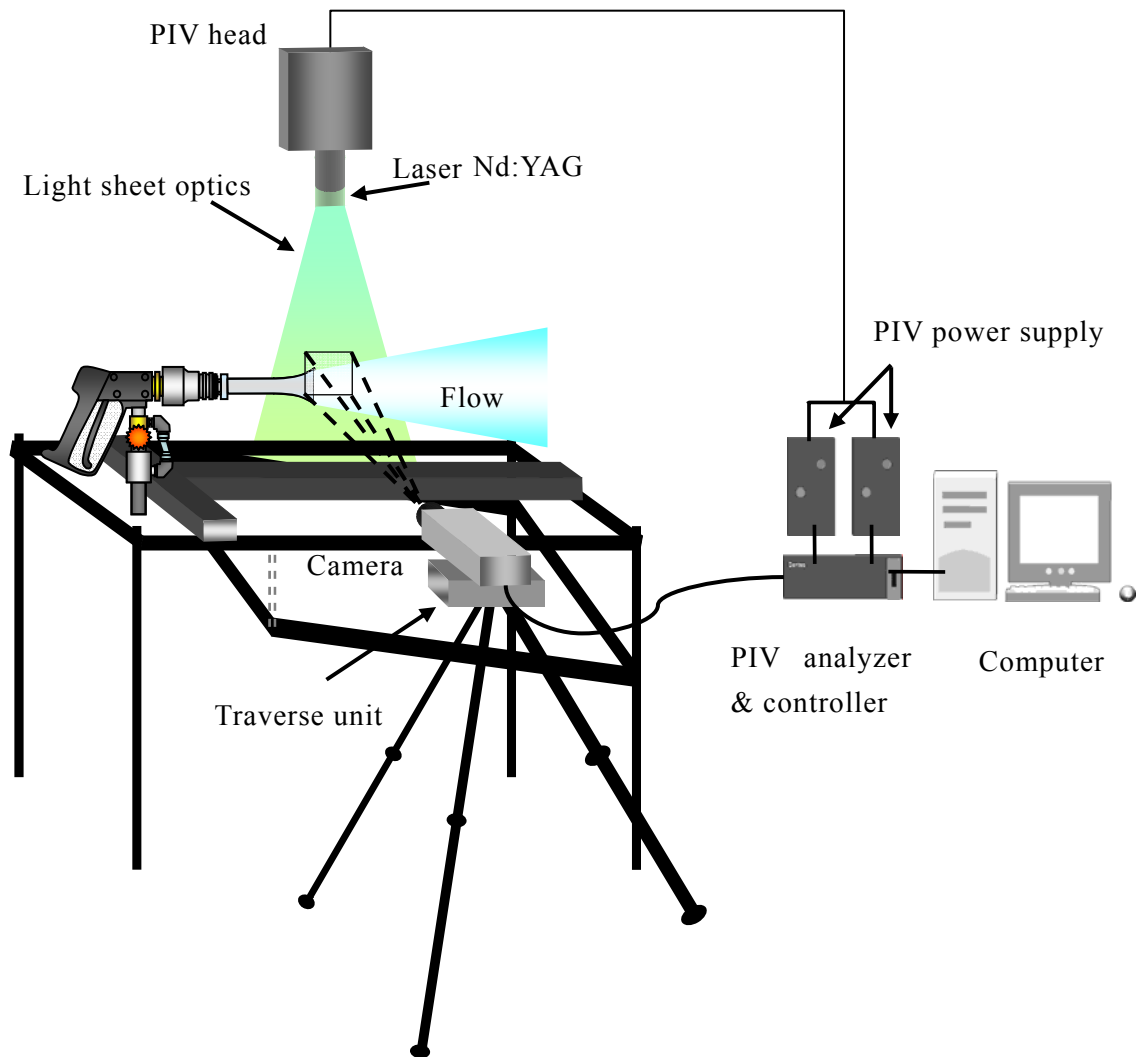


図 3-11 PIV 計測システム

3-5-2 ライトシート

ライトシートは、着目する流れの二次元断面を抽出し、この断面内の粒子の散乱光が光学系ノイズに埋もれないよう散乱光強度に配慮して、適切に得られるようにする必要があるのである。また、ライトシートの発光時間は、流れている粒子の動きをフリーズさせるために瞬間的であること、粒子画像の輝度分布を取得する際に前後の被写界深度に存在する粒子の散乱光がノイズの原因となるため、スリットを用いてライトシートの厚さを調整することが重要となる。さらに、CCD カメラの全画素 (Pixels) で散乱光が捉えられるように測定領域にあわせて照射するために最適なライトシート光学器が必要である。CCD カメラは青緑のスペクトルにおいて最も量子効率が高いので、波長 1064 nm 赤外光の第 2 高調波 532 nm (緑の可視光) が良質の画像を選ぶには最適である。なお、レーザ照射領域は測定領域に合わせて散乱強度が均一になるように十分に配慮して行った。表 3-5 には本計測において使用したライトシートの仕様を示す。

表 3-5 レーザシステム仕様

Minirase Double pulsed Nd:YAG laser (New wave Research)	
Laser medium	Nd:YAG
Beam diameter	2.5 mm
Wavelength	532 nm
Output power	100 mJ
Pulse width	6 ns

3-5-3 CCD カメラ

PIV 計測において CCD カメラは流れ場の粒子の位置を捉えるため、その散乱光を電荷すなわち電子に変換して粒子画像を取得する。CCD カメラは、計測時にオンラインで画像を確認でき、リアルタイムで速度分布を算出することが出来ることから用いている。表 3-6 に CCD カメラの仕様を示す。

表 3-6 CCD カメラ仕様

Megapluse ES1.0 camera (Kodak)	
Sensor readout	Interline, progressive scan
Resolution	1008×1018 pixel
Lens	AF Micro-Nikkor 60 mm <i>F</i> /2.8 D (Nikon)
Aperture	32

3-5-4 PIV 制御処理装置

PIV 制御処理装置(DANTEC A/S., Flow Map PIV2100 Processor)は ,トリガ ,レーザ ,そして CCD カメラを同期させる Synchronization unit ,撮影した画像を一時保存する Input buffer ,画像から解析により速度分布を算出する Correlator unit から構成されている .本装置は ,操作ならびにデータ保存用としてパーソナルコンピュータ (PC) に Ethernet 接続されており ,すべての操作は ,パーソナルコンピュータから制御処理装置を介して行った .

3-5-5 オーバーラップ法

本計測では ,PIVの空間分解能の向上を図るためにセル (速度算出格子) のオーバーラップ法を導入した .オーバーラップ法はセル分割に際し ,相関領域を隣接するセル同士で重ね合わせることにより ,空間分解能を向上させ ,取得できるベクトルを増加するとともに ,二時刻間 (t_0, t_1) にセル内からセル外部へ流出する粒子情報を有効に活用できる .

3-5-6 PIV 計測による渦度算出および移動平均有効化処理法

PIV 計測によって取得したデータの解析手法については ,解析ソフト (DANTEC A/S., Flow Manager Ver. 4.0. 以下 ,Flow Manager と呼ぶ .) より過誤ベクトル情報の除去および速度場情報の平滑化処理を行った .

(1) Moving Average Validation (移動平均有効化処理)

過誤ベクトルの除去は ,移動平均有効化処理といわれる Flow Manager 内にある診断方法に基づいて行った .

座標 (m,n) の速度ベクトルは ,以下の計算式により ,しきい値 k_a を用いて過誤ベクトルかどうか判断される .過誤ベクトル除去後は ,平均値 $\bar{v}(x,y)$ に置き換えられる .なお , $v(m,n)_x$ は主流方向速度 , $v(m,n)_y$ は主流垂直方向速度を示し , x, y は ,ベクトル算出グリッド間隔を示している .

$$\bar{v}(x,y) = \frac{1}{mn} \sum_{i=x-\frac{n-1}{2}}^{x+\frac{n-1}{2}} \sum_{j=y-\frac{n-1}{2}}^{y+\frac{n-1}{2}} v(i,j)$$

$$\|v(x,y) - \bar{v}(x,y)\| > k_a$$

$$\|v(x,y) - \bar{v}(x,y)\| = \sqrt{(v(x,y)_x - \bar{v}(x,y)_x)^2 + (v(x,y)_y - \bar{v}(x,y)_y)^2}$$

設定は ,

Averaging area (比較対照セル範囲 $m \times n$ (個))	: 3×3
Acceptance factor (有効化しきい値)	: $k_a=0.1$
Iteration (繰り返し回数)	: 3

として行った .

(2)Average Filter (平滑化処理)

明確な渦度分布などの情報を得るために速度場全体の平滑化処理を行う必要がある。平滑化は、Flow Manager 内において

$$\bar{v}(x,y) = \frac{1}{mn} \sum_{i=x-\frac{n-1}{2}}^{x+\frac{n-1}{2}} \sum_{j=y-\frac{n-1}{2}}^{y+\frac{n-1}{2}} v(i,j)$$

$$= \left[\begin{array}{c} v(m-1,n-1)_{x,y} + v(m-1,n)_{x,y} + v(m-1,n+1)_{x,y} + v(m,n-1)_{x,y} + v(m,n)_{x,y} \\ + v(m,n+1)_{x,y} + v(m+1,n-1)_{x,y} + v(m+1,n)_{x,y} + v(m+1,n+1)_{x,y} \end{array} \right] / 9$$

設定は、

Averaging area(比較対照セル範囲 $m \times n$ (個)) : 3×3

として行った。Flow Manager 内では、Iteration (繰り返し回数) は 3 回である。

(3)Adaptive correlation

速度勾配の大きい流れ場において、Cross correlationでは図 3-12 の左図の赤い領域のように、粒子が検査領域外に出てしまうことから、相関係数は下がり、正確なベクトル情報を算出できない。正確なベクトル情報を算出するためには、検査領域の中の最大・最小速度の違いは平均速度の 5%未満という条件が必要である⁽³⁾。

一方、Adaptive correlation は、Cross correlation と比し、2つの利点あげられる。第一に、図 3-12 の右図の赤色の領域のように最終的に算出する検査領域の 2 倍の検査領域に対して Cross correlation を行うことにより、検査領域外に出てしまう粒子が減少するために相関係数は高くなり、信頼性の高い移動距離が算出される。第二に、2 倍の検査領域の大きさを最終的に算出する検査領域のサイズに変更する。そして、先ほどの信頼性の高い移動距離を基準とし、各検査領域に対してオフセット作業を行い相関係数の算出を行うことにより右図の橙色のベクトルが取得できる。

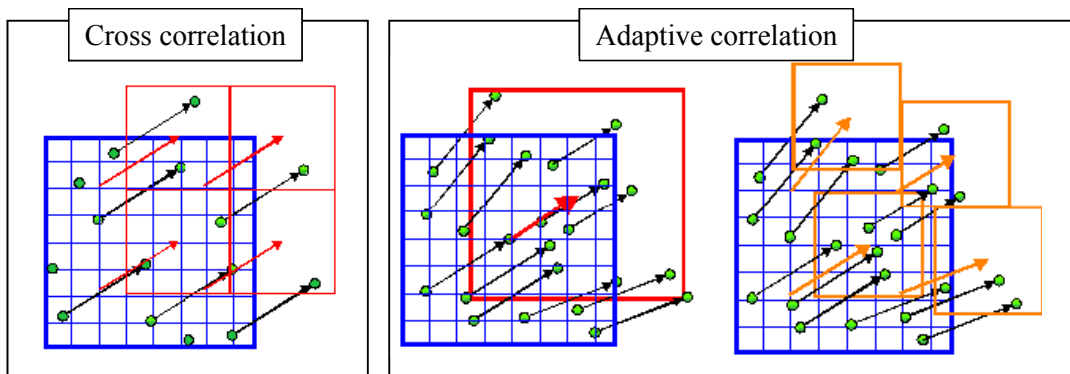


図 3-12 Cross correlation と Adaptive correlation の比較

(4) 渦度

渦度の算出は、Flow Manager 内にある Moving Average Validation および Average Filter の処理後のデータを用いて行っている。

PIV 計測において座標 (m,n) における渦度 $\zeta(m,n)$ は次式で算出される。

$$\zeta(m,n) = \frac{v(m+1,n)_y - v(m-1,n)_y}{\Delta x} - \frac{v(m,n+1)_x - v(m,n-1)_x}{\Delta y}$$

3-6 実験方法

【洗浄器使用法】

洗浄器は、すべての実験において以下の手順で使用した。A：洗浄剤注入バルブ，C：エア供給バルブ，G：圧力解放バルブの各バルブがすべて閉じていることを確認したあと，A を開きカップに洗浄液（本実験では水を使用。）をゆっくり注入して A を閉じた。そのあと，コンプレッサーを接続し，C を開き B：タンク内を加圧した。加圧し終わったら D：流量調整バルブで洗浄剤の混合率を調整し，E：ガンレバーを開き気液二相流噴流を発生させた。計測時間 t は，ガンレバーを作動させている時間とした。

【圧力分布計測】

圧力分布を測定するために，ツーシートタイプの圧力測定フィルムを用いて実験を行った。A，C フィルムを測定に必要な大きさに切り取り，A，C フィルムの発色剤，顕色剤面どうしを合わせて，その合わせたフィルムをチャック付きポリ袋（厚さ 0.04 mm）に入れ真空引きし，シールした。この時，袋の中の湿度が常に一定になるように，また湿度変化の確認用に，袋の中に 2，3 粒のシリカゲルも一緒に入れた。この袋をアルミ板にセロテープで四方を貼り付け，そこに噴流を当て計測した。ポリ袋とプレスケールの形状を図 3-13 に，供試洗浄器でのプレスケールの測定装置を図 3-14 に示す。

実験は加圧時間の時間変化による圧力分布の測定と，ノズル プレスケール間の距離変化による圧力分布の測定を行った。測定後 A フィルムを取り出し，C フィルムを支持体側から圧力分布が正しく計測されたか目視検査した。さらに C フィルムをスキャナに取り込み，画像処理し圧力分布を比較した。圧力値は，標準色見本チャートを実験スキャニングすることにより得られる赤色濃度と，プレスケールの赤色濃度（図 3-6，図 3-7）とを比較することで取得した。このとき，計測時の温度，湿度，条件により適切な圧力較正曲線を選択することで赤色濃度から圧力を求めた。

比較方法は，受圧部の面積の変化を評価することにより行った。受圧部の面積は，生データである C フィルムの受圧した部分を円と仮定して，それぞれの径を直接測り求めた。

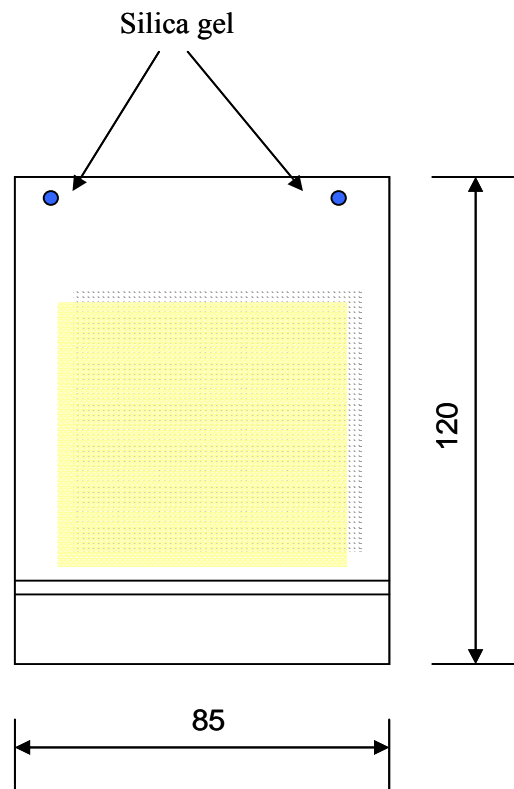


図 3-13 ポリ袋とプレスケールの使用法

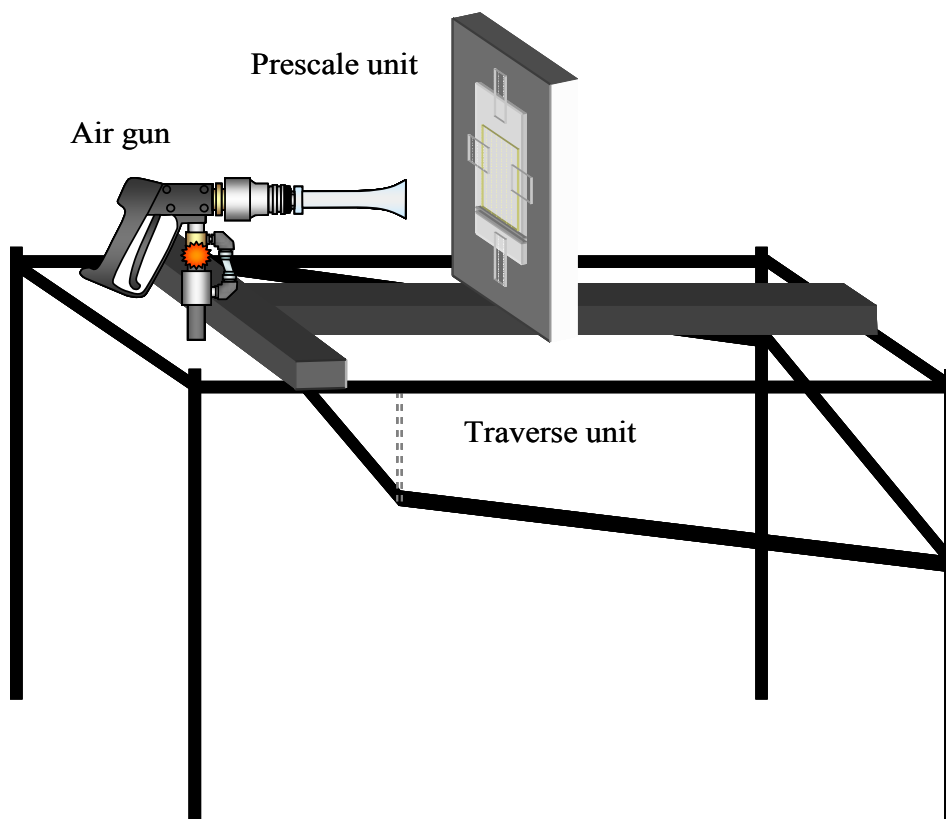


図 3-14 プレスケール測定装置

【変動圧力計測】

変動圧力の測定は，アルミ板に圧力トランスデューサを取り付け，それをトラバース装置によって噴流の左端から 1 mm ずつ右に移動させて行った．また圧力トランスデューサを 1 mm ずつ移動させることによって圧力値がどのように変化するのかを計測した．

【速度場計測】

速度場計測は，PIV 計測システムを用いて行った．ノズルはフレキシブルノズル，固定ノズルを使用して噴流を発生させ，噴流の噴出方向の垂直断面を計測した．計測時のレーザ光パルス間隔 t は 2 μ s で，画角はフレキシブルノズルを使用した時は 31 mm×31 mm，固定ノズルを使用した時は 29 mm×29 mm である．噴流の最高流速と噴流流域の幅がノズルによってどのような違いが現れるのかを計測した．そして計測によって取得したデータから過誤ベクトルを除去した．PIV 計測によって取得したデータから過誤ベクトルを除去する際には，Flow Manager 内で画像を Masking 処理したあと Adaptive Correlation により Overlap : 50 %，Peak Validation : 1.06，Local Median に設定して行った．

3-7 洗浄器基本性能

毎回の実験条件を同じにするためには，タンク内の水量 V と流量調整バルブの開度 O の影響を確認した上で実験を行う必要がある．そこで，タンク内の水量 V を完全に満たされた 5.0 l 時と半分の 2.5 l 時において，ノズルから噴出される流量が流量調整バルブの開度 O によってどのように変化するのかを示す．

噴出流量の計測は，ノズル出口にポリバケツを設置して，噴出される水をできる限り口スすることなく回収するように工夫して行った．計測時間は 6 秒で行い，噴出した総液量を 1 秒あたりに噴出した流量 Q に変換した．この計測方法で，流量調整バルブの開度 O を 10 % から 100 % まで 10 % 刻みで変化させ流量 Q の変化を計測した．

図 3-15 に供試洗浄器のタンク内水量 V による噴出流量 Q を示す． V が完全に満たされた 5.0 l 時は，噴出流量 Q にばらつきが見られ動作が不安定である．この結果より， V を完全に満たされた 5.0 l にすると十分な圧縮空気がタンク内に無いことから，装置の動作が不安定になり洗浄効果も落ちてしまう可能性がある．

図 3-16 に V が半分の 2.5 l の状態で，5.0 l の時と同様にバルブの開度 O と噴出流量 Q の変化を示す． V が 2.5 l の状態の時は， V が 5.0 l に比べ噴出流量は小さくなっているが O が変化することによって噴出流量 Q は一定の値で安定して噴出されており，バルブ開度 O にかかわらず噴出流量 Q はほぼ一定である．この結果より， V を 2.5 l にすると満タンの時よりも動作は安定し， O に関係なく Q はほぼ一定である．

以上から，本実験ではタンク内水量 V を一定とし，適切な開度で実験を行った．

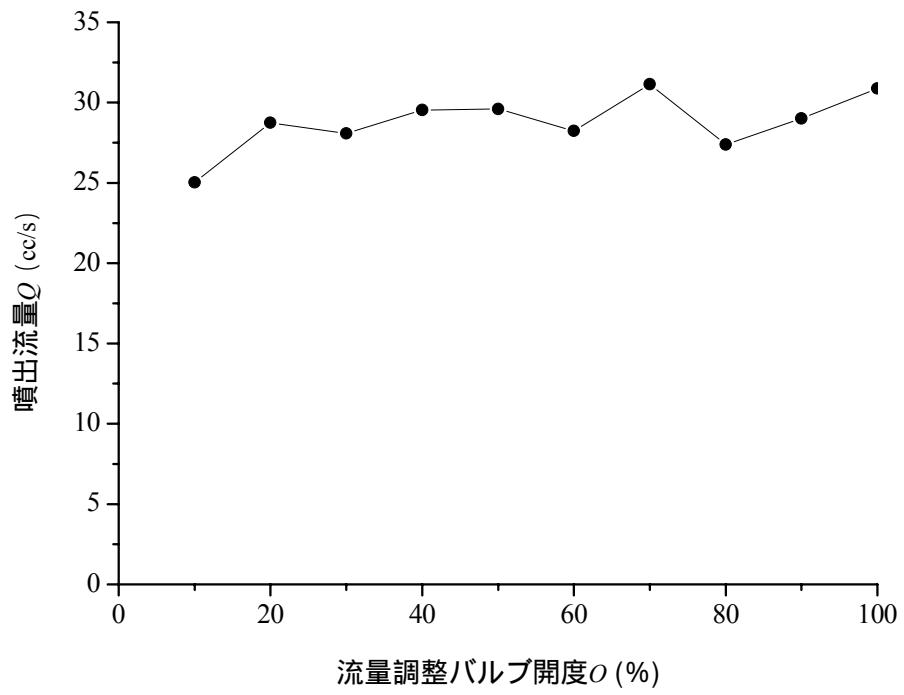


図 3-15 $V=5.0$ l の時

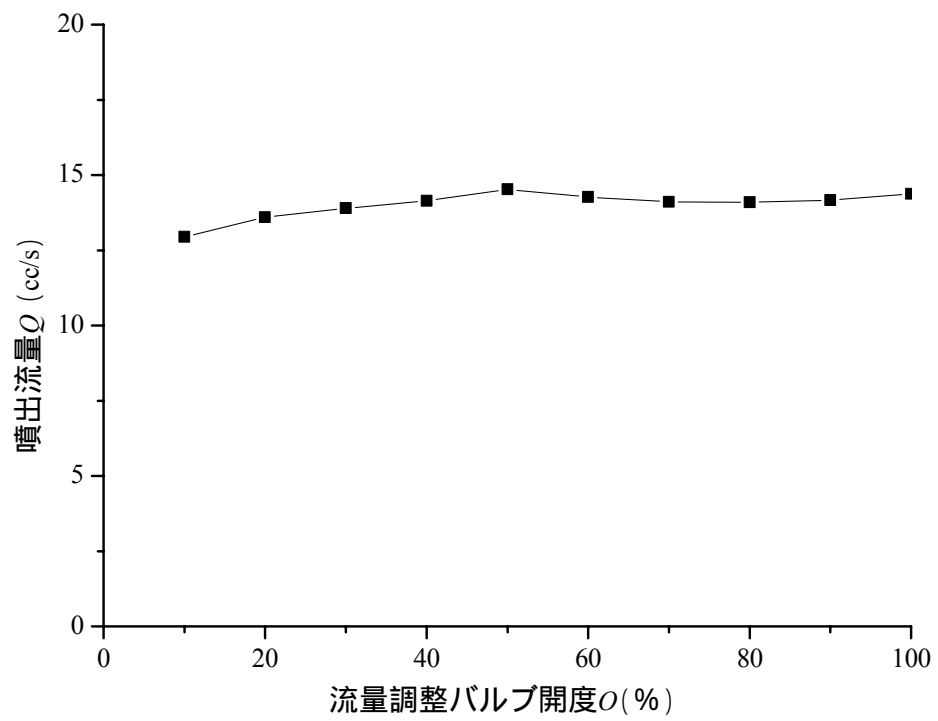


図 3-16 $V=2.5$ l の時

3-8 実験条件

いずれの実験においてもフレキシブルノズル，固定ノズルの 2 種類のノズルを使用して実験を行い，流量の条件はタンク内の水量 V を 2.5 l に固定し，流量調整バルブの開度 O を 20 % に固定して実験を行った．

圧力分布の計測においては，受圧時間変化による圧力分布の測定と，計測区間の距離変化による圧力分布の測定を行った．計測時間 t の受圧時間変化による圧力分布の測定を行う時の条件は，ノズル 洗浄面間距離 z (以下，ノズルと洗浄面間の距離 z を噴流長さと呼ぶ．) を 8 mm で固定し，計測時間 t を +0.0 ~ 3 s まで 1 s 間隔にした． z の噴流長さ変化による圧力分布の測定を行う時の条件は，計測時間 t を 6 s で固定し，噴流長さ z を 2 ~ 8 mm まで 2 mm 間隔にした．

変動圧力計測においては，噴流長さ z を 8 mm，計測時間 t を 5 s に固定して計測を行った．

速度場計測においては，圧力計測用のついでには使用せず噴流長さ $z =$ とした．また，時間も計測に適切な時間とし特に設定せず実験を行った．

各計測における条件を表 3-7 に示す．

表 3-7 実験条件

圧力分布計測		
時間変化	$t = +0.0, 1, 2, 3 \text{ s}$	$z = 8 \text{ mm}$
距離変化	$t = 6 \text{ s}$	$z = 2, 4, 6, 8 \text{ mm}$
変動圧力計測		
	$t = 5 \text{ s}$	$z = 8 \text{ mm}$
速度場計測		
	t は設定せず	$z =$

第 4 章 実験結果および考察

4-1 感圧紙法による圧力分布評価

4-1-1 感圧紙の特性評価

本実験において使用した超極低圧用感圧紙と超低圧用感圧紙での測定結果の評価を行う。これは、測定可能圧力範囲が 0.2~0.6 MPa である超極低圧用によって超低圧用の測定可能圧力範囲である 0.5~2.5 MPa も含めて、正しく表現できているかを確認するためである。図 4-1-1, 4-1-2 はフレキシブルノズルの噴流長さ $z=2$ mm, $z=4$ mm における超極低圧用()と超低圧用の感圧紙()による圧力分布を示す。ここに、左図(a)は計測により取得した生データである感圧紙の画像であり、右図(b)はその画像から圧力値への換算処理を行って取得した圧力分布である。換算された圧力値はページ最上部のカラーバーに示し、0 MPa~2 MPa の範囲となり、0 MPa を青色、2 MPa を赤色で示している。本来、超極低圧用の感圧紙の測定可能圧力範囲は 0.2~0.6 MPa であり 2 MPa までは測定できないが、図 3-6(c) 圧力較正曲線の曲線 E が線形であると仮定して(b) 標準色見本の色濃度の数値が 1.3 の時の圧力値を比例により求めることによって、この圧力分布の範囲を算出した。評価は右図(b)の圧力分布で行うことにする。

図 4-1-1 の $z=2$ mm の場合は、超極低圧、超低圧用いずれも受圧部の中心部付近では高圧を示す赤色の領域で分布しているが、受圧部と受圧していない部分との境界付近では若干だが色調分布が異なっている。超極低圧用ではあまり現れていない黄色の領域が、超低圧用では拡大されて分布している。超低圧用では高い圧力において分解能が低下しているが、カラーバーの表示を参考にすると、高い圧力値に関しても評価可能であると言える。

図 4-1-2 の $z=4$ mm の場合は、図 4-1-1 と比べ受圧部全体の領域で色調分布は低くなっている。超低圧用では受圧部と受圧していない部分との境界付近だけではなく、受圧部の中心部付近でも黄色の領域が拡大している。しかし、超極低圧用でも黄色の領域は拡大してきており、両方とも $z=2$ mm の時より赤色の分布は減っている。しかしながら、超低圧用では低い圧力の領域と考えられる境界部分での分布が十分でなく、また、筋状に現れる特徴的な圧力分布も不鮮明である。

以上より、超極低圧用は超低圧用の測定可能圧力範囲においても同程度の精度で計測可能であることが示され、測定圧力仕様内の低い圧力領域まで広範囲で計測可能であることが示された。よって、今回は超極低圧用を使用することで十分評価可能であり、超低圧用は使用せず超極低圧用のみ使用して計測を行い圧力分布特性を評価する。



(1) $z=2$

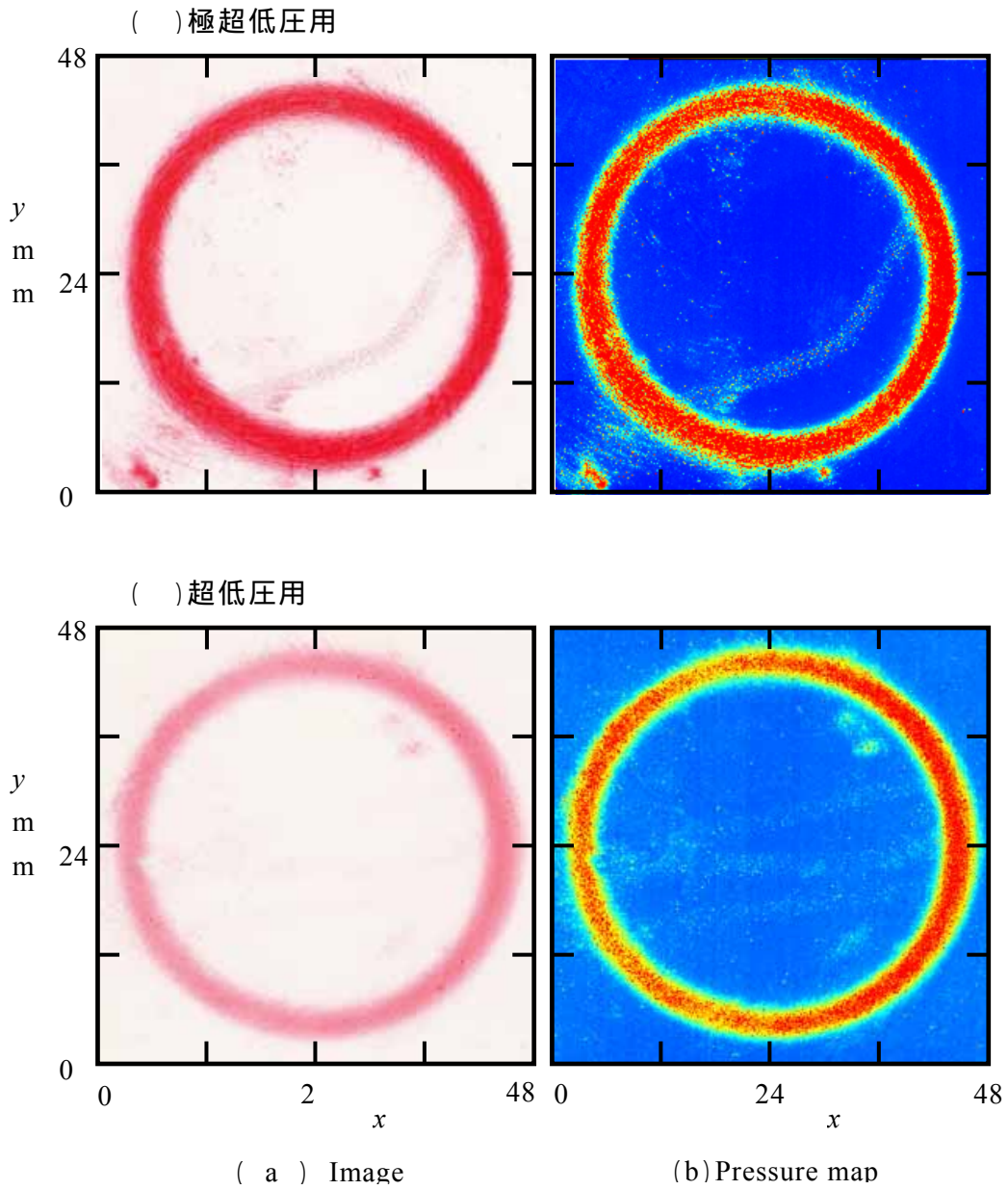


図4-1-1 $z=2$ mmにおける超極低压および超低压用の圧力分布の



(2) $z=4$

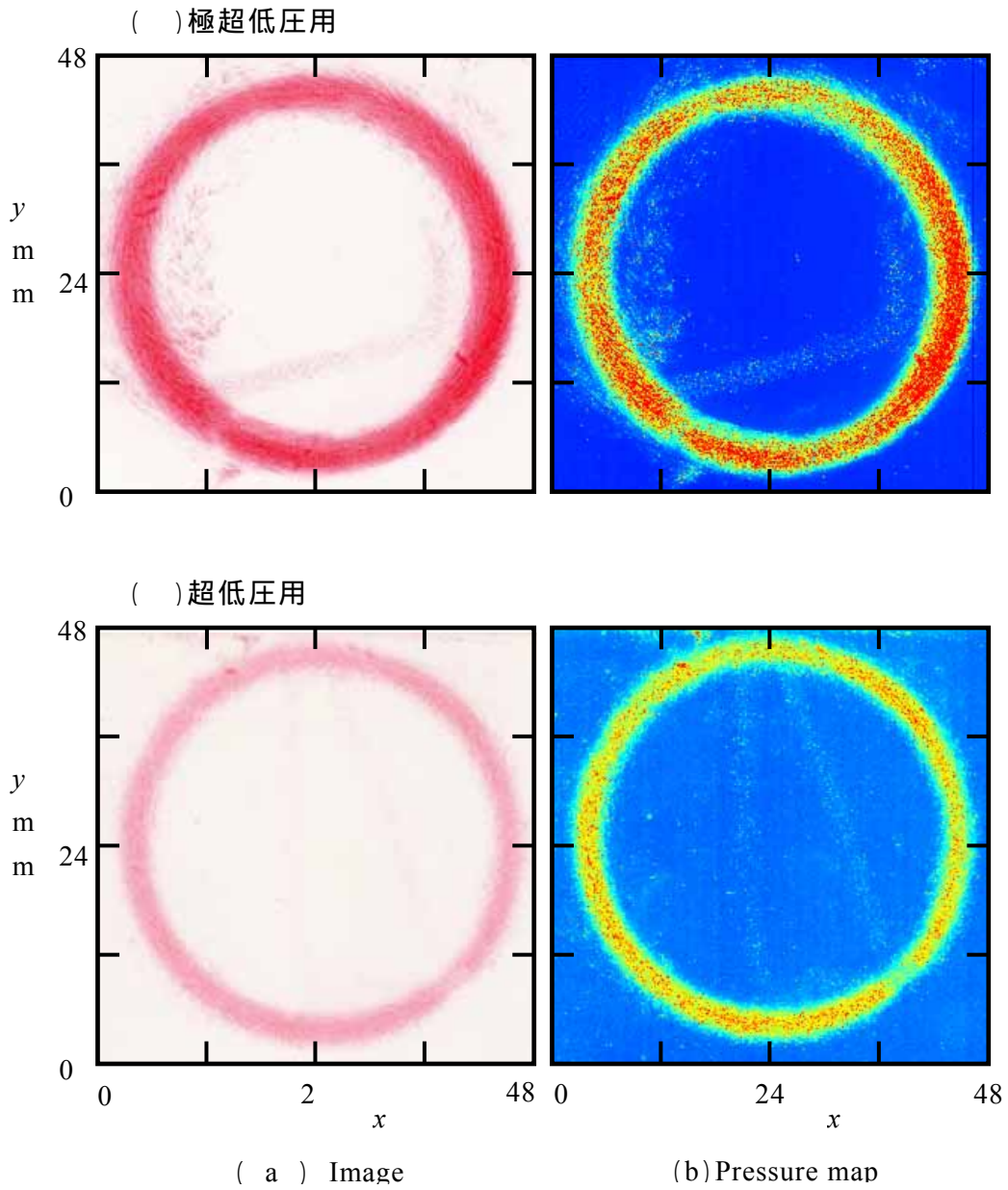


図4-1-2 $z=4$ mmにおける超極低压および超低压用の圧力分布の

4-1-2 感圧紙圧力分布に及ぼす受圧時間の影響

図 4-1-3, 4-1-4 は固定ノズル, フレキシブルノズル使用時の感圧紙の受圧時間変化による圧力分布を示す。各受圧時間は計測時間 $t=+0.0, 1, 2, 3$ sとなっており, 噴流長さ $z=8$ mmの結果を示す。なお, $t=+0.0$ sの結果はガンレバーを開いた直後のものである。また, 図 4-1-3 の(a), (b)には破線で表した円とその直径を記してあるが, これは受圧部を円と仮定した受圧円領域で, その直径 D を記したものである。図 4-1-4 の(a)には受圧した環状部分の外径 D_0 を記している。

図 4-1-3 の固定ノズルは, 画像情報から受圧時間の経過にともなって受圧部分が僅かであるが徐々に増加し, 圧力分布から高圧を示す赤色の分布もそれに伴い増加していることが確認できる。また, 受圧円領域の直径 D は, 時間の経過とともに僅かではあるが大きくなっている。しかし, いずれの増加においてもそれらの変化は微小である。また, 受圧部内の圧力は点で表されているところが多く, 洗浄できる範囲は狭く効率よく洗浄できないと考えられる。

図 4-1-4 のフレキシブルノズルも, 時間の経過にともなって受圧部面積が増加し, 圧力の値も高くなっていくことが確認でき, 受圧環状領域の外径 D_0 も大きくなっている。このようにフレキシブルノズルの場合も受圧時間変化に関しては前述した固定ノズルとほぼ同じ傾向を示す。また, 受圧部の圧力はほぼ一様な面で表されている。さらにフレキシブルノズルの場合にのみ, 旋回流によるものと思われる筋状に受圧環状領域に示されるひっかき痕が現れている。(2) $t=1$ s以降の(a) 感圧紙のスキャン画像においてひっかき痕は顕著に現れ, 時間が経過するごとにひっかき痕が重なり合って断続的に高圧を受けていることが見てとれる。しかし, このひっかき痕は(b) 圧力分布にはそれに対応した圧力値として解像度の関係上評価できない。このひっかき痕は圧力の高低だけによって生じる洗浄能力の相違とは異なる別の洗浄能力を向上させる性質を持っていると考えられる。

また, 固定ノズルとフレキシブルノズルのいずれも, (3) $t=2$ s と (4) $t=3$ sの間にはほとんど圧力分布変化が無く, 同様な(a) 感圧紙の画像と(b) 圧力分布が得られている。この結果より, (3) $t=2$ s 以降は超極低圧用の感圧紙の性能により計測時間 t をこれ以上長くしても計測結果は同等であると言える。以上のことから, 以後では計測時間 $t=2$ s または 6 s に固定して計測を行う。

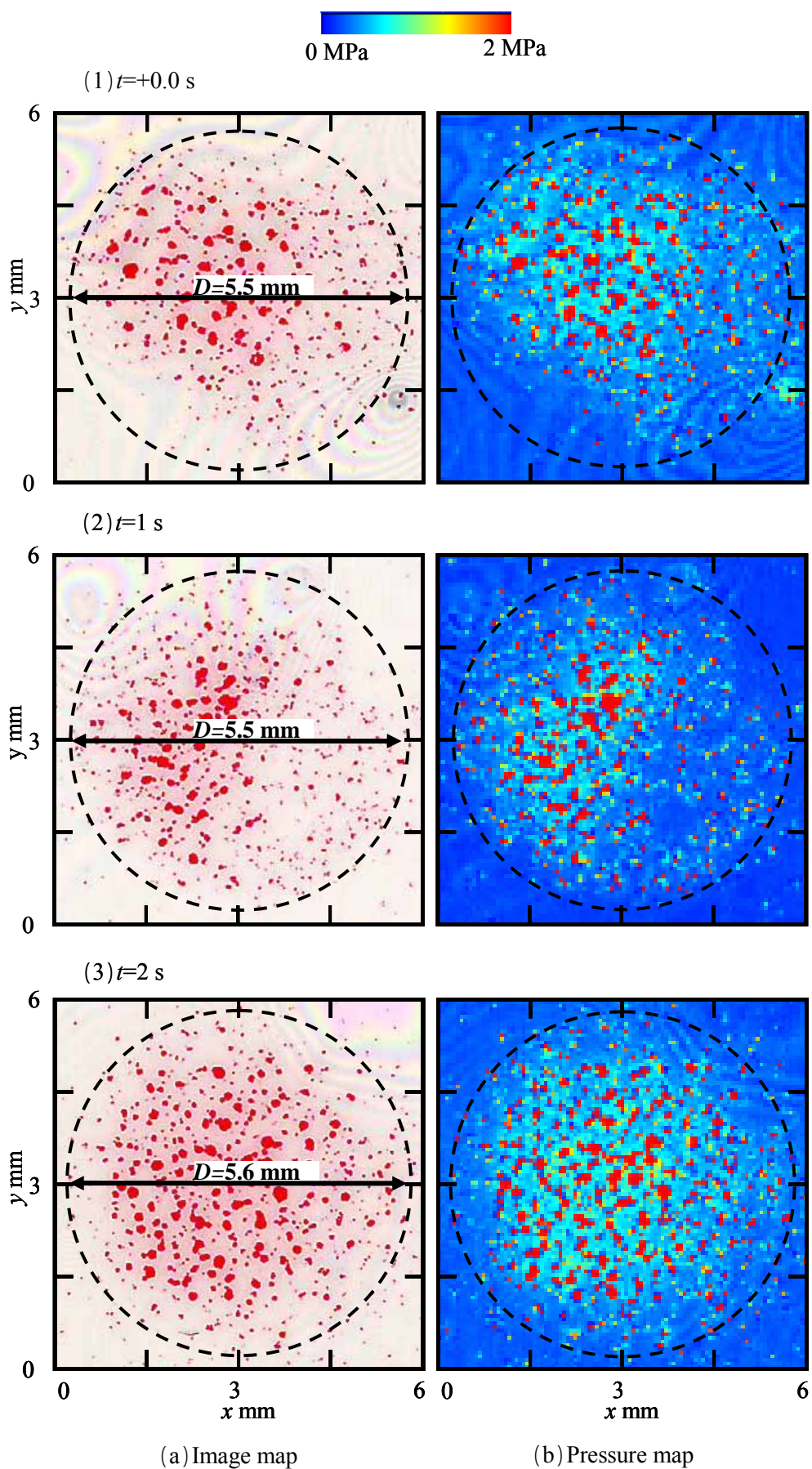


図4-1-3a 感圧紙圧力分布に及ぼす受圧時間の影響（固定ノズル）

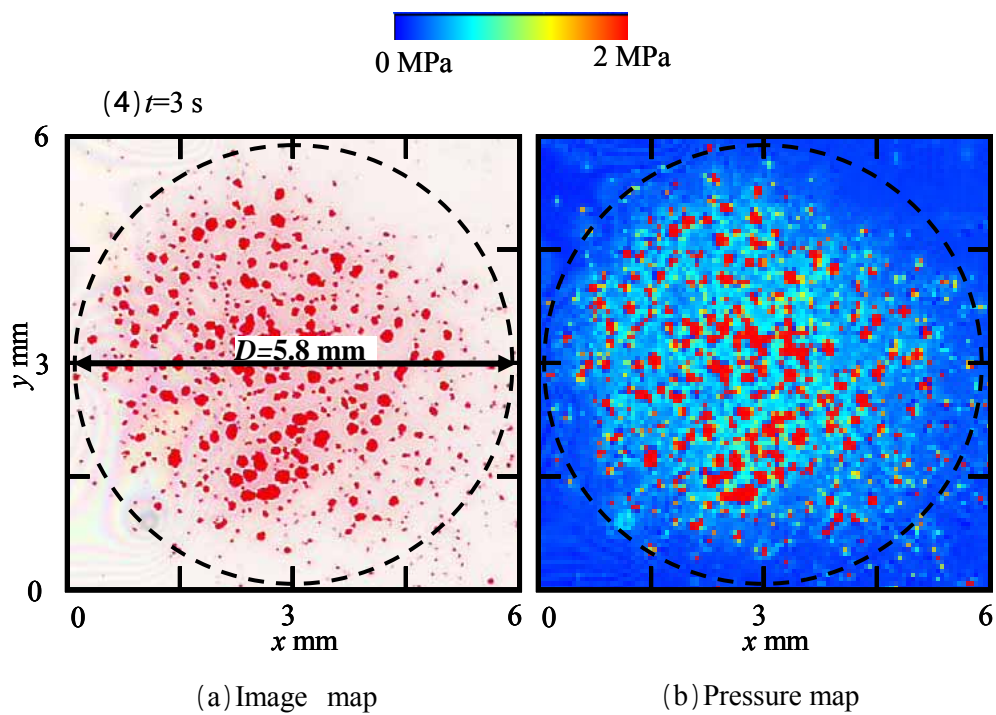


図4-1-3b 感圧紙圧力分布に及ぼす受圧時間の影響（固定ノズル）

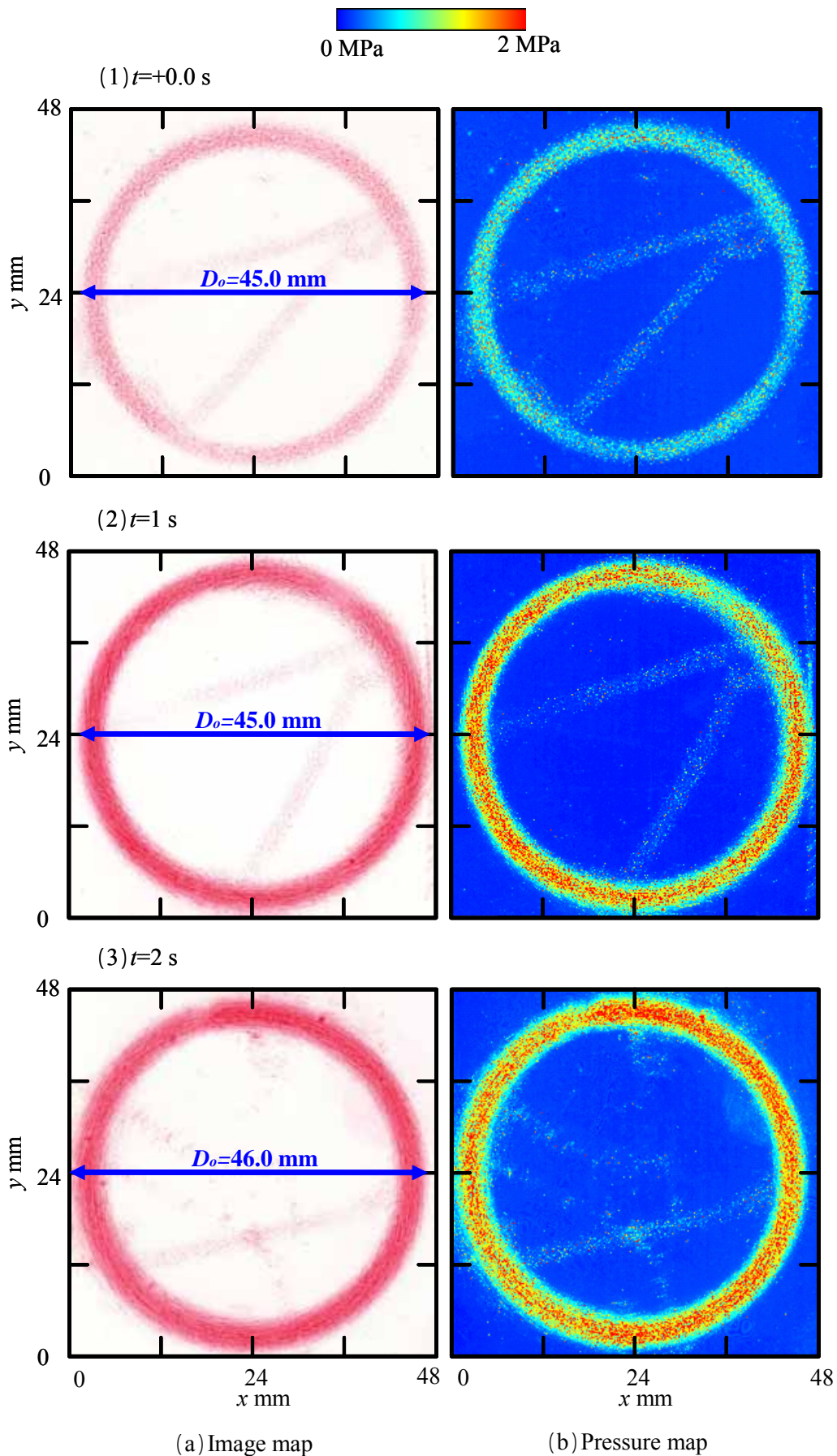


図4-1-4a 感圧紙圧力分布に及ぼす受圧時間の影響（フレキシブルノズル）

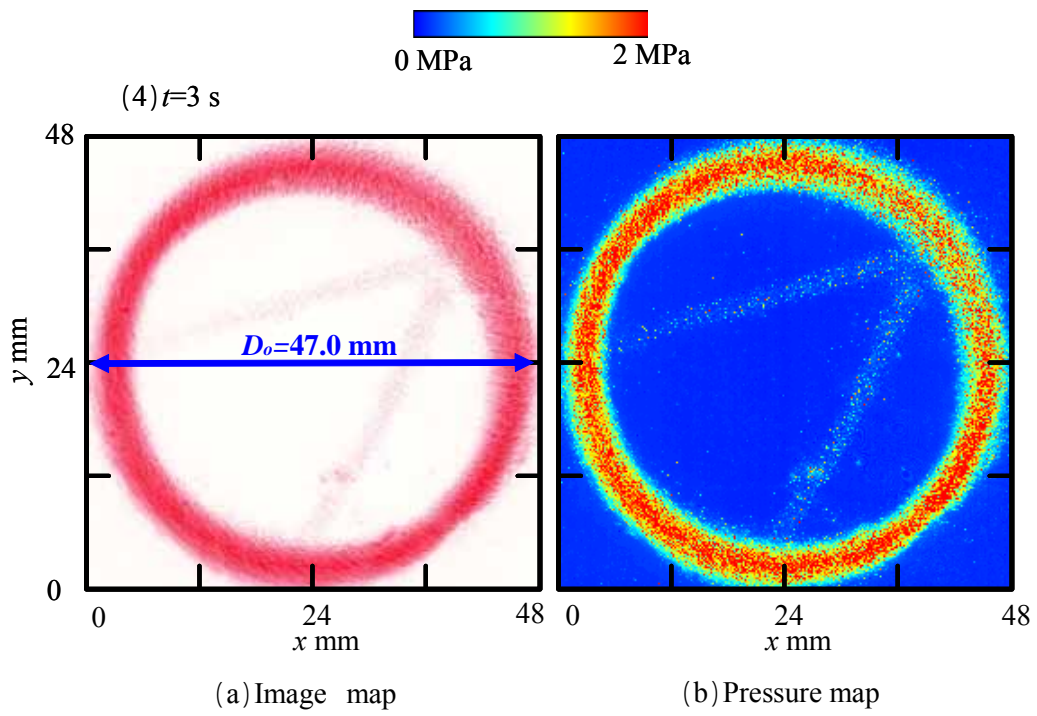


図4-1-4b 感圧紙圧力分布に及ぼす受圧時間の影響 (フレキシブルノズル)

4-1-3 感圧紙圧力分布に及ぼす噴流長さの影響

図 4-1-5, 4-1-6 は固定ノズル, フレキシブルノズル使用時の感圧紙の噴流長さ変化による圧力分布を示す. 各噴流長さは $z=2, 4, 6, 8$ mmとなっており, 計測時間 $t=6$ sに固定した結果である. ここで, 図の表示は前述と同一であり, 図 4-1-6 の(a)には受圧環状領域の外径 D_o とともに内径 D_i を記している.

図 4-1-5 の固定ノズルは, 噴流長さ z が短いほど受圧部面積は小さく高圧力を示す赤色の分布も多い. また, 噴流長さ z と, 受圧円領域の直径 D は特に比例関係がなく, z が2 mm増加するのに対して, 高々 D が1 mm増加するのみである. 噴流長さによる圧力分布も受圧時間による圧力分布と同様に, 受圧部の圧力が点で表されているところが多いことから洗浄できる範囲が狭く, 効率よく洗浄できないと考えられる.

図 4-1-6 のフレキシブルノズルも, 固定ノズルと同様に噴流長さ z が短いほど受圧部面積は小さく, 圧力は高くなっているが, (2) $z=4$ mm ~ (4) $z=8$ mmの間には圧力分布にあまり目立った変化が見られなかった. これは, 距離が離れても十分に圧力が伝わり洗浄ができることを示していると考えられる. ただし, たわみなどによる計測距離のずれや誤差による単純な計測ミスが原因であることも考えられる. また, 前述の時間変化の場合と類似しているように(1) $z=2$ mm ~ (4) $z=8$ mmのすべての距離において, 受圧部が点ではなくほぼ一様な面で圧力が分布しており, さらに旋回流が原因によるものと思われるひっかき痕が存在している.(1) $z=2$ mm ~ (4) $z=8$ mmを比較すると噴流長さ z が多少離れていても, この旋回流によって生じるひっかき痕の力が加わることにより噴流による圧力以上の力が働いていると推測できる.

以上により, 固定ノズル, フレキシブルノズルいずれも噴流長さ z が短くなるほど受圧部面積は小さくなるが, フレキシブルノズルの場合にのみひっかき痕の力が加わって噴流長さ z が変化しても圧力の変化はあまり生じないと言える.

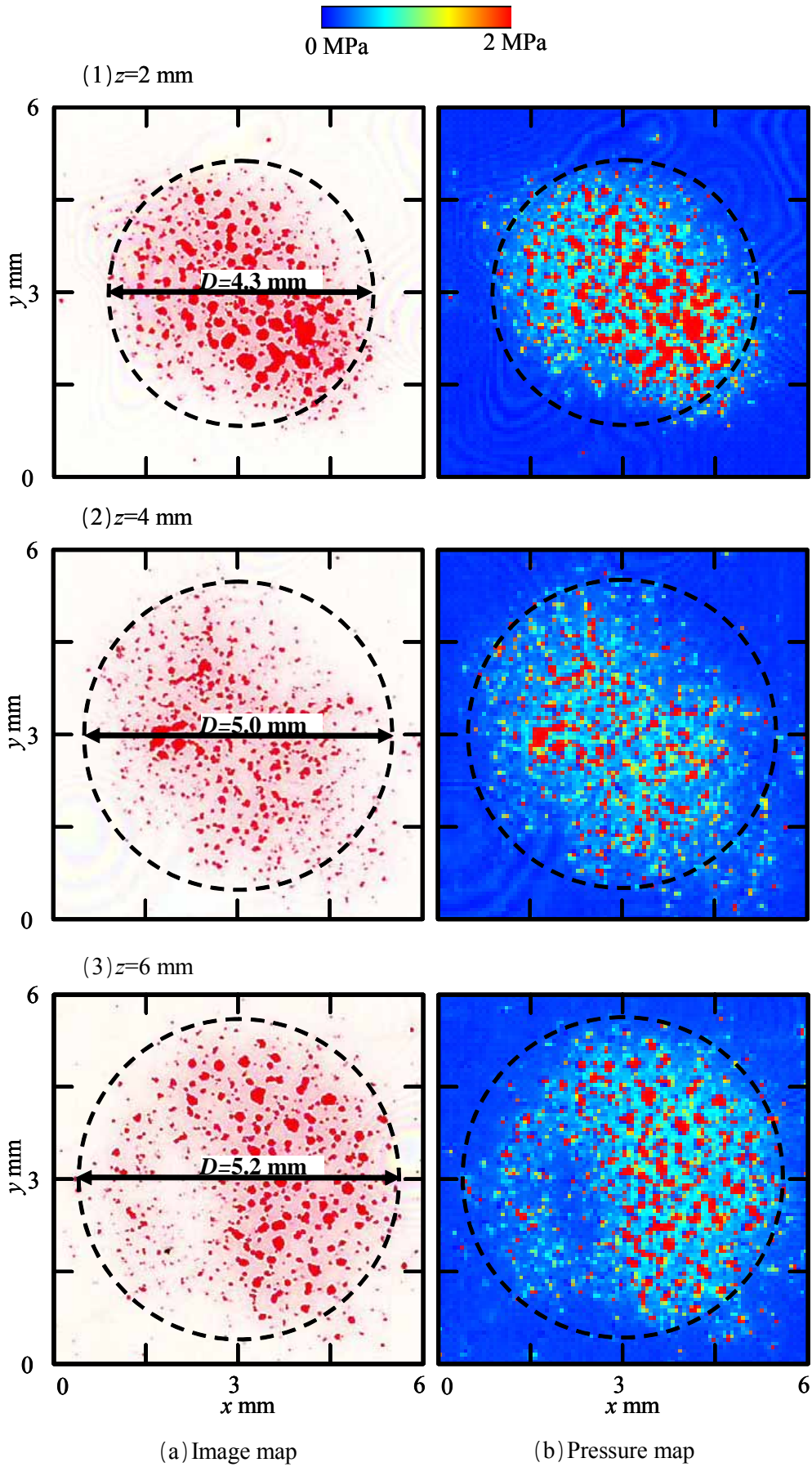


図4-1-5a 感圧紙圧力分布に及ぼす噴流長さの影響（固定ノズル）

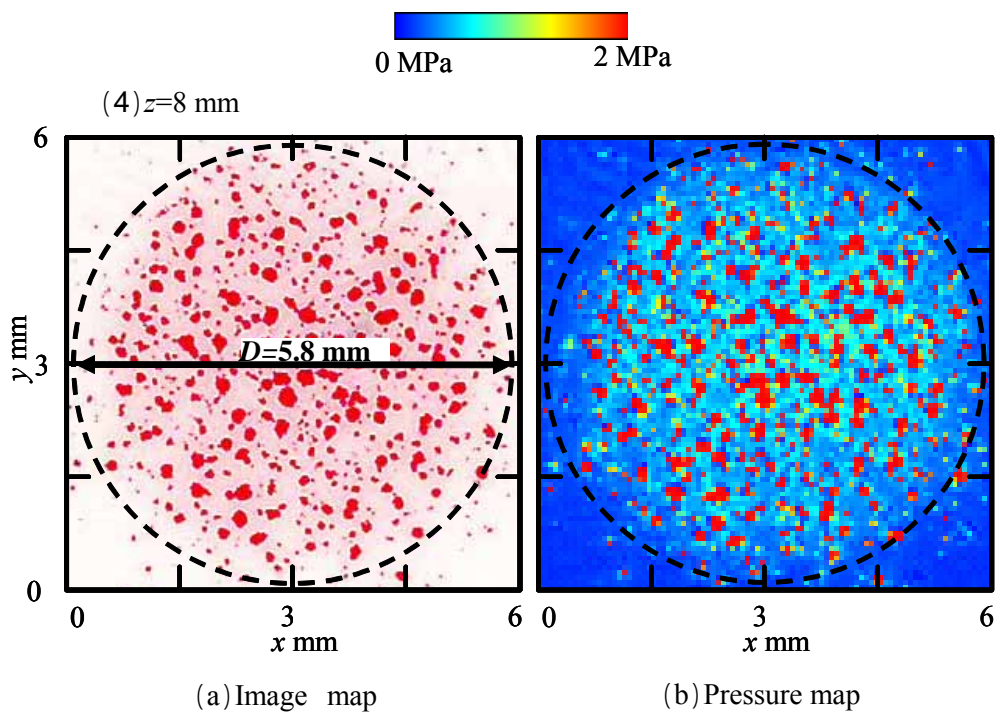


図4-1-5b 感圧紙圧力分布に及ぼす噴流長さの影響（固定ノズル）

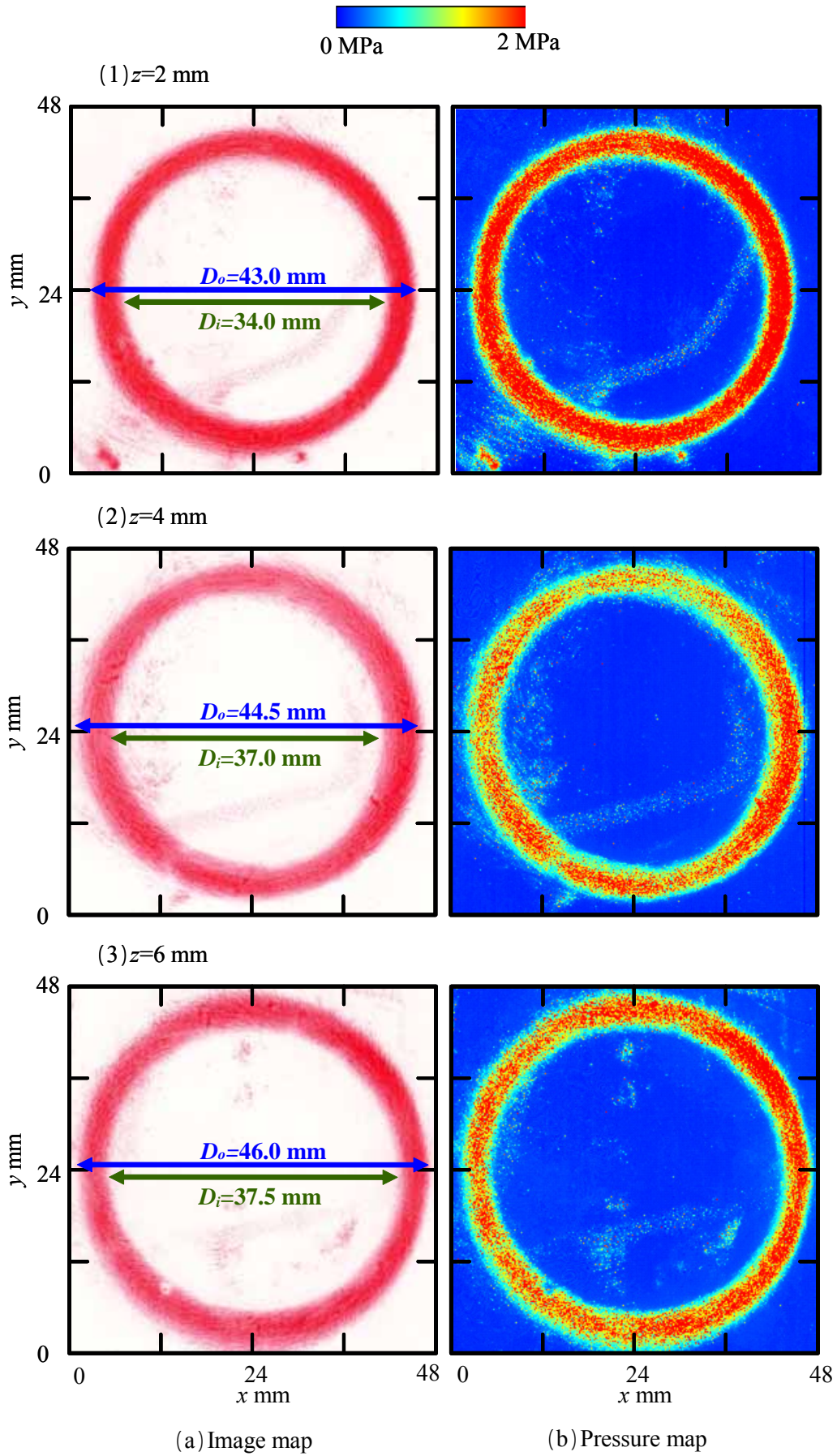


図4-1-6a 感圧紙圧力分布に及ぼす噴流長さの影響（フレキシブルノズル）

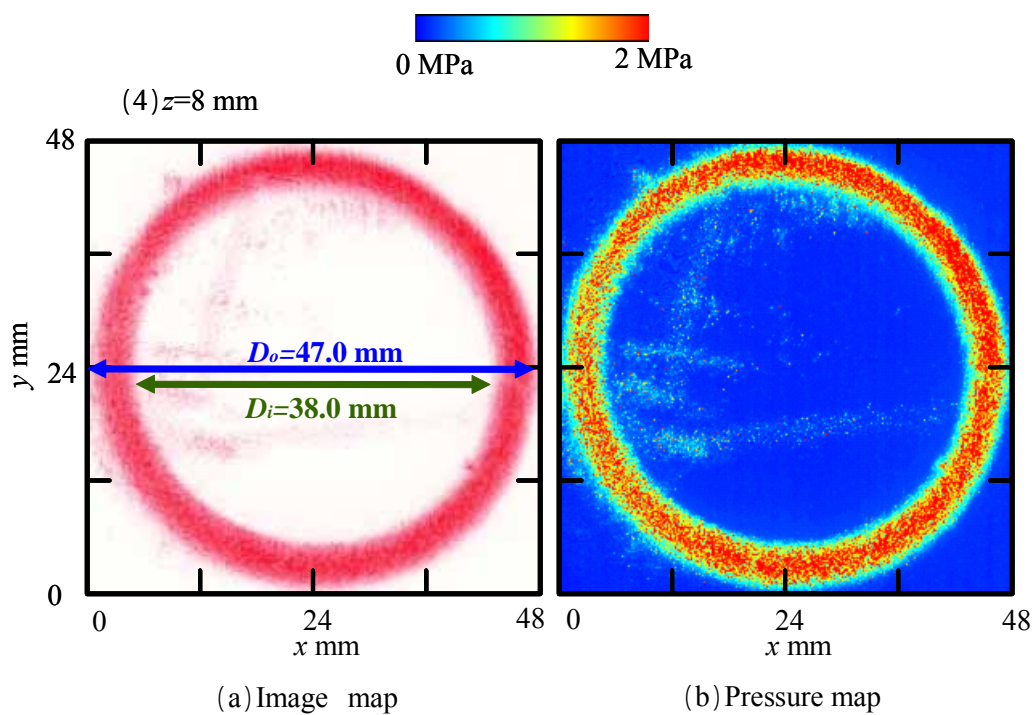


図4-1-6b 感圧紙圧力分布に及ぼす噴流長さの影響 (フレキシブルノズル)

4-1-4 圧力分布によるフレキシブルノズルの洗浄効果

図 4-1-7, 4-1-8 は固定ノズル, フレキシブルノズルの $z=8$ mm における圧力分布を示す。ここに, 左図 (a) は計測により取得した生データである感圧紙のイメージ画像であり, 下図 (b) はそれぞれ $y=3$ mm, 24 mm の断面における圧力分布であり, 右図 (c) はそれぞれ $x=3$ mm, 24 mm の断面における圧力分布である。また, 図 4-1-9 に固定ノズルとフレキシブルノズルの $t=2$ s, $z=8$ mm における解像度の違いを示す。ここで上図 (1) はフレキシブルノズルの画像であり, 中図 (2) は (1) の図の領域を $1/64$ にしたものを解像度を高めて固定ノズルと同じ寸法となるように拡大した画像であり, 下図 (3) は固定ノズルの画像である。

図 4-1-7, 図 4-1-8 の圧力値の分布を比較してみると, 固定ノズルは水平断面も垂直断面も受圧している部分と受圧していない部分が不均一に分布しているのに対して, フレキシブルノズルは受圧している部分と受圧していない部分が明確に分離している。固定ノズルのように全体が不均一に分布するよりも, フレキシブルノズルのように受圧する領域には均一に分布しているほうが洗浄能力は高いとみることができる。

また, 固定ノズルとフレキシブルノズルでは大きく異なる点が 2 つある。1 つは受圧部分の差異である。図 4-1-9 に示すように固定ノズルは受圧部内が多数の点で表されているが, フレキシブルノズルは受圧部が点ではなくほぼ一様な面の圧力分布として形成されている。これは噴流が多点多点で洗浄面に作用するよりも, 面で一様に作用するほうが洗浄される面積も増えるので洗浄能力が向上し, また全体的にばらつき無く均一に洗浄することができると考えられる。2 つ目はフレキシブルノズルにのみ現れる旋回流によるものと思われる筋状に受圧環状領域に示されるひっかき痕があるという点である。このひっかき痕は拡大した (a) 感圧紙の画像, (b) 圧力分布において明瞭に確認できる。ひっかき痕に対応した圧力値は強く現れており, 受圧環状領域上に縞状に連続的に示されている。このひっかき痕は, 圧力分布の解像度の差異により圧力分布には画像に対応した圧力値として示されないが, 解像度を上げることで対応した圧力値を示すことが可能となった。ただし, このひっかき痕は旋回流によって生じるせん断力によって, 感圧粒子がつぶれて発色したものと考えられる。よって, ひっかき痕は圧力の高低によって生じる洗浄能力とは異なり, 旋回流によるせん断力により洗浄能力を向上させる性質を持っていると推測している。

表 4-1 は各ノズルの噴流長さによる受圧部面積を示す。すなわち, 固定ノズルとフレキシブルノズルの洗浄範囲の大きさを意味する。この面積による比較は噴流長さ $z=2, 4, 6, 8$ mm に着目し, 図 4-1-5, 図 4-1-6 の直径 D, D_o, D_i を用いることにする。ここに, 固定ノズルは受圧円領域の直径を D とし面積を S_s としており, フレキシブルノズルは受圧環状領域の外径を D_o , 内径を D_i とし面積を S_F としている。

表 4-1 噴流長さによる受圧部面積

	固定ノズル	フレキシブルノズル	受圧面積比
	$S_S = \pi D^2 / 4$	$S_F = \pi (D_o^2 - D_i^2) / 4$	S_F / S_S
$z = 2$ mm	$D = 4.3$ mm	$D_o = 43.0$ mm, $D_i = 34.0$ mm	37.5
	$S_S = 14.5$ mm ²	$S_F = 544.3$ mm ²	
$z = 4$ mm	$D = 5.0$ mm	$D_o = 44.5$ mm, $D_i = 37.0$ mm	24.5
	$S_S = 19.6$ mm ²	$S_F = 480.1$ mm ²	
$z = 6$ mm	$D = 5.2$ mm	$D_o = 46.0$ mm, $D_i = 37.5$ mm	26.2
	$S_S = 21.2$ mm ²	$S_F = 557.4$ mm ²	
$z = 8$ mm	$D = 5.8$ mm	$D_o = 47.0$ mm, $D_i = 38.0$ mm	22.7
	$S_S = 26.4$ mm ²	$S_F = 600.8$ mm ²	

表 4-1 より，固定ノズルの受圧部の面積は噴流長さ z が大きくなるにつれ徐々に増加しており，フレキシブルノズルも $z = 4$ mmの場合を除けば増加していることが確認できる．つまり洗浄する場合において，噴流長さ z を近づけると高圧洗浄が可能となるが，その分洗浄できる範囲が狭くなり，噴流長さ z を大きくすると噴流の圧力は低くなっていくが洗浄できる範囲は広くすることができると言える．ただし，前述の 4-1-3 において評価したように $z = 2$ mm以外の $z = 4 \sim 8$ mmでは圧力はほぼ同程度に維持されている．また，受圧面積比 S_F / S_S を見てみると，噴流長さ z が大きくなっていくと面積比が小さくなる．このことから，噴流長さ z が小さければフレキシブルノズルを使用した方が固定ノズルよりも洗浄できる範囲を広くすることができる．また，噴流長さ z が大きくなれば固定ノズルとフレキシブルノズルの洗浄範囲が近づくが，前述したようにフレキシブルノズルの持つ旋回流によるひっかき痕による効果が期待できフレキシブルノズルの方が洗浄の効果が高いものと思われる．

以上の圧力分布の比較と受圧部の面積比較により，固定ノズルに比べフレキシブルノズルは，旋回流によるひっかき痕の力が加わって，単純な圧力の高低とは異なる洗浄効果により洗浄能力が上がるということが考えられる．さらに圧力が一様に作用する領域が形成され，洗浄できる範囲を広くすることができ，一様に洗浄できると考えられる．

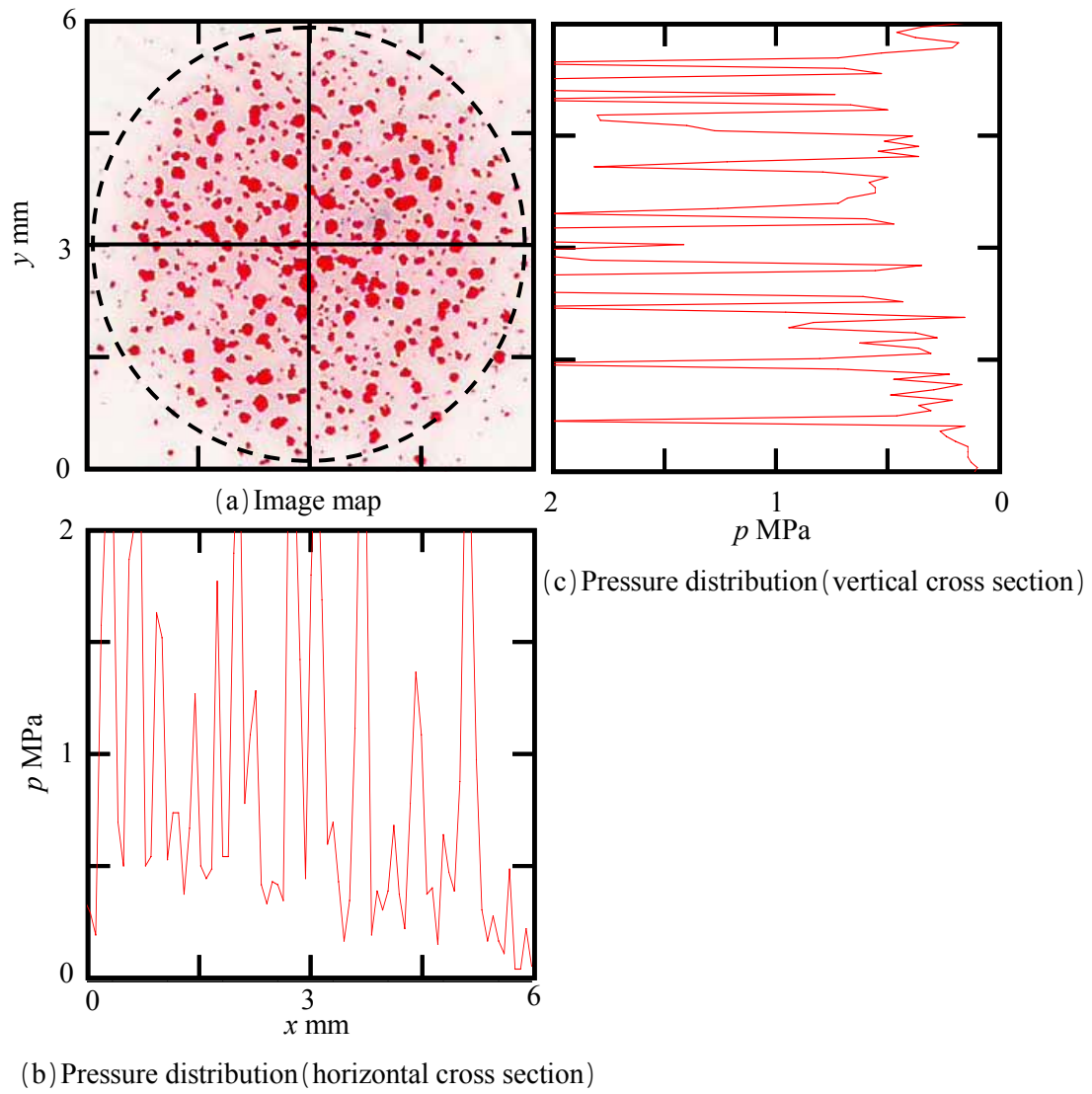


図4-1-7 固定ノズルの圧力分布 ($t=6\text{ s}, z=8\text{ mm}$)

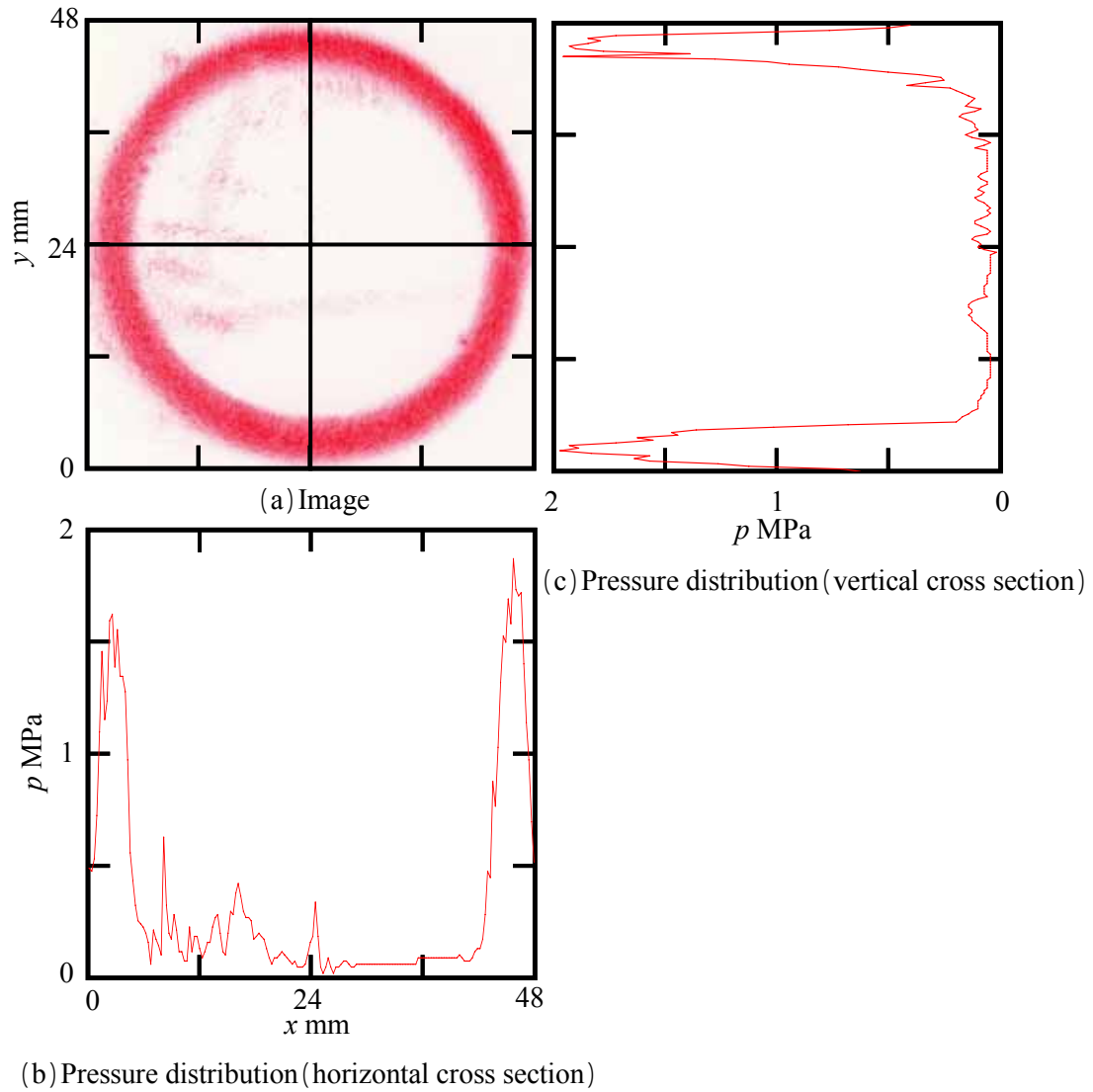


図4-1-8 フレキシブルノズルの圧力分布 ($t=6\text{ s}$, $z=8\text{ mm}$)

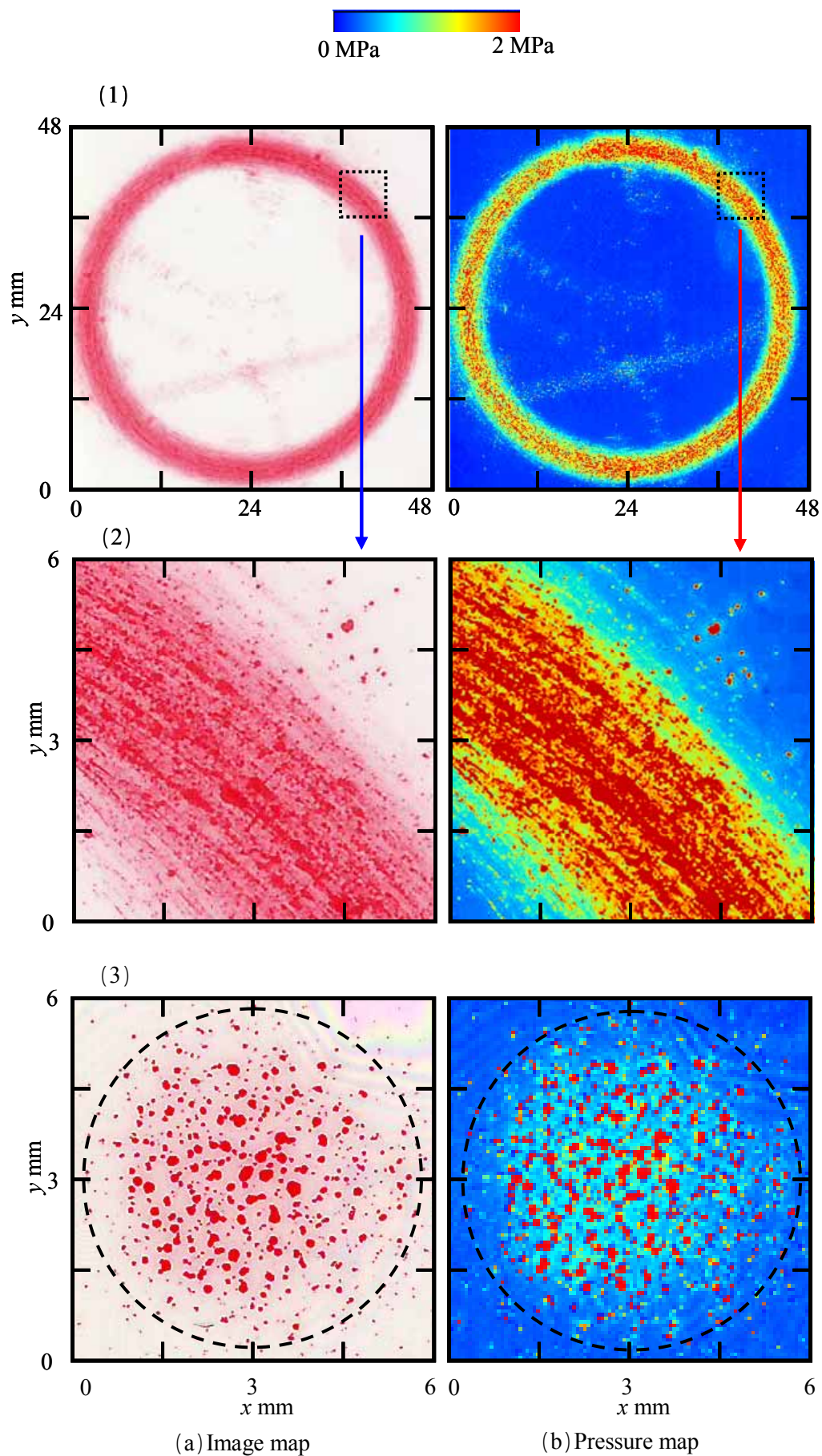


図4-1-9 固定ノズルとフレキシブルノズルの圧力分布（拡大図， $t=2\text{ s}$ ， $z=8\text{ mm}$ ）

4-2 圧力トランスデューサによる変動圧力計測結果

4-2-1 変動圧力波形とスペクトル

図 4-2-1 に各ノズルにおける変動圧力計測時の計測点を示し、図 4-2-2、4-2-3 は固定ノズル、フレキシブルノズルの変動圧力波形と FFT スペクトルを示す。ここで、変動圧力波形の時間軸は 0～5 s とし、1 s あたり 10000 点の合計 50000 点の計測を行っている。固定ノズルは、圧力トランスデューサを前節で表されている受圧円領域の左端から右端まで 1 mm ずつ計 5 mm、右に移動させて計測したものを示す。また、フレキシブルノズルは、圧力トランスデューサを前節で表されている受圧環状領域の左端から 1 mm ずつ計 3 mm、右に移動させて計測したものを示す。いずれも噴流長さ $z=8$ mm における結果である。

図 4-2-2 の固定ノズルでは、各計測点において不規則な低周波数の変動が示されている。受圧円の外周 $x=1, 5$ mm では鋸波状、内部では高周波の変動を含む波形となっている。これは固定ノズルの微動により噴流の中心位置が微小ながらも変化するためと考えられる。 $x=2$ mm 以外においては、この低周波数の変動により RMS 値が大きくなっていると考えられる。低周波数の変動を除いた局所的な波形の振幅は、 $x=3$ mm と $x=4$ mm では他と比較して大きくなっており、合わせて RMS 値も大きくなっている。スペクトル分布において、いずれの計測点も特徴的なものは見られない。受圧円領域の中央地点である $x=3$ mm の RMS 値は、各計測点の RMS 値より大きくなっており、また、周波数も各計測点より若干大きくなっている。

図 4-2-3 のフレキシブルノズルでは、各計測点の波形には低周波の櫛状波形および高周波のスパイク状波形の特徴的な分布が見られる。スパイク状波形は、フレキシブルノズル通過による衝撃的な圧力変動によるものと思われる。また、スペクトル分布においてはフレキシブルノズルが自励的に回転する周期に対応していると思われる周波数が現れている。

図 4-2-4 に図 4-2-2 における固定ノズルの一部を拡大した詳細変動圧力波形と FFT スペクトルを示す。ここで、変動圧力波形の時間軸は 0～0.1 s である。また、固定ノズルはフレキシブルノズルと比較するため $x=1 \sim 3$ mm までを示している。なお、いずれも変動圧力波形が低周波数の変動を示さない安定している時間帯を拡大している。すなわち、図 4-2-4 の固定ノズルの詳細図において、 $x=1$ mm の時は図 4-2-2 の時の 3.3～3.4 s の詳細図であり、 $x=2$ mm の時は図 4-2-2 の時の 1.5～1.6 s の詳細図であり、 $x=3$ mm の時は図 4-2-2 の時の 1.9～2.0 s の詳細図である。なお、図 4-2-4 中の t は図 4-2-2 における計測時間 t を表している。固定ノズルは、図 4-2-2 と同様に受圧円領域中央において大きな変動を示している。各計測点とも波形の振幅、RMS 値、スペクトルともに周期的な変動は見られない。

図 4-2-5 に図 4-2-3 におけるフレキシブルノズルの変動圧力波形と FFT スペクトルの詳細変動圧力波形を示す。図 4-2-4 のフレキシブルノズルの詳細図において、 $x=1$ mm の時は図 4-2-3 の時の 3.3～3.4 s の詳細図であり、 $x=2$ mm の時は図 4-2-3 の時の 3.3～3.4 s の詳細図であり、 $x=3$ mm の時は図 4-2-3 の時の 1.2～1.3 s の詳細図である。なお、図 4-2-5 中の t は図 4-2-3 における計測時間 t を表している。フレキシブルノズルは、 $x=1$ mm、2 mm の波形において周期性の高いスパイク状の波形が見られ、 $x=3$ mm においてもわずかにこの波形が見られる。このスパイク状の波形は 1 つずつ等間隔に現れ

ており、0.1 s 間に 6 個存在している。つまり約 60 Hz の周期で現れていることになる。また各計測点のスペクトル分布にも約 60 Hz 周期の共通した周波数が現れている。このことから、高速回転フレキシブルノズルの旋回周波数が約 60 Hz と考えられる。

ここで、この自励的に旋回する高速回転フレキシブルノズルの回転数 n を調べるために、ストロボ発光によりその周波数をフレキシブルノズルの回転数と同期させ、フレキシブルノズルの旋回が停止して見えるストロボ発光周波数を計測した。この計測結果により、フレキシブルノズルの回転数 n は約 3800 rpm であり、フレキシブルノズルの自励的旋回周波数が約 63 Hz と考えられる。これにより、図 4-2-3、4-2-5 の各計測点に現れている約 60 Hz 周期の共通した周波数は、フレキシブルノズルの旋回周波数であると言える。

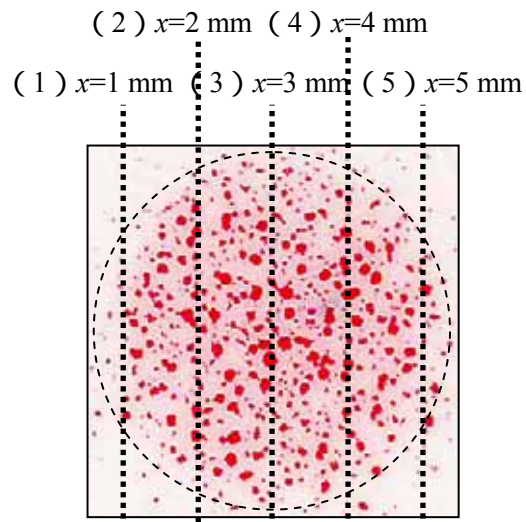
また、スパイク状の波形は、受圧環状領域中央で大きく現れており、圧力分布で示された特徴的なひっかき痕もこのスパイク状の圧力変動と対応していると考えられる。このスパイク状の波形となる理由として、フレキシブルノズル噴流は回転速度を有しており、フレキシブルノズル噴流が圧力トランスデューサの静圧孔測定点を通る時間が短くなることによる。ここで、フレキシブルノズル噴流の回転速度 v_θ は、フレキシブルノズル噴流の半径を r 、フレキシブルノズルの回転数を n として次のように示される。

$$\begin{aligned} v_\theta &= \frac{2\pi rn}{60} \\ &= \frac{2\pi \times 20.5 \times 10^{-3} \times 3800}{60} \\ &= 8.16 \text{ m/s} \end{aligned}$$

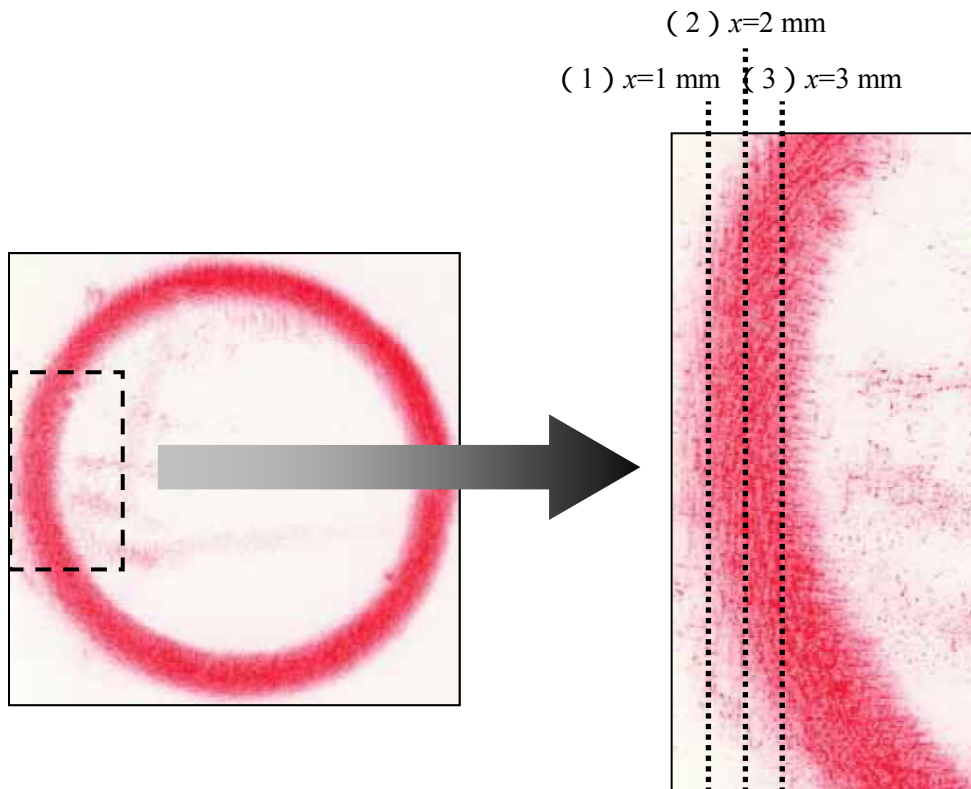
フレキシブルノズル噴流幅は約 4 mm であり、測定点を通る時間 t_H は

$$\begin{aligned} t_H &= \frac{4 \times 10^{-3}}{8.16} \\ &= 490 \text{ } \mu\text{s} \end{aligned}$$

となる。ここで、図 4-2-6 に図 4-2-5 の $x=2$ mm における詳細変動圧力波形の拡大図を示す。図 4-2-6 よりスパイク波発生周期 T は 0.016 s、スパイク波時間間隔 t_p は半値幅で 640 μs である。これによりフレキシブルノズル噴流が圧力測定点を通る時間 t_H とスパイク波時間間隔 t_p がほぼ同じオーダーである。このため、変動圧力波形がスパイク波となることが裏付けられる。以上のことから、固定ノズルは受圧面に連続的に噴流圧が加えられるのに対し、フレキシブルノズルは受圧面にスパイク的に約 60 Hz にて繰り返し噴流圧が加えられる。この加圧条件の違いはフレキシブルノズルの持つ旋回流によるひっかき痕とも関連づけられ、洗浄効果が上がる要因の 1 つと推測している。



(a) 固定ノズル



(b) フレキシブルノズル

図4-2-1 変動圧力計測時の計測点

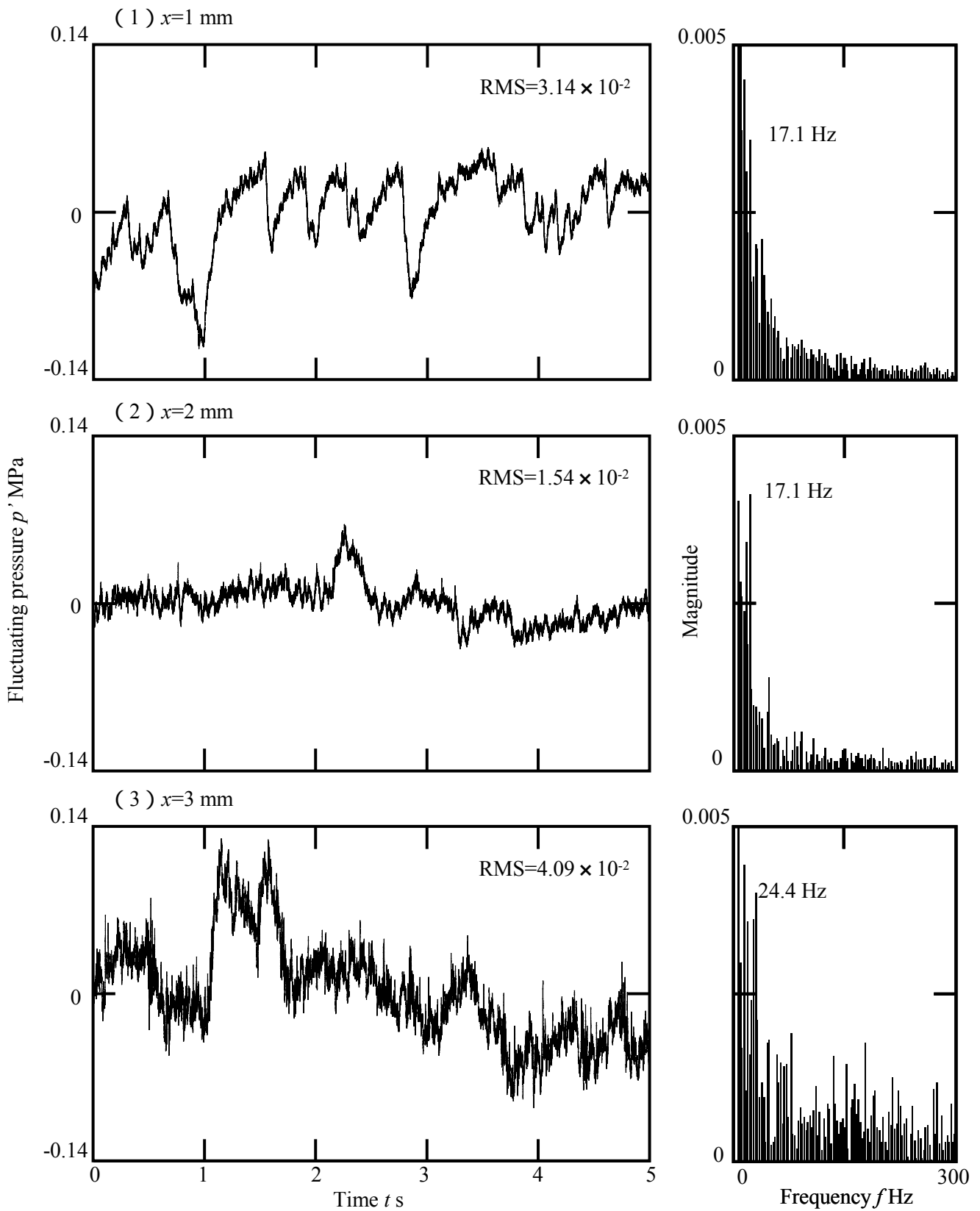


図4-2-2a 固定ノズル使用時の変動圧力波形とFFTスペクトル

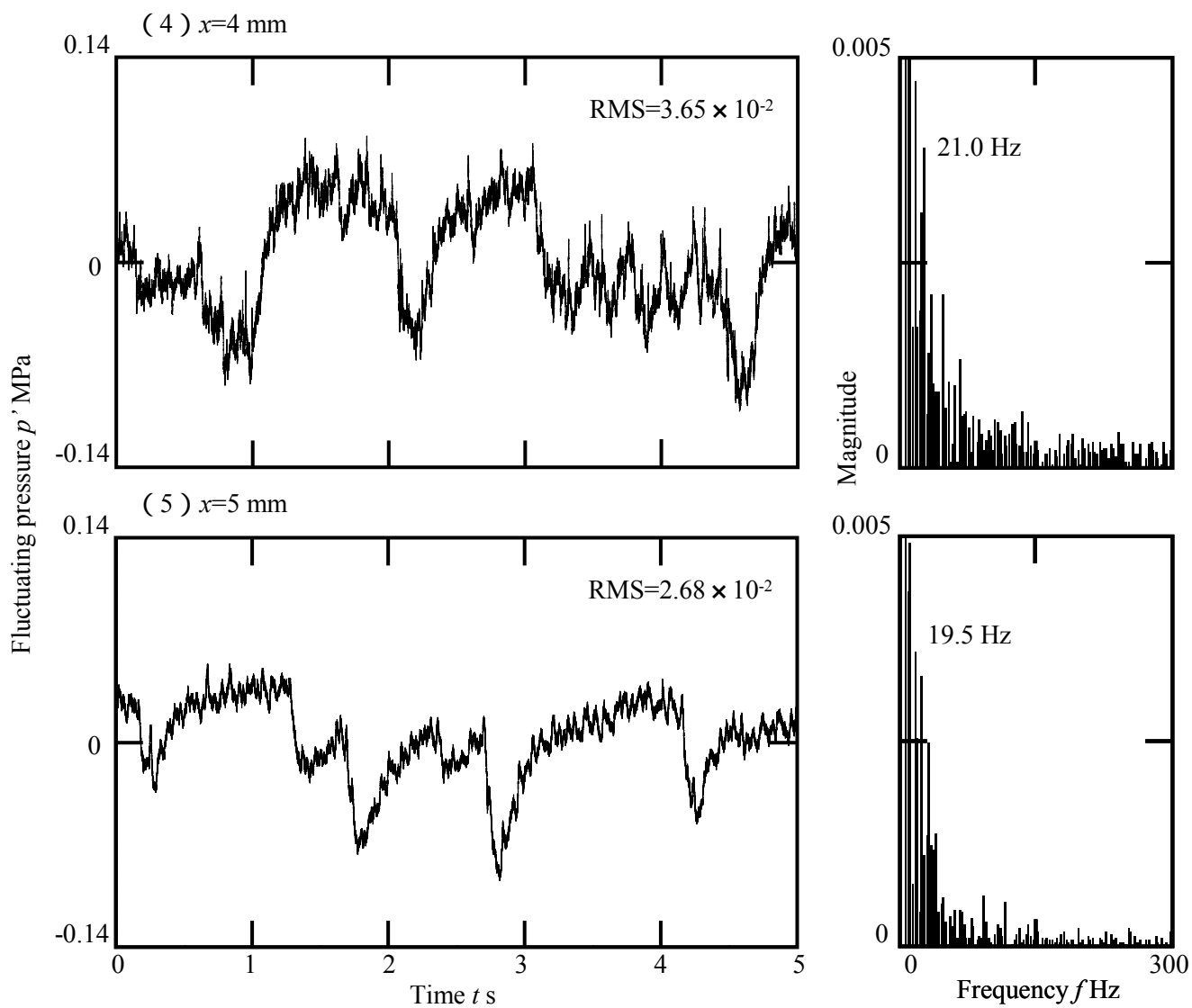


図4-2-2b 固定ノズル使用時の変動圧力波形とFFTスペクトル

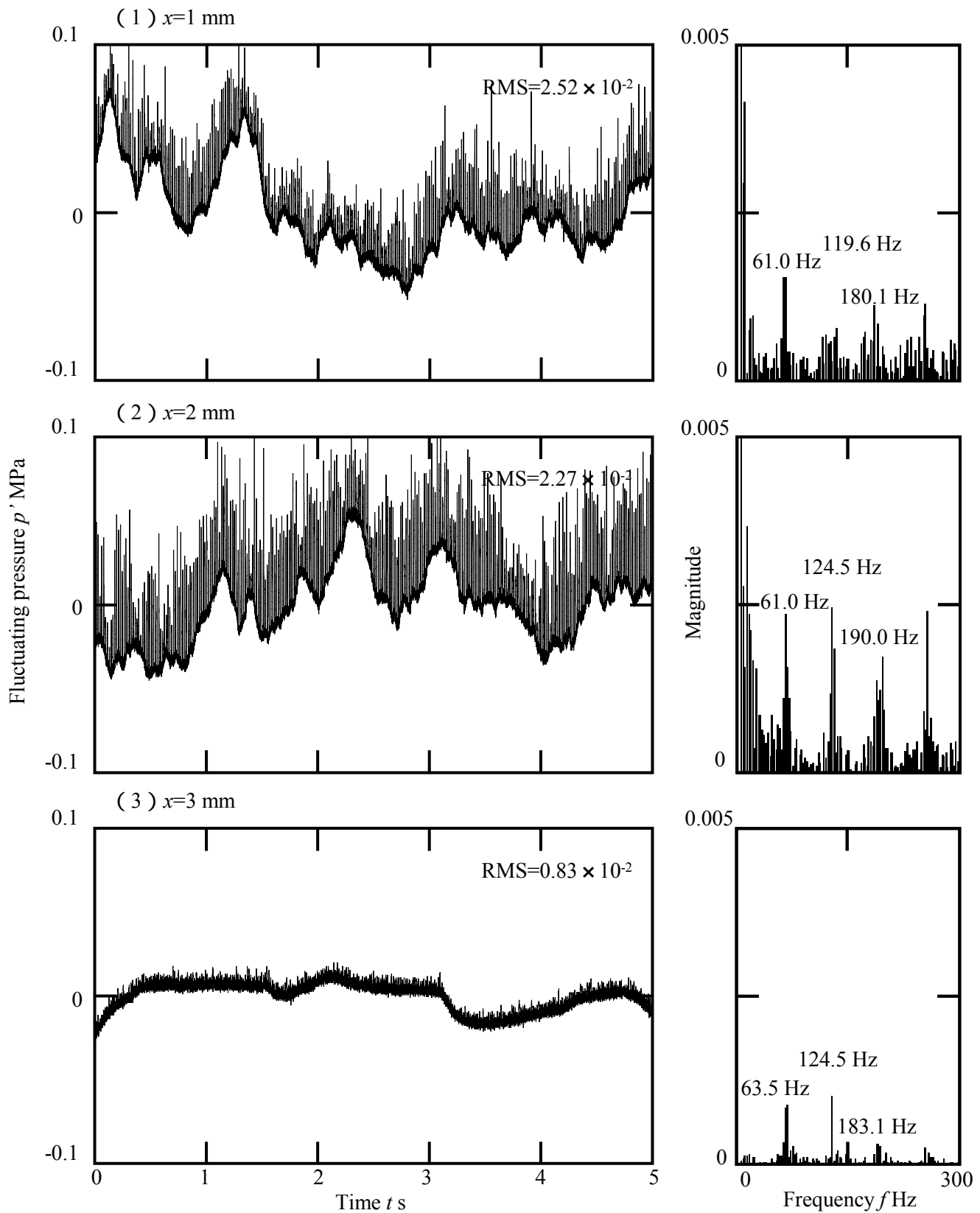


図4-2-3 フレキシブルノズル使用時の変動圧力波形とFFTスペクトル

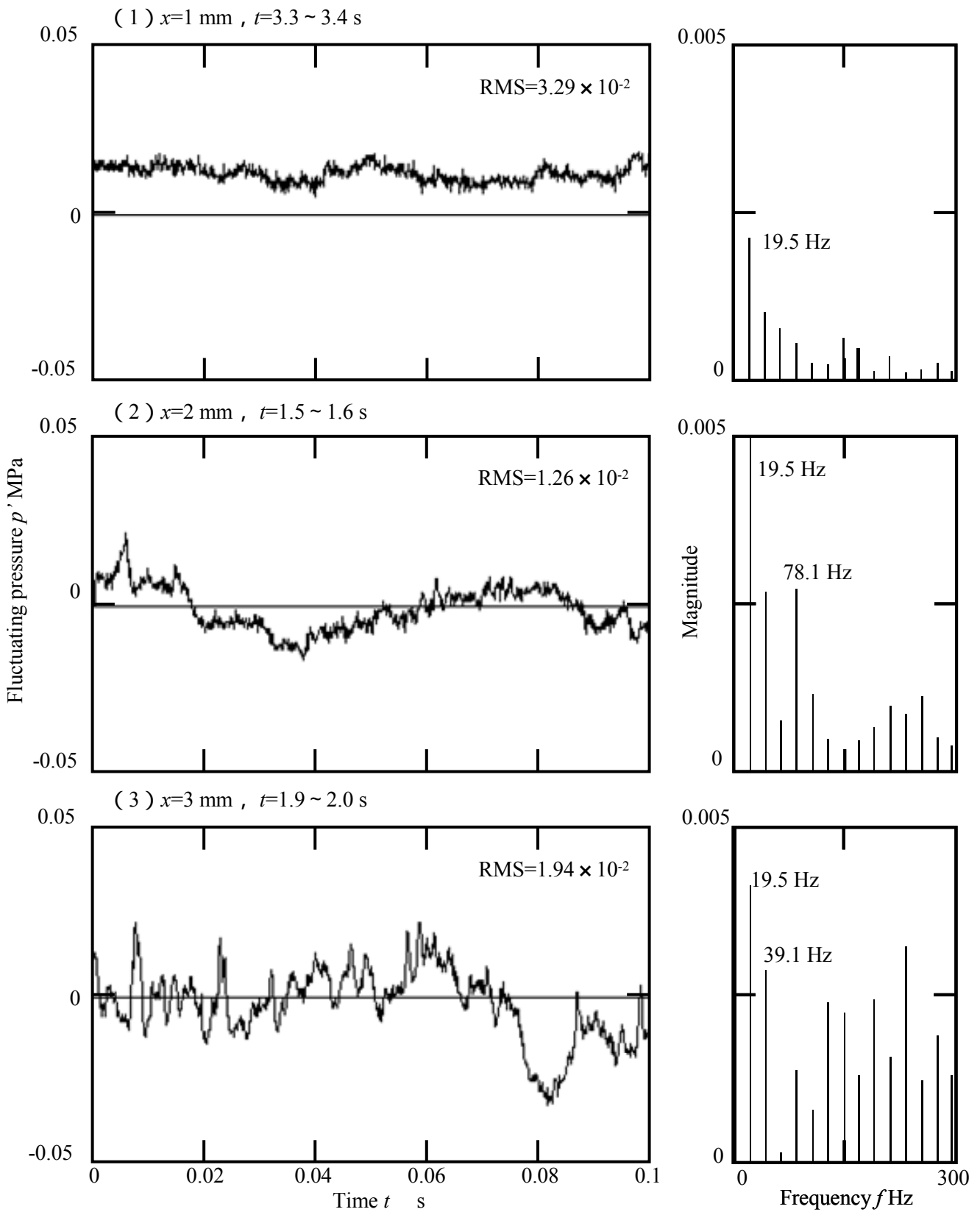


図4-2-4 固定ノズル使用時の詳細変動圧力波形

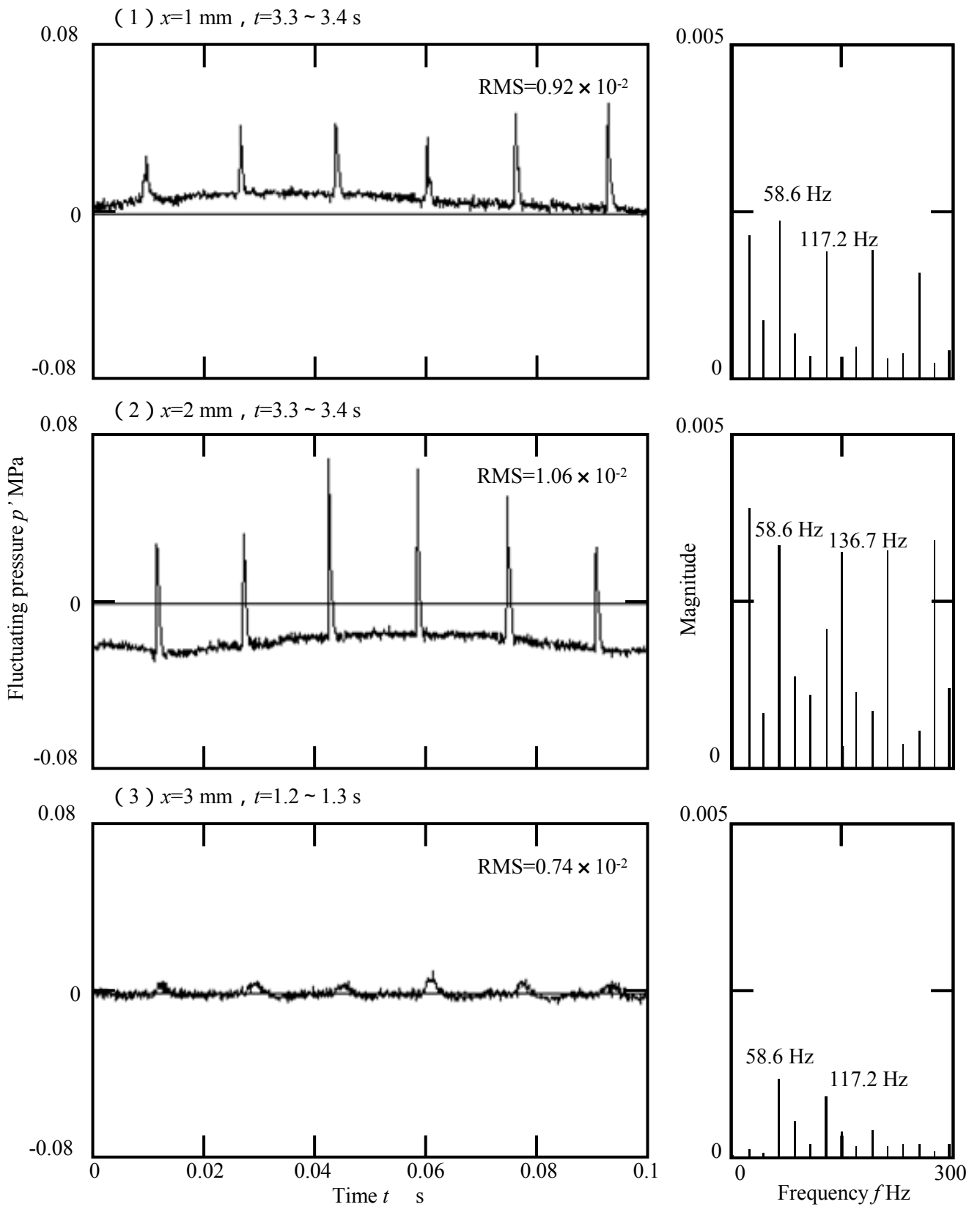


図4-2-5 フレキシブルノズル使用時の詳細変動圧力波形

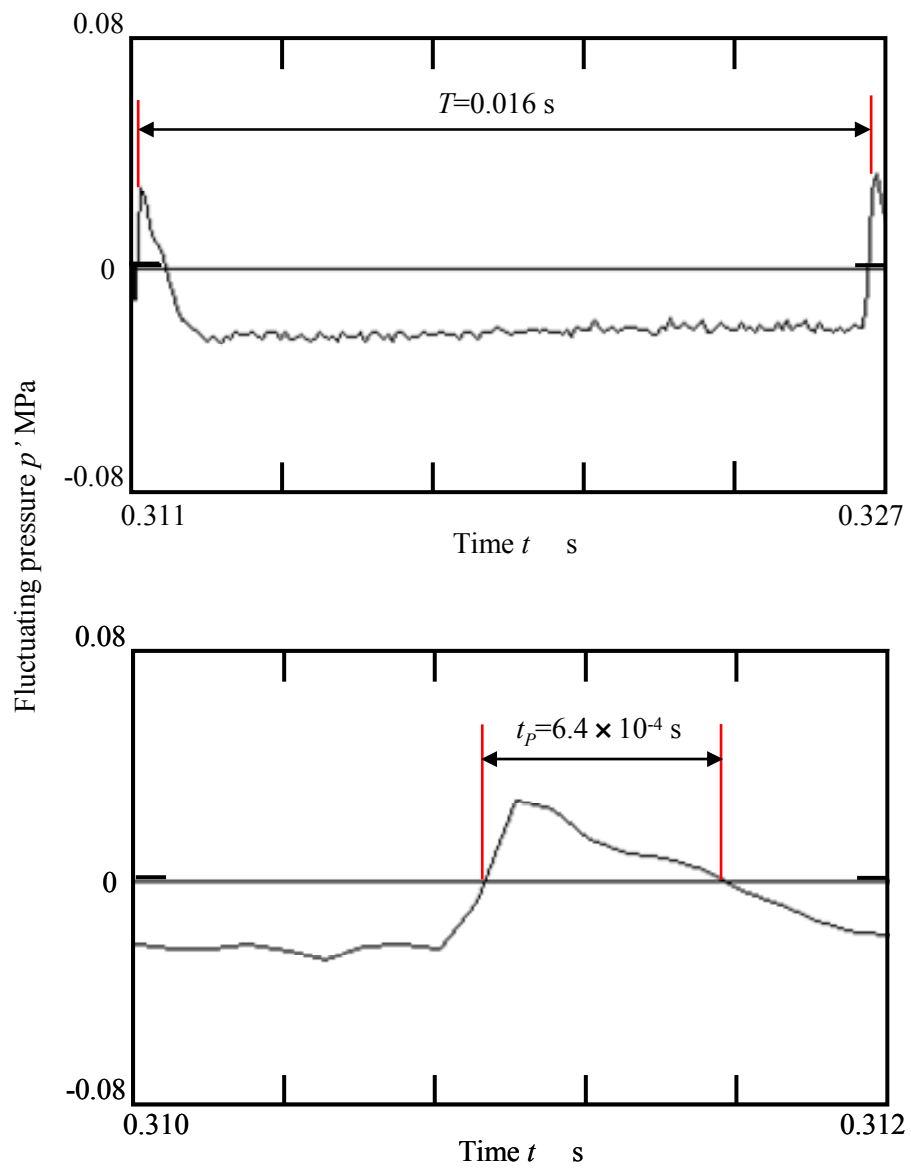


図4-2-6 スパイク波の周期と時間半値幅

4-3 PIV 計測による噴流速度場

4-3-1 噴流の流速と渦度の可視化情報

図 4-3-1 ~ 図 4-3-3 に固定ノズルの PIV 計測による速度場可視化情報を示し, 図 4-3-4 ~ 図 4-3-6 にフレキシブルノズルの速度場可視化情報を示す. ここに, PIV 計測情報は特徴的であり, 明瞭に画像, 速度場が計測されたものを各ノズルそれぞれ(A) ~ (C), (D) ~ (F) の 3 パターンずつ示している. 各図にはそれぞれ, 画像, ベクトルマップ, 垂直断面速度分布, 渦度マップを示す. なお, 画像においては, 輝度を上げるために取得画像に全体的な色調のレベル補正を行ったものを示している. 図 4-3-1 ~ 図 4-3-3 の画像マップは固定ノズルを y 方向の中心付近に設置して取得した画像である. 図 4-3-4 ~ 図 4-3-6 の画像マップはフレキシブルノズルの外筒ノズルの中心を $y=0$ に設置して, フレキシブルホースが外筒ノズルの最上位に位置している時の画像を整理したもので, ベクトルマップ等もこの時のものを示す. ベクトルマップにおいては, カラーバーに示すとおり $0 \sim 50$ m/s でベクトルの速度を色分けして表示している. また, 垂直断面速度分布においては, 各ノズルの先端から 8 mm (固定ノズルの場合 $z=12$ mm, フレキシブルノズルの場合 $z=13.6$ mm) における垂直断面の水平方向速度 w と垂直方向速度 v を示している.

図 4-3-1 ~ 図 4-3-3 の固定ノズルは, ベクトルマップから噴流は z 軸方向に直進し, ノズル出口から下流に向かうに従って y 方向に広がっている. また $z=12$ mm の垂直断面における水平方向速度から, ノズルの中心部付近で速度は最大を示し, 垂直方向速度からはノズルの中心部より上部は正の速度で, 下部は負の速度でほぼ分布している. ベクトルマップより, この速度分布はどの垂直断面においてもほぼ同一とみなせる. 渦度マップは噴流の外縁に沿って蛇行した渦層が形成されており, 噴流の中心部付近には一様ではない小規模の渦度分布が示されている. なお, 図 4-3-1 ~ 図 4-3-3 においての $z=12$ mm の垂直断面における最高流速 q_{Max} は (A) $q_{Max}=64$ m/s, (B) $q_{Max}=39$ m/s, (C) $q_{Max}=47$ m/s である. 最高流速にばらつきが見られるが, これは固定ノズルの微動やタンクの圧力条件によって, 噴流が一定に噴出されないためと考えられる.

図 4-3-4 ~ 図 4-3-6 のフレキシブルノズルは, ベクトルマップから噴流は固定ノズル使用時のベクトルマップに角度を与えたものとよく類似していることがわかる. また $z=13.6$ mm の垂直断面における水平方向速度から, 常に正の方向に向いており噴流の中心付近が大きい速度を持っていることが確認でき, 垂直方向速度からも常に正の方向に分布している. ベクトルマップより, この速度分布はどの垂直断面においてもほぼ同一とみなせる. これより, 渦度マップには噴流の外縁に沿って蛇行した渦層が形成されているが, 噴流の中心部には固定ノズルと比べると小規模の渦度分布はあまり形成されていない. なお, 図 4-3-4 ~ 図 4-3-6 の $z=13.6$ mm の垂直断面における最高流速 q_{Max} は (D) $q_{Max}=40$ m/s, (E) $q_{Max}=40$ m/s, (F) $q_{Max}=38$ m/s である. 固定ノズルと比べ最高流速にあまりばらつきが見られない.

ここで, 固定ノズルとフレキシブルノズルの噴流の流速を, ベクトルマップや各ノズルの先端から 8 mm の位置の垂直断面の最高流速 q_{Max} にて比較する. ベクトルマップは, 固定ノズルのほうがフレキシブルノズルより, 明らかに速度が大きい赤色のベクトルが多いことがわかり, 固定ノズルの方が速い速度となっている. また, 各ノズルの先端から 8 mm の位置の垂直断面の最高流速 q_{Max} を比較してみても, 固定ノズルのほ

うがばらつきがあるものの、最高流速 q_{Max} はフレキシブルノズルより大きくなっている。これは、内部のフレキシブルホースを固定していたほうがフレキシブルな時よりも、噴流の全速度成分が z 方向に集中するためであり、フレキシブルノズルは旋回方向成分も多く有していると考えられ、今回はこの旋回速度を射影した速度成分として計測しているため速度が小さいと考えられる。

4-3-2 噴流幅の変化

図 4-3-7, 4-3-8 に固定ノズル, フレキシブルノズルの噴流幅の変化を示す。ここに、画像とベクトルマップは前項で用いた固定ノズルの (A) ~ (C) の 3 パターン, フレキシブルノズルの (D) ~ (F) の 3 パターンをそれぞれ使用しており、左図 (a) は画像とベクトルマップを重ね合わせたものを、右図 (b) には画像を示している。ベクトルはページ最上部のカラーバーに示すとおりに 0~50 m/s でベクトルの速度を色分けして表示している。また、噴流幅を計測する位置は、各ノズルの先端と、先端から 8 mm 離れた点、そこからさらに 8 mm 離れた点の 3 ヶ所としている。噴流幅の計測は、(a) 画像とベクトルマップで行い、このマップ上に各地点の噴流幅を記している。そのあと、測定した噴流幅を (b) 画像マップに転載している。

図 4-3-7 の固定ノズルにおける噴流幅の測定結果を表 4-2 に、図 4-3-8 のフレキシブルノズルにおける噴流幅の測定結果を表 4-3 に示す。

表 4-2 固定ノズルの噴流幅

	ノズルの先端	先端から 8 mm	先端から 16 mm
(A)	4.0 mm	7.8 mm	12.4 mm
(B)	4.0 mm	7.7 mm	11.3 mm
(C)	4.0 mm	7.7 mm	13.4 mm
平均	4.0 mm	7.7 mm	12.4 mm

表 4-3 フレキシブルノズルの噴流幅

	ノズルの先端	先端から 8 mm	先端から 16 mm
(D)	2.8 mm	6.8 mm	9.4 mm
(E)	2.8 mm	5.9 mm	10.1 mm
(F)	2.8 mm	7.1 mm	10.0 mm
平均	2.8 mm	6.6 mm	9.8 mm

測定結果より、固定ノズルの (A) ~ (C) とフレキシブルノズルの (D) ~ (F) の各 3 パターンとも各ノズル間においてはほぼ同様な値を示している。固定ノズルとフレキシブルノズルの噴流幅の、各 3 パターンの平均値を比較すると、固定ノズルの噴流幅が広がっている。これは、内部のフレキシブルホースと固定しているアクリル筒の間に微小の隙間があり、その隙間をフレキシブルホースが微動することによって

擬似的に噴流幅が広がるためではないかと考えられる。逆に，外筒ノズルを使用しているフレキシブルホースは，外筒ノズルの内側を回転しているだけなので，ある瞬間において微動するようなことはなく，噴流幅が擬似的に広がることはない。もしくは，計測時における噴流の計測断面がノズル間において同一ではないためではないかと考えられる。しかし，いずれにしても噴流幅にそれほど違いはなく，噴流幅はいずれのノズルでも一定であることが言える。

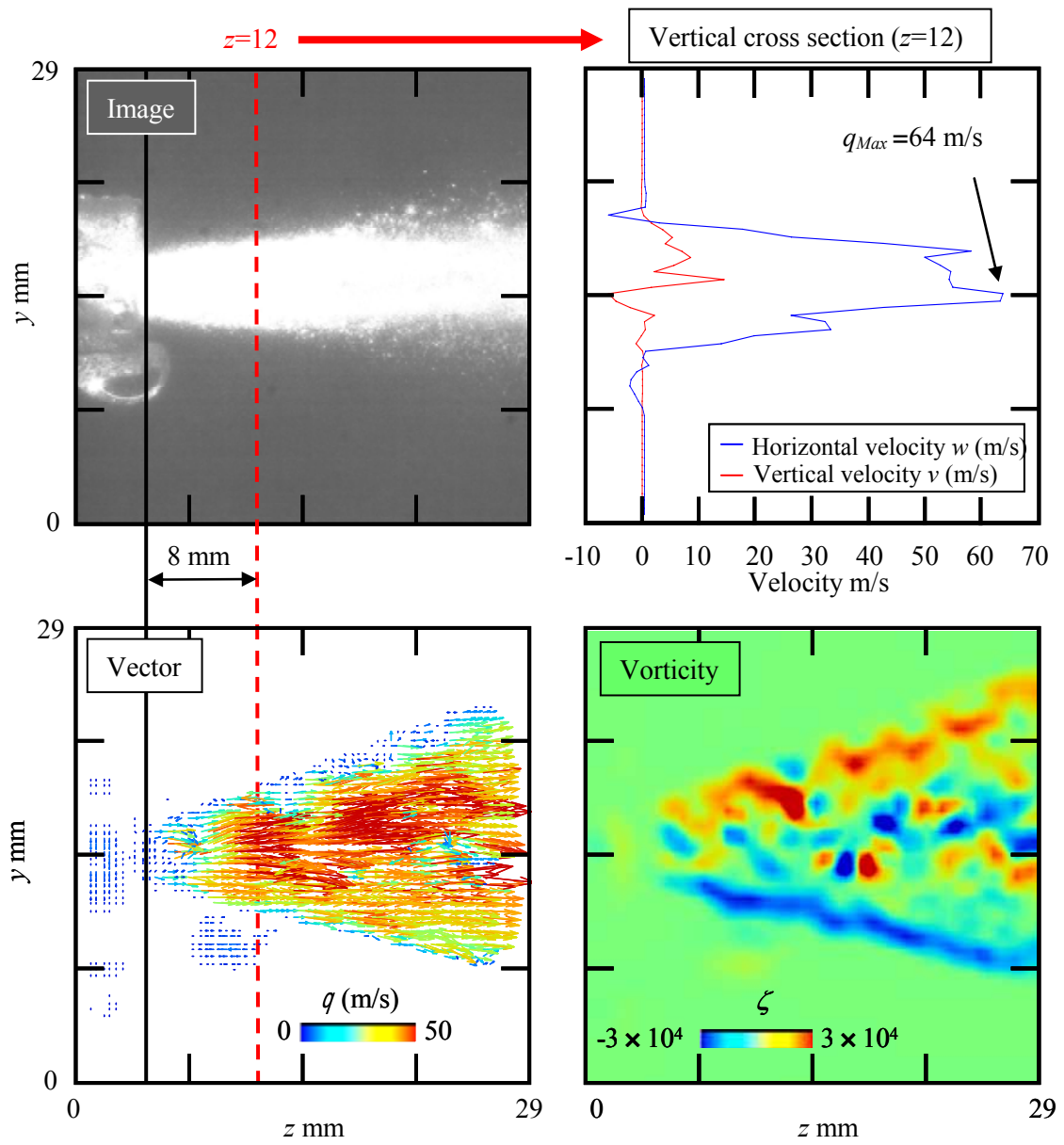


図4-3-1 固定ノズルの可視化情報 (A)

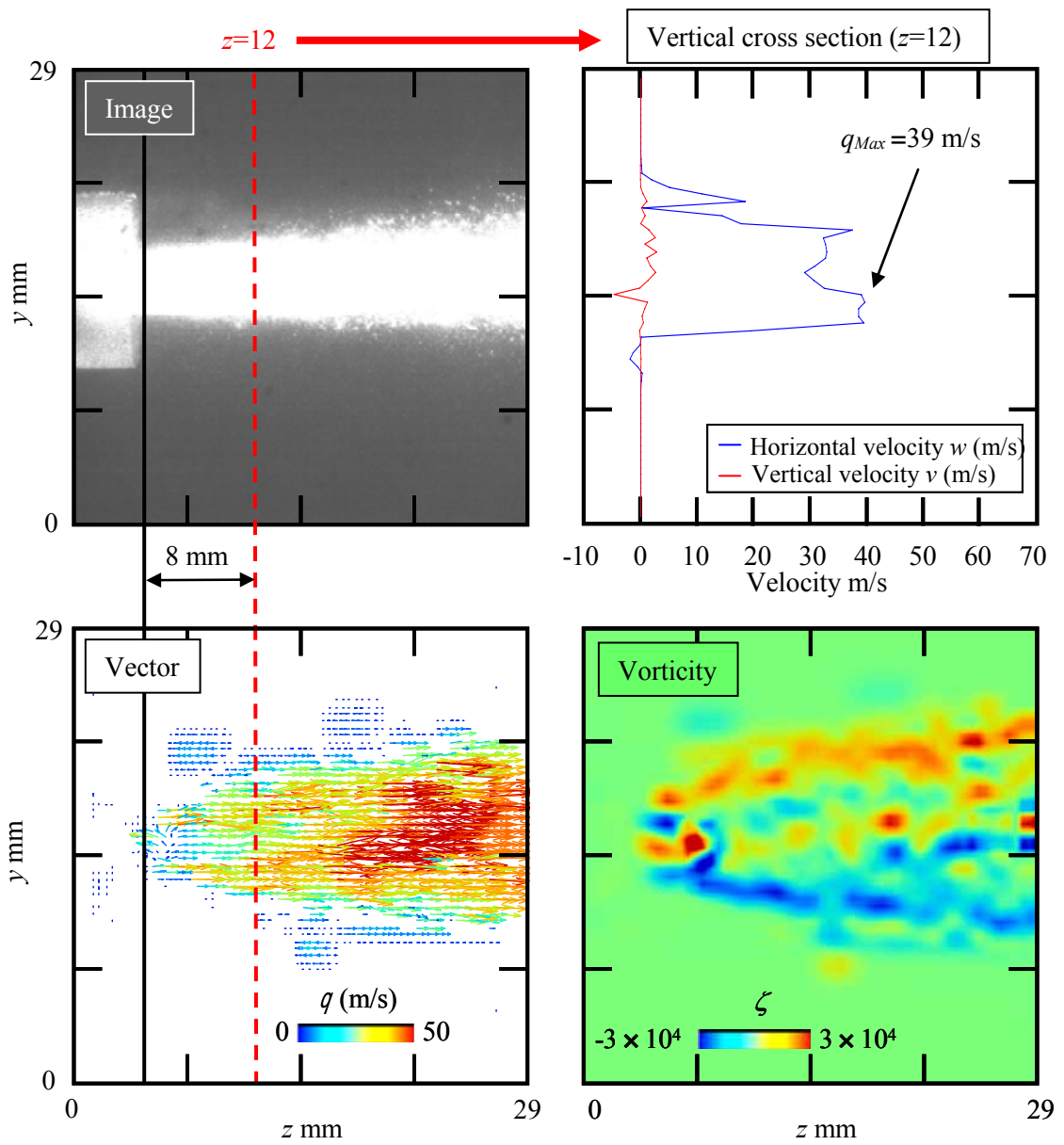


図4-3-2 固定ノズルの可視化情報 (B)

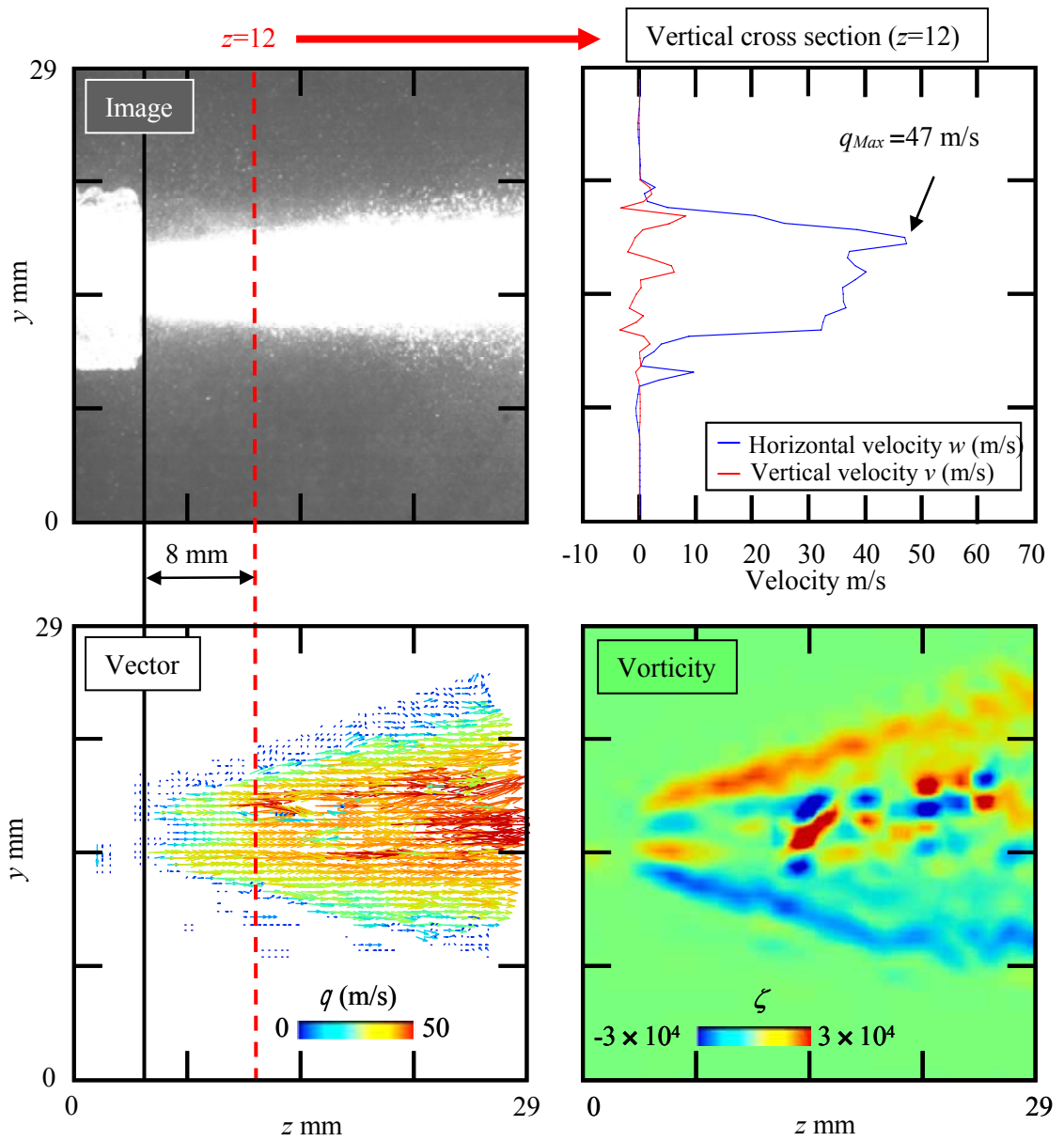


図4-3-3 固定ノズルの可視化情報 (C)

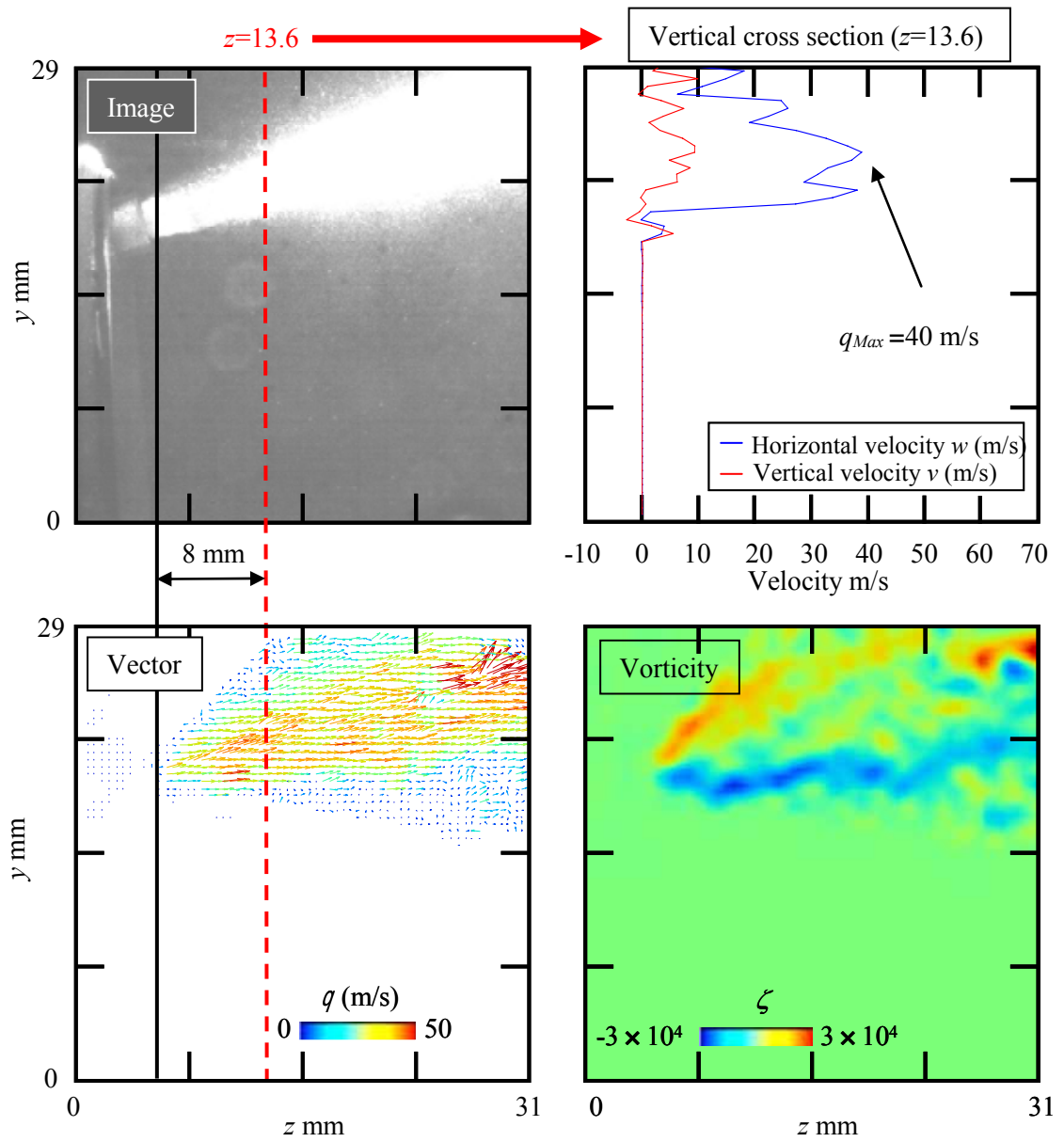


図4-3-4 フレキシブルノズルの可視化情報 (D)

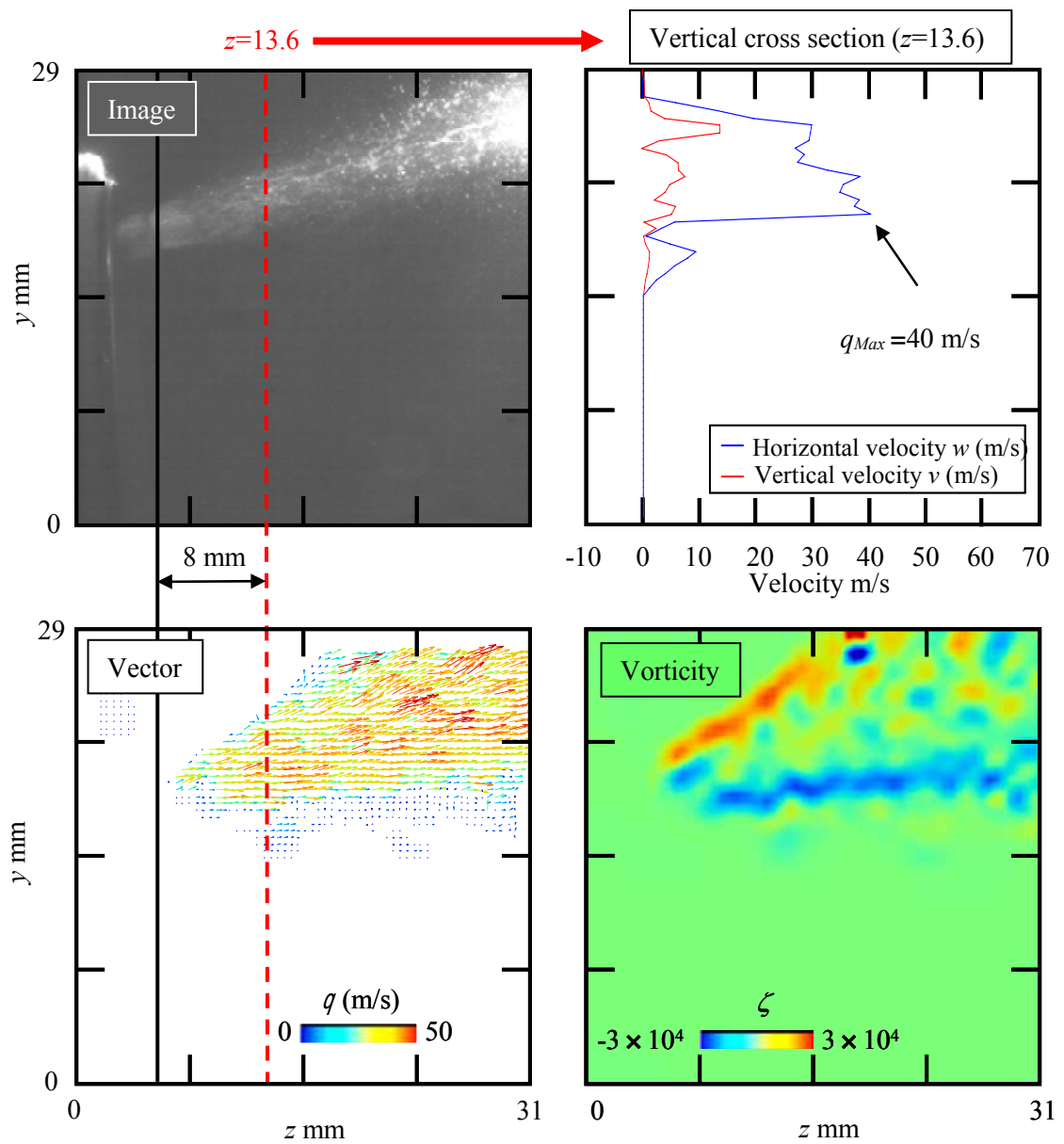


図4-3-5 フレキシブルノズルの可視化情報 (E)

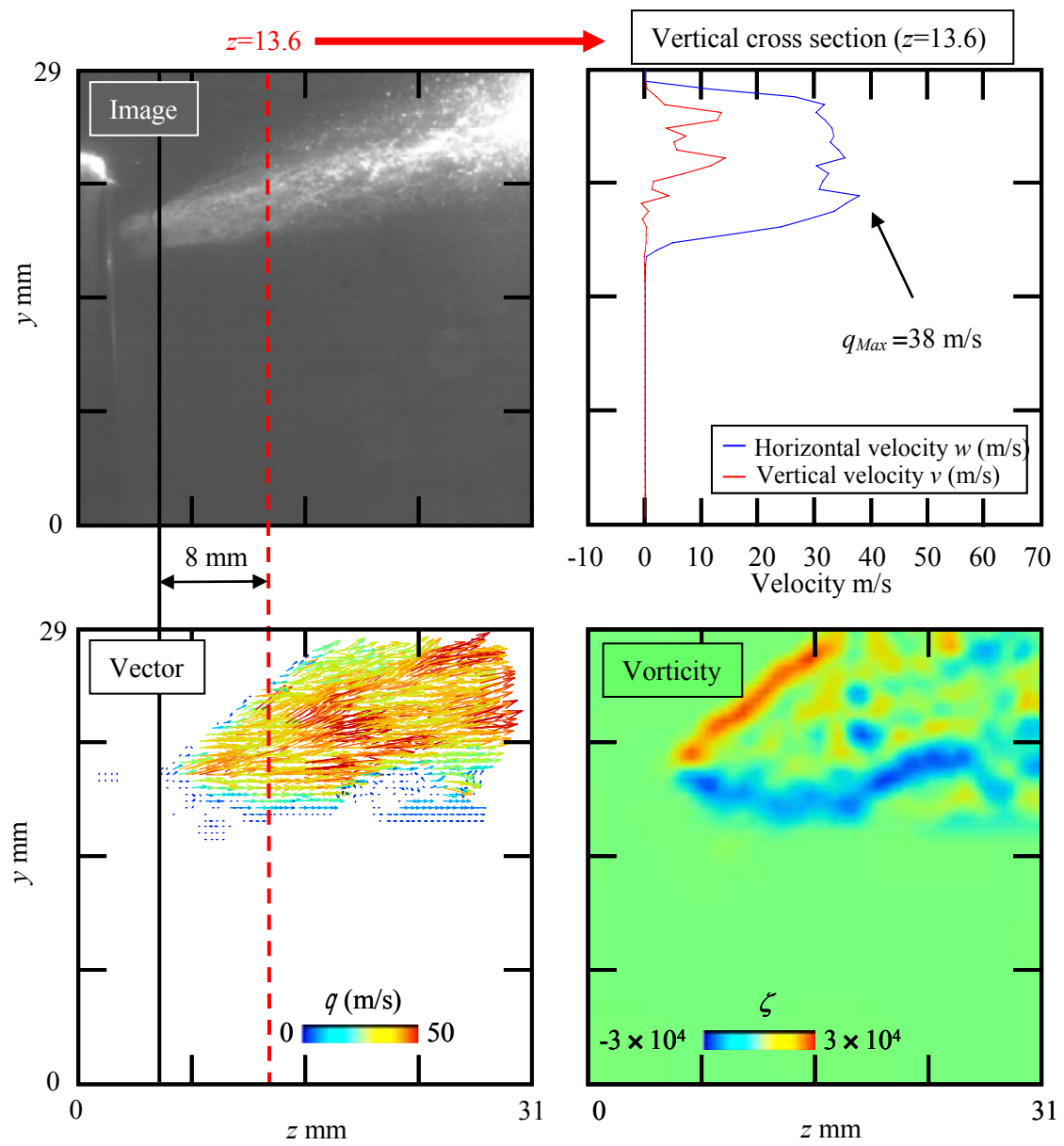


図4-3-6 フレキシブルノズルの可視化情報 (F)

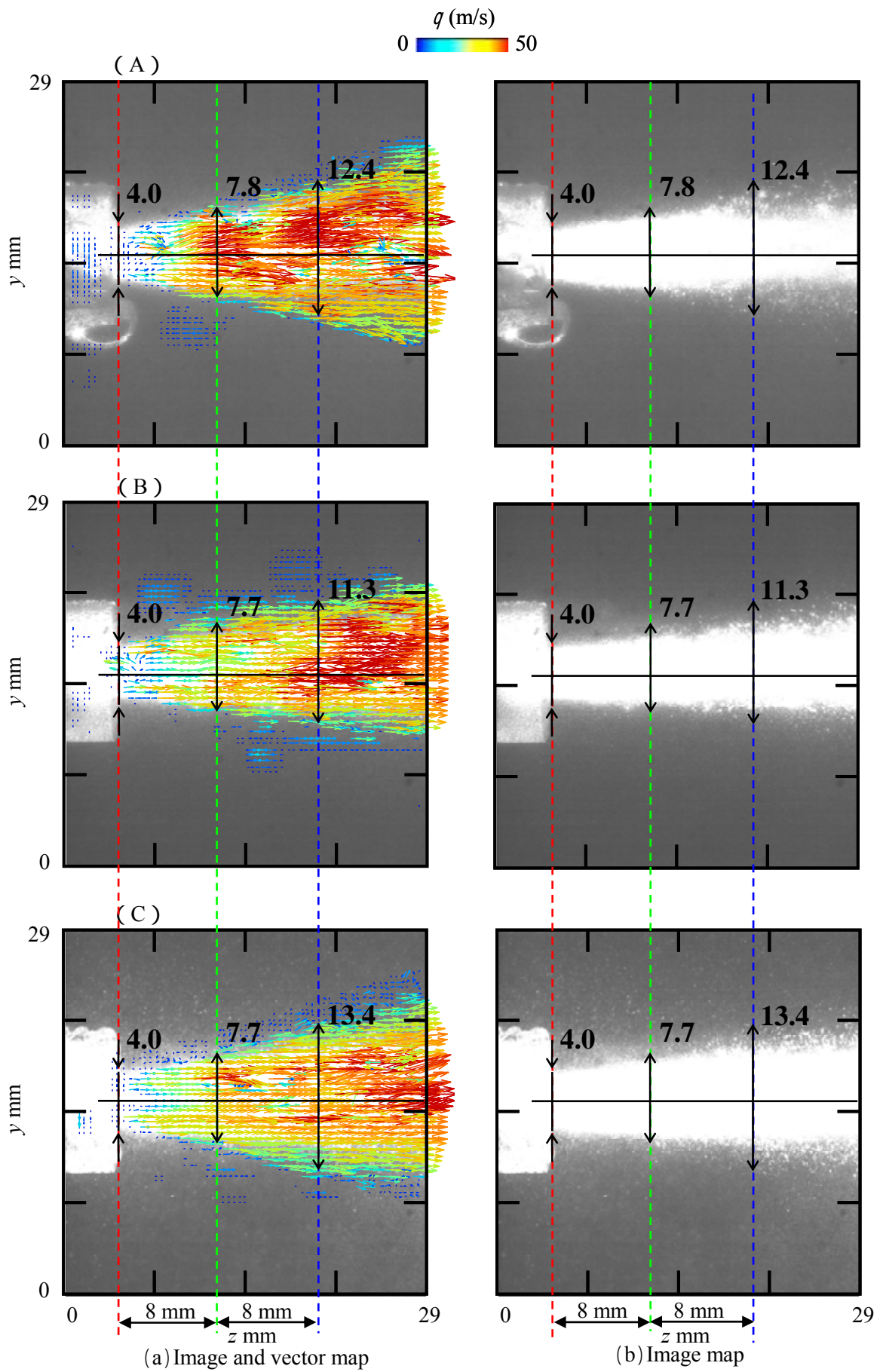


図4-3-7 固定ノズルの噴流幅の変化

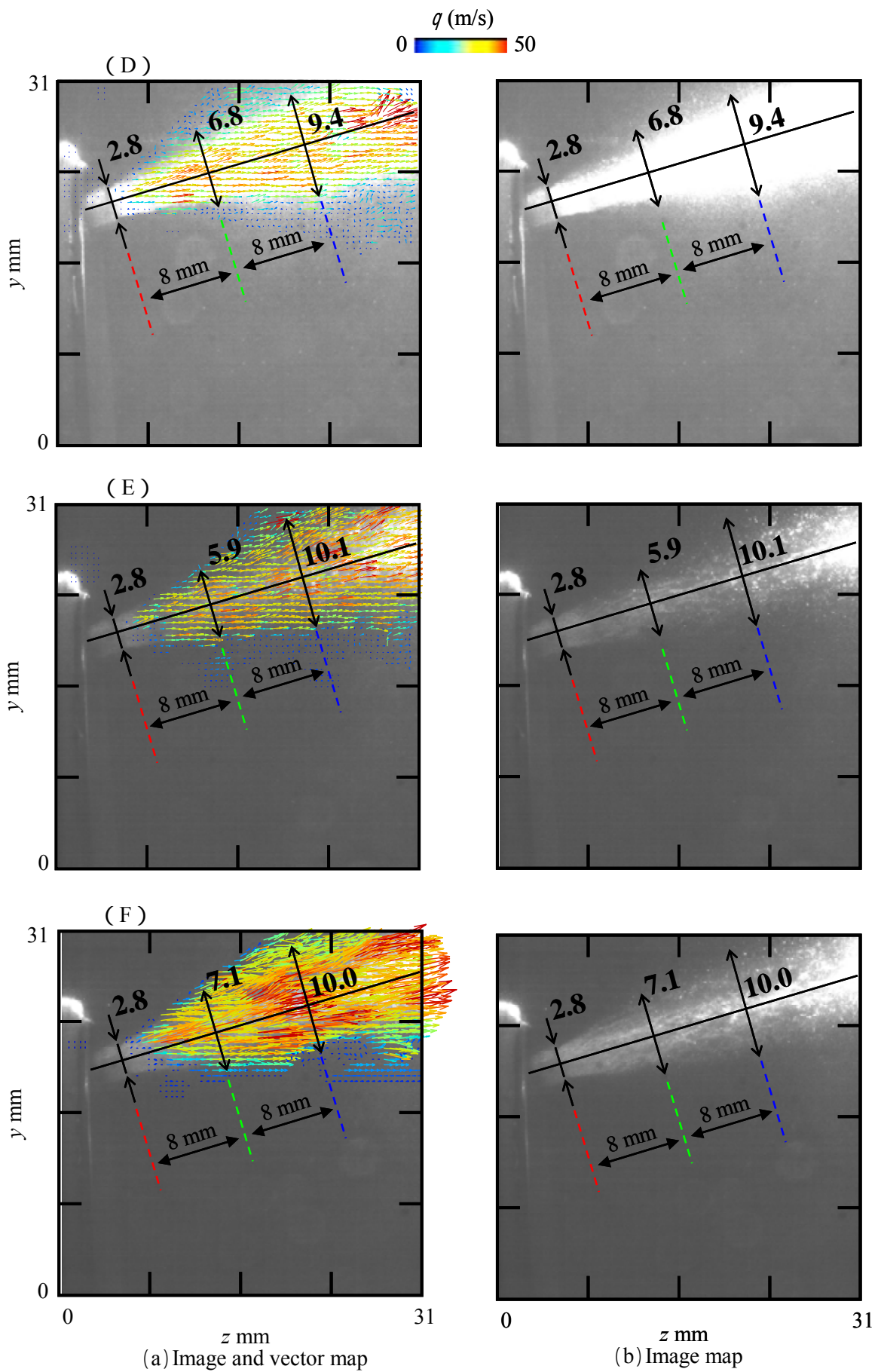


図4-3-8 フレキシブルノズルの噴流幅の変化

第5章 結言

供試洗浄器の洗浄能力の向上を目的とし、自励的に旋回する噴流に着目し、旋回を持つフレキシブルノズル噴流と固定ノズル噴流の比較を行った。洗浄能力評価法として圧力測定フィルムを用いた圧力分布評価、圧力トランスデューサを用いた変動圧力の計測、PIV 計測を用いた速度場計測を行い、供試洗浄器の基本特性について詳細な検討を行った。

以下に、その内容を要約する。

() 圧力分布による評価

1. 固定ノズルもフレキシブルノズルも受圧時間を長くするほど、受圧領域と高圧力の分布が増加する。また、噴流長さを短くするほど、受圧領域は減少し、高圧力の分布は増加する。
2. 固定ノズルの受圧部は円形で圧力は点分布しているが、フレキシブルノズルの受圧部は環状で圧力はほぼ一様な面分布している。
3. フレキシブルノズルのみ、旋回流によるものと思われる筋状のひっかき痕が存在している。

以上により、フレキシブルノズルはひっかき痕の力が加わって単純な圧力の高低とは異なる洗浄効果があり、さらに圧力が一様に作用する環状領域が形成され洗浄できる範囲を広くすることができる。

() 変動圧力による評価

1. フレキシブルノズル内部のフレキシブルホースは約 60 Hz の周波数を有する自励的な旋回をしている。
2. フレキシブルホースの自励的な旋回により形成される変動圧力波形は、受圧面に対しスパイク波で繰り返し加圧している。このことは、旋回流によるひっかき痕とも関連づけられ、洗浄効果を上げる要因の1つと推測している。

() 速度場による評価

1. 固定ノズルの噴流は z 方向に直進し、下流に向かうに従い y 方向に広がり、噴流の外縁に沿って蛇行した渦層が形成され、中心部付近では一様でない小規模の渦度分布が示される。また、垂直断面における水平方向速度から噴流中心付近で速度は最大になり、垂直方向速度からノズル中心部より上部は正、下部は負の速度で分布する。
2. フレキシブルノズル噴流は固定ノズルに角度を与えたものと類似した様相を示し、噴流中心部においては小規模の渦度分布はあまり形成されず、垂直断面における垂直方向速度は常に正の方向に分布している点が固定ノズルと異なる。

参考文献

- (1) 技術分野別特許マップ，機械 1 産業用洗浄技術，特許庁
<http://www.jpo.go.jp/shiryousonota/tokumapf.htm>
- (2) エアークロ－製品開発販売 有限会社ガリユ－ ホームページ
<http://www.ga-rew.com/>
- (3) Dantec Measurement Technology A/S. , Addendum to the FlowManager[®] 3.30 manual:
Adaptive Correlation , (2000) , 1-1,1-2