Particle Image Velocimetry の展開*

小林 敏雄**, 岡本 孝司***, 佐賀 徹雄†

Innovation of Particle Image Velocimetry

Toshio KOBAYASHI, Koji OKAMOTO and Tetsuo SAGA

1. はじめに

流れを知ることは、工学の最も基礎的な知見である。煙突から流れ出る煙を見ると大気の流れを知ることができるが、流れそのものは普通は目に見えない。煙突の煙は、目に見えない流れを可視化するためのトレーサーである。透明な空気や水の流れが、トレーサーの動きを通して人間の理解できる画像として映し出されている。有名なレオナルド・ダ・ビンチのスケッチや、鴨長明の方丈記を見るまでもなく、絵（眼）によって定性的な流れの動きを知る事は、遥か昔から行われて来ている。現在の製品開発の現場においても、流れの可視化技術は広く用いられている。

近年のデジタル処理技術の格段の進歩により、これらの定性的な流れの可視化画像データから、定量的な情報を抽出する事が出来るようになって来ている。この定量可視化工学の最も代表的な例が、粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry: PIV)¹⁾と呼ばれる流速分布の計測法である。この10年でPIVは大きく進歩し、様々な流れ場における一般的な流速計測法として、その地位を確立して来ている。

PIVの大きな特徴は、分布が計測できる事である。画像は2次元の情報を持っている。可視化された2次元画像に記録されている画像情報を解析することで、定量物理量（流速）を計測するということは、3次元空間中の2次元分布を計測するということである。これは、従来のピトー管やレーザードップラ流速計 (LDV) とは大きく異なる点である。さらに、ハードウェアやソフトウェアの進歩とあいまって、高解像度の流速分布情報や、時間方向にも密な情報（過渡変化）を取得することが可能となって来ている。

本稿では、特にここ2~3年のハードウェア、ソフトウェアの進歩をレビューするとともに、PIVによって培われた技術を、流速以外の物理量計測手法への応用や、全く異なる分野への応用など、PIVの展開について考えて

いきたい。

2. 2次元2成分流速計測

画像は2次元情報である。これに対して、流れ場は3次元空間+1次元時間の情報量を持っている。2次元画像は、4次元時空間の中から、任意の瞬時2次元断面を切り出したものと考えることができる。この2次元断面の情報は2次元画像に情報として記録することが可能である。つまり、画像を用いることで、2次元断面情報を固定化できる。この2次元断面情報を2時刻に渡って取得し、その画像間の変動を抽出すれば断面内の速度ベクトル（2成分ベクトル）に換算できる。

この2次元2成分流速計測に関しては、PIVは実用化の域に近付いている。計測できる領域の大きさは、数cmから1m程度の大きさの領域に限られているが、数mm/sから数百m/sといった高速流まで、お金をかければほぼターンキーシステムに近い形で計測を行うことが出来る。これは、以下に述べるようにハードウェアが大きく進歩して来たことが大きい。これに対し、ソフトウェア側も、コンピュータの大容量化高速化を受けて、時間が掛かっても画像の持っている全ての情報を抽出しようとするアルゴリズムの開発が盛んである。

前述のように、PIVはいくつかのステップにより成り立っている。Fig.1に概略を示すが、まず、流れ場に粒子を混入することにより流れ場を可視化しなければならない。次にこの流れ場をカメラなどの機器で撮影しデジタル化する。最後にこのデジタル画像を解析して流速分布を算出するというステップを取る事となる。このいくつかの複合システムのどれもが、精度の良い優れたシステムであることが要求される。

2.1 ハードウェアの進歩

照明光源 前述のように、3次元流れ場を2次元画像によって精度良く取得するためには、対象となる3次元流れ場の中から2次元情報を切り出してやる必要がある。一般に2次元情報を切り出すためにシート光源が用いられる。シート光源としてはレーザーをシート状にした光源が輝度も強く、またコントロールが容易なため良く用いられている。時間軸方向の動きを考えると、ある瞬間の情報を凍結するためには、照明を短時間に照射するか、

* 原稿受付 2000年1月5日

** 正会員 東京大学 国際・産学共同研究センター

*** 正会員 東京大学 大学院工学系研究科

† 正会員 東京大学 生産技術研究所

Fig. 1 Flowchart of PIV system

カメラのシャッターを短時間開放するかのどちらかの方法が必要である。現在主流になりつつある方法は短時間照明の方式である。シャッターによる時間切り出しの場合、シャッターが閉じている時間の光は利用されない。このため短時間を切り出す場合には非常に強力な照明が必要となってしまう。一方、パルスレーザーを使うことで瞬時に大量の照明光を発生することが可能であり、これが時間切り出しの強力な武器となっている。

この様なパルス照明に使われるレーザーはNd:YAGレーザーの倍波(532 nm)が一般的である。20 mJ~400 mJという強力な光を10 nsという短い時間発光する。この時間は流れにとっては十分短いので、瞬間の情報を凍結することに相当する。このパルスレーザーを2本使うことによって任意の時間間隔の2枚の画像を得ることができる。遅い流れ場ではこの時間間隔を長くし、速い流れ場では時間間隔を短く(1 μ s以下)設定することで、2つの画像上における粒子の移動距離をコントロールすることができる。このため、正確な移動追跡を行うことができるようになり、近年のPIVは大きく発展した。

現在、この様なパルスレーザーは数百万円している。数年前は一千万円以上していた事を考えると大幅な下落である。今後、ダイオードレーザーなどの発達によって、瞬間的なパルス光源としてのレーザー光が更に安価に得られることができると期待される。現在のレーザー光源はヘッドの大きさが30 cm程度で、一般的な照明器具程度の大きさまで小さくなって来ている。細かい領域や複雑な領域の照明を簡易に行うためには、さらなる小型化や光ファイバーの開発が必要であろう。現在の光ファイバでは、パルスレーザー光が強力過ぎるため光を通すことが出来ない。パルス継続時間が1 μ s程度の色素レーザーを用いて光ファイバによる照明を行うことも考えられているが色素レーザーが高価なためあまり普及していない。

トレーサ 流れの可視化画像を得るためには、照明光

源も重要であるが、可視化するために混入する粒子(トレーサ)の選択も重要である。画像に記録されるのは粒子の情報であるので、粒子の動きが流れの動きを代表していることが計測の前提となる。強い速度変化がある場合など、粒子と流れとの間に相対速度を持つことがあり得る。粒子が十分小さければ、流れとの相対速度は十分小さくなる。しかし、散乱光も弱くなるため、照明システム、画像記録システムも含めた最適な粒子の選択が重要である。

粒子の大きさの他に、流体と密度が等しいことも重要となる。浮力/重力の影響は粒子が十分小さくなれば無視することが出来るが、加速度への追従性などの問題もあり様々な検討がなされている^{2,3)}。気体中へのトレーサとしては、ラスキンノズルによる直径1 μ m程度のオイル粒子が用いられることが多い⁴⁾。

画像取得装置 照明された領域内の粒子による散乱光をデジタル画像データとして記録する。画像記録素子としては、CCD (Charge Coupled Device) が一般的に用いられている。これは、光量に応じて電荷が蓄えられる素子であり、一般の家庭用ビデオカメラにも用いられている。最近のCCD技術の進歩により、高解像度CCD素子が製作されている。

任意の時間間隔で発光する2つのレーザー照明による2時刻の画像を各々別々の画像として記録することが重要である。一つの画像に2時刻の情報を記録する事は容易であるが、自己相関法を用いる必要があったり、記録できる情報が相対的に減少するなどデメリットも多い。このため2枚の連続するビデオ画像の区切りを利用する。つまり、区切りの直前に1時刻目の発光、直後に2時刻目の発光を行うことで、2枚の画像にそれぞれの時刻の画像を記録するという事が行われる。(フレームストロドリングなどと呼ばれる)。レーザーの発光とカメラの画像取得をコントロールすることで、時間と空間をコントロールした、情報量の十分な、かつ、精度の高い画像を得ることができる。情報量の十分な高精度画像は、PIVで得られるベクトルの精度と情報を規定する。これらのハードウェアによってPIV技術の信頼性が大幅に高まったといっても過言ではない。

PIV画像取得に用いられているCCDカメラとしては、640 $\times$ 480画素/60 HzのプロGRESSIVスキャンカメラ(Sony XC-7500等)や、1016 $\times$ 1008画素/30 Hzの高解像度カメラ(Kodak ES-1.0等)が用いられている。解像度が大きくなる(画素数が増える)事で、得られる情報量が増大する。また、流れの細かい変動もとらえることが出来るようになる。

しかし、低解像度のカメラは15万円程度であるが、高解像度は一般に100万円以上する。近年、価格の低下が著しく、高解像度カメラが一般的になる事が期待される。また、昨年、2000 $\times$ 2000画素/15 Hzというカメラ(Kodak ES-4.0)も市販され、高解像度化への動きも進

んでいる。

なお、現在 CCD 素子ではなく、MOS 素子を使ったカメラの開発が進められている。MOS 素子は製造工程が CCD 素子よりも容易であるため、今後急速に CCD 素子に取って変わることが予想される。しかしながら、MOS 素子は CCD 素子と異なり、光蓄積時間が画像全体で同一タイミングではない。つまり、現状ではフレームストラドリングを MOS 素子で行うことは出来ない。

画像圧縮 時間方向に長時間の画像を取得する場合、画像データの記録が必要になる。RAM-Bus メモリなどコンピュータハードウェアが進歩していくことを考えると、将来的には画像圧縮なしに画像記録が可能となることも考えられるが、現状では画像圧縮技術は重要である。近年の圧縮では不可逆圧縮が主流であり、PIV 画像に対しても画像圧縮を考慮することは必要であろう。

一般に PIV 画像の持っている情報量は、画像が最大保持できる情報量に比較して格段に少ない。このため、1/5 程度の画像圧縮 (DV) では、粒子情報はほとんど失われない。つまり、民生分野で広く利用されているデジタル圧縮技術をそのまま画像取得に用いることが出来る。今後、デジタル圧縮技術はどんどん進歩していくと予想され、これらの技術を取り入れていくことは重要なファクターであると考えられる。現在、1000×1000 程度の高解像度画像圧縮技術に対する標準化が推進されており、近い将来民生用機器として普及していく可能性が高い^{5,6)}。但し、注意しなくてはならないことは、民生用の画像圧縮技術は人間の目によって圧縮による劣化を判断している事である。つまり、劣化が激しくても人間が気付かない劣化であれば、それを許容すると言うことである。例えば、現在パーフェク TV などで行われている MPEG 2 や Motion-JPEG という圧縮方法は、1/30 秒程度の短時間であれば、全く原画と異なる程劣化した画像でも許容している。一方、このような画像は、計測には全く用いることが出来ない。1 枚 1 枚を別々に圧縮する、JPEG や DV といった圧縮技術であれば PIV に用いることも可能である。なお、DV ビデオカメラは現在 20 万円弱で市販されている。このカメラを用いれば、解像度は 720×240 と悪くなるが、1 時間のデータが名刺サイズのビデオテープに記録することが可能となっている。

2.2 ソフトウェアの進歩

PIV のアルゴリズム自体はさほど難しいことをやっているわけではない。現在、最も広く利用されている手法は画像相関法である。短時間に撮影された 2 枚の画像を解析し、画像の歪みを解析して速度分布を求めることになる。相互相関法の他に、画像中から粒子の重心位置を算出しその後その重心の移動を解析する手法 (PTV) も多く利用されている。

相関法 2 台の Nd:YAG パルスレーザーと高解像度カメラによるフレームストラドリングを行うシステムにおいては、相関法が用いられる。これは、2 つの画像の

輝度分布パターンが似通っているパターンを相関値を用いて探査する方法である。1 時刻目のパターンの輝度分布を $f(x, y)$ 、2 時刻目を $g(x, y)$ とすると、相関値は、

$$R(p, q) = \frac{\sum f(x+p, y+q)g(x, y)}{\sqrt{\sum f^2 \sum g^2}} \quad (1)$$

で与えられ、この R が最大となる (p, q) をもってパターンの移動先とするものである。ここにあるように、並行移動が仮定されているが、実際の流れ場にはせん断や回転が含まれており、移動量が大きくなるとこの手法は適用できない。一方、2 画像間の時間間隔が十分に小さければ、歪みによって失われる情報量は小さく、単純な相関法を適用する事が出来る。流れ場の状況に依存するが、画像中の移動量が 2~3 画素 (ピクセル) 程度の画像であれば、相互相関法を用いて比較的精度の良い解析が可能となる。

さらに、相関値ピーク値周辺の分布がガウス分布をしていると仮定することによって、サブピクセル精度の移動量を算出することが行われる。1 次元の場合、相関ピーク値を与える移動量を p (整数) とおくと、サブピクセル移動量は以下の式で求められる。

$$P = p - \frac{1}{2} \frac{\ln R_{(p+1)} - \ln R_{(p-1)}}{\ln R_{(p+1)} + \ln R_{(p-1)} - 2 \ln R_{(p)}} \quad (2)$$

この方法で、0.1 ピクセル程度の精度が得られる。つまり、最大移動量が 3 ピクセルであっても、30:1 のダイナミックレンジの情報を取得することが可能となる⁴⁾。

なお、画像量子化の影響とガウス分布仮定からのずれにより、上式でサブピクセルを求めるとピークロッキングと呼ばれる現象がおきる。これは実際の移動量よりも整数値の方向にずれた値が求まるものである。このため、得られたベクトルのヒストグラムを取ると Fig. 2 の様になる。ピークロッキングが起きているかどうかを知るためにはヒストグラムを見るのが最も容易で確実である。このサブピクセル精度のピークロッキングを回避するためには粒子像を 3 ピクセル程度に大きく撮影することが必要である^{4,7,8)}。

また、粒子画像に含まれている情報を最大限に利用するための研究も進められている^{9,10)}。Fig. 3 にその概要を示す。疑似的に解像度を増大するため画像をスプライン補間する (Fig. 3 a)。この補間によって、1000×1000 ピ

Fig. 2 Histogram of peak-locking vector⁴⁾

クセルの画像を 2000×2000 ピクセルに増大させることが出来る。これは、撮影されている画像が粒子であると言う前提に基づいている。粒子の画像は比較的緩やかな変化をしていることから、画像解像度を疑似的に増やすことが可能となっている。なお、この手法の意味を理論的に検討した研究は無く、解析によるバックアップが必要であろう。

次に再帰的相関法もしくは階層的相関法と呼ばれる方法がある (Fig. 3 b)。まず、 128×128 といった大きな検査領域で移動先を求める。これは、大領域の平均的な移動先であるが、情報量が十分にあるため、過誤の少ないデータが得られる。次にこれよりも小さな検査領域 (例えば 64×64) で移動先を探す。このとき、大きな検査領域で求められた移動先を元にその周辺のみで探査をする。このことで、小さな探査領域を高速にかつ、過誤の少ない探査が出来る。この操作を繰り返すことで小さい検査領域のパターンマッチングを高精度で行うことが可能となる。つまり、高解像度なベクトルを得ることになり、1枚の画像から数万点の情報を得ることができる。Fig. 4 に一例を示すが、6万点の情報を取得できている¹¹⁾。

Fig. 3 Improved algorithms for PIV analysis⁹⁾

Fig. 4 High resolution PIV (8×8)¹¹⁾

さらに、画像歪みを考慮した相関法が挙げられる (Fig. 3 c)。再帰的相関法によって密な流速分布が得られると、この流速分布から速度勾配テンソルが得られる。一方、スプライン補間では任意点 (実数点) の輝度値を求めることが出来る。速度勾配テンソルを用いて対象領域の変形を計算し、変形後の各グリッド位置における輝度値をスプライン補間して求める。この輝度値と2時刻目の画像輝度値を用いて相関値を求め、これをサブピクセル移動量算出に用いることで、変形を考慮した移動先が高精度に決定できる。この方法により、0.04 ピクセルまで精度を高めることができる⁹⁾。

これらのアルゴリズムの他にも、オプティカルフロー¹²⁾を用いたり、相関法と粒子追跡を組み合わせる方法¹³⁾、相関係数を工夫すること^{14,15)}等で、高解像度の情報を得ようとする試みがなされている。

なお、相関法の基本アルゴリズム自体は単純であり、フリーソフトウェアもネットワーク上にいろいろと提供されている。例えば、Gui¹⁶⁾はホームページにおいて Windows 上で動く GUI タイプの PIV ソフトウェアを提供している。また、Hart¹⁷⁾は、MATLAB を用いたフリーのソフトを提供している。PIV 講習会 CD-ROM³⁾にも簡単なソフトがついている。この様なソフトを利用することも一つの方法であろう。

3. PIV 技術の展開

PIV を用いた 2 次元流速分布計測は、高解像度、高精度計測へと進んでいっている。今後の PIV 技術の展開としては、3つの方向があると考えられる。

一つは、標準化および実用化の推進である。例えば、上記のシステムに最も欠けている情報、つまり、精度評価を行うツールおよび評価標準を設定していく事が挙げられる。言い換えれば、乱流計測など、2次元空間方向に十分な精度を持つことを保証するためのシステムの制定である。ヨーロッパにおいては、EUROPIV (1995-1997) 及び PIVNet (1998-) と呼ばれるプロジェクトが EC 主体で推進されている¹⁸⁾。これらは、PIV の開発と標準化を目指した研究グループで、ヨーロッパにおける PIV の普及と標準化に関する活動を行っている。日本国内においても、1996 年より可視化情報学会が中心となり PIV 標準化のための研究活動を推進している¹⁹⁾。これらの標準化に向けた活動については、本号の PIV 研究会活動報告²⁰⁾を参照されたい。

二番目は、現状では計測できない領域を拡充していく方向、測定領域を拡大していく方向である。これには、3次元 3 成分流速計測²¹⁾、濃度などの他の物理量との同時計測²²⁾、微小領域計測、混相流計測、時間方向への高解像度化といった、単純な 2 次元計測システムでは計測できない情報を取得するための技術開発である^{1,3)}。

3 番目の方向は、PIV で培われた画像取得、画像解析技術の他分野への応用である。これには、画像解析によ

り流速以外の物理情報である界面移動検知や温度／密度計測への応用などの他、画像ベースの移動検知システムへの応用が考えられる。本稿では、この3番目の画像解析応用技術について触れてみたい。

4. 流速計測以外への PIV 技術応用

PIV 技術は本来画像解析によって流速を算出する手法であるが、流速計測以外への様々な応用がなされている。例えば、Kawahashi²³⁾は密度分布計測へ適用を試みているし、3次元形状計測への応用を試みている研究者も居る。ここでは、PIV で培われた画像解析技術を応用して、流速以外の物理量を解析しようとしている例の一つとして、岡本ら²⁴⁾の液面計測への応用について紹介する。

4.1 液面計測

元来、PIV はスペckルパターン解析から発展して来た。このスペckルパターンの相互相関法解析を応用し、液面形状を計測する^{24, 25)}。Fig. 5 に計測システムを示す。レーザを光ファイバーを通して照射すると、光ファイバー内の微小欠陥や多重散乱などの影響によって照射光にはある程度のスペckルノイズが含まれている。このスペckルノイズを含んだレーザ光をレンズによって直径 10 cm 程度の平行光束とする。このレーザ光を液面の下方から照明し、液面の上方に設置したスクリーンに投影すると、スペckルパターンを含んだ画像が投影される。液面上に波が生ずると気液界面によってレーザ光が屈折され、スペckルパターンが変形する。このスペckルパターンの平行移動量を計測すれば、この移動量は界面の傾きを表している。Fig. 5 に示す簡単な線形解析によって、平行移動量 (δ) と傾き (θ) との関係は

$$\theta = \frac{\delta}{(n-1)L} \quad (3)$$

と近似することができる。ここで、 n は液体の屈折率であり L は界面とスクリーンとの距離を表す。

Fig. 6 に本手法によって得られたスペckル画像の例を示す。波の無い画像と波のある画像を比較し、スペckルパターンの移動を計測する。移動量計測には、PIV で良く用いられている相互相関法を適用する。この時、計測精度を上げるためには、どうしてもサブピクセルの

情報を得ることが必須となる。そこで、PIV で培われた相互相関法におけるサブピクセル精度の解析法をスペckルパターン解析に応用する。Fig. 6 右には、相互相関法によって得られた各注目点におけるスペckルパターンの移動量ベクトルを示す。この2次元ベクトル ($\vec{\delta}$) に(3)式を適用することで界面上の任意点における傾きを算出できる。あとは、この傾きデータを元に液面形状を再構築する。Fig. 7 に液面下を流れる噴流により変形させられている液面を本手法によって計測した例を示す。液面変化が定量的にとらえられ、2次元的な界面形状が再構築されている事が判る。

スペckルパターン計測に、サブピクセル精度相互相関法を導入することで、界面形状を精度良く再構築できる新しい計測手法を開発することができている。この様に、PIV 技術によって開発がすすめられて来た画像解析手法は、流速だけでなく様々な計測への応用が可能であり、新しい展開の方向であると考えられる。

5. まとめ

レーザ技術や画像技術の格段の進展により、近い将来誰でもが PIV を容易に使う事ができるようになることと予感させる。ソフトウェアも進歩し、高解像度の情報が得られるようになってきた。しかし、計測されたデータの精度評価に関する手法の標準化はまだ緒についたばかりであり、早急な評価標準の制定が望まれる。

また、今後の展開の一つの方向として、PIV 技術の広域分野への応用が挙げられる。単なる流速計測技術ではなく、様々な対象に応用されていくと考えられる。さらに、CFD とのハイブリッド化など、新しい PIV 技術の芽が膨らんでいる。

Fig. 6 Speckle and displacement²⁵⁾

Fig. 5 Surface measurement configuration²⁵⁾

Fig. 7 Reconstructed surface height²⁵⁾

参考文献

- 1) 小林他, 「PIVの研究動向」, 日本機械学会論文集B, Vol. 65, No. 629 (1999), 8-14.
- 2) 可視化情報学会編「流れの可視化ハンドブック」, 朝倉書店
- 3) 可視化情報学会講習会テキスト, 「実践集中講義: PIVの要点」 (1998)
- 4) Raffel, M., et al., Particle Image Velocimetry, (1998), Springer-verlag
- 5) 角尾他, 「家庭用デジタルVTR規格, 多様な放送を網羅(上)」, 日経エレクトロニクス No. 692, (1997), 141-153.
- 6) 角尾他, 「同上(下)」, 日経エレクトロニクス No. 695, (1997), 127-137.
- 7) Westerweel, J., Effect on sensor geometry on the performance of PIV interrogation, Proc. 9th Int. Symp. on Appl. of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, (1998) 1. 2.
- 8) Westerweel, J., "Theoretical analysis of the measurement precision and reliability in PIV," Proc. 3rd Int. Workshop, PIV, (1999), 9-14.
- 9) Fincham, A., Delerce, G., "Advanced optimization of correlation imageing velocimetry algorithms," Proc. 3rd Int. Workshop, PIV, (1999), additional print
- 10) Lecordier, B., Lecordier, J.C., Trinité, M., "Iterative sub-pixel algorithm for the cross-correlation PIV measurements," Proc. 3rd Int. Workshop, PIV, (1999), 37-43.
- 11) Hu H.他「Hierarchical Recursive PIVと噴流解析への応用」日本機械学会流体工学部門講演会, No. 517 (1999), 345-346
- 12) Quénot, G.M., et al. "Particle image velocimetry with optical flow," Experiment in Fluids, 25-3, (1998) 177-189.
- 13) Keane, R.D., et al., "Super Resolution PIV," Meas Sci. Tech, 6 (1995), 754-768.
- 14) Hart, D.P., "The elimination of correlation errors in PIV processing," Proc. 9th Int. Symp. on Appl. of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, (1998) 13. 3.
- 15) Lourenco, L.M., et al., "Measurement of velocity field spectra by means of PIV," Proc. 9th Int. Symp. on Appl. of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, (1998) 13. 5.
- 16) Gui, L., "Evaluation program for digital PIV," <http://www.flow.uni-essen.de/~gui>
- 17) Hart, D.P., "Super-resolution PIV Processing Program," <http://web.mit.edu/dphart/www/Program.pdf>
- 18) Kompenhans J., et al., "International activities for cooperation, comparison and standarization at the developemnt and application of particle image velocimetry,," Proc. 9th Int. Symp. on Appl. of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, (1998) 13. 6.
- 19) Okamoto, K., et al., "Standard Images for Particle Imaging Velocimetry," Proc. PIV'97-Fukui, Fukui, (1997), 229-236.
- 20) 小林他, 「PIV実用化・標準化研究会報告」, 可視化情報, Vol. 20, No. 77, (2000), 172-175.
- 21) 西野, 「3次元PIVの実用化に向けて」, 可視化情報, Vol. 20, No. 77, (2000), 113-119.
- 22) 新美, 「可視化画像による物理量の複合計測」, 可視化情報, Vol. 20, No. 77, (2000), 126-132.
- 23) Kawahashi, M., "Velocity and density fields measurements by speckle technology," Proc. Korea-Japan Joint Seminar on PIV, (1999), 105-110.
- 24) 岡本他, 「スペckル法による自由液面形状の計測」, 混相流シンポジウム, (1998), 164-165
- 25) Tanaka, G., et al., "Experimental investigation on interaction between polymer solution jet and free surface," Experiment in Fluids, (2000), in press