

画像処理による二次元移動粒子の速度測定*

Measurement of two-dimensional velocity of moving fine particles
with the aid of an image processing technique

近 江 和 生¹⁾

Kazuo Ohmi

A new prototype of image-processing velocimetry is tested in the case of two-dimensional flows behind an airfoil body. This method is based on flow visualization techniques using fine particles suspended in water and image processing schemes where the velocity is determined by a series of particle pursuit algorithm working between two sequential image frames. The pursuit algorithm makes use of coefficients of image correlation on a binary basis and has been developed by the present author and his group. The reference velocity distribution is given by the particle-streak photography, in which the velocity vectors are defined as length and gradient of particle paths during a given time of exposure.

1. 緒 言

画像処理を用いた物体移動速度の測定は、近年、計算機援用の自動計測における重要な応用例として定着しつつあるが、その性能・効率面には依然として改善の余地が残されている。とくに本研究のように、多数の粒子の不均一な二次元運動速度を扱う問題は、一般にオプティカルフローと呼ばれ、例えば水や空気の流速測定や構造物の急速な変形測定等に際して大きな実用的価値を有するものの、計算アルゴリズムの複雑さや有効なフィードバック手法の欠如ゆえに、精度と効率の両面で満足しうる、しかも汎用性の高い処理系開発には多大の困難が伴う。

本研究では粒子移動速度の画像計測を、とくに水流中での流速測定という立場から行うが、その主たる目的は、上記のような処理系開発における基礎的展開を試みることである。したがって粒子速度の具体的な測定では、最も基本的な手法として、対象の写真撮影により得られる粒子の軌跡像を利用する方法、そしてより発展的な手法として、微小な時間差で撮影された粒子の瞬時画像を解析し、二面の画像間で各粒子の対応付け（粒子追跡）を行うことによって速度を求める方法、以上双方の測定結果を比較しながら、画像計測法としての有効性や問題点を検討する。後者の手法に関しては、粒子対応付けの方法が幾つか考えられるが、ここでは筆者らのグループが実用化を進めている、局所画像相関を調べる方法が適用される。

ここで問題とすべき点は、水流中の粒子の動きが同一の条件で可視化されるとして、軌跡撮影型の画像計測法で得られる速度の分布結果は、粒子追跡型の計測法で得られる結果とは、精度面において同一基準での比較が行えないことである。すなわち粒子の水流に対する追従

* 平成4年5月 原稿受理

1) 大阪産業大学 工学部

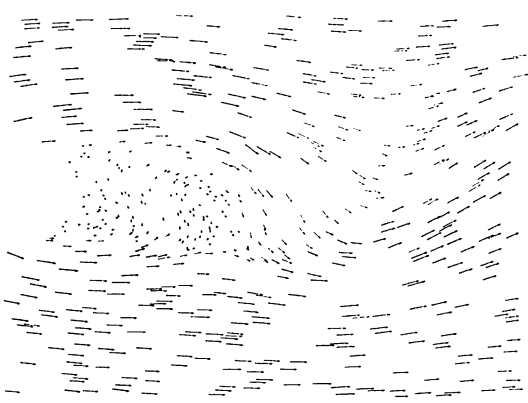
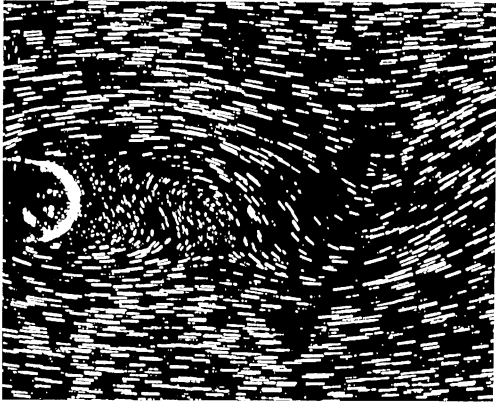
を前提にすれば、前者の計測法で求まる流速ベクトルは、その有効数字の桁がいかに小さくとも自己充足的な直接データであるのに対し、後者の計測法においては、若干の例外的な粒子挙動を別にすれば、原則として二画面間での全粒子の unique な対応付け達成が、流速データの有効性に深く関連している点である。もし100%の対応付けができない場合には何等かの規範データに基いて、対応付けから除外された粒子が、すでに対応付けされた粒子のいずれとも結びつかないことを明確に示す必要がある。しかし現実問題として、一般の複雑な水流中での計測においてこれを行うことは困難である。

そこで本研究では、軌跡撮影型の計測で得られる速度情報を規範データとして、そこから粒子追跡型の計測で必要となる粒子の瞬時画像を人為的に生成して、後者における対応付けの信頼性を検討することを考えた。このような既知の速度データを利用しての、粒子追跡型計測法の性能検定は、すでに植村ら¹¹⁾や山本ら¹²⁾が試みているが、これらの実験の大半では、速度場に関する理論数値解から乱数的に粒子の瞬時画像を生成しており、現実の水流中における粒子の分布や移動傾向との関係は必ずしも明白でない。これに対して本研究の比較実験では、実際の水流中における粒子挙動に即して速度測定の評価が行われる点が重要である。なおここで、同一水流に対して両者の計測法を同時に適用しないのは、画素分解能等の特性値が、本実験での使用装置においてかなり異なるためである。

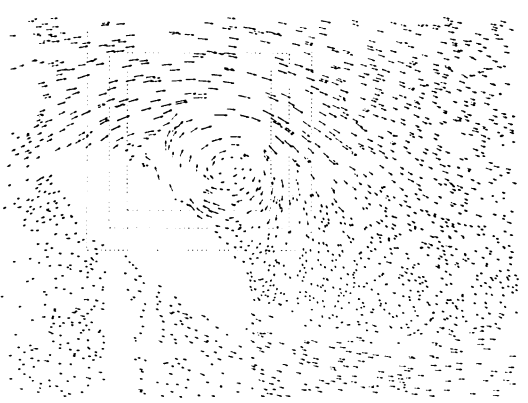
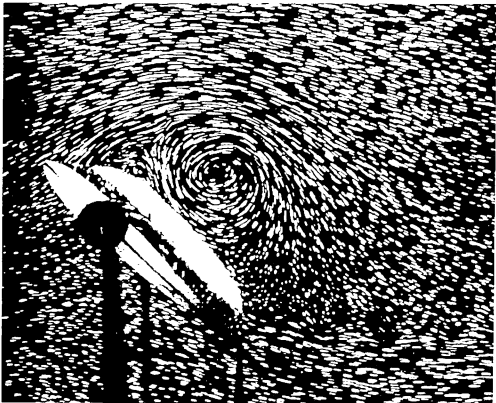
2. 実験方法

今回の実験で扱う水流のサンプルは、円筒ならびに翼形を横切る三種の二次元流（層流状態）であり、その流れをナイロン11の微粒子で可視化し、軌跡線の集合という形で撮影した結果が図1(A)~(C)の左側である。(A)の円筒、および(B)の翼形は水流に対して静止しており、(C)の翼形は翼自身がピッチ方向に振動している¹³⁾。(A)における水流の近づき速度は2.67mm/s、(B)~(C)の水流では24.9mm/sである。撮影時の露光時間は、(A)が1/1秒、(B)~(C)の場合は1/4秒である。

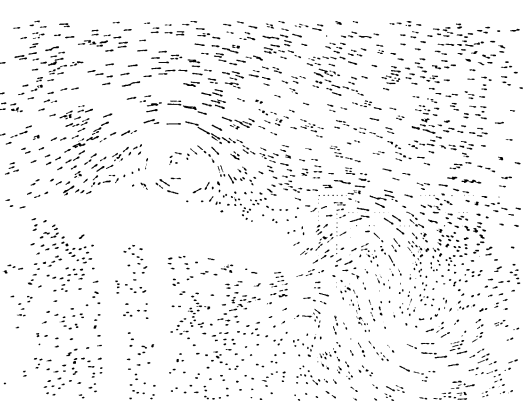
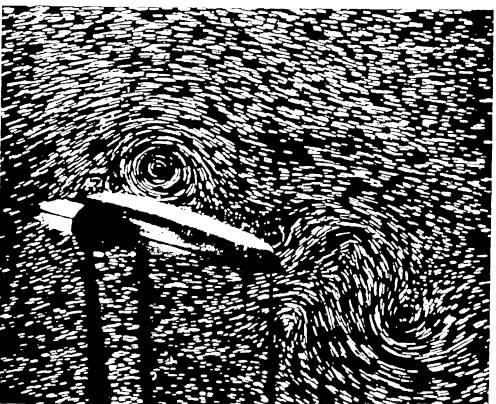
これらの写真に軌跡撮影型の計測法^{14),15)}を適用して流速分布を定量化するが、そこで得られる速度値は、軌跡線の微妙な交差や重なりを含むものが一部存在しており、そのままでは規範データとして適さない。そのため今回の実験に限って、原写真との直接対比から、この種の誤ベクトルを対話型処理によって除去し、図1(A)~(C)の右側に示す最終結果を得た。これら各図におけるベクトルの総数は800~1500であり、本実験での粒子追跡型の計測にとって物理的に大きすぎるため、処理の領域を図中に示す正方領域に限定して、ベクトル数を150~300に減少させた。また画像処理の総画素数が軌跡撮影型の計測系では1500×1110、粒子追跡型の計測系では256×256と異なるため、各正方領域において両者の扱う画素数がともに256×256となるよう、適切なアフィン変換を行った。さらに軌跡撮影型の計測で得られる流速ベクトルの始点・終点は、粒子追跡型の計測には大きすぎる粒子像の変位を生じるため、ベクトル長さを原軌跡の1/10~3/10に短縮して、その始点・終点に粒子の瞬時像を生成した。なお瞬時像における粒子径に関しては、粒子追跡処理の効率上、粒子径の規格化が望ましい¹⁶⁾ので、原画における軌跡線の幅に関係なく一定の大きさ（3×3 pixの正方粒子）とした。



(A) 円筒背後の流れ（主流方向は画面左から右）



(B) 翼形背後の流れ（翼形は静止，主流方向は画面左から右）



(C) 翼形背後の流れ（翼形は振動，主流方向は画面左から右）

図1 微粒子による水流の可視化（左）と軌跡像解析による流速分布の定量化（右）

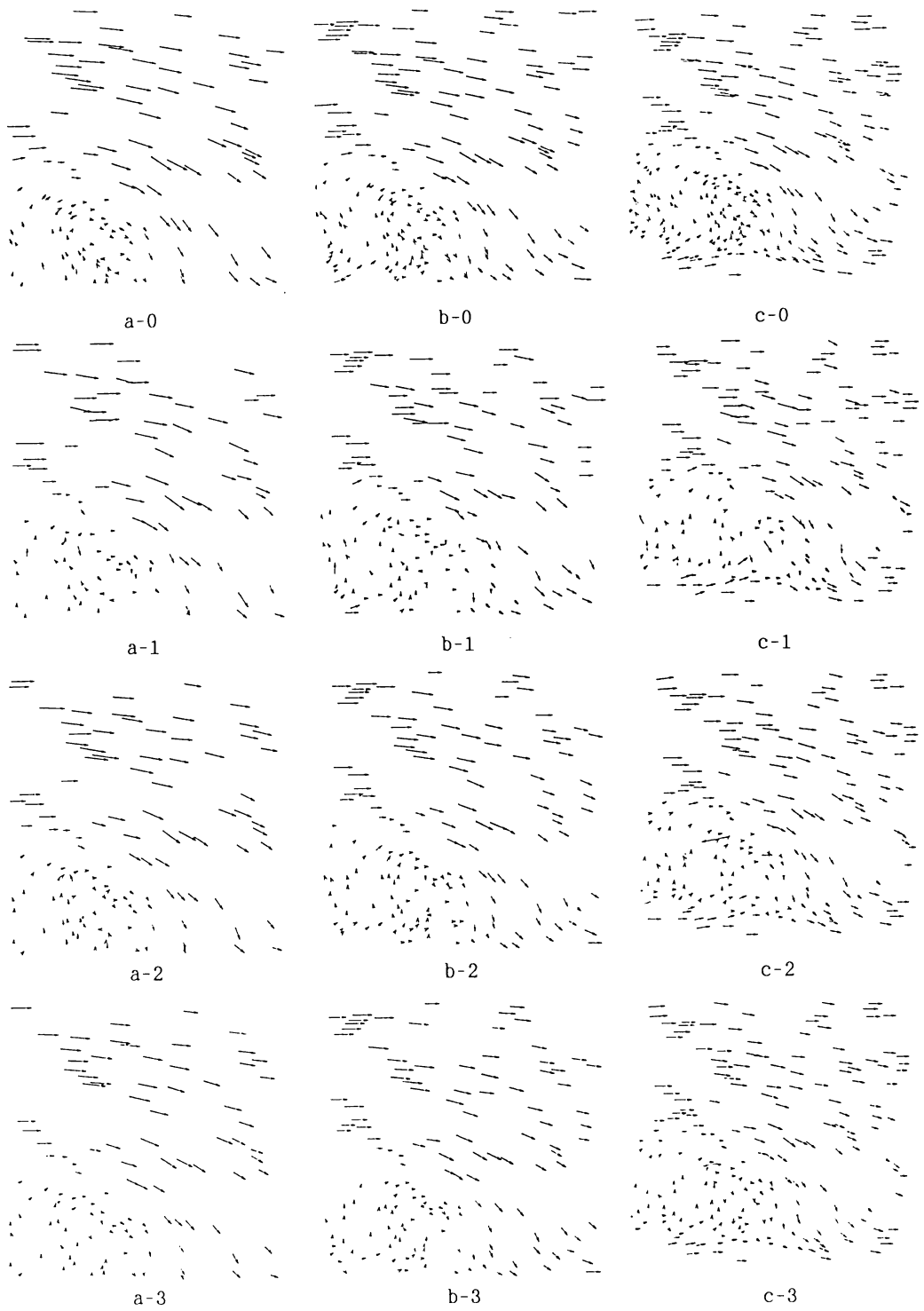


図2 図1(A)右図の正方領域における流速分布
 (コード0は参照用の流速データ, コード1~3は粒子追跡処理による測定結果)

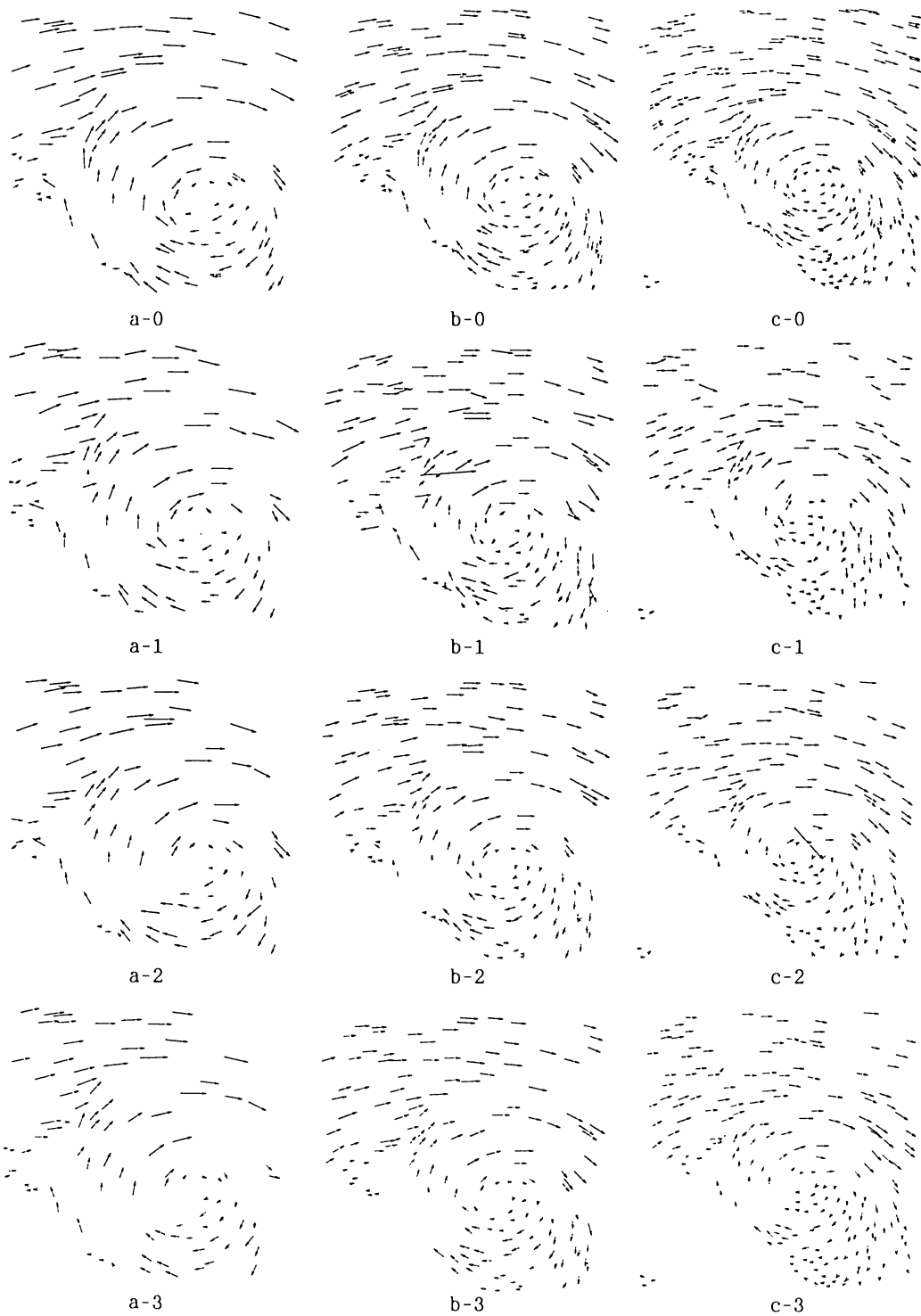


図3 図1(B)右図の正方領域における流速分布
 (コード0は参照用の流速データ, コード1~3は粒子追跡処理による測定結果)

表1 図1(A)–(C)の水流における流速測定の特値値一覧

参 照 図	完全粒子対 粒子対の 粒子対の				C/B	D/C	D/B	
	軌跡の総数 (= A)	の存在数 (= B)	全認識数 (= C)	正対応数 (= D)				
図2	a-1	132	126	116	115	0.92	0.99	0.91
	a-2	132	125	119	118	0.95	0.99	0.94
	a-3	132	122	110	110	0.90	1.00	0.90
	b-1	197	190	166	165	0.87	0.99	0.87
	b-2	197	186	162	162	0.87	1.00	0.87
	b-3	197	184	150	148	0.82	0.99	0.80
	c-1	262	257	206	200	0.80	0.97	0.78
	c-2	262	257	206	204	0.80	0.99	0.79
	c-3	262	257	205	204	0.80	0.99	0.79
図3	a-1	126	123	113	112	0.92	0.99	0.91
	a-2	126	121	100	98	0.83	0.98	0.81
	a-3	126	120	93	92	0.78	0.99	0.77
	b-1	189	178	169	164	0.95	0.97	0.92
	b-2	189	178	165	164	0.93	0.99	0.92
	b-3	189	175	153	153	0.87	1.00	0.87
	c-1	284	271	209	204	0.77	0.98	0.75
	c-2	284	269	195	191	0.72	0.98	0.71
	c-3	284	266	205	199	0.77	0.99	0.75
△ 掲 載 省 略 ▽	a-1	155	151	124	123	0.81	1.00	0.81
	a-2	155	149	111	111	0.74	1.00	0.74
	a-3	155	148	97	91	0.66	0.94	0.61
	b-1	218	213	182	177	0.85	0.98	0.83
	b-2	218	211	162	156	0.77	0.98	0.73
	b-3	218	207	124	119	0.60	0.96	0.57
	c-1	316	306	234	230	0.76	0.98	0.75
	c-2	316	304	216	209	0.71	0.98	0.69
	c-3	316	300	192	181	0.64	0.95	0.60

3. 実験結果と検討

図1(A)右図中の正方領域内の流速分布について、速度ベクトルの正しいデータおよび粒子追跡型の計測による測定結果を示したものが図2である。この図において縦列に共通の記号 a ~ c は、図1(A)右図の三個の正方領域を小さい方から順に示し、横列に共通の数字は0がベクトルの正データ（原軌跡線と長さは同一）、1 ~ 3が原軌跡の露光時間のそれぞれ1/10, 2/10, 3/10に相当する時間差の粒子画像を、粒子追跡型の計測法で測定した結果を表す。なお1 ~ 3の測定結果に関しては、正データの比較を容易にするため、計算した速度の大きさ（長さ）を、0図の場合と同一の尺度でベクトル化している。一方これらの計測結果に関して、統計的な数値を示したものが表1である。この表において、(A)欄はもとの流速分布における軌跡線の数を、(B)欄は2時刻の瞬時画像の双方に撮影された完全な粒子ペアの組数、(C)欄は粒子追跡の計算処理によって対応付られた粒子ペアの組数、(D)欄は(C)欄の粒子ペアのうち正対応の数を表す。

図2の計測結果を一見すると、最短時間差の瞬時画像を処理した場合 (a-1,b-1,c-1)、少なからぬ数の誤ベクトルが主流領域で発生すると判断されるが、原データと対照すると、実際にはほぼ全部のベクトルが、二画面間での正しい粒子対応を示していることが分かる。描かれたベクトルの長さや方向がかなり不規則であるのは、画像処理における量子化誤差が、ベクトルの引伸ばし操作により顕著化した結果であると理解される。二画面間の時間差が長くなれば、以下の図に示すようにこの誤差の影響は減少する。一方、この円筒背後の流れの例では、表1の結果が示すように、粒子対の認識数Cや正対応率D/Cは時間差の増大に対してほとんど低下しない。したがって長時間差による瞬時画像を処理する方が有利とも考えられる。ただしここでは粒子数（すなわち粒子の分布密度）が増大した場合、粒子対の認識率C/Bが明らかに低下する。

次に、図1(B)右図の正方領域の流速分布を、粒子追跡型の計測で処理した結果を検討する。前例と同じ手順で $3 \times 3 = 9$ 種のベクトルプロット図（図3）を比較すると、やはり最短時間差の画像処理において、主流領域でのベクトル長さや方向にかなりの不規則性（粒子対応自体は正しい）が見られた。この不規則性は先と同様、二画面間の時間差増大とともに目立たなくなる。しかしここでの翼形流れの場合、時間差増大によって粒子対の認識数Cが低下するのに対し（以下表1参照）、正対応率D/Cはほとんど低下しない。この傾向は粒子の分布密度が低下した場合、より一層顕著となる。一方粒子の分布密度自体の影響については、粒子対の認識率C/Bがa → b列間で低下せず、b → c列間でかなり低下するのに対し、正対応率D/Cにはこのような分布密度の影響が見られない。すなわちこの例から言えることは、粒子の分布密度に一定の限度があるという点である。

最後に、図1(C)右図の正方領域に対する粒子追跡型の測定結果を検討する（ベクトル図は掲載省略）。この例では表1の統計数値データからも明らかなように、二画面間の時間差増大によって粒子対の認識率C/Bが大きく低下するのが重要な特色である。加えて時間差の増大は、いかなる粒子の分布密度においても正対応率D/Cを微減させる点が指摘される。前例で見たような、粒子分布密度の粒子対認識率C/Bに対する影響はあまり目立たないが、傾向自体はここでも認められる。その理由は水流中の乱れの増加により、C/Bの値自体が全般に低下していること（特にa列b列で）であると考えられる。とはいえ、正対応率

D/C はここでも粒子分布密度にほとんど影響されない。

4. 結 言

今回の実験では、軌跡撮影型の画像計測で得られる二次元流速分布を、粒子追跡型の計測法によって再測定し、後者の手法における対応付けの信頼性という問題を中心に、議論や検討を行った。三種類の比較実験における第一の観察事項は、粒子分布密度の増大による粒子対認識率の低下であり、これは今回処理したサンプル中で、最も乱れの少ない円筒周りの流れにおいても認められた。次の観察事項は、二画面間の時間差増大による粒子対認識率の低下であり、これは乱れの影響がやや大きい、翼形周りの流れにおいて明らかになった。乱れの影響がさらに増大すると（翼形が振動する場合）、粒子対の認識数そのものが減少し、加えて二画面間の時間差増大による、粒子正対応率の減少が観察され始める。

したがって粒子追跡型の計測法を用いて水流の流速測定を行なう最良の方法は、二画面間の時間差を適度に短くし、かつ粒子の分布密度に関して一定限度を越えないことであると判断される。ところが二画面間の時間差を短くすると、先述した量子化誤差の影響が顕著になるので、打開策として流速測定を短い時間差画面で時系列的に運用し、速度の評価には時間平均値を用いるという方法が考えられる。

なお本研究中、水流の可視化実験ではフランスのポワチエ大学 Medeleine Coutanceau 教授に、実験設備の提供や資料の収集等、数々のご厚意を賜った。ここに記して、心より謝意を表明させていただく。

参 考 文 献

- (1)植村ら, 可視化情報, 10-Suppl. No.1 (1990), 155.
- (2)山本ら, 可視化情報, 10-Suppl. No.1 (1990), 91.
- (3)近江ら, 流れの可視化, 8-Suppl. (1988), 127.
- (4)近江, 流れの可視化, 6-20 (1986), 19.
- (5)近江・今市, 日本機械学会論文集B, 55-515 (1989), 1970.
- (6)植村・山本, 流れの可視化, 9-Suppl. (1989), 45.