

流れの可視化

Flow Visualization

小林 敏雄*・石原 智男*

Toshio KOBAYASHI and Tomoo ISHIHARA

流れの可視化に用いられている手法の分類と適用流速範囲の一例を表示する。次いで可視化によって観察される流跡、流脈と時間線の相違を例示するとともに、可視化のデータから流れ模様を判定したり、定量測定する際の問題点を二つの例について説明する

1. はじめに

流体の運動は主として、ピトー管、熱線風速計、流量計や圧力計によって計測された速度、乱れ、流量あるいは圧力などによって間接的に表現されるのが普通であるが、現象を直接に目視したり撮影記録することができれば、それは流体の運動を解明する上に有効な情報を与えることになる。自然界における流れの現象を観察することは古くから行われており、たとえばルネサンス時代には川の流れの中の人脚の背後のうずが描かれているし、あるいは流れの中の物体に生じるうずがレオナルド・ダ・ヴィンチによって観察描写されている(図1)。し

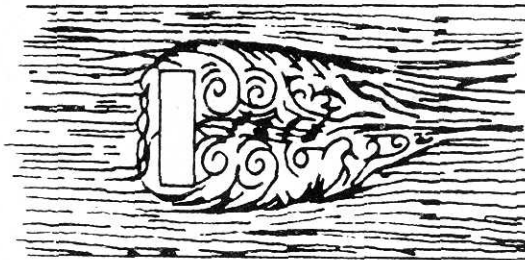


図1 水の運動と計測 (Leonardo da Vinci)

かし、流体は気体であれ液体であれ一般に透明であるため、これをそのまま観察することは困難である場合が多く、可視化のための工夫が必要となってくる。この流れを観察する手段としての可視化の技術は19世紀にG. Hagenがのこぎりの切屑を流れの中に投入することによって水路の流れを観察したことや、O. Reynoldsが水平な円管内の水流に着色料を注入し、層流から乱流への遷移を実証したこと(図2)に始まろうが、1960年にASME(米国機械学会)の主催で流れの可視化に関するシンポジウムが開かれて以来、改めてその有用性が認識され、相次いで可視化技術の解説や手法の改良などが報告されている^{1)~6)}

流れの可視化の目的は、新しい流れの現象を発見したり、流れを支配する諸法則を実証したり、あるいは数学

*東京大学生産技術研究所 第2部

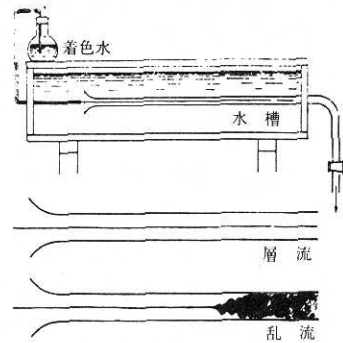


図2 レイノルズの実験

的モデルを作るための資料を得るという科学的な解析研究と流体の関与する機器装置の開発・改善のために複雑な流れに及ぼす諸因子の影響を系統的に調べるという工業的な開発研究とにおいて有効な手段を与えることである。この流れの場を把握する手段としての可視化が他の計測手段と比べて有利な点は、流体の挙動を直接的、直観的に理解でき、しかも流れを余り乱すことなく全体的な流れの場を同時に観察・測定できることである。流れの速度や方向を定量的に計測するために種々のプローブが考案されているが、多数のプローブを流れの中に挿入すれば流れの状態が変化してしまうし、また1本のプローブの移動による測定は非定常流には適用できない。可視化は多くの場合、広い流れの場を短時間に観察・測定するのに適している。

一方、流れの可視化による観察が不適當である場合も多い。照明のできない場所や異種物質を混入できない流れには可視化を適用し難いし、あるいは可視化の方法によっては流速範囲に制限が生じることがある。たとえば煙を用いて空気流を可視化する場合、流速が大きいと煙は導入点のすぐ下流で拡散してしまい、流れの詳しい観察は困難となる。流速を下げる则该欠点は改良されるが、その場合には実験条件の相違に注意しなければならない。実際の流れの場が乱流であるにも拘わらず、観察する時の流れが可視化の技術的制約から層流であるならば流れの状態に大きな相違が生じているし、たとえ、両

方とも層流であるとしても、たとえばレイノルズ数の違いによって流れの状態も変化し得る。このように、観察すべき対象に適した可視化の方法を選択することが重要であるとともに、実験条件を変えざるを得ない場合には条件の違いによる流れの場の変化の可能性を十分に考慮しなければならない。

さて、流れの可視化によって観測されるものは、①流れの方向、②速度、加速度の大きさとその分布、③層流から乱流への遷移、剥離点やよどみ点、剥離線や付着線あるいは渦の発生や消滅など、④温度や密度分布などである。近年、可視化技術の改良や新しい工夫、撮影・照明技術の発展によって可視化を流れの一計測手段として採用することが多くなっている。その場合、観測すべき対象に適した方法を選択すること、および観測結果から流れの正確な挙動を把握することが必要となる。そこでここでは流れの可視化技術の分類、適用流速範囲を例示し、記録データの解析にあたって注意すべき事項を略述する。なお、わが国でも1973年以来、流れの可視化シンポジウムが毎年開かれており、可視化技術に関する情報の交換が行われている。最近、このシンポジウムを基礎にして流れの可視化技術を体系化する試みがなされており、著者らもそれに参画しているが、本稿の一部は体系化のための一資料として提案したものである。

2. 流跡, 流脈, 流線と時間線

流れを観察する際には、流線 (stream line), 流跡 (path line), 流脈 (streak line) が区別されねばならない。流れの中にある曲線を考え、その曲線上の任意の点の接線方向がその点における流れの方向と一致する場合にこれを流線とよぶ。一方、流れの中のある粒子 (トレーサ) あるいは流体の微小部分が時間とともに実際に通過する経路を流跡、流れの中のある固定点を次々に通過した粒子を連ねた線を流脈と呼んでいる。すなわち、水中や水面のアルミニウム粒子あるいは大気中の風船の運動を長時間露出して撮影したものは流跡であり、同一注入点から連続して流れ出る染料の描く経路は流脈である。このように流れの可視化によって観察されるものは流跡や流脈であり、流線ではない。しかし定常流の場合には流跡、流脈、流線は一致し、可視化の効用はこのとき最も大きい。

流跡、流脈、流線の相違について例をあげて調べてみる。速度 U の一様流に対して図3(a)のように時刻 $t=t_0 \sim t_2$ において、 U と直角な方向の速度変動 $v(t)$ が流れの場全域域に加わったとする。 $t=0$ で1個のトレーサ

(トレーサは液体の運動に正しく追従するものと仮定する) を注入するとそのトレーサの描く流跡は $t > t_2$ で図3(b)のようになる。一方、ある時刻 $t (> t_2)$ における流脈は図3(c)のようになる。図中A, B, C, D, Eは

それぞれ $t=0, t_0, t_1, t_2, t$ におけるトレーサの位置であり、a, b, c, d, e はそれぞれ $t=t, t_2, t_1, t_0, 0$ の時刻にトレーサ注入位置を通過した粒子の時刻 t における位置である。図4に幾つかの時刻にお

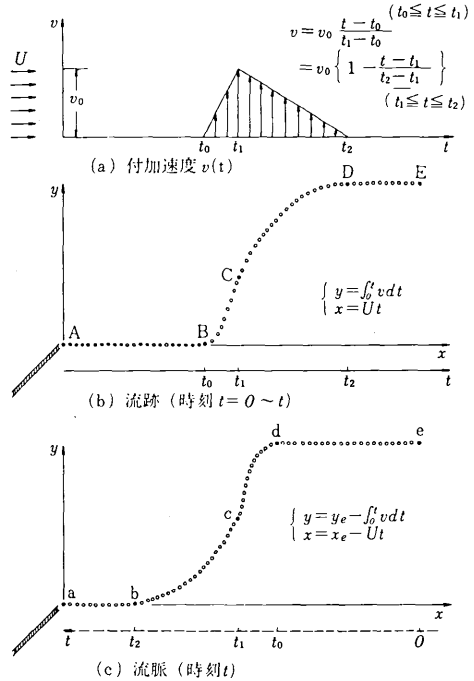


図3 一様流にそれと直角方向の付加速度が加わったときの流跡と流脈

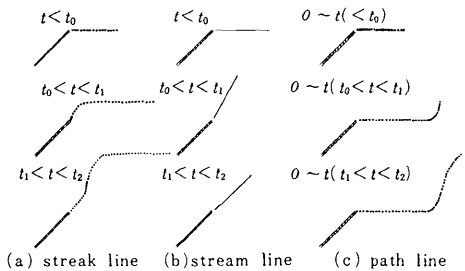


図4 各時刻における streak line および $0 \sim t$ における path line の比較

る流脈、流線、および流跡の例を示す。このように、流跡はある粒子の観察時間内における運動の歴史を示し、流脈と流線は各瞬間の流れの様子を示しており、三者は異なった曲線となる。

さて、可視化によって得られた流脈および流跡上の近接する2点の時間微分値の意味を考えてみる必要がある。図5に示すように時刻 t におけるトレーサの位置 P' の座標を Z とする。微小時間 dt 後のそのトレーサの位置 Q' の座標を $Z + dZ$ とすると $\lim_{dt \rightarrow 0} \frac{dZ}{dt}$ は時刻 t における P' 点の流速を表わしている。一方、流脈上の点 $P(Z)$

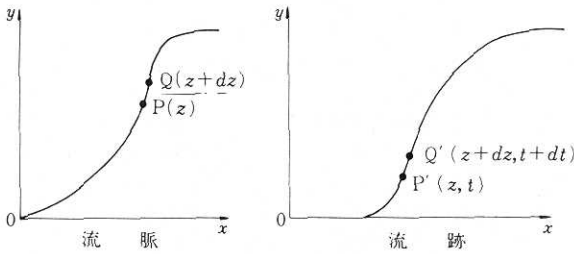


図5 流脈, 流跡上の近接2点

はその流脈を記録した時刻 τ より t だけ以前に点0を通過した粒子の時刻 τ における位置を表わし、点 $Q(Z + dZ)$ は τ より $(t + dt)$ だけ前に点0を通過した別の粒子の時刻 τ における位置を表わしている。したがって一般に流脈上での $\lim_{dt \rightarrow 0} \frac{dZ}{dt}$ は時刻 $\tau - t$ における P 点の流速を表わしていない。

次に、図6(a)に示すように、一様流 U をもつ流路の途中 CD において流れと直角方向に正弦波状の速度変動 $v = A \cos(2\pi Ut/L)$ を連続的に与えた場合の流跡と流脈を考えると (L は区間 CD の長さ)。 C 点での v が A (最大値) となるような時刻を選んで O 点にトレーサを注入すれば、トレーサが区間 CD を通過するとき受ける速度変動は(b)ようになる。このときの流跡は(c)に示すように区間 CD 間でのみ正弦波となるが D 点より下流

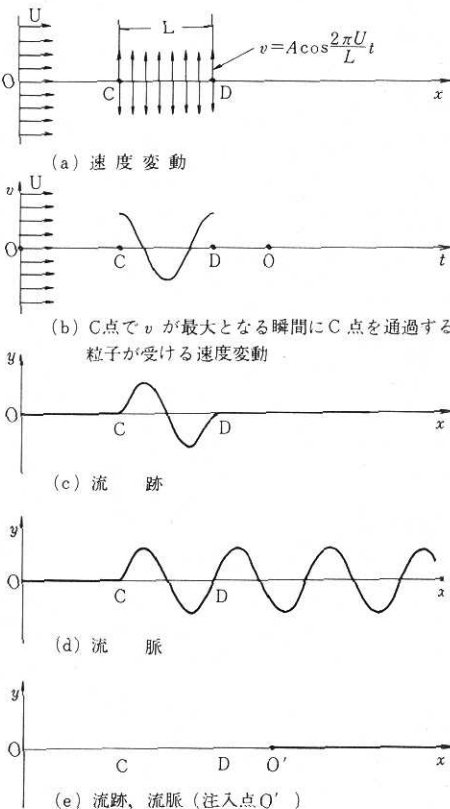


図6 速度変動と流跡, 流脈

では直線となる。一方、速度変動 v が C 点で A となるような瞬間における流脈は (d) のようになり、 D 点により下流でも正弦波が残存する。 D 点より下流の点 O からトレーサを注入した場合の流跡、流脈は(e) のような直線となる。このように流脈は速度変動がない部分においても以前の速度変動の影響が残存することに注意する必要がある。

可視化の記録から速度分布などの定量的測定を可能にするためには同時に時間を記録しなければならない。この基準時間としては普通、撮影時の露出時間やトレーサの断続注入・発生による時間線 (time line) などが用いられる。時間線は図7に示すように、流れの中の曲線

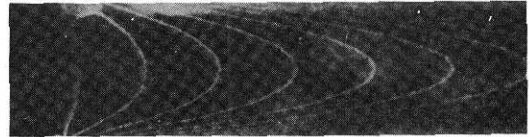


図7 水素気泡法による時間線

(一般には主流と垂直な直線) 上の粒子をある時刻 t_1 でマークしたとき、それから一定時間後の時刻 t_2, t_3, \dots におけるそれら粒子のなす曲線であり、概略の速度分布を知ることができる。しかし、たとえ定常流であっても時間線だけから正確な速度分布を得ることはできない。そのため図8に示すような流脈と時間線の組合せなどが主として水素気泡法において考案されている。しかし特に非定常流の定量測定を可視化によって行う場合には、得られた曲線が流跡なのか、流脈なのか、それとも時間線なのかを正しく把握しなければならない。

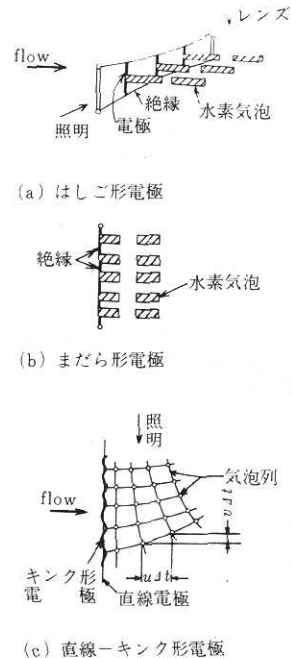
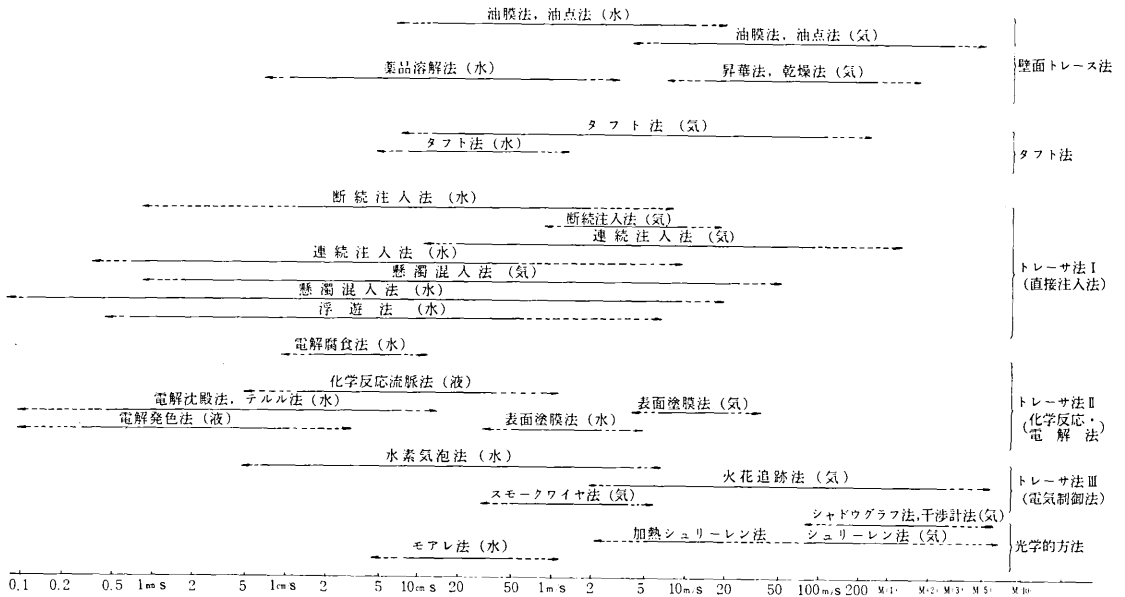


図8 水素気泡法による時間線と流脈

表1 流れの可視化手法の分類

a 壁面トレース法	〔物体表面近傍の流れの状態・方向・速度〕	油膜法、油点法 (気・水)	昇華法、乾燥法 (気)	薬品溶解法 (水)
b タフト法	〔物体表面近傍の流れの方向〕	表面タフト法 (気・水)	タフト格子法 (気・水)	タフト移動法 (気・水)
	〔断面内流れ方向の分布〕			
	〔流れの方向〕			
c トレーサ法 I (直接注入法)	〔流跡、時間線〕	断続注入法 (気・水)	連続注入法 (気・水)	懸濁混入法 (気・水)
	〔流脈〕			浮遊法 (水)
	〔流跡〕			
d トレーサ法 II (化学反応・電解法)	〔物体表面近傍の流れの状態・方向〕	表面塗膜法 (気・水)	電解腐食法 (水)	化学反応流脈法 (気・液)
	〔流脈〕			電解沈殿法、テルル法 (水)
				電解発色法 (液)
e トレーサ法 III (電気制御法)	〔流脈、流跡、時間線〕	水素気泡法 (水)	火花追跡法 (気)	スモークワイヤ法 (気)
	〔流跡、時間線〕			
f 光学的方法	〔密度変化〕	シャドウグラフ法 (気)	シュリーレン法 (気・水)	干渉計法、ホログラフ法 (気)
	〔せん断変形〕			流動複屈折法 (液)
	〔液面高低差〕			モアレ法 (水)

表2 流れの可視化手法の適用流速範囲



3. 可視化技術の分類と適用流速範囲例

流れの可視化にはきわめて多くの手法が用いられており、観察の対象や流体の種類によって適当な手法を選択することが望ましい。可視化の手法は通常、壁面トレース法、タフト法、トレーサ直接注入法、化学反応・電解法、電気制御法および光学的方法に大別される。表1に手法の分類を示す。表中、右欄の()内はその手法を適用できる流体の種類を表わしており、気は気体、水は水およびその他の液体、液は特殊液体を意味する。また[]内はその手法によって観察される主な対象を表わす。各手法の概要、特徴についてはここでは省略する^{1)~8)}

表1に記した各手法の適用範囲を明確に示すことは不可能に近い。適用流速の範囲だけを取上げて考えてみても、観察すべき現象の相違、その周囲の環境の相違、流体の種類、照明方法や撮影装置の相違、あるいは要求される精度によって同じ手法を用いても異なってくることは容易に想像できる。したがって表2に示される可視化技術の適用流速範囲は、できるだけ多くの文献から適用流速を抽出し整理したものであり、各手法ともこの流速範囲に限定されるものでもなく、またこの流速範囲ならば必ず鮮明に可視化できるとも限らない。観察すべき対象、環境に応じて従来の手法を改善し新たな工夫を加えるべきである。

4. 記録結果の解析上の注意

流れを可視化する場合、光学的方法を除くすべての手法で、流れの中に物体(物質)を挿入または発生させている。したがって厳密に考えると、①それが流れの中に存在することによって流れが変化してしまうこと、②それが流体粒子の運動と正確に一致するとは限らないことのために誤差が生じてくる。このため、記録されたデータから流れの模様を判定するにあたっては、特に定量的解析を行う場合には、得られたデータの物理的意味を詳しく知ることが大切である。ここでは解析上の問題点として二つの例を示す。

a 壁面トレース法における流れの方向

壁面トレース法によって得られる模様は一般に境界層の流れ模様を表わしていると考えられる。たとえば油膜法における油膜の運動は、①物体表面で油膜は静止している。②油膜表面(油と流体の境界面)は境界層内にあって、油の表面速度はその面の流体の速度に等しい。③油膜表面において油と流体の剪断応力が釣合う、という境界条件を満足すると考えられる。物体表面上に x, y 軸を、これと垂直に z 軸をとり、 u, v, w を流体の速度の x, y, z 成分、 p を圧力、 h を油膜の厚さ、 μ を流体の粘度とする。境界層の厚さが薄く、流体の粘度が油の粘度に比べて十分小さいと仮定すると層流境界層

の理論から、油の流れ方向は、

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{z=0} = \frac{\mu(\partial v/\partial z)_{z=0} - h(\partial p/\partial y)}{\mu(\partial u/\partial z)_{z=0} - h(\partial p/\partial x)} \quad (\text{物体表面で})$$

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{z=h} = \frac{2\mu(\partial v/\partial z)_{z=0} - h(\partial p/\partial y)}{2\mu(\partial u/\partial z)_{z=0} - h(\partial p/\partial x)} \quad (\text{油膜表面上で})$$

となる⁹⁾。圧力勾配の項が表面摩擦の項に比べて十分小さい場合には $(dy/dx)_{z=0} = (dy/dx)_{z=h}$ となり、物体表面の流れ方向は油膜表面の流れ方向、すなわち境界層の流れ方向と一致する。しかし表面摩擦の小さい剥離点近傍では油の流れ方向と境界層内の流体の流れ方向とは必ずしも一致しない。図9に後退前縁付近の翼面上の油の流れ方向の一例を示す。

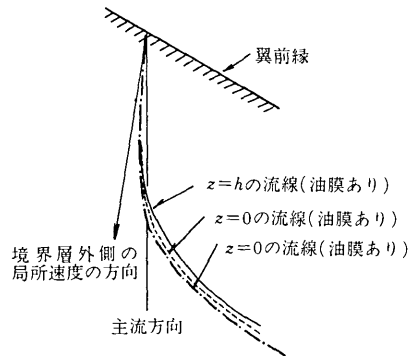


図9 後退翼前縁付近の翼面上の油膜による流線模様

b トレーサの運動と流体粒子の運動

トレーサの粒径が小さく、しかもトレーサの全量が流れの場の全空間に比べて十分小さい場合には、トレーサが本来の流れを変えてしまう恐れは少ない。しかしこのような場合にも、トレーサの運動と流体粒子の運動が一致するとは限らない。流れの場におけるトレーサの運動方程式は、トレーサの質量を m_t 、加速度を a_t とすると

$$m_t a_t = K + P + F$$

ここに、 K : 体積力、 $P = -V \text{grad } p$: 圧力による力、 p : 圧力、 V : トレーサの体積、 F : 流体とトレーサの間の相対運動に基づく流体力。 F はきわめて複雑な内容を含んでおりこれを正確に与えることは難しい。最も単純な場合として F として定常抗力のみを、 K として重力のみを考える。抗力係数を C_D 、トレーサの断面積を S 、流体、トレーサの密度をそれぞれ ρ_f, ρ_t 、重力加速度を g 、相対速度を Δu とするとトレーサの運動方程式は

$$\rho_t V a = \rho_t V g - V \text{grad } p - \frac{1}{2} \rho_f C_D |\Delta u| \Delta u \cdot S$$

一方、流体の運動方程式は粘性を無視すると、

$$\rho_f a_f = \rho_f g - \text{grad } p$$

ここに a_f : 流体粒子の加速度、したがって両者の運動の

差は

$$\rho_t a_t - \rho_f a_f = (\rho_t - \rho_f)g - \frac{1}{2} \rho_f C_D \frac{S}{V} |\Delta u| \Delta u$$

この式からわかるように、 $\rho_t \approx \rho_f$ のとき、たとえば水流中の固体あるいは気体トレーサ、気流中のミストあるいは固体トレーサの場合には、トレーサの運動は流体粒子の運動と必ずしも一致しない。

しかし、 $\rho_t \sim \rho_f$ とみなすことができ、しかもトレーサまわりの相対流れのレイノルズ数 R_e がきわめて小さいときには、固体トレーサの C_D は Stokes の式: $C_D = 24/R_e$ 、気体トレーサの C_D は Hadamard - Rybczynski の式: $C_D = (8/R_e)(2\mu + 3\mu')/(\mu + \mu')$ 、(μ は流体の粘度、 μ' は気体の粘度) で表わされるので

$$a_t - a_f = -C \Delta u$$

となる。ここは C は正の定数、上式の解は

$$\Delta u = (\Delta u)_{t=0} e^{-ct}$$

となり、相対速度 Δu は時間 t とともに指数関数的に減少する。したがって流体との密度差が小さく、粒径の小さいトレーサを少量用いれば、トレーサ注入点より十分下流におけるトレーサの運動は流体粒子の運動とほぼ等しいと考えられる。図10に、一様気流中に注入されたトレーサ粒子の速度変化の計算値を示す。¹⁰⁾

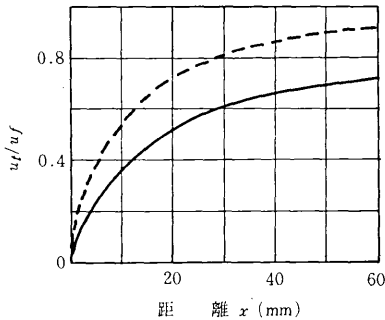


図10 トレーサ粒子の速度 u_t と流体の速度 u_f との関係 ($x=0$ はトレーサ挿入位置、 $\rho_t = 870 \text{ kg/m}^3$ 、実線は粒子径 $100 \mu\text{m}$ 、破線は粒子径 $50 \mu\text{m}$)

5. む す び

流れの可視化の手法の分類と適用流速範囲を示し、特に定量的観測を行うに際しての注意事項を2,3の例をあげて述べてきた。今後、流れの可視化は流れの場の重要な計測手段としてますます活用され、定常流および非定常流の定量的観測が要求される傾向にある。現在、可視化のデータは写真フィルム上の流跡、流脈あるいは時間線と与えられているが、これを流速などに変換するのに多大の労力を必要としている。したがって、この種の映像解析の迅速で精度の高い自動処理システムの確立が望まれる。
(1976年12月10日受理)

参 考 文 献

- 1) B. R. Clayton & B. S. Massey, Flow Visualization in Water: A Review of Techniques, J. Sci. Instr., 44-1 (1967), 2
- 2) 花輪・岡本, 流れの可視化技術について, 日本機械学会誌 70-587 (1967), 1973
- 3) 種子田, 流体運動の Visualization, 日本物理学会誌, 23-6 (1968), 430
- 4) 浅沼, 最近の流れの可視化について, 日本機械学会誌, 72-609 (1969), 1370,
- 5) 小林, 流れの可視化による非定常現象の測定, 日本機械学会第367回講習会 (1972), 117.
- 6) ターボ機械協会, 流れの可視化特集, ターボ機械, 3-3 (1975), 1
- 7) R. Reznicek, Flow Visualization (1972), Academia (Prague)
- 8) W. Merzkirch, Flow Visualization (1974), Academic Press.
- 9) L. C. Squire, The Motion of a Thin Oil Sheet under the Steady Boundary Layer on a Body, J. Fluid Mech., 11 (1962), 161
- 10) S. A. Morsi & A. J. Alexander, An Investigation of Particle Trajectories in Two-phase Flow Systems, J. Fluid Mech., 55-2 (1972), 193