展望・解説

速度分布の可視化計測法*

吉村 武晃**

Flow Visualization Technique for Velocity Distributions

Takeaki YOSHIMURA

1. はじめに

非接触で諸物理量を計測するには、光を利用する方法が一般に用いられる。この光応用計測法は、インプロセス測定における高速計測や流速測定などのように対象を乱さない計測に特に重要となっている。一方近年の電子技術はめざましく、光センサ、高速 A/D 変換器、演算処理装置、記憶装置などの周辺技術が発達し、それらを汎用的に利用できるようになっている。この電子技術と光応用計測法との結合により、画像計測、自動化計測、高精度・高速計測などの研究が盛んである。

流れ場の計測分野では、光学的手法は従来のものを用い、画像処理の手法を改良する研究が盛んであり、多くの成果が得られている。一定時間内の 1 個 1 個のトレーサ粒子の流跡線を観測する粒子追跡法¹⁾の研究はまさにその結合による高精度化、自動処理化の例である。このほか微小時間間隔の 2 枚の画像を取り込み、その間のトレーサの移動距離から速度ベクトル分布を求める相関法²⁾がある。この方法は電子技術の発展によって生み出された手法である。この方法をより汎用的に多粒子系に拡張した方法として、時空間微分算法³⁾、濃度パターン相関法^{4), 5)}、フーリエ変換法^{6) ~ 8)}等が開発されている。以上のように画像処理手法の改善に重点を置いた研究は実用上、ますます重要となっている。電子技術の発展は急速であり、それにとまった画像処理技術も今後飛躍的に向上してゆくと思われる。

しかしながら速度はベクトル量であるとともに、3次元空間にわたった測定が必要である。その上に速度は時間的に刻々と変化する。このため単に電子技術とその画像処理技術の発展を期待するだけでは速度測定には限界がある。どうしても光学的手法の開発が必要となる。特に電子技術と整合された方法の開発が重要である。電子技術の開発に比べ光学的手法の開発は遅れているが、新しい方法が少しずつ提案されている。

速度分布の計測システムは本来大量のデータをどう処理するかということである。物体像を 3 次元的に記録し、その像を再生できるホログラフィ法は最も重要であり、今後の応用研究が待たれる。この方法で重要なことは新しい機能を持った光学材料の利用方法と 3 次元再生像の解析方法である。一方スペックル法はこのホログラフィ法と相補の関係にある。スペックル法は光学的高安定性のため実用的であり、しかも光センサとして TV カメラを容易に利用できる。画像処理技術に見合った光学手法の開発を行う上で今後も重要である。またドップラ効果利用技術はすでに実用段階に入っているが、いずれもドップラシフト周波数を直接測定する方法を用いている。これに対してシフト周波数を強度に変換する方法が開発されている。この方法はデータ処理の簡略化という意味において新しい手法の示唆を与える。これらの観点から以上の三つの測定法を取り上げ、現在必ずしも十分な速度測定ができてはいないが、比較的新しい測定法を紹介したい。

*原稿受付 1991年4月23日

**正会員 神戸大学工学部

2. ホログラフィ干渉法

レーザ光の可干渉性を利用したホログラフィ干渉法は流れ場を可視化するには有用である。トレーサ粒子を記録し、任意の時刻にトレーサ粒子像を再生する技術である。例えば数十 μm 程度の速度場であるペルナル流を多重露光ホログラフィ干渉法で観測することができる^{9),10)}。さらにレーザは高輝度であり超短パルス化ができる特性がある。パルス幅 20ns のレーザ光では 450m/s 以上の高速物体をホログラム乾板に凍結記録することができる。この光源をダブルパルス化し、二重露光ホログラフィ干渉法で衝撃波の 3 次元計測する試みがある¹¹⁾。ダブルパルス光の簡便な製作法として、光ファイバによる遅延を利用する方法¹²⁾が開発されている。この他にフリンジスキニング技術やヘテロダイン技術を取り入れる研究もされているが、いずれも従来のホログラフィ干渉法の精度向上あるいは実用化をおもに目的としている。これに対して新しい記録材を用いた実時間ホログラフィ法¹³⁾や位相共役光による動的干渉法¹⁴⁾が提案されている。また CT 技術を導入した 3 次元計測法¹⁵⁾も提案されている。これらの手法について以下簡単に触れる。

a) 実時間測定法¹⁴⁾

図 1 は $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 結晶 (BSO) による物体光の記録およびその位相共役光の発生を利用して、物体の動的状態を観測する干渉計を示している。レーザ光は常に物体を照射しているとする。ある時刻 t_1 から微小時間の間だけシャッタ S_1 , S_2 が開かれ、物体光と参照光との干渉縞が BSO_1 にホログラムとして記録される。任意の時間経過後、時

図1

刻 t_2 にシャッタ S_1 , S_2 とが開かれ、参照光は M_1 で反射される。この光は BSO_1 に記録されているホログラムから物体の位相共役光を発生させる。その光波は BS_4 で反射され、CCD カメラで検出される。またレーザ光は常に物体を照射しているから、時刻 t_2 での物体光は BS_3 , M_3 , BS_5 を通って BSO_2 に書き込まれる。図から分かるように M_5 があるため、この結晶では常に参照光がポンプ光として働いている。したがって BSO_2 は物体光を書き込むと同時に、4 光波混合によるその物体の位相共役光が常に発生している。時刻 t_2 以後の CCD カメラの光電面には、時刻 t_1 での物体の位相共役光と物体の変化に追従した位相共役光が同時に到達し、それらの干渉縞が形成されている。この干渉縞はイメージプロセッサに記録され、解析される。BSO の応答時間は 0.5ms, 記憶時間は 1.5s である。結晶の応答特性が十分とは言えないが物体の動的状態が観測される。例えば塩水の拡散状況、水槽を加熱したときの対流の時間変化が観測されている。

b) トモグラフィ法

図2は干渉トモグラフィ法による流れの 3 次元計測システム¹⁵⁾である。(a)の光学系でヘリウムガスの噴流をホログラムに記録する。ガスは透明で、その流れの空間分布が屈折率分布に対応しているとする。照射光がこの流れ場を通過すると、その光路に沿った屈折率分布にしたがって位相が変調され、物体光となる。この物体光と参照光との干渉縞を乾板に記録する。このホログラムには、物体情報は光強度ではなく干渉縞の位相変化のみに記録されている。照射光がパルスレーザ光とすると、高速噴流が凍結記録される。再生は CW レーザを用いて連続的に行う。再生された像は図(b)に示すように CCD カメラで撮影され、計算処理される。撮影される量はもちろん光強度であるが、位相変調法により位相に変換される¹⁶⁾。したがって観測値はカメラの観測軸に沿って変調された位相の累積値である。この累積量は X 線 CT 法にみられる投影像と等価である。したがって逆投影法を用いて流れ場の屈折率分布を計算機によって再構成できる。この再構成を完全にするため観測角 (viewing angle) は 0 から π まで必

図 2

要である。できるだけ広角の撮影ができるように、ここでは図のように互いに垂直な 2 枚の乾板を用いて記録と再生を行う。このシステムでレイノルズ数が 2,800 と 4,300 とのジェット噴流の 3 次元構造 (断層像) が測定されている。

3. スペックル法

2 次元的速度測定にスペックルの性質を利用する技術¹⁷⁾がある。この分野での研究は大きく二つに分けられる。一つはすでに開発されている手法 (スペックル写真法¹⁸⁾, 空間フィルタ法¹⁹⁾ など) を用いるが, スペックルパターンの検出方法に改良を加え, 処理方法を改善する。他の一つは TV カメラで測定し, デジタル画像処理技術を利用するが, それに見合った光学系の改善 (TV ホログ

ラフィ法²⁰⁾, ESPI 法²¹⁾を行う。これらの研究は主に実時間性や高精度化を目指している。しかしスペックル法を流体速度の画像計測に応用する例は少ない。これはスペックルの運動は剛体運動とは正確に対応するが, 流体運動とは必ずしも対応しないからである。測定対象の適切な選択が重要である。ここではモーメント法による流速測定とそれを血流測定に応用した例を紹介する。

図 3 に示すように対象物体にレーザ光を照射すると観測面では斑点模様のスペックル発生する。観測光学系が倍率 M の結像条件を満足しているとする。物体の局所領域が速度 v で移動すると, 対応する観測面でのスペックルは速度 $V_s = Mv$ で移動する。そのため観測面での光強度 $I(t)$ の変動は, スペックル速度が大きくなれば激しくなる。時間 T の間, この光を蓄積作用のある検出器で検出するとする。その出力を $W(t)$ とすると

$$W(t) = \int_t^{t+T} I(\tau) d\tau$$

と与えられる。検出器が TV カメラであるとする。と T はフレーム時間となる。この T 時間内の平均信号を積分強度と呼ぶ。この積分強度はスペックル強度の揺らぎを平滑化する。したがって積分強度の揺らぎ量は速度の大きさに対応する。揺らぎ量は 2 次モーメント Var (分散値) によって表され, 速度 v との関係は²²⁾

$$Var = (\langle W^2 \rangle - \langle W \rangle^2) / \langle W \rangle^2 \\ = [1 + (M|v|T/2r_s)^2]^{-1/2}$$

と与えられる。 r_s は観測面での平均スペックル半径である。この r_s は観測光学系の点像応答広がりによって決められる。したがって観測光学系は結像条件さえ満足すればよく, 図 3 以外に単レンズ系でもよい。観測面でのスペックルパターンを TV カメラで検出し, そのビデオ信号 W から

図4

電氣的に Var を自動的に計算処理する。速度の絶対値を直接モニタに表示させることができ、この方法で2次元流が測定^{23), 24)}されている。図4の上の図は左へ流れる噴流の Var を8bitで示し、下二つの図はその中心軸上の Var とそれを速度に変換して示した例である。検出器として商用のTVカメラを用いるとすれば、 T はフレーム時間に固定されているために、測定される速度範囲が限定される。

通常の計測法で速度測定を行うときには流れ場の画像を凍結記録する必要がある。TVカメラは積分効果があり、それを使用するには低速流を測定対象とするか、あるいはパルスレーザによるストロボ撮影を必要とする。モーメント法の特長はこの積分効果を逆に利用して速度測定ができる点である。TVカメラの積分効果を利用しているから、光の検出効果が極めて高い。したがって測定対象に弱い光を照明しても速度測定ができる。この特長を利用すれば通常では測定できない対象の速度測定が可能となる。その例として眼底の血流計測を取り上げる。この方法は Fercher によ

図5

て可能性²⁵⁾が示された。その後、藤居らによって電子的に実現し、図5はその測定例^{26), 27)}である。血流速度が比較的に早いので、フレーム時間を小さくする必要がある。 $T=1.7\text{ms}$ 、画素数 64×64 のTVカメラを新たに製作し、使用している。図(a)の領域 c (0.5mm 四方)を測定した結果が図(b)である。測定時間は 0.3s であり、180画面のモーメント値を積算平均した結果である。スペクルを利用する測定方法では流れに乱れがあると、対応するスペクルはボイリング現象を起こし、その乱れもあわせて測定される。ボイリングの早さも速度に対応すると考えられ、速度の空間的相対値が測定される。

4. ドップラ効果測定法

ドップラ効果によるシフト周波数は速度に比例する。この周波数がオーディオ周波数領域にあると、電氣的周波数分析器により周波数が求められ、速度が求められる。周波数は高精度に測定され、この方法はドップラ速度計として実用化されている。ところが空間的な速度分布を同時に計測しようとする、測定点の数だけ周波数分析器が必要となる。実現された画像計測法として、ドッ

図6

プラシフト周波数を直接強度に変換するレーザ・ドップラ・イメージ法 (LDI 法) とレーザ励起蛍光法 (LIF 法) とが開発されている。

a) LDI 法

LDI 法は二つの異なった方法が実現されている。一つは図6に示す光学系²⁹⁾である。 x 軸方向にシート状のレーザ光を測定対象領域に照射する。散乱光は右のマイケルソン干渉計で検出される。例えばP点からの散乱光のうちT点で一部反射された光は S_1 で反射され、検出面である P' に到達する。T点を通じた一部の光は S_2 で反射され、さらにTで反射され P' に到達する。これら二つの光波は観測面で互いに干渉する。この光学系で重要な点はP点が P' 点に結像することと二つのアームに光路差があることである。この実現に一方のアーム内にガラスブロックを置いてある。さらに測定感度を上げるために鏡 S_1 をわずかに傾ける。このようにすることによりシート内の速度が一定で、散乱光の周波数が一定ならば等間隔の干渉縞が観測される。速度が空間的に分布しているとすると、干渉縞の位相がシフトする。ドップラシフト周波数が干渉縞のシフトとして観測される。測定例としてマッハ数1前後のジェット噴流がある。

他の一つは低速流を高精度に画像計測する方法である。光学系はヘテロダイン方式であり、図7^{29), 30)}に示す。TVカメラの光電面には周波数 f_0 の物体光と周波数 f_r の参照光とが入射している。レーザ光の周波数を f とすると、 $f_0 = f + f_D$ 、 $f_r = f + \Delta f$ であり、 f_D はドップラシフト周波数、 Δf は周波数変調器による周波数オフセ

図7

ットである。時刻 t での光電面 (X, Y) 上の物体光と参照光の電場は、入射角をそれぞれ ϕ_0, ϕ_r とすると

$$U_0 = A \exp [-i(2\pi f_0 t + \theta_0 - 2\pi X \sin \phi_0 / \lambda)]$$

$$U_r = B \exp [-i(2\pi f_r t + \theta_r - 2\pi X \sin \phi_r / \lambda)]$$

となる。 θ は初期位相、 λ は波長、 A, B は振幅である。この二つの光波をTVカメラで観測するとする。フレーム時間 T の蓄積効果があるから、ビデオ信号は

$$\begin{aligned} W(X, Y) &= \int |U_0 + U_r|^2 \text{rect}(t/T) dt \\ &= T(|U_0|^2 + |U_r|^2) \\ &\quad + 2TAB^* \text{sinc}[\Delta F(X, Y)T] \\ &\quad \times \cos(2\pi f_x X + \Delta\theta) \end{aligned}$$

と与えられる。ここで $\Delta\theta = \theta_0 - \theta_r$ である。光電面には空間周波数 $f_x = (\sin \phi_0 - \sin \phi_r) / \lambda$ の干渉縞が形成されている。物体光と参照光との差周波数 $\Delta F(X, Y) = f_0(X, Y) - f_r$ が零の時、この干渉縞は静止している。 $\Delta F(X, Y) \neq 0$ のとき干渉縞はその差周波数で移動する。TVカメラはフレーム時間 T にわたって入射光強度を平均化する。そのため干渉縞の振幅は係数 $\text{sinc}[\Delta F(X, Y)T]$

図8

にしたがって減少する。すなわち TV カメラはバンド幅 $1/T \sim 30\text{Hz}$ のローパスフィルタとして働く。もし $\Delta F(X, Y) \leq 1/T$ ならば干渉縞をコントラスト良く検出できる。ビデオ信号をハイパスフィルタに通し、検波整流すれば $\Delta F \sim 0$ の領域がモニタ上に明るく表示される。参照光の周波数オフセット Δf を変えれば任意のドップラシフト周波数領域が検出される。図 8 は矩形断面の y 軸上の速度分布を実時間で 2 次元表示した結果である。

b) LIF 法³¹⁾

蛍光分子が運動しているとその方向では吸収スペクトルがドップラシフトする。蛍光分子に共鳴吸収するレーザー光がその運動方向に照射されているとする。蛍光分子の吸収線はドップラシフト周波数だけずれるから、共鳴吸収率が変化する。吸収率が変化すると、それにもなって発生する蛍光強度が変化する。この蛍光強度を測定すれば分

子の速度すなわち流れ場の速度が求められる。この方法は多く研究されているが、2 次元場の速度ベクトルが求められる方法を示す。図 9(a) は測定装置である。周波数 f_0 のシート状のレーザー光を 1, 2, 3 の方向から照射する。レーザー光 4 はレーザー光 3 に重ねられ、その周波数は $f_s = f_0 + \Delta f$ であり、 Δf はわずかであるとする。実際はアルゴンイオンレーザーが用いられ、レーザー共振器内のエタロンを調整し、 f_0 と f_s とが作られる。蛍光分子は I_2 が用いられる。これら四つのレーザー光が順次切り替えられ、蛍光はエリアセンサで検出される。図(b) は図(a) を観測方向からみた座標系である。観測領域の蛍光分子の速度ベクトル v はレーザー光 1, 2 の方向成分 v_1, v_2 を持つとする。それぞれの照射レーザー光でのドップラシフト周波数は $f_{D1} = v_1/\lambda$, $f_{D2} = v_2/\lambda$, $f_{D3} = f_{D4} = (-v_1 + v_2)/(\sqrt{2}\lambda)$ と表される。吸収線は用いる範囲で $g = af + b$ のように線形に近似できるとする。これはアルゴンレーザー光の周波数 f_0 は I_2 分子の吸収中心から低周波数側に 1.1 GHz 離れており、 Δf を数百 MHz 以下とすることにより成り立つ。このときそれぞれのレーザー光による吸収率は

$$g_1 = a[f_0 + (v_1/\lambda)] + b$$

$$g_2 = a[f_0 + (v_2/\lambda)] + b$$

$$g_3 = a[f_0 + (-v_1 + v_2)/(\sqrt{2}\lambda)] + b$$

$$g_4 = a[f_0 + \Delta f + (-v_1 + v_2)/(\sqrt{2}\lambda)] + b$$

と与えられる。この連立方程式を解くと v_1, v_2 が得られる。 v_1 のみを示すと

$$v_1 = \lambda \Delta f [g_1 - g_2 + (g_2 - g_1)/\sqrt{2}] / (g_4 - g_3)$$

となる。 $g_1 \sim g_4$ を測定すれば速度成分が求められる。この方法で N_2 ガスによる超高速噴流の 2 次元速度分布が求められている。

5. おわりに

速度測定の最大の課題は大量のデータをいかに記録し、解析するかにある。速度はベクトル量であり、3 次元で表される。流れは立体的であり、これも 3 次元で表される。さらに非定常流とすれば時間の次元も必要である。この 7 次元量を記録するにも、またそれを解析するにも困難が付きまとう。今後これらを乗り越えるにはここで取り上げた三つのアプローチがあると思える。(1): とも

図 9

かくも記録することに重点を置き、後からゆっくり読みだし解析を行う。2章に示したように3次元像を記録するホログラフィ法に改良を加え、動的現象を記録できるようにする。その解析にはCT手法を適用し、3次元解析を可能とさせる。

(2): もともと7次元量としても後から解析により復元できる量を削除して測定する。さらに直接速度に対応する量を記録するように工夫し、記録容量を極端に減らす。3章に挙げたモーメント法は一つの例と思う。モーメント値は速度の大きさを直接表す。しかも速度の空間分布の空間微分からは速度のベクトルが求められる可能性がある。

(3): 速度は直接測定されず、対象物体の移動量から得られる。このことが測定を困難にしている。ところがドップラ・シフト周波数は直接速度を表す。この周波数シフトを光強度に変換して測定すれば測定が容易になる。3章に挙げた方法はその例である。

以上のように速度分布計測の新しい手法の開発は、電子的画像処理技術に整合された光学的手法を目指すことによって可能となると思われる。

文 献

- 1) 近江: 第5回流れの計測大阪シンポジウム講演要旨集, (1989) 118.
- 2) 植村, 山本, 幸川: 可視化情報, 10-38 (1990) 196.
- 3) 安藤: 計測自動制御学会論文集, 22-12 (1986).
- 4) 筧: 流れの可視化, 3-10 (1983) 189.
- 5) 木村, 高森, 井上: 流れの可視化, 6-22 (1986) 269.
- 6) 奥野, 坂本: 可視化画像のフーリエ変換による流場計測 (1990) 5.
- 7) C. E. Willert and M. Gharib: Proc. of 5-th. Intern. Symp. on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon (1990) 18-1.
- 8) T. Murakami, J. Wakasugi, Y. Harada and S. Hatano: 4-th Intern. Conf. on Liquid Atomization and spray systems, Sendai (1988) 305.
- 9) M. Ueda, K. Kagawa, K. Yamada, C. Yamaguchi and Y. Harada: Appl. Opt., 21-18 (1982) 3269.
- 10) 原田, 角田, 重盛, 宮坂, 上田: 応用物理, 59-10 (1990) 1385.
- 11) 安, 玉木, 永野, 柏木: 日本機械学会論文集 (B編) 56-529 (1990) 78.
- 12) 梅津, 江頭, 波多野, 村上: 九州大学工学集報, 61-3 (1988) 215.
- 13) J. P. Huignard and J. P. Herriau: Appl. Opt., 16-7 (1977) 1807.
- 14) S. Chang, M. Isono and T. Sato: Appl. Opt., 27-22 (1988) 4735.
- 15) D. W. Watt and C. M. Vest: Experiments in Fluids, 8 (1990) 301.
- 16) D. W. Watt and C. M. Vest: Experiments in Fluids, 5 (1987) 401.
- 17) 吉村: 光応用計測技術と動向, 第1章, (1990) pp.1-59, アイビーン.
- 18) K. Nakagawa, T. Takatsuji and T. Minemoto: Opt. Commun., 76 (1990) 206.
- 19) Y. Aizu and T. Asakura: Appl. Phys. B, 43 (1987) 209.
- 20) E. Vikhagen: Appl. Opt., 29 (1990) 137.
- 21) S. Nakadate and H. Saito: Appl. Opt., 24 (1985) 2172.
- 22) T. Yoshimura: J. Opt. Soc. Am. A, 3 (1986) 1032.
- 23) T. Yoshimura, H. Saito and N. Wakabayashi: Opt. Commun. 52 (1984) 265.
- 24) 吉村, 斉藤, 石村, 若林: 光学, 14 (1985) 198.
- 25) A. F. Fercher and J. D. Briers: Opt. Commun. 37 (1981) 326.
- 26) 藤居: 病態生理, 9 (1990) 137.
- 27) 藤居, 新家, 江口, 横倉: 第51回応用物理学会学術講演会講演予稿集, 第3分冊 (1990) 821.
- 28) F. Seiler and J. Srulijes: Proc. of 3rd Intern. symp. on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon (1986) 19-1.
- 29) T. Yoshimura, H. Yamamoto and N. Wakabayashi: Opt. Commun. 40 (1981) 10.
- 30) T. Yoshimura, H. Sakashita and N. Wakabayashi: Appl. Opt. 22 (1983) 2448.
- 31) B. Hiller, L. M. Cohen and R. K. Hanson: 4-th Int. Symp. on Flow Visual., Paris (1986) B2-2.