

最近の技術から

動的スペckルの複数開口検出による流速測定

相津 佳永

興和(株)調布研究所 〒182 調布市調布ヶ丘 3-3-1

1. ま え が き

光を利用した流速測定法は、非接触無侵襲計測という特徴とともに、他の方法では困難な微小領域中の流速や微小流量を測定できるという特色をもつ。代表的な測定法にレーザー・ドップラー法¹⁾、空間フィルター法²⁾、相互相関法³⁾等があるが、これらは散乱粒子濃度が高く、また不用散乱光が多くなると、信号の S/N 比が劣化し測定困難になるため、生体血流計測等の応用では十分有効な結果を得られないのが現状である。近年、レーザー光が散乱粒子を含む流体や生体組織等によって散乱される現象を、動的スペckルとして計測する手法が研究され、実際に皮膚血流^{4,5)}や眼底血流^{6,7)}の計測に応用されている。ここでは、微小領域中の散乱粒子濃度の高い流体から得られる、微弱強度の動的スペckルを複数の微小円形開口^{8,9)}を介して光電検出し、光強度に応じた離散的な光電子パルス計数値から直接相関関数を求める光子相関法によって、流速を測定する方法について述べる。

2. 微小領域流速測定

図1の光学系において、細管内の探測領域を管径より大きなビーム径のレーザー光で暗視野照明する。流体中の粒子からの散乱光は二重回折系および拡大結像系を介して検出面に集光され、ここに形成される像面スペckルの強度変動が、複数開口で検出される。光電子増倍管の出力信号は光子計数ユニットを介して、デジタル相関

器で光子相関関数が測定され、 $1/e$ に減衰する時間相関長 τ_c が解析される。この相関長が測定すべき流速と1対1に対応する。複数開口は、図のように直径 a の微小円形開口を間隔 d で格子状に規則配列してある。また、フーリエ面上の瞳 P はスペckル径を調節し、マスク M は探測領域を制限する。

粒子濃度が高くなると多重散乱などの影響で、像面スペckルは並進せずにボイリング的な運動となる。そこで一般に測定には点状開口検出による自己相関法¹⁰⁾が適用されるが、散乱検出光が微弱な場合は光子相関曲線の収束にかなりの観測時間を要する。これを複数開口で検出することにより、信号成分の光量増加による観測時間の短縮が期待できる。これは信号光量が m 倍になれば $1/m^2$ の観測時間で同じ収束性が得られるという、光子相関の性質による。一方、ボイリング運動の場合は隣接開口間の相互相関の影響⁹⁾がほとんど無視できるため、開口間隔 d は平均スペckル径の3倍程度まで小さくできる。この間隔 d はマスク径と併せて開口数を規定する。

直径約 $1\mu\text{m}$ のアクリル粒子で白濁した食塩水を、内径 $110\mu\text{m}$ のガラス管に流速 2cm/s で流したときの光子相関曲線を図2に示す。マスク径 1mm 、結像倍率 $20\times$ で探測領域は $50\mu\text{m}\phi$ である。平均スペckル径 $65\mu\text{m}$ に対し、(a)と(c)は $50\mu\text{m}\phi$ の単一開口、(b)

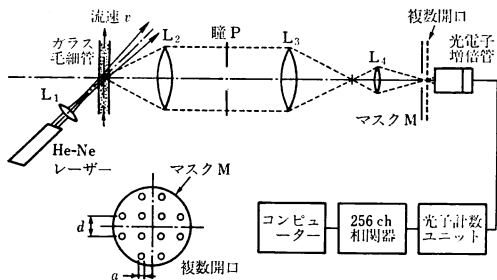


図1 流速測定の基本光学系

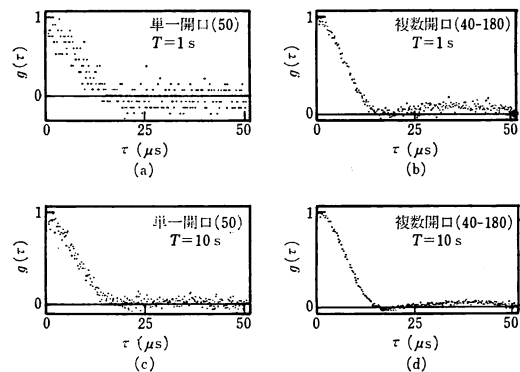


図2 光子相関データの例

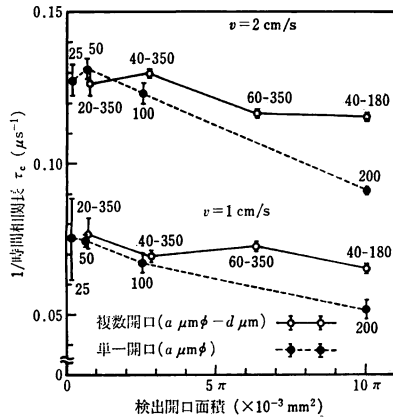


図3 速度応答性の比較

と(d)は直径 $40 \mu\text{m}$ 、間隔 $180 \mu\text{m}$ の複数開口を用いて検出し、おのおの 1 s および 10 s 観測した結果である。相関データの収束性は複数開口によりかなり改善され、そのぶん観測時間を短縮できることがわかる。実際はさらに平滑化処理も併用する。実験で得た測定精度は、流速 $0.5 \sim 50 \text{ mm/s}$ 、流量 $0.004 \sim 0.4 \mu\text{l/s}$ の範囲で誤差 3% 以内であった。

3. 積分効果

検出開口面積の拡大に伴い、考慮すべき空間積分効果として二つの問題がある。第1は、直流成分の増加によるスペckル信号のコントラストの低下である。一般にコントラストの低下は光子相関データの収束性を劣化させるが、複数開口検出の場合、コントラストの低下より信号成分の絶対光量の増加の寄与が大きく、最終的な収束性は図2のように改善されることがわかる。また、複数開口と同一面積の径の大きな単一開口との比較では、複数開口のほうが検出信号のコントラストがよく有利である⁸⁾。

第2は積分効果による速度応答性の低下である。これは、自己相関関数の時間相関長 τ_c が積分効果に伴って長くなる性質¹¹⁾によるもので、一定流速に対するスペckル信号の周波数成分の低下を意味する。図3に、種々の複数開口と単一開口の速度応答性を比較した実験結果を示す。開口面積の増加に伴う時間相関長の逆数 $1/\tau_c$ の低下の割合は、複数開口のほうが単一開口に比べて小さく、その差は開口面積の拡大とともに大きくなっている。これより、速度応答性においても複数開口の有用性

がわかる。ただし、複数開口内の各微小開口径は平均スペckル径と同程度以下にすることが重要である。

4. あとがき

動的スペckルの複数開口検出を利用した、光子相関法による微小領域流速測定について述べた。本方法では流速の絶対値や管内流速分布の測定は困難であるが、一方微弱光から安定した結果を得ることができる。そこで、単純な流速よりもむしろ生体分野における血流速度や血行動態の時系列変化、および動的光散乱に基づくバクテリア等微小動物の不規則な運動(挙動、活性等)の定量計測に有効であると考えている。

文 献

- 1) Y. Yeh and H. Z. Cummins: "Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer," *Appl. Phys. Lett.*, **4** (1964) 176-178.
- 2) M. Gaster: "A new technique for the measurement of low fluid velocities," *J. Fluid Mech.*, **20** (1964) 183-192.
- 3) M. H. Butterfield, G. F. Bryant and J. Dowsing: "A new method of strip-speed measurement using random-waveform correlation," *Trans. Soc. Instrum. Technol.* (1961) 111-119.
- 4) H. Fujii, T. Asakura, K. Nohira, Y. Shintomi and T. Ohura: "Blood flow observed by time-varying laser speckle," *Opt. Lett.*, **10** (1985) 104-106.
- 5) B. Ruth: "Superposition of two dynamic speckle patterns: An application to non-contact blood flow measurements," *J. Mod. Opt.*, **34** (1987) 257-273.
- 6) A. F. Fercher and J. D. Briers: "Flow visualization by means of single-exposure speckle photography," *Opt. Commun.*, **37** (1981) 326-330.
- 7) Y. Aizu, K. Ogino, T. Koyama, N. Takai and T. Asakura: "Evaluation of retinal blood flow using time-varying laser speckle," *Laser Anemometry in Fluid Mechanics—III* (Ladoan, Lisbon, 1988) pp. 55-68.
- 8) 高井信勝, 朝倉利光: "動的スペckルの複数開口検出特性", *光学*, **11** (1982) 291-297.
- 9) Y. Aizu, K. Ogino and T. Asakura: "A laser velocimeter using a random pattern," *Opt. Commun.*, **64** (1987) 205-210.
- 10) T. Asakura and N. Takai: "Dynamic laser speckles and their application to velocity measurements of the diffuse object," *Appl. Phys.*, **25** (1981) 179-194.
- 11) T. Iwai, N. Takai and T. Asakura: "The autocorrelation function of the speckle intensity fluctuation integrated spatially by a detecting aperture of finite size," *Opt. Acta*, **28** (1981) 1425-1437.

(1988年8月9日受理)