

レーザー計測の基礎 I：速度計測

相津 佳永, 岩井 俊昭*, 朝倉 利光**

室蘭工業大学 機械システム工学科 (〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1)

*北海道大学 電子科学研究所電子計測開発施設 (〒060-0812 北海道札幌市北区北12条西6)

**北海学園大学 工学部電子情報工学科 (〒064-0926 北海道札幌市中央区南26条西11-1-1)

Fundamentals of Laser Measurements I: Velocity Measurements

Yoshihisa AIZU, Toshiaki IWAI*, and Toshimitsu ASAKURA**

Department of Mechanical System Engineering, Muroran Institute of Technology

27-1 Mizumoto, Muroran, Hokkaido 050-8585

* Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University

6 Nishi, Kita 12-jou, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0812

** Faculty of Engineering, Hokkai-Gakuen University

11-1-1 Nishi, Minami 26-jou, Chuo-ku, Sapporo, Hokkaido 064-0926

(Received April 7, 1999)

1. はじめに

1960年にレーザー光が発明されてから、間もなく40年が経過しようとしている。この間に、レーザー光は光学をはじめ関連する科学・工学の諸分野へ、様々な形で計り知れない貢献をしてきた。レーザー計測は、その最も代表的な例に挙げられよう。レーザー光がもつコヒーレンス性、単色性、直進性、集光性等の特色は、計測分野において非接触、無侵襲、高感度、高精度な測定法を巧みな形で提供してきた。そして、その用途は純粋科学から応用科学、工学へと広い領域にわたっている。

レーザー計測法が対象とする物理量や物理現象¹⁻³⁾には、変位、変形、速度、振動、距離、長さ、大きさ、形状、粗さなど種々のものが挙げられる。その中でもレーザー光の出現後の比較的早い時期に注目され、世界中の数多くの科学者が最も積極的に参画してきた研究対象はレーザー光利用による速度計測であろう。そういう意味で、速度計測の原理を理解することは、レーザー計測の基本を学ぶ際の最初のステップとして効果的である。本講義では、レーザー光を利用した速度計測法として、代表的なスペックル法、ドップラー法、そして原理的にはインコヒーレント光でも利用できるが、上の2つの方法と関連の深い空間フィルター法の3つを取り上げ、その原理と特徴、信号の取り扱い方と解析処理などの基礎的事項を中心に紹介しよう。これらの速度計測法は、流体や粉体計測、燃焼解析、生体計測などの研究・技術開発にすでに幅広く使われており、種々の機種も市販されている。

2. スペックル法

2.1 動的スペックル現象

レーザー光が、光の波長に比べて十分粗い不規則な物体表面によって散乱されると、Fig.1に示すような明暗のランダムな斑点模様を観測される。このようなパターンをスペックルパターン⁴⁾、また個々の明暗の斑点を単にスペックルと呼んでいる。スペックルは古くはニュートンの時代から知られていた物理現象であるが、レーザー光の出現により初めて身近なものとなった。スペックルパターンは、Fig.2に示すように光の回折面(a)、結像面(b)のどちらにおいても観察することができる。(a)では物体表面上の各点で散乱されたレーザー光の波面が、ランダムな位相変動を受けて回折面上で重ね合わさり、(b)では観測点に対応

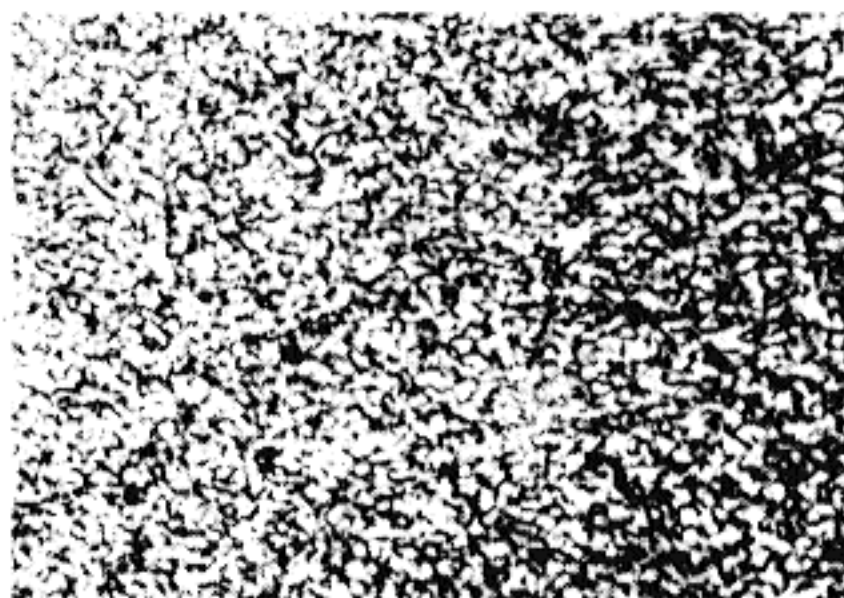
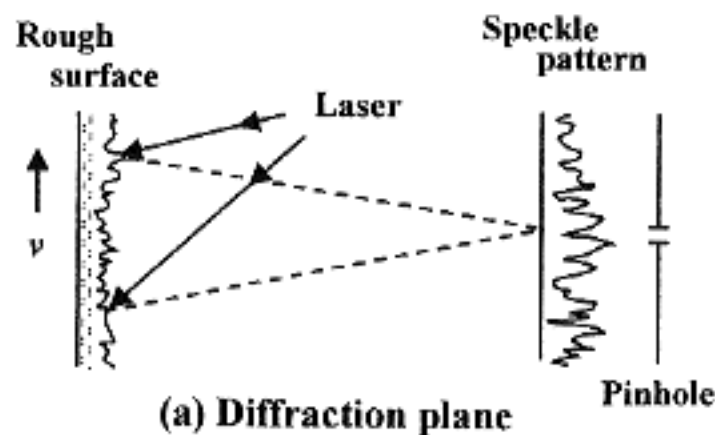
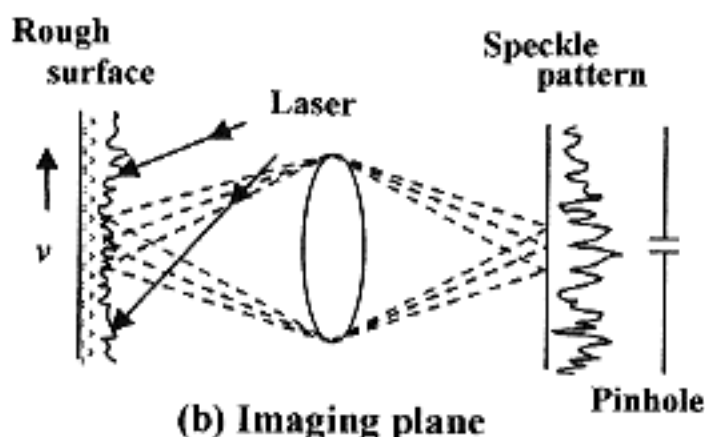


Fig.1 Speckle pattern.



(a) Diffraction plane



(b) Imaging plane

Fig. 2 Formation of speckle patterns in the diffraction plane (a) and imaging plane (b).

する物体面上の1点と、光学系の伝達関数で決まる有限近傍領域(点像広がり)からのランダムな位相をもつ散乱光波が幾つも重ね合わさって、ともにランダムな干渉を生じた結果ととらえることができる。

スペックル現象の解析には、そのランダム性ゆえに確率密度関数や相関関数などの統計的手法⁴⁾が用いられ、変位、変形、粗さ計測などに利用⁵⁾されるが、ここでは特に物体が面内方向に運動する場合に観測されるスペックル時間変動特性に注目しよう。物体が移動すれば観測面上の任意の点に寄与する散乱光波も時々刻々入れ代わるため、個々のスペックルはその明暗状態を変化させることが容易に想像できる。微小開口を通して検出した光強度変動信号 $I(t)$ は、Fig. 3 (a)のごとくスペックルの変動に応じた不規則信号になる。TEM₀₀モードのガウスレーザービームで物体を照明し、遠方回折領域に生じるスペックルパターンを考えてみよう。その統計的特性は、スペックル強度変動の規格化時空間相関関数^{6,8)}

$$R(x, \tau) = \exp\left[-\frac{(\tau - \tau_d)^2}{\tau_c^2}\right] \exp\left[-\frac{x^2}{\Delta x^2} + \frac{\tau_d^2}{\tau_c^2}\right] \quad (1)$$

によって調べることができる。ここで x はスペックル面上における任意の2点間の距離、 τ は相関関数の時間軸である。また、 τ_c はスペックルの時間相関長、 τ_d は相互相関関数の遅れ時間を表し、それぞれ

$$\tau_c = \frac{1}{v} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{w^2} + \frac{\sigma^2}{\Delta x^2}}} \quad (2)$$

$$\tau_d = \frac{\tau_c^2}{\Delta x^2} \sigma v x \quad (3)$$

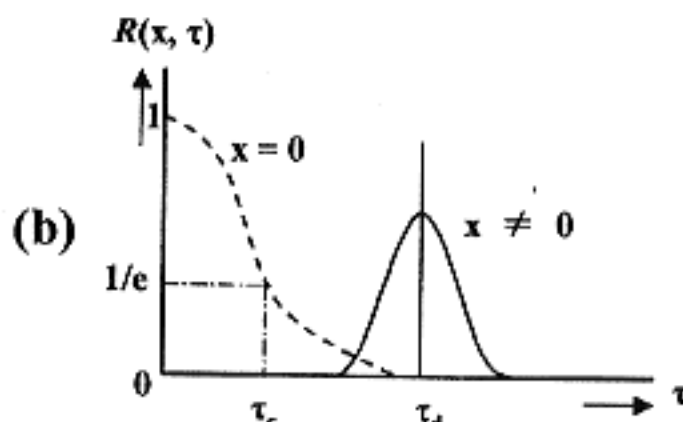
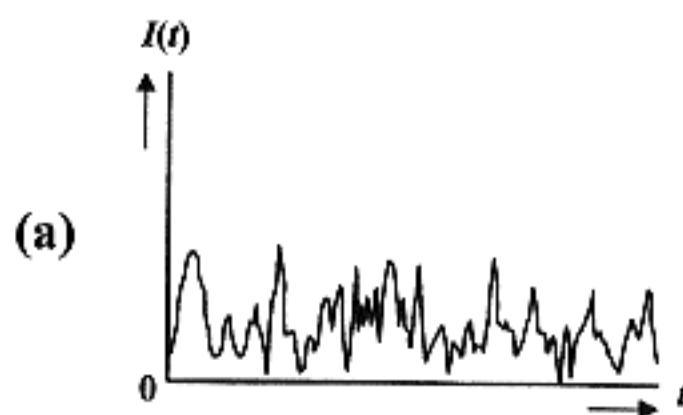


Fig. 3 Schematic illustrations of speckle signals (a) and the space-time correlation function (b).

である。ここで v は物体の移動速度である。また、 $\sigma = (R/\rho + 1)$ であり、 R は物体から観測面までの距離、 ρ は物体面上での照射ビーム波面の曲率半径を示す。さらに、 $\Delta x = \lambda R/\pi w$ は観測面における平均スペックル径であり、 λ は照射レーザー光の波長、 w は物体面上での照射レーザービーム径を表す。(1)式で $\tau = 0$ とおくと、

$$R(x, 0) = \exp\left[-\frac{x^2}{\Delta x^2}\right] \quad (4)$$

となる。これより、スペックルパターンが有する空間的な相関領域の大きさが平均スペックル径であることがわかる。一方、(1)式で $x = 0$ とすると観測面上でのスペックル強度の時間相関関数

$$R(0, \tau) = \exp\left[-\frac{\tau^2}{\tau_c^2}\right] \quad (5)$$

が得られ、相関関数の広がり τ_c が時間相関長 τ_c で評価できる。つまり、時間相関長 τ_c を計測することにより、(2)式から速度 v が決定できることがわかる。(1)式を図式的に示したものがFig. 3 (b)^{6,8)}である。図中の $\tau = \tau_d$ にピークをもつ相関成分は、スペックルが一方の検出点を横切ったのちに時間遅れを伴って他方の検出点を通過する運動によるもので、これがスペックルの並進運動を表している。これに対し、個々のスペックルが並進せずに、互いに無関係に明暗の変動を繰り返す現象をボイリング運動と呼ぶ。スペックルがどちらの運動形態をとるかは光学系に依存するため^{6,8)}、スペックル変動を検出して速度を測定する場合、これらの運動形態の違いを考慮することが大切である。

2.2 スペックル速度計^{7,8)}

スペックルを利用した代表的な速度測定法として、(a)自

己相関法, (b)相互相関法, (c)零交叉計数法, (d)空間フィルター法の4つを説明しよう。

(a)自己相関法 スペックル面上の任意の一点で強度変動を検出すれば, その自己相関関数は(5)式で与えられる。これはFig.3 (b)に示す $x=0$ のときの分布(波線で表示)になり, 相関関数が $1/e$ に減衰する点の遅れ時間である τ_c が時間相関長を与え, (2)式より光学系パラメータが規定されれば, τ_c の測定により速度 v を求めることができる。自己相関法はスペックルが並進・ボイリングのどちらの運動をする場合にも有効である。

(b)相互相関法 観察面上である距離だけ離れた2点に光検出器をおき, 2つのスペックル強度変動信号の相互相関関数を計測すれば, Fig.3 (b)で $x \neq 0$ の場合のように $\tau = \tau_d$ にピークをもつ分布が得られる。(2)式及び(3)式の光学系のパラメータが既知であれば, 遅れ時間 τ_d より物体速度が求められる。この方法はボイリング運動には適用できないが, 物体の移動方向を τ_d の符号から決定できる利点がある。

(c)零交叉計数法 スペックル強度変動の時間相関長は物体速度に反比例するので, 単位時間内に検出される変動スペックルの個数を数えれば, 物体速度を求めることができる。出力信号の直流分を差し引き, 強度微分信号にした上で, 信号が零レベルを交叉する回数 N を数える。 $N = Kv$ (K は比例係数)なる関係が得られ, 使用する光学条件により K も決まるので, 速度が決定される。この方法は出力信号を直接計数するので, 実時間測定に有効であるが, 時間微分が雑音の影響を受けやすいため, 有限開口による空間積分⁹⁾が併用される。

(d)空間フィルター法 後で述べる空間フィルター速度計において, 測定対象となる移動物体像の代わりに並進スペックルを計測すれば, その速度が求まる。いま, 格子の縞間隔を p , 格子面の縞を横切って移動するスペックルの並進速度を v_0 とすれば, 透過光を検出することにより縞の周期的な透過率分布に従った周期信号が得られ, その周波数 f_0 は $f_0 = v_0/p$ で与えられる。 f_0 の測定により速度 v_0 を求めたのち, 既知の光学条件の下で得られる物体速度とスペックル並進速度の関係^{6,8)}を使って, 物体速度 v が決定される。この方法もボイリングスペックルには適用できない。

時間変動スペックルはここで紹介した粗面物体の例だけでなく, 散乱粒子を含む流体や揺らぎのある大気などの媒質を介しても観測することができる。さらに, 生体組織や植物等の生物体に対しても観測することができるが, これらは特にバイオスペックル¹⁰⁾と呼ばれ, 血流など生命活動に関する複雑な動きの解析に応用される。

3. ドップラー法

3.1 光のドップラー効果と測定原理

レーザー光の出現によって容易に観測できるようになった光のドップラー効果を利用し, 1964年にレーザードップラー速度計(Laser Doppler Velocimeter: LDV)が提案¹¹⁾された。LDVは非接触, 無侵襲, 高空間分解能, 高時間

応答性, 広ダイナミックレンジなどの特長を有し, 今日の代表的な速度計測法である。しかし, 反面では光学系設定に専門知識と熟練を要する, 光散乱体が必要である, 装置が高価であるなどの難点が挙げられよう。

LDVは光の散乱現象, ドップラー効果, ヘテロダイン検波の3つの作用を巧みに結合した測定法である。Fig.4において, 静止光源から発した周波数 f_0 の単色光は v なる速度ベクトルで運動する粒子によって散乱される。散乱光はドップラー効果による周波数偏移を受け, $f_0 + f_d$ なる周波数の光として静止した光検出器で観測される。このときの周波数偏移量 f_d は,

$$f_d = \frac{(k_i - k_s) \cdot v}{2\pi} \quad (6)$$

で与えられる。ここで k_i, k_s はそれぞれ照射光と散乱光の波数ベクトルで, $k_i - k_s$ は散乱ベクトルと呼ばれる。粒子速度 $|v|$ が光速に比べて非常に小さければ, ドップラー偏移周波数 f_d も f_0 に比べて極めて小さく, $|k_i| \approx |k_s|$ とみなせる。これより f_d を知ることで散乱ベクトル方向への速度の投影成分が求められる。ここで物体速度を1m/s, 光の周波数をおよそ 10^{14} Hzとして, ドップラー偏移周波数を計算すると, 大略 10^6 程度になる。これは光の周波数に比べて9桁も小さく, この偏移を直接計測することは現実には難しい。そこで光のうなり(beat)現象を利用したヘテロダイン検波が使われる。ドップラー偏移した散乱光に, もとの光源からの光の一部を参照光として重ね合わせ, 自乗検出器で受けることにより, 両周波数の差であるドップラー偏移周波数 f_d で振動するビート信号が得られる。一般に f_d は通常の測定器で十分計測可能なオーダーである。

3.2 測定光学系と信号特性

Fig.5に代表的な3種類のLDV光学系構成^{12,13)}を示す。(a)は参照光法であり, レーザー光源からのビームを2つに分け, 粒子の移動する点で交叉させる。片方のビームの伝搬方向に光検出器をおき参照光として, もう1つのビームによる粒子からの散乱光を重ね合わせることでヘテロダイン検波を行う。(b)の差動型法は(a)と似たような2ビーム交叉型の照射系であるが, ビーム交叉領域からの散乱光を

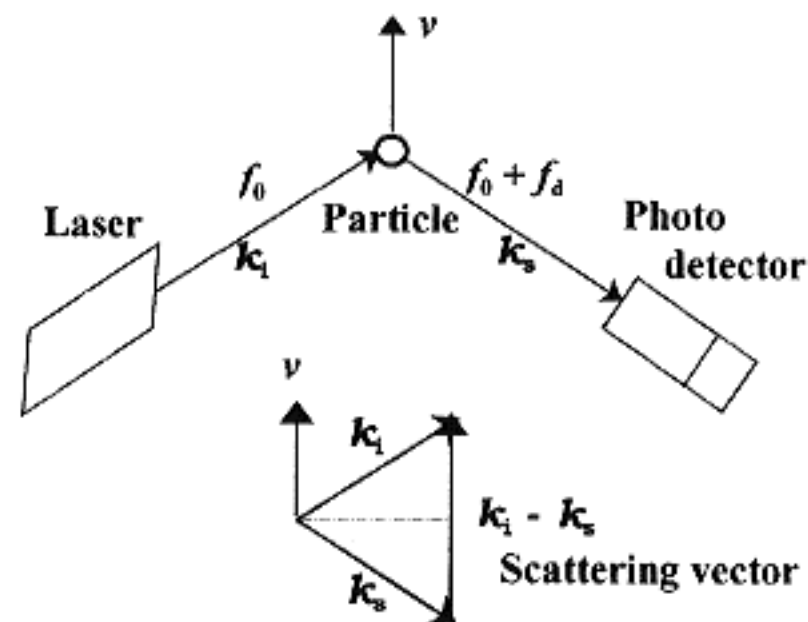


Fig.4 Laser Doppler effect.

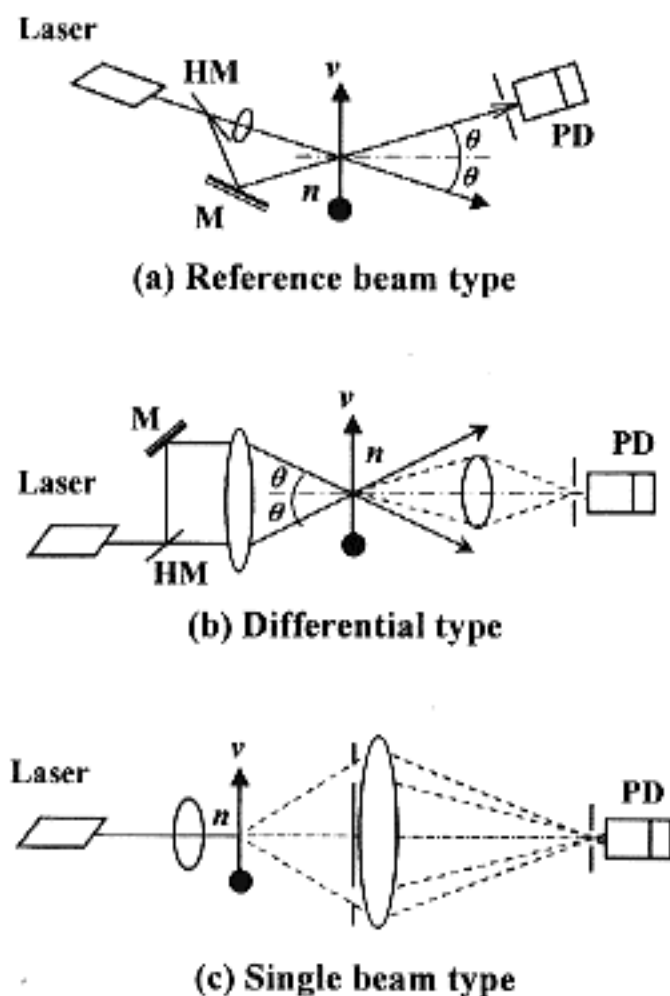


Fig.5 Typical laser Doppler optical systems: (a) reference beam type, (b) differential type, and (c) single beam type.

結像レンズで集光する点異なる。(c)に示す単一ビーム法は、1つのビーム照射で得られる散乱光を異なる2方向で検出する。(b)と(c)は自己比較法ともいわれ、前者は異なる2照射ビームから同一方向への散乱光同士が、後者では1照射ビームから異なる2方向への散乱光同士が、互いに一方が他方を参照光としてヘテロダイン検波を行う点に特徴がある。(a)と(c)は受光開口を制限しなければならず、信号強度が弱くなる点や光学系の変動の影響を受けやすい点が問題である。一方(b)は、広い受光開口で光検出できるため強度的に有利であるが、2本のビームを正確に交叉させる必要がある。実用的に最も多用されている方式は、(b)の差動型である。

そこで差動型におけるビート信号の特性⁵⁾をみてみよう。Fig.6 (a)に示すように、2本の照射ビームの波数ベクトルを k_1, k_2 とし、両ビームからの各散乱光波を波数ベクトル k_s の方向で検出するとき、各電場 E_1, E_2 は

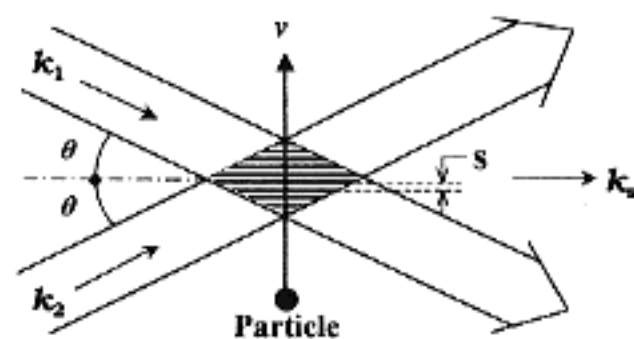
$$E_1 = A_1 \exp[-i\{\omega t + (k_s - k_1) \cdot vt - k_s \cdot r\}] \quad (7)$$

$$E_2 = A_2 \exp[-i\{\omega t + (k_s - k_2) \cdot vt - k_s \cdot r + \phi\}] \quad (8)$$

と表される。ここで A_1, A_2 は散乱光振幅、 $\omega = 2\pi f_0$ は照射レーザー光の角周波数、 r は任意の原点に関する位置ベクトル、 ϕ は E_1 と E_2 の位相差である。自乗検出された信号は、

$$I = C(E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2)^* \\ = C[|A_1|^2 + |A_2|^2 + 2|A_1||A_2|\cos\{(k_2 - k_1) \cdot vt + \phi\}] \quad (9)$$

となる(C は比例係数)。右辺[...]内の最初の2項がペDESTAL成分と呼ばれる低周波成分を表し、 \cos 項がドップラー



(a) Beam intersection

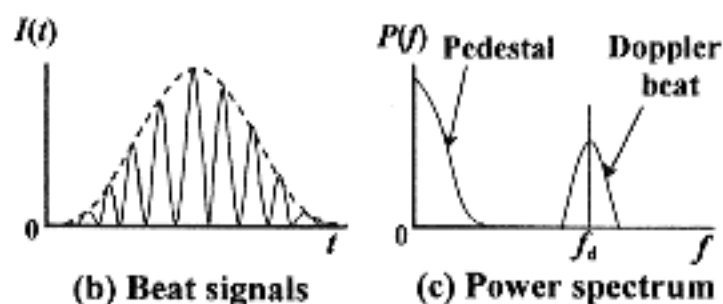


Fig.6 (a) Beam intersection in the differential-type optical system, and schematic illustrations of Doppler beat signals (b) and power spectrum (c).

ビート成分である。ビート周波数 f_d は、

$$f_d = \frac{(k_2 - k_1) \cdot v}{2\pi} = \frac{2n|v|\sin\theta}{\lambda} \quad (10)$$

となる。ここで $|k_1| = |k_2| = 2\pi n/\lambda$ であり、 n は測定領域媒質の屈折率、 λ は照射レーザー光の波長である。上式は散乱方向の波数ベクトル k_s に無関係なことから、広い受光開口を利用できることがわかる。

2ビームの交叉領域には、Fig.6 (a)にあるように入射波面の位相差による干涉縞が形成されていると考えると、その縞間隔 s は幾何学的に

$$s = \frac{\lambda}{2n\sin\theta} \quad (11)$$

で与えられる¹³⁾。粒子が速度 $|v|$ で縞を直角に横切って移動するとき、散乱光強度はFig.6 (b)のようにガウスビーム強度分布の包絡線を有する周期信号となり、その周波数は $|v|/s$ より求まる。以上のことが(10)式に一致することはすぐにわかるであろう。これが差動型を分かり易く説明したブリッジモデルである。干涉縞の存在している交叉領域を一般に測定領域と定義する。Fig.6 (b)のような信号のパワースペクトルはFig.6 (c)のようになり、 f_d を中心に分布するスペクトルがビート信号成分、低周波側のスペクトル分布がペDESTAL成分を示している。ペDESTAL成分は粒子がビームを横切る際の直流的なバイアス成分と理解すればよく、その広がりには有限の通過時間に起因する。

3.3 信号処理と測定機能

ドップラービート周波数を解析する信号処理^{12,13)}としては、周波数解析法、自己相関法、周波数トラッカー法、周期測定法などが使われる。出力信号を周波数解析器に入力するとFig.6 (c)のようなスペクトル分布となるので、ビート信号スペクトルの中心周波数を読み取って f_d を得る。これが周波数解析法である。パワースペクトルとフーリエ

変換の関係にあるのが自己相関関数であり、中心対象に一定周期 τ_d で振動しながら減衰する特性を示す。 τ_d を測定し、 $\tau_d = 1/f_d$ の関係より f_d が求まる。自己相関関数は専用の相関器のほか、周波数解析器でも計測できるものが多い。いずれも市販の汎用機器が利用でき、操作の簡単なことが特長であるが、スペクトルの広がりや測定精度に影響を及ぼす点に注意が必要である。散乱光強度が微弱な場合は光子相関法が有効である。

周波数トラッカー法は、電圧制御型発振器(VCO)、帯域通過フィルター、周波数弁別器、積分器を用いて、VCOの出力をドップラービート信号周波数に追従させ、その出力からビート周波数を知る方法である。速度の時間変動に対して有効な方法であるが、電子回路に依存する時間応答性に注意しなければならない。

周期測定法は、ビート信号からベダスタル成分を除去したのちパルス波形に整形し、パルス間隔をパルス波高値に変換するか、高速クロックパルスで計数することにより、1周期毎のデータを取得するもので、データの収集効率が良く、高速処理に適している。また、粒子の離散的到来による間欠信号にも対応できる利点があるが、雑音の影響を受けやすい欠点もあり、数周期分の平均を取る等の工夫がなされる。

ベダスタル成分とビート信号成分がスペクトル領域で近接すると、電気的フィルターによるベダスタル成分の除去が困難になる。そこで、照射ビームを回転格子や超音波変調器で回折させ、周波数シフトを与えてスペクトルを分離する方法や、偏光を利用してベダスタル成分を光学的にキャンセルする方法などがある。LDVでは、原理的に粒子に関する180°の移動方向が判定できない。そこで上記の周波数シフトを利用し、シフト周波数に対するビート周波数の正負を調べて判定する方式が使われる。2次元・3次元の速度測定には基本光学系を組み合わせればよいが、装置が大がかりになり実用的でない。偏波面保存型光ファイバを用いた光学系¹⁴⁾は、その柔軟性により多次元計測に有効な手段を与えている。

LDVは速度だけでなく、粒子径や粒子屈折率を計測する方法¹⁵⁾においても研究されている。また、半導体レーザーとアバランシェ・フォトダイオードを用いた小型化¹⁶⁾や、光集積型LDVデバイス¹⁷⁾の開発も行われており、実用的な計測システムとして益々発展しつつある。

4. スペックル現象とドップラー効果

ここで、日頃あまり注目されることのないスペックル法とドップラー法の関係¹⁸⁻²⁰⁾について少し考えてみよう。LDVの原理は単一粒子で平易に説明される。そこで速度測定の対象物体が単一粒子や、十分に希薄な粒子分散溶液、気体中の粒子などの場合、Fig.5のドップラー法が有効に利用できる。一方、このような状況では散乱体の数が十分でないためスペックルは観測されない。

対象が粗面物体になると、逆にFig.2のスペックル法が利用できる。このとき、各散乱光波は粗面の移動に伴うドップラー効果を受けるが、互いにランダムな位相のため参照

光として機能せずヘテロダイン検波は行なわれない。よってドップラービート信号は観測されない。

それでは粗面物体にLDV光学系を適用したらどうであろうか。Fig.7 (a)は差動型構成で粗面を照射し、散乱光を反射側の回折面で検出する場合を示している。このとき光電流 $I(t)$ の自己相関関数は

$$g(\tau) = \exp\left[-\frac{\tau^2}{\tau_d^2}\right] \cos^2\left(\pi \frac{\tau}{\tau_d}\right) \quad (12)$$

となる²¹⁾。これは、もとの信号 $I(t)$ がFig.7 (b)に示すようにドップラービート信号を基本とし、その包絡線がスペクトルによって変調されたものととらえることができる。ドップラービート周波数 f_d はFig.7 (c)のパワースペクトル、あるいは同図(b)の波形や(d)の自己相関関数より $f_d = 1/\tau_d$ の関係で求まり、(10)式から速度が決まる。つまりLDV法が利用できることを示している。スペックル変動の時間相関長は τ_s であり、物体上の照射領域幅を w_s とすれば、 $\tau_s = w_s/v$ なる関係から速度が求まる。ここで(d)に示す $\tau_s > \tau_d$ の状況は通常のLDV光学系を用いた場合に成り立つ条件である。以上より、Fig.7はスペックル法とドップラー法が共存し、信号検出処理によってどちらも速度測定に利用できる例である。

Fig.7のLDV光学系において、移動粗面物体の代わりに微粒子分散溶液の流れを考えてみよう。粒子濃度が希薄であれば、前述の単一粒子の状況になると考えられる。中程度の濃度(例えば重量濃度で1%前後)の場合、複数粒子による位置と速度に分布が生じ、異なる偏移量のドップラービート信号が検出される。一方、位置の不規則性により各散乱光波の位相にもある程度のランダム性が現れ、スペックル的な強度変動が重畳してくる。この状況はFig.7の場合に似ており、スペックル成分とドップラー成分が混在すると考えられる。

粒子が高濃度になると、光の多重散乱効果が目立ってくる。このとき、多数の粒子の位置と速度が互いに時々刻々変動することの不規則性により、散乱光波の位相のランダ

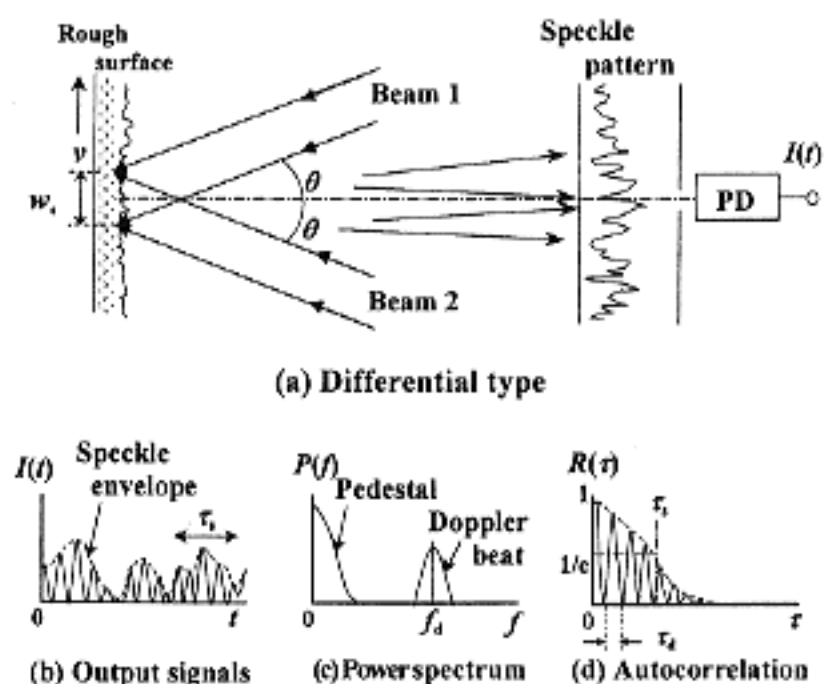


Fig.7 Differential-type Doppler optical arrangement (a) applied to a moving rough surface, and schematic illustrations of output signals (b), power spectrum (c), and autocorrelation function (d).

ム化が極めて顕著になる。この場合、観測点の位相が一定であり続ける時間、つまり1つのスペックルが形を変えずに存在し得る時間相関長 τ_c は、同一速度で移動する粗面物体の場合よりも、かなり短い時間となる。かくして $\tau_c < \tau_0$ となり、ヘテロダイン検波は実現できない。この場合の信号では、ドップラービート周波数よりも高周波で変動するスペックル的なランダム信号が支配的となる。この場合、スペックルの時間相関長 τ_c も濃度などに左右され一義的に決定できない。したがって高速なスペックル変動は相対的な速度測定に利用される。血流計測などに応用されているバイオスペックル現象などがこうした例²²⁾に挙げられよう。

5. 空間フィルター法

5.1 空間フィルタリング効果と測定原理

熱光源のようなインコヒーレント光でも利用できる光学的速度計に空間フィルター法^{23,25)}がある。LDVと同程度の精度や感度が得られる上、光学系と測定原理が極めて簡単で機械的に安定なため用途に応じた柔軟な構成が可能であり、実用向きな計測法と言えよう。

Fig.8に基本的な格子状空間フィルター速度計の原理を示す。速度 v で移動する粒子からの散乱光をレンズで集光し、粒子像を一定間隔 p で並んだ複数のスリット列からなる透過型格子 G 面上に結像する。粒子像の移動に伴い、格子を透過した光を検出すると、格子の周期的な透過率分布に従い、速度 v に比例した周波数 f_G で振動する周期信号が得られる。 f_G を測定すれば、次式により速度 v が決定される。

$$v = \frac{p}{M} f_G \quad (13)$$

ここで、 M は光学系の結像倍率である。この原理はLDVのフリッジモデルの考え方と類似している。Fig.8で格子 G に重ねて設置する適当な開口は物体面の測定領域断面を規定し、一方、奥行き方向は照明領域と結像光学系の焦点深度で決定される。

以上の原理は、単一粒子像だけでなく空間的に何らかの不規則な強度分布を有する像パターンやスペックルパターンに対しても成り立つ。(13)式で周波数 f_G は対象速度とともに変わってしまうが、透過光量が縞間隔 p 毎に周期的に変動する性質は不変である。これより空間周波数領域で理論解析する方が分かり易い²⁶⁾。Fig.9(a)のように格子

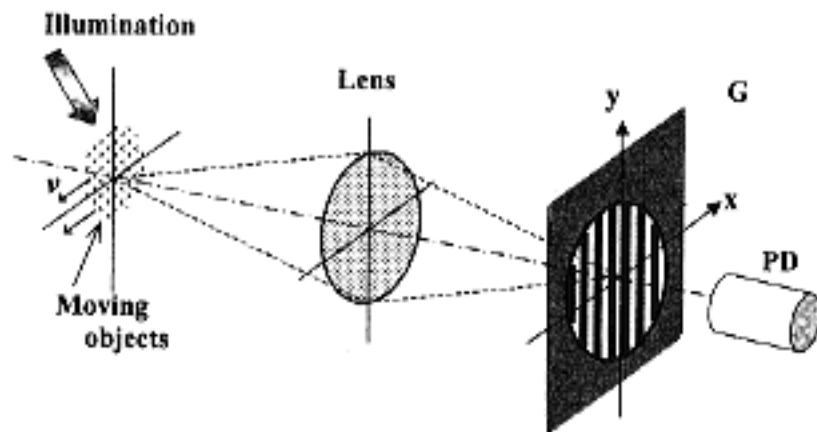


Fig.8 Schematic principle of spatial filtering velocimetry.

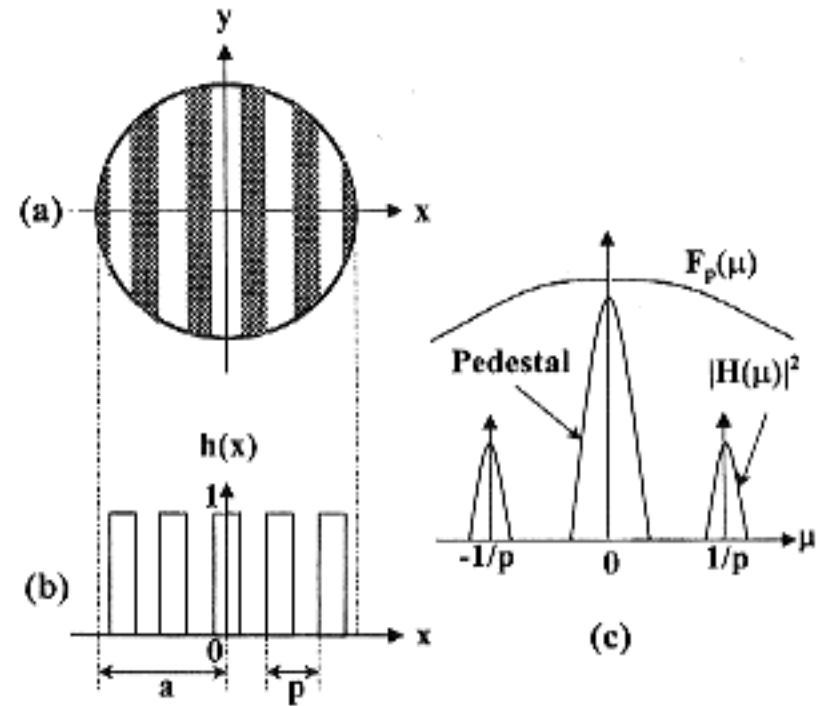


Fig.9 Transmission grating (a) with a circular aperture and its transmittance function (b), and power spectra (c) describing the spatial filtering effect.

面上に (x, y) 座標を考え、同図(b)のような格子の光透過率分布を $h(x, y)$ 、この面を移動する像面強度分布をエルゴード性をもつランダム関数 $f(x, y)$ とすると、出力光電流の瞬時値は両者の畳み込み積分で与えられ、空間周波数領域でのパワースペクトル $G_p(\mu, \nu)$ は、

$$G_p(\mu, \nu) = F_p(\mu, \nu) |H(\mu, \nu)|^2 \quad (14)$$

と表される。ここで μ, ν は x, y 各方向の空間周波数、 $F_p(\mu, \nu)$ は $f(x, y)$ のパワースペクトル、 $H(\mu, \nu)$ は $h(x, y)$ のフーリエスペクトルである。 $F_p(\mu, \nu)$ と $|H(\mu, \nu)|^2$ の $\nu=0$ における分布の例をFig.9(c)に示す。これよりピッチ p の格子は直流分である $\mu=0$ 以外に $\mu=\pm 1/p$ に明確な選択特性をもち、狭帯域通過空間フィルターとして作用することがわかる。これが“空間フィルター法”といわれる所以である。格子によって一般に高調波も存在するが、ここでは考えない。 $F_p(\mu)$ が図のように $\mu=\pm 1/p$ を超えて広帯域な分布特性をもっていれば、 $F_p(\mu)$ が $|H(\mu)|^2$ によるフィルター作用を受けて出力信号のパワースペクトル $G_p(\mu)$ も $\mu=\pm 1/p$ を中心とする成分をもつようになる。 $f = \mu M v$ の関係から出力信号は時間領域周波数 $f_G = M v / p$ なる周期信号となることが理解できる。

空間フィルター法では、格子の狭帯域通過スペクトルの鋭さが出力信号の精度を左右する。 $\mu=\pm 1/p$ におけるスペクトルの帯域幅をその中心周波数で正規化した値である比帯域幅 D ²⁶⁾は、Fig.9(a)に示す円形開口内の実効的な縞数 n (b)より $n = 2a/p$ に依存し、 $D = K/n$ (K は比例係数)の関係にある²⁷⁾。対象の移動方向が格子縞の直角方向から角度 θ だけ傾いた場合は、速度の余弦成分が計測される。

5.2 信号処理と空間フィルターデバイス

出力信号はLDVと似たようなバースト状の周期信号となり、その処理には3.3で紹介したLDV用の信号処理がそのまま適用できる。ペダスタル成分の除去は電気的フィルターを用いる以外に、2系統の検出系からなる差動型光学系

により光学的に除去する方式が一般的である。空間フィルター法も対象物体の180°移動方向を判定できない。これを可能にするため移動縞法や位相差法が使われる。移動縞法は格子の縞を一定速度で移動させて信号に周波数シフトを与えるもので、シフト周波数に対する信号周波数の正負で方向を判定する。位相差法は、2系統に分けた検出光学系に2つの格子を互いに1/4周期ずらした位置で配置し、2信号間での1/4周期の位相差の正負から方向を判定する。2次元速度成分の測定は、2系統の光学系で各格子をx,y各方向に設置すればよい。

空間フィルターとして利用可能な光学デバイス²⁶⁾は、最も基本的なものが透過型格子であるが、その他に用途に応じて種々のデバイスが報告されている。空間フィルター検出器は、Si太陽電池の表面セル配列を格子状にパターン化したもので、光検出機能を併せ持つことから小型化、安定化を実現している。フォトダイオードアレイやイメージセンサーは、素子出力に所望の重み付け処理を行うことで信号処理にて空間フィルター機能を実現でき、縞間隔の変更や移動縞の設定が可能である。液晶を利用してセル電極を格子状に配列すれば、縞間隔変更や移動縞の可能な透過型格子を構成できる。複数の光ファイバ入射端面を直線状に等間隔配列することにより、光伝送路を兼ねた空間フィルターが実現される。光束を2方向または3方向に偏向するプリズムを周期的に並べて構成したプリズム格子や、細長い微小円筒レンズを周期配列して構成したレンチキュラー格子も空間フィルターとして利用可能である。透過光を2ないし3系統の検出器で受光することにより、差動型や移動方向の判定が行える。その他、対象物の移動を直接画像記録し、画像処理によって空間フィルター法を実現する方法もある。

空間フィルター法は光の情報処理に基づく点で、レーザー光のコヒーレントな性質を利用したスペックル法やドップラー法とは異なる。しかし、速度計測の原理はLDVのフリンジモデルと同等に考えられ、信号処理も同じ手法が使える。一方、移動物体像の代わりに並進スペックルを計測すればスペックル法にもなり得るわけであり²⁷⁾、これら3つの方法が互いに興味深い関係にあることに気づく。

6. おわりに

本講義では、レーザー計測の基礎としてレーザー光を利

用した速度測定を取り上げ、代表的な3つの方法である、スペックル法、ドップラー法、空間フィルター法について、測定原理と基礎的事項を中心に紹介した。したがって、ここでは速度がどう決定されるかが話の中心となったが、そこに介在するレーザー光の散乱・回折・干渉現象、光情報処理、そして光検出と信号処理の考え方は、変位、変形、振動など他の物理量計測にも共通したレーザー計測の大切な基礎事項を含んでいると言えよう。また、レーザー計測のこれまでの発展を側面から支えてきた大きな力は、やはりエレクトロニクスと関連光材料・デバイスであり、これらの高性能、高機能な特質も併せて理解することが、レーザー計測技術を学ぶ上で大切なことである。

参考文献

- 1) レーザー学会編：レーザーハンドブック（オーム社、1982）p.485.
- 2) 計量管理協会編：光計測のニーズとシーズ（コロナ社、1987）p.125.
- 3) 田幸 敏治：レーザー研究 **11** (1983) 635.
- 4) J. W. Goodman: in *Laser Speckle and Related Phenomena* ed. J. C. Dainty (Topics in Applied Physics Vol. 9, Springer-Verlag, Berlin, 1984) p.9.
- 5) 諸隈 肇, 大坪 順次, 松田 浄史：光応用機械計測技術（朝倉書店、1985）p.94, p.124.
- 6) 高井 信勝, 朝倉 利光：レーザー研究 **8** (1980) 379.
- 7) 高井 信勝, 朝倉 利光：レーザー研究 **8** (1980) 476.
- 8) T. Asakura and N. Takai: *Appl. Phys.* **25** (1981) 179.
- 9) N. Takai, T. Iwai, and T. Asakura: *J. Opt. Soc. Am.* **70** (1980) 450.
- 10) Y. Aizu and T. Asakura: in *Trends in Optics* ed. A. Consortini (ICO Vol. 3, Academic Press, London, 1996) p.27.
- 11) Y. Yeh and H. Z. Cummins: *Appl. Phys. Lett.* **4** (1964) 176.
- 12) 三品 博達, 朝倉 利光：応用物理 **42** (1973) 560.
- 13) 流れの計測懇談会編：LDVの基礎と応用（日刊工業新聞社、1980）.
- 14) K. Kyuma, S. Tai, K. Hamanaka, and M. Nunoshita: *Appl. Opt.* **20** (1981) 2424.
- 15) F. Durst and M. Zäre: *Proc. LDA Symp. Copenhagen* (1975) p.403.
- 16) H. Nishihara, K. Matsumoto, and J. Koyama: *Opt. Lett.* **9** (1984) 62.
- 17) H. Toda: *IEEE J. Lightwave Tech.* **1** LT-5, 7 (1987) 901.
- 18) 小松 進一, 斎藤 弘義：光学 **6** (1977) 20.
- 19) H. M. Pedersen: *Opt. Acta* **29** (1982) 105.
- 20) J. D. Briers: *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 345.
- 21) J. Ohtsubo and T. Asakura: *Optik* **52** (1978) 413.
- 22) Y. Aizu, H. Ambar, T. Yamamoto, and T. Asakura: *Opt. Commun.* **72** (1989) 269.
- 23) M. Gaster: *J. Fluid Mech.* **20** (1964) 183.
- 24) J. T. Ator: *Appl. Opt.* **5** (1966) 1325.
- 25) 内藤 正, 狼 嘉彰, 小林 彬：計測と制御 **7** (1968) 761.
- 26) Y. Aizu and T. Asakura: *Appl. Phys. B* **43** (1987) 209.
- 27) 相津 佳永：光学系設計技術（技術情報協会、1991）p.298.