



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	光学的空間フィルターを用いた微小域流速計の開発
Author(s)	牛坂, 健; 朝倉, 利光
Citation	北海道大学電子科学研究所技術部技術研究報告集, 1, 36-40
Issue Date	1992
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/1442
Type	departmental bulletin paper
File Information	KJ00000697018.pdf



光学的空間フィルターを用いた微小域流速計の開発

牛坂 健, 朝倉利光 (光システム工学部門)

1. はじめに

私達は、空間フィルター法と呼ばれる速度測定法を顕微鏡的に微小な測定領域における速度測定に応用する研究を行ってきた。¹⁻¹²⁾その原理は、一定間隔に配列されたスリット列のような透過率分布をもつ空間図形を通して移動する物体を観察すると、その速度に比例した周波数をもつ信号が得られることを利用するものである。今回は、実際に開発した流速計のなかから、格子状空間フィルターおよびレンティキュラグレーティングを用いた微小域用流速計を紹介する。

2. 速度測定の実理

空間フィルターを用いた流速計は、測定対象である流体の流れと共に移動する微小粒子の移動速度を測定するものである。図1は格子状空間フィルターを用いた速度計の原理図である。探測領域は、適切に集光された光束で、受光光学系に対して暗視野照明となるように斜め方向から照明されている。流体中の微粒子で散乱された光はレンズLで集光され、周期的な透過率分布をもつ格子Gの面上に粒子の像を形成する。受光光学系の倍率をM、粒子の速度を v_0 とすれば、格子面上の粒子像は速度 Mv_0 で移動するので、格子Gを透過する光の総量は、粒子像の移動に伴い、格子の透過率分布に従って時間的に変化する。この格子からの透過光を後方に置いた光検出器PDで受光すれば、その出力に周期的に変化する電気信号が得られる。この信号の周波数 f は、格子の縞間隔を p とすると、 $f = Mv_0/p$ の関係があるので、周波数 f を知ること

$$v_0 = (p/M) f \quad (1)$$

から速度 v_0 が決定できる。これが空間フィルター法による速度測定の基本原理である。

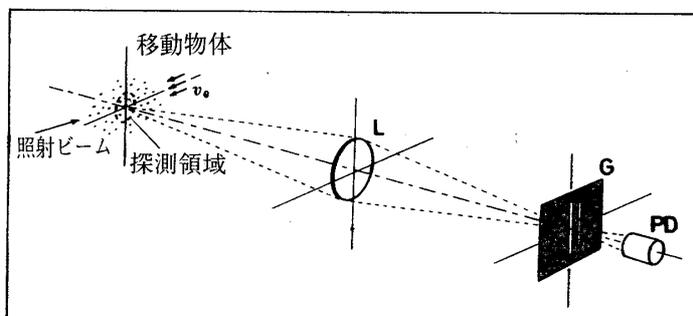


図1 格子状空間フィルターを用いた速度計の原理

3. 微小域用流速計の構成

3-1 格子状空間フィルターを用いた微小域流速計

図2は流速計の構成図である。照明には、微小領域に光を集光するのが容易なため、レーザー

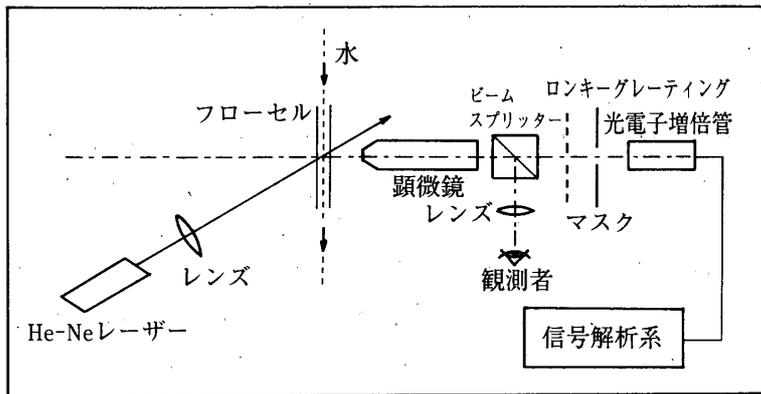


図2 格子状空間フィルターを用いた微小域用速度測定系

光の集束光を用い、ガラス管内の探測領域を照明した。結像光学系は顕微鏡を用い、その後部に置かれた市販の顕微鏡撮影装置で探測領域を目視観測できる。顕微鏡の対物レンズの倍率は、主に作動距離の点から制限され、最大で10倍である。接眼レンズは、入手が容易なものは10から20倍程度で、顕微鏡撮影装置を含

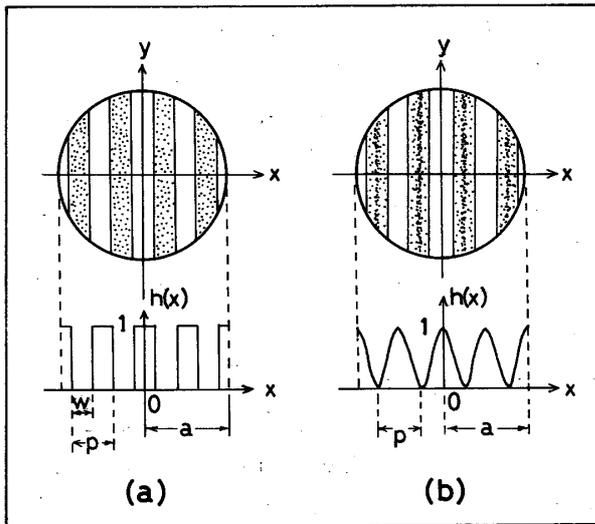


図3 円形境界の空間フィルター
(a)矩形波格子, (b)正弦波格子

んだ顕微鏡系の総合倍率は最大で100倍程度となる。顕微鏡系の像面に置かれる空間フィルターは、市販の縞間隔が100μmのロンキールリングと直径が1mmφから2mmφの円形開口マスクを密着したものを使用した。光検出器は高感度の光電子増倍管を使用した。

私たちが用いたロンキールリングに円形開口のマスクをかけた空間フィルターは、図3(a)に示すような円形境界の矩形波格子である。矩形波格子の透過率分布関数 $h(x)$ はフーリエ級数に展開できるので、係数を除いて図3(b)で示される正弦波格子の重ね合わせである。したがって、その空間フィルターの特性は、 $w = p/2$ の場合、

$$H(\mu, \nu) = \pi a^2 \left\{ \frac{J_1(2\pi a \sqrt{\mu^2 + \nu^2})}{2\pi a \sqrt{\mu^2 + \nu^2}} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{m\pi} \left\{ \frac{J_1(2\pi a \sqrt{(\mu - m/p)^2 + \nu^2})}{2\pi a \sqrt{(\mu - m/p)^2 + \nu^2}} + \frac{J_1(2\pi a \sqrt{(\mu + m/p)^2 + \nu^2})}{2\pi a \sqrt{(\mu + m/p)^2 + \nu^2}} \right\} \right\}$$

ただし、 $m = 1, 3, 5, \dots$

となる。すなわち、図3(a)の円形境界をもつ矩形波格子を空間フィルターとして用いたときは、電気信号として周波数が0, ν/p , $m\nu/p$ ($m=3, 5, \dots$)なる信号が得られるが、 m が3以上の高調波は小さいので電気フィルターで容易に除去でき、結果として図3(b)のような正弦波格子として利用できる。

3-2 レンティキュラーグレーティングを用いた微小域流速計

前述した格子状空間フィルターを用いた流速計は、出力信号中に低周波の不用信号（ベデスタル信号と呼ばれる）を含んでいる。この不用信号は振幅が大きいので、電気的フィルターでは除去が難しい場合がある。しかし、この不用信号を電気的フィルターを使用せずに除去する構成があり、これは差動型構成と呼ばれている。ここでは、微小域流速計の一例として、レンティキュラーグレーティングを用いた差動型速度計を紹介する。

円筒状凸レンズが一定間隔に並んでいるような構造のレンティキュラーグレーティングも空間フィルターとして利用が可能である。図4はレンティキュラーグレーティングを用いた微小域流速計の構成を示す。流速計の構成は、基本的に前項のものと同様であるが、空間フィルターとして間隔が0.48mmのレンティキュラーグレーティングLGを用いる点が異なっている。顕微鏡で結像された粒子像がレンティキュラーグレーティング面を移動するとき、その透過光はレンティキュラーグレーティングの各微小レンズの光偏向作用で光軸の正負に偏向される。光軸の正負に偏向された光を別々の光電子増倍管 PM_1 、 PM_2 に導くために二面プリズムPを用い、その後部の光学系でマスクの像面が光電子増倍管の検出面にくるように調整する。二面プリズムは、レンズ L_c に対して顕微鏡の射出瞳の像面の関係になる位置に置かなければならない。光電子増倍管 PM_1 、 PM_2 の出力電気信号は、互いに180度位相が異なっているので、差動増幅器DAで二つの信号の差をとることで差動型と呼ばれる動作が実現できる。差動型の動作は格子状空間フィルターを用いることでも達成できるが、レンティキュラーグレーティングを用いた構成は、より簡単な構成で差動型の動作が実現でき、調整もほとんど必要がない。また、原理的には光に対する不透明部分が無く、光の損失が無いことも重要な特徴である。

3-3 信号処理系

信号処理系としては、原理的には、一般的な周波数分析器や相関器が利用できるが、微小域流速測定においては、得られる信号が長い休止期間をもつバースト状信号であることから、測定時間が異常に長くかかるなど不都合が多い、私たちは、

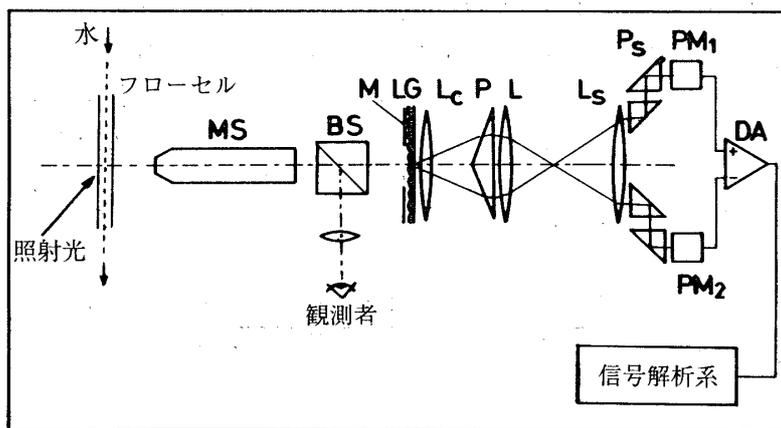


図4 レンティキュラーグレーティングを用いた差動型速度計

このような信号の処理に適する方法として、信号の周期を測定してその逆数から周波数を決定する周期測定法¹³⁾を採用している。さらに、測定結果の統計処理によって、より正確な測定ができるようにした。また、マイクロコンピュータを用いて比較法と名付けた信号処理法により、流速の

時間的変化も測定できる。

図5は、信号処理系の構成図である。光検出器からの電気信号は処理系の入力に導かれ、適当なレベルまで直流増幅される。次に高域通過フィルターでベデスタル信号が除去され、さらに低域通過フィルターで高周波の不用信号（ショット雑音など）が除去される。電気フィルターで選択された目的の信号は、交流増幅器で増幅される。適切な振幅に増幅された信号は、シ

シュミット回路で矩形波に整形され、時間-電圧変換器で周期に比例した電圧に変換される。その後、逆数演算器で周波数に比例した電圧に変換される。結果は、統計解析器に導かれヒストグラムが作られる。そのヒストグラムから周波数が決定でき、したがって(1)式から被測定対象の速度が決定される。

4. 測定結果

測定は四種のフローセルを対象とし、その中を流れる水の流速分布を測定した。フローセルは、 $4 \times 1.4\text{mm}$ の矩形断面のものと、内径が 3.5mm 、 0.7mm 、 0.18mm の円形断面のものを用いた。

円形断面のフローセルは、レンズ作用を除去するために矩形のガラス製水槽の中に浸してある。フローセル内には、二つの水槽の水位差を利用して水を流した。

図6は、四種のガラス管に対する流速分布の測定結果である。グラフは統計解析器による周波数ヒストグラムの最確値をプロットしたもので、測定点はフローセル断面の中心を零として半径方向に計った距離である。

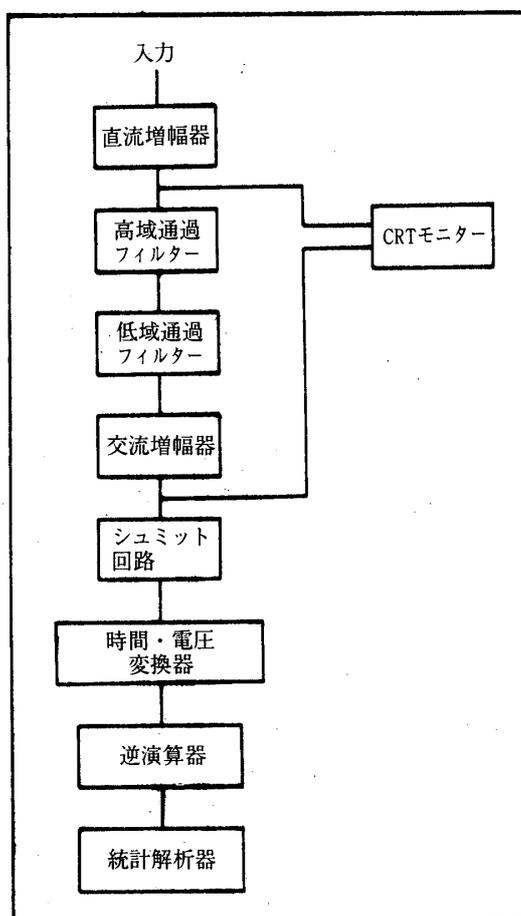


図5 周期測定法を用いた信号解析系

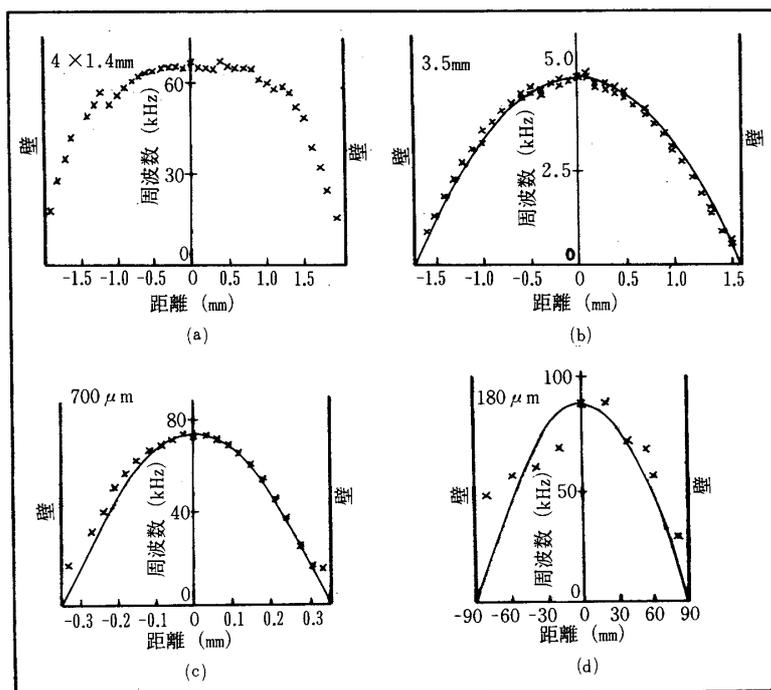


図6 流速分布の測定結果

円形断面フローセルについては、実線で理論曲線を表示してある。円形断面フローセルでは、セル内の平均流速はセル中心における最大流速の1/2である。この関係を利用して、フローセルから流出する水量を測定し、本速度計で測定した測定値と比較することができる。この差は実験では5%以内であった。この誤差は、実験をしている間の流量の不安定が主因である。

5. おわりに

以上、空間フィルターを用いた速度測定法について、私たちの微小域速度測定への応用研究の一部を紹介した。空間フィルター法の原理による速度測定は構造が簡単で製作が容易であり、かつ光学的手法の特徴である微小領域における速度測定にも十分に適用可能であることが分かった。

なお、本研究における流速計やフローセルの製作にあたっては、本研究所機械工作室および硝子工作室の方々にお世話になりました。ここに感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 牛坂 健, 朝倉利光: 光学 **8**, (1979) p.157.
- 2) 牛坂 健, 松本真一, 朝倉利光: 応用電気研究所報告 **32**, (1980) p.15.
- 3) 相津佳永, 牛坂 健, 朝倉利光: 応用物理 **51**, (1982) p.860.
- 4) T.Ushizaka and T.Asakura: Appl. Opt. **22**, (1983) p.1870.
- 5) 相津佳永, 牛坂 健, 朝倉利光: 応用物理 **52**, (1983) p.718.
- 6) 相津佳永, 牛坂 健, 朝倉利光: O E **59**, (1984) p.55.
- 7) 牛坂 健, 相津佳永, 朝倉利光: 応用物理 **54**, (1985) p.828.
- 8) 牛坂 健, 相津佳永, 朝倉利光: 応用電気研究所技術報告 **5**, (1985) p. 1.
- 9) Y.Aizu, T.Ushizaka and T.Asakura: Appl. Opt. **24**, (1985) p.627.
- 10) Y.Aizu, T.Ushizaka and T.Asakura: Appl. Opt. **24**, (1985) p.637.
- 11) Y.Aizu, T.Ushizaka and T.Asakura: Appl. Opt. **25**, (1986) p.31.
- 12) T.Ushizaka, Y.Aizu and T.Asakura: Appl. phys. **B39**, (1986) p.97.
- 13) H.Mishina and T.Asakura: opt. Commun. **11**, (1974) p.99.