



ロンキールーリングを用いた光散乱流速計の研究*

船津賢人** 天谷賢児***
田部井勝稲**** 柿沼涼子*****

Study on Light Scattering Velocimetry by Using Ronchi-rulings

By Masato Funatsu, Kenji Amagai, Katsuine Tabei, and Ryoko Kakinuma

The Ronchi-ruling is a grating, with lines, spaces and small pitches of spatial frequency. This is used in the Ronchi test for the evaluation of surface flatness. In this study, a new type of velocimeter, using a Ronchi-ruling, was proposed and its performances were investigated. When the stripes of laser light through a grid of the Ronchi-ruling illuminated the tracer particles moving with the flow, the scattered light signal could be obtained as a wavy signal of light intensity. This signal was detected with a photomultiplier. Frequencies of the obtained signal were measured by an FFT analyzer. The flow velocity was calculated from the grid pitch and the frequency. This method was applied to the measurement of velocity profiles of pipe flows. The profiles measured by this velocimeter agreed with theoretical profiles of the laminar and turbulent flows.

1. 緒 論

光学系の解像度評価, レンズなどの面精度評価, 静止パターンによる物体表面平滑度の計測, 移動パターンによる物体の大きさや変位測定, モアレ縞の作成などに用いる光学素子としてロンキールーリング (Ronchi-ruling) と呼ばれるものがある^{1, 2)}. これは, 線と空間が同じ幅で交互に配置された格子縞である. このロンキールーリングを移動する測定対象と検出器の間に設置することで, その移動速度を測定する方法が提案されている^{3, 4)}が, これは, ロンキールーリングを通して測定対象を観察するために, 奥行き方向の測定位置を求めることが難しく, 一般的な流れ場の流速測定には適していない. 本論文では, ロンキールーリングを通してレーザー光を照射し, 空間に光の縞を形成する流速測定法を提案する. レーザー光がロンキールーリングを透過すると空間内にそれと同じ空間波長の光の縞が形成される. この光の縞を流れ場に当て, 流れに乗った散乱粒子がこれを通過すれば, 周期的な散乱光を観察することができる. この散乱光をとらえることでその粒子の速度を求めることが可能になる. このような方法は流速測定法の代表的なものである LDV (Laser Doppler Velocimeter)⁵⁻⁸⁾や, 近接した 2 本

のレーザービーム間を粒子が通過する際の信号から粒子速度を求める L2FV (Laser 2 Focus Velocimeter)⁹⁾などと類似した方法と考えられる. しかしながら, ここで提案する測定法の原理は, LDV が二光束の交差部での光の干渉縞を用いているのに対して, ロンキールーリングによる一光束の空間格子を用いる点が異なっている. このような流速計は, 船舶などの設計や開発において LDV による乱れ計測のような局所瞬時の高精度計測は必ずしも必要でないが, より短時間に簡便な計測が求められる水槽を用いた海流や船舶周りの流れの模型実験, パイプライン内の流れや混相流動, あるいは, 煙道内の流れのモニタリングなどへの応用が期待できる. また, ピトー管よりも低速条件での測定が可能なることから教育や研究用に簡易な速度計測を行いたい場合にも適用可能である. 本研究ではこのようなロンキールーリングを用いた計測法の基本概念を明らかにし, 実際の流れ場への適用性を検討した.

2. 測定原理

本論文で検討する流速計の測定原理を表したものを図 1 に示す. 光源としてレーザー光などの平行光線を用いる. この光線をロンキールーリングに通すことで空間内に光の縞を形成することができる. ここでは, この縞の間隔を d_g とする. 一般に, 光がロンキールーリングのような格子を通過する場合には回折を生じ, 回折光の 1 次光, 2 次光, さらに高次光が, 格子縞を通過した光線に対して斜めに拡がることになる. この

* 原稿受付 平成 20 年 5 月 19 日.
** 群馬大学大学院工学研究科 (群馬県桐生市天神町 1-5-1) .
*** 正会員 群馬大学大学院工学研究科.
**** 元・群馬大学大学院工学研究科.
***** 群馬大学大学院工学研究科 (現・アトムメディアカル株) (埼玉県さいたま市桜区道場 2-2-1) .

ために、明瞭な光の縞とならない部分が生じる。しかしながら、格子縞を通過した光の縞と、回折光がちよと交差する位置では光の縞が明瞭になることになる。この光線の縞が明瞭になる格子からの距離 L の範囲は Talbot の条件^{10,11)}を基に次式となる。

$$L = \frac{d_g^2}{\lambda} (N - s) \sim \frac{d_g^2}{\lambda} (N + s) \quad (1)$$

ここで、 λ は透過光の波長、 $N = 0, 1, 2, 3 \dots$ は干渉の次数である。 s は明瞭な縞が現れる範囲として実験的に定める値であり、予備実験から、 $s=0.25$ であれば十分良好な縞が得られることがわかった。流速計測のためには、測定対象となる流れを、この Talbot の条件を満たす位置に置き、そこを通過する粒子の散乱光の周波数から速度を計算する。

図2は式(1)を基に $\lambda=632.8\text{ nm}$ のHe-Neレーザーを用いた場合の計測範囲 L を示す。図より d_g が大きいほど明瞭な縞のできる長さ L は大きくなる。このことは本装置が比較的大きな粒子 (0.1mm 以上) を含む流れ (気泡流や液滴の大きな噴霧流) の計測に適していることを示す。

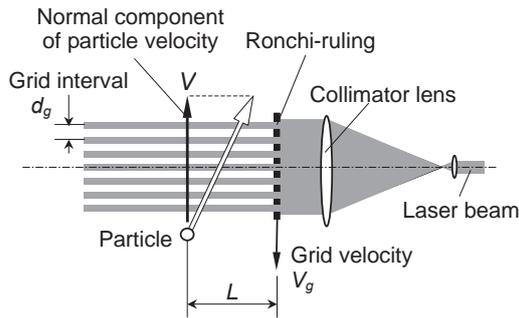


図1 ロンキールーリングを用いた流速計の測定原理

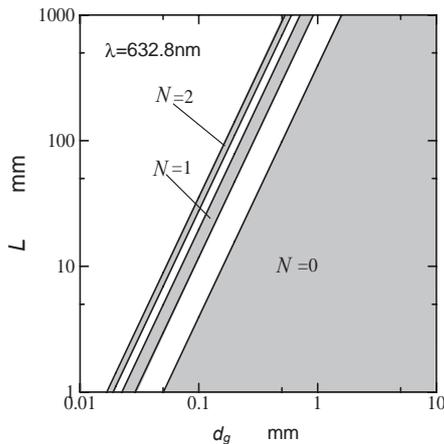


図2 L と d_g の関係

今、このような空間に形成された光の縞を粒子がある速度で通過する場合を考える。通過粒子の光の縞に対する垂直方向速度成分を V とすると、粒子の散乱光

の周波数 $f[\text{Hz}]$ は次式で与えられる。

$$f = \frac{V}{d_g} \quad (2)$$

また、粒子速度が遅い場合や粒子の通過方向が不明の場合にも対応するために、ロンキールーリングの格子縞を一定の速度で移動させることにした。図1のように粒子の運動方向と格子縞の移動方向が逆な場合、格子縞の移動速度を V_g とすると、式(2)は次式となる。

$$f = \frac{V + V_g}{d_g} \quad (3)$$

このとき V_g と d_g は既知であるので、得られる散乱光信号の周波数 f が求められれば、格子を通過する粒子速度 V が求められることになる。ここで、 $f_g = V_g / d_g$ はシフト周波数で、 f が f_g より大きな場合には、粒子が格子の移動方向とは逆に運動していることになり、反対に f が f_g よりも小さいときは格子の移動方向と同じ方向に運動していると判断することができる。

本装置は空間格子のピッチ間隔 d_g を自由に選ぶことが可能であり、また、結像レンズと絞りによりレーザーの照射領域から測定空間 (サンプリングボリューム) を自由に切り取ることもできるという特徴を持っている。測定に必要な空間距離 L_s をピッチ間隔 d_g の約3倍と仮定し、散乱粒子速度 V より計測可能な時間分解能を T 、その周波数を f とおくと、おおよそ $T = L_s / V = 3d_g / V$ と見積もることができる。例えば1インチ当たり250本のロンキールーリングを用いた場合、1ピッチは0.1mmであるので $L_s = 0.3\text{ mm}$ となり、 $V = 10\text{ mm/s}$ の場合には $T = 30\text{ ms}$ 、 $f = 30\text{ Hz}$ 、 $V = 100\text{ mm/s}$ の場合には $T = 3\text{ ms}$ 、 $f = 300\text{ Hz}$ 間隔での流速 (定常流、変動流) の計測が可能となる。

3. 実験装置および方法

上記の原理に基づいて流れが実際に計測できるかを確認するために、最も基本的な平行円管流を取り上げ、図3のような実験装置を製作した。この装置は円管流路、レーザーとロンキールーリングによる格子縞の発生装置、および散乱光信号の検出部からなる。

円管流路は内径26mm、外径30mmの亚克力円管で、測定部までの助走長さを1000mmとした。円管内を流れる流体は水道水で、ポンプを用いて循環させた。円管内の平均流速は0~350mm/sの範囲で変化させ、このときのレイノルズ数は0~約9000となった。円管内の流れの状態は層流から乱流の範囲である。また、散乱光の検出に当たって、円管の屈折率の影響をできるだけ小さくするために、円管外側に矩形のウォータ

ージャケットを取り付けた。

散乱光を発生させるための粒子としては比重 1.06, 平均粒径 379 μm のポリスチレン粒子, および, 比重 1.02, 平均粒径 310 μm のナイロン粒子 (Nylon12 粒子) を使用した。ポリスチレン粒子を用いた場合, 200Hz の流れの変動に対して 1%程度の減衰で追従するといわれており¹²⁾, 本計測法の散乱粒子として十分に利用できると考えられる。また, 粒子の沈降速度は 1.5mm/s 程度と見積ることができた。

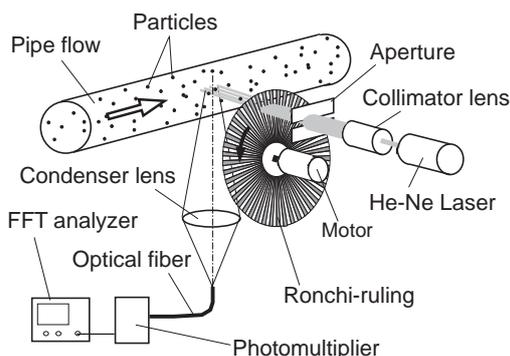


図3 実験装置概略

たびに光の散乱を生じて, 点列となって観察されている。このような粒子からの散乱信号はレンズを用いて集光され, 光ファイバーに導かれるようにした。光ファイバーの他端には光電子増倍管を置いて, 散乱光強度の変化を電圧信号に変換した。

集光レンズによって検出する部分の大きさは, 流れ方向に約 4.0mm, 半径方向はアクリル管の屈折効果のため壁近傍と短中心で異なり, 1.5~2mm となった。また, シート光の厚みが 2.0mm であるから, 本装置の

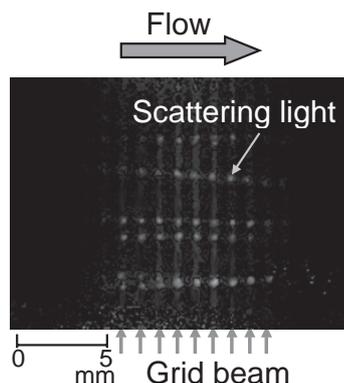


図4 粒子の散乱光の様子 (露光時間 0.5 秒)

粒子の添加量は散乱信号がある程度の頻度で検出できるように調整した。予備実験の結果, ここでは粒子の数密度を 36×10^6 個/ m^3 として実験を行った。

流れ場の中に光の縞を形成するための光源としては He-Ne レーザー (MELLES GRIOT 社製, 05-LHP-151, 5mW) を用いた。レーザー光をコリメーターを通して直径約 10mm のビームにし, さらに, スリットによって幅が 2.0mm のシート状の光線とした。このシート光線を円管の中心軸を通るように照射した。レーザー光のビーム内の強度分布については一様性が必ずしも保たれていないが, ここでは特別な補正は行わなかった。スリットで作られたシート光線を図に示すような回転格子を通して, 円管内の流れと逆方向に格子縞が移動するようにした。

図のように, この回転格子は透明部分が放射状に存在する円板 (回転格子, 720 本/ 360°) である。この場合, 光線の通過位置を比較的大きな半径方向の位置に取ることで, 放射状格子を近似的に平行格子と同様に扱うことができる。ここでは, 光線が円板を通過する位置の半径を $r_g=83\text{mm}$ とした。このとき, この位置での格子縞間隔は 1 ラインペア (lp: 格子の明暗をひとつのペアとした長さ) あたり 0.922mm/lp となる。

図4は円管内の流れの一部を拡大し, 粒子の散乱光の様子をとらえた写真 (露光時間約 0.5 秒) である。粒子は左から右に流れに乗って移動している。ロンキールーリングで作られた格子状の光を粒子が通過する

測定体積は幅がおおよそ 4.0mm, 奥行きが 1.5~2.0mm, 高さが 2.0mm となる。ロンキールーリングの格子間隔からこの測定体積内に 4~5 本の格子縞が入ることになる。得られた散乱光信号から FFT アナライザー (小野測器製, CF-350Z) を用いて周波数スペクトルを求めた。

円板の格子縞の数を n_g , 円板の回転角速度を ω_g (rad/s), 光線が円板を通過する位置の半径を r_g とすると式(3)は次式となる。

$$f = \frac{V + r_g \omega_g}{d_g} \quad (4)$$

この場合シフト周波数は $f_g=(n_g \omega_g) / 2\pi$ で与えられる。これより, 速度 V は次式となり,

$$V = \frac{2\pi r_g}{n_g} (f - f_g) \quad (5)$$

既知のシフト周波数に対して, 散乱光信号から得られる周波数 f を求めれば, 速度 V が求められる。

図5はFFTアナライザーで求めた周波数スペクトルの例である。図中には格子を空間に固定して求めた粒子散乱信号のスペクトルと, 移動格子の場合のスペクトルを示した。この図において 0.1kHz 以下に見られる低周波成分は円板の回転に伴う成分と考えられ, 本測定の場合は不要な信号成分である。固定格子の場合 (図中の太い実線) の散乱信号の周波数成分は(a)の位置に

現れている。この周波数成分はある程度の幅を持ったバンドスペクトルとなっているが、ここでは(a)の部分で最も高いピークの周波数を f とした。

図中の細い実線は、移動格子の場合のスペクトル波形を表している。このスペクトルの(b)の部分はシフト周波数 f_g と一致しており、格子の移動速度を求めなくてもスペクトルから f_g を求められることを示している。また、図中(c)の部分は散乱信号の周波数成分を表している。この例の場合、(b)と(c)のピークスペクトルの値が $f_g=727\text{Hz}$ および $f=1185\text{Hz}$ となっており、式(5)を用いると速度が $V=0.33\text{mm/s}$ と求まることになる。

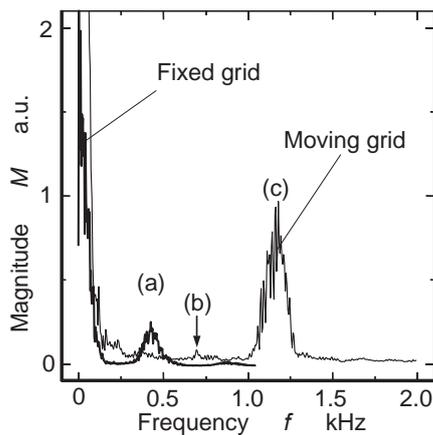


図5 散乱光の周波数スペクトルの一例

本論文で検討する計測法における流速測定誤差 $\Delta V/V$ は空間に形成した光の縞の誤差と周波数測定誤差に依存すると考えられる。すなわち、 $\Delta V/V$ は、

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta d_g}{d_g} + \frac{\Delta f}{f} \quad (6)$$

と表せる。ここで右辺第1項は格子縞の誤差、第2項は周波数測定誤差である。今回製作した格子縞の誤差は10%程度であった。また、FFTアナライザーの測定分解能は設定周波数レンジの0.0025倍であり、測定周波数を設定周波数レンジの1/2とした場合、測定誤差は0.5%程度と見積ることができる。これより今回製作した測定装置の誤差は11%程度と考えられる。ただし、エッチング等により精密な格子を製作することができれば、精度はさらに向上できるものと考えられる。

4. 実験結果および考察

4.1 高速ビデオによる確認実験 上記の原理によって流れが計測できるかを確認するために、粒子が実際に格子を通過する速度を高速ビデオにより求め、散乱信号から求めた速度と比較した。この確認実験では高速ビデオでの撮影が容易な水噴霧の液滴（液滴径

60~300 μm)を散乱粒子として用いた。結果を図6に示す。図の横軸は噴霧の噴射圧で、図中の●が高速ビデオによる速度、○が本計測法による速度を示している。両者が良く一致していることが確認できる。

4.2 格子間隔と粒子径の関係 次に、前述の実験装置で示したように、円管内の流れを用いた実験を行った。まず、適切な格子間隔を検討した。前述のとおり本研究で用いた散乱粒子は、平均粒径が379 μm 、および310 μm の粒子である。ロンキールーリングの格子間隔を様々に変えて、得られる散乱信号と周波数スペクトルを観測することで、散乱粒子に対して、どの程度の格子間隔が適切かを調べた。

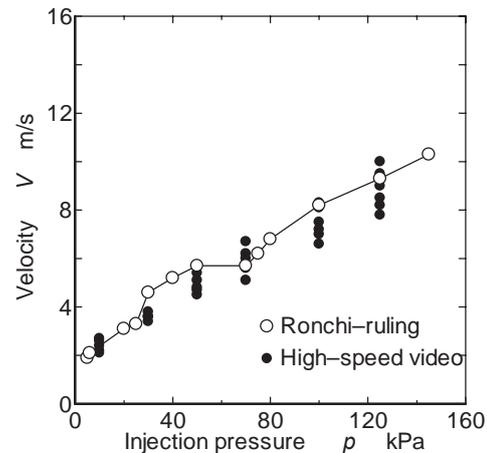


図6 高速ビデオを用いた確認実験結果

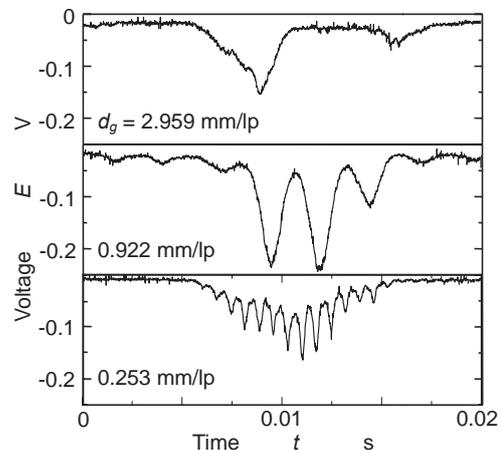


図7 散乱光の信号波形

図7は格子間隔 d_g を変えて求めた散乱信号の波形である。格子間隔が2.959mm/lp、0.922mm/lp、0.253mm/lpの例を示したが、実際は1ラインペアあたり明暗が一組あるので、これらの値の半分の長さの光が粒子に当たっている。また、散乱信号が検出された場合に電圧信号が低下する回路となっているが、周波数解析を行う際には問題は生じない。

この結果から判断すると粒子径に比べて格子間隔が

十分に大きな 2.959mm/lp の条件では、明瞭な周期的波形を得ることができなかつたが、0.922mm/lp、および、0.253mm/lp の場合は周期的な波形を検出することができた。特に 0.253mm/lp の場合は、粒子の平均粒径が格子間隔よりも大きい、周期的な散乱信号が発生することが確認できた。ただし、この場合の波形の一つ一つの山が 0V の値まで戻らずに、全体的に負の方向に下がっている。この理由は、散乱粒子が光線の間隔よりも大きいために、同時に複数の光線が散乱されているためである。サンプリングボリューム内に複数の粒子が入っても、いくつかの格子間を通過する間の粒子群の動きが同じならば、FFT のピーク周波数は変わらず、計測への影響はほとんどないと考えられる。

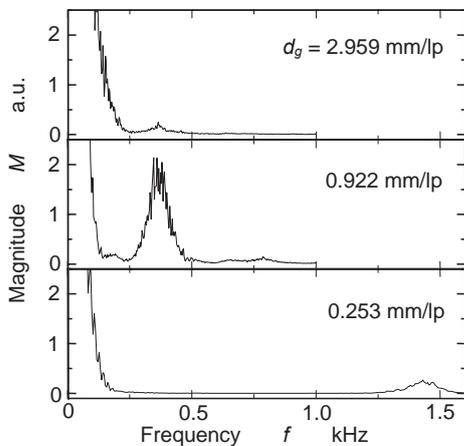


図8 散乱光の周波数スペクトル

図8は図7と同じ条件で求めた周波数スペクトルの波形である。図の $d_g=2.959\text{mm/lp}$ および 0.922mm/lp の場合は測定レンジを 1kHz としたデータを取ったために、それ以上の周波数のスペクトルは表示していない。図より 0.922mm/lp の場合に最も明瞭なピークが現れていることがわかる。この条件は、ロンキールーリングによって作られる光線の幅が、粒子の平均粒径よりも若干拡ぐ、粒子から比較的周期性の良い散乱信号が得られたためであると考えられる。これより以下の実験では間隔が 0.922mm/lp の格子を用いることにした。

4. 3 円管内流れの計測 円管内の速度分布を計測する前に、流速条件を変えてどのように周波数スペクトルが変化するかを調べた。図9は管中心軸上でレイノルズ数 Re が、3400、6330、および、8900 のスペクトル例で、流れの状態は $Re=3400$ の場合が層流から乱流への遷移領域の流れ、他の二つが乱流状態であると考えられる。いずれの場合も散乱信号によるバンドスペクトルが見られ、ピーク値を求めることができた。また、レイノルズ数が大きくなるのにしたが、バンドスペクトルの幅も拡ぐなっていくことがわかる。

これは、乱流変動が大きくなり、光の格子を通過する粒子速度にばらつきが増えたためと解釈できる。

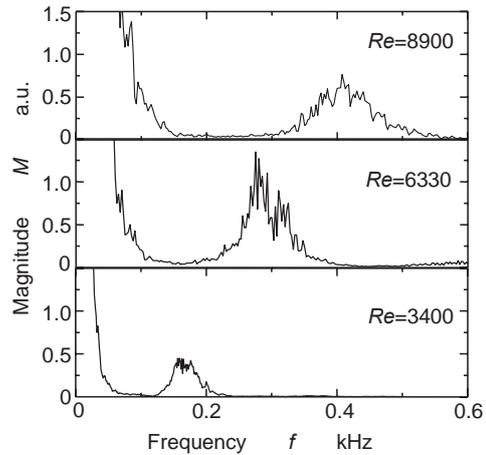


図9 散乱光の周波数スペクトル ($Re = 3400, 6330, 8900$)

図10は流れが層流の条件 ($Re=730, Re=1176$) で、円管内流れの速度分布を求めた結果である。図中の実線は、十分に発達した場合の層流速度分布を表している。それぞれのレイノルズ数の条件において、計測された速度が十分に発達した流れの速度分布と良く一致していることがわかった。また、壁付近の速度分布についても計測可能であることが確認できた。壁近傍の速度は 0.01m/s 以下の部分も検出されており、ピトー管などでは検出が難しい低速域についても測定が可能であることが確認できる。各位置での測定データのばらつきは、層流中にも存在すると考えられる小さな乱れ成分や、周波数スペクトルからのピーク波長の読み取り誤差などによるものと思われる。

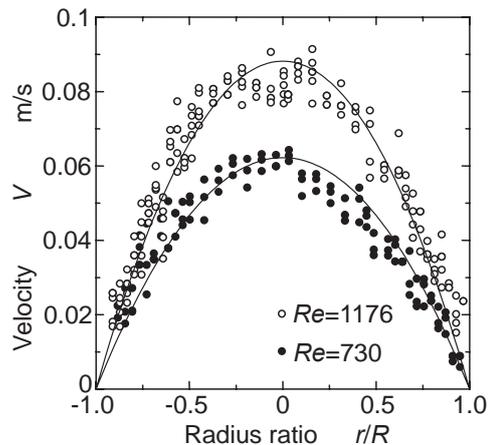


図10 層流条件における円管内流れの速度分布

図11は、 $Re=4451$ 、および、 $Re=6138$ の条件で、流れが乱流の場合の測定結果を示したものである。ま

た、図中の実線は、滑らかな円管内流れに対する対数法則の式から求めた平均速度分布を示している。破線は $1/7$ べき乗則による分布を表している。 $Re=4451$ における、対数法則の式および $1/7$ べき乗則による速度分布はほぼ同一の値をとるため、実線と破線は重なって見える。実験結果とこれらの速度分布を比較すると、それぞれのレイノルズ数条件で、両者が良く一致していることがわかる。各位置でのデータのばらつきは、主に乱れによるデータのばらつきや、周波数スペクトルのピーク波長の読み取り誤差によるものと思われる。また、図10と11を比較すると、速度に対するばらつきの程度は相対的にほぼ同じであるが、乱流の場合の方が乱れ成分が大きいためばらつきの絶対値が大きい。

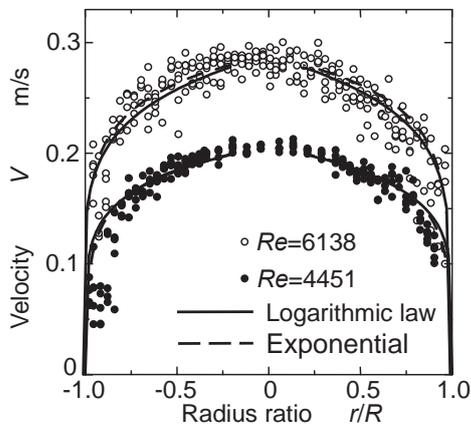


図11 乱流条件における円管内流れの速度分布

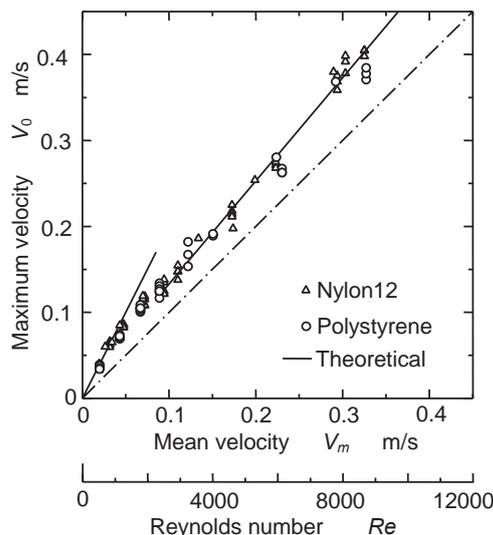


図12 円管中心軸上の速度と平均流速の関係

図12は円管中心軸上の速度を平均流速に対してプロットした結果である。また、図中の実線は円管内層流ならびに乱流の半理論式から求まる平均速度と中心

速度（乱流の場合は平均中心速度）との関係を表している。実験で得られた中心速度はこれらの線に良く一致していることがわかる。

以上のようなことから、本研究で製作したロンキールーリングを用いた計測法によって流れ場の計測が可能であることが確認できた。

5. 結 論

線と空間が同じ幅で交互に配置された格子縞であるロンキールーリングを用いた流れの速度計測法を検討し、以下の結論を得た。

1. ロンキールーリングによって空間内に構成された光の縞を通過する微粒子からの散乱信号を検出することで、その微粒子を含む流れの速度を求めることができる。
2. 格子縞で形成される光の縞の幅が、散乱粒子の直径よりも若干広い場合に、明瞭な散乱信号を得ることができる。
3. 円管内の層流および乱流流れに本計測法を適用した結果、円管内の速度分布（乱流の場合は平均速度分布）を求めることができた。

謝辞 本研究を行うに当たり、実験装置の開発費用の一部として（独）科学技術振興機構 JST サテライト新潟「平成18年度シーズ発掘試験研究」の支援を受けた。また、本学学生、曹 嗣源君、高橋 健君、望月 聡君の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 鶴田匡夫, 応用光学 I, (1990), p.266, 培風館.
- 2) 眞島正一・磯部孝編, 計測法通論, (1991), p. 66-68, 東京大学出版会.
- 3) Shaklan, S., Pravdo, S., Gatewood, G., and Ftacis, C., Modeling of a Space-based Ronchi-ruling Experiment for High-precision Astrometry, Astrophysics and Space Science, Vol. 212, No. 1-2, (1994), pp. 453-463.
- 4) Borders, J. L. and Granger, H. J., An Optical Doppler Intravital Velocimeter, Microvasc Res. Vol. 27, No. 1, (1984), pp. 117-127.
- 5) Maeda, M. and Hishida, K., Sizing and Velocity Measurement of Particles in Spray Jet Using a Two-Colour, Four-Beam LDV, Laser Diagnostics and Modeling of Combustion, (1987), pp.1-10.
- 6) Obokata, T. and Hanada, N., Gas Velocity and

- Turbulence Measurement in a Spark Ignition Engine Using a LDA with a Fiber-Optic Pick-Up, Laser Diagnostics and Modeling of Combustion, (1987), pp.251-258.
- 7) 小保方富夫・大澤敏彦, レーザ計測, (1994), p.105, 裳華房.
 - 8) Nakatani, N., Yamada, T. and Sakabe, T., Measurement of Turbulent Structure in Premixed Flame with Multi-point LDVs, Laser Diagnostics and Modeling of Combustion, (1987), pp.11-20.
 - 9) Hayami, H. and Hirashima, K., Velocity Measurement in Combustion Fields Using a Laser-2-Focus Velocimeter, Laser Diagnostics and Modeling of Combustion, (1987), pp.21-28.
 - 10) Glatt, I. and Kafri, O., Moire-deflectometry (Ray Tracing Interferometry), Optics and Laser in Engineering, Vol.8 (1988), pp.277-320.
 - 11) Ovchinnikov, Y. B., Fresnel interference pattern of triple-slit interferometer, Optics Communications, Vol.216 (2003), pp.33-40.
 - 12) 可視化情報学会編, PIV ハンドブック, (2005), p.31, 森北出版.