

「計測トレーサビリティ確保をめざしたレーザー流速計の新型較正技術の開発」
国立大学法人 神戸大学 自然科学系先端融合研究環 重点研究部 白井 克明

1 研究の背景と目的

現代の高度なものづくりにおいて計測は欠かすことのできない根幹技術であり、その不確かさトレーサビリティの需要が高まっている。計測におけるトレーサビリティとは、「不確かさがすべて表記された切れ目のない連鎖の比較によって、決められた基準に結び付けられ得る測定結果、または標準の値の性質である」と定義され、国家標準がその基準となる。不確かさはこれまで統計的要因を中心に扱われてきたが、1995年発行の国際文書「計測における不確かさの表現ガイド」最新版¹⁾で方針転換があり、これまであまり考えられてこなかった計測機器そのものが持つ不確かさを含めた統一的な扱いが導入された。計測器の不確かさ評価の根底には較正作業があり、その技術や装置の性能が重要である。

熱流体の計測では、ターボ機械の動翼背後などプローブ挿入が物理的に困難な場面で非接触計測が可能な方法としてレーザー計測が広く用いられる。中でもレーザー・ドップラー流速計(LDV)は確立された手法であり、高時空間分解能と幅広い流速ダイナミックレンジを特徴とする。また、LDVは不確かさトレーサビリティ確保が可能な周波数計測であり、広い速度域で直線出力が得られることから、米国、日本、ドイツで気体流量の国家標準として定められている。

しかしながらLDV自体の計測不確かさおよびトレーサビリティに対して、個々の要素に関して報告はあるものの、システム全体の不確かさ値に言及するものは国家標準以外に稀である。数少ない不確かさ評価によると、LDVの不確かさはガウシアンビームの性質に基づく光学的要因に支配され、最低0.6%程度の不確かさが存在する²⁾。LDV計測は較正速度の再現であり、較正不確かさが計測に大きく影響する。国家標準以外の較正では、較正法がLDVを越える0.6~1.7%程度の不確かさを持つ²⁾。国家標準では0.03%程度の不確かさが達成されているが、標準研究所内に据え付けた状態での使用に限定される。

本研究では、LDVを中心とするレーザー流速計を対象として、国家標準以外で使用される較正不確かさの低減を目指した。研究代表者が提案する新たな較正方法では、個々の流速計ユーザーが実験室外においても使用でき、小型で携行可能である。さらに、新較正法はほぼ完全な自動化が可能であり、レーザー計測に精通しない一般のユーザーに高度な較正を広く提供することが可能である。本研究を通じて、新較正法が原理的にトレーサビリティ確保可能であることを示し、性能の限界を調べ、実験を通じてその性能を確認したことを報告する。

2 研究方法・研究内容

(1) レーザー流速計とその較正

LDVは光学干渉計である。基本原理を図1に模式的に示す。一对の可干渉レーザー光をレンズで絞り、その焦点で交差させると、光の波動的性質によって交差部分にほぼ平行な明暗パターン(干渉縞)が形成される。この干渉縞領域が測定体積となる。計測対象の流体に予め微粒子を混入させておくと、粒子が測定体積を通過する際に内部の光が散乱される。散乱光を検出器で観測すると、散乱信号は測定体積内の干渉縞の明暗パターンに応じた振動波形を持つ。この、光のドップラー効果を受けた振動周波数 f [Hz]はドップラー周波数と呼ばれ、通過する散乱粒子の速度 u [m/s]に比例する。両者は干渉縞の間隔 d [m]

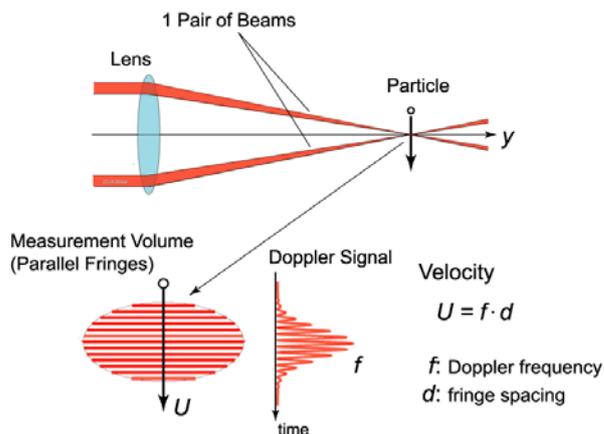


図1：レーザー・ドップラー流速計の原理図

一方、LDVの較正は式(1)において比例定数 d [m] を求めることである。それには、既知で再現可能な較正速度 u_c [m/s] で動く散乱物体を用いて LDV の測定体積をスキャンするのが常である。すなわち、その際のドップラー周波数 f_c [Hz] から

$$d = u_c / f_c \quad (2)$$

として干渉縞間隔 d [m] が求められる。よって LDV における流速の計測とは、比例定数 d [m] を通じて較正速度を再現することに他ならず、較正速度の不確かさが LDV 計測の不確かさに多大な影響を及ぼす。LDV の較正において重要なことは、いかに既知で再現性のある散乱物体の速度を作り出すかという点にある。それには、多くの場合に既知の一定角速度 ω [rad/s] で回転する円盤に取り付けられた散乱物体が用いられ、その較正速度は

$$u_c = r\omega \quad (3)$$

の形で実現される。不確かさ解析を行うと、円盤の回転角速度に比べて散乱物体の回転軌道半径 r [m] の不確かさがおおそ 1 桁大きいことがわかる。そこで、較正の不確かさを抑えるには、回転軌道半径の不確かさを減らすのが効果的である。本研究では、較正半径の不確かさを回転角速度の不確かさ程度 (0.1%以下) まで小さくすることに挑戦した。

(2) LDV の新較正法

本研究では、新較正法は、一定速度で回転する円盤を用いて、図2の概念図に示すように較正円盤に散乱点 (ピンホール) を複数配置する。各々の散乱地点 j でドップラー周波数 f_j [Hz] を測定する。一つの散乱点の計測後、精密リニアステージによって次の散乱点 ($j+1$) まで円盤を半径方向に沿って移動させる。一つの軌道半径から次の散乱点の軌道半径までの移動距離 Δx_j [m] は、精密リニアステージに取り付けられた距離センサーもしくはエンコーダーによって記録される。式(1)と(3)から、以下のようにリニアステージ座標とドップラー周波数の間には、一次関数の関係がある。

を通じて

$$f = u/d \quad (1)$$

の関係にある。干渉縞間隔 d [m] は、使用するレーザー波長と幾何学的配置によって一意的に決まる定数である。そこで、観測散乱光の周波数 f [Hz] を測定することで、通過粒子の速度 u [m/s] が求まる。これが LDV の基本原理であり、予め流体に混入された微小粒子が流体の局所運動に追従する限り、粒子の速度を基に流体の速度が間接的に測定される。

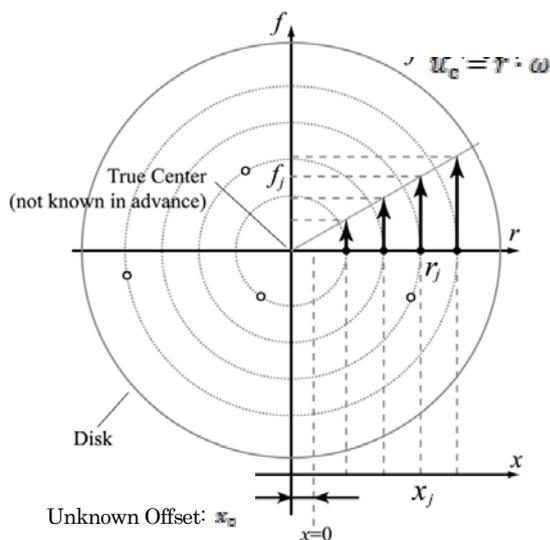


図2：新型較正装置の原理

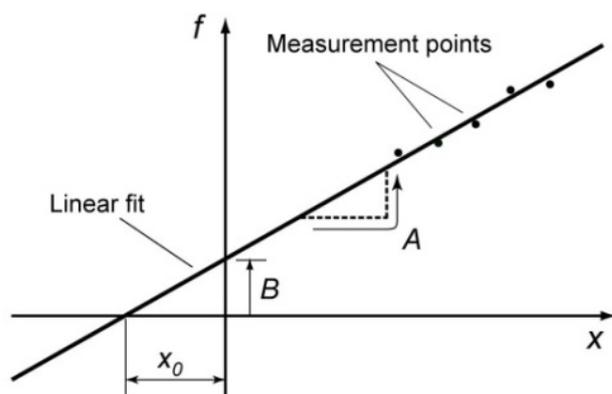


図3:精密ステージ位置とドップラー周波数の間に成り立つ直線関係

$$f = Ax + B \quad (A, B: \text{定数}) \quad (4)$$

ステージ座標の原点は未知であるが、式(4)の関係を用いて最小自乗法近似によって求められる。式(4)でドップラー周波数が回転軌道半径に比例する（すなわち、図3のように各点で式(3)が成り立つ）ことから、ステージ座標オフセット x_0 を算出することができ、較正係数である干渉縞間隔 d は

$$d = \omega/A \quad (5)$$

と求められる。これが新較正法の基本原理である。新較正法の特徴は、直接知ることの困難な較正半径を知ることなく、直線関係の傾きから干渉縞間隔を求めることにある。

3 研究成果

(1) 不確かさトレーサビリティの確保

新較正法では、精密ステージ位置とドップラー周波数の関係を最小自乗近似し、その直線の傾きから較正定数を求めている。最小自乗近似は多くの教科書で扱われ、その近似とその不確かさに対して出力側（式(4)における変数 f ）の不確かさが貢献することが記述されている。ほぼすべての教科書において、入力側（式(4)における変数 x ）は絶対的で、その不確かさはゼロであるとされている。しかしながら、現実的には入力側にも不確かさがあり近似に影響を及ぼす。つまり、最小自乗近似における不確かさに対しては、入力・出力側のいずれもが近似に影響を与えるとともに不確かさに貢献する。この点に関して、本研究では入力側の不確かさを従来のように無視することなく考慮し、全体的な不確かさ解析に取り込むことに成功した。つまり、本研究を開始する以前に組み入れられていなかった入力側つまり精密ステージ位置の不確かさを最小自乗近似とその不確かさに組み入れた。それにより、完成度の高い較正方法が確立されるに至った。新たに組み入れた手法を用い、これまで得られた研究代表者の実験データを再解析した結果、本研究で提唱する新型較正法で 0.2%程度の不確かさが得られた。また、新型較正法によって実現可能な原理的不確かさ限界に関して 0.05%程度と見積もられることが判明した。詳細はドイツ・ドレスデン工科大学の研究協力者（ユルゲン・チャルスケ教授とその同僚ラルス・ビュットナー博士）とともに専門分野の査読付き学術雑誌「レーザー研究」にて学術論文として報告した³⁾。

(2) 較正実験

較正実験を行うにあたり、LDV システムを自作構築した。自作 LDV は図4のように、光学系と信号処理系から成り、光学系はさらに送光部 C と受光部 E を含む。送光部はレーザー光源、レンズ系、プリズムなどから成り、計測体積となる干渉縞を作成する。また、受光部は計測体積を通過する散乱体からの散乱光を受光し、光ファイバーを介して計測信号を検出器 B へ伝送する。検出器では光電変換によって散乱光が電気信号に変換される。電気信号はオシロスコープ A へと接続される。パソコン上の自作プログラムでオシロスコープを制御し、計測信号を取り込み、信号処理を行う。信号処理にはプログラム言語 LabVIEW (National Instruments 社) を用い、USB (=Universal Serial Bus) ケーブル

を介してオシロスコープと通信して計測信号を取り込んだ。さらに取り込んだ信号から、計測信号部分を判別・検出し、周波数算出を行う部分は LabVIEW 上でソフトウェア的に実現した。較正実験システムとして、ピンホールを取り付けた較正円盤 D を直流モーターに付け、3 軸直線ステージ上に設置した。較正円盤は自作し、ピンホールもしくはスリットをはめ込み、散乱体として使用した。モーターはパルス制御方式で回転数制御した。

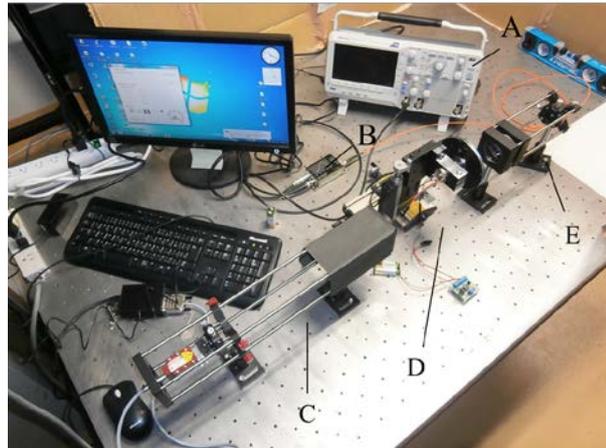


図 4：実験装置写真 (A:オシロスコープ、B:検出器、C:送光部光学系、D:較正円盤、E:受光部光学系)

実際にドップラー信号を検出し、システムが LDV として動作することを確認し、基本的な較正実験を行った。今後、さらなる較正実験を続けるとともに、ロバスト性を考慮し、散乱体としてピンホール以外のものも試していく計画である。さらに、新較正法の普及を目指し、較正システム全体の制御をプログラム言語 Python で統一する方針である。

なお、本研究に関して、一般社団法人 日本機械学会 IIP2014 情報・知能・精密機器部門 (IIP 部門) 講演会 (2014 年 3 月 18~19 日、東洋大学白山キャンパス開催) にて、ベストプレゼンテーション表彰を頂いたことを記す。

4 生活や産業への貢献および波及効果

現段階では目に見える形での生活や産業へ直接の貢献や波及はないが、将来的に波及効果が出ると考えている。まず、最初の本研究の成果である、精密ステージ不確かを含んだ最小自乗法によるトレーサビリティ確保が確立された意義は大きい。本研究の新型較正法は完全な自動化が可能であり、製品化を含めて新型較正法を一般ユーザーに提供することを計画している。高度な新技術を供給することにより、産業計測や研究開発の場面でさらなる高品質化と技術革新を生み出す原動力となるよう目指している。

参考文献

- 1) BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML: Guide to the expression of uncertainty in measurement, 2nd edn. (1995).
- 2) K. Shirai: Development and application of novel laser Doppler velocity profile sensors for high spatially resolved velocity measurements in turbulent shear flows. Dissertation (Dresdner Berichte zur Messsystemtechnik, Vol. 3, ed.: J. Czarske, Shaker, Aachen) (2010)
- 3) 白井克明、ビュットナー ラルス、チャルスケ ユルゲン：計測の不確かさトレーサビリティ確保を目指したレーザー流速計の新型較正法の開発、レーザー研究 (The Review of Laser Engineering)、Vol. 42, pp. 404-411 (2014)