

感温蛍光粒子を用いた流動場の温度、速度分布の同時計測技術

Simultaneous Measuring Technique for Temperature and Velocity Distribution in a Flow Field using Thermographic Phosphor



川添 浩平* ¹ Kohei Kawazoe	中拂 博之* ² Hiroyuki Nakaharai
真島 浩* ³ Hiroshi Mashima	金巻 裕一* ⁴ Yuichi Kanemaki
山田 明* ⁵ Akira Yamada	染矢 聡* ⁶ Satoshi Someya

当社の製品群には液体・気体の流体を扱うものが多く、流動場の速度・温度分布の特性、挙動の実測把握が製品性能向上におけるキーとなる。これに応える技術として、蛍光 PIV 法が挙げられ、当社では(国研)産業技術総合研究所の協力を得て製品開発試験への適用技術を開発している。本手法は感温蛍光粒子を用いた PIV であり、速度・温度分布の同時計測が可能である。試験流路にて計測手法を検証し、流体速度と温度の相関を評価した。

1. はじめに

当社は熱交換を伴う製品を数多く設計/製造しており、その性能・信頼性向上のためには、伝熱面からの熱輸送量を正しく評価することが重要となる。一般的に、流れが十分に乱れた場所では熱輸送が促進されるように、流れ場(運動量輸送)と温度場(熱輸送)には相関がある。そのため、熱輸送を議論する際には伝熱面近傍の流れ場を評価することが必要不可欠であり、実測手法として PIV (Particle Image Velocimetry: 粒子画像流速計) が活用されている。しかしながら、今後、より高精度な解析・評価手法を確立するためには、流れ場に併せて、同時刻の伝熱面近傍の温度場を計測し、両者の相関を評価することが必須になると考えられ、従来の PIV では不十分である。

これに対し、当社では、流れ場と温度場を高精度、かつ二次元で同時計測可能とする蛍光 PIV 法による製品計測技術の開発を進めている。本手法は PIV で用いられるシード粒子の代わりに、蛍光・燐光発光に温度依存性を持つ感温蛍光体を使用し、レーザー光により蛍光を発生させて画像を取得・計測する PLIF (Planar Laser-Induced Fluorescence: 平面レーザー誘起蛍光法) を組み合わせた手法である。流れ場については従来同様の PIV 解析で評価する一方、温度場については、蛍光発光特性の温度による差異を元に評価する。同一のカメラ画像で速度・温度を評価可能であるため、個別の計測システムを組む必要が無い等の利点も有する。

本技術は当社製品開発における実現象把握において重要な計測技術になると考えられる。本報では、蛍光 PIV 技術構築における単純化した試験流路での計測結果について紹介する。

2. 蛍光 PIV 法

2.1 感温蛍光体

分子中の電子は分子内のエネルギー準位差に相当するエネルギーを受けると、上準位に励起され、これが再び元の準位に戻る際にその準位差に応じたエネルギーの光を放出する。これが

*1 総合研究所 電気・応用物理研究部 主席研究員 *2 総合研究所 伝熱研究部 工博
 *3 総合研究所 電気・応用物理研究部 主席研究員 理博 *4 総合研究所 伝熱研究部 室長
 *5 総合研究所 顧問 工博
 *6 産業総合技術研究所 エネルギー・環境領域 省エネルギー研究部門 上級研究員 工博

蛍光であり、放出の持続時間がマイクロ秒、ミリ秒と長いものは燐光と呼ばれる。感温蛍光体は蛍光(燐光)の強度、分光特性、持続時間等に温度依存性を有するものであり、励起光の吸収効率や、電子の励起・遷移に関連するエネルギー準位等が温度により変化することで、感温特性が現れる。有機物の感温蛍光体としてローダミン、フルオレセイン等の色素が挙げられ、感温燐光物質としては有機系金属錯体イオンが挙げられる。また、無機物でも多くの感温燐光物質があり、希土類金属を含有した BAM(バリウムアルミン酸マグネシウム)、YAG(イットリウム・アルミニウム・ガーネット)系などが挙げられる⁽¹⁾。1000℃超の環境にも適用可能な物質もあり、これらを用いた高温領域の計測技術開発も当社では進めている。

2.2 蛍光 PIV 法

本計測手法では感温蛍光体の粒子を流れ場に散布し、速度・温度分布を計測・可視化したいエリアに対して、シートレーザ光を照射する。これにより、必要な断面のみの情報を取得可能となる。粒子からのレーザ蛍光・燐光の空間分布、時間変化を高速度カメラを用いて撮像し、画像を元に速度、温度を解析・評価する。

ここで、速度分布の解析は通常の PIV と同様であり、所定の画像間の粒子移動の量、方向に基づく。一方、温度分布の解析においては、使用する感温蛍光体、場の特性に応じて、複数の手法が使い分けられている。一般に、蛍光・燐光の強度、二波長成分比、寿命の温度による変化が用いられる。本稿の検証では、蛍光強度法を用いた。

本手法においては、流れ場の速度によっては高速度カメラの露光時間を絞る必要があること、並びに流れ場中の粒子を高強度で蛍光発光させて明瞭な画像を得る等の理由から、高ピークパワーのパルスレーザを使用した。

3. 計測手法の検証

蛍光 PIV 法の当社製品開発への適用性検討のため、簡易なリブ付き流路における流速、温度分布の計測を行い、発生する渦と水温の関係を評価した。

3.1 試験装置

リブ付き流路はアルミ製で図1に示す形状のものを用いた。リザーバタンク、ポンプ、流量調整バルブ、冷却ジャケットなどからなる水循環装置の一部にこのリブ付き流路を組み込んだ。リブ付き面に対向した窓からシートレーザを照射し、流路側面の窓から感温蛍光粒子の発光を撮影した。粒子はローダミンBを樹脂ビーズに吸着させたものとし、これに合わせて励起光源に YAG レーザの2倍波(波長 532nm)を用いた。レーザ照射後の蛍光発光に対して、フィルタにより 560nm 以上の成分を選択し、高速度カメラで撮影、画像処理により流速、温度分布を評価した。流路の背面にはヒータを設置しており、加熱により水流に温度変化を与えた。また、流量は 1.5, 4.5l/min とした。計測条件を表1に示した。

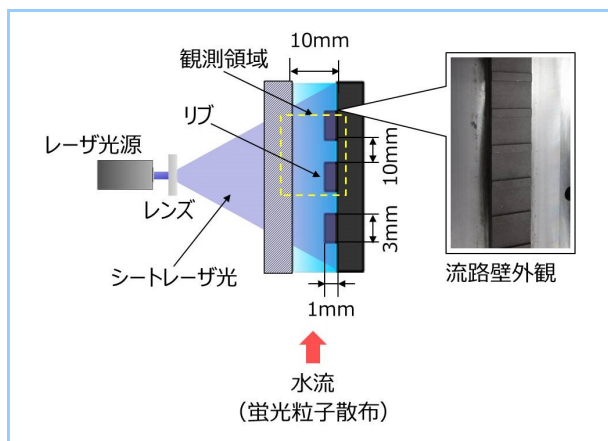


図1 リブ付き流路

表1 計測条件

項目	条件
流量	1.5, 4.5l/min
蛍光材料	ローダミンB
レーザ波長	532nm
蛍光観察波長	560nm 以上
計測エリア	11×18mm

3.2 検証結果

(1) 流体の速度, 温度分布計測結果

本手法により, 流路内の速度, 温度分布を取得した結果を図2(a), (b)に示す。本結果はリップ高さ1.0mm, 流量1.5ℓ/minの条件下にて取得した。同図(a)において, 流路壁近傍の白線で示した位置が流速0mm/sである。これより, リップの後流側(図中, リップの上側領域)において, 流れが逆流し, 渦領域が形成されていることが分かった。また, リップの上流側にも小規模であるが, 渦が発生している。流速分布状況と, 同図(b)の温度分布計測結果とを対比すると, リップ後流域が高温となっており, 渦領域と合致することが分かった。これは, 渦領域において流体が滞留することで, 主流への熱輸送が阻害されているためであると考えられる。

続いて, 流量条件を4.5ℓ/minに増加して計測した結果を図3(a), (b)に示す。1.5ℓ/minの条件に比べて, 渦領域が縮小している。また, これに応じて, リップ後流側の高温域も縮小し, 温度の最高値が32℃から26℃となり, 温度レンジも低下していることが分かった。

これらの結果から, 感温蛍光粒子を用いた蛍光PIV法により流動場を計測することで, 同時刻の速度, 温度分布を定量化, 可視化することができ, 流路形状が流線に与える影響, そのときの温度場の変動の関係を詳細に把握, 評価できることが分かった。

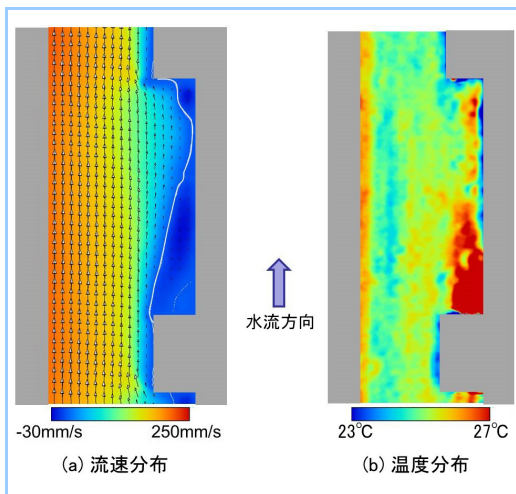


図2 流量1.5ℓ/minの計測結果

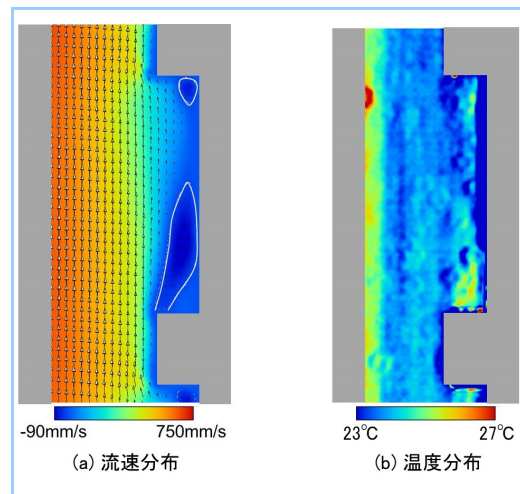


図3 流量4.5ℓ/minの計測結果

(2) 流路加熱壁表面の温度分布計測結果

流路内の流体計測に加えて, 感温蛍光粒子を流路壁面に塗布することで, 表面温度を計測した。水流の存在下では赤外線が吸収されるためIRカメラでは水流を通しての流路壁温の計測は不可能であるが, 感温蛍光粒子の場合は励起光, 蛍光発光とも水を透過するため, 計測が可能となる。本計測用に粒子を塗布した流路に交換し, 励起光はビーム形状を変え, 流路壁面をカバーするよう照射した。また, カメラも壁面と対向して配置し, 蛍光発光を撮影した。

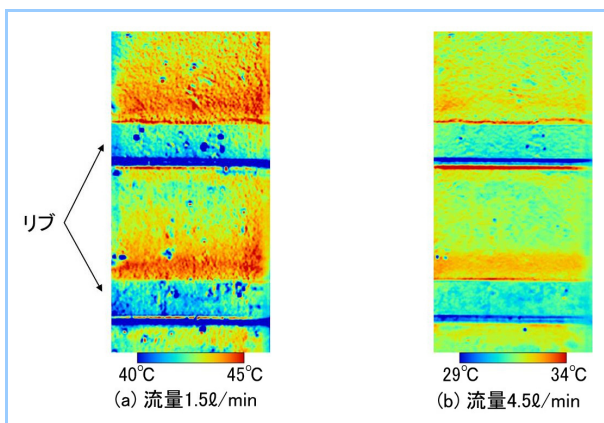


図4 流路壁面温度の計測結果

計測結果を図4に示す。流路形状、流量、加熱等の条件は図2, 3と同様である。流体の温度分布と同様、リブ後流の渦発生領域において壁面温が高くなっており、水温の上昇に繋がったことが分かった。渦により、壁面からの熱輸送が阻害された結果と考えられる。(図中、まばらに存在する周囲より低温のスポットは流路壁面上に発生した気泡によるものである)

以上の 3.2(1), (2)の結果から、感温蛍光粒子を用いた計測手法は伝熱面と流体間の熱伝達、流動場内の速度・温度の関連を取得できるため、当社製品において種々の形式で用いられている熱交換器の開発、設計検証などに適用でき、効果を発揮すると考えられる。

4. まとめ

熱交換器などにおける流動場の温度・速度の二次元分布を同時に取得可能な蛍光 PIV 法の開発について述べた。本手法は、当社製品における、液体、気体の流動場における実現象のより詳細な把握、これによる設計品質向上、製品の開発力、競争力強化に貢献すると考えられる。本技術の製品開発試験適用に向け、簡易な形状の流路で計測を行い、流動場の現象可視化・計測を行った。壁面にリブ(段差)を設け、加熱した流路での計測の結果、リブ後流側に発生する渦を確認でき、この部分が高温になっており、流れ場と温度場の相関を評価できることを確認できた。本計測で得られる流体及び温度の挙動は、CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析における乱流モデルの検証/改良への活用が期待できる。

今後、本手法を高温ガスの計測へ展開し、エンジン、ターボ、など当社製品の開発試験への適用も進め、さらなる性能向上に貢献していく。

なお、本手法の開発においては、産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 省エネルギー研究部門より多大なご指導・ご協力を頂いた。簡略ながら、ここに感謝の意を表明する。

参考文献

- (1) Alden, M. et al., Thermographic phosphors for thermometry: A survey of combustion applications, Progress in Energy and Combustion Science, 37 (2011) p.422-461