

対流現象の可視化と光画像計測

Visualization and Opto-Imaging Measurement of Convection Phenomena

正 西野 耕一 (横浜国大)

Koichi Nishino, Yokohama National University, 75-9 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama

This article describes some recent results obtained by the author and his group by applying visualization and opto-imaging measurement to various convection phenomena. The results presented include those related to index-matching stereo particle image velocimetry (PIV), 3-D particle tracking velocimetry for thermocapillary convection, micro fluorescent particle surface velocimetry, dynamic PIV, stereo direct-imaging for particle measurement, micro-imaging displacement meter for dynamic surface displacement and electronic speckle pattern interferometry. Although those techniques cover only a limited area in this field, they provide an idea on the current status and the future direction of this field.

Key Words: Visualization, Opto-Imaging Measurement, Convection

1. はじめに

対流現象は、速度・温度・濃度などの多数の物理量が互いに関連しながら非定常に3次元挙動する多次元多自由度系を構成する。そのため、現象の迅速で効率的な理解のために、可視化と光画像計測が多用されている。その特徴を示すキーワードは次の通りである。

- ・非接触・非侵襲 (non-contact, non-intrusive)
- ・高分解能 (high-resolution)
- ・高速・高応答性 (high-speed, quick-response)
- ・多次元 (multi-dimension)
- ・多成分 (multi-component)
- ・視覚的 (visual)

代表的な光画像計測手法を測定量によって列挙すると表1の通りである。

Quantity	Method
Velocity	Particle Image Velocimetry (PIV)
	Particle Tracking Velocimetry (PTV)
	Doppler Global Velocimetry (DGV)
Pressure	Pressure Sensitive Paint (PSP)
Density	Holography Interferometry
	Speckle Interferometry
	Laser-induced Fluorescence

	Infrared Camera
Temperature	Temperature-sensitive Liquid Crystal Laser-induced Fluorescence
Particle	Direct-imaging Technique Interferometric Laser Imaging Technique Shadow Doppler Technique
	Direct-imaging Technique Speckle Interferometry Moire Fringe Method
Interface	

これらの可視化計測手法を実現するシステムは一般的に Fig.1 のように図式化される。外部から光を照射して現象の情報を含む散乱光・放射光を得る部分が可視化であり、その情報を光学デバイスや電気電子機器で定量化することが光画像計測である。最終結果を得るまでには、ここに図示された多くの過程を経る。

以下本稿では、筆者が取り組んでいる可視化と光画像計測を紹介することによって、限られた範囲ではあるが、この分野の状況をお伝えしたい。

2. 可視化と光画像計測の状況と適用例

2.1 流速測定

乱流計測を視野に入れると、流速測定手法として熱線・熱膜流速計、レーザドップラ流速計、超音波流速計、粒子像流速計がある。筆者は粒子像流速計 (PIV と PTV) の開発・実用化に長年取り組んでいる。その研究開発ならびに実用化の動向は次のキーワードで表せる。

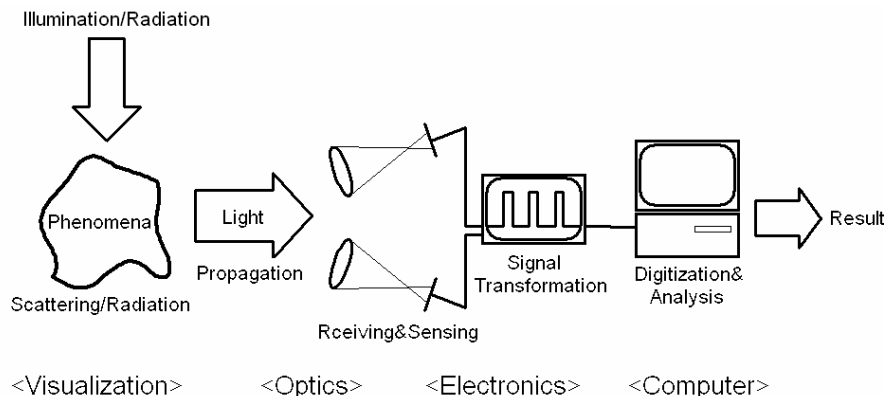


Fig. 1 Basic configuration of visualization and opto-imaging system.

- ・ステレオ計測
- ・3次元計測
- ・マイクロ計測
- ・ダイナミック計測

ステレオ計測は2台のカメラを用いて、シート光内部の速度3成分の計測を行うものである。技術的には1990年頃にほぼ完成したが、精密なカメラ校正を必要とするため、工学分野への応用は多くない。筆者のグループは、カメラ校正の煩雑さを最低限に抑え、多断面のステレオ計測を実現する方法として、インデックスマッチング法を実用化した⁽¹⁾。Fig.2は3次元形状データから製作されたアクリル製エンジンモデルである。Fig.3は、そのモデルを屈折率調合した流体（インデックスマッチング流体）に浸した様子である。3次元曲面を形成する吸気ポートやシリンダの内部構造が可視化されている。その状態において、シリンダ内部流動の多断面ステレオPIV計測を行った結果をFig.4に示す。CFD結果との比較に適した3次元情報が得られている。インデックスマッチング法はエポキシ樹脂による光造

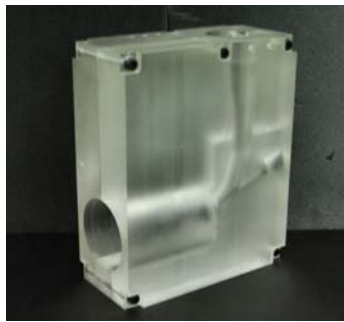


Fig. 2 An acrylic engine model.

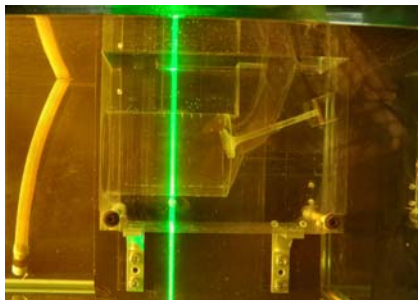


Fig.3 An engine model immersed in index-matching fluid.

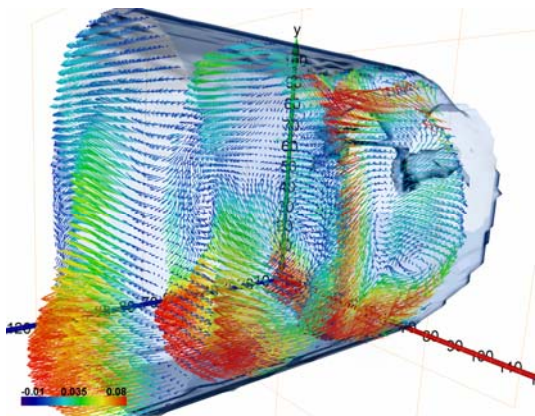


Fig. 4 3-D plot of mean velocity distribution measured in an engine model.

形モデルにも適用できるため、複雑形状流路の光画像計測を効率的に行うことができる⁽²⁾。

3次元計測はフルボリューム計測であり、ステレオ撮影、多眼撮影、シート光スキャン、ホログラフィーなどの方法がある。Fig.5は直径5mmのシリコンオイル液柱に発生する温度差駆動表面張力対流の様子をステレオ撮影によってフルボリューム計測した例である⁽³⁾。対流駆動力の増大とともに流れは定常層流から振動流へと遷移する。Fig.5には振動流状態におけるトレーサ粒子軌跡が示されている。

温度差駆動の表面張力流の不安定性に関する実験は、国際宇宙ステーション（International Space Station : ISS）で実施される予定で、筆者らが開発に携わった3次元PTVが流体物理実験装置（Fluid Physics Experiment Facility : FPEF）に搭載されている（Fig.6）⁽⁴⁾。

マイクロ計測は光画像計測技術の独壇場と言える。センサー挿入は微小な計測対象に擾乱を与えるため、使えないことが多いためである。マイクロ計測技術の分類と特徴は拙著⁽⁵⁾に詳しい。流れ場のマイクロ計測は対物レンズを用いた顕微鏡撮影が主流である。計測対象の寸法（通常、数100 μm 以下）に比べてレーザシート光の厚みが決して薄くないため、ボリューム照明と同じ状況になる。そのため、測定位置の決定は撮影光学系の被写界深度に頼って行われ

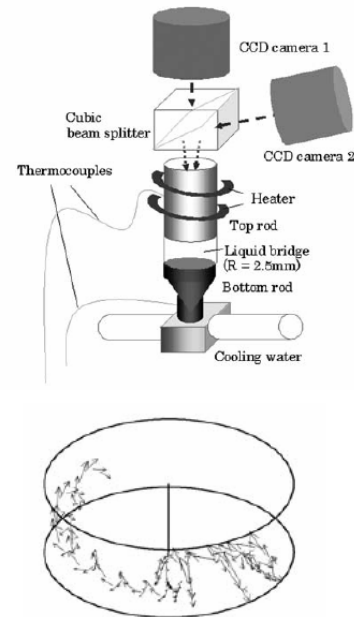


Fig. 5 3-D PTV measurement of thermocapillary convection in a 5-mm diameter liquid bridge.

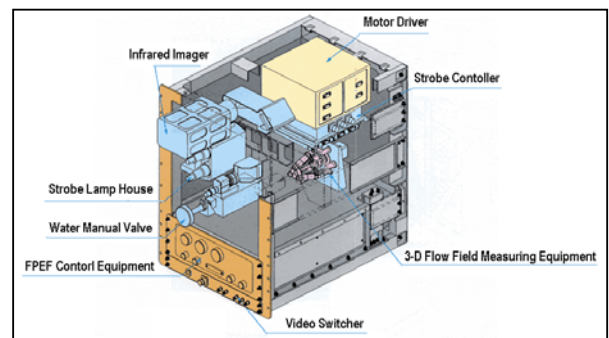


Fig. 6 Fluid physics experiment facility (FPEF) to be operated in the International Space Station (ISS).

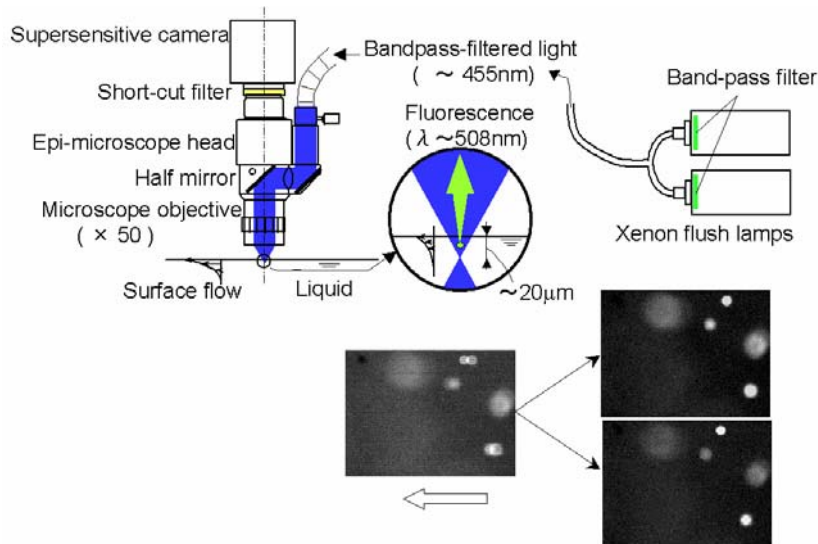


Fig. 7 Micro fluorescent particle surface velocimetry for thermocapillary convection in a liquid bridge.

る。Fig.7は筆者等が開発した蛍光粒子と対物レンズを用いた表面張力流の表面流速計測システムである⁽⁶⁾。被写界深度を $20\mu\text{m}$ 程度に抑えることによって、速度勾配の大きな気液界面近傍の流速の測定を可能とした。

ダイナミック計測は、PIV システムの時間分解能の向上によって、非定常流体挙動を時々刻々捉えるものである。高速度カメラと高繰り返しダブルパルスレーザーの性能向上によって実現された。最新の高速カメラでは 1024×1024

画素で 5400fps が得られており、速度場を 2.7kHz でサンプリング可能である。この周波数はヒトの可聴最高周波数 (20kHz) の約 $1/10$ であり、流体関連騒音への用途が期待される。Fig.8はダイナミック PIV システムを用いて 2kHz の時間分解能で衝突噴流乱流の速度場を捉えた例である⁽⁷⁾。

2.2 粒子測定

流れ場飛翔する微小粒子の挙動（粒径、速度など）の情報は、分散混相流を理解・解析する上での基礎となる。粒子計測手法として、直接撮影法、液浸法、散乱光強度法、回折光強度法、レーザー回折法、位相ドップラ法、透過光減衰法、干渉画像法、シャドウ・ドップラ法など、多数の方法が提案されている⁽⁸⁾。

著者らは、単一粒子の粒径と速度を同時に計測でき、粒子媒質や形状の影響を受けない直接撮影法の研究開発と実用化を進めてきた。直接撮影法は、背景照明で撮影される粒子画像を解析することによって、個々の粒子の粒径と速度を同時計測するものである。欠点は、被写界深度の中の全ての粒子を撮影してしまうことと、被写界深度が粒径に依存していることである。後者の欠点は、大きな粒子ほど実質的な被写界深度が大きいいため、粒径ヒストグラムにバイアス誤差をもたらす要因となる。

その欠点を解消するため、ステレオ撮影によって粒子の

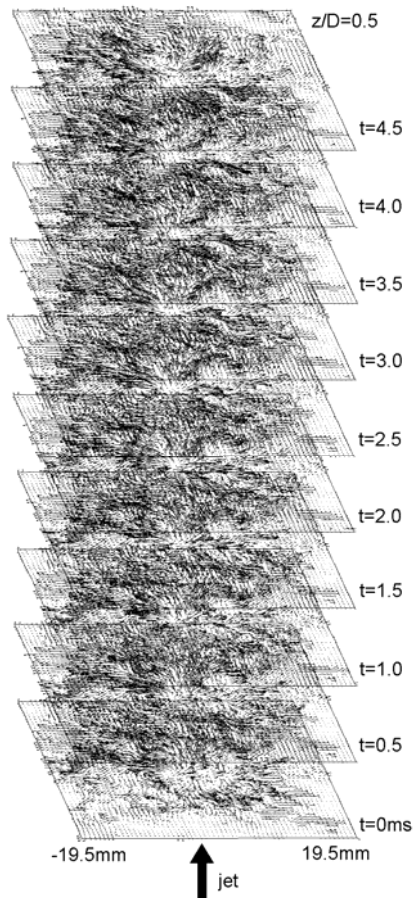


Fig. 8 Time evolution of turbulent velocity field measured on a horizontal cut at $0.5D$ below the impingement wall.

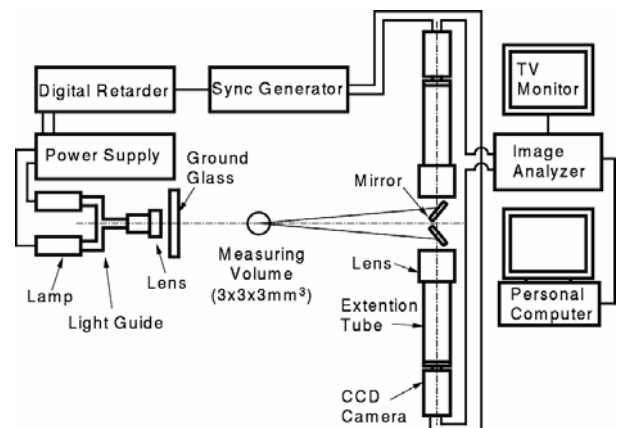


Fig. 9 Stereo direct-imaging system for particle measurement

奥行き方向位置を特定することを提案した⁽⁹⁾。Fig.9はそのシステムを示したものである。計測体積は $3 \times 3 \times 3 \text{mm}^3$ 、計測可能最小粒径は $10 \mu\text{m}$ である。被写界深度の影響の解消に加え、粒子速度3成分が得られるという特徴を有する。

2.3 界面計測

前節の直接撮影法は粒子表面形状を検出するという意味で界面計測ということもできる。この方法を発展させたものが、気液界面の動的変形を計測するための顕微鏡撮影変位計 (Micro-imaging Displacement Meter: MIDM) である⁽¹⁰⁾。温度差駆動表面張力流の振動流遷移に伴う気液界面の動的変形をサブミクロンの分解能で検出することができる。この手法は、ISS 宇宙実験テーマとして国際公募を経て採択された「Experimental Assessment of Dynamic Surface Deformation Effects in Transition to Oscillatory Thermocapillary Flow in Liquid Bridge of High Prandtl Number Fluid」⁽¹¹⁾で利用される予定である。

界面の動的変形を面的に捉えるため、電子のスペックルパターン干渉法 (Electronic Speckle Pattern Interferometry: ESPI) を開発した。Fig.10はそのシステム構成図である。液柱表面(#16)での反射光と鏡面(#9)での参照光とが磨りガラス(#6)で干渉してスペックルパターンを形成する。スペックルパターンの輝度が液柱表面の変位に応じて変化することを利用して (Fig.11 参照)、液柱表面の動的変形を計測する。加熱・冷却に起因する鏡面反射面の動的変形を計測した結果が Fig.12 である。レーザ利用の市販点計測システムの結果と良好に一致する。

3. まとめ

対流現象の可視化と光画像計測手法について、著者らの最近の研究成果を紹介することによって、限られた範囲ではあるが、この分野の研究動向を示した。多次元情報を視覚的に得ることのできる可視化計測は、数値解析結果の検証や製品開発製造の支援のツールとして、ますます重要性を増している。この分野の更なる発展を期待したい。

謝辞 本稿で紹介した計測例の一部は(株)フローテック・リサーチのとの共同研究で実施したものである。

参考文献

- (1)西野, 日本機械学会流体工学部門ニュースレター, 2006年9月号 (2006).
- (2)Nishino, K. and Choi, J.-W., **SAE2007-32-0092** (2007).
- (3)Nishimura, M. et al., *Exp. Fluids*, **38** (2005), 285.
- (4)<http://kibo.jaxa.jp/experiment/microgravity/fpef/>
- (5)西野, ながれ, **20** (2001), 83.
- (6)Nishino, K. et al., CD-ROM Proc. 5th Int. Symp. Particle Image Velocimetry, Paper 3243, Busan, Korea, (2003).
- (7)Nishino, K. and T. Takahashi, CD-ROM Proc. 5th Int. Symp. Particle Image Velocimetry, Paper 3217, Busan, Korea, (2003).
- (8)西野, 第 32 節 直接撮影法による液滴径の測定, 日本原子力学会編, "混相流計測法", 森北出版, (2003), 193.
- (9)Nishino, K., Kato, H. and Torii, K., *Measurement Science and Technology*, **11** (2000), 633.
- (10)Kanashima, Y., Nishino, K. and Yoda, S., *Microgravity Science and Technology*, **16-1** (2005), 285.
- (11)http://iss.jaxa.jp/utiliz/collect/iao_mg01_fl.html.
- (12)Li, X. et. al., *Measurement Science and Technology*, **15** (2004), 2284.

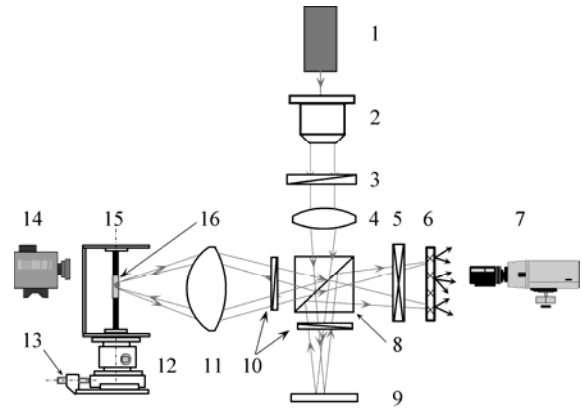


Fig. 10 Layout of the present electronic speckle pattern interferometer for measuring dynamic deformation of liquid surface: 1, laser; 2, beam expander; 3, $\lambda/2$ plate; 4, beam shaping lens; 5, polarizing filter; 6, ground glass; 7, CCD camera; 8, polarizing beam splitter; 9, reference surface (flat mirror); 10, $\lambda/4$ plate; 11, objective lens; 12, supporting stage; 13, PZT; 14, laser-focusing displacement meter; 15, main frame of liquid bridge; 16, cylindrical object surface (of glass rod or liquid bridge).

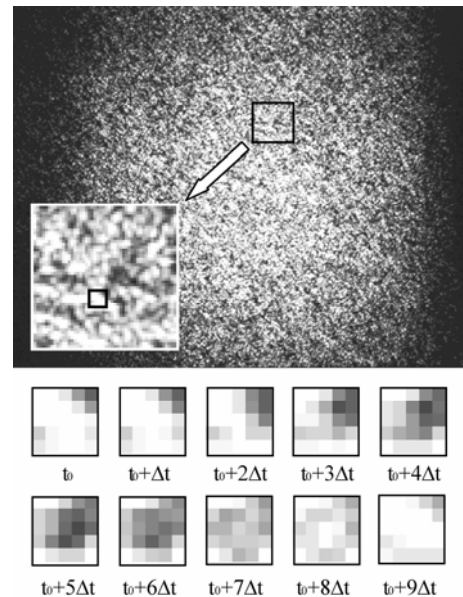


Fig. 11 An example of specklegram (only an area of 100×120 pixels shown) and time-varying intensity in a box marked (time interval $\Delta t = 1/60$ s).

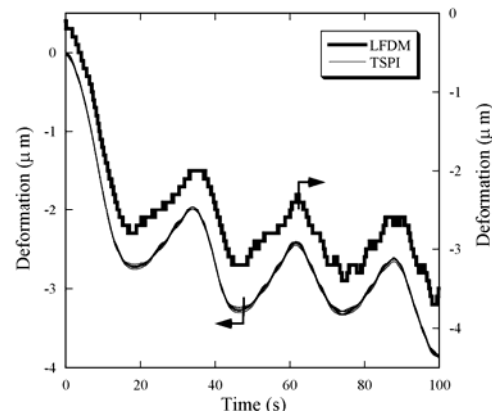


Fig. 12 Comparison of dynamic displacement of a flat mirror.