

光画像利用の多次元流体計測システム

横浜国立大学 西野 耕一
サイエンスワークス 武田 伸一郎

1. はじめに

流体速度を効率的かつ高精度で計測することは、工学、生物学、医学など多分野にまたがる共通のニーズである。具体例は、自動車、空調機器、流体機械、熱交換器、電子機器、家電、反応槽、水処理、食品製造、材料製造、血流診断、医用機器、DNA解析装置など多岐にわたる。多くの場合、実験と並行して流体解析シミュレーションが実施され、シミュレーション結果を検証し得る2次元・3次元かつ時間分解能の高い計測結果が求められる。特に、少量・単品生産あるいは個別診断（例えば、血流のテイルド治療）では実体モデルごとの流体計測が望まれる。そのようなニーズに応えるためには、高い空間・時間分解能を有する多次元流体計測を効率的に行う必要がある。本講演では、その実現に向けた新しい試みを紹介する。

2. 多次元流体計測手法

流体速度は3次元空間内で時間変動するベクトル量である。つまり、速度3成分 (u, v, w) が空間座標 (x, y, z) と時間座標 t で表される4次元空間内で定義される。多次元流体計測の究極の目標は4次元空間内の速度3成分を全て把握することである。図1は既存の流体計測手法の性能マップである。横軸が計測次元数、縦軸が計測成分数であり、各計測手法バーの高さが時間分解能を表している。

近年の研究成果によって実用化された多次元流速計が粒子像流速計 (particle image velocimeter : PIV) と粒子追跡流速計 (particle tracking velocimeter : PTV) である。どちらも、流体に懸濁させた微小トレーサ粒子の移動を光・画像計測することによってシート光面内の速度2成分を計測する

手法である。最新の高速撮像技術を利用した高速度PIV (high-speed PIV) や、ステレオ撮影を利用して速度3成分を同時計測するステレオ PIV (stereo PIV) が実用化されている。PIV あるいは PTV を空間計測に発展させたものが3次元 PTV (three-dimensional PTV : 3-D PTV) とホログラフィック PIV (holographic PIV : HPIV) であり、速度3成分の3次元計測が可能になる。さらに、HPIV を高速撮影技術と組み合わせることによって高速度 HPIV (high-speed HPIV) を実現するアイデアが提案されている。

3. 流体計測現場の抱える問題点

前節で述べたように、流体計測技術の進展は目覚ましく、いずれは究極の多次元流体計測が、少なくとも手法的には可能になると推定される。しかしながら、流体計測現場において、そのような計測技術の進展の恩恵を受けるためには、解決しなければならない大きな課題が残されている。それは、複雑な

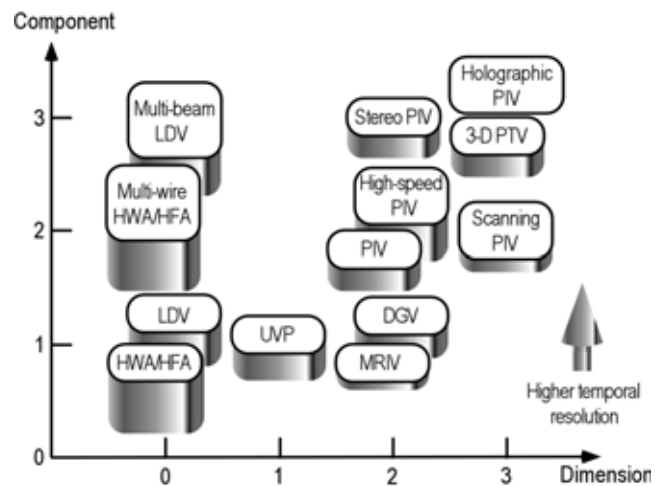


図1 流体計測手法の性能マップ

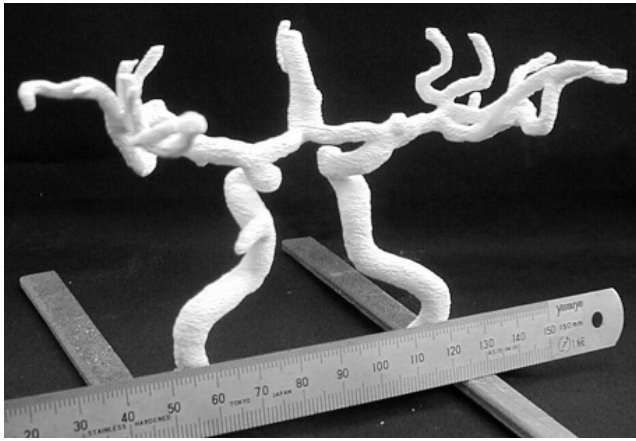


図2 粉体積層型高速造型による脳血管実体モデル

流路形状内部や複雑な物体周りを、如何にして効率的に計測するか？ という実際的问题である。これまでは、流体計測モデル（あるいは実機供試体）を特注製作し、専門技術者が流れ場の各点あるいは各断面を一箇所ずつ計測することが行われてきた。形状の複雑さが増すにつれて計測の難易度も上がるため、満足できる計測結果を得るまでに多大の労力・時間・費用が必要であった。

これとは対照的に、流体解析シミュレーションでは、解析対象の3次元CADモデルから効率的に計算格子が生成されるため、近年のコンピュータ性能の著しい向上に支えられて、流れ場特性を把握するための解析結果が比較的短時間に得られるようになっている。従って、流体解析で最も時間が掛かる部分は、境界条件や初期条件の適切さを含めて、解析結果の物理的妥当性を実験的に検証することにあると言える状況にある。

このように、実際の流体計測現場の抱える問題点は、流体計測技術の性能そのものではなく、最新の

（そして非常に高価な）多次元流体計測システムを如何にして効率的に計測対象に適用するか？ にあり、そのための新しいアプローチの開発が求められている。

4. 高速造型技術と屈折率マッチング技術

3次元CADデータから実体モデルを効率的に形成する高速造型技術として、光造形法、熔融接着積層法、粉末熔融積層法、薄膜積層法、インクジェット法、粉体積層法などが知られており、そのための各種の造型装置が市販されている。光・画像利用の流体計測技術では、流れ場の実体モデルを透明ゴムや透明プラスチックで製作することが望まれ、そのような透明材料用鑄型の製作において粉体積層法が有利であるとされている。

図2は、粉体積層法で製作された人体の脳血管実体モデルである⁽¹⁾。3次元的な複雑形状の製作が可能であることがわかる。この例では、MRIによる脳断層画像から computer tomography (CT) によって3次元CADデータが再構築され、そのデジタルデータからモデル製作が行われている。理工学分野では、機器設計の段階で既に3次元CADデータが準備されていることが多く、それを利用することにより実体モデルの効率的な製作が可能になる。

3次元的な曲面を有する流路では、作動流体とモデル材との屈折率の違いによって、大きな像歪みが生じてしまう。この問題は、適切な作動流体の選定と、適切な作動流体の条件（特に、温度と溶液濃度）の設定とによって、作動流体とモデル材との屈折率を合致させることによって解決される。これが屈折率

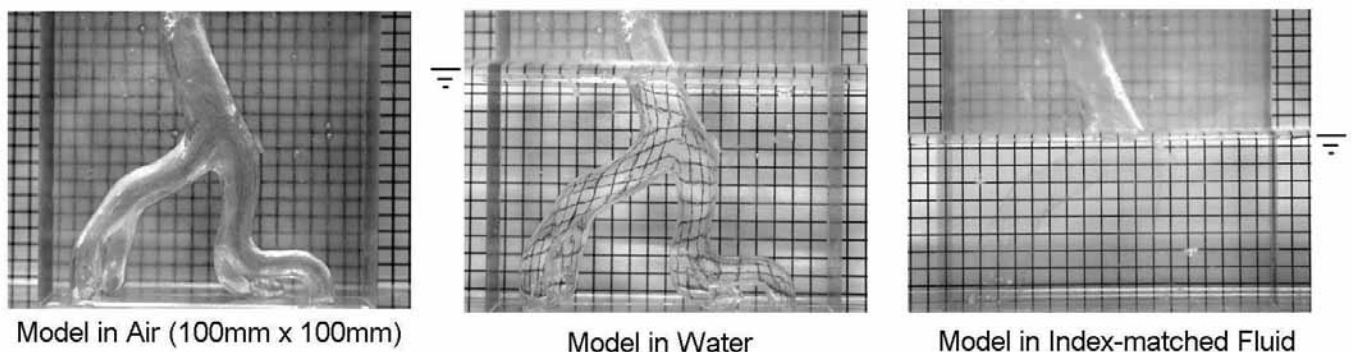


図3 屈折率マッチングの効果： 左より空気中、水中、屈折率マッチング流体中に置かれた血管モデル

マッチング (refractive index matching) である。図 3 は透明ゴム製流体モデルに対する屈折率マッチングの効果を示すものである。透明モデルを空気中におくと、3次元曲面の存在のため背後の格子が全く見えなくなっている。モデルを水中に置くと若干改善されるが、格子が大きく歪んでしまう。モデルを屈折率マッチング流体 (この例では、グリセリン水溶液) の中に設置すると、全く歪みなく格子が観察されるようになる。

流体実験における屈折率マッチングの利用は以前から知られている。表 1 と 2 は Budwig⁽²⁾ がまとめたモデル材の屈折率と作動流体のそれである。多くの作動流体が検討されているが、屈折率はもちろんのこと、透明度、密度、粘度、腐食性、化学的安定性、臭い、価格などを考慮して選定される。西田・山根⁽³⁾ はアクリル材とヨウ化ナトリウム水溶液の組み合わせで屈折率マッチングを実現し、複雑な形状を呈する血液ポンプ内部の可視化計測を行った。

5. 多次元流体計測の新しい試み

前節で述べた高速造型技術と屈折率マッチング技術を用いて流れ場モデルを実現し、それに第 2 節で述べた多次元流体計測手法 (特に、PIV) を適用す

表 1 代表的モデル材質の屈折率

モデル材質	屈折率
パイレックスガラス	1.47-1.49
アクリル	1.49-1.53
エポキシ	1.56
ウレタン	1.49
シリコンゴム	1.43

表 2 代表的作動流体の屈折率

作動流体	屈折率
グリセリン水溶液	1.33-1.47
ヨウ化亜鉛水溶液	1.33-1.62
ヨウ化ナトリウム水溶液	1.5
鉱物油	1.48

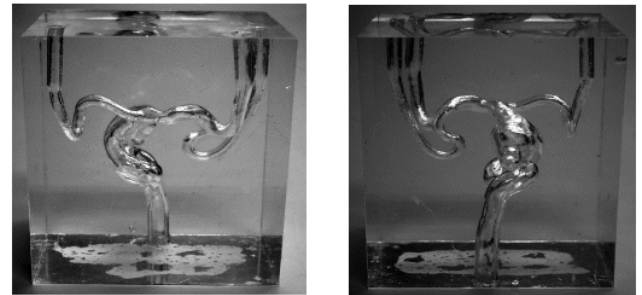
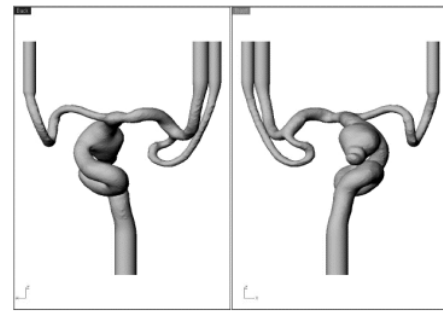


図 4 脳動脈のシリコンゴムモデル

ることによって、複雑な流路形状内部や複雑な物体周りの流れ場を効率的に多次元流体計測する道が開かれる。3次元 CAD データから流れ場モデルの製作が 1 週間、屈折率マッチング技術を組み込んだ多次元流体計測が 1 週間、合わせて 2 週間程度で詳細な流速データが取得される可能性が芽生えている。

図 4 は人体頭部の MRI 断層画像データから再構築された脳動脈の 3次元 CAD データとそれから製作された透明モデルである。図 5 は動脈瘤内部の瞬時速度分布を屈折率マッチング技術と PIV とを用いて測定した結果である⁽¹⁾⁽⁴⁾。

6. おわりに

本稿では、流体計測現場における多次元流体計測を著しく効率化するための新しい試みとして、高速造型技術と屈折率マッチング技術を利用した多次元流体計測手法の可能性について述べた。現状では、流れ場モデル製作から流速データ取得までを 1 ~ 2 週間以内で実施するまでの効率化には至っておらず、技術的な研究開発の積み上げが必要であるが、近い将来にそのような効率化が実現されるものと期待している。

謝辞 本稿で紹介した多次元流体計測技術の研究開発は、科学技術振興機構の平成 15 年度大学発ベンチャー創出事業「多次元流体計測システムの研究開発」の一環として実施されているものである。透明流れ場モデルの製作については(株)アールテックの小杉隆司氏、脳動脈の PIV 計測については浜松医科大学の磯田治夫博士の協力を得た。また、本稿で示した PIV 結果は横浜国立大学大学院の川口大輔氏の卒業研究の一部である。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- (1) 西野耕一・小杉隆司・武田伸一郎・磯田治夫, 2004, 複雑流路の多次元流速計測の効率化, 日本機械学会第 9 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文, 東京.
- (2) Budwig, R., 1994, Refractive index matching methods for liquid flow investigations, *Experiments in Fluids*, Vol. 17, pp. 350-355.
- (3) 西田正浩・山根隆志, 1998, 遠心血流ポンプ内流れの可視化定量解析, 機械技術研究所報, Vol. 52, No. 3, pp. 16-34.
- (4) 川口大輔, 2004, 大脳動脈モデルを用いた血流の PIV 測定, 横浜国立大学工学部卒業論文.

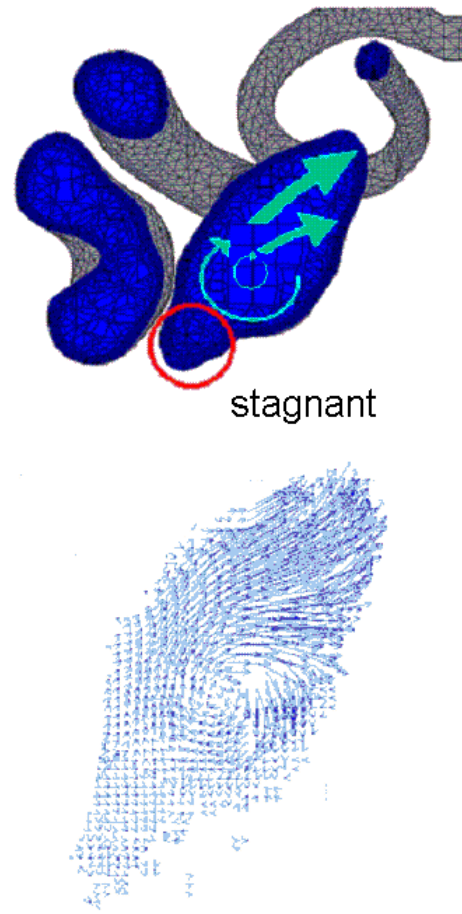


図 5 模擬脳動脈流の PIV 測定結果⁽¹⁾⁽⁴⁾