

複雑乱流の全場計測

—乱流モデル計算との比較に向けて—

西野 耕一*

1. はじめに

産業界が対象とする乱流は、複雑3次元形状の機器の内部・周囲に存在し、複数の乱流素過程(非等方性, 2次流れ, 流線曲率, 回転, 加速・減速, 剥離・再付着, 乱流・層流遷移など)が共存する複雑乱流場であることが多い。例えば, 衝突噴流, 攪拌槽内乱流, エンジン吸排気ポート流れ, 各種の流体機械(ポンプ, 水車, タービンなど)の内部流れなどが挙げられる。

そのような複雑乱流の特性を把握し, 機器の開発・設計を行うために, 市販の数値流体解析コードに組み込まれた乱流モデルを用いた解析が行われる。これまでに研究成果として提案されている乱流モデルは, マイナーな修正版を含めると, まさに無数ともいえる状況にあり, ごく少数の代表的なものが市販の数値流体解析コードに組み込まれているに過ぎない。その乱流モデルが上述したような複雑乱流を妥当なレベルで再現できるかどうかの判断は難しく, 数値解析結果と検証実験結果とを比較しながら, 少しずつ乱流モデルの適用範囲を広げて行かざるを得ない。

検証実験を行う場合, 流れ場が複雑3次元形状を呈していることは大きな障壁となる。3次元空間内の多点で計測を行う必要に迫られるからである。さらに, 後述するように, LDV(laser Doppler velocimetry)やPIV(particle image velocimetry)などの近年の流速計測手法は光・画像利用であり, 複雑3次元形状では「照明光が届かない」や「構造体が邪魔して撮影できない」といった泥臭いが致命的な問題が生じることも少なくない。そのため, 不十分な検証実験結果との対比によって, 乱流モデルによる数値解析結果の妥当性を判断せざるを得ないことが多かった。

本稿では, 複雑乱流の全場計測(whole field measurement)についての最近の進展を概説する。特に, 複雑3次元形状の乱流計測を可能とするインデックスマッチングと高速造形とを融合したPIV計測技術を紹介する。適用事例として攪拌槽内乱流の計測事例を示し, ①インペラ回転による噴流の形成, ②斜め衝突噴流領域の存在, ③3次元壁面噴流領域の存在, ④巻き込み渦と気液界面変形の存在, ⑤長周期変動の存在など, 数値流体解析による取り扱いが難しい特性が存在することを提示する。

2. PIVによる乱流計測手法

2.1 乱流計測手法の進展

乱流は必然的に3次元(3D: three dimensional)であり, 速度3成分(3C: three components)を有する。そのため, 流れ場の速度3成分を3次的に測定したいとの要求は昔からあった。例えば, すでに1956年には2台のステルカメラを用いたステレオ撮影によって低速乱流噴流の測定(乱れエネルギー

* 横浜国立大学大学院工学研究院システムの創生部門

ギーの散逸率の測定)が報告されている¹⁾。

また、1961年には円管乱流の壁近傍の速度測定をやはりステレオ撮影で行った研究が報告されている²⁾。興味深いことに、当時は流れを乱すことなく壁近傍の速度分布を測定できる唯一の手法としてステレオ撮影法が考えられていたようである。図1は各種の流速計測手法を測定次元数(dimension)と測定成分数(component)でプロットしたものである。

各手法の黒色部分は計測時間分解能の高さを示す。熱線・熱膜流速計(HWA/HFA: hot-wire anemometry/hot-film anemometry)とLDVは点計測手法であり、乱流計測の強力なツール

として利用されているが、3次元かつ3成分計測に答えることが難しい。一方、超音波流速計(UVP: ultrasonic velocity profile monitor)は1次元計測、Doppler global velocimetry(DGV)は2次元計測が可能であるが、どちらも単成分計測であり多成分計測は容易でない。そのため、2次元2成分計測が効率的に行えるPIVの普及と利用が進んでいる。PIVの発展型として、2台のカメラを用いるステレオPIVは2次元3成分計測が可能である。さらに、3次元計測のために、シート光をスキャンするScanning PIV、複眼視や多眼視を利用する3次元PTV(3-D PTV)、ホログラムを利用するホログラフィックPIV(HPIV)などが開発されている。以上のような流速計測手法の「3次元化」と「3成分化」の詳細については拙著³⁾を参照されたい。

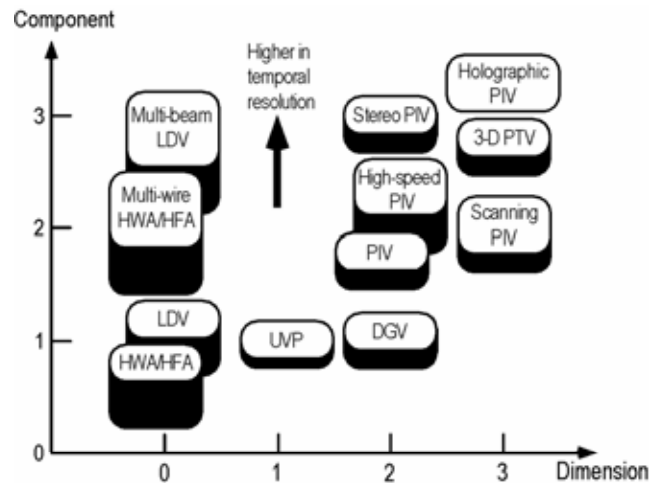


図1 流速計測手法の特徴：測定次元数と測定成分数

2.2 PIVの概説

本節ではPIVを概説する。詳細についてはハンドブックなど^{4,5)}を参照されたい。

乱流中に微小トレーサ粒子を懸濁させ、適切な時間間隔 Δt でダブルパルス照明をシート光として供給して撮影すると、第1時刻(=前時刻)と第2時刻(=後時刻)の粒子画像が得られる。粒子像の移動距離 $\Delta \vec{x}$ を画像解析によって計測し、それを流れ場中の物理空間中での移動距離 $\Delta \vec{x}$ に変換する。粒子が乱流に十分に追従し、粒子速度が局所の流体速度に等しいとみなせる条件において、局所流体速度 $\Delta \vec{u}$ が次式で求められる。

$$\Delta \vec{u} = \Delta \vec{x} / \Delta t \quad (1)$$

図2は直線羽根を有する遠心ポンプのインペラ内部で撮影された粒子画像(第1時刻)である⁶⁾。回転速度は700rpm、ナイロン粒子(密度1.03g/cm³、粒子径20~30 μ m)、羽根長さ60mmである。照明はダブルパルスNd:YAGレーザ(出力20mJ/pulse、波長532nm)のシート光として供給

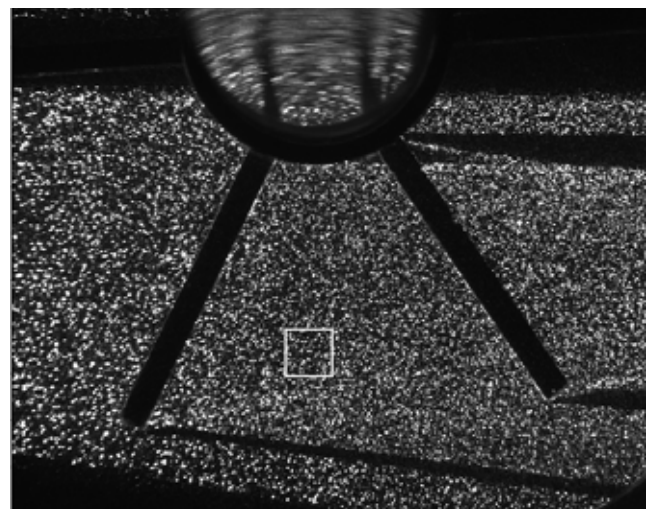


図2 トレーサ粒子像(第1時刻)の一例(遠心ポンプのインペラ内部流動のPIV計測)

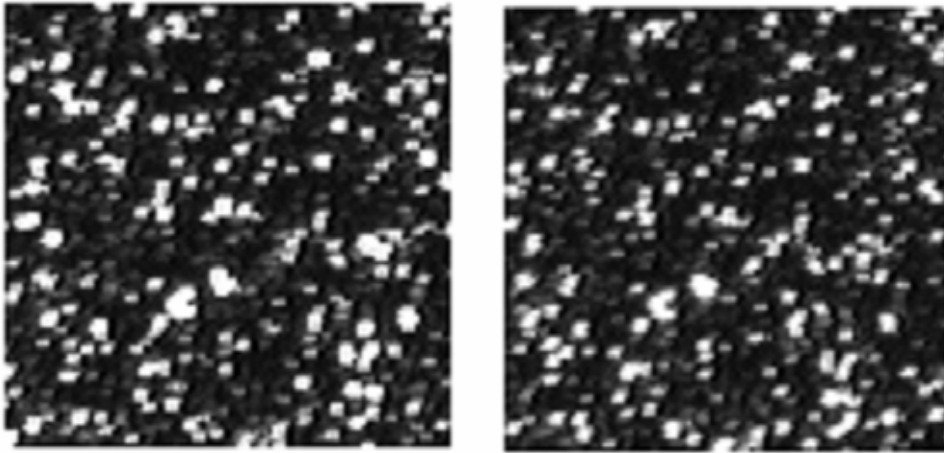


図3 拡大粒子像(100×100画素) : (左)第1時刻、(右)第2時刻

した。図3は拡大粒子像である。図2に示した枠線内の100×100画素を拡大したもので、両時刻の粒子画像には明らかな類似性が見られ、画像相互相関を利用して粒子像パターンの移動が定量化される。

図4に得られた瞬時速度ベクトル分布を示す。粒子画像中に32×32画素の検査窓を設け、各検査窓の中の粒子像の移動を定量化した結果である。インペラの回転(時計方向)に対応した流速分布が得られており、定量的な流速情報とともにフローパターンが明らかになる。

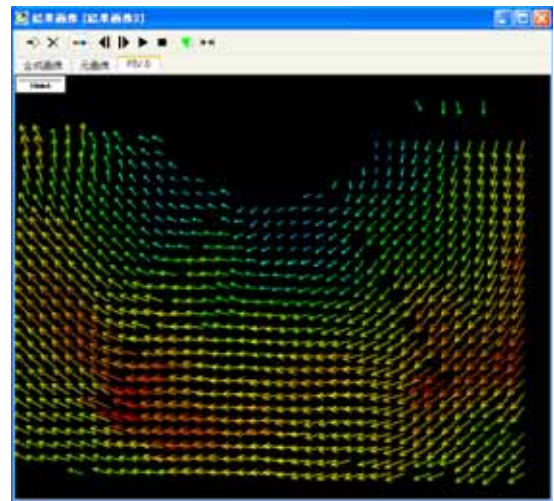


図4 得られた瞬時速度ベクトル分布

2.3 ステレオPIVの概説

シート光で照射された2次元断面内の速度3成分を計測する方法がステレオPIVである。計測用デジタルCCDカメラを2台配置することが特徴である。左右のカメラで同じ断面を撮影するための配置は、角度オフセット、レンズオフセット、Scheimpflug配置に分類される(図5)。

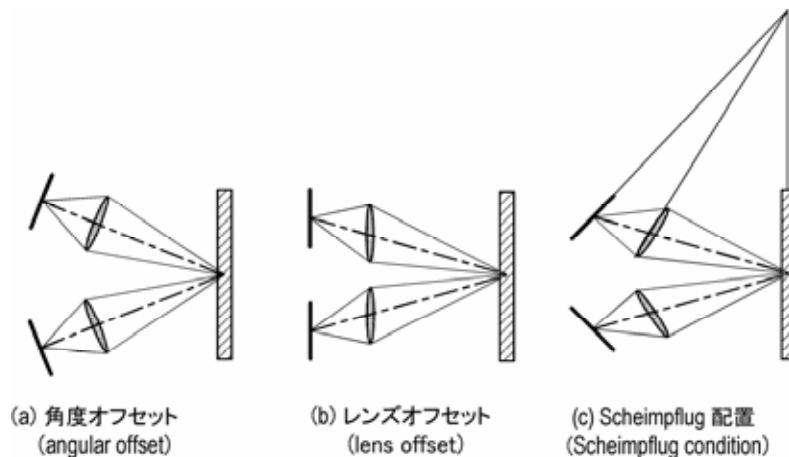


図5 ステレオPIVのカメラ配置

サブミクロンから数十ミクロンの微小トレーサ粒子を鮮明に撮影するためには、シート光全域に撮影系のピントが合うことが望ましい。Scheimpflug 配置はそのための配置で、最近のステレオ PIV の標準となっている。

ステレオ PIV では、粒子像の画面座標 (X_p, Y_p) と、その粒子のシート光内の物理座標 (x_p, y_p, z_p) との関係性を事前に校正する必要がある。両者は次式の透視投影で結ばれる(詳細は参考文献⁵⁾の第7章を参照されたい)。

$$\begin{aligned} x_p &= -c \frac{a_{11}(X_p - X_0) + a_{12}(Y_p - Y_0) + a_{13}(Z_p - Z_0)}{a_{31}(X_p - X_0) + a_{32}(Y_p - Y_0) + a_{33}(Z_p - Z_0)} + x_0 + \Delta x_p \\ y_p &= -c \frac{a_{21}(X_p - X_0) + a_{22}(Y_p - Y_0) + a_{23}(Z_p - Z_0)}{a_{31}(X_p - X_0) + a_{32}(Y_p - Y_0) + a_{33}(Z_p - Z_0)} + x_0 + \Delta x_p \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 (X_0, Y_0, Z_0) はカメラ座標系の原点座標、 a_{ij} は物理座標系とカメラ座標系の回転変換マトリックス、 c はカメラ視点から主平面まで距離、 (x_0, y_0) は主点位置のずれ、 $(\Delta x_p, \Delta y_p)$ はレンズ収差である。この式は投影式として次のように一般的に表される。

$$X_p = F_x(x_p, y_p, z_p; q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (3a)$$

$$Y_p = F_y(x_p, y_p, z_p; q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (3b)$$

ここで、 F_x と F_y は投影関数、 q_i は投影パラメータである。式(3)を時間で微分すると、次の速度投影式を得る。

$$U_p = \frac{\partial F_x}{\partial x_p} u_p + \frac{\partial F_x}{\partial y_p} v_p + \frac{\partial F_x}{\partial z_p} w_p \quad (4a)$$

$$V_p = \frac{\partial F_y}{\partial x_p} u_p + \frac{\partial F_y}{\partial y_p} v_p + \frac{\partial F_y}{\partial z_p} w_p \quad (4b)$$

ここで、 (U_p, V_p) は粒子像速度、 (u_p, v_p, w_p) は粒子速度である。当然ではあるが、式(4)は2成分の粒子像速度から粒子速度の3成分を求めることが一般にはできないことを意味する。

ステレオ PIV は二組の粒子像速度から粒子速度3成分を求めるものである。そのために、式(4)あるいは(3)に含まれる投影パラメータを校正によって決定する必要がある。基準点を配置したカメラ校正板を流れ場に挿入して撮影する。図6はカメラ校正板の一例である。流れ場形状が単純であればカメラ校正板の挿入も容易であるが、複雑3次元形状では相当の工夫を要する。このことが、ステレオ PIV の適用範囲を狭める主要因の一つである。次節に述べるインデックスマッチングはその制約を解消する方法である。

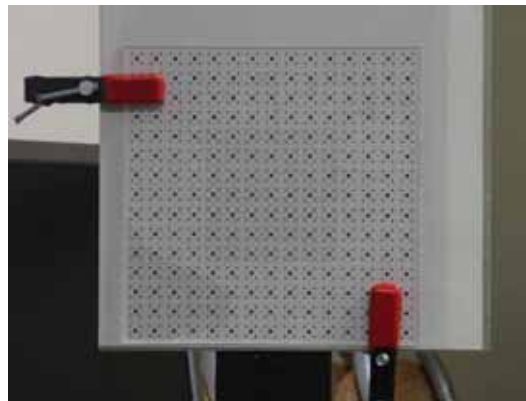


図6 カメラ校正板

2台のカメラそれぞれの投影パラメータが定まると、二組の粒子像速度($U_p^{(1)}, V_p^{(1)}$)と($U_p^{(2)}, V_p^{(2)}$)と一つの粒子速度(u_p, v_p, w_p)とが係数行列 $[F']$ を用いて次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} U_p^{(1)} \\ V_p^{(1)} \\ U_p^{(2)} \\ V_p^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial F_x^{(1)} / \partial x_p & \partial F_x^{(1)} / \partial y_p & \partial F_x^{(1)} / \partial z_p \\ \partial F_y^{(1)} / \partial x_p & \partial F_y^{(1)} / \partial y_p & \partial F_y^{(1)} / \partial z_p \\ \partial F_x^{(2)} / \partial x_p & \partial F_x^{(2)} / \partial y_p & \partial F_x^{(2)} / \partial z_p \\ \partial F_y^{(2)} / \partial x_p & \partial F_y^{(2)} / \partial y_p & \partial F_y^{(2)} / \partial z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ w_p \end{bmatrix} = [F'] \begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ w_p \end{bmatrix} \quad (5)$$

上式を解くことによって最終的に粒子速度(u_p, v_p, w_p)が求まる。

2.4 インデックスマッチングと高速造形の利用

PIVを複雑3次元形状に適用する場合、固体壁が邪魔になって「撮影できない」や「照明光が届かない」という問題に遭遇する。この問題は、固体壁と作動流体の屈折率を合致させ、固体壁を透明化すれば解消される。これが「インデックスマッチング」である。流体実験におけるインデックスマッチングの利用は以前から知られている。表1は代表的な固体壁材料と作動流体の屈折率である⁷⁾。多くの作動流体が候補となるが、屈折率に加えて、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する。アクリル材とヨウ化ナトリウム水溶液でインデックスマッチングを実現し、血液ポンプモデル内部の可視化計測を行った例が報告されている⁸⁾。

図7は粉体積層法で造形された血管モデルに対するインデックスマッチングの効果を示すものである。モデルを空気中におくと、表面粗さと3次元曲面の存在のため背後の格子が全く見えない。モデルを水中に置くと若干改善されるが、格子は大きく歪んでいる。モデルを屈折率調合した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。この状態であれば、血管モデル内部の流れの可視化や計測が容易に行える。

実機形状通りのモデルを短期間で安価に製作する方法として、デジタル形状データから一気に製作する高速造形(RP: rapid prototyping)がある。高速造形技術として、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、そのための造形装

表1 代表的な固体壁材料と作動流体の屈折率

固体壁材料	屈折率	作動流体	屈折率
シリコンゴム	1.43	グリセリン水溶液	1.33~1.47
パイレックスガラス	1.47~1.49	ヨウ化亜鉛水溶液	1.33~1.62
アクリル	1.49~1.53	ヨウ化ナトリウム水溶液	1.5
エポキシ	1.56	鉍物油	1.48
ウレタン	1.49		



図7 インデックスマッチングの効果

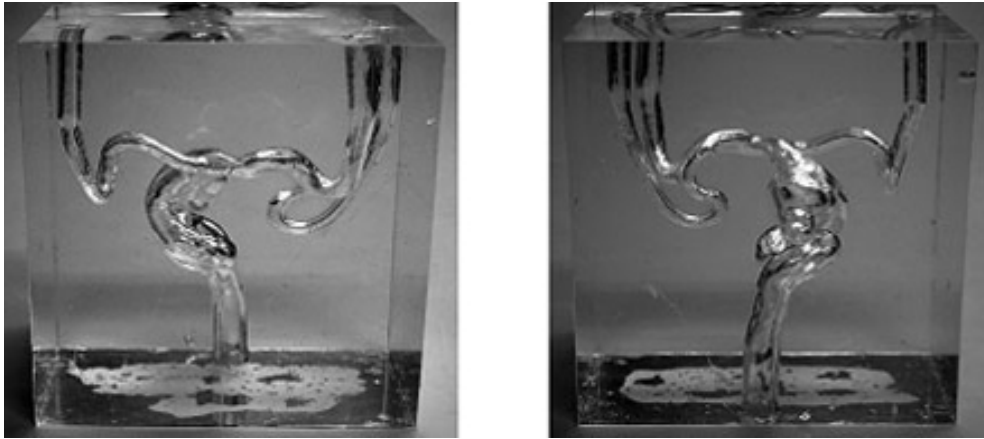


図 8(a) シリコンゴム製脳動脈瘤モデル

置が販売されている。また、3次元NC加工機を用いて、ブロック材料から短時間で削り出す方法も広義の高速造形といえる。図8は粉体積層法で製作されたシリコンゴム製脳動脈瘤モデルと、3次元NC加工機を用いて製作されたアクリル樹脂製エンジンモデルである。

図9はアクリル樹脂製吸気ポートの内部流動のPIV計測結果である。作動流体はヨウ化亜鉛水溶液であり、濃度調整によりインデックスマッチング状態が実現されている。これまでの流速計測手法では適用が困難であった複雑3次元流路の内部流動が明瞭に定量化されることが示されている。

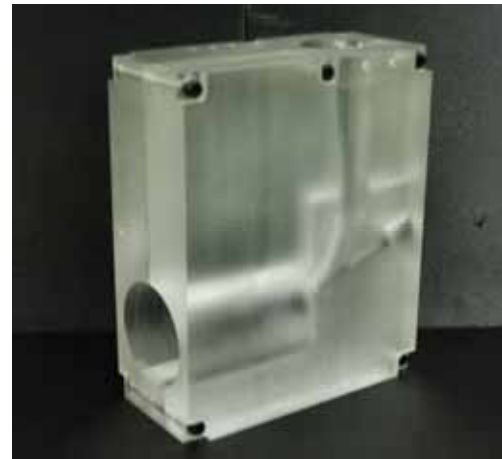


図 8(b) アクリル樹脂製エンジンモデル

2.5 インデックスマッチングを利用したステレオPIV

インデックスマッチングによってモデルが透明化すると照明および撮影のための光学的アクセスが確保され、ステレオPIVにとって大変好都合である。何故ならば、モデルが存在しない状態でカメラ校正板を設置してカメラ校正を行い、次にモデルを設置してステレオPIV計測を行えばよいからである。

カメラ校正結果の妥当性は逆投影 (back-projection) によって確認することができる。図

10は逆投影の仕組みを示すものである。式(3)は物理座標から画面座標への投影 (projection) を与える。物理空間中のシート光に対応する位置に仮想面を設けると (すなわち, z_p を与えると), 画面座標から仮想面への逆投影が可能になる。この逆投影によって, 撮影された粒子像を仮想面における粒子像に

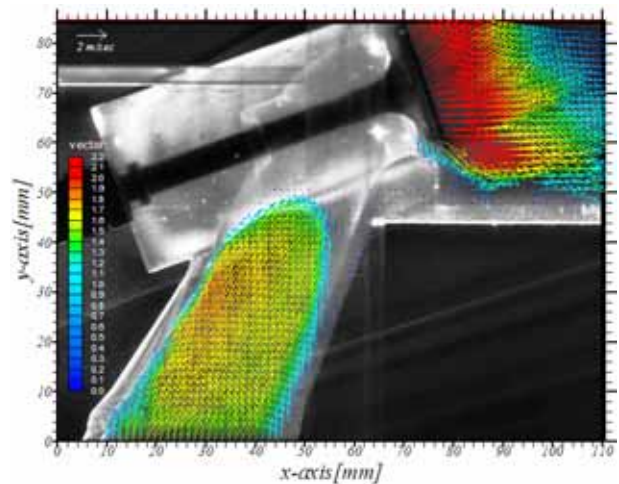


図 9 吸気ポートの内部流動のPIV計測結果

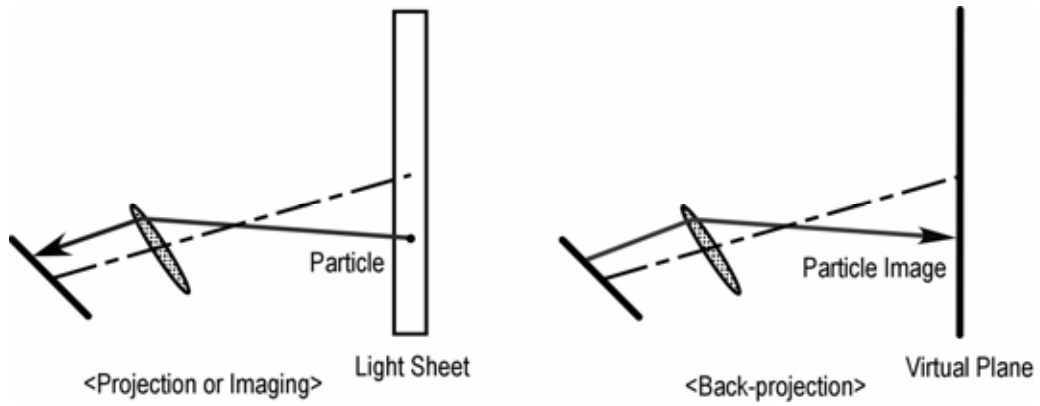
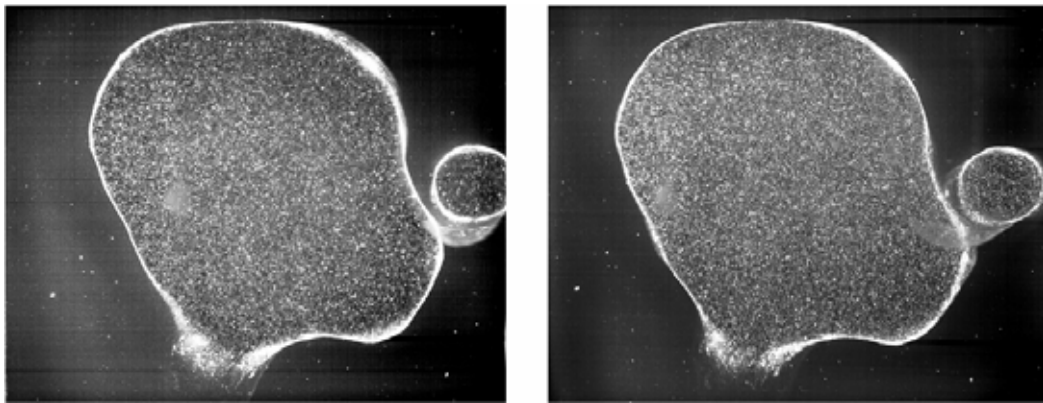


図10 逆投影の仕組み



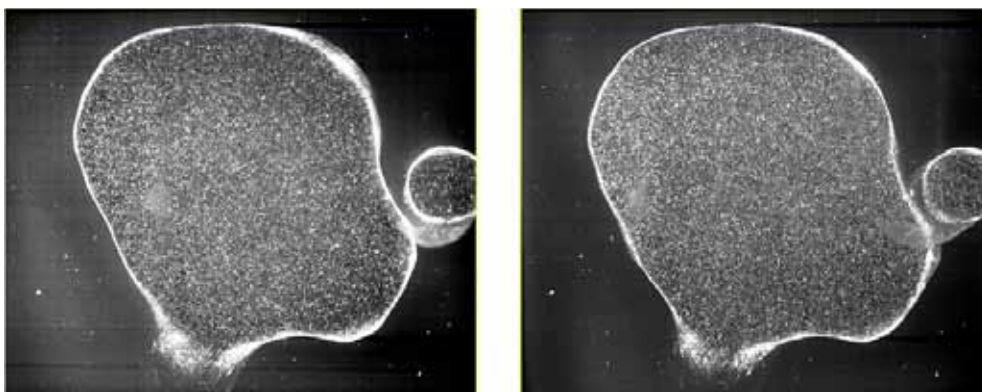
左カメラの画像

右カメラの画像

図11 脳動脈瘤モデルで撮影されたステレオPIV用の粒子像

変換する。

図11は図8(a)に示した脳動脈瘤モデルを用いて撮影されたステレオPIV用の粒子像である。左右のカメラで撮影されているため、倍率、モデルの位置、見え方などが異なっている。両画像に逆投影を施した結果が図12である。同一の仮想面に逆投影されるため、倍率、モデルの位置、見え方などが同一になる。逆投影後の粒子像にPIV解析を適用し瞬時速度ベクトルを得る(図4参照)。左右のカメラで撮影された粒子像のそれぞれから粒子像速度が得られ、式(4)を解くことによって物理速度が得



左カメラの画像

右カメラの画像

図12 逆投影後の粒子像

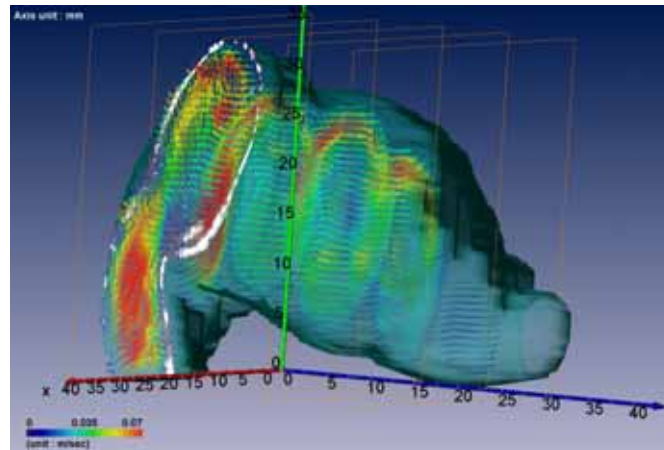


図13 脳動脈瘤モデル内部流動の多断面ステレオPIV計測結果

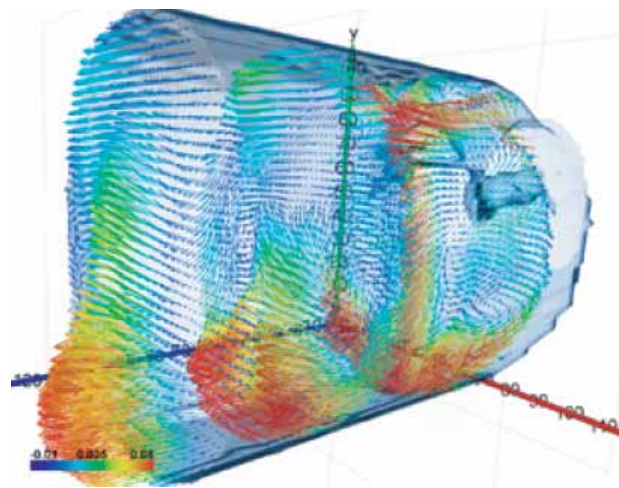


図14 エンジンモデル内部流動の多断面ステレオPIV計測結果

られる。

インデックスマッチングを用いると多断面のステレオPIV計測が効率的に行える。通常は、異なる断面を計測する度にカメラ校正が必要となるが、インデックスマッチング状態では撮影系と照明系を固定して、モデルのみを移動させればよいからである。図13は図8(a)の脳動脈瘤モデルの内部流動を多断面ステレオPIV計測した結果である。図14は図8(b)のエンジンモデル内部流動を多断面ステレオPIV計測した結果である。

3. PIVによる乱流計測事例

本章ではPIVによる計測事例として攪拌槽内乱流の計測結果を紹介する。攪拌槽は化学工学の分野における複雑乱流の典型であり、乱流モデルを用いた数値流体解析の対象としてさまざまな取り組みがなされている⁹⁾。

3.1 攪拌槽

図15に攪拌槽の概略図を示す。高さ350 mm、内径330 mm、肉厚5 mmの亚克力樹脂製円筒容器の中心軸に攪拌インペラが設置されている。容器内部は後述するインデックスマッチング流体で満た

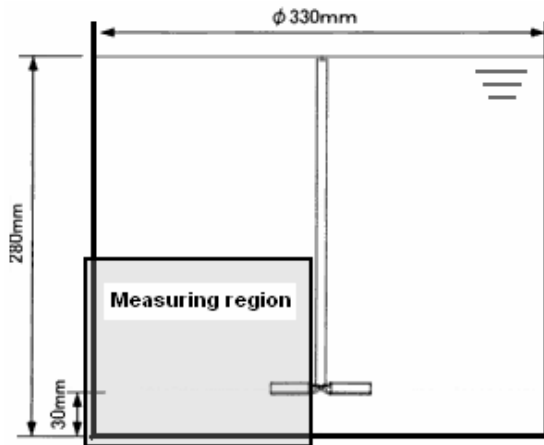


図15 攪拌槽の概略図

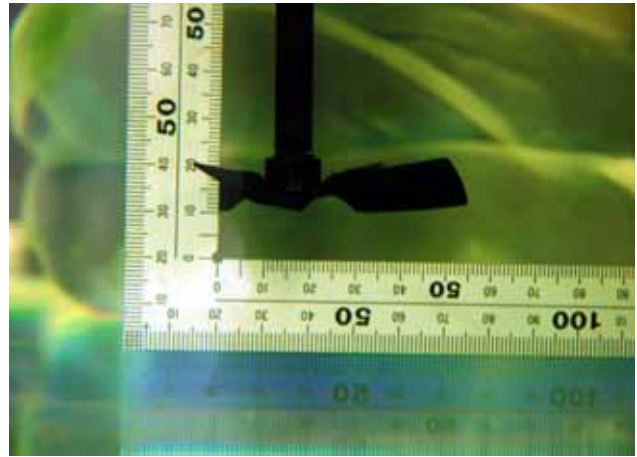


図16 インペラ形状と設置高さ

されており、液面高さは280 mmである。容器上部は開放で、気液自由界面が形成されている。円筒容器側壁は滑らかで、じゃま板等は設置されていない。インペラは直径80 mmの軸流タイプで、その最下端は容器底面から30 mmの位置にある(図16)。インペラ軸は外径8 mmである。円筒容器全体が直方体ガラス水槽内に固定され、容器外部もインデックスマッチング流体で満たされている。これにより、円筒壁による像歪みなく、ステレオPIV計測が可能となっている。

3. 2 実験条件とPIV解析条件

インペラ回転数は300 rpmである。作動流体はヨウ化亜鉛水溶液で、物性値は表2の通りである。

前章で述べたステレオPIV(速度3成分計測)および通常のPIV(速度2成分計測)を行った。計測システムとトレーサ粒子の仕様は表3の通りである。

ヨウ化亜鉛水溶液は密度が大きい(1.86×10³ kg/m³)、トレーサ粒子として金属被覆されたもの(2.02×10³ kg/m³)を選定した。

測定領域はインペラ軸から容器側壁までを含む容器底部側の軸対称領域である(図15参照)。なお、インペラ軸の設置における軸対称性には十分に注意を払った。

PIV解析条件は表4の通りである。

表2 ヨウ化亜鉛水溶液の物性値
(液温30℃)

密度	1.86×10 ³ kg/m ³
粘性係数	2.43×10 ⁻³ Pa·s
動粘性係数	1.31×10 ⁻⁶ m ² /s

表3 計測システムとトレーサ粒子の仕様

ダブルパルス Nd:YAG レーザ	出力200 mJ, パルス幅 4 ~ 6 ns, 発光周波数 5 Hz
デジタル CCD カメラ	1280×1024 画素
レンズ	AF Micro-Nikkor 105 mm
金属被覆トレーサ粒子	平均粒子径 10 μm, 密度 2.02×10 ³ kg/m ³

表4 PIV解析条件

PIV 解析手法	直接相互相関法
検査窓サイズ	H41×V41 画素 (5.7 mm×5.7 mm)
検査窓総数	H 80×V64 (オーバーラップ率 61%)
撮影倍率	約 0.14mm/画素

3. 3 計測結果

図17に、ステレオ PIV 計測で得られた面内成分平均速度のベクトル分布と面外成分平均速度のカラーコンターを示す。十分なデータ数(サンプル数)を確保するため、粒子像の撮影を約 20 分間に渡って行い、左右のデジタル CCD カメラでそれぞれ 2,000 フレーム撮影した。得られた瞬時速度ベクトル分布は 1,000 枚で、それらの算術平均として平均速度を得た。座標系は半径方向内向きに x 、軸方向上向きに y 、奥行き方向に z を定義し、それぞれの方向の速度成分を u 、 v 、 w とした。座標系原点は円筒容器左隅付近に設けられ、円筒容器左隅の座標は $(-8.0 \text{ mm}, -7.2 \text{ mm})$ である。

これらの平均速度分布には以下のような特性が観察され、乱流モデルによる数値流体解析に対する諸問題を提示する。なお、図18は瞬時速度ベクトル分布の一例であり、さまざまなスケールの速度変動が存在していることが確認される。

(1) インペラ回転による噴流の形成

インペラの回転によって $x = 120 \text{ mm}$ 、 $y = 30 \text{ mm}$ 付近を起点とし、容器底面に向かう斜め噴流領域が形成されている。図16に示したインペラ形状とその回転を忠実に数値流体解析に反映させることは可能であるが、インペラに向かう流れを入口条件として陽に指定することができないという難しさ

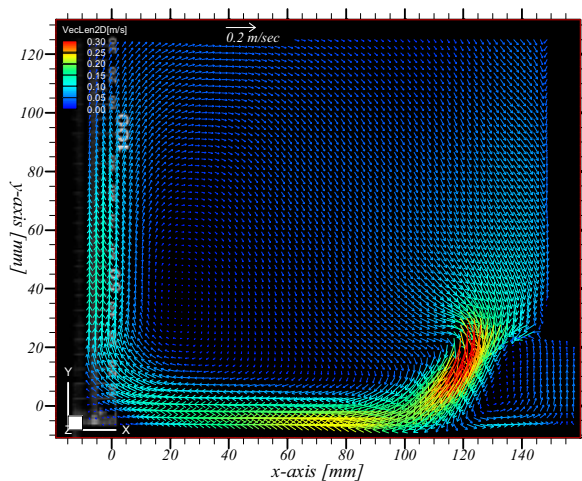


図17(a) 面内成分平均速度 (U , V) のベクトル分布

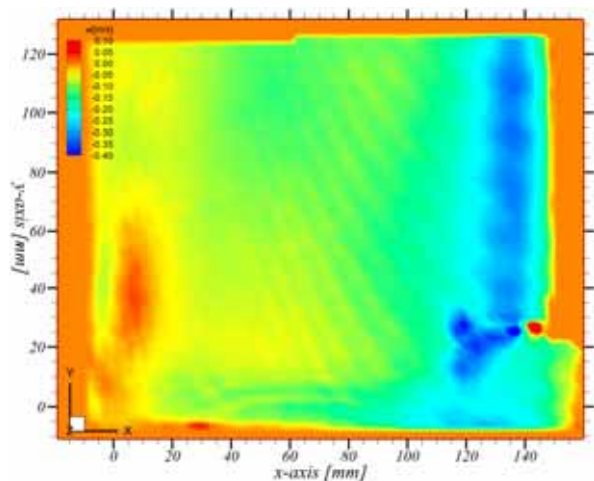


図17(b) 面外成分平均速度 W のカラーコンター

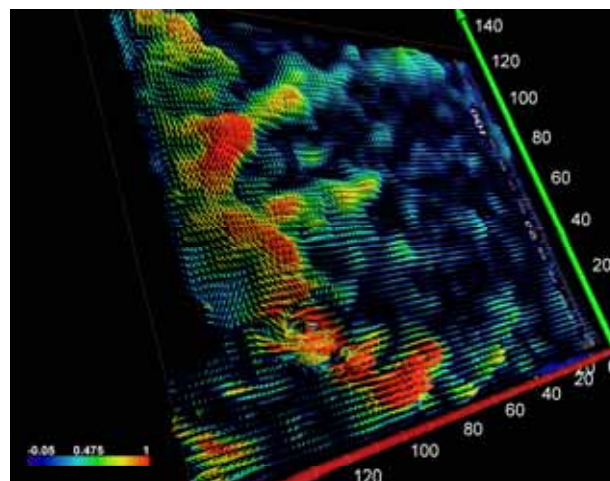


図18 瞬時速度ベクトル分布の一例

を有する。このことは、ポンプや水車といった回転機械において、入口条件を一様流速や層流速度分布として陽に規定できることと対照的である。

(2) 斜め衝突噴流領域の存在

インペラの回転によって形成された噴流は、容器底面に向かう斜め衝突噴流領域を形成する。衝突噴流の壁面近傍は乱流垂直応力の非等方性が強く、それに起因する乱れエネルギーの負の生成 (negative production) が生じ得ることが知られている¹⁰⁾。そのため、負の生成を表現できない渦粘性近似に基づく乱流モデル ($k-\varepsilon$ モデルなど) では、乱れエネルギーの過剰生成および渦粘性の過大評価という問題が生じる。

(3) 3次元壁面噴流領域の存在

容器底部では、周方向速度成分 (= 回転流成分) の存在とともに、半径方向に広がる3次元壁面噴流が形成されている。一般に、壁面噴流は平均速度分布の極大点 (= 勾配ゼロ点) と乱流せん断応力のゼロ点とが一致せず、渦粘性近似の乱流モデルでは精度のよい予測が困難であることが知られている。さらに、半径方向に広がる壁面噴流は逆圧力勾配の境界層を形成するため、壁関数の取り扱いにも注意を要する。

(4) 巻き込み渦と気液界面変形の存在

インペラ軸付近に周方向速度成分の極大領域が存在する。この領域はインペラから計測範囲上端まで連なっており、上部は気液界面に達している (図省略)。図19は気液界面の変形と巻き込み渦の様子であり、回転流動場に見られる典型的な気液界面変形が生じている。インペラ軸付近では組み合わせ渦 (ランキン渦) に似た速度分布が生じ、PIV 計測結果に見られる周方向速度分布の極大領域に対応する。このような特性は、気液界面変形を許さない数値流体解析では忠実な再現が困難であると考えられる。

(5) 長周期変動の存在

回転数や液温などの実験条件を注意深く一定に保った状態で PIV 計測を繰り返すと、平均速度分布が時間とともに有意に変動することが見出された。繰り返し計測は2成分 PIV で行い、10分間の待機と7分間の撮影とを5回繰り返した (CASE 1 ~ 5)。各撮影から1,000枚の瞬時速度ベクトルを求め、平均速度分布を算出した。この繰り返し計測は全く同一の撮影条件で行われており、計測システムに起因する時間変動の要因は存在しない。

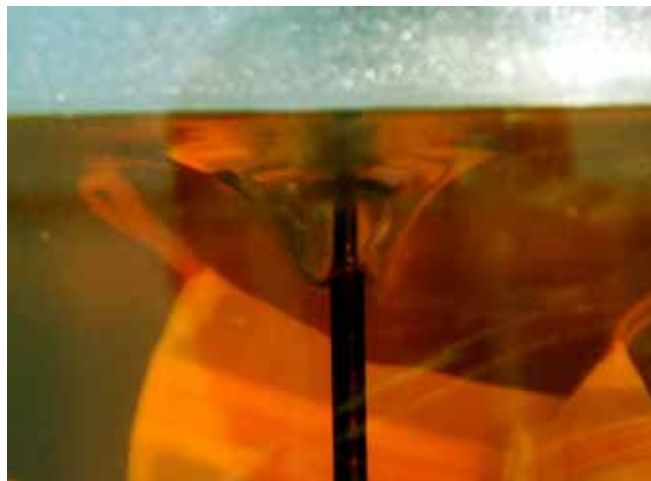


図19 気液界面の変形と巻き込み渦

図20は容器底面から $y=120$ mm の高さにおける半径方向平均速度 U と軸方向平均速度 V の分布である。 U を見ると、 $x=50\sim 90$ mm で最大速度を示し、その大きさと位置とが繰り返し計測ごとに変動していることがわかる。変動幅は 0.01 m/s 程度であり、 U の大きさに比べて有意に大きい。一方、 V を見ると、相対的な変動幅は小さいものの、CASE 2 の $x=140\sim 150$ mm には明らかな差異が見られる。また、他の CASE を含めて $x=90\sim 150$ mm には有意な変動が認められる。

このような長周期変動の発生原因は、内円筒回転・外円筒静止の回転二重円筒に見られる Taylor-Couette 不安定性にあると推察される。図17(b)に示した通り、本攪拌槽はインペラ軸付近で周方向速度が大きく、外円筒に向かうにつれて減少するという、典型的な遠心力不安定性を有する系である。円筒間隙間が大きく、Taylor数が大きな条件では、非定常性を有する2次流れが発生することが知られている^{11,12)}。このような非定常性の数値流体解析は、定常乱流を前提とした乱流モデルでは取り扱いが困難であり、LESやDNSなどの計算負荷の大きな方法を探らざるを得ない。

4. まとめ

本稿では複雑乱流の全场計測についての最近の進展を概説し、複雑3次元形状の乱流計測を可能とするインデックスマッチングと高速造形とを融合したPIV計測技術を紹介した。適用事例として攪拌槽内乱流の計測事例を示し、①インペラ回転による噴流の形成、②斜め衝突噴流領域の存在、③3次元壁面噴流領域の存在、④巻き込み渦と気液界面変形の存在、⑤長周期変動の存在など、数値流体解析による取り扱いが難しい特性が存在することを提示した。

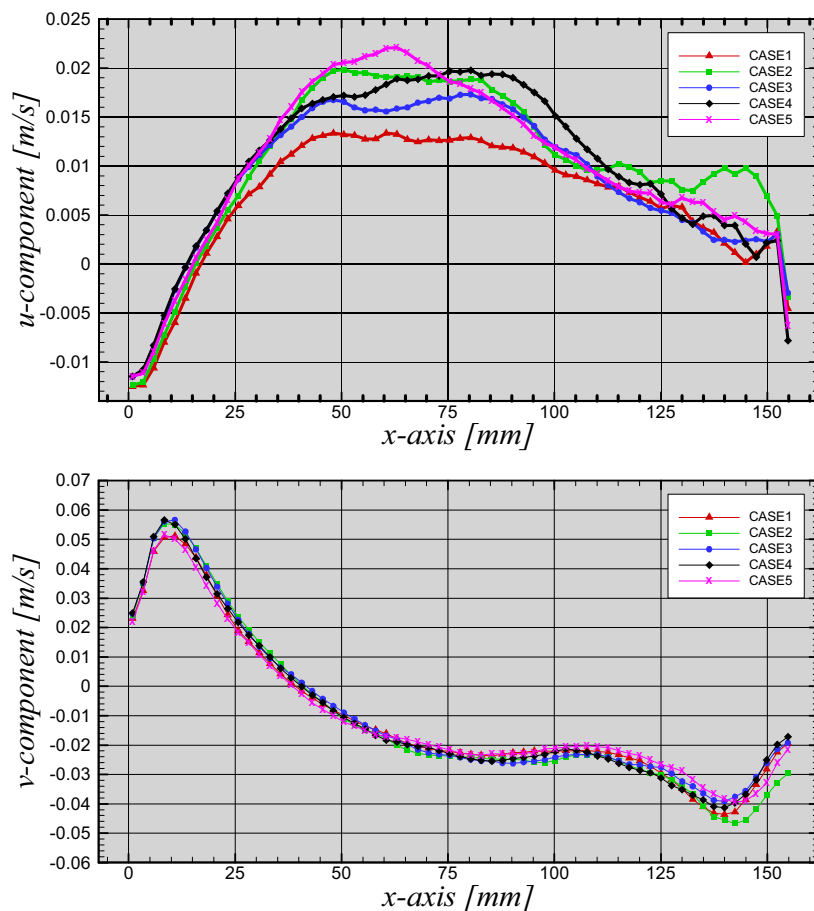


図20 2成分PIVによる繰り返し計測の結果

産業界では製品開発や性能評価のために数値流体解析が多用されているが、市販の解析コードに組み込まれている乱流モデルの予測性能は必ずしも十分でなく、その詳細もブラックボックス化されていることが多い。本稿で提示した攪拌槽内乱流は、化学工学の分野における代表的な複雑乱流として多くの研究成果が報告されているが、上述したような数値流体解析による取り扱いが難しい特性が存在しており、依然として数値解析と実験的検証の二人三脚で進めて行かざるを得ない状況が続いているといえる。

謝 辞

攪拌槽内流動の数値流体解析ならびに実験的研究の動向について、横浜国立大学大学院工学研究院の上ノ山周教授よりご教示を得た。本稿で紹介した脳動脈瘤モデルの内部流動の計測にあたり浜松医科大学の磯田治夫博士と株式会社アールテックの小杉隆司氏のご協力を得た。本稿で紹介した乱流計測事例は、株式会社フローテック・リサーチが実施したPIV計測の結果を承諾を得て掲載したものである。ここに、記して謝意を表す。

参考文献

- 1) W.-C. Chiu and L. N. Rib : Transactions of American Geophysical Union, Vol.37, No.1, 13-26 (1956)
- 2) R.M. Nedderman : *Chemical Engineering Science*, Vol.16, 113-119 (1961)
- 3) 西野耕一 : 可視化情報学会誌, Vol.20, No.77, 113-119 (2000)
- 4) M. Raffel, C. Willert and J. Kompenhans : *Particle Image Velocimetry*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1998)
- 5) 可視化情報学会編 : PIVハンドブック, 森北出版 (2002)
- 6) Y.-D. Choi, K. Nishino, J. Kurokawa and J. Matsui : *Experiments in Fluids*, Vol. 37, 617-630 (2004)
- 7) R. Budwig, R. : *Experiments in Fluids*, Vol.17, 350-355 (1994)
- 8) 西田正浩, 山根隆志 : 機械技術研究所報, Vol.52, No.3, 16-34 (1998)
- 9) E.M. Marshall and A. Bakker, *Computational Fluid Mixing*, Fluent Inc. (2002)
- 10) 西野耕一, 佐間田正憲, 糟谷圭一, 鳥居 薫 : 日本機械学会論文集(B編), 第62巻, 第594号, 474-482 (1996)
- 11) A. Barcilon, J. Brindley, M. Lessen and F.R. Mobbs : *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.94, part 3, 453-463 (1979)
- 12) G.P. Smith and A.A. Townsend : *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.123, 187-217 (1982)