

可視化 • 画像計測

Flow Visualization and Image Processing

津田宜久 Norihisa Tuda

(株)日鐵テクノリサーチ 数値解析センター 部長代理

(1) はじめに

流れ場の現象を解明することは、鉄鋼プロセスの幅広い分野で非常に重要な位置を占めている。これゆえ、古くから、流れ場を解析するために、レーザー流速計や熱線流速計を用いた各種計測技術が研究され、技術の蓄積がなされている。また、近年、強大な能力を持ったコンピュータが我々の身近なものになり、これらを用いた流れ場の予測手法が盛んに研究され、その実用化が進められている。

今回、紹介する「画像処理流速計」は、流れ場の可視化画像をデジタル処理し、速度を計測する流体計測法で、瞬時に速度の2次元、3次元の多点の速度情報を採取できる有用な計測技術である。この計測技術の最大の特徴は、第1に速度の多点同時計測が可能であるという点である。例えば、鉄鋼の幅広い分野で取り扱われる流路形状が複雑な流れ場、3次元性の強い流れ場および非定常性を示す流れ場に対しても多大な労力や煩雑なトラバース装置を用いずに計測が可能である。また、乱流場の準秩序構造の把握や乱流モデルの構築には、ある時刻での速度の3次元分布や空間内の2点での相互相関テンソルが必要となることが多々ある。このような要求に対しても、「画像処理流速計」を用いた実験は、十分な空間分解能を持った情報を与えてくれる。

本稿では、新日本製鐡と東京大学生産技術研究所で協同開

発した「汎用画像処理流速計:Current」の適用例を中心に 概説する。ここでは、紙面の関係から「画像処理流速計」の 概要とその応用例を示すが、「画像処理流速径の基礎原理を 十分に理解しないと、簡単に使用できるものでは無い」こと を記しておく。ただし、いったん、基礎原理が理解できると、 その応用範囲は限りなく広い事を理解できることも記してお く。

(2) 画像処理計測の分類

Fig.1に画像処理流速計の分類を示す。画像処理流速計には、トレーサ粒子の分子レベルの性質を利用する方法と粒子画像を用いる方法がある。分子レベルの性質を利用する方法には、フォトクロミクス法とレーザー誘起蛍光法が、粒子画像を用いる方法には、粒子画像のスペクトル画像を用いる方法や粒子画像そのものを解析する粒子画像法がある。

これらの可視化方法のうち、粒子画像法は、ほぼ実用レベルに達した計測手法であり、最近では、複数のメーカから高解像度の専用カメラを用いたPIVシステムが市販されている。一方、フォトクロミクス法やレーザー誘起蛍光法は、開発段階の方法である。

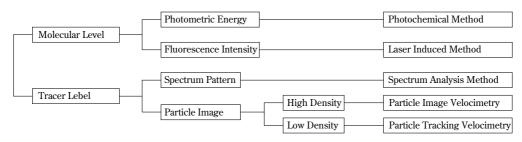


Fig.1 Classification of Particle Image Velocimetory

2.1 粒子画像法

粒子画像法は、可視化画像上の粒子密度の差により、PTV (Particle Tracking Velocimetry) 法とPIV (Particle Image Velocimetry) 法に分類される。PTV/PIV法は、流体中にあらかじめ混入したトレーサ粒子の動きを時々刻々追跡し、速度を計測する方法であるが、画像の解析方法により、可視化方法が異なる。PTV/PIV法の特徴を比較すると以下のようになる。

PTV法の特徴

- (1) 粒子そのものを追跡するLagrange的計測方法
- (2) 透明流体、特に水モデル等では、有効な方法
- (3) 乱れ、レイノルズ応力の計測精度は高い
- (4) 空気流れ等では、トレーサ粒子の選択が困難
- (5) 非定常流れに対しては、後処理が大変

PIV法の特徴

- (1) Euler的計測方法
- (2) 特に、空気流れに対して有効
- (3) 温度と速度の同時計測も可能

- (4) 高密度画像が連続する時間で画像化できれば、非定 常流れに対しても有効
- (5) 時間と空間の概念が入った計測方法であり、乱流の 諸情報の算出には研究課題がある

まず、PTV法の長所である乱流計測例を示し、次にPIV 法の長所である非定常計測例および温度と速度の同時計測例 を示す。

Fig.2~4にPTV法の長所である乱流計測例を示す。Fig.2 は、実験装置の概要図 (実験装置の詳細は、「2.2節 可視化装置」を参照)である。可視化においては、対象とするモデルのアスペクト比が大きい (x/h=10) ため、4台のカメラで可視化空間を分割し、同時撮像することで空間分解能を上げた。可視化光源には、4Wの全波長Arレーザーを使用し、複数のシリンドリカルレンズにより厚さ1mmのレーザーシートを形成し、流体中に間欠照射した。このシステムでは、可視化空間を高速で移動するトレーサ粒子を画像化するため、レーザー光の照射タイミングをTVカメラと同期させ、フレーム上に4回照射する特殊な可視化方法を採用している。実

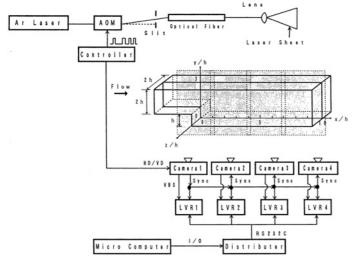


Fig.2 Flow Visualization system (for high resolution)

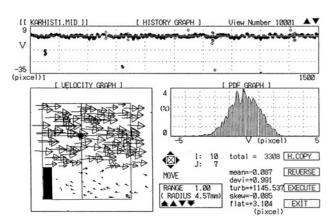


Fig.3 Instantaneous velocity and history velocity on nodal point

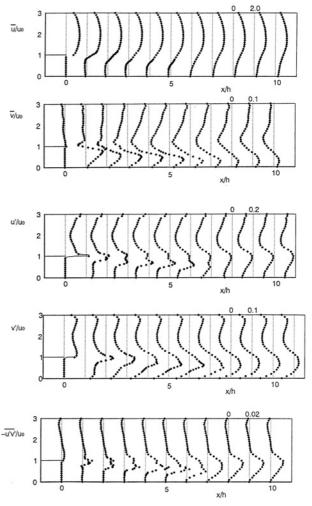


Fig.4 Examples of measured velocity (turbulent flow)

験は、ステップ高さh=0.006m、入口速度u=1.16m/sで行っ た。トレーサ追跡に用いた可視化画像は、各カメラあたり 30000 フレーム (16.6min) であり、合計約1400 万個のトレ ーサ追跡結果を得た。このようにして得られたトレーサ追跡 結果は、コンピュータ上で統計的に処理される。Fig.3に処 理結果を示す。図中左下は、1/30秒のフレーム画像からト レーサ追跡を行った瞬時の速度情報である。このようなトレ ーサ追跡は、連続する30000フレームの画像に対して実施さ れた。Fig.3中上図は、左下図中の●印の速度の時間変化情 報を抽出したものである。横軸は、フレーム時間 (1秒=30 フレーム)であり、処理を行った30000フレームの中から 1500フレームを抽出し、表示している。更に、任意の点で の速度の時間変化情報からは、Fig.3中右下のような確率密 度関数が算出できる。本実験では、その分布は、ほぼ、ガウ ス分布であり、スキューネスが-0.085、フラットネスが 3.104であることがわかる。この様な情報からは、Fig.4に 示すような統計量が算出される。上段より時間平均速度 ū, $\bar{\mathbf{v}}$ 、乱れ強度 $\bar{\mathbf{u}}'$, $\bar{\mathbf{v}}'$ およびレイノルズ応力 $-\mathbf{u}'\mathbf{v}'$ である。な お、この図では、x/h=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 上での速度の各成分が図中に●印で表示されている。即ち、 line分布を同一空間上に重ねたものである。

Fig.5にPIVの長所である非定常計測例を示す。本例は、

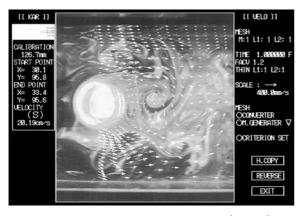


Fig.5 Flow visualizaion and velocity by PIV (Air flow)

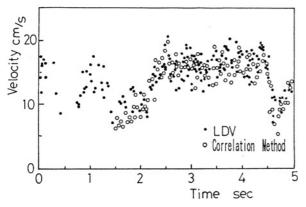


Fig.6 Velocity compared PIV with LDV

円柱回りの空気流れをサブミクロンのトレーサ粒子で画像化した結果である。図中背景は可視化画像を、ベクトルは、2時刻の画像に対して濃度相関法を適用した結果である。可視化は、断面形状が0.1m×0.1m、長さ2mの矩形管内に置かれた直径0.03mの円柱回りの流れをTVカメラで画像化した。Fig.6は、円柱後方0.034m、壁面から0.017mの位置における変動速度の経時変化を示したものである。○印はPIV (Correlation Method) による計測結果を、●印はLaser-Doppler Velocimetory (LDV) による同時計測結果を示している。両者、比較的良い一致を示していることがわかる。

Fig.7、Fig.8に温度との同時計測例を示す。実験は、容器に入れられた温水が自然冷却される場を感温液晶で可視化したものである。Fig.7に可視化画像を示す。画像は白黒で印刷されているが本来はカラーである。感温液晶は、流体温度と色の間にほぼ直線的な関係があり、図中グレーの部分は赤で表示され、20度程度を、その周辺の白い部分は青で表示され、30度程度を示している。この可視化画像からは、温度情報を得ることが可能であるが、この画像に対して、PIV法を適用すれば、Fig.8のような速度場を得ることが可能と

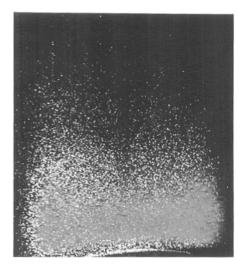


Fig.7 Temperature visualizaion

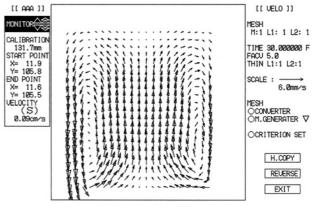


Fig.8 Velocity from Temperature visualizaion Images

691

なる。

以上PTV/PIVの長所である例を示したが、PTV/PIV計測では、それぞれの長所短所を理解し、対象とする流れ場に合わせた可視化と可視化画像の処理が必要である。

2.2 可視化装置

PTV/PIV計測のための可視化装置をFig.9、Fig.10に示す。 Fig.9は、光源にArレーザーを用いたシステムで、Fig.2の 基本構成である。この図では、4wの全波長タイプのArレー ザーが使用されている。音響光学セル (AOM) は、連続発振 するレーザー光をチョッピングするためのものであり、 80MHzの音響光学セルが使用されている。レーザー光のチ ョッピング原理は、音響光学セル内に超音波の平面波を発生 させ、この平面波とレーザー光のドップラー効果により得ら れる1次の散乱光のみを取り出すことで、レーザー光を間欠 照射可能としている。システムの構成においては、Arレー ザーの照射タイミングとTVカメラの時間同期が必要とな る。本システムでは、TVカメラ上で構成されたNTSC信号 のフレーム開始点を基準に、マイクロコンピュータ上のプロ グラムにより音響光学セルに照射タイミング信号を与えるこ とで制御を可能としている。Fig.10は、光源にYAGレーザ ーを使用したものである。基本原理は、Fig.9のArレーザー とほぼ同じであるが、光源に高エネルギ密度 (15mJ) の

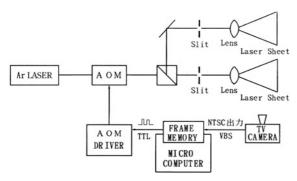


Fig.9 Flow Visualization system (Ar laser)

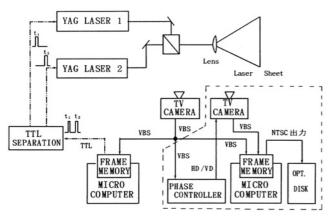


Fig.10 Flow Visualization system (YAG laser)

YAGレーザーを使用していることから、微細なトレーサ粒子の可視化に有効な方法であり、空気流れで適用されることが多い。なお、本図では、2台のTVカメラを使用したシステムを紹介しているが、これは、4.3.3節で示す流れ場を可視化するために開発したものである。なお、点線枠内を使用しない場合は、Fig.9とFig.10では、単に光源が異なるだけである。

2.3 可視化方法

PTV/PIV計測には、速度に対するダイナミックレンジが 狭いと言う問題がある。Fig.11は、連続鋳造機の水モデル に対してPTV法を適用した結果である。本計測結果は、4水 準のレーザー光の照射を行い、1秒間30フレームの画像を解 析した結果である。Fig.11-1は、トレーサ追跡結果を格子点 に補間演算した結果を、Fig.11-2は、LDVによる計測結果 である。PTVによる計測結果とLDV (速度の絶対値測定方 法であり計測精度が高い)による計測結果は非常に良く一致 していることがわかる。また、LDVは、点計測であるがゆ え、図中の約200点を計測するには、膨大な時間を必要とす る。一方、PIVでは、1秒程度の可視化画像を数分で解析す ることが可能であり、計測時間が大幅に短縮されている。し かしながら、PTVでは、常に、速度に対するダイナミック レンジが狭いという問題がつきまとう。連続鋳造機の水モデ ルの場合、浸漬ノズルの吐出流速に対し鋳型内流速は、非常 に小さい。すなわち、計測対象の速度範囲が非常に広い。こ のような場合、トレーサ粒子の移動量に合わせた可視化が必 要となる。従って、4水準のレーザー光の照射方法を採用し、 得られたトレーサ追跡結果を合成している。以下、流れ場に 合わせた可視化方法について説明する。

2.3.1 電子シャッター方式

電子シャッター方式による可視化は、PTV/PIV計測の基本である。この方法は、TVカメラ(子供の運動会で使用さ

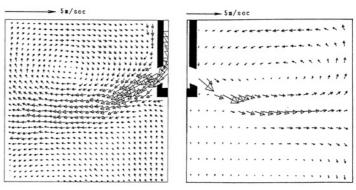


Fig.11-1 Velocity Vector by PIV

Fig.11-2 Velocity Vector by LDV

Fig.11 Velocity Vector (PIV and LDV)

れるカメラ等も含まれる)の電子シャッターを利用し、流れ 場を可視化するものである。電子シャッター方式の構成原理 をFig.12に示す。1/30秒単位のフレーム画像は、ODDフィ ールド画像とEVENフィールド画像から構成されており、 それぞれのフィールドの後半で電子シャッターが開閉してい る。可視化された画像上のトレーサ粒子位置は、この電子シ ャッターの開閉時の映像である。Fig.13は、自由表面上に 浮遊する粒子画像をTVカメラで可視化した代表的な画像で ある。フレーム画像と呼ばれる映像でFig.12のAとBの電子 シャッターで画像化されたトレーサ粒子像が撮像されてい る。トレーサ粒子の追跡は、例えば、PTV法では、連続す る2フレーム・4フィールドの画像を抽出して行うことにな る。Fig.14は、1フレーム・2フィールドの画像に対してバ ネモデル (PTV 法の1つのアルゴリズム) を適用し、速度を 算出したものである。即ち、2時刻PTV法である。電子シャ ッター法を用いた場合の計測可能範囲は、電子シャッターの 間隔が1/60秒であることから、トレーサ粒子の移動量でそ の最大速度が決まることになる。一般形な4時刻PTV法では、 トレーサ追跡の移動量は、可視化画像の12%~20%程度であ る。これに対して、PIV法では、0.1~5.5%程度である。こ れゆえ、例えば、可視化空間が0.01m×0.01mの場合、計 測可能な最大速度は、一般的なPTV法では、約0.03m/s程度 となる。なお、可視化空間が広い場合には、解析可能な最大

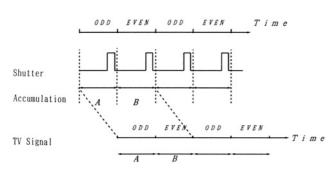


Fig.12 Principle of NTSC Signal

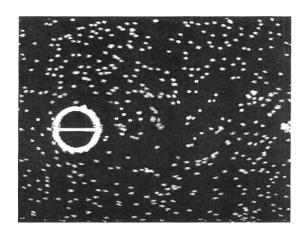


Fig.13 Flow Visualization by Conventional TV Camera

速度は大きくなり、例えば、可視化空間が $0.1m \times 0.1m$ の場合、その最大速度は、0.3m/sである。

2.3.2 高速流れへの展開

可視化空間を高速で移動する流れを画像化し、速度を算出するための各種の可視化方法とトレーサ追跡方法が提案されている。これらの方法の大部分がレーザー光の間欠照射方法である。著者らは、以下の方法を採用している。

- (1) 4時刻PTV法:同一フレーム内に4度のレーザー光を 照射する可視化方法。
- (2) 2時刻PTV法 (SpringModel) : 同一フレーム内のフィールド境界に2度のレーザー光を照射する可視化方法
- (3) PIV法:トレーサ粒子の濃度が変わるだけで2時刻 PTV法と同じ可視化方法

Fig.15に4時刻PTV法で高速流れを計測するための方法を示す。この方法では、同一フレーム内にレーザー光を4度照射している。その適用最大速度は、先の示した可視化空間が0.01m×0.01mの場合、約60m/sである。Fig.15-1はレーザー光の照射方法を示したものである。ODD画像に1度、EVEN画像に3度のレーザー光を照射するとともにTVカメラでの光の蓄積方法をフレーム蓄積としている。トレーサ粒子の追跡は、得られたフレーム画像およびフレーム画像から、ODD画像およびEVEN画像に分離した3枚の画像を使用することで行っている。すなわち、ODD画像とEVEN画像の演算から始点トレーサ粒子を抽出し、レーザー光の照射タイミングを情報として4時刻法で同一のトレーサ粒子を判断している。

Fig.16に2時刻PTV法 (Spring Model) およびPIV法の可 視化方法を示す。この方法では、同一フレームのODD後半 とEVEN前半にレーザー光を照射するとともにTVカメラで の光の蓄積方法をフィルド単位としている。照射間隔は、ト レーサ粒子の可視化空間での移動量に合わせて調整するが、

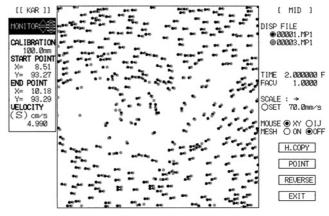


Fig.14 Velocity Vector by spring model

PTV (Spring Model) の場合、経験的にトレーサ粒子移動量を5Pixel (全空間が500Pixel 程度)程度にする。Fig.17-1にPIV法でトレーサ粒子を追跡するための可視化画像を示す。

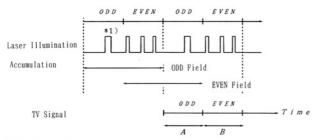


Fig.15-1 Laser Light Illumination method

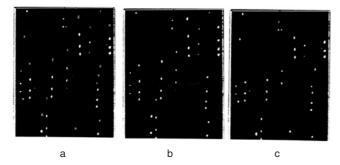


Fig.15 Flow Visualization Method for High Speed Flow

- a Visualization Image (FRAME)
- b Visualization Image (ODD FIELD)
- c Visualization Image (EVEN FIELD)

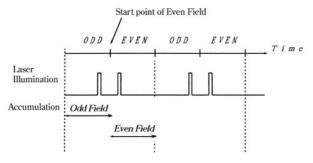


Fig.16 Flow Visualization Method (PIV and Spring Model)

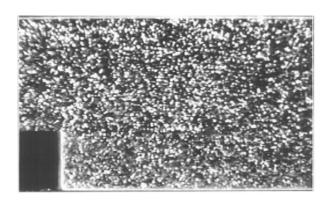


Fig.17-1 Visualized Image

Fig.2に示した実験装置を用いた場合である。可視化には、 $15\mu m$ のトレーサ粒子を用いたため、個々のトレーサ粒子像を分離することは困難であるが、2時刻の画像上には、濃度パターンが存在するため、速度計測が可能となる。Fig.17-2は、計測結果である。計測時間は、Pentium III 500 MHz程度のCPUで約10 秒程度である。

更に高速な流れへの適用も実用化されている。同様の条件で、約200m/s程度までが可能となっている。用いたシステムは、Fig.10の可視化光学系であり、同一空間を2台のカメラで可視化することでNTSC方式のシステムで流れ場の可視化計測を可能としている。詳細は、4.3.3節で紹介する論文に記載されている。

ろ レーザー誘起蛍光法¹⁾

レーザー誘起蛍光法を用いて、気液2相流を計測する方法 について、その一例を紹介する。Fig.18は、円筒底吹き噴流の計測例である。この実験は、内径0.14m ϕ のアクリル製



Fig.18 Visualized Image and Velocity Vector (Two Phase Flow)

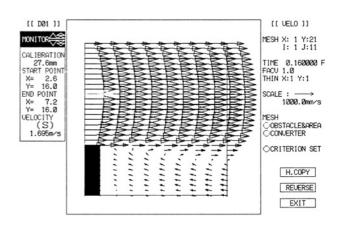


Fig.17-2 Velocity Vector

Fig.17 Visualized Image and Velocity Vector for PIV

円筒容器の容器中央底部に設置したポーラスプラグを介して 容器内に空気を吹き込んだ場合である0。このような実験に おいては、気体が存在する部分では、気体の画像と液体の画 像を分離することは困難であるため、気体の運動と液体の運 動を分離した計測が不可能となることが多い。本実験では、 レーザー光によりトレーサ粒子が誘起蛍光する性質を利用 し、気体画像と液体画像を分離し、液速度を計測したもので ある。その原理は、流体中にあらかじめ混入したZnS粒子 の残光特性を利用したものである。ZnS粒子は、355nmの レーザー光を受けると励起し、残光を示す。この残光特性を 利用すると、液体画像のみが得られる。すなわち、レーザー 照射時には、Znsの励起光と気泡の散乱光の両方が画像化さ れるが、ZnSの残光特性時 (レーザー光照射後) の画像を可 視化すれば、気泡の散乱光とZnSの励起光が分離できる。 したがって、液速度を計測するための可視化画像を得ること が可能となる。Fig.19は、レーザー光照射後、数ms後の可 視化画像である。この可視化画像に対して、濃度相関法を適 用すれば、液速度の計測が可能となる。このような方法で計 測した速度場がFig.18左の速度ベクトルであり、気泡が浮 上する領域での液速度が計測可能となっていることがわか る。

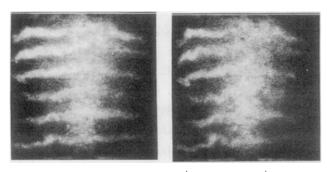


Fig.19 Visualized Image (Two Phase Flow)

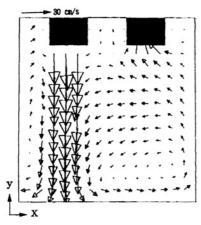


Fig.20 Velocity Vector Plot

4 との他適用例

最後に可視化および画像計測例を幾つか紹介するととも に、著者らが開発したシステムを実用的に利用する企業およ び大学で報告された参考論文とその内容を概説する。

4.1 RH水モデルにおける可視化計測²⁾

RH取鍋精錬プロセスの脱炭特性を流れの観点から解明す る目的で行った模型実験結果を紹介する。Fig.20は、複数 の真空精錬装置での取鍋内の流れ場を1/7水モデルで計測し たものである。図中、○印は、RH鍋精錬プロセスの脱炭特 性を、それ以外は、新たに開発したプロセスでの脱炭特性を 示す。計測は、3分間の可視化画像をPTV法で解析したもの である。PTV計測では、取鍋の混合指標であるレイノルズ 応力が算出できる。このレイノルズ応力と実機脱炭性能を比 較を示したものがFig.21であり、3水準の取鍋の混合状態が 異なる事および精錬[C]レンジが異なることが分かる。

4.2 RH水モデルにおける脱炭模擬実験

Fig.22の可視化写真は、水モデルで脱炭現象を模擬した

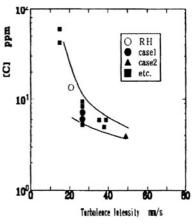


Fig.21 Turbulence Intensity and [C]

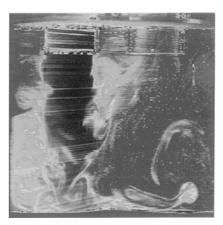


Fig.22 Flow Image

実験をコンピュータ処理した結果である。水モデルでの実験は、脱炭反応を酸塩基反応に置き換えた。すなわち、事前に溶解したウラニン溶液に真空槽で塩酸を加えることで、脱炭反応を模擬した。この実験は、ウラニン溶液の励起画像を利用したもので、励起強度がPHの関数であるという性質を利用したものである。RH下降管(図中左側が下降管、右側が上昇管)から反応した流体が取鍋に流れている事がわかる。

4.3 参考論文と概要

4.3.1 馬蹄渦の乱流遷移仮過程の研究

防衛大学校の鶴野、松口らによる研究³⁾:馬蹄渦は、3次元物体の上流側に発生する渦で、タービンブレード、翼、橋脚等に関連する工学上重要な問題である。これゆえ、多くの研究は、乱流馬蹄渦に関するものであり、層流馬蹄渦や乱流遷移馬蹄渦に関するものは少ない。上記論文では、PIV計測を用い、遷移過程に現れる非定常馬蹄渦を可視化と定量的解析の両面から検討している。速度データの周波数解析等参考になると思われる。

4.3.2 複断面開水路流れの時空間相関解析

京都大学の禰津らによる研究⁴⁾:複断面開水路では、低水路と高水敷の境界によって水理量が不連続に変化する水路である。この水路で形成される組織構造の瞬間的な特性の検証は、非常に重要である。上記論文では、PTV計測を用い、複断面開水路流れの3次元乱流構造を解明している。速度の空間相関やその後の研究で行われたKolmogoroff理論に基づく-5/3則等の計測が参考になると思われる。

4.3.3 直噴ガソリンエンジン用スワールインジェクタの 噴霧解析

日産自動車の久保らによる研究⁵⁾:インジェクターの設計に重要なノズル内部の流れをPIV法で計測する技術である。特に可視化空間が狭く、また流れ場が非常に高速であるという特徴がある。

4.3.4 ビデオ画像解析とBundary-Fit法を用いた砕波変形内部 の特性に関する研究

熊本大学の山田らによる研究⁶⁾: PTV計測やPIV計測では、格子点に補間された速度ベクトルは、必ずしも質量保存則を満足しない。山田らは、上記研究でMass-Considentモデルを画像処理結果に適用し、壁面境界や自由表面付近においての有用性を示している。

5 終わりに

実験テクニック編の応用とトピックスの最終回に「可視化・画像計測」の記事を記載させていただきました。本来、実機での可視化・画像計測の実用化に焦点をあてたかったのですが、実験の範囲になってしまったことが残念です。流体実験の1手段であります「可視化・画像計測」は、本文中でも申し上げましたが、決して簡単な技術ではなく、奥深いものであります。しかしながら、既に、模型実験での実用化は完了しており、その有用性が示されています。今後、プロセス改善と提案のための技術として根強く展開される事を期待しております。

参考文献

- 1) 富野, 津田, 大場:レーザー誘起蛍光法による気液二相流れの測定, 日本機械学会第71期全国大会講演論文集 Vol.C (1993), 236.
- 2)小関,津田,佐賀,小林:取鍋精錬炉の脱炭現象と模型実験における乱流計測,日本機械学会第72期通常総会講演論文集Ⅲ,(1995),249.
- 3) 松口 淳5:日本機械学会論文集 (B), 65 (1999) 629, 28.
- 4) 禰津家久ら: 土木学会論文集, 539/Ⅱ-35 (1996), 89.
- 5) 久保賢明ら:自動車技術会1999 秋季学会講演論文集, (1999)
- 6) 山本文彦ら:海岸工学論文集,43 (1996) 1,51.

(2000年8月8日受付)