# 画像処理による流動場の速度・温度同時計測法\*

榊原 潤† 菱田公一‡

前田昌信‡

# Simultaneous Measurement Method of Velocity and Temperature Fields by Using Image Processing

Jun SAKAKIBARA Koichi HISHIDA

Masanobu MAEDA

#### Abstract

Simultaneous measurements of velocity and temperature in the water flow has been done by using DPIV (Digital Particle Image Velocimetry) and LIF (Laser Induced Fluorescence). Details of the technique, e.g. seeding, illumination, image captureing and processing, are described as reproducible way. The software of a newly develoed measurement system, called JSFLOW, will be open to the public domain in Internet.

KEYWORDS: Image Processing, PIV, LIF, Heat Transfer, Turbulent heat flux

# 1 はじめに

熱流動場の多点同時計測を目的として、ビデオ画像 を利用した流速や温度、濃度等の面的計測手法に関す る論文が数多く発表されており(1)(4)、強力な計測法と して認められつつある。特に、PIV(Particle Image Velocimetry)とPTV(Particle Tracking Velocimetry)は流 速測定法として、LIF(Laser Induced Fluorescence)は濃 度や温度などのスカラー測定法として一般的な用語と して浸透してきており、計測装置としての製品化も進 んでいる。しかし、高価な画像計測システム一式を購 入したとしても、ハードウェアに依存した多くの限界 や細かいノウハウの不足によって、必ずしも満足な結 果をもたらすとはいい難い。市販のパソコンや画像機 器を用いて画像計測を行いたいという要望は少なくな いことから、本論文では市販のパソコン、画像機器と ある程度のエレクトロニクス技術を用いて、高い自由 度と経済性をめざした画像計測技術を、著者らにより 開発されたPIVシステム(JSFLOW)を例としてなるべく 具体的な形で提供することを目的とする。測定例とし て二次元衝突噴流よどみ域の温度・速度同時計測<sup>(1)</sup>を 取り上げ、実際の計測手順を解説する。製品化されて いない装置はその回路図を付記し、ソフトウェアはイ ンターネットのFTPサイトに常備することで一般に公 開する考えである。

# 2 ハードウェア構成

図1にPIVに必要な基本的な計測システムを示し、 表1に各装置の内容を列挙した。本システムはパソコ ンの世界的標準機であるIBM ATを基本に構築した。 画像機器はNTSC規格に準じた製品を使用した。

#### 2.1 画像計測のための可視化

アルゴン・イオン・レーザ・ビームは音響光学素子 (AOM)および光ファイバを経由してレーザシート光学 系へ導かれ、トレーサ粒子を懸濁した流動場を可視化 し、これをCCDカメラで撮影する。可視化用光源とし てはレーザシートの他にキセノンランプ等のストロボ

<sup>\*</sup> 平成6年7月6日受理, Editor: 土方邦夫

<sup>\*</sup>慶應義塾大学大学院(〒223 横浜市港北区日吉3-14-1, Tel(045)563-1141, Fax(045)563-5943)

<sup>\*</sup>慶應義塾大学理工学部

Thermal Science & Engineering Vol.2 No.4 (1994)



図1 計測システム

表1 装置一覧

名称	メーカ・製品名
1111	IBM AT 互换模
CCDカメラ	SONY XC-75
画像取り込みボード	Data Translation DT2867-LC
DSPボード"	Loughborough PC/C31
VTR	Panasonic AG-5700
レーザ	NEC GLG3400
レーザシート送光系	カノマックス
音響光学素子	HOYA A-160
フィールド番号	自作
スーパインポーザ"	U.
タイミングコントローラ"	自作

<sup>\*1</sup> JSFLOWではDSPを使用しなくても動作可 <sup>\*2</sup> 付記に回路図を示す

を用いることも可能である。図2にPIVで用いる発光タ イミングをCCDカメラの撮像時間に基づいて示す。 NTSC規格では映像を撮影あるいは表示する際に1画 面につき2回の走査を行うインターレース方式を採用 しており、1回の走査で得られる画像を偶数フィール ド画像あるいは奇数フィールド画像、2回の走査で得 られる画像をフレーム画像と称する。そのため、CCD カメラの撮像時刻は偶数ラインと奇数ラインで異な り、お互い1/60秒の時間差を伴う。また、各ラインの 撮像時間が1/30秒間であるフレーム蓄積モードと、



図2 レーザシートの発光タイミング

1/60秒間であるフィールド蓄積モードの2種類のモー ドがある。図2(a)は可視化光源をフレーム蓄積モード で各フレームごとに発光する方法であり、1/30秒ごと に1フレームの画像を得ることができる。また、図2(b) はフィールド蓄積モードで各フィールドに発光する方 法で、1/60秒ごとに1フィールドの画像を得る。これ は連続光で可視化した場をCCDカメラの電子シャッ ター機能を用いて撮影することと等価である。このと き、偶数フィールドと奇数フィールドの画面垂直方向 の撮像位置が異なるため、時間的に隣接した2画面か ら粒子パタンの移動量を求めて速度を計測するPIV (相関法)などでは縦方向の移動量に誤差を生じる。 この画像を画像取り込み装置で取り込み表示すると、 1フレームに2時刻の画像が存在することから、撮影 対象がチラついて見える。図2(c)は隣接したフィール ド同士に発光することで2画面の時間間隔を任意に設 定する方法であり、1/20秒間隔で1組のフィールド画 像対を得る。この場合、2画像の撮像位置は等しく、 また2画面の時間間隔を相当短くすることができるた め、比較的高速でせん断の強い流れ場のPIV計測に適している。

以上に示した発光タイミングを実現するためには、 CCDカメラの撮像タイミングに同期した信号を必要と する。付記1にNTSC映像信号から垂直および水平同期 信号を分離する回路を示す。また、付記2には垂直同 期信号から図2(c)に示した発光タイミングを可能とす るために、トリガー信号の立ち上がりから設定された 時間後にパルスを発行する回路を示す。

# 2.2 フィールド番号の記録とVTRへの録画

上記の手法で可視化された流動場をCCDカメラで撮 影し、一旦、VTRや光ディスクレコーダに画像を録画 する。光ディスクレコーダは各フィールド画像を固有 の識別番号で管理しており、再生時に任意の画像を検 素することができる。このため画像を時系列に処理す ることが可能となる。また、同様の機能を有したVTR も製品化されてはいるが、いずれも比較的高価である ことから、本システムではフィールド識別番号を画面 に直接スーパーインボーズし、再生時に画像取り込み 装置によってその番号を読みとることで任意の画像を 選別する方法を採った。これにより静止再生に伴う画 像の劣化はない。また、録画の際には汎用のVTRを用 いることができるため、CCDカメラを複数台同時に使 用する際、その台数を比較的容易に増やすことができ る。付記3には各フィールドに2進数のバーコードを スーパーインポーズするための回路図を示す。



図3 JSFLOWのソフトウェア構成図

Thermal Science & Engineering Vol.2 No.4 (1994)

# 2.3 画像処理装置

画像取り込みボードと速度算出のための相関演算用 のDSP(Digital Signal Processor)ボードは共にパソコン のI/O空間にマッピングされている(画像取り込みボー ドはI/Oアドレス2A0h~2C3h, 6A0~6C3、DSPボード はI/Oアドレス290h~297h、メモリーアドレスE000h~ E7FFh)。画像取り込みボードには画像メモリが2画面 分装備されており、映像信号の輝度情報をA/D変換す る際のリファレンス電圧の調整機能も付加されてい る。DSPは32ビットの浮動小数点積和演算を毎秒1670 万回行うことができる。

# 3 ソフトウェア構成

図3にJSFLOWのメニュー構造を示す。以下、この メニューの各項目は{…}で示す。DSPのプログラムは アセンプラ言語で記述したが、他の大部分はC言語に よって書かれている。操作はメニュー形式で対話的に 行うことができる。測定用のパラメータや表示には位 置校正情報をもとにmmの表示を多用しており、実際 の計測において大変便利である。また、一点の速度を 実時間で計測する機能も付加しており、熱線流速計的 な計測も行うことができる。

# 3.1 画像の検索とコンピュータへの取り込み

録画された可視化画像は各フレームあるいはフィー ルドごとに画像取り込み装置へ取り込まれる。統計量 の算出には多くの時刻の画像を必要とするため、画像 の取り込みと速度・スカラーの算出およびファイル セーブは自動化し、大量処理を可能とするべきであ る。そのため、光ディスクレコーダやVTRはパソコン による制御用のインターフェースが装備されている物 を使う。本システムではRS-232Cインターフェースに よって画像を秒単位に管理することが可能なVTRを用 いた。

このVTRを用いて、画面にスーパーインボーズされ たバーコードに従って任意の画像を検索する。VTRの



Reference Matrix : f(x,y)

Interrogation Window : g(x,y)

図4 相互相関法の概念図

画像検索機能を用いて目的の画像の直前までテープを 進め、そこから再生状態にして画像を連続的に画像取 り込み装置へ上書きしながら送り込む。この際、パソ コンはメモリーに送り込まれた画像からバーコードを 読みとり、所望の番号の画像が取り込まれるまで、作 業を継続する。取り込みが終わった時点で画像の検索 は終了し、メモリー上に目的の画像が記憶されてい る。{Velocity Measurement - Velocity Map from the VTR}および{Scalar Measurement - Scalar Map from the VTR}でこの手法が用いられている。

# 3.2 相関法による速度ベクトルの算出

速度の計測はトレーサ粒子像の局所的な移動量を画 像の相互相関によって求める相関法に基づいて行われ る。画像の相互相関関数は

$$R \ (\xi, \eta) = \frac{\sum_{0}^{n-1} \sum_{0}^{m-1} (f(i, j) + f_{av}) \cdot (g(i + \xi, j + \eta) - g_{av})}{\sqrt{\sum_{0}^{n-1} \sum_{0}^{m-1} (f(i, j) - f_{av})^2} \sqrt{\sum_{0}^{n-1} \sum_{0}^{m-1} (g(i + \xi, j + \eta) - g_{av})^2}}$$

で表される。ここで、

$$f_{av} = \frac{\sum_{0}^{n-1} \sum_{0}^{m-1} f(i,j)}{n \cdot m}, \quad g_{av} = \frac{\sum_{0}^{n-1} \sum_{0}^{m-1} g(i+\xi,j+\eta)}{n \cdot m}$$
(3.2)

である。これを変形すると式(3.3)となる。この式の中 で $\sum f, \sum f^2$ は $\xi, \eta$ の関数ではないので計算時間は少な く、また、 $\sum g(\xi, \eta), \sum g(\xi, \eta)^2$ は $\sum g(\xi-1, \eta), \sum g(\xi-1, \eta)^2$ か

$$R\left(\xi,\eta\right) = \frac{n \cdot m \cdot \sum_{0}^{n-1} \sum_{0}^{m-1} \left(f\left(i,j\right) \cdot g\left(i+\xi,j+\eta\right)\right) - \left(\sum_{0}^{n-1} \sum_{0}^{m-1} f\left(i,j\right)\right) \left(\sum_{0}^{n-1} \sum_{0}^{m-1} g\left(i+\xi,j+\eta\right)\right)}{\sqrt{\left(n \cdot m \cdot \sum_{0}^{n-1} \sum_{0}^{m-1} f\left(i,j\right)^{2} \left(\sum_{0}^{n-1} \sum_{0}^{m-1} f\left(i,j\right)\right)^{2} + \left(n \cdot m \cdot \sum_{0}^{n-1} \sum_{0}^{m-1} g\left(i+\xi,j+\eta\right)^{2} \left(\sum_{0}^{n-1} \sum_{0}^{m-1} g\left(i+\xi,j+\eta\right)^{2}\right)\right)}}$$
(3.3)

- 4 -

ら求めることができるため演算時間を大幅に短縮できる。しかし、 $\sum f(g(\xi, \eta))$ は各 $\xi, \eta$ に対して逐一算出する必要があり、大部分の計算時間をこの項の算出に要する。

相関関数が求まれば、そこから最大値を探し、さら にその最大値を中心として相関関数に正規分布を当て はめξ, η を1ピクセル以下の精度で求める。相互相関 関数を正規分布で近似すると、

$$-\gamma \xi = \frac{\log\left(\frac{R_{1,0}}{R_{1,0}}\right)}{2\log\left(\frac{R_{1,0}R_{-1,0}}{R_{0,0}^2}\right)}, \quad \gamma \eta = \frac{\log\left(\frac{R_{0,1}}{R_{0,1}}\right)}{2\log\left(\frac{R_{0,1}R_{0,-1}}{R_{0,0}^2}\right)}$$
(3.5)

となり、1ピクセル以下の精度を持つ移動量 $\xi_{spa}\eta_{spa}$ は  $\xi_{spa}=\xi+\gamma_{\xi}, \eta_{spa}=\eta+\gamma_{\eta}$  (3.6) となる。回転速度が既知の円筒容器を用いた誤差検定 実験の結果、移動量算出に伴う精密度は $S_{pix}=0.2$ (pixel) であった。

JSFLOWでは相関領域と探索領域の大きさ、および その相対位置、計算領域とグリッド間隔を任意に設定 できる (Velocity Measurement - Parameter Setting)。

3.3 レーザー誘起蛍光法による温度の計測

強度I<sub>c</sub>の励起光により励起された蛍光体の発光強度 I<sub>c</sub>は、蛍光体濃度Cが励起光の減衰が無視できるほど 低い場合、

*I<sub>f</sub>* =AC*I*εφ(T) (3.7) で表される<sup>(α)</sup>。ここで、Aは集光率、ε は吸光係数、φ は量子収率で温度の関数である。よって、*I<sub>e</sub>*とCが一 定のとき、蛍光発光強度*I<sub>e</sub>*は温度のみの関数となる。 図5は温度と蛍光発光の関係を

$$I_c = \frac{\phi(T)}{\phi(T=303K)}$$
(3.8)

とおいて実験的に求めたものである。CCDカメラへの 入力とその出力信号電圧の関係をV<sub>c</sub>で表せば、(3.7) (3.8)より

 $V = V_c \left( I_c(T) I_e \right) \tag{3.9}$ 

 $V_c$ は参照温度  $T=T_{ref}$  について実験的に求める。温度分布T は $I_c$ ,  $V_c$ の逆関数をそれぞれ $I_c$ ,  $V_c$  とすれば(3.9) より





$$T = I_c^{-1} \left( \frac{V_c^{-1}(V)}{I_e} \right)$$
(3.10)

として求めることができる。

本研究で用いたローダミンBはピーク発光波長  $\lambda_{=600nm}$ 、ピーク吸収波長 $\lambda_{=540nm}$ であるため、ア ルゴンレーザの波長 $\lambda_{x-im}=514.5nm$ で励起した場合に はそれ以下の波長を遮るフィルターをCCDカメラに装 着することで励起光を遮断し、発光のみを捉えること が可能となる。

{Scalar Measurement}では画像ピクセル強度分布を 局所領域で平均化してノイズを軽減した後、ファイル にセーブする。温度の計算はこのファイルをもとに EWS上で別プログラムによって算出される。計測の不 確かさは±1.2℃であった。

# 4 計測手順とその一例

二次元衝突噴流よどみ域の温度と速度の計測方法を 実際の手順に従って具体的に解説する。流路測定部と CCDカメラおよび校正板の挿入位置を図6にしめす。 また、表2に実験条件を示す。なお、実験結果につい ては文献1を参照願いたい。

## 4.1 トレーサ粒子の懸濁と蛍光染料の溶解

作動流体の水道水はヒーターにて85℃に加熱、脱気後、25℃に冷却し、トレーサ粒子として平均粒径5ミクロンの高密度ポリエチレン粒子(住友精化HE5023)を 10mg/Iの割合で懸濁し、蛍光染料としてRhodamine B を0.3mg/Iの割合で溶解させた。 Thermal Science & Engineering Vol.2 No.4 (1994)



図6 衝突噴流の温度・速度計測のための機器配置

表2	実験条	牛

: 14.5 mm
: 107 mm/s
: 2000
: 8B
: 44 kW/m²
: 14.3 K

#### 4.2 カメラの設置と位置の校正

ノズルの出口速度測定用に校正板とカメラの設置を 行う。位置校正板とCCDカメラを図6(Position 1)に設 置する。カメラと校正板の距離は約20cmであり、レン ズに接写用リングを装着することで視野を30x30mm<sup>2</sup> とした。校正板の映像を{Image Capture - Capture 2 Frames}にて取り込み、{Caribration}にて校正板上の4 点のビクセル座標をカーソルを用いて、また、実際の 位置を数値にて入力して位置校正情報の入力を行う。 次項ではこの4点の座標情報をもとにして速度を算出 する。

# 4.3 ノズル出口速度の設定

{Velocity Measurement - One Point Velocity in Realtime}にてノズル出口の速度の計測を行う。ノズル 出口付近は矩形速度分布を有した層流であるため噴流 中央における流体の変形は少なく、粒子の移動距離を 大きくとることができる。ここでは2画像の時間間隔 を15msとし、粒子移動量を35ピクセル程度とした。こ のときの計測される速度の精密度はSmeet Spit /35=0.57% である。カーソルをノズル出口にあわせ、速度計測を 表3 速度計測における相関計算のパラメータ

Reference Matrix	: 25x25
Interrogation Window	: 48x48
Offset of interrogation window from reference matrix Grid Step	: -15,-15 : 15,15

行いながら出口条件を整える。ノズル出口流速は 107mm/sとした。

# 4.4 カメラの再設置と位置の校正

よどみ線上の計測を行うために、4.2で設置した校 正板とCCDカメラを(Position 2)に設置し直す。レー ザーシートの位置も同時に合わせる。(CCD Camera 1) は粒子画像撮影用、(CCD Camera 2)は蛍光画像撮影用 で光学フィルターを備えている。映像をVTRに録画し た後、校正板を取り外して加熱衝突板を挿入する。

# 4.5 温度の校正

レーザ強度I<sub>c</sub>の変動をフォトディテクタによって光 電変換し、その信号をA/Dコンバータを介してパソコ ンに入力する。同時に、フィールド番号を画像取り込 み装置を介してパソコンに読みとり、両者を連続的に メモリに書き込む。そしてレーザー光強度I<sub>c</sub>を最低照 度から最大照度へ変化させて、その発光強度を録画す ることでV<sub>c</sub>を求める。このときの水温を熱電対等で計 測してT<sub>-</sub>とする。

#### 4.6 速度場・温度場の計測

一旦録画を停止した後、衝突板の加熱を開始し、熱移動が平衡状態に達した時点で映像の録画を再び開始する。よどみ線近傍は高い変形速度を伴う渦構造が存在するため、2画像の時間間隔を3msとした。録画と共にレーザ光強度とフィールド番号も同時に記録する。 Camera 1,2によって撮影された画像を図7に示す。

#### 4.7 画像の自動解析

(CCD Camera 1)で撮影した校正板画像から4.2と同様 にして位置の校正を行ったのち、{Velocity Map from the VTR}によって粒子画像から速度分布を算出する。 相関演算の各バラメータを表3に示す。



(a) 粒子画像



蛍光画像 (b)

図7 Camera 1, Camera 2 により同時撮影された粒子画 像(a)と蛍光画像(b). 各画像左上はフィールド番 号スーパインボーザにより付加されたバーコー ド.

(CCD Camera 2)で撮影した校正板画像からも同様に位 置校正を行い、{Scalar Map from the VTR}によって温 度校正画像および計測画像の強度分布を算出する。得 られたデータはEWSに転送した後、3.3項のアルゴリ ズムによって温度分布の算出を行う。図7に示した画 像から算出された速度・温度分布を図8に示す。



図7に示した画像から算出された速度・温度分布 図8

#### 5 結言

市販のパソコン、画像機器を用いたPIVシステム (JSFLOW)を例として、画像処理による熱流動計測の 具体的な方法を示した。このシステムのソフトウェア はインターネットのanonemous FTPサイトに常備する ことで一般に配布する考えである。入手法ならびにソ フトウェアの詳細についての質問は下記までE-mailで お送り願いたい。

今後、画像計測がより一般的なものとなって、伝熱 研究に大きく貢献すれば幸いである。

E-mail : juns@mech.keio.ac.jp hishida@mech.keio.ac.jp maeda@mech.keio.ac.jp

#### 参考文献

- (1) 榊原潤, 菱田公一, 前田昌信,「二次元衝突噴流よど み域における渦構造と熱伝達(DPIVとLIFによる 速度・温度場の同時計測)」日本機械学会論文集 (B編) 60-573 (1994), 1538-1545.
- (2) Sakakibara, J., Hishida, K., and Maeda, M., "Measurements of thermally stratified pipe flow using image-processing techniques", Exp. in Fluids,16 (1993), 82-96.
- (3) 西野耕一, 笠木伸英,平田賢、佐田豊「画像処理に 基ずく流れの三次元計測に関する研究」日本機械 学会論文集(B編) 55-510 (1989), 404-414.
- (4) Jimenez, J. Cogollos, M., and Bernal, L., "A perspective view of the plane mixing layer", J.Fluid Mech., 152 (1985), 125-143.

- 7 -

# 付録

付記1:同期信号分離回路

[VIDEO IN]にNTSCビデオ信号を入力すると[V.SYNC] および[H.SYNC] にそれぞれ垂直同期信号と水平同期 信号が出力される。[V.SYNC]および[H.SYNC]は付記 3のフィールド番号スーパーインポーザへ接続され る。使用したICは新日本無線(株)の製品である。 [VCC] にはDC 5Vを供給する。

# 付記2:タイミングコントローラ回路

[TRIG.] に入力されたパルス信号の立ち上がりから [SW1]と[SW2] で指定した時間後にそれぞれ [VR1]と [VR2] で指定した時間間隔のパルス信号を [SIGNAL OUT]に出力する。[VCC] にはDC 5Vを供給する。IC は汎用のTTL ICであり、回路図上で電源の接続は省略 してある。







付図2 タイミングコントローラ回路

付記3:フィールド番号スーパーインボーザ回路 [Video Input]にNTSCビデオ信号を入力し、[H.SYNC], [V.SYNC] にその垂直同期信号と水平同期信号を入力 しすると、[Video Output]にフィールド番号がスーパー インボーズされたビデオ信号が出力される。 [VR1],[VR2]でバーコードの0,1の各輝度を調整し、 [VR3],[VR4] でバーコードの水平方向位置を調整す る。[TRIG.]からは3フィールドに1回パルスが出力さ れる。これを付記2に示した回路に入力することで、

図2(c)の発光タイミングを実現できる。カウンターの 値は[RESET SW]でリセットできる。[VCC] にはDC 5Vを、[9V]にはDC 9Vを供給する。[\*1],[\*2],[\*3]はそ れぞれ同記号の部分を接続することを意味する。 NJM2249は新日本無線株式会社の製品である。その他 のICは汎用のTTL ICであり、回路図上で電源の接続は 省略してある。



付図3 フィールド番号スーパーインポーザ回路

# Editor's Comment (土方邦夫)

本論文は近年頻繁に用いられるようになってきたビ デオによる定量的な多次元計測を、より廉価にかつ精 度良く測定するためのノーハウを述べており、多くの 伝熱研究者にとって有用であると考える。著者らは本 文中でソフトウエアーの公開を宣言しているので、可 能であればMosaicによるThermal Science and Engineeringの閲覧サイト内に登録していただきたい。 Author's Response (菱田公一)

是非そうさせて頂きます。ソフトウエアーのソー スリストのみならず、画像データの一例もポストス クリプトファイル等にして閲覧サイトに置かせて頂 きます。