

テイラー渦流れの2次元画像解析

戸谷 順信*・平林 利裕**

Two-Dimensional Digital Image Processing System for Taylor Vortex Flow

Yorinobu TOYA and Toshihiro HIRABAYASHI

Two-dimensional digital image processing system was developed for the analysis of Taylor Vortex flow. The Taylor Vortex flow between concentric cylinder, inner cylinder rotating and outer one fixed is visualized with some small particles as a tracer. The two-dimensional flow field lighted by the slitted light was taken the picture for image data. The light of locus of particle in the photograph shows the velocity of the flow. The image data are inputted to the computer with the binary data by the image scanner, and they are processed with binarization, thinning, labelling, and so on, to analyze for the flow. Consequently, it was cleared that for a cell flow of the Taylor vortex flow, the velocity in the inner cylinder side was high and the velocity in the center of cell was zero and again became to be high in the side of the outer cylinder. And this two-dimensional digital image processing system was useful to analyze the Taylor vortex flow.

1. 緒 言

内円筒が回転し外円筒が静止している同軸二重円筒間におけるテイラー渦流れは1923年のG.I.Taylor 以来、長期にわたって非常に多くの研究が行われてきており、中でも現在は流れの遷移過程、流れの分岐関係等の研究が注目されている。特に流れの非一意性、流れの分岐関係は流体工学ばかりでなく、数学の分野からも関数解析によるアプローチがなされており^{(1),(2)}、数値計算の分野においてもホモトピパラメータの考えを導入した継続法によるシミュレーションが行われている⁽³⁾。流体工学に関して言えば、テイラー渦流れはその閉じた系であることから実験がし易い反面、その流れの速度分布、圧力分布等の定量的特性についてはレーザドップラ流速計による測定結果⁽⁴⁾の研究があるが、あまり報告がなされていないようである。その原因は流れを測定するために流れ場へセンサーを挿入することにより、流れ場を乱して正確な結果が得られないこと、そのためには非接触で測定を行う必要があり、そのための測定装置は高価であることによると思われる。また、熱線流速計による測定結果が報告されているが^{(5),(6)}、微少擾乱に対して変化しやすい流れ場の検討には問題があると思われる。筆者の一人は、従来よりテイラー渦を可視化することによりテイラー渦における流れ

1991年3月14日 日本機械学会第20回北陸信越学生員卒業研究発表講演会で発表

* 機械工学科 講師

** (株)三協精機製作所 電子第2事業部 技術1グループ

の発生過程と構造による分類、動的パラメータであるレイノルズ数と幾何学的パラメータであるアスペクト比の変化による不安定性、さらに分岐関係等の定性的研究を行ってきた^{(7),(8),(9),(10)}。しかしテイラー渦流れについて速度分布等の定量的解析を行うことは、さらに今後の流れの特徴を明らかにするための研究に重要なことであると思われる。

本来、テイラー渦は3次元のスパイラル流れであり、3次元速度場を知る必要がある。しかし、半径方向、方位角方向、軸方向成分の三つの速度場を一度に測定することは困難である。よって、本研究では流れ場に軸方向に平行なスリット光を照射することにより、3次元流れ場を2次元化し、半径方向と軸方向の流れの速度場を画像処理を使って解析した。

コンピュータによるデジタル画像処理は工学に限らず、その応用分野は自然科学、医学など幅広い。さらに最近のコンピュータと周辺機器の発達により個人的にも手軽に画像処理ができるようになってきている。流体力学の分野でもTVカメラからの画像処理を行い、速度分布を求めるシステムの研究⁽¹¹⁾も行われている。本研究では比較的安価に手に入れやすい情報機器を使って簡単に画像処理できるシステムを考案した。そしてその画像処理システムを使ってテイラー渦流れの速度分布の解析を行い、本システムの有効性を検討した。

2. テイラー渦流れの実験装置と方法

本研究で使用した実験装置を図1に示す。内円筒はステンレス鋼で半径が40mmでできており、サーボモータとベルトで伝動され、回転するようになっている。回転は直流電圧で制御されている。外円筒は流れの状態が観察できるように透明なアクリル樹脂でできており内半径が60mmになっている。よって内外円筒の隙間は20mmであり、この隙間に作動流体が入る。作動流体は水とグリセリンの混合液で体積比がほぼ1:1の割合になっている。また流れの可視化のためにトレーサとしてポリスチレンビーズを少量混入させている。

テイラー渦流れは実際には3次元のスパイラル流れであり、この流れの速度分布を求めることは一度にはできない。よって、まず半径方向と軸方向の速度成分を求めるために内円筒の回転軸を含む面の方向に500Wのスライドプロジェクタによるスリット光を照射し、2次元流れ場を写真撮影した。今回の適正な撮影条件はシャッタースピードは1/60秒で絞りは4であった。

流れを制御するパラメータは二つある。一つは動的パラメータであるレイノルズ数、 Re で(1)式で表わせられる。

$$Re = \omega R_1 d / \nu \quad (1)$$

ここで、 ω は内円筒の角速度、 R_1 は内円筒の半径、 d は内外円筒の隙間、 ν は作動流体の動粘度を表す。もう一つは幾何学的パラメータであるアスペクト比、 Γ で(2)式で表わせられる。

$$\Gamma = L / d \quad (2)$$

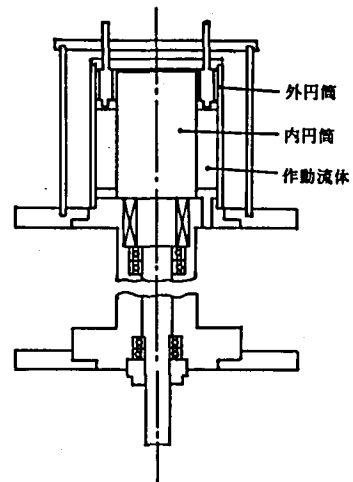


図1 実験装置

ここで、 L は作動流体の軸方向高さである。

作動流体の動粘度はあらかじめ作動流体の各温度における動粘度を求めておき、実験中は作動流体の温度を測定することにより動粘度とした。よって直接のレイノルズ数の制御は内円筒の回転角速度であり、直流電圧で変化させた。アスペクト比は作動流体の軸方向の高さを読み取り顕微鏡で測定して求めた。

3. 画像処理システム

3.1 システムのハードウェア

画像処理システムのハードウェア部分についてその全体を図2に示す。画像入力装置はイ

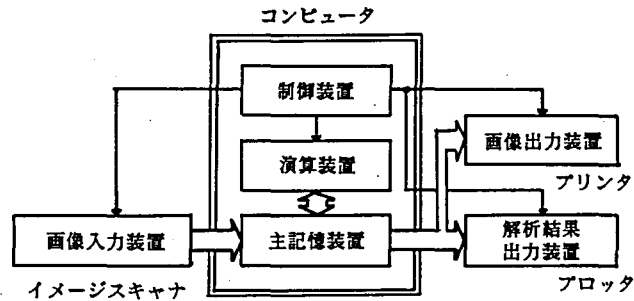


図2 ハードウェア

メージスキャナ (NEC製, PC-in503) を使用する。この装置は平面走査方式でデータはRS-232Cで2値化されてコンピュータに送られる。画像出力装置はプリンタ (NEC製, NM-9950 II) を使用し、逐次、画像処理された画像を出力する。画像はドット出力の絵画的表現と2値化データの形の出力ができる。また、解析された渦中心からの距離と速度値はプリンタに出力される。ベクトル線図、速度分布図の結果はプロッタ (グラフテック製, MP4200) に出力される。コンピュータ (NEC製, PC-9801RX) は周辺装置の制御と画像処理演算、解析演算を行う。

3.2 システムのソフトウェア

画像処理手順を図3に示す。画像処理範囲指定 (Processing Aria Set) は入力された画像データにおいて画像処理できるデータはコンピュータのメモリ量の関係で制限されるため、入力画像の中から画像処理に適する範囲を指定することである。本解析は流れの軌跡から速度を求めるので線の幅は必要ない。細線化 (Thinning)⁽¹²⁾ は入力された画像をその画素の連結性を失うことなく線幅1の線図形まで細めることをいう。ラベル化 (Labelling)⁽¹²⁾ は線図形の一つ一つを区別するために通常は1と0で表わされるデータを1以上の値で名前を付けて区別するものである。以上の処理が画像処理であり、この処理により画像解析が可能なデータが用意される。ベクトル線図は入力画像から画像処理された画像データを



図3 画像処理フローチャート

線図化してプロッタに出力される。ベクトルの長さはラベル化された一つ一つの線素(画素)の始点と終点の距離とする。長さを求めるには画素の数の総数を長さとする方法と座標値から2点間の距離とする方法とがあるが、本解析では二つの方法を比較した結果、信頼性の高い2点の座標値から距離を求める方法を採用した。速度分布の解析については、このベクトル線図から流れの渦の仮想中心、流れの方向を使用者が入力することによって中心からの距離における速度が求められる。都合上、中心を通る半径方向の軸に対してベクトルが上向きのもは速度の大きさを正とし、下向きのもは負と表現した。このシステムにおける一連の画像処理、解析、及び周辺機器の制御のプログラムはC言語を使用した。

4. 結 果

4. 1 画像処理

流れの断面写真を図4に示す。図は渦の中心付近を取り出している。1枚だけの写真ではデータ数が少なくなるため同じ条件のものを4枚使用して合成する。このときの条件は Re がほぼ1730で Γ は1である。この条件におけるテイラー渦のセル数は1セルである。写真について右側は内円筒であり、左側は外円筒である。流れ方向は反時計方向になっていることがわかっている。白い線はポリスチレンビーズの軌跡であり、流跡を示している。この流跡が一定時間における流れの距離を示しているので、距離を求めることで速度とする。この写真が入力画像となる。

図5は入力画像をパソコンに入力した4枚のうちの1枚の原画像である。入力画像はポリスチレンの軌跡が白いため入力した実際の原画像は軌跡の線は黒くなる。ここで画像データ上で白色とは0であり、黒い色とは1の値を意味している。図6は原画像を細線化したも

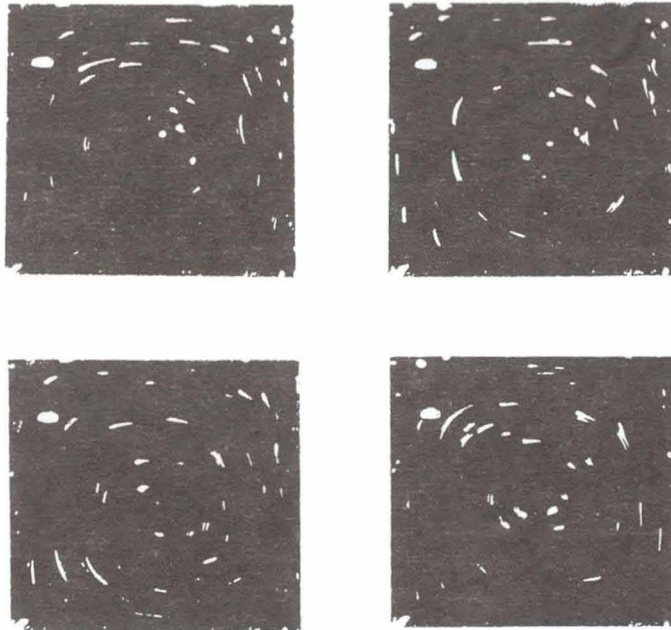


図4 流れの断面写真

のである。細線化において一つの線からの分岐線が発生したものは消去する。この段階において入力された流跡線は1本1本が区別された幅1の線となってデータになっている。

4. 2 画像解析

画像処理されたデータから速度分布を求めるためにベクトル線図を求める。図7はベクトル線図である。このベクトル線図は4枚の写真を画像処理した結果を合成してある。流れの方向を示すために終点に・印を付けてある。流れの方向は写真からは判定できないため、あらかじめ写真撮影の段階で確認しておき、解析者が回転方向を入力した。本システムはベクトル線が4枚の写真のうちのどのデータであるか色別に判断できるようになっているが、今回は不要のためこの図からは不明である。

図8はベクトル線図から求めた速度分布を示す。グラフの横軸は渦中心からの距離であり、中心から右方向は二重円筒の内円筒方向で、左方向は外円筒方向である。縦軸は速度の大きさを示す。渦中心は仮想の中心であり、解析者が任意に決めたものである。

表1は速度の大きさと中心からの距離を表わしている。一の記号がついているのは半径の欄においてはグラフの第2, 3象限にベクトル線がある場合であり、速度の欄の場合はベクトル線図上で下向きのもを表わす。

以上の結果から、一つの渦流れの速度分布は内円筒側において大きく、また外円筒側も大きい。渦中心は速度は0となる領域が存在するように思われる。本結果は今尾らが熱線流速計で測定した結果⁽⁵⁾、及び小林らのピトー管による測定結果⁽⁶⁾と定性的に類似しているように思われる。

5. 結 論

同軸回転二重円筒間の粘性流体の流れ、すなわちテイラー渦流れにおける半径方向と軸方向の速度分布を解析するために、流れの可視化法から写真撮影を行い、それを画像データとしてコンピュータにより画像処理を行ない解析するシステムを開発した。その結果、内円筒側における速度は大きく、渦中心では速度は0になる。さらに外円筒側における速度は外円筒に向かって大きくなる。

本システムは流れの画像処理、解析を行うのに有効であることがわかった。

最後に、本研究を行うにあたり本校機械工学科教授、坂口正雄先生よりイメージスキャナを借用しました。ここに謝意を表します。また、本システムのプログラムを作成するにあたり有益な助言をいただいた本校機械工学科助手、小野伸幸先生に謝意を表します。



図5 原画像



図6 細線化処理



図7 ベクトル線図

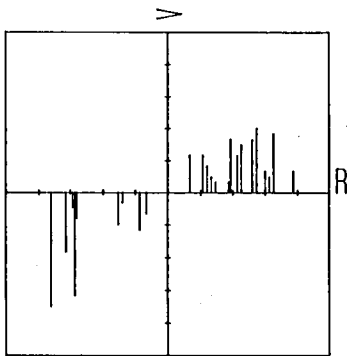


図8 速度分布図

表1 速度データ

1 パンメ	no	ハンケイ	ソクド
	1	-54	21
	2	16	-7
	3	58	-4
	4	39	-2
2 パンメ	no	ハンケイ	ソクド
	1	39	-10
	2	-43	19
	3	-10	4
	4	-47	11
	5	29	-10
	6	45	-4
	7	32	-7
	8	16	-2
3 パンメ	no	ハンケイ	ソクド
	1	22	-2
	2	32	-6
	3	-44	3
	4	-43	3
	5	-13	7
	6	-23	6
	7	-43	7
	8	41	-2
	9	34	-9
4 パンメ	no	ハンケイ	ソクド
	1	10	-7
	2	18	-5
	3	-21	2
	4	-42	5
	5	41	-12
	6	20	-3
	7	49	-11
	8	47	-3
	9	28	-2

参 考 文 献

- (1) Benjamin, T.B., Proc. R. Soc. London, Ser A. 359 (1977), 1
- (2) Shaeffer, D.G., Math. Proc. Camb.
- (3) Bolstad, J.H. and Keller, H.B., J. Comput. Phys., 69, (1987), 230
- (4) King, G.P., Li, Y., Lee, W., Swinney, H.L., and Marcus, P.S., J. Fluid Mech., Vol. 141, (1984), 365
- (5) 今尾・他2名, 機論, 55-514, B (1989),1546
- (6) 小林・他3名, 機論, 55-517, B (1989),2581
- (7) 中村・他3名, 機論, 54-504, B (1988),1898
- (8) 中村・他3名, 機論, 54-505, B (1988),2425
- (9) 中村・他3名, 機論, 56-522, B (1990),307
- (10) 戸谷・他3名, 機論, 56-532, B (1990),3617
- (11) 小林・他3名, 機論, 55-509, B (1989),107
- (12) 長谷川・他3名, 画像処理の基本技法, 技術評論社, (1986)