

二重円筒間を旋回する流体の表面波動の画像解析*

戸谷順信**・小林和弘***

Image processing and analysis on the wave motion of a free surface of the rotating fluid between cylinders

Yorinobu TOYA, Kazuhiro KOBAYASHI

A wave motion on a free surface of the rotating fluid between cylinders which the inner cylinder is rotating and the outer cylinder is stationary was investigated by image processing and analysis. Images taken by a video camera were inputted on a computer and were given a series of image processing. The processed images have the values of the gray level from zero to 255. The frequency of the value of gray level of the image was measured for Reynolds number. Standard deviation on each frequency of the value of the gray level was calculated and was compared for Reynolds number which was changed from zero to 4086. Consequently the wave motions of the free surface were classified the four types.

キーワード：旋回流れ，表面波動，画像処理

1. 緒 言

本研究は、内側円筒が回転し、外側円筒が静止している同軸回転二重円筒間における旋回流体の自由表面の流れに関して扱っている。この二重円筒間の流れは、テイラー渦流れとして良く知られており、その渦構造、波動化、非一意性等については詳細に調べられている¹⁾。その中で、円筒の端面が自由表面を持つテイラー渦流れの状態については明らかにされているものの、自由表面そのものの流れの特徴については検討されていない。自由表面の流れの問題に関しては、海面の流れ、水路の表面流れ、タンク内の流体のスロッシング等で重要であるが、閉じられた水路における、しかも旋回する流体については、二重円筒間の表面流れが従来からテイラー渦流れに関連して興味ある問題であったにも関わらず扱われていない。

旋回する流体の自由表面の流れは内側円筒の回転速度の増加により、クエット流れから半径方向の速

度成分を持つ流れの発展とスロッシングを伴う波動現象が発生することが予想される。さらにレイノルズ数の増加により、表面に発生した波と外壁の反射波との干渉により複雑な態様を示すことが予想される。

この表面流れの可視化の様子と液面の変動の状態については、著者の一人が表面流れを可視化して明らかにし、また、表面の軸方向の変動については超音波センサを使用して求め、FFT解析結果から発展の様子を明らかにした²⁾。

特に可視化観察から自由表面の状態はレイノルズ数の増加により、表面全体が波打ち振動するスロッシングが発生する。これはレイノルズ数が小さい時は極小さい振幅であるがレイノルズ数が増加すると振幅は次第に大きくなる。また、さらにレイノルズ数が増加すると外円筒内壁に沿ってリング状の盛り上がりが発生し、それがさらにレイノルズ数の増加で波形になる。しかし、これらの特性を調べるためには現在の装置の大きさから、超音波センサ等の測定器では困難であり、可視化観察では定量化することができない。

本研究は、流れを可視化し、ビデオカメラにより撮影し、その画像データから画像処理を行い表面波動現象の発展の様子を画像解析から特徴づけることを目的としている。特に、流れの表面に現れる波動

* 平成10年3月20日、日本機械学会北陸信越支部学生員卒業研究発表講演会にて講演

本研究は平成9年度長野高専教育研究特別経費の助成を受け行われた

** 機械工学科助教授

*** 宇都宮大学学生(平成9年度本校機械工学科卒業)

原稿受付 1998年9月29日

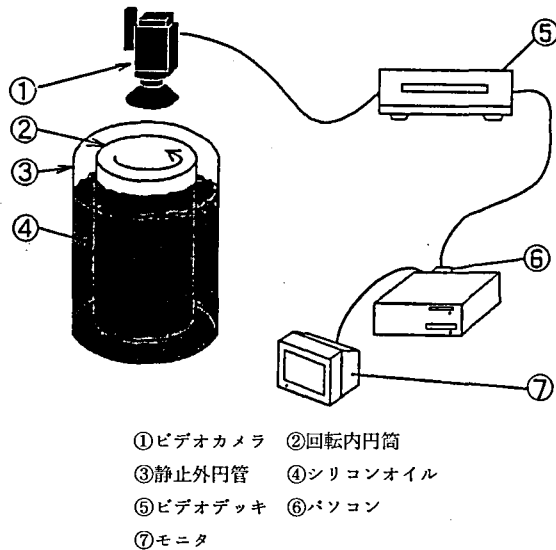


図1 実験モデルと画像解析システム

の凹凸が明暗となって現れる画像の特徴を解析することにより、状態の特徴を数値化して表現することを試みた。

2. 実験モデル及び画像解析システム

2-1 実験モデル

二重円筒間を旋回する流れの実験モデルと画像解析システムを図1に示す。内側の回転円筒は直径が80mmでサーボモータからタイミングベルトで連結され、DC電圧に比例した回転数で駆動される。外側の円筒は直径が120mmで静止している。二重円筒間の隙間は20mmである。隙間に満たす流体はシリコンオイルであり、流れを可視化する為にアルミ粉を混入させる。今回使用したシリコンオイルの物性は以下の通りである。動粘度は $9.54\text{mm}^2/\text{s}$ (25°C)、表面張力はメーカー（信越化学工業(株)）の測定値により、 $20.1\sim 21.3\text{dyn}/\text{cm}$ (25°C)、比重は $0.93\sim 0.94$ (25°C)である。

流れの特性を決定するパラメータはレイノルズ数 Re とアスペクト比 Γ である。それぞれ以下の式で表される。

$$Re = \omega R / \nu$$

$$\Gamma = L/D$$

ここで、 ω は内側回転円筒角速度、 R は内側回転円筒半径、 ν は流体の動粘度、 L は流体の回転軸方向高さ、 D は内外円筒の隙間である。

アスペクト比 Γ は今回は5.7に固定した。 $\Gamma=5.7$ ではテイラー渦流れは5つの渦構造を持つことが判っており、最も上に位置する渦の表面の流れは内円筒から外円筒へ向かう流れとなる。

2-2 画像入出力装置

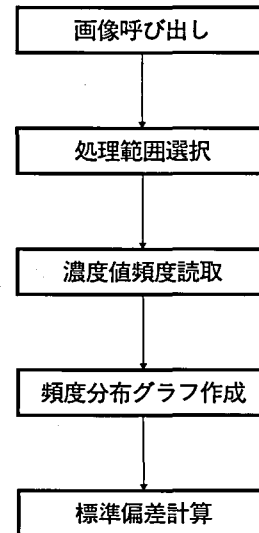


図2 画像解析手順

画像解析に関する機器のシステム図について、撮影装置はビデオカメラを使用し、回転円筒の真上に設置する。ビデオカメラは30フレーム/秒で撮影する。各 Re 毎に撮影を行い、その中のフレーム画像をコンピュータに入力する。画像は 680×480 ドットの24ビットをWindows Bit Map画像としてコンピュータに取り込む。入力画像はビデオプリンタに出力し、処理画像はプリンタに出力する。

2-3 画像解析

画像処理及び解析手順を図2に示す。処理範囲選択は流れの領域のみを切り取る処理であり、以後、その範囲において解析を行う。処理範囲の切り取りは保存しておくメモリ容量が少なくすむこと、処理上において人間にも認識しやすい利点がある。処理方法は、画像上で内円筒の2接線を指定し、内円筒と外円筒を除き流れの領域のみを自動的に抽出する方法を採用した。図3にビデオカメラからコンピュータに入力した表面波動の画像と処理範囲を指定して切り取った画像を示す。濃度値は0（暗い）から255（明るい）の値を持ち、R（レッド）、G（グリーン）、B（ブルー）で表せられる。今回の濃度値読み取りはR、G、Bの3つの値の平均を採用した。よって、データ値の0は黒で255は白と表示され、濃度値頻度読み取りは画像データの0～255までの256個のデータであるので各数値をカウントされる。その後、濃度値の頻度分布を求め、その分散を計算し、グラフ化した。画像処理³⁾及び解析におけるプログラムはVisual C++⁴⁾を使用し、データ解析は市販のソフトを使用した。

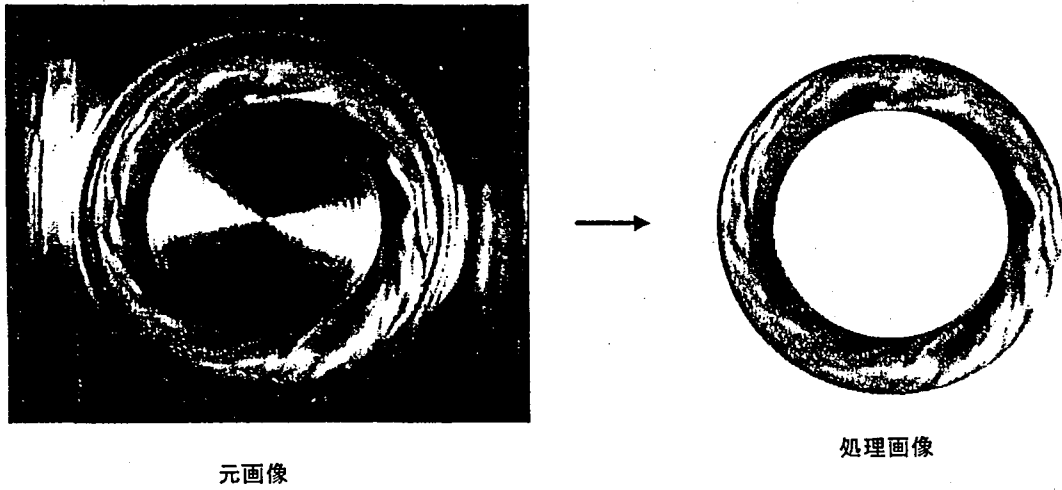


図3 画像処理範囲の切取り

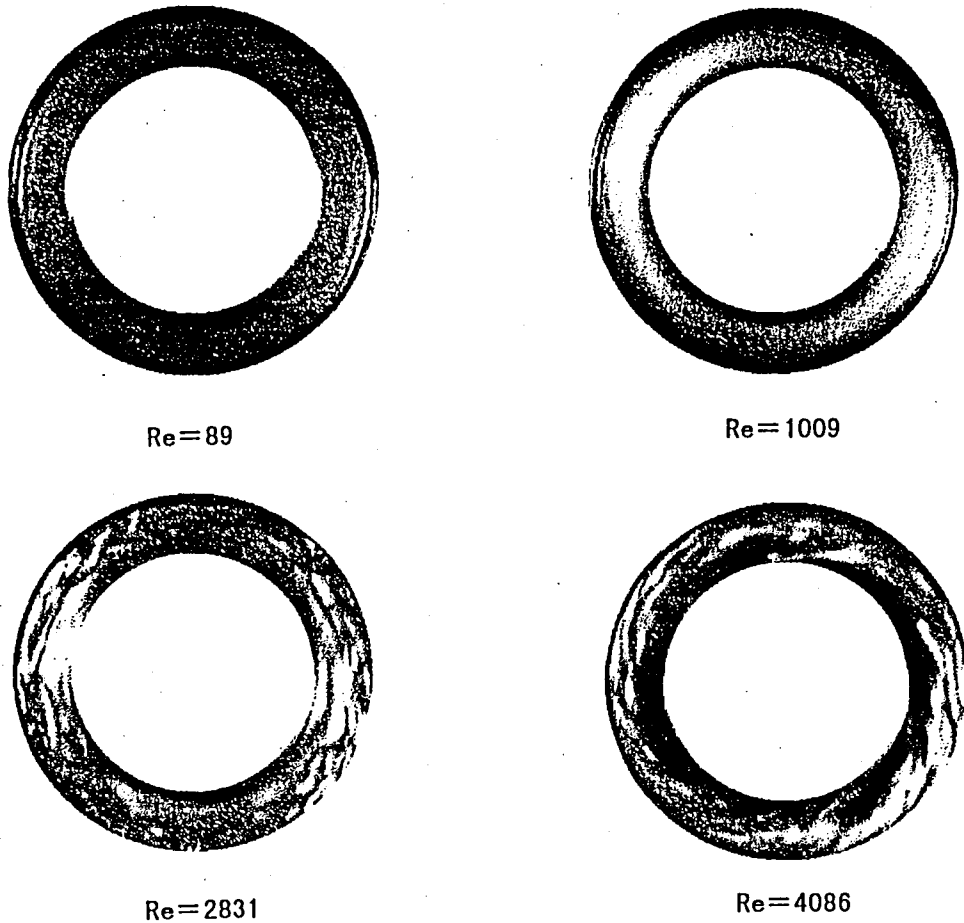


図4 画像処理結果

3. 結果及び考察

3-1 レイノルズ数に対する表面波動現象

Re に対する表面波動現象の代表的画像を図4に示す。Re=89では、クエット流れであり、表面において特に振動している状態は確認できない。画像としては、左右に白くなっている部分があるが、照

明が強い場所であり、流れの領域としては明暗が一樣であり特徴が見られない。Re=1009では、内円筒から半径方向外向きの流れが見られ、その結果、外円筒に近い領域で跳ね水のような盛り上がり部分（以後、外周波と呼ぶ）が観察される。画像からもそれがちょうど外側1/3の領域に同心円の線として観察できる。Reがさらに増加するとこの外周波は

半径方向に振幅を持つ進行波となり、 Re の増加とともに一周における波の数が増加し、次第に一定に落ち着く。さらに Re が増加すると外周波の形は不規則な合成波のように複雑な形状に発展する。 $Re=2831$ はその間の波形が不規則になってきている状態を示す。画像としては、外周波の形が明暗で表されており、外周波から外円管に向かって複雑な波が現れていることが確認される。 $Re=4086$ では、既に表面の流れは外円管から内円筒へ向かう半径方向内向きの流れとなっている。これは Re が小さい時の流れ方向とは逆向きである。これは3次元的なテ일러渦流れとして考えると、それまで5セルの構造を持っていた流れは自由表面の流れは外向きであったが、 $Re=3936$ 付近で4セルの構造に分岐したため、自由表面の流れが内向きになったことを意味している。これは断面の流れを観察することによって確認されている。また、表面の状態は内円筒近傍では液面が低くなっており、外円管から内向きに波動現象が見られる。画像としては、内円筒付近が暗くなっており、波動現象は明暗のコントラストで表されている。

以上のように、表面波動の状態は画像として見た場合、明暗のコントラストで表現されており、このことから1つの画像の濃度値から流れの状態を特徴づけることができると期待される。

3-2 濃度値の頻度

4つの Re における画像の濃度値頻度分布の結果から代表的なものを図5に示す。横軸は0から255の画素の濃度値を示し、縦軸は各濃度値の頻度である。 $Re=89$ では、濃度値は比較的小さい値に集中しており、また、ばらつきの中心はほぼ100付近であり、他の条件と比較して小さいと言えることから画像は全体に暗いことがわかる。 $Re=1009$ では、50から250まで全体的に濃度値が分布しており、ばらつきは大きい。 $Re=2831$ では、濃度値の中心値は150付近に集中しており、 $Re=89$ とは異なり、比較的明るい画像であることがわかる。また、200から250の濃度値も頻度としては小さいが、平均して分布している。 $Re=4086$ では、70から180で比較的一様な分布であり、頻度は大きい。また、200から250の濃度値も見られるのは $Re=2831$ の場合と同様である。画像からも判断できるように、波立っている部分は白く表現されており、表面が乱れている場合は、白色部分が多くを占めることになるので、濃度値は高い値になる。

以上のように、各 Re によって頻度分布の形状が異なり、画像の濃度分布に特徴があることがわかる。

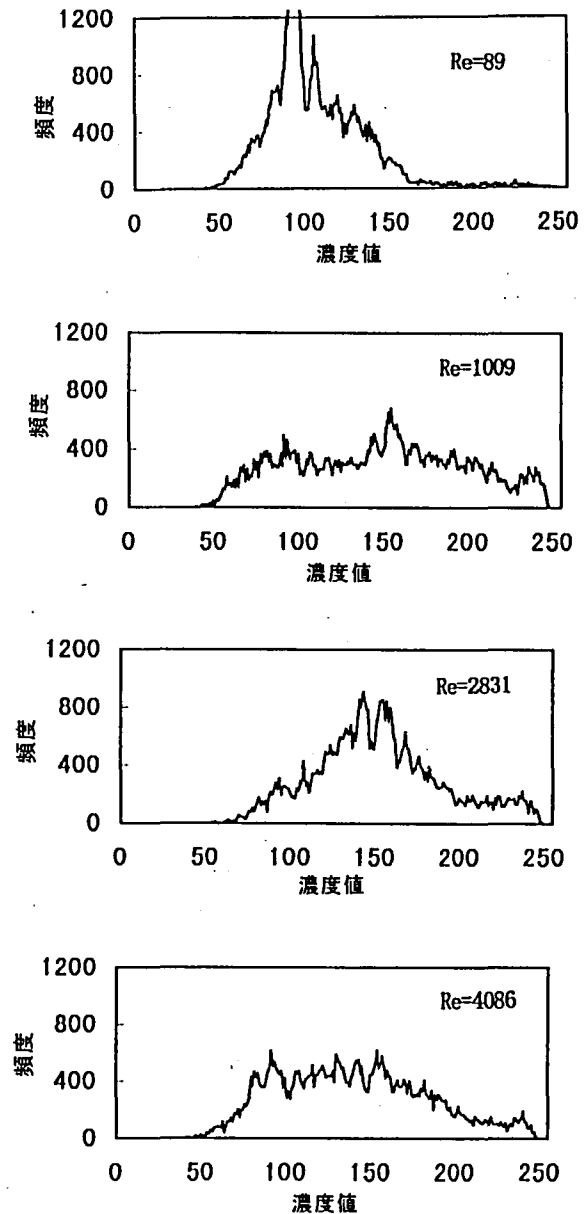


図5 濃度値の頻度分布

3-3 濃度値の標準偏差

$Re=0$ (流れの状態が静止) から $Re=4089$ までの代表的な39個の画像データを画像処理・解析し、濃度分布の標準偏差を求めた。また、各 Re の再現性を確認する為に各 Re において3フレームの画像を処理し、再現性があることを確認するとともに標準偏差は3個の平均を取った。その結果を図6に示す。横軸は Re で縦軸は標準偏差である。

$Re=0$ から $Re=178$ までは標準偏差は30前後であり、非常に小さい。これは表面の状態がほぼ静止状態と変わらず波動現象は現れていないと考えられる。 $Re=178$ から $Re=1705$ の範囲は50前後と比較的ばらつきの大きい領域であり、明るい画素と暗い画

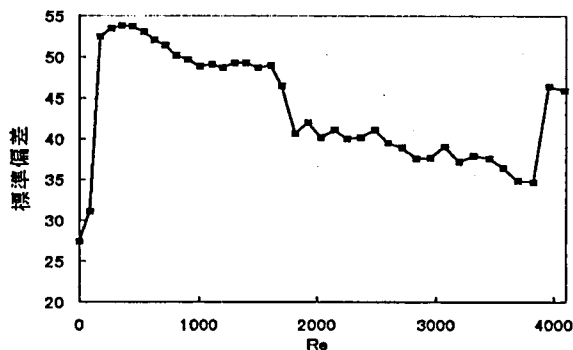


図6 濃度値の標準偏差

素が混在していることを示している。これは自由表面全体が振動しているため表面が斜めになり、それにより照明が広い範囲に渡って照射されているためと思われる。Re=1817からRe=3956の範囲において、35から40とばらつきが中程度である。しかし、明らかに前のRe=178からRe=1705の領域とは異なっており、表面波動状態が異なっていることがわかる。これは液面全体の振動から波打ち現象が発生し、波の高い部分が明るく光り、低い部分は暗くなることから現れると考えられる。Re=4000を超える範囲では再度ばらつきが大きくなっており、波動状態が異なっている。可視化法による観察によると、Re=3936で渦構造が変化しており、この現象はテイラー渦流れが5セル流れから4セル流れへ分岐していることがわかっている。4セルの場合の自由面は外円管から内円筒に向かって傾斜しており、照明のあたり方が他の場合と異なると思われる。また、波打ち現象は残るため波の高低で白黒のコントラストが表されることからばらつきが大きいと思われる。しかし、画像データが少ないため詳細なことは不明である。

3-4 可視化による結果との比較

旋回流体の表面流れの発展する様子を可視化により分類した結果²⁾と比較した。可視化による分類と画像解析による分類を図7に示す。可視化による分類は大きく5つに分類され、Re=1060までのタイプIは自由表面全体が僅かであるが、上下振動している状態である。いわゆるスロッシング現象を起している範囲である。Re=1600までのタイプIIは外円筒内壁において外周波が発生しており、リング状の盛り上がりを示している範囲である。Re=2710までのタイプIIIは外周波が波の形状をしており、次第にその数を増加させている範囲である。Re=3936までのタイプIVは、外周波の波が複雑に合成し、かなり乱れが生じている。Re=3936以上のタイプVは渦構造が異なっている表面の流れが内向きの状態で

Re	可視化による分類	Re	画像解析による分類
1060	タイプ I	89~178	タイプ I
	タイプ II		タイプ II
1600	タイプ III	1705~1817	タイプ III
2710	タイプ IV		
3936	タイプ V	3827~3956	タイプ IV

図7 可視化法と画像解析法による流れの分類

ある。これに対して画像解析結果によるとRe=89~178の間まででタイプI、Re=1705~1817の間まででタイプII、Re=3827~3956の間まででタイプIII、それ以上の範囲でタイプIVと4つに分類される。最後のテイラー渦流れが5セルから4セルに分岐する領域は2つの解析方法で一致しているといえる。その他の領域については、いわゆる外周波がリング状の形状で発生している領域はスロッシングの発生している流れ領域との区別を判断できない。また、外周波の波が発生する領域と複雑に合成される領域とは区別することができない。類似していると思われる個所もあるが、完全に一致していない。この原因は撮影時に照明の強度のばらつき、必ずしも画像明度が統一されていなかったためと思われる。撮影時に照明強度を統一するか、画像処理で補正する方法を採る必要があると思われる。また、原画像における画像処理も他の処理を施すことにより明暗の境界を正確に判別する必要があると思われる。

4. 結 言

同軸二重円筒間を旋回する流体の表面波動現象を流れの可視化と画像解析により解明した。旋回流れにおける表面の流れはレイノルズ数の増加によりクエット流れから半径方向速度成分を持ち、スロッシングを伴う振動現象を発生する。この波動現象は進行波となり、外壁に衝突し、反射波と互いに干渉しあいながら複雑な流れに発展する。表面波動現象を画像として捉えコンピュータによる画像処理し解析することでこの波動現象を特徴づけることを試みた。主な結論は以下の通りである。

- (1) 処理した画像から、濃度分布を求めその標準偏差から流れの状態をある程度分類できることがわかった。

- (2) 旋回流れの表面波動現象はクエット流れから乱流に至るまでに4つ状態に分類できる。

参考文献

- 1) Toya Yorinobu, Nakamura Ikuo, Yamashita Shintaro and Ueki Yoshinori, An experiment on a Taylor vortex flow in a gap with a small aspect ratio : Bifurcation of flows in an asymmetric system, *Acta Mechanica*, 102(1994), pp137-148.
- 2) 戸谷順信, 中村育雄, 旋回流れの表面波動現象(流れの可視化と液位のFFT解析), 日本機械学会第76期流体力学部門講演会講演論文集, (1998), pp153-154.
- 3) 長谷川純一他3名, 画像処理の基本技法(技術評論社)
- 4) 桜田幸嗣, 田口景介, Visual C++4.0プログラミング入門(アスキー出版)