

流れの可視化（第2報）

田 島 勲*・蘇 武 栄 治**

Flow visualization (Part 2)

Isao TAJIMA and Eiji SOBU

要旨

流れの中に置かれた物体後方の流れを可視化し、その経時変化を記録することによって円柱後方に発生する渦のストローハル数を求め、さらに流れを有限要素法で解析した結果得られる、流れの経時変化と比較検討した。

Abstract

The vortex wake of a circular cylinder or ball is investigated by visualization experiments in wind tunnel.

The flow visualization is realized by use of High Speed Video System.

1. 緒 言

自然科学においては、その現象のメカニズムがわかったときに現象が解明されたこととなるが、我々の周囲で解明されていない多くの現象はそれが起こるメカニズムがわかっていない。最近ではコンピュータによって流れを解析する方法が急速に用いられるようになってきているが、それも流れ現象の一部に過ぎない。流れを直接目視することで流動やそれに伴う諸現象の物理的な把握を容易にし、さらに現象の理解を助けるということで「流れの可視化」は各分野の研究者や技術者に強い関心が持たれている。

著者等はこれまでに、35mmカメラ（カメラ）やホームビデオシステムを渦巻ポンプ羽根車内や円柱後方に生ずるキャビテーション¹⁾²⁾を記録するのに利用した。さらに最近ではハイスピードビデオシステムにより流れの連続的記録³⁾を試みている。また、コンピュータを利用した有限要素法による流れ解析をおこない流れのメカニズムの理解と解明に役立てている。前報³⁾でハイスピードビデオシステムによる流れの可視化は流れの経時変化の記録、記録再生の容易さ、画像の教育教材への応用の点において有効であることを述べた。ま

たGWS (Graphics Work Station) による流れ解析の結果得られる流れの様相とあわせて流れのメカニズムを理解し説明することにも大いに有効であることを示した。前報に続いて流れの可視化と連続記録について実験を行いその有用性と実験の範囲について考察したので報告する。

2. 実験方法

2. 1 実験装置

風洞を中心とした流体解析総合実験システムは前報と同じ装置を利用した。今回の実験では流れ解析用に使用したGWSは前報で使用したIndy R4000SCにIndyR4000PCをシステムに加えた。R4000SCは解析用に、R4000PCは結果のグラフィック表示等に用いた。図1に実験装置を、さらに図2にはハイスピードビデオシステムの概略を示した。

カメラ撮影と違ってビデオ撮影はホームビデオも含めて強い光量が必要であるため、ビデオシステムに連動したストロボライトに加え白燭光を補助として利用した。

2. 2 スモークワイヤ

流れの可視化にはスモークワイヤ法を用いた。撮影は暗室内でカメラを開放にし、ストロボライトの単発ないしは連続発光で記録するのが普

* 助教授 機械工学科

** 技 官 機械工学科



①原動機制御盤 ⑤スモーク・パルス・ジェネレータ
②カラービデオコピー ⑥熱線風速計
③ハイスピード・ビデオデッキ ⑦照明（白燭光、ストロボライト）
④ハイスピード・ビデオカメラ

図1 実験装置

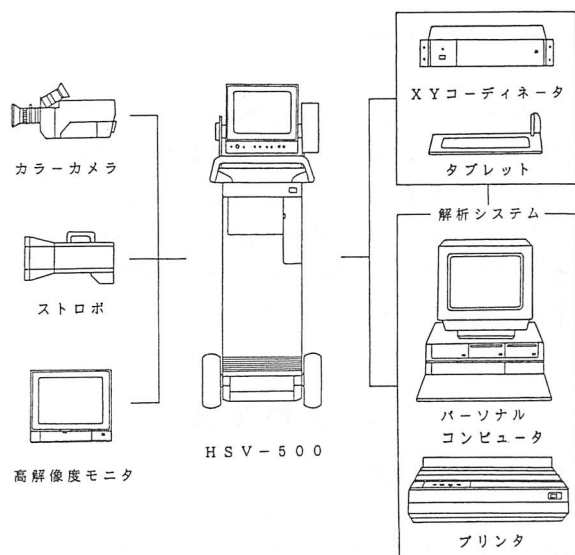


図2 ハイスピード・ビデオシステム

通であるが、実験ではビデオシステムを画像の記録に用いた。実際の実験では充電電圧によって画像の鮮明さが大きく変わった。電熱細線には0.1mmのタングステン、ニクロム線、塗布液には流動パラフィン、白灯油、機械油、ベビーオイルを用意し、スモークパルスジェネレータで充電電圧とパルス幅時間を設定した。

2. 3 ハイスピードビデオ

実験に際し画像を記録するために用いたビデオシステムは下記のような特徴を持つ。

1. 高速録画、即時再生

1秒間に250画面（フルサイズ）または500

画面（ハーフサイズ）のカラー／白黒映像を録画し、その場ですぐにサーチ再生、ジョブ再生などの各種の再生が正逆方向どちらでもできる。

2. 高速シャッター機能

高速シャッター機能ストロボ撮影によって露出時間が高速度フィルムカメラの1万画面／秒に相当するので動きの速い被写体も明瞭にとらえられる。

3. シーンコードと時間の表示

録画を始めると同時に、3桁のシーンコードと時間（分、秒、ミリ秒）が画面に表示され、これらが同時に記録される。再生時に、実験の種類を識別したり計時観察に役立てることが出来る。

4. 画質

VHSあるいはS-VHSテープを利用できるので画質がとても良い。

5. 接写撮影

カメラの交換レンズを有効利用が出来るので、接写距離約60cmで撮影が可能であり、照明の点でも有利である。

6. ビデオコピーの利用

モニター画面をビデオプリンターを介して出力することができ、流れの場の経時変化を目視できる。さらにOHPにも駒は出力することが可能である。

流れの経時変化は、これまでは高速度フィルムカメラで可能であった。最近ではコンピュータの画像解析によって経時変化が目視できるようになってきた。しかし、これには非常に多くの記憶容量と高速度の処理機能、深い情報処理に対する知識と計算時間を必要とするため、手軽には実験室で利用できない欠点がある。その点、ビデオシステムの利用は現象の把握に幅広い応用範囲があるものと考えられる。

3. 実験結果および考察

3. 1 流れの可視化

今回の実験では、塗布液が沸騰で飛散することや電熱細線を0.1mmとしたことなど、発煙が気流に影響を与えたため、下限速度を実験の結果1m/sとした。これは細線の直径や塗布液、あるいは供給電圧、遅延時間等に起因するものと考えられる。ホームビデオ撮影の際に用いる照明は大変な熱を伴い実験には向いていないため、それに代わる強

力な照明が必要である。ストロボライトは早い周波数で点滅させると極端に明るさが不足してくる欠点がある。ライティングにビデオと連動しているストロボライトのみを使用した場合を図3-(a)に、同じく白燭光のみの場合を図3-(b)に示す。また、二種類(1ストロボライト, 2白燭光150W)を照明として用いた場合を図3-(c)に示した。白燭光の場合は連続光のためスモークの線がぼけて全体的に黄ばんで見え、少し速度が大きくなると光量不足になってしまう欠点があるのであくまでも補助光として用いた。ライティングの適切な位置を選択することによって、ストロボライトの場合は青みがかった線になり、反射の関係でスモークの線がかなり細く明瞭に見えたが、速度が5 m/s以上になり、500駒で撮影するようになると補助に白燭光が必要になった。照明の位置は撮影に大きな影響を及ぼすがカメラには逆光になる方向で白燭光は左右からストロボライトは上方からが最適であった。しかし、模型の形や支持方法でその位置を多少変える必要があった。特に照明の位置や照明の質によってスモークの陰影が大きく左右されるため上限は今少し速度を大きくすることが出来るものと思われる。カメラのように1駒に撮影するのと違い、ビデオは駒を連続的に送りながら駒それぞれに画像を記録するために照明には十分注意を払わなければいけないようである。

金属細線については、同じ条件ではニクロム線の方が煙が明瞭になった。しかし、いずれの場合も電圧が高くなるに従って細線が通電した瞬間わずかに振動⁴⁾するのが見られたり、また劣化も激しかった。塗布液は単独の液や薄めたりすることで実験を繰り返した。

塗布液について白灯油単独では粘性が小さいため細線に液が付着しにくく、風速に関係無くス

モークがほとんど発生しなかった。流動パラフィンとベビーオイルの比較は、風速が小さいときにはパラフィンの方が流脈線ははっきりしていたが、パラフィン単独の液では煙が薄くなる傾向があったため灯油と混合(8:2)して使用した。しかしこれも風速が大きくなるにつれて薄くなる傾向があり、5 m/s程度を境としてベビーオイルにする必要があった。ベビーオイルは低速度では流脈線が太くて明確さに欠けたが、5 m/s以上では細く明瞭な流脈線となった。

充電電圧とパルス幅時間については今回の実験ではそれぞれ150~250V, 80~200msの間で種々設定した。照明は、ストロボライトが1個では速度が大きい場合に光量不足となり白燭光を補助に利用したが今後はストロボライト2個が必要であることがわかった。

速度の上限については図4に示すようにベビーオイルでは13m/sまでの流れの可視化が可能であったが、画像の鮮明さにおいては10m/sが限界

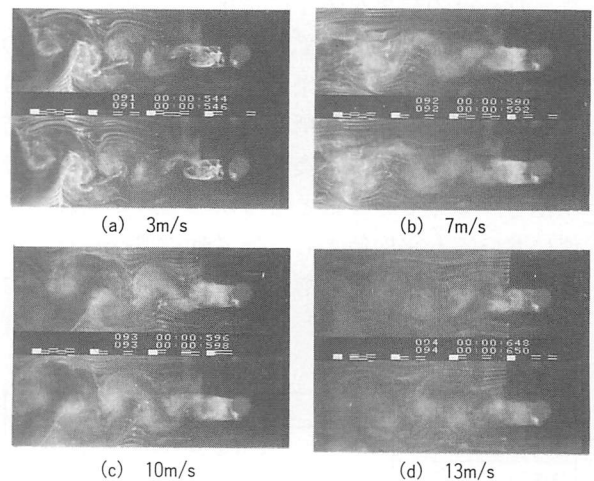


図4 流脈線

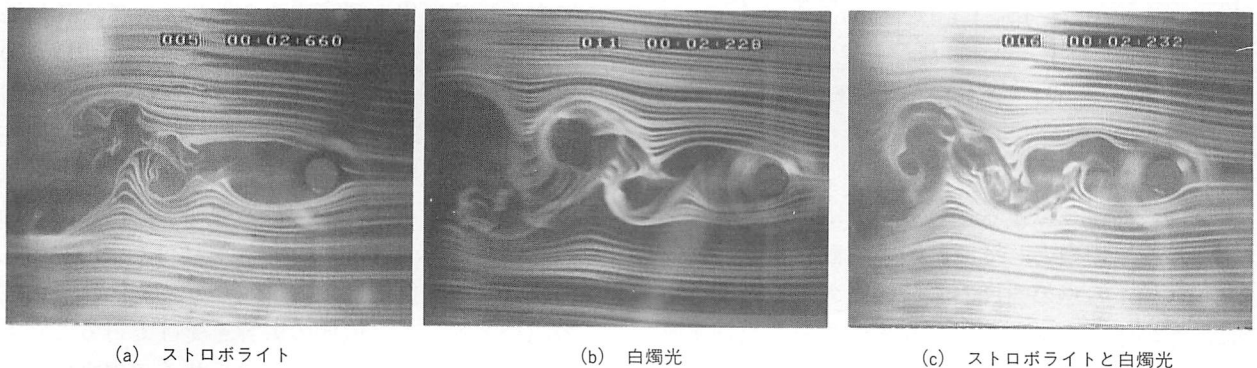


図3 ビデオ照明

と考えられる。

過去に渦巻ポンプ羽根車先端におけるキャビテーションをカメラで撮影したが、その際の回転する周速は約14～15m/s、また流入速度は5 m/s以下と考えられる。また、円柱後方に生ずるキャビテーションの実験では流速が7 m/s前後で行われた。いずれの場合も35mmカメラによる撮影であるため、時間的に連続な画像は得られなかった。後日ホームビデオによって試みたが速度が7 m/sの場合には駒間で200mm以上の動きがあるため利用する意味がなかったが、ハイスピードビデオによると流れの移動は駒間で10mm程度となるため流れの現象記録としては利用価値があると思われる。

3. 2 ストローハル数について

流れの経時変化の記録の有効性を確認するため、流れの中におかれた1円柱の後方流れを可視化し、幾何学的相似の渦が発生する時間間隔を画像から求め、ストローハル数Stを求めた。風速は1～13m/sの間でいずれも500駒モードで実験を行った。その結果を表1に示す。

13m/sでは3駒に1度、あるいは2駒に1度の割合で渦は繰り返す結果となり、平均してStはおよそ0.18になったが、精度の上で信頼性に欠く結果となった。しかし、実験回数を多く行うことで誤差を少なくできることも分かった。いずれの風速においても平均値としては文献に述べられているStの値に非常に近いものが得られた。低速においては250駒モードによって実験を行うことも有効である。

		ストローハル数				
実験回数		1	2	3	4	5
風速[m/s]	Re					
1	660	0.2	0.19	0.18	0.21	0.21
3	1980	0.21	0.21	0.19	0.21	0.21
7	4630	0.18	0.24	0.18	0.24	0.18
10	6610	0.25	0.17	0.17	0.17	0.25
13	8600	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19

表1 ストローハル数

3. 3 球の後方における流れ

球の表面粗さによる違いをピンポン球とゴルフボールを、模型として流れの中で観察することで剥離が始まる点の角度および後流の渦の形成過程に、どのような違いが見られるかを調べた画像を図5に示した。スモークを球の上流側から発生させた場合と球の後方から発生させた場合とにわけ

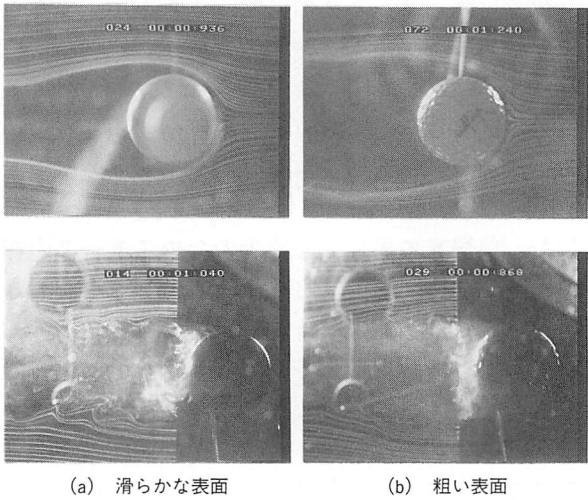


図5 球後方の流れ

て実験を行った。球前方に張られた熱線から発生するスモークの流れによる流れの可視化の画像では、表面が滑らかな場合は球の表面に沿う流れはきれいに整った流脈線に見えるのに対して、球の表面が粗い場合はボールの表面に沿う流れは乱れて薄くなっている様子が目視される。また、球後方に張られた熱線から発生するスモークの状態を見ると滑らかな表面を持つ球の方が大きい抗力を受けているような渦が確認され、剥離点も荒い表面を持つ球の方が大きく球後方へ後退していることも容易に理解できる画像が得られた。

3. 4 円柱後方の流れ

数多くの文献にスモークワイヤ法によって可視化された流れの画像が発表⁵⁾⁶⁾されている。今回の実験でも同程度の画像は得られた。しかし、流れの中に置かれた物体後方の流れを可視化⁷⁾⁸⁾する場合、渦を観察することが主となることが多く、渦は複雑な流れの様相を示しその観察は1枚の画像からでは情報は不足であり、時間的につながりのある経時変化を観察することによって、先に述べたストローハル数などを確認することがはじめて出来る。図6-(a)にRe=6.66×10²の場合における、円柱後方の流れを示した。図6-(b)は円柱間距離を直径の3倍に設定された2円柱の後方流れの画像である。1円柱後方の渦と2円柱間の渦の振動数はこの条件の場合一致した。また2円柱の場合、下流側円柱後方に生じている渦は1円柱の場合と違って上流側の影響を受けていることもわかる。図6-(a)の場合はフルサイズの画像なので駒間の時間は4/1000秒なので、渦が繰り返し発生

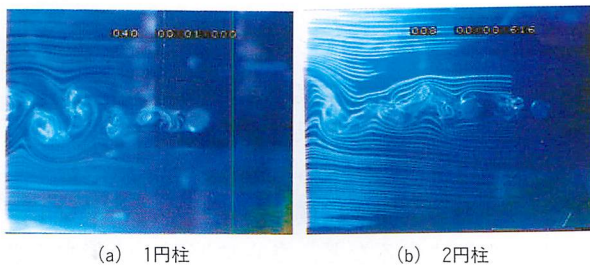


図6 円柱後方の流れ

する同じ2枚の画像間の時間は48/1000秒と確認でき、これから渦の振動数は20.8Hzと読み取れる。

今回利用したビデオシステムは現在では1秒間に1000駒まで可能なシステムが用意され生産ラインやスポーツあるいは研究開発分野で利用されているものである。学生には自分達の撮影した「物体後方の流れ」を観察することで円柱の抗力や渦による振動あるいは境界層の剥離、また翼の揚力や回転円柱の揚力などを学生に理解させる上で非常に役立った。

3.5 数値計算例

GWSによる流れ解析では先に述べた流れの経時変化として、計算途中での出力や計算結果の記憶によってとらえることが容易である。しかし2

円柱の実験のように、幾通りもの実験を行って比較しなければいけない場合には、記憶媒体の用意や管理、また計算時間等に多大な時間と費用が必要である。2円柱を流れの方向に並べた場合の計算機による流れ解析によって得られた流線を図7-(a)に示した。いずれも流れの方向は図の左から右に向かっており、節点数1903, 要素数1820, $Re = 6.66 \times 10^2$ 円柱間距離は図6-(b)と同じ3dである。図7-(b)は流れ解析の結果の圧力分布、図7-(c)はそれを一部拡大したものである。この図7-(b)(c)では上流側円柱の淀み点が最高圧力を示し下側の点で最低圧力を示している。緑の部分が正圧、白の部分が負圧部である。カルマン渦列の発生するメカニズムが、流れ解析の計算結果を圧力分布図に示すことで現象の理解を容易にすることができる。さらに2円柱の場合には、上流側の円柱の影響をどのように受けているかについて、円柱間距離を自由に選択して実際の実験のシミュレーションをすることができる。

翼まわりの流れの解析結果を圧力分布で示したものを図8に示した。迎え角 10° では翼長全体で上面では負圧、下面では正圧になっているが 14° , 15° と迎え角が大きくなるに従って上面において流れの剥離現象が生じ、翼上下面での圧力差および作用する面積が小さくなっている。翼の迎え角に応じた流線、圧力分布、および圧力の鳥瞰図等は、

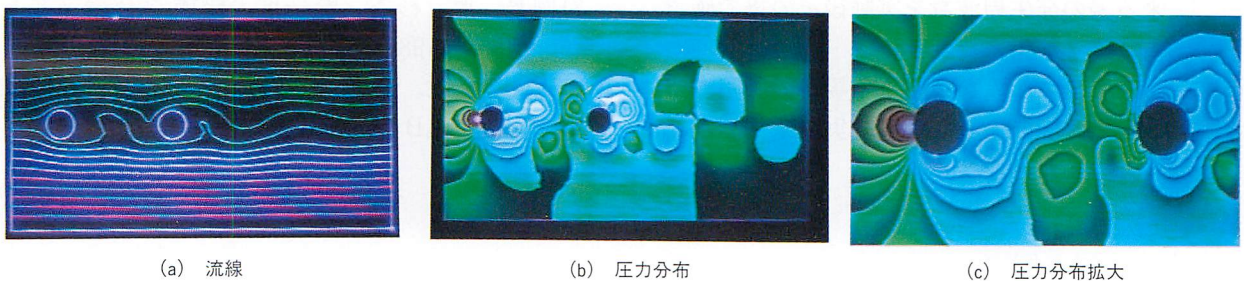


図7 GWSによる流れ解析

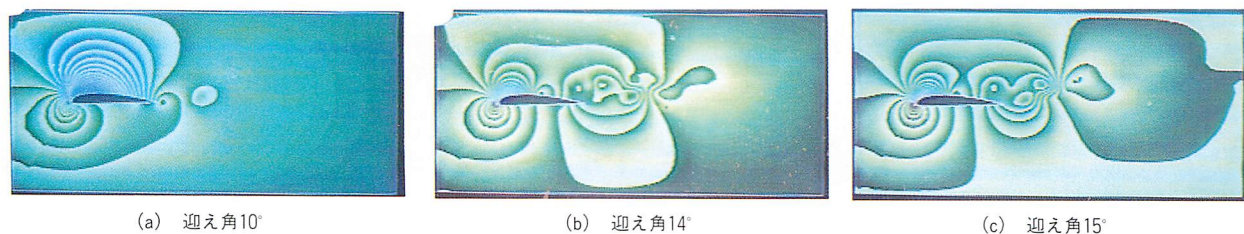


図8 翼まわりの圧力分布

学生に揚力、抗力についての理解を助ける教材として役立てることが出来た。

計算結果のグラフィック画面については

1. カラープリンターへ出力する
2. 画面をビデオ撮影し、ビデオコピーに出力する
3. 35mmカメラによって画面を撮影する

等の方法があるが、いずれも色分けされた流速や圧力が色によっては判別しにくい場合があるようである。なお、風洞実験では円柱の上流からスモークを流した場合と下流側で流した場合が計算結果の流線の図と圧力分布図に近いたためその比較もできた。円柱の間に1つの渦が上下方向から交互に生じている様子はビデオによる画像と計算による画像とから同様に目視できる。

4. ま と め

流れの可視化を風洞による実験とコンピュータによる数値シミュレーションによって行い下記の結果が得られた。

1. ハイスピードビデオシステムによると、風洞内の流れの可視化を瞬間的な画像だけではなく流れの経時変化もあわせて記録・再生することが出来る。その結果とGWSによる数値シミュレーションと容易に比較検討できた。
2. ビデオシステムを利用すると円柱後方に出来る渦の発生周波数を実験後その場で確認することが出来た。
3. ビデオシステムを利用する場合の照明方法（光量、方向）、塗布液等の実験条件を確認することが出来た。

4. ビデオシステムによって流れを可視化する場合、スモークワイヤ法では風速の上限は約13m/s程度である。

現在、2円柱に関する実験を実行中であり風洞実験と数値解析による結果とを比較検討していきたい。実験では風速が大きくなるに従って光量不足になったので、今後白燭光のかわりにストロボライトを2個にするなど、さらに照明を改善する必要があると思われる。

終わりにこの研究に際してご協力いただいた第28期卒業生の遠藤 貴史、久木田 博、宮谷 政人の諸氏に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 田島 勲 他1名, 苫小牧工業高等専門学校紀要 No16, p27 (1981)
- 2) 田島 勲 他1名, 苫小牧工業高等専門学校紀要 No19, p23 (1984)
- 3) 田島 勲 他1名, 苫小牧工業高等専門学校紀要 No30, p7 (1995)
- 4) 浅沼 強 編, 流れの可視化ハンドブック, p306 (1979) (朝倉書店)
- 5) 浅沼 強 編, 流れの可視化ハンドブック, 口絵13 (1979) (朝倉書店)
- 6) 種子田 定俊, 画像から学ぶ流体力学, p91 (1989) (朝倉書店)
- 7) 岡島 厚, 杉谷 賢一郎, 機械学会論文集B 50-458 (1984), 2531
- 8) 近江 和生, 今市 憲作, 山本 富士夫, 機械学会論文集B 58-553 (1992), 2651
(平成7年11月30日受理)