

流　れ　の　可　視　化

田　島　　　　勲*・蘇　武　栄　治**

Flow visualization

Isao TAJIMA, Eiji SOBU

Abstract

We observed and recorded formerly fluid motions.

We used high-speed video system to get a change with passage of time for the flow, used a graphics work station for numerical simulations of fluid flows and made a comparison with the observation data.

1. 緒　　言

流れ現象の物理的な把握を容易にし、その解明の端緒を見いだすために流体の動きを目視する必要がある、流れの可視化としてタフト法、表面浮遊法、注入流脈法などいろいろな方法¹⁾が工夫されてきた。これまで記録する方法としてはフラッシュ撮影や高速度カメラ等が利用されてきたが、前者は経時変化が記録できにくく、後者はランニングコストが高いなどの欠点があった。

著者は以前から、流れの可視化のためにホームビデオカメラ²⁾やフラッシュによる汎用カメラの利用³⁾をはかり、容易に且つ安価に流れの様子を観察し記録することについて検討を重ねてきた。しかし、汎用カメラでは瞬間的な様子を記録するのには向いているものの、経時変化を記録することが困難であり、その上画像が得られる迄に非常に手間がかかった。以前、自動車のエンジン調整に使うタイミングライトを利用して遠心ポンプ羽車内の流れの様子を記録したことがある。この方法は現象するまでその瞬間が適当であったか否か分からないため時間と資材の無駄がとても多かった。しかし、得られた画像は、光量が十分であれば鮮明度の高いものが得られた。また、流れの数値シミュレーションも有限要素法によるため、パソコンによる従来の方法⁴⁾では数日の計算時間が

必要であった。

最近には特に家庭で使われているホームビデオカメラに電子シャッターが備わり、シャッタースピードが飛躍的に早くなり、スポーツの運動解析に家庭で手軽に利用されている。実験室では接写用レンズを装着し、数10cmの距離から流れの経時変化を記録してきた。文献²⁾では円柱後方のキャビテーションの様子を示したが、経時変化も枚数こそ多くはないが、手軽に得られる手段の一つであることが確認されている。また、低速風洞では円柱後方のカルマン渦列観察に利用され、学生の授業での理解を深める補助教材等として利用されてきた。しかし、いずれの場合も経時変化の点で時間間隔が長い限られた画面範囲では、得られる画像の枚数が少ないため変化に推測を加えざるを得なかった。

数値シミュレーション⁵⁾においては最近のコンピュータの容量、計算処理の飛躍的な進歩、更に低価格という面から著者らも利用できる環境を整えることができるようになってきた。本研究では、カラーハイスピードビデオシステムの応用を試みたと同時に Graphics Work Station (GWS) の利用による流れの数値シミュレーションを行い流れの可視化について検討したので報告する。

2. 実験方法

実験装置は図1に示されるように小型還流式風洞を中心としてシステムが組まれている。

* 助教授 機械工学科

** 技 官 機械工学科

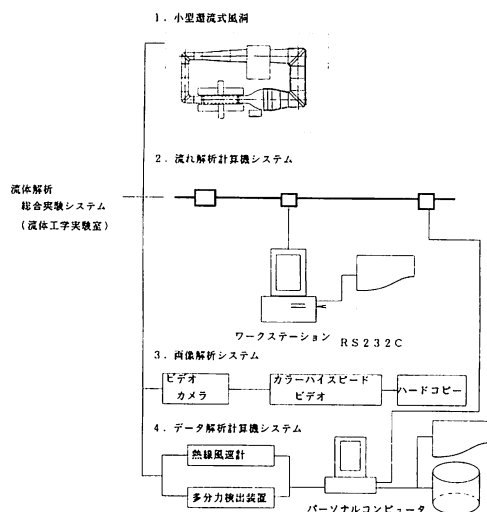


図1 システム図

1) 還流式風洞

実験風速範囲は40 [m/s] まで可能であり、観測部は400×400mmの断面を持ち、その長さは1200mmとし、流れの様子を目視できるように3方をアクリル板とした。内部の温度上昇を押さえるためのエアコンも備えた。乱れ度は約5%である。

2) 流れ解析計算機

流れの数値シミュレーションはGWSで行った。またビデオ入力ポートも備えているので画像解析が可能である。流れのシミュレーションはソフトとしてMT FLOW (Ver 4.3) を使用した。

流れの数値解析にはSilicon Graphics社のIndy R 4000 SCを利用した。高速の計算スピードを持つこと、GUIを超えてオーディオ、ビデオ、グラフィックスなどを容易に扱うことができるなどの特徴を持っている。その主な能力を下記に示す。

クロック : 100 MHz

主記憶容量 : 32 MB

内部記憶装置 : 1 GB

SPEC 92 INT : 59

周辺装置として、テープドライブ、CD-ROMも備えた。

3) 画像解析

流れの可視化にはスモークワイヤー法を用いた。また、ビデオカメラの撮影可能なフィールド

ド数は毎秒500または250である。他に比較のためホームビデオでも撮影した。必要な画像はビデオコピープロセッサによって出力した。

4) データ解析

データ解析には、大量のデータを記憶できるMOディスクを利用し、画像データ処理や各種センサーから得られたデータが処理できるようにした。

以上の4つの部分に分けられる。他にイーサネットによって実験室および研究室から本校電子計算機室⁶⁾のVAX 4000とDEC station 5000/25をデータ処理に利用した。

3. 風洞の特性

著者らはこれまで吸込型風洞を使用して実験⁷⁾を行ってきた。しかし風速範囲が狭いうえに、流れの可視化についても低速に対応する方法をとっていたため十分な実験が出来なかった。今回実験に利用した風洞の主な緒言を下記に示す。

最大風速 40 [m/s]

縮流部 収縮率 9

入口 1200 [mm]

出口 400 [mm]

乱れ度 5%以内

観測部 400×400×1200 [mm]

電動機出力 11 [kW]

図2に観測部におけるピトー管で測定された風速分布を示す。図3は熱線風速計で測定した同様

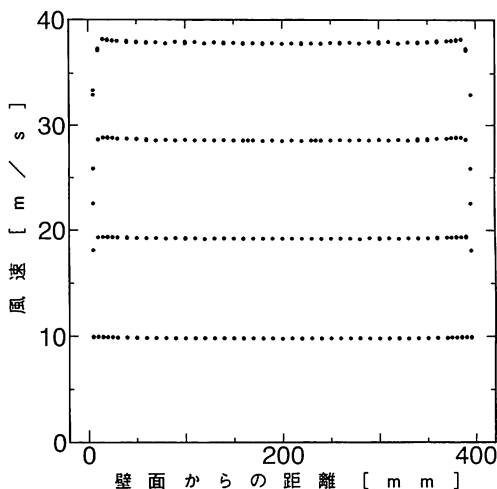


図2 風洞観測部における風速分布

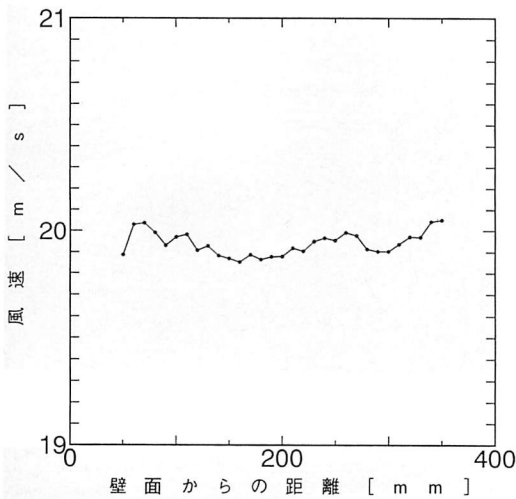


図3 熱線風速計による風速分布

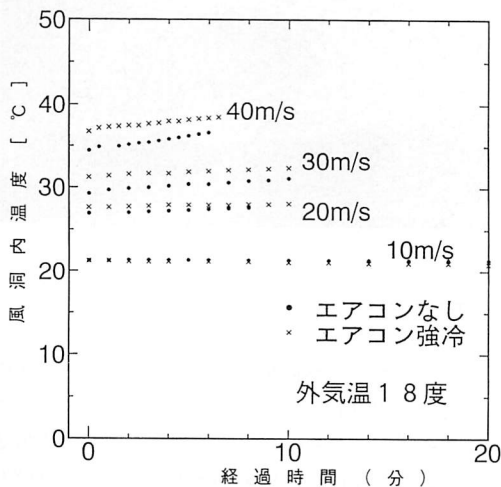


図4 風洞内の温度上昇

の風速分布の一例であるが、一様流が得られる有効幅は約200mm、乱れ度は風速が大きくなっても約3%以内の実験条件が得られることが確認された。装置の一部を空冷することで、運転中の温度上昇を押さえる試みを行ったが図4に示されるように20～30 [m/s] 程度までならば、温度条件をコントロールできることが分かった。

4. 実験結果および考察

4. 1 ハイスピードビデオ

流れの可視化のためにスモークワイヤ法を用いた。風洞内の模型前方約50mmにニクロム線（直径

0.1mm）を張りスモークを発生させ、模型後流の流れを記録するために35mmカメラ、ホームビデオ、HSV 500を用い必要な画像を選択した後に出力させた。いずれの実験も Re はおよそ 6×10^2 程度で行った。

図5に示したのは35mmカメラによるフラッシュ撮影の例である。文献に出てくる画像と同じように鮮明度の高いものであるが瞬間的な写真なので希望する渦の状態を記録したり、その動きをこれから知ることは出来ないし、また機械的なシャッタースピードが遅いので低速にしか向いていない。

図6はホームビデオカメラで流れの経時変化を記録した1/30秒間隔の画像例である。単位時間当たりのフレーム数はホームビデオでは30フレーム/秒であるがHSV 500を利用するとフィールド再生が可能である。接写やズームアップなど工夫しながら可視化された流れを記録してきたがフレーム間の時間間隔が大きいので風速の大きい流れの経時変化は画面内では4フレーム（8フィールド）程度記録できるにすぎなかった。渦の動きについて大まかなところを知ることはできるが、生成過程あるいは剥離の状態を知るデータとしては不向きである。画面は電子シャッターON（シャッタースピード1/1000）で撮影しているので画像の鮮明度は高い。この方法は流速の小さい場合でなければ有効でないことがわかる。

ハイスピードビデオシステム HSV 500はハーフ

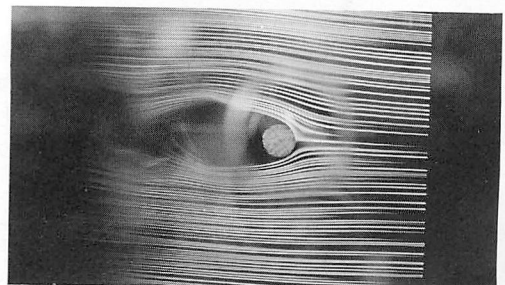
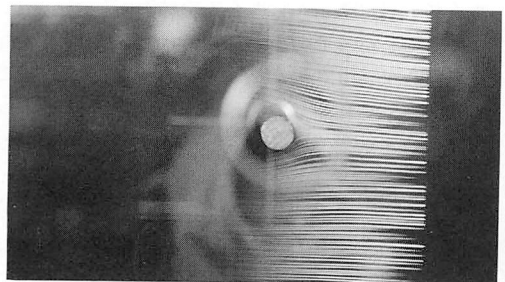


図5 フラッシュ撮影

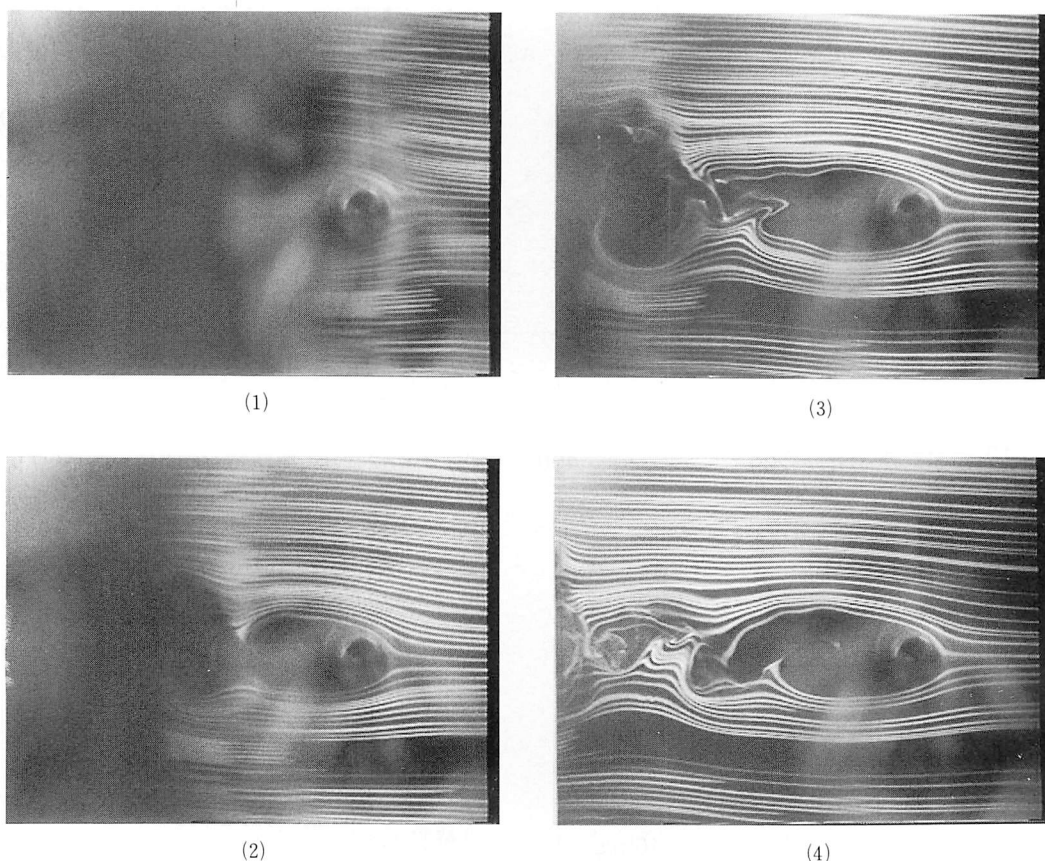


図6 ホームビデオカメラ

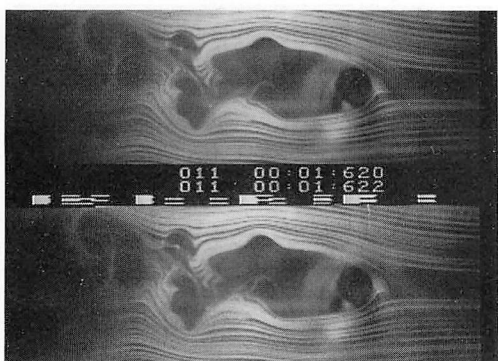
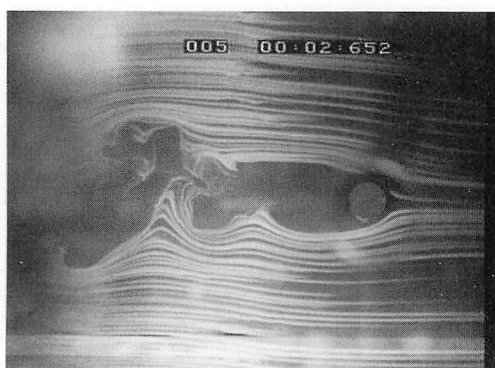
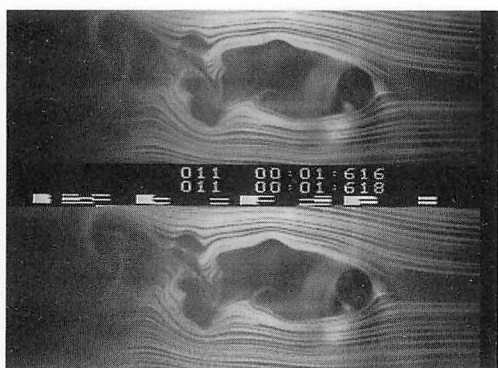
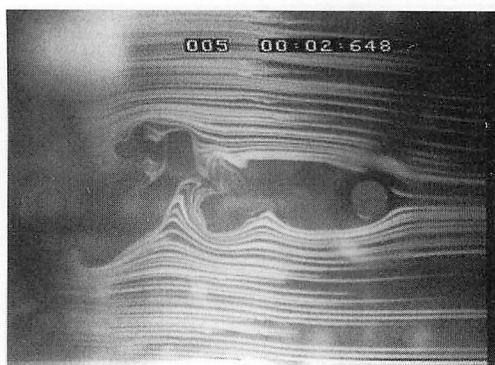
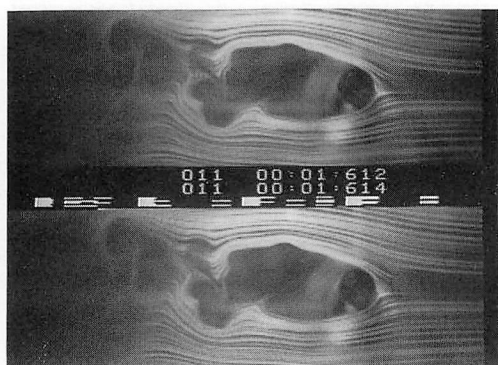
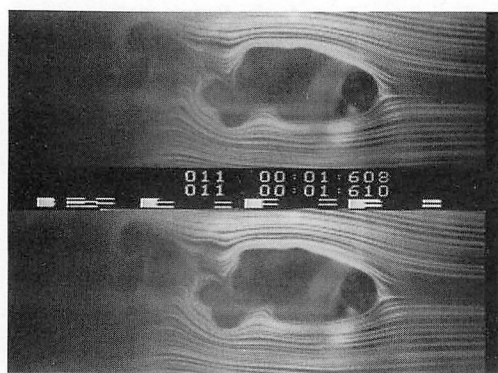
サイズでは500, フルサイズでは250フィールド/秒の能力を持っており, 更に機能として運動解析ができるソフトも備え持っている装置である。このシステムを利用して流れの可視化を風洞によって実験した結果, スモークワイヤーの塗布材として流動パラフィンを用いた場合, 約10 [m/s] 程度までの流れの可視化に応用できることが分かった。供給電圧180 V, 照明は白色光とストロボライトを併用した。実験ではビデオカメラに35mmカメラの接写レンズを装着して撮影した。

図7(a)に実験で得られた円柱後流の経時変化をハーフサイズの連続写真として示した。高速録画になるに従って多少光量不足ではあるが渦の変化の様子は明確に記録された。図の場合, 画像の間の時間は2/1000秒で, 動く距離は約3mm, 上から下に向かい渦の詳細な動きが記録されていることが分る。

図7(b)はフルサイズで時間間隔は4/1000秒の画像である。図8はスモークが円柱を通過する瞬

間から出力させた画像である。同図における画像の時間間隔は12/1000秒であるがフルサイズのものから選択したものである。画像から渦の生成過程が詳細に目視できる。流速が小さければ250フィールド/秒で十分であることがわかる。

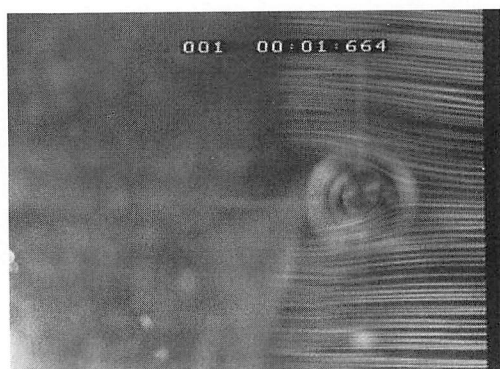
テープの再生には手軽なホームビデオデッキの使用を試みたが, シャトル機能がフレーム再生に追付かないため, 連続した画像再生が困難であった。記録として連続画像を再生するときには, HSV 500の再生機能を利用してビデオコピーした。記録・再生が容易にできるので画面を検討しながら実験を進めることができた。ビデオテープはS-VHSとVHSと比較した場合, コピー後の画質はあまり変わらず録画時間を前者では大きくとれた。画質についてはカメラおよびビデオコピープロセッサ両方で調節した。実験の記録はわずか数秒間単位の記録なのでデータ整理や再生を考えるとテープはST-60を用いた結果, 記録時間はおおよそ15分程度であった。



(a) 500フィールド/秒

(b) 250フィールド/秒

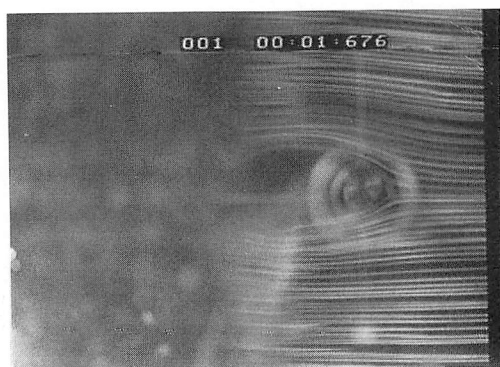
図7 ハイスピードカメラ



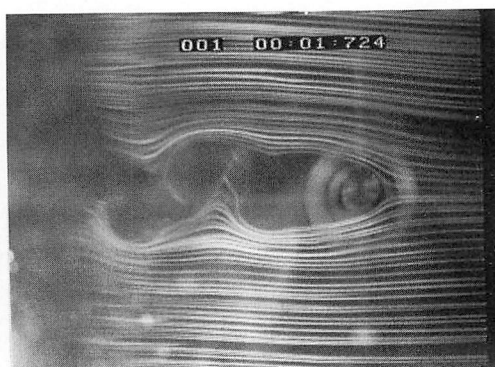
(1)



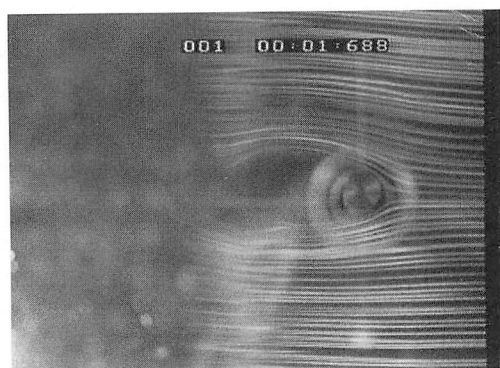
(5)



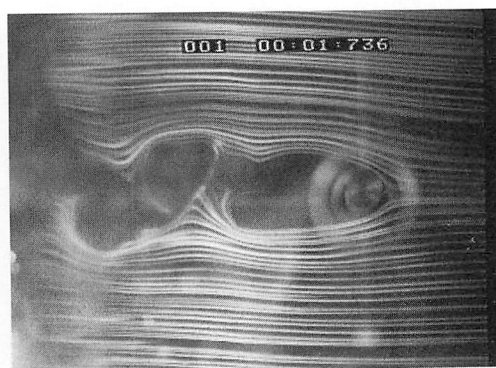
(2)



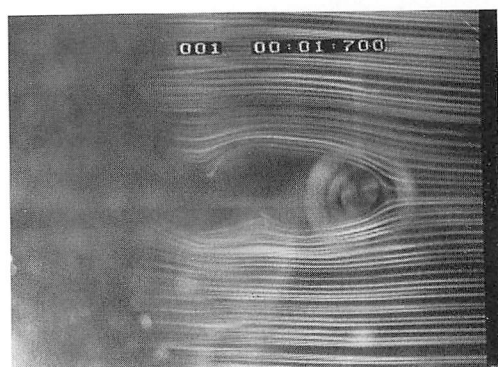
(6)



(3)



(7)

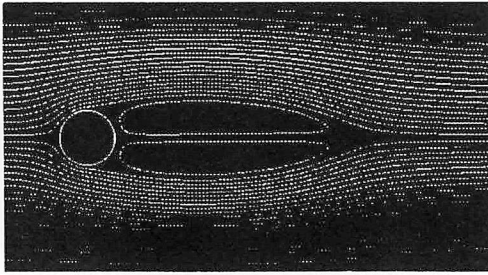


(4)

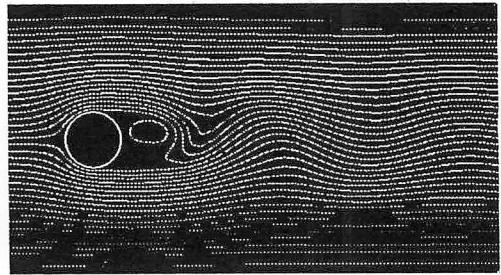


(8)

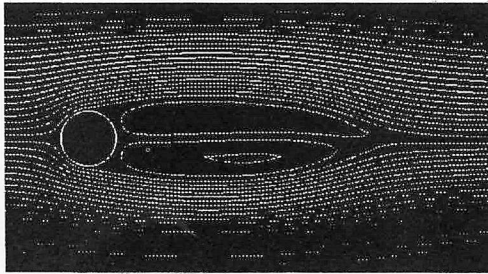
図8 スモークが円柱を通り過ぎるときの連続画像



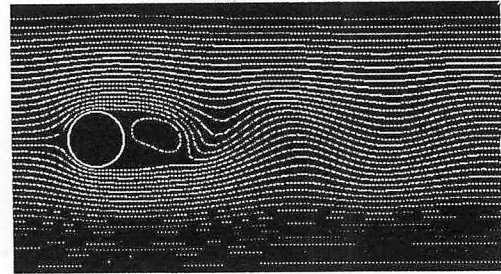
(1)



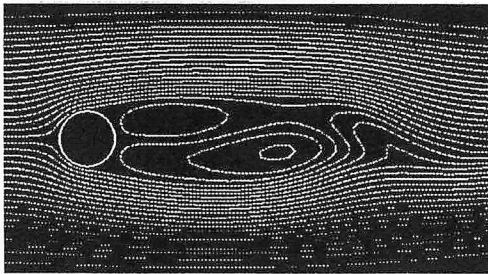
(6)



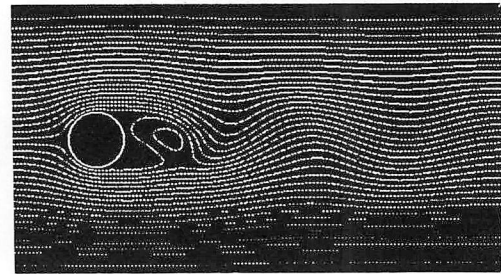
(2)



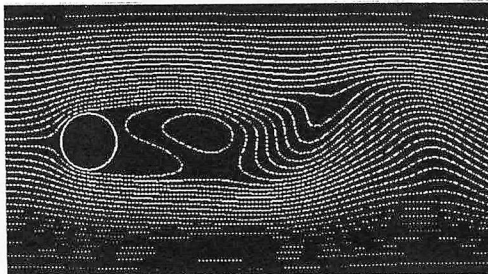
(7)



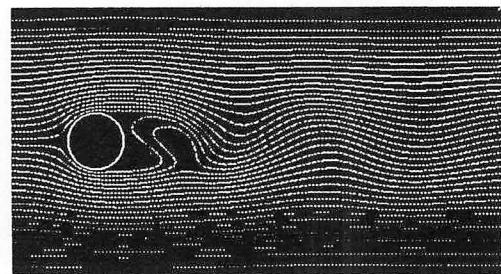
(3)



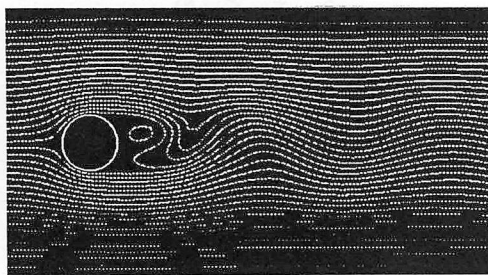
(8)



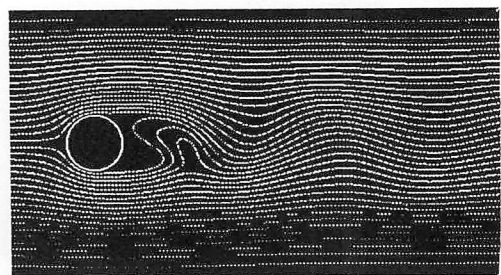
(4)



(9)



(5)



(10)

図9 数値シミュレーション（流線）

4. 2 数値シミュレーション

MTFLOW (Ver 4.3) は有限要素法によって解析を行なうが大幅な省メモリを実現し計算時間の高速化を計りさらに精度と安定性において満足させることができる流体解析用ソフトである。その操作性はマウス操作を基本としているため、初心者でも利用し易いものであった。特に IRIS 版 GWS にはアニメーション用ポストオプションがサポートされているため、ディスプレイ上でのリアルタイム・アニメーションは流れの可視化として非常に有効である。基本的模型の一種である円柱の後方にできる流れの模様を計算し、ソフトの real time visualization 機能や post visualization による経時変化表示機能を利用し、コンピュータによる流れの可視化を実験した。前者では X ウィンドウをベースにした静止画が得られるので計算結果の頻度を選ぶことで計算の進み具合を観察できる。後者は GL を使っているため描画速度が速くアニメーション機能を持っており、流れの経時変化を計算させながら画面上で観察でき、更に任意の画面を出力して保管することができた。いずれも流速、流線、圧力、温度に関する情報が対象となっている。図形の拡大、縮小、移動も自由にウィンドウを複数開いて画面を比較することも出来た。

流れ解析の結果について述べる。図 9 に $Re = 3000$ における円柱後方にできる渦の生成過程を示した。計算ステップ毎に出力はできるがここには過程が解る程度の様子を示すに止めた。実際にアニメーションでディスプレイに表示されている中から選んだものである。双子渦から成長する後流の様子がよく理解できると同時に実際の実験による渦と比較するとよく一致している。なお、計算時間は GWS の計算環境条件、流れ場の格子点や計算の初期条件によっても変わるが図 9 に示したものはノード数 2200 でおよそ 1 時間程度である。角柱の場合はノード数が 1300 程度で計算時間が 20 分程度であった。しかし、プリンタ出力に非常に時間がとられ円柱の場合などは 30 分/枚必要であった。

流れの速度ベクトル表示の例を図 10 に示す。後流の速度の方向、大きさがディスプレイではフルカラーで表示されているので渦の様子が非常にわかりやすい。図 11 には翼周りの流れの中から迎え角を選び 2 枚示したが、これらからも翼上面における剥離の様子を知ることができる。これらの画面出力には postscript printer を利用した。

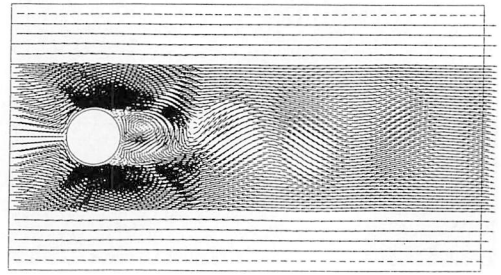
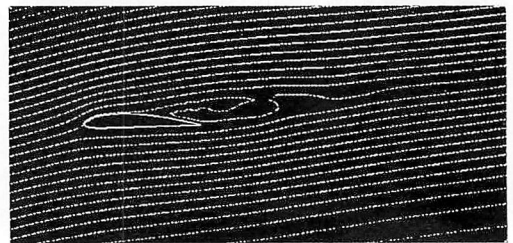
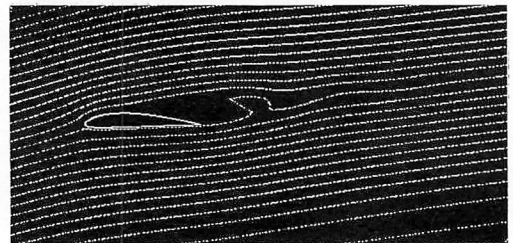


図10 数値シミュレーション (速度ベクトル)



(a) 迎え角14°



(b) 迎え角15°

図11 翼周りの流れ

GWS にはビデオ入力端子があるため画像入力が可能でありそれによる記録も可能であるが処理の時間やスモークワイヤー法による限界も考え今後の検討課題とした。

5. ま と め

ハイスピードビデオや GWS を用いて流れの可視化について実験し、下記の結果を得た。

- 1) 流れの様子を可視化し、それを安価に記録することができた。
- 2) 実際の流れと流体数値シミュレーションの両面で流れの可視化を行い、比較することができた。
- 3) 35mmカメラで得られる画像と同等あるいはそれ以上の画質のものがビデオからえられること

が分かった。

4) 流れの挙動について、学内のメディアを利用して授業、実験で教育教材として応用できることが実現された。

5) 購入したシステムによって可能な実験範囲を確認することができた。

実験や数値解析によって得られた流れの経時変化の連続画像は渦や剥離などについて、学生の理解を助ける教材として有効である。さらに研究に際しても繰り返し画像を記録・再生できることは流れの現象を把握する上で非常に役立つと思われる。

最後に、本研究に用いたシステム購入の際、御協力頂いた栗村事務部長を始めとする事務部の方に対し深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 浅沼 強編, 流れの可視化ハンドブック, 朝倉書店 (1979)
- 2) 伊藤治男 他 7 名, 苫小牧工業高等専門学校紀要 No 23, p 121 (1988)
- 3) 田島 勲 他 1 名, 苫小牧工業高等専門学校紀要 No 19, p 23 (1984)
- 4) 大西和栄監修, パソコンによる流れ解析, 朝倉書店 (1986)
- 5) 小林紘士 他 2 名, 流体数値実験, 朝倉書店 (1989)
- 6) 長谷川博一 他 1 名, 苫小牧工業高等専門学校紀要 No 29, p 51 (1994)
- 7) 田島勲 他 2 名, 苫小牧工業高等専門学校紀要 No 27, p 37 (1992)

(平成 6 年11月29日受理)

