

基礎流体力学教育用流れの可視化装置の開発

赤池 志郎*・根本 光正*・杉村 顕宏**・中根 一朗*

Development of Educational Flow Visualization Apparatuses
for Basic Fluid Mechanics

Shiro AKAIKE, Mitsumasa NEMOTO, Akihiro SUGIMURA
and Ichiro NAKANE

Abstract

Fluid mechanics is a basic subject for students of the mechanical engineering of the faculty of engineering, but the understanding of basic flow phenomena is not always easy. Flow visualization plays an important role in understanding the basic flow by students.

Five flow visualization apparatuses are developed. They are a portable type and the working fluid is water or air. Therefore, the apparatuses can demonstrate the visualized flow directly to students at a lecture room. An outline of the apparatuses is presented and an example of the visualized flow is shown.

1. ま え が き

今日の多様化した技術においても工科大の学部での基礎科目教育の重要性は何ら変わっていない。機械工学系学科においては力学系基礎科目の教育は特に重要であり、従来から4力学の教育が基礎になっていた。4力学とは材料力学、工業力学(または機械力学)、熱力学および流体力学(または流れ学)が一般である。本学機械工学科でもこれらの4力学の基礎を低学年(1年次または2年次)に配置して必修にしている。

著者らの担当する流れ学についても2年次に必修科目として配置されている。流体力学の基礎となる流れ学教育において、これまで各種の教育の改善を試みてきた。他の力学と異なり流体力学関係の教育では流れを目で見せることができるという利点がある¹⁾。このために8ミリ映写やスライドによる教育を行ってきたが、講義室を暗くするために学生の眠気を誘うなどの欠点もあり、これまでこの種の視聴覚教育ではあまり教育効果が上がらなかったようである。そのために講

義室でじかにデモンストレーションできる教育用の可視化装置の開発を数年前から行って来た。なお、教育用の流れの可視化装置は国内および海外の一部のメーカーで販売されているが、価格が高くまた固定用であるので学生実験等では使用できるが、直接講義室での使用は難しい。

開発した装置は講義室での使用を可能にするために可搬式としており、また講義室のドアを通れるように装置の外形を高さ1.5m以内、幅0.5m以内とした。装置のコンパクト化から可視化する流れのレイノルズ数が小さい等の問題は残るが、ある程度初期の目標を達することのできた装置が作れた。

一部平成元年度から流れ学の講義に利用しているので、その装置の概要をここに紹介する。教育効果については数年の経験後に評価できよう。

2. 流体力学関係教育

流体力学は工学の基礎科目であり、各大学の機械工学系学科ではその基礎となる流れ学または水力学と流体力学とに分けて教育する場合が多い。これら科目の分類は明確にされていないが、前者の流れ学、水力学

平成2年9月28日受理

* 機械工学科

** 大蔵省印刷局

では一次元流れを中心としていると言えよう。なお、水力学は流体力学の Fluids dynamics に対する Hydraulics の訳で、現在では必ずしも液体だけを対象としていない。

本学機械工学科でも流体力学関係の教育に数年前から2年次に流れ学 I, II (各半期, 必修), 3年次に流体力学 I, II (各半期, 選択) と4年前期に流体力学 (自由) を配置している。

3. 流れ学教育と可視化装置

流体力学関係教育の基礎となる流れ学の教育用として、流れの可視化装置の開発を行った。現在、本学科の流れ学では完全流体と粘性流体の流れについて主として下記の6項目について講義を行っている。教育内容と開発した可視化装置との関連を以下に述べる。

(1) 流体の物理的性質

粘度等の物理的性質と単位系について講義している。特に可視化装置の必要はない。

(2) 静水力学

圧力の概念の教育が重要であるが、学生が既知のタイヤ圧等の事実に基づいて講義している。ただし、機械工学ではヘッドの概念の教育も重要であり、下記に示すベルヌーイの定理の可視化装置で復習するようにしている。

(3) 流れの基礎式

まず流れの基礎的現象を理解させる必要があり、水流による円管内の層流と乱流 (レイノルズの実験) が可視化できる装置 I を製作した。流れの基礎式であるベルヌーイの定理を理解させるために、圧力をヘッドとして見れる水流による装置 II も製作した。もう一つの重要な基礎式の運動量の法則を理解させるための装置は現在保有していない。

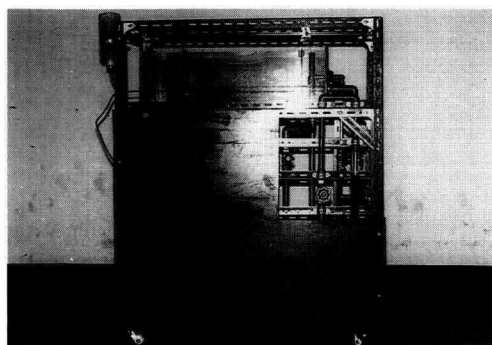


Fig. 1. Photograph of apparatus I

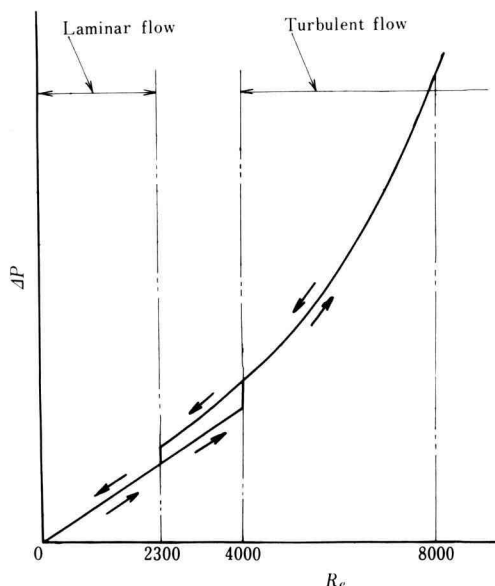


Fig. 3. Relationship between pressure loss and Reynolds number

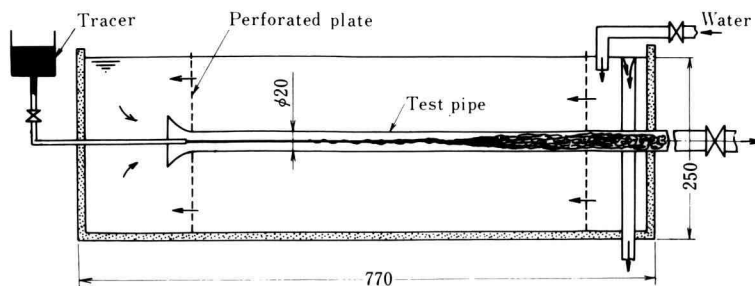


Fig. 2. Details of test section of apparatus I (Unit : mm)

(4) 管内の流れ

管内の流速分布等を可視化できる装置は保有していないが、装置 I で層流と乱流の流れの相違を理解させておき、そのときの流速分布の相違を講義する。管内の摩擦損失については水流による装置 III で圧力ヘッドの損失を理解させる。

(5) 管路における流れ

各種の管路要素の損失については装置 II, III によって示し、管路全体の流れの圧力の変化は装置 II によって講義する。

(6) 物体まわりの流れと物体に働く力

物体まわりの流れについては煙風洞装置 IV により直接流れを見せて理解させる。流れの中の物体に作用する力のうち揚力については直接測定できないが、抗力測定が可能な空気流の装置 V によるデモを行う。なお、揚力については装置 IV での翼まわりの流れから

理解させる。

4. 教育用流れの可視化装置の概要

4.1 装置 I: 層流と乱流 (レイノルズの実験)

層流と乱流に関するレイノルズの実験は有名で、ほとんどの教科書にその概要が掲載されている。本装置もそれを参考にして製作した。図 1 に装置全体の写真を示す。観察部の詳細を図 2 に示す。観察部はレイノルズの実験装置と同様な形状をしており、円管には内径 20 mm のガラス管を使用している。可搬式にするために観察部下部に水槽がありポンプで流れを循環させている。流量は円管下流の面積流量計で測定する。流れの観察は円管入口のノズルからトレーサーとしてポスターカラーを流入させて行う。

静止状態から流量を上げると、流れの乱れにもよるが通常レイノルズ数 $Re = dv/\nu$ (d : 管内径, v : 管内の平均速度, ν : 動粘度) が 4,000 以上では流れは層流から完全乱流に遷移する。周知のように Re が約 2,300 以下では必ず層流となり、一般に Re と管の圧力損失 Δp との関係が流量の増減によって図 3 のようにヒステリシスを示す。本装置では図に示すように最大のレイノルズ数は約 8,000 であるので、本装置で十分層流と乱流の流れの観察ができる。図 4 に層流と乱流の流れの状態の写真を示す。また図 5 に実際の講義風景の写真を示す。

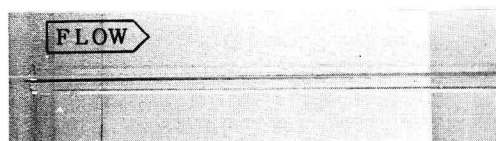
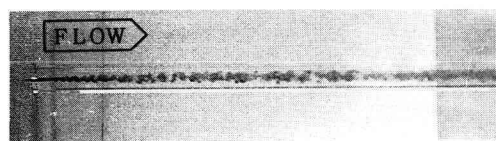
(a) Laminar flow ($Re=1230$)(b) Turbulent flow ($Re=4800$)

Fig. 4. Photographs of laminar and turbulent flows

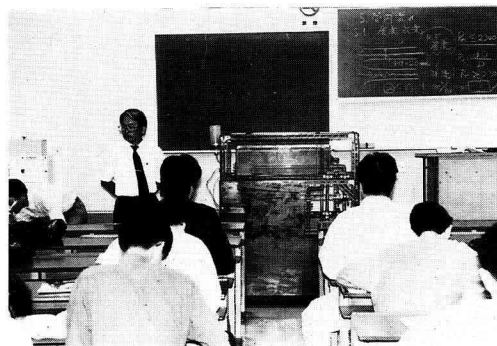


Fig. 5. Demonstration at lecture room

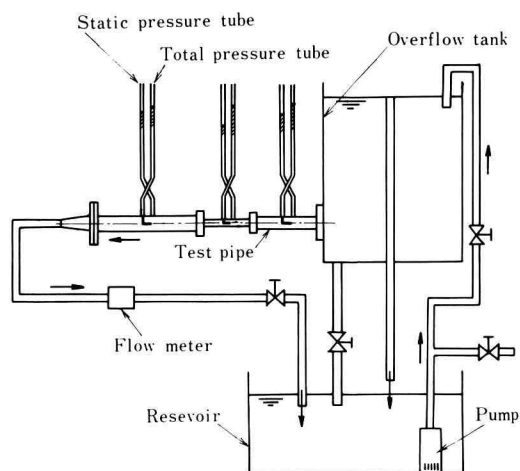


Fig. 6. Schematic diagram of apparatus II

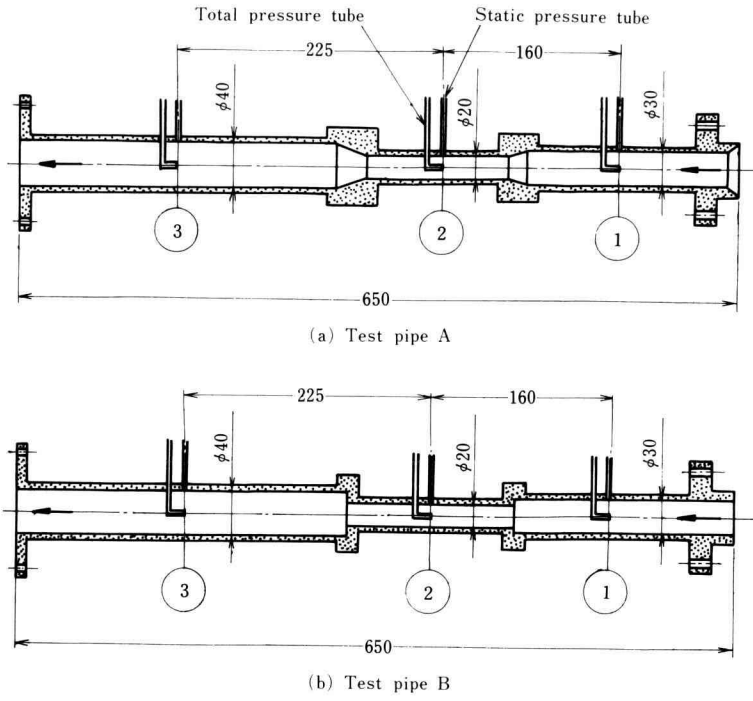
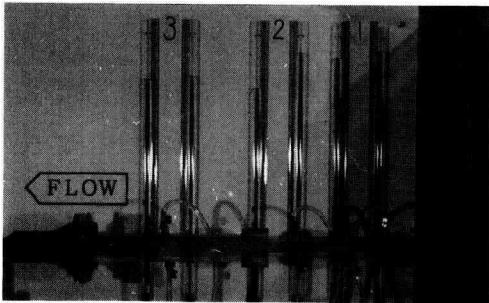
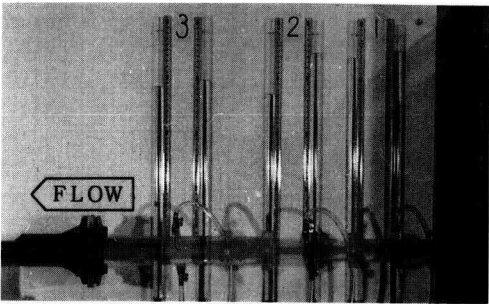


Fig. 7. Test pipes of apparatus II (Unit : mm)



(a) Test pipe A



(b) Test pipe B

Fig. 8. Photographs of test pipes of apparatus II

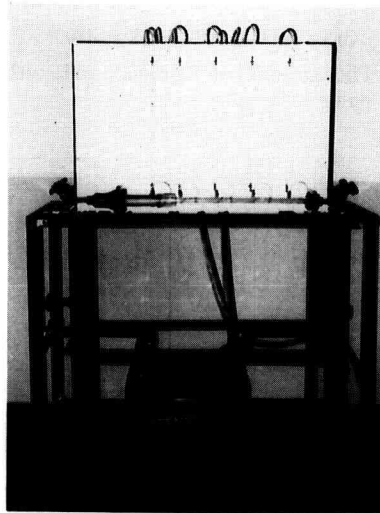


Fig. 9. Photograph of apparatus III

当初の目標をある程度本装置は達成できたが、装置のコンパクト化のために円管の内径が小さいので、乱流域の流速が速くなり乱れた流れを肉眼で追うのが難しいという欠点がある。また観察部の円管長が短いので、観察部の管内の流れはまだ完全に発達していないという欠点もあるが、写真に示すように流れには層流と乱流があるということを学生に十分理解させることができる。

4.2 装置 II: ベルヌーイの定理と管路損失

図 6 に本装置の概略図を示す。下部タンクの水を上部タンクへポンプで供給し、オーバーフローさせ管路にかかるヘッドを一定に保持し、試験管路に水を供給する。試験管路は図 7(a), (b) の 2 種類を用いる。管路 A はベルヌーイの定理用で異径管の接続をできるだけスムーズになるようにし、損失が小さくなるようにした。管路 B は急縮小と急拡大管の損失を調べるためのものである。なお、いずれの管路も各管には図のように全圧管が挿入されており、全圧ヘッドの測定ができる。これと壁面からの静圧ヘッドとの差から各管の中心の流速が求められるようになっており、ピトー管

の原理も理解させられる。

実験はまず管路下流のバルブを全閉にして各ガラス管のヘッドが一定であることを示してから、バルブを開き流量をセットして、各ガラス管のヘッドから全圧損失、中心速度を計算させる。図 8 に流量 $Q=201/\text{min}$ の実験例の写真を示す。この管路 A, B の実験結果の検討を付録に示す。

4.3 装置 III: 管路の圧力損失

図 9 に装置の写真を示す。本装置の目的はベンチュリ管と管摩擦損失および広がり管 (ディフューザ) の損失を提示するもので、装置 II とは異なり直接下部タンクから管路にポンプで直接水流を循環させている。また装置の両面には図 10 に示す管摩擦測定用の管路 A と広がり管の損失を調べる管路 B が設けてあり、バルブで流れを切り換えるようになっている。

4.4 装置 IV: 煙風洞による物体まわりの流れ

物体まわりの流れの可視化には各種の方法がある²⁾が、コンパクト化からは煙風洞が便利である。ただし、講義室で行うためには吹き出し式でなく循環式にする

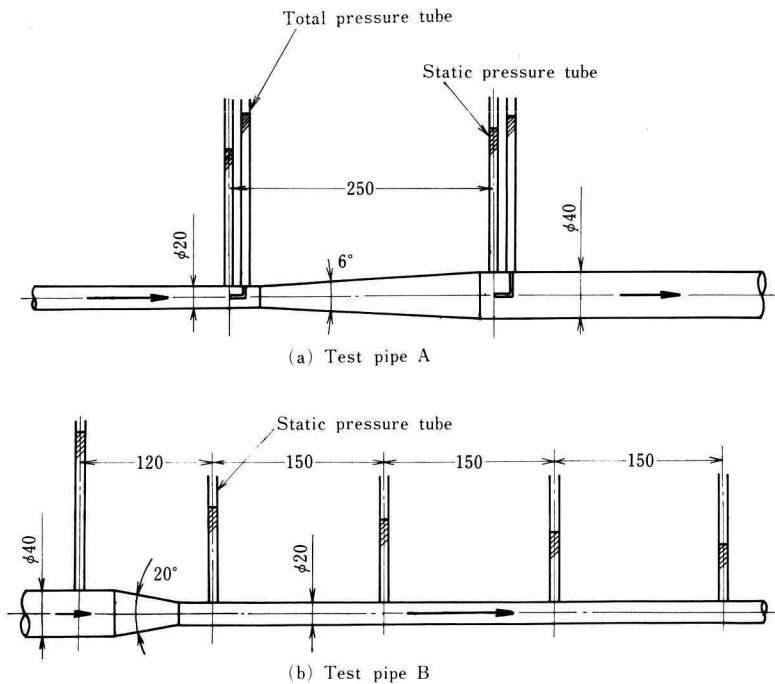
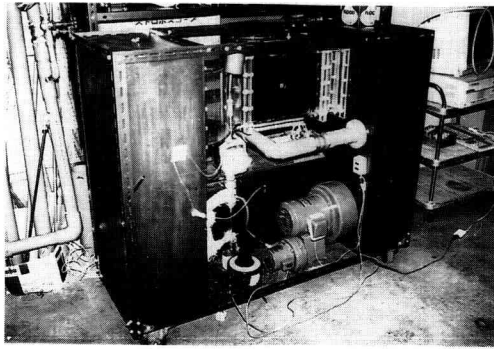
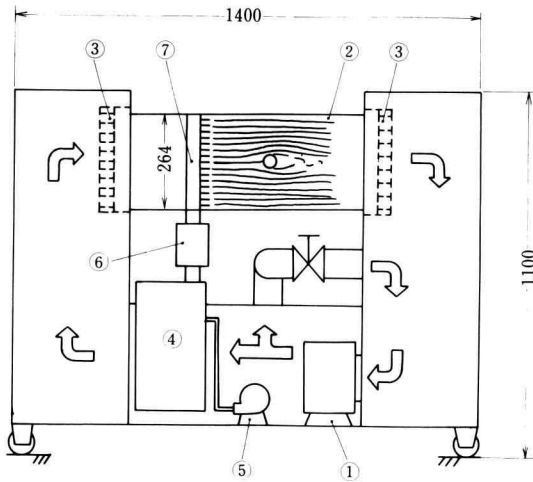


Fig. 10. Test pipes of apparatus III (Unit: mm)



(a) Photograph

- | | |
|----------------------|----------------|
| ① Blower | ⑤ Blower |
| ② Test passage | ⑥ Bumping tank |
| ③ Straightener | ⑦ Nozzle |
| ④ Oil mist generator | |



(b) Schematic diagram

Fig. 11. Apparatus IV (Unit: mm)

必要がある。これらを考慮して、図 11 に示す装置を製作した。

送風機 ① で観察流路 ② に空気流を循環させる。観察流路の前後にはハニカムを用いた整流箱 ③ が設けられている。煙発生装置 ④ は元防衛大助教授の故広瀬先生の指導により図 12 の装置を製作した。一般に煙は普通の軽油で作られることが多いが、悪臭のため講義室では問題を生じるので、本装置では軽油の中でも無味、無臭に近い日石アイソゾール 300 を発煙材とした。煙送

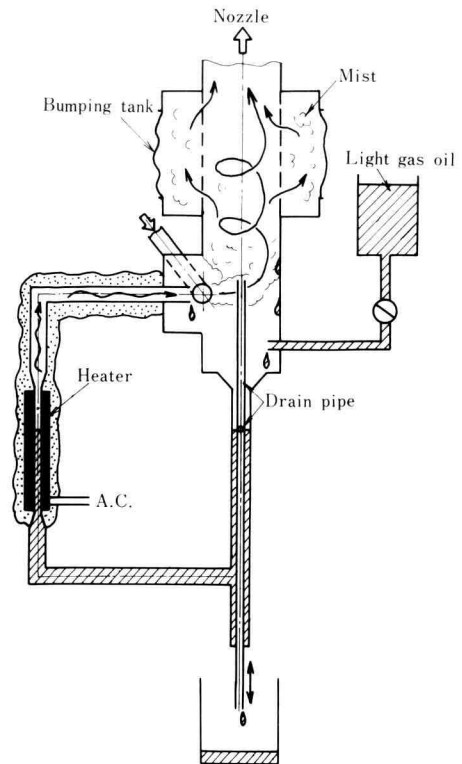


Fig. 12. Oil mist generator

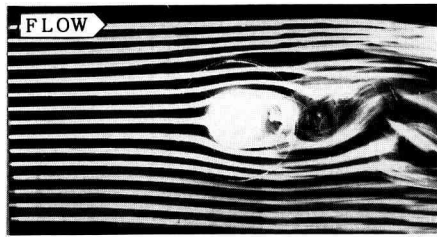
風用の送風機 ⑤ からの送風で煙は緩衝用のタンク ⑥ を経てノズル ⑦ から観察流路に入る。観察流路の幅は 40 mm で背面から観察物体が取り付けられるようになっている。

煙風洞で実験できる供試体には各種の翼、円柱、平板、球(ピンポン、ゴルフ)やミニチュアの自動車、飛行機がある。

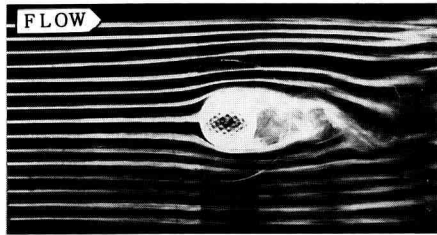
図 13 に煙風洞による可視化写真の例を示す。流路幅が狭いため、完全に物体まわりの流れを可視化できていないが、図(a), (b)のピンポン球とゴルフボールの後流の相違や、翼まわりの流れ [図(c)], 円柱後方のカルマン渦 [図(d)]を目で確かめることができる。なお、本装置では観察部の流速が 5 m/s 程度が最適であり、物体のレイノルズ数が一般の流れに比べて小さいが、物体まわりの流れを学生に理解させることができる。

4.5 装置 V: 抗力の測定

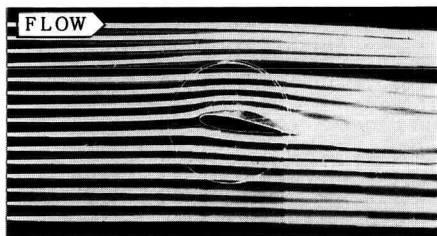
本装置の概略を図 14 に示す。下部タンク内を送風機



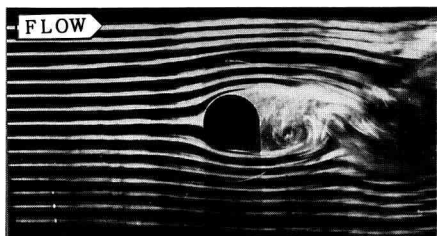
(a) Ping-pong ball



(b) Golf ball



(c) Aerofoil



(d) Circular cylinder

Fig. 13. Photographs of visualized flow ($U \approx 5 \text{ m/s}$)

①で加圧し上部のノズル②から空気流を上方に吹き出すようになっている。ノズル入口には整流装置③が取付けてある。ノズルからの流れの中に供試物体④を天秤⑤に取り付ける。抗力測定と抗力比較実験を行うために上部の蓋は図中に示すようにノズルの異なる2種類を製作した。

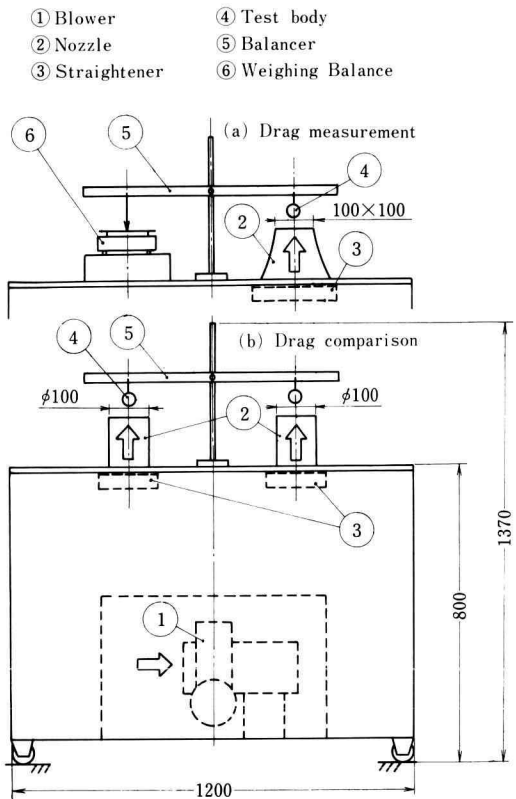


Fig. 14. Schematic diagram of apparatus V (Unit : mm)

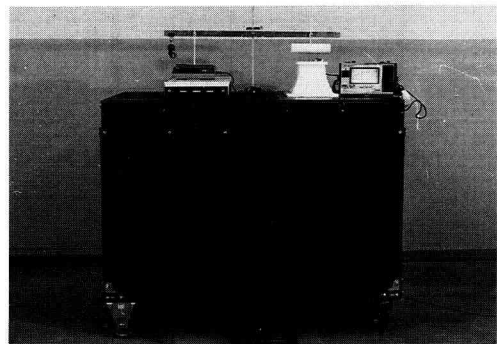


Fig. 15. Photograph of apparatus V

抗力測定用には $100 \times 100 \text{ mm}$ の正方形ノズルが1箇所に設けてあり、天秤の反対のハカリ⑥で力が測定できるようになっている。抗力比較実験用には内径 100 mm の二つのノズルが設けてあり、天秤の左右に

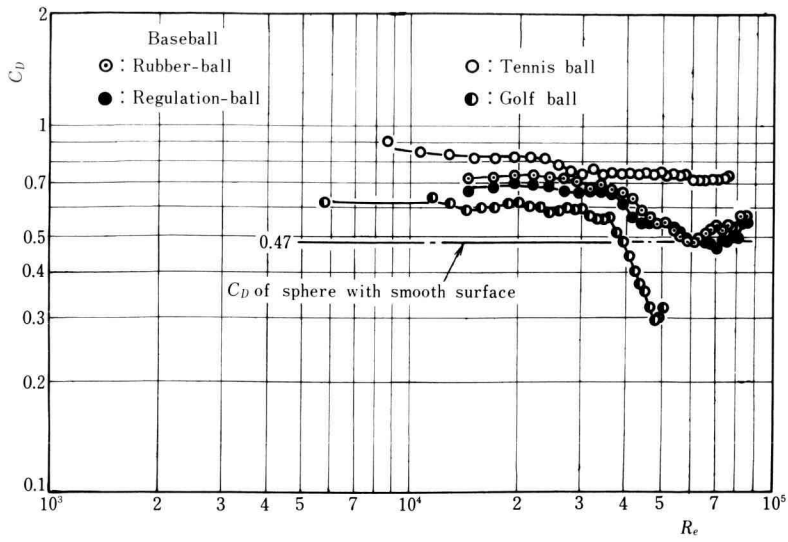


Fig. 16. Comparison of drag Coefficients between balls

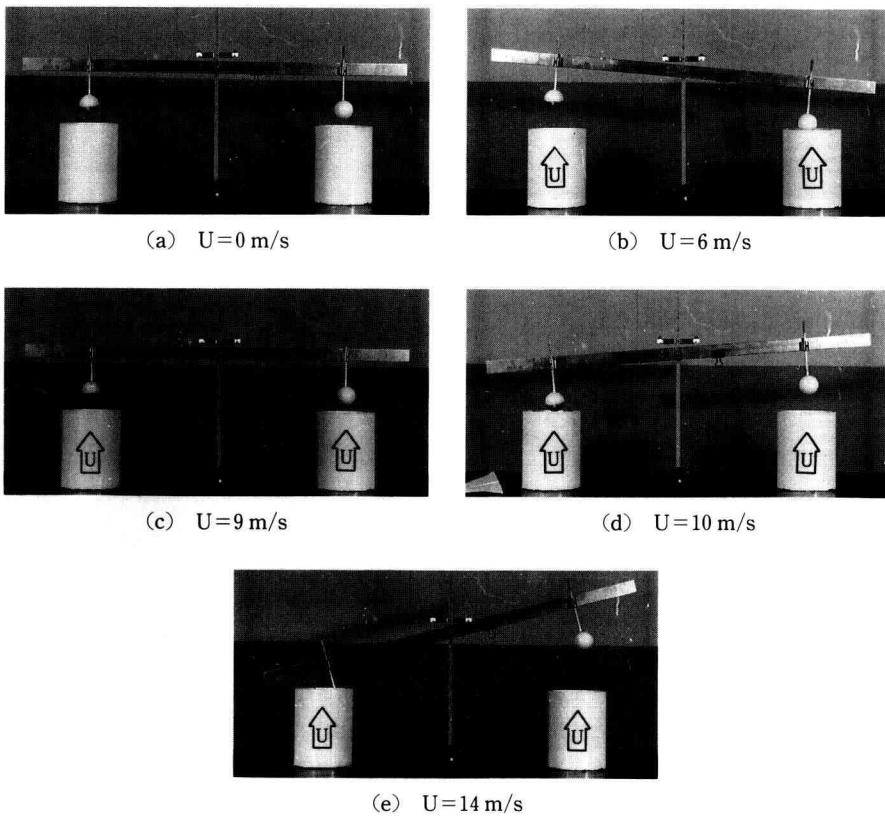


Fig. 17. Experiment on effect of surface roughness of ping-pong balls on drag

取り付けた物体の抗力の比較ができるようになってい
る。前者のノズルの最大流速は約 20 m/s で後者は約
15 m/s であり、実験できるレイノルズ数は小さい。抗
力測定用蓋を取付けた装置の写真を図 15 に示す。

抗力測定物体としては表面粗さの異なる各種の円
柱、球、角柱、円板、翼やバドミントンのシャトル等
を用意してある。

図 16 に各種スポーツ球の抗力係数の実験結果を示
す。従来から滑らかな球の抗力係数 $C_D = D / (\rho U^2 S / 2)$ (D : 抗力, ρ : 密度, U : 流速, S : 流れに面した
物体の投影面積) は臨界レイノルズ数 3×10^5 以下では
約 0.47 であり、それぞれ粗さがあるのでレイノルズ数
の小さいところではこの値より抗力が大きい。ただし、
表面上の境界層の層流から乱流への遷移が粗さによっ
て早まるので、あるレイノルズ数以上で抗力が減少す
るのがわかる。

図 17 に比較実験の例を示す。図の右がピンポン球
で、左はそれに 40 番のサンドペーパーを前面に附着さ
せたもので表面の境界層の遷移を早めるようにした。
図 (a) は風速 $U = 0$ m/s で両者が釣り合うようにし
た。図 (b) の風速が小さい (レイノルズ数が小さい) 場
合には粗面球の方が抗力が大きい、図 (c) で釣合い、
図 (d) のように風速を上げると抗力が逆転する。さらに
風速を上げると図 (e) のように粗面球の抗力はさらに
減少し、天秤は左に大きく傾く。

実験範囲のレイノルズ数には多少問題があるが、実
際に物体に作用する力を直接学生に見せることのでき
る本装置は学生の理解を深めることができると共に、
流れ学への興味も増強させることができるであろう。

5. む す び

本報告では開発した教育用流れの可視化装置の概要
と一部の結果を示した。各装置は教室で直接デモン
ストレーションするために、コンパクトに作られている
ので、流れのレイノルズ数が小さいことなど問題はあ
るが、今後さらに改良していきたい。これらの装置を
実際の講義にこれまであまり活用していないが、今後
これらを用いてさらに流れ学教育の改善に努めたい。

最後に、これらの装置の製作には当時卒業研究生の
岡部 洋、坂口忠久、深谷英孝および松川 純諸氏
のご協力を得たので、ここに感謝の意を表します。また、
本研究の研究費の一部は、昭和 62 年度私立大学等経
常費補助金特別補助 (特色ある教育研究) によるもので、

ここに謝意を表します。

文 献

- 1) 日本機械学会編, 写真集流れ, 丸善 (1984).
- 2) 流れ可視化学会編, 流れの可視化ハンドブック, 朝
倉 (1987).

[付録] 装置 II による実験例

付 1. 各ヘッドとビーター管の原理の講義

流れている流体のエネルギーをヘッドで表すことは
流れ学を理解するために重要である。学生にヘッドの
概念を理解させるために装置 II で講義を行う。単位質
量あたりのヘッドは長さの次元をもち、流れている流
体では

速度ヘッド: $V = v^2 / 2g$, 位置ヘッド: Z , 圧力ヘッ
ド: $P = p / (\rho g)$

がある。ここに、 v : 平均速度, p : 圧力, g : 重力の加
速度, ρ : 密度。これらの総和の全ヘッド H

$$H = V + Z + P \quad (1)$$

は流れに損失が生じなければ流線に沿って一定である
(ベルヌーイの定理)。

実験は図 8(a) に示すように管路 A [図 7(a)] を用い
て流量 $Q = 20$ l/min で行った。この場合基準面を管中
心にとると $Z = 0$ である。図 8(a) の ①, ②, ③ は図
7(a) の ①, ②, ③ に対応し、下流側のガラス管は壁面

付表 1. $Q = 20$ l/min の各ヘッドとビーター管の原理
の実験

	断面①	断面②	断面③
流量より求めた平均速 度 v [m/s]	0.47	1.06	0.27
全ヘッド H [mm] 実験	353	350	302
圧力ヘッド P [mm] 実験	339	282	293
速度ヘッド V [mm] 実験	14	68	9
速度ヘッドから求めた 管中心速度 V_c [m/s]	0.52	1.15	0.42
V_c/v	1.11	1.08	1.56

付表2. $Q=201/\text{min}$ の管路損失の損失の実験

	断面①	断面②	断面③
流量より求めた平均速度 $v[\text{m/s}]$	0.47	1.06	0.27
レイノルズ数 Re	1.4×10^4	2.1×10^4	1.1×10^4
管摩擦係数 λ	0.029	0.026	0.031
全ヘッド $H[\text{mm}]$ 実験	351	340	297
圧力ヘッド $P[\text{mm}]$ 実験	337	272	284

の静圧を示すので、圧力ヘッド P に相当する。上流側のガラス管は管中心に設けられた全圧管に接続されているので、流れの全ヘッド H を示す。したがって、全ヘッド H と圧力ヘッドの差が速度ヘッド V になる。この速度ヘッドから管中心の流れの速度が求められる。これらを実際に教室でデモンストレーションして、学生に数値を読み取らせて演習を行っている。この場合の結果を付表1に示す。

損失が無ければ各断面の全ヘッドはベルヌーイの定理から一定でなくてはならないが、この場合断面②から③の間の広がり管の損失が大きいので、断面③の全ヘッドはかなり減少している。管中心の速度ヘッドから求めた速度 V_c は流量から求まる平均速度より大きい。とくに断面③では広がり管を出た流れがまだ完全に発達していないため、とくに中心で大きい。なお、発達した乱流では一般に $V_c/v=1.2$ である。

付2. 管路損失の実験

図7(b)の管路Bを用いた流量 $Q=201/\text{min}$ での実験結果が図8(b)である。この実験では管路の摩擦損失と急縮小および拡大管の損失を学生に理解させる。

管摩擦損失ヘッド h_f は次式で求められる。

付表3. 損失の実験値と計算値の比較

	h_{12}	h_{23}
計算による損失ヘッド $h[\text{mm}]$	16	33
実験による損失ヘッド $h_{ch1}[\text{mm}]$	11	43
実験による損失ヘッド $h_{ch2}[\text{mm}]$	19	41

$$h_f = \lambda(l/d)V \quad (2)$$

ここに、 λ : 管摩擦係数、 l : 管路長さ、 d : 管内径。また急縮小および拡大管等の各種管路の損失 h は損失係数 ζ を用いて次式で求められる。

$$h = \zeta V \quad (3)$$

したがって、この管路の断面 i, j 管の全損失ヘッド h_{ij} は

$$h_{ij} = \lambda_i(l_i/d_i)V_i + \zeta_{ij}V_{iorj} + \lambda_j(l_j/d_j)V_j \quad (4)$$

となる。

付表2に実験結果を示す。学生には流量が与えられるのでまず各断面の平均速度を計算させ、レイノルズ数からブラジウスの式により管摩擦係数を求めさせる。急縮小および拡大管の損失係数も従来の結果から求めさせて、式(4)より損失ヘッドを計算させる。この場合の結果を付表3に示す。実験による損失ヘッド h_{ch1} は付表2の全ヘッド差から求めたもので、計算値とかなり相違している。この場合全ヘッドは管中心の全圧管から求めているので、流れが偏っている場合にはかなりの誤差が予想できる。したがって、流量から求まる速度ヘッドと実験で求めた圧力ヘッドの和から全ヘッドを決めて損失を求めたものが h_{ch2} であり、計算値にかなり近づく。

上述のように計算値と実験値の一致は良くないが、実際に流れを見せることによって、かなりの教育効果が期待できよう。