論 文 CONTRIBUTED PAPERS

平面壁上に置かれた透過壁立方体周りの流れ (第1報)

開口比とフローパターン^{*1}

The Flow around the Permeable Wall Cube Placed on the Flat Plate (Part 1)

Effects of Open Area Ratio on Flow Pattern

山 田 英 巳^{*2}・大 坂 英 雄^{*2}

Hidemi YAMADA, Hideo OSAKA

影 山 芳 郎^{*2}・長 谷 川 秀^{*3}

Yoshiro KAGEYAMA and Shigeru HASEGAWA

Key words: fluid dynamics; turbulent flows; permeable wall cube; wall-wake

Abstract

The flow around and behind a permeable wall cube set on a flat plate turbulent boundary layer has been investigated experimentally. Eight kinds of cubes, each different in the value of open area ratio, have been used in this experiment. Flow patterns are split into two cases considering the value of open area ratio $\beta=0.32$ to 0.40 as a boundary. One of them is the case for which the separation bubble causes behind a cube, and the other is the bubble is not observed. In the former, the separation bubble behind a cube moves downstream as the open area ratio increases. The tendency of spread of the wall-wake region is characterized by the value of open area ratio in both x - y plane and x - z plane. These phenomena seem to be dependent on the strength of secondary flow found in the flow field behind a permeable wall cube.

1. ま え が き

平面壁上に置かれた三次元物体がその内部を透過する流れ (以後透過流れと呼ぶ) を伴う場合の物体周りの流れは、地表面上の各種機械プラントおよび海底床上の人工礁等に作用する流体力および下流域に及ぼす後流の影響の評価に関し工学上重要である。

これまでに平面壁にある三次元物体、とくに有限高さの円柱^{1,2)}、角柱³⁻⁷⁾、円錐^{8,9)} および有限幅平板^{10,11)}の周りの流れに関して多くの研究がなされてきた。一方、透過流れを伴う場合には特定の模型実験¹²⁻¹⁴⁾あるいは二次元物体¹⁵⁻¹⁸⁾に限って解析が行わ

れている程度であり、有限高さの円柱あるいは角柱のような三次元物体に関する基礎的で系統的な研究はきわめて少ない¹⁹⁾。したがって透過流れが物体周りの流れ場に及ぼす影響についてはまだほとんど知られていないようである。

以上のことをふまえて、本研究では最も基本的な三次元物体の一つと考えられる立方体を取り上げ、透過流れによるフローパターンの変化を実験的に調べることを試みた。本実験では透過流れの量は正確に規定できないため立方体の開口比で代用して表わすこととし、その開口比は立方体の一面を構成する細長い平板要素の数により広範囲に変化させた。

記 号

x, y, z : 立方体底面の中心を原点とする直角座標 (第1図参照)

x_0 : 測定部の平面壁前縁から測った距離

U_1 : 主流速度

U : 平均速度の x 方向成分

u : 変動速度の x 方向成分

h : 立方体の一辺の長さ

δ : 境界層厚さ

δ^* : 排除厚さ $\left(= \int_0^1 (1 - U/U_1) d(y/\delta) \right)$

s^* : 排除面積 $\left(= \int_{-3/2}^3 \int_0^1 (1 - U/U_1) d(y/\delta) d(z/h) \right)$

s^0 : 運動量欠損面積

$\left(= \int_{-3/2}^3 \int_0^1 (U/U_1 - U^2/U_1^2) d(y/\delta) d(z/h) \right)$

E : 乱流運動エネルギー流束

^{*1} 昭和58年12月1日原稿受理

^{*2} 山口大学工学部機械工学科

^{*3} 東京芝浦電気(株)

第1図 流れ場の概要と座標系

$$\left(= \frac{1}{2} \int_{-3}^3 \int_0^1 (U \cdot \bar{u}^2 / U_1^3) d(y/\delta) d(z/h) \right)$$

b : 水平断面 ($y/h=0.5$) 平均速度分布における半値幅

P_1 : 主流静圧

P_w : 平面壁静圧

C_{pw} : 平面壁圧力係数 ($= (P_w - P_1) / (\rho U_1^2 / 2)$), ρ は空気密度

Re : レイノルズ数 ($= U_1 \cdot h / \nu$), ν は空気および水の動粘度

β : みかけの開口比

添字

(*)_{un}: 立方体を設置していない場合の(*)の値

2. 実験装置および方法

2.1 風洞実験 使用した風洞は、入口部断面が340 mm 高さ、900 mm 幅、2 m 長さの測定部をもつものであり、実験の平面壁には測定部床平板を利用した。床平板は、鋭い前縁形状に加工された前縁より10 mm 下流に直径0.3 mm のトリップワイヤをもつアクリル製平板で、供試物体設置位置の周囲には直径0.5 mm の圧力孔が約400個あけられた400 mm × 400 mm の真鍮製板がはめ込まれている (第1図参照)。測定部の天井板は流れ方向圧力勾配を調節するため上下に変えられるようになっている。

実験は、供試立方体を $x_s=525$ mm 位置の平面壁上に設置し、主流速度を10 m/s (約 $Re=3.6 \times 10^4$) の一定に保って零圧力勾配下で行った。供試立方体設置以前の $x_s=525$ mm 位置における平均速度および乱れ強さは通常の発達した乱流境界層の分布を示し、境界層厚さは約14 mmであった。また平均速度および乱れ強さ (主流中で約 $\sqrt{\bar{u}^2}/U_1=0.004$) 分布からみた主流の一様性は測定部断面の広範囲にわたりきわめて良好であった。

平均速度および変動速度の測定にはI形熱線プロ-

ブと定温度型熱線風速計とを用いたが、立方体背後の逆流を伴う剥離泡 (再循環領域) 近傍の平均速度分布を調べる際にはピトー静圧管を併用した。

立方体周辺の平面壁上の流れの可視化は、黒色のつや消し塗装を施した厚さ5 mm のアクリル板を測定部の床平板の上に置き、適当な混合比の流動パラフィン、二酸化チタンおよびオレイン酸から成る油膜を塗布して行った。

2.2 水槽実験 可視化に使用した水槽は、400 mm × 400 mm 断面、長さ2 m のアクリル製の開水路測定部を有するもの²⁰⁾である。立方体周りの可視化は、供試立方体を $x_s=625$ mm 位置の開水路測定部中央の床面に設置し、立方体の上流に配置されたくし形注入管から染料 (ローダミンBおよびフルオレセイン) を注入して行った。写真撮影は測定対象の平面にスリット光線を照射し、30秒の長時間露出で行った。このとき主流速度は $U_1=3.5$ cm/s (約 $Re=1500$) の一定とした。立方体設置以前の $x_s=600$ mm における境界層はブラジウス型の速度分布をもつ層流境界層であり、境界層厚さは約42 mmであった。

2.3 供試骨組構造立方体 供試物体は、幅5 mm、厚さ1.5 mm の真鍮製の細長い板により一辺の長さが50 mm の立方体形状に構成された骨組構造立方体で、その空表面にはめ込まれた平板要素の数により第2図(a)~(h)のように開口比の値を広範囲に変化させることができる。供試骨組構造立方体 (以後立方体モデルと呼ぶ) の開口比とこれを透過する流量との相関が不明であり、かつ便宜さから本実験の開口比を立方体の投影面積 h^2 に対する開口部投影面積の比として定義する。立方体モデルは、その一面 (前面) が流れと垂直で、かつ開口部の長辺が2側面では x 方向に、他の4面では z 方向に一致するように測定部床平板上に置かれた (第1図参照)。

第2図 骨組構造立方体の一面の形状と寸法

3. 実験結果および考察

3.1 フローパターン 骨組構造立方体周りの中心断面 ($z/h=0$) における流れの可視化写真を第3図 (a)~(d)に示す。 $\beta=0$ の場合、立方体上面の前縁から生じ立方体の背後にまで達している剥離泡が可視化されている。一方、 $\beta=0.24$ の場合、立方体の内部に流入した後上面後部と後面より流出する透過流れのため、剥離泡は立方体の後面に付着しておらず、 $\beta=0$ の場合に比べ下流に移動しているのがわかる。この種の現象は、一様流中に置かれた多孔平板²¹⁾あるいは並列多数本円柱²²⁾等の場合にも観察されている。このような剥離泡の下流側への移動は、本実験の場合 $\beta=0.16\sim0.32$ の開口比の範囲で生じている。剥離泡は β が大きくなるにつれ小さくなっていき、 $\beta=0.40$ の場合には観察されなくなる。 $\beta=0.64$ の場合、立方体の内部および直後において各平板要素から生じる小さな範囲の後流が立方体高さの数倍下流に至って重なり合っている。

このように立方体モデルの周囲で透過流れと立方体モデルを越える流れとの干渉の程度が開口比により異なるため、平面壁上に置かれた骨組構造立方体周りの流れ場は複雑なフローパターンを形成する。ここで、

第3図 中心断面流れの可視化

第4図 平均速度および乱れ強さ分布の開口比による比較 ($x/h=5$)

(a) U/U_1 , (b) $\sqrt{u'}/U_1$

便宜上剥離泡が存在する $\beta=0\sim0.32$ の場合の流れをパターンⅠ、それが存在しない開口比が大きい場合の流れをパターンⅡと呼び大別することにする。

第4図(a), (b)は $x/h=5$ 位置の中心断面における各 β に対する平均速度および乱れ強さ分布の比較を示す。平均速度の欠損は、パターンⅠとⅡの境界付近

の開口比である $\beta=0.32$ から 0.40 の場合に層内全域にわたって最も大きい。 $\beta \geq 0.40$ の場合、 β の増加に伴い透過流量が増加するため速度欠損は小さくなる。一方、 $\beta \leq 0.32$ の場合、速度欠損は β が小さい場合ほど小さくなっている。乱れ強さ分布を見ると、平均速度分布の場合と同様パターンIとIIの境界に相当する開口比を境としてその傾向が異なる。パターンIについては $\beta=0$ と $\beta \neq 0$ の場合でさらに分布傾向が若干異なっている。すなわち、 $\beta=0.16 \sim 0.32$ の場合分布は層内全域にわたりほぼ等しく、かつ最大値も大きい。一方、 $\beta=0$ の場合乱れ強さは平面壁近くで大きいが他の位置では相対的に小さい。パターンIIに相当する開口比 ($\beta=0.40 \sim 0.64$) の場合では、おおむね β が大きくなるにつれ乱れ強さは小さくなる分布傾向がある。

3.2 平面壁圧力分布 第5図(a)、(b)は中心線(x 軸)上における平面壁圧力係数の分布を8種の開口比の場合について示したものである。立方体モデル

第5図 中心線上平面壁圧力分布
(a) 物体前方, (b) 物体後方

前方の圧力分布は、 β が小さい場合ほど上流位置で圧力上昇が生じているが、 $C_{pw} \leq 0.4$ の範囲では β によらずほぼ等しい傾向をとっている。 $\beta=0$ の場合分布は $x/h=-0.9$ 位置で馬蹄形渦の生成に関連する極小値をとる^{23,24)}。この特徴は、若干不明瞭となるが $\beta=0.32$ の場合まで見られ、パターンIの開口比の範囲で存在している。 β が増加するにつれ物体前方の圧力勾配は小さくなり、本実験の最大開口比である $\beta=0.64$ の場合には物体前面の最大圧力は $\beta=0$ の場合の約半分程度にしか増加していない。一方、立方体モデル後方の圧力分布は β によりそれぞれ異なる形状をとっており、透過流れのため立方体モデル後方の流れ場が複雑になっていることを示している。 $\beta=0$ の場合、分布は $x/h=1.1$ の位置で強い負圧の谷をとった後下流に向かって急上昇しており、分布の変化が最も著しい。パターンIの開口比の範囲では、 β が増加するにつれ負圧の大きさは減少し、その負圧の谷の位置は下流にずれてくる。これは前述の剝離泡の後退を示すものと思われる。一方パターンIIを示す開口比の場合、おもに平面壁に隣接する平板要素から生じる剝離泡のため負圧の領域は立方体モデル後面に付着し、かつきわめて小さくなっている。

次に、立方体モデル周辺の平面壁圧力分布の変化パターンを第6図(a)~(d)に示す。図は多数の測定点から求められた C_{pw} の等値線(以下等圧線と呼ぶ)である。立方体モデル前方の $C_{pw}=0.20 \sim 0.45$ の等圧線を見ると、おおむね立方体前面の角部を端とする半円形状の等圧線が物体のすぐ上流位置で中心方向への突出のため歪んでいるのがわかる。この等圧線の歪を示す付近は、第7図(a)の油膜パターンを参照すると馬蹄形渦位置と関連しているものと推察される。また立方体モデルの側方から後方にかけては負の等圧線が広がっている。パターンIの開口比の範囲では、 $\beta=0$ の場合に中心線に関し対称におよそ $x/h=1$ 、 $z/h=0.5$ の位置に最小値 $C_{pw}=-0.525$ が存在する。 $\beta=0.24$ の場合になるとこの領域は透過流れのため $x/h \approx 2$ 、 $z/h \approx 0.7$ にまで後退するとともにその最小値は $C_{pw}=-0.25$ にまで上昇してくる。これらの最小圧力位置は第7図の油膜パターンからもわかるように立方体モデル後方の剝離泡を形成する、いわゆるアーチ形渦の付け根²⁵⁾を示している。これに対しパターンIIの開口比の範囲では、油膜パターンからもわかるようにアーチ形渦に関連する負圧の最大値は観察されない。しかし $\beta=0.64$ の場合には、立方体モデルの後面の角部の部材要素に基づく小さな負圧領域が存在する。

3.3 平均速度および乱れ強さ分布 第8, 9図は中心断面 ($z/h=0$) における平均速度および乱れ強さ

第6図 平面壁上の等圧線分布

分布を示す。 $x/h=0$ の位置では平均速度がきわめて大きい値をもつ領域および乱れ強さがピークをとる位置は開口比が小さい場合ほど上方まで達している。また局所速度が主流速度より超過する現象が広い領域で見られるが、この領域で乱れ強さ分布にはとくに大きくなるといった傾向は現われていない。 $x/h=3$ の位置では両者の分布は前述 (第4図) した $x/h=5$ の位置のものにほぼ近い傾向を示す。ただ $\beta=0.16\sim0.32$ の範囲の速度分布には平面壁近傍において逆流の存在が確認された。このことは、第3図の可視化からも見

第7図 平面壁上のフローパターン (油膜法)

られるようにパターンIの開口比の範囲のなかで $\beta=0$ の場合には、中心断面における剥離泡が下流方向に移動し $x/h=3$ の位置まで達していることを示すものと思われる。 $x/h\geq 10$ の範囲では、速度欠損の大きさおよびそれを示す領域の両方が $\beta=0.40$ の場合に最も大きく、 $\beta=0$ の場合に最も小さくなっている。一方、乱れ強さ分布では上流領域で $\beta=0$ の場合の平面壁近くの値が最も大きいため、 $x/h\leq 20$ の範囲では $\beta=0$ の場合の乱れ強さは最小とはなっていない。しかし乱れ強さ分布の流れ方向への変化パターンからみて $x/h\geq 20$ のある範囲では速度欠損分布の傾向と同様乱れ強さは $\beta=0$ の場合に最小、 $\beta=0.40$ の場合に

第8図 中心断面速度分布

第9図 中心断面乱れ強さ分布

第10図 排除厚さの流れ方向変化 (中心断面)

最大となるものと推察される。

このようにパターンⅠとⅡの境界付近の開口比の場合に速度欠損および乱れ強さの両方が最大となる。これは、パターンⅠの β の範囲では負の後流効果²⁵⁾のた

め中心断面を下方に向かう二次流れが透過流れの増加につれ緩和され、一方パターンⅡの β の範囲では透過流れが小さいほど後流の速度欠損が大きいためと考えられる。

中心断面の平均速度分布から求めた排除厚さを第10図に示す。排除厚さ δ^* はすべての開口比の場合に対し下流方向に減少する傾向をとる。図に見られるように排除厚さは $\beta=0$ の場合に小さく、 $\beta=0.40$ の場合に最も大きい。なお $\beta=0$ の場合の δ^* は $x/h=20$ の位置では物体設置以前の場合と同程度にまで減少している。また $\beta=0.64$ の場合、下流方向への変化割合は最も小さくなっている。

次に $y/h=0.5$ の水平断面における平均速度分布を第11図に示す。 $x/h=3$ の位置では、前述した中心断面分布と同様にパターンⅠとⅡの境界の開口比の場合の速度欠損が最も大きくなっている。また最大欠損の位置はパターンⅠの開口比の場合すべて中心断面上に見られるが、パターンⅡの開口比の場合 β の増加に伴い中心断面から立方体モデルの側面位置の後方に移っ

ている。しかしながらこれらの分布の下流方向への変化は相反する傾向をとる。パターンⅠの開口比の場合下流に行くにつれ最大速度欠損位置は中心断面上から

側方へずれ始める。これは前述の負の後流効果のためと思われ、とくに $\beta=0$ の場合に顕著であり、すでに $x/h=5$ の位置でこの傾向が見られる。このような最大速度欠損位置の側方への移動により、パターンⅠの開口比の場合に x 方向への速度欠損領域の広がりが著しくなっているものと考えられる。一方、パターンⅡの開口比の場合、最大速度欠損位置は下流に行くにつれ相対的に中心断面上に移っていくようである。

下流方向への速度欠損領域の変化の様子は $y/h=0.5$ の水平断面における半値幅を示す第12図によく

第11図 水平断面速度分布 ($y/h=0.5$)

第12図 水平断面速度分布における半値幅 ($y/h=0.5$)

第13図 等速線分布 ($x/h=5$)

現われている。図からわかるように欠損領域の広がりはおおまかにパターンⅠとⅡの開口比の場合とで異なっている。たとえば、パターンⅠの開口比の範囲では β が小さい場合ほど下流方向への変化割合が大きくなっている。一方、パターンⅡの範囲では β によらず半値幅はほぼ等しく、また下流方向への変化割合も β にほとんど無関係のようである。

3.4 壁面後流の広がり 骨組構造立方体後方の平面壁面上に生成する壁面後流の広がり、開口比との関係を調べるため、 $x/h=5$ の y - z 断面における平均速度および乱れ強さの等値線（等速線および等乱れ線と呼ぶことにする）を描いたものを第13、14図(a)～(d)に示す。 z/h の大きい領域における等速線および等乱れ線は z 軸とほぼ平行となっており、この領域で二次元的な乱流境界層が形成されているとみなせる。

等速線分布を見ると、 $\beta=0$ の場合 $z/h=0$ 断面付近の等速線がすべて下方の平面壁に向かい突出しているのがわかる。これは負の後流効果により $z/h=0$ 付近で下方に向かい $z/h=0.7$ 付近で上方に向かう、か

なり大きなスケールの二次流れが生じているためと解釈される。ただ同じパターンⅠの開口比の範囲にある $\beta=0.24$ の場合には、透過流れのためこの二次流れ成分が弱くなっているものと考えられる。したがって等速線分布の y 方向への広がり、 $\beta=0$ の場合より大きくなっている。一方 z 方向への広がり、前述の $y/h=0.5$ の水平断面分布において得られた結果と同様、 β が小さい場合のほうが大きくなっている。パターンⅡの開口比の場合、 β の大きいほうが等速線分布は複雑になっているが、小さい速度欠損を示す等速線の傾向は互いに類似している。しかし $\beta=0.64$ の場合 y - z 断面内について速度欠損を示す領域の広がりはかなり小さい。また $U/U_1 \leq 0.8$ の比較的大きな速度欠損の領域がほぼ立方体モデルを構成する部材要素の背後に位置している。

一方、等乱れ線分布を見ると、値の大きい等乱れ線の閉じたかなり大きな領域が $z/h=0$ 断面から z 方向にずれた位置に現われている。これは前述の等速線分布において二次流れを予想した位置にほぼ対応してい

第14図 等乱れ線分布 ($x/h=5$)

第15図 排除面積および運動量欠損面積 ($x/h=5$)

第16図 乱流運動エネルギー流束 ($x/h=5$)

る。この乱れ強さの大きい領域は、 β が大きくなるにつれその値を減じながら $x/h=0$ 断面のほうに移動していき、分布の傾向は等速線の場合と同様複雑となっていく。また乱れ強さが0.4%以上の領域は β の増加につれ減少している。

次に各開口比の場合の三次元壁面後流の断面積分特性を調べ、供試物体の影響について議論する。第15図は、 $x/h=5$ の断面における排除断面 S^* および運動量欠損面積 S^0 を、立方体モデルを設置しない場合のそれぞれの値の S_{un}^* , S_{un}^0 で無次元化し開口比による変化として示したものである。 S^*/S_{un}^* および S^0/S_{un}^0 はともに $\beta=0\sim0.24$ の範囲内のある値のとき最大値をとるようであり、 β がさらに増加すると減少する。第16図は乱流運動エネルギー流束 E を無次元化して示したものである。乱流運動エネルギー流束は平均速度場のみならず乱流場をも包含して後流特性を表わすもので、供試物体の流れ場へ及ぼす影響を評価する場合最も重要な量であると思われる。 E/E_{un} の分布は $\beta=0$ のとき最大値をとり、 β の増加につれ単調に減少する傾向を示す。以上の結果から、後流場全域に対して供試物体の開口比の及ぼす効果は、平均速

度についてのみこれを評価するとある小さい開口比の場合に最大となるが、乱流変動量を加えて評価すると開口比の増加につれ単調に減少するのみとなる。したがって三次元物体の壁面後流への影響を調べる際には目的に沿う特性量による評価をしなければならない。

4. 結 論

平面壁に置かれた透過壁立方体周りの流れに及ぼす開口比の影響を、平面壁圧力分布、壁面後流特性および流れの可視化により調べ、以下の点を明らかにした。

(1) 立方体モデル周りの流れは開口比 β により変化する。 $\beta=0.32\sim0.40$ の間の値を境として2種のフローパターンに大別できる。すなわち、開口比の小さい範囲のフローパターンIでは立方体モデル後方に剝離泡が存在し、 β の増加につれ後方に移動する。一方開口比の大きい範囲のフローパターンIIでは剝離泡は観察されない。

(2) 平面壁上の等圧線分布および油膜パターンにおける、物体周りに生じる馬蹄形渦およびアーチ形渦の痕跡はフローパターンIの場合にのみ観察される。さらにこれらの挙動には開口比の影響がみられる。

(3) 中心断面における平均速度の欠損は、フローパターンIとIIの境界の β の場合に最大で、すべての範囲のなかで $\beta=0$ の場合に最小となる。一方、水平断面における速度欠損領域の下流方向への変化割合はフローパターンIの範囲では β が小さい場合ほど大きく、フローパターンIIの範囲では β によらずほぼ等しい。

(4) 後流場全域に対し、平均速度の欠損はある小さい開口比の場合 ($\beta \neq 0$) に最大となるが、乱流運動エネルギー流束は $\beta=0$ の場合に最大であり、開口比の増加につれ単調に減少する。

なお、境界層厚さおよび物体の開口部形状の影響については機会を改めて報告する予定である。

終わりに、本研究の遂行に当たり協力いただいた本学井上忠義技官ならびに昭和56年度卒研究生山田直史君に深謝いたします。

参 考 文 献

- 岡本哲史, 八木田幹: 一様流に平行な平面に垂直に置かれた有限長円柱の流れに関する実験的研究, 日本機械学会論文集, 38 (1972), pp. 2259-2267.
- 谷口清一, 坂本弘志, 有江幹男: 乱流境界層の中に存在する直立円柱周辺の流れ (円柱の直径と高さが異なる場合), 日本機械学会論文集(B編), 46 (1980), pp. 802-812.
- Castro, I. P. and Robins, A. G.: The Flow around

- a Surface-Mounted Cube in Uniform and Turbulent Streams, *J. Fluid Mech.*, **79**, Part 2 (1977), pp. 307-335.
- 4) 岡島 厚, 杉谷賢一郎: 平板上に置かれた有限長角柱周辺流れの可視化実験, 九州大学応用力学研究所報, 第46号 (1977), pp. 167-175.
 - 5) 坂本弘志, 谷口清一, 森谷 優, 有江幹男: 乱流境界層の中にある正方形柱周辺の流れに関する研究 (乱流境界層特性と抗力係数との関係), 日本機械学会論文集 (B編), **46** (1980), pp. 1437-1446.
 - 6) 高野 暉, 新井 勲, 松坂正芳: 角柱周りの流れ, 日本航空宇宙学会誌, **31** (1983), pp. 485-495.
 - 7) 坂本弘志, 森谷 優, 有江幹男: 乱流境界層の中にある角柱および円柱からの渦放出, 日本機械学会論文集 (B編), **49** (1983), pp. 44-52.
 - 8) 岡本哲史, 八木田幹, 片岡真一: 平板上に置かれた円すいまわりの流れ, 日本機械学会論文集, **42** (1976), pp. 2107-2115.
 - 9) 佐藤 浩: 風—この捉え難きもの, 数理科学, 第140号 (1975), pp. 28-34.
 - 10) 片山忠久: 障壁後流に関する風洞模型実験 (模型設置位置の境界層および模型のアスペクト比の影響について), 日本建築学会論文報告集, 第322号 (1982), pp. 76-81.
 - 11) 坂本弘志, 森谷 優, 谷口清一, 有江幹男: 乱流境界層内に埋没する有限幅平板周辺の流れ (第2報, ストローハル数およびフローパターン), 日本機械学会論文集 (B編), **48** (1982), pp. 1683-1691.
 - 12) 大坂英雄, 山田英巳, 平野孝典, 嵐 義文, 大川徳義, 山田彦彦: 風洞実験によるグレートリーフ型人工魚礁の周りの流況解析, 水産土木, **15** (1978), pp. 19-26.
 - 13) 佐久田博司, 佐久田昌昭, 渡辺浩一郎, 大西 寛: 人工沈設魚礁模型の流体力学的特性に関する基礎的研究, 水産土木, **18** (1981), pp. 7-19.
 - 14) 影山芳郎, 大坂英雄, 山田英巳, 松井勝範, 笹山 仁: 人工魚礁モデル周りの流況 (形状及び開口比を変化させた場合), 水産土木, **19** (1983), pp. 1-8.
 - 15) 有江幹男, 木谷 勝, 小林正志: 多孔平板の後流およびその防風効果, 日本機械学会講演論文集, No. 780-15 (1978), pp. 70-72.
 - 16) Perera, M. D. A. E. S.: Shelter behind Two-Dimensional Solid and Porous Fences, *J. Wind Eng. Indus. Aero.*, **8** (1981), pp. 93-104.
 - 17) 橋本 享, 松見吉晴: 魚礁背後の流況特性について, 第28回海岸工学講演会論文集, 1981, pp. 387-391.
 - 18) 棚沢一郎, 西尾茂文, 高野 清, 田渡正史: タービュレンスプロモータによる長方形管内強制対流熱伝達の促進 (第1報, 多孔板プロモータ付き伝熱面の性能), 日本機械学会論文集 (B編), **49** (1983), pp. 676-684.
 - 19) 影山芳郎, 大坂英雄, 山田英巳: 平面上に置かれた透過壁立方体周りの流れの可視化, 水産土木, **18** (1982), pp. 1-9.
 - 20) 影山芳郎, 大坂英雄, 山田英巳: 水槽実験による多孔立方体魚礁モデル周りの可視化, 水産土木, **17** (1980), pp. 1-10.
 - 21) Castro, I. P.: Wake Characteristics of Two-Dimensional Perforated Plates Normal to an Air-Stream, *J. Fluid Mech.*, **46**, Part 3 (1971), pp. 599-609.
 - 22) 本地弘之: 流れに直角に置かれた有限円柱列の低レイノルズ数領域における伴流特性, 九州大学応用力学研究所報, 第39号 (1973), pp. 1-36.
 - 23) Baker, C. J.: The Turbulent Horseshoe Vortex, *J. Wind Eng. Indus. Aero.*, **6** (1980), pp. 9-23.
 - 24) 大坂英雄, 山田英巳, 影山芳郎: 透過壁立方体周りの層流馬蹄形渦の可視化, 流れの可視化, **2** (1982), pp. 44-50.
 - 25) Schlichting, H.: Boundary-Layer Theory, Seventh, ed., McGraw-Hill, New York, 1979, pp. 655-657.

— 論 文 —

高性能パルス分子線装置の開発と分子線の特性*1

Development of a High-Performance Pulsed Molecular Beam Apparatus and Characteristics of the Beam

手 島 光 司*2・守 谷 富 男*2
Koji TESHIMA, Tomio MORIYA
高 橋 教 雄*2
and Norio TAKAHASHI

Key words: rarefied gas flows; molecular beams

Abstract

A pulsed molecular beam source with an electromagnetic valve controlled by a micro-computer has been developed. Relative intensities

and velocity distributions of the molecular beams from the source with a convergent and a convergent-divergent nozzles are measured. For these measurements a data acquisition system using the micro-computer has been also developed. For the convergent nozzle the measured beam intensity and speed ratio are consistent with theoretical considerations and the existing

*1 昭和57年10月18日, 第14回流体力学講演会にて発表. 昭和58年12月14日原稿受理.

*2 京都大学工学部航空工学教室