平面壁と平行に走行する直方体形状物体の底面と壁面との間の流れ*

城井 浩^{*1}, 浅井 雅人^{*2}, 稲澤 歩^{*2}Flows Between the Bottom of Moving Rectangular Body
and the Plane WallHiroshi KII, Masahito ASAI^{*3} and Ayumu INASAWA^{**3} Department of Aerospace Engineering, Tokyo Metropolitan University,
6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo, 191-0065 Japan

Laminar flows between the bottom surface of a moving rectangular body and the plane wall are investigated experimentally using a towing wind tunnel facility where the model is carried in still air by a linear-motor actuator. The Reynolds number based on the moving speed and the distance between the bottom of the moving body and the fixed plane wall is about 170. In the transient stage of the flow development including the acceleration stage immediately after the body starts to move, the flow is driven not only by viscous shearing stress but also pressure gradient so that the maximum flow velocity exceeds the speed of the moving body. After the flow becomes steady, the normal-to-wall velocity distribution tends to the linear profile of the Couette flow except near the leading edge of the moving body where the flow is still affected by pressure gradient. In addition, the same rectangular-body is carried between two side-walls set normal to the plane wall. For such a nearly two-dimensional configuration, the flow develops to a Couette-Poiseuille flow.

Key Words: Laminar Viscous Flow, Couette Flow, Couette-Poiseuille Flow, Towing Wind Tunnel

1. 緒 言

狭い隙間で隔てられた平行平板の一方が一定速度で移動するとき、走行壁と静止壁との間にはクエット流と呼ばれるせん断流が実現される。この流れは、レイノルズ数が比較的小さく層流を維持する場合、直線的な速度分布をもつ平行流であり、流れの安定性や壁乱流の発生維持機構を調べる基礎研究の対象⁽¹⁾⁻⁽³⁾としてこれまで数多く取り上げられてきた。このような低レイノルズ数の走行壁と静止壁間の流れは工学上においても様々な状況で現れ、身近な例としては、インクジェットプリンタのプリンタヘッドと紙との間の流れがそれに近いと考えられる。

プリンタヘッド底面では、ヘッド移動速度と紙との間隔で定義されるレイノルズ数は高々100程度であり、その隙間の流れは層流が維持されていると考えられる。しかし、走行物体(プリンタヘッド)は平板とは異な

り、有限の高さおよび奥行きを有する三次元物体であるため、このような鈍頭物体が平面壁上を走行する場合の隙間の流れが平板の場合と同様クエット流になるかどうかは疑問である。すなわち、鈍頭物体の場合、物体先端部(のよどみ点)圧力が上昇し、従って走行物体底面と固定壁との間には圧力勾配による流れが生じ得るので、線形速度分布のクエット流とは異なる可能性が十分考えられる。インクジェットプリンタの場合、走行ヘッドから噴射されるインク液滴は非常に小さく、空気抵抗の影響を強く受けるため、隙間の流れを把握することは液滴の挙動を予測する際に非常に重要であると考えられる。しかしながら、これまでの研究はインク液滴の形成過程^{(4),(5)}や壁面との衝突過程^{(6),(7)}に関するものがほとんどで、隙間の流れ場について調べた研究報告は見あたらない。

そこで本研究では、低レイノルズ数の隙間の流れに焦点を当て、リニアモータアクチュエータを利用した曳航風洞を用いて、平面壁と平行に走行する直方体形状物体の底面と静止平面壁との隙間の流れを実験的に調べた。

* 原稿受付 2007年10月31日。

^{*1} 首都大学東京大学院工学研究科。^{*2} 正員、首都大学東京大学院システムデザイン研究科(〒191-0065 日野市旭が丘6-6)。

E-mail: masai@sd.tmu.ac.jp

2. 記号・単位

L	: 走行物体の長さ [m]
h	: 走行物体底面と静止壁面との距離 [m]
t	: 時刻 [s]
x	: 進行逆向き方向座標 [m]
y	: 底面に垂直方向座標 [m]
z	: スパン方向座標 [m]
u	: 流れの x 方向速度成分 [m/s]
w	: 流れの z 方向速度成分 [m/s]
u'	: クエット流からのずれ速度 [m/s]
$u'_{\max}$	: u' の最大値 [m/s]
U_0	: 物体の定常走行速度 [m/s]
ν	: 動粘性係数 [m^2/s]
Re	: レイノルズ数 ($=U_0 h/\nu$)
E	: 熱線流速計出力 [V]

3. 実験装置および方法

実験に用いた曳航風洞⁸⁾は、4mの可動範囲を有するリニアモータアクチュエータ(THK 製)を利用している。図1(a)は、実験装置の概略である。周囲から測定部への外乱の侵入を防ぐために実験装置全体をアクリル板および木材合板で囲ってある。走行台車の移動速度は最大で 2m/s であり、台車の動作(走行パターン)はパーソナルコンピュータによって制御されている。本実験では台車の走行速度は 1m/s 以下であり、このとき、台車は静止状態から定常走行速度までアクチュエータの最大加速度 (2.5m/s^2) で加速される。台車の走行路と平行に厚さ 10mm のアクリル製平面壁が鉛直に固定してある。平面壁の大きさは、2000mm×600mm である。

台車に取り付ける走行物体は、図1(b)に示すように、長さ $L=200\text{mm}$ 、高さ 100mm、幅 100mm の直方体形状であり、底面壁の一部は熱線プローブが装着されたモジュールと取替え可能である。物体は、底面と固定平面壁間の隙間 h が 5mm となるように設定され、真鍮パイプ、スチール製矩形パイプを介して台車に固定されている。本実験では、走行物体に固定した座標系を採用し、原点を物体底面の前縁、スパン中心にとり、後縁に向かって x 、底面から固定壁方向へ y 、スパン方向(鉛直下向き)に z をとる。

物体底面と固定壁間の速度分布は、定温度型熱線風速計を用いて測定された。熱線の実感部は、直径 5 μm 、長さ 1mm のタングステン線である。熱線プローブは、 y 方向に移動可能な小さなトラバース機構をもつ平板モジュール (100mm×50mm) に取り付けられ、物体底面に装着される。このモジュールは物体から取り外

せるようスライド式になっており、底面での取付け位置により、底面のスパン中心線に沿って、前縁近く、中央と後縁近くの 3 つの位置 $x=33, 100, 167\text{mm}$ (それぞれ、 $x/L=0.165, 0.5, 0.835$) で流速の y 分布計測が可能である。

熱線風速計の出力は、ローパスフィルタ(4kHz 以下)を通し高周波ノイズをカットした後、16 ビット、サンプリング周波数 4096Hz で A/D 変換し、パーソナルコンピュータに取り込まれる。ここで、熱線信号の取り込みの際、リニアモータアクチュエータの動作開始と同時に制御ドライバから出力される信号をトリガ信号に用いた。低速実験における熱線風速計の校正については後述する。

流れの平面分布 (x - z 面) を得るために PIV システム (Dantec) を用いた測定も行った。PIV システムは、画素数 1280×1024 の CCD カメラ (HiSense) およびダブルパルス Nd:YAG レーザ発振器からなる。シーディング粒子はスモークジェネレータにより発生させ、その粒子径は 1~1.5 μm である。CCD カメラの撮影と走行物体の通過とを同期させるために、フォトランジスタセンサを用いた。このセンサは、走行台車に取り付けた銅板がセンサのレーザスリット部を通過した時

Fig. 1. Experimental setup (dimensions in mm). (a) Linear-motor actuator system. (b) Dimensions of rectangular body and coordinate system.

Fig. 2. Calibration of hot-wire. Circle; experimental data. Solid curve; approximation.

にトリガ信号を発信するように設置されており、物体底面の流れ場を前方、中央、後方の3つの領域に分けて撮影した。

4. 熱線流速計の較正

本実験の風速(相対気流速度)は最大でも1m/s程度であり、そのような低速流れを熱線流速計により精度良く測定するには、熱線出力の較正が極めて重要でかつ厄介な問題である⁹⁾。ここでは、熱線プローブを取り付けた走行台車の速度(コンピュータ制御で正確に設定可能)を用いて較正を行った。較正はプローブ付きのモジュールを底面から取り外し、境界層平板として台車に別途取り付けて行う。ただし、モジュール平板の前方に楕円形状に加工したアクリル製の前縁を取り付け、前縁剥離が起きないようにしている。また、プローブ位置は、最小較正速度の $u=0.2\text{m/s}$ においても走行平板上に発達する境界層の外側にある。較正曲線は2~30m/sの風速範囲ではキングの式が一般的であるが、本実験は1.0m/s以下の走行速度で行われるため、図2に示すように0.2m/sまでの低速域の熱線出力 $E[\text{V}]$ を3次曲線で近似した較正曲線を用いた。なお、気温の変化による影響を最小限にするため、本実験では熱線の較正を測定開始時および以後約2時間毎に行った。

5. 実験結果および考察

5・1 走行物体底面と静止壁との間の流れ 以下の実験では、直方体形状モデルを静止状態から0.21秒間加速した後、一定速度 $U_0=0.5\text{m/s}$ で走行させた。走行速度 U_0 および底面と平面壁間距離 h に基づくレイ

Fig. 3. Time variations of streamwise velocity at $x/L = 0.5$ ($U_0=0.5\text{m/s}$). Curves from top to bottom; $y/h = 0.88, 0.76, 0.66, 0.56, 0.46, 0.36, 0.26, 0.16$.

Fig. 4. Velocity distributions at $x/L = 0.5$ ($U_0 = 0.5\text{m/s}$). (a) $t = 0.05\text{s}$ (○), 0.10s (△), 0.15s (▽), 0.20s (●), (b) $t = 0.21\text{s}$ (●), 0.30s (△), 1.0s (▽), 2.5s (○).

ノルズ数 Re は約170である。この値は、平面クエット流において乱流が維持できる最小レイノルズ数(約1400)⁽²⁾よりも十分小さい。

図3は、 $x = 100\text{mm}$ ($x/L=0.5$)において種々の y 位置で測定された物体底面と固定壁間の気流速度(走行物体との相対速度)の時間変化である。気流速度は、

いずれの y 位置においても運動開始とともに直線的に増加し、加速が終了する $t = 0.21\text{s}$ で $y/h = 0.66$ ($y = 3.3\text{mm}$) 付近の速度が最大となり、一時的に物体の走行速度 ($U_0 = 0.5\text{m/s}$) を 15% 程度超えて $1.15 U_0$ に達する。その後 $t = 0.5\text{s}$ まで急減少するが、その時刻を過ぎると速度は緩やかに変化し、 $t = 1.0\text{s}$ 以降ではほぼ定常状態となる。ここで、走行物体の底面前縁において流れがはく離すると推測されるが、少なくとも定常走行後では走行時の振動による周期的変動を除いて強い速度変動は観察されておらず、渦放出を伴うような大きなはく離は起きていないと考えられる。また、底面に沿う流れは繰り返し走行に対して非常に再現性がよいことを追記する。これらのデータを用いて走行物体底面と静止壁面との間の速度 u の y 分布を求めた。

図 4(a)(b)は、それぞれ、加速段階 ($0 < t < 0.21\text{s}$) および一定走行速度に到達した後の、 $x = 100\text{mm}$ ($x/L = 0.5$) で測定された速度分布である。動き始めた $t = 0.05\text{s}$ では物体底面近くを除きフラットな分布で走行物体底面近傍に境界層が発達しているのみであるが、 $t = 0.10\text{s}$, 0.15s , 0.20s と時刻が進むにつれ、中心部分が膨らんだ放物型の速度分布に変わってゆく。定常走行になった後は、 $t = 0.30\text{s}$, 1.0s および 2.5s の速度分布が示すように、隙間中央部での膨らみは減少してクエット流の線形速度分布に近づいてゆく。ただし、定常速度場になった後 ($t = 1.0\text{s}$, 2.5s) でも、速度分布は完全に線形分布ではなく、まだ少し膨らみが残っている。図 3 で示した測定位置 $x = 100\text{mm}$ ($x/L = 0.5$) は物体前縁から隙間間隔 h ($= 5\text{mm}$) の 20 倍下流であるにも関わらず、クエット流とは異なる速度分布を示すことは注目すべきである。これは、走行物体底面と静止壁との間の流れが、粘性せん断応力による駆動だけでなく x 方向の圧力勾配によっても生じていることを示唆している。

加速時の速度分布の変化は他の x 位置でも同様であるが、走行速度が一定になった後の定常状態への近付き方および定常流の速度分布形状はかなり異なる。図 5 および図 6 は、それぞれ、前縁近くの $x = 33\text{mm}$ ($x/L = 0.165$) および後縁近くの $x = 167\text{mm}$ ($x/L = 0.835$) における一定走行速度に到達した $t = 0.21\text{s}$ 以降の速度分布の定常状態への漸近の様子である。 $x = 33\text{mm}$ ($x/L = 0.165$) では、加速終了時に最大速度が走行速度の 1.45 倍まで達し、その後時間が経過して定常流場になっても最大速度が少し減少するのみで放物線分布に近いままである。一方、 $x = 167\text{mm}$ ($x/L = 0.835$) では、加速時にやはり最大速度が走行速度 U_0 を 20% 程度超えるが、定常走行後はすみやかにクエット流の線形分布に近づくのがわかる。従って、前縁近くでは、物体前

Fig.5. Velocity profiles at $x/L = 0.165$ ($U_0 = 0.5\text{m/s}$). ● $t = 0.21\text{s}$, △ 0.30s , ○ 2.5s .

Fig.6. Velocity profiles at $x/L = 0.835$ ($U_0 = 0.5\text{m/s}$). ● $t = 0.21\text{s}$, △ 0.30s , ▽ 0.40s , □ 0.50s , ○ 2.5s .

面の淀み点による圧力増加のため隙間に流入する流れが存在するが、流入した流体は下流へ向かうにつれて側面から流れ出て、十分下流ではせん断応力のみによる線形速度分布に近づくと考えられる。そこで、走行物体底面と固定壁間の x - z 面内の流れ構造を調べるために PIV 計測を行った。図 7 は、隙間中間部の $y = 2.5\text{mm}$ ($y/h = 0.50$) における流れ方向速度 u とスパン方向速度 w の分布を示している。測定は、 $t = 0.2\text{s}$, 0.6s , 1.1s で行った。なお、各速度場は、60 枚の PIV 計測結果のアンサンブル平均から得られたものである。 $t = 0.2\text{s}$ では、走行物体前縁近くで流れ方向速度 u がスパン全域で走行速度 U_0 ($= 0.5\text{m/s}$) より増加し、下流でも速度は一樣に走行速度と同程度の値であり、熱線測定の結果 (図 4a) と対応している。一方、スパン方向速度 w から、前縁角部を回り込む流れと、そのすぐ下流では物体側面方向に向かう流れが存在するのがわかる。流れが定常状態に近づいた時刻 $t = 0.6\text{s}$ と 1.1s では、隙間から流れ出る流れはより顕著になり、それは $x/L = 0.5$ 付近まで続いている。また、これらの時刻で

は、流れ方向速度 u は $x/L=0.5$ より下流においてスパン方向にほぼ一様に $u/U_0 = 0.5$ となり、熱線プローブによる測定結果 (図 4b, 図 6) と一致している. このように、物体前面淀み点での圧力上昇により隙間に入り込んだ流れはすぐ下流で隙間の側方から流出し、下流位置では速度分布がクエット流に近づくことが理解される.

5・2 二次元走行モデルの底面流れ

走行物体底面のスパン方向の流出が無く、流れが二次的な場合、底面の速度分布はどのようになるであろうか. この場合の流れを調べるため、図 8 のように、走路の両側に大きな側壁を立て同じ物体を走行させた.

図 9 は、前節の実験と同様、静止状態から 0.21 秒間加速した後、一定速度 $U_0=0.5\text{m/s}$ で走行したとき、定常走行になった後の $x/L=0.165, 0.5, 0.835$ の位置での速度分布の変化である. 定常走行直後の $t=0.21\text{s}$ では前方 ($x/L=0.165$) での最大流速が走行速度の約 2 倍に達する. 中央 ($x/L=0.5$) や後方 ($x/L=0.835$) でも最大速度は $1.7U_0$ に達し、前節の三次元流の場合と比べ、急加速による圧力勾配の付加に起因する速度増加が非

Fig. 8. Arrangement of model and side-walls in 2D experiment (dimensions in mm).

Fig. 7. Flow field in the x - z plane at $y/h = 0.5$ at $t = 0.2\text{s}$ (a and d), 0.6s (b and e) and 1.1s (c and f). (a), (b), (c) Streamwise velocity u/U_0 . (d), (e), (f) Cross-stream velocity w/U_0 . White square represents the perimeter of the moving body. The rectangular body (marked by broken lines) is moving from top to bottom.

Fig. 9. Velocity profiles at (a) $x/L = 0.165$, (b) $x/L = 0.5$, (c) $x/L = 0.835$. $U_0 = 0.5\text{m/s}$. The body runs between side-walls. $\bullet$ $t = 0.21\text{s}$, Δ 0.30s , ∇ 0.40s , $\square$ 0.50s , $\circ$ 2.5s .

Fig.10. Deviation from the linear profile (Couette flow) at $t=2.5s$, $\nabla x/L=0.165$, $\circ x/L=0.5$, $\triangle x/L=0.835$. Solid curve represents parabolic profile. Model runs at $U_0=0.5m/s$ between sidewalls.

常に大きいことがわかる。即ち、側面が閉じられた二次元物体の場合、物体前面での圧力上昇に加え物体背面での負圧の発生に起因する大きな圧力勾配が生じると考えられる。時刻が十分経過して流れが定常となった $t=2.5s$ では前方、中央と後方の分布にはほとんど違いがなくなり、底面の流量が各 x 断面でほぼ一定に保たれ、二次元的な流れが実現されていると判断される。

三次元流との顕著な相違は、十分時間が経過しても速度分布はクエット流の線形分布とはならずにはなれなかったままであることである。これは、流れ方向の圧力勾配が無くならず、それにより誘起される流れが存在していることによる。事実、図9の $t=2.5s$ の速度分布とクエット流の線形速度分布との差を取ると、図10に示すように放物型速度分布が得られ、これは、一定圧力勾配下での平面ポアズイユ流の速度分布そのものである。このように、二次元性を課した場合、走行物体底面と静止壁面の間にはクエット・ポアズイユ流が発達することがわかる。

6. 結 言

平面壁と平行に走行する直方体形状物体の底面と平面壁との隙間の流れ ($Re=170$) を、リニアモータアクチュエータを利用した曳航式風洞を用いて実験的に調べた。主な結果を以下にまとめる。

- (1) 物体が静止状態から急発進し定常走行に移行した直後までの期間では、底面の全領域で圧力勾配による流れが生成され、速度分布は線形分布とは大きく異なる。
- (2) 流れが定常状態になった後も、前縁近くでは、物体前面の淀み点による圧力増加のため隙間に流入する流れが存在するが、下流へ向かうにつれて流

入した流体は側方から流れ出て、十分下流ではせん断応力のみで駆動されるクエット流の線形速度分布に近づく。

- (3) 走行経路に側壁を設けて流れを二次元的にした場合、急加速時の速度増加は三次元流の場合よりも大きく、また、流れが定常状態になった後も走行物体底面流れに及ぼす圧力勾配の影響は残る。その結果、線形速度分布をもつクエット流ではなくクエット・ポアズイユ流が発達する。

文 献

- (1) Nagata, M., Three-dimensional finite-amplitude solutions in plane Couette flow. Bifurcation from infinity, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 217 (1990), pp. 519-527.
- (2) Tillmark, N. and Alfredsson, P.H., Experiments on transition in plane Couette flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 235 (1992), pp. 89-102.
- (3) Kawahara, G. and Kida, S., Periodic motion embedded in plane Couette turbulence: Regeneration cycle and burst, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 449 (2001), pp. 291-300.
- (4) Meacham, J.M., Varady, M.J., Degertekin, F.L. and Fedorov, A.G., Droplet formation and ejection from a micromachined ultrasonic droplet generator: Visualization and scaling, *Physics of Fluids*, Vol. 17 (2005), 100605.
- (5) Jong, J., Jeurissen, R., Borel, H., Berg, M., Wijshoff, H., Reinten, H., Versluis, M., Prosperetti, A. and Lohse, D., Entrapped air bubbles in piezo-driven inkjet printing: Their effect on the droplet velocity, *Physics of Fluids*, Vol. 18 (2006), 121511.
- (6) Dam, D.B. and Clerc, C.L., Experimental study of the impact of an ink-jet printed droplet on a solid substrate, *Physics of Fluids*, Vol. 16 (2004), pp. 3403-3414.
- (7) Khataavkar, V.V., Anderson, P.D., Duineveld, P.C. and Meijer H.E.H., Diffuse-interface modeling of droplet impact, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 581 (2007), pp. 97-127.
- (8) Inasawa, A., Toda, K. and Asai, M., Experimental study on the stability and vortex structure of flow behind accelerating circular cylinder, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 73, No. 727 (2007), pp. 767-773.
- (9) Nishioka, M. and Sato, H., Measurements of velocity distributions in the wake of a circular cylinder at low Reynolds numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 65 (1974), pp. 97-111.