

地面効果を受ける進行物体に働く流体力

正員 金井 誠* 駒 徹 郎**
 青木 清平*** 正員 宮田 秀明*
 山下 高明*

Hydrodynamical Forces on a Moving Body in Ground Effect

by Makoto Kanai, *Member* Tetsuro Koma,
 Kiyohira Aoki, Hideaki Miyata, *Member*
 Takaaki Yamasita

Summary

An experimental technique is developed for a vehicle moving steadily in the vicinity of the ground. The towing tank with a steadily advancing carriage is used and the unfavorable effects of the boundary layer on the wall of wind tunnel is fully removed. Experiments with a box-shaped model and a car model revealed some interesting features of lift, drag and side force at various clearance from the ground. Lift force is more sensitive to the boundary layer and it should not be measured in a wind tunnel. The flow with vortices near the bottom surface of the body gives one of the most important effects on the forces.

1. 結 言

平面上を進行する物体としては、車 (road vehicle)、軌道車両などの他に、浅海域を航行する船舶、海底近くで作業を行う各種の水中移動体、WIG などある。これらに加わる流体力は、地面、海底面、水面などの影響を受け、これを的確に求めることは、理論的にも実験的にも、大変難しい。流体運動が非粘性的であれば鏡像モデルによる説明が有効であるが、多くの場合、渦を含む粘性流体運動が重要な位置を占めており、理論流体力学の応用には限界がある。一方、地面の影響を実験的に取り扱うことも、技術的に難しい。

車両工学の分野では、古くから風洞試験が用いられている。回流水槽と同様に空気を循環させるため、比較的簡便な実験技術として確立されている¹⁾。しかし、地面に対応する風洞底には境界層が発達し、物体底部まわりの流れは、実際と大きく異なり、得られた流体力の精度にも不安があ

る。そこで moving belt 法²⁾³⁾⁴⁾ という技術が開発され、地面に相当する面を、物体の進行速度と同じ速度でスライドさせることにより、この問題を除去するのが一般的になりつつある。しかし、完全に一樣な流れを作ることは難しく、これでも尚、地面を定速走 (航) 行する場合とは異なった流れ場において実験を行っていることになる。

この問題を完全に解決するためには、船舶の曳航水槽における実験と類似の実験技術を開発すれば良いように思われる。水槽底または仮底を地面と考えれば、地面上移動体の条件と同一となり、境界層の影響を受けない。乗用車に関してこのような実験を行ったのは Larsson⁵⁾⁶⁾ らが初めてのようである。彼らは、実車を角水槽内に置き、曳引車でワイヤーを使って曳引し、抗力を計測し、風洞試験結果と比較した。大変興味ある研究であるが、この方法では直進行中の抗力と圧力分布の計測だけに内容が限られる。揚力や横力の計測、迎え角や yaw 角をつけた時の流体力の計測、流れの可視化などは難しい。

そこで筆者らは、水槽中に仮底を設け、模型を三分力計に固定して曳引する方法を試みた。単純形状の例として箱型模型を、複雑な形状の例として、乗用車模型を用い、力の計測、流れの可視化を行った。乗用車模型に関しては風洞試験も行い、水槽試験と比較した。

* 東京大学工学部

** 川崎重工(株) (研究当時 東京大学工学部船舶海洋工学科4年生)

*** いすゞ自動車(株)

2. 実験法

2.1 仮底と模型固定法

実験装置の全体配置を Fig. 1 に示す。東京大学船型試験水槽(幅 3.5 m, 水深 2.3 m)の底に, 地面に相当するステンレス製の仮底を幅 0.9 m, 長さ 18 m, 高さ 0.83 m で敷設した。模型を翼断面を持った sword で支持し, 3 分力計を介して曳引台車に固定した。地面近くを進行する物体の試験では, 地面の平面精度や物体の取り付け治具の形状などが実験精度に大きく影響する。仮底の水平精度は, ± 0.5 mm 以内に調整した。仮底の幅は, 模型の幅に対して, 箱型模型では 3.75 倍, 乗用車模型では 2.67 倍である。第 4 章で示す箱型模型による流れの可視化写真では, 剝離域が模型幅の 2 倍程度であり, また, 乗用車模型では箱型模型に比べ大幅に剝離域が小さく, 仮底の幅が 0.9 m であれば地面に相当する面として満足できると思われる。また, sword は, その影響が最小限になるように翼厚 10 mm, コード長さ 70 mm とし, sword 内部は圧力計測パイプが挿入できるよう中空にした。

2.2 可視化法

スライドプロジェクターにより, 約 5 mm 幅のスリット光を作り, 各断面を可視化した。可視化のトレーサーには直径約 1 mm, 比重 1.07 のポリスチレン球を使用した。撮

影は, 35 mm スチールカメラを使用し, シャッタースピードを 1/2 秒とした。模型上面からの撮影は 28 mm レンズを使用した。模型側面と後面からの撮影は, 50 mm レンズを使用し, 水中に置かれた 45° に傾けた鏡を介して撮影した。

2.3 供試模型

供試模型は, 長さ 0.5 m, 幅 0.24 m, 高さ 0.24 m の箱型の模型(以下 box 模型と呼ぶ)と, 実車の 1/5 スケール模型(以下乗用車模型と呼ぶ)の 2 タイプを使用した。乗用車模型を Fig. 2 に示す。乗用車模型の寸法は, 長さ 0.83 m, 幅 0.337 m, 高さ 0.219 m である。地面効果がより明らかになるよう, タイヤ, ドアミラーなどの付加物は取り付けず, タイヤハウスを滑らかに塞ぎ, 模型の床面を平滑とした。

2.4 没水度の影響

曳航水槽の実験において問題となる点は, 没水度による流れ場の変化や造波などの自由表面影響である。仮底を取り除いた水槽において, 曳航速度 0.7 m/s で, box 模型と乗用車模型を用いて, 自由表面から模型上面までの深さ d を変化させ, 没水度の影響を調べた。box 模型による結果を Fig. 3 に, 乗用車模型による結果を Fig. 4 にそれぞれ示す。模型固定用の sword の抗力を補正している。横軸の d/h は没水度であり, 模型上面までの深さ d を模型の高さ

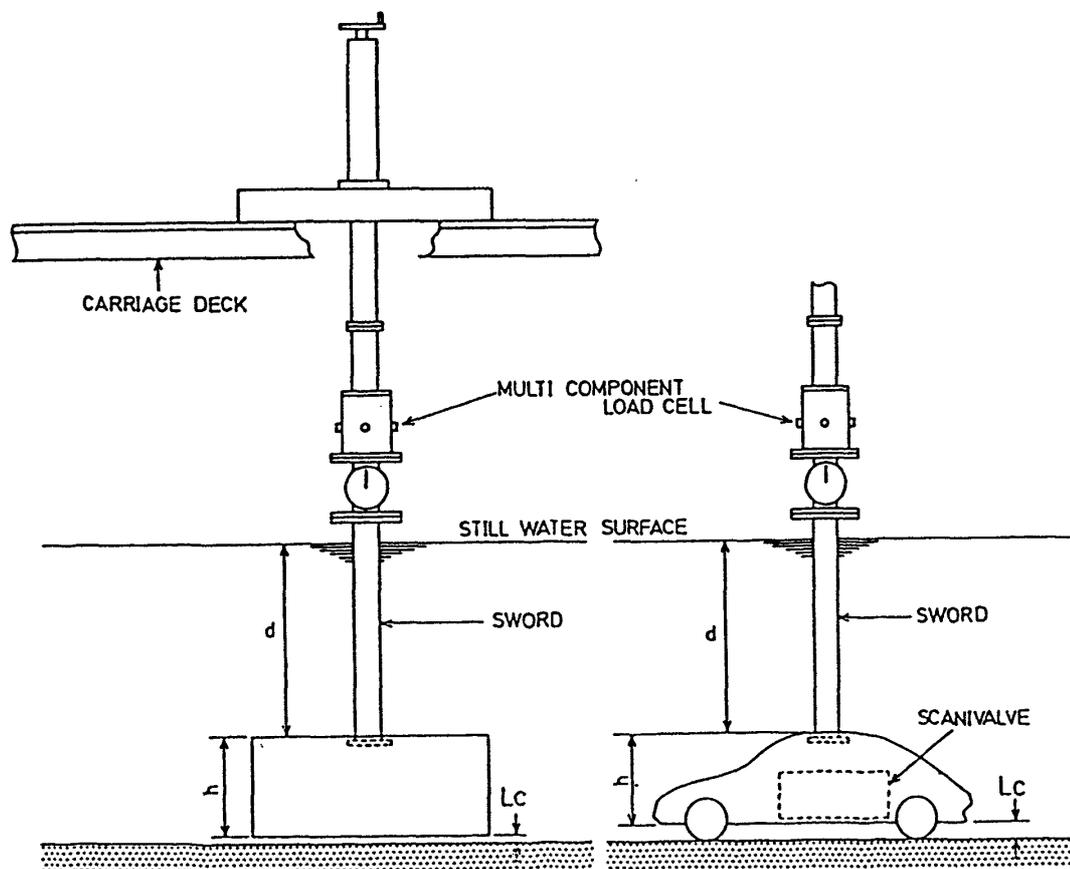


Fig. 1 Experimental set-up.

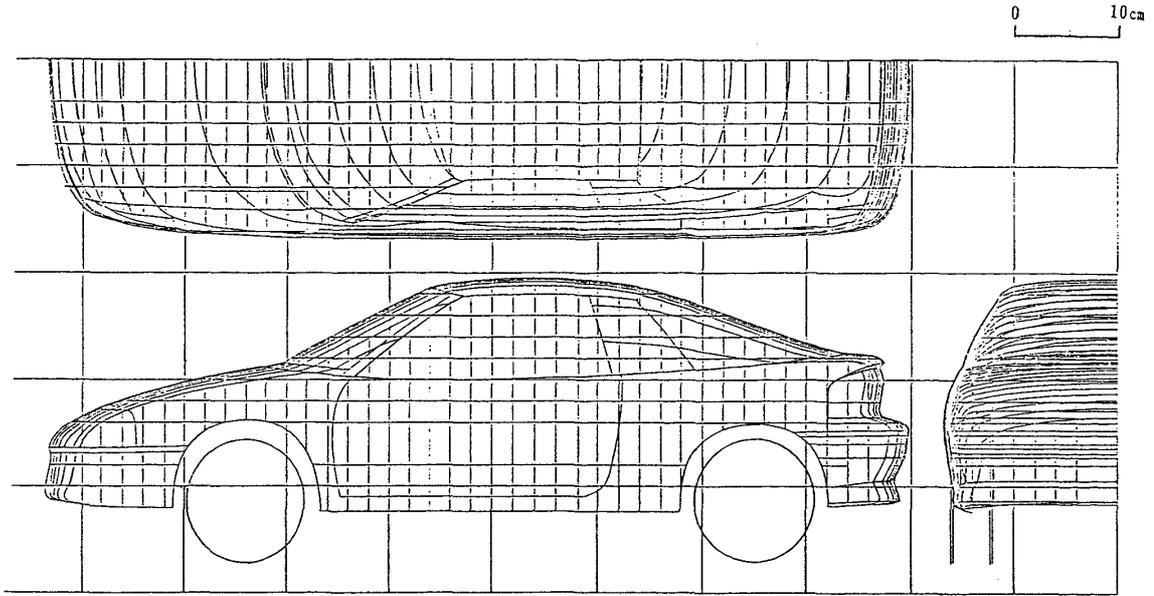


Fig. 2 Configuration of a car model.

h で無次元化したものである。いずれの模型においても $d/h=1.5$ 付近から比較的安定した値を示している。また、抗力 C_D に比べ揚力 C_L の方が、自由表面の影響を大きく受けていることがわかる。特に、乗用車模型では、 $d/h=1.0$ より浅い部分では、顕著にその影響を受けている。これらから、自由表面影響を避けるため、 $d/h > 2.0$ で実験を行うことが望ましいと考えられる。また、フルード数の影響については、別所⁷⁾が、回転楕円体を用いて調査した結果があり、それによると喫水ベースのフルード数 $F_d=0.35$ 以下では造波の影響が無視できる。今回の試験においても C_D が増加し始める点は $d/h=1.5$ 付近からであり、その時の喫水ベースのフルード数は、 $F_d=0.37$ である。

これらから、 d ベースのフルード数が 0.37 以下の条件で実験を行う必要があることが判った。

本研究では、模型の設置条件、模型支持装置の強度などを考慮し、今回の実験状態を曳航速度 0.7 m/s , $d/h=2.5$ を

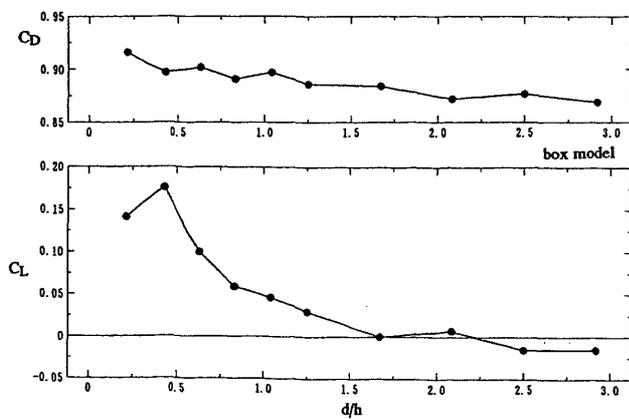


Fig. 3 Effect of free-surface on C_L and C_D , the case of box model.

標準的な条件とした。本実験で模型が最も水面に近づく時の d/h は 1.7 である。乗用車模型では、 $d/h=1.7$ における自由表面影響は、その影響が無視できると思われる $d/h=3.2$ における C_D, C_L に比べ、それぞれ 1% , 5% 程度大きな値となっている。

2.5 レイノルズ数の影響

全長 4.2 m の車が時速 100 km/h で走行した場合、レイノルズ数は $Re=8.0 \times 10^5$ となる。本実験は、曳航速度を 0.7 m/s としたので、その時レイノルズ数 $Re=5.1 \times 10^5$ となり実車のレイノルズ数より一桁低い。層流から乱流への遷移点に近いが、乱流促進用にワイヤーを付けても、抗力に変化のなかったことから、同じ乱流状態であると考えら

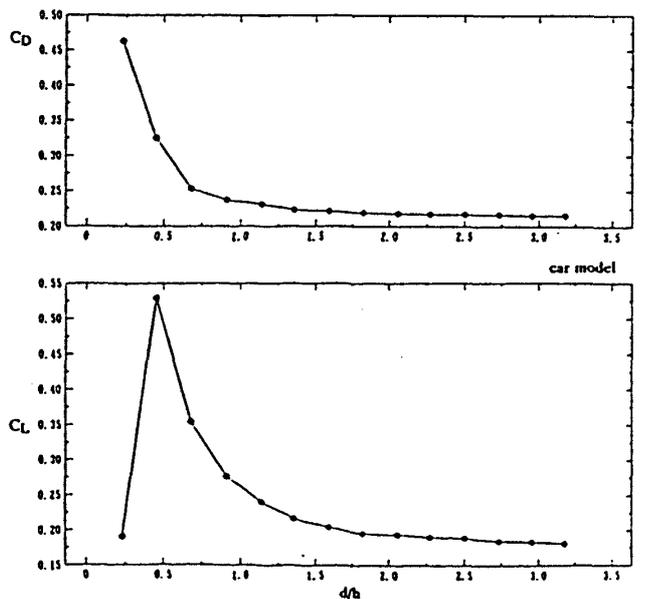


Fig. 4 same as Fig. 3, the case of a car model.

れる。

仮底を取り除いた水槽において、没水度の影響が無視できる $d/h=3.0$ の状態で $Re=2.2 \times 10^5$ から 1.5×10^6 まで変化させ、乗用車模型におけるレイノルズ数影響を調べた。その結果を Fig. 5 に示す。曳航速度が 0.7 m/s の場合、 C_D 、 C_L 値はそれぞれ $C_D=0.22$ 、 $C_L=0.18$ であった。図中の C_f は、Schoenherr の摩擦係数である。 C_D の変化は、 C_f の変化とよく一致している。 Δ 印は、計測した C_D から摩擦成分を引いたものであり、ほぼ一定値となる。レイノルズ数の異なった実験結果を比較する場合は、乗用車のような blunt 形状物体でも船の場合と同様に、レイノルズ数の変化による摩擦抵抗の変化を修正した方が好ましいと考えられる。乗用車模型の場合、車の表面積から推定した摩擦抵抗は、全抵抗の約 35% となる。

3. 箱型模型に加わる流体力

実験状態は、曳航速度 0.7 m/s 、レイノルズ数 $Re=3.1 \times 10^5$ で行い、地面と模型底面との clearance L_c や迎え角、yaw 角を変化させ、3分力計により drag, lift, side force を計測した。各々の力を模型の前面投影面積 A で無次元化した。

抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L 、横力係数 C_Y は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} C_D &= D/1/2\rho V^2 A & D: \text{drag} \\ C_L &= L/1/2\rho V^2 A & L: \text{lift} \\ C_Y &= Y/1/2\rho V^2 A & Y: \text{side force} \end{aligned}$$

ここで ρ は、水の密度、 V は、速度である。

3.1 迎え角と yaw 角のない場合

迎え角と yaw 角のない場合における C_D 、 C_L の計測結果を Fig. 6 に示す。横軸 L_c/h は、地面と模型底面との clearance L_c を模型高さ h で無次元化したものである。

抗力係数 C_D は、地面と模型底面との clearance を変化させても $C_D=0.9 \pm 0.02$ の範囲にあり、ほぼ一定値を保つ。他方、揚力係数 C_L は、その影響を強く受けている。 $L_c/h=0.02$ で lift (上向きの揚力) になり clearance が大きくなるにつれ急激に down force (下向きの揚力) に変化をする。 $L_c/h=0.2$ 付近で急激な流れの変化があることが予想され

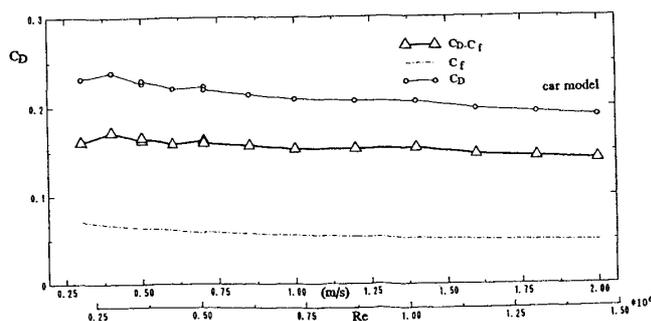


Fig. 5 Effect of Reynolds number on C_D .

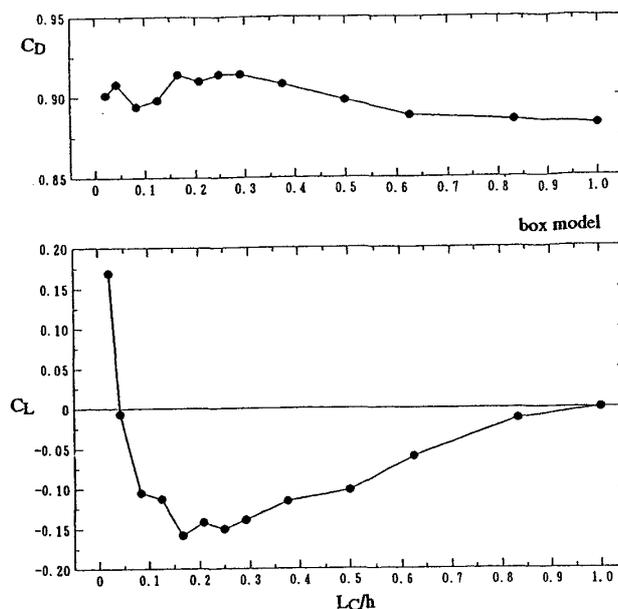


Fig. 6 Variation of C_D and C_L at various clearance from the bottom wall.

る。流れの様子については次章で述べる。

3.2 yaw 角をつけた場合

yaw 角 $\beta=10 \text{ deg}$ をつけた場合における C_D 、 C_L 、 C_Y の計測結果を Fig. 7 に示す。 C_D は、yaw 角をつけた場合、 $\beta=0 \text{ deg}$ にくらべ 10 数% 増大するがその傾向は変わらない。 C_L は、yaw 角をつけない場合に比べ、down force が約 1/2 となり、その最大値は $L_c/h=0.2$ から 0.4 へ移動する。 C_Y は、 C_L が lift から急激に down force に変化するのに対応して増大し、 $L_c/h=0.2 \sim 0.35$ で最大となり、その後、緩やかに減少する。 C_L が最小となるところで C_Y が最大となるのは興味深い。

3.3 迎え角をつけた場合

模型中心において、実車の走行状態のクリアランス (5 cm) に相当する $L_c/h=0.208$ を一定に保ち、迎え角 α を変化させ C_D 、 C_L を計測した。その結果を Fig. 8 に示す。模型の前面が上がる方向が正の迎え角である。 C_D は、 $\alpha=0 \text{ deg}$ で最小値をとり、正負の迎え角で C_D は共に増加する。 C_L は、迎え角が大きくなるにつれ直線的に増加する。

3.4 迎え角と yaw 角をつけた場合

yaw 角 $\beta=10 \text{ deg}$ をつけ、迎え角を変化させた場合の結果を Fig. 9 に示す。 $L_c/h=0.104, 0.208, 0.67$ である。 C_D は、yaw 角をつけない場合に比べいずれの L_c/h においても 15%~20% 程度増大する。 C_L は yaw 角をつけない場合と同様に、迎え角が大きくなるにつれ直線的に増加しているが、yaw 角をつけない場合は、迎え角 $\alpha=3 \text{ deg}$ で $C_L=0$ になったのに対し、yaw 角をつけた場合は、迎え角 $\alpha=0 \text{ deg}$ で $C_L=0$ となる。 C_Y は、 $L_c/h=0.104$ では迎え角が大きくなるに従い、やや増加する傾向にあるが、 $L_c/h=0.208$ 以上では、迎え角を変化させてもほぼ一定値を保つ。

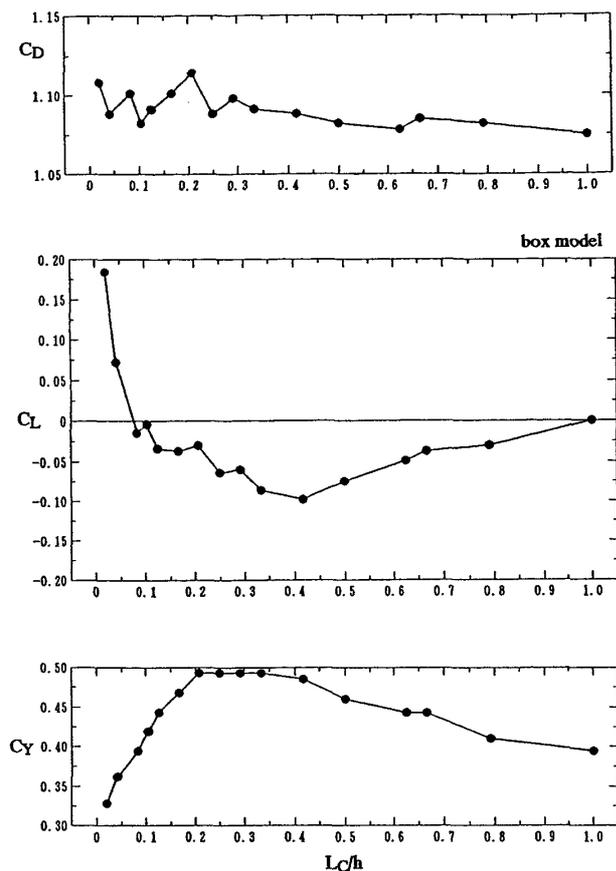


Fig. 7 Variation of C_D , C_L and C_Y at various clearane from the bottom wall when yaw angle is set at 10 deg.

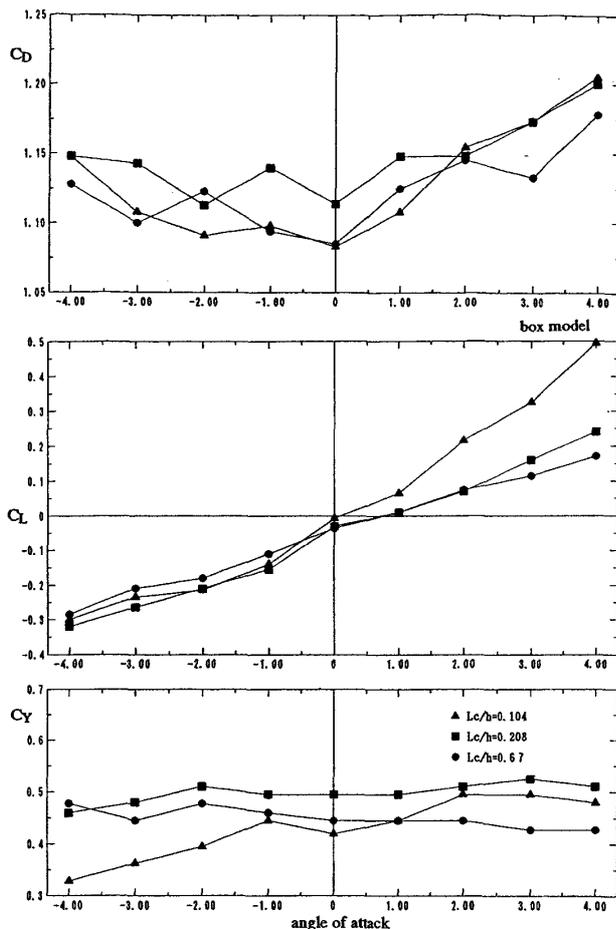


Fig. 9 Variation of C_D , C_L and C_Y at various angle of attack when yaw angle is set at 10 deg, $L_c/h=0.104, 0.208$ and 0.67 .

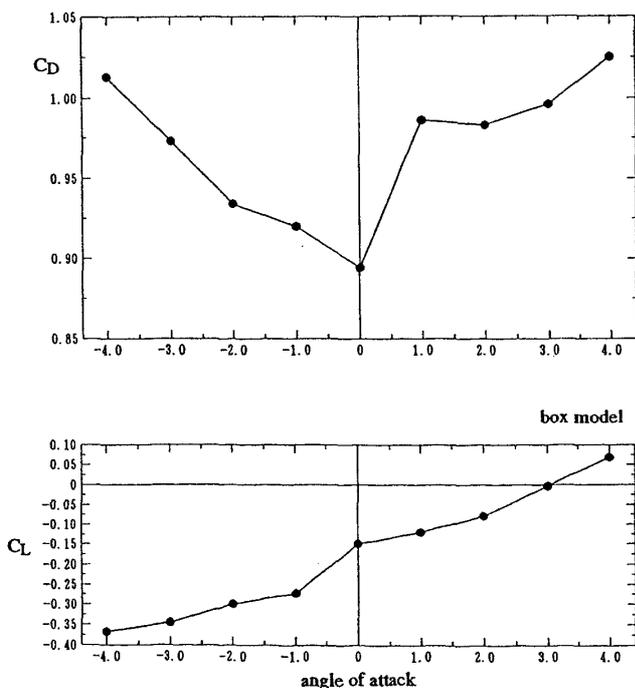


Fig. 8 Variation of C_D and C_L at various angle of attack, $L_c/h=0.208$.

4. 箱型模型まわりの流れ

4.1 底面近くの流れ

box 模型の底面を可視化した写真が Fig. 10 である。流れの方向を矢印で示す。写真(a)は $L_c/h=0.04$ で模型底面が最も地面に近づいて大きな lift が発生し、写真(b)は $L_c/h=0.208$ で down force が最大になる状態での可視化写真である。clearance が $L_c=1$ cm では模型底面近傍に写真(a)のように大きな渦が生成される。しかし、地面と模型底面の clearance が $L_c=5$ cm になると急激にその渦は弱まり滑らかな流れとなる。Fig. 11 は、模型の中央縦断面を可視化した写真である。流れは、紙面から読者に向かって流れている。(a), (b)は、Fig. 10 と同状態で(c)は、 $L_c/h=0.67$ である。

写真(a)では、模型側面から大規模な縦渦が発生し、地面と干渉して上下非対称の流れを作っていることが判る。地面と模型底面の clearance が増すに従い、その縦渦は模型全体の側面に拡散され縦渦成分も弱まり、最終的には軸対称の渦になる。(c)の状態での流れの様子は地面のない状

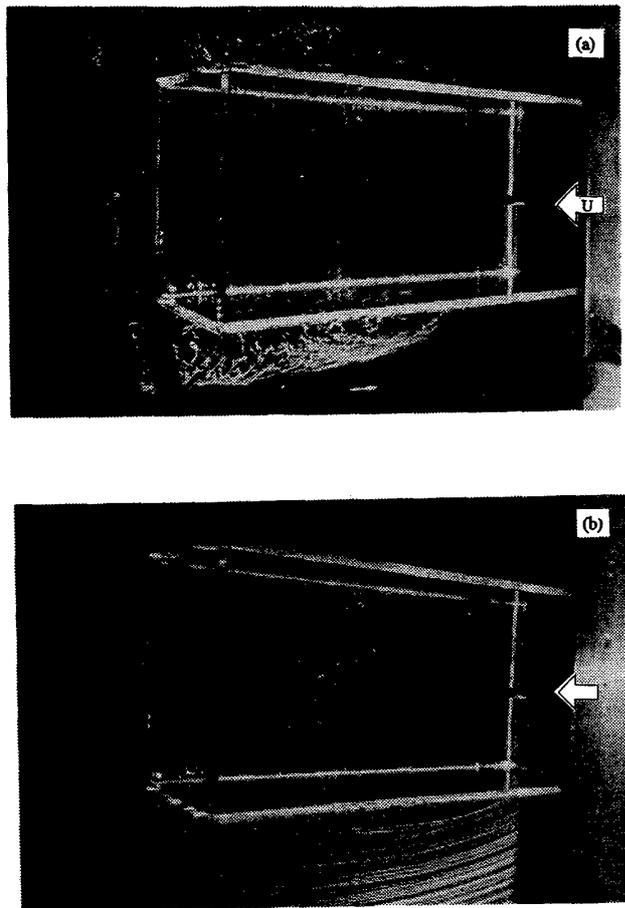


Fig. 10 Visualized flow on the lower surface of the model, (a) $L_c/h=0.04$, (b) $L_c/h=0.208$.

態に近い。down force が最大になる (b) では底面の流れが明瞭に可視化されていないが、模型上面よりスムーズな流れになっており、一種のベンチュリー効果により down force が発生すると考えられる。

Fig. 12 に物体後方断面での可視化写真を示す。Fig. 11 に対応した状態である。(b)の状態では、後方に伸びた縦渦が地面に接しており、放出渦が後方で地面と干渉して接近することが判る。供試模型は直方体であるので各種の縦渦と横渦が発生することが容易に想像され、流体力はすべてこれらの影響を受ける⁹⁾。進行軸を含む垂直断面での可視化写真を Fig. 13, 14 に示す。物体後面上、上面上 (Fig. 13), さらに物体側面上 (Fig. 14) に横渦 (ω_y, ω_z) が顕著に発生することが判る。Fig. 11, 12 に見られる縦渦と、これらが複雑な渦流場を形成していると言える。

5. 乗用車模型に加わる流体力

5.1 抗力・揚力・横力

乗用車模型に加わる流体力の計測を、曳航速度 $V=0.7$ m/s, $Re=5.1 \times 10^5$ で行った。yaw 角のない場合における C_D, C_L の計測結果を Fig. 15 に示す。 C_D は、 L_c/h が大きく

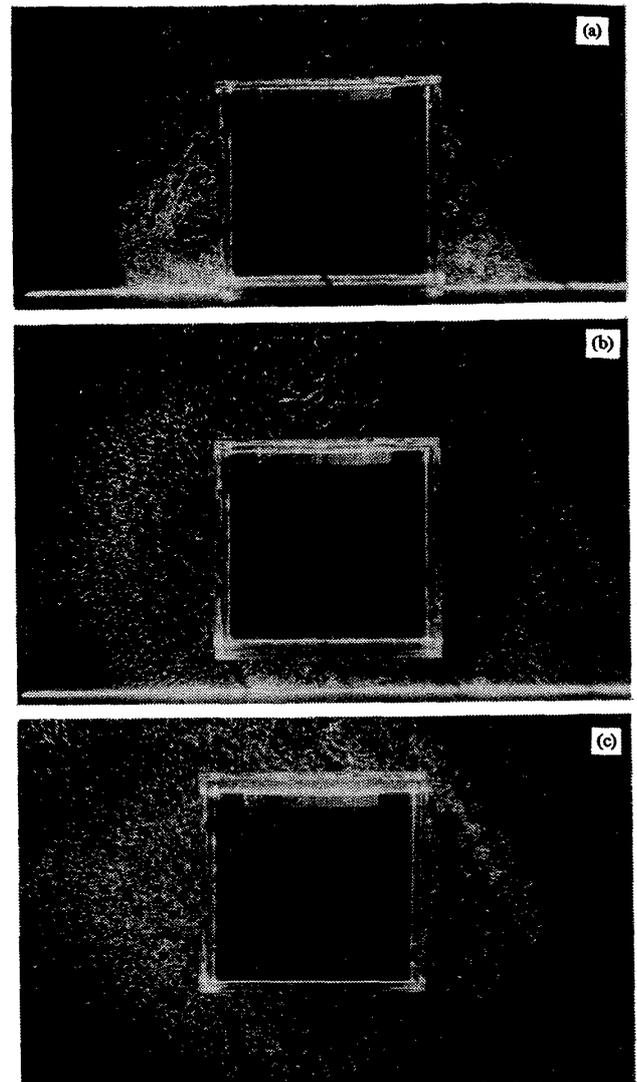


Fig. 11 Visualized flow field at the cross section 330 mm behind the fore-end of the moel, (a) $L_c/h=0.02$, (b) $L_c/h=0.208$ and (c) $L_c/h=0.67$.

なるに従い、徐々に増加し、地面がない場合の $C_D=0.22$ に近づいてくる。 C_L は、clearance の増加にともなって $L_c/h=0.05$ で最小値をとった後、急激な増加に転じ、 $L_c/h=0.25$ で零 lift となり、そこから緩やかに増加する。乗用車模型は、box 模型と異なり模型断面形状が翼形に近いため地面のない場合でも $C_L=0.2$ 程度の値をとる。

yaw 角 10 deg における C_D, C_L, C_Y の計測結果を Fig. 16 に示す。 C_D, C_L とも、yaw 角をつけたことによる特性の変化は余り見られないが、 C_Y は clearance の減少にともなって急激に増加する。この clearance の減少による横力の急激な増加は直進安定性の面から注意が必要と思われる。

5.2 流体力の風洞実験との比較

乗用車模型の風洞試験を日本自動車研究所の測定部開放型模型風洞で実施した。風洞の計測部分の寸法は 0.6 m \times 0.6 m \times 1.2 m の開放型である。 C_D について風洞試験との

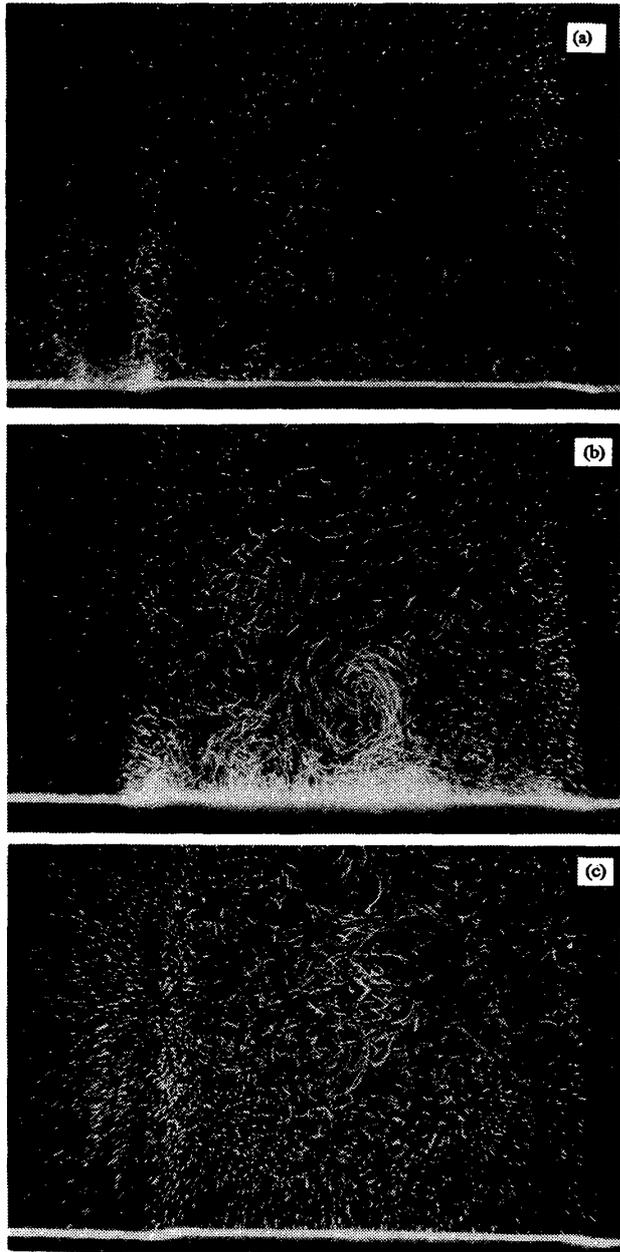


Fig. 12 Visualized flow field at the cross section 150 mm behind the after-end, (a) $L_c/h=0.02$, (b) $L_c/h=0.208$ and (c) $L_c/h=0.67$.

比較を Fig. 17 に示す。実験のレイノルズ数は $R_e=1.4 \times 10^6$ である。水槽試験における C_D 値は、レイノルズ数が $R_e=5.1 \times 10^5$ であるので、風洞試験のレイノルズ数に合わせ摩擦抵抗成分を修正した。水槽試験と風洞試験の C_D を比較すると水槽試験結果が 10% あまり大きい値となっている。この原因は、十分明らかでない。風洞試験における測定誤差やブロックの影響なども考えられる。地面近傍の流れの影響を強く受ける C_L についての水槽及び風洞試験の比較を Fig. 18 に示す。clearance の変化による C_L の変化の傾向は両者の試験とも一致しているが、風洞試験では、固定地面、moving belt 法の順に、水槽試験結果に近

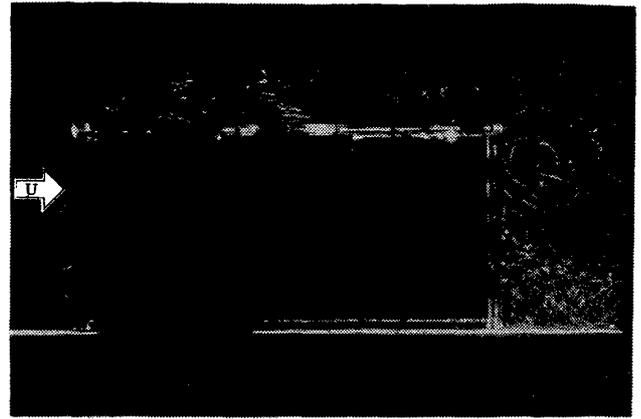


Fig. 13 Visualized flow field on the centerline, $L_c/h=0.02$.

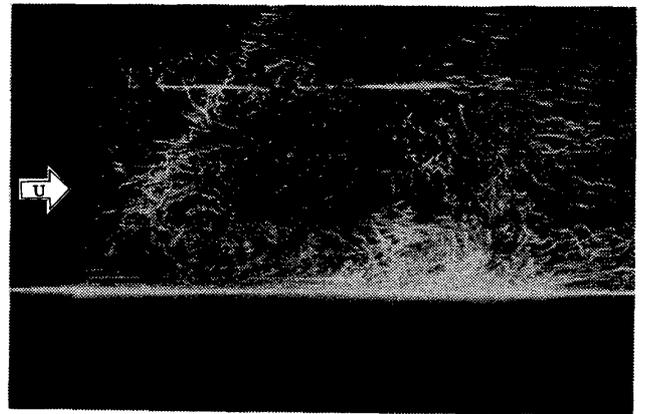


Fig. 14 Visualized flow field on the side surface of the model.

づく傾向にある。これらの傾向は、地面近傍の流れの違いによるものと思われる。風洞の固定地面では、地面付近に境界層が発達し、moving belt 法ではその境界層を加速しているが完全な一様流にはなっていない。水槽試験では、境界層はなく、完全な一様流と考えてよい。地面近くを進行する物体に働く流体力の内、特に揚力は地面近くの流れの影響を強く受け、moving belt を使用してもその影響を除去できないことが示されていると思われる。

5.3 可視化例

乗用車模型の水槽における可視化例を Fig. 19 に示す。車の背面以外では、物体に沿った流れとなっている。逆流域の流れの様子が明瞭に車の後部で観察される。風洞における可視化では煙トレーサーによる可視化が一般的に行われているが、高レイノルズ数流れでは煙トレーサーが拡散し逆流域の流れを観察することは極めて困難である。本実験のような簡単な方法で可視化が出来ることも水槽の特色である。

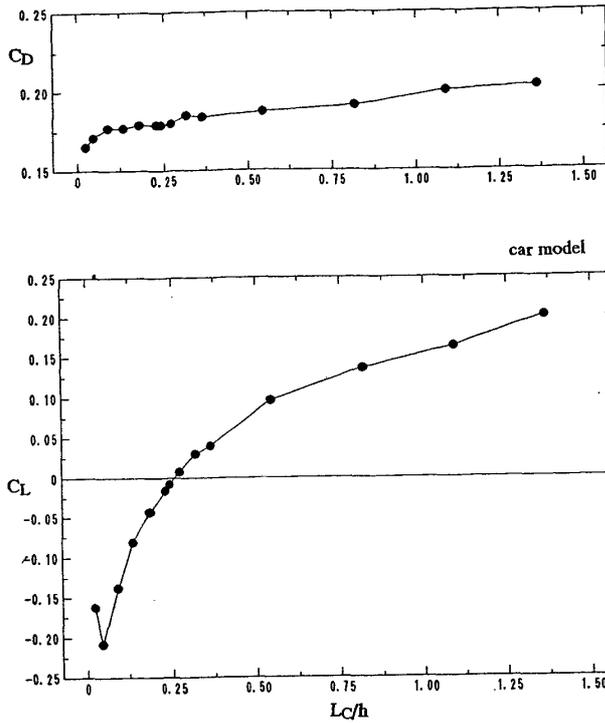


Fig. 15 Variation of C_D and C_L at various clearance from the bottom wall.

6. 結 論

地面効果を受ける進行物体に働く流体力を計測する方法として、水槽中に仮底を設け、模型を三分力計に固定して曳引する方法を試みた。単純形状の例として箱型模型を、複雑な形状の例として、乗用車模型を用い、力の計測、流れの可視化を行った。乗用車模型に関しては風洞試験も行い、水槽試験と比較した結果、次のことが明かとなった。

- 1) 曳航水槽による試験法は、地面効果を受ける進行物体の流体力の計測法として有効である。

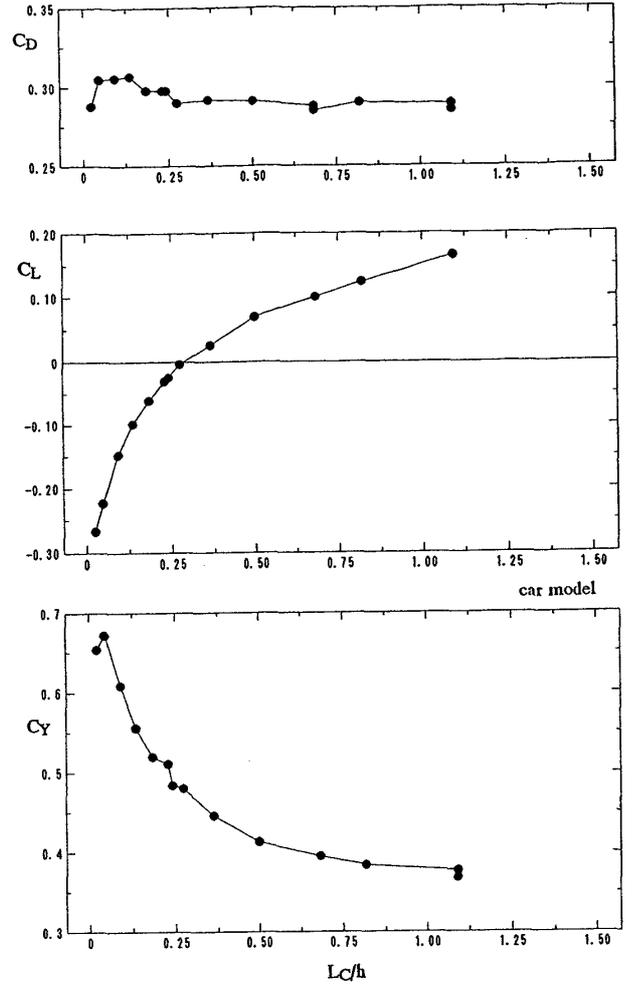


Fig. 16 Variation of C_D , C_L and C_Y at various clearance when the yaw angle is set at 10 deg.

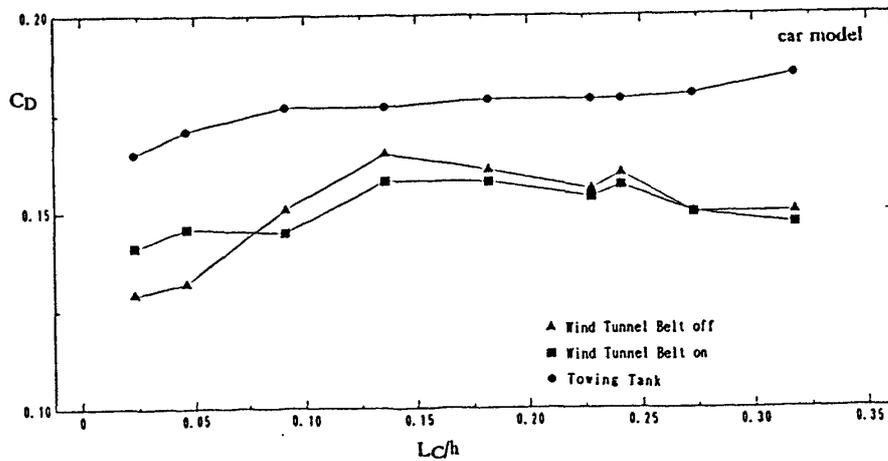


Fig. 17 Comparison of C_D between towing tank experiment and wind tunnel experiment.

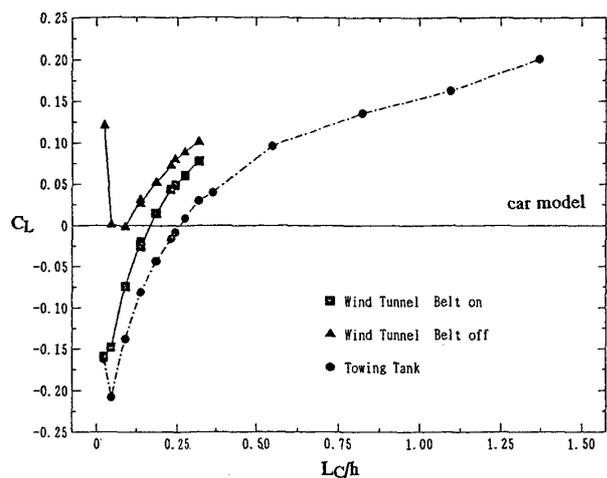


Fig. 18 Comparison of C_L between towing tank experiment and wind tunnel experiment.

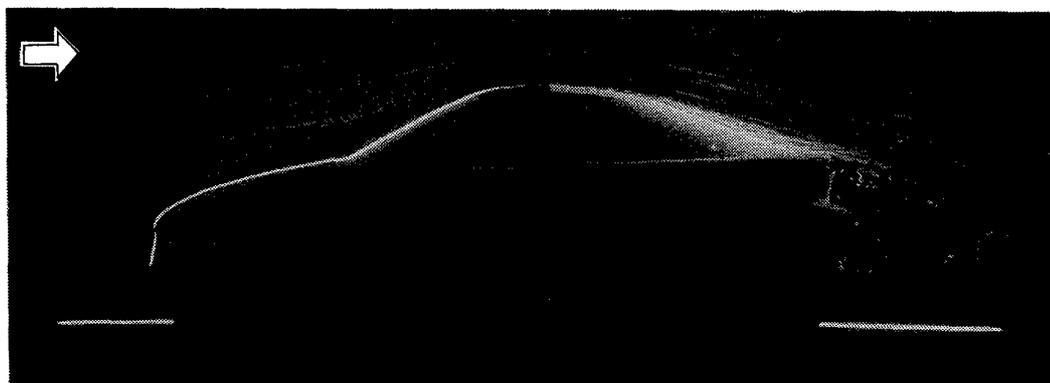


Fig. 19 Visualized flow field on the centerline, $L_c/h = 0.24$.

参考文献

- 1) W. H. Hucho: Aerodynamics of Road Vehicles, Butterworths, 1987.
- 2) K. Buring, P. C. Adey and J. P. Beatham: Wind Tunnel Tests on Road Vehicle Models Using a Moving Belt Simulation of Ground Effect, J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 22, Nos. 2-3, 1986.
- 3) M. Sardou: "Reynolds Effect" and "Moving Ground Effect" Tested in a Quarter Scale Wind Tunnel Over a High Speed Moving Belt, J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 22, Nos. 2-3, 1986.
- 4) 今泉, 吉田, 武藤: 風洞試験における移動地面効果について, 自動車技術, Vol. 44, No 3, 1990.
- 5) L. Larsson et. al.: A Study of Gound Simulation-Correlation Between Wind-Tunnel and Water-Basin Tests of Full-Scale Car, SAE Paper 890368, 1989.
- 6) M. L. Vorwaller and J.G. Geoff: Aerodynamic Drag Studies on Rolling Vehicles by Underwater Tow Testing, SAE Paper 860091, 1986.
- 7) 別所正利: 没水回転楕円体の造波抵抗について, 日本造船学会論文集, 第 109 号, 昭和 36 年.
- 8) 松永圭司: 矩形格子による壁面近傍進行物体まわり流れのシミュレーション, 東京大学工学部修士論文, 1991.