

# 横風を受ける鉄道車輛まわりの流れ

Flow around Train in Lateral Wind

玉野美和 (Miwa TAMANO)

お茶の水女子大学大学院 人間文化創成科学研究科

河村哲也 (Tetuya KAWAMURA)

お茶の水女子大学大学院 人間文化創成科学研究科

## 1 はじめに

鉄道車輛の横転事故は一般に被害が甚大である。横転事故の要因は様々であるが、突風等の自然現象が寄与すること多いと考えられる。そこで列車を題材にとり、横風を受ける停止中の車輛まわりの流れの解析および、横風が車輛に及ぼす力の考察を目的とする。

## 2 計算方法

停止した鉄道車輛周りの大気の流れは非圧縮性流体と仮定できるため、連続の式 (1) と非圧縮性 Navier-Stokes 方程式 (2) を基礎方程式として解析することができる。

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{V} \quad (2)$$

$\mathbf{V}$ : 速度  $t$ : 時間  $p$ : 圧力  $Re$ : レイノルズ数

これらの方程式を、MAC 法を用いて数値的に解いた。そして、数値的に解く過程で得られる圧力を用い、式 (3) により車輛の各壁面が受ける力の計算を行う。

$$\mathbf{F} = \oint_{\text{車輛}} d\mathbf{f} \doteq \sum_i \Delta \mathbf{f}_i \quad (3)$$

$\mathbf{F}$ : 車輛に働く圧力による力  $\mathbf{f}_i$ :  $i$  番目の要素に働く圧力による力

また、横転現象については、抗力、揚力、車輛の風下側下端まわりの力のモーメントが影響すると考えられるため、これらの量を求める。

ここで、車輛に作用する抗力は、 $\mathbf{F}$  の水平方向成分、 $\mathbf{F}$  の鉛直方向成分である。

以上から求められた抗力と揚力を、それぞれ (4) 式、(5) 式に代入し、抗力係数、揚力係数を求める。

$$C_D = \frac{D}{0.5\rho U^2 A} \quad (4)$$

$$C_L = \frac{L}{0.5\rho U^2 A} \quad (5)$$

$C_D$ : 抗力係数  $C_L$ : 揚力係数  $D$ : 抗力  $L$ : 揚力  
 $\rho$ : 密度  $U$ : 一様流の速度  $A$ : 代表面積

式 (3) で求めた力を用いて、風下側の下端まわりの力のモーメントを式 (6) により計算する。ここで求められるモーメントは、時計回りの回転を正とする。また、この回転は縦揺れモーメントであるので、式 (7) を用いて縦揺れモーメント係数を求める。

$$N = \oint_{\text{車輪}} \mathbf{r} \times d\mathbf{f} \doteq \sum_i \mathbf{r}_i \times d\mathbf{f}_i \quad (6)$$

$$C_{N_z} = \frac{N_z}{0.5\rho U^2 A l} \quad (7)$$

$N$ : ある基準点まわりの力のモーメント  $\mathbf{r}$ : 基準点と作用点の位置を表すベクトル  $\mathbf{F}_i$ :  $i$  番目の要素に働く力の大きさ  $\mathbf{r}_i$ :  $i$  番目の要素の位置ベクトル  $C_{N_z}$ : 縦揺れモーメント係数  $N_z$ :  $N$  の車輪断面に垂直方向成分  $\rho$ : 密度  $U$ : 一様流の速度  $A$ : 代表面積  $l$ : 物体長さ

なお、抗力係数、揚力係数、縦揺れモーメント係数の時間平均値は、圧力場が安定する 10000 ステップ以降の値を用いて計算する。

### 3 平地上での車輪周りの流れ

#### 3.1 モデル化

傾いた車輪を対象としてシミュレーションを行う。車輪形状は正方形 (図 1), 風は上流側では地面に平行な一様流を想定している。計算領域は、車輪の先頭に平行に切断した断面を含む 2 次元長方形領域とした。傾いた車輪を実現するため、座標系は一般座標系とし、車輪の一辺、領域の x 方向の長さ、y 方向の長さの比を 1:22:10 とした。また、車輪に迎え角を与えられるようにし、車輪周りの流れを詳しく解析するため、車輪周りは細かく、領域の端に行くにしたがって粗くなる格子を生成した。図 2 には、迎え角 10 度の車輪と領域全体を示した図を、図 3 には、その場合の計算格子を示す。

grid 320 x 220 x 1

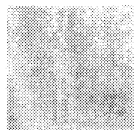


図 1: 車輪

grid 320 x 220 x 1



図 2: 車輪の領域比

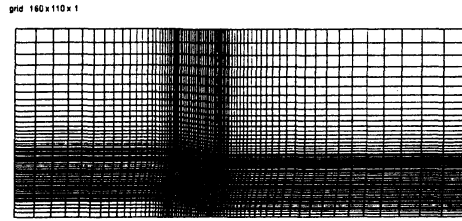


図 3: 計算格子例

車両の傾きと車両の側面が横風から受ける力との関係を調べるため、車両の傾きを0度から5度ずつ増やし、35度までの流れ場について検証を行う。また、地面から車両までの高さで車両の側面が横風から受ける力との関係を調べるため、正方形の1辺の長さを基準に取り、基準に対し5%ずつ高さを上げ、各ケースの流れ場を比較する。

## 3.2 正当性の検証

### 3.2.1 仮定

今回用いた計算手法の正当性を示すため、計算結果と実験結果との比較を行った。ここで、迎え角0度の正方形車両の形状は長方形断面柱の特殊な場合と捉えられるため、長方形断面柱の抗力係数  $C_D$  を実験結果、図4を比較対象とした。この実験結果より既知の事

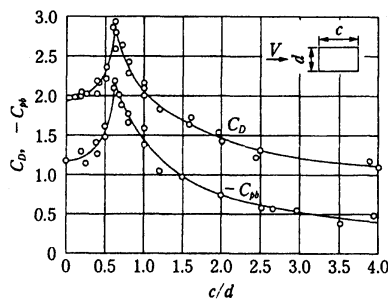


図 8・49 長方形断面柱の抗力係数と背圧係数

図 4: 長方形断面柱の抗力係数

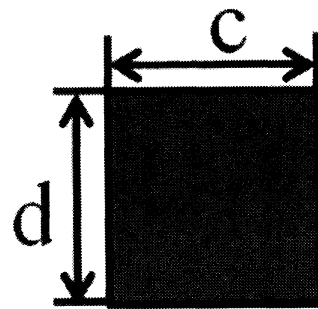


図 5: 辺長比

項として、以下の3点が挙げられる。

1. 辺長を代表長さとするレイノルズ数が  $10^4 \sim 10^5$  の範囲で、抗力係数にはレイノルズ数の影響が及ばない
2. 抗力係数は、辺長比  $c/d$  (図5) 0.6~0.7 付近で極大値を取る
3. 本研究では正方形の車両を仮定しているため、辺長比 1.0 の値が重要となる。実験結果図4から、辺長比 1.0 における抗力係数は 2.0~2.5 の範囲である。

また、計算結果に対し、以上の2.3.について検証を行う。計算条件として、レイノルズ数は、上記の1.よりレイノルズ数の影響を受けないとされる  $10^4$  とし、境界の影響を軽減するために領域の鉛直方向中央部に車両を置くこととする。また、境界の影響を受けないことを重視し、辺長比 0.1~2.0 の範囲で計算を行う。

### 3.2.2 検証結果

以下が実験結果（図6）と今回の計算結果（図7）である。

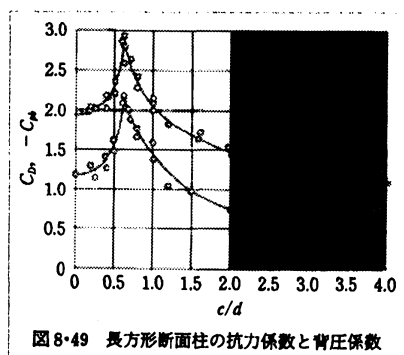


図 6: 実験結果

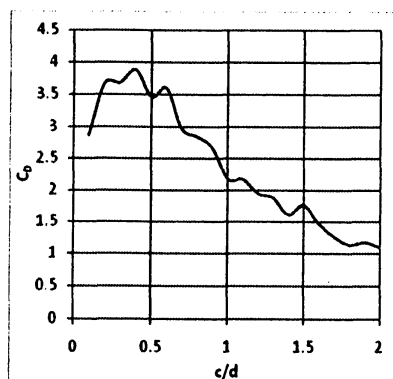


図 7: 計算結果

0.6～0.7の範囲で極大値を取ること、辺長比1.0において係数値が2～2.5の値をとること、どちらも計算により再現できている。したがって、計算手法は妥当であるといえる。

### 3.3 車輻の迎え角と車輻周りの流れ場との関係

鉛直方向の車輻位置を一定に保ち、迎え角を変化させた際に、各種係数値にどのような影響が表れるかを調べる。鉛直方向の位置別に計算を行った結果は以下、図8～図16である。（x軸：車輻の迎え角，y軸：各種係数値）

図8～図16より、鉛直方向の車輻位置を固定した場合、どのような位置であっても、迎え角の増加に伴い抗力と力のモーメントの平均がほぼ単調に増加することが、図8～図16より確認できる。これは、迎え角が増加するのに従って、風上側では風が直接当たる面積が大きくなり、一方風下側では後流部にできる渦の影響を受ける面積が小さくなるためと考えられる。

参考のため、図17に傾き0度の車輻周りの流れ場の様子を、図18に傾き30度の車輻周りの流れ場の様子を、ともに車輻の地面からの高さが車輻1辺の60%と仮定とした場合の圧力分布により示す。

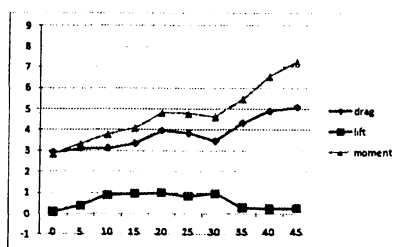


図 8: 高さ 0.25

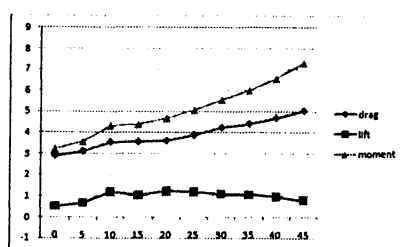


図 9: 高さ 0.4

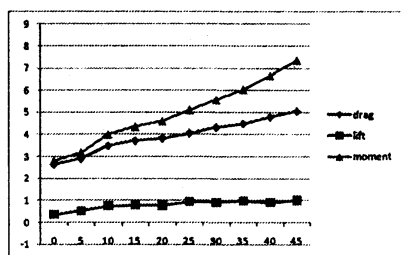


図 10: 高さ 0.5

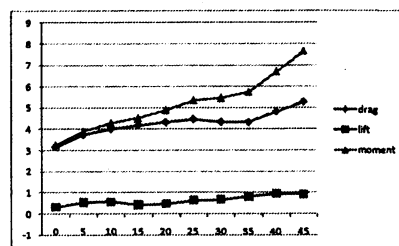


図 11: 高さ 0.6

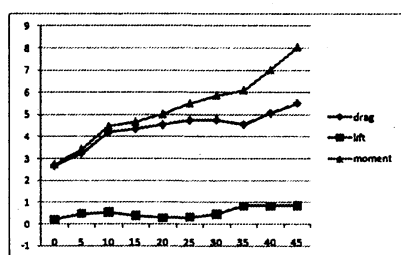


図 12: 高さ 0.7

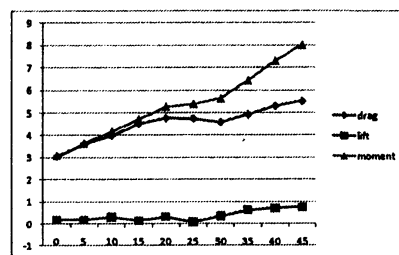


図 13: 高さ 0.8

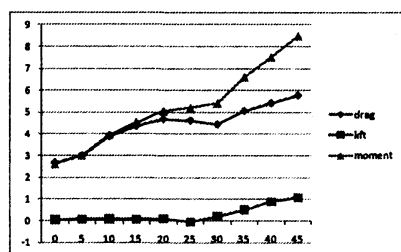


図 14: 高さ 0.9

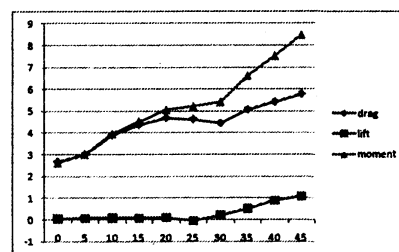


図 15: 高さ 1.0

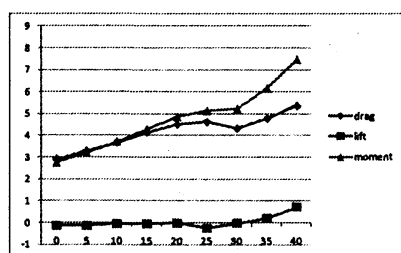


図 16: 高さ 1.1

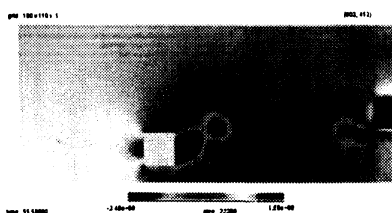


図 17: 迎え角 0 度の車輻まわりの流れ場

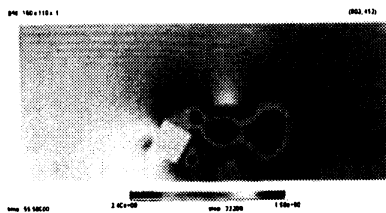


図 18: 迎え角 30 度の車輻まわりの流れ場

### 3.4 車輻の鉛直方向位置と車輻周りの流れ場との関係

迎え角を一定に保ち、車輻の鉛直方向位置を変化させた際に、各種の空力係数値にどのような影響が表れるかを調べる。鉛直方向の位置別に計算を行った結果を図 19～図 26 に示す。(x 軸：車輻の鉛直方向位置、y 軸：各種係数値)

図 19～図 26 より、揚力係数が鉛直方向位置 0.4 前後で最大となり、0.4 以降は車輻の上昇に伴って減少した。これは、地面との距離が近すぎると車輻の下に風が入りにくく、遠くなると地面からの影響を受けにくくなるためだと推測できる。

ここで、参考のため、図 27 に鉛直方向位置 0.4 の車輻周りの流れ場の様子を、図 28 に鉛直方向位置 1 の車輻周りの流れ場の様子を、ともに車輻の迎え角を 30 度と仮定し、圧力分布表示で示す。この結果より、鉛直方向位置 0.4 の場合の方が、より高圧の部分が多いことが確認出来る。

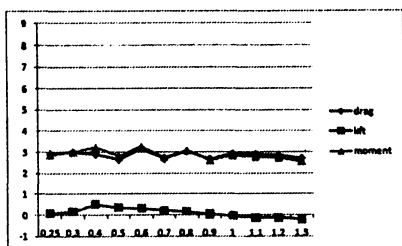


図 19: 迎え角 0 度

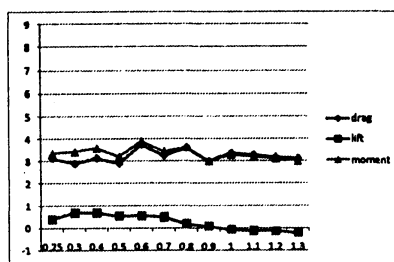


図 20: 迎え角 5 度

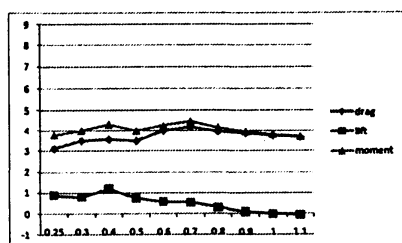


図 21: 迎え角 10 度

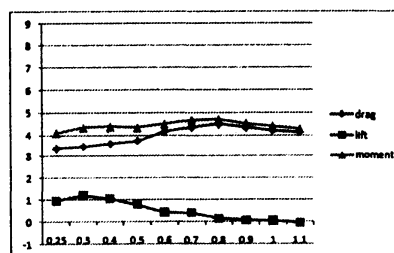


図 22: 迎え角 15 度

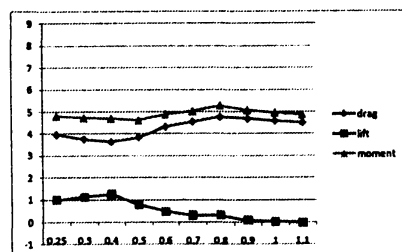


図 23: 迎え角 20 度

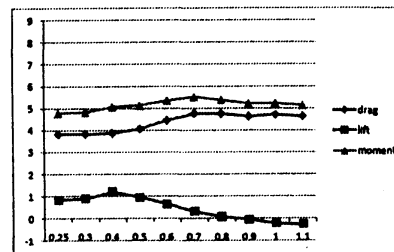


図 24: 迎え角 25 度

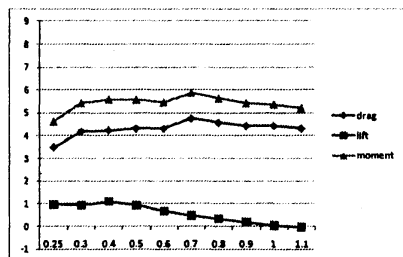


図 25: 迎え角 30 度

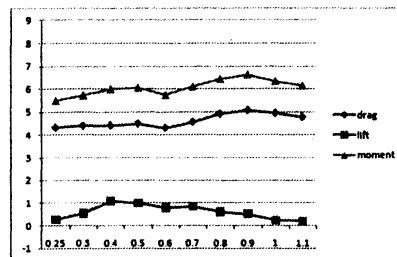


図 26: 迎え角 35 度

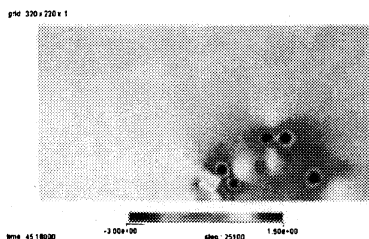


図 27: 高さ 0.4 の車輛まわりの流れ場

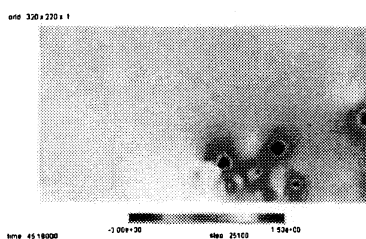


図 28: 高さ 1 の車輛まわりの流れ場

## 4 地形と車輛形状の影響

### 4.1 モデル化

車輛の形状を変え、2つのケースについてシミュレーションを行った。1つ目は地形の変化による影響、2つ目は正方形車輛との比較を目的としたものである。ここでの車輛形状は一般的な通勤車両（図 29）、風は上流部では地面に平行な一様流を想定している。また、計算領域は、車輛の先頭に平行に切断した断面を含む2次元長方形領域とした。計算領域は車輛断面に及ぼされる境界の影響を最小限に留めるため、48m×39mの平面を想定し、後流領域を広くとった。車輛断面は1辺3mの正方形から四隅を切り取った形とした（図 29）。

節 4.3 では、一般的に線路がある地形を想定し、盛り土（図 30）、高架（橋脚有／図 31、橋脚無／図 32）を仮定した。節 4.4 では、車輛として本研究で想定した車輛（図 29）と、正方形（図 1）を用いた。

grid 481 x 421 x 1

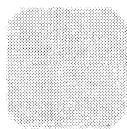


図 29: 車輛

grid 481 x 421 x 1

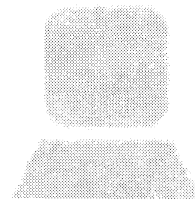


図 30: 盛り土

gnd. 481 x 421 x 1



図 31: 高架（橋脚有）

gnd. 481 x 421 x 1

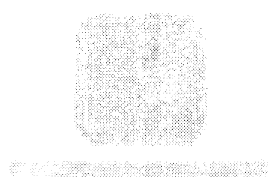


図 32: 高架（橋脚無）

## 4.2 格子生成

座標系は2次元直交座標系とし、車輛の一边、領域のx方向、y方向の長さの比を1:20:15とした。また、車輛周りの流れを詳しく解析するため、車輛周りには細かい等間隔格子を、他の部分には端に行くにしたがって粗くなる不等間隔格子を用いた。そして、領域の左端から一様な速さの風が流れ込むと仮定した。また、計算式と手法は前節と同様で、2節に示した通りである。ここで、車輛を平地上に置いた時の車輛と計算領域の大きさ及び位置の関係を図34に示す。

gnd. 481 x 421 x 1

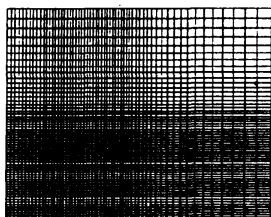


図 33: 計算格子

gnd. 481 x 421 x 1

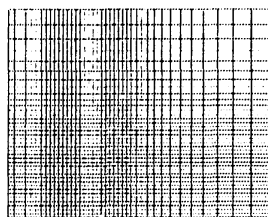


図 34: 車輛の領域比

## 4.3 各地形上の車輛についての比較

平地（図34）、盛り土（図30）、高架（橋脚有／図31、橋脚無／図32）上に停止している車輛に作用する、力、モーメントの係数の平均値を比較する。いずれもレイノルズ数は2000とした。以下表1が各種の空力係数の時間平均値、図35が平均値をグラフ化したものである。

表1より、平地上に車輛がある時、全ての係数の値が最も小さく、続いて高架（橋脚無）上に車輛がある場合の値が小さくなっているため、これらは比較的安全である。一方、盛り土上に車輛がある場合には揚力係数の値が、高架（橋脚有）上に車輛がある場合には抗力係数、縦揺れモーメント係数がそれぞれ最大となっており、横転の危険性が高いと言える。

表 1: 各地形上の車輻に作用する力の係数

|            | 平地        | 盛り土       |
|------------|-----------|-----------|
| 抗力係数       | 0.9115033 | 1.567939  |
| 揚力係数       | 0.3489384 | 0.8305463 |
| 縦揺れモーメント係数 | -1.248244 | -1.789734 |
|            | 高架（橋脚有）   | 高架（橋脚無）   |
| 抗力係数       | 2.253507  | 1.356152  |
| 揚力係数       | 0.6902807 | 0.6346167 |
| 縦揺れモーメント係数 | -2.121119 | -1.319523 |

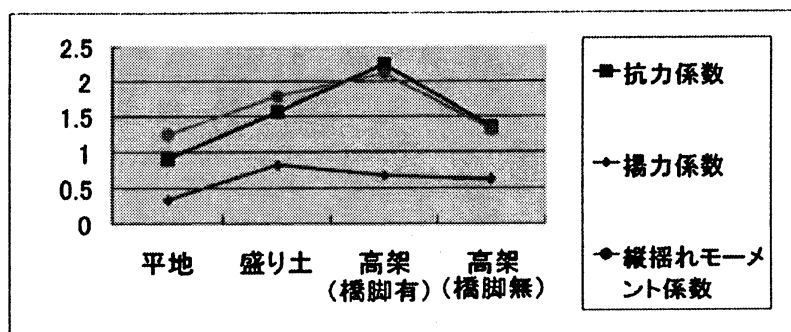


図 35: 平均値グラフ

#### 4.4 車輻形状と車輻にかかる力の係数の関係

本研究で仮定した車輻形状（図 29）と、正方形の車輻とでは車輻に作用する空力係数に相違が存在するか，考察を行った．ここでレイノルズ数を 2000 とし，境界の影響を最小限に留めるため，車輻が宙に浮いた状態を想定し，領域の上下の境界条件を揃えた．また，境界の影響が及ばないという仮定により，揚力，力のモーメントはを調べることはあまり意味を持たないと考えられるので，形状抗力係数のみを考える．

表 2: 各々の形状の車輻に作用する力の係数

|        | 本研究の形状   | 正方形      |
|--------|----------|----------|
| 形状抗力係数 | 1.710438 | 1.995519 |

表 2 より，正方形の車輻にかかる形状抗力係数値は，本研究で想定した形状の車輻にかかる係数値よりも大きいことが読み取れる．

参考のため，同時刻における正方形（図 36）と通勤車両型（図 37）の車輻周りの圧力分布と速度ベクトルを比較すると，正方形の車輻では流れが剥離した点から大きな渦ができ後ろに流れ，一方，通勤車両型の車輻まわりでは，流れが剥離する点が後方に移動し，剥

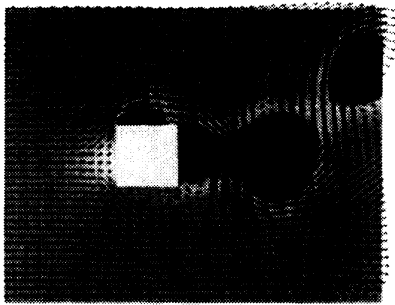


図 36: 正方形車輛周りの流れ

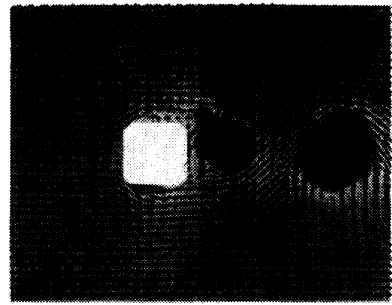


図 37: 通勤車両型車輛周りの流れ

離れた点からは大きな渦ができなかった。したがって、車輛形状が正方形であると、流れ場全体が乱れることがわかった。すなわち、通勤車両の形状は、横風の影響を緩和させる効果があると考えられる。

## 5 まとめと今後の課題

本研究では、車輛の高さ、車輛の迎え角、地形、車輛形状と車輛に働く空力係数との関係が明らかになった。しかし今回は、車輛の壁に働く力を求める場合に、形状抗力のみを考慮し計算を行ったため、定性的な傾向は読み取れたものの、量的な正確さには欠けると言える。また、風を一樣流と仮定し、2次元領域で計算を行っているため、実際の状況とは異なる。

したがって、今後の課題としては、摩擦抗力を考慮すること、風を自然風に近づけること、横風の影響の3次元特性を解析すること、さらに、走行中の車輛に作用する力の考察を目標としたいと考えている。

## 参考文献

- [1] 河村哲也, "数値シミュレーション入門", ISBN4-7819-1134-X, サイエンス社, 2006
- [2] 河村哲也, "流れのシミュレーションの基礎!", ISBN4-381-01452-9, 山海堂, 2002
- [3] 社団法人日本機械学会, "機械工学便覧 基礎編  $\alpha 4$  流体力学", ISBN4-88898-135-3, 2006