

# 突風を受けるトラックの空気力特性

小園 茂平<sup>1)</sup>・柏木 悠己<sup>2)</sup>・山口 靖之<sup>3)</sup>

## Aerodynamic characteristics of trucks under gusty winds

Shigehira Ozono, Yuki Kashiwagi, Yasuyuki Yamaguchi

### Abstract

The aerodynamic characteristics of bluff models subjected to the accelerated flow were investigated with increasing yaw angle. The accelerated flow was generated by using a multi-fan wind tunnel with 99 small fans (9 columns × 11 rows). The models used were rectangular prisms and a scale model of similar shape to a real truck. Two kinds of accelerated flows were applied: one was accelerated from a velocity close to zero and the other from non-zero velocity. Significant overshoot was observed only for the former case.

### Key Words:

Truck, Gusty wind, Aerodynamic force, Yaw angle, Multi-fan wind tunnel, Overshoot

## 1. はじめに

環境問題などの点からエネルギー効率の向上のために自動車の軽量化が進んでいるが、トラックやバスなどの車高の高い自動車が突風の影響を受けると横転することがある。そのため、突風災害対策を考えると横風を受ける車両の耐風性能は重要な問題となっている。今までに2次元的な列車に関しては、急加速時の空気力特性が実験的に調べられたり [1]、渦点法で数値計算により調べられたりしている [2]。3次元的な自動車についても乗用車 [3] やトラック [4] などの車体に関し定常な空気力特性が調べられている。本研究では、直方体模型と実形状に近いトラック模型を用いて、偏揺れ角が変化する時、模型に作用する空気力特性を調べた。

## 2. 風洞装置

本実験では室内開放型押込式（エッフェル型）のマルチファン型風洞を使用した。この風洞の特徴は、気流を複数の小さなファンで駆動することである。ファンの最大径は 270 mm で、縦 11 個 × 横 9 個 = 合計 99 個配置されており、それぞれ独立に制御することができる。

パソコンで作られた信号に従いファンが回転し生じた気流は、隔壁で四面を囲われたそれぞれのダクトを通り独立して縮流され、最終的にハニカム（外径 30 mm、長さ 212 mm）で整流され測定部に至る。縮流比は平均して 1:1.8 である。測定部吹き出し口におけるダクトの寸法は鉛直長さ  $M_Y=164$  mm、水平長さ  $M_Z=282$  mm である。

測定部吹き出し口から 10 m の流下距離の基準断面において気流が一樣となるように調整され、平均風速は ± 2.0 % 以下の非一様性があり、乱れ強度は 2.0 % 以下である。回転数が約 4200rpm まで ( $U = 16.0$  m/s) 風速は線形に増加し、非常に良好な線形性が得られた。

本風洞は八つの可搬洞をそなえており、断面の大きさは全て横 2.54 m × 縦 1.80 m である。それらを組み合わせ測定部長さ  $G$  を最大 15.5 m まで延長できる。本実験は、風速の応答性を高めるために、定常流の測定は 3 個の可搬洞を設置し  $G=6.65$  m、非定常流の測定は 2 個の可搬洞を設置し  $G=4.45$  m の短い測定部を使用した。

その他の風洞の詳細は文献 [5] を参照されたい。

## 3. 測定方法と使用模型

### 3.1 測定方法

図 1 に使用した装置の側面図を示す。風洞上流で発達した境界層の影響を避けるため、直径 800 mm の

1) 宮崎大学材料物理学科 教授

2) 宮崎大学材料物理学科 材料物理工学科

3) 宮崎大学材料物理学科 材料物理工学科

円型木製板を風洞床面から上方に 315 mm 離して設置した。この円板の下部には、下から順にH型鋼（幅 175 mm, 高さ 175 mm, 長さ 175 mm）、スチール板（幅 150 mm, 厚さ 6 mm, 長さ 150 mm）、3分力検出器（最大径 88 mm, 高さ 95 mm）、ジグ（最大径 75 mm, 高さ 22 mm）を設置した。模型の重心は円板中心と一致させた。円板中心には直径 12 mm の穴を開け、模型を 1 本のアルミ棒で支えジグと接続した。

3分力検出器（日章電機, LMC-3501）を直流型歪増幅器（日章電機, DSA-100A）に接続し、得られた電圧はロガー（KEYENCE, NR-600）により AD 変換された。定常流による空気力特性の測定はサンプリング周波数 2000 Hz, サンプリングデータ長 20000 個, また急加速流による空気力特性の測定は, サンプリング周波数 500 Hz, データ長 25000 個で収録した。

図2に使用した装置の平面図を示す。測定部吹き出し口からの流下距離を  $X$  とすると, 定常流では  $X = 5.5$  m に, 非定常流では  $X = 3.5$  m に模型を設置した。偏揺れ角を  $\theta$  とし,  $\theta$  を  $5^\circ$  おきに測定した。3分力検出器から得られた水平方向にかかる力  $F_x$ ,  $F_y$  とそれらの模型横方向への合力である横力  $F_s$  を以下の式で無次元化し,  $F_x$  係数を  $C_x$ ,  $F_y$  係数を  $C_y$ , 横力係数を  $C_s$  とした。

$$C_x = F_x / (1/2 \rho U^2 A) \quad (1)$$

$$C_y = F_y / (1/2 \rho U^2 A) \quad (2)$$

$$C_s = F_s / (1/2 \rho U^2 A) \quad (3)$$

ここで,  $\rho$  は空気の密度,  $A$  は見付け面積,  $U$  は平均流速（加速流では高レベル流速）である。

### 3.2 模型

本研究では, 5種類の直方体模型（ウッドラック製）と実際のトラックに近い形状を持つトラック模型（1/32 2t カスタムトラックシリーズ, 三菱ふそうキャンターワイドギャップ）を使用した。それぞれの寸法を表1に, 特性を表2に示す。

直方体模型をモデル1, モデル2, ... と呼ぶことにする。モデル1~4は断面比を変化させたシリーズである。モデル2とモデル5は同じ断面比についてアスペクト比を変化させたシリーズである。これらの模型と3分力検出器を結合するとバネ-質量系を構成するので, 動的な応答を調べる時は固有振動数を知っておく必要がある。模型を軽く叩き, その変動応力をFFTアナライザー（小野測器 CF-3200）を用いて解析し固有振動数を求めた。空気力測定では, それらの値を参

考に 50 Hz 以下（固有振動数の 1/3 程度）のローパスフィルターを通した。

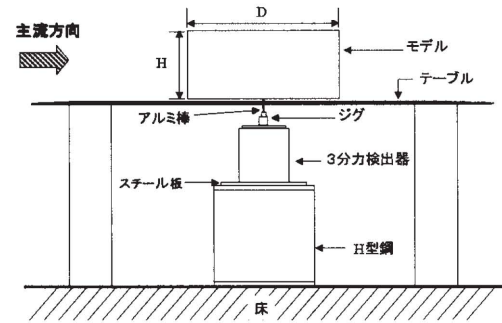


Fig. 1: Experimental apparatus (Side view).

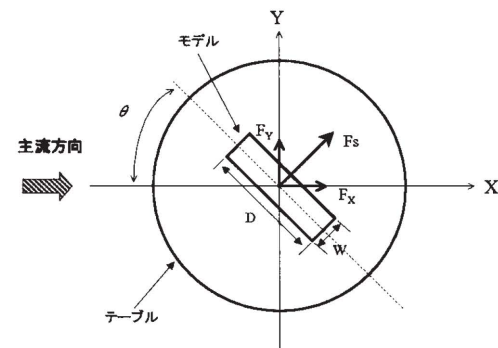


Fig. 2: Experimental apparatus (Plan view).

	W (mm)	H (mm)	D (mm)
モデル1	48	120	264
モデル2	72	120	264
モデル3	96	120	264
モデル4	120	120	264
モデル5	72	120	120
トラック	65	100	250

Table 1: Dimensions of the models used.

	D/H	W/H	固有振動数 (Hz)
モデル1	2.2	0.4	138.1
モデル2	2.2	0.6	133.8
モデル3	2.2	0.8	131.9
モデル4	2.2	1.0	130.0
モデル5	1.0	0.6	139.4
トラック	2.5	0.65	155.0

Table 2: Properties of the models used.

### 3.3 定常流と急加速流の気流特性

#### 3.3.1 定常流

本風洞では入力信号と観測される流速が必ずしも一致しない。入力信号の流速を  $U_{in}$  とする。定常流で用いる  $U_{in}=3.0, 7.0, 10 \text{ m/s}$  の一様流の気流特性を模型設置位置の  $X = 5.5 \text{ m}$  で、急加速流で用いる  $U_{in}=0.1, 5.1, 3.0, 8.0 \text{ m/s}$  の一様流の気流特性を模型設置位置の  $X = 3.5 \text{ m}$  で調べた。ピトー管と熱線流速計 (Kanomax 7000 シリーズ) で流速を測定した。その結果、平均流速と乱れ強度の一様性は良好であった。

#### 3.3.2 急加速・急減速流

図 3 と図 4 は急加速流で使われた入力信号と観測された速度の 1 周期分 50sec の一例を示す。低レベルの流速 (入力) を  $U_1$ 、高レベルの流速 (入力) を  $U_2$  とする時、 $U_1=0.1 \text{ m/s} \rightarrow U_2=5.1 \text{ m/s}$  と  $U_1=3.0 \text{ m/s} \rightarrow U_2=8.0 \text{ m/s}$  の 2 種類のステップ流を使用した。  $\Delta t$  は観測される低レベル流速  $U_{low}$  から高レベル流速  $U_{high}$  に達するまでに要する時間であり、 $U_1=0.1 \text{ m/s} \rightarrow U_2=5.1 \text{ m/s}$  で  $\Delta t = 1.6 \text{ s}$ 、 $U_1=3.0 \text{ m/s} \rightarrow U_2=8.0 \text{ m/s}$  で  $\Delta t = 0.91 \text{ s}$  であった。この時、無次元時間  $\tau$  は  $\tau = \Delta t \cdot U_{high} / D$  と定義される。 $U_1=0.1 \text{ m/s} \rightarrow U_2=5.1 \text{ m/s}$  の時、モデル 2 の  $\tau=30.9$ 、トラック模型の  $\tau=32.5$  であった。 $U_1=3.0 \text{ m/s} \rightarrow U_2=8.0 \text{ m/s}$  の時、モデル 2 の  $\tau=27.6$ 、トラック模型の  $\tau=29.1$  であった。急減速流も急減速流と同様に瞬時に低レベル流速に至るわけではなく、むしろ急加速流よりも緩慢に定常流速に推移している。

## 4. 結果

### 4.1 定常流

それぞれの模型の偏揺れ角  $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$  (トラック模型に限り  $\theta = 0^\circ \sim 180^\circ$ ) に対する  $C_x$ 、 $C_y$ 、 $C_s$  の変化を図 5～図 10 に示す。

定常流の実験では流速を  $U = 3.0 \sim 10.0 \text{ m/s}$  と変化させて行った。使用されたレイノルズ数 ( $Re=0.77 \times 10^5 \sim 1.37 \times 10^5$ ) の範囲では  $C_s$  の挙動にレイノルズ数の影響はほとんど見られなかった。

直方体模型の間に二三の共通の傾向が見られた。 $C_x$  は  $\theta = 5^\circ \sim 10^\circ$  で最小値を取った後、単調に増加する。また、 $C_y$  は  $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$  で最大値を取った後、単調に減少する。これらの横方向合力である横力係数

$C_s$  は  $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$  まで急に増加するが、その後の変化は小さい。トラック模型の  $C_x$  は  $\theta = 0^\circ \sim 5^\circ$  で最大値を取り、横力係数  $C_s$  は直方体模型と同様の傾向を示した。

図 11 は  $U_{in} = 10 \text{ m/s}$  の時の横力係数  $C_s$  をモデル間で比較したものである。変化の傾向は全ての直方体模型で同様である。断面比を変化させたモデル 1～4 を比較すると、断面比が小さい模型ほど横力係数は高い値を示した。同じ断面比で、アスペクト比が異なるモデル 2 とモデル 5 では、アスペクト比の大きいモデル 2 の方が高い横力係数を示した。

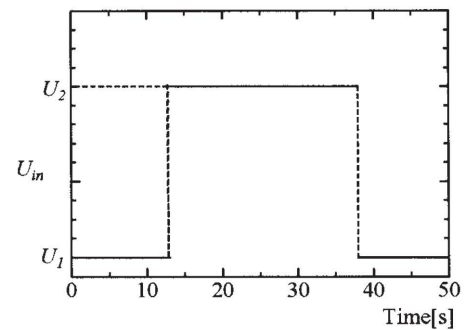


Fig. 3: A time trace of input signal.

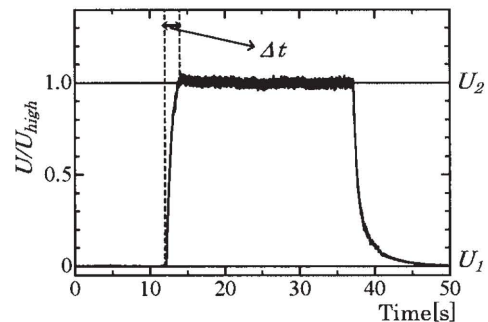


Fig. 4: Corresponding time trace of velocity.

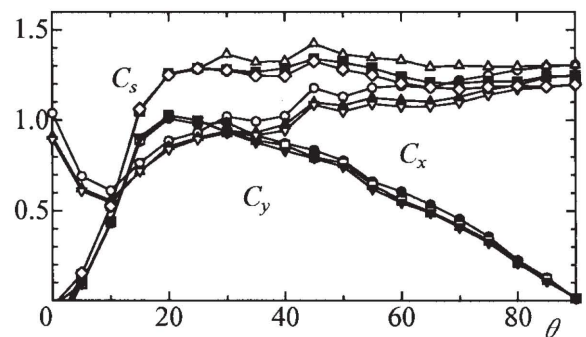


Fig. 5: Variation of aerodynamic forces with yaw angle. Model 1.  $C_x$ :  $\circ$ ,  $U_{in}=3 \text{ m/s}$ ;  $\bullet$ ,  $U_{in}=3 \text{ m/s}$ ;  $\Delta$ ,  $U_{in}=3 \text{ m/s}$ .  $C_y$ :  $\blacktriangle$ ,  $U_{in}=7 \text{ m/s}$ ;  $\square$ ,  $U_{in}=7 \text{ m/s}$ ;  $\blacksquare$ ,  $U_{in}=7 \text{ m/s}$ .  $C_s$ :  $\nabla$ ,  $U_{in}=10 \text{ m/s}$ ;  $\blacktriangledown$ ,  $U_{in}=10 \text{ m/s}$ ;  $\diamond$ ,  $U_{in}=10 \text{ m/s}$ .

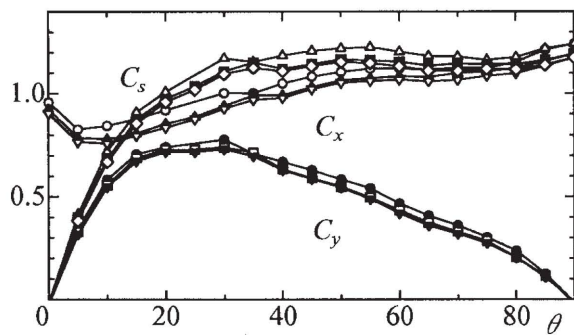


Fig. 6: Variation of aerodynamic forces with yaw angle. Model 2. See fig. 1 for legend.

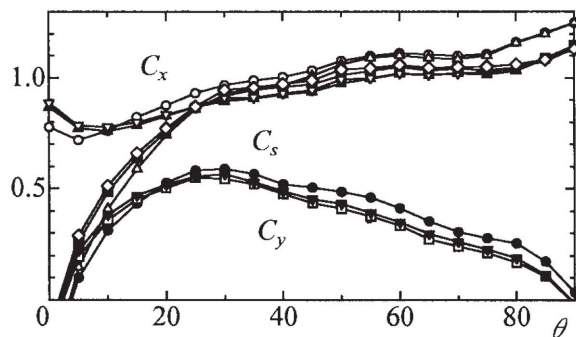


Fig. 7: Variation of aerodynamic forces with yaw angle. Model 3. See fig. 1 for legend.

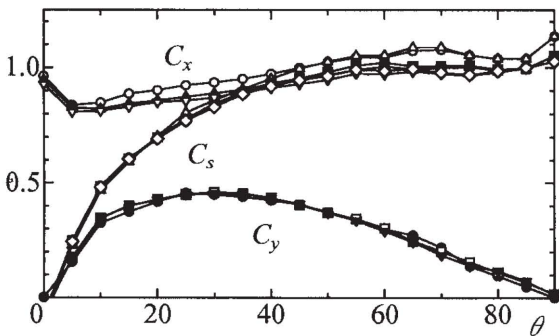


Fig. 8: Variation of aerodynamic forces with yaw angle. Model 4. See fig. 1 for legend.

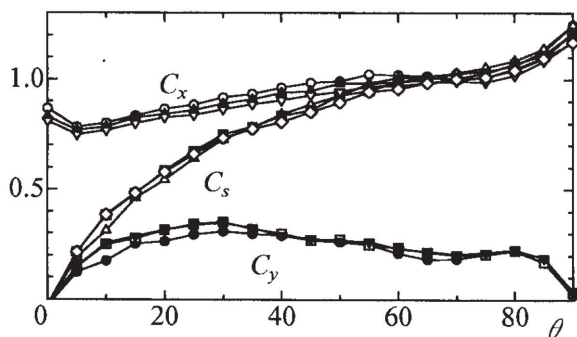


Fig. 9: Variation of aerodynamic forces with yaw angle. Model 5. See fig. 1 for legend.

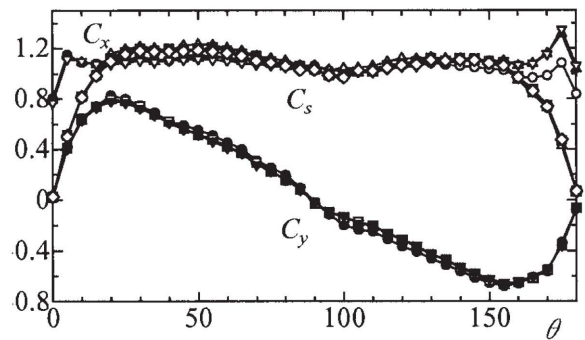


Fig. 10: Variation of aerodynamic forces with yaw angle. Truck model. See fig. 1 for legend.

トラック模型では本体が車輪により地面からわずかに離れている。車輪を含めて見積もった断面比 ( $W/H$  に相当) は  $65/100=0.65$  であり直方体模型のモデル2 ( $W/H=0.6$ ) に近い。横力特性もこの模型に近い値となっている。  $\theta \sim 30^\circ$  まで  $C_s$  の増加率  $\partial C_s / \partial \theta$  が大きい。

自動車は通常  $10 \sim 30 \text{ m/s}$  程度で走行しているので、偏揺れ角は  $10^\circ$  以下と見積もられる [3]。しかるに、その小さな偏揺れ角は、本実験によれば  $\theta < \sim 30^\circ$  の僅かの  $\theta$  の変化によって横力が大きく変化する範囲にあることが分かった。

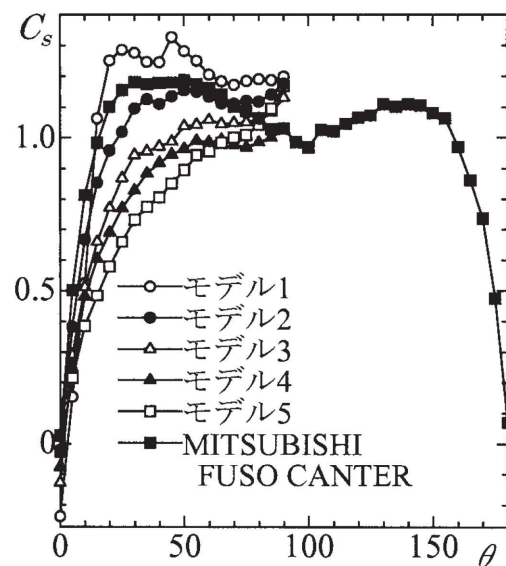


Fig. 11: Variation of  $C_s$  for all the models used.  $U_{in} = 10 \text{ m/s}$ .

#### 4.2 急加速・急減速流

モデル2とトラック模型は似通った定常空気力特性を持つことが分かったので、非定常流の実験はこの二つの模型を使用した。

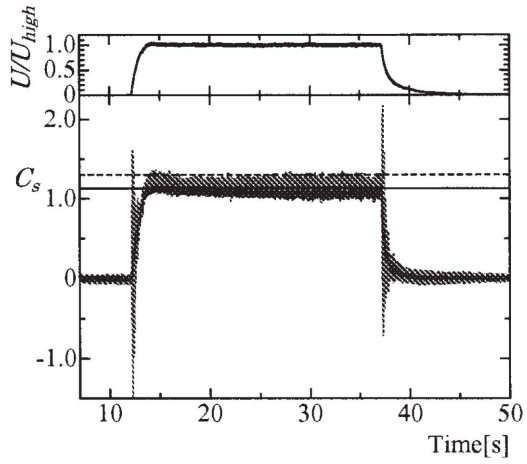


Fig. 12:  $\theta = 30^\circ$ ,  $U_1 = 0.1 \text{ m/s} \rightarrow U_2 = 5.1 \text{ m/s}$ . Solid line, Model 2; Grey line, Truck model. Horizontal solid line, Model 2; Horizontal broken line, Truck model.

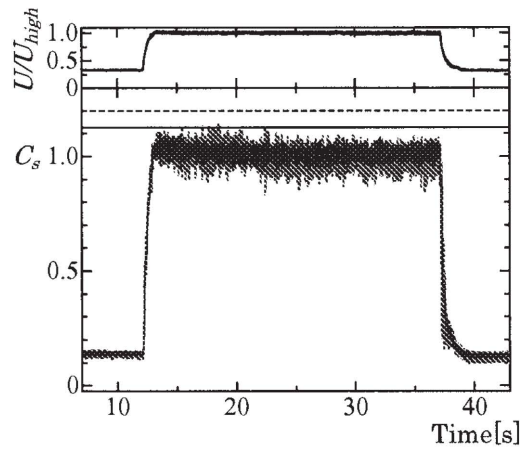


Fig. 15:  $\theta=30^\circ$ ,  $U_1 = 3.0 \text{ m/s} \rightarrow U_2 = 8.0 \text{ m/s}$ . See Fig. 12 for legend.

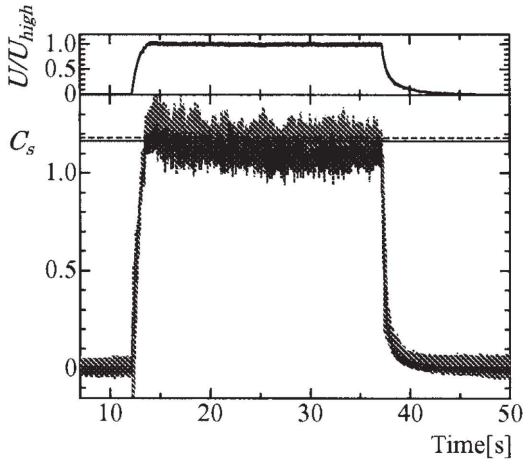


Fig. 13:  $\theta = 60^\circ$ ,  $U_1 = 0.1 \text{ m/s} \rightarrow U_2 = 5.1 \text{ m/s}$ . See Fig. 12 for legend.

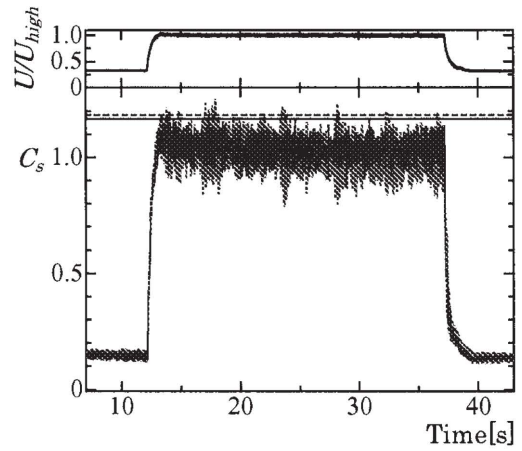


Fig. 16:  $\theta=60^\circ$ ,  $U_1 = 3.0 \text{ m/s} \rightarrow U_2 = 8.0 \text{ m/s}$ . See Fig. 12 for legend.

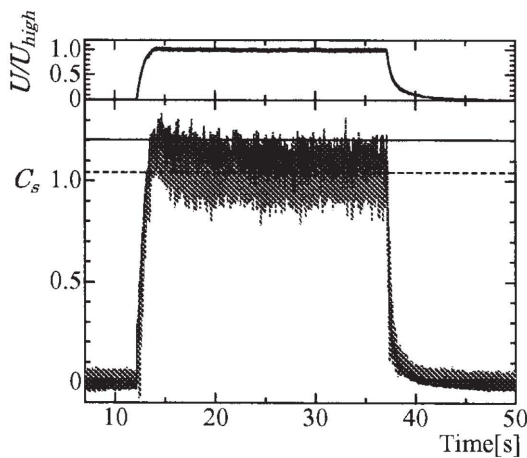


Fig. 14:  $\theta=90^\circ$ ,  $U_1 = 0.1 \text{ m/s} \rightarrow U_2 = 5.1 \text{ m/s}$ . See Fig. 12 for legend.

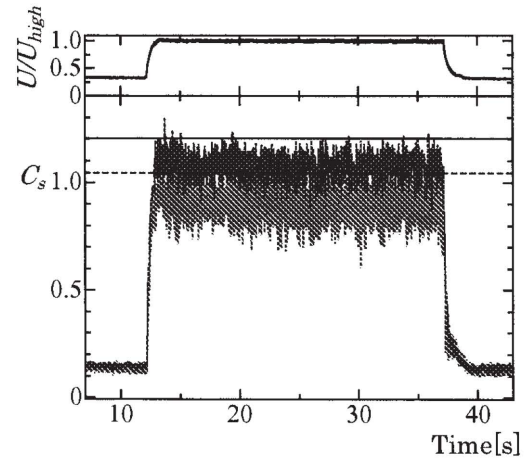


Fig. 17:  $\theta = 90^\circ$ ,  $U_1 = 3.0 \text{ m/s} \rightarrow U_2 = 8.0 \text{ m/s}$ . See Fig. 12 for legend.

図12～図14は  $U_1=0.1\text{ m/s} \rightarrow U_2=5.1\text{ m/s}$  の急加速流に対する横力係数  $C_s$  の応答性を示し、上部には風速の時刻歴を示した。いずれの偏揺れ角でも、加速直後の僅かな間に定常流の横力係数より少し大きな値をとり、その後は定常流の横力係数に漸近する。偏揺れ角  $\theta$  が  $30^\circ$  以下の時、トラック模型では、急加速と急減速した直後にスパイク状に増減する挙動が現れた。 $\theta=45^\circ$  以上ではこのような現象は消えた。

図15～図17は  $U_1 = 3.0\text{ m/s} \rightarrow U_2 = 8.0\text{ m/s}$  の急加速流に対する横力係数  $C_s$  の応答特性を示す。 $U_1 = 0.1\text{ m/s} \rightarrow U_2 = 5.1\text{ m/s}$  とは異なり、加速直後の大きな  $C_s$  値をとる傾向は見られなかった。さらに偏揺れ角  $\theta$  が  $30^\circ$  以下の時、トラック模型にスパイク状の挙動は見られなかった。急加速流では無次元時間  $\tau$  のみならず低速レベルの流速の大きさも空気力特性に影響するものと思われる。低レベル流速で物体近傍の流れの状態が空気力影響するのは自明のように思われる。

モデル2とトラック模型ではともに加速後の  $C_s$  値は定常流の  $C_s$  値よりも小さな値をとった。今回の実験では模型を設置した流下距離での平均流速の値に誤差が含まれたものと思われる。

## 5. 結論

マルチファン風洞を使って定常流と急加速流を生成し、直方体模型とトラック模型にかかる空気力の特性を調べた結果、以下のことが分かった。

### 定常流:

- 1)  $Re=0.52 \times 10^5 \sim 1.72 \times 10^5$  の範囲ではレイノルズ数が横力特性に及ぼす効果はほとんど見られなかった。
- 2) 直方体模型の間では、断面比の小さい模型ほど横力係数  $C_s$  が大きくなった。
- 3) トラック模型の横力係数  $C_s$  は車輪の高さを含めた大きさを幾何学的に相似な直方体模型とほぼ同様な特性を示した。

### 急加速流:

- 1)  $U_1 = 0.1\text{ m/s} \rightarrow U_2 = 5.1\text{ m/s}$  の時: どの角度でも、加速直後のわずかな間、定常流の  $C_s$  値より大きな値をとった後、定常流の  $C_s$  値に漸近する。偏揺れ角が  $30^\circ$  以下の時、トラック模型では、流速が急加速した直後にスパイク状の挙動が現れる。
- 2)  $U_1 = 3.0\text{ m/s} \rightarrow U_2 = 8.0\text{ m/s}$  の時: 低速域の流速が  $0\text{ m/s}$  に近い場合とは異なり、加速直後に大き

な  $C_s$  値をとる挙動は見られない。偏揺れ角が  $30^\circ$  以下のときのトラック模型ではスパイク状の挙動は現れない。

## 謝辞

本研究の一部は平成19年度科学技術振興調整費「竜巻等による突風災害対策に関する調査研究」の支援でなされた。京都大学工学部松本勝教授、東京工芸大学工学部曹曙陽准教授には有益な御助言をいただいた。ここに深謝します。

## 参考文献

- [1] 白石成人, 松本勝, 北川雅章 (1982): 風速が急変する場合の物体に作用する空気力, 第2回風工学シンポジウム, pp. 107-113.
- [2] 薦原道久, 巽雄二郎, 前田達夫, 鈴木実 (2000): 三次元離散渦法による車両への横風による流体力に関する研究, 日本機械学会論文集, B編, 66巻, 664号, pp. 75-82.
- [3] 橋口真宜, 神本一朗, 桑原邦郎 (1994): 三次元ブラフボディに生じる非線形空気力について, 日本機械学会論文集, B編, 60巻, 580号, pp. 88-95.
- [4] 門叶智子, 田代伸一 (1994): トラック模型の風洞実験 (横風を受けるときの空力特性について), 東京都立科学技術大学研究報告, 第6号, pp. 19-30.
- [5] 小園茂平, 西亮, 宮城弘守他 (2004): マルチファン型大型風洞の開発—様アクティブ法により生成される乱流の特性, 日本機械学会論文集, B編, 70巻, 690号, pp. 311-318.