

○ 正 [機] 中出 孝次 (鉄道総研)

正 [機] 鈴木 昌弘 (鉄道総研)

## Numerical simulation of flow around a train under a sudden increase of the wind

Koji NAKADE, Railway Technical Research Institute, 2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8540

Masahiro SUZUKI, Railway Technical Research Institute

In order to investigate transitional aerodynamic characteristics of a railway vehicle when the train runs from no crosswind area to strong crosswind area, we performed LES of flow around a simple train model by using a crosswind boundary condition model. Numerical results show that transitional positive lift force and negative yawing moment were observed due to increasing crosswind velocity.

*Key Words:* Aerodynamic characteristics, Side winds, Large-eddy simulation

## 1 はじめに

横風に対する鉄道車両の空力特性を解明するために、これまで風洞試験による研究開発がすすめられてきた。しかし、風洞内に車両模型を静止させる実験方法では模擬できない、車両の走行の影響（車両が地面に対して相対運動する影響）については、実験方法の難易度の高さにより、現在までに実施されたケースは少なく、現象に対する知見は多くはない。そこで、数値シミュレーションを用いて、走行の影響を調べるための研究開発をすすめている。まず、定常的に横風が走行車両に作用する状況についての流れの数値シミュレーションを試みた<sup>(1)</sup>。解析対象の形状および条件を単純化した計算ではあるが、走行時と静止時の横力係数および車両周りの圧力場の比較を示した。一方、車両走行に関わる現象としては、定常的に横風が作用する以外に、例えばトンネル退出時に横風が車両に作用するなど、非定常に横風が作用する状況がある。

今回、横風が走行車両に非定常に作用する現象の一つとして、車両が無風地帯から強風地帯へと突入する状況を想定した流れの数値シミュレーションを試みたので、ここに報告する。

## 2 計算方法

**2.1 計算モデル** 車両形状は貨物列車1両分に相当するものを直方体で簡易的に表現したものである(図1)。車体高さを $H$ としたとき、幅を $0.828H$ 、長さを $6.799H$ 、車両下面と地面との間隔を $0.346H$ とした。計算領域、車両の設置位置および座標系は図1に示すとおりである。計算格子は最小格子間隔を $0.01H$ とした直交不等間隔格子(計算格子数:約1300万セル)とした。

境界条件は、流入境界(「Inflow1( $x_{min}$ 面)」 「Inflow2( $z_{min}$ 面)」)・地面・列車表面を速度固定条件、上空の遠方境界をスリップ境界条件、流出境界(「Outflow1( $x_{max}$ 面)」 「Outflow2( $z_{max}$ 面)」)を対流流出境界条件とした。ここでは車両固定の座標系を考えているため、車両表面の速度はゼロ、地面の速度は車両速度の逆ベクトルとなる。流入境界の速度の詳細は次節に示す。

**2.2 横風の流入境界条件モデル** 車両の横風領域への突入を相対的に表現するための流入境界条件は、文献<sup>(2)</sup>の方法を参考にした。しかし、本研究では、「Outflow1」をより自然な境界条件である対流流出境界条件に変更するとともに(文献<sup>(2)</sup>では、「Outflow1」を「Inflow1」と等しい値に設定)、風の立ち上がり時間を任意に設定できるように逆正接関数を用いた。流入境界面(「Inflow1」と「Inflow2」)の速度( $u, v, w$ )を以下に示す(物理量は列車速度と車体高さを用いて無次元化)。

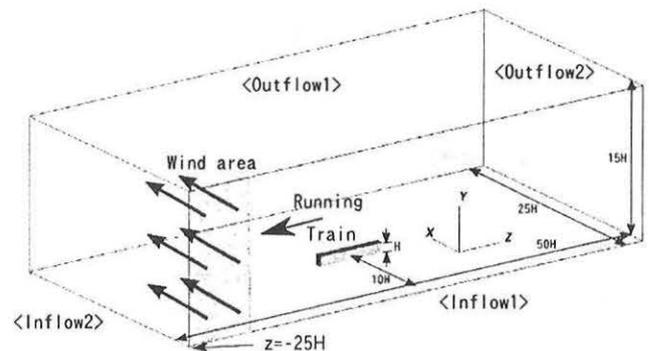


Fig. 1: Computational model

$$u_{inflow2}(T) = U_{wind} \frac{\tan^{-1}((T - T_0)/\alpha) + \pi/2}{\pi} \quad (1)$$

$$u_{inflow1}(T, Z) = U_{wind} \frac{\tan^{-1}((T - (Z - Z_0) - T_0)/\alpha) + \pi/2}{\pi} \quad (2)$$

$$v_{inflow2} = 0, w_{inflow2} = 1 \quad (3)$$

$$v_{inflow1} = 0, w_{inflow1} = 1 \quad (4)$$

時刻 $T = T_0$ 、位置 $Z = Z_0$ に $U_{wind}$ の横風が立ち上がる状況を表している。 $\alpha$ は横風の立ち上がる度合いを調整するパラメータである。本計算では、 $U_{wind} = 1, T_0 = 100, Z_0 = -25, \alpha = 1.0$ とした。横風の時間変化の様子は後に述べる(図4)。

**2.3 数値解法** 非圧縮性流体のLES基礎式に対して、一般座標系コロケート格子の高次精度差分法を用いた<sup>(3)</sup>。空間方向を4次精度中心差分、時間方向を3次のアダムス・バッシュフォース法により離散化した。乱流解析方法は、ダイナミックスマゴリンスキーモデルを用いた。なお、列車角部において数値振動による計算不安定が生じたため、4階数粘性も併用した。

列車速度と車体高さで無次元化したときのレイノルズ数を16,000、時刻間隔( $\Delta T$ )を0.001(クーラン数で約0.1程度)とした。

計算機は鉄道総研所有のCray XT4を用い、MPIライブラリによる480PE並列計算を実施した。計算は $T = 250$ まで実施し、計算時間は実時間で約50時間程度であった。

### 3 計算結果と考察

数値シミュレーションの検証は、文献<sup>(1)</sup>において、真横の風が作用する静止車両について車体表面の平均圧力分布と風洞実験結果とを比較することにより行い、概ね良好な結果が得られることを確認した。

横風領域に車両が突入する様子について、車体中心高さ平面上の速度ベクトルを図2に示す。横風領域に突入後 ( $T = 130$ )、後流の方向が変化する様子が分かる。

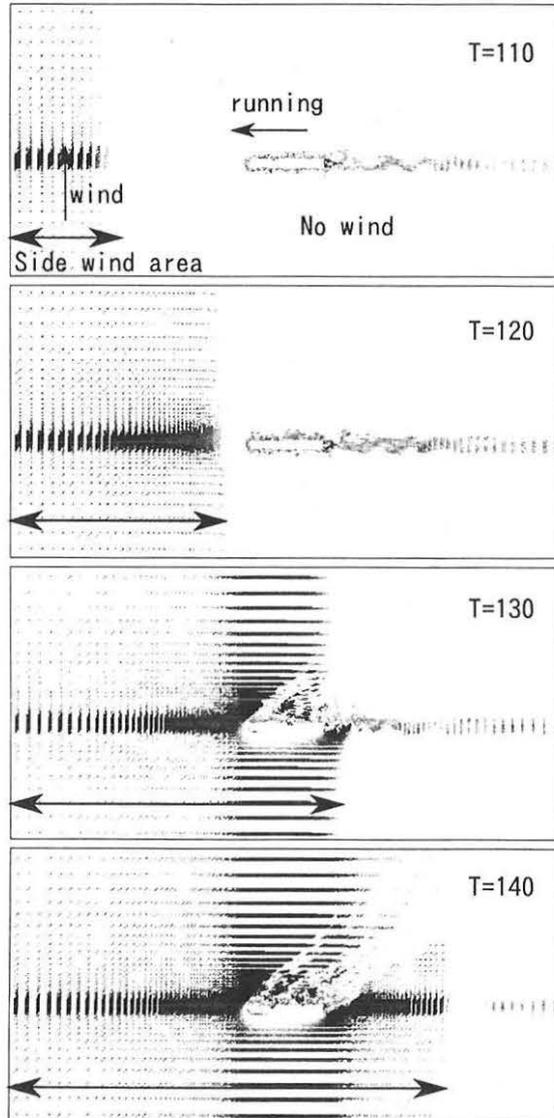


Fig. 2: Velocity vectors

横風を受ける前 ( $T = 120$ ) と後 ( $T = 130$ ) の車体周りの圧力の等値面 (高圧部と低圧部) を図3に示す。横風を受ける前では車体先頭部の高圧領域と車体側面の先頭付近の低圧領域の形成が特徴的であるが、横風を受けたときには高圧領域および低圧領域が車体の側面に広がる様子が観察される。

列車速度・車体側面積・車体高さで無次元化した横力係数 ( $Cfx$ )・揚力係数 ( $Cfy$ )・ローリングモーメント係数 ( $Cmz$ )・ヨーイングモーメント係数 ( $Cmy$ ) の時間変化を図4に示す。また、車両が横風に遭遇するタイミングを示すために、車体先頭、車体中心、車体後尾の境界条件位置における横風速度の時間変化もあわせて示す。車体中心位置が横風を受けるタイミン

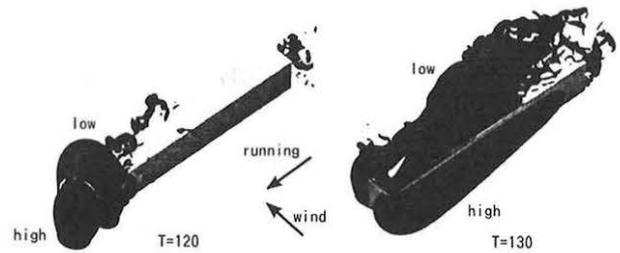


Fig. 3: Pressure contours

グは  $T = 125$  である。横力およびローリングモーメントは横風に対応して増加し一定状態になる。揚力は定常状態では負となるが、横風を受ける瞬間では正の値が生じる。ヨーイングモーメントは、横風を受ける瞬間に負の方向に大きな値が生じている。これは、横風領域が車体先頭から後方に拡大することに伴って、車体側面風上面の圧力が上昇することに対応している。つまり、ヨーイングモーメントの絶対値の最大値は横風領域が車体中心位置に達する付近で生じることになる。

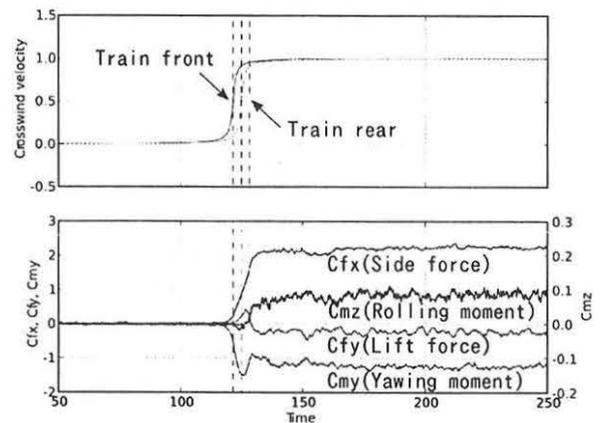


Fig. 4: Time history of aerodynamic forces

### 4 まとめ

車両が横風領域に突入する過渡的現象を数値シミュレーションするために、横風の流入境界条件モデルを用いる方法を試みた。今回の計算条件については、横力およびローリングモーメントは単調に変化したが揚力・ヨーイングモーメントについては、正の揚力および負のヨーイングモーメントが過渡的に発生する結果が得られた。今後、風洞実験との比較検証をすすめるとともに、風の立ち上がり時間を変化させたときの様子を調べていく必要がある。

### 参考文献

- (1) 中出孝次ほか、横風を受ける走行車両周りの流れの数値シミュレーション、機械学会流体工学部門講演会、講演番号 G702(2009)。
- (2) 中島卓司ほか、突風を受けるフォーミュラカーの非定常空力解析、第22回数値流体力学シンポジウム、CD-ROM(講演番号 J6-4)(2008)。
- (3) 梶島岳夫ほか、コロケート格子による非圧縮流れの高次差分解析、機論 B, 63 巻 614 号, pp.3247-3254(1997)。