単純形状モデルを用いた鉄道車両床下流れの数値シミュレーション

Numerical Simulation of Underbody Flow of Simplified Railway Vehicle

○ 正 中出 孝次 (鉄道総研) 正 井門 敦志 (鉄道総研)

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

Large-eddy simulation of flow around a train was conducted to investigate unsteady underbody flows. The results of this study showed that large lateral velocity fluctuations were generated by two vortex streets along the train and that they propagated along the streamwise direction under the train.

Key Words: Large-eddy simulation, Train, Underbody flow, Vortex street

1 はじめに

鉄道車両のような細長い物体 (新幹線 16 両編成で全長 400m) が地面近くを移動するという状況は、自動車や航空機などにはない鉄道分野特有のものであり、それに付随する流体力学を把握することは重要である。本研究では、鉄道分野特有の流れである編成列車の車両床下流れについて調べた。車両床下流れは、床下機器、台車、輪軸、線路、バラスト (もしくはスラブなど) が存在する複雑な流路形状により、複雑な流れが生じている。現在までの研究では、主として実測・模型実験により平均流れ場の知見が得られているが、非定常流れ場についての知見はほとんどない。そこで、車両床下流れの非定常流れの基礎検討を行うために流れのラージ・エディ・シミュレーションを実施した。数値シミュレーションモデル、計算方法、結果、そして、左右方向に変動する流れが生じるメカニズムの推定について報告する。

2 計算方法

2.1 計算モデル 車両モデルは正方形断面の直方体 (高さ W 、幅 W 、長さ $8W$) を車間部の凹凸なしに 6 両接続し、先頭端と後尾端では、流れをなめらかに流入・流出させるために三角柱 (側面高さ W 、長さ $1.2W$ の直角三角形断面) を接続した。ここで用いた車両形状は、過去に風洞実験⁽¹⁾に使用されたものである (風洞模型の W は 100mm)。 (床下高さ)/ $W=0.05$ とし、台車部を収納するキャビティ ((切り欠き高さ)/ $W=0.02$ 、(切り欠き長さ)/ $W=1$) を模擬し、地面は滑面とした。列車走行速度は、風洞実験⁽¹⁾の風速を参考に、30m/s(108km/h)とした。列車速度と車体幅を代表スケールとしたときのレイノルズ数は 200,000 である。ただし、風洞実験と異なり、地面は車両に対して相対的に移動している。

以下において特に断らない限り、物理量は、代表長さ：車体幅 W 、代表速度：列車速度 V で無次元化した値として記述する。

計算領域は、流れ方向に $x = -5 \sim 60.4$ 、車体幅方向に $y = 0 \sim 14$ 、車体高さ方向に $z = 0 \sim 7$ とした。地面は $z = 0$ である。車両位置は、車両先頭端中心を $x = 0, y = 7$ 、車両底面の位置は $z = 0.05$ である。計算領域全体を図 1 に示す。

計算格子は車体壁面および地面の格子幅を密 (0.001) とした直交不等間隔格子 (格子間隔は滑らかに変化) である。計算格子数は、 x 方向 2160 セル、 y 方向 320 セル、 z 方向 236 セルであり、合計:163,123,200 セル (約 1.6 億セル) である。

Fig. 1: Computational domain

2.2 数値解法 基礎式は非圧縮性流体に対するナビエ・ストークスの式である。乱流解析はラージ・エディ・シミュレーション (LES) により実施した。サブグリッドスケールモデルはコヒーレント構造スマゴリンスキーモデル⁽²⁾を用いた。

基礎式を差分法で離散化することにより数値計算を行った。速度と圧力のカップリングはフラクショナル・ステップ法を用いた。時間進行は三次精度のアダムス・バッシュフォース法を、空間差分は二次精度中心差分法を用いた。数値計算は車両固定座標系で実行した。境界条件は、 x_{min} で速度 1 に固定、 x_{max} で対流流出条件、 y_{min} 、 y_{max} 、 z_{min} 、 z_{max} で速度 1 に固定、列車表面は速度ゼロに固定とした。時間進行における時間刻みは、無次元時間間隔 $\Delta t = 0.0001$ とし、いくつかのモニター点における流速変動の平均及び分散の変化がほぼなくなるまで計算をすすめた。平均流れ場の算出は、全ケースともに無次元時間長さ $T=100$ で時間平均した。鉄道総研のスーパーコンピュータ (CRAY 製、XC30) で 2400 並列計算を実施し、無次元時間長さ $T=100$ の計算実行時間 (実際にかかった経過時間) は約 20 時間である。

3 計算結果

3.1 平均流れ 各車両の x 方向中心位置における、時間平均 u の y 方向分布 ($z = 0.025$) と z 方向分布 ($y = 7$) を図 2、図 3 にそれぞれ示す。車両床下部分で u は減少し (図 2)、乱流ク

エット流の分布 (図 3) になっていることが分かる。また、 u は先頭から x 方向に進むにつれて徐々に低減し、一定値になる様子が分かる。

Fig. 2: Time averaged $u(y)$ distribution ($z = 0.025$)

Fig. 3: Time averaged $u(z)$ distribution ($y = 7$)

3.2 瞬時の流れ 車両床下流路の v について、瞬時の流れの x 方向分布 ($y = 7, z = 0.025$) を図 4 に示す。また、5 両目と 6 両目の yz 平面 ($z = 0.025$) について、瞬時の速度ベクトルを図 5 に示す。図中の青は車両を、ベクトルの色は速度の大きさ (赤: 高速、青: 低速) を示している。車両床下には左右方向 (y 方向) に蛇行する流れが存在することが分かる。紙面の都合でここに示さないが、この流れ場の時間変化を観察した結果、 v 変動は下流方向に伝播することを確認した。また、周波数解析より、この蛇行流れの波長は約 3 程度であった。

Fig. 4: $v(x)$ distribution ($y = 7, z = 0.025$)

Fig. 5: Velocity vectors (5th car - 6th car, $z=0.025$)

4 車両床下の蛇行流れの発生メカニズムに関する考察

車両固定座標系における車両床下流れを以下に示す三次元クエット流としてまとめる (図 6)。有限平板先端からは一様に移動速度に相当する流れが入る。そして、有限平板による摩擦の影響で境界層が発達し、境界層によって排除された流れが有限平板下の流路から左右両側方に逃げ、主流流速が低下する。ここで生じる平均速度勾配において、ケルビン・ヘルムホルツ不安定による高速側から低速側への流体の巻き込みによる渦が生成される。ここで、左右両側で形成される渦の向きは、速度勾配に対応してそれぞれ逆向きになる。2つの渦列形成の段階では、渦の大きさは小さく左右の渦の干渉はないが、ある下流点以降では、それぞれの渦が干渉するほど大きく成長し、やがて、互いに逆向きの渦を持つ平行渦列を形成するに至る。平行渦列の状態になると、それらの渦の配置は安定性の理論 (完全流体の平行渦列の中立安定性) により決まる。ここで、カルマン渦列と同様に考えると、(車両床下の左右流速変動の波長) $= 3.56 \times$ (車体幅) となり、今回のシミュレーション結果による波長 $= 3 \times$ (車体幅) 程度と概ね対応することが分かる。つまり、流速変動の波長は車体幅によって決まり、その値はカルマン渦列と同様な考察で予測できると考えらる。そして、この平行渦列によって、車両床下には左右方向の流速変動と圧力変動が発生すると考えられる。

Fig. 6: Three dimensional Couette flow

5 まとめ

本研究をまとめると以下ようになる。

- ・車両の床下には、左右方向に蛇行する流れが存在することが数値シミュレーションにより示された。
- ・車両床下の蛇行流れのメカニズムとして、車両床下の流路に対して、平行渦列モデルを適用することを提案した。つまり、その変動の特徴は、完全流体の平行渦列モデルによって概ね説明できると考えられる。

今後、移動地面を使った風洞試験などにより、ここで得られた結論を実験的に検証することが望まれる。

参考文献

- (1) Masahiro Suzuki: Studies on the Flow Fields around a Train in Tunnel, Proceedings of Conference on the 12th International Conference on Fluid Flow Technologies (2003), pp.702-703.
- (2) Hiromichi Kobayashi: The subgrid-scale models based on coherent structures for rotating homogeneous turbulence and turbulent channel flow, Physics of Fluids, 17, 045104(2005), pp.045104-1-12.