

横風を受ける鉄道車両の車体まわりの3次元流れのシミュレーション

理学専攻 情報科学コース 玉野美和 (指導教員: 河村哲也)

1 はじめに

鉄道車両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も多いと考えられる。そこで列車を題材にとり、数値シミュレーションを用いて横風を受け走行中の車両の車体まわりの流れの解析を行うとともに、横風が車体に及ぼす力の考察を目的とする。

2 計算方法

ゆっくりと走行する鉄道車両まわりの大気の流れは非圧縮性を仮定できるため、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、フラクショナルステップ法を用いて数値的に解いた。そして、数値的に解く過程で求められる圧力を用い、式 (3) により車体の各壁面が受ける力の計算を行う。

$$\mathbf{F} = \oint_{\text{車体}} d\mathbf{f} \sum_i \Delta \mathbf{f}_i = \sum_i i S_i p_i \quad (3)$$

\mathbf{F} : 車体に働く力 f_i : i 番目の要素に働く力
 S_i : i 番目の格子の面積 i : 面 S_i の法線ベクトル
 p_i : i 番目の格子における圧力

ただし上式において車体に作用する力は、風上側の壁面にかかる力と風下側の壁面にかかる力の差、揚力は天井にかかる力と底面にかかる力の差と定義し、計算を行った。以上から求められた抗力 (\mathbf{F} の水平方向成分) と揚力 (\mathbf{F} の鉛直方向成分) 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
 ρ : 密度 U : 一様流の速度 A : 代表面積

続いて式 (3) で求めた各壁面にかかる力に式 (6) を適用することで、風下側の下端まわりの力のモーメントを計算し、式 (7) を用いて係数化した。

$$\mathbf{N} = \oint_{\text{車体}} \mathbf{r} \times d\mathbf{f} \sum_i \mathbf{F}_i d_i \quad (6)$$

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

\mathbf{N} : 基準点まわりの力のモーメント \mathbf{r} : 基準点を原点としたときの作用点の位置を表すベクトル F_i : i 番

目の要素に働く力 d_i : i 番目の要素における力の作用線と回転の中心 (基準点) との距離 C_{N_z} : モーメント係数 N_z : N の車体軸 (z) 方向成分 ρ : 密度 U : 一様流の速度 A : 代表面積 l : 物体長さ

3 正当性の検証

今回用いた計算手法の正当性を示すため、レイノルズ数 10^4 における迎え角 0 度の車体を受ける抗力の計算結果を、長方形断面柱の抗力係数の実験結果 [1] と比較した。ここで、迎え角 0 度の正方形車体の形状は長方形断面柱の特殊な場合と捉えられるため、実験により長方形断面柱の抗力係数を求めたものを比較対象とした。以下が実験結果 (図 1) と今回の計算結果 (図 2) である。図 1, 図 2 より、グラフのピークは異なるものの、グラフ全体の挙動は類似していることがわかる。

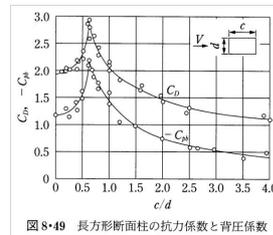


図 1: 実験結果

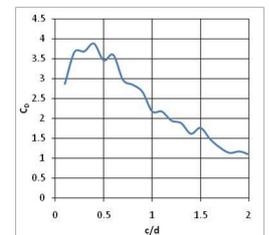


図 2: 計算結果

4 2次元領域における車体まわりの流れ

様々な場合を想定し、車体まわりの流れ場と車体が横風から受ける力について検証した。ここで想定したケースは、車体が横風を受け傾いたケース (Case1, 2)、車体が種々の地形上にあるケース (Case3)、車体の形状が変化したケース (Case4) である。

4.1 モデル化・格子生成

Case1, 2 では傾いた車体を対象としてシミュレーションを行う。車体形状は正方形、風は地面に平行な一様流を想定し、 $Re=500$ として計算を行う。計算領域は、車両の先頭に平行に切断した断面を含む 2次元長方形領域 (図 3) とした。傾いた車体を実現するため、座標系は一般座標系とし、車体の一辺、領域の x 方向の長さ、 y 方向の長さの比を $1:22:10$ とした。Case3, 4 では地面と平行な車体を対象とし、車体形状は一般的な通勤車両の車体、風は地面に平行な一様流を想定し $Re=2000$ で計算を行う。計算領域は車両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。座標系は直交座標系とし、 $48\text{m} \times 39\text{m}$ の平面、車体断面は 1 辺 3m の正方形から四隅を切り取った形とした。Case3 では一般的に線路がある地形を想定し、平地、盛り土、高架 (橋脚有、橋脚無) を仮定した。Case4 では、通勤車両型の車体と正方形の車体を用いた。

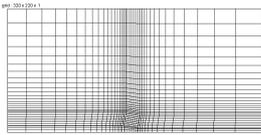


図 3: 格子 (Case1,2)

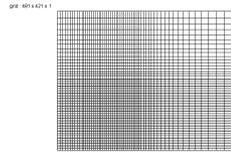


図 4: 格子 (Case3,4)

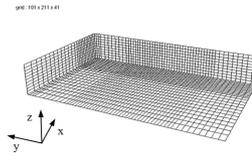


図 5: 格子 (領域 1)

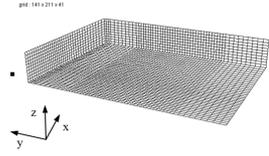


図 6: 格子 (領域 2)

4.2 計算結果

Case1 では車体の迎え角と車体の側面が横風から受ける力との関係性を調べるため、車体の迎え角 0 度 ~ 30 度までの流れ場について検証を行った。その結果、抗力係数・揚力係数・モーメント係数の全ての係数に対し、迎え角の増加とともに係数値が増加する傾向が見られた。

Case2 では、車体の地面からの高さや車体の側面が横風から受ける力との関係性を調べるため、正方形の辺の長さを基準値 1 として、車体高さ 0.25 ~ 1.1 において検証を行った。その結果、抗力係数・モーメント係数は高さの影響をほぼ受けず、揚力係数のみ高さ 0.4 前後で最大値をとり、その後減少する傾向が見られた。

Case3 では、平地、盛り土、高架（橋脚有、橋脚無）上に車体がある場合の、横風から車体を受ける力への影響について検証を行った。

表 1: 抗力・揚力・モーメント係数 (時間平均値)

	平地	盛り土	高架 (橋脚有)	高架 (橋脚無)
抗力係数	2.0943	2.9800	4.8582	2.1732
揚力係数	0.3489	0.8303	0.6088	-1.74E-02
モーメント係数	1.2482	1.7896	2.7329	1.0688

表 1 から、平地上の車体にかかる力は全項目において小さく、一方、盛り土・高架（橋脚有）上の車体は、平地・高架（橋脚無）上の車体に比べて車体にかかる力が大きいことがわかった。

Case4 では、通勤車両型の車体と正方形の車体を受ける力について検証した。その結果、通勤車両型の車体を受ける抗力の方がわずかに小さく、また、車体による流れの剥離も小さいことがわかった。

5 3次元領域における車体まわりの流れ

5.1 モデル化・格子生成

同じ形状の車両がすれ違う状況を想定し、シミュレーションを行った。ここでの車体形状は一般的な通勤車両の車体を、風は地面に平行な一様流を想定し、 $Re=50$ とする。また、5.2 節では停止中の車体の横を車体が通過する状況を、5.3 節では逆方向に移動する状況を想定する。

ここで、車両がすれ違う状況を実現するため、直交座標系の不等間隔格子を用いた計算領域を 2 個用意し、領域 1 は $24\text{m} \times 35\text{m} \times 6\text{m}$ (図 5)、領域 2 は $27\text{m} \times 35\text{m} \times 6\text{m}$ (図 6) の直方体とする。そして、それらの領域が領域 1 右端、領域 2 左端において接し、風が領域 1 の左端から流入すると仮定した。2 つの領域が接する境界付近に、 $3\text{m} \times 7\text{m} \times 3\text{m}$ の大きさの車体が各々あるとする。

5.2 停止中の車体とのすれ違い

停止中の車体と移動中の車体のすれ違いをシミュレーションする。ここでは領域 1 の車体と格子が同じ速度で y 軸正方向に移動し、領域 2 の車体は停止している。t=0.8 における速度と圧力分布を図 7、図 8 に示す。

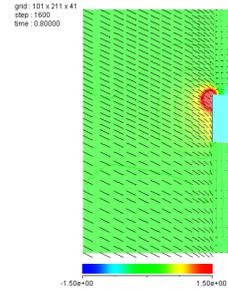


図 7: 速度と圧力分布 (領域 1)

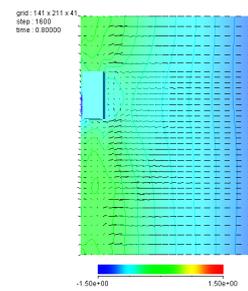


図 8: 速度と圧力分布 (領域 2)

5.3 移動中の車体とのすれ違い

移動中の車体同士のすれ違いをシミュレーションする。ここでは領域 1 の車体と格子が同じ速度で y 軸正方向 (図 9 の上方向) に移動し、領域 2 の車体と格子が同じ速度で y 軸負方向 (図 10 の下方向) に移動する。t=0.2625 における速度と圧力分布を図 9、図 10 に示す。

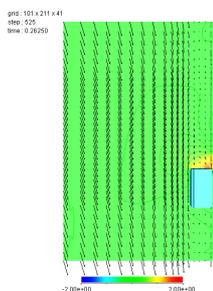


図 9: 速度と圧力分布 (領域 1)

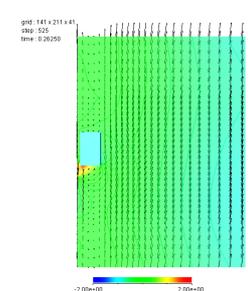


図 10: 速度と圧力分布 (領域 2)

6 まとめ

2 次元領域において、様々な地形上にある車体が横風から受ける力、車体形状と横風から受ける力との関連、車体の迎え角や地面からの高さや横風から受ける力との関連を求めた。また、3 次元領域において、走行中の車両まわりの流れとその特性を示した。

参考文献

- [1] 社団法人日本機械学会, "機械工学便覧 基礎編 α4 流体力学", ISBN4-88898-135-3, 2006
- [2] Minoru Suzuki, Katsuji Tanemoto, Tatsuo Maeda, "Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91 209-218, 2003