

横風を受ける鉄道車輛まわりの流れ

玉野美和 (指導教員：河村哲也)

1 はじめに

風が交通車両に与える影響は、以前より問題視されてきた。その中でも横風に起因する主な現象は、自動車では横転、列車では脱線、横転などが挙げられ、いずれも大事故を引き起こす恐れがある。そこで本研究では列車を題材にとり、横風を受ける車体まわりの流れの解析および、横風が車体に及ぼす力の考察を目的とする。

2 モデル化

本研究では、停止している車体を対象としてシミュレーションを行う。車体形状は一般的な通勤電車型車両、風は一様流を想定している。

また、計算領域は、車体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。計算領域は車体に及ぼす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(図1)。続いて、各ケースのモデル化である。本研究では、一般的に線路がある地形を想定し、盛り土(図2)、高架(橋脚有/図3、橋脚無/図4)を仮定した。さらに、車体形状として本研究で想定した車体(図1)のほかに、正方形の車体も用いて比較した。

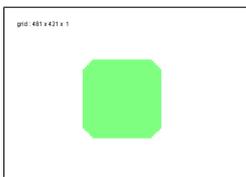


図 1: 車体

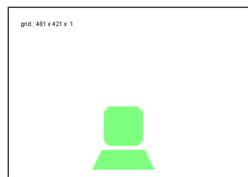


図 2: 盛り土

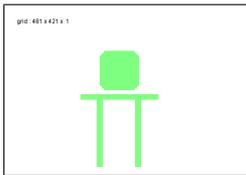


図 3: 高架(橋脚有)

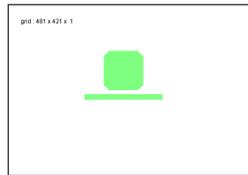


図 4: 高架(橋脚無)

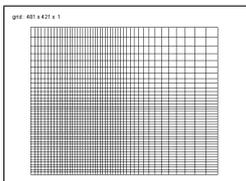


図 5: 計算格子

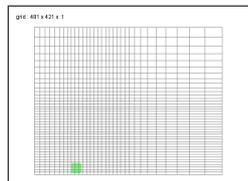


図 6: 車体の領域比

3 格子生成

座標系は2次元直交格子とする。また、車体周りの流れを詳しく解析するため、車体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。格子数はx方向を480、y

方向を420とし(図5)、車体の格子数はx,y方向ともに各40とする。車体を平地上に置いた場合の計算領域の大きさ及び位置の関係を図6に示す。

4 計算方法

停止物体の周囲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、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} : 形状抗力 \mathbf{f}_i : 単位面積あたりに働く形状抗力
 i : 単位ベクトル S_i : i 番目の格子の面積 p_i : i 番目の格子に働く圧力

また、横転現象については、横転には抗力、揚力、車体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、車体に作用する抗力は、風上側の壁面にかかる形状抗力と風下側の壁面にかかる形状抗力の差、揚力は天井にかかる形状抗力と底面にかかる形状抗力の差と定義し、計算を行った。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
 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、力のモーメントの定義より、反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。

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

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

\mathbf{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 F_i : i 番目の要素に働く力の大きさ d_i : i 番目の要素における力の作用線と回転の中心との距離 C_P : 縦揺れモーメント係数 P : ある基準点まわりの縦揺れモーメント ρ : 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 15000 ステップ以降の値を用いて計算する。

5 計算結果

5.1 各地形上の車体についての比較

平地、盛り土(図2)、高架(橋脚有/図3、橋脚無/図4)上に停止している車体に作用する、力、モーメントの係数の平均値を比較する。いずれも乱流粘性を考慮して、レイノルズ数は 2000 とした。

表 1: 各地形上の車体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

表 1 より、平地上に車体がある時、全ての係数の値が最も小さく、続いて高架(橋脚無)上に車体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、盛り土上に車体がある場合には揚力係数の値が、高架(橋脚有)上に車体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。図 7、図 8 に、平地上の場合、高架上(橋脚有)の場合の各流れ場を示す。

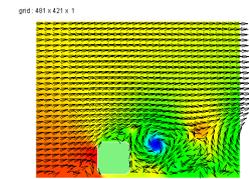


図 7: 平地上の場合の流れ場

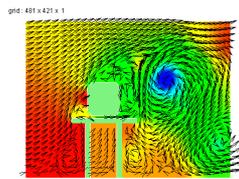


図 8: 高架上(橋脚有)の場合の流れ場

5.2 車体形状と車体にかかる力の係数の関係

本研究で仮定した車体形状(図1)と、正方形の車体とは車体に作用する力の係数に相違が存在するか、考察を行った。ここではレイノルズ数を 2000 とし、境界の影響を最小限に留めるため、車体が宙に浮いた状態を想定した。

表 2 より、正方形の車体にかかる力の係数は、本研究で想定した形状の車体にかかる力の係数よりも、全ての項目において大きいことが読み取れる。本研究では一般的な通勤電車型車両の形状を仮定しているため、通勤電車型車両の形状は、横風の影響を緩和させる効

果があると考えられる。

表 2: 各々の形状の車体に作用する力の係数

	本研究の形状	正方形
抗力係数	1.710438	1.995519
揚力係数	-1.74×10^{-2}	0.1326315
縦揺れモーメント係数	-1.068767	-1.524727

5.3 レイノルズ数と抗力係数との関係

レイノルズ数の変化による抗力係数の変化について、考察を行った。また、地面が及ぼす影響についても調べるため、車体が宙に浮いた状態と、平地上に停止している状態との比較を行った。図 9、図 10 から、抗力係数は、高レイノルズ数領域でほぼ一定の値をとることが確認できる。

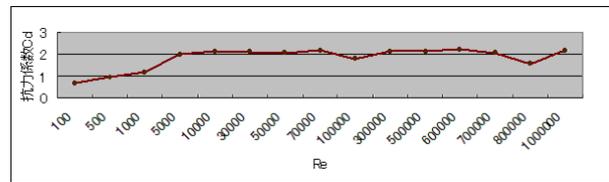


図 9: レイノルズ数と抗力係数の関係(空中の車体)

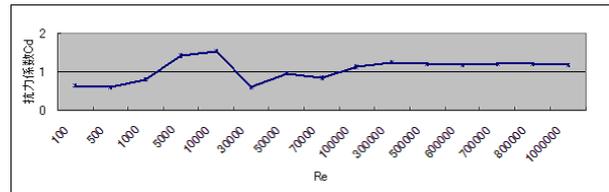


図 10: レイノルズ数と抗力係数の関係(地上の車体)

6 まとめと今後の課題

本研究では、横風を受ける停止中の車体に働く種々の力の係数と、地形、車体形状、レイノルズ数との関係を明らかにした。しかし今回は、車体の壁に働く力を求める際、形状抗力のみを考慮して計算を行ったため、傾向は読み取れたものの、定量的な値の正確さには欠けると言える。また、風を一様流と仮定し、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、走行中の車体に作用する力の考察を目標としたいと考えている。

7 謝辞

本研究を行うにあたり、ご指導いただきました河村先生、研究室の諸先輩方に深く感謝いたします。

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 α4 流体工学", ISBN4-88898-135-3, 2006