

低速で曲線を走行する鉄道車両の走行安全性に及ぼす横風の影響

○学 [機] 島田 晃一 (新潟大・院) 正 [機] 谷藤 克也 (新潟大)

Influence of Cross Wind on the Running Safety of Railway Vehicle
Running on Curve at Low SpeedKoichi SHIMADA, Niigata University, 8050, Ikarashi 2-no-cho, Niigata
Katsuya TANIFUJI, Niigata University

This paper deals with the safety of a train such as derailment or overturn, running at lower speeds on curved sections than usual speeds being subject to strong cross wind. Curving simulation was carried out under the condition that the cross wind is blowing, using the multi-body software SIMPACK. As a result, it is shown that flange climb derailment may occur if a train is running at a lower speed on a tight curve in the cross wind blowing from the outer side. It is also shown that overturn can occur on entrance transition curve, when the cross wind is blowing from inner side.

キーワード：鉄道，曲線通過，走行安全性，横風，マルチボディソフト

Key Words：Railway, Curve Negotiation, Running Safety, Cross Wind, Multi-Body Software

1. はじめに

天候，事故などの様々な要因による運転規制により，車両の基本速度以下で曲線走行する場面が発生する。このとき，走行中の車両に風圧による横力が働くことにより，走行安全性が失われ，脱線または転覆する可能性が考えられる。強風下の車両走行安全性を確保するために，これらの場面での脱線または，転覆現象の解明に関する研究は重要である。

本研究では，マルチボディソフト SIMPACK で一車両モデルを構築し，内軌側，外軌側のそれぞれから，車両に風圧による横力を作用させた状態で曲線通過シミュレーションを行う。それにより，得られた輪重，横圧，脱線係数，車輪上下変位などの各パラメータ，またはアニメーションによって，曲線条件による車両の走行安全性を走行速度ごとに検討する。

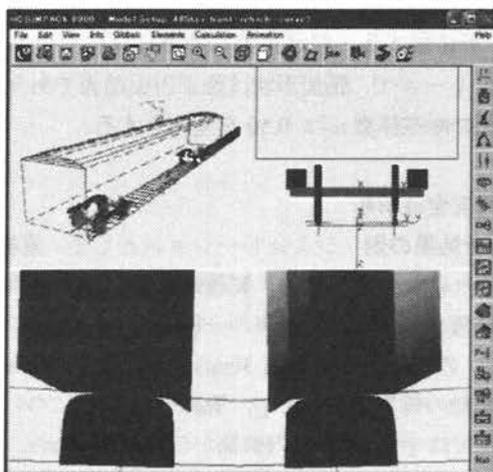


Fig.1 Full vehicle model in SIMPACK

2. 車両モデル

マルチボディソフト SIMPACK を利用し，車体，台車，輪軸などの物体要素を，ばねやダンパなどの力要素で繋ぎ合わせ，在来線特急車両の諸元の数値に基づき，図1に示す一車両モデルを構築した。

自由度は車体，及び前後台車で，前後，左右，上下，ロール，ピッチ，ヨー方向の計18自由度，各車輪軸は前後，左右，ピッチ，ヨー方向の計16自由度，1車両で合計34自由度である。本モデルでは，線形の一次ばね，軸ダンパ，ばねダンパ並列系でモデル化した空気ばね，左右動ダンパ，及び車体台車間の左右動ストッパと上下動ストッパが考慮される。

3. 風圧力モデル

3.1 風圧力の入力方法 走行中の車体側面に作用する風圧力は一様流とし，図2のように車体側面の中心高さに作用し，曲線走行中においても常に車体側面に垂直に作用するものとする。また，風圧力 F_w は式(1)のように分割して4ヶ所に作用させる。

$$F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = F_w / 4 \quad (1)$$

なお，風圧力の衝撃的な作用を避けるために，その入力は図3のような時刻歴で，与えられる。

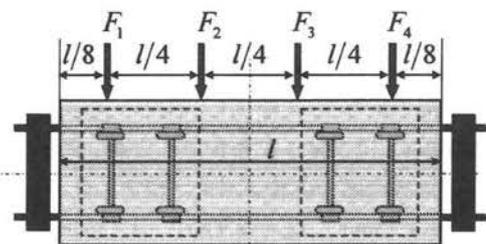


Fig.2 Model of aerodynamic force acting on car-body

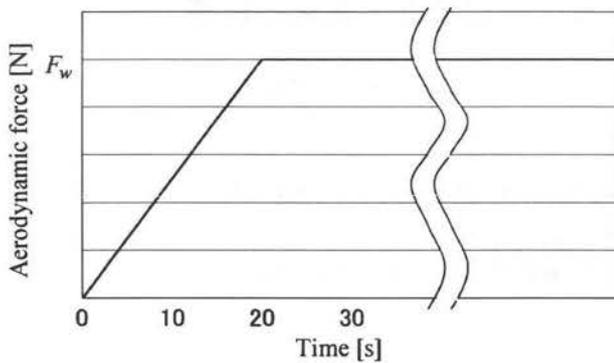


Fig.3 Input of aerodynamic force on car-body

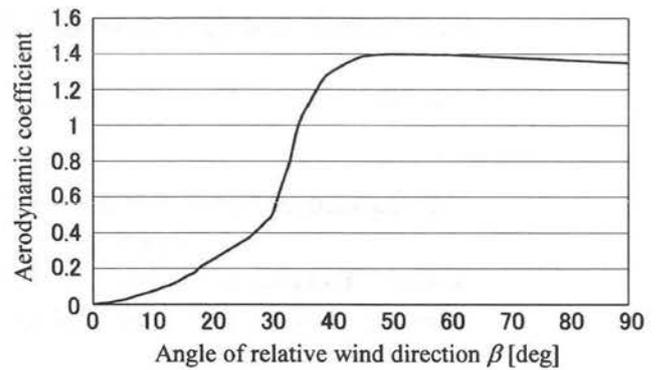


Fig.5 Assumed aerodynamic coefficient for vehicle running windward track on embankment

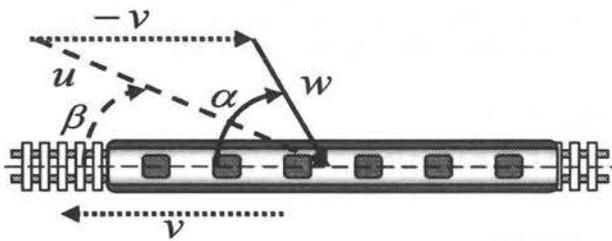


Fig.4 Wind acting on moving vehicle

3.2 車両が受ける風の風向・風速^{(1),(2),(3)} 地上で風速 w 、風向角 α の自然風が吹くとき、走行速度 v の車両には、自然風速と走行速度のベクトルの和であり、相対風速 u 、相対風の風向角 β の相対風が図 4 のように作用する。

車両側面に作用する風圧力 F_w は空気密度 ρ 、車体側面積 S 、相対風速 u 、横力係数 C_s を用いて、式(2)で表される。なお、横力係数 C_s は風向角 β によって変化する。

$$F_w = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot u^2 \cdot C_s \quad (2)$$

また、図 4 に示される速度ベクトルの関係から相対風の風速 u 、及び風向角 β はそれぞれ式 (3)、(4) で表される。

$$u = \sqrt{w^2 + v^2 + 2wv \cos \alpha} \quad (3)$$

$$\beta = \cos^{-1}((w \cos \alpha + v)/u) \quad (4)$$

ここで、強風時の運転規制は自然風速 w の値によって、以下のように走行速度 v が定められている。

- 25m/s $\leq w < 30$ m/s : 徐行 (25km/h)
- 30m/s $\leq w$: 運転抑止

本研究では、 $v = 25$ km/h で走行する車両に作用する $w = 25$ m/s、 30 m/s、 35 m/s の三つの自然風速における風圧力 F_w の最大値及び F_w の最大値とする自然風の風向角 α を図 5 に示す横力係数 C_s を使用し、式(2)~(4)より算出する。この横力係数 C_s は文献 3 に報告される盛土風上側走行(複線)の先頭車両の横力係数を参考に想定したものである。

- $w = 25$ m/s : $F_w = 38.9$ KN $\alpha = 56$ deg
- $w = 30$ m/s : $F_w = 53.3$ KN $\alpha = 55$ deg
- $w = 35$ m/s : $F_w = 70.2$ KN $\alpha = 53$ deg

これら F_w の値を用いて、シミュレーションを実行する。

Table1 Curve condition

	Curve 1	Curve 2	Curve 3
R [m]	400	160	117
V [km/h]	75	40	25
C [mm]	85	65	0
L [m]	85	65	0
S [mm]	5	20	10

4. シミュレーション条件

4.1 軌道条件 解析の対象は通常の R400m の曲線、R160m の急曲線、及び分岐器であり、曲線半径 R、曲線半径による基本速度 V、設定カント量 C、緩和曲線長 L、そして、スラック S を表 1 に示す。表において、Curve 1 は R400m の曲線、Curve 2 は R160m の曲線、Curve 3 は分岐器を模擬した R117m の曲線である。

4.2 走行条件 各曲線において、10km/h から解析を始め、表 1 に示した基本速度に至るまで解析を行う。なお、走行速度は緩和曲線出口で目的の速度となるように設定する。設定した速度は以下の通りである。

- R400 m : 10, 25, 40, 60, 75 [km/h]
- R160 m : 10, 25, 40 [km/h]
- 分岐器 : 10, 25 [km/h]

車両には外力として、遠心力と外軌または内軌側からの風圧力 F_w が作用する。軌道不整は考慮しない。レール形状は 50kgN レールで、踏面形状は修正円弧踏面であり、車輪レール間の摩擦係数 μ は 0.50 を基本とする。

5. 走行安全性解析

5.1 解析結果の例 シミュレーションとして、直線では、風速 35m/s においても脱線、転覆は発生しないが曲線では脱線、転覆が発生した。結果の一例として、脱線では、半径 160m、外軌側からの風速 30m/s、走行速度 10km/h の場合の先頭軸の輪重 P、横圧 Q、脱線係数 Q/P について図 6 に、転覆では半径 160m、内軌側からの風速 35m/s、走行速度 40km/h の場合の第一軸の輪重 P、車輪浮き上がり量、脱線係数 Q/P について図 7 に示す。なお、脱線または転覆後の車両の挙動を模擬することができないため、シミュレー

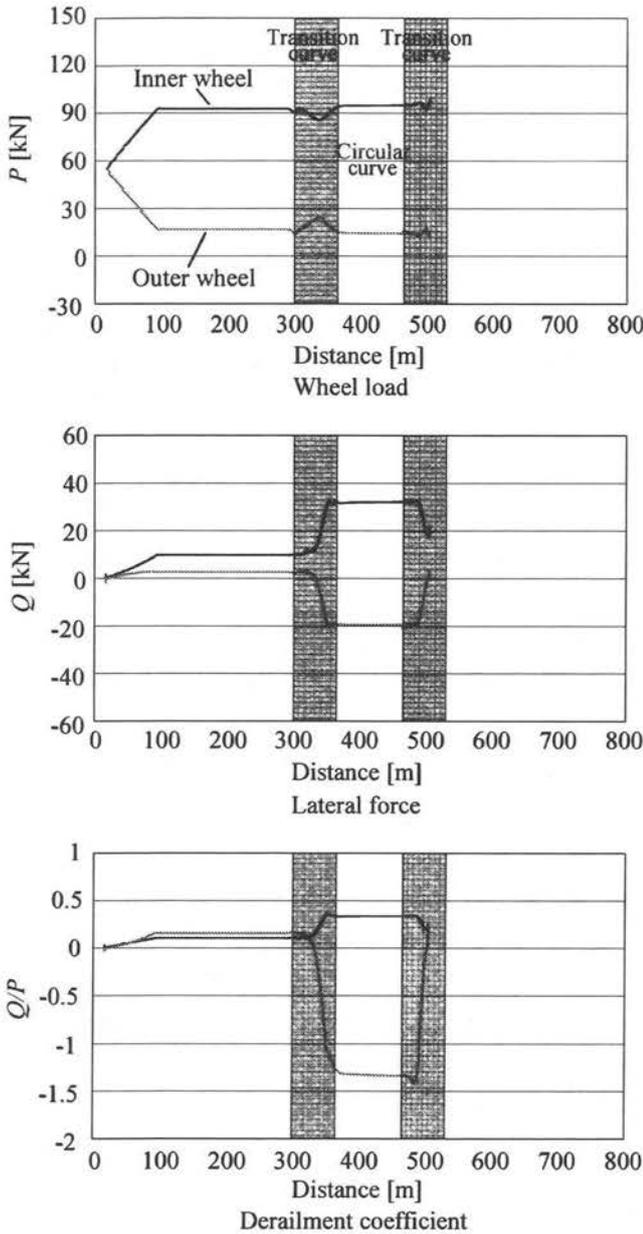


Fig.6 Example of derailment ; 1st wheel-set, $w=30\text{m/s}$, $R160\text{m}$ curve at 10km/h

ションは脱線または転覆が発生した時点で停止している。脱線の例では輪重が0になっておらず、かつ脱線係数が緩和曲線出口において、約1.4に増大しており、乗り上がり脱線が発生したと確認される。

転覆の例では、緩和曲線入口において、脱線係数が低い状態で輪重が0になっていることから、転覆が発生したことが確認される。

5.2 曲線外軌側からの風圧力 車両に外軌側から風圧力が作用したときの風速ごとの脱線、転覆の発生の有無を表2に示す。表において、○は曲線通過が可能であることを示し、DRは脱線、OTは転覆、*は片輪走行が発生したことを示す。風速25m/sの場合、脱線、転覆は生じていない。風速30m/sの場合、急曲線の緩和曲線出口と分岐器において、走行速度10km/hで乗り上がり脱線が発生する。風速35m/sでは、 $R400\text{m}$ の曲線における75km/hを除いて、い

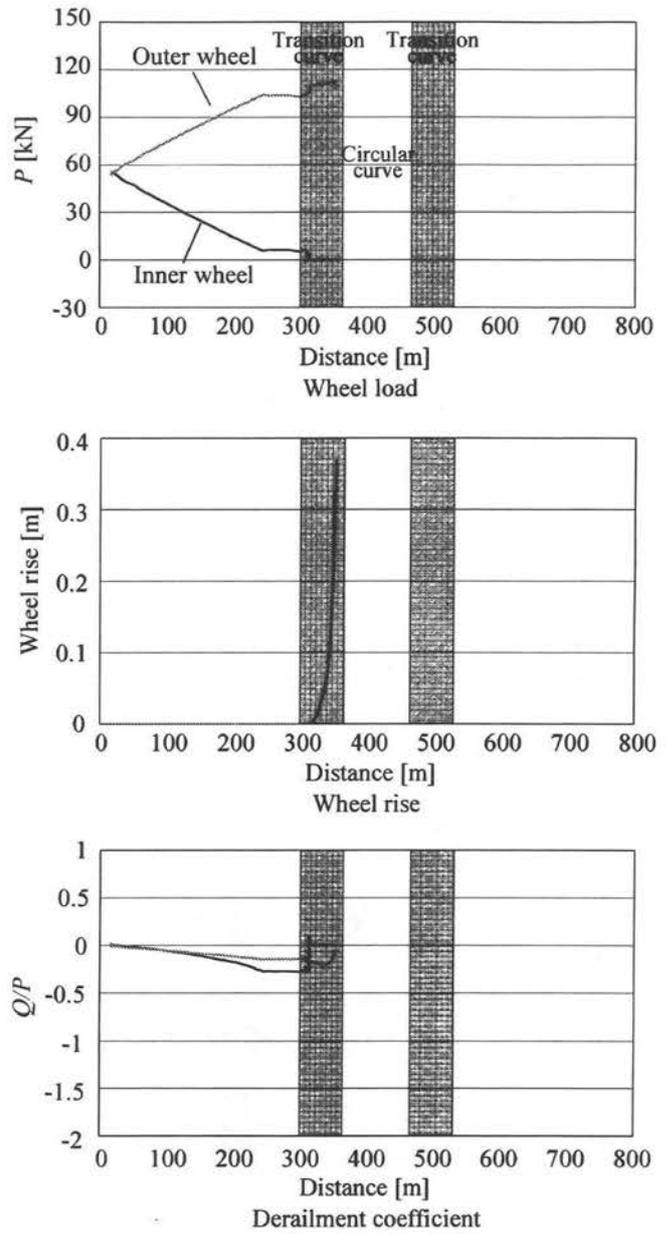


Fig.7 Example of overturn ; 1st wheel-set, $w=35\text{m/s}$, $R160\text{m}$ curve at 40km/h

れも緩和曲線入口で乗り上がり脱線が発生する。これらの結果より車両に外軌側から風圧力が作用する場合、曲線半径が小さく、速度が低くなるほど、脱線の傾向があらわれる。すなわち、曲線外軌側からの風圧力では転覆は起きにくく、低速走行するときに、乗り上がり脱線が発生する可能性が示される。

5.3 曲線内軌側からの風圧力 車両に内軌側から風圧力が作用したときの風速ごとの脱線、転覆の発生の有無を表3に示す。風速25m/s, 30m/sの場合、脱線、転覆は生じていない。風速35m/sでは、いずれの曲線でも基本速度に近づくと緩和曲線入口で転覆が発生している。しかし、それより低速では、曲線区間で内軌側の車輪が浮き上がり、片輪走行となる。これらの結果より、車両に内軌側から風圧力が作用する場合、緩和曲線入口において、先頭軸車輪で最も内軌側輪重が減少し、走行速度があがるほど、輪重

Table2 Simulation result (outer side wind)

$w=25\text{m/s}$			
v km/h	$R=400\text{m}$	$R=160\text{m}$	point
10	○	○	○
25	○	○	○
40	○	○	○
60	○	○	○
75	○	○	○

$w=30\text{m/s}$			
v km/h	$R=400\text{m}$	$R=160\text{m}$	point
10	○	DR	DR
25	○	○	○
40	○	○	○
60	○	○	○
75	○	○	○

$w=35\text{m/s}$			
v km/h	$R=400\text{m}$	$R=160\text{m}$	point
10	DR	DR	DR
25	DR	DR	DR
40	DR	DR	DR
60	DR	DR	DR
75	○	○	○

Table3 Simulation result (inner side wind)

$w=25\text{m/s}$			
v km/h	$R=400\text{m}$	$R=160\text{m}$	point
10	○	○	○
25	○	○	○
40	○	○	○
60	○	○	○
75	○	○	○

$w=30\text{m/s}$			
v km/h	$R=400\text{m}$	$R=160\text{m}$	point
10	○	○	○
25	○	○	○
40	○	○	○
60	○	○	○
75	○	○	○

$w=35\text{m/s}$			
v km/h	$R=400\text{m}$	$R=160\text{m}$	point
10	○*	○*	○*
25	○*	○*	OT
40	○*	OT	OT
60	OT	OT	OT
75	OT	OT	OT

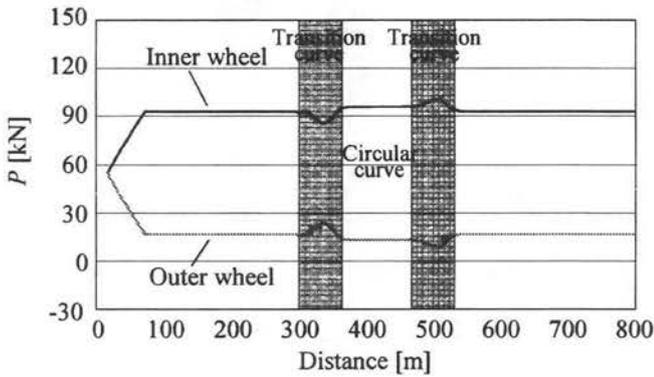


Fig.8 Wheel load on R160m curve ; 1st wheel-set $w=30\text{m/s}$, at $v=10\text{km/h}$, $\mu=0.25$

の減少することが確認される。また、内軌側からの風圧力では脱線は起きにくく、走行速度及び風速によっては、転覆が発生する可能性があることが示される。

5.4 摩擦係数の影響の検討 脱線または転覆が発生した曲線、風速、走行速度において、摩擦係数 μ を 0.5 から 0.25 に変更して、解析を行った。その結果、乗り上がり脱線が発生していた風速 30m/s の場合に、 $\mu=0.5$ で急曲線の緩和曲線出口と分岐器において、乗り上がり脱線が発生したのに対し、 $\mu=0.25$ では乗り上がり脱線は発生していない。半径 160m の曲線について、外軌側から風速 30m/s、走行速度 10km/h の条件での先頭軸の輪重 P を図 8 に示す。このことから、摩擦係数 μ が低いときには、低速で曲線走行する車両でも、脱線は発生しにくくなることが示される。

6. まとめ

低速で曲線走行する車両に内軌側、外軌側のそれぞれから横風が作用したときの走行安全性について、マルチボディソフト SIMPACK の一車両モデルを用いた曲線通過シミュレーションにより検討した。

車両に外軌側から風圧力が作用する場合には、曲線半径が小さく、速度が低くなるほど、脱線の傾向があらわれ、低速で走行するときに、乗り上がり脱線が発生する可能性がある。なお、摩擦係数 μ が低い場合には、低速で走行しても脱線は発生しにくい。

車両に内軌側から風圧力が作用する場合には、緩和曲線入口において、先頭軸の車輪で最も内軌側の輪重が減少し、転覆の可能性が生じる。

参考文献

- 1) 日比野 有, 石田弘明, 車両の転覆限界風速に関する静的解析法, 鉄道総研報告, Vol.17, No.4, (2003.4), pp.39-44.
- 2) 日比野 有, 横風による車両転覆に関する条件, RRR, Vol.60, No.8, (2003.8), pp.8-9.
- 3) 種本 勝二, 鈴木 実, 他, 風洞試験による防風対策の評価, RRR, Vol.62, No.2, (2005.2), pp.10-13.