

# 1413 蛇行動限界速度と実測摩耗踏面による等価踏面勾配との関係の研究

○市川 聡 (東急車輛)

## Study of hunting velocity and equivalent conicity by actual worn wheel tread

Satoshi ICHIKAWA, Tokyu Car Co., 3-1, Ohkawa, Kanazawa, Yokohama City

Because the train running speed is getting higher, it should be considered at the development stage of the bogie to prevent the hunting. General thought is that the hunting velocity is same when the equivalent conicity is the same value. In this study, measurement of the wheel tread shape at some mileages and the equivalent conicity calculation are done. Then simulation for the hunting velocity with the actual worn wheel tread is done. The results have the different hunting velocity, even when the equivalent conicity is the same value. The result in this study makes clear that the hunting velocity is higher when the contact area between rail and wheel in the rail direction is longer.

Keywords: High speed stability, Hunting velocity, Actual worn wheel tread, Equivalent Conicity, High speed train

### 1. はじめに

鉄道車両の高速化による、到達時間の短縮は社会的な要求事項である。高速化に伴う課題は、多々あるが、その中に高速走行安定性の向上がある。高速走行時に蛇行動が発生すると、乗り心地が悪化するばかりでなく、軌道破壊や脱線につながる懸念される。すなわち、蛇行動発生を抑制することは、高速車両の台車設計に要求される重要な課題の一つである。

一般に、等価踏面勾配の変化により蛇行動限界速度が変化するといわれている。特に、踏面摩耗後は、凹摩の発生や接触点の変化により等価踏面勾配が大きくなる。これにより、蛇行動限界速度が低くなるがシミュレーションや試験結果として得られている<sup>1)</sup>。一方、新製時から時々刻々の踏面形状の変化に対して、蛇行動限界速度の検討を行った例は少ない<sup>2)</sup>。

我々は、営業投入後約1年を経過した時点で、最長約27万km走行後の踏面形状の実測データを入手した。各車両は新製後踏面測定までの間、踏面の削正は行われていない。これを受けて、営業開始後1年の間で進行する摩耗踏面に対して、蛇行動限界速度の検討を行った。

### 2. 数値解析による蛇行動限界速度の算出

#### 2.1 蛇行動限界速度の算出方法

一般に、蛇行動限界速度の算出方法は、大きく二通りの手法がある。

一つは、マルチボディダイナミクスによる時刻歴解析による方法である。これを用いれば、ばね系の非線形性も入力でき、より現実に近い諸元で検討ができる。解の算出には、車両に速度を設定し、適当な軌道不整を含む軌道を走行させ、解の収束を判断する。そのため、検討に時間を要することがしばしば生じる。

もう一つは、線形運動方程式に基づく固有値解析による方法である。これは、車両研究会乗り心地向上分科会CDWGにより、基礎的な運動方程式が導出されている<sup>3)</sup>。固有値解析であるので、計算時間が短いことが有利である。反面、線形範囲のみでの検討となる。

ここでは、検討時間の短縮のため固有値解析による安

定性判別を用い、蛇行動限界速度を算出した。ヨーダンバ片側フェールなどの左右非対称なモデルでも精度良く検討できるよう、Table 1に示す前後系の自由度を含んだ28自由度の1車両モデルを用いた<sup>4)</sup>。

Table 1 Degree of freedom for simulation model

質点	自由度の方向	自由度の数
ばね上(車体)	左右, ロール, ヨー, 前後	4×1= 4
ばね間(台車)	左右, ロール, ヨー, 前後	4×2= 8
ばね下(輪軸)	左右, ロール, 前後	3×4=12
ヨーダンバ部	前後	1×4= 4
合計		28自由度

#### 2.2 等価踏面勾配の算出方法

蛇行動限界速度を固有値解析で求める場合、車輪とレールとの接触点に働くクリープ力は線形法則に従うものと考えて検討を行う。Fig.1に示す車輪レール間の接触情報がある場合、等価踏面勾配は式(1)で算出できる。

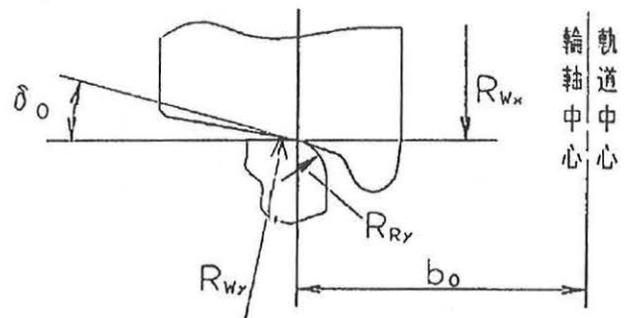


Fig.1 Contact parameters with wheel and rail

$$\lambda = \frac{-R_{WY} + R_{RY} \times \frac{R_{Wx}}{R_{Rx}}}{-R_{WY} - R_{RY}} \times \frac{b_0 + R_{RY} \times \sin \delta_0}{b_0 - R_{Wx} \times \tan \delta_0} \times \tan \delta_0 \quad (1)$$

等価踏面勾配 $\lambda$ は、車輪半径 $R_{Wx}$ 、接触点における車輪の半径 $R_{Wy}$ 、レールの半径 $R_{Ry}$ 、接触角度 $\delta_0$ と接触点左右間隔 $2 \times b_0$ とで表される。式(1)中のレールの前後方向曲率半径 $R_{Rx}$ は通常無限大である。車輪が摩耗しても、車輪半径 $R_{Wx}$ と接触点左右間隔 $2 \times b_0$ とに大きな変化はない。

すなわち、等価踏面勾配 $\lambda$ は、接触点における車輪とレールとの半径 $R_{Wy}$ 、 $R_{Ry}$ と接触角度 $\delta_0$ の3つのパラメータで決定される。

### 2.3 解析解の信頼性

蛇行動解析に先立ち、解析モデルの信頼性を検証する。過去に実施された台上回転試験において、蛇行動を開始した時点の速度と固有値解析結果とを比較する。

固有値解析による安定性判別は、式(2)に示す減衰比 $\xi$ を用いることが一般的である。

$$\xi = -\frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \quad (2)$$

式(2)の $\alpha$ と $\beta$ とは、それぞれ算出された固有値の実部と虚部を示す。

蛇行動限界速度を減衰比により判別する場合、一般に二通りの判断基準がある。一つは、数式上の不安定となる $\xi=0.0$ であり、もう一つは設計上の余裕を考えた場合の $\xi=0.1$ とする場合である<sup>3)</sup>。

ここでは、台上回転試験による試験結果と固有値解析結果とを比較することで判断基準を明確化した。試験と固有値解析との比較においては、回転試験台の軌条輪半径775mmを $R_{Rx}$ に用いて等価踏面勾配 $\lambda$ を算出した。

Fig.2に、台上回転試験における蛇行動開始速度を1として正規化した結果を示す。解析結果は、減衰比 $\xi$ が0.0 (Simulation (0.0))または0.1 (Simulation (0.1))を下回る最小速度とする。

この結果、減衰比 $\xi$ が0.0を判断基準として用いれば、台上回転試験における蛇行動の開始速度とほぼ同等な結果を算出できることを得た。従って、固有値解析モデルの信頼性は十分高いと判断できる。

これを受け、以降、減衰比 $\xi$ が正である最大速度を蛇行動限界速度 $V_c$ として取り扱うこととする。

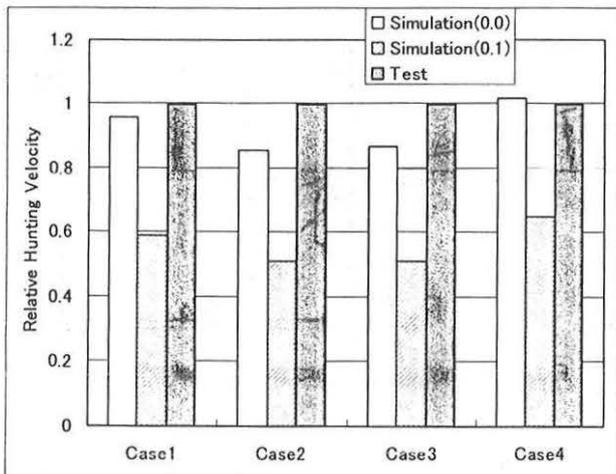


Fig.2 Comparison of the Hunting Velocity between Test and Simulation

## 3. 摩耗踏面の数値化

### 3.1 摩耗踏面形状

摩耗踏面形状は、Table 2に示す走行時間、走行距離の車両で調査した。測定対象の車両は、全て同一形式である。摩耗踏面形状は、実測により約0.3mmピッチ、約560点の点群データとして集積される。それぞれ代表的な摩耗踏面形状(抜粋された点による)を新品形状と比較してFig.3,4に示す。寸法を示した点が最大の摩耗部位と摩耗量を示す。つまり、26万km走行後の踏面形状は、最大2.2mmの摩耗があったことを示す。図中、Aで示した点が新品時の新品レールとの接触点である。なお、同一車両の他の踏面形状はFig.3,4に示す形状と大きな差はなかった。

なお、踏面形状を測定した車両の基礎ブレーキはディスクブレーキであり、踏面ブレーキは用いられていない。

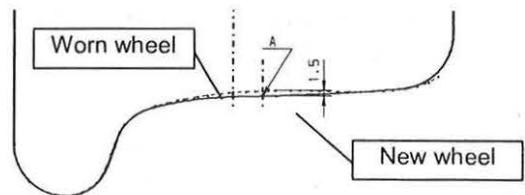


Fig.3 Worn wheel tread after 170,000km running

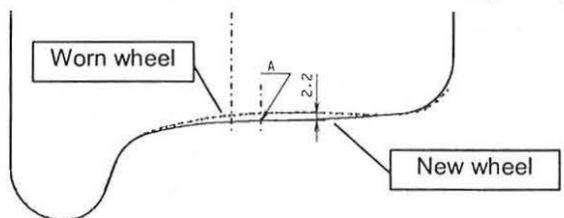


Fig.4 Worn wheel tread after 260,000km running

Table 2 Mileage of the vehicle which measured worn wheel tread

Measured vehicle	Mileage [km]	Term after service	Tread shape
A	40,682	2 months	
B	126,107	6 months	
C	129,480	6 months	
D	162,046	8 months	
E	173,590	8 months	Fig. 3
F	258,584	12 months	Fig. 4
G	265,074	12 months	
H	266,755	12 months	

### 3.2 摩耗車輪の等価踏面勾配

レール側の条件は、新品レールと直線軌道上の代表的な実測摩耗レールとで検討した。Fig.5は左レールを示す。

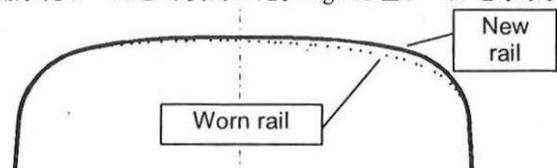


Fig.5 New Rail and Typical Worn Rail shape

それぞれのレール条件に対して摩耗車輪の等価踏面勾配を求めた。摩耗踏面における解析に必要なパラメータ( $R_{Wy}$ 、 $R_{Ry}$ と $\delta_0$ )は、マルチボディダイナミクスソフトであるSIMPACKの線形化機能を用いて算出した。

走行距離と等価踏面勾配との関係をFig.6に示す。今回

の摩耗踏面形状では、新品レールに対して等価踏面勾配を走行距離の2次関数として近似できた。一方、摩耗レールに対しては明確な近似式は見出せなかった。踏面摩耗の進行につれ、新品レールに対する等価踏面勾配が摩耗レールより大きくなる。今回の摩耗踏面形状は、摩耗レールとの接触点付近で摩耗量が最大となることから、摩耗レールが主体となって摩耗した形状と推測できる。

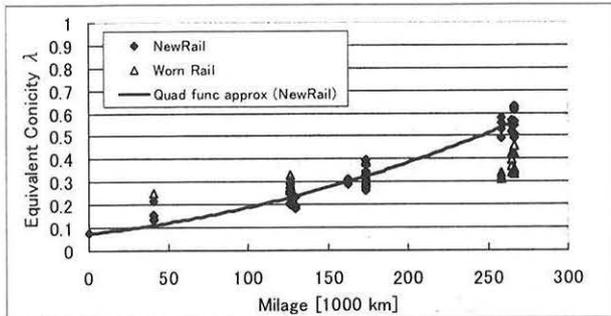


Fig.6 Relationship between Mileage and Equivalent conicity  $\lambda$

#### 4. 蛇行動限界速度の算出

##### 4.1 実測摩耗踏面による検討

前章で数値化した摩耗踏面に対して、蛇行動限界速度  $V_c$  を算出した。ここでは、新品レール上と摩耗レール上で検討した。これ以降、固有値解析の入力諸元で変化させたのは、 $R_{wy}$ 、 $R_{ry}$  と  $\delta_0$  との3パラメータのみとし、車両諸元は変更しない。車両諸元は、踏面を実測した車両の値を用いた。なお、実車ではヨーダンバを実装するが、本報告ではヨーダンバを取り除いた状態で解析した。

その結果、得られた蛇行動限界速度と走行距離との関係を図.7に、等価踏面勾配  $\lambda$  との関係を図.8に示す。

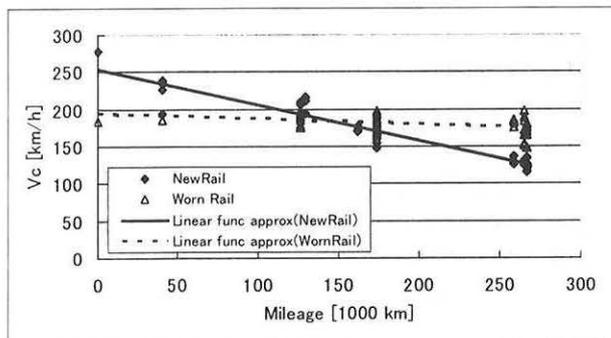


Fig.7 Relationship between Mileage and Hunting Velocity  $V_c$  [km/h]

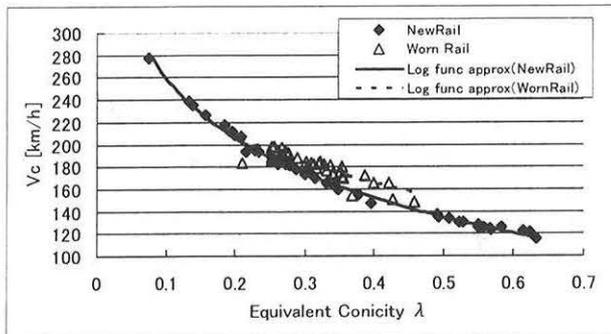


Fig.8 Relationship between Equivalent Conicity  $\lambda$  and Hunting Velocity  $V_c$  [km/h]

新品レール上の時、蛇行動限界速度は走行距離が増加するほど減少する。本検討では、おおよそ10万km走行に対して50km/hの蛇行動限界速度が低下した。一方、摩耗レール上では蛇行動限界速度の低下はあまりなかった。いずれも一次関数として近似できた。

Fig.8から同一レール上であれば、蛇行動限界速度は等価踏面勾配の関数として表されることが示される。これは、従来から論じられた通りの結論である。今回の検討では、その関係はlog関数として近似できた。

一方、同じ等価踏面勾配であっても、新品レール上と摩耗レール上で蛇行動限界速度に差が生じることがわかった。特に今回の検討では、等価踏面勾配が0.33~0.4では摩耗レール上のほうが蛇行動限界速度は高くなる傾向にある。

この解析には、レールの条件違いによる、等価踏面勾配の算出方法や蛇行動限界速度の算出手法には差がない。すなわち、ここで得られた結果は、蛇行動限界速度が等価踏面勾配だけでは決まらない可能性を示す。次節で、その検証を行う。

#### 4.2 等価踏面勾配がほぼ同一条件での蛇行動限界速度

等価踏面勾配が同一であっても蛇行動限界速度に差が生じることがわかった。特に、Fig.8において等価踏面勾配が0.35付近に注目すると、新品レール上では160km/h程度に対して、摩耗レール上では180km/h程度である。

この結果を受けて等価踏面勾配が0.33~0.35となる条件だけ抽出して、詳細に検討を行った。この時、実測値に加え、検討の一般化を目指す意味で、本検討に用いた車両諸元とは異なる踏面とレールとの組み合わせをベースとしてパラメータスタディを行った。Table 3に  $R_{wy}$ 、 $R_{ry}$  と  $\delta_0$  との3パラメータと得られる等価踏面勾配を示す。

Table 3 Input parameters and Equivalent conicity  $\lambda$

Condition	$R_{wy}$ [mm]	$R_{ry}$ [mm]	$\delta_0$ [deg]	Equivalent Conicity $\lambda$	Mileage [1000 km]
Worn wheel and New rail	153.7	83.8	7.87	0.332	174
	113.4	67.8	7.27	0.343	174
	130.2	79.6	7.12	0.347	174
Worn wheel and rail	103.7	69.3	6.18	0.349	174
	119.0	46.3	10.56	0.341	265
Parameter study	121.5	32.6	12.23	0.336	267
	115.3	41.2	11.03	0.340	267
Parameter study	900	600	5.60	0.332	-
	900	600	5.80	0.345	-
	900	767	2.65	0.335	-
	900	768	2.65	0.337	-
	704	600	2.65	0.332	-
	698	600	2.65	0.349	-
	750	640	2.65	0.335	-
	400	300	4.50	0.337	-
	400	342	2.65	0.333	-
550	300	7.65	0.333	-	

この条件で蛇行動限界速度を算出した結果を図.9に示す。その結果、極めて近い等価踏面勾配 (0.33から0.35) にもかかわらず、先に示した3つのパラメータを変化させるだけで133km/hから181km/hまで蛇行動限界速度が変化することがわかった。

その原因を調査するために、パラメータとの比較を行った。各接触パラメータと蛇行動限界速度との関係をFig.10から12に示す。その結果、 $R_{wy}$  と  $R_{ry}$  は小さいほど、 $\delta_0$  は大きいほど蛇行動限界速度は大きくなる。しかし、い

ずれのパラメータでも各値が同じ程度でも蛇行動限界速度に差が発生することがわかる。このことから、これら3つの接触パラメータだけでは蛇行動限界速度は決定しないと判断した。

続いて、車輪レール間の接触だ円の大きさと蛇行動限界速度との関係を調べた。Fig.13に、接触だ円率（だ円の長軸と短軸との比）と蛇行動限界速度との関係を示す。この時、接触だ円の長軸がレール方向に長くなると、蛇行動限界速度が上昇する。これは、車輪とレールとの接触領域がレール方向に長くなることで、輪軸の左右動を抑制できるため、蛇行動限界速度が上昇すると推測する。

従って、等価踏面勾配が同一であっても、車輪レール間の接触だ円の形状によって蛇行動限界速度が変化すると結論づける。

## 5. まとめ

実測摩耗踏面を用いて、蛇行動限界速度の変化を固有値解析による数値検討で算出した。その結果、本検討の範囲では次の結論を得た。

- 1) 固有値解析における蛇行動限界速度は、減衰比が0.0を基準値とすれば、台上回転試験の蛇行動の開始速度に近い結果を得る。
- 2) 同一レール上の条件では、摩耗が進行すると等価踏面勾配が上昇し、蛇行動限界速度は低下する。
- 3) 車輪の摩耗進行による蛇行動限界速度の低減度合いは、レール条件によって変化する。
- 4) 同一等価踏面勾配であっても蛇行動限界速度には差が生じることがある。その時、車輪レール間の接触だ円がレール方向に長いほど蛇行動限界速度は高くなる。

本検討では接触点情報の違いによる蛇行動限界速度を、数値解析で算出した。一方、台上回転試験と数値解との比較は、新品踏面、レールの条件ではしているものの、踏面が摩耗した状態での試験は行っていない。

今後は、台上回転試験でも本検討と同様に、摩耗踏面の車両を用いるなど、踏面形状をパラメータとし、より詳細な蛇行動現象の把握を行うことが課題である。

## 参考文献

- 1) 弘津哲二, 寺田勝之, 平石元実, 油井兄朝: 鉄道車両の蛇行動シミュレーション(第2報, 円弧踏面車輪を使用した場合), 日本機械学会論文集(C編), 56巻528号, pp2149-2157, 1990-8
- 2) 谷藤克也: 新幹線電車の摩耗車輪とレールとの接触(幾何学的接触による車輪有効こう配の分析), 日本機械学会論文集(C編), 54巻497号, pp.305-311, 1988-1.
- 3) 多自由度モデルによるボギー車の蛇行動解析 - 計算の方法と結果 - : 車両研究会 乗心地向上分科会 CDWG
- 4) 大野真弘, 市川聡: 蛇行動解析ソフトウェアの機能拡張, 東急車輛技報 第53号, pp2-9, 2003-12

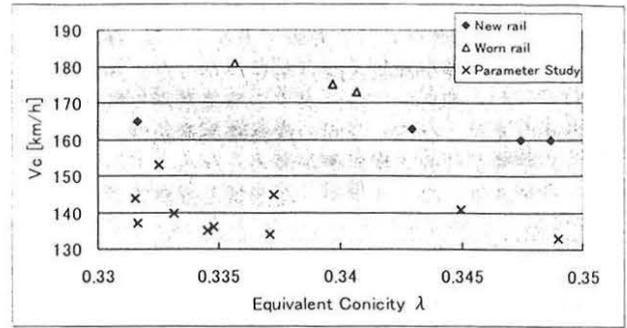


Fig.9 Relationship between Equivalent concidity and Hunting velocity  $V_c$  [km/h] (Equivalent concidity from 0.33 to 0.35)

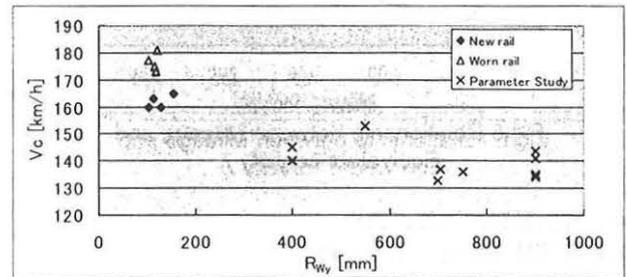


Fig.10 Relationship between  $R_{wy}$  and  $V_c$  [km/h]

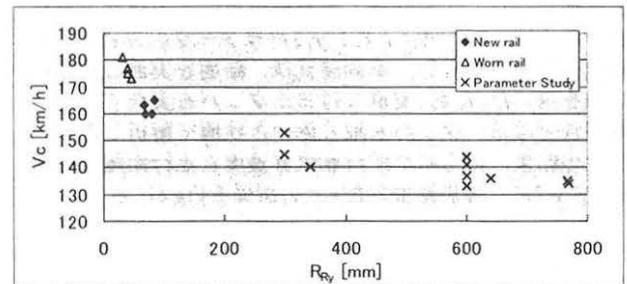


Fig.11 Relationship between  $R_{ry}$  and  $V_c$  [km/h]

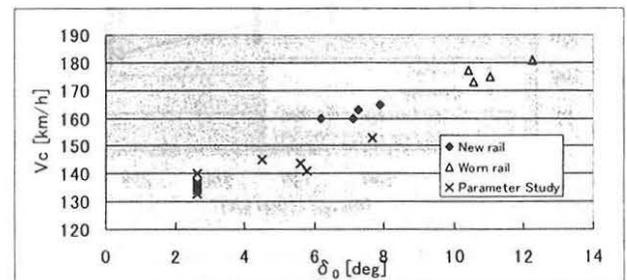


Fig.12 Relationship between  $\delta_0$  and  $V_c$  [km/h]

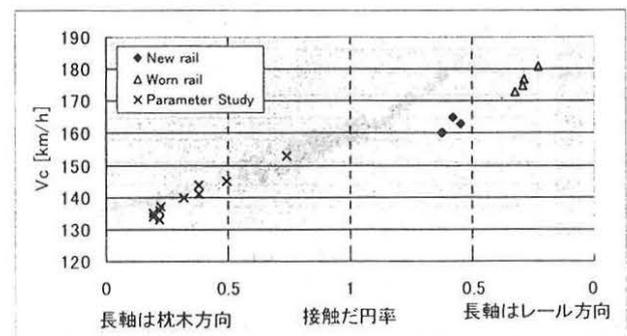


Fig.13 Relationship between Contact Area (ellipse rate) and Hunting Velocity  $V_c$  [km/h]