

1107 アタック角が付与された車輪フランジとレールとの接触面を 3次元の場で捉えるための一研究

正〔機〕○土井 賢一 (JR 東日本)

正〔機〕 永瀬 和彦 (金沢工大)

Contact Point Position under Three Dimensional Field between Rail and Wheel Flange Provided with Attack Angle

Ken-ichi DOI, East Japan Railway Co. 2-479, Nisshin-cho, Kita-ku, Saitama City

Kazuhiko NAGASE, Kanazawa Institute of Technology

On the cause of Wheel Climb Derailment, the contact point position between the rail and the wheel has a tight contact with the wheel lift-up value, which is the most relational factor to the WCD. The position, situated in the wheel-flange, has used to be one or two dimensionally defined, because the position has been deemed to transfer merely to the vertical and rail-longitudinal directions. But, the position also transfers to the lateral direction according to the changing of the wheel attack angle to the rail when the WCD occurs. Then, the position should be three dimensionally defined, and the authors had made clear the position using a geometric method and a model use experiment. The friction coefficient on the contact point has also a tight contact with the WCD and the coefficient is said to be profoundly affected by the sliding length and velocity on the point. They analyze the sliding length of the point using of the three dimensionally defined positions. The results of the study are written in the paper briefly.

Keywords : wheel-climb derailment, contact point position, wheel lift-up value, attack angle

1. はじめに

のり上がり脱線の解明に不可欠なレールと車輪の接触の場は、従前は1次又は2次元でのみ論じられてきた。しかし、車輪にアタック角が付与された状態の下での接触点位置はレール長手及び車軸直下方向だけでなく、枕木方向にも移動する。よって、この場を論ずるに際しては、車輪とレールとの形状を3次元空間で捉えて考察をすべきである。本報では、著者らがこれまでに幾何学的解析および模型実験によって得た接触点位置に関わる知見を基に、車輪にのり上がりが起きたときの、接触点におけるすべり方向を3次元で捉えた結果などを考察する。

2. 車輪・レール接触面の3次元空間内での位置

2.1 フランジとレールの接触範囲と車軸中心からの距離

既報¹⁾²⁾の中で、著者らは、急曲線を車輪がアタック角を生じながらフランジ接触状態で走行している状況を想定し、車輪フランジと外軌レールゲージコーナ部の接触状態を研究した成果を報告してきた。その結果のポイントとしては

- ・車輪とレールの接触位置は、レール長手方向に10mm程度の範囲を持つ細長い接触面となる
- ・アタック角を生じていることにより、外軌側車輪は2mm程度のわずかな車輪上昇量でフランジ接触状態となり、車輪とレールの接触範囲はアタック角に応じて急激に車軸直下から車両進行方向前方に移動する
- ・接触位置の移動に伴い、接触位置の車軸中心からの距離もわずかな車輪上昇量で急激に増大しフランジ外周に近づく

という点である。

接触状態のイメージを図1に、また一例として、車輪(半径430mm・修正円弧踏面・フランジ角度65°)とレール(50kgN レール)がアタック角1°で接触している状態の接触範囲を図2に示す。

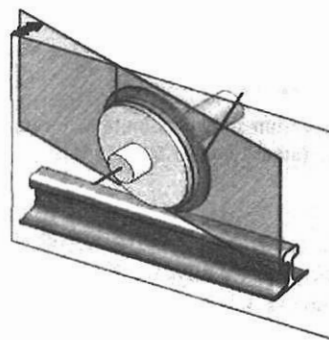


Fig.1 An image of contact condition between wheel and rail provided with attack angle (drawn by Y.Imai)

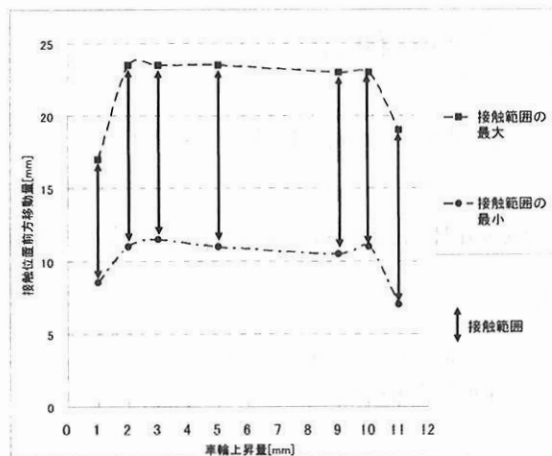


Fig.2 Contact area between wheel and rail
(attack angle 1.0°)

またこのような接触状態の場合、接触範囲の各位置の車軸中心からの距離も、ある幅で分布し、これが車輪上昇に伴って変化する。図2と同じ例の場合で、車軸中心からの距離の分布を図3に示す。

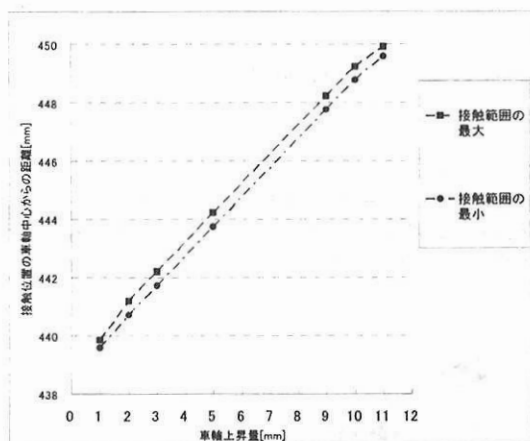


Fig.3 Distance from contact point to axle center
(attack angle 1.0°)

車輪フランジ・レールの接触位置は、車輪上昇量が1mm程度のところでその車軸中心からの距離が車輪半径(=430mm)と比較して急激に増大し、その後は車輪上昇量にほぼ比例して順次増大してゆく。

2.2 急曲線走行時の車輪フランジとレールのすべり方向

これまで見てきたように、急曲線を車輪がアタック角を生じながらフランジ接触状態で走行している状況では、車輪上昇量に応じて、外軌フランジはより車軸中心から離れて、かつ車軸直下より前方の場所で、レールと接触しながら走行していることが分かる。

ところで、実際の車両の急曲線走行時の状況を観察していると、一定の軌道諸元(曲線半径等)、一定の車両諸元(軸箱前後支持剛性等)の下では、ほぼ一定の車輪上昇量と一定のアタック角を維持しながら走行してゆく状況が見られる³⁾。一例として、構内の軌道を想定し、半径110mの急曲線(カントなし、スラック20mm)を、一定の車輪上昇量、アタック角(ここでは1.0°と仮定)で走行す

る状況を考えてみる。

ここで、図4に示すように、座標系を、レール長手方向をx軸、枕木方向をy軸、鉛直方向をz軸と置く。

x軸方向については、内外軌のレール長差に対し、内外軌の車輪・レール接触点の車軸中心からの距離の差による外軌側車輪の進行距離のほうが大きいので、もしx方向のすべりがなければ、外軌側車輪が内軌側よりも先行しアタック角を減少させるような挙動になる。が、ここではアタック角が一定のまま走行している状況を考えていることから、接触点ではx軸方向に進行後方に引き戻されるようなすべりが生じていると考えられる。

またz軸方向では、接触点が車軸直下より前方にあることにより、すべりがなければこの接触点を支点として車輪全体が鉛直上方に上昇する「理論のり上がり量」が生じるが、ここでは車輪上昇量が一定のまま走行している状況を考えていることから、この「理論のり上がり量」と同じだけの鉛直下方へのすべりが生じていることになる。

さらにこのz方向すべりに伴い、フランジ面はz軸方向に対して角度(接触角度)を持っているので、フランジ面に沿ってy軸方向にもすべりが生じることになる。

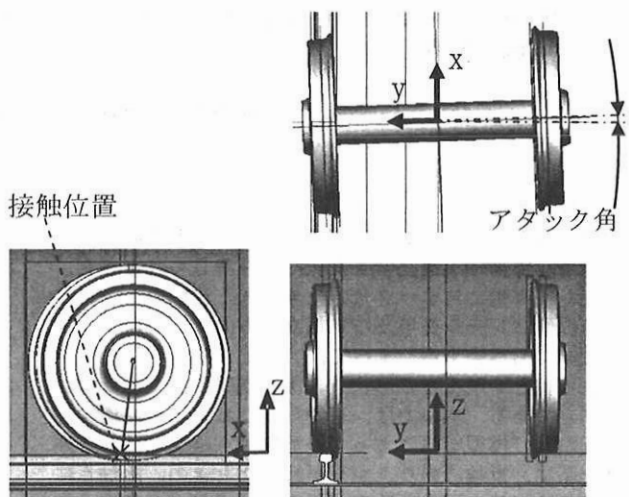


Fig.4 3-dimension coordinates about wheel-rail contact field

このすべりに関して、車輪の微小回転角1°あたりのすべり量を考える。この場合、車輪の進行距離は、 $430 \times \pi / 180 \approx 7.5\text{mm}$ である。既報の中で得られている、接触点前方移動量、接触点の車軸中心からの距離、接触角、理論のり上がり量、のそれぞれの値を基に、各車輪上昇量におけるx, y, z各方向へのすべり量を算出した。

またこれらの値は、3次元空間における車輪フランジ・レール接触点でのすべり方向ベクトルの各座標軸方向成分であり、またこのベクトルの大きさ(ノルム)が、車輪回転角1°あたりのすべり量である。さらに、これら各座標軸方向成分とノルムの比の逆余弦をとることにより、すべり方向ベクトルと各座標軸のなす角(方向角)を求めることができる。結果を表1に示す。上段が車輪フランジ・レール接触範囲のうち最も車軸直下に近い点(「接触範囲の最小」と表記)、下段が最も車軸直下から遠い点(「接触範囲の最大」と表記)におけるすべり方向ベクトルである。なお、表1では各座標値の符号は無視し絶対値のみ示している。

Table 1 The 3-dim. "slipping direction vector" of wheel-rail contact area depending wheel lift-up value (per wheel rotation 1°)

		すべり方向ベクトル(接触範囲の最小)									
		成分 (mm)			大きさ (N/m)			方向角 (deg)			
		x	y	Z	(x, z 成分のみを合成) (mm)	(z に対する比)	(mm)	(z に対する比)	x	y	z
車輪上昇量 (mm)	1	0.093	0.070	0.148 (1)	0.175	(1.18)	0.189	(1.27)	60.3	68.4	38.1
	2	0.113	0.089	0.192 (1)	0.223	(1.16)	0.240	(1.25)	62.0	68.2	36.8
	3	0.130	0.093	0.201 (1)	0.239	(1.19)	0.257	(1.28)	59.5	68.8	38.6
	5	0.165	0.088	0.192 (1)	0.253	(1.32)	0.268	(1.40)	51.9	70.8	44.3
	9	0.236	0.084	0.183 (1)	0.299	(1.63)	0.310	(1.69)	40.5	74.3	53.8
	10	0.254	0.087	0.192 (1)	0.318	(1.66)	0.330	(1.72)	39.8	74.6	54.4
	11	0.268	0.057	0.122 (1)	0.294	(2.41)	0.300	(2.45)	26.8	79.0	65.9

すべり方向ベクトル(接触範囲の最大)											
成分(mm)				大きさ(mm)				方向角(deg)			
		y	z	(x, z 成分のみを合成) (mm)	(z に対する比)	(mm)	(z に対する比)	x	y	z	
車輪上昇量(mm)	1	0.098	0.139	0.297 (1)	0.312	(1.05)	0.342	(1.15)	73.4	66.0	29.8
	2	0.121	0.190	0.410 (1)	0.428	(1.04)	0.468	(1.14)	75.0	66.0	28.8
	3	0.139	0.190	0.410 (1)	0.433	(1.06)	0.473	(1.15)	72.9	66.3	29.8
	5	0.174	0.189	0.410 (1)	0.446	(1.09)	0.484	(1.18)	68.9	67.0	32.1
	9	0.244	0.183	0.401 (1)	0.470	(1.17)	0.504	(1.26)	61.1	68.7	37.2
	10	0.262	0.183	0.401 (1)	0.479	(1.19)	0.513	(1.28)	59.3	69.1	38.5
	11	0.274	0.155	0.332 (1)	0.430	(1.30)	0.457	(1.38)	53.2	70.2	43.5

3. 考察

3.1 接触範囲におけるすべり方向ベクトルと領域全体のすべり挙動

表1を見ると、車輪・レールの接触点位置におけるすべり方向ベクトルには、鉛直方向(z方向)、レール長手方向(x方向)のみならず、枕木方向(y方向)成分も無視し得ない程度に含まれていることが分かる。このすべり方向ベクトルには、軌道諸元一定、アタック角一定、車輪上昇量一定の下で車輪が走行する場合、レール長手方向すべり、鉛直方向すべりに加えて、車輪の回転に伴うすべり成分も含まれている。表1では車輪の単位回転角あたりの長さ成分を記載しているが、例えばこれが一定回転速度の下で生じていると考えれば、すべり速度成分(=単位時間あたりにすべる長さ)と見ることもできる。

すべり量の点では、従来考慮していた鉛直方向すべり(z成分)のみの場合と比較して、レール長手方向すべり(x成分)も考慮した場合には増加し、これに枕木方向すべり(y成分)も考慮した場合ではさらに増加していることが分かる。表1中に、z方向成分のみを考慮する場合に対して、x・z二次元を考慮した場合、x・y・z三次元すべてを考慮した場合の、すべり量の大きさの比率を括弧書きで示す。

また、接触範囲全体にわたって、車輪上昇量が増加するにつれ、x成分がy、z成分と比較して急激に増大し、結果すべり方向ベクトルの向きもx軸方向に近づいてくることが分かる。

さらに表1上段と下段の値を比較すると、x成分はそれほど大きな差はないが、y、z成分は、接触範囲最大の点では、最小の点と比較して2倍程度の大きさとなっており、接触位置を面として捉えた場合には、接触範囲全体でレール表面をこじめるような複雑なすべり挙動をしていることが分かる(図5参照)。

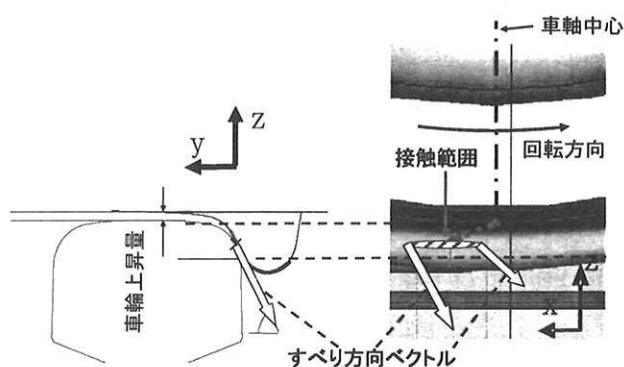


Fig.5 An image of slipping direction vector of wheel-rail contact area

3.2 フランジ直線部と先端R部とのすべり状態の差異

表1の各車輪上昇量のうち、車輪上昇量11mmという状態は、もはや接触点位置はフランジ直線部を外れ、先端R部で接触している状態であると既報の中で述べてき

た。表1の車輪上昇10mmから11mmの間で、すべり方向ベクトルの各成分のうち、 x 成分については引続き増加しているが、 y 、 z 成分については減少しており、結果すべり方向ベクトルの大きさ(ノルム)も減少している。

このことは、外軌車輪フランジがレールゲージコーナ一部をのり上がってゆく際に、フランジ直線部でレールと接触している間は、車輪上昇につれてすべり量も増大してゆくが、フランジ直線部を外れて先端R部で接触するような状態では、逆にすべり量が減少してゆくことを示している。

3.3 のり上がり脱線に至る過程に与える影響

上述のことから、車輪フランジがレールにのり上がってゆく過程で、車輪・レールの相対すべりの挙動は、車輪上昇量、またアタック角に応じて、すべりの大きさや方向が複雑に変化することが分かる。粘着や摩擦といった車輪・レール境界の力学的な挙動に対して、すべり率やすべり速度が影響することは知られているが、のり上がり脱線のメカニズムを考える上でも、このような3次元空間で見たすべりの大きさや方向が同様に影響することが推測される。

従って、のり上がり脱線の現象解明の研究を行なうに際しても、レールと車輪との接触の場を、このような次元から捉えることが望ましいと思われる。

4. 結論

のり上がり脱線の解明に不可欠な急曲線におけるレールと車輪の接触の場を、従前に論じられてきた1次又は2次元に代えて3次元の場で求めた結果、以下のようなことが分かった。

(1) レールに対しアタック角が付与された車輪が接触点を中心にのり挙がる途上で、接触点位置にすべりを生じた場合、そのすべりの方向は、鉛直方向およびレール長手方向だけでなく、枕木方向の成分も含まれることを確認した。

(2) 前記のすべりによって車輪とレールとの接触面が単位時間当たりにすべる長さは、1次元的に鉛直方向だけで捉えた場合に比べると、レール長手方向も含めた2次元で捉えた場合にはより増加し、3次元で捉えた場合にはさらに増加する

(3) 一方、接触点は比較的広い面接触の状態ではあるために、同じ状態で接触している場合であっても接触面中の位置が異なる場合には、その位置に応じすべり長さが少なからず変化することが分かった

(4) 金属接触面にすべりがある場合、すべり速度は当該接触面の摩擦現象に影響を及ぼす場合が少なくないことを踏まえれば、のり上がり脱線研究の過程で必要とされるレールと車輪との接触面の現象の解明に際しても、接触面のすべり現象を多次元で捉えることが好ましい

なお、レールと車輪との接触面におけるすべり現象を前記の次元で捉えた、摩擦係数などに及ぼす影響は今後の研究課題である。

本研究にあたっては、これまでの幾何学的解析、および模型実験の際のデータ取得、分析に関し、元JR東日本安全研究所の片折暁伸氏、桃崎秀二氏、元JR東日本新津車両製作所の石田陽士氏、大内田章氏、および関連する試験データの取得に関し、JR東日本安全研究所所

属の諸氏に多大なるご助力を賜った。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 土井賢一，片折暁伸，村木克行，石田陽士，大内田章，堀岡健司：幾何学的手法で得た車輪・レール間の接触点位置から見たのり上がり脱線の可能性，第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.685-688，2009
- 2) 土井賢一，飯島仁，片折暁伸，桃崎秀二，堀岡健司：実物大模型による車輪・レール間の接触点位置把握とのり上がり脱線に対する余裕度評価，第17回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.613-616，2010
- 3) 飯島仁，土井賢一，加藤幸夫，田村大輔，日沖由理香，堀岡健司：低速のり上がり脱線の根絶を目指して—第5報 脱線に深く関与する摩擦係数を求める手法とその手法により求めた結果—，第19回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，2012
- 4) 佐藤祐，橋弘矩，若林雄介，永瀬和彦：低速域におけるのり上がり脱線現象解明の一研究（第3報，車輪乗り上がり量の算出方法），日本機械学会論文集（C編），73巻725号，pp.59-65，2007