

在来線鉄道車両用車輪踏面形状—CS 踏面—の開発

Development of Wheel Tread Shape Nicknamed “CS Tread” for Narrow Gauge Lines of Rolling Stock

仲田摩智/Machi Nakata・関西製造所 鉄道台車製造部 第一台車設計室 室長

日野和明/Kazuaki Hino・関西製造所 鉄道台車製造部 第一台車設計室 参事補

伊佐 学/Manabu Isa・住金デザインアンドエンジニアリング(株)

要 約

これまで、東海旅客鉄道(株)殿とともに、在来線鉄道車両用車輪踏面の削正周期の延伸を目的として、新しい車輪踏面形状の開発に取り組んできた。

その結果、JR 東海殿管内の営業線における摩耗したレール形状を考慮した設計手法を用いることにより、長期にわたり安定した走行性能を維持できる車輪踏面形状を開発した。

本稿では、開発に当たった考え方と性能評価試験の結果について、その概要を紹介する。

Synopsis

This study has been pursued mutually to extend the turning interval of wheel tread for narrow gauge lines of rolling stock with Central Japan Railway Company.

As a result, it developed the wheel tread shape which can maintain the running efficiency which is stable among long-term by using the design technique to have considered the rail wearing shape of JR-Central's commercial lines.

In this report, it introduces the outline about the point of view of the design in case of development and the result of the bench tests and field tests (including long-term endurance tests).

1. 緒 言

一般的に、車輪踏面とレール頭頂面の接触状態は、車両の走行性能に大きく影響することが知られているが、従来の車輪踏面は新製時のレール頭頂面形状に対して最適設計されているために、営業線における摩耗した実レール形状に対しては設計時に予想した性能が発揮できないことがある¹⁾。特に従来の在来線円弧踏面の場合、車輪削正後の比較的早い段階で走行安定性に対する余裕度が低下し、一部の区間において周期的な台車の振動が発生することがあるため、常に短い周期での削正を余儀なくされてきた。そのため、摩耗に強い、あるいは摩耗しても設計当初予想した性能を維持できる車輪踏面形状の設計手法の確立が望まれている。前者については耐摩耗車輪の開発がなされつつあるが、後者の試みについては十分なアプローチがなされていないのが現状である²⁾。

そこで、在来線円弧踏面の曲線通過性を維持しつつ、更なる走行安定性の向上を図るとともに、車輪踏面形状の経年変化を低減し、車輪削正周期の延伸とこれに伴う保守作業の軽減を目的として、在来線車両用の新しい車輪踏面

形状を JR 東海殿とともに開発することとした。

ここでは、その最適化へのアプローチ方法³⁾とその手法を用いて開発した踏面形状(以下、CS 踏面と称する。)の性能について現車試験で良好な結果を得ることができた⁴⁾ので、その概要について紹介する。

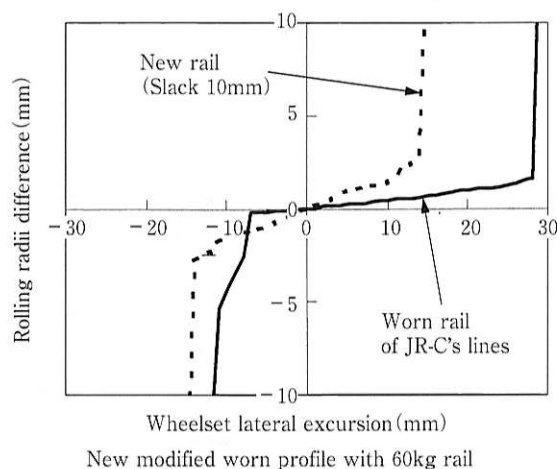
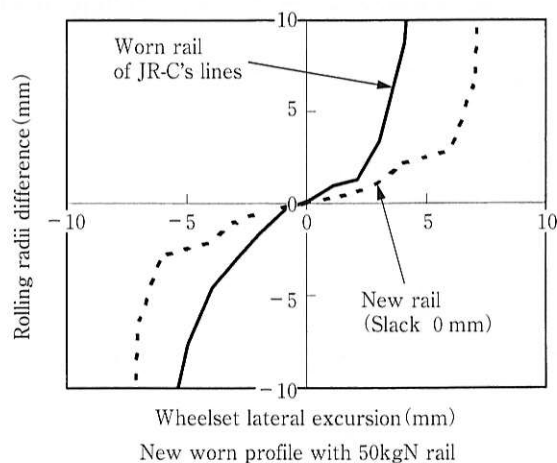
2. 車輪踏面形状の最適化

2-1 従来の問題点

車輪踏面とレール頭頂面の接触点における接線の傾き(踏面勾配)は車両の走行安定性と曲線通過性に大きく影響する。一般的に走行安定性については踏面勾配を小さく、曲線通過性については踏面勾配を大きくする方が良いとされており、従来の車輪踏面形状は新製レールの頭頂面形状に対して、相反する両者の特性を最適化し決定してきた。

しかしながら、実際の営業線のレール形状は長期間にわたり、様々な車両が様々な速度で運用されていることから、総じて摩耗している場合が多く、区間によっては、踏面勾配が予想以上に大きくなったり、逆に踏面勾配が小さくなって車輪回転半径差が得られにくくなる(第1図)と

いった車両走行性能にとっては好ましくない現象が起こり得ることが判明した。



第1図 車輪回転半径差線図
Fig. 1 Rolling radii difference

2-2 新たな設計手法

本項では従来の問題点を踏まえ、今回、新たに試みた最適化へのアプローチ方法(第2図)について紹介する。

車輪踏面形状検討に必要なレール頭頂面形状の勾配曲線の作成(新たな試み)

- ① 適用線区の代表的区間のレール頭頂面形状の実測
- ② 勾配曲線の作成・近似化→実レールの勾配曲線

勾配曲線による車輪踏面形状の最適化の検討(従来手法)

- ① 走行安定性(踏面勾配)からのアプローチ
- ② 曲線通過性(車輪回転半径差)からのアプローチ
→車輪踏面形状の最適化(形状決定)

車輪踏面形状性能確認

- ① 台車台上回転試験による走行安定性の確認
- ② 走行試験による走行安定性および曲線通過性の確認
- ③ 走行試験による耐久性の確認

第2図 最適化へのアプローチ方法
Fig. 2 Approaching method

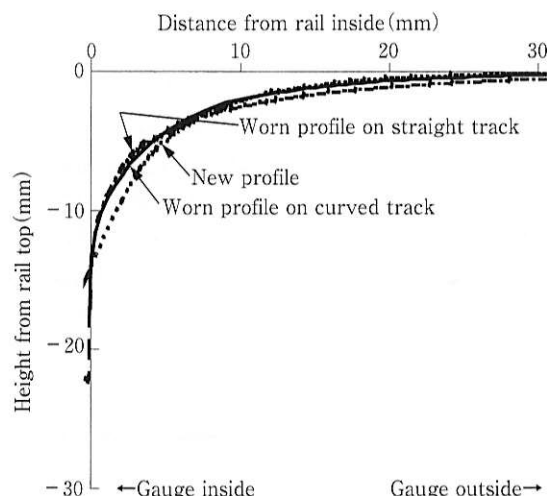
2-2-1 JR東海殿適用区間の実レール頭頂面形状の実測

適用線区の代表的な区間のレール頭頂面の形状を調査するため、左右レール間に直交するように配置した絶縁構造のストレッチ部と測定子を有する測定ヘッド部により構成されたレール形状測定装置を使用した(第3図)。

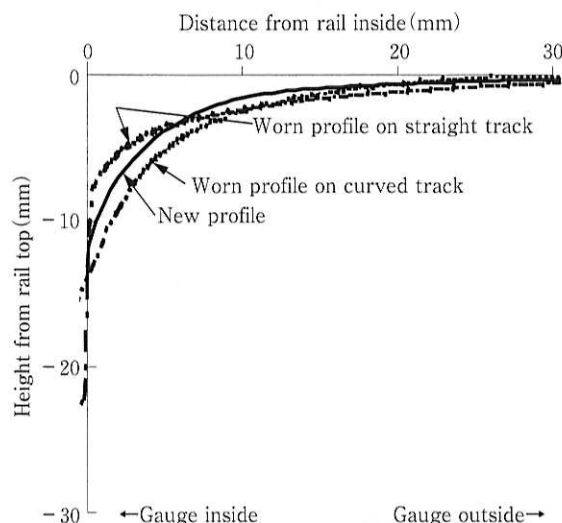
このレール形状測定装置は左右のレール頭頂面形状を同一の座標系でデジタル測定し、かつ、同時に軌間を計測できる特長を有するものである。



第3図 レール形状測定装置
Fig. 3 Rail profile measuring device



第4図 50kgN レール(直線・曲線区間)実測形状
Fig. 4 50kgN rail worn profile



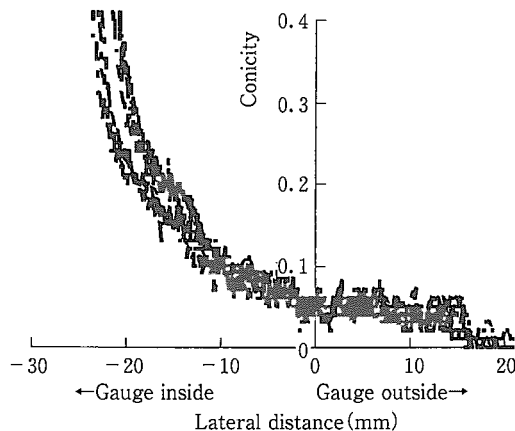
第5図 60kg レール(直線・曲線区間)実測形状
Fig. 5 60kg rail worn profile

適用線区内での実レールの頭頂面形状を適切に把握するため、その調査は線区内の代表的な区間を任意に測定し、かつ、同一区間内はデータのバラツキを考慮して数カ所測定することとした。このレール形状測定装置を用いて、測定したレール頭頂面形状の一例を第4～5図に示す。

2-2-2 勾配曲線の作成および近似化(第6～8図)

(1) 勾配曲線の作成

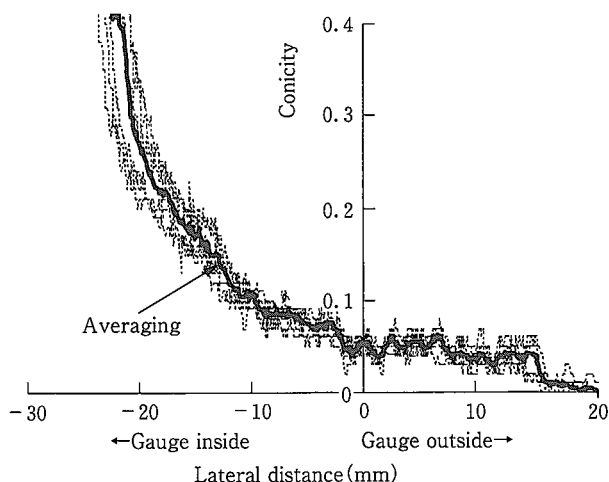
車輪踏面の最適形状を検討する場合、中立位置での車輪とレールとの接触および輪軸左右移動時の両者の接触を把握する必要があることから、2-2-1項で実測したレール頭頂面形状を左右(枕木方向)座標(X軸)と各点での勾配(Y軸)とからなる座標系(勾配曲線)に変換した⁵⁾。その勾配曲線の一例を第6図に示す。



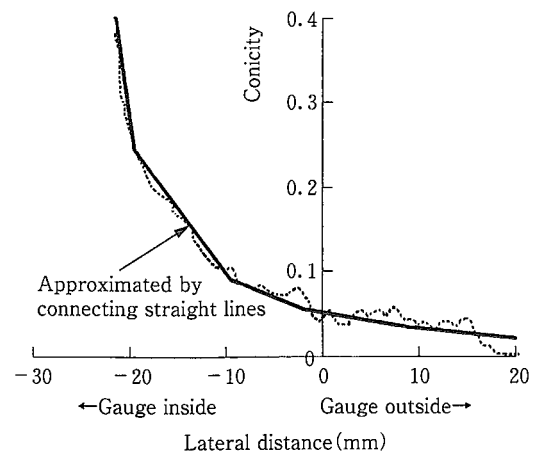
第6図 実レール形状の勾配曲線
Fig. 6 Conicity curve of worn rail profile

(2) 勾配曲線の近似化

ここでは、車輪踏面形状の最適化の検討を容易にするため、同一区間内の勾配曲線データの勾配を測定間隔の左右座標(輪軸左右移動量)ごとに平均化し(第7図)、更にその平均化したデータの特長を明確に示している代表点を抽出し、その間を同一曲率半径として直線補間した(第8図)。



第7図 実レール形状の勾配曲線(平均化)
Fig. 7 Average conicity curve of worn rail profile



第8図 実レール形状の勾配曲線(直線補間)
Fig. 8 Approximate conicity curve of worn rail profile

2-2-3 車輪踏面形状の最適化

2-2-2項で得られた50kgN レール・60kg レールの実形状の勾配曲線に対して次の考え方で車輪踏面形状の最適化を試みた。

(1) 最適化の考え方

本報で考慮した検討項目は下記に示す2項目であり、50kgN レール・60kg レールの実形状に対して、これらの両立化を図ることとした。

〈走行安定性〉 一般的に円弧踏面は円錐踏面に比べて有効踏面勾配が大きい傾向にあるため走行安定性に対して不利である。ここでは、在来線円弧踏面に対して有効踏面勾配を小さくし、走行安定性の向上を図ることを目標とした。

〈曲線通過性〉 在来線円弧踏面と同等の曲線通過性を確保するため、フランジ接触することなく同等の車輪回転半径差を確保できることを目標とした。

(2) 走行安定性からのアプローチ

走行安定性は中立位置での有効踏面勾配の大きさにより大きく左右されるものであり、走行安定性の向上を図るためにはこの勾配を小さくする必要がある。円弧踏面の勾配は次式の有効踏面勾配で示される。

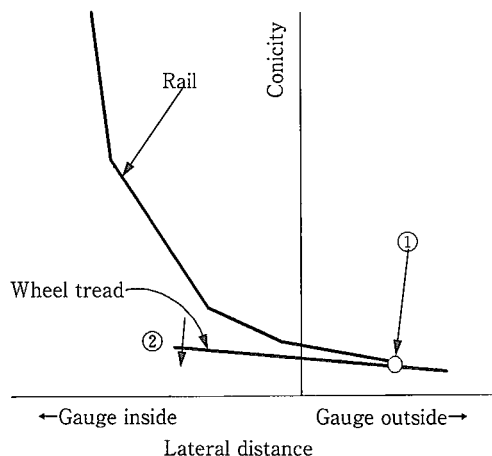
$$y_e = \gamma / (1 - (\rho_r / \rho_w)) \quad (1)$$

ここで、 y_e :有効踏面勾配、 γ :接触点の勾配、 ρ_r :レール頭頂面の曲率半径、 ρ_w :車輪踏面の曲率半径
上式より有効踏面勾配 y_e を小さくするためには、

- ① 接触点の勾配 γ を小さくする。
- ② 踏面の曲率半径 ρ_w をレールの曲率半径 ρ_r より大きくする。

すなわち、上記の2項目を勾配曲線上で検討する場合、次の条件を満たす必要がある(第9図)。

- ① 中立位置でのレール頭頂面と車輪踏面の各勾配曲線の交点のY座標は正の領域内で小さい値とする。
- ② 中立位置での車輪踏面の勾配曲線の傾きはレール頭頂面の勾配曲線の傾きより小さい値とする。



第9図 走行安定性の検討

Fig. 9 Examination of hunting stability

(3) 曲線通過性からのアプローチ

曲線通過性の向上を図るためには曲線通過時にフランジ当たりすることなく、曲線半径に応じた必要半径差以上の車輪回転半径差を確保する必要がある。ここでは、適用線区の最小曲線半径通過時の必要半径差を次式により算出し、中立位置からフランジ付け根部の曲率半径の始点に至る間でこの必要半径差を確保できる車輪踏面形状とする必要がある。

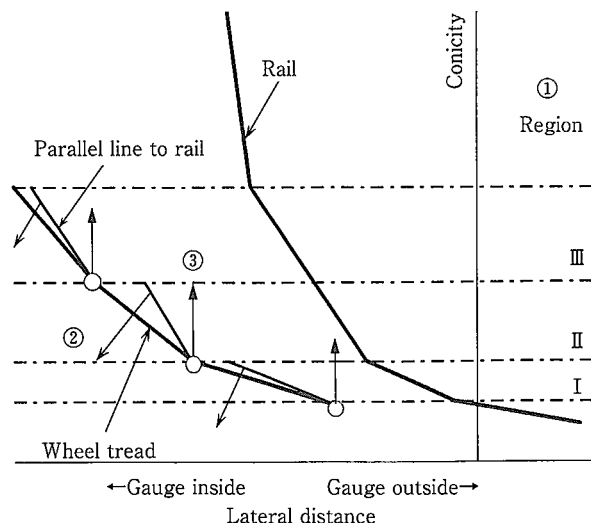
$$[\text{必要半径差}] \quad \Delta r = 2 \cdot b \cdot r / R \quad (2)$$

ここで、 b ：(車輪踏面・レール頭頂面接触点間距離) $\times 1/2$ ， r ：車輪半径， R ：曲線半径

〈勾配曲線による検討〉

輪軸左右移動時において車輪踏面とレール頭頂面との多重点接触および踏面勾配の急激な変化をさける目的で車輪踏面の曲率半径とその開始点を下記のとおり決定する(第10図)。

① レール頭頂面の勾配曲線の勾配の変化点(もしくはそれ以上の点)を通り、X 軸(勾配 = 0)に平行な直線により勾配曲線を多重分割する。



第10図 曲線通過性の検討

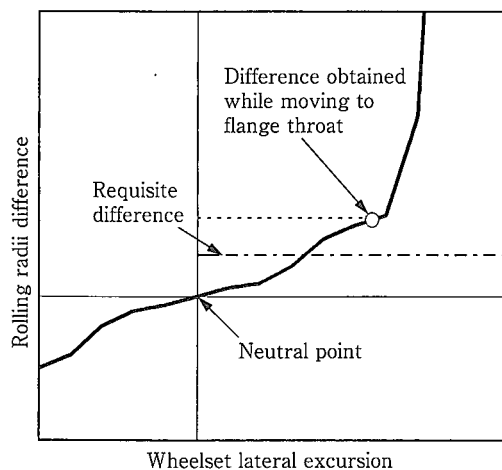
Fig. 10 Examination of curving performance

② ①で分割した各領域内での車輪踏面の勾配曲線の傾きは同一領域内のレール頭頂面の勾配曲線の傾きより小さくする。

③ 各領域内の車輪踏面の勾配の変化点の Y 座標は可能な限りレール頭頂面の勾配曲線と分割直線との交点の Y 座標以上の値とする。

〈車輪回転半径差線図による検討〉

前項より得られた車輪踏面形状の車輪回転半径差線図を用いて、中立位置からフランジ付け根部の曲率半径の始点に至る輪軸左右移動で得られる車輪回転半径差を求め、その値が必要半径差以上であることを確認する(第11図)。



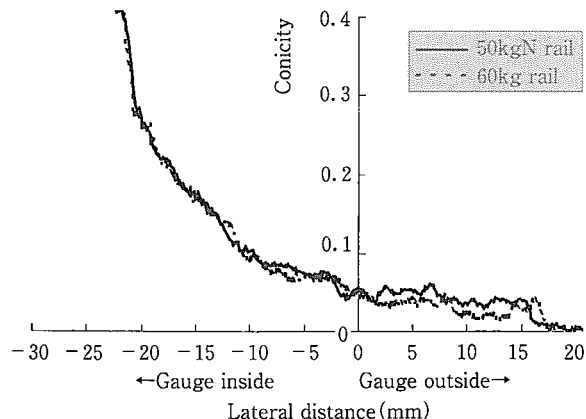
第11図 車輪回転半径差の検討

Fig. 11 Examination of rolling radii difference

2-3 車輪踏面形状の最適化

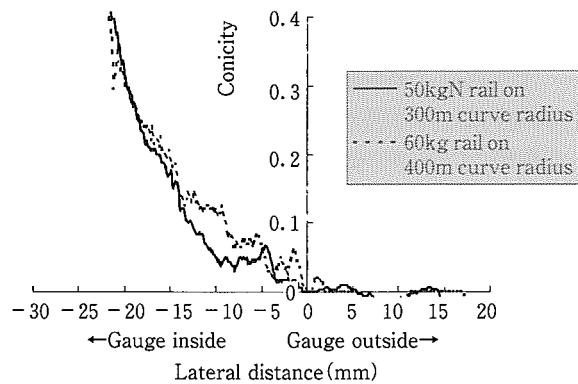
2-3-1 実レール頭頂面形状(勾配曲線)

JR 東海既適用線区の代表的な区間のレール頭頂面形状をレール形状測定装置を用いて測定した。調査対象区間は東海道本線・中央本線とし、50kgN レール・60kg レールの直線区間・曲線区間別に選定した。第12図にそのレールの勾配曲線(平均化)を示す。



第12-1図 直線区間実レールの勾配曲線

Fig. 12-1 Conicity curve of worn rail profile on straight track

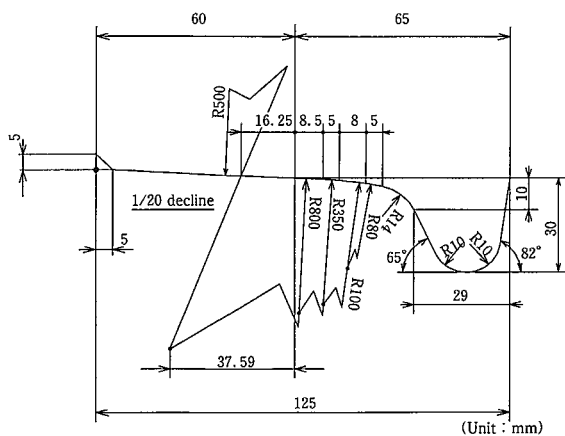


第12-2図 曲線区間実レールの勾配曲線

Fig. 12-2 Conicity curve of worn rail profile on curved track

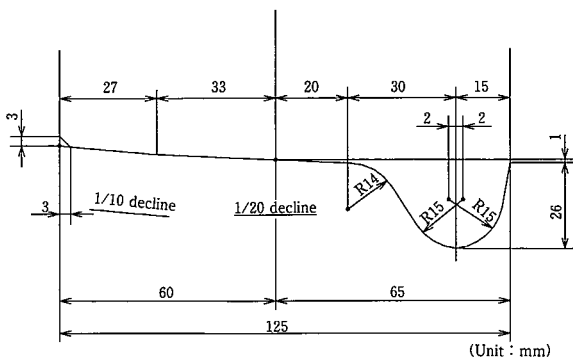
2-3-2 車輪踏面形状の決定

第13図に前項の50kgN レール・60kg レールの実レール頭頂面形状に適合するように前記2-2項のアプローチ方法に基づき決定したCS 踏面形状を示す。また、従来の基本踏面、在来線円弧踏面および修正円弧踏面の形状を第14~16図に示す。CS 踏面形状の特長は下記に示す3項目である。



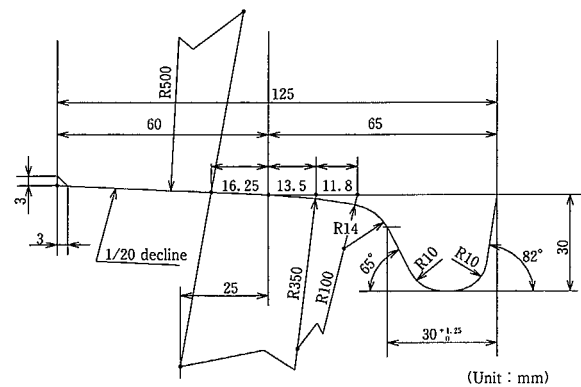
第13図 CS 踏面

Fig. 13 CS profile



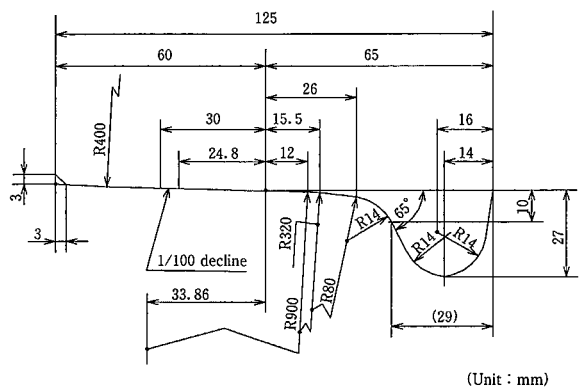
第14図 基本踏面

Fig. 14 Cone profile



第15図 在来線円弧踏面

Fig. 15 Worn profile



第16図 修正円弧踏面

Fig. 16 Modified worn profile

(1) 接触中立位置形状

直線区間での50kgN レール、60kg レールの実形状に対して、在来線円弧踏面の曲率半径350mm に対して走行安定性を向上する目的で曲率半径を800mm に設定した。

(2) フランジ付け根形状

曲線区間での50kgN レール、60kg レールの実形状に適合することを目的として、中立位置付近の曲率半径800mm に隣接して350mm の曲率半径を設定し、かつ、曲線区間で滑らかにレールとの接触点が移動して、可能な限り車輪回転半径差を確保することを目的としてフランジ厚さを修正円弧踏面並みの29mm とし、2つの曲率半径(100mm, 80mm)を挿入することとした。

(3) フランジ頂部形状

JR 東海殿適用線区では、現在、フランジ高さ30mm、フランジ角度65°の在来線円弧踏面を主に使用されていることから、その踏面形状によるレール頭頂部の摩耗形態に適合させること、および、脱線への安全性を確保することを目的として、フランジ頂部形状は前記のフランジ厚さを除いて在来線円弧踏面に合わせることにした。

2-3-3 CS踏面の特性

ここでは、CS 踏面と従来の踏面形状(基本踏面、在来線円弧踏面、修正円弧踏面)の実レールとの適合性を車輪回転半径差線図を用いてその等価踏面勾配と得られる車輪

回転半径差から評価した。評価に当たり、等価踏面勾配は直線区間の実レール形状による車輪回転半径差線図から得られるその中立位置近傍の傾き(第1表)とし、車輪回転半径差は曲線区間の実レール形状による車輪回転半径差線図から得られる中立位置からフランジ付け根部の曲率半径(R=14mm)の始点に至る輪軸左右移動で得られる車輪回転半径差(第2表)とした。その結果、CS踏面は従来の踏面形状に対して良好な特性を有することを確認した。

第1表 踏面形状の特性比較(等価踏面勾配)
Table 1 Comparison of geometric characteristics
(Wheel equivalent conicity)

Wheel conicity	JR-C's worn rail profile	
	50kgN rail	60kg rail
CS profile	1/11 (1/13)	1/13 (1/13)
Cone profile	1/20 (1/20)	1/20 (1/20)
Worn profile	1/3 (1/8)	1/3 (1/5)
Modified worn profile	1/40 (1/18)	1/30 (1/7)

Notice () : in case of new rail profile

第2表 踏面形状の特性比較(車輪回転半径差)
Table 2 Comparison of geometric characteristics
(Rolling radii difference)

Rolling radii difference	JR-C's worn rail profile	
	50kgN rail on 300m curve radius	60kg rail on 400m curve radius
Requisite difference	1.5	1.1
CS profile	2.7	2.6
Cone profile	1.3	1.7
Worn profile	3.2	3.0
Modified worn profile	2.0	1.5

(Unit : mm)

3. 性能確認試験

今回開発した車輪踏面形状は台車台上回転試験および現車試験で踏面新製時の基本的な走行性能を確認した後、耐久試験でその性能の経年変化を調査することとした。

3-1 基本性能確認試験

3-1-1 台車台上回転試験結果

ボルスタレス台車にこの踏面形状(新製形状)を有する輪軸を供試した結果、従来の在来線円弧踏面の蛇行動発生限界速度(220km/h)に対して、CS踏面の限界速度は300km/h以上であり、良好な走行安定性を有することを確認した。

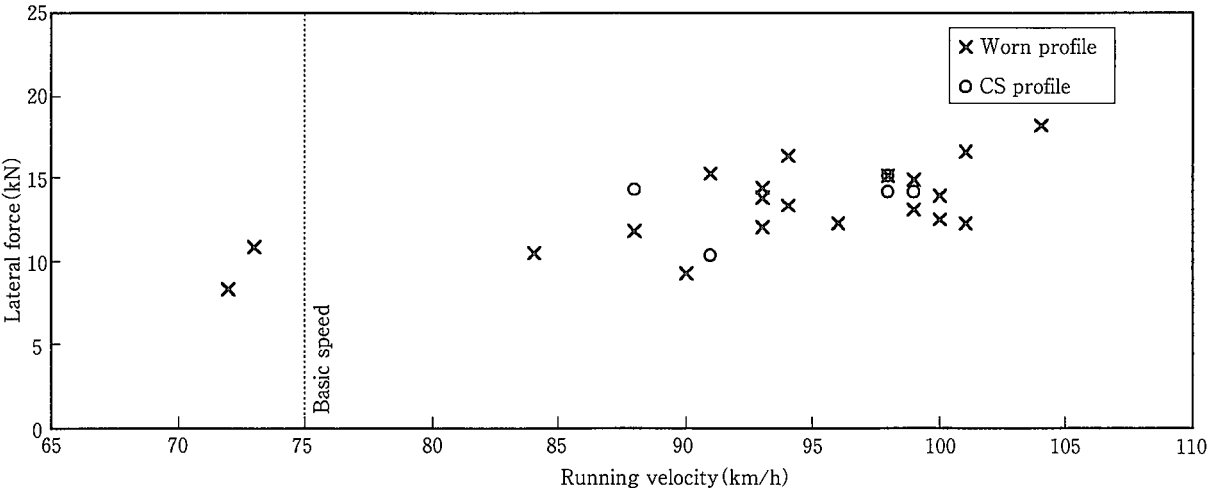
3-1-2 現車試験結果

130km/hの高速走行時においても、走行安定性の低下を示す周期的な台車枠左右振動は認められず、良好な走行安定性を有することを確認するとともに、在来線円弧踏面と比較して輪重・横圧等の値に顕著な差はなく、在来線円弧踏面と同等の曲線通過性を有することを確認した(第17図)。

3-2 耐久性能確認試験

車輪削正周期の延伸効果について確認するため、長期耐久試験に供試した。評価は踏面形状(車輪回転半径差)と走行安定性の指標となる台車枠左右振動の経年変化である。

従来の在来線円弧踏面の場合には削正後間もない初期摩耗の段階で(第19-(a)図)、走行安定性が低下する兆候を示す台車枠の左右振動が、レールの摩耗状態によっては、一部の区間において発生する(第18-(a)図)ことを確認した。このような振動は直ちに乗り心地や走行に支障を与えるものではないが、長期間放置した場合、徐々に振動が大きくなり、乗り心地等に影響を与える可能性があるため、車輪削正により踏面を初期形状に保守する必要がある。






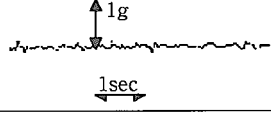

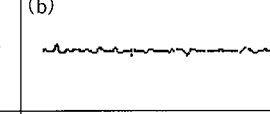
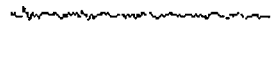

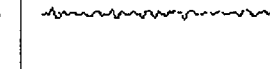
第17図 平均横圧の比較(R400)
Fig. 17 Average lateral force on 400m curve radius

一方、CS 踏面の場合には上記のような周期的な台車枠左右振動の発生は長期走行した場合においても確認されず(第18-(b)図)、踏面形状についても在来線円弧踏面で観察されたような局所的な初期摩耗の発生はなく、中立点付近からフランジに至る領域で均一に摩耗していることを確認した(第19-(b)図)。

なお、参考のために比較試験を実施した修正円弧踏面は、

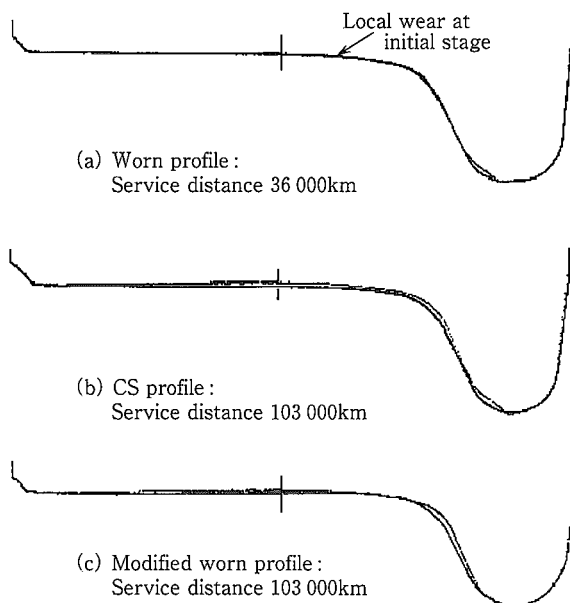
安定した走行性能を確保しているものの(第18-(c)図)、フランジ直摩量が多く、JR 東海殿適用区間における使用には適していないことを確認した(第19-(c)図)。

また、車輪・レール間の接触シミュレーションによる車輪回転半径差の経年変化を整理した結果(第20図)を見ても、円弧踏面の場合、周期的な台車枠左右振動の発生時には中立点付近の踏面勾配が大きくなっていることが確認で

Service distance	36 000km	55 000km	103 000km
Worn profile	(a) 		
CS profile			(b) 
Modified worn profile			(c) 

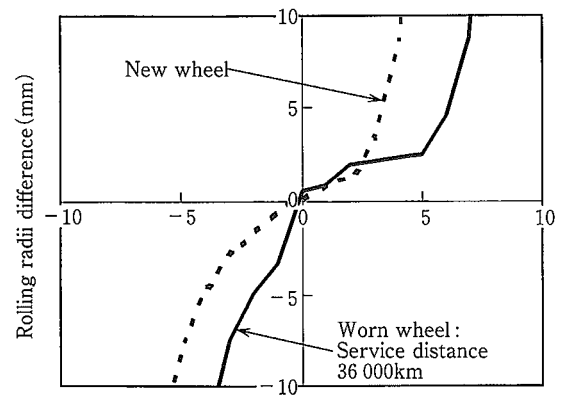
第18図 台車枠左右振動

Fig. 18 Lateral vibration of bogie frame



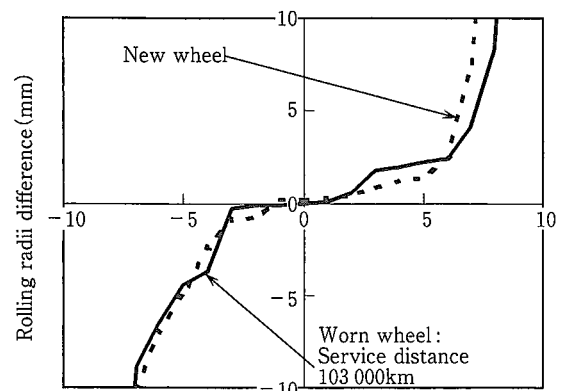
第19図 踏面の摩耗形状

Fig. 19 Wheel tread worn shape



Wheelset lateral excursion (mm)

Worn profile with 50kgN rail



Wheelset lateral excursion (mm)

CS profile with 50kgN rail

第20図 実レール形状に対する車輪回転半径差線図

Fig. 20 Rolling radii difference of worn rail profile

きるのに対して、CS 踏面の経年変化は極めて小さく、中
立点付近の踏面勾配は走行距離によらず小さいレベルであ
ることを確認した。

4. まとめ

本稿では、営業線における実レール形状に基づいて車輪
踏面形状を設計する新たな試みは、短周期での削正を余儀
なくされていた在来線円弧踏面に対して、その削正周期を
延伸できる有効な手段であることを示した。

今回開発した車輪踏面形状は在来線円弧踏面の有する曲
線通過性(Curving Performance)を確保しつつ、走行安
定性(Hunting Stability)に対する余裕度を在来線円弧踏
面より更に向上した踏面であることから、その両特性の頭
文字を引用し、CS 踏面と命名することとした。

この CS 踏面は、JR 東海殿「ワイドビューしなの」用383
系量産車に新製時から採用されており、今後は、311系等
の東海道線・中央線向けの円弧踏面適用車両に平成10年
度より CS 踏面が投入され、適用車種の拡大が図られる予
定である。

なお、本研究は JR 東海／大垣電車区殿により集大成さ
れ、平成 9 年度第 5 回全国「車両と機械」研究発表会(社)日
本鉄道車両機械技術協会主催)において優秀賞を受賞して
いる⁶⁾。

最後に、本共同開発を遂行するに当たり御尽力頂きまし
た東海旅客鉄道(株) 技術開発センター、車両課および大垣
電車区ならびにレール・車輪形状の測定・現車試験関係各
位に感謝の意を表します。



仲田 摩智 / Machi Nakata

関西製造所 鉄道台車製造部
第一台車設計室 室長

(問合せ先：06(466)6132)

参考文献

- 1) 日本機械学会編：鉄道車両のダイナミクス，電気車研究会，平成 6 年，p.52～54
- 2) 藤岡，佐藤，小寺，井口：車輪踏面およびレール頭頂面の
摩耗形状の調査，機講論 No.840-16 ('84.11)，p.49
- 3) 山田，目時，林，仲田，伊佐：在来線用新円弧踏面形状の
開発(第 1 報)，第 5 回交通・物流部門大会 ('96.12.17～
19)，p.311～314
- 4) 林，山田，目時，日野，伊佐：在来線用新円弧踏面形状の
開発(第 2 報)，鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL'97)
('97.7.28～30)，p.79～82
- 5) 横瀬：2 軸鉄道車両に適する車輪踏面形状(第 1 報)，機論
(第 1 部)41 卷346号 ('75.6)，p.1727～1738
- 6) 後藤，竹山，青木，木村，林：車輪踏面形状の研究，平成
9 年度第 5 回全国「車両と機械」研究発表会 ('98.2.5～6)