

# LRTにおける車両と軌道の適合性について

— 超低床式車両の走行安全性の評価 —

交通システム研究領域

※佐藤 安弘

大野 寛之

松本 陽

## 1. はじめに

近年、移動のバリアフリー化、環境負荷低減など都市内交通の改善に対応する公共交通として、LRT（ライトレール・トランジット）が注目され、ヨーロッパの技術を取り入れた超低床式車両の導入が進められつつある。一方、超低床式車両は、全低床とするため、基本的に車軸がない独立車輪が採用されるなど、在来車両と構造が異なったものとなっている。しかしながら、超低床式車両のレール/車輪接触力などの測定例は従来ほとんど報告されておらず、LRTにおける車両と軌道の適合性について知見が多く蓄積された状況にはないと思われる。そこで、レール/車輪接触に関する測定方法や走行安全性の検討について調査した<sup>1)</sup>ので報告する。

## 2. 超低床式車両とLRT

### 2. 1. 超低床式車両の導入状況

独立車輪方式の超低床式車両は、1997年8月に熊本市交通局に初めて採用されて以来、広島電鉄、岡山電気軌道、万葉線で導入されている。このほか、鹿児島市交通局、伊予鉄道、土佐電鉄及び長崎電気軌道において、国産の低床式車両が導入されており、これらは基本的に車軸を持つ部分低床式車両となっている（長崎は車軸付きであるが台車部分を含む100%低床化を実現）。また最近では、広島電鉄において国産初の超低床式車両の営業運転が開始された。

### 2. 2. 超低床式車両と在来車両との構造比較

超低床式車両と在来車両の主な構造の違いとして、次のような点が見られる。

(1) 走行装置（独立回転車輪）、(2) 車体連結部（連接車体）、(3) 車体に対する台車ボギー量、(4) 固定軸距など。

超低床式車両の台車の例を図1に示す。

独立回転車輪は、左右車輪間で回転力が伝わらないため、蛇行動を発生せず高速安定性に優れ、急曲線でも輪径差不足により発生する有害な縦クリープ力が発生しない、という優れた性質がある反面、自己操舵性がないため、直線で偏り走行する、曲線でアタック角が大きくなりフランジ摩耗するなどの指摘もある。

しかしながら、路面電車で見られる急曲線では、一体輪軸であっても左右車輪回転半径差による操舵はあまり期待できず、急曲線ではフランジ等によりガイドしながら、車輪踏面とレールがある程度すべりつつ通過している。脱線に対する安全性や摩耗防止のため、路面電車の急曲線では、外軌フランジのみならず、護輪軌条又は溝型軌条により内軌側フランジ背面をガイドするようにしている。

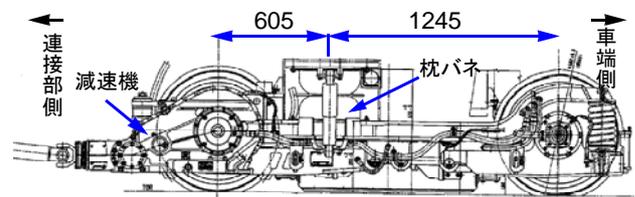


図1 超低床式車両の台車(例)

### 2. 3. 新しい軌道構造

路面電車のレールとして、市街地の交通頻繁な箇所では、過去には溝型軌条が代表的であったが、近年では、鉄道と同じ40Nレール等を使用している場合が多いようである。

路面電車のLRT化の取組として、超低床式車両を取り入れるほかに、「制振軌道」<sup>2)</sup>として位置づけられた新しい軌道構造の採用も始まっている。すなわち、樹脂固定軌道<sup>3)</sup>が熊本市交通局、広島電鉄、福井鉄道等のそれぞれ一部区間に導入され、新しい溝型軌条との組合せも見られる。樹脂固定軌道の断面が見える供試体<sup>4)</sup>を図2に示す。



図2 樹脂固定軌道供試体

### 3. レール/車輪接触に関する測定

#### 3. 1. レール/車輪形状測定

護輪軌条等がない最急曲線、護輪軌条がある急曲線等を代表箇所として選定し、レール断面形状の測定を実施した。また、車輪踏面形状については、超低床式車両(低床車)及び車両数が多い標準的な在来車について、基本的に最も最近に車輪転削をしたもの及び最も過去に車輪転削をしたものを測定対象とした。測定は、"MiniProf<sup>®</sup>"を使用して行った。

低床車の車輪踏面形状測定結果のうち、車輪フランジの摩耗が激しい事例を図3に示す。フランジの摩耗原因は、在来車よりバックゲージが大きいため曲線部に護輪軌条が存在してもこれに内軌側車輪が接触せず、曲線部外軌側のみでフランジとレールが接触したことによるものが一因と考えられる。

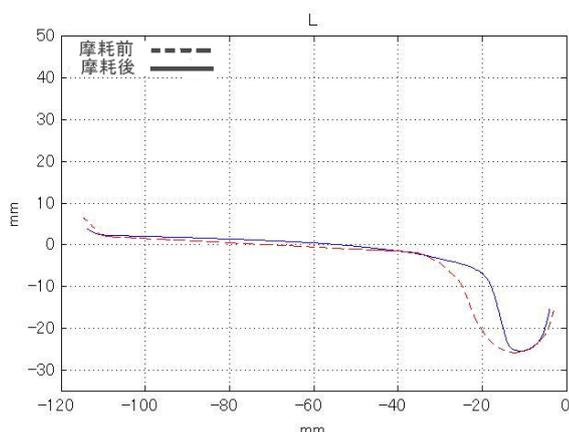


図3 車輪フランジの摩耗が激しい例

#### 3. 2. レール/車輪接触解析

形状測定の結果をもとに、レール/車輪接触解析を行った。接触解析にあたっては、専用ソフトウェア上で、左右レールはスラックを含む実測の軌間と一致する位置に、車輪は左右車輪背面がバックゲ

ジと一致する位置にそれぞれ配置し、輪軸中央が軌間中央にあるときを0mmとして、輪軸を0.2mmピッチで外軌側にずらしていき、それぞれの接触点を求めた。

護輪軌条のある半径24mの曲線における解析結果のうち、図4が内軌の接触状況、図5が外軌の接触状況を示しており、○印が接触点である。これらの図は、輪軸が外軌側へ15.8mm変位した瞬間を示している。この変位では、図6にあるように外軌側フランジ接触角が急激に増大して67°となっていることからフランジ接触の状態と考えられる。この場合は、外軌が先に接触し、輪軸がそれより外軌側に変位すると、続いて内軌側フランジ背面が護輪軌条に接触することがわかる。さらに輪軸を外軌側に変位させると、解析上は接触角も減少し、やがてレールに乗り上がる状態となる。

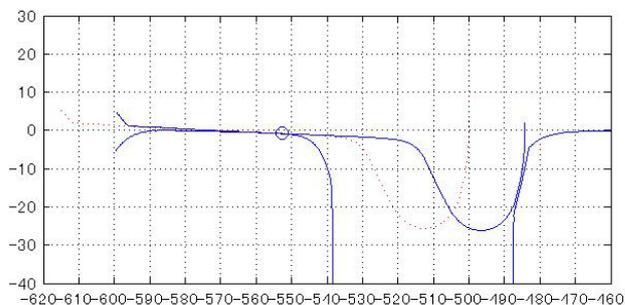


図4 曲線部内軌側のレール/車輪接触点

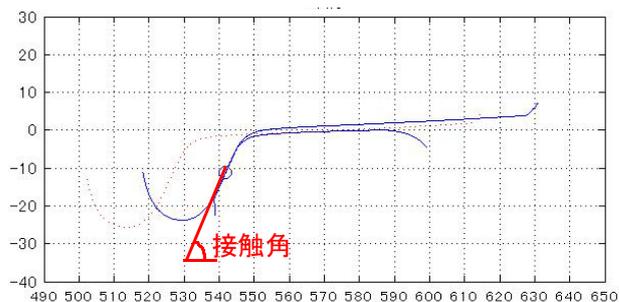


図5 曲線部外軌側のレール/車輪接触点

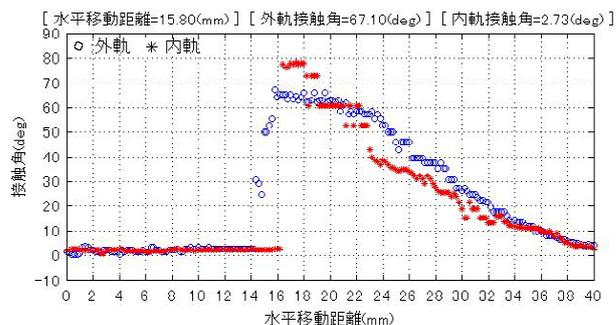


図6 レール/車輪接触点における接触角

実測のレール断面形状との組合せにおいて、転削直後の車輪では外軌側が先に接触する傾向に対して、摩耗踏面の車輪では内軌側が先に護輪軌条に接触する傾向が見られた。これは、フランジのど元がわずかに摩耗すると、フランジのど元の接触点と内軌側フランジ背面との距離が小さくなるためと考えられるが、微妙な相違であり、実際は各部の弾性変位等により、先頭車輪の内外軌フランジともレールと接触しながら曲線通過するものと思われる。

### 3. 3. 曲線部における在来車との特性比較

低床車及び在来車(2軸ボギー車)が、半径 160m の曲線(軌間 1067mm、カント 60mm、スラック 0mm)をそれぞれ通過したときに地上側で測定された輪重及び横圧を図7及び図8に示す。

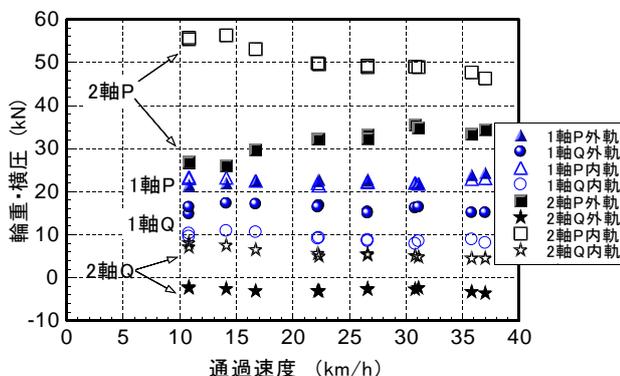


図7 曲線通過時の低床車の輪重及び横圧

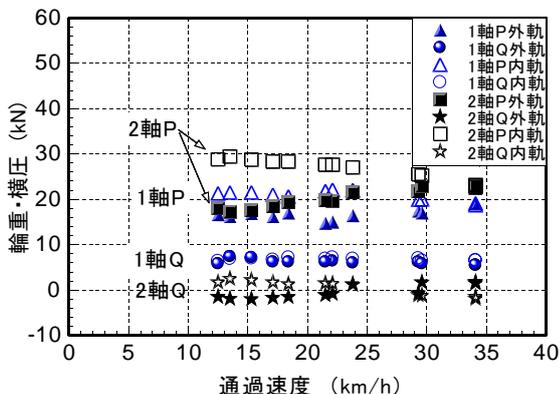


図8 曲線通過時の在来車の輪重及び横圧

低床車の輪重は、先頭台車の先頭輪(第1軸)に比べ後輪(第2軸)が比較的大きな値となっている。これは、当該車両が台車枕バネ位置を後輪側にオフセットし、駆動輪側である後輪の輪重を重くして粘着力を確保する設計となっていることによるものと考えられる(図1参照)。なお、後尾台車においても、動輪側である第3軸車輪の輪重が比較的大きな値と

なっている。

低床車、在来車とも、台車の進行方向前側車輪の横圧が大きく、後ろ側の横圧が小さい傾向を示している。また、在来車に比べて低床車は、先頭輪(第1軸)の横圧が高めであった。これは、低床車の輪重が元々大きいほかに、軸距が長いこと(在来車 1.4m に対し 1.85m)等が要因として考えられる。

### 3. 4. 車両側輪重・横圧測定

3.4.1. 測定方法 地上側の測定結果からわかるように、低床車は、在来車と横圧等の特性が異なる場合もあること、さらに実測例も少ないことから、輪重・横圧を測定すること等により、脱線に対する安全性を定量的に把握することが望ましい。そこで、車両側での輪重・横圧測定方法を検討した。

通常の輪軸では、車輪に歪みゲージを貼付して車輪の圧縮ひずみや曲げひずみを検出し、スリップリングかテレメータを用いて、非回転部分に取り出す方法が広く用いられている。しかしながら、低床車では例えば、歪みゲージを貼付できる穴が車輪板部にほとんどなく弾性車輪であったり、板部が曲がっていてひずみの輪重成分と横圧成分の分離が困難、スペース等の点からスリップリングやテレメータの取付も簡単ではないなど、車輪に歪みゲージを貼付する方法で測定するのは困難な場合がある。

そこで、横圧については、台車従輪の軸箱支持梁の角部にひずみゲージを貼付け、各車輪にかかる横圧相当の力をひずみ測定値より換算する方法を採用した。支持梁とひずみゲージの取付位置概要を図9に示す。

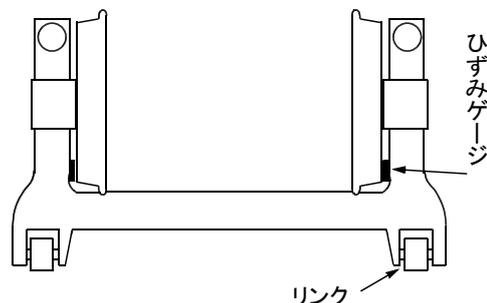


図9 軸箱支持梁へのひずみゲージ取付

油圧ジャッキによる荷重検定を行った結果、横圧にはほぼ比例する十分な感度のひずみ出力が得られた。また、選定した測定点における横圧に対する輪重の影響は 15%程度であり、横圧測定データに対し、輪重測定値に基づく補正を行った。

一方、輪重については、軸バネたわみ量と軸バネ荷重の関係が得られており、たわみに比例した特性であることから、軸バネたわみ量を変位センサで測定し、輪重に換算した。

3.4.2. 測定結果 軌道線と鉄道線の両方の区間を乗り入れる一つの低床車で車両側測定を行った例として、曲線通過時に発生した脱線係数を図10に示す。同図において、脱線係数は外軌側又は内軌側の絶対値の大きい方をプロットしており、符号がマイナスとなっている曲線では、内軌側護輪軌条によりフランジ背面側で横圧を受けているものと考えられる。従って、半径160m程度以下の急曲線において、内軌側護輪軌条が有効に作用し、脱線を防止しているものと考えられる。また、同程度の曲線半径では、軌道線と鉄道線で脱線係数はあまり変わらないことがわかる。

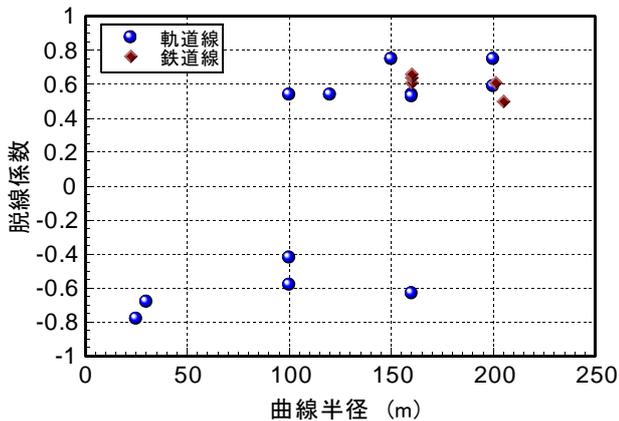


図10 曲線部通過時の脱線係数

#### 4. レール/車輪適合性に関するその他の検討

超低床式車両を導入する場合、あるいは、新たに溝型軌条を導入する場合、あらかじめレール/車輪適合性について検討し、バックゲージや軌間及びそれらの公差を定める必要がある。レール/車輪の寸法関係を図11に示す。

溝型軌条を用いる場合は、溝フランジの摩耗防止のため、軌間が公差の範囲で最大の時に車輪フランジ背面が溝フランジに接触しない(s1)ことが望ましい。その一方で、軌間が公差の範囲で最小の時に溝レールと車輪フランジのど元との接触余裕(s2)を確保する。また、分岐器においては、クロッシングの軌間線欠線部の異線進入防止(N)及びウイングレールへの乗り上がり防止(W)の観点でそれぞれチェックする必要がある。

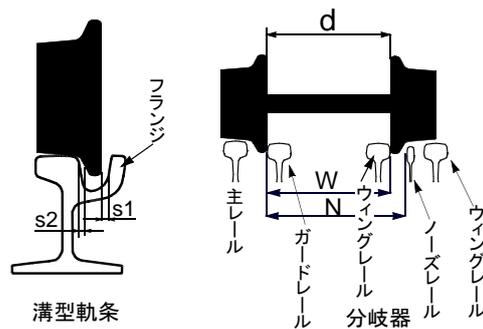


図11 レール/車輪の寸法関係

#### 5. まとめ

- (1) 超低床式車両は、独立回転車輪を有する点、固定軸距などの点で、在来車とは異なる。
  - (2) 超低床式車両、在来車とも、台車の進行方向前側車輪の横圧が大きく、後ろ側の横圧が小さい傾向は同様であるが、今回測定したタイプの超低床式車両は動輪の輪重が重いことなど、在来車と特性が相違する点がある。
  - (3) レール・車輪の断面形状測定及び接触解析結果によれば、護輪軌条のある区間では、基本的には先頭軸の内外軌フランジともレールと接触しながら曲線を通すものと思われる。
  - (4) 輪重・横圧の車両側測定結果によれば、半径160m程度以下の急曲線において、内軌側護輪軌条が有効に作用していることが確認された。
  - (5) 超低床式車両や溝型軌条等の導入にあたっては、バックゲージや軌間等の検討が必要である。今後も超低床式車両の実測データを積み重ねることによって、将来的には、脱線に対する安全性をより簡便に推定する手法の確立が期待される。
- 最後に、現地調査に協力いただいた軌道事業者ならびに、現地測定やレール・車輪接触解析ソフトウェア開発等で協力いただいた関係者に対し謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 佐藤; レール・車輪接触力学研究会第3回シンポジウム, pp47-59, 2005.
- 2) <http://www.mlit.go.jp/crd/gairo/h17kettei/03-06.pdf>
- 3) 佐藤ほか; 平成14年度交通研究発表会講演概要, pp7-10, 2002.
- 4) 佐藤ほか, J-Rail'04, pp269-272, 2004.
- 5) <http://www.railway-technology.com/contractors/track/greenwood/>