

S4-1-2

超低床式車両の走行特性測定例について

[土] ○佐藤 安弘 [機] 松本 陽 [機] 大野 寛之 (交通安全環境研究所)

Measuring the wheel/rail contact forces of Low Floor Light Rail Vehicles

Yasuhiro Sato, Akira Matsumoto and Hiroyuki Ohno

(National Traffic Safety and Environment Laboratory)

In recent years, low floor Light Rail Vehicles developed in Europe are going to be introduced in some Japanese tramways. There are almost few reports on the measured wheel/rail contact forces of LRV though the forces are significant values to evaluate the safety of the vehicles running in curved track. This paper reports a sample of examination to measure the contact forces of LRV.

キーワード：ライトレール、軌道、超低床式車両、接触力、測定

Keyword : Light Rail Transit, Tram, Low Floor Vehicles, Contact Force, Measurement

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が我が国の複数都市に導入されている。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、これまでの路面電車車両と構造が異なったものとなっている。しかしながら、超低床式車両の走行安全性を評価する上で重要なレール・車輪接触力などについて実測された報告はほとんど見られず、超低床式車両の走行特性について、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の検討や、実車走行試験等による測定例¹⁾について報告する。

2. 超低床式車両の概要

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2005年3月には、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. 在来車両との構造の違い

超低床式車両（低床車）と従来の一般的な路面電車車両（在来車）の構造の違いを比較すると、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。

低床車の台車の例を図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、蛇行動作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。

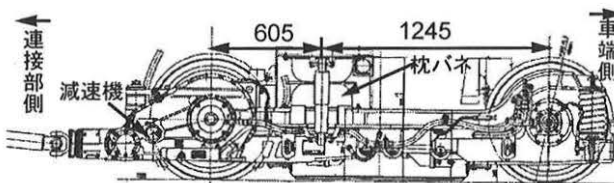


図1 超低床式車両の台車(例)

3. レール・車輪接触に関する測定

低床車の特性を明らかにするため、大きく分けて、形状に関する測定及び力に関する測定を行った。すな

わち、レール断面形状及び車輪踏面形状の測定を実施し、それらの測定結果をもとにレール・車輪接触解析を行い、接触点の接触角を求めた。また、曲線部の地上側で輪重や横圧を測定すること等により、在来車との特性の比較を行った。さらに、低床車における輪重・横圧の車両側測定を実施した。

3. 1. レール・車輪形状測定及び接触解析

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、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"⁽²⁾を使用して行った。

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ー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。図 2 は外軌の接触状況を示す例であり、○印が接触点である。

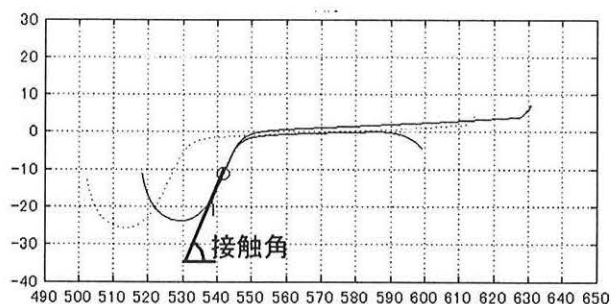


図 2 曲線部外軌側のレール・車輪接触点

内軌側に護輪軌条のある曲線を対象にレール・車輪接触点における接触角を算出した例を表 1 に示す。解析において、外軌が先にフランジ接触する場合は、外軌の接触点における接触角を記載し、内軌側接触角欄は塗りつぶしている。逆に、内軌側護輪軌条が先にフランジ背面に接触する場合は、内軌側を記載し外軌側を塗りつぶしている。

B 線の半径 160m 曲線において、低床車の外軌側接触角は、70° ～73° となり在来車より若干大きい傾向にあるが、これは、車輪転削時のフランジ角度を 72° と在来車 (65°) より大きくしているためであり、この点を除けば特に低床車と在来車で目立った差異は見られない。

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を通過するものと思われる。

表 1 接触角の解析結果

線別	曲線半径(m)	車両	車輪の状況	先にフランジ接触する側	外軌側接触角(°)	内軌側接触角(°)
A線	24	在来車	転削直後	外軌	67	
			摩耗踏面	内軌		78
		低床車	摩耗踏面	内軌		78
B線	30	在来車	転削直後	内外軌同時	66	80
			摩耗踏面	内軌		81
		低床車	転削直後	内軌		79
			摩耗踏面	内軌		83
	160	在来車	転削直後	外軌	68	
			摩耗踏面	外軌	68	
		低床車	転削直後	外軌	73	
			摩耗踏面	内外軌同時	70	84

3. 2. 曲線部地上側における接触力の測定

半径 160m の曲線 (軌間 1067mm、カント 60mm、スラック 0mm) において、レールせん断ひずみ法により、輪重及び横圧を測定した。低床車及び在来車 (2 軸ボギー車) が、それぞれ通過したときに発生した輪重及び横圧を図 3 及び図 4 に示す。

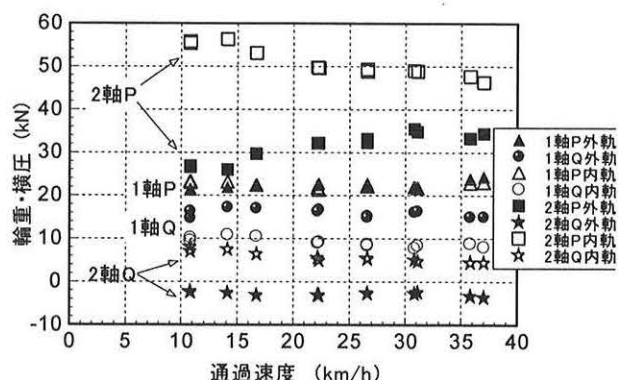


図 3 曲線通過時の低床車の輪重及び横圧

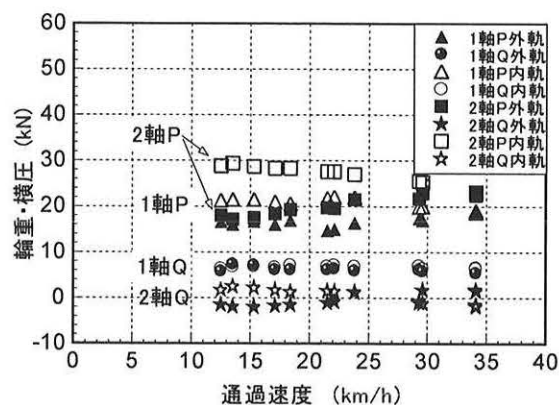


図 4 曲線通過時の在来車の輪重及び横圧

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. 3. 輪重に対する駆動力の影響

路面電車では、通常 1 台車 1 モータで片側軸のみ駆動しており、1 台車に動輪と従輪があることの影響については、直線部の地上側で力行通過時等の輪重を測定することにより確認した。低床車及び在来車が力行及び惰行でそれぞれ通過したときの先頭軸左右輪の輪重を測定し、結果をわかりやすくするため左右輪の輪重を加算して軸重として求めた結果を図5に示す。

低床車の先頭車輪（従輪）は、惰行時に比べ力行時は約 6 % 輪重が減少し、また、在来車の先頭車輪（従輪）は、惰行時に比べ力行時は約 10 % 輪重が減少した。低床車、在来車ともに 1 台車に動輪と従輪がある方式であるため力行すると輪重が減少するものと考えられる。

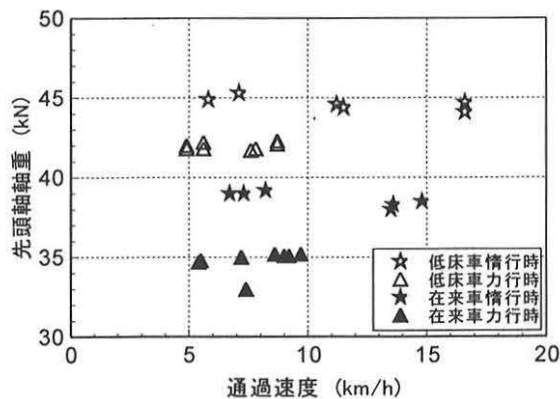


図5 惰行時及び力行時の先頭軸軸重

3. 4. 車両側輪重・横圧測定

3.4.1. 測定方法 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。

従来、低床車の車輪に歪みゲージを貼付して車輪の曲げひずみを検出し、テレメータを用いて測定を行ったことはある³⁾が、テレメータバッテリーの交換や、車輪板部が曲がっていてひずみの輪重成分と横圧成分の

分離に苦労した経験がある。また、海外では、弾性車輪のタイヤ側と輪芯側の相対変位を渦電流式非接触変位計で測定する方法や、車輪軸受部分の曲げひずみを測定する方法が紹介されている⁴⁾が、前者はフランジ接触時以外は十分な精度が得られないとのことであり、後者は軸受付近の加工が必要と思われる。

図6に低床車の独立回転車輪の例を示すが、軌間内側には車軸も軸箱もなく、車輪は軌間外側の軸箱により片持ち支持されている。

そこで今回の車両側測定に当たっては、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7に示す。

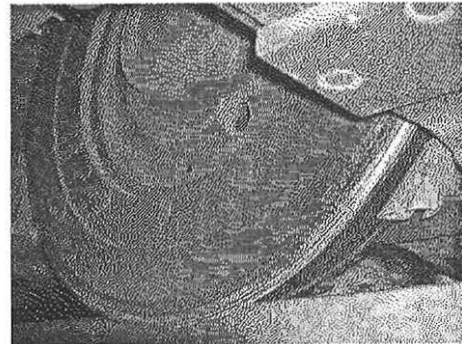


図6 低床車の独立回転車輪

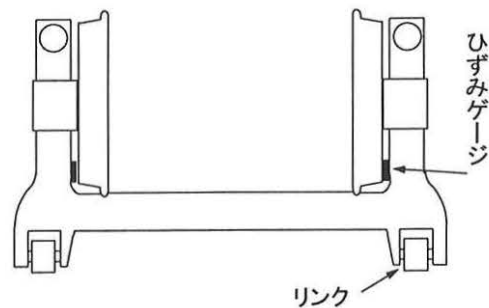


図7 軸箱支持梁へのひずみゲージ取付

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（図8参照）、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。

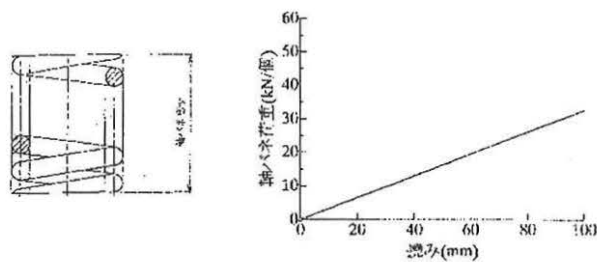


図8 軸バネ特性

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9に示す。同図において、フランジ背面側で荷重を受ける場合の脱線係数を便宜上マイナスの符号を付けて表記している。また、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、主に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。

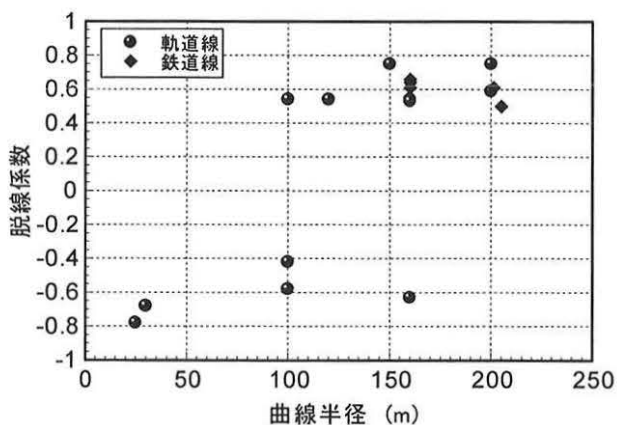


図9 曲線部通過時の脱線係数

半径 160m 程度以下の急曲線においてフランジ背面横圧が発生し、外軌側の脱線係数は曲線半径が小さくなくても増加する傾向にないことから、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。なお、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。

同様に、車両側測定において分岐器通過時に発生した脱線係数（最大値）を図10に示す。同図において、鉄道線では、外軌側に相当する車輪のフランジに正の横圧が発生した一方、軌道線の分岐器では、負の横圧の発生も見られる。これは、軌道の分岐器では、分岐器通過時にトンゲールから内軌側に相当する車輪のフランジ背面に横圧を受けることがあるためと考えられる。

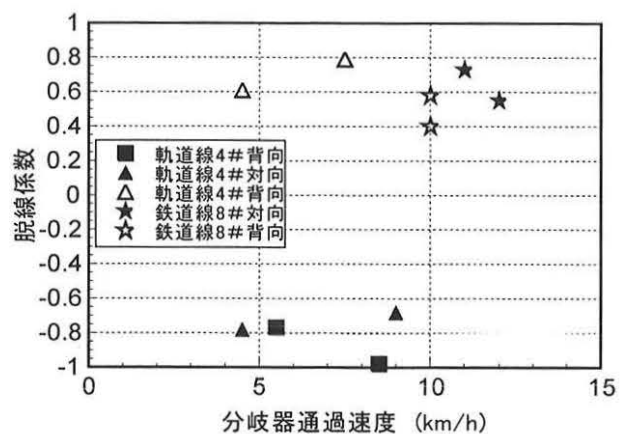


図10 分岐器通過時の脱線係数

4. 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) 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軌側フランジともレールと接触しながら曲線を通過するものと思われる。
- (3) 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。
- (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。

但し、以上は結果の一例であり、線区によっては状況が異なることも考えられる。

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、現地調査や測定等に協力いただいた軌道事業者、メーカー等の関係各位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.railway-technology.com/contractors/track/greenwood/>
- 3) 大野ほか; J-Rail'98, pp275-279, 1998.
- 4) Federico Cheli, et al.; Proc. of ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, DETC2005-85039, 2005