

ボギー角操舵台車の輪軸アタック角・左右変位とクリープ力特性に関する実験的考察

○ [機] 本堂 貴敏 [機] 田中 隆之 [機] 葛田 理仁

[機] 國行 翔哉 [機] 梅原 康宏 (鉄道総研) [機] 根岸 久子 (JR 東日本)

Experimental Discussions on Angle of Attack and Lateral Displacement of Wheelset and Creep Force Characteristics of Active Steering Bogie

○ Takatoshi Hondo, Takayuki Tanaka, Masahito Kuzuta,

Shoya Kuniyuki, Yasuhiro Umehara (RTRI), Hisako Negishi (JR East)

It is crucial to reduce the lateral force acted between wheel and rail during the curve negotiation in the context of the design of railway vehicles since a lateral force would cause some problems; for example, reduction in the running safety and increasing a noise. A steering bogie is one of the effective solutions to reduce the lateral force. The authors have developed the active steering bogie which utilizes yaw dampers as active steering actuators. In this paper, a curve negotiation mechanism of the active steering bogie is discussed based on the results of the running test which is carried out on RTRI test track.

キーワード: 操舵台車, ヨーダンパ, 横圧, 台車旋回抵抗, 横圧推定式, アタック角

Key Words: Steering bogie, Lateral force, Lateral-force estimation equation, Wheelset angle of attack

1. はじめに

鉄道車両が曲線を通過する際に車輪・レール間に作用する横方向の力である横圧を低減することは、走行安全性の向上などの観点から、台車設計上の重要な課題である。操舵台車の導入は、この課題に対する有効な方策の一つである。操舵台車は、台車枠・輪軸間に操舵力を作用させる「輪軸操舵方式」¹⁾と、車体・台車枠間に操舵力を作用させる「ボギー角操舵方式」²⁾に大別される。著者らは、ボギー角操舵方式の具体的な実装手法のひとつとして、減衰力切替式ダンパ機能を有する油圧アクチュエータでヨーダンパを置き換えるシステムの研究開発を行ってきた³⁾。しかし、ボギー角操舵システムを適用した鉄道車両が実軌道を走行している際に、どのようなメカニズムで横圧が低減されるかについて実験的に把握できていなかった。本稿では、鉄道総研構内試験線における走行試験結果を基に、ボギー角操舵台車の横圧低減メカニズムについて考察する。

2. 曲線通過中の横圧増加要因

曲線通過中の横圧増加要因については、「横圧推定式」において整理されている。1 台車内のヨーモーメントのつり合いを考慮した横圧推定式によると、先頭軸外軌側の横圧 Q_0 は次式のように表せる⁴⁾。

$$Q_0 = \bar{Q}_1 + \Delta Q'_{AS} + \Delta Q'_{AD} + \Delta Q'_{unsp} \dots\dots\dots(1)$$

$\bar{Q}_1$ は内軌側車輪に作用する横圧、 $\Delta Q'_{AS}$ は定常輪軸横圧、 $\Delta Q'_{AD}$ は軌道不整に起因する横圧変動、 $\Delta Q'_{unsp}$ は継ぎ目等で生じる衝撃的横圧である。本稿では定常的な横圧に着目するため、 $\Delta Q'_{AD}$ と $\Delta Q'_{unsp}$ については取り上げない。 $\bar{Q}_1$ は、内軌側の輪重、輪重横圧比、アタック角によって決まる。内軌側の輪重横圧比とアタック角は、アタック角が小さい線形領域では比例関係にあるが、アタック角が大きくなると摩擦係数に飽和する⁵⁾。

式(1)の右辺第2項 $\Delta Q'_{AS}$ は、次式のように表される。

$$\Delta Q'_{AS} = Q_C + \Delta Q_{TF} + \Delta Q_{A2} + \Delta Q_{AS} + \Delta Q_{YD} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 Q_C は超過遠心力、 ΔQ_{TF} は前後接線力作用に伴うヨーモーメントに起因する横圧増分、 ΔQ_{A2} は第2軸の輪軸横圧に起因する横圧増分、 ΔQ_{AS} は空気ばねの変形による台車旋回抵抗⁶⁾に起因する横圧増分、 ΔQ_{YD} はヨーダンパ変位に起因する横圧増分である。このうち ΔQ_{YD} は、ボギー角操舵システムにおいては操舵力に伴う横圧増減分であり、操舵システムが適切に動作すれば、横圧を減少させる要素である。したがって、図1に示す4つの要素が主な定常横圧の増加要因である。このうち ΔQ_{AS} はボギー角に応じて大きくなり、さらにボギー角はおおよそ曲線の曲率に比例する。本稿で取り上げる操舵システムでは、曲線の曲率に応じて操舵力を作用させるため、 ΔQ_{AS} は直接的にキャンセルされ

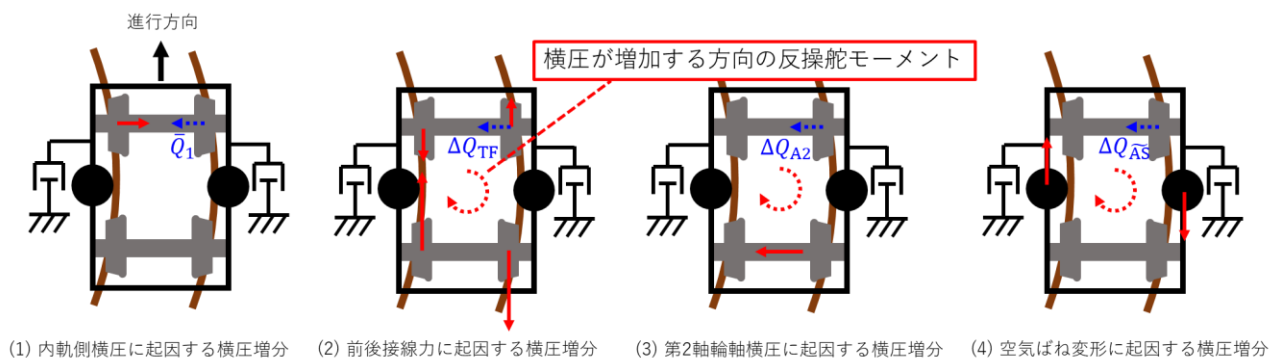


図 1 台車のヨーモーメントバランスに関連した先頭軸外軌側の定常横圧増加要因

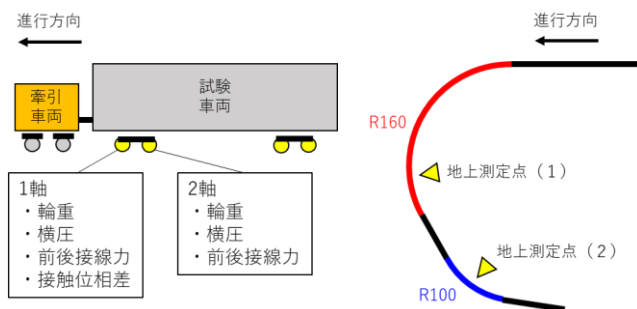


図 2 試験車両の構成と試験線の概略線形

る。本稿では $\bar{Q}_1$, Q_C , ΔQ_{TF} , ΔQ_{A2} の、横圧低減に対する寄与について考察する。

3. 走行試験における測定項目とボギー角操舵台車の横圧低減効果

3.1 車輪・レール間作用力測定

輪重・横圧測定用輪軸（PQ 輪軸）を 1 車両 4 軸に装荷し、新連続法による輪重・横圧・前後接線力の測定を実施した（図 2）。本稿では、1 台車 2 軸分の測定結果について評価する。

3.2 輪軸アタック角・左右変位測定（地上定点）

まくらぎにレーザ変位計を設置し、車輪バック面にレーザを照射することで、地上定点において輪軸アタック角および左右変位を測定した。レーザがバック面に照射されている間の距離の時間変化率と走行速度から輪軸アタック角を算出する方法を採用した⁷⁾。地上測定点は、構内試験線が有する曲線半径 160m および 100m の 2 か所の円曲線中（以下、R160 および R100）に設定した（図 2）。地上測定点には、車上で地上測定点通過検知のために、軸箱に装着した光电センサの光を反射する反射マーカを設置した。

3.3 接触位相差

アタック角測定の妥当性評価のために、接触位相差を第 1 軸において測定した。接触位相差とは、曲線通過中の車輪・レール間接触点の前後移動量を車軸まわりの角度で表現したもので、接触角（接触点における踏面・フランジの勾配）が一定であれば、アタック角に比例する。PQ 輪軸から得られる輪重測定用ひずみ波形をフーリエ変換する方法

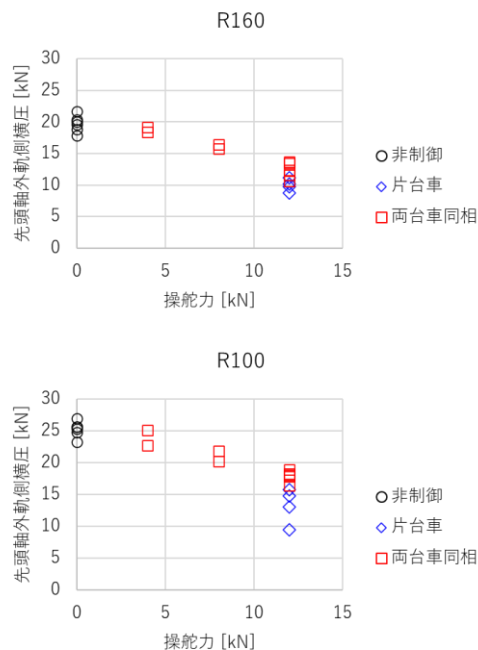


図 3 ボギー角操舵制御による先頭軸外軌側横圧低減効果

を用いて、接触位相差を測定した。

3.4 操舵制御条件

本稿では、両台車同相制御と片台車制御、非制御の 3 種類の制御条件について考察する。両台車同相制御は、1 車両 2 台車を前後ともに曲線と同じ方向に旋回させる操舵モーメントを作用させる制御条件であり、片台車制御は進行前位台車のみに曲線と同じ方向に旋回させる操舵モーメントを作用させる制御条件である。

3.5 ボギー角操舵による横圧低減効果

試験線を走行速度 10km/h, 15km/h, 20km/h で定速走行した際に、操舵力上限値を 0kN, 4kN, 8kN, 12kN とした場合の、地上測定点前後 2 秒間の先頭軸外軌側横圧の平均値と、1 アクチュエータあたりの操舵力の関係を図 3 に示す。以下、本稿に掲載する車上測定した物理量は、すべて地上測定点前後 2 秒間の平均値である。各操舵力におけるプロットのばらつきには、走行速度の違いによるものも含まれるが、操舵力が増加するにつれて、先頭軸外軌側横圧が減少する傾向が確認できる。

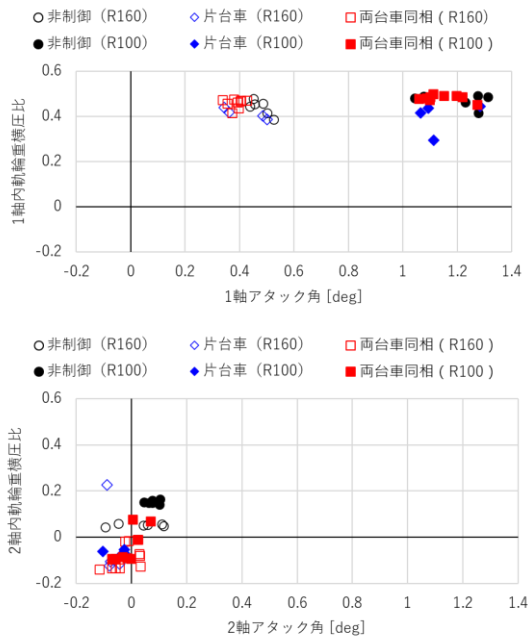


図4 アタック角と内軌側輪重横圧比の関係

4. 各横圧増加要因に対する操舵制御の影響度評価

4.1 内軌側横圧 $\bar{Q}_1$ への影響

第2章で述べた通り、内軌側輪重横圧比は、線形領域ではアタック角に比例し、飽和領域ではアタック角によらず、摩擦係数と一致する。操舵制御による内軌側輪重横圧の変化を検証するために、アタック角と内軌側輪重横圧比の関係を評価する。本節ではこれに加え、地上アタック角測定結果と車上での接触位相差測定結果の関係を評価する。

(1) アタック角と内軌側輪重横圧比の関係

アタック角と内軌側輪重横圧比の関係を、第1軸と第2軸それぞれについて図4に示す。非制御条件と制御条件(片台車と両台車同相)を比較すると、制御を行った条件の方が、R160円曲線において第1軸アタック角が若干小さくなる傾向にあることがわかる。ただし、それに伴う第1軸輪重横圧比の低下は見られず、内軌側輪重横圧比の飽和領域内でアタック角が変化していたことが示唆される。第2軸のアタック角についても、制御を行う条件の方がアタック角が小さく、条件によっては負に転じることがわかる。また、第2軸のアタック角と内軌側輪重横圧比の間には正の相関がみられ、操舵制御によりアタック角が変化することによって第2軸の横圧の方向が変化することが確認できる。

(2) 地上アタック角測定結果と接触位相差の関係

地上アタック角測定結果と、接触位相差から推定したアタック角の関係を図5に示す。車輪フランジがレールに接触していると仮定すると、接触位相差 $\Delta\phi$ とアタック角 ψ との間には、近似的に以下の関係が成立する。

$$\psi \approx \frac{\Delta\phi}{\tan \alpha} \dots\dots\dots (3)$$

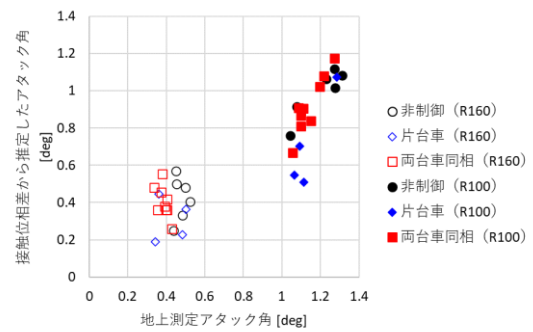


図5 地上アタック角測定結果と接触位相差から推定したアタック角の関係

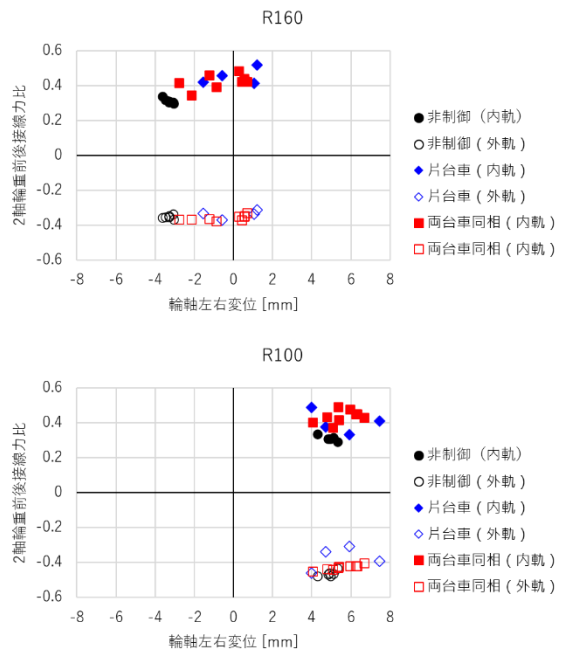


図6 第2軸左右変位と輪重・前後接線力比の関係

ただし、 α はフランジ角度であり、図の縦軸は、 $\alpha = 65\text{deg}$ として接触位相差から推定した値である。地上測定と接触位相差から推定したアタック角の間に相関がみられ、特にR100においては強い相関がみられる。したがって、各条件におけるアタック角の相対的な変化傾向については、接触位相差で代用評価できると考えられる。

4.2 前後接線力に起因する横圧増分 ΔQ_{TF} への影響

ボルスタレス台車が曲線通過する際、一般に第2軸は純粋転がり線よりも軌道中心側を走行する。これに起因して、反操舵方向の前後接線力が作用する。仮に、操舵制御により第2軸が外軌側へ変位すると、輪径差不足が解消し、反操舵モーメントが減少する可能性がある。ただし、前後接線力を輪重で除した値(以下、輪重前後接線力比)が十分小さくなる領域まで輪軸が変位しなければ、横圧低減に

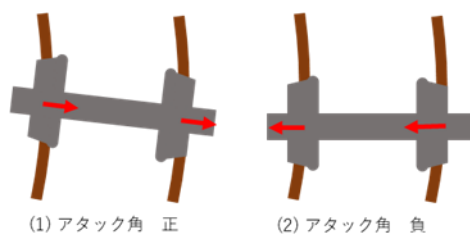


図7 第2軸のアタック角と横圧の模式的関係

は結びつかないと考えられる。

第2軸の左右変位量と輪重前後接線力比の関係を図6に示す。図の横軸は、地上で測定した軌道中心からの変位量であり、プラス方向が曲線内方である。非制御条件に比べて、制御を行う条件の方が、第2軸は内軌側へ変位する傾向がみられ、輪重前後接線力比の減少も確認されない。

4.3 第2軸輪軸横圧に起因する横圧増分 ΔQ_{A2} への影響

これまでの評価より、第2軸に関しては、操舵力の増加に伴いアタック角が減少し、負に転じるとともに、外軌側へ変位する傾向が確認された。ただし、フランジ接触に至るほどの変位量ではなく、第2軸には、内外軌ともに横クリープ力による横圧が主に作用していると考えられ、図7に示すように、内外軌側の車輪に同じ方向の横圧が作用する。アタック角が正から負へ転じることで、第2軸に作用していた曲線外方へ押し出す輪軸横圧(図7-(1))が、曲線内方へ向かう輪軸横圧(図7-(2))へと転じる。曲線内方へ向かう第2軸の輪軸横圧は、台車全体のヨーモーメントの観点からは、横圧を増加させる方向の力である。一方で、曲線内方へ向かう力は、円運動に欠かせない向心力そのものでもある。操舵制御を行わない場合に、主に先頭軸のみで負担していた向心力(超過遠心力 Q_C)が第2軸に分散されたと捉えることもできる。特に、より高速域で超過遠心力が大きくなる場合には、第2軸による向心力分担効果がより重要になる可能性がある。

4.4 台車旋回抵抗に起因する横圧増分 ΔQ_{AS} への影響

これまでの考察により、クリープ力特性が関与する横圧増分 $\bar{Q}_1$ 、 Q_C 、 ΔQ_{TF} 、 ΔQ_{A2} については、顕著な寄与が認められず、ボギー角操舵台車における主要な横圧低減要因は、台車旋回抵抗をキャンセルすることであったと考えられる。台車旋回性能試験装置を用いて、操舵制御時の台車旋回抵抗を測定した例を図8に示す。通常、ボギー角の絶対値が増加すると台車旋回抵抗の絶対値も増加するが、操舵制御を適用することで、その増加が抑制される。これにより、先頭軸外軌側横圧が低減したものと推測される。

5. おわりに

本稿では、ボギー角操舵台車の走行試験結果を基に、その横圧低減メカニズムについて考察した。本稿の議論をまとめると以下になる。

- 第1軸のアタック角低減に伴う内軌側輪重横圧比の低減は確認されず、横圧低減へのアタック角低減の寄与度は小さいと考えられる。

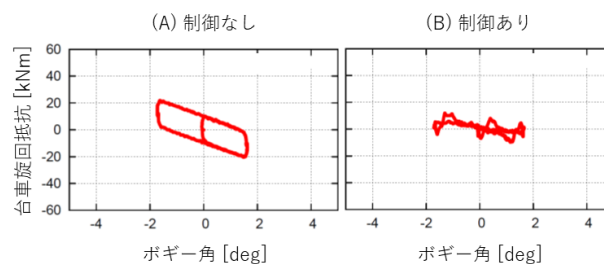


図8 操舵制御による台車旋回抵抗低減効果

- 第2軸の反操舵モーメント低減効果は確認されず、横圧低減への寄与度は小さいと考えられる。
- 操舵制御により、第2軸のアタック角が負に転じる傾向が見られ、第2軸の輪軸横圧が、曲線外向きから曲線内向きに転じた。ヨーモーメントのつり合いを考えると、先頭軸外軌側横圧を増加させる方向の変化だが、向心力が分散されたと考えると、横圧低減に寄与している可能性もある。
- 本走行試験における基本的な横圧低減のメカニズムは、空気ばねの変形による台車旋回抵抗に起因する横圧増分 ΔQ_{AS} を操舵アクチュエータがキャンセルすることであったと考えられる。

以上はあくまで本走行試験の制御条件下でのメカニズムであり、例えば操舵力上限値を向上させた場合には、アタック角低減などの要素も横圧低減に貢献する可能性がある。

参考文献

- 1) 下川嘉之, 水野将明: 新しい操舵台車の開発, 新日鉄住金技報, 第395号, pp.41-47, 2013
- 2) 松本陽, 他: ボギー角アクティブ操舵台車の研究開発(第1報・基本コンセプトと基礎実験), 交通・物流部門大会講演論文集, pp.237-276, 2002
- 3) 小島崇, 他: ヨーダンパのアクティブ制御によるボギー角操舵システムの開発, 交通・物流部門大会講演論文集, No. 2104, 2018
- 4) 田中隆之, 他: 鉄道台車のモーメントに着目した横圧推定式の検討, 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 482, DOI: 0.1299/transjsme.16-00054, 2016
- 5) 石田弘明, 他: 急曲線低速走行時の乗り上がり脱線に対する安全性評価手法, 鉄道総研報告, Vol. 18, No. 8, pp.5-10, 2004
- 6) 田中隆之, 他: 台車旋回性能試験装置による台車性能の定量的な評価法, 第22回鉄道技術連合シンポジウム, No. 2602, 2005
- 7) 田中隆之, 他: 脱線しにくい台車の急曲線通過時のアタック角低減効果に関する考察, 第23回鉄道技術連合シンポジウム, No. S7-1-3, 2016
- 8) Hondo, T. and Noguchi, Y.: Measurement method for longitudinal displacement of wheel/rail contact point using strain gauges put on wheels, Mechanical Engineering Journal, Vol. 7, Issue 3, DOI:10.1299/mej.19-00659, 2020