

# 機械式空気圧操舵システムの機構と横圧低減効果

山長 雄亮\* 鴨下 庄吾\*\* 梅原 康宏\*

## Mechanism of the Mechanical Pneumatic Steering System and Its Effect of Reducing Lateral Force

Yusuke YAMANAGA Shogo KAMOSHITA Yasuhiro UMEHARA

The authors have developed a steering system for a bolster-less bogie named “Mechanical Pneumatic Steering System” that is mainly composed of three mechanical gadgets: the steering actuator, the pneumatic valve, and the bogie angle sensing device. In this paper, we report the function and mechanism of these gadgets, and among them, we explain the bogie angle sensing device in more detail. Then the paper shows the results of the bench test to evaluate the performance of the sensing device. Finally, it presents the results of the running test on the test track using a bogie equipped with the mechanical pneumatic steering system and its effect of reducing lateral force.

キーワード：操舵台車，ボルスタレス台車，横圧，自在継手

### 1. はじめに

鉄道車両の曲線通過性能に影響を及ぼす横圧を低減するには、曲線内軌側の車輪に作用する横クリープ力を小さくすることが効果的である。車輪とレールの間の摩擦係数の抑制はその手段の一つであり、摩擦緩和剤を適切に噴射して横圧低減を実現している例がある<sup>1)</sup>。一方、横クリープ力は、輪軸の進行方向とレールの接線方向との角度であるアタック角の増加によっても大きくなるので、輪軸を操舵することでアタック角を減少させることも大きな効果がある。そのような仕組みを持つ台車の一つに枕はり付き台車（以下、ボルスタ付き台車）の幾何学的な構造を利用したリンク式のボギー角連動操舵台車がある。この操舵台車は、枕はり台車中心との間の垂直軸周りの回転角（ボギー角）を、リンク機構を介して軸箱支持点における前後変位に変換して輪軸を操舵させる台車である。この方式は、純機械的な構造のため逆方向に操舵する恐れが無く、安全性に優れているため、すでに営業車に搭載され、円曲線中の定常横圧を大幅に低減している<sup>2)</sup>。

機械式空気圧操舵システムは、ボルスタレス台車の台車枠と軸箱の間に取り付けられた操舵アクチュエータを曲線通過時に伸長させることで輪軸を操舵し、アタック角を小さくすることで横圧の低減を図るシステムである。機械式と呼ぶのは、曲線通過時のボギー角の検知から、アクチュエータを伸長して輪軸を操舵するまでの一連の動作を機械動作のみで実現していることに由来する。本稿では、機械式空気圧操舵システムを構成する機械要素の機構を詳細に説明すると共に、その横圧低減効果について報告する。

\* 車両構造技術研究部 走り装置研究室  
\*\* 車両振動研究室

### 2. 機械式空気圧操舵システム

機械式空気圧操舵システムは、ボギー角検出装置、空気圧バルブ、操舵アクチュエータの3つの機械要素からなる。

#### 2.1 ボギー角検出装置

ボギー角検出装置は、ボルスタレス台車のボギー角を検出し、空気圧バルブへその角度を伝達する。以下に、検出原理を中心に概要を説明する。

##### 2.1.1 ボギー角の定義

一般に、台車と車体との相対的なヨー角のことをボギー角という。以降、一般的な姿勢角を表現する際にはヨー角、台車と車体の相対ヨー角を表す場合にボギー角を用いる。本項では、ボギー角検出装置の原理を説明するために、以下に示す詳細な定義を与える。

車体および台車枠それぞれに固定された移動座標系を考える。図1(a)のように、静止状態で車体と台車枠の姿勢角が同じ状態を中立位置とすると、中立位置において車体からみた台車の相対的な姿勢角は0degとなる。

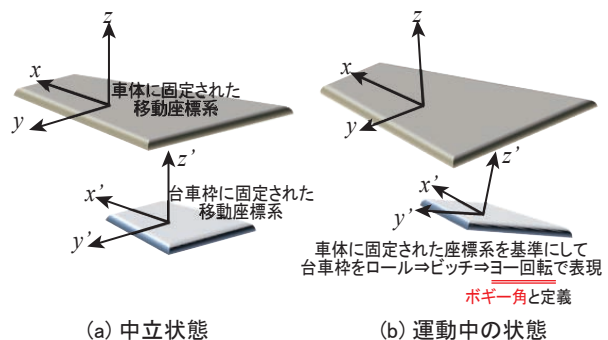


図1 ボギー角の定義

特集：車両技術

一方、図1 (b) のような運動中の状態において、台車枠に固定された移動座標系を、車体に固定された移動座標系上で観測することを考える。このとき、ある瞬間における台車枠上の移動座標系は、車体に固定された座標系を基準とした座標原点の平行移動量と、回転変換によって表現できる。回転変換は任意性があるが、ここでは、X軸周りにY軸周りにZ軸周りの順の回転変換(ロール・ピッチ・ヨー回転)によって表す。この表現方法に則った3番目の回転であるヨー回転角を台車のボギー角と定義する。

ボルスタ付き台車の場合、ダイレクトマウントタイプであれば台車枠の中心に、インダイレクトマウントタイプであれば枕はりの中心に、それぞれ明確な垂直軸周りの回転中心がある。このため、ロール・ピッチ角が微小であることを考慮すれば、それら垂直軸周りの回転角度を検出することで簡便にボギー角が得られる。一方で、ボルスタレス台車の場合には車体と台車枠との間に明確な回転中心を持たず、簡便にはボギー角が得られないため、検出には工夫が必要となる。

2.1.2 ボギー角検出装置の基本構成

前項で述べた通り、ある瞬間の車体と台車の相対的な姿勢は、車体を基準にして、台車枠をロール・ピッチ・ヨー回転することで表現でき、最後のヨー回転、即ち、台車枠に固定された垂直軸の回転角度を車体側から相対的に観測することができれば、ボギー角を検出できる。そこで、次節で説明する空気圧バルブを車体床下に設置することを踏まえて、図2のような基本構成の角度検出装置を検討した。

まず、軸周りの回転角を伝達する軸継手の一方の軸(軸1)を台車枠側の水平面に対し垂直な角度で剛に固定する。軸継手のもう一方の軸(軸2)には、スプラインシャフトを用い、軸長手方向に伸縮可能とする。次に、スプラインシャフトの車体側端部では、先ほどと同じ軸継手

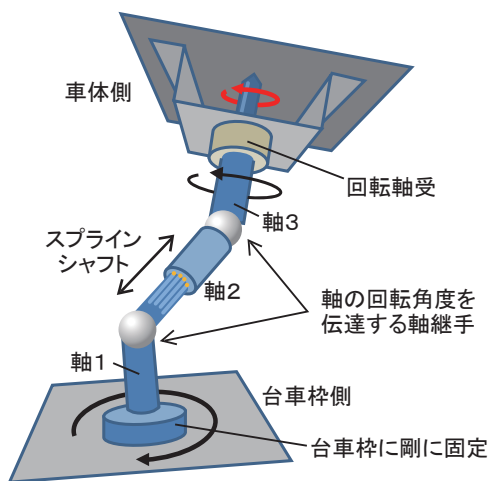


図2 ボギー角検出装置の基本構成

を介して、車体側の水平面に対して垂直な軸(軸3)を接続し、その軸(軸3)は、主軸周りの回転のみ許容するよう車体側で支持する。この構成により、車体と台車枠の間の相対運動を許容しながら、台車枠上の垂直軸の回転角度(以降、入力角度)を、2つの軸継手を介して車体に固定された座標上での垂直軸周りの回転角度(以降、出力角度)に変換することができる。ただし、ボギー角検出装置として使用するためには、軸1と軸3の回転角度が等しくなる必要がある。

ここで、図2の2カ所の軸継手に等速継手を用いれば、原理上車体と台車枠の姿勢に関わらず、入出力角度は等しくなる。しかし、等速継手の入出力軸間の倒れ角度(首振り角度)の制限や、微小角度のための遊間縮小に伴う重量増加等、等速継手には克服すべき課題が多い。そこで自在継手の適用を検討した。

2.1.3 自在継手を用いた検出原理

まず自在継手単体で入力回転角度と出力回転角度の関係を考える。図3に自在継手の模式図を示す。自在継手が、十字部分の2つの枢支軸を中心に、それぞれ $\alpha$ および $\beta$ だけ回転している状態を仮定し、以降はそれら回転角度のことを首振り角度と呼ぶ。

今、図3のように軸1上にz軸を持つ静止直交座標系O-xyzと、軸2上に $\zeta$ 軸をもつ静止直交座標系O- $\zeta\eta\zeta$ を定める。O-xyz座標系をy軸周りに $-\alpha$ だけ回転させた座標系をO-x'y'z'とし、その状態からx'軸周りにさらに $\beta$ だけ回転させた座標系がO- $\zeta\eta\zeta$ であるので、両座標系間の変換則は、次式で表せる。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、軸1が $\theta$ だけ回転した結果、軸2が $\phi$ だけ回転し、軸受け部P、QがそれぞれP'、Q'に移動したとする。P'はO-xyz座標系上で、 $(-R\sin\theta, R\cos\theta, 0)$ で表され、Q'はO- $\zeta\eta\zeta$ 座標系上で、 $(R\cos\phi, R\sin\phi, 0)$ で表される。一方、Q'を座標変換式(1)を用いてO-xyz座標系上で表したものを(X,Y,Z)とすると、

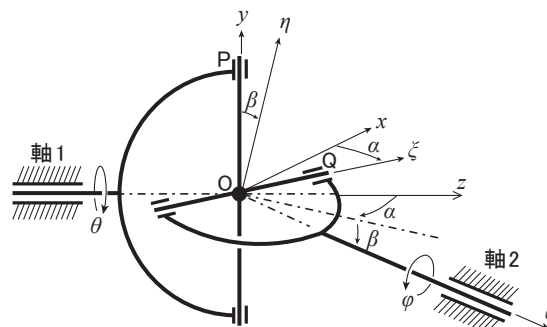


図3 自在継手模式図

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cos \alpha \cos \varphi - R \sin \alpha \sin \beta \sin \varphi \\ R \cos \beta \sin \varphi \\ R \sin \alpha \cos \varphi + R \cos \alpha \sin \beta \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

となる。ベクトル  $OP'$  とベクトル  $OQ'$  は常に直交していることから、両ベクトルの内積をとり、 $\theta$  と  $\varphi$  を微小として一次近似したうえで二次の微小項を無視すると次式を得る。

$$\cos \alpha \cdot \theta \approx \cos \beta \cdot \varphi \quad (3)$$

ところで、今検証しているボギー角検出装置は、自在継手を2つ直列に繋いだ両自在継手と呼ばれる構造となっている。図4に示すように、もう一方の自在継手の首振り角度を  $\alpha'$ 、 $\beta'$  とすると、先と同様の考え方により、軸3の回転角  $\theta'$  と軸2の回転角  $\varphi$  の関係は次式で表せる。

$$\theta' \approx \frac{\cos \beta'}{\cos \alpha'} \cdot \varphi \quad (4)$$

さらに式(3)を代入して、ボギー角検出装置の入出力回転角度に相当する  $\theta$  と  $\theta'$  の関係を表すと次式となる。

$$\theta' \approx \frac{\cos \beta'}{\cos \alpha'} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \cdot \theta \quad (5)$$

式(5)より、 $\alpha$  と  $\alpha'$ 、 $\beta$  と  $\beta'$  がそれぞれ等しい場合、つまり、軸1（以下、入力軸）と軸3（以下、出力軸）が平行な位置関係にある場合は、その等速性が保証される。しかし、ボギー角検出装置の場合、車体と台車枠の間の相対ヨー角以外の姿勢角も変化することで入力軸と出力軸の平行状態が保たれない。以下その影響を検証する。出力軸側の自在継手の首振り角度  $\alpha'$ 、 $\beta'$  が、入力軸側の自在継手の首振り角度  $\alpha$ 、 $\beta$  と比べてそれぞれ微小角  $\delta_1$  および  $\delta_2$  だけ傾いている場合 ( $\alpha' = \alpha + \delta_1$ 、 $\beta' = \beta + \delta_2$ ) を考える。ここで微小角  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  は、例えば車体と台車枠の間の相対的なロール角とピッチ角で生じる角度を想定している。式(5)に代入し、余弦関数を展開して微小角  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  の一次の項まで考慮すると次式を得る。

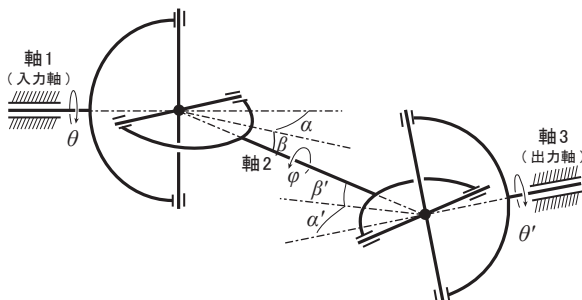


図4 両自在継手を用いた検出装置

$$\begin{aligned} \theta' &\approx \frac{\cos(\beta + \delta_2)}{\cos(\alpha + \delta_1)} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \cdot \theta \\ &\approx \frac{1 - \tan \beta \cdot \delta_2}{1 - \tan \alpha \cdot \delta_1} \cdot \theta \end{aligned} \quad (6)$$

空気ばね高さ調整弁および高さ調整棒位置にボギー角検出装置が設置されたと仮定して式(6)から入出力角度の差を検討した。首振り角度  $\alpha$ 、 $\beta$  は急曲線で発生する車体と台車との左右相対変位から生じる 25deg、相対ロール角  $\delta_1$  は空気ばねの上下可動範囲から発生しうる 2deg、相対ピッチ角  $\delta_2$  は走行試験実測最大値を基にした 2deg までそれぞれ見込んだ。これらの角度は余裕を持った値であるが、それらを式(6)に代入し、入力軸回転角度と出力軸回転角度の差を計算すると、最大でも 3% 程度であることが分かった。ボギー角検出装置は後述する空気圧の On-Off バルブの入力軸にボギー角を伝達することが役割であることを踏まえると、入出力軸の回転角度は等しいとみなせる。

以上により、設置場所によらず、自在継手とスプラインシャフトを直列に組み合わせた単純な構造でほぼ正確にボギー角を検出可能な装置が構成できる。今回は、台車への艤装の容易さから、空気ばね高さ調整棒取り付け点を想定した。車体側も空気ばね高さ調整弁がある位置に後述の空気圧バルブを配置すれば、全体の艤装スペースは、空気ばね高さ調整装置一式と比較して、同等か若干広くなる程度である。

## 2.2 空気圧バルブ

空気圧バルブは後述する操舵アクチュエータへの圧縮空気の供給と、アクチュエータ内の圧縮空気の排気をボギー角に応じて行う。

空気圧バルブの外観を図5に、模式図を図6に示す。バルブへの入力角度が一定以上になった際に圧縮空気を供給し、逆に一定角度以下の場合には大気解放する。

今回の操舵システムでは、概ね半径 600m 以下の曲線での横圧低減を目指している。台車中心間距離と曲線半径から求められる幾何学的なボギー角は、曲線半径 600m の場合、一般的な在来線車体を想定すると概ね 0.7deg となる。そこで、入力ボギー角が 0.7deg 以上で給気動作(給気弁が開)を行い、0.6deg 以下で排気動作(排気弁が開)を行う状態を標準設定とした。

給気弁と排気弁の動作角度の間の 0.1deg の不感帯は、給排気弁の動作角度と円曲線中のボギー角が一致した時に給排気動作のハンチングを防止するために設けている。

弁は、鉄道車両での使用実績が十分な高さ調整弁と同様のものを用いている。また図6で示したように、給気弁の動作角度は弁棒とアームの離隔距離で決まり、排気弁の動作角度は弁棒のアームに対する押し込み量で決ま

特集：車両技術

る。離隔距離および押し込み量共に、バルブ筐体側面から植え込まれている弁を回転させることで調整できるので、弁動作角度は標準設定値を基準に任意にかつ容易に設定できる。

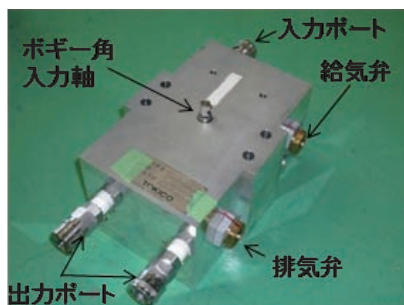


図5 空気圧バルブ外観

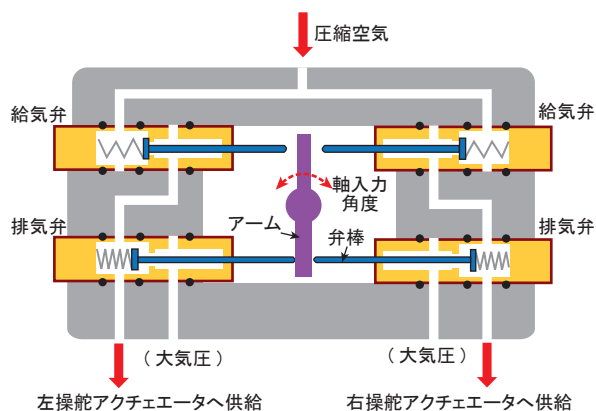


図6 空気圧バルブ模式図

### 2.3 操舵アクチュエータ

操舵アクチュエータは、台車枠と軸箱の間にレール長手方向に取り付けられ、空気圧バルブから供給される圧縮空気によって伸長し、輪軸を操舵する機能を担う。また、万が一、曲線内軌側のアクチュエータに対して圧縮空気が供給されるような逆操舵指令が発生した場合の安全性の担保、さらに、非制御時においては、軸箱支持装置の前後支持剛性を確保することも非常に重要な役割となる。

図7に操舵アクチュエータの模式図を示す。タンデムシリンダを用い、一方のシリンダ内部に予圧縮した皿ばねが内蔵されている点が大きな特徴である。

直線走行時など非制御時においては、空気圧バルブからの圧縮空気の供給が遮断されており、皿ばねの予圧縮力によってばね側ピストンが段付きのピストンロッドの伸び方向の動きを拘束している。この構造によって通常の軸箱支持装置と同等の前後支持剛性を確保しており、フェールセーフ性を持たせた設計となっている。

曲線進入時には、圧縮空気によって予圧縮ばねによる

段付きピストンロッドの拘束が解かれ、その後、輪軸自身の自己操舵機能によって自ら舵を切ることで段付きピストンロッドが伸ばされることによって、本体側ピストンが力を発揮する仕組みとなっているので、逆操舵を防止することができる<sup>3)</sup>。

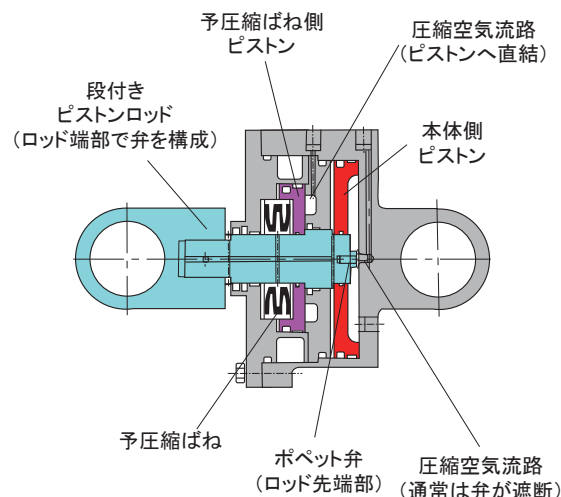


図7 操舵アクチュエータ模式図

### 3. 組合せ定置加振試験

ボギー角検出装置の出力軸と空気圧バルブの入力軸を接続した状態で、任意の並進方向の変位と姿勢角を与えられる6軸モーションベースを用いて定置加振試験を実施した。この試験の目的は、角度検出機構としてのボギー角検出装置の性能と、検出角度を空気圧バルブ入力軸の負荷トルクに抗して伝える伝達機構としての性能、および、空気圧バルブの給排気性能を検証することである。

#### 3.1 試験概要

組合せ定置加振試験の様子を図8に示す。固定枠にボギー角検出装置の一端を剛に固定し、モーションベース側に空気圧バルブを固定する。ボギー角検出装置の另一端（出力軸）と空気圧バルブの入力軸を接続する。この状態で、モーションベースを6自由度（前後・左右・上下・ロール・ピッチ・ヨー）に加振して、モーションベース自身のヨー角と、ボギー角検出機構によって検出される回転角度を比較した。同時に、空気圧バルブの入力ポートに圧縮空気源（600kPa）を接続し、さらに出力ポートに空気タンクを接続してその内圧を測定した。空気タンクは実際の操舵システムにおいてバルブの接続先となる操舵アクチュエータのシリンダ内容積を模したものである。なお加振信号には、所内試験線の軌道データを用いて実施した車両運動シミュレーションによるボギー角検出装置の想定取り付け位置での車体と台車の相対的な変

位と姿勢角を用いた。

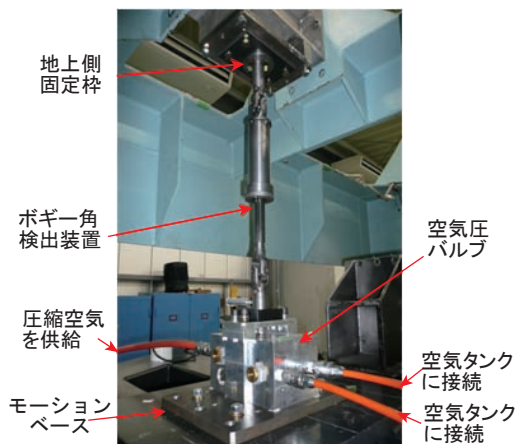


図8 組合せ試験の様子

### 3.2 試験結果

図9に加振試験におけるモーションベースの変位と姿勢角を示す。モーションベースの動きには、ヨー角以外にもロール角、ピッチ角および並進方向の動きが含まれている。図10に、このときのモーションベースのヨー角とボギー角検出装置によって検出された角度、空気タンクの内圧変化を示す。ヨー角以外の様々な動きに影響されることなく、ヨー角のみをほぼ正確に検出していることが分かる。ヨー角と検出角との間には僅かな差が見られるが、これは前章で述べたボギー角検出装置の入力軸と出力軸が平行でないことに起因する微小回転角度差に、空気圧バルブの軸入力部の負荷トルクによって生じる微小ねじり角変位が加わったものである。

空気圧バルブは、給気弁の動作角度が0.7deg、排気弁の動作角度が0.6degとなることを期待した設定で試験したものであるが、図10の拡大部から、概ね所期の角度で給排気動作が行われていることを確認した。

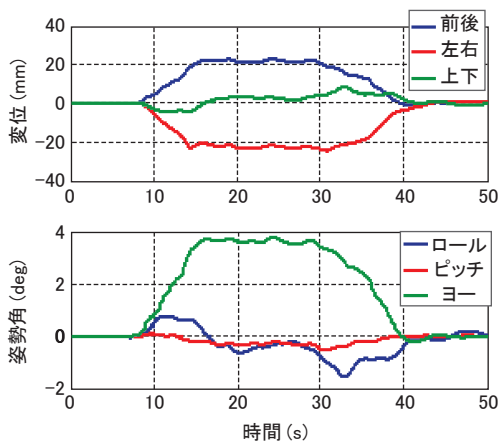


図9 モーションベースの変位と姿勢角

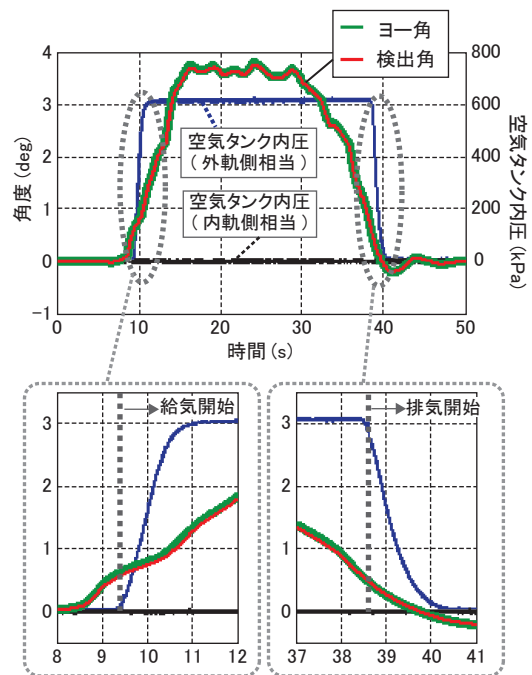


図10 検出角度と給排気動作

## 4. 鉄道総研所内試験線における走行試験

### 4.1 試験概要

図11に試験台車の外観を示す。モノリンク軸箱支持方式の台車のモノリンク部分を操舵アクチュエータに換装し、ボギー角検出装置および空気圧バルブを試験車両に搭載して、機械式空気圧操舵システムの性能確認走行試験を鉄道総研所内の試験線にて実施した。試験線は、R160曲線とR100曲線がほぼ連続した線形であり、両曲線区間における横圧発生状況を、操舵制御の有無と比較した。尚、操舵制御なしとは、圧縮空気の供給を完全に遮断した状態のことであり、この場合常にアクチュエータ内の予圧縮ばねにより段付きピストンロッドを最縮位置に拘束しているため、通常のモノリンク軸箱支持方式の台車と等価であるとみなせる。

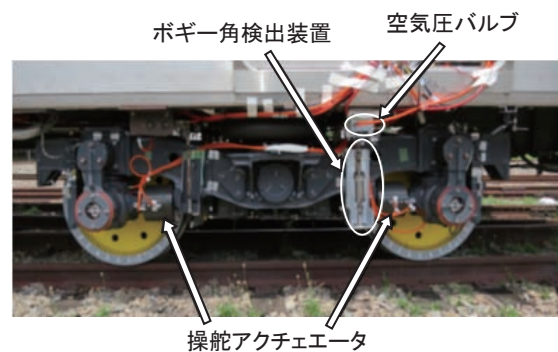


図11 機械式空気圧操舵システム搭載台車

特集：車両技術

4.2 試験結果

先頭軸の内外軌横圧の波形例を図12に示す。横圧の符号は、内外軌ともに、車輪に対して曲線内側に向かって作用する場合を正としている。操舵制御なしと比較して、操舵制御有りの場合は、円曲線中の横圧低減効果が明確に現れており、特にR160の曲線において定常横圧がほぼ0kN近くまで低減していることが分かる。断続的に、横圧のピークが発生しているが、これはレールの継ぎ目などの角折れの影響を受けている箇所である。本操舵システムは曲線中の定常横圧低減を目指したシステムであり、局所的に発生する横圧には対応していない。以上のように、機械式空気圧操舵システムを構成する各要素が正常に機能し、円曲線において高い横圧低減効果を発揮することを確認できた<sup>3)</sup>。

一方で、出口緩和曲線の一部区間（図12の点線で囲まれた部分）において、制御なしに比べて、操舵制御有りの方が、横圧が大きくなっている。これは、操舵した状態で出口緩和曲線に進入した際に、曲線の曲率の減少に対して蛇角の戻りが遅れて、いわゆるオーバーステアリングの状態になるためである。この解消のためには、出口緩和曲線において早めに排気する必要があり、その方法については今後検討していく。

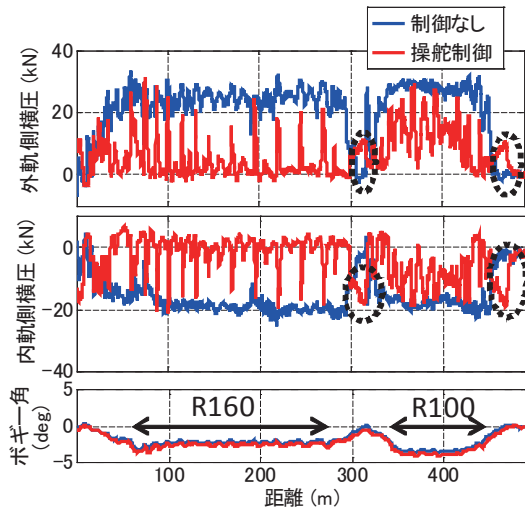


図12 先頭軸横圧波形例

5. まとめ

機械式空気圧操舵システムの構成要素であるボギー角検出装置を考案し、空気圧バルブと組み合わせた性能確認試験を実施した。また、操舵アクチュエータも含めた機械式空気圧操舵システムを試験車両に搭載して、所内試験線にて走行試験を実施した。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 2つの自在継手にスプラインシャフトを組み合わせたボギー角検出装置により、明確な回転中心を持たないボルスタレス台車のボギー角をほぼ正確に検出できることを理論的に確認した。
- 2) 空気圧バルブとボギー角検出装置の組合せ試験において、ボギー角に相当する角度を他の動きに影響されることなく伝達し、所期の角度で空気圧バルブが適切に作動することを実験で確認した。
- 3) 試験車両に機械式空気圧操舵システムを搭載した走行試験において、システムを構成する各要素が正常に機能し、十分な横圧低減効果が得られることを確認した。

今後は、出口緩和曲線におけるオーバーステアリングの解消へ向けた検討を進めシステムの性能向上を図っていく予定である。

文献

- 1) 緒方政照, 伴巧, 深貝晋也, 石田誠, 名村明: 車輪/レール摩擦緩和システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.21, No.6, pp.51-56, 2007
- 2) 佐藤栄作, 小林秀之, 岡本勲, 手塚和彦, 柿沼博彦, 玉置俊治: リンク式ボギー角連動方式による特急気動車用操舵台車の曲線通過横圧, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.64, No.625, pp.315-322, 1998
- 3) 鴨下庄吾, 梅原康宏, 山長雄亮, 石栗航太郎: 機械式空気圧操舵システムによる曲線通過性能向上, 第21回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2014), S1-2-2