3105　簡易型空気ばね車体傾斜システムの開発

正［機］○遠竹　隆行　（鉄道総研）　　正［機］　風戸　昭人　（鉄道総研）
福井　広道　（JR 西日本）　　若山　一樹　（JR 西日本）

Development of a Simplified Air-Spring Car-Body Tilting Control System

○Takayuki TOHTAKE,　Akihito KAZATO,　Railway Technical Research Institute
Hiromichi FUKUI,　Kazuki WAKAYAMA,　West Japan Railway Company

In this study, we propose a new air spring car-body tilting control system to improve running speed and ride comfort of Shinkansen passing through curve sections. The new system is compact and simple, and does not require electrical control or complex structure. This paper introduces the mechanism of a new air-spring car-body tilting control system, and it proposes two devices (an acceleration-sensitive pneumatic valve for railway vehicles and a leveling device for air suspension) that comprise the new system. The results of experiments using the testing apparatus confirmed the expected performance. In the future, the characteristics of the proposed two devices will be improved. Furthermore, the scope of testing conditions will be expanded, and examinations will be conducted aiming for practical use.

Keywords : Railway Vehicle, Car-body tilting system, Passive control, Air spring, Air-valve, Steady lateral acceleration

1．はじめに

新幹線の曲線通過における乗り心地の向上策として、空気ばねを用いた車体傾斜システムが実用化されている[1)2)]。この空気ばね式車体傾斜システムは、曲線に応じて傾斜角をアクティブに制御するため、複数の電磁弁、センサや制御装置を搭載している。しかし、このような積極的な車体傾斜を必要とする曲線が少ない走行線区では、車両にとって過剰な性能と判断されることがある。

そこで、電気的な制御や複雑な構造を必要としない、機械式で簡易な空気ばね式車体傾斜システムの開発に着手した。本稿では、本システムの車体傾斜機構を示すとともに、開発中の加速度感応型空気弁と車体傾斜用高さ調整弁について説明する。

2．車体傾斜機構

2.1 基本構成

本システムの開発にあたっては、次のことを前提条件とした。

- 電気的な制御は使用しないものとする
- できる限り簡素な構造とする
- 既存の高さ調整弁の置き換えで実現可能なものとする
- 不具合が生じても既存の空気ばね高さ調整機能を維持するものとする。

この構成案を基に提案するシステムの概略図を図 1 に示す。図 1 は車両の断面を表しており、1 台車に装備された 1 対の空気ばねに対して、本システムは以下の部品を装備する。

①曲線検知のための加速度感応型空気弁（以下、振子弁と呼ぶ）
②空気ばねを伸長させるための車体傾斜用高さ調整装置（以下、車傾用 LV と呼ぶ）

本システムは、振子弁の錘に生じる超過遠心加速度をトリガとして、高さ調整弁（以下、LV と呼ぶ）本体を駆動用空気圧シリンダで回転させることでテコ角を強制的に大きくし、外軌側の空気ばねを伸長させるシステムである。車体傾斜角は曲線条件に依らず固定である。なお、図 1 中に示すバイパス空気回路とは、テコ棒の角度が大きくなると開口する、LV と並列に設けた空気回路で、流量を LV より大きく設定することで車体傾斜の応答性を向上させる狙いがある。振子弁と車傾用 LV については 3 章と 4 章で詳細説明と定置試験による機能検証の結果を述べる。

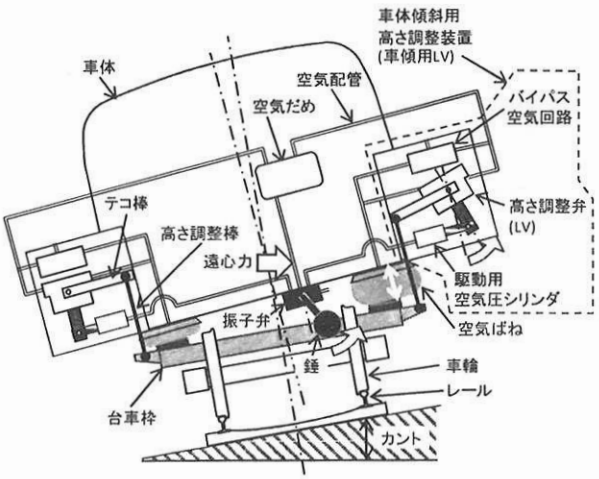

Fig.1 提案する車体傾斜システムの概略図

2.2 基本動作

本システムを装備した車両が曲線を通過する際の基本動作を以下に示す。

① 車両が入口側緩和曲線に進入すると、振子弁の錘が遠心力によって外軌側に変位する。
② 振子弁本体に対する錘の角度が所定の角度を超えると、振子弁は開口して外軌側の車傾用 LV の駆動用空気圧シリンダに給気を行う。
③ 駆動用空気圧シリンダはロッドを伸ばして LV をロール方向に回転させる。それにより、不感帯の位置を移動させると同時に、給気方向における LV とテコ棒の相対角が通常に比べて大きくなる。
④ LV とテコ棒の相対角が給気側の所定の角度以上になると、バイパス空気回路が開口して空気ばねへの給気が始まる。
⑤ バイパス空気回路の給気から数秒遅れた後、LV を経由した給気も始まる。
⑥ 空気ばねが所定の高さに達すると、バイパス空気回路と LV の空気回路は閉口して、車体傾斜が完了する。
⑦ 車両が出口側緩和曲線に進入すると、遠心力が徐々に弱まり、振子弁の錘は中立位置に戻り始める。
⑧ 振子弁本体と錘の角度が所定の角度より小さくなると、振子弁は車傾用 LV の駆動用空気圧シリンダの圧力を大気に排気する。
⑨ 駆動用空気圧シリンダの排気によって、ロール方向に回転していた LV が戻しばねによって初期位置に復位する。そして、不感帯の位置が初期状態に戻ると同時に排気方向における LV とテコ棒の相対角が通常に比べて大きくなる。
⑩ LV とテコ棒の相対角が排気側の所定の角度以上になると、バイパス空気回路を経由して空気ばねの排気が始まる。
⑪ バイパス空気回路の排気から数秒遅れた後、LV を経由した排気も始まる。
⑫ 車体が水平に近い状態に戻るとバイパス空気回路と LV は閉口して、高さ調整が完了する。

2.3 目標傾斜角と評価条件

本システムの車体傾斜角度は、現行の空気ばね式車体傾斜システムと同じ 1° [1]とした。評価曲線は曲線半径 3500m、カント 190mm とし、この曲線を時速 300km で走行する際に生じる車体床面左右振動加速度が 0.8m/s² を超えないことを目標に検討を進めた。

3. 振子弁

振子弁は、曲線の検知を目的に開発した空気弁である。ここでは、振子弁の基本構成ならびに、試作した振子弁の曲線検知性能を確認するために実施した定置試験の結果について説明する。

3.1 基本構成

図 2 に振子弁の基本構成を示す。振子弁は超過遠心加速度を受けて左右に変位する錘と、これをつり下げる振子棒、錘の比較的高周波の振動を減衰させる空気圧ダンパ、および振子棒の回転変位によって開閉する空気弁により構成される。振子弁には空気圧ダンパの減衰特性に合わせた圧力が供給される。空気弁が開くと、この供給圧力が車傾用 LV の駆動用空気圧シリンダに送られ、LV を回転させる仕組みである。振子弁は 1 台車につき 1 台、または 1 両に 1 台構成すればよい。取付位置は、車体床下を想定している。

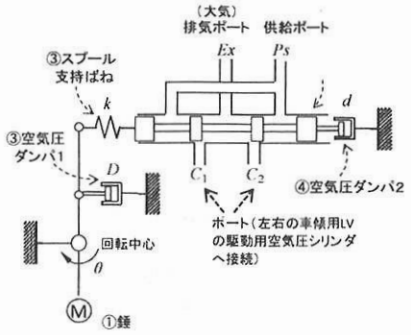

Fig.2 加速度感応型空気圧弁（振子弁）の概略図

3.2 開口角と閉口角

図 2 において、振子弁の C1 あるいは C2 ポートが供給ポートと開通する場合を開口、排気ポートと開通する場合を閉口とする。ここでは評価曲線の条件より、振子弁が開口する錘の角度を 3°、閉口する角度を 1° に設定した。この設定値の理由は以下の通りである。

2.3 節で示した条件で曲線を走行した際の振子弁の錘の角度は約 4° となる。本システムの車体傾斜角は 1° であるため、車体傾斜後の錘の角度は約 3° まで戻される。すなわち、閉口角を開口角と同じ 3° に設定すると、車体傾斜の完了と同時に排気を始めてしまい、ハンチングを起こしてしまう。従って、閉口角は開口角から設定傾斜角を引いた角度より小さく設定する必要があり、実際には、軌道不整や変動空気力による車両動揺を許容する必要があるため、ここでは閉口角を 1° に設定した。

なお、開口角を、小さくしすぎると、曲線に進入する際の検知は早くなるが、車両動揺に過敏に反応する恐れがある。一方、閉口角を、小さくしすぎると、車体傾斜中の車両動揺に反応しづらくなるが、曲線を抜けた際の検知が遅くなる恐れがある。

3.3 試作振子弁

図 3 に試作した振子弁の外観写真を示す。おおよその寸法は、高さ 200mm、幅 80mm、奥行き 100mm（試験計測用のセンサや配管部品を除く）で、質量は 2.7kg（錘 1kg を含む）である。給気ポートは前面、排気ポートは背面、C1 と C2 ポートは上面に設けられている。なお、本機は試験用であるため、スプールの変位および錘の角度を測定するセンサが取付けられている。

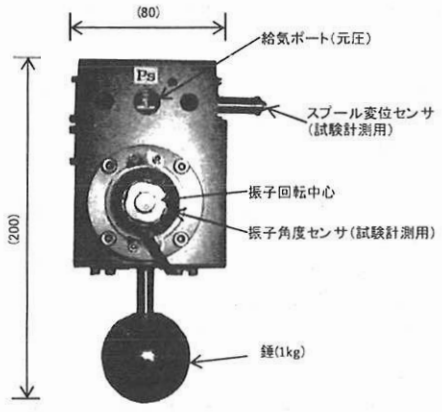

Fig.3 加速度感応型空気圧弁（振子弁）

3.4 試作振子弁の性能確認試験

鉄道総研が所有する空気ばね試験装置の加振機を用いて、振子弁の性能確認試験を実施した。試験による確認項目は、走行試験で取得した曲線通過時の左右の定常加速度を含む車体動揺に対する弁の動作感度である。

図 4 に加振試験の構成の概略図を示す。加振機は 6 自由度の加振が可能なモーションベースである。振子弁は加振機上に治具を介して固定した。振子弁の空気配管は、給気ポートに 400kPa に調整した空気圧を供給し、C1 と C2 ポートは、本来、車傾用 LV の駆動用空気圧シリンダに接続されるが、ここでは、圧力センサをそれぞれに接続し、ポートの圧力が 200kPa を超えた場合を開口(ON)、200kPa 以下の場合を閉口(OFF)の状態と定義した。

加振入力波形は、走行試験で取得した、評価曲線を含む 3 つの曲線を時速 300km で走行した際の左右方向と上下方向の車体床面振動加速度に、通過帯域の周波数を 0.2Hz から 5Hz に設定したバンドパスフィルタを掛けた波形を用いた。これに加えて、曲線通過時の左右定常加速度は、加振機をロール方向に傾斜させて重力成分で模擬した。さらに、ロール角の指令値には 1° の車体傾斜状態を模擬するため、振子弁の開口を検知した場合は 1° 小さくし、その後に閉口を検知した場合は 1° 大きくする指令を加えた。

図 5 に加振試験結果を示す。加振機上面の左右振動加速度と振子弁の開口と閉口を表す動作フラグ信号の結果を重ねて示した。動作フラグ信号は、OFF の状態を中心に上側を C1 ポートが ON、下側を C2 ポートが ON として表示している。

振子弁の動作フラグを見ると、3 つの曲線における入口側と出口側の緩和曲線の進入時に開口もしくは閉口を行っており、想定通りの動作を確認した。一方で、同方向の曲線が連続する場合に、不必要な動作（図 5 における丸で囲った箇所）が認められた。これは、曲線の通過後の外軌側空気ばねの排気の遅れによって残った車体傾斜分が原因と考える。この対策として、錘の応答を空気圧ダンパで調整することや、車傾用 LV と組み合わせた配管の流体抵抗で調整することを考えている。

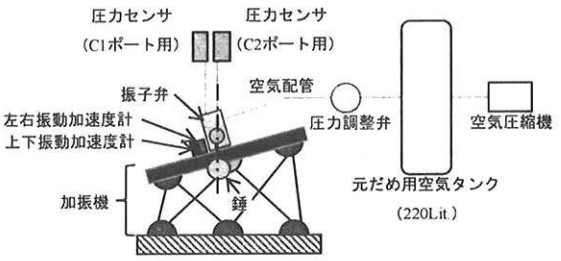

Fig. 4 加振試験の構成の概略図

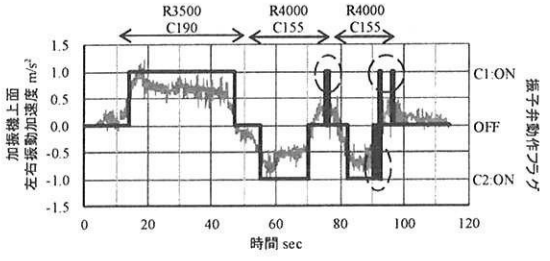

Fig.5 試作した振子弁の加振試験の結果

4．車体傾斜用高さ調整装置

本装置は、振子弁から出力されるパイロット圧力によって LV の不感帯の位置を変えて空気ばねを伸長させる機構と、バイパス空気回路を備えている。

LV の不感帯の位置は、テコ棒が LV 本体と直交する位置にあり、言い換えると LV が給気排気を行わない空気ばね高さ（位置）である。この設計上決められた空気ばね高さを保つように、LV は機械的に制御をおこなっているため、LV の機能を殺さず空気ばね高さを変えるには、LV の不感帯位置を変える必要がある。ここでは駆動用空気圧シリンダで LV 本体をロール方向に回転させて不感帯位置を変える方法を用いた。一方、バイパス空気回路は、空気ばねに給気する際に、動作遅れを持つ LV とは別に設けた、遅れ要素を持たない空気回路である。流量も通常の LV より大きく設定し、車体傾斜の応答性を向上させる目的がある。

ここでは、バイパス空気回路の有効性について、検証用の車傾用 LV を用いた定置試験の結果について説明する。

4.1 バイパス空気回路の構成

図 6 にバイパス空気回路を具備した LV の概略図を示す。図中の上側に示す空気経路は、通常の LV の部品構成を表したもので、レバー1 は回転軸に対してねじりばねとダンパで支持され、テコ棒に対して時間遅れを持って回転する。一方、下側に示すバイパス回路もほぼ同様の構成であるが、レバー2 はテコ棒と剛に結合されているため動作遅れはない。そのため、通常走行時の自動高さ調整を支障しないように、レバー2 と弁の隙間（不感帯）は大きく設定している。車体傾斜を行う際は、テコ棒と LV 本体の相対角を大きくし、不感帯を詰める必要がある。

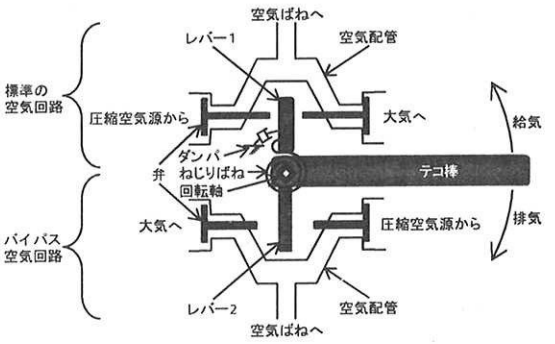

Fig.6 バイパス空気回路の構成

4.3 バイパス空気回路の検証用高さ調整装置

バイパス空気回路の有効性を実物の空気ばねを用いて検証するために、図 7 に示す検証用の車傾用 LV を試作した。車傾用 LV は、LV をロール方向の回転を許容する台座に取付け、LV 下側に取付けた駆動用空気圧シリンダの伸縮によって所定の角度だけ回転し、通常時は戻しばねによって中立を保持する機構とした。バイパス空気回路は、給気と排気に対応した機械式スイッチ弁を、テコ棒の回転中心から垂直に伸ばしたレバー2 端の左右に仮設し、図 6 に示す構成を再現した。LV およびスイッチ弁の空気配管は、LV の回転を阻害しないように銅管ではなく柔軟なエアホースで結線した。

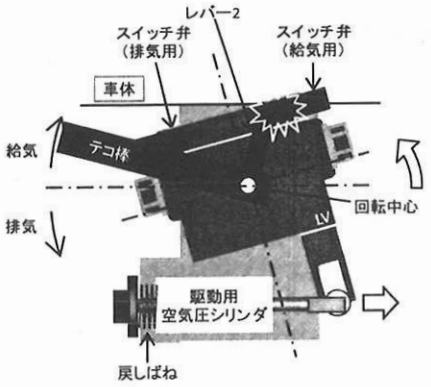

Fig.7 バイパス回路検証用高さ調整装置

4.4 バイパス空気回路の検証試験

鉄道総研が所有する、半車体の振子試験装置である動揺負荷試験装置に車傾用 LV を仮設して、車体を支持する梁（台車枠に相当する）をロール方向に傾斜させて曲線走行時に車体に働く超過遠心力を、重力加速度の横方向分力で模擬した定置試験を実施した。図 8 に試験装置の概略図を示す。試験における空気ばね周りの条件は新幹線の諸元に合わせたが、装置の制約から空気ばね間隔については新幹線よりも狭い 1.64m である。

試験の入力となる台車枠の傾斜角は、評価曲線の諸元と走行速度(300km/h)より、約 4.2°となる。なお、振子弁については、本試験の実施が 3.3 節で紹介した試作振子弁の製作前であったため、2kg の錘を下げた振子棒と機械式スイッチ弁を組み合わせた簡易的なものとした。

図 9 に定置試験結果について車体傾斜の有無を比較した台車ロール角（入力）、車体左右加速度と外軌側空気ばね供給流量の時刻歴応答を示す。車体左右加速度について入口側緩和曲線で見られる最大値に注目すると、車体傾斜なしの場合で 1m/s^2 程度であったのに対し、車体傾斜ありの場合では 0.8m/s^2 程度まで低減された。この時の空気ばねへの供給最大流量は、車体傾斜なしの場合の 2.5 倍以上であった。また、車体傾斜ありの場合の給気開始時間は、車体傾斜が無い場合に比べて約 3 秒早くなった。一方、出口側の緩和曲線においては、空気ばねの排気速度が遅いために、曲線通過後に傾斜状態が残ってしまい、逆方向の加速度が生じている。この対策として、バイパス空気回路の排気特性を改善することを考えている。

5．終わりに

電気的な制御や複雑な構造を必要としない空気ばね車体傾斜システムの開発に着手し、本システムで用いる加速度感応型空気弁と、バイパス回路を有する高さ調整装置について試作機を製作し、性能を評価する定置試験を行った。結果を以下に示す。

- 試作した加速度感応型空気弁は、車両動揺に対して過敏な反応をせず、曲線の検知が可能であることを定置加振試験により確認した。

- 試作した検証用高さ調整装置は、緩和曲線通過時に発生する大きな車体左右加速度を低減できることを定置試験により確認した。このことから、提案するバイパス空気回路は有効であると言える。

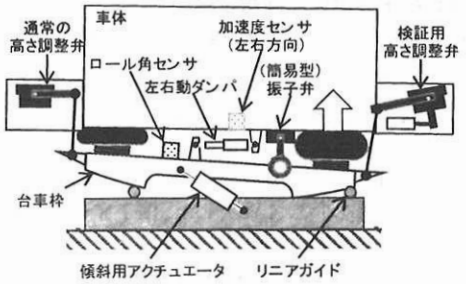

Fig.8 動揺負荷試験装置の概略図

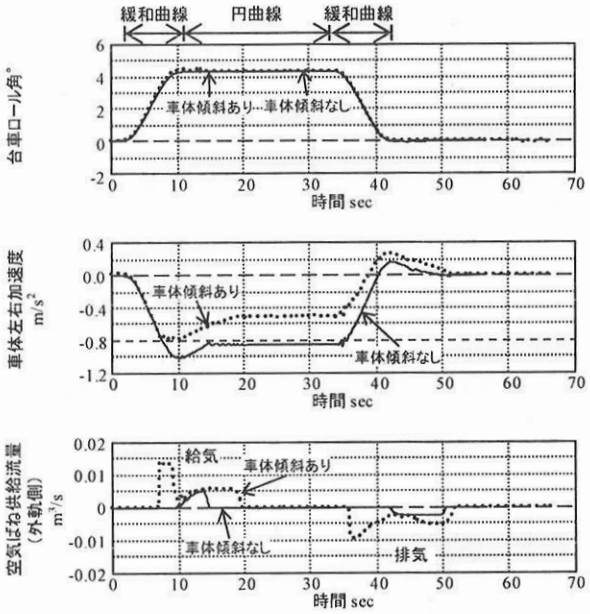

Fig.9 定置試験の結果

今後は、各装置の特性改善を図るとともに、他の曲線条件や低速時のカント超過時など試験条件を拡張し、実用化へ向けた検証を進めていく予定である。

謝辞

加速度感応型空気弁の開発にご尽力頂いたピー・エス・シー(株)の関係各位に心より深謝の意を表する。

参考文献

1) 田中守，平田治雄：東海道・山陽新幹線直通用次世代車両 N700 系量産車の概要，R&m，Vol.15，No.6，pp4-9,2007.6
2) 梶谷泰史，加藤博之，浅野浩二：乗り心地向上の取り組み，JR EAST Technical Review，No.31 pp69-72，2010