

シンプルな構造で鉄道車両の車体を傾けて曲線の乗り心地を向上する



風戸 昭人
Akihito Kazato
車両技術研究部
車両運動研究室
主任研究員(上級)



小島 崇
Takashi Kojima
車両技術研究部
車両運動研究室
副主任研究員



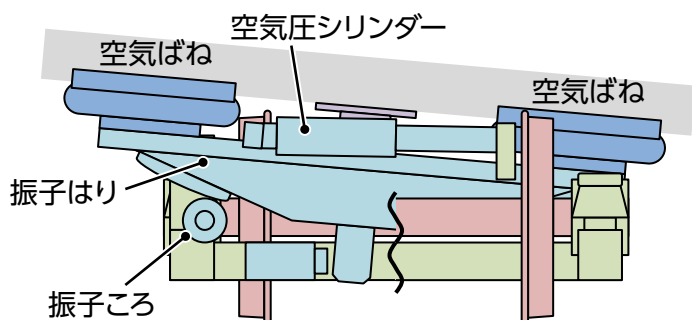
石栗 航太郎
Kotaro Ishiguri
車両技術研究部
車両運動研究室
主任研究員

はじめに

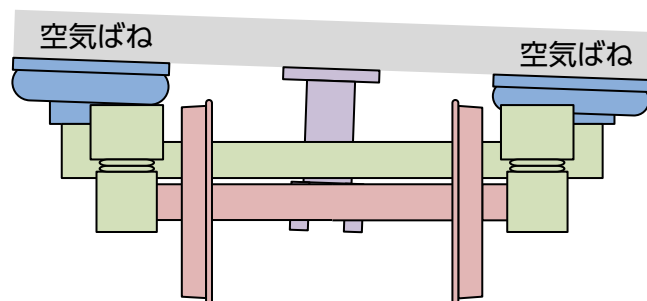
車体傾斜車両は、曲線を高速で走行する際に、車体を曲線の内側に傾けることで乗客に作用する遠心力を緩和して、良好な乗り心地を提供する車両です。おもに急カーブが多い地域を走る在来線の特急車両として運用されているほか、近年は新幹線車両にも使用されています。国内の車体傾斜方式には、振子式と空気ばね式の2種類があります。図1(a)の振子式は、最大5°の大きな傾斜角をもち制御性能に優れていますが、振子はりや振子ころなど大型で摩耗状態などの管理が必要な部材が多くあるため、一般車両と比べて保守性に課題があります。図1(b)の空気ばね式は、空気ばねを直接上下に伸び縮みさせて傾斜を行う方式のため、構造はきわめてシンプルですが、最大傾斜角は2°程度にとどまります。

鉄道総研ではこれらの長所を両立した第三の方式として、アンチローリング装置を応用した「アクティブトーションバー（以後「ATB」）式車体傾斜システム」の開発に取り組んでいます¹⁾。アンチローリング装置は、その名前のとおり遠心力で車体が曲線の外側に傾こうとする「ローリング」を、ねじりばねの反力で抑制する装置ですが、これに外部から力を加えることで、逆に車体を傾けるのに使おうというアイデアです。一般車両で実績のあるアンチローリング装置をベースとして工夫することにより、振子式よりもシンプルな構成で保守性を向上し、さらにより乗り心地を実現します。ここでは、本方式の課題の一つであるフェールセーフ性の向上を主眼とした開発状況を中心に報告し、実用的な仕様を紹介します。

図1 国内の車体傾斜方式



(a) 振子式車体傾斜機構



(b) 空気ばね式車体傾斜機構

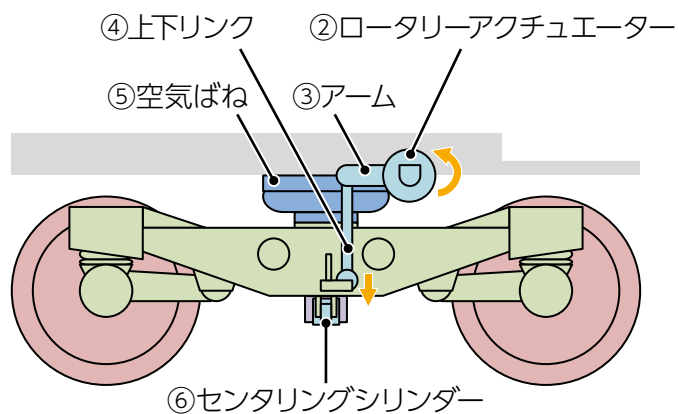
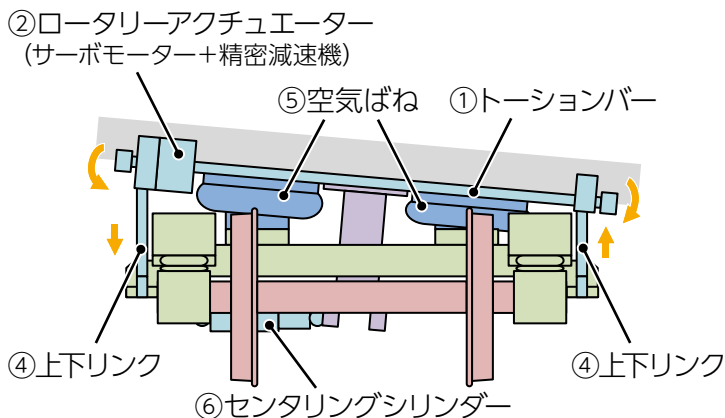


図2 アクティブトーションバー式車体傾斜機構

車体傾斜機構の基本構成

図2に基本構成を示します。一般的なアンチローリング装置に用いられているトーションバー①の端部に対して、電動式のロータリーアクチュエーター^{※参照}②で強制的に力（トルク）を加え、アーム③と上下リンク④を介して台車と車体の間に傾斜に必要な力を与える構造が特徴的となっています。最大傾斜角が5°と大きいため、空気ばね⑤を一般的な左右間隔1.6～2.0m程度に配置すると、大きな上下ストロークを許容しなければなりません。そこで、空気ばねの左右間隔を一般的な配置よりも狭めています。また、大きな遠心力が作用する場合に、車体が曲線の外側方向に強く引っ張られ、左右

動ストッパー当たりとよばれる衝撃的な振動が発生しやすくなることから、車体が左右方向に過剰に動かないようにセンタリングシリンダー⑥を設けることでこれを防ぎます。

なお、ATBは①～④で構成されます。

アクティブトーションバー

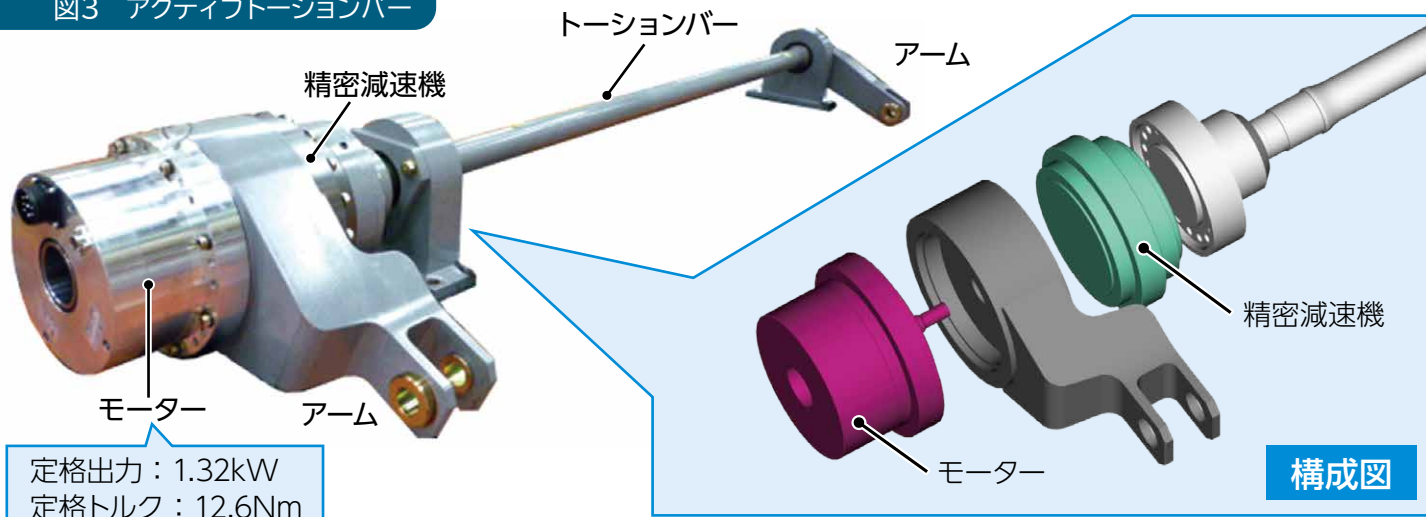
ATBは、ロータリーアクチュエーター②の構成部品であるモーターの回転角度を制御して左右のアーム③の回転角度に差をつけることで、左右それぞれの上下リンク④が車体を傾けます。なお、モーター単独で発生できる力は小さいので、この力を増幅する「減速機」とよばれる歯車装置を併用します。

図3に試作したATBと概略の仕様を示します。減速機には、鉄道車両での使用に求められる強度と耐久性をもたせるため、産業用ロボットの関節などに使用される精密減速機を選定しまし

※ ロータリーアクチュエーター

アクチュエーターは電気などのエネルギーを物理的な力、運動に変換する装置の総称で、回転運動を行うものをロータリーアクチュエーターとよびます。

図3 アクティブトーションバー



た。モーターは短い全長の中空タイプを選定し、ATB全体を車両限界内に収めることができました。また、通常このタイプのモーターは電源の供給が遮断された場合のために回転を「固定する」機械式ブレーキを内部にもっています。しかし今回のシステムの場合、電源の供給が遮断されたときに「固定する」のがよいのか、乗客の乗り心地や走行安全性の観点から検討した結果、機械式ブレーキは設けないこととしました。

車体支持装置

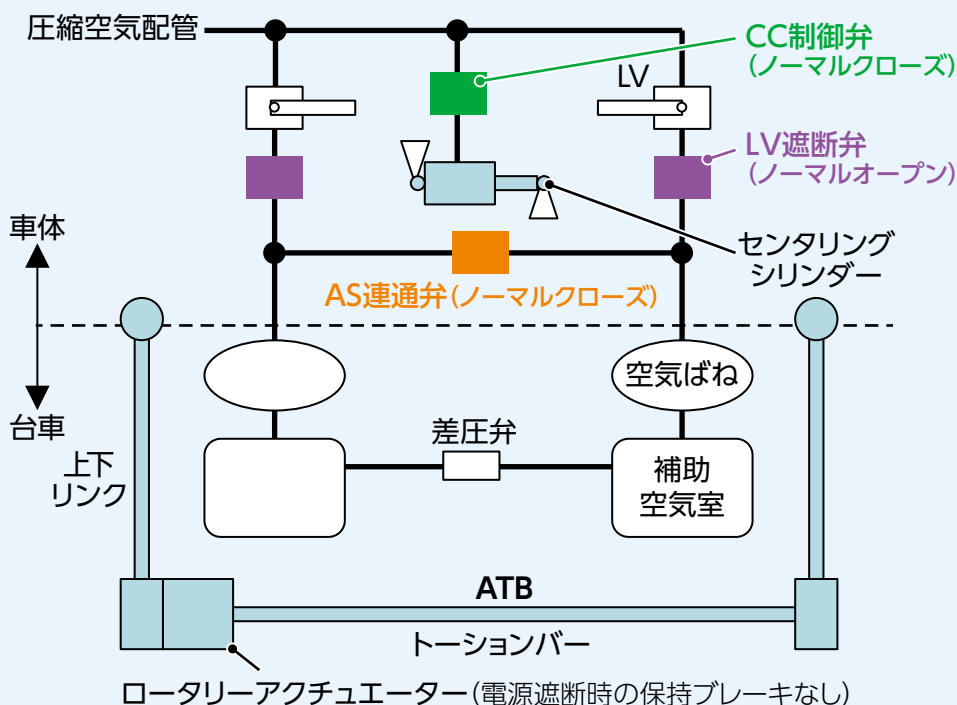
車体支持装置は、車体と台車との間の荷重の伝達装置の総称です。ATB式による車体傾斜制御では、空気ばねに関係する部分に工夫が必要になります。図4に、ATB式に合わせて開発した車体支持装置の構成を示します。楕円状の部品は空気ばねを表しており、色つきで示した部品は本システムに特有の部品です。

車体傾斜制御に対応するために設けた電磁弁3種類を紹介します。紫色で示した弁を「LV

遮断弁」とよびます。通常の車両は、LV装置 (Leveling valve) とよばれる機械式の空気弁がつねに空気ばねの高さをある一定範囲に保つように空気ばね内部の空気を給排気しています。この機能は意図的に車体傾斜を行おうとする場合に阻害する方向に作用しますので、制御中はLV遮断弁を閉じることでLV装置の給排気機能を一時的に無効にします。次に、^{だいたい}橙色の弁を「AS (Air Spring) 連通弁」とよびます。車体傾斜制御を行うとき、一方の空気ばねは縮められ、もう一方は伸ばされるため、左右の空気ばねに圧力差が生じて、車体を押し戻します。AS連通弁は、左右の空気ばねをつなぐ空気管路の途中に設け、空気ばね内の空気を左右に行き来させることで、車体傾斜制御に対する反力を軽減させます。緑色の弁は「CC制御弁」です。CCは、センタリングシリンダー (Centering Cylinder) (図2の⑥) を表しています。このシリンダーは空気圧式で、車体傾斜制御中にCC制御弁を開いてこれを動作させます。

以上は、車体傾斜制御をうまく行うための装

図4 車体支持装置の構成



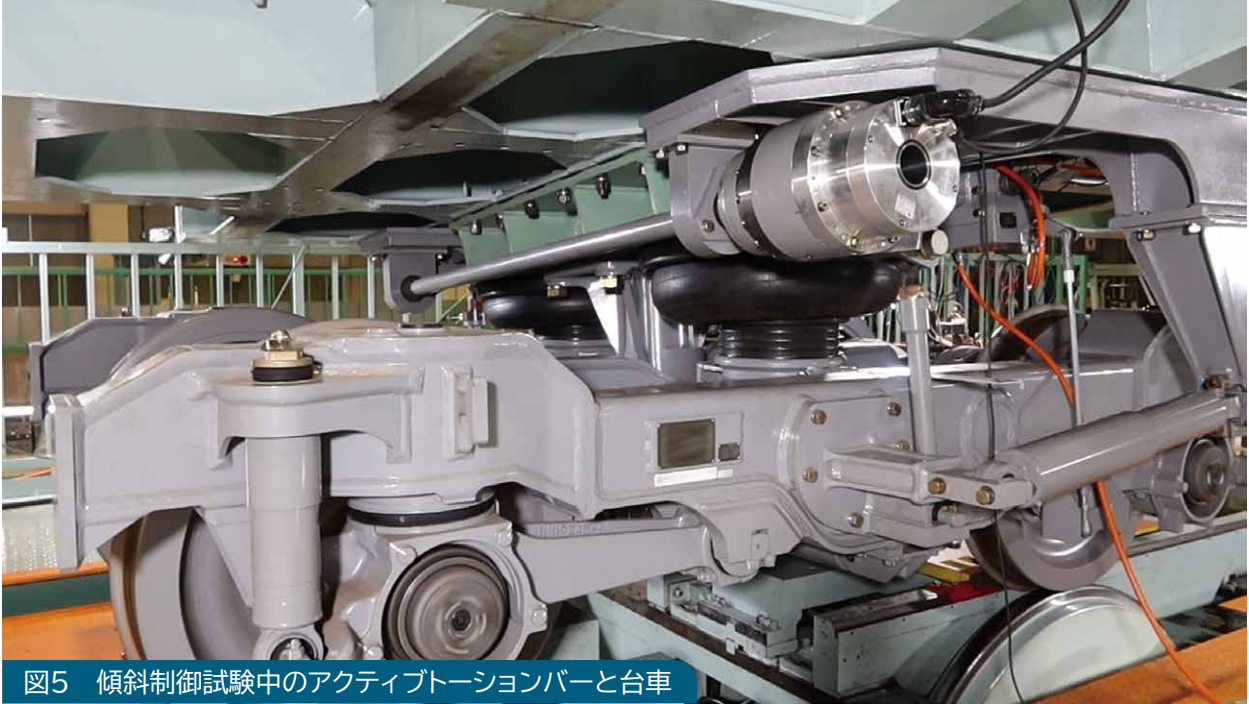


図5 傾斜制御試験中のアクティブーションバーと台車

備ですが、低速走行時や、万が一制御がフェールしたときには、これらの弁への電源供給を遮断するだけで、一般的な車両の車体支持装置と同等の構成にできます。このときATBは、車体の動きに合わせて自由に回転できますが、減速機とモーター内部で発生する抵抗力を利用することで、車体の急激なロール動作を防ぎます。

以上によって、車体傾斜制御とフェールセーフの両立を実現します。

定置傾斜試験による性能確認

図5のようにATBを試験台車に組み込み、鉄道総研の車両試験装置で傾斜試験を行いました。図6に急曲線での走行を模擬した5°傾斜の様子

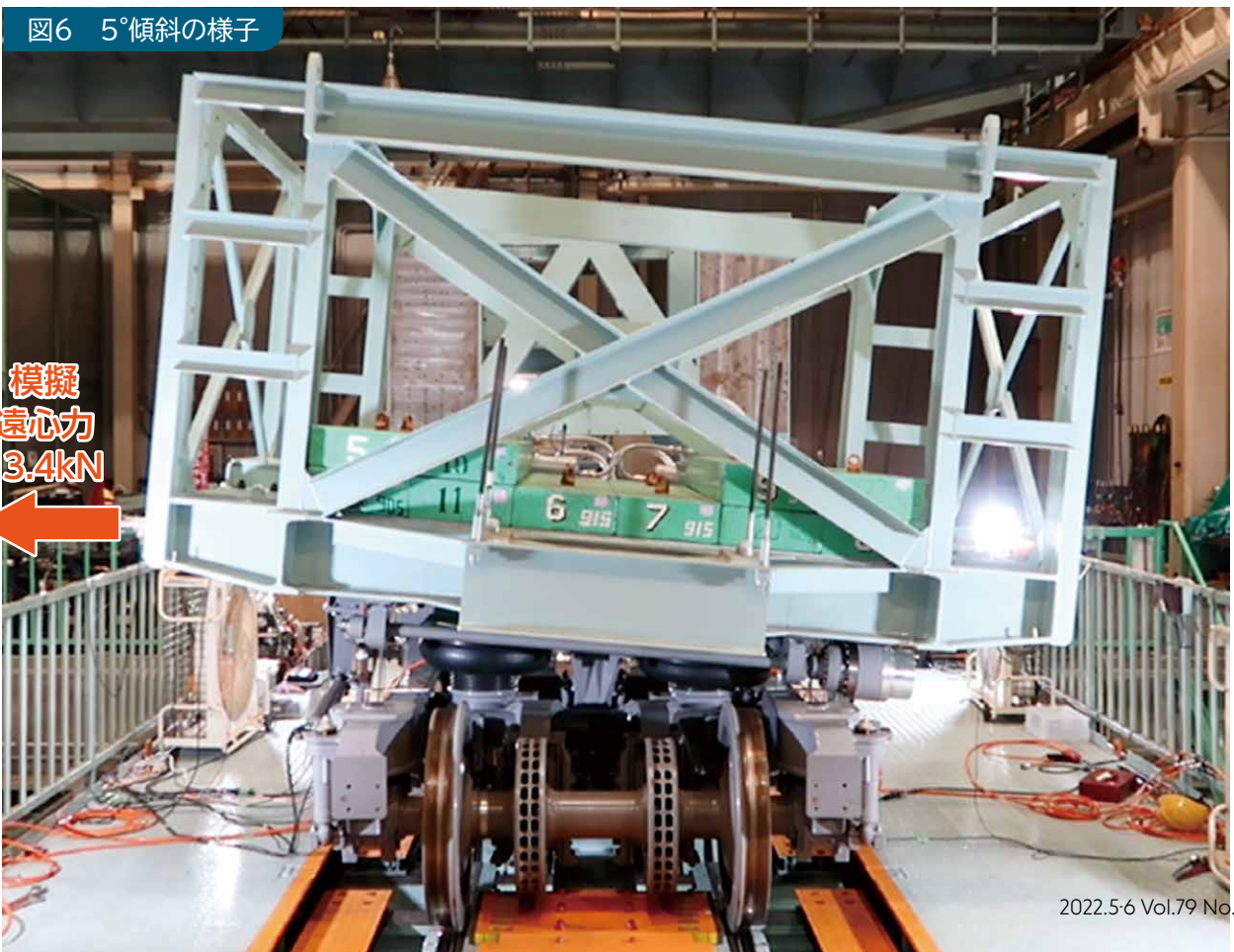


図6 5°傾斜の様子

模擬
遠心力
13.4kN

を示します。車体傾斜角の目標値への追従性はきわめて良好で、モーターの回転数や電流値などにも余裕があることを確認しました。さらに、車体の重心位置を意図的に左右にオフセットさせた場合や、走行時の振動環境を模擬した条件での制御も問題なく行うことができました。

また、走行中に何らかの異常が発生して制御ができなくなる事態を想定し、このとき車体がどのような挙動をするか確認しました。その結果、ATBは制御を行っていないときであっても、想定どおり車体のロール運動に対して適切な剛性と減衰を発揮することを確認できました。これにLV装置による空気ばねの自動高さ調整機能が加わることで、車体を水平に維持して走行することができました。

車体傾斜システムの実用仕様

定置傾斜試験の結果を踏まえて策定した、車体傾斜システムの実用仕様を紹介します。図7に1両分の概略システム構成を示します。

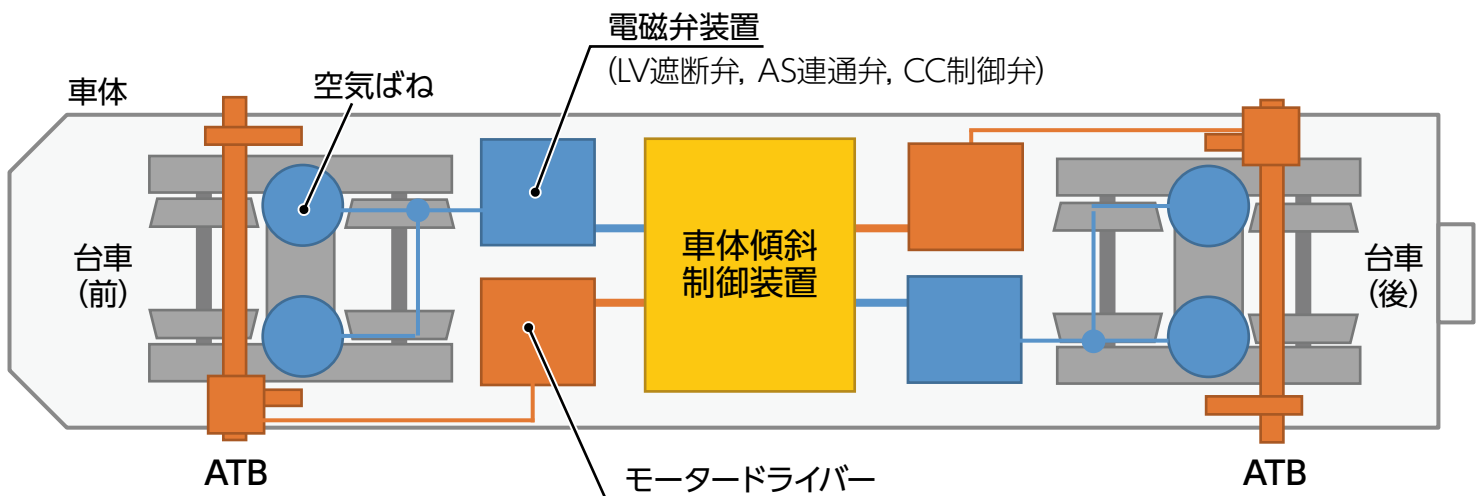
車体傾斜制御装置は、カーブの正確な位置を把握するための現在走行位置の特定、車体傾斜

角目標値の計算、システムの異常監視機能など、車体傾斜制御を統括する中心的な役割を担います。モータードライバーは車体傾斜制御装置からの指令に従って、モーターに電力を供給して、回転/停止の制御を行うものです。電磁弁装置は、先述したLV遮断弁、AS連通弁、CC制御弁を台車ごとにまとめたものです。

実用化に際しては、万が一車体傾斜システムに異常が発生しても、一般特急車両の走行速度で安全に走行できることが求められます。本システムのフェールセーフ性確保の考え方を説明します。

車体傾斜制御装置は内蔵されたソフトウェアで、システムに異常が発生していないか常時監視を行い、異常を検出した際には、速やかにモータードライバー、ならびに電磁弁装置への電源供給を遮断します。これまで述べたように、ATBは電源を失って制御ができない状態になっても、抵抗力や減衰力を完全に失うことはなく、車体の動きを安定させることができます。そしてLV装置による空気ばねの高さ調整機能で速やかに車体姿勢を水平に戻すことがで

図7 実用的な車体傾斜システムの概略構成



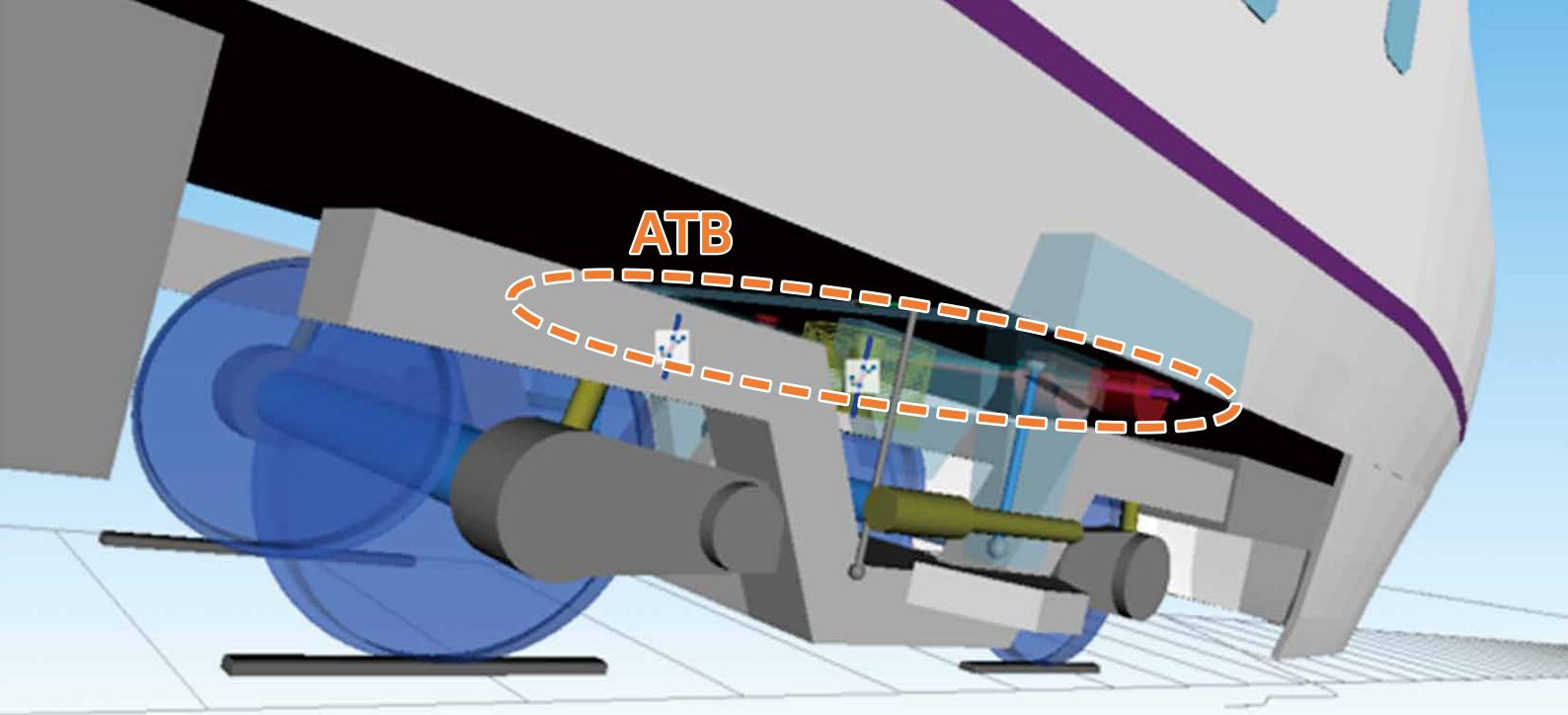


図8 ATBを搭載したシミュレーション車両モデル

きます。以上により一般車両と同等の走行が可能になります。

なお、現在走行位置の特定には、鉄道総研にて開発した技術²⁾を適用します。

乗り心地向上への期待

本システムは、センタリングシリンダーによる左右動ストッパー当たりの抑制など、乗り心地を考慮した設計を行っていますが、車体傾斜車両で配慮が不可欠なのは乗り物酔い³⁾です。鉄道総研では、乗り物酔いを引き起こすおもな原因はゆっくりとした低周波の左右動揺であると考えています。そこで、こういった動揺の抑制に効果がある「JTMパターン」とよばれる車体傾斜角目標値の生成方法を開発済みです³⁾。JTMパターンは、車両の速度とカーブの大きさなどの情報をもとに、数秒先の車両の揺れ方を予測して、何度傾ければこういった揺れをもっとも抑えられるのか、人間工学的な乗り心地評価式に当てはめて計算される高度なものです。従来の車体傾斜方式では、JTMパターンのとおりに車体を傾けることは難しかったのですが、ATB式はこれを実現できると考えてい

ます。コンピューターを使った走行シミュレーション(図8)を行ったところ、ATB式の低周波左右動揺は、一般の特急形車両が直線を走行するときと同程度の小さいレベルに抑えられており、本システムによる乗り物酔い低減が期待できます。

おわりに

シンプルな構造で大きな傾斜角を実現する車体傾斜システムの開発状況と実用仕様を紹介しました。今後は、新しい車体傾斜システムとして選定いただけるよう、積極的な情報提供に努めて参ります。

本研究の一部は、川崎車両株式会社殿との共同研究により実施しました。[RRR](#)

文献

- 1) 風戸昭人, 小島崇, 石栗航太郎, 井出知良: フェールセーフ性を向上したアクティブトーションバー式車体傾斜システム, 鉄道総研報告, Vol.35, No.8, pp.23-28, 2021
- 2) 原田康平, 真木康隆, 石栗航太郎, 風戸昭人: 曲線中の走行位置にあわせた車体傾斜で乗り心地を向上する, RRR, Vol.77, No.5, pp.16-19, 2020
- 3) 風戸昭人: 振り車両の乗り物酔い解消を目指して, RRR, Vol.68, No.10, pp.2-5, 2011