

次世代の振子技術で移動を快適にする



真木 康隆
Yasutaka Maki
車両技術研究部
車両運動研究室長



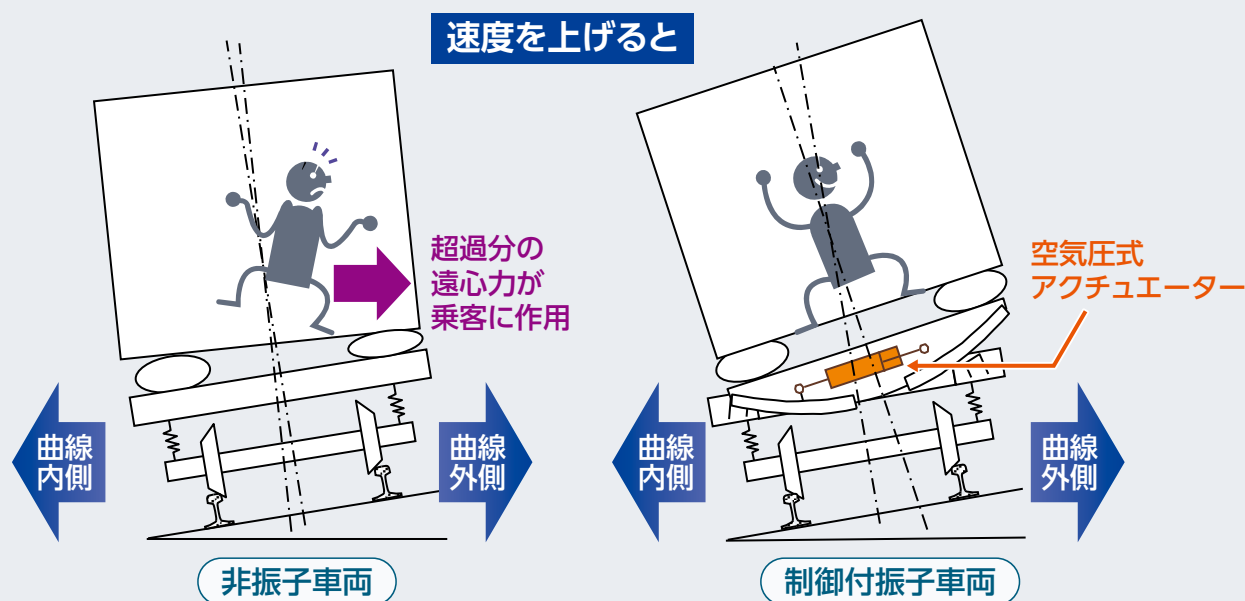
風戸 昭人
Akihito Kazato
車両技術研究部
車両運動研究室
主任研究員(上級)

はじめに

移動手段を選択する際に、目的地まで短い時間で到達することは重要ですが、移動中いかに快適に過ごすことができるかも同様です。移動する物体がカーブ(曲線)に進入すると、必ず曲線から外向きに離れようとする遠心力が作用します。鉄道車両の場合は乗客にこの遠心力が作用し、より高速で車両を曲線区間で走行させると、**図1**のように乗客に作用する遠心力は大きくなることから、これを軽減させることが必

要となります。そこで投入されたのが、曲線で発生する遠心力により車体を傾斜させる自然振り子式車両(以下、振り子車両)です。車体とともに車内の乗客も曲線の内側に傾くことで、遠心力を打ち消す効果が生まれます。ここでは振り子車両に特有のゆっくりとした低周波の動揺を抑え、より快適な移動環境をお客様に提供することを目標に開発した、次世代振り子システムについて紹介します。

図1 曲線における遠心力



次世代振子システム

1973年に運行を開始した最初の振子車両は、車体傾斜動作に遠心力のみを利用する「自然振子式」とよばれるものでした。その後、**図1**に示す空気圧式の振子**アクチュエーター**¹⁾を搭載した制御付き自然振子式車両（以下、制御付振子車両）が開発され、現在まで多くの曲線をもつ路線で運用されています。鉄道総研では、制御付振子車両を構成する要素のうち**図2**に示す3つをキーとした次世代振子システムを開発してきました。3つの要素は密接に関連しており、各要素を高いレベルで実現することで次世代振子システムを構成します。**図3**に次世代振子システムの構成を示します。

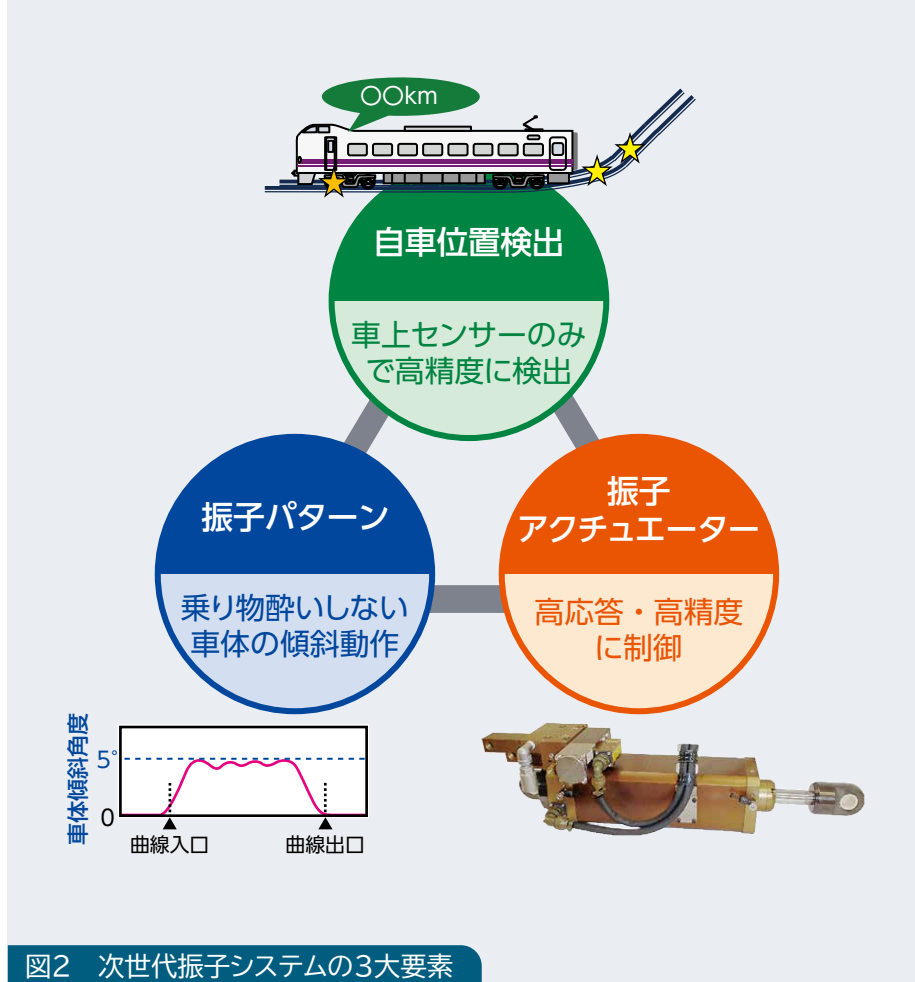


図2 次世代振子システムの3大要素

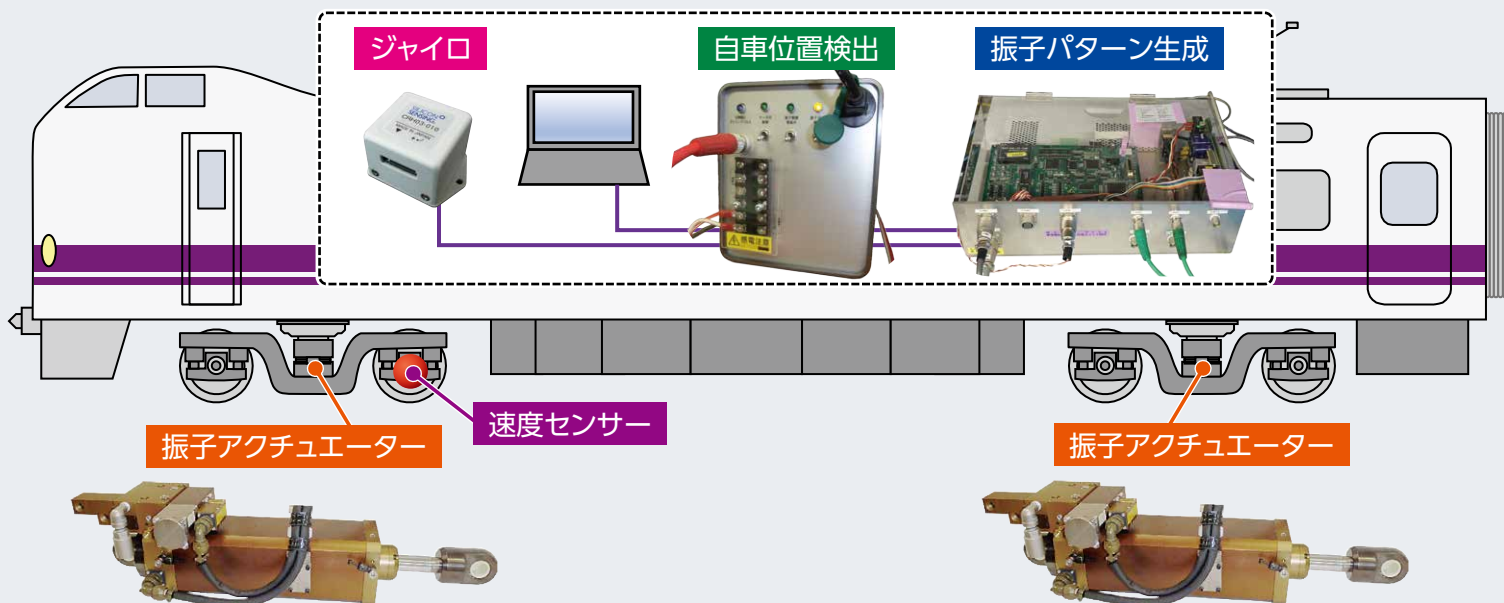
自車位置検出

曲線でタイミングよく車体を傾斜させるには、自車の位置を正確に継

1) アクチュエーター

入力されたエネルギーを機械的な運動に変換する装置であり、エネルギー源としては空気圧、油圧、電気、磁力などがあります。

図3 次世代振子システムの構成



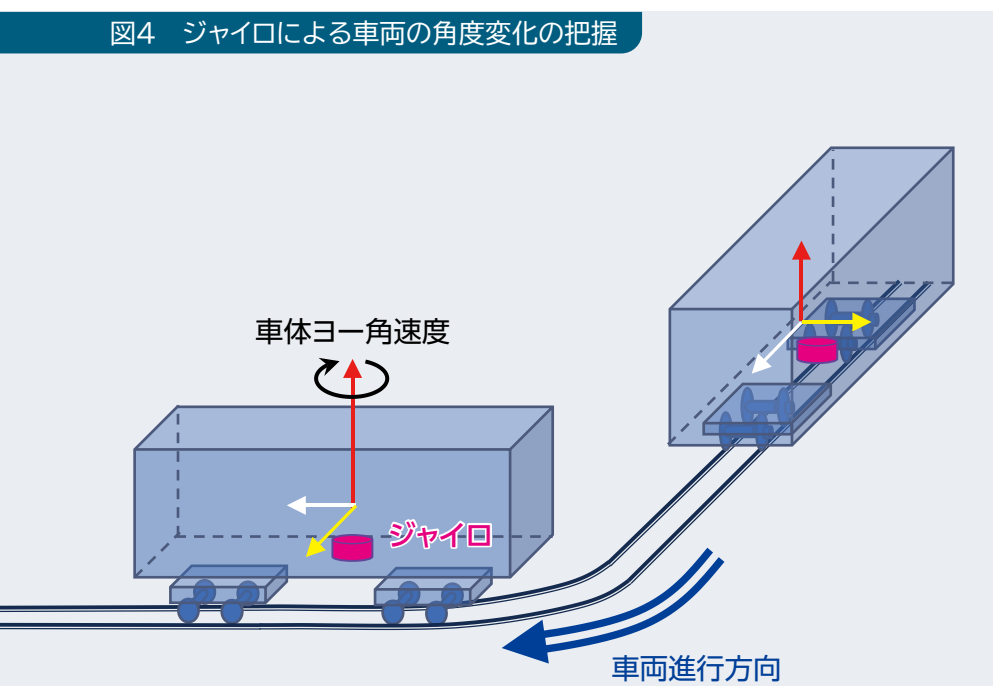
続いて把握することが必要です。現行の制御システムでは、軌道に設置されたATS[®]地上子を通過するごとに車両のデータベースに登録された地上子の位置情報を参照することで自車位置を把握しています。この方式の場合、データベースを最新の情報に維持する必要がある、また複数ある地上子の中から利用する地上子を選定する作業が煩雑であることが課題となっています。そこで次世代振子システムでは、車両にジャイロ[®]を搭載し、**図4**に示すような車両の進行方向に対する角度の変化(以下、車体ヨー角速度)を検出し、同時に車両から速度情報を受け取ることで、曲線の曲がり具合を把握します。この曲がり具合は曲線半径の逆数にあたる「曲率」として算出されます。鉄道車両は自動車とは異なり、敷設された線路に沿って走行することから、曲線を通過するときに車上で観測される曲率データは非常に再現性が高いことがわかっています。そこでこの再現性の高さに着目しました。まず運用の対象となる路線を走行し曲率データを取得し、マップデータとして車上に登録します。次に、**図5**に示すように車両を制御状態で走行するときには、同じく走行しながら

曲率データを取得しつつ、マップデータとして登録した曲率データを参照し、両者がもっとも一致するマップデータ上の自車位置を探索することで、自車位置を補正、更新します。現行の制御システムでは選定されたATS地上子ごとに自車位置を補正します。この地上子の間隔は数キロメートルにおよぶ場合もあります。一方、次世代振子システムでは曲線ごとに自車位置が補正されることで、より高い自車位置検出精度を実現しました。

乗り物酔いしない振子パターン

遠心力を打ち消す適切な車体の傾斜角度を計算するには、曲線の曲がり具合である曲率と、**図1**で示した曲線の内側と外側のレールの高低差であるカントの大きさの情報が必要です。現行の制御システムでは、軌道を管理している保線部門が持つデータを車両に登録して使用しています。一方、次世代振子システムでは、車両自身がジャイロなどのセンサーで測定した曲率とカントの情報をマップデータとして持ち、検出された自車位置情報を元にマップデータを参照することで、これから走行する区間の曲率と

図4 ジャイロによる車両の角度変化の把握



ATS

正式名はAutomatic Train Stop (自動列車停止装置)。列車が停止を示す信号機に接近したときに、地上からの制御信号により運転室内に警報ベルを鳴らして運転士に注意を喚起したり、自動的にブレーキを動作させて列車を信号機の手前に停止させる装置です。

ジャイロ

振動している物体が回転すると、物体に対して回転軸と垂直方向に力が作用します。ジャイロはこの力の大きさをもとに回転による物体の角度変化を検出します。

走行曲率データとマップ曲率データを
ずらしながら照合し一致する箇所を探索

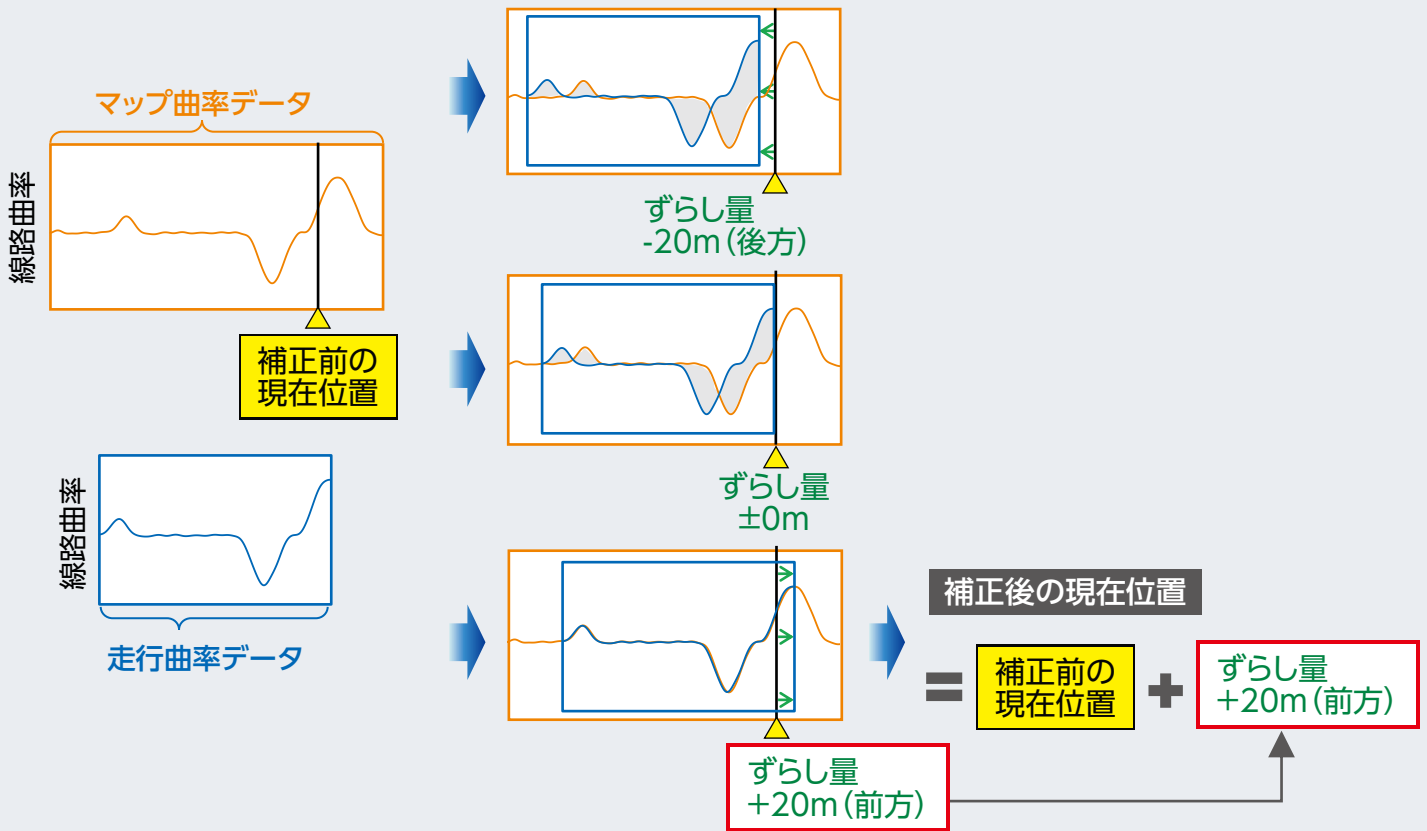
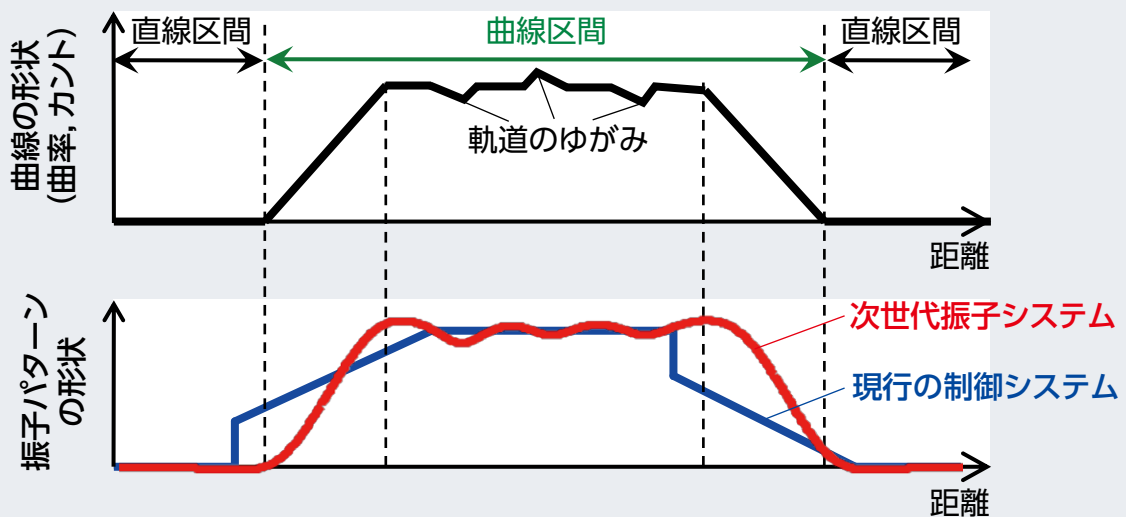


図5 曲率データの照合による自転車位置の補正イメージ

カント情報をあらかじめ把握します。これら2つのデータと現在の走行速度を元に、直後に走行する曲線での理想的な車体の傾斜角（以下、振子パターン）を算出します。図6に現行の制御システムと次世代振子システムの振子パターンを比較した例を示します。次世代振子システ

ムの振子パターンは、軌道のゆがみも含めた曲線の形に忠実に沿うように出力されるのが特徴です。そして後述する空気圧アクチュエーターと組み合わせることで、遠心力だけでなく軌道のゆがみなどで発生しやすい低周波の動揺も打ち消すことができます。低周波の動揺は振子車

図6 曲線に対する振子パターンの例



両に特有の乗り物酔いの原因と言われており、その抑制も実現しています。なお振子パターンの算出には人間工学的な知見に基づいた計算方法を採用しており、傾ける速さも適切なものとなるようにしています。

車体を傾ける 「振子アクチュエーター」

次世代振子システムでは、現行の制御システムと同じく圧縮空気の力を使った「空気圧アクチュエーター」を採用しました。現行の制御システムでは、遠心力による傾斜が遅れないようにアシストする思想であったことから、あまり高い性能は求められませんでした。次世代振子システムの振子パターンに沿って車体を傾けるには、従来よりも速く車体を傾ける性能が必要ですので、いくつか改良を行いました。

図7にアクチュエーターの写真と概略図を示します。シリンダー内部にはピストンに区切られた空気室があり、サーボ弁が左右の空気室の圧力を調整することで長さを制御しています。次世代振子システムでは、空気の出し入れを細かく精緻に行うことができるサーボ弁を採用するとともに、シリンダーの径を小さくして空気室の容積を減らすことで制御の応答性を高めました。

サーボ弁

電気信号に従って空気の出し入れを制御する電磁弁です。一般的な工業製品に使われる電磁弁よりもきめ細かな制御ができます。

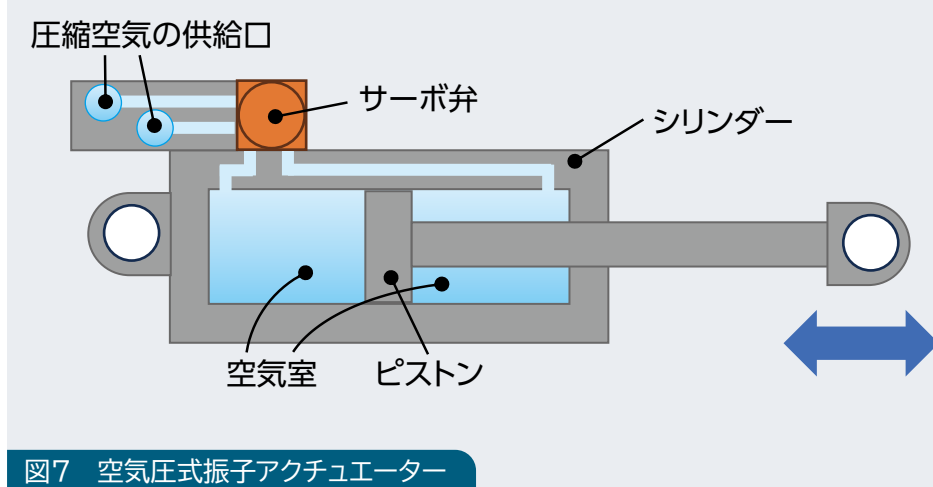


図7 空気圧式振子アクチュエーター

アクチュエーターの動きを速くするほど、安定した制御を行うことが難しくなります。この課題には制御方法の工夫で対応しました。従来のアクチュエーターは、目標の長さ与实际の長さの差だけに比例した力を発生するように制御していましたが、次世代振子システムでは、アクチュエーターが伸縮する速度とその変化の大きさ（加速度）にも着目した制御を行うことで、速く安定した動作を実現しました。

走行試験による性能評価

次世代振子システムによる乗り心地の改善効果を確認するため、既存の制御付振子車両にシステム一式を搭載した走行試験を実施しました。図8に同一地点上を通過した際に、車両が認識

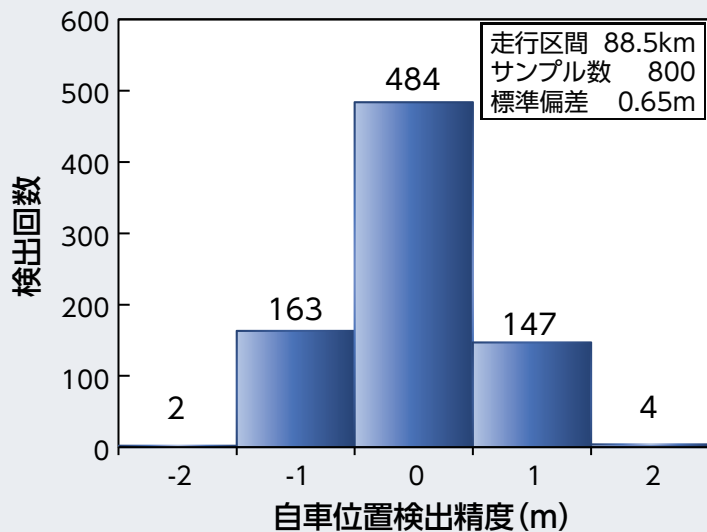


図8 自転車位置検出精度

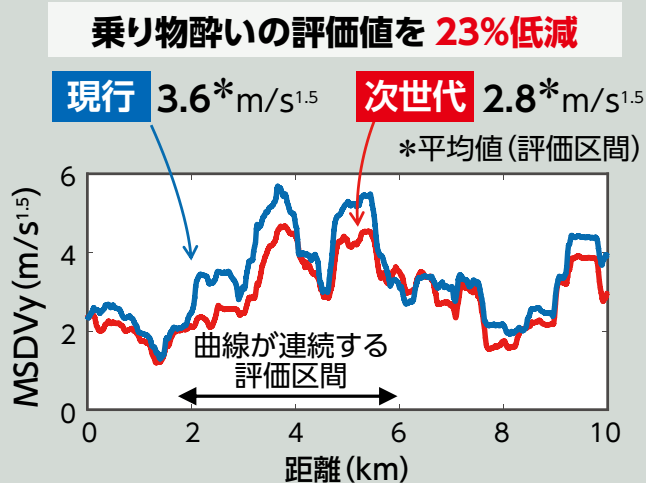


図9 乗り心地改善効果



図10 次世代振りシステムが搭載された273系電車

していた自転車位置のばらつきを示します。最大誤差は±2m、標準偏差0.65mとなっており、車体の傾斜制御に十分な精度が確保できています。また、図9に乗り物酔いの影響を反映する指標とされているMSDVy¹⁾について現行の制御システムと次世代振りシステムで比較した結果を示します。評価区間での一例では、平均で約23%の低減効果を確認することができました。

MSDVy

MSDVの正式名はMotion Sickness Dose Value (motion sicknessは乗り物酔い、dose valueは暴露量の意味)。MSDVyは左右方向の振動加速度に対して、乗り物酔いを起こしやすい周波数成分を強調するフィルターをかけ、一定時間の実効値の積分量で評価します。

おわりに

岡山駅と出雲市駅を結ぶ381系振り車両の後継として、次世代振りシステムが初めて搭載された図10のJR西日本273系振り車両が新たな特急やくもとして2024年4月より運用が開始されます。都市間輸送を担う移動手段としての振り車両の快適性を今後も向上させることを目標に、既存の制御付振り車両への次世代振りシステムの適用方法についても提案していきます。

RRR

文献

- 1) ISO 2631-1 (1997): Mechanical vibration and shock -- Evaluation of human exposure to whole-body vibration -- Part 1: General requirements, 1997