

振り車両の乗り心地を向上する

佐々木 君章
車両構造技術研究部
(車両振動 研究室長)

風戸 昭人
同
(走り装置 副主任研究員)



ささき きみあき



かごと あきひと

はじめに

振り車両とは、曲線走行時に乗客に働く遠心力をオートバイのように曲線の内側に車体を傾けて打ち消す機能を持っている車両を言います。

曲線の多い在来線では、最高速度を向上するよりも曲線通過速度の向上の方が到達時間短縮に有効です。このため、在来線特急車両には振り車両が広く用いられています。

代表的な日本の振り車両は、図1のように円弧状の軌跡に沿って動くはり（振りはり）の上に車体を載せ、重心が円弧の中心よりも低い位置になるようにしています。

このようにすると、遠心力と重力による復元力（傾斜を戻そうとする力）が釣り合うところまで遠心力により車体が傾こうとします。傾斜機構の抵抗が小さければ、釣り合い位置では客室内で働く遠心力と、重力の床面方向の分力が釣り合うので、乗客は遠心力を感じなくて済みます。

また、振りはりは台車の振動を車体に伝えにくくする作用があり、車体の高周波振動を小さくする効果があります。

この仕組みなら、制御などなくとも乗り心地を良くできそうですが、特に日本のような急曲線が連続する線形ではうまく制御しないと「乗り物酔い」という、大きな問題が発生します。このため、本稿では特に乗り物酔いの問題に焦点を当て、主として制御システムの改良による乗り心地改善について述べます。

振り車両の乗り物酔い

振り列車は曲線を高速で走るので、普通の列車に比べて船酔いのような乗り物酔いが起こりやすいと言われていますが、乗り物酔いは個人差が非常に大きく、評価が難しい現象の一つです。

船の分野では鉄道に比べて酔いの発生率が高く、従って酔いの評価法に関する研究が進んでおり、ISOに登録されています。これは上下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をかけ、一定時間の実効値の積算量で評価するもので、MSDV_zと呼ばれています。

鉄道車両でもこれを参考にすることが考えられますが、船と鉄道では揺れ方が全く違います。そこで、鉄道総研の人間工学グループは多数の乗客にアンケートを行って、どのような揺れが鉄道車両の乗り物酔いに関係しているのかを調べ、①鉄道は船と違い、左右方向の低周波加速度の影響が大きく、②酔いやすい周波数も船より高いことがわかりました。

この結果から船の場合と同様に左右加速度に対してあるフィルタをかけ、その実効値の積算で酔いを評価する手法を提案しMSDV_yと名付けました。

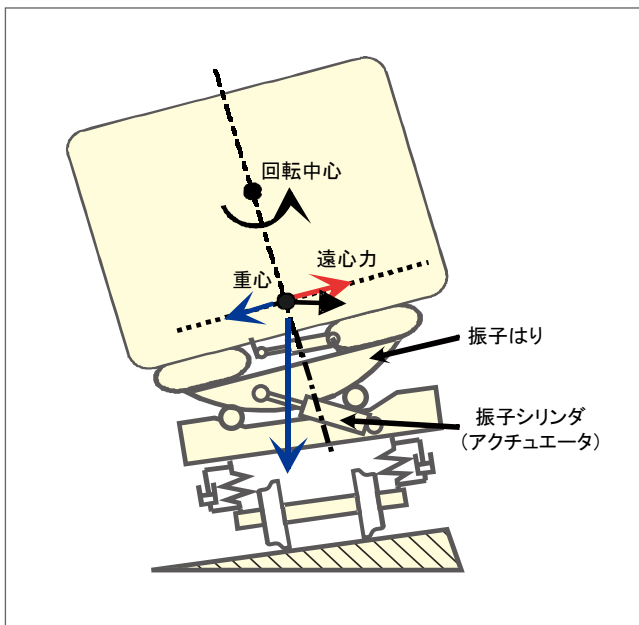


図1 振り車両の構造

この重みづけフィルタを船の場合と対比して図2に示します。船では酔いやすい周波数のピークが0.16Hz付近であるのに対して、鉄道では0.25～0.32Hz付近にピークが現れます。

振動に関する乗り心地は0.5Hz～80Hzの周波数範囲で評価しますが、酔いに関する周波数はこれより低く、振動乗り心地の評価からは外れています。さらに、酔いの場合は低周波振動の積算値が効き、酔うまでは自覚症状がない場合が多いので、「乗り心地が良いのに酔いやすい車」というのがありえるわけです。

初期の振り子車両は遠心力だけで車体を傾斜させる「自然振り」車両として開発がすすめられました。この観点から、自然振り車両の挙動を見直すと、MSDV_yの増加につながりやすい次のような特徴が認められます。

- (1) 曲線入口では車体の慣性のため傾斜が遅れ、乗客に遠心加速度が加わり、円曲線に入ると小さくなるので、左右加速度に低周波の変動が発生する。
- (2) 傾斜装置の抵抗が小さいため、傾斜装置が動くことによって直線走行中でも低周波の連続した揺れが起きやすい。

制御則の性能向上

1. 制御付振り子車両

傾斜機構に空気圧式のアクチュエータを付加し、車体傾斜角を制御することにより乗り心地を改善したものが制御付振り子車両です。これは曲線データ(位置、曲線半径など)を車上の制御装置内に記憶させ、自車両の走行位置・速度から計算した乗客の遠心加速度を打ち消すように車体の傾斜角度とタイミングを決定します。走行位置は線路上に設

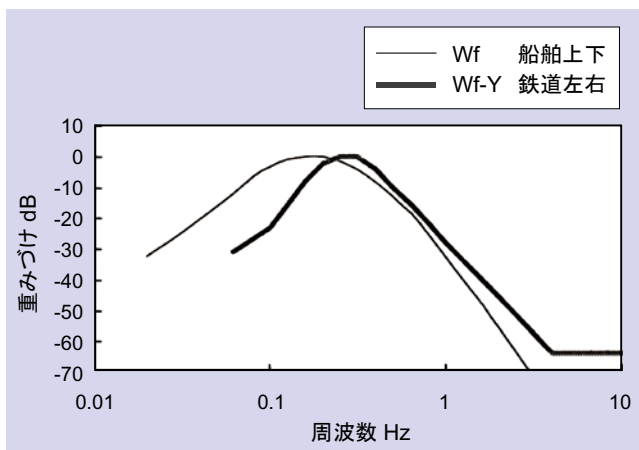


図2 乗り物酔いの重みづけフィルタ

けられているATS(自動列車停止装置)の地上コイルを検出して補正します。この技術により振り子車両の乗り心地は大きく改善され、在来線特急列車の速度向上に欠かせない技術として発展してきました。

制御付振子の傾斜制御パターンを図3に示します。曲線への進入を予測して傾斜タイミングを生成するので、自然振子で問題だった振り遅れをなくすることができます。この装置が開発された当時、曲線部の乗り心地は左右加速度の大きさと傾斜角速度、およびそれらの時間変化率で評価され、乗り物酔いとの関係も明確ではありませんでした。したがって、この制御則は低周波加速度の低減を意識したものではありませんでしたが、傾斜遅れの改善などによって自然振子と比べて低周波振動が大幅に低下し、酔いの面でも改善を図ることができました。

2. 次世代振り子制御システム

曲線通過速度がさらに高まると、必要な傾斜角度が大きくなり、さらに短い時間で傾けなければなりませんから、傾斜角速度が増大します。一方、制御付振子では傾斜角速度が制限を超えると、傾斜開始を早めて傾斜角速度を抑制する方法が取られますが、このとき車体の傾斜と遠心力はつり合っていないので、加速度のうねりが発生し、MSDV_yを増加させます。曲線通過速度が高くなると、線路を改良しない限りこれらが両立しなくなるのは明らかです。

このため、曲線通過時の乗り心地を示す評価指標と、乗り物酔いの評価指標の優先度合いを指定し、2つの指標の重みづけ和を最小にするように傾斜制御する方式を考案し、「次世代振り子制御システム」の制御則としました。

このシステムは1m刻みの線路情報データベースを持っており、現時点から約5秒先までの左右加速度、傾斜角速

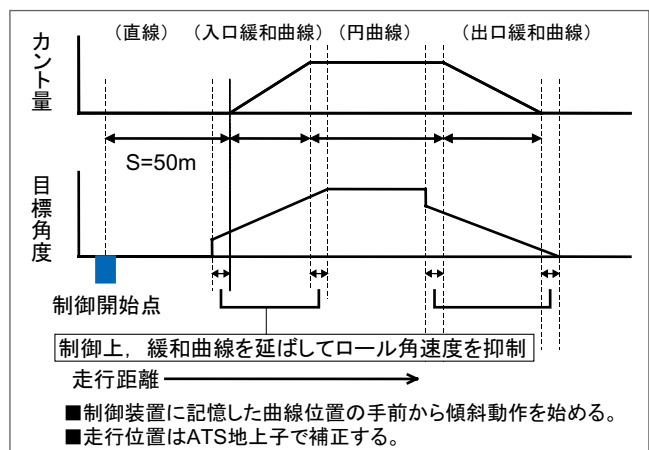


図3 制御付振子の制御パターン

度などを予測して、評価関数が最小になる傾斜パターンを生成します。図4に優先度を変えた傾斜パターンの例を示します。角速度優先では線路の曲率変化位置より前後にはみ出してなだらかに変化しようとはしますが、MSDV_y優先では加速度のうねりを防ぐために、線路の形に近い傾斜パターンが生成されていることがわかります。

この方法によりMSDV_yが下がり、酔いにくい制御にできることは走行試験で確認しましたが、傾斜角速度の大きさ(乗り心地)と低周波加速度変動(乗り物酔い)の優先度合いをどうすべきか、この最適な関係は現在のところわかっていません。より良い乗り心地を求めるために、解明を進めていかなければならない分野と考えています。

アクチュエータの性能向上

現行の制御付振子には空気圧式のアクチュエータが使われています。このアクチュエータは簡便ですが、応答性があまり良くないので、前述の傾斜パターンを活かすには、アクチュエータの高精度化が必要です。このため、次世代振子制御では「電動油圧式アクチュエータ」を開発しました。これは図5に示すように油圧シリンダにサーボモータと油圧ポンプを一体化したものです。

長所は、①制御性が良く正確な制御が可能、②故障時には自動的に振子ダンパとなり、自然振子に切り替わるなどが挙げられます。一方で、長所①の反動として、台車の振動に抵抗する力が強くなり、高周波の台車振動を車体に伝えやすくなることや、コストが高くなるなどの短所があります。

このため、空気圧式アクチュエータの良い点を活かしたままで、制御性能を改善するための開発も進めています。

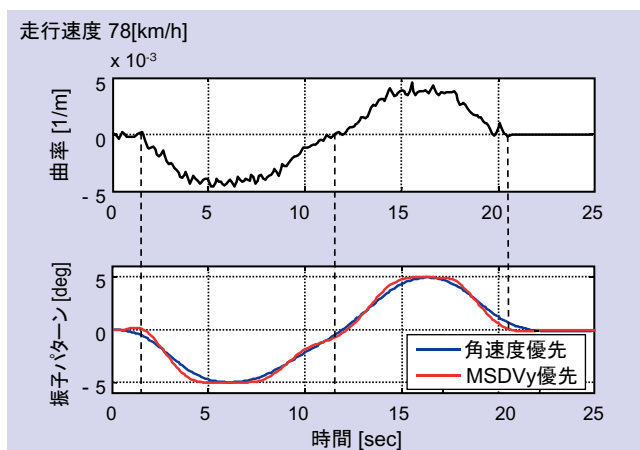


図4 優先指標による傾斜パターンの違い

現行の空気圧式振子制御システムの構成を図6に示します。振子制御装置からの変位目標値と、変位センサで計測される実変位の差に応じて出力される指令電圧が電流ドライバへ送られ、サーボ弁の電磁石に電流を流します。この力によって弁が動かされ、ポート(空気の通路)が開いてシリンダの一方の空気室に空気を供給し、もう一方の空気室からは空気を大気へ放出します。するとシリンダの2つの空気室の差圧でアクチュエータに駆動力が発生し、車体を傾斜させます。

ところで、現状システムのサーボ弁には圧力制御弁と呼ばれる弁が用いられています。圧力制御弁は電磁石の力と対抗するようにシリンダの圧力がかかるようになっており、シリンダの圧力が高くなるとポートを閉じて空気を流さないように動作し、さらにシリンダ圧が高い時は大気に開放するポートが開いて圧力を下げます。この結果、シリンダ

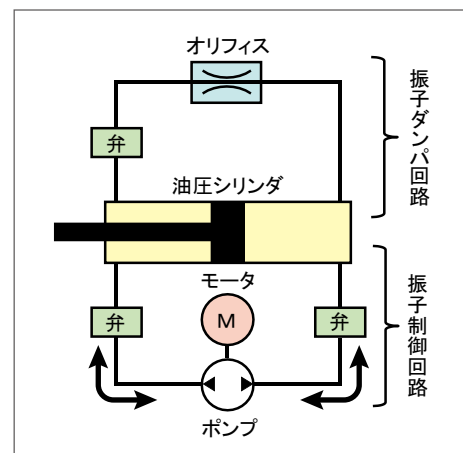


図5 電動油圧式アクチュエータ

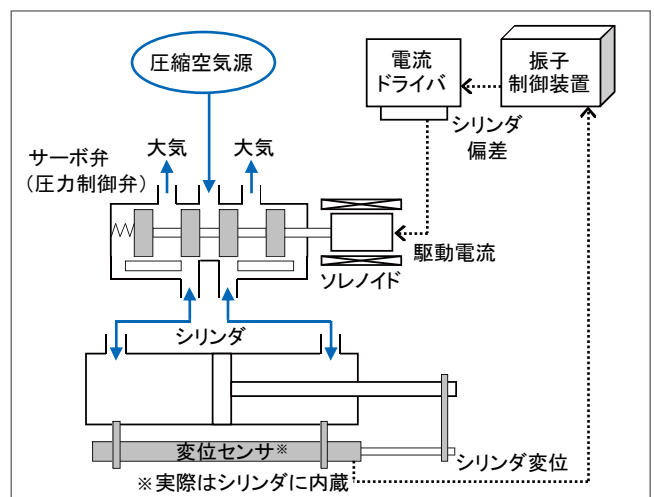


図6 空気圧式振子制御システムの構成

圧力は指令電流に比例した値でバランスしようとし、圧力のフィードバックがかかります。この動作は制御の安定性を高めるのに寄与しますが、目標値に対する応答性が悪くなり、さらに最大発生力が不足する傾向にあります。

そこで、サーボ弁の特性を変更して、目標値に対する応答性、最大発生力を向上することを考えました。一例として、図7に示す流量制御弁を適用した場合について説明します。流量制御弁には圧力フィードバックの機構がないので、流量制御弁よりも弁を大きく開くことができ、より多くの空気を給排気することができます。

流量制御弁の効果を確認するため、定置動作試験(図8)を行いました。試験には実物大の振子動作試験装置である「動揺負荷試験装置」を用いました。空気シリンダをこの装置に取り付け、0.1Hzで振幅±100mmの変位目標値を与えた時の動作を確認しました。図9に圧力制御弁および流量制御弁を用いた場合のシリンダ変位、変位目標値との偏差、シリンダ発生力を示します。流量制御弁を用いることにより変位目標値に対する動作遅れは減少し、最大変位量も大きくなること確認できました。以上のように、空気圧式振子制御システムの特性改善の見込みが出てきましたので、サーボ弁以外の部分のシステム変更も考慮しつつ、1両モデルでの実走行条件での乗り心地改善を、シミュレーションにより検討しています。

おわりに

曲線の多い在来線では振子車両は高速化に欠かせず、その重要性はますます大きくなっています。

一方で、乗り心地の観点からみると、曲線出入り口の長さ(緩和曲線長)の制約から、傾斜角速度と遠心加速度の抑制に対する要求は物理的に両立が困難になってきつつあり、遠心加速度を十分に補償しようとする、振子車両が開発された当時には想定されていなかったような大きな傾斜角速度が必要になってきています。

従って、現在以上の高速化を目指すならば、乗り心地や乗り物酔いの改善については「人間が何にどのよう反応しているか」という、より根源的な研究が避けて通れなくなっていると思われます。

今後はこのような観点から分野を超えた研究協力を進め、より一層の乗り心地改善を進めていきたいと考えています。

RRR

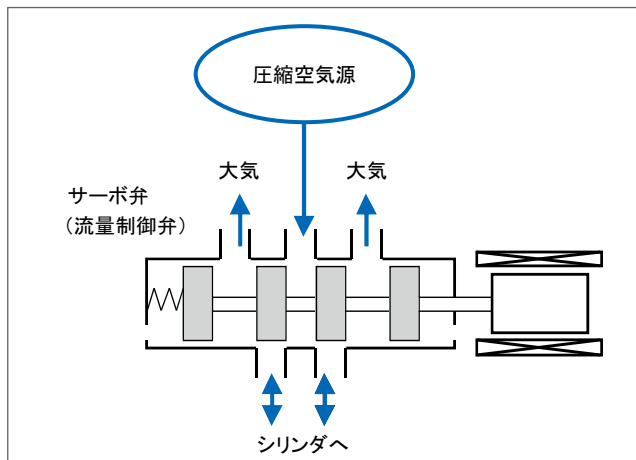


図7 流量制御弁

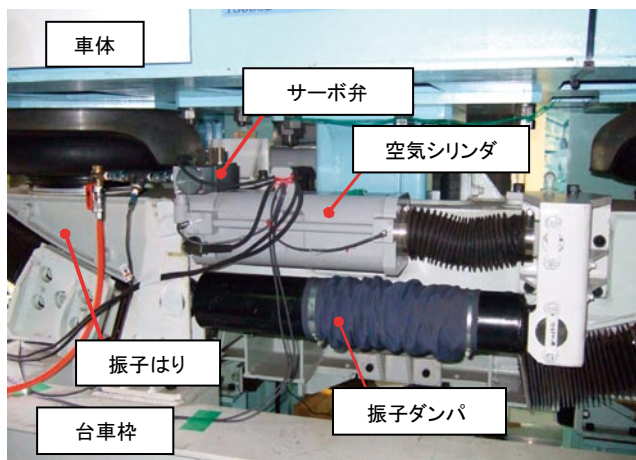


図8 空気シリンダの定置動作試験

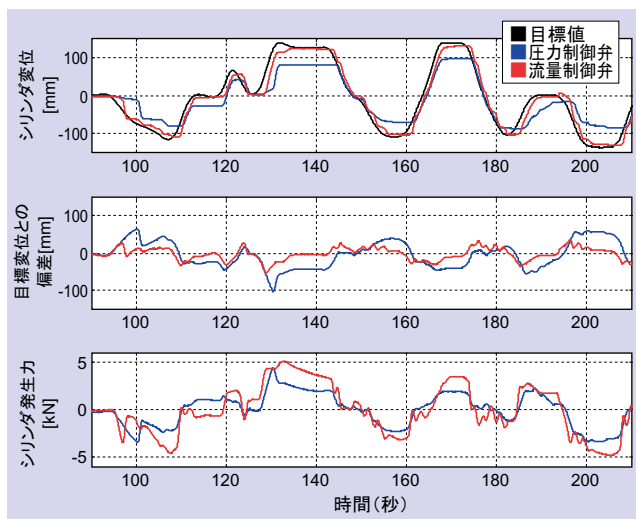


図9 空気シリンダの定置動作試験結果