

## 低コスト振子制御システムの開発

車両構造技術研究部 車両振動  
研究室長 佐々木君章

### 【概要】

自然振子車両の酔いを改善するため、既存車両の大幅な改造を伴わずに適用可能な振子制御システムを開発した。本システムは次世代振子制御システムの一環として開発したものであるが、制御システムは簡略化のため、車速とヨー角速度に基づく超過遠心加速度推定を基本とし、線路情報を用いない簡便なものとした。フェールセーフ性を担保するため、車体傾斜用アクチュエータに電動油圧式（従来は空気圧式）を採用し、故障時に振子ダンパとして動作する機能を持たせる事により、既存車両の振子ダンパとアクチュエータを置き換えが可能になり、制御付き振子車両への改良が可能になった。自然振子車両に本システムを適用し、乗り物酔い暴露量値（乗り物酔いの起こりやすさの指標：低周波左右振動加速度の累積値）を30%程度改善できることを走行試験で確認した。本稿ではこの装置の構造と効果の概要を報告する。

### 1. 自然振子車両の構造と特性

曲線の多い在来線では到達時分の短縮には曲線通過速度の向上が不可欠なため、1960年代から振子車両の研究が行われ、1973年に自然振子式の381系振子特急電車が営業に投入されて高速化に寄与してきた。

自然振子車両は図1のように、コロの作用で円運動するはり（振子はり）の上に車体を載せ、回転中心を車体重心よりも高い位置に設定することで、曲線走行中に車体に作用する遠心力によって車体を内傾させて乗客が感じる遠心力を打ち消すものである。

自然振子車両では逆振子などの誤動作の恐れがなく、制御面では非常に単純であるが、左右加速度が大きくないにもかかわらず、「乗り物酔い」が発現しやすい性質がある。これは、主として次のことが原因と考えられる。

#### ① 曲線進入部・出口部の傾斜遅れ

自然振子は車体に遠心力を受ける事により、遠心力と重力復元力が釣り合う位置まで内傾する。したがって、曲線の入口では車体の慣性で傾斜動作が遅れ、乗客に遠心加速度が加わる。円曲線内では車体傾斜により乗客の感じる遠心加速度が小さくなるが、曲線出口では戻りが遅れるため、過傾斜となって逆方向に加速度が作用する。このため、乗客には曲線ごとに低周波の加速度のうねりが加わっているように感じられ、酔いを誘発する要因となる。

#### ② 緩和曲線出口におけるオーバーシュート

傾斜動作の急激になる短い緩和曲線の出口において

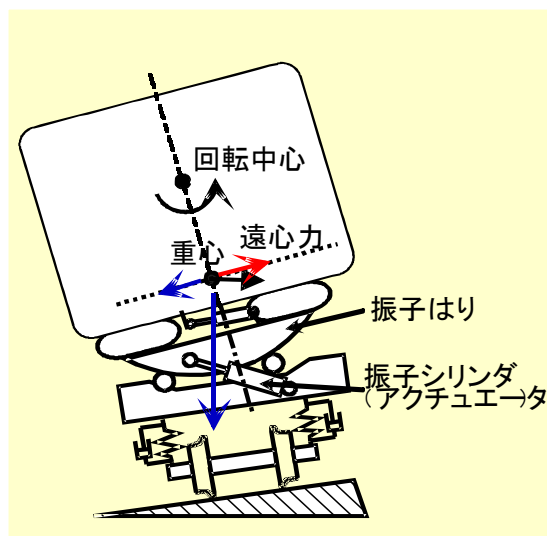


図1 自然振子車両

は、車体の慣性力のために振りすぎ（戻りすぎ）が発生する。これも低周波の左右加速度と知覚される。

### ③ 持続的な低周波振動

自然振子では振子はりの運動を規制するために、台車と振子はりの間には振子ダンパが設けられているが、この減衰係数が大きいと傾斜遅れを拡大するため、振子ダンパの減衰係数は小さな値に抑えられている。このため、車体の重力復元力によるローリング運動や、前後の振子はりが逆相で動いて起こるヨーイング運動などの低周波振動の成長が止めにくく、持続する傾向がある。

この台車構造は制御付き振子車両にも踏襲されており、「制御」は自然振子による傾斜力を補助することと、傾斜開始タイミングを早めて傾斜遅れを小さくする位置づけとなっているため、①～③の改善にも効果的であり、自然振子車両に比較して酔いの問題は少ない。

## 2. 酔いの評価

乗り物酔いの評価は通常の振動乗り心地と区別して考える必要がある。振動乗り心地では 0.5Hz～5Hz 程度の振動が強く評価されるが、自然振子車両では振子はりが台車からの振動絶縁効果を持つため、この周波数帯域の左右振動加速度は一般的に小さい。一方で、前項の理由により低周波振動は大きくなる傾向がある。

鉄道車両の酔いの評価は標準が確立しているとはいえないが、一つの方法として鉄道総研の人間工学グループが提唱している乗り物酔い暴露量値（以下MSDVと表記）を用いる方法がある。これは、図 2 のように酔い易い周波数の振動を強調するフィルタ  $W_{fy}$  で走行中に現れる左右加速度を処理し、得られた重み付け加速度の実効値の時間積分（標準 30 分）により評価する方法である。元々は船舶の上下振動による酔いを評価する手法であったが、乗客のアンケート結果から、鉄道車両の酔いでは上下加速度よりも左右加速度に対する相関が高いことが分かり、またフィルタの周波数特性も同アンケートから決定されたものである。

## 3. 低コスト振子制御システム

### 3.1 システム構成

図 2 より、酔いの改善には 0.3Hz 付近を中心とする低周波の左右振動加速度を低減するのが有効で、傾斜遅れの低減や非傾斜動作時における振子はりの拘束強化を図る必要がある。

一方で、既存車両の改良を考慮すると

フェールセーフ性や取り付けに伴う車両改造の規模が小さいこと、コストが低いことなどが求められる。

以上の検討から、次の開発方針を立てた。

- ① 車両間情報伝送の制約を考慮し、車両ごとに自立した制御システムとする。
- ② 振子ダンパ機能付き傾斜アクチュエータを開発し、既存の振子ダンパと置き換える。

①については角速度センサと速度発電機による超過遠心加速度予測により対応し、

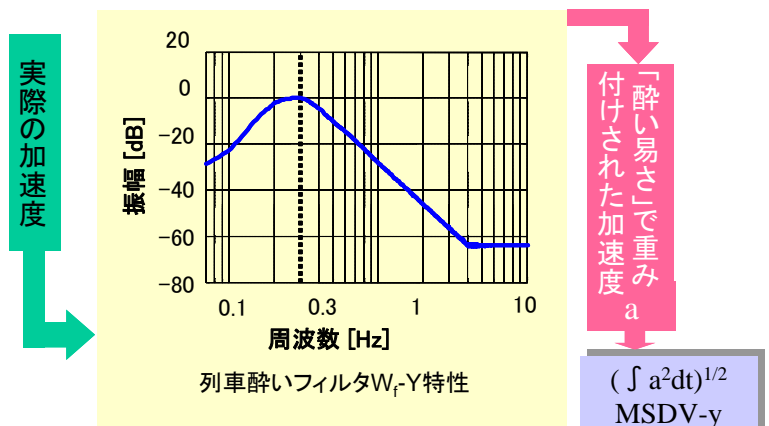


図 2 乗り物酔い暴露量値 (MSDV-y)

②についてはアクチュエータとして電動油圧方式を採用し、非制御時にダンパに切り替える方式とした。以下に各部の詳細を示す。

### 3.2 制御方式

図3に基本の制御ブロックを示す。車体に作用する超過遠心加速度は速度、曲率、カントによって求められるが、カントは車両側での測定が困難である。

ここで、カントはその線区を走る最高速の列車を考慮して決められるので、特定の線区上では線路曲率と密接な関係を持つものと考えられる。実測した曲率とカントの関係を図4に示す。構内等の低速区間を除くと、おおむね比例関係を持ち、この比例係数を線区のパラメータとして持つことで、カントと超過遠心加速度を予測できる。実際のシステムには位相調整や予測残差補正のフィードバックがあるが、補助的なもので、この予測超過遠心加速度による制御が支配的である。

さらに、先頭車以外の車両では先行車両の角速度センサ出力を用いて、タイミングを合わせることで、精度の良い傾斜設定を行うことが可能である。

### 3.3 アクチュエータ

開発した電動油圧アクチュエータを図5に示す。このアクチュエータは油圧シリンダ、油圧ポンプ、サーボモータを一体化したものである。制御時にはサーボモータでポンプを回し、シリンダ内の作動油を直接移動させて伸縮させるが、非制御時はポンプの回路を閉じ、絞り回路（ダンパ回路）に切り換えてダンパとする。これは電動油圧方式に特有の機能で、本方式を選定した大きな理由である。

本方式はこれ以外にも①高剛性で正確な動作が可能、②応答が速い、③大推力などの利点がある。一方で①の副作用として、振子はりの振動絶縁効果が阻害され、車体振動が増える欠点がある。

## 4. 走行試験

開発したシステムを自然振子車両に取り付け、図6の構成で走行試験を行った。MSDVの低減効果を図7に示す。先行車両の角速度センサを参照できる上り走行においては、MSDVが大きく低下しているのに対して、自車のセンサだけで制御を行っている下り走行では低下の程度が小さい。

一方、アクチュエータ剛性増大のため、台車枠から振子はりへの振動伝播が増大し、左右の振動乗り心地が約3dB悪化した。

これらの不具合への対応として、以下の対策を行い、再度走行試験を行った。

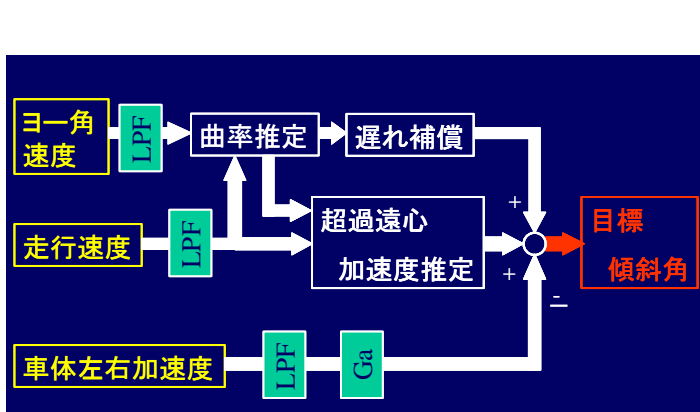


図3 制御ブロック図

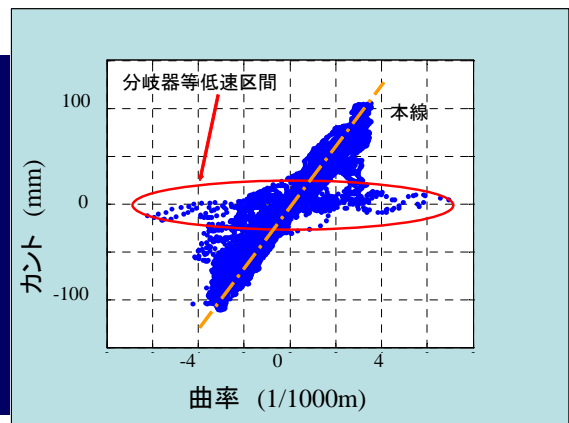


図4 曲率とカントの関係

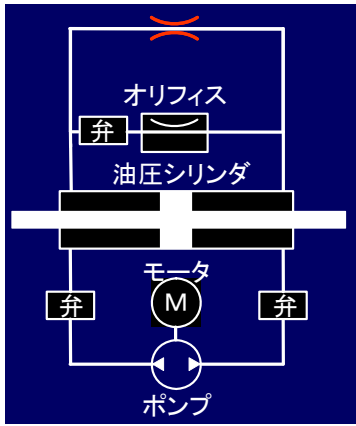


図5 電動油圧アクチュエータ

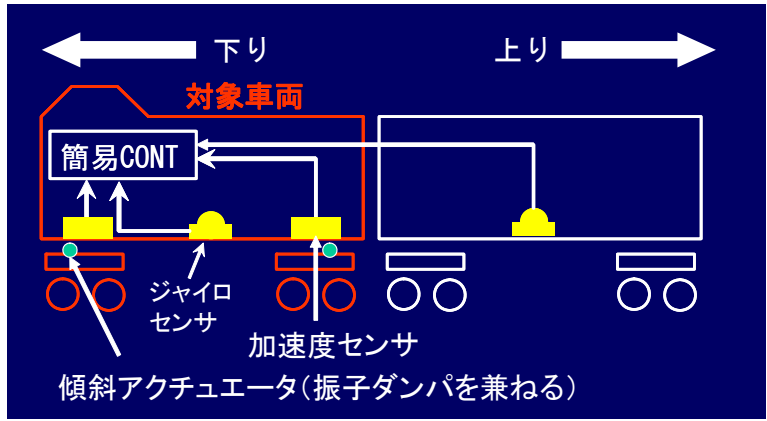


図6 走行試験の装置構成

- ① ポンプ回路と並列に設けた分流回路による台車振動（高周波振動）の絶縁
- ② GPSと角速度センサによる走行位置検出装置による擬似先行車両の角速度生成
- ③ アクチュエータ推力の余裕を活かし、片台車のみで駆動する。

この結果を図8に示す。MSDVについては両方向とも改善され、当初の目的である酔いの改善に目処が立った。

振動乗り心地については、片側アクチュエータだけを使用した場合に効果が見られ、下りでは自然振子よりも良くなったが、上りでは1dB程度の増加で、ほぼ同等と考えられる。コスト的には試作品の段階であるため正確な算定が難しいが、現在の制御付き振子システムに比べて30%程度下げられる見通しである。

### 5. まとめ

自然振子車両の欠点である「酔い」の問題を解決するため、既存車両に大きな変更を加えずに制御振子化するシステムを開発した。走行試験の結果、酔いの評価指標であるMSDVが20～30%低下することが確認された。振動乗り心地は自然振子と同等だった。本システムは自然振子車両の改造用として開発したが、制御システムは他の車両への適用が可能なので、通勤車両等、簡便な振子のニーズへの展開を図っていきたい。

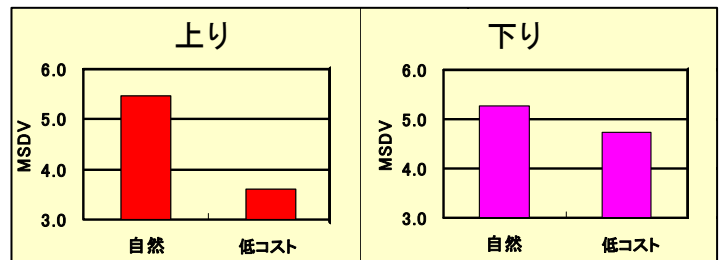


図7 MSDVの低減効果

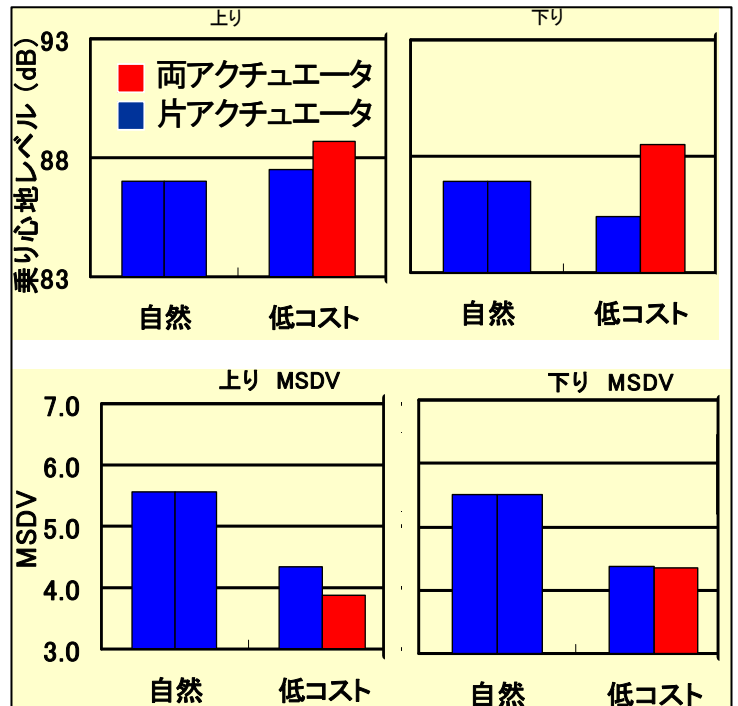


図8 改良後の効果

### 参考文献

1) 鈴木,白戸,手塚: 低周波振動が列車酔いに及ぼす影響,鉄道総研報告,Vol.18,No2,P.9-14,2004-02