

鉄道の一軸回車輪台車の操舵角制御による振動低減の研究

(操舵アクチュエータ加速制御の場合)

○鎌田 祥弘 (明星大院) [機] 秋山 和彦 (THK 株式会社)

[機] 宮本 昌幸 (明星大)

Study on the Decrease of Vibration of Railway Vehicles by Control of Steering on Wheelset.

(Steering acceleration control)

○Yoshihiro Kamata, Kazuhiko Akiyama(THK)

Masayuki Miyamoto, (Meisei University)

Experimental investigations were carried out to make clear the effect of control of steering on wheelset to decrease the lateral vibration of railway vehicle running on the track with alignment irregularity. The running experiments used the model bogie of about 1/8 reduced scales were done. It was shown the effectiveness of the steering acceleration control for the reduction of truck lateral vibration and the influence of steering control law on vehicle dynamics by model experiments and computer simulations

キーワード：鉄道, 振動低減, 操舵角制御, 模型実験, シミュレーション

KeyWords : Railway vehicle, Vibration reduction, Steering control, Model experiment, Computer simulation

に設置した。例として通り変位部を Fig.1 に示す。

1. はじめに

曲線を走行する際に生じる、横圧の低減を目的とした操舵台車はすでに実現している。しかし、通り変位の生じたレールなどを走行した際に生じる振動を低減させる事を目的とした操舵角制御台車の研究は、基礎的な検討が行われているのみである。輪軸を操舵角制御する事により、通り変位の生じたレール上を走行しても通り変位に影響されずまっすぐ走り、通り変位による振動を抑え乗り心地の向上を図る事を目的としている。この目的のために模型実験と数値シミュレーション両面から検討を進めて来ている¹⁾²⁾³⁾。

今回は、模型実験における操舵アクチュエータの操舵加速を行う事での目標操舵角に対する遅れの減少させた場合の実験結果と、シミュレーションの結果について報告する。

2. 実験

2.1 軌道

実験軌道は軌間 128mm, 全長 5000mm で波長 1600mm 全振幅 20mm の通り変位を付けたものである。レール側面部には測定基準となる垂直な反射板をレールに対して平行

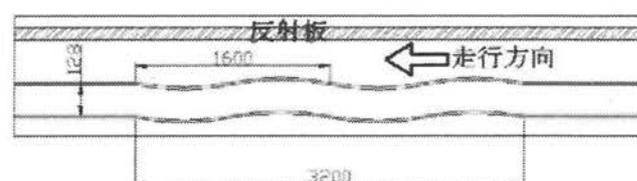


Fig. 1 通り変位部軌道

2.2 2軸駆動模型台車

模型台車は自走可能となっており、操舵角制御が可能な仕様となっている。

操舵角制御にはマイコンで制御されたアクチュエータを使用し、操舵はりを介して輪軸の操舵角制御を行う。車輪については振動低減を本質的に実現できるか否かを見極める事を当面の目的とした為、フランジがレールに当たるなどの外乱を無くし非線形性を除外する為、フランジを無くした幅広車輪を使用した。踏面勾配は在来線をモデルとした 1/20 とした。模型台車の進行方向右側の側面には台車左右変位を測定するレーザ式変位計と操舵角を検出するポテンショメータが設置されている。模型台車を Fig.2 に示す。

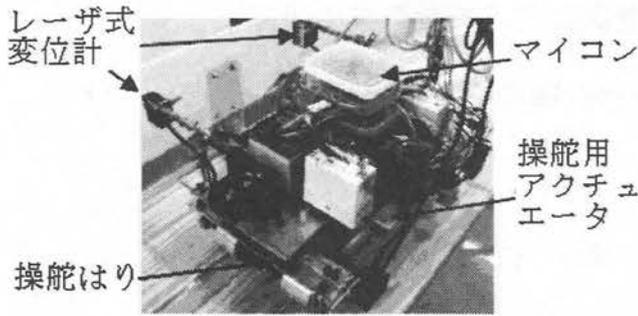


Fig. 2 実験台車

2.3 制御用マイコン

模型台車の操舵角を制御する制御用マイコンには、SH7045F マイコンを使用した。これにより、必要なときに前後でパルスの出力と停止をリアルタイムで切り替えることで、前後輪操舵角制御を行うことが可能である。

2.4 制御

制御の流れの概略は、レーザ式変位計の値から台車の現在の左右位置情報を制御用マイコンに取り込み、その値から目標操舵角を算出する。その目標操舵角とポテンシオメータで取り込んだ輪軸のヨーイング角から、操舵角度を検出する。その目標操舵角から、操舵に必要な操舵角を導き出し輪軸の操舵角制御を行う。今回使用した制御則は以下の2つの制御を組み合わせたものである。

(1) 制御A

制御Aは台車の前方または後方左右変位にフィードバックゲイン(以下 FG と略称)をかけた比例制御で目標操舵角を算出する制御則である。制御式を式(1)に示す。

$$\begin{aligned} \text{操舵速度 } \psi_i(^{\circ}) = & \\ -\text{ゲイン } \alpha(^{\circ}/\text{mm}) \times \text{台車左右変位 } y_i(\text{mm}) & \end{aligned} \quad (1)$$

(2) 制御B

制御Bは前方または後方台車左右変位にゲインをかけたものに、台車ヨーイング角を加えた比例制御で目標操舵角を算出する制御則である。制御式を式(2)に示す。

$$\begin{aligned} \text{操舵速度 } \psi_i(^{\circ}) = & \\ -\text{ゲイン } \alpha(^{\circ}/\text{mm}) \times \text{台車左右変位 } y_i(\text{mm}) & \\ -\text{台車ヨーイング角 } (\text{^{\circ}}) & \end{aligned} \quad (2)$$

- 制御則 1 は制御Aを使用した前輪のみの制御
 - 制御則 2 は制御Bを使用した前輪のみの制御
 - 制御則 3 は前後輪共に制御Aを使用した制御
 - 制御則 4 は前輪に制御B、後輪に制御Aを使用した制御
 - 制御則 5 は前後輪共に制御Bを使用した制御
- となっている。ゲイン α についてはTable.1に示す。

2.4 操舵加速での制御

これまで行ってきた操舵速度一定での制御では、目標操舵角が大きくなるにつれて、目標に到着する時間が著しく増大する。そこで操舵加速での制御を行うことで、目標操

Table.1 フィードバックゲイン

制御則	FG 名称	前輪側 FG ($^{\circ}/\text{mm}$)	後輪側 FG ($^{\circ}/\text{mm}$)
制御則 1&2	FG1	0.05	none
	FG2	0.1	none
	FG3	0.2	none
制御則 3&4&5	FG1-1	0.05	0.05
	FG2-1	0.1	0.05
	FG3-1	0.2	0.05
	FG3-2	0.2	0.1

舵角が大きいか場合にも操舵遅れを抑えられる様にした。

本実験で用いた操舵用アクチュエータであるステッピングモータはマイコンのMTU(マルチファンクションタイマパルスユニット)から出力されるパルス信号の周期に比例した回転速度が得られるが、そのモータの特性で決まる周波数以上では回転できなくなる。停止しているステッピングモータを回転できる最大の周波数から低い周波数の範囲である自起動周波数以上で作動させるために、MTU から 1 パルス出力される毎に割り込み処理を行い、そのつど CPU で周期を変化させる様に設定値のみを変更していくことで可変周期のパルス出力を行い Fig.3 に示す様な台形加速パターンを用いてアクチュエータの制御を行った。

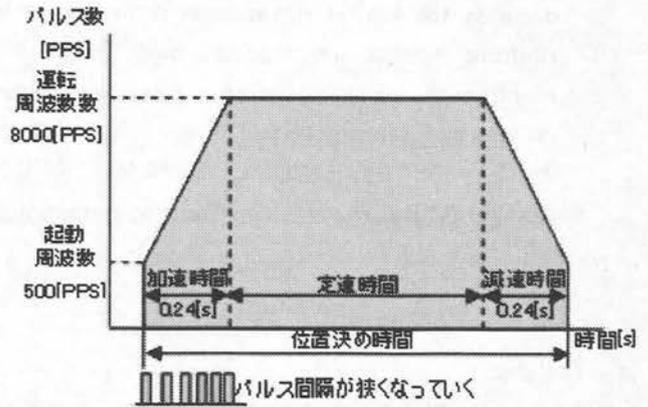


Fig. 3 操舵用アクチュエータ加速パターン

2.5 実験結果

模型台車での通り変位のあるレールでの走行実験を、制御則 1 から 5 について、また走行速度 0.2, 0.4, 0.6(m/s) について、Table.1 に示した各フィードバックゲインを使用して3回ずつ行った。ほぼ同じ傾向が得られたので、最後のデータを用いた。紙面の都合上台車前方左右変位を最も低減できた制御則 2 について、走行速度 0.6(m/s)、FG を 0.2($^{\circ}/\text{mm}$)で操舵加速制御を行った場合を、操舵速度一定の場合の走行実験と比較し Fig.4, Fig.5 に示す。グラフ上の Δ は前輪軸が通り変位のピークを通過した時刻を、 \blacktriangle は後輪軸が通過した時刻を示している。

Fig. 4 に示す様に操舵速度一定では走行開始後次第に左右変位が大きくなり、脱線してしまった。操舵加速の場合では最後まで走りきった。Fig. 5 より操舵速度一定では操舵遅れの影響で目標操舵角に追従できておらず、操舵加速

の場合では追従できている事が確認できる。

Fig. 6, Fig. 7 に各制御則で FG を変更した場合の台車左右変位 p-p の変化を示す。

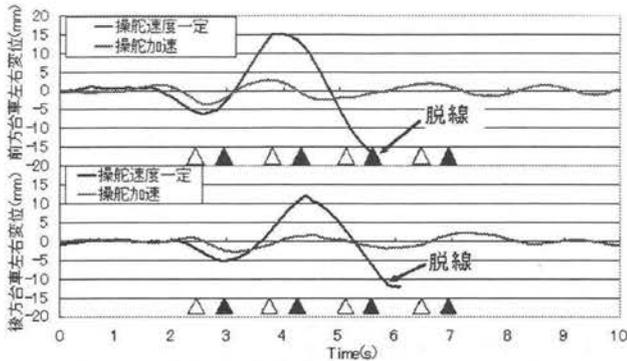


Fig. 4 台車左右変位(実験, 制御則 2, 速度 0.6m/s)

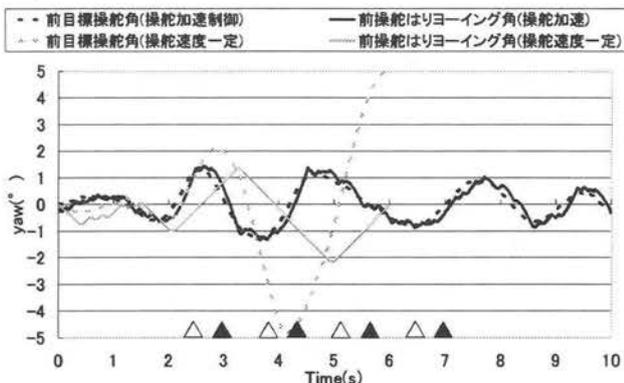


Fig. 5 操舵角(実験, 制御則 2, 速度 0.6m/s)

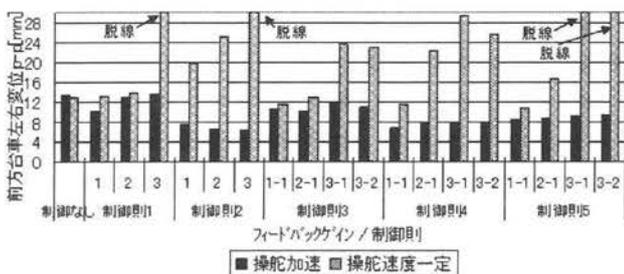


Fig. 6 前方台車左右変位(実験)

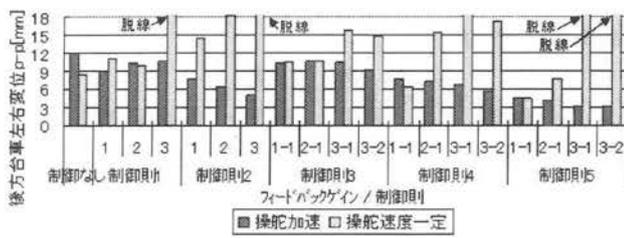


Fig. 7 後方台車左右変位(実験)

ここでは割愛したが、走行速度が 0.2(m/s)と遅い時、操舵速度一定と操舵加速での左右変位 p-p 値はほぼ同程度となったが、Fig4, Fig.5 に示した走行速度が 0.6(m/s)と早い場合では、操舵速度一定よりも操舵加速の場合の方が左右変位 p-p 値を低減できた。制御則毎の差を見た場合、前

後方台車左右変位両方を考えると、操舵加速においては制御則 5 が最も左右変位 p-p を減少できたが、操舵速度一定では操舵遅れの影響で脱線してしまった。前方台車左右変位のみ考えた場合では制御則 2 が最も前方台車左右変位 p-p 値を低減できた。

3. 運動シミュレーション

操舵加速を行った場合のシミュレーションについて述べる。

3.1 運動のモデリング

2軸駆動模型台車の運動シミュレーションモデルを基にモデリングした図を Fig. 8 に示す。

台車の構成は台車 1 個、輪軸が 2 個、輪軸を操舵するための操舵はりが 2 個の構成となっている。台車と前後輪軸の左右方向と旋回方向の自由度 6、操舵はりの旋回方向の自由度 2 の計 8 個の連立方程式が本モデルの運動方程式となる。操舵はりの運動方程式には旋回方向にだけ自由度を持たせ、回転中心回りに摩擦が無く回転するものとしている。また、輪軸の運動方程式には、軌道の通り変位を考慮できる様にしている。加速を行う制御を 2 次遅れ系と仮定した。模型台車の運動方程式に関しては、参考資料³⁾を参照願いたい。模型台車の諸元を Table. 2 に示す。

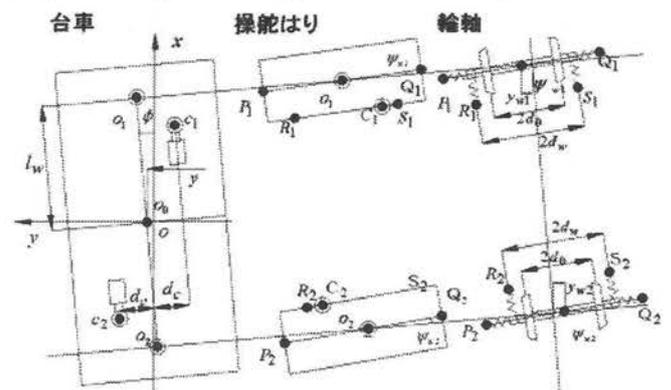


Fig. 8 運動モデル

Table. 2 模型緒元

パラメータ	value	Unit
クリーブ係数	κ 800	N
中立位置での車輪半径	r_0 0.034	m
台車重量	M 9.3	kg
操舵はり重量	M_s 0.35	kg
輪軸重量	M_w 0.96	kg
台車ヨーイングの慣性モーメント	I 0.18	kgm^2
操舵はりの慣性モーメント	I_s 4.0×10^3	kgm^2
輪軸の慣性モーメント	I_w 9.0×10^3	kgm^2
台車重心から輪軸旋回中心距離	L_w 0.16	m

3.2 操舵遅れ

(1) 操舵速度一定での遅れ設定

実験での操舵速度は 0.03rad/s であった。この設定を用いてシミュレーションをしたところ、実験の様に操舵遅れが増大しなかった。これは考慮していない要因によると考

えられる。今回は、実験の目標に対する操舵遅れの波形に近くなる操舵速度 0.02rad/s とした。

(2) 操舵加速での遅れ設定

操舵アクチュエータのステップ応答実験から、遅れパラメータを同定した。その値を用いてシミュレーションを行ったところ、実験よりも左右変位が小さくなった。これは操舵用アクチュエータと操舵はりの間の操舵リンクの剛性が低い事や、取り付け誤差等のがたつきにより発生した機械系遅れの為と考えられた。指令からアクチュエータ動作までの遅れに加え、アクチュエータから車輪までのこの機械系遅れも考慮して、式(3)で表される 2 次遅れ系のパラメータを $T=0.01s$, $\tau=0.13s$ と決定した。

$$T^2\ddot{\psi}_s + \tau\dot{\psi}_s + \psi_s = \text{目標操舵角} \quad (3)$$

ψ_s : 台車に対する操舵はりの操舵角

3.3 シミュレーション結果

走行実験を行った条件にあわせ、シミュレーションを行った。紙面の都合上、代表して制御則 2, 走行速度 0.6m/s, FG を 0.2° /mm で操舵加速制御を行った場合と操舵速度一定の場合のシミュレーション結果の比較を Fig.9, Fig.10 に示す。

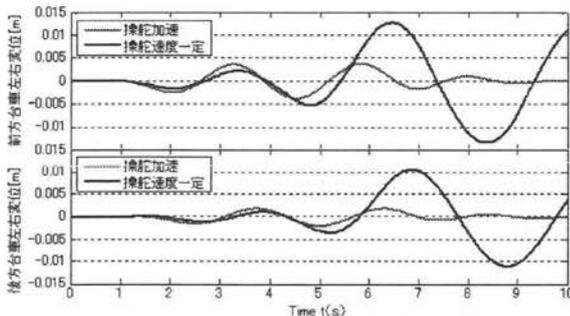


Fig. 9 台車左右変位

(シミュレーション, 制御則 2, 速度 0.6m/s)

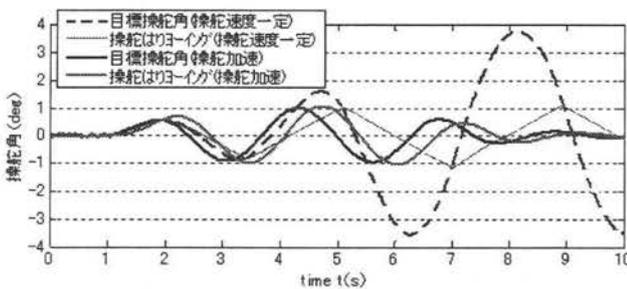


Fig. 10 操舵角

(シミュレーション, 制御則 2, 速度 0.6m/s)

Fig. 9 に示す様に操舵速度一定では走行開始後次第に左右変位が増大していった。操舵加速の場合では一定の振幅で振動した後、通り変位終了後は収束していった。Fig. 10 より操舵速度一定では操舵遅れの影響で目標操舵角に追従できておらず、操舵加速の場合では追従できている事が確

認できる。

Fig. 11, Fig. 12 に各制御則で FG を変更した場合の台車左右変位 p-p の実験値とシミュレーション結果の比較を示す。

実験とシミュレーションで前方台車左右変位の結果を比較すると差は 1.5mm 以内となり、制御則や FG による増減傾向はほぼ一致した。後方左右変位では実験の結果がシミュレーションの結果を概して上回った。これはマイコンの割り込み処理の仕様により、前輪軸制御をメインとしたため後輪軸の加速処理が十分でなかったためと考えられる。

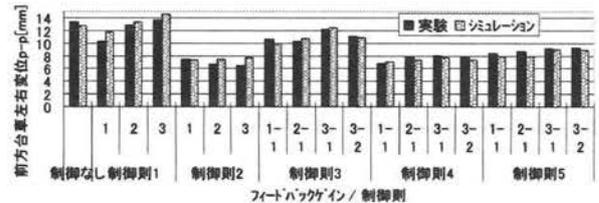


Fig. 11 前方台車左右変位(実験とシミュレーション)

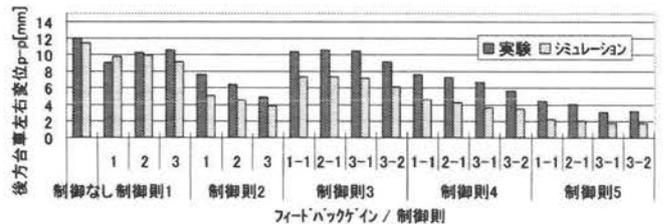


Fig. 12 後方台車左右変位(実験とシミュレーション)

4. まとめ

模型台車では SH7045F マイコンの MTU 機能の割り込み処理を使用することで、操舵用アクチュエータの加速制御を行えるようになった。模型台車を使用した走行実験の結果、操舵加速制御を行った場合、加速を行わない場合に比べて操舵遅れを減少させ、多くの場合左右変位 p-p 値を減少させることができた。数値シミュレーションにおいては、指令からアクチュエータ動作までの遅れに加えて、アクチュエータから車輪までの機械系の遅れを考慮することでほぼ実験値と同様の傾向を示し、シミュレーションの妥当性を確認できた。

参考文献

- 1) 秋山 和彦, 宮本 昌幸:「鉄道の一体回転車輪による操舵角制御による振動低減の研究」, [J-RAIL2007]第 14 回鉄道技術連合シンポジウム[2007-12.18~20. 参宮橋], pp. 665-668, 2007.
- 2) 秋山 和彦, 宮本 昌幸:「鉄道の一体回転車輪による操舵角制御による振動低減の研究」, [No.06-52]第 13 回鉄道技術連合シンポジウム[2006-12.13~15.川崎], pp. 155-158, 2006.
- 3) 割貝 宣介, 宮本 昌幸:「鉄道の一体回転台車の操舵角制御による振動低減の研究」[No.05-52], 第 14 回交通物流部門大会公演論文集[2005-12.7~9.川崎], pp. 177-180, 2005.