

鉄道車両用の空圧動揺防止制御システムの開発

Development of an Active Suspension Systems for Railway Vehicles

丸山佳之 / Yoshiyuki Maruyama ・ 総合技術研究所 機械システム研究部 台車技術開発室

石原広一郎 / Koichiro Ishihara ・ 総合技術研究所 機械システム研究部 台車技術開発室 室長 工博

小泉智志 / Satoshi Koizumi ・ 関西製造所 鉄道台車製造部 台車設計室 参事補

松井敏明 / Toshiaki Matsui ・ 関西製造所 鉄道台車製造部 台車設計室

則直 久 / Hisashi Norinao ・ 西日本旅客鉄道(株) 主席

田中徳和 / Norikazu Tanaka ・ 西日本旅客鉄道(株)

要 約

列車の走行速度があがる程車体の振動が増加して乗り心地が悪くなっていくことの対策として、我々は動揺防止制御システムを開発してきた。昨年度には、500系新幹線を使用して、1年間45万kmにわたる耐久試験を行い、製品化に向けての最後の確認を行っている。試験結果は、良好であり、動揺防止制御によって大きく乗り心地を改善することができた。また同時に行っていた信頼性の検証においても良好な結果が得られた。この試験によって動揺防止制御システムは、営業運転にも使用可能なレベルの技術として完成した。

Synopsis

The faster a train runs, the more difficult it becomes to provide good ride comfort. We have developed an active suspension system for railway vehicles for such situations. Last year, we used a Series 500 Shinkansen for the endurance test of an active suspension system. The results of the endurance test showed the efficiency of an active suspension system, which could provide good ride comfort in high speed railway vehicles. We have also made some modifications to the active suspension system to increase its reliability. As a result, an active suspension system for railway vehicles is now ready for utilization.

1. はじめに

鉄道車両の高速化の試みが最近盛んに行われているが、列車の走行速度が高速になるほど車体の振動が増加して乗り心地が悪化するという問題が生じる。この問題の対策と

して、我々は鉄道車両用の動揺防止制御システムの開発を行ってきた^{1),2)}。

これまでにJR西日本の試験車両WIN 350を用いた試験を行い、昨年度は、今春より営業運転を開始した500系新幹線(写真1)を使用した1年間にわたる延べ走行距離45万



写真1 500系新幹線
Photo 1 Series 500 Shinkansen

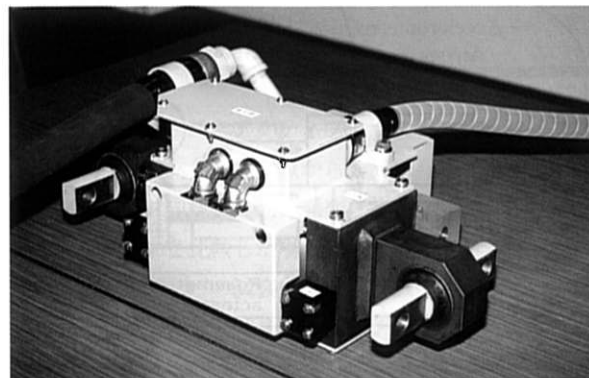


写真2 アクチュエータ
Photo 2 Actuator unit

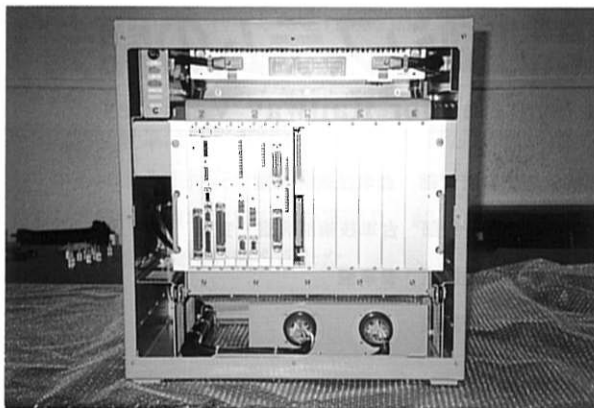


写真3 制御器
Photo 3 Control box

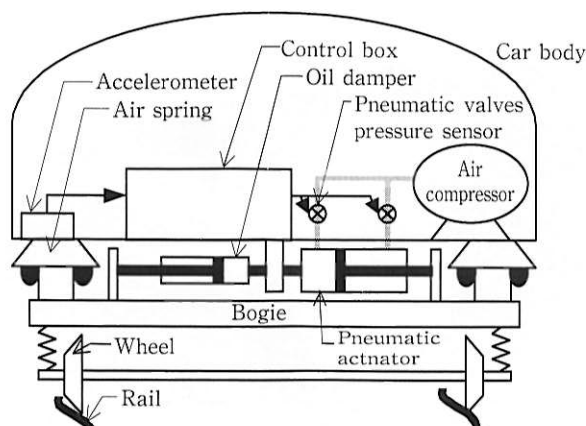
kmの耐久試験を実施した。

ここでは、500系新幹線の耐久試験時に両先頭車に装備された動揺防止制御システムの試験結果、および営業運転で使用するために追加した保守機能について報告する。

2. 制御システムの構成

動揺防止制御の方法としては大別して、外部からエネルギーを供給することでアクチュエータを駆動して車体の振動を強制的に抑えるアクティブ・サスペンションと、ダンパの減衰力を適切な値に高速で切り替えて振動を吸収させるセミアクティブ・サスペンションの2種類がある。今回開発を行ったのは、前者(アクティブ・サスペンション)である。第1図に500系のアクティブ・サスペンションシステムの構成を示す。

通常の車両には無い、アクティブ・サスペンションを装備した車両の特徴として、アクチュエータ、制御器、加速度計の存在がある。写真2から写真4にこれらの機器の外形を示した。これら制御システムのハードウェアは、基本的にWIN 350に使用していたものと同一の機器による構成とした。ただし、500系のシステムは量産を前提としてお



第1図 動揺防止制御システムの構成
Fig.1 Schematic diagram

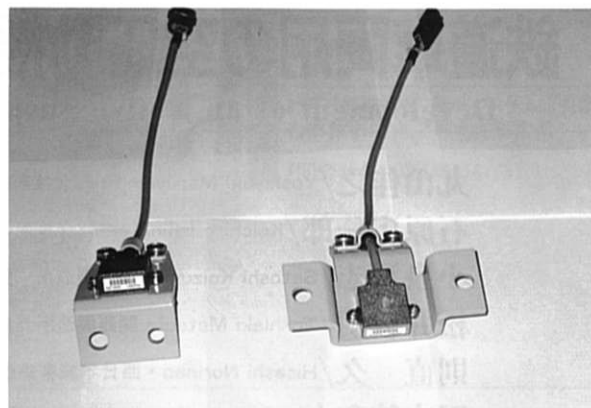


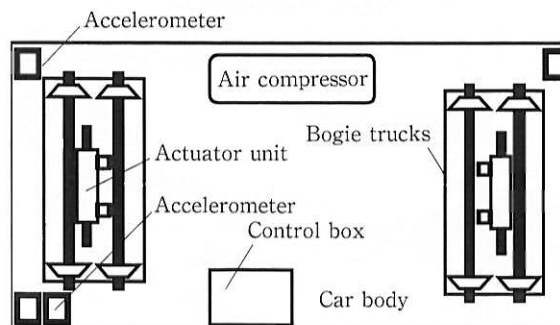
写真4 加速度計
Photo 4 Accelerometer

り、営業車では不要となるような計測機能、調整機能を削除することで仕様の簡素化を行っている。

通常の車両とアクティブ・サスペンションシステムを装備した車両で最も異なる点は、車体一台車間にダンパと並列に取り付けられたアクチュエータである。アクチュエータの動力としては様々なものが考えられるが、500系で使用したものは空圧式アクチュエータである。使用するアクチュエータの動力として、元々鉄道車両に搭載されているエア・コンプレッサからの空気圧を利用することで、油圧式等と比べて新たな動力源を必要とせず、なおかつ保守の面からも馴染みのあるものとなっている。このアクチュエータは空圧シリンダ、比例弁、圧力計から構成されている。比例弁は、空圧シリンダへの空気の流入を制御して制御に必要なアクチュエータの出力を制御する。このときの出力が圧力計によって検出される制御器へと伝えられる。

制御器は床下、もしくは床上の機器スペースに取り付けられる。制御器内には、各種の信号処理ボードが収納されており、加速度計と圧力計からの入力信号に基づいて、車体の振動を抑えるのに必要な出力の演算を行う。

加速度計は、車体の床下に装着され、通常のアクティブ・サスペンションの構成の場合では、左右加速度検出用と上下加速度検出用の加速度計が各々2個ずつ使用される。第2図にこれら制御機器の配置例を示す。



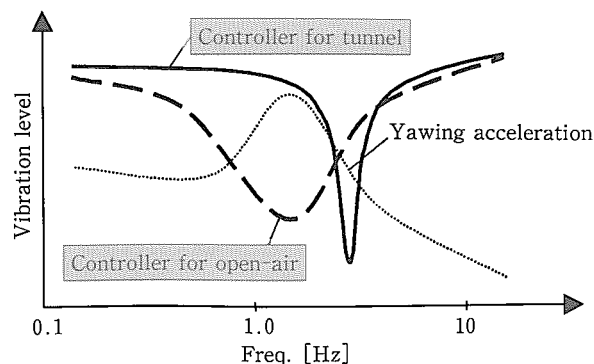
第2図 動揺防止制御システムの機器配置
Fig.2 Typical allocation of components

ソフトウェアに関しては、基本的な部分は WIN 350 と同一のものを使用しているが、500 系で新たに加わった運転台からの制御状態の監視機能などを持った情報伝送装置に対応するための通信機能といった、保守、信頼性向上のための機能が追加されている。

3. 制御設計

鉄道車両の乗り心地には、特に 1 Hz～3 Hz のいわゆる動揺成分が大きく影響する。すなわち乗り心地を向上するためには、この周波数域の振動を重点的に抑えてやる必要がある。このような場合には特定の周波数に対して制御効果の調節を行える H_∞ 制御が極めて有効である³⁾。 H_∞ 制御では、重み関数を用いて周波数によって制御の強弱を調整することができる。一般的に H_∞ 制御の制御の重み付けの中心は車体の共振周波数に設定される。WIN 350 では、ヨーイング・モードの共振周波数である 1.4 Hz に重み付けの中心を置き、できるだけ動揺成分全体を抑えて乗り心地を良くするような重み関数の調整を行った。500 系の重み関数は、そうして得られた形状を基にしているが、耐久試験の開始以前に行った加振試験の結果、ヨーイング・モードでの共振周波数は 1.9 Hz 程度となり、WIN 350 の場合に対してやや高周波寄りであることが判明したため、重み付けの中心の変更を加えている。

WIN 350 の試験では、トンネル内の高速走行時、特に対向車両とのすれ違い時の最後尾車に空力に起因すると思われる 3 Hz 程度の振動が発生した。旧来の制御データでは十分な効果が得られないこの高周波振動は、乗り心地の面から改善が望まれた。そのため、WIN 350 のアクティブ・サスペンションシステムの開発では、トンネル内の最後尾車での対向対策が大きな課題であった。結果として、トンネル内対向時の車体振動周波数に対して非常に強い制御の重み付けを行うことでこの問題は解決された。このような制御設計を行うには、極めて微妙な調整が要求され、走行試験を繰り返し行って検討する必要がある。500 系では、あら



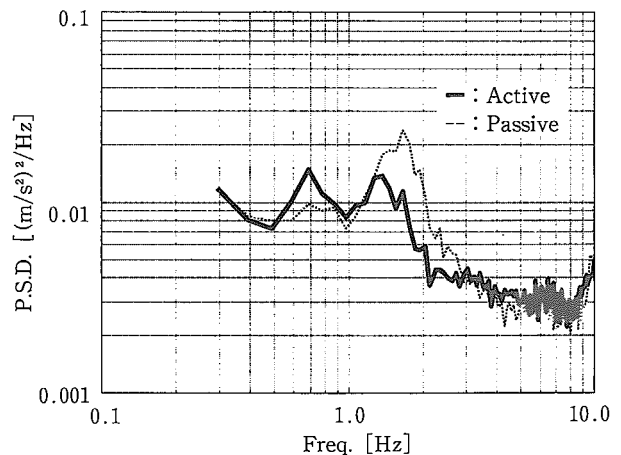
第3図 H_∞ 制御器(ヨーイング)の重み付け
Fig.3 Gain diagram of controller

かじめ車両の製作にあたって車体断面形状の見直しなどによる空力対策を実施した結果、事前のパッシブでの走行でトンネル内対向の影響があまり顕著でないことが判明したため、特に制御設計上での高周波振動対策は行っていない。参考として、第3図に重み関数の概形を示した。

4. 試験結果

第4図に耐久試験時の左右加速度の周波数解析結果の一例を示す。乗り心地に大きな影響を与える 1 Hz～3 Hz の動揺成分については、制御によって左右振動加速度が大きく低減されている。一方 0.8 Hz 付近、および 4 Hz～5 Hz では、逆に制御によって左右振動加速度は若干増加しているが、これらの周波数域は乗り心地に対しては比較的影響しない。

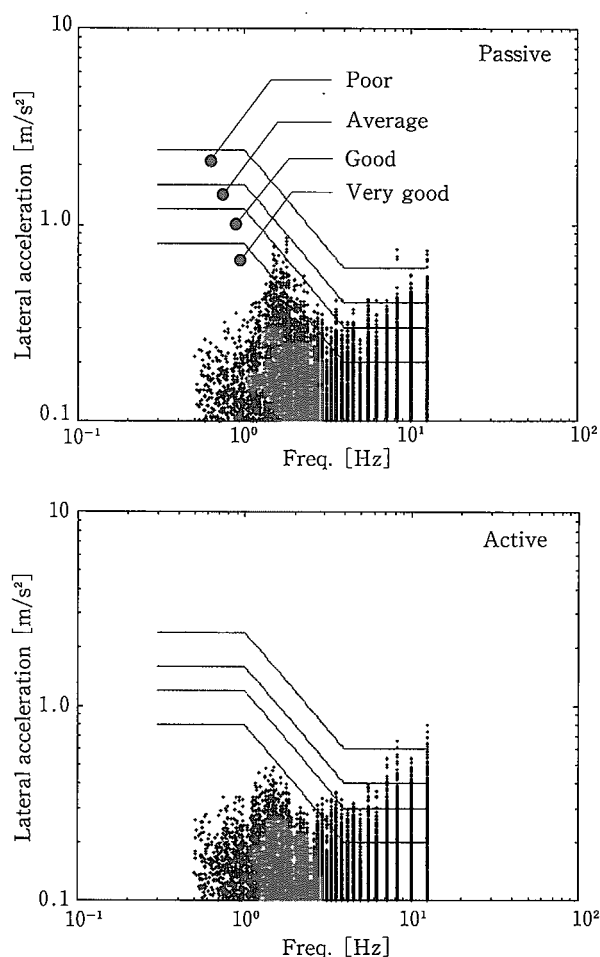
この点は第5図に示す乗り心地レベルの解析結果に、はっきりと現れている。乗り心地レベルで比較すると制御無しの場合の 1 Hz～3 Hz の“良い”が、制御ありの場合には“非常に良い”へと向上し、その他の周波数域では両者にほとんど差が生じておらず、アクティブ・サスペンションによる乗り心地改善の効果がはっきりと分かる。



第4図 周波数解析結果
Fig.4 Frequency response

5. 自己診断機能

以上述べたように、アクティブ・サスペンションシステムは乗り心地の向上という点から非常に有効であることが分かる。一方、同様の目的で開発されたセミアクティブ・サスペンションと比較した場合に、セミアクティブ・サスペンションがダンパの減衰力を最適な値に変化させるのに対して、アクティブ・サスペンションではアクチュエータの駆動力によって動揺防止を行っている。アクティブ・サスペンションでは、通常の台車と異なる構成になるため制御中の状態監視、いわゆるフェール検知だけでなく、自己



第5図 乗り心地解析結果

Fig.5 Riding comfort analysis of active train

診断を列車の発車前に行うことで、制御システムの異常を早期に発見できるようにし、信頼性の向上を図っている。

自己診断は、プログラム内で実施される時期により日常的に用いる静止自己診断と、必要なときだけ用いる加振自己診断の2種類に分かれる。これらの2種類の自己診断の関係は、第1表、第6図にまとめた。

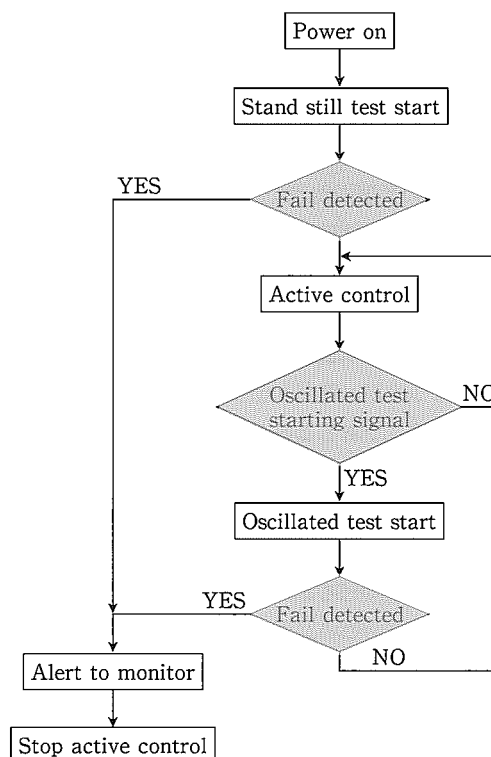
電源投入による制御プログラムの起動時には、毎回必ず静止自己診断と呼ばれる短時間での検査が行われる。静止自己診断は、動揺防止制御システムが制御を行うために最低限必要な基準を満たしているかどうかの確認のために行われる。この診断では、主に制御器—センサ間配線の断線などを検査を行っている。

また、一定の走行距離ごとに繰り返される台車点検後には、前述の情報伝送装置を用いた加振自己診断と呼ばれる詳細な検査が行われる。加振自己診断は、台車交換による車体—台車間のアクチュエータなどの取り外し作業の終了後に正常に復旧が行われたかを確認する。加振自己診断では、アクチュエータを用いて強制的に車体を加振し、そのときの車体の運動を制御設計時に行ったパラメータ同定試験の結果と比較している。使用する制御データはパラメータ同定試験の結果に基づいて作成されているので、加振自

第1表 自己診断

Table 1 Outline of self check

	Stand still	Oscillated
Opportunity	After power on (every time)	After bogie exchange (in periodical overhaul)
Necessary time	About 30 sec	About 10 min
How to begin	Auto	External trigger
Item	<ul style="list-style-type: none"> • Connection of sensor • I/O signal etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Airtight of actuator • Actuator force • Direction of sensor set up etc.



第6図 制御フローチャート

Fig.6 Flow chart

己診断での車体の運動がパラメータ同定試験の結果と一致していれば正常な制御が行える。一方、機器の取り付け方向の間違いや経年変化による劣化などで実際の車両の状態とパラメータ同定試験の結果に差が生じていると、所定の制御性能が発揮されないことになる。加振自己診断を行うことで、こういった事態を未然に回避することができる。

耐久走行試験中には、上記の自己診断機能で制御機器の健全性の確認を行ってきた。耐久試験終了後には、制御機器を引き取って、確認のために自己診断では検査していない項目に関してもあ詳細な検証を行った。外部の信号処理装置によって、擬似的な故障信号を与えて組み込まれている全てのフェール検知項目に対する動作確認や、模擬的な加速度信号を与えた場合の出力の確認などを行った。試験結果はいずれも正常であり、45万 km 走行を終えた後も制

御システムは問題なく作動しており、営業運転に使用可能な耐久性の確認が行えた。

6. まとめ

試験車両 WIN 350 を用いて開発を行ってきたアクティブ・サスペンションは、500 系での一年間にわたる走行試験で性能と信頼性の確認を行った。500 系での試験で、アクティブ・サスペンションは良好な乗り心地の実現を達成し、車両側からの監視機能の付加など営業運転での使用を前提とした信頼性向上のための改良も加えられたことで、ほぼ商用レベルの技術として完成した。



丸山佳之 / Yoshiyuki Maruyama

総合技術研究所 機械システム研究部
台車技術開発室

(問合せ先：06(466)6165)

参考文献

- 1) 小泉 他, “住友金属”, Vol.46, No.4, 1994, pp.57-62
- 2) 吉江・島本, “電気学会交通電気鉄道研究会資料”, TER-93-48

- 3) 平田 他, “ H_∞ 制御の実プラントへの応用”, 1996, pp.156-187, 計測自動制御学会