

鉄道車両とアクティブ制振技術*

Technology of Active Vibration Control for Railway Vehicles

谷藤 克也**

Katsuya TANIFUJI

Key words railway vehicle, vibration control, active suspension, semi-active control, full-active control

1. はじめに

鉄道車両の運転においては、空転・滑走防止を始めとしていろいろな機能で制御技術が採用されている。しかし、走行振動の抑制に制御技術が使われたのは、表1に示すように近年になってからのことであり、それを可能にした大きな要因はロバスト制御理論の発展とコンピュータ演算速度の飛躍的向上、システム構成機器の小型化にあると言える。しかも、鉄道は公共輸送機関として安全性を最も重要としており、制御システムには信頼性が強く求められている。そのため、外部エネルギーを使ってアクチュエータで制振する制御サスペンションの採用には慎重にならざるをえない。そのような状況のもとで実用に供されたのがセミアクティブサスペンションである。セミアクティブサスペンションは、可変ダンパの減衰係数をアクティブに切り替えることで制振効果を高める方式であり、制御系がフェールした場合でも、パッシブなダンパに戻ることで安全性が損なわれることはないと判断される。このセミアクティブサスペンションは、1997年に東海道・山陽新幹線の「500系のぞみ」で初めて実用化された。しかし、セミアクティブサスペンションではダンパとしての制振性に限界があることも事実である。2002年、東北新幹線の八戸延伸にともなって運行を開始した「E2系はやて」とそれに併結される「E3系こまち」で、世界初のフルアクティブサスペンションが採用されるに至った。フルアクティブは、振動抑制のために外部からエネルギーを供給する制御方式であり、その採用に当たっては自己診断とフェール検知システムの導入による信頼性の向上とコストパフォーマンス

表1 制御サスペンションを採用した新幹線電車
セミアクティブ

列車形式	実用開始	制御サスペンション装備車両
500系のぞみ	1997	両端車、グリーン車、パンタ搭載車
700系のぞみ	1998	同上
700系レールスター	1999	同上
E2系はやて	2002	両端車、グリーン車を除く全車両
E3系こまち	2002	同上
800系つばめ	2003	全車両
300系のぞみ	2005	両端車、グリーン車、パンタ搭載車 (セミアクティブ化改造)
N700系	2007 予定	全車両

フルアクティブ

列車形式	実用開始	制御サスペンション装備車両
E2系はやて	2002	両端車、グリーン車
E3系こまち	2002	同上
E954形式試験車	(2005)	全車両 (FASTECH360 試験電車)
E955形式試験車	(2006)	

ンスの改善が寄与している。

本報では、これまでに公表された文献に基づいて、新幹線を主体に鉄道車両の「セミアクティブ」と「フルアクティブ」の制御サスペンションについて概観する。

2. 制御サスペンションの必要性

鉄道車両のサスペンションは本来パッシブで構成できることが、運用・保守の面からは望ましいと考えられる。それでは、なぜ鉄道車両にアクティブ制振が必要かという、それは高速化のためであると言える。鉄道車両は、同じ軌道上を走行しても、速度が上げれば上がるほど振動が増大する。一般に軌道狂いは波長が長いほど狂い量が大きくなる傾向にある。車両はその固有振動数で加振されたときに大きく振動するが、その固有振動数に相当する軌道狂い波長は高速になるほど長くなるため、固有振動を加振する狂い量も増大する。これまでの、パッシブサスペンションの最適化と軌道整備を図ることで高速化による振動増大に対応してきた。しかし、近年、目ざましくスピードアップが進められる新幹線では、パッシブサスペンションの改



*原稿受付 平成19年1月23日

**正会員 新潟大学工学部(新潟市五十嵐2の町8050)

谷藤 克也

1971年東北大学大学院工学研究科修士課程修了。同年日本国有鉄道入社。鉄道技術研究所において車両の運動力学と乗り心地の研究に従事。工学博士。1987年新潟大学工学部助教授。1991年より教授。日本機械学会などの会員。

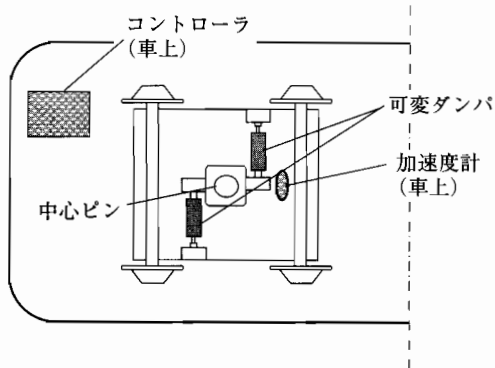
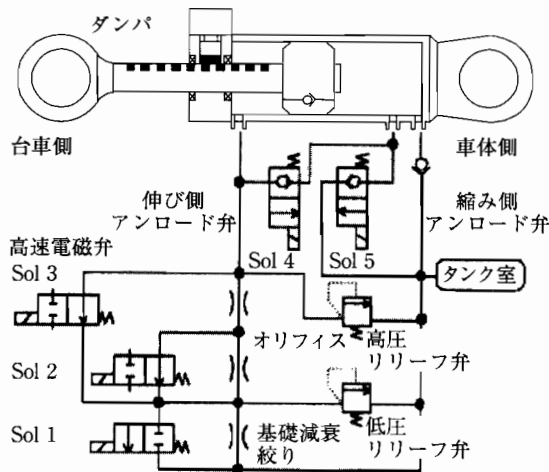
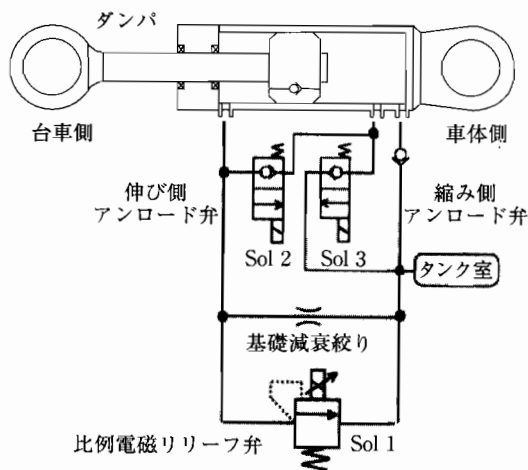

図1 セミアクティブサスペンションの構成⁴⁾

(a) 高速電磁弁方式の例⁴⁾

(b) 比例電磁リリーフ弁方式の例⁶⁾

図2 可変ダンパの構成

善だけで高速化による振動増大を抑制するにはほぼ限界に近い状態にある¹⁾²⁾。

3. セミアクティブサスペンション

鉄道車両の走行振動は、ピッチングを含む上下系とヨーイング・ローリングを含む左右系の振動に分類される。乗り心地を評価する場合も、上下振動と左右振動は別個に評価される。高速化において乗り心地改善の必要性が大きい

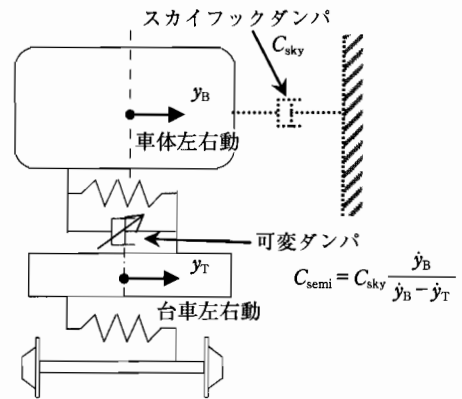


図3 左右振動のスカイフック制御

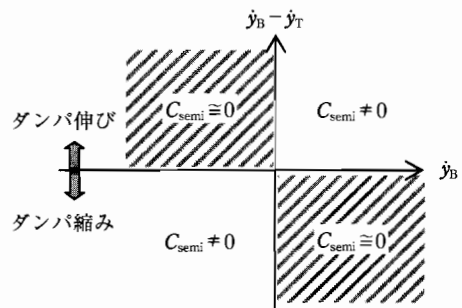


図4 擬似スカイフック制御における減衰係数

のは左右振動である。実用化されたセミアクティブサスペンションも、ほとんどが左右振動の抑制を対象としている³⁾。そのシステム構成の一例を図1に示す。パッシブサスペンションでは、車体・台車間に中心ピンをはさんで2本の左右動ダンパが取り付けられている。これらのダンパの減衰係数を可変とし、振動の状況に応じて減衰力の変更を可能にしたのがセミアクティブである⁴⁾⁵⁾。図2(a)は高速電磁弁による可変ダンパの構成例を示す。3個の高速電磁弁のオン・オフで油路中の複数のオリフィス(絞り)を組み替えることにより、減衰係数が増え変わる。この例では、6段の減衰力を実現される。なお、現在は図2(b)の比例電磁リリーフ弁により連続的(無段階)に減衰力を変化させる方式が開発され、高性能化が図られている⁶⁾。

セミアクティブサスペンションで用いられるスカイフック制御の概念図を図3に示す。線路に平行して移動する壁と車体の間に取付けられた仮想のダンパ(スカイフックダンパ)と同等の減衰力を、車体・台車間の可変ダンパで発生させようとするものである。減衰係数を増加させても高振動数域の振動増大を伴わず、広い振動数域にわたって振動を低減するのが、スカイフックダンパの特徴である。しかし、車体・台車間のダンパでは、この特徴を完全には実現することはできない。車体の動き(y_B)とダンパの伸縮方向($y_B - y_T$)の関係において、図4の第2, 4象限ではむしろダンパ力が車体を加振する。そこで、この条件ではアンロード弁を介して減衰係数をゼロに近づける。このように、ダンパ力で制振可能な第1, 3象限の条件でのみ減



図5 全車両にセミアクティブが装備される N700 系新幹線電車 (JR 東海・JR 西日本)

衰力を発生させるのが、Karnopp の切り換え則による擬似的なスカイフック制御である。

500 系電車の速度 300 km/h による試験結果では、振動が大きくなるトンネル内で高速電磁弁方式のセミアクティブにより乗り心地レベル L_a が 2.5 dB 程度改善された。これは乗り心地の評価として「普通」の領域から「良い」～「普通」の領域へ改善する効果である⁸⁾。現在試験走行中の N700 系電車 (図 5) に採用される比例電磁リリーフ弁方式のセミアクティブは、700 系電車の高速電磁弁方式に比べ、さらに乗り心地がよくなっている⁹⁾¹⁰⁾。

4. フルアクティブサスペンション

可変ダンパのセミアクティブよりもさらに制振効果を上げるため、アクチュエータで制振するのがフルアクティブサスペンションである。外部エネルギーとしては、空気圧、油圧、電気などが用いられる。

2002 年に実用化された E2 系 (図 6)・E3 系のフルアクティブ¹¹⁾は空気圧アクチュエータを利用しており、制振の対象は前章のセミアクティブと同様に左右振動である。最高速度 275 km/h において乗り心地レベルで 5 dB 以上の低減が目標とされた。初めに空気圧が採用されたのは、これまでも鉄道の車両装置に空気圧が利用されてきた実績と制振対象とする動揺成分が 1～3 Hz 帯域にあることを考慮したものである。そのシステム構成は図 7 に示される。パッシブなサスペンションで装備される車体・台車間の 2 本の左右動ダンパは、1 本が空気圧アクチュエータで、もう 1 本が切替式のダンパで置き換えられる。切替式のダンパは、セミアクティブの制振中は制御を妨げないように柔らかい特性とし、非制御時には従来の左右動ダンパと同等の特性に変わる。

制御アルゴリズム¹²⁾¹³⁾の概要を図 8 に示す。制御則には H_∞ 理論が採用されている。図示されるように、実装されるコントローラには、車体ヨーイングのみを対象とするものと、車体左右動・ローリングを対象とする単純化したモデルが用いられる。そのモデル化誤差に対するロバスト性と、図 9 に例示されるように、周波数重み関数により振動を低減させたい振動数帯に的を絞れることが H_∞ 制御の



図6 世界初のフルアクティブが装備された E2 系新幹線電車 (JR 東日本)

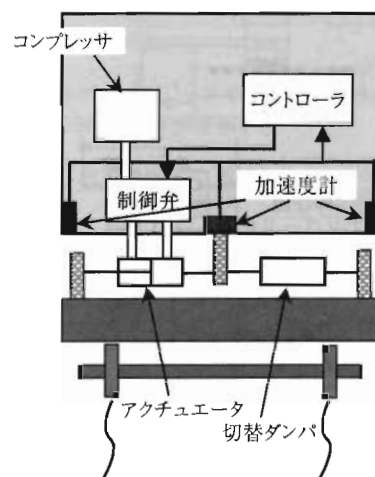


図7 フルアクティブサスペンションの構成¹³⁾

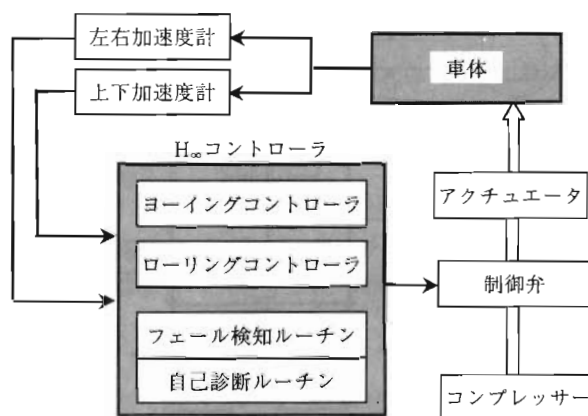


図8 フルアクティブ制御アルゴリズムの概要¹³⁾

特長である。新幹線車両の左右振動は、一般に明かり区間では 1～2 Hz で車体ヨーイングの固有モードが卓越しており、この帯域を狙った重み付けのコントローラが用いられている。

一方、高速でトンネル区間を走行すると、卓越振動数が 2 Hz 以上に移動する場合があるため、この狙う帯域を変えたコントローラを別に用意し、明かり区間と長大トンネル区間でソフト的にコントローラの切り替えが行われている。なお、アクチュエータの空気消費量も考慮して、振動制御は速度 200 km/h 以上で機能するようになっている。

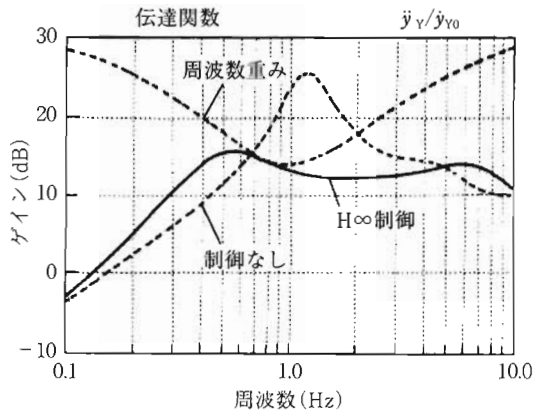
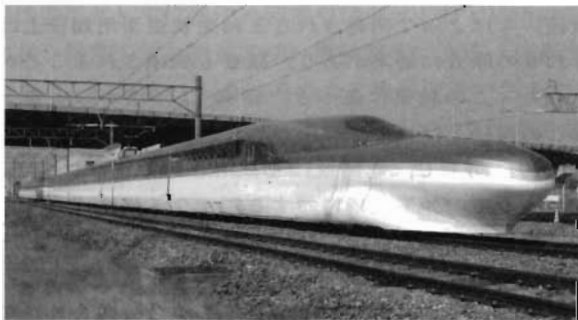
図9 H ∞ コントローラのゲイン線図の一例¹²⁾

図10 全車両にフルアクティブが装備されたE954形式新幹線試験電車 (JR 東日本)

E2系・E3系でフルアクティブが装備されたのは、最後尾で走行するときに振動が増大する両端車と高い居住性が求められるグリーン車である。試験結果では、明かり区間の乗り心地レベルを5~9 dB、トンネル区間でもコントローラの切り替えにより5 dB以上の低減が達成された¹⁴⁾。

現在、試験走行中のE954形式 (新幹線専用車両：図10)^{15,16)}とE955形式 (新在直通車両)¹⁷⁾は最高速度360 km/hの営業運転を目指す高速試験電車であり、目標とする乗り心地レベルは左右振動、上下振動ともに80 dBである。そのために、全車両に装備されるフルアクティブのアクチュエータには応答性とパワーに優れた電磁式が採用されているとのことであるが、その詳細は公表されていない。

これまでに実用化された制御サスペンションはすべて左右振動を対象としているが、試験車では上下振動を対象とするフルアクティブが開発されている¹⁸⁾。そこでは、油圧式アクチュエータが空気ばねと並列に配置され、制御則にH ∞ 理論を採用して、車体の上下動、ピッチング、一次曲げのモード別に単純化コントローラが用いられる。300X新幹線試験車による速度350 km/hの試験走行が行われた¹⁹⁾。

6. おわりに

制御サスペンションとしては、在来線においても小田急

新型特急50000形ロマンスカークが両端車に空気圧式のフルアクティブを装備²⁰⁾、JR東海313系5000番台はセミアクティブを装備して乗り心地改善に寄与している。このように、非振り子車両においては、左右振動の制御サスペンションは既に基礎研究を終え、実用面で性能アップを図る段階にある。今後は、振り子車両の車体傾斜制御との協調が課題となるであろう。なお、セミアクティブに関しては、空気ばねの減衰 (絞り) を制御して上下振動を低減する試みも検討されており²¹⁾、実用化が期待される。

最後に、図の引用をお認めいただいた参考文献の著者各位と写真の提供をいただいたJRの関係各位に謝意を表す次第です。

参考文献

- 1) 佐々木君章：鉄道車両のアクティブコントロール, JREA, 47, 11 (2004) 30425.
- 2) 小泉智志：鉄道車両の乗り心地向上のためのアクティブ制御技術, 計測と制御, 45, 9 (2006) 779.
- 3) 川崎治彦：高速鉄道車両用セミアクティブサスペンション開発小史, KYB技報, 33 (2006) 17.
- 4) 中里雅一・他3名：新幹線用セミアクティブサスペンション, KYB技報, 13 (1996) 23.
- 5) 牧寛司・他3名：700系新幹線のセミアクティブシステム, KYB技報, 19 (1999) 43.
- 6) 荒井順一・小川義博：低コストセミアクティブサスペンションの開発, J-RAIL '99講演論文集, (1999) 151-152, 土木学会.
- 7) 佐々木君章：車両の揺れを賢く抑える—セミアクティブサスペンション—, RRR, 60, 2 (2003) 6.
- 8) 則直久：500系のセミアクティブサスペンション, 油圧と空気圧, 28, 2 (1997) 147.
- 9) 臼井俊一・木本憲宏：東海道・山陽新幹線直通用次世代車両N700系量産先行試作車の概要 (4), 鉄道車両と技術, 111 (2005) 37.
- 10) 田中守・吉江則彦：東海道・山陽新幹線直通用次世代車両「N700系」量産車の概要, JREA, 49, 7 (2006) 31740.
- 11) 遠藤知幸・小泉智志：JR東日本E2系・E3系フルアクティブサスペンションの概要, R & m, 11, 2 (2003) 18.
- 12) 小泉智志：(実用可能な制御理論) 鉄道での制御理論, 計測と制御, 38, 1 (1999) 60.
- 13) 小泉智志：住友金属工業におけるアクティブコントロールの技術, 鉄道車両と技術, 80 (2002) 9.
- 14) 遠藤知幸・小泉智志：鉄道車両の空気圧アクティブコントロールシステム, フルードパワーシステム, 34, 3 (2003) 169.
- 15) 堀内雅彦：JR東日本E954形式新幹線高速試験電車の概要, R & m, 14, 1 (2006) 19.
- 16) 白石仁史：JR東日本E954形式新幹線高速試験電車, 車両技術, 231 (2006) 3.
- 17) 堀内雅彦：JR東日本新幹線高速試験電車E955形式 (FASTECH360Z) の概要, R & m, 14, 7 (2006) 4.
- 18) 西義和・他7名：車両のアクティブ制振制御・車体傾斜制御の開発, 川崎重工技報, 124 (1995) 6.
- 19) 臼井俊一・他4名：上下系アクティブ制振制御装置の開発 (300X新幹線試験車両での走行試験結果), フルードパワーシステム, 30, 6 (1999) 468.
- 20) 小田急電鉄(株)運転車両部：小田急電鉄50000形特急車両VSEの新技術開発 (その2), R & m, 14, 11 (2006) 8.
- 21) 菅原能生・他2名：空気ばねの減衰制御による鉄道車両の車体上下振動低減, 日本機械学会論文集 (C編), 72, 721 (2006) 2762.