

- 鉄道一般
- 車 両
- 施 設
- 電 気
- 運 転・輸 送
- 防 災
- 環 境
- 人 間 科 学
- 浮上式鉄道

鉄道的高速化技術



佐々木 君章
Kimiaki Sasaki

研究開発推進部
主管研究員

【専門分野】 鉄道車両、制御技術

世界初の旅客営業用蒸気機関車ロケット号（英1830年）は最高速度58km/hだったのに対し、現在は鉄輪式鉄道で575km/h（仏TGV2007年）、浮上式鉄道では603km/h（日L0系2015年）となっています。ただし、鉄道の「高速化」は同じ区間の所要時間を短縮することを指す場合が多く、必ずしも最高速度の向上だけを意味しません。

高速化には非常に多くの事項が関係しており、鉄道の総合的な技術力の向上が必要ですが、ここでは主に車両技術の面から高速化の課題と技術を見ていきたいと思ひます。

高速化の進展

日本の鉄道的高速化の歴史を概観するため、東京－大阪間の特急列車による所要時間の推移を図1に示します。この図は地区間の移動に必要な時間の変化を大まかに示すのが目的であり、途中の経路による距離差（東海道線、東海道新幹線、リニア中央新幹線）や駅位置の違い（大阪と新大阪など）は無視しています。

新橋～神戸間の開通は1889年で、このとき新橋～大阪間は直通で約19時間かかっていたようです¹⁾。東京駅が開業し、東海道線の起点駅となったのは1914年、特急「^{つばめ}燕」は1930年に

登場しました。速達性を重視する特急列車の所要時間は、速度向上に関する実力を表していると考えられますので、本図では特急列車による最短所要時間について整理しました。

この図を見ると、大幅な速度向上が実現したときには、たとえば電車特急の登場（1958年）、新幹線（1964年）などの大きな技術革新があったことがわかります。また、丹那トンネルの開通など、線路や運転ダイヤの改良によっても少しずつ高速化が進められてきました。一方で終戦後の混乱期においては電力や石炭の不足や、頻繁に運行ダイヤ

の変更を要求される世情の影響を受けて特急列車を運行する余力がなく、大きく所要時間が伸びています。このように、高速化は狭い意味の技術力以外にもさまざまな条件が整って実現できる総合力の成果であることがわかります。

将来に目を転じてみると、最高速度505km/hのリニア中央新幹線が計画されています。東京－大阪間が結ばれるのは2045年の計画で、所要時間は67分程度とされています。これにより通勤電車とさして変わらない時間で両都市が結ばれることになり、大きな刺激を社会に与えるものと期待されています。

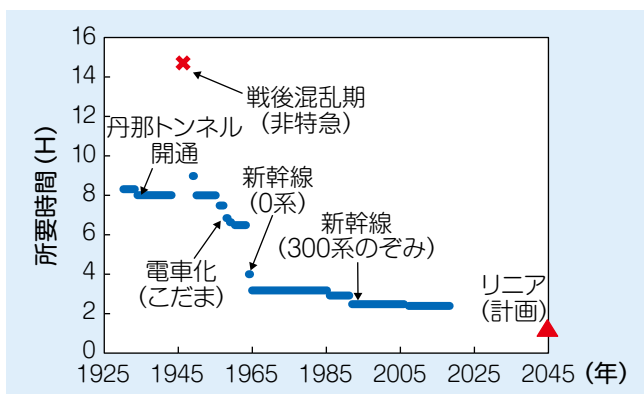


図1 特急列車による東京－大阪（新大阪）間の所要時間

表1 高速化における車両の課題

項目	課題	新幹線	在来線
安全性・高速安定性	ブレーキ距離	●	●
	蛇行動限界速度	●	△
	曲線通過性能	△	●
乗り心地	軌道不整	●	●
	空力振動	●	△
	車内圧力変動	△	△
	超過遠心加速度	△	●
環境負荷	トンネル微気圧波	●	
	騒音	●	△
	地盤振動	●	△
動力	高速集電性能	●	
	空気抵抗	●	
	動力性能	●	●

●重要 △場合により関係 無印 あまり関係しない

高速化の課題

鉄道の高速化において、考慮しなければならない課題は、車両技術に関する主なものだけでも表1に示すように多数あります。

列車の性格・目的により解決すべき課題は変わってきます。たとえば、駅間距離が長く、曲線半径が大きい新幹線では所要時間短縮における最高速度向上の効果が大きいものに対して、急曲線が多く、長い直線の少ない在来線特急では最高速度の向上よりも曲線での平均走行速度を上げるほうが有利です。駅間の短い通勤電車などでは、加減速性能が重要になる線区も多くみられます。また、踏切のある在来線では、特別の場合を除いて最高速度から600m以内に停止できるブレーキ性能をもつことが定められています

新幹線の高速化

新幹線の最高速度向上において、現時点の最大の課題は騒音やトンネル微気圧波、地盤振動などの環境負荷の低減です。新幹線騒音は1975年の環境庁告示により、基準が定められ、住宅地70dB、それ以外75dBとされています。新幹線はさまざまな対策により低騒音化を進めてきましたが、この基準を守りながら高速化するのは非常に難度の高い目標といえます。

新幹線騒音は車輪・レールからの転動音、空力音、高架橋のような構造物が振動して発生する構造物音などが主なものですが、このうち空力音は列車速度の6乗に比例してパワーが増大する性質があり²⁾、最高速度向上にはこの低減が重要です。このため、パンタグラフや台車周りに対して、鉄道総研が所有する大型低騒音風洞を用いて、音源特定試験(図2)を行い、形状の最適化を進めています。パンタグラフについては騒音が小さくなる形状などが

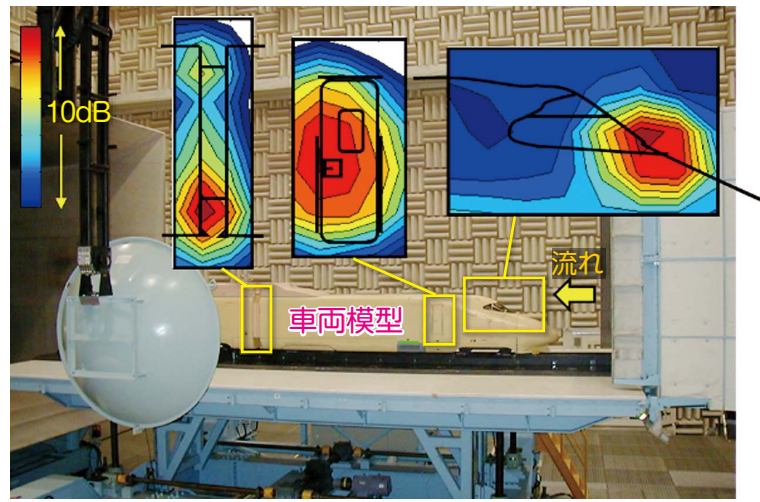


図2 風洞試験による音源分布解析

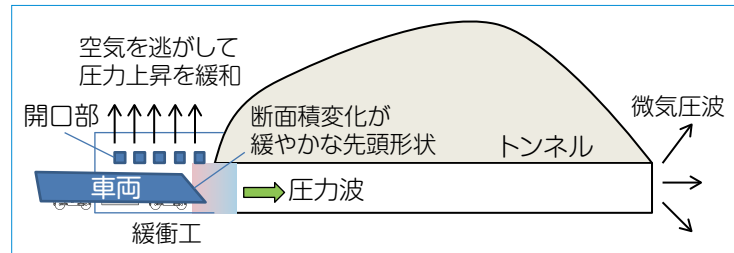


図3 トンネル微気圧波と対策

判明してきています。ただ、このようなパンタグラフは気流による揚力変化が大きいという欠点があります。揚力の変動が大きいと架線やすり板の摩擦増大や離線率増加の原因になります。集電特性を悪化させないように、揚力変動抑制の開発も進めています。

トンネル微気圧波は図3のように列車が高速でトンネルに進入する際に空気が圧縮されて発生した圧力波がトンネル内を伝わり、出口でパルス状の圧力波が放射されて衝撃音などを発生する現象です。この抑制にはトンネル進入時の圧力勾配の低減が有効で、地上側では緩衝工の設置が、車両側では先頭車両の鼻を伸ばして断面積変化率を小さくするなどの対策³⁾が取られてきました。しかし、今後の高速化に対して、さらに鼻を伸ばすのは車内スペースの関係から難しく、より適切な先頭形状の研究が、低減効果の高い緩衝工の開発とあわせて進められています。

地盤振動に関しては、軽量化が有効です。最近の新幹線車両は軸重が0系

に比べて40%程度軽くなっていますが、軽量化は省エネルギー・省資源などの他の利点も大きいので、今後も検討すべきテーマです。

走行安全性の面ではブレーキの性能向上が重要です。列車がもつ運動エネルギーは速度の2乗に比例して増大します。また、高速走行時にはレール・車輪間の粘着力も低下するので、レール車輪間の粘着力を必要としないブレーキも必要になります。このため、耐熱性を向上したディスクブレーキやレールとの粘着が不要な空力ブレーキ・レールブレーキを組み合わせた新しいブレーキシステムを開発し、非常時にも確実に停止するための開発を進めています⁴⁾。

乗り心地の面では、①高速走行で車体に発生する空気の渦により、大きな力(空気力)が車体に作用し、トンネル内で横揺れが大きくなる、②長波長の軌道不整(一般的に長波長ほど振幅が大きい)による加振周波数が上昇して、車両が揺れやすくなるなどの問題があります。

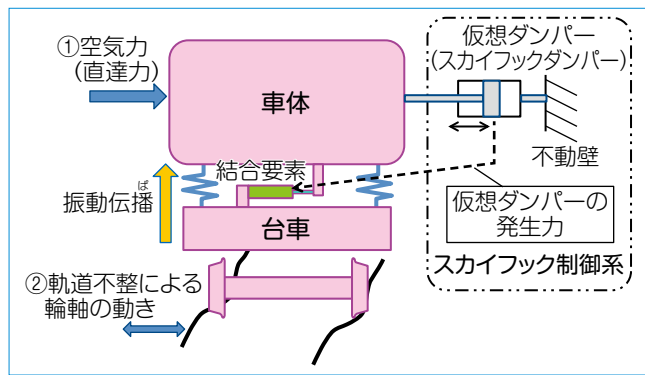


図4 車体に振動が伝わる経路と振動制御の例

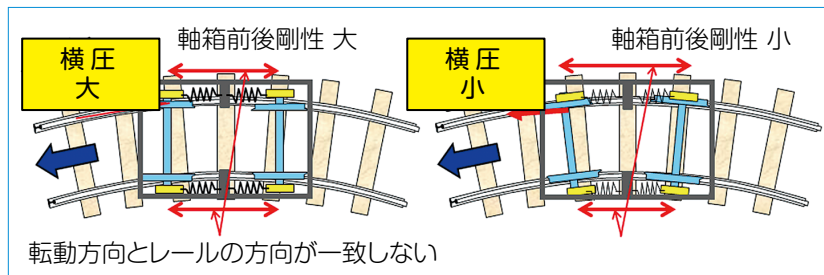
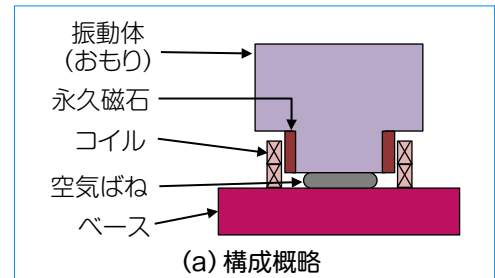
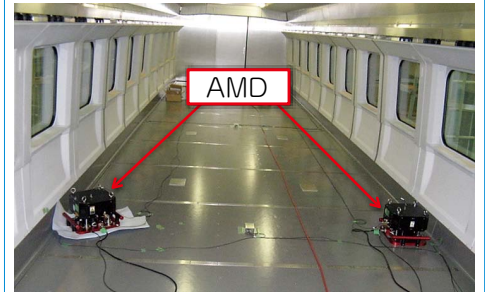


図6 軸ばね前後剛性による横圧の大小



(a) 構成概略



(b) AMD設置状況

図5 アクティブマスダンパー(AMD)

図4に①、②の関係を示します。①は車体に直接働くので、抑制するためには台車と車体との結合を強くして抵抗する必要がありますが、②は台車から伝わるので、結合を弱くする方が車体に伝わりにくくなります。つまり、「結合の強さ」という点では①と②に対する対策が正反対になります。また、高速になるほどこの乖離は大きくなります。このため、従来の固定的な特性のサスペンションでは十分な性能が得にくくなっており、新幹線では振動制御システム⁵⁾⁶⁾の採用が一般的になっています。振動制御の簡単な例として「スカイフック制御」の考え方を同図右側に示しました。車体の側方に動かない壁があるものと仮定して、この壁と車体の間にダンパー(スカイフックダンパー)があるものと考えます。スカイフックダンパーは台車から伝わる振動がないので、減衰力が大きいほど振動を抑制することができます。現実にはこのようなダンパーは設置不可能ですが、このダンパーの発生力は車体振動速度(加速度信号の積分)に比例するので、この力を発生するように結

合要素を制御すれば、車体についてはスカイフックダンパーと等価になり、有効に車体振動を抑えることができます(実際の制御はもっと高度な方式で安定性を保証しています)。

また、高速走行では車体の弾性変形をともなう高い周波数の振動が多くなり、上下の振動乗り心地を損なう傾向があります。これを抑制するために、アクティブマスダンパー(AMD)⁷⁾と呼ばれる振動制御方式も提案されています。

振動制御は今後の高速化において必要性が増していく技術であり、性能向上が図られていくと考えられます。

在来線の高速化

在来線では最高速度を向上できる線区が限られ、高速化の制約要因も列車の性格によって大きく違います。ここでは特急列車の場合を想定し、高速化の効果が大きい曲線通過速度の向上について紹介します。

曲線走行における問題の一つに、横圧(車輪がレールを横に押す力)が大きくなりやすいということがありま

す。鉄道の車輪にはテーパ(踏面勾配)がついていて、中心からずれると車輪/レール接触位置での左右車輪の周速に差ができて、線路中心方向に向きを変えるモーメントが働き、自分で線路中心方向に戻ろうとします(自己操舵作用)。しかし、この作用は高速での走行安定性を下げるように働くため、輪軸を前後方向のばねで抑制して、敏感になり過ぎないようにしています。最高速度の高い車両では、このばねの剛性を大きくする必要がありますため、図6のように曲線走行時に前軸の転動方向が少し曲線の外側を向き、横圧が大きくなります。このため、曲線外側の軸距(前後の軸箱の距離)を空気圧アクチュエーターで伸ばして転動方向レールの接線方向に向け、横圧を低減する「アシスト操舵システム」⁸⁾の開発を行っています。このような輪軸を能動的に動かす方式(操舵制御)は誤動作した場合に脱線の危険が大きくなるため、実用化が困難でした。アシスト操舵は故障しても普通の台車より横圧が大きくなりえないため、安全性が高いといえます(☞参照)。

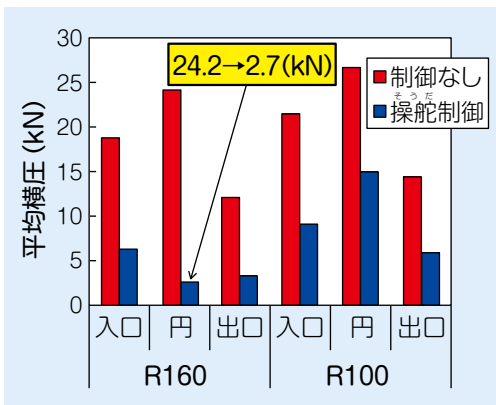


図7 アシスト操舵による横圧低減効果

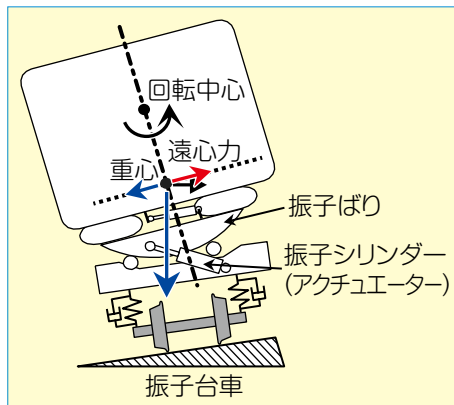


図8 振り子車両の仕組み

テム⁹⁾の開発を進めています。これは、車体のローリング運動(長手方向を軸とする回転)を抑制するトーションバーというリンクをアクチュエーターでねじることによって車体を傾斜させるものです。電動式を想定しており、単純な機構で、空気ばね傾斜方式や振り子方式に対して応答性を向上

できることが期待されます。

おわりに

鉄道の高速度化は社会に対するインパクトが大きく、また、鉄道の総合力を示すものです。今後も安全性を最優先し、着実に技術開発を進めていきたいと思ひます。[RRR]

鉄道総研試験線における横圧低減効果の測定例を図7に示します。制御により横圧が顕著に下がっており、安全性の余裕が大きくなるため、曲線部の高速化に寄与できるものと考えています。

乗り心地の面では、車体傾斜制御の高度化があげられます。曲線では外軌側を高くして(カント)遠心加速度を緩和していますが、曲線中で停車した場合の安全性からカントの大きさには制約がある一方で、遠心加速度は速度の2乗に比例して大きくなるので、車両の高速化により乗客に働く遠心加速度の大きさが問題になります。これを緩和するため、図8のように車体を曲線内側に傾けるのが振り子(車体傾斜)制御です。最初は傾斜用のアクチュエーターがなく、遠心力で自然に傾斜させる方式(自然振り子)が実用化されましたが、遠心加速度を受けてから車

体が傾斜するまでの時間遅れ(振り遅れ)に起因して乗り物酔いが多発する問題が明らかになりました。このため、「制御付き振り子」が開発されました。これは、各曲線の諸元(半径、カント、位置など)を車上のコンピューターに記憶させ、自分の走行位置をATS地上子位置と車輪の回転数から決定して、曲線に進入する少し前から空気圧で傾斜を補助して上記の加速度変動を抑える仕組みです。この方式は在来線高速化の有力な方法として、日本全国に普及しました。

一方で、振り子方式は台車が複雑で、メンテナンスの負担が大きいことから、構造が簡単な「空気ばね式車体傾斜システム」の採用例が近年増えています。これは、普通の台車で曲線外側の空気ばねを伸ばして車体を傾斜させるもので、振り方式と比較すると、最大傾斜角度・傾斜速度が小さいため、急曲線の連続する線区に適さないという難点がありますが、安価でメンテナンスが容易という利点があります。ちなみに、新幹線は曲線半径が大きいと書きましたが、最近の新幹線の速度は計画当時の設計速度を超えており、N700系などでは構造が簡単で軽量の本方式の車体傾斜システムが搭載されています。

在来線の一層の高速化を図るため、空気ばね式車体傾斜の長所(軽量・省メンテナンス)と振り方式の長所(大傾斜角・小制御力)をあわせもつ

アシスト操舵の安全性

操舵制御が大きな横圧低減効果を持つことは昔からわかっていましたが、装置が故障したときの安全性の保証が困難なため、実用化が遅れていました。アシスト操舵は輪軸の自己操舵作用を助ける方向に輪軸を動かすことはできませんが、万一の誤動作で逆方向に動かそうとした場合には自己操舵作用に打ち勝って逆操舵するだけの力は発生せず、横圧が増えないことを実験で確認しています。また、制御しないときは普通の台車になるため、安全性が高く、実現性が高いと考えています。

文献

- 1) 探検コム：時刻表の誕生, <http://www.tanken.com/jikokuhyo.html> (入手日：2017/11/6)
- 2) 長倉清：新幹線鉄道騒音の解析・低減技術, RRR, Vol.68, No.3, pp.32-35, 2011
- 3) 飯田雅宣：入口緩衝工と先頭部形状によるトンネル微気圧波対策, RRR, Vol.62, No.5, pp.8-11, 2005
- 4) 佐々木君章：新幹線のさらなる高速化を目指して, RRR, Vol.72, No.3, pp.4-7, 2015
- 5) 佐々木君章, 林哲也, 大石達哉, 荒井順一：新幹線車両用低コスト型セミアクティブサスペンションの開発, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.597-600, 2001
- 6) 名倉宏明：新日鐵住金におけるフルアクティブサスペンション技術 最近の動向, 鉄道車両と技術, Vol.19, No.6, pp.7-12, 2013
- 7) 秋山裕喜, 富岡隆弘, 瀧上唯夫, 相田健一郎：実走行を模擬して車体制振デバイスの効果を調べる, RRR, Vol.72, No.11, 2015
- 8) 鴨下庄吾, 梅原康宏, 宮本岳史, 鈴木貢：アシスト操舵で横圧を低減させる, RRR, Vol.73, No.10, pp.8-11, 2016
- 9) 風戸昭人：アンチローリング装置を活用した車体傾斜機構の開発, 第295回鉄道総研月例発表会講演要旨, 2015