

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

空力ブレーキで高速鉄道の緊急停止距離を短縮する

空気抵抗を利用した空力ブレーキは、地震などの緊急時における高速鉄道の停止距離を短縮する新技術として、付加的なブレーキとしての適用が検討されています。ここでは、空力ブレーキに関するこれまでの経緯を紹介するとともに、鉄道総研で開発を進めている小型空力ブレーキ装置について、その特徴と性能について紹介します。



高見 創
Hajime Takami
車両制御技術研究部
ブレーキ制御研究室
室長
【専門分野】ブレーキ装置、流体力学

緊急時のブレーキ

高速鉄道のさらなる安全性向上に資するブレーキ力の向上は、国内外を問わず常に重要な研究課題です。特に、国内では地震時の安全対策としても、高速域からいち早く減速することが有効です。

しかし、駆動用のモータを利用した電気ブレーキや、車輪の回転を機械的に止めるディスクブレーキなどは、装置自体の性能上限に加え、車輪とレールの間に働く物理的な粘着力(☞参照)により、利用できるブレーキ力は制約を受けます。したがって、高速鉄道の緊急停止距離を現在よりも大幅に短縮するためには、車輪とレールに頼らない方法を、現在のブレーキ装置と組み合わせる使用することが有効です。

その手段として、台車からレールへ力を直接作用させるレールブレーキ方

式(☞参照)や、空気抵抗を利用して車体へ力を直接作用させる空力ブレーキ方式などが検討されてきました。これらの方式は速度域や使い方によって一長一短がありますが、ここでは鉄道総研が主体となって現在開発を進めている小型の空力ブレーキ方式について紹介します。

空力ブレーキとは

高速で走行しているときの列車周りの空気は、列車から相対的に見れば、列車の前方から列車速度で吹き付ける向かい風として作用します。このとき、流線形をしている列車の表面から外側へ抵抗板と呼ぶ板を張り出せば、板には空気抵抗が作用し、列車を直接減速させるブレーキ力となります(図1)。

空気抵抗の大きさは抵抗板の断面積や形状に依存するほか、速度の2乗に

☞ 粘着力

転がり接触しながらレール・車輪間で伝達される接線方向の摩擦力を表します。粘着力の限界は、輪重や車輪・レールの表面状態、気象条件などで変化します。また、速度が高いほど粘着力の限界は低くなる傾向があります。

☞ レールブレーキ

代表的な実用例として、ドイツの高速鉄道ICE3は渦電流方式のレールブレーキを搭載しています。また、鉄道総研においても、自己発電により動作時の電源を不要とするリニア型レールブレーキ方式の開発を進めています。

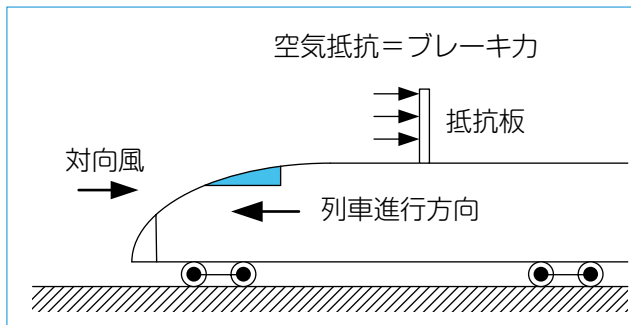


図1 空気抵抗の発生

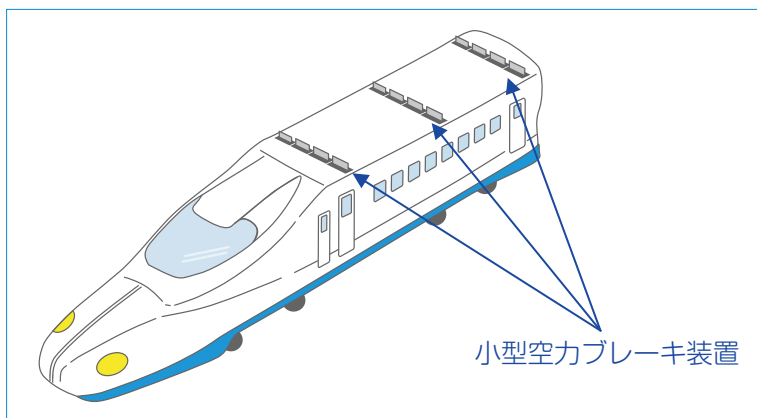


図2 小型分散方式の空力ブレーキ配置例

比例して大きくなる物理的な特性があります。このため、高速移動体である航空機やレーシングカーなどでは、一般的に利用されるブレーキ方法です。

このような空力ブレーキ装置を高速鉄道に応用する利点は、気象条件や車輪・レールの表面状態で変化しやすい粘着力に依存することなく、安定して高速域のブレーキ力が発生できる点です。また、比較的軽量で単純な構成が可能であることや、動作時の電源や制

御が基本的に不要で信頼性に優れることなどが挙げられます。

空力ブレーキが高速鉄道に採用された例としては、500km/hでの営業運転を目指した超電導リニアの試験車両¹⁾や、360km/h運転を目指したJR東日本のE954/E955系新幹線試験電車²⁾があります(☞参照)。

小型分散方式

鉄道営業車両に空力ブレーキ装置を

搭載する際の課題は、動作時には要求されるブレーキ力を得ながら、車体に格納され使わないときは客室容積へ影響しないことです。

ブレーキ力となる空力抵抗を十分に得るためには、一般に抵抗板を大きくすることが簡便です。しかし、大きな抵抗板は装置の大型化を招いて客室容積を圧迫するとともに、駅やトンネルなどの地上設備との衝突を防ぐための車両限界と呼ぶ寸法上の制約もあります。また、保守性や重量軽減の観点からも、抵抗板の開閉構造は簡素化することが望ましく、抵抗板の大型化は望ましくありません。

このため、逆に抵抗板を従来よりも大幅に小型化して車両の屋根上に搭載可能なサイズとし、小型化にとまなうブレーキ力の低下を抵抗板の枚数増加で補う新たな方式を提案しました³⁾。この方式では、小型化によって車端部以外の客室中央部にも空力ブレーキ装置が設置可能となり、客室容積や走行安定性へ影響を与えずに編成全体のブレーキ力を上げられる利点もあります。

これまでに開発されてきた空力ブレーキ装置は、台車単位程度に空力ブレーキ装置を配置した「集中配置型」とすれば、本方式は車体の全長に渡って小型の空力ブレーキ装置を配置する「分散配置型」と言えます。小型分散方式の設置イメージを図2に示します。

☞ 試験車の空力ブレーキ

右の写真は、過去に宮崎実験線で試験された空力ブレーキ装置です。その外観と開き方から「エリマキトカゲ」と呼ばれていました。は虫類の「エリマキトカゲ」は、自分の体を襟で大きく見せて相手を威嚇することが目的ですが、空力ブレーキの抵抗板は車体を大きく見せてブレーキ力を得ることが目的です。

その後開発されたJR東日本のE954/955系用の空力ブレーキ装置は、その形状から「ネコミミ」と呼ばれ、話題になりました。



動作時の電源が要らない構造

空力ブレーキの動作時に抵抗板を車外へ張り出す展開機構は、緊急時に使用されることから、高い信頼性と停電状態での動作が求められます。また、複数台の空力ブレーキ装置を車両の屋根上に分散配置する本方式では、極力単純で小型の展開機構が必要です。

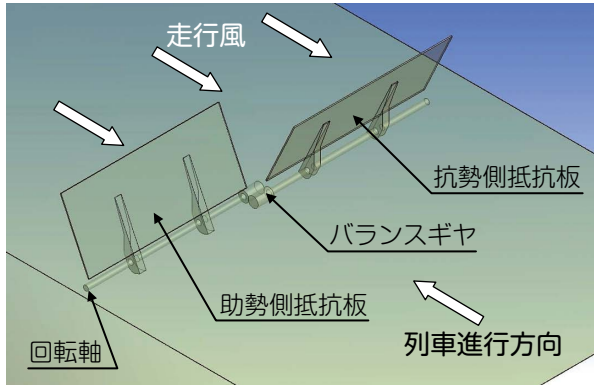


図3 トルクバランス展開機構

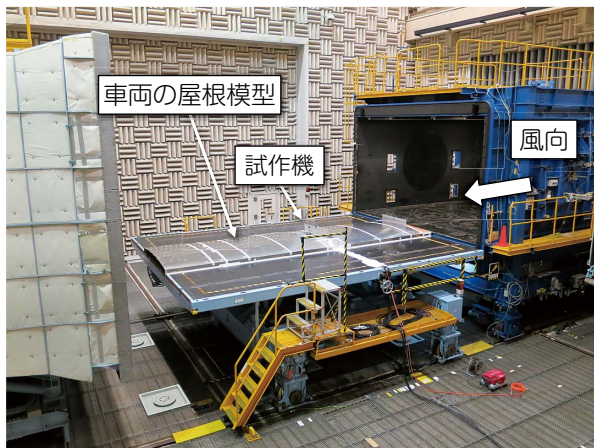
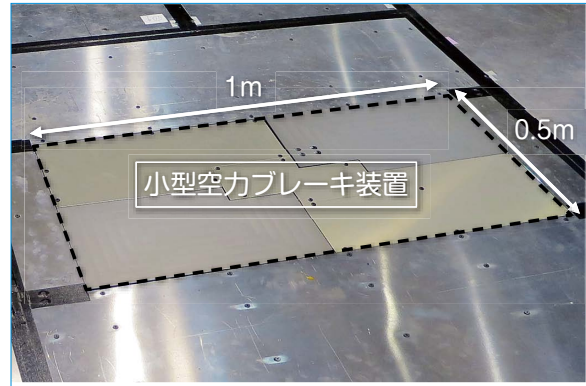
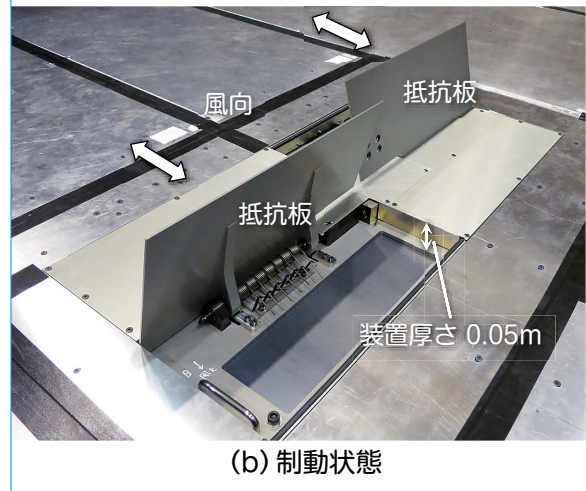


図5 風洞試験の様子



(a) 格納状態



(b) 制動状態

図4 小型空力ブレーキ試作機の外観

このような展開機構として、抵抗板2枚1組を無動力・無制御で走行風により作動させる「トルクバランス展開機構」を開発しました。この概念を図3に示します。

この方式は、走行風と直交する水平な回転軸周りに2枚の抵抗板を開閉し、2枚の抵抗板の回転を図中に示した「バランスギヤ」により反転動作させるものです。

抵抗板は、列車の進行方向と開き方向によって、風圧で開く力と風圧で閉じる力がそれぞれ生じます。この際、2枚の抵抗板にバランス機構を形成することで、走行風によるこのような開閉方向のトルクは打ち消されます。さらに、迎え角と呼ぶ抵抗板と風向角の

差から、風圧で開こうとする力が風圧で閉じようとする力を上回るように設計されています。

このため、2枚の抵抗板は走行風によって無動力・無制御で開動作し、その後、2枚の抵抗板は風圧により最大開度で保持されます。一方、格納操作は停車中に小型モーターまたは小型エアシリンダーにより行い、通常走行時は抵抗板が開かないようにするためのロック機構を設けます。

走行風を利用したこのような展開機構を用いることで、大掛かりな駆動装置を不要とし、装置の軽量化と屋根上に搭載可能な小型・薄型化を図りました。

小型空力ブレーキ試作機の概要

数値解析および模型実験から適切な抵抗板形状と配置を決定し、これに基づいた実機大の概念実証機を試作しました(図4)。

試作機は、前節で示したトルクバランス機構と、通常走行時に抵抗板を格納して機械的にロックする機構を備えています。作動時の設計荷重は、トンネル区間を400km/hで走行中に使用する条件を前提としています。また、格納した状態の通常走行時は、トンネル通過や対向列車とのすれ違いによる繰り返しの圧力荷重を考慮しています。

試作機1台の実測質量は22.3kgです。後述する試験結果を基に、E954系の空力ブレーキと等価なブレーキ力が得ら

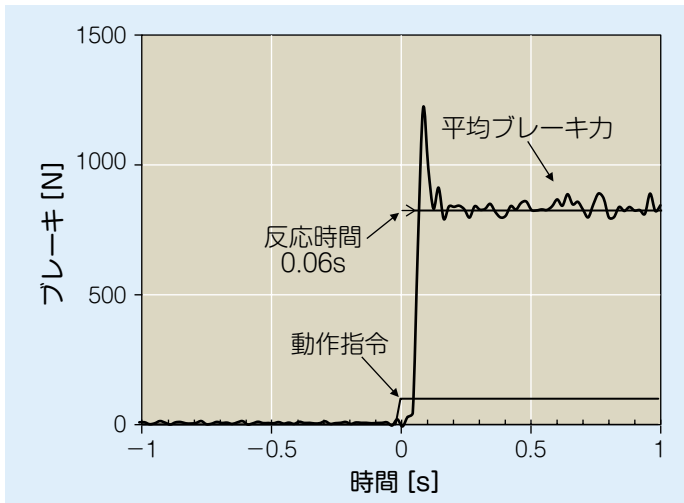


図6 空力ブレーキの応答特性

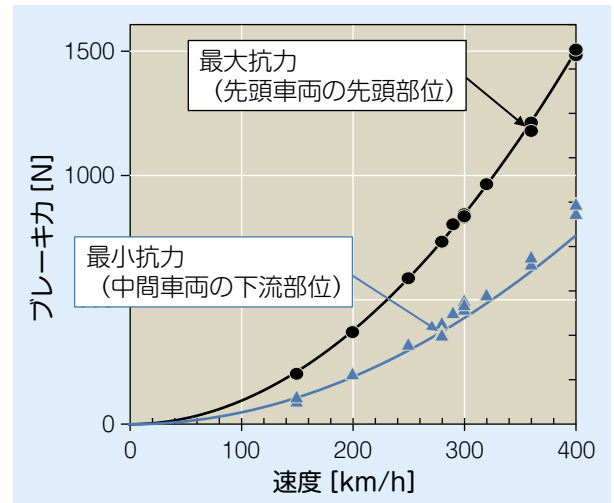


図7 ブレーキ力の速度特性

れる設置台数とした場合、1両あたりの装置質量は150kg程度に軽量化が図られます。

なお、装置表面に凹凸などはなく、可動部周囲の隙間も最小限とすることで、格納時には騒音源とならないことを実機で確認しました。

風洞試験による性能検証

速度400km/hで走行する列車の屋根上流れを、大型風洞試験設備で模擬し、その流れ場中に複数台の空力ブレーキ試作機を設置して、性能検証を行いました(図5)。この際、流れのレイノルズ数と呼ぶ力学的相似性を表す無次元数が、実車とほぼ等価となるように調整しています。

空力ブレーキ動作時の挙動例を図6に示します。動作指令の投入後、速やかに抵抗板が展開し、慣性力による著大値が生じた後、車両のブレーキ力となる抗力が正常に得られています。指令の投入からブレーキ力を生じるまでの空走時間は0.06sと極めて短く、緊急時における非常ブレーキとして良好な特性を示しました。

また、ブレーキ力の速度特性を図7

に示します。抗力は主流速度の2乗で増加し、先頭車両に相当する流れ場での最大ブレーキ力は、400km/hで1台あたり約1,500Nが得られています。

中間車両に相当する流れ場では、境界層と呼ばれる車体表面の流れが遅い領域の影響を受け、1台あたりのブレーキ力は低下します。さらに、複数台の空力ブレーキ装置を列車の長手方向へ配置した場合、前方の装置によって乱された空気の流れが後方の装置へ作用するため、後方の装置で得られるブレーキ力は低くなります(図7に示す青いプロット)。

この時のブレーキ力の低下割合は、装置の配置間隔に対する抵抗板高さの比に依存します。逆に言えば、この比を適切に設定することで、空力ブレーキ装置を連続的に配置する場合でも、必要な抗力を得ることができます。

すなわち、空力ブレーキ装置を複数台設置する場合のブレーキ力は、1台あたりの抗力と前後離隔による直列干渉、および車体1両に搭載可能な装置の数(=車体長/離隔)によって見積もられます。本試作機では、車体1両に10列を配置することで最も大きな

ブレーキ力が得られ、この時のブレーキ力はE954系の集中配置型に対し2.5倍と推定されました。

おわりに

空気抵抗を利用した空力ブレーキは、高速時に効率的で安定した力を発生することから、高速域での負荷が増大しやすい現行のディスクブレーキを補完するものとして、理にかなった方式です。

現在、装置の信頼性向上などに関する研究開発を進めており、将来の高速車両における安全性向上へ役立てることを目指しています。[RRR]

文献

- 1) 吉村正文, 齊藤実俊, 保坂史郎, 角田祐樹: 山梨実験線空力ブレーキ特性, 鉄道総研報告, Vol.13, No.9, pp.25-28, 1999
- 2) 新井浩, 菅野悟, 藤野謙司, 加藤博之, 浅野浩二: 新幹線高速化に向けたブレーキの開発, JR EAST Technical Review, No.31, pp.17-21, 2010
- 3) 高見創, 須山哲宏, 井上達哉: 高速鉄道用小型空気抵抗ブレーキ装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.27, No.12, pp.35-40, 2013