

高速新幹線用の小型分散空気抵抗ブレーキ

車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室

室長 高見 創

1. はじめに

国内外を問わず、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、重要な研究課題である。特に、国内では地震時の安全対策としても高速域でのブレーキ距離短縮は有効である。しかし、電気ブレーキ（回生ブレーキ）やディスクブレーキで得られるブレーキ力は、装置自体の性能上限に加え、車輪・レール間の物理的な粘着力（車輪とレールの接線力。輪重や速度、車輪・レールの表面状態で変化する）に依存している。したがって、高速新幹線において現行以上のブレーキ力を得るためには、車輪・レールの粘着力以外を組み合わせることが有効となる。

その手段として、レールへ力を直接作用させるレールブレーキ方式や、空気抵抗を利用した空力ブレーキ方式¹⁾などが検討されている。レールブレーキについては、海外の高速鉄道で渦電流方式が既に実用化されているが、台車重量の大幅な増加に加え、軌道側への影響（レール温度上昇、レール締結力、構造物耐力）や動作時の電源確保、非常時の制御の信頼性などに解決すべき課題が残っている。

これに対し、高速走行時の空気抵抗を利用した空力ブレーキ方式は、比較的軽量で単純な構成が可能であり、動作時の電源や制御は基本的に不要で信頼性に優れる特徴がある。また、空気抵抗は速度の2乗に比例して物理的に大きくなることから、現行ブレーキの高速域を補完する目的にかなった方式である。このような空力ブレーキは航空機で広く使われているほか、500km/hでの営業運転を目指した超電導リニア試験車両や、360km/h 運転を目指した JR 東日本の E954 系新幹線試験電車²⁾に搭載された例がある。

本発表では、従来よりも装置の小型化を図って客室容積への影響をなくしながら、より大きなブレーキ力が得られる新たな鉄道用空力ブレーキ装置の概要について述べ、大型風洞による実機相当の試作機を用いた性能検証結果について示す。

2. 小型分散方式の空力ブレーキ

空力ブレーキは、一時的に車両から抵抗板を車外へ突出することで、列車の空気抵抗を増加させて減速作用を得る。空気抵抗は抵抗板の断面積に比例することから、ブレーキ力を増やすためには、抵抗板を大きくすることが簡便である。しかし、新幹線では車両限界や架線および走行安定性への影響を考慮すると、抵抗板1枚あたりの断面積拡大には限界がある。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、特にモーメントが大きくなりやすい高さ方向の拡大は望ましくない。

このため、抵抗板の高さ寸法を逆に縮小し、小型化にともなうブレーキ力の低下を抵抗板の枚数増加で対応した新たな方式を提案する。この方式では、小型化によって車端部以外の中央部にも空力ブレーキ装置が設置可能となり、走行安定性に影響を与えずに編成合計のブレーキ力を上げられる利点がある。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」であるとすれば、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」である。分散配置型空力ブレーキ装置の設置イメージを図1に示す。この図は、高さ 200 mm 程度のブレーキ板を 1 車両の屋根上に 5 列配置した場合である。

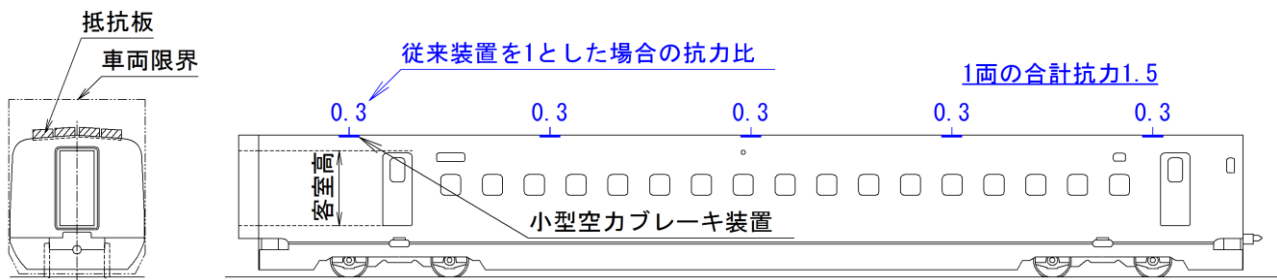


図1 小型分散方式の空力ブレーキ配置例

ここで、装置の小型化には抵抗板だけではなく、抵抗板の展開機構が課題となる。この展開機構は、通常走行中に抵抗板を車両内へ格納して車体表面を平滑な状態に保ち、空力ブレーキ装置が抵抗源や騒音源とならないようにする一方、ブレーキ時は抵抗板を速やかに車外へ出して空気抗力を発生させる機能を有する。このため、展開機構は小型・軽量であることに加え、非常ブレーキとしての高い信頼性と外部電源が断たれた状態での動作が求められる。

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可能な「トルクバランス展開機構」を考案した。この概念を図2に示す。この駆動方式は、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ある。

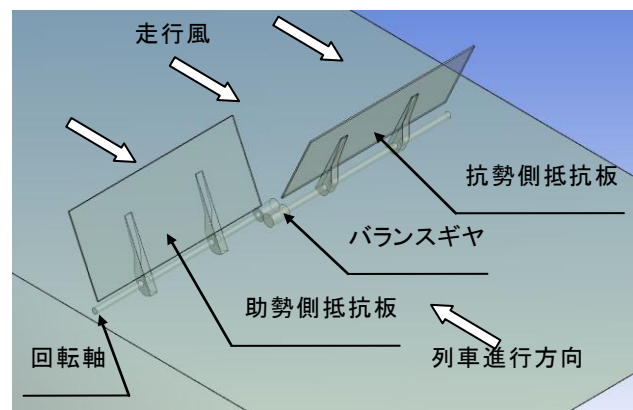


図2 トルクバランス展開方式

抵抗板をバネなどのパッシブ機構によりわずかに開くと（開度約 5°）、列車の進行方向と開き方向によって助勢力（風圧で開く力）と抗勢力（風圧で閉じる力）が生じる。この

際、2 枚の抵抗板にバランス機構を形成することで、走行風による開閉方向のトルクは打ち消される。さらに、抵抗板迎え角の差から、助勢側は抗力係数が大きく抗力値が高くなるのに対し、抗勢側は抗力係数が小さく抗力値は低くなる。すなわち、2 枚の抵抗板に掛かる開閉トルクをバランス機構で差し引きすると、走行方向に依らず開方向の力が 2 枚の抵抗板へ作用する。

このため、いずれの走行方向に対しても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る。なお、格納操作は停車中に小型モータまたは小型エアシリンダにより行い、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有する。

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、装置の軽量化と車体の屋根上に搭載可能な小型・薄型化を図った。

3. 空カブレーキ試作機の性能検証

3. 1 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た。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（格納時）に抵抗板を機械的にロックする機構を備えた。試作機の外観を図3に示す。

作動時の設計荷重（最大抗力）は、明かり区間 400km/h 走行時の抗力推定値にトンネル係数 1.5 を乗じた 2500N/台とした。また、通常走行時（格納時）の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についても考慮した。

試作機 1 台の実測質量は 22.3kg である。後述する試験結果を基に従来装置と等価なブレーキ力を設定した場合（2 台×3 列配置）、1 両あたりの装置質量は 134kg となり、従来装置から軽量化が図られる。なお、装置表面に段差や不陸はなく（ボルト頭を除く）、可動部周囲の隙間も 2mm 以下とすることで、格納時に騒音源となることを防止した。

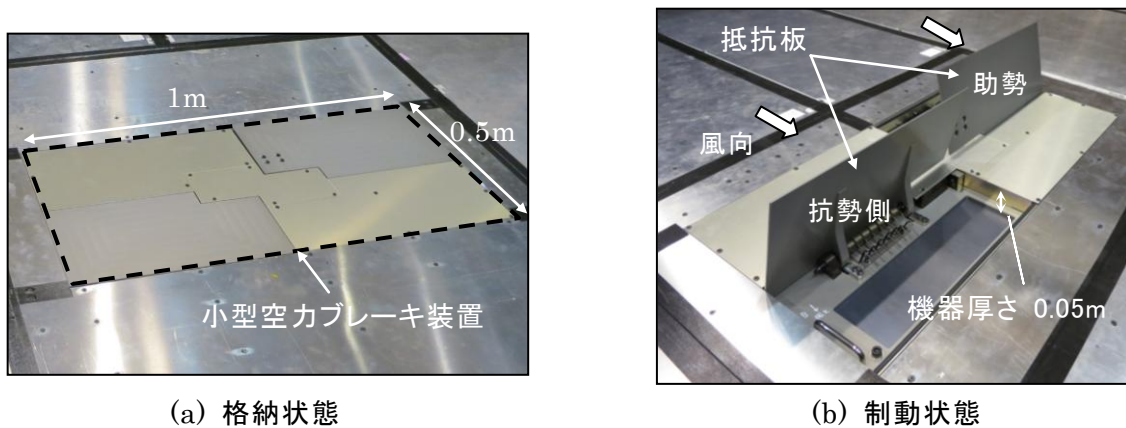


図3 試作機の外観

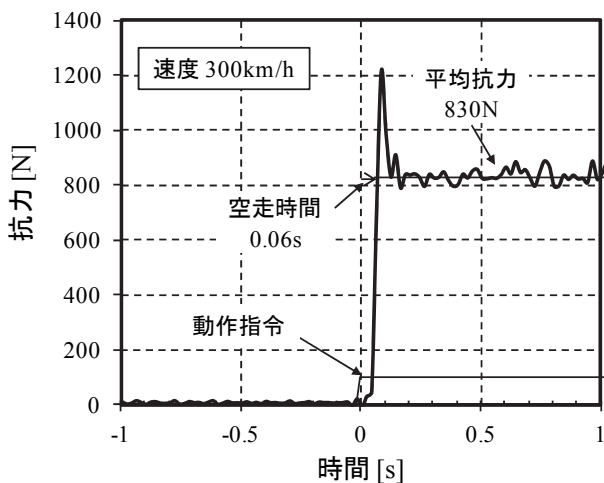
3. 2 風洞試験によるブレーキ力特性

実車両の屋根上流れを模擬した主流速度 400km/h の壁面乱流境界層を大型風洞で生成し、その流れ場中に空カブレーキ試作機 3 台を現車と同様に配置して、性能検証を行った。この際、壁面乱流境界層の排除厚さを基にしたレイノルズ数が、実車体表面とほぼ等価となるように調整した。

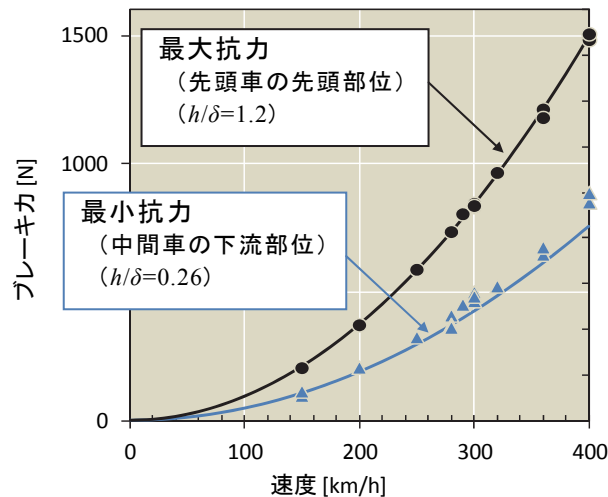
空カブレーキ動作時の挙動例を図4(a)に示す。開指令の投入後、速やかに空カブレーキが動作し、慣性力による著大値が生じた後、抗力（ブレーキ力）が正常に発生している。指令の投入からブレーキ力を生じるまで（平均ブレーキ力に達する最初の時刻まで）の空走時間は 0.06s と極めて短く、高速走行時の非常ブレーキとして良好な特性を示した。

流れ方向へ空カブレーキを複数台配置した時の 1 台あたりの発生ブレーキ力を図4(b)に示す。抗力は主流速度の 2 乗で増加し、先頭車 1 位の最大ブレーキ力は 300km/h で 841N, 400km/h で 1, 494N が実測で得られる。中間車では境界層厚さ δ の発達程度によって 1 台あたりの抗力係数は変化を示す。また、2 位以降は上流部位からの直列干渉により得られる抗力は低くなる。これは、抵抗板の前面に衝突した流れが下流に向けて剥離せん断層を形成し、板の下流側に板の高さ h と距離 r に依存した減速領域を生じるためである。

すなわち、空カブレーキ装置を複数台設置する場合のブレーキ力は、1 台あたりの抗力係数と



(a) 応答速度



(b) 速度特性

図4 空カブレーキの動作特性

前後離隔による直列干渉係数，および1車体に設置可能な抵抗板の数 (=車体長/離隔) によって見積られる。本試験では $r/h=10$ の装置離隔で1車体に10列を配置する際に最も大きなブレーキ力が得られると推定され，このときのブレーキ力を基にした減速度の例を図5に示す。

4. まとめ

本発表では，空気抵抗を利用した鉄道用の空カブレーキ装置について，小型化とブレーキ力向上が可能な小型分散方式の概要と，試作機を用いた性能検証結果について述べた。

本方式の特長をまとめると以下の通りである。

- (1) 空カブレーキ装置の小型・薄型化により客室容積へ影響せずに設置可能
- (2) 抵抗板からの放出渦が小さく，走行安定性や地上設備へ影響しない
- (3) 無動力・無制御によるフェイルセーフ動作
- (4) 動作時の空走時間が短い (実績 0.06 秒)

現在，装置の信頼性向上と合わせて，車両構体への適切な取り付け構造の検討を進めており，将来の高速車両に搭載を目指している。

文献

- 1) Yoshimura, M. et al, *QR of RTRI*, 41-2, pp. 74-78, 2000.
- 2) 新井浩, 他4名, *JR EAST Technical Review*, 31, pp. 17-21, 2010

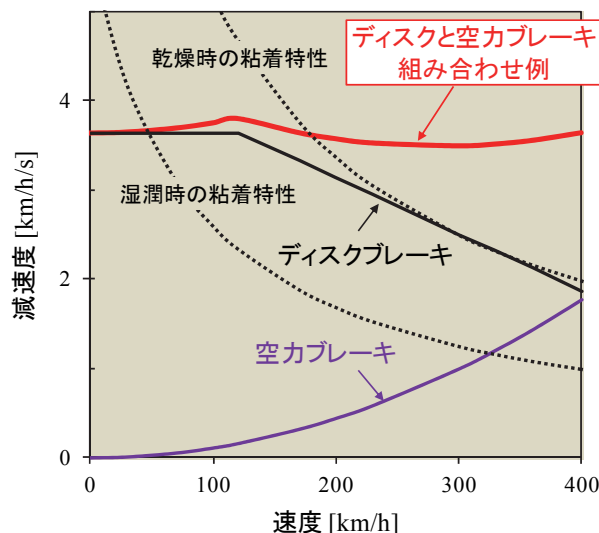


図5 ディスク・空カブレーキの組み合わせ