

高速鉄道用小型空気抵抗ブレーキ装置の開発

高見 創* 須山 哲宏** 井上 達哉***

Development of Small-sized Aerodynamic Brake for High-speed Railway

Hajime TAKAMI Norihiro SUYAMA Tatsuya INOUE

There is a strong demand for improving brake system performance of Shinkansen to shorten the stopping distance at the time of an emergency such as a huge earthquake. In this study, we discussed an aerodynamic brake system using small-sized drag panels. From the computational fluid dynamics and wind tunnel experiments, the suitable shape of the drag panel, arrangement and an opening-and-closing mechanism of the panel were developed. In addition, a full-scale prototype aerodynamic brake device was designed and manufactured. Its aerodynamic characteristics were examined on a large wind tunnel with a high Reynolds number. It was proven that the target braking force was obtained with the small-sized aerodynamic brake placed into a modeled turbulent boundary layer around the train at a running speed of 300 km/h.

キーワード：高速鉄道，非常ブレーキ，空力ブレーキ，空気抵抗，流体力学

1. はじめに

新幹線の安全性向上が進む中で、地震等の異常時を考慮して可能な限り緊急時の停止距離を短縮するブレーキシステムが望まれている。現行の新幹線ブレーキシステムは、車輪駆動用のモータをブレーキとして利用する電気ブレーキと、機械的な車輪ディスクブレーキから構成される。これらは、いずれも列車の運動エネルギーを車輪の回転運動を介して吸収し列車を減速させるため、得られるブレーキ力は車輪とレールが接触している点での接線力と等しくなる。この接線力には輪重や車輪・レールの表面状態による粘着力の限界があり、粘着力を超えるブレーキ力を作用させた場合、車輪の周速度のみが減速して滑走状態となり、列車自体の減速度は十分に得られなくなる。また、粘着力は高速になるほど低下する特性を有し、雨天時等はさらに不安定な値を示す¹⁾。

すなわち、電気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に依存している。したがって、将来的な新幹線の速度向上に際しては、粘着力の制約によるブレーキ力の制限を解決することが必要となる。

一方、このような車輪・レール間の粘着力に依存した「粘着ブレーキ」のほかに、レールへ力を直接作用させるレールブレーキ方式²⁾や、走行時の空気抵抗を利用

した空力ブレーキ方式³⁾などの「非粘着ブレーキ」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、非常ブレーキとして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、走行風による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が高い。また、空気抗力は流速の2乗に比例して物理的に大きくなることから、粘着ブレーキの高速域を補完する目的になった方式である。空力ブレーキの目標減速度をディスクブレーキに加えた減速度の一例を図1に示す。

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⁴⁾に搭載された例がある。

本報では、従来よりも装置の省スペース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⁵⁾の概要について述べ、実機相当の試作機を用いた大型風洞試験による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

2.1 従来型空力ブレーキの課題

これまでに開発された鉄道用の空力ブレーキ装置（E954系試験搭載品。以降、従来装置と呼ぶ）を営業車

* 車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室
 ** 車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室（現 東海旅客鉄道株式会社）
 *** 環境工学研究部 車両空力特性研究室（現 西日本旅客鉄道株式会社）

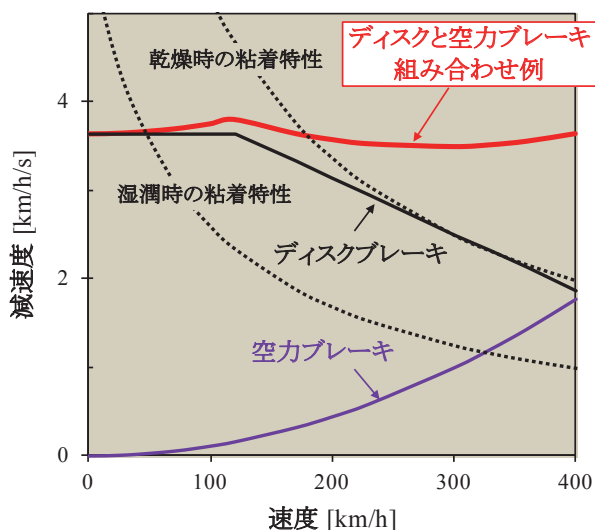


図1 ディスク・空カブレーキの組み合わせ例

両へ適用する場合、主に以下の2点が課題となる。

- (1) 空カブレーキ装置が客室容積へ及ぼす影響
- (2) 営業速度域で得られる減速度

ここで、空カブレーキによって得られる減速度 β [m/s²] は、一般の空気抵抗式を拡張した次式で表せる。

$$\beta = \left[\frac{1}{2} \rho_0 U_0^2 A C_D \sum_{i=1}^n C_{d1}(i) \cdot C_{d2} \right] / M \quad (1)$$

ただし、編成における抵抗板の総数を n とし、 ρ_0 : 空気密度 [kg/m³], U_0 : 対気速度 [m/s] (走行列車と大気との相対速度), A : 抵抗板の正面投影断面積 [m²], C_D : 車両周りの流れ場に設置された抵抗板の抗力係数, $C_{d1}(i)$: 先頭から i 番目の抵抗板における直列干渉係数 (前方の抵抗板による抗力の減少割合), C_{d2} : トンネル係数 (トンネル区間において対気速度が増加することによる抗力の増加割合), M : 編成質量 [kg] である。

すなわち、走行区間 (トンネル, 明かり (トンネル以外の区間を指し周囲の空間が閉塞していない状態)) と列車速度・編成質量などの条件が決められた条件で、課題 (2) の減速度をより向上するためには、抵抗板の断面積や総数を増やすか、1箇所あたりの抗力係数を増加させる必要がある。

しかし、抵抗板の拡大は課題 (1) の装置容積縮小と相反する上、車両限界寸法の制約や、大きな抵抗板から

のはく離渦による渦励振が走行安定性や架線など地上設備へ与える影響が問題となる。また、装置の格納部を確保するため、設置場所は客室部を除く車端部に制約されていたため、複数台の配置は実質的に困難であった。

2.2 開発した空カブレーキの概略

前記課題を解決するため研究を進めた「小型分散方式」は、抵抗板1枚あたりの断面積を従来よりも逆に縮小して装置容積の小型化や走行安定性の向上を図ったものである。その一方で、抵抗板の形状を変更して、1部位あたりの抗力係数の増加を図るとともに、小型・薄型化による設置位置の自由度から直列干渉が最適な値となるように列車の長手方向へ小型空カブレーキを分散して配置するものである。この概念を図2に示す。

ここで、装置の格納容積を縮小するためには、抵抗板の小型化に加え、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、空カ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、ブレーキ作動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、非常ブレーキ装置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3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。

抵抗板をバネ等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。

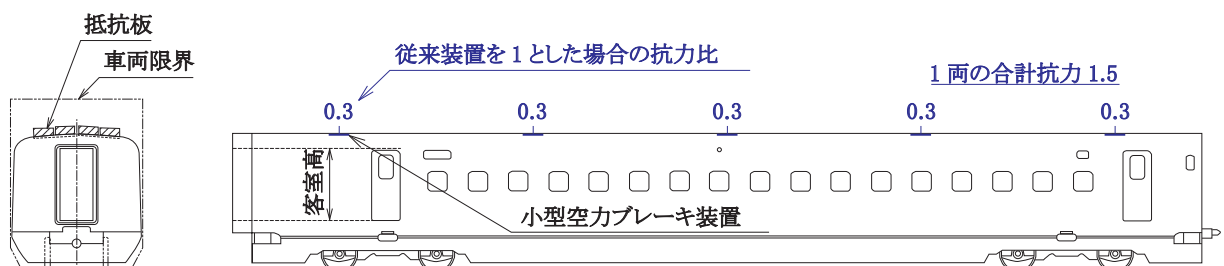


図2 小型分散方式の空カブレーキ配置例

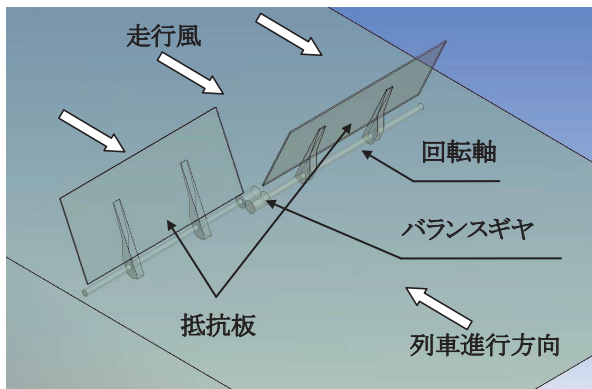


図3 トルクバランス展開方式

このため、走行風がある条件では抵抗板が無動力・無制御で開動作し、その後、2枚の抵抗板は最大開度で保持される。なお、格納操作は内蔵する小型モータにより行い、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、駆動装置を不要とし、装置の大幅な軽量化と車体の屋根上に搭載可能な薄型化を図った。

3. 空力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方式による展開機構に加え、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。試作機的主要仕様を表1に示し、外観写真を図4に示す。

作動時の設計荷重（最大抗力）には、明かり区間400km/h走行時の抗力推定値にトンネル係数 $C_{d2} = 1.5$

を乗じ、さらに過負荷分の余裕を見込んだ。この際、抵抗板の各部に塑性変形等が生じない前提で、抵抗板には一定の弾性変形を許容し、軽量化を図った。また、通常走行時のトンネル走行や対向列車とのすれ違いによって、格納時の抵抗板は繰り返しの圧力荷重を受ける。この際、負圧方向の力は抵抗板を不用意に開く方向へ作用するため、これを保持するメカニカルロック機構を構成した。

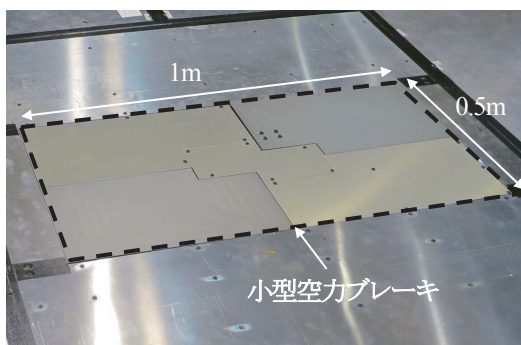
動作時間は高速走行時の空走距離を左右するため、極力短くする必要がある。本方式は外部動力や制御を必要としないため、実績で0.1s以下である。一方、格納動作は列車が非常停止した後に時間をおいて格納できればよく、動作時間の目安として5s程度とした。

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。

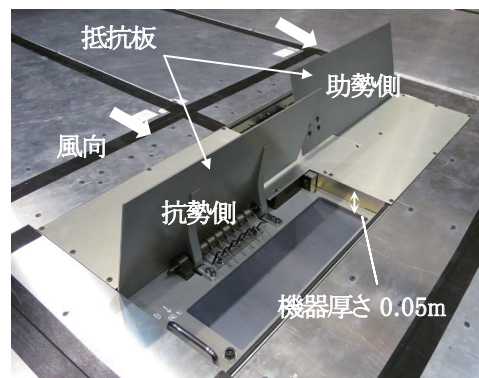
なお、装置表面に段差や不陸はなく（ボルト頭を除く）、可動部周囲の隙間も2mm以下とすることで、格納時に騒音源となることを防止した。

表1 試作機の諸元

抵抗板	1枚あたりの幅	w	0.500 m
	高さ	h	0.210 m
装置外形 (格納時)	長さ	0.491 m	
	幅	1.050 m	
	厚さ	0.050 m	
1台当たりの最大ブレーキ力			2,500 N
動作時間			0.1 sec
質量			22.3 kg



(a) 格納状態



(b) 制動状態

図4 試作機の外観

特集：車両技術

3.2 風洞試験方法

実車両の屋根上流れを模擬した高レイノルズ数の壁面乱流境界層⁶⁾を大型風洞で生成し、その流れ場中に空力ブレーキ試作機3台を直列に設置して、性能検証を行った。風洞設備は、鉄道総研所有の回流型大型低騒音風洞を使用した。

風洞ノズルは流路断面が大きく特性試験に適したタイプ（幅5m×高さ3m、～300km/h）と、流路断面が小さく高速流に適したタイプ（幅3m×高さ2.5m、～400km/h）の2形式を流速範囲によって使い分け、各ノズルの最高風速まで試験を実施した。実車体表面と等価な壁面乱流境界層は、風洞吹き出し口の底面に設置したノコギリ歯状のバリアと、風洞吹き出し口から供試体までの助走距離（最大10.5m）により生成し、測定部における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しくなるように調整した。

抵抗板に働く抗力は、空力ブレーキ装置をリニアガイドにより前後へ浮動させて設置し、その反力をロードセルにより計測することで行った。合わせて、回転軸のトルクおよび空力ブレーキ装置前後の壁面静圧分布を計測した。

3.3 動作特性

空力ブレーキ動作時の挙動例を図5(a)に示す。ただし、 h/δ は抵抗板高さ h と境界層厚さ δ の比を表し、 $h/\delta=1.2$ は先頭部位の条件に相当する。

開指令の投入後、速やかに空力ブレーキが動作し、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。なお、 h/δ が異なる条件に

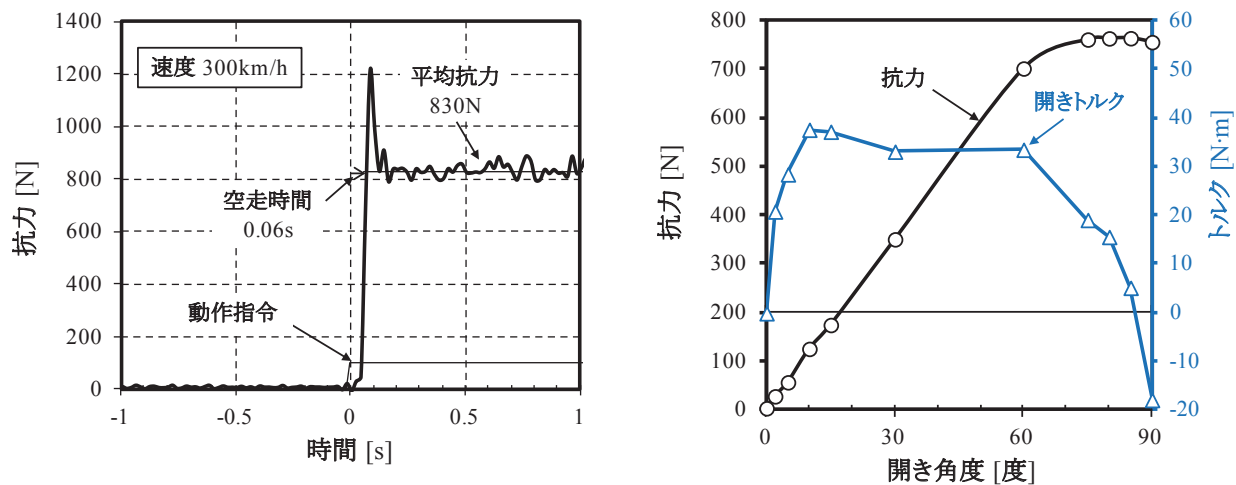
ついても、空走時間はいずれも0.1s以下であった。

ここで、反転動作する2枚の抵抗板が走行風により開き、その後最大開度で保持されるためには、助勢側の抵抗板に働く抗力が抗勢側の抵抗板に働く抗力より大きくなる必要がある。すなわち、2枚の抵抗板に働く抗力を差し引きするバランスギヤには、常に開側の軸トルクが残っている必要がある。図5(b)は抵抗板の開き角度による特性を調べた結果である。この図から、走行風によるバランスギヤの軸トルクは抵抗板の開き角度で20N・m（正の符号が抵抗板の開き方向）が得られており、自重による閉じ方向のモーメントを上回って、2枚の抵抗板は開き動作が可能となる。また、60°以上の開度で開きトルクは徐々に減少するが、85°までは開き方向のトルクが残り、90°のみ閉じ側に反転する。この際、2枚の抵抗板による合計抗力は、各開度におけるそれぞれの抗力係数と正面投影面積により変化し、最大抗力は垂直開度のときではなく開度75°～85°において得られる。

したがって、抵抗板の最大開度を垂直よりも浅い75°～85°に設定することで、開きトルクの安定化とブレーキ力確保の両立が可能となる（次節の抗力特性は最大開度を75°に設定した場合）。

3.4 抗力特性

流れ方向へ空力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6(a)に示す。抗力は主流速度の2乗で増加し、先頭車条件時の1位最大ブレーキ力は300km/hで841N、400km/hで1,494Nが実測で得られている。また、2位以降の装置は上流部位からの直列干渉により得られる抗力が低くなり、境界層が厚い中間車条件では、壁面近傍の減速域によって得られる抗力はさらに低くなることを示される。なお、抵抗板の前後



(a) 応答速度 ($h/\delta=1.2$)

(b) 開き角度による特性 ($h/\delta=0.26$)

図5 空力ブレーキの動作特性

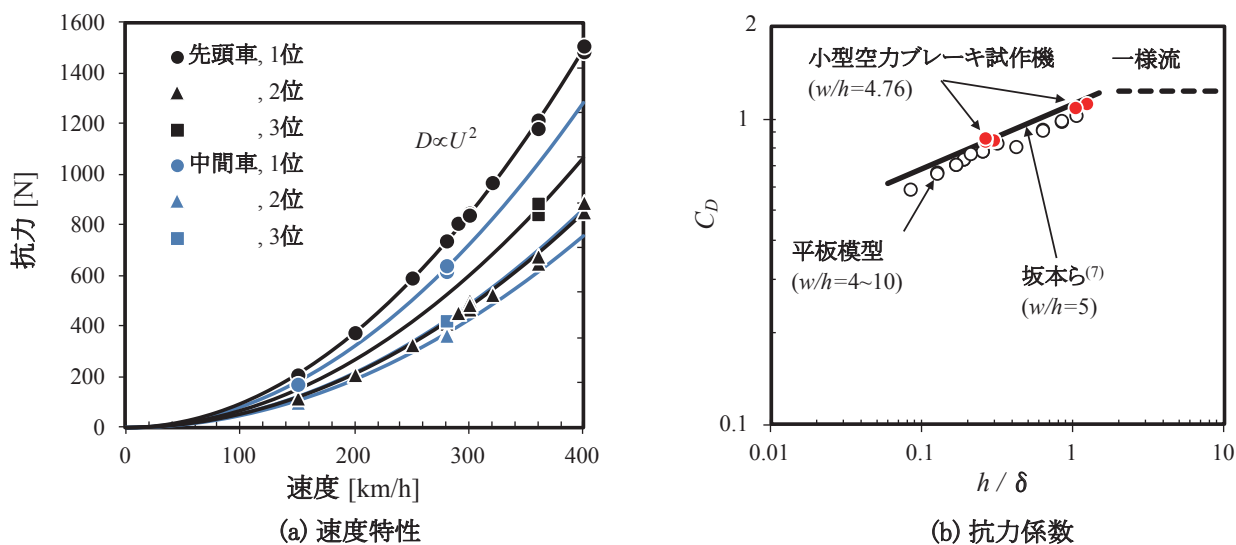


図6 空カブレーキの抗力特性

離隔 r は実用上最も狭い $r/h = 10$ に設定した。

図6 (b) は、抵抗板の高さを流入部の境界層厚さで無次元化し、抗力係数に対する傾向を調べた結果である。ただし、白丸プロットは垂直平板模型を用いて著者が別途調べた実験値であり、実線は摩擦速度 u_τ と抵抗板の縦横比 w/h に基づき乱流境界層内に埋没する垂直平板の抗力係数を算出する坂本ら⁷⁾ による実験式である。この図から、抗力係数は板の高さ h と境界層厚さ δ の比に対して指数関数で表され、板の高さが境界層厚さに対して極端に低い場合を除けば、板を高くしても抗力係数の増加幅は大きなものではない。したがって、抵抗板の高さは実車の境界層流れに対して、概ね $0.2 < h/\delta < 1.0$ の範囲に設定することが装置の小型化には適している。

次に、列車の長手方向へ空カブレーキ装置を連続配置する場合の流れ場の状況を、数値解析により求めた結果を図7に示す。この図から、抵抗板の前面に衝突した流れは、基礎的な流れ場と同様に、板前面と壁面との間に馬蹄形渦を形成して板の側方から下流へ流れると同時に、板の上方に跳ね除けられて加速し、板端部から下流に向けて剥離せん断層を形成する⁸⁾。板の縦横比がおおよそ $1 \leq w/h \leq 5$ の範囲では、板の上端と側端からの剥離せん断層は一体となって板の後方にアーチ渦を形成し、より下流における渦の崩壊・拡散とともに壁面に再付着して、2枚目以降の抵抗板へ順次作用する。

再付着に要する流下距離 x_0 は、この流れ場でおおよそ $x_0/h \approx 6$ の関係があり、それ以降に設置した下流の抵抗板抗力は抵抗板の前後間隔 r/h に依存する。この特性は、風洞試験の壁面静圧および抗力特性からも認められ、抗力の直列干渉係数には次式の特性がある。

$$C_{d1} = 1 - e^{[1-a(r/h)]} \quad (a \text{ は定数}) \quad (2)$$

すなわち、抵抗板の前後間隔が小さ過ぎる場合 ($r/h \leq 6$) は流れが壁面上に再付着せず $C_{d1} = 0$ となる一方、ある一定以上の間隔を取れば $C_{d1} \approx 1$ (上流部位の影響を受けない) へ漸近することを表す。

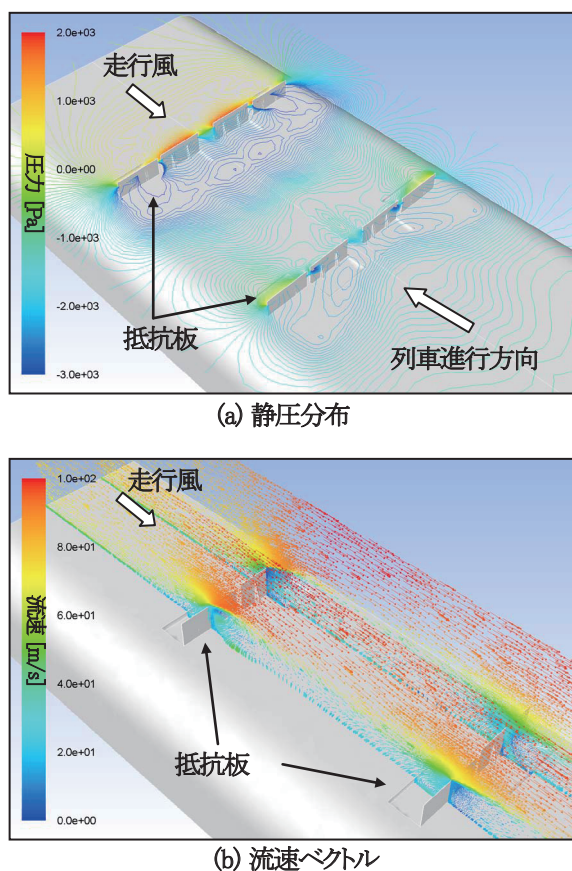


図7 空カブレーキ装置周りの流れ場

表2 空力ブレーキの減速度推定

* (300km/h 走行時)

検討 No.	区間	配置間隔 (m)	1両あたりの設置数		両数	編成質量 (ton)	ブレーキ力 (kN)	空力ブレーキによる減速度* (km/h/s)
			幅方向	長手方向				
①	明かりトンネル	2.5	2	10	16	650	186	1.03
							279	1.54
②	明かりトンネル	5.0	2	5	16	650	115	0.64
							173	0.96

3.5 空力ブレーキによる減速度の評価

1編成に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台あたりの抗力係数 C_D と前後離隔による抗力の直列干渉係数 C_{dl} 、および1車体に設置可能な抵抗板の数 (=車体長/離隔) によって見積もられる。このため、装置の設置数には1編成で得られる抗力を最大とする最適値が存在する。

本実験から推定した300km/h走行時における1編成分の空力ブレーキ力とその時の減速度を表2に示す。検討①は編成のブレーキ力が最大となる設定であり、1車体の長手方向へ10列を設置することで、明かり区間300km/h走行時の減速度は約1km/h/sが得られると推定される。また、検討②は重量やコストを考慮して空力ブレーキの設置数を検討①から半減した例であるが、このときでも従来装置(文献⁴⁾の図4)の1.5倍に相当するブレーキ力が得られると推定される。

4. 結論

本研究では、空気抵抗を利用した鉄道用の空力ブレーキ装置について、過去に試験研究されたものよりも装置の小型化と編成全体でのブレーキ力向上が可能な小型分散方式の検討を進めた。検討に基づき、実荷重に対応した試作機を製作し、列車表面の高レイノルズ数乱流境界層を模擬した大型風洞試験により、無動力での制動動作と所要のブレーキ力確保が可能であることを示した。

本方式の特長をまとめると以下の通りである。

- (1) 空力ブレーキ装置の小型・薄型化により客室容積へ影響しない
- (2) 抵抗板からの放出渦が小さく、高ブレーキ力設定においても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)

5. おわりに

現在、空力ブレーキ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、将来の高速車両へ搭載を目指している。

文献

- 1) 大山忠夫：粘着の話－車輪とレール間の粘着力とその有効利用－，レールアンドテック出版，2002
- 2) 坂本泰明，柏木隆行，田中実，長谷川均，笹川卓，藤井信男：リニア誘導モータを用いた発電制動型レールブレーキシステム，電気学会論文誌D，Vol. 129，No. 3，pp. 342-349，2009
- 3) Yoshimura, M., Saito, S., Hosaka, S. and Tsunoda, H., "Characteristics of the aerodynamic brake of the vehicle on the Yamanashi Maglev test line", *Quarterly Report of RTRI*, Vol. 41, No. 2, pp. 74-78, 2000.
- 4) 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*, Vol. 31, pp. 17-21, 2010
- 5) 高見創：小型分散方式による新幹線用空気抵抗ブレーキ装置の開発，日本機械学会論文集B編，Vol. 79，No. 803，pp. 1254-1263，2013
- 6) Takaishi, T. and Ikeda, M., "Experimental method in wind tunnel tests to simulate the turbulent flow on the roof of high-speed trains", *Quarterly Report of RTRI*, Vol. 53, No. 3, pp. 167-172, 2012.
- 7) 坂本弘志，森谷優，谷口清一，有江幹男：乱流境界層内に埋没する有限幅平板周辺の流れ(第1報，平板に作用する圧力および抗力)，日本機械学会論文集B編，Vol. 48，No. 433，pp. 1674-1682，1982
- 8) 岡本史紀，小林正人，門野司，加賀谷春幸，島根淳：平面壁上の有限幅直立平板周りの流れ，日本機械学会論文集B編，Vol. 71，No. 711，pp. 2663-2670，2005