

新幹線速度向上に向けた空力ブレーキ装置の開発

高見 創*

Development of Aerodynamic Brake for High-speed Railway

Hajime TAKAMI

To shorten the stopping distance by emergency braking of high-speed train, the author developed a small-size and light-weight aerodynamic braking device. The full-scale prototype is designed and manufactured. To examine its aerodynamic characteristics, several prototypes are tested on a wind tunnel facility at a maximum flow speed of 400 km/h. It has been proven that the response time of motion takes only 0.39 s, and the prototype could produce the aerodynamic drag of 2.3 kN per one unit. In addition, the performance is calculated using computational fluid dynamics (CFD). The result of the CFD analysis around a train roof with a large number of devices, it is found that the staggered arrangement could increase the total drag coefficients by 10 percent compared to the standard parallel arrangement.

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

次世代の新幹線は、低騒音や省エネルギー性など環境性能の向上と同時に、高速化も検討されている¹⁾。高速化の前提となる安全性能には、緊急時の制動性能を含む。これは主に地震時の安全性を高める目的で、現行以上の高速域から現行と同等以下の距離で停止することが一つの性能目標になる。この際には、架線の停電による電力再生ブレーキの失効に加えて、車輪・レール間の粘着状態は必ずしも理想的なものではなく、湿潤や低温・降雪などの低粘着状態、さらには地震動による輪重抜けなどによって、車輪が滑走しやすくなる条件も想定される。

緊急時の制動方法として、通常の減速に用いる電気ブレーキ以外では、車輪の回転を摩擦力で機械的に止めるディスクブレーキの性能向上が進んでいる。しかし、列車の運動エネルギーを熱に変換し吸収するディスクブレーキは、速度向上に伴う吸収熱の増加が大きいことに加え、利用できるブレーキ力の上限は電気ブレーキと同様に、車輪とレールの間に働く粘着力の制約を受ける。

このため、既存のブレーキ装置（電気ブレーキおよびディスクブレーキ）の高速域性能を補完する必要から、走行中の列車に作用する空気抵抗を一時的に増加させて減速力を得る鉄道用の空気抵抗ブレーキ装置（以下、空力ブレーキ）の検討をこれまでに進めてきた²⁾。本稿では、実車搭載を想定して開発した小型軽量な空力ブレー

キ試作機の検証結果、および数値解析（CFD）の結果について報告する。

2. 空力ブレーキの概略

2.1 装置の小型化による分散配置方式

過去に研究開発された鉄道用の空力ブレーキとして、超電導リニアモーターカー用³⁾のほか、新幹線の試験車用⁴⁾などが知られている。走行試験の結果、地上設備や走行安定性に影響を与えず使用可能なことが明らかにされているが、新幹線の営業車へ搭載するためには客室容積を確保するため搭載機器を小型化すること、および減速性能を向上することが課題として挙げられた。

ここで、空力ブレーキによる減速度 β [m/s²] は、一般の空気抵抗式から次式で表せる。

$$\beta = \frac{1}{M} \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 A \sum_{i=1}^n C_d(i) \cdot K_T(i) \quad (1)$$

ただし、編成質量を M [kg] として、 ρ : 空気密度 [kg/m³]、 U : 対気速度 [m/s]（走行列車と大気との相対速度）、 A : 抵抗板の正面投影面積 [m²]、 n : 1 列車の装置台数、 $C_d(i)$: 先頭から i 番目の抵抗板における抗力係数、 $K_T(i)$: トンネル係数（トンネル区間の抗力変化割合）である。

この式から、空力ブレーキによる減速度を向上するためには、抵抗板の投影面積 A 、台数 n 、抗力係数 C_d のいずれかを増やす必要がある。このうち、抵抗板の面積増加は車両が地上構造物に支障しないための限界範囲（車

* 環境工学研究部 車両空力特性研究室

特集：空気力学・騒音

両限界)の制約に加え、装置の小型化に不利となる。また、台数の増加は客室容積とのトレードオフとなる。

このため、装置を車体の屋根上に搭載可能な寸法に薄型・小型化したうえで、列車全体に装置を分散させる図1の方式を考案した。本方式は装置の設置位置に自由度が高く、より多くの台数を客室容積を縮小することなく効率的に配置できる。また、複数台の装置を分散して設置するため、単体装置の機能不全に対して冗長性が高い。さらに、抵抗板の正面投影面積が小さいことから、超電導リニアのように屋根上に他の機器がない場合は車両限界の縮小による地上インフラのコスト減が期待できる。

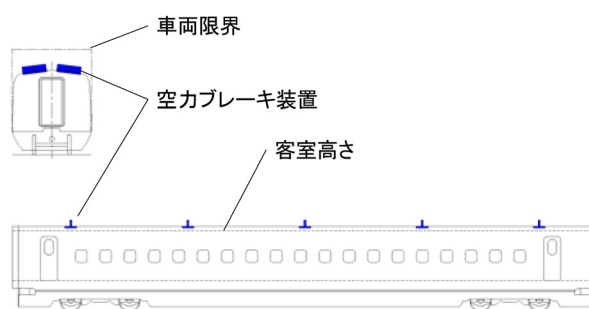


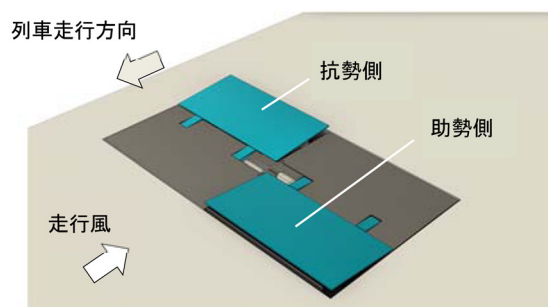
図1 空力ブレーキの分散配置方式

2.2 動作機構

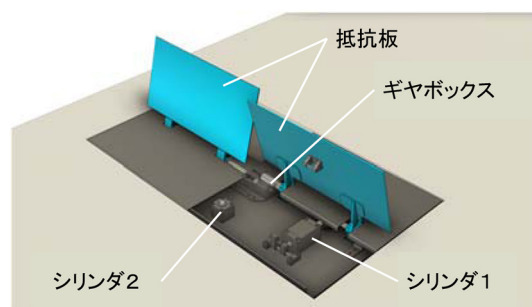
空力ブレーキは、普段の走行時は車体内に格納されており、作動時に車体から車外へ抵抗板を出し、その状態を保持することで列車に働く抗力を増加させ減速作用を得る。列車の停止後は抵抗板を速やかに車体へ格納し、運転再開を行う。常用のブレーキ装置と異なり、通常時は動作することがなく、地震等の非常時にのみ使用される。このことは動作機構各部の摩擦等が少なく有利な反面、稀な地震等の時は普段使わない機構が確実に動作することが求められる。また、普段の走行時はデッドウェイトになることから、小型軽量でメンテナンス性に優れた構造が必要である。

このような動作機構として、抵抗板2枚を一組として作動させる「トルクバランス動作機構」を開発した。この方式は、走行風によって2枚の抵抗板に働く圧力の差を利用して、抵抗板を開くための動作力の大部分を得るものである。また、抵抗板の初動、格納および鎖錠動作は、小型の空圧シリンダを組み合わせることで実現した。構成の概略を図2に示し、以下に動作の概略を述べる。

はじめに鎖錠装置の解除と初動を小型の両ロッドシリンダ(以下、シリンダ1)で行う。これにより、水平方向に回転軸を持つ抵抗板が約4°以上に開く。鎖錠装置とは、トンネル通過時に作用する圧力荷重や走行中の振動などによって、不意に格納状態の抵抗板が開くことを



(a) 初動 (開度 5 度)



(b) 全開 (開度 75 度)

図2 空力ブレーキの動作機構

防ぐ機械的なロック機構である。また、シリンダ1の初動を補助する小型のエアシリンダ(以下、シリンダ2)も備えている。これは、抵抗板の固着や凍結などによって、抵抗板の初動ができなくなることを防ぎ、確実な動作を保証するためである。

微小に開いた2枚の抵抗板は走行風を受けて、空気抵抗による軸周りの回転モーメントを発生させる。このモーメントは、列車の進行方向と抵抗板の開き方向によって、風圧で開こうとする側(助勢側)と閉じようとする側(抗勢側)の両方が作用する。このとき、それぞれの抵抗板はその開度(迎え角)によって抗力係数が異なり、開度が浅いときは助勢側の抗力係数が抗勢側よりも2倍程度大きく、2枚の抵抗板の回転軸をギヤボックスで接続しておけば抵抗板を開く動作力が得られる。抵抗板の開度が増して迎え角が垂直になると、2枚の抵抗板はほぼ釣り合って保持される。ただし、その状態では外乱により抵抗板の開度が不安定となるため、常に助勢側の抗力係数が抗勢側よりも大きくなるように、全開時の開度を75度に設定している。

装置は上面から見て点対称に構成され、列車の走行方向が反転した場合にも制御の切り替えなどは不要で、同じ原理により動作が行われる。また、抵抗板の格納は列車停止後の無負荷の状態で行い、シリンダ1を逆方向に作用させて抵抗板を格納し、同時に機械的な鎖錠を行う。

走行風を利用したこのような動作機構を用いることで、大型の駆動装置が不要となり小型・軽量化を実現した。特に、装置を薄型化したことで、車体屋根上への設置性が向上した。1台当たりの設置容積は従来の新幹線試験車用⁴⁾の約1/25である（ただし、抵抗板面積は1/3）。

2.3 空力ブレーキ試作機の概略

空力ブレーキ試作機の仕様を表1に示し、外観を図3に示す。なお、本機は開発当初から数えて第6次の試作機であり、これまでの検証結果を踏まえて信頼性の向上や低コスト化を図り、実車搭載を想定した仕様で設計したものである。

装置に作用する荷重は、トンネル内を400km/hで走行時の先頭部位に作用する最大抗力と、展開動作時に生じる衝撃力を考慮した。また、格納した状態では、トンネル通過時の圧力荷重および作業者の踏みつけ荷重を考慮した。ここで踏みつけ荷重とは、作業者が検修作業時に装置上面へ乗ることを想定した集中荷重である。

周囲環境の特殊条件として、外気温が低温になる条件を考慮した。一般に、鉄道用を含む産業機器の多くは-20℃仕様であるが、今後新幹線の路線が寒冷地まで伸びることを考慮し、外気温は-30℃に対応した。このため、環境影響を受けやすいエアシリンダについては、産業界で実績のある汎用品をベースに、耐寒・防塵性能を強化した堅牢シリンダを新たに開発した。また、主な軸受および鎖錠装置部は水密構造として、内部に水が浸入して凍結することを防ぐ構造とした。

シリンダの駆動源には鉄道車両で一般に用いられる圧力範囲の圧縮空気を用い、トンネル走行時の気密荷重が掛かった条件や、抵抗板の周囲が着氷した条件においても、抵抗板の初動が可能なシリンダ出力を確保した。

装置の動作・格納は外部から供給ポートを切り替えることで行う。このため、装置内には制御弁や電気品はなく、簡素で信頼性の高い構造となっている。

表1 空力ブレーキ試作機の仕様

抵抗板寸法	幅 500 × 高さ 250 [mm / 枚]
装置外形	幅 1024 × 長さ 566 × 厚さ 65 [mm]
装置質量	36.3 [kg]
設計最大抗力	3.3 [kN] 衝撃荷重 4.0 [kN] (400km/h, トンネル走行, 先頭部)
動作時間	0.5 [s] 以下
シリンダ動作圧力	580 ~ 950 [kPa]
外気温	-30 ~ +40 [°C]



(a) 格納状態



(b) 展開状態

図3 空力ブレーキ試作機の外観

3. 風洞試験による検証

3.1 試験方法

大型風洞に2台の試作機を設置して、最大風速400km/h (111m/s, マッハ数 0.32) の動作試験を行った。設置状況を図4に示す。

2台の装置の内、上流側の装置は風洞ノズル先端付近に設置し、風洞の主流が直接作用して装置に最大荷重が掛かる条件とした。下流側の装置は上流側の抵抗板からはく離れた流れが作用するため、一般に抗力の減少と変動流体力の増加が生じる。このような相互干渉による影響を調べるため、下流側の装置は移動可能とし、装置間隔を変更した試験を行った。装置はリニアスライダ上に固定して前後へ可動する構成とし、この際の前後荷重をロードセルで計測した。

3.2 動作特性

装置動作時の前後荷重を図5に示す。動作指令となる空圧回路の電磁弁切り替え後、鎖錠装置の解除に約0.29s

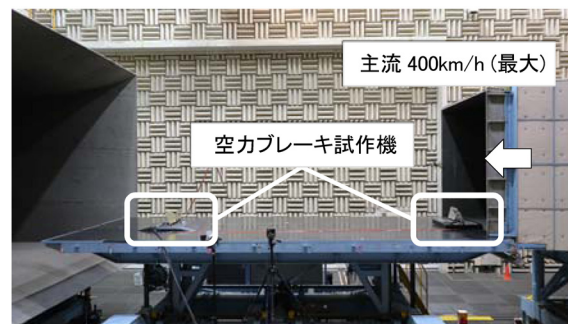


図4 風洞試験の状況

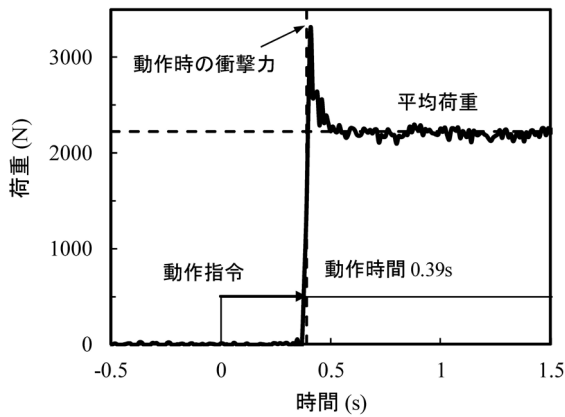


図5 動作時の挙動 (400 km/h)

(鎖錠装置部の計測により別途確認)，その後の抵抗板の展開動作に約 0.1s，合計 0.39s で俊敏に動作している。抵抗板の展開にともない最大開度で衝撃力を生じるが，その大きさは設計値内に収まっており問題ない。

従来のような大型の抵抗板を直接駆動する方式の場合，動作の指令から完了までには数秒程度が必要であり，本開発方式により動作時間の短縮が可能である。

3.3 抗力特性

各速度域における平均抗力を図6に示す。この図から，抗力は式(1)にしたがい主流速度の2乗に比例して増加し，最大は400km/h・上流装置の2.3kNである。また，2台の装置を主流方向へ並べると下流装置は流れの干渉によって抗力が低下し，その低下度合いは2台の装置間隔 r に応じて変化する。特に，2台の装置が近接して間隔が1mと狭い場合，下流の装置は上流の抵抗板からはく離れた流れの逆流域に入り，得られる抗力は負となる。したがって，複数台の装置を配置する場合は，各装置が効率よく抗力を得られる適正な配置の存在が分かる。

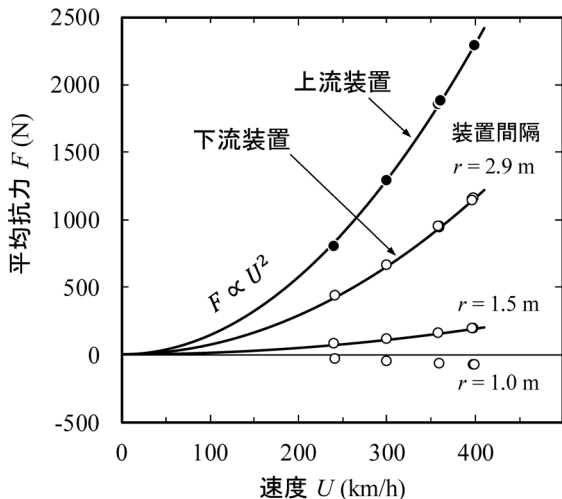


図6 抗力特性

3.4 振動特性

空力ブレーキ動作中における装置取り付け点の上下加速度 PSD を図7に示す。振動は速度の上昇にしたがって大きくなり，特に下流装置では上流装置の影響を受けて流力振動が大きくなる。ただし，振動の大きさは試験規格 JIS E 4031 における区分1 等級 B (車体取付け品) の振動程度に収まっている。加速度のピーク周波数は40Hz 前後にあり，この周波数は装置の振動解析で求めた抵抗板の共振周波数と概ね一致している。

試作機の耐振性を検証するため，動電式振動試験装置による振動試験を実施した(図8)。車体側を模擬した治具を加振台に固定し，その上に試作機を設置した。加振条件は JIS E 4031 の1種とし，上限周波数 45Hz の耐久試験，および 80Hz までの共振確認試験を行った。

試験の結果，抵抗板の格納状態では振動耐久条件の45Hz 以下に共振周波数はなく，展開状態の抵抗板にのみ風洞試験と同じ 43Hz の共振が生じた。また，上下・前後・左右方向の振動耐久試験を行い，装置の機械的健全性や作動状況が変化しないことを確認した。

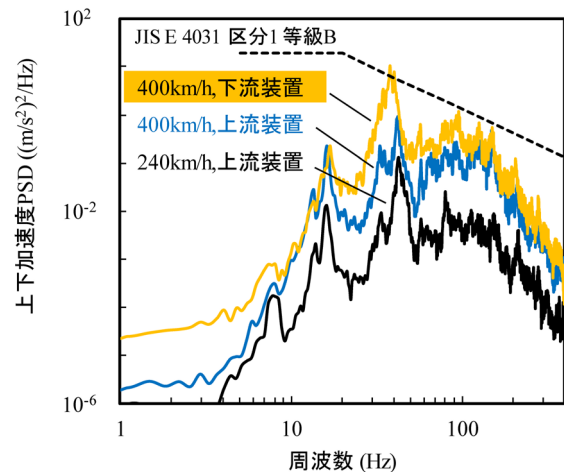


図7 風洞試験における動作時の振動



図8 振動試験の状況 (動作状態)

4. 抵抗板への異物衝突試験

本装置はその使用が地震等の非常時に限られること、および車体からの突出量が低いことを考慮すると、鳥等の異物が動作中の抵抗板へ高速で衝突する可能性は極めて低い。しかし、万が一の事態でも部品の飛散や車両構体側の損傷を防ぐため、異物衝突時は抵抗板を大きく塑性変形させて衝突荷重を減らす一方、軸受等の締結部には十分な強度を持たせたクラッシュブル構造を取り入れた。本章では衝突試験の結果を述べる。

4.1 衝突試験方法

抵抗板へ鳥相当の飛翔体を高速で衝突させ、衝突時の各部応力および破損状態を調べた。抵抗板は助勢側相当の構成および材質のものを複数台用意した。飛翔体は、円柱φ100の発泡スチロール内に粘土を詰め、質量1.25kg、長さ200mmに揃えた。なお、質量1.25kgは大型のダイサギなどに相当し、一般的な野鳥のトビやカラス等よりも大きい。

射出には、圧縮空気による空気砲を用いた。衝突速度は最大400km/hに設定したが、空気砲の性能上、設定速度には±10km/h程度の誤差が生じた。衝突位置は抵抗板中央、衝突角度は水平とした。

4.2 衝突試験結果

衝突速度394km/hにおける破損状況および衝突解析の結果を図9に示す。衝突解析は材料降伏応力にひずみ速度依存性を持たせたFEM（有限要素法）で行った。

抵抗板は衝突時に後方へ45～90°傾き、その後前方へ一旦戻った後、再度後方へ傾いた状態で静止した。このとき、抵抗板は水平および垂直方向へ「くの字」に塑性変形した。回転軸は中央付近に最大5mm程度の曲が

りが生じ、衝突後は抵抗板の回転が不能となった。ただし、抵抗板や軸受等の飛散やボルトの破断はなく、異物衝突時において部品飛散の可能性は低いものと推定された。

解析において、抵抗板が剛体の場合は衝突した粘土モデルは2msで潰れきり、要求仕様の衝突速度360km/hで142.9kNの衝突荷重が生じた。これに対し、抵抗板の変形を許容したクラッシュブル構造は、衝突荷重が14.7kNまで低減され、車体側を損傷しない範囲に軽減された。

なお、衝突位置はここで示した抵抗板中央の条件が最も厳しく、衝突位置が抵抗板の隅部に近い条件では抵抗板がより大きく変形するため、衝突荷重は小さかった。

5. 装置周りの流れの数値解析（CFD）

5.1 解析モデル

1編成10両相当の屋根上解析領域を設定し、3号車と7号車に相当する部分には、シングルアームパンタグラフのモデルを配置した。流入条件は360km/hの一様流、解析手法には壁面近傍にRANSを組み合わせたDES（Detached Eddy Simulation）を適用した。

装置の配置は複数の場合を検討したが、ここでは装置を車体左右に交互に並べた交互配置を示す。これは、抵抗板の側方から流れが回り込む効果を利用し、車両中心線上の流速を維持し易いと考えた配置である。また、上流装置の影響を緩和するため、車端部の特高圧引通線のジョイントを左右にオフセットさせ、装置間隔 r は $r/h=14$ （ h は抵抗板高さ）まで広げられている。

5.2 解析結果

流れの様子を図10に示す。ここで、図(a)は主流方向平均流速の水平断面分布（高さ $0.5h$ ）を表し、図(b)は瞬間場における鉛直断面分布（助勢側および抗勢側の抵抗板中心の二断面）と抵抗板表面の圧力係数分布を表す。この図から、流れは抵抗板前面でせき止められて高い正圧となり、前面に衝突した流れは板の上および側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している。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、下流における渦の崩壊・拡散とともに車体表面に再付着して、2枚目以降の抵抗板へ順次作用する。再付着にはおよそ $r/h=6$ の距離が必要であり、それよりも上流では逆流域の存在が確認できる。

抵抗板の表面圧力を積分して求まる抗力値と風洞試験の実測抗力を比較すると、先頭部の抵抗板において誤差3.7%、下流の抵抗板において誤差3.6%の精度が得られた。また、解析における複数の配置方法を比較すると、

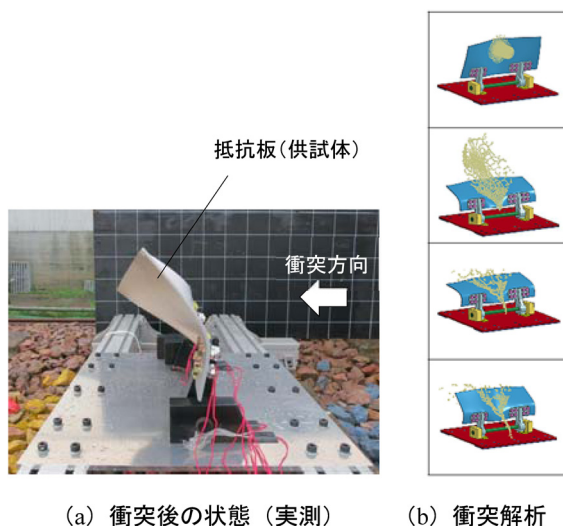
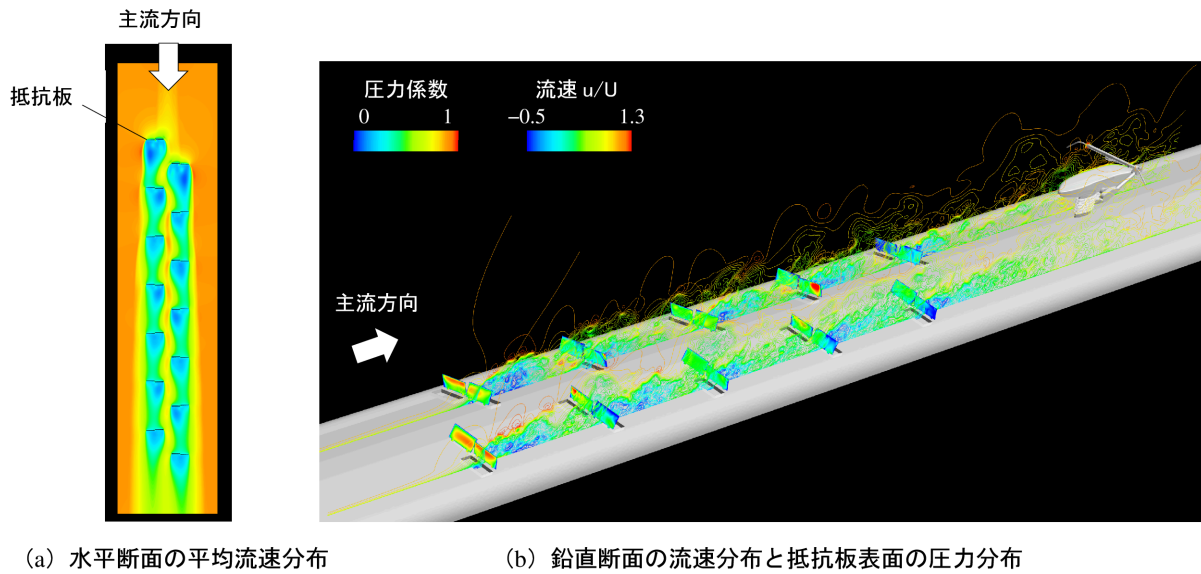


図9 抵抗板への異物衝突



(a) 水平断面の平均流速分布

(b) 鉛直断面の流速分布と抵抗板表面の圧力分布

図 10 複数台を配置した流れ場解析

一般的な並列配置と比較して、交互配置は抗力が 10% 高く得られた。これは、装置を互い違いに配置したことで、抵抗板からはく離れた速い流れが車両中心線上に下流まで持続したためである。

また、解析で求めた主流方向以外の力は、主流方向の平均力に対して横方向の変動力は ± 1% 以下、上下方向の変動力は ± 5% 以下を示し、車両運動上の問題となるような流体変動力は生じないと推定された。

6. まとめ

非常時における高速走行からの停止距離短縮を目的に、既存ブレーキ装置の高速域性能を空気抵抗の増加により補完する空力ブレーキ装置を開発した。開発品には、2 枚 1 組の抵抗板に掛かる空気圧力の差を利用して走行風で作動する機構を組み込み、装置厚さ 65mm、装置質量 36kg の小型・軽量な構成を実現した。

試作機を用いて 400km/h の風洞試験を実施し、1 台あたり 2.3kN の最大力が動作時間 0.5 秒以下の短時間で得られることを示した。また、複数台の配置を数値解析により検討し、交互配置が有効であることを示した。さらに、振動試験、異物衝突試験を実施し、それぞれ問題がないことを確認した。

なお、本稿で述べた以外に、試作機は 400km/h から 250 回を超す連続動作、長時間送風（累計 4 時間）、抵抗板の面積を拡大した過負荷試験、低温試験等から、各部の強度および耐久性に問題が無いことを確認している。

今後の実用化に向けては、以下の項目が技術的課題と

して挙げられる。

- 1) 実車両周りの流れは、複数台の空力ブレーキによる大規模な剥離によって複雑流れとなっており、解析による抗力の推定には不確かな点が多い。このため、実車両に複数台を搭載して抗力特性の検証を行い、制動性能への寄与を明らかにする必要がある。
- 2) 車体への設置方法は、騒音対策と車体の軽量化を両立した簡素な構造が求められ、車両構体の設計・製造面から検討の深度化が必要となる。
- 3) 屋外での長期使用にともなう装置各部の劣化やヒートサイクル等の影響については、実環境下において検証する必要がある。

文献

- 1) 浅野浩二：次世代新幹線の実現に向けてーこれまでの研究開発と新幹線高速試験電車「ALFA-X」の製作ー, JREA, Vol.62, No.5, pp.4-7, 2019
- 2) 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
- 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