

S1-1-6. 高速ブレーキシステムの適用

Dr. Jonathan Paddison, Vice-President (Knorr-Bremse Rail Systems Japan Limited)

Dr. Nicolas Lange, Team Leader Disc & Pad Development [Knorr-Bremse Systems for Rail Vehicles Limited]

10 年前には、280km/h を超える速度で高速列車を経済的に運行することは不可能と考えられていました。しかし今日では、軽量の分散型牽引システムおよび新世代摩擦ブレーキ装置の開発により、スペインと日本のプロジェクトが速度 350km/h の運行限界に挑戦しています。本論文は、最新の高速ブレーキ装置の要件を紹介します。最新のコンパクトな空気キャリパにより、軽量かつ省メンテナンス型のアクチュエータが実現します。鋳鋼ブレーキディスクにより、最適化された冷却設計が可能になります。特別の設計により均一な拡張が可能です。より高い自由度を持つ革新的なブレーキパッドは、ディスク表面に追従し、ホットスポットを大幅に減少します。これにより、より大きなエネルギーの吸収およびディスク内応力の低減が可能になります。

キーワード: ディスク、キャリパ、新幹線、高速

1. はじめに

10 年前には、280km/h を超える速度で高速列車を経済的に運行することは不可能と考えられていました。しかし今日では、軽量の分散型牽引システムおよび新世代摩擦ブレーキ装置の開発により、スペインと日本のプロジェクトが速度 350km/h の運行限界に挑戦しています。本論文は、最新の高速ブレーキ装置の要件を紹介します。最新のコンパクトな空気キャリパにより、軽量かつ省メンテナンス型のアクチュエータが実現します。鋳鋼ブレーキディスクにより、最適化された冷却設計が可能になります。特別の設計により均一な拡張が可能です。より高い自由度を持つ革新的なブレーキパッドは、ディスク表面に追従し、ホットスポットを大幅に減少します。これにより、より大きなエネルギーの吸収およびディスク内応力の低減が可能になります。

2. 高速列車ブレーキの要件

ブレーキ装置は、効率的かつ経済的な方法で列車を停止させると同時に、安全を保証しなければなりません。

ブレーキ装置は、次のようないくつかのサブシステムから構成されます。

- 電気（牽引）ブレーキ
- 発電ブレーキ
- 摩擦ブレーキ（ディスク/パッド/キャリパ）

- 線形渦電流ブレーキ
- 磁気トラックブレーキ

電気ブレーキは通常、主電動機を用いて発電し、その電気は電源ネットワークへフィードバックされます。このブレーキは、摩耗しないこと、および既存の牽引装置を使用できるという長所があります。短所は、電源の受電能力に依存することです。さらに、レールと車輪間のインターフェースおよび有効な密着力に依存します。

電気ブレーキは、ほとんどのブレーキ方式について望ましいが、摩擦ブレーキシステムにより補わなければなりません。電気ブレーキが故障した場合には、緊急ブレーキ作動中に、実質的に全てのエネルギーが摩擦ディスク・ブレーキに吸収されなければなりません。

発電ブレーキは、牽引発生力に依存し、この力は抵抗器群に消費されます。このブレーキは、電源ネットワークに依存しないという長所を持ちますが、重量のある抵抗器群を列車に搭載する必要があります。

最近では、線形渦電流ブレーキが開発され、付加的な非接触型ブレーキサブシステムを実現しています。線形渦電流ブレーキは、線路に物理的に接触することなく作動します。主な長所は、車輪レールの有効な密着力に依存しないことです。

摩擦ブレーキは、ブレーキディスク内の列車運動エネルギーの消費に依存します。通常、空気キャリパがブレーキパッドに力を伝達し、それがブレーキディスクに作用します。ブレーキ動作は、ブレーキディスクおよびブレーキパッドの許容熱容量および許容車輪レール摩擦

係数に於いて実施しなければなりません。

混成（ブレンディング）とは、種類の異なるブレーキ装置を併用することを表わすために使う用語です。車両のブレーキがかかると、摩擦ブレーキが増加するにしたがって電気ブレーキがしだいに減少します。この混成プロセスは、長い間、車両ごとに実施されてきましたが、全列車ブレーキ管理システムの登場により、はじめて列車全体に発生させることが可能になります。

種類の異なるブレーキサブシステムを調整するための制御システムは、ルックアップテーブルを使用した開ループまたは既定の制動曲線です。あるいは閉ループ制御を使用します。どちらの方法でも、ブレーキ制御の優先順位を設定しなければなりません。

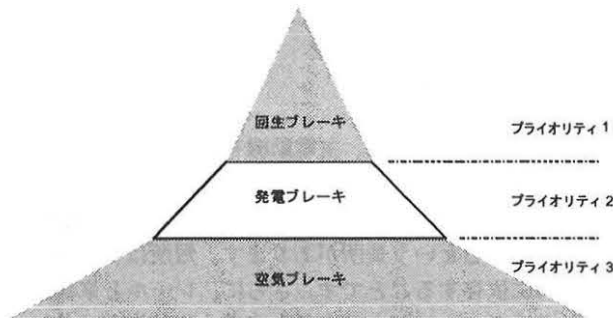


図1 Velaro のブレーキプライオリティ
(スペイン RENFE の 350km/h の列車)

図1は、スペイン RENFE の Velaro (350km/h の列車) に実装されたブレーキサブシステムのプライオリティを示します。線形渦電流ブレーキは、この車両では使用されません。

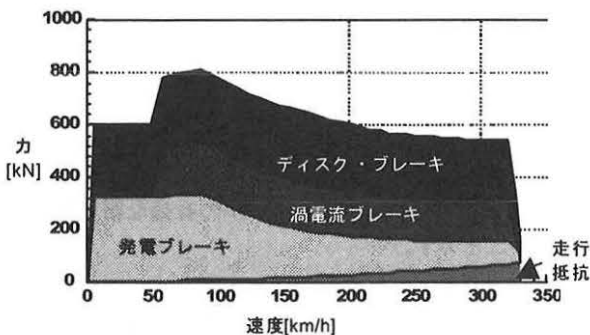


図2 ICE3 におけるブレーキの混成

例えば、ICE3 は、電気ブレーキ、摩擦ディスクブレ

ーキ、渦電流ブレーキを利用するブレーキパターンを持っています。これを図2に示します。

3. 摩擦ブレーキの要件

高速列車の速度が増加するにしたがって、消費されるべき運動エネルギー量も増加します。消費される運動エネルギーは速度の二乗に比例します。300km/h 以上で走行する比較的重い列車では、列車が停止または減速するたびに、大量の運動エネルギーが吸収されなければなりません。

図3では、摩擦ブレーキに必要な消費エネルギーは、ここ数年間で5倍に増加しました。これは、パッド、ディスク、キャリパの技術革新により達成されました。

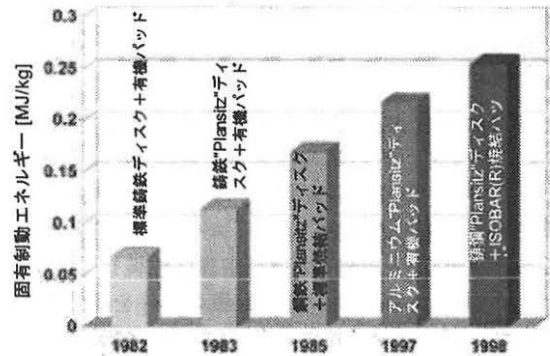


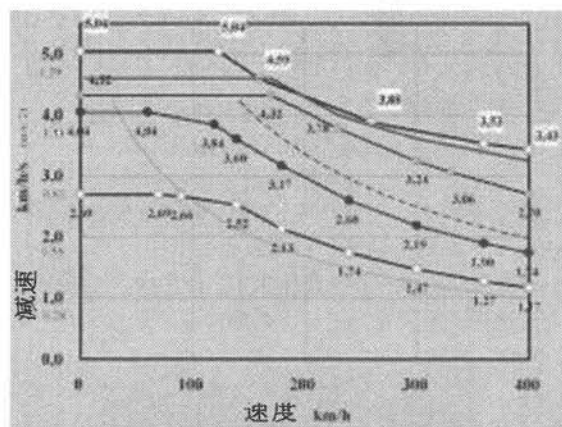
図3 最新列車の速度増加に伴って増加する
ブレーキの消費エネルギー

3. 「超」高速の要件

諸外国のブレーキ装置の性能は国際規格および国家規格により決定されます。

ヨーロッパでは、最新のブレーキ制御システムの構想段階において、TSI 規格[1]が適用されました。前出の、Velaro (350km/h の列車) でも、TSI の要件を適用しなければなりません。

図 4 は、摩擦ブレーキだけを用いてウェット条件下でブレーキをかけなければならないという最悪のケース (TSI ケース B) に適用した減速曲線限界を示します。



- 新要件：地震ブレーキ
- AV103 (350km/h)
- TSI 要件 (ケースB)
- 現在の新幹線の制動減速曲線

図 4 高速列車の減速比

ブレーキディスクの熱容量および粘着力限界で図 4 の減速比を達成するため、過去 15 年にわたって高度なブレーキ技術が開発されてきました。

4. 空気キャリパ技術

小型軽量の空気キャリパの開発により、コストのかかる異種キャリパアクチュエータの解決策はもはや不要になります。図 6 では、従来のキャリパが、1 群のドラッグリンクを用いてキャリパの動きを誘導し、パッドがディスクに追随するようにしていることがわかります。これは、パッドとディスクの間の適正な接触を確保するために必要でした。

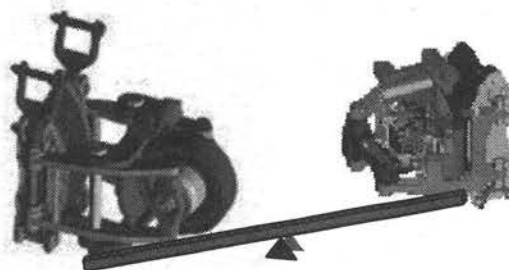


図 5 従来のキャリパとコンパクトキャリパ

コンパクトキャリパは、小型軽量だけでなく、構造が著しく単純化されています。

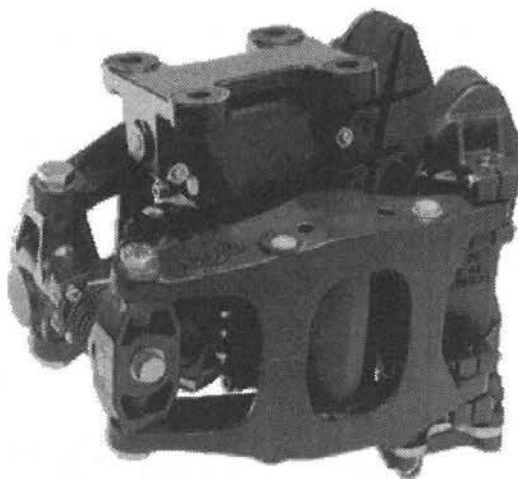


図 6 コンパクト空気キャリパ

コンパクトキャリパには、次のような優位性を備えています。

- 設置および取付が簡単
- コンパクトで小型
- 軽量化
空気コンパクトキャリパは従来の空気キャリパより 30% 軽い。空油変換 (AOH) システムが不要なので、油圧キャリパ+AOH 装置に比べて著しく重量が低減されます。
- ドラッグリンクなしで最適な運動
- モジュラ設計による標準化
- ライフサイクルコストの低減 (原則、6 年間は保守不要)
- 耐寒・耐雪用途 (ダイヤフラムシリンダ)
- 騒音と空気消費の低減
- 低ヒステリシスによる最適な挙動

5. ブレーキディスク技術

原材料および生産方式の選択は、ブレーキディスクの最適化の基本です。

摩擦リング材料 (Disc)		
熱負荷 の増加 ↓	標準	軽量
	鋳鉄	アルミニウム
	鍛鋼	—
	鋳鋼	セラミック*)

*) 開発

図 7 ブレーキディスクへの材料適合性

鋳造ディスクは、冷却性に対してより良好な設計の可能性があるため、鍛造ディスクと比べて優れた性能を示します。このことを図 8 に示します。

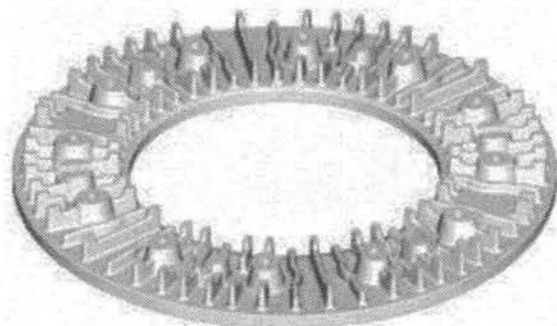


図 8 鋳造車輪取り付けブレーキディスク
(冷却フィンとガイドピンが見える)

鍛鋼ディスクはしばしば使用されますが、幾何学（造形）的な制限により伝熱能力が制限されます。

アルミニウムは鋳鉄の軽量代替金属として使用することができます。熱限界は 400℃、最高速度 300km/h までが使用可能です。しかも通勤電車での典型的な適用例では、軽量化およびブレーキディスクおよびブレーキパッドの寿命が延びたことにより、大幅な省エネルギーを実現しました。

最新の車輪に取り付けられたディスクの優位性

- モジュラ設計（さまざまな材料およびサイズに対応）
- 容易な取り付け
- 6 個のキー状ピンによる正確な中心位置あわせ
- 均一な熱膨張
- 優れた平行度
- 軽量

- 円周方向の起伏なし
- 分割形ディスクも利用可能
- 高い動的強度（100g まで）

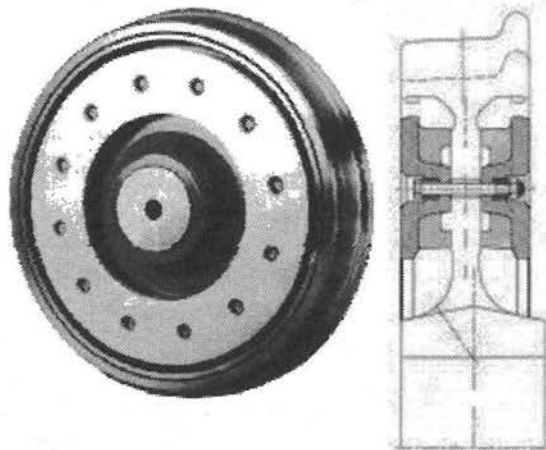


図 9 車輪に取り付けられた鋳鋼ディスク
(固定ポイント x12)

図 9 に示すディスクは、RENFE Velaro 等の高速列車に使用する車輪に取り付けられたブレーキディスクです。周辺方向へのうねりや使用中・使用後の歪みがないことを確保する固定ポイントの数に留意してください。

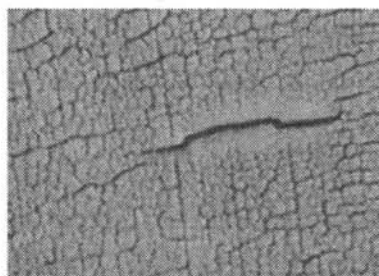


図 10 ディスク内の応力による熱亀裂

図 10 は、ディスクが熱的に膨張・収縮できない場合に発生しうる亀裂の例をしめします。

6. ブレーキパッド技術: ISOBAR 焼結パッド

焼結ブレーキパッドは、非常に高い温度に耐えることができます。有効面積が 40,000mm² の本パッドは、中レベルの制動エネルギーにて、熱処理された鋼のブレーキディスク上で耐えられる接触パターンを呈示します。

高温領域では、ディスクの熱膨張により「ホットスポット」が発生します。ここでは表面の圧力が冷却器の「谷」の圧力より高いので、その不均衡でエネルギーの一部を受け取ります。ディスク材料の降伏点が超過した場合、ディスクが冷えた後に残留引張応力が発生し、いわゆる熱亀裂の発生原因になります。

図 13 は、今日は一般的な焼結ブレーキパッドを使用して、300km/h からのブレーキ作動中のディスクの感熱写真です。ディスクが中間の比較的低温の領域の特定の位置でホットスポットを示すことがわかります。

このような理由により、今日の TGV および ICE 1, 2 の列車編成は、軸当たり 4 枚のディスクを装備しています。これにより、重量の不利な条件が発生します。ICE 1 の列車編成のブレーキディスクは、軸当たり 520kg になります。一方、台車の吊り部の 4 個の作動キャリパによりさらに 260kg 増加します。

革新的な ISOBAR ブレーキパッドの開発により、大幅な軽量化および性能の向上が実現します。

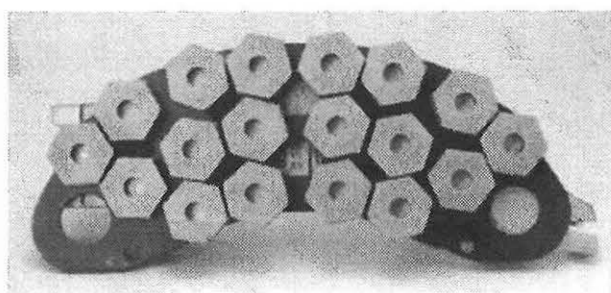


図 11 ISOBAR®パッド

ISOBAR という名称は、ディスク上の全てのポイントで圧力を等しくするという意図を反映しています。開発目的は次のとおりです。

- 特に金属の焼結摩擦材料を使用する場合、接触パターンを改善することにより負荷の大きなブレーキディスクの性能を向上させる。
- ブレーキ鳴きを減らす。

- ライフサイクル運転コストをできるだけ抑えるために、パッド全体ではなく、摩耗した摩擦エレメントのみの交換可能性に着目する。

ISOBAR ブレーキパッドは、ホルダ、パッドサポート、負荷分散メンバ、パッドエレメント自身の 4 つの主要コンポーネントから構成されます。

パッドサポートは摩擦エレメントを固定する役目をします。本サポートは、循環リングガイドを使用してパッドホルダと確実に接続されます。本サポートからホルダへの摩擦力の伝達は、ばねがプレインストールされたピン（軸方向に自由に動く）により発生します。追加のスプリングにより、ホルダおよびサポートが確実に互いに制限しあいます。その結果、摩耗を促進するガタつきや音を伴う動きをできるだけ抑えることができます。

回転中のブレーキディスクとの接触時、パッドエレメントは摩擦力を発生します。各面において、ブレーキキャリパの型締力が当該エレメント間で確実に均等に割り当てられるように、18 個の摩擦エレメントがパッドサポートに接続されます。

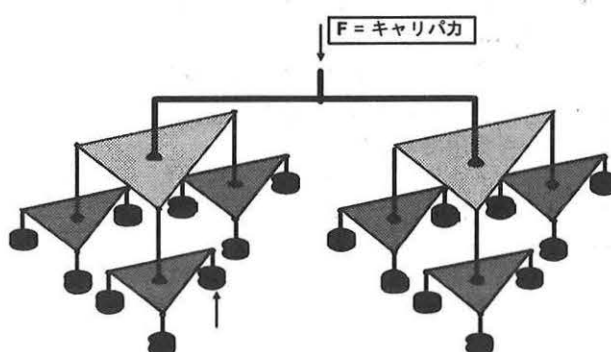


図 12 負荷分散部分により、ISOBAR パッドの摩擦エレメント間で制動力を均等に分散

明確に定義された接触圧力における個々の摩擦エレメントの追従性により、ISOBAR ブレーキパッドは、ブレーキ作動中に熱的に誘発された摩擦表面の不均一なパッチに追従することができます。これにより、摩擦エネルギーのディスクへの伝達がより均一になることが保証され、熱応力を軽減し、ホットスポット内の温度ピークを下げます。これを図 13 の感熱写真に示します。最高表面温度と最低表面温度の比は 9 から 2 に減少し、ピーク温度は約 900℃から 600℃に下がりました。

我々の広範なテストプログラムにおける ISOBAR パッドの分析・評価により、プリセットされた温度限界にてパフォーマンスケイパビリティが最大 50%増加する

ことが明らかになりました。これは、制動モーメントと速度の積に比例して追従する瞬時摩擦力、およびブレーキディスクが熱として吸収することができる総エネルギー量にも当てはまります。

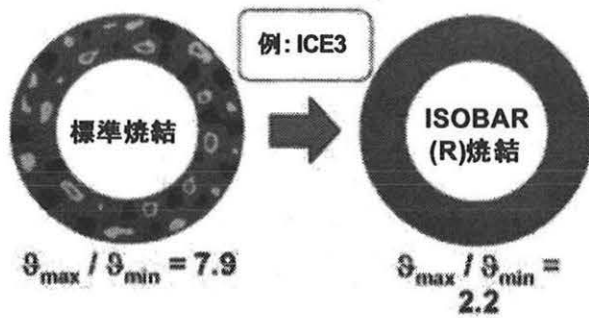


図 13 ISOBAR パッド使用時の
ディスク表面上の温度分布の改善

さらに、接触パターンが改善されたことにより、パッドおよびディスクの摩耗が減少し、この減少幅は負荷が大きいほど大きくなります。300km/h から「緊急」ブレーキ作動中に実施した動力計での測定により、同じ摩擦材料を使用した場合、標準的なパッドと比べてパッドの摩耗が 90% 減少しました。

標準的な焼結合金パッドと比較しての優位性

- スチールディスクの特性をさらに 40% 増加
- ブレーキ作用時の低騒音化
- 焼結材（六角形のブロック）の交換のみ
- 磨耗率の低減、LCC の減少
- ハイテクの磨耗材料に適する

7. 結論

摩擦ブレーキシステムのコンポーネントを全て調和させることにより、エネルギー消費の要件を 0.05MJ/kg から 0.25MJ/kg まで著しく改善することができ、且つ下記効果が述べられます。

- ・ コンパクトキャリパー
 - 小型軽量化
 - 低運行コスト
- ・ スチールディスク
 - 均一な熱膨張
- ・ ISOBAR パッド◎
 - 此処のエレメントが均衡にスチールディスク接触する

個々のサブコンポーネントが最適化されました。性能がもっとも大きく改善されるのはコンポーネントの調和です。

本論文で述べた摩擦ブレーキ技術は、ICE3 およびスペインの新型 Velario 列車で日常的に用いられています。日本の市場におけるその性能を判定するために、日本で試験を実施中です。

8. 参考文献

- [1] 相互運用性に関する技術仕様 L245/402（草稿）2002 年 5 月 30 日、欧州共同体の公式機関紙
- [2] Wirth, Xavier, Isobar によるディスクブレーキの性能改善、Railway Gazette International、1997 年 7 月