

付随車回生制動の実現によりさらなる 環境性能向上を目指す非接触電磁ディスクブレーキ



浮田 啓悟

Keigo Ukita

浮上式鉄道技術研究部
電磁気研究室
主任研究員



坂本 泰明

Yasuaki Sakamoto

浮上式鉄道技術研究部
電磁気研究室長



嵯峨 信一

Shinichi Saga

車両技術研究部
ブレーキシステム研究室
主任研究員

はじめに

車両には迅速に減速して安全に止まるためのブレーキが必ず備えられています。ブレーキの性能に対する要求は高く、信頼性、省エネ、経済性などが求められます。ブレーキには主に機械ブレーキと電気ブレーキの2種類があります。機械ブレーキは地震などの緊急時に架線が停電した際（電気ブレーキが使用できない）などに動作するため、列車内のすべての車両への搭載が義務付けられています。一方、電気ブレーキはモーターを搭載した車両（**電動車**[※]）のみで動

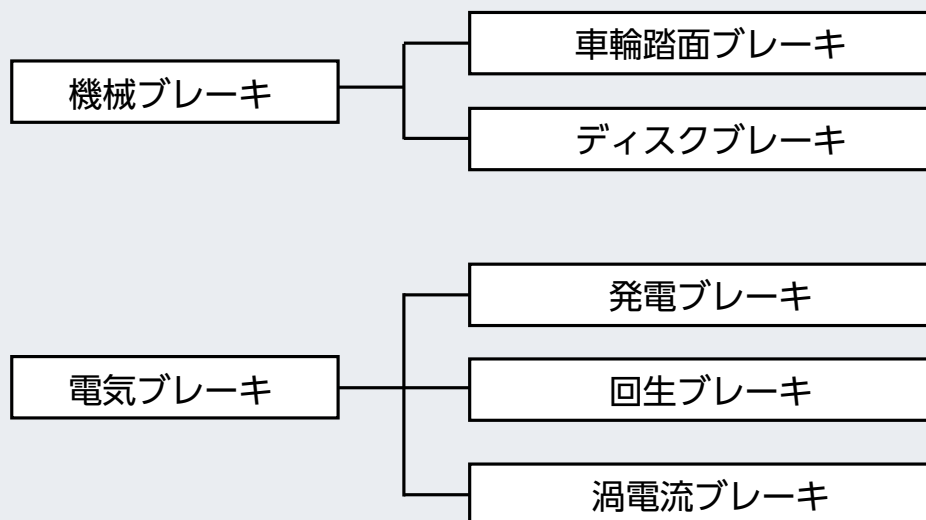
作し、省エネ、省メンテナンスに適しています。

近年、カーボンニュートラルの推進やメンテナンスの省人化が強く求められています。そこで、鉄道総研ではモーターを搭載していない車両（**付随車**[※]）の機械ブレーキの一部で消費されるエネルギーと消耗品の削減を目指し、これに替わる簡易的な電気ブレーキの基礎研究を行っています。

※ 電動車と付随車

電車を駆動するモーターを備えた車両を電動車、動力を持たずけん引される車両を付随車という。

図1 鉄道車両のブレーキ



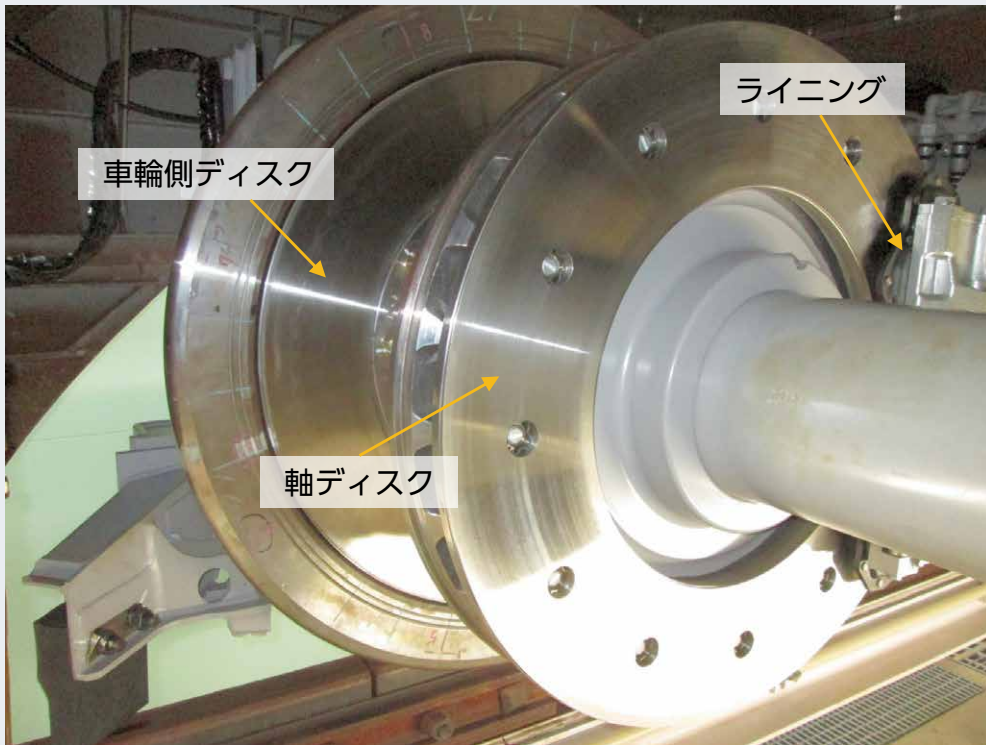


図2 ディスクブレーキ（ライニングを押し付けて摩擦力を発生させる）

ブレーキライニング

ブレーキディスクなどに押し付ける摩擦しゅう動部材。背面の取り付け板を含めた場合はブレーキパッドという。新幹線車両や在来線車両（付随車）に用いられる。

ブレーキディスク

ディスクブレーキ装置における車輪と一緒に回転する円板状の摩擦ブレーキ材。ディスクの取り付け位置によって、車軸に取り付く軸ディスクと、車輪板部の両側に取り付く側ディスクがある。

制輪子

踏面ブレーキにおいて、車輪踏面に押し付ける摩擦しゅう動部材。在来線車両に用いられる。

鉄道車両のブレーキ

機械ブレーキと電気ブレーキ

鉄道車両のブレーキを大別すると機械ブレーキと電気ブレーキに分けられます（図1）。

機械ブレーキの一種である空気ブレーキは、あらかじめコンプレッサーで圧縮した空気を空気タンクに込めておき、ブレーキの指令に応じた空気圧をブレーキシリンダに送って、はさみ装置がブレーキライニングをブレーキディスクに押し付けたり（図2）、制輪子を車輪踏面に押し付けて摩擦力を発生させ、回転する車輪を止めます。このため、停電が発生しても使うことができるため、在来線では保安ブレーキとしての役割も担い、基本的にすべての車両に搭載されています。

電気ブレーキ¹⁾は車両を走らせるためのモーターの回転力を逆向きに発生させることで減速するものです。このとき、モーターは発電機として動作することになり、車両の運動エネル

ギーが電力に変換されて、モーターから出力されます。電気ブレーキのひとつである回生ブレーキは、パンタグラフを介して電力を電車線に戻すことで、電力を必要としている加速中のほかの列車が活用できるようにしたもので、鉄道車両の省エネ・環境性能の向上に大きく役立っています。また、電気ブレーキは、機械ブレーキの動作原理と異なって摩耗部品がないため、消耗品のメンテナンスを省略できます。

高速車両のブレーキと付随車用電気ブレーキ

新幹線のような高速車両は、走行時の運動エネルギーが速度の二乗で増大するため、ブレーキの負担も大きくなります。このため、ブレーキを掛けて駅に停車するには摩耗のない電気ブレーキが適しています。初代新幹線0系は列車内のすべての車両を電動車として、電気ブレーキを優先的に動作させる仕組みを構築しています（ただし、緊急時は機械ブレーキ）。続く100系においては、車両設備のコスト削減などのた

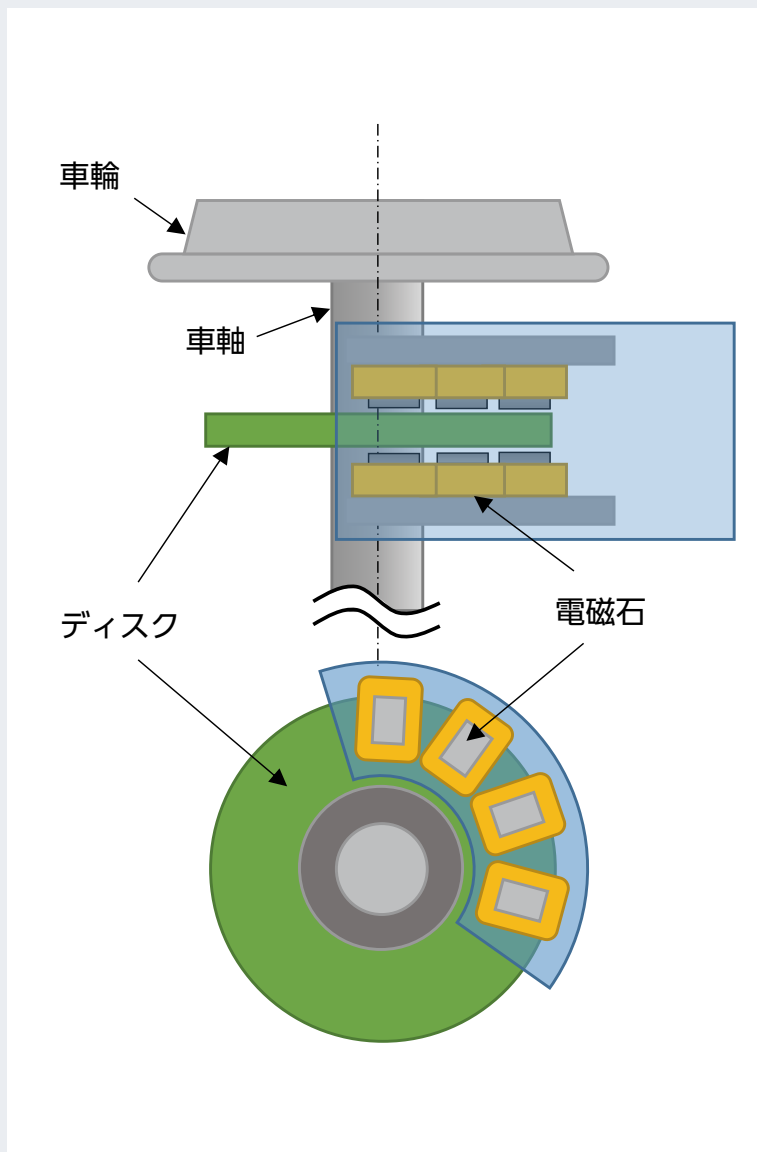


図3 渦電流ブレーキ

め、付随車が導入されました。付随車ではモーターによる電気ブレーキが使えないため、渦電流ブレーキが新たに導入されました(図3)。これは車軸に取り付けられたディスクに対してわずかな隙間を介して直流の電磁石を配置し、**電磁誘導**でディスクに渦電流を誘導することにより、電磁的なブレーキ力を発生させるものです。摩耗がないという電気ブレーキの特長を備えています。回生ブレーキのような機能はありませんでした。また、近年では電動車の回生ブレーキ性能が向上したことや、軽量化のために渦電流ブレーキが搭載されなくなりました。

ただし、雪の多い地域を走行する列車の付随車には、車軸に機械ブレーキ(軸ディスクブレーキ、図2)を備えておき、回生ブレーキ力が不足した場合に機械ブレーキを併用して補う車両もあります。

付随車回生を実現する 非接触電磁ディスクブレーキ

前述した付随車の軸ディスクブレーキは、その搭載数や使用頻度は多くないものの、使用の際には、運動エネルギーを摩擦熱に変換するため、ブレーキライニングの摩耗が発生してしま

電磁誘導

時間変化する磁場中に鉄やアルミなどの電気を通す物(導体)を置くと、磁場を囲っている導体内部に電圧が発生する現象。渦電流ブレーキではこの電圧により鋼製のディスク内部に渦を巻くように電流が流れる。

三相交流

発電や電力供給に使われ、三つの交流電流が互いに120度の位相差で送られる。効率的な電力供給が可能で、モーターや産業用機械で広く使用されている。

インバーター

直流電力を交流電力に変換する装置。交流の周波数を変えて電気機器の動作速度などを調整することもできる。

コンデンサー

電気を一時的に蓄える部品。電圧がかかると電荷を蓄え、電圧がなくなると放出する。電源の安定化や信号の平滑化などに使用される。

整流器

交流を直流に変換する装置。

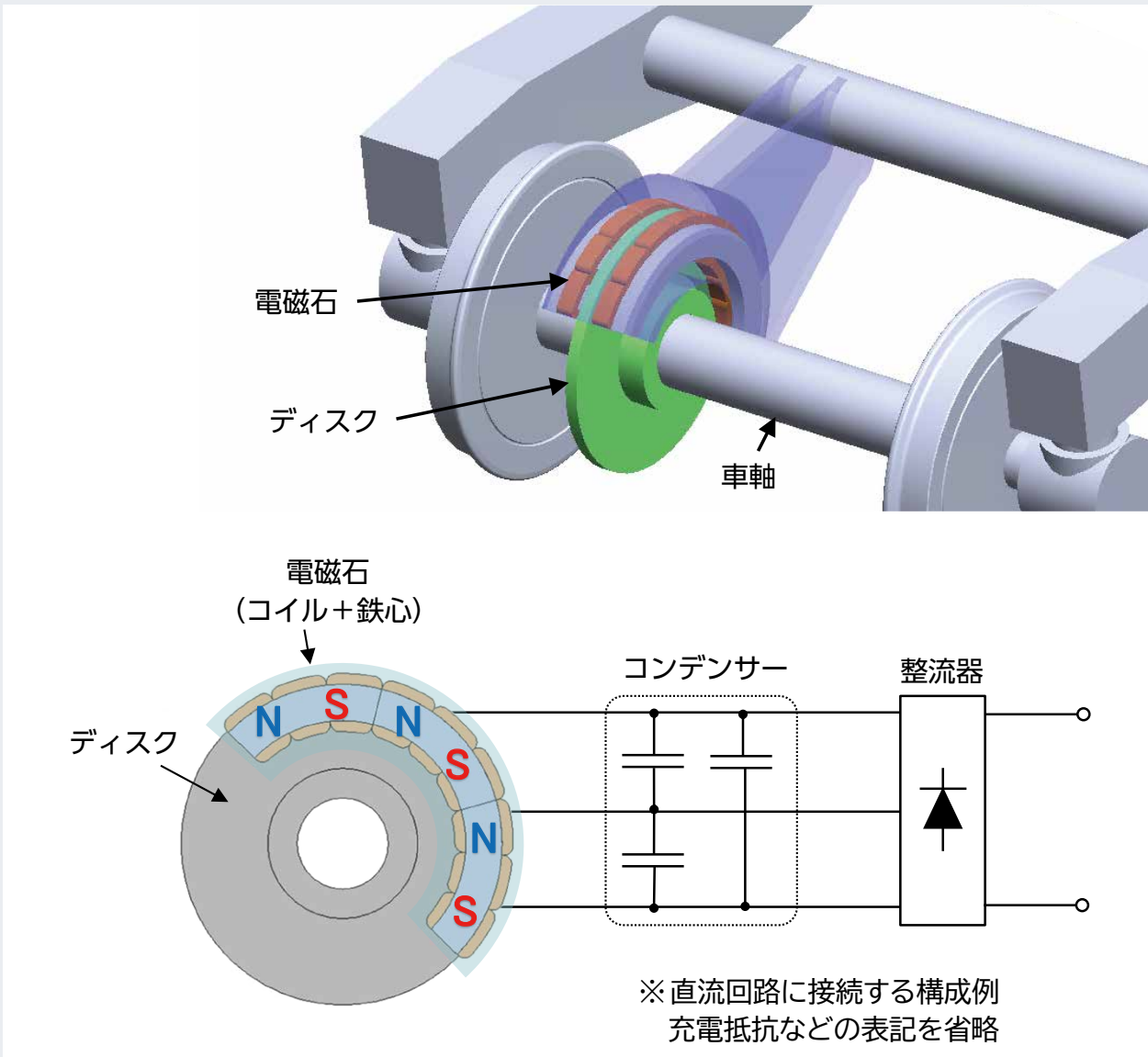


図4 非接触電磁ディスクブレーキ

います。そこで、鉄道総研では、鉄道車両の環境性能の向上と省メンテナンスの追求を目的として、この軸ディスクブレーキに着目しました。具体的には、回生ブレーキ機能を持たせた渦電流ブレーキとして使用する方法です。ただし、付随車用として簡素な構成でありながら低コストであることが必要となります。

これらに対応するため、付随車で回生を実現する非接触電磁ディスクブレーキを考案しました(図4)。基本的な構成は三相交流の電磁石を用いた渦電流ブレーキになっており、これまでの渦電流ブレーキでは不可能であった発電

機としての動作が可能になります。さらに、抜本的な低コスト化を図るため、三相交流の通電に使用するインバーターなどの電源装置を用いる代わりに、安価な電気部品であるコンデンサーと電磁石の電氣的な共振現象を利用して、自己発電で通電する方法²⁾を考案しました。この方法によれば、電源装置を用いないため、地震や停電でも単独で動作することが可能になります。加えて、コンデンサー容量の設定で動作周波数などを調整することにより、原理的には車両内の回路に電力を回生させることが可能になります。

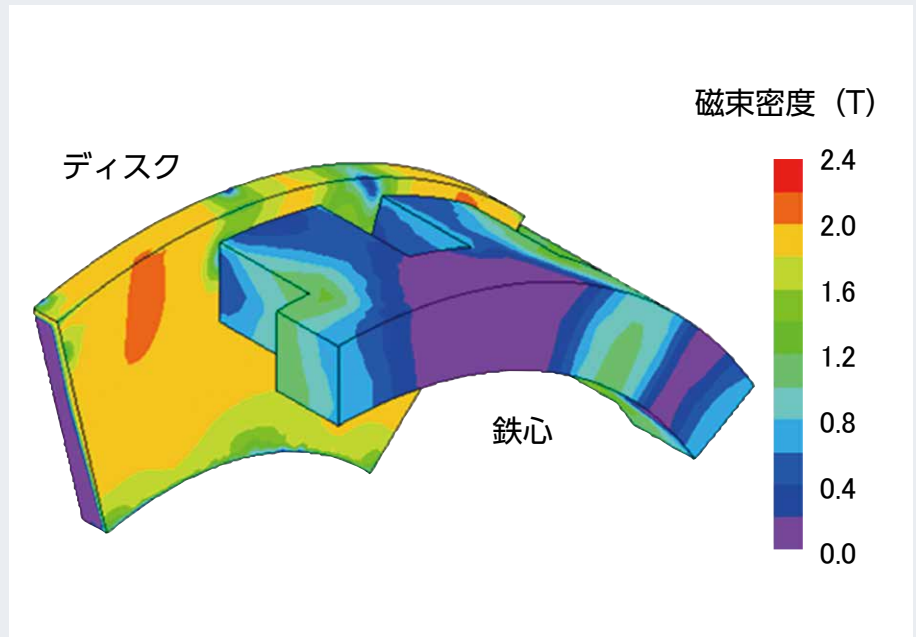
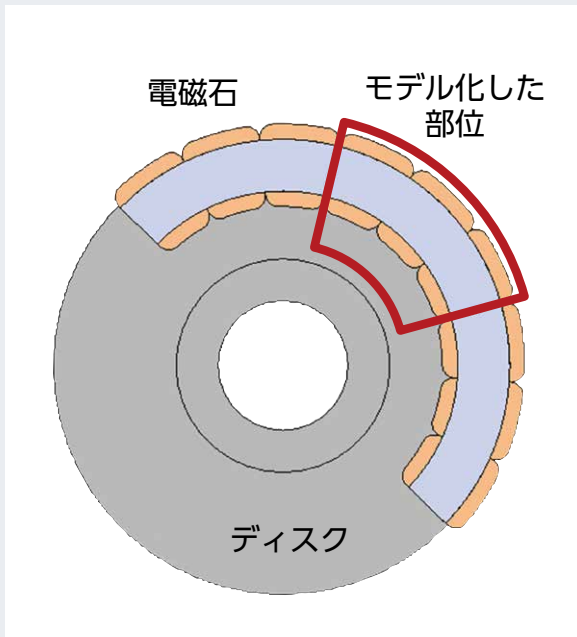


図5 電磁界解析の例

設計法構築に向けた基礎検討

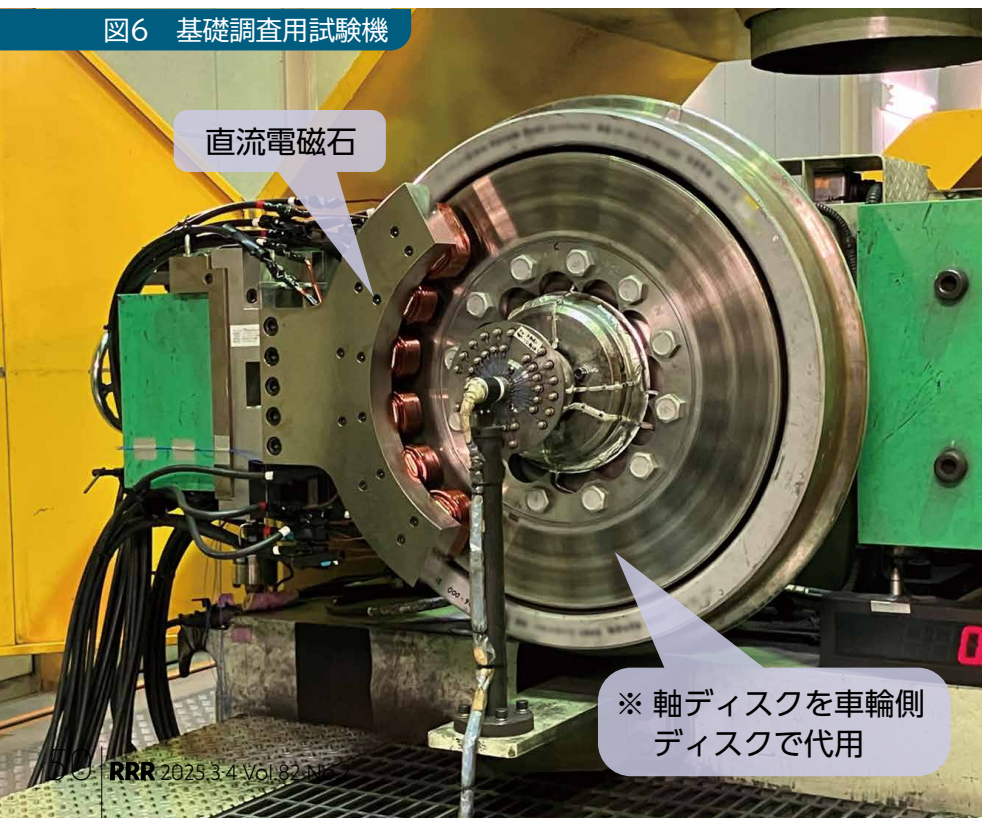
提案する非接触電磁ディスクブレーキは、従来の渦電流ブレーキと通電方法や回路が大きく異なるため、そのコンセプトの実現性を確認する必要があります。また、設計法の構築に向けて多くの検討項目があります。例えば、ブレーキ時のディスク温度は、通常の電気機器では想

定されない数百℃に達するため、ディスク温度のブレーキトルクへの影響を調べる必要があります。

そこで初めに、電磁界解析と回路シミュレーションによって、必要な性能が得られるかを試算しました(図5)。その結果、高速走行時の電

動車とおおむね同程度のブレーキトルクが得られる見通しが得られました。次いで、構成と電気的な特性が似ているリニアレールブレーキ²⁾の試験機を用いて、コンデンサーと電磁石の共振現象を利用して自己発電により通電する方法を検証しました。その結果、高額なインバーターなどの電源装置を用いずに通電できることが実証されました。さらに、車両内の回路に電力を回生する模擬試験を行い、問題なく回生できることを確認しました。今後は、回生電力をさらに大きくする

図6 基礎調査用試験機



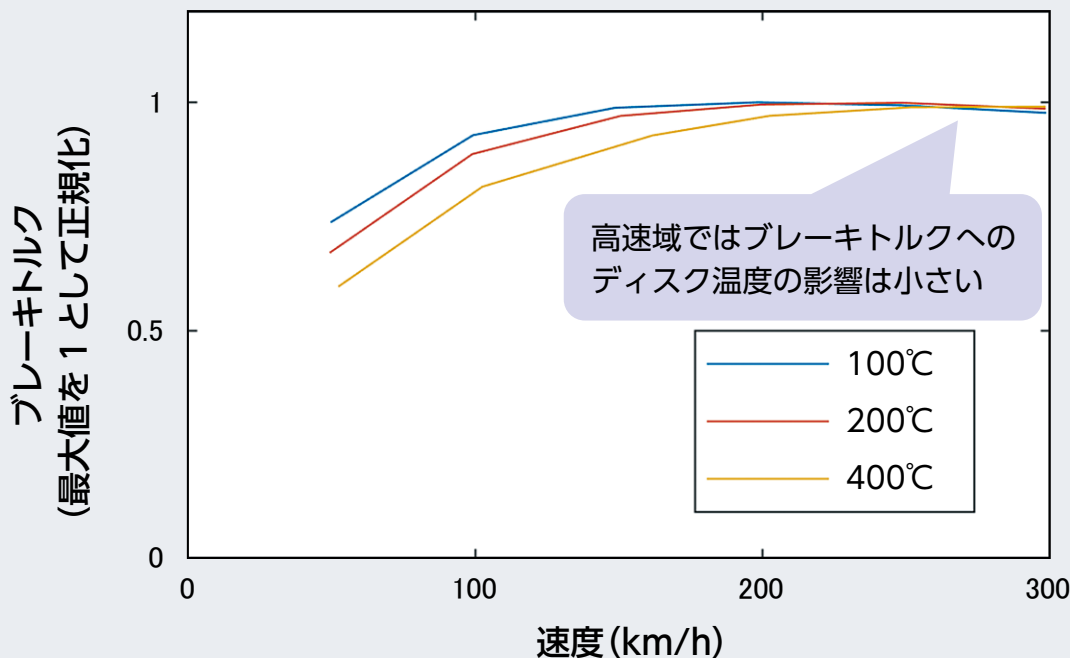


図7 デスク温度とブレーキトルクの関係

検討を行います。

続いて、非接触電磁ディスクブレーキの基礎調査用試験機 (図6) を用いて、台上試験機によるブレーキトルクとディスク温度の関係を調査しました。研究初期の基礎的な調査のため、電力回生機能を省いて、直流電磁石で三相交流のある瞬間を再現した試験としました。また、軸ディスクの代わりに、既存の車輪に取り付けられている車輪側ディスクを利用することとしました。試験の結果、電流値を一定とすれば、ブレーキ距離への影響が大きな高速度領域のブレーキトルクについては、ディスク温度の影響は小さいことが分かりました。このことから、温度条件に依らず安定したブレーキ性能が得られる見込みを得ました (図7)。

おわりに

鉄道車両の環境性能の向上と省メンテナンスを実現するひとつの方策として取り組んでいる非接触電磁ディスクブレーキの基礎研究を紹介しました。このブレーキは従来不可能であった付随車での簡易的な回生ブレーキを実現するとともに、地震などの緊急時も使用可能です。また、渦電流ブレーキのような構造が地震時の台車逸脱を抑制できる可能性も指摘されています³⁾。鉄道車両のさらなる安全性の向上を念頭に、環境性能の優位性を高めるべく、今後も研究開発に尽力してまいります。RRR

文献

- 1) 長谷川均：電気ブレーキ, RRR, Vol.75, No.1, pp.28-31, 2018
- 2) 坂本泰明, 浮田啓悟：リアレールブレーキに向けたインバータレス励磁方法の開発, 鉄道総研報告, Vol.36, No.6, pp.5-11, 2022
- 3) 遠見雑誌：高鉄也曾「車震出軌」這個秘密武器 救了3百條人命, <https://www.gvm.com.tw/article/37745> (入手日: 2024/12/20)