

鉄道一般
車両
軌道
構造物
防災
電力
信号通信情報
材料
環境
人間科学
浮上式鉄道

新幹線高速化に対応した ブレーキディスクを追求する

新幹線電車の営業最高速度は開業当初の200km/hから段階的に向上し、現在では320km/hまで引き上げられています。これに対応したブレーキシステムは、通常時にはモーターによる電気ブレーキが優先的に作用しますが、地震や車両故障などの緊急時には機械的な空気ブレーキが作用して、車両の運動エネルギーを熱エネルギーとして吸収します。この運動エネルギーは速度の二乗に比例することから、今後の速度向上を視野に、ブレーキディスクの熱影響を緩和する手法について紹介します。

新幹線電車のブレーキディスク

新幹線電車のブレーキディスクは、**図1**に示すように車輪側面の両側にボルトで固定されています。これをキャリパー装置（**☞**参照）に取り付けられたライニングではさみ込むことにより摩擦力が得られる仕組みになっています。この方式を車輪側ディスクと呼びます。一方、在来線に多く採用されている車軸にマウントされたブレーキディスクは軸ディスクと呼ばれ、新幹線電車では付随車（T車）に搭載されています。

車輪側ディスクにおいて、車輪と締結するボルトが車軸寄りにあるものを

内周締結型ディスクと呼び、従来から広く使われてきました。近年は、ディスクの軽量化と熱変形の抑制を目的として、ボルトが摩擦面の中央付近にある中央締結型ディスクを採用する車両も増えてきています。

ここで、速度300km/hからの非常ブレーキを台上試験で繰り返し行った際のディスク断面マクロ写真を**図2**に、摩擦面から深さ方向のビッカース硬さ（**☞**参照）を**図3**に示します。

マクロ写真には、摩擦面から深さ方向に進展した熱き裂と製造時にはみられない熱影響部（**☞**参照）が認められます。この組織は、ブレーキ時の摩擦



嵯峨 信一
Shin-ichi Saga
車両制御技術研究部
ブレーキ制御研究室
副主任研究員
【専門分野】ブレーキ時の熱的問題、車輪/レールの粘着問題



狩野 泰
Yasushi Karino
研究開発推進室
(GCT) 主査
【専門分野】機械ブレーキ装置、ディスク/ライニングの摩擦問題

☞ キャリパー装置

ブレーキディスクにライニングを押し付けるための装置。はさみ装置とも呼ばれます。押し方は、テコによりはさみ込む方式とピストンにより押し込む方式があります。

☞ (マイクロ) ビッカース硬さ

工業材料の硬さを表す尺度の一つで、押し込み硬さの一種です。押し込み荷重を概ね 1 kgf 以下で測定した際のビッカース硬さをマイクロビッカース硬さと呼びます。

☞ 熱影響部

溶接・切断などの熱で組織や冶金的性質および機械的性質などの変化を生じた溶融していない母材の部分。熱影響部では硬さやじん性が大きく変化し、もろくなります。

☞ マルテンサイト組織

Fe-C 系炭素鋼を安定なオーステナイトから急冷することによって得られる組織。体心正方格子の鉄の結晶中に炭素が侵入した固溶体で、硬くてもろい組織です。



図1 新幹線のブレーキディスク

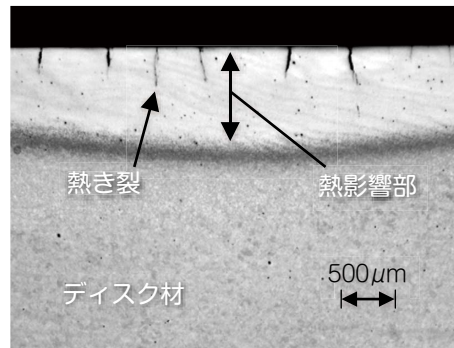


図2 断面マクロ写真

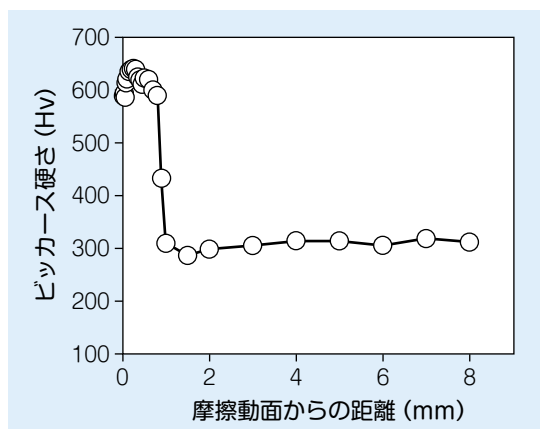


図3 深さ方向のビッカース硬さ

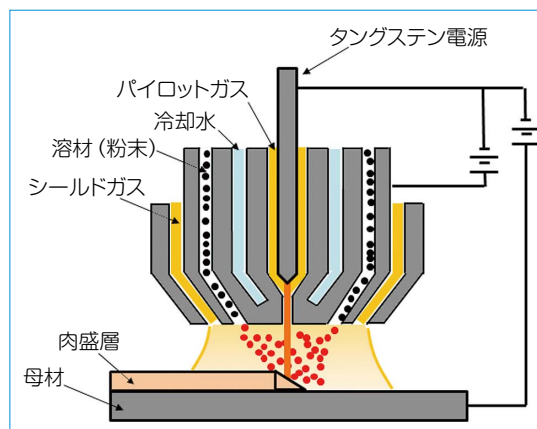


図4 PTA肉盛溶接の概念図

熱によって600℃以上の高温に焼き入れされた後、さらに急冷されて組織変態をしたもので、鋼特有の性質によるものです。特に深さ約0.5mmまでは変態したマルテンサイト組織(☞参照)がみられます¹⁾。このような熱影響を受けた部分のビッカース硬さはHv600を超えており、もろくなっているものと考えられます。

☞ 吸収エネルギー

列車の運動エネルギーや位置エネルギーをブレーキ装置が熱エネルギーに変換し、吸収するエネルギー。

☞ ばね下質量

台車において、軸ばねを介さずレールに直接乗っている部分の質量。主に輪軸(車輪、車軸、ディスク)や駆動装置、軸箱がこれに相当します。

ディスクの吸収エネルギー

新幹線電車のブレーキシステムでは、通常の高速走行時はモーターによる電気ブレーキのみが作用し、ディスクブレーキは基本的に作用しません。しかし、電気ブレーキ失効時、地震や停電のような非常ブレーキ作用時および車両故障などによる緊急ブレーキ作用時は、車両の運動エネルギーをディスクが熱エネルギーとして吸収して車両を停止させる必要があります。このとき、ディスクの表面温度は800℃を超える高温になります。

速度300km/hから非常ブレーキを作用させた場合にディスク1枚が吸収するエネルギー(☞参照)は12MJになります。運動エネルギーは速度の二乗に比例して増大するので、速度400km/hでは速度300km/hの約2倍

の21MJに達します。一方、速度向上する際には、軌道などの地盤振動に影響を与えるばね下質量(☞参照)を軽くする必要がありますため、むやみにディスクの大きさや質量を変えることはできません。

そこで、中央締結型ディスクの形状や質量を現状から大きく変えることなく、ディスクの熱的損傷や摩擦係数の低下といった熱影響を緩和する手法として、粉体肉盛プラズマアーク溶接を用いたディスクの表面改質を検討しました。

粉体肉盛プラズマアーク溶接

粉体肉盛プラズマアーク溶接は、Plasma Transferred Arcの頭文字をとってPTA肉盛溶接と呼ばれます。その概念図を☞図4に示します。電極と

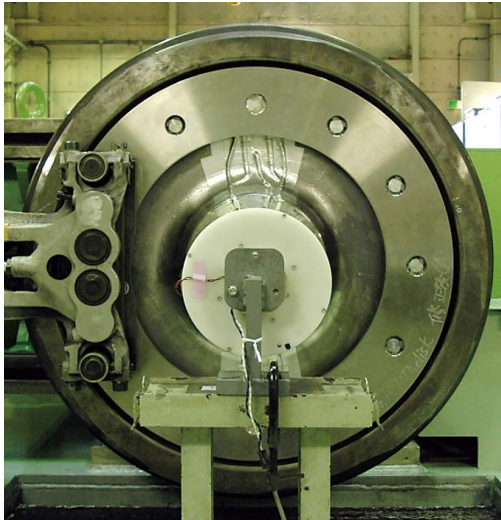


図5 PTA肉盛溶接ブレーキディスク

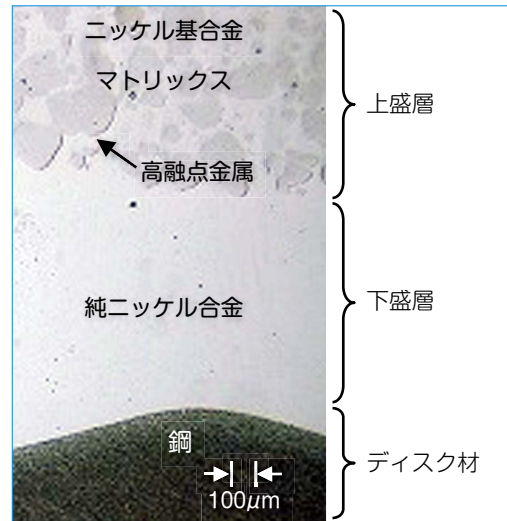


図6 肉盛溶接後の断面マクロ写真

母材間にプラズマアークを発生させ、その中へ溶材である粉末をキャリアガス（アルゴンガス）とともに供給して溶接を行う手法です。粉末を溶接材料として用いるPTA肉盛溶接は、溶け込みが浅く、平滑なビードが得られ、高能率で自動化が可能であることから、肉盛溶接に適した施工法として産業界で多くの実績があります。

PTA肉盛溶接ブレーキディスク

鋼製ディスクの表層に肉盛溶接する素材としては、鋼との溶接密着性が良いこと、ブレーキ時の摩擦熱による組織変態や大幅な強度低下をしないこと、なおかつ耐熱性があり、入熱をすみやかに拡散するような高い熱伝導率を持つことが必要です。また、過大な熱応力（☞参照）が鋼材と肉盛材に生じないようにするために、肉盛材の熱膨張率を適切に選択する必要があります。

肉盛材のマトリックスに選定したニッケル基合金²⁾³⁾⁴⁾は、冷却過程で

☞ 熱応力

物体中の温度分布により生じる内部応力。熱変形や熱き裂の発生原因となります。

組織変態を生じない特性を持ちます。また、ヤング率が鋼とほぼ同等で耐熱性と溶接密着性が良いことも知られています。これに粒径を整えた高融点金属を混合させた粉体を用いました。

摩擦面にPTA肉盛溶接したブレーキディスク⁵⁾の外観を図5に、その断面マクロ写真を図6に示します。

上盛層のニッケル基マトリックス内には高融点金属が分散して存在し、ディスク材との間には下盛層（純ニッケル合金）が形成されています。いずれの境界面も溶け込み不良はみられず、良好な溶接状態であると言えます。

ここで、熱伝導率の測定結果を図7に示します。一般的な金属材料は温度上昇に伴い熱伝導率が低下しますが、選定した上盛材は上昇する特長を持ちます。特に、ディスク表面の最高温度として想定される1000℃付近では、ディスク材の約1.8倍の熱伝導率を有し、すみやかな熱拡散が期待できることから、局所的な熱応力の緩和に効果的と考えられます。また、下盛層はディスク材よりもヤング率と熱伝導率が低いため、各境界の熱応力差を緩和するとともに、ディスク材への伝熱を抑制する働きを兼ね備えています。

台上試験による性能評価

PTA肉盛溶接ブレーキディスクを用いて、台上試験による基本性能と耐久性能を確認しました。基本性能試験では、常用最大ブレーキ（B7）と非常ブレーキ（EB）に加え、非常ブレーキを約20%向上したブレーキ（EB向上）の3種類を最高速度400km/hまで実施しました。また、耐久性能試験では速度300km/hからの非常ブレーキを105回繰り返して、その後、速度400km/hからの非常ブレーキを40回繰り返してディスク摩擦面の耐摩耗性を評価しました。

平均摩擦係数

平均摩擦係数の結果を図8に示します。摩擦係数はB7で0.4以上、EBおよびEB向上で0.3以上となり、想定摩擦係数0.3を上回りました。通常のディスクでは速度300km/hを超えると、ディスクとライニングの温度上昇による摩擦係数の低下を生じやすくなりますが、肉盛ディスクでは速度400km/hまで落ち込みがみられず安定した傾向を示しました。

熱影響部の調査

耐久性能試験を終えたディスクから、試験片を切り出して熱影響部を調査し

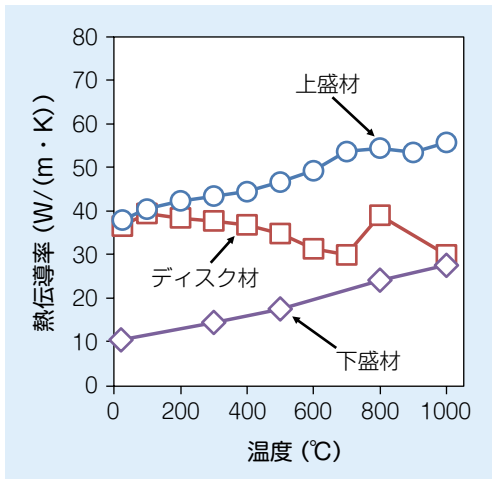


図7 熱伝導率の測定結果

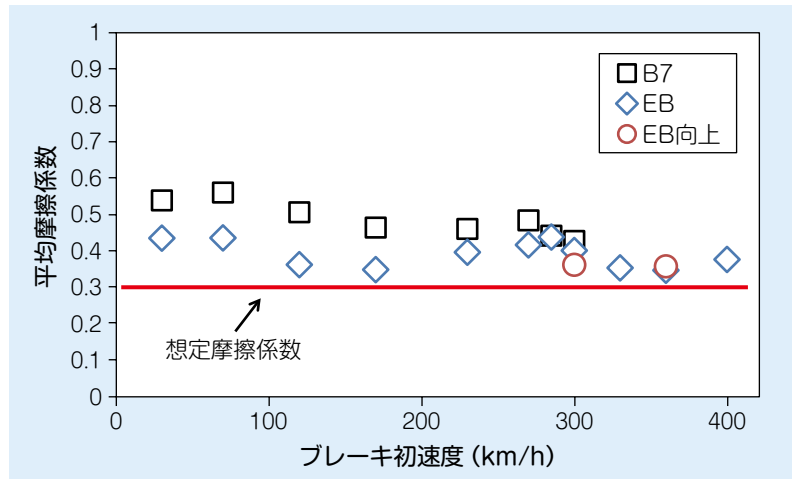


図8 平均摩擦係数の結果

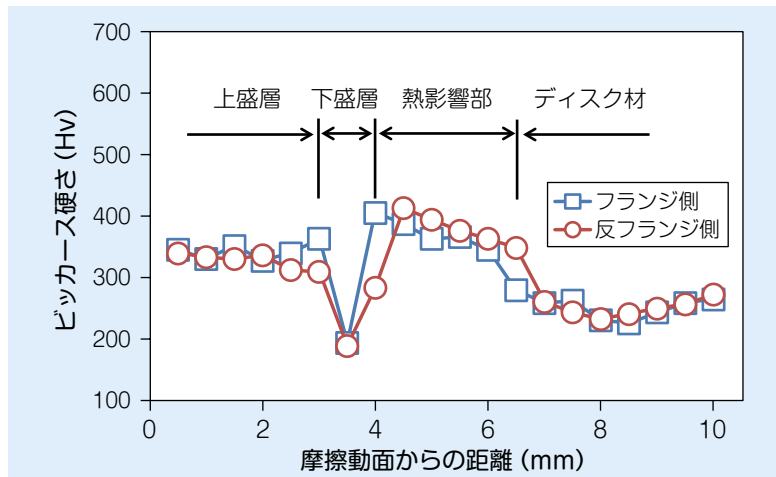


図9 深さ方向のビッカース硬さ

ました。摩擦面から0.5mmピッチで測定したビッカース硬さを図9に示します。上盛層の硬さは製造時から変化しておらず、熱影響は受けていません。また、上盛層からディスク材への各境界面に剥離やき裂は認められず健全な状態を保っていました。

下盛層とディスク材の境界から1.5mm下の熱影響部は組織の微細化がみられるものの、硬さがHv400まで低く抑えられ、ディスク材の原質部から変質のない健全な状態を維持していました。

まとめ

定時性をもとより安全性が最優先される新幹線電車の高速化は、機械ブレーキの性能向上が必須の条件です。現在使われているブレーキディスクは、十分な強度と耐熱性を備えています。さらなる高速化を視野に、既存のブレーキディスクを土台として、より耐熱性の高い金属を付加する手法を開発し、その有効性を台上試験で確認しました。

今後は、肉盛材への添加材と溶接方法を見直し、耐摩耗性を向上したうえで、実用化を図る計画です。[RRR]

文献

- 1) 森久史, 富永誉也, 松井元英, 邱海, 辻村太郎: Ni-Cr-Mo鋼ブレーキディスクの摩擦熱影響により発生する微視熱き裂の観察, 日本金属学会誌, 第70巻, 第10号, pp.785-789, 2006
- 2) 澤田俊之, 柳本勝, 丸山貴三, 川添勝利: 耐熱亀裂性に優れた連铸ロール肉盛用Ni基超合金の開発, 山陽特殊製鋼技報, Vol.17, No.1, pp.42-47, 2010
- 3) 澤田俊之, 柳本勝: 超耐食・耐摩耗性を有する硼化物分散Ni基合金の開発, 山陽特殊製鋼技報, Vol.16, No.1, pp.63-70, 2009
- 4) 杉山憲一, 川村聡, 長坂浩志, 三橋克広, 屋代利明, 近藤鉄也: 耐食・耐摩耗性を備えた肉盛材料の開発, エバラ時報, No.207, pp.50-57, 2005
- 5) 嵯峨信一, 狩野泰: 粉体肉盛溶接を適用したブレーキディスクの開発, 鉄道総研報告, Vol.28, No.7, pp.9-16, 2014