

粉体肉盛溶接を適用したブレーキディスクの開発

嵯峨 信一* 狩野 泰*

Development of the Brake Disk for High Speed Vehicle Applied Powder Built up Welding

Shin-ichi SAGA Yasushi KARINO

Improvement of the braking force that will contribute to the further safe operation of high speed vehicle is an important research issue in all the countries in the world. Reduction of the brake distance is an effective safety measure particularly in Japan where the earthquake often occurs. However, improvement of the braking force will usually put higher heat load on the brake disk in case of the emergency braking, causing various problems such as damages of disk surfaces. In order to mitigate the thermal effects of disk material, we studied several methods and developed a method to form built up welding layer on the disk surface using the plasma transferred arc welding (PTA). In this paper, we report the summary of the evaluation of performance of this method applied to brake disk on dynamo test bench up to 400km/h. It was proven that the improved brake disk ensured the target brake distance, and the built up layer and the base material of the brake disk after the test bench maintained a state in which a crack hardly occurs.

キーワード：ブレーキディスク、熱影響層、表面改質、粉体肉盛プラズマアーク溶接

1. はじめに

国内外を問わず、高速鉄道のさらなる安全性に資するブレーキ力の向上は、重要な研究課題である。特に、日本国内では地震時の安全対策としてもブレーキ距離の短縮は有効である。しかし、非常ブレーキとして使用されるブレーキディスクは、ブレーキ力の向上が熱負荷の増大へ直接つながり、これに伴うディスク摺動面の損傷、ディスクの熱変形、摩擦係数のフェードおよび締結ボルト軸力の疲労損傷などが懸念される。

このため、本研究ではディスクの温度上昇による影響を明らかにした上で、ディスクへの熱影響を緩和する手法を検討し、実物大ディスクを用いた台上試験により各種性能を評価した。

2. 高減速化の課題

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による回生ブレーキ（電制）のみが作用し、ディスクブレーキは基本的に作用しない。しかし、電制失効時、地震や停電を含む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ブレーキ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る。

ディスク1枚が吸収するエネルギーを図1に示す。初速度300km/hから非常ブレーキを作用させた場合にお

* 車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室

る吸収エネルギーは12MJである。速度向上した場合、吸収エネルギーは速度の自乗に比例して増大する。また、この際のブレーキ時間と摺動面積を用いてディスクへの熱流束を簡易的に求めると約0.368MW/m²となる。ブレーキ力を1.3倍に向上して高減速化した場合、吸収エネルギーは不変であるが、ブレーキ時間が短縮されるため熱流束は1.3倍の約0.479MW/m²と見込まれ、ディスク・ライニングのさらなる温度上昇が生じる。

ブレーキ時の摩擦熱はディスクとライニングに伝わるが、その割合は熱容量の比に等しい。すなわち、吸収エネルギーの大部分を熱容量の大きなディスクが負担することになる。

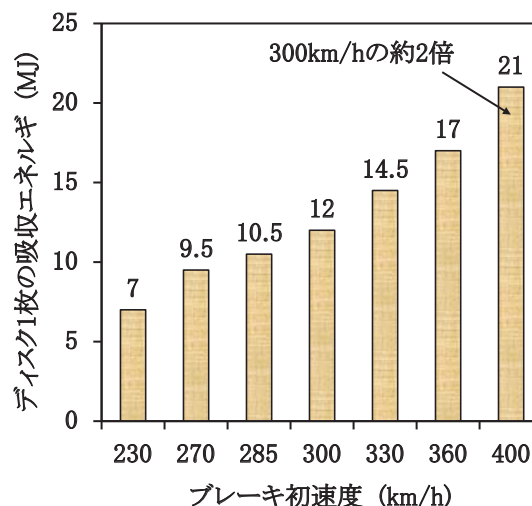


図1 ディスク1枚の吸収エネルギー

特集：車両技術

鍛鋼製ディスクの台上試験において、初速度 300km/h からの非常ブレーキを繰り返し作用させた際のディスク摺動面直下の熱影響調査を行った。断面マクロ写真を図 2、摺動面から深さ方向のビッカース硬さを図 3 に示す。マクロ写真には、摺動面から深さ方向に進展した熱き裂と新造時にはみられない熱影響層が認められる。この組織は、ブレーキ時の摩擦熱によって製造時の焼き鈍し温度（約 600℃以上）よりも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ある。特に摺動面直下約 0.5mm までは白色層と呼ばれる変態したマルテンサイト組織がみられる¹⁾。このような熱影響を受けた摺動面直下のビッカース硬さは Hv600 を超えており、靱性が低下して熱き裂が発生し易い状態と考えられる。

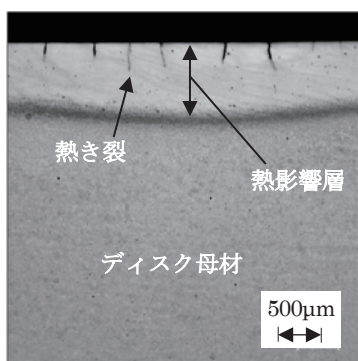


図 2 断面マクロ写真

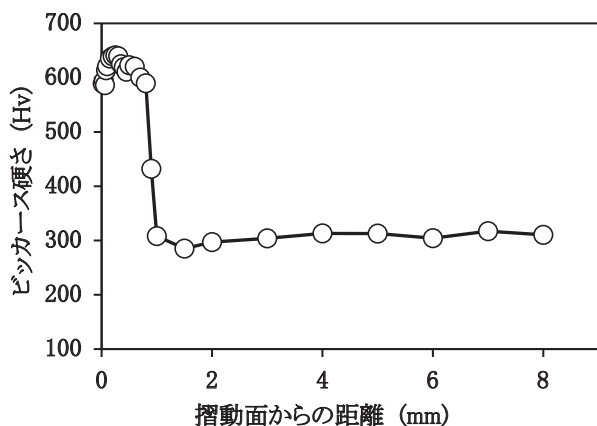


図 3 深さ方向のビッカース硬さ

3. 表面改質による熱影響の緩和

高速車両用ブレーキディスクの開発は耐熱性向上と軽量化を目指して進められ、铸铁・铸鋼のクラッド材²⁾、アルミ基複合材(AMC)、炭素繊維複合材(C/C)、セラミック基複合材(CMC)などがその適用素材の候補として挙げられていた。このうち、铸铁・铸鋼のクラッド材は、新幹線の開業当初に搭載された NCM (Ni-Cr-Mo) 低合金铸铁製ブレーキディスクに発生する熱き裂の対策として開発されたものである。その構造は、ディスク摺動面に摩擦材として高炭素铸铁、ディスク母材に強度材として低合金铸鋼が用いられ、速度向上に伴う耐熱き裂性能と遠心力破壊に耐えるように設計された。しかしなが

ら、製造工程で铸铁と铸鋼の合わせ面に完全な铸着状態(Hv400 以上)を得る必要があり、品質管理が困難であることや铸铁部からディスク母材の铸鋼部に亀裂が進展したことなどから現在では使用されていない。その他の材質についても製造コストや欠陥検出手法および検査修繕性に課題があり、採用に至っていない。

その後、耐熱き裂性と高強度を有す鍛鋼製ブレーキディスクが開発され、現在では全ての新幹線電車に搭載されている。そこで、本研究ではこの鍛鋼製ディスクに対し、粉体肉盛プラズマアーク溶接を用いて高耐熱材を摺動面に肉盛溶接する方法について検討した。

3.1 PTA 肉盛溶接

粉体肉盛プラズマアーク溶接 (Plasma Transferred Arc, 以下, PTA 肉盛溶接と呼ぶ) の概念図を図 4 に示す。電極と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ある。

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る。その事例としては、建設機械、製鉄機械、化工機械、火力発電所、船舶などの主に耐摩耗を要する部材への適用例が多い。

一方で、粉末を溶接材料としているため炭化物を多量に含有する金属を肉盛することも可能である。このため、同様に炭化物を多く含むブレーキ材の特性に似た肉盛層を生成することも可能であると考えられる。

PTA 肉盛溶接の主な特長は次の通りである。①肉盛金属は母材と完全に融合・金属結合し、母材との接着強度が高い。②溶着速度と作業能率が高く、肉盛厚さを厚くすることが可能。③肉盛金属は、熔融スラグ下または不活性ガス雰囲気下での冶金反応により生成され高品質。④母材との溶接性が良好な肉盛を選定可能。⑤作業が自動化され高品質。⑥肉盛部材の寸法に制限がない。

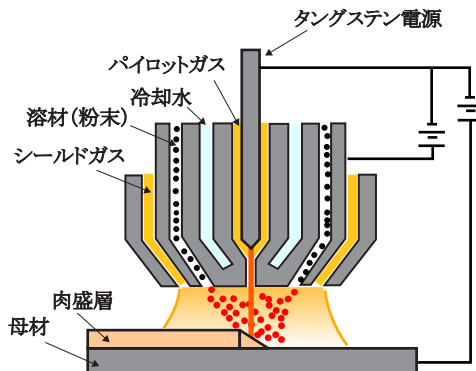


図 4 PTA 肉盛溶接の概念図

3.2 肉盛材の選定

鍛鋼材の表層に肉盛溶接する素材としては、鍛鋼材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、耐熱性があり、ブレーキ時の入熱をすみやかに面内方向へ拡散するような高い熱伝導率を持つことが必要である。また、入熱による過大な熱応力が鍛鋼材と肉盛材へ生じないようにするためには、肉盛材の線膨張係数が適切な値である必要がある。鍛鋼材においては、摺動面1mm直下の温度が6mm直下の温度に比べて最大3割程度高いことが分かっている。従って、表層の肉盛材と母材の鍛鋼材が同等の熱ひずみとなるためには、肉盛材の線膨張係数を鍛鋼材よりも約3割小さくする必要がある。

肉盛材のマトリックスに選定したニッケル合金^{3) 4) 5)}のハステロイC系(Ni, Cr, Mo, W, Fe, C, Mn, Si)は、凝固組織(面心立方格子構造:FCC)をしており、冷却過程で組織変態を生じない特性を持つ。また、ヤング率が鋼とほぼ同等で耐熱性と溶接密着性(濡れ性)が良いことも知られている。さらに予め微粉を除去して粒径を整えた高融点金属(W, Mo, Nb, Ta)を混合させた粉体である。

溶接後の断面マクロ写真を図5に示す。ニッケル基マトリックス内に高融点金属が分散して存在しており、母材である鍛鋼材との境界面に溶け込み不良はみられず、良好な溶接状態であると言える。さらに、母材と上盛の間に下盛の中間層を形成して溶接性を向上する方策も試行した。下盛材には線膨張係数が母材に近い純ニッケル合金を選定し、母材と上盛の熱応力に起因する剪断力の緩和が期待できる。

熱伝導率の測定結果を図6に示す。一般的に、金属材料は温度の上昇に伴い熱伝導率は低下することが知られているが、選定した上盛材は上昇する優れた特長を持つ。ディスク表面の最高温度として想定される1000℃付近では、鍛鋼材の約1.8倍の熱伝導率を有し、すみやかな面内熱拡散ができることから、ヒートスポットの抑制や局所的な熱応力の緩和に効果的である。下盛材は純ニッケル合金(Ni, Cr, Mo, W)に近い組成を有し、ディスク母材よりも低い熱伝導率となることから、上盛層からディスク母材への伝熱を抑制する断熱材の働きを持つ。

3.3 高温曲げ試験

高温環境下における下盛の有無が曲げ強さに与える影響を調べるため、高温曲げ試験を実施した。試験片の寸法は長さ100mm×幅10mm×厚さ8mmとし、母材である鍛鋼の上に各肉盛層をPTA肉盛溶接した。下盛無し試験片は厚さ3mmの上盛のみ、下盛有りの試験片は厚さ1mmの下盛に厚さ3mmの上盛をそれぞれ施工し、試験は母材側からの折り曲げ法で行った。温度条件

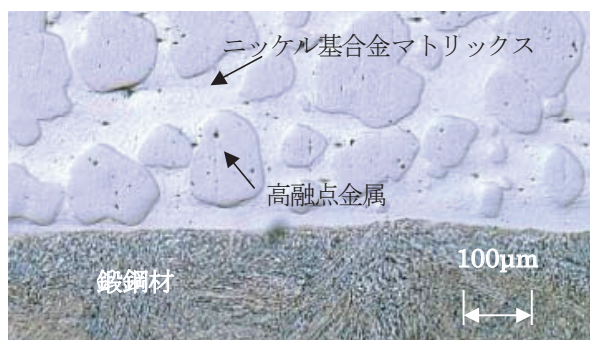


図5 肉盛境界の断面マクロ写真

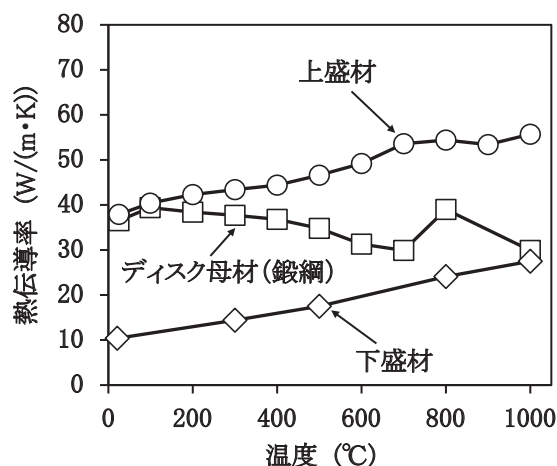


図6 熱伝導率と温度の関係

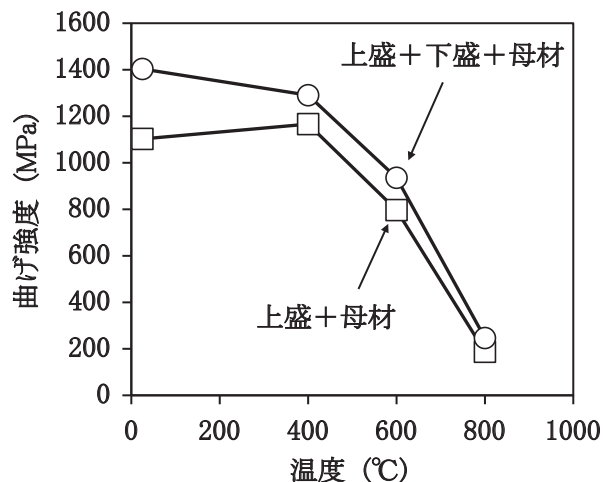


図7 高温下における曲げ強度

は400℃、600℃、800℃とし、試験片が割れるか変形量が3mmに達した時点で終了するものとした。試験結果を図7に示す。下盛層を形成した試験片は上盛のみの場合に比べていずれの温度条件下においても約1.2倍の曲げ強さを有しており、その優位性が示された。

4. 肉盛層の有無による比較試験

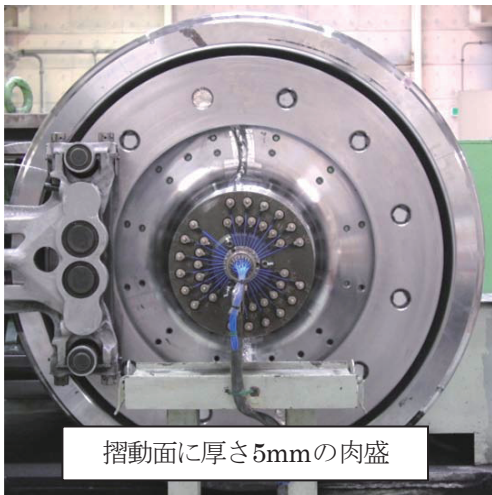
鍛鋼製ディスクへPTA肉盛溶接による肉盛層を形成した場合の効果を検証するため、中央締結型ディスクの

特集：車両技術

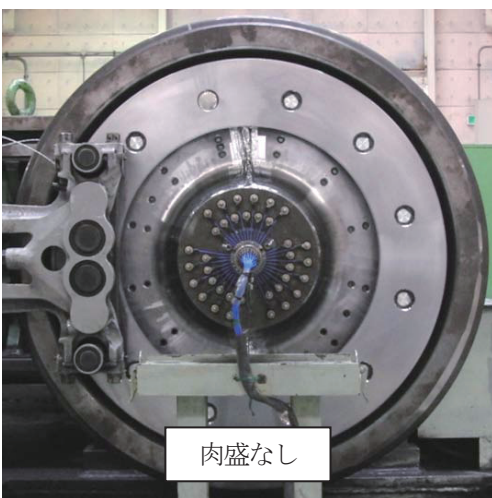
摺動面に PTA 肉盛溶接を施工した実物大ブレーキディスクを試作し、肉盛の有無による特性を比較した。

4.1 試験条件

ディスク形状は、直径 720mm、摺動幅 120mm の中央締結型とし、その摺動面上盛材のみを 3 層で厚さ 5mm となるように PTA 肉盛溶接した「肉盛型」と、肉盛施工をしない通常の「母材型」の 2 種類で比較した。また、ライニング材は現用品（リジット形状）を用いた。ディスク外観を図 8 に示す。想定車両質量は 46t、初速度 300km/h までの停止ブレーキ（常用最大ブレーキ：B7、非常ブレーキ：EB）を各 3 回ずつ行った。但し、各試験条件における 2 つのディスクの熱流束を等しくするため、ブレーキパターンは押付力フィードフォワード制御ではなくトルクフィードバック制御を行った。



(a) 肉盛型



(b) 母材型

図 8 ディスク外観

4.2 ディスク温度

ディスクの摺動面直下 6mm における温度について、

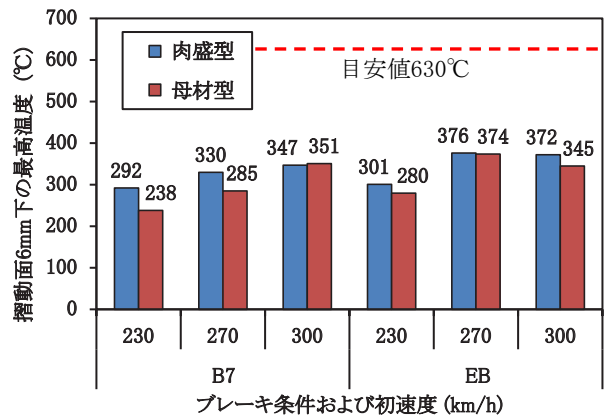


図 9 ディスクの最高温度 (試番平均値)

内周部、中央部、外周部の最高温度の 3 点平均値を求めた (図 9)。全試番を通して、いずれの条件も目安値 630°C を下回ったが、肉盛型の方が母材型よりも高い値であった。これは、肉盛材の熱伝導率が高温条件下で向上する特性を有しているために、6mm 下への伝熱量が増加した効果と考えられる。

4.3 締結ボルトの軸力

ブレーキ時に生じるディスク表面とディスク内部の温度差によりディスク中央部は凸状の熱変形を起こし、締結ボルトの軸力はこの変形に抗しようと増大することが分かっている。ブレーキ時におけるディスク締結ボルトの最大軸力の測定結果を図 10 に示す。なお、ディスク締結ボルトの初期軸力は 50kN である。肉盛型は母材型と比較して最大軸力が約 10% 低減されており、肉盛材の高い熱伝導率によってディスク表面とディスク内部の温度差が緩和された効果と考えられる。

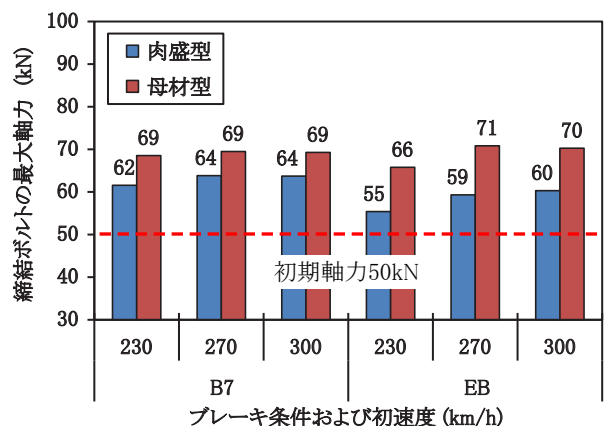


図 10 締結ボルトの最大軸力 (試番平均値)

4.4 熱影響の調査

肉盛溶接をそれぞれ 3 条件変更して施工した試験片①～③と、台上試験を終えたディスク (施工条件は③) から切り出した試験片④を比較対象とした熱影響層の調査

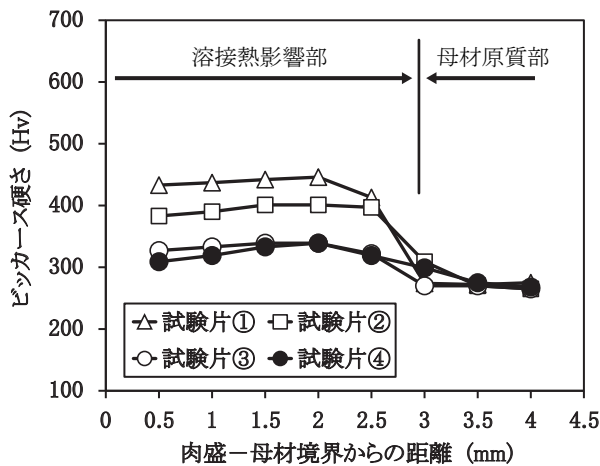


図 11 溶接熱影響部のビッカース硬さ

を行った。試験片の条件を表 1 に示す。肉盛境界面から 0.5mm ピッチで測定したビッカース硬さを図 11 に示す。試験片①および試験片②の溶接熱影響部は、熱き裂が発生し易い硬度の目安である Hv350 を大きく上回っている。これに対し、試験片③は Hv350 を下回り、熱影響部の硬さは鍛鋼材の原質部よりも 1～2 割程度の増加に抑えられている。また、台上試験後の試験片④についても硬さの変化は認められない。

断面マクロ写真を図 12 に示す。試験片①、②、③はいずれも肉盛境界から 1.5mm 下まで縞状の焼き入れ模様が観察されるのに対し、試験片④では組織の微細化がみられるものの焼き入れ模様はみられなかった。これら

表 1 試験片の施工条件

試験片	予熱	肉盛層数	備考
①	無し	1 層上盛	溶接施工のみ
②	有り 250℃		
③		3 層上盛	試験後のディスク
④			

の結果から、PTA 肉盛ディスクはブレーキ時の入熱による熱き裂のリスクが低減されているものと考えられる。

5. 性能試験および耐久試験

肉盛層と母材の材料物性の違いに起因する熱応力を緩和するため、ディスク母材に下盛材と上盛材をそれぞれ肉盛溶接した改良肉盛型中央締結ディスクを試作し、台上試験による基本性能を確認した。性能試験では初速度 400km/h まで、耐久試験では初速度 300km/h および 400km/h での試験を行い、各種性能を評価した。

5.1 試験条件

ディスク形状は直径 720mm、摺動幅 120mm の中央締結型ディスクとし、その摺動面に前述した下盛材（厚さ 2mm）と上盛材（厚さ 3mm）を PTA 肉盛溶接した（以下、改良肉盛型と呼ぶ）。ライニング材は現用品（リジット形状）の他に、初速度 300km/h を超える試験と非常ブレーキ力向上試験では等面圧形状を用いた。ディスク外観を図 13 に示す。

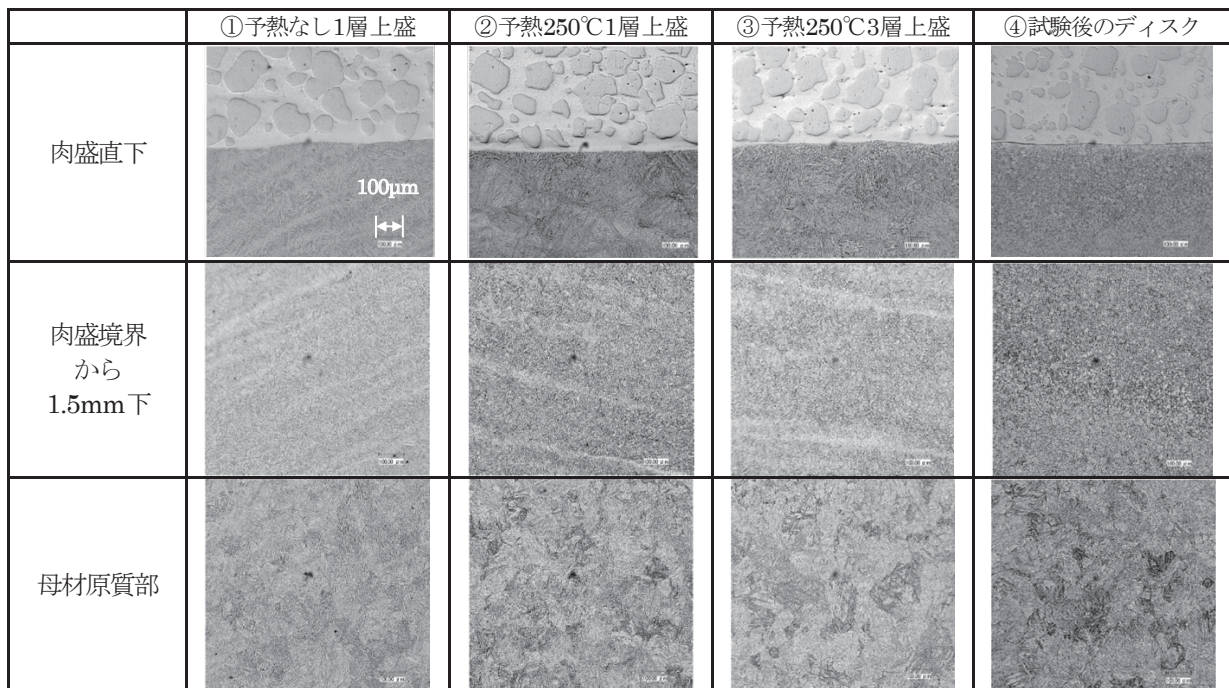


図 12 各試験片の断面マクロ写真



図13 ディスク外観（改良肉盛型）

想定車両質量は50t、初速度は常用最大ブレーキ（B7）が300km/hまでのATC各速度段、非常ブレーキ（EB）が300km/hまでのATC各速度段と330km/h、360km/h、400km/hまでを実施した。ブレーキ力を約20%向上した非常ブレーキ力向上（EB向上）は300km/hおよび360km/hで実施した。ブレーキパターンは現車と同様の押付力フィードフォワード制御で各3回実施した。

5.2 平均摩擦係数およびブレーキ距離

平均摩擦係数の結果を図14に示す。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、想定摩擦係数の0.3を上回った。通常、鍛鋼製ディスクは300km/hを超える条件にな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易いが、改良肉盛型では400km/hまで落ち込みがみられず安定した傾向を示すことを確認した。

ブレーキ距離の結果を図15に示す。平均摩擦係数が想定値を上回ったことにより、ブレーキ距離は計画値をほぼ満足した。また、非常ブレーキ力向上試験ではブレーキ距離が約20%短縮できることを確認した。

5.3 ディスク温度

ディスクの摺動面直下6mmにおける温度について、内周部、中央部、外周部の最高温度の3点平均値を求めた（図16）。全試験を通して、4章で示した結果よりも温度上昇がみられるが、これは車両質量が増したことに加えて、フィードフォワード制御における押付力がトルクフィードバック制御時よりも平均的に高い影響である。300km/hを超える速度向上ならびに非常ブレーキ力向上ではさらに温度が上昇するが、いずれの条件も目安値630℃を下回ることを確認した。

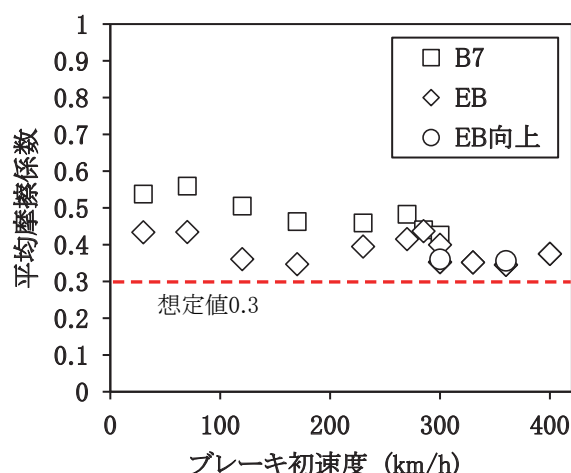


図14 平均摩擦係数（試番平均値）

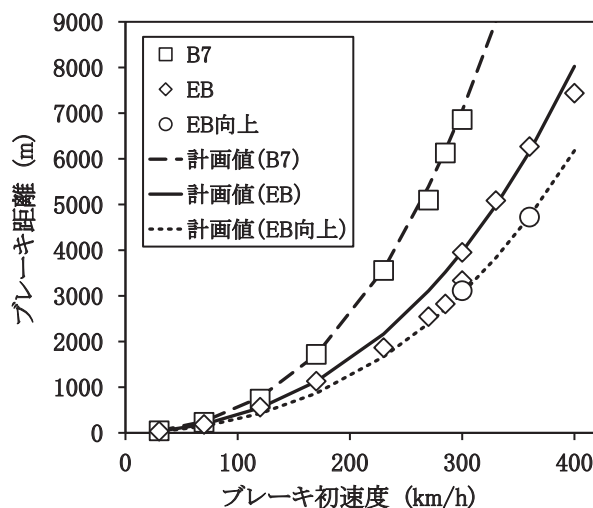


図15 ブレーキ距離（試番平均値）

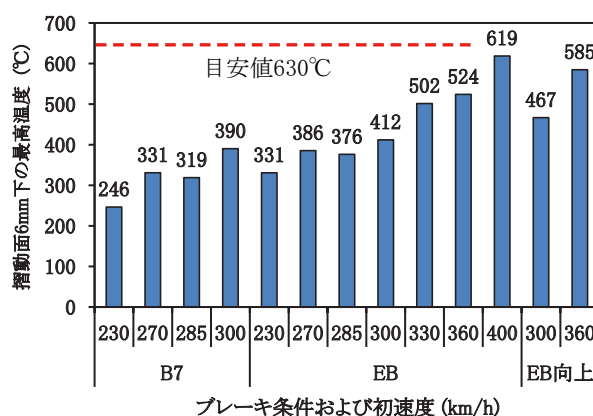


図16 ディスクの最高温度（試番平均値）

5.4 締結ボルトの軸力

ディスク締結ボルトの最大軸力の測定結果を図17に示す。300km/hを超える非常ブレーキ試験および非常ブレーキ力向上試験でも最大で68kNに抑えられており、4章で示した最大軸力71kNを下回ることを確認した。

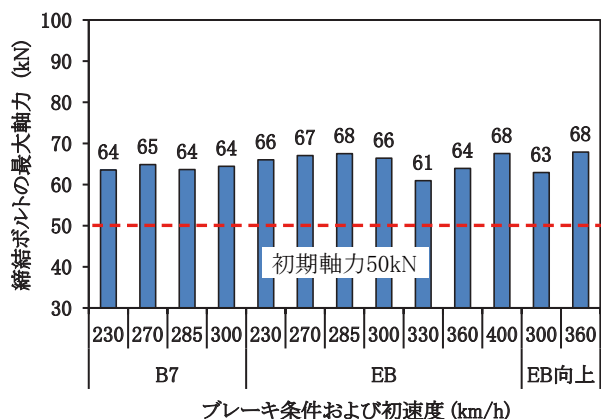


図 17 締結ボルトの最大軸力 (試番平均値)

5.5 耐摩耗性

耐久試験では、はじめに現用リジット形状ライニングを用いた初速度 300km/h からの非常ブレーキ試験を 105 回繰り返した。その後、等面圧形状ライニングを用いた初速度 400km/h からの非常ブレーキ試験を 40 回繰り返して、ディスク摺動面の耐摩耗性を評価した。各試験条件におけるディスクの摩耗形状を図 18 に示す。なお、ディスクの摩耗限度は 2mm である。

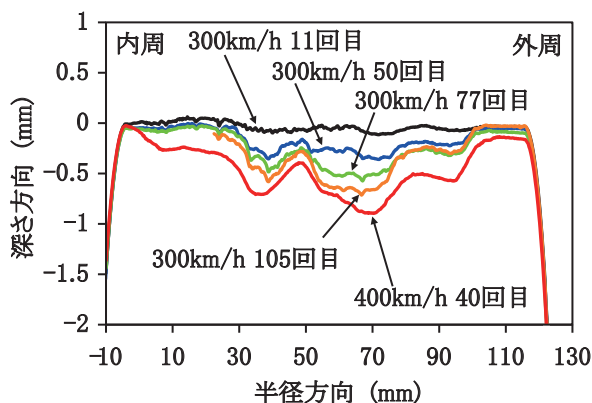


図 18 ディスク摺動面の摩耗形状の変化

初速度 300km/h からの非常ブレーキを 77 回繰り返した際の最大摩耗深さは約 0.5mm、105 回では約 0.75mm に達した。その後、初速度 400km/h からの非常ブレーキを 40 回繰り返した際の最大摩耗深さは約 1mm に達し、半径方向に凹凸のある摩耗形状となった。

初速度 300km/h からの非常ブレーキを 100 回繰り返した際の鍛鋼製ディスクの摩耗量は約 0.35mm 程度であることから、肉盛層は約 2.5 倍摩耗しやすく耐摩耗性に課題があることが判明した。従って、実際の運用に耐えるには肉盛素材への添加材を検討し、耐摩耗性の向上を図る必要がある。

5.6 熱影響の調査

台上試験を終えたディスクから切り出した試験片の熱影響を調査した。摺動面から 0.5mm ピッチで測定したビッカース硬さを図 19 に示す。上盛層の硬さは製造時の硬さから変化しておらず、熱影響は受けていない。

断面マクロ写真を図 20 に示す。摺動面のごく表層には微細な熱き裂がみられるが、進展することなく表層に留まっている。上盛と下盛および下盛とディスク母材の各境界面には剥離やき裂は認められず健全な状態を保っている。また、下盛と母材の境界から 1.5mm 下の熱影

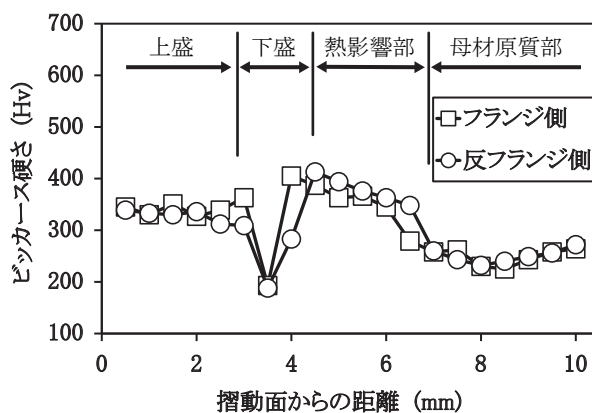


図 19 溶接熱影響部のビッカース硬さ

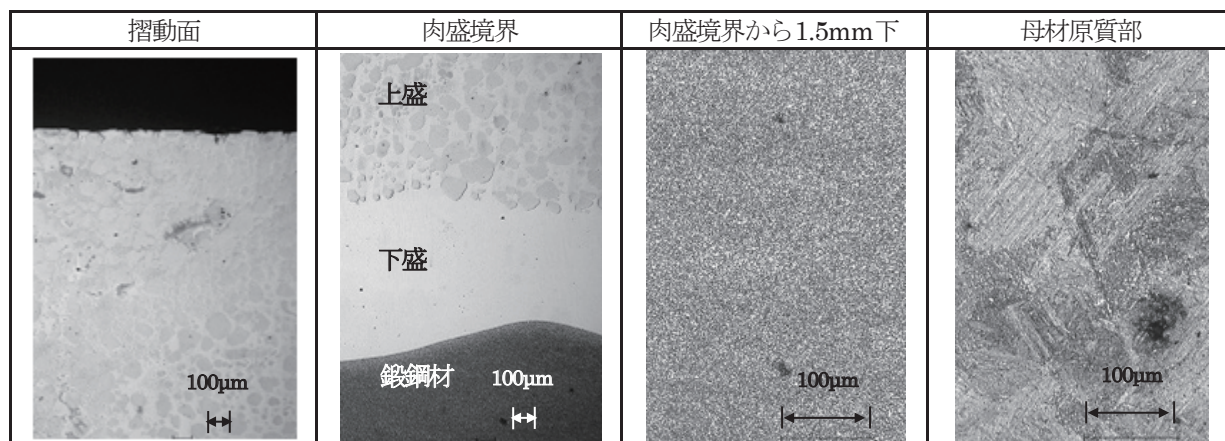


図 20 溶接熱影響部の断面マクロ写真 (耐久試験後)

特集：車両技術

響部は組織の微細化がみられるものの、ディスク母材原質部から変質のない健全な状態を維持している。

6. まとめ

本研究において得られた結果は以下の通りである。

- (1) ブレーキ時の入熱によるディスク母材への熱影響の緩和と熱変形の抑制を目的に、ディスク母材の摺動面に厚さ 2mm の下盛層および厚さ 3mm の上盛層からなる肉盛層を粉体肉盛プラズマアーク溶接 (PTA) により形成する手法を開発し、台上試験用の PTA 中央締結型ブレーキディスクを試作した。
- (2) 初速度 400km/h までの台上試験を実施し、肉盛しない母材型と比較して、締結ボルトの最大軸力が約 10% 低減されることを確認した。また、平均摩擦係数は低速から 400km/h にわたって 0.3 以上の安定した特性を示し、計画ブレーキ距離を満足した。さらに、停止距離を約 20% 短縮した非常ブレーキ力向上試験を実施し、ディスク温度が目安温度以下に収まることを確認した。
- (3) 初速度 300km/h および初速度 400km/h からの非常ブレーキ条件を繰り返し、肉盛層の耐摩耗性を評価する耐久試験を実施した。ディスク摺動面の最大摩耗深さは現行ディスクの約 2.5 倍に相当することから、耐摩耗性に課題があることが明らかになった。
- (4) 非常ブレーキ力向上による過酷な熱負荷を試作した PTA ブレーキディスクへ繰り返し与えても、熱影響による母材の組織変態は認められず、健全な状態を維持した。

7. おわりに

開発したブレーキディスクは、ブレーキ力向上や速度向上した際に発生する熱影響からディスク母材を保護する効果と、高速域においても安定したブレーキ性能を維持する効果を有している。実用化に向けては、耐摩耗性に課題があることから、今後は PTA 肉盛溶接に代わる新たな肉盛溶接施工法を用いて耐摩耗性の性能向上に関する検討を進める。

謝辞

本ブレーキディスクの開発にあたって、多大なるご協力を頂きました新日鐵住金株式会社、大阪富士工業株式会社の関係者各位に深く感謝いたします。

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, Vol.70, No.10, pp.785-789, 2006
- 2) 竹中康雄, 辻村太郎, 松永孝文: 新幹線用鑄鉄 - 鑄鋼クラッドブレーキディスクの開発, 鑄物, Vol.60, No.7, 日本鑄造工学会, pp.419-425, 1987
- 3) 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鑄ロール肉盛用 Ni 基超合金の開発, 山陽特殊製鋼技報, Vol.17, No.1, pp.42-47, 2010
- 4) 澤田俊之, 柳本勝: 超耐食・耐摩耗性を有する化物分散 Ni 基合金の開発, 山陽特殊製鋼技報, Vol.16, No.1, pp.63-70, 2009
- 5) 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