

新幹線速度向上対応ブレーキシステムの開発

嵯峨 信一* 高見 創** 坂本 泰明***

Development of Braking System to Cope with Increased Speed of Shinkansen

Shinichi SAGA Hajime TAKAMI Yasuaki SAKAMOTO

Considering the increase in heat load on the brake disks as the speed of Shinkansen increases, the heat capacity of the current steel brake disks is approaching its limit. Therefore, from the viewpoint of reducing the heat load on the brake disk, one of the methods to be considered is to form heat-resistant layers on the friction surface of the brake disk. As a result, we apply laser metal deposition welding, which is the latest technology. As a result of a bench test of a brake disk to which this method is applied, we find that the basic performance is satisfied, the wear resistance is improved by about three times compared to the current disk, and no cracks occurs. In addition, as a countermeasure against the sliding, which is a concern due to the increase in braking force, non-adhesion brake system that combines a disk brake with an aerodynamic drag brake and a rail brake is investigated, and its stopping distance is evaluated. This paper reports the test results of the laser metal deposition welding applied to the friction surface of a brake disk as a heat load reduction method. In addition to that, the effect of shortening the stopping distance by the system combined with the non-adhesive brake is also introduced.

キーワード：高速車両，ブレーキディスク，レーザ粉体肉盛溶接，粘着，空力ブレーキ，レールブレーキ

1. はじめに

新幹線に代表される高速鉄道のさらなる安全性のため、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、非常時のブレーキ力を負担するブレーキディスクにとって、ブレーキ力の向上は直接的に熱負荷の増大を招き、これに伴うディスク摩擦面の損傷、ディスクの熱変形、摩擦係数の熱的低下および締結ボルトの疲労損傷などが懸念される。

将来的な速度向上を想定した場合、ディスク1枚が吸収すべきエネルギーは、速度300km/hの12MJに対して、速度400km/hでは約2倍の21MJに達する。この膨大な熱量に対し、現用の鍛鋼製ディスクに代って性能面と強度面およびコスト面で適用可能な新素材は今のところ見当たらないのが現状であり、主としてライニング材質の開発が進められている¹⁾。また、ディスクの寸法拡大や重量増加は高速走行安定性に与える影響が大きいことから、これらの相反する要件を両立するディスク開発が課題となっている。加えて、鉄系材料である鍛鋼製ディスクの摩擦面には、摩擦熱による焼き入れ硬化という固有の問題がある。図1は現用ディスクの台上試験において、速度300km/hからの非常ブレーキを繰り返し掛けた際

のディスク断面マクロ写真と摺動面直下のマイクロビッカース硬度である。使用に伴って同図のように細かなき裂とHv600を超える熱影響層（以下、HAZ）が発生し、運用におけるディスク交換頻度の増加につながっている。

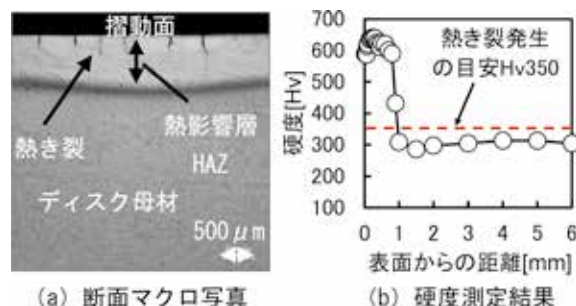


図1 鍛鋼製ディスクの割断調査結果

著者らは、鍛鋼製ディスクの摩擦面を高融点金属により肉盛強化し、寸法や重量を変えずに耐熱性能を向上する肉盛ディスクの開発を進めてきた。初めに、粉体肉盛プラズマアーク溶接（以下、PTA）でディスクの摩擦面に耐熱肉盛層を形成し、ディスク母材を熱的に保護する方法について検討した²⁾。その結果、性能面で一定の成果が得られたが、ディスクの耐摩耗性や製作性に課題が残った。この問題解決の方策として、レーザ粉体肉盛溶接法³⁾⁴⁾（以下、LMD）の適用化検討⁵⁾⁶⁾を行い、速度400km/hまでの速度向上に対応する新たなディスクを開発し、非粘着方式のブレーキとの併用により4000m以内で停止可能なブレーキシステムについて検討した。

* 車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室
 ** 環境工学研究部 車両空力特性研究室
 *** 浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室

2. レーザ粉体肉盛溶接法 (LMD)

PTA と LMD の溶接方法の違いを図 2 に示す。PTA は、電極と母材間にプラズマアークを発生させその中で溶材である粉末をキャリアガスとともに供給して溶接を行う手法である。溶接材料として粉末を用いるため、溶け込みが浅く、平滑なビードが得られ、高能率で半自動化が可能である。また、炭化物を多量に含有する金属にも施工可能であり、多くの実績がある。

一方、LMD は PTA に代わる最新技術であり、レーザー源の電気-光変換効率が上がったこと、ファイバー伝送が可能になったことで実用化された。制御性の高いレーザーを溶接対象部に照射し、照射領域に金属粉末を噴射することにより粉体肉盛を行う仕組みで、アーク溶接に比べて溶接対象物の温度影響を低く抑えられる長所がある。その他、溶接対象物の希釈率（肉盛材と母材の融合比率）が低減されること、小さい溶接スポット径で正確な溶接（肉盛厚さを $\sim 2\text{mm}$ 、ビード幅を $\sim 5.2\text{mm}$ ）が可能なおも利点である。さらに、レーザートーチや溶接対象部の把持にマニピュレータロボットを用いることで、三次元曲面に溶接することも可能である。なお、本研究で採用した LMD 溶接機は、ディスクの摩擦面積と溶接時間を考慮し、ドイツルンブ社製の TruDisk4006（レーザーダイオード励起 YAG レーザ、出力 4000W）である。

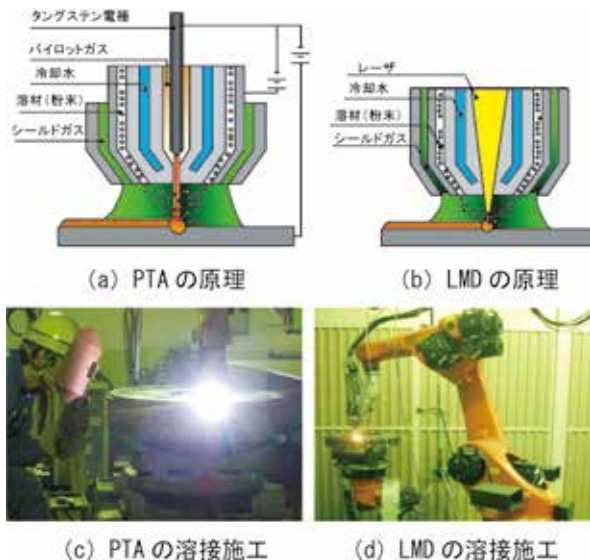


図 2 溶接方法の比較

2.1 肉盛材の溶接性能の比較

肉盛マトリックス素材は、PTA で実績のあるニッケル合金の Hastelloy C 系 (Ni, Cr, Mo, W, Fe, C, Mn, Si) を用いた。この素材は凝固組織をなし、冷却過程で組織変態を生じない特性を持つ。また、ヤング率と線膨張係数がディスク母材とほぼ同等で溶接密着性

(濡れ性) が良いこと、ディスク母材と上盛の熱応力に起因する剪断力を緩和する効果も期待できることから下盛材に適用した。ライニングと摩擦摺動し、膨大な摩擦入熱を受ける上盛材には PTA で実績のあるニッケル合金マトリックスに、粒径を整えた ($\sim 44\ \mu\text{m}$, $105\ \mu\text{m}$) 高融点金属 (W, Mo, Nb, Ta) を混合したものを用いた。

溶接方法の違いによるディスク母材への熱影響を評価するため、試験片の片面 (2 層目) に PTA と LMD を施工 (1 層目の下盛は LMD, 予熱温度は 250°C および 350°C) し、溶接断面の観察を行った。硬度測定の結果から、母材の熱影響層は下盛層からの距離が、PTA で 4mm 、LMD で 2mm であり、LMD の方がディスク母材に与える熱影響が低く抑えられていることが分かった。また、図 3 に示したディスク断面観察では、LMD 上盛部のマトリックスに高融点金属が溶解した析出物がみられた。LMD は PTA に比べてディスク母材の熱影響層が薄い領域に限定されており、熱影響が小さく抑えられている。

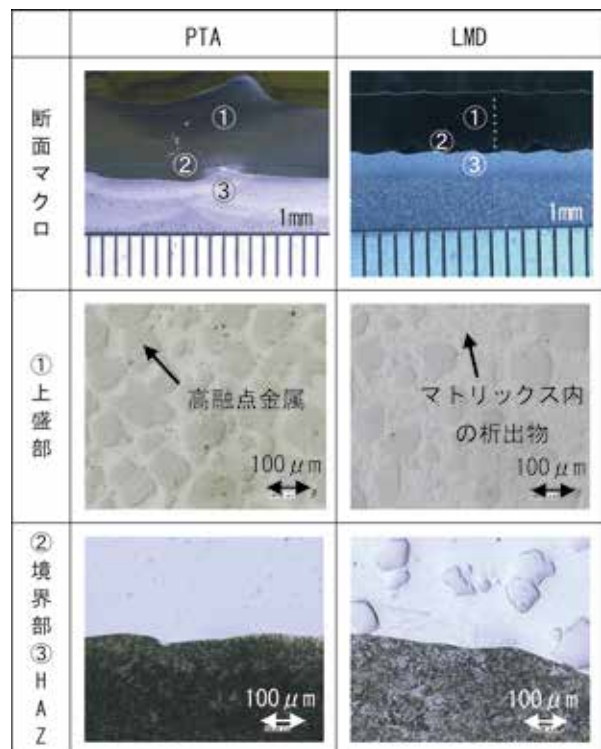


図 3 ディスク断面観察の比較 (予熱温度 250°C)

2.2 肉盛材の高温強度の比較

肉盛の有無による高温環境下での材料強度試験を実施した。温度条件は、室温から 1200°C までとした。引張強さおよび伸び測定の結果を図 4 に示す。

現用のディスク母材は、 600°C 付近で引張強さが著しく低下する鉄系材料特有の性質を示したのに対し、耐熱性の高いニッケル合金を用いた PTA と LMD の肉盛材では温度が高くなるにつれて低下傾向がみられるが、

1200℃の高温時においてもディスク母材よりも高い強度を維持した。伸び測定の結果では、600℃付近でディスク母材に著しい増加が生じている。一方、肉盛材では温度が高くなるにつれて伸びが減少する性質を示した。

高速サーモカメラの観察結果から、ブレーキ中のディスク摩擦面の最高温度は約1000℃の高温状態であることが分かっている。したがって、ブレーキ時の摩擦熱によってディスク母材の強度が低下し、さらに伸びが増大することで熱き裂が発生しやすい状態になっているものと考えられる。一方、肉盛材では高温環境下でも強度低下が抑えられ、さらに伸びが抑制されることから熱き裂が発生し難い状態になっているものと考えられる。加えて、肉盛層が断熱および熱膨脹に対する緩衝材となってディスク母材への直接的な入熱を緩和する役割を果たし、母材の強度低下を低く抑えられることが期待できる。

次に、肉盛溶接法の違いによる肉盛層の性質を比較するため、肉盛マトリックスの詳細な組織分析を実施した。走査型電子顕微鏡（SEM）による観察では、下盛層でLMDの方が微細化しており、強度が向上しているものと考えられる。一方、上盛層については差異がみられなかった。そこで、下盛層のマトリックス、上盛層のマトリックスについて、マイクロビッカース硬さの平均値を測定した結果、LMDの方がPTAよりも約1.2倍高い値を示し、強度が向上しているものと考えられる。

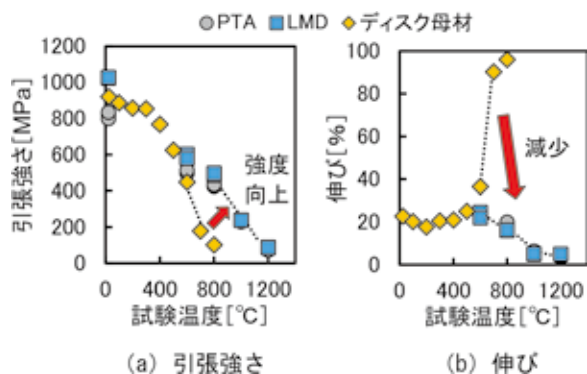


図4 肉盛材の高温強度試験の結果

3. 実物大台上試験

3.1 試験概要

現用の実物大中央締結型ディスクの摩擦面に、LMDにより下盛層（厚さ2mm）と上盛層（厚さ3mm）を形成して耐熱性を向上したディスク（以下、LMDBD）を試作し、台上試験による基本性能を確認した。ただし、締結ボルト孔周りには下盛材で肉盛溶接を施し、耐き裂性を向上した。性能試験と限界性能試験では最高の初速400km/h、耐久試験では初速300km/hでそれぞれ実施した。

ライニング材質はPTA ディスクと組み合わせた実績

のあるものを用い、ライニング形状は等面圧型とした。性能試験のブレーキ種別は、非常ブレーキ（以下、EB）、非常ブレーキにおける停止距離の約4割削減を目標としてブレーキ力を増大した非常ブレーキ向上（以下、EB向上）、ライニング押付力を最大にした非常ブレーキ向上改（以下、EB向上改）の3種類とした。耐久試験は、初速300km/hの非常ブレーキを105回繰り返す条件とした。

3.2 試験結果

耐久試験後の供試体外観を図5に、停止距離の平均値、ディスクおよびライニング最高温度の平均値を図6にそれぞれ示す。平均摩擦係数は、0.2~0.35の範囲にあり、概ね想定値で摩擦係数の大幅な低下は生じなかったため、停止距離についても概ね想定値を満足した。特に、EB向上改では約4600mで停止しており、非常ブレーキの停止距離想定値に対して約6割の低減であった。い

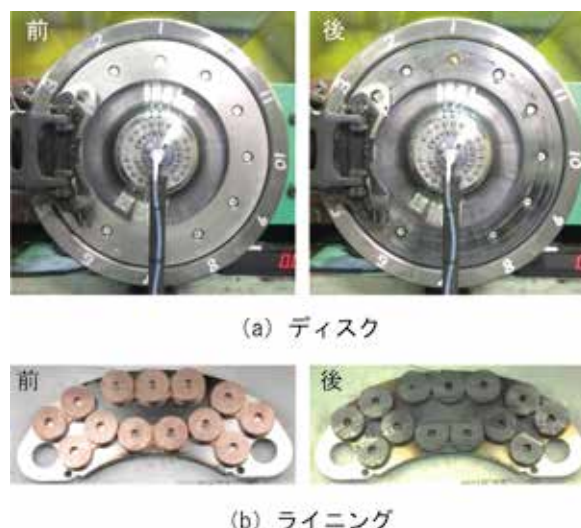


図5 試験前と耐久試験後の供試体外観

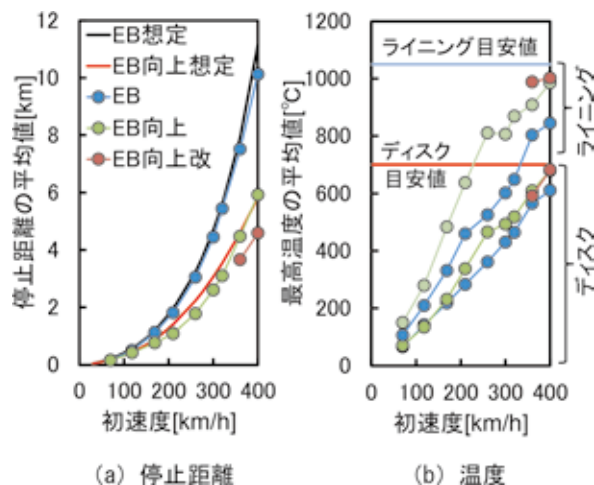


図6 実物大台上試験の結果

れの条件においても、ディスク温度は目安値の700℃を下回り、ライニング温度は目安値の1050℃を下回った。

耐久試験後のディスク摩擦面に目立ったき裂および荒損はなく、良好な状態であった。耐久試験後のディスクを解体した後、摩擦面の浸透探傷試験を行った結果、摩擦面のき裂は認められなかった。また、ディスクの断面観察およびマイクロビッカース硬さを測定した(図7、図8)。観察の結果、肉盛層内およびディスク母材内におけるき裂の発生は認められなかった。

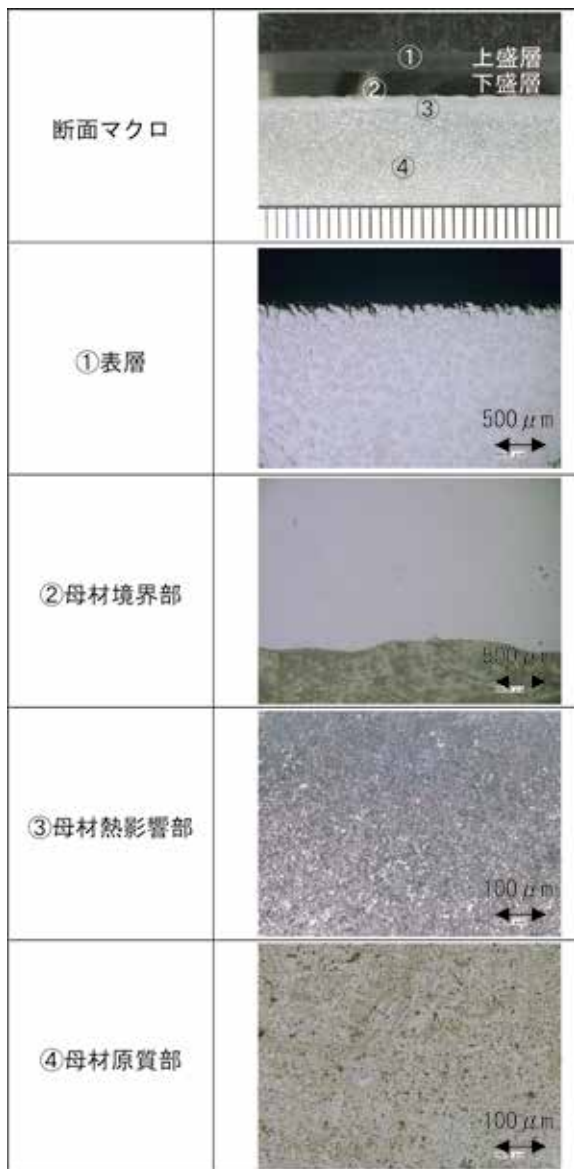


図7 耐久試験後におけるディスク割断観察の結果

硬度はフランジ側、リム側ともに同傾向を示し、上盛層でHv400、下盛層でHv250、母材の熱影響部でHv350~400、母材でHv350であった。硬度は製造時からほぼ変化しておらず、ディスク摩擦摺動面およびディスク母材は正常状態を維持している。

摩耗が最も顕著であったフランジ側におけるディスクの摩耗量は、PTA ディスク比で約1/7、現用のディスク比で約1/3であり、耐摩耗性が大幅に向上した。これは、肉盛層の硬度向上や結晶粒の微細化による粒界強度の向上などの肉盛層の耐摩耗性向上に加え、ライニング成分がディスク摩擦面へ移着して自己潤滑層を形成し、ディスク摩擦面が保護されたことが理由として考えられる。この性質は現用のディスクではみられないことから、LMDBDの特長の一つと言える。

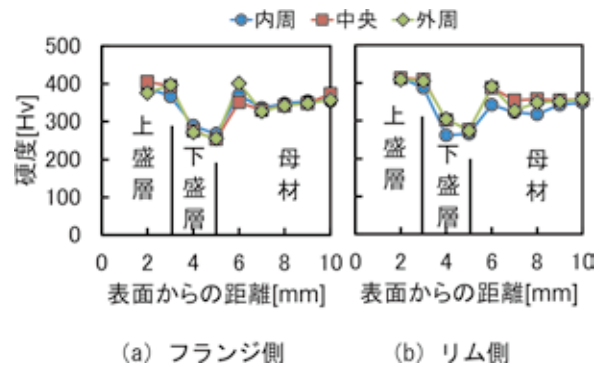


図8 耐久試験後におけるディスク硬度測定の結果

4. 400km/hにおけるブレーキシステムの検討

地震時のように、停電により電気ブレーキが使用できない場合にはディスクブレーキが動作する。開発したLMDBDは、耐熱性の向上により従来では困難であった高速域でも安定的に高いブレーキ力が得られる特長を有し、大幅な性能向上を達成しているが、粘着方式のブレーキであるためにレール湿潤時の滑走の課題がある。すなわち、速度の増加に応じてレール/車輪間の粘着力は低下する傾向を示すため、仮に高いブレーキ力が得られても、雨天時のようなレール湿潤条件では車輪の滑走が多発して所期の性能が得られない懸念がある⁷⁾⁸⁾。

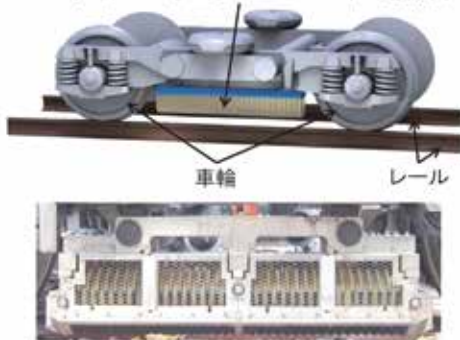
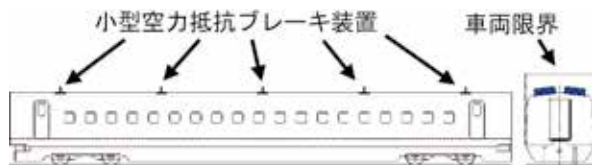
こうした状況を鑑みて、編成中の数軸に増粘着噴射装置を搭載した条件、非粘着方式のブレーキを搭載した研究開発⁹⁾¹⁰⁾が報告されている。上記のように、速度400km/hから営業列車の非常ブレーキ時の停止距離である4000mで確実に停止するには、レール/車輪間の粘着力に依存しない非粘着方式のブレーキ、たとえば小型空力抵抗ブレーキ¹¹⁾¹²⁾(以下、ADB)に加えてリニアモータ型レールブレーキ¹³⁾(以下、LRB)をディスクブレーキと併用したブレーキシシステムが不可欠である。

4.1 ブレーキシシステムの減速度特性

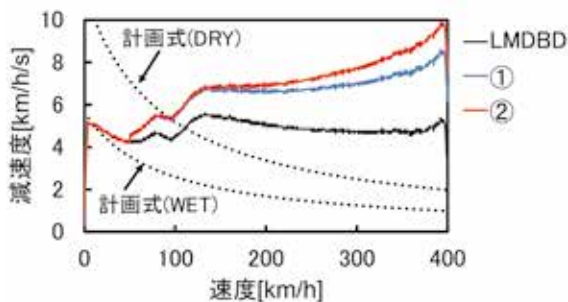
明かり区間やトンネル区間での走行抵抗を考慮したうえで、LMDBD単独、これにADBとLRBの両方を組み合わせた場合の速度に対する減速度特性を図9に示

す。ただし、車両は10両編成とし、LMDBDは台上試験結果、ADBは風洞試験結果の近似値（最大性能となる配置）、LRBは軌条輪試験結果を基にした推定値であり、全台車に搭載するものとした。LRBについては、速度400km/hからの停止距離短縮に対応するため、従来の特長である自己発電による励磁に加えて、バッテリーなどの電力を併用してブレーキ力を高める新たな励磁制御を使用しており、架線停電時にも動作可能である。

図中に示す新幹線の計画式（DRY）はレール乾燥条件におけるEBに、計画式（WET）はレール湿潤条件における常用最大ブレーキに相当し、先頭車両ほどあるいは走行速度が高いほど低下する傾向は、レール/車輪間に働く粘着力の影響を考慮したものである。ここで、明かり区間を（OP）、トンネル区間を（T）で表すと、図中①がLMDBD+ADB（OP）+LRB、図中②がLMDBD



(b) リニアレールブレーキのイメージと試作品



(c) 減速度特性

図9 ブレーキシステムの減速度特性

+ADB（T）+LRBの減速度特性である。

空力抵抗が増すトンネル内（②）では400km/h付近において、粘着の影響を最小限に抑えながら最大10km/h/s（0.28G）の高減速度が得られるものと考えられる。

4.2 停止距離のシミュレーション

図10に示す1車両モデルにおいて、初速360km/hおよび400km/hからのブレーキシミュレーションを行い、停止距離を推定した。

レール条件は、乾燥（DRY）と湿潤（WET）の2種類、明かり区間（OP）とトンネル区間（T）の2種類としたが、トンネル内は天候の影響を受けないため、湿潤条件を設定しなかった。また、各輪軸に制動力を与えると同時に、レール/車輪間に働く粘着力に対して、ホワイトノイズで擾乱を与えることにより低粘着の条件を生成した。その他、滑走再粘着制御¹⁴⁾は制御則（パラメータ）が停止距離に影響を与えるため、考慮しないこととした。

湿潤時の停止距離は、連続滑走が多発して固着に至るなど、乾燥時よりも約20%延伸する傾向を示した（図11）。そこで、編成すべての車両で約20%の延伸が生じ

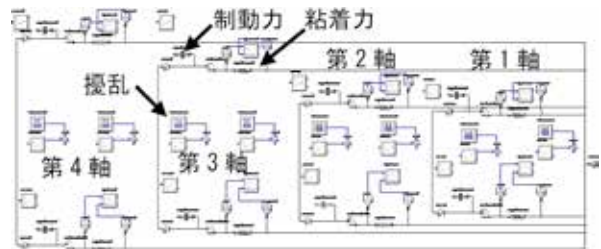
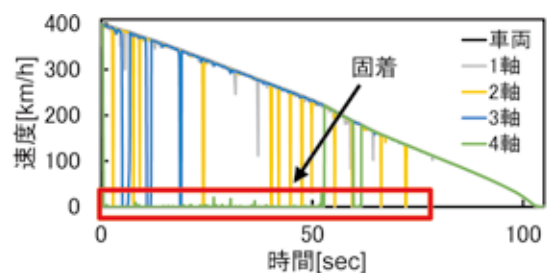
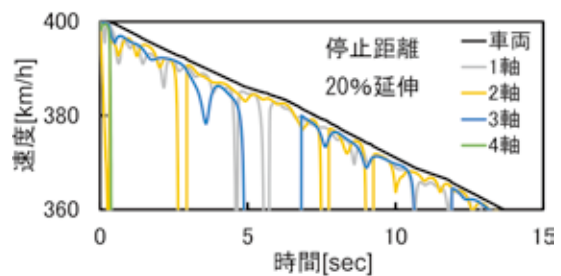


図10 シミュレーションモデル（1車両）



(a) 速度波形



(b) 拡大図

図11 車両および各輪軸の滑走・固着の速度波形

る最悪条件を仮定して停止距離を推定したところ、初速360km/hにおいて、レール乾燥条件の明かり区間が2827m、レール湿潤条件の明かり区間が3292mであった。さらに、初速400km/hにおいては、レール乾燥条件の明かり区間が3404m、レール湿潤条件の明かり区間が3947mとなり、ほぼ目標とする4000m以内に停止できる見通しを得た(図12)。

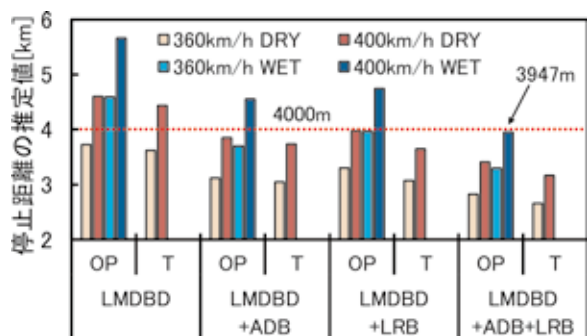


図12 停止距離のシミュレーション結果(10両編成)

5. まとめ

現用ディスクの耐熱性向上を目的に、従来方法に代わってより強固な肉盛層形成が可能なレーザー粉体肉盛溶接法を摩擦面へ適用し、各種性能を実物大台上試験により評価した。さらに、400km/hから4000m以内で停止可能なブレーキシステムについての検討を行った。得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- (1) レーザー粉体肉盛溶接法は、従来の粉体肉盛プラズマアーク溶接法に比べて、ディスク母材への熱影響が低く抑えられること、形成した肉盛層は現用のディスク材質に比べて高温強度が高いこと、レーザー粉体肉盛溶接法の組織は微細化しており、硬度が向上していることなどを確認した。
- (2) レーザー粉体肉盛溶接法を摩擦面に適用した実物大ディスクを試作し、最高速度400km/hまでの台上試験を実施した。その結果、ディスクやライニング温度は目安値を下回り、停止距離の大幅な短縮効果を確認した。また、初速300km/hからの耐久試験後の摩擦面には、熱き裂等の損傷が発生しないこと、ディスクの耐摩耗性が現用のディスクに比べて向上することを確認した。さらに、試験後のディスクを割断調査した結果、ディスク母材への熱影響が小さく抑えられており、正常な状態であることを確認した。
- (3) 開発したディスクに非粘着方式の小型空力抵抗ブレーキとリニアモータ型レールブレーキを組み合わせたブレーキシステムを検討し、シミュレーションにより停止距離を推定した結果、初速400km/hにおいては、レール乾燥条件の明かり区間で3404m、レール湿潤条件の

明かり区間で3947mであり、ほぼ目標とする4000m以内に停止できる見通しを得た。

なお、レール/車輪間に働く粘着力の影響を極力抑えるには、従来よりも性能を高めた増粘着手法(増粘着噴射装置や増粘着研磨子など)を本ブレーキシステムと併せて装備しておくことが有効である。

本研究の一部は、中小企業庁 戦略的基盤技術高度化支援事業による成果を含んでいる。

謝辞

本研究のディスク開発では、大阪富士工業株式会社の辰巳氏、国立大学法人大阪大学の阿部氏、日本製鉄株式会社の坂口氏をはじめ関係者には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

文献

- 1) 西森久宜, 松岡耕作: 高温摩擦試験装置を用いたブレーキ摩擦材の評価手法, 鉄道総研報告, Vol.32, No.8, pp.41-46, 2018
- 2) 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.10-16, 2014
- 3) 片山聖二: ものづくりを革新するレーザー溶接, 溶接学会誌, 第78巻, 第8号, pp.12-21, 2009
- 4) 片山聖二: レーザ溶接技術開発の最新動向, 溶接学会誌, 第80巻, 第7号, pp.11-17, 2011
- 5) 辰巳佳宏, 嵯峨信一, 阿部信行, 坂口篤司, 宮部成央, 米山三樹男, 松井祥司: レーザクラディング表面機能化技術による次世代高速鉄道用ブレーキディスクの開発, レーザ加工学会誌, Vol.25, No.1, pp.24-29, 2018
- 6) 嵯峨信一, 辰巳佳宏, 阿部信行, 坂口篤司: レーザクラディング表面機能化技術による次世代高速鉄道用ブレーキディスクの開発, 溶射技術, 140巻, 1号, 2020
- 7) 大山忠夫: 粘着の話—車輪とレール間の粘着力とその有効利用—, レールアンドテック出版, 2002
- 8) 嵯峨信一, 宮部実, 川村淳也, 杉田裕伸, 竹間克俊: 一本リンク牽引力を用いたブレーキ性能評価手法, 鉄道総研報告, Vol.29, No.2, pp.23-28, 2015
- 9) 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
- 10) 浅野浩二: 次世代新幹線の実現に向けて—これまでの研究開発と新幹線高速試験電車「ALFA-X」の製作—, JREA, Vol.62, No.5, pp.4-7, 2019
- 11) 高見創, 須山哲宏, 井上達哉: 高速鉄道用小型空力抵抗ブレーキ装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.27, No.12, pp.35-40, 2013
- 12) 高見創: 新幹線速度向上に向けた空力ブレーキ装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.34, No.3, pp.5-10, 2020
- 13) 坂本泰明, 柏木隆行, 米山崇, 嵯峨信一: リニアモータ型レールブレーキの開発, 鉄道総研報告, Vol.27, No.7, pp.23-28, 2013
- 14) 土方大輔, Peter Spiess: シミュレーションによる停止距離分布傾向を用いた滑走制御性能評価, 鉄道総研報告, Vol.33, No.10, pp.29-34, 2019