

称号及び氏名 博士（工学） 原田 尚紀

学位授与の日付 2016年3月31日

論文名 「低合金鋳鋼ブレーキディスクの長寿命化に関する研究」

論文審査委員 主査 東 健司

副査 井上博史

副査 金野泰幸

副査 上杉徳照

## 論文要旨

鉄道用ブレーキディスクは車両の運動エネルギーを摩擦により熱エネルギーに変換し、車両を安全に減速させ、正確な運行に寄与する重要な制動部材である。近年、省エネルギーおよびCO<sub>2</sub>削減の観点から、航空機や自動車から鉄道へのモデルシフトが進んでいる。また大量輸送が可能であるため、特に人口増加、経済発展の著しい新興国において鉄道インフラ開発が活況を呈している。それに伴い鉄道車両の高速化が進み車両制動時にブレーキディスクが負担するエネルギーは増大しており、高負荷に耐えうる耐久性の高いブレーキディスクの開発が喫緊の課題となっている。日本の新幹線では、1964年の0系開業当時には（現在では、在来線にも適用されている）低合金鋳鉄ディスクが採用されていた。1992年に高速化に対応するため300系が投入されて以降、耐熱性が高い鋼ディスク（A4340相当鍛造鋼、0.35% C）が適用されているが、それ以後、材料成分改良によるディスクの高機能化へのアプローチは報告されていない。また、他国においても同様に、成分改良によるディスクの高機能化の報告は見当たらない。

他方、ブレーキディスクの制動性能向上は冷却フィンの付与により放熱性を高めることが有効であるが、仏国のTGVや新幹線の鋼ディスクは金型鍛造により製造されているため、形状自由度に制約があり、冷却フィン付与などによる制動性能向上には限界がある。そのため、本研究開発では、造型自由度が高く、低コストで製造可能な鋳造プロセスを用いて、ディスクの寿命延伸、メンテナンスコスト低減の点で顧客ニーズとなっている耐熱衝撃性および耐摩耗性の向上を課題とした。鋼の合

金添加による高強度化と耐熱衝撃性の向上はトレードオフの関係にあり、必要強度を確保しつつ、耐熱衝撃性を向上するには、材料組成の改良が必要となり、新規成分の研究開発に取り組んだ。ディスクは制動により相手材であるライニングとの局所摩擦により、オーステナイト化終了温度（以下  $A_f$  点）以上まで昇温を示すホットスポットの生成とその後の急冷によって同部はじん性が低いマルテンサイトに変態し、引張応力に加え変態応力が作用し、熱き裂の発生が促進される。そのため、耐熱衝撃性向上の手段としては、マルテンサイト生成抑制のため、焼入れ性の制御、すなわち  $A_f$  点およびマルテンサイト変態開始温度（以下  $M_s$  点）の向上およびベイナイト変態の促進を採用した。また、耐摩耗性向上の手段としては、硬質微細炭化物（VC）による析出強化を採用した。V は C との相互作用エネルギーが大きく、極微量添加でも極めて効果的に炭化物を形成し、経済的にもメリットが高い元素であるため選択した。高温の耐摩耗性、すなわち高温硬さは高温強度と正の相関があり、耐摩耗性を高温強度で予測した。V 添加量を変化させた高温引張試験から最適 V 量を決定した。また、V 添加鋼の構成方程式から、V 添加が高温強度向上に及ぼす影響を考察した。

耐熱衝撃性は焼入れを繰り返す熱サイクル試験にて、また耐摩耗性は実体ディスクの摩耗形態であるアブレッシブ摩耗を再現できる高温摩耗試験にて評価した。開発目標値としては、ユーザー取り換え周期の関係から、既存材に対し耐熱衝撃性、耐摩耗性ともに 2 倍以上と設定した。A4340 鋼と比較し、ディスク材として必要な引張強度を確保する観点から 0.23 % C-0.80 % Mn 系を基本組成とした。基本組成材（以下基準材）では A4340 鋼に対し、耐熱衝撃性、耐摩耗性ともに同等以上であり、以後の研究開発は基準材との比較で進めた。

本論文は次の 5 章から構成されている。

第 1 章では、鉄道高速化に対応するためのブレーキディスクの果たすべき役割を述べた。材料開発に先立ちディスク材の先行知財、研究論文を整理するとともに、マルテンサイト鋼ディスクの課題である白色層の発生とそれによる耐熱衝撃性の低下を提起した。最後に開発目標値（基準材に対し、2 倍以上の耐熱衝撃性、耐摩耗性付与）とそれを解決する手段（マルテンサイト変態の抑制、ベイナイト変態の促進および VC 析出の利用）を述べた。

第 2 章では、マルテンサイト鋼の問題点である白色層の発生と耐熱衝撃性低下との関係を明らかにし、それを解決する合金組成の改良を行い、耐熱衝撃性向上の方

向性を明らかにした。まず、高い焼入れ性を有する基準材の制動試験後に発生する白色層のき裂感受性を評価するために、白色層の曲げ疲労試験を行い、疲労き裂進展速度を求めた。その結果、制動試験後の白色層を含むディスク材の Paris 則が成立する領域での指数  $m$  値は 4.85 に対し、白色層がない未使用ディスク材は 4.19 となり、白色層を含むディスク材のき裂伝播速度が大きいことがわかった。すなわち白色層はき裂感受性が高く、耐熱衝撃性を損なうことが示された。次に、耐熱衝撃性の向上を目標として、白色層発生を抑制しうる合金組成の開発を行った。溶製試験材の  $A_f$  点、 $M_s$  点の評価、熱サイクル試験を行い、必要引張強度との関係から、基準材に対し Mn と Ni を減じ、Mo を増加させた耐熱衝撃性に優れる低焼入れ材（組成 0.23 C-0.50 Mn-0.80 Mo）を開発した。基準材と低焼入れ材の組成にて実体ディスクを鋳造し、新幹線相当の最高制動開始速度 300 km/h で実物大制動試験を実施し、摺動面近傍の組織変化を比較した結果、基準材ではマルテンサイトの生成および多数のき裂発生を確認した。一方、低焼入れ材では摺動面近傍のき裂数の減少および焼き戻しマルテンサイトの生成を確認し、成分改良により耐熱衝撃性が向上することを確認した。しかしながら、両材ともそれらの CCT 線図から、新幹線よりも高負荷な制動条件を想定した急冷時では、マルテンサイトが優先的に生成することが示唆されたために、組成の見直しが必要となった。そこで V を 0.1 % 添加した改良材ではベイナイトノーズが急冷側に張り出し、急冷時でも安定的にベイナイト変態が生じ、マルテンサイト変態が抑制されることが CCT 線図より示された。また  $A_f$  点/ $M_s$  点は、基準材の 1096 K/643 K に対し、改良材は 1143 K/693 K となり、それぞれ 47 K/50 K の向上となり、現条件よりも過酷な制動条件でも耐熱衝撃性が維持されることが予測できた。同時に V 添加の効果として、基準材および低焼入れ材の急冷側で観察された凝固偏析に伴う島状マルテンサイトのまだら組織が、改良材ではほとんど見られず均一組織を呈することが明らかとなった。すなわち改良材では、ベイナイトの優先的な生成によって、鋳造材の欠点である凝固偏析に伴う変態ムラ生成が抑制されることが確認された。

第 3 章では、V 添加、硬質微細炭化物 (VC) の析出による高温硬さの向上による耐摩耗性向上の影響を明らかにした。低温 253 K の衝撃値を損なわず、973 K の引張強度を基準材に比べ 2 倍以上向上させる最適 V 量は 0.10 % であると決定した。しきい応力を考慮した構成方程式を導出した結果、本合金系の高温変形機構は格子拡散律速であり、しきい応力は V 添加により VC 粒子数の増加と平均粒子径が減少したことによって顕著に増加することが示された。また、973 K における硬さは基準材

が 46 HV に対し、改良材は 67 HV となり、耐摩耗性向上の目途付けができた。

第 4 章では、成分改良による耐熱衝撃性および耐摩耗性の実証と制動性能の確認およびき裂伝播特性の比較を行った。摩耗量評価については、実物大試験では摩耗量を評価することが困難なため、実制動条件を模擬した 1073 K の高温摩耗試験機にて評価した。改良材に対し、第 2 章で実施した新幹線条件よりも過酷な最高制動開始速度 430 km/h の実物大制動試験を行い、耐熱衝撃性向上の効果を確認した。また、単板ディスクを試作し制動性能の確認を行った。き裂発生後のき裂伝播を想定し、CT 試験片を用いた疲労き裂伝播速度試験にて評価した。3 章で予測した耐摩耗性向上効果を高温摩耗試験にて実証した結果、1073K において、基準材は比摩耗量  $5.2 (\times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm})$  に対し、改良材は 1.6 と 3 倍以上の耐摩耗性を示し、耐摩耗性についても目標値をクリアしたことを確認した。試験後の摩耗面は基準材では局所的にはく離していたのに対し、改良材は塑性流動し、はく離は認められなかった。実物大制動試験では、新幹線条件よりも過酷な 430 km/h からの制動にもかかわらず、改良材ディスクにはき裂発生は認められず、また摺動面近傍は均一なベイナイト組織に変化していることを確認し、耐熱衝撃性の向上を実証できた。制動性能の比較では、改良材は基準材よりも摩擦係数が向上、停止距離が短縮することをそれぞれ確認した。き裂伝播速度を評価した結果、Paris 則が成立する領域での指数  $m$  値は基準材が 3.44 に対し、改良材が 2.97 と改良材は微細 VC の析出により、基準材に比べき裂伝播が抑制されることを確認した。

最後に第 5 章では本研究の総括として、まとめと今後の展望を述べた。

本研究では、製造コストの安価な鋳造法の採用、レアメタル削減を勘案しながら、鉄道車両の高速化に対応した鋳鋼製ブレーキディスク材の実用化を目指して成分改良を行った。本論文は特に大学の研究シーズ（高温変形における析出強化ならびに構成方程式による合金組成最適化予測）を活用し、鋼ディスク材の成分改良の成果を理論的にまとめたものである。顧客ニーズであるディスクの長寿命化、耐熱衝撃性および耐摩耗性の向上を目標として、将来の高速化に備えた高負荷制動に耐えうる新規成分を開発した。改良材は開発目標値を大きくクリアし、改良材ディスクの実用化が期待されている。

## 審査結果の要旨

人口増加、経済発展の著しい新興国において鉄道インフラ開発が活況を呈している。それに伴い鉄道車両の高速化が進み、車両制動時にブレーキディスクが負担するエネルギーは増大しており、高負荷に耐えうる耐久性の高いブレーキディスクの開発が喫緊の課題となっている。本研究では、造型自由度が高く、低コストで製造可能な鋳造プロセスを用いて、ディスクの寿命延伸、メンテナンスコスト低減の観点から、耐熱衝撃性および耐摩耗性の向上を目的とした。開発目標値としては、ユーザー取り換え周期の関係から、既存材に対し耐熱衝撃性、耐摩耗性ともに 2 倍以上と設定した。また、ディスク材として必要な引張強度を確保する観点から、基準材の基本組成を Fe-0.23%C-0.80%Mn 系とした。研究結果として、以下に述べるような成果を得ている。

① マルテンサイト鋼の問題点である白色層の発生と耐熱衝撃性低下との関係を明らかにし、白色層のき裂感受性を評価するために、白色層の曲げ疲労試験を行い、疲労き裂進展速度を求めた。その結果、制動試験後の白色層を含むディスク材の Paris 則が成立する領域での指数  $m$  値は 4.85 に対し、白色層がない未使用ディスク材は 4.19 となり、白色層を含むディスク材のき裂伝播速度が大きいことを示し、白色層はき裂感受性が高く、耐熱衝撃性が損なわれることを明らかにした。

② 耐熱衝撃性の向上を目標として、白色層発生を抑制しうる合金組成の検討を行った結果、V を 0.1 % 添加した改良材では、ベイナイトノーズが急冷側に張り出し、急冷時でも安定的にベイナイト変態が生じ、マルテンサイト変態が抑制されること、さらに現条件よりも過酷な制動条件でも耐熱衝撃性が維持されることを明らかにした。また、V 添加の効果として、ベイナイトの優先生成により、鋳造材の欠点である凝固偏析に伴う変態ムラの生成が抑制されることを確認した。

③ V の固溶と硬質微細炭化物の析出による高温硬さの向上による耐摩耗性向上の影響を検討した結果、必要な衝撃値を保持したまま、973 K での引張強度を 2 倍以上向上させる最適 V 量が 0.10 % であることを示した。また、しきい応力を考慮した高温変形の構成方程式を導出した結果、本合金系の高温変形機構は格子拡散律速であり、しきい応力は V 添加により VC 粒子数の増加と平均粒子径の減少により顕著に増加することを明らかにした。また、973 K における硬さは、基準材 (46 HV) 比較して、改良材は 67 HV となり、耐摩耗性向上を確認した。

④ 成分改良による耐熱衝撃性、耐摩耗性の実証、および制動性能の確認とき裂伝播特性を比較検討した結果、430 km/h の実物大制動試験において、耐熱衝撃性向上の効果を、また、1073 K での高温摩耗試験では、基準材より 3 倍以上の耐摩耗性を確認し、本研究

の目標値を達成した。

本研究成果は、学術的のみならず工業的にも大いに期待できる有益な知見を含んでおり、材料開発および製造技術の一層の高度化に貢献するところ大である。さらに、申請者が自立して研究を行うに十分な能力と学識を有することを証したものである。