

鉄道車両用低合金ベイナイト鋳鋼ブレーキディスク材料の開発

Development of Low-Alloy Bainitic Cast Steel Material for Railway Car Brake Disks

原田尚紀*

Naoki Harada

近年、鉄道車両の高速化が進み、ブレーキディスクには制動負荷が増大している。このため、鉄道車両用ブレーキディスクは、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が望まれている。今回開発した微量バナジウムを添加したベイナイト鋼は、従来の焼入れ性の高いマルテンサイト鋼に対し、高温下において組織変化が抑制されることにより耐熱衝撃性に優れること、および微細炭化物の析出により高温の耐摩耗性を向上させることをこれまでの研究開発において見出した。本報では、ベイナイト鋼の特徴と実物大制動試験および摩耗試験によってベイナイト鋼ディスクの長寿命化の有効性を示した結果について報告する。

Recently, the maximum running speed of railway vehicles has increased, and thus the braking load on brake disk has increased. Therefore improvement in the heat-shock resistance and wear resistance of the disk for railway vehicles is desired in terms of reducing their maintenance costs. As a result of our previous study, it was confirmed that the heat shock resistance of developed bainitic steel containing small amount of vanadium was superior in heat-shock resistance compared to conventional martensitic steel with high hardenability by suppression of martensitic transformation at high temperatures, and that the wear resistance of such developed steel at high temperatures was higher than that of martensitic steel due to fine carbide precipitation. In this report the characteristics of the bainitic steel and the results regarding the effectiveness of the bainitic steel for longer disk life found by conducting full-scale braking tests and wear tests are reported.

1 はじめに

近年、環境負荷低減の観点から優れた輸送効率を有する鉄道車両の高速化ニーズは高まっている。また耐熱衝撃性および耐摩耗性は鉄道用ブレーキディスク（以下単にディスク）の寿命を決定することから、メンテナンスコスト低減のために、それら特性の向上が求められている。著者らは既報¹⁾の通り、マルテンサイト系低合金Ni-Cr-Mo鋼の成分改良による耐熱衝撃性の向上を試みてきた。しかしマルテンサイト系低合金鋼の摺動面には亀裂感受性の高い変態組織である白色層（再焼入れマルテンサイト）が生成しやすいという、マルテンサイト系低合金鋼の欠点が明らかになった²⁾。そこで、微量のバナジウム（V）を添加し、マルテンサイト化を抑制することで耐熱衝撃性を向上させるとともに、微細V炭化物（VC）の析出により高温硬さを向上させることで耐摩耗性を向上しうるベイナイト系鋳鋼材を開発した。本報では、まずベイナイト鋼の特徴を述べる。ついでマルテンサイト系基準材とベイナイト系開発材とを比較しながら、実物大制動試験により耐熱衝撃性向上の効果を、

最後に高温摩耗試験により耐摩耗性向上の効果を示した実証例を紹介する。

2 ベイナイト鋼の特徴

ベイナイトは炭化物の析出箇所により、フェライト界面に析出する上部ベイナイトと、フェライト粒内に析出する下部ベイナイトに区分される³⁾。本報で紹介する開発鋼は下部ベイナイトを含む鋼であり、その特徴は以下の通りである。

- ・亀裂先端に炭化物があるとその伝播が抑制される。ベイナイト鋼は微細炭化物が多数析出するため、亀裂が伝播しにくくなる⁴⁾。
- ・高温域から常温に至る冷却過程でベイナイトが生成するため、亀裂感受性が高いマルテンサイト相への組織変化が生じにくく、亀裂感受性が低くなる。
- ・微細炭化物が転位移動を妨げるために、耐摩耗性が向上する。

なお、これらの特徴は、制動による熱エネルギーの繰返し負荷を受けるディスク材料に好適であると言える。

表1 供試材の化学組成

(mass%)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Al	Fe	C _{eq}
基準材	0.20 ~ 0.30	0.60 ~ 1.00	0.60 ~ 1.00	1.50 ~ 2.00	0.60 ~ 1.00	0.40 ~ 0.60	—	0.05 以下	残部	0.70 ~ 0.75
開発材	0.20 ~ 0.30	0.60 ~ 1.00	0.50 未満	0.60 ~ 0.80	0.60 ~ 1.00	0.60 ~ 1.00	0.08 ~ 0.12	0.05 以下	残部	0.70 ~ 0.75

3 試験方法

3.1 供試材

基準材¹⁾ および開発材の化学成分を表1に示す。両材料において強度確保の観点から炭素量、炭素当量をほぼ等しくした。開発材はマルテンサイト化を防止する目的でフェライトからオーステナイトへ変態が完了する温度である A_{c3} 変態温度 (以下単に変態温度) を向上させるために、Mn、Ni および Mo 量を変化させ、変態温度向上に顕著に効果を示す V⁵⁾ を約 0.10 mass% 程度添加した。表1の化学成分を有する実体ディスクおよびブロックを鋳造し、各試験に供した。JIS G 0203(2009)に記載されている炭素当量 C_{eq} は以下で表現され、含有元素量から鋼合金の硬さを見積もる式である。

$$C_{eq} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}$$

3.2 組織、耐力および変態温度

開発材の成分改良の効果を確認するために、基準材および開発材を SEM による組織観察、引張試験による常温および 700℃ の耐力の測定およびフォーマスター試験機による変態温度の測定に供した。

3.3 制動試験後の亀裂発生状況の比較

実物大ディスクを鋳造し、制動試験に供した。基準材は最高制動初速度 300km/h (車輪およびディスク回転数 1,850min⁻¹) の国内新幹線を想定した高速鉄道車両用非常制動試験を含む制動試験を行ない、ディスク摩擦面に対し実使用レベルの熱負荷を与えた。一方、開発材は今後の更なる高速化対応を見据えて、430km/h (車輪およびディスク回転数 2,650min⁻¹) からの制動を含む試験に供した。表2に基準材、開発材の制動試験諸元を示す。

表2 制動試験諸元

材 料	制動開始速度 (km/h)	総制動回数	総制動エネルギー (MJ)
基準材	30-300	78	241
開発材	40-430	132	850

図1に示すように、制動試験後のディスク摺動面をデジタルマイクロスコブで拡大観察し、亀裂発生状況を比較した。

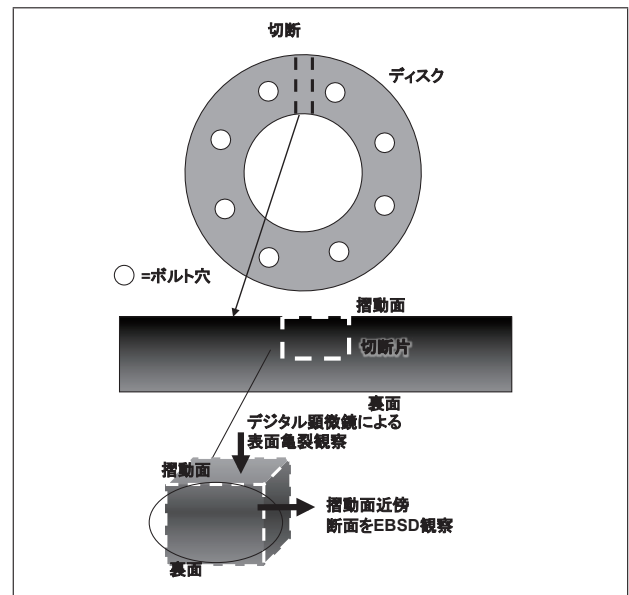


図1 制動試験後の亀裂発生状況および組織変化の確認方法

3.4 組織変化の確認

ディスク断面を研磨し、電子線後方散乱回折装置 (EBSD phase map) で観察し、組織変化の有無を確認した。

3.5 耐摩耗性の比較

図2に示すように、ディスクの相手材として用いられる青銅系焼結ライニング材を押し当て高温摩耗試験に供し、基準材および開発材の耐摩耗性を比較した。試験諸元を表3に記す。実体ディスク表面の温度に近づけるために、供試材の表面を高周波加熱装置にて 800℃ まで昇温させた。耐摩耗性の指標は一般的に用いられる比摩耗量 {試験体の摩耗減量を鋼の密度 7.8g/cm³ で除して摩耗体積とし、それを荷重 (N) および滑り距離 (m) で除した値} を用いて比較した。

表3 高温摩耗試験諸元

押付荷重 (N)	回転数 (min ⁻¹)	試験時間 (min)
400	1,000	5

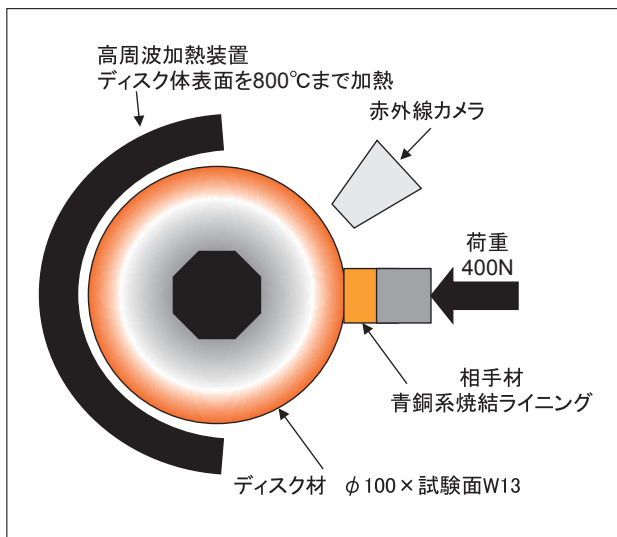


図2 高温摩耗試験方法

4 試験結果と考察

4.1 組織、耐力および変態温度

図3に供試材のSEM写真を示す。基準材では、粗大な炭化物が多いのに対し、開発材では微細な炭化物（VC）が多数析出していた。表4に供試材の常温および700℃における0.2%耐力および変態温度の測定結果を示す。開発材は基準材に対し700℃における耐力が顕著に向上した。これは、微細な炭化物が転位の移動を妨げたために、開発材では高温強度が向上したと考えられる⁶⁾。また、成分改良により開発材の変態温度が基準材に対し向上したことが示された。

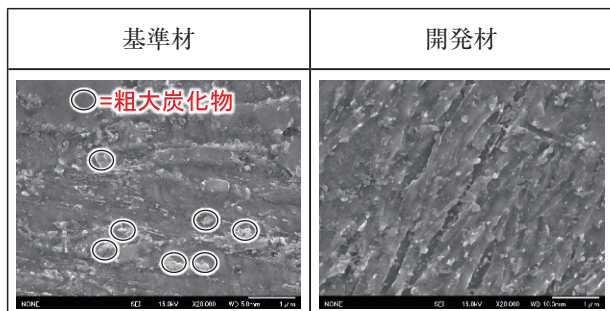


図3 組織写真 (SEM)

表4 供試材の常温および700℃における0.2%耐力およびA₃変態温度

材 料	0.2%耐力 (MPa)		A ₃ 変態温度 (℃)
	常温	700℃	
基準材	850	69	823
開発材	1,037	157	870

4.2 亀裂発生状況

図4に制動試験後の亀裂発生状況を示す。基準材ディスクでは亀甲状に発生した多数の亀裂が観察されたが、開発材ディスクではほとんど認められなかった。

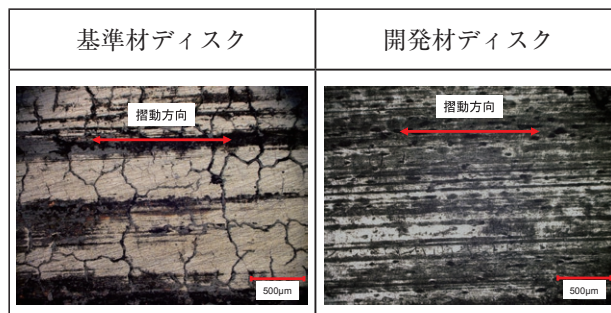


図4 亀裂発生状況

4.3 組織変化

図5にEBSD観察結果を示す。緑色はフェライトを、赤色は残留オーステナイトを含む再焼入れ組織（マルテンサイトと残留オーステナイト混合相）を示している。基準材ディスク母材（摺動面とは反対の図下部非熱影響部）はフェライトであるが、摺動面近傍は制動試験中に変態温度以上に昇温し、その後の室温までの冷却過程でマルテンサイトが生じたことを示している。基準材ディスクはマルテンサイトに变化したことを示したのに対し、開発材ディスクの摺動面近傍は母材と同じく、フェライト（フェライトと炭化物から構成されるベイナイト）のままで組織変化がないことが示された。一般に、鋼の局所的なマルテンサイト変態によって、変態した組織と周囲の未変態組織との間でミクロ的な応力差が生じ、亀裂発生に至る。しかしながら開発材のようなV添加鋼ではベイナイト変態の促進、すなわちマルテンサイト変態抑制の効果が示されており⁷⁾、その結果、ミクロ的な応力差が生じにくく、加えて4.1で述べたように、高温強度と変態温度の向上によって熱疲労強度が向上したために、開発材ディスクでは亀裂発生が低減したと考えられる。

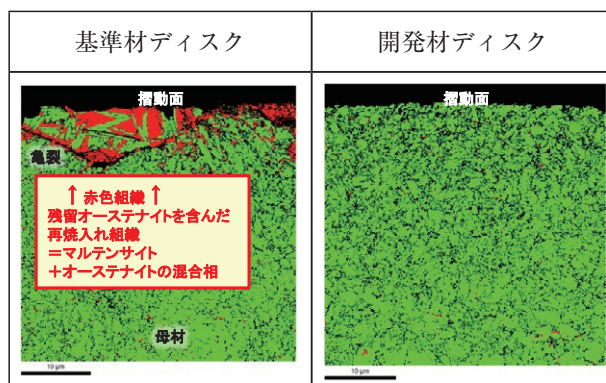


図5 EBSD phase map 観察結果 (組織変化の様子)

4.4 耐摩耗性比較

図6に耐摩耗性評価結果を示す。開発材は基準材に比べ、比摩耗量が1/3に低減、すなわち約3倍の耐摩耗性を示した。開発材の微細炭化物生成により耐摩耗性が向上したものと考えられる。

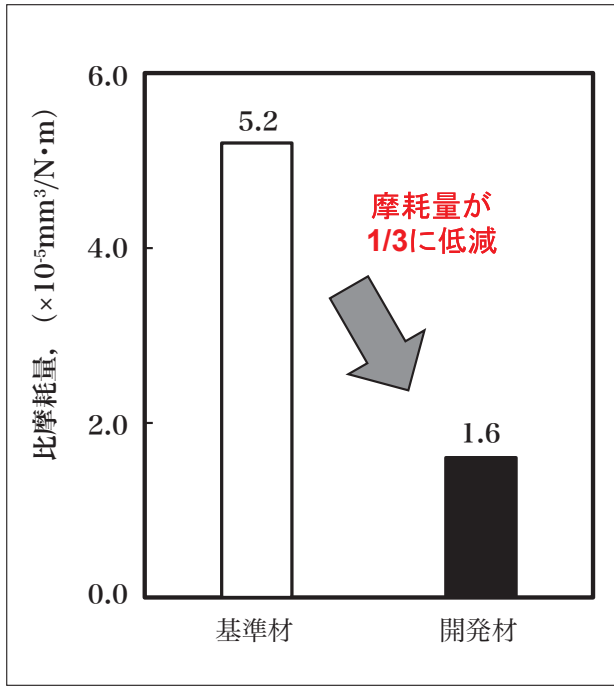


図6 耐摩耗性比較結果

5 まとめ

メンテナンスコストの削減を目的としたディスクの耐熱亀裂性および耐摩耗性向上を目指し、材料開発を行った結果、以下の結論を得た。

- ・これまでのマルテンサイト系基準材ディスクに対し、ベイナイト系開発材ディスクは組織変化しにくく、亀裂発生の抑制が期待できる結果を得た。同時に耐摩耗性に優れることも明らかになった。
- ・実物大制動試験により開発材ディスクは実車への適応が可能であることを確認した。

謝辞：

本研究開発の成果は、大阪府立大学工学研究科物質・化学系専攻 マテリアル工学分野 東健司教授のご指導により得られた研究成果をまとめたものであります。誌上ではありますが御礼申し上げます。

参考文献：

- 1) 原田尚紀、谷田幸夫：耐熱衝撃性に優れた鉄道車両用鋳鋼ブレーキディスクの開発、クリモト技報 62 (2012) pp.29-33
- 2) 原田尚紀、宅間正則、齋藤賢一、脇田昌志、辻川正人、東健司：AE法による鋳鋼ブレーキディスク白色層の曲げ疲労損傷評価 鋳造工学 87 (2015) 1 pp.52-59
- 3) 牧正志：鋼のベイナイトとその工業的重要性 まてりあ 46 (2007) No.5 pp.321-326
- 4) 原田尚紀、都築勇人、宅間正則：第169回鋳造学会全国講演大会概要集 (2017) p.98
- 5) 邦武立郎、加藤直：低合金熱間鍛造用型鋼の研究 鉄と鋼 54 (1968) pp.572-584
- 6) N. Harada, T. Uesugi, Y. Takigawa, K. Higashi Improvement of High Temperature Strength by Addition of Vanadium Content of Ni-Cr-Mo Steel for Brake Discs, ISIJ International, 57 (2017), No. 3 pp. 550-557
- 7) J. Głownia, B. Kalandyk Effect of precipitation strengthening in low alloyed Mn-Ni cast steels Journal of materials processing technology 207 (2008) pp.147-153

執筆者：

原田尚紀

1998年入社

ブレーキディスクの開発に従事

博士 (工学)

技術士 (金属部門)

