

耐熱衝撃性に優れた鉄道用鋳鋼ブレーキディスクの開発

Development of Cast Steel Brake Disk with Heat Shock Resistance

原田尚紀* 谷田幸夫**

Naoki Harada, Yukio Tanida

近年、鉄道車両の高速化が進み、制動負荷が増大しており、鉄道車両用ブレーキディスクの耐熱衝撃性の改善が望まれている。これまでの研究において当社では、鋼の焼入れ性と耐熱き裂性には密接な関係があることを確認している。

そこで、制動試験によって焼入れ性の異なる2種類の組成を有するブレーキディスクの耐熱き裂性を比較した。制動試験の結果、焼入れ性の高いブレーキディスクは、摩擦面近傍において硬さが上昇し、き裂が数多く観察された。一方、焼入れ性の制御したブレーキディスクは、摩擦面近傍における硬化がほとんどなく、き裂の数も少なかった。このことから、焼入れ性を制御したブレーキディスクは高速鉄道車両への適用が期待できる。

Due to the recent increase in running speeds and braking loads carried by railway vehicles, it is necessary to improve the heat-shock resistance of the disc brakes in railway vehicles. The results of a previous study confirmed that the martensite hardenability (hereinafter referred to as hardenability) of steel had a close connection with the heat-shock resistance. In this study, the heat-shock resistance discs of two materials with different hardenability were compared in a braking test. In the disc with high hardenability, hardness near the friction surface increased and many cracks were observed. On the other hand, in the disc with low hardenability, hardness hardly changed, and only a few cracks were observed. It is expected for the disc with controlled hardenability to be applied for high speed railway vehicles.

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。鉄道車両用ブレーキディスク（以下、単にディスク）は制動時に発生する摩擦熱を繰り返し受けることから、苛酷な熱負荷が摩擦面に与えられ、組織変化や熱き裂が生じることがある^{1)~3)}。特に新幹線などの速度300km/h走行の高速鉄道のディスクには耐熱性や強度が求められるため、機械的性質の優れたNi-Cr-Mo系鋳鋼もしくは鍛鋼ディスクが国内外とも適用されている。鉄道の高速化に伴い、ディスクの耐熱衝撃性の改善は極めて重要な技術課題となってきた。

筆者らは、これまで鋳鋼ディスクの耐熱衝撃性改善を目的とした、鋼焼入れ性と耐熱衝撃性の関係に着目したラボレベルの研究開発を進めてきた。その結果、焼入れ性の高い従来材であるA3430鋼相当材（以下、基準材と称す）に対し、焼入れ性を制御した耐熱衝撃性改良材

（以下、改良材と称す）を開発した⁴⁾。

本報告では、基準材および改良材の実物大鋳鋼ディスクを試作し、制動試験を行い、成分と耐熱衝撃性、摩擦面近傍の組織変化の関連を調査することによって、成分改良の効果について検討した。

2. 試験方法

2.1 供試材

基準材および改良材の化学成分を表1に示す。2材において炭素量を等しくし、耐熱衝撃性に及ぼす焼入れ性の影響を調査する目的で基準材に対し改良材のMnを減じた⁵⁾。またAc3変態温度の影響を調査する目的でNiを減じた⁶⁾。さらには、ディスク材の高温引張強さを改善する目的でMoを増やした。

ディスク材の常温および700℃における0.2%耐力および初期硬さ（HV1.0）を表2に、変態温度測定結果を表3に示す。

表1 ディスク材の化学組成 (mass%)

材料	焼入れ性	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Al	Ceq (%)
基準材	高	0.20 0.30	0.60 1.00	0.60 1.00	1.50 2.00	0.60 1.00	0.40 0.60	0.03 以下	0.70 0.75
改良材	低	0.20 0.30	0.60 1.00	0.50 以下	0.50 以下	0.60 1.00	0.60 1.00	0.03 以下	0.70 0.75

表2 ディスク材の常温および700℃における0.2%耐力および硬さ

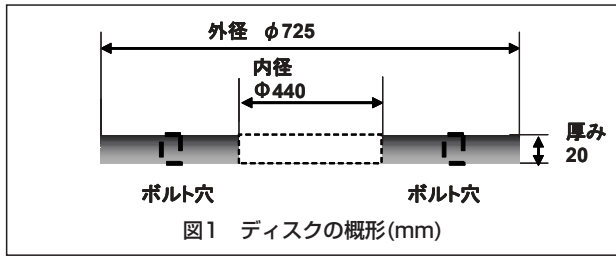
材料	常温		700℃	
	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	HV1.0	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	HV1.0
基準材	850	323	69	38.1
改良材	1050	380	103	43.8

表3 ディスク材のAc3、Ac1変態温度(℃)

材料	Ac3	Ac1
基準材	852	736
改良材	915	765

* 技術開発室 クリモト創造技術研究所
** 素形材エンジニアリング事業部 素形材技術部

基準材および改良材の成分を有する図1に示すディスク（概形：外径725mm×内径440mm×厚さ20mm）を鋳造した。鋳造後、熱処理と機械加工を行い、制動試験用ディスクとした。



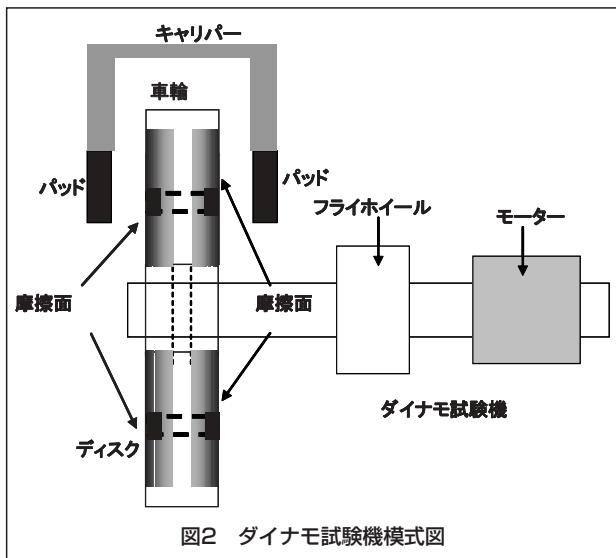
2.2 ヒートサイクル特性比較

供試材を高周波加熱により1,000℃まで昇温、その後水冷のサイクルを繰り返し与える、ヒートサイクル試験に供し、耐熱衝撃特性を比較した。

2.3 制動試験

1枚の車輪に2枚のディスクを摩擦面の中央でボルト締結した車輪マウントタイプのディスクを、図2および図3に示すダイナモ試験機を用いて制動試験した。

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車両用非常制動試験を6回行い、ディスク摩擦面に対し実使用レベルの熱負荷を与えた。



2.4 熱変形量測定

ディスクは制動熱によって、外周部が反り上がる熱変形が生じる。ディスクが安定した制動性能を示すためには、熱変形は小さい方が望ましい。制動試験後の熱変形を図4に示す方法で評価した。

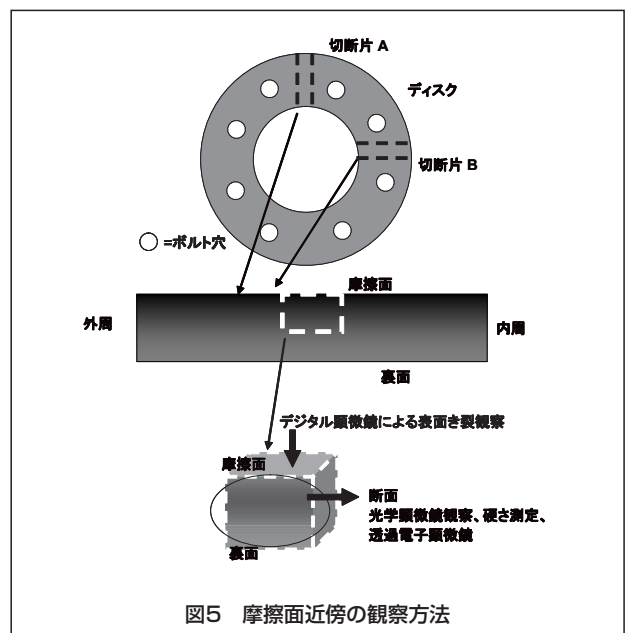
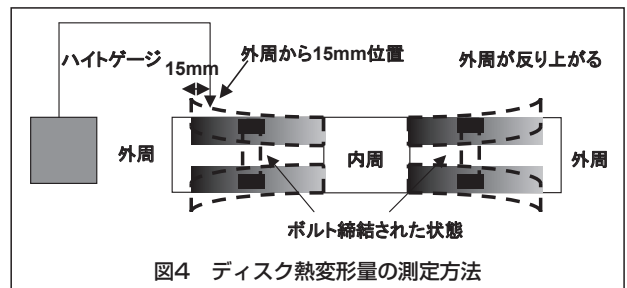
測定位置は制動試験前に定めた基準位置と90°ずつ回転させた1ディスク当たり4位置（ディスク外周端から15mmの箇所、合計8箇所）についてハイトゲージを用いて測定した。

2.5 き裂発生状況、組織観察および硬さ測定

制動試験後のディスクを切断し、摩擦面近傍のき裂発生状況、組織観察および硬さ測定により制動によって生じた熱影響を観察した。観察方法を図5に示す。切断片のディスク径方向中心部について、摩擦面のき裂発生状況をデジタルマイクロスコープにより観察した。断面組織は腐食後、光学顕微鏡を用いて観察した。硬さ(HV0.10)については、マイクロビッカース硬度計にて測定した。

2.6 白色層観察

光学顕微鏡によって観察された摩擦面近傍の白色組織変化部、いわゆる白色層について、透過型電子顕微鏡(TEM)により詳細観察し、組織同定した。



3. 実験結果と考察

3.1 ヒートサイクル特性比較結果

ヒートサイクルの比較結果を図6に示す。基準材は50回のヒートサイクルによってき裂の発生が確認されたのに対し、改良材はき裂の発生が認められず、良好な耐熱衝撃性を示した。

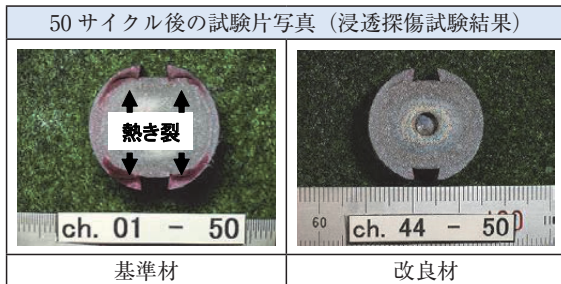


図6 ヒートサイクル特性比較結果

3.2 熱変形量測定結果

熱変形量測定結果を表4に示す。基準材ディスクに比べ、改良材ディスクの熱変形量は小さかった。表2に示したように、基準材ディスクに比べ改良材ディスクは耐力が高いため、熱変形が抑制されたことに加え、表3に

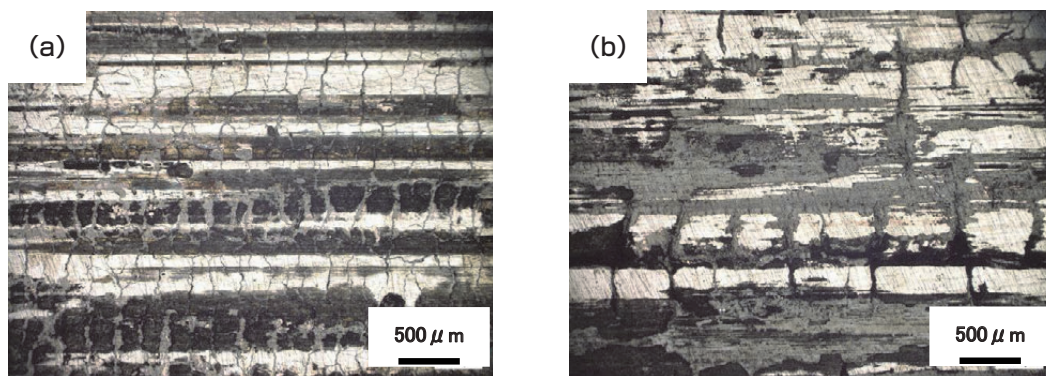
示したように、Ac3変態温度も高く、変態による変形も抑制されたものと考えられる。

表4 熱変形量測定結果 (mm)

ディスク	最大	最小	8点平均
基準材ディスク	0.43	0.23	0.31
改良材ディスク	0.34	0.19	0.26

3.3 き裂発生状況、組織観察および硬さ測定

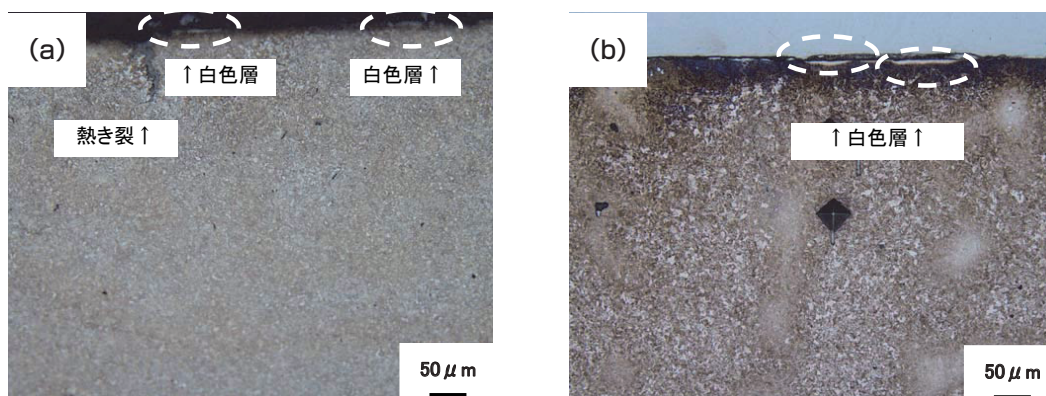
摩擦面のき裂発生状況を図7に、摩擦面近傍の光学顕微鏡観察結果を図8に、硬さ測定結果を図9に示す。摩擦面のき裂発生状況を比較すると、改良材は基準材に対し、き裂が少なく、耐熱衝撃性が良好であることがわかった。基準材ディスクでは摩擦面近傍の硬さが上昇しており、焼入れ硬化していることが確認された。一方、改良材ディスクでは硬さの上昇はほとんどなく、焼入れの程度は小さかったと考えられる。基準材ディスク、改良材ディスクとも摩擦面近傍には白色層と呼ばれる組織変化部が観察された。この白色層は γ 単相温度領域まで昇温後、急冷することによって生じる変質層であり、鋼の研削加工面などに生成することが報告されている⁷⁾。白色層の生成原因としては、ディスクの局所的な変形によって生じたパッド材との局所的な接触による過大な摩擦熱



(a) 基準材ディスク

(b) 改良材ディスク

図7 切断片の摩擦面観察結果

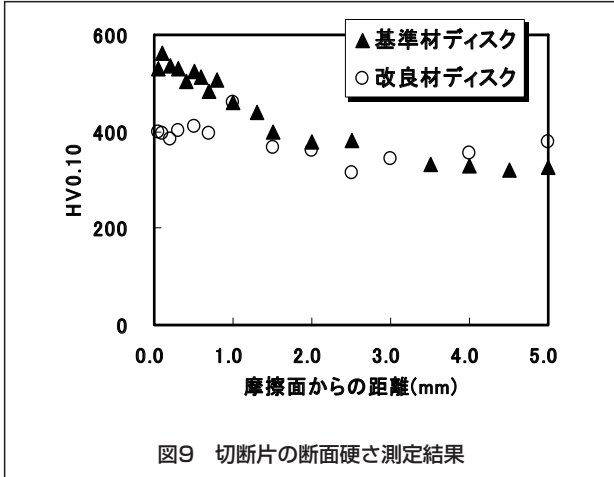


(a) 基準材ディスク

(b) 改良材ディスク

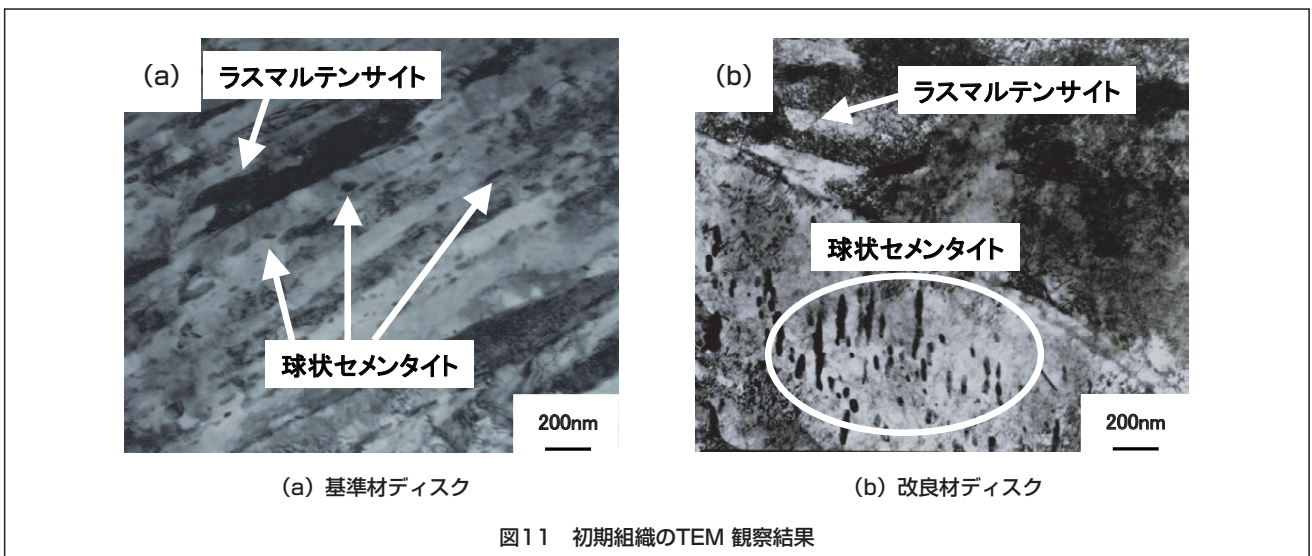
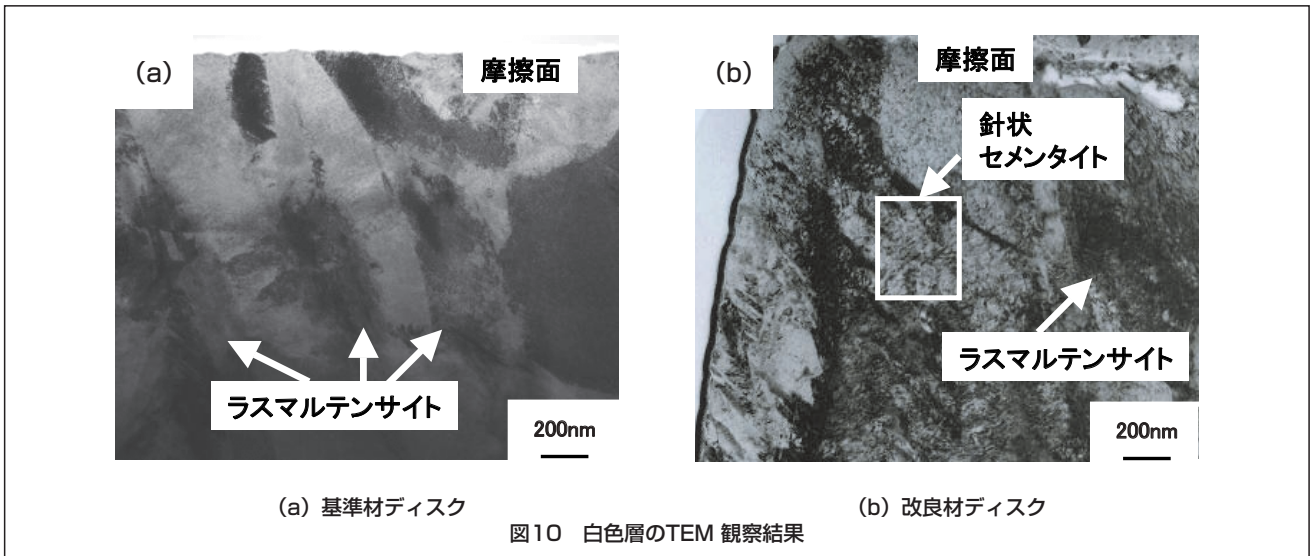
図8 切断片の断面光学顕微鏡観察結果 (3%ナイトール×5sec後観察)

による昇温と急冷によって生じたものと考えられる。基準材ディスクでは摩擦面下 2mm 程度まで硬さが上昇していた。一方、改良材ディスクでは最も摩擦面に近い 0.05mm での硬さ上昇は認められなかったために、改良ディスクの熱影響範囲は 0.05mm より小さい摩擦面のごく近傍に留まったと考えられる。



3.4 白色層観察

白色層の TEM 観察結果を図 10 に示す。比較のために、熱処理ままの初期組織の TEM 観察結果を図 11 に示す。図 11 の初期組織においては、基準材ディスク、改良材ディスクとも焼入れ組織であるラスマルテンサイトおよび焼き戻し組織である球状セメントイドが確認されたため典型的な焼入れ焼戻し組織であり、両材は同等であるといえる。図 10(a) に示した基準材ディスクの白色層では、ラスマルテンサイトが観察されたが、セメントイドは観察されなかった。この組織は制動熱による昇温と急冷による焼入れによって生じた焼入れ組織であると考えられる。一方、図 10 (b) に示すように改良材ディスクの白色層においては、ラスマルテンサイトに加え、初期組織より微細な針状セメントイドが観察された。このことから、改良材ディスクの白色層は一度ラスマルテンサイトに変態し、その後焼戻された状態であることがわかった。これは、焼入れ能の高い元素である Mn の量が基準材は 0.60-1.00% と高いのに対し、改良材は 0.5% 以下と低いために、焼戻されたものと考えられる。焼戻されたマル



テンサイト（焼入れ焼戻し組織）はラスマルテンサイトよりもじん性が高いことが予想されるため、き裂進展を抑制しやすいと考えられる。熱き裂の発生起点が白色層であるという報告^{8),9)}があり Mn 量などの焼入れ能の高い元素量を制御することがき裂の発生や進展抑制に寄与したものと考えられる。

4. まとめ

焼入れ性の高い基準材ディスク、焼入れ性を制御した改良材ディスクを制動試験した結果、以下の結論を得た。

- (1) 基準材ディスクに比べ、改良材ディスクは熱変形量が凡そ 35% 抑制された。
- (2) ラボで確認したヒートサイクル特性と同様、300km/h からの制動を想定したベンチ試験においても、基準材ディスクに比べ、改良材ディスクの方が良い耐熱衝撃性を示した。
- (3) 改良材ディスクでは、基準ディスクに対し Ac3 変態温度を 63℃ 高めたことにより、ディスク摩擦面近傍のマルテンサイト変態が抑制され、表面の硬さ上昇を示さなかった。
- (4) 基準材ディスク、改良材ディスクともディスク摩擦面には白色層が観察された。TEM 観察の結果、基準材ディスクの白色層は焼入れのままの組織であったのに対し、改良ディスクは焼入れ焼戻しの組織であり、じん性が高いと考えられる。そのため、改良材ディスクにおいてはき裂の進展が抑制されると考えられる。

5. 今後の展開

耐熱衝撃性の向上を目的としたディスク材料開発および鉄道車両用ブレーキディスクの評価を実物大ベンチ試験機で行い、実車への適応が可能であることを確認した。今後は、実用化に向けたフィールド試験での評価を行い、高速鉄道への採用に繋げたいと考える。

謝辞

本研究の遂行にあたり、大阪府立大学大学院工学研究科 東健司教授、大阪府立大学地域連携研究機構 辻川正人教授ならびに、関西大学大学院理工学研究科 宅間正則教授には貴重なご教示を賜りました。誌上ではありますが御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 森久史、松井元英、辻村太郎：鉄と鋼 91 (2005) 12 910-912
- 2) P.Dufrénoy, G.Bodovillé, G.Degallaix : European Structural Integrity Society 29 (2002) 167-176
- 3) H.Samrout, R.EI Abdi : Int.J.Fatigue 20 (1998) 8 555-563
- 4) 原田尚紀、平井良政、上田泰：日本鑄造工学会講演概要集第 155 回大会 141
- 5) 金属熱処理技術便覧編集委員会編：金属熱処理技術便覧 - 増補改訂版 - (日刊工業新聞社) (1981) 74-75
- 6) http://www-it.jwes.or.jp/weld_simulator/call.jsp (参照 2012-10-1)
- 7) 江田弘、貴志浩三、橋本聡：日本機械学会誌 46 (1980) 970-978
- 8) 森久史、富永誉也、松井元英、邱海、辻村太郎：日本金属学会誌 70 (2006) 10、785-789
- 9) Y.B.Guo, W.Schwach : International Journal of Fatigue 27 (2005) 9 1051-1061

執筆者

原田尚紀

Naoki Harada

1998 年入社

ブレーキディスクの開発に従事
技術士（金属部門）



谷田幸夫

Yukio Tanida

1981 年入社

ブレーキディスクの開発に従事

