

# オートバイブレーキディスク用 高耐熱マルテンサイト系ステンレス鋼 JFE410DB-ER

## Martensitic Stainless Steel “JFE410DB-ER” with Excellent Heat Resistance for Motorcycle Brake Disks

山内 克久 YAMAUCHI Katsuhisa JFE スチール スチール研究所 ステンレス鋼研究部 主任研究員(課長)  
尾崎 芳宏 OZAKI Yoshihiro JFE スチール スチール研究所 ステンレス鋼研究部 主任研究員(課長)  
宇城 工 UJIRO Takumi JFE スチール スチール研究所 ステンレス鋼研究部長・工博

### 要旨

オートバイのディスクブレーキローター材として、従来鋼に比べて耐熱性と耐食性を向上させた低炭素マルテンサイト系ステンレス鋼 JFE410DB-ER を開発した。開発にあたっては、炭窒化物の微細化や固溶 C、N の維持による焼もどし軟化抵抗の向上を目的に、従来鋼 (12%Cr-15%Mn) をベースに Nb 添加や高 N 化の効果を検討した。Nb を添加すると、微細な Nb(C, N) が析出し、焼もどし過程でもその微細な状態を維持するため、軟化抵抗が向上する。また、高 N 化すると、焼もどし過程において、粗大な  $M_{23}C_6$  の析出が抑制される一方で固溶 (C + N) 量が確保され、微細な  $Cr_2(C, N)$  が析出するため、軟化抵抗が向上する。さらに Nb 添加と高 N 化を同時に行うことによって複合的な効果が得られ、550°C の焼もどし温度に対しても適正な硬さを維持できるようになることが分かった。このような検討結果を基に、500°C を超える温度に対する耐熱寿命が、従来鋼に比べて大幅に向上した新たな高耐熱ステンレス鋼を開発した。

### Abstract:

Low carbon martensitic stainless steel “JFE410DB-ER” with higher heat resistance and corrosion resistance than conventional steels for rotors of motorcycle brake disks has been developed. Effects of Nb and N on the heat resistant properties in 12%Cr-1.5%Mn steel were investigated for the purpose of enhancing the heat resistance by fine carbonitrides and keeping amount of solute (C + N). Main results were described as follows: (1) Addition of Nb introduced fine Nb(C, N), and thereby prevented temper softening. (2) Addition of N decreased the amount of coarse  $M_{23}C_6$  and increased the amounts of solute (C + N) and fine  $Cr_2(C, N)$ , and thereby prevented temper softening. (3) Additions of Nb and N maintained the proper hardness for rotor materials even after tempering at 550°C. (4) Based on these findings, 12%Cr-1.5%Mn-0.13%Nb-0.05%C-0.04%N steel has been developed. The durability of the newly developed steel against temper softening above 500°C was much more longer than that of a conventional steel.

### 1. はじめに

オートバイのブレーキ装置には、図 1 に示すような構造を有し、放熱性に優れ、安定した制動力が得られるディスクブレーキが多く採用されている。ディスクブレーキは、車輪と連動して回転するローター部を両側からパッドで締め付け、その摩擦力により車両の速度を制動する仕組みとなっている。ローター部には、耐摩耗性や変形抵抗を確保

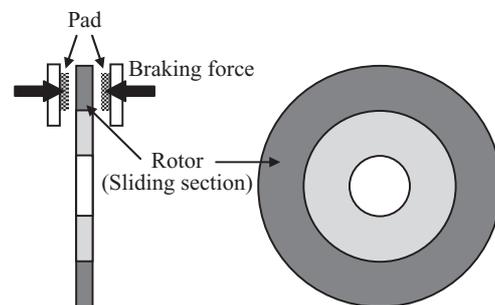


図 1 ディスクブレーキ装置の概要図

Fig. 1 Schematic illustration of a disk brake system

2008 年 1 月 15 日受付

するために適正な硬さ（一般的には、ロックウェル硬さで 32~38HRC）が求められ、制動発熱に対しても、その特性を維持する耐熱性が必要である。また、ブレーキ性能の維持や外観上の理由から、耐食性も求められる。このため、ローター部の素材として、耐熱性と耐食性を兼ね備えたマルテンサイト系ステンレス鋼が使用される。

従来は、ローター材として、主に SUS420J1 (13%Cr-0.2%C) や SUS420J2 (13%Cr-0.3%C) が使用されていたが、これらの鋼は、耐熱性に優れる反面、所定の硬さを得るために焼入れと焼もどしの二段階の熱処理工程を必要とし、耐食性もやや不足する面があった。これに対して、図 2 は JFE410DB (12%Cr-1.5%Mn-0.05%C) と SUS420J2 の焼入処理後の硬さに及ぼす焼入温度の影響を示したものであるが、現在は、このように焼入処理のみで適正な硬さが得られ、耐食性にも優れる JFE410DB に代表される低炭素マルテンサイト系ステンレス鋼の使用が主流となっている<sup>1,2)</sup>。

一方、近年、特に中・大型やスポーツタイプのオートバイでは、走行性能の向上に合わせてブレーキの信頼性向上が課題となっている。このようなオートバイでは、従来に比べて制動発熱も大きく、ローター部が 500℃ を超える高温まで繰り返し上昇する可能性があるため、焼もどしにより素材が軟化する危険性が高くなっている。素材の軟化は、ディスクの摩耗量増加や反り発生などを引き起こし、ブレーキ性能の低下に繋がるため、ローター材として従来に比べて耐熱性（焼もどし軟化抵抗）の高い素材が求められるようになってきた。

このような要求にこたえるため、当社では、焼もどし過程における鋼中の炭窒化物の析出形態を制御することより、500℃ を超える温度においても、従来鋼に比べて適正な硬さを長時間維持できる高耐熱鋼 JFE410DB-ER を開発した<sup>3)</sup>。本論文では、高耐熱化技術と開発鋼の特性について報告する。

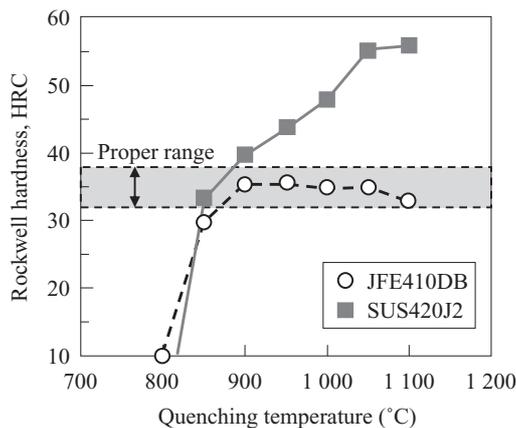


図 2 SUS420J2 と JFE410DB の焼入性

Fig. 2 Quenching hardenability in JFE410DB and SUS420J2 (Specimens were quenched by air cooling from each temperature after holding 10 min.)

## 2. 高耐熱化の検討

### 2.1 開発の考え方

マルテンサイト系ステンレス鋼は、焼もどし過程において、転位の回復や炭窒化物析出にともなう固溶 C, N の減少により軟化が進行する<sup>4,5)</sup>。そこで、炭窒化物の微細化および固溶 C, N の維持により、転位の回復を遅延させ、焼もどし軟化抵抗を向上させるという考え方のもと、Nb 添加と高 N 化に着目し、従来鋼 (JFE410DB) をベースとして高耐熱材の開発を行った。

### 2.2 供試材および試験方法

従来鋼相当の 12.3%Cr-1.5%Mn-0.05%C-0.01%N 鋼（ベース鋼）を基本に、Nb を添加した鋼（Nb 添加鋼）、N の添加量を増加させた鋼（高 N 鋼）、Nb 添加と高 N 化を行った鋼（Nb 添加高 N 鋼）の 4 鋼種を、高周波真空溶解炉を用いて溶製し、50 kg の鋼塊とした。供試材の化学組成を表 1 に示す。

鋼塊は、1200℃ に加熱後、熱間圧延により板厚約 6 mm の熱間圧延鋼板とした。熱間圧延鋼板には、ディスクの加工に適した 90 HRB 以下の硬さとなるように、700~800℃ で均熱し、室温付近まで炉冷する焼鈍を施した。さらに、1000℃ で 10 min 保持後、空冷する焼入処理を行った。その後、耐熱性の評価として、500, 550, 600℃ でそれぞれ 60 min 保持後、空冷の焼もどし処理を行った試料について、スケールを研削除去した表面のロックウェル硬さを測定した。

また、耐熱性に及ぼす Nb 添加や高 N 化の効果を明確にするため、焼入れおよび焼もどし処理後の試料における炭窒化物について、アセチルアセトン系電解液で電解抽出した残渣の化学分析による定量や X 線回折による同定、薄膜試料の透過電子顕微鏡 (TEM) による析出形態の観察を行った。

### 2.3 結果および考察

#### 2.3.1 耐熱性（焼もどし軟化抵抗）

図 3 に、供試材の焼入れおよび焼もどし処理後の硬さの変化を示した。焼入処理後の硬さに差は認められないが、

表 1 供試材の化学成分  
Table 1 Chemical composition

Steel	(mass%)					
	C	Si	Mn	Cr	N	Nb
A: Base	0.052	0.31	1.54	12.3	0.007	—
B: Nb added	0.079	0.29	1.58	12.4	0.010	0.15
C: High N	0.030	0.31	1.59	12.3	0.043	—
D: Nb added+high N	0.049	0.30	1.57	12.2	0.042	0.15

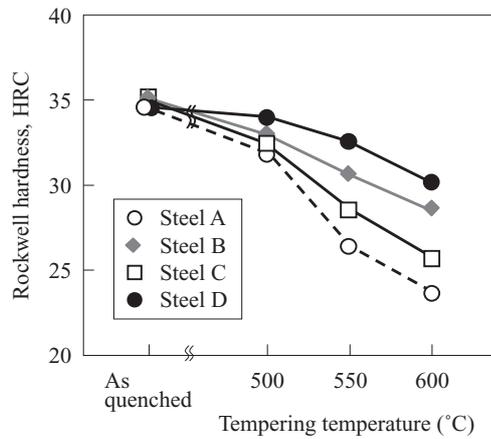


図3 焼もどし軟化挙動に及ぼす Nb 添加および高 N 化の影響  
Fig. 3 Effects of Nb and N on temper softening

焼もどし処理後の硬さは、ベース鋼に対して、高 N 鋼、Nb 添加鋼、Nb 添加高 N 鋼の順に上昇した。焼もどし軟化抵抗がもっとも高い Nb 添加高 N 鋼では、550℃の焼もどし処理後においても適正な硬さを維持していた。このように、Nb 添加や高 N 化は、それぞれ軟化抵抗の向上に寄与し、複合して添加した場合には、さらに軟化抵抗が向上することが分かった。

2.3.2 耐熱性に及ぼす Nb 添加、高 N 化の効果

焼入れおよび焼もどし処理後の試料について析出物形態を比較し、Nb 添加や高 N 化によって焼もどし軟化抵抗が向上した理由を考察した。

550℃で焼もどし処理を行った Nb 添加鋼、高 N 鋼について、X 線回折により析出物を同定した結果を図 4、TEM

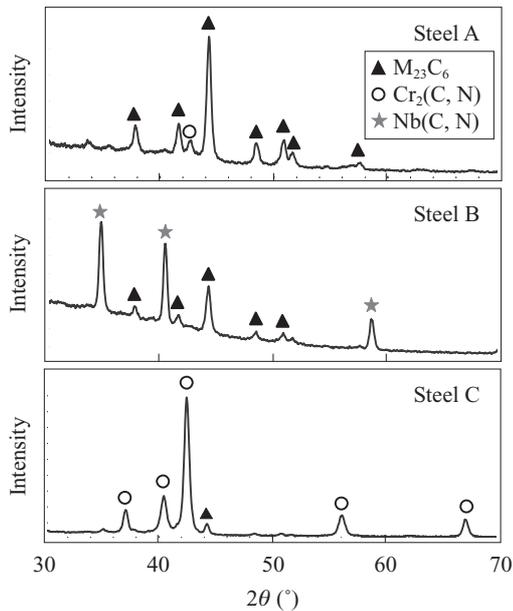


図4 Nb 添加および高 N 化による焼もどし処理後の析出物の変化 (X 線回折結果)  
Fig. 4 X-ray diffraction intensity of precipitates in Steel A (base), B(Nb added), and C(high N) tempered at 550°C

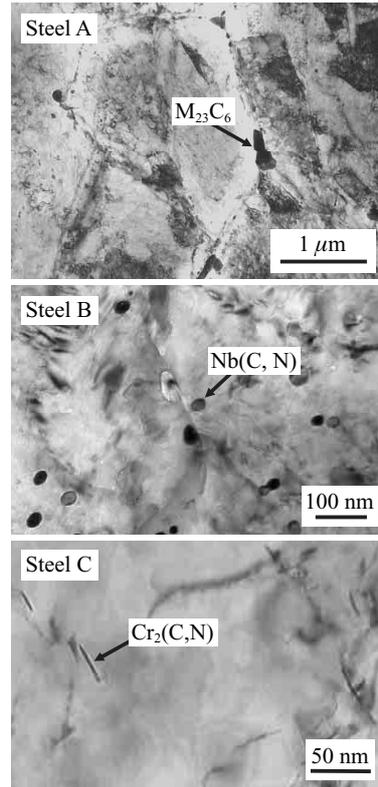


写真1 Nb 添加および高 N 化による焼もどし処理後の析出物 (TEM 像)  
Photo 1 TEM images of precipitates in Steel A(base), B(Nb added), and C(high N) tempered at 550°C for 60 min

観察した結果を写真 1 に、それぞれベース鋼と比較して示した。ベース鋼では、析出物のほとんどが  $M_{23}C_6$  であり、旧  $\gamma$  粒界に粗大に析出しているものが多い。これに対して、Nb 添加鋼では、 $M_{23}C_6$  の他に Nb(C, N) が析出しており、20~30 nm の微細なものが粒内にも多数析出していた。また、高 N 鋼では、析出物のほとんどが  $Cr_2(C, N)$  であり、幅数ナノメートルで長さ数十ナノメートル程度の微細なものが粒内に多数析出し、その一方で、 $M_{23}C_6$  の析出はベース鋼に比べて著しく少なくなっていた。

図 5 には、Nb 添加鋼における焼入れおよび焼もどし処理後の析出 Nb 量の測定結果を示した。この結果から、添

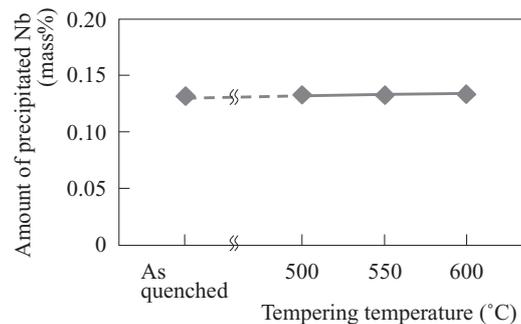


図5 Nb 添加鋼における焼入れおよび焼もどし処理後の析出 Nb 量の変化  
Fig. 5 Amount of precipitated Nb in Steel B(Nb added) (Specimens were tempered at each temperature for 60 min.)

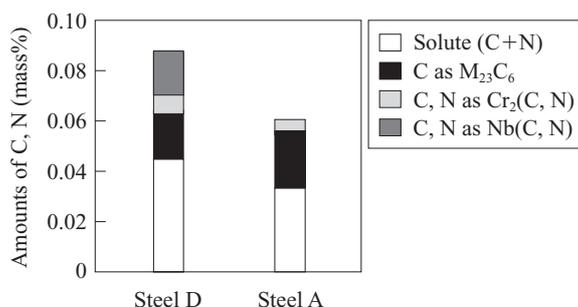


図6 Nb添加および高N化によるC, Nの固溶/析出量の変化

Fig.6 Amounts of solute/precipitated C, N in Steel A (base), and D (Nb added + high N) tempered at 550°C

加したNbのほぼ全量が焼入処理ままで析出していたことが分かる。よって、Nb添加鋼では、焼入処理後に析出していたNb(C, N)が、焼もどし過程でも微細な析出状態を維持することにより転位回復を抑制し、焼もどし軟化抵抗が向上したと考えられる。

一方、高N鋼では、焼もどし過程において、軟化抵抗の向上に寄与しない粗大な $M_{23}C_6$ の析出が抑制され、その分、C, Nの固溶量が確保される。また、焼もどし過程で析出してくる微細な $Cr_2(C, N)$ の強化作用も加わり、転位回復が抑制され、焼もどし軟化抵抗が向上したと考えられる。

さらに、図6には、550°Cで焼もどし処理を行ったNb添加高N鋼について、電解抽出物分析により求めた固溶または析出物としてのC, N量を、ベース鋼と比較して示した。Nb添加高N鋼では、上記したNb添加と高N化の効果がともに表れており、ベース鋼に比べて、 $M_{23}C_6$ の析出量は少なく、一方で、Nb(C, N)、 $Cr_2(C, N)$ の析出量やC, Nの固溶量が多いことが分かる。よって、Nb添加と高N化を同時に行った場合、焼入処理後に析出していた微細なNb(C, N)の形態維持、また、焼もどし過程における固溶(C+N)量の確保や微細な $Cr_2(C, N)$ の析出などの複合的な効果により、焼もどし軟化抵抗が大幅に向上したと結論される。

### 3. 開発鋼の特性

上記の検討結果をもとに、さらに、耐食性や製造性なども含めた検討を行い、新しいブレーキディスクローター用の高耐熱鋼の化学成分を決定した。表2に、開発鋼JFE410DB-ERの主な成分を、従来鋼と比較して示した。以

表2 開発鋼の化学成分  
Table 2 Chemical composition of JFE410DB-ER

Steel	(mass%)					
	C	Si	Mn	Cr	N	Nb
JFE410DB-ER	0.05	0.3	1.5	12.3	0.04	0.13
JFE410DB	0.05	0.3	1.5	12.3	0.01	—

下に、本開発鋼の焼入性、焼もどし軟化特性、耐食性を、従来鋼と比較して示す。

#### 3.1 焼入性および耐熱性 (焼もどし軟化特性)

焼入性の評価として、焼入温度に対する焼入処理後の硬さの変化を測定し、図7に示した。焼入れは、各温度で10 min保持後、空冷の処理を行った。開発鋼は、焼入温度850~1150°Cで適正な硬さを満足しており、従来鋼に比べて焼入れ可能な温度範囲が広がっている。

耐熱性の評価として、1000°Cで10 min保持後、空冷の焼入処理を行った試料について、焼もどし軟化挙動を調査した。図8に500~600°Cで60 min保持、空冷の焼もどし処理後の硬さ、図9に500°Cと550°Cの焼もどし処理における硬さの時間変化を、それぞれ示した。開発鋼は、550°Cで60 min保持の焼もどし処理後において適正な硬さを維持しており、500°Cを超える焼もどし温度において適正な硬さを維持できる時間も、従来鋼に比べて大幅に増加している。

#### 3.2 耐食性

耐食性の評価として、1000°Cで10 min保持、空冷の焼入処理後の試料について、塩水噴霧試験と孔食電位測定試験を行った。塩水噴霧試験は、ローター部の円孔(冷却や摩耗屑排出などを目的)を模した8 mmφの穴を穿孔し、表面粗さ(Ra)が1.0 μm程度になるように#240で仕上げ研磨を行った試験片について、JIS Z 2371に準拠した条件(5%NaCl溶液, 35°C)で96 hまで実施した。孔食電位測定試験は、腐食液を0.5%NaCl, 35°Cとし、他の条件はJIS G 0577に準拠して実施した。写真2に96 hの塩水噴霧試験を行った後の試験片外観、図10に孔食電位の測定結果を示した。開発鋼は、発錆が穴縁などに少し認められるが、従来鋼に比べると発錆の程度は軽い。また、孔食電位も従来鋼より高い。このように開発鋼の耐食性が従来鋼に比べて優れているのは、高N化により、粗大な $M_{23}C_6$ の粒

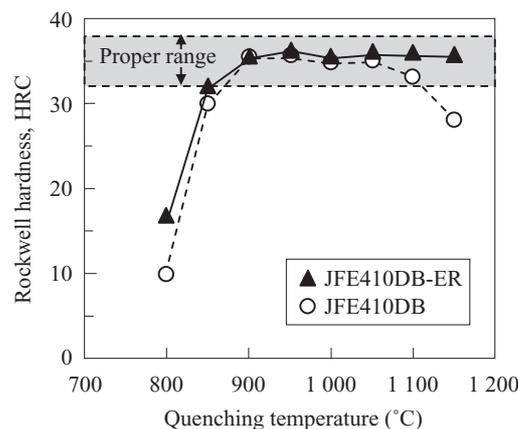


図7 開発鋼の焼入性

Fig.7 Change in hardness with quenching temperature in JFE410DB-ER and JFE410DB

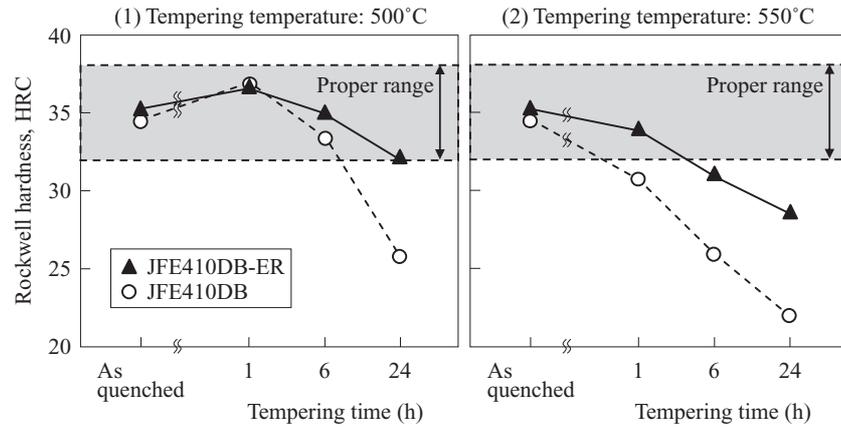


図9 開発鋼の焼もどし軟化挙動 (時間変化)

Fig.9 Change in hardness with tempering time at (1) 500°C, (2) 550°C in JFE410DB-ER and JFE410DB

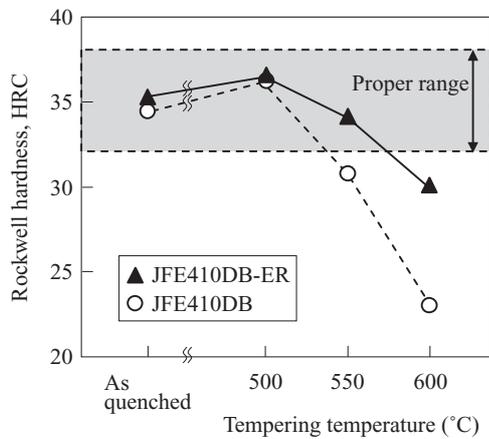


図8 開発鋼の焼もどし軟化挙動

Fig.8 Change in hardness with tempering temperature in JFE410DB-ER and JFE410DB (Specimens were tempered at each temperature for 60 min)

Simulated a circular hole of rotor for brake disk

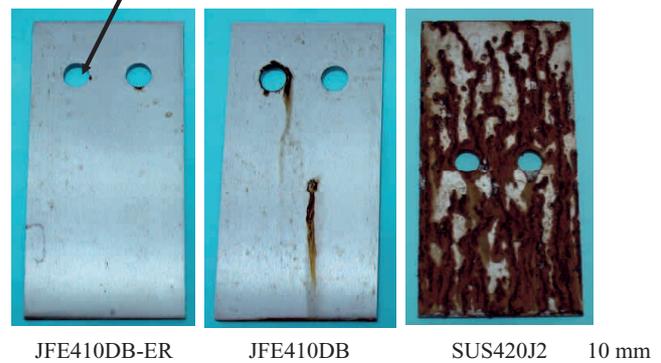


写真2 開発鋼の耐食性 (SST 試験, 96 h)

Photo 2 Appearance of salt spray test specimens (testing time; 96 h) in JFE410DB-ER, JFE410DB, and SUS420J2 (Specimens were quenched from 1 000°C, and polished by #240.)

界析出が減少したことや固溶 N 量が増加したことが寄与していると考えられる<sup>6)</sup>。

#### 4. まとめ

オートバイのディスクブレーキローター材として低炭素マルテンサイト系ステンレス鋼の高耐熱化に関する研究を行い、以下の知見を得た。

- (1) Nb 添加により焼もどし軟化抵抗が向上する。この原因は、焼入処理後に析出していた微細な Nb(C, N) が、焼もどし過程でもその形態を維持し、転位回復を抑制したためと考えられる。
- (2) 高 N 化により焼もどし軟化抵抗が向上する。この原因は、焼もどし過程において、強化に寄与しない旧  $\gamma$  粒界での粗大な  $M_{23}C_6$  の析出が抑制される一方で、固溶 (C + N) 量が確保され、また微細な  $Cr_2(C, N)$  が析出することにより、転位回復が抑制されたためと考えられる。

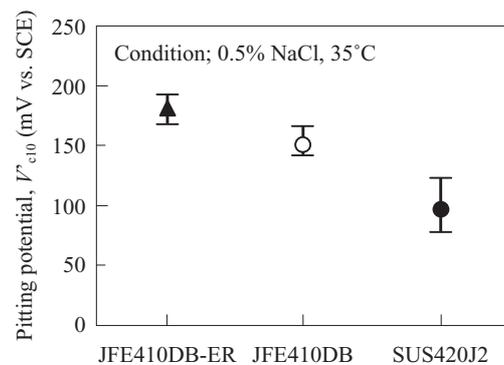


図10 開発鋼の孔食電位

Fig.10 Pitting potential in JFE410DB-ER and JFE410DB (Specimens were quenched from 1 000°C.)

- (3) Nb 添加と高 N 化を同時に行うと、上記を複合した効果が得られ、焼もどし軟化抵抗が大幅に向上する。
- (4) Nb 添加および高 N 化した開発鋼 JFE410DB-ER (12%Cr-1.5%Mn-0.13%Nb-0.04%N) は、550°C で 60 min 保持の焼もどし処理後でも、ローター材として適正な

硬さ (32~38 HRC) を維持しており、従来鋼に比べて優れた焼もどし軟化抵抗を有している。

- (5) 開発鋼は、従来鋼に比べて、塩水噴霧試験 96 h 後の発錆が少なく、また孔食電位も高く、優れた耐食性を有している。

## 5. おわりに

開発した高耐熱鋼は、オートバイの高性能化にともなうローター部の摩耗、反りなど、ブレーキ性能に関わる諸問題の改善に寄与するものと期待される。また、耐熱性が高くなる分だけ熱容量の低下を補えるため、ブレーキディスクの小型化、薄肉化やデザインの自由度拡大にも寄与するものと考えられる。

本稿は、(社)日本金属学会の会報まてりあ、第 43 巻、第 3 号 (2004) に掲載された「炭窒化物微細析出物制御により耐熱性を向上させたディスクブレーキローター用ステンレス鋼」に加筆、作成したものである。

### 参考文献

- 1) 吉岡啓一, 鈴木重治, 石田文良, 堀内雅義, 小林眞. 川崎製鉄技報. 1983, vol. 15, no. 4, p. 266-272.
- 2) 西村正博, 佐藤隆策, 飯泉省三. 日新製鋼技報. 1984, no. 50, p. 84-95.
- 3) 平澤淳一郎, 尾崎芳宏, 宇城工, 古君修, 笠茂利広. まてりあ. 2004, vol. 43, no. 3, p. 238-240.
- 4) F. B. Pickering. Iron and Steel Inst., Publ., 1968, vol. 114, p. 131.
- 5) Masumoto, T.; Takeda, S.; Imai, Y. Sc. Rep. Tohoku Univ. 1970, vol. 22, p. 34-36.
- 6) Osozawa, K.; Okato, N.; Fukase, Y.; Yokota K. Boshoku Gijutsu. 1975, vol. 24, p. 1-7.



山内 克久



尾崎 芳宏



宇城 工