

# 技 術 論 文

## 圧延ロール軸部強度に及ぼす諸因子の影響

### Effects of Various Factors on the Rolling Roll Shaft Strength



技術開発センター  
第一開発室 リーダー  
博士(工学) 園田 晃大  
Akio Sonoda

商品技術部  
顧問  
宮本 浩二  
Kouji Miyamoto

技術開発センター  
技術開発センター長  
博士(工学) 永吉 英昭  
Hideaki Nagayoshi

#### 要 旨

当社では CPC プロセスによって熱間圧延用ロールの製造を行っている。圧延用ロールの軸部には大きな負荷がかかるため、品質を確保することが重要である。本稿では、軸部強度に及ぼす諸因子について報告する。複合サイクル試験を実施し、軸材表面の腐食が疲労強度に及ぼす影響について検証した。その結果、表面腐食の影響によって軸材の疲労強度は 30%程低下することが見込まれた。また、特殊熱処理を施した部材が強度特性に及ぼす影響について調査した結果、延性やシャルピー衝撃値の改善が確認された。

#### Synopsis:

FUJICO has been producing the rolls for hot rolling by using CPC process. Since the journal of roll is heavily loaded, the quality and mechanical characteristics of the journal are important. In this paper, effects of various factors on the strength of the rolling roll journal are reported. The effect of corrosion on the surface of the journal on fatigue strength was examined by combined cyclic corrosion test. As a result, fatigue strength of journal reduced by about 30% because of surface corrosion. In addition, as a result of investigating the effect of the special heat-treated on the mechanical properties, it was concluded that the ductility and Charpy impact value were improved.

#### 1. 緒言

当社では CPC 法によって、板材や棒鋼・線材、形鋼を対象とした熱間圧延用ロール（以下ロールと記す）の製造を行っている。CPC 法によって製造されたロール表面には、硬質のハイス層がクラッド処理されているため、損耗の少ない状態のままロール表面性状を維持することができ、圧延材の品質確保やロール寿命向上に大きく貢献している。

ところで、熱間圧延でロールは大きな機械的負荷を繰り返し受けるため、ロールの軸部にも損傷が起き、最も酷い時には折損してしまう場合がある。このため、

ロール製造においては、ロール胴体の品質と同じく、軸部の品質を確保しておくことが重要である。

当社では、生産性向上のため、ロール胴体と軸部を接合する組立方式を実施しており<sup>2)~5)</sup>、これまでもロール軸部の品質や性能改善の取組みを広く行ってきた<sup>6)</sup>。本稿では、ロール軸部の強度特性に及ぼす影響についていくつか言及することとする。まず強度低下の要因の一つとなる表面腐食について、ロール軸材を用いた腐食試験を行い、疲労強度への影響を検証した。次に、軸部の強度特性への熱処理の効果について検証した結果を報告する。

## 2. 表面腐食の軸部強度への影響

### 2.1 表面腐食の要因によって折損したロール

Fig.1 に軸部が折損したロールの一例を示す。破断位置は応力が集中するロール胴体の付け根位置であり、破面を確認すると、軸部表面側にいくつかのラチェット模様が見られ、軸部表面からき裂が進展した疲労破壊の様相を呈していることがわかる。Fig.2 のロールでは、ロール軸部が圧延使用中に冷却水の影響を受け表面が著しく酸化腐食しており、疲労き裂発生 の要因となったことが確認されている。疲労き裂はほとんどの場合、部材の表面から発生するため、ロール軸部の表面の状態を表面腐食の影響と合わせて捉える事が重要となる。



Fig.1 Appearance of the roll with a broken journal



Fig.2 Appearance of the corroded journal

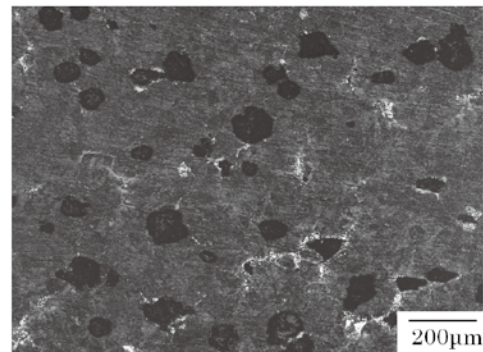
## 2.2 複合サイクル試験

### 2.2.1 供試材および試験条件

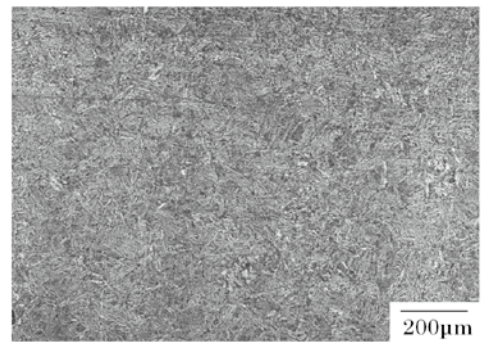
ロール軸材表面の腐食状態を確認するため、複合サイクル試験を行った。供試材には、ロール軸部として実際に使用される材料として、ダクタイル鋳鉄材と鍛鋼材 (SCM440 材) を用いた。ダクタイル鋳鉄は実際のロール軸部から採取し、SCM440 は市販の圧延丸鋼から採取した後、所定の焼入れ、焼き戻し処理を行った。それぞれの金属組織を Fig.3 に示す。ダクタイル

鋳鉄材の基底はパーライトであり、平均の硬さは HV280 であった。SCM440 材は、ソルバイト組織を呈しており平均の硬さは HV243 であった。

複合サイクル試験は、70×70×5mm の板状の試験片を用いて実施した。試験条件は、日本自動車技術協会規格 JASO610 (①中性塩水噴霧 35℃、pH6.5~7.2、2hr ②乾燥 60℃、25%RH、4hr ③湿潤 50℃、95% RH 以上、2hr) に準じて①~③の計 8hr を 1 サイクルとした。



(a) Ductile cast iron



(b) SCM440

Fig.3 Microstructures of test specimens

### 2.2.2 試験結果

ダクタイル鋳鉄材と SCM440 材の試験後の外観をそれぞれ Fig.4 および Fig.5 に示す。ダクタイル鋳鉄材と SCM440 材いずれも 3 サイクル (24hr) 後で赤錆が発生しており、12 サイクル (96hr) では、より赤錆の発生が顕著になっている。Fig.6 は試験後の腐食原料を測定した結果であるが、ダクタイル鋳鉄材の方が SCM440 材よりも腐食による減量が大いことが分かった。

複合サイクル試験で試験片表面に発生した赤錆を酸で洗い流した状態を Fig.7 に示す。ダクタイル鋳鉄材では一様に腐食が進行したような表面状態であったのに対し、SCM440 材では斑点状の様相が確認されたことが特徴的であった。これらの表面状態確認のため、酸洗い後の試験片の粗度を測定した結果を Fig.8 に示

す。ダクタイル鋳鉄材の平均粗さ  $R_a$  は  $8.4\mu\text{m}$  であり、最大高さ粗さ  $R_z$  は  $104\mu\text{m}$  であった。SCM440 材の平均粗さ  $R_a$  は  $5.2\mu\text{m}$  であり、最大高さ粗さ  $R_z$  は  $80\mu\text{m}$  であった。粗さ測定値で見ると、ダクタイル鋳鉄材の方が SCM440 材よりもやや粗い表面状態となっているが、SCM440 材については斑点状の腐食箇所と思われる部分が窪み形状となっている事が特徴であった。次の節では、これらの表面状態が疲労強度へ及ぼす影響について検証した。

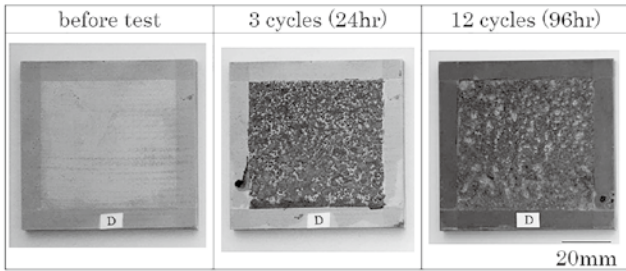


Fig.4 After Combined Cyclic Corrosion Test (Ductile Cast Iron).

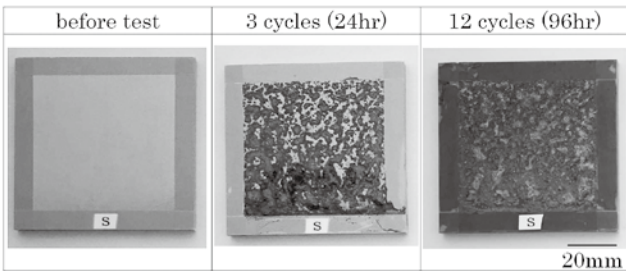


Fig.5 After Combined Cyclic Corrosion Test (SCM440).

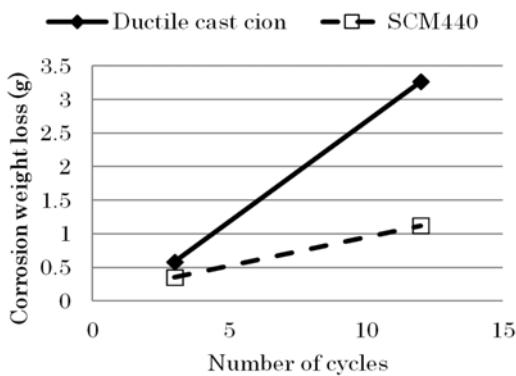


Fig.6 Corrosion weight loss of Combined Cyclic Corrosion Test.

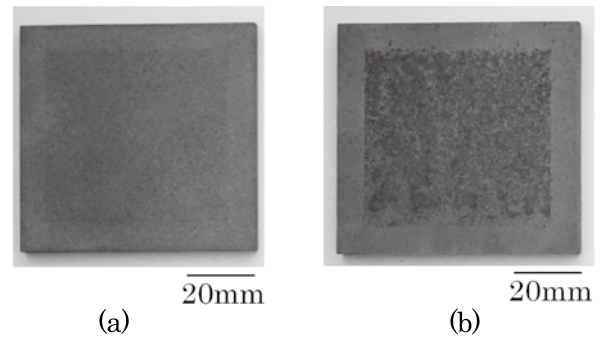
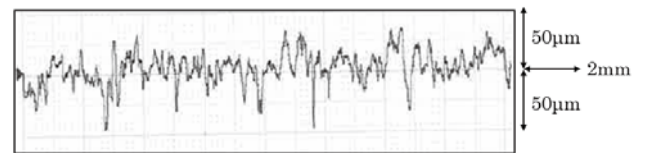
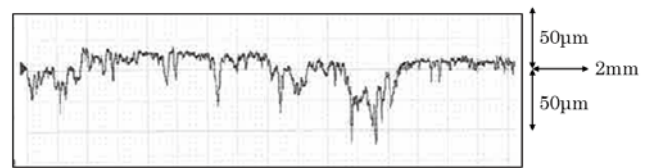


Fig.7 Oxidation scale removed sample after Combined Cyclic Corrosion Test ; (a) Ductile cast iron , (b)SCM440.



(a) Ductile cast iron



(b) SCM440

Fig.8 Result of surface roughness measurement.

### 2.2.3 腐食による表面粗さ変化の疲労強度への影響

表面粗さの疲労強度への影響については、村上らの研究による $\sqrt{area}$ パラメータモデル<sup>8)</sup>によって検討した。

$\sqrt{area}$ は欠陥の幾何学的パラメータであり、欠陥を主応力方向に投影した面積の平方根で定義され、予想疲労強度 $\sigma_w$ は式 (1) で表される。

$$\sigma_w = 1.43(HV + 120) / (\sqrt{area})^{1/6} \cdot [(1-R) / 2]^\alpha \quad \dots (1)$$

なお、 $HV$ はビッカース硬度、 $R$ は応力比であり、 $\alpha = 0.226 + HV \times 10^{-4}$ となっている。表面粗さ形状を表面に存在するピット状の微小欠陥と等価と評価し、ダクタイル鋳鉄材と SCM440 材における最大高さ粗さ  $R_z$  から $\sqrt{area}$ を求めた。次に求めた $\sqrt{area}$ から、式 (1) を用いて予測される疲労強度低下率を算出し

た。予め測定していたダクタイル鋳鉄材と SCM440 材の疲労強度測定結果と、疲労強度低下率から予測される腐食後の疲労強度について算出し、これらを整理したものを Table1 に示す。ダクタイル鋳鉄材と SCM440 材ともに、腐食による表面粗さ変化の影響で疲労強度が 30%程低下してしまうことが予想される。一般に疲労強度への表面粗さの影響を表した表面効果係数<sup>9)</sup>が加工材表面で 0.8~0.95 のレベル (5~20%程低下) であるが、腐食後の表面ではこの数値よりも低くなっているといえる。また、いくつかの疲労強度への表面粗さの影響に関する研究<sup>10),11)</sup>を考慮しても、本稿と同レベルの疲労強度低下が見込まれた。ただし、ダクタイル鋳鉄材の腐食後の表面は凹凸があるものの一様な状態を呈していたため、き裂の干渉効果などを考慮すると<sup>12),13)</sup>、この疲労強度低下率は低めになる事が考えられる。

総じて、腐食による疲労強度低下の影響を考慮しても、もともとの疲労強度の低いダクタイル鋳鉄材よりは SCM440 材の方が疲労強度は高く、安全側にてロールが使用できるといえる。なお、当社の CPC 法によって製造されたロールは、外層を硬質なハイス材とし、軸部を含む母材は SCM440 材を組み合わせたものとなっており、ダクタイル鋳鉄材のロールよりも軸部の疲労破壊に対しては安全に使用することができている。

Table1 Predictions of fatigue strength in roll journal materials

	Rmax	$\sqrt{area}$	Fatigue strength reduction rate	Experimental Fatigue strength	Predictional Fatigue strength
	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	%	MPa	MPa
Ductile cast iron	104	64.5	36	150	96
SCM440	80.5	63.4	32	340	231

## 2.2.4 軸部表面腐食の対策

上述の通り、軸部の表面腐食が軸材の疲労強度にとっては悪影響であるため、当社では熱間圧延におけるロール使用時に軸部の腐食による損傷を防ぐ取組みも実施しているもので以下に紹介する。

Fig.9 は、軸部表面をコーキング処理する事によって水冷環境から軸部の腐食を保護している例である。Fig.8 は使用後のロール軸となっているが、コーキング処理された軸は、コーキング処理が維持されており、コーキング処理がなされていない軸では表面が腐食し錆が発生している事が確認できる。

## 3. 熱処理による強度特性改善

### 3.1 供試材および試験条件

前章では表面腐食による疲労強度低下について述べたが、本章では強度特性改善を目的とした熱処理の効果について言及する。

当社で実施しているロール胴体と軸部を摩擦圧接した部材 (SCM440 材および相当材を使用) を用いて、引張試験およびシャルピー衝撃試験を実施した。引張試験は JIS4 号試験によって実施し、シャルピー衝撃試験は 10mm×10mm×55mm に加工した試験片に U ノッチを導入して行った。

当社で実施している通常の焼入れ焼き戻し処理を実施したもの (以下従来材と記す) と、特殊熱処理を施したもの (以下改善材と記す) を準備し、熱処理による強度改善効果を確認した。



(a) Caulking



(b) No caulking

Fig.9 Effect of caulking on roll journal.

### 3.2 試験結果及び考察

強度試験結果の一例を Table2 に示す。引張り試験では、降伏強度や引張強度は従来材の方が改善材よりもやや高い値を示した。一方、伸び、絞り値は従来材に比べ改善材の方が著しく高い値を示し、大きく延性が改善したことが確認された。また、シャルピー衝撃試験でも同様に衝撃値が従来材に比べ、改善材では衝撃値が大きく向上し、改善効果が確認された。

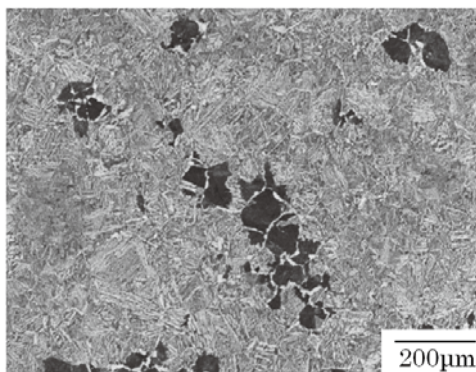
従来材および改善材の摩擦圧接部近傍の組織を Fig.10 に示すが、従来材では白く見えるベイナイト組織と黒く見えるパーライト組織が混在しているのに対し、改善材では、一様なベイナイト組織となっている。

このように特殊熱処理によって、均一な組織が得られた事が、延性や衝撃値改善に寄与したものと考えられる。

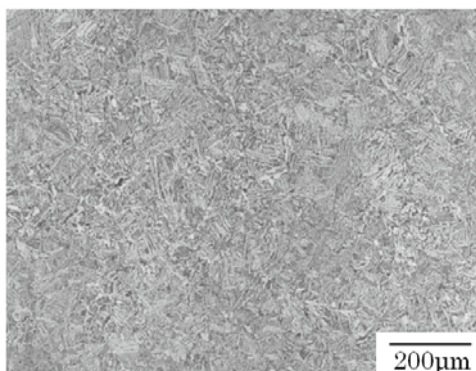
実際の圧延では、圧延材の噛み込み事故などが起きた場合、ロールへは瞬間的に大きな負荷がかかるため、このように延性や衝撃値の改善することも重要と言える。先にも述べたが、当社の CPC 法で製造したロールは、外層を硬質のハイス材とし、軸部を含む母材は強靱な SCM440 材との複合材である。そのため、瞬間的な負荷に対する耐事故性は、母材が SCM440 であることから既に十分備わっているといえるが、本稿の熱処理による強度特性の改善によって、さらなる安全側におけるロール使用が可能となる。

Table2 Mechanical property of roll journal materials

	Yield strength MPa	Tensile Strength MPa	Elongation %	Reduction of Area %	Charpy Impact Value J/cm <sup>2</sup>
Conventional	651	911	8.4	5.6	5.1
Developed	517	849	60.5	18.8	9.1



(a) Conventional



(b) Developed

Fig.10 Microstructures of test specimens near the friction welding part.

#### 4. まとめ

ロール軸材の強度へ及ぼす諸因子の影響を検証するため、軸材の複合サイクル試験を実施し腐食後の表面状態から疲労強度への影響を検証した。また、特殊熱処理を施した軸材の強度試験を行った。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 複合サイクル試験では、ダクタイル鋳鉄材の方が SCM440 材よりも腐食減量が大きく、表面の最大粗さ高さも大きくなっていた。
- 2) 複合サイクル試験後の腐食のように、表面粗さ変化は疲労強度に悪影響を及ぼすと考えられ、ダクタイル鋳鉄材や SCM440 材では約 30%の疲労強度低下が考えられる。ただし、ダクタイル鋳鉄材のように様な全面ピット状の腐食では、それぞれのピットの干渉効果から、単独のピットが存在するよりも疲労強度は高めになると考えられる。
- 3) 特殊熱処理によって、軸材の延性やシャルピー衝撃値の改善効果が確認された。

#### 参考文献

- 1) 坂本眞一、玉川進、斉藤弘道、津田篤信、山本厚生：フジコー技報 3(1995) 10
- 2) 大野京一郎、嵩純孝、尾崎龍宏：フジコー技報 14(2006) 26
- 3) 大野京一郎、芳谷和政、尾崎健一：フジコー技報 10(2002) 48
- 4) 木村健治、園田晃大：フジコー技報 21(2013) 53
- 5) 坂田太志：フジコー技報 25(2017) 68
- 6) 近藤加寿心、園田晃大、古田博昭、姜孝京、永吉英昭：フジコー技報 25(2017) 29
- 7) 林直宏、山下勝也、小林弘明、片岡泰弘：あいち産業科学技術総合センター研究報告 (2013) 20
- 8) 村上敬宜、清水真佐男：日本機械学会論文集 (A 偏) 54-499 (昭 63-3) 413
- 9) 機械設計便覧編集委員会：機械設計便覧，丸善 (1973) 633
- 10) 塩田俊雄、旗手稔、竹本勝昭：鑄造工学会誌 69-11 (1997) 904
- 11) 井藤賀久岳、戸梶恵郎、中島正貴、高行男：材料 54-12 (2005) 1249
- 12) 村上敬宜、堤一也、藤嶋正博：日本機械学会論文集 (A 偏) 62-597 (1996-5) 8
- 13) 村上敬宜、高橋宏治、山下晃生：日本機械学会論文集 (A 偏) 63-612 (1997-8) 12