

UDC 621.771.237.016.3 : 621.771.073 : 531.781.082.5 : 539.  
431 : 620.179.152

論 文

## X線回折による圧延ロールの表面疲労損傷度評価\*

武 智 弘\*\*・難 波 和 郎\*\*\*

川 崎 宏 一\*\*\*・藤 原 圭 三\*\*\*

## Evaluation of the Fatigue Damage of Rolls for Strip Mills below the Surface by X-ray Diffraction Method

Hiroshi TAKECHI, Kazuo NAMBA,

Koichi KAWASAKI, and Keizo FUJIWARA

## Synopsis:

Technique of the X-ray diffraction line profile analysis has been applied to the study of fatigue damage below the surface of the work and the backup rolls of cold strip mill and the backup rolls of hot strip mill. Half value breadth has been taken as a measure of fatiguing.

Fatigued zone below the surface of rolls is well correlated with the half contact length of roll,  $L$ ;  $0.03L$  in the work roll of cold strip mill and  $0.1L$  in the other rolls. Changes in the half value breadth with increase in cycles of roll contact differ in accordance with the surface hardness of the rolls: continued cycling results in decrease of the half value breadth at surface in hard rolls ( $H_s \geq 60$ ) and increase in soft rolls ( $H_s \leq 50$ ). The technique of X-ray study of fatigue can be extended to prediction and prevention of accidental failure of rolls due to fatigue fracture such as spalling. Furthermore the amount of surface dressing at regular maintenance of rolls can be saved significantly on the basis of accurate evaluation of the depth of fatigue damaged zone.

## 1. 緒 言

金属材料に生じる疲労損傷（疲労被害ともいう）を非破壊的に検知し、致命的な破壊事故を未然に防止することは設備の保全上重要な課題である。鉄鋼業においても諸設備に関し安定操業、効率的運用、保全コスト低減などの課題を解決するために疲労損傷の非破壊的な検知方法の開発が強く要請されている。特に目視き裂の発生を事前に予測できればそのメリットはきわめて大きいといえる。

従来、金属材料の疲労については疲労強度に関する機械工学的な研究および疲労にともなう組織変化に関する金属物理学的研究が多数進められてきた<sup>1)2)</sup>。しかし、疲労損傷を定量的に評価する研究は少ない。たとえばMINERの法則<sup>3)</sup>は疲労損傷の評価規準として実負荷回数の破壊負荷回数に対する比を用いており疲労損傷を直接定量的に評価するものではない。

一方、金属物理学の分野では金属材料の疲労現象の解

明のために従来X線回折法の利用が試みられてきたが、近年X線回折線の半価幅値の測定により疲労損傷を非破壊的かつ定量的に検知する研究がはじめられた。すでに平らおよび日本材料学会により基礎的研究が積み重ねられ<sup>4)~6)</sup>また計数管方式を取り入れた測定方式も確立されて実用化の可能性が高まってきた。X線回折法は超音波探傷法などの方法に比し目視き裂の発生前における疲労損傷の検出に有効であることが大きな特徴である。一方、X線回折法の有する制約としては測定深さが露出表面の直下  $20 \sim 50 \mu$  以内に限定されることがあげられる。

疲労が問題となる鉄鋼製造設備は多種多様であるが筆者らは圧延ロールに着目した。圧延工程コストのなかでロールの費用は大きな比重を占めており、コスト低減のため(1)定期改削量低減、および(2)スポーリング、チルハゲ（ケースクラッシングともいう）などのロール破壊事故防止、に対する強い要請がある。ここで、この定期改削量は極力減らすことが望ましいが、疲労損傷の定量的把握なしに減少すればロールの破壊事故を多発しか

\* 昭和 51 年 4 月, 昭和 52 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 54 年 3 月 7 日受付  
(Received March 7, 1979)

\*\* 新日本製鉄(株)君津製鉄所 工博 (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp.)

\*\*\* 新日本製鉄株君津製鉄所 (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp., 1 Kimitsu Kimitsu 299-11)

Table 1. Specification of tested mill rolls in the surface layer.

Shop	Roll	Size of barell (mm)	Chemical composition (wt.%)					Process	Hardness (Hs)	Structure
			C	Si	Mn	Cr	Mo			
Cold rolling	Work roll	500-600φ ×2 100	1.0	0.3	0.3	2.0	0.3	Forge	80~97	Martensite
"	Backup roll	1 400-1 600φ ×2 100	0.5	0.3	0.3	2.0	0.3	"	55~72	Bainite
Hot rolling (Rough)	"	"	0.7	0.4	1.0	1.0	0.4	Cast	43~50	"
Hot rolling (Finish)	"	"	0.7	0.4	0.7	3.0	0.4	Forge	50~68	"

Table 2. Rolling results of rolls.

Shop	Roll	Number	Mill	Stand No.	Maximum pressure $P_{max}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	Number of rolling contact $N$ (cycle)	Half contact length $L$ (mm)	Wear depth (mm φ)
Cold rolling	Work roll	8	5 stand tandem 4Hi	1~3	105	4~24×10 <sup>4</sup>	3.7	<0.05
"	Backup roll	6	"	4, 5	106	0~1.4×10 <sup>6</sup>	3.6	<0.1
Hot rolling (Rough)	"	2	Single stand 4Hi	4	130	1×10 <sup>5</sup>	7.0	1.2
Hot rolling (Finish)	"	5	7 stand tandem 4Hi	2~6	120	2~4×10 <sup>5</sup>	5.5	0.4

えつて総ロール費用の増大を招くことになる。したがって最適の定期改削量を定めることは極めて困難な問題であり、今まではもつばら経験的に定められるのが常とされた。なおロール損傷深さを定量的に測定し、それに基づいて必要最小限の改削量を決定する試みはわずかに二、三の例がみられるだけである<sup>7)8)</sup>。

本報告はこの圧延ロールの疲労損傷を近年発達 of 著しい計数管式X線回折法を用いて測定し定量的に評価するとともに最適な定期改削量について検討したものである。本報告は軟鋼ストリップの熱間および冷間圧延機に使用されるロールを研究対象とした。熱間圧延用ロールとしてはバックアップロール (以下 HBR と略記) を、冷間圧延用ロールとしてはワークロール (以下 CWR) およびバックアップロール (以下 CBR) を測定対象とした。HBR は圧延中つねに 200°C 以下に保たれるので本報告では測定対象を冷間圧延温度域 (再結晶を生ぜずまた著しい回復の生じない温度域) で使用されるロールに限定したことになる。上述の各ロールについて圧延によつて生じる表面近傍の疲労損傷を特性X線の回折線の半価幅値 (以下半価幅と略記、定義については9) 参照) の変化によつて測定した。また小試験片を用いた転動疲労のモデル実験も行った。

## 2. 圧延ロールにおける疲労損傷の検出

### 2.1 実験方法

本実験に供した測定対象ロールは新日本製鉄(株)君津製

鉄所の冷延工場および熱延工場において通常のストリップ圧延に使用しているものである。Table 1 に各種ロールの表層の化学成分、硬度および金属組織などを記す。Table 2 には各種供試ロールの使用状況を示した。最大接触応力  $P_{max}$  はワークロールとバックアップロール間に発生する HERTZ の応力であるが<sup>9)</sup>、圧下力の幅方向分布が均一と仮定した計算値である。転動接触回数  $N$  は一回の使用 (改削と次の改削の間) ごとの接触回数である。バックアップロールではロール回転数にひとしい値になっているが、ワークロールについてはバックアップロールとストリップの双方と接触するためロール回転数の2倍とした。接触半長  $L$  は最大接触応力  $P_{max}$  と同様の手順で求めた。摩耗量は一回の使用での値である。

測定は次の三項目について行った。

- (1) 使用前での半価幅の深さ方向分布
- (2) 使用後における半価幅の深さ方向分布
- (3) ロール表面での半価幅の転動接触回数の増大にともなう変化

また測定は(株)島津製作所製X線応力測定装置を用いて行った。測定条件を Table 3 に示した。カウンター走査速度および時定数はワークロールとバックアップロールで異なるが両者の積を一定としたので半価幅への影響は小さい。測定は連続走査で得られた回折計数値をレートメーターを通してチャート上に記録した。回折線は鞍点のないブロードな波形を示しており、 $K_{\alpha 1}$  と  $K_{\alpha 2}$

Table 3. Measurement conditions.

1	X-ray	Cr $K_{\alpha}$
2	Filter	V, at the receiving slit
3	Diffraction plane	$\alpha$ Fe (211)
4	Slits	Parallel beam, $0.4^{\circ}$
5	Irradiation mask	$8\text{ mm} \times 4\text{ mm}$
6	Irradiation area	$12\text{ mm} \times 2\text{ mm}$
7	Tube voltage	30kV
8	Tube current	10mA
9	Counter	Scintillation counter
10	Counter scan speed	$1^{\circ}/\text{min}$ ( $2^{\circ}/\text{min}$ )
11	Time constant	16 s (8 s)
12	Range of $2\theta$	$145^{\circ} \rightarrow 169^{\circ}$ ( $148^{\circ} \rightarrow 164^{\circ}$ )

( ) : for backup rolls

の分離を行わず、バックグラウンドを差し引いたピーク強度の2分の1の点を通りバックグラウンドと平行にひいた直線と回折線との2つの交点の回折角度の差を半価幅とした。ロール上での測定位置は胴部での中央および端部(両端より100~200mmの位置)である。なお半価幅の深さ方向分布測定における表面層の逐次除去は電解研磨により行つた。

またCWRについては圧延後に表面部分から小片を切り出し透過電子顕微鏡観察を行つた。

### 2.2 実験結果

#### 2.2.1 使用前ロールの半価幅の分布

測定例を Fig. 1, Fig. 2 に示す。未使用のCWRの深さ0.25mmまでの半価幅は一定であるといえる。HBRでは半価幅が最表面で増加しているほか一定であることが認められる。改削量(2mm $\phi$ 以上)および摩耗量を考慮すれば疲労損傷層がHBR表面に残存している可能性はない。したがってHBRの研削影響層は表面下0.05mm以内のごく表面近傍にのみ存在するといえる。またCWRでは研削によつてなんら半価幅変化を生ぜず、研削の影響層が無視しうる程度のものであると考えられる。

#### 2.2.2 使用后ロールの半価幅分布

使用后での半価幅の深さ方向分布の測定例を Fig. 3

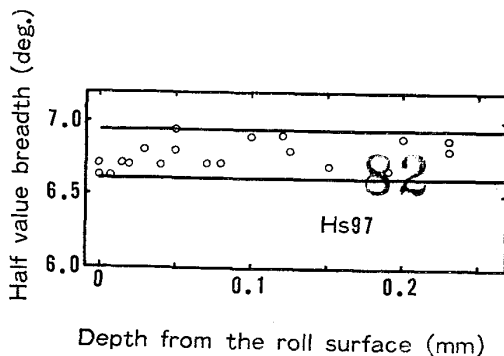


Fig. 1. Distribution of half value breadth below the surface of work roll of cold strip mill before service.

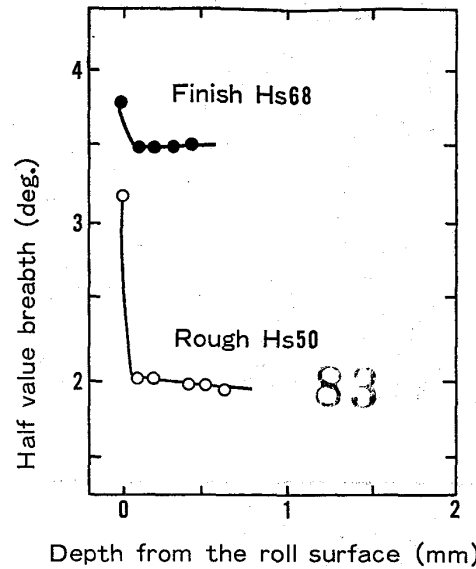


Fig. 2. Distribution of half value breadth below the surface of backup rolls of hot strip mill after dressing over 2 mm $\phi$ .

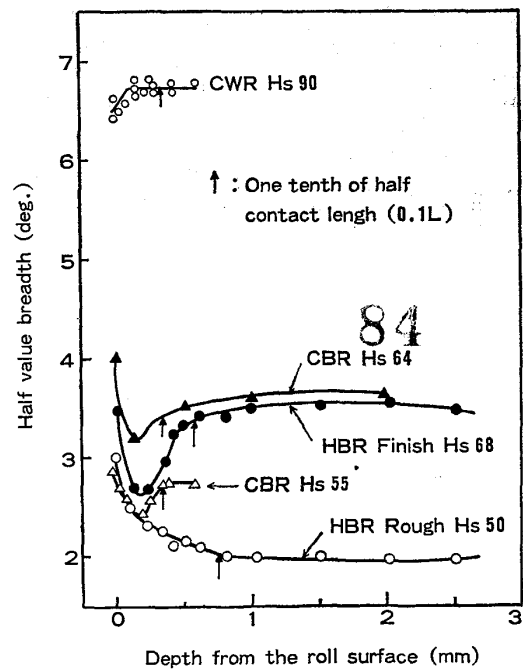


Fig. 3. Distribution of half value breadth below the surface, (1) work rolls of cold strip mill. ( $N=9 \times 10^4$ ;  $N$  is the number of rolling contact of the roll at a chance.) (2) backup rolls of cold strip mill. ( $N=4 \times 10^5$  for Hs 55,  $N=6 \times 10^5$  for Hs 64.) (3) backup rolls of hot strip mill. ( $N=1 \times 10^5$  for rough,  $N=3 \times 10^5$  for finish)

に示す。CWRは、表面下0.1mm以内で最表面に向つて単調に低下する分布を示している。0.1mmより深い領域では半価幅はほぼ一定で母材の値を示している。図中0.1Lを示す矢印は接触半長 $L$ の0.1倍を表している。CWRでは半価幅の変化領域は表面下0.03L以

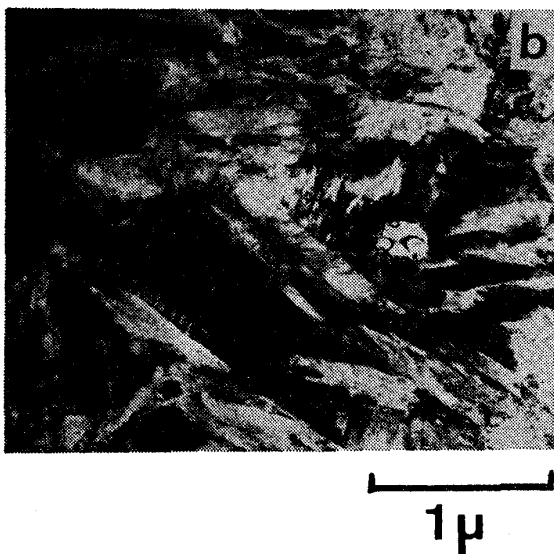
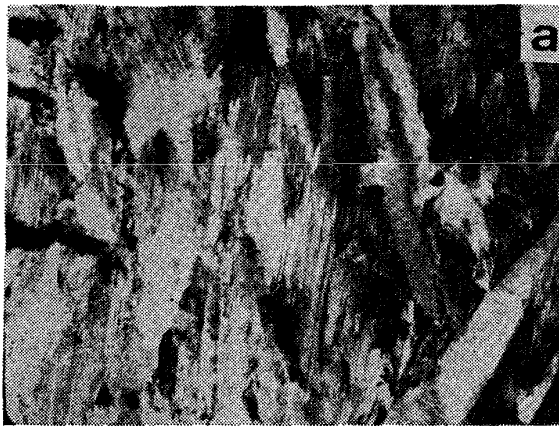


Photo. 1. Transmission electron microscope observation of the work roll of cold strip mill. (a) damaged by fatigue :  $10\mu$  from the surface, (b) undamaged : 1 mm from the surface. (Hs 90,  $N=9 \times 10^4$ )

内に限定されている。使用後の CWR の透過電子顕微鏡写真を Photo. 1 に示す。表面下 1 mm の未疲労部ではマルテンサイト葉の組織境界が明りようなものが多いのに比し、表面下  $10\mu$  の疲労部では不明りようになりサブグレイン組織状を呈している。

CBR では表面から 0.3 mm 以内に半価幅の変化が認められる。半価幅は最表面で最大で中へ入るほど小さくなり深さ 0.15 mm 付近で極小を示す。0.3 mm 以上の深さでは半価幅が一定になり母材の値を示していると考えられる。半価幅変化の認められる深さはほぼ  $0.1L$  に一致している。

HBR の場合は表面からほぼ 0.6 mm 以内で半価幅の変化が生じており、 $0.1L$  以内で変化が生じているといえる。変化のパターンは粗圧延用と仕上圧延用で異なる。硬度の高い仕上圧延用 HBR は CBR の半価幅分

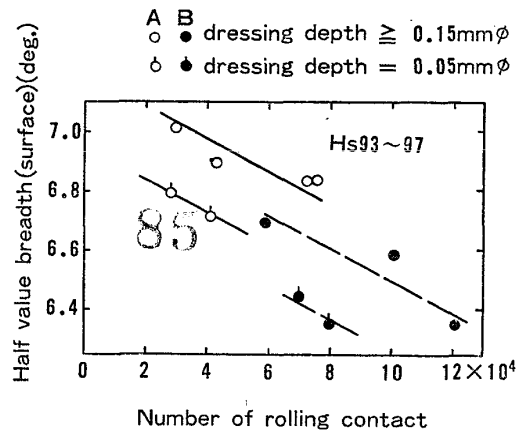


Fig. 4. Change of the relation between half value breadth and  $N$  at different dressing depth, regarding work rolls of cold strip mill.

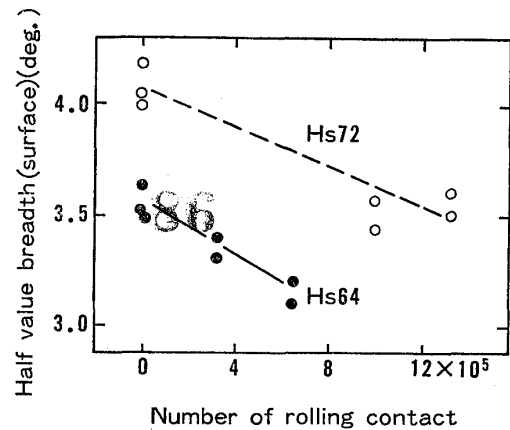


Fig. 5. Relation between half value breadth and  $N$ , regarding backup rolls of cold strip mill.

布の極小をさらに深くした分布をしている。これに対し硬度の低い粗圧延用 HBR はロール内部から表面に向けて単調に増大する分布を示している。分布の相違については 4.1 で考察を加える。

### 2.2.3 表面の半価幅の圧延による変化

実際の作業において圧延改削をくり返した場合の各圧延ごとの接触回数と各圧延終了時に表面で測定した半価幅との関係を Fig. 4, Fig. 5 に例示する。CWR は通常改削量 ( $0.15\text{mm}\phi$  以上) の場合と改削量をテスト的に  $0.05\text{mm}\phi$  に減じた場合を示した。いずれの場合も接触回数の増大にともないロール表面の半価幅低下が認められる。改削量を  $0.05\text{mm}\phi$  に減じた場合は通常改削量の場合に比し半価幅が低下しているがこれは転動疲労による表面近傍の半価幅低下が累積したためと考えられる。

CBR も CWR と同様に接触回数の増大に伴う表面半価幅の低下が認められる。

Table 4. Specification of specimens for model test comparing the mill roll.

	Chemical composition (wt.%)						Hardness* (Hs)	Structure*	Heat treatment			
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni			Soak	Quench	Temper	Cool
Specimen	0.4	0.34	0.34	0.73	0.17	1.72	75	Bainite	850°C ×15 min	180°C Salt ×30 min	450°C ×2 h	Water cooling
Backup roll of cold strip mill	0.5	0.3	0.3	2.0	0.3	—	60	Bainite	900°C	Jet water	450°C	Furnace cooling

\* at surface layer

本章に示した実験結果は下田ら<sup>7)</sup> および長瀬ら<sup>8)</sup> のバックアップロールに関する半価幅分布の研究結果と矛盾していない。なおロールの中央および胴端部で測定値の差はみられない。

### 3. モデル実験

2.2.2 で述べたように使用後のバックアップロールについて極小を有する半価幅分布が得られているが、その形成機構を明らかにするためにモデル実験を行った。使用機は当社の工作事業部研究開発室が保有する(株)島津製作所製 転動疲労試験機である。当試験機は  $100\phi \times 10$  t (mm) の円板状試験片 2 枚を転動接触させ、テコを介して試験片に重錘の荷重を加える方式をとっている。試験片は Table 4 に示すように CBR をシミュレートして製作した。まず SNCM8 の棒鋼を素材とし所定寸法に切り出した後熱処理を行った。焼戻し温度は CBR と同一の  $450^\circ\text{C}$  とした。表面硬度は Hs 75 である。金属組織はベイナイトである。熱処理後研削により寸法をそろえて実験に供した。

実験条件について述べる。試験片が接触する他の円板は SUJ2 製の (Hs 95) ものを使用した。試験時の最大接触応力は  $P_{\max} = 84 \text{ kg/mm}^2$ 、接触半長は  $L = 0.36$  mm である。回転速度は 600 rpm、接触時のすべりは 0% とした。潤滑は行わなかったが試験片の温度は実験中  $60^\circ\text{C}$  以下であった。接触回数は  $N = 0 \sim 9 \times 10^5$  とした。

実験後の測定項目は目視観察、半価幅の深さ方向分布、光学顕微鏡観察および透過電子顕微鏡観察である。半価幅の測定条件は Table 3 におけるバックアップロールの条件と同一である。

以下実験結果を説明する。まず目視観察では試験片にき裂、スポーリングの発生および変形はみられなかった。半価幅の深さ方向分布の一例を Fig. 6 に示す。未疲労材 ( $N = 0$ ) では最表面での半価幅変化は小さい。

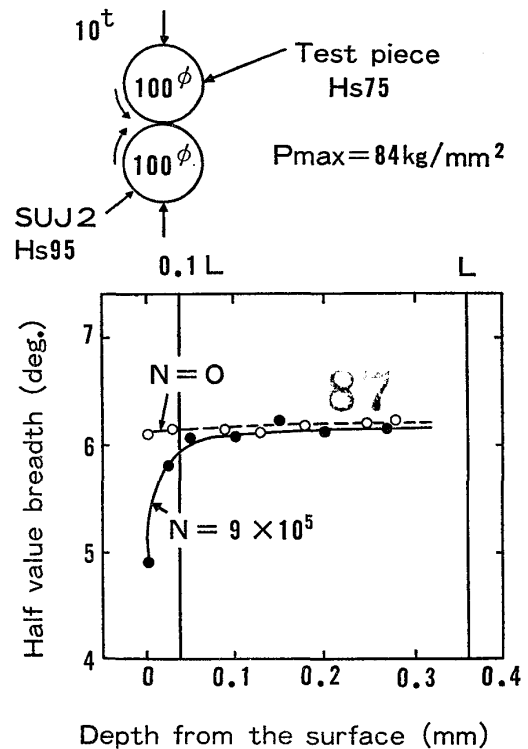
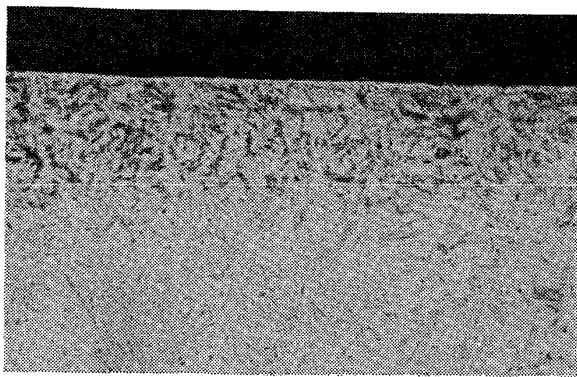


Fig. 6. Change of distribution of half value breadth at rolling contact model test.

疲労材 ( $N = 9 \times 10^5$ ) では表面から  $0.05 \text{ mm}$  以内の領域 (ほぼ  $0.1L$  以内) で半価幅が内部から表面に向つて単調に低下している。

疲労後の検鏡写真の一例を Photo. 2 に示す。表面から  $30 \mu$  以内で黒変が観察されるが、この黒変の領域は半価幅の低下域とほぼ一致する。またメタルフローは観察されなかった。透過電子顕微鏡観察の一例を Photo. 3 に示す。未疲労部ではマイクロ組織の境界が鮮明であるが、疲労部では組織境界が不明確になっておりサブグレイン組織状を呈している。上記黒変はこの組織変化にもとづくものと考えられる。

以上の結果をまとめると、Hs75 の試験片を  $P_{\max} = 84 \text{ kg/mm}^2$  ですべりの無い状態で  $N = 9 \times 10^5$  まで転動接触疲労させたところ、表面下  $0.1L$  以内の領域におい



10 μ

Photo. 2. Optical microstructure of specimen of model test. ( $N=9 \times 10^5$ , cross section normal to tangential direction)

Hs	Causes of change		Type of changing by fatigue	Plastic flow
	Fatigue	Fatigue + Plastic flow		
Hs $\geq 80$		—	B	non exist
Hs 60 ~ 70			B	exist
Hs $\leq 50$			A	exist

Fig. 7. Patterns of half value breadth distribution occurred by contact rolling. The dashed lines represent patterns before changing. (b is half value breadth and x is depth from the surface.)

て単調な半価幅低下, 金属組織の黒変およびマイクロ組織境界の不明確化が観察された。

#### 4. 考 察

##### 4.1 疲労進行にともなう半価幅の変化

2章の半価幅分布の測定結果を Hs レベル別に図式化し Fig. 7 に示す。第 2 欄は疲労による半価幅の変化を, 第 3 欄は第 2 欄に記した変化にさらに塑性流動がプラスされた際の変化を示す。第 4 欄には疲労にともなう半価幅変化のタイプを記したがこれは日本材料学会 X 線材料強度部門委員会第 2 分科会の分類に従った<sup>6)</sup>。A は 3 段階増加, B は 3 段階減少を示す。同図は以下の考察にもとづいて作成した。

- (1) Hs 60 以上のロールでは疲労にともない半価幅が減少するが (B タイプ), Hs 50 以下では半価幅は増大する (A タイプ)



1 μ

Photo. 3. Transmission electron microscope observation of specimen of model test. (a) damaged by fatigue,  $N=9 \times 10^5$ :  $10 \mu$  from the surface, (b) undamaged,  $N=0$ : 1 mm from the surface.

- (2) 転動疲労に際して Hs70 以下のロールでは表層で塑性流動が生じる。塑性流動によつて半価幅は増大する。Hs80 以上のロールでは塑性流動は小さく無視できる。

次に上記した 2 項目の考察について検討を加える。

- (1) Hs レベルによつて疲労にともなう半価幅変化が異なる点に関して述べる。一般に焼なまし材では A タイプ, 加工材では B タイプであることが日本材料学会によつて明らかにされている<sup>6)</sup>。一方半価幅の値は転位, 積層欠陥, 点欠陥などの格子欠陥の量と対応することが知られている<sup>10)</sup>。焼鈍材など半価幅が狭い材料では素材の格子欠陥密度が低い, 疲労によつて金属組織内に微視的塑性変形が導入されて格子欠陥密度が増大し, したがつて半価幅が増大すると考えられる。これに対し半価幅が広い加工材および熱処理材では初期の格子欠陥密度が高いため, (1) チャンネリング効果による転位密度の

減少、や(2)マルテンサイト正方格子の等方化が起こり半価幅の減少が生じると考えられる。

したがってA, B両タイプの遷移域に対応した硬度レベル(ないしは半価幅レベル)が存在すると考えられる。本研究で検討した圧延用ロールおよびモデル実験ではA, B両タイプの遷移域がHs50~60に存在すると考えられる。この臨界の半価幅は本研究の測定条件で2.5°附近である。

また疲労にともなう金属組織変化も多々研究されているが、例えば林らは加工鋼材ではセル組織からサブグレイン組織への変化、すなわち一種の回復が生じ半価幅の低下をもたらしているとしている<sup>11)</sup>。筆者らは圧延ロールおよびモデル試験片の透過電子顕微鏡観察により疲労後熱処理組織の境界が不鮮明になりサブグレイン組織状を呈していることを認めた。

(2) 塑性流動層はHs 48のCBRスリーブについて下田ら<sup>7)</sup>が存在を確認している。塑性流動は硬度が低いほど顕著に生じるが、半価幅分布より推定すればHs50以下のロールでは半価幅増大を生じ、Hs 80以上のロールでは塑性流動は無視しうるといえる。Hs 60~70のロールについては必ずしも明確でないが研削による半価幅変化を参考にして考察すればHs 50以下の場合と同様半価幅増大が生じると考えられる。

以上まとめるとFig. 7に示したように圧延中に半価幅変化をもたらす原因として疲労と塑性流動を考慮することによって硬度レベルごとの半価幅分布を説明しうる。

4.2 疲労損傷層の発生機構

本研究では実機圧延およびモデル実験により表面から0.1L以内に圧延にともなう半価幅変化層を検出したがこのような半価幅変化を生ぜしめる諸原因をFig. 8に示す。同図に示すように表面近傍の半価幅変化は前述した疲労、塑性流動のほか発熱にともなう焼戻しによっても生じる可能性がある。さらに疲労と塑性流動はHERTZの応力、接線応力、残留応力および熱応力によって支配

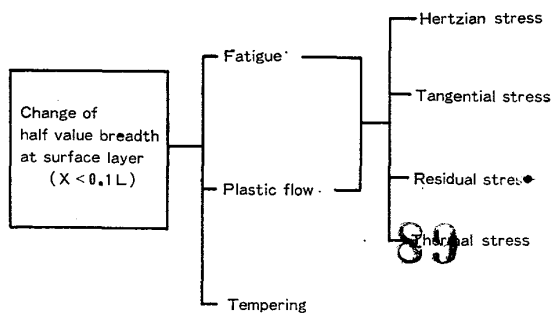


Fig. 8. Causes of change of half value breadth at surface layer ( $x < 0.1L$ ).

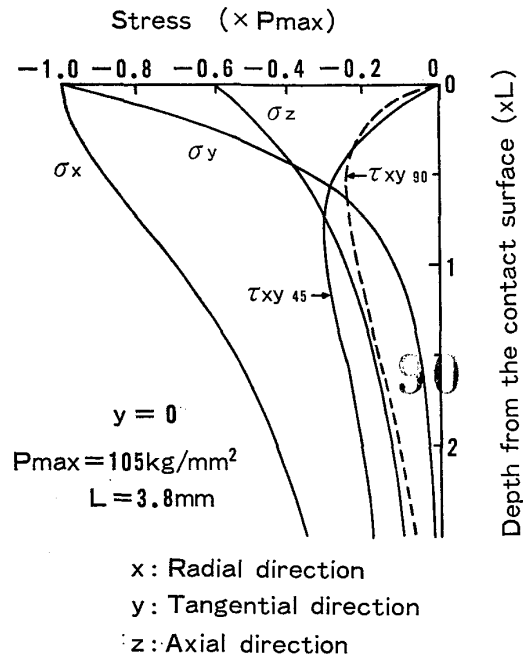


Fig. 9. Stress distribution below the contact surface between the work roll and the backup roll of cold strip mill without tangential force<sup>12)</sup>. Only  $\tau_{xy90}$  is compiled from<sup>1)</sup> p. 338, Table 17.1 and the dashed line represents its amplitude.

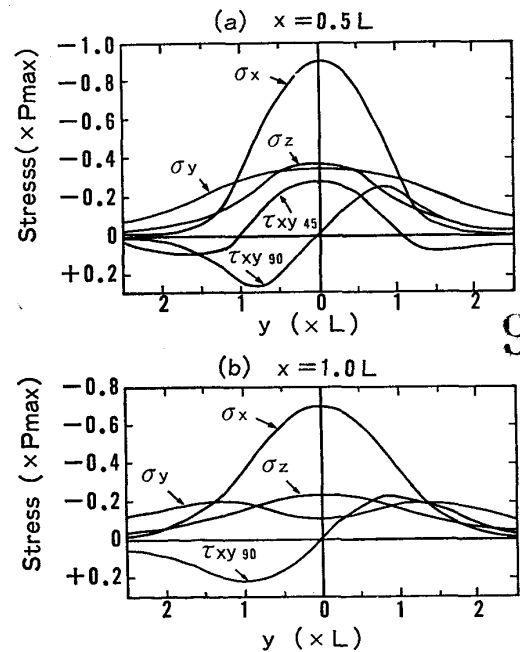


Fig. 10. Stress distribution in tangential direction at the depth of 0.5L and 1.0L without tangential force<sup>13)</sup>.

されていると考えられる。以下諸原因について検討を加える。

(1) HERTZ の応力

接線応力が存在しない場合のHERTZの応力の半径方

向分布を Fig. 9 に<sup>1)12)</sup>, 接線方向分布を Fig. 10 に<sup>13)</sup>示す. 従来転動接触疲労を支配する応力として  $\tau_{xy45}$  ( $\tau_{45}$  ともいう) または  $\tau_{xy90}$  ( $\tau_z$  ともいう) が指摘されているが (たとえば1) の p. 338), いずれも表面下  $0.5L \sim 0.8L$  で最大を示す応力であり, 表面下  $0.1L$  以内で半価幅変化をもたらす応力とは考えられない. また  $\sigma_y, \sigma_z$  などの表面近傍で大きな応力勾配を有する応力については表面近傍の疲労および塑性流動への部分的寄与が考えられる.

#### (2) 接線応力

接線応力は表面に作用する摩擦力によつて生じる. CWR および CBR ではバックアップロール〜ワークロール間およびワークロール〜ストリップ間のいずれも  $\mu$  は 0.03 程度である. したがつて  $P_{max} = 100 \text{ kg/mm}^2$  とすれば接線応力は約  $3 \text{ kg/mm}^2$  であり疲労および塑性流動への寄与は小さい. HBR についてもほぼ同様と考えられる.

#### (3) 残留応力

焼入れ材の接線方向および軸方向の圧縮残留応力は表面近傍で急増するが, このような残留応力は疲労に対し平均応力として作用する一方, 塑性流動への寄与も考えられる. CWR と CBR の残留応力の深さ方向分布を測定したが半価幅の深さ方向分布に比し, 変化が小さく対応は明らかでなかつた. 残留応力については不明の点が多く今後の解明が期待される.

#### (4) 熱応力

圧延ロールの接触面では摩擦による発熱が考えられる. またロールは冷媒で冷却されており, 発熱と冷却のくり返しにより熱応力が発生し疲労を生じると考えられる. KELLY はすべりのある円柱の転動接触において Fig 11 に示すような表面下の瞬間最高温度分布を得ている<sup>14)</sup>. 同図によれば表面下  $0.1L$  以内のごく表面近傍において大きな温度上昇が生じているが, これは筆者らの得た半価幅の変化領域とほぼ一致しており, 熱応力が疲労および塑性流動の主原因となつていゝとされる. なお KELLY は同図の例で発生する熱応力は  $90 \text{ kg/mm}^2$  に達するとしているが圧延ロールの場合はこの例に比しすべり, 摩擦係数  $\mu$  および  $P_{max}$  が小さいので発生する熱応力も小さくなると思われる.

#### (5) 焼戻し

(4) で述べた発熱によつて焼戻しが生じ半価幅が減少することが考えられる. 本研究では到達温度が低いため主として回復が生じると考えられる. なお焼戻しにより半価幅が増大することは考えられない.

バックアップロールでは HBR, CBR とともに圧延中

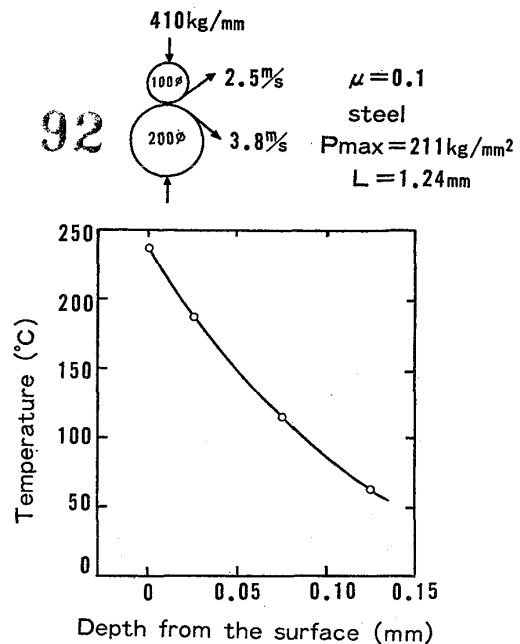


Fig. 11. Distribution of maximum temperature at rolling contact. This figure is compiled from the data of KELLY<sup>14)</sup>.

の表面温度は  $200^\circ\text{C}$  以下と推定されるが, この温度はロール製造時の焼戻し温度 (約  $450^\circ\text{C}$ ) に達しないため焼戻しは生じないと考えられる. また Hs50 以下のバックアップロールで使用後半価幅の上昇だけがみられることから焼戻しの半価幅分布に対する影響はないといえる.

CWR はストリップとの摩擦によつて表面温度が約  $300^\circ\text{C}$  まで上昇すると推定されるが, この温度はロール製造時の焼戻し温度 (約  $150^\circ\text{C}$ ) より高い. しかし,  $300^\circ\text{C}$  程度の温度では半価幅の減少量も小さく, また保持時間も短いため焼戻しによる半価幅低下への影響は小さいと考えられる.

以上まとめると圧延ロール表面で観察された半価幅の変化は主に熱応力などの諸応力による疲労および塑性流動によつて形成されたと考えられる. なお半価幅変化によつて検出された金属組織の損傷は疲労によるものが主であり疲労損傷と呼ぶことができる.

#### 4.3 疲労破壊事故の防止およびロール改削量の低減

本研究で認められた疲労損傷は HERTZ の剪断応力 ( $\tau_{xy45}$  および  $\tau_{xy90}$ ) に支配されるものではなく表面近傍の熱応力を主とした諸応力に起因することを前節で述べた. また辛島は疲労にともなつて金属組織が変化し下部組織 (セルまたはサブグレイン) や転位配列が一定状態に達するとしている<sup>2)</sup>. さらに辛島<sup>2)</sup> および林ら<sup>11)</sup> は疲労にともなう下部組織の発達によつてき裂が発生する



としている。半価幅はこのような下部組織の発達に対応して変化するので、疲労き裂の発生を予測し疲労破壊を未然に防止するための効果的手段といえる。

一般に圧延ロールに生じるスポーリング、チルハゲなどの疲労破壊事故はロール表面に起因するものとロール内部に起因するものに分れる<sup>16)~17)</sup>。このうちロール内部に起因するものは介在物などの内部欠陥により生じ、表面近傍での疲労損傷の検出によつては把握しえない。これに対しロール表面に起因する疲労破壊事故は表面近傍における疲労損傷の検出により防止することができる。

半価幅を圧延ロールの表面における疲労損傷の検出尺度として確立し、疲労破壊事故の防止および最小限の改削量を実現していくためにはさらに研究を積み重ねる必要がある。ソフト面では表面半価幅の変化率とき裂発生との具体的関連の解明をはじめ、ロールの鋼種および製造条件、圧延条件などの影響を明らかにする必要がある。ハード面ではロールを回転させながら表面半価幅を連続測定し、異常を検出する方法など具体的測定法について検討を要する。

なお、本研究によつて疲労損傷の生成深さを定量的に把握しえたので摩耗深さを考慮して当君津製鉄所の定期改削量の基準を改定しロール原単位を半減せしめることができた。改定後スポーリングの発生などのトラブルはみられない。

## 5. 結 言

軟鋼ストリップ用圧延機に使用される熱延バックアップロール、冷延ワークロールおよび冷延バックアップロールの表面近傍に発生する疲労損傷をX線回折線の半価幅値（以下半価幅と略記）を用いて研究し次の結果を得た。

(1) 疲労損傷は冷延ワークロールでは表面下  $0.03L$  以内 ( $L$  は接触半長)、ほかのロールでは  $0.1L$  以内に生じている。

(2) 表面硬度が Hs60 以上のロールでは転動接触回数が増大にともなつて表面での半価幅が低下し、Hs50 以下の場合は表面での半価幅が増大する。

(3) 表面下の半価幅深さ方向分布は Hs レベルによつて次の3項目に分けられる。

i) 単調減少 (ロール内部の母材レベルから表面に向つて、以下同じ) (Hs80以上; 冷延ワークロール)

ii) 一度減少した後急増大する (Hs60~70; 冷延バックアップロールおよび熱延バックアップロールの一部)

iii) 単調増大 (Hs50 以下; 熱延バックアップロールの一部)

(4) (3)で述べた半価幅分布は(2)で述べた疲労にともなう半価幅変化に塑性流動の影響 (Hs 70 以下の場合のみ) が加わつて形成されたものと考えられる。

(5) ロール表面下  $0.1L$  以内にみられる疲労および塑性流動は熱応力を主とした表面近傍の諸応力によつて生じると考えられる。

おわりに、実験に協力していただいた新日本製鉄(株)君津製鉄所、工作事業部および生産技術研究所の各位に感謝の意を表す。

## 文 献

- 1) 石橋 正: 金属の疲労と破壊の防止, (1967), p. 335 [養賢堂]
- 2) 辛島誠一: 金属材料の疲労, (1973), p. 57 [日本金属学会]
- 3) M. A. MINER: Trans. ASME, 67(1945)
- 4) 平 修二, 本田和男: 金属材料, 2(1962), p. 84
- 5) X線材料強度部門委員会第2分科会: 材料, 18(1969), p. 679
- 6) X線材料強度部門委員会第2分科会: 材料, 19(1970), p. 714
- 7) 下田秀夫, 荒木田豊, 柴崎鶴雄: 材料試験, 11(1962), p. 663
- 8) 長瀬光夫, 清水茂成, 清水英明, 田部博輔, 工藤浩一, 後藤 宏: 鉄と鋼, 56(1970), p. 1201
- 9) 日本材料学会: X線応力測定法, (1971), p. 244 [養賢堂]
- 10) 佐藤進一: X線材料強度学 (日本材料学会編), (1973), p. 301 [養賢堂]
- 11) 林 建吉, 幡中憲治: 材料, 20(1971), p. 1244
- 12) S. TIMOSHENKO and J. N. GOODIER: Theory of Elasticity, (1951), p. 381 [McGraw-Hill Book Co. Inc.]
- 13) E. I. RADZIMOVSKY: Illinois Bulletin, Ser. No. 408 (1953)
- 14) B. W. KELLY: Handbook of Mechanical Wear, ed. by C. Lipson and L. V. Colwell, (1961), p. 155 [The University of Michigan Press]
- 15) 赤堀公彦: 塑性と加工, 6(1965), p. 329
- 16) 工藤浩一: 日本製鋼所技報, 26(1969), p. 3053
- 17) 中川師夫: 日立評論, 58(1976), p. 719