

# 技術論文

## 軌条矯正用ローラに発生したころがり疲れ破壊の解析

Investigation of Rolling Contact Fatigue Fracture Occurred in Rail Straightening Roller



溶接溶射技術開発室

尾崎 健一

Ken-ichi Ozaki

溶接溶射技術開発室

宮崎 裕之

Hiroyuki Miyazaki

溶接溶射技術開発室長

吉村 武憲

Takenori Yoshimura

### 要旨

ハイス系の溶接肉盛り溶接材料を用いた軌条矯正用ローラに、前例のないころがり疲れによるとみられるスポーリング状の破壊が発生した。そこでこれを切断してクラックの経路を詳細に観察するとともに、ローラが受ける接触応力を計算してその機構を推定した。その結果、破壊の原因は溶接欠陥ではなく、過大な応力が負荷されたときにセラミックスのような硬脆材料に生じる表面クラックが、圧延ロールのスポーリングと同様に、ころがり疲れにより内部に進展したものであることがわかった。ハイス系材料のような極度に耐摩耗性を向上させた硬脆材料の使用条件には注意が必要である。

### Synopsis:

The rail straightening roller overlaid by welding of a high speed steel fractured owing to rolling contact fatigue, and the appearance of the fracture was similar to the spalling but had been scarcely occurred. Then, the roller was cut, and the crack pass was examined precisely. Next, the contact stress acted on the roller surface was calculated. After these examinations, the mechanism of this phenomena was concluded as follows. That is, the crack source was not weld defects, but small surface cracks were generated at first by excessive stress as the same manner as that in the case of a ceramics, a hard and brittle material. At the second step, the cracks propagated inside as a result of rolling contact fatigue like a spalling of a rolling roll.

It should be taken care in case a highly wear resistant material as the high speed steel is applied to a roller under a severe condition.

### 1 緒言

鉄鋼製造工程では搬送、支持、グリップ、巻取、圧延、矯正などのために多くのロール、ローラが用いられている。それぞれに使用される材料にはより高い機能発揮と寿命延長を目指した研究開発が各所で進められている。しかし、このような多種類のロール、ローラ材料の開発がその製造業者に主体が置かれすぎている現状をかんがみると、製造業者と使用者とのより一層の協力関係を築くことが開発効率向上のために重要であ

ると著者らは常に考えている。ここでは、これまであまり報告例のない矯正機ローラの耐久性改善過程で遭遇した、ころがり疲れ破壊事例を解析した結果について述べる。

矯正機のローラが受ける負荷は一般的には低いとされている<sup>1)</sup>。しかし、被矯正材料の初期形状あるいは負荷配分によっては、ローラが予期せぬ重大な表面損傷を受けることがある。また、これらのローラは使用期間が比較的長いという特徴があるために損傷の種類

としては疲労要素を含んだ、特にころがり疲れ破壊を呈することが多いと推測される。

以下で対象とする軌条 (rail) はその断面形状の故に熱間圧延後冷却中に少なからぬ歪みが生じ、かつ製品として要求される真直度が厳しいために矯正は必須の工程になっている。軌条の種類について最近、高強度材が加わり、矯正に要する応力も増加の傾向にある。その矯正ローラの材質には最近耐摩耗性の高い溶接肉盛りが使用されているが、従来から溶接欠陥等に起因する破壊事例が度々発生していた。当社におけるこの肉盛り材質の開発状況については既報<sup>2)</sup>のとおりであるが、耐摩耗性の優れたハイス系材料を用いた本肉盛りローラに、最近ころがり疲れによるとみられるスポーリング状の破壊現象が観察されたので、詳細に解析を行った。

## 2 ころがり疲れと硬脆材料の破壊

ころがり疲れは比較的摩耗量が少ないころがり接触の場合に生じやすい。言い換えるとすべりが無いとか、あるいは潤滑が良好な場合などである。摩耗があると表層に疲労が蓄積することがないからである。従って、ころがり疲れは材料の耐摩耗性を向上させればさせるほど注意せねばならない表面損傷であるといえる。また、疲労現象であるから最初から起きるのではなく、ある限界寿命を過ぎると突然出現するので、予測が出来れば完全に防止することが出来る。この点で摩耗現象とは大きく異なる。

ころがり接触における弾塑性応力解析は既に数10年以上前から多くの人により詳細に行われている<sup>3)</sup>。すなわち、球あるいは円筒が接触して表面では圧縮応力のみが作用しても表面下には剪断応力が生じ、その大きさと分布は材料の形状と弾性定数を与えれば弾性論により比較的簡単に計算できる。しかし、この計算は材料が等方性均質連続体の場合に限り可能なので、実在の材料においては当然近似的なものとなる。実在の材料、特に金属は結晶の集合体、かつ複数の組織構造を有し、大なり小なりの欠陥を必ず含む。

次に、ころがり疲れは疲労現象の一つであるから、作用する応力が破壊強度より小さく、かつ繰り返されるときにのみ見られる。応力がその材料の降伏あるいは破壊強度を越える場合には疲労ではなく、他の現象

が生じる。その一つとして、材料が硬く脆い場合に見られる破壊がある<sup>4)</sup>。通常はセラミックスがその対象であるが、伸びがほとんどない高強度金属材料でも起こる可能性は十分ある。破壊の形態は複数あり、それを模式図で示すとFig.1のようである。これは引掻き痕の場合であるが、直下あるいは周辺に種々のクラックが生じる。クラックにはそれぞれ名称が付けられており、ヘルツクラック、ラジアルクラック、ラテラルクラック、メジアンクラックであり、この場合にも詳しい応力解析が行われている<sup>4)</sup>。

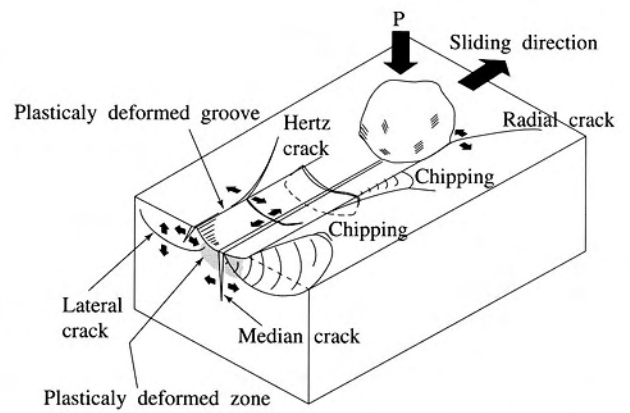


Fig.1 Schematic diagram of micro-cracks around a scratch of a hard and brittle material<sup>4)</sup>

ハイス系のような硬脆材料において、これらが組み合わせられた現象、例えば、短時間過大な応力を受けて微小破壊が生じた後、疲労によりクラックが進展し、マクロな破壊に至ることは、十分起り得ることであると考えられる。

## 3 軌条矯正用ローラの受ける負荷

ここで取り上げる軌条矯正機の構成をFig.2に、またFig.3にそのローラ配置を示す。Fig.2の矯正機は片持ち

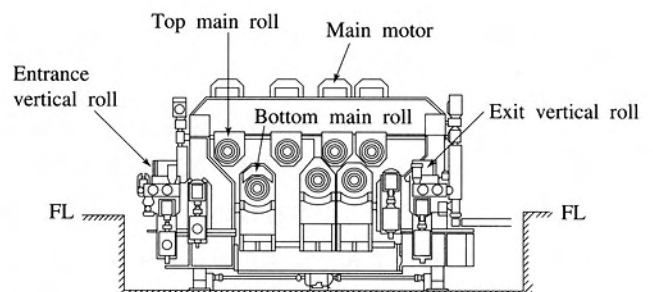


Fig.2 Construction of one side supporting and variable pitch type roller straightening machine<sup>5)</sup>

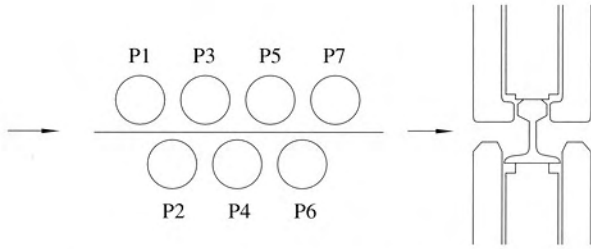


Fig.3 Disposition of straightening rollers

式可変ピッチ型で上下7本のローラから構成されている。各ローラが被矯正材料から受ける矯正反力の一例はTable 1に示した如く、入り側(前段)の方が負荷が高い配分で操業され、またレールの材質に応じた矯正反力の調整が行われていることがわかる。

なお、今回の破壊はレール材質136LBの矯正作業中に、P3スタンドにおいて発生している。

Table 1 Roller separating force of each roller

Kinds of rail	Separating force (ton)						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
50K	28	46	49	46	41	35	30
60K	37	62	66	62	55	47	40
136LB	76	124	134	124	110	96	82

#### 4 ローラ破壊状況

本肉盛りローラに発生した破壊状況をFig.4およびFig.5に示した。Fig.4で表面に観察されたスポーリング状破壊部周辺のクラックはFig.1の模式図中のラジアルクラックに類似している。ちなみに、ローラ回転方向は写真の左から右方向であり、被矯正材との接触部の

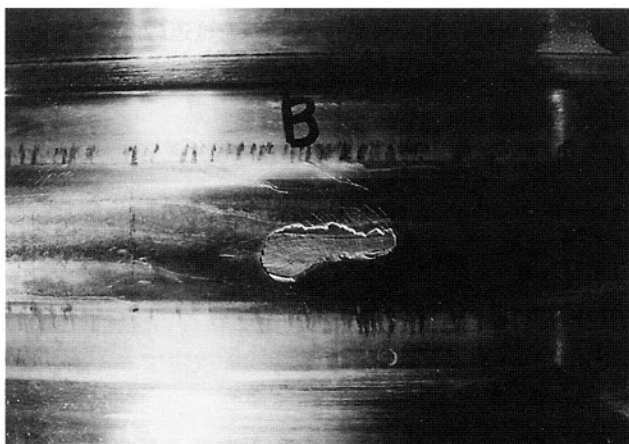


Fig.4 Appearance of fracture looking like spalling

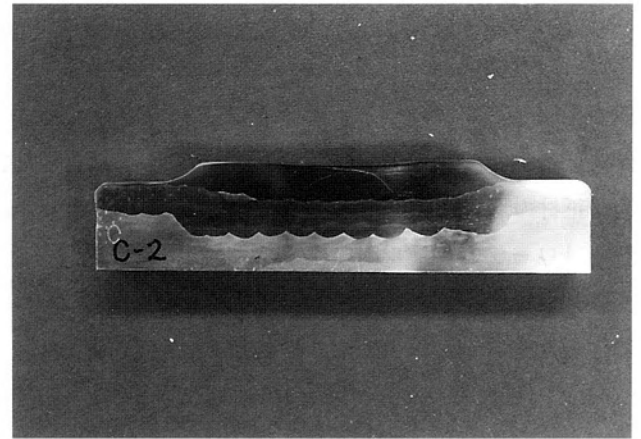


Fig.5 Internally propagated crack (Axial cross section)

移動はその逆方向となる。

断面写真のFig.5に見られるドーム状のクラックは過去に報告例がない。中央部の表面で発生したクラックは左右に別れて伝播し、その最大深さは肉盛り1層目と2層目の境界であり、2層目より内部には進展していない。ハイス系材料は1層目のみである。また、円周方向断面の観察結果によると、クラックの進展方向はFig.6に示したように、ローラ表層から内部へ向かって、力の作用点の移動と同じ方向(回転とは逆方向)である。この状況は圧延ロールにおいて、絞り事故などで表面に入ったクラックが内部に進展する様子と同じであり<sup>6)7)</sup>、この破壊がころがり疲れの機構によっているといえることができる。

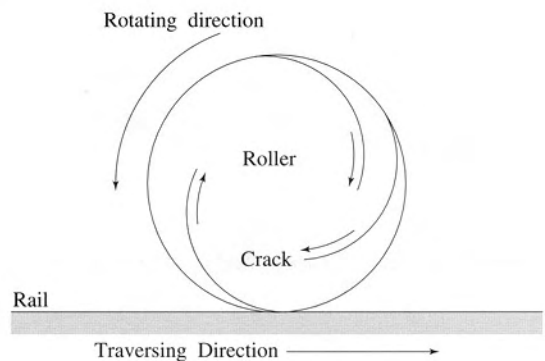


Fig.6 Propagating direction of cracks, related to rotating direction

また、他の場所も含めた断面観察の結果から溶接欠陥は全く認められず、本破壊事例は過大応力により発生したクラックがころがり疲れにより進展したものと推定される。



## 5 接触応力解析

以下に本肉盛りローラにおけるころがり接触応力解析の手法について述べる。しかし、冒頭にも述べたように、これは定常的な応力レベルを知るためであって、被矯正材の形状による異常応力まで求めるものではない。解析はローラとレール間に発生する圧力を、接触する2つの弾性体の問題としたHertzの理論に従って次のように行った<sup>8)</sup>。

Fig.7に示したように、肉盛りローラとレールを半径 $R_1$ の球座と半径 $R_2$ の球の接触とみなし、その接点における接平面を $xy$ 平面とする。接点近傍のそれぞれの表面上の点MとNの $xy$ 平面からの距離 $Z_1, Z_2$ は、高次の微小量を無視すると式(1)で表すことができる(両表面を2次曲面と仮定する)。

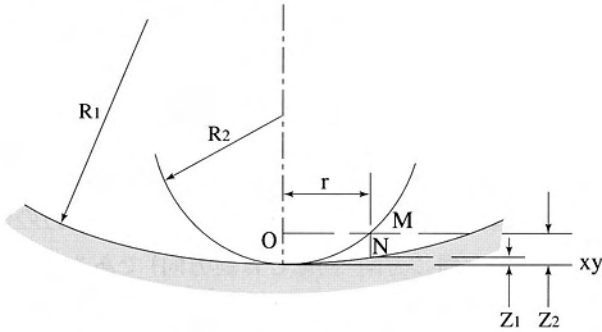


Fig.7 Contact plain and coordinate of rail-roller system

$$\begin{aligned} Z_1 &= A_1x^2 + A_2xy + A_3y^2 \\ Z_2 &= B_1x^2 + B_2xy + B_3y^2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

従って、MとNの2点間の距離は次のようになる。

$$Z_1 + Z_2 = (A_1+B_1)x^2 + (A_2+B_2)xy + (A_3+B_3)y^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(2)は積 $xy$ の項が消えるように $x$ と $y$ の方向を選ぶことにより、式(3)の形に表すことができる。

$$Z_1 + Z_2 = Ax^2 + By^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで定数 $A, B$ は式(4)で与えられる。

$$\begin{aligned} A+B &= \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1'} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2'} \right) \\ B-A &= \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'} \right)^2 + \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + 2 \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'} \right) \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'} \right) \cos 2\psi \right]^{1/2} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$A, B$ : 接触面の主曲率の大きさと2つの曲面の主曲率平面のなす角度に関する定数

$R_1, R_1'$ : 1つの物体の接点における主曲率半径

$R_2, R_2'$ : もう一方の物体の接点における主曲率半径

$\psi$ : 曲率 $1/R_1$ および $1/R_2$ を含めた垂直平面のなす角度

式(3)は、相互距離 $Z_1+Z_2$ 一定の点はすべて楕円上にあること、従って、2物体を圧縮して生じる接触面も楕円であることを意味する。

さらにHertzは、接触面に作用する圧力 $q$ の大きさが、接触面に垂直方向に作られる半楕円分布によって表されるものと仮定すると、最大応力 $q_0$ は接触面の中心に生じることから、接触面の楕円境界の長辺、短辺を $2a, 2b$ とすれば $q_0$ は方程式(5)から求められ、これから式(6)が得られることを示した。

$$P = \iint qdA = \frac{2}{3} \pi abq_0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$q_0 = \frac{3}{2} \frac{P}{\pi ab} \quad \dots\dots\dots (6)$$

この圧力を計算するために必要な長辺、短辺の $2a, 2b$ の大きさは次式(7)により与えられる。

$$\begin{aligned} a &= m \sqrt[3]{\frac{3\pi}{4} \frac{P(k_1+k_2)}{(A+B)}} \\ b &= n \sqrt[3]{\frac{3\pi}{4} \frac{P(k_1+k_2)}{(A+B)}} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式(7)の $A+B$ は式(4)から決定され、係数 $m, n$ は比 $(B-A):(A+B)$ に関する数である。ちなみに、 $k_1$ および

$k_2$ は式(8)により求められる。

$$k_1 = \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1} \quad k_2 = \frac{1-\nu_2^2}{\pi E_2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 $E_1, E_2$ は材料1、2の縦弾性係数、 $\nu_1, \nu_2$ はそれらのポアソン比である。

接触面形状から定まるA,Bに対して式(9)とおけば、 $\theta$ の値に対するm,nの値はTable 2で与えられ、式(7)からa,bが、次に式(6)から最大応力 $q_0$ を求めることができる。

$$\cos \theta = \frac{B-A}{A+B} \quad \dots\dots\dots (9)$$

Table 2 Value of m and n

$\theta$	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°
m =	2.731	2.397	2.136	1.926	1.754	1.611	1.486
n =	0.493	0.530	0.567	0.604	0.641	0.678	0.717
$\theta$	65°	70°	75°	80°	85°	90°	
m =	1.378	1.284	1.202	1.128	1.061	1.000	
n =	0.759	0.802	0.846	0.893	0.944	1.000	

上述した方法を用いて、Table 1に示したP3ローラの136LBレール矯正時における最大接触応力を計算した結果はTable 3のとおりである。なお、レール頭頂部の曲率半径を254、203(mm)の2種類とした。圧延ロールが受ける最大応力は100ないし200kgf/mm<sup>2</sup>程度であるから、この矯正ローラはかなり大きな応力を受けていることがわかる。

Table 3 Maximum contact stress acted on P3 roller

Radius of curvature of rail head (mm)	Maximum contact stress (kgf/mm <sup>2</sup> )
254	269
203	294

## 6 破壊機構の推定

これまで述べてきたことから、この破壊機構は次のように推定される。

このローラは定常時でもかなり大きな接触応力を受けており、被矯正材の初期形状によってはそれ以上の過大な応力となる可能性がある。その結果、ハイスという硬脆材料の表面にラジアルクラックに類似した初期クラックが生じた。また、それ以前にころがり疲れに伴う歪みの蓄積によって、ハイス表面層がさらに脆化し、クラックの発生を促進したことも考えられる。さらに、クラック発生後に引き続くころがり摩擦により、それが接触点の前方内部に進展し、遂に圧延ロールのスポーリングに類似した破壊に至った。

## 7 結 言

肉盛りハイスを使用した軌条矯正用ローラにみられたスポーリング状破壊を解析した結果、次のことが明らかになった。

- (1) ローラを切断し、クラックの進展状況を詳細に観察した結果、これは圧延ロールに生じるスポーリングと同じころがり疲れによるものと考えられる。
- (2) Hertz理論を用いて最大接触応力を計算した結果、この矯正ローラが受ける負荷は圧延ロールが受ける負荷以上の大きな値であることがわかった。
- (3) これらのことから、この破壊の起点はハイスという硬脆材料が大きな表面応力を受けて生じたクラックであり、これがその後のころがり疲れにより内部に進展しマクロな破壊に至ったものと推定される。
- (4) このような事故防止のためには、常にローラには過大な応力がかからないようにするとともに、クラックの進展しにくい耐ころがり疲れ性の優れた材質開発が必要である。

## 謝 辞

本報告に述べた接触応力解析に際し、九州大学工学部 機械工学科 栄 中 助教授にご協力ご助言をいただいたことを記し、謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 木内 学：生産研究, 48(1996), P.226
- 2) 宮崎裕之, 吉村武憲：フジコー技報, No.4(1996), P.39
- 3) 例えば, J.E.Merwin, K.L.Johnson : Proc.INstn.Mech.Engrs., 177(1963), P.676

- 4) 例えば, 榎本 祐嗣: 機械の研究, 37(1985), P.31
- 5) 日本鉄鋼協会編 鉄鋼便覧Ⅲ(2) 条鋼・鋼管・圧延  
共通設備, 丸善(1980)
- 6) 荒木田豊, 工藤 浩一: 塑性と加工, 7(1966), P.175
- 7) 佐野 義一, 木村 和夫: 鉄と鋼, 73(1987), P.1154
- 8) ティモシェンコ, グーディア: 弾性論(金多 潔 監訳),  
コロナ社(1992)

