

細束X線によるころがり接触の研究

真武友一*・藤村顕世*・石橋 彰**

Microbeam X-Ray Study on the Rolling
Contact Specimens (At $p_{max} = 0.7 HB$)

by

Tomokazu MATAKE

(Department of Mechanical Engineering)

Kensei FUJIMURA

(Department of Mechanical Engineering)

and Akira ISHIBASHI

(Department of Mechanical Engineering,

Faculty of Science and Engineering, Saga University)

For rolling contact fatigue specimens (S35C, $H_B=160$) which were subjected to a Hertzian stress $p_{max}=113 \text{ kg/mm}^2$ at different rolling cycles, the residual stress distribution at and below the contact surface was measured by X-ray microbeam diffraction and the changes of half-value breadth of the diffraction pattern were obtained.

The maximum value of residual stress in each specimen, except the one at low cycles ($N=10^2$), was obtained in the layer between 0.3~0.6mm below the surface, but not just at the contact surface. The residual stress distribution corresponds almost to the hardness distribution. The half-value breadth of diffraction pattern is the largest at the contact surface and decreases with distance from the surface for each specimen.

1. 緒 論

ころがり接触に関する研究ではピッチングの発生が重要な課題となっており、ころがり接触面のあらさや接触面下の内部組織の状態あるいはかたさの変化(加工硬化の影響)などが観察されており、これらの事象とピッチング限あるいはピッチング発生の原因となるき裂発生との関係を論じているものが多い^{1)~5)}。

著者の一人の研究¹⁾²⁾によれば、ころがり接触面を非常になめらかにするか、またはなじみ後の一對の口

ーラ表面の最大高さあらさの和が理論油膜厚さよりも小さくなるようにすれば、ピッチング限は飛躍的に向上し、かたさは表面から数mmの深さで著しく高くなっており、表面ではあまりかたくなっていないことがあきらかになっている。

一方X線的方法によって表面あるいは表面下の残留応力を測定してころがり疲れとの関係を求めた報告もある^{6)~9)}。それらの研究では接触面の残留応力の変化は表面あらさに左右され、あらさが大きいほど大

* 機械工学科

** 佐賀大学理工学部

大きく変化すること、繰返しのごく初期の段階で残留応力が変化し始めることなどが報告されている。

本論文は細束X線を用いてころがり接触による材料の表面および表面下の挙動を調査するものである。すなわち残留応力はX線回折法によって求められるし、細束X線を用いれば微小領域での残留応力が測定できるので、この方法によって圧縮残留応力の分布を測定し、従来の硬度分布とも比較し、ころがり接触の繰返しによる挙動を調査するのが目的である。このため細束X線の特性を利用して回折環の半価幅の変化を求めこれらの結果を対照して考察を加えた。

2. 試験片

本研究に用いた試料は著者の一人が以前に行なったころがり疲れの研究³⁾に使用したもので材料はS35C ($\sigma_s=33.5\text{kg/mm}^2$)である。ころがり試験片形状を図1に、組織写真を図2に示す。これらの試料は駆動側ローラ ($H_B=160$, 表面あらさ $H_{max}=5\mu$)で、一方従動側ローラ ($H_B=420$, 表面あらさ $H_{max}=0.2\sim 0.3\mu$)の表面は研削仕上げ後、超仕上げがなされている。本実験の試料はヘルツの接触応力 $p_{max}=113\text{kg/mm}^2$ で、ころがり繰返数は $N=10^2, 10^3, 10^5, 10^6$ お

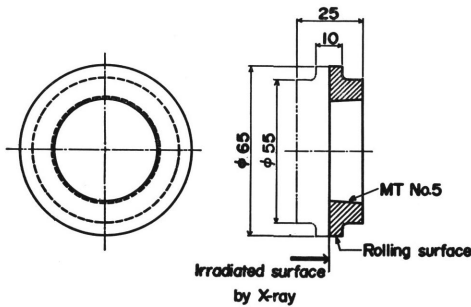


Fig. 1 Dimension of specimen

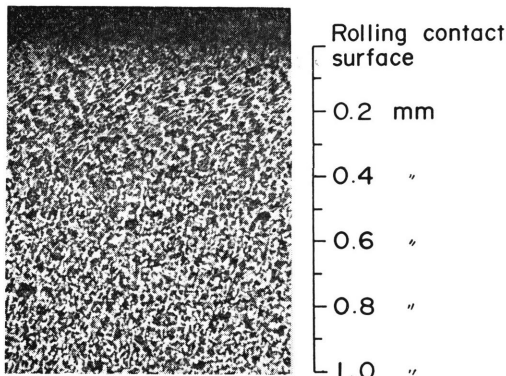


Fig. 2 Photograph of microstructure (No.20, $N=10^7$)

び 10^7 の5通りである。繰返速度は、特に繰返数の少ない場合を除き、3570rpmである。 $N=10^3$ の場合は180rpm、 $N=10^2$ の場合は手動によって回転を与えている。これらの試料はすべてピッチングは全く生じていない。

通常 160H_B 鋼ローラのピッチング限は $p_{max}=32\sim 56\text{kg/mm}^2$ ($0.2\sim 0.35H_B$) と考えられているから、本試験片に負荷されたヘルツ応力 $p_{max}=113\text{kg/mm}^2$ ($0.7H_B$) は非常に高い応力である。

X線回折用試料はローラのころがり接触による端面の影響を避けるため、ローラ幅の中央で切断(輪切り)したもので、切断加工の影響を排除するため調査部分の表面を約20 μ 電解研磨によって除去した(図1参照)。

3. 実験方法および測定法

本実験で測定した応力は接線方向の残留応力で、写真法により $\sin^2\psi$ 法を用いた。X線発生装置は理学電機製微小焦点X線回折装置で撮影条件は表1に示したがスリットは0.1mm ϕ のダブルピンホールで、試料面X線照射域は約0.3mm ϕ となる。

Table 1 X-ray conditions

X-ray	Co-K α
Filter	Fe
Diffraction plane	(310)
Tube voltage	40 kv
Tube current	20 mA
Slit (double pin hole)	0.1 ϕ
Exposure time	about 8 hr
Film	IX 200

得られた回折環に理学電機製マイクロフォトメーターを使用して回折強度分布曲線を求め、半価幅法によって回折環直径を測定した。

前述のように試料面上のX線照射域が0.3mm ϕ と微小なため、ころがり接触面より内部約1mm以上では回折環は点状となって連続な回折環が得られないので表面より1mmまでを測定範囲とした。すなわちころがり接触面および内部へおよそ0.3mmおきに1mmの深さまで測定した。

また連続環となっても $K_{\alpha 1}$ および $K_{\alpha 2}$ 線の分離が明瞭でないものもあり、特に繰返数の増加や測定位置が変わる場合に、その統一的な測定は必ずしも容易で

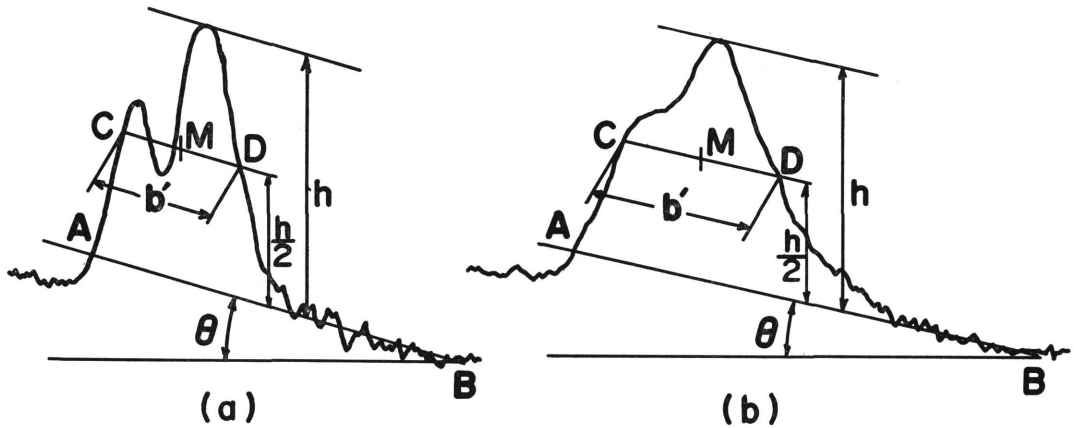


Fig. 3 Schematic illustration of half-value breadth K_{α_1} and K_{α_2} diffraction peak are : (a) distinguishable, (b) undistinguishable

はない。そこで本実験では図3に示すように、 K_{α_1} 線と K_{α_2} 線が分離して現われて来ない場合にも統一して考察できるように K_{α_1} 線のピーク高さ h の $1/2$ の点を通して基準線 AB に平行線を引き、これが回折強度分布曲線と交わる点を CD とし、線分 CD の中央の点を M とする。同様に回折環直径上の対応する中央点を M' とし、この距離 MM' を回折環直径として残留応力を計算した。

残留応力の測定は、各位置においてX線入射角度を $\psi_0 = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ の4方向として各々回折環直径を求め、 $d - \sin^2\psi$ 線図より最小自乗法によってこれらの測定点を通る直線の勾配を求めて計算した。なお残留応力は次式によって計算した。¹⁰⁾

$$d = \frac{1+\nu}{E} d_0 \sigma_x \cdot \sin^2\psi + \left\{ 1 - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \right\} d_0$$

ここで $E = 2.1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$, $\nu = 0.3$, $d_0 = 0.90481 \text{ \AA}$ (無応力状態の (310) 面格子面間隔),

一方細束X線回折法によると回折はん点の半径方向の拡がりから格子ひずみ $\Delta d/d$ を測定できるので¹¹⁾, X線回折線の半価幅 b ところがり接触面からの深さの関係を求めた。この場合の半価幅は図3の線分 $CD = b'$ の長さに基準線の傾き角の $\cos\theta$ を乗じて、 $b = b' \cos\theta$ として求めた。

4. 実験結果

前節の方法によって求めたX線回折環および $d - \sin^2\psi$ 線図の一例を図4および図5に示す。

図6は測定された残留応力を表面からの深さに対してプロットしたもので、各繰返数のものを同一図面に記載してある。

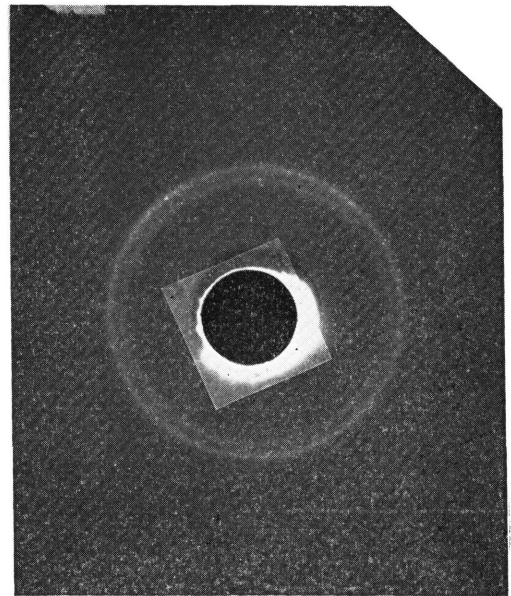


Fig. 4 X-ray diffraction pattern (No.14, $N=10^5$, 0.3mm below surface, $\psi_0=0$)

図7は繰返数ごとの回折環の半価幅 b と基準の半価幅の差 ($b - B_0$) を表面からの深さに対してプロットしたものである。 B_0 は各試験片内部のころがり疲れによる材質的な影響(たとえば加工硬化等)を受けていないと思われる位置(ころがり接触面から1.5~2mm)の半価幅である。これらの半価幅の測定は各位置での垂直入射によって得られた回折環上の数ヶ所の平均をとったものである。

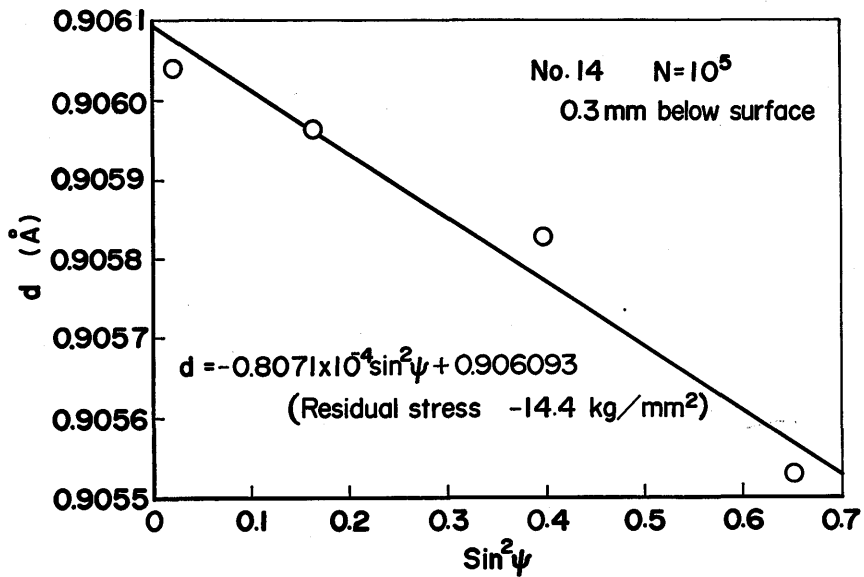
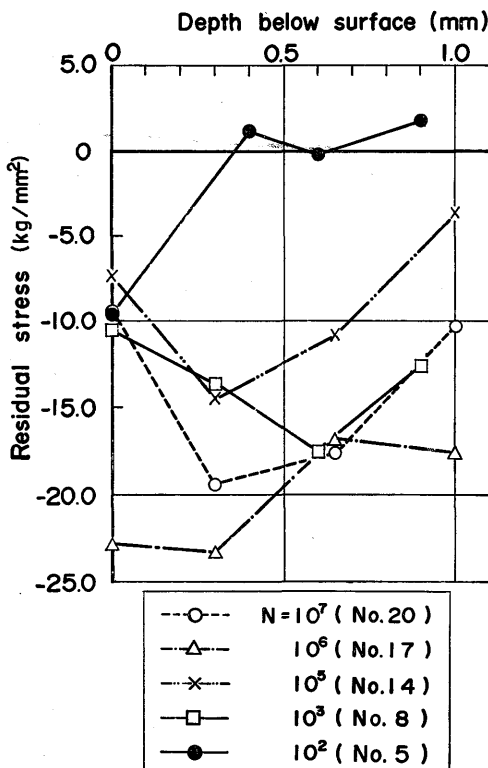
Fig. 5 $d-\sin^2\psi$ diagram

Fig. 6 Residual stress distribution

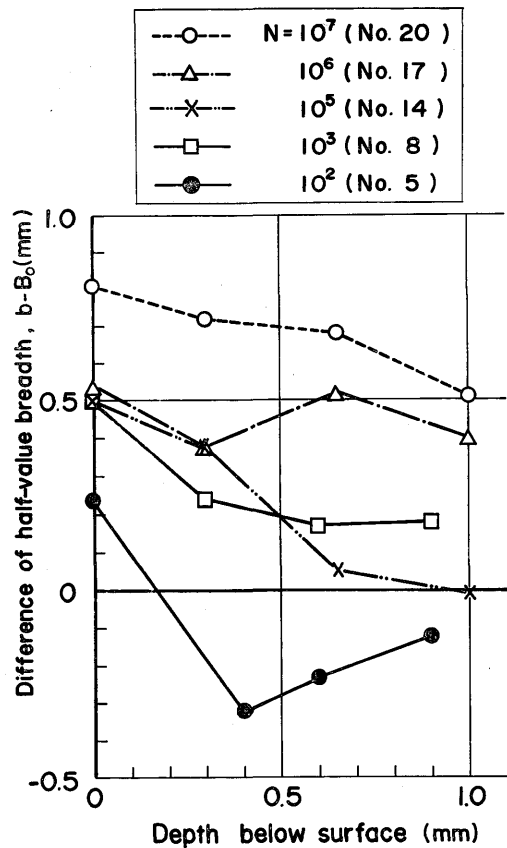


Fig. 7 Half-value breadth changes

5. 考 察

図6を見ると接線方向の残留応力は繰返数の少ない No. 5 の試験片 ($N=10^2$) を除いて、すべて圧縮の残留応力であり、またころがり接触面より内部の方が一度大きくなって後減少する傾向にある。そして残留応力最大の位置は表面から 0.6mm までの間にあることがわかる。すなわち接触面の残留応力は No. 5 の試験片を除いて最高の残留応力を示していない。手動による No. 5 の試験片は接触面で最高の残留応力を示し、表面から 0.4mm の位置ではほとんど残留応力は消失している。これは $p_{max}=113\text{kg/mm}^2$ という大きなヘルツ応力にもかかわらず、総繰返数が 10^2 回と少ないために加工硬化の影響が内部まで及ばなかったものと思われる。あるいは繰返速度の影響も考えられる。また測定された圧縮の残留応力は、試験片が図1のように中央で切断されたために、ローラ自体とは若干異なっているかも知れないが、大体の傾向は示しているものと思われる。

一方本試料を用いたころがり疲れの研究³⁾によると、表面からの深さに対する硬度分布は図8の通りで、残留応力の場合と同様表面のかたさはあまり大き

くない。最大硬度の位置は表面から 0.15~0.5mm のところであって図6の残留応力最大の位置とは一致しているようである。これは最大せん断応力が生じる位置が接触面下にあることと関係があるものと思われる。しかし図8のような硬度分布を示すのは、本試料を用いたころがり疲れの実験条件すなわち硬い方のローラの表面あらさが非常に小さい場合で、従来のころがり疲れにおいては表面の硬度が最大となっている。

図2は 10^7 回転後の組織写真であるが、この図で組織の流れの状態を見ると、表面では組織の流れは少ないが、表面下では著しい組織の流れが起こっている。この図から見ると最も組織の流れている位置は表面からおおよそ 0.1~0.4mm の間くらいで前述の最大硬度、最大残留応力の位置とは対応している。

残留応力の繰返数による変化を調査すると、少数の繰返しによって発生した残留応力が、応力の繰返しによって漸次解放されて低減することを期待したが、本実験では $N=10^6$ (No.17) の試験片が最高の残留応力を示している。これはころがり疲れ試験をする前の残留応力値が不明なためと、各繰返数の試料が異なっていて同一試料による繰返数ごとの追跡調査ができないために起こったものと考えられる。

次に図7を見ると繰返数の異なる各試料とも表面から内部に進むにつれて半価幅の差 ($b-B_0$) は減少していて残留応力の分布(図6)と異なっている。半価幅変化の原因は結晶の微細化と格子ひずみが主なものと考えられるが¹²⁾¹³⁾、この両者を明確に区別することは困難である。しかしころがり接触をしたローラでは表面の結晶がもっとも微細化されて半価幅が増大し、一方内部では表面ほどは結晶の微細化が進まず、残留応力の減少による半価幅の変化も少ないため、相対的に表面の半価幅が大幅に増加して、図7のように内部に向って半価幅の様な減少を示したものと考えられる。繰返数の少ない No. 5 ($N=10^2$) の場合は実験誤差を考慮すれば、内部ではほとんど変化がないとみるべきであろう。

このように半価幅の分布が残留応力や硬度の分布と一致しない原因としては格子ひずみと結晶の微細化の変化を区別できないことほかに、残留応力としては回折はん点で示される微小範囲のものを取扱っていることと、 B_0 の測定の問題がある。 B_0 を求めた位置では回折線ははん点状であり、本実験ではフィルムあるいは試料の揺動を行っていないので、 B_0 の測定に多少の誤差が生じたことも考えられる。

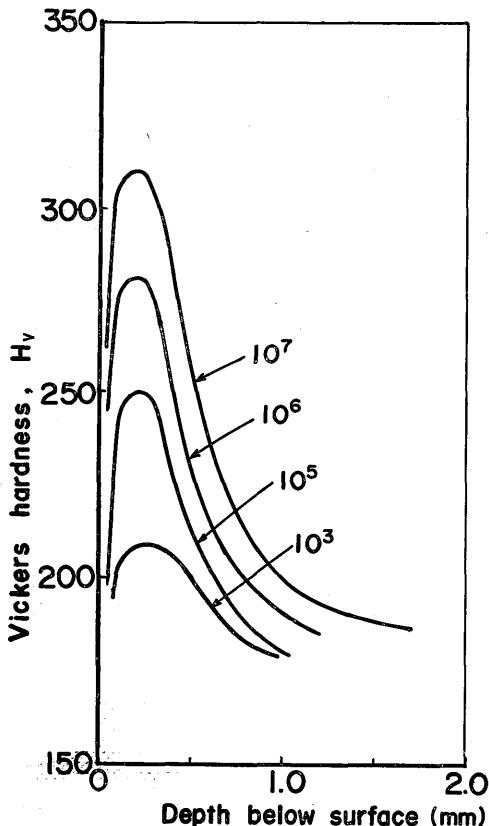


Fig. 8 Vickers hardness distribution

6. 結 論

以上のように細束X線回折によって、ころがり疲れ試験を行なったローラ試験片の表面および中央断面にX線を照射して接線方向の残留応力および半価幅を測定した結果から次のような結論を得た。

(1) 非常に表面あらさの小さい(接触面に油膜が形成された場合の)S35Cローラのヘルツ応力 $p_{max} = 113\text{kg/mm}^2$ の下でのころがり接触によって生じる圧縮残留応力は、表面はあまり高くなく、表面からおよそ0.6mm までの間にそのピークが存在する。

(2) 残留応力分布はビッカース硬度分布とも大体において一致している。

(3) 回折線の半価幅の変化は各繰返数とも表面がもっとも大きく内部へ進むにつれて減少している。

文 献

- 1) 石橋, 横手; 機械学会論文集, 35—277, p.1929, (昭44) .
- 2) 石橋, 横手; 機械学会論文集, 36—285, p.852, (昭45) .
- 3) A. Ishibashi and T. Yokote ; Bull. Japan Soc. of Prec.Engg., vol.5, No.2, p.55 (1971).
- 4) 平野, 桑野, 市丸; 機械学会論文集, 32—236, p.672, (昭41).
- 5) 平野, 市丸; 機械学会論文集, 32—242, p.1589, (昭41).
- 6) H. Muro and N. Tsushima ; Wear, 15, p.309, (1970).
- 7) 松本, 上原; 機械学会論文集, 42—354, p.625, (昭51).
- 8) 藤田, 他3名; 機械学会講演論文集, No. 730—10, p.159, (1973).
- 9) 真武, 石橋, 藤村; 機械学会講演論文集, No. 748—1, p.85, (1974).
- 10) 日本材料学会編; X線応力測定法, p 88 (1969), (養賢堂).
- 11) 林; 材料, 21—266, p692. (昭47).
- 12) 平, 本田; 機械学会論文集, 26—167, p.929, (昭35).
- 13) 平, 林; 機械学会論文集, 32—235, p.389, (昭41).