

## はめ合軸のフレッチング疲労特性 に及ぼす温間加工の影響

小笠原 淳

### The Effect of Warm Surface Rolling on Fretting Fatigue Properties of Shring-Fitted Axles

Jun OGASAWARA  
(昭和59年10月31日受理)

Rotating bending fatigue test is performed for shring-fitted specimen subjected to warm surface rolling so that fretting fatigue properties are clarified quantitatively. The results obtained are as follows;

- (1) Surface roughness grows larger in the inward region of 3 to 4 mm from the end of fitted part with stress cycle increase.
- (2) Fretting width of cold surface rolling specimen increases with stress cycle and has saturated at early stress cycle. On the other, the fretting width of warm surface rolling specimen increases linearly in  $15\mu\text{m}$  fitting allowance and increases little in  $20\mu\text{m}$  fitting allowance with stress cycle increase.
- (3) The maximum number of pits under  $5\mu\text{m}$  is at 2 to 3 mm's distance from the end of fitted part.
- (4) Failures position of cold surface rolling specimen shifts toward the inside of shring-fitted part with stress cycle increase, however that of warm surface rolling specimen shows a tendency to approach the end of fitted part.

#### 1. 緒 言

一般に、はめ合軸の疲労強度が平滑軸に比べて著しく低下することは良く知られているが、これは、はめ合端部の形状による応力集中と、はめ合部に生ずるフレッチングの影響によるもので、これまでの研究<sup>1)~7)</sup>によりその機構が明らかにされてきている。すなわち、軸はめ合部ではフレッチング部で疲労破壊することが多いとともに、低い負荷応力の場合でも微細き裂が発生することが知られ<sup>2)8)9)</sup>、その疲労強度には、はめ合端の応力集中も影響するが、フレッチングがかなり大きく影響するとみられている。フレッチング疲労の各種因子のうち接触面圧<sup>10)</sup>、相対すべり量<sup>3)4)7)</sup>、接触による応力状態<sup>1)5)</sup>、平均応力<sup>2)6)</sup>などが大きく関与することが知られてきているが、これらの多くは実験の難しさ、および因子個々の影響を知るため、円筒と平板による試験であって、はめ合軸によるものではない。

筆者はこれまでに、温間ロール加工によるはめ合

軸の疲労強度について研究してきたが、軸に温間加工を行うことにより、軸表層部の硬さおよび圧縮残留応力が増加し、この結果、疲労強度は焼ならし軸の約2倍、常温加工を行った軸の約1.2倍に向上することが分った<sup>11)12)</sup>。また直径50mmのはめ合軸について、温間および常温ロール加工によるフレッチングの性状を定性的に調べた結果<sup>13)</sup>、温間加工を行った軸のフレッチング幅は、負荷応力の増大に伴い増加するが常温加工の場合よりやや狭く、フレッチング部に発生するピットは、温間加工の場合の方が常温加工の場合より大きいが発生数が少ないこと、およびき裂発生位置は温間加工を行った軸がはめ合端に近い傾向にあることが知られた。

しかし、上述のようにフレッチングに影響する因子は多く、その現象は複雑であり、かつまた、定量的なはめ合軸の実験結果の報告がみられないので、既報<sup>12)</sup>の小形試験片による疲労試験の中の、温間および常温ロール加工を行った軸について、軸はめ合部のフレッチング部の性状を定量的に調査した。

はめ合軸のフレッチング疲労特性に及ぼす温間加工の影響

本報では、疲労試験後のはめ合部の表面あらさ、フレッチング幅、ピット個数および破断位置について報告する。

2. 実験方法

供試材は表1に示す車軸材である。疲労試験片は図1に示す直径12mmのはめ合試験片で、ホルダーはS45C材を用い油焼ばめした。使用した試験機は繰返し速度2100rpmの片持式回転曲げ疲労試験機である。本報で取り上げた試験片は、図2のS-N曲線に示す41本(温間加工34本、常温加工7本)である。

表1 化学成分

Material	C	Mn	Si	P	S	Cu
SFA 55	0.35	0.17	0.69	0.018	0.015	0.13

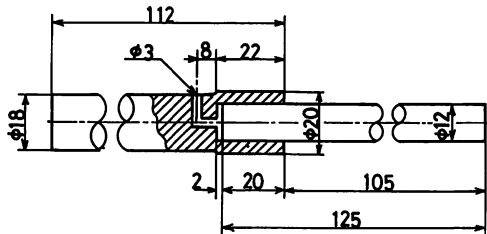


図1 試験片形状

試験片の表面ロール加工は直径80mm、転動面曲率半径50mmのロールを用い、ロール加工圧力を最大ヘルツ圧力3165MPaとして、加工温度を常温、250℃、300℃および375℃で行った。ロール加工後の試験片の表面硬さHvは常温加工が約220、温間加工が250~280であり、表面あらさRmaxは常温加工が1.5~2.2μm、温間加工が2.5~3.3μmである。

はめ合における締め代は1.5d/1000(18μm)を目標としたが、実際の締め代は15~20μmとなった。前述のようにフレッチングには接触面圧が影響するので、これを15~17μmと18~20μmに分類し、前者を15μm、後者を20μmとして整理することにした。はめ合面圧はLaméの式より締め代18μmの場合に104MPaである。

疲労試験後のはめ合部の表面あらさRmaxを測定した試験片は、温間加工の締め代15μmのものが13本、20μmのものが21本で、常温加工はすべて15μmのものである。測定は、ホルダーを割って試験片を取り出し、はめ合端部からはめ合内部へ7mmの位置ま

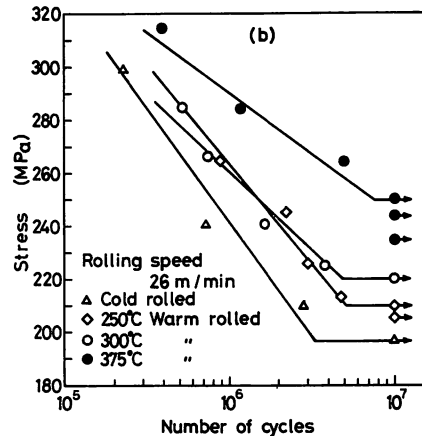
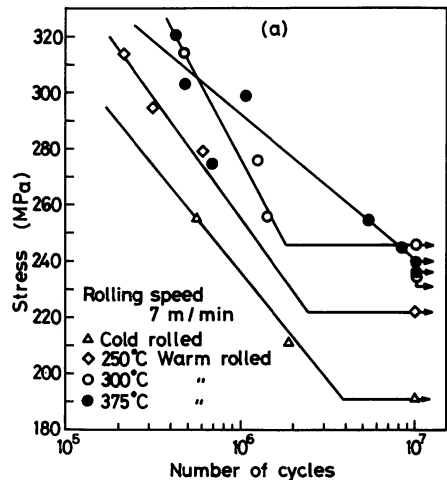


図2 S-N曲線

でのあらさ曲線を求めて行った。

フレッチング幅の測定は、試験片円周を8等分した軸方向について行い、その平均で示した。ここにフレッチング幅とは図3に示すように、曲げ荷重による軸とホルダーの間の相対的な微小振幅の繰返しすべり運動が行われる接触幅のことである。

ピットの調査は、温間加工の12本(破断、非破断

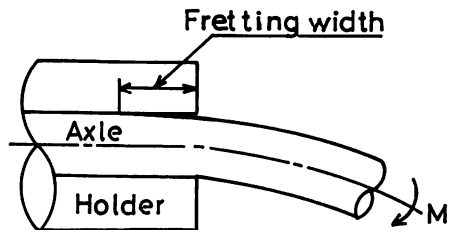


図3 フレッチング幅

それぞれ同数) について、金属顕微鏡の100倍の視野内のピット数をその最大径により3段階に分類して、はめ合端から内部へ1mmごとに7mm位置まで測定して行った。

はめ合始端からの破断位置は、破断材についてホルダー周上を8等分した各位置について、ホルダー始端からの距離を測定しその平均で示した。

なお、ロール加工温度および加工速度の異なる試験片であるため、調査結果を整理する段階でその影響を検討した結果、加工速度による違いはほとんど認められず、また加工温度は破断位置についてその影響が僅かに考えられる程度である。

### 3. 実験結果および考察

#### 3・1 表面あらさの変化

図4に疲労試験後の試験片はめ合部のフレッチング損傷の例を、図5にはめ合部の断面の例を示す。フレッチングによる表面の荒れとピットの状態、および一部にピット底に発生するき裂がみられる。ピットおよびき裂を図に矢印で示した。図6は図5と同じ試験片のはめ合部の表面あらさ曲線を示す。これらのあらさ曲線について、はめ合端から1mm幅に区切りその区間の最大あらさ  $R_{max}$  を求め、これを表面あらさと呼ぶことにする。

図7(a)は繰返し数 $10^5 \sim 10^6$ 回において破断した試験片の、はめ合部の表面あらさの変化である。表面

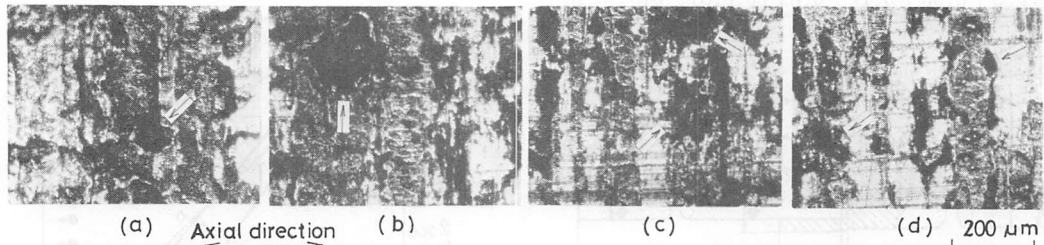


図4 はめ合部表面のフレッチング損傷

(375°C 温間加工試験片, 加工速度26 m/min, 負荷応力265MPa, 繰返し数 $4.96 \times 10^6$ )  
破断位置からの距離 (a) 0 mm, (b) 1 mm, (c) 2 mm, (d) 3 mm

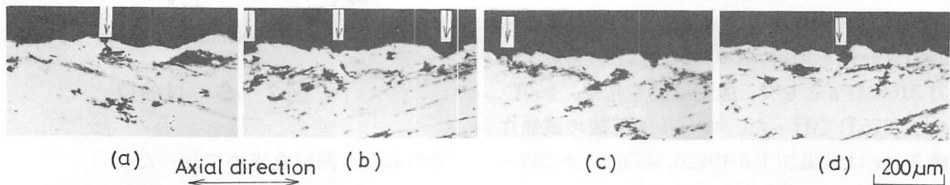


図5 はめ合部断面

(375°C 温間加工試験片, 加工速度7 m/min, 負荷応力235MPa, 繰返し数 $10^7$ )  
はめ合端からの距離 (a) 0.8mm, (b) 1.9mm, (c) 2.9mm, (d) 3.3mm

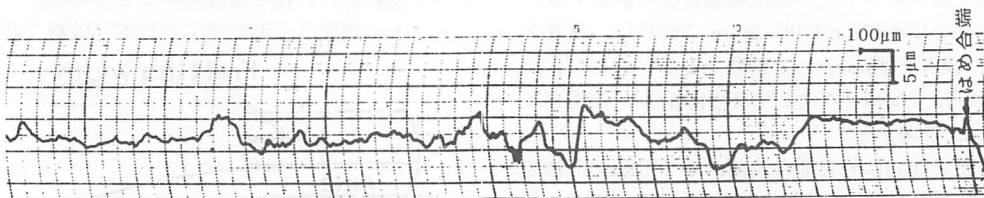


図6 はめ合部の表面あらさ曲線

(375°C 温間加工試験片, 加工速度7 m/min, 負荷応力235MPa, 繰返し数 $10^7$ )

はめ合軸のフレッチング疲労特性に及ぼす温間加工の影響

あらさはかなり分散しているので、その平均を取り折れ線によって変化を示した。図7(b)はこのようにして求めた全試験片の表面あらさの変化である。表面あらさは、はめ合端から内部の3~4mmまでの範囲で、どちらかといえば常温加工のほうが温間加工よりあらさが大きい。次に温間加工の締め代別でみると、締め代20 $\mu\text{m}$ の試験片は応力繰返しの増加とともに、はめ合端部の表面あらさが大きくなる傾向にある。

図8は負荷（公称）応力別にみた表面あらさの変化である。図8(a)の疲労限度付近の負荷応力の場合は、常温加工および温間加工ともに大きな変化はみられないが、図8(b)の高い負荷応力の場合は、常温加工のあらさ値がはめ合端部で温間加工より大きくなり、図7(a)と同じような傾向を示している。図8(c)は、はめ合端から2~3mm内部における負荷応力と表面あらさの関係で、両加工ともに応力の増大に伴い表面あらさが僅かに減少する傾向がみられる。

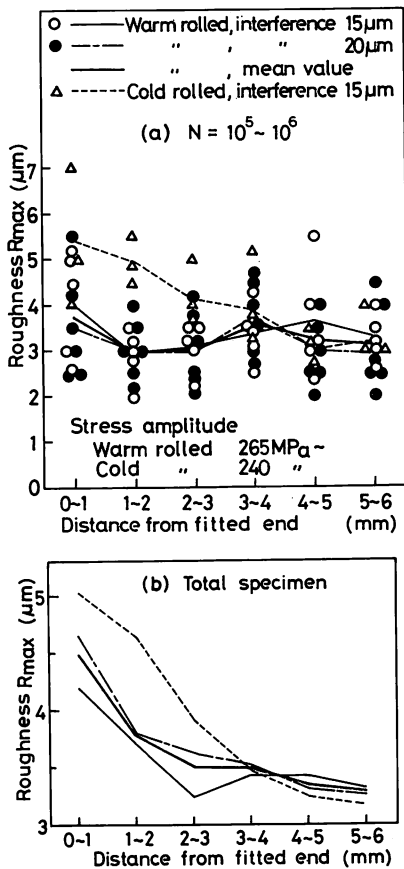


図7 応力繰返しによる表面あらさの変化

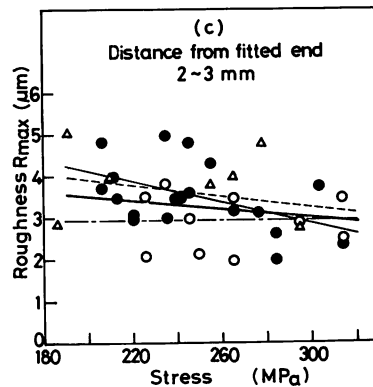
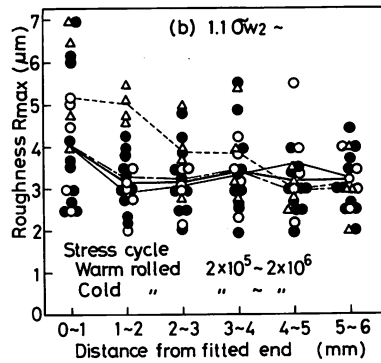
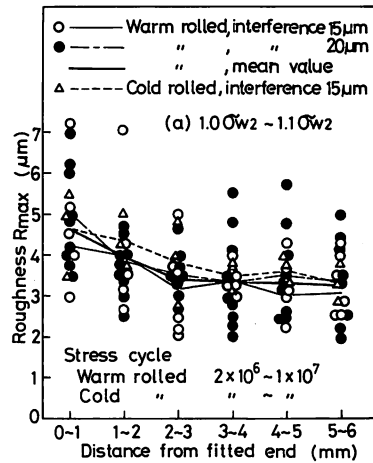


図8 負荷応力による表面あらさの変化

3.2 フレッチング幅の変化

図9に繰返し数とフレッチング幅の関係を示す。はめ合軸では、はめ合端近くに生じたフレッチング・コロージョンが、その部分の摩耗とともに徐々に内部に広がるといわれ<sup>16)</sup>、田中ら<sup>17)</sup>も繰返し数の増加とともにフレッチング幅が増すことを報告している。図9の常温加工のフレッチング幅は繰返しに伴い増

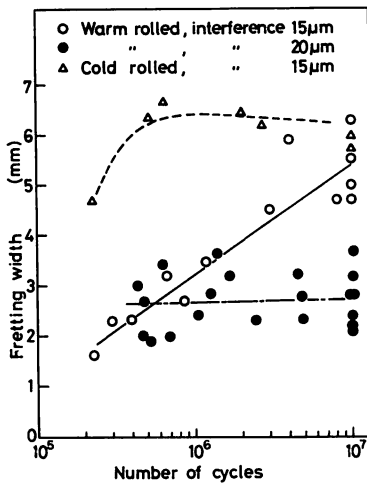


図9 繰返し数とフレッチング幅の関係

加し、早い繰返し数で飽和する傾向にある。温間加工の締め代  $15\mu\text{m}$  の場合は、繰返し数の増加とともにフレッチング幅が直線的に増加する傾向にあるが、締め代  $20\mu\text{m}$  の場合は繰返し数による変化はほとんどみられない。これから、温間加工の場合にはフレッチング幅は常温加工の場合の半分以下であって、相対すべり量が少なくフレッチングが起りにくいことが考えられる。

図9 でみられた温間加工の場合の繰返し数とフレッチング幅の関係を、繰返し数別に負荷応力とフレッチング幅の関係としてプロットし直して検討したものが図10である。図10(a)の繰返し数の少ない場合には、締め代と関係なく負荷応力による違いはほとんどみられないが、図10(b)(c)のように、締め代の少ない場合は負荷応力の小さい、すなわち繰返し数の多い場合にフレッチング幅が増加する傾向にある。

以上から、はめ合軸においては締め代をできるだけ大きくしてはめ合面圧を高めるのがよく、同じ締め代では温間加工の場合の方がフレッチング抵抗が大きいと考えられる。

### 3・3 ピット個数の変化

フレッチングにより疲労強度が低下する原因の一つは、フレッチングによって接触面に生じたピットが応力集中源となることで<sup>5)</sup>、筆者は先に定性的に常温加工ではピットは小さいが数は多く、温間加工では逆にピットは大きい数が少ないことを調べた<sup>13)</sup>。

本実験ではさらにピットの状態を知るために、温間加工の場合についてピットの大きさおよび個数に

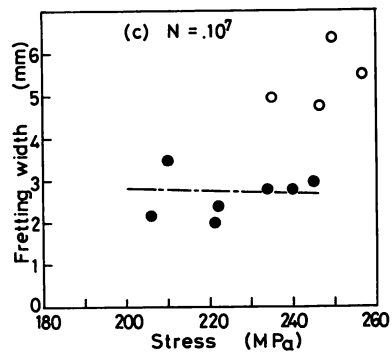
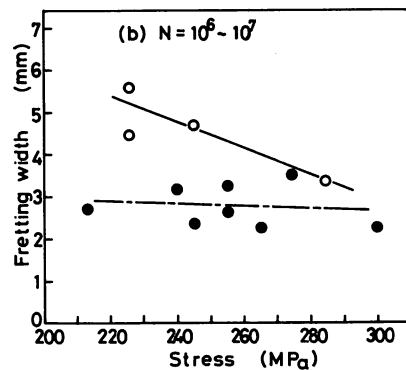
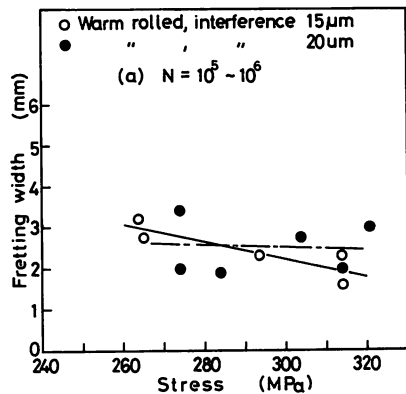


図10 負荷応力とフレッチング幅の関係

ついて調査した。試験片の内訳は、加工速度2種類、加工温度3種類の組合せのそれぞれについて、破断および非破断各1本ずつの計12本である。

図11は繰返し数とピット個数の変化を示す。大きさ  $5\mu\text{m}$  以下の微小なピットの数は繰返し数に関係なくほぼ一定とみられるが、 $5\mu\text{m}$  以上のピットは繰返し数とともに増加することが考えられる。

このピット個数の、はめ合端から内部への各位置における変化は図12のようで、大きさ  $5\mu\text{m}$  以下の

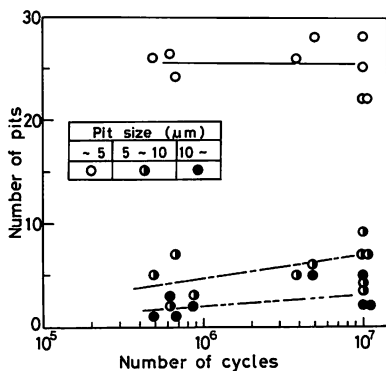


図11 繰返し数とピット数の関係

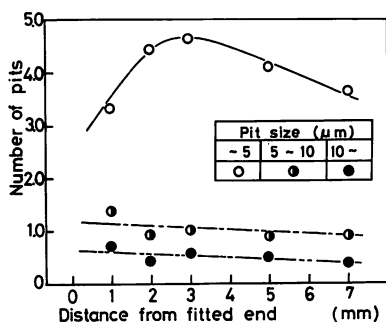


図12 はめ合端からの距離とピット数の関係

ピット数は、はめ合端から内部の2～3mm位置で最大となり、破断に係わるとみられる10μm以上の大きなピットは、はめ合の内部から端部に向かって多くなる傾向がみられる。このことは図7(b)でみたように、表面あらさがはめ合内部の3mm位置から端部に向かって次第に大きくなっていることから、はめ合端部では摩耗により微小なピットが少なくなり、大きなピットが増加したものと考えられる。

### 3・4 破断位置

一般に、はめ合軸の疲労破断ははめ合内部で起り、これはフレッチングに起因する<sup>1)2)5)</sup>と考えられるが、高周波焼入れなどの高硬さ材では、はめ合部の外側で破断することがある<sup>14)15)</sup>。

本実験の試験片の破断位置は図13のようである。縦軸ははめ合端からはめ合内部への距離を示す。温間加工の場合は、はめ合端から内部の1mmの範囲内で破断するものが多いが、常温加工の場合は破線のように応力繰返し数の多いほど、すなわち負荷応力が低いほど破断位置がはめ合内部に移動し、フレッチングの影響が大きいことが考えられる。常温加工の場合は、加工硬化はしていてもかなり可動転位が

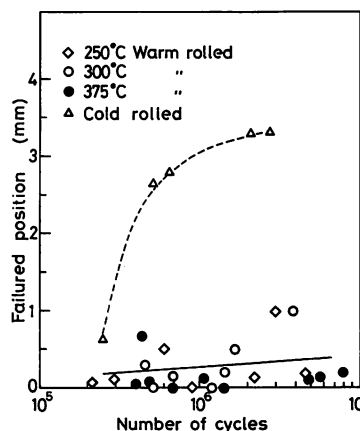


図13 破断繰返し数と破断位置の関係

存在しており、はめ合端でかなりの変形が起りうるのでフレッチングを起し易く、フレッチングが次第に内部へと進行するためであると考えられる。一方において温間加工の場合においては、いわゆる強制ひずみ時効のために転位は動きにくいので、はめ合端での試験片の変形はほとんど弾性変形だけしか起らないと考えられ、したがってフレッチング幅も小さく、図12にみたように10μm以上の大きなピットがはめ合端で多くなり、はめ合端部の形状による応力集力と、深いピットの応力集中によるき裂の発生とが複合して、破断位置もはめ合端に近い所になるものと考えられる。

## 4 結 言

温間および常温ロール加工を行った試験片について、回転曲げ疲労試験後の試験片はめ合部のフレッチング疲労特性として、表面あらさ、フレッチング幅、ピット個数および破断位置について定量的に調べた。得られた結果は次の通りである。

(1) 表面あらさは温間および常温ロール加工ともに、はめ合端からはめ合内部の3～4mmまでの範囲で、応力繰返し数の増加とともに大きくなる。また高負荷応力の場合に表面あらさが大きくなり、この傾向は常温加工の場合に著しくなる。

(2) 常温加工の場合、フレッチング幅は応力繰返し数の増加とともに増大し、早い繰返し数で飽和する傾向にある。一方、温間加工の場合のフレッチング幅は、締め代15μmでは繰返し数の増加に伴い直線的に増加する傾向にあるが、締め代20μmでは常温加工の半分以下で、繰返し数による変化はほとんど

どみられない。はめ合軸においては、締め代を大きくしてはめ合面圧を高めるのがよく、同じ締め代では温間加工によりフレッチング抵抗が大きくなると考えられる。

(3) 温間加工の場合、 $5\mu\text{m}$ 以下の微小なピットの数 は 繰返し数に関係なくほぼ一定とみられるが、 $5\mu\text{m}$ 以上のピットは繰返し数の増加とともに増大する傾向にある。また $5\mu\text{m}$ 以下のピットの数 は、はめ合端から内部の $2\sim 3\mu\text{m}$ 位置で最大となり、 $10\mu\text{m}$ 以上の大きなピットははめ合端が多くなる。

(4) 温間加工の場合、はめ合端から内部への $1\text{mm}$ 以内で破断するものが多いが、常温加工では繰返し数の増加に伴い破断位置がはめ合内部に移動する。これは、温間加工の場合は強制時効によって転位が動きにくく、はめ合部ではほとんど弾性変形のみとなり、はめ合端部の形状による応力集中と深いピットの応力集中とが複合して、はめ合端近くでの破断が多くなるものと考えられる。

(5) 温間加工を行った軸では強制時効によって転位が動きにくくなるため相対すべり量が少なくなり、表面が荒れることも少なくフレッチング幅が抑制されることになり、温間加工処理は耐フレッチングに対し有効な処理法であると考えられる。

終りに、ご助言いただいた東北大学川崎正名誉教授ならびに秋田県工業技術センター（元鉄道技術研究所主任研究員）高橋良治氏に対して厚く謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) R. B. Waterhouse, Proc. Inst. Mech. Engr. 169, 1157 (1955)
- 2) O. J. Horger, Proc. Inter. Conf., Fatigue of Metals, 352 (1956)
- 3) 西岡邦夫, 平川賢爾, 日本機械学会論文集, 33, 1344 (1967)
- 4) 西岡邦夫, 平川賢爾, 日本機械学会論文集, 34, 1183 (1968)
- 5) 西岡邦夫, 平川賢爾, 日本機械学会論文集, 34, 1635 (1968)
- 6) 西岡邦夫, 平川賢爾, 日本機械学会論文集, 34, 1644 (1968)
- 7) 西岡邦夫, 平川賢爾, 日本機械学会論文集, 34, 2068 (1968)
- 8) 中村宏, 日本機械学会論文集, 18, 64 (1952)
- 9) 大内田久, 日本機械学会論文集, 19, 96(1953)
- 10) 西岡邦夫, 小松英雄, 日本機械学会論文集, 33, 503 (1967)
- 11) 斎藤葆, 小笠原淳, 星野芳男, 高橋良治, 塑性と加工, 13, 825 (1972)
- 12) 斎藤葆, 小笠原淳, 星野芳男, 高橋良治, 塑性と加工, 14, 392 (1973)
- 13) 小笠原淳, 高橋良治, 斎藤葆, 宮野泰治, 塑性と加工, 23, 643 (1982)
- 14) 西岡邦夫, 平川賢爾, 日本機械学会講演論文集, 720—1, 101 (1972)
- 15) 中村宏, 星野次郎, 高橋秀雄, 日本機械学会論文集, 31, 1447 (1965)
- 16) 西岡邦夫, 平川賢爾, 材料, 18, 669 (1969)
- 17) 田中真一, 初野耕三, 夏井由郎, 日本機械学会講演論文集, 700—12, 53 (1970)