

## WJ2 および WJ7 ホワイトメタル軸受の損傷機構と寿命\*

田村 清<sup>\*1</sup>, 石原 外美<sup>\*2</sup>, 五嶋 孝仁<sup>\*2</sup>  
館 ゆかり<sup>\*3</sup>, 板川 巧<sup>\*3</sup>Failure Mechanism and Lives for Sliding Bearings  
Lined with WJ2 and WJ7 White-MetalKiyoshi TAMURA, Sotomi ISHIHARA<sup>\*4</sup>, Takahito GOSHIMA,  
Yukari TACHI and Takumi ITAKAWA<sup>\*4</sup> Department of Mechanical and Intellectual System Engineering, Toyama University,  
3190 Gofuku, Toyama-shi, Toyama, 930-8555 Japan

This work presents and discusses the result of sliding wear tests under the boundary lubrication condition with two kinds of white metal, JIS WJ 2 and WJ 7. They are widely used as sliding bearing materials. One (WJ 2) has tin as its main component, the other (WJ 7) lead. The sliding wear tests were performed with lubricant under various compressive stresses and sliding speeds. The log-log plots of the relations between the compressive stresses and the cut off lives are shown by straight lines which differ with sliding speeds. However, there is a unique straight line in the log-log plot between the frictional stress  $\tau$  and the cut off lives  $N_f$ , regardless of the sliding speeds. It was also clarified that the effect of materials on the plot can be eliminated by replacing  $\tau$  with the non-dimensional stress,  $\tau/\sigma_{cp}$ , where  $\sigma_{cp}$  is a compressive proof strength (0.125%) of the materials. Furthermore below the critical frictional stress,  $\tau_w$  no damages were observed.

**Key Words**: Wear, Bearing, Friction, Surface Roughness, White Metal, Pit

## 1. 緒 言

ホワイトメタルはすべり軸受の摺動材として広く使用されている。現在使用されているホワイトメタルは、PbあるいはSnを主成分とした2種類に大別することができる<sup>(1)</sup>。最近では、環境への配慮から、環境への影響が大きいPbを主体とするWJ7から、その影響が少ないSnを主体としたWJ2への移行が進みつつある<sup>(2)</sup>。Pbを主成分とするWJ7軸受材は、伸びが大きく、塑性変形により軸とのなじみ性に優れているため、一般に中速・中荷重用の軸受材として使用されている<sup>(1)</sup>。一方、Snを主成分としたWJ2軸受材は熱伝導率が高く、高速高荷重用の軸受材として使用されている<sup>(1)</sup>。しかしながら、これらホワイトメタル軸受材の摺動摩耗過程における性能特性は、損傷の発生と進展挙動、及び総合的な耐久寿命の見地から、未だ定量的に明確にされていないのが現状である。

これまで著者らはWJ7軸受材の摺動摩耗実験を行い、打ち切り寿命に及ぼす圧縮応力並びに変動圧縮荷重の影響を研究し、変動荷重の影響は静

的に負荷される平均圧縮応力に置き換えて考えることができることを明らかにした<sup>(3)</sup>。引き続きWJ7材の摺動摩耗下の打ち切り寿命に及ぼす軸回転速度の影響を研究した。その結果打ち切り寿命は摺動面に作用する摩擦応力によって一義的に決定されることを明らかにした<sup>(4,5)</sup>。

本研究では、WJ2並びにWJ7の2種類のホワイトメタルを用いて、摺動摩耗過程の損傷発生から耐久寿命に至るまでのプロセスを実験的に研究し、両材の差異と摺動摩耗過程の機構を考察することにより、耐久寿命を規定する力学的パラメータを明らかにすることを目的とした。

## 2. 試験片及び実験方法

**2.1 試験片** 円筒状台金に、WJ2及びWJ7製ホワイトメタルを遠心鋳造法によりライニングすることによりすべり軸受を製作した。なお、軸受台金として、ダクタイル鋳鉄FCD400を用いた。ホワイトメタルWJ2及びWJ7材の化学成分、材料の機械的性質をそれぞれ表1、表2に示した。なお、弾塑性有限要素解析に用いる圧縮応力とひずみ関係を図1に示す。

本実験では、すべり軸受試験片と摺動する相手方の回転軸として、一般的な軸材としてよく使用

\* 原稿受付 2002年8月15日。

<sup>\*1</sup> 正員, 日本マリンテクノ(株)(☎930-0916 富士市向新庄)。<sup>\*2</sup> 正員, 富山大学工学部(☎930-8555 富山市五福3190)。<sup>\*3</sup> 富山大学工学部。

E-mail: ishi@eng.toyama-u.ac.jp

されている炭素鋼S45Cを用いた。

試験片と回転軸の摺動部における接触面積を以下の方法で決定した。まず、40mm×9.8mmの摺動面積（投影寸法）をもつ試験片に小さな荷重をかけながらしばらく試験片と軸を摺動させることにより予備実験を行った。予備実験の荷重荷重は本実験のそれの約1/3とした。その理由は、荷重による圧縮応力が降伏応力以下で、且つ明確に摺動痕跡がわかる荷重として選定したためである。そしてホワイトメタル表面に残された擦過痕を観察することによって、接触面積を決定した。このようにして決定された摺動部の面積は、12mm×9.8mm（投影寸法）であり、荷重荷重の大きさによる影響は認められず、ほぼ一定であった。その後、回転軸と接触している部分のみを残し、他の非接触部分を切除することにより、図2に示す形状の、軸受試験片（以後試験片と略称）を作成した。なお、試験片の曲率半径は軸とほぼ同一の100.15mmとなっている。

試験開始前の回転軸の表面粗さは  $Ra=0.35\mu\text{m}$ 、ホワイトメタル試験片の表面粗さは  $Ra=1.4\mu\text{m}$  であった。

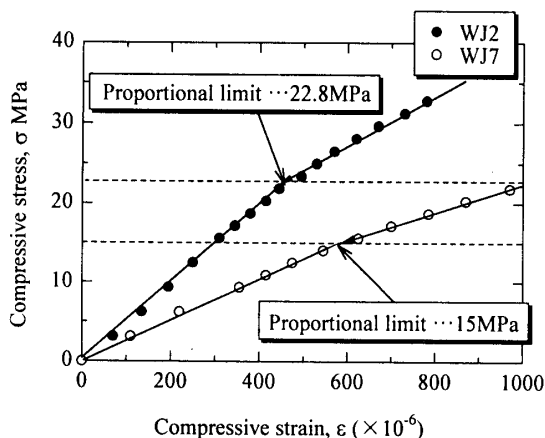


Fig.1 Stress-strain diagram.

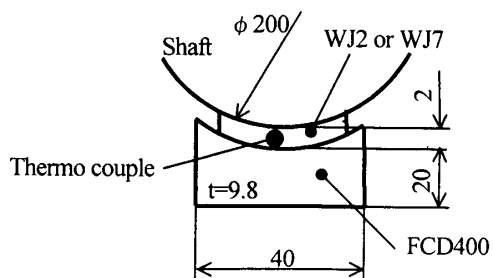


Fig. 2 Shape and dimensions of the specimen.

Table 1 Chemical compositions of the specimen

(a) WJ2

Sb (%)	Cu (%)	Sn (%)
8-10	5-6	Bal.

(b) WJ7

Sn (%)	Sb (%)	Cu (%)	Pb (%)
11-13	13-15	1.0	Bal.

Table 2 Mechanical properties of the specimen

(a)WJ2

Tensile Strength (MPa)	Compressive Proof Strength (0.125%) (MPa)	Proportional Limit (MPa)	Young's Modulus (GPa)
81.4	42.2	22.8	54.0

(b)WJ7

Tensile Strength (MPa)	Compressive Proof Strength (0.125%) (MPa)	Proportional Limit (MPa)	Young's Modulus (GPa)
72.3	25.5	15	33.4

## 2・2 実験方法

2・2・1 実験装置 実験には図3に示す摺動摩耗試験機を用いた。同試験機は、試験片に種々の圧縮応力を負荷しながら、試験片と回転軸との摺動摩耗実験を行うもので、本研究のために製作したものである。圧縮応力 $\sigma$ の定義として、 $\sigma=P/BL$ を用いた。ここで、 $P$ ：負荷された静荷重、 $B$ ：試験片の接触部の幅、 $L$ ：試験片の接触部の長さである。また軸回転速度  $N_{rev}$  は、摺動部への油の供給量を変化させるために、種々に変更された。なお、回転軸の直径は200mmである。

本実験では、圧縮応力 $\sigma$ が、8、15、20、30MPaの4種類、軸の回転速度が、200、287、400、500、600rpmの5種類のもとで実験を行なった。試験片摺動部への潤滑油の供給法として、軸下部を油槽に浸漬させ、軸の回転によって、潤滑油が試験片と軸の摺動部に掻き上げられる機構を採用した。使用した潤滑油は MOBIL DTE VG100 heavy (粘度  $95 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ , 313 K) である。

2・2・2 温度並びに摩擦力の測定方法 アルミニウム合金製の試験片の支持部にひずみゲージを貼り付けることによって、摺動過程中的摩擦力を連続的に計測した。ひずみの測定には、曲げひずみ除去のために2ゲージ法を用い、動ひずみ計とパーソナルコンピュータを用いて、自動計測を行った。また、同時に摺動過程中的温度変化も測定したが、その結果は既報<sup>(4)</sup>に示してある。

2・2・3 摺動部幅の測定法 試験片摺動部幅の変化は実験を中断し、試験片の幅をマイクロメータにより測定した。試験打ち切り寿命  $N_f$  は、

試験片の摺動部幅が、試験前の初期寸法 ( $t=9.8\text{mm}$ ) から 5%だけ増加するまでの回転軸の回転数と定義した。この理由は、後述するように 5%前後を境として、試験片の急激な温度増加が生じ、急速に焼きつき状態に至ったためである。

2.2.4 摺動部の表面粗さの測定法 摺動摩擦実験後、摺動面の表面粗さを、ミツトヨ社製の表面粗さ計SURFTEST 301を用いて測定した。測定は一サンプルにつき5回の測定を行い、また摺動面に平行と直角の2方向について行った。

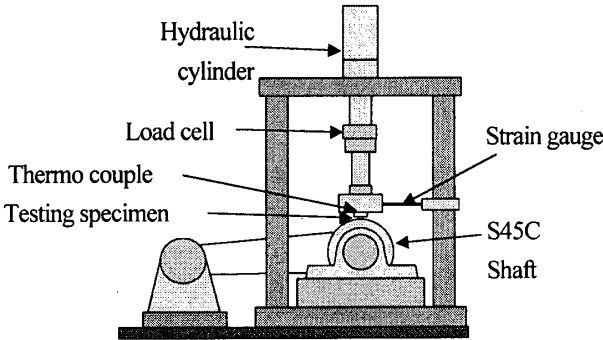
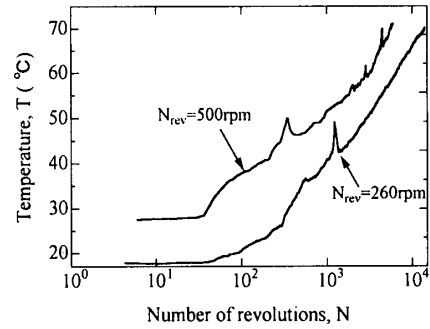


Fig.3 Schematic illustration of the test -machine.

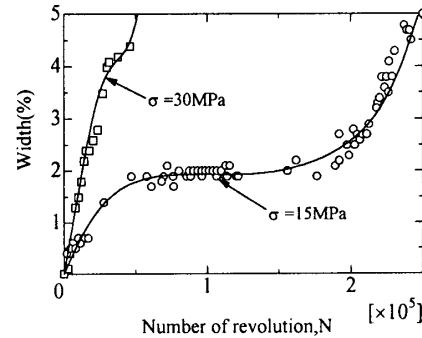
### 3. 実験結果

3.1 温度と摺動部幅、摩擦係数の変化 図4は摺動摩擦過程の試験片の温度変化ならびに幅の変化の一例を示したものである。図より試験片の温度及び幅は摩擦過程で徐々に増加していることがわかる。この理由は4.2節で後述する。摺動過程での摩擦力の変化を、種々の圧縮応力、軸回転速度のもとで測定した。測定した摩擦力  $F$  より、摩擦係数  $\mu$  を、 $\mu = F/P$  の関係より算出した。ここで、 $P$  は圧縮荷重である。

軸回転速度  $N_{rev}=115\text{rpm}$ 、圧縮応力  $\sigma=7\text{MPa}$  に対する実験結果を、一例として図5に示す。また、図6は種々の圧縮応力及び軸回転速度  $N_{rev}$  の下での摩擦係数  $\mu$  の変化を示したものである。図5に示すように、摩擦係数  $\mu$  は摺動摩擦過程で変動するので、ここでは、比較的安定した値をとる試験打ち切り寿命  $N_f$  の 20~80%の期間における、平均摩擦係数を採用した。図より、WJ2、並びにWJ7 材共に軸回転速度  $N_{rev}$  の増加につれ、摩擦係数  $\mu$  は増加するが、同一材料で、圧縮応力の違いによる摩擦係数  $\mu$  の差異はほとんど見られない。また、WJ2 における摩擦係数は WJ7 のそれと比較するとかなり小さいことが分かる。なお 287rpm 付近での急激な摩擦係数の増加は、用いた試験機の性質上、軸の回転による遠心力の増加によって潤滑油が飛散し、回転軸と試験片の摺動部への潤滑油の供給量が減少するためである。この事実は同試験機において、潤滑油の供給量と回転速度の関係の調査より、確認されている<sup>(5)</sup>。



(a) Temperature ( $\sigma=30\text{MPa}$ )



(b) Width ( $N_{rev}=287\text{rpm}$ )

Fig.4 Variations of both specimen temperature and width with number of shaft revolutions.

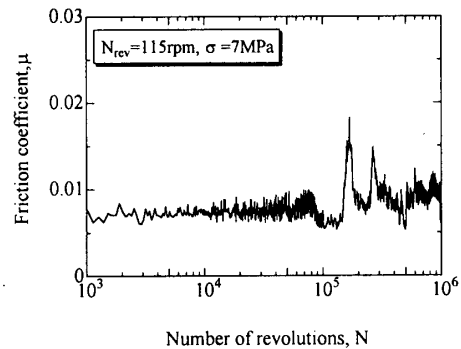


Fig.5 Variation of friction coefficient with number of shaft revolution, N.

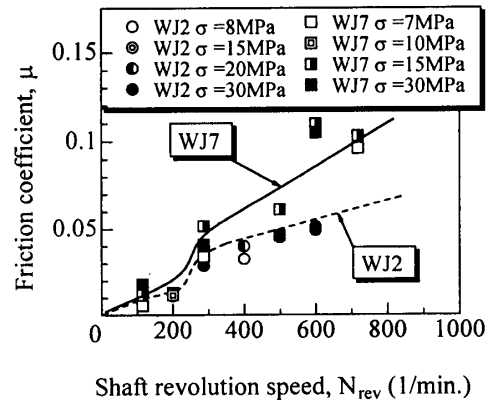


Fig.6 Variation of friction coefficient,  $\mu$  as a function of shaft revolution speed,  $N_{rev}$ .

**3.2 軸受寿命に及ぼす圧縮応力と軸回転速度の影響** 図7は、圧縮応力 $\sigma$ と試験打ち切り寿命 $N_f$ の関係を、軸回転速度毎に示したものである。図より、一定の圧縮応力のもとでは、軸回転速度 $N_{rev}$ の上昇と共に $N_f$ が減少することがわかる。これは図6に示すように軸回転速度が大きくなるほど潤滑油が減少し、摩擦係数が大きくなるためである。その結果、図4(a)に示すように摺動部の温度は軸回転速度が速いほど早期に上昇し、試験片の打ち切り寿命が短くなる。また、同一条件下におけるWJ2とWJ7両材の打ち切り寿命 $N_f$ を比較すると、前者の $N_f$ は後者に比較して明らかに長い。したがって、軸受摺動材の寿命の観点から判断すると、WJ2軸受材の方がWJ7軸受材よりも優れているといえる。

図8は、図7の $\sigma$ と $N_f$ の関係を、無次元応力 $\sigma/\sigma_{cp}$ と試験打ち切り寿命 $N_f$ の関係として再整理したものである。ここで、 $\sigma_{cp}$ はホワイトメタルの0.125%圧縮耐力である。図より、 $\sigma/\sigma_{cp}$ - $N_f$ 関係には、軸回転速度の影響は残るものの、WJ2とWJ7の軸受材料による差異は消失することがわかる。従って、実用的観点に立てば、この図を用いることによって、ひとつの軸受材料の圧縮応力 $\sigma$ と打ち切り寿命 $N_f$ の関係を調査することによって他の軸受材の $N_f$ を予測することが可能となる。

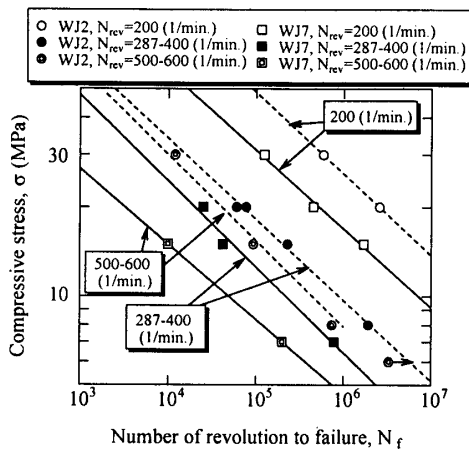


Fig.7 Relationship between  $N_f$  and  $\sigma$ .

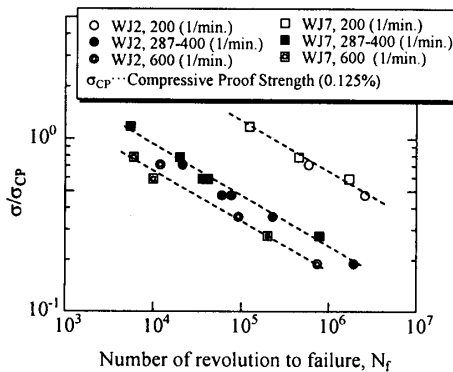


Fig.8 Relationship between  $N_f$  and  $\sigma/\sigma_{cp}$ .

**3.3 軸受寿命に及ぼす摩擦応力の影響** 図9は、摩擦応力 $\tau$ と試験打ち切り寿命 $N_f$ の関係をWJ2とWJ7の両材に対して示したものである。ここで摩擦応力 $\tau$ は、 $\tau = \mu\sigma$ の関係式より評価したものである。図より分かるように、 $\tau$ - $N_f$ 関係における試験打ち切り寿命 $N_f$ は、 $\sigma$ - $N_f$ 関係におけるそれとは異なり軸回転速度 $N_{rev}$ に依存せず、摩擦応力 $\tau$ により一義的に決定される。

このような結果は、材料に依存せず共通して観察できる。しかし、 $\tau$ - $N_f$ 関係は、2種類の材料WJ2並びにWJ7材に対して異なる2本の直線で与えられる。

摩擦応力 $\tau = 0.2 \sim 0.3$ MPa以下では、累積回転数が $10^7$ 回でも打ち切り寿命は得られない。従って、摺動摩耗過程では、疲労過程と同様に限界摩擦応力 $\tau_m$ が存在し、この摩擦応力以下では、摺動摩耗による損傷が発生・進展しないものと考えられる。

図10は、図8におけるものと同様に無次元摩擦応力 $\tau/\sigma_{cp}$ と試験打ち切り寿命 $N_f$ の関係を示したものである。ここで、 $\sigma_{cp}$ は前述のようにホワイトメタルの0.125%圧縮耐力である。図より、材料並びに軸回転速度に依らず、打ち切り寿命は無次元摩擦応力 $\tau/\sigma_{cp}$ によって一義的に与えられることがわかる。

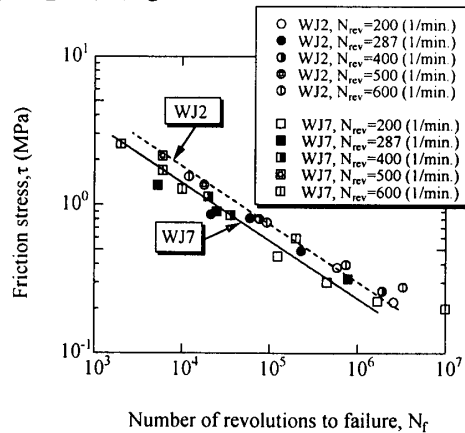


Fig.9 Relationship between  $N_f$  and  $\tau$ .

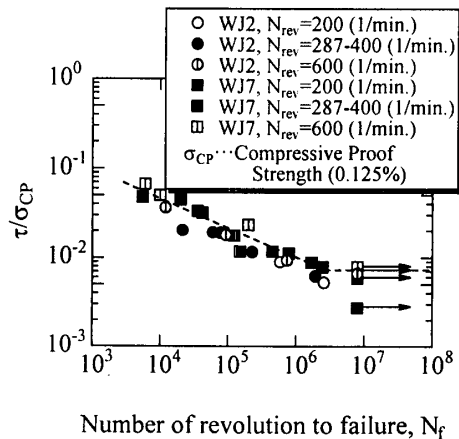


Fig.10 Relationship between  $N_f$  and  $\tau/\sigma_{cp}$ .

**3.4 軸受摺動面のピット発生** すべり軸受の寿命に影響を及ぼす重要な要因の一つとして、摺動部の表面状態が挙げられる。既報<sup>(3)</sup>では、軸受の摺動面上に生成する損傷の成長挙動が観察されている。その結果によれば、まず摺動面にピットが発生し、累積回転数の増加に伴いピット密度は徐々に増加する。ピット生成による摺動面の粗化により、摺動面の摩擦係数が増加する。摩擦仕事の増加にともない、図 4(a)に示すように寿命終期において急激な温度上昇がみられ、試験片が軟化する。その結果図 4(b)に見られるように試験片幅は増加し打ち切り寿命に至る。

図 11 は、累積回転数の増加に伴う試験片摺動部のピット密度の変化を、WJ7、並びに WJ2 両材について示したものである。実験は、表面粗さ並びに軸回転速度が一定のもとで、2種類の圧縮応力、9.81 および 29.4MPa のもとで行われた。図より分かるように、WJ2 のピット発生時期は WJ7 におけるよりも遅く、またピット密度の増加速度も遅いことが分かる。

ピット発生による表面の粗化は、摩擦係数の増加に寄与することが予想される。事実 3.1 節で示したように、ピット発生に対する抵抗が高い WJ2 材の摩擦係数は WJ7 のそれと比較するとかなり小さい。

また容易に予測されることであるが、負荷圧縮応力が小さいほど、ピット発生が遅く、また増加速度も少ないことが分かる。このようなピットの発生傾向は打ち切り寿命の大小関係と良い相関関係にある。

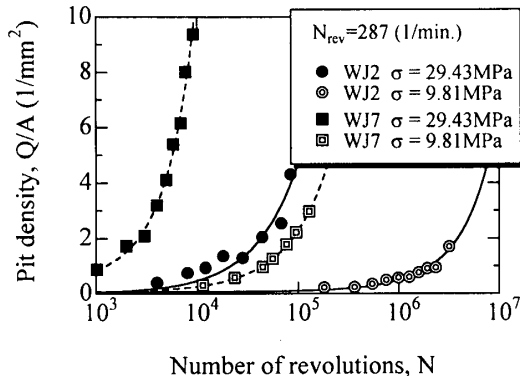


Fig.11 Change of pit density with number of shaft revolutions.

#### 4. 考 察

**4.1 摺動摩耗過程におけるピット発生箇所** 摺動摩耗過程において、ピット生成が生じるメカニズムを明らかにするために、WJ2 及び WJ7 の摺動面のピット発生部の EPMA による面分析を行った。図 12 及び図 13 に結果の一例を示す。図中の太線で囲んだ領域は、ピット発生領域を示したものである。

図 12 は、WJ2 軸受の  $\sigma=30\text{MPa}$ 、軸回転速度  $N_{rev}$  が 287rpm における面分析結果である。図よりわかるように、ピット生成箇所では Cu と Sn、特に Cu の欠落が明確に確認できる。図 13 は、WJ7 軸受の  $\sigma=10\text{MPa}$ 、 $N_{rev}$  が 287rpm における面分析結果である。WJ2 と同様にピット発生部分では Cu の存在が少ないことが分かる。しかし、Sn は摺動面全体にほぼ均一に分散しており、ピット発生部とその他の領域との差異は明確に認められない。

Cu や Sn の熱伝導率はホワイトメタルの他の構成成分と比較して大きい。特に Cu の熱伝導率は  $377\text{W/m}\cdot\text{K}$  (300K) であり、ホワイトメタルの他の構成成分と比較して一桁以上も大きい<sup>(6)</sup>。

摩耗過程において、摺動部に発生した熱量は熱伝導により試験片深さ方向へ移動する。Cu と Sn が多く含まれている部分は熱伝導率が高いため、摺動部の発生熱量を試験片深さ方向へ効率的に逃がすことによって、温度増加が大きくなる。一方、Cu と Sn を含まない部分は、熱伝導率が低いので、発生熱量を試験片深さ方向へ容易に吐き出せず、その結果高温となって軟化・溶着し、ピットを生じさせたものと考えられる。

Sliding direction  
←

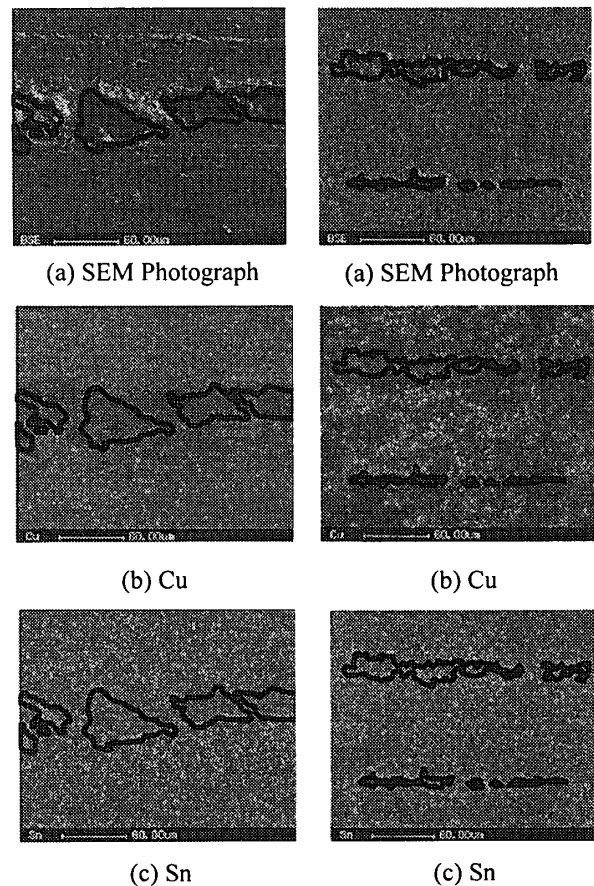


Fig.12 EPMA analysis of WJ2.

Fig.13 EPMA analysis of WJ7.

**4.2 摺動摩擦過程における摺動部表面の粗さ変化に関する考察** 図14は、摩擦実験後の試験片の摺動部粗さを摩擦応力 $\tau$ の関数として示したものである。図よりわかるように、実験後の摺動部の表面粗さは、 $Ra_N=0.2\sim 1.0\mu\text{m}$ の範囲にデータが分布している。試験開始前の摺動部粗さが $Ra_0=1.4\mu\text{m}$ であることから、摺動摩擦過程で、摺動部の表面粗さが $0.4\sim 1.2\mu\text{m}$ 減少したことがわかる。この表面粗さの減少要因として、摺動摩擦過程で負荷される圧縮応力による変形と、摩擦による減少が考えられる。以下ではこれら二つの要因に関して考察することにする。

(a) 摺動部表面の局所的弾塑性変形

摺動摩擦過程を微視的に見ると、回転軸と試験片は表面粗さの凹凸同士で局部的に接触し、これらの接触部には高い局所圧縮応力が作用している。摺動摩擦過程の局部接触による試験片の変形量を、以下のようにモデル化することにより、弾塑性有限要素法を用いて解析した。

試験前の試験片の摺動部の表面粗さ $Ra_0$ を粗さ計により測定した。一例を図15(a)に示す。次にこの表面粗さのプロフィールを図15(b)に示すように、等ピッチ、等高さの突起群で近似し、近似した粗さを持つ試験片と回転軸が接触する問題として弾塑性有限要素法で解析することにより、粗さの変形量を求めた。対称性を考慮することにより、半分のみを対象とし、4節点アイソパラメトリックス要素を用いて解析を行った。用いた全要素数は152、全節点数は180であった。

弾塑性有限要素法により得られた、圧縮による変形量と圧縮応力の関係を図16に示す。図より、本摩擦実験における最大圧縮応力 $\sigma=30\text{MPa}$ において、垂直方向の変形は、WJ7において $0.045\mu\text{m}$ 、WJ2において $0.025\mu\text{m}$ 程度であることがわかる。これは摺動部の表面粗さの減少量 $0.4\sim 1.2\mu\text{m}$ と比較して、一桁ほど小さい。したがって、表面粗さの主たる減少要因として、摺動摩擦過程で負荷される圧縮応力による変形は考えにくい。

(b) 摩擦の検討

前項の検討より、摺動部粗さの変化の主要因として、圧縮変形によるものではなく、摩擦によるものと考えられる。摩擦量は、軸一回転当たりの平均摩擦量、 $(Ra_0-Ra_N)/N_f$ で与えられると仮定して、摩擦応力 $\tau$ との関係として整理した図を図17(a)、無次元摩擦応力 $\tau/\sigma_p$ によって整理した結果を図17(b)に示す。

図よりわかるように、 $\tau=0.2\text{MPa}$ 以上では、軸1回転あたりの平均摩擦量は両対数グラフ上で $\tau$ の増加に伴い比例的に増加している。 $\tau=0.2\text{MPa}$ 以下では、摩擦が生じないことがわかる。

これらのことより、摺動部の表面粗さの変化には摩擦が大きく関わっており、この摩擦量は摩擦

応力 $\tau$ の値によって規定される。試験打ち切り寿命 $N_f$ が摩擦応力 $\tau$ によって一義的に決定される理由として、以下の機構が考えられる。本実験条件では軸と試験片間の油膜厚さが薄く容易に破壊しやすい状態にあると考えられる。そのため局部的に軸と試験片が直接接触し試験片の摺動面にピットが発生する。また試験片から剥離したピット小片は軸に付着することによって、試験片と軸の両者の粗面化が同時に進む。その結果、摺動面の摩擦係数、すなわち摩擦応力 $\tau$ が増大し、温度が上昇することによって試験片が軟化、打ち切り寿命に至る。

図17(b)の無次元摩擦応力 $\tau/\sigma_p$ での整理結果は、WJ2とWJ7の材料間の差異をより縮小させるものと予想されたが、予想に反して図17(a)の結果と大きな差異は認められない。これは粗さデータの実験誤差が大きいため、無次元化の効果が現れなかったものと思われる。今後、WJ2、WJ7両材の摩擦量と摩擦応力の関係について、より詳細な検討を行う必要があると考えられ、現在ピンオンディスク試験による実験を計画中である。

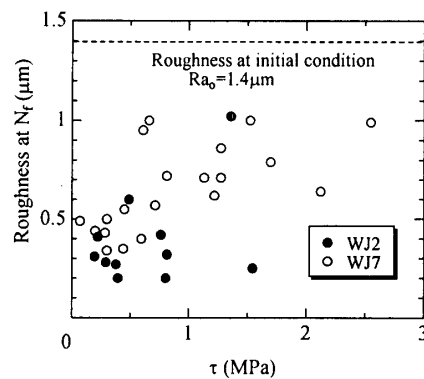
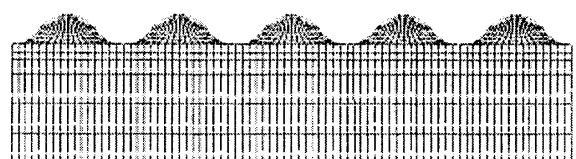


Fig.14 Relationship between  $\tau$  and surface roughness for the failed specimens.



(a) Surface roughness at initial condition



(b) Model

Fig.15 Deformation analysis by elastic-plastic FEM.

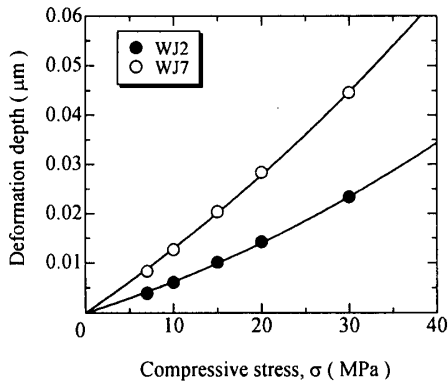
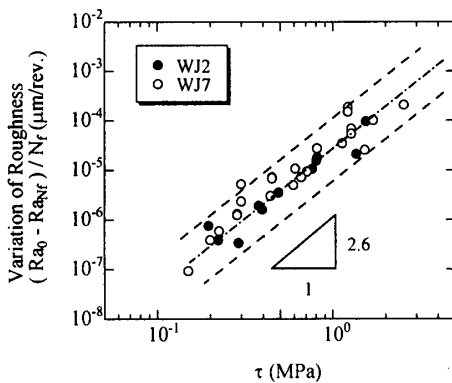
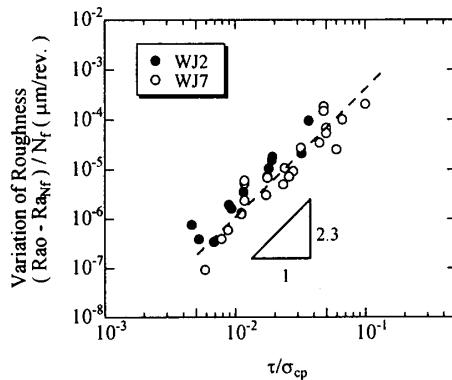


Fig. 16 Relationship between  $\sigma$  and deformation depth,  $d$ .



(a)  $\tau - (Ra_0 - Ra_{Nf}) / N_f$



(b)  $\tau / \sigma_{cp} - (Ra_0 - Ra_{Nf}) / N_f$

Fig. 17 Variation of  $(Ra_0 - Ra_{Nf}) / N_f$  as a function of frictional stress.

## 5. 結 言

- (1) WJ2 と WJ7 軸受材の打切り寿命を比較す

ると、前者は後者よりも寿命が長く、また、摺動部におけるピットの発生時期は遅く、その増加速度も遅い。したがって、軸受摺動材の寿命の観点から判断すると、WJ2 軸受材の方が WJ7 軸受材よりも優れているといえる。

(2) 無次元摩擦応力  $\tau / \sigma_{cp}$  と試験打切り寿命  $N_f$  の関係を用いると、軸受材料並びに軸回転速度に依らず、打ち切り寿命は無次元摩擦応力  $\tau / \sigma_{cp}$  によって一義的に与えられる。また、摺動摩擦による損傷が発生・進展しない限界摩擦応力  $\tau_w$  が存在し、その値は 0.2~0.3MPa である。

(3) 試験打ち切り寿命  $N_f$  が摩擦応力  $\tau$  によって一義的に決定される理由は、摩擦応力  $\tau$  が摺動部の摩擦を支配する重要な因子となっているからである。限界摩擦応力以下では摩擦量は生じない。したがってホワイトメタル軸受に負荷される摩擦応力は、この限界摩擦応力以下になるように設計すべきである。

## 文 献

- (1) 日本潤滑学会, 潤滑ハンドブック, (1975), 446, 養賢堂
- (2) 岡本 裕, 最近のエンジン用すべり軸受の研究, トライボロジ, 16-5(2002), 40-41
- (3) 田村 清, 石原外美, 五嶋孝仁, 吉田久志 ホワイトメタルをライニングした軸受材の摺動疲労寿命, 日本船用機関学会誌, 35-3(2000), 198-204.
- (4) 田村 清, 石原外美, 五嶋孝仁, 野口春光 ホワイトメタル軸受の摩擦損傷に及ぼす摺動速度の影響, 機講論, No.017-1 (2001-3) 9-10.
- (5) 田村 清, 石原外美, 五嶋孝仁, 吉田久志 ホワイトメタル軸受の打切り寿命に及ぼす摺動速度と摩擦応力の影響, 日本船用機関学会誌, 37-8(2002), 31-37.
- (6) 日本機械学会, 伝熱工学資料, (1975), 294.

## 謝 辞

日本マリンテクノ(株)工場長 関森 繁氏, 技師長 吉田久志氏, 及び技術部長 岩脇栄一氏には本研究遂行に当って多くの便宜を図っていただいた。記して謝意を表す次第である。