

# トライボロジーと材料



木村好次\*

## Materials for Tribological Applications

Yoshitsugu KIMURA

### 1. はじめに

材料の選択というものは、傍目にはなかなか面白い。竹・南天・ポリプロピレン・象牙と並べれば、これは筈(はし)の材料、セルロイド・鉄・洋白・チタンとくれば眼鏡のフレームである。無限にある物質の中から、一体どんな基準でこんなものが選ばれたのかと思う。筆者は機械の出であるが、基礎方程式から議論を展開していくという機械屋の手法に比べると、材料屋さんのそれには、ある種の芸術性が要求されるのではあるまいか。

さて表題のトライボロジーだが、これは“*相対運動を行いながら相互作用を及ぼしあう表面、およびそれに関連する実際問題の科学技術<sup>1)</sup>*”と定義される分野である。早い話が、すべり・ころがりを含めた摩擦面が守備範囲であつて、主たる問題は、エネルギー節減に寄与すべき摩擦の低減と、資源の有効利用に貢献すべき摩擦面損傷の軽減ないしは防止と、今様に書けばそういうことになる。無論例外はあつて、摩擦は困るが摩擦は高いほうが良い、などという場合も無いではない。とにかく摩擦面という舞台がきまつていて、何事によらずそこで生起する現象は取り扱わなければならない。これがトライボロジーの特徴であり、トライボロジストの宿命である。あまり真面目な人に向く分野ではない。

世の中にはたくさんの摩擦面が存在する。まず朝、寝呆けまなこで目をこする。人間の一日はトライボロジーで始まるわけである。トイレットペーパーは摩擦用品の一種だし、顔を洗うには、摩擦で止まつている水栓をひ

ねらなくてはならない。そんなものを一々挙げていてもきりが無いから、多少まともに工学の対象とされている摩擦面を取上げ、そこに使われている代表的な材料を並べたのが表1である。結婚記念日のネーミングよろしく、一般の構造材料とはかなり趣を異にするバラエティーがお分かりいただけよう。

これらの全般を網羅した記述は、残念ながら筆者のよくするところではない。本稿ではいくつかの代表的な材料に話を絞らせていただいて、そこに籠めたトライボロジストの思いをお話ししよう。

### 2. 摩擦・潤滑・表面損傷

トライボロジーがご専門でない読者がほとんどだろうから、ごくかいつまんで、摩擦、潤滑および摩擦面の表面損傷の概要を紹介しておこう。

まず摩擦だが、そもそも摩擦係数とはどのくらいの値をとるものなのか、大雑把な範囲を図1<sup>2)</sup>に示す。

高いほうの端に位置するのは、金属の清浄面である。清浄面というのは、表面から汚れはもちろん、吸着膜から酸化膜までを取り去つた面の意味である。空気中ではまず現実不可能であるが、水素で還元したり、スパッタリング、イオン衝撃などでこれを作ると、同種金属間では100以上の摩擦係数が測定されることがある<sup>3)</sup>。

異物質の存在しない、いわば裸の表面が、固体内部に

表1 摩擦面用材料のバラエティ

材 料	用途の例
紙	湿式クラックチル
ゴ 皮	オイルシールトキ
ア ス	平ベレ軸受
プ ラ	スチック無潤滑ラ
カ ー	ボ ス
木 非	鉄 金 材 属 鋼
鉄	金 材 属 鋼
コ ン	クリックトス
セラ	ミック ス
宝	石

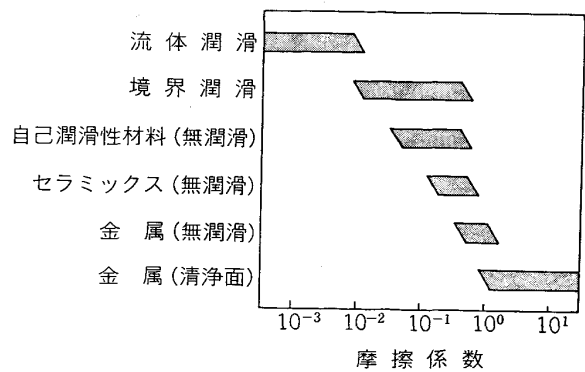


図1 摩擦係数の概略値<sup>2)</sup>

昭和 60 年 12 月 4 日 受付 (Received Dec. 4, 1985) (依頼展望)

\* 東京大学工学部境界領域研究施設 工博 (Faculty of Engineering, Institute of Interdisciplinary Research, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba Meguro-ku, Tokyo 153)

おける原子間距離と同程度にまで接近すれば、表面エネルギーによってその界面が強度をもつに至る。トライボロジストはこれを、凝着が生じたと呼んでいる。特に同種金属が接触すれば、どこがもとの表面かも分からなくなり、凝着部は金属自体と同程度の強度になることもあるだろう。すべるためにはこの部分をせん断しなくてはならず、これが摩擦の主要な原因をなしている。

もつとも、固体の表面には必ず微視的な凹凸があるから、押しつけてもべつたり接触するわけではない。押しつける垂直力—これを荷重と称する—を $P$ 、固体の塑性変形に対する抵抗、ちょうど押し込み硬さのようなものを $p_m$ と書くと、真の接触がおこる面積 $A_r$ は、第一次近似として $A_r = P/p_m$ で与えられる。つまり $A_r$ は、見かけの面積とは関係がなく、微視的な塑性変形における力の釣合いによつてきまるのである。そのようにしてできた接触部のせん断強さを $S_i$ とすると、摩擦力 $F$ は $A_r S_i$ 、したがって摩擦係数 $F/P$ は $S_i/p_m$ ということになる。

ただし、 $S_i/p_m$ が100いくつになるということは考えにくい。清浄面における高い摩擦は、大きな $S_i$ にもとづく接線力自体も、接触点を形成する際の塑性変形に寄与し、 $A_r$ が $P/p_m$ より大きくなるためと説明されている。

さて図1に戻つて、無潤滑と書いたのは空気中の話である。金属の場合にはその酸化膜が上述した凝着を妨げ、 $S_i$ が小さくなつて、摩擦係数は0.4~1.0程度の値をとるのがふつうである。セラミックスも、そう摩擦の低い材料ではない。無潤滑における摩擦係数の小さい、いわゆる自己潤滑性材料の代表的なものに、四ふつ化エチレン樹脂(PTFE、商品名テフロンで知られている)があり、ギネスブックにも載っている由だが、摩擦係数は低いと言つても0.04程度で、それ以下を狙うとなれば人為的な潤滑に頼らなければならない。

境界潤滑というのは、吸着膜や反応膜によつて、上述の $S_i$ を下げようという方法である。一方流体潤滑は、固体面間に潤滑油、水、空気などの流体膜を介在させ、その膜の圧力を荷重に釣り合わせることににより、固体間の接触を無くするというものである。完全な流体潤滑状態においては、摩擦は流体の粘性抵抗のみとなつて、摩擦係数は $10^{-3}$ ~ $10^{-4}$ 程度まで下がる。新素材の開発によつて、あるいは境界潤滑状態に匹敵する低摩擦材料が得られるかも知れないが、流体潤滑による低摩擦は、それとはいくつかオーダーの違う話である。

もう一つの問題である摩擦面の損傷には、いくつもの種類がある。まずもつともポピュラーな損傷は、いわゆる凝着摩擦である。上述したように、完全な流体潤滑状態を除いて、摩擦面には真の接触部が存在し、通常数十 $\mu\text{m}$ 以下の微小な接触点を多数作っている。摩擦中には、そのような接触点に $p_m$ 、つまり押し込み硬さと同程

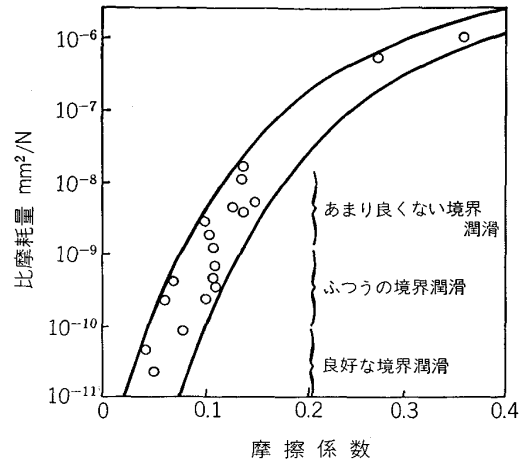


図2 潤滑状態と比摩耗量<sup>4)</sup>

度の圧力が加わり、それに摩擦係数を乗じた接線方向の応力が作用する。その繰り返しによつて、接触点近傍に疲れ破壊がおこり、通常フレック状の微細な摩耗粉として、固体が少しずつ取り去られて行く、これが凝着摩擦である。

摩耗の程度を示す目安として、単位荷重・単位すべり距離あたりの摩耗体積、いわゆる比摩耗量を用いる。摩耗は摩擦条件によつて大幅に変動するので、図1のように概略値を示すことはむずかしい。図2<sup>4)</sup>は、鋼との摩擦におけるりん青銅の摩耗について、摩擦係数との対応を示した例であつて、無潤滑の場合のデータである上方の2点から、境界潤滑によつて5けたほど摩耗が低下している。流体潤滑状態では、事実上摩耗は生じない。

摩擦面の損傷の第二は、焼付きである。これは、一般には温度上昇がトリガーになつて、潤滑油の粘度低下による流体潤滑から境界潤滑への遷移、境界潤滑における吸着膜の熱的離脱などにより、局所的に清浄面の接触に似た状態が現れ、摩擦係数の急激な上昇と摩擦面間の巨視的な凝着に発展する現象である。潤滑膜の熱的不安定と考えるべきものであつて、摩耗が少しずつ生ずる損傷であるのに対し、こちらは一種カタストロフィックであるところが特徴である。

重要な摩擦面損傷としてもう一つ、ころがり疲れがあるが、これについては第5章で述べることにしたい。

### 3. 軸受合金

少し回り道をしたが、第一の例として、自動車用エンジンのクランクシャフト軸受に使われている、すべり軸受用の軸受合金を紹介しよう。

クランクシャフト軸受というのは、大変過酷な条件下で運転されている代物である。近年その面圧、すなわち軸径と軸受幅の積で荷重を割つた値は、最大50 MPaを超え、軸の周速は最高20 m/s、加えて潤滑油温が百数十 $^{\circ}\text{C}$ というレベルにある。このような高負荷軸受は、流体潤滑状態に保つことが絶対の要件である。

これはしかし、そう簡単な話ではない。直径 40 mm の軸受として、軸受と軸の直径差は約 40  $\mu\text{m}$ 、同心で回転していても、すきまは 20  $\mu\text{m}$  程度しかない。それが 90% 以上偏心するのはざらだから、最小すきまは 2  $\mu\text{m}$  以下という勘定になり、さらに軸受と軸の表面あらしを差し引かなくてはならない。そこへもつてきて、軸受と軸の平行度の狂いがしばしばあるし、摩耗粉やごみなど、固形異物の油中への混入も避けられない。これらをクリアーして、二面を流体膜で隔てなければならないのである。

そこで軸受合金にまず求められたのは、一種の弱さであった。容易に塑性流動を生じて、平行度の狂った軸になじんだ形状を作る conformability, 固形異物を埋め込んでしまう embeddability がそれである。もう一つ、焼付きにくさが重視されるが、これは少し次元の異なる因子になる。これらにすぐれたものとして一時広く用いられたのが、ホワイトメタルであった。これは、Sn または Pb の基材に Sb, Cu などを添加した、ビッカース硬さ HV 15 以下という、きわめて軟らかい材料である。

しかしながら、近年のクランクシャフト軸受では、これらの要求と裏腹に、ある種の強さが求められている。具体的に言えば、大きな変動荷重の下での疲れ強さと、交換期間が延びて酸性成分の増した潤滑油中における耐食性、なかんずく高温におけるそれらの性質である。こうなると、熔融開始温度 230~250°C というホワイトメタルではどうにもならない。それに代わるものとして多用されるようになったのが Cu-Pb 合金、いわゆるケルメットであり、さらに高温強度の高いものとして、Pb, Si, Sn, Zn などを含む Al 合金が用いられるようになって、クランクシャフト軸受はほぼこの二種に置き換えられてしまった<sup>5)</sup>。これらはホワイトメタルよりは硬いけれど、それにしても、HV 30 前後のものである。

このように、材質はがらりと変わったが、それは上述した弱さと強さのバランスの問題なのであつて、基本となる考え方は全く変わっていない。すなわちいずれもが、強さを受け持つ硬質相と、弱さを出すための軟質相から成る、二相合金なのである。ホワイトメタルでは、軟質の Pb または Sn 中に、SnSb, Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> など、硬質の金属間化合物を析出させてあり、ケルメットでは Pb, Al 合金では Pb, Sn などが軟質相を作っている。

例として、ケルメットの断面組織を写真 1<sup>6)</sup> に示す。白い部分が Cu, 灰色の部分が Pb 相で、お風呂のスポンジに石けんを含ませたような形をしている。このような構造は、固相における溶解度の低い二成分系ならばできる理屈であるが、問題は組織の細かさにあり、一風変わった製造法がとられている。幸い Cu と Pb は均一な液相を作るから、るつぼの底の孔からこれを流下さ

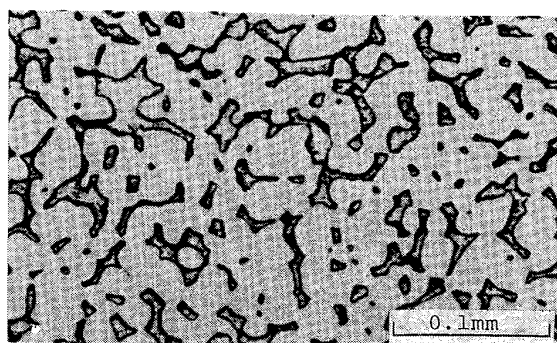


写真 1 ケルメットの断面組織<sup>6)</sup>

せ、横からウォーター・ジェットを吹き付ける。そうすると、一粒一粒が微細な Cu 相と Pb 相を含んだ粉末が得られ、それを裏金と称する鋼板上に載せて焼結すると、めでたく写真 1 のような組織ができるというわけである。

ところで、耐焼付性を次元の異なる因子だと書いたが、それは第 2 章に触れたように、焼付現象にはいくつかのステップがあり、いくつもの因子が寄与しているからである。すなわち、焼付きの防止には流体潤滑状態の確保が最も有効な手段であり、したがって上述した conformability, embeddability をまず考慮しなければならない。そのつぎが境界潤滑で、潤滑油成分の吸着性も因子の一つである。そして最後に、金属どうしの接触がおきてしまったときの問題がある。

これには、二つの因子が関与している。その一は力学的なもので、第 2 章で述べた摩擦係数  $S_i/p_m$  の話である。これを低くするには、硬質相の上を軟質相が、うすく覆っている状態が望ましい。そうすれば、接触圧力は前者が受持ち、せん断されるのは後者ということになって、大きな  $p_m$  と小さな  $S_i$  が利用できるわけである。言ってみればすべり軸受全体もそういう構造になっているわけで、鋼の裏金の上に載っている軸受合金の層の厚さは、わずか 0.3 mm ぐらいのものである。

その二は、軸の材料との“相性”である。溶解度の小さい組合せを選べば、その界面の強度は低くなるだろうし、巨視的な凝着に発展する可能性も小さい。こういうわけで、金属学的には相性の悪い組合せが、摩擦面の組合せでは良い相性だということになる。これを compatibility などと呼んでいる。

#### 4. 自己潤滑性材料

流体潤滑というのは、トライボロジーにおける一つの理想状態であるが、それが望めない場合というものたくさんある。まず高・低温がそれで、油を使つた流体潤滑で温度範囲の広い例としてはジェットエンジンがあるが、合成潤滑油を使つたにしても -55~+260°C 程度がせいぜいである。また宇宙空間のような真空中におい

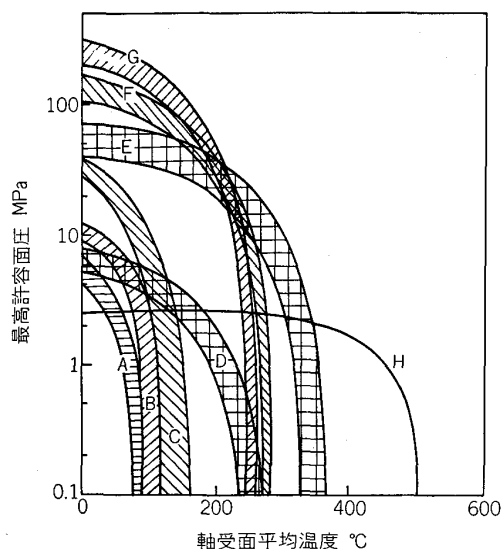
ては、よほどうまくシールしない限り、液体潤滑剤はどんどん蒸発してしまつて使いものにならない。

こういう高尚な話とは別に、値段が理由になる場合も少なくない。流体潤滑をすとなれば、潤滑油の給油装置、油槽を設けたり、オイルシールで漏れを防いだりしなければならぬから、おのずと仕掛けが複雑になる。そんなところに金をかけるのはもつたいないから、潤滑なしで何とかならないか、そういう注文が現実には多い。

前述したように、流体潤滑と同等の潤滑性は望むべくもなく、したがつて適用範囲は限られるけれども、そのような場合に使われるのが自己潤滑性の固体である。これで摩擦面に被膜を作る使用法があり、固体潤滑剤と呼ばれることもあるが、本質的には同じものである。

使用条件が潤滑油以上に漠としているところからも予想されるように、これにはこれでバラエティがある。第一のグループは、Au, Pb, In などの軟質金属で、前章の軸受合金もこの仲間である。第二は金属以外の無機材料で、このグループでは黒鉛と二硫化モリブデン  $\text{MoS}_2$  が抜群に有名である。第三が前述した PTFE などの高分子材料であつて、以下本節ではこれを取り上げる。

無潤滑軸受として使われる高分子材料には、ポリエチレン、ポリアミド (ナイロン)、ポリアセタール、フェノール、ポリイミド、そして PTFE などがあり、後述するように、これらの多くは充てん材を入れて用いられる。高分子材料の泣きどころは高温であつて、図 3<sup>7)</sup> に



	摩擦係数
A 高分子量高密度ポリエチレン	0.06~0.3
B 充てん材入りナイロン, ポリアセタール	0.15~0.4
C 充てん材入り強化フェノール積層材	0.1~0.4
D 充てん材入り PTFE	0.05~0.32
E 充てん材入りポリイミド	0.15~0.5
F 青銅入り PTFE	0.04~0.25
G PTFE 繊維基材料	0.04~0.25
H (電気黒鉛)	0.15~0.35

図 3 自己潤滑性高分子材料の使用限界<sup>7)</sup>

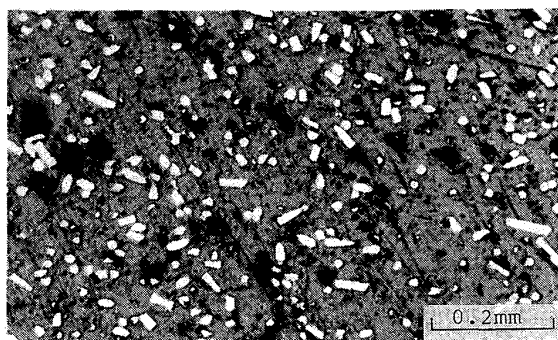


写真 2 PTFE 基自己潤滑性複合材料の断面組織

示すように、最も金属に近い性質をもつと言われるポリイミドでも、せいぜい  $360^{\circ}\text{C}$  ぐらいまでしか使えない。図に併せて示した黒鉛に比べるとかなり低い、許容面圧のほうは、結構高いものがある。

自己潤滑性高分子材料のチャンピオンは、何と言つても PTFE である。そしてその低摩擦は、もつて生まれた属性なのである。

第 2 章に述べたように、摩擦力の主要な原因は固体面間の凝着であり、凝着の強さは表面エネルギーに依存する。金属は高表面エネルギー物質の代表であつて、たとえば Cu のそれは  $1300 \text{ erg/cm}^2$  もある。これに対し高分子材料、分けても PTFE は低表面エネルギー物質であつて、その値は  $20 \text{ erg/cm}^2$  程度しかない<sup>8)</sup>。だからそもそも、相手の面にくつつかないのである。この性質を利用したテフロン・コートのフライパンなど、先刻ご存じであろう。そんな物質が固体として存在していることが、本来おかしいとも言えるわけで、事実分子量を七百万から八百万と、他の高分子よりずっと大きくし、巨大分子を無理矢理からみあわせて固体にしているのである。

これは反面、耐摩耗性がきわめて低いことを意味している。比摩耗量を比較した例<sup>9)</sup>によると、いずれも  $10^{10} \text{ mm}^2/\text{N}$  の単位で、ポリアセタールの 12.5, ポリイミドの 30 に対し、PTFE は 4000 になるという。そこで何かを充てんして補強してやろうと、前章の軸受合金と軌を一にするアイデアが出てくることになる。いま述べた比較<sup>9)</sup>によれば、ガラスや炭素繊維、グラファイト、 $\text{MoS}_2$  などを 15~25% 充てんすることにより、摩擦係数をほとんど変えずに、比摩耗量を  $(1\sim 1.4) \times 10^{10} \text{ mm}^2/\text{N}$  まで下げることができるという。筆者の経験では、千分の一以下になるというのはややオーバーに見えるが、2けたならば容易に下がる。

写真 2 は、市販されている PTFE 基複合材料の例であつて、灰色の地が軟質相に相当する PTFE、白い部分が硬質相として充てんしたガラス繊維、黒く見えるのは着色用の顔料である。充てん材としては上述したほかに、アスベスト、酸化亜鉛、青銅、さらに芳香族ポリイミドやポリフェニレンサルファイドなどの高分子材料も

試みられている。

### 5. 軸 受 鋼

最後に趣を変えて、ころがり軸受用の材料について述べよう。これはむしろ読者のご専門であつて、馬脚を現すおそれがあるが、“鉄と鋼”誌とあらば避けて通るわけにもいかない。

鉄鋼というのは皆そうなのかも知れないが、軸受鋼の品質は、軸受産業の構造と経済学によつてきめられているように見える。すなわち、ころがり軸受というのは高度に規格化された製品であつて、主要寸法・公差から回転精度、保証寿命に対応する基本動定格荷重まで、こと細かに規定されている。メーカーはそれを大量生産しているわけで、軸受産業における競争の主眼は、規格にあつたものをいかに安く作るかという、生産技術にあるようである。その成果たるや見事なもので、量産されている型番のものであれば、直径誤差  $0.08 \mu\text{m}$  以下、中心線平均あらさ  $0.012 \mu\text{m}$  以下、などという恐るべき精度の鋼球が何個も入つた軸受を、200 円前後で手に入れることも可能なのである。半面規格外のもの入手しようとすれば、当然のことながら値段は幾けたも上がるし、半年や1年は待たなければならない。

軸受鋼は、まさにこのような事情を反映している。ほとんどの軸受は、高炭素クロム軸受鋼 SUJ 2 で作られ、SUJ 2 の性能は、コストとのバランスでそこそこに安定している。寿命数倍の新材料が開発されたなどというニュースを時折聞くが、それが取つて替わることもない。ただし金に糸目をつけぬとなれば、はるかに高性能の材料がちどころにできるのだらうと思う。

さてその“性能”であるが、トライボロジーが軸受鋼に要求する最も重要な性能は、ころがり疲れ寿命である。軸受の内・外輪と転動体はころがり接触をしており、局所的に大きな荷重が繰り返し作用する。いま例として、内径 25 mm の円筒ころ軸受 NU 305 に 1 kN の半径方向荷重をかけたところを考えると、ころと内輪との接触部には、弾性変形によつて幅  $80 \mu\text{m}$  足らずの接触面積ができて、最大  $0.6 \text{ GPa}$  を超える接触圧力が働く。そうすると、表面に平行な面内のせん断応力は、 $20 \mu\text{m}$  ほどの深さで最大振幅を生じ、軸の回転によつて  $\pm 0.16 \text{ GPa}$  の応力が繰り返し作用する勘定になる。ころがり軸受は流体潤滑状態で使われることが多いが、流体膜があろうと無かろうと、これらの数値はほとんど変わらない。この応力によつて表面下にクラックが発生し、その進展によつてついにははくりを生ずる、と、これがころがり疲れの古典的な説明<sup>10)</sup>である。ころがり軸受のカタログに載っている基本動定格荷重、すなわちその型番の軸受の 90% がはくりをおこさないで  $10^6$  回転しうる荷重も、このメカニズムにもとづいて算出されている。

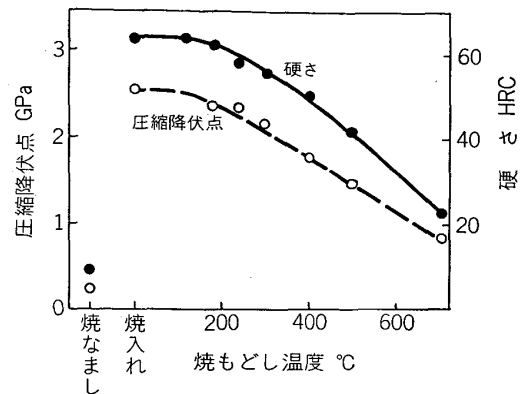


図4 SUJ 2 の焼もどし温度と機械的性質<sup>11)</sup>

このような性能を発揮すべく、軸受鋼は遮二無二強くしてある。図4<sup>11)</sup>は、高炭素クロム軸受鋼 SUJ 2 の、焼もどしによる機械的性質の変化を示したものであるが、実際には焼もどし温度約  $180^\circ\text{C}$ 、ロックウェル硬さ HRC 60 以上で使われていて、第3、4章で取り上げた材料の持つていた“弱さ”はみじんもない。それが無くてもすんでいるのは、玉と溝とのいわゆる点接触や自動調心構造など、設計上の工夫で平行度の狂いを逃がしていることと、ころがり接触が基本であつて、すべりは存在してもわずかであること、この二つの理由による。事実高速で運転されるときなど、転動体がころがらずに派手にすべつたりすると、スミアリングという一種の焼付きをしばしば発生する。

さて、上述した表面下におけるクラックの発生であるが、その起点は材料内の非金属介在物のような欠陥であるという<sup>10)</sup>。そうではなくて、クラックは表面から入るのだという説もあるが、とにかく介在物を少なくすれば軸受の寿命が延びることは事実のようである。そこそこの性能だなどと言いたけれども、高炭素クロム軸受鋼における非金属介在物、特に酸化物の含有量の低下は、ここ20年ほどの進歩の一つであつた。鋼中の酸素量を見ると、大気中溶解材の 30~60 ppm から真空脱ガス材の 10~25、真空溶解材の 8 以下へと大幅に低下しており、これに伴い従来 0.03~0.06% であつた酸化物系非金属介在物の重量比は、0.02~0.03% 以下に抑えられるようになった<sup>12)</sup>。これによる軸受寿命の延長は、ほぼ 3~5 倍というのが定説らしい。

ところで、上述した焼もどし温度  $180^\circ\text{C}$  というのは、いささか気になるところである。ふつうの潤滑油の使用限界が比較的低いから、あまり問題にはならないけれども、温度がこれを超えると使用中に焼もどしが進行し、硬さが落ちる。硬さと寿命の関係はあまりはつきりしていないが、たとえば HRC 62 の材料で  $32 \times 10^6$  回転であつた寿命が、HRC 60.4 で  $12 \times 10^6$ 、HRC 59 で  $3.6 \times 10^6$  に縮んだというデータ<sup>13)</sup>がある。

このへんが、高速化と関連して今後面白くなるところ

だろう。すでに軸周速が 120 m/s, 温度が 200°C を超えているジェットエンジンの軸受には, 高周波誘導溶解・真空電弧溶解を行つた。モリブデン系工具鋼 M 50 が標準になつており<sup>14)</sup>, エンジニアリング・セラミックスをも含め, いろいろな材料の使用が試みられている。

## 6. む す び

トライボロジーというのは, 典型的な境界領域の一つである。だからトライボロジカルな性能の向上, あるいは問題の解決に際して, いくつもの面からのアタックが可能である。手つ取り早いのは潤滑油のグレード・アップだが, 設計変更も無論考えるべきだし, もう一つ, 材料の改良がある。現在のトライボロジストは, 機械屋と化学屋が大半を占めていて, それかあらぬか, 材料科学とのつながりがいささか希薄であるように思う。新素材の時代なぞというが, この分野の材料にも新たな展開を望みたい。

## 文 献

- 1) Glossary of Terms and Definitions in the Field of Friction, Wear and Lubrication—Tribology—

- (1969), p. 62 [OECD]  
 2) 木村好次: 日本機械学会誌, 87 (1984), p. 58  
 3) 木村好次, 岡部平八郎: トライボロジー概論 (1982), p. 41 [養賢堂]  
 4) W. H. ROBERTS: 国際潤滑会議 1985 (東京) 特別講演スライド  
 5) 福岡辰彦: 潤滑, 22 (1977), p. 689  
 6) 大豊工業(株)のご好意による  
 7) A. B. GREASE: Proc. 3rd Leeds-Lyon Symp. on Tribology (1976), p. 245  
 8) 里川孝臣, 米谷 稜, 山田 彰, 小泉 舜: ふつ素樹脂 (プラスチック構座) (1979), p. 32 [日刊工業新聞社]  
 9) J. K. LANCASTER: Tribology, 6 (1973), p. 219  
 10) G. LUNDBERG and A. PALMGREN: Dynamic Capacity of Rolling Bearings, Ingeniörsvetenskapsakademiens Handlingar Nr 196 (1947)  
 11) 室 博: 潤滑, 16 (1971), p. 76  
 12) 転がり軸受工学 (日本精工(株) 転がり軸受工学編集委員会編) (1975), p. 64 [養賢堂]  
 13) Life Adjustment Factors for Ball and Roller Bearings (1971), p. 26 [ASME]  
 14) 角田和雄: 日本機械学会 第 607 回 講習会教材 (1985), p. 85