

大気中の二硫化モリブデン焼成被膜の疲労はく離寿命が真空中よりも大幅に低下する原因は、ふたつ考えられる。ひとつは被膜の内部や表面に吸着する物質の量が雰囲気により変化することによる疲労強度の変化、もうひとつは雰囲気の違いによる応力の変化である。

雰囲気が材料の疲労強度に与える影響についてまず考察する。金属材料については従来からよく研究され、その影響の大きいものがあることはよく知られている。大気中では酸素や水蒸気が疲労寿命を低下させるのに対して、それらのない真空中では疲労強度が大気中より増加することがいくつかの金属で観察されている。たとえば、鉛やアルミニウムは、 10^{-4} Pa台の真空と比較して大気中では寿命が一桁程度短くなり、疲労強度が低下している(たとえば文献[20])。

一方、二硫化モリブデン焼成被膜の疲労強度を支配するバインダ成分の樹脂やその複合材など、被膜の強度部材の疲労強度に与える雰囲気の影響についての研究は、金属材料に比べると少ない。その中で、若島ら[21]は本研究の二硫化モリブデン焼成被膜のバインダであるフェノール樹脂と同じ熱硬化性樹脂であるエポキシ樹脂について、疲労き裂伝播速度を大気中と真空中で測定し、違いがなかったと報告している。この原因は、エポキシ樹脂の酸素や水蒸気との反応性が金属のようには高くないためと考える。疲労き裂伝播速度は疲労寿命と対応していると考えられるので、エポキシ樹脂やフェノール樹脂の疲労寿命、すなわち疲労強度は雰囲気の影響を受けにくいといえる。

このことから、二硫化モリブデン焼成被膜の疲労寿命が大気中と真空中とで大幅に異なった原因として、被膜の疲労強度が雰囲気により大幅に変化したためと考える根拠は薄い。したがって、被膜の疲労寿命の雰囲気による違いは、被膜内の応力が異なったことによって生じたものと考えられる。同じ荷重条件でも応力が異なるのは、雰囲気によって摩擦係数が異なるためである(図2-16)。

そこで接触応力解析を行うことによって各試験条件における被膜内応力を求め、寿命との関係を調べることにする。そのためには被膜の縦弾性率を実測する必要があり、次項にそれを述べる。また、バインダ樹脂の疲労寿命に与える雰囲気の影響を再確認するため、湿度を大きく変えて被膜の縦弾性率および引張り強さを実測し、湿度の影響を調べる。

2. 5. 3 被膜の縦弾性率と引張り強さの測定

被膜の弾性率を測定するには、ビーム状の金属薄板試験片を片持ちで自由振動させて、被膜処理の有無による振動数の変化から求める方法(たとえば文献[22, 23])があるが、今

回の場合、二硫化モリブデン焼成被膜の弾性率が下地金属に比較してかなり小さいので、この方法を適用するのは困難であると考えられる。金属薄板を使用せずに、被膜と同じ材料をビーム状に固めたバルク試験片を用いて曲げ試験を行ってせん断弾性率を求めた Martinら[4]の例があるが、この方法も、スプレーコーティングした被膜とビーム状に固めたバルク材では内部の構造が異なるという恐れがある。

そこで本研究では、金属薄膜の試験装置(たとえば文献[23-28])を参考にして新たに専用の試験機を製作し、被膜そのものの引張試験を行って被膜の縦弾性率と引張り強度を測定することにした[29]。

図2-19に、縦弾性率測定のための被膜試験片の作製法を示す。被膜試験片の材料は、先に述べたすべり軸受試験で用いた被膜、および後述のピンオンディスク試験で用いる被膜の2種類と同一のものである。食塩単結晶の板に被膜の原液をスプレーコーティングし、焼成後に食塩を純水で溶かし、残った被膜を大気中で1日以上、さらにデシケータ中で2日以上乾燥して被膜試験片を得た。スプレーコーティングから焼成までの工程は専門業者によって行った。食塩板の表面は被膜が付きやすいようにサンドペーパーで適当に荒らした。被膜厚さは通常の $10\mu\text{m}$ では取り扱い性が悪いため、約 $30\mu\text{m}$ とした。

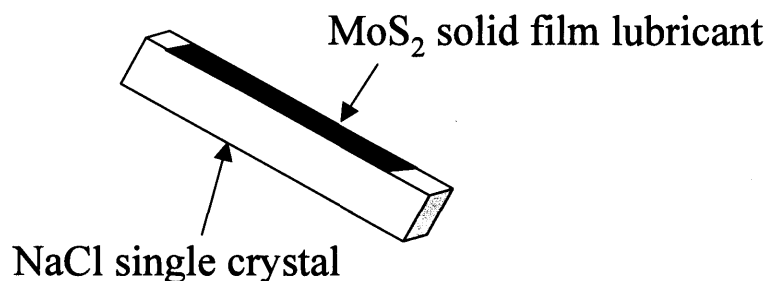


図2-19 被膜試験片作成法

表2-6に試験片の寸法を示す。A1~A4はすべり軸受試験に使用した被膜と同等のもの、B1~B4はピンオンディスク試験に使用した被膜と同等のものである。試験片は長方形の薄片であり、厚さは、試験片長手方向の3~4ヶ所を球面マイクロメータで測定した値の平均値である。一つの試験片でこの測定値のばらつきは $2\mu\text{m}$ 以内であった。この球面マイクロメータでPES(Poly Ether Sulfone)フィルム2種の厚さを同様の方法で測ったところ、測定値50

μm , $75\mu\text{m}$ はカタログ値と正しく一致した。このことから、二硫化モリブデン焼成被膜より軟らかいPESフィルムであってもマイクロメータ測定面の押付けによる変形は無視できるので、この方法によって測定された表2-6の二硫化モリブデン焼成被膜の厚さは、十分に正確であると言える。

表2-6 引張り試験試験片寸法

material symbol	Thickness μm	Length mm	Width mm
A1	30	10.0	2.0
A2	35	10.0	2.0
A3	30	10.0	3.0
A4	28	9.8	3.0
B1	38	10.0	2.0
B2	38	10.0	2.0
B3	38	9.4	3.0
B4	38	10.0	2.1

図2-20に被膜引張り試験機の外観写真を、図2-21に構造図を示す。図2-21(a)において、丸穴と丸穴ではさまれた細い部分が、たわみ抵抗の小さい弾性ヒンジになっている。これらのヒンジのうち、試験機の変位する部分につくヒンジを模式的に○印で表し、試験機中央の固定部分と変位する部分をつなぐヒンジを△印で表して、試験機全体の動きを模式的に示したのが図2-21(b)である。圧電アクチュエータの変位を弾性ヒンジ機構で拡大し、被膜試験片を載せたステージの一方を移動させることによって試験片を引張る構成となっている。被膜試験片の伸びは渦電流式の変位計で、引張り力は被膜試験片の支持梁に貼り付けたひずみゲージによって測定した。弾性ヒンジ機構は取付け座の中心軸線に対し対称な構造となっているので、一軸引張り状態が可能となる。弾性ヒンジ機構は、SCN440焼入れ焼戻し鋼の一枚板から、精密ワイヤカットで直線部を切り抜き、その一部にジグボウラを用いて丸穴を穿孔して作製することで高い加工精度を得た。

図2-21(c)は試験片取り付け座周辺の拡大図である。試験片は、変位拡大機構によって図で下方方向に駆動されるステージと固定ステージに渡る形で固定される。各ステージには試験片取り付け用の取り付け座が座ぐってあり、ここに試験片を固定する。この試験片取り付け座は、固定側、移動側を一体加工で同時に削り出し、双方の取り付け座が同一平面になるところにして、被膜試験片を取り付けた際にねじりや曲げなど不要な力が試験片に働かないよう注意を払った。取り付け座上の試験片は、その端部から長さ5mm程度の部分を押さえ板で固

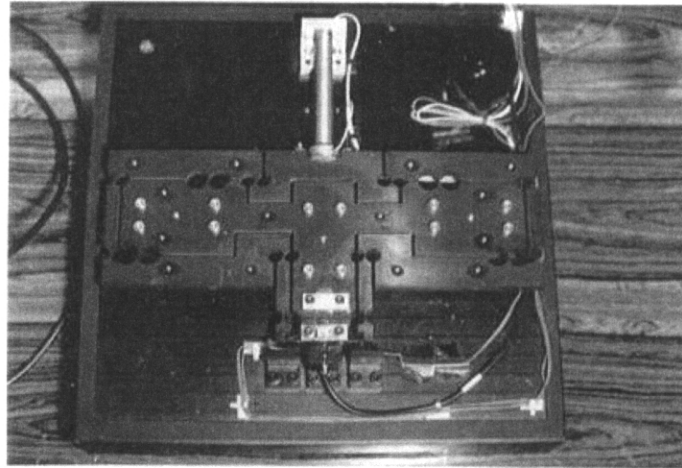


図2-20 被膜引張試験機外観

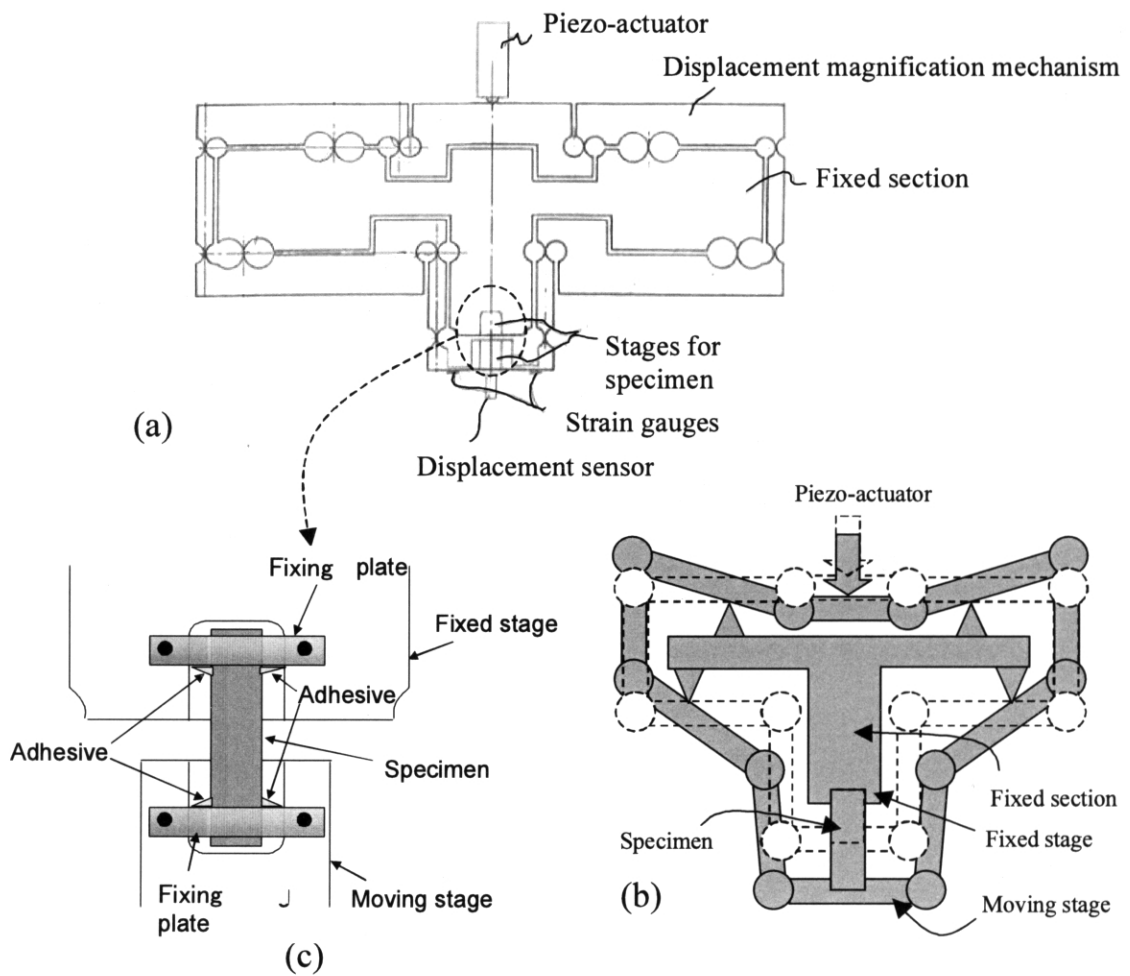


図2-21 被膜引張試験機構造

(a) 全体図 (b) 動作模式図 (c) 試験片取り付け座周辺拡大図

定し、さらに押さえ板と試験片は、測定に影響しない程度の少量の接着剤を図に示す位置に用いて接着した。この試験機を用いて、市販の厚さ50～75 μ mのPESフィルムの縦弾性率を測定した結果では、3回の測定の平均で2.70GPaの値が得られ、これはカタログ値2.55GPaと良い一致を示した。

測定は温度20 $^{\circ}$ C～25 $^{\circ}$ C、湿度50%～60%の実験室大気中の他、1ケースではあるが乾燥空気中でも行って、被膜強度に与える湿度の影響を調べた。図2-22に変位-力曲線の測定例を示す。初期に線形弾性領域を示した後は、やや曲線状を示し、短い塑性領域を経て破断する。

初期の線形部分から計算した縦弾性率および引張り強さの測定値を図2-23に示す。縦弾性率は被膜種類によらずほぼ10GPaを示すことがわかる。一方、引張り強さはほぼ40MPa～80MPaであり、縦弾性率に比べて被膜試験片形状や取り付け具合の影響を受けやすいことが原因でばらついているが、充填剤入りフェノール樹脂の一般的な値(たとえば文献[30])として知られている範囲に入っている。

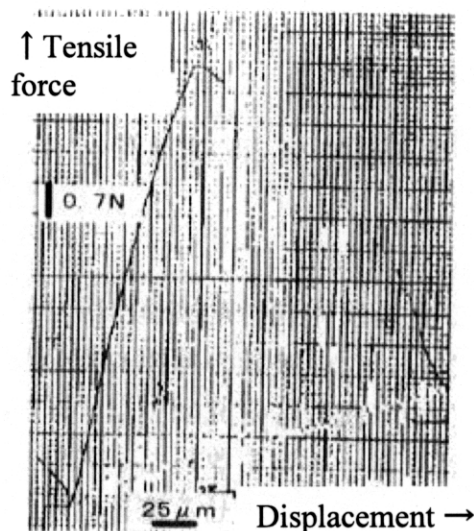


図2-22 変位-力曲線測定例

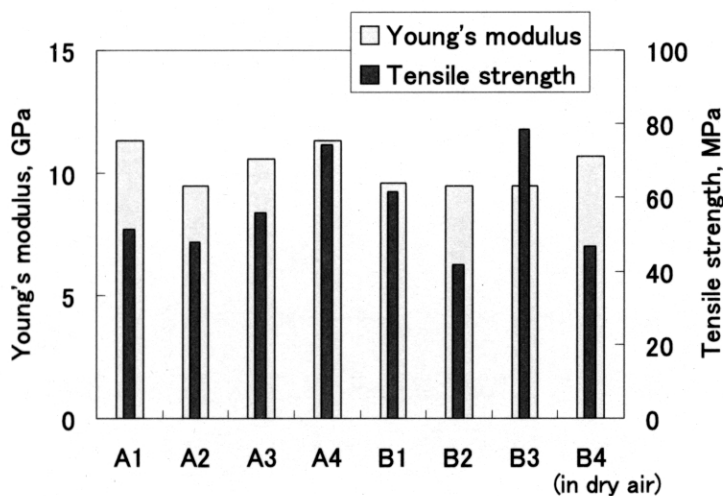


図2-23 被膜縦弾性率および引張り強さ測定値

二硫化モリブデン焼成被膜の弾性率は異方性があることも考えられるが、圧縮試験は行えなかったため、今回の応力計算にはこの引張り試験で求めた縦弾性率、10GPaを用いることにした。また応力計算にはポアソン比も必要であるが、測定できなかったため、材料の一般的な値である0.3を用いる。

さて、真空中のすべり軸受試験の解析を行うには、厳密には真空中で測定された縦弾性率を使用する必要がある。それは、二硫化モリブデン焼成被膜の主成分である二硫化モリブデンの摩擦抵抗が雰囲気によって大きく異なることから、せん断抵抗についても同様と推定され、このため被膜の縦弾性率が大気中と真空中で異なる可能性があるからである。しかしながら、以下の計算においては下記の理由によって真空中の試験の場合でも上記の大気中での測定値、10GPaを用いることにした。

図2-23から、乾燥空気中の縦弾性率や引張り強さは、湿度のある通常大気中とほとんど変わらない値を示す。したがって両雰囲気間での二硫化モリブデンのせん断抵抗の変化は、被膜の縦弾性率に影響しないといえる。真空中と乾燥空気中の二硫化モリブデンの摩擦係数は同程度になり(たとえば文献[31])、摩擦係数はせん断抵抗に比例すると考えられることから、二硫化モリブデンのせん断抵抗は乾燥空気中および真空中でほぼ等しい。したがって、真空中においても二硫化モリブデンのせん断抵抗の変化は被膜の縦弾性率に影響しないと考えられ、乾燥空気中や通常大気中の縦弾性率の測定値を真空中の試験条件の計算に用いても不都合はないといえる。

2.5.4 被膜内応力解析方法

本実験では、軸と軸受の荷重による弾性変形のために生じる周方向接触長さは軸受幅に比較して十分に小さいので、接触応力は軸方向に一様であると仮定し、被膜のある半無限平面に対する平面ひずみ弾性問題として扱うことにより軸と軸受の接触解析を行った。解析にあたっては志摩ら[32]の導いた応力とひずみの影響係数を用い、また志摩ら[32]と同様に摩擦力を考慮した。

これらの影響係数を用いて次の手順で接触問題を解く。まず摩擦のない状態で垂直圧力と表面の垂直変位のみ考慮して接触領域と接触圧力を求め、次にその接触圧力に実験で求めた摩擦係数を乗じて得た接線応力を分布させて摩擦力による解を求め、両者の和として被膜内応力を得る。

接触領域と接触圧力は、一般的な matrix inversion method(たとえば文献[33])

を用いて、繰り返し収束計算により数値的に求めた。その際、まず被膜がないものとして下地同士のヘルツ接触による接触領域の大きさを求める。被膜は下地より軟質であるので、被膜が存在すれば接触領域はこれより広がるため、次にその2～4倍程度を実際に接触がある領域と仮定し、この接触領域を等分割して、各分割領域内では発生する接触圧力がそれぞれ一定とし、接触領域により決まる変形量に対してそれぞれの分割領域で発生する圧力を求めた。荷重につらう圧力分布が得られるまで接触領域の大きさを修正して計算を繰り返す。詳細な計算方法は付録1に示す。

接触領域を過大に見積もっている場合は、接触領域両端の領域で負の圧力が計算されるので、次は圧力がゼロおよび正の領域を接触領域とし、同様の計算を負の領域が出なくなるまで繰り返す。繰り返し途中において、逆に接触領域の両最端部における圧力が正の大きな値を持ってしまふようになった場合は、分割を接触領域の両側に1つずつ広げてゆき、両端の圧力がゼロになるまで計算を繰り返した。実際は両端部の圧力がちょうどゼロになることはないため、両端部の圧力が最大圧力の25～50%になるまでとした。最大圧力の50%では両端圧力としては大きすぎるようにも見えるが、軟質被膜をはさんだ、狭い隙間の広がった接触形態であることから、接触圧力分布はかなり平坦で端部で急激に減少する分布となるために、両端をこのようにして決めても大きな誤差はないと判断した。なお、接触領域の分割数は24～26とした。

表2-7に被膜内応力の計算条件を示す。計算に用いた数値は、実測値、試験条件値である。条件1～3は真空中試験、4～7は大気中試験に対応する。図2-24に被膜内応力分布の計算例を示す。

図2-24において x 軸は軸受周方向を展開した距離を、 y 軸は被膜の表面からの深さ方向の距離を、縦方向の軸は応力の大きさを表す。図(a)、(c)においてミーゼス応力とは $\sqrt{3J_2}$ 、 J_2 :偏差応力の第2不変量、で表される量であり、降伏条件のせん断ひずみエネルギー説にしたがえば、この値が材料の単軸引張り降伏応力に達すると弾性破損が生じる。図(b)、(d)の τ_{xy} は被膜-下地界面に平行な面内におけるせん断応力である。

図には応力が被膜厚さ方向にほぼ一定となることが示されており、被膜内部も下地界面においても応力はほぼ同じである。

表2-7 被膜内応力計算条件

	Film thickness (μm)	Young's modulus of film (GPa)	Poisson's ratio of film	Young's modulus of substrate (GPa)	Poisson's ratio of substrate
	10	10	0.3	197	0.3
No.	Bearing bore (mm)	Shaft diameter (mm)	Line load (N/mm)	Friction coefficient	Corresponding test numbers
1	10.02	10	840	0.05	1,7
2	10.02	10	280	0.05	2,9
3	10.02	10	140	0.05	3
4	10.02	10	840	0.2	4,8
5	10.02	10	280	0.2	5,10,12
6	10.02	10	140	0.3	6
7	5.02	5	140	0.2	11

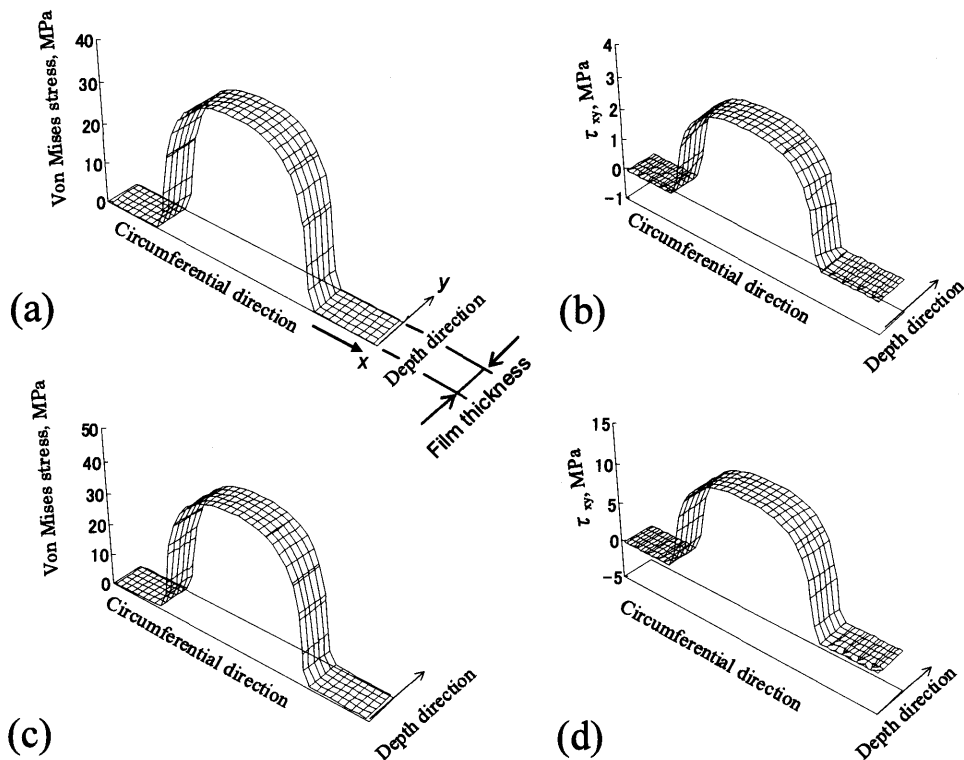


図2-24 被膜内応力分布計算例

投影面圧 28MPa, 接触長さ約 5.5mm は(a)-(d)に共通

(a), (b):摩擦係数 0.05, (c), (d):摩擦係数 0.2

2. 5. 5 被膜内応力解析結果と考察

図2-25は、表2-7の条件で計算した被膜-下地界面での最大ミーゼス応力の値、および最大せん断応力の値と投影面圧との関係を示す。ミーゼス応力は被膜自体の疲労破壊に関係する量で、一方、界面のせん断応力は下地からの被膜のはく離に関係する量と考えられる。最大ミーゼス応力は真空中の値が大気中の値の80%以上を示しており、大気中と真空中で大きな差はない。これはミーゼス応力が大気中と真空中で変わらない接触圧力を主として反映した値をとるからである。しかしながら、被膜-下地界面の最大せん断応力は真空中の値が大気中の値の1/4程度しかない。これは、被膜-下地界面の最大せん断応力が摩擦力の値を主として反映した値をとるからである。すなわち、被膜厚さに比べて接触幅が大きいと被膜の厚さ方向に応力の値がほとんど変化しないために、最大接触圧力×摩擦係数で計算される表面の最大接線応力がせん断応力として直接下地界面に達する。真空中の摩擦係数は大気中の1/4程度であることから、最大せん断応力もこれを反映して同様の比率を示すものである。

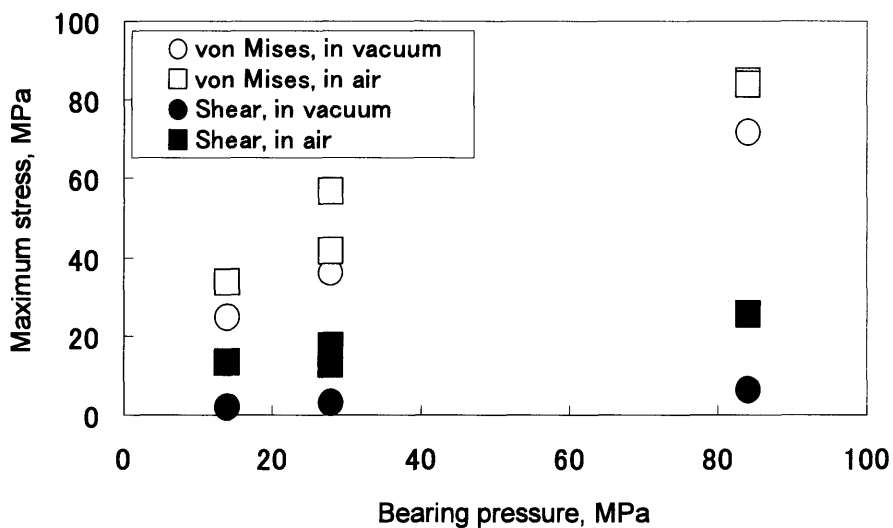


図2-25 投影面圧と応力の関係

2. 5. 6 被膜寿命の雰囲気依存メカニズム

図2-26に軸受寿命と被膜-下地界面応力との関係を示す。図2-26(a)の最大ミーゼス応力と寿命の関係は、図2-17で示した軸受寿命の等価面圧に対する関係と同様に、大気中と真空中とで異なる。なお、最大ミーゼス応力が実験で得られた被膜の引張り強さの最大

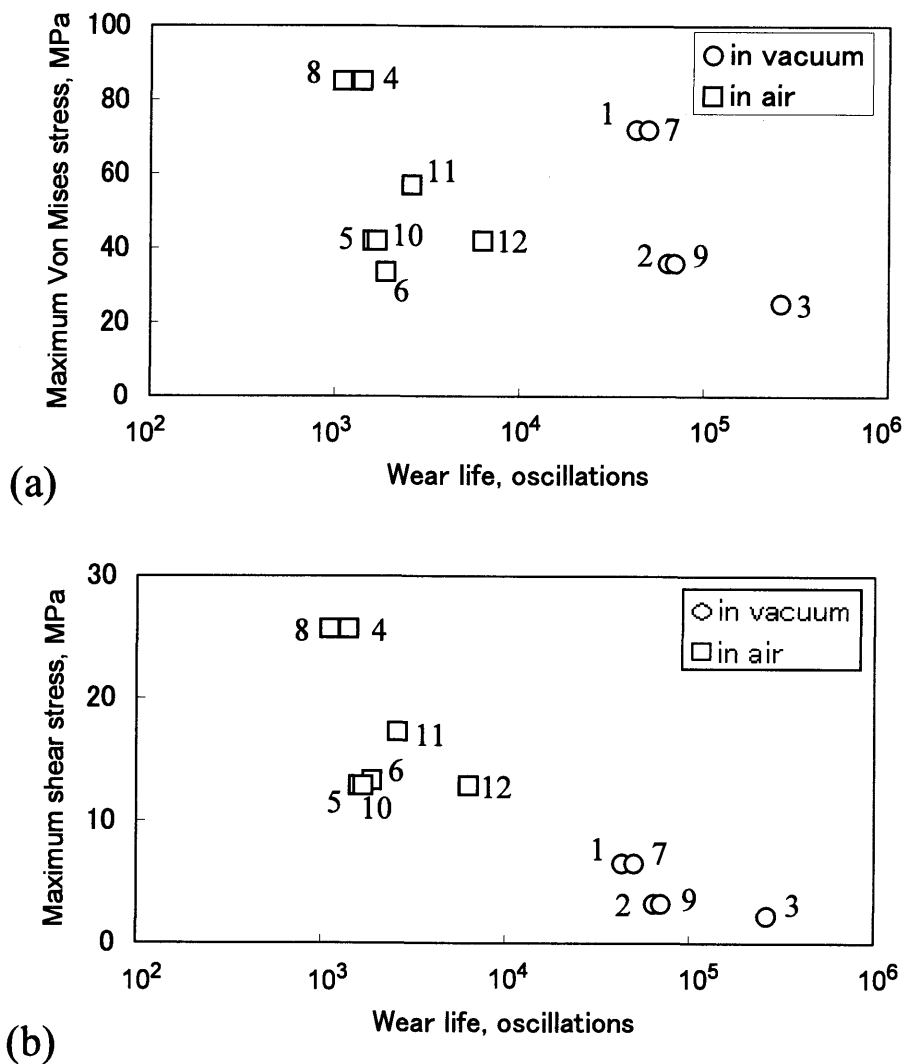


図2-26 軸受寿命と界面応力の関係

(a) : 界面における最大ミーゼス応力 (b) : 界面における最大せん断応力

値, 約80MPaを超えているデータが一部にあるが, この時の軸受寿命の値が他のデータと比較して大きく逸脱していることはない. これは2. 5. 3で述べた被膜の引張り試験で測定した引張り強さの不確かさ, および下地が被膜の変形を拘束することによる, 被膜の見かけ上の強度向上の影響によるものと考えられる.

なお Tangena ら[34]は, 二硫化モリブデン焼成被膜ではないが, 金属被膜に対する摩耗試験の結果として, 被膜内ミーゼス応力がある値以下では被膜の摩耗は非常に小さく, ミーゼス応力がある値を超えると急激に摩耗が大きくなる現象を報告した. これは, 被膜が内部から破損する条件と, 摩耗が大きくなる条件が金属被膜では一致することを示している. しかし,

二硫化モリブデン焼成被膜についての今回の実験ではそのような傾向は見られない。しかも、真空中でもっとも大きい最大ミーゼス応力を示す実験条件(実験番号1, 7)の軸受では、大気中で実験されたいくつかの軸受より最大ミーゼス応力が大きいにもかかわらず、それらよりも長寿命を示しており、ミーゼス応力と軸受寿命には明瞭な関係が見られない。このことより、本実験条件では、二硫化モリブデン焼成被膜の寿命は被膜の内部破損によるものではないと考えられる。

図2-26(b)に示す軸受寿命と界面せん断応力の関係は、大気中と真空中にかかわらず一本の右下がりの線上にほぼ載っている。したがって、これは疲労現象一般に見られるSN曲線と同様なものと考えることができ、被膜の疲労はく離寿命は、大気中、真空中の雰囲気によらず、被膜一下地界面のせん断応力に支配されていると考えることができる。界面でのせん断応力は被膜表面での摩擦係数(軸受摩擦係数)にほぼ比例することを示す2.5.5で述べた解析結果と本図を合わせ考えると、被膜の疲労はく離寿命は摩擦係数により支配されるものとみなすことができる。このことより、有機バインダ二硫化モリブデン焼成被膜の大気中での寿命が真空中よりも短くなるのは、摩擦係数が大気中で大きいためと説明できる。なお、この関係を利用すると、大気中と真空中での摩擦係数をあらかじめ測定することにより、大気中での短時間で済む寿命試験結果を用いて、通常は長時間を要する真空中での寿命試験の結果を容易、かつ精度良く推定することが可能になる。

なお、被膜のはく離にはせん断応力だけでなく、はく離面に作用する垂直応力も影響している可能性があるため、これについて検討しておく。すなわち、Nadai [35] が概念を示し、現在「内部応力説」として知られている破壊条件(たとえば文献[36])が成り立つかどうかを検討する。内部応力説によると、せん断による材料の破壊条件は、

$$\tau + \mu\sigma = \tau_0 \quad (2-3)$$

と表される。ここに、 τ はせん断される「すべり面」に沿って作用するせん断応力、 μ は「すべり面」の摩擦係数に相当する値、 σ は「すべり面」に作用する垂直応力、 τ_0 は純せん断に対する材料の強度である。この式は、「すべり面」に圧縮応力(負の値)が作用する場合は破壊時の τ (実効せん断強度)を $\mu\sigma$ の分だけ高めるということを表している。せん断強度の上昇は疲労強度の上昇につながるため、この説によれば、はく離面に対する圧縮応力は疲労寿命を伸ばし、逆に引張り応力は寿命を短縮することになる。

この「すべり面」は上述のすべり軸受試験での被膜一下地界面に相当する。ここで2種の μ (0.01と0.05)を仮定して界面における等価応力 $\tau + \mu\sigma$ の最大値を計算し、先に実測した

軸受寿命に対応させて表示すると図2-27が得られる。一方、図2-26(b)は垂直応力を考慮していないので $\mu = 0$ に相当する。この両図を比較すると、結果はそれほど変わらず、垂直応力の影響は大きくないことがわかる。したがって、今回のすべり軸受試験では、疲労を支配しているのは界面のせん断応力であって、界面での圧縮応力の影響は小さい。したがって、被膜の疲労はく離寿命の予測などを行うときには、せん断応力にのみ着目すればよいといえる。

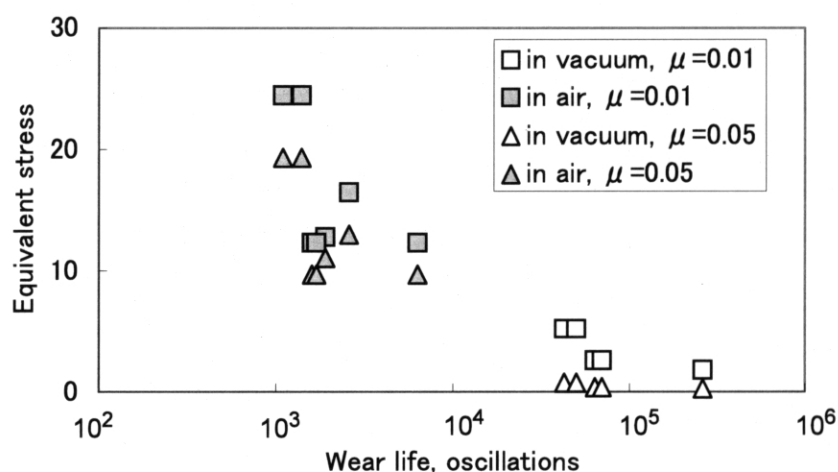


図2-27 軸受寿命と界面における等価せん断応力の最大値の関係

2.6 本実験 2

2.6.1 実験方法

試験機形式による寿命モードの違いなどを調べるため、ピンオンディスク型摩擦摩耗試験機を用いて試験を行った。図2-28に試験機の構造を示す。真空チャンバ内に収められたディスクは摩擦面が鉛直に置かれ、磁性流体シールで軸封された水平軸により、外部から回転駆動される。荷重は、やはり真空チャンバ内に収められたおもりによりピン側から負荷し、摩擦力はピンの支持ビームに貼られたひずみゲージによって測定した。また、大気中試験の場合のみ、ピンのディスク方向への垂直変位を渦電流式変位計によって測定し、摩耗量を求めた。摩擦力とピンの変位はペンレコーダによって記録した。ペンレコーダのゲイン3db低下の周波数は20Hz程度である。全試験条件を表2-8に示す。ピンはSUS304製、直径3/8インチ(約9.5mm)の球であり、表面粗さは $R_{max} 1 \mu m$ 、ディスクもSUS304製で、2.3節で用いたのと同じ二硫化モリブデン焼成被膜をディスク側にのみ厚さ約 $10 \mu m$ だけ施した。被膜処理工程はすべり軸受試験と場合と同一である。

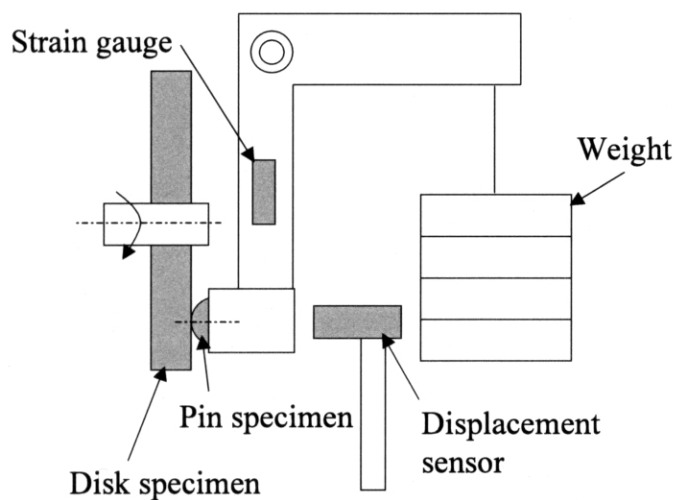


図2-28 ピンオンディスク試験機構造

表2-8 ピンオンディスク試験条件

No.	Load N	Atmosphere	Wear track diameter mm	Disk No.	Rotational speed rpm	Velocity m/s	Total number of revolutions	Total sliding distance M
1	0.098	air	42	A	273	0.60	30030	3960
2	0.098	air	39	A	273	0.56	31395	3845
3	0.098	air	35	B	273	0.50	58695	6451
4	0.49	air	35	C	273	0.50	50505	5550
5	0.98	air	46	C	270	0.65	6075	677
6	0.98	air	35	D	270	0.49	15390	1691
7	0.98	air	35	A	273	0.50	26836	2949
8	0.98	air	40	C	270	0.57	51300	6443
9	9.8	air	45	D	14	0.03	2184	309
10	9.8	air	48	D	50	0.13	8250	1243
11	9.8	vacuum	35	E	270	0.49	153900	16914
12	24	vacuum	46	E	270	0.65	117450	16964
13	24	vacuum	45	F	270	0.64	830250	117314
14	49	air	40	F	50	0.10	1500	188
15	49	vacuum	35	F	270	0.49	52650	5786
16	49	vacuum	40	E	270	0.57	117450	14752

vacuum: 10^{-4} Pa level, 20~25°C

air : laboratory air, 20~25°C, RH 40~60%

2. 6. 2 実験結果および考察

図2-29(a)～(f)に摩擦係数の推移の例を示す. このうち, 大気中試験((a)～(d))については, ピンの垂直変位の測定値も示してある. これらを基に, すべり軸受試験結果と比較しつつ, 被膜摩耗の進み方, 寿命, 摩擦係数の面圧依存性について考察を行う.

(1) 大気中における被膜摩耗の進み方

被膜摩耗の指標となるピン変位が測定されている大気中試験において, 被膜の摩耗の進み方を時間的に追い, 被膜がすべり軸受試験と同様にはく離を起しているか否か, すべり軸受試験における被膜寿命と等価な被膜損傷状態が発生している時点はいつかを調べる.

a. ピン垂直変位と被膜摩耗深さの関係

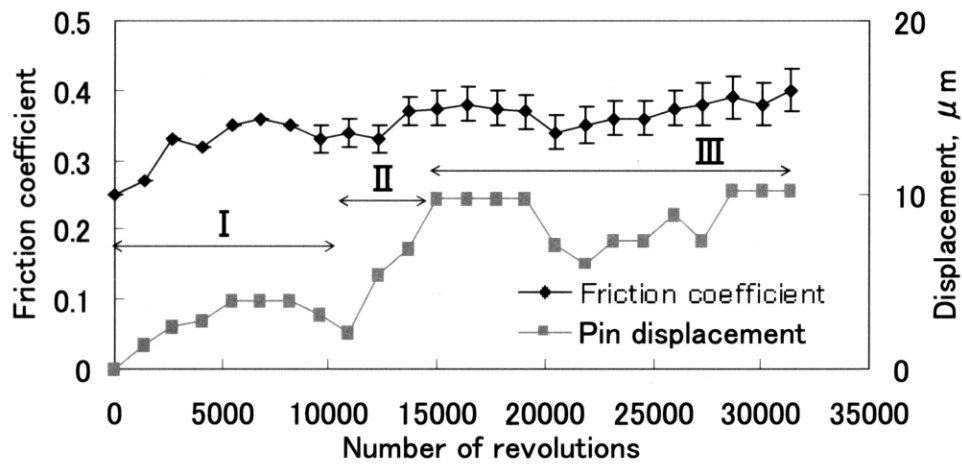
まず, 大気中の各試験において測定したピンの垂直変位と被膜摩耗深さの関係を調べる. ピンの垂直変位は本来, 被膜とピンのそれぞれの摩耗深さの和と一致するはずである. 表2-8中の大気中での全試験について, 触針式表面粗さ計で測定した試験終了時の被膜の摩耗深さ, およびピンの摩耗痕径から計算したピンの摩耗深さを被膜の摩耗深さに加えた総摩耗深さを求め, またペンレコーダの記録から試験終了時までのピン垂直変位を求めた. ただし, 摩擦トラック内で被膜の摩耗深さが一様でないため, ピン変位測定値は時間的に変動するので, 試験終了約1分前からの瞬時値を平均化して求めた値を試験終了時までのピン垂直変位とした. 図2-30は, こうして得た被膜の摩耗深さおよび総摩耗深さの値を縦軸に, ピン変位の値を横軸にして全データを示す.

この図において被膜摩耗深さ(■)のデータ(縦座標)は, 深さが $1\mu\text{m}$ 程度, $3\mu\text{m}$ 程度, および $10\mu\text{m}$ 程度の3つのグループに大きく分かれていることがわかる.

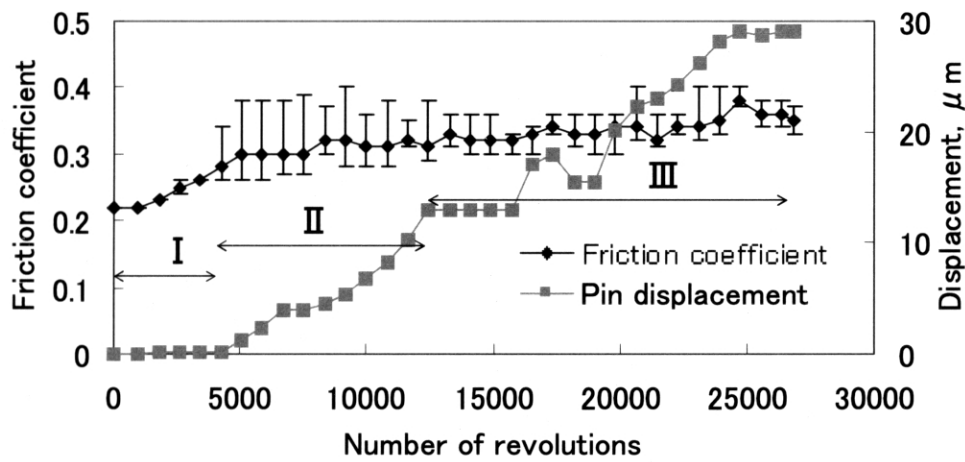
まず第一の被膜摩耗深さ $1\mu\text{m}$ 程度に対応するピン変位(横座標)は約 $2\mu\text{m}$ であり, このときの総摩耗深さ(◆)は被膜摩耗深さより $1\mu\text{m}$ 程度大きい約 $2\mu\text{m}$ で, ピン変位とほぼ等しい. これを, ①ピン変位が $0\sim 2\mu\text{m}$ までの第1段階:被膜の摩耗もピンの摩耗も $1\mu\text{m}$ 程度であり, 被膜表面に残っている初期粗さが摩耗してなじみが進行する初期摩耗段階, と分類する.

二番目のグループでは, 被膜摩耗深さ $3\mu\text{m}$ 程度に対応するピン変位は $2\sim 10\mu\text{m}$ の範囲にあり, このときの総摩耗深さは被膜摩耗深さよりすべて $2\sim 3\mu\text{m}$ 大きいがこの差はデータによらずほぼ一定であり, ピン変位と一致しないところが見られる. これを, ②ピン変位が $2\sim 10\mu\text{m}$ 程度の第2段階:被膜の表面粗さが第1段階の摩耗で取り去られた後の, 被膜とピン双方の摩耗の進行が非常に少ない定常段階, と分類する.

最後のグループの, 被膜摩耗深さが $10\mu\text{m}$ 程度に対応するピン変位は $10\mu\text{m}$ 以上になっ



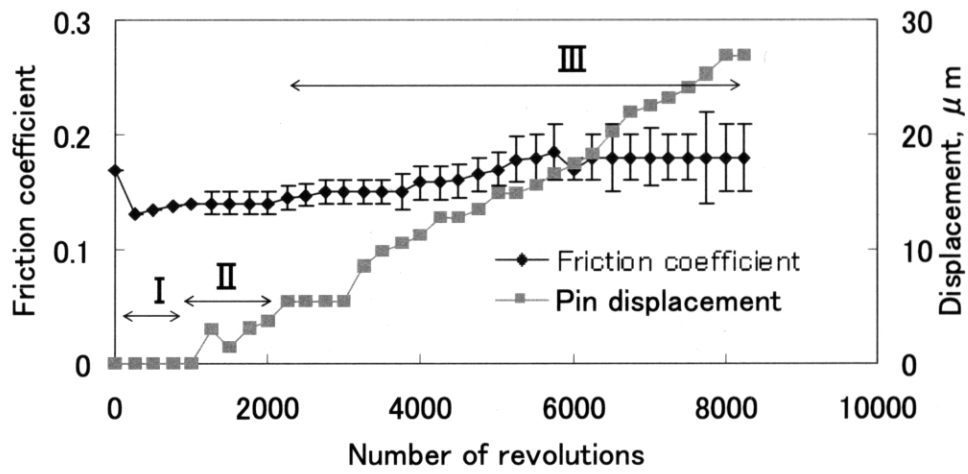
(a)



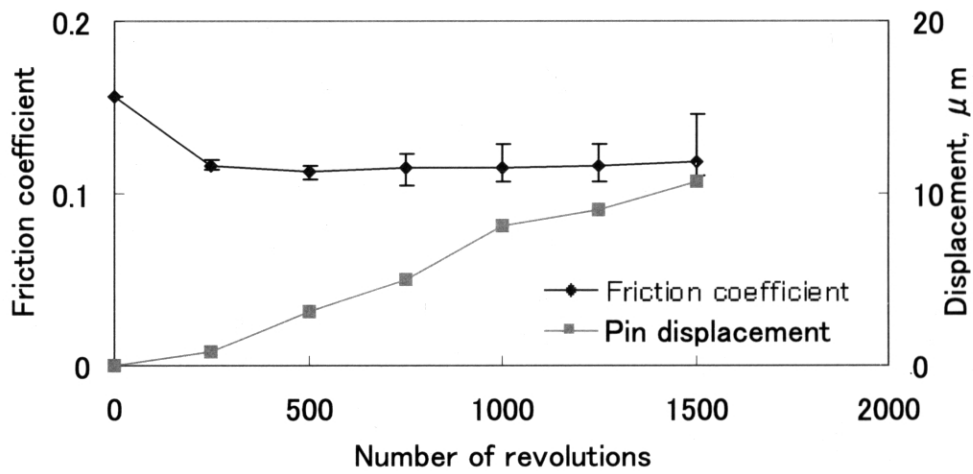
(b)

図2-29 摩擦係数とピン垂直変位の推移

(a)荷重 0.098N 大気中 (b)荷重 0.98N 大気中



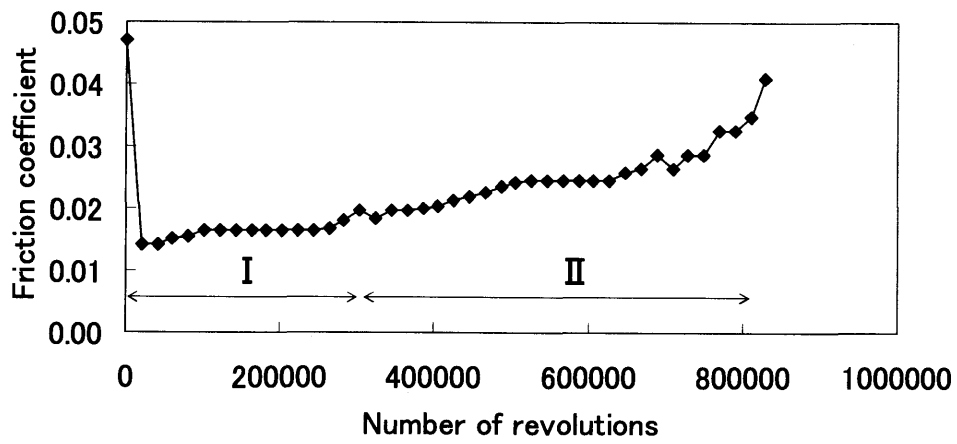
(c)



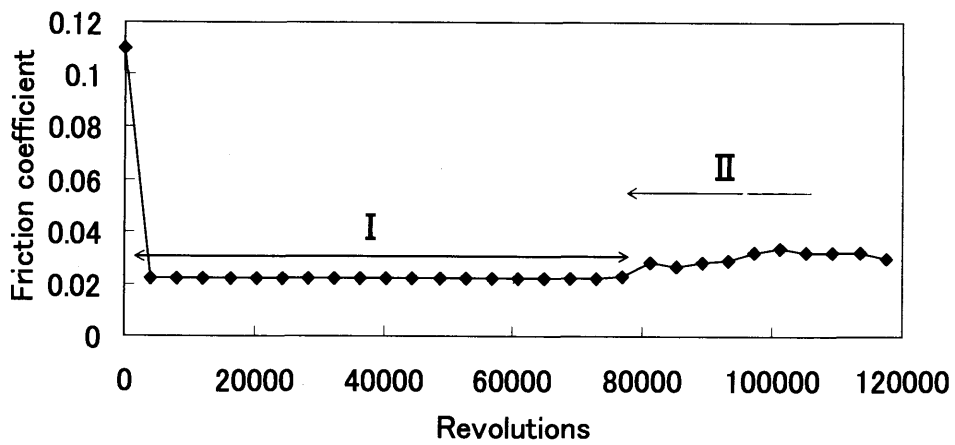
(d)

図2-29(続き) 摩擦係数とピン垂直変位の推移

(c)荷重 9.8N 大気中 (d)荷重 49N 大気中



(e)



(f)

図2-29(続き) 摩擦係数とピン垂直変位の推移

(e) 荷重 24N 真空中 (f) 荷重 49N 真空中

ていて、第2段階よりも総摩耗深さがさらに大きくなり、ピン変位が増加するに伴い被膜摩耗深さとの差が増大する。これを、③被膜が完全になくなってディスク下地が露出し、ピンが大きく摩耗し始める第3段階、と分類する。

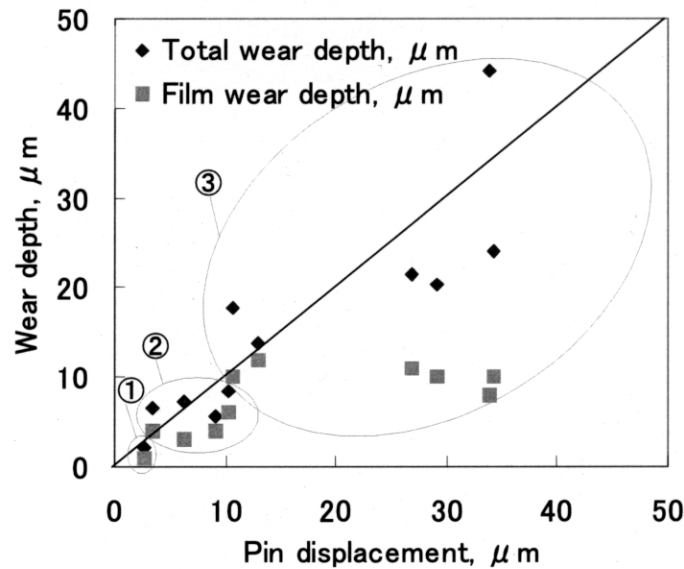


図2-30 ピン垂直変位と摩耗深さの関係

b. 被膜寿命モード

上述の第2段階から第3段階に移行するときに被膜厚さが不連続にほぼゼロになる。このような被膜厚さの推移はすべり軸受試験の場合の現象と同じであり、したがって、ピンオンディスク試験でもすべり軸受試験の場合と同様に被膜-下地界面での被膜はく離により寿命となることを示唆している。

しかしながら、実際には被膜は摩擦トラック全周で一時にはく離するのではなく、以下に述べるように、第2段階において摩擦トラックの一部から始まる。

第2段階では総摩耗深さはおよそ一定となるが、ピン変位は進み、両者に差が生じる。この段階のディスクの摩擦トラックの光学顕微鏡観察等によると、被膜にピッチング様のはく離が認められる(なお、図2-30における表面粗さ計による被膜摩耗深さの測定はこのはく離部分を避けて行っている)。このはく離部分が摩擦とともに増加して全周はく離に至り、第3段階に入るものと考えられる。このため、これをピンの変位として観察したとき、ペンレコーダの応答周波数が低いために変位の平均値が出力されるので、見かけ上はピン変位が徐々に増加して

いくように測定されるのである。したがって、第2段階では摩耗がほとんど進行しないが、被膜の疲労はく離は部分的にすでに始まっている段階と見ることができる。

(2) 寿命

すべり軸受試験では摩擦係数が急激に立ち上がる時点をもって寿命とした。しかし、図2-29(a)～(f)に示されているように、ピンオンディスク試験においてはこのような寿命到達の指標となる摩擦係数の急激な立ち上がりは見られない。したがって、すべり軸受試験のように、摩擦係数の推移から明快に寿命を求めることはできない。

すべり軸受試験における摩擦係数の急激な上昇は被膜のはく離と対応しているため、ピンオンディスク試験における被膜寿命も被膜のはく離が始まる時点とすることで、すべり軸受試験と等価な寿命評価が行えると考えられる。大気中試験においてはピン変位が測定されており、この変位測定値と被膜の摩耗状態は(1)で示したように対応付けられるため、摩擦係数を参照しなくても、ピン変位の推移から被膜のはく離開始時点を特定し、寿命を求めることができる。しかし、真空中試験においてはピン変位が測定できなかったために、摩擦係数の推移を手がかりとして寿命を求める必要がある。

そこで、まず大気中試験における被膜摩耗深さと摩擦係数の関係を調べ、その関係から真空中試験における被膜摩耗深さと摩擦係数の関係を類推する。この関係を用いて、真空中試験における被膜のはく離時点、すなわち被膜寿命を摩擦係数の推移から求めることにする。

a. 大気中試験における被膜摩耗深さと摩擦係数の関係

大気中試験結果の図2-29(a)～(c)においてピン変位に着目すると、図に示すように、初めに1～数 μm のほぼ一定の変位を示す期間Ⅰ、次に約10 μm までほぼ直線的に増加する期間Ⅱ、最後にしばらく10 μm 程度を保った後に再び増加を始める期間Ⅲの3段階に分けることができ、これらの各期間は(1)a.で述べた被膜摩耗の第1～第3段階にそれぞれ対応している。

被膜摩耗第1段階(期間Ⅰ)での摩擦係数は、初期から徐々に上昇する。被膜の部分的のはく離が始まる第2段階(期間Ⅱ)の摩擦係数は、はく離部分とピンの摩擦が生じるために変動幅が大きくなるが、上昇の度合いは初期とあまり変わらない。被膜が消失したと思われるピン変位10 μm を超えた第3段階(期間Ⅲ)でも、急激な上昇は起こらない。

次に図2-29(d)に着目する。この試験では、ピン変位は摩擦初期から連続して上昇している。摩擦係数は(a)～(c)の試験のように徐々に増加することなく、試験期間中ほぼ一定値を保っている。

これらの摩擦係数の推移の様子は、試験開始後に摩擦係数がすぐに一定値を示す期間を経た後に急激に上昇するという、すべり軸受試験で観察された傾向とはまったく異なる。この原因について次に検討する。

図2-29(a)～(c)のピンオンディスク試験において試験開始直後(期間Ⅰ)から摩擦係数が徐々に上昇するのは、被膜の摩耗によるピン先端球面の被膜中への埋まり込みによる掘起こし抵抗の増加と、ピンの摩耗による接触面積の漸増が原因と考えられる。被膜が損耗して下地が出た期間ⅡおよびⅢにおいても摩擦係数の上昇が著しくない理由は、一つには被膜がはく離してピン先端と下地の直接接触が開始しても、ピン先端の微小な面積でしか接触せず、大部分は図2-31の模式図に示すように被膜と接触するにとどまり、この部分の摩擦が支配的であるためと考えられる。また、赤岡ら[37]がセラミック系のバインダを用いた焼成被膜で実験的に見いだしているように、ブラスティング等の処理で作られた下地の表面粗さの谷部分に保持された二硫化モリブデン被膜の残部によって、潤滑作用が長く維持されることが理由とも考えられる。

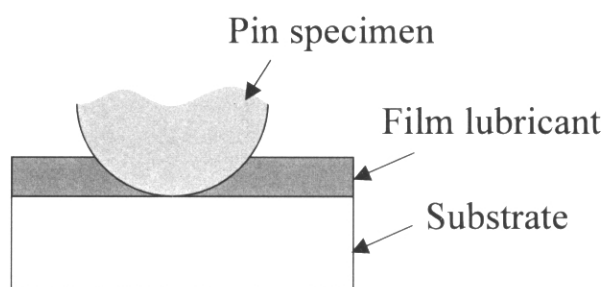


図2-31 被膜摩耗時のピンと被膜の関係

図2-29(d)において、ピン変位が単調に増加する間、摩擦係数がほぼ一定であったのは、49Nという(a)～(c)よりもかなり大きい荷重によって、はく離する以前に被膜が内部から破損していったために、ピンが被膜にコンフォーマルに埋まりこむことなく、被膜との接触面積があまり変化しなかったためではないかと思われる。

一方、すべり軸受試験の摩擦係数が、ピンオンディスク試験と異なってほぼ一定値を示した後急上昇するという推移を示した理由は、以下のように推定される。すべり軸受試験の軸と軸受においては、面圧が小さいため、図2-29(d)のような被膜の内部破損は起こらず、図2-29(a)～(c)と同様に被膜は疲労はく離を起こす。しかしながら、ピンオンディスク試験とは異なり、摩耗による接触面積の増加が少なく、また掘起こし抵抗の増加がおこらないために、被膜

が残存している間は摩擦係数の変化は少ない。接触領域が小さいピンオンディスク試験では、摩耗粉の接触領域外への排出が容易であるのに対し、すべり軸受試験では接触領域が広く、しかも揺動運動であるため、被膜がはく離した後に発生した下地金属の摩耗粉が排出されにくい。この金属摩耗粉がアブレシブとなって急激な摩擦上昇をもたらすものと考えられる。

b. 真空中試験における被膜摩耗深さと摩擦係数の関係

次に図2-29(e), (f)の真空中試験について検討する。真空中試験ではピンの変位は測定できなかったため、試験後の被膜の摩耗深さを測定すると、(e)において約 $3\mu\text{m}$ 、(f)において約 $10\mu\text{m}$ であった。(e)では被膜は浅く摩耗しており、(f)においては被膜はほぼ消失している。

(e)では摩擦係数は摩擦初期から徐々に上昇し、約30万回転時から上昇の程度と変動幅が少し大きくなり始める。これは大気中の摩擦係数の時間推移の傾向と類似しているが、値は大気中の $1/10$ 程度である。試験終了時にも、被膜厚さは平均約 $7\mu\text{m}$ 残っているが、光学顕微鏡観察により、被膜の摩擦トラック上において部分的にはく離が観察されたことから、大気中試験結果から類推すると、約30万回転時からの上昇と変動幅増加は、摩擦トラック上の被膜が部分的にはく離し始めたことによるものと思われる。したがって、約30万回転時までが大気中と同じく期間Ⅰ、それ以降が期間Ⅱに相当すると考えられる。

(f)では初期の摩擦係数の漸増は明瞭でないが、約8万回転時から摩擦係数およびその変動幅の増加が見られる。(f)と同じ荷重条件で、約5万回転で中止した試験(表2-8の試験番号15)では、被膜の摩耗深さは $1\sim 3\mu\text{m}$ 程度で被膜粗さ相当であった。これに対し、(f)では試験終了後、ほぼ被膜が消失していたことから、この摩擦係数の上昇と変動増加が始まる約8万回転時は、被膜のはく離が始まった時期と考えてよいであろう。したがって、約8万回転時までが期間Ⅰ、それ以降が期間Ⅱ、Ⅲに相当していると考えられる。

このように真空中試験においても、被膜の摩耗の進行状況は大気中試験と同じくⅠ～Ⅲの3期間に分けることができ、期間Ⅰから期間Ⅱへ遷移する時点、すなわち被膜の部分的にはく離が始まる時点は、摩擦係数の上昇が始まる時点と推定することができる。なお、(f)では期間ⅡからⅢへ移行する正確な時点は不明であるので示していない。

c. 大気中、真空中における被膜寿命

大気中ピンオンディスク試験においては、期間ⅠからⅡへの遷移時点、すなわち被膜のはく離が部分的に開始してピンの垂直変位が上昇しはじめる時点をもって被膜寿命とした。ピンの垂直変位を計測していない真空中試験では、被膜の部分的にはく離開始と対応すると考えら

れる、摩擦係数が上昇しはじめる時点を被膜寿命とした。このようにして求めた被膜寿命と荷重の関係を図2-32に示す。真空中の寿命は大気中の数十倍であり、すべり軸受試験の結果と同様の傾向を持つことがわかる。

このように、ピンオンディスク試験の摩擦係数の推移の様子は、大気中、真空中ともにすべり軸受試験の場合と大きく異なっているが、被膜寿命が雰囲気依存するという特徴、および被膜はく離という寿命モードは両者で共通している(ただし、大気中の高荷重試験(試験番号16)を除く)。

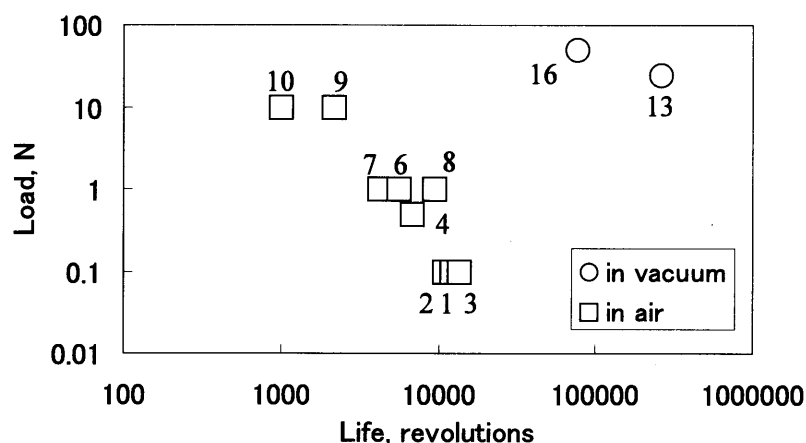


図2-32 荷重と被膜寿命の関係

(3) 大気中での摩擦係数の面圧依存性

a. 摩擦係数と面圧の関係

ピンオンディスク試験の摩擦係数は、(2)で検討した時間的な推移の様子のみでなく、面圧による変化の様子もすべり軸受試験と異なる。図2-33に被膜はく離が始まる前までの摩擦係数の時間平均値と、被膜の存在を無視しSUS304同士の接触と仮定して計算したヘルツ接触圧力の関係を示す。これより大気中の摩擦係数は、1000MPa以上の高面圧領域では0.1程度の低い値を示すが、面圧が低下すると摩擦係数が次第に増加し、数十MPaの低面圧領域になると0.3を超える大きな値となることがわかる。一方、すべり軸受試験では投影面圧14~84MPaにおいて、面圧によらず大気中の摩擦係数は約0.2であった。このように両試験で摩擦係数の値が異なるのは、すべり軸受試験では軸と軸受のすべり対偶の両方に被膜処理したのに対し、ピンオンディスク試験ではピン側が未処理であるという、表面被膜処理の有無が原因として考えられる。しかし、摩擦係数の面圧依存挙動の違いについては、表面被膜処理の有無からは説明しにくい。

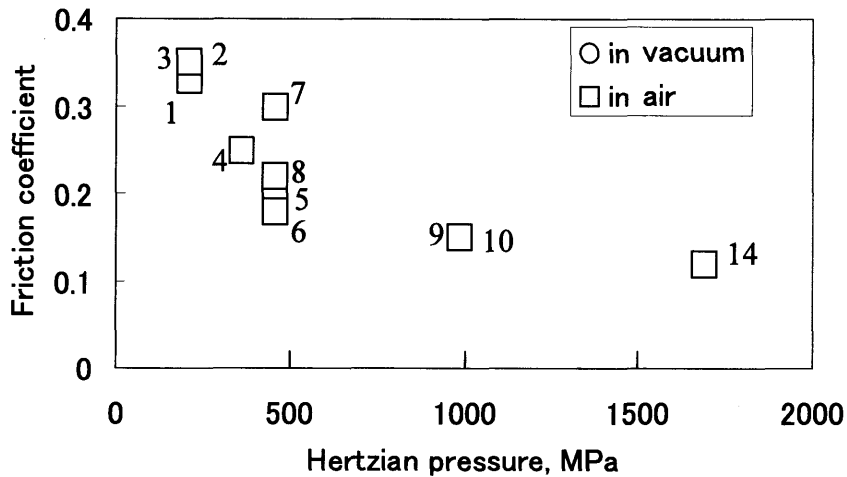


図2-33 摩擦係数とヘルツ接触圧の関係

この説明として、ピンオンディスク試験またはピンオンプレート試験の結果に基づいて得た図2-33と同様のグラフから、二硫化モリブデンにはそのような材料固有の性質が本来備わっているとする複数の説(たとえば文献[37-39])があり、そのメカニズムについて Moser ら[39]は二硫化モリブデンの水分吸着特性を用いて説明している。また、Puchkov ら[40]はピンオンプレート試験によって得た二硫化モリブデン被膜の摩擦力を鋼同士のヘルツ接触を仮定して計算した接触面積で除して接触面せん断応力を求め、ヘルツ接触圧力に依存して変化することを見いだしている。このせん断応力は、接触面における接触面間の凝着部をせん断破壊するのに必要な応力であり、いわば接触面のせん断強さである。

そこで Puchkov らと同様に、図2-33の摩擦係数を計算する元となった摩擦力をヘルツ接触面積で割って接触面せん断応力を求め、図2-34にヘルツ接触圧力との関係を示す。これより、接触圧力の増加とともにせん断応力は増加しており、本実験においても、二硫化モリブデン焼成被膜のせん断強さは Puchkov らの得た結果と同様に接触面圧に依存して変化する。しかしこのようにして求めたせん断応力は、硬いピンとディスク上の軟らかい被膜の摩擦において現れやすい掘起し摩擦抵抗を考慮せずに計算しており、いわば見かけのせん断応力である。上記の研究[37-39]もピンオンディスク試験またはピンオンプレート試験の結果に基づいているにもかかわらず、掘起し摩擦抵抗についてほとんど考慮しておらず、このため摩擦係数の面圧依存挙動の原因説明が誤っている可能性がある。そこで、次に掘り起こしの項が摩擦係数に与える影響について検討してみる。

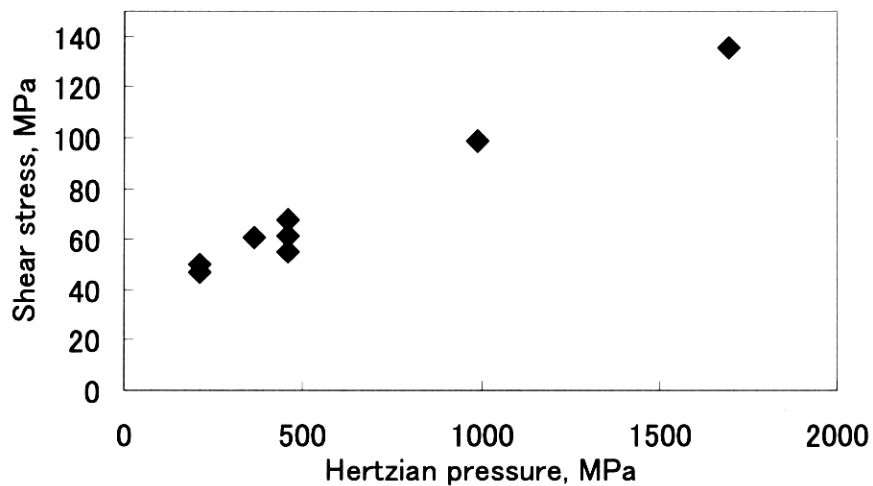


図2-34 せん断応力とヘルツ接触圧の関係

b. 掘起しの項の摩擦係数への影響

今回の試験のように、硬いピンが軟らかい被膜と集中接触状態で摩擦する時は、図2-35に示すように硬いピンの先端が軟らかい被膜に沈み込んで摩擦するので、ピン先端接触面での凝着摩擦のみならず、ピンの運動方向前面の接触面が被膜を排除するのに必要な、いわゆる掘起し抵抗も摩擦抵抗として考えなければならない。ピンの被膜への沈み込み量は面圧によって決まるため、前述の摩擦係数の面圧依存性に掘起しが影響している可能性がある。

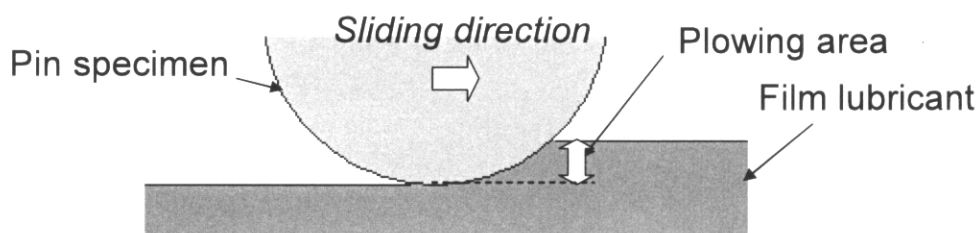


図2-35 ピンによる掘起し面積の増加の模式図

このために田中[41]のモデルを使用して、ピンオンディスク試験における掘起しの項の摩擦係数への寄与度を評価する。田中は、摩擦力 F を凝着項と掘起し項の和として、

$$F = sAP + HCP^{3/2} \quad (2-4)$$

と表す式を提案している。これは硬い球面が平面に接触したときの近似式であって、平面が塑性変形して剛体球が平面に食い込むモデルをもとにしている。右辺第1項は凝着力の項、第2項は掘起し抵抗の項である。 s は接触面のせん断強さ、 P は荷重で、系によって決まる定数 A との積 $A \cdot P$ は真実接触面積を表す。掘起しの項では球が被膜の塑性変形領域に沈み込んだときの被膜内前面投影面積($P^{3/2}$ に比例。比例定数を C とする)と、単位投影面積当たりの材料の掘起し抵抗力 H の積が掘起し抵抗となる。しかし、このモデルは金属同士の接触を対象としており、今回の実験条件と異なるため、次のようにモデルを実験条件に合わせて変更する。

式(2-4)では、真実接触面積を金属同士の接触で一般的に用いられる近似を用いて、塑性変形により発生する接触面積 $A \cdot P$ としているが、焼成被膜は金属に比べて弾性係数が2桁小さく、弾性変形が接触面積に大きく寄与していると推定されることから、式(2-4)の凝着項における真実接触面積 $A \cdot P$ をヘルツ接触面積で近似して置き換えることで、弾性接触部も凝着面積に算入する。掘起し摩擦抵抗については、弾性接触部分は弾性回復により寄与せず、塑性接触部分だけが抵抗となると仮定して、式(2-4)の掘起し項をそのまま用いる。すると、

$$F = s\pi a^2 + HCP^{3/2} \quad (2-5)$$

ここで、 a : ヘルツ接触半径 $a = (3PR/4E)^{1/3}$ 、 R : ピン半径、 E : 等価縦弾性率 $E = \{(1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2\}^{-1}$ 、 E_1 、 E_2 、 ν_1 、 ν_2 : それぞれピンと平面の縦弾性係数およびポアソン比である。このような仮定のもとで、大気中の実験結果を用いて s と $H \cdot C$ を決定する。最小二乗法を用い、上式から計算される摩擦係数と摩擦係数の実験値の差の二乗の和が最小になるようにする。すなわち、

$$G = \sum \{(s\pi a^2 + HCP^{3/2})/P - \mu\}^2 \quad (2-6)$$

における G が最小値をとるような s と $H \cdot C$ を求める。ここに μ は摩擦係数の実験値であり、 Σ はすべての大気中実験点について和をとることを示す。ただし、同じ荷重での複数の実験値は、荷重による重み付けを避けるためにその平均値を用い、また荷重49Nの試験についてはピン変位が連続して上昇しており、他の荷重のように被膜摩耗が一定となる期間を持たない

ことから、被膜が摩擦により徐々に破壊していく摩耗形態をとっている可能性があるため、計算から除外した。

$$\frac{\partial G}{\partial s} = 0, \quad \frac{\partial G}{\partial(HC)} = 0 \quad (2-7)$$

より $s \approx 49.4 \text{ MPa}$ が求まる。これは Briscoe ら[42]が二硫化モリブデン薄膜に対して求めた値と同程度である。一方、 $H \cdot C \approx 0.014 \text{ mm}^{-1/2}$ となる。

これらの値を式(2-5)に代入して求めた摩擦力 F を荷重 P で除すと、掘り起こし抵抗を考慮した摩擦係数が荷重 P の関数として求まる。また、掘り起こし抵抗を考慮せずに凝着項のみからなるとして先の最小二乗法を同様に適用すると、せん断強さ s が 52.4 MPa となり、これより凝着項のみ摩擦係数が荷重 P の関数として求まる。荷重 P はヘルツ接触圧力と一義的な関係にあり、この二通りの摩擦係数をそれぞれ太線および細線で図2-36に示す。また図中の□は図2-33に示した実験値である。

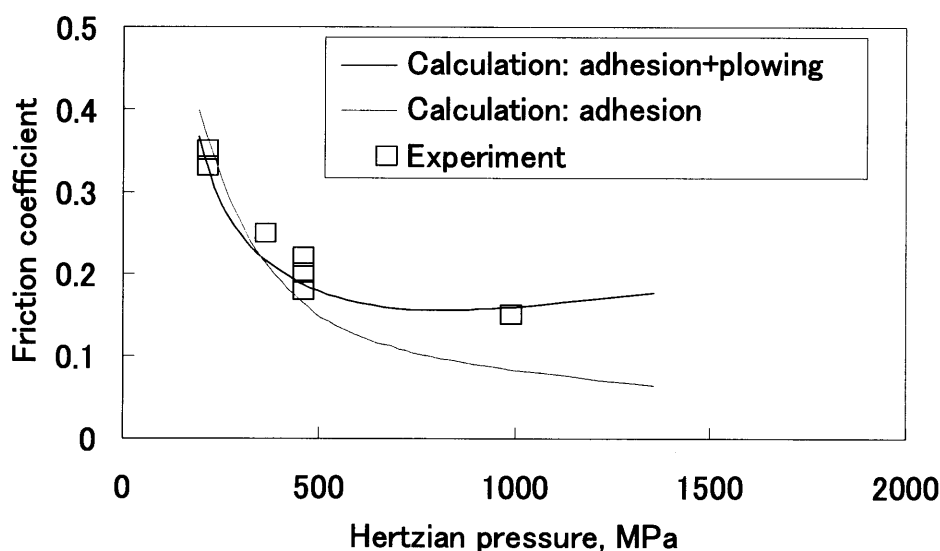


図2-36 摩擦係数の計算値と実験値

掘り起こし項を無視した細線の摩擦係数は、ヘルツ接触圧力の増加に伴って漸減し続ける。一方、掘り起こし項を考慮した太線の摩擦係数は、低面圧では掘り起こし項の影響が小さいので

細線の摩擦係数とほぼ同じであるが、ヘルツ接触圧500MPaあたりから摩擦係数は低下率を緩め、さらに1000MPa以上に大きくなると摩擦係数は一転して上昇を始める。これは掘起しが激しくなるためと考えられる。全体として見ると、掘起し項を考慮した太線の摩擦係数予測の方が実験値の変動挙動をより良く表していることがわかる。

(4) 実験結果のまとめ

以上のように、ピンオンディスク試験において二硫化モリブデン焼成被膜の摩耗挙動は、被膜の初期粗さ程度の摩耗があるのみで、被膜全体は摩耗が非常に少ない第1段階、摩擦トラック上で部分的にはく離が始まる第2段階、被膜がすべてはく離し、下地が露出する第3段階に分けることができ、それぞれの段階に応じて摩擦係数の挙動が変化する。被膜がはく離によって寿命となることはすべり軸受試験と同様であるが、摩擦係数の推移形態はすべり軸受試験と大きく異なり、すべり軸受試験のように寿命の指標となる急激な上昇点を持たない。

摩擦係数は、推移形態だけではなく、その値もピンの掘起し抵抗などが原因となってすべり軸受試験と異なり、また荷重依存性を持つ。このため、ピンオンディスク試験の結果から二硫化モリブデン焼成被膜をすべり軸受に適用した場合の摩擦係数を直接推定することはできない。

はく離が開始したと推定できる、上述の被膜摩耗進行の第2段階の開始時点を被膜寿命とすると、ピンオンディスク試験においても大気中、真空中においてすべり軸受試験と類似の荷重と被膜寿命の関係が得られた。2.5.5で述べたように、すべり軸受試験の場合には、被膜寿命の雰囲気による違いの原因は被膜内応力の違いによることが明らかになった。そこで次に、ピンオンディスク試験における被膜寿命の雰囲気による違いの原因が、同様に被膜内応力の違いに帰すことができるかどうかを検討するための応力解析を行い、考察する。

2.6.3 被膜内応力解析方法と解析結果

ピンオンディスク試験において応力解析を行う場合にも、すべり軸受試験と同様の影響係数を用いた計算法を用いるのが、両者の計算結果の比較検討を行う上で望ましいと思われる。しかし、ピンオンディスク試験ではピンと被膜の接触は幾何学的に点接触であり、また摩擦力も考慮するために歪み場が非点対称になるので、すべり軸受試験の場合と同じ最も簡便な平面ひずみ近似はこの場合の接触解析に適用すべきではない。そこで、被膜のある半無限平面上への球面の点接触問題として解析しようとする、O'sullivanら[43]によって求め方が示された影響係数を用いればよいが、平面ひずみ近似解析に比べると極めて煩雑になる

のでここでは採用しないこととした。そのため、ここでは市販の汎用有限要素法(FEM)解析プログラム、MARCのバージョンK7-2を用いて弾性解析する。

図2-37に解析対象モデルを示す。ピン、ディスク、潤滑被膜の接触部近傍を切り出してそれぞれに3次元格子を設定し、特に接触部直近については細かく分割格子を設けている。全体の計算負荷が過大にならないよう、被膜の深さ方向には4分割とした。計算手順は2.5.4項に準じ、摩擦のない状態で接触圧力分布を求め、次にその垂直圧力分布とそれに摩擦係数をかけた水平方向表面力が作用した状態で応力解析を行った。摩擦の作用した状態での応力は、接触面の摩擦方向中央断面に対し左右対称なので、解析はその片側についてだけ行なった。被膜の縦弾性率は2.5.4節と同じく10GPa、ディスク下地とピンの縦弾性率は197GPaとした。大気中試験では摩擦係数0.2、真空中試験では荷重49Nの試験のみ同0.012とし、他は0.02とした。

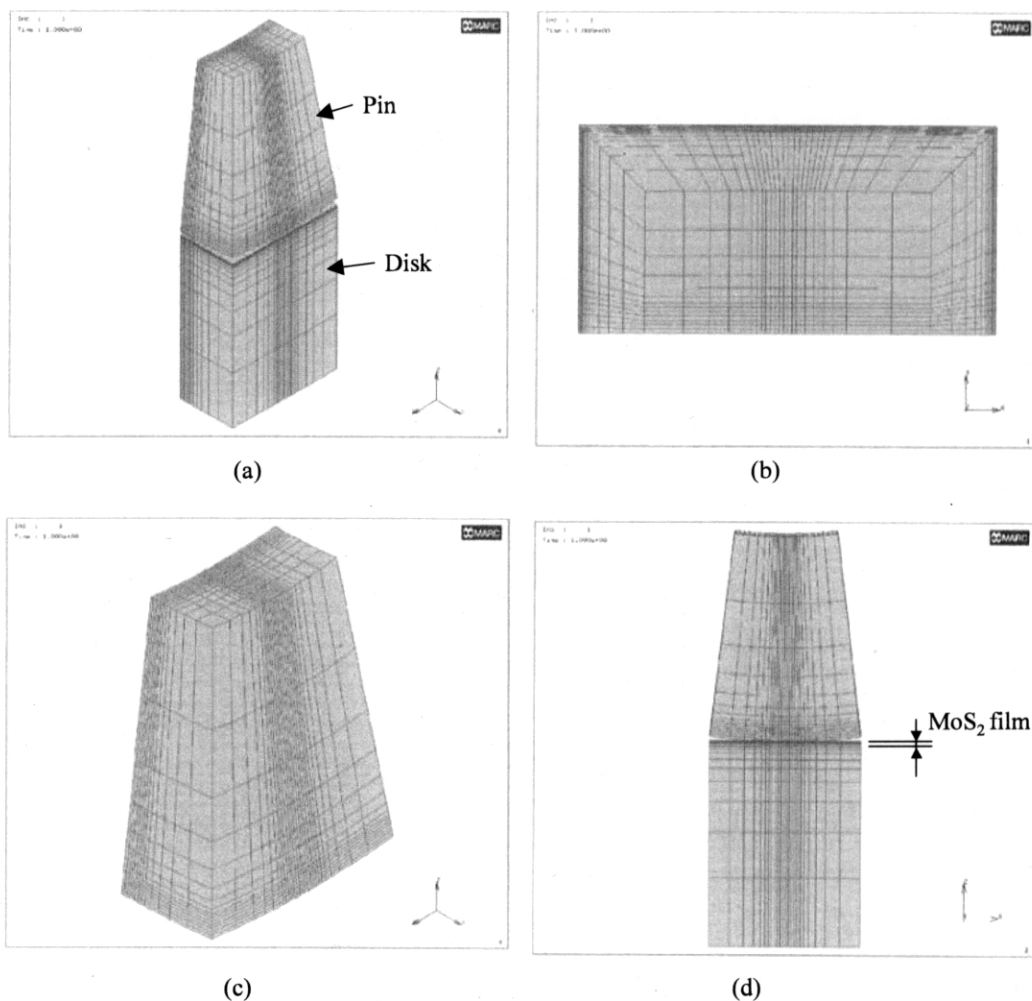


図2-37 FEM解析モデル

(a)モデル全体図 (b)ディスクモデル上面図 (c)ピンモデル拡大図 (d)モデル全体図側面図