総説 REVIEW

材料の表面と疲労強度に関する二、三の問題*

遠 藤 吉 郎**

On Fatigue Properties Affected by Surface Conditions of Materials

by

Kichiro ENDO

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

1 緒 言

表面工学の研究は種々の化学反応に大きく貢献してきたが、材料の変形能、強度に関する分野でも注目されてきはじめた。金属の摩擦、疲労は表面の影響の大きい現象であり、表面の物理的、化学的状态の影響は静的な場合より大きいことが考えられる。吸着より腐食に進むと、疲労強度に及ぼす影響はいっそうはなはだしくなる。表面、あるいはふん囲気は疲労き裂の発生だけでなく、その進展にも影響し、油が疲労強度に及ぼす効果は実質的な意味ももっている。

ころがり接触によるピッチングは表面疲労の現象であるが、さらにすべり摩擦による摩耗も一種の表面疲労と考えられる場合が多く、その他エロージョンなどを含めて、表面損傷には共通した性質がみられ、表面工学の一分野として興味もたれる。ここには上記の各事項について概説する。したがって表面仕上、加工層、残留応力など、表面の機械的性質との関連は別に譲りたい。

2 表面エネルギーと強度

金属の表面エネルギーはその強度に影響をもつ。液体の表面エネルギーは表面張力より知りうるが、固体においてはその測定が困難である。ぜい性材料ではへき開に要する仕事から測定されるものがあるが、ふん囲気の吸着に大きく影響される。また、溶態で表面張力を測定し、凝固後の温度低下に対して適当に補正することが行なわれるが、正確でなく、かつ金属固有の因子がはいってこない。このように、表面エネルギーの絶対値を知ることは困難であるが、その相対的变化が固体の強度に種々の影響をもつことが知られている。

Griffith がき裂の進展によって開放されるエネルギーと、新しいき裂面を作るに要する表面エネルギーとのつりあいより、ぜい性材料のき裂の進展に対する条件を求めたのは有名である。砂を微細化するに必要な仕事には、砂の表面積増大による表面エネルギーが含まれている。前者の大部分は塑性仕事として、熱損失になると考えられるが、なお、両者の間にはほぼ比例関係が認められたことより、この考え方は粘性材料にも適用できよう。さらに表面は変形能にも影響をもつ。たとえば、加工を受けた種々の材料のかたさ H と表面エネルギー γ との間にはFig. 1のように、 $\gamma \propto H^{1/3}$ の関係が認め

Fig. 1. Surface energy at the melting point against hardness at room temperature¹⁾.

られている。

吸着によって表面エネルギーが低下するとともに、機械的性質に変化がみられる。たとえば、ガラスの破壊遅れの現象は空中の CO_2 、特に水蒸気の吸着のためであって、ガラスをききにベーキングして吸着ふん囲気を取り去って置いて、真空中で試験するとき、破壊の遅れがみられなくなる。また、単結晶では特に明か

* 原稿受理 昭和42年6月15日

** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

であるが、多結晶金属においても、無極性の油中で引張るときより、オレイン酸その他の有極性の脂肪酸、アルコールなどを微量混ぜて吸着を強くさせると、降伏点、加工硬化係数が低下し、すべり帯の寸法が小さくなる。これを **Rebinder** 効果と称するが、この効果の結果、Fig. 2 にみるように、脂肪酸の含有によ

Fig. 2. Effects of concentration of fatty acid in vaseline on mechanical strengths²⁾.

て、細線のクリープ試験におけるラプチャ時間 τ 、ラプチャ伸び ϵ が低下し、摩擦力 F も低下するといわれている。摩擦力は二面の局部的に凝着した部分のせん断に要する力であるので、吸着によって表面層のせん断抵抗が減少したためと考えられる。

表面エネルギーは界面電位によっても変化する。すなわち、無電荷の状態より正負どちらにでも電荷を与えると、表面エネルギーは低下する。これに伴ってかたさが変化する。Fig. 3 に 1N の Na_2SO_4 液中における

H: Hardness of thallium in 1N. Na_2SO_4
 γ: Surface tension of thallium amalgam in 1N. Na_2SO_4

Fig. 3. Hardness and surface tension against potential drop²⁾.

Tl のかたさと、タリウム・アマルガムの表面張力の電位による変化を示すように、よく傾向が一致している²⁾。また、Fig. 4 に Pb の 5hr 後のクリープ変形 ϵ を示すように、電荷によってひずみが増大し、ひずみが最小になる電位を有する。図でカソード側のみが示されているのは、アノード側では表面に酸化物を生ずるためである。さらに電解液中に脂肪酸、アルコール

Fig. 4. Creep deformation of lead crystal against potential drop in 0.1N. Na_2SO_4 ²⁾.

などの活性剤を少量混ぜると、 H_{max} は低下し、 ϵ は増大している。

摩擦力もさきに述べた理由から界面電圧によって変化する。Pt を希硫酸につけた場合の電極電位と摩擦の関係としてFig. 5 が得られている。酸素も水素もデ

Fig. 5. Effect of interfacial potential on friction of platinum-platinum in 0.1N. H_2SO_4 ³⁾.

ポジットしない電位で表面張力および摩擦は最高になり、この場合表面損傷も最大であった。

金属の加工面は見掛け上、外部からエネルギーを与えないでも電子を放射し、吸着を促進することがある。この **Kramer** 効果は金属切削における切削液の影響にもみられ、ある種の有機化合物は切削新生面の電子によって金属面と反応する。潤滑油中の脂肪酸は研削や摩擦された新生面の電子放射によって、その吸着が促進され、せっけん生成が激しくなる。金属を水中で切削すると、新生した金属面は電子のため周囲の水と酸素を反応させて H_2O_2 に変化させるが、この現象は変形によるすべり帯またはき裂にもみられる。Al 合金その他の疲労試験片に透明テープをはって、生ずるあ

わより疲労き裂の観察が行なわれている。⁵⁾⁶⁾

以上述べたような種々の表面の影響は、断面に比べて表面積の大きいとき著しくなるのは当然であるが、疲労のように表面またはき裂先端が重要なときや、摩

擦、摩耗その他の表面現象に対して特に影響が大きいと考えられる。

3 疲労強度とふん囲気

真空中の疲労強度は空中より高いことが知られているが、その程度は真空度で左右される。Al, Cu, Ni その他で試験された結果を総合すると、破断繰返し数 N と気圧 p の間には両対数目盛で直線になる結果と、Fig. 6 にみるように $10^{-3} \sim 10^{-4}$ torr で水平部がでる

Fig. 6. Effects of atmospheric pressure on fatigue lives of nickel⁸⁾ and lead⁹⁾.

結果とがある。真空にして酸素を除く代わりに、不活性ガス中で試験することも行なわれているが、ガス中の微量の不純物に注意する必要がある。

ふん囲気ガスが影響をもつ原因を、酸化物の形成がサイクル中の圧縮時におけるき裂の再溶着を妨げることにあると考え、き裂面がサイクルの引張りの間に吸着するガス量を計算して、空気圧の影響にみられる飽和点が実験とだいたい一致することを述べた研究もみられる。空中の湿度は害作用をもつといわれるが、酸素の影響に比べて非常に小さいという実験結果が多い。水蒸気が触媒作用を行なって酸素の作用を促進するともいわれる。これらの影響がき裂の発生と進展のどちらに強いのかも、結果はまちまちである。

筆者らは炭素鋼 S35C (焼なまし) を 99.99% 以上

Fig. 7. S - N curves of smooth specimens of 0.35% C steel in gaseous environments under rotating bending ($n=2200\text{rpm}$).¹¹⁾

の純度のアルゴン中と、 2×10^{-5} 以下の湿度の乾燥空气中で回転曲げ疲労試験を行なった。平滑材の S - N 曲線を Fig. 7 に示すように、酸素のほかに水蒸気も寿命を短縮している。平滑材はき裂発生までの期間が長いために、反応に比較的長時間を要する水蒸気の腐食作用が現われやすいものと思われる。一方き裂発生期がごく短く、ほとんどの寿命がき裂進展期による鋭い切欠き材の場合、Fig. 8 にみるように、水蒸気の効果は

Fig. 8. S - N curves of notched specimens of 0.35% C steel in gaseous environments under rotating bending¹¹⁾.

ほとんど現われず、大気中と乾燥空气中とは同一の強度を示す。すなわち、大気中の水蒸気はき裂発生に対しては害作用をもつが、き裂進展に及ぼす影響は小さい。しかし、Al 合金、Mg 合金に対する平滑材の試験結果と比べると、鋼においては水蒸気の影響がかなり小さく、この効果は材質によって異なるようである。

酸素の影響は Fig. 8 にみたように、き裂進展に特に著しい。さらに渦電流法によって、切欠き試験片のき裂進展を非破壊で連続的に測定した結果を Fig. 9 に示

Fig. 9. Crack propagation of notched specimens of 0.35% C steel in gaseous environments under rotating bending¹¹⁾. l^* is the sum of notch depth (0.85 mm) and crack depth.

す。図中 l^* は切欠き深さ (0.85mm) とき裂深さの和である。アルゴン中では空中に比べて著しくき裂進展速度が小さい。酸素の化学吸着によってき裂面の表面

エネルギーが、アルゴンの物理吸着状態の約 1/2 に低下し、き裂先端で塑性変形しやすくなっていることをこの原因と考えた。これは疲労試験中ふん囲気を変えたときのき裂進展を測定した Fig. 10 からも考えられることである。アルゴンから大気に変えたとき、ただちに大気中固有のき裂速度に変化するが、大気よりアルゴ

Fig. 10. Crack propagation in varying environments under rotating bending. Dormant stages are seen at A¹¹⁾.

ンに変えたとき、き裂の進展に停留期がみられる。これは二段荷重疲労試験において、それぞれ小応力から大応力へ、および大応力から小応力へ変化したときのき裂進展と似ており、見掛けの応力振幅は同じでも、大気中ではアルゴン中より大きいひずみ振幅をき裂先端で受けていることを推察させる。

油は空中の酸素、水分をしゃ断して疲労寿命を延長さすと考えられるが、脂肪酸を含む油中での球軸受用鋼の疲労強度は、Table I に示すように、吸着のため低下する結果が Rebinders³⁾ によって得られている。しかし一方、極性有機剤としてドデシルアルコールで鋼その他の試験片面をおおうことによって、Fig. 11 に示すように、平滑材、切欠き材ともに疲労寿命が空中より伸びる報告もある。強固な吸着膜が空中の酸素、水分の接近を防ぐことによるとされている。しかし、この被覆も水蒸気の防護に対して完全でなく、特にき裂進展に対する影響のほうが大きいという説¹⁵⁾もみられる

Fig. 11. S-N curves of smooth and notched specimens of 4340 steel covered by dodecyl alcohol under rotating bending¹⁴⁾.

が、水蒸気の影響については前述のように疑問がもたれよう。¹⁸⁾

Frost¹⁸⁾も鉱油 (SAE30)、ドデシルアルコール中で鋼の回転曲げ疲労試験を行ない、疲労寿命の増大を考察して、この効果はき裂進展に対して有効であり、特に鋭い切欠きに対しては、水も酸素の接近を妨げるため、油と同じ程度に寿命を増大させる結果を得ている。また、切欠き平板の一軸疲労試験にてき裂進展を測定し、試験片をブチルゴムで被覆したときも、油中、水中とほぼ等しいき裂速度を得、また、回転曲げ試験で油の粘度を SAE 5 より 90 まで変化しても寿命に差がみられなかったことより、液の流動性、言い替えれば液のくさび作用は影響せず、これらの効果は酸素のき裂先端への接近が妨げられ、圧縮半サイクルの間でのき裂面の再溶着が行なわれることにあったとした。

同様に鉱油の粘度を変えて Ni 鋼の平滑試験片の回転曲げ疲労試験を行ない、粘度の影響はみられない結果を得ているが、平滑試験片ではき裂進展期はきわめて短期であるので、これからくさび効果の有無は論ぜられない。同じ論文に脂肪酸添加の影響も試験され、耐久限度が相当に低下するが、Au を被覆した試験片では変化のないことより、脂肪酸の効果は金属との化

Table I. Fatigue strength of Cr steels in lubricating oils under rotating bending²⁾.

σ_B (kg/mm ²)	52		65		102		219	
	σ_w (kg/mm ²)	1/K	σ_w (kg/mm ²)	1/K	σ_w (kg/mm ²)	1/K	σ_w (kg/mm ²)	1/K
Air	28.9	1	31.4	1	49.4	1	95.0	1
MS oil	27.9	0.97	29.0	0.93			92.6	0.98
Used MS oil			29.0	0.93				
MS oil, activated with 0.2% oleic acid	26.9	0.93	25.5	0.82	41.8	0.85	84.7	0.89
Castor oil					41.3	0.84		
Grease							89.9	0.95

学反応によるものであると結論を下している。

筆者らの鋼試験による回転曲げの実験によれば、切欠き材のき裂進展速度は Fig. 12 にみるように、空中に比べて非常に小さくなり、酸素のしゃ断効果が明ら

Fig. 12. Crack propagation of notched specimens of 0.35% C steel in oil of various viscosities under rotating bending ($n=2200\text{rpm}$)¹⁸⁾.

かであるが、さらに、使用した油の粘度が高いほどき裂進展速度が減少しており、き裂内に浸入した油のくさび作用による圧縮側半サイクル中のき裂先端のひずみ減少の効果が明らかである。このように、油の効果は酸素のしゃ断効果とくさび作用の和によるものであるにかかわらず、応力によっては Fig. 13 に示すように、アルゴン中よりき裂進展速度が高くなることがある。これは油中に含有されている酸素の影響のためと考え

Fig. 13. Crack propagation of notched specimens in oil with and without stearic acid under rotating bending ($n=2200\text{rpm}$)¹⁸⁾.

Fig. 14. $S-N$ curves of notched specimens of 0.35% C steel in various oils under rotating bending¹⁸⁾.

られる。一般に油には相当量の空気と水分が含まれている。そこで、脱気した後アルゴンを通じて不活性にしたパラフィン油を用い、同じ切欠き試験片によって、アルゴン中で疲労試験をした結果、Fig. 14の $S-N$

曲線にみるように、寿命は応力にかかわらず、アルゴン中より長くなり、き裂速度がアルゴン中より常に低いことが知られた。さらに、ステアリン酸を少量混ぜて試験すると、Fig. 13, 14に示したようにき裂進展速度が低下し、脱気油中とはほぼ等しくなる。有機性脂肪酸の吸着膜によって酸素の接近を防ぎ、かつ油のくさび効果の現われたためと考えられる。

この活性油中で平滑材の疲労試験を行なうと、Fig. 15に示すように、耐久限度以上の寿命はやや伸びるようであるが、耐久限度は

Fig. 15. $S-N$ curves of smooth specimens in oils under rotating bending ($n=2200\text{rpm}$)¹⁹⁾.

無添加の油中より若干低下したことより、Rebinder効果はき裂発生の限界応力にくくと考えられる。特に切欠き感度の高い焼入球軸受用鋼の平滑材にこの効果が著しかったこともこのことを暗示するが、さらに研究を要する。

表面疲労の一現象として、ころがり接触によるピッチングがある。一般に油の粘度が高いほうが油膜作用または微小き裂への油の浸入しにくさのため寿命が長くなるとされているが、Fig. 16に示すように必ずしもそうではなく、特に油の種類の影響が大きく、脂肪酸では著しく短寿命である。この差は粘度の圧力指数によっても説明できず、表面の化学反応を考えねばならない。ナフテン系の油のほうがパラフィン系の油より寿命を長くするのは、前者のほうが熱的に安定で、反応時に発生する水素によるぜい化の程度が少ないことによるという説明もみられる。また、従来ピッチングに対しては Rebinder 効果を認めるような実験結果が多かったが、物理吸着のみを行なう添加剤では強度低下がみられなかったことより、Rebinder 効果に疑

Fig. 16. Effects of oil viscosities on pitting lives of steel balls in various oils¹⁹⁾.

問を提している。²¹⁾

鉱油に水分を含むとき、Fig. 17に示すように、寿命が著しく減少し、これを腐食疲労と考えたり、水素ぜい性の影響と考えたりされる。1%の水分を含む鉱油中で、油膜を介して電圧を加えた状態で試験した結果、アノード側にされたときは短時間のため腐食の効果が

Fig. 17. Effects of water content in lubricating oil on pitting lives of steel balls²²⁾.

現われず、寿命の低下が認められなかったが、カソード側にされると寿命が1/3に減少し、この原因を水素ぜい性に帰している論文もある。²³⁾

4 腐 食 疲 労

化学反応が進むとき、腐食疲労の現象を生ずる。腐食疲労の一般の疲労と異なる特色は、鉄鋼材料でも耐久限度が認められず、応力繰返し速度の影響が大きい点である。筆者らはさきに腐食効果 k なる概念を導入してこの問題を明らかにした。すなわち、ある称呼応力 σ_c で腐食疲労試験を行なうと、ピット、き裂の応力集中により真応力は $\sigma_c k$ となり、この応力が空中の疲労強度に達したとき破損を生ずるとすると、Fig. 18, 19に示す $S-N$ 曲線、 $S-t$ 曲線の説明図にみられるように、任意の繰返し速度、指定繰返し数における強度を知りえ、また各種の組合せ応力における強度も説明される。ここで k は一般には時間の関数であるが、²⁴⁾ときには繰返し速度も影響してくる。しかし、これらの研究に用いた応力波形は正弦波状のため、繰返し速

Fig. 18. Schematic diagram of frequency effects on $S-N$ curves under corrosion fatigue²⁴⁾.

Fig. 19. Schematic diagram of frequency effects on $S-t$ curves under corrosion fatigue²⁴⁾.

度が変化すると、所定の繰返し数を与えるに要する時間とともに、ひずみ速度も変化する。そのため、腐食効果に及ぼす繰返し速度の影響の由以が明らかでない。また、非常に低サイクルまでこの考え方が成立するか疑問である。

筆者らはFig. 20に示すような台形状の応力波形を用い、繰返し速度にかかわらずひずみ速度を規定しうる

Fig. 20. Electrodepotential varying in a cycle of stress wave shown by a dotted line²⁶⁾.

試験を行ない、サイクル中の電位の変動をあわせて測定した。図は1サイクル 7.3 secの例であるが、電位はひずみの変動より遅れて変化し、応力波形が台形状でも、電位変化は正弦波に近い形をとり、各サイクルにおいてわずかずつ卑方向へのずれを示す。²⁶⁾²⁷⁾

したがって、速度効果は応力が上昇、下降している間の時間に最も強く影響される。高応力に保持されている間に電位が貴方向に回復する材料（たとえば高力Al合金）と、しない材料（たとえば高力鋼）とがあり、それぞれ高応力保持時間の寿命に対する影響の出

かたが異なる。また前者では、各サイクルにおける電位のずれがなく、応力繰返し数に伴う電位は初めからほとんど一定であるが、後者では各サイクルにおける電位のずれが蓄積されるので、応力繰返しに伴って電位が卑になっていく。

また、腐食疲労における平均応力の影響は電位の平均値の変化として現われることが知られ、さらにある程度以上応力繰返し速度が小さくなり、電位が応力波形に完全に追従するようになると、腐食疲労における速度効果が現われなくなることが知られた。

以上は主として電位に対する考察であるが、腐食によるき裂先端の鈍化、き裂に対する切欠き効果のき裂速度への影響が含まれ、前述の腐食効果 k と関連される。定量的に規定できる段階に達していないが、定性的に充分説明できるようになった。

5 摩耗 その他

摩擦と表面エネルギーの関係についてはさきに簡単に述べたが、摩耗もまた表面エネルギーと結びつけて考えられている。二面が接触するとき真の接触面積は見掛けのそれに比べて非常に小さいものであり、その圧力は高い。接触部は凝着し、一方の金属より他方の金属面へ転移し、これがいわゆる凝着摩耗の原因である。この凝着して転移した金属が摩耗粉となって脱落する機構として、次のようなことがいわれている。

Rabinowicz²⁸⁾は転移した金属を半球状と仮定し、これにたくわえられた弾性エネルギーが、転移片が母材に凝着するエネルギー U_{ab} をこえるときに摩耗粉になるとした。これより簡単な計算により $d=60\,000U_{ab}/H$ で摩耗粉の大きさ d を得た。種々の金属および少数の非金属について同質摩耗試験を行なって、摩耗率とかたさ H との間には簡単な関係が認められないが、摩耗粉直径と U_{aa}/H の関係は、Fig. 21に示すように、上式とよく一致していることを示している。異種摩耗を行なうと、凝着仕事 U_{ab} は一般に U_{aa} より小さいので、摩耗粉は小さくなる。また、ふん囲気を変えて試験を行なうと、Table IIに示すように、表面エネルギーが吸着によって低下されたとき摩耗粉が小さいことを確かめ、潤滑油による摩耗粉の微細化を説明している。

摩耗の別の形態としてアブレシブ摩耗がある。介在する固い物体または固くてあらい面による切削に近い摩耗をいう。Kuznetsov²⁹⁾はぜい性材料のアブレシブ摩耗において、摩耗粉を作るに要する仕事として、 $U=FL=\beta/\alpha \cdot V\gamma$ を得ている。ここに F は摩擦力、 L は走行距離であり、 α は全仕事のうち表面エネルギー増大に対する仕事の割合で 10^{-7} の程度の小さい値、 β は粉末の寸法に関連した値、 V は摩耗容積である。これは、たとえば表面凹凸を片持ばりと考え、最大応力が引張

Fig. 21. Diameter of wear particles and work of adhesion/hardness ratio¹⁾.

Table II. Size of copper wear particles in various environments¹⁾.

Environment	Average fragment diameter (μ)
Nitrogen	480
Helium	380
Carbon dioxide	300
Dry air	224
Oxygen	201
Laboratory air	177
Wet air	144
Cetane	12.0
Silicone DC 200-100 cst	9.5
Ucon fluid LB-70X	9.5
Palmitic acid in cetane	8.0

強度 σ_B に達するまでの弾性仕事と、 a なる原子間距離における表面エネルギー $\gamma = a\sigma_B^2/2E$ とを組み合わせ得られるものである。2個の結晶で α 、 β が等しいとき、 $F_1L_1/F_2L_2=V_1\gamma_1/V_2\gamma_2$ であり、荷重を適当に選んで $F_1=F_2$ で試験すると、同じ走行距離 $L_1=L_2$ において、 $V_1/V_2=\gamma_2/\gamma_1$ により、摩耗量は表面エネルギーと逆比例する。エメリ紙によるアブレシブ摩耗でこのことを証明している。また立方晶の岩塩において、へき開は(100)面で生ずるが、その仕事 U_1 と、(110)面および(111)面で分割するに要する仕事 U_2 、 U_3 との比は、へき開面の面積比より $U_1:U_2:U_3=1:\sqrt{2}:\sqrt{3}$ が得られ、各面をアブレシブ試験するとき、実験とよく合うことを述べている。最も簡単なのは2種の材料を互いに摩擦させ、したがって $F_1=F_2$ として、このときの摩耗量を表面エネルギーの評価に適用することを提案している。

このように、摩耗と表面エネルギーに関連させる考え方は、摩耗を一種の表面疲労とする考え方に導く。筆者らは摩耗率の逆数と摩耗力の間に、Fig. 22に示すよ

Fig. 22. Relation between frictional force and reciprocal of wear rate under lubricating wear tests of a carbon steel⁸¹⁾.

うに、疲労の $S-N$ 曲線と類似した関係を得ている。⁸¹⁾ 摩耗率の逆数は摩耗粉を発生するに要する摩擦力の繰返し数に相当する。この図は疲労試験におけるき裂進展速度と、称呼应力との間に得られる線図と似た意味をもつと考えられる。また、試験の途中で荷重を増減したときの摩耗量の変化は、Fig. 23に示すように、大荷

Fig. 23. Wear curves under varying loads. Dormant stage CD is seen under high-low load⁸²⁾.

重より小荷重に変化したC点でD点までの摩耗の停留期がみられ、小荷重より大荷重に変化したC点では停留期が存在せず、さきに述べた変動荷重における疲労き裂の進展曲線と酷似した模様を示している。

Sibley³⁸⁾ らが球軸受の寿命に対する Palmgren の式を用いて、機械要素の摩耗量を定量的に求めることを提案しているのは、摩耗を疲労の現象としたものである。

筆者らはまた、アブレシブ摩耗を塑性疲労の現象であると考えて、その抵抗が H^3/E^2 または H^2/E^2 (H はかたさ、 E は弾性係数) に比例することを導いた。⁸⁴⁾ これは Oberle⁸⁵⁾ が、別の考え方より、 H/E または H^2/E を modell factor とよんで、摩耗抵抗を表わす値としているのと一致する。

ころがり接触によるピッチングの耐久限度が H^2/E に比例するであろうことは、ピッチングが Hertz 応力の繰返しによる疲労であることより当然考えられることである。キャビテーション気泡の崩壊圧の繰返しに

よるエロージョン抵抗として、Glikman⁸⁶⁾ の実験結果より重量減少率の逆数を取り、材料の E を推定して H^2/E との関係を求めると、Fig. 24に示すように、ほ

	H_B	E (kg/mm ²)
1. Brass	103	0.63×10^4
2. Manganese-iron -aluminium-brass	217	1.05
3. Modified cast iron	197	1.40
4. S 10 C	107	2.07
5. S 31 C	153	2.10
6. Stainless steel	229	2.10
7. Ni-Cr-steel	368	2.10
8. Grey cast iron	187	1.40

Fig. 24. Relation between cavitation damage and H^2/E obtained from test results by Glikman⁸⁶⁾.

ぼ比例関係が得られるのは興味がある。ただし、铸铁はその組織の不均一性とキャビテーションの局所性のため、これに当てはまらない。さらに、これらの強度が表面性質、ふん囲気と密接な関係にあるだろうことは想像にかたくない。

平軸受、ころがり軸受、歯車などのように、二面が液中で急速に接近、離反を繰り返す場合は、キャビテーション・エロージョンだけでなく、二面間のスキューズ・フィルム作用に伴う液の流出、流入による表面摩

Fig. 25. Weight losses of unmoved specimens and of specimen oscillating with various thicknesses of liquid film³⁷⁾.

擦の繰返しによって、表面に疲労損傷を生ずる³⁷⁾。水中で鋼平板に対して鋼円板を振動させたときの、二面間のすきまと損傷度の関係をFig. 25に示す。静止平板と振動円板とでは損傷の程度に差があるが、ともにすきまが大きい間はキャビテーション・エロージョンにより、また、すきまが非常に小さくになると液の繰返し摩擦による疲労被害を生ずる。

ライニングした軸受用銅・鉛合金を平板試験片として油中で試験した結果をFig. 26に示す³⁸⁾。すきまが小さ

Fig. 26. Weight loss of unmoved specimens of Cu-Pb bearing alloy due to vibration of opposite disc in lubricating oils³⁸⁾.

いとき、明らかに表面疲労による損傷の増大が認められる。この損傷は重量減少量としては大きいものではないが、き裂を生じてメタルのはく離に至る危険なものである。オレイン酸を2%含ませた油中では、キャビテーション・エロージョンの範囲内ではその影響は大きくないが、流体摩擦の疲労の範囲で急激に影響が増大し、ここにも吸着の表面疲労に及ぼす影響が明らかにみられる。

6 結 言

材料表面の仕上程度、加工層、残留応力のような機械的性質は当然であるが、その物理的、化学的狀態とふん囲気が材料の強度、特に疲労強度に大きい影響をもつことを述べた。各種の表面損傷を疲労の現象として、これに及ぼす表面エネルギー、ふん囲気の影響をとり入れて考えることによって、種々の現象が説明され、また興味深い問題が提起される。

(昭和42年5月23日 日本材料学会第16期総会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Rabinowicz, E., "Friction and Wear of Materials" (1965) John Wiley and Sons.
- 2) Likhtman, V.I., P.A. Rebinder, and G.V. Karpenko, Effect of a Surface-Active Medium on the Deformation of Metals (1958) Her Majesty's Stationery Office.
- 3) Bowden F.P., and D. Tabor, Properties of Metallic Surfaces, Inst. of Metals, p.197 (1953).
- 4) Shaw, M.C., J. Appl. Mech., **15**, 37 (1948).
- 5) Grosskreutz, J., J. Appl. Phys., **33**, 2 653 (1962).
- 6) Holshouser, W.L., and J.A. Bennett, Proc. AS TM, **62**, 683 (1962).
- 7) Wadsworth N.J., and J. Hutchings, Phil. Mag., **3**, 1 154 (1958).
- 8) Achter, M.R., G.J. Danek, and H.H. Smith, Trans. ASME, **227**, 1 296 (1963).
- 9) Snowden, K.U., Nature, **189**, 53 (1961).
- 10) Gough, H.J., and D.G. Sopwith, J. Inst. Metals, **72**, 415 (1946).
- 11) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 日本機械学会論文集, **244**, 1 800 (1965).
- 12) Bennett, J.A., Mat. Res. & Standards, **3**, 480 (1963).
- 13) Hudson C.M., and H.F. Hardrath, NASA TN D-960 (1961).
- 14) Holshouser, W.L., and H.P. Utech, Proc. AS TM, **61**, 749 (1961).
- 15) Shives, T.R., and J.A. Bennett, NASA CR-267 (1965).
- 16) Frost, N. E., NEL Report, No. 89 (1963).
- 17) Galvin, G.D., and H. Naylor, Proc. Inst. Mech. Engrs., **179**, 857 (1964).
- 18) Endo, K., and K. Komai, JSME 1967 Semi-International Symposium Papers, **1**, 97 (1967-9).
- 19) Rounds, F.G., Jr., "Rolling Contact Phenomena", 346 (1962) Elsevier Publishing Co.
- 20) Grunberg, L., D.T. Jamieson, and D. Scott, Phil. Mag., **8**, 1 553 (1963).
- 21) Rounds, F.G., ASLE Paper, No.66 LC-27 (1966).
- 22) Grunberg, L., and D. Scott, J. Inst. Petro., **49**, 406 (1958).
- 23) Syniuta, W.D., The Origin of Microcracks Leading to Rolling Contact Fatigue, Surface Laboratory, MIT, Research Report No. 35 (1966).
- 24) 遠藤吉郎, 宮尾義治, 日本機械学会論文集, **24**, 167 (1958).
- 25) 遠藤吉郎, 宮尾義治, Proc. 1st Japan Cong. on Test. Materials, p. 17 (1958).
- 26) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 材料, **13**, 536 (1964).
- 27) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 材料, **14**, 827 (1965).

- 28) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, *Proc. 9th Japan Cong. on Test. Materials*, p. 25 (1966).
- 29) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 中垣邦弘, 日本機械学会論文集, **34** (1968-1) 掲載予定.
- 30) Kuznetsov, V.D., *Surface Energy of Solids* (1957) Her Majesty's Stationery Office.
- 31) 遠藤吉郎, 福田嘉雄, *Proc. 8th Japan Cong. on Test. Materials*, p. 69 (1965).
- 32) 遠藤吉郎, 福田嘉雄, 豊田洋民, 日本機械学会講演前刷集, No.168, 125 (1967).
- 33) Sibley, L.B., and C.M. Allen, *Wear*, **5**, 312 (1962).
- 34) 遠藤吉郎, 福田嘉雄, 工藤 忠, 日本機械学会論文集, **32**, 526 (1966).
- 35) Oberle, T.L., *J. Metals*, **3**, 438 (1951).
- 36) Glikman, L.A., *Corrosion-Mechanical Strength of Metals*, Butterworths (1962).
- 37) 遠藤吉郎, 岡田庸敬, 中野達也, 中島政明, 日本機械学会論文集, **32**, 831 (1966).
- 38) 遠藤吉郎, 岡田庸敬, 中島政明, 日本機械学会論文集, **33**, 1 515 (1967).