

ISSN 0389-4010
UDC 620.17.16:
669.716:
62.993

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-818

極低温液体中におけるアルミニウム陽極酸化被膜の摩耗

尾池 守 ・ 菊池 正孝

1984年6月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

極低温液体中におけるアルミニウム陽極酸化被膜の摩耗*

尾池 守** 菊池 正孝**

Wear of Anodic Oxide Films on Aluminum Alloys in Cryogenic Liquids

Mamoru OIKE and Masataka KIKUCHI

Abstract

An experimental study was carried out on the wear of several materials rubbed against anodic oxide films on aluminum alloys in liquid nitrogen. The appearance of wear particles and wear track, the wear rate and the transverse moment of the slider were examined. The main findings obtained in this study are as follows:

1. The wear particles left the rubbing surfaces at an early stage of growth; namely, the fine wear particles were produced when the sliders were rubbed against the anodic oxide films on aluminum alloys.
2. The wear particles grew large between the rubbing surfaces when the sliders were rubbed against the disks of aluminum alloys.

From these findings, the authors concluded that the anodic oxide films formed on the rubbing surfaces of aluminum alloys prevented the large-scale growth of wear particles between these rubbing surfaces in cryogenic liquids.

1. ま え が き

液体ロケットエンジンのターボポンプは、作動流体が液体酸素や液体水素などの極低温流体であり、また軽量化が望まれるため高速回転で運転する必要がある。それ故、ターボポンプの羽根車は極低温中で高速回転という過酷な条件下で稼動しなければならない。このような条件下で作動する羽根車の材料としてアルミニウム合金を用いることには、以下のような利点がある。すなわち、アルミニウム合金は比重の割に引張強度が大きい(比強度が高い)ので高速回転体としては有利である。更に、アルミニウム合金は面心立方格子であるため、低温脆性を示さ

ず、極低温においても優れた機械的性質を有する。その他、比較的安価であり加工性も良いなどの利点があげられる。

ところで、ポンプはその機能上、羽根車外周部とケーシングの間にシール(絞り)を設け、高圧側から低圧側への流体の漏れを防がなければならない。しかも、ロケットエンジン用のターボポンプのように高揚程、低比速度で、^(註)その上、低粘度の流体を作動させるポンプでは体積効率を良くするために、この漏れを出来る限り抑えなければならない。すなわち、シール部のシールすきまを小さくする必要がある。しかしその結果、シール部において羽根車外周部と相手材(ケーシング)が摩擦接触を起こす可能

* 昭和59年3月29日受付
** 角田支所

(註) 比速度 $N_s = n \sqrt{Q} / H^{3/4}$ n : 回転数,
 Q : 流量, H : 揚程

性が高くなる。このシール部で摩擦接触が生じた場合、そのPV値（荷重×摩擦速度）はたとえば、 52000Nm/s 程度にまで達するものと推定される。したがって、シール部材の摩耗は不可避免的に生ずることが予想され、このシール部材に対しては、単に摩耗量ということだけではなく、その摩耗状態あるいは摩耗粉の排出の仕方そのものが問われなければならない。特に、液体酸素用ターボポンプの場合、

摩耗状況次第ではシール部から着火する恐れがあり、安全上重大な問題となる。

さて一方、アルミニウム合金は一般的に言って、耐摩耗性に優れた材料ではない。それ故、上記のような条件下で羽根車材料として使用するためには、何かしらの対策を講ずる必要がある。アルミニウム合金に対し、従来から知られている表面処理の方法として、陽極酸化処理いわゆるアルマイト処理が存

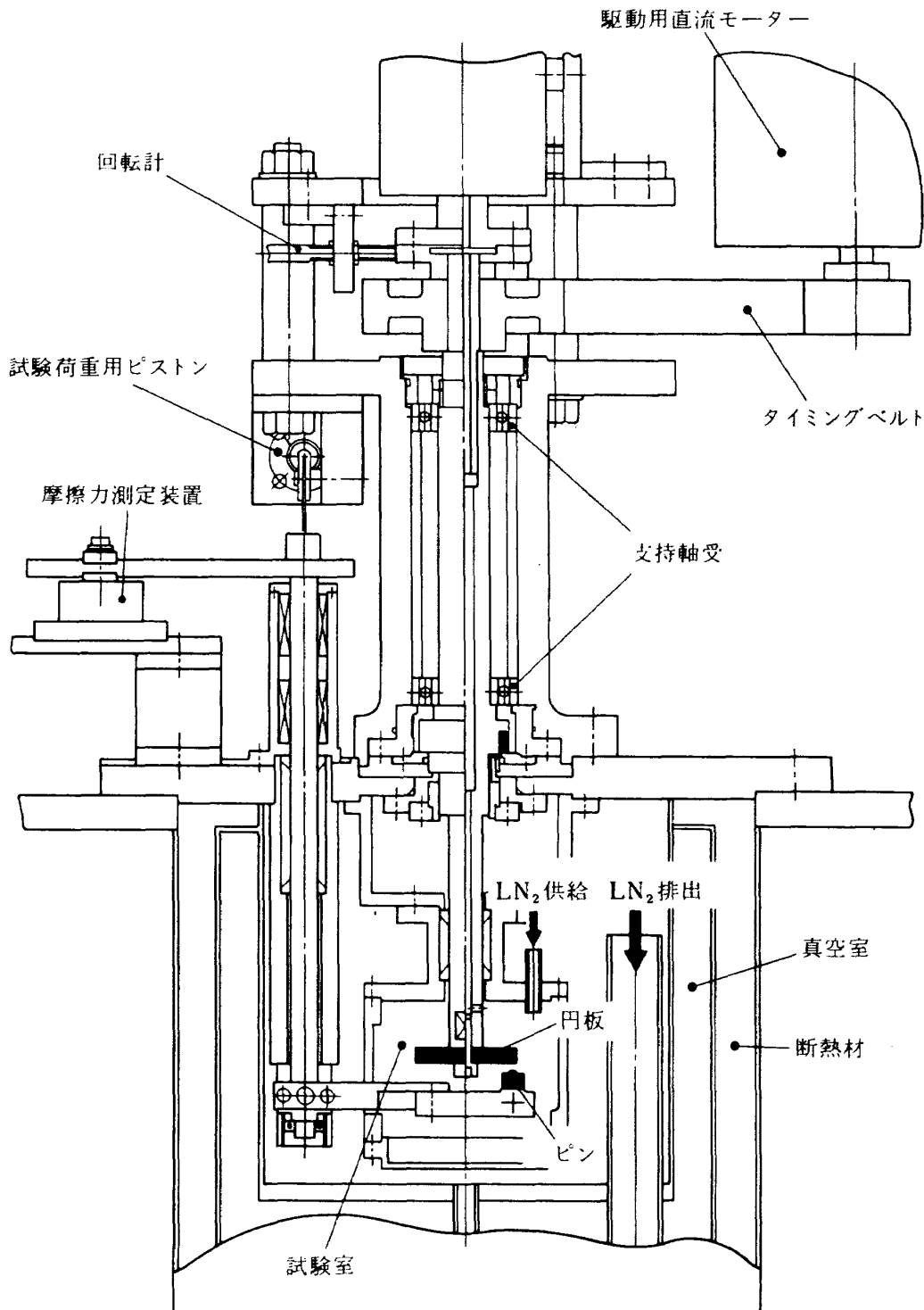


図1 摩耗試験機の概略図

在する。この陽極酸化被膜は、摩耗率が低いという実験結果が多数報告⁽²⁾されており、上述の問題に対する有効な解決策となりうることが予測される。

以上のような背景の下に、筆者らは本研究において、アルミニウム陽極酸化被膜（以下単に陽極酸化被膜と略す）の極低温液体中における摩耗挙動を調べるとともに、ポンプでの稼働結果を掲げ、陽極酸化被膜の効果について論ずるものである。

2. 実験方法

図1に用いた試験機の概要を示すが、真空断熱そう内に液化ガスを満たし、その中でピン回転円板型の摩耗試験を行なう方式のものである。液化ガスとしては液体酸素と物性値が近く、しかも着火の危険性がない液体窒素を用いた。液体窒素は可搬式の充てん容器からフレキシブルホースを介して、供給口より試験室に供給される。試験室よりあふれ出た液体窒素は、真空断熱そうを満たし、排出口より導管を通して外部に導かれ、大気へと放出される。したがって、ピン・円板両試片は常に液体窒素中で摩擦し合うことになる。

試験に際しては、試験室内が液体窒素温度(77.4K)に達し、更に排出口より液体窒素が連続的に放出されていることを確認した後、摩耗試験を開始した。試験中は常時2ℓ/min程度の割合で液体窒素を供給した。また比較のために、常温空気中でも試験を行なった。

荷重はピストンより鋼線を介し、ピン試片を円板試片に押し付けることで、所定の値を加えた。摩擦力はピン試片支持棒に働く力を歪ゲージにより検出し、逐次記録した。摩擦速度は1~10m/sの範囲で、主に10m/sで行ない（摩擦円直径は40mmと50mmの2種類を用いた）、荷重は9.8N一定とした。

ピン試片は直径3mmで炭素繊維を充てんしたPTFE(Polytetrafluoroethylene)と市販の純銅、軟鋼及びアルミニウム合金(A6061)の4種類を用いた。円板試片は直径70mmのアルミニウム合金(A6061)上に陽極酸化処理を施し、封孔処理^(註)を行な

(註) 封孔処理は水和封孔の一種である酢酸ニッケル法を用いた。

表1 陽極酸化条件

電 解 質	硫 酸
電解質濃度 (wt%)	15
電 流 密 度 (A/dm ²)	DC3.2~4.2
処 理 温 度 (°C)	-5~8
処 理 時 間	被膜厚さに応じて制御する。

ったもので、被膜厚さは20~120μmまでの4種類である。表1に陽極酸化条件を示す。この処理条件はいわゆる硬質陽極酸化の範ちゅうに属するものである。比較のために、陽極酸化処理を施していないアルミニウム合金円板も使用した。

両試片ともアセトンで3分間程度超音波洗浄し、数時間真空引き(0.1Pa程度)した後実験に供した。摩耗量は試験後の摩耗痕形状及び試験前後における重量変化より、単位荷重・単位摩擦距離あたりの体積摩耗量、すなわち比摩耗量として求めた。

3. 実験結果

3.1 相手材の影響

図2に4種類のピン材料に対する陽極酸化被膜の比摩耗量を示した。これは被膜厚さ120μm、摩擦速度10m/sのものである。良好な自己潤滑材料であるPTFEピンの場合は、円板試片の重量減は見られず、むしろ、PTFEの移着による重量増加が認められた。

これに対して、金属ピンの場合は比較的軟質な金

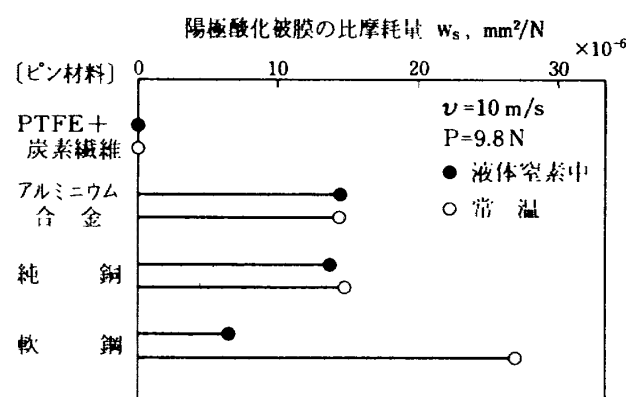


図2 陽極酸化被膜の摩耗に対する相手材の影響

属にもかかわらず、陽極酸化被膜の比摩耗量は $10^{-5} \text{mm}^2/\text{N}$ オーダと比較的高い値を示した。アルミニウム合金及び純銅ピンに対しては、常温と液体窒素中で、陽極酸化被膜の比摩耗量に大差がなく、極低温雰囲気の影響は定かでない。軟鋼ピンに対する場合は、液体窒素中で比摩耗量が常温時に比較して $1/4$ に減少しており、極低温雰囲気の影響が顕著である。

しかしながら、この実験結果を見る限り、極低温雰囲気は陽極酸化被膜の摩耗に悪影響を及ぼしていないことが分る。

3.2 摩擦速度の影響

極低温雰囲気の影響が顕著であった軟鋼ピンを用いて、陽極酸化被膜の摩耗に及ぼす摩擦速度の影響を調べた。その結果を図3に示す、図中の値は被膜厚さ $120 \mu\text{m}$ のものである。

図より分る様に、陽極酸化被膜の比摩耗量は摩擦速度が $1 \text{m/s} \sim 10 \text{m/s}$ の範囲で、速度の増加と共に

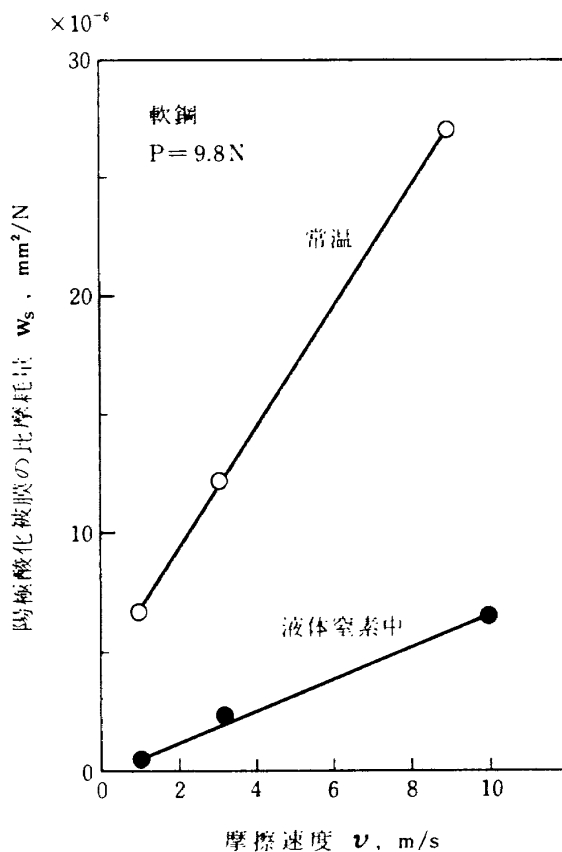


図3 陽極酸化被膜の摩耗に対する摩擦速度の影響

ほぼ線形に増加している。この傾向は常温においても、液体窒素中においても観察されており、大久保の行なった大気中での実験結果⁽³⁾とも対応するものである。また、大気中と液体窒素中でその速度特性の傾向に差がなかったことは、液体窒素の流体潤滑効果が希少である^(註)ことを意味する。

3.3 被膜厚さの影響

陽極酸化被膜の摩耗に及ぼす被膜厚さの影響を調べた。図4は、常温、摩擦速度 1m/s で軟鋼ピンに対して摩擦した、被膜厚さの異なる陽極酸化被膜の比摩耗量を示したものである。

図によれば、被膜厚さが $40 \mu\text{m}$ を下回る場合、被膜厚さが増加すると比摩耗量も増加する傾向を示す。しかしながら、被膜厚さが $40 \mu\text{m}$ 以上になると、被膜厚さが増加しても比摩耗量の増加量は僅かであり、ほぼ一定と見なせる状況にある。

3.4 摩耗状態の観察

3.4.1 PTFEピンの場合

図5は、陽極酸化被膜及びアルミニウム合金円板に対するPTFEピンの摩耗量を示したものである。それぞれ、摩擦距離 36km の時点におけるピン試片

(註) 沸点における液体窒素の粘度は $1.68 \times 10^{-4} \text{kg/ms}$ であり、常温の水の10の1程度である。

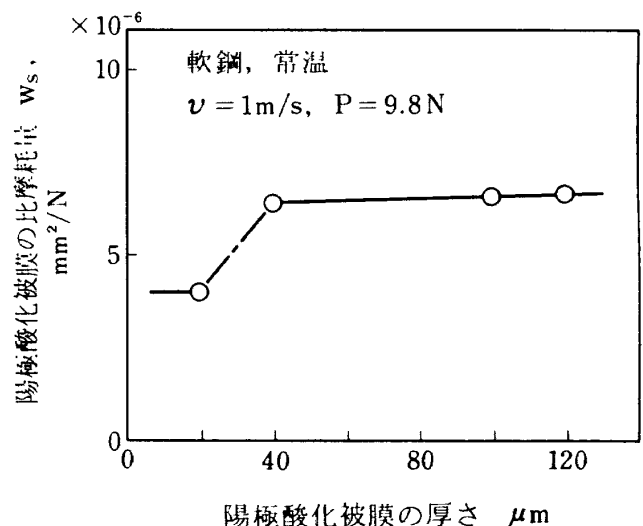


図4 陽極酸化被膜の摩耗に対する被膜厚さの影響

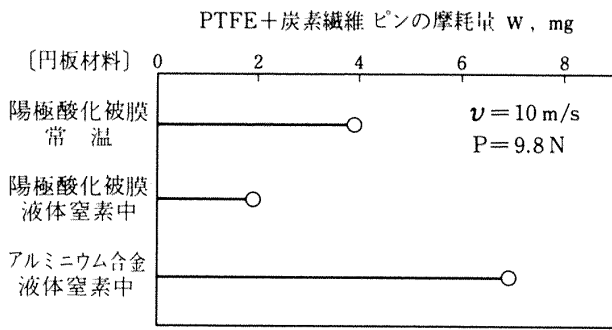


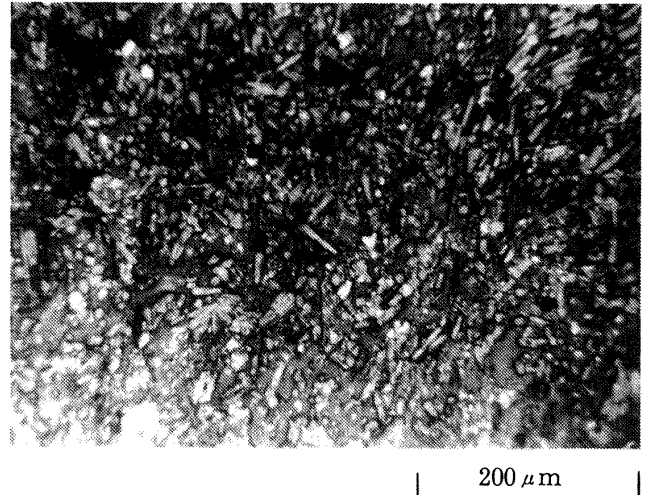
図5 炭素繊維と充てんしたPTFEピンの摩耗

の質量減少量である。陽極酸化被膜を施した円板の場合、PTFEピンの摩耗量は常温時に比べ、液体窒素中では半分程度にまで減少している。

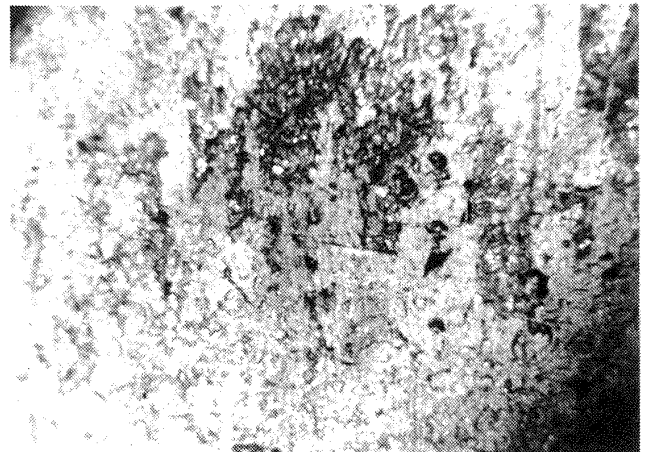
図6は、それぞれの試験後におけるPTFEピンの摩擦面顕微鏡写真の一例である。図を見ると、常温である(a)の場合、表面のPTFE母材が摩耗し、充てんされていた炭素繊維が露出しているのが分る。これに対して、液体窒素中である(b)の場合は、炭素繊維が露出せず、PTFE表面部には摩擦痕跡が明確に認められる。この結果は、極低温下でPTFE自身の機械的強度が高まり、その結果PTFEピンの耐摩耗性が向上したことを意味するものと思われる。

しかしながら、同じ液体窒素中でも被膜のないアルミニウム合金に対する場合は、PTFEピンの摩耗量が最も高い値を示した。その際のアルミニウム合金円板側の摩耗量は6mgで、比摩耗量は $6.2 \times 10^{-9} \text{ mm}^2/\text{N}$ であった。試験中に測定した摩擦係数推移の一例を図7に示す。同図(a)は被膜のないアルミニウム合金に、(b)は陽極酸化被膜に対して摩擦したときのものである。両者を比較すると明らかなように、アルミニウム合金の場合は定常時の10倍にも及ぶ突発的なピークが見られるが、陽極酸化被膜ではほぼ一定な低い値を保っている。

試験中に採集された摩耗粉を観察すると、陽極酸化被膜の場合はPTFEの微細な摩耗粉しか見られなかった。これに対して、アルミニウム合金では図8に示したような、金属様の大型摩耗粉が観察された。同様な差異は円板試片の摩擦面上にも認められた。すなわち、陽極酸化被膜摩擦面上にはPTFEの移着膜が一様に形成されたが、アルミニウム合金円板の場合は、摩擦面上に図9のような大型の移着粒



(a) 常温，陽極酸化被膜円板



(b) 液体窒素中，陽極酸化被膜円板



(c) 液体窒素中，アルミニウム合金円板

図6 炭素繊維を充てんしたPTFEピン試片の摩擦面顕微鏡写真

$V = 10 \text{ m/s}$ ， $P = 9.8 \text{ N}$

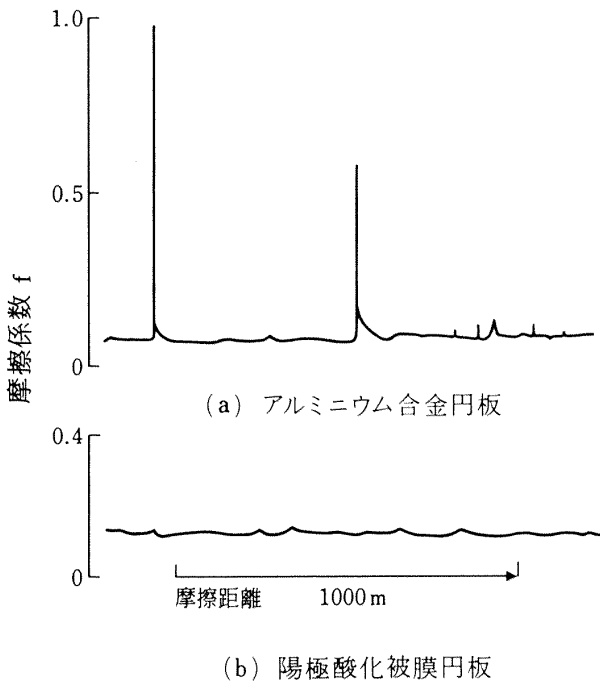


図7 摩擦係数の推移

炭素繊維を充てんした PTFE ピン
液体窒素中, $V = 10\text{m/s}$, $P = 9.8\text{N}$

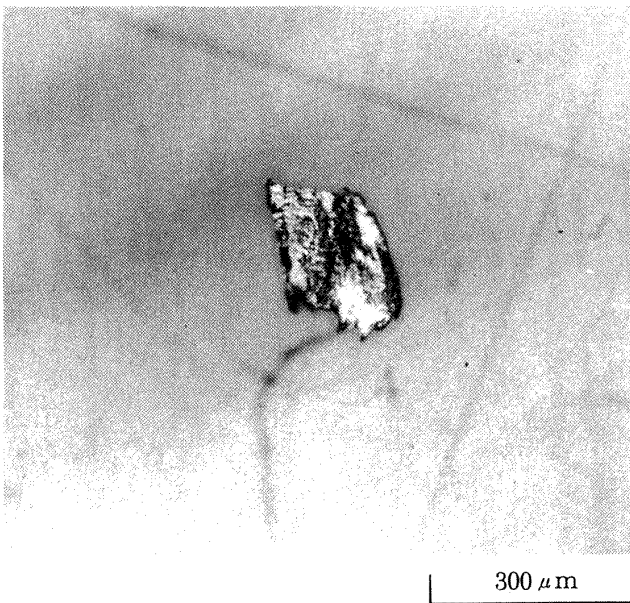


図8 摩耗粉の顕微鏡写真

PTFE + 炭素繊維ピン / アルミニウム合金円板
液体窒素中, $V = 10\text{m/s}$, $P = 9.8\text{N}$

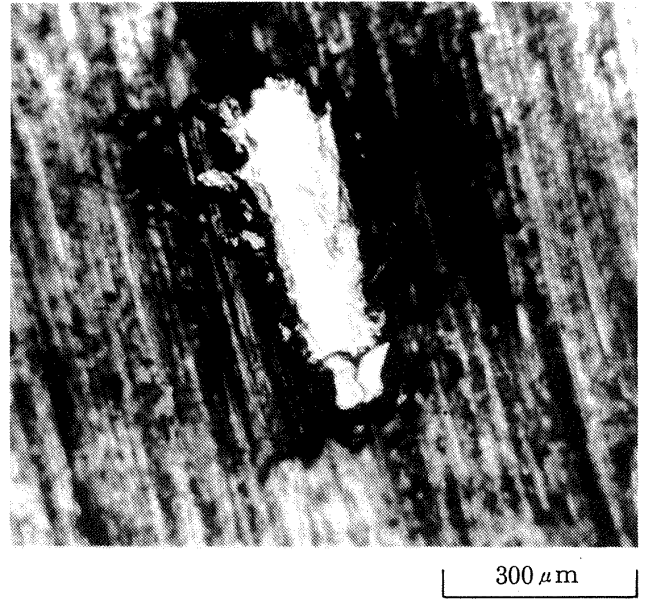
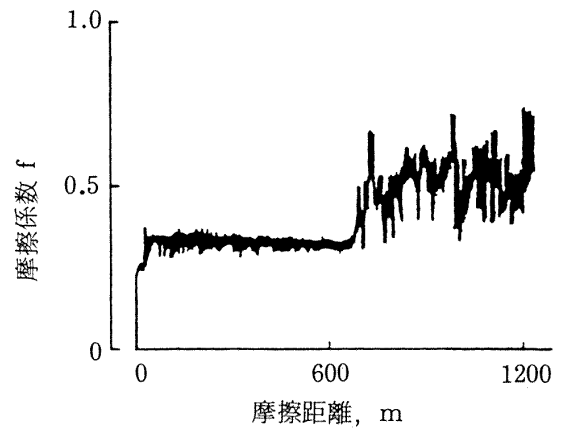
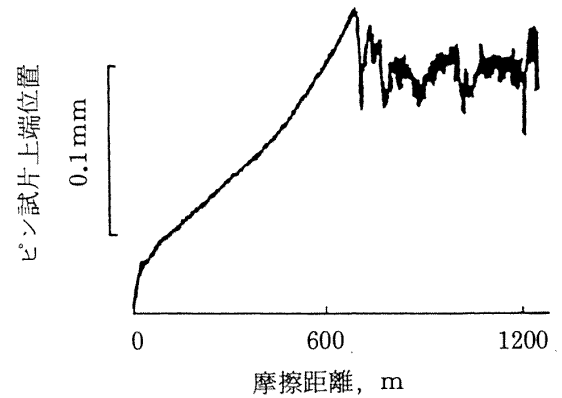


図9 アルミニウム合金円板の摩擦面顕微鏡写真
PTFE + 炭素繊維ピン / アルミニウム合金円板
液体窒素中, $V = 10\text{m/s}$, $P = 9.8\text{N}$



(a) 摩擦係数の推移

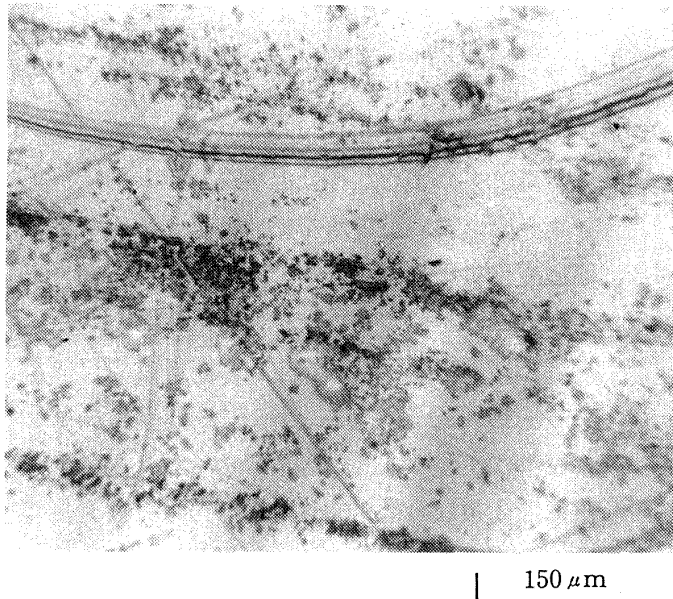


(b) ピン試片上下方向位置の推移

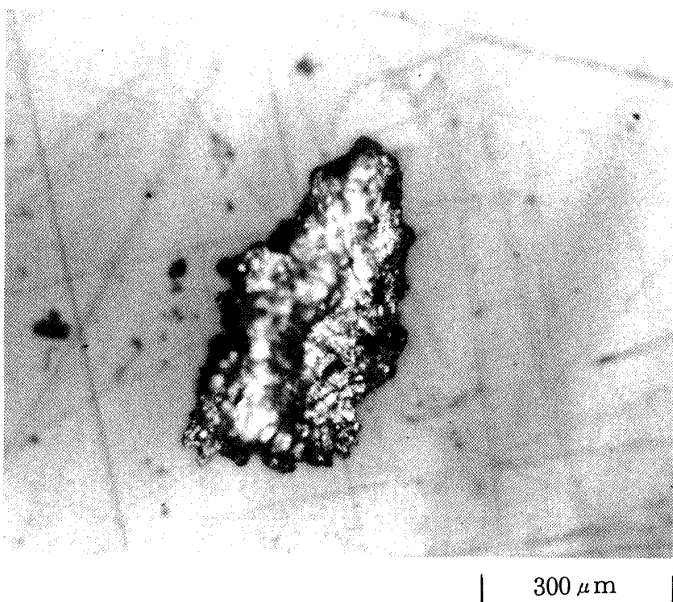
図10 陽極酸化被膜の破断に伴う変化
軟鋼ピン / 陽極酸化被膜 (を施したアルミニウム合金円板)
液体窒素中, $V = 10\text{m/s}$, $P = 9.8\text{N}$

子が観察された。またこの場合は、PTFEピンの摩擦面上にも図6(c)のような金属の移着物が見られた。

これらの観察結果は、アルミニウム合金円板の場合、ピン試片が良好な自己潤滑材であっても、摩擦面間で移着粒子の成長脱落が生じ、移着粒子の脱落に際して摩擦係数に突発的なピークが現われることを意味している。



(a) 陽極酸化被膜



(b) アルミニウム合金

図11 摩耗粉の顕微鏡写真

軟鋼ピン／陽極酸化被膜（を施したアルミニウム合金円板）

液体窒素， $V = 10\text{m/s}$ ， $P = 9.8\text{N}$

3.4.2 金属ピンの場合

次に金属ピンを用いて、陽極酸化被膜の破断する前と後での摩耗状態を観察した。図10は、液体窒素中で軟鋼ピンと陽極酸化被膜（被膜厚さ $120\mu\text{m}$ ）を施した円板とを摩擦速度 10m/s で摩擦したときの、摩擦係数(a)とピン試片上端の上下変動(b)の推移を示したものである。同図(b)の表示方法は、縦軸上方向がピン円板との近接方向、すなわち次元摩耗を意味し、縦軸下方に向うピークは移着粒子の成長によるピン試片の間欠的な持ち上がりを意味する。

図を見ると、ピン試片の上下変動及び摩擦係数の両者とも、摩擦距離 700m 付近でその挙動に明確な変化が認められる。この変化は摩擦面上の陽極酸化被膜が破断し、アルミニウム合金の地肌が露出したことを物語っている。すなわち、陽極酸化被膜との摩耗ではピン試片の上下動や摩擦係数の変動は少なく、摩耗が一様に進行する。しかし、アルミニウム合金の地肌が露出した後では、移着粒子の成長脱落に伴うピン試片の上下変動が激しく、摩擦係数もより高い値で激しく変動する。

陽極酸化被膜の破断前後において採集された摩耗粉の一例を図11に示す。同図(a)は破断前、(b)は破断後のものである。図を見ると、陽極酸化被膜の摩耗では(a)のようにアルミナの微細な白色の微粒子が観察されたが、アルミニウム合金の地肌が露出すると、(b)のようにピン試片の上下変動の大きさに見合う厚さを有した、金属様の大型摩耗粉が見られた。

以上のような特徴は、他の金属ピン材料においても共通して観察されたものである。

4. 液体酸素用ポンプでの稼動結果

一例として、高揚程液酸ポンプ羽根車のシールランナ部に陽極酸化被膜を施した場合について述べる。試作した高揚程液酸ポンプの構造及び性能については、既に発表⁽⁴⁾されているので、ここでは説明を省略する。

図12は、羽根車とその吸込部に取り付けられたインデューサの外観写真である。図中で羽根車外周部の黒色の部分が陽極酸化被膜を施した所である。この部分は、ポンプケーシングに取り付けられたウェアリングシールと対をなして、シール部を形成す

る。平均シール径は62mmで、直径シールすきまは0.15mmに設定した。ウェアリングシールは炭素繊維を充てんしたPTFE製のものである。

このポンプは水及び液体窒素を用いて最高17,500rpmまでの範囲で数時間運転され、その後、液体酸素を用いて最高15,000rpmまでの範囲で数分間運転された。運転後に測定された陽極酸化被膜部の摩耗痕断面形状を図13に示す。図を見ると、陽極酸化被

膜とPTFEの組合せにもかかわらず、陽極酸化被膜が最大50μm程度の深さにまで摩耗したことが分る。このように多大な摩耗が生じたことは、実際のポンプ内における摩擦条件が過酷な状況下にあることを裏付けるものである。

しかしながら、試験中このシール部に起因するポンプの性能劣化や、液体酸素中における着火などの事態も生ぜず、良好な運転状態を呈した。

5. 考 察

以上の実験及び観察結果から、ロケットエンジンのターボポンプのような極低温用高速ポンプに、アルミニウム合金製の羽根車を用いても、そのシール部に陽極酸化被膜を施すことで、ポンプの信頼性を確保し得ることが明らかとなった。しかしながら、前章の稼動結果によれば、相手材に良好な自己潤滑材であるPTFEを選んでも、シール部の陽極酸化被膜に摩耗が生じたことは事実である。この結果から、陽極酸化被膜の効果を考えるならば、摩耗量だけではなく、摩耗の状態あるいは摩耗粉の排出の仕方に対しても、着目せざるを得ない。

以下このような観点から、極低温液体中で作動するアルミニウム合金高速しゅう動部に、陽極酸化被膜を施すことの効果について、若干の考察を加えてみたい。

5.1 摩耗量について

さて、図2, 3, 4を見ると、ピン試片が金属材料

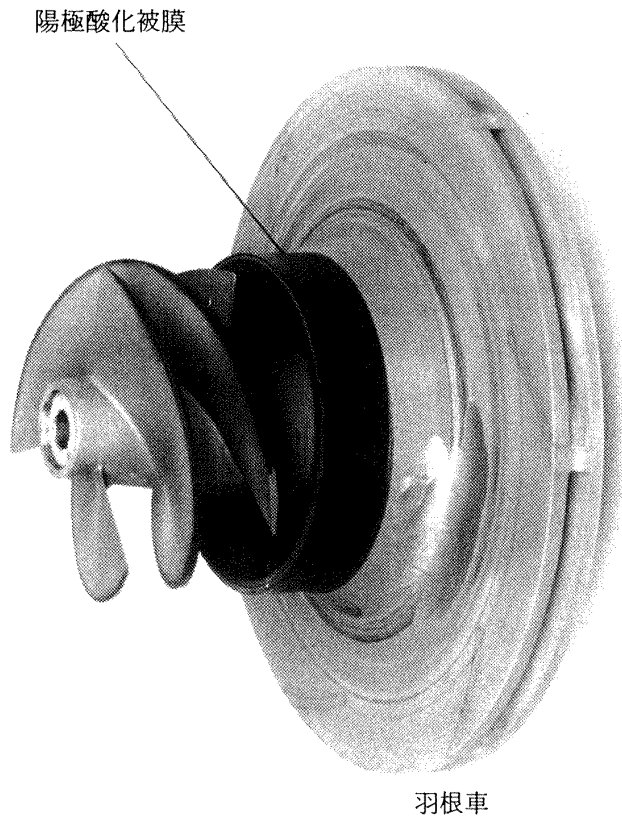


図12 高揚程液酸ポンプのアルミニウム合金(A6061)製羽根車

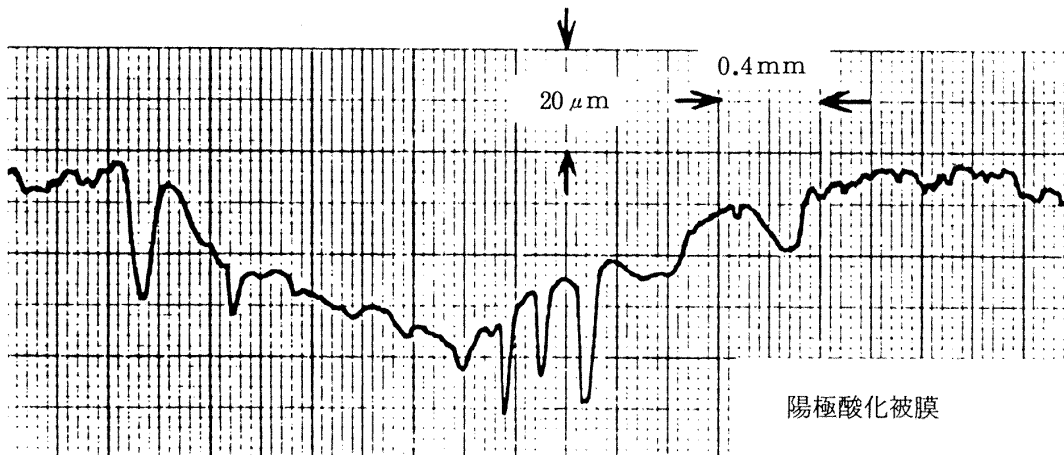


図13 羽根車陽極酸化被膜部の摩耗痕断面形状

である場合、陽極酸化被膜の比摩耗量は $10^{-6} \sim 10^{-5}$ mm^2/N のオーダーにある。この値は決して低い値とは言えない。たとえば筆者らの経験⁽⁵⁾によれば、同種金属同士のシビヤー摩耗で測定される値が、このオーダーである。確かに相手材が金属材料であっても、陽極酸化被膜の比摩耗量が $10^{-8} \sim 10^{-9}$ mm^2/N オーダーにある場合も報告⁽³⁾されている。その意味では、陽極酸化被膜の比摩耗量は、むしろ陽極酸化の条件や、アルミニウム合金材の組成及び摩擦条件によって、大いに左右されると考えるべきであろう。すなわち、本実験条件下においては、陽極酸化被膜の摩耗量を低下させるという効果に、多少とも疑問をいだかざるを得ない。

しかしながら、極低温雰囲気という条件に関しては、その影響が相手材によって異なるものの、図2の結果を見る限り比摩耗量は常温に比べ変わらないか、あるいは減少する傾向にあり、悪影響を及ぼしていない。また、図4の結果に従えば、陽極酸化の被膜厚さがある値以上になると、比摩耗量が一定値を保つという傾向がある。このような傾向は本研究だけではなく、他にも報告⁽⁶⁾されているものである。したがって、これらの結果から類推すれば、被膜厚さを十分厚くすることによって、極低温液体中においても摩耗に対する寿命を、ある程度確保することが可能であると考えられる。

5.2 摩耗状態について

それでは、陽極酸化被膜の効果とは一体何であろうか。それに対する答えを端的に示したのが図7及び図10の結果である。これらの観察結果はアルミニウム合金とその陽極酸化被膜層とで、摩耗状態が明らかに異なることを示している。ピン試片が金属材料の場合、アルミニウム合金との摩擦ではいわゆるシビヤー摩耗状態で観察される特徴⁽⁷⁾を呈した。すなわち、摩擦面間に発生した移着粒子は、大きく成長しなければ摩耗粉として系外へ脱落出来ず、その結果、図11(b)のように大型金属様摩耗粉が観察されたのである。また、移着粒子の大規模な成長脱落に伴って、図10のチャート後半のようにピン試片の激しい上下動や、摩擦係数の振動が認められた。

これに対して、陽極酸化被膜との摩耗は様相を異

にする。ピン試片の上端及び摩擦係数の変動は微小であり、摩耗粉も微細なものしか観察されなかった。図10のチャート前半及び図11(a)に示したこれらの観察結果は、移着粒子が成長の初期段階で系外に脱落することを意味しており、いわゆるマイルド摩耗を特徴⁽⁷⁾づけるものである。

ピン試片が炭素繊維を充てんしたPTFEの場合、この両者における差は更に顕著なものとなる。PTFEは極低温雰囲気においても良好な自己潤滑材料である。⁽⁸⁾しかし、アルミニウム合金との摩擦では図7(a)、図8及び図9に示したように、間欠的ではあるが移着粒子の成長脱落が生じ、摩擦係数の鋭いピークや大型金属様摩耗粉が生成されたのである。これに対して、陽極酸化被膜との摩擦では、酸化被膜摩擦面上にPTFEの移着膜が一様に形成され、摩擦係数も図7(b)のように0.1程度の低い値を保ったのである。

以上の対比により、これらの観察結果の意味することは明白であろう。すなわち、しゅう動部に陽極酸化被膜を施す効果とは、移着粒子の大規模な成長及びその結果としての、大型金属様摩耗粉の発生や摩擦係数の急激な変動を妨げるという意味で、シビヤー摩耗をよりマイルドな摩耗状態に移行させることであると理解出来るのである。

シビヤー摩耗状態が機械のしゅう動部にとって極めて有害であることは、大型移着粒子の存在が焼き付きの原因になるという報告⁽⁹⁾などからも明らかである。特に、液体酸素雰囲気では、移着粒子の大規模な成長及び脱落に伴う、摩擦係数のピークや振動による衝撃が、しゅう動部の着火を引き起こす危険性がある。実際、液体酸素用ターボポンプのしゅう動部から着火した例も報告⁽¹⁰⁾されている。また、ロケットエンジン用ターボポンプのしゅう動部は、極限的な摩擦状況下にあるが、ある限定された時間内での十分な信頼性が求められるのであるから、摩耗量そのもの以上に、摩耗の状態が重要な意味を帯びて来るものと考えられる。したがって、このような意味からいっても、陽極酸化被膜の摩耗状態を変化させる効果は、実用上極めて有効に働くものと思われる。

6. ま と め

液体窒素中で、アルミニウム合金上に施した陽極酸化被膜と4種類の材料を摩擦する実験を行ない、その摩擦挙動を調べた。その結果、極低温液体中のしゅう動部に対する陽極酸化被膜の効果は、単に比摩擦量を下げることではなく、むしろそれ以上に、摩擦係数の急激な変動や大型金属様摩擦粉の発生を妨げるという意味で、シビヤ-摩擦をよりマイルドな摩擦状態に移行させる作用にあることが明らかとなった。

本研究を行なうにあたり、多くの方々に協力を得た。原型試験機を供与された当研究所・宇宙研究グループ第9研究グループの方々、並びに、試料を製作された石川島播磨重工業(株)の関係の方々をはじめとする、皆様に厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 藤井芳郎；低温度における金属の帯脆性，金属の研究，12巻（昭和10年）pp. 189-198
- (2) 小久保定次郎；アルミニウム表面処理（昭和28）p. 189，内田老鶴園新社
- (3) 大久保敬吾；自己潤滑性陽極酸化被膜，潤滑，21巻，6号（昭和51年）pp. 403-409
- (4) 上條謙二郎ほか7名；ロケット用小形高速高揚程液体酸素ポンプの実験的研究，航技研報告TR-415（昭和50年）
- (5) 笹田直，尾池守，江森信彦；遊離粒子をはさんだすべり摩擦における摩擦過程，潤滑，27巻，12号，（昭和57年）pp. 922-929
- (6) 金属表面技術協会，金属表面技術便覧，改訂新版，（昭和51年）p. 667，日本工業新聞社
- (7) 三科博司，蒔田裕之，笹田直，野呂瀬進；純金属間摩擦粉形成における移着成長過程の諸相，潤滑，24巻，7号（昭和54年）pp. 466-472
- (8) D.W. Wisander, C.E. Maley & R.L. JQHNS ON; Wear and Friction of Filled Poly-tetrafluoroethylene Compositions in Liquid Nitrogen, ASLE Trans., Vol. 2, No. 1 (1959) pp. 58-66
- (9) 三科博司；摩擦と焼付き，機械の研究，34巻，1号（昭和57年）pp. 79-82
- (10) A.J. Letson & C. Chistian; RL10A-3-3 Rocket Engine Oxidizer Pump Development Program, PWA. FR-1890, 30, DEC (1966)

航空宇宙技術研究所報告 818号

昭和59年6月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182

印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川2-27-12

Printed in Japan