

高比強度チタン合金のトライボロジー特性

Tribological Properties of High Specific Strength Titanium Alloys

技術本部 松井 昭彦^{*1}

名古屋航空宇宙システム製作所 浜井 升平^{*2}

名古屋誘導推進システム製作所 山本 博久^{*3}

高比強度を有するチタン合金は、機器や運動部品の軽量化の要求に対して有用である。しかし、しゅう動部へ適用するにはしゅう動材としての使用限界を把握しておくこと、さらにその限界を向上させることが必要である。そこで本研究では、乾燥摩擦あるいは油潤滑条件下でチタン合金の摩擦試験を行い、そのトライボロジー特性を評価した。また、コーティングや拡散処理などの表面改質によりトライボロジー特性の向上を図った。

Titanium alloys with high specific strength are useful in saving the weight of products or moving parts. The tribological properties of titanium alloys should be evaluated and improved for their use as sliding parts. In the present study, the tribological properties of titanium alloys were evaluated in dry sliding and oil lubricated conditions. Furthermore, they were improved by surface modifications, coatings and diffusion treatments.

1. ま え が き

近年、航空宇宙製品を初め油圧ピストン、エンジン部品などの運動部品で軽量化の要求が高まっている。この要求にこたえるためには高比強度材の適用が有用であるが、そのトライボロジー特性が十分に把握されておらず、しゅう動部材設計に支障をきたしているのが現状である。

本研究では、高比強度と優れた耐食性を持っており、構造材として多用されているチタン合金を対象とした。チタン合金は、化学的活性度が高く、熱伝導度が低い。その結果、焼付きやすく、摩耗が多い欠点を持っていると言われている。また、表面の不動態皮膜は、硬化元素(C, N, Bなど)の拡散浸透やコーティング膜の基板への密着を妨げるため、トライボロジー特性の改善策である表面改質法は、鉄系材料に比べて限定される。前者では硬化層を厚くしようとすると高温処理が必要になり、母材の強度低下や変形を招く。後者はめっきや溶射など低温処理が可能であるが、密着性の点で十分とは言えない状況であり、耐摩耗表面硬化処理の開発が行われている^{(1)~(3)}。

当社においても、チタン合金に対してめっき皮膜や溶射皮膜の密着性向上を図る研究⁽⁴⁾や固体潤滑膜による潤滑技術の開発⁽⁵⁾⁽⁶⁾を行っている。本報では、チタン合金をしゅう動部材として適用する際に必要な基本的トライボロジー特性の把握とその改善への取組みを紹介する。

2. しゅう動材として必要な特性とその評価法

チタン合金をしゅう動部材として見た場合、焼付きやすいこと、これを改善するための表面改質の信頼性がないこと、表面改質により強度が低下すること⁽⁴⁾が使用上の制約となっている。

そこで、トライボロジー特性の評価及び改善を図るだけでなく、強度も把握するために摩擦試験と回転曲げ試験を実施した。試験片には、高比強度構造材として多用されているTi-6Al-4V (α - β Ti) 合金を使用した。化学成分を表1に、機械的性質を表2に示す。

摩擦試験を図1(a), (b), (c)に示した接触形態で行った。(a)と

表1 供試材の化学成分

Chemical composition of test material

化学成分, wt %							
Al	V	O	Fe	N	C	H	Ti
6.2	4.2	0.2	0.15	0.01	<0.01	0.001	Rem

表2 供試材の機械的性質

Mechanical properties of test material

引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)	硬さ (mHV)
970	920	17	330

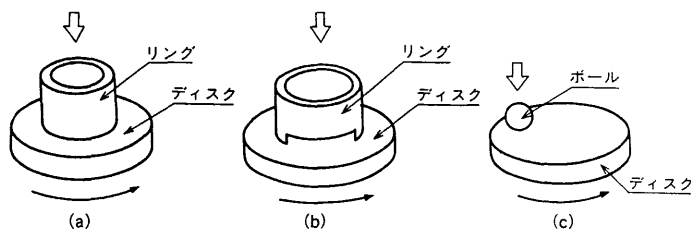


図1 摩擦試験片の接触形態 (a), (b)はリング/ディスク型の面接触, (c)はボール/ディスク型の点接触である。
Specimens for friction test

(b)はリング/ディスク型と呼ばれる面接触であり、摩耗の進行で面圧が変わらないので、一定条件での摩耗量評価や焼付き限界面圧の評価に有効である。なお、油中の試験ではリング内部に油がたまるのを防ぐため、接触面積を狭くし高面圧まで試験可能とするために、(b)のように3箇所のパッドを摩擦面とした。(c)はボール/ディスク型と呼ばれる点接触であり、後述の理由により真空中の摩擦試験に用いた。

潤滑条件は、大気あるいは真空中の乾燥摩擦及び油潤滑とした。特に、乾燥摩擦と油潤滑条件下での使用限界把握は、対象しゅう動部に無給油で用いるかどうかの重要な判断基準であり、その定量化がしゅう動部材設計には必要である。真空中では乾燥摩擦特性に強く影響を及ぼす酸化の影響を除外することができ、材料自身の特性を評価できる。また、真空中の潤滑法として有用である固

*1 長崎研究所トライボロジー研究室

*2 研究部材料研究課主務

*3 エンジン・機器部ガスタービンエンジン設計課

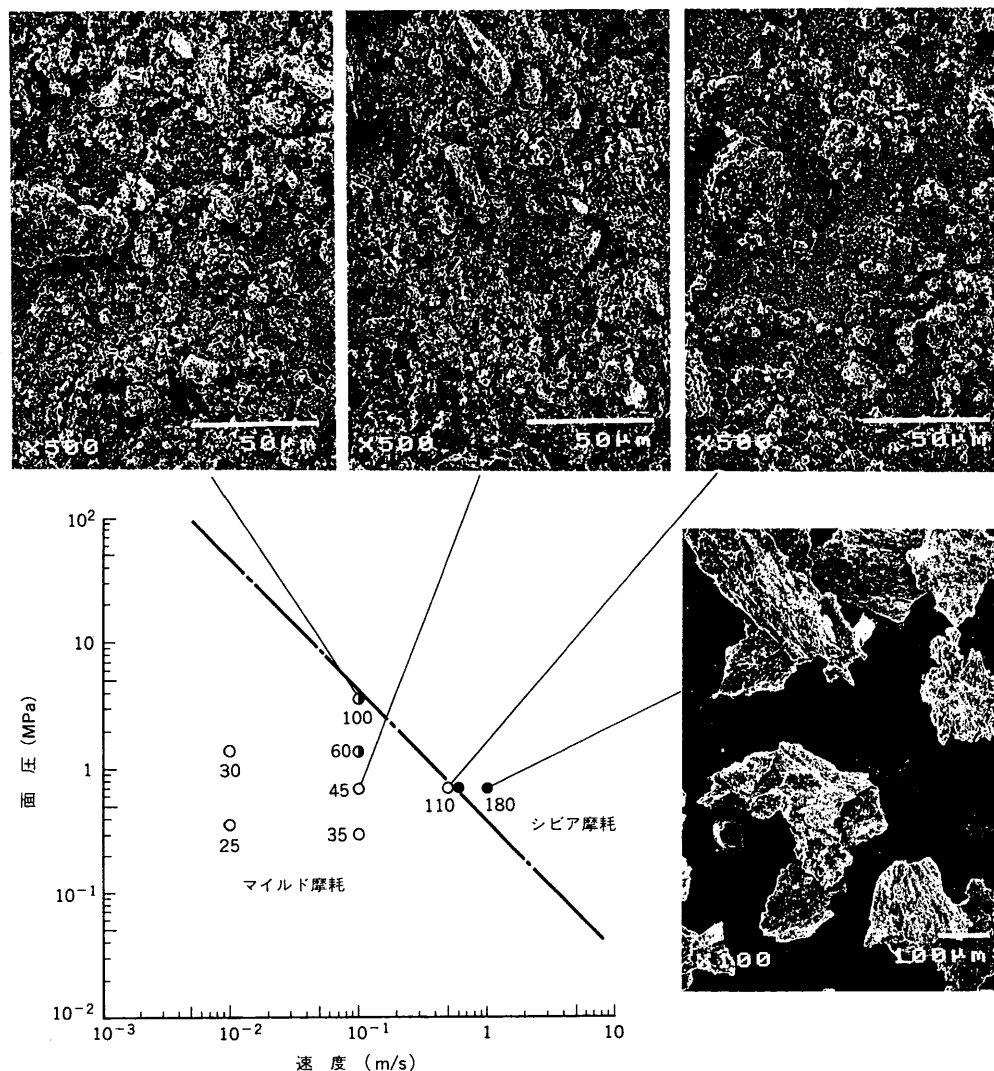


図2 乾燥摩擦下の摩耗形態分類マップと摩耗粉写真 摩擦条件によって摩耗形態は分類される。図中数字は試験片温度(℃)で、破線はPV値一定ラインである。
Wear map with photographs of wear particles

体潤滑膜開発への展開のために、潤滑膜寿命に関する報告例が多いボール/ディスク型〔図1(c)〕の接触形態とした。

以下に、各条件での摩擦試験結果と回転曲げ試験結果を述べる。

3. 大気中乾燥摩擦特性

図1(a)に示す試験片の摩擦面を研磨で $1\mu\text{mRmax}$ 目標に仕上げ、摩擦試験を行った。縦型のリング/ディスク型摩擦試験で、回転するディスクにリング端面を押付けるものである。乾燥摩擦特性は雰囲気湿度の影響を受けるので、試験部をアクリルケースで覆い雰囲気湿度を $\text{RH } 50 \pm 5\%$ に制御し、試験環境の影響を除外した。また、摩耗粉採取のための受取皿を設けた。摩擦試験中には、摩擦力と試験片温度そして摩耗の経時変化を知るために押付け軸の変位を計測した。

乾燥摩擦試験結果からチタン合金の摩耗形態を判断し、マップ化した。各しゅう動条件での摩耗粉写真とともに図2に示す。数ミクロンの微細酸化摩耗粉を排出するマイルド摩耗を○、数百ミクロンのメタリック摩耗粉を排出するシビア摩耗を●、混在と判断した形態を●で示した。面圧 0.7 MPa 、速度 0.1 m/s ではほとんどが数ミクロンの細粒で、大きいものでも $50\mu\text{m}$ 以下であるが、速度 1.0 m/s では $100\sim 500\mu\text{m}$ のフレーク状摩耗粉である。このように速度増加による摩耗形態の遷移は明らかである。

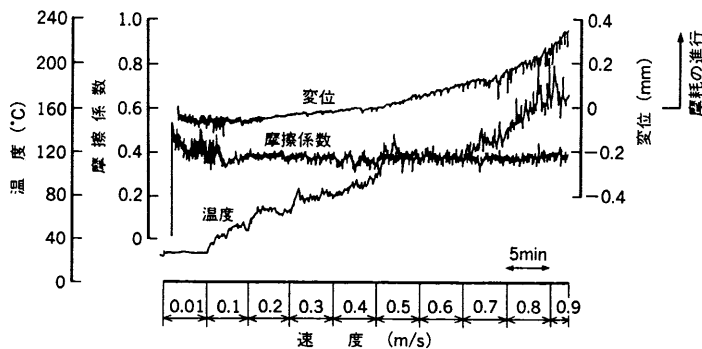
面圧 1.4 MPa 以上ではメタリック摩耗粉が認められるようになるものの、ほとんどが黒色の微細粒(マイルド摩耗粉)であり、荷重増加による摩耗形態の明りょうな遷移はなかった。図中に試験片温度(摩擦面下 1 mm)とPV(面圧×速度)一定ラインを示す。PV条件によって摩擦係数 μ に差がほとんどないので摩擦発熱 μPV が同じであり、PV値と試験片温度は対応するが、摩耗形態を仕分けるものではない。

図3(a)～(c)には、摩擦摩耗特性に及ぼす試験条件、表面酸化の影響を示す。

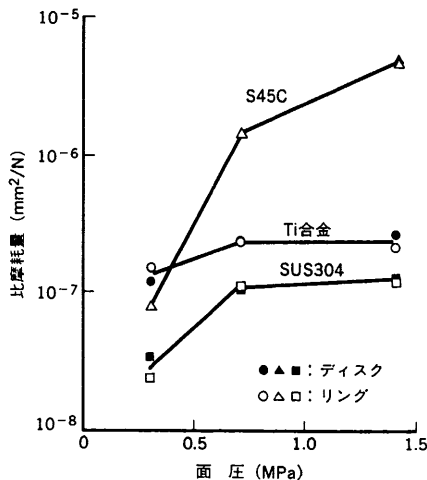
図3(a)は速度をステップアップする焼付き試験での摩擦係数、変位、温度の変化である。速度 0.6 m/s から、黒色の微粒子摩耗粉(マイルド摩耗粉)中にメタリックな摩耗粉(シビア摩耗粉)が見られるようになった。これに伴い、変位が摩耗の進行と反対に変動した。これは、メタリック摩耗粉を摩擦面にかみ込んでいるためであり、マイルド/シビア摩耗の遷移を示唆する。

図3(b)はPV一定条件で 500 m 摩擦したときの面圧と比摩耗量の関係である。なお、比較のために炭素鋼(S45C)とステンレス鋼(SUS304)の結果も示す。チタン合金では、炭素鋼に見られるような顕著な摩耗量の遷移はないが、比摩耗量は $10^{-7}\text{ mm}^2/\text{N}$ 台であり、金属材料の一般的比摩耗量と同等である。

上述の摩耗形態の考察から、酸化膜の保護作用によりマイルド



(a) 速度増加時の摩擦特性変化



(b) 比摩耗量の比較 (速度0.1m/s)

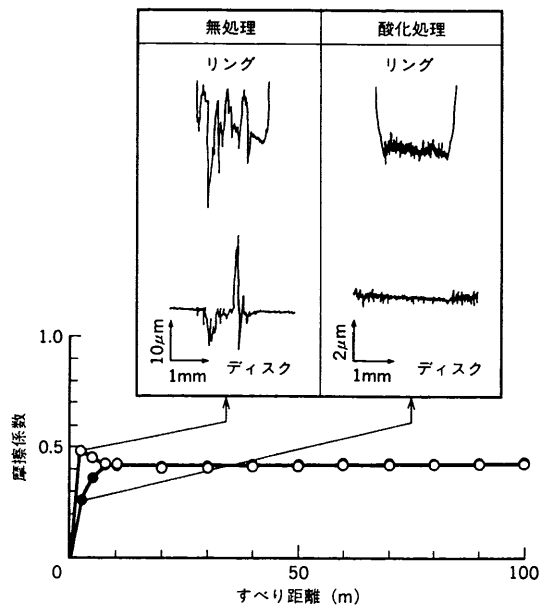
(c) 酸化処理材の摩擦特性
(面圧0.7MPa, 速度0.1m/s)

図3 大気中乾燥摩擦摩耗特性 (a)は速度増加時の摩擦特性変化を, (b)はチタン合金の比摩耗量が一般の金属材料と同等であることを, (c)は酸化処理が初期の凝着防止に効果があることを示す。
Dry friction and wear properties in air

摩耗状態を維持することが期待される。実際、酸化処理は安価な表面処理として一部で実用されているものがある。図3(c)の摩擦係数の変化と摩耗痕(こん)プロフィールから分かるように、酸化処理材では、摩擦初期の摩擦係数が低く、摩擦面の凝着防止に効果を発揮している。しかし、本試験条件で10m摩擦後は酸化膜が摩滅しその効果はなくなっている。

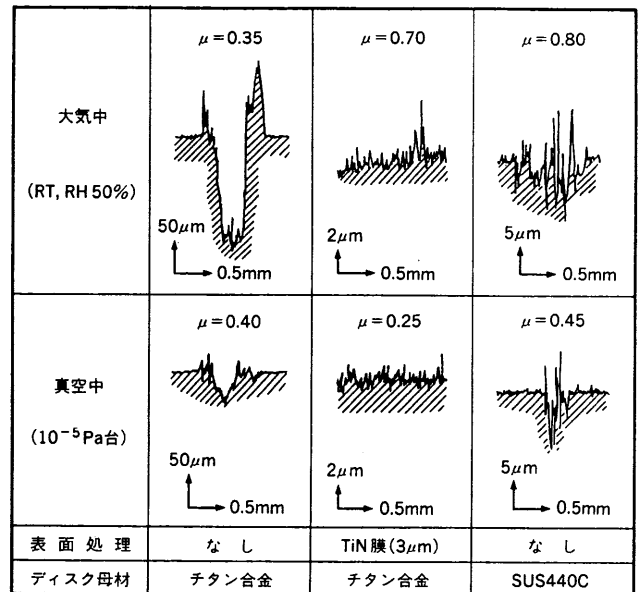


図4 大気及び真空中乾燥摩擦摩耗特性(荷重2.5N, 速度0.5m/s) SUS440Cボールを相手材とした摩擦試験後の各種ディスク摩擦痕プロフィールと摩擦係数 μ を示す。
Dry friction and wear properties in air or vacuum

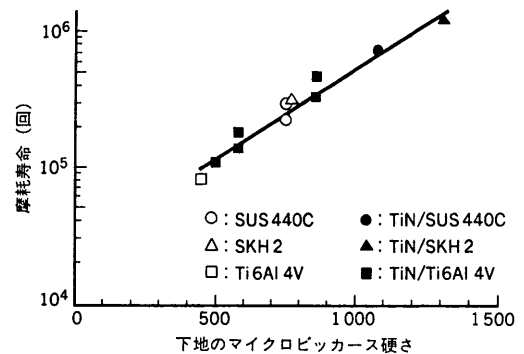


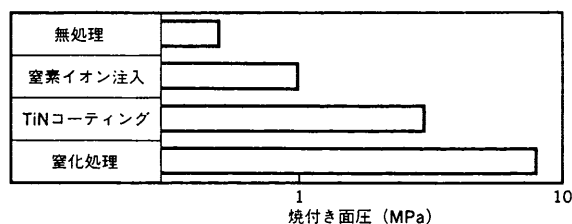
図5 MoS₂膜の真空中摩耗寿命と下地硬さの関係
チタン合金基板へのTiNコーティングにより、MoS₂膜の摩耗寿命を向上させることができる。
Relation between wear life of MoS₂ films and surface hardness

4. 真空中乾燥摩擦特性

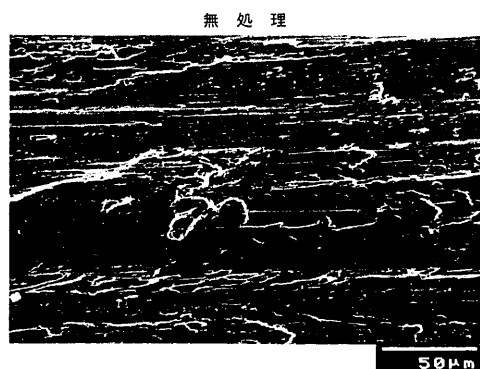
図1(c)に示すように、直径約8mmの高硬度ステンレス鋼(SUS440C)ボールを押付けるボール/ディスク摩擦試験を大気中あるいは真空中で行い、雰囲気及び材質の影響を調べた。図4に摩擦試験後のディスク摩擦痕プロフィールと摩擦係数 μ を示す。

チタン合金は摩耗粉の排出が進む大気中では、摩耗痕深さは約150μmと深い、真空中では相手材へ移着したままで摩耗は少ない。TiNコーティング材は、ほとんど摩耗せず真空中の摩擦係数は0.25と低い。大気中の摩擦係数は高くなっているが、これはボール材がTiN表面に移着し同種材同士のしゅう動になったためである。

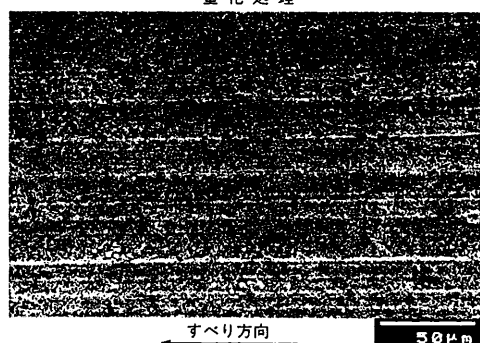
真空中の潤滑法として固体潤滑膜が知られるが、これまで二硫化モリブデン膜の成膜条件、基板材、密着性改善を検討し、寿命向上を図った⁽⁵⁾⁽⁶⁾。図5に、二硫化モリブデン膜の摩耗寿命と下地硬さの関係を示す。チタン合金基板の場合には、高硬度のSUS440CやSKH2基板に比べて寿命は短い、基板表面にTiN膜を形成し下地硬さを高めることで寿命を向上させること



(a) 油潤滑下焼付き面圧 (速度1m/s)



無 処 理



窒 化 処 理

(b) ディスク摩擦面写真

図6 表面改質による耐焼付き性の改善 表面改質により焼付き面圧は向上し(a), 摩擦面の損傷は低減される(b).
Improvement of anti-seizure properties by surface modifications

ができた。

5. 油潤滑条件での焼付き限界

図1(b)に示すように、リングに高さ2mm、幅6mmのパッドを3箇所設け摩擦面とした。速度1m/sで、荷重をステップアップしたときの焼付き面圧を図6(a)に示す。表面改質していないチタン合金の焼付き面圧0.5MPaに対し、イオン注入材は1MPaと効果は小さいが、TiNコーティング材は3MPa、窒化処理材は8MPaと向上する。なお、摩擦相手材(リング)は表面改質していないチタン合金である。

図6(b)は回転するディスク摩擦面の走査電子顕微鏡写真である。無処理材は面圧0.5MPaで損傷を受けているのに対し、窒化処理材は面圧7MPa(焼付き前の面圧)でも損傷はない。

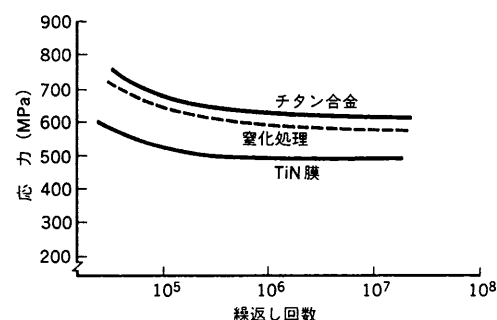


図7 表面改質チタン合金の疲労強度 コーティングあるいは表面の拡散処理によりチタン合金の疲労強度は低下する。
Fatigue strength of surface modified titanium alloys

6. 表面改質チタン合金の機械的性質

高比強度材としてチタン合金を実用する以上、トライボロジー特性の改善だけでなく強度の確保は重要である。小野式回転曲げ試験による疲労強度評価で、母材に比べてCrめっきでは約10%、Mo溶射では約20%疲労限が低下する結果を得ている⁽⁴⁾。

焼付き限界を紹介したTiNコーティング、窒化処理材の疲労強度を図7に示す。TiNコーティングで約18%疲労限が低下しているのに対し、窒化処理では約5%とほとんど低下していないことが分かる。

7. む す び

チタン合金及びその表面改質材の乾燥摩擦あるいは油潤滑条件でのトライボロジー特性を評価し、使用限界を明らかにした。特に、母材に比べて疲労限の低下が約5%と小さい窒化処理で、油潤滑の焼付き限界約15倍向上を実現した。

このように表面改質によりそのトライボロジー特性を向上させることができるが、耐久性向上と強度低下への影響を低減することが今後の課題である。

参 考 文 献

- (1) 塚原靖夫, 日本機械学会第68期通常総会講演会資料集, Vol.D (1991-3, 4) p.99
- (2) Rowntree R. A., Advanced Tribological Coatings for High Specific Strength Alloys, NCT Report No.3789/607 (1989)
- (3) Budinski K. G., Tribological Properties of Titanium Alloys, Wear of Materials ASME (1991) p.289
- (4) 木村君男ほか, チタン合金の表面硬化法の研究, 三菱重工技報 Vol.12 No.2 (1975) p.1
- (5) 松井昭彦ほか, 真空中における潤滑技術の開発—二硫化モリブデン固体潤滑膜の潤滑特性評価と長寿命化—, 三菱重工技報 Vol.28 No.6 (1991) p.573
- (6) Matsui A. et al., Improvement of Tribological Properties of MoS₂ Films by Forming Interlayers and/or Bombarding with Ions, MRS Symp. Proc. 239 (1992) p.605