

# 時効処理を施したチタン合金の摩擦摩耗特性

## *Tribological Properties of Aging Treated Titanium Alloy*

道山 泰宏\* 出水 敬\*\*  
Yasuhiro Michiyama Kei Demizu

(2010年6月7日 受理)

This study examines the tribological properties of a titanium alloy. Especially, the effects of aging treatment on the tribological properties, such as wear amount and coefficient of friction, were investigated systematically for the beta type titanium alloy (Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al). Accelerated aging treatment was conducted at temperatures of 350–550°C for 2–72 hr after solution treatment at 850°C for 2 hr. A ball-on-flat type friction and wear tester were used to evaluate tribological properties at 25°C and 50%RH under a dry sliding condition in which an SUJ2 steel ball was used as the counter-face material. Microvickers hardness values of the titanium alloys with aging treatment were 260–440 HV. The wear amount and the hardness of the titanium alloy did not correlate linearly. The wear amount values of the titanium alloys were almost identical in the treatment range of 450–550°C for 16–48 hr. The wear amount of the titanium alloy was affected by the precipitation morphologies of the alpha phase.

**Key words:** tribology, titanium alloy, aging, precipitate hardening, wear, friction

### 1. はじめに

チタン材料は、比強度が高い、耐食性が高いなどの優れた特性をもつため、産業機械部品、自動車部品などの分野へ用途が拡大している<sup>1)</sup>。しかし、鉄鋼材料に比べて耐摩耗性に劣るため、しゅう動部品への適用を見送られる場合が多い。それは、チタン材料が鉄鋼材料に比べ、軟らかく、熱伝導率が低く、非常に活性であり相手材と凝着を起しやすいたことが原因である。したがって、しゅう動部品への適用を図るには、その耐摩耗性の改善が必要とされる<sup>2)</sup>。

最近、チタン材料の耐摩耗性改善を目的とした表面改質に関する研究開発が盛んに進められるようになってきた<sup>3)</sup>。一方、耐摩耗性を改善するもう一つの方法として、表面のみを改質するのではなく、母材全体を硬化させる時効硬化処理がある。時効処理は時効条件により強度特性がさまざまに変化するので、所望の強度レベルに応じて時効条件を選定することが可能であ

る<sup>4)</sup>。ところが、時効処理の影響に関する報告の多くは、引張強さや伸びに対するものであり、摩擦摩耗特性に関する報告はほとんどない。

そこで本研究では、時効処理が可能なβ型チタン合金を選定し、さまざまな条件下で時効処理を行って摩擦摩耗特性について検討した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 試料

本実験では、時効処理ができるチタン合金であるβ型チタン合金 Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al (以後 15-3) を試料として用いた。このチタン合金の組成を Table 1 に示す。

入手材を 850°C, 2 h の条件で溶体化処理した後、

**Table 1** Chemical composition of 15-3 alloy used. (mass%)

| V    | Cr   | Sn   | Al   | Ti   |
|------|------|------|------|------|
| 15.0 | 3.05 | 3.06 | 2.99 | Bal. |

\* 機械金属部 金属材料系

\*\* 情報電子部 信頼性・生活科学系

**Table 2** List of specimens.

|                |    | Aging temperature (°C) |        |        |        |        |
|----------------|----|------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                |    | 350                    | 400    | 450    | 500    | 550    |
| Aging time (h) | 0  | 000-00                 |        |        |        |        |
|                | 2  | 350-02                 | 400-02 | 450-02 | 500-02 | 550-02 |
|                | 4  | 350-04                 | 400-04 | 450-04 | 500-04 | 550-04 |
|                | 8  | 350-08                 | 400-08 | 450-08 | 500-08 | 550-08 |
|                | 16 | 350-16                 | 400-16 | 450-16 | 500-16 | 550-16 |
|                | 24 | 350-24                 | 400-24 | 450-24 | 500-24 | 550-24 |
|                | 48 | 350-48                 | 400-48 | 450-48 | 500-48 | 550-48 |
|                | 72 | 350-72                 | 400-72 |        |        |        |

6×20×2 mm に機械加工し平板試料とした。

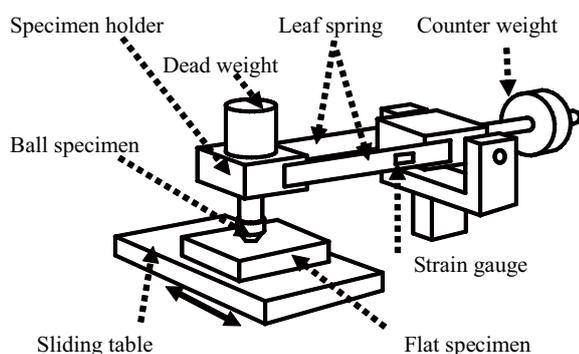
## 2.2 時効処理

マuffle炉を用いて後述する時効処理条件の温度および時間で加熱，水冷した。すべての処理は大気中で行った。

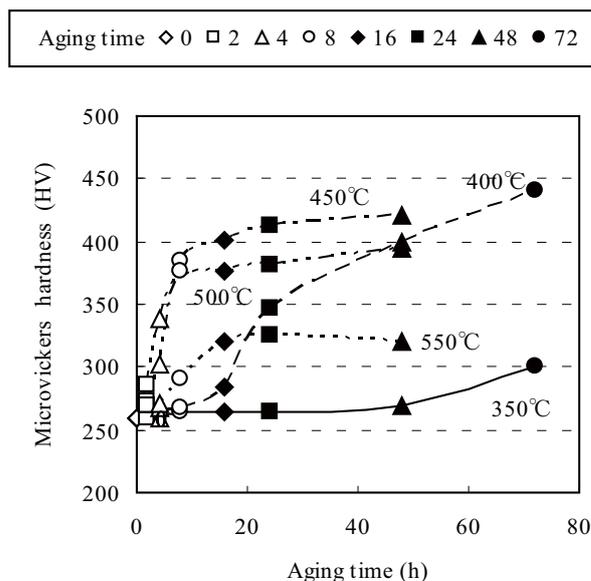
時効処理温度は 350°C，400°C，450°C，500°C および 550°C の 5 種類とし，それぞれの温度で処理時間を 2 h，4 h，8 h，16 h，24 h および 48 h とした。350°C，400°C については更に 72 h を加えた。今回，時効処理によって得られた試料が多種あるため，時効温度，時間別にそれぞれを簡略化して試料名とした。その試料名を表にまとめたものを Table 2 に示す。得られた試料の硬さ試験，組織観察，X 線回折をそれぞれ行った。

## 2.3 摩擦摩耗実験

Fig. 1 に示すような Ball-on-Flat 型往復動式摩擦摩耗試験機を用いた。平板試料 (Flat) であるチタン合金は，エメリー紙で 2000 番まで研磨 (Ra=0.03 μm) してエチルアルコールで洗浄し，乾燥させた。摩擦相手材 (Ball) は，相手材として摩擦摩耗試験に多く用いられる鋼球 (SUSJ2，直径 4.76 mm) を用いた。鋼球は，防錆油など



**Fig. 1** Schematic drawing of the ball-on-flat type friction and wear tester.



**Fig. 2** Age hardening behavior at 350-550°C in the solution treated specimens.

による汚れを取り除くため，ヘキサン，アセトン，エチルアルコールでそれぞれ 10 min の超音波洗浄を行い，乾燥させてから試験機に取り付けた。実験条件は，荷重 0.98 N，振動数 1 Hz，振幅 5 mm，摩擦距離 36 m，無潤滑，大気中 (温度 25°C，湿度 50%RH) とした。実験は，各試料につき 4 回行った。実験後の試料に対して表面粗さ計による三次元断面形状測定を行い，摩耗体積を算出した。また，4 回の実験の摩耗体積を平均して，各試料の摩耗量とした。

## 3. 実験結果

### 3.1 硬さ試験結果

時効処理時間と硬さの関係を図 2 に示す。処理時間による硬さの変化は，各時効処理温度において異なっている。本実験で得られた試料のうち，最も高い硬さは，400°C，72 h 処理 (400-72) において得られる 440HV である。350°C で処理した試料の硬さは，処理時間とともに上昇するが，72 h 処理を行っても 300HV であり，増加量はわずかである。450°C，500°C および 550°C で処理した試料の硬さは，処理時間が 16 h までは上昇するが，それ以上処理時間を延長してもそれぞれの硬さは変わらない。550-48 は，550-24 よりも硬さが下がっていることから過時効であると思われる。溶体化処理材 (000-00，260HV) を種々の条件で時効処理することによって 260 ~ 440HV の範囲の硬さを有する試料が得られる。

### 3.2 組織観察結果

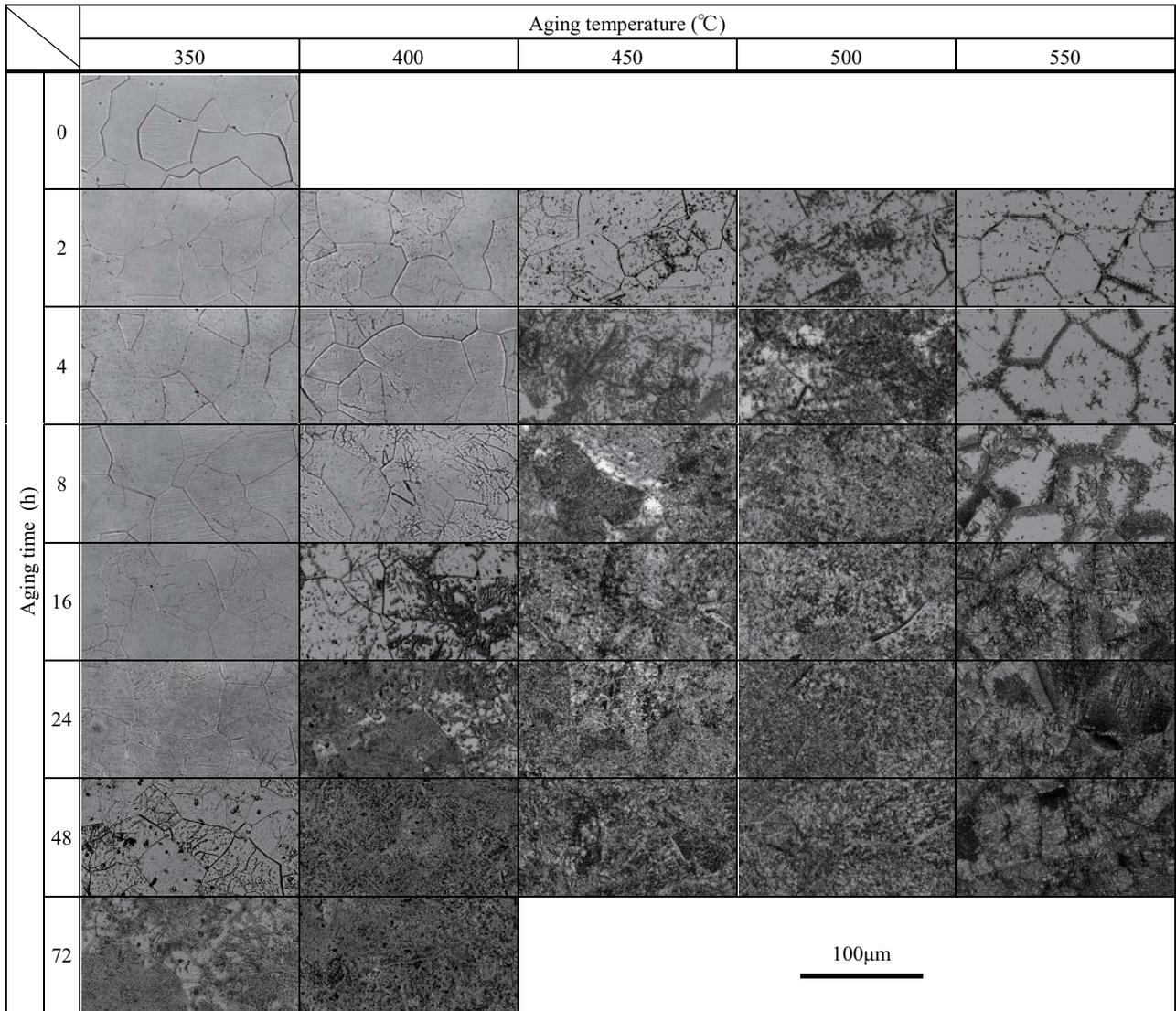


Fig. 3 Optical micrographs of titanium alloy.

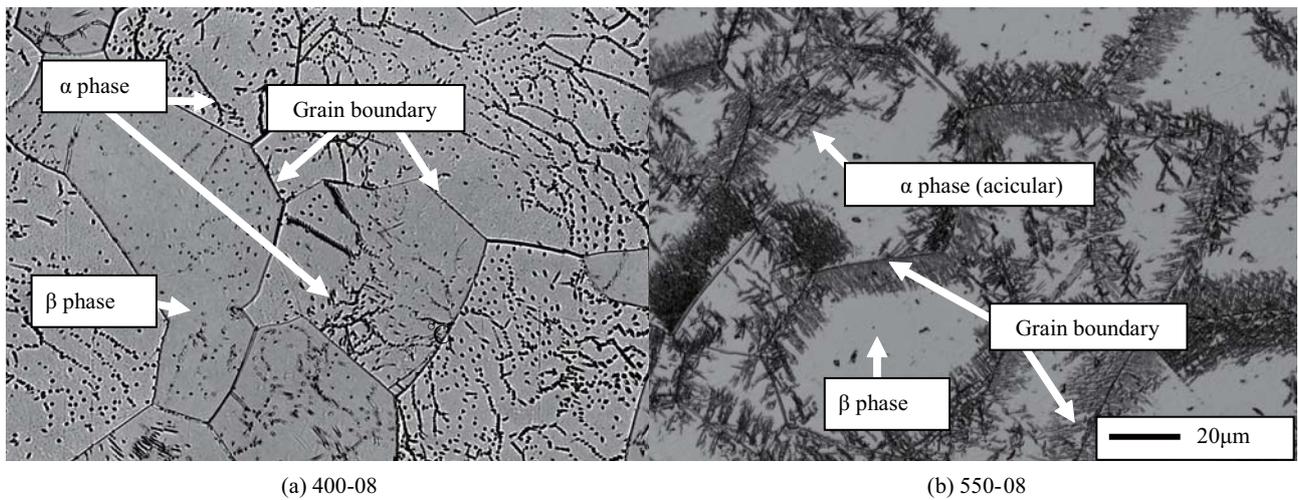


Fig. 4 Optical micrographs of the specimens aged at (a) 400°C for 8 h and (b) 550°C for 8 h.

組織観察結果を Fig. 3 および Fig. 4 に示す。Fig.4 (a), (b) は Fig. 3 の 400-08, 550-08 を拡大したものである。本実験で使用したチタン合金は、溶体化処理材

の 000-00 からわかるように 50 ~ 100 μm の混粒組織である。どの時効処理温度をみても時間が経過するにつれて β 相である母相から第 2 相である析出物がみら

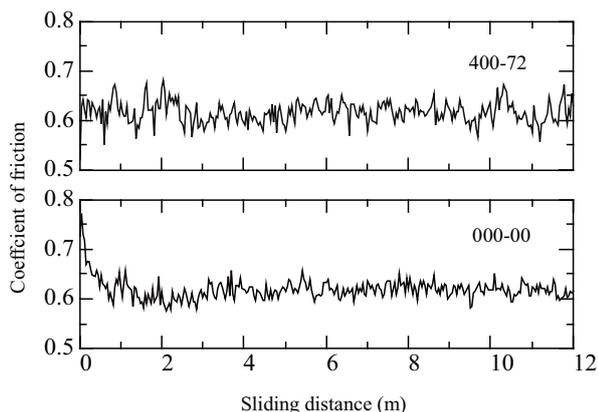


Fig. 5 Relation between sliding distance and coefficient of friction.

れる。この析出物はX線回折によって $\alpha$ 相であると確認できた。350℃から500℃までは、たとえば400-08(Fig. 4(a))のように、析出物が結晶粒内から析出しているが、550℃においては、Fig. 4(b)に示すように結晶粒界から析出している。また550℃は析出物が針状になっており、他の処理温度とは異なった析出形態である。

### 3.3 摩擦摩耗実験結果

摩擦距離と摩擦係数の関係の一例をFig. 5に示す。000-00の摩擦係数は、試験開始直後が0.8付近であり、摩擦距離が1 m以降になると0.6付近に下がり、以後は一定(定常状態)になる。400-72の摩擦係数は、試験開始直後の変動がみられない。他の試料の摩擦係数の挙動も上記の2種類に大別される。

硬さと摩耗量の関係をFig. 6に示す。溶体化処理材(000-00)の硬さと摩耗量は、それぞれ260HVと0.030 mm<sup>3</sup>である。硬さが260~300HVの試料の摩耗量は、000-00より多いものも少ないものもあり硬さと摩耗量の相関は認められない。それに対して300HV以上の試料の摩耗量は、時効処理温度別でみれば硬さの増加に伴い減少する傾向にある。しかし、すべての試料を比較すると最も摩耗量が少ない試料は、最も硬い400-72(440HV)でなく、550-48(321HV)である。

Fig. 7に350~450℃で処理した試料の時効処理時間と摩耗量の関係を示す。エラーバーは、摩耗量のばらつきを示している。いずれの処理温度においても時効処理時間が16 h以下の試料の摩耗量は、ばらつきが大きい。しかし、時効処理温度が400℃および450℃で処理時間が16 hを超える試料の摩耗量は、ばらつきが小さい。また、時効処理温度が500℃および550℃の試料の時効処理時間と摩耗量の関係は、Fig. 7(c)の450℃の試料と同じ傾向であった。

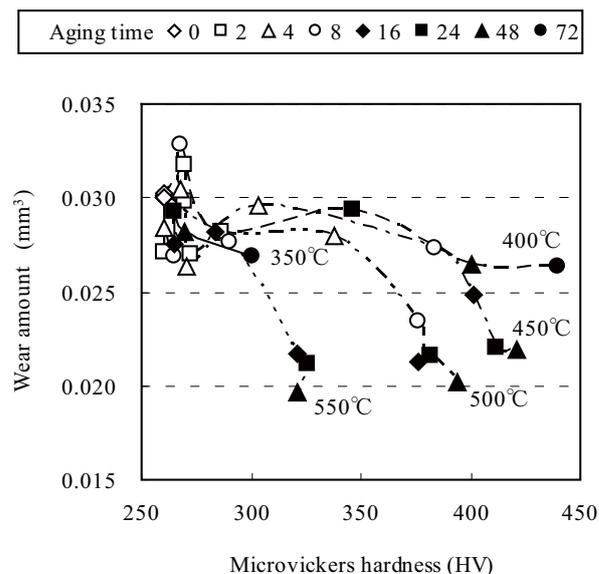


Fig. 6 Relation between microvickers hardness and wear amount.

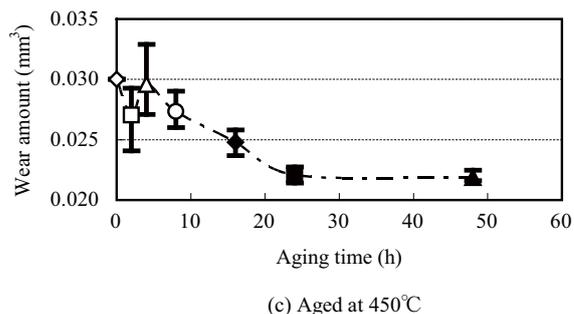
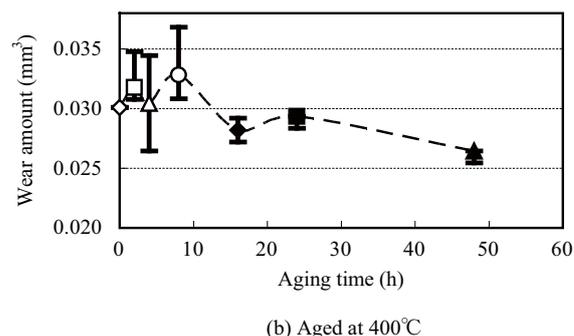
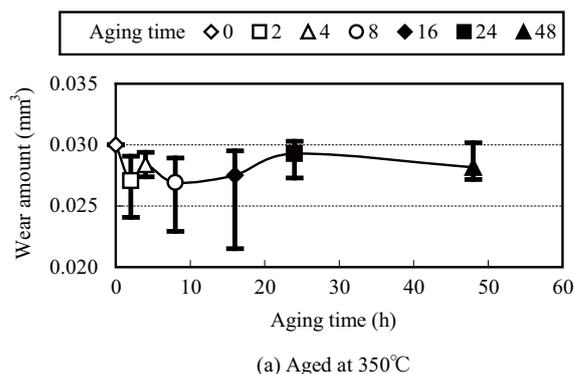


Fig. 7 Relation between aging time and wear amount.

### 4. 考察

Fig. 6 に示す硬さと摩耗量の関係から、単に硬ければ摩耗量が減少するわけではないことがわかった。

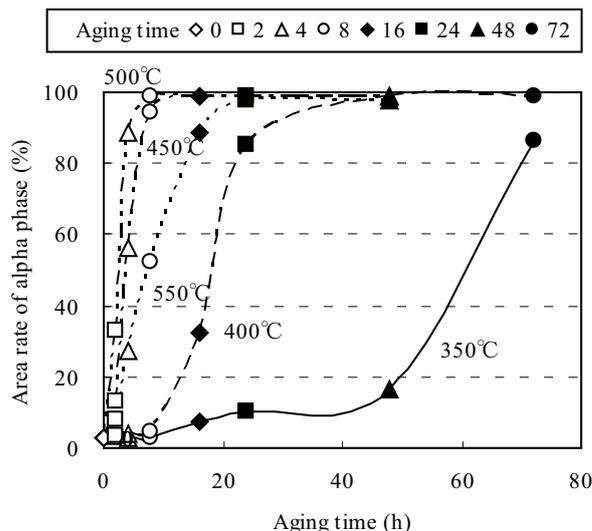
一般に時効硬化する金属は、母相中に GP ゾーンを形成して結晶をひずませて硬化する<sup>5)</sup>。本実験で用いたβ型チタン合金は、母相からα相が析出することで硬化するが、処理条件によっては多量に析出して過時効となり軟化する場合もある。チタン合金の時効硬化による機械的性質の変化は、α相の析出状態(析出量, 大きさ, 分布状態)に影響すると報告されている<sup>6-9)</sup>。このため摩耗量の変化についてもα相の析出量や分布状態などが影響する<sup>10)</sup>と考えられる。

Fig. 3 のα相の析出量を明瞭にするため、母相であるβ相を白、析出物であるα相などを主とした母相とは色が異なるものすべてを黒として二値化を行い、画像解析から簡易的にα相の面積率を求めて定量化を行った。したがって、実際のα相、β相の比率とは異なるが、面積率からα相の析出状態をおおまかに把握することができる。このα相の面積率と時効処理時間の関係を Fig. 8 に示す。溶体化処理材である 000-00 の面積率は 3% となっているが、これは二値化において、結晶粒界なども黒と認識してしまうためである。350℃で処理した試料を除き、いずれの試料もα相は、時効処理時間が増すにつれ多くなり、やがて飽和状態に達している。

α相の面積率と摩耗量の関係を Fig. 9 に示す。摩耗量の少ない 550-48 の面積率は 98% である。550℃以外の試料の摩耗量は、α相の面積率がほぼ 98% 以上になると減少している。この結果から、摩耗量の減少に効果があるのは、母相中に析出するα相の分布状態が、部分的ではなく全面に多く析出した状態のみと考えられる。

摩擦係数は Fig. 5 に示すように 2 種類の挙動に大別された。摩擦係数と組織観察結果を対比させると、α相の面積率がおよそ 50% 未満のものは、000-00 のように初期変動(初期 0.8 → 定常 0.6)を示し、それ以上のものは 400-72 のように初期変動がないことがわかった。これらのことから摩擦初期において、析出物の存在が摩擦係数を下げていると考えられる。

15-3 チタン合金の時効による析出挙動は、溶体化処理の状況により異なると報告されている<sup>11)</sup>。本研究で調製(溶体化処理および時効処理)して得られた結晶粒の平均粒径が 50 ~ 100 μm 程度のチタン合金の場合には、析出したα相が結晶粒全体に存在していれば、硬さ増加に寄与していない過時効であっても初



られた結論を示す。

- (1) 種々の時効処理によって異なる硬さのチタン合金が得られた。その硬さと摩耗量には、一様な相関が認められなかった。
- (2) 組織写真の画像解析によって得られた $\alpha$ 相の面積率から、 $\alpha$ 相が母相中に析出して、面積率が98%以上になると摩耗量が低下する傾向がわかった。
- (3)  $\alpha$ 相の面積率が50%未満の試料は、摩擦係数に初期変動をともなう摩擦挙動を示すが、50%以上の試料は、初期変動をともなわず、すぐに定常状態に推移した。
- (4) 時効処理条件が温度450～550℃、時間16～48 hの範囲の試料において、摩耗量は硬さの差に依存せずほぼ同じ値を示した。
- (5) 時効処理温度400～550℃において、摩耗特性の安定した(摩耗量のばらつきが小さい)材料を得るには、16 h以上の時効処理が必要である。また、 $\alpha$ 相を多く析出させれば軟化した過時効

試料であっても耐摩耗性が向上した。

## 参考文献

- 1) (社)日本チタン協会編：現場で生かす金属材料シリーズチタン，工業調査会(2007)18.
- 2) 中山武則，加藤 淳，漆原 亘，寺田好則：金属，**66**，11(1996)986.
- 3) (社)日本チタン協会編：チタンの加工技術，日刊工業新聞社(1992)178.
- 4) (社)日本塑性加工学会：チタンの基礎と加工，コロナ社(2008)46.
- 5) 不二越熱処理研究グループ：知りたい熱処理，ジャパンマシニスト社(1992)31.
- 6) 稲葉輝彦，飴山 恵，時実正治：日本金属学会誌，**54**，8(1990)853.
- 7) 稲葉輝彦，飴山 恵，時実正治：日本金属学会誌，**56**，8(1992)881.
- 8) 宗木政一，河部義邦，貝沼紀夫，高橋順次：日本金属学会誌，**55**，2(1991)158.
- 9) 宮野公樹，則村貴洋，稲葉輝彦，飴山 恵：日本金属学会誌，**71**，5(2007)469.
- 10) 松井昭彦：トライボロジスト，**40**，2(1995)173.
- 11) H.Fujii and H.G.Suzuki: JIM, **34**，4(1993)373.