

前方軸-後方缶押し鍛造によるチタン合金の トライボロジーの温度依存性の研究

静岡大学 工学部機械工学科

教授 早川 邦夫

(2018年度 一般研究開発助成 AF-2018005-B2)

キーワード：トライボロジー，チタン合金，凝着

1. 緒言

チタン製ボルトは、強度や耐食性など、様々な特性に優れており、機械構造物や医療用等の締結に使用されている。チタン製ボルトは、低・中強度の純チタンボルト、高強度（引張強さ 825 MPa 以上）の α - β 型チタン合金ボルト、 β 型チタン合金ボルト¹⁾ の 3 種類が存在する。

生産実績が多い Ti-6Al-4V が代表的な α - β 型チタン合金ボルトは、高い強度と高延性が必要とされ、組織の等軸微細粒化を狙い、 α - β 域温間多段鍛造工程によって成形されるが、その前方軸押し工程で、凝着や焼付きが発生し、成形が困難となる場合が多い。

本研究では、 α - β 型チタン合金ボルトの温間前方軸押し型のトライボ特性を評価するため、塑性変形の様式が同様な温間前方軸-後方缶押し（以後 RC と略称）型摩擦試験法を開発し、それを使用して、大気酸化によって酸化膜を形成させた α - β 型チタン合金の前方押し鍛造におけるトライボ特性の温度依存性に関する研究を行った。

2. チタン合金の温間前方軸-後方缶押し型摩擦試験法の開発

2.1 ボルトの多段鍛造工程

図 1 は、一般的なボルトの多段鍛造工程を示す。第 1 工程はねじ転造下径を成形するボルト軸部の前方軸押し、第 2 工程はボルト頭部の予備据込み、第 3 工程は頭部ソケットを成形する後方せん孔である。 α - β 型チタン合金ボルトの温間多段鍛造においても同様な工程設計が行われるが、特に第 1 工程の前方軸押しで凝着や焼付きが激しく、切削工程に置き換えられる場合が多い。 α - β 型チタン合金の温間の前方軸押しを可能にするため、種々の鍛造条件でトライボ特性の評価が行える摩擦試験法を開発を行った。

2.2 前方軸-後方缶押し型摩擦試験の原理

図 2 は、中村らによるテーパダイス面のトライボ特性を評価する前方軸-後方缶押し型摩擦試験の概念図を示す²⁾。パンチストローク Sp と成形後の後方缶高さ Hu を実測し、有限要素法によって作成した較正線図に当てはめ、テーパダイス面の摩擦係数を同定する。この試験法は、図 1 の第 1 工程のボルト軸前方押しにおける塑性変形の様式と同様であるため、この試験法を基に α - β 型チタン合金の温間鍛造に適用可能な試験法を開発した。

2.3 温間 RC 型摩擦試験用のダイス・パンチ・試験片

図 3 は、本試験法における試験片寸法を示す。直径 10 mm、高さ 11 mm とし、実際の α - β 型チタン合金ボルト

の素材の直径との整合性を図った。これは、潤滑剤の評価は極力実加工に近い条件で行うことが望ましいとされているためである³⁾。試験片端部には、あらかじめ 10° の面取り部を設けた。これは、試験片端部のエッジ部がダイステーパー面に接触すると、局所的な凝着や焼付きが発生し、ダイステーパー面の摩擦を評価することが難しくなるためである。

ダイス穴径の基本寸法を、試験片の温間鍛造の熱膨張を考慮し 10.1 mm とした。ダイス nib は、リングによって締め代 0.6% の焼きばめされ、圧縮応力によって nib の割れを防止した。nib 材は、RT53（超硬）、HAP40（熱間鍛造用ハイス）および SNP-03（窒化珪素）の 3 種類を使用した。

試験片の素材として、ASTEM136（Ti-6Al-4V 相当 α - β 型チタン合金）を使用し、大気酸化によって酸化膜を形成した。

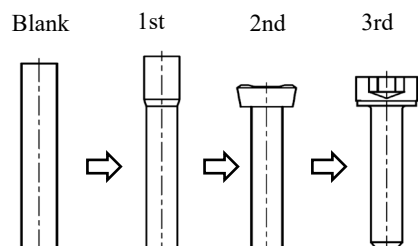


図 1 一般的なボルトの多段鍛造工程

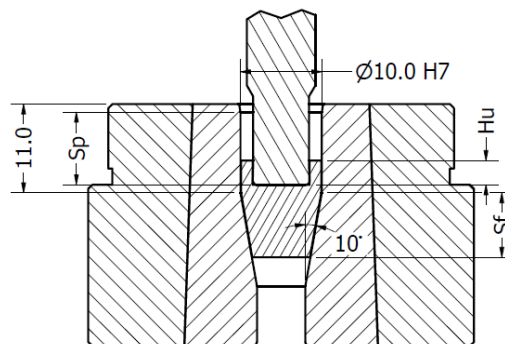


図 2 前方軸-後方缶押し型（RC 型）摩擦試験法

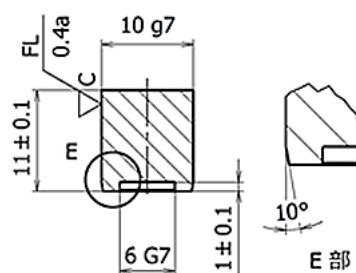


図 3 試験片寸法

図4は、RC型摩擦試験に用いた成形パンチを示す。ランド部の長さ $l < 0.2 \text{ mm}$ とし、パンチの凝着を軽減し、離型性の向上を図った。

2.4 試験片の加熱装置の開発

従来の温間鍛造の摩擦試験では、素材の加熱に電気炉を使用するため、炉から取り出し金型まで搬送する間の温度低下が問題となる。本試験では、加熱直後に成形が行えるように、吉田らが開発したダイス直上で加熱を行う温・熱間鍛造用加熱装置⁹⁾を参考に、図5に示す加熱方法を考案した。すなわち、素材をKOピンでダイス上端より上方に持ち上げ、誘導加熱を行い、加熱終了後速やかにKOピンを下げて試験片をダイス内に装填し実験を行う。素材の加熱制御には光ファイバー式赤外線温度計とPID制御を採用した。

2.5 温間RC型摩擦試験用ダイセットの開発

図6は、サーボプレス上のダイセットにセットアップされたRC型温間摩擦試験の主要な型構造を示す。既存のRC型摩擦試験用金型の試験片の芯出しは、試験ごとに真鍮製のマンドレルをパンチに装着し、ダイスに挿入して調整していたが、小径の試験片でも、芯出し精度を一定に保つため、ガイドポスト方式とした。

2.6 摩擦係数の算出方法

有限要素解析ソフトウェア Simufact. Forming を用いて、試験片-ダイス間の摩擦係数 μ_d を変化させた較正線図を作成した。一方、試験後の試験片寸法から、実験系の剛性

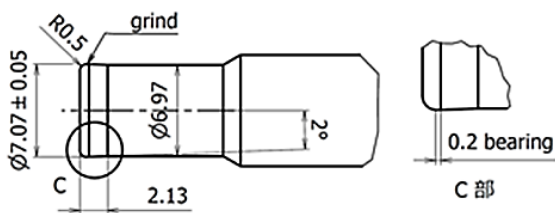


図4 RC型摩擦試験の成形パンチ

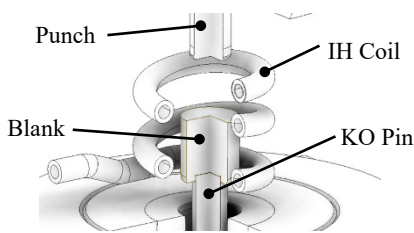


図5 誘導加熱を用いた加熱システム

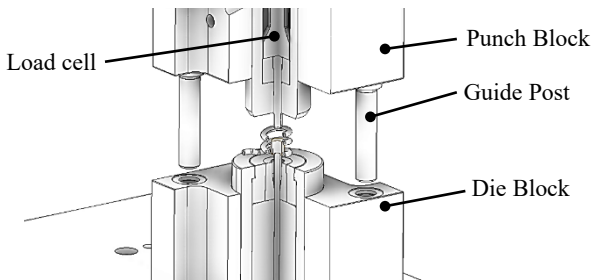


図6 ダイセットの概要

を考慮した真の Sp と後方押し出し量 Hu を求め、その関係を較正線図にプロットし、内挿法を用いて μ_d を算出した。図7は、解析に用いた温度依存の変形抵抗を示す。

3. 試験および結果の考察

3.1 冷間RC型摩擦試験

3.1.1 試験内容

大気中のチタン酸化膜は約 40 nm 程度であり、そのまま鍛造を行うと、凝着・焼付きが生じるが、大気中で加熱したチタン酸化膜の厚さは、約 0.1 μm 程度まで成長し、深絞り成形で良好な潤滑特性が報告されている⁹⁾。

そこで、本試験では大気酸化によってチタン酸化膜を形成させた試験片を用いて、複数の潤滑剤とダイス素材を組み合わせ、 μ_d を評価した。

表1は、試験条件を示す。潤滑剤として、二硫化モリブデン MoS_2 およびフォーマーオイル(硫黄系プレスオイル)を用いた。また、ダイス素材にはRT53(超硬材料)、HAP40(熱間鍛造用ハイス)およびSNP-03(窒化ケイ素セラミックス)を用いた。基準とする公称 Sp を 4.7 mm としたが、無潤滑鍛造の摩擦抵抗に応じて適宜変更した。

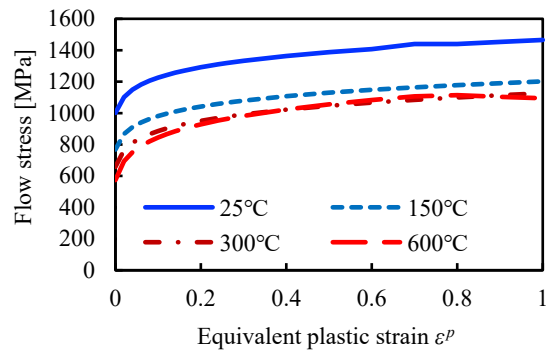


図7 チタン合金ASTEM136の変形抵抗曲線

表1 冷間RC型摩擦試験の実験条件

Nib material	RT53, SNP-03, HAP40
Lubricant	MoS_2 , Former oil. Not used (only oxide film)
Punch stroke [mm]	4.7 / 2.7
Punch speed [mm/s]	5
Thickness of oxide film [μm]	0.08 / 0.10
Temperature before forging [$^{\circ}\text{C}$]	20

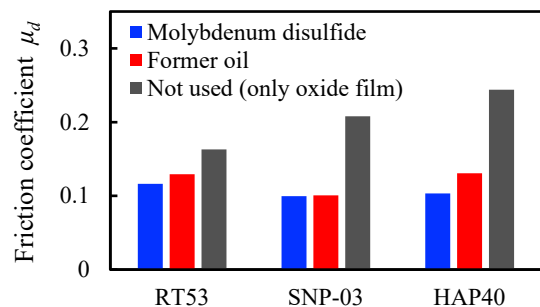


図8 冷間RC型摩擦試験で同定された摩擦係数

3.1.2 試験結果

図8は、同定した μ_d を示す。潤滑剤を用いた条件では、どのダイス素材でも $\mu_d \approx 0.1$ となった。また、目視では、どの試験片にも凝着は確認されなかった。一方、無潤滑では、HAP40>SNP-03>RT53の順に μ_d が大きくなり、SNP-03とHAP40では試験片に焼付きが生じた。

3.1.3 考察

図9は、冷間RC型摩擦試験後の試験片形状および表面外観を示す。無潤滑では、SNP-03およびHAP40で凝着が生じた。特に、SNP-03の無潤滑成形後の試験片では、テーパ部と軸部の一部に酸化膜のはく離が生じた。また、HAP40の無潤滑成形後の試験片は、 $Sp = 2.7 \text{ mm}$ としたが試験片テーパ部に酸化膜のはく離が生じた。したがって、酸化膜のはく離はテーパ部で生じた後に、軸部に伝播すると推察される。

また、テーパ面の筋状に見える酸化膜のはく離は、マイクロクラックの成長⁹⁾によって説明することが可能であるが、軸部の酸化膜のはく離に関してはその限りではない。

図10は、試験後のテーパ部表面の観察結果を示す。(a)のRT53の無潤滑成形された試験片テーパ部の拡大写真からは、テーパ部には軸方向に伸びた線条痕が生じていたが、酸化膜のアブレイブ摩耗と考えられる。一方、

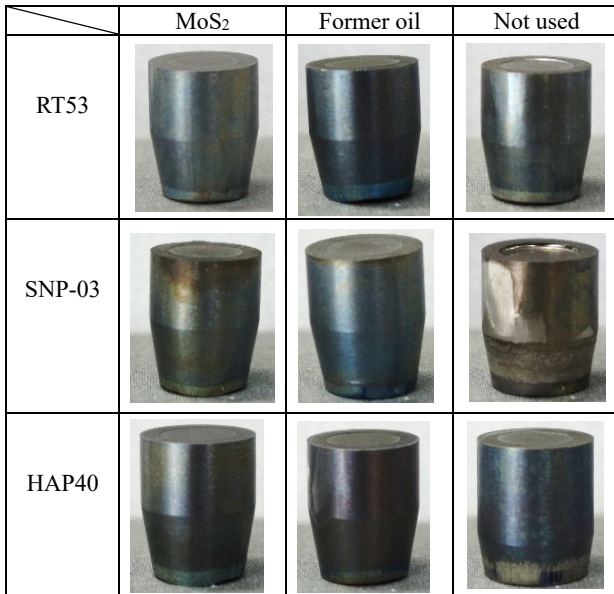


図9 冷間RC型摩擦試験後の試験片形状

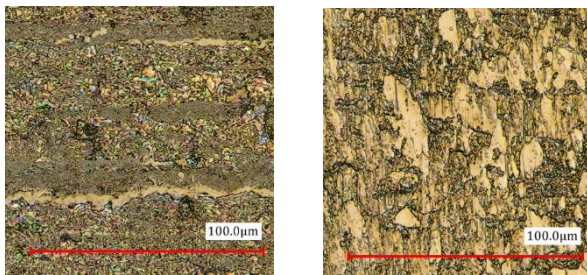


図10 テーパ部表面の様子

(b)では、酸化膜が残存している様子が観察される。

図11は、レプリカ法によって測定したダイス内径部の算術平均粗さを示す。ダイスの表面粗さはRT53<SNP-03<HAP40の順に大きくなっていった。この傾向は、図8に示す無潤滑成形の場合と一致していた。したがって、無潤滑成形の大きな摩擦係数は、nibの材質ではなく表面粗さによるものであると推察される。

また、潤滑剤を使用した場合の摩擦係数は、RT53>(SNP-03 \approx HAP40)であった。これは、潤滑剤とマイクロプールの関連⁷⁾で説明可能である。

3.2 温間RC型摩擦試験

3.2.1 試験内容

3.1節で大気酸化によって酸化膜を形成させると、冷間鍛造でも凝着を抑制できることが確認できた。

次に、試験片を温間域まで加熱し、チタン合金の温間鍛造におけるトライボロジー特性を調査した。ネットシェイプが要求されるチタン合金の温間鍛造では、液体ガラスのような膜厚の大きな潤滑剤の使用は難しく、また耐熱温度の低い油性潤滑材も使用できない⁸⁾。3.1節と同様、大気酸化によって試験片の表面に酸化膜を形成させ、無潤滑による温間のトライボロジー特性を検証した。

表2は試験条件を示す。ダイスの素材として、3.1節の結果よりSNP-03、HAP40は凝着の恐れがあるため、RT53のみを用いた。また、試験片の加熱条件は、昇温30s、保持1minで昇温後空冷し、所定の試験片温度になる約5s前にダイス内に装填した。

3.2.2 試験結果

図12は、成形後の試験片を示す。また、図13は、温度ごとに求めた μ_d を示す。20℃では、膜厚0.08、0.10 μm ともに凝着痕は見られなかった。150℃では、0.08 μm ではテーパ部で凝着痕が見られたが、0.10 μm では凝着痕は見られなかった。300℃では、0.08、0.10 μm ともにテーパ部で凝着痕が見られたが、0.08 μm では試験片軸部でも凝着痕が見られ、そのうちの1つは試験片全体に凝

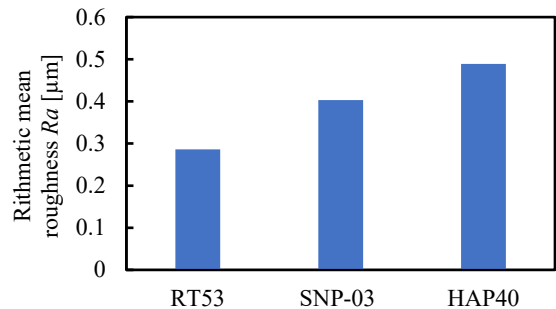


図11 レプリカ法によるダイス表面の算術平均粗さ

表2 温間RC型摩擦試験の試験条件

Temperature before forging [°C]	20	150	300	600
Heating temperature [°C]	20	200	400	750
Punch stroke [mm]	3.7			
Punch speed [mm/s]	5			
Lubricant	Not used (Only oxide film)			
Thickness of oxide film [μm]	0.08 / 0.10		0.10	

着が発生し、ダイスから取り外すことが困難であった。600℃では、0.10μmのうち一つで試験片全体に凝着が生じ、ダイスからの取り外しが困難であった。

また、図13より、温度が高くなるにつれて、 μ_d が増加し、かつそのばらつきが大きくなっていることがわかる。

3.2.3 考察

先行実験⁹⁾において、試験片温度が600℃以上の条件では凝着が激しいことから、酸化膜のトライボロジー特性の温度依存性が示唆された。その要因として、600℃近辺でチタン酸化膜の結晶構造がアナターゼ型からルチル型への変化することが考えられたが、図11および12より、試験片温度の上昇に伴い、酸化膜の破壊が徐々に進行し、 μ_d が増加する傾向を示すことから、酸化膜の結晶構造変化だけでは説明できず、温度の上昇とともにトライボロジー特性が劣化するものと推察される。

図12より、凝着はテーパ部で生じているため、有限要素解析によりテーパ部の摩擦界面の応力状態と表面積拡大率を調査した。各温度における μ_d は、膜厚が0.08μmにおける値を用いた。ただし、600℃では0.08μmにおける μ_d を得られなかったため、0.10μmにおける値を用いた。

図14は、解析により得られたテーパ部に作用する応力状態を示す。温度の増加に伴い接触面圧は低下する。これは、図7の解析に用いた変形抵抗が温度の増加に伴い低下するためである。一方、摩擦応力および最大せん断応力に大きな変化は見られない。温度上昇に伴う応力の変化は、接触面圧の低下のみであることから、凝着は試験片に生じ

る応力の変化によるものではないと考えられる。

図15は、テーパ部の表面積拡大率の分布を示す。温度が高くなるにつれ、酸化膜の破壊が生じるテーパ部入口での表面積拡大率は小さくなり、150℃以上では広い範囲で負の値を取る。これは、その部分の母材表面が収縮していることを示す。この母材の局所的な塑性変形に酸化膜が追従することができず、はく離や破壊につながり¹⁰⁾、その結果、凝着が生じやすくなると考えられる。

図16は、酸化膜の摩擦特性に温度依存性がないと仮定して $\mu_d = 0.15$ とし、試験片温度を変えた場合の表面積拡大率の解析結果を示す。これは、 $S_p = 3.7$ mmで最も表面積拡大率が小さい位置を特定した後、その位置の表面積拡大率と S_p との関係を示したものである。 $S_p = 3.7$ mmにおい

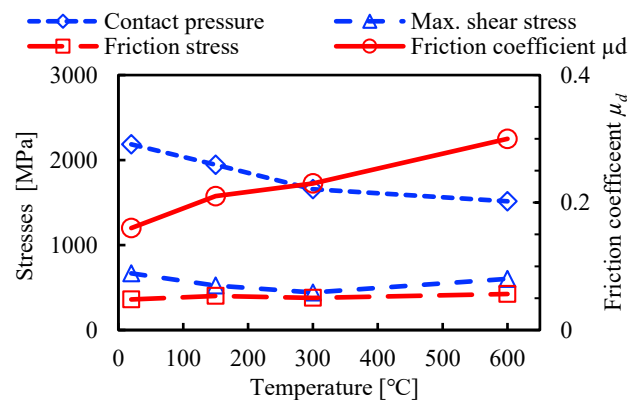


図14 テーパー部における応力と摩擦係数

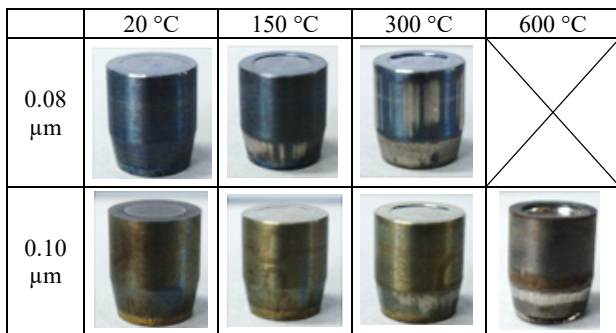


図12 温間RC型摩擦試験後の試験片形状

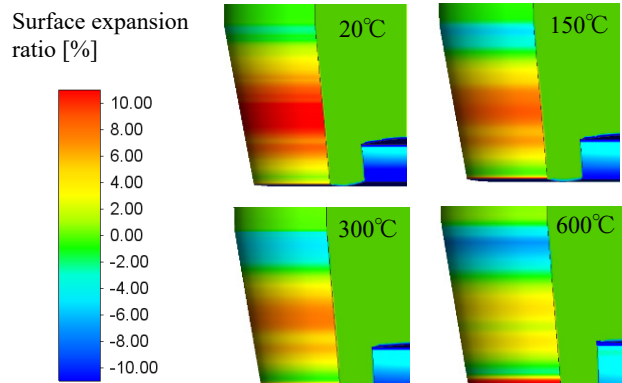


図15 下死点における表面積拡大率の分布

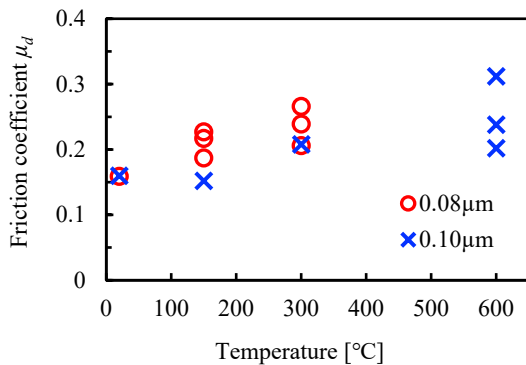


図13 温間RC型摩擦試験で同定された摩擦係数

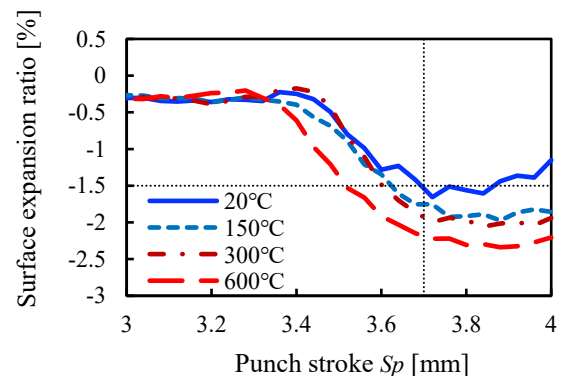


図16 表面積拡大率の変化 ($\mu_d = 0.15$)

て、20 °C では表面積拡大率は約 -1.5%であるが、温度の増加に伴い表面積拡大率はより小さくなることがわかる。これは、図 7 からわかるように、温度の増加に伴い、母材の強度および加工硬化特性が小さくなり、テーパ部の成形に際して局所的な塑性変形が生じやすくなるためと考えられる。

また、20 °C では凝着が生じなかったことから、表面積拡大率が -1.5%を下回ると酸化膜がはく離し、凝着が生じやすくなると考えられる。温度の増加に伴い、 S_p が小さい段階で表面積拡大率が -1.5%を下回っていることから、早期に酸化膜がはく離し、凝着が生じると推察される。凝着が生じると摩擦抵抗が増加するため、 μ_d の増加を引き起こす。

次に、酸化膜厚の影響について検討する。事前の試験において、膜厚 0.08, 0.10 および 0.12 μm で冷間成形を行った際には、 μ_d 、成形荷重および試験片の表面状態に違いは見られなかった。しかし、図 12 および 13 に示すように、温度が高い時には 0.10 μm の方が凝着、 μ_d ともに小さい。凝着により試験片の取り外しが困難となるような成形限界については、0.08 μm の場合は 300 °C、0.10 μm では 600 °C であり、0.10 μm の方がより高い温度での成形限界となった。酸化膜の破壊によって μ_d が増加する¹¹⁾ため、膜厚をより大きくすることで、酸化膜が破壊されにくくなり、凝着が抑制され、その結果チタン合金の温間加工における成形性の改善につながると推察される。

4. 結 言

チタン合金の前方押し出しによるテーパ面のトライボロジーの温度依存性に関し、冷間・温間 RC 型摩擦試験を行い、以下の結論を得た。

1. 大気酸化によるチタン酸化膜は、凝着を抑制し、摩擦を低く安定化させる効果がある。特に、超硬材料のダイスの場合、無潤滑で凝着を抑制することができた。
2. 温間鍛造では温度の増加に伴って、凝着がより生じやすくなる。これは、母材の変形に酸化膜が追従できず、酸化膜がはく離し、その結果凝着が生じたためと推察される。

3. 温度の増加に伴って、摩擦係数が増加した。これは、塑性変形の局所化に伴いテーパ部入口で酸化膜がはく離しやすくなるためと推察される。
4. 温間加工では、酸化膜が厚い場合は薄い場合に比べ、凝着がより小さい。これは酸化膜が厚いと、母材の変形による亀裂が生じても、チタン新生面の出現による凝着が抑制されるためであると推察される。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の一般研究助成 (AF-2018005-B2) により実施した研究に基づいている。ここに記して深甚なる謝意を表します。また、本研究の遂行には、静岡大学客員教授 久保田義弘氏および静岡大学大学院生 西源貴氏の多大な協力があったことを付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本ねじ研究協会: FRS 0701, 締結用部品の機械的性質-Ti-6Al-4V チタン合金製ねじ部品, (2007).
- 2) Nakamura, T., Bay, N., Zhang, Z. L.: J. Tribol., Trans. ASME, **119**-3 (1997), 501-506. 3.
- 3) 五十川幸宏・土屋能成: 塑性と加工, **39**-455 (1998), 1207-1211.
- 4) Yoshida, Y. & Kanda, Y.: Proc.7th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes (ICTMP), (2015), 200-207.
- 5) 森謙一郎: Materia Japan, **41**-7 (2002), 467-472.
- 6) 河鱒実昌: トライボロジスト, **48**-10 (2003), 802-807.
- 7) 川並高雄, 関口秀夫, 斎藤正美, 廣井轍磨, 大賀喬一, 小林政教, 仲町英治, 片岡征二, 筒井佳子: 基礎塑性加工学 (第 3 版), (2015), 森北出版.
- 8) 小坂田宏造: 精密工学会誌, **58**-6 (1992), 943-947.
- 9) 西源貴・久保田義弘・早川邦夫・中村保: 第 71 回塑加連講論, (2020), 106-107.
- 10) 川鱒実昌: トライボロジスト, **48**-10 (2003), 802-807.
- 11) 福田正人・田部明芳・森口康夫: 昭 57 春塑加講論 (1982), 143-146.