

β 型チタン合金の引張変形特性とプレス加工性をつなぐ 塑性変形メカニズムの解明

鈴鹿工業高等専門学校 材料工学科
准教授 万谷 義和
(平成 25 年度一般研究開発助成 AF-2013017)

キーワード：β 型チタン合金，局所変形，加工誘起 ω 変態，引張試験，打抜き加工，絞り加工

1. 研究の目的と背景

チタン合金のβ相はBCC構造であり、HCP構造のα相と比較してすべり系が多いことから、塑性加工性が良いとされる。しかしβ型チタン合金の分類中でも、β相安定度によって引張り変形特性が大きく異なる¹⁻³⁾。β安定型元素の少ない場合には低い応力で降伏して加工硬化しながら良好な破断伸びを示す。β安定化元素量が増えると弾性域から引張り強さまでほぼ直線的に到達し、局所的な変形により前者より大幅に少ない破断伸びを示すが、一般的に良好な加工性を示すと評価されているのは、破断伸びの少ない後者のβ型チタン合金の方である。前者のβ型チタン合金では降伏後に加工誘起マルテンサイト変態⁴⁾や変形双晶⁵⁾の形成により良好な破断伸びを示すが、後者では光学顕微鏡で明瞭に観察される集中すべり変形により局所変形を生じ、低い破断伸びにとどまる。この現象には、マルテンサイト相ではなく、加工誘起 ω 変態⁶⁾が関係していると考えている。チタン合金の ω 相は時効析出により生じた場合、脆化の原因とされている⁸⁾が、加工誘起的に形成された場合、変形を促進するように働くという塑性変形メカニズムが生じていると予測している⁹⁾。鉄鋼材料におけるTRIP鋼などのように、変形に伴う相変態が、塑性変形特性に多大な影響を与えている報告もあり、チタン合金においても加工誘起変態が塑性加工、さらにはプレス加工にも大きく影響を及ぼしていると考えられる。

引張り破断伸びは少なくとも、部分的な圧縮加工を与えるプレス加工では、この局所変形性が効果的に影響し、せん断加工による良好な切り口面の形成や負荷部分のみの集中変形に寄与すると考えられる。このβ型チタン合金の引張変形性とプレス加工性をつなぐ塑性変形メカニズムを加工誘起変態の観点からアプローチすることにより、β型チタン合金の新たな組織設計指針が構築され、さらに高いプレス加工性をもつβ型チタン合金の開発が可能になると期待できる。

そこで本研究では、汎用β型チタン合金の引張変形特性と打抜き特性や絞り加工性を調べるとともに、Nb量によりβ相安定化度を調整したTi-Nb二元合金を用い、β安定化度の差に伴う引張変形特性を調べ、β型チタン合金の加工誘起変態について系統的に評価する。これらの結果から、引張変形特性と打抜き加工性をつなぐ局所変形について考察することを目的とする。

2. 実験方法

2.1 供試材料

実験に用いた汎用β型チタン合金は、Ti-22V-4Al合金(Ti224)、Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn合金(Ti153)である。比較のため、CPチタンJIS1種(CPTi)も評価に用いた。また、特にβ相安定化度の違いに伴う引張変形特性の変化を調べるために、Ti-(35, 40, 50)mass%Nb合金も用いて比較検討した。

引張試験片の熱処理条件は、石英管に真空封入し、950°C(一部の試験片は750°C)で1時間加熱保持後、石英管を氷水中で破砕することによって溶体化焼入れを行った。プレス加工用の試験片は加熱保持後、真空にした石英管中に入れたまま氷水中に入れて冷却した。熱処理後は表面の酸化膜を研磨紙で取り除き、各種試験に用いた。

2.2 引張試験

引張試験片は厚さ0.8mm、幅3mm、平行部12mmの形状に切り出し、上記熱処理を行った。標点間距離は10mmとし、引張試験はクロスヘッド速度0.5mm/minで行った。また、負荷除荷サイクル引張試験による弾塑性変形挙動の解析およびクロスヘッド速度をパラメータとした引張試験も行い、変形に伴う相変態挙動について検討を行った。

2.3 打抜き加工

打抜き加工試験片は板厚1mmとし、表面に薄く潤滑油を塗布して打抜き加工を行った。クリアランス(CI)はダイ内径を6.30mmに固定し、パンチ直径を6.25mmから6.00mmに変化させ、2.5%から15%の値に設定して打抜き加工を行った。加工速度は0.5mm/minとして荷重-ストローク線図を描いた後に、試験片はエポキシ樹脂に埋め込み、切断後の断面を研磨して鏡面に仕上げた。これらの試験片に対して、切り口面に沿って平行に、押込み荷重0.1kgfと0.02kgfの2通りの条件でビッカース硬さ試験を行った。今回押込み荷重0.02kgfで硬さ試験を行ったのは、圧子痕の大きさを小さくし、より切り口近傍の硬さ分布を得るためである。測定間隔は、押込み荷重0.1kgfの条件では0.1mm間隔、0.02kgfの条件においては0.03mm(30 μ m)間隔に設定し、硬さ分布図を得た。

2.4 絞り加工

絞り加工試験片は初期板厚0.5mm, 直径D=10mmとし, 表面に薄く潤滑油を塗布して絞り加工を行った. 加工速度は0.5mm/minとし, 4段までの荷重-変位線図を描いた. 多段絞り加工は, 先端がR1のパンチとダイを用い, チタン合金の深絞り加工の報告例⁹⁾に倣って, 絞り比は1.6から1.2の間に設定した.

3. 実験結果および考察

3.1 各種引張試験によるβ型チタン合金の変形挙動

図1に, チタンおよび各β型チタン合金の応力-ひずみ線図を示す. 上段はCPTi, Ti224およびTi153の線図を示しており, CPTiは降伏後に加工硬化を示して良好な破断伸びを示すのに対して, Ti224およびTi153は最大応力まで早く到達して公称応力がひずみの増加に伴い徐々に減少する特徴を示す. 一方, 下段はTi-Nb合金の線図で, Nb量が増えるほど, β安定化度が高くなる傾向にある. 加工誘起α'マルテンサイトが形成されるTi35Nbでは低い降伏応力で加工硬化して良好な破断伸びを示すのに対し, Ti40Nbでは汎用β型チタン合金と同様な, 最大応力まで早く到達する曲線形状になった. さらにβ相安定化度の高いTi50Nbでは, 降伏応力が低くなった.

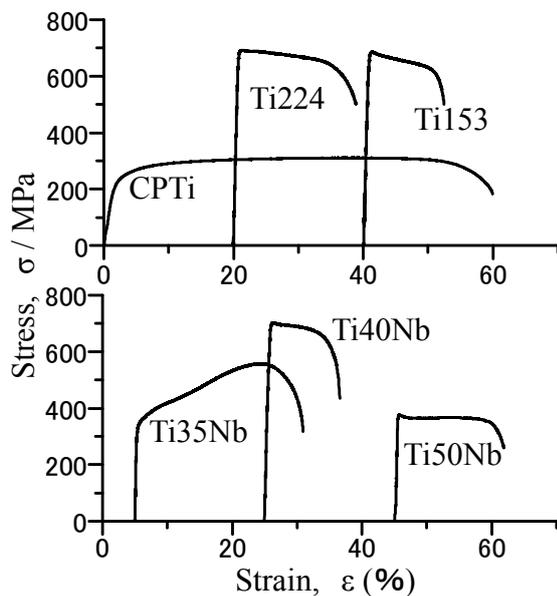


図1 チタンおよびβ型チタン合金の応力-ひずみ線図

上記のようなβ型チタン合金の変形特性は, 均一伸び部分の生じにくい局所変形に起因している. これらと加工誘起変態の関係を検討するため, 荷重除荷サイクル引張試験を行った. 図2に, ひずみ3%までの結果を示す. これらの試験片は, 750℃から溶体化焼入れをしたものを用いた. Ti224(a)およびTi153(b)の初期の弾性限は, これらの線図

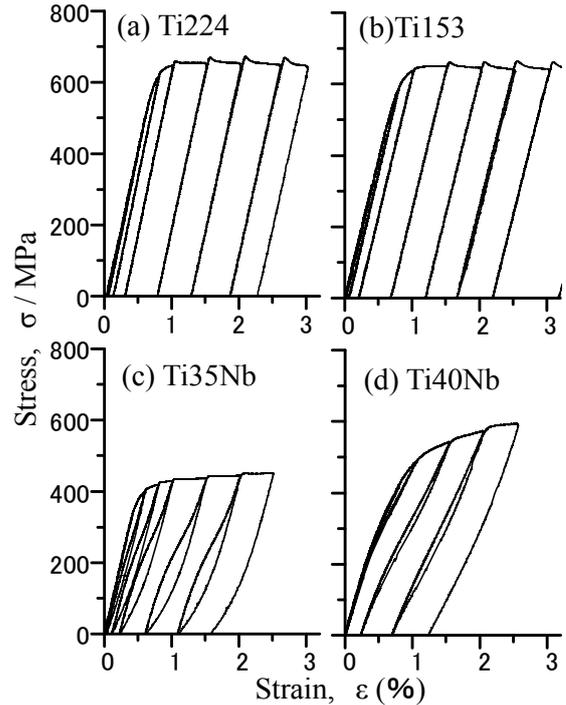


図2 β型チタン合金の荷重除荷サイクル引張試験結果

より最大応力値に到達する前の500MPaを越えたあたりになっていることが分かる. また, 塑性変形後にサイクルを繰り返すと, 最大応力値に到達した後に公称応力値が低下する減少を繰り返すことが分かった. これは最大応力値に至るまでに加工誘起的に加工硬化を示し, 最大応力値に達してから応力が集中的なすべり変形により低下していると考えられる. Ti35Nb(c)では, 400MPaを超えたあたりで降伏し, β相から加工誘起α'マルテンサイトの形成と除荷に伴う回復により, ひずみヒステリシスが生じる. 一方, Ti40Nb(d)は, 弾性域の400MPaから600MPaの間でひずみヒステリシスを生じ, 塑性変形後のサイクルでもわずかなひずみヒステリシスを繰り返した. この変化は, 加工誘起マルテンサイトあるいはω相の形成と回復に伴う変化と考えられる. Ti40Nbの応力-ひずみ線図は汎用β型チタン合金に近かったため, 汎用β型チタン合金の弾性域以降の硬化にも加工誘起ω変態などが関係していることを示唆していると考えられる.

引張変形速度の影響を調べた結果が図3である. 変形中に加工誘起変態が生じる場合, 変形速度が速い方が顕著に現れやすいと考えられる. 加工誘起α'マルテンサイト変態が生じるTi35Nb(a)では, クロスヘッド速度を5mm/minに速くすると変態を生じやすくなって降伏後の応力値が低くなり, 0.05mm/minに遅くすると, β相の塑性変形の割合が増加して降伏点と降伏後の応力値が増加した. 一方, Ti40Nb(b)およびTi224(c)では, 5mm/minに速くすると最大応力値が増加するとともにその後の応力値の低下が顕

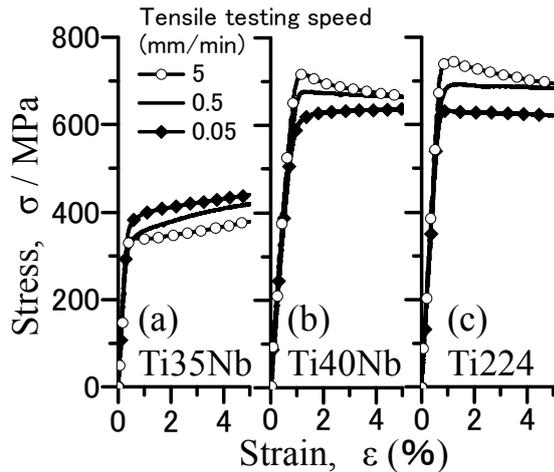


図3 β型チタン合金の弾塑性変形挙動に及ぼす変形速度の影響

著になり、0.05mm/min に遅くすると、最大応力後の応力値の低下割合が減少し、Ti40Nb では加工硬化も生じてβ相本来の塑性変形挙動に近づいたと考えられる。これらの結果から考えると、図2で現れたひずみヒステリシスも、加工誘起α'マルテンサイト変態よりも、加工誘起ω変態が関係していると考えられる。

弾性域での変化をより詳しく検討するため、除荷負荷サイクル試験から弾性域から塑性域に入る付近までの傾きの変化を調べた¹⁰⁾。図4に、Ti224(a)およびTi40Nb(b)の結果を示す。左図の応力-ひずみ線図において各記号で表した部分の弾性勾配変化を、同一記号で右図に示している。

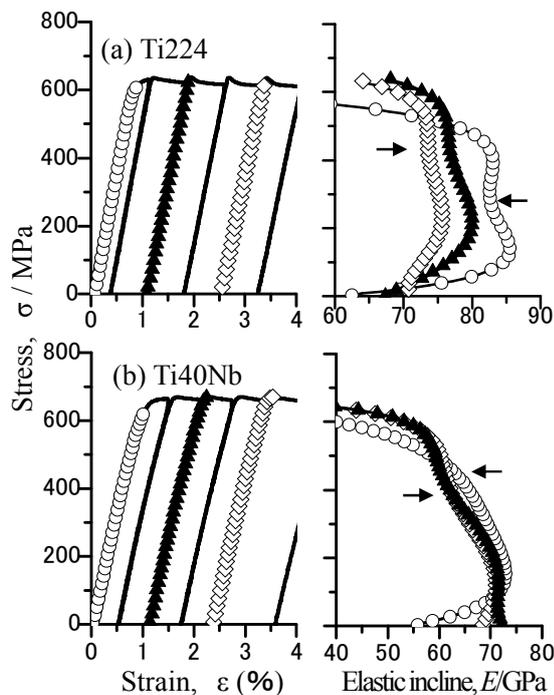


図4 β型チタン合金の負荷除荷サイクル引張試験結果から算出した弾性勾配の変化

Ti224では、初期負荷時(○)に100MPaあたりまで弾性勾配は増加し、その後減少傾向に入るが、300MPaあたりから一定値に入って塑性変形が始まった。塑性変形後の再負荷時(▲, ◇)でも、400MPaを超えると一定値に入った後に塑性変形が始まった。Ti40Nbでは、初期負荷時(○)では減少傾向から塑性変形が開始したが、塑性変形後の再負荷時(▲, ◇)では400MPaを超えると減少傾向が低下した後に塑性変形が始まった。ω相がβ母相中に存在すると、構造的にヤング率および強度が増加する。そのため、これらの弾性勾配の減少傾向から一定値あるいは減少傾向の低下が生じる部分において、加工誘起ω変態が生じて、ヤング率および強度上昇が生じていると考えられる。

3.2 打抜き加工と変形特性

前項のような引張特性を持つチタンおよびβ型チタン合金の打抜き特性を調べた。^{11, 12)} 図5にCPTi, Ti224, Ti153のクリアランス15%, 2.5%の打抜き加工における荷重-ストローク線図を示す。CPTiでは、だれの形成からせん断面の形成にかけて加工硬化してせん断を完了した。せん断荷重は2.5%の方が大きく、せん断完了までのパンチストローク比は15%の方が大きかった。どちらのパンチストローク比でも、せん断荷重に到達後、早い段階でせん断が完了した。一方、Ti224とTi153ではせん断荷重が2.5%の方が大きい傾向は同様であるが、15%ではせん断荷重に到達して早い段階でせん断が完了するのに対し、2.5%ではせん断荷重に到達するのが早く、その後も徐々に荷重が低下してせん断が完了した。結果として、せん断に要するパンチストローク比は、2.5%の方が大きく、CPTiとは異なる結果となった。この結果により、β型チタン合金においてせん断力で加工硬化することが明らかである。また、低

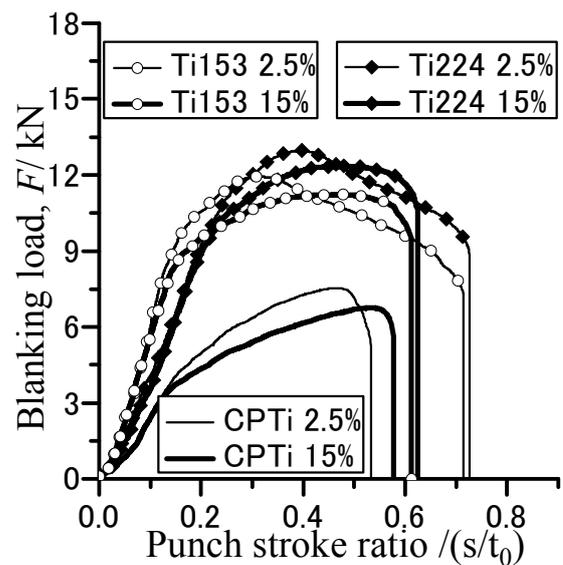


図5 β型チタン合金の打抜き加工時の荷重-ストローク線図

クリアランスによるクラックのすれ違いも一部は含まれていると考えられるが、クリアランスが低いほどパンチストローク比が高くなる傾向があり、低クリアランスの方が局所的に集中した変形が生じるためにパンチストローク比が大きくなっていることが分かった。このようなせん断加工による荷重—ストローク線図に、局所変形が顕著なβ型チタン合金のプレス加工性の特徴が現れていると考えられる。

図6にCPTi, Ti224の押し込み荷重0.1kgfにおけるビッカース硬度分布図を示す。せん断加工前の硬さは、CPTiが140HV0.1, Ti224が250HV0.1である。CPTiでは、クリアランス15%(a)のせん断切り口面全体に硬化領域が生じ、最大218HV0.1を示した。2.5%(b)でも領域は狭まっているものの、最大212HV0.1を示した。一方、Ti224ではクリアランス15%(c)ではせん断切り口面のごく狭い領域で最大300HV0.1を示したが、2.5%(d)ではせん断面の一部領域でのみ、硬化した程度だった。特に、β型チタン合金では図6の測定範囲では硬化が分かりにくかったため、さらに小さい荷重でよりせん断切り口面に近い部分の硬度分布を測定した。図7に、Ti224の押し込み荷重0.02kgfにおけるビッカース硬度分布を示す。この図は切り口からおおよそ0.1mm程度の範囲の硬度分布となっている。クリアランス15%では、せん断切り口面全体にわたって330HV0.02を超える領域が形成されており、硬化していることが明らかである。一方、2.5%(b)でも、特にせん断面と破断面の境界部分で高い硬さを示していることが分かる。その中で一部、白く示された軟化部分も観察された。Ti-20Mo合金にお

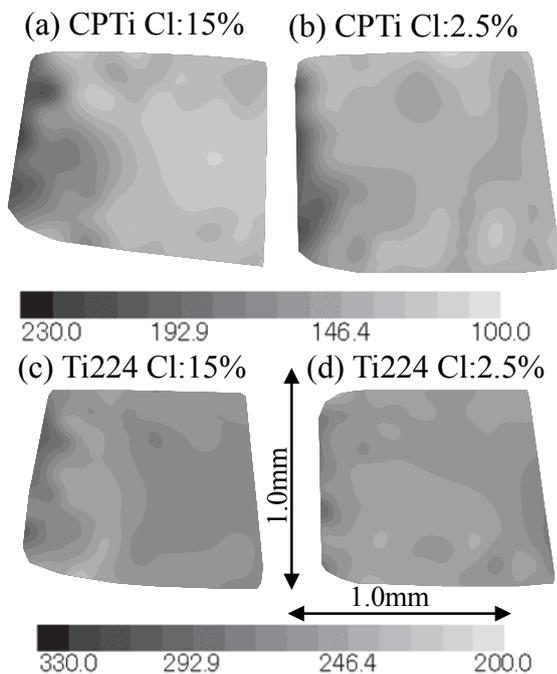


図6 チタンおよびβ型チタン合金の打抜き加工による切り口面の硬度変化

るω相の加工誘起構造変化と集中すべりの発生メカニズムについては、これまでに変形前後のTEM組織観察の結果から示唆している⁹⁾。この背景を踏まえて、本実験結果の局所領域の硬度変化は、加工誘起ω変態による硬化とすべり変形によるω>β逆変態による軟化の可能性を示唆していると考えられる。

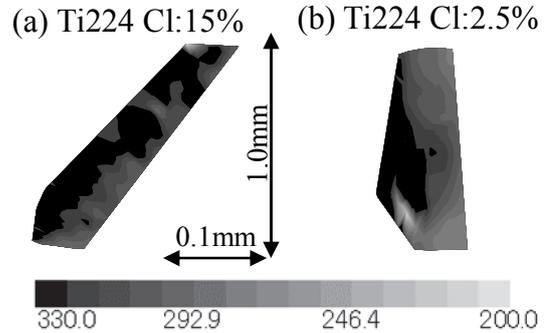


図7 β型チタン合金の切り口面の微小荷重によるビッカース硬度測定結果

3.3 絞り加工と変形特性

図8にCPTi, Ti224, Ti153の1段目の絞り加工による荷重—変位線図を示す。Ti224とTi153は、ほぼ一致した形状となっている。CPTiとβ型チタン合金の絞り加工の最大荷重比は、引張試験で調べた引張強さの比から考えると、相関性がある。曲線の形状を比較すると、CPTiでは変位2mm付近の矢印で示した勾配が緩やかなのに対し、β型チタン合金の矢印部分の勾配は、急激な増加と減少を示していることが分かった。この現象についても、局所変形を生じるβ型チタン合金の特徴であると考えられる。1段

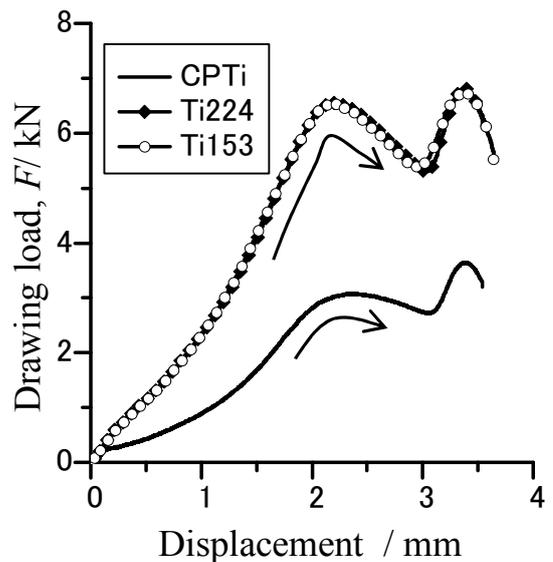


図8 チタンおよびβ型チタン合金の絞り加工による荷重—変位線図

目の絞り加工後の、試験片外観写真を図9に示す。形状は同様に加工できているが、CPTi が比較的滑らかな表面になっているのに対し、Ti224 と Ti153 は表面のあれが観察される。β型チタン合金のプレス加工には、局所変形や加工誘起変態が関係するため、絞り比や潤滑条件などにも注意が必要と考えられる。



図9 チタンおよびβ型チタン合金の絞り加工後の形状

4. 結言

本研究ではチタンおよび各種β型チタン合金の引張変形特性から局所変形と加工誘起変態の相関関係を検討し、打抜き特性や絞り加工性との相関関係について検討した。その結果をもとに、Ti40Nb および汎用β型チタン合金の弾塑性変形挙動からは、加工誘起ω変態の発生を示唆した。また、せん断加工による荷重-ストローク線図および硬さの変化から、局所領域での硬さの増加と集中的な変形が生じていることが分かった。絞り加工の結果からは、荷重-変位線図の変化より、初期絞り工程での荷重の急激な増加と減少が生じており、局所的な加工硬化が生じていることも分かった。本実験結果からはβ型チタン合金の加工誘起ω変態と局所変形の発生についてのメカニズムを示唆し、β型チタン合金の局所変形とプレス加工性の相関について現象を考察することができた。しかしながら、メカニズム解明については、さらなる実験と検討が必要である。これを解明していくことにより、加工誘起変態を利用した高加工性チタン合金の開発につながることを期待できる。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団による一般研究開発助成（AF-2013017）の助成を受けて実施したものです。ここに記して、厚く感謝いたします。また、本研究の実験の一部を遂行した、恒川弥佑氏をはじめとする研究室学生諸氏に感謝いたします。

参考文献

1) 飛田守孝, 助台栄一: オメガ変態, 日本金属学会会報, **26** (1987), 887-992.

- 2) 福井彰一, 大宝雄蔵, 鈴木昭弘: 電気製鋼, **57**(1986), 303-317.
- 3) 万谷義和: ケミカルエンジニアリング, **60**(2015), 116-120.
- 4) H.Y. Kim, T. Sasaki, K. Okutu, J.I. Kim, T. Inamura, H. Hosoda and S. Miyazaki: Acta Mater. **54** (2006) 423-433.
- 5) 万谷義和, 竹元嘉利, 飛田守孝, 榊原精: 日本金属学会誌, **68**(2004), 106-109.
- 6) 万谷義和, 竹元嘉利, 飛田守孝, 榊原精, 高山和義, 保田英洋: 日本金属学会誌, **64**(2000), 934-939.
- 7) Q. Li, M. Niinomi, J. Hieda, M. Nakai and K. Cho: Acta Biomater., **9** (2013), 8027-8035.
- 8) 木村啓造: 日本金属学会会報, **16**(1977), 829-834.
- 9) 原田泰典, 古川陽介, 村尾卓児, 森謙一郎, 土田紀之, 深浦健三: 塑性と加工, **47**(2006), 851-854.
- 10) 万谷義和, 竹元嘉利: 日本金属学会第157回秋期講演大会講演概要集, (2015), J27.
- 11) 恒川弥佑, 万谷義和: 平成26年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2014), 173-174.
- 12) 恒川弥佑, 万谷義和: 平成27年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2015), 71-72.