

マルテンサイト組織を有するチタン合金のプレス加工

鈴鹿工業高等専門学校 材料工学科

助教 万谷義和

(平成 20 年度奨励研究助成 AF-2008032)

キーワード：チタン合金, α' マルテンサイト組織, プレス打抜き加工

1. 研究の目的と背景

従来、チタン合金に関する研究・開発は、海外においては航空宇宙産業分野を用途として行われ、国内においては軽い・強い・腐食しにくいという特長を活かし、化学プラントや民生品の分野を用途として、盛んに行われてきた。これらの研究・開発は前述の三大特徴を活かした、ステンレスなどと競合する構造材料的な視点で行われてきている。しかしながら近年、特に国内ではステンレスと競合する構造材料としてのチタン合金よりも、機能材料としてチタン合金を活用する視点が積極的に取り入れられ、そのような研究が活発に行われている¹⁻³⁾。

それら機能性を付与したチタン合金を用いてもものづくりを推進していくためには、プレス加工に関する研究との融合が必要となってくる。純チタンや加工性の良い β 型チタン合金に関するプレス加工、特に深絞り加工についての報告例はある^{4,5)}。しかしながら、一般に難加工性と指摘されるチタン合金のプレス加工に関する基礎研究は、いまだ十分ではないと思われる。特にチタン合金について熱処理による高機能化を図った合金では、単相組織だけではなくマルテンサイト相などの準安定相も含めた混相組織をもち、また加工に伴う相変態なども生じることが予測されることから、塑性変型過程もより複雑化する。そのため、マルテンサイト組織を有するチタン合金について、プレス加工に関する基礎的研究を行っていくことは、今後のチタン合金を用いたものづくりのために重要な役割を果たすと考えられる。これらの背景を踏まえて、本研究ではチタン合金マルテンサイト組織のプレス加工について実験的検討を行うことを目的としている。

現在までに行ってきた研究内容は、チタン合金について熱処理により組織制御を施し、合金の機能性を拡張させていく研究と、それら合金の引張り変形や圧延に伴う加工誘起相変態に関する研究であった⁶⁻⁹⁾。これらの研究を通して得られた成果により、機能性を付与したチタン合金の用途としては、大型部品よりも精密小型部品としてのニーズが予測され、また生産性の観点からも板材のプレス加工による製作法が重要な役割を果たし、そのための研究が欠かせない。本研究ではその基礎的段階として、マルテンサイト組織のプレス打抜き加工に関する基礎的実験と評価を行った。

2. 実験方法

2・1 使用材料および材料特性の測定

実験に用いた材料は、Ti-15mass%Nb 合金（以下、Ti-15Nb 合金）である。引張試験片は、厚さ 0.5mm×幅 3mm×平行部長さ 12mm にフライス盤で切り出した。ヤング率および内部摩擦測定試験片は、厚さ 2mm×幅 10mm×長さ 50mm にファインカッターで切り出した。

各試験片を石英管内に真空封入して 750°C で 1h 加熱保持後、炉中で冷却したものを焼なまし材 (T15N-AN)、氷水中で石英管を破碎することによって急冷したものを焼入れ材 (T15N-AQ) とした。また、比較材として工業用純チタン JIS1 種相当 (CP-Ti) を用いた。

引張試験は標点間距離を 10mm とし、クロスヘッド速度 0.5mm/min で破断するまで行った。ヤング率は自由共振法により固有振動数から算出し、内部摩擦は半値幅法により求めた。

2・2 プレス打抜き加工および断面観察

Ti-15Nb 合金を厚さ 1mm×幅 12mm×長さ 15mm の試験片に切り出した。各試験片に対して上述の熱処理を施して焼なまし材および焼入れ材を作製し、表面の酸化被膜を取り除いたのち、#2000 の研磨で仕上げた。図 1 のように、ダイ直径を 6.30mm に固定し、パンチ直径を 6.25~6.00mm と変えることによってクリアランスを 2.5~15.0% に設定し、打抜き加工を行った。打抜き速度は 0.5mm/min とし、荷重-ストローク線図を得た。

打抜き加工後の試験片をエポキシ樹脂に埋め込み、半円部分で切断して材料縦断面を実体顕微鏡で観察した。また、レーザー顕微鏡で切断面観察と粗さ測定を行った。

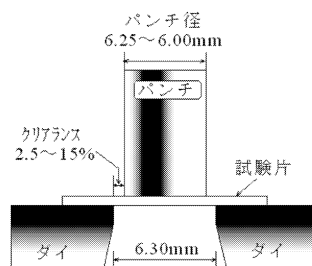


図 1 プレス打抜き加工部の模式図

3. 実験結果及び考察

3・1 Ti-15Nb 合金の材料特性

CP-Ti は α 単相組織、T15N-AN は $\alpha + \beta$ 相組織、T15N-AQ は α' マルテンサイト組織になっている。これらの各種材料特性値を表 1 に示す。CP-Ti と β 安定化元素である Nb を含有した T15N-AN を比較すると、 β 相を含有する組織になることによりヤング率は減少し、硬さは増加する。内部摩擦については、どちらも同等の値である。一方、Ti-15Nb 合金に焼入れを施した T15N-AQ では、 α' マルテンサイト組織が形成され、それに伴いヤング率はさらに低下するとともに内部摩擦は大幅に増加し、制振性が向上するという特徴がある。また、硬さは焼なまし材の $\alpha + \beta$ 組織より、 α' マルテンサイト組織の方が柔らかくなっていることが分かる。

引張試験により得られた公称応力-公称ひずみ曲線を図 2 に示す。CP-Ti は引張強さ 315MPa で、破断伸びが 50% を超えた。一方、T15N-AN は引張強さ 750MPa を示し、破断伸びは 20% 程度であった。 α' マルテンサイト組織の T15N-AQ の引張強さは、 $\alpha + \beta$ 組織の T15N-AN より低くて 605MPa であり、破断伸びも低下して 11% 程度であった。

表 1 Ti-15Nb 合金および CP チタンの各材料特性値

	T15N		CP-Ti
	AN	AQ	
ヤング率(GPa)	87	56	109
内部摩擦($\times 10^{-3}$)	0.21	6.1	0.18
ビッカース硬さ(HV)	293	234	122

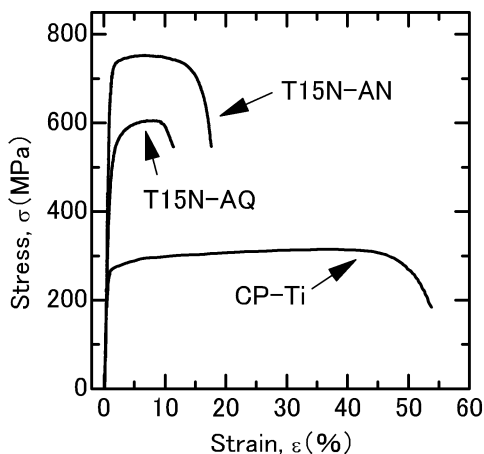


図 2 Ti-15Nb 合金および CP チタンの応力-ひずみ線図

3・2 プレス打抜き加工

上記のような制振性が向上した材料特性を示す、Ti-15Nb 合金 α' マルテンサイト組織 (T15N-AQ) のプレス打抜き性を調べるため、CP-Ti および T15N-AN のプレス打抜き加工性との比較を行った。図 3 にクリアランス 5%

および 10% の荷重-ストローク線図を示す。クリアランスが 5% の場合、CP-Ti は 6.7kN の打抜き荷重で、切断までに 50%t 以上のストローク比を必要とした。T15N-AN は 12.6kN の打抜き荷重を必要とし、25%t のストローク比で切断された。一方、T15N-AQ は低いヤング率のために打抜き加工初期の勾配が小さくなり、11.5kN の打抜き荷重で切断まで 40%t のストロークを必要とした。引張試験結果の破断伸びでは、T15N-AN よりも T15N-AQ の方が小さい値であったが、打抜き加工に要するストロークは α' マルテンサイト組織である T15N-AQ の方が多くを必要とすることが分かった。クリアランスが 10% の場合、試験片材種の違いに伴う荷重-ストローク線図の傾向は同じであるが、どの条件でも切断までに必要とするストロークが増加していた。

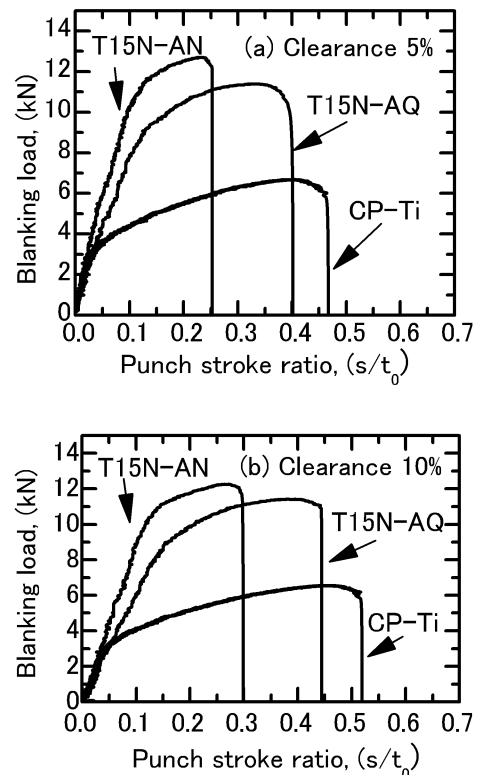


図 3 Ti-15Nb 合金および CP チタンの荷重-ストローク線図

各試験片材種におけるクリアランスごとの打抜き荷重、パンチストローク比およびせん断仕事を図 4 に示す。打抜き荷重については、応力-ひずみ曲線における引張強さの大小関係と同様、T15N-AN よりも α' マルテンサイト組織の T15N-AQ の方が低くなっていた。クリアランスが増加するに従って、打抜き荷重はわずかず減少する傾向にあった。せん断抵抗値は、 $\alpha + \beta$ 組織の T15N-AN で 83% 程度であったが、 α' マルテンサイト組織の T15N-AQ では 95% 程度と大きめの値になっていた。CP-Ti の打抜き荷重につ

いても、クリアランスの増加に伴い減少する傾向を示した。パンチストローク比についてはCP-Tiが最も大きく、クリアランスが小さくなるにしたがってパンチストローク比も減少した。パンチストローク比が最も小さいT15N-ANについても、クリアランスが小さくなるにしたがってパンチストローク比も減少した。一方、T15N-AQはクリアランス7.5%の時のパンチストローク比が最少ではあるが、クリアランス2.5から15%にかけて、それほど変化を示さなかった。せん断仕事については、打抜き荷重とパンチストローク比には大きな違いがあったものの、CP-TiとT15N-ANは同等の値を示し、クリアランスが小さい方がせん断仕事も小さい傾向にあった。一方、 α' マルテンサイト組織のT15N-AQでは、クリアランス15%では他の試験片材種と同程度であるが、クリアランスが小さくてもせん断仕事はそれほど変わらず、結果として低クリアランス側では他の試験片材種よりも高い傾向にあった。

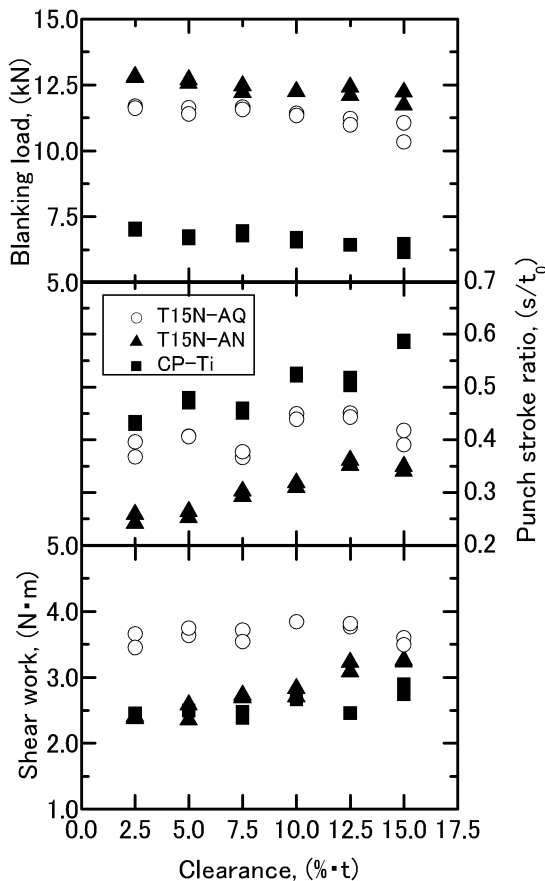


図4 各クリアランスにおける最大せん断荷重、せん断ストロークおよびせん断仕事

3・3 切断面観察

プレス打抜き加工を行ったT15N-ANおよびT15N-AQの各試験片について、切断面の観察を行った。打抜き加工後、

穴側(Piercing)および抜き落とし側(Blanking)の両方をエポキシ樹脂に埋め込み、中心で切断した後に材料縦断面を観察した写真が図5である。切断面に関しては、T15N-ANとT15N-AQの材料特性に起因する差異はそれほど大きくないとみられる。一方、クリアランスの違いによる切断面の違いについては明瞭であった。5%では、比較的良好な切断面となっていた。10%では、抜き落とし側ではかえりは発生していないものの、穴側でかえりが発生していた。15%でも同様に、穴側でのみ、かえりが発生していた。

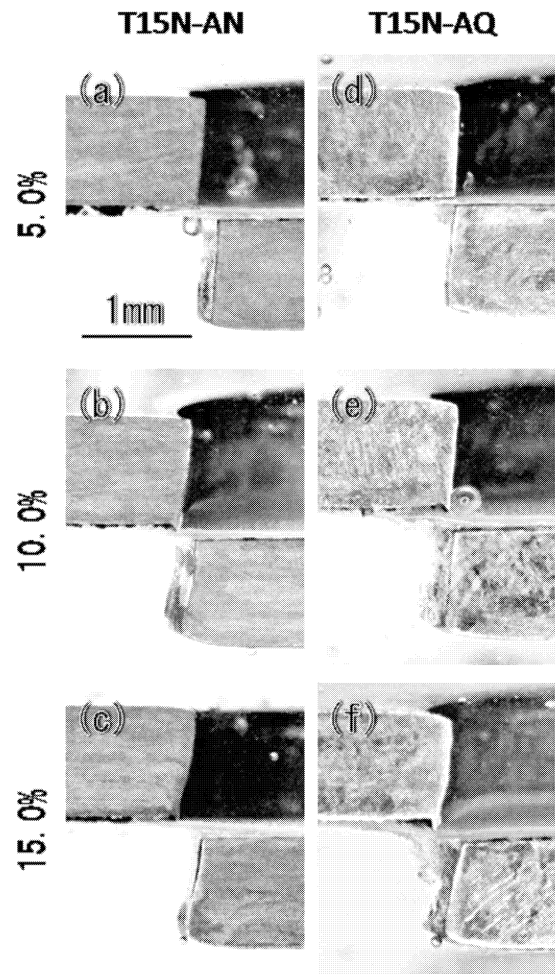


図5 Ti-15Nb合金におけるせん断打ち抜き後の材料縦断面写真

穴側および抜き落とし側のだれの割合について、定量化したものが図6である。穴側(a)と抜き落とし側(b)を比較すると、だれの割合は穴側の方が比較的小さな値となっている。T15N-ANとT15N-AQの比較では、ヤング率の小さいT15N-AQの方が、およそどのクリアランスでも大きいだれの量を示し、特に抜き落とし側では5%の時の差が顕著で、T15N-AQが大きい値を示していることが分かった。

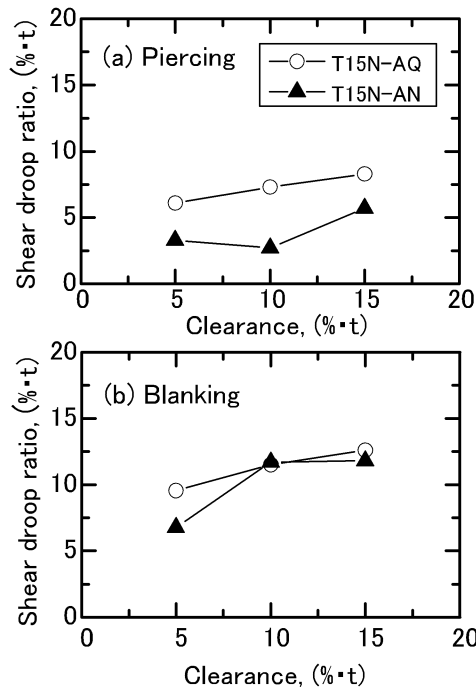


図6 Ti-15Nb合金におけるだれの割合

図7に抜き落とし側の切断面写真を示す。図5と同様、T15N-ANとT15N-AQの材料特性に起因する差異はそれほど大きくないとみられる。T15N-AQにおけるクリアランス5% (d)の切断面が、最もきれいに切断されているように見受けられる。しかしながら、(d)図中下側は比較的きれいなせん断面になっているが、多くは破断面で構成されているようである。クリアランス10%および15%の場合にはほとんどが破断面で構成されており、切断面中央部がくぼんだ形になっていることがわかる。

だれの部分を除いた、切断面の表面高低差を測定した結果を図8に示す。この結果からも、材料特性に起因する差異はほとんどないとみられる。クリアランス2.5%では、比較的平坦な面になっていた。5%でも、ほぼ平坦な切断面になっており、7.5%では50 μ m以内の高低差になっていた。10%を境としてクリアランスが大きくなると、高低差が100 μ m程度以上に大きくなっており、クリアランスは10%以下が適切であることが分かる。

以上のような切断面観察より、 $\alpha + \beta$ 組織から材料特性が大きく異なる α' マルテンサイト組織であっても、クリアランスが5%前後のプレス打抜き加工を行うことにより、 $\alpha + \beta$ 組織と同等の切断面が得られることが分かった。

4. 結言

Ti-15Nb合金における焼入れ α' マルテンサイト組織のプレス打抜き加工の特徴を調べるため、Ti-15Nb合金の焼なまし $\alpha + \beta$ 組織および工業用純チタンについても材料特性および打抜き加工の特徴を調べた。その結果を比較検討することにより、以下の知見が得られた。

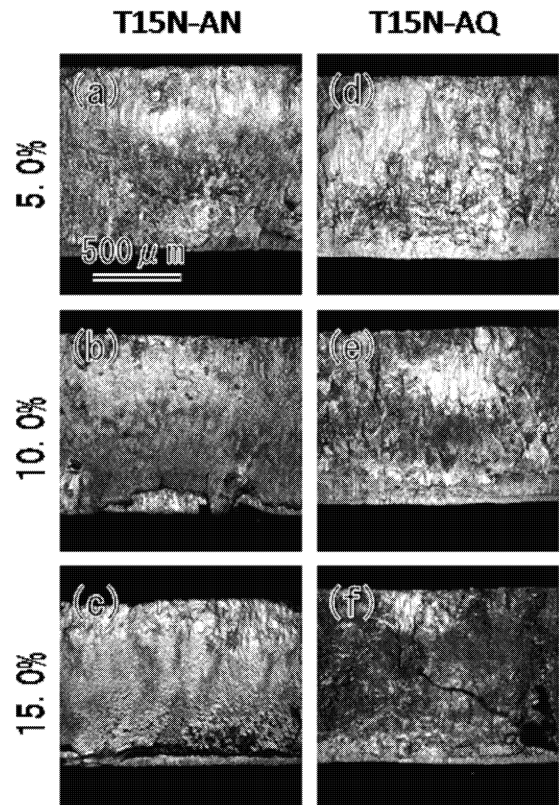


図7 Ti-15Nb合金におけるせん断打ち抜き後の切断面写真

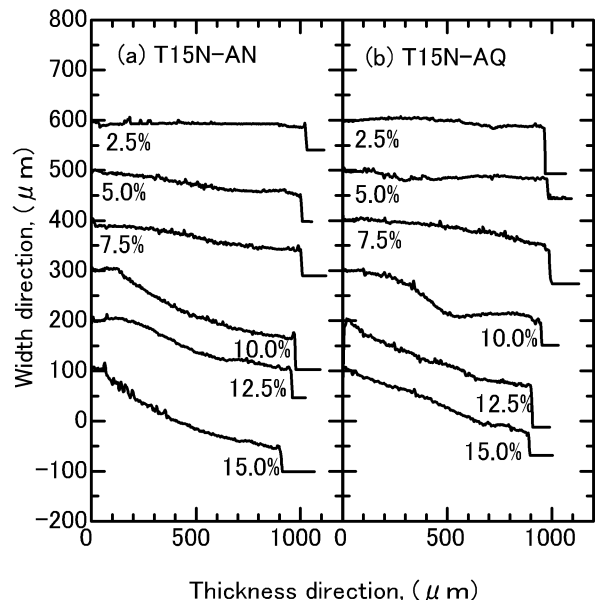


図8 Ti-15Nb合金における各クリアランスでせん断打ち抜き後の高低差

- 1) 焼入れ α' マルテンサイト組織が形成されることにより、ヤング率および硬さは低下し、内部摩擦は増加する。また、マルテンサイト組織が形成されることにより、引張強さとともに引張破断伸びも減少した。
- 2) 各試験片において測定した荷重-ストローク線図より、クリアランスごとの打ち抜き荷重、パンチストローク比、せん断仕事を測定した。焼なまし $\alpha+\beta$ 組織と比較して、焼入れ α' マルテンサイト組織は打ち抜き荷重は小さいものの、パンチストローク比は大きくなっていた。また、焼なまし $\alpha+\beta$ 組織のせん断仕事は工業用純チタンと同等であったが、焼入れ α' マルテンサイト組織は、より多くのせん断仕事を必要することが分かった。この傾向は、低クリアランス側で顕著であった。引張強さに対するせん断抵抗値は、 $\alpha+\beta$ 組織で83%程度であったが、 α' マルテンサイト組織では95%程度であることが分かった。
- 3) 切断面形状に関しては、クリアランスが10%以上になると $\alpha+\beta$ 組織および α' マルテンサイト組織ともに穴側にのみ、かえりが発生していた。だれについては、 $\alpha+\beta$ 組織よりも α' マルテンサイト組織の方が、割合が多くなっていた。また、だれの割合は穴側の方が小さく、抜き落とし側の方が大きくなっていることが分かった。

謝辞

本研究の実施にあたり、財団法人天田金属加工機械技術振興財団の奨励研究助成を賜りましたことを付記し、厚く謝意を表します。また、研究で用いた金型においてご協力を頂いた神奈川大学教授青木勇教授、ならびにご助言を頂いた笹田昌弘准教授に対し、深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 黒田大介・新家光雄・福井壽男・森永正彦・鈴木昭弘・長谷川二郎：鉄と鋼，86(2000)，602-609.
- 2) 倉本繁・西野和彰・斎藤卓：軽金属，55(2005)，618-623.
- 3) J-I Kim, H-Y. Kim, H. Hosoda, S. Miyazaki : Materials Transactions, 46(2005)，852-857.
- 4) 森謙一郎：型技術，20(2005)，38-41.
- 5) 森謙一郎・古川陽介・原田泰典・村尾卓児：材料とプロセス，17(2004)，268.
- 6) 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.
- 7) Y. Mantani, M. Tajima : Materials Science and Engineering A, 442(2006)，409-413.
- 8) Y. Mantani and M. Tajima : Proc. 11th World Conf. on Titanium, Kyoto, (2007)，531-534.
- 9) 万谷義和・工藤邦男：材料とプロセス，23(2010)，499.