

(技術資料)

## KS Ti-9の異方性改善技術

### Process for Hot Rolling KS Ti-9 Coiled Sheet for Less In-Plane Anisotropy in Strength and Bendability



逸見義男\*  
Yoshio ITSUMI



多田宏一郎\*\*  
Koichiro TADA

KS Ti-9 has been developed as substitute for Ti-6Al-4V alloy, which has been widely used in aerospace parts. However, this alloy shows strong in-plane anisotropy in strength and bendability when manufactured by the conventional method, that is, by a uni-directional rolling process in the  $\alpha$ - $\beta$  region. In order to reduce in-plane anisotropy, we have adopted the  $\beta$  rolling process, defined as the process of rolling after heating the slab in the  $\beta$  region. This new process results in forming a weaker transverse-texture than that obtained by the conventional method, as it offers a much better chance for new  $\alpha$  nucleation with random crystal orientation in cooling from  $\beta$  into the  $\alpha$ - $\beta$  phase. Trial sheet manufactured by the new process on a mass production line also exhibits less in-plane anisotropy and has the same properties as Ti-6Al-4V.

まえがき= KS Ti-9 は、汎用の Ti-6Al-4V 合金と同等の高い機械的特性を有し、これまでその強度クラス (1,000MPa) では困難であったコイル圧延を工業レベルで世界で初めて可能にした合金<sup>1), 2)</sup> であり、ASTM に Gr.35 として登録されている。

航空機部材に多用されている Ti-6Al-4V 合金は加工性が悪く、そのまま熱間圧延すると激しいエッジ割れを起こすことや冷間圧延性に乏しいことから、鋼板の量産ラインで製造することはきわめて困難である。このような Ti-6Al-4V 合金と比較して、KS Ti-9 は鋼板の量産製造ラインにてコイル圧延が可能であることから、低コスト・短リードタイムで製造できる。このため、Ti-6Al-4V の代替合金として航空機分野での適用拡大が期待されている。

しかしながら、熱延スラブから仕上げまで一方向に圧延されることから、強度などの機械的特性において圧延方向とそれに垂直な方向の間で強い面内異方性が生じる。とくに  $\alpha$ - $\beta$  型チタン合金は、主相である  $\alpha$  相の結晶構造が最密六方晶であることからすべり系が限られているため、結晶方位によって機械的特性が大幅に異なる。このため、一方向にのみ圧延を行うと特有の集合組織が形成されるとともに、一般のアルミや鋼と比べて板面にきわめて強い異方性を発現する。この異方性を抑制する方法としてはいくつかの方法が提案されている<sup>3), 4)</sup>。たとえば、圧延方向と 90° 方向に一定量圧延するいわゆるクロス圧延法が採用されている<sup>3)</sup> が、コイルの製造を前提とした場合にはその方法を採用することは困難である。クロス圧延した Ti-6Al-4V 合金板を使い慣れたユーザでも違和感なく KS Ti-9 を使用して頂くためには、コイルであっても異方性の低減を図ってゆく必要がある。

本稿では、熱延プロセスにおける集合組織の変化に着目し、強度と曲げ加工性における異方性軽減の検討を行った。さらに、その結果を基に量産ラインでコイルを試作した板の諸特性も紹介する。

#### 1. 強度異方性に及ぼす熱延温度の影響

##### 1.1 供試材および試験方法

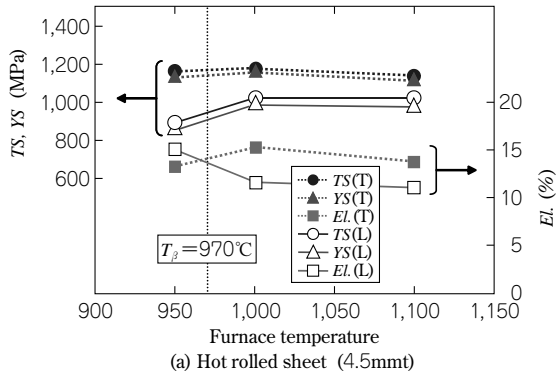
KS Ti-9 の基本組成である Ti-4.5Al-2Mo-1.6V-0.5Fe-0.3Si-0.03C (mass%) をコールドクルーシブル誘導溶解炉にて溶解して得た、10kg 強の  $\phi$ 100mm、高さ約 300mm の鋳塊を供試材とした。その化学組成を表 1 に示す。これを 1,100°C にて分塊鍛造後、板厚 75mm、幅 100mm のスラブに分割、調整した。さらに、 $\beta$  変態点 ( $T_\beta$ ) の 970°C を境とする 950°C、1,000°C、および 1,100°C に加熱した後熱間圧延を行い、板厚 4.5mm の熱延板を得た。その後、焼鈍酸洗、冷延を繰返して板厚 1.0mm に仕上げた。

試験は、圧延方向に平行な方向 (L 方向) および垂直方向 (T 方向) の 2 方向に対する引張試験、および 105° 曲げ試験をいずれも室温にて実施した。引張試験は、ASTM E8M に準拠し、曲げ試験は ASTM E290 に準拠して行った。なお曲げ試験では、押込み治具の半径  $R$  (mm) を変えて目視にて割れの有無を観察し、割れが発生しない限界の曲げ半径を板厚  $t$  (mm) で除して無次元

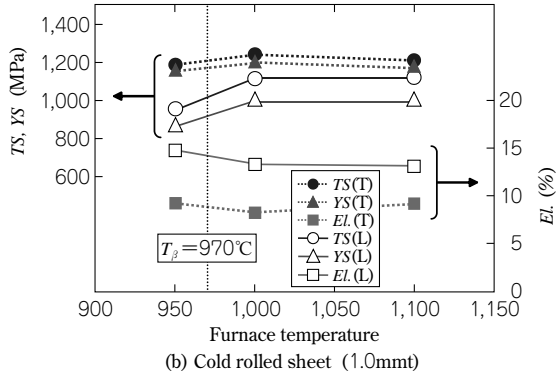
表 1 試験材の化学組成  
Table 1 Chemical composition of KS Ti-9 specimen (wt%)

Element	Al	Mo	V	Fe	Si	C	O
Chemical compositions	4.31	1.91	1.58	0.51	0.27	0.03	0.142
Nominal compositions	4.5	2.0	1.6	0.5	0.3	0.03	—

\*鉄鋼事業部門 チタン本部 チタン研究開発室 \*\*鉄鋼事業部門 加古川製鉄所 薄板部



(a) Hot rolled sheet (4.5mmt)



(b) Cold rolled sheet (1.0mmt)

図1 引張特性に及ぼす熱延時の加熱温度の影響

Fig. 1 Effect of furnace temperature in hot rolling on mechanical properties of KS Ti-9

化した値を限界曲げ半径 ( $R/t$ ) として定義した。同時に、それらのマイクロ組織を走査型電子顕微鏡 (SEM) にて観察し、電子線後方散乱回折 (EBSP) 法を用いて集合組織を測定した。観察面は板面から  $1/4t$  まで削り込み、研磨した面とした。

### 1.2 試験結果・考察

図1に4.5mmt熱延板ならびに1.0mmt冷延板における引張特性に及ぼす熱延時の加熱温度の影響を示す。 $\beta$ 変態点直下の950°Cで加熱・圧延した従来工程(以下、 $\alpha$ - $\beta$ 圧延という)材に比べ、 $\beta$ 変態点よりも高い1,000°C、1,100°Cに加熱した圧延(以下、 $\beta$ 圧延材という)材は、L方向では耐力および引張強度がともに高くなる一方で、T方向ではほとんど変化せず、結果的にその異方性は小さくなっていることがわかる(図1(a))。

熱延後、冷延焼鈍を繰返して得た1.0mmtの冷延板も同様の傾向を示している(図1(b))。また、 $\beta$ 圧延材では強度の低いL方向が $\alpha$ - $\beta$ 圧延材よりも向上しているため、Ti-6Al-4V合金焼鈍板の規格AMS4911の耐力(YS)  $\geq 866$ MPa、引張強度(TS)  $\geq 920$ MPa、伸び(El.)  $\geq 10\%$  (for 4.5mmt),  $\geq 8\%$  (for 1.0mmt)を満足している。とくに耐力は若干の余裕を持たせることができている。

常に強度が高いT方向の値をL方向のそれで割った値を強度異方性と定義し、図1を強度異方性で整理したものを図2に示す。 $\beta$ 変態点を超えるとその異方性が明瞭に低減していることから、 $\beta$ 圧延は異方性低減効果があることがわかる。一方、熱延材と冷延材で比較すると、冷延・焼鈍の工程を経ることによって、引張強度の異方性は低減するが、耐力のそれは逆に増大する傾向を示す。ただし、その変化量は熱延時の加熱温度が与える影

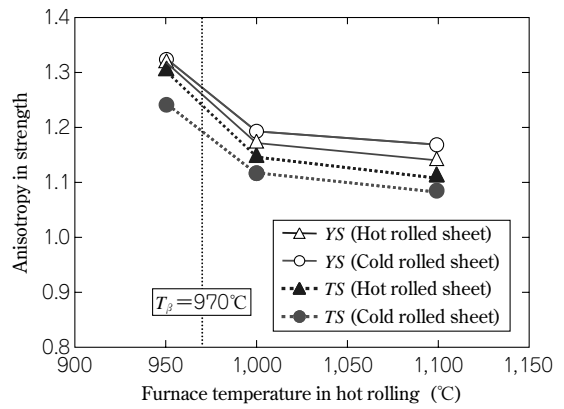


図2 強度異方性に及ぼす熱延時の加熱温度の影響

Fig. 2 Effect of furnace temperature in hot rolling on anisotropy in strength of KS Ti-9 sheet

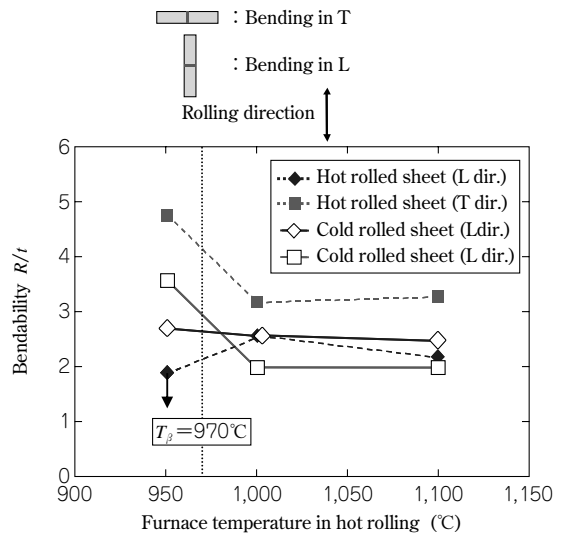


図3 限界曲げ半径と熱延時の加熱温度の関係

Fig. 3 Effect of furnace temperature in hot rolling on bendability in L and T direction

響量に比べると小さいことから、本試験範囲では熱延工程が異方性に対して支配的であることがわかった。

強度と同様、曲げ加工性についても熱延時の加熱温度の影響を図3に整理した。T方向(曲げ稜線が圧延方向と平行)の曲げ加工性は、熱延材、冷延材ともに $\alpha$ - $\beta$ 圧延材と比べて $\beta$ 圧延材で大幅に改善されている。一方、L方向(曲げ稜線が圧延方向と垂直)では逆に劣化しているが、その変化はT方向に比べて小さい。また、冷延材は、熱延材と比べて総じて曲げ加工性が改善されている。熱延工程のみならず冷延、焼鈍工程の影響も大きく受けることがわかり、強度特性とは異なる傾向を示す。

図4に限界曲げ半径の異方性に及ぼす熱延温度の影響を示す。熱延材、冷延材ともに $\beta$ 圧延材は $\alpha$ - $\beta$ 圧延材よりも異方性が改善されている。また $\alpha$ - $\beta$ 圧延材では、熱延材、冷延材を問わずL方向の曲げ加工性がT方向よりも良い関係を示すが、 $\beta$ 圧延材では熱延後に冷延、焼鈍を加えるとその関係が逆転することがわかる。この結果は、冷延、焼鈍の工程を経ることによって曲げ加工性の面内異方性の関係が変化することを示唆している。

これらの違いを明らかにするために組織および集合組織を調査した。各熱延温度での焼鈍後の熱延板および冷延板を対象に、板面方向のSEM組成像を図5に示す。暗

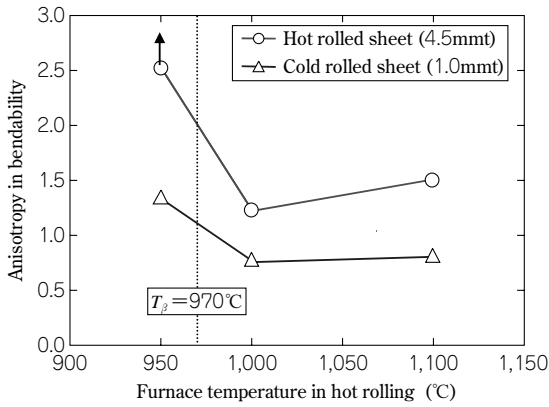


図4 曲げ異方性に及ぼす熱延温度の影響

Fig. 4 Effect of furnace temperature in hot rolling on anisotropy in bendability of KS Ti-9 sheet

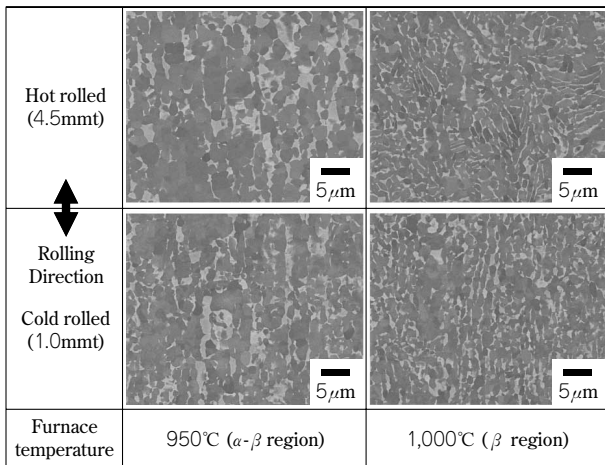


図5 圧延温度と熱延、冷延後のマイクロ組織との関係

Fig. 5 Relationships between furnace temperature in hot rolling and microstructure after hot rolling and cold rolling with subsequent annealing

灰色が主相の $\alpha$ で明灰色が $\beta$ である。950°Cの $\alpha$ - $\beta$ 圧延材は、変態点直下の圧延温度のため、粗大化した初析 $\alpha$ 晶が圧延方向にやや伸びた等軸組織が不均一に分布している。冷延材では、冷延と焼鈍の繰返しによってやや微細になる傾向は見られる。一方、 $\beta$ 圧延材は、熱延中に析出した $\alpha$ に変形が加わるため針状の長い $\alpha$ は分断され、アスペクト比が比較的小さく、幅がそろった針状 $\alpha$ が均一分散している。これに冷延、焼鈍を加えると、長軸 $\alpha$ がさらに分断され、等軸化が進む傾向がうかがえ、 $\alpha$ - $\beta$ 圧延材よりも等軸で均一微細な組織が得られている。 $\beta$ 圧延材の曲げ加工性が改善するのは、この均一微細組織がある程度寄与しているものと考えられる。

冷延焼鈍後の $\alpha$ の結晶方位マップと集合組織を図6に示す。 $\alpha$ - $\beta$ 圧延材はほとんどの $\alpha$ 晶の(0001)面の法線がT方向に向いた非常に強いTransverse Texture(以下、T-textureという。)を形成している。これに対して1,000°Cの $\beta$ 圧延材は、T-textureの成分も残るものの、板面法線から(0001)面の法線がT方向に約 $\pm 50^\circ$ 傾いたsprit TD textureが強くなっている。図7に(0001)面の集積度ピークに及ぼす圧延温度の影響を示した。 $\beta$ 圧延材は $\alpha$ - $\beta$ 圧延材より集積度は低く、弱い集合組織を形成しているのに対し、 $\alpha$ - $\beta$ 圧延では初析 $\alpha$ が熱延時に加工を

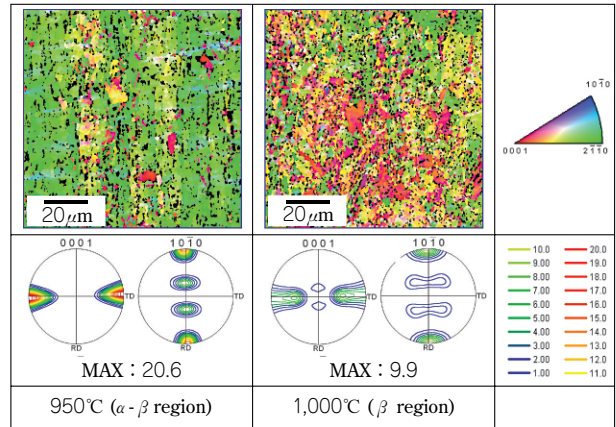


図6 熱延温度と集合組織の関係

Fig. 6 Relationships between furnace temperature in hot rolling and their texture

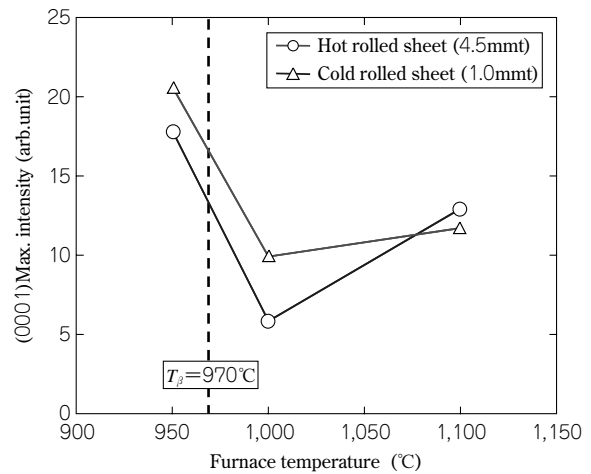


図7 (0001)集積度に及ぼす熱延温度の影響

Fig. 7 Effect of (0001)Max. intensity on furnace temperature in hot rolling

受けて強い集合組織を形成する。 $\beta$ 圧延においては、 $\beta$ が加工を受けつつ比較的ランダムに $\beta$ から $\alpha$ に変態する。変態析出した $\alpha$ はその後に加工を受けることになるが、その集合組織の形成は必然的に $\alpha$ - $\beta$ 圧延よりも弱くなる。このため、 $\beta$ 圧延は $\alpha$ - $\beta$ 圧延に比べて異方性が軽減されたものと推察される。純チタン板の冷延焼鈍集合組織はsprit TD textureを示し<sup>5)</sup>、T方向の曲げ加工性がL方向より良好であることが知られており<sup>6)</sup>、図3に示すT方向の曲げ加工性の向上は $\beta$ 圧延によるsprit TD textureが影響していると考えられる。

以上により、 $\beta$ 圧延によって集合組織のランダム化と組織微細化が図られ、強度ならびに曲げ異方性が改善されることがわかった。

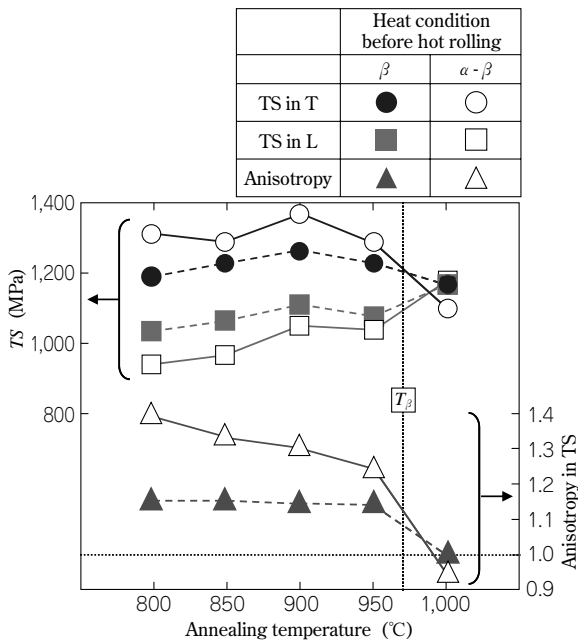
## 2. 量産試作材の特性

1章で述べた試験結果を受け、量産ラインでの試作を行ってその特性を評価した。まず、真空アーク溶解炉(VAR)にて2回溶解し、 $\phi 1,080\text{mm}$ の6トン鋳塊を造り、 $\beta$ 域で分塊鍛造後スラブ形状に整えた。これをさらに $\beta$ 域の1,000°Cに加熱・熱延し、板幅1,000mm、板厚4.8mmの熱延コイルを製作した。続いて酸洗焼鈍した後、冷延、焼鈍を繰返して板厚1.0mmのコイルとした。

また、 $\alpha$ - $\beta$  圧延した従来プロセスの量産材を比較材とした。

量産試作した  $\beta$  圧延材および  $\alpha$ - $\beta$  圧延材における引張強度やその異方性に及ぼす仕上焼鈍温度の影響を **図 8** に示す。 $\beta$  圧延材は、量産材においても  $\alpha$ - $\beta$  圧延材より L 方向の強度が上がり、T 方向の強度が下がる傾向を示し、結果として異方性が軽減している。焼鈍温度が  $\beta$  変態点を超えると強度異方性は消失するが、その伸びを調べると両方向とも 5% 未満に低下していることがわかった。 $\beta$  変態点以上に加熱すると  $\beta$  単相となって  $\beta$  結晶粒が急激に粗大化し、最終的に旧  $\beta$  粒界に沿った粒界  $\alpha$  と針状  $\alpha$  で構成された組織となる。延性が低下したのはこのためであると推定される。また、 $\beta$  変態点から下の  $\alpha$ - $\beta$  域内では、温度が高くなるほど異方性は軽減する傾向を示している。とくに  $\alpha$ - $\beta$  圧延材はその傾向が強い。これは、温度が高いほど変態する  $\beta$  相量が多くなる一方で、その後の冷却過程において  $\beta$  相から比較的ランダムに  $\alpha$  相が変態析出するため異方性が改善されるものと推察される。したがって、異方性の強い  $\alpha$ - $\beta$  圧延材でその効果がより強く出るものと考えられる。

**表 2** に、量産試作材の限界曲げ半径とその異方性を示



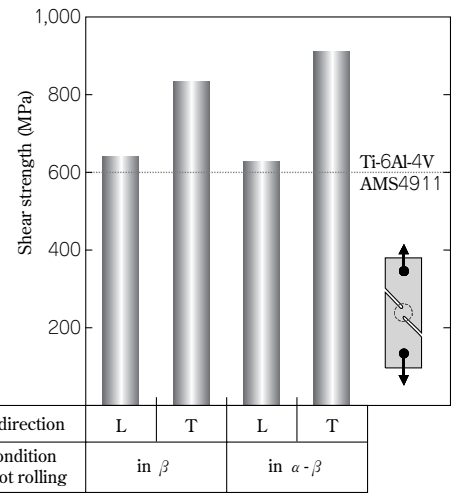
**図 8**  $\beta$  圧延および  $\alpha$ - $\beta$  圧延材の引張強度とその異方性に及ぼす焼鈍温度の影響

**Fig. 8** Effect of annealing temperature on tensile strength and their anisotropy, comparing KS Ti-9 sheet hot rolled in  $\beta$  region heating with in  $\alpha$ - $\beta$  region heating

**表 2** 実機  $\beta$  圧延材と  $\alpha$ - $\beta$  圧延材の限界曲げ半径とその異方性

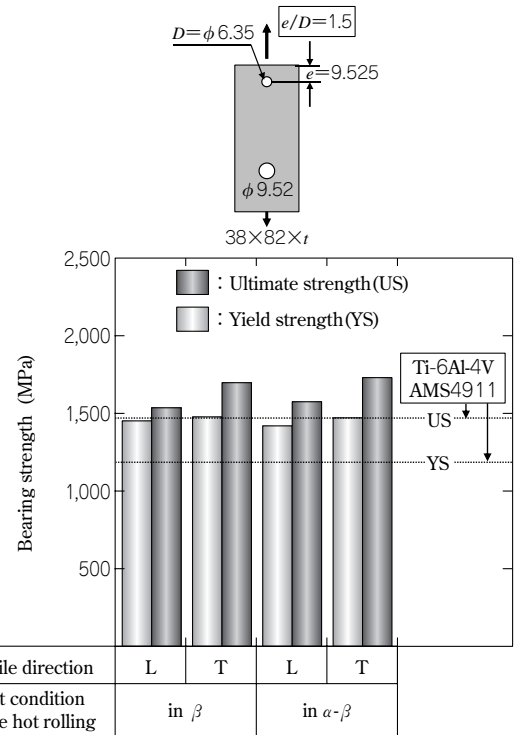
**Table 2** Minimum bend radius in L and T direction and its anisotropy of KS Ti-9 annealed sheet, heated in  $\beta$  and in  $\alpha$ - $\beta$  at hot rolling

Heat condition before hot rolling	Annealing condition	Minimum bend radius (R/t)		Anisotropy
		in T	in L	
in $\beta$ region	800°C, 3min	3.3	2.6	1.3
	850°C, 3min	2.9	2.2	1.3
in $\alpha$ - $\beta$ region	800°C, 3min	4.4	1.7	2.6
	850°C, 3min	3.9	2.2	1.8



**図 9** KS Ti-9 のせん断強度

**Fig. 9** Shear strength of KS Ti-9



**図 10** KS Ti-9 のベアリング強度

**Fig. 10** Bearing strength of KS Ti-9

す。ラボでの試験と同様に  $\beta$  圧延材は  $\alpha$ - $\beta$  圧延材と比較して曲げ加工性の低い T 方向が改善する一方、L 方向が低下し、異方性が改善することが確認された。また  $\alpha$ - $\beta$  圧延材、 $\beta$  圧延材ともに高温で熱処理するほど、曲げ加工性が改善されることがわかった。詳細は不明であるが、高温ほど初析  $\alpha$  の再結晶や等軸化が進み、加工性が改善するものと考えられる。一方、ラボでの試験結果で見られたような L 方向と T 方向の曲げ加工性の逆転は認められなかった。これは、量産材の集合組織においてラボ試験での  $\beta$  圧延材ほど sprit TD texture が発達しなかったためと推察される。

つぎに、航空機に必要とされる板のせん断的な破壊に対する強さを評価するため、せん断強度試験 (ASTM B831) を実施した。その結果を **図 9** に示す。また、リベットなどの穴部からの破壊に対する強さを評価するた

め、短冊状の試験片に板端部から所定距離の位置に設けた穴に同径のピンを通して引張り、その強度を調べるベアリング強度試験 (ASTM E238) を行った。その結果を図10に示す。いずれの試験結果からも異方性の影響が認められるものの、基本的な特性はTi-6Al-4V焼鈍材 (AMS4911) とほぼ同等であり、使用に際して問題ないものと考えられる。

むすび= KS-Ti-9は $\beta$ 域からの圧延により、 $\alpha$ - $\beta$ 圧延材と比べて集合組織のランダム化および組織の均質微細化に伴い、強度ならびに曲げ加工性の異方性が改善できることがわかった。また、航空機部材適用にあたり必要とされるせん断強度、ベアリング強度とも汎用のTi-6Al-4V合金のそれとほぼ同等であり十分な特性が備わっているものといえる。

しかしながら本手法では、クロス圧延のように完全に異方性が解消されているわけではない。さらなる異方性軽減に向けて今後も継続して改善を図っていきたい。

実績が重視される航空機業界において、新規部材の採用に対しては機体メーカーの協力が必須である。そこで平成20年度より、国内重工メーカーとの共同研究による航空

機部材の開発を進めている。この共同研究は、本合金ならびに熱間加工性の良好なKS EL-Fをベースとした合金を題材とする経済産業省「次世代構造部材創製・加工技術開発」プロジェクトの1テーマである「次世代チタン合金構造部材創製・加工技術開発」において遂行されているものであり、新たな日本発の航空機部材用合金として適用実現が期待される。

なお、本稿で紹介した開発の一部は、上記プロジェクトの開発の一環として(財)素形材センター 次世代材料技術本部との契約に基づいて実施した成果である。ここに関係各位に謝意を表す。

#### 参 考 文 献

- 1) 大山英人ら：R&D 神戸製鋼技報, Vol.49, No.3 (1999), pp.53-56.
- 2) 逸見義男ら：R&D 神戸製鋼技報, Vol.59, No.1 (2009), pp.81-84.
- 3) M. Peters et al.: Titanium'80 Science and Technology, Vol.2 (1980), pp.925-935.
- 4) H. Fujii: Mat. Sci. Form, 426-432 (2003), pp.661-666.
- 5) H. Conrad et al.: Titanium Science and Technology, Vol.2 (1973), pp.969-1005, Plenum Press.
- 6) (社)チタニウム協会編：チタンの加工技術 (1992), pp.77-80, 日刊工業新聞.