

(技術資料)

# コイル製造可能なTi-6Al-4V代替高強度 - 型チタン合金、KS Ti-9

Coilable High Strength - Type Titanium Alloy, KS Ti-9, with Properties Comparable to Ti-6Al-4V



逸見義男\*  
Yoshio ITSUMI



大山英人\*(工博)  
Dr. Hideto OYAMA

KS Ti-9 has been developed as a coilable high strength - type titanium alloy. Over 100 tonnes of the alloy, registered as ASTM Gr.35, has been produced mainly for golf club faces. KS Ti-9 can be formed into coiled sheets using ordinary steel mill facilities and therefore, being less costly compared to Ti-6Al-4V which requires a special pack rolling process for manufacturing. In addition, KS Ti-9 has mechanical properties, weldability, super-plasticity, and formability, all of which are comparable to those of Ti-6Al-4V.

まえがき = KS Ti-9 は、航空機部材で最も広範に使用されている Ti-6Al-4V と同等の高強度を有しながら、商業的にコイル圧延で薄板製造が可能なることを世界で初めて示した + 型チタン合金であり、1999 年より製造を開始した<sup>1)</sup>。Ti-6Al-4V は熱間、冷間加工性に乏しいため、一般的には複数枚の板を鋼で包み込んで熱間圧延する、いわゆるパック圧延の繰返しにより製造しているのに対し、KS Ti-9 は、生産性の高い鉄鋼圧延設備を用いて、そのまま一貫プロセスで薄板製造しているため、大幅なコスト低減を達成している。現在、ASTM Gr.35 として登録され、ゴルフクラブフェースなどの用途で 100 トンを超えるコイルでの量産実績がある。さらに用途拡大を図るためにはチタン合金のほとんどを消費している航空機分野への適用が欠かせない。本稿では、航空機での使用を念頭においた KS Ti-9 の材料諸特性や溶接性、さらに拡散接合例についても紹介する。

## 1. KS Ti-9 の物性値と材料諸特性

表 1 に KS Ti-9 および Ti-6Al-4V の物性値を示す。KS Ti-9 の公称組成は Ti-4.5Al-2Mo-1.6V-0.5Fe-0.3Si-0.03C(各数値は重量%)である。常温での構成相は Ti-6Al-4V と同様、およびの 2 相である。その変態点は約 970 で Ti-6Al-4V よりも若干低めに設定している。密度は

4.50g/cm<sup>3</sup> とやや高めだが、純チタン(4.51g/cm<sup>3</sup>)と同等である。また、ヤング率、電気抵抗および透磁率は Ti-6Al-4V とほぼ同等である。

本合金は安定化元素として Mo, V および Fe を採用しており、その添加量は、溶接性を考慮して溶融状態から単相域を経て急冷されて生じる変態組織における延性が確保できる Mo 当量( = %Mo + 1/1.5 × %V + 2.5 × %Fe<sup>2)</sup>): 4.75 以下としている。この安定化元素のうち、V については全量を入手が比較的容易な Ti-6Al-4V のスクラップでもまかなえ、かつ Fe は低品位のスポンジチタンも有効活用できるようにすることで原料面のコスト低減に配慮した。一方、安定化元素の Al は強度アップに有効であるが、Ti-6Al-4V の欠点でもある冷延性を低下させるため、その添加量を 5% 未満に抑えている。これに伴い、常温ならびに高温強度が低下することから、少量の Si および C を添加している。Si は溶接後の延性を確保する上で必要な変態組織での延性確保にも寄与している<sup>1)</sup>。

KS Ti-9 の量産工程は次のとおりである。真空アーク再溶解法 (VAR) にて溶製した 6 トン鑄塊を温度域で分塊鍛造、分塊圧延にて厚さ 200mm 前後のスラブとする。つづいて、+ 温度域で厚さ 4 ~ 5mm のコイルに熱間圧延し、連続焼鈍・酸洗ラインにて焼鈍と脱スケールを行った後、さらに冷延と焼鈍を繰返して所定の板厚に仕上げる。

量産工程で板厚 0.8mm まで製造した熱延および種々の板厚の冷延コイル材の常温引張特性を図 1 に示す<sup>2)</sup>。熱延、冷延圧延方向と平行な方向 (L 方向) と圧延方向に垂直な方向 (T 方向) の強度に異方性が生じているが、低強度側の L 方向でも Ti-6Al-4V 板の AMS (Aerospace Material Specification) 規格である AMS4911L の下限値の

表 1 KS Ti-9 の物理的諸特性

Table 1 Physical properties of KS Ti-9

Physical properties	KS Ti-9	Ti-6Al-4V
Phase	+	+
transus ( )	970	990
Density (g/cm <sup>3</sup> )	4.50	4.42
Elastic modulus (GPa)	105 - 110	105 - 116
Electrical resistivity (μ ·cm)	150	170
Magnetic permeability	1.0002	1.0002

\* 鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター

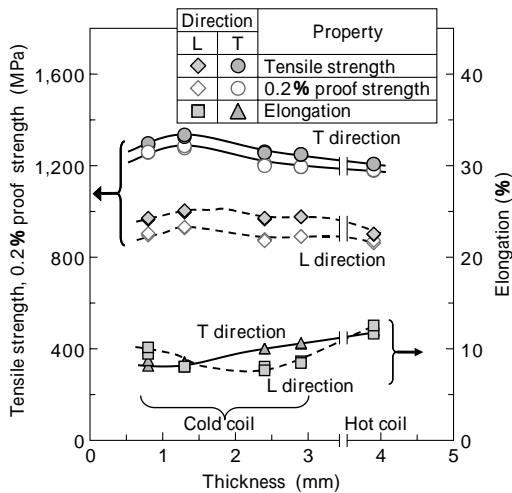


図1 熱延および冷延コイル材の引張特性  
Fig. 1 Tensile properties of KS Ti-9 coiled sheet

引張強度 (920MPa), 耐力 (866MPa) および伸び (8%) を確保している。熱延材の集合組織を確認したところ、主相である 相 (最密六方晶 (hcp) 構造) の (0002) 面方位が圧延方向と垂直な方向に強く集積した集合組織を形成していることがわかった。熱間でスラブから一気にコイル圧延されるため、特定の結晶方位が強く配向するものと考えられるが、熱延プロセス条件を適正化することにより、異方性改善が可能と考えている。

表2に板厚1.9mm, 幅1,000mmの冷延コイル材の板幅中心部, および端部における曲げ加工性を示す。試験法はASTM E 290に準拠した105°曲げにて評価した。曲げ加工性はL方向(曲げ軸が圧延方法と直交)の方が優れており, 曲げ限界の低いT方向(曲げ軸が圧延方向に対して平行)についても上記AMS4911Lの下限値(R/t 4.5)を確保している。

KS Ti-9 および市販のTi-6Al-4V合金丸棒を対象に調べた500までの高温引張特性を図2に示す。試験材は, コイル圧延する前のスラブから切出した素材を25mmの丸棒材に鍛造したものであるが, KS Ti-9の温度低下に伴う強度低下の割合はTi-6Al-4V合金とほぼ同等であり, 耐熱性の観点からも同等の性能が得られている。

図3に冷延材(板厚1.3mm)のL, T方向の疲労特性を示す。同図には比較のため, Ti-6Al-4Vの溶体化時効処理(STA)材<sup>3)</sup>(板厚1.5mm)の疲労強度特性を合せて示した。L方向の疲労強度はT方向よりもやや低い傾向を示すが, 強度異方性ほど顕著な差はない。また, 高サイクル側では, Ti-6Al-4Vにおいて疲労強度が最も高いとされるSTA材とほぼ同等である。

また, 航空機の板金部材においてリベットなどで締結する場合を想定し, 孔を起点とする破壊に対する強度の目安となるベアリング強度特性を図4に, せん断強度を図5に示す。厚さ10mmの板材を用いた結果であるが, いずれもT方向の強度がL方向よりも高い。

以上のように, Ti-6Al-4V板と同等もしくはそれ以上の特性を有しており, KS Ti-9は, 航空機構造部材として必要な機械的諸特性を十分に備えているといえる。

表2 1.9mm厚の冷延コイル材の曲げ特性  
Table 2 Bending property of coiled sheet for 1.9 mm thick plate

Position	Rolling direction	Minimum bend radius (R/t)
Center in width	L	2.5
	T	4.5
Side	L	2.5
	T	4.5

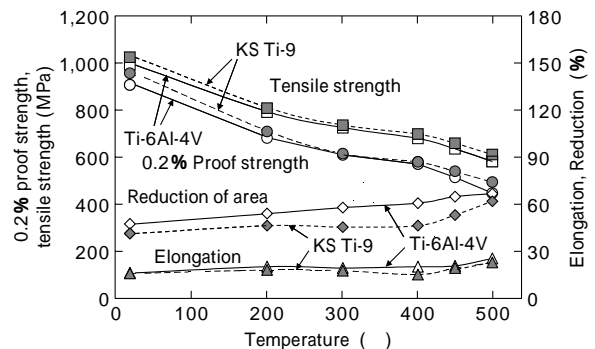


図2 鍛造丸棒(25mm)における引張特性の温度依存性  
Fig. 2 Temperature dependence of tensile properties for 25mm diameter forged bar

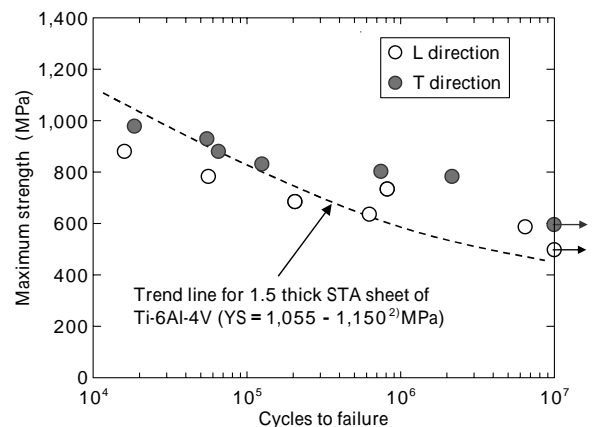


図3 KS Ti-9冷延材(1.3mm)の疲労強度特性  
Fig. 3 Smooth axial fatigue property of KS Ti-9 sheet (1.3mm)

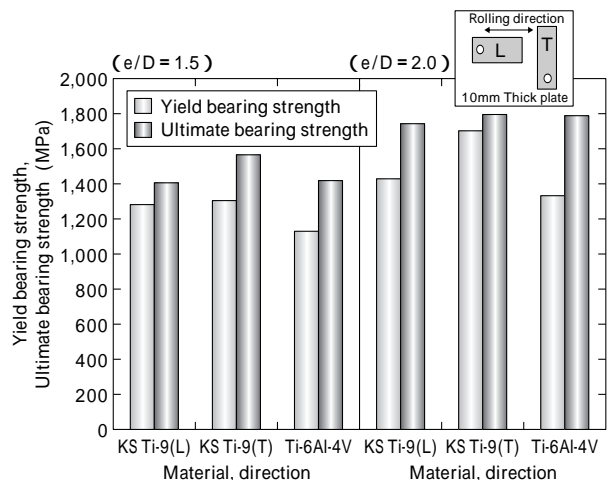


図4 KS Ti-9のベアリング強度特性  
Fig. 4 Bearing Properties of KS Ti-9 compared with Ti-6Al-4V

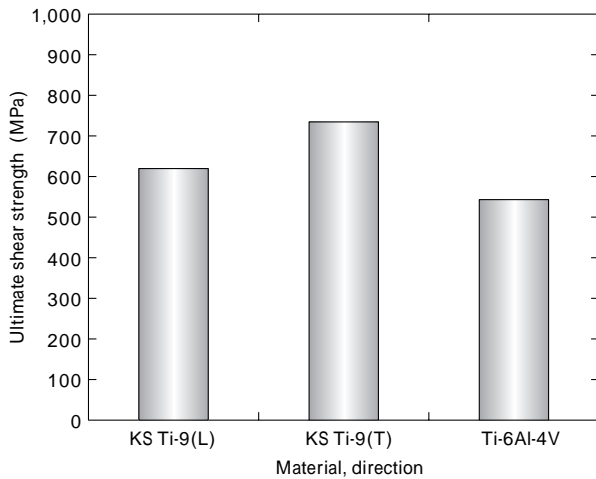


図5 KS Ti-9 のせん断強度特性  
Fig. 5 Shear strength of KS Ti-9 compared with Ti-6Al-4V

## 2. KS Ti-9 の溶接性

KT Ti-9 の溶接部の強度特性を評価するため、板厚 3.8mm の KT Ti-9 熱延焼鈍板の突合せ TIG 溶接を行い、溶接まま、および溶接後のひずみ取り焼鈍 (650 °C, 6h) を施した被験材を作製した。これらの被験材の溶融金属部 (Welded zone), 熱影響部 (Heat affected zone) および母材 (Base metal) から引張試験用の試験片 (平行部径 2.0mm, 平行部長 10.0mm) を作製し、それぞれの引張強度特性を調べた (図 6)。溶融金属部, 熱影響部ともに母材より強度がやや下がる傾向にあるが、伸びは溶融金属部, 熱影響部ともに 10% を超えており十分な延性を確保している。ひずみ取り焼鈍後の延性劣化も認められなかった。

つぎに、溶接部の疲労強度を評価するため、圧延方向と平行に突合せ溶接した KS Ti-9 の厚板 (試験片サイズを確保するため、板厚は 10mm とした) から様々な箇所・方向の試験片を作製し、疲労強度試験を行った (図 7)。溶接法としてここでは、厚板のワンパス溶接が可能で溶加材が不要な電子ビーム溶接 (EBW), およびプラズマアーク溶接 (PAW) を採用した。図 7 には比較のため、Ti-

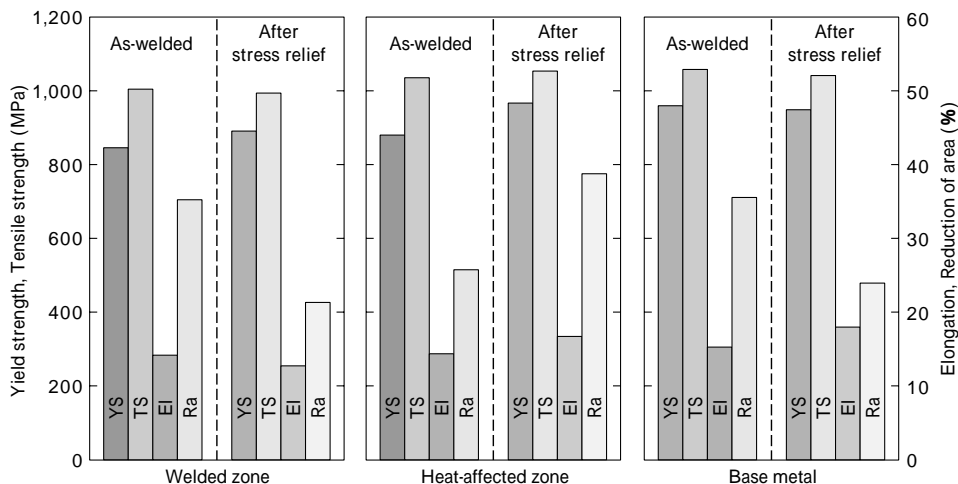


図6 TIG 溶接後および応力除去後の KS Ti-9 の機械的特性  
Fig. 6 Tensile properties of KS Ti-9 after TIG welding and stress relief (650 °C × 6h) for 3.8mm thick plate

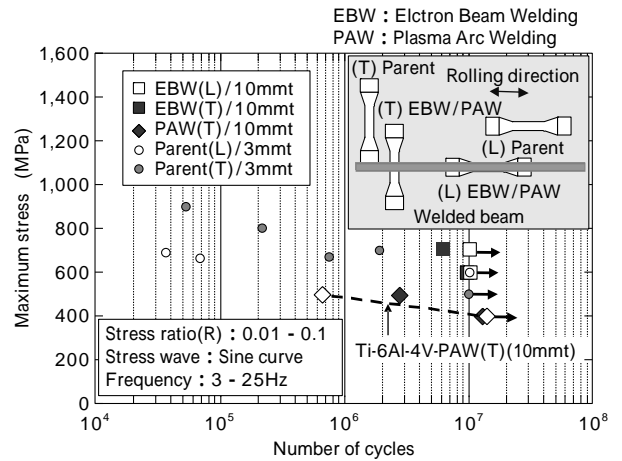


図7 KS Ti-9 各種溶接部の疲労特性  
Fig. 7 Fatigue properties of KS Ti-9 welded joint compared with Ti-6Al-4V

6Al-4V の疲労強度特性を合せて示した。測定点は少ないが、同じ PAW で溶接した KS Ti-9 は Ti-6Al-4V と同等の疲労強度を有している。一方、EBW の溶接部の疲労強度は、PAW のそれよりも高い傾向を示した。PAW は EBW に比べて溶融部が大きく、溶接部の強度低下が EBW よりも大きいことが原因と推察される。母材の疲労強度も、併記している 3mm の特性以外に 10mm でも確認しているが、EBW の溶接部とほぼ同等であることを確認している。

以上により、KS Ti-9 は溶接性においても良好であり、安心して使用できることを確認した。

## 3. KS Ti-9 の超塑性成形例

図 8 に超塑性成形性の目安となるひずみ速度感受性指数 (m 値) におよぼすひずみ速度の影響を示す。900 °C において、比較的速いひずみ速度  $\dot{\epsilon} = 10^{-2} (s^{-1})$  においても L, T 方向ともに超塑性成形が可能とされる m 値 0.3 以上が得られている。図 9 に、900 °C 超塑性成形後のサンプル外観を示す。

また、図 10 に成形後の断面と成形前後のミクロ組織変化を示す。断面写真を見ると、極端なくびれを起こす



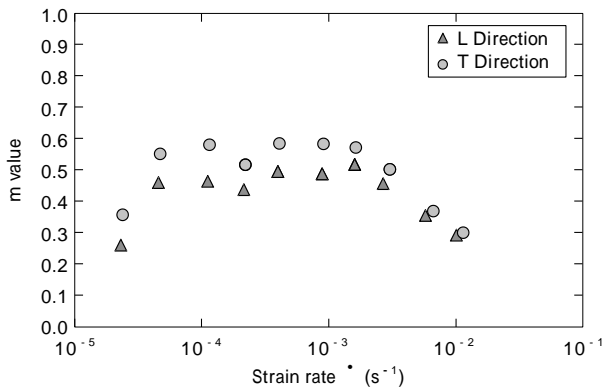


図8 ひずみ速度感受性指数(m 値)におよぼすひずみ速度の影響  
Fig. 8 Effect of strain-rate sensitivity exponent (m value) on strain rate at 900 °C (1.9mm thick sheet)

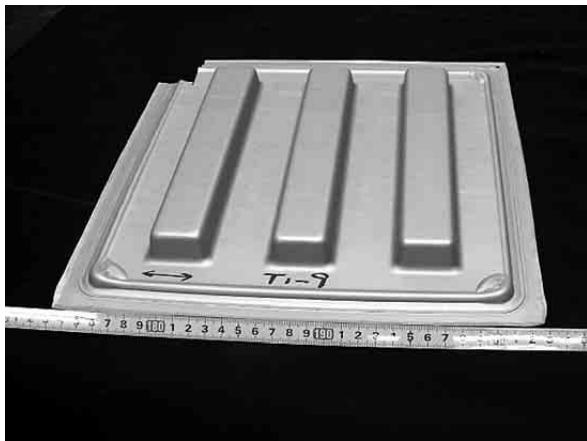


図9 超塑性成形サンプルの外観  
Fig. 9 Super-plastically formed sample

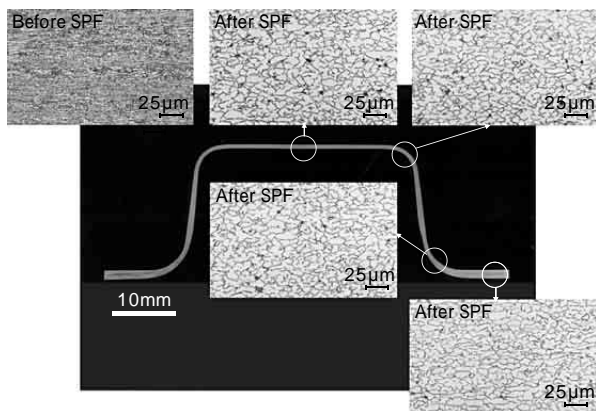


図10 超塑性成形 (SPF) 前後のマイクロ組織  
Fig.10 Optical microstructures before and after superplastic forming

こともなく良好な超塑性成形が行われていることがわかる。また、成形前のマイクロ組織は、圧延方向に筋状に流れた組織で、やや扁平な微細等軸の + 組織であるが、超塑性成形後のマイクロ組織では、相の等軸化と粗大化が進んだ結果、いずれの部位でも均一で、かつポイドのない健全な組織が得られている。なお、相の部分の所々に黒く見える組織があるが、これは相内に針状の相が微細に析出してエッチングが深くなったもので、ポイドではないことを確認している。また、成形後の各部位での機械的特性も、L 方向で耐力が 850MPa 程度に若干低下し異方性も残るが、伸びは 10% 以上が確保されており、超塑性成形も十分行えることがわかった。

むすび= 本稿では、低コストな板の提供を可能にするコイル成形可能な KS Ti-9 の量産材の諸特性について、航空機用途を念頭におき、Ti-6Al-4V と同等の特性であることを示した。航空機部材に多用されている Ti-6Al-4V の唯一の欠点である冷間加工性を克服した本合金が、航空機分野のみならず、幅広く使用されていくことを期待している。

当社は、平成 20 年度に発足した経済産業省主導による「次世代構造部材創製・加工技術開発 (次世代チタン合金構造部材創製・加工技術開発)」プロジェクトに参画し、本合金ならびに次ページに掲載されている熱間鍛造性に優れた高強度チタン合金 KS EL-F の航空機部材への適用に道を開く取組みを開始した。本合金は、その特徴であるコイル圧延を行った場合、先に述べたように材料特性に異方性を示すが、部材を設計するユーザにとってより使いやすい素材にするためには、異方性は軽減されることが望ましい。集合組織制御による異方性低減にも取組み、熱間加工プロセスの適正化を行う予定である。また、規格重視の航空機分野においては、AMS への登録も汎用化への道を開く鍵であると考えている。

日本の航空機産業を支える重工メーカーと共同で開発を進めることで、少しでも日本の航空機分野に貢献できるよう技術力の研さんに努めたい。

#### 参考文献

- 1) 大山英人ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.49, No.3(1999) p.53.
- 2) E.W.Collins：Materials Properties Handbook Titanium Alloy, ASM, (1994) p.1.
- 3) E. W. Collins：Materials Properties Handbook Titanium Alloy, ASM,(1994) p.555.