

コイル製造可能な高強度 - 合金 (KS Ti-9)

大山英人(工博)・小島壮一郎・木田貴之

鉄鋼カンパニー・チタン技術部

Coilable - Titanium Alloy (KS Ti-9) Comparable to Ti-6Al-4V

Dr. Hideto Oyama・Soichiro Kojima・Takayuki Kida

The effects of alloying elements on the tensile properties of transformed β -phase in α -titanium alloys were investigated. Silicon was found to enhance ductility after welding. Ductility is considerably degraded beyond an Mo equivalence of 4.75. Kobe Steel's new coilable α -titanium alloy, Ti-2Mo-1.6V-0.5Fe-4.5Al-0.3Si-0.03C (KS Ti-9), has the same strength (at room and high temperatures) and weldability as Ti-6Al-4V.

はじめに α -合金の代表である Ti-6Al-4V 合金は強度特性、耐熱性、溶接性など種々の性能面で均整がとれており、汎用的な高強度チタン材料として様々な用途にもちいられている。しかし、この合金は熱間および冷間での加工性に乏しく、コイルでの薄板製造が不可能である。薄板を製造する場合は複数枚のチタン板を鋼で包んで熱間圧延する、いわゆる、バック圧延を繰り返す。そのため、コスト高は避けられず、航空機などごく限られた分野での使用にとどまっている。コイル製造可能な α -合金に Ti-3Al-2.5V 合金があるが、この合金は強度が Ti-6Al-4V 合金の 6 割程度と低い。本稿では、Ti-6Al-4V 合金の主要な性能をまったく損なうことなく、熱延および冷延コイル製造可能な高強度 α -合金について紹介する。

1. 実験方法

基本組成選定のための予備実験として、熱間加工性に優れ高強度がえられるニア合金 Ti-17 (Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr) に着目し、リコイル性、冷延性および強度に及ぼす安定化元素 (Al) 量および安定化元素 (Mo, Cr) 量の影響、中性的元素 (Sn, Zr) の影響ならびに Cr と Fe の置換の効果を調べた。これより Ti-3Mo-3Cr-4.5Al を選定して切板を試作したが、0.8mm 冷延焼鈍板を溶接の模擬として変態点以上の 970 に 5 分間加熱後空冷 (焼鈍) し変態相の引張性質を確認したところ、顕著な延性低下がみられた。そこで、溶接部の延性改善を目的に以下の実験をおこなった。

Ti(2.5~4.5)Mo(0~2.4)Cr(0~0.5)Fe(3~4.5)Al(0~0.3)Si(0~0.1)C 合金での変態相の引張性質に及ぼす添加元素の影響を検討した。Si および C 添加の影響に着目したのは、冷延性の観点から高温強度に寄与する Al を Ti-6Al-4V 合金より 1.5%~3% 低減させていることで耐熱性に劣ることが予想されたため、それを少量添加で耐熱性を向上させられる Si⁽¹⁾ および C⁽²⁾ で補うことを意図した。実験には 40×20mm のボタン鋳塊を変態点以下の 850 に加熱後 5.5mm 厚まで圧延し焼鈍した試料をもちいた。

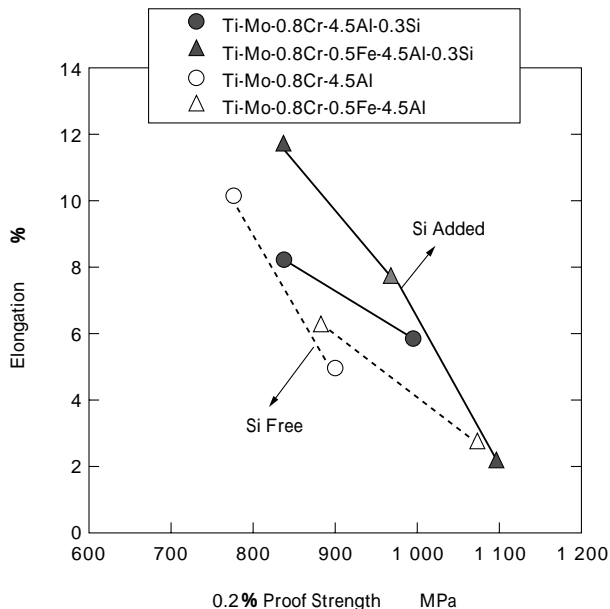
その実験結果に基づき、低コスト化も考慮して、溶接部においても Ti-6Al-4V 合金と同等の引張性質がえられると考えられる合金を選定した。インダクトスカル溶解にて厚さ 60×幅 130×長さ 260mm の小型鋳塊を溶製、厚さ 40mm まで鍛造した後厚さ 36mm まで機械加工し、 β 域 (850) 加熱後再加熱なしで厚さ 4.5mm まで熱間圧延、760 で 5 分間の焼鈍、ショットブラスト後酸洗にて脱スケールし、厚さ 4mm の熱延焼鈍板を作製した。熱延焼鈍板を幅方向で 2 分割後突き合わせ TIG 溶接し、溶接ままの場合に加え、溶接後の歪み取りを想定して 650 で 6 時間焼鈍した場合と 720 で 30 分間焼鈍した場合の溶融金属部および熱影響部の引張性質を調べた。引張試験片は平行部径 2mm、平行部長さ 10mm で、板厚中央より切り出した。また、40% 冷延と 760 での 5 分間焼鈍を 2 回繰り返した後、さらに、40% 冷延後 760~950 の変態点 (963) 以下の所定の温度で 5 分間焼鈍し、板厚 0.8mm の板での引張性質と焼鈍温度の関係を調査した。

さらに、6ton 鋳塊を VAR 溶解にて溶製し、実生産設備にて板厚 1.2mm までのコイルを試作し、引張性質の確認をおこなった。また、熱延スラブ段階で断面が厚さ 40mm×幅 70mm のブロックを切り出し、950 加熱で径 25mm まで鍛造後 700 で 2 時間焼鈍した丸棒をもちい、室温から 500 までの引張性質を調べ Ti-6Al-4V 合金と比較した。

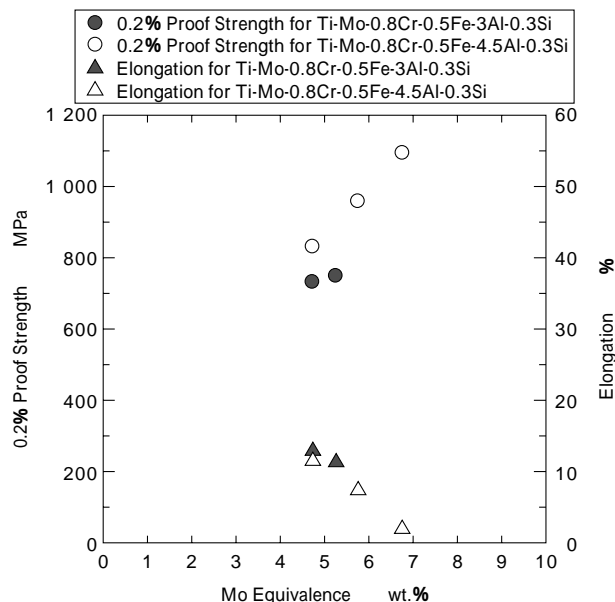
2. 実験結果および考察

2.1 変態相の引張性質 (溶接性) の合金組成依存性
第 1 図に、Ti(3.5~4.5)Mo-0.8Cr-4.5Al および Ti(2.5~4.5)Mo-0.8Cr-0.5Fe-4.5Al で変態相の 0.2% 耐力と伸びとの関係に及ぼす 0.3% Si 添加の影響を示す。Si 無添加材と比較し、Si を添加することで強度-延性バランスが向上している。

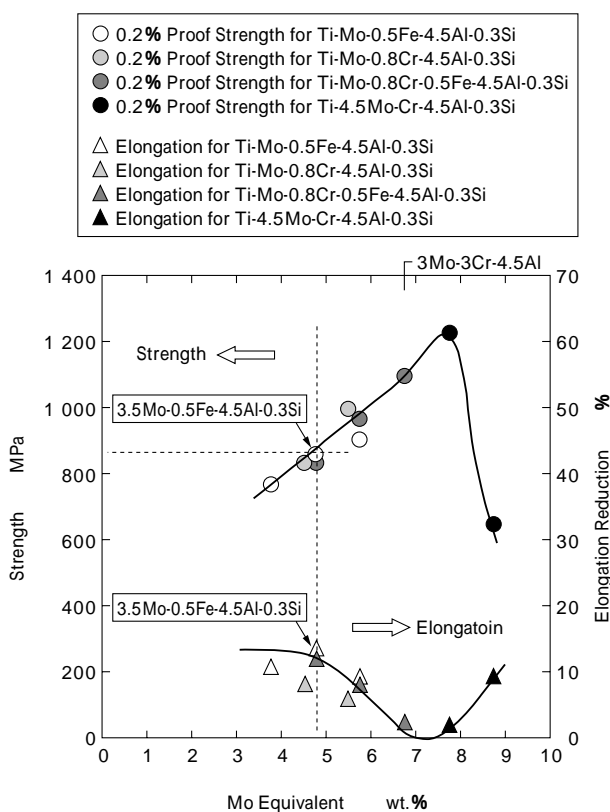
第 2 図に Ti(2.5~4.5)Mo(0~2.4)Cr(0~0.5)Fe-4.5Al-0.3Si 合金での安定化元素量と 0.2% 耐力および伸びとの関係を示す。ここでは、Al を 4.5% 一定とし、第 1 図で Si 添加が溶接部の延性向上に効果があることが確



第1図 変態相の強度 延性バランスに及ぼす Si 添加の影響
Fig. 1 Effect of Si on 0.2% proof strength-elongation balance

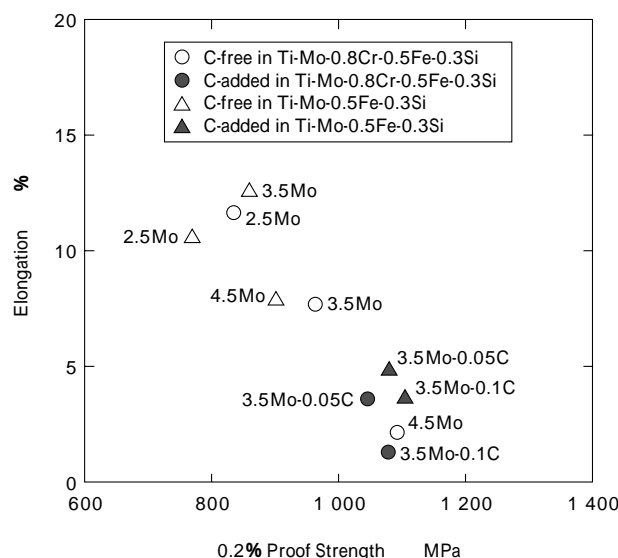


第3図 変態相の引張性質に及ぼす Al 添加量の影響
Fig. 3 Effects of Al content on tensile properties of transformed



第2図 変態相の引張性質と Mo 当量との関係
Fig. 2 Tensile properties of transformed vs Mo equivalence

かめられたので、Si を 0.3% 添加している。安定化元素量は $Mo \text{ 当量} (= \% Mo + 1.25 \% Cr + 2.5 \% Fe)$ で表示した。これより、変態相の引張性質は Mo 当量に依存し、Mo 当量が増えると強度は上昇するが 4.75 を越えると延性が低下し始め、7 前後でほとんど伸びは 0% になる。さらに Mo 当量が増加すると延性は回復するが大幅な耐力低下がおこる。予備実験結果で Ti-3Mo-3Cr-4.5Al が脆性を示した理由は、この合金は Mo 当量が 6.75 であり、まさに低延性領域に位置するためと考えら



第4図 変態相の強度 延性バランスに及ぼす C 添加の影響
Fig. 4 Comparison of 0.2% proof strength-elongation balance between C free and C added alloys

れる。第2図中に点線で示すように、延性低下をおこさず AMS (Aerospace Material Specification) 規格における Ti-6Al-4V の強度を溶接部においても維持できる Mo 当量の上限は 4.75 である。なかでも Cr 無添加の Ti-3.5Mo-0.5Fe-4.5Al-0.3Si で高延性がえられる。

第3図に Ti-Mo-0.8Cr-0.5Fe-Al-0.3Si 系で、変態相の 0.2% 耐力および伸びと Mo 当量との関係を 4.5%Al と 3%Al との間で比較した。3%まで Al を低減させてもほとんど延性は変わらず、強度が 1 割程度低下するだけである。

第4図に Ti(2.5~4.5)Mo-0.5Fe-4.5Al-0.3Si および Ti(2.5~4.5)Mo-0.8Cr-0.5Fe-4.5Al-0.3Si 合金の強度 延性バランスと Ti-3.5Mo-0.5Fe-4.5Al-0.3Si および Ti-3.5Mo-0.8Cr-0.5Fe-4.5Al-0.3Si に C を 0.05% および 0.1% 添加した場合のそれを比較した。0.05% の C 添加でも耐力は大幅に上昇する。これにともない延性は低下しているが、

安定化元素 (Mo) 量の増加にともなう延性低下と同程度である。すなわち, C は強度 延性バランスを損なうことなく 安定化元素量を低減できると考えられる。

2.2 製造性向上および原料コスト低減のための組成検討

前述の実験結果でもっとも開発目的に適合する合金は Ti-3.5Mo-0.5Fe-4.5Al-0.3Si である。しかし, コイル製造上もっとも重要な熱間加工性のさらなる向上と原料コスト低減の観点から, さらに Ti-3.5Mo-0.5Fe-4.5Al-0.3Si の組成改善を検討した。

チタン合金の熱間加工性が合金組成に依存することはいうまでもないが, 同じ組成であれば熱間加工性は温度に依存し高温ほど加工性が良好である。通常, 合金の場合, 組織を等軸化するには 変態点以下での熱間加工が必須である。変態点は上昇させるが組成的に熱間加工性を低下させる Al の添加量を一定とすると, 変態点は高いほうが加熱温度を高く設定できるだけ熱延に有利と考えられる。

第4図にみられたように, C は変態相の強度 延性バランスを損なうことなく同等の強度をえるのに Mo 量を低減できる。Mo 量を低減すると 変態点は上昇する。また, 第2図にみられた延性と Mo 当量の関係からは, Mo 量を下げると溶接部の延性がさらに向上することも期待できる。この考えに基づき, 試作評価を実施する合金では Mo0.5% を C0.03% で置換することに決定した。

次に, 第2図で示されたように, 変態相の引張性質は添加元素の種類にはあまり依存せず Mo 当量でほぼ整理できる。通常, VAR 溶解では Mo は 50Mo-50Al 母合金, V は 65V-35Al 母合金で添加するが, 単位 Mo 当量を Mo で添加する場合と V で添加する場合とでは V で添加するほうが安価である。そこで, さらに, Mo1% を等価な V1.6% で置換した Ti-2Mo-1.6V-0.5Fe-4.5Al-0.3Si-0.03C を選定し, 小型鋳塊をもちいて実際のコイル製造を想定した製造条件で熱延焼鈍板および冷延焼鈍板を試作, 特性の確認をおこなった。

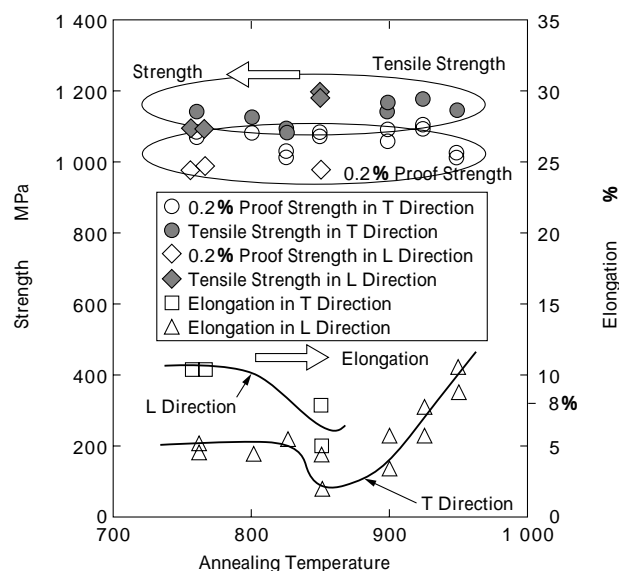
2.3 Ti-2Mo-1.6V-0.5Fe-4.5Al-0.3Si-0.03C の特性確認

2.3.1 溶接性

第1表に 4mm 熱延焼鈍板を突き合わせ TIG 溶接した試料で, 溶接ままおよび溶接後の歪み取りを想定して 650 で6時間焼鈍した場合と 720 で30分間焼鈍した場合の母材部, 溶融金属部 (DEPO), および, 熱影響部 (HAZ) の引張性質を示す。溶接ままの DEPO 部で目標としていた Ti-6Al-4V 合金薄板母材の AMS 規格耐力下限値に満たないものの, ほぼ同等の値がえられている。延性に関しては DEPO, HAZ とともに母材部と遜色なく高延性がえられており, 歪み取り焼鈍後の特性の劣化も認められない。

2.3.2 冷延焼鈍板の引張性質の焼鈍温度依存性

第5図に, 熱延焼鈍板に対し 40% 冷延と 760 での5分間焼鈍を2回繰り返した後, さらに, 40% 冷延後所定の温度で5分間焼鈍した厚さ 0.8mm 冷延焼鈍板の引張性質と焼鈍温度との関係を示した。圧延方向 (L) で



第5図 焼鈍温度と引張性質との関係

Fig. 5 Tensile properties vs. annealing temperature

第1表 KS Ti-9 の溶接部の引張性質
Table 1 Tensile properties of KS Ti-9 after welding

KS Ti-9	Position	0.2% Proof Strength	Tensile Strength	Elongation	Reduction
		MPa	MPa	%	%
As-welded	DEPO	848	1 009	14.3	35.7
		857	1 004	9.5	14.3
	HAZ	883	1 040	14.5	26.0
		921	1 045	15.3	34.2
	PARENT	958	1 060	15.2	35.8
		936	1 034	12.5	34.9
600 /6h-annealed	DEPO	894	998	12.8	21.5
		920	1 008	12.4	16.3
	HAZ	970	1 058	16.8	39.2
		949	1 043	17.1	39.9
	PARENT	949	1 045	18.0	24.0
		963	1 061	18.4	29.2
720 /0.5h-annealed	DEPO	967	996	13.5	16.3
		920	997	13.1	11.8
	HAZ	961	1 045	18.4	41.3
		952	1 028	17.8	41.1
	PARENT	930	1 014	18.6	32.8
		924	1 017	18.9	32.8
Ti-6Al-4V Spec.		864	966	8	-

の引張性質は760 および850 の焼鈍でのみ調べたが、760 焼鈍で0.2%耐力が約1000MPa、伸び10%以上がえられており、Ti-6Al-4V合金のAMS規格を満足している。いっぽう、圧延方向と直角方向(T)では異方性のため強度はL方向よりも高いが延性は低い。それでも、760~825 までの焼鈍では伸びが5%程度はえられ、850 で2%程度まで延性低下が認められるものの、900 以上では延性が回復、焼鈍温度の上昇とともに延性は増し、950 焼鈍ではT方向でも伸び8%以上がえられている。

このT方向の伸びの焼鈍温度依存性は、次のように解釈できる。すなわち、焼鈍温度の上昇とともに再結晶が促進されることでT方向の延性低下をもたらしている集合組織は徐々に軽減し、延性は上昇する。いっぽう、2相域焼鈍の冷却で出現する変態相のMo当量が第2図にみられた延性低下領域(7前後)に相当する焼鈍温度範囲が850 前後に存在し、そのため、850 で延性が低下しているものと推察される。

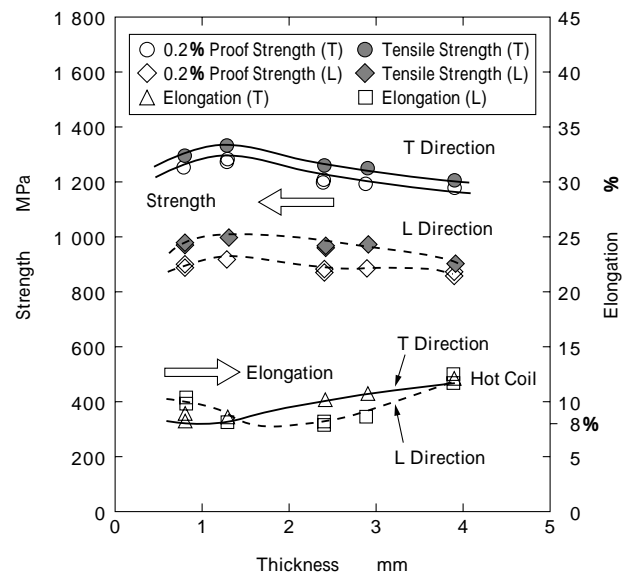
この切板試作結果が実際のコイル製造を完全に模擬しているとはいえない。しかし、延性の焼鈍温度依存性は同じ傾向を示すものと考え、950 程度まで焼鈍温度を上げれば実用上まったく問題とならない延性はえられるものと判断し、実生産設備でのコイル試作をおこなった。

2.3.3 コイル試作結果

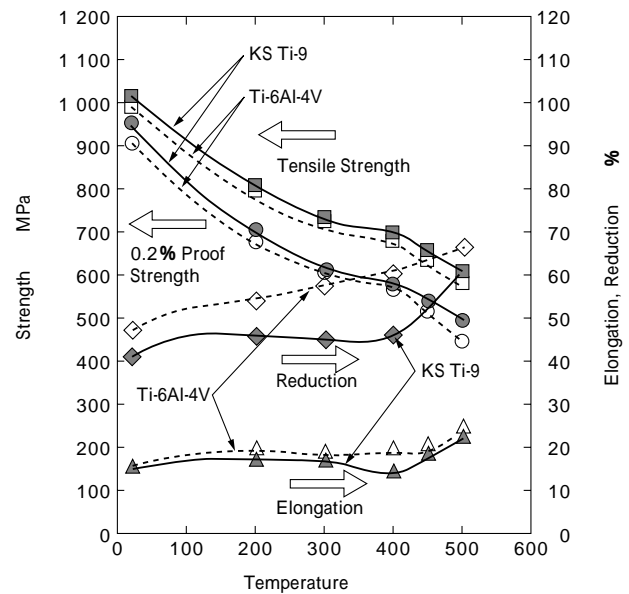
VAR溶解にて溶製したTi-2Mo-1.6V-0.5Fe-4.5Al-0.3Si-0.03C合金6ton鑄塊を温度域で分塊して厚さ140mmのスラブを作製し、+域加熱で厚さ4mmの熱延コイルに巻き上げた。その後、箱焼鈍なしで連続焼鈍・酸洗ラインにて焼鈍および脱スケールをおこない、さらに、冷延と焼鈍を繰り返して冷延焼鈍コイルを製造した。焼鈍温度はすべて800とした。今回のコイル試作では3回冷延で厚さ1.2mmまで減肉し、コイル製造上問題のないことを確認した。第6図に熱延焼鈍段階も含め各板厚での焼鈍後の引張性質を示す。L方向とT方向の強度差は第5図の切板試作結果よりさらに大きい。しかし、低強度なL方向でもTi-6Al-4V合金のAMS規格下限値(867MPa)以上の耐力がえられ、しかも、800で焼鈍しているにもかかわらず、切板試作では5%程度であったT方向の伸びも実コイルではTi-6Al-4V合金の伸びに関するAMS規格下限値(8%)より高い。これは、切板試作が厚さ36mmから4mmに対し本コイルでは厚さ140mmから4mmと熱延での加工量に大きく差があり熱延段階ですでに集合組織が異なっているためと考えられる。

2.3.4 耐熱強度

第7図にコイル試作にもちいたスラブの一部から製造した径25mm鍛造丸棒の室温から500までの引張性質を、市販のTi-6Al-4V合金丸棒と比較して示す。Ti-2Mo-1.6V-0.5Fe-4.5Al-0.3Si-0.03C合金とTi-6Al-4V合金の温度上昇とともに強度低下の程度は同じであり、この合金は耐熱性の観点からもTi-6Al-4V合金と同等の性能がえられている。



第6図 KS Ti-9 試作コイルの引張性質
Fig. 6 Tensile properties of KS Ti-9 trial coil



第7図 KS Ti-9 と Ti-6Al-4V との常高温引張性質の比較
Fig. 7 Comparison of tensile properties of 25mm rounds between KS Ti-9 and Ti-6Al-4V

むすび = 強度特性、とくに、溶接部の延性確保の観点から、変態相の引張性質と合金組成の関係を詳細に検討し、また、原料コスト面からも合金組成を考慮して、コイル製造が可能な高強度合金Ti-2Mo-1.6V-0.5Fe-4.5Al-0.3Si-0.03C(KS Ti-9)を開発した。この合金はTi-6Al-4V合金と同等の常高温強度特性と溶接性を有している。これにより、Ti-6Al-4V合金相当の特性の合金薄板が安価に供給可能となった。

参考文献

- 1) S. H. Hall et al.: Titanium, Science and Technology, Plenum Press, New York(1973) p.2141.
- 2) J. W. Suiter et al.: Journal of the Institute of Metals, Vol.83 (1954), p.460.
- 3) E. W. Collings: Materials Properties Handbook Titanium Alloys, ASM(1994), p.1.