

技術解説

Technical Review

軽量耐熱材料チタンアルミ合金の実用化に向けた技術発展

小柳禎彦*

Technology Evolution for Commercial Expansion of TiAl Alloys as a Light Weight Heat Resistant Material

Yoshihiko KOYANAGI

Synopsis

From a viewpoint of light weight owing to low density, application of an intermetallics TiAl alloy to engine components, especially rotation parts, improves mechanical loss and the following combustion efficiency. So far it has been applied to a turbine wheel in an automotive turbocharger system and a turbine blade in an aero jet engine. Looking to future social demands, expansion of the TiAl commercial market would be expected much more than in the past.

The TiAl has been researched since the 1960's, so several inherent weak points such as brittleness, low oxidation resistance, and manufacturing difficulties and so on in the case of gamma single phase by only Ti and Al have been overcome by addition of alloying elements with adequate balance, microstructure control, and some innovative processes. To evolve the technology with the market growth, understanding and studying the great effort made by forerunners is important. In this paper, the history of the technology's developments is reviewed and some of the recent challenges are introduced.

1. 緒言

自動車やガスタービンなどの燃焼機の性能向上には金属材料の耐熱性向上が大きく貢献しており、フェライト系やオーステナイト系の耐熱鋼、ニッケル基合金など、固溶強化や炭化物や金属間化合物などによる析出強化を利用した耐熱材料の研究開発が行われてきた。特に、ニッケル基合金の高い高温強度は金属間化合物である正方晶系 $L1_2$ 構造をもつガンマプライム (γ' -Ni₃Al) の特異な性質に起因しており、強化機構については多くの研究がされている^{1~3)}。

ところで回転体として耐熱材料が使用される場合、材料が軽量であるほど望ましい。軽量材料としてアルミニウム合金やチタン合金などが挙げられるが、最高水準の耐熱チタン合金でも耐用温度はニッケル基合金より大幅に低い。そこで、軽量耐熱材料として、規則構造のため

高いクリープ強度が期待されるチタンとアルミニウムの金属間化合物である Ti-Al 系合金が注目され、チタン合金より耐用温度の高い軽量耐熱材料として期待された。その後、欧米を中心に 1960 年代頃から実用化に向けたさまざまな研究が行われ、これまでにチタンアルミ合金は金属間化合物でありながら成分設計や熱処理による組織制御や、熱間加工の可能性が見出されている。我が国においても、耐熱材料の研究開発の中心であった耐熱金属材料第 123 委員で 1987 年にチタンアルミ合金に関して初めて報告された⁴⁾。1990 年代には基礎研究が盛んに行われ、さらに実用化に向けた製造技術の発展により、世界に先駆けて自動車用ターボチャージャー向けとして、チタンアルミ合金製タービンホイールの量産化に成功した。最近では、欧米を中心に航空機のジェットエンジンの低压タービンブレードとして実用化されており、今後さらなる使用拡大が見込まれている。

2017年11月9日 受付

* 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

研究当初は軽量性と耐熱性から『夢の材料』と言われたチタンアルミ合金も、すでに実用化され『工業材料』として認知される段階にきている。そこで、これまでのチタンアルミ合金の研究開発や製造技術発展の経緯を振り返るとともに、今後のチタンアルミ合金の課題について述べ、さらなる発展の方向性を示す。

2. チタンアルミ合金の特徴

1950年代にTi-Al二元系の状態図が報告⁵⁾され、それによるとTi-Al二元系ではTi₃Al (α₂相)と、TiAl (γ相)が広域なアルミ組成範囲で存在する。Fig. 1に両相の結晶構造を示す。Ti₃Al (α₂相)は六方晶系D0₁₉構造の、TiAl (γ相)は正方晶系L1₀構造であり、各組織での基礎特性調査が行われた。Table 1に示すようにTi-Al系合金はチタン合金とニッケル基合金の中間の耐熱性⁶⁾であり、Ti₃Al (α₂相)ベースでは耐熱性が乏しく、TiAl (γ相)ベースは高い高温強度に加えて正方晶系であることからさまざまな研究が行われたが、乏しい加工性の改善が克服できず、実用化への道は非常に険しい状況であった。しかし、1989年に、TiAl (γ相)に少量のTi₃Al (α₂相)が層状に析出したラメラ組織が高温強度と比較的延性や靱性に優れることが見出され⁷⁾、ニッケル基合金の半分の比重を考慮すると、比強度特性ではニッケル基合金を凌駕することが判明した。

その後さまざまな調査⁸⁻¹⁰⁾が行われ、以降チタンアルミ合金といえば、TiAl (γ相)と少量のTi₃Al (α₂相)で構成されたラメラ組織がベースの材料と認知されている。

Fig. 2に铸造ままで得られるTiAl (γ相)と約20 vol%のTi₃Al (α₂相)で構成されたラメラ組織を示す。Fig. 2はラメラ組織のみで構成されているためフルラメラ組織と呼ばれ、さまざまなラメラ方位のコロニの多結晶体のような形

態を示す。他に、少量の等軸状TiAl (γ相)とラメラ組織で構成されるニアラメラ組織や、さらに等軸状TiAl (γ相)が多いデュプレックス (Duplex) 組織など成分や熱処理に応じてさまざまな組織を得ることができる。

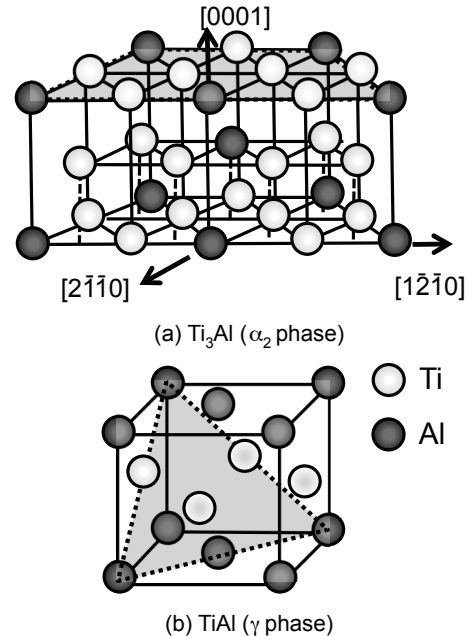


Fig. 1. Crystal structures of (a) Ti₃Al (α₂ phase) and (b) TiAl (γ phase) .

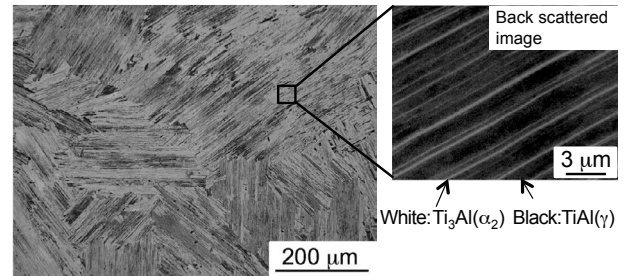


Fig. 2. Microstructure and back scattered image of Lamellar structure.

Table 1. Characteristics comparison of titanium alloy, titanium aluminide alloy, and nicke-based alloy⁶⁾.

Property	Ti-base	Ti ₃ Al-base	TiAl-base	Superalloy
Structure	hcp/bcc	D0 ₁₉	L1 ₀	fcc/L1 ₀
Density, g/cm ³	4.5	4.1-4.7	3.7-3.9	7.9-8.5
Modulus, GPa	96-115	100-145	160-180	206
Yield strength, MPa	380-1150	700-990	350-600	800-1200
Tensile strength, MPa	480-1200	800-1140	440-700	1250-1450
Room-Temp. Ductility, %	10-25	2-10	1-4	3-25
High-Temp. Ductility, %/°C	12-50	10-20/660	10-500/870	20-80/870
Room-Temp. Fracture Toughness, MPa√m	12-50	13-30	12-35	30-100
Creep Limit, °C	600	750	750*-950 ⁺	800-1090
Oxidation Limit, °C	600	650	800 [#] -950 [!]	870 [#] -1090 [!]

*Duplex Structures +Fully-lamellar mictrostructures #Uncoated !Coated/Actively cooled

実用化を目指したチタンアルミ合金は高温強度の点から Ti₃Al (α₂ 相) と TiAl (γ 相) のラメラ組織がベースとなっており、結晶学的にも特異なラメラ組織の形成により強度や延性などの特性異方性が生じる。ラメラ組織を有するチタンアルミ合金は Ti-50Al (at%) の化学量論組成から、若干 Al 過剰側の Ti-47 ~ 48Al (at%) が基本組成となる。これは、ラメラ組織が β 相の凝固反応を経て L + β → α の包晶反応で α 単相となり、続いて温度低下で (α + γ) 域に入ると α 相から γ 相が析出する。この時、六方晶構造 (hcp) である α 相と、面心立方構造 (fcc) をベースとする L1₀ 構造の TiAl (γ 相) は以下 (1) の結晶方位関係を維持するよう析出するため TiAl (γ 相) は層状に析出する。さらに温度低下が進むと α 相は規則化し、D0₁₉ 構造の Ti₃Al (α₂ 相) となる。

$$\{111\}_{\gamma} // (0001)_{\alpha}, \langle 110 \rangle_{\gamma} // \langle 1\bar{1}20 \rangle_{\alpha} \dots \dots (1)$$

単一の α 相粒では (0001) 面はひとつしかないため、単一の α 相粒では一つの方向に揃った TiAl (γ 相) のラメラ組織が形成される。しかし、通常の溶解凝固では α 相粒は多結晶体として形成されるため特定の方向にラメラ組織を制御できず、チタンアルミ合金の特性異方性を理解するための調査は非常に困難であった。そこで、1990

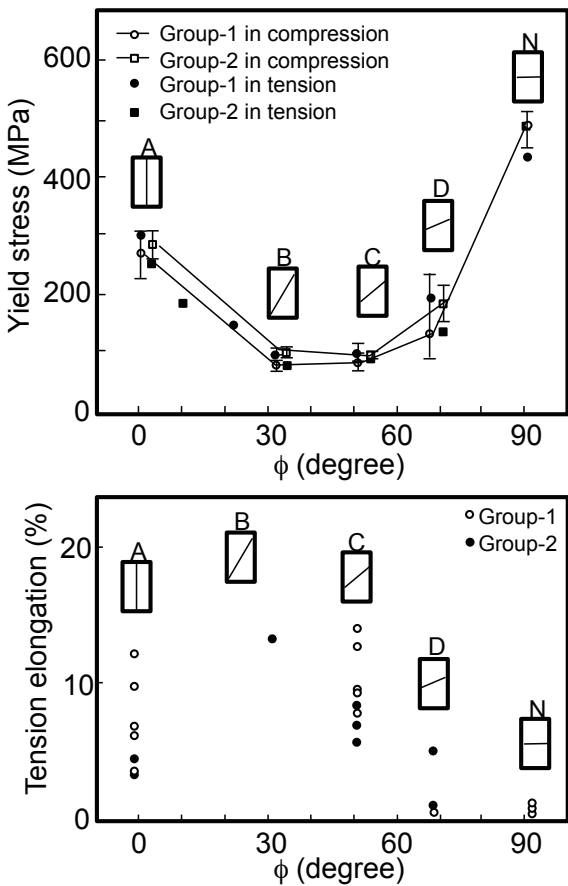


Fig. 3. Lamellar orientation dependence of yield stress and tensile elongation in the air of TiAl PST crystal¹².

年に α 単相域を単結晶状態で通過させ、全域にわたりラメラ組織の方位を揃えた PST (Polysynthetically Twined (PST) Crystal) 結晶¹¹が開発され、ラメラ組織の特性異方性の解明に大きく貢献した¹²。Fig. 3 に PST 結晶により調査されたラメラ組織の特性異方性を示す。ラメラ組織の方位により特性は大きく影響され、引張り方向と 45 度近傍に傾いたラメラ組織では強度は低く、延性が高い。これは比較的変形しやすい TiAl (γ 相) のすべり変形および双晶変形によるものであり、複雑な結晶構造をもつ Ti₃Al (α₂ 相) は変形を阻害する相となる。

我が国でも組織学やクリープ特性、耐酸化性などに関する詳細な研究報告がされており、各組織の役割や TiAl (γ 相) 単相^{13, 14} やラメラ組織のクリープ特性に関する理解が進んだ。特に、ラメラ組織の場合、特性に影響する因子は多岐にわたり、ラメラ組織を構成する相の割合や層間隔、同一ラメラ方位をもつコロニー径、ラメラ方位などの影響が調査された。特に、ラメラ組織のクリープ特性は層間隔やコロニーサイズが影響することが報告され¹⁵、高温材料としては粗大なコロニーをもつフルメラ組織が有望であると考えられた。

また、ニッケル基合金代替の高温材料として使用耐酸化性は、Ti-Al 二元系への第 3 元素の影響が調査されており、二元系のチタンアルミ合金では 800 °C を超えると著しく酸化が進行し、バナジウム、マンガンおよびクロムなどの元素添加は耐酸化性を劣化させるが、モリブデンおよびシリコンなどの元素の添加で耐酸化性が著しく改善することが報告された¹⁶。さらに、耐酸化性向上に有効なニオブ¹⁷ あるいはタングステン¹⁷ を添加したチタンアルミ合金に低酸素分圧下熱処理により表層に Al₂O₃ を形成させることで、900 °C でニッケル基铸造合金である Alloy713C に匹敵する耐酸化性が得られると報告された¹⁸。同処理は 950 °C でも有効だが、長時間試験後ではアルミの拡散により効果が低下する¹⁸。Fig. 4 に Ti-Al

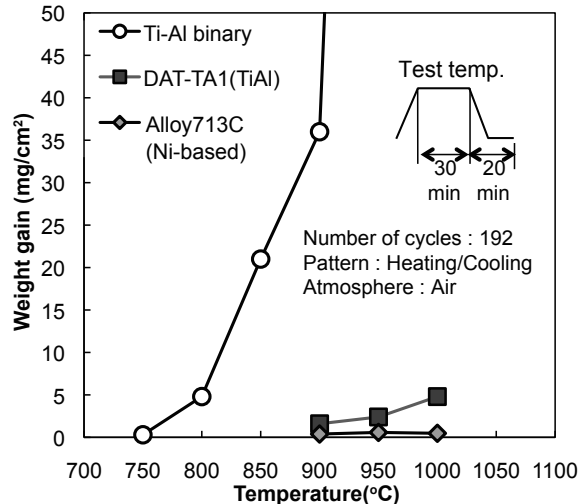


Fig. 4. Oxidation resistance of Ti-Al binary alloy, DAT-TA1 and Alloy713C.

二元系合金および耐酸化特性改善のため Nb や Si を添加した DAT-TA1, ニッケル基 casting 合金である Alloy713C の耐酸化特性を示す。Ti-Al 二元系合金では 800 °C から酸化が進行し, 850 °C 以上では著しく酸化が進行するが, Nb や Si を添加した合金では耐酸化性が著しく改善し, Alloy713C に近い耐酸化性となっている。ただし, 添加元素の選択で改善可能だが, 耐酸化性を改善させる元素の多くは高比重なため多量の添加はチタンアルミ合金の軽量性を損なうため, 注意が必要である。他にも表面処理による耐酸化性の向上も検討され, アルミナ処理¹⁹⁾ やハロゲン元素による処理^{20, 21)} などによる研究が報告されている。

3. チタンアルミ合金の製造技術

PST 結晶やさまざまな研究報告により材料的な理解は大きく進歩したものの, 依然として実用化までには大きな壁があった。それは金属間化合物であることに起因した脆さによる製造の難しさであり, 実用化には製造技術の発展が必要であった。実用化した事例を見てみるとチタンアルミ合金の製造課題をすべて克服したとは言い難いものの, 材料開発とさまざまな製造技術開発の集大成として実用化が達成されている。本報では製造技術として, 溶解- casting 技術や熱間加工技術, 粉末成形技術について主に述べる。

3. 1 溶解- casting 技術

チタンアルミ合金は非常に活性であり, 不純物元素(酸素や窒素)の混入により元々脆い性質がさらに脆化するためコンタミフリーの溶解技術が必要であった。そこで, 同じく活性で不純物元素の混入を好まないチタン合金で実用化されている溶解技術の適用が試みられた。チタン合金の溶解方法として VAR (Vacuum Arc Remelting) や EB 溶解 (Electron Beam Melting) などが知られていたが, これらの方法は均質な大型鋼塊を製造するのに適しているものの, チタンアルミ合金では凝固冷却後の熱応力により割れが発生するため大型鋼塊の製造が困難である。また適用部材として casting 部材を目指す場合は大型鋼塊のニーズは大きくなく, むしろ casting と組み合わせた生産性の高い溶解方法が必要となる。そこで, ニッケル基 casting 合金の製造で用いられているセラミックス坩堝での溶解が検討されたが, 坩堝からの不純物混入による特性影響が課題であった。従来チタン合金の溶解- casting は真空アーク溶解- 遠心 casting 法²²⁾ で実施されていたが, 生産性やタービンホイールなどの複雑形状への適用を考慮し,

チタン合金で実用化されていた溶解- casting 方法 (LEVItation melting and CASTing : LEVICAST 法) が適用された^{23, 24)}。Fig. 5 に LEVICAST²³⁾ の模式図を示す。この溶解- casting 方法はコールドクループ中で溶解されるため溶湯への不純物の混入がなく, さらに減圧吸引 casting 法のため湯廻り性が良く, 融点の高いチタンアルミ合金の精密 casting に対して有効であった。他にも, チタンとの反応が小さいイットリアをフェイスコートした坩堝と遠心 casting を組み合わせた精密 casting 技術²⁵⁾ や VAR と遠心 casting 法を組み合わせ内部欠陥の少ない均質なインゴットを得る製造技術²⁶⁾ が開発されており, 溶解技術と casting 技術の組み合わせで発展してきた。

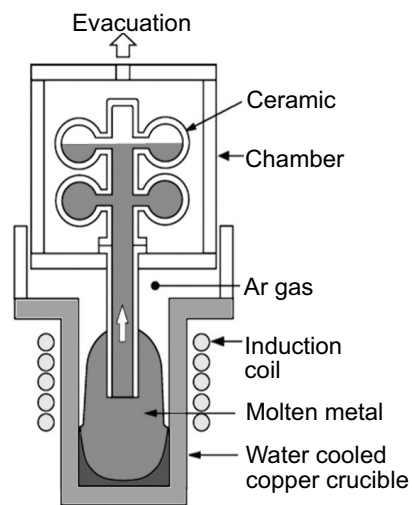


Fig. 5. Schematic diagram of LEVICAST²³⁾.

3. 2 鍛造技術

チタンアルミ合金は低ひずみ速度であれば恒温鍛造による熱間加工が可能であることは確認されていたが, 生産性の悪さが実用化への課題であり, 次第に成分設計によりチタンアルミ合金の熱間加工性を改善し, 汎用の熱間加工方法を適用させる方向にシフトしていった。チタンアルミ合金に汎用の熱間加工方法を適用させるには, 高温での熱間加工性を大幅に改善させる必要がある。チタンアルミ合金の熱間加工性改善方法として, 加工性に優れた立方晶系の β 相を活用する方法が 1990 年代に竹山らによって提唱されており^{27~30)}, 現在チタンアルミ合金の熱間加工性を改善する基本的な考え方になっている。その考え方は, 熱間加工性に優れた β 相を安定化させる元素 (マンガ, バナジウム, クロム, ニオブ, モリブデンなど) を多量に添加して β 相域を低温まで拡大させて熱間加工に利用する。Fig. 6 に Ti-Al 二元系状態図と β 相安定化元素として多量のニオブを添加したチタンアルミ合金の状態図を示す³¹⁾。アルミ量

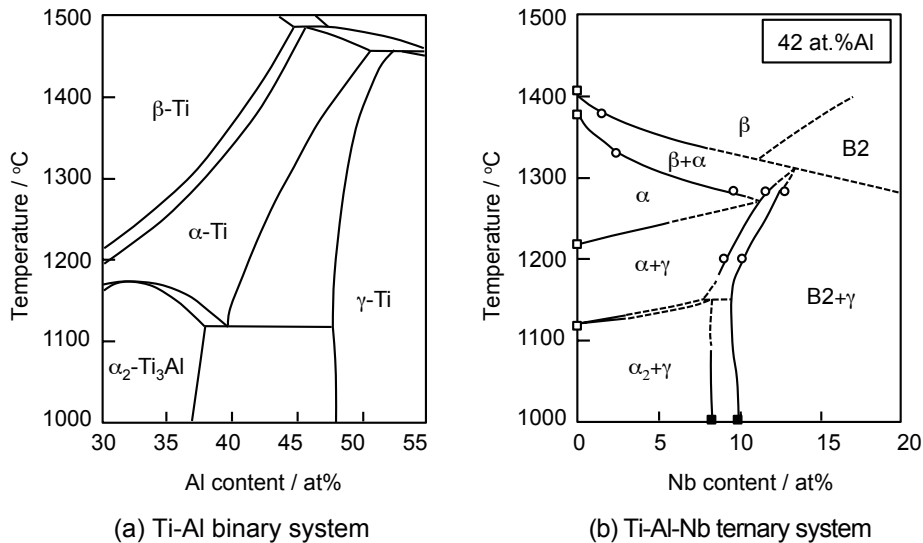


Fig. 6. Phase diagrams of (a)Ti-Al and (b)Ti-42 at%Al-Nb system.

が 42 at% で比較すると、Ti-Al 二元系では β 相は 1623 K 以上でようやく存在するが、ニオブを添加することで β 相域が低温側に広がり、ニオブを 8 at% 以上添加することで 1573 K 付近で β 相が存在できる。さらに、竹山らは高温強度が課題となる鍛造チタンアルミ合金に熱処理を組み合わせることで β 相を有効に活用する試みをしており、鍛造チタンアルミ合金の耐用温度向上も検討している³¹⁾。これまでに β 相を多量に含有させたチタンアルミ合金は、ステンレスなどのパイプに封入後に熱間押出により丸棒に成形することが可能であることが確認されているが、工業的な生産性を考慮した場合、さらなる熱間加工性の改善が必要となる。現在、 β 安定化元素や組織の最適化により、熱間自由鍛造による圧縮成形でパンケーキ状ディスクが製造可能な水準まで到達しており³¹⁾、鍛造チタンアルミ合金の実用化に向けた研究開発が進められている。

3. 3 粉末成形技術

チタンアルミ合金の粉末を用いた成形技術開発は 1990 年代から始まった。粉末製造は基本的にはチタン合金と同様に酸素や窒素のコンタミの少ない、不活性雰囲気でのガス噴霧にて製造される。製造された粉末は、熱間等方圧加圧法 (HIP)、金属粉末射出成形法 (MIM)、放電プラズマ焼結法 (SPS) により成形され特性調査が行われた。一方、チタンアルミ合金においても 3D 積層成形技術の開発が盛んで基礎特性調査が進められており^{32, 33)}、新しいチタンアルミ合金の製造技術として期待されている。

他にも、実用化には切削加工技術や接合技術などさまざまな技術開発が行われており、実用化に大きく貢献している。

4. チタンアルミ合金の実用材料

製造技術の発展とともに材料学的な理解が深まっていく中で、さまざまな材料が開発された。チタンアルミ合金ではニオブフリーを第一世代として、ニオブ < 5 (at%) を第二世代、ニオブ \geq 5 (at%) を第三世代と分類している。ニオブは耐酸化特性と熱間加工性の改善に有効な元素だが、多量の添加は融点の上昇や密度の増加を招く。Table 2 に代表的なチタンアルミ合金を示すが、現在では casting と forging とで設計コンセプトが異なり、casting 合金は第二世代、forging 合金は第三世代が多い。

casting 用チタンアルミ合金の基本的な設計コンセプトは、ラメラ組織となるよう化学量論組成より若干アルミを少なくし、耐酸化特性を改善させるためにニオブを添加する。その他、延性改善にクロムやマンガンを添加したり、耐酸化特性とクリープ特性改善にシリコンを添加する。延性は低下するもののクリープ特性改善に非常に有効な炭素の添加も行われている。また、結晶粒微細化に TiB_2 を活用した合金も開発されている³⁴⁾。

casting 用チタンアルミ合金で最も有名なのは 1989 年に GE 社が開発した Ti-48Al-2Nb-2Cr (at%, 48-2-2)³⁵⁾ であり、延性が比較的高く、700 °C までの低サイクル疲労特性に優れるなど特性のバランスがよい。また、自動車のターボチャージャー用タービンホイール材料として高温強度と耐酸化特性を高めた Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.1Si (at%, DAT-TA1) や Ti-46.5Al-3.2Nb-0.7Cr-0.4Si-0.1C (at%, DAT-TA2) が開発されている³⁶⁾。

鍛造用チタンアルミ合金は、前述の通り β 相を活用することが基本的なコンセプトであり、これまで国内では

Ti-42Al-5Mn (at%) が自由鍛造で熱間加工可能であることが報告されている^{29, 30)}。欧州では高Nbを含有した合金開発がさかんで、Ti-45Al-8Nb-C-B (at%, TNB)³⁷⁾ や Ti-43Al-4Nb-1Mo-B (at%, TNM)³⁸⁾ などが開発されている。鍛造用チタンアルミ合金は熱間加工性に優れるが高温強度の低いβ相を含むため、最高耐用温度は鍛造用チタンアルミ合金の方が高いが、耐用温度を向上させるため、シリコンや炭素などの高温強度上昇元素³⁹⁾の添加や熱処理による組織制御⁴⁰⁾などによる耐用温度性向上が検討されている。

実用化されているチタンアルミ合金のマイクロ組織はさまざま、48-2-2合金は700℃までの特性バランスを重視するため等軸TiAl(γ相)とラメラ組織のDuplex組織としている一方で、DAT-TA1やDAT-TA2は高温強度を重視するため、フルラメラ組織となるよう成分設計されている。また、TNM合金は用途に応じて靱性の高いTriplex組織(β+等軸TiAl(γ相)+ラメラ組織)やフルラメラ組織など使い分けが可能である。このように、用途に応じて成分や熱処理による組織制御が可能なのも、他の金属間化合物にはないチタンアルミ合金の特徴といえる。

5. 実用化事例1 — 自動車用ターボチャージャーの タービンホイール —

チタンアルミ合金が一般産業向けとして初めて実用化されたのは、自動車用ターボチャージャーのタービンホイールである。自動車用タービンホイールは900℃以上の排ガスに曝されながら20万回転/分もの超高速回転による遠心力が負荷するため、耐酸化特性とクリープ特性などの高温強度に優れるニッケル基鋳造合金の精密鋳造品が使用されている。チタンアルミ合金はニッケル基鋳造合金の半分の密度のため回転体として負荷される

遠心力が小さくなり、比強度特性はニッケル基鋳造合金を凌駕する。また、ターボチャージャーの最大の課題である初期応答遅れ(ターボラグ)についても、その軽量性を発揮することができる。そこで、1984年に実用化検討が開始され、溶解-鋳造技術開発^{23, 24)}やタービンシャフトとの接合技術が開発⁴¹⁾され、1999年、2000年と相次いで一般車で搭載された^{42, 43)}。現在、排気ガス温度の上昇に対応した高耐熱チタンアルミ合金も開発されており⁴⁴⁾、自動車用ターボチャージャーへの適用拡大に貢献している。

他にも自動車用途での適用が検討され、熱間押出法とアップセット法を組み合わせた排気バルブにおいてさまざまな調査が行われ⁴⁵⁾、Formula 1で採用された。しかし、高性能すぎるため2003年にレギュレーション(比剛性率:>40[GPa/(g/cm³)])の対象となったが、2014年にレギュレーションが解除されており、今後採用が増えていくものと思われる。

6. 実用化事例2 — 航空機ジェットエンジン用 低圧タービンブレード —

航空機用としては1984年にGE社が鋳造で製造した4822合金の低圧タービンブレードへの適用検討を報告しており、さまざまなフライトテストを得て2012年からGE社製GEnXエンジンの低圧タービンブレードとして適用した⁴⁶⁾。チタンアルミ製タービンブレードはタービンの6, 7段目(後段側2段)で採用されており使用温度は700℃程度である。ニッケル基合金からの置き換えで、エンジン1基あたり400lbs(約181kg)軽量化され、燃費改善に大きく貢献している。我が国においても鋳造チタンアルミ製ブレードの実用化を目指した検討が行われている⁴⁷⁾。一方、2016年よりP&W社製PW1100G-JMの低圧タービンの最終段にはTNM合金で

Table 2. Exemplary Titanium Aluminide alloys reviewed for practical use.

Produce	Alloy	Composition (at%)	Development	Application
Cast	48-2-2	Ti-48Al-2Nb-2Cr	GE	LPT* ¹
	45/47XD	Ti-45/47Al-2Nb-2Mn-0.8vol%TiB	Howmet	LPT* ¹
	IR24T	Ti-48Al-0.8Mo-0.5V-0.2Si	IHI	LPT* ¹
	DAT-TA1	Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si	Daido	Turbine Wheel
	DAT-TA2	Ti-46Al-3.2Nb-0.7Cr-0.5Si-0.1C	Daido	Turbine Wheel
	-	Ti-46Al-8Nb-Cr-Ni	MHI	Turbine Wheel
Wrought	TNB	Ti-45Al-5~8Nb-0.2C-B	GKSS	Sheet, Bar
	TNM	Ti-43Al-4Nb-1Mo-B	MU Leoben, MTU	LPT* ¹
	γ-MET	Ti-46.5Al-4(Nb, Cr, Ta, B)	Plansee	Exhaust valve

*1 : Low Pressure Turbine Blade

製造された鍛造タービンプレードが適用⁴⁸⁾されており、Snecma社とGE社の合弁会社であるCFM社製LEAP-Xでも鍛造タービンプレードの採用が決定している。最近では電子ビーム積層造形(EBM)により製造したタービンプレードも実用化を目指して評価が進められており⁴⁹⁾、チタンアルミ合金製タービンプレードは航空機用ジェットエンジンで重要な技術となっている。

7. 今後の技術課題

チタンアルミ合金は軽量耐熱材料として期待され続け、40年近い研究開発と製造技術発展を経て実用化された。これまでの実用化分野はチタンアルミ合金の軽量性と高温特性が最大限発揮できる分野であり、高いパフォーマンスだけでなく、燃費改善などにも効果が認められている。しかし、工業製品としては製品コストは重要な要素であり、さらなる市場の拡大にはさまざまな低コスト化技術が望まれる。例えば、効率的な鋼塊の製造方法やスクラップのリサイクル化、鋳造品や積層造形品によるネットシェイプ化、汎用熱間加工方法の適用など、これまで一定の実用化レベルには達しているもののさらなる技術発展が望まれる。また、ニッケル基合金からチタンアルミ合金への置き換えは技術的な課題は多いものの大きなインパクトがあったが、一方で、チタンアルミ合金に関しては材料開発技術の余地が十分にあるといえる。今後はチタンアルミ合金のさらなる高性能(高耐熱)化が望まれ、材料開発だけでなく表面処理やコストを考慮し、実用化拡大に向けたトータル材料技術開発が望まれる。

8. 結 言

世界中の研究者や製造メーカーの長きにわたる研究開発の結果、ついに夢の材料であったチタンアルミ合金が現実の材料となった。チタンアルミ合金の実用化は、現在高い技術課題に直面している次世代の材料にとっても希望を抱かせるものであり、今後の技術課題はこれまでに以上に困難な壁だが、産学官が連携することで乗り越えていけると確信している。

最後に、1980年代から2000年代にかけて、我が国はチタンアルミ合金の実用化研究の先頭を進んでいたが、2000年代になると欧米でさまざまなチタンアルミ合金に関するの国家プロジェクトが発足され、材料からアプリケーションまで幅広い検討が行われた結果、現在では

欧米が実用化研究の先進となっている。しかし、我が国においても2014年から戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の革新的構造材料の一つとして、『ジェットエンジン用高性能TiAl基合金の設計・製造技術の開発』が採択され、2030年の実用化に向けて今後の発展が大いに期待される。

(文 献)

- 1) M. Yamaguchi and Y. Umakoshi: Prog. Mater. Sci., **34** (1990), 1.
- 2) S. Takeuchi and E. Kuramoto: Acta Metall., **21** (1973), 4, 415.
- 3) P. Beardmore, R. G. Davies and T. L. Jonston: Trans. Metall. Soc. AIME, **245** (1969), 1537.
- 4) 山口正治: 耐熱金属材料 123委員会, **28** (1987), 3, 435.
- 5) H. R. Ogden, D. J. Maykuth, W. L. Finlay and R. I. Jaffee: Trans. Metall. Soc. AIME, **3** (1950), 1150.
- 6) Y-M. Kim: JOM, **46** (1994) 7, 30.
- 7) 野田俊治, 飯久保知人, 磯部晋: 日本金属学会講演概要, (1989), 335.
- 8) S. Mitao, S. Tsuyama and K. Minakawa: Mater. Sci. Eng. **A143** (1991), 51.
- 9) S. Mitao, S. Tsuyama and K. Minakawa: TMS, (1991), 297.
- 10) Y. W. Kim and D. M. Dimiduk: Journal of Metals, **43** (1991), 40.
- 11) T. Fujiwara, A. Nakamura, M. Hosomi, S. R. Nishitani, Y. Shirai and M. Yamaguchi: Phil. Mag. A, **61** (1990), 591.
- 12) 山口正治, 乾晴行: 耐熱金属材料 123委員会, **34** (1993), 1, 89.
- 13) 石川幸雄, 丸山公一, 及川洪: 耐熱金属材料 123委員会, **32** (1991), 3, 313.
- 14) 具明会, 松尾孝, 菊地寛: 耐熱金属材料 123委員会, **31** (1990), 2, 253.
- 15) 山本隆一, 中久喜英夫, 丸山公一, 藤網宣之: 耐熱金属材料 123委員会, **37** (1996), 3, 203.
- 16) 穴田博之, 志田善明: 耐熱金属材料 123委員会, **32** (1991), 3, 347.
- 17) 志田善明, 穴田博之: 日本金属学会誌, **58** (1994), 754.
- 18) 吉原美知子, 田中良平, 今村尚近, 税所正昭: 耐熱

- 金属材料 123委員会, 32(1991), 1, 39.
- 19) 武井厚, 石田章: 耐熱金属材料 123委員会, 31(1990), 2, 327.
- 20) 熊谷正樹, 渋谷和久, 金睦淳: J. Japan Inst. Metals, 57(1993), 6, 721.
- 21) A. Donchev, E. Richter, M. Schütze and R. Yankov: Intermetallic, 14(2006), 10, 1168.
- 22) D. Eylon, F. H. Froes, and R. W. Gardiner: Journal of Metals, Feb., 35(1983) .
- 23) 出向井登, 一柳信吾, 芝田智樹, 宮谷仁志: 電気製鋼, 62(1991), 12.
- 24) N. Demukai and K. Tsushima: Journal of Advanced Materials, 37(2005), 12.
- 25) J. Aguilar, A. Schievenbusch and O. Kättlitz: Intermetallics, 19(2011), 6, 757.
- 26) M. Achtermann, V. Guthier, J. Klose and H.-P. Nicoletti: "4th International Workshop on Titanium Aluminides", Nuremberg, Germany, (2011) .
- 27) 中村英幸, 魏林, 竹山雅夫, 菊地寛: 耐熱金属材料 123委員会, 34(1993), 2, 189.
- 28) 福島寛明, 小林覚, 松尾孝, 竹山雅夫: 耐熱金属材料 123委員会, 45(2004), 3, 327.
- 29) T. Tetsui, K. Shindo, S. Koyayashi and M. Takeyama: Scr. Mater., 47(2002), 399.
- 30) T. Tetsui, K. Shindo, S. Kaji, S. Koyayashi and M. Takeyama: Intermetallics, 13(2005), 971.
- 31) 竹山雅夫, 中島広豊: 塑性と加工, 56(2015), 535.
- 32) L. E. Murr, S. M. Gaytan, A. Ceylan, E. Martinez, J. L. Martinez, D. H. Hernandez, B. I. Machado, D. A. Ramirez, F. Medina, S. Collins and R. B. Wicker: Acta Mater., 58(2010), 1887.
- 33) S. Biamino, A. Penna, U. Ackelid, S. Sabbadini, O. Tassa, P. Fino, M. Pavese, P. Gennaro and C. Badini: Intermetallics, 19(2011), 6, 776.
- 34) D. Larsen and C. Goven: Gamma Titanium Aluminide, TMS, Warrendale, 1995, 405.
- 35) S. C. Huang: US Patent 4,879,092, (1989) .
- 36) 小柳禎彦: 電気製鋼, 82(2011), 1, 79.
- 37) W. E. Voice, M. Henderson, E. F. J. Shelton and X. Wu: Intermetallics, 13(2005), 9, 959.
- 38) H. Clemens, H. F. Chladil, W. Wallgram, G. A. Zickler, R. Gerling, K. -D. Liss, S. Kremmer, V. Güther and W. Smarsly: Intermetallics, 16(2008), 6, 827.
- 39) M. Kasthuber, B. Rashkova, H. Clemens and S. Mayer: Intermetallics, 63(2015), 19.
- 40) H. Clemens, W. Smarsly, V. Guthier and S. Mayer: Proceedings of the 13th World Conference on Titanium, (2016), 1193.
- 41) T. Noda, T. Shimizu, M. Okabe and T. Iikubo: Mater. Sci. Eng., 239-240(1996), 613.
- 42) T. Noda: Intermetallics, 6(1998), 7, 709.
- 43) T. Tetsui: Mater. Sci. and Eng, A, 329-331(2002), 582.
- 44) 小柳禎彦, 鷺見芳紀, 高林宏之: 電気製鋼, 85(2014), 2, 121.
- 45) M. Tsuchiya, S. Tsunashima and H. Hashimoto: Honda R&D Technical Review, (2009), 254.
- 46) M. Weimer: "4th International Workshop on Titanium Aluminides", Nuremberg, Germany, (2011) .
- 47) 竹川光弘, 倉茂将史: IHI技報, 53(2013), 4, 16.
- 48) MTU Aero Engines Report, 01(2013) .
- 49) GE report, Aug., (2014) .



小柳禎彦