

# 航空機向けチタン製造技術

## Manufacturing Technology of Titanium Products for Aerospace Industry

有安 望\*      松本 啓      北浦 知之  
Nozomu ARIYASU      Satoshi MATSUMOTO      Tomoyuki KITAURA  
西山 真哉      米正 裕  
Shinya NISHIYAMA      Yutaka YONESHO

### 抄 録

航空機用途として様々な金属材料が使用されているが、特に近年機体素材として炭素繊維強化複合材 (CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic Composite) を多用する機種が主流になりつつあり、物性値の相性の観点においてアルミニウム材からチタン材への転換が進んでいる。本論文では航空機に使用される主なチタン材を紹介するとともに、日本製鉄(株)における航空機向けチタン素材製造技術について、その取り組みを紹介する。

### Abstract

Various metal materials are used as an aircraft application, but particularly in late years a model using many CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic Composite) as body material is becoming mainstream, and the switches from aluminum materials to titanium materials advance in the point of the affinity of the properties. This article introduces main titanium materials used for an aircraft and about a titanium material manufacturing technology for an aircraft in Nippon Steel Corporation.

### 1. はじめに

2019年末から起こった新型コロナウイルス(COVID-19)によるパンデミックの影響で、世界中で国内外において移動制限が発生し、航空旅客需要が著しく低下した(図1)。2021年4月現在、その事態収束は目途を得ておらず、コロナ前の需要に回復するのは2024年頃との予測がなされている。

ただし、パンデミックという不測の事態に見舞われはしたものの、将来的な航空旅客需要の伸びは確実であり、アフターコロナに備え準備を進める必要がある。近年環境問題として、所謂カーボンニュートラル(脱炭素社会)が世界的に提唱され、航空機も更なる高燃費化のための軽量化が進み、CFRPおよびチタン素材が多用されるようになってきた。図2にボーイングB787型機使用素材比率を示す。

その際、チタン材の製造技術においても、よりエコロジータな製造技術が求められる。例えば現在、航空機向けチタン合金薄板素材として多用されているTi-6Al-4V合金は、冷間加工性に乏しく薄板にする場合熱間によるバックシート

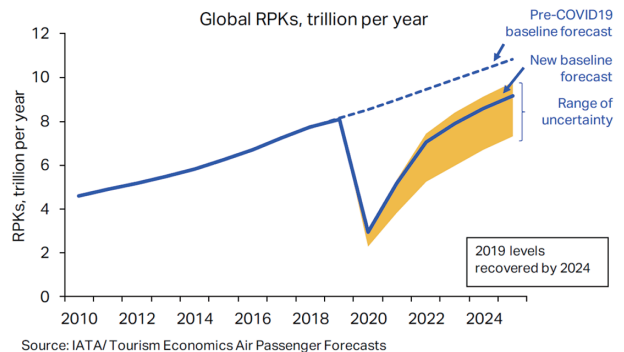


図1 IATA (国際航空運送協会) による航空旅客推移予測 (出典 IATA)

Tourism economics air passengers forecasts by IATA (International Air Transport Association)

圧延が必要でありエネルギー効率が悪い。同等性能を有する薄板をコイル製造(冷間圧延仕上)できるチタン材を開発することで、社会に大きく貢献できると考える。また、航空機部品の中には大きな厚板から素材を切り出し、10%以下の歩留で機械加工による削り出しするものもある。そのような部品の中で、レール形状のような同一断面、長尺

\* チタン事業部 チタン技術部 チタン商品技術室 航空機・プラント課長 東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071

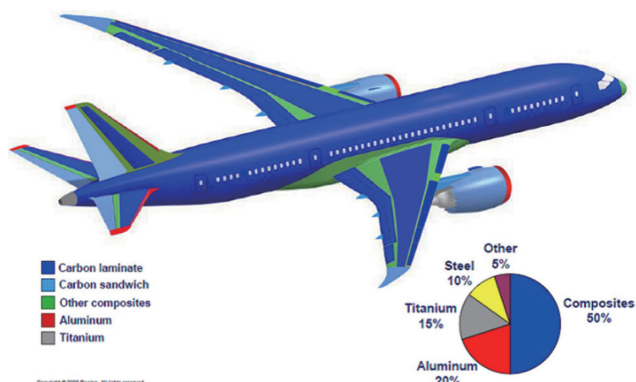


図2 B787 使用素材比率 (CFRP とチタンを合わせた使用比率が 65%) (提供 Boeing)  
Ratio of materials for B787 (using ratio of titanium and CFRP: 65%)

部品については押出型材とすることで、歩留向上、機械加工工数削減を図れるものもある。以降においてそのような製造技術について述べる。

## 2. 航空機向けチタン薄板について

航空機に使われるチタンの使用量としては厚板や鍛造品が多いが、薄板のニーズもある。日本製鉄(株)では薄板の中でも冷間成形性に優れた純チタン並びに Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 合金について航空機向けチタン薄板として製造している。また、冷間成形性があり Ti-6Al-4V に近い特性を有する日本製鉄独自合金 Super-TiX®51AF に関し航空機向け適用に取り組んでいる。

### 2.1 純チタン

純チタンは冷間加工性に優れることから、航空機では薄板として使われることが多い。部品メーカーで成形加工により種々部品へ加工されている。強度レベルに応じて4つのグレードがあり、必要な強度や成形加工に応じた材料が用いられている。強度は不純物として含まれる酸素と鉄の量で決まってくる。

純チタンは結晶構造が六方最密構造でありすべり系が少ない。そのため双晶が起こることで少ないすべり系を補完している。そのようなことから純チタン薄板は冷間成形性に優れ、この特性を用いて加工される場合が多い。

用途は、厨房、トイレ等の水回り、ダクトや配管、カバー材等の非構造部材であり、耐食性や成形加工性が求められる部品が多い。また機体だけでなくエンジン部品にも各部位の軽量化を目的にCFRPを適用する機会が増えているが、補強のためカバーする場合がある。図3に例を示す<sup>2)</sup>。エアバス A320neo に搭載されているエンジンの1つであるPW1100G-JM のファン部後方のSGV (Structural Guide Vane ファン出口案内翼) のシースに日本製鉄の純チタンが採用された。SGV の静翼は複合材で作られており、その保護のため用いられる。

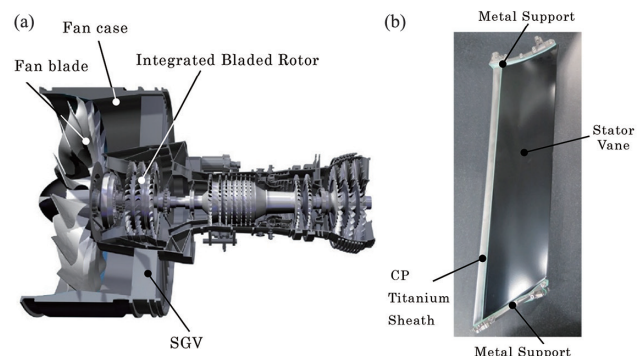


図3 PW1100G-JM 概要と純チタン薄板適用部位<sup>2)</sup>  
(a) PW1100G-JM 断面図並びに主な部品の位置 (提供 P&W 社), (b) SGV 外観 (提供 IHI)  
Commercial pure titanium sheets application part and schematic image of PW1100G-JM<sup>2)</sup>  
(a) Cut model schematic image of PW1100G-JM and position of main parts, (b) Schematic image of SGV

表1 航空機向け純チタン薄板規格  
Specifications of commercial pure titanium sheet for aircraft

Material	AMS	BS	DIN
Gr.1	AMS4940	BS TA1	WL3.7024
Gr.2	AMS4902	BS TA2	WL3.7034
Gr.3	AMS4900	—	—
Gr.4	AMS4901	BS TA6	WL3.7064

純チタン薄板の製造方法は航空機用であっても民生用とほとんど変わらない。しかし、製造にあたっては、航空宇宙品質マネジメントシステム (JIS Q 9100) や国際特殊工程認証システム (Nadcap : National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program) の取得が求められる、また必要に応じて顧客の個別認定や品質管理が求められる。

航空機用の材料規格としては米国の AMS (Aerospace Material Specifications) が知られている。純チタン薄板も4種類が規定されている。さらに英国の BS (British Standards)、ドイツの DIN (Deutsches Institut für Normung) にも航空機用純チタン薄板の規格がある (表1)。それらに加え航空機メーカーごとに規格が存在する場合がある。

純チタン薄板においてはこれらの規格を複数種類満たすことを求められることが多い。これは1つの材料から複数の部品に使われることが多く、また部品ごとに要求される材料規格が異なるためである。

また、規格ごとに引用規格が異なる場合が多い。例えば引張試験に関し、AMS は ASTM E8/E8M, BS は EN2002-1, DIN は DIN50114 (現在は廃止され ISO6892-1 に移行) となっており、また航空機メーカー規格の中には上記以外に EN10002-1 (現在は廃止され ISO6892-1 に移行) が要求されているものがある。これらについて全て満たすように試験を行う必要がある。

日本製鉄では1997年にエアバスがドイツ、フランス、英

国、スペイン各社の企業連合であったときにその中の1つのダイムラー・クライスラー・エアロスペースに出荷開始したところから航空機向けに純チタン薄板の供給が始まっている。その後エアバスが2001年に統合企業となり、現在に至るまで、継続して納入し続けている<sup>3)</sup>。

その後、機体メーカーではボンバルディア、エンブラエル、エンジンメーカーではロールス・ロイス、サフランの認定を取得している。その他に直接認定ではないが、(株)IHIに供給した純チタン薄板を用いたSGVがエンジンメーカーから認定されている。

これら各メーカーからは認定維持のため各種監査を継続的に受審している。

## 2.2 チタン合金

チタン合金としてはTi-6Al-4Vが最も知られており、航空機でも最も使用されている合金であり、薄板も例外ではなく最も使用されている。しかし純チタンとは異なり冷間成形性に乏しいため熱間で成形されている。また製造もロシア、米国等で製造されており、日本国内では製造されていない。日本製鉄では純チタンと同様に冷間性に優れた2つの合金について航空機向けに取り組んでいる。

### 2.2.1 Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn

本合金は1970年代に米国で開発された $\beta$ 型チタン合金(以下 $\beta$ 合金)である<sup>4)</sup>。 $\beta$ 合金の結晶構造は鉄と同じく体心立方構造であるため冷間加工性に優れている。一方で時効処理により高強度化が可能という特徴を持っている。また、ヤング率が低いことから、メガネフレームやゴルフクラブにも適用されている。

航空機用途としては時効処理前提で高強度が必要なダクト等に使用されている。図4にボーイング B777 型機における使用部位を示す<sup>5)</sup>。その中の Environment Conditioning System Ducting に使用されていることが示されている。ダクトは純チタンや Ti-6Al-4V を用いられることが多いが、高強度且つ冷間成形が必要な場合は、本合金が用いられる。

公的規格としては AMS4914 が規定されており、成分や焼鈍状態での機械的性質の他、時効処理後(2条件)の引張特性を満たすことが求められている。

日本製鉄では従来メガネフレーム向け等に本合金を製造してきたが、航空機向けに供給するべく規格を満足する製造方法を確立した。

### 2.2.2 Super-TiX<sup>®</sup>51AF

先に示した通り、チタン合金薄板としては Ti-6Al-4V が最も使用されている。しかし Ti-6Al-4V は冷間成形性が乏しいため、成形加工の場合熱間で行われている。またパック圧延と呼ばれる手法で製造されているため生産性が悪いとの問題もある。

日本製鉄では V フリーの独自合金である Super-TiX<sup>®</sup> 51AF (Ti-5Al-1Fe) を開発した<sup>6)</sup>。本合金は現在自動車エンジン部品やゴルフクラブ等に適用されている。

本合金は Ti-6Al-4V より若干強度が低い冷間加工性を有しているため冷間圧延によるコイル製造が可能である(図5)。それを評価した結果、十分な冷間成形性を有することが判明した(図6)。Ti-6Al-4V に代わる新たな合金として航空機分野への適用を広げていきたい。

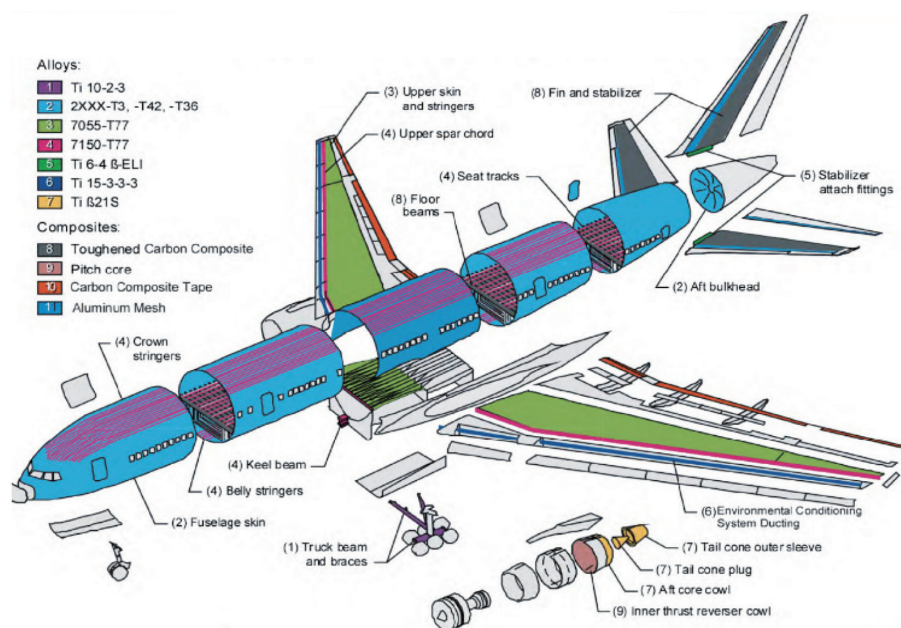


図4 B777におけるTi-15V-3Cr-3Al-3Sn等各種材料の使用部位例<sup>5)</sup>  
Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn sheets and other materials application part and schematic image of B777<sup>5)</sup>



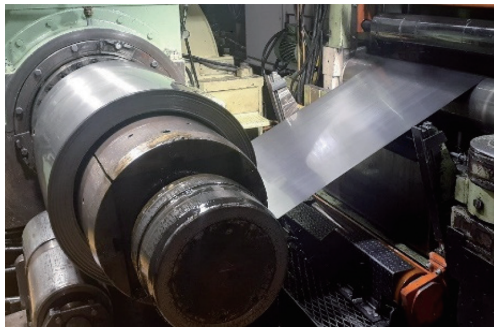


図5 Super-TIX<sup>®</sup>51AF 冷間圧延コイル外観  
Photograph of Super-TIX<sup>™</sup>51AF cold rolled sheet



図6 Super-TIX<sup>®</sup>51AF 薄板深絞り後の外観(板厚 0.4mm, 絞り比 2)  
Photograph of Super-TIX<sup>™</sup>51AF cold rolled sheet after cold deep drawing

### 3. 航空機向け熱間押出型材について

熱間押出型材は間接押出法、静水圧押出法等の様々な方法で製造される。日本製鉄における熱間押出型材の製造工程を図7に示す。日本製鉄ではビレットを所定の温度に加熱後、製品形状に押出して酸洗する。その後、熱間矯正を行い出荷する。本章では、熱間押出、熱間矯正の詳細について述べる。

#### 3.1 熱間押出

日本製鉄では、ユージン・セジュールネ法を用いて熱間押出加工を実施する。本方法では、ビレットを熱間加工しやすくするため、所定の温度に加熱し、横型水圧式押出プレスにセットして、製品形状にくりぬかれたダイスから短時間で押出する。図7に模式図を示す。押出された製品は、酸洗工程を経て、次工程に引き渡す。尚、ビレットの加熱温度は、後述するように、加熱～押出の温度分布が最適となるよう FEM 解析で算出している。

ユージン・セジュールネ法<sup>7)</sup>は、ガラス潤滑剤を用いて各種金属の棒、管、型材等を押出する方法である。1942年に発明され、炭素鋼<sup>8)</sup>をはじめ、アルミニウム<sup>9)</sup>や銅および銅合金<sup>10)</sup>などの非鉄金属への適用が進められてきた。チタン合金は、アルミニウムや銅・銅合金に比べて変形抵抗が高く、加工発熱も大きいため、一般に $\beta$ 単相温度域に加熱して押出される。ただし、チタンは化学的に活性であり、

切削加工等でも問題になるように、他金属との接触時に著しく凝着し、相手金属を激しく摩耗させる<sup>11)</sup>。そのため、他金属の押出に比べて、ダイスや押出治具の凝着摩耗、および共晶反応による損耗が大きく、ビレットの加熱温度、潤滑剤、ダイスの形状や素材の選定が重要である。

#### 3.2 熱間矯正

熱間押出された型材には曲がりや捻れが残存している。チタン合金製の型材は鋼製と比べると高強度・低弾性であるため室温ではスプリングバックが大きく矯正が困難で、その曲がりや捻れは主に熱間で矯正される。日本製鉄は通電加熱引張方式の矯正機を用いて型材を熱間矯正する。模式図に示すように、型材の両端部を形状に合わせた治具で保持しながら通電加熱し、そのまま捻り・引張変形させたのち、所定の時間保持後冷却することで、型材の形状を修正する。矯正する際の条件は、最終顧客である航空機メーカー指定の規格(例えば AMS4935 など)で規定されており、この範囲内で製造条件を微調整することで矯正後の形状寸法精度をコントロールする。

#### 3.3 解析

チタン合金型材の製造工程において、熱間押出では寸法形状と組織・材質を両立、熱間矯正では矯正直後の形状とともに、機械加工後も優れた形状が得られるよう残留応力

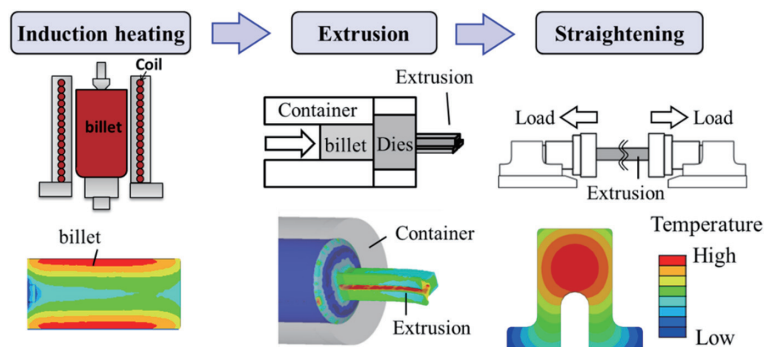


図7 FEM 解析により求めたチタン合金型材の各プロセスにおける温度分布  
Temperature distribution in each manufacturing process calculated by FEM analysis in titanium alloy billet or extrusion

の低減が重要である。熱間押出における加熱温度、ダイス形状や押出速度、および熱間矯正における熱履歴、矯正力を決定するため、クリープや熱ひずみなどを考慮したFEM解析、および解析した温度、ひずみの履歴から組織・材質特性を予測する技術を確立し、様々な各断面形状の形材の製造条件を決定している。各製造工程におけるFEM解析例を図7に示す。熱間押出、および熱間矯正の温度、ひずみ分布を把握し、品質の安定化を図っている。

#### 4. まとめ

航空機機体材料として、チタン材の使用は今後増加していくと考えられその重要性は増すばかりである。その中で我々素材メーカーの役割は、より安価高品質でエコロジーな製造方法を確立させていくことである。チタンはその製造過程(特に原料鉱石からの抽出過程)において多量の電力を消費することから、反エコロジーな金属と思われがちであるが、他材質と比較してメンテナンスフリー(高耐腐食性)で耐用年数も長く、長い目で見ればエコロジーな材料である。上記で説明したような冷間加工性、ニアネット形状押出による歩留向上等の製造技術を駆使することで、

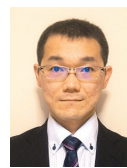
環境問題に少しでも貢献していきたいと考える。またその一方で、航空機用素材には安全性確保の観点から厳しい品質管理が要求され、日本製鉄としても各航空機メーカーからの品質要求を堅持してきた歴史がある。今後共、品質管理を維持しつつ、よりエコロジーなチタン製造技術を開発・発展させていくことで世界に貢献していきたい。

#### 参照文献

- 1) 日本チタン協会編：チタンの加工技術
- 2) 守屋勝義 ほか：IHI 技報. 60 (2), 42 (2020)
- 3) 稲垣育弘 ほか：新日鉄住金技報. (396), 26 (2013)
- 4) Cotton, J.D. et al.: JOM. 67 (6), 1281 (2015)
- 5) Cotton, J.D. et al.: AEROMAT 2010, ボーイングのスライドより
- 6) 藤井秀樹 ほか：新日鉄技報. (375), 99 (2001)
- 7) 川村宏矣：鉄と鋼. 43 (8), 826 (1957)
- 8) Hughes, K.E. et al.: Metals Technology. 1 (1), 161 (1974)
- 9) 小林啓行, 斉藤勝義：軽金属. 30 (6), 349 (1980)
- 10) Davis, J.R.: ASM Specialty Handbook Copper and Copper Alloys. Ohio, ASM International, 2001, p.221
- 11) 佐久間敬三：精密機械. 41 (6), 70 (1975)



有安 望 Nozomu ARIYASU  
チタン事業部 チタン技術部  
チタン商品技術室 航空機・プラント課長  
東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071



西山真哉 Shinya NISHIYAMA  
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部  
チタン・ステンレス研究室  
主幹研究員 博士(理学)



松本 啓 Satoshi MATSUMOTO  
チタン事業部 チタン技術部  
チタン商品技術室 航空機・プラント課  
主幹



米正 裕 Yutaka YONESHU  
九州製鉄所 八幡地区(光チタン)  
チタン・ステンレス部 チタン管理室  
主幹



北浦知之 Tomoyuki KITAURA  
東日本製鉄所 直江津地区  
チタン部 チタン技術室  
形鋼・プレス技術課長 博士(工学)