

2－2 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)

目 次

1.	事業の目的・政策的位置付け	
1-1.	事業の目的	1
1-2.	政策的位置付け	1
1-3.	国の関与の必要性	1
2.	研究開発目標	
2-1.	研究開発目標	2
2-1-1.	全体の目標設定	2
2-1-2.	個別要素技術の目標設定	2
3.	成果、目標の達成度	
3-1.	成果	5
3-1-1.	全体成果	
3-1-2.	個別要素技術成果	
3-1-3.	特許出願状況等	21
3-2.	目標の達成度	24
4.	事業化、波及効果	
4-1.	事業化の見通し	27
4-2.	波及効果	27
5.	研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等	
5-1.	研究開発計画	29
5-2.	研究開発実施者の実施体制・運営	29
5-3.	資金配分	30
5-4.	費用対効果	30
5-5.	変化への対応	31

1. 事業の目的・政策的位置付け

1-1. 事業の目的

グローバル輸送時代の到来に伴い、航空運輸需要は、年々増加傾向にある。また一方で、環境保護の観点から航空機の軽量化（低燃費化）の要求は強く、それに伴い、民間航空機の構造部材は、高強度、高信頼性を付与した炭素繊維強化複合材料、およびチタン合金を代表とする軽量金属材料の大幅な導入が進んでいる。わが国は加工性に優れるチタン合金を独自に有しているもので、これらチタン合金材料を用い航空機チタン合金部品の製造を低コストで行う技術を開発し、航空機産業における国際競争力を獲得するとともに、航空機機体構造分野の省エネルギー化に寄与することを目的とする。

1-2. 政策的位置付け

図1-1に、経済産業省策定の技術戦略マップ（2010年度版、図1-1）を示すが、本プロジェクトはこの戦略に合致している。

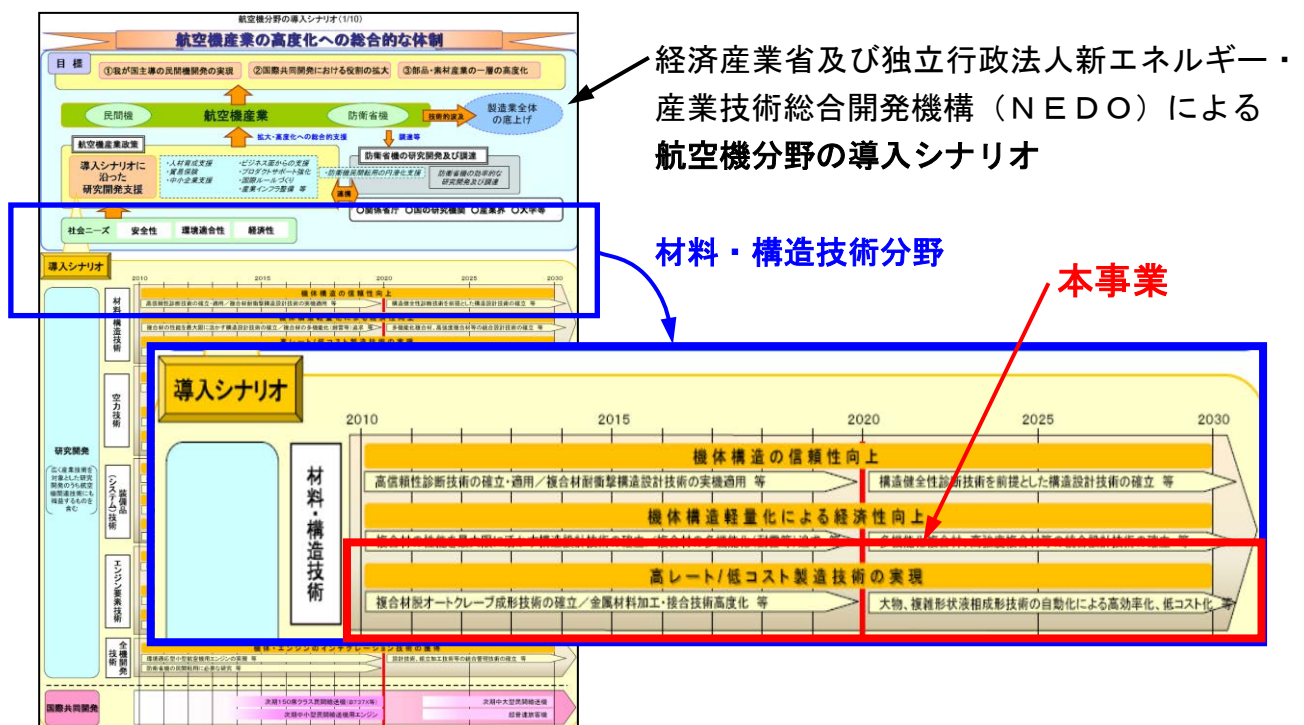


図1-1 本事業の位置付け

1-3. 国の関与の必要性

わが国の航空機用チタン合金構造部材における素材技術、加工技術、および部材供給は、現在そのほとんどを大規模の加工設備を保有し、実機適用実績の豊富な欧米に依存している。

一方、こうした状況を打破して、独自の省エネルギー材料・プロセス技術を保有し、部材自給を達成することは、「省エネルギー技術戦略」にもとづくわが国独自の国産航空機開発にとって、また、わが国の航空機メーカーおよびチタン素材メーカーにとって共通の課題であり、国内の素材産業、航空機関連産業、および研究機関の横通しによる、一貫性のある研究開発が必須である。

また、本研究開発が対象とする技術は、未だ一般的な普及レベルにまで到達しておらず、その信頼性の実証にも現実には膨大な技術リスクの解決や設備投資を伴う必要があるため、国が積極的に研究開発投資を行なって先導し、その成果を産業界に普及していく必要がある。

2. 研究開発目標

2-1. 研究開発目標

本研究開発は、次の3つのテーマ別技術、および3つの共通技術において研究開発を実施する。これらの新チタン合金およびその加工法を通じて、従来のチタン合金製造コストの30%以上低減を図る。具体的な目標は、2-2および2-3項に示す。

[テーマ別技術]

- ア. チタン板金部品の低コスト製造技術の開発
 - ・ 常温圧延可能なチタン合金の加工性改善技術の開発
 - ・ チタン合金の低温／局所加熱成形技術の開発
- イ. 高加工性新チタン合金の押出／鍛造材を用いた低コスト製造技術の開発
 - ・ 高加工性チタン合金およびその押出／鍛造素材の開発
 - ・ 押出型材成形技術の開発
 - ・ 低コスト機械加工／一体大型化技術の開発
- ウ. 高機能化チタン合金焼結部品の低コスト製造技術の開発
 - ・ 焼結材料の開発
 - ・ 放電プラズマ焼結法による部品製造プロセス開発
 - ・ 粉末焼結法による部品製造プロセス開発

[共通技術]

- ア. 材質評価
- イ. 接合技術
- ウ. 先端粉末造形技術

2-1-1. 全体の目標設定

表2-2に全体の目標を示す。

2-1-2. 個別要素技術の目標設定

表2-3に個別要素技術の目標を示す。

表 2－2 全体の目標

目標・指標 (事後評価時点)	設定理由・根拠等
・加工性に優れた新チタン合金を開発し、合わせてその効率的な加工プロセスを開発する ・従来のチタン合金製造コストを 30%以上低減する	チタン合金は航空機構造の軽量化・高機能化にとって重要な材料であり、我が国には目標を達成するための基礎技術がある。

表 2－3 個別要素技術の目標 (①：材料開発、②：加工プロセス開発)

要素技術	目標・指標 (事後評価時点)	設定理由・根拠等
[テーマ別技術開発]		
(1) チタン板金部品の低コスト製造技術の開発	①低コストで冷間加工性に優れたチタン合金 (Ti-9) 板材を開発する ②チタン合金製板金部品の低コスト曲げ成形技術を確立する	チタン合金板材とその成形技術の開発は航空機で多用される板構造の合理化につながる
(2) 高加工性新チタン合金の押出/鍛造材を用いた低コスト製造技術開発	①加工性に優れたチタン合金 (Ti-531C) 開発 ②チタン合金の押出材・鍛造材を対象とした低コスト加工プロセス (押出材曲げ、接合、切削) を開発する	部材のニアネットシェイプ化、高速加工技術により低コスト化とリードタイムの短縮が実現できる
(3) 高機能化チタン合金焼結部品の低コスト製造技術	①SP-700 合金をベースとし、焼結に適したチタン混合粉末を開発する ②・粉末焼結法による部品製造プロセスを開発	低コストで機能性を有するニアネットシェイプの部材製造が可能となり、翼胴結合金具やファスナーなどの部材への適用が可能となる

の開発	する ・放電プラズマ焼結法による部品製造プロセスを開発する	
(4) 材質評価	開発する素材および加工部品が適切な特性を有するよう調査・提言し、実用化を促す	素材を検証しフィードバックすることで、開発水準を維持・向上する
(5) 接合技術（摩擦拡散接合 (FSW)）	・FSWによるチタン合金接合技術を開発する ・新合金へのFSW適用を図る	新しいチタン合金接合技術として有用であり、航空機への応用が期待される
(6) 先端粉末造形技術（レーザフォーミングおよび金属粉末射出成形 (MIM) ）	レーザフォーミングおよび MIM をチタン合金粉末に適用するための研究を実施する MIM については大型・複雑形状品の試作を行う MIM: Metal Injection Molding	粉末造形技術は精密複雑形状部品のネットシェイプ加工技術として期待される

3. 成果、目標の達成度

3-1. 成果

3-1-1. 全体成果

表3-3の成果概要に示すように、テーマ別技術については、素材検討として低コスト加工に適するチタン合金素材の組成調整、製造技術開発を行った。また新合金素材の基礎検討、基本プロセス検討として低コスト加工プロセスにおける成形・加工性、接合性、力学的特性などを取得して課題を明らかにするとともに、材料開発やプロセス開発に必要な治具や試験装置の計画や導入を実施した。

共通技術では、開発素材・プロセスに対する材質評価、接合技術および先端粉末造形技術の導入検討を実施した。

計画期間全体に対する目標を達成した。

3-1-2. 個別要素技術成果

(1) テーマ別技術開発

ア. チタン板金部品の低コスト製造技術の開発

本テーマは、板金部材の製造コスト低減を目的に、材料費と板材の成形コストの低減を図る研究開発を行っている。材料費低減では、常温圧延でコイル化が可能なKS Ti-9 チタン合金を適用できるようにするために、この材料で問題である面内の強度異方性の改善をはかり、実機部品に適用できる技術の開発を行う。また、成形コスト低減については、チタン合金は、常温では延性が乏しいため成形しにくく、成形後高い残留応力が存在するため、熱間成形されるのが一般的であるが、金型と部品をともに加工する現状の成形では、加熱時間が長く、高温に耐える金型が必要で金型費が高く、治具を含めて加熱する必要があるため、大型部品では設備的な制約を受ける。そこで、成形する必要がある部分だけを加熱して、形状を付与する局所加熱成形技術の開発を行い、治具費の軽減と設備制約の緩和を図ることにした。以下、各技術について成果を説明する。

① 常温圧延可能なチタン合金の加工性改善技術の開発

航空機で汎用されているTi-6Al-4V合金は熱間、冷間加工性に乏しいため、素材を比較的厚い鉄板で覆って保温しながら圧延する、所謂バック圧延を繰り返し行い、薄板を製造する方法が一般的であり、低コスト化には限界がある。これに対して神戸製鋼が開発したKS Ti-9 チタン合金は原料に安価なTi-6Al-4V合金のスクラップや鉄原料のFe-Moを利用し、かつ鉄鋼材料と同様な連続圧延によるコイル圧延が可能であり、Ti-6Al-4V合金と比べて薄板の製造コストの大幅な軽減が可能である。しかしながら、圧延は一方向で行われることから、強い集合組織が形成され、どうしても面内に材料強度異方性が生じる。過度な強度異方性は、部材に成形加工する際、特に複雑な板曲げ加工をする場合、変形がいびつになり強いしわの形成や割

れなどの成形不良の要因となっている。そこで、本開発では、異方性を軽減する製造技術について研究開発を行った。

集合組織の形成を支配する熱間圧延(熱延)に着目し、加熱温度を従来の $\alpha+\beta$ 域から更に高温の β 単相域に変更することにより、強い集合組織の形成が緩和され、図 3-1 に示すように面内強度異方性が改善されることを実験にて確認した。

しかし、この β 域から熱延した板は、圧延方向の伸びが構造物として望まれる 5% よりも低い値が認められたため、熱延後の冷間圧延と続く熱処理条件の適正化を行った。延性低下の原因と考えられた焼鈍不足を解消するために、中間焼鈍時間を 6 分から 12 分へ長時間化し、かつ焼鈍前後の冷延量に上限を設けることで、図 3-2 に示すように圧延方向の伸びが改善され、製造条件の目処を得ることができた。上記で得られた知見に基づいて鋼板の生産ラインで試作を行い、計画通り、実験で得られた通りの材料特性(図 3-2)を有する板幅約 1000mm、重量 1 トン程度の薄板コイル(図 3-3)を製造することができた。また、航空機部材に必要な特性である疲労、ベアリング、せん断において、Ti-6Al-4V 合金とほぼ同等であることを確認した。これにより、Ti-6Al-4V 合金と比較して鋳塊から薄板までの製造コスト低減が可能な事を示した。

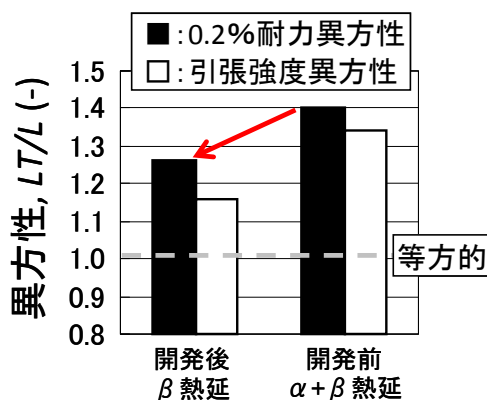


図 3-1 β 圧延による異方性改善

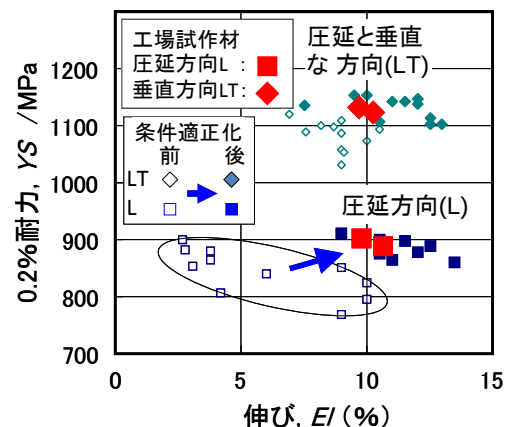


図 3-2 圧延方向の延性改善



図 3-3 工場生産ラインで試作した KS Ti-9 コイルの外観

②チタン合金の低温/局所加熱成形技術の開発

チタン合金は、常温での成形性が良くないため、600℃以上の高温で成形する必要があり、部品の成形においては、部品を加熱成形できる設備やその温度で使用

可能な耐熱材料を用いた高価な金型が必要で、加工コストが高い。特に大型の部品では、金型の昇温や成形等に長い時間が必要であり、設備の制約もあり、大型の部品は製造しにくい。そこで、部品全体を加熱するのではなく、局所的に加熱して成形することにより、成形/金型加熱時間の短縮及び金型費の削減等により製造コストを下げられないかについて、研究開発を行った。また、開発材料の成形性の評価についても実施した。

航空機の複曲面成形部品の成形方法として一般的なストレッチ成形を選定し、その成形装置と走査可能なランプを組み合わせた局所加熱成形用装置を開発した。図 3-4 に開発した装置を用いて加熱成形している状況を示す。

開発した装置を用いて、単曲面形状及び複曲面形状の部品に対して適正な成形条件について検討を行った。単曲面形状部品については比較的低い 600℃程度の加熱条件で成形することで、複曲面形状ではより高い 700℃で加熱して金型に材料を密着させたのち、単曲面形状と同様の条件で成形することで精度良く部品が成形できることが分かった。航空機翼前縁部を模擬した部品の試作品を図 3-5 に示す。試作した部品の特性を評価して、航空機の部品として使用可能であることを確認した。本成形方法の適用により、成形に使用する治具コストの大幅な低減を図ることが可能であったが、成形時間については一本のランプでの加熱には高速化に限界があるため、10%の低減に留まった。しかしながら、実用する場合は加工時間短縮のために複数ランプの使用等より高出力な熱源を適用することは容易であり、30%コストダウンが可能であることを確認した。

KS Ti-9 材の異方性軽減効果を確認するために、航空機の部品の試作を行った。改良前の材料では、図 3-6 に示すように 1 工程目の冷間成形時に、材料の異方性に起因するしわが発生して、次工程に移れなかったが、改良後の材料では 1 工程でのしわはなくなり、その後の熱間成形で所定の形状に部品を成形することができた。

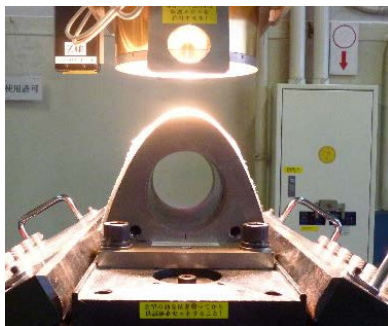


図 3-4 局所加熱成形装置



図 3-5 複曲面形状の試作部品

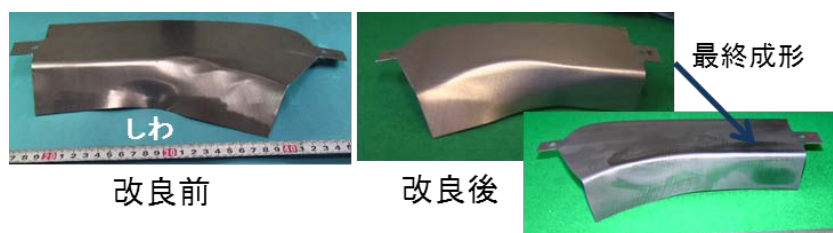
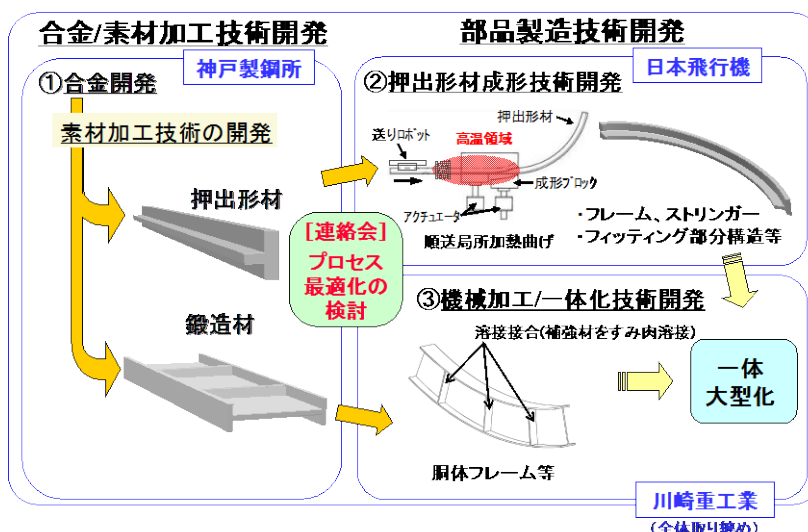


図 3-6 異方性軽減材による成形試験結果

イ. 高加工性新チタン合金の押出／鍛造材を用いた低コスト製造技術の開発

本テーマでは図3-7に概念を示す3項目の技術を開発し、国内メーカーでは製造が難しい大型チタン部材を低コストで製造する技術の確立を行なう。各研究項目について、開発内容の詳細は、以下の通りである。



・ 高加工性チタン合金および素材製造技術の開発

現在広く使われているTi-6Al-4V合金と同等の材料特性を持ち、かつ、より高い加工性を有する国産新チタン合金を開発する。また、その特性最適化のための製造技術(鍛造品、押出形材)の開発を行なう。

・ 押出形材成形技術の開発

高加工性チタン合金押出形材を用いた順送局所加熱曲げ法による連続曲げにより、フレーム等の曲率を持つ部材を低コストで高精度に成形する技術を開発する。

・ 低コスト機械加工／一体化技術の開発

高加工性チタン合金に適した高効率切削技術を開発する。また、溶接による部材の一体大型化技術を開発する。

各研究項目について、本研究開発の成果を以下に説明するが、いずれも目標を達成した。

①高加工性新チタン合金の開発

図 3-7 研究開発を行なう技術の概念

従来の Ti-6Al-4V 合金よりも熱間加工性に優れるチタン合金 EL-F の成分を見直し、最適成分 (Ti-4.5Al-2.5Cr-1.2Fe, -0.1C) を確定して Ti-531C 合金を開発した。約 1 トンの小型実機溶製を行って特性を評価し、引張強度特性および疲労強度が Ti-6Al-4V と同等以上であることを確認した。

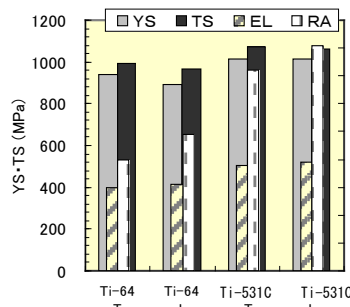


図 3-8 引張強度特性

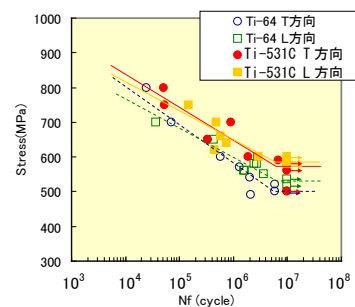


図 3-9 疲労強度特性

T 字断面押出型材 図 3-10 機体模擬鍛造品の鍛造試作の結果、同一形状においては Ti-6Al-4V よりも最大で 30% 程度低荷重で成形できることを確認した。また強度についても Ti-6Al-4V と同等以上の特性が得られることを確認した (図 3-11 (b))。



図 3-10 機体模擬鍛造品

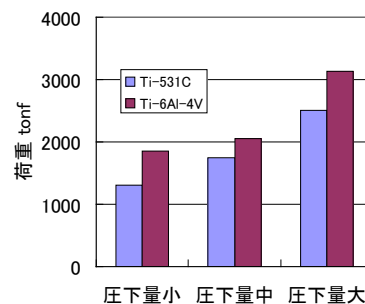


図 3-11 (a) 鍛造荷重比較

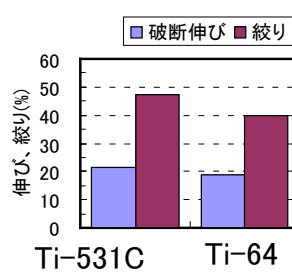
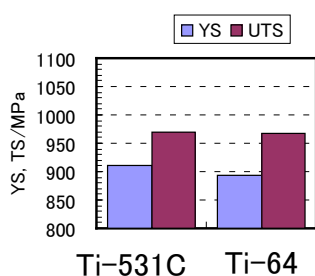


図 3-11 (b) 鍛造品引張試験結果

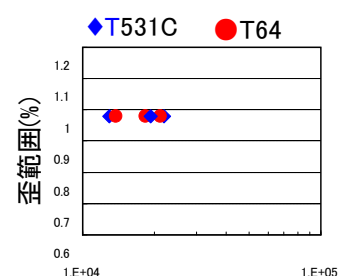


図 3-11 (c) 鍛造品疲労試験結果

② チタン合金押出材の曲げ成形装置の開発

チタン押出し材の曲げ成形では、図 3-12 に示す成形プロセスを考案し、成形装置を試作した。Ti-531C 押出型材の成形試験を行い、成形条件 (温度、送り、ピッチ等) の制御により各種曲率半径への成形が可能で、本プロセスが成立することを確認した。成形後の型材で材料特性 (強度、表面酸化) を評価し、問題が

ないことを確認した。更に、実機部品に準ずる大断面模擬形材を対象に、自動運転で任意の大曲率半径へ成形できることを実証した(図 3-14)。また、FEM による変形解析を試行して成形解析精度を評価し、加工条件の設定や成形型の設計に適用できる見通しを得た。成形コスト試算の結果、局所加熱逐次成形法は、従来のホットサイジングプレス成形と比較して低コストであることを確認した。

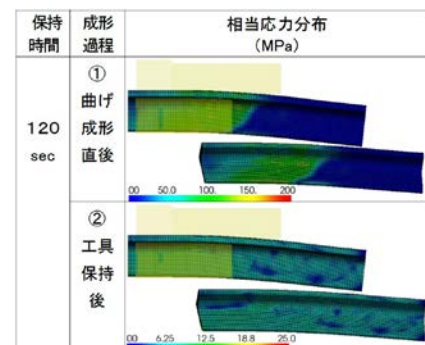
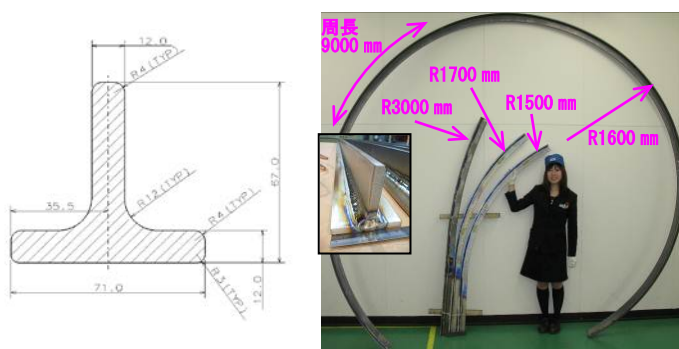
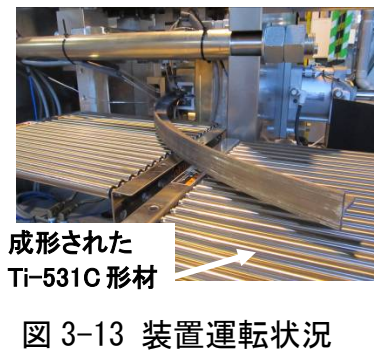
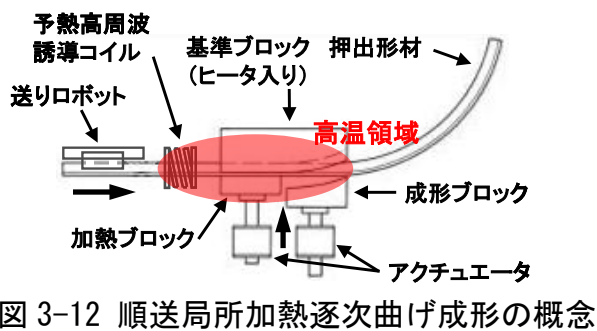


図 3-14 開発した装置による Ti-531C 合金押出形材の成形例および解析例

③ 低コスト機械加工／一体化技術の開発

Ti-531C 合金について、クーポン供試体での評価により、切削性および溶接性が Ti-6Al-4V と同等であることを確認した。また、図 3-15 に示すような切削解析を用い、Ti-531C 合金の最適な切削条件を選定した。

さらに、Ti-531C のレーザ溶接材の強度評価を行い、母材と較べて引張強度は同等だが、疲労強度は 2~3 割低下することを確認した。模擬部品は、開発した Ti-531C 合金押出形材を順送局所加熱逐次曲げ成形し、溶接により一体大型化した後に全表面を機械加工して試作した。(図 3-16 および 17)。開発した新製造プロセスと Ti-6Al-4V 鍛造品を用

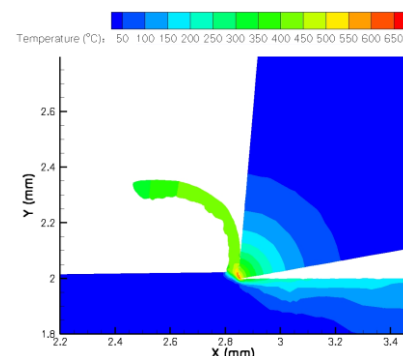


図 3-15 刃先温度の解析例 (二次元)

いる従来プロセスでコストを比較した結果、型材成形と溶接費用が追加発生するが、素材費と切削費の低減により全体として 3 割のコスト低減という目標が達成できる見通しを得た。



図 3-16 模擬部材(型材溶接後)



図 3-17 模擬部材(機械加工後)

ウ. 高機能化チタン合金焼結部品の低コスト製造技術の開発

近年航空機材料としてその使用量が拡大しているチタン合金は、アルミ合金と比較して材料コスト、機械加工コスト共に非常に高く、これらのコスト低減技術が航空機製造技術の中でますます重要な課題となってきた。軽量化が求められる航空機部品はその形状が複雑になる場合が多く、機械加工により素材の大部分を切削加工することから、コスト低減のためには素材のニアネットシェイプ化製造技術の開発が必須である。本研究プロジェクトでは、焼結技術の開発により部品のニアネットシェイプ化を図り、チタン合金部品の製造コスト低減を目指すものである。最終目標は、Ti-6Al-4V 合金鍛造品と同等以上の特性を有する粉末焼結部品を開発し、さらにその部品製造コストを 30%低減することとする。また、焼結の特性を生かして、航空機部品として有効な機能を付加したチタン合金部品製造技術を開発することも検討する。

焼結方法としては、低コスト焼結方法で量産化へ移行しやすい素粉末混合法、難焼結材の焼結が可能な放電プラズマ焼結法の 2 種の方法を用いて焼結を行い、評価を行った。

①素粉末混合法による焼結技術開発

素粉末混合法は、複雑な形状の成形が可能で、ある程度の量産化も容易なため、工業化に適したニアネットシェイプ加工技術である。合金系には、国内で開発された Ti-4.5Al-3V-2Fe-2Mo (SP-700) 合金に TiB_2 を微量添加した合金を用いた。

プロセスの改善に関しては、粉末混合プロセス中で材料に吸収される酸素を低減することにより、焼結体の延性の向上を図ると同時に、粉末の流動性向上による内部欠陥の低減を図った。焼結体の静強度試験結果を図 3-18、図 3-19 に示す。改善されたプロセスにより特に伸びと絞りが改善し、最終的に図中の 2012 で示した材料は開発目標である Ti-6Al-4V 合金鍛造材の特性値を達成した。疲労試験結果を図 3-20 に示す。焼結体の疲労特性は、図中の実線で示した Ti-6Al-4V 合金鍛造材の疲労強度に近い特性を示した。また、図 3-21 に、開発

材の破壊靱性値を示す。開発材の破壊靱性値は、破線で示す Ti-6Al-4V 合金の特性範囲を上回っており、開発目標を達成した。亀裂進展特性についても、開発目標を達成した。

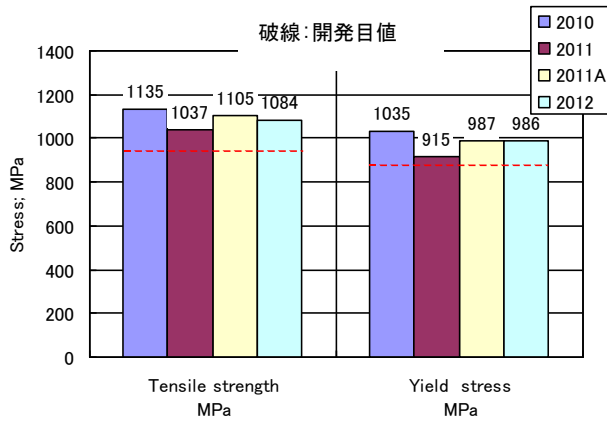


図 3-18 開発材の引張試験結果
(引張強度・降伏応力)

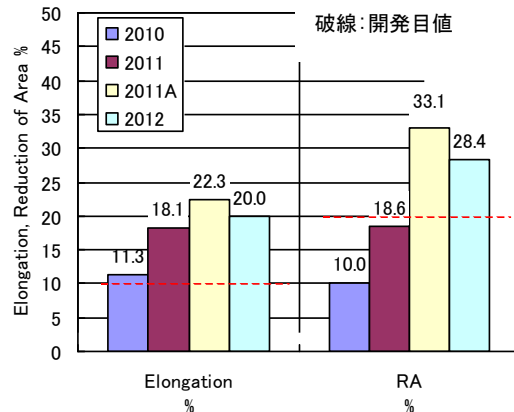


図 3-19 開発材の引張試験結果
(伸び・絞り)

本技術の実機適用時の製造性を実証するため、航空機部品を模擬した試作品を製作した。図 3-22 に試作品の外観を示す。非常に深いポケットを複数持つ複雑な形状要素を持つ部品であるが、一部に欠けが発生したものの、大きな問題なく焼結することができた。本試作を通じて、成立性と残る課題を確認することができた。

試作品に対して製造コスト評価を行った。単位重量あたりの材料単価は高いものの、ニアネットシェイプ化による素材重量の減少と機械加工費の低減により、製造プロセス全体で計 33% のコスト低減が可能であることを確認した。

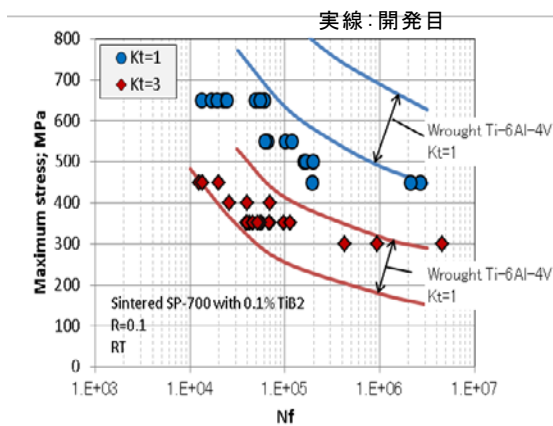


図 3-20 開発材の疲労試験結果

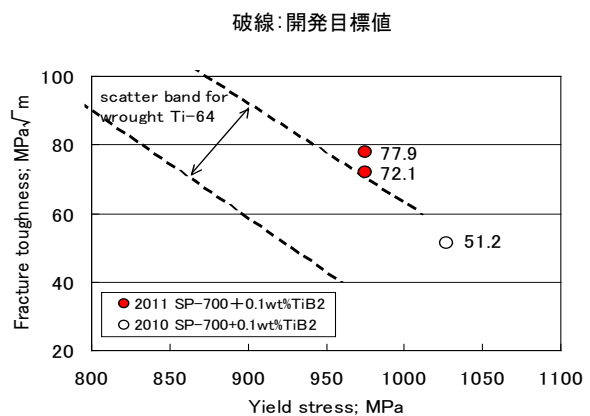


図 3-21 開発材の破壊靱性値

②放電プラズマ焼結法による焼結技術開発

放電プラズマ焼結法は、比較的低温での焼結が可能で、難焼結材の焼結が可能という特徴を持つ。この特徴を生かして、TiB を強化物とした分散強化チタン合金の開発を行った。又、本焼結法ではこれまで困難とされてきた複雑形状の焼結手法の開発を行った。合金系には、Ti-6Al-4V 合金を用いた。分散強化チタン合金について種々の特性を調査した結果、分散強化チタン合金のメリットとして高いビッカース硬さを示した。この特徴を生かすため、面圧強度が重要となる部品について試作を行い、評価を行った。評価の結果、分散強化チタン合金で強化したファスナ結合部は複雑な破壊モードを示し、破壊までに従来よりも高い吸収エネルギーを示し、本技術によってより信頼性の高い結合構造を得られることが分かった。

又、型材料として炭素粉を用いる新しい焼結方法(特願 2009-209555)により、傾斜機能を持つ複雑形状の焼結が可能であることを確認した。図 3-23 に複雑形状の焼結体の写真を示す。焼結に用いる金型材料の最適化により、高い焼結密度が得られることも確認した。以上から、新しい機能を持つチタン合金焼結部品の実現性に目処を得ることができ、開発目標を達成した。



図 3-22 複雑形状の試作結果

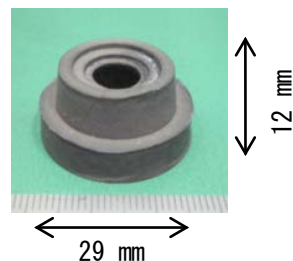


図 3-23 焼結体の試作結果

(2) 共通技術開発

ア. 材質評価

材質評価では、本プロジェクトのテーマ別技術に対し、以下のような検討を行った。①高加工性新チタン合金の押出/鍛造材を用いた低コスト製造技術の開発において創製した Ti-531C 合金について、レーザ溶接による疲労特性低下のミクロ組織因子を検討した。②チタン板金部品の低コスト製造技術の開発において創製した Ti-9 合金について、力学的異方性を軽減するための製造プロセスを検討した。以下に、これらの研究成果を記す。

① レーザ溶接を施した Ti-531C 合金の疲労特性とその決定因子

本合金の厚板材（母材）に、アルゴン雰囲気中にて、片面（溶接条件 A）および両面（溶接条件 B）からレーザ溶接を施した後、973 K で 7.2 ks の焼鈍処理を施した。これらの試料について、引張特性および疲労特性を評価し、破面観察を行った。

溶接前の試料および 2 種類の溶接後の試料の引張特性は、引張強度、0.2%耐力および伸びのいずれについても、三者の間にほとんど差はなく、良好な引張特性を呈した。また、いずれの溶接後の試料においても、破断は母材部で生じたことから、レーザ溶接による引張特性への悪影響はほとんどないと考えられる。

図 3-24 に溶接前の試料および 2 種類の溶接後の試料の疲労特性を示す。溶接前の試料の疲労強度と比較して、いずれの溶接条件の溶接後の試料も疲労強度が低下しているが、溶接条件 A のほうが、溶接条件 B に比べて、疲労強度が高いことがわかる。レーザ溶接を施した Ti-6Al-4V 合金（従来材）の疲労強度と比較しても、溶接条件 A は疲労強度が高く、良好な疲労特性が得られている

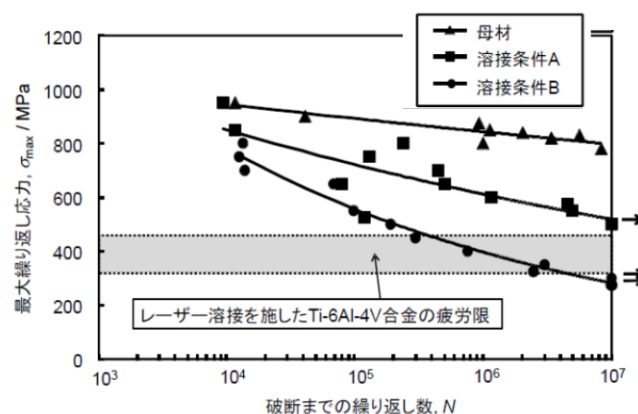


図 3-24 溶接前（母材）および溶接後（溶接条件 A、B）の Ti-531C の疲労特性

といえる。溶接後の試料では、いずれも破断が溶接部で生じた。さらに、疲労試験後の破面を観察した結果、溶接後の試料では、き裂発生点にポア（気泡）の存在が認められた。したがって、レーザ溶接を施した試料の疲労強度低下は、主にポアの存在によって引き起されていることが示唆される。さらに、ポアの大きさ

が溶接条件 A に比べて溶接条件 B のほうが大きかったことから、ポアが大きいほど疲労強度が低下すると考えられる。以上より、疲労特性を改善するためには、溶接時に生じるポアの大きさを極力小さくすることが有効であると考えられる。

② Ti-9 合金の力学的異方性と溶体化処理条件との関係

本合金の薄板材に、1123 K、1173 K、1223 K あるいは 1273 K で 3.6 ks の溶体化水冷処理を施した後、973 K にて 7.2 ks 保持後空冷の焼鈍処理を施した。また、同薄板材に、1223 K で 3.6 ks の溶体化空冷処理を施した後、973 K にて 7.2 ks 保持後空冷の焼鈍処理を施した。これらの試料について、ミクロ組織の観察および引張特性の評価を行った。

図 3-25 に各条件にて熱処理を施した試料の光学顕微鏡像を示す。 $\alpha + \beta$ 相温度域である 1123 K、1173 K あるいは 1223 K にて溶体化水冷処理を施した場合、図 (a)、(b) および (c) に示すように、溶体化処理温度が増加するに伴い初析 α 相の体積分率が減少し、針状 $\alpha + \beta$ 相の体積分率が増加する。一方、 β 温度域である 1273 K にて溶体化水冷処理を施した場合、図 (d) に示すように、初析 α 相は消失し、針状 $\alpha + \beta$ 相および旧 β 粒界に析出した α 相から成るミクロ組織を呈する。力学的異方性は、熱間圧延時に形成する初析 α 相の集合組織に強く

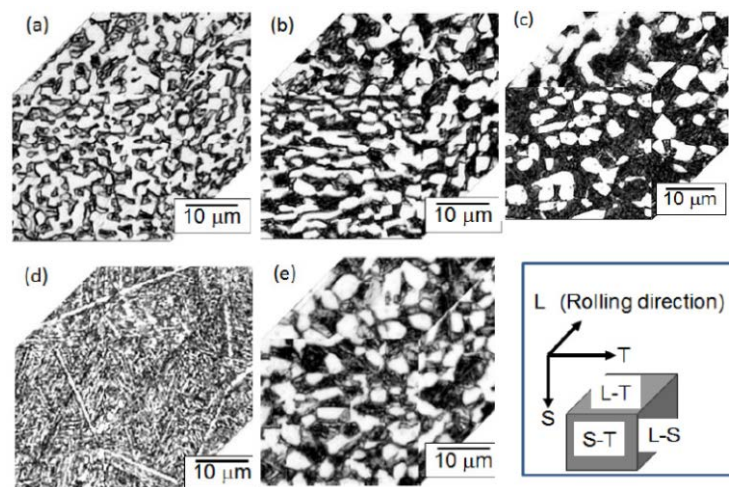


図 3-25 (a) 1123 K、(b) 1173 K、(c) 1223 K あるいは (d) 1273 K で 3.6 ks 溶体化水冷処理および (e) 1223 K で 3.6 ks の溶体化空冷処理を施し、その後 973 K で 7.2 ks 保持後空冷の焼鈍処理を施した Ti-9 合金の光学顕微鏡によるミクロ組織観察結果

依存するため、熱処理により初析 α 相の体積分率を低下させることにより、力学的異方性が改善されると考えられる。図 (e) は 1223 K にて溶体化空冷処理を施した試料のミクロ組織を示している。溶体化温度は図 (c) に示した試料と同じであるため、初析 α 相の集合組織に大きな違いはないが、引張試験の結果では、図 (e) に示す試料のほうが著しい力学的異方性を示した。この結果は、

溶体化後の冷却中に析出する針状 α 相の結晶方位が初析 α 相のそれに強く依存することを示唆している。以上より、Ti-9 合金の力学的異方性を軽減するためには、初析 α 相の体積分率が小さくなるように溶体化温度を β 相温度域とし、さらに、溶体化後の冷却速度を大きくすることが有効であると考えられる。

③ FSW による Ti-531C 合金接合部疲労特性調査

本プロジェクトで開発されたチタン合金 Ti-531C は、航空機構造材として多用されている Ti-6Al-4V 合金の代替材として期待されており、FSW 試験では Ti-6Al-4V 合金よりも低温で軟化することから接合性の良さが確認されている。同合金の FSW 接合材に対し疲労強度を調査した。

図 3-26 に Ti-531C 母材 (FSW-base-2t)、200rpm、25mm/min で FSW 接合した後、973K、7.2ks で焼鈍処理を施した FSW 接合材 (200-25-anneal-2t) および 600pm、100mm/min で FSW 接合した後、973K、7.2ks で焼鈍処理を施した FSW 接合材 (600-100-anneal-2t) における最大繰返し応力と破断に至るまでの繰返し数との関係 (S-N 曲線) を示す。FSW-base-2t は、高サイクル疲労寿命領域においても約 800MPa の高い疲労強度を示す。200-25-anneal-2t および 600-100-anneal-2t は FSW を施したにもかかわらず、FSW-base-2t の高い疲労強度とほぼ同程度の値が得られている。レーザ溶接材では、疲労強度が母材に比べて大きく低下することを考慮すると、FSW 接合材の疲労強度は極めて良好であるといえる。

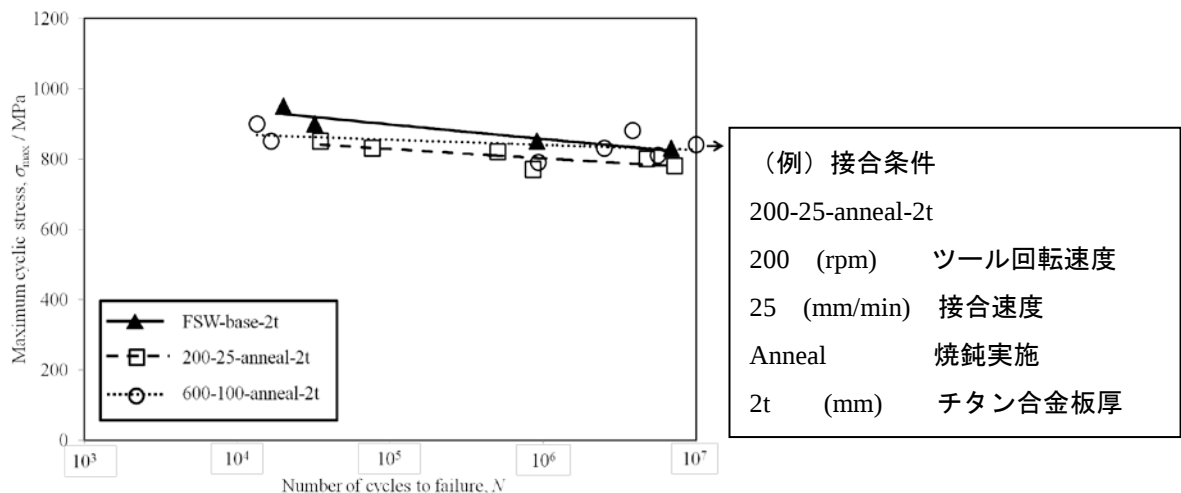


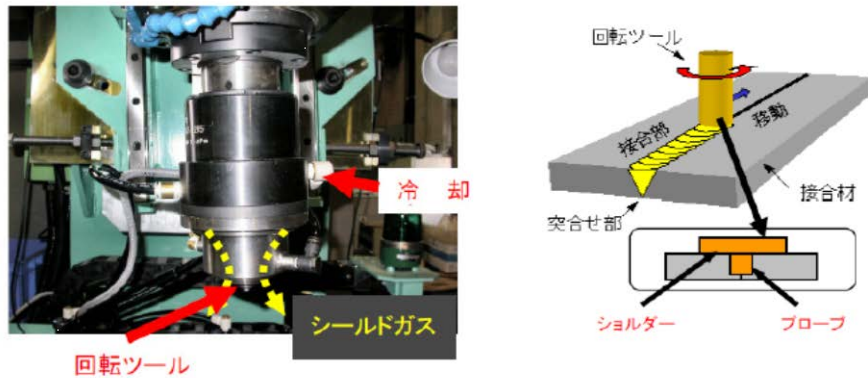
図 3-26 FSW を施した Ti-531C および母材の疲労特性

イ. 接合技術

摩擦攪拌接合 (FSW) は英国の The Welding Institute (TWI) において発明されて以来、世界各地で精力的に研究開発が行われてきており、アルミニウム合金に対しては既に多くの産業分野で実用化の段階に入っている。現在は、炭素鋼やステンレス鋼などの鉄鋼材料やチタン合金に対しても研究開発が始められているが、接合装置や接合用回転ツールなどの制約のために研究開発は限定的である。そこで本研究開発では、摩擦攪拌接合 (FSW) によるチタン合金の接合技術を開発し、接合による低コストでの航空機部材の形成を実現する。そのために必要な FSW プロセスの安定化、および接合可能条件の取得に関する研究開発を実施し、FSW 適用の目処を得ることを目標とした。

実験は、大阪大学が保有する位置制御式摩擦攪拌接合装置等の設備を利用し、2mm厚のTi531C合金およびSP700合金の接合を行った。継手断面の硬度分布および継手の引張試験による接合材の継手の機械的強度の評価と、光学顕微鏡、SEM、TEM、EBSP による組織の解析を行うことで両者の関係を明確にし、継手の摩擦攪拌接合性を評価した。回転ツールは超硬ツールとし、150~1000rpm、接合速度を 25~600mm/min に変化させて入熱量を変化させながら接合することにより、最適条件を求めた。得られた知見をまとめると以下のようになる。

- (1) $\alpha + \beta$ 合金である Ti-9、Ti-531C および SP-700 合金の摩擦攪拌接合に成功し、母材より高強度の継手を得ることができた。チタンの摩擦攪拌接合において位置制御を用いると、安定的な接合の場合は接合中の荷重は安定する。したがって、荷重の検出は良好な継手を得るための有効な手段となり得る。
- (2) Ti-531C の摩擦攪拌接合においては、Ti-6Al-4V よりもおおよそ 20%低い荷重で接合が可能である。
- (3) 接合条件およびツール形状を最適化することにより、 β トランザス以上の温度での接合ではラメラ組織、 β トランザス以下では動的再結晶による形成された極めて微細な等軸組織をもつ継手を形成することができる。接合後の継手断面において EBSD 測定し、 β トランザス以上および以下の接合条件において、共に異方性のない継手が得られることを確認した。
- (4) ラメラ組織が形成する温度領域では、最高到達温度を変化させることにより、旧 β 粒の大きさを制御できる。最高到達温度が低いほど、旧 β 粒は小さくなる。ラメラ組織の大きさは、冷却速度に大きく依存する。冷却速度が大きいほど、ラメラ組織は微細化する。
- (5) Ti-531C の摩擦攪拌接合継手で得られるラメラ組織は極めて微細となるため、母材より機械的特性が上昇する。また、等軸組織にすることにより母材と同程度の特性にすることが可能である。



高剛性大型接合装置；荷重制御型装置（最大荷重5.5t）

酸化防止機構；シールドガスにより酸化を防止冷却水により装置の温度上昇を抑制

図3-27 FSW装置と接合原理

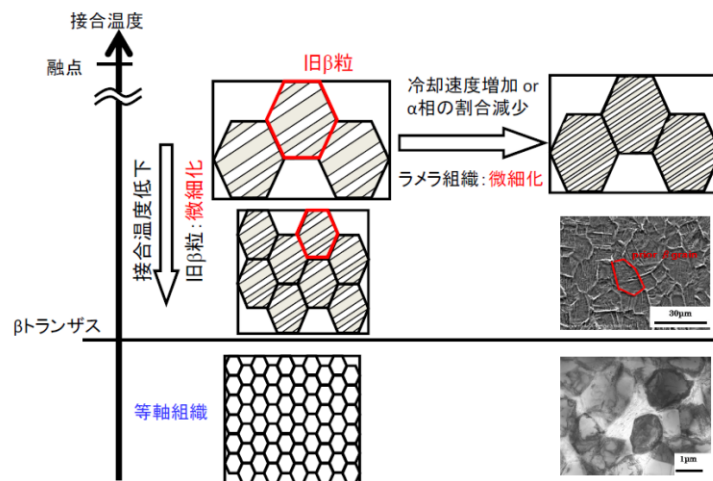


図3-28 接合条件および素材と組織の関係

ウ. 先端粉末造形技術

チタン合金は、比強度が高く、耐食性や耐熱性に優れた特性を示し、なかでも航空機部材など大型の輸送機械に用いられる代表的なチタン合金としてTi-6Al-4V合金が挙げられる。

本合金は、強度、延性および靱性のバランスを備え、かつ適度な加工、溶接もできることからチタン合金の需要量の約八割を占めている。しかし、チタン合金は、一般に被切削性が悪く機械加工が困難であることから、複雑形状品の加工費がステンレス鋼の場合の約2倍、アルミニウム合金の場合の約5～10倍という非常に高くなっている。そのため、近年これらの課題を改善する加工プロセスの開発が必要とされている。

本研究開発では、金属粉末を用いてネットシェイプの製品が精度良く、高性能に作製できる先端粉末造形技術として、レーザフォーミングおよび金属粉末

射出成形（MIM）の2つの技術に着目した。まずは、レーザを利用して粉末をチタンバルク部材に溶着させることで、複雑な局部形状の形成（レーザフォーミング）が可能であるので、これを応用して航空機用チタン製品の補修や機能化を実現する。また、小型精密複雑形状品のネットシェイプ加工技術として有用な金属粉末射出成形（MIM）技術を航空機部材用としての大型品にも適用可能とすることを目標とした。

実現化のための課題は、前者においては、1)素過程（粉末の融合）の解明、2)形状化プロセスの確立である。後者では、1)大型化に向けたバインダならびに脱バインダ・焼結プロセスの確立、2)寸法精度および高強度部材確立である。平成23年度までの研究で得られている結果を列記すると以下のようなものである。

① レーザフォーミング

各種造形条件、相対密度および引張強度との関係から緻密化・高強度化のための造形条件の最適化を行った結果、レーザフォーミングによる Ti-6Al-4V 合金粉末積層造形体の相対密度はほぼ 100 %で、引張強度は溶製材の 960 MPa に対し 1157 MPa であったが、伸びは溶製材の半分強の約 9%であった。なお、造形方法によって力学特性に異方性が生じるという新しい知見も得た。

最後にレーザフォーミングを用いて図 3-31 に示すモデルの小型タービンブレードの造形を行った。タービンブレードの形状は直径 33mm 高さ 15.2mm である。造形条件は 220W、160mm/s とし、粉末層厚さは 60 μ m とした。

造形した試料を 3-32 に示す。側面の凹凸は存在しているものの、傾斜のあるブレード部分は隣接したブレードと一体化することなく一枚ずつ造形されておりモデルとほぼ同等の形で造形されている。今後、側面の形状精度を向上させることにより、製品として使用可能な造形体を作製可能であると考えられる。

② 金属粉末射出成形（MIM）

航空機用締結部材を MIM により作製し、三次元測定機のレーザプローブを用いて変形を評価した。各工程での変形の推移を検討した結果、脱脂時に大きな変形が生じることがわかった。加熱脱脂時に適切なサポートを用いること、さらに焼結時の自重を考慮したサポートで変形を抑制できた。また粉末の粒度分布、バインダの構成成分の最適化により変形を抑制できた。

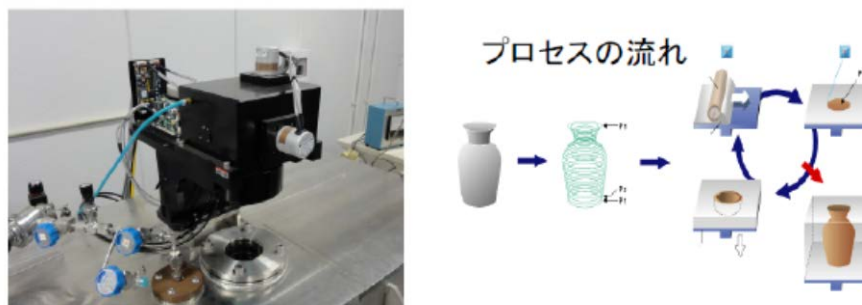
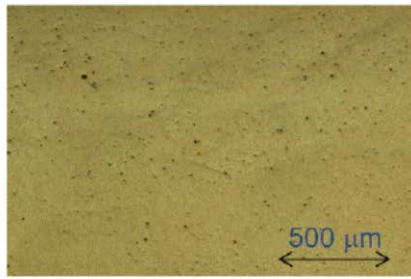


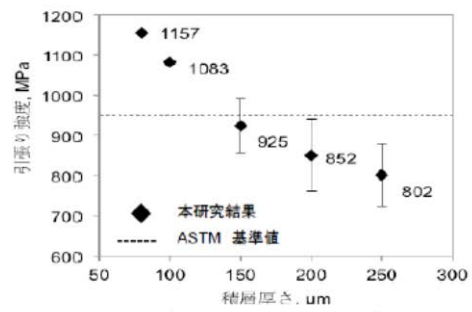
図 3-29 レーザフォーミング装置とプロセスの流れ

真空中, TILOP64-45, 80 μ m 積層



レーザー出力: 260 W
走査速度 80 mm/s

強度に及ぼす積層厚さの影響



積層厚さが薄いと引張り強度が増加

図 3-30 強度に及ぼす積層厚さの影響



図 3-31 3D モデル(タービンブレード)

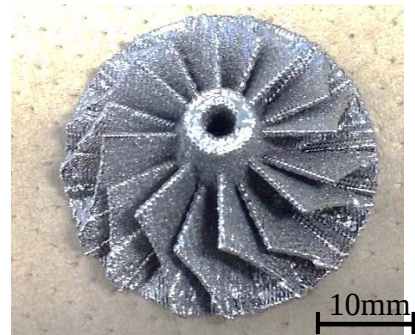


図 3-32 造形したタービンブレード

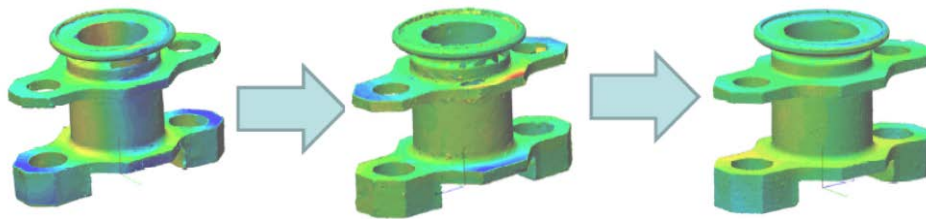


図 3-33 大形部材の変形抑制結果

3-1-3. 特許出願状況等

表3-1に特許・論文件数を、表3-2に論文・投稿・発表・特許リストを示す。

表3-1 特許論文等件数

要素技術	論文数	論文の被引用度数	特許等件数 (出願を含む)	特許権の 実施件数	ライセンス 供与数	取得ライ センス料	国際標準 への寄与
(1) チタン板金部品の低コスト製造技術の開発	1		5				
(2) 高加工性新チタン合金の押出／鍛造材を用いた低コスト製造技術の開発			2				
(3) 高機能化チタン合金焼結部品の低コスト製造技術の開発			1				
(4) 材質評価	2						
(5) 接合技術	2		1				
(6) 先端粉末造形技術	2						
(7) 総合調査研究	1						
計	8		9				

表3-2 論文、投稿、発表、特許リスト

	題目・メディア等	時期
論文	Materials Science and Engineering, A 「Investigation of Welding Parameter Dependent Microstructure and Mechanical Properties in Friction Stir Welded Pure Ti joint」 藤井他、大阪大学	H22. 6
	R&D 神戸製鋼技報 「KS Ti-9 の異方性改善技術」 逸見他、神戸製鋼	H22. 8
	素形材センター「素形材」 11月号 「航空機用構造材料の技術研究開発動向」 伊牟田、素形材センター	H22. 11
	軽金属 Vol. 61 「ミクロ組織制御による次世代航空機用 Ti-Al-Cr-Fe-C 系合金の高力学機能化」 赤堀他、東北大学	H24. 1
	軽金属 Vol. 61 「次世代航空機用 Ti-4.5%Al-2%Mo-1.6%V-0.5%Fe-0.3%Si-0.03%C 合金のミクロ組織と機械的性質の関係」 赤堀他、東北大学	H24. 1
	粉体および粉末冶金 「MIM プロセスにおけるチタン合金部材の変形挙動の評価ならびに解析-第2報-」 三浦他、九州大学	H24. 5
	Key Engineering Materials 「Evaluation and Analysis of Distortion of Complex Shaped Ti-6Al-4V Compacts by Metal Injection Molding Process」 三浦他、九州大学	H24. 9
	Materials and Design 「Flexible Control of the Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Ti-6Al-4V Joints」 北村他、大阪大学	H25. 3
投稿	日本チタン協会誌「チタン」 Vol. 57 No. 1 「次世代チタン合金構造部材創製・加工技術開発の概要」 伊牟田、素形材センター	H21. 1
	Canada-Japan Aerospace Technology Collaboration Workshop session Location: Paris Airshow, Canadian Chalet 「Advanced Metallic Alloys and Processing」 伊牟田、素形材センター	H21. 6
	「素形材」 7月号 「次世代構造部材創製・加工技術開発プロジェクトの概要」 伊牟田他、素形材センター	H21. 7
	「素形材」 1月号 「航空機構造チタン合金部品の少量生産技術」 鈴木、日本飛行機	H23. 1
	日刊工業新聞 「チタン合金で実現 摩擦攪拌接合 920℃で靱性 1.5 倍 針状結晶でできず」 藤井、大阪大学	H23. 4
発表	平成 21 年度春季溶接学会全国大会講演概要 84 集 「工業用純チタンの摩擦攪拌接合」 岩田他、大阪大学	H21. 4
	日本金属学会 2009 年秋期(第 145 回)大会 「次世代航空機用 $\alpha+\beta$ 型チタン合金のミクロ組織と高力学機能化」 安芸、東北大学	H21. 9
	ICCCI2009 「Friction Stir Welding of Commercial Purity Titanium」 藤井他、大阪大学	H21. 9
	粉体粉末冶金協会平成 21 年度秋季講演大会 「MIM プロセスによる Ti-6Al-4V 合金部材の大型化」 三浦他、九州大学	H21. 10
	第 118 回東北大学金属材料研究所講演会 2009 年秋季 「次世代航空機用 $\alpha+\beta$ 型チタン合金のミクロ組織変化と高力学機能化」 安芸、東北大学	H21. 11
	平成 21 年度秋季溶接学会全国大会講演概要 85 集 「Ti-6Al-4V 合金の摩擦攪拌接合継手特性に及ぼす接合条件の影響」 岩田他、大阪大学	H21. 11
	日本金属学会 2010 年春季大会 「放電プラズマ焼結法による Ti-10Al-2Fe-3Al 合金の焼結性と力学特性」 江川、日本大学	H22. 3
	軽金属学会 2010 年春季(第 118 回)大会 「次世代航空機用 $\alpha+\beta$ 型チタン合金のミクロ組織および力学的特性の関係」 林、東北大学	H22. 5
	第 119 回東北大学金属材料研究所講演会 2010 年春季 「次世代航空機用チタン合金圧延・鍛造材におけるミクロ組織と力学機能」 林、東北大学	H22. 5
	日本材料学会第 59 期学術講演会 「放電プラズマ焼結法による Ti-6Al-4V 合金の焼結性と強度特性」 出井他、日本大学	H22. 5
	AeroMat 2010 「Mechanical and Fatigue Properties of Ti-6Al-4V Prepared by Spark Plasma Sintering」 出井、日本大学	H22. 6
	チタン協会平成 22 年夏季研修会 「チタンの摩擦攪拌接合 (FSW)」 藤井、大阪大学	H22. 7
	第 7 回環太平洋先端材料とプロセス国際会議 「Spark Plasma Sintering of Ti-4.5Al-3V-2Fe-3Mo (SP-700)」 菊池、日本大学	H22. 8
	日本機械学会 第 6 回粉体・粉末成形技術研究分科会 「放電プラズマ焼結法による TiB 強化チタン合金の高強度化」 出井、日本大学	H22. 8
	日本鉄鋼協会秋季講演大会 「 $\alpha-\beta$ 型チタン合金 KS Ti-9 の面内異方性に及ぼす熱延加熱温度の影響」 今野、神戸製鋼	H22. 9

	日本鉄鋼協会秋季講演大会 「Cr-Fe-C系 α - β 型チタン合金の被削性、溶接性および熱間変形抵抗に及ぼす合金元素の影響」村上、神戸製鋼	H22. 9
	日本金属学会 2010 年秋期(第 147 回)大会 「次世代航空機用 α + β 型チタン合金溶接材のミクロ組織と力学的特性」林、東北大学	H22. 9
	第 54 回日本学術会議 材料工学連合講演会 「放電プラズマ焼結法で作製した TiB 強化 Ti-6Al-4V 合金の引張および疲労特性」出井他、日本大学	H22. 10
	軽金属学会 2010 年秋期(第 119 回)大会 「次世代航空機用 α + β 型チタン合金溶接材における力学的特性およびミクロ組織の関係」林、東北大学	H22. 11
	粉体粉末冶金協会 平成 22 年度秋季大会 「放電プラズマ焼結法による SP-700 の焼結性と力学的特性」菊池他、日本大学	H22. 11
	粉体粉末冶金協会平成 22 年度秋季講演大会 「直接金属レーザー製造技術(DMLF)による密度傾斜材料のための気孔組織の制御」三浦他、九州大学	H22. 11
	日本機械学会 第 18 回機械材料・材料加工技術講演会 「放電プラズマ焼結法による TiB 強化 SP-700 合金のミクロ組織と強度特性」出井他、日本大学	H22. 11
	第 3 回素形材新技術連携シンポジウム 「航空機用構造材料の技術動向と RIMCOF の研究開発」伊牟田、素形材センター	H22. 11
	平成 23 年度春季溶接学会全国大会講演概要 88 集 「チタン合金の摩擦攪拌接合」北村他、大阪大学	H23. 4
	AeroMat2011 「Development of Forming Process by using Partial Heating for Titanium Alloys」橘他三菱重工	H23. 5
	AeroMat2011 「Effect of Hot Rolling Temperature on Planar Anisotropy of α - β Type Titanium Alloy, KS Ti-9」逸見他、神戸製鋼	H23. 5
	AeroMat2011 「Improvement of Workability in the Alpha-Beta Titanium Alloy Containing Cr, Fe and C」逸見他、神戸製鋼	H23. 5
	軽金属学会第 120 回春期大会 「レーザー溶接した次世代航空機用 α + β 型チタン合金の力学的特性とミクロ組織」永澤、東北大学	H23. 5
	金属材料研究所第 121 回講演会 「次世代航空機用 α + β 型チタン合金冷延材のミクロ組織および力学的特性に及ぼす熱間圧延の影響」永澤、東北大学	H23. 5
	The 12th World Conference on Titanium 2011 「Influence of heat temperature of hot rolling on in-plane anisotropy of Ti-4.5Al-2Mo-1.6V-0.5Fe-0.3Si-0.03C」今野他、神戸製鋼	H23. 6
	The 12th World Conference on Titanium 2011 「Influence of alloy elements on machinability, weldability and hot deformation resistance in alpha-beta titanium alloys containing Cr, Fe and C」村上他、神戸製鋼	H23. 6
	第 23 回溶接・接合研究会 「次世代航空機用 α + β 型チタン合金におけるミクロ組織および疲労特性に及ぼすレーザー溶接の影響」永澤、東北大学	H23. 7
	日本鉄鋼協会第 162 回秋季講演大会 「次世代航空機用 α + β 型チタン合金薄板のミクロ組織および力学的特性に及ぼす加工熱処理の影響」永澤、東北大学	H23. 9
	第 62 回塑性加工連合講演会 「チタン合金形材の逐次曲げ成形法の開発」鈴木他、日本飛行機	H23. 10
	日本航空宇宙学会、第 49 回飛行機シンポジウム 「放電プラズマ焼結法による TiC 強化 Ti-6Al-4V 合金のミクロ組織と力学的特性」出井他、日本大学	H23. 10
	粉体粉末冶金協会 平成 23 年度秋季講演大会 「Effects of Processing Parameters on The Distortion of Injection Molded Ti6Al4V alloy」三浦他、九州大学	H23. 10
	TECH Biz EXPO 2011 「航空機構造用チタン合金の技術動向と素形材センターにおける研究開発」磯江、素形材センター	H23. 10
	日本金属学会第 149 回秋期大会 「次世代航空機用 α + β 型チタン合金薄板の力学的特性に及ぼす加工熱処理の影響」永澤、東北大学	H23. 11
	日本金属学会 2011 年秋季大会 「TiB2 および B4C 強化 Ti-6Al-4V 合金のフレットング疲労と耐摩耗性の検討」江川他、日本大学	H23. 11
	日本金属学会 2011 年秋季講演(第 149 回)大会 「高加工性チタン合金の摩擦攪拌接合」北村他、大阪大学	H23. 11
	平成 23 年度高温学会秋季総合学術講演会講演概要 「高加工性チタン合金の摩擦攪拌接合」北村他、大阪大学	H23. 11
	日本金属学会 機能性チタン合金研究会講演会 「チタン合金摩擦攪拌接合部の組織制御」藤井、大阪大学	H23. 12
	Powder Processing, Consolidation and Metallurgy of Titanium 「Evaluation and Analysis of Distortion of Complex Shaped Ti-6Al-4V Compacts by Metal Injection Molding Process」三浦他、九州大学	H23. 12

	セミナー「航空機材料の将来展望」 「次世代チタン合金構造部材創製・加工技術開発の概要」 磯江、素形材センター	H24. 1
	平成 23 年度西尾市地場産業活性化協議会 「チタンの研究紹介」磯江、素形材センター	H24. 2
	平成 24 年度溶接学会春季全国講演大会 「摩擦攪拌接合を施したチタン合金の微細組織および 機械的特性」北村他、大阪大学、JFE スチール、東北大学	H24. 4
	9 th International Friction Stir Welding Symposium「Friction Stir Welding of High-Workability Titanium Alloy」北村他、大阪大学、JFE スチール	H24. 5
	平成 24 年度溶接学会秋季全国講演大会 「種々の高加工性チタン合金摩擦攪拌継手の衝撃吸収 エネルギーに及ぼす微細組織の影響」北村他、大阪大学	H24. 9
	ISAEM2012-AMD13 「Effect of Microstructure on Adsorbed Energy of Friction Stir Welded High-Workability Ti Alloys」森貞他、大阪大学	H24. 11
	第 50 回飛行機シンポジウム 「チタン部材の低コスト製造技術の開発」浅井、川崎重工業	H24. 11
	AEROMAT 2014 「Development of Advanced Titanium Alloy & Production/Processing Technology for Next-Generation Aircraft Structure」素形材センター	H26. 6
	AEROMAT 2014 「Mechanical Properties of Newly Developed Low Cost Titanium Alloys Subjected to Micro-structural Control for Next Generation Aircrafts」東北大学	H26. 6
	AEROMAT 2014 「Development of Low Cost Production Techniques for Titanium Parts」川崎 重工業	H26. 6
特許	出願No.2009-118699 「チタン合金細長素材の曲げ成形装置」日本飛行機	H21. 5
	出願No.2009-209555 「導電性成形体の製造方法及び導電性成形体の製造装置」日本大学	H21. 9
	出願No.2010-172462 「曲げ加工性および曲げ異方性に優れた高強度 $\alpha + \beta$ 型チタン合金板並びに 高強度 $\alpha + \beta$ 型チタン合金板の製造法」神戸製鋼	H22. 7
	出願No.2010-172463 「強度異方性に優れた高強度 $\alpha + \beta$ 型チタン合金板および高強度 $\alpha + \beta$ 型 チタン合金板の製造方法」神戸製鋼	H22. 7
	出願No.2010-174138 「疲労強度に優れた $\alpha - \beta$ 型チタン合金押出材およびその $\alpha - \beta$ 型チタン 合金押出材の製造方法」神戸製鋼	H22. 8
	出願No.2011-051847 「板材成形方法、板材成形装置、板材成形装置の成形条件決定方法および 板材成形装置の成形条件決定装置」三菱重工	H23. 3
	出願No.2011-066816 「Ti 合金の接合方法、Ti 合金の加工方法及び構造体」大阪大学	H23. 3
	PCT/JP2012/053717 「板材成形方法、板材成形装置、板材成形装置の成形条件決定方法および 板材成形装置の成形条件決定装置」三菱重工	H24. 2
	出願No.2012-220535 「板材成形方法および板材成形装置」三菱重工	H24. 10

3-2. 目標の達成度

テーマ別技術 1～3 について、従来の製造方法と比較して製造コストを 30% 以上低減できる目途が付き、全体目標は達成できた。その他個別のテーマについて、表 3-3 に成果概要、および達成度を示す。

表 3-3 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果概要	達成度
[テーマ別技術開発]			
(1) テーマ 1 チタン板金部品の 低コスト製造技術 の開発	①低コストで冷間加工性に優 れたチタン合金 (Ti-9) 板材 を開発する ②チタン合金製板金部品の低 コスト曲げ成形技術を確立す る	①・鉄鋼用製造ラインを用いて、 Ti-9 合金板の面内強度異方性を軽 減する圧延方法を開発した。 ・ AMS (Aerospace Material Specification) に記載の諸条件 に対し Ti-6Al-4V 合金とほぼ同等 の性能を確認した。 ②・局所加熱成形装置を開発し、 Ti-9 合金の精度の良い曲げ成形手	達成

		法を開発した。 ・局所加熱成形技術（装置）を改良し、一方向曲げのみならず2方向曲げ成形へと成形対象を広げた。	
(2) テーマ2 高加工性新チタン合金の押出／鍛造材を用いた低コスト製造技術の開発	①加工性に優れたチタン合金（Ti-531C）開発 ②チタン合金の押出材・鍛造材を対象とした低コスト加工プロセス（押出材曲げ、接合、切削）を開発する	①・高加工性新チタン合金の成分を決定し（Ti-531C 合金）、鍛造および押出試作を行い、新合金がTi-6Al-4V合金よりも熱間加工性に優れていることを確認した。 ②・成形装置を開発した。 ・新合金（Ti-531C 合金）押出材に対して曲げ成形を実施し、各種曲率半径への成形技術を開発した。 ③・レーザ溶接では、新チタン合金（Ti-531C 合金）を最新のファイバー・レーザ溶接機器を用いて高効率に接合する手法を開発した。 ・模擬部品を Ti-531C 合金押出形材を逐次成形後、溶接により一体大型化した後、全表面を機械加工して試作した。	達成
(3) テーマ3 高機能化チタン合金焼結部品の低コスト製造技術の開発	①SP-700 合金をベースとし、焼結に適したチタン混合粉末を開発する ②・粉末焼結法による部品製造プロセスを開発する ・放電プラズマ焼結法による部品製造プロセスを開発する	①・チタン SP-700 合金をベースとした焼結用混合粉末を開発した。 ②・一般的な金属粉末焼結法をベースに、チタン合金粉末に適した焼結手法を開発した。 ・焼結体の性能を調査し、焼結体の性能アップを進め実用化の目途を得るとともに、大型部品製造への目途を得た。 ③・放電プラズマ装置をチタン合金小型部品の製造に適用し、製造条件の最適化を行い、高密度焼結体を製造することができた。	達成
[共通技術開発]			
(4) 共通技術 1 材質評価	開発する素材および加工部品が適切な特性を有するよう調査・提言し、実用化を促す	以下に示すような新チタン合金、新加工方法における問題を調査し、提言を行い、実用化を促した。 ・押出/鍛造部材（Ti-531C 合金）のレーザ溶接部分に対し、疲労特性を低下させるミクロ組織因子を明らかにした。 ・板金部材（Ti-9 合金）について、機体設計の弊害となる力学的異方性を軽減する製造プロセス開発の	達成

		指針を得た。	
(5) 共通技術 2 接合技術	・FSWによるチタン合金接合技術を開発する ・新合金へのFSW適用を図る	・大阪大学が保有する摩擦攪拌接合装置等の設備を利用し、接合条件を制御することにより、継手の組織および機械的特性を制御する手法を確立した。 ・2mm厚の純Ti、Ti-6Al-4V、Ti-9、Ti-531C、SP-700合金を接合し、良好な結果を得た。	達成
(6) 共通技術 3 先端粉末造形技術	レーザフォーミングおよびMIMをチタン合金粉末に適用するための研究を実施する MIMについては大型・複雑形状品の試作を行う MIM: Metal Injection Molding	①レーザフォーミング；装置を開発し、緻密化・高強度化のためのレーザ本体や造形条件の最適化を行った結果、Ti-6Al-4V合金粉末積層造形体の相対密度は100%に近く、引張強度は溶製材の960MPaに対し1157MPaの高い値を示した。 ① MIM；チタン合金に対し、充填密度の高い焼結に成功した。実用の大型複雑形状部材を試作し、成形、脱バインダおよび焼結の各プロセスの前後における試験片の形状変化を測定し、寸法精度を向上した。	達成

4. 事業化、波及効果について

4-1. 事業化の見通し

本研究開発の成果をもとに、本研究開発完了後5年間を目途に、事業化への計画とターゲットを示す（図4-1）。

（1）チタン板金部品の低コスト製造技術の開発

低コストで優れた加工性を有するチタン合金（Ti-9）板材は、認証取得を検討中である。成形技術の開発の目途はたっており、翼端部などの板金部品曲げ加工に適宜適用を図る。

（2）高加工性新チタン合金の押出／鍛造材を用いた低コスト製造技術の開発

現在広範に使用されている Ti-6Al-4V 合金と同等の性能を有する国産新チタン合金（Ti-531C）がほぼ開発を終了しており、Ti-9 合金と同様認証取得を検討中である。また押出材の成形技術開発および高効率切削技術開発も成果が挙がっており、H25 年度以降、適宜適用を図る。

接合技術（溶接、FSW）については、アルミニウム合金構造で従来のボルト／リベット接合に代えて採用が始まっており、チタン合金についても米・欧で研究が進んでいる。最新のファイバー・レーザ機器を用いる高効率溶接、および新しい接合方法である FSW は、製造時に必要となる検査技術を H25 年度以降開発するとともに、FSW については厚板接合など適用対象を拡大し、実機への適用へとつなげる計画である。

（3）高機能化チタン合金焼結部品の低コスト製造技術の開発

チタン合金粉末焼結は、特に切削が困難なチタン合金に対して期待されている加工方法であり、素形材に相当するチタン合金粉末の新しい製造方法（アームストリング法）の研究も米・オーストラリアで進められている。本研究は、国産チタン合金である SP-700 合金をベースとした混合粉末の開発と合わせて焼結体製造の成果が出ており、完成も間近に来ている。

計画では H25 年度よりチタン粉末焼結体の設計データを取得するなど製造準備を進め、また Boeing との共同研究をスタートさせて同社将来機への適用のための技術固めにつなげる計画である。

4-2. 波及効果

航空機部品は常に軽量・高強度の最新材料を使いこなし、かつ製品は高精度、高信頼性を要求されるので、開発した技術は他機器に適用する場合も十分に要求を満足し、かつ高品質化を図ることができる。チタン合金は、中国の進出により世界のスポンジチタン製造能力および製造量が急激に増加しており、これと相応して図4-2 左下表に示すように用途（使用量）が拡大している。今回のチタン合金製造コストの低価格化は、航空機におけるチタン合金使用量の増加による軽量化、高機能化に寄与するとともに、他産業におけるチタン合金の使用にさらに拍車をかけ、鉄道車両、自動車を始めとする輸送機器の軽量化、機械製品の高付加価値化に寄与してゆくと考えられる。

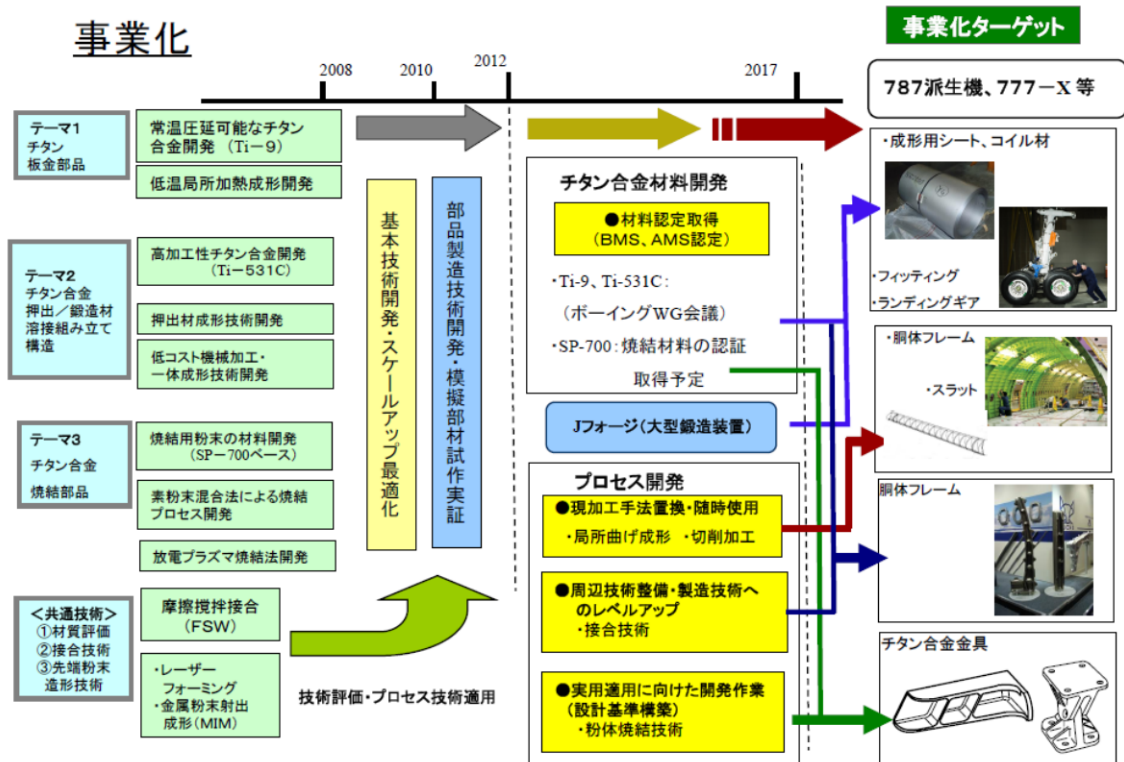


図 4-1 事業化計画

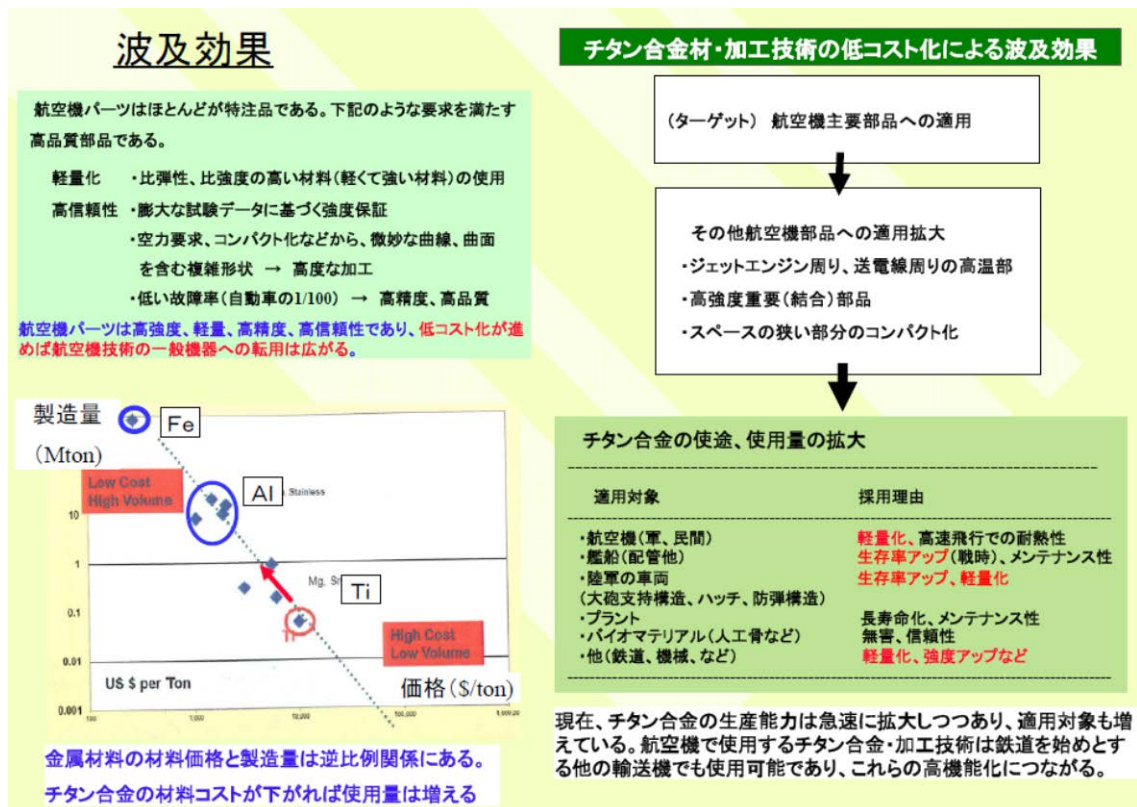


図 4-2 波及効果

5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

5-1. 研究開発計画

本研究開発は、表 5-1 に示すように、平成 20 年度よりスタートし、平成 24 年度までの 5 年間で実施する計画となっており、現中間評価時点は、最終年度となる平成 24 年度のほぼ中間時点に位置する。5 年間の内最初の 3 年間において基本技術を開発し、その後 2 年間で部材製造技術の開発を行っている。研究計画としては、以下のような配慮がなされた。

- ・日本材料メーカーがほぼ開発を終了している材料の適用
- ・加工側から材料側への試作結果および要求フィードバック
- ・解析シミュレーション技術の使用

実施者については、材料研究は新合金を有しているメーカーが参加し、加工研究は日本の有力航空機メーカーが参加しており、材料開発・加工技術開発を実施する素地がある。大学は、材質評価、接合および粉末焼結各分野の我が国第一人者が参加しており、大学保有の設備能力や金属材料・加工に関する技術レベルは高い。

表 5-1 研究開発計画

項目 \ 年度	H20	H21	H22	H23	H24
マイルストーン	基本技術開発	中間評価▽		部材製造技術開発	中間評価▽
(1) チタン板金部品の低コスト製造技術の開発	素材・基本プロセス検討 (Ti-9 合金板材) (曲げ加工)	基本材料・プロセス開発 ▽ 装置試作	材料特性最適化 プロセス最適化	模擬部材試作用 材料の製造 部材の設計試作	実機相当材料の製造 実機相当部材の試作 コスト低減効果評価
(2) 高加工性新チタン合金の押出／鍛造材を用いた低コスト製造技術の開発	素材・基本プロセス検討 (Ti-531-C 合金鍛造材、押出材) (曲げ、接合、切削加工) ▽ 装置試作	基本材料・プロセス開発	材料特性最適化 プロセス最適化	模擬部材試作用 材料の製造 部材の設計試作	実機相当材料の製造 実機相当部材の試作 コスト低減効果評価
(3) 高機能化チタン合金焼結部品の低コスト製造技術の開発	素材・基本プロセス検討 (SP-700 ベース混合粉末) (粉末焼結)	基本材料・プロセス開発	材料特性最適化 プロセス最適化	模擬部材試作用 材料の製造 部材の設計試作	実機相当材料の製造 実機相当部材の試作 コスト低減効果評価
(4) 材質評価		プロジェクトで開発された材料、加工部品の材質調査・改善提			
(5) 接合技術	基本プロセス検討	プロセス開発	各種材料への試行	性能調査	改善
(6) 先端粉末造形技術	基本プロセス検討	プロセス開発	プロセス最適化	部材の設計試作	品質改善

↑ : 適宜材料提供・加工上の課題フィードバック実施

5-2. 研究開発実施者の実施体制・運営

(1) 研究開発実施者の実施体制

実施体制を、図 5-1 に示す。

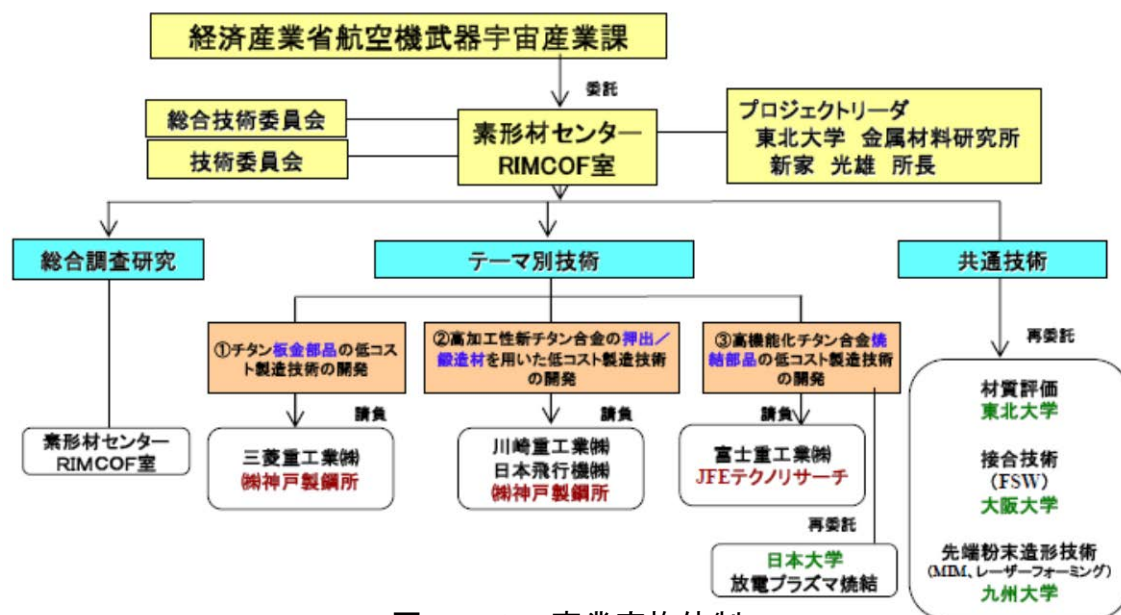


図 5－1 事業実施体制

(2) 実施体制の妥当性

東北大学金属材料研究所長 新家教授は、日本における航空機分野を含む広範な産業分野におけるチタン材料研究の第一人者であり、本事業の研究開発責任者として最適である。国内チタン素材メーカーおよび航空機メーカーがテーマごとにグループを組むことで、相乗効果が得られている。大学においては、最新の設備を用いて研究を行う体制となっており、各開発項目の実施責任体制は明確で妥当である。

(3) 実施者間の連携

目標達成及び効率的実施のために4半期ごとに技術委員会を開催し、進捗把握および方向付け等を行った。これにより緊密な連携を図り、効率的な研究開発を推進している。

(4) 成果の普及および関与の取り組み

プロジェクトの紹介、成果発表を通じて普及に努めている。

5－3. 資金配分

本研究開発の予算配分・推移を表5－3に示す。各年度とも研究開発設備導入等を勘案して予算を組んだ。

5－4. 費用対効果

材料開発においては既存の優れた材料をベースに素形材開発を進めており、短期間で成果にたどり着くことができた。また高度な最新設備と高い技術を有

する大学が参加することにより、高度な分析情報とアドバイスが少ない費用で提供され、効果が上がっている。

また、研究目標はチタン部品製造コストを30%低減することであり、具体的には今後以下のような効果が期待できる。

- ① 材料のニアネットシェープ化による材料費の低減
- ② 加工手順の効率化による加工時間短縮、電力使用量低減
- ③ チタン合金の活用に伴う航空機の軽量化
- ④ ファスナーから溶接への変換に伴う航空機の軽量化

表 5－2 資金配分 (単位：百万円 税込)

年度	平成	2 0	2 1	2 2	2 3	2 4	20-24 年度計
(1)チタン板金部品製造		25.4	32.7	24.9	30.2	29.7	142.9
(2) 高加工性新チタン合金の押出／鍛造材		46.9	42.5	48.4	65.3	62.3	265.3
(3) 高機能化チタン合金焼結部品		22.9	21.3	23.3	31.1	31.4	130.0
(4)材質評価		3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	16.0
(5)接合技術		4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	21.0
(6)先端粉末造形技術		4.2	4.2	4.2	17.0	12.6	42.2
(7)総合調査研究		13.2	11.9	11.8	18.0	20.6	75.5
合計		120.0	120.0	120.0	169.0	164.0	693.0

5－5. 変化への対応

チタン合金は戦略材料と呼ばれる重要な材料であるが、ここ数年で中国がスポンジチタンの製造能力を大幅に強化しており、チタン合金の適用範囲、使用量とも世界的に増加している。また、CIS（旧ソ連）のチタン関連軍事技術も民間市場に展開され、米国との関係も深まりつつある。

チタン合金は加工（特に切削）が困難な材料なので、材料の加工性改良およびチタンに適した加工方法を開発する必要があるが、海外航空機メーカーでも同じような研究が盛んに行われており、本プロジェクトで開発を進めている技術の重要性が確認された。また、クロール法に代わるチタン製錬方法の研究が進み、砂状の原材料からチタン粉末を製造する手法（アームストロング法）の成果が出始めており、これが材料コストに大きな影響を与える可能性もある（価格破壊とチタン提供国の入れ替わり）。この状況から、将来、チタン粉末焼結技術が重要になってくることが予想される。