

D 次世代航空機用構造部材創製・加工技術開発  
(4) 次世代チタン合金構造部材創製・加工技術開発

目 次

	頁
1. 事業の目的・政策的位置付け.....	1
2. 研究開発目標.....	5
3. 成果、目標の達成度.....	12
4. 事業化、波及効果.....	38
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等.....	42

## 1. 事業の目的・政策的位置付け

### 1-1. 事業の目的

近年の世界的な民間航空機開発競争の中で、わが国の航空機産業は、その発展とともに、高度な先進技術の波及効果によって、産業構造の高度化に大きく貢献し、輸送機器を始めとした様々な分野に高付加価値を生み出してゆくことが期待されている。

また、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。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により、軽量化、低コスト化を達成しつつ、環境適合性の向上、居住性の向上が図られつつある。

たとえば、1995年に初飛行したボーイング777型機では、構造重量のおよそ11%にCFRP、同じく9%にチタン合金が使用されているのに対し、2009年の初飛行を目指し、現在開発が進んでいるボーイング787型機では、構造重量のおよそ50%にCFRP、同じく13%にチタン合金が使用される見込みである。

このように、チタン合金は、今後も複合材料とともに使用する量が増大し、さらなる適用拡大が予想され、その重要性は増している。

チタン合金の使用量増加の背景は、軽量でありながら繊維強化材料などの異方性材料では容易に達成できない複雑形状の部材の形成が可能であり、かつ炭素繊維強化複合材料と接触しても熱膨張差や局部電池腐食による弊害を生じることがない、すなわち複合材料との相性の良さを有しており、かつ耐熱性や耐食性に優れるという特徴を有することにある。しかし、チタン合金は、塑性加工や機械加工などの加工性が悪く、素材・加工コストが非常に高いという課題があり、これを改善する材料および加工プロセスの開発が必須となっている。

一方、わが国は、超塑性加工が可能なチタン合金、あるいは冷間加工性に優れるチタン合金を独自に有している。また、現在、冷間加工材の改良や、塑性加工性、溶接接合性や機械加工性に優れた新合金の開発、局所加熱成形による低コスト成形加工、接合技術を活用した一体大型化、粉末焼結法によるニアネットシェイプ化や高機能材料開発、摩擦攪拌接合や先端粉末造形などの材料やプロセス技術に端緒が見えつつあり、これらの特徴を生かした国産材料開発を成功させ、独自の航空機開発に適用することにより、国際競争力を高め、わが国航空機開発の世界に対する先進的地位が実現できるものとする。

このように、わが国独自のチタン合金材料およびプロセス技術による、低コストかつ先進的な次世代チタン合金構造部材創製・加工技術を開発し、航空機模擬部材の試作・評価を行って、製品化の見通しを得ることにより、今後の航空機開発において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

わが国は、2005年2月に発効した京都議定書を受けた取り組みの中で、温室効果ガスの大半を占めると言われている、エネルギー起源の二酸化炭素排出量削減のため、新・国家エネルギー戦略（2006年5月経済産業省）を策定し、「省エネルギーフロンティア計画」において技術革新等により、2030年までに少なくとも30%のエネルギー消費効率を改善（2003年度実績比）することを目指している。また、この計画の具体的取組として、技術によって解決すべき課題を、技術戦略マップ（ロードマップ）として明示している。

本研究開発は、このような政策に基づく「エネルギー使用合理化技術開発」の一環として、「次世代構造部材創製・加工技術開発」を実施し、航空機用構造部材における革新的エネルギー使用合理化技術の中長期的基礎・基盤技術を開発し、2030年の目標達成に寄与する。

本事業の技術戦略上の位置付けを明確にするため、経済産業省策定の最新の技術戦略マップを抜粋し、導入シナリオを図1-2に、技術ロードマップを図1-3に示す。

航空機分野の技術戦略マップでは、中核的要素技術の一つに「材料・構造技術」を位置づけ、地球温暖化問題の顕在化や燃料価格高騰といった環境変化によって重要性が増している「省エネ用炭素繊維複合材技術」や「複合材適用拡大の趨勢に伴って必要となる技術等」を重点的に支援すべき技術とし、機体構造分野の省エネルギーに資する「低コスト化技術」である「チタン合金プロセス技術」や「ニアネットシェイプ技術」といった「金属材料成形高度化技術」に関する研究開発を展開している。

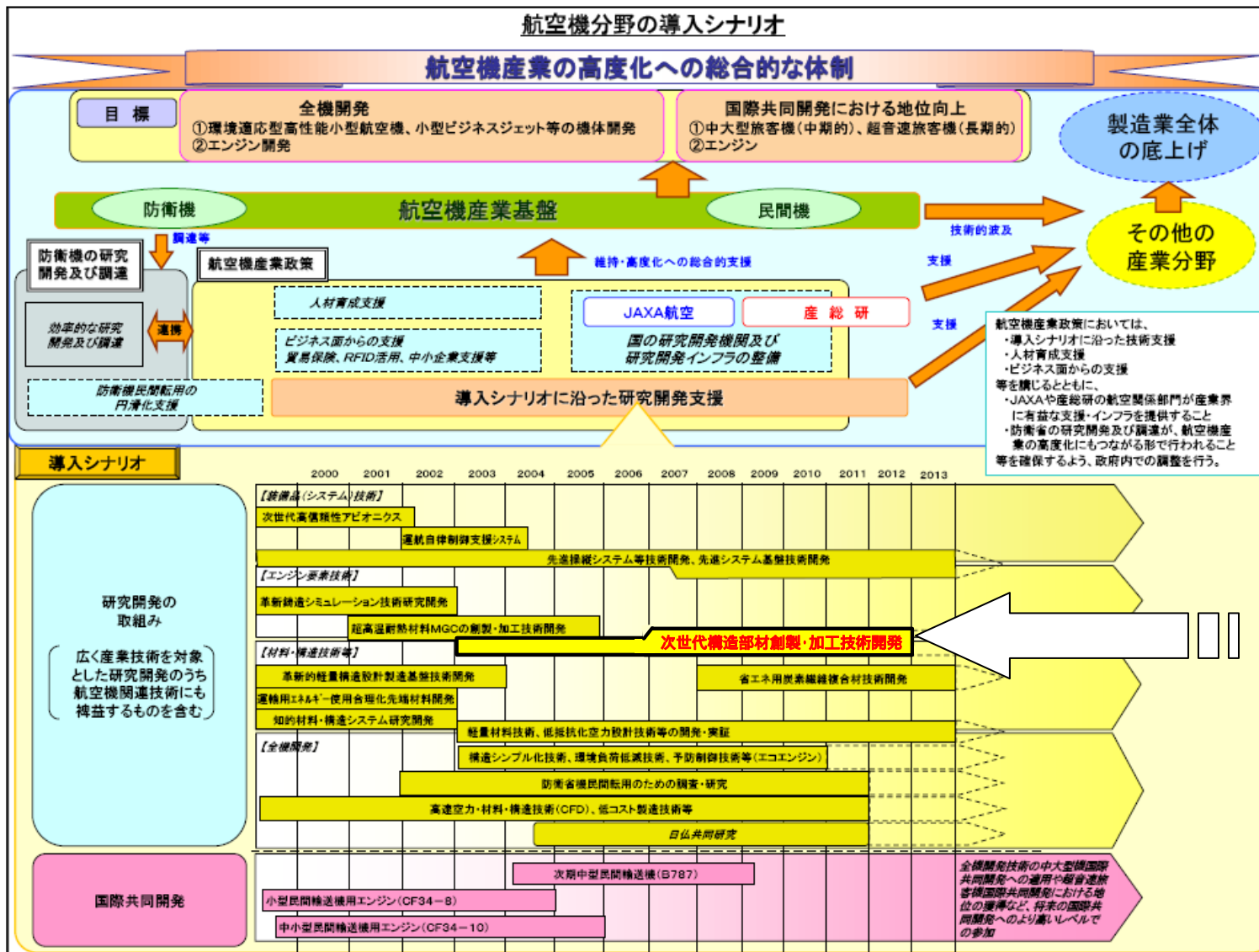
## 1-3. 国の関与の必要性

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。

このように、わが国独自の省エネルギー技術を達成すべく、国の先導による国内技術力の集約と横並び開発の推進が不可欠である。

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。



**図 1-2 技術戦略マップ (導入シナリオ)**  
(経済産業省 技術戦略マップ2009 2-3. システム・新製造 航空機分野より)

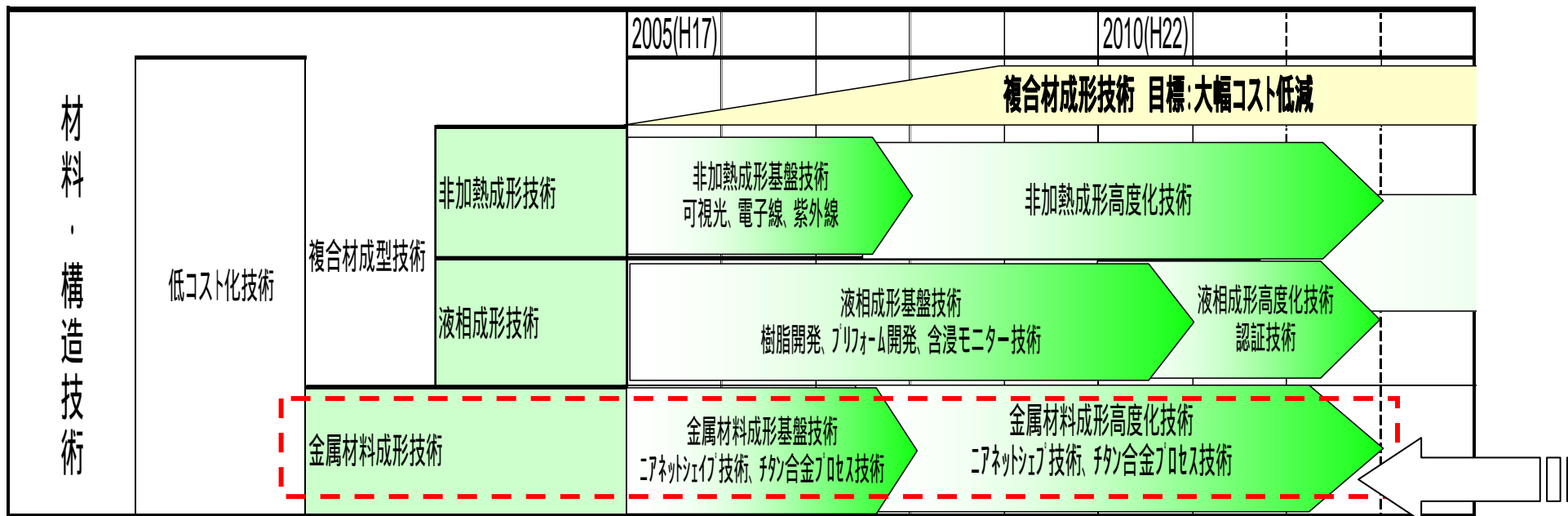


図1-3 技術ロードマップ（航空機分野～材料・構造技術）  
 （経済産業省 技術戦略マップ2009 2-3. システム・新製造 航空機分野より）

## 2. 研究開発目標

### 2-1. 研究開発目標

「次世代構造部材創製・加工技術（次世代チタン合金構造部材創製・加工技術）」プロジェクトの実施期間（平成20年度から5年間）において、今後の使用拡大が見込まれる航空機構造用チタン合金について、加工性の良い合金を開発するとともに、低コストで効率の良い加工プロセスを開発する。

具体的には、以下①～④に示す通りである。

- ①成分調整等を行うことにより高い寸法精度・高強度特性を保持しつつ、低コスト成形・加工プロセスに適した合金素材の改良、開発を行う。
- ②大型加熱装置を使用せずに折り曲げ成形や曲面成形を可能とする加工技術、押出部材の曲げ成形及び一体大型化技術、高機能化焼結部材の成形等を可能とする技術など、航空機構造を想定した形状部材に対応する低コストで効率の良い成形・加工プロセスを開発する。
- ③航空機模擬部材の試作・評価を通じ製品化の見通しを得る。
- ④計画事業期間（5年間）において部材コストの30%低減（共通目標）を達成する。

また、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。テーマ別技術については、各企業チームが担当する。また、共通技術分野については各大学が担当し、3～5年目のテーマ別開発に逐次成果をフィードバックする。

#### [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

2-2. 全体の目標設定

表 2-2 に全体の目標を示す。

2-3. 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

<p>目標・指標 (事後評価時点)</p>	<p>目標・指標 (中間評価時点 (平成 20 年度末))</p>	<p>設定理由・根拠等</p>
<p>1) 概 要 先進的航空機構造に対し、最適化した低コストチタン合金素材及び加工技術を、板金部材、押出／鍛造部材、および焼結部材の3つのテーマ別技術、および、材質評価、接合技術、先端粉末造形技術の3つの共通技術において開発する。すなわち適正素材開発、成形プロセス開発、および当該技術による航空機模擬部材の試作評価を行い、製品化の見通しを得る。</p> <p>2) 数値目標 複数年度事業（5年間）において開発される次世代チタン合金構造部材は、航空機に使用可能な強度特性、材料品質等を備えるものとし、従来の材料およびプロセスにかかるコストに対し、30%以上のコスト低減を実現する。</p>	<p>1) 素材開発 低コスト加工に適するチタン合金素材の組成調整及び製造技術開発、あるいは新合金素材の基礎検討を行う</p> <p>2) 基本プロセス開発 低コスト加工プロセスにおける成形・加工性、接合性などの基礎特性を取得して課題を明らかにする。 基本材料開発や基本プロセス開発に必要な治具や試験装置を計画する。</p> <p>3) 共通技術 開発素材・プロセスに対する材質評価や、独自の展開がなされている接合技術および先端粉末造形技術について個別に研究開発を実施し、必要な成果をテーマ別技術開発にフィードバックする。</p>	<p>1) トレンドの変化 最新の海外民間航空機開発では、航空機用構造部材の軽量化と高強度化を同時に達成し、優れた「エネルギー効率」を有する“炭素繊維強化複合材料”の適用が拡大しつつあり、それに伴い、チタン合金部材の適用が拡大している。</p> <p>2) 課 題 チタン合金部材は、素材コストや加工コストが非常に高い。</p> <p>3) ブレイクスルー わが国独自の先進的チタン合金素材および加工技術を基盤とし、低コストかつ革新的な構造部材を創製する。</p>

表 2-3 個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標 (事後評価時点)	目標・指標 (中間評価時点 (平成 20 年度末))	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	<p>①常温圧延可能なチタン合金の加工性改善技術の開発； 低コストで冷間加工性に優れたチタン合金板材を開発し、チタン合金製板金部品の低コスト製造技術を確立する。</p> <p>②チタン合金の低温/局所加熱成形技術の開発； 低コストで冷間加工性に優れたチタン合金板材を適用する低コストの板金成形技術を開発し、チタン合金製板金部品の低コスト製造技術を確立する。</p>	<p>①加工熱処理により常温曲げ加工の改善に有効な組織形態を明らかにし、適正なチタン板材製造の技術の目途付けを行う。</p> <p>②既存のチタン合金板材を用いて、局所加熱成形に必要な基本的加工条件を明らかにするとともに、プロセス技術開発に必要な設備の基本仕様を設定する。</p>	<p>低コストで優れた加工性を有するチタン合金板材とその成形技術の開発、および航空機に適用する為に必要な各種データの取得が可能となり、防火壁、ドア枠、パイロン等の板金部品などへ製品化の見通しを得ることができる。</p>
(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	<p>①高加工性新チタン合金およびその押出／鍛造素材の開発； 高加工性を有する新チタン合金を開発し、チタン合金部材のコスト低減を図る。</p>	<p>①高加工性新チタン合金のラボレベルでの試作・評価を行う。</p>	<p>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を実現し、大型鍛造設備を持たない国内において、胴体フレームや大型結合部材などの大型部</p>

要素技術	目標・指標 (事後評価時点)	目標・指標 (中間評価時点 (平成 20 年度末))	設定理由・根拠等
(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 (続き)	②押出型材の順送局所加熱による逐次曲げ成形技術、③低コスト機械加工／一体大型化技術の開発； 高加工性を有する新チタン合金の押出材・鍛造材を対象とした低コストプロセス技術を開発し、チタン合金部材のコスト低減を図る。	②③チタン合金押出材の曲げ成形装置の試作および新チタン合金の切削性／溶接性の基礎的な評価を行うとともに、それらの結果を検討して今後の研究開発の指針を得る。	材の製造が可能となる。
(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	①焼結材料の検討・開発； 粉末焼結プロセスに適した素材開発を実施し、高機能化されたチタン合金製航空機部品を低コストで製造する技術を確立する。 ②粉末焼結法による部品製造プロセス開発、 ③放電プラズマ焼結法による部品製造プロセス開発； 粉末焼結プロセスにより、高機能化されたチタン合金製航空機部品を低コストで製造する技術を開発する。	①焼結材料の検討・開発；各種合金に関して、素粉末混合法による粉末焼結を行い、各々の合金系における焼結性、合金成分均一性の差異を明らかにする。 ②粉末焼結法による部品製造プロセス開発、 ③放電プラズマ焼結法による部品製造プロセス開発； チタン合金の焼結技術に関する基礎技術を検討し、Ti-6Al-4V 合金製航空機向け鍛造品と同等以上の疲労強度特性を有する粉末焼結部品の製造技術についての技術的課題を抽出する。合金系として比較基準とする Ti-6Al-4V 合金の他に、SP-700 および Ti-10V-2Fe-3Al 合金を検討する。	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。

要素技術	目標・指標 (事後評価時点)	目標・指標 (中間評価時点 (平成 20 年度末))	設定理由・根拠等
[共通技術開発]			
(4) 材質評価	開発する素材およびプロセスが、材料の特性に与える影響について試験・評価を実施し、適切な合金製造・プロセス条件を示し、実用化を促す。	現行素材に対する材質評価を実施し、参照データを取得、開発素材に対する材質評価や熱履歴を含むプロセスでの材質評価方法に関する基礎調査を段階的に実施する。	素材、プロセスを正しく検証し、各テーマ開発に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) によるチタン合金の接合技術を開発する。そのために必要なプロセスの安定化、および接合可能条件の取得に関する研究開発を実施する。そして、接合部材の試作を行うとともに、テーマ別技術で開発した素材・プロセスに応用して開発技術を実証する。	プロセスの安定化および必要なツールの材質と形状の最適化、および品質のよい継手が得られる板厚などの接合可能条件を段階的に取得する。	熱影響や酸化などが無い、新しいチタン合金部材の一体化技術として有用であり、航空機部材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) を部材形成に適用するための研究開発を実施する。そのために必要な素過程の解明、形状化の試行、プロセス技術の取得に関する研究開発を実施する。そして、レーザフォーミングによるパターン形成などの形状化および金属粉末射出成形 (MIM) により従来に比べ大型化した複雑形状品の試作を行い、開発技術を実証する。	レーザフォーミングの素過程の解明、チタン合金上への形状化の試行および金属粉末射出成形 (MIM) を従来に比べ大型化するために必要な新バイндаならびに脱バイнда・焼結技術の開発について、段階的な技術検討を行う。	粉末造形技術は現在、開発途上にあり、民生用の小型部品に適用されるのみであるが、大型化が可能となれば、精密複雑形状部品のネットシェイプ加工技術として航空機部材への適用が拡大することが期待される。

要素技術	目標・指標 (事後評価時点)	目標・指標 (中間評価時点 (平成 20 年度末))	設定理由・根拠等
(7) 総合調査研究	チタン板金部品の低コスト製造技術の開発、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、および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について、研究計画を総括し、各目標に対する達成状況を評価して、達成に向けての見通しを把握する。	技術動向調査を実施し、本研究開発の方向性、達成レベル等についての客観的判断材料を探索する。また、委員会等開催による研究開発の促進、技術課題の検討、研究グループ間の調整、研究開発の進捗状況の点検等を行い、研究開発の効率的な推進を図る。	研究全体を見通した、基礎的研究開発から実大規模の試作への適正な流れを策定し、オペレーションを行うとともに、最新技術動向に注視し、最先端の研究成果を得る。

### 3. 成果、目標の達成度

#### 3-1. 成果

##### 3-1-1. 全体成果

平成20年度末における成果は、表3-2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、および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。また、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達成度については、今後の研究成果によるところであるが、平成20年度の計画に対しては、目標を達成し、研究開発は順調に進展している。

##### 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Ti-9合金を適用できるようにするために、その材料で問題である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H20年度（研究初年度）の成果を中心に説明する。平成20年度は、目標を達成し、研究開発は順調に進展している。

###### ①常温圧延可能なチタン合金の加工性改善技術の開発

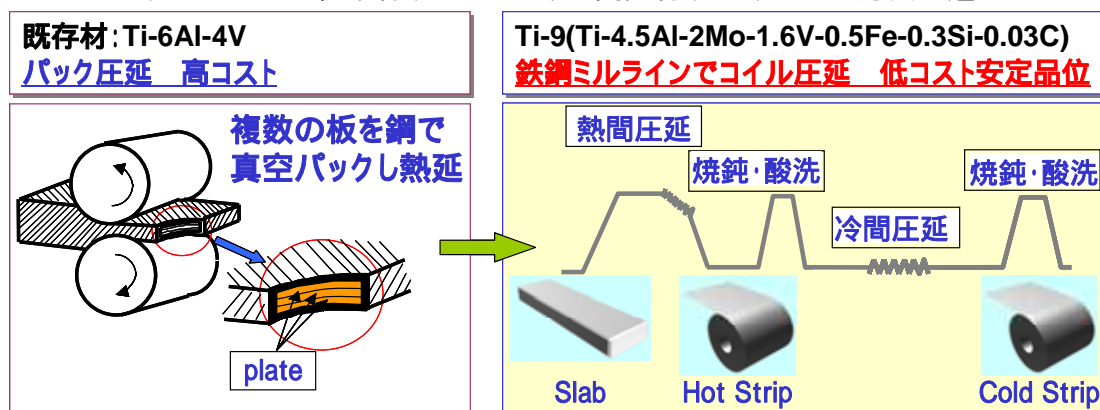
チタン合金板材の製造コストが高い、原料費以外の理由は、航空機用途に使用されるTi-6Al-4V合金の板材製造時に、図3-1-2-1に示すようにチタン材を鉄で包んだ状態で圧延するパック圧延が一般的であり、圧延作業にコストが掛かっているためである。これに対して、Ti-9合金は鉄鋼材料と同様に、パックなしで連続圧延（熱間、冷間）が可能であり、製造コストの大幅な軽減が可能である。しかしながら、この材料には、圧延を一方向で行うことに起因して、

圧延中に集合組織が強く形成され、図 3-1-2-2 に示すように、圧延方向(L)とその直交方向(LT)で強度特性が異なる異方性が存在している。この異方性の存在により、L方向の強度が低くなり、Ti-6Al-4V合金の規格に対して余裕が少ないだけ出なく、通常は異方性を考慮する必要のない航空機の板金加工において、異方性に起因する割れ等の発生が起こる可能性があり、実用化するには異方性を軽減する必要がある。

平成 20 年度の研究では異方性が発生する原因を調査するとともに、異方性を軽減する製造条件（特に熱間圧延条件）について検討した。

異方性が発生する原因は、合金中に存在する $\alpha$ 相が最密六方晶構造(hcp)を有しており、この $\alpha$ 相は鋼を代表とする体心立方構造(bcc)等と比べて、すべり変形できる方位が限られており、同じ方向に圧延が繰り返し行われると、結晶方位が一方向に揃い易くなるため、強い異方性が生じると考えられる。そこで、従来のTi-9合金は950°C前後の $\alpha+\beta$ 二相領域で圧延を行っているが、 $\beta$ 変態温度を超え、 $\beta$ 単相状態の温度域、つまり $\alpha$ 相のない領域で圧延し、その後の冷却過程でランダムな方位の $\alpha$ 相を析出させることで異方性を改善できないかの検討を行った。

図 3-1-2-1 従来材(Ti-6Al-4V)と開発材(Ti-9)の圧延方法の違い



小型の圧延機を用いて、 $\beta$ 域で圧延した材料の異方性を図 3-1-2-3 に示す。従来の $\alpha-\beta$ 域で圧延した試験材よりも異方性が軽減できることが分かった。また、Ti-6Al-4V合金の規格に対して余裕が少ないL方向の強度も向上し、 $\beta$ 圧延の適用により、図 3-1-2-2 のLとLT方向の強度の違いが両者の中間値に近づく方向に改善できた。

図 3-1-2-4 には従来材と $\beta$ 圧延材の集合組織の状況を示すが、従来材では強いピークが存在しているが、 $\beta$ 圧延材ではピークが滑らかになっており、圧延温度の変更により集合組織の形成が抑制され、異方性が改善されたことが分かる。

平成 21 年度において、更なる異方性の改善に向け、冷間圧延や焼鈍条件を含め、より詳細な条件を検討し、平成 22 年度に工場ラインでの試作を行う予定で

ある。

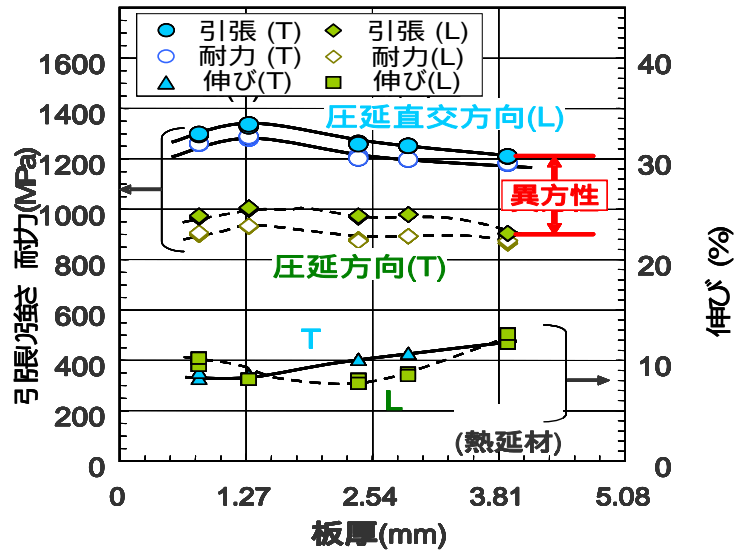


図 3-1-2-2 Ti-9 材の強度特性の異方性

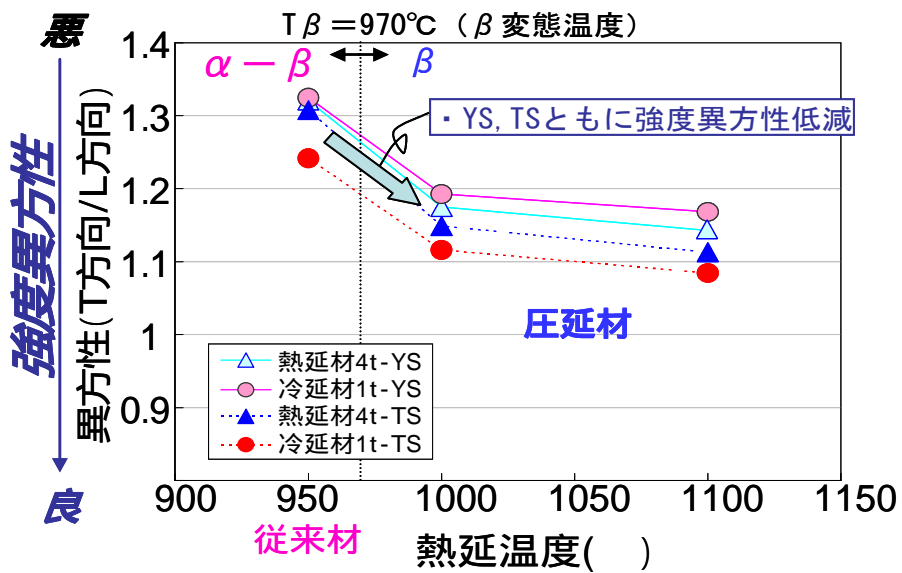


図 3-1-2-3  $\beta$  圧延による異方性の改善

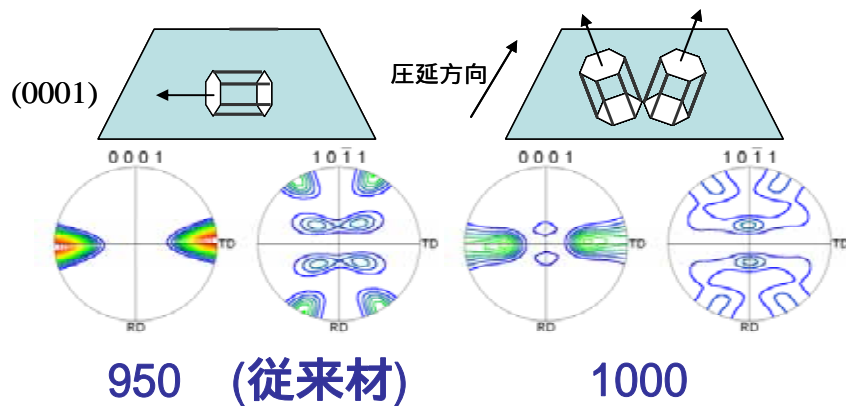


図 3-1-2-4 圧延温度の集合組織に与える影響

## 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、常温での延性が低く、耐力が高いため、成形性が悪く、成形後高い残留応力が存在することから熱間成形が適用されている。現在の熱間成形においては、材料と金型をともに、高温（600～900℃）に加熱できるプレスに入れて、成形加工を行っている。そのため、金型は高温に加熱され、荷重をうけるため、耐熱性に優れた高価な金型が必要であり、大型の部品の製造においては、それを格納できる大型の熱間プレスが必要である。しかし、特に曲げ加工においては、変形を受ける部位は限られており、図 3-1-2-5 に示すように材料に金型で応力を負荷した状態で変形を受ける部分だけを外部から高温に加熱できれば、その部分を軟化させて容易に形状を付与でき、高温で成形するため残留応力も押さえることが可能である。そこで、このような局所加熱成形技術の開発を行うことにした。

平成 20 年度の研究においては、Ti-9 合金の成形条件検討のため、高温での材料特性を取得するとともに、局所加熱成形の基本的な概念の成立性を確認するため、簡易の装置を用いて成立性の検証を行った。

Ti-9 合金の成形条件を検討するため、変形特性の温度依存性(図 3-1-2-6)及び高温域での応力緩和特性についてデータを取得した。温度の上昇に伴い材料の変形応力は低下し、600℃以上の温度では急激な変形応力の低下が認められた。また、常温で認められる変形の異方性は高温域では低減でき、適正な成形温度としては、加熱に伴う酸化を考慮すると、Ti-6Al-4V 合金と同様に 650-750℃付近であり、高温での加工性は Ti-6Al-4V 合金とほぼ同等であることが分かった。

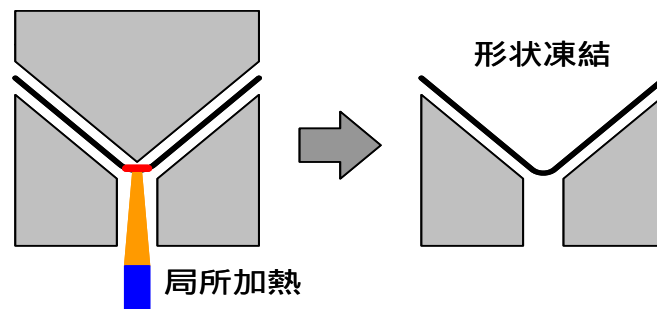


図 3-1-2-5 局所加熱成形の概念

局所加熱成形に適用する成形方法としては、ストレッチ成形を選定した。この成形方法は、アルミニウム合金の成形方法としては一般的で、複雑な形状部品を雄型のみを用いて精度よく加工できるという特徴があるが、チタン合金の板材では、冷間では材料の強度が高く、スプリングバックが大きいため使われていない。そこで、図 3-1-2-7 に示すように、成形材を冷間である程度金型になじませ、その状態で外部から加熱することで材料を軟化させ、形状を凍結することにした。この成形方法の成立性を確認するため、図 3-1-2-8 に示すように、形状を付与した後、材料を外部から加熱して形状を凍結できるかの試験を行った。

図 3-1-2-6 に示すように、常温ではスプリングバックが大きく形状がほとんど付与できないが、高温に加熱することで、材料を軟化、降伏させることで形状の付与ができた。

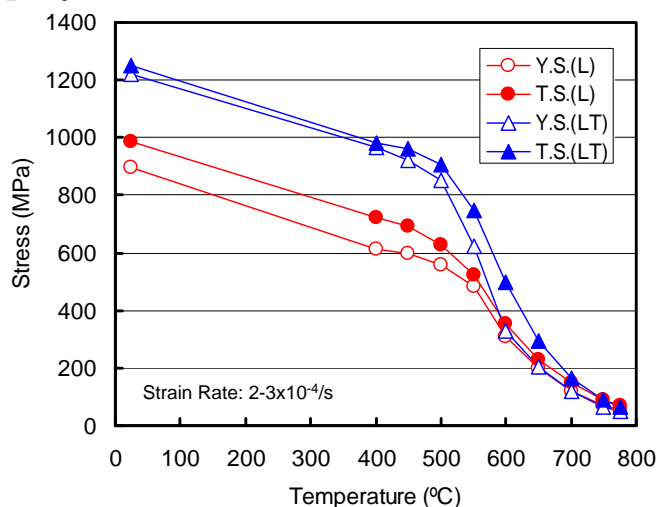


図 3-1-2-6 材料の変形応力の温度依存性

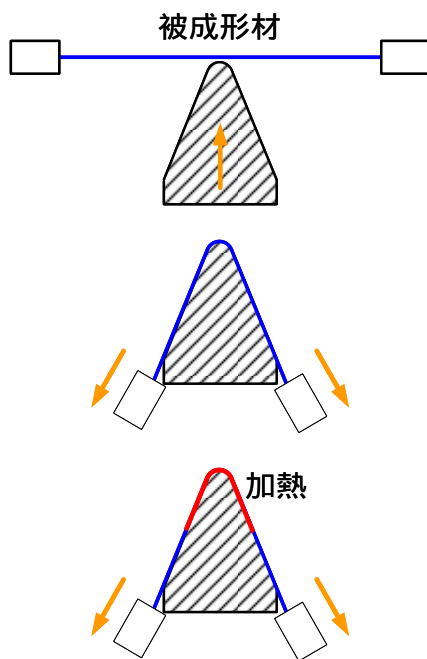
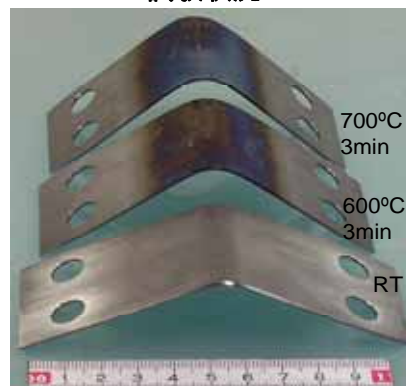


図 3-1-2-7 成形方法



試験状況



試験後の外観

図 3-1-2-8 成形構想  
検証用試験治具と試験結果

図 3-1-2-7 に示すような常温で形状を付与し、外部から加熱してそれを軟化させることで、形状を付与する成形法の基本的な成立性は確認できた。

平成 21 年度以降は、局所加熱が可能な成形試験装置を導入するとともに、成形条件に詳細を検討するとともに、常温では金型になじまないような複雑な形状についても対応できる成形技術の開発を行う。

## 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 3-1-2-9 に概念を示す 3 項目の技術を開発し、海外メーカーのような超大型鍛造プレスを持たない国内メーカーでは為し得なかったサイズのチタン部材を低コストで製造する技術の確立を目的とする。

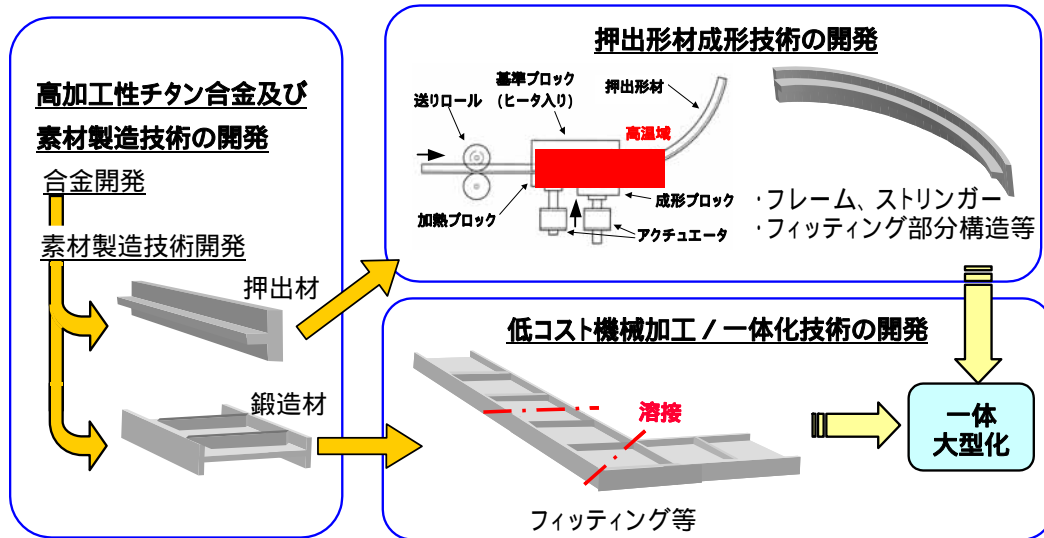


図3-1-2-9 研究開発を行なう技術の概念

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

現在機体構造材料として広範に使用されているTi-6Al-4V合金と同等の特性を持ちながら、より高い加工性(熱間加工性／切削性／溶接性)を有する国産新チタン合金(合金組成およびその素材)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、押出型材)の開発も行なう。

### ・ 押出型材成形技術の開発

高加工性チタン合金押出型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平成 20 年度(研究初年度)の成果を以下に説明する。

平成 20 年度は、目標を達成し、研究開発は順調に進展している。

## ①高加工性新チタン合金の開発

既存の $\alpha+\beta$ 型チタン合金“EL-F”と、本合金をベースに各種元素の成分バランスを変化させた合計 4 つのサンプルについて材料特性評価を行った。評価結果の代表として、被削性の指標となる工具磨耗量を図 3-1-2-10 に、熱間変形抵抗

を図 3-1-2-11 に示す。被削性の観点からは“E2C”、“E2R”および“E2F”が優れ、熱間加工性の観点からはチタン合金“EL-F”、“E2S”および“E2C”が優れていた。これらの結果と引張特性や溶接部曲げ性等評価結果から、材料特性のバランスが最も優れた“E2C”を選定した。さらに、“E2C”をベースに実機溶製での偏析抑制を考慮し、Fe 濃度を若干下げた合金を新チタン合金“EL-F 改”とし本研究で用いることにした。

その後、③で後述する切削性/溶接性の評価のため、“EL-F 改”について1トン程度の小規模の溶製を行った。

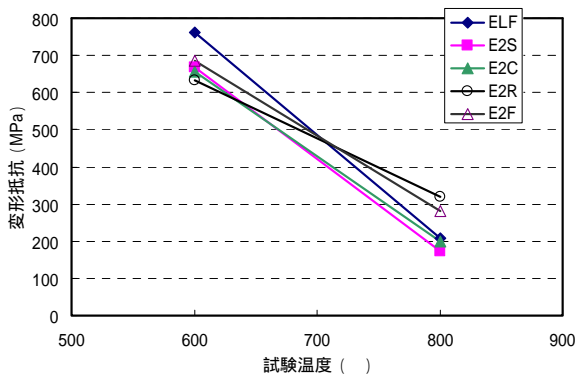


図 3-1-2-10 逃げ面摩耗幅  
(切削速度 25m/min、送り速度 0.2mm/rev)

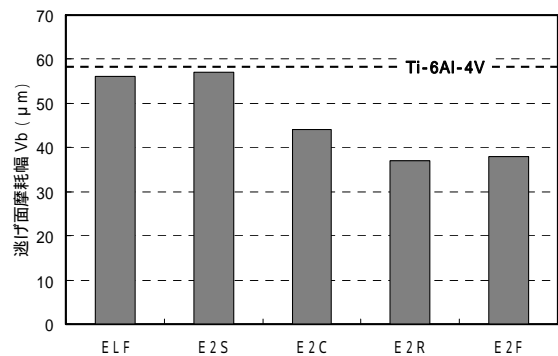


図 3-1-2-11 検討材の熱間変形抵抗  
(600°C, 800°C)

また、押出性を評価するため、新チタン合金“EL-F 改”と同等の熱間変形抵抗特性を持つチタン合金を用いて 400 トンプレスで静水圧押出試験を行い、押出の基礎データとなる「押出比-押出荷重」の関係を把握した(図 3-1-2-12 参照)。また、押出後の組織は、再結晶した  $\alpha-\beta$  組織であり、狙いどおりの押出ができることを確認した。

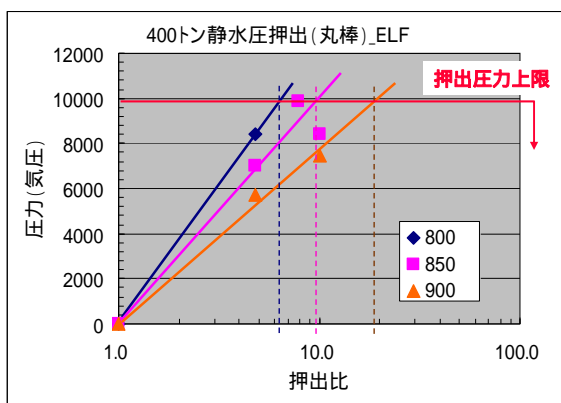


図 3-1-2-12 チタン合金 EL-F II の押出試験結果

押出条件

ダイス径 (mm)	押出比	温度 (°C)		
		800	850	900
φ32	4.8	○	○	○
φ22	10.0	×	○	○

○ : 成功  
× : 失敗

今後の課題は、選定した新チタン合金“EL-F 改”の材料特性(破壊特性)および合金成分の許容範囲の評価と、ラボ的に適正押出方法および適正条件範囲を設

定した上での実機押出実験による製造上の課題抽出である。

## ②チタン合金押出材の曲げ成形装置の開発

チタン押し材の曲げ成形技術について検討を行い、図 3-1-2-13 に示す順送局所加熱逐次曲げ成形プロセスを考案し、そのプロセスに基づいた装置を試作した。そして、曲率半径 3 m を目標とし、純チタン模擬形材で成形試験を行なった結果、チタン押し材に対して本成形プロセスが成立することを確認した。装置の運転状況を図 3-1-2-14 に、模擬形材の断面を図 3-1-2-15 に、成形後の供試体を図 3-1-2-16 に示す。

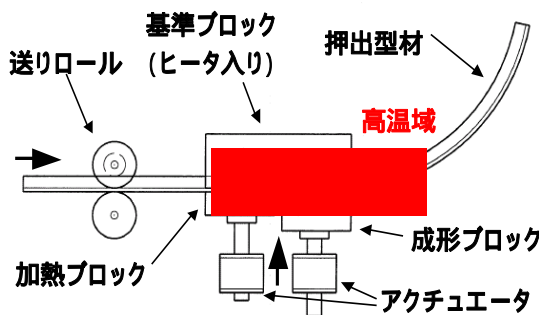


図 3-1-2-13 順送局所加熱逐次曲げ法の概念



図 3-1-2-14 装置運転状況

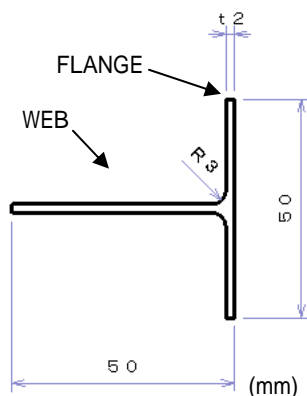


図3-1-2-15 模擬形材断面（純チタン）



図3-1-2-16 成形試験結果（供試体全体形状）

今後の課題は、実用に必要な形状精度を得るため、成形法および装置の改善による形状制御技術の向上とともに成形ステップ間の不連続性の解消、さらに成形後の材料特性（機械的特性、酸化状況等）の評価である。

なお、本研究の一環として、RTI 社のホットストレッチフォーミング技術について調査を行い、優れた成形品質を持つが、高額な設備投資や生産までの長い準備期間が必要という課題があることを把握した。

## ③新チタン合金の切削性／溶接性の評価

上記①で選定した新チタン合金“EL-F 改”について、従来広く使われているチタン合金 Ti-6Al-4V 合金を比較材として切削性および溶接性を評価した。

切削性評価について、セット状況を図3-1-2-17に、代表的な結果を図3-1-2-18に示す。

新チタン合金“EL-F 改”は高速加工や磨耗等により刃先温度が上昇すると溶着が発生しやすい結果となった。しかし、低回転領域では“EL-F 改”は Ti-6Al-4V 合金と比べて刃具寿命が延びる傾向も見受けられた。

次年度以降、これらの特徴を元に“EL-F 改”を安定した刃具寿命で高効率に切削する切削条件をシミュレーションと切削試験により検討する予定である。

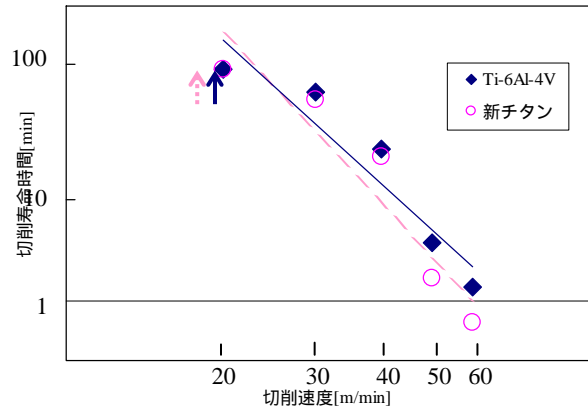






図 3-1-2-17 刃具及び供試材料セット状況 図 3-1-2-18 切削速度と刃具寿命時間の関係 (200 μm 磨耗)

一方、一体大型化技術開発は、レーザー溶接を大型化技術として選定し基本的な評価を行った。“EL-F 改”は Ti-6Al-4V 合金とほぼ同等の溶接性を持ち、また X 線やペネトランド検査の結果から、両合金とも板厚 5mm までなら良好な接合ができることが確認できた。5mm での結果を表 3-1-2-19 に示す。

表 3-1-2-19 板厚 5mm での溶接部外観およびビード部断面 (溶接速度 120cm/min)

材質	ビード部外観	ビード部断面
新チタン合金 EL-F 改		
Ti-6Al-4V 合金		

今後は、レーザーの出力増加やパルス照射の条件設定により溶接可能な板厚の拡大を目指すとともに、継手特性の詳細な評価も検討していく予定である。

### 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、さらに材料コスト、機械加工コストが増加する要因となっている。チタン合金部品のコスト低減のためには、材料コストと機械加工コストを同時に低減できるニアネットシェイプ化製造技術の開発が必須である。本テーマでは、近年粉末材料の低コスト製造技術が開発されている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、チタン合金のコスト低減を目指す。

焼結方法としては、低コストの焼結方法で量産化へ移行しやすい素粉末混合法、低温で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。平成20年度は、目標を達成し、研究開発は順調に進展している。

#### ① 焼結材料の開発

素粉末混合法は、溶解法による材料と遜色ない機械的特性が得られる安価なニアネットシェイプ加工技術である。焼結の素材となる粉末は、その

粒径が大きい材料はコストが低く、汚染の恐れが少ない反面、焼結欠陥の発生が懸念されるため、粒径の異なる粉末を種々の割合で混合して焼結密度との関係を調べた。焼結試験の結果を図3-1-2-20に示す。粒径の小さい粉末を用いた焼結体は高い焼結密度を示し、非常に欠陥の少ない焼結体を得ることが出来た。欠陥が疲労強度に与える影響は大きいと推測されるため、原料粉末としては微細な粒径のものを用いる必要があるといえる。

これまで、チタン合金の焼結技術は主としてTi-6Al-4V合金が進められており、焼結性に及ぼす合金系の

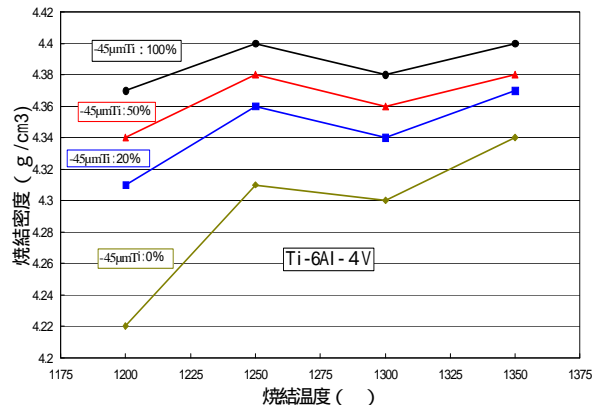


図 3-1-2-20 焼結温度と焼結密度の関係に与える原料粉末混合比の影響

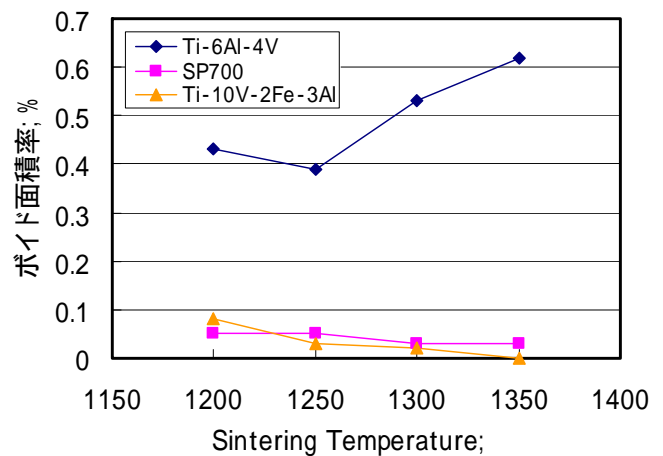


図 3-1-2-21 各合金系についての焼結温度とポイド面積率の関係

違いは明確にされていない。このため、代表的 $\alpha$ - $\beta$ 合金であるTi-6Al-4V合金、低温で加工性が良く、優れた焼結性と高い疲労強度が期待されるTi-4.5Al-3V-2Fe-2Mo合金（SP-700）およびTi-10V-2Fe-3Al合金に関して、素粉末混合法による粉末焼結を行い、合金系が焼結性に与える影響、合金成分均一性の差異を調査した。図3-1-2-21に各合金系のミクロ組織から測定したボイドの面積率と焼結温度の関係を示す。Ti-10V-2Fe-3Al合金およびSP-700合金のボイド面積率はTi-6Al-4V合金に比べて非常に小さく、Ti-10V-2Fe-3Al合金およびSP-700合金の焼結性はTi-6Al-4V合金より良好であった。

### ②粉末焼結法による部品製造プロセス開発

Ti-6Al-4V合金、SP-700合金、およびTi-10V-2Fe-3Al合金の素粉末混合法による焼結チタン合金に関して、焼結温度が引張強度特性、疲労強度特性に与える影響を調査した。引張試験結果を図3-1-2-22および図3-1-2-23に示す。

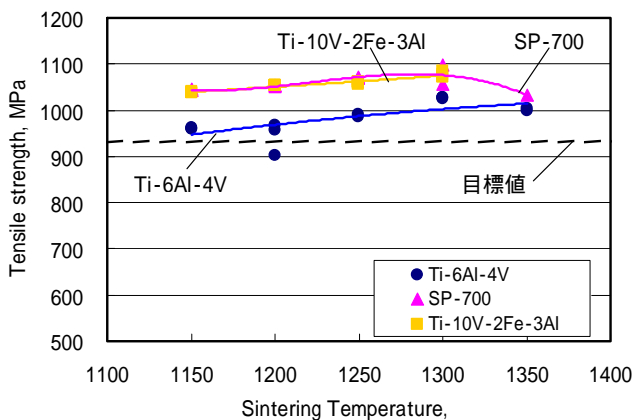


図3-1-2-22 各合金系についての焼結温度と引張強度の関係

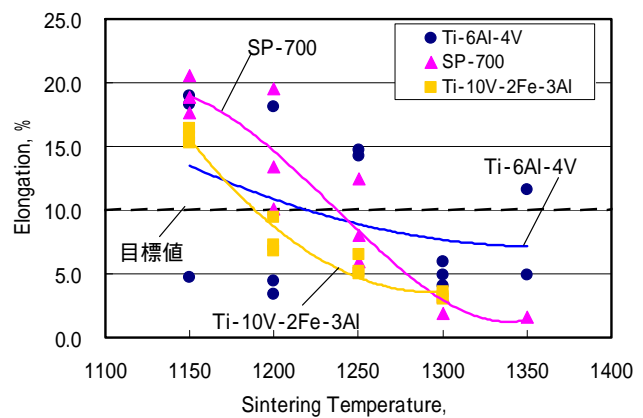


図3-1-2-23 各合金系についての焼結温度と破断伸びの関係

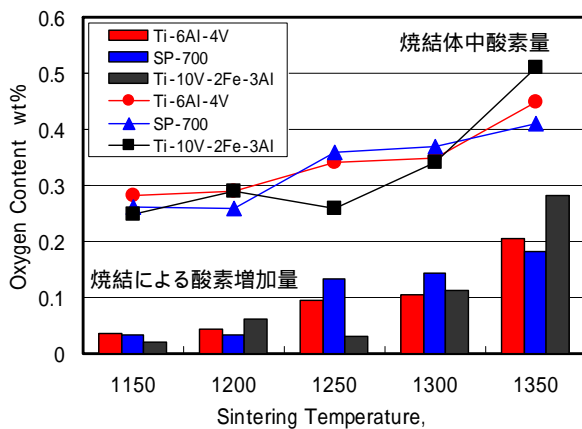


図3-1-2-24 各合金系についての焼結温度と酸素量の関係

引張強度特性は全ての合金系に共通して焼結温度が高いほど強度が高くなり、目標である鍛造材の引張り強度特性を満足する強度を得ることが出来た。一方、伸びおよび絞りは焼結温度が高くなるに従い著しく低下して鍛造材の規格値を満足できず、ばらつきも大きかった。この原因は、図3-1-2-24に示す様に、焼結温度が高くなるに伴って増加していた酸素濃度による影響が大きいと考えられ、酸素濃度の低減が材料の伸び、絞りの向上のための今後の

課題であるといえる。各合金の引張強度を比較すると、SP-700 合金および Ti-10V-2Fe-3Al 合金の引張強度が Ti-6Al-4V 合金よりも高い値を示した。平成 21 年度は、材料、プロセスの改善を行って延性の高い焼結体の開発を行う予定である。

疲労強度試験の結果を、図 3-1-2-25 に示す。Ti-6Al-4V 合金および SP-700 合金の焼結体の疲労寿命はばらつきが大きく、Ti-10V-2Fe-3Al 合金の焼結体は他の合金の焼結体よりも高い疲労強度を示した。焼結温度による疲労強度の違いは明確には見られなかった。平成 21 年度は、材料、プロセスの改善により、疲労強度の向上、ばらつきの低下を図っていく予定である。

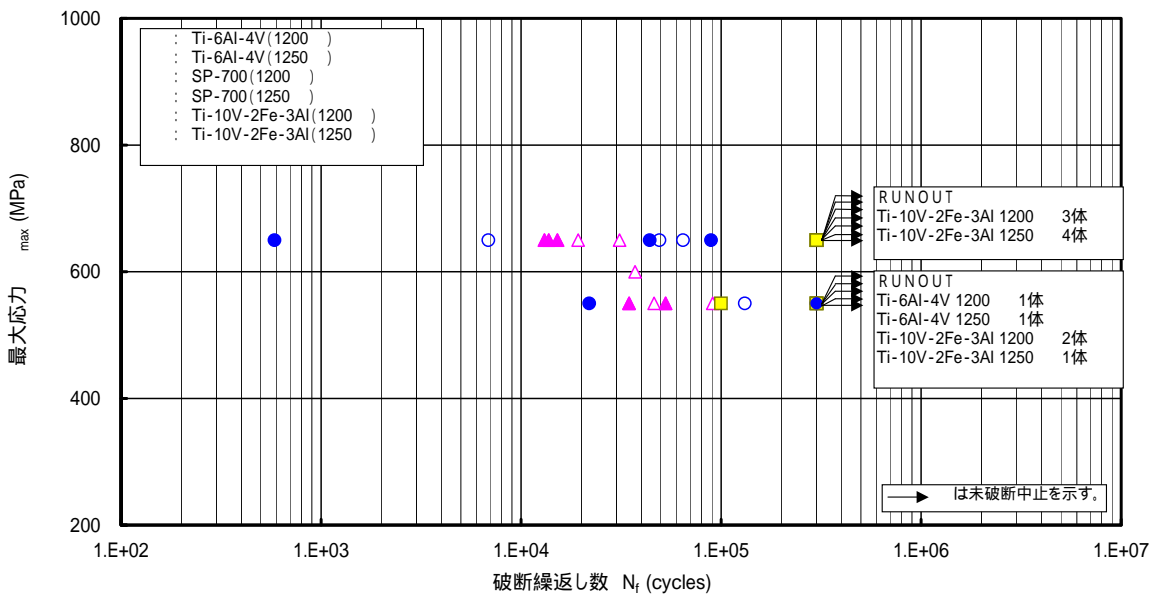


図 3-1-2-25 焼結体の疲労強度試験結果

### ③放電プラズマ焼結法による部品製造プロセス開発

放電プラズマ焼結法の概要を図 3-1-2-26 に示す。放電プラズマ焼結法（以下 SPS）は、一般的な焼結法と比較して低温、短時間での焼結が可能とされており、結晶粒が微細な焼結品が得られることが期待される。チタン合金の疲労強度は結晶粒径に大きく影響を受けるとされており、SPS により高い疲労強度を持つ焼結体を製作できる可能性がある。さらに、低温で焼結できることから、チタン合金中に安定に複

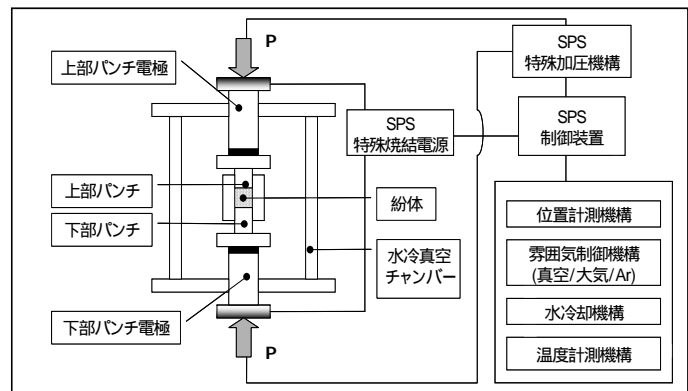


図 3-1-2-26 放電プラズマ焼結法の概念図

合強化粒子等を分散できる特徴も併せ持っており、溶性材が持ち得なかった機能を持つ部品製造の可能性がある。このSPSによりTi-6Al-4V合金、SP-700合金、およびTi-10V-2Fe-3Al合金について合金粉末の焼結を行い、焼結性および焼結体の引張強さに及ぼす焼結温度と加熱速度の影響を検討した。焼結温度と焼結密度の関係を図3-1-2-27に示す。いずれのチタン合金とも加熱温度が高いほど、加熱速度は遅いほどより高い焼結密度が得られた。焼結性は、SP-700合金、Ti-6Al-4V合金、Ti-10V-2Fe-3Al合金の順に優れており、SP-700合金では99.5%の相対密度を得ることができた。

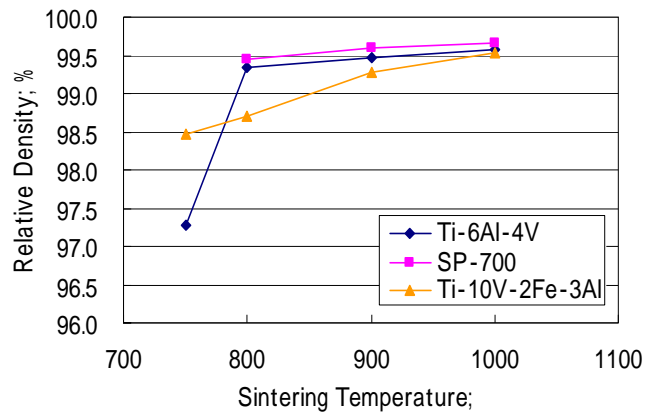


図 3-1-2-27 焼結温度と相対密度の関係

図 3-1-2-28 および図 3-1-2-29 に引張試験の結果を示す。Ti-6Al-4V合金、SP-700合金およびTi-10V-2Fe-3Al合金は鍛造品と同等以上の引張強度を示したが、伸びは低い値を示した。各チタン合金ともに、 $\beta$ 変態点以下の焼結温度では等軸組織を示すが、 $\beta$ 変態点を超える焼結温度では針状組織を呈し、さらに焼結温度が高くなるにつれて、旧 $\beta$ 粒の粗大化が認められた。伸びの減少の原因としては、この旧 $\beta$ 粒の粗大化が考えられる。各合金の焼結体の酸素濃度は、全ての条件においてTi-6Al-4V合金焼結体の酸素濃度の規格値( $\leq 0.30\text{wt}\%$ )を下回り、焼結温度による影響は見られなかった。

平成21年度は、粒子分散強化複合材料の焼結性の検討と、複雑形状部品の焼結技術の開発を行い、機能を付加した実部品の製造性検討を行う予定である。

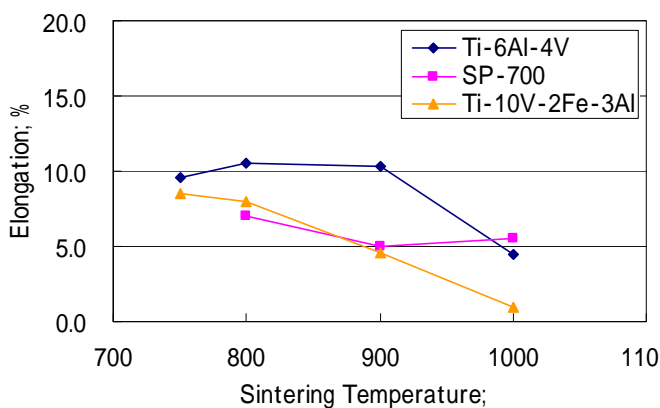


図 3-1-2-28 焼結温度と引張強度の関係

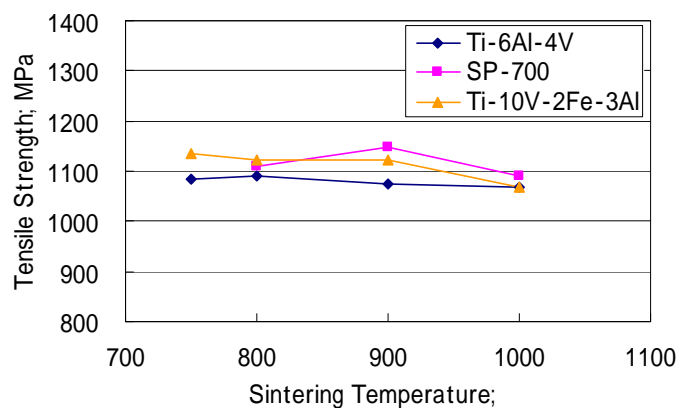


図 3-1-2-29 焼結温度と破断伸びの関係

## (2) 共通技術開発

### ア. 材質評価

平成 20 年度における東北大学にて行った材質評価では、本プロジェクトのテーマ別技術として、①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 合金熱間圧延板材ならびに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において創製した EL-F 合金および EL-F 改合金熱間鍛造丸棒について、焼鈍温度変化に対するミクロ組織および機械的性質の調査・検討を行った。以下に、各合金について得られた研究成果を記す。

#### ① Ti-9 合金

本合金の受け入れまま材に、真空中にて 973 K から 1223 K の温度範囲で 3.6 ks 保持後、空冷の焼鈍を施し、焼鈍温度変化に対するミクロ組織観察およびビッカース硬さの測定をそれぞれ行った。受け入れまま材のミクロ組織は、圧延方向に大きく伸展していたのに対し、焼鈍した本合金のミクロ組織では、焼鈍温度の上昇とともに初析  $\alpha$  相の形態が球状化する等軸  $\alpha$  組織を呈し、1173 K から 1223 K まで焼鈍温度を上昇させた場合、球状化した初析  $\alpha$  相とともに、 $\beta$  相中に針状  $\alpha$  相が析出した  $\alpha$ - $\beta$  相の体積率が増加した。

ビッカース硬さの測定は、受け入れまま材および上述の焼鈍した同合金に対し圧延、幅および厚さの三方向について、それぞれ行った。受け入れまま材および 973 K から 1173 K で焼鈍した本合金では、幅方向のビッカース硬さが圧延方向および厚さ方向のそれと比較して、65 Hv から 70 Hv 高かったことから、本合金は、圧延加工により強い異方性を示すことが示唆された。また、焼鈍温度の上昇に伴う初析  $\alpha$  相の体積率の減少、特に 1223 K で焼鈍した場合は、各方向でのビッカース硬さがほぼ同様の値を示したことから、初析  $\alpha$  相に起因した集合組織により各方向におけるビッカース硬さの変化が生じたと考えられる。

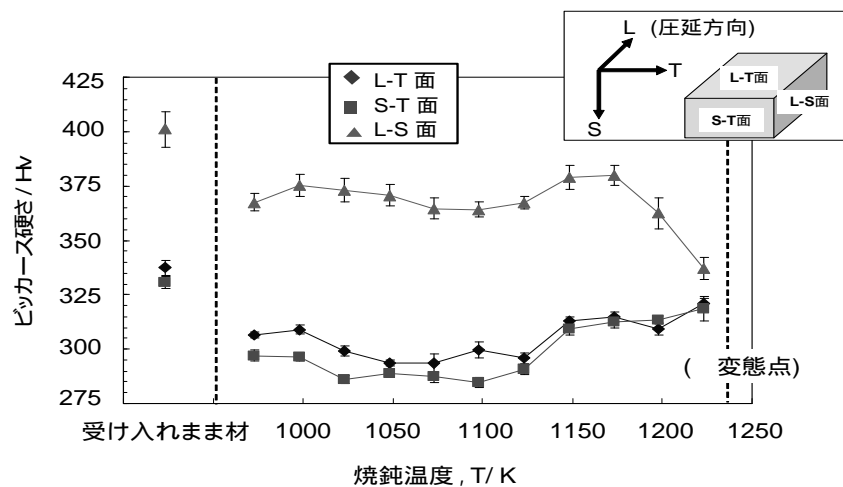


図 3-1-2-30 KS Ti-9 合金の焼鈍温度とビッカース硬さとの関係

## ② EL-F 合金および EL-F 改合金

両合金の受け入れまま材に、真空中にて 573 K から 1273 K の温度範囲で 3.6 ks 保持後、空冷の焼鈍を施し、ミクロ組織観察、ビッカース硬さの測定および引張特性の調査をそれぞれ行った。773 K および 873 K で焼鈍した両合金のミクロ組織では、初析  $\alpha$  相および  $\alpha$ - $\beta$  相とともに、 $\alpha$ - $\beta$  相内に結晶粒直径が  $1\ \mu\text{m}$  程度以下の  $\text{TiCr}_2$  と考えられる微細な析出物が存在する等軸  $\alpha$  組織を呈していた。一方、1173 K で焼鈍した両合金のミクロ組織では初析  $\alpha$  相および  $\alpha$ - $\beta$  相のみを有する等軸  $\alpha$  組織を呈し、 $\beta$  変態点以上の 1273 K で焼鈍した場合には粗大な旧  $\beta$  粒を有する針状  $\alpha$  組織を呈し、さらに結晶粒直径が  $5\ \mu\text{m}$  程度の  $\text{TiC}$  と考えられる析出物が同組織中に多数確認された。

両合金のビッカース硬さは、温度上昇とともに増大し、773 K から 873 K の焼鈍温度付近で最大値を示した後、さらなる温度上昇とともに 1000 K 付近まで低下傾向を示したが、その後の温度上昇とともに再び上昇傾向を示した。また、全ての焼鈍温度条件におけるビッカース硬さは、受け入れまま材のそれよりも高かった。この場合、773 K から 873 K における、温度上昇に伴うビッカース硬さの上昇は、上述のミクロ組織観察で確認された微細な析出物に起因すると考えられる。

両合金の焼鈍温度に対する引張特性、特に引張強さの変化は、上述したビッカース硬さの変化とほぼ同様であった。973 K で焼鈍した両合金の引張強さと破断伸びは、受け入れまま材のそれとほぼ同等の値を示し、773 K および 1173 K で焼鈍した場合には、引張強さはやや上昇し、逆に破断伸び

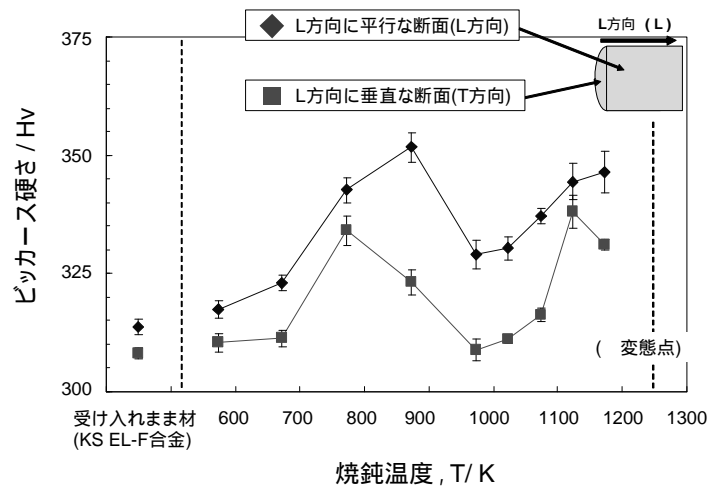


図 3-1-2-31 EL-F 合金の焼鈍温度とビッカース硬さとの関係

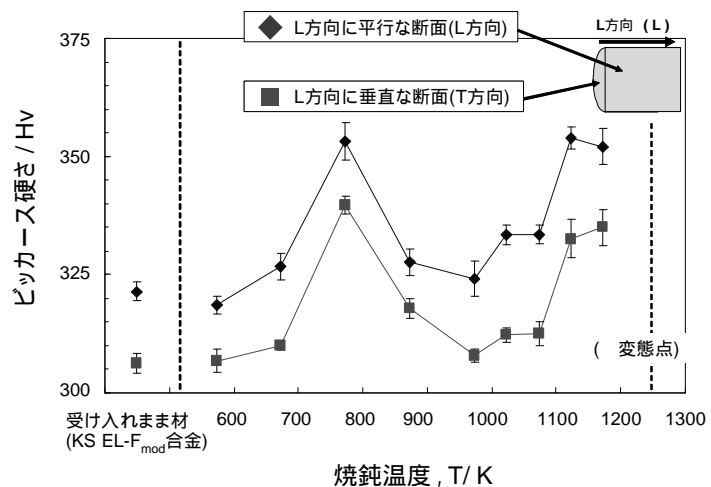


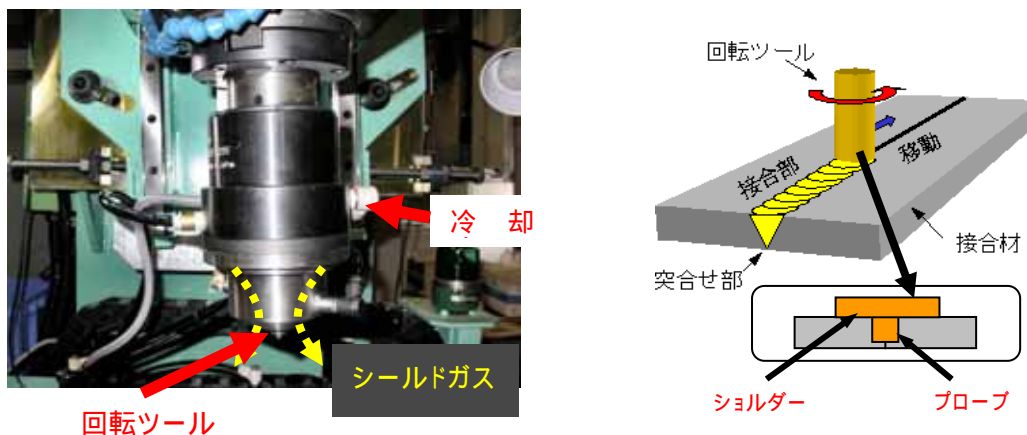
図 3-1-2-32 EL-F 改合金の焼鈍温度とビッカース硬さとの関係

はやや低下した。この場合、773 Kで焼鈍した両合金において、上述のマイクロ組織観察で確認されたTiCr<sub>2</sub>と考えられる析出物による脆化は認められなかった。

以上の研究成果をもとに、平成21年度では、焼鈍温度変化に対する各合金マイクロ組織評価（構成相および集合組織の同定および定量解析）と機械的性質（ビッカース硬さおよび引張特性）との関係をまとめ、同結果より焼鈍処理条件を選択し、通常疲労およびフレッティング疲労特性を中心とした力学的特性の改善について系統的に調査・検討を行う予定である。

## イ. 接合技術

航空機構造部材に対する摩擦攪拌接合は従来、アルミニウム合金を主体として技術開発と適用拡大が図られてきたが、航空機に複合材料が使用されることにより、アルミニウムに代わって、チタン合金はさらなる適用拡大が予想される。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、低コストでの航空機部材の接合による形成を実現する。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ている。



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3-1-2-33 FSW装置と接合原理

FSWは、英国のTWIにおいて発明されて以来、主にアルミニウム合金、マグネシウム合金、銅合金に対して世界各地で精力的に研究開発がなされてきており、中でもアルミニウム合金に対しては既に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、接合装置や接合用ツールなどの制約のために、研究開発は限定的である。言うまでもなく、チタン合金などの、より高融点である材料に対する報告は、非常

に少ないのが現状である。

そこで、平成20年度は、まず、大阪大学が保有する荷重制御式摩擦攪拌接合装置等の設備を利用し、2mm厚の工業用純チタン（commercial purity Ti：cp-Ti）を用いて研究を行った。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および光学顕微鏡、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することを目的とした。回転ツールは、超硬ツールとし、回転速度200rpm一定の条件で、接合速度を50~300mm/minの範囲で変化させ、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。また、接合中の温度測定やアルミニウム合金や鉄鋼材料との比較等も行った。得られた知見をまとめると以下のようなになる。

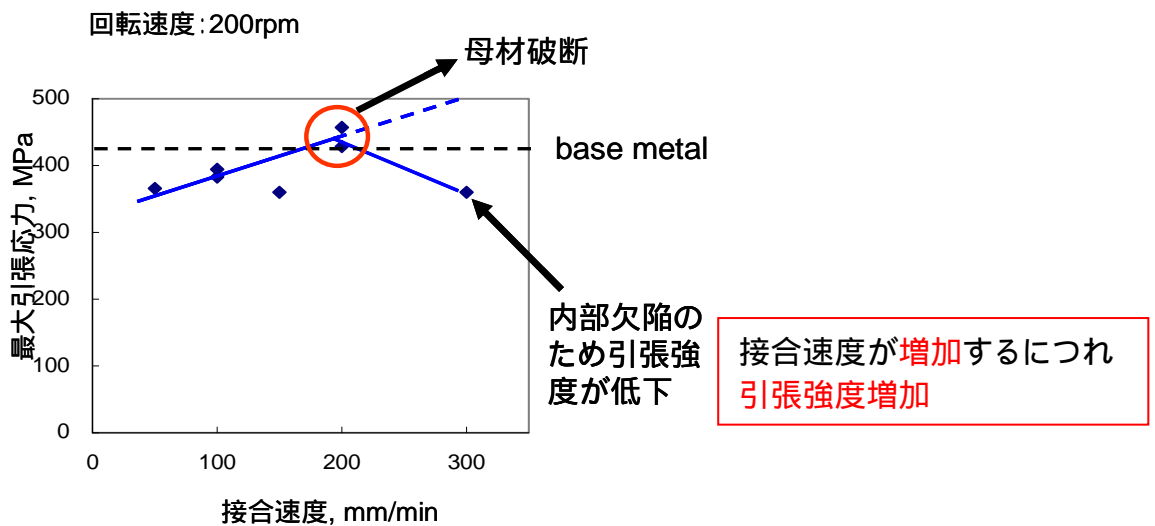


図3-1-2-34 純Ti引張試験結果

- ① 融点が1668℃と高く、非常に酸化しやすいため困難と考えられていた工業用純チタンの摩擦攪拌接合に対して、高剛性でシールドガス機構を備えた装置を用いることで良好な継手を得ることに成功した。
- ② 接合中の最高到達温度は880℃以下であり、 $\alpha$ 相を維持したまま、接合が行われたと考えられる。
- ③ 工業用純チタンに対して摩擦攪拌接合を行うと、結晶粒が微細化されるとともに、転位密度が増加し機械的強度が向上する。特に、ツール回転速度200rpm、接合速度200mm/minの条件では、攪拌部の室温引張試験、硬さ試験において母材よりも高強度となった。
- ④ 工業用純チタンに対して摩擦攪拌接合を行うと、等軸の結晶粒内に多数の転位が存在し、動的再結晶が起こることが示唆される。これは、転位の少ない再結晶粒が得られるアルミニウム合金および鉄鋼材料の結果とは大きく異なる。アルミニウム合金や鉄鋼材料では、接合中は、チタン合金と同様に動

的再結晶が生じているが、回復しやすいため、その後冷却過程で転位が消失したものと考えられる。

- ⑤チタン合金のように、変態することで急激に強度が変化する材料では、荷重制御型接合装置と比較して、位置制御型接合装置の使用が有効であると考えられる。したがって、平成21年度は、位置制御接合装置の使用を検討する。

#### 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、レーザー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、レーザー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(レーザーフォーミング)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ндаならびに脱バイнда・焼結プロセスの確立、2)寸法精度および高強度部材の確立である。

平成20年度の研究で得られた結果を列記すると以下のものである。

#### ①レーザーフォーミング

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、レーザー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76~91%で、引張強度は溶製材の960MPaに対し400~700MPaであった。このレベルは、航空機部材用としては不十分であることから、平成21年度では、レーザー強度を高めた場合の高密度化の可能性を探る。

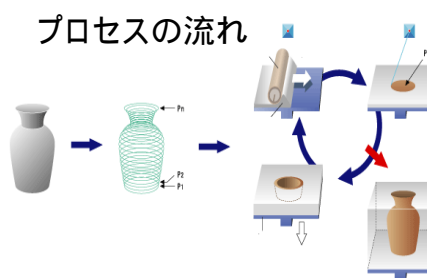
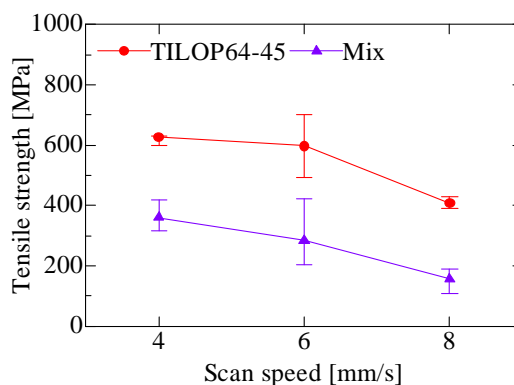
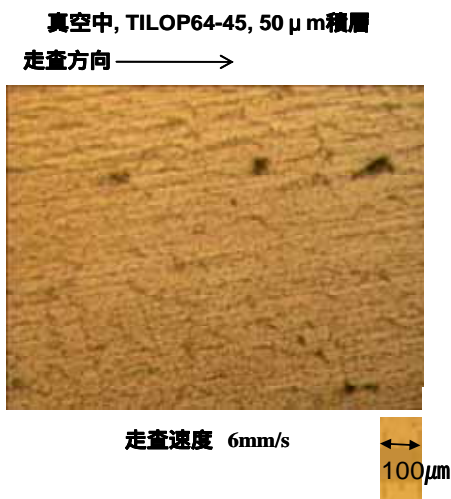


図3-1-2-35 レーザーフォーミング装置とプロセスの流れ



より小さい粒径の粉末を用いることが緻密化・高強度化に有効である

図 3-1-2-36 密度や強度に及ぼす使用粉末・走査速度の影響

## ②金属粉末射出成形 (MIM)

試料寸法が大きくなると変形率が上がることから、変形率を抑える MIM プロセス条件を見出すため、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（真円度や厚さ）を測定するための非接触式レーザー変位計を用いた評価装置を設計、試作した（ジグ、検芯台、芯出台を作製し、粗さ測定機と変位計を統合）。これにより、平成 21 年度では精確に真円度を測定できると思われる。

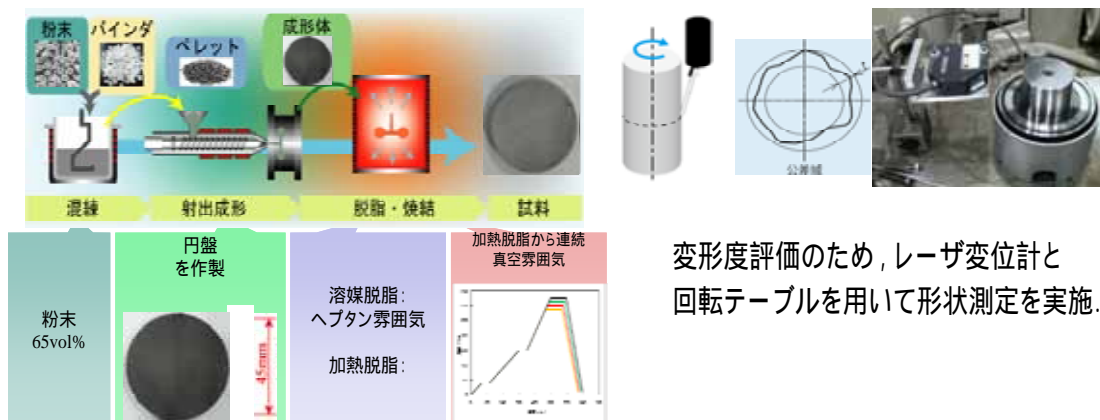


図 3-1-2-37 MIMのプロセスおよび形状変化

### 3-1-3. 特許出願状況等

表3-1-3-1に特許・論文件数を、表3-1-3-2に論文・投稿・発表・特許リストを示す。

### 3-2. 目標の達成度

表3-2に平成20年度目標に対する成果概要、および達成度を示す。

表 3-1-3-1 特許・論文等件数（平成 21 年 11 月末現在）

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	0	0	0	0	0	0	0
(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	0	0	1	0	0	0	0
(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	0	0	1	0	0	0	0
(4) 材質評価	0	0	0	0	0	0	0
(5) 接合技術	1	0	0	0	0	0	0
(6) 先端粉末造形技術	0	0	0	0	0	0	0
(7) 総合調査研究	0	0	0	0	0	0	0
計	1	0	2	0	0	0	0

表3-1-3-2 論文、投稿、発表、特許リスト（平成21年11月末現在）

	題目・メディア等	時期
論文	Scripta Materialia 誌, “Mechanical Properties of friction stir welded Ti joint”, 藤井、大阪大学接合科学研究所	H21.8
投稿	(社)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・加工技術の概要」、伊牟田、(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	H21.1
	(財)素形材センター誌「素形材」2009年7月号、「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の概要」、伊牟田他、(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	H21.7
発表	溶接学会 H21 年度春季全国大会「工業用純チタンの摩擦攪拌接合」岩田他、大阪大学接合科学研究所	H21.4
	溶接学会 H21 年度秋季全国大会「Ti-6Al-4V 合金の摩擦攪拌接合継手の特性に及ぼす接合条件の影響」岩田他、大阪大学接合科学研究所	H21.9
	日本金属学会 2009 年秋季講演大会「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」、安芸他、東北大学金属材料研究所	H21.9
	ICCC12009, “Friction Stir Welding of Commercial purity Titanium”, 岩田他、大阪大学接合科学研究所	H21.9
	金属材料研究所第 118 回講演会 (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と高力学機能化」安芸他、東北大学金属材料研究所	H21.11
	粉体粉末冶金協会 H21 年度秋期大会「MIM プロセスによる Ti-6Al-4V 合金部材の大型化」、篠崎他、九州大学	H21.10
特許	特願 2009-118699 チタン合金細長素材の曲げ成形装置、日本飛行機 (株)、三栄機械 (株)	H21.5 出願済
	特願 2009-209555 放電プラズマ焼結法によるチタン合金のニアネット成形とその装置、日本大学	H21.9 出願済

表 3-2 目標に対する成果・達成度の一覧表（平成 20 年度）

要素技術	目標・指標	成果概要	達成度
[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	<p>①常温圧延可能なチタン合金の加工性改善技術の開発； 加工熱処理により常温曲げ加工の改善に有効な組織形態を明らかにし、適正なチタン板材製造の技術の目途付けを行う。</p> <p>②チタン合金の低温/局所加熱成形技術の開発； 既存のチタン合金板材を用いて、局所加熱成形に必要な基本的加工条件を明らかにするとともに、装置プロセス技術開発に必要な設備の基本仕様を設定する。</p>	<p>①常温圧延可能なチタン材である Ti-9 合金の <math>\beta</math> 圧延材の製造技術により、強度異方性が軽減するとともに、これまで乏しかった T 方向の曲げ加工性が特に改善されることが判明した。</p> <p>②板材の成形技術の開発では、Ti-9 合金を用いて、常温および高温での塑性加工特性に関するデータの取得を行うとともに、局所加熱成形の基本コンセプトの検証と成形装置の仕様設定を行った。局所加熱成形方法として引張り曲げ成形法を選択し、この成形方法により常温で材料に形状を付与し、その後材料を外部より局所加熱することにより塑性変形をあたえ、その形状を凍結することという基本コンセプトの成立性の確認をした。</p>	達成
(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	<p>①高加工性新チタン合金およびその押出／鍛造素材の開発； 高加工性新チタン合金のラボレベルでの試作・評価を行う。</p>	<p>①EL-F 合金をベースに作成した数種類のサンプルについて、材料特性評価（熱間変形抵抗、工具磨耗量、引張特性、溶接部曲げ性等）を行い、各種特性バランスに優れた新チタン合金 EL-F 改合金を選定した。また、静水</p>	達成

要素技術	目標・指標	成果概要	達成度
<p>(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 (続き)</p>	<p>②押出型材の順送局所加熱による逐次曲げ成形技術； チタン合金押出材の曲げ成形装置の試作および模擬成形を行い、プロセスの成立性を確認する。 ③低コスト機械加工／一体大型化技術の開発； 新チタン合金の切削性／溶接性の基礎的な評価を行うとともに、それらの結果を検討して今後の研究の指針を得る。</p>	<p>圧押出試験を行い、基礎データとなる「押出比－押出荷重」の関係を把握した。さらに、押出後の組織は、再結晶した <math>\alpha-\beta</math> 組織であり、狙いどおりの押出しができることを確認した。 ②チタン押出し材の順送局所加熱逐次曲げ成形プロセスを考案し、そのプロセスに基づいた装置を試作した。そして、曲率半径 3m を目標とし、純チタン模擬型材で成形試験を行なった結果、チタン押出型材に対して本成形プロセスが成立することを確認した。 ③新チタン合金 EL-F 改合金について、切削性および溶接性を評価した。また、一体大型化技術として、レーザー溶接の評価を行った。新チタン合金は、Ti-6Al-4V 合金とほぼ同等の溶接性を持ち、両合金とも板厚 5mm までなら良好な接合ができることを確認した。</p>	
<p>(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</p>	<p>①焼結材料の検討・開発； 各種合金に関して、素粉末混合法による粉末焼結を行い、各々の合金系における焼結性、合金成分均一性の差異を調査する。 ②粉末焼結法による部品製造プロセス開発、 ③放電プラズマ焼結法による部品製造プロセス開発； チタン合金の焼結技術に関する基礎技術を検討</p>	<p>①Ti-10V-2Fe-3Al 合金および SP-700 合金の焼結性は、Ti-6Al-4V 合金より良好であるという成果を得た。 ②Ti-6Al-4V、SP-700、および Ti-10V-2Fe-3Al の各合金の焼結チタン合金の引張強度特性は全ての合金系に共通して焼結温度が高いほど強度が高くなり、伸びおよび絞りは著しく低下した。これは、焼結温度が高くなるに伴って増加していた酸素濃度による影響が大きいと考えられる。</p>	<p>達成</p>

要素技術	目標・指標	成果概要	達成度
(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 (続き)	し、Ti-6Al-4V 合金製航空機向け鍛造品と同等以上の疲労強度特性を有する粉末焼結部品の製造技術についての技術的課題を抽出する。合金系として比較基準とする Ti-6Al-4V 合金の他に、SP-700 合金および Ti-10V-2Fe-3Al 合金を検討する。	③Ti-6Al-4V、SP-700、および Ti-10V-2Fe-3Al いずれのチタン合金とも加熱温度が高いほど、加熱速度は遅いほどより高い焼結密度が得られた。焼結性は、SP-700 合金、Ti-6Al-4V 合金、Ti-10V-2Fe-3Al 合金の順に優れており、SP-700 合金では 99.5%の相対密度が得られた。	
[共通技術開発]			
(4) 材質評価	開発する素材およびプロセスが、材料の特性に与える影響について試験・評価を実施し、適切な合金製造・プロセス条件を示し、実用化を促す。	テーマ別技術の板金部材において創製した Ti-9 合金ならびに押出/鍛造部材において創製した EL-F 合金および EL-F 改合金について、焼鈍温度変化に対するミクロ組織および機械的性質を明らかにした。	達成
(5) 接合技術	摩擦拡散接合 (FSW) によるチタン合金の接合技術を開発する。そのために必要なプロセスの安定化、および接合可能条件の取得に関する研究開発を実施する。 そして、接合部材の試作を行うとともに、テーマ別技術で開発した素材・プロセスに応用して開発技術を実証する。	大阪大学が保有する荷重制御式摩擦攪拌接合装置等の設備を利用し、2mm 厚の工業用純チタンを用い、接合継手の機械的強度の評価および組織解析を行って、継手の摩擦攪拌接合性を評価した結果、工業用純チタンの摩擦攪拌接合に対して、高剛性でシールドガス機構を備えた装置を用いることで良好な継手を得ることに成功した。	達成
(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) を部材形成に適用するための研究開発を実施する。そのために必要な素過程の解明、形状化の試行、プロセス技術の取得に関する研	レーザフォーミング；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、Ti-6Al-4V 合金粉末積層造形体の相対密度は 76~91%で、引張強度は溶製材の 960MPa に対し 400~700MPa であった。	達成

要素技術	目標・指標	成果概要	達成度
(6)先端粉末造形技術 (続き)	究開発を実施する。そして、レーザフォーミングによるパターン形成などの形状化および金属粉末射出成形(MIM)により従来に比べ大型化した複雑形状品の試作を行い、開発技術を実証する。	MIM; 試料寸法が大きくなると変形率が上がることから、変形率を抑える MIM プロセス条件を見出すため、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(真円度や厚さ)を測定するための非接触式レーザー変位計を用いた評価装置を設計、試作した。	
(7)総合調査研究	技術動向調査を実施し、本研究開発の方向性、達成レベル等についての客観的判断材料を探索する。また、委員会等開催による研究開発の促進、技術課題の検討、研究グループ間の調整、研究開発の進捗状況の点検等を行い、研究開発の効率的な推進を図る。	開発材料・技術の適用検討等のため関連技術の動向調査を実施した。また、研究推進のために、総合技術委員会を2回開催して、研究の方向性、成果の審議を行うとともに、技術委員会を3回、グループ間調整会等を複数回開催して研究の進捗状況と達成目標に対する達成状況および課題について検討した。	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年間を目処に、材料関係規格登録手続きや、必要な生産設備を導入するなど、製品化を目指した開発を行い、環境適応型小型航空機派生型機、民間転用機、ビジネスジェット機や将来国際共同開発機等へ適用し、航空機への実用化を図る予定である。

開発技術が将来適用された場合を想定した製品等のイメージを、後記および図4-1-1～図4-1-3に示す。またプロジェクトのアウトカム（プロジェクトの成果が及ぼす効果等）を、図4-1-4～図4-1-5に示す。

#### (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板材とその成形技術の開発、および航空機に適用する為に必要な各種データの取得が可能となり、防火壁、ドア枠、パイロン等の板金部品などへ製品化の見通しを得ることが出来る。

#### (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 合金と同等の特性と高加工性(熱間加工性／切削性／溶接性)を有する国産新チタン合金を開発することで、押出や鍛造成形による部材のニアネットシェイプ化が可能となる。また、押出材の成形技術を開発するとともに、高効率に切削する技術を開発することにより、低コスト化とともにリードタイムの短縮を実現できる。更に、この合金で製造した素材を溶接する技術を開発することにより、大型鍛造プレスを持たない国内メーカーでは為し得なかった大型サイズの部材の製造が可能となり、国内メーカーによる安定した品質の素材の確保も容易になって、胴体フレームや大型結合部材などへ製品化の見通しを得ることが出来る。

#### (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

低コストで優れた機能性を有したニアネットシェイプのチタン合金焼結部品の材料および成形技術の開発が可能となり、翼胴結合金具やファスナーなどの部材への適用が期待される。



図4-1-1 チタン板金部品例（ドア部補強部品）



図 4-1-2 チタン押出／鍛造材例（胴体フレーム）

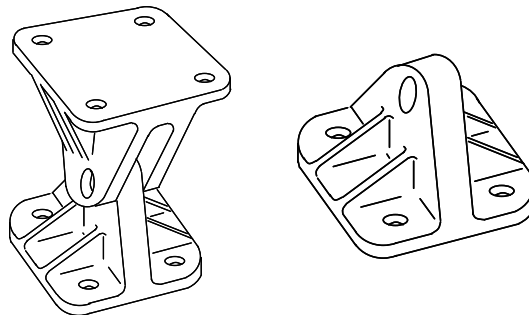


図 4-1-3 チタン焼結部品例（翼胴結合金具）

#### 4-2. 波及効果

本研究開発の成果は、航空機開発への実用化にとどまらず、種々の波及効果が期待できる。各テーマ毎、以下に示す。

##### （1）チタン板金部品の低コスト製造技術

低コストで優れた加工性を有する材料およびプロセスを実現するため、高速車両等軽量化が求められるその他の輸送機器分野への適用が波及することが期待される。

##### （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

これまで為し得なかった大型サイズの部材の製造が可能とするため、高速車両等軽量化が求められるその他の輸送機器分野への適用が期待される。

##### （3）高機能化チタン合金焼結部品の低コスト製造技術

汎用性の高い技術であり、自動車部品（エンジンバルブ、コネクティングロッド等）をはじめ、高速車両等、軽量化が求められるその他の輸送機器分野への適用が期待される。

##### （4）共通技術

材質評価については、航空機産業以外の広範な民生産業技術分野における、チタン合金適用のために必要な技術基盤として重要な学術的知見を与える。摩擦攪拌接合（FSW）に代表される接合技術は、市販純チタンからチタン合金材料の接合、一体大型化技術として多くの産業分野における実用性の高い技術として応用されることが期待される。レーザーフォーミングおよび金属粉末射出成形（MIM）技術については、大型化の技術が民生分野へ応用されることが期待される。

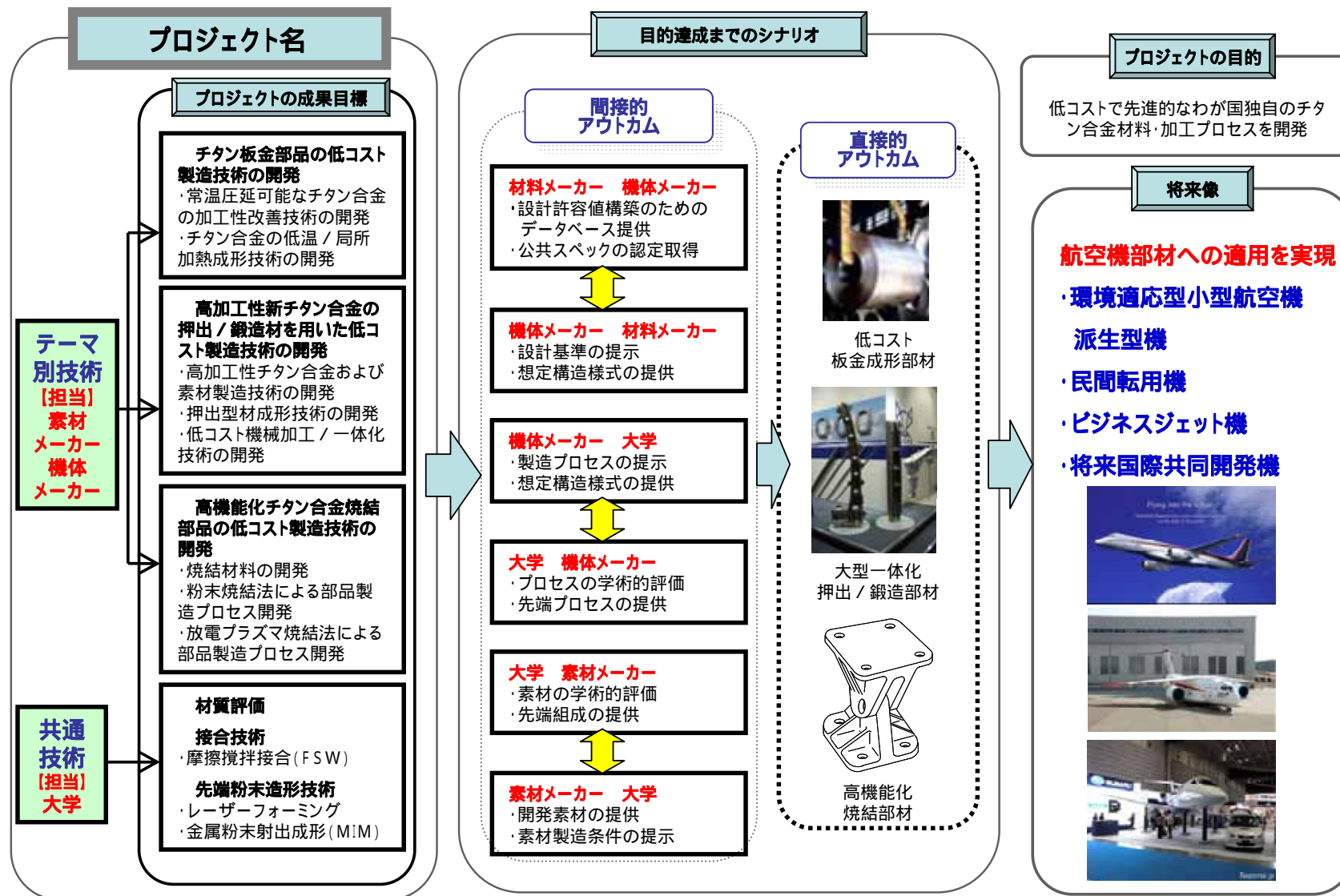


図4 - 1 - 4 プロジェクトのアウトカム(プロジェクトの成果が及ぼす効果等)

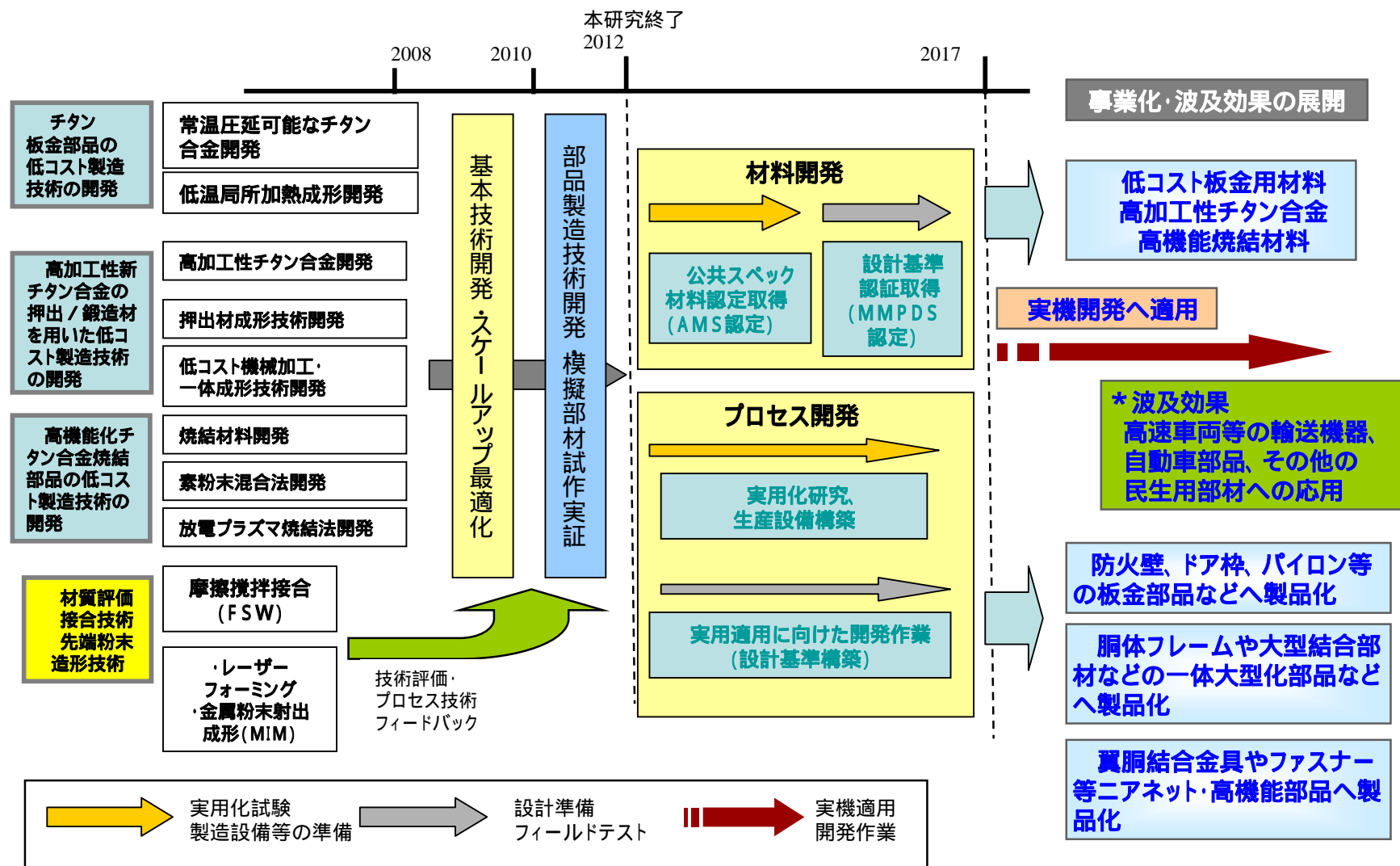


図4 - 1 - 5 プロジェクトの事業化・波及効果の展開

## 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、2年目となる平成21年度のほぼ中間時点に位置する。

5年間の研究の流れは、まず3年間において基本技術を開発し、残り2年間において部材製造技術の開発を行う。特に4年目においては、部材試作に必要な材料の製造、部材の設計・試作を実施し、最後の5年目において、模擬部材の製作およびその試験評価を実施する流れとなる。具体的には以下の通りである。

#### (1) 1年目（平成20年度）

##### ①素材検討

低コスト加工に適するチタン合金素材の組成調整及び製造技術開発、あるいは新合金素材の基礎検討を行う。

##### ②基本プロセス検討

低コスト加工プロセスにおける成形・加工性、接合性、非破壊検査特性などの基礎特性を取得して課題を明らかにする。

☆基本材料開発や基本プロセス開発に必要な治具や試験装置を計画する。

#### (2) 2年目（平成21年度）

##### ①基本材料開発

H20年度の検討結果に基づき、低コスト加工に適するチタン合金素材を用いた基本材料を試作、評価する。

##### ②基本プロセス開発

H20年度に取得した基礎特性および明らかとなった課題を踏まえ、成形・加工等の基本プロセスを開発する。

☆基本材料開発や基本プロセス開発に必要な治具や試験装置を導入し、試験片レベルでの試作・評価を実施する。

#### (3) 3年目（平成22年度）

##### ①材料特性の最適化

H21年度に開発した基本材料を、部材試作レベルにスケールアップするため、素材の組成及び製造技術の最適化を実施する。また、H23年度に実施する部材試作用材料の製造に必要な治具等を計画・準備する。

##### ②プロセスの最適化

H21年度に開発した基本材料を用い、部材試作レベルにスケールアップするため、成形・加工等のプロセスの最適化を実施する。

☆基本材料開発や基本プロセス開発に必要な 治具や試験装置を導入し、試験片レベルでの試作・評価を実施する。

(4) 4年目（平成23年度）

①模擬部材試作用材料の製造

H22年度までに最適化した基本材料により、部材試作用材料を製造する。

②部材の設計、試作

航空機への適用を模擬した部材を設計する。また、H22年度までに最適化した成形・加工等のプロセスを踏まえ、試作プロセスを確立する。そして、部材試作に必要な治具や装置を計画・準備する。また、試作部材の試験・評価の方案を検討し、必要な試験治具や装置を計画・準備する。

(5) 5年目（平成24年度）

①材料特性の高性能化

部材試作用の材料を評価して、更なる高性能化を検討し、素材の組成や製造技術に反映する。また、航空機への適用に必要な各種材料特性の整備を実施する。

②部材の試験、評価

部材の試作および試験・評価を実施する。また試験・評価に必要な試験治具や装置を導入する。

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					
【テーマ別技術】 材料開発	<b>素材検討</b> 合金組成等の検討	<b>基本材料開発</b> 基本材料の試作・評価	<b>材料特性最適化</b> 部材試作レベルへのスケールアップのための組成最適化	<b>模擬部材試作用材料の製造</b>	<b>材料の高性能化</b>
成形加工 プロセス開発	<b>基本プロセス検討</b> 成形基礎特性の取得	<b>基本プロセス開発</b> 成形・加工等の基本プロセス開発	<b>プロセス最適</b> 部材試作レベルへのスケールアップのための成形・加工プロセスの最適化	<b>部材の設計・試作</b>	<b>部材の試験・評価</b>
【共通技術】	<b>素材・プロセス技術開発・評価</b>		<b>素材・プロセス技術のフィードバック</b>		
予算計画(百万円)	120	120	未定	未定	未定

## 5-2. 研究開発実施者の実施体制・運営

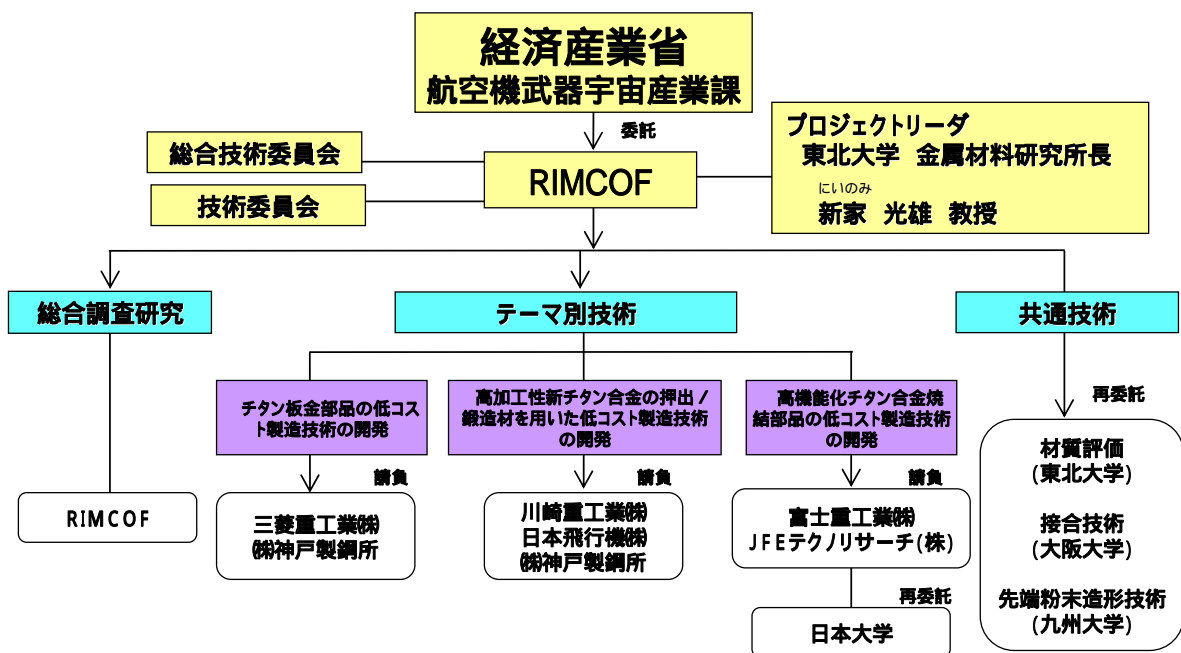
### (1) 研究開発実施者の実施体制

本研究開発は、経済産業省公募の委託事業である平成20年度「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）」の事業委託を受けた（財）次世代金属・複合材料研究開発協会（以下、「RIMCOF」という）のもとで、企業6社（請負）、大学4機関（再委託）が、研究開発責任者（プロジェクトリーダー）である東北大学金属材料研究所の新家光雄教授の下で、それぞれの研究テーマの達成目標を実現すべく研究開発を実施する方式で実施している。

RIMCOFは、研究開発を推進するとともに、経済産業省および研究開発責任者と密接な関係を維持しつつ、本研究開発の目的および目標に照らして適切な運営管理を実施している。

具体的には、RIMCOFにプロジェクト全体の研究方針、成果等を審議する総合技術委員会を設け外部有識者の意見を運営管理や研究方針に反映するとともに、実施機関で構成する技術委員会を四半期毎に実施してプロジェクトの推進把握と方向付けを行っている。

図5-2に全体実施体制図を示す。



### 6企業、4大学の連携により研究開発を推進

図5-2 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。

本事業で取り組む次世代チタン合金構造部材創製・加工技術開発は、航空機機体構造を対象にしている。したがって、国内チタン素材メーカーおよび航空機メーカーが中心となり、大学等の協力を得て実施している。すなわち、大学において、開発する材料・プロセスの妥当性の評価、基礎的な加工プロセスの研究を行い、素材メーカーおよび航空機メーカーは、実機適用を目指した素材・プロセス開発を行うとい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RIMCOFに設置した総合技術委員会における外部有識者の意見を運営管理に反映させた。又、四半期に一回程度、主として実施機関で構成される技術委員会等を通じて本事業の進捗把握及び方向付け等を行った。これ等委員会により、実施者間の緊密な連携を図った上で、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

前述の総合技術委員会委員として素材産業分野より(社)日本チタン協会、ユーザーであるエアラインの全日本空輸株式会社からも参加願ひ、本事業の進捗や実用化に向けてのアドバイスをいただいている。

## 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。平成20年度、平成21年度の予算総額は同規模であるが、各年度とも研究開発設備導入を実施するテーマに対し重点配分を行っている。

具体的には、平成20年度は、表5-3の(2) 押出／鍛造部材開発における順送局所曲げ押出型材成形試験装置を導入した。また、平成21年度は、板金部材開発における局所加熱成形試験装置、押出／鍛造部材開発における押出材製造治具を導入する計画である。

平成22年度以降は、焼結部材開発における研究開発設備、共通技術開発における研究開発設備の導入が急がれるが、予算規模次第では、テーマの再検討が必要になる可能性があると考えられる。

表5-3 資金配分 (単位：百万円 税込)

年度 平成	20	21	22	23	24	20-21 年度計
(1) チタン板金部品の低コスト製造技術の開発	25.4	32.7				58.1
(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	46.9	42.5				89.4
(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	22.9	21.3				44.2
(4) 材質評価	3.2	3.2				6.4
(5) 接合技術	4.2	4.2				8.4
(6) 先端粉末造形技術	4.2	4.2				8.4
(7) 総合調査研究	13.2	11.9				25.1
合計	120.0	120.0	未定	未定	未定	240.0

(注) 表中、各テーマ毎の担当機関

- (1) 三菱重工業、神戸製鋼所の2社
- (2) 川崎重工業、日本飛行機、神戸製鋼所の3社
- (3) 富士重工業、JFEテクノリサーチ、日本大学の2社、1大学
- (4) 東北大学金属材料研究所
- (5) 大阪大学接合科学研究所
- (6) 九州大学大学院
- (7) (財)次世代金属・複合材料研究開発協会

#### 5-4. 費用対効果

初年度および2年目は、各研究機関とも、既存の汎用的実験装置や機器をうまく応用し、必要最小限の治具等の導入にとどめ、最小セグメントあるいは目標素材を模擬する素材でのデータ取得を行っている。また、設備導入も、優先順位を考慮しつつ、年1～2機関分のみを、複数年度で完成するという部分的導入にとどめた。素材あるいはプロセスの基礎検討を行う初年度および2年目は、このような各社・各機関の協力的対応により必要最小限の予算に対し最大限の成果が得られている。

しかしながら、3年目以降の研究開発は、部材製造技術開発の準備段階に入り、素材および設備・装置のスケールアップが計画されているため、これらを実現するために必要な予算措置が必要となる。

#### 5-5. 変化への対応

本事業開始から、平成20年度終了時点までは、技術動向・社会情勢・市場ニーズの変化等本事業に影響を及ぼすような大きな変化はない。

しかしながら本研究開発の計画当初に比較し、航空機用構造部材は新しい航空機開発の流れに沿って、航空機用構造材料の変革、すなわち、従来のアルミ合金を主体とするものから炭素繊維強化複合材料を主体とした軽量構造を達成して一層の省エネルギー化を目指しつつある。

このような情勢の流れは、ボーイング社のみならずエアバス社の新機種開発計画を見ても明らかであり、世界のあらゆる航空機メーカーにとってのコア技術となりつつある。

当研究開発がテーマとする、チタン合金部材の低コスト化技術はこのような構造材料の変革の一翼を担うものであり、その重要性は、ますます高まっているといえる。