

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) の概要について

平成27年3月26日
一般財団法人 素形材センター

目 次

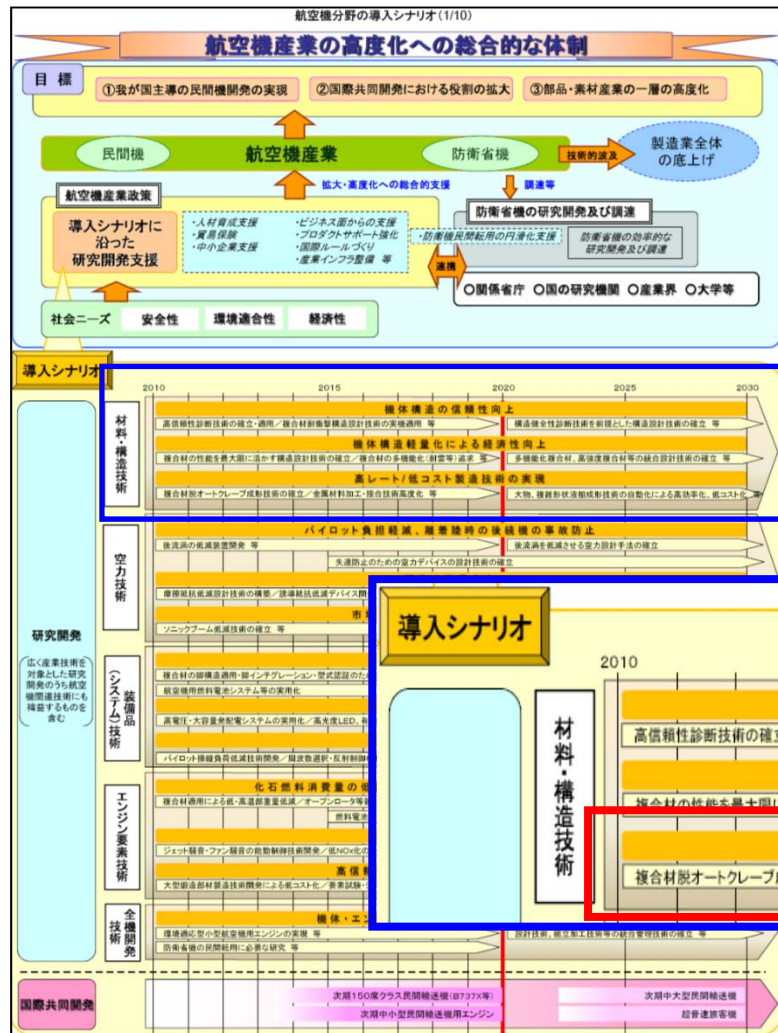
1. 次世代チタン合金構造部材創製・加工技術開発の概要
2. 事業の目的・政策的位置付け
3. 目標
4. 成果、目標の達成度
5. 事業化、波及効果
6. 調査研究マネジメント・体制等
7. 中間評価結果

1. 次世代チタン合金構造部材創製・加工技術開発の概要

概 要	わが国独自の先進的チタン合金および加工技術をベースとし、 低コストで効率の良い航空機構造用合金材料および加工プロセスを開発し、部材の試作・評価を行って製品化の見通しを得、航空機機体構造分野の省エネルギーに資する。
実施期間	平成20年度～平成24年度（5年間）
予算総額	6.9億円（委託） （平成20年度：1.2億円 平成21年度：1.2億円 平成22年度：1.2億円 平成23年度：1.7億円 平成24年度：1.6億円）
実 施 者	一般財団法人 素形材センター （財団法人 次世代金属・複合材料研究開発協会）
プロジェクト リーダー	東北大学金属材料研究所長 新家光雄（教授）

2. 目的・政策的位置付け

・航空機産業施策のうち、中核的要素技術に位置づけて、事業を推進している。



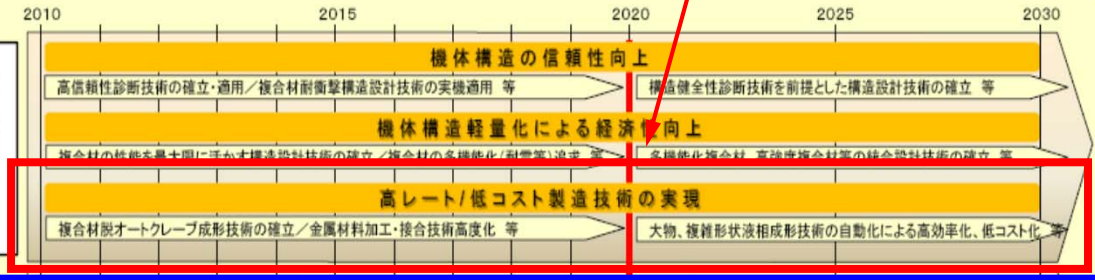
経済産業省及び独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)による航空機分野の導入シナリオ

材料・構造技術分野

本事業

導入シナリオ

材料・構造技術



3. 目標(1/2)

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、加工性の良い材料および加工プロセスを開発し、実機相当部品の製造技術完成の目途を得るとともに、コスト低減目標達成(30%低減)の目途を付ける

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	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

個別要素技術の目標 (①:材料開発、②:加工プロセス開発)

3. 目標(2/2)

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]		
(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

4. 成果、目標の達成度(1/12)

3種類の材料および加工プロセスを開発し、コスト低減(30%)達成可能であることを確認した

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。 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法を開発した。	達成
(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。 ① 成形装置を開発し、新合金 (Ti-531C合金) 押出材に対して曲げ成形を実施し、性能を確認した。 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。	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。 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

4. 成果、目標の達成度(2/12)

要素技術	目標・指標	成果概要	達成度
[共通技術開発]			
(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	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指針を得た。	達成
(5) 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) 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. 成果、目標の達成度(3/12) テーマ技術1

チタン板金部品の低コスト製造技術の開発

研究目標

- ①鉄鋼材と同等に連続熱間圧延するTi-9合金板の強度異方性を改善する製造方法を開発し、 航空機用板材としての要求性能を確保する
- ②局所加熱による成形装置を開発する
複曲面形状に対応できる成形技術を開発する

材料素材

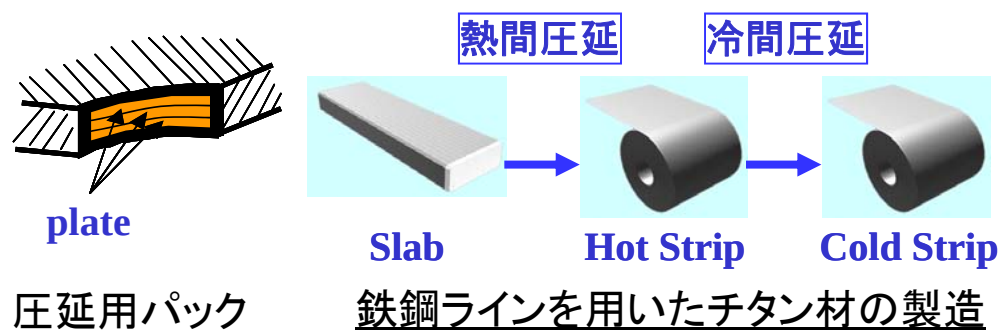
技術課題

現行材(Ti-6Al-4V)は常温加工性が悪く
パック圧延が必須で、高コスト

解決策

常温圧延可能なチタン合金材の適用と
その加工性(異方性)の改善

常温圧延可能なチタン合金の加工性改善技術の開発



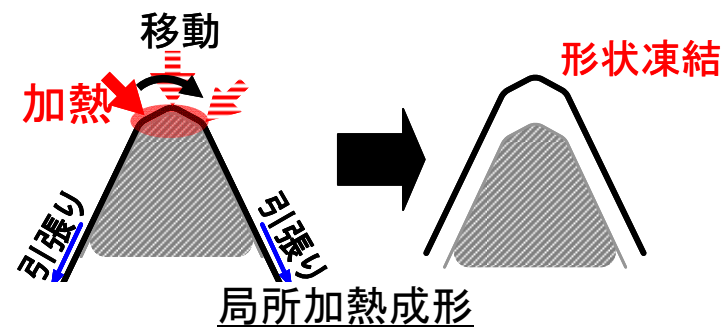
加工技術

翼前縁部品

熱間加工(700℃前後)が必須で金型費、
加工費(加熱, 時間)が高く, 加熱設備の
制約で大型化が困難

加工温度の低温化, 加熱部位の局所化に
よる加工時間の改善と適用部の大型化

チタン合金の低温/局所加熱成形技術の開発



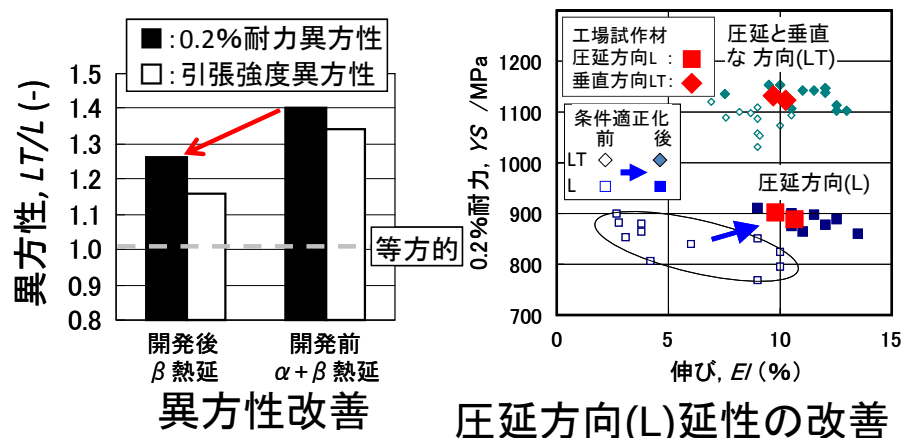
→ 板金部品の製造コスト30%低減, 板材の成形時間50%低減

4. 成果、目標の達成度(4/12) テーマ技術1

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(神戸製鋼所)

鉄鋼用製造ラインを用いて、Ti-9合金板の強度異方性を軽減する圧延方法を開発しコストダウンが可能なことを示した。また、本合金はAMS(Aerospace Material Specification)で示される諸特性についてTi-6Al-4V合金とほぼ同等の性能を有する事を確認した。

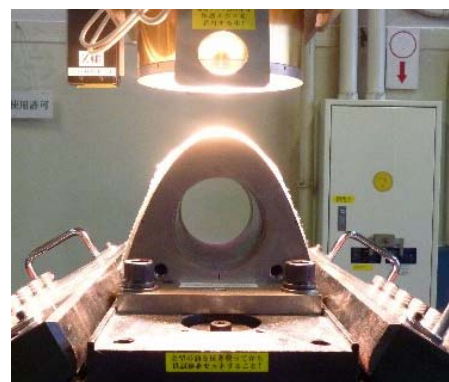


工場生産ラインで試作した薄板コイル



チタン合金の低温/局所加熱成形技術の開発(三菱重工業)

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性手法を開発した。ま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。



局所加熱成形装置



モデル部品(複曲面形状)

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

研究目標

高加工性を有する新チタン合金を開発し、その押出材・鍛造材を対象とした低コスト製造技術を開発することにより、チタン合金部材のコスト低減を図る技術を開発する。

技術課題

- ・部材コストの30%低減
- ・国内メーカーでは製造が難しい大型チタン部品の低コスト化

解決策

合金/素材加工技術開発

- ・Ti-6Al-4Vと同等の特性を持つ
高加工性新チタン合金の開発
- ・開発合金の高加工性を活用した
ニアネット素材(押出/鍛造材)の開発

部品製造技術開発

- ・押出し材成形技術の開発
- ・機械加工における高効率切削、
溶接による大型一体化技術の開発

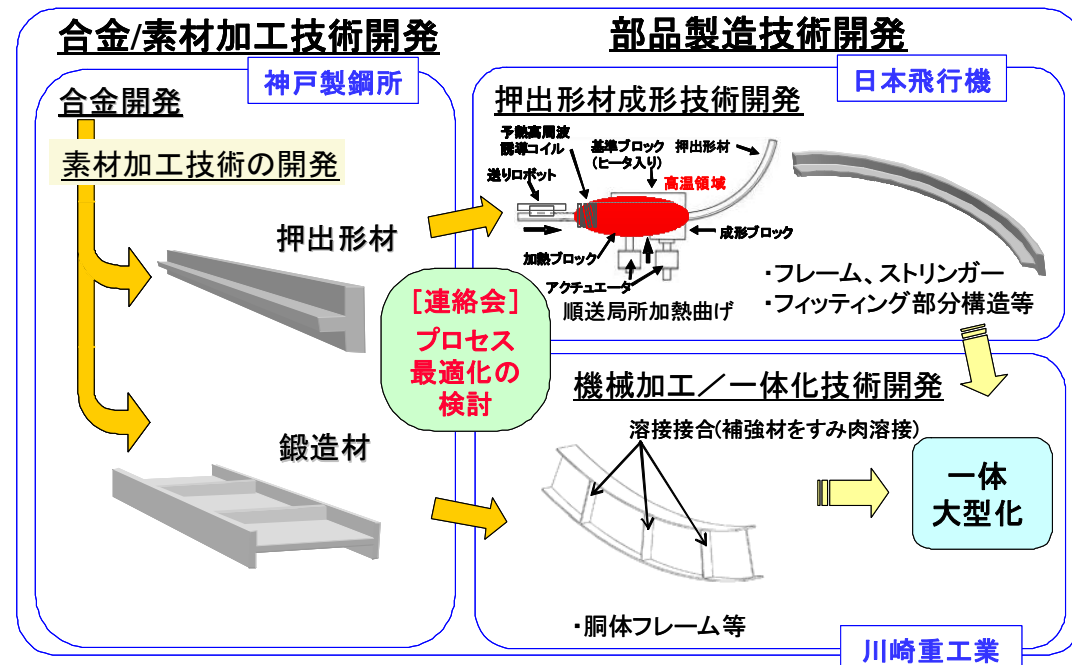


図1 技術開発の概要/研究開発体制

川崎重工業
(全体取り纏め)

(研究成果)

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

高加工性新チタン合金押出/鍛造素材の開発

- ・ 熱間加工性や機械特性に優れる、新チタン合金Ti-531C (Ti-4.5Al-2.5Cr-1.2Fe, -0.1C)を開発した
- ・ Ti-531C合金の機械特性はTi-6Al-4Vと同等以上である。
- ・ 新合金(Ti-531C合金)がTi-6Al-4V合金よりも熱間加工性に優れ、同等以上の機械特性があることを確認した。

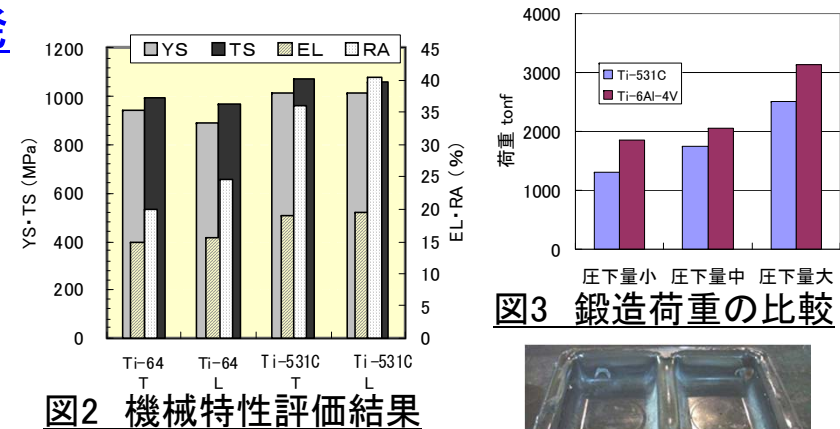


図2 機械特性評価結果

図3 鍛造荷重の比較



図4 H23試作鍛造品

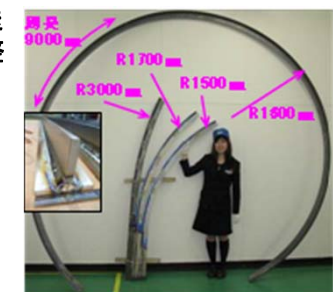


図6 Ti-531C型材成形例

チタン合金押出材の順送局所加熱曲げ成形装置の開発

- ・ 成形プロセス考案とそれに基づく成形装置の製作
- ・ Ti-531C型材を成形条件の調整により目標とする曲率に成形でき、本成形プロセス成立を確認した。
- ・ FEM解析手法を実成形に利用できる見通しを得た。

機械加工/一体化技術の開発

- ・ 切削解析と実切削による検証により、Ti-531Cの最適な切削条件を選定した。
- ・ Ti-531Cのレーザ溶接材は、母材と比較して引張強度は同等、疲労強度は2~3割低下
- ・ レーザ溶接とその後の仕上げ加工により、小型模擬部材を良好な寸法精度で試作でき、より大型品製作の見通しを得た(図7と図8)
- ・ 上記工程を通じてコストを3割低減できる見通しを得た。



図5 装置運転状況

成形条件(温度,送りピッチ等)の調整により、曲率半径の制御(750mm~2000mm)が可能



図7 小型模擬部材



図8 模擬部材

4. 成果、目標の達成度(7/12) テーマ技術3

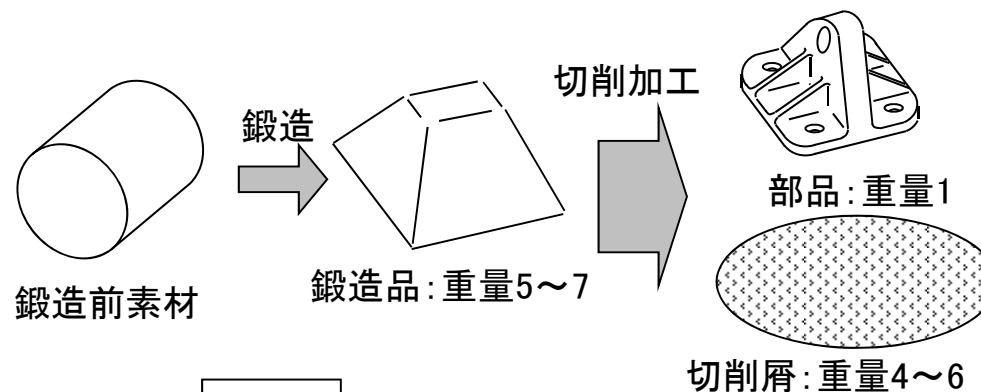
高機能化チタン合金焼結部品の低コスト製造技術の開発

研究目標

- ①SP-700合金をベースとし、チタン合金の焼結に適した混合チタン粉末を開発する。
- ②粉末焼結法により航空機部品に必要な特性を持つニアネットシェイプのチタン合金焼結手法を開発し、航空機部品の低コスト製造の目途を得る。
放電プラズマ焼結法によるプロセスを開発し、複合化による高機能化の目途を得る。

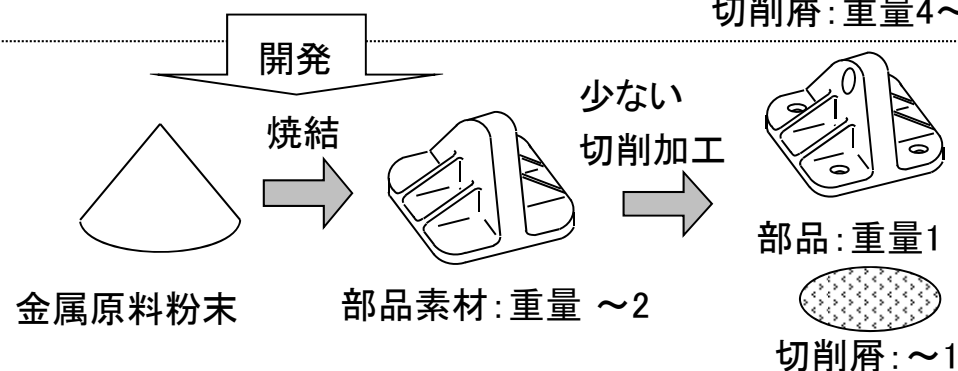
現状の課題

厚板や鍛造品から切削加工して製造されており、部品重量の数倍の素材を使用している。



解決策

粉末から部品に近い形状の素材を作る(ニアネットシェイプ化)ことで、材料の無駄をなくし、機械加工コストを低減する。



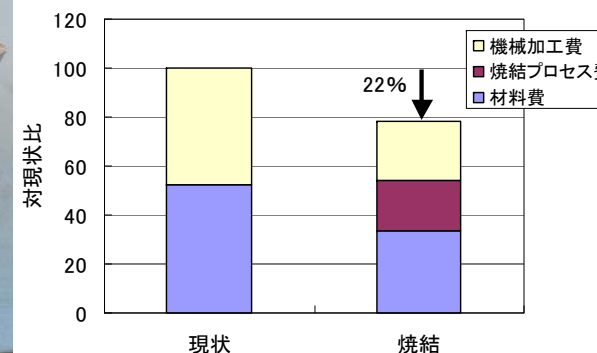
4. 成果、目標の達成度(8/12) テーマ技術3

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チタン合金粉末に適した焼結手法を開発し、焼結体の特性向上を進め実用化の目途を得た。

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高密度焼結体を試作し、TiBによる複合化により信頼性の高い結合構造を得られることが分かった。

特性		プロセス			
		2010	2011	2011A	2012
強度	引張強度	○	○	○	○
	降伏応力	○	○	○	○
延性	伸び	○	○	○	○
	絞り	×	×	○	○
疲労	平滑	○	×	△	△
	切欠	△	△	△	○
損傷許容	破壊靱性	○	○	○	○
	亀裂進展	○	○	○	○



総合的に、開発目標であるTi-6Al-4V鍛造品の特性に匹敵する焼結材料を得ることができた。

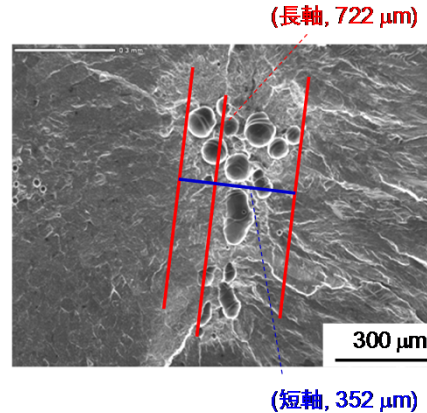
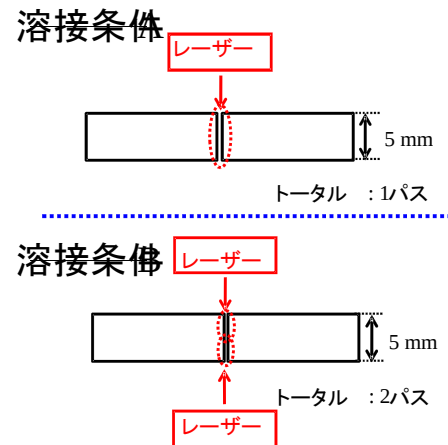
航空機部品を模擬した試作品を製作し、ニアネットシェイプ成形の成立性を確認した。コスト試算から、33%の低コスト化を見込んでおり、更なるニアネットシェイプ化により低コスト化を図る。

個別成果概要

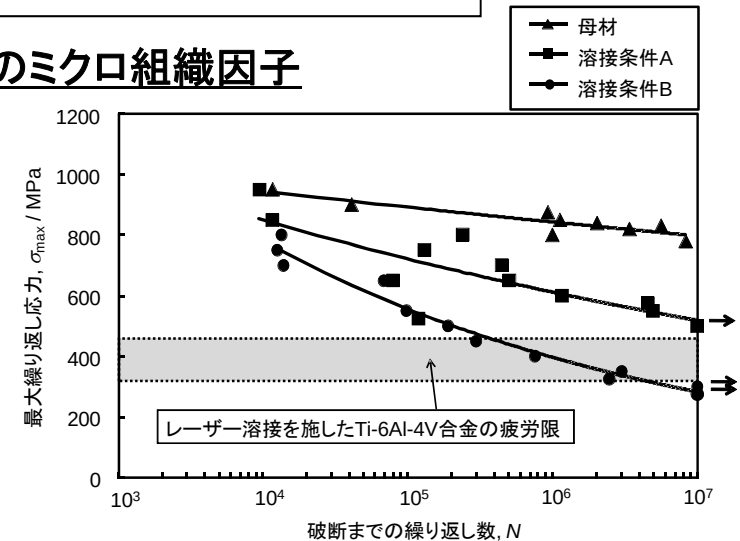
材質評価～東北大学

目標： 目標達成の難易度が高いと思われる素材およびプロセス・加工部品の試験・評価を行い、改善を促す。

1. Ti-531C合金におけるレーザー溶接による疲労特性低下のミクロ組織因子



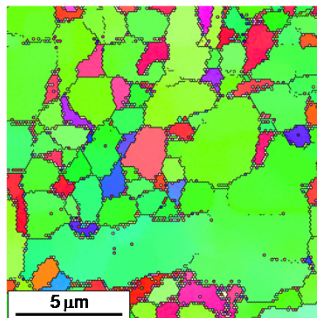
疲労破面に認められる溶接欠陥(ポア)の解析例



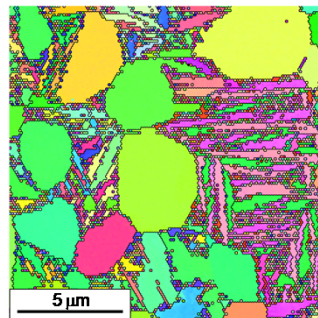
Ti-531C母材およびレーザー溶接材の疲労特性

溶接を施したTi-531Cの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ことが示唆された。

2. Ti-9合金の力学的異方性を軽減するための製造プロセス

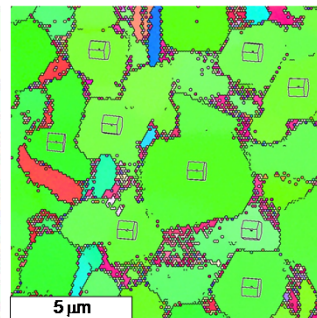


1123 K 溶体化水冷処理を施した試料

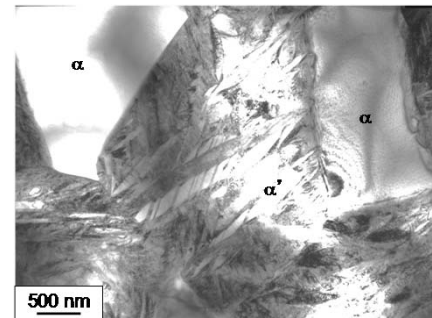


1123 K 溶体化水冷処理を施した試料

結晶方位解析例



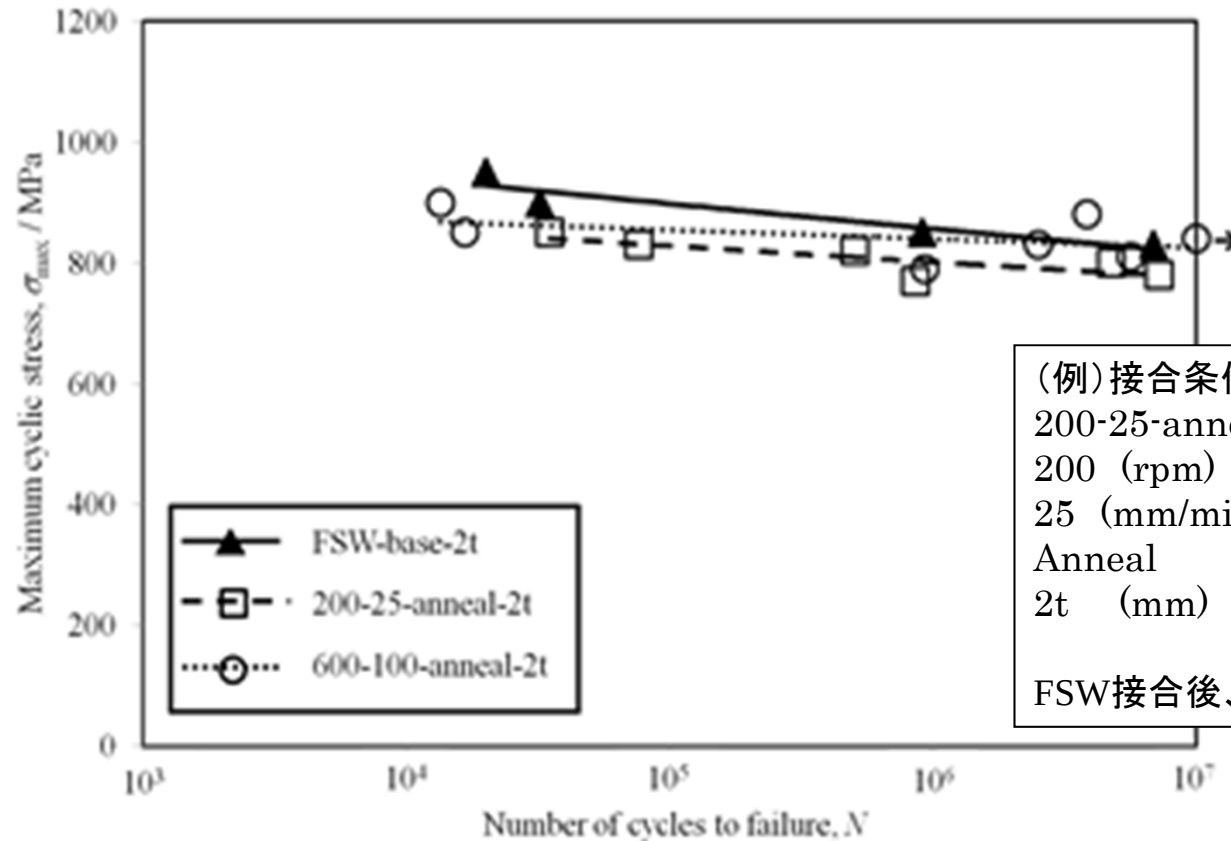
1123 K 溶体化空冷処理を施した試料



1123K 溶体化水冷処理を施した試料の透過電子顕微鏡像

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ことが示唆された。

材質評価～東北大学 続き



(例)接合条件
200-25-anneal-2t
200 (rpm) ツール回転速度
25 (mm/min) 接合速度
Anneal 焼鈍実施
2t (mm) チタン合金板厚

FSW接合後、973K、7.2ksで焼鈍処理実施

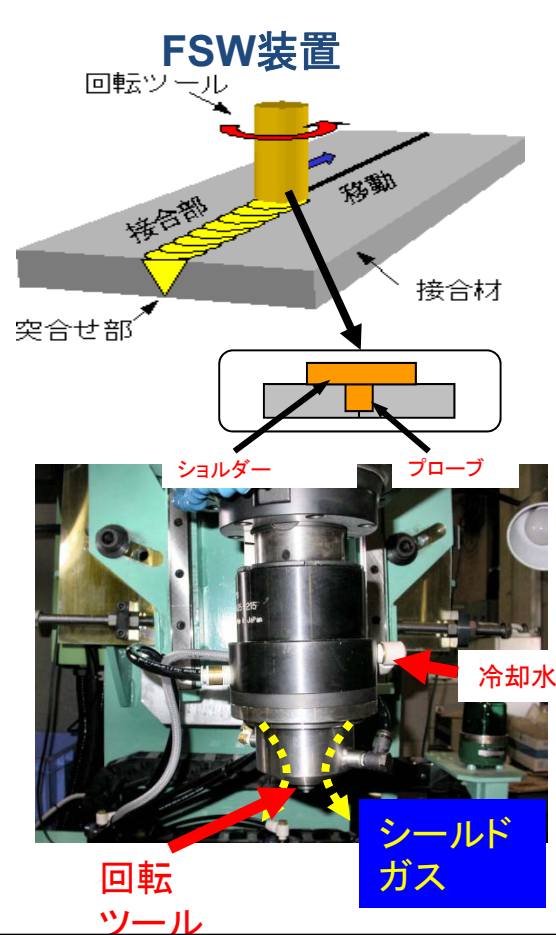
3 FSWによるTi-531C合金接合部疲労特性調査

Ti-531C母材(FSW-base-2t)、および接合条件の異なる2種類のFSW接合材(200-25-anneal-2t)および(600-100-anneal-2t)における最大繰り返し応力と破断に至るまでの繰り返し数との関係(S-N曲線)を調査した。FSW-base-2t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。(接合は、阪大接合科学研究所において実施した)

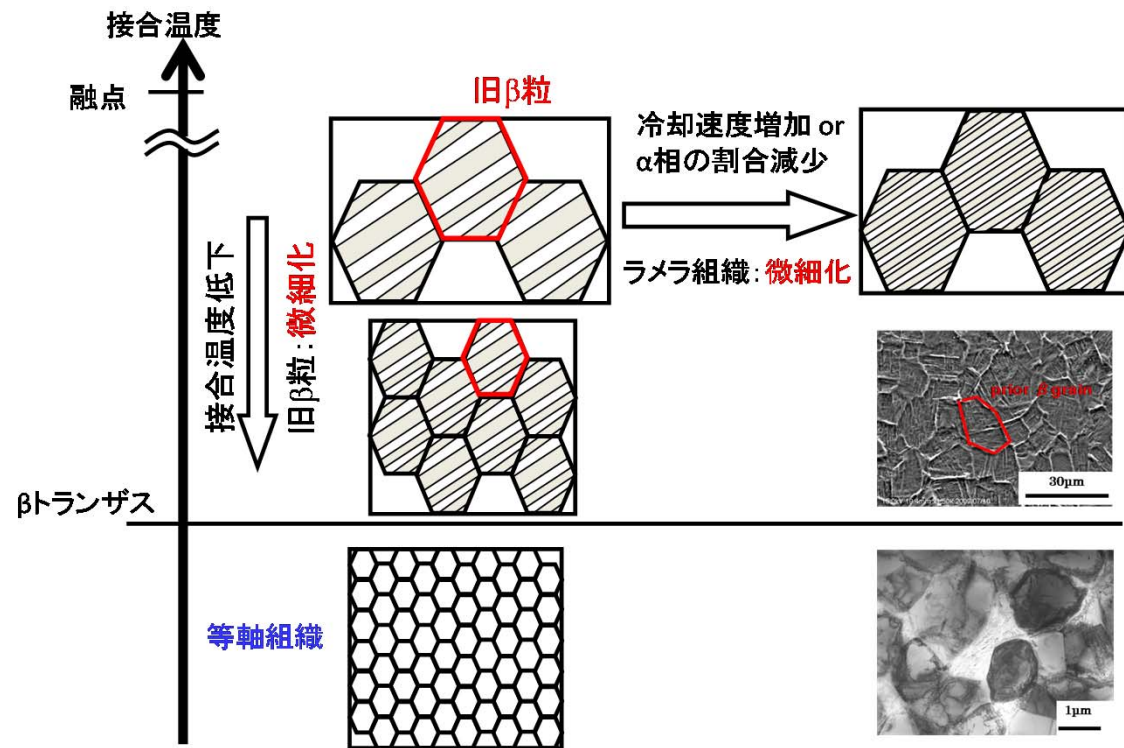
4. 成果、目標の達成度(10/12) 共通技術2

接合技術～摩擦攪拌接合(FSW)～大阪大学

目標：
・FSWによるチタン合金の接合技術を開発する。
・チタン新合金へのFSW適用を図る。



高剛性大型接合装置(最大荷重 5t)
酸化防止機構; 冷却機構



2mm厚の工業用純Ti、Ti-6Al-4V、Ti-9、Ti-531C、
SP700のFSW接合性を評価し、最適接合条件を求め、
新しい組織制御プロセスを確立した。

4. 成果、目標の達成度(11/12) 共通技術3

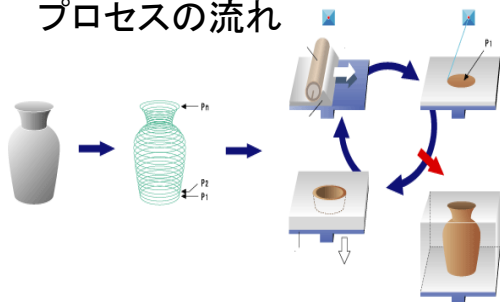
先端粉末造形技術・・・レーザーフォーミング～九州大学

- 目標:
- ・レーザーフォーミング装置を開発する。
 - ・焼結体の相対密度を、実用化可能なレベルまで上げる。

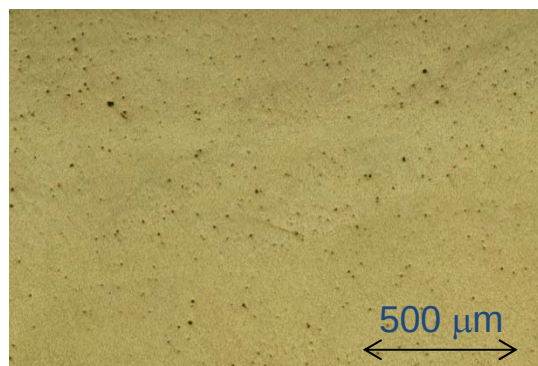
レーザーフォーミング
実験装置 (レーザーヘッド)



プロセスの流れ

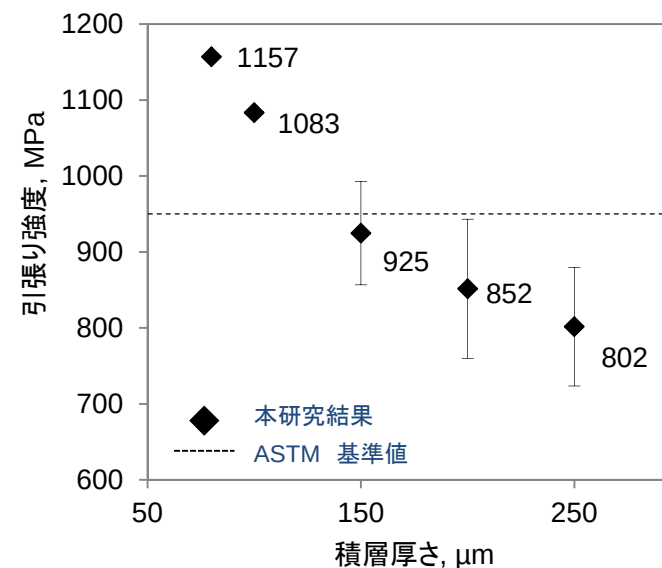


真空中, TILOP64-45, 80 μ m積層



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

より薄い積層厚さを用いることが緻密化・高強度化に有効である
さらに、薄い積層厚さのため高精度化も期待される

種々の造形条件の検討により、相対密度、引張強度、造形時間および欠陥などのバランスから、最適造形条件を求めた。これにより、Ti-6Al-4V造形体の相対密度はほぼ100 %で、引張強度は 溶製材960 MPaに対し1157 MPaであった。

先端粉末造形技術・・・レーザーフォーミング～九州大学 続き



3Dモデル(タービンブレード) 造形したタービンブレード

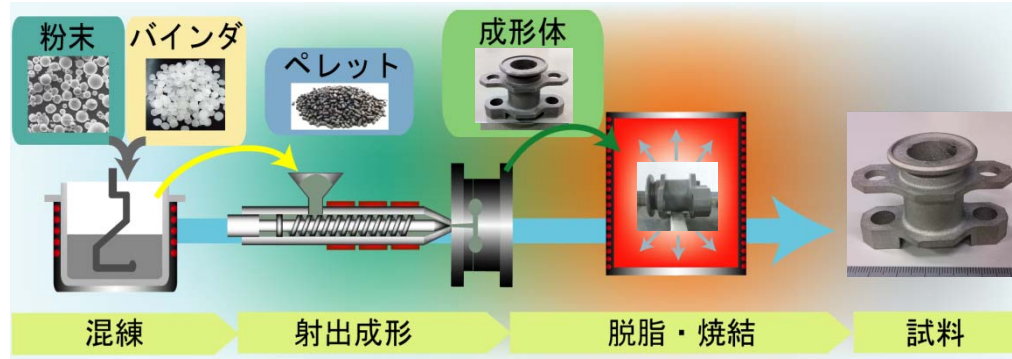
レーザーフォーミングを用いて上手左に示すモデルの小型タービンブレードの造形を行った。タービンブレードの形状は直径33mm高さ15.2mmである。造形条件は220W、160mm/sとし、粉末層厚さは60 μ mとした。

造形した試料を上手右に示す。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。

4. 成果、目標の達成度(12/12) 共通技術3

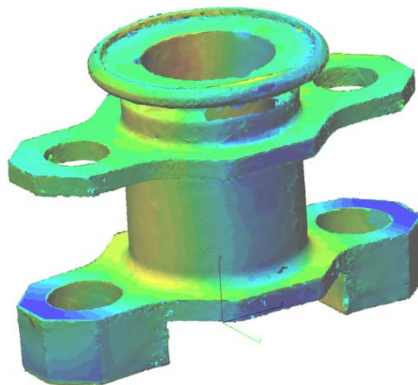
先端粉末造形技術・・・金属粉末射出成形(MIM)～九州大学

目標： チタン合金粉末に適用可能なMIM(Metal Injection Molding)による焼結手法を開発し、大型部品製造の目途を得る。

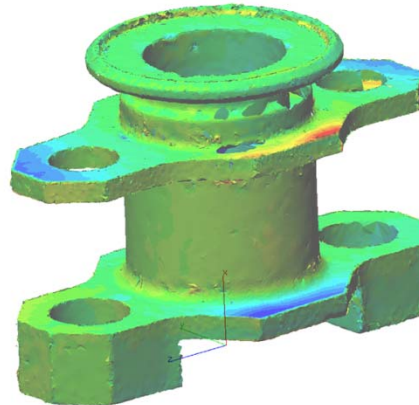


- ✓ 大形
- ✓ 円筒部
- ✓ フランジ
- ✓ 鋭利な角

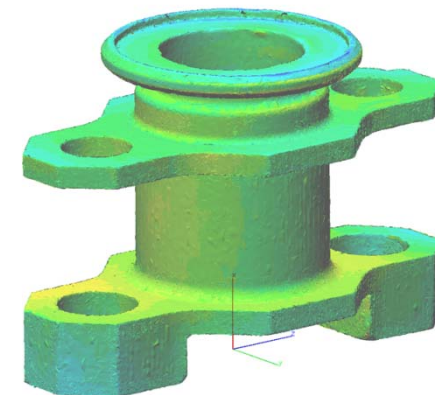
水平脱脂, 焼結



垂直脱脂, 水平焼結



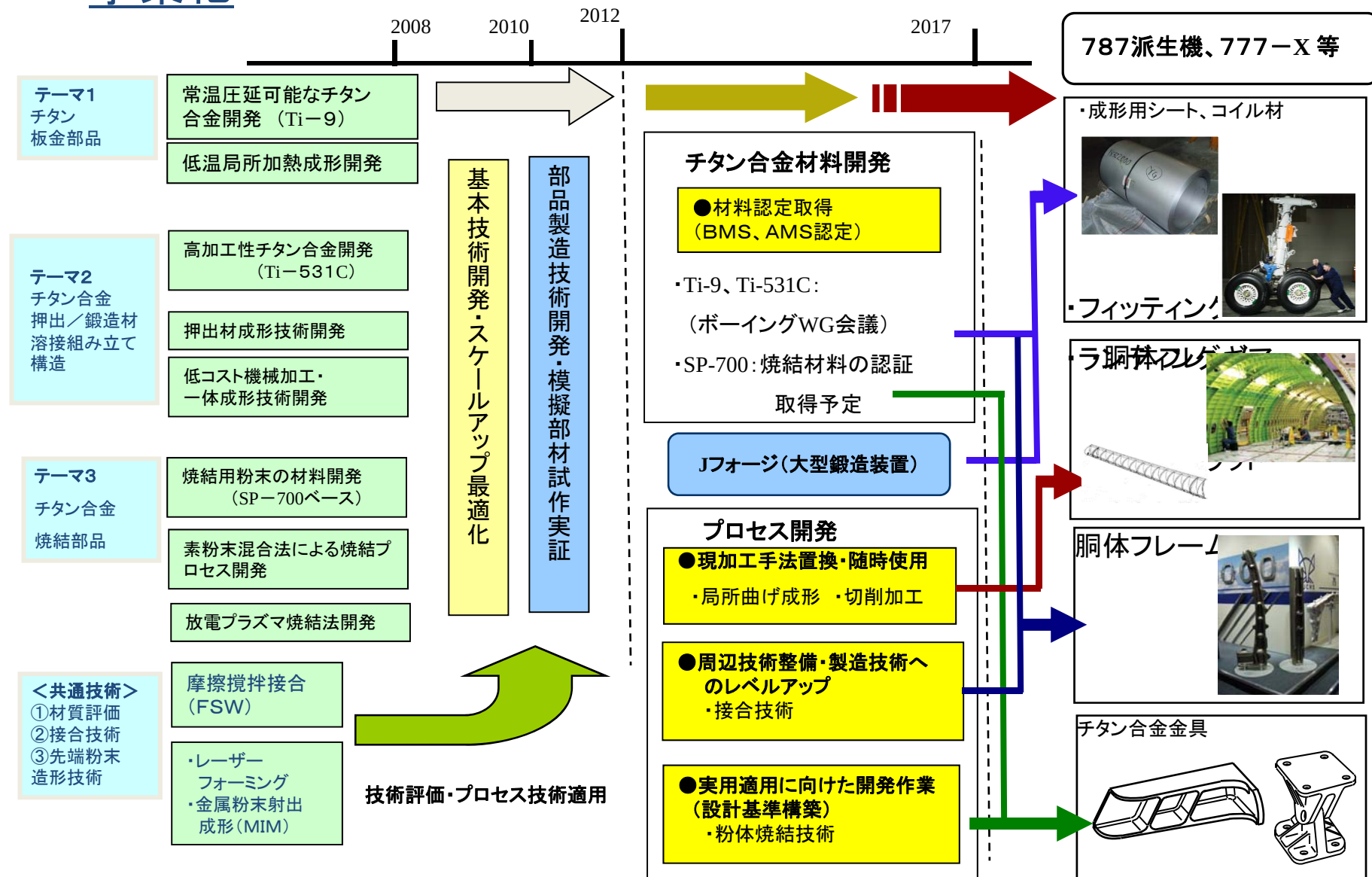
垂直脱脂, 水平焼結



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つつ改良し、寸法精度を向上した。

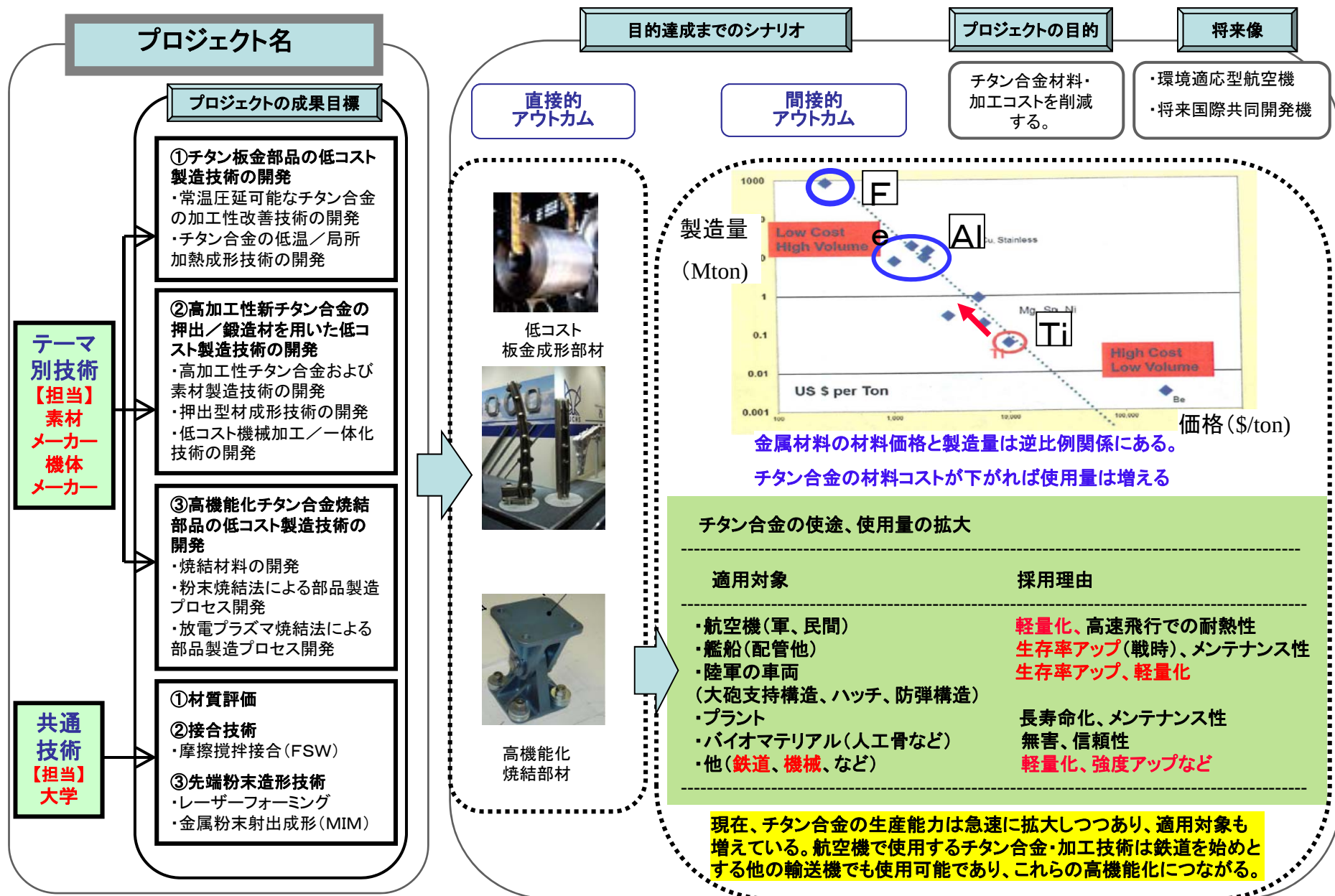
事業化

事業化ターゲット



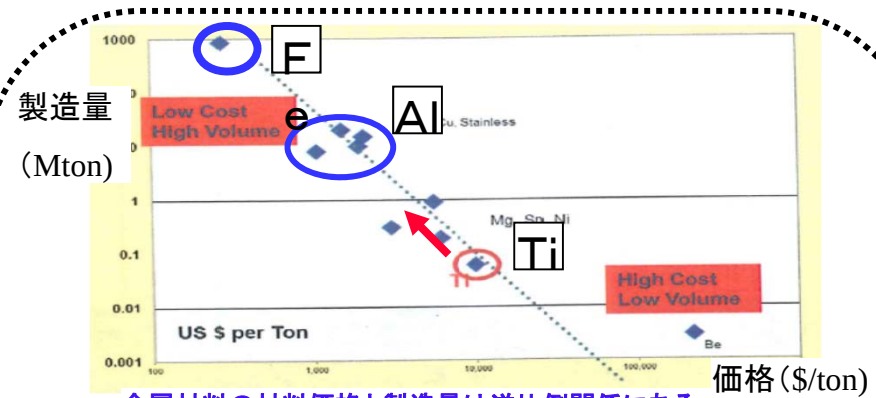
5. 事業化、波及効果

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)



テーマ別技術
【担当】
素材
メーカー
機体
メーカー

共通技術
【担当】
大学



チタン合金の用途、使用量の拡大

適用対象

- ・航空機(軍、民間)
- ・艦船(配管他)
- ・陸軍の車両(大砲支持構造、ハッチ、防弾構造)
- ・プラント
- ・バイオマテリアル(人工骨など)
- ・他(鉄道、機械、など)

採用理由

- 軽量化、高速飛行での耐熱性
- 生存率アップ(戦時)、メンテナンス性
- 生存率アップ、軽量化
- 長寿命化、メンテナンス性
- 無害、信頼性
- 軽量化、強度アップなど

現在、チタン合金の生産能力は急速に拡大しつつあり、適用対象も増えている。航空機で使用するチタン合金・加工技術は鉄道を始めとする他の輸送機でも使用可能であり、これらの高機能化につながる。

6. 研究開発マネジメント・体制等

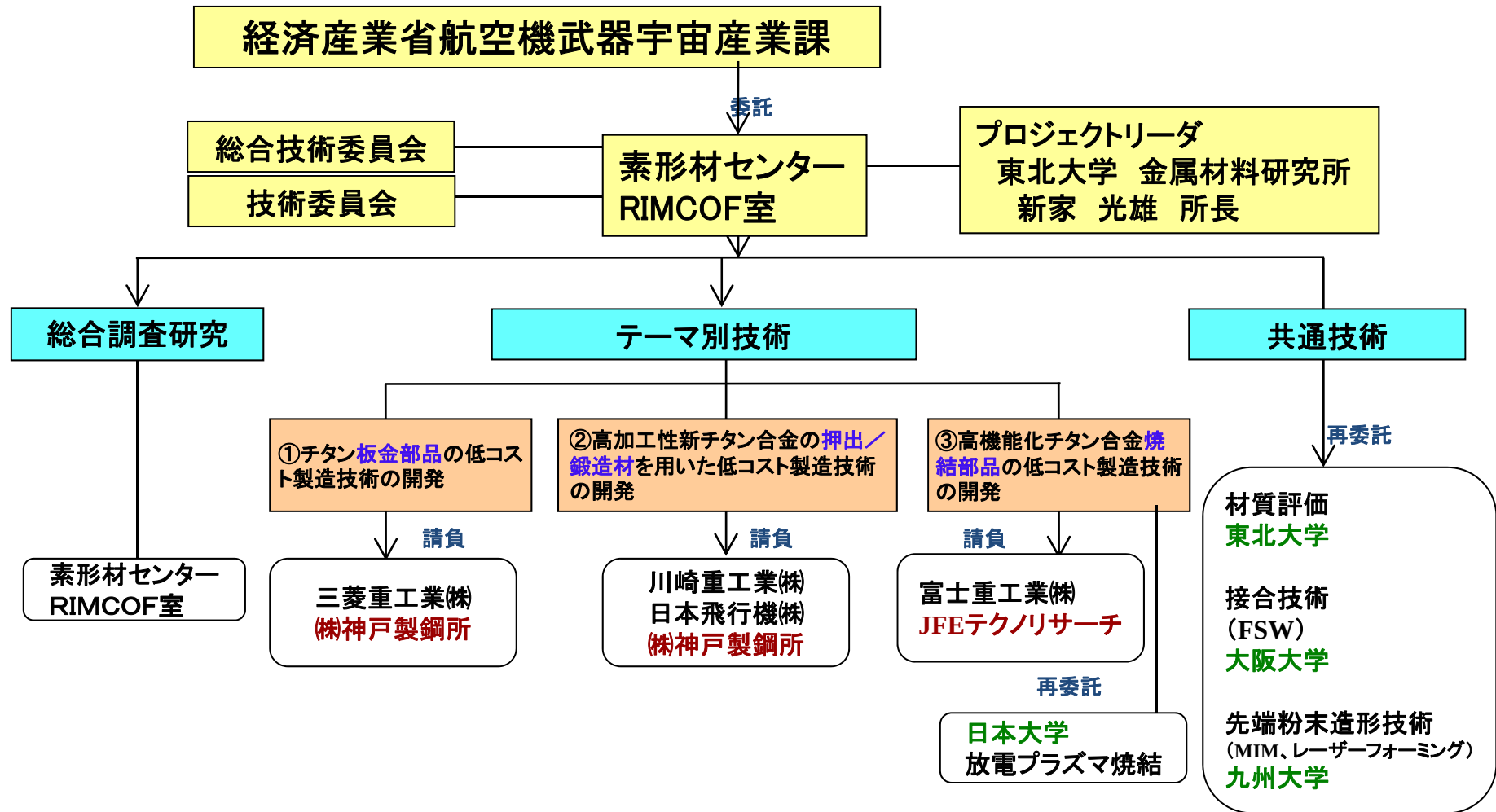
研究開発の実施体制

- 経済産業省からの委託を受けて、(一財)素形材センターのもとで企業6社(請負)、大学4機関(再委託)が実施する。
- 研究開発責任者(プロジェクトリーダー);
東北大学金属材料研究所 新家光雄教授
- 各機関は、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。

調査研究委員会等

- 素形材センターは、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する。
- 総合技術委員会;プロジェクト全体の研究方針、成果等を審議する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。
- 技術委員会;実施機関で構成する委員会を四半期毎に開催してプロジェクトの推進把握と方向付けを行う。

事業実施体制



7. 中間評価の結果

提 言	対 処 方 針
我が国は材料技術に強みがあり、技術の応用範囲も広いため、推進すべき分野である。複合材料関連技術では、日本の優れた複合材料技術を生かして、知的財産権保持または国際標準化によって、世界をリードする戦略をとるのが望ましい。我が国独自の技術として早期確立が望まれる技術については、事業化及び認証取得に向け、産学官の連携によるスピード感を持った取り組みが必要である。	○ 引き続き我が国の強みを一層強化すべく、取り組みを推進してまいりたい。世界をリードしていくため、我が国からの規格策定の場への出席なども含め検討してまいりたい。 ○ 事業化及び認証取得を加速するため、産学官の連携等、適切な体制構築に努めてまいりたい。

評価小委員会のコメント	対 処 方 針
航空機用の素材等として先進的なスペックの素材開発を行うに際しては、提案公募型のみならず、計画研究型の開発手法が適していることもあり得られるので、より良い研究開発メカニズムのあり方についても検討することが望ましい。	○ 先進的なスペックの素材開発を行うに際して、より効率的・効果的に進めるための研究開発メカニズムのあり方についても検討して参りたい。