



CMI研究開発の成果について

The Forth CMI Symposium

2016年10月14日

東京大学生産技術研究所
先進ものづくりシステム連携研究センター
帯川 利之

Consortium for Manufacturing Innovation (CMI)

目次

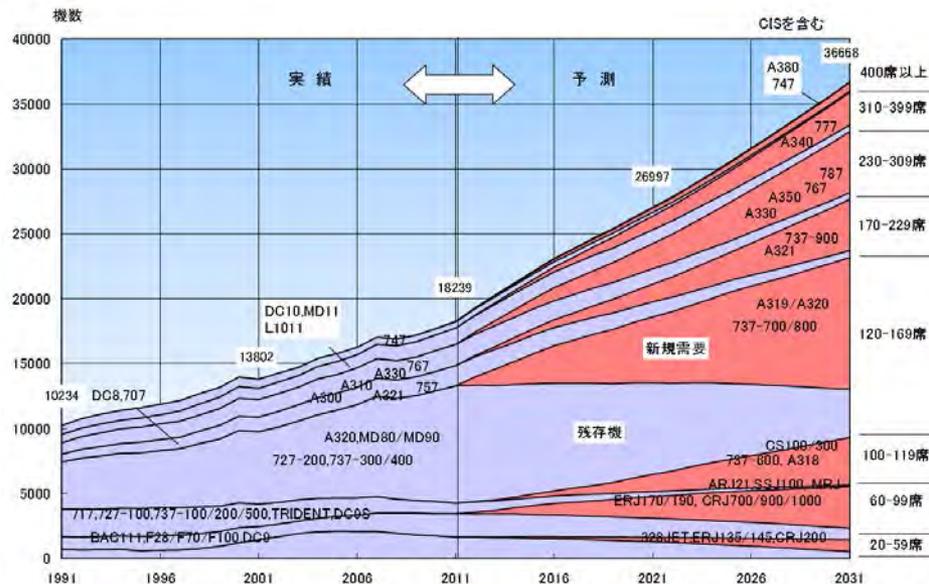
✓ 航空機産業を取巻く環境, CMIの技術開発, 研究課題等

✓ CMIの研究成果の紹介

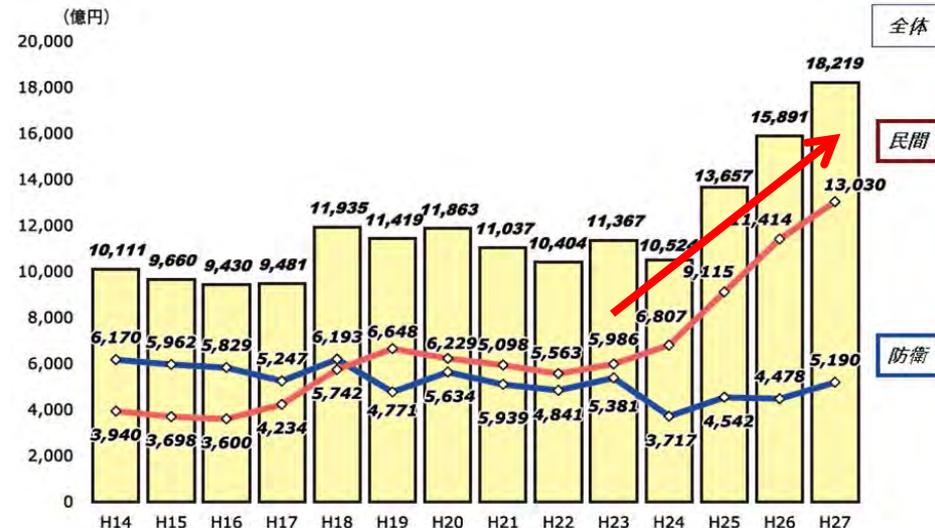
1. チタン合金の高速ポケット加工
2. 高速ポケット加工技術のアルミ合金への展開
3. アルミ・リチウム合金の切削
4. CFRPのドリル加工
5. ロボット切削
6. チタン合金の熱間ストレッチ成形

航空機産業を取巻く環境(1)

- 世界的には民間航空機産業は、**数少ない長期成長産業**のひとつ。
年率約5%の成長が見込まれ、今後20年間で約2万9千機(約300兆円)の市場規模。
- 我が国の民間航空機の生産額は、平成23年度から27年度までの4年間で、2倍以上に急増。
平成27年度の機体部品の生産額、7888億円。
→ 生産量の高い伸びに対応し、製造技術の拡充を図る必要あり



ジェット機の運航機材構成予測



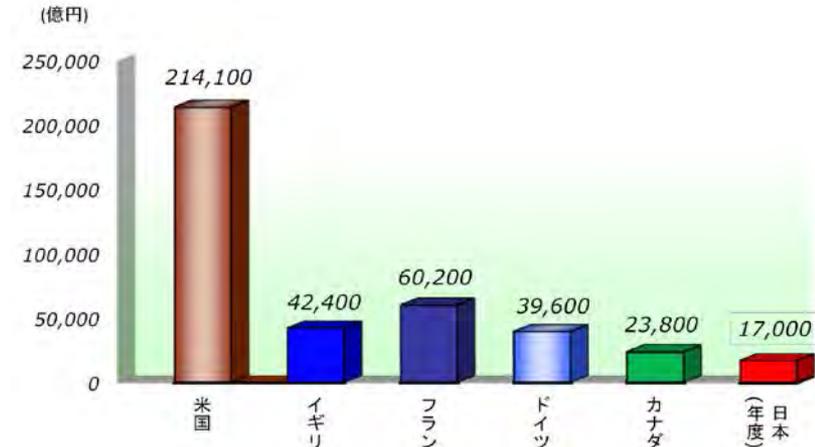
航空機の国内生産額の推移(航空宇宙データベース, 日本航空宇宙工業会, 平成28年7月)

航空機産業を取巻く環境(2)

- 航空機材料の加工技術、特に切削加工技術レベル
 - ・概ね航空宇宙生産額の順
 - ・トップグループ(米、英、(仏)、独)と日本には明確な差
 - ・EUでは継続して製造技術開発に投資
MANUFUTURE (EU)、CATAPULT (英)
 - ・先端製造技術への期待が大 → Industrie 4.0

- 研究拠点の形成(世界的な動向)
 - ・ポーイング 2002年、Sheffield大学
Advanced Manufacturing Research Center (AMRC) の 設立
現在、世界に15拠点
 - ・非競争領域での共同研究、競争領域での実用化研究
国、地方、国際(EU)、民間の資金

- CMI 研究の方向性
 - ・我が国の航空機製造技術の底上げ
 - ・CFRPの切削(主に穴あけ)
トップレベルの技術維持
 - ・チタン合金や先進アルミ合金等の切削競争力強化
 - ・新技術の提案およびキャッチアップ
ロボット切削
熱間ストレッチ成形

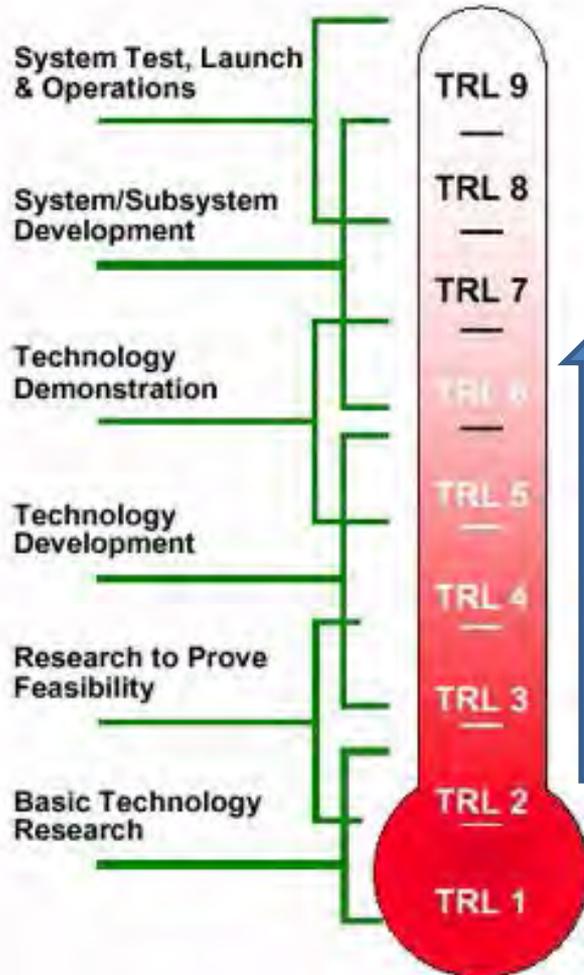


H25年主要国の航空宇宙生産額(航空宇宙データベース、日本航空宇宙工業会、平成27年7月)



AMRC with Boeing, Rolls-Royce Factory of the Future

NASA Technology Readiness Level*



CMIの技術開発

- ✓ 航空機製造技術
切削、塑性加工、接合、組立、修理、検査、リサイクル
- ✓ 将来的には製造技術全般に

CMIの技術開発の特徴

- ・TRLの範囲が広い: 共通課題から個別課題まで
- ・TRL 3-5 common painへの取り組みに重点
(産官学共同研究プロジェクトのレバレッジ効果)
- ・企業と大学の緊密な連携体制(多くの企業技術者の参加)
- ・コンペティターの共同参画
- ・科学的アプローチ(解析・シミュレーション)

通常の大学
研究

Manufacturing Capability Readiness Level (MCRL)*

Program phase	MCRL	State of development
Phase 3 Production implementation	9	Fully production capable process qualified on full range of parts over extended period (all Business Case metrics achieved)
	8	Fully production capable (FAIR Stage 2) process qualified on full range of parts over significant run lengths
	7	Capability and rate confirmed (FAIR Stage 1 without concessions) via economic run lengths
Phase 2 Pre-production	6	Process optimized for capability and rate using production equipment
	5	Basic capability demonstrated using production equipment
Phase 1 Technology assessment and proving	4	Process validated in laboratory using representative development equipment
	3	Experimental proof of concept completed
	2	Applicability and validity of concept described and vetted or demonstrated
	1	Process concept proposed with scientific foundation

CMI

- 世界最先端の高度な航空機製造技術開発により、高付加価値の航空機づくりを目指し、我が国の産業及び経済、環境保護、学術の発展に貢献する。

熱間成形、接合
・チタン合金

リサイクル
・Al-Li合金



CFRP

非破壊検査
・CFRP 部品

環境対応



高速切削
・CFRP
・チタン合金
・Al-Li 合金

高効率化
国際競争力向上



航空機の革新的製造
技術開発

高付加価値生産



柔軟なシステム化
知能化



ロボット利用技術
・シーリング
・ミーリング

CMIの研究テーマ

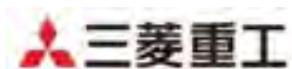
- ◆ **高付加価値生産技術** (Rapid and high value manufacturing)
 - ✓ CFRP、チタン合金、アルミ・リチウム合金の高品位、高速切削加工技術
 - ✓ CFRPの非破壊検査技術
 - ✓ ロボットシーリング、ロボットミーリング(多品種少量生産の自動化)

- ◆ **環境対応型生産技術** (Environmentally conscious manufacturing)
 - ✓ 難削材の環境対応型切削加工技術(切削油剤や電力消費の低減)
 - ✓ チタン合金の接合技術(工程転換による切りくずの大幅削減)

- ◆ **省資源型生産技術** (Manufacturing with the minimum natural resources)
 - ✓ チタン合金の熱間ストレッチフォーミング)
 - ✓ アルミ・リチウム合金の切りくずリサイクル
 - ✓ 切削工具の長寿命化等: 切削加工条件や工具刃形の最適化

CMI メンバー(産業界)

■ 航空機



■ 工作機械



■ 切削工具



■ 材料・切削油



航空機部品の切削加工：被削材料の変化

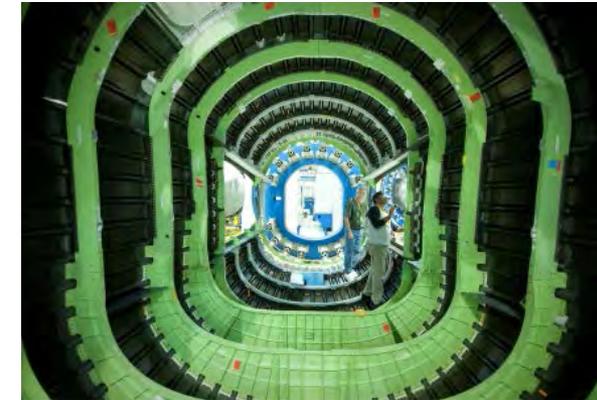
- CFRPの採用によるチタン合金の増加
 - アルミ合金とCFRPとの電位差によるガルバニック腐食
 - アルミ合金とCFRPとの線膨張係数の差による機体の大きな熱変形



アルミニウム合金からチタン合金に
問題点の解消

- 1機当たりのチタン素材の使用量
 - 787: 90-120 ton (中型機)
 - 777: 60-70 ton
 - A350: 90 ton
 - A380: 80 ton

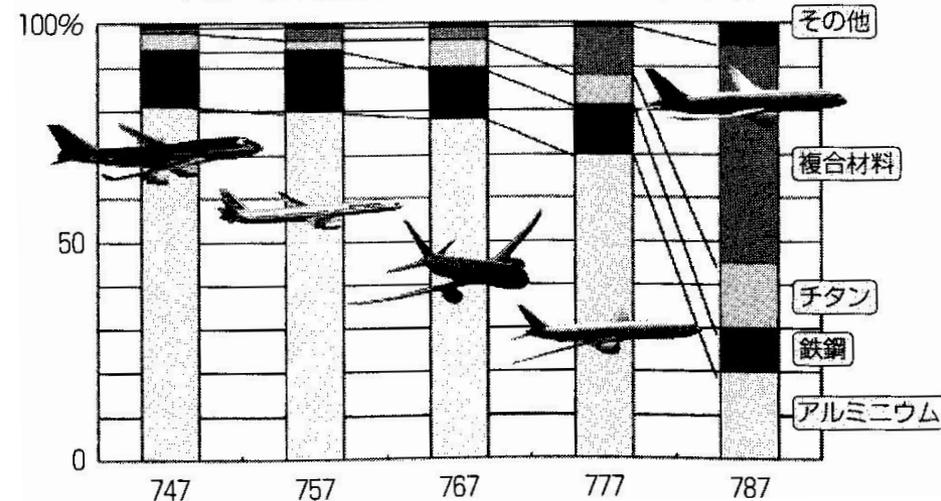
*約85%素材を切削



787の機体内部構造

ボーイング航空機における構造材の変遷

出所：日本航空宇宙工業会 会報 平成18年3月



目次

✓ 航空機産業を取巻く環境, CMIの技術開発, 研究課題等

✓ CMIの研究成果の紹介

1. チタン合金の高速ポケット加工
2. 高速ポケット加工技術のアルミ合金への展開
3. アルミ・リチウム合金の切削
4. CFRPのドリル加工
5. ロボット切削
6. チタン合金の熱間ストレッチ成形

1. チタン合金の高速ポケット加工(1)

■ ポケット加工の高速・高能率化: 加工工程の短縮

・荒削り→仕上削り→手仕上げ → 荒削り→仕上削り

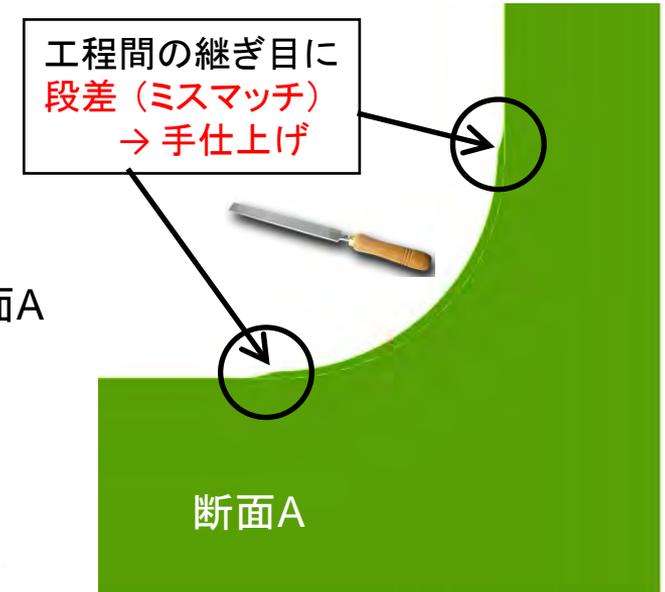
・手仕上げ不要の切削加工技術の確立 ← 磨きレス金型加工技術 (日本のお家芸)



■ 技術目標

- ・切削面の段差の解消 → 手仕上げ不要
- ・環境対応加工: ミストの利用による高速切削

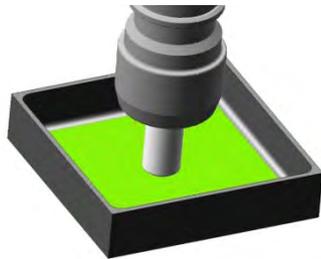
コストアップ要因: 段差の手仕上げ
 ミスマッチ⇒20 (25) μm以下
 25 μm: 1 inch/1,000



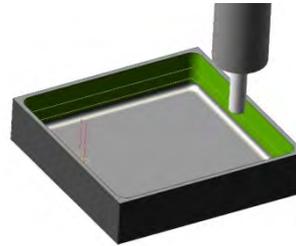
通常の切削面

1. チタン合金の高速ポケット加工(2)

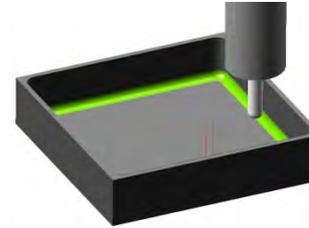
従来加工法



底面加工:大径刃具



側面加工:小径刃具



フィレット部:ボール状刃具

新加工法

- ✓ 切削面の段差解消のための工夫
 - ・高速仕上げ削りにおいて, 摩耗しにくい, びびりにくい刃形, 材種, 加工条件
 - ・.....

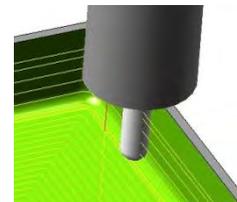
- ✓ 迅速なコーナ加工

- ✓ 側壁での軸方向切込み深さの増大

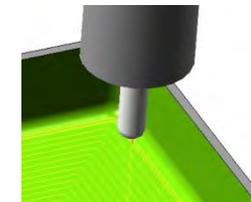
10mm → 30mm



標準モデルでの
ポケット加工
(深さ 30mm)



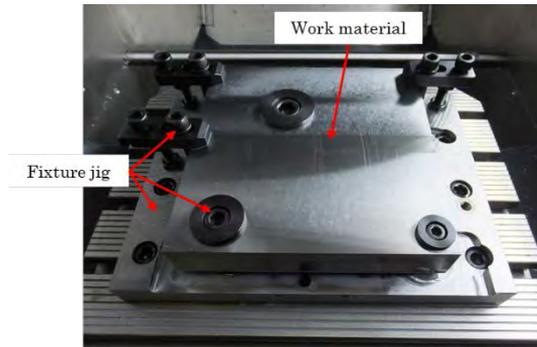
3回の周回加工



1周の側面加工

1. チタン合金の高速ポケット加工 (3)

■ 平成27年の加工モデル



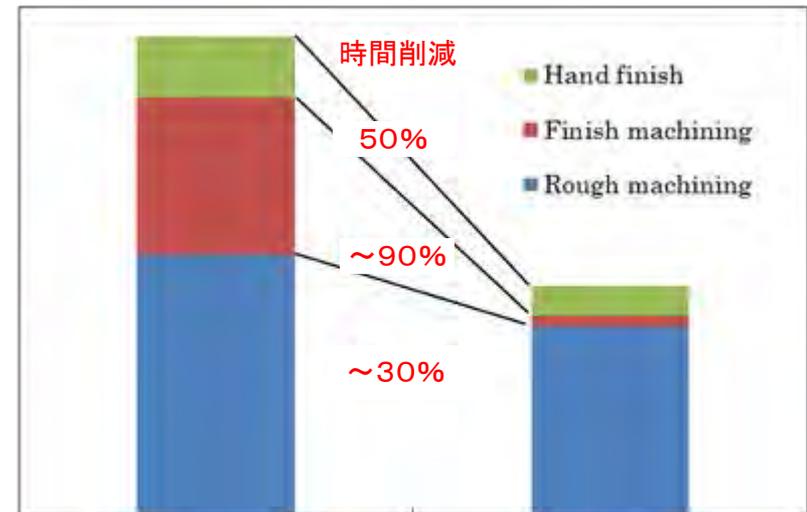
■ 成果 (加工時間で評価)

1. ミスマッチのない仕上げ加工技術の確立
手仕上げ: 50%短縮
(ポケット加工の部位以外の手仕上げ)
仕上げ削り: 約90%短縮
2. 荒削り: 約30%短縮
3. 総時間: 約50%短縮



重工3社の評価:

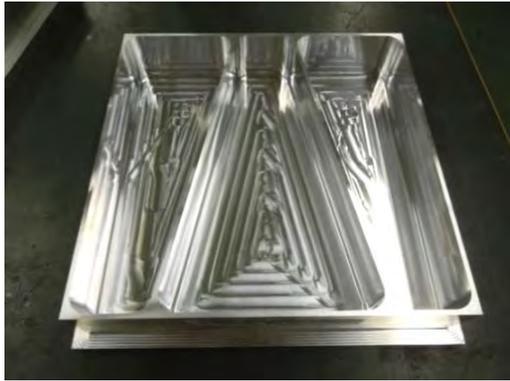
チタン合金のポケット加工技術開発 ⇒ 完了



成果 (加工時間で評価)

2. 高速ポケット加工のアルミ合金への展開(2)

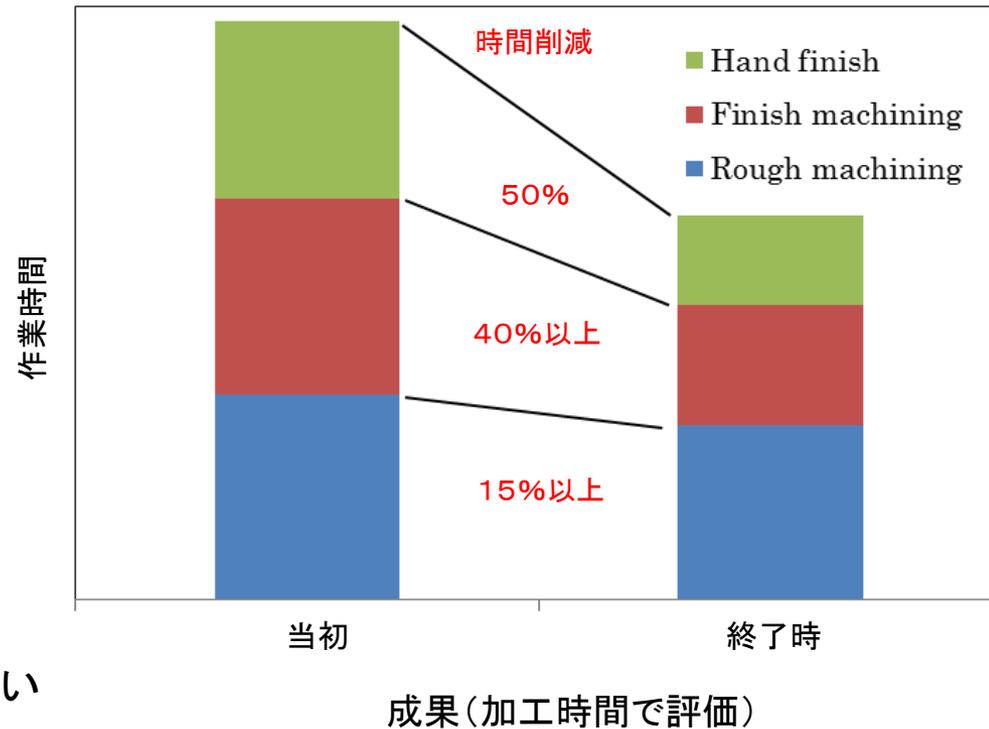
■アルミ合金のポケット加工の標準モデル



■成果(加工時間で評価)

1. 手仕上げ: 50%短縮
(ポケット加工の部位以外の手仕上げ)
仕上げ削り40%以上短縮
2. 荒削り: 15%以上短縮

- ★当初よりチタン合金の知見を適用
加工時間の短縮: チタン合金ほど大きくない
軸方向切込み: 研究開始当初から50 mm



3. アルミ・リチウム合金の切削(1)

- アルミリチウム合金の切削後の変形が大きい
 - ・物性値の影響: 熱伝導率 Al-Li alloy < Al alloy
→ 切削温度が高い
 - ・切削残留応力が大きい。薄板では一般に、
切削残留応力 > 素材の残留応力
 - ・コスト高の要因: 切削後の矯正作業、低切削速度



正面フライス加工後に変形したAl-Li板
(両側の把持部は加工後に切断)

- アルミリチウム合金の変形量の低減
 - ・切削残留応力の低減(切削加工技術で最も難しい課題)
 - ・切削加工のデータ不足、学術的な報告はほとんど無い

- 切削現象の解明: 有限要素法の適用
 - ・アルミリチウム合金(工作物)
温度、ひずみ速度を考慮した構成方程式
Johnson-Cook 型のパラメータ同定
熱物性値(温度依存性)の計測

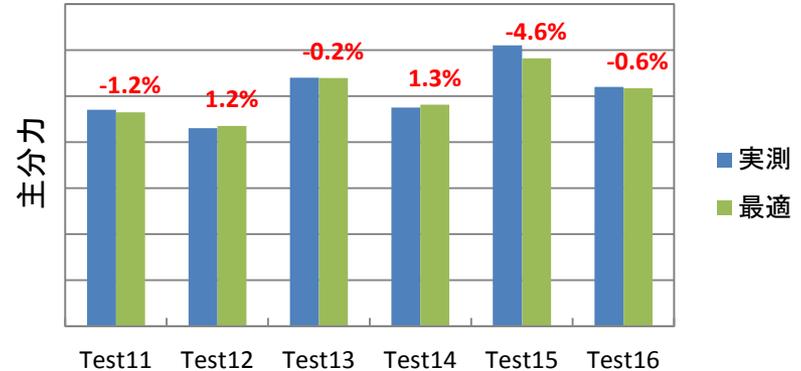
$$\sigma = (A+B\varepsilon^n)(1+C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1-T^{*m})$$

A: yield stress, B: strain hardening constant,
 ε : plastic strain, n: hardening exponent,
 C: strain rate constant,
 $\dot{\varepsilon}^*$: normalized plastic strain rate,
 T*: normalized temperature,
 m: temperature exponent

3. アルミ・リチウム合金の切削(2)

■ 加工された板材の変形(ひずみ)低減

- ・制御パラメータ
 - 工具
 - 切削条件
 - 切削工程・工具経路
 - 冷却法(クーラント)



■ 有限要素解析 (当面, 二次元切削)

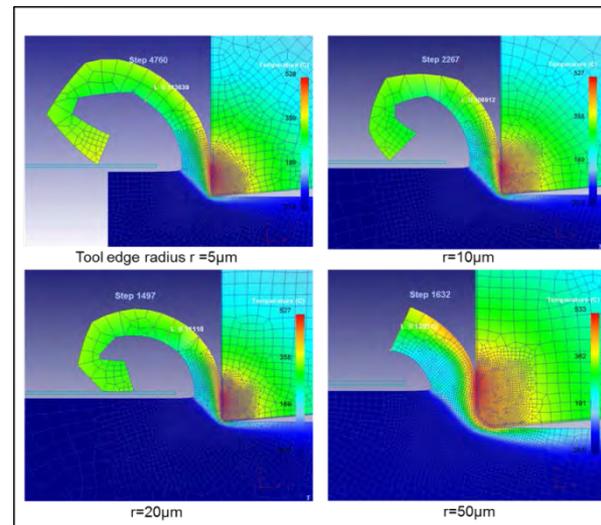
→ 残留応力の予測と制御

- ・影響因子
 - 切削速度
 - 切取り厚さ
 - 刃先の丸み
 - 逃げ面摩耗幅
 - クーラントの有無



残留応力抑制法
 > 実験により実証
 > 予測法の確立

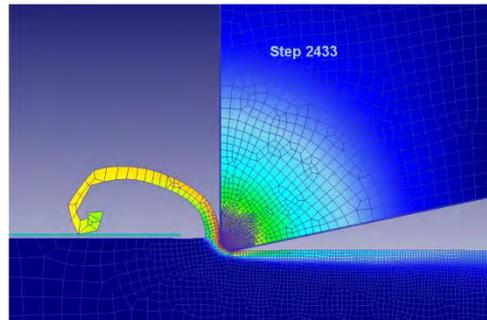
有限要素解析モデルの妥当性



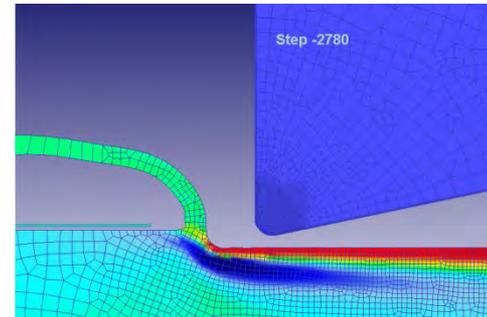
刃先丸みの影響

3. アルミ・リチウム合金の切削(3)

- ✓ 有限要素解析による予測



切削温度



残留応力

- ✓ 正面フライス削り



Al-Li 合金板の正面フライス切削実験

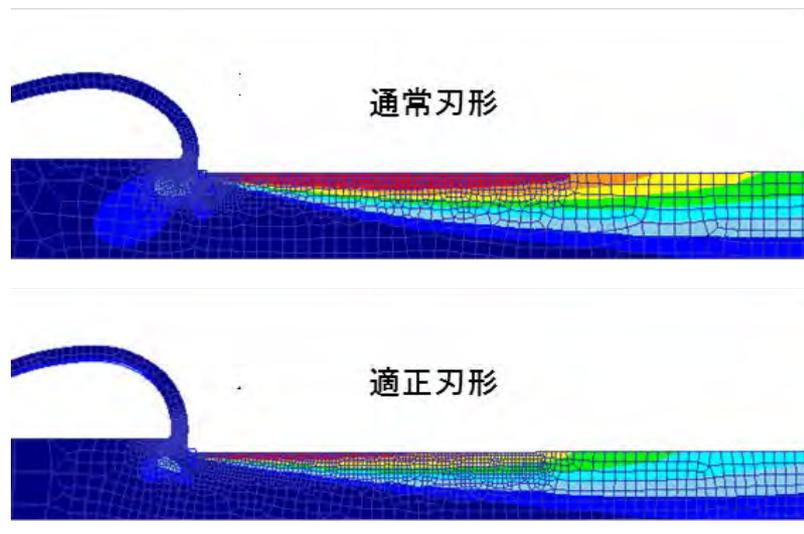


ポータブル型X線残留応力測定装置

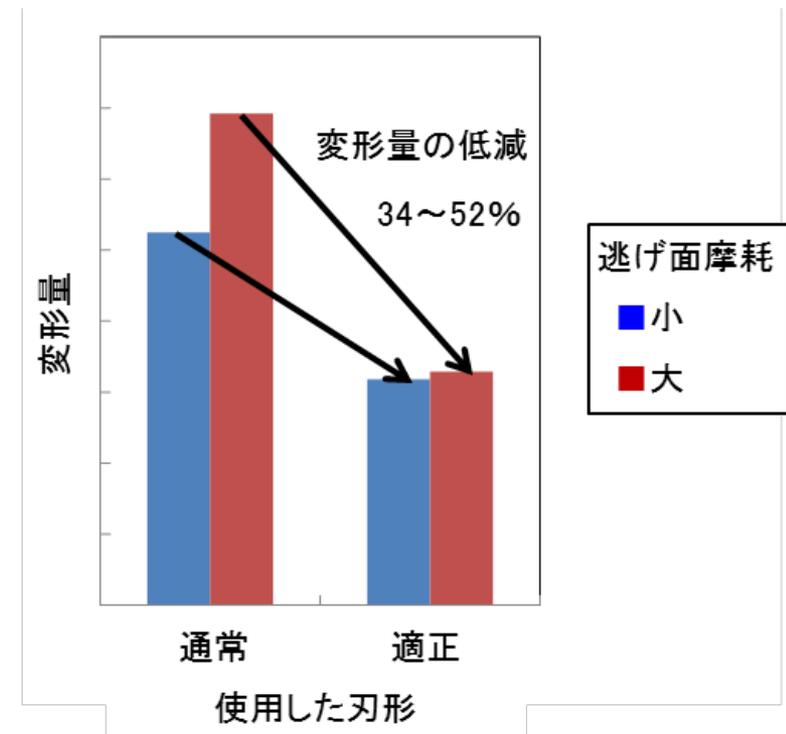
3. アルミ・リチウム合金の切削(4)

■ 成果

1. 変形量: 30%以上軽減
2. 有限要素法: アルミリチウム合金の切削モデリングを確立



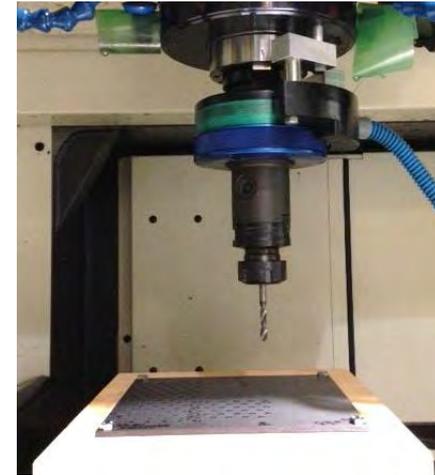
工具形状最適化による残留応力抑制効果 (FEM解析)



変形量抑制効果

4. CFRPのドリル加工(1)

- ・デラミネーション(剥離)の抑制
 - ・工具摩耗の抑制
 - ・切削条件の最適化
 - CFRP内最高温度の制御(劣化防止)
 - ・大孔径, 重積材に対する切削条件の最適化
- ✓ 数値解析による切削力, 切削温度, 工具摩耗, 切りくず流出方向の予測
+ 工作物内(三次元)温度履歴の予測

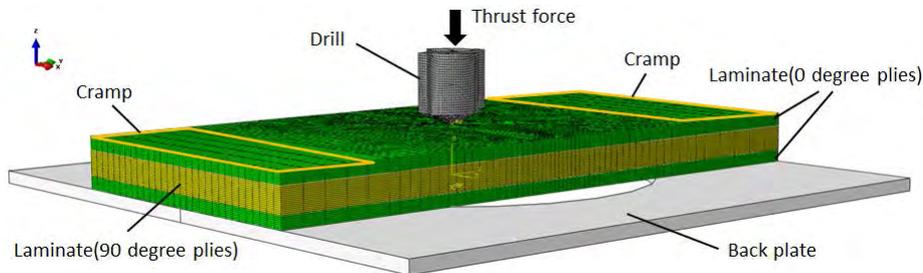


切削実験

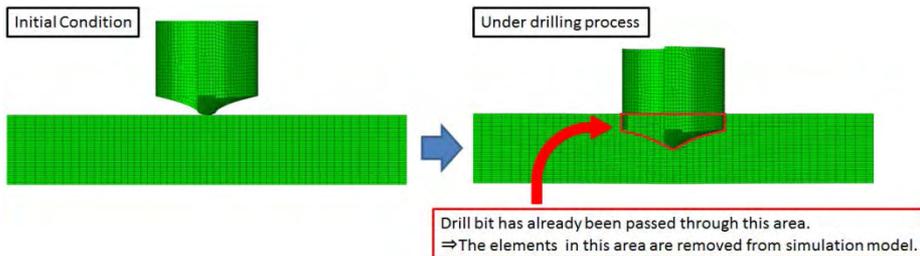
- ・スラスト力の増加 ➡ 剥離の危険性大
- ・切りくず流出方向 → 半径方向 ➡ スラスト力の低下 ➡ CFRPの剥離の抑制
→ 軸方向 ➡ (重積材の場合)CFRPの孔内面の損傷抑制
- ・切削温度の増加 ➡ CFRPの劣化
- ・工具摩耗の増加 ➡ スラスト力の増加 ➡ 剥離の危険性大
➡ 切削温度の増加 ➡ CFRPの劣化

4. CFRPのドリル加工(2)

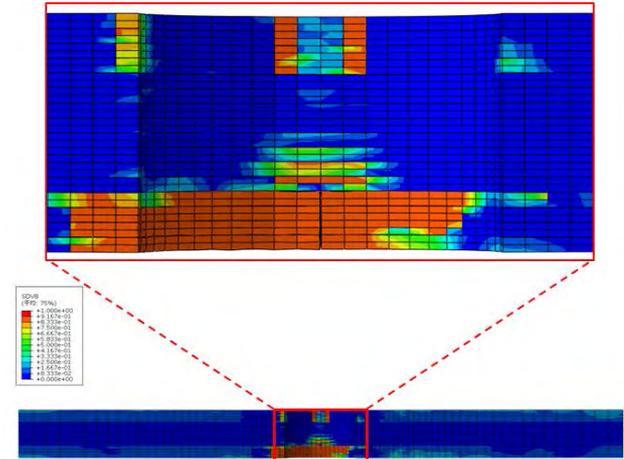
- 有限要素による損傷モデルの構築
 工作物内の損傷を重視した解析
 ドリル入口での損傷(剥離): 積層の引き上げ
 ドリル出口での損傷(剥離): 積層の押し下げ



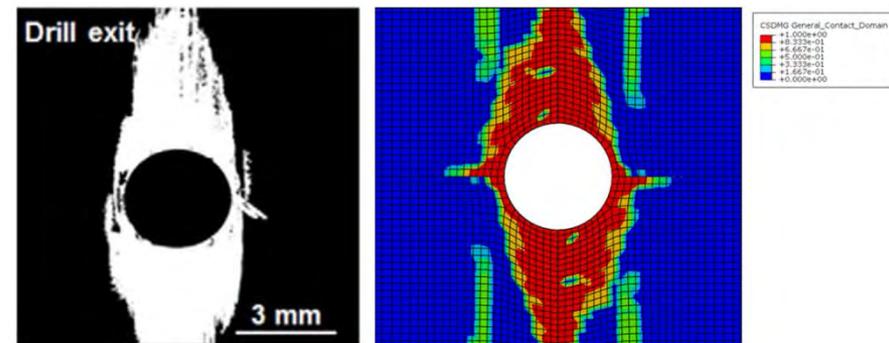
有限要素モデル



簡易切削モデル



CFRP内部の損傷(横断面)



実験

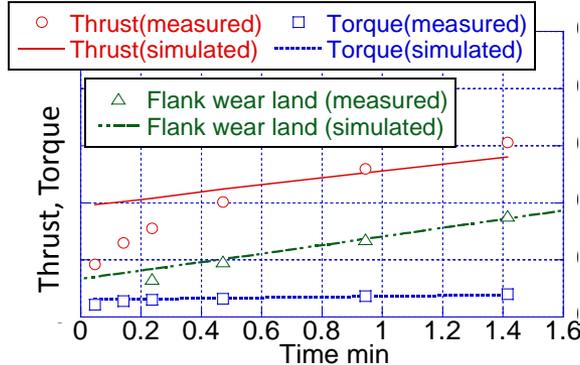
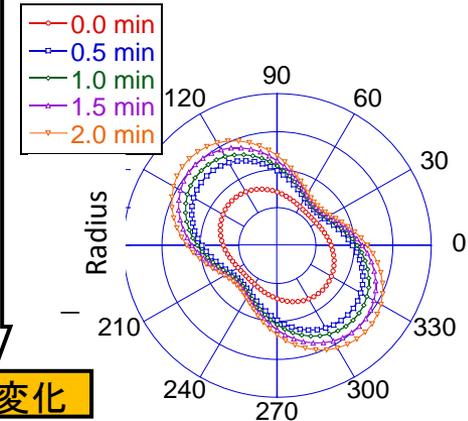
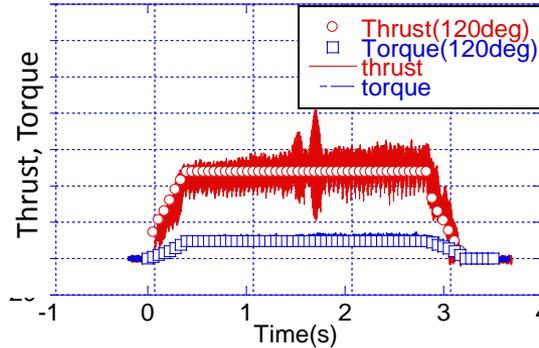
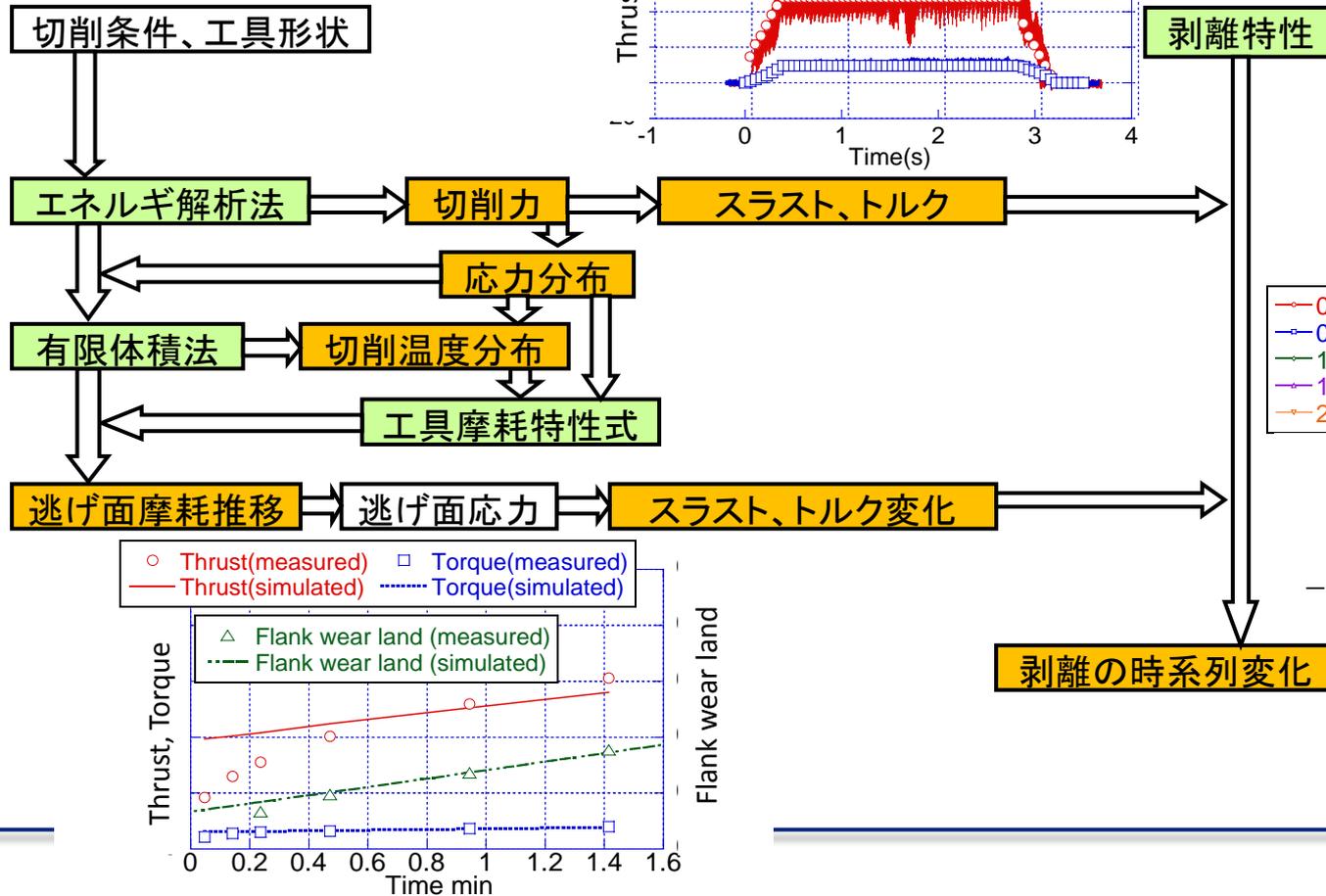
解析

出口での損傷

4. CFRPのドリル加工(3): 予測システム

■ エネルギー法

- ・切削力、切削温度、工具摩耗
- ・ドリル出口での剥離



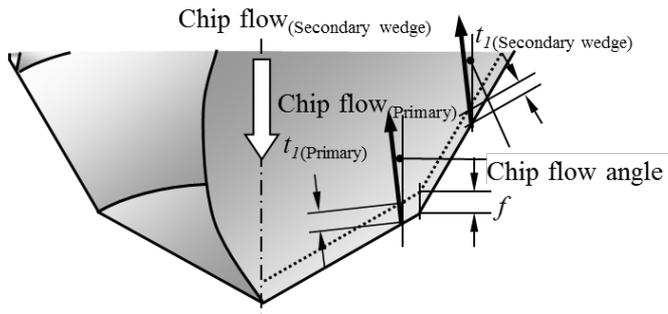
4. CFRPのドリル加工(4)

■二段切れ刃のドリルへの適用 (平成25年度までの成果)

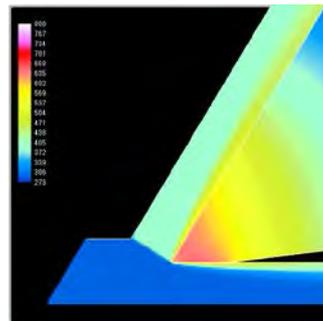
・ドリルの抜け際

切りくず流出方向が大

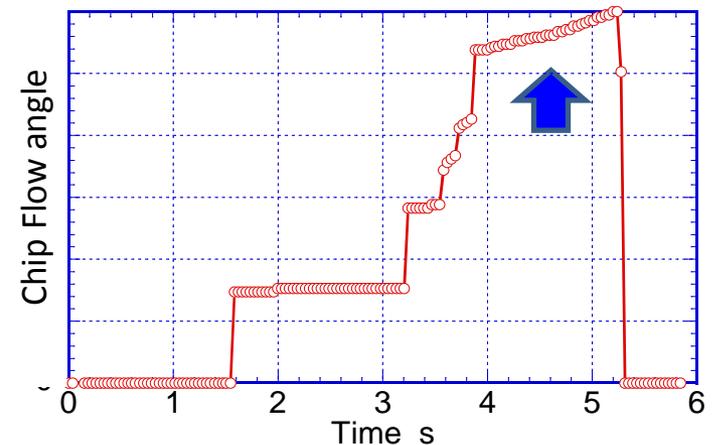
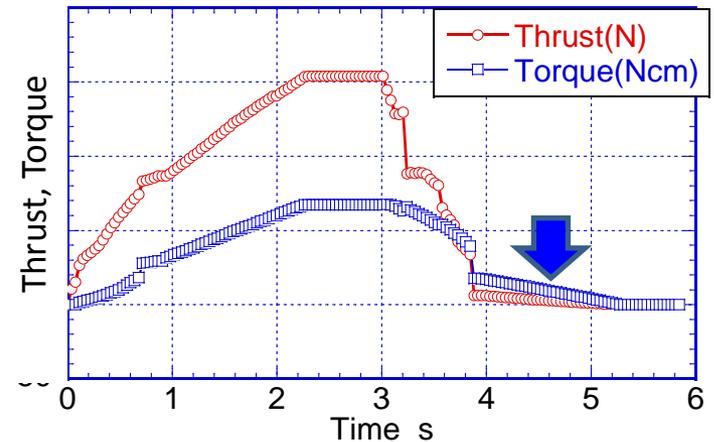
- 半径方向
- スラスト力の低下
- CFRPの剥離の抑制



切れ刃モデル



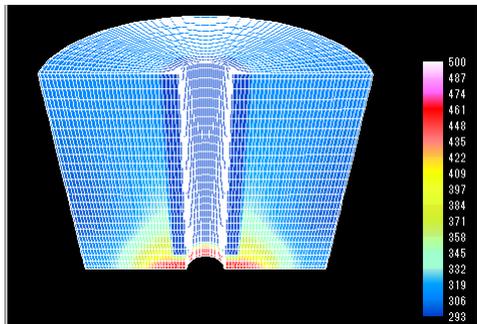
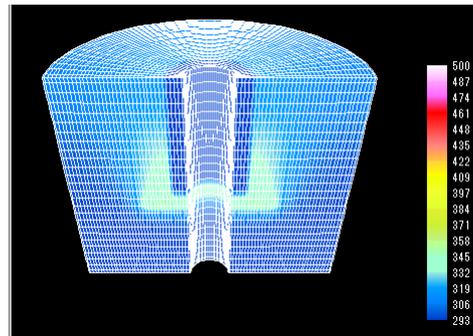
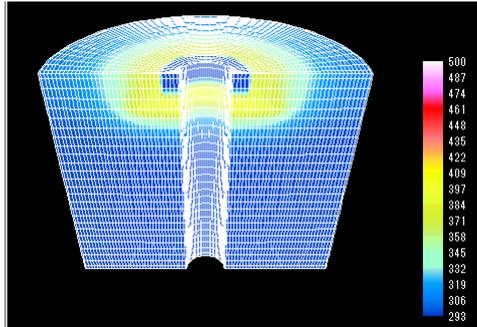
切削温度解析例



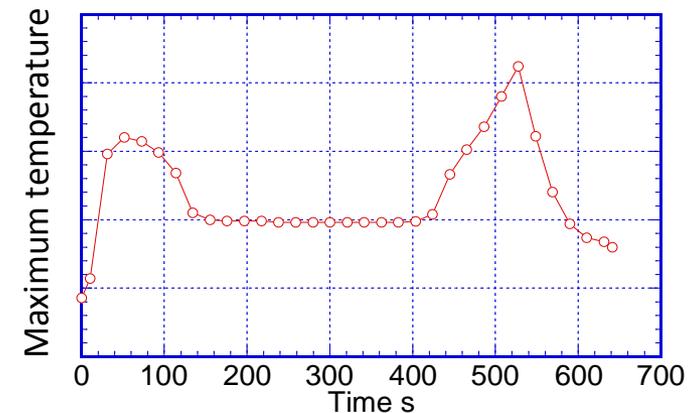
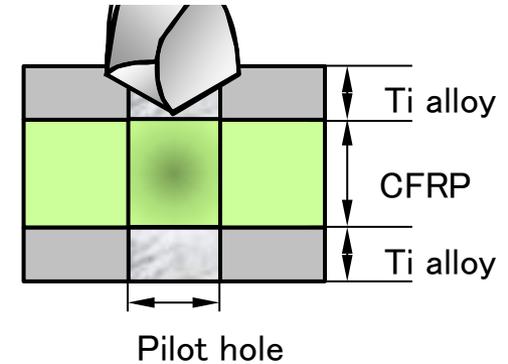
切削力と切りくず流出角

4. CFRPのドリル加工(5)

- チタン合金とCFRPの重積材
 - ・穴あけにおける工作物内温度分布予測
 - CFRPの熱的損傷の回避



- ・スタック材内部の温度変化.
- ・チタン合金切削時の高温がCFRPに影響



工作物内の最高温度
(CFRP内の最高温度ではない)

5. ロボット切削(1)

✓ケミカルミリングから機械的なミリングへ

- ・排出物の処理費削減
- ・設備投資の削減
- ・生産の柔軟性増大

✓ロボットミリングの実現

- ・高速主軸による高能率切削
- ・ロボットの動特性の把握

マシニングセンタとロボットミリングシステムの比較

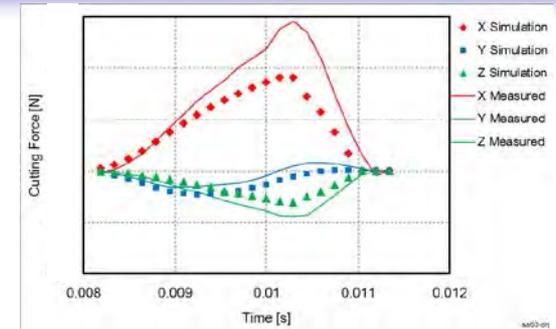
	 大型の工作機械	 ロボットミリングシステム (搬送ロボット)	 ロボットミリングシステム (加工ロボット)
設備費	非常に高価	さほど高価でない	高価
エネルギー消費	高	低	低
精度	非常に高い	低	高
剛性	非常に高い	低	高
速度	低速	非常に高速	高速

5. ロボット切削(2)

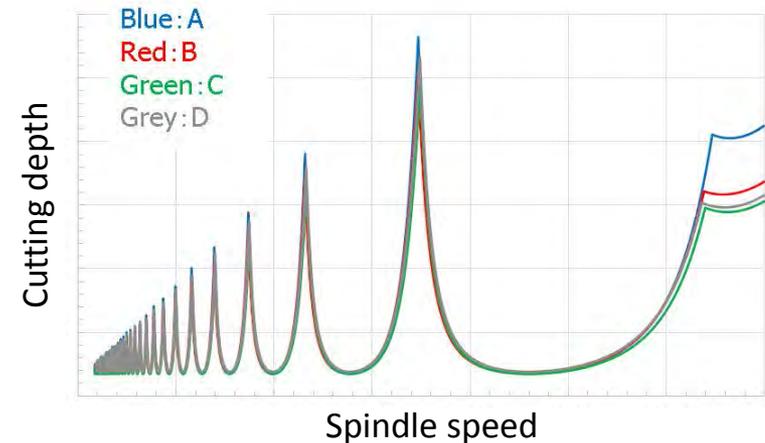
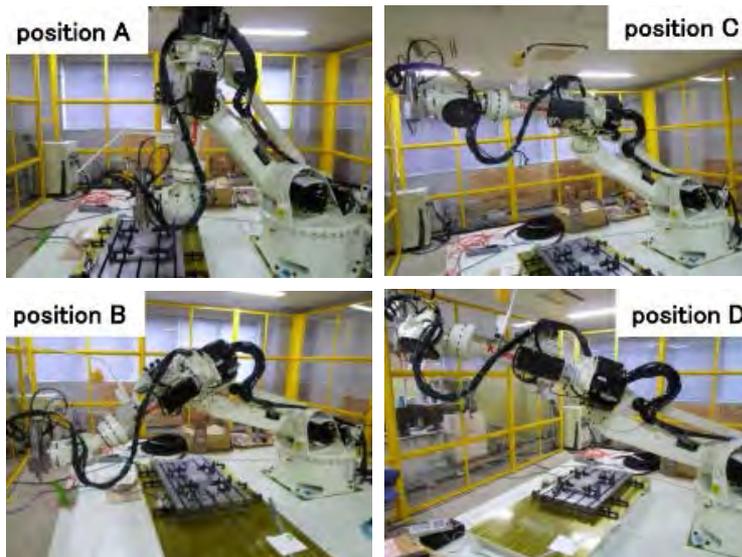


想定される加工面
(ケミカルミリングの加工面)

■ ロボット姿勢と安定限界 (搬送ロボット)



エネルギー解析法による切削力の予測
(ラジラスエンドミルによるスロットティング)



びびり安定限界に及ぼすロボット姿勢の影響

6. チタン合金の熱間ストレッチ成形(1)

■チタン合金の大曲率大形部材の熱間成形

- ・切りくず排出量と切削時間の大幅削減
- ・素材ロス低減

➡ 大きな残留応力の発生
残留応力除去のための熱処理・クリープ応力除去処理
[コスト高、時間の無駄]



薄肉大半径部材

■組合せ応力によるチタン合金の熱間成形

- ✓ 塑性変形の促進
- ✓ 残留応力制御
- ✓ 組織制御

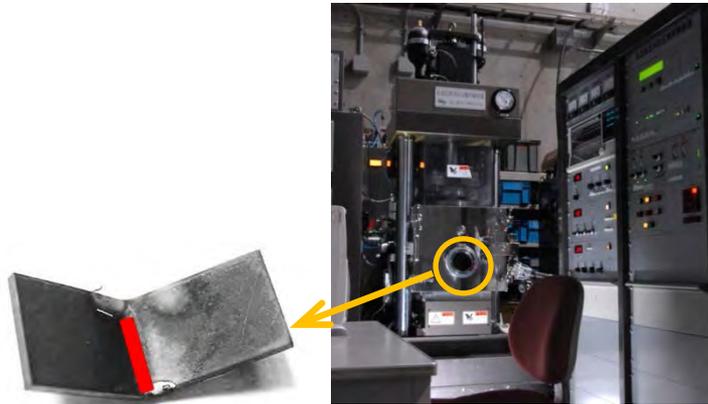
→切削用素材の残留応力の低減

- ✓ 引張+曲げ
熱間ストレッチ成形
組織制御性を高める

6. チタン合金の熱間ストレッチ成形(2)

- ✓ 温度制御・ひずみ速度制御試験
- ✓ 残留応力評価

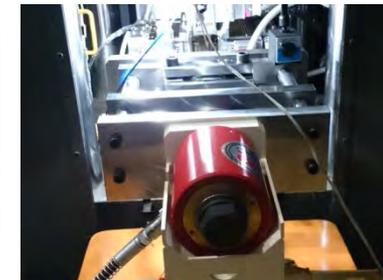
■ スモールスケール実験



試験片、温度・ひずみ速度制御材料試験機



■ サブスケール実験



引張応力無し

引張応力有(HSF)

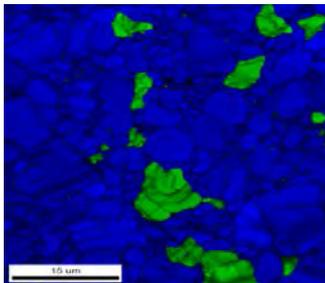
試験装置
試験片(30mm角)

6. チタン合金の熱間ストレッチ成形(3)

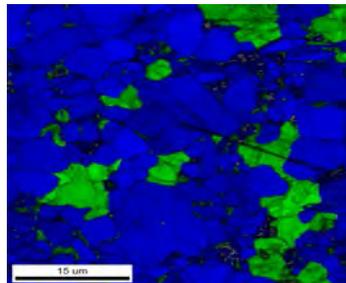
■ 結晶異方性(スモールスケール試験片)

- ・塑性ひずみの指標
- ・残留応力と相関あり

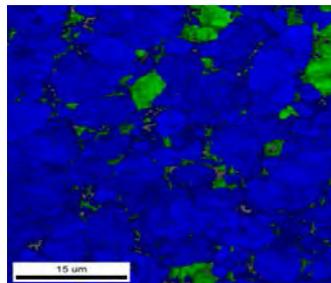
母材



熱間成形



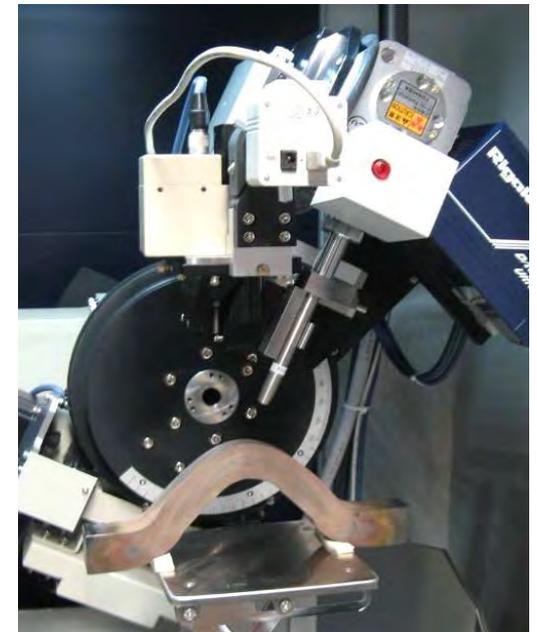
熱間ストレッチ成形



結晶異方性角度

	Min	Max
	0	1
	1	2
	2	3
	3	4
	4	5

■ X線残留応力測定



サブスケール試験片の残留応力測定



先進ものづくりシステム連携研究センター