



東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo



CMI研究について

The Third CMI Symposium

2015年11月 6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



目次

✓ CMIの設立, 運営, 研究課題, 航空機の構造材の変化等

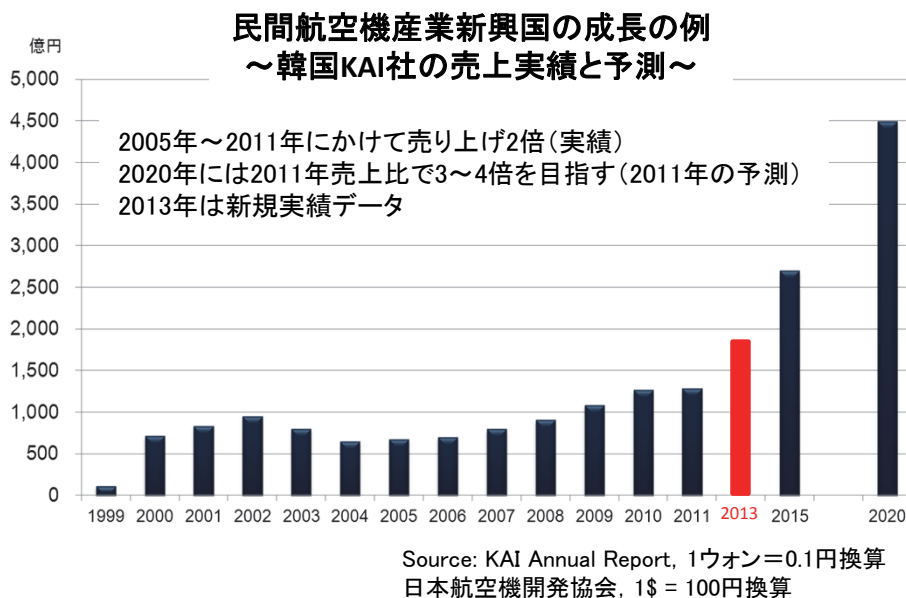
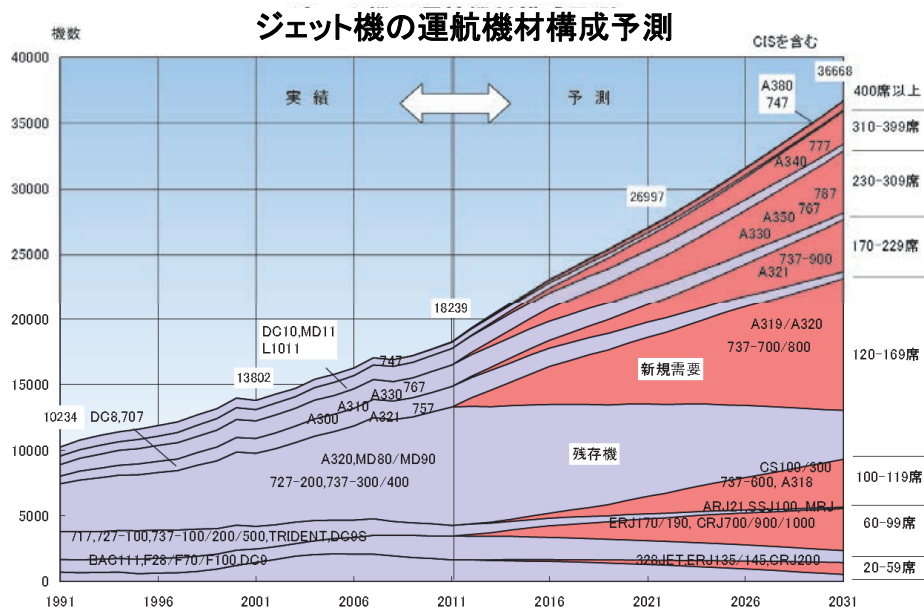
✓ CMIの研究成果の紹介

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. チタン合金の熱間成形加工

航空機産業を取巻く環境と CMI 設立の意義

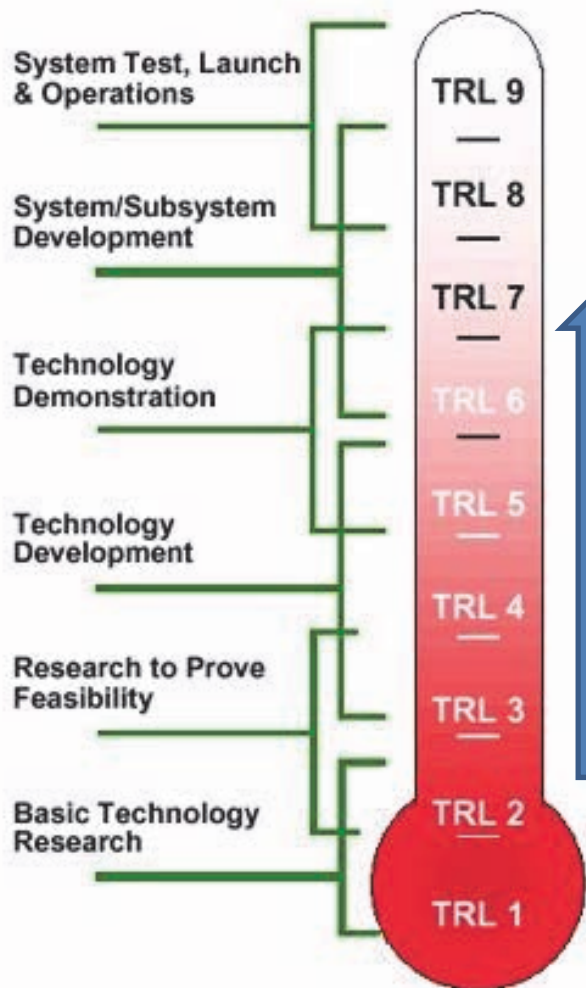
CMI: Consortium for Manufacturing Innovation

- 世界的には民間航空機産業は、数少ない成長産業のひとつ
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)の市場規模となることが予測されている
- 一方、日本の民間航空機産業は新興国の急伸による“日本パッシング”の危機に直面しつつあり、存亡をかけたターニングポイントを迎えている状況(技術的優位性は前提)



✓ 産学官連携により新興国のキャッチアップを上回るスピードと効率で技術的優位性を維持することが重要

NASA Technology Readiness Level*



現在の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

*http://en.wikipedia.org/wiki/Technology_readiness_level



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

*<http://www.ailu.org.uk/assets/document/2010rmsra.pdf> を編集



コンソーシアムの設立と運営

2012年度 国プロに採択
共同研究開始

航空機用難削材 (Ti, Al-Li, CFRP) の高速切削

2013年度 コンソーシアム (CMI) 設立 (5年間)

切削+

塑性加工, 接合, 組立, 修理, 検査, リサイクル

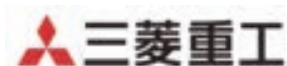
- ✓ 多対多の共同研究方式
米国で近年採用されつつある新しい共同研究方式

- ✓ 運営
 - ・テクニカルミーティング: 1ヶ月に1回
テレコンファレンス (日米電話会議): 1ヶ月に2回
各メンバーが事業所より参加
 - ・サイドミーティング (テクニカル): 随時
プロジェクト毎の国内, 日米ミーティング



CMI メンバー(産業界)

■航空機



■工作機械



■切削工具



■材料・切削油



Manufacturing Innovation for Efficient and Sustainable Operations



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、高能率、高速切削加工技術、高精度計測、高精度検査技術 (CFRPの非破壊検査技術、補修技術)
 - ✓ 航空機部品の超多品種少量生産における自動化技術 : ロボット組立、ロボットミーリング

- ◆ **環境対応型生産技術 (Environmentally conscious manufacturing) :**
 - ✓ 切削油剤や電力消費を大幅に減少させた難削材の切削加工技術
 - ✓ 工程転換により排出物を削減した高能率生産加工システム : チタン合金の接合技術

- ◆ **省資源型生産技術 (Manufacturing with the minimum natural resources and less amount of rare metals) :**
 - ✓ チタン合金の切りくず除去量最小化のための成形加工技術 : ホット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
 - ✓ タングステン、チタン、コバルトなどのレアメタルを大量に含む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

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



チタン合金による問題点の解消

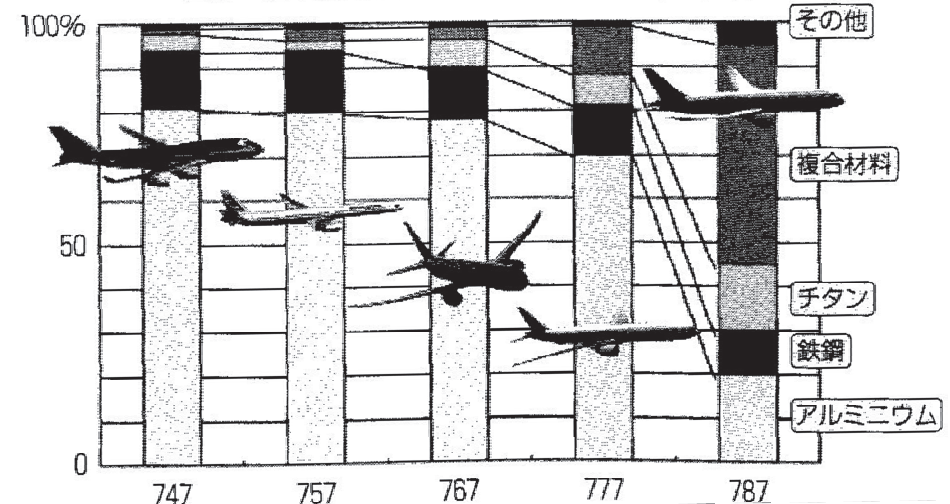
■ 1機当たりのチタン素材の使用量

- 787: 90-120 ton (中型機)
- 777: 60-70 ton
- A350: 90 ton
- A380: 80 ton

*約90%素材を切削

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





航空機の燃費

- ✓ 簡易計算(以下の仮定で求められる燃費)

燃費～(最大積載時の)航続距離÷最大燃料容量

787-8: $14,500 \text{ km} \div 126,210 \text{ L} \sim 115 \text{ m/L}$

777-300ER: $14,690 \text{ km} \div 181,283 \text{ L} \sim 81 \text{ m/L}$

737-800: $5,665 \text{ km} \div 26,020 \text{ L} \sim 218 \text{ m/L}$

- ✓ 最大積載燃料と機体の重量

787-8: 燃料 $126,210 \text{ L} \times 0.80 \text{ kg/L} \sim 101 \text{ t}$

運用自重 $\sim 118 \text{ t}$

777-300ER: 燃料 $181,283 \text{ L} \times 0.80 \text{ kg/L} \sim 145 \text{ t}$

運用自重 $\sim 168 \text{ t}$

737-800: 燃料 $26,020 \text{ L} \times 0.80 \text{ kg/L} \sim 21 \text{ t}$

運用自重 $\sim 41 \text{ t}$

航空機の付加価値

787-8: 約220億円 (¥100/\$) ¥180/g

- ✓ 他との比較

プリウス(ZVW30, 2011/12): 240万円/1,400 kg ¥1.7/g

コーテッド超硬(インサート): ¥50～60/g (レアメタルの塊, 素材が高価)



目次

✓ CMIの設立, 運営, 研究課題, 航空機の構造材の変化等

✓ 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. チタン合金の熱間成形加工

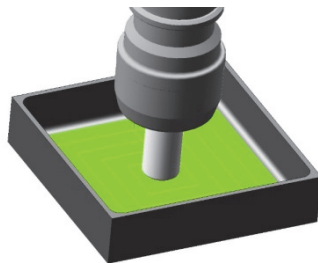
切削加工 (I) : チタン合金の高速ポケット加工

- ✓ ポケット加工の高速・高能率化 (大幅な時間短縮)
 - ・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)

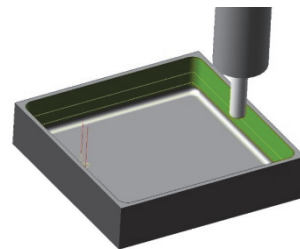


- ✓ 技術目標
 切削面の段差とバリの解消 → 手仕上げ不要

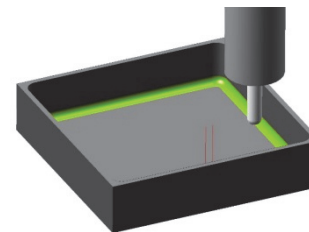
従来加工法



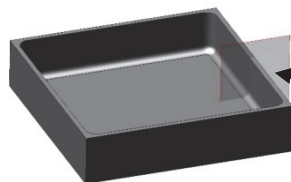
底面加工: 大径刃具



側面加工: 小径刃具



フィレット部加工: ボール状刃具



断面A

コストアップ要因: 段差の手仕上げ
 20 (25) μm 以下

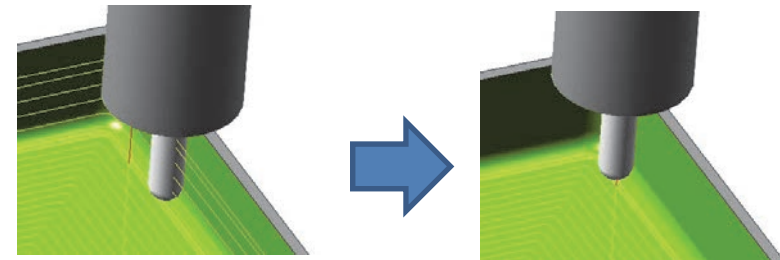
各刃具の継ぎ目に
 段差 → 手仕上げ



断面A

切削加工 (I) : チタン合金の高速ポケット加工 (2)

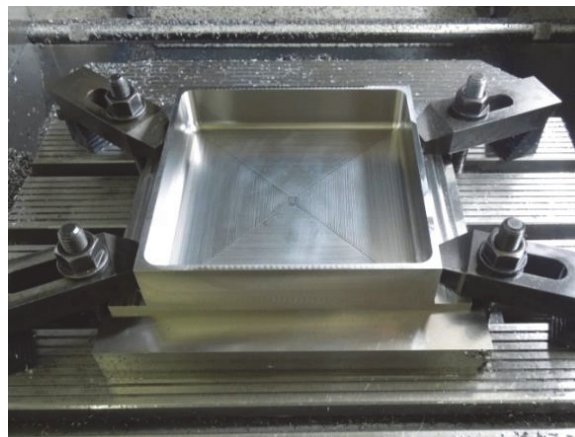
- ✓ 切削面の段差の原因
 - ・工具の持ち替えによる把持誤差 (中心軸のずれ, 傾き)
 - ・工具摩耗による工具径の縮小
 - ・工作機械の熱変位
 - ・工具の形状誤差
- ✓ 切削面の段差解消のための工夫
 - ・高速仕上げ削りにおいて, 摩耗しにくい, びびりにくい刃形, 材種, 加工条件
 - ・.....



3回の周回加工

1週の側面加工

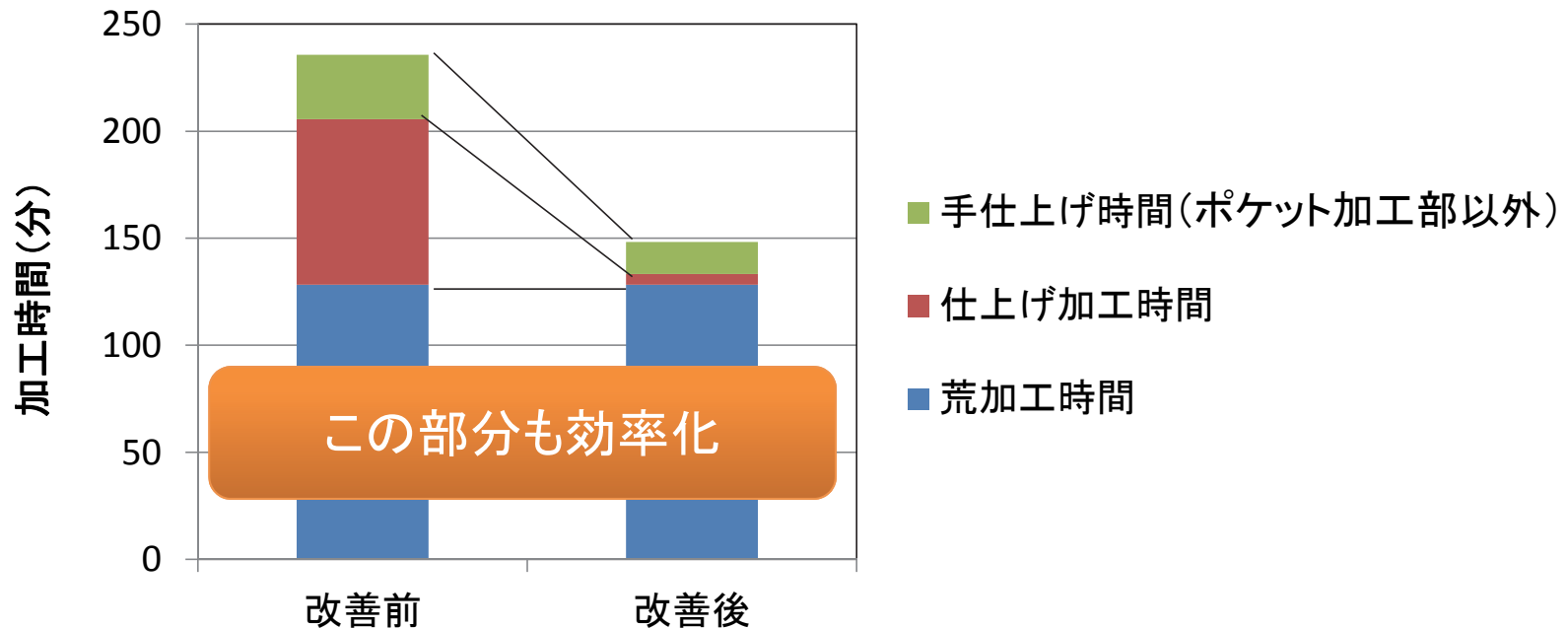
- ✓ 迅速なコーナ加工
- ✓ 側壁での軸方向切入み深さの増大
10mm → 30mm



モデルポケット形状において、
手仕上げ不要な加工を実現
(ポケットの深さ 30mm)

切削加工 (I) : チタン合金の高速ポケット加工 (3)

✓ 開発技術による加工時間 (コスト) 削減効果



- ・手仕上げ: ミスマッチやびびり振動による面粗度不良の問題解消 ⇒ 50% 時間短縮
- ・仕上げ : 新開発刃具と加工条件最適化 ⇒ 90% 時間短縮

切削加工(Ⅱ): 高速ポケット加工技術のアルミ合金への展開

✓ チタン合金 → アルミ合金のポケット加工

アルミ合金の部品: チタン合金の部品より圧倒的に多い

アルミ合金の加工: チタン合金の加工よりさらに高速・高能率化が強く求められる

両合金の切削特性の違いを明確化

○仕上げ削り: 切削条件は異なるが, 開発したチタン切削の要素技術は利用

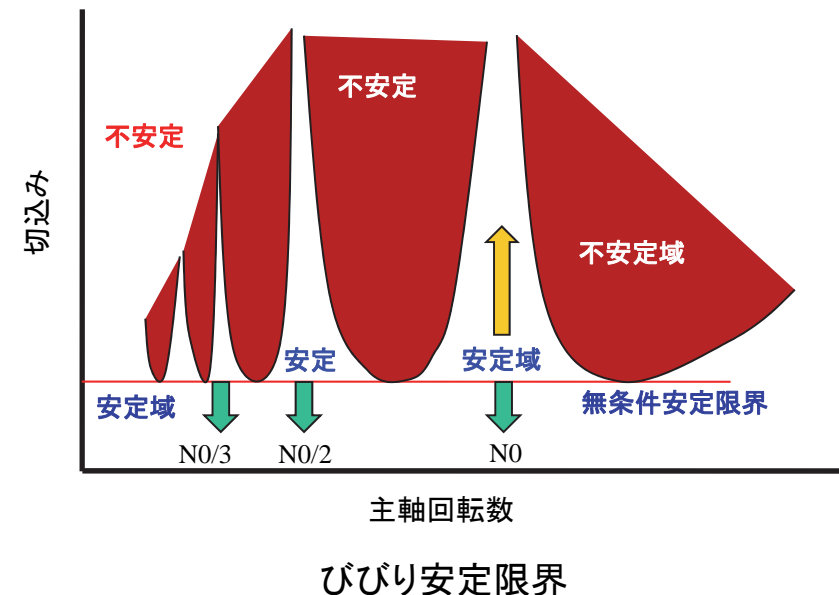
・荒加工への対応(平成27年度) → 加工能率の向上

✓ 技術目標

- ・仕上げ面の品位向上
- ・手仕上げ工程の削減
→ ミスマッチの解消
- ・高能率加工による加工時間の短縮

✓ 高切込み(側壁の仕上げ, 軸方向)

不安定ローブ間の広い安定領域を利用
(実質的に, 約4~5倍)

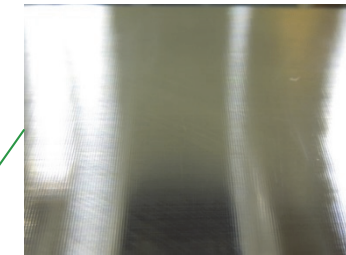
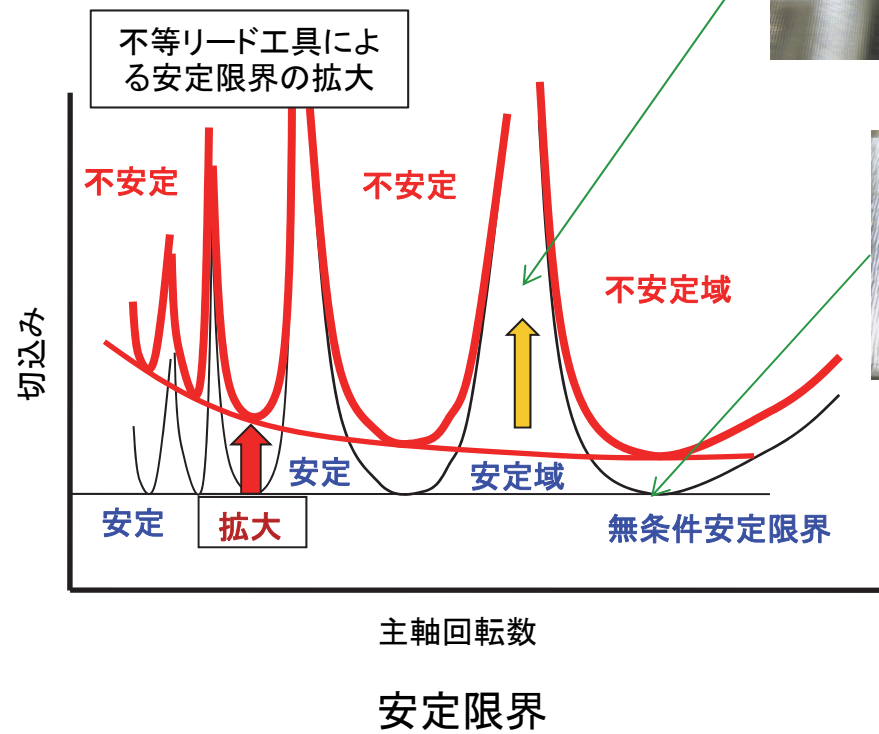


切削加工(Ⅱ): 高速ポケット加工のアルミ合金への展開(2)

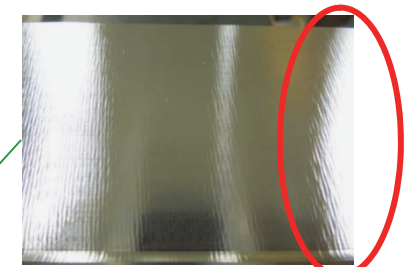
- ✓ 側壁部の軸方向切込み50 mmで、深さ50 mmのポケットの高速仕上げ加工を実現.
- ✓ 高回転速度での不安定ローブ間の広い安定領域を使用.



試作工具



びびりなし



びびり発生

切削加工(Ⅱ): 高速ポケット加工のアルミ合金への展開(3)

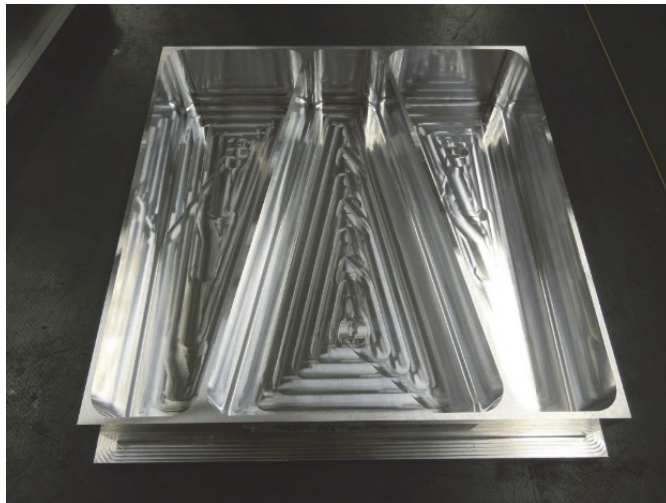
新開発の刃具

×

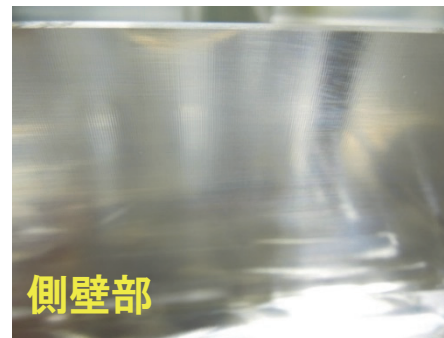
最適な工具経路と切削条件



モデルポケット形状において、**手仕上げ不要な加工**を実現



加工後のモデルポケット形状



側壁部

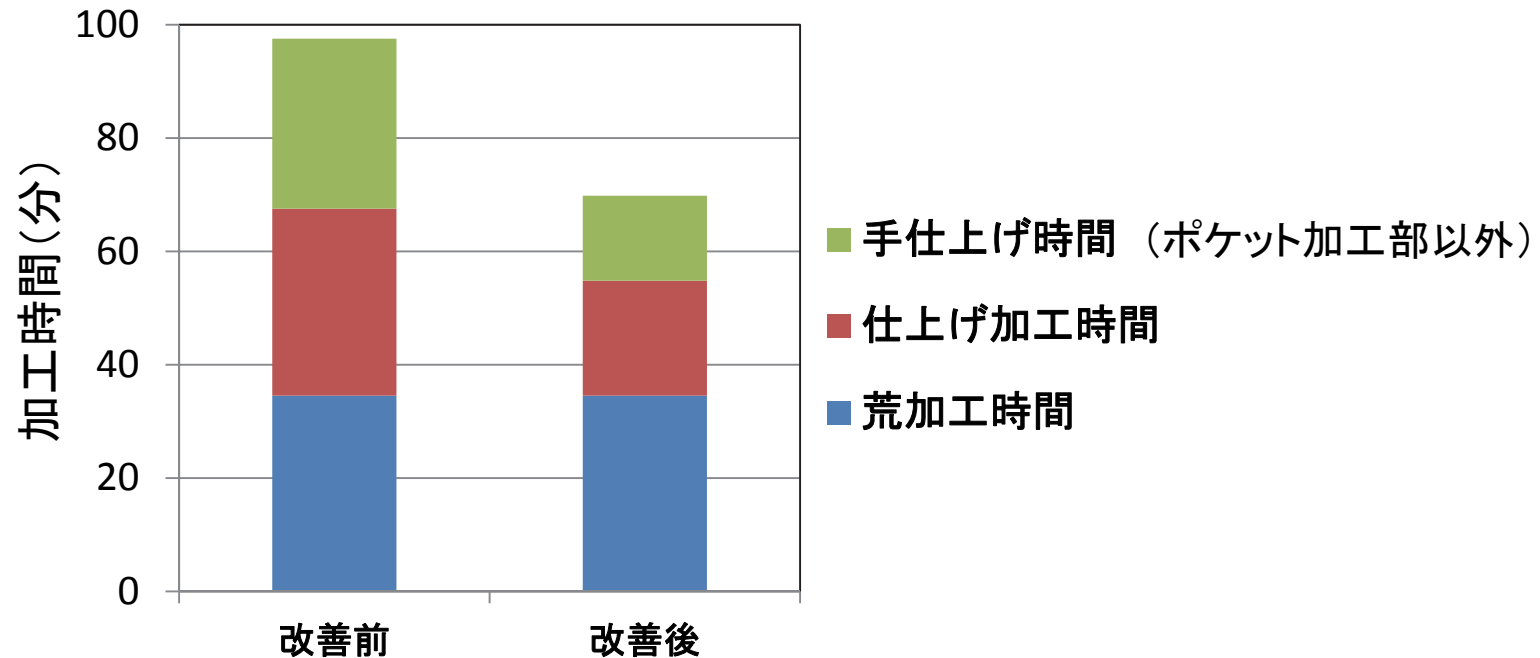


コーナー部

全面、びびり無し

切削加工(Ⅱ): 高速ポケット加工のアルミ合金への展開(4)

✓ 開発技術による加工時間(コスト)削減効果



- ・手仕上げ: ミスマッチやびびり振動による面粗度不良の問題解消 ⇒ 50%時間短縮
- ・仕上げ : 新開発刃具と加工条件最適化 ⇒ 40%時間短縮

(研究開始当初から切込み50mmのため改善小)

切削加工(Ⅲ): アルミ・リチウム合金の切削

✓ 加工された板材・部品の変形(ひずみ)低減

変形の原因(一般論として)

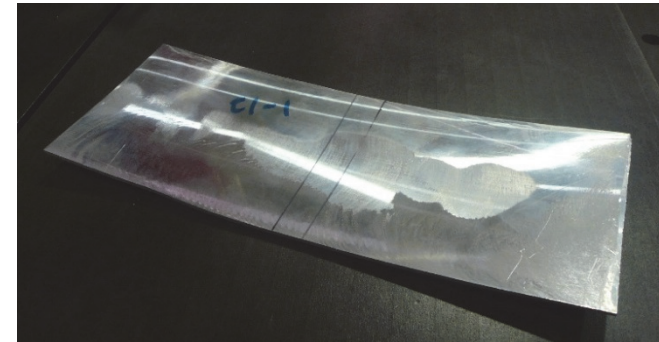
- ・素材固有の残留応力(50~60%)
切削での材料除去により残留応力の再配分
- ・切削の機械的・熱的要因で生ずる残留応力
(20~40%)
- ・クランプ力により生ずる残留応力(5~15%)
- ・その他(~5%)

材料特性

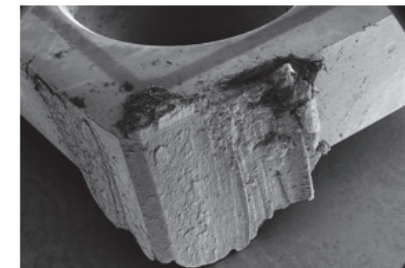
- ・熱伝導率が小さい → 切削温度が上がり易い

✓ 本研究での課題抽出

- ・素材の残留応力測定
→ 固有の残留応力は小
→ 切削残留応力が主な原因
- ・工具への凝着の影響が大
→ 工具への凝着の抑制
→ 切削温度の低下, 残留応力低下



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)



正面フライス加工後にインサートに
凝着したAl-Li合金

切削加工(Ⅲ): 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

・Al-Li合金の構成方程式

・Al-Li合金の熱物性値の温度依存性

・影響因子

切削速度

切取り厚さ

刃先の丸み

逃げ面摩耗幅

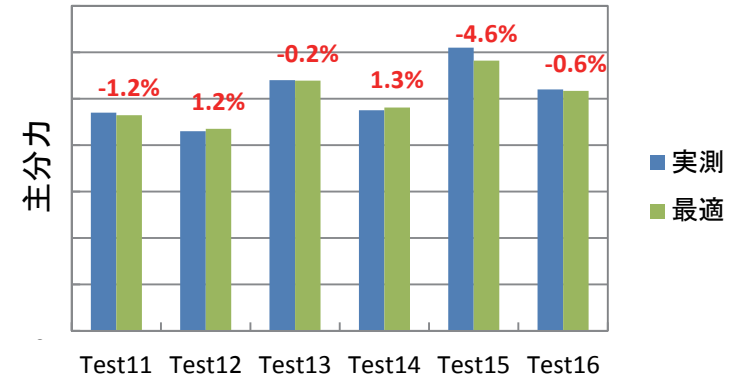
クーラントの有無

残留応力抑制法

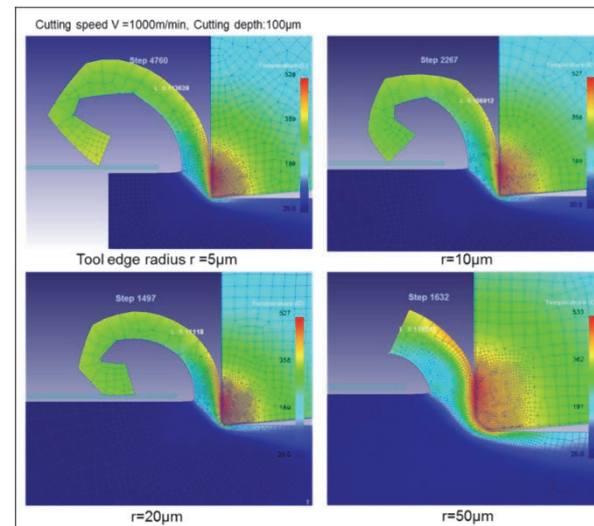
> 目途が立つ

> 実験により実証

> 予測法の確立



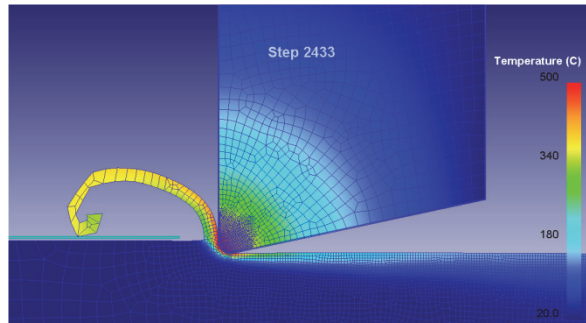
有限要素解析モデルの妥当性



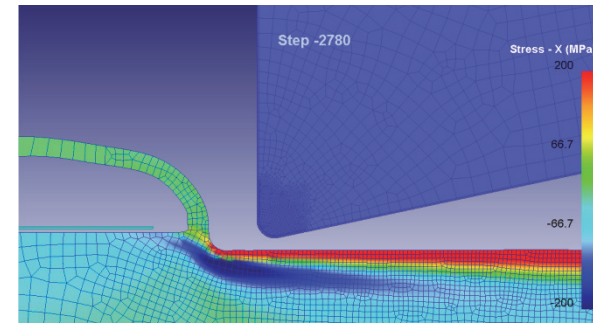
刃先丸みの影響

切削加工(Ⅲ): アルミ・リチウム合金の切削(3)

- ✓ 有限要素解析による予測

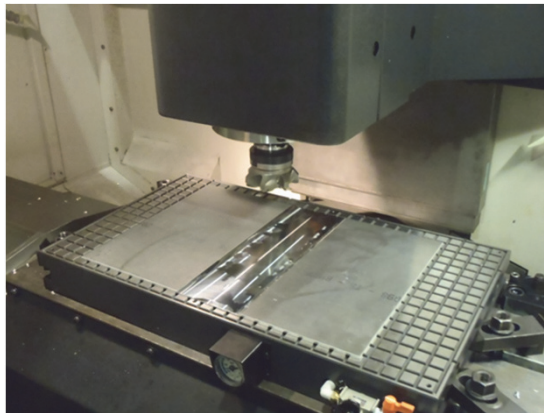


切削温度



残留応力

- ✓ 正面フライス削り



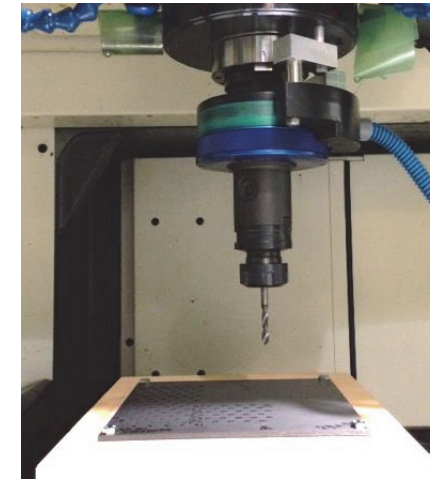
Al-Li 合金板の正面フライス切削実験



ポータブル型X線残留応力測定装置

切削加工(Ⅳ): CFRPのドリル加工

- ・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
 - ・孔径, CFRPの厚さに対する刃形の最適化
- ✓ 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



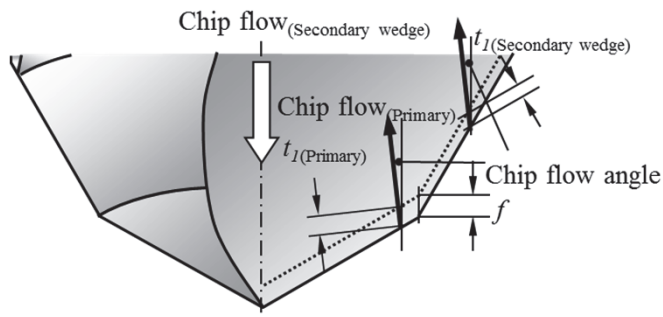
切削実験

- ・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
- ・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

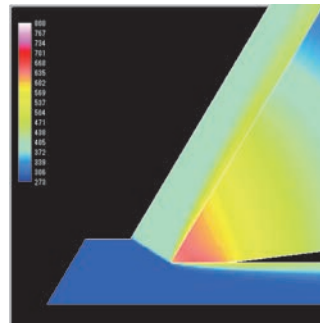
切削加工 (IV) : CFRPのドリル加工 (2)

✓二段切れ刃のドリルへの適用
(平成25年度までの成果)

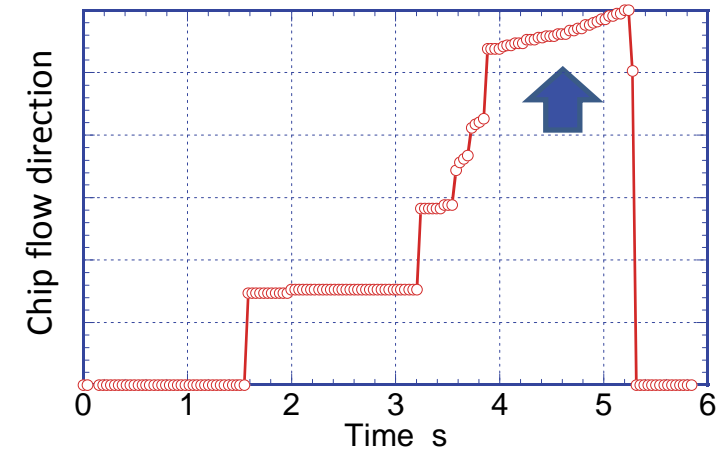
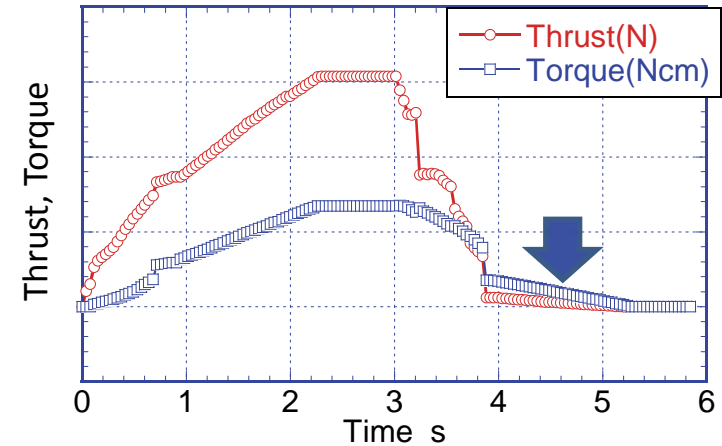
- ・ドリルの抜け際
 - 切りくず流出方向が大
 - 半径方向
 - スラスト力の低下
 - CFRPの剥離の抑制



切れ刃モデル



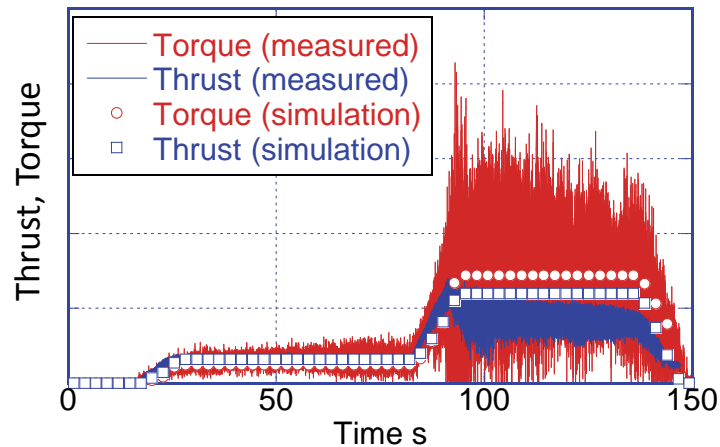
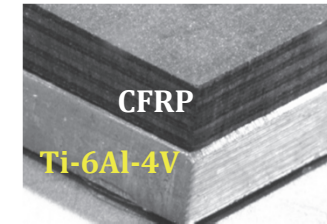
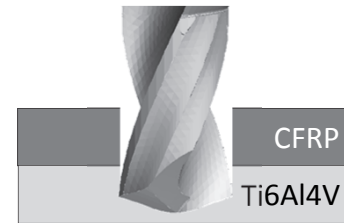
切削温度解析例



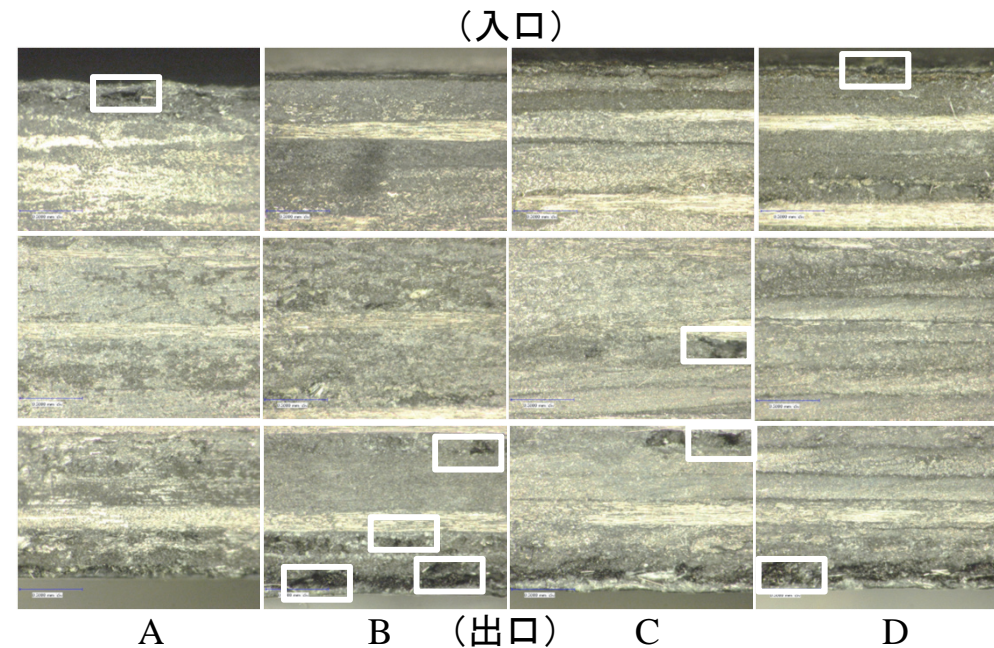
切削力と切りくず流出角

切削加工 (IV) : CFRPのドリル加工 (3)

- ✓ CFRPとチタンのスタック材の穴あけ
 - ・チタン合金の切削過程の改善
切削温度, 工具摩耗, 切りくず制御
 - ・クーラントの影響
Dryでの内壁の損傷
 - ・コーティングの影響
4種類



解析結果と実測値の比較

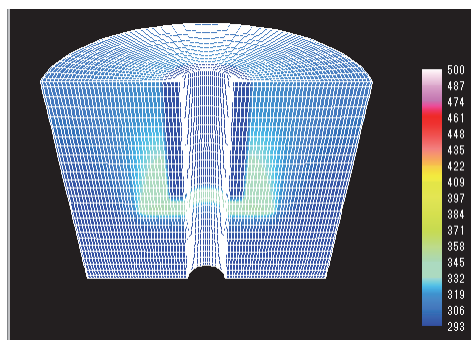
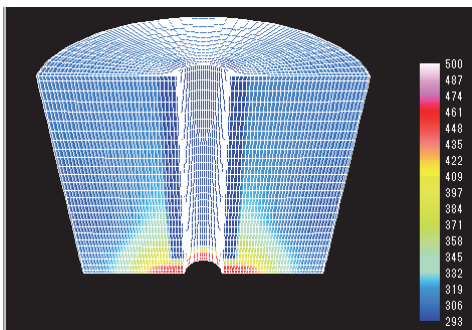
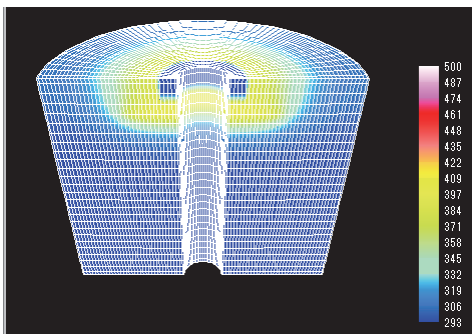


CFRPの剥離に及ぼす4種類のコーティング(A, B, C, D)の影響

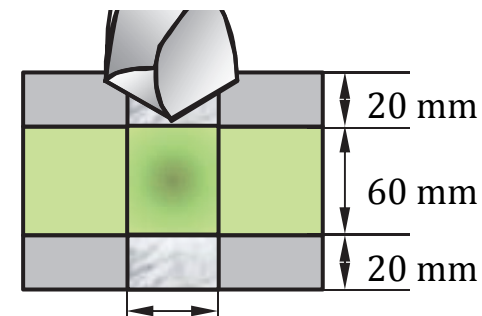
の領域で剥離

切削加工(Ⅳ): CFRPのドリル加工(4)

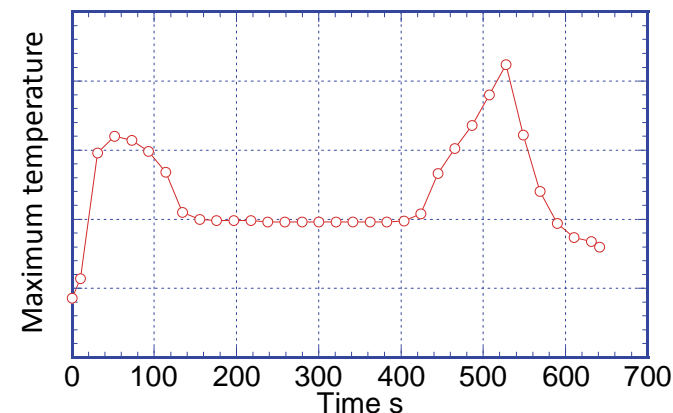
- > チタン合金とCFRPのスタック材の穴あけにおける
 工作物内温度分布予測
- > CFRPの熱的損傷の回避



- ・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



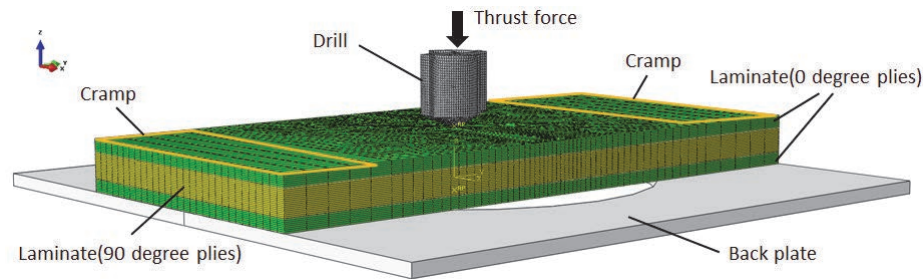
Pilot hole 7.9375 mm



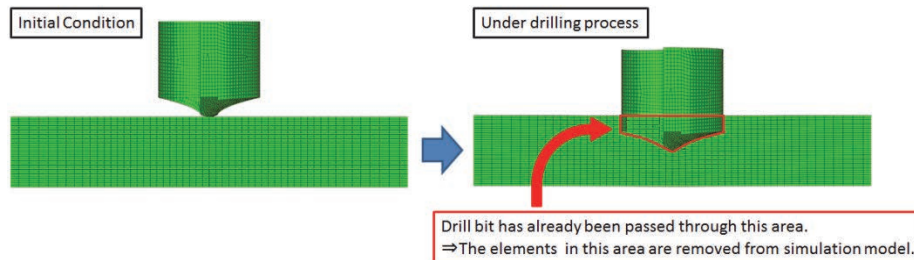
工作物内の最高温度
(CFRP内の最高温度ではない)

切削加工(Ⅳ): CFRPのドリル加工(5)

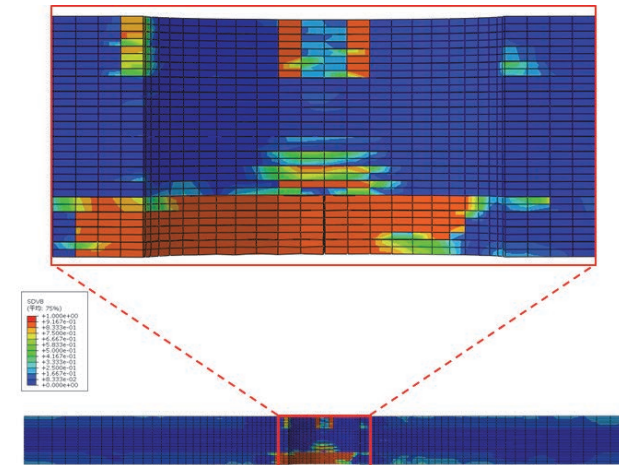
- > CFRPのドリル加工における詳細な損傷モデルの構築
- > 工作物内の損傷を重視した解析
 - ドリル入口での損傷(剥離): 積層の引き上げ
 - ドリル出口での損傷(剥離): 積層の押し下げ



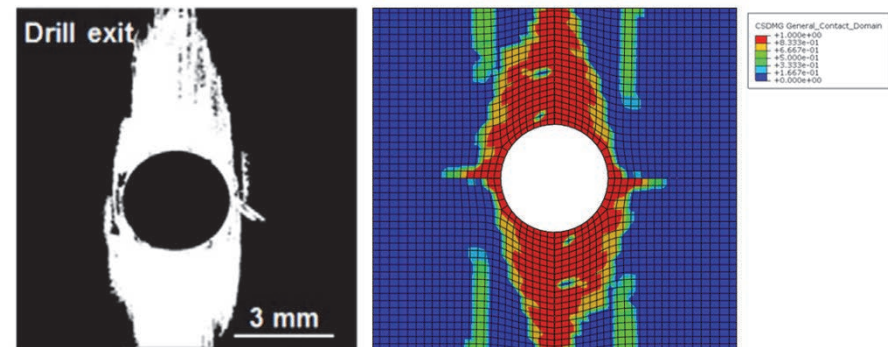
有限要素モデル



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

ロボット切削

✓ケミカルミリングから機械的なミーリングへ

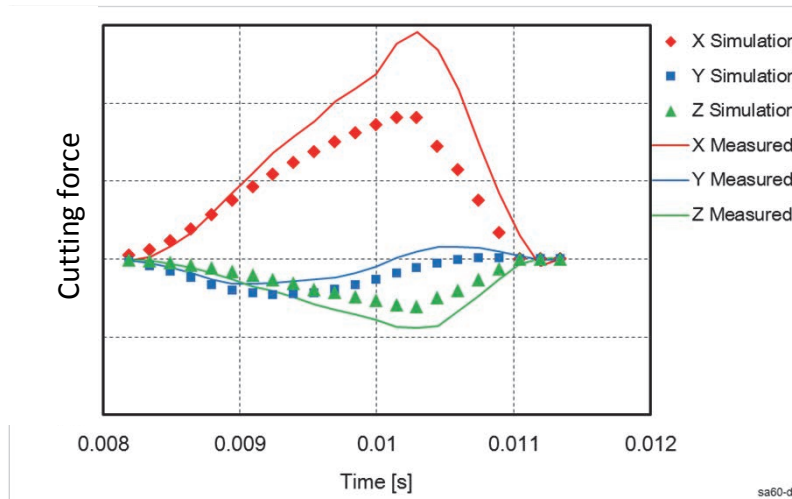
- ・生産の柔軟性増大
- ・設備投資の削減
- ・排出物の処理費削減

✓ロボットミリングの実現

- ・高速主軸による高能率切削
- ・リアルタイム計測による高精度化
- ・ロボットの動特性の把握
- ・切削力の合力と作用方向の予測



想定される加工面
(ケミカルミリングの加工面)



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)



導入したロボットミリングシステム

チタン合金の熱間成形加工

✓ 切りくず排出量と切削時間の大幅削減

・切削用素形材の熱間成形

・部品の接合

・把持部(廃棄部分)の最小化

✓ 残留応力制御

✓ 組織制御

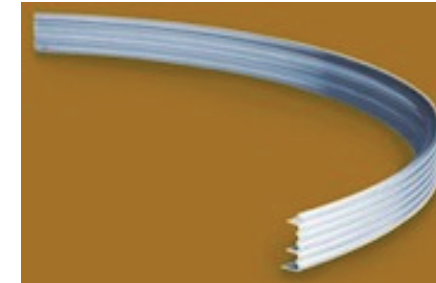
→ 切削前の残留応力の低減

✓ 引張+曲げ

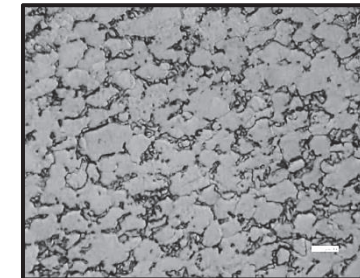
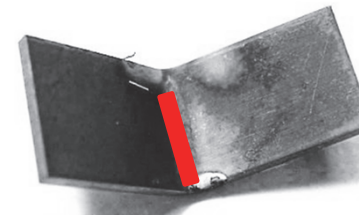
ホットストレッチフォーミング

(HSF)

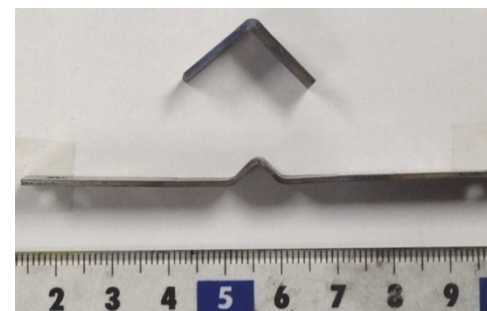
組織制御性を高める



薄肉大半径部材



組織とスプリングバック(残留応力)評価



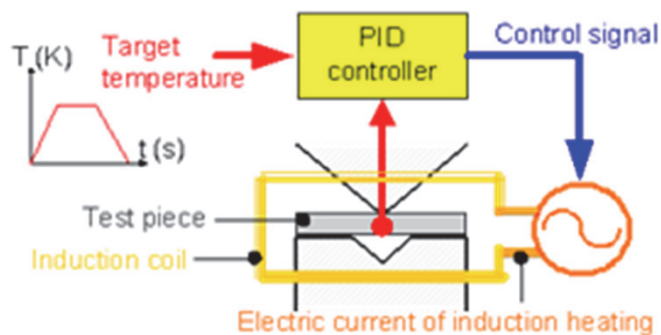
成形後の試験片

上: 単純V曲げ

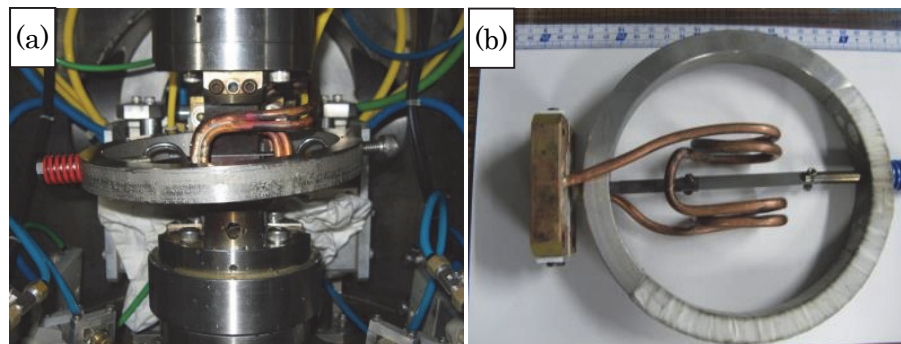
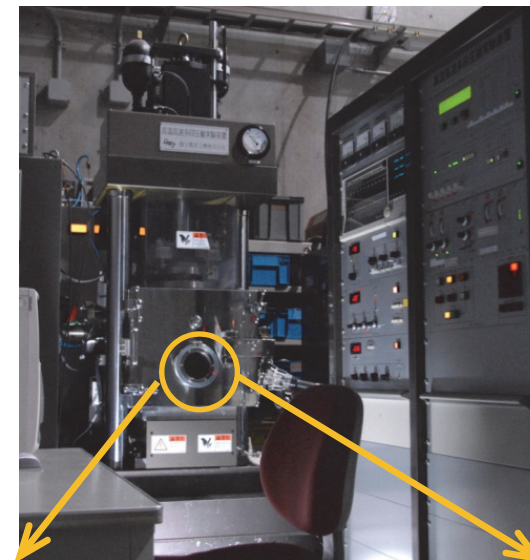
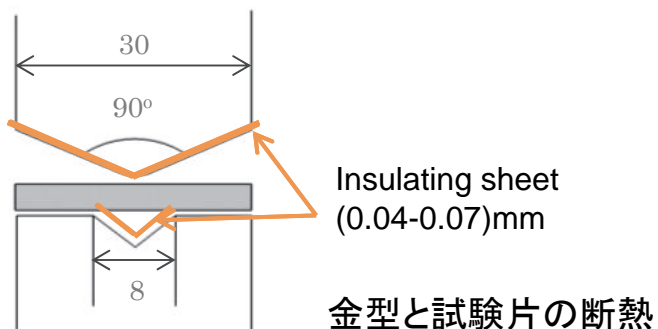
下: HSF

チタン合金の熱間成形加工技術(2)

- ✓ 温度制御・ひずみ速度制御試験
- ✓ 残留応力評価
 - ・EBSD(定性的)
 - ・X線残留応力測定(定量的)

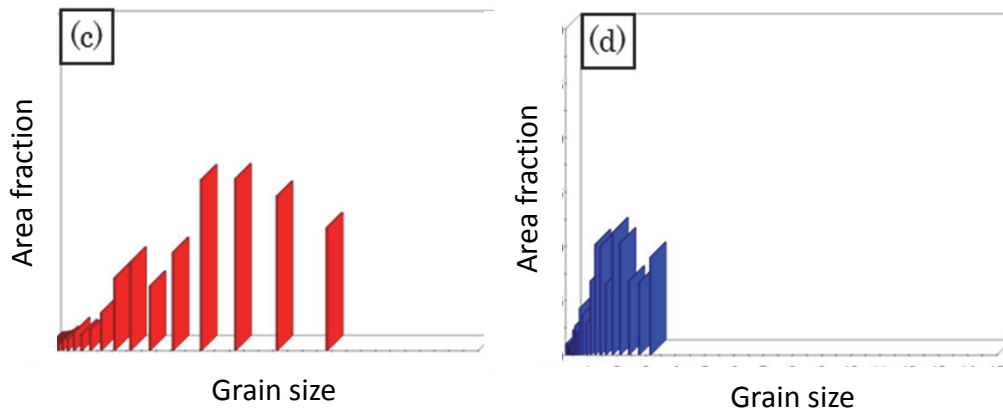
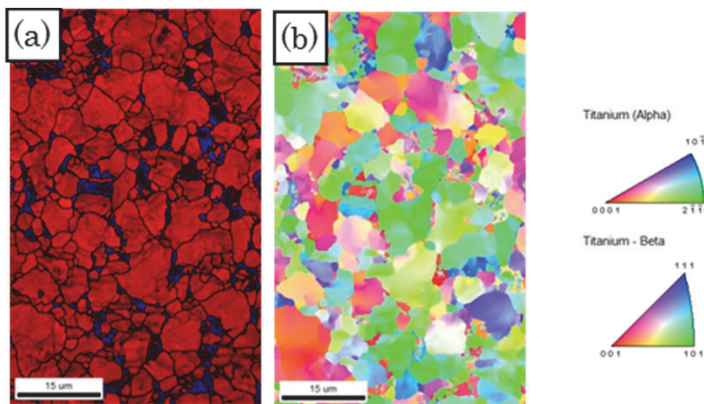


熱間試験の概略

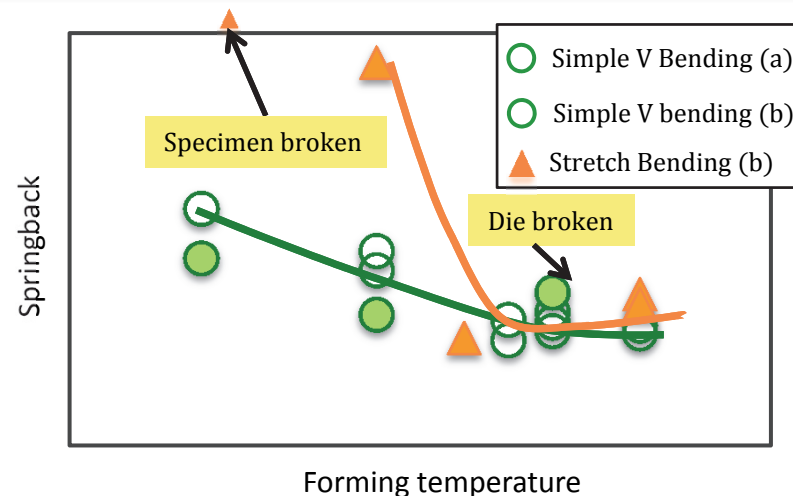


温度・ひずみ速度制御材料試験機と HSF用のヒータと治具

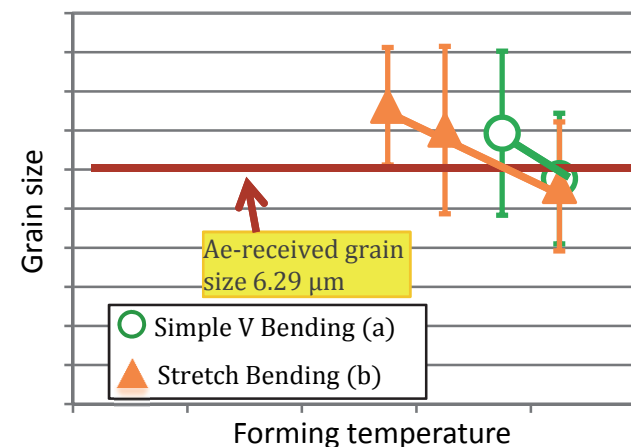
チタン合金の熱間成形加工技術(3)



HSF後の相分布図, 逆極点図, α 相の粒子径分布, β 相の粒子径分布



HSFと単純V曲げ後のスプリングバック



HSFと単純V曲げ後の粒子径



東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo



地球とともに“CMI”



先進ものづくりシステム連携研究センター