



CMIの研究状況

The Second CMI Symposium

2014年10月 17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

現在のCMIの技術開発

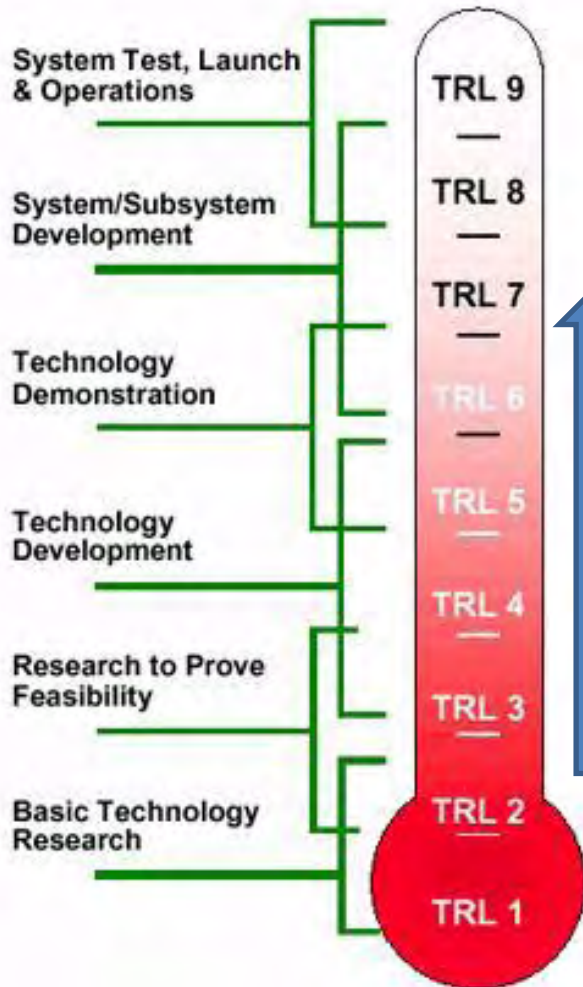
- ✓ 航空機製造技術
切削, 塑性加工, 接合, 組立, 修理, 検査, リサイクル
- ✓ 将来的には製造技術全般に

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

NASA Technology Readiness Level*



*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



2012年度 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4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

◆高付加価値生産技術：

- ✓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：

- ✓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：

- ✓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
- ✓チタン合金やアルミ・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

CMIの技術開発の目標

- ✓ **高付加価値生産**
 - ・先進材料の高効率(高品位・高速・高能率)切削加工
 - ・複合材の高レート生産技術(加工・組立・修理)
 - ・短時間ロボスト検査技術
- ✓ **省資源・省エネルギー**
 - ・革新的成形加工(チタン合金の熱間塑性加工)
 - ・革新的接合加工
 - 切りくず除去量の最小化, 必要素材の最小化
- ✓ **環境対応**
 - ・リサイクル
 - ・低消費電力切削加工技術
 - ・ロボットミリング
- ✓ **自動化**
 - ・燃料タンク内シーリング(作業環境改善)
 - ・ロボットミリング(柔軟性)
- ✓ **安全・安心の技術**
 - ・短時間ロボスト検査技術
- ✓ **国際競争力向上**

CMIの技術開発の目標



CFRP

Sustainability



Machine tools

Economics



High value manufacturing

Flexibility



Robots



Cutting tools

http://www.shoda.com/ncrouter_other_products/ncrouter_other_categories.php?cate=6

<http://jp.dmgmori.com/%E8%A3%BD%E5%93%81/%E3%83%9F%E3%83%BC%E3%83%AA%E3%83%B3%E3%82%B0/5%E8%BB%B8%E5%88%B6%E5%BE%A1%E3%83%9E%E3%82%B7%E3%83%8B%E3%83%B3%E3%82%B0%E3%82%BB%E3%83%B3%E3%82%BF/nmv/nmv5000dgc>

http://www.khi.co.jp/robot/product/z_series.html

http://www.sumitool.com/catalog/pdf/IN_505.pdf

http://www.sumitool.com/catalog/pdf/IN_491.pdf

http://www.osg.co.jp/products/n-97_cfrp_vol4_1103.pdf

http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mmc/ja/html/product/product_guide/information/milling/coating_technology.html

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

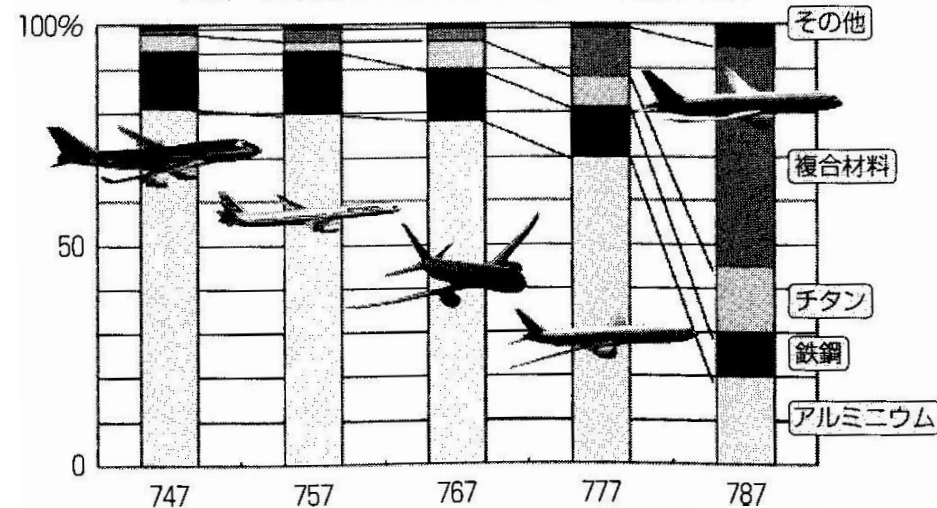
■ 1機当たりのチタン素材の使用量

- 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



航空機材料の特徴

■ 剛性(ヤング率 E)が鋼に比べて低い

● 金属材料

チタン合金 $E = 106\text{GPa}$

(炭素鋼 $E = 210\text{GPa}$ の約1/2)

アルミニウム合金 $E = 69\text{GPa}$

マグネシウム合金 $E = 42\text{GPa}$

● 複合材料

MMC (Al-SiC) $E = 100\text{GPa}$ (20%SiC)

-170GPa (45%SiC)

CFRP(50/50) $E = 125\text{--}150\text{GPa}$

切削加工 (I) : チタン合金の高速ポケット加工

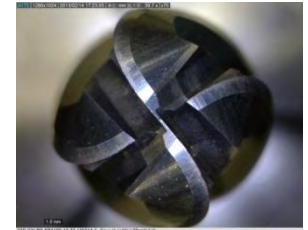
✓ ポケット加工の高速化 (大幅な時間短縮)

・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 ↔ 磨きレスの金型加工技術 (日本のお家芸)

✓ 切削面の段差・バリ解消のための工夫

- ・高速の仕上げ削りで摩耗しにくい, びびりにくい刃形と加工条件
- ・仕上げ削りのためのコーナ部、フィレット部での下準備
- ・新しいタイプの工具形状
- ・



✓ 環境対応型加工によるチタンの高速切削

-
- ・段差やバリのないきれいな仕上がり
 - ・各社から手仕上げ不要の評価
 - ・大幅なコスト削減が見込まれる



使用工具の底部と加工後のポケット

切削加工 (I) : チタン合金の高速ポケット加工 (2)

- ✓ コーナ部での実質切込みの増加を抑えるための中仕上げ
 コーナ部での複雑な工具経路を簡略化
 → 多種多様なポケット加工への適用 (実機適用の促進)

- ✓ 高能率加工への対応

高能率化を実現する新工具 (刃形)

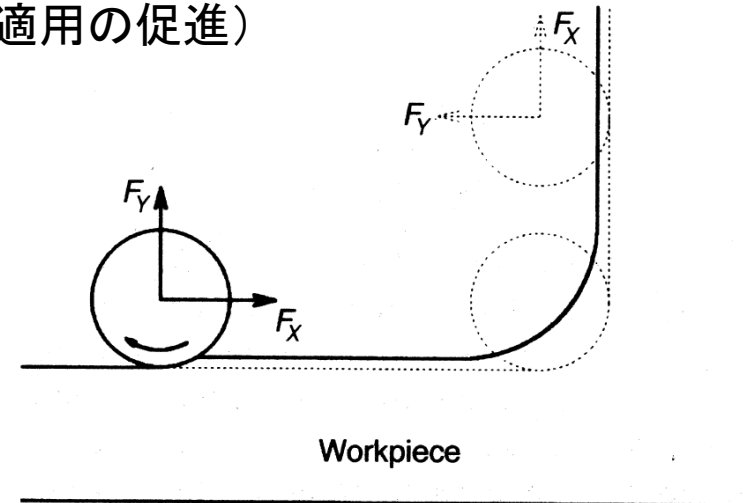
- ・仕上げ加工時間の短縮
 → 開発工具の改良 (完了)
- ・荒加工 → 高能率加工用工具の開発

- ✓ クーラント

仕上げ削り: 環境対応型加工

荒削り: 最適な方法の検討

(部品1個当たりの電力消費の削減)



コーナにおける実質切込みの増加

航空機部品: ポケット加工の例



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桁違いの高速・高能率化が求められる

両合金の切削特性の違いを明確化

- ・削り方を大幅に変更
- ・荒加工への対応 → 高能率加工用工具の開発
アルミ合金の溶着軽減

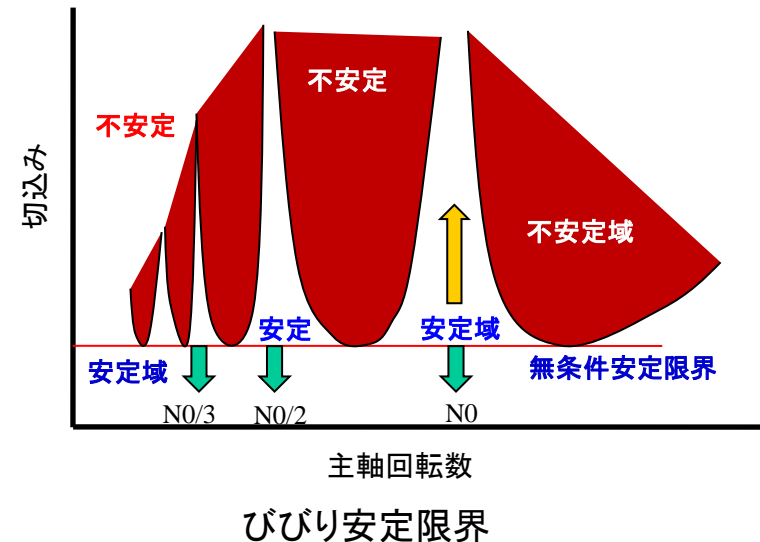
✓ 技術目標

- ・仕上げ面の品位向上
- ・手仕上げ工程の削減
- ・高能率加工による加工時間の短縮

✓ 高切込み(軸方向)

不安定ローブ間の安定領域を利用(実質的に、約4~5倍)

➡ チタン合金の切込みももっと大きくすることは可能



切削加工(Ⅱ): 高速ポケット加工のアルミ合金への展開(2)

✓ 今後の検討課題

不等リード工具

- ・効果が小さい

クーラント

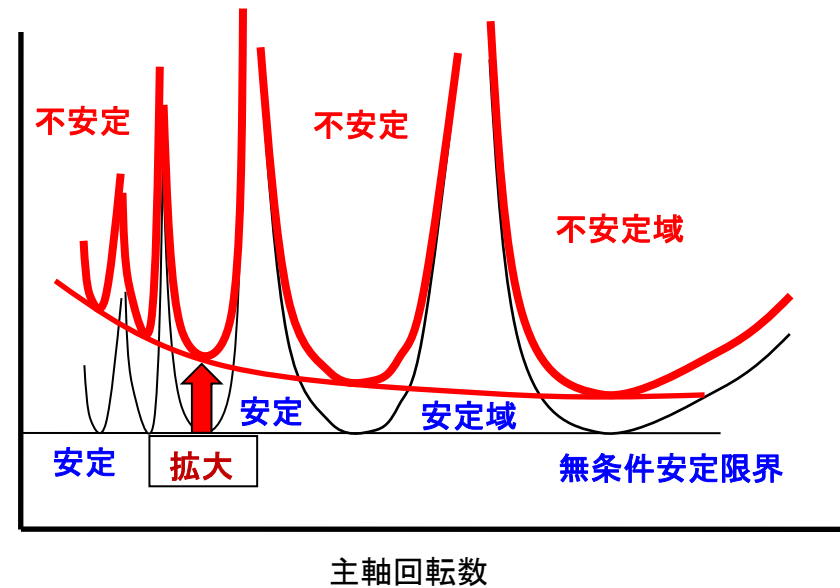
- ・アルミ部品には水溶性クーラント



試作工具



想定したポケット加工



不等リード工具による安定限界の拡大

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)軽減

変形の原因

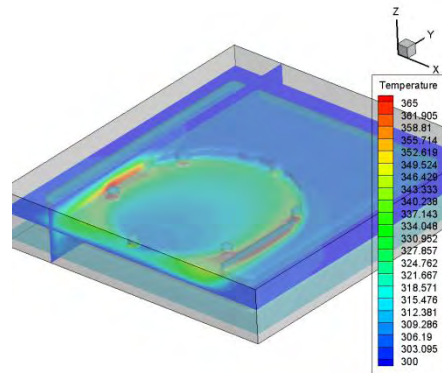
- ・素材固有の残留応力(50~60%)
 切削での材料除去により残留応力の再配分
- ・切削の機械的・熱的要因で生ずる残留応力
 (20~40%)
- ・クランプ力により生ずる残留応力(5~15%)
- ・その他(~5%)

材料特性

- ・熱伝導率が小さい → 切削温度が上がり易い

- ✓ フェースミリングの温度解析

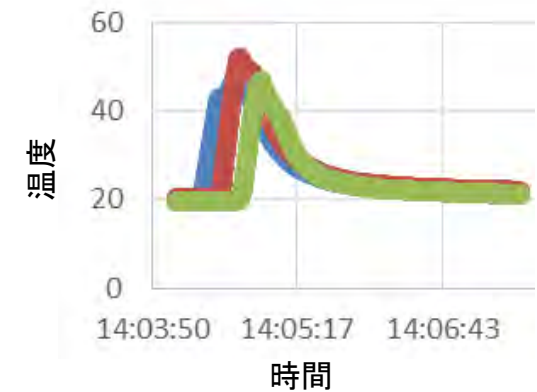
- ・簡易解析法の開発
- ・測定温度との比較検証



温度解析の結果



変形しやすい加工部品



被削材下面での温度変化の測定例

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・部品の変形(ひずみ)軽減

・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)

✓ 有限要素解析による予測と制御
(当面, 二次元切削)

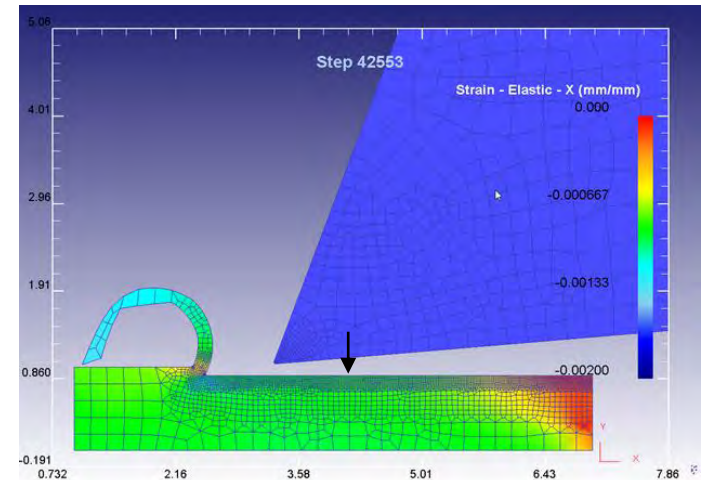
・有限要素解析

・流体解析

・素材の残留応力評価

・切削残留応力の評価

・切削条件, 冷却条件の最適化



残留弾性ひずみ分布 → 残留応力



ポータブル型X線残留応力測定装置

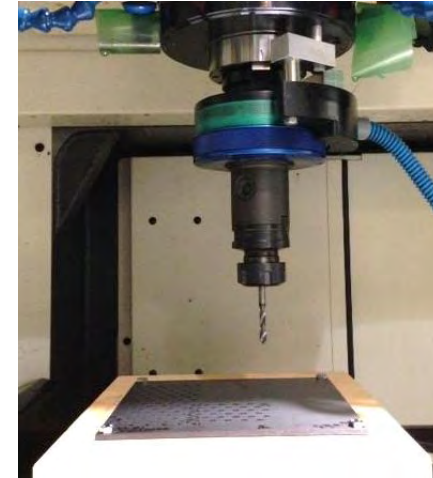
切削加工 (IV) : CFRPのドリル加工

- ・デラミネーション(剥離)の抑制
- ・工具摩耗の抑制
- ✓ 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

工具摩耗モデル

$$\frac{dW}{dt} = A \sigma_n V_{real} \exp\left(-\frac{B}{T}\right)$$

工具摩耗 $\begin{matrix} \rightarrow \\ \leftarrow \end{matrix}$ 摩耗したドリルの切削力,
切削温度

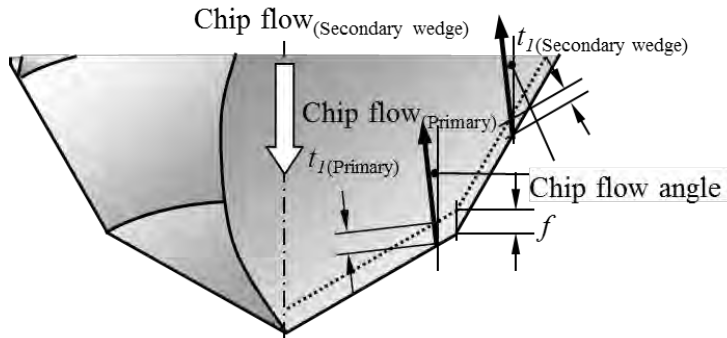


切削実験

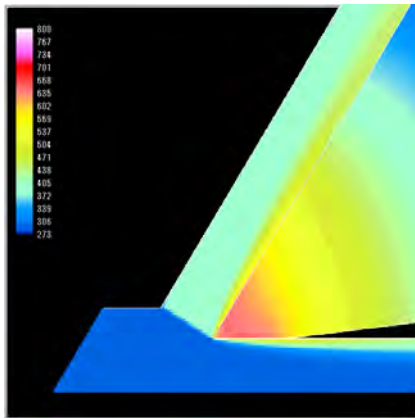
- ・工具摩耗, 切削力(特に, スラスト力)の増加 \rightarrow 剥離(方向性)に及ぼす影響
- ・切りくず流出方向 \rightarrow 半径方向 \rightarrow スラスト力の低下 \rightarrow CFRPの剥離の抑制
- ・切削温度 \rightarrow CFRPの劣化
- ・孔径, CFRPの厚さに対する刃形の最適化

切削加工(Ⅳ): CFRPのドリル加工(2)

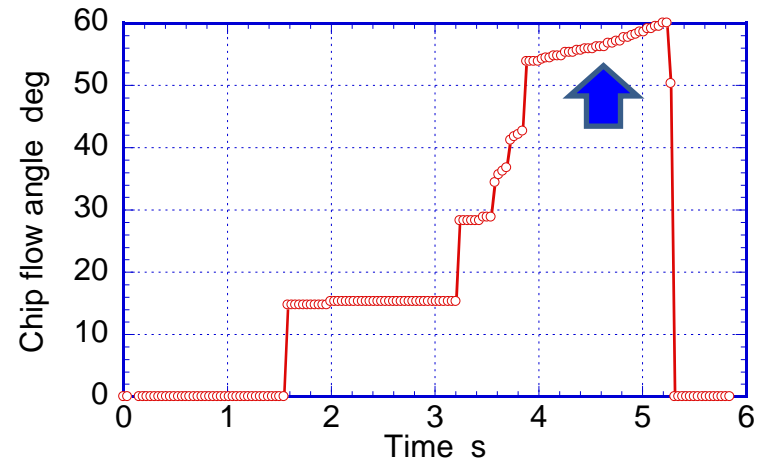
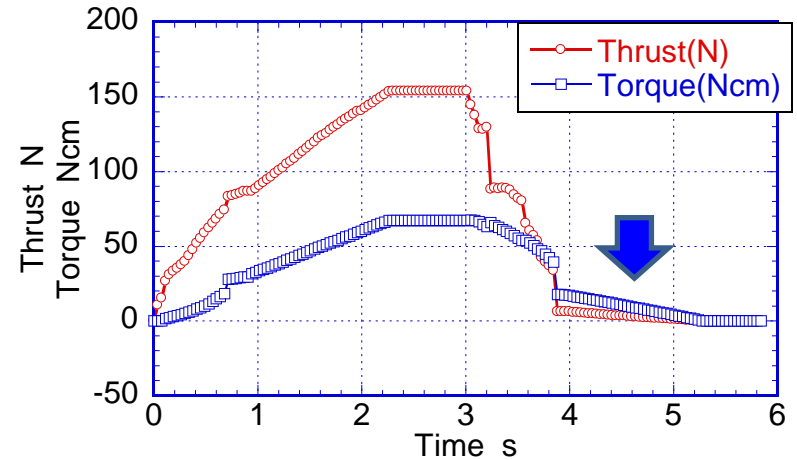
✓二段切れ刃のドリルへの適用



切れ刃モデル



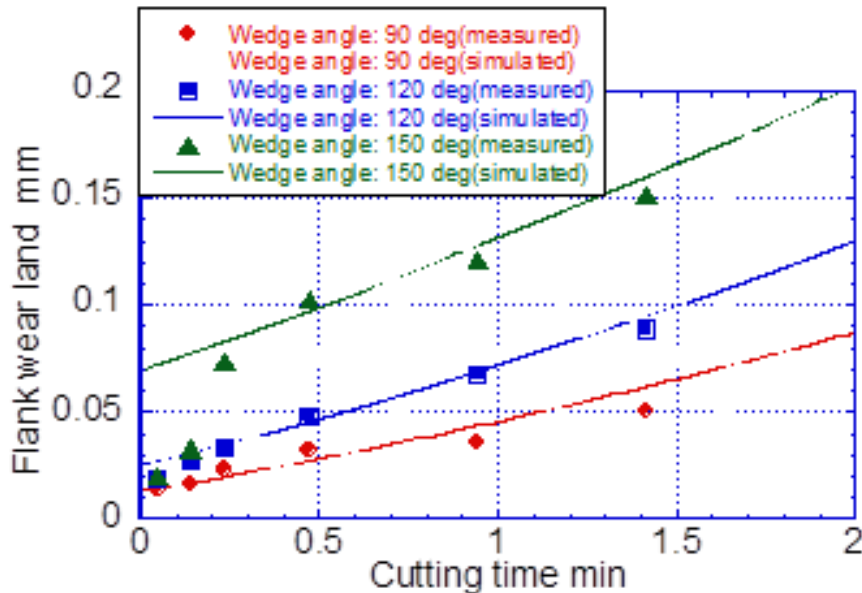
切削温度解析例



切削力と切りくず流出角

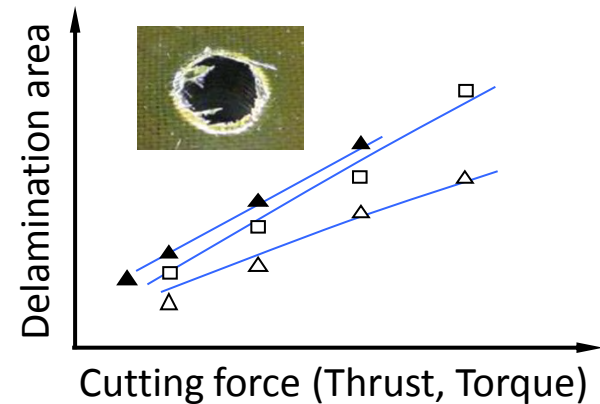
切削加工 (IV) : CFRPのドリル加工 (3)

✓ ドリルの摩耗 (通常の直径6mmのドリル)



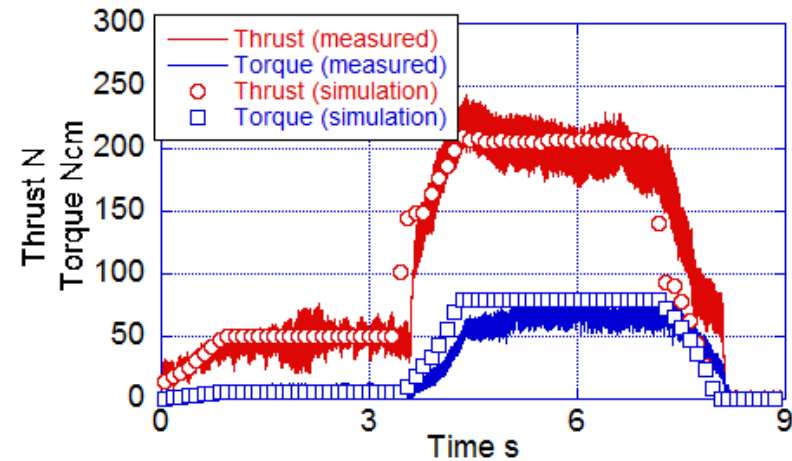
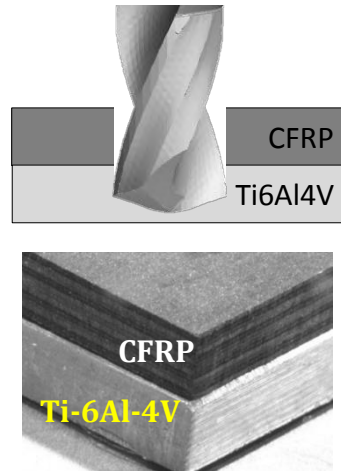
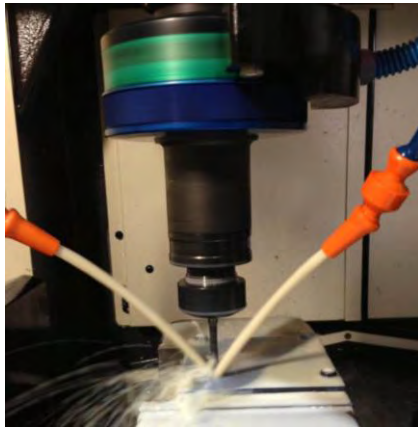
工具摩耗の増加に及ぼす先端角の影響

✓ CFRPのデラミネーション (イメージ)



- ・先端角 → 小
 切削力 → 小, 切削温度 → 低, 工具摩耗 → 小
 スラスト力 → 小, デラミネーション → 低減
 加工時間 → 長
- ・二段切れ刃
 二段目の最外周切れ刃 (先端角: 小) の摩耗
 (切削速度が最大で摩耗が最大)
 → デラミネーションに直接影響

切削加工 (IV) : CFRPのドリル加工 (4)



解析結果と実測値の比較

✓ CFRPとチタンのスタック材の孔明け

- ・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
 - CFRP内壁の損傷
- ・クーラント
- ・切削条件
 - ドリル径, 刃形, 工作物の厚さを考慮
- ・CFRP内壁の損傷低減
 - 先端角 → 大
 - (切りくず流出 → 軸方向)

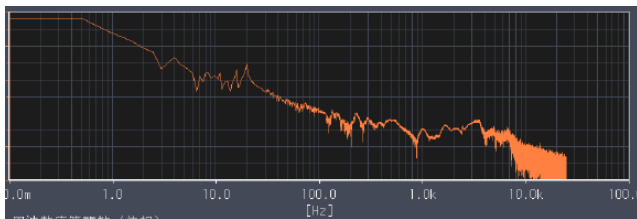
ロボット切削技術

✓ケミカルミリングから機械的なミリングへ

- ・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方策

- ・切削力の合力と作用方向の予測
- ・ロボットの動特性の把握
- ・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



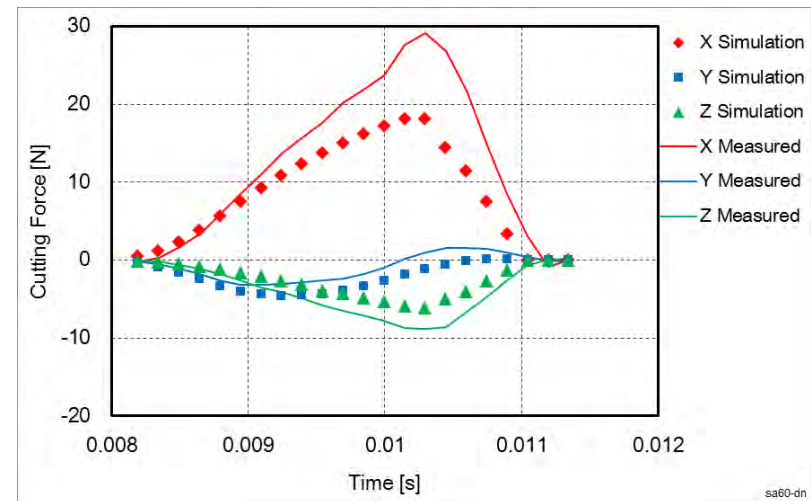
ロボットの動的コンプライアンスの計測例



ロボットによるエンドミル切削



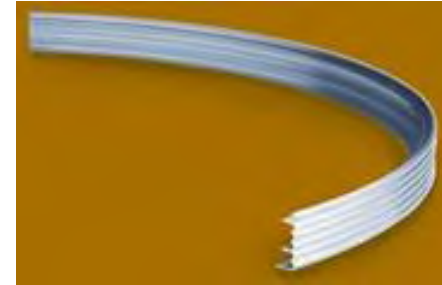
想定される加工面
(ケミカルミリングの加工面)



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

チタン合金の熱間成形加工技術

- ✓ 切りくず量・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

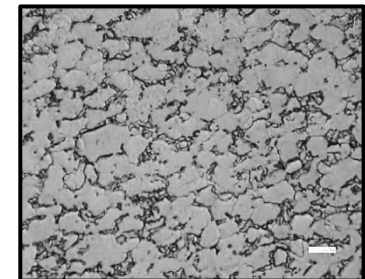
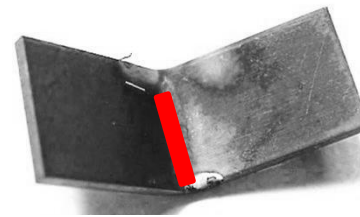


薄肉大半径部材

- ✓ 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
ストレッチフォーミング
組織制御性を高める



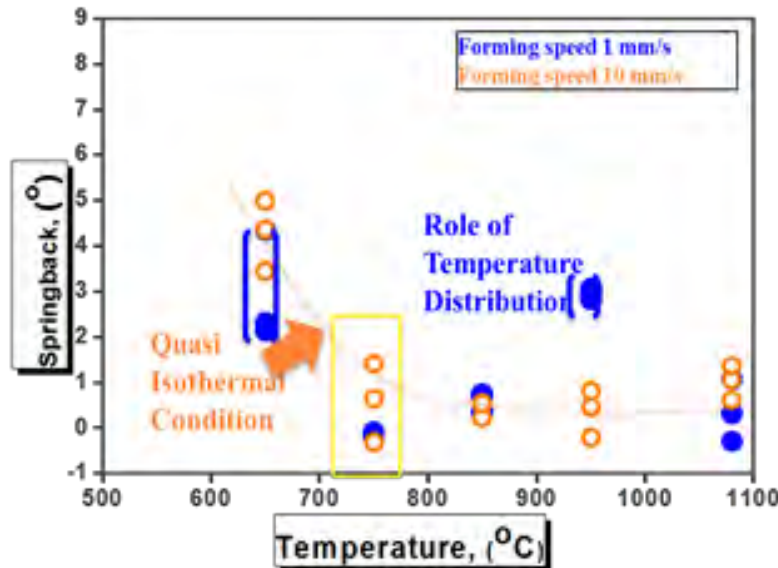
組織とスプリングバック評価

チタン合金の熱間成形加工技術(2)

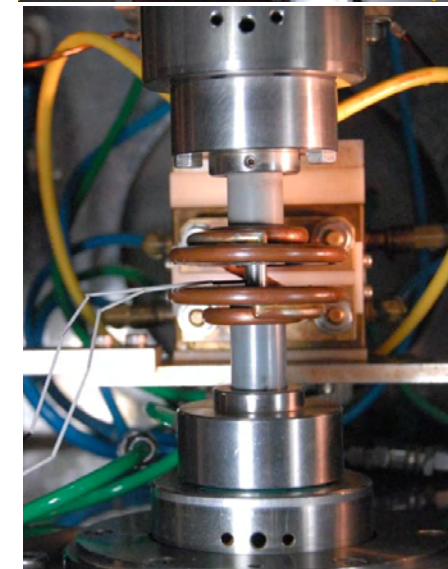
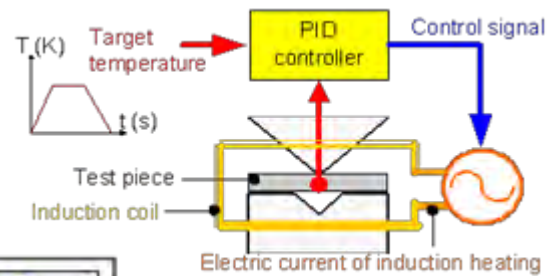
- ✓ 温度制御・ひずみ速度制御試験
- ✓ 残留応力評価
 - 定性的評価: EBSD*
 - 定量的評価:

X線残留応力測定機

*Electron Backscatter Diffraction



薄板試験片のスプリングバック

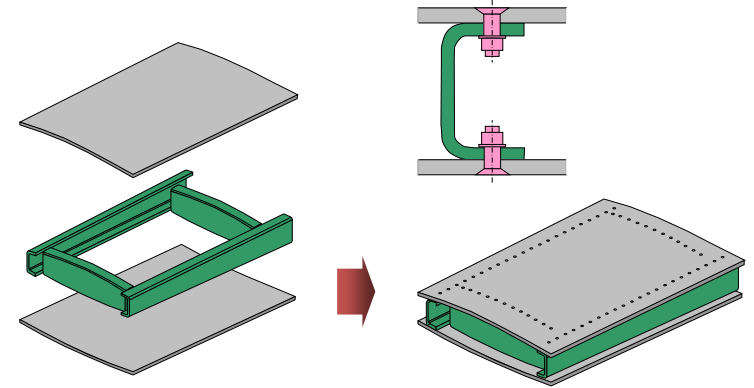


温度・ひずみ速度制御材料試験機

燃料タンク内シーリング

✓ シーリング作業の自動化

- ・燃料タンク：主翼内
狭隘な作業領域 → 厳しい作業環境
運用時に大きな変形を受ける
→ シーリングが非常に重要
- ・燃料の重さ ~ 機体の重さ
駐機時：主翼は下向きに変形
飛行時：主翼は上向きに変形



燃料タンク模型

✓ シーリング作業：人間からロボットへ

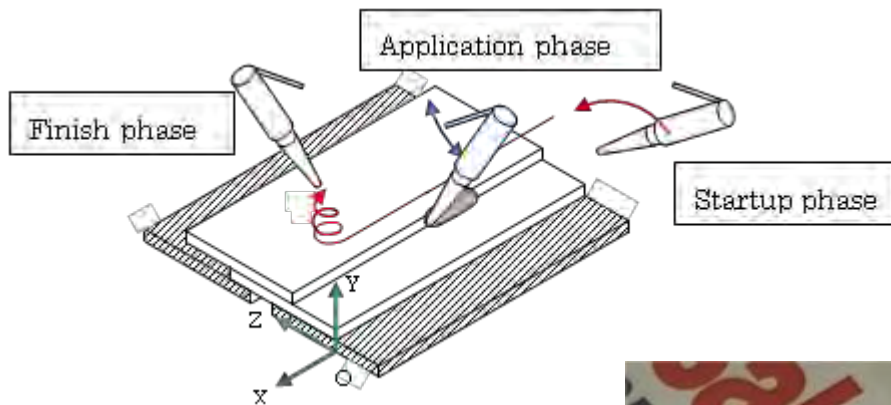


シーリングのモデル



燃料タンク内シーリング(2)

✓ シーリング作業の解析とロボットによる制御



- ・作業(ガンの姿勢, 移動速度)の解析
- ・シーラントの特性(硬化状態)の変化を考慮
- ・新しいガン機構の開発
人間 → ロボット
多少のガンの重量増大は許容される



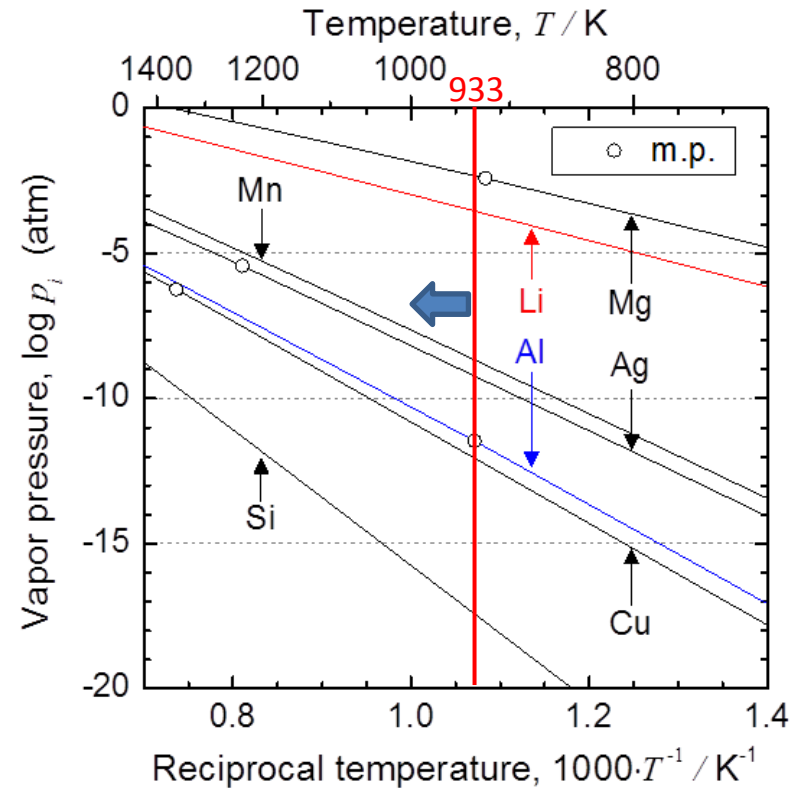
ロボットによるシーリング作業

航空機用材料のリサイクル

- ✓ アルミ-リチウム合金
 - ・日本にリサイクルシステムがない。
 - ・リチウムを抽出・除去し、ダイカスト材へと戻す日本国内のアルミリサイクルシステムによって再資源化する。

- ✓ Al-Li合金からのリチウムの抽出
 - ・Al, Liの蒸気圧の違いによる

- ✓ 抽出結果



	Sample weight (g)		Weight change (g)	Weight change (%)
	before experiment	after experiment		
A2098	51.418	50.914	-0.504	-0.98



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