



東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo



第6回CMI Symposium
12/10/2018

CMI研究開発の成果について

東京大学生産技術研究所
白杵 年



東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo



内容

- ・CMI概要
- ・研究テーマ
- ・研究成果概要



東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo



CMIとは

- Consortium for Manufacturing Innovation
- Collaborative Research Center for Manufacturing Innovation
(東大生研組織)
- NEDO Project



産学官連携により競争力のある早期製造技術開発を目指す
難削材料を安くて早く加工する技術課題
組立作業の自動化課題

- ・難削材料の高速切削加工：CFRP, チタン合金, Al-Li合金
- ・Near net shape 3Dプリント(メタル), 熱間接合, 熱間ストレッチ
- ・ロボット利用技術：ロボット切削, ロボットシーリング

産業界(24社)

Boeing
 三菱重工業
 川崎重工業
 SUBARU
 DMG森精機
 OSG
 住友電工ハードメタル
 東レ
 出光興産
 不二越
 京セラ

徳田工業
 岩戸工業
 ヤシマ
 水野鉄工
 エーシーエム栃木
 平和産業
 丸隆工業
 エヌ・ティー・エス
 KSI
 福田交易
 佐渡精密
 東京貿易テクノシステム

大学

東京大学 生産技術研究所
 東北大学
 東京農工大学
 東京電機大学
 広島大学
 新潟県工業技術総合研究所

官・行政

経済産業省
 製造産業局
 航空機武器宇宙産業課
 NEDO
 材料・ナノテクノロジー部



研究拠点

柏地区

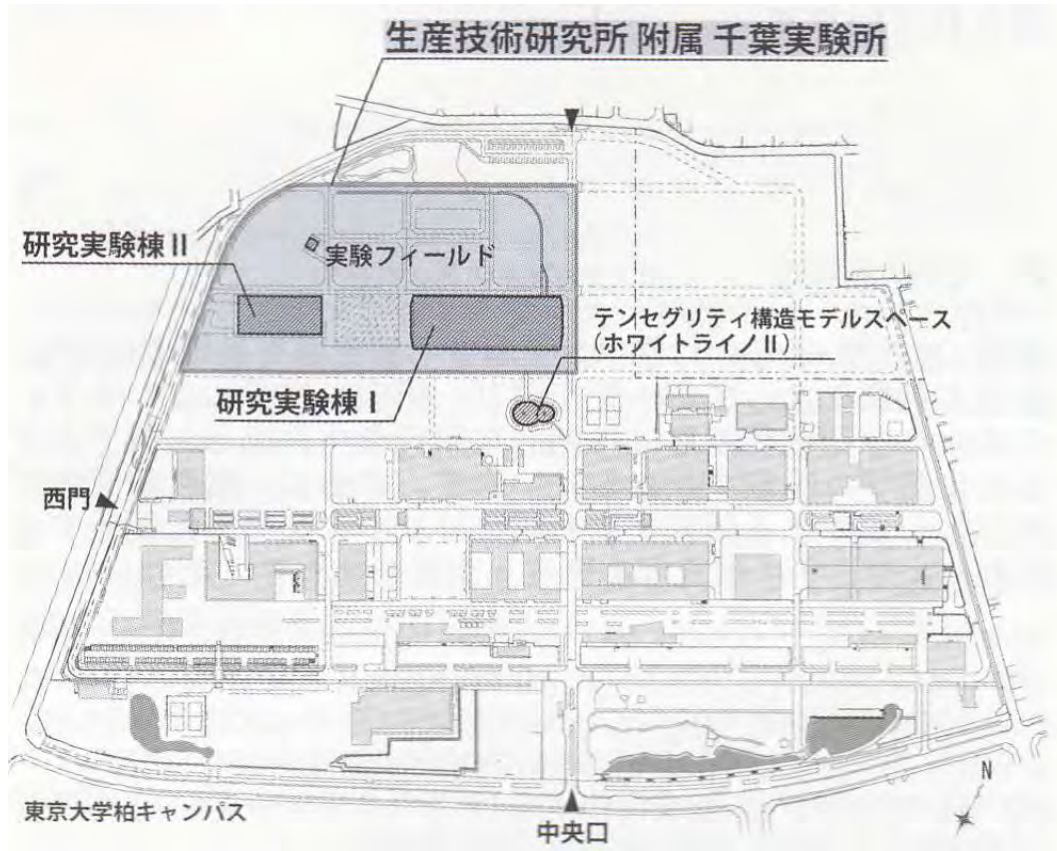
- ・切削加工関係研究課題
- ・成型加工関係研究課題

駒場地区

- ・組立関係研究課題

再委託先 (仙台, 小金井, 北千住, 新潟, 東広島)

アルミ, CFRP切削関係課題およびロボット高精度制御関係課題



研究実験棟 I
Research and Testing Complex I

Photo: Yutaka SUZUKI

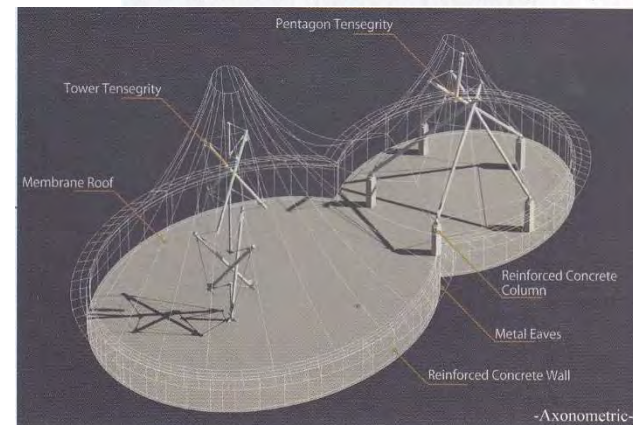


大空間実験室 (研究実験棟 I)
Open Space Lab. (Research and Testing Complex I)

Photo: Yutaka SUZUKI



研究実験棟 II
Research and Testing Complex II



テンセグリティ構造モデルスペース / ホワイトライノ II
Tensegrity Space / White Rhino II



東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo



・研究テーマ





CMI研究活動

生産技術スキル



生産科学



高能率生産技術

生産技術の飛躍的高度化

研究テーマ(FY2018)

1. 先進アルミ合金の切削加工技術開発
2. Al-Li合金切削:機械加工後の歪最小化のための高精度加工技術の開発
3. 炭素繊維複合材の切削加工技術開発
4. Additive Metal Processing (勤続接合プロセス)
5. ロボット切削システムの開発
8. 炭素繊維複合材に適した非破壊検査技術の開発

New 1. チタン合金切削(オービタル穿孔)

New 2. メタルデポジション

New 3. アルミ合金の残留応力・変形制御

New 4. ファスナーシーリング

New 5. 切削工具コンペ

他にFS 2件, 黄色はNEDOテーマ



東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo



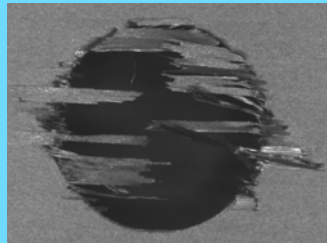
・研究成果概要



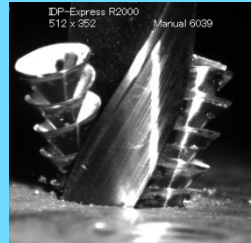
CFRP 切削技術

目的

CFRP切削技術における高能率，高品位化



CFRPの穿孔

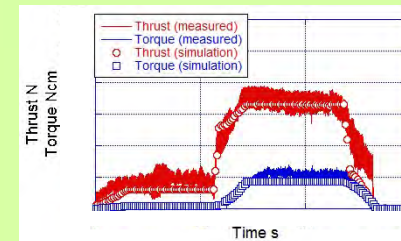


CFRP/チタン合金重積材の穿孔

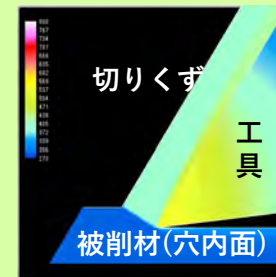
CFRPの剥離，CFRP/チタン合金重積材の切りくず処理を制御した高能率切削加工

内容

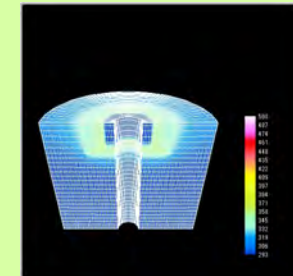
切削シミュレーションを利用した工具設計，切削条件の最適化



重積材の切削力解析



切れ刃の温度解析

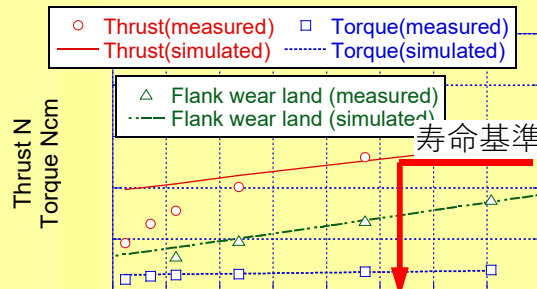


被削材の温度解析

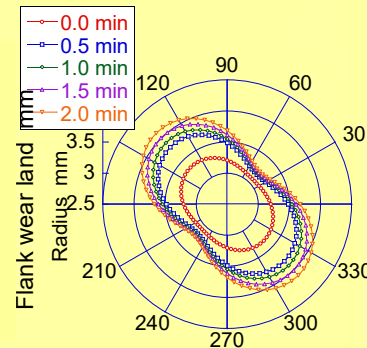
切削シミュレーションによるCFRP/チタン合金重積材の切削力解析，切削温度解析，被削材の解析の事例。これにより切れ刃の負荷や工具摩耗，CFRPの樹脂のダメージを把握できる。

成果

工具摩耗，剥離解析



工具寿命



CFRP切削時の超硬合金工具での工具摩耗経過曲線。アブレッシブ摩耗による摩耗の増加とともに，板裏面の剥離の領域が拡大していることが把握できる。これにより工具材質と形状を検討できる。

今後の課題

- CFRP/チタン合金重積材の穿孔技術の高度化
- 大口径穿孔に対する高精度，高能率化
- CFRPトリミング(エンドミル)の高能率，高品位化

複合材料構造に適した非破壊検査技術

目的

- レーザ超音波によるCFRP複合材構造の非破壊検査の高効率化
機体内部のような狭い空間での非破壊検査は、従来の超音波探傷装置を用いて手動で多点計測をしており、検査に多大な時間と労力を要している。自動化、高速化で非破壊検査の高効率化を目指す。

コンパクトなレーザ超音波検査システムによる自動化

手法

- レーザ超音波可視化検査装置(LUVI)の導入



LUVI-CP1(つくばテクノロジー社製)

特徴

- ・非接触でのラム波による2次元計測により高速化が可能
- ・複雑形状に柔軟に対応
- ・装置がコンパクト
- ・低コスト

成果①

- CFRP製の平板や複雑形状構造に対する探傷性能を評価



R部にテフロンシートを埋設して人工欠陥を形成

超音波ガイド波の伝播挙動を可視化

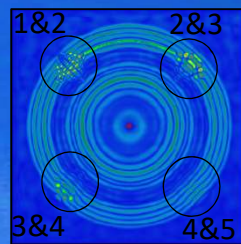


どの層間に存在する欠陥も検出可能

超音波の伝播挙動の変化と最大振幅の分布により欠陥の検出が可能

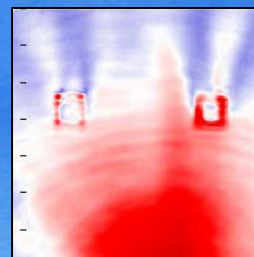
成果②

- 理論数値解析によって欠陥検出のメカニズムを解明



ラム波モードの振幅、速度、位相などの変化によって、積層板の各層間の欠陥を検出するメカニズムを、理論的に解明した。さらに、周波数依存性や探傷可能範囲も理論的に検証した。

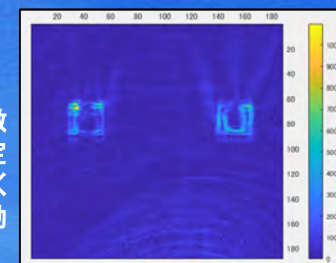
- 診断の自動化



LUVIによる計測結果



物理的な特徴量の抽出・定量化に基づく欠陥部の自動判定

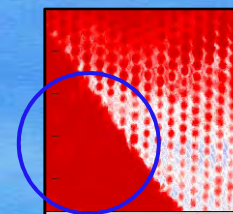


ノイズが除去され、欠陥部が鮮明に

- ハニカム構造の剥離検出



スキンとコアの剥離



剥離部では振幅が大きく、セル形状が消失している

今後の課題

- ・複合材構造の検査に適したレーザ波長の検討
- ・自動化のための診断アルゴリズムの構築

Al-Li平面大型部材の高精度切削加工

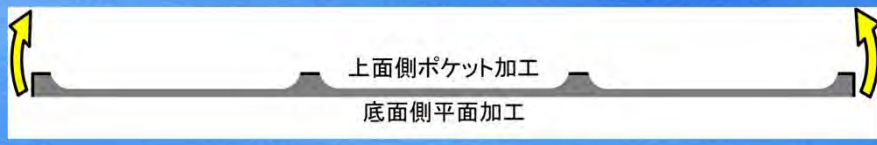


東京農工大学笹原研究室

目的

残留応力を制御可能な切削加工技術の開発による、Al-Li合金の切削加工後の歪み除去工程の削減

Al-Li合金は従来Al合金よりも切削後の変形が大きく、加工後の歪み矯正作業が必要であり、コスト高の要因となる。歪みの原因となる残留応力を制御可能な切削技術を開発することで矯正作業の省略を図る。

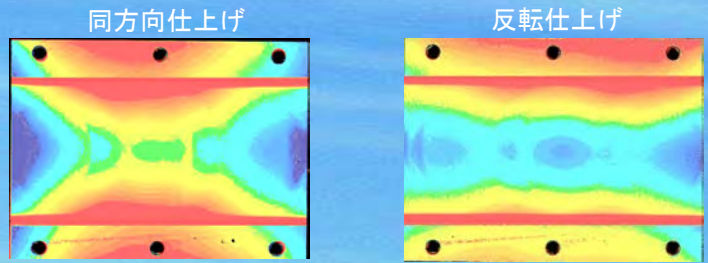


平面部品の切削加工による歪み(上面側への反り)

成果

工具形状および加工条件を最適化することで残留応力を低減
反転仕上げ切削の適用によって切削後の歪みを低減

工具形状・切削条件を最適化し、反転仕上げ切削を適用することで歪みを50%以上低減できる可能性を示した。

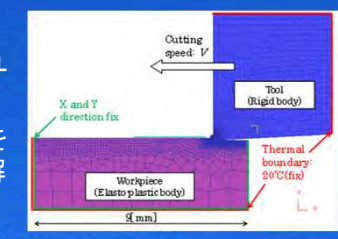


切削後の歪みの3次元スキャン測定結果

内容

●Al-Li合金切削解析のシミュレーションモデル開発

有限要素法解析ソフト「DEFORM」を用いてAl-Li合金の切削残留応力解析モデルを開発した。



2次元切削解析モデル

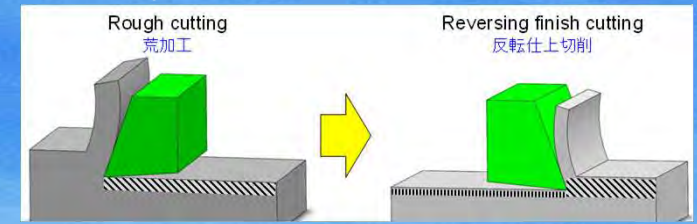
●残留応力を低減可能な工具形状、加工条件を実験的・解析的に検討

すくい角、逃げ角、刃先丸み、逃げ面摩擦、切削速度、切込み深さ、潤滑条件などが仕上げ面の残留応力に及ぼす影響を検討し、工具形状・切削条件の最適化を図った。



X線残留応力測定装置

●反転仕上げ切削等の加工方法が残留応力および歪みに及ぼす影響を検討



反転仕上げ切削

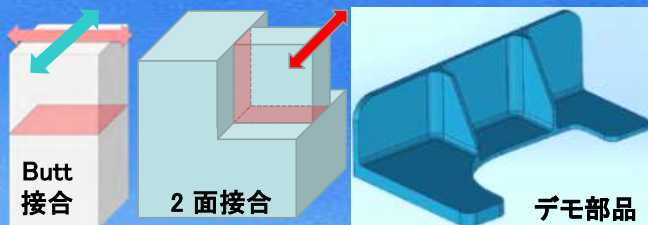
今後の課題

工具形状や加工工程、反転仕上げ切削等の各種加工方法の組み合わせで実用レベルの歪み低減を目指す。

Ti-6Al-4V合金の線形摩擦接合(LFW)特性評価

目的

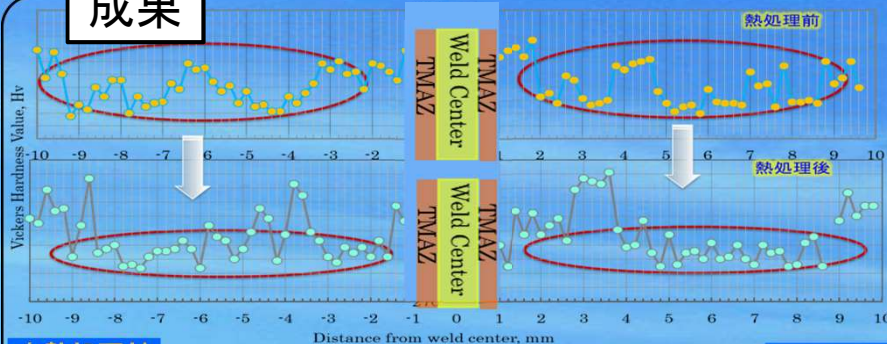
線形摩擦接合(LFW:Linear Friction Welding)とは、材料同士を押し付けながら片側の部材を線形運動させ、接合面に発生する摩擦熱によって溶着させる接合法である。本プロジェクトでは、材料特性を検証し最適な接合条件を選定する。



本プロジェクトで取り扱うLFW接合された部品

チタン合金はCFRPとの相性も良く、特にBoeing787で構造部材に多用されているが、切削加工により部品を削り出すため材料やエネルギーの無駄が多くなる。線形摩擦接合では、ニアネットシェイプの部品を製造することで、切削によるロスを最小限化する。本プロジェクトでは、ライン適用に向け、LFW材料の機械的性質(熱処理の検証も含む)を把握するために評価実験を行う。

成果



未熱処理材

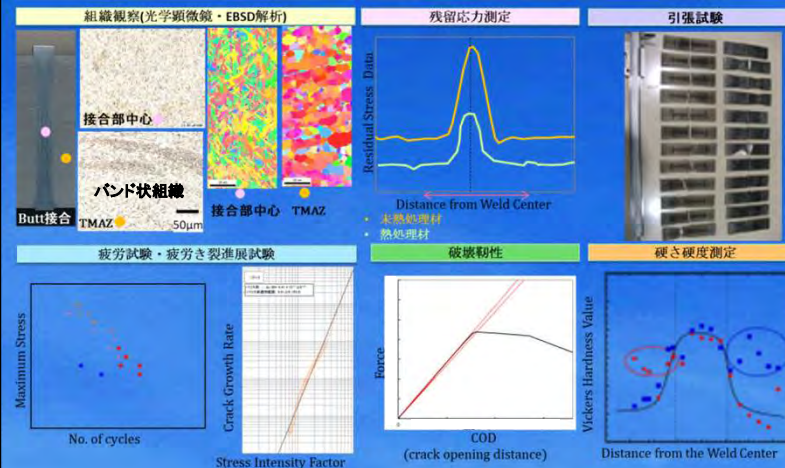
材料硬度に比較的大きいバラツキがある
←バンド状組織の存在

TMAZ領域で硬度値は低下。

←バンド状組織の減少によると思われる比較的均質の硬度データを得た
→疲労特性の向上が期待できる

熱処理材

内容



様々な評価試験を行い、結果を分析する:

- 組織観察(光学顕微鏡・EBSD解析・電子顕微鏡による結晶解析)
- 硬さ試験
- 引張試験・疲労試験・疲労き裂試験・破壊靱性試験

上記評価試験の結果を分析し、最適な接合条件を検討する。更に、接合部周辺の材料性質を改善するため熱処理の検証も行う。

今後の課題

熱履歴の異なる熱処理実験を試行し、特に疲労き裂進展特性の向上を目指す

ロボットシーリング

目的

シーリングの手作業工程の自動化による高速化と省力化



手作業



ロボットシーリング

シーリング工程は手作業によって行われており、作業者の養成には長い時間を要する。ロボットによる自動化を行うことによって、工程の高速化・省力化を図る。

成果

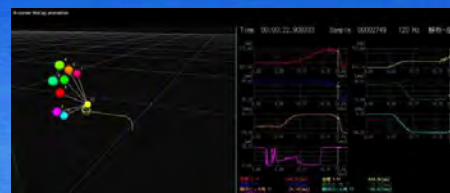
ロボットの適用による、作業時間の短縮および品質の向上と均一化



複数種類のシーリング形態において、作業の効率化、品質の向上および均一化を行った。また、適用箇所によっては専用のノズルを開発し、仕上げ工程の省略を図った。

内容

- 熟練者の手作業をモーションキャプチャーでデータ化し、解析・評価・最適化し、ロボットの運動に反映

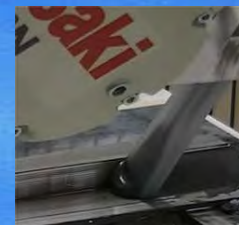


モーションキャプチャーによる運動解析



ロボットシミュレーション

- ロボットに特化したシーリングガンの開発



新しい機構の開発により、従来のシーリングガンよりもシーラントの吐出量を安定させ、また、吐出の開始・終了のタイミングをロボットによって高精度に制御することに成功した。

- シーリング形態の異なる、複数種類の部材において自動化を達成

今後の課題

更に多くの種類の部材に対して、シーリング作業の自動化を目指す

目的

～切削加工前素材の残留応力緩和～

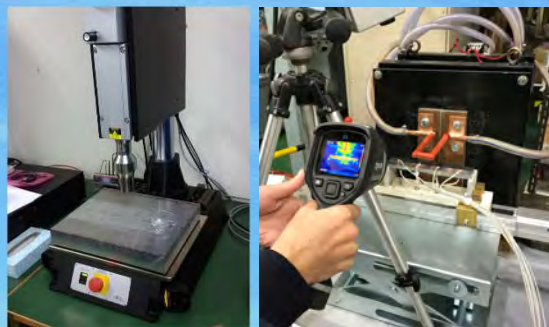
切削加工により製作される航空機用大型部品は、素材に残る内部応力により微小変形が生じることから、現状では手加工による修正行程が必要となっており、多大な工数ロスが発生している。本研究では、素材の残留応力を予め緩和することにより、寸法通りの切削加工を実現し、前記補修工程を不要とすることを目的としている。



航空機用大型切削部品イメージ

成果

～各緩和手法のメカニズム解明と効果の検証～



「振動」と「温度」をキーファクターとした、複数の残留応力低減手法について、効果の検証を行っている。効果の見られた手法について、そのメカニズムを解明する。

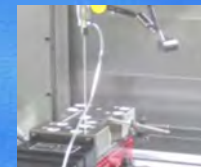
内容

- 「振動」による各種残留応力低減手法検証
- 「温度」による各種残留応力低減手法検証
- 「上記の組み合わせ」による残留応力低減手法検証
- 表層残留応力の評価



Rigaku AutoMATE II (XRD)

- 素材内部残留応力の評価



MIRS法(穿孔法)

- 残留応力低減手法実施後の材料特性評価
- 各残留応力低減手法のメカニズム解明

今後の課題

- ・メカニズムの明確化
- ・実機ライン適用手法の選出・詳細検討 など

アルミ合金切削

新潟県工業技術総合研究所

目的

ポケット形状部品切削加工の高能率化



ポケット形状

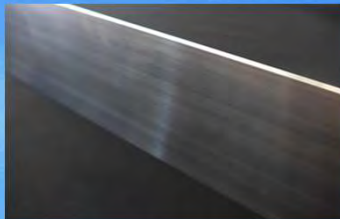


側壁部に発生したびびりの例

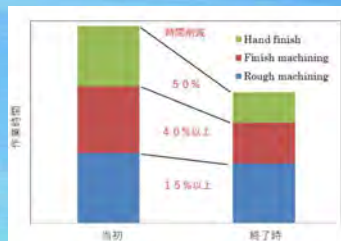
側壁部仕上げ加工における“びびり”やミスマッチの発生しない安定した加工を実現することにより、加工時間の短縮を図る。

成果

安定した側壁部仕上げ加工の実現と高能率化



実部品を想定したモデル形状加工において、開発した工具と加工法を適用した結果、びびりやミスマッチのない高品位かつ高能率な加工が可能であることを実証。

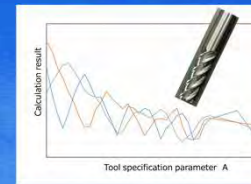


■ 成果 (加工時間で評価)

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40%以上短縮
2. 荒加工: 15%以上短縮

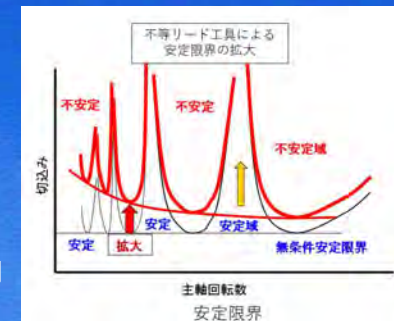
内容

●側壁部仕上げ加工工具の開発



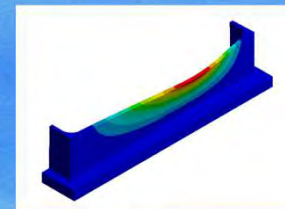
設計・解析

- ★高回転速度の安定域を使用
- ★最適エンドミルの製作



側壁部の高速仕上げ加工の実現: 軸方向切込 ÷ 側壁高さ

●側壁部仕上げ加工法の開発



シミュレーション等により、最適な側壁部仕上げ加工法を検討。



5軸マシニングセンターによる加工試験

今後の課題

荒加工～仕上げ加工の高速化・高切込み化を実現することにより、さらなる加工時間の短縮を目指す。

オービタルドリル加工技術

東京大学土屋研究室

目的

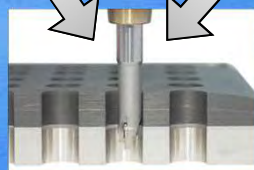
航空機部材を積層同時ドリル加工で高効率・高品位を確保



ヘリカル軌道専用加工機



小形エンドミル

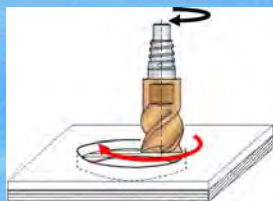


オービタルドリル加工

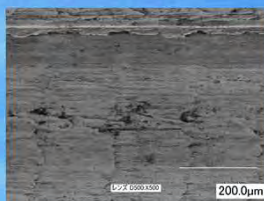
現状、航空機部材を組立するために締結部をドリルにより穿孔加工している。このドリルによる穿孔加工を小形エンドミルを用いたヘリカル軌道で加工する専用機による加工へ代替を検討することで、小形エンドミル工具でも大きな穿孔径の加工が可能になり、更にドリル加工よりも高効率、疲労強度向上など高品位な加工を目指す。

成果

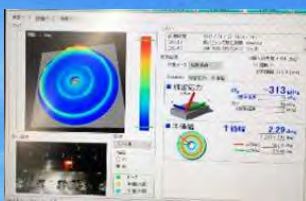
マシニングセンタでの穿孔予備実験により高品位加工を確認



小形エンドミルによる断続切削



表面観察例



残留応力測定例

5軸マシニングセンターで小型エンドミルをヘリカル軌道で動かし、予備実験を行い、オービタル加工の可能性を確認した。

内容

●マシニングセンタでの穿孔予備実験を実施



マシニングセンタ

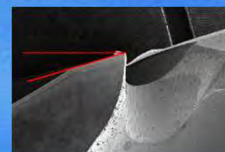


穿孔予備実験

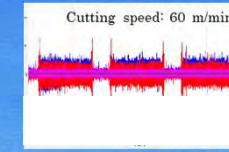
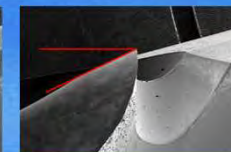


マシニングセンタで種々の特殊な小形エンドミル工具や特殊工具を組み合わせ、ヘリカル軌道で動かし穿孔予備実験を実施

●カスタマイズした小形エンドミル工具による穿孔予備実験で評価を行ない品位を検討



カスタマイズした小形エンドミル



評価例(切削抵抗)

刃先形状をカスタマイズした小形エンドミル工具と加工条件の組合せを変えて穿孔予備実験を行い、切削抵抗や残留応力などを評価して加工品位を検討した。

今後の課題

今後、オービタル専用加工機での加工実験を行い、高効率、高品位な加工を目指す。



東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo



ロボット切削

目的

6軸多関節ロボットを用いた新しいシステムの開発



6軸多関節ロボット

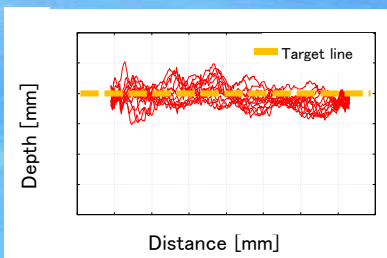


ミーリングヘッド

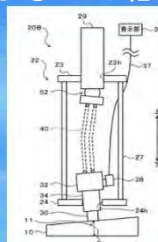
多関節ロボットにミーリングヘッドを搭載したロボット切削システムを開発し、従来加工法に対してランニングコスト低減およびロボットによる加工精度向上を目指す。

成果

ロボットの適用による、加工精度向上と自動化によるコスト低減



開発したオフライン補正システムを利用した際の加工後の深さ精度測定結果の一例。

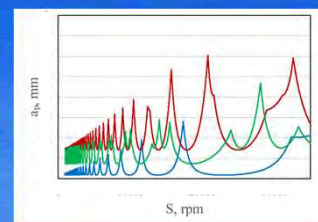


自動板厚測定システム

- ①ケミカルミリングの代替法としてロボット切削の有効性を提案
- ②板厚測定の手法と機構を開発し特許を出願中

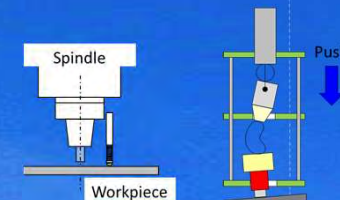
内容

●ロボットの特性把握



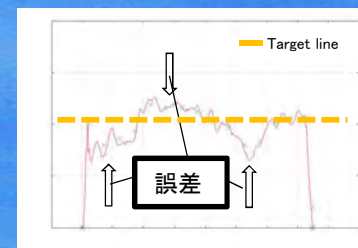
安定加工限界線図による静的な剛性評価の例

●ロボットによる自動計測システムの開発



被削材の「うねり」や「板厚」の自動計測システムの提案

●ロボットの運動特性把握と誤差補正システムの開発



NC指令値に対してターゲットからズレた動きを補正するシステムを提案。自動計測システムを活用し補正精度向上を検討。

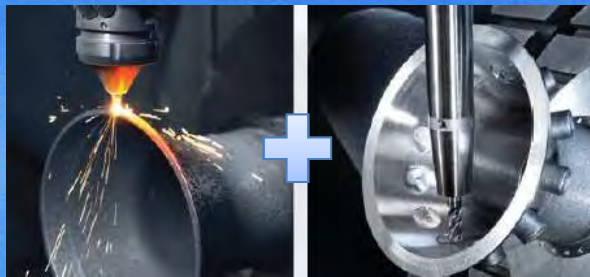
今後の課題

所要の加工精度を達成するためにリアルタイム補正技術の開発を目指す。

メタルデポジション

目的

- ①低コストで高い熱効率を持つ冶具の造形
- ②異種金属の積層造形によるコスト低減



金属粉末積層

切削加工

金属積層造形+切削加工を同一の機械で行うことで複雑形状の高精度・高エネルギー加工を実現しコスト削減を図る。
温度特性の異なる異種金属の積層造形を行い新しい金属部品を提案する。

成果

最適積層条件の確立, 異種金属積層の提案



条件最適化の一例



最適積層条件で造形した耐熱合金



異種金属積層造形の一例

- ①最適積層条件を確立し大型構造物造形への指針を得た。
- ②基礎実験により異種金属積層造形への指針を得た。

内容

- ①積層条件を最適化し造形形状の大型化を図る。
要求される大型部品を積層+切削で製作し実用化に向けた評価を実施。

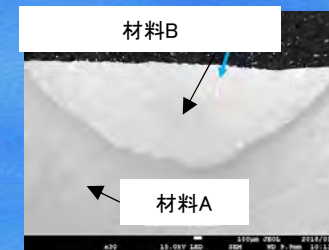


単純形状による耐熱合金の積層条件最適化



実験装置

- ②積層界面の分析・材料特性(硬さ)の評価



SEM(走査型電子顕微鏡)やEDS(エネルギー分散形X線分光器)を利用し積層界面の分析を行い組織の状態を観察。
マイクロビッカース硬さ試験を行い材料特性を簡易的に把握。

異種金属の積層断面SEM観察写真

今後の課題

今後、熱応力解析シミュレーションによる変形の推定および積層金属の機械的特性評価を行い、造形物の高精度・高品質化を目指す。

Background, Approach and Goal

Deposition of metal on previously formed or machined object

Additive & subtractive integrated manufacturing

- 1) Vast cost reduction by creating a multi alloy part and complexity of detail part
- 2) Making a single unit with multiple alloys
- 3) To establish process parameters to mechanical properties for Invar Alloy in LMD

Laser Deposition (additive)



Milling(subtractive)



Planned scheme

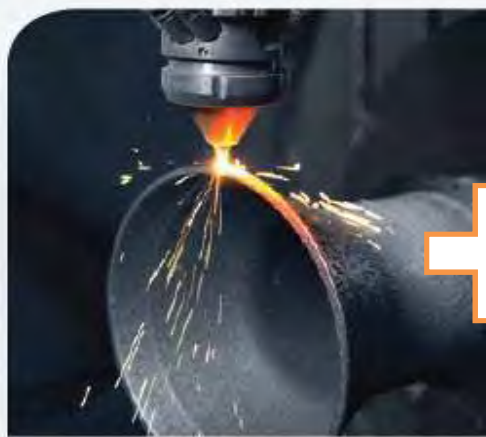
-Development of generic technology for jig application with 3D printer-



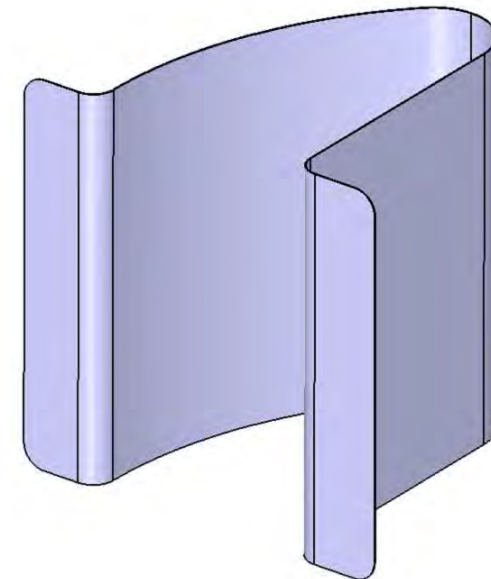
Fabrication of Jig structure

Fabrication of Jig structure for an exhibit of CMI Symposium

Laser Deposition



Milling



Draft 1

(Draft of Structure made by MHI)

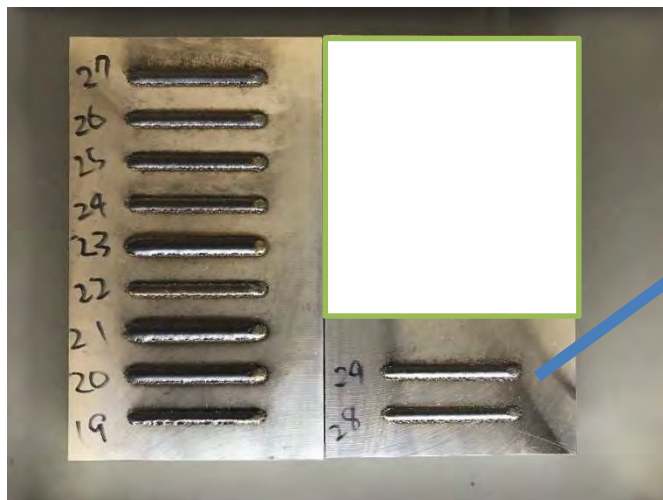
Fabrication step

First trial fabricate using SUS316L powder

After that we will try to fabrication by INVAR powder

Results of optimization of process conditions

-Development of generic technology for jig application with 3D printer-



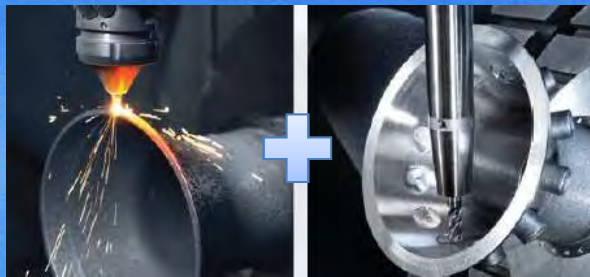
Cross section view
Upper and Lower bead size, bead height and width are measured by microscope

Invar 36 on SUS316L

メタルデポジション

目的

- ①低コストで高い熱効率を持つ冶具の造形
- ②異種金属の積層造形によるコスト低減



金属粉末積層

切削加工

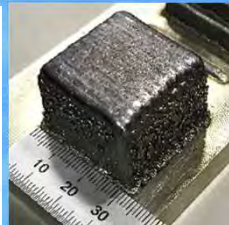
金属積層造形+切削加工を同一の機械で行うことで複雑形状の高精度・高エネルギー加工を実現しコスト削減を図る。
温度特性の異なる異種金属の積層造形を行い新しい金属部品を提案する。

成果

最適積層条件の確立, 異種金属積層の提案



条件最適化の一例



最適積層条件で造形した耐熱合金



異種金属積層造形の一例

- ①最適積層条件を確立し大型構造物造形への指針を得た。
- ②基礎実験により異種金属積層造形への指針を得た。

内容

- ①積層条件を最適化し造形形状の大型化を図る。
要求される大型部品を積層+切削で製作し実用化に向けた評価を実施。

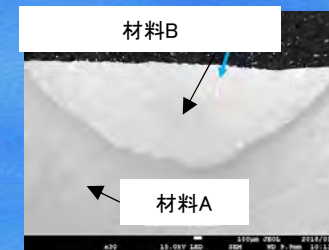


単純形状による耐熱合金の積層条件最適化



実験装置

- ②積層界面の分析・材料特性(硬さ)の評価



異種金属の積層断面SEM観察写真

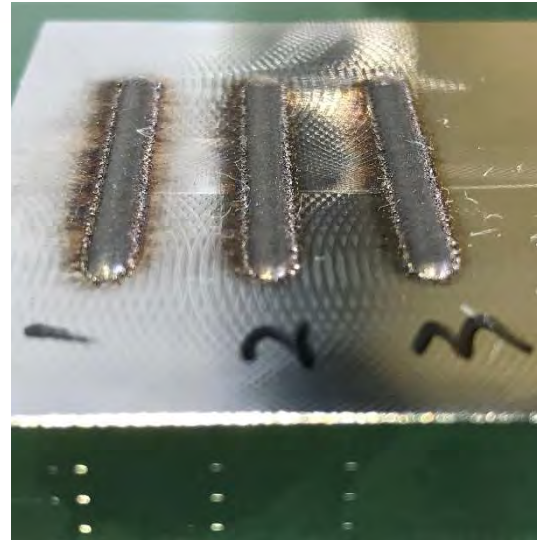
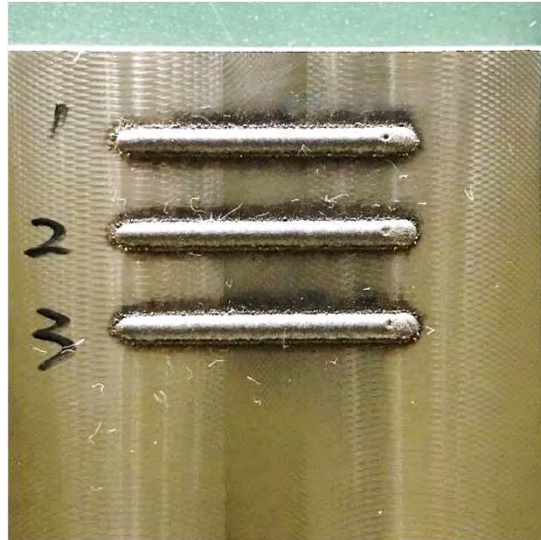
SEM(走査型電子顕微鏡)やEDS(エネルギー分散形X線分光器)を利用し積層界面の分析を行い組織の状態を観察。
マイクロビッカース硬さ試験を行い材料特性を簡易的に把握。

今後の課題

今後、熱応力解析シミュレーションによる変形の推定および積層金属の機械的特性評価を行い、造形物の高精度・高品質化を目指す。

Results of optimization of process conditions

-Development of generic technology for jig application with 3D printer-



Single line lamination using optimum process conditions

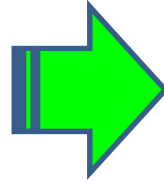
About results of trial experiment
Tried to single wall lamination in INVAR.

Parameter adjustment of constant
temperature control is in progress now.



Display sample for JIMTOF

-Development of generic technology for jig application with 3D printer-



Hight: about 13mm

Base plate size: 350 × 350mm



東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo



第6回CMI Symposium
12/10/2018

Thank you so much
for your attention

