



東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo



第7回CMI Symposium  
10/11/2019

# CMI研究開発の成果について

On the results of CMI R & D

東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

臼杵 年

Hiroshi Usuki



東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo



# 内容

Contents

・CMI概要

CMI overview

・研究テーマ

Research theme

・研究成果概要

Outline of research results



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)  
Organization of IIS, The University of Tokyo
- 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

Efficiently develop aircraft manufacturing technology through industry-academia-government collaboration and maintain the technical advantage of our country

### 難削材料を安く早く加工する技術課題

High speed and low cost cutting of difficult-to-cut materials

### 組立作業の自動化課題

Automation of assembly work

- ・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(22社)

Boeing  
 三菱重工業  
 川崎重工業  
 SUBARU  
 DMG森精機  
 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  
 青山精工  
 東京貿易テクノシステム  
 富士電波工業

#### 大学

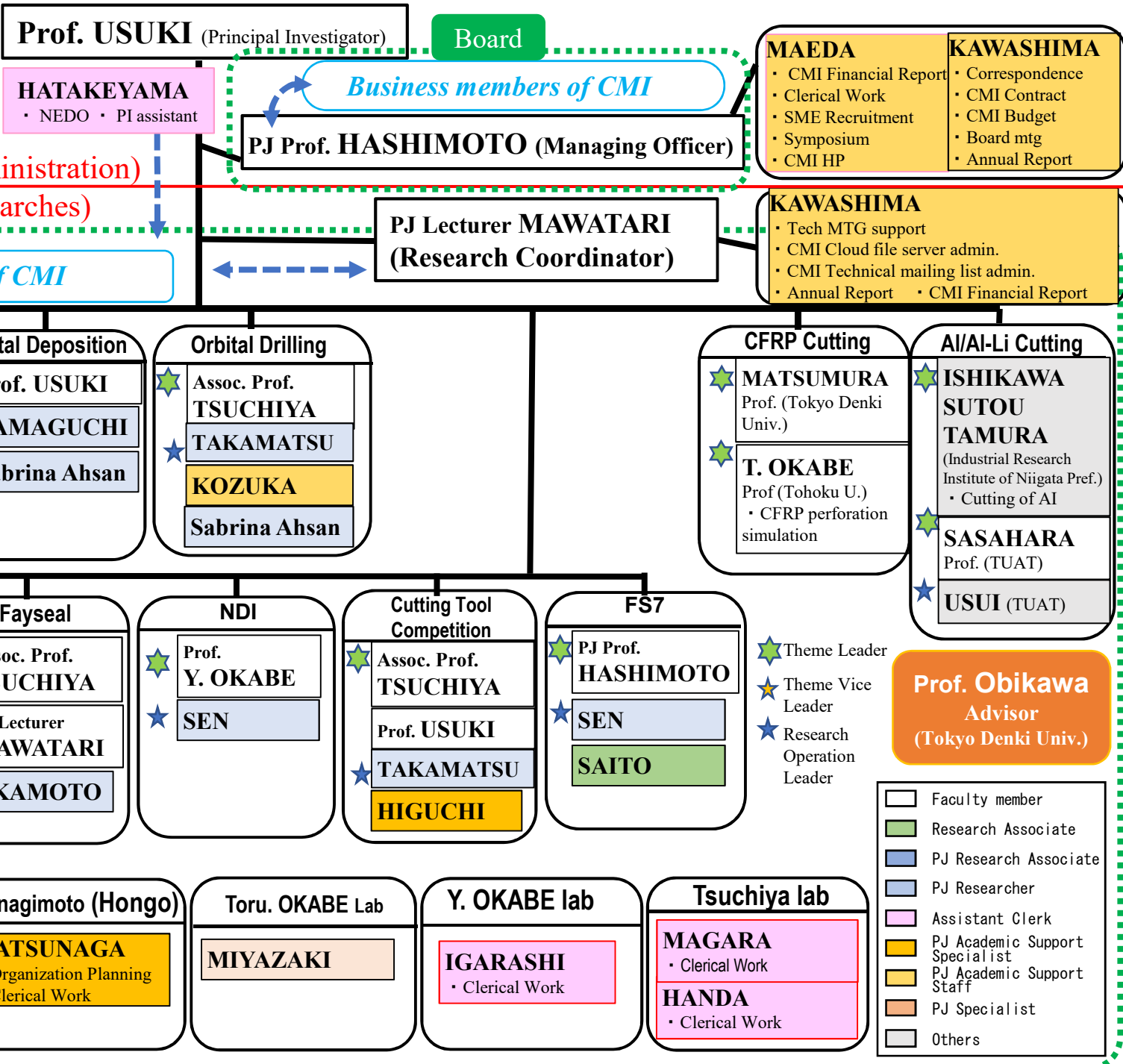
東京大学 生産技術研究所  
 東北大学  
 東京農工大学  
 東京電機大学  
 広島大学  
 新潟県工業技術総合研究所

#### 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

# CMI Organization Chart by Theme

(as of Aug. 1, 2019)





# 研究拠点

Research base

## 柏地区

Kashiwa campus

- ・切削加工関係研究課題
- ・成型加工関係研究課題

Cutting process relation research

Molding process relation research

## 駒場地区

Komaba II campus

- ・組立関係研究課題

Assembly Relation Research

Tokyo Denki University

再委託先(東北大, 東京農工大, 東京電機大,

Subcontractor

Tohoku University

Tokyo University of Agriculture and Technology

新潟県工業技術総合研究所, 広島大)

Industrial research institute of Niigata prefecture

Hiroshima University

- ・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



東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo



# ・研究テーマ

Research theme





## CMI研究活動 CMI Research Activity

生産技術スキル

Production skills



生産科学

Production Science



高能率生産技術

High efficiency production technology

生産技術の飛躍的高度化

Dramatic advance of production technology

## 研究テーマ (FY2019)

1. 先進アルミ合金の切削加工技術開発

Machining Technology for Aluminium Alloy

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

Residual Stress Control of Aluminium Alloy

3. 炭素繊維複合材の切削加工技術開発

Drillings of CFRP

5. ロボット切削システムの開発

Robotic Milling Technology

8. 炭素繊維複合材に適した非破壊検査技術の開発

NDI for CFRP

New 1. チタン合金切削(オービタル穿孔)

Orbital Drilling

New 2. メタルデポジション

Metal Deposition

New 3. アルミ合金の残留応力・変形制御

Residual Stress Control of Aluminium Alloy

New 4. フェイシーリング

Robotic Sealing Technology

New 5. 切削工具コンペ

Cutting tool competition

他にFS 1件, 黄色はNEDOテーマ

Yellow shows NEDO Project





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

Outline of research results



# 先進アルミ合金の切削加工技術開発



Development of cutting technology for advanced aluminum alloy

新潟県工業技術総合研究所

## 目的 Purpose

ポケット形状部品切削加工の高能率化  
High efficiency of cutting process of pocket-shaped parts



ポケット形状

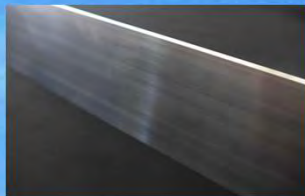


側壁部に発生したびびりの例

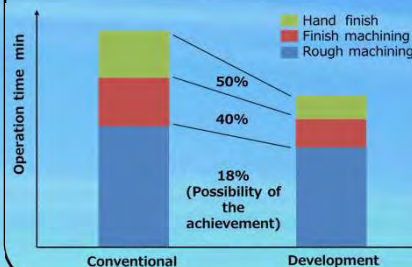
側壁部仕上げ加工における“びびり”やミスマッチの発生しない安定した加工を実現するとともに、荒加工を含めた加工時間の短縮を図る。

## 成果 Achievements

安定した側壁部仕上げ加工の実現と高能率化  
Realization of stable sidewall part finish processing and high efficiency

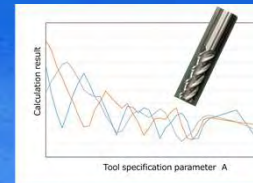


実部品を想定したモデル形状加工において、開発した工具と加工法を適用した結果、びびりやミスマッチのない高品位かつ高能率な側壁仕上げ加工が可能であることを実証。

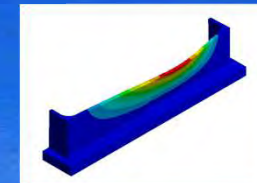


## 内容 Contents

- 側壁部仕上げ加工工具・加工法の開発  
Development of finishing tool for side wall



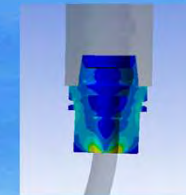
設計・解析



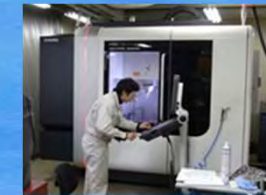
加工精度の予測

- ★最適エンドミルの製作
- ★シミュレーションによる最適な側壁部仕上げ加工法の検討  
側壁部の高速仕上げ加工の実現:軸方向切込≡側壁高さ

- 高能率化のための工具ホルダー設計技術開発  
Development of design technology of tool and holder for high efficiency machining



シミュレーションによる特性評価



設計試作品による加工試験

## 今後の課題 Future tasks

これまでの開発要素技術を実部品モデル加工に適用し、目標とする加工時間短縮を実証する。  
We demonstrate shortening at machining time by applying development element technology to the actual model processing.

# Al-Li合金切削: 機械加工後の歪み最小化のための高精度加工技術の開発



Al-Li alloy cutting: Development of high precision processing technology for minimizing distortion after machining

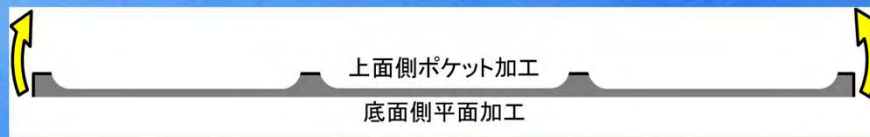
東京農工大学笹原研究室

## 目的 Purpose

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

Development of cutting technology capable of controlling residual stress by reduction of distortion removal process after cutting Al-Li alloy.

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)

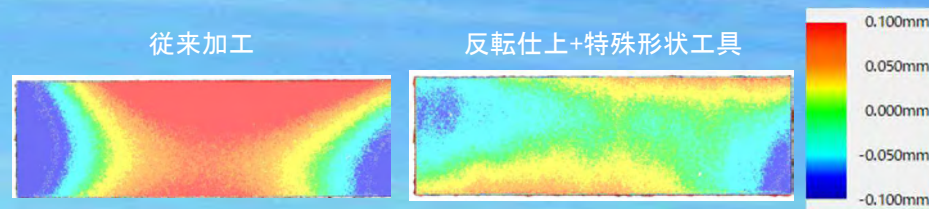
## 成果 Achievements

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

Reduction of residual stress by optimizing tool shape and processing conditions

反転仕上切削と特殊形状(刃先丸みを大きくし、切削と同時にバニシング加工を行う)工具の組合せにより切削後の歪みを大幅に低減

Significant reduction of the distortion after machining by combining reverse finishing and specially shaped tools



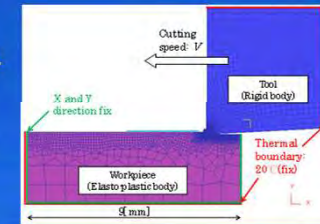
切削後表面の変形量の3次元スキャン測定結果

## 内容 Contents

●Al-Li合金切削解析のシミュレーションモデル開発

Simulation model of analysis

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

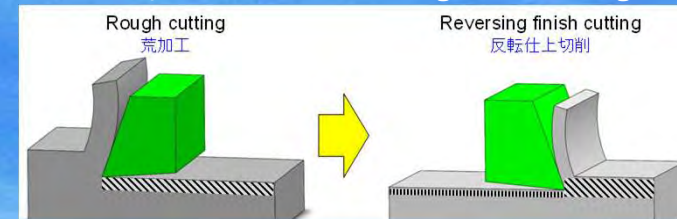
●残留応力を低減可能な工具形状、加工条件を実験的・解析的に検討 Experimental and analytical study of tool shape and processing

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・切削条件を最適化。



X線残留応力測定装置

●反転仕上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 Reversing finish cutting



反転仕上切削

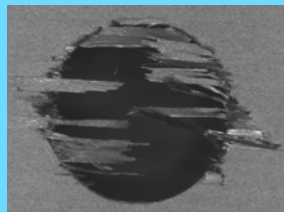
## 今後の課題 Future tasks

反転仕上切削と特殊形状工具を組み合わせ、加工条件を最適化することで実用レベルの歪み低減を目指す。

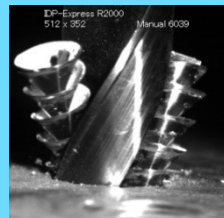
We aim to reduce the distortion at the practical level by combining the tool shape and reverse finishing and optimizing the machining conditions.

## 目的 Purpose

CFRP切削技術における高能率，高品位化  
High efficiency and high quality in CFRP cutting technology



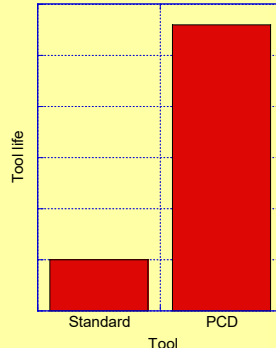
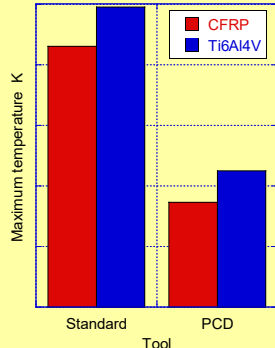
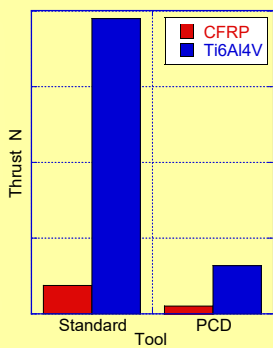
CFRPの穿孔  
CFRP drilling



CFRP/チタン合金重積材の穿孔  
Drilling of CFRP/Ti alloy stacks

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  
Cutting technology with control of delamination and chip formation in machining of CFRP and CFRP/Ti alloy stacks

## 成果 Achievements



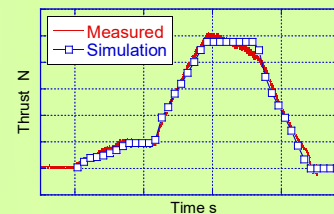
PCDの開発工具の効果: ①スラスト30%に低減. ②切削温度50%に抑制. ③工具寿命5倍に改善.

Impact of developed PCD tool: ①reduce thrust to 30%. ②control cutting temperature at 50%. ③improve tool life up to 5 times.

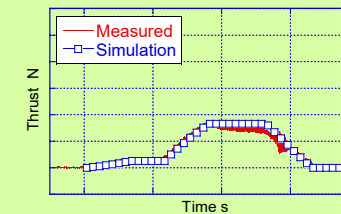
## 内容 Contents

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

Design of tool and cutting operation using cutting simulation



標準工具 Standard



PCD工具 PCD

重積材の切削力解析 Cutting force analysis



標準工具 Standard



PCD工具 PCD

チタンの切削温度解析 Cutting temperature analysis

## 今後の課題 Future tasks

- CFRP/チタン合金重積材の穿孔技術の高度化  
High performance in drilling of CFRP/Ti alloy stacks
- 大口径穿孔に対する高精度，高能率化  
Drilling of large diameter holes with high machining accuracy and efficiency
- CFRPトリミング(エンドミル)の高能率，高品位化  
High performance in CFRP trimming (milling)

# ロボット切削システムの開発

Development of robot cutting system

東京大学臼杵研究室

## 目的 Purpose

6軸多関節ロボットを用いた新しいシステムの開発  
Development of a new system using a 6-axis articulated robot



6軸多関節ロボット  
6-axis articulated robot



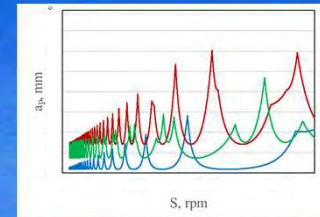
ミーリングヘッド  
Milling head

ロボット切削システムの加工精度を向上し、従来の手法よりコストを削減する

Improve the machining accuracy of the robot cutting system and reduce costs compared to conventional method

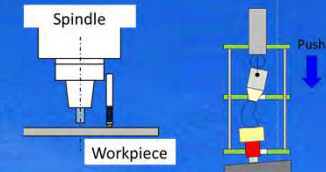
## 内容 Contents

●ロボットの特性把握  
Study of the characteristics of the robot



安定加工限界線図による静的な剛性評価の例  
Static stiffness evaluation by stability limit diagram

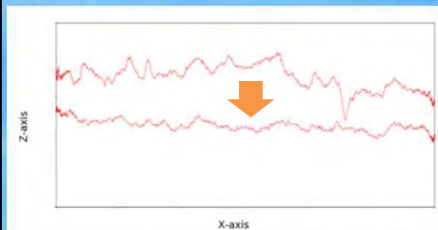
●ロボットによる自動計測システムの開発  
Automatic measurement system



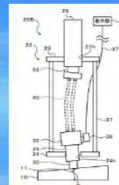
被削材の「うねり」や「板厚」の自動計測システムの提案  
Proposal for automatic workpiece thickness and waviness measurement system

## 成果 Achievements

補正による位置精度の向上  
Improve position accuracy by correction



開発したオフライン補正システムを利用した際の精度向上例  
Example of offline correction effect



自動板厚測定  
Automatic thickness measurement

- 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  
Proposal for alternative method of chemical milling
- ②板厚測定の手法と機構を開発し特許を出願中  
Method and mechanism for plate thickness measurement were developed (patent pending)



6自由度測定可能なレーザートラッカーによる工具経路の測定と補正  
Tool trajectory measurement and correction by 6DoF laser tracker

## 今後の課題 Future tasks

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。

In order to achieve required processing accuracy, we aim to develop real time correction technology.

# 炭素繊維複合材に適した非破壊検査技術の開発

Development of non-destructive inspection technology suitable for carbon fiber composite materials



## 目的 Purpose

Automation by compact laser ultrasonic inspection system

### ●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 Method

### ●レーザ超音波可視化検査装置(LUVI)の導入

Laser ultrasound visualization inspection device (LUVI)



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 Achievements

### ●CFRP製の平板や複雑形状構造に対する探傷性能を評価

Evaluation of flaw detection performance for CFRP flat plates and complex shape structures



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

7ply目と8ply目の間    4ply目と5ply目の間    1ply目と2ply目の間

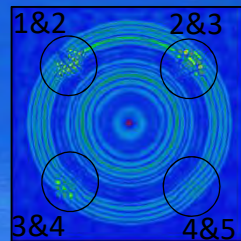
どの層間に存在する欠陥も検出可能

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 Achievements

東京大学岡部(洋)研究室

### ●理論数値解析によって欠陥検出のメカニズムを解明

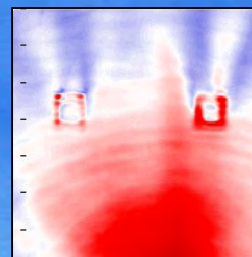


Elucidation of mechanism of defect detection by theoretical numerical analysis

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。

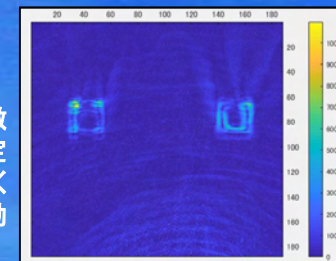
### ●診断の自動化 Automated diagnosis



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



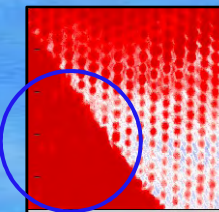
ノイズが除去され、欠陥部が鮮明に

### ●ハニカム構造の剥離検出

Peeling Detection of Honeycomb Structure



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 Future tasks

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

# チタン合金切削(オービタル穿孔)

## 目的 Purpose

Titanium alloy drilling (Orbital drilling)

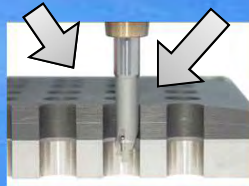
航空機部材を積層同時ドリル加工で高効率・高品位を確保  
Ensuring high efficiency and high quality by simultaneous drilling of aircraft members



ヘリカル軌道専用加工機  
Orbital drilling unit



小形エンドミル  
Endmill



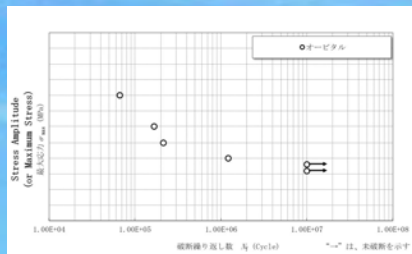
オービタルドリル加工  
Orbital drilling

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。

Currently, in order to assemble aircraft members, the fastening portion is drilled with a drill. This drill will be considered as an alternative to drilling with a helical drilling unit using a small end mill tool.

## 成果 Achievements

マシニングセンタでヘリカル穿孔した試験片の疲労強度を確認  
Confirmation of fatigue strength of specimens that were helically drilled by machining center



疲労試験結果 例  
Example of fatigue test results

マシニングセンタで特殊エンドミルをヘリカル軌道で動かし穿孔した試験片を疲労試験した。開発した特殊エンドミルは圧縮性残留応力を改善し疲労強度を付与できる可能性を確認した。

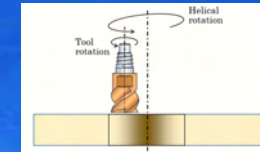
Fatigue tests were performed on specimens that were helically drilled with a special end mill in a machining center. The developed special end mill has been confirmed to be able to improve compressive residual stress and impart fatigue strength.

## 内容 Contents

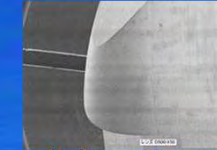
- マシニングセンタでの穿孔予備実験  
Preliminary Experiment at Machining Center



マシニングセンタ  
Machining center



穿孔実験方法  
Drilling experiment method



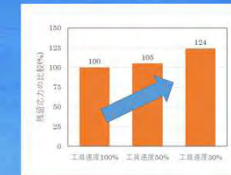
特殊エンドミル  
Special Endmill

マシニングセンタで開発した特殊エンドミルを用いたヘリカル軌道による穿孔予備実験で加工条件を検討  
Preliminary helical drilling experiment using special end mill developed at machining center to examine drilling conditions

- 特殊エンドミルを用いたオービタル専用加工機での穿孔実験で残留応力評価  
Drilling experiment with orbital drilling unit using special end mill  
Evaluate by preliminary experiment



オービタル専用加工機  
Orbital drilling unit



残留応力測定 例  
(Ex) Residual stress measurement

特殊エンドミルによる加工条件と加工方法の組合せてオービタル専用加工機で穿孔実験を行い、残留応力を評価した。  
Residual stress was evaluated by combining a special end mill, drilling conditions and drilling methods, and drilling with an orbital drilling unit.

## 今後の課題 Future tasks

今後、オービタル専用加工機で加工実験を重ね、最適な加工方法・条件を見出す。

In the future, drilling experiments will be repeated in the orbital drilling unit to find the optimal drilling method and conditions.

# メタルデポジション Metal deposition



東京大学臼杵研究室

## 目的 Purpose

- ①低コストで高い熱効率を持つ治具の造形  
Jig shaping with low cost and high thermal efficiency
- ②異種金属の積層造形によるコスト低減  
Cost reduction by stacking different metals



金属粉末積層  
Deposition

切削加工

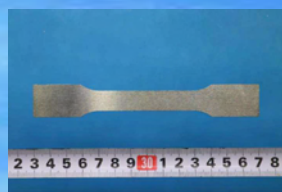
- ・金属積層造形+切削加工を同一の機械で行うことで複雑形状の高精度・高能率加工を実現しコスト削減を図る。
- ・温度特性の異なる異種金属の積層造形を行い新しい金属部品を提案する。
- ・Manufacturing with high precision and efficiency by combining deposition and cutting.
- ・Development of demo parts consisting of different metals.

## 成果 Achievements

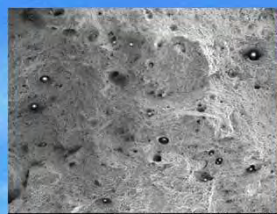
治具の造形, 引張強度などの機械的特性評価  
Manufacturing of jig, evaluation of mechanical properties



造形後の治具部品  
Laminated Jig parts



引張試験片の一例  
Test piece for tensile test

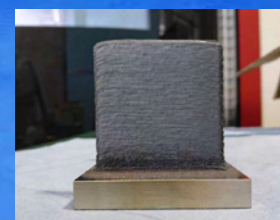


引張試験後の破断面観察  
Fracture surface after tensile test

- ・確立した最適積層条件によってデモ部品を造形し, 大型構造物造形への指針を得た。  
Establishment of laminating conditions for large-size demo parts
- ・引張強度などの機械的特性評価や破断面観察を実施した。  
Evaluation of mechanical properties such as tensile strength and fracture surface

## 内容 Contents

- 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。  
Optimize the laminating conditions and try to manufacture the large-size parts by combining deposition and cutting.

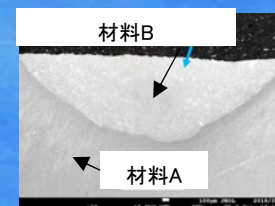


壁形状の積層実験  
Laminating experiment of wall shape sample



実験装置  
Experimental device

- ②積層界面の分析・材料特性の評価  
Analysis of laminated interface and evaluation of properties



異種金属の積層断面SEM像  
Cross-section of laminated sample with different materials

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。  
Analysis of structure on laminated interface by using SEM and EDS.

## 今後の課題 Future tasks

今後, さらに高速造形できる条件を確立する。また, 熱応力解析シミュレーションの結果と実際の実験結果の合わせこみを検討する。

In the future, we will try to establish the laminating condition for high-speed manufacturing, and to combine simulation data by thermal stress analysis and experiment results.



# アルミ合金の残留応力・変形制御

Residual stress and deformation control of aluminum alloy



東京大学柳本研究室

## 目的 Purpose

### ～切削加工前素材の残留応力緩和～

Residual stress relaxation of material before cutting

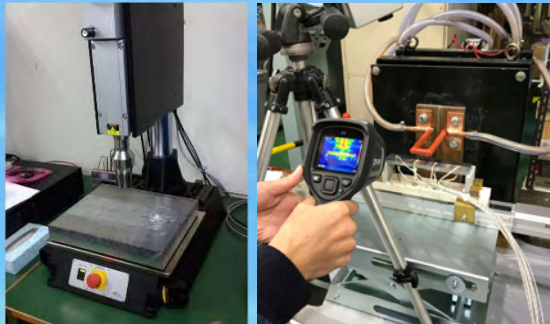
切削加工により製作される航空機用大型部品は、素材に残る内部応力により微小変形が生じることから、現状では手加工による修正行程が必要となっており、多大な工数ロスが発生している。

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。

## 成果 Achievements

### ～各緩和手法のメカニズム解明と効果の検証～

Elucidation of the mechanism of each relaxation method and verification of its effect



「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 Contents

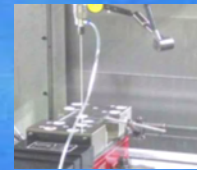
- 「振動」による各種残留応力低減手法検証  
“vibration” method
- 「温度」による各種残留応力低減手法検証  
“temperature” method
- 「上記の組み合わせ」による残留応力低減手法検証  
The combination of above two methods
- 表層残留応力の評価



Evaluation of surface layer residual stress

Rigaku AutoMATE II (XRD)

- 素材内部残留応力の評価



Evaluation of internal residual stress of material

MIRS法(穿孔法)  
(Hole drilling method)

- 残留応力低減手法実施後の材料特性評価  
Evaluation of material properties after residual stress reduction method
- 各残留応力低減手法のメカニズム解明  
Elucidation of the mechanism of each residual stress reduction method

## 今後の課題 Future tasks

- ・メカニズムの明確化  
Clarification of mechanism
- ・実機ライン適用手法の選出・詳細検討 など  
Election and detailed examination of actual line application method etc.

# ロボットシーリング

Robot sealing



東京大学土屋研究室・馬渡研究室

## 目的 Purpose

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および品質の安定化

Speeding up and labor saving by automating the handling process of sealing and Stabilizing quality



手作業



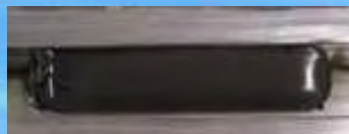
ロボットシーリング

Sealing is a highly-skilled handwork process, and it takes a long time for labors to master the technique. The process is automated by a robot for speeding up, labor saving and quality stabilization.

## 成果 Achievements

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

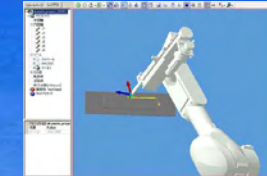
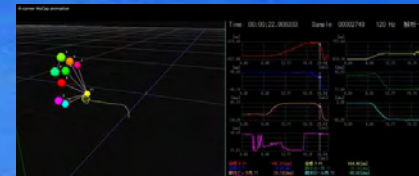
Reduction of working time, improvement of quality and uniformization by application of robot



The automation was done by optimizing nozzle geometries and robot motions for variety sections of workpiece such as flat surface, corner, and fastener.

## 内容 Contents

● 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  
Move hands' motion of experts into data using motion capture. Analysis, evaluation and optimization, reflected in the movement of the robot



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  
Development of sealing gun specialized for robot



By developing the robot sealing system, the flow rate of sealant has become much more stable than that of conventional sealing guns. The start and end of discharge can be precisely controlled by a robot.

● 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

In a plurality of types of members having different sealing forms Achieve automation

## 今後の課題 Future tasks

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

Aim for automation of sealing work for many kinds of members



# 今後の動き

Future Activity

## ・CMI全般 CMI general

-研究・広報・運営面での改善推進

Promotion of improvements in research, publicity, and administration

-研究成果の公開の推進

Promotion of publication of research results

## ・研究体制 Research organization

-課題推進強化

Strengthen research promotion

## ・研究テーマ Research theme

-終了・統合

Termination / integration

-新規課題選定

Selection of new research theme



-選択&集中

Selection & concentration of research theme



東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo



第7回CMI Symposium  
10/11/2019

Thank you so much  
for your attention

