

第10回 CMIシンポジウム

金属3D積層技術開発の 成果と今後の課題について

Achievements and Future Challenges
in the Development for
Metal 3D Additive Manufacturing

2022/10/20

藤井 和慶 Kazuyoshi Fujii

主席チーム統括

民間機セグメント 生産技術部

三菱重工業株式会社



MHI単独では解決が難しい航空機生産技術に関する研究に特化したコンソーシアムであるCMIに、2013年設立初期より参画。これまで様々な研究に取り組んできた。

MHI has joined to CMI from 2013 for solving technical issues in aircraft manufacturing processes.



The poster features a background image of an aircraft manufacturing plant. At the top left is the logo of the Institute of Industrial Science, The University of Tokyo. At the top right is the CMI logo. The main text is in Japanese and English, describing the consortium's goals and research topics. A list of participating organizations is provided at the bottom, categorized into Industry, University, and Government/Administration.

東京大学生産技術研究所
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

CMI
Consortium of Industrial Materials
The University of Tokyo

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)	大学	官・行政
Boeing	東京大学 生産技術研究所	経済産業省
三菱重工業	東北大学	製造産業局
川崎重工業	東京農工大学	航空機武器宇宙産業課
SUBARU	東京電機大学	
DIMG森精機	広島大学	NEED
出光興産	新潟県工業技術総合研究所	材料・テクノロジ一部
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		
丸尾工業		
エヌ・ティー・エス		
KSI		
福田交易		
佐藤精密		
青山精工		
東京貿易テクノシステム		
富士電波工業		

MHIは、これまで787レートアップや777Xの立上げに向けた生産技術課題を洗い出し、CMI研究テーマとして産学官連携の活動を推進することにより、この課題の解決に取り組んだ。

MHI has addressed in CMI several technical issues for the 787 production rate-up and launching the 777 X project.

787レートアップ、777X立上げに向けた生産課題の一例

複雑形状部における複合材の非破壊検査手法の確立
Improving NDI for composite material

サンディング作業の自動化
Automation for sanding

新素材Al-Liへの対応
Investigation for new Al-Li material

チタン製部品のコストダウン
Reducing cost for Ti parts

複合材積層用インバー製治具の製造コストダウン
Metal 3D additive manufacturing

ファスナーシール塗布作業の自動化
Automation for applying fastener seal

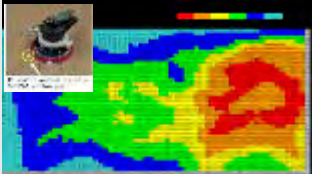

機械加工部品的高速加工化
High speed milling

Boeing 787

Boeing 777X

CMI研究では下記テーマに参画し、その成果を量産に反映すべく活動を推進している

MHI has researched the following items in CMI

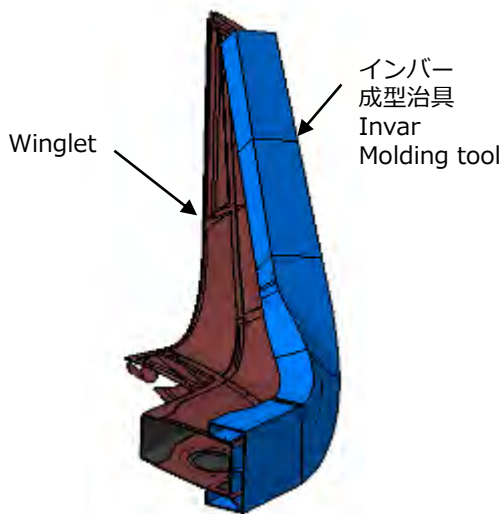
テーマ Research Item	実施期間 Period	成果 Results	量産への適用状況 Implementation plan
アルミニウム部品の 切削を高効率化する工具 の開発 High speed milling	FY2013 ↓ FY2017	アルミ重切削部品における加工時間の短縮が可能な工具及び加工方法を開発した	 777Xの機械加工フレームに適用中 Implemented for 777X
モーションキャプチャーを利用したサンディング工程の自動化のためのデータ取得 Automation for sanding	FY2016 ↓ FY2017	サンディング熟練作業者の作業を定量的データを用いて数値化し、自動化に必要なデータを取得した。	 適用先検討中 Under consideration
複合材構造用の非破壊検査の高効率化 Improving NDI	FY2013 ↓ FY2018	複合材の積層欠陥位置が自動判別可能となるデータ解析手法を構築した	 787適用に向け社内研究継続中 Implementing for 787
ファスナーシーリングの自動塗布手法構築 Automation for applying fastener seal	FY2017 ↓ FY2018	機体技術要求を満足できるファスナー自動塗布手法を構築した	 適用先検討中 Under consideration
3Dプリンタを用いた複合材部品用治具製造のための基盤技術開発 Metal 3D AM	FY2018 ↓ FY2021	基本的な造形条件の設定および、積層時間短縮や造形自由度の向上が実現できる条件の導出を実施した	 新規機種での適用に向け検討中 Under consideration

本日で説明 : will explain for detail

航空機における複合材部品の増加に対し、インバー製治具の高コスト及び長L/Tが問題となっている。本研究の目的は、金属3Dプリンターを用いてこの課題を解決し、かつ従来の鋳物や削り出しでは難しかった治具の薄肉化(5mm)を実現し、オートクレーブ熱効率向上のための治具軽量化を狙う。

In the fabrication for composite jigs made of invar36 material, there are some issues, longer lead time and high manufacturing cost. MHI aims to fix these issues by developing Metal 3D additive manufacturing technology.

適用想定するウイングレット部品 Target item



治具に対する要求事項: Requirements for Tooling

- CFRPと同等な線膨張係数であるインバー合金であること
- オートクレーブ硬化時の熱効率を上げるために薄肉、軽量であること
- 治具表面は高气密性（リークタイト）を保てること
- 傾斜やねじれを持った複雑形状を作れること

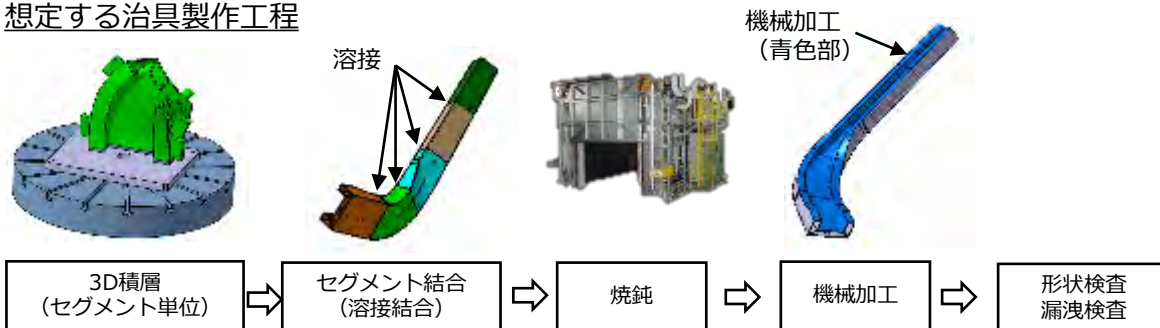
3Dプリンタ工法による重量及び製造コスト削減 :

Casting 従来鋳造工法 (t=12mm) : 131kg

3DAM DED金属積層法 (t=5mm) : 60kg

Weight 55%
Cost 20%

想定する治具製作工程



本研究には、DMG森精機製LASERTEC 65 3D (DED方式) の金属3Dプリンターを使用した。
DMG MORI Lasetec 65 3D, which can laminate metal and milling, was used in this research.

DMG MORI



機械の基本仕様

- 主軸回転数 18,000min-1
- 旋削テーブル機能付き(1,000min-1)
- 工具マガジン60本
- 主軸タッチセンサ
- 工具長機内計測
- Mダイナミクス
- MPC (=Machine Protection Control)
- 主軸ロードメータ
- レーザ出力2000W
- パウダーフィーダ 1本

※写真は最新式のLASERTEC 65 *DED hybrid*です

FY18年度よりDED方式での基礎試験を開始し、生産性向上のため造形速度の向上を行った。その結果、当初の2倍の積層スピードまで向上した。複雑形状への対応をするため、造形自由度の向上に取り組んだ。

Laminating tests using the DED started in FY 18. The laminating speed was improved to double the original. From FY21 in order to laminate complex shapes, we worked on improving the degree of freedom in shaping.



生産コストを確保するためには、造形速度 = 金属積層 + 機械加工の高速化が必須であった。そこで、溶接条件の最適化を行い積層速度を1.7倍向上させると共に、機能性リブを追加して仕上げ加工時間も削減した。

Welding conditions were optimized by Box Behnken method for increasing the laminating speed. Machining time was improved by adding the high rigidity ribs to laminating body for eliminating the chatter.

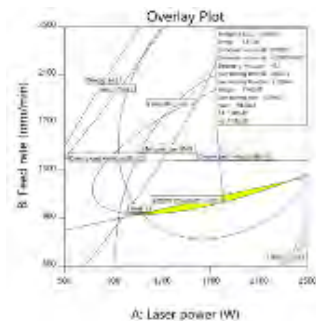
金属積層の高速化 Higher Laminating Speed

積層効率が最大となる溶接条件を Box Behnken法を用いて算出した。

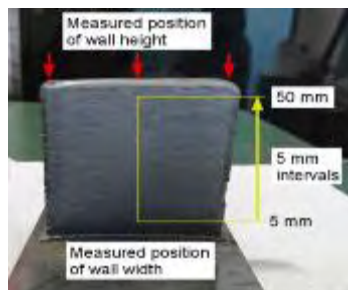
積層量 : 14.3 ⇒ 23.8g/min

積層高さ : 5 ⇒ 50mm/段

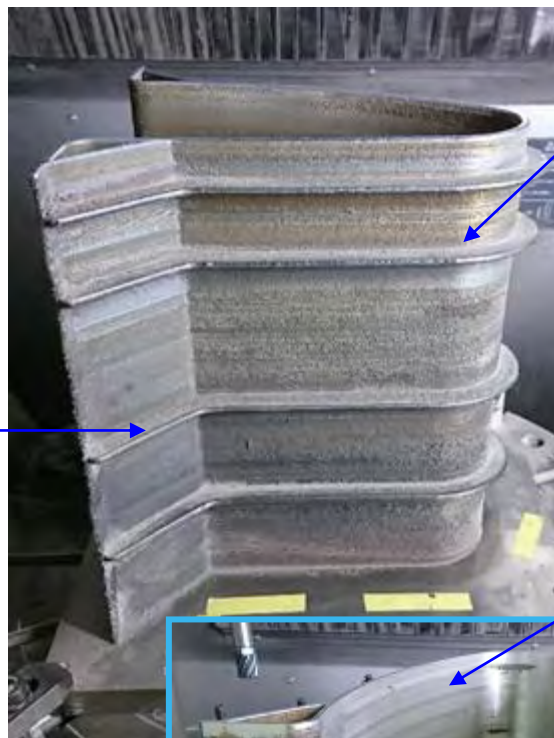
Box Behnken法
⇒



積層試験
(基礎試験)
⇒



FY19 デモ部品 Demo Part



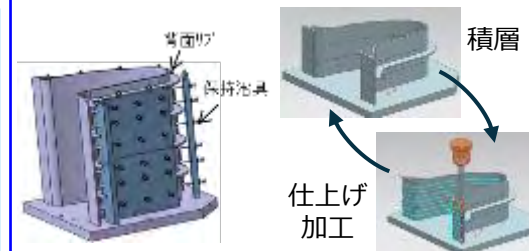
高剛性リブ形状の追加 Adding High Rigidity Ribs

機械加工時のビビリ防止（製造）及び放熱性の向上（性能）の両立を狙ったリブ形状を背面に追加した。

仕上げ加工時間の改善 Improving Machining Time

仕上げ加工時間を短縮するために、上記の機能性リブによる部品剛性UP及びビビリ防止対策として工法改善を行った。

- ・ 工具/治具改善
- ・ 1回の積層/仕上げ高さの最適化

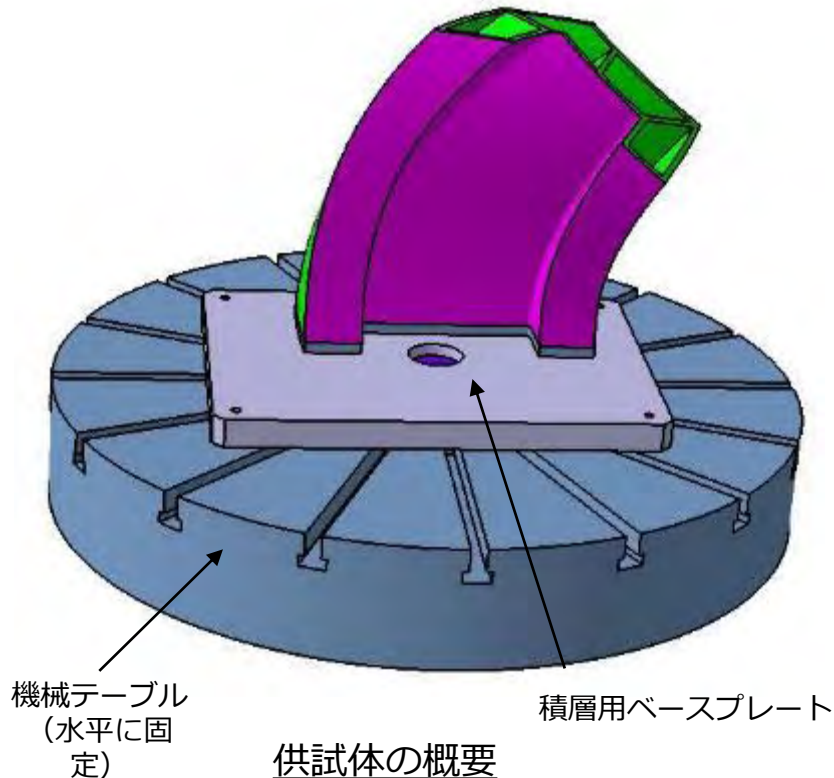




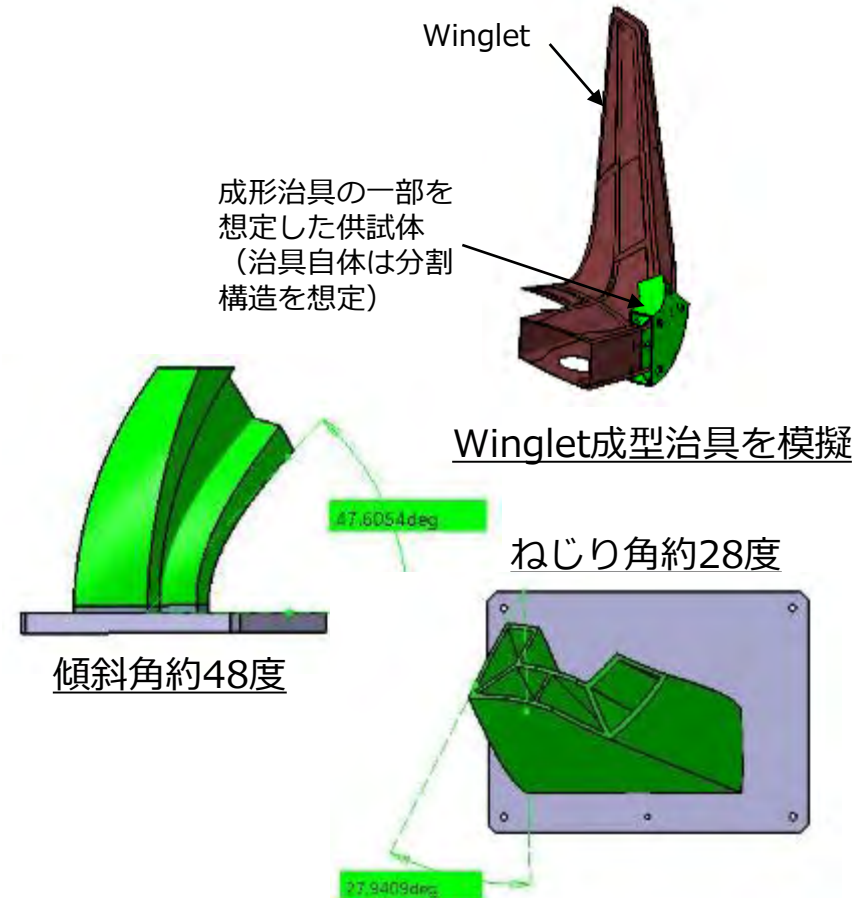


複雑な航空機の大型部品治具を狙うために、加工機側のテーブルを水平に固定したまま、最大傾斜48度、ねじり角28度の複雑な形状を積層できる条件の明確化に取り組んだ

We worked to clarify the welding conditions under which complex shapes with a maximum incline of 48 degrees and a maximum twist angle of 28 degrees without tilting machine table could be laminated.



サイズ : 380mmW×350mmD×322mmH (狙い板厚 : 3~4mm)
重量 : 14kg
粉末 : Invar36 (Sandvik製)



マルチプールサイズ、パウダー供給量と積層ヘッドの送り速度を最適化する事で、目標とする傾斜角48度の積層を行うことができた

Max. degrees of incline was achieved 48deg, which is target angle, by optimizing melt-pool size and powder feed rate and laser power.

【3軸制御による傾斜角の積層】

その条件における最大傾斜角度

	Melt-pool size 5000 [pixel]	Melt-pool size 7000 [pixel]	Melt-pool size 9000 [pixel]	Melt-pool size 10000 [pixel]	Melt-pool size 11000 [pixel]
Powder feed rate [g/min] 13.7 幅2.6mm	15° 	15° 	20° 		
Powder feed rate [g/min] 18.7	20° 	40° 	25° 		
Powder feed rate [g/min] 23.7	12.5° 	20° 	30° 		
Powder feed rate [g/min] 28.7			45° 	50° 	50°
Powder feed rate [g/min] 33.3			40° 	45° 	55° 幅4.0mm

金属粉ばらつきによる溶接不良

Effect of Quality Variation of Metal Powder on Welding Conditions

新ロットの金属パウダーに切り替えた際に、これまでに導出した条件において積層物内部に溶接不良による穴が発生し、傾斜や捩れの積層が出来ない現象が発生した

When refilled a new lot of metal powder, key holes were observed inside laminating body due to poor welding. This poor welding made it impossible to laminate the shape with tilts and twists angle.

溶接不良による穴が発生!!

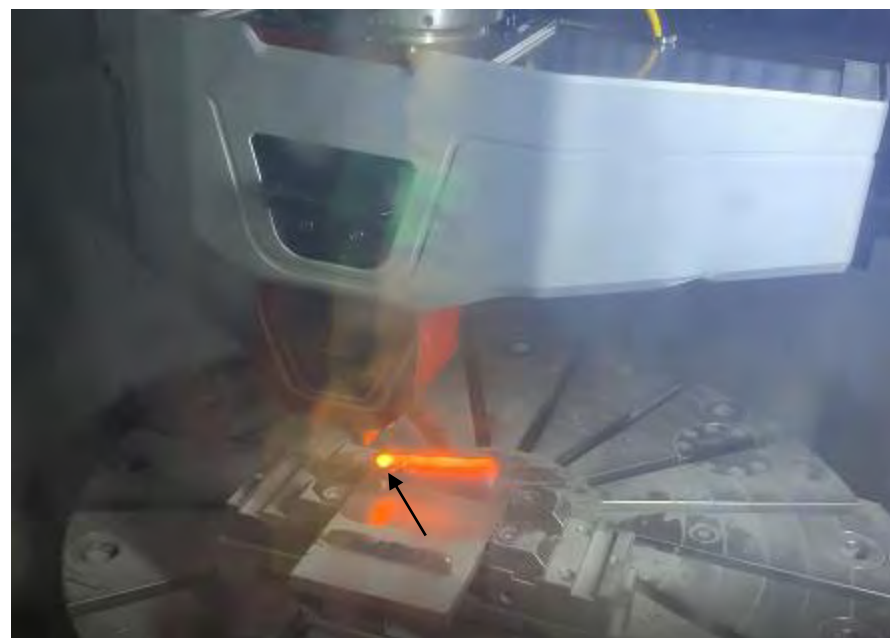
Key hole



新パウダー(Sandvik2020)での造形状態



旧パウダー(Sandvik2019)での造形状態

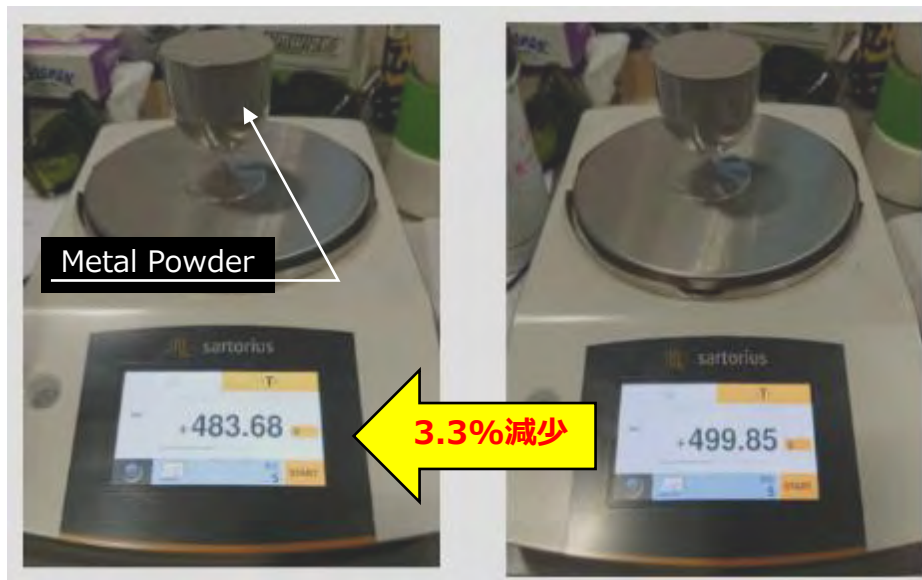


積層時に黒い点が発生し穴が発生
(2020年12月9日の積層ビデオより)

材料ロット毎のかさ密度※を計測した結果、密度が3.3%減少していた。**パウダーノズルから吐出される金属量は、材料ロットによって変化することが分かった。**

Measurements of bulk density for each material lot showed that the density had decreased by 3.3%. **It was found that the amount of metal ejected from the powder nozzle varied depending on the material lot.**

各金属粉のかさ密度調査

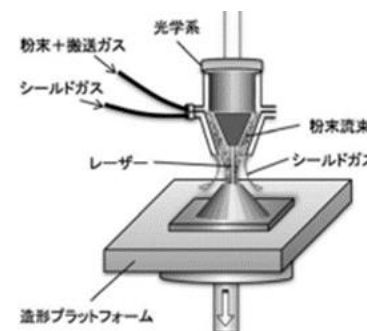
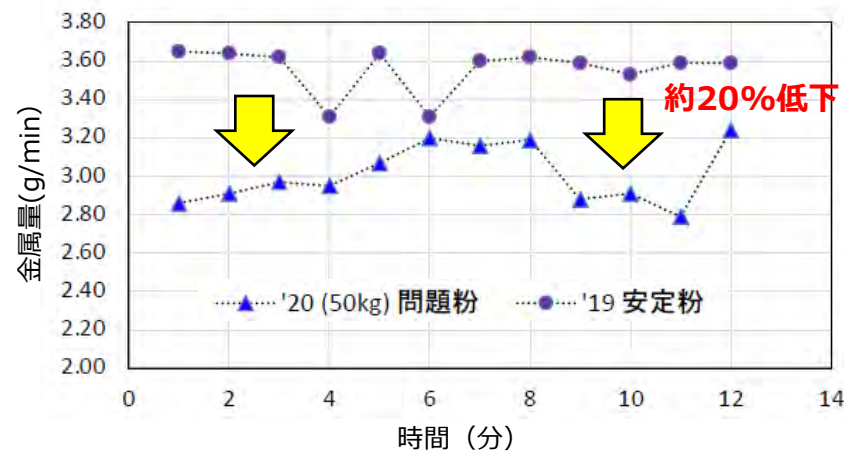


Sandvik2020
(問題粉)

Sandvik2019
(安定粉)

※かさ密度：一定体積あたりの質量、見かけの密度

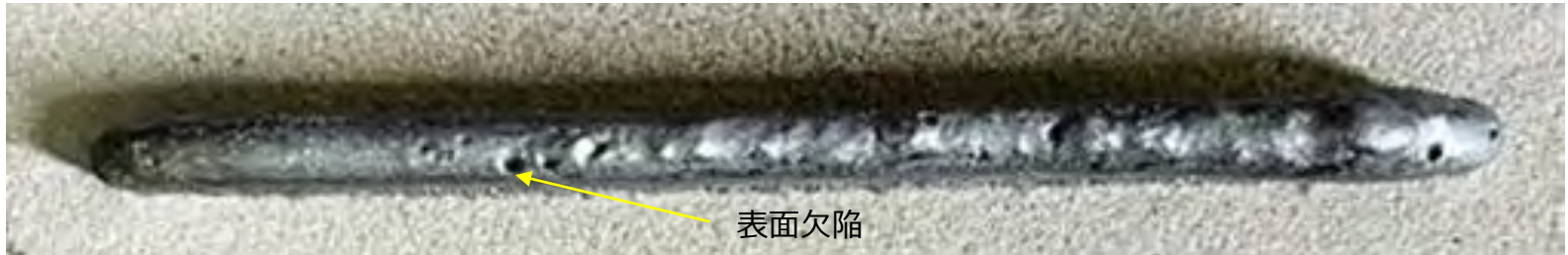
ノズルから吐出される金属質量の時間推移



供給される金属量がロット毎に変化するため、供給するレーザー量を調整する必要がある。新ロット材のかさ密度のデータに基づいて、レーザー出力を最適化することで、不適合が低減することが確認できた。

It is necessary to adapt the laser power supplied based on the bulk density on metal powder. it was confirmed that the key holes has been reduced by this countermeasure.

従来



今回



連続積層する場合は、レーザーの調整は先述した供給される金属粉のバラツキに合わせるだけでなく、既に積層されている層からの入熱量も溶接品質に大きく影響を与える。そのため、上層に行くほどこの影響が大きくなり、レーザー出力はより下げる必要がある。

In continuous laminating process, the welding quality is affected by not only the variation of powder quality but also the conducted heat from lower laminate. Thus, laser power is needed to decrease further at higher laminate.

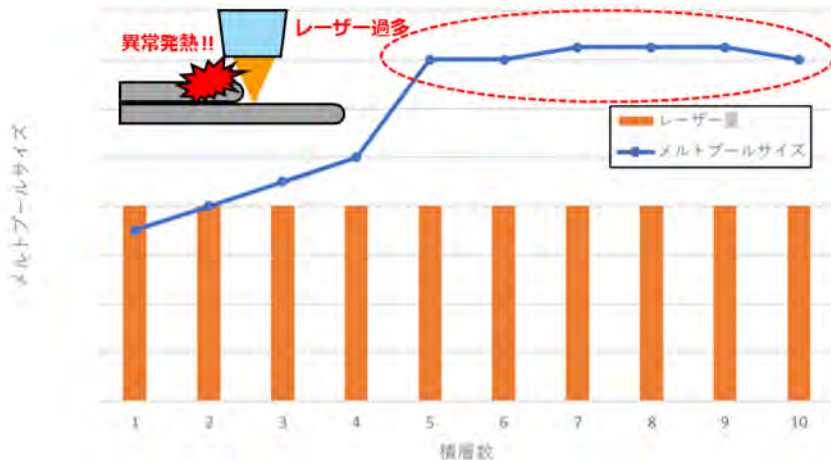
表面欠陥あり Keyholes are observed



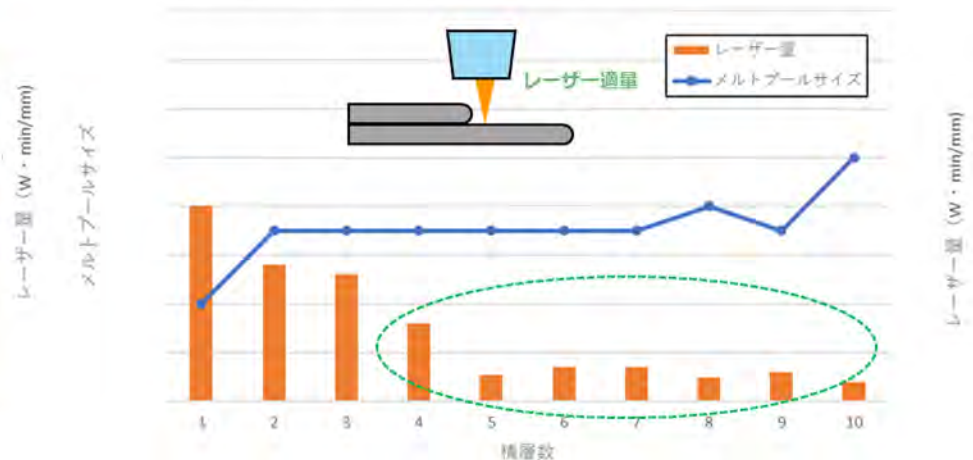
表面欠陥なし Eliminate keyholes



レーザー量とメルトプールサイズの推移



レーザー量とメルトプールサイズの推移



ロットの異なる材料においても、デモ造形で一番形状が難しい傾斜角45度の捩じり角28度の積層が実施できることを確認することができた。

It was confirmed that lamination with a twist angle of 28 degrees and an inclination angle of 45 degrees, which is the most difficult shape in demonstration laminating, could be performed with different materials in lots.

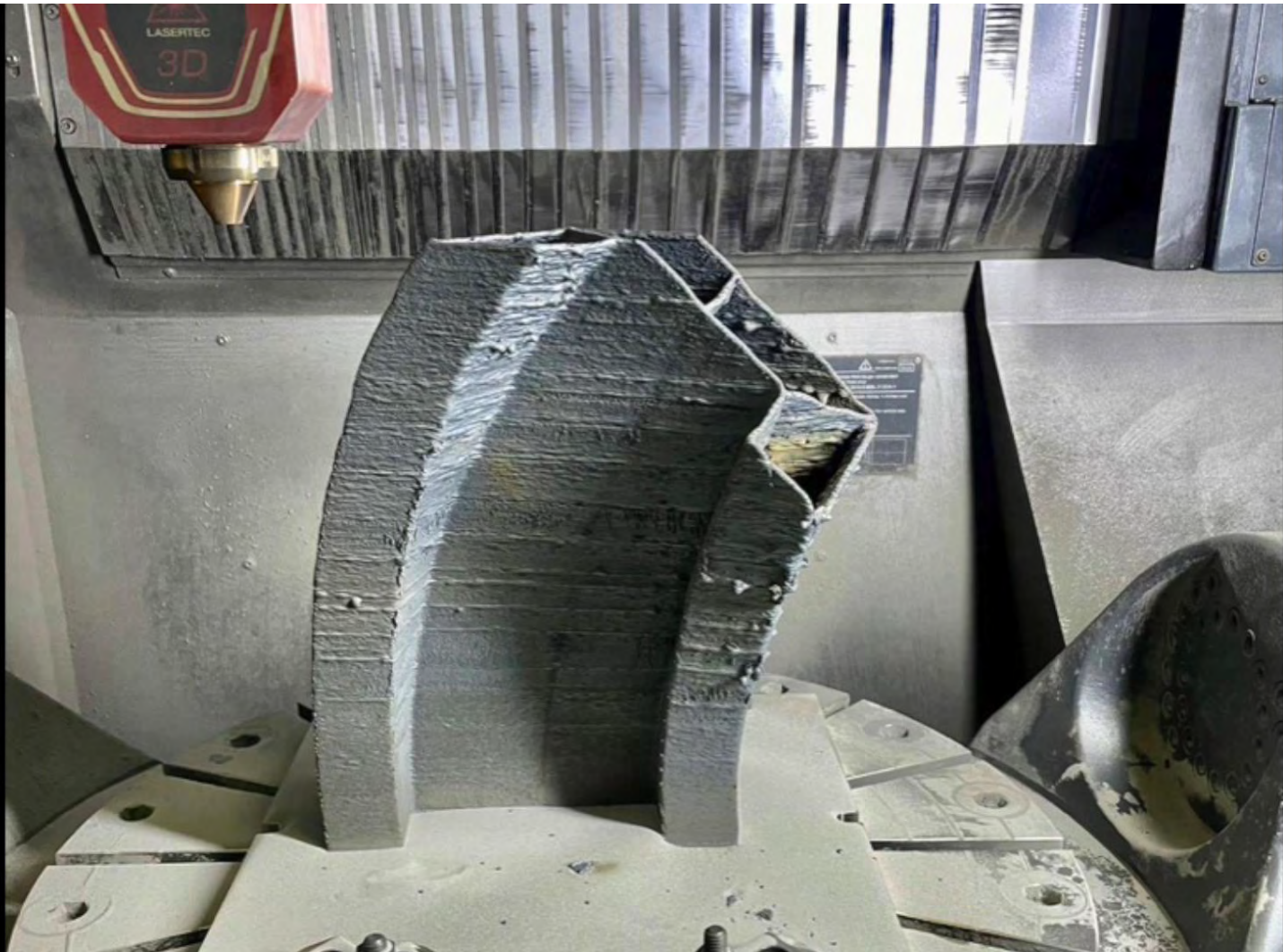
LOT#1 : Sandvik2019



LOT#2 : Sandvik2020



8X Video



- 従来の鋳造構造では難しい、中空リブ構造を持つ薄肉積層物を製作することができた。
 - Box Behnken法による多変量の溶接条件の最適化を行うことで、積層時間を短縮することができた
 - 3軸固定の積層においても、傾斜角48度、捩れ角28度を積層できる溶接条件を見出した
-
- A thin-walled laminate demo structure with a hollow rib, which is difficult with conventional cast structures was able to fabricate.
 - The Box Behnken method was used to optimize the welding conditions for reducing the lamination time.
 - Welding conditions were found to enable lamination for max. 48 degrees of inclination and max. 28 degrees of twist even in three-axis-fixed lamination.

- 金属粉末のロット間のバラツキによるレーザー出力は、現状はマニュアル操作による調整が必要で、今後更なる研究によって自動化できる機構が必要である。
- 最適化した溶接条件においても、積層物内の細かい空隙がまだ残っており、更なる溶接条件の改善が必要である
- 実機適用に向けては、積層物の補正などによる寸法精度の更なる改善が必要である
- 航空機製造に多用されるアルミ材の積層技術について調査を進めていく

- The adaption laser power due to the variation of powder quality needed the manually operation. Development for automated operation is needed by further research in the future.
- Even under optimal welding conditions, there are some keyholes inside a laminating body. Further improvement for eliminating keyholes is needed.
- Compensation technology for higher dimensional accuracy in laminating body is necessary in actual production.
- MHI will further investigate the possibility of Metal-3DAM in aluminum alloy.

CMI研究に参画したメリット

- 企業単体の研究では、なかなか難しいチャレンジングな目標の試験を実施することができた。
- 機械加工、ロボット、構造解析、金属積層など様々な分野の第一人者が集まった研究では、様々なアイデアが創出され研究以外でも得られる知識や経験が多かった

MHI Benefits of participating in the CMI

- In a company-by-company study, it was possible to conduct a rather difficult and challenging target test.
- In the research that brought together leading figures in various fields such as machining, robotics, structural analysis and metal lamination, various ideas were created and there was much knowledge and experience that could be gained outside of research.

今後の産学官連携への提言

- 企業側は漠然としたテーマを選定し依頼するだけでなく、量産適用を見据えた研究課題の明確化と最適な目標値の設定を大学と行うことが必要と考える。
- 企業を取り巻く事業環境は、日々目まぐるしく変化している。タイムリーに成果を享受できる研究体制の構築が必要である。
 - 例) ドイツの加工機メーカーでは、大学研究者が企業の装置を一定期間借りて企業から依頼された研究を実施しているなど、密な連携を取っている

Proposals for future collaboration

- Companies should not only select and request research themes, but also clarify research issues with an eye to mass production applications and set optimal target values with universities.
- The business environment surrounding companies is changing at a dizzying pace every day. It is necessary to establish a research system that can get results in a timely manner.
 - ex.) German machine manufacturers has close cooperation with university, such as researchers renting company equipment for a certain period to conduct research requested by companies.



MITSUBISHI
HEAVY INDUSTRIES

MOVE THE WORLD FORWARD

**MITSUBISHI
HEAVY
INDUSTRIES
GROUP**