

「エジソンの会」第25回会合

アディティブマニュファクチャリング による新たな“ものづくり”

近畿大学工学部ロボティクス学科・教授
次世代基盤技術研究所3D造形技術研究センター・センター長
京極 秀樹

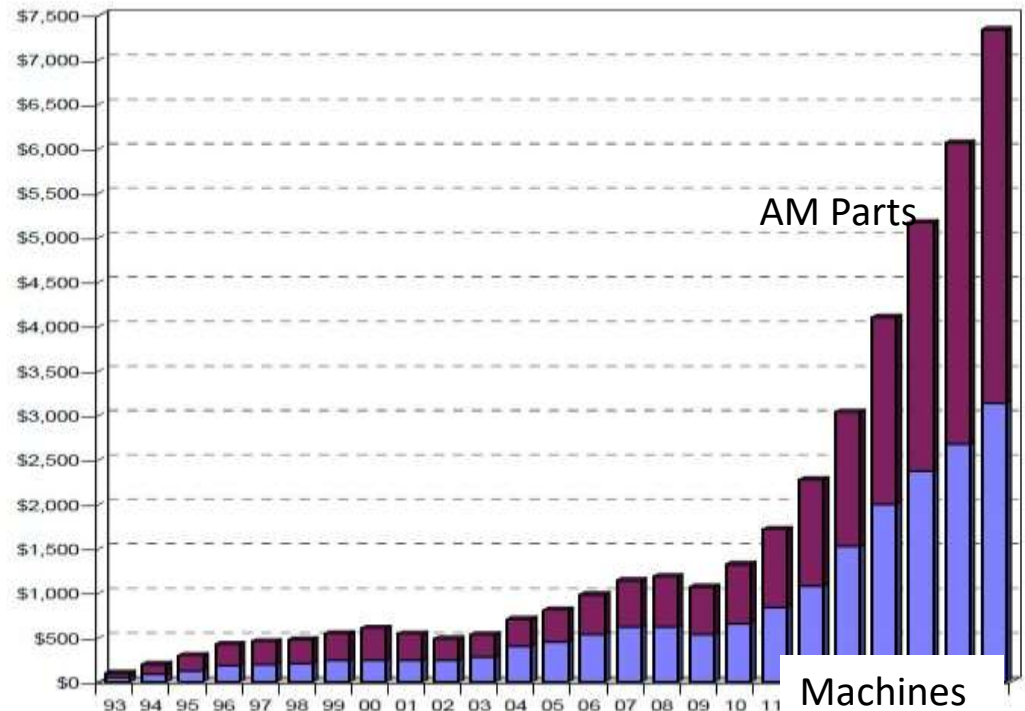
講演内容

1. はじめに
2. 金属積層造形(AM)技術の概要
 - 2.1 AM技術の分類
 - 2.2 AM技術の特徴
3. 金属AM技術の開発動向
4. 金属AMにおける溶融凝固現象
5. 3Dプリンタによる“ものづくり”
6. おわりに

1. はじめに

Growth of Additive Manufacturing

- AM is growing exponentially and is currently valued at \$7.3 billion
- Annual growth for 2017 was 22%
- The value is split evenly between AM fabricators/machines and parts produced on these machines
- Over 14,700 industrial units (unit value > \$5000) were sold in 2017, including over ~1800 metal AM fabricators
- Sales of low cost polymer 3D printers was over 530,000 units in 2017



Source: Wohlers Report 2018

(テキサス大学Bourell教授の好意による)

1. はじめに

■AM技術の最近の動向

SFF Symposium2018(8/13~8/15)

ANNUAL INTERNATIONAL
SOLID FREEFORM
FABRICATION SYMPOSIUM

- ・講演件数:549件
- ・参加登録者数:620名以上
- ・参加国数:18か国
- ・America Makesなどの成果

【2018年における動向】

- ①テストベンチを利用したin-situモニタリング技術開発、特に高速X線画像処理を利用した溶融凝固現象、粉末のリコート現象の解明に関する研究
- ②モニタリングデータ処理技術に関する研究
- ③物理モデルによるシミュレーション技術に関する研究
- ④トポロジー最適化、ラティス構造に関する研究
- ⑤ハイブリッドAM技術に関する研究
- ⑥バインダージェティングに関する研究

1. はじめに

■ EuroPM2017 (10/1~10/5)

● 会長挨拶

- ・金属AM装置台数:
 - 約 1000 台(世界の販売台数)
 - 約 3500 台(世界の設置台数)
- ・金属粉末製造量
 - 700 ton (2015年)
 - 4700 ton (2023年予測)



● 基調講演: GE、Baker Hughes(イタリア) Giannozzi氏

- ・製品: 陸用ガスタービン、オイル用遠心ポンプなど製造
- ・AM技術: HIPとバインダーージェット(BJ)の組合せ、
デポジション装置、DMLM、EBM装置

2025年までに、BJ 50台、DMLM 30台導入予定

- ・適用事例: ポンプ部品のバランスドラム、インペラー、
ガスタービンの燃焼ケース、高温ガス通過部品

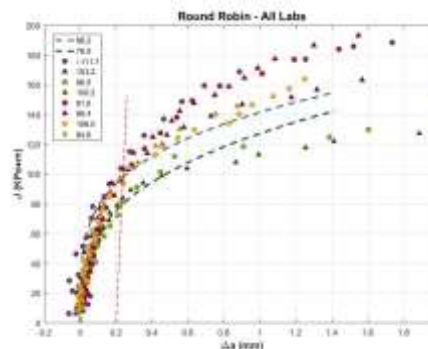
1. はじめに

■ formnext2017 (Frankfurt)

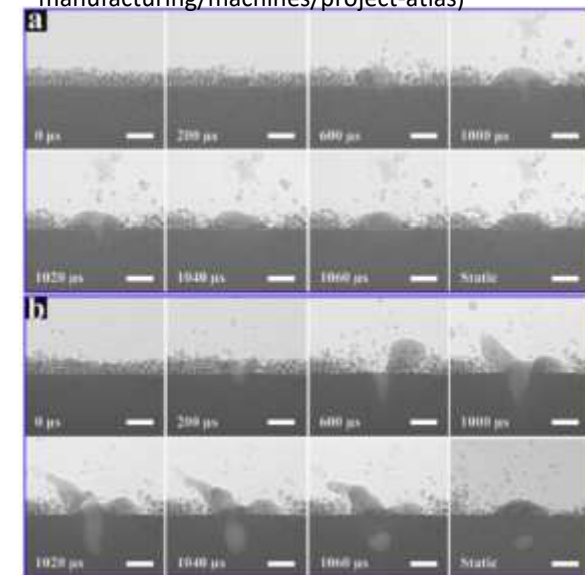
- 出展社数: 470社、訪問者: 21,492人
- 装置:
 - 大型化 (GE, SLM Solutions)
 - マルチレーザによる高速化
 - 自動化
- 設計・製造統合ソフトウェア
 - Autodesk
 - Siemens

■ MS&T2017 (Pittsburgh)

- 材料開発及び評価
 - 機能材料開発
 - 疲労強度・破壊靱性
- モニタリング技術
- シミュレーション技術



(Source: W. Campbell, W. Tilson, ASTM/NIST Workshop on Mechanical Behavior in Additive Manufactured parts May 4, 2016)



C. Zhao et al., Scientific Reports, 7 (2017), 1-11.

1. はじめに

1985～

ラピッドプロト
タイピング

- 光造形方式
- 製品の形状確認



2000～

試作品への
適用

- PBL方式、バインダージェットティング (BJ) 方式 (砂型)
- 樹脂・金属試作品、砂型
- レーシングカー、少量生産自動車試作品への適用



2010～

少量実用部
品への適用

- PBL方式、DED方式、BJ方式 (金属)
- 樹脂・金属部品 (Renault Trucks etc.)
- 金型、修理部品などへの適用 (BMW、Audi etc.)
- トラックエンジンロッカーアームなど少量部品への適用



講演内容

1. はじめに
- 2. 金属積層造形(AM)技術の概要**
 - 2.1 AM技術の分類**
 - 2.2 AM技術の特徴**
3. 金属AM技術の開発動向
4. 金属AMにおける溶融凝固現象
5. 3Dプリンタによる“ものづくり”
6. おわりに

2. 金属AM技術の概要

■ 積層造形(AM)技術の分類

- ラピッドプロトタイピング (RP: Rapid Prototyping)
- ラピッドマニファクチャリング (RM: Rapid Manufacturing)
- **アディティブマニファクチャリング (AM: Additive Manufacturing)**

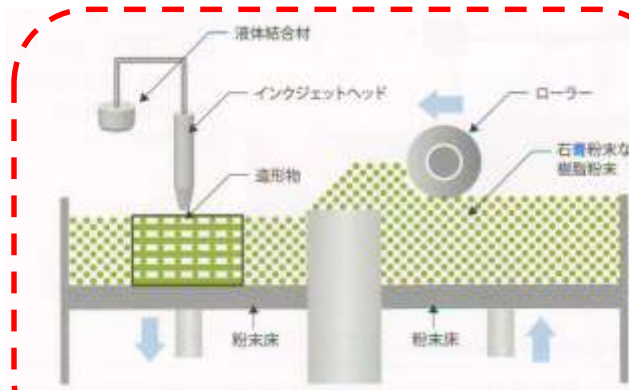
Additive Manufacturing Categories

As defined by ASTM F42 Committee

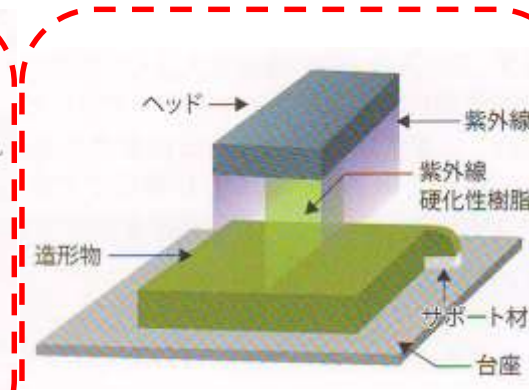
Category	Description
Binder Jetting	Liquid bonding agent selectively deposited to join powder
Material Jetting	Droplets of build materials selectively deposited
Powder Bed Fusion	Thermal energy selectively fused regions of powder bed
Directed Energy Deposition	Focused thermal energy melts materials as deposited
Sheet Lamination	Sheet of material bonded together
Vat Photopolymerization	Liquid photopolymer selectively cured by light activation
Material Extrusion	Material selectively dispensed through nozzle or orifice

2. 金属AM技術の概要

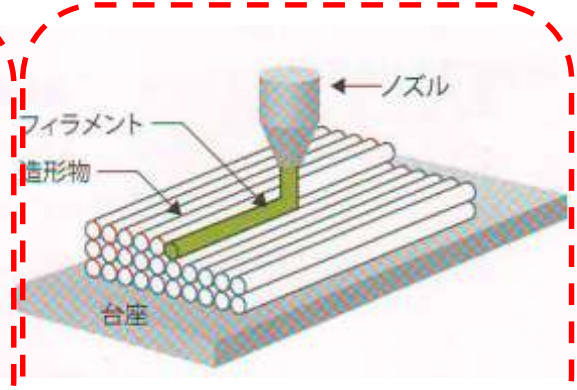
■ ASTMによるAM技術の分類



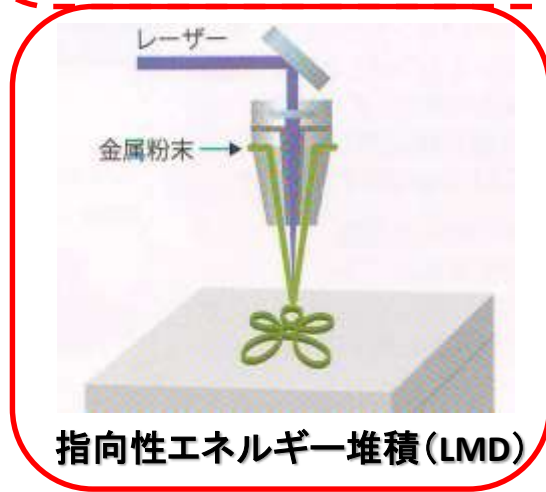
バインダージェッティング



マテリアルジェッティング



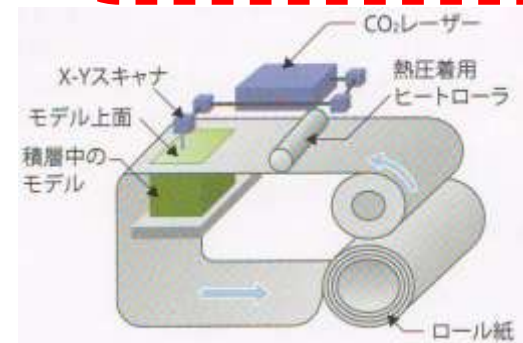
材料押出し(FDM)



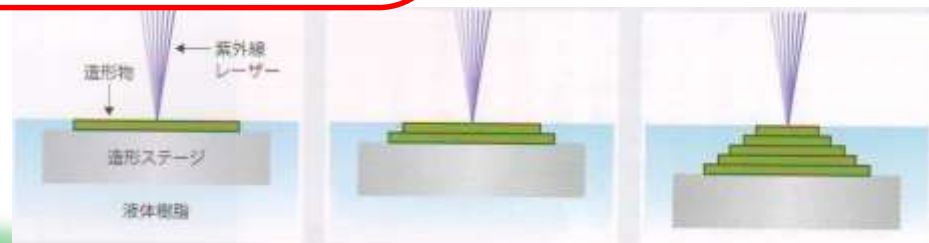
指向性エネルギー堆積(LMD)



粉末床溶融(SLS/SLM)



シート積層



光重合硬化(光造形)

(eoms, 42(2015),pp.37-40より)

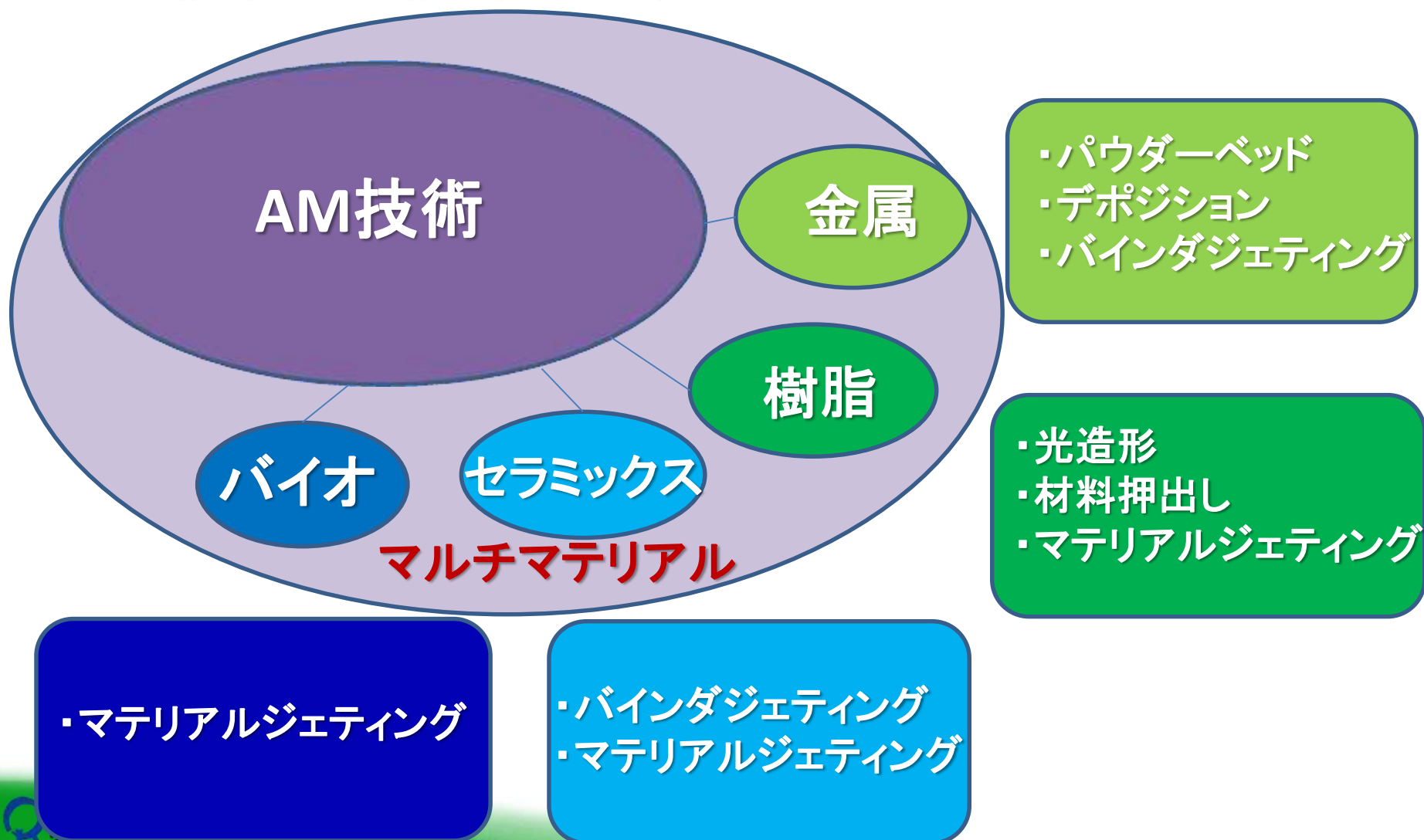
2. 金属AM技術の概要

■ ASTMによるAM技術の分類

- (1) **バインダージェットティング(結合剤噴射)**: 石膏、砂、セラミックス粉末などにバインダー(液体結合剤)を噴射して選択的に造形する方法
- (2) **マテリアルージェットティング(材料噴射)**: 光硬化樹脂などをインクジェットノズルなどから噴射して選択的に造形する方法
- (3) **粉末床溶融(パウダーベッド)**: 金属や樹脂粉末を敷き詰めたパウダーベッドにレーザーや電子ビームを照射して、選択的に溶融させて造形する方法
- (4) **指向性エネルギー堆積(デポジション)**: 金属粉末あるいはワイヤーを供給しながらレーザーや電子ビームを照射し、溶融・堆積して造形する方法
- (5) **シート積層**: シート材を所望の形状に切断し、接着や溶接などのより結合して造形する方法
- (6) **光重合硬化(光造形)**: 光硬化樹脂に光を当て、選択的に硬化させて造形する方法
- (7) **材料押出し(熱溶融積層)**: 樹脂ワイヤーなどの造形材料をノズルやオリフィスから押出して選択的に造形する方法

2. 金属AM技術の概要

■ 積層造形技術の分類



2. 金属AM技術の概要

■ AM技術の主な特徴

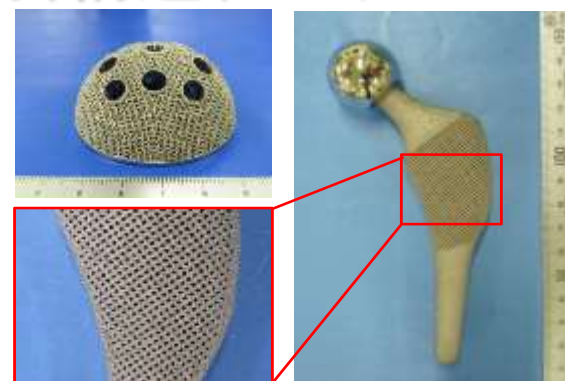
- 従来の切削加工等他の加工技術では不可能な形状の製品の作製が可能(表面・内部構造表現、傾斜構造、・・・)
 - 製品機能の統合化・個性化が可能
 - ニーズへの素早い対応が可能
- 等



軽量化冷却管
(ホワイトインパクトの好意による)



金型(冷却用水管)(松浦機械製作所の好意による)



人工股関節用インプラント
(ナカシマメディカルの好意による)

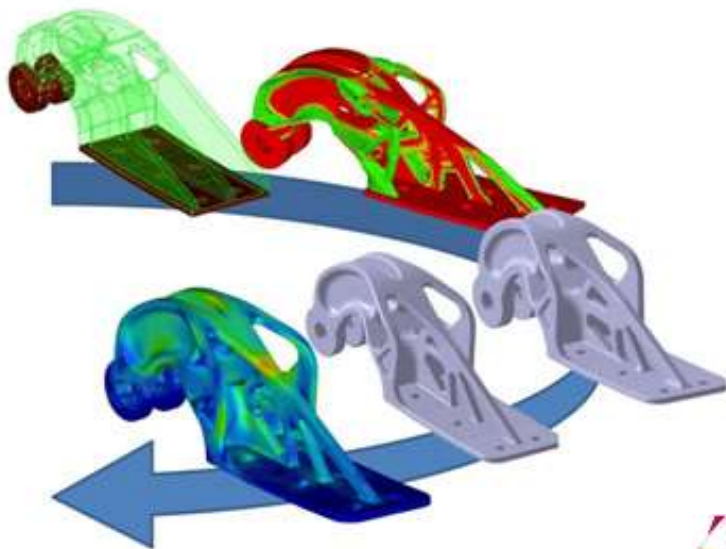


タービンブレード
(SLM Solutions GmbHの好意による)

2. 金属AM技術の概要

■ 設計・製造技術の革新

- ・トポロジー最適設計
- ・軽量化構造の採用による機能化設計
- ・シミュレーション利用による最適設計



(World PM2016, Hamburg)

Graphic of the conventional design of the assessed steel cast bracket (left) and titanium bracket with optimised topology made by using DMLS technology (Source: EADS)

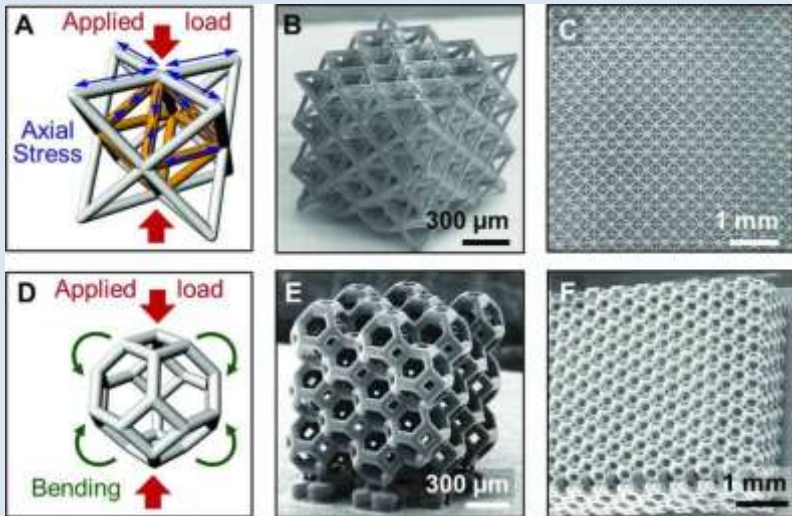
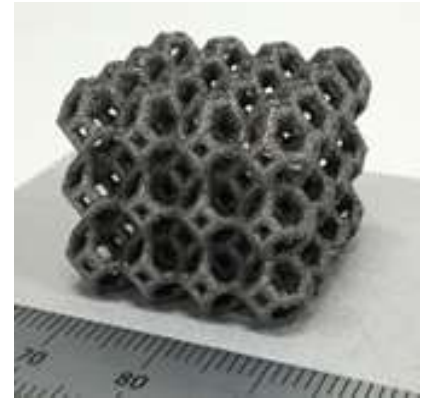
(http://www.eos.info/press/customer_case_studies/eads)



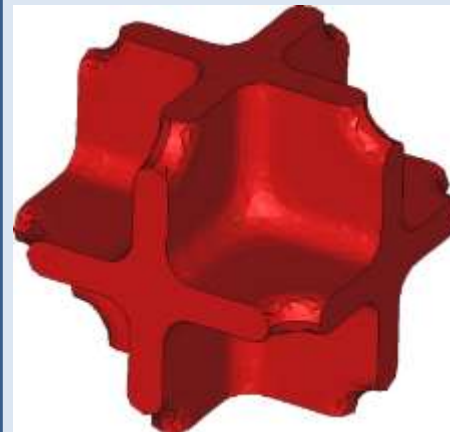
2. 金属AM技術の概要

■ 設計・製造技術の革新

- ・トポロジー最適設計
- ・軽量化構造の採用による機能化設計
- ・シミュレーション利用による最適設計



LLNL/MIT team creates ultralight, ultrastiff metamaterials; possible applications for automotive and aerospace



気孔率70%



試作品

(近畿大学次世代基盤技術研究所
SLM280HLにより試作)

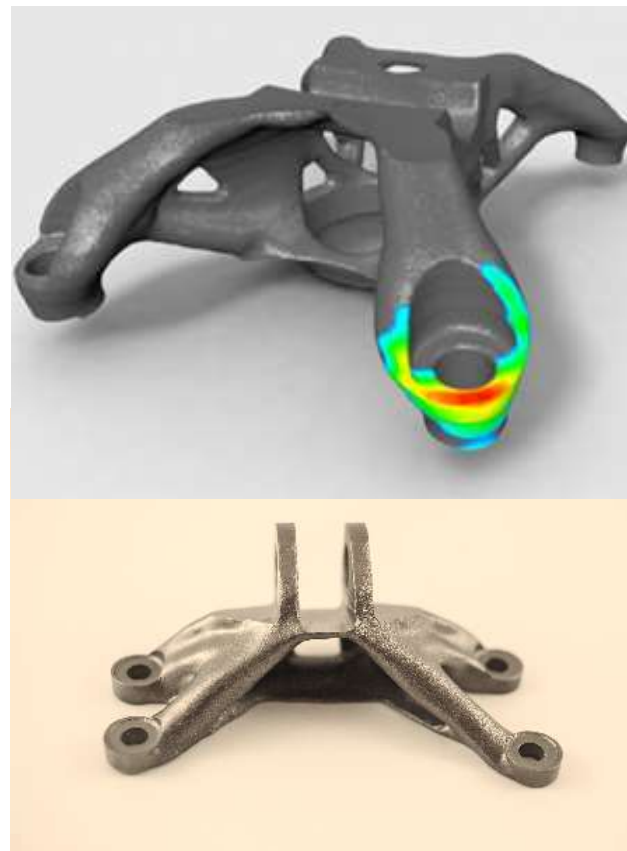
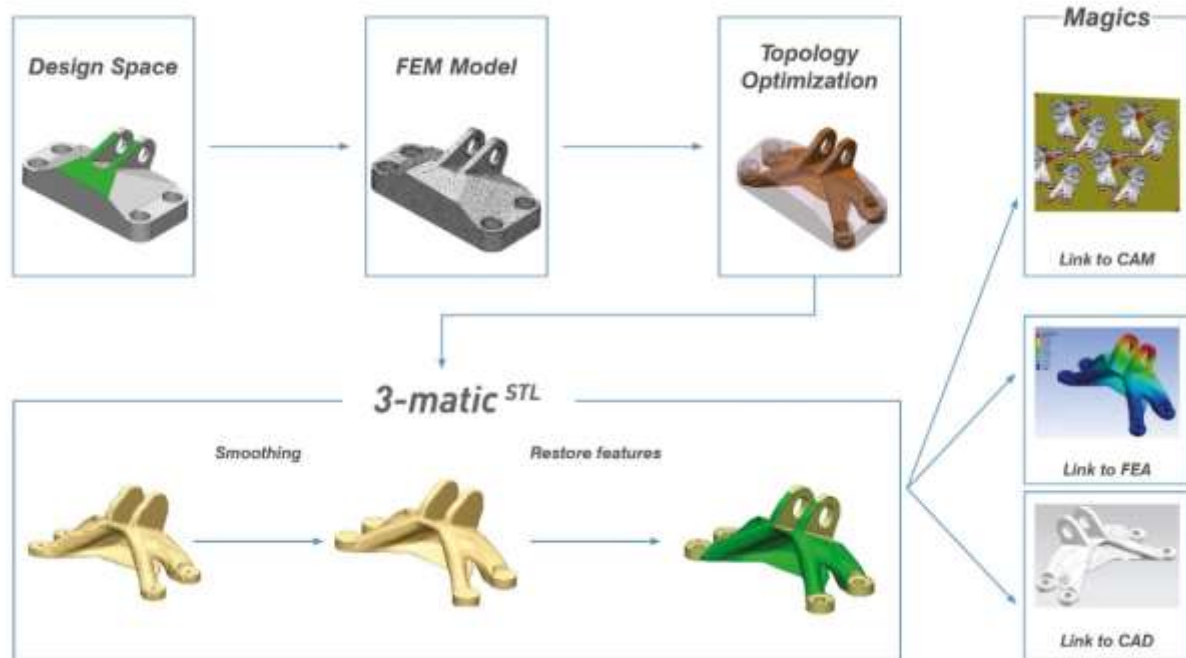
(広島大学・竹澤先生の好意による)

新たな機能材料の創製

2. 金属AM技術の概要

■ 設計・製造技術の革新

- ・トポロジー最適設計
- ・軽量化構造の採用による機能化設計
- ・航空機エンジン用ブラケット

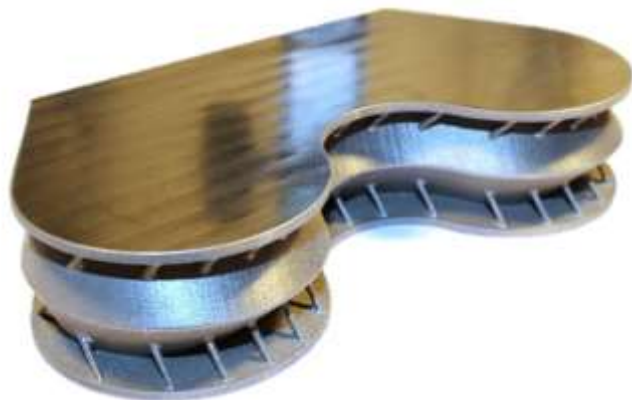


(Materialise HPより)

2. 金属AM技術の概要

■ 設計・製造技術の革新

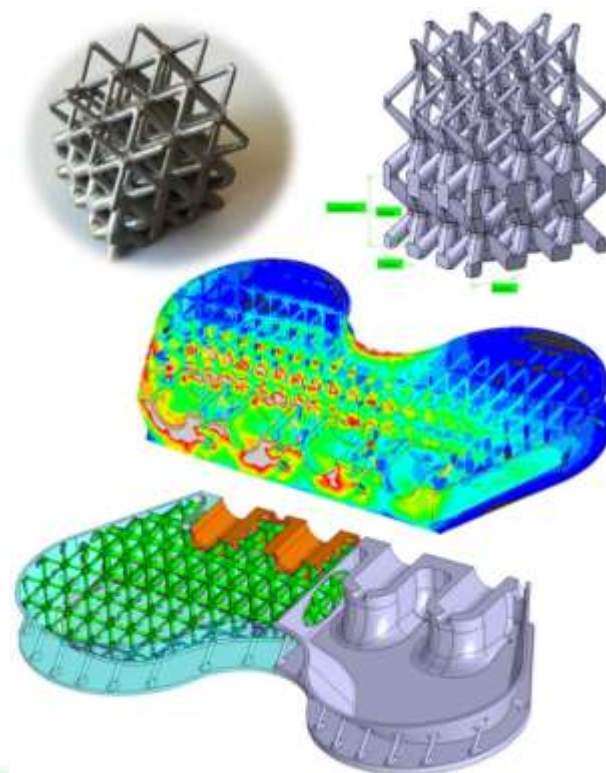
- ・トポロジー最適設計
- ・軽量化構造の採用による機能化設計
- ・Titanium Inserts for Spacecraft: 66% Lighter with Metal 3D Printing



from 1454 grams to 500 grams

(https://atos.net/en/2016/press-release_2016_10_03/atos-materialise-create-revolutionary-component-spacecraft-structures-made-

次世代基盤技術研究所



講演内容

1. はじめに
2. 金属積層造形(AM)技術の概要
 - 2.1 AM技術の分類
 - 2.2 AM技術の特徴
- 3. 金属AM技術の開発動向**
4. 金属AMにおける溶融凝固現象
5. 3Dプリンタによる“ものづくり”
6. おわりに

3. 金属AM技術の開発動向

【課題と対策】

1. 高速造形が難しい

- ・大量生産に対応できない⇒バインダージェットティング:
Hoeganes、ExOne、RICOH、GE
- ・TRAFAM: 高速造形装置開発(500cc/h)



2. 大型造形が難しい

- ・砂型造形⇒TRAFAM開発
- ・樹脂造形は可能⇒ORNL&Lochheed Martin & Cincinnati Inc.
- ・デポジション方式では可能
- ・パウダーベッド方式: 最大□1000mm
⇒
 - ・GE: 大型β機開発
 - ・TRAFAM開発予定

3. パウダーベッド方式では、 マルチマテリアルの造形ができない

- ・TRAFAM開発中
- ・GE開発予定



3. 金属AM技術の開発動向

4. 品質保証のためのモニタリング・フィードバック技術

未確立⇒メルトプールモニタリング開発

5. 熱変形予測などのシミュレーション技術未確立

⇒実用化されつつある、TRAFAM開発中

6. AM用金属材料が少ない⇒合金設計

- ・AlSi10Mg: 特性不十分

⇒

- ・高強度アルミ開発 (A2024、A6061、A7075 クラック対策必要)

- ・AlMgSc合金 (引張強さ: 520MPa、伸び: 13%)

7. 疲労特性や破壊靱性などのデータが不十分

- ・NASA/NISTによるラウンドロビンテスト

8. 評価技術(NDEなど)未確立

⇒ASTM & ISOなどで作成中

9. 後加工技術(85%の製品には必要)の開発必要

- ・表面処理技術



3. 金属AM技術の開発動向

■ 装置開発の概要

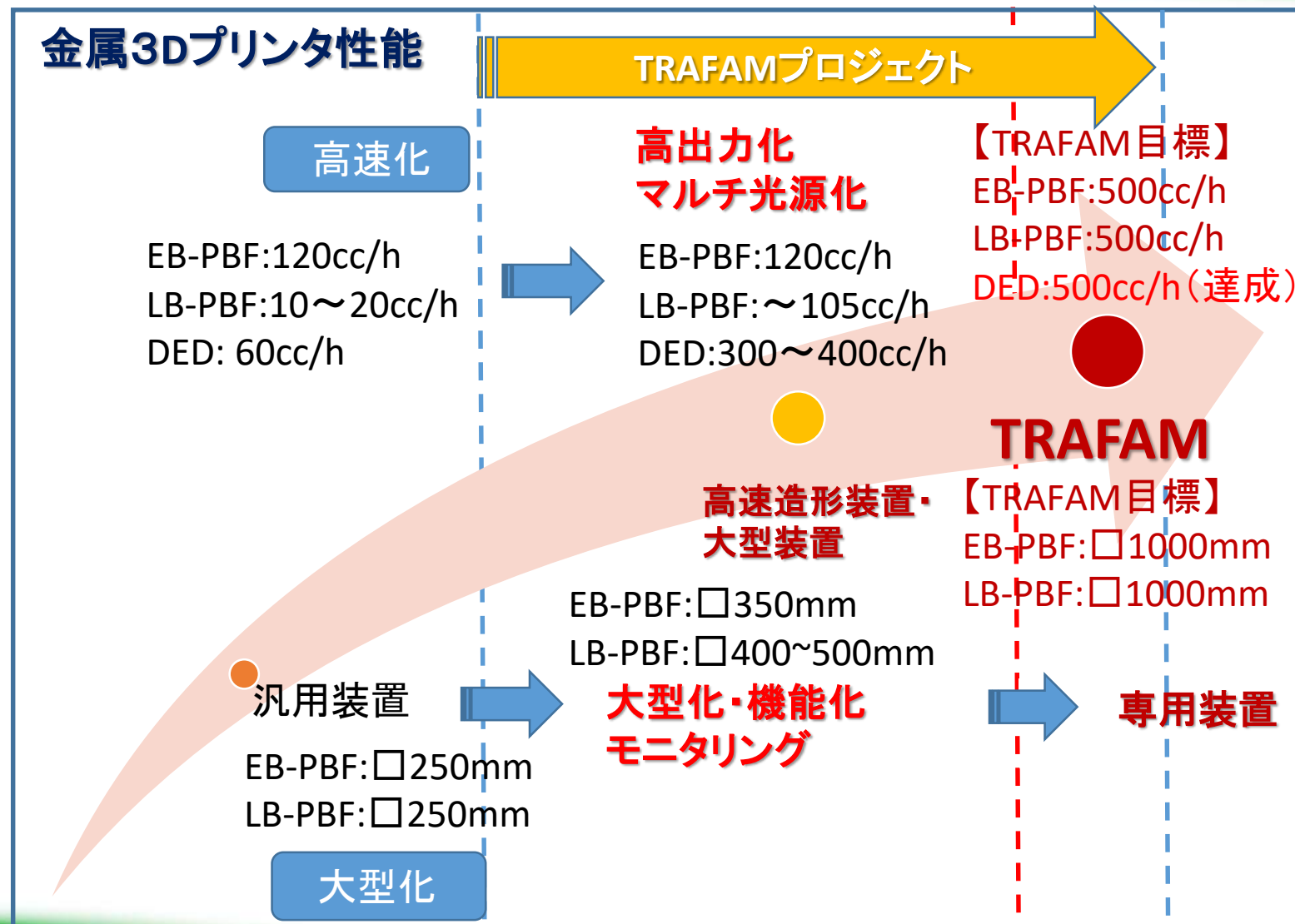
● パウダーベッド方式

- ・レーザの高出力化 (200、400 W⇒1 kW)
- ・レーザの多光源化 (1台⇒2あるいは4台)
- ・造形サイズの大型 (□250×250mm⇒□1000×1000mm)
- ・造形状態のモニタリング機能搭載

表 大型装置の仕様

装置	EOS M400	SLM SLM500HL	Concept Laser X line 2000R	3D Systems ProX400
造形サイズ(mm)	400x400x400	500x280x320	800x400x500	500x500x500
レーザー	ファイバーレーザー	ファイバーレーザー	ファイバーレーザー	ファイバーレーザー
出力 (W)	1000	400/1000	1000x2	500x2
スポット径 (μm)	—	80~120	100~500	—
走査速度 (m/s)	~7	~10	~7	—
積層厚さ (μm)	20~	20~200	30~150	10~100
造形速度 (cm ³ /h)	—	105	10~100	—

3. 金属AM技術の開発動向



2015

2020

3. 金属AM技術の開発動向

■ 最近の装置開発のトレンド

● パウダーベッド方式

- Trumpf (TruPrint)
- AddUp

● ハイブリッド方式

▪ パウダーベッド方式 & 切削機能

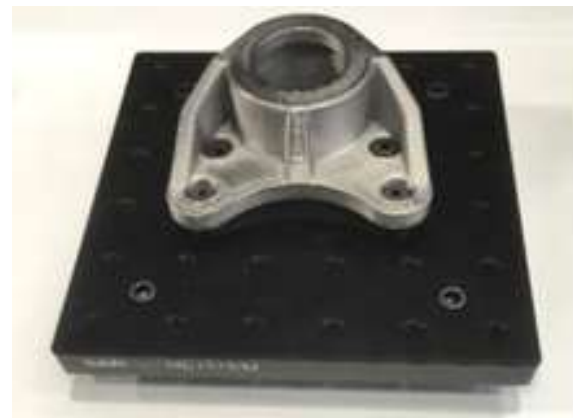
- 松浦機械製作所 (大型装置)
- ソディック (低価格装置)

● 材料押出し方式

- Markforged
- Desktop Metal



(AddUp社の好意による:
3D Printing2018展示会にて)



(Markforged社の好意による:
3D Printing2018展示会にて)

3. 金属AM技術の開発動向

■ 指向性エネルギー堆積法(DMP(Direct Metal Deposition))



・アーク溶融デポジション
【Cranfield University】

・電子ビーム溶融デポジション
【Sciaky】(愛知産業)

3. 金属AM技術の開発動向

■ バインダージェティング (Binder Jetting)

- Digital Metal®
- ExOne
- RICOH

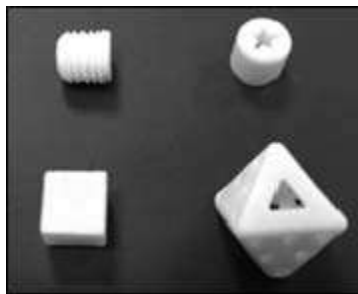
Parameter	3DP	MIM	Press & Sinter	Casting	Machining
Density	98%	98%	86%	100%	100%
Roughness	1.6	0.8	1.6	3.2	1.6
Weight	0.1-20Kg	0.1-100g	5g-2Kg	30g-4.5Kg	No limit

“Coated Powder Based Additive Manufacturing using Inkjet Technique” by RICOH

(Proceedings of Printing for Fabrication 2016)



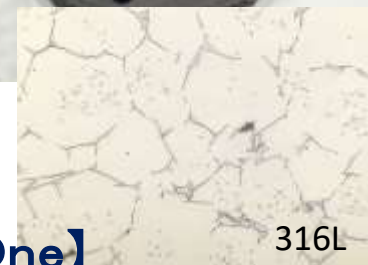
【RICOH】



【ExOne】



【Digital Metal】



316L

(Digital Metal社の好意による)

(PowderMet2016, Boston & World PM2016, Hamburg)

3. 金属AM技術の開発動向

■ 複雑形状性と精度の視点から

小型
微細部品
表面粗さ: 良



中型
複雑形状部品
表面粗さ: 中



中型
複雑形状部品
表面粗さ: 悪い



中型
単純部品
表面粗さ: 優



大型
単純部品
表面粗さ: 悪い



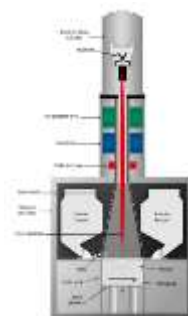
BJ

LB-PBF

EB-PBF

HYBRID

DED



(出典: 各社ホームページ)

講演内容

1. はじめに
2. 金属積層造形(AM)技術の概要
 - 2.1 AM技術の分類
 - 2.2 AM技術の特徴
3. 金属AM技術の開発動向
- 4. 金属AMにおける溶融凝固現象**
5. 3Dプリンタによる“ものづくり”
6. おわりに

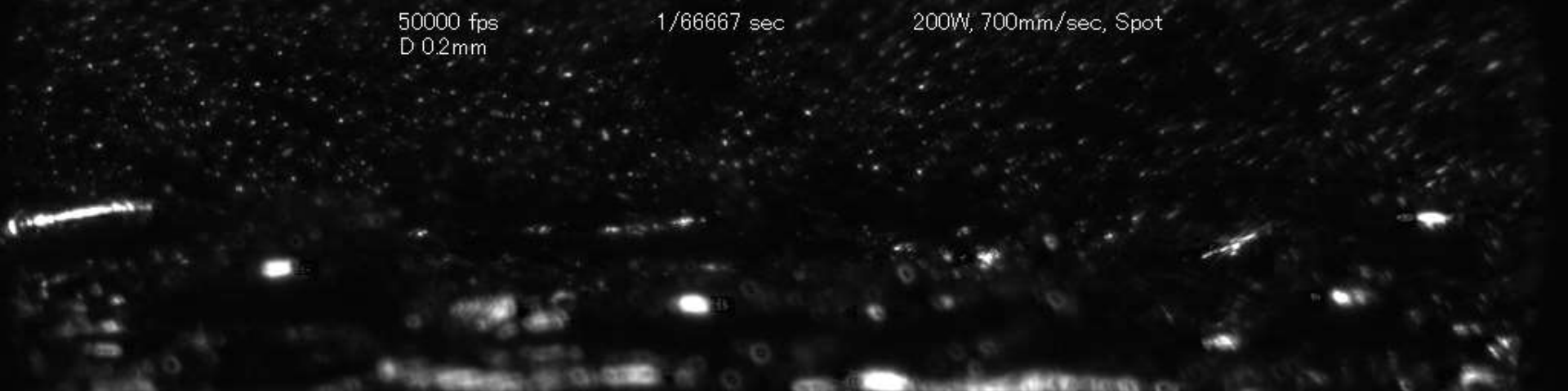
4. 金属AMにおける熔融凝固現象



50000 fps
D 0.2mm

1/66667 sec

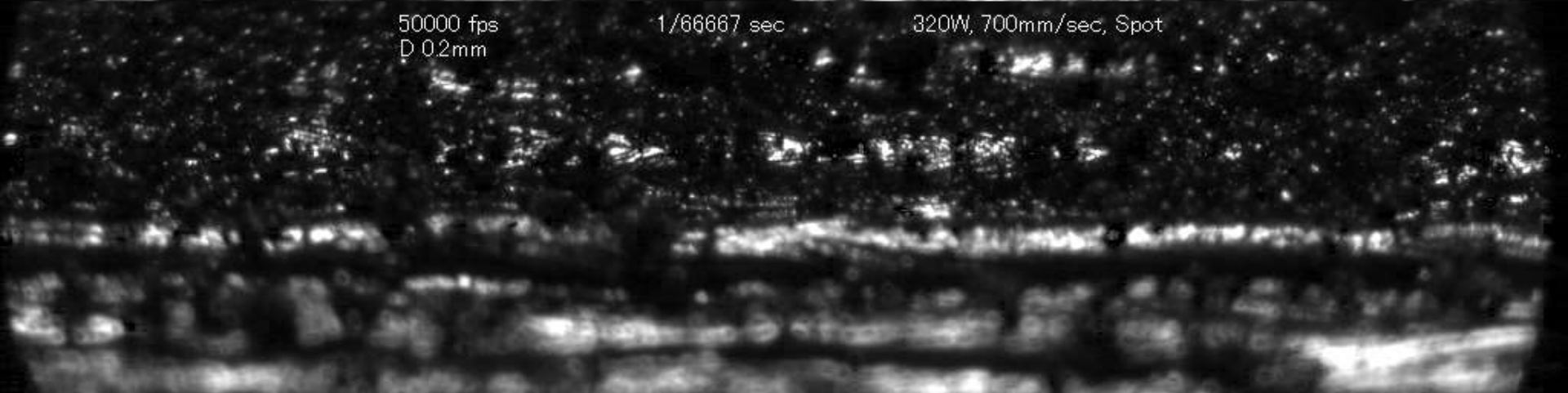
200W, 700mm/sec, Spot



50000 fps
D 0.2mm

1/66667 sec

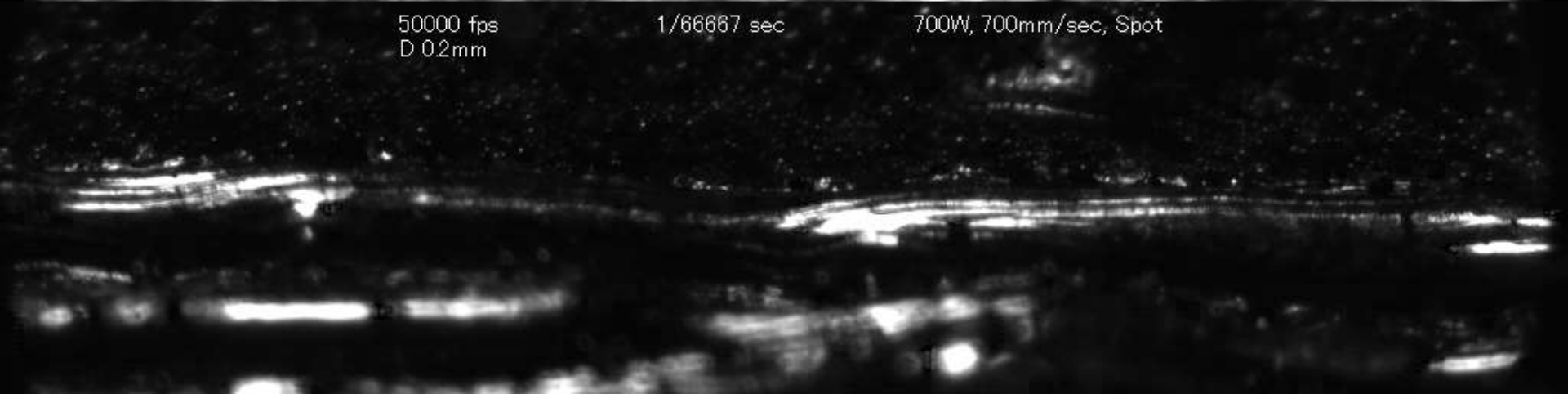
320W, 700mm/sec, Spot



50000 fps
D 0.2mm

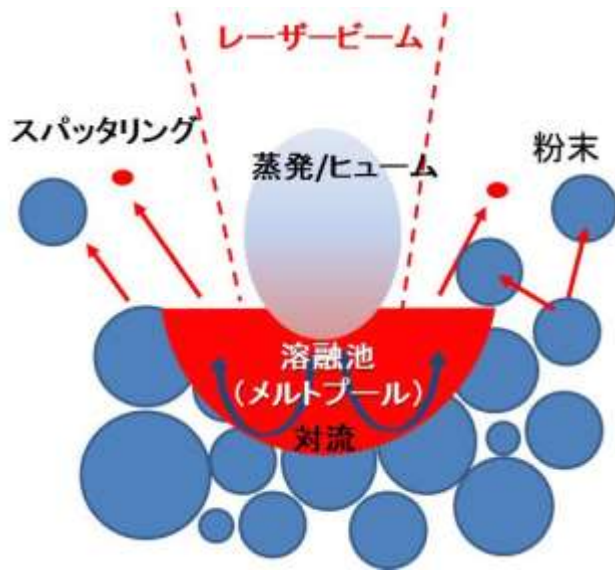
1/66667 sec

700W, 700mm/sec, Spot



4. 金属AMにおける溶融凝固現象

■ 溶融・凝固機構の解明 - ステンレス鋼 (17-4PH)



* マランゴニ対流: 表面張力を駆動力とした対流

図 溶融現象の模式図

Rapid solidification
⇒ very fine microstructure
& high strength

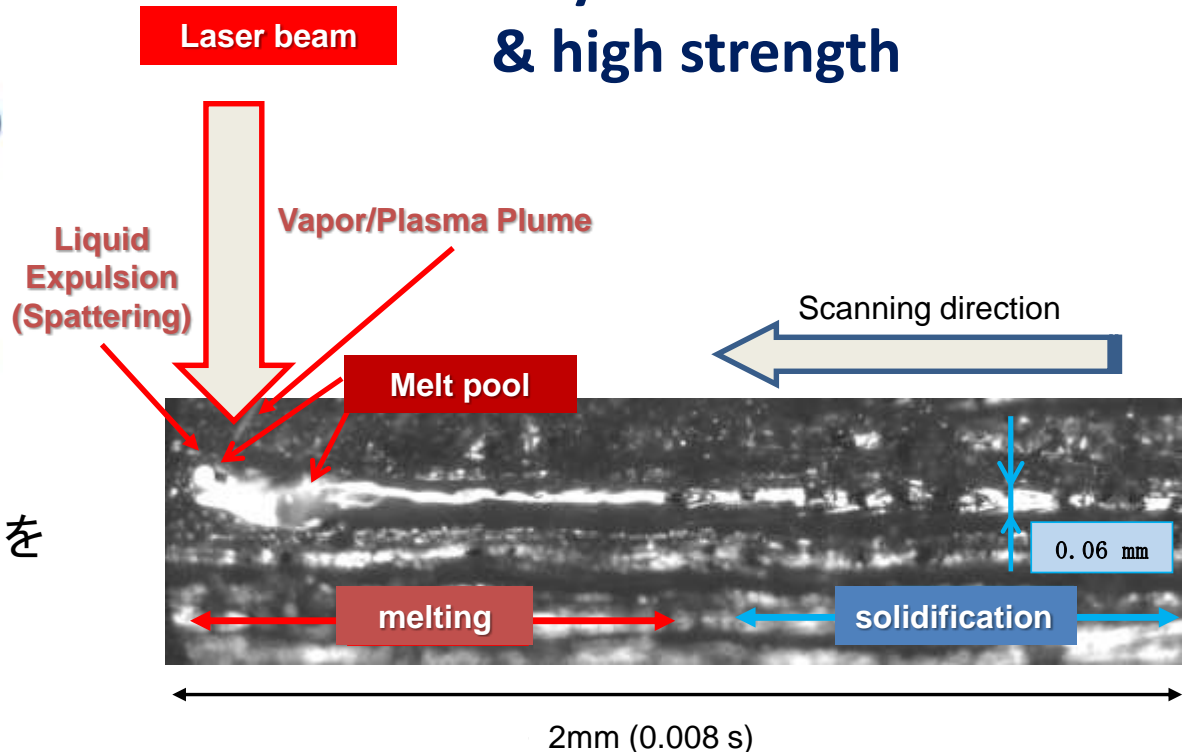


図 高速度カメラによる溶融・凝固現象

4. 金属AMにおける溶融凝固現象

■ 溶融・凝固現象

・メルトプールの挙動

- Surface tension

$$(\gamma(T) = \gamma_m + (d\gamma/dT)(T - T_m))$$

(Marangoni convection)

- Vapor recoil pressure

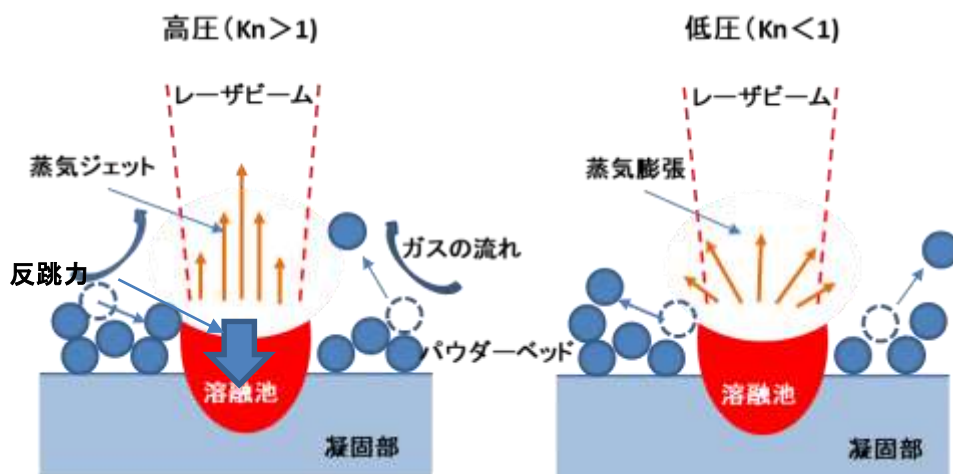
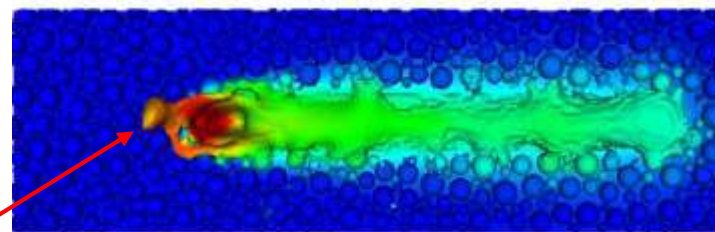


図 溶融現象の模式図

(出典: M.J. Matthews et al., "Denudation of metal powder layers in laser powder bed fusion processes", Acta Materialia, 114 (2016), pp. 33-42.より作成)

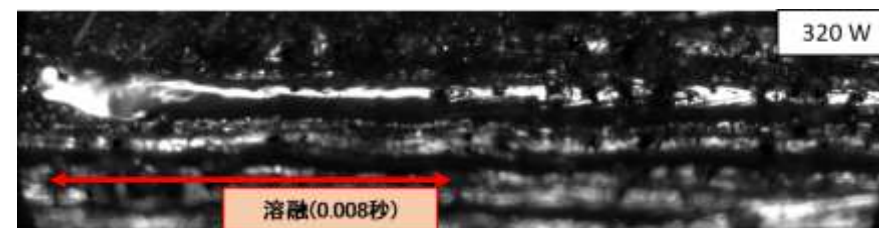
スパッタ



Mathewsらによるシミュレーション結果



(a) レーザ出力が低すぎる場合



(b) レーザ出力が適正な場合



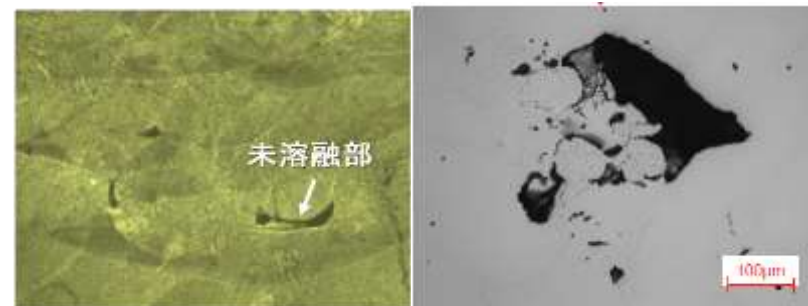
(c) レーザ出力が高すぎる場合

4. 金属AMにおける溶融凝固現象

■ 溶融凝固に伴う欠陥の発生

(1) 未溶融・溶融不良

- ・不適切な造形条件
(低エネルギー密度、ハッチピッチ、...)
⇒最適なレーザ照射パターンにより
解決可能

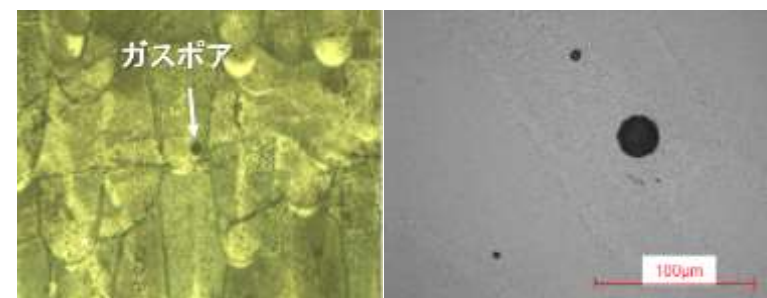
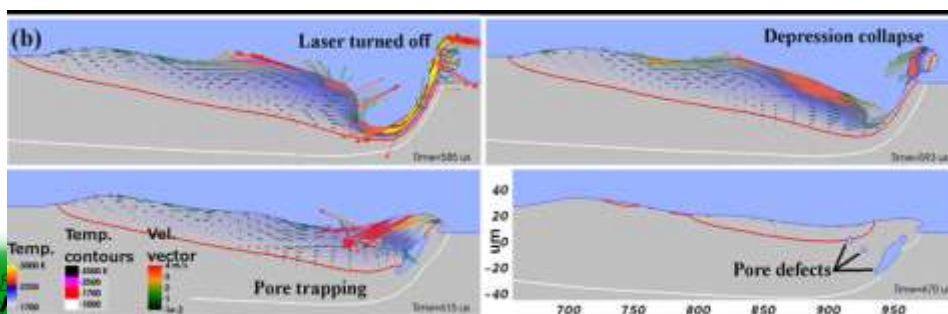


- ・大きなスパッタ発生
⇒真空により可能



(2) 空隙(ポア)

- ・キーホールポア
⇒最適なレーザ照射パターンにより解決可能
- ・粉末ポア
⇒粉末特性の向上により可能



講演内容

1. はじめに
2. 金属積層造形(AM)技術の概要
 - 2.1 AM技術の分類
 - 2.2 AM技術の特徴
3. 金属AM技術の開発動向
4. 金属AMにおける溶融凝固現象
- 5. 3Dプリンタによる“ものづくり”**
6. おわりに

5. 3Dプリンタによる“ものづくり”

■ GE社のAMへの取り組み

GE AM Team



Fuel nozzle

1st Heat exchanger

GE90 series

Parts:855⇒12

additive CT7-2E1 technology demonstrator (a-CT7) design



GE PREDIX platform

GE Additive

- Machines
- Materials
- Consulting

- "meter-class" SLM machine
- "multi-material" SLM machine
- BJ type machine

2010

2012

2013

2014

2015

2016

2017

▪ Morris Tech.

▪ Avio Aero



LEAP nozzle



Advanced Turboprop (ATP) engine design

AM:35%



▪ ARCAM
▪ Concept Laser

GE Aviation Opens New Brilliant Factory



5. 3Dプリンタによる“ものづくり”

■ 新たな統合生産システム(プラットフォーム)の構築

- ・ 設計から製造・計測までを統合したものづくり
- ・ AM装置のモジュール化・システム化



AM Factory

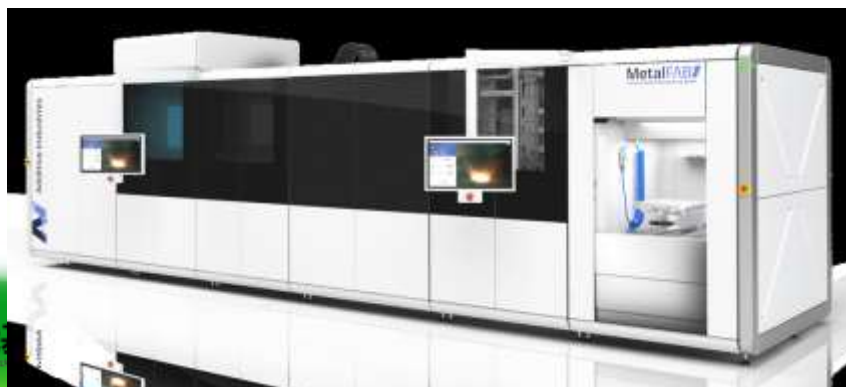


Process stations and handling station



Handling module

(<http://www.conceptlaserinc.com/>)



Additive Industries
MetalFAB1 system

(Metal AM magazine, Vol.1, No.4(2015), p.35.)

5. 3Dプリンタによる“ものづくり”

■ 設計製造プラットフォーム構築

- ・SIEMENS: PLMをベースにMaterialiseとの連携による設計製造統合プラットフォーム構築
- ・Autodesk: Netfabb & WITHINの買収による設計製造統合プラットフォーム構築
- ・Dassault:
3DEXPERIENCE
設計製造統合
プラットフォーム構築



Autodesk社のプラットフォームの構成

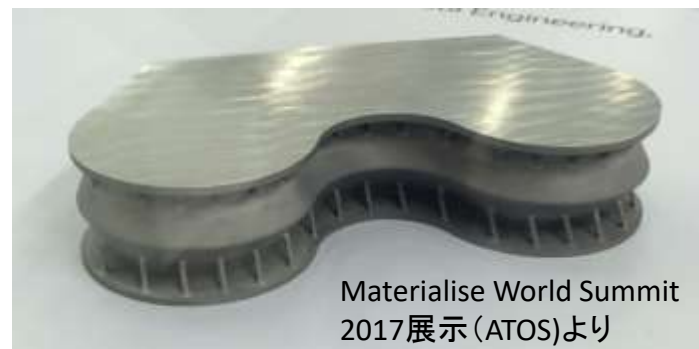
(Autodesk社の好意による: <https://www.mztimes-scsk.jp/archives/1147>)

5. 3Dプリンタによる“ものづくり”

- ・航空宇宙分野や自動車分野のTier1部品製造メーカーの参入
- ・GKNの航空宇宙・自動車部品へのAM技術の適用
- ・ATOSの航空宇宙部品へのAM技術の適用



Differential Housing (GKN社の好意による)



Materialise World Summit
2017展示(ATOS)より

Titanium Inserts for Spacecraft:
66% Lighter with Metal 3D Printing
(Materialise社の好意による)



- ・ニッチ領域からメジャー領域への移行期
- ・AM技術がメジャーな加工技術として認知

講演内容

1. はじめに
2. 金属積層造形(AM)技術の概要
 - 2.1 AM技術の分類
 - 2.2 AM技術の特徴
3. 金属AM技術の開発動向
4. 金属AMにおける溶融凝固現象
5. 3Dプリンタによる“ものづくり”
6. おわりに

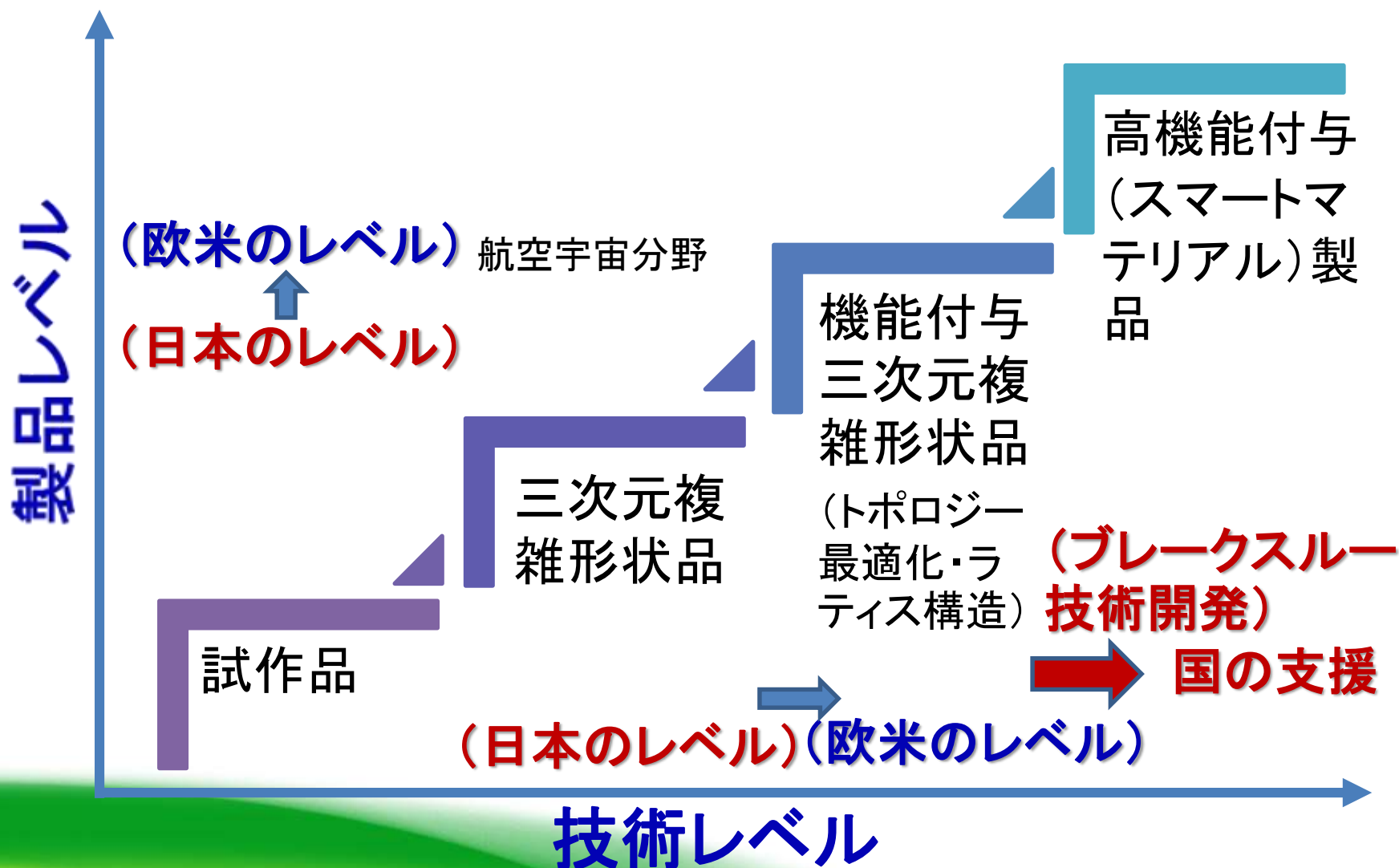
6. おわりに

3Dプリンタ導入のための注意点

- 対象製品(ターゲット)を明確にしておくこと。
 - ・自社試作品・製品
 - ・他社試作品・製品
- AM技術導入への事前対応をしておくこと。
 - ・樹脂用3Dプリンタの導入による技術の習得及び
人材育成
 - ・シミュレーション技術の導入(提案型へ)
 - ・設計技術の変革(提案型へ)
- 3Dプリンタ導入時に注意しておくこと。
 - ・対象製品と装置性能の整合性
 - ・周辺機器への対応
 - ・粉末などの購入への対応
 - ・メンテナンスへの対応

6. おわりに

■ 技術及び製品レベル



6. おわりに

■次世代積層造形技術の展望

●装置(3Dプリンタ)の高機能化及び機能分化

- ・高速・高精度化、多色化などの高機能化
- ・汎用機⇒専用機
- ・スタンドアローン⇒インライン化

●【サイバー空間】

シミュレーションによる設計・製造技術

●【フィジカル空間】

モニタリング・フィードバック制御技術

↓ “Digital Twin”

アメリカ: Industrial Internet、ドイツ: Industrie 4.0

中国: Made in China 2025、日本: Society 5.0

新たな“ものづくり”における設計・製造技術の革新

近畿大学の研究開発体制

■ 次世代基盤技術研究所

- ・3D造形技術研究センター設置 による拠点化

■ 国の研究開発プロジェクト実施

「次世代型産業用3Dプリンタ技術開発」

- ・要素技術開発(造形条件の確立・シミュレーション技術の開発・加工条件・材料データベースの作成)

■ 地域オープンイノベーション事業

- ・レーザ積層造形装置(2014年11月、次世代基盤技術研究所に導入)
- ・企業との共同研究
- ・講演会・研修会を通じた人材育成



謝 辞

本報告の一部は、経済産業省「三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム（次世代型産業用3Dプリンタ技術開発）」プロジェクトによる研究成果である。ここに、経済産業省ならびに技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構（TRAFAM）の皆様に深謝の意を表する。

ご清聴ありがとうございました。