

2022/12/19 日本塑性加工学会
北関東・信越支部長野ブロック 第6 1回技術講習会
於 坂城テクノセンター

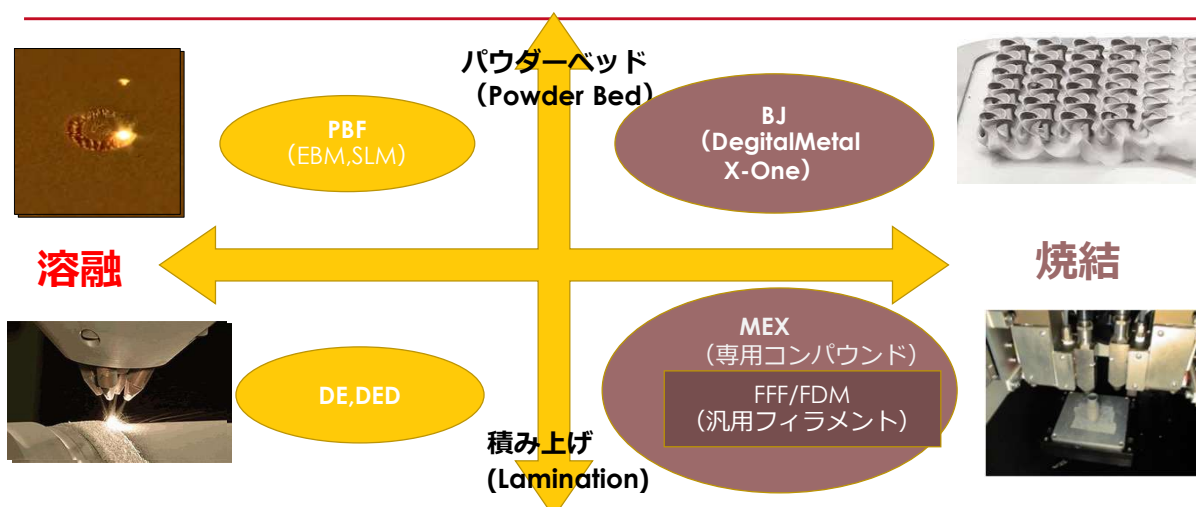
粉末焼結による金属 AM 技術の動向

東京電機大学 理工学部

清水 透 MEX
(専用コンパウンド)

1

金属 3Dプリンティングの分類



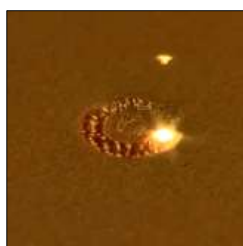
2

各種法の特徴と歴史

- PBF法 (SLM,EBM)

樹脂から始まる (SLS)

金属造形への適用



DTM (テキサス大学オースティン校)
EOS (独)

金属粉に樹脂コーティングしてSinter
低融点金属含浸

FaiberLaserの開発により、SLMが実用化
電子ビームを使ったEBMも実現
3Dプリンターブーム

3

各種法の特徴と歴史

- DED法

強力レーザー技術から始まる

(独) Trunp を中心としたハイパワーレーザー溶接技術

(米) 中止となったスターウォーズ計画 (レーガンの遺産)

金属造形への適用

レーザー熱源による肉盛り溶接

サンディアナショナルラボのLENS PJ

独ではロボットアームの先端にDEDヘッド

米ではクローズドチャンバーの中で雰囲気制御

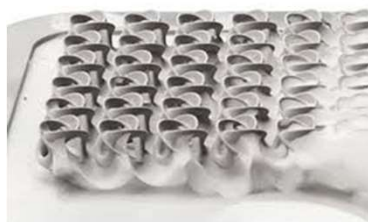
日ではマシニングセンターヘッドに独製DEDヘッドを追加



4

各種法の特徴と歴史

- BJ法 BJ法はMITの特許 Z Corpolation の石膏造形
Ex Honeの鋳造型造形
- 金属造形への適用 金属粉を造形して 低融点金属含侵
(Ex Hone → ExOne)
- BJ+焼結のプロセス ヘガネス DigitalMetal
HP
リコー（開発のみ、製品化は行わず）
Ex One（日本支社が協力を推進）

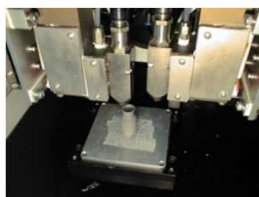


5

各種法の特徴と歴史

- MEX法 MEXはノズルから樹脂を吐出して積層造形する方法
FFF(FDM)法はフィラメント状の樹脂を使う方法(Stratasys社特許?)
FFC MEX MEX法は 日本の特許?
Reprap/Makers ムーブメントによりFFF造形装置の廉価化と普及
FPFと呼ばれる方法も日本を中心に登場 (Fused Pellet Forming)

金属造形への適用



フラウンホーファー EFAM (MEX)
工業技術院 機械技術研究所 (MEX)

DesktopMegal Studio (MEX)
MarcForged (FFF)

フィラメント開発の動向 BASFを中心に進展、FFF装置の利用が可能に

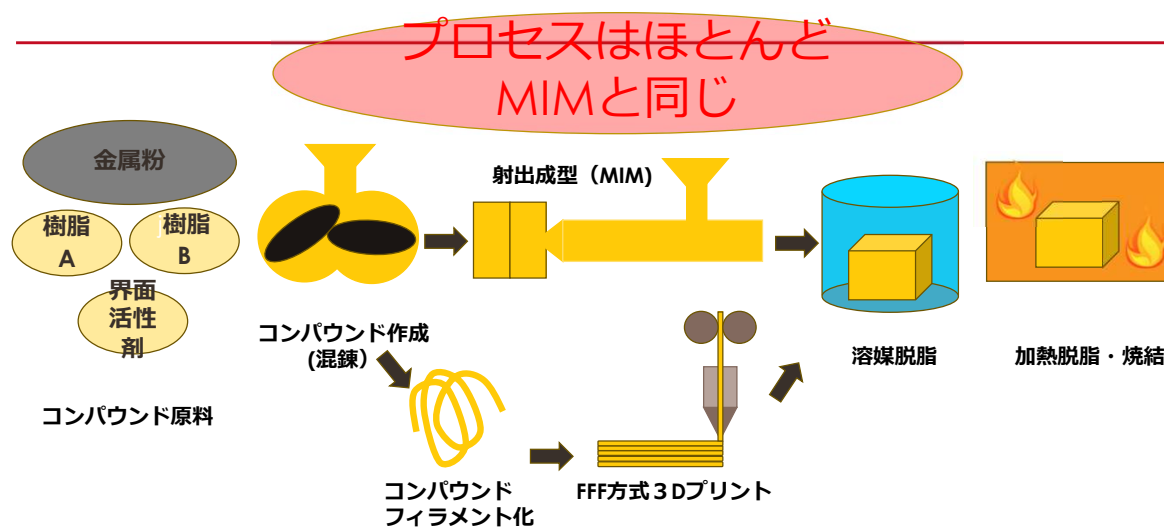
6

金属AMの問題点・解決の方向

- 問題点** 装置が高価であり、参入障壁が高い
 PBFのシステム、BJのシステム、MEXのシステムで
 数千万 ~ 一億円
- 解決の方向**
 FFF方式、焼結によるプロセスの開発
 FFF造形装置は極めて安価
 脱脂焼結プロセスが高価になる
 小型で安価な設備での脱脂焼結も可能とする

7

FFF-Sinter法による金属造形の登場



8

粉末焼結型FFF造形による金属AMの提案

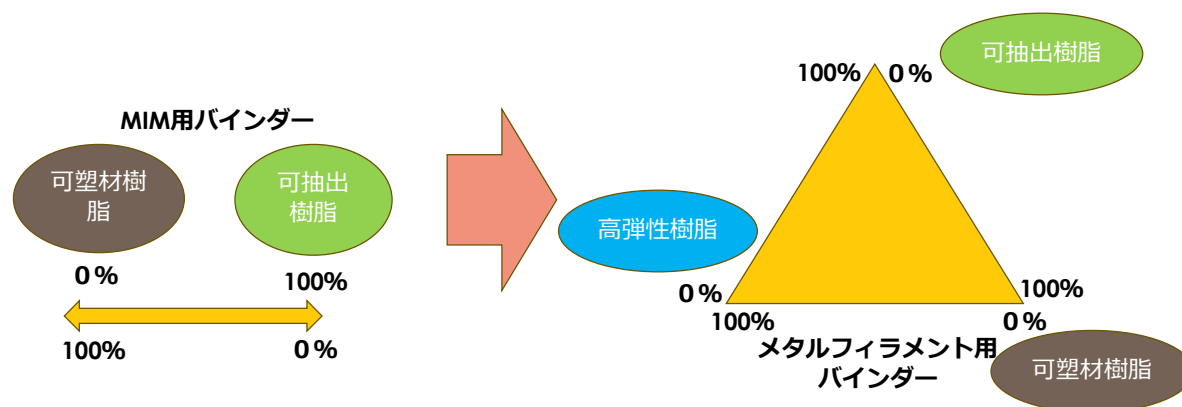
実用金属FFF 3 DPプロセスを実現するために克服するために克服すべき課題

- フィラメントの課題
フィラメントの強度・造形性（適切なバインダー成分、粉末配合率、粉末品質）
- 3Dプリンティング装置の課題（ほとんどの装置は樹脂造形を想定）
造形トラブルのない造形（フィラメント送り形式、ノズルでのトラブル、）
造形ソフトウェア
- 脱脂の課題（悪臭、毒性等の問題）
加熱脱脂 溶媒脱脂 触媒脱脂 の 選択
- 焼結の課題(装置価格、高温、高圧の問題)
コンパクトで設置場所を選ばない焼結炉 真空ポンプ、高圧ガスの問題、排気ガスの問題、

9

問題点克服のための技術

- ・低コストFFF装置で使用可能なメタルコンパウンドフィラメントの開発



10

FFF法による金属造形の登場

- フィラメントのみを提供する（汎用フィラメントの開発）
- 造形は既存のFFF方式3Dプリンタを用いる
- 脱脂・焼結処理は外部委託、あるいは自前の処理

- **BASFフィラメント** (独) — POM系2重構造
- Virtual Foundry フィラメント(米)
- Markforged フィラメント (米) — すべてクローズドなシステム
- Nanoe フィラメント (仏) — EVA系フィラメント（日本で特許公開済み）
- **アセトン脱脂 フィラメント** (独)
(MiMtechnik, Element22, PT + A, AM-Ex)
(単独のバインダー開発元がある模様)

* 最近になってAnycubic(中)から、廉価フィラメントが発表された模様 → 製造中止の報告
(<https://www.anycubic.com/products/316l-metal-filament-1-75mm>)

11

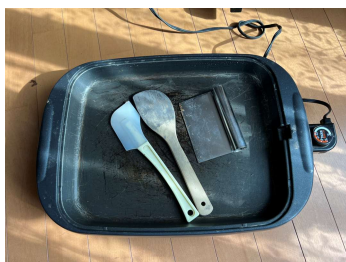
東京電機大学でのフィラメント作製

- 三成分系フィラメント

TDUシステムによる効率的なフィラメント開発

コンパウンド作成 1時間 (100cc)

フィラメント作製 3時間 (φ1.75mm、20m)



12

問題点克服のための技術

・開発フィラメントの評価（強度・取り扱い性）

粉末配合率 (vol%)	従来フィラメント	新フィラメントA	新フィラメントB	新フィラメントC
45	○	◎	◎	◎
48	○	○	○	◎
50	△	○	○	◎
52	△	△	○	○

◎：慎重に取り扱う必要なし
 ○：慎重に取り扱えば造形可能
 △：極めて慎重に取り扱う必要あり
 ×：造形不能

* PF10F-SUS316L（エプソンアトミックス）を使用した評価

13

問題点克服のための技術

・開発フィラメントの評価（強度・取り扱い性）

粉末配合率 (vol%)				
45	◎	◎	?	◎
48	○	○	○	◎
50	○	△	○	◎
52	?	△	△	○

◎：慎重に取り扱う必要なし
 ○：慎重に取り扱えば造形可能
 △：極めて慎重に取り扱う必要あり
 ×：造形不能

* 新バインダーAを使用

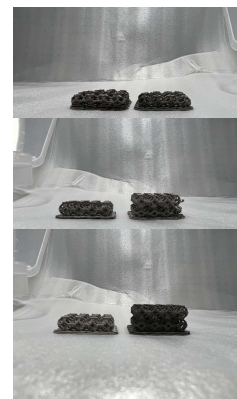
14

問題点克服のための技術

・開発フィラメントの評価（加熱脱脂・焼結後の形状保持）

粉末配合率 (vol%)			
45	×	×	×
48	×	○	×
50	○	○	△
52	?	◎	?

* 新バインダーAを使用



配合率
48vol%

配合率
50vol%

配合率
52vol%

14面体ラティスの焼結

15

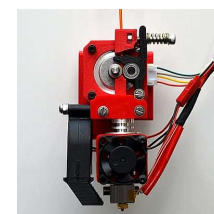
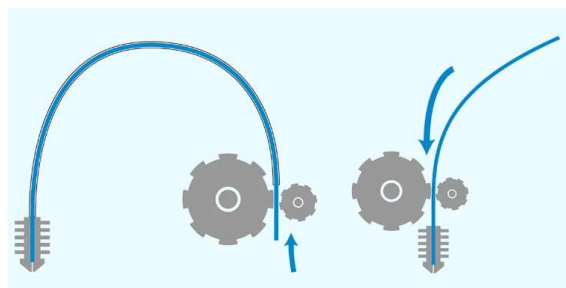
問題点克服のための技術

* PF10F-SUS316Lを使用した評価

・3Dプリンティング装置の課題(フィラメント送り機能)



ボーデン方式

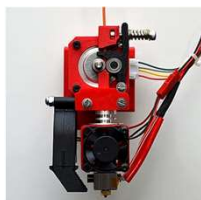


直接押出方式

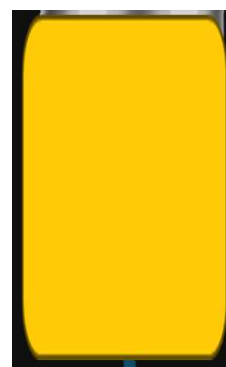
16

問題点克服のための技術

- 3Dプリンティング装置の課題(フィラメント送り機能)



Fuse Labo
ベルギー



17

問題点克服のための技術

- 3Dプリンティング装置の課題(ソフトウェア)

形状デザインは STL 装置コントロールは Gcode

- 最も進んだ、金属FFF用スライサー Ultimaker Cura
BASFフィラメント用にチューニング

金属フィラメントは樹脂フィラメントと比較して、
熱容量が大きい、熱伝導率が高い、熔融時の粘性が低い
適切な造形には 適切なスライサーが必要

18

問題点克服のための技術

- 脱脂の課題（加熱脱脂・溶媒脱脂・触媒脱脂の選択）
- バインダー成分が多いため、加熱脱脂ではスランプ変形が大きい。
- 触媒脱脂では（BASFフィラメントを想定）
シュウ酸脱脂等も考えられるが、硝酸脱脂は実施が困難
脱脂・焼結を国内で実施が困難
- 脱脂では、溶媒脱脂を想定
パラフィン系成分を用いれば、有機溶媒で脱脂可能
低分子量PEならば、加熱シクロヘキサンで脱脂可能

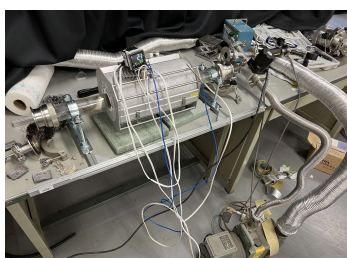
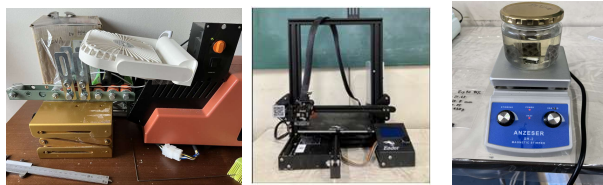
19

問題点克服のための技術

- 低コスト炉による焼結技術
- 焼結雰囲気改善
高価なディフュージョンポンプによる高真空から
水分除去した低露点不活性ガスの利用へ
- 焼結温度の低温化
金属粉末の最適化
より粒径が小さく、流動性が適切な粉末の利用

20

東京電機大学での造形システム



- 低コスト炉による焼結技術

- 焼結雰囲気改善

高価なディフュージョンポンプによる高真空から水分除去した低露点不活性ガスの利用へ

- 焼結温度の低温化

金属粉末の最適化により粒径が小さく、流動性が適切な粉末の利用

21

開発技術のまとめ

- この技術の完成により、**参入障壁の低い** 金属3Dプリンティングが実現

- さらに、この造形法により、他の金属3Dプリンティングでは不可能な

クローズドセル製品の製造が可能（PBF, BJ法では不可能）

ノズルのマルチ化により**素材を複合化**しての造形が可能

ノズル内混合により、**傾斜機能素材**の造形が可能

22

フィラメント方式からペレット方式へ転換する可能性

- フィラメント方式の短所
- 短所 金属粉を高配合率にすることはなかなか困難
 フィラメントへの配合率は55vol%ていどが限界か？
 脱脂・焼結時の脆弱性を改善するには金属粉の高配合化が必須？
 高配合率にすればフィラメントは極めて脆くなる
- 改善の方法として ペレット供給プリンタの可能性
- 問題点 装置が高価である、
 素材供給がフィラメント方式に比較して安定しない可能性

23

フィラメント方式からペレット方式へ転換する可能性

- ペレット方式装置の現状
- **エスラボ**
 近畿大(第一セラモ+エスラボ+島津)による研究が進行中
- **セイコーエプソン** (旧新興セルビック)
 新興セルビック開発のコンパクトスクリュウを利用
- **Extra Bold**
 大型樹脂製品、廃プラスチックの利用
- **Creality G5** (深圳)
 \$3,000、日本では販売されていない
 MIMコンパウンドを使用してFFF装置相当の造形が可能であれば、
 ゲームチェンジャーとなるかも？

24