



PBF-LB/M金属積層造形により作製したFCC单相ハイエントロピー合金の計算ソフトウェアによる強度予測



長野県PRキャラクター「アルクマ」
©長野県アルクマ

長野県工業技術総合センター材料技術部門金属材料部

研究員 鈴木崇司 ○

主任研究員 小池 透

主任研究員 傳田直史

1 研究の背景及び目的

2 取組結果の概要

3 実験結果

- メカニカルミリング(MM)法を用いた粉末作製
- MM粉末を用いたPBF-LB/M金属積層造形
- 汎用物性計算ソフトウェアのPBF-LB/Mへの適用

4 まとめ



金属積層造形(AM*)の大波に本県産業がどのように立ち向かうべきか？

⇒ 工技Cが培ってきた粉末プロセス技術で付加価値を生み出す

* Additive Manufacturing : 付加(積層)造形、3Dプリンタによる造形

《 金属AM関連製品の世界市場 》

NEDO 技術戦略研究センターレポート TSC foresight vol.32(2019)

★ 造形機 (= 3Dプリンタ本体)	6,500億円	} 3兆円市場 2030年予測 2016年の50倍以上
★ 造形製品 (= 3Dプリンタで製作したもの)	2兆円	
★ 金属粉末 (= 3Dプリンタで使用する原材料)	6,000億円	

(例) カスタムメイド医療機器

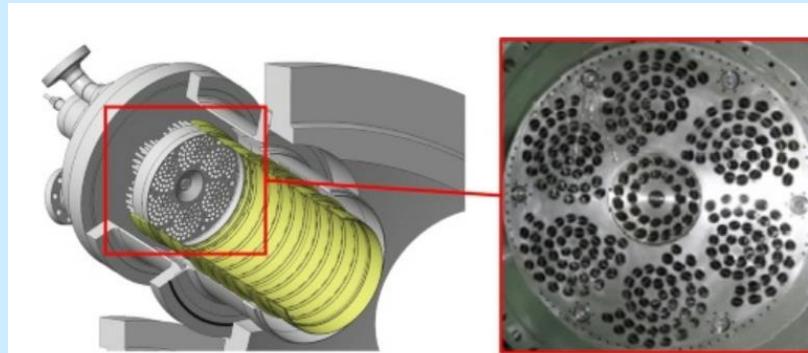
3Dプリンタ製 骨接合プレート



帝人ナカシマメディカル(株)webサイト

(例) 高効率ガスタービン

3Dプリンタ製 燃料噴射ノズル



三菱重工(株)webサイト

本県産業においても
もはや人ごとではなくなってきた！！

「金属AM」の「プロセスの特徴」を最大限に生かした
本県産業による先進的な金属AMの事業化を目指して



工
技
C
発

「所望の特性をもたせた材料」
を「所望の形状」に

- ✓ 経営層の思考を刺激する！
- ✓ 企業の経営ビジョンに浸透させる！

「材料調整・粉末作製・造形」
で「競争力のあるAM事業化」へ

- ✓ 自社設計思想（標準）の転換へ！
- ✓ ものづくりに破壊的なイノベーションを！



本
県
産
業
へ

- ✓ 歴史的背景から、現在の加工組立型産業に特化してきた長野県製造業

★ 「素形材製造」と「加工（造形）」を同時に行う「金属AM」プロセスへのモチベーション

- ✓ **これまで手つかずだった材料開発への挑戦（合金調整、粉末製造 etc.）**

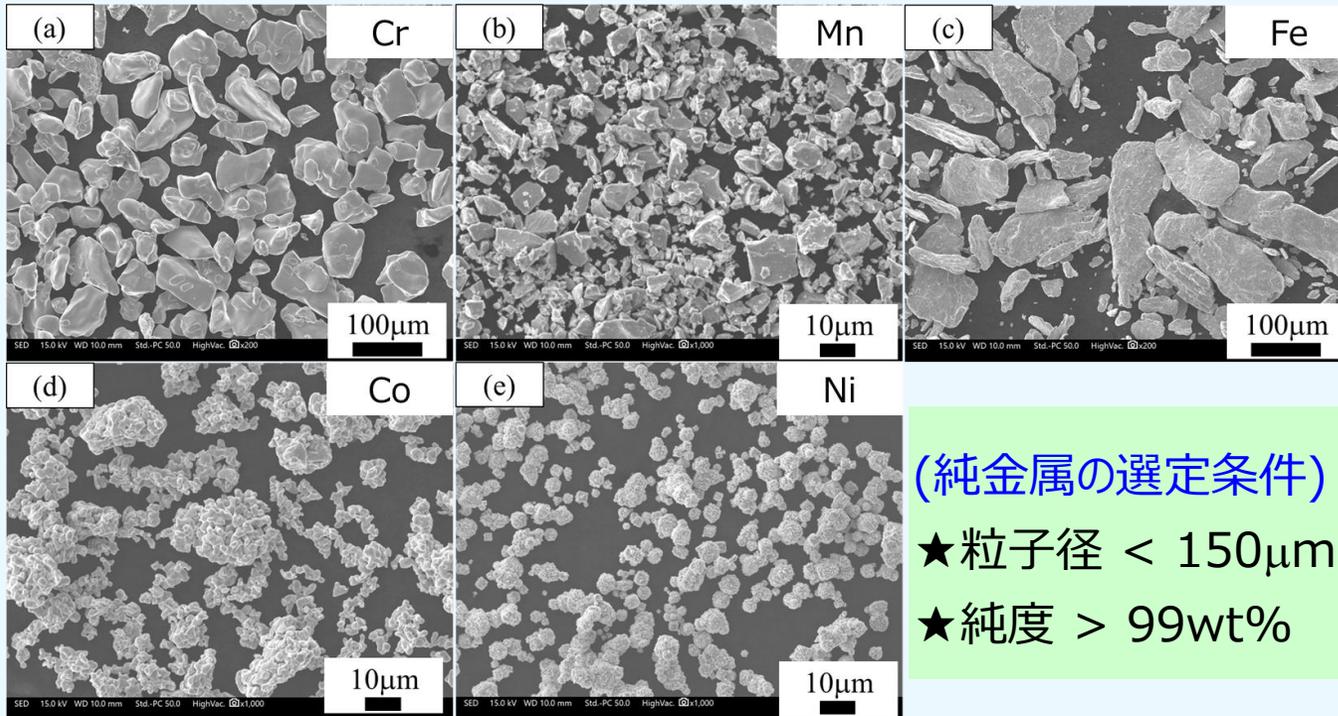
⇒ 材料は「供給されるもの」から「作るもの」へと 発想or構造の転換

純金属粉末からAM適用可能な粉末作製

- ★ 安価に購入できる粒子径、形状のものを選択（大きさ、形状は揃えていない）
- ★ 粉末同士を混ぜてくっつけること（メカニカルミリング）で所望の合金粉末を作製

出発材料 = 純金属粉末

Cr, Mn, Fe, Co, Niをそれぞれ等原子量組成（20at%）で秤量

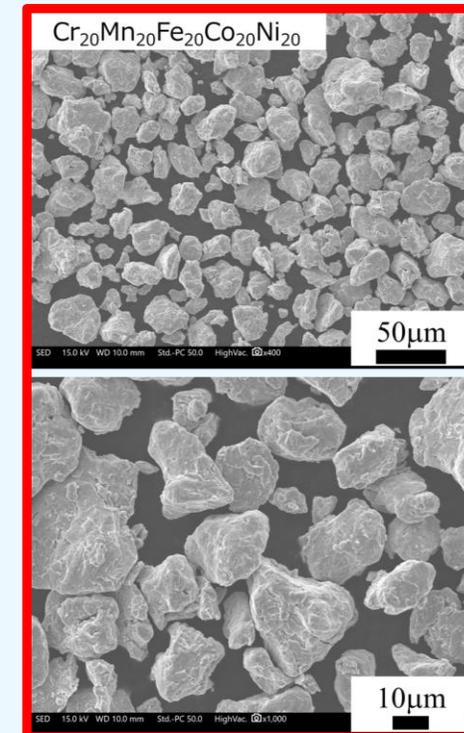


（純金属の選定条件）

- ★ 粒子径 < 150μm
- ★ 純度 > 99wt%

メカニカルミリング
（機械的な粉砕）

複合 or 合金粉末 （CrMnFeCoNi合金）



（メカニカルミリング条件）

- ★ 重量比
ボール:原料 = 10:1
- ★ 回転数
300rpm
- ★ 処理時間
180分

- ✓ 溶かさないで、少量の試作が安価に、簡単にできる！
- ✓ 基本的に異形粉末となるため、AMプロセス条件にひと工夫が必要！

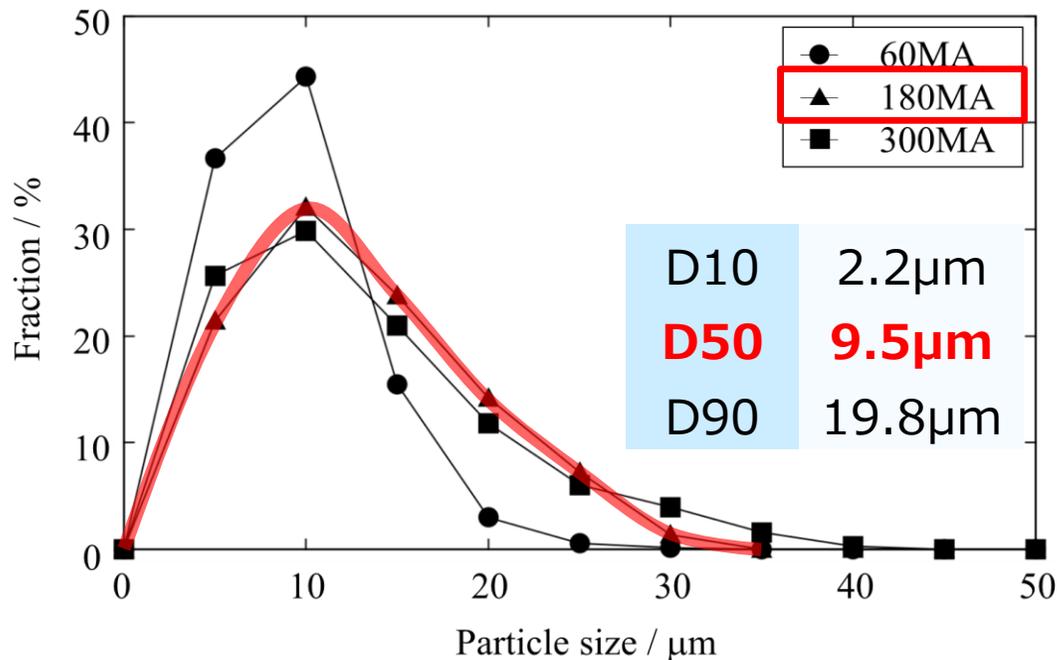
作製したメカニカルミリング粉末

- ★ 市販のPBF-LB/M用粉末に比べ、**粒子径は小さく、流動性はよくない**
- ★ メカニカルミリングのみでは、複合化した粉末は**完全に合金化されていない**

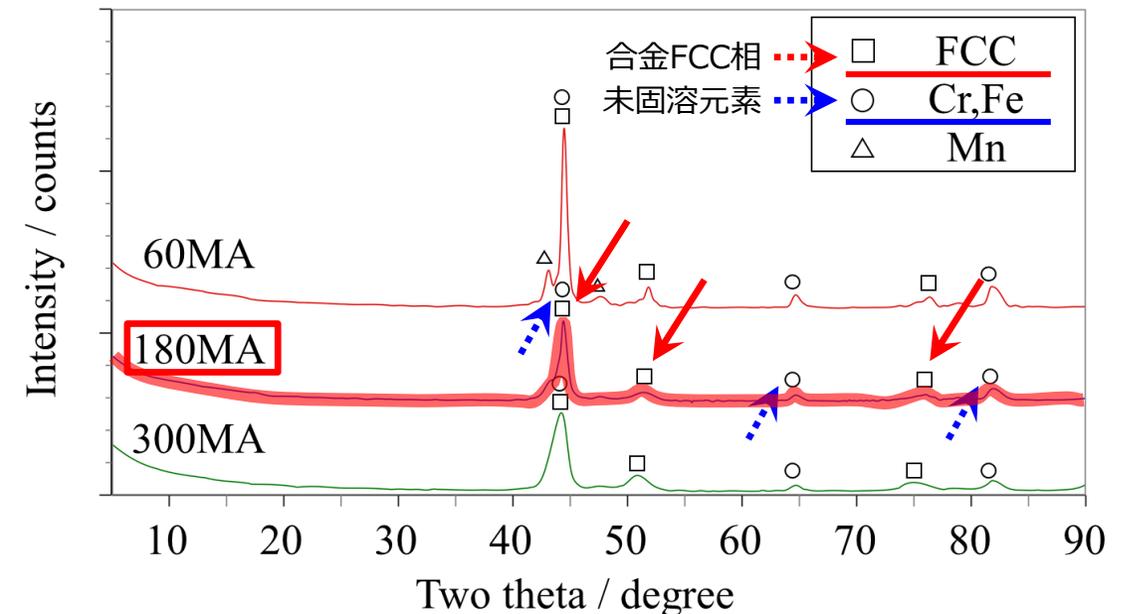


このままの状態
でAMに適用

粒子径分布と粉末流動性



X線回折プロフィール



Powder	流動性 / s/50 g	安息角 / degree
MM-CrMnFeCoNi	37	30
市販品-CrMnFeCoNi	17	28

項目	説明	評価
流動性	粉末が小孔を通過する時間	小さいほど
安息角	粉末がなす山の高さ	○

メカニカルミリング粉末による金属AM

- ★ メカニカルミリングにより作製した異形粉末であっても緻密体造形ができる
- ★ (メカニカルミリング) × (金属AM) = 「**所望の形状**」にすることができる

金属AM (PBF-LB/M) の原理

異形粉末による緻密体造形

通常使用される粉末

100µm

Movie

Std.-PC 50.0 HighVac. 100x100

①粉末計量 → ②粉末供給 ↑ ③選択的溶融凝固 ↑ ④ステージ1段降下

繰り返して積み上げていく

原料

異形メカニカルミリング粉末

金属AM

高密度造形体

※写真は表面研磨後の鏡面

10µm

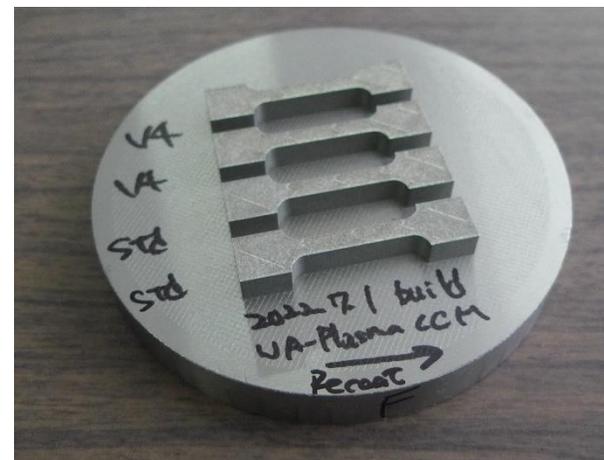
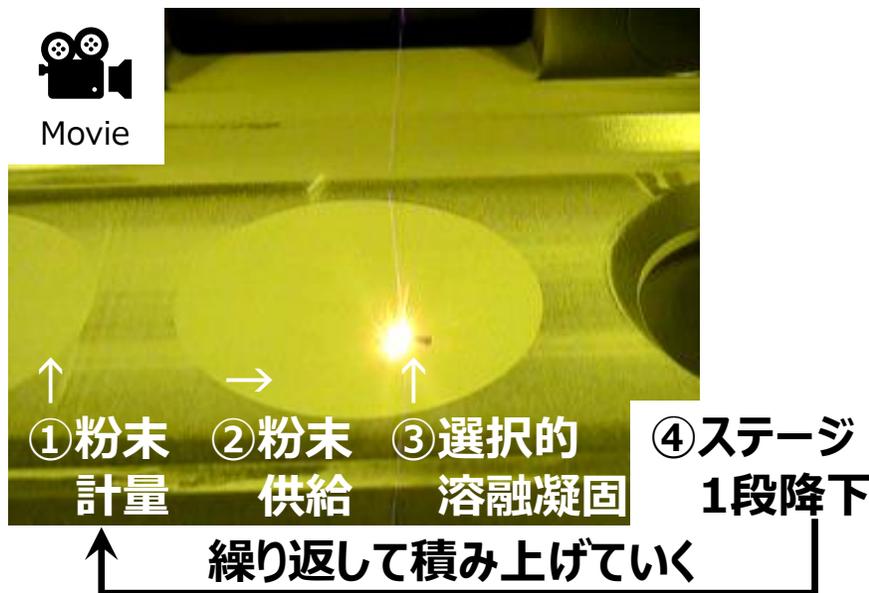
5mm

使用した金属AM装置

★ PBF-LB/M方式*1の金属AM装置です

*1 Powder Bed Fusion – Laser Beam / Melting : レーザーを熱源とした粉末床溶融結合方式

★ 小さな造形エリア (φ100mm) で、多様な原料粉末で造形テストOKです



造形体の写真

メーカー

- TRUMPF社

型式

- TruPrint1000

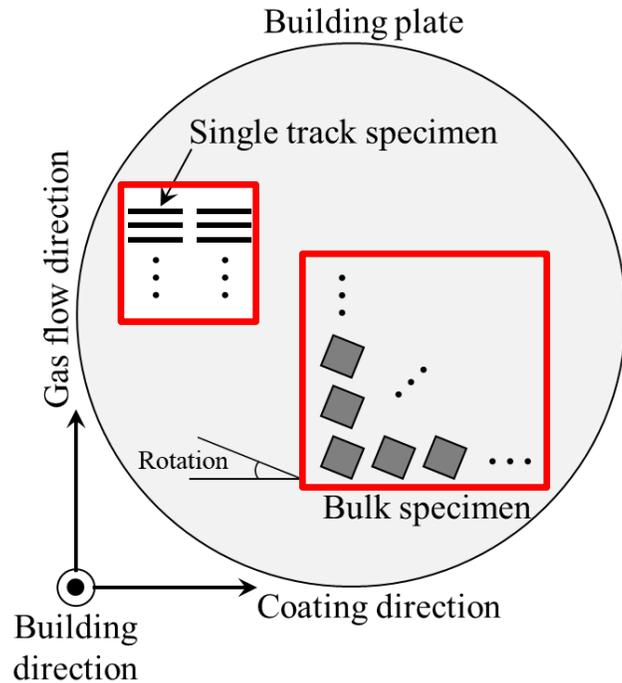
仕様

- 造形サイズ : φ100×100mm 未満
- 造形可能材料 : 316L, Ti64, Pure Ti, CCM, AlSi10Mgなど
- レーザー光源 : 200Wファイバーレーザー、スポット径 : 55μm

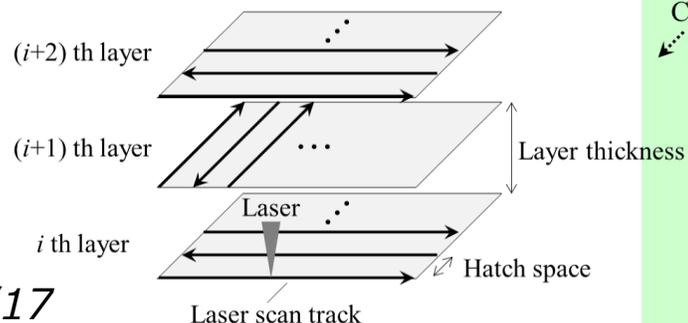
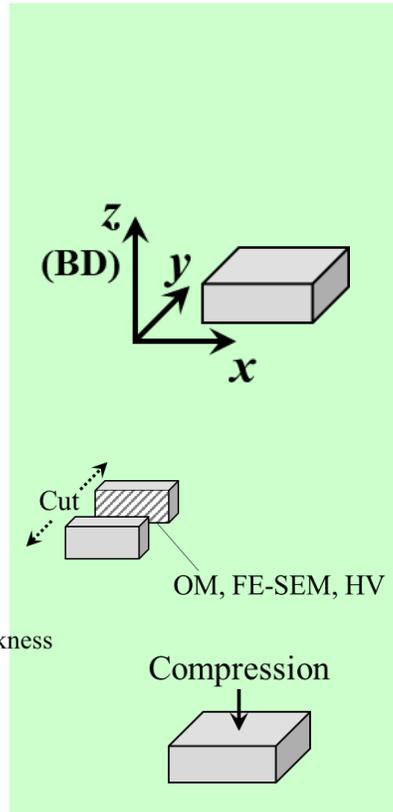
装置・人体に危険なものでなければ、オリジナルの
新規材料等の持ち込みもOKです

受託研究 or 依頼試験 or
設備利用(4,200円/時間)で
ご利用いただけます！！

- ★ 1層1パス造形でレーザーによる粉末材料の熔融条件出し
- ★ 立体造形で緻密体の造形条件出し



試料座標系
及び評価箇所



造形条件

Layer thickness, t / mm	0.020
Laser power, P / W	20 - 200
Scan speed, v / mm/s	250 - 3000
Hatch space, h / mm	0.01 - 0.1
Laser spot diameter / mm	0.055
Building plate	SUS304
Shielding gas	Argon
Oxygen concentration /%	< 0.01

エネルギー密度

$$E_{LB} = P/vht$$

E_{LB} : エネルギー密度
 P : レーザーパワー
 v : スキャンスピード
 h : ハッチスペース
 t : 積層厚さ

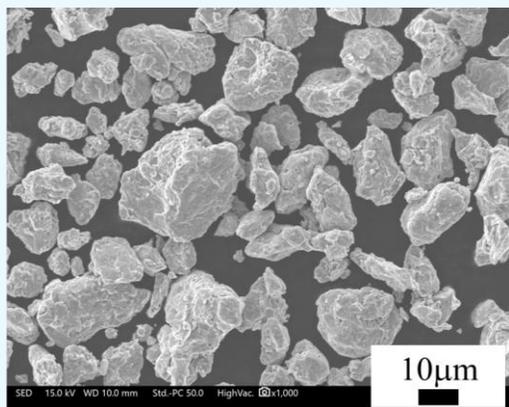
造形体作製方法

ライン造形	1層1パス10mmスキャン
立体造形	1辺5mm×高さ2.5mm直方体 XYラスタースキャン

異形粉末から緻密造形体の作製手順

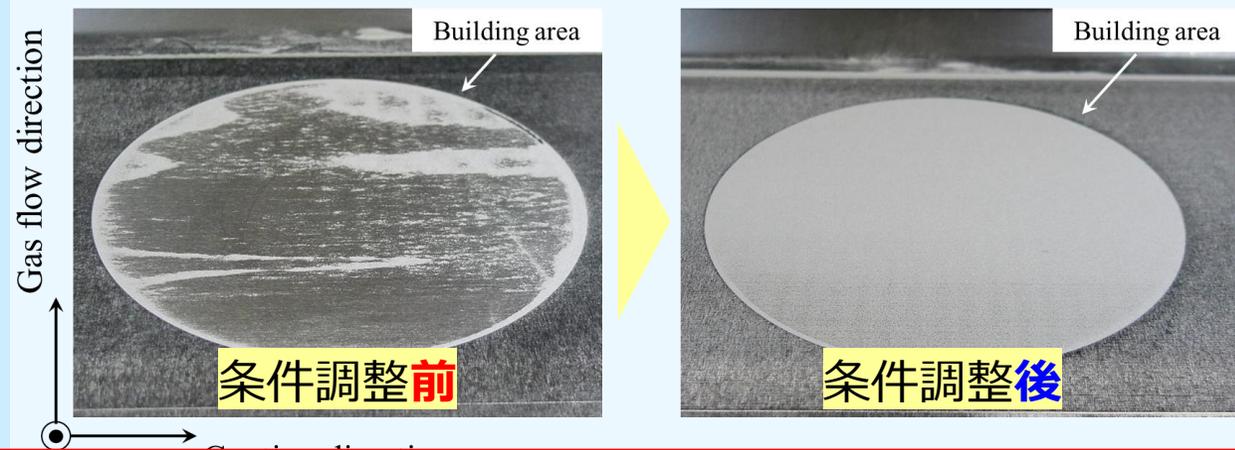
- ★ ①～④の工程で、流動性・充填性が低い異形粉末により緻密体を造形
- ★ ②粉末床形成にひと工夫：粉末はゆっくり・やさしく運ぶ、ガス流速は抑える

① 粉末作製



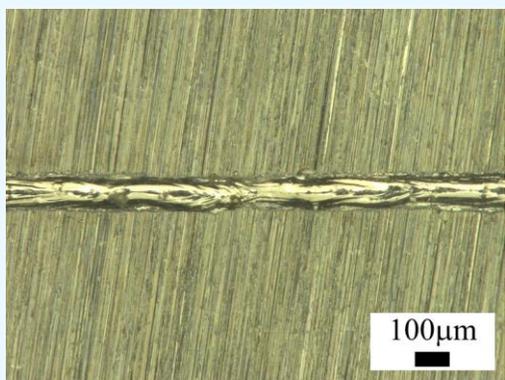
↑ 均質な複合化・粒子径・形

② 粉末床形成



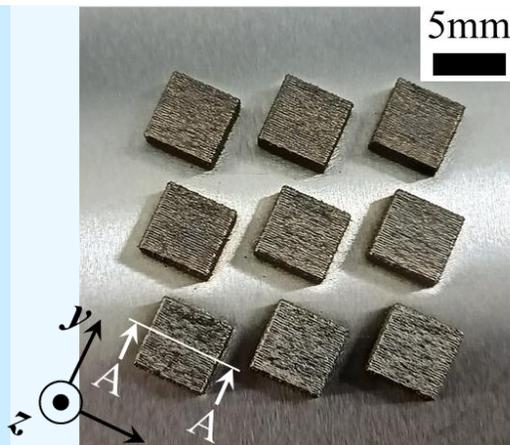
↑ 均一・緻密・凹凸のない粉末床、粉末安定供給

③ 連続メルト

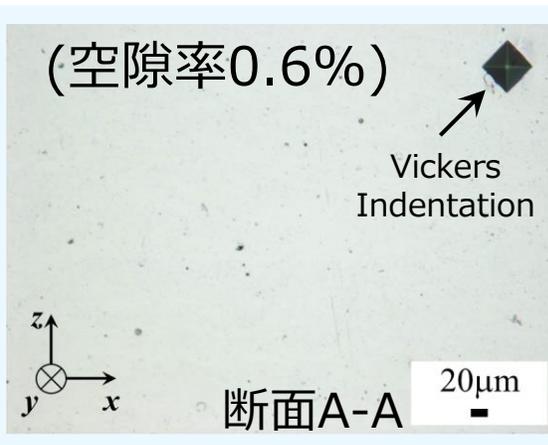


↑ 連続性・均一幅・高さ・溶け込み深さ

④ 立体造形



↑ 内部欠陥・機械的性質

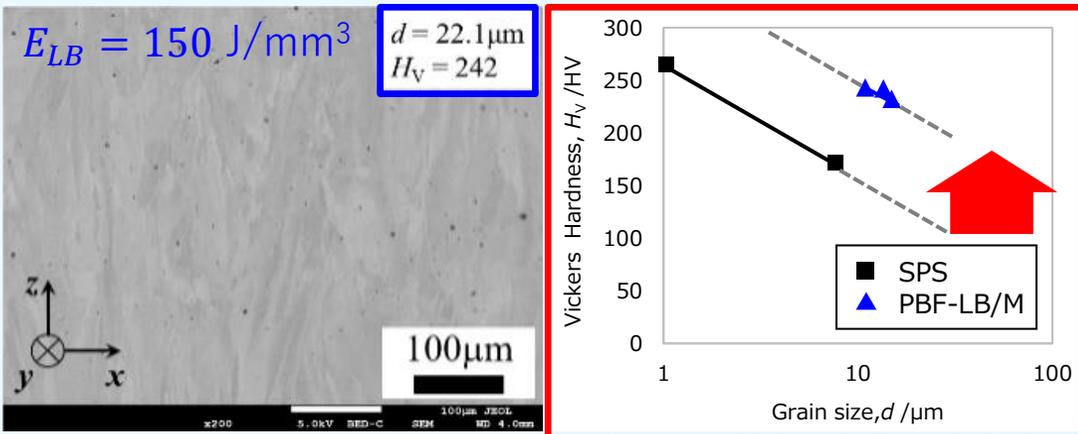


★ PBF-LB/M造形体は、同じ結晶粒径で比較した場合、SPS焼結体より硬さが高い

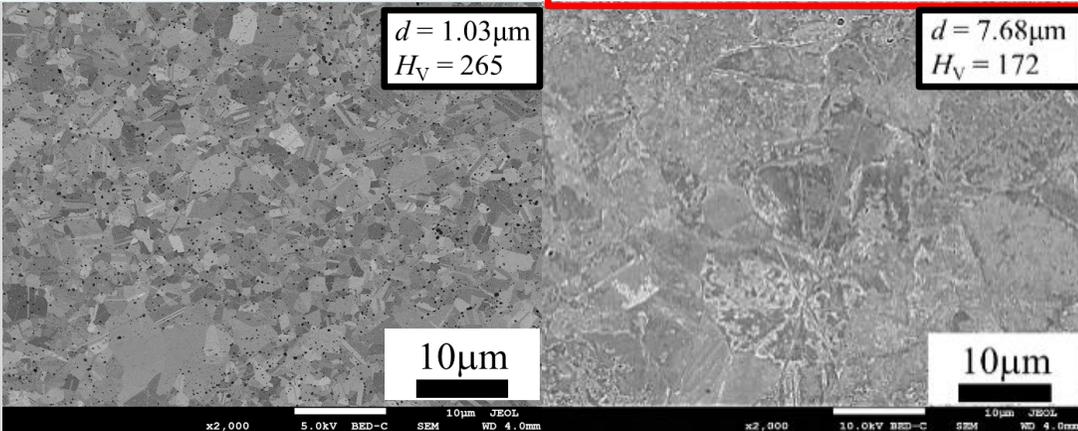
⇔ X線回折から、造形体は結晶格子へのひずみ導入による転位強化量が大いことを示唆

金属組織と硬さ

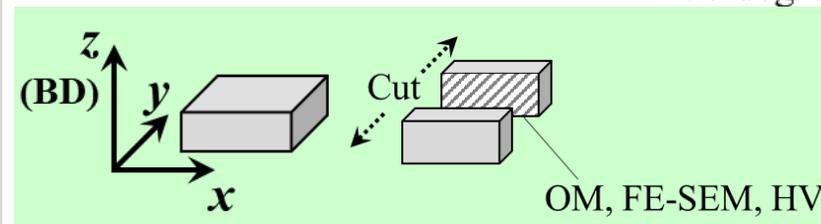
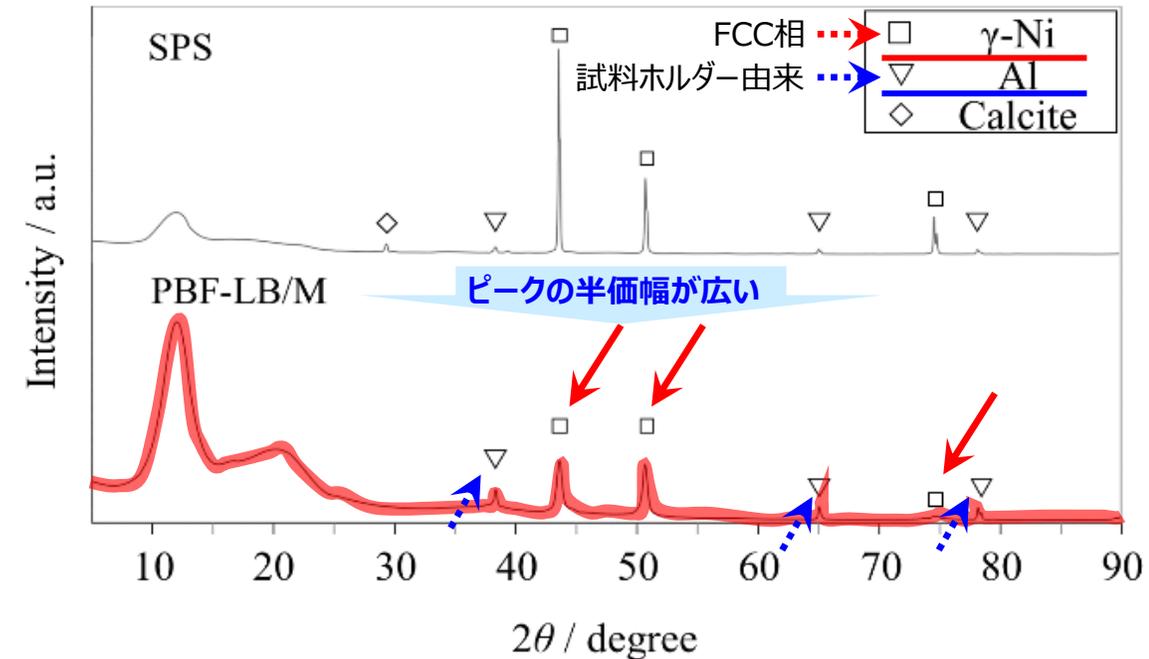
PBF-LB/M



SPS (参考)



X線回折プロファイル



- ★ 汎用の材料物性値計算ソフトウェア
- ★ 大手材料メーカー等においても使用されており、世界中で活用されている予測ツール

■ ソフトウェア名 ■

JMatPro (Sente Software社)

■ 計算内容 ■

平衡状態図、凝固物性、機械物性、相変態
CAEで必要となるほとんど全ての入力材料物性値を計算

■ 対応データベース ■

Al合金、Mg合金、鋳鉄、一般鋼、ステンレス鋼、
Cu合金、Ti合金、**Ni基超合金**、NiFe基超合金、
Ni単結晶、Co合金、半田、ジルコニウム合金

* 国内代理店 (株) ユーイーエス・ソフトウェア・アジア
<https://www.usi-asia.com/jmatpro/index.html>



JMatProによる計算手順

★ 化学組成、熱処理条件等を入力するだけ

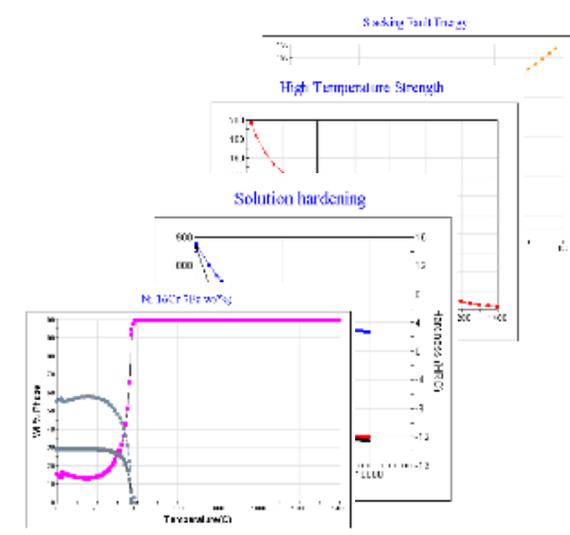
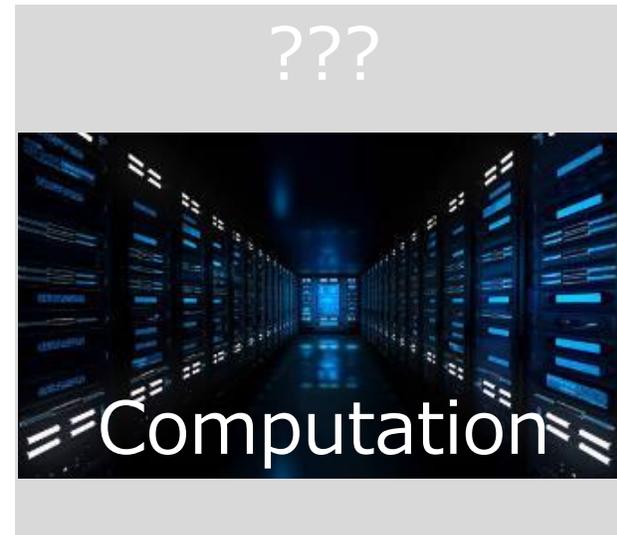
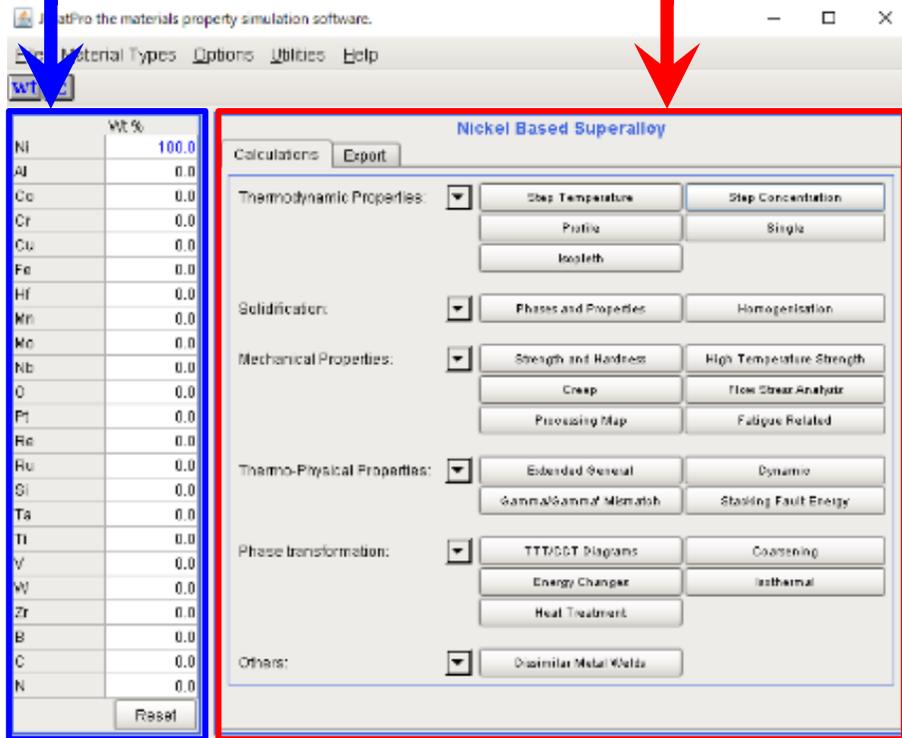
★ 使用するデータベースに応じて、入力可能な化学組成、計算内容は異なる

① 化学組成入力

② 計算内容選択

③ 計算実行

④ 機械的性質等出力

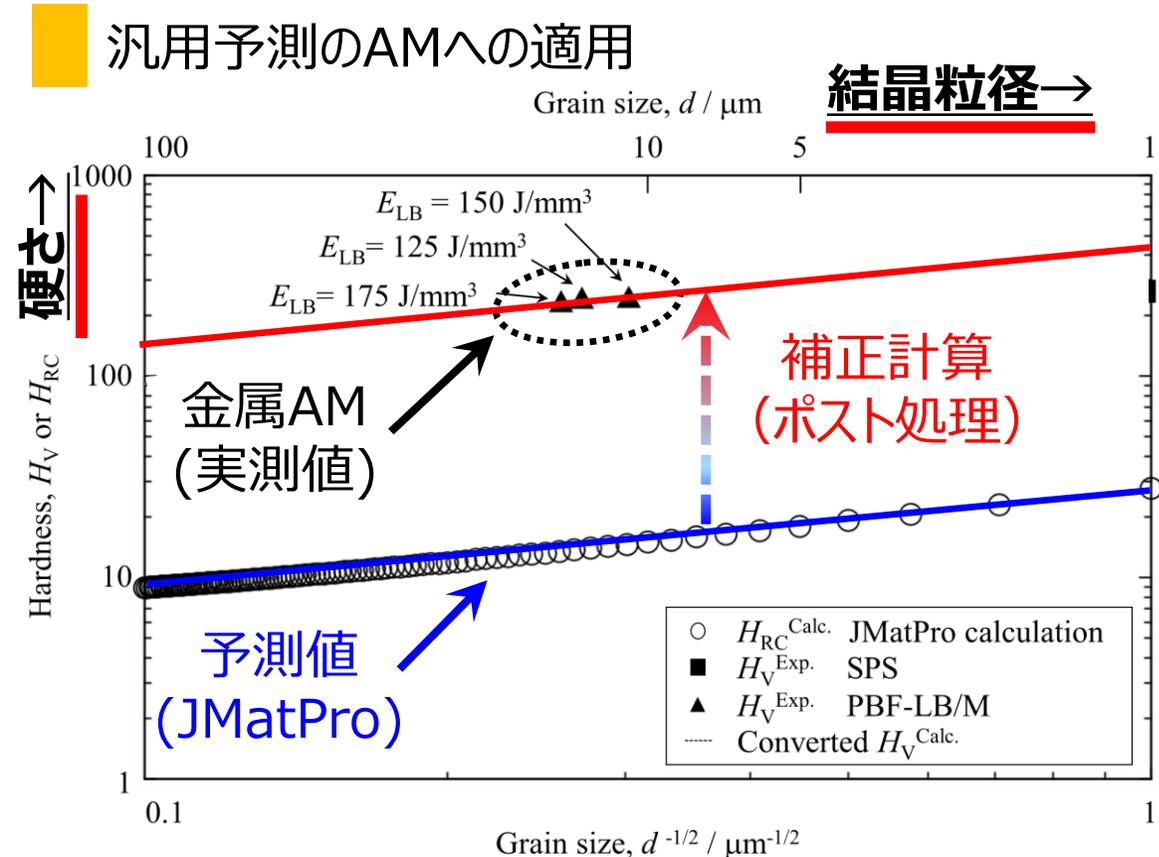


- 平衡状態図計算
- 機械的物性値
- 凝固物性値
- 熱物性値
- 相変態 ...ほか

waiting for the user to pick a property.

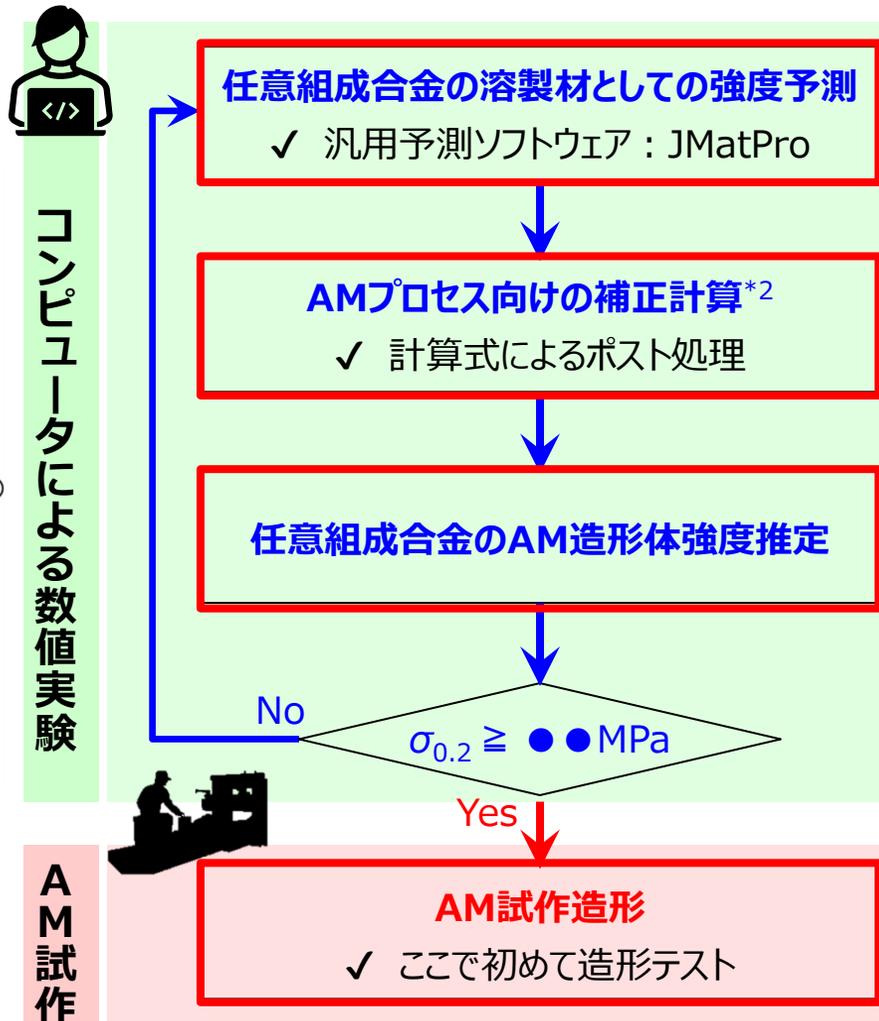
★ (任意組成*1) × (物性予測) = 「**所望の特性をもたせた材料**」を設計し
 (メカニカルリング) × (金属AM) = 「**所望の形状**」にすることができる

汎用予測のAMへの適用



予測値をAMプロセス向けに補正

$$H_V^{Calc.} = C_1 H_{RC}^{Calc.2} + C_2 H_{RC}^{Calc.} + C_3$$



- ★ メカニカルミリング法により作製した粉末をPBF-LB/Mプロセスに適用した
- ★ 汎用計算ソフトウェアJMatProを用いた強度予測のPBF-LB/Mプロセスへの適用を検討した

- (1) 純金属粉末を出発材料としたメカニカルミリング粉末から、緻密な造形体が作製できることを示した
- (2) JMatProによる硬さ予測値に対して、多項近似式により補正することで、PBF-LB/M造形体に適用できる可能性を示した

「所望の特性をもたせた材料」を「所望の形状に」するための金属AMプロセスに挑戦できる基盤を構築した **一緒に金属AMに挑戦してみませんか？**

最新情報はココ

<https://www.gitc.pref.nagano.lg.jp/zairyo/3Ddigital/index.html>



長野県工業技術総合センター材料技術部門

長野市若里1-18-1 〒380-0928 TEL 026-226-2812

E-mail kogyoshiken@pref.nagano.lg.jp

URL <https://www.gitc.pref.nagano.lg.jp/zairyo/3Ddigital/index.html>

