



MEET UP CHUBU vol.53
AM技術 in Co-startup Space & Community FUSE

新しいモノづくり技術としての 金属3D積層造形への取り組み

2024年12月3日

ヤマハ発動機(株)
生産技術本部 材料技術部

渡邊 慧太

1897年 **日本楽器製造** 誕生
(現在のヤマハ株式会社)



1955年 **二輪車部門** を分離・独立



ヤマハ株式会社



ヤマハ発動機株式会社



1955



モーターサイクル

1960



船外機



モーターボート

1970



スクーター



プール

1980



水上オートバイ

1990



電動アシスト自転車



スポーツボート

2000



電動スクーター



サイドバイサイドビークル

2010



リーニング・マルチホイール



高出力大型
船外機



ROV



産業用ドローン



セルハンダー

2020



自動車エンジン



スノーモビル



汎用エンジン



発電機



ゴルフカー



除雪機



ATV



産業用無人ヘリ



電動車いす



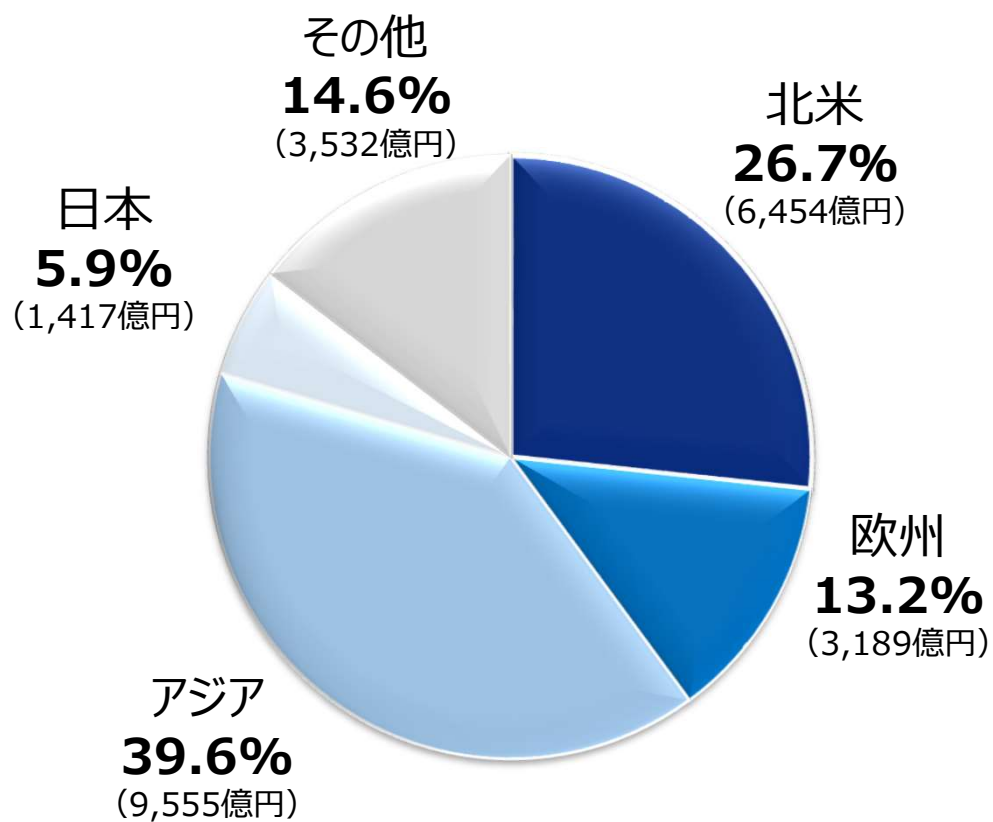
サーフェスマウンター



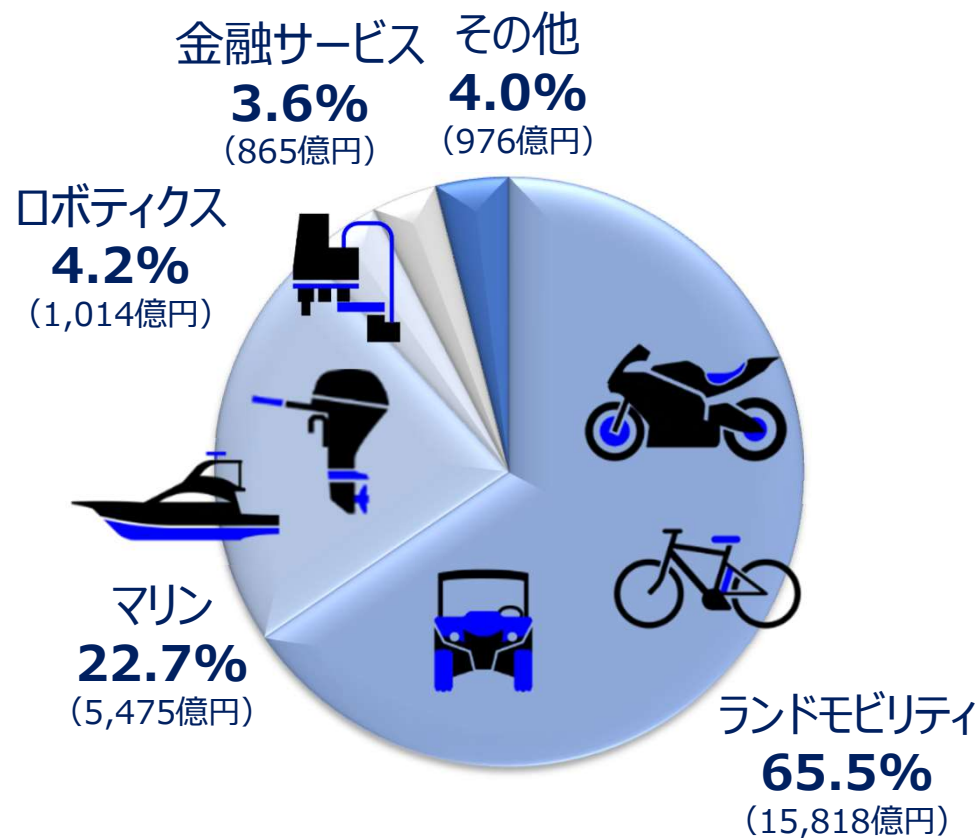
産業用ロボット

連結売上高 = 2兆4,148億円 (2023年)

地域別



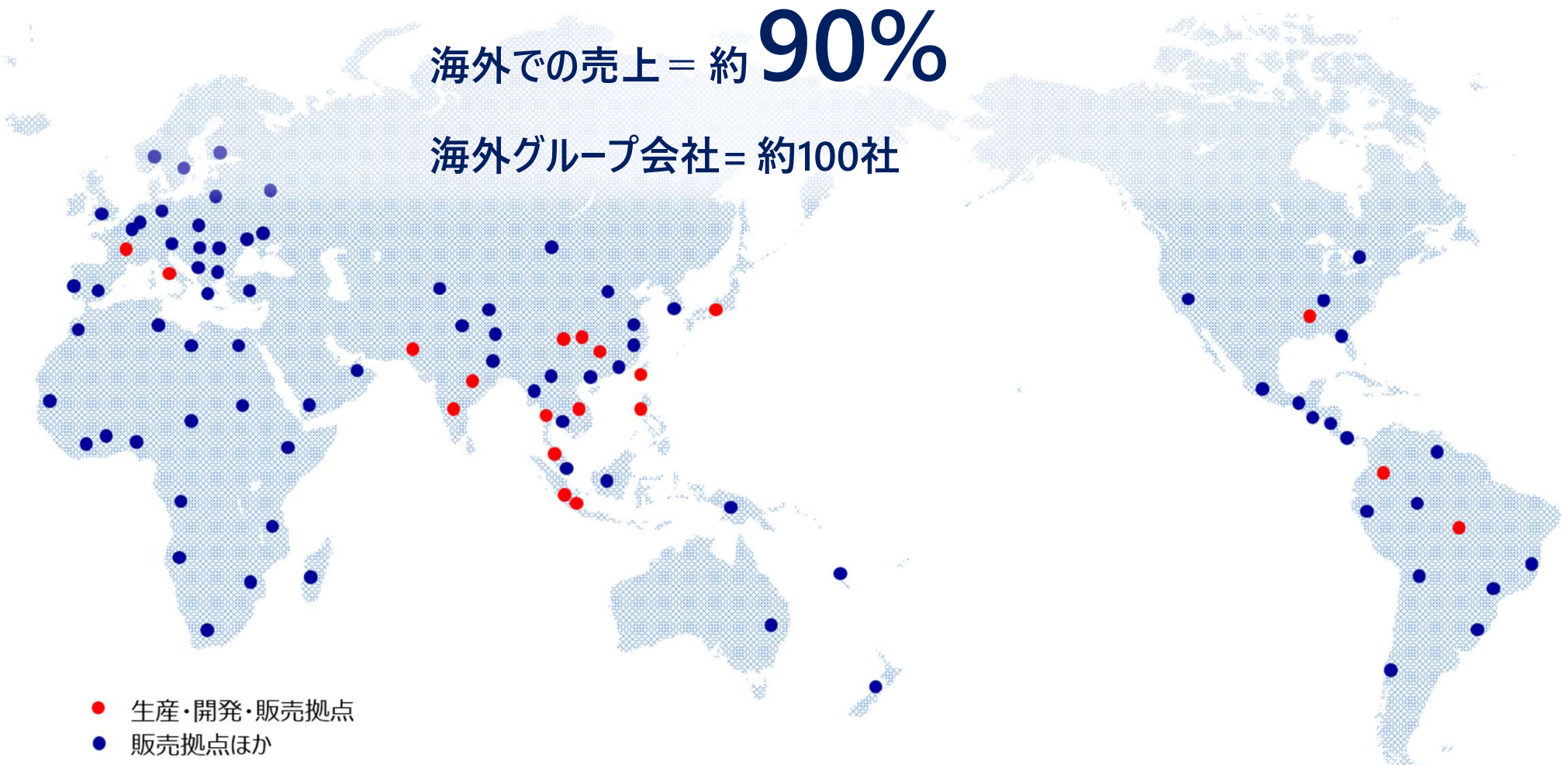
事業別



グローバルな開発・生産体制、**180**を超える国と地域で販売

海外での売上 = 約 **90%**

海外グループ会社 = 約100社

- 
- 生産・開発・販売拠点
 - 販売拠点ほか

Additive Manufacturing (AM) , 3D積層造形

JIS B 9441:2020 付加製造 (AM) 用語及び基本的概念

付加製造：3Dモデルデータを基に，材料を結合して造形物を実体化する加工法．多くの場合，造形層を積み重ねる形態をとる．除去加工及び成形加工と対照的な方法．



2013年 オバマ大統領一般教書演説

... once shuttered warehouse is now a state-of-art lab where new workers are mastering the **3d printing that has the potential to revolutionize the way we make almost everything.** ...

<https://www.youtube.com/watch?v=Yw1jAdMgsW8>

3D積層造形技術の発明者は日本人だった！



1980年 名古屋市工研の小玉秀男氏が光硬化樹脂を用いた3D積層造形技術を開発，特許出願．但し審査請求せず登録されなかった．技術も注目されずに終わった．



世界発の光造形 (SLA: Stereo lithographic apparatus)



1983年，3Dシステムズの共同創業者 Chuck Hull氏が光造形法を開発，1984年光造形装置 (SLA) の特許取得．1987年3Dシステムズにより世界初の光造形マシンが実用化された．

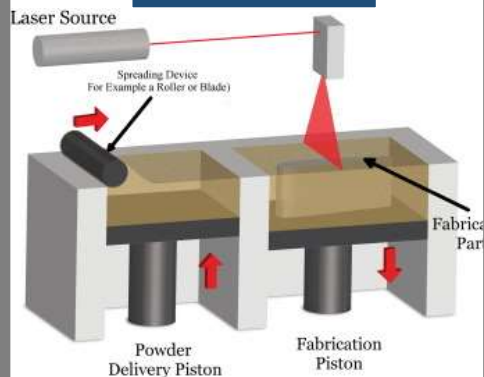


3次元積層造形の分類 ... 方式

■ Metal ■ Non-metal

PBF

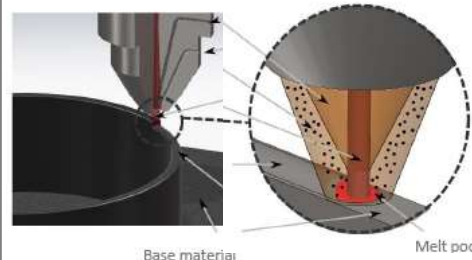
Powder bed fusion



粉末に熱源を照射し、溶融結合

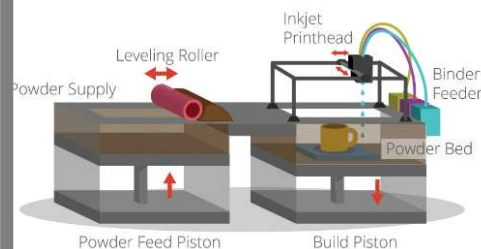
DED

Directed energy deposition



パウダーまたはワイヤーをフィード
積層後、機械加工（同一加工機内）

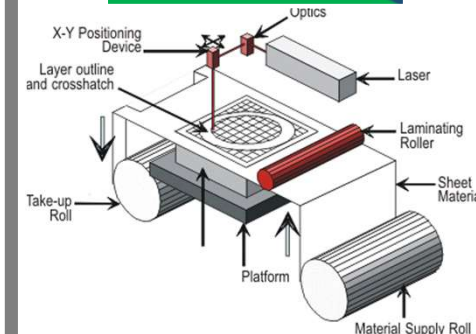
Binder Jetting



バインダジェット金属は
焼結工程が必要

LOM

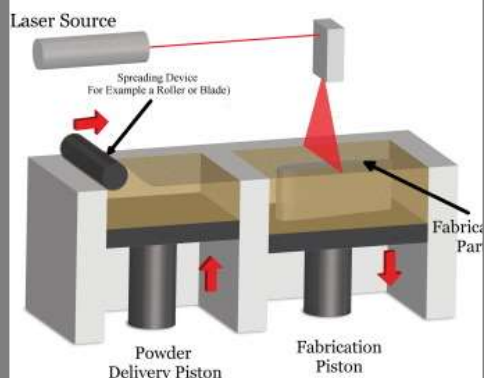
Laminated object manufacturing



シート積層
樹脂、金属、紙に適用可

SLS

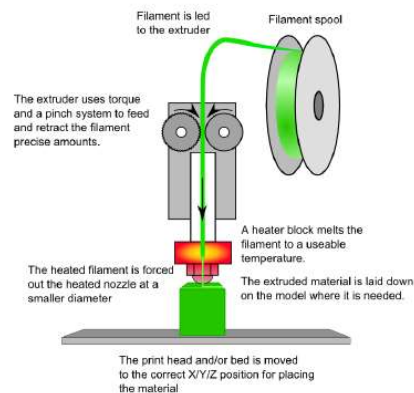
Selective laser sintering



粉末に熱源を照射し、焼結

FDM

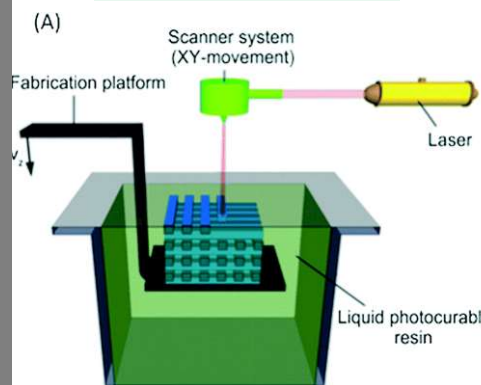
Fused deposition modeling



樹脂ワイヤをフィード

SLA

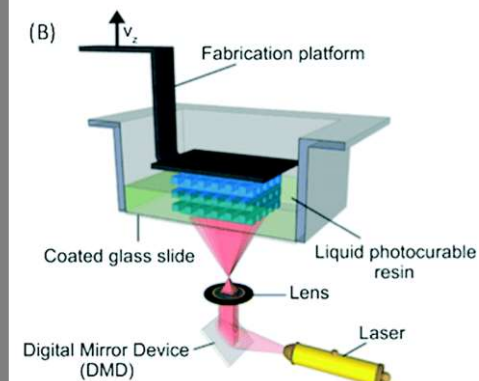
Stereolithography



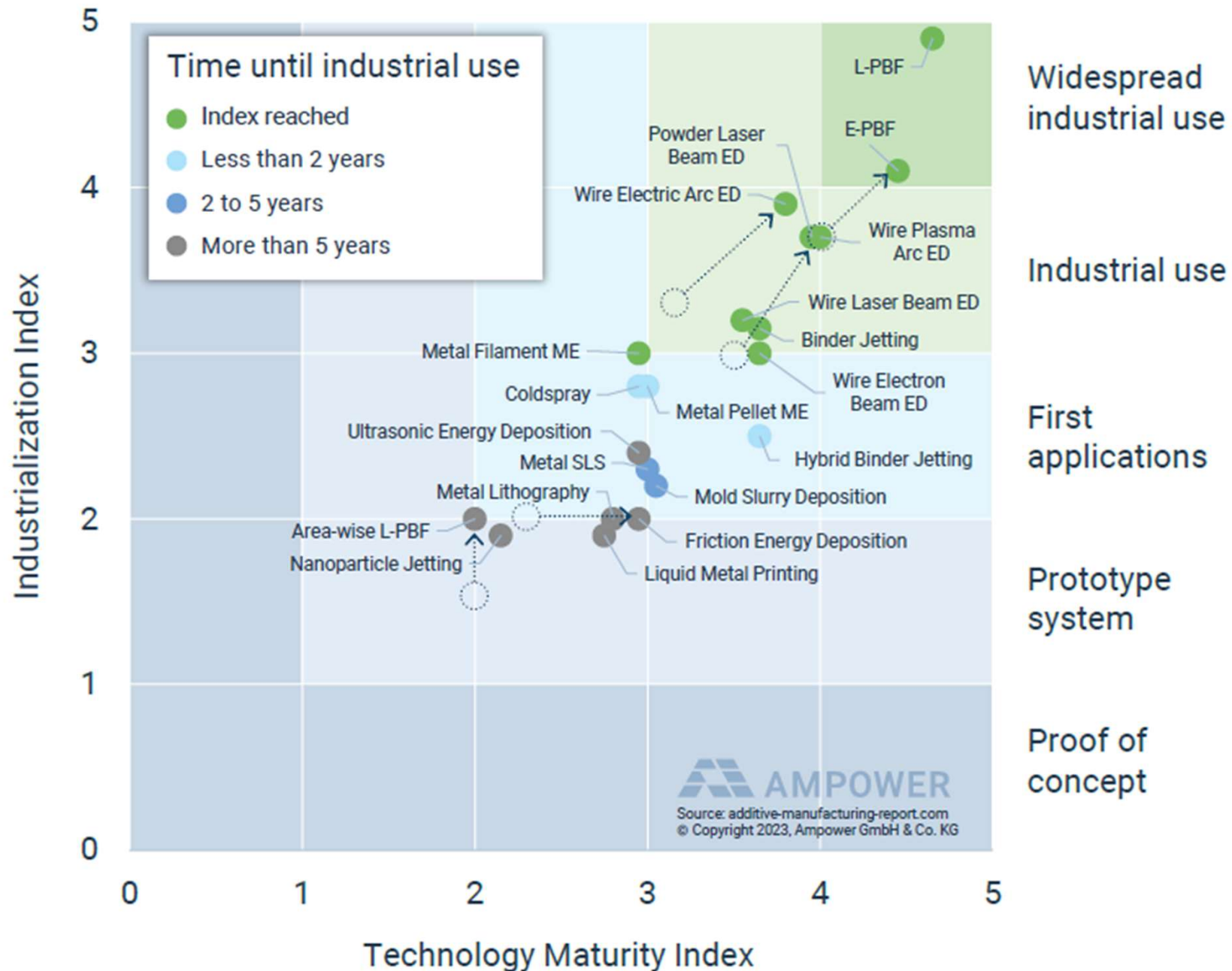
紫外線硬化樹脂
ラピッドプロト

DLP

Digital Light Projector



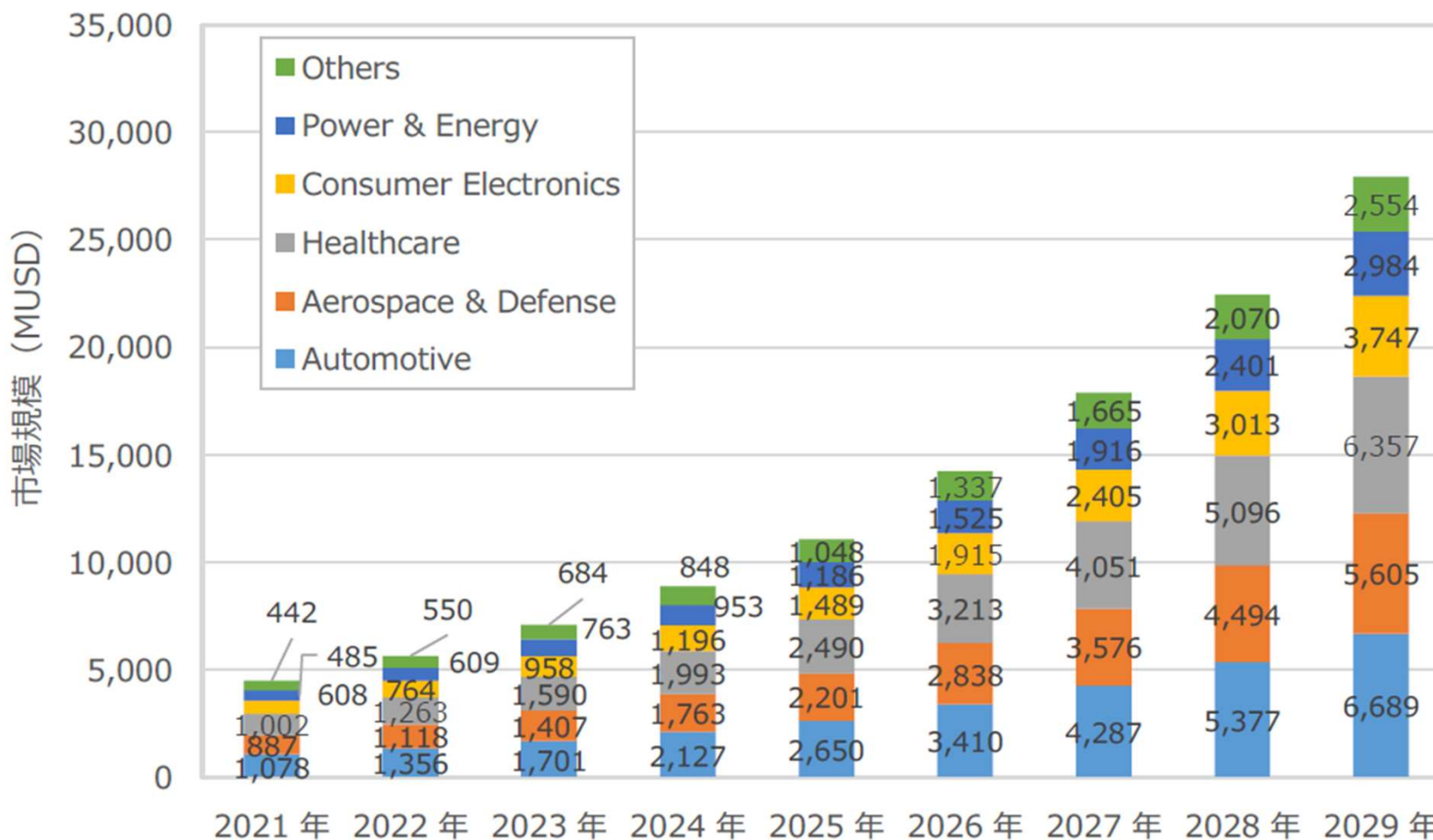
SLAを上下反転



3次元積層造形の分類 …… 材料×工法

	Fe	Al	Ti	Ni	セラミック	樹脂	その他
PBF 粉末床熔融結合法	○ マルエージング鋼、 SUS、ハイス等	○ Al-Si系、 A1000系等	○ 純Ti, Ti-Al 等	○ インコル等			
DED 指向性エネルギー堆積法	○ マルエージング鋼、 SUS、ハイス等			○ インコル等			
Binder Jetting 結合剤噴射法	○ SUS				○ 珪砂等	○	
LOM シート積層法		○ アルミシート				○	○ 紙
SLS 選択的レーザ焼結法	○		○		○	○ PA等	
FDM 材料押出堆積法						○ ABS, PC等	
SLA 光造形法						○ UV硬化樹脂	

グローバルAM市場動向（売上金額）



グローバル市場

2021年：4,501MUSD（約 ¥ 6,500億@ ¥ 145/ \$）

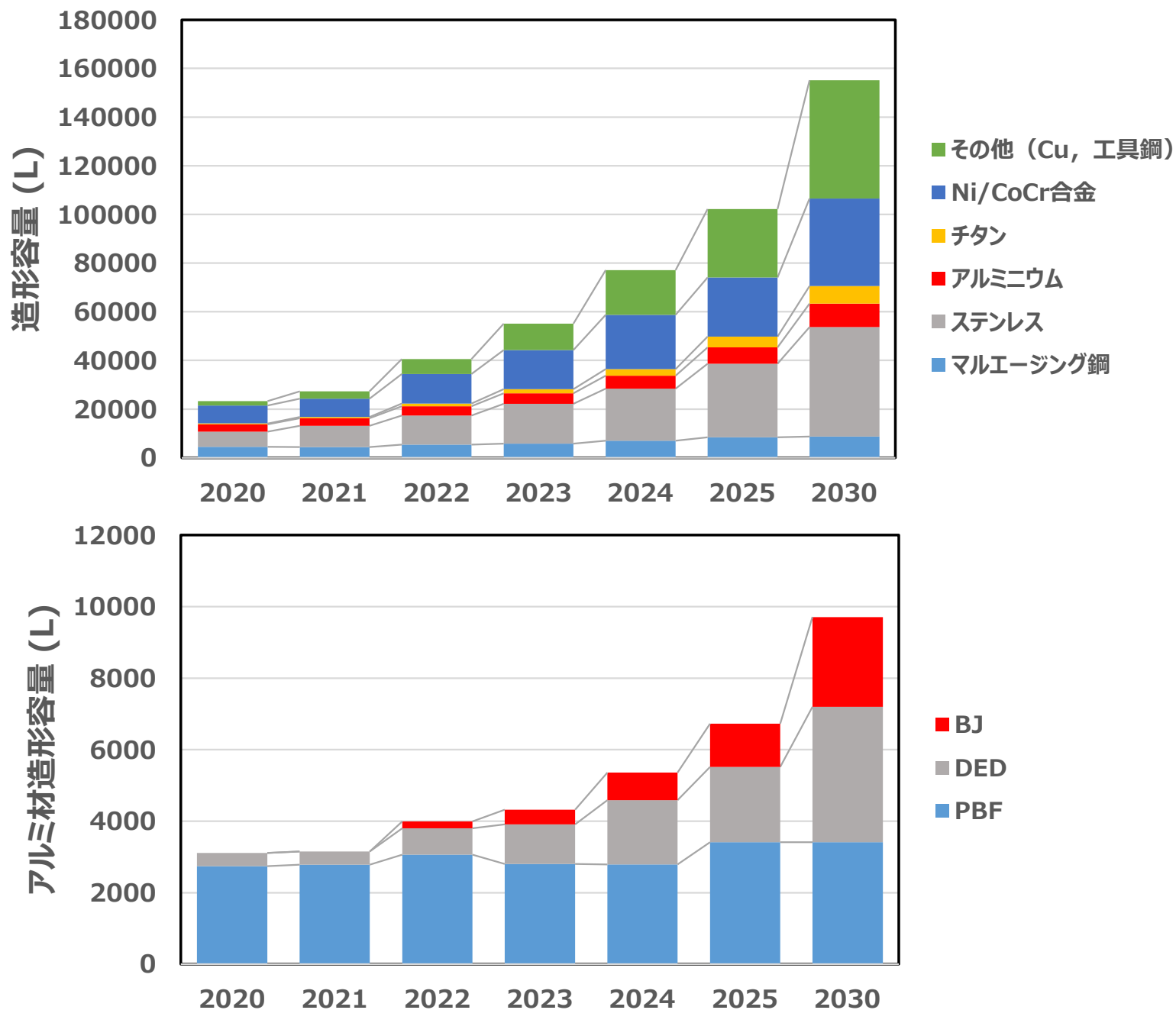
2029年：27,935MUSD（約 ¥ 4兆@ ¥ 145/ \$）

日本市場

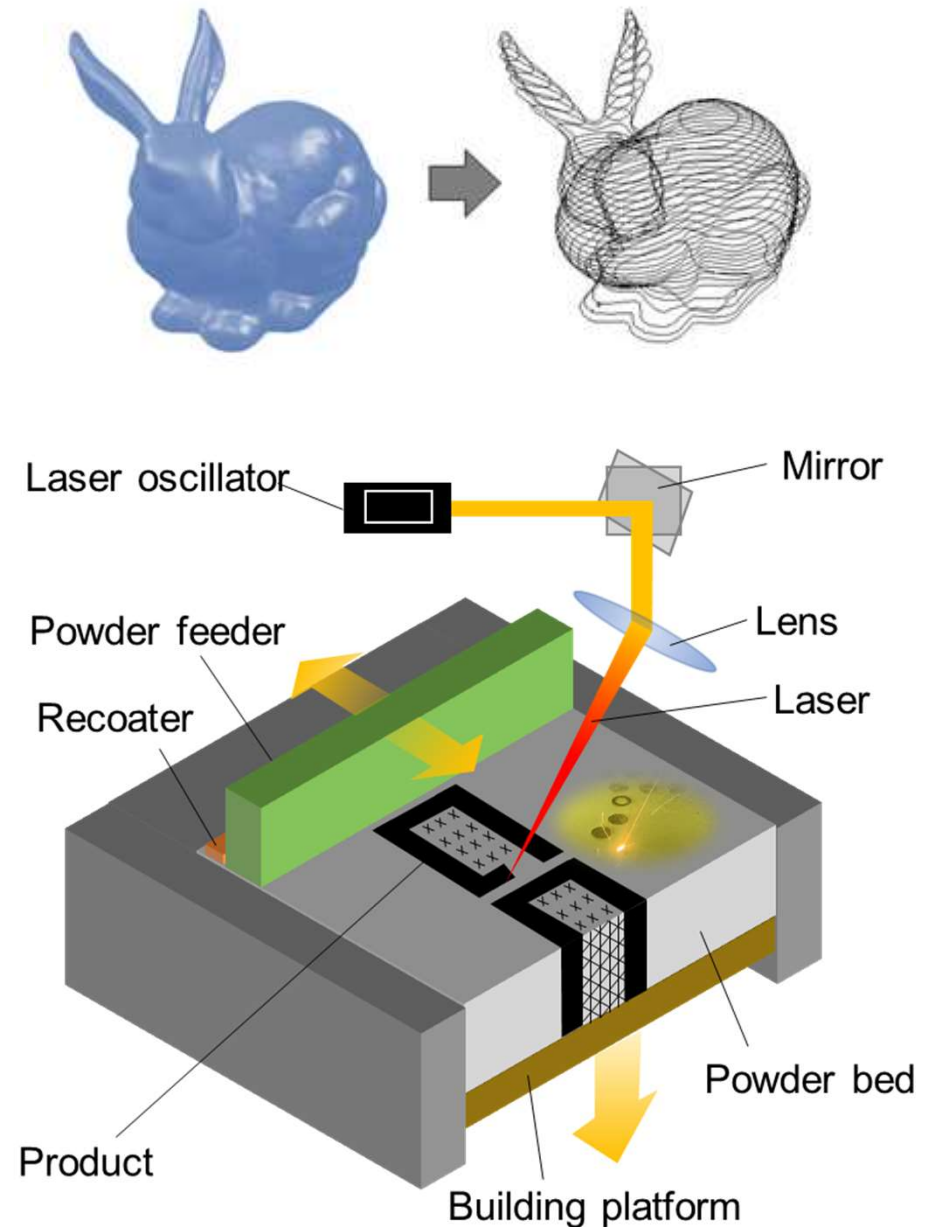
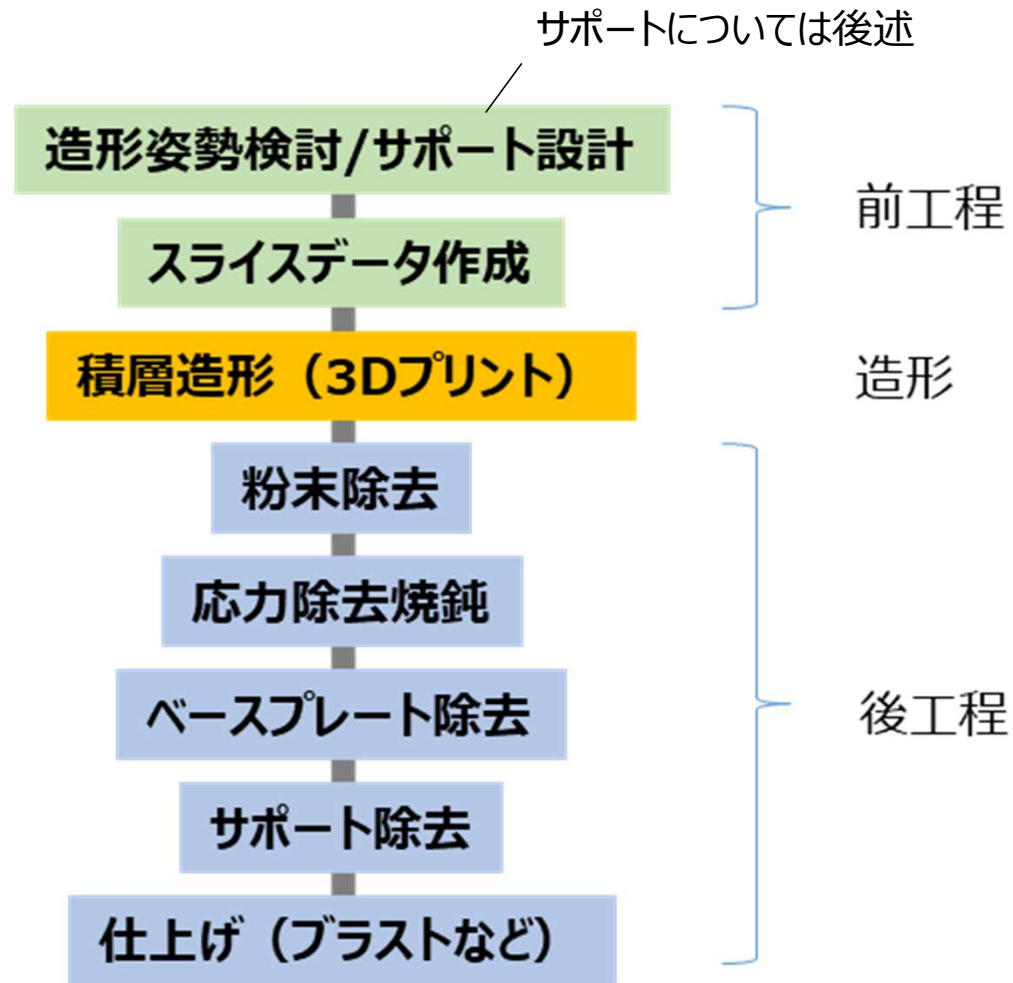
2030年：¥ 3,740億

データ出典：Metal 3D Printing Market ANALYSIS AND FORCASTS FROM 2017 TO 2030, Grand View Research.
金属積層造形の技術動向及び社会実装の促進戦略に関する調査成果報告書, NEDO（2023）。

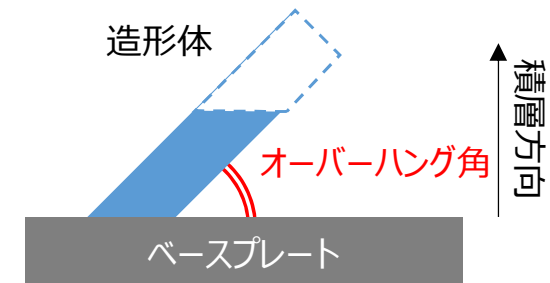
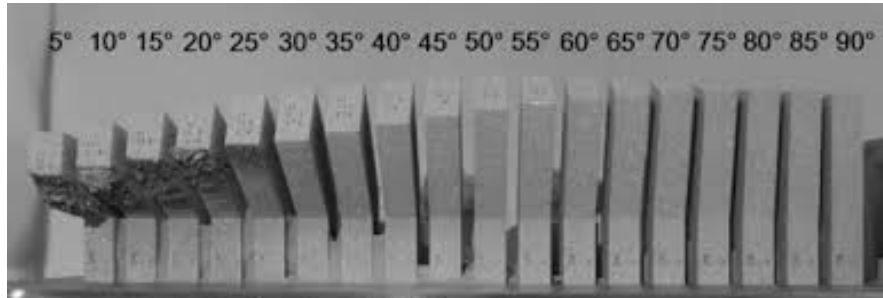
国内AM市場動向（材料使用量）



データ出典：最新Metal Additive Manufacturing 市場の現状と将来展望（2023年版），（株）アクトプローブ
※2023年以降は推計値

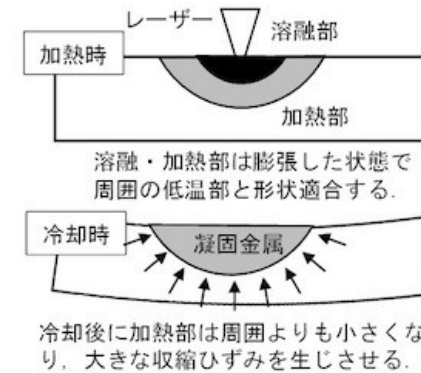


・オーバーハング角



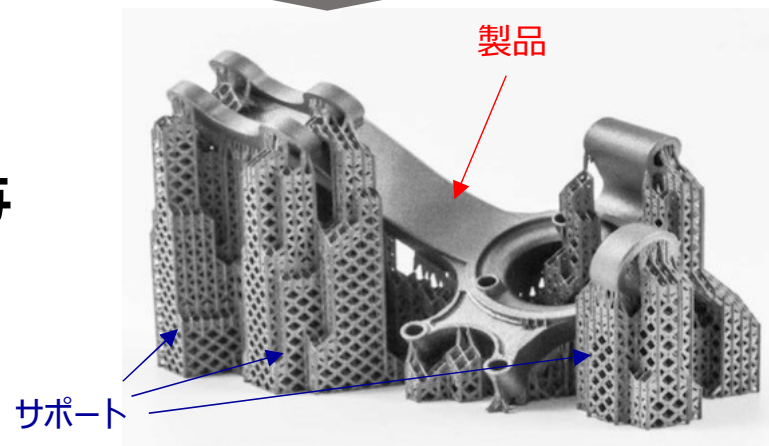
垂れないように、崩れないように。

・造形ひずみ（残留応力）

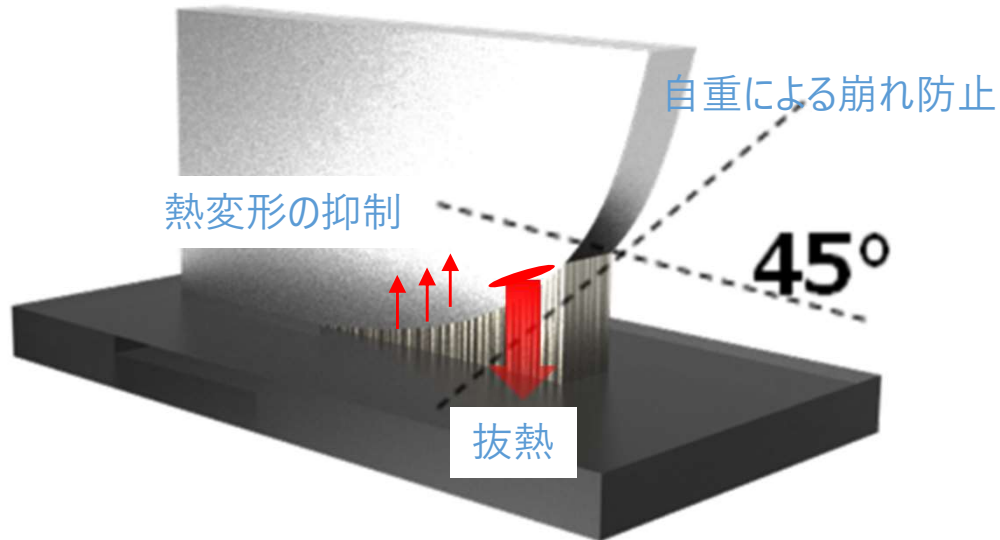


反らないように、熱が溜まらないように。

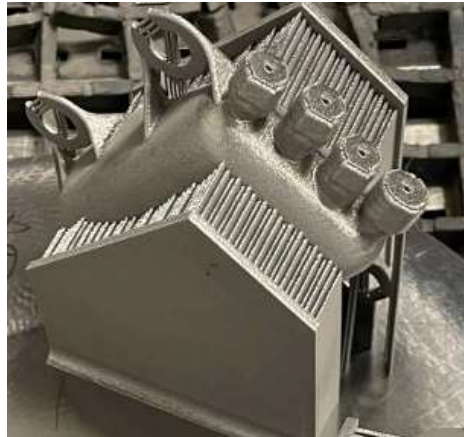
サポートの付与



サポートの役割



<https://www.cybernet.co.jp/ansys/product/lineup/additive/solution.html>



サポート除去工程



付与したサポートは除去する必要がある
➡ 手作業で対応しているのが実情

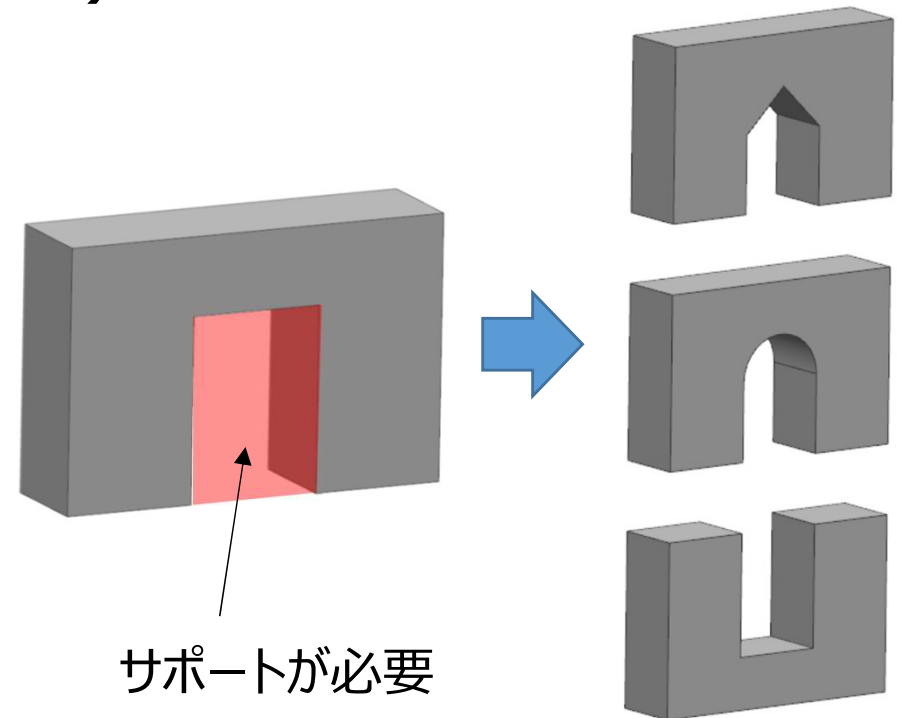
1) 臨界オーバーハング角の低角化（設備性能）

VELO3D Sapphire

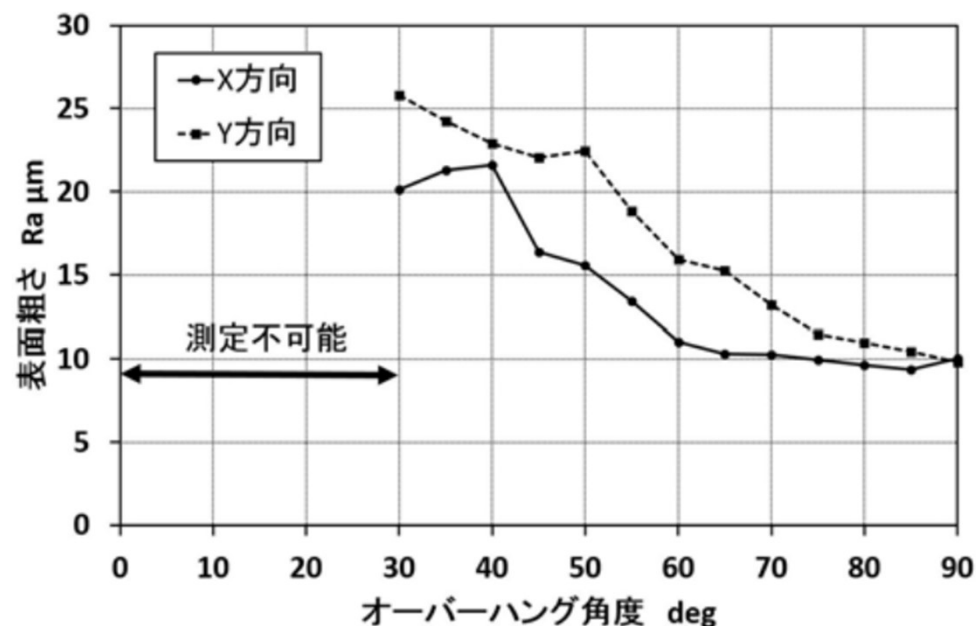
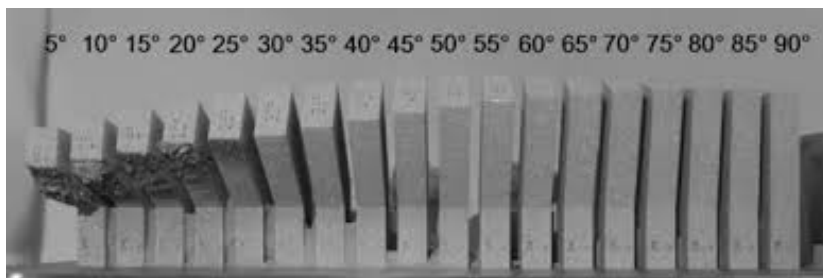


<https://velo3d.com/products/#sapphire>

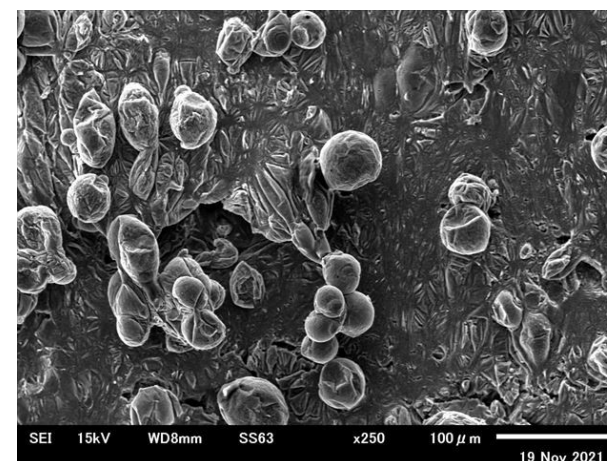
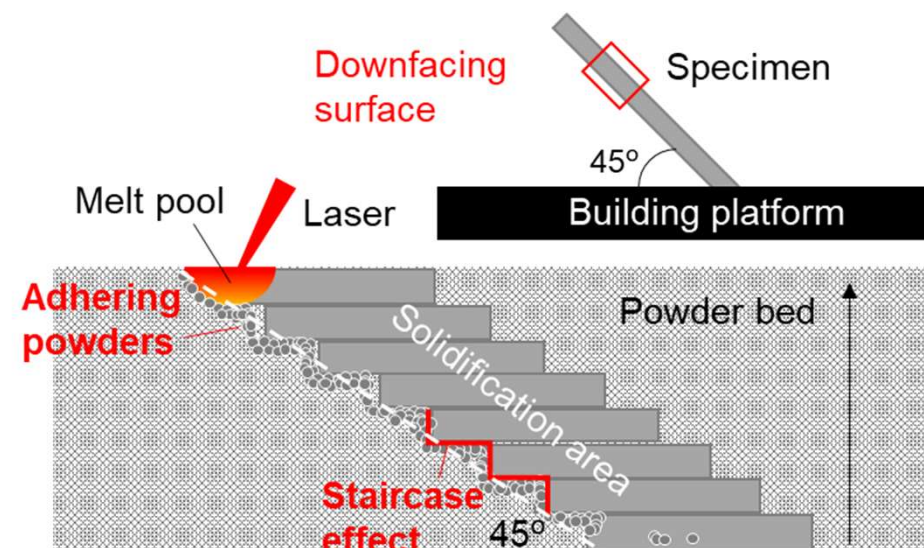
2) 工法を理解した設計

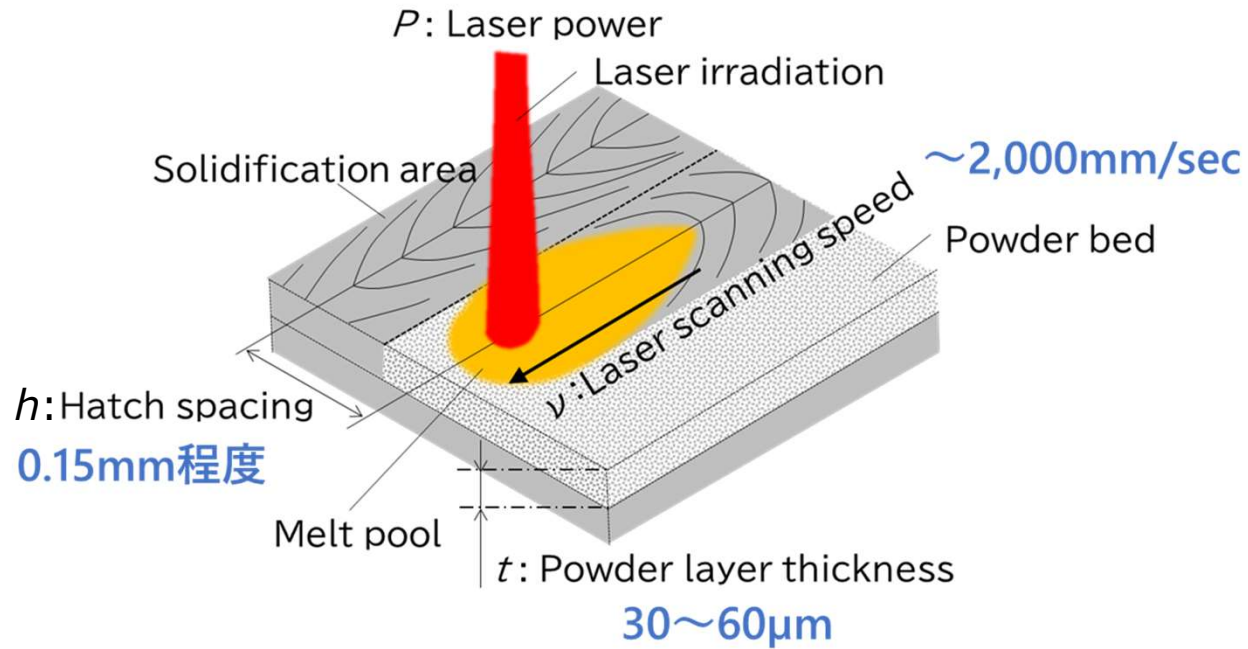


オーバーハング角の低下に伴い 表面粗さが増加する

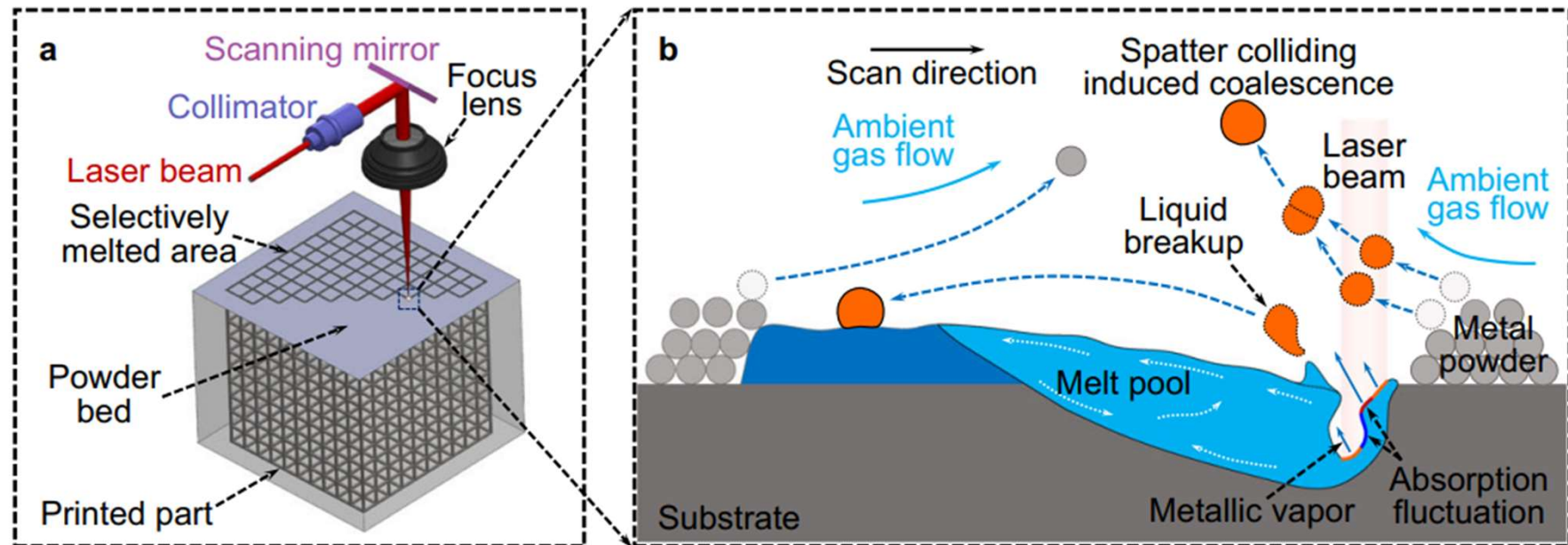


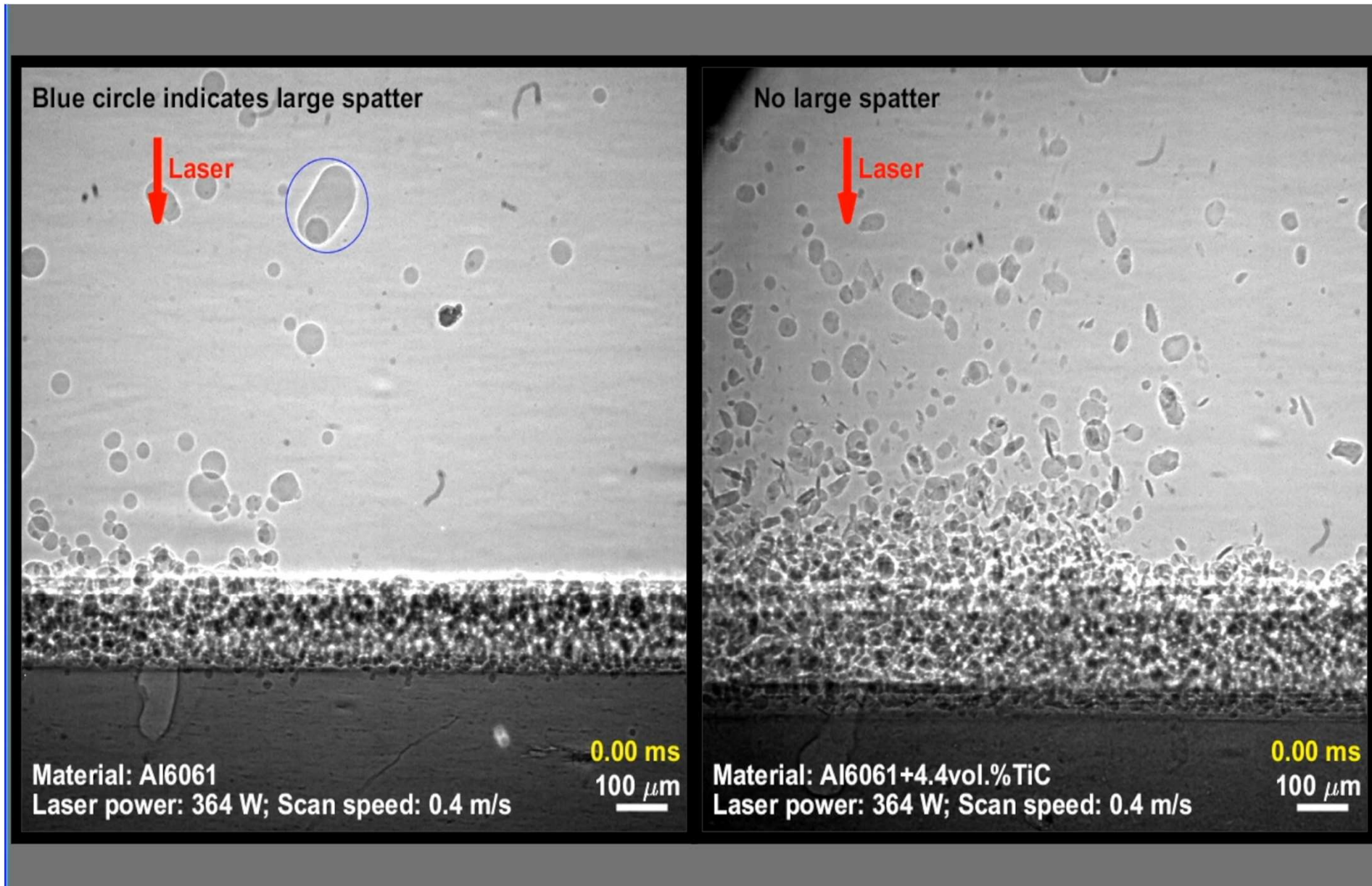
※ステンレス鋼17-4PHのデータ



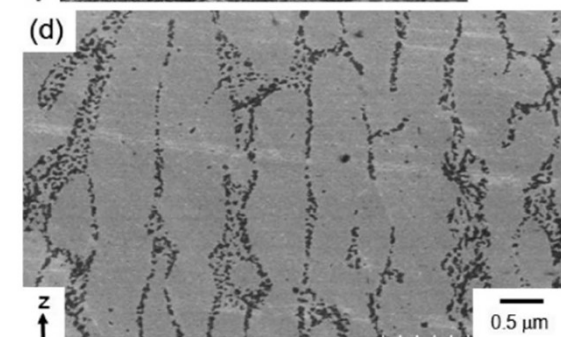
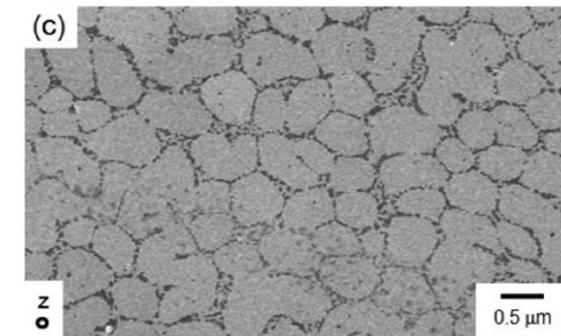
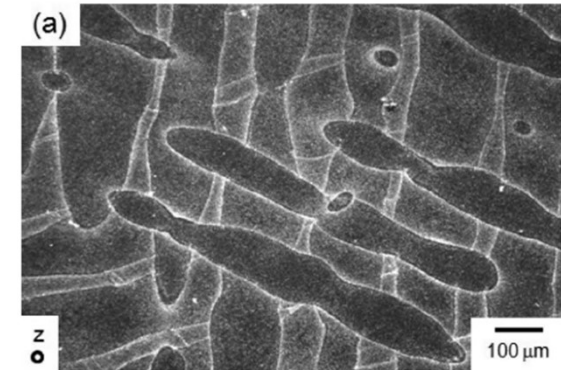
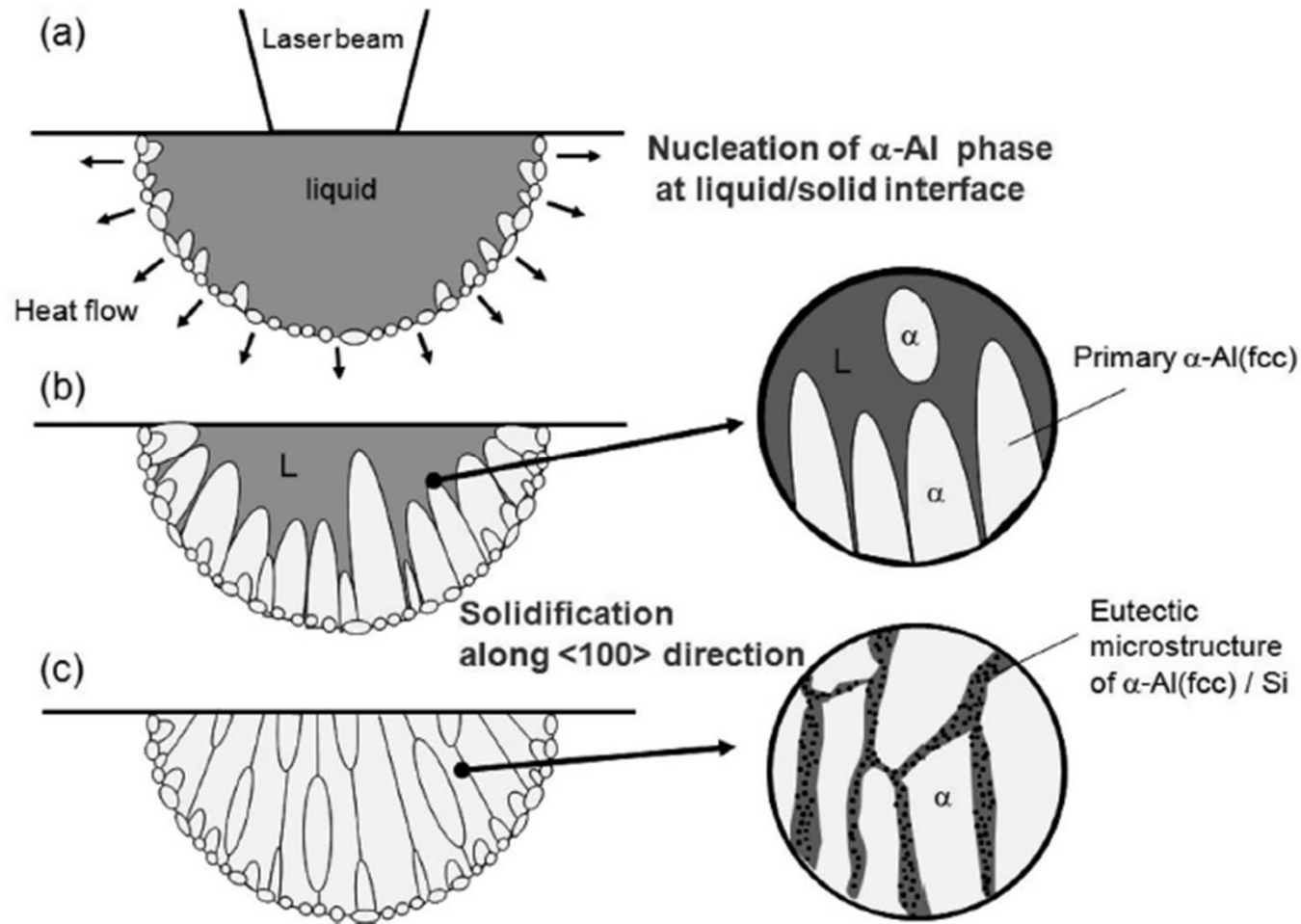


$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \text{ (J/mm}^3\text{)}$$

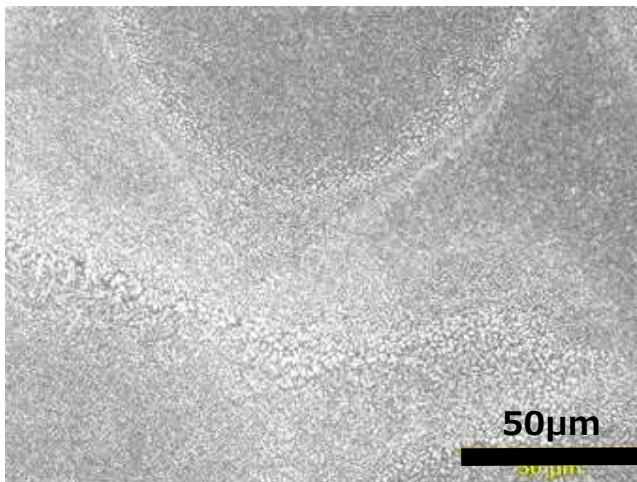
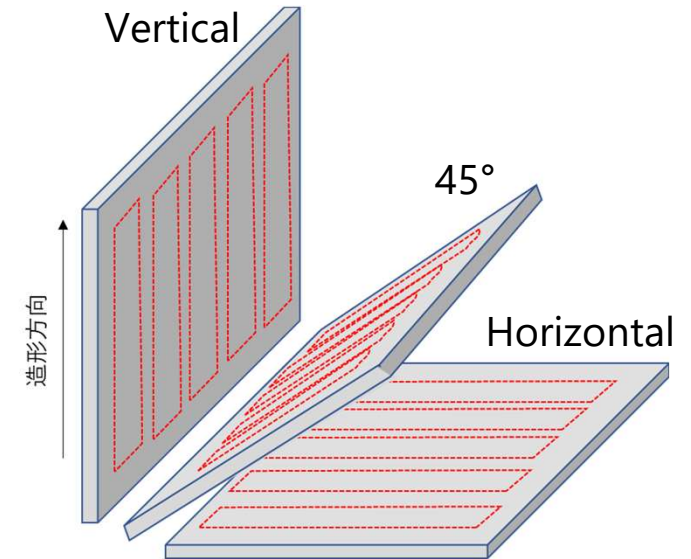
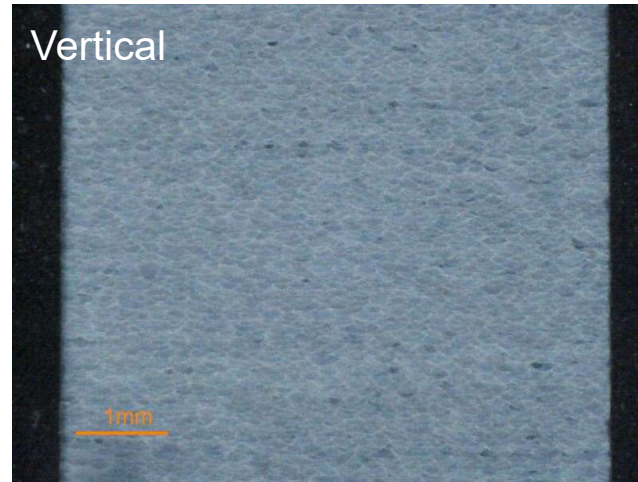
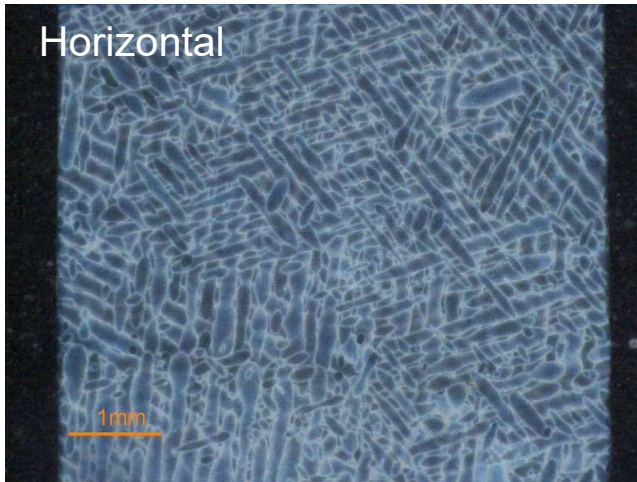




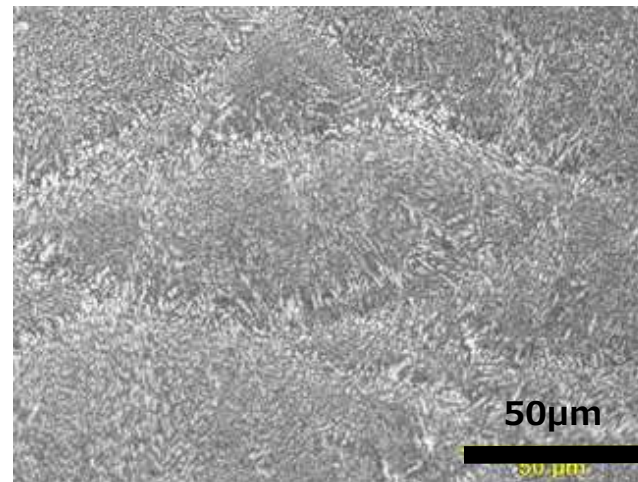
Al-10Si-0.4Mg合金の凝固過程と金属組織



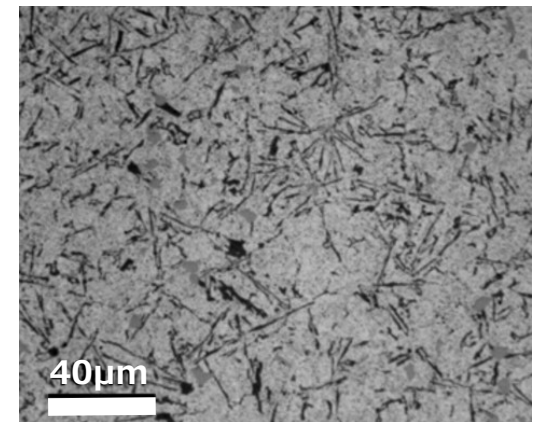
高田, 小平, 関沢, 鈴木, 小橋: 金属粉末レーザー積層造形法によって作製されたAl-10Si-0.4Mg合金の組織と機械的性質, 軽金属, 第67巻, 第11号 (2017), 582-588.



造形面に対し水平
(造形方向に対し垂直)



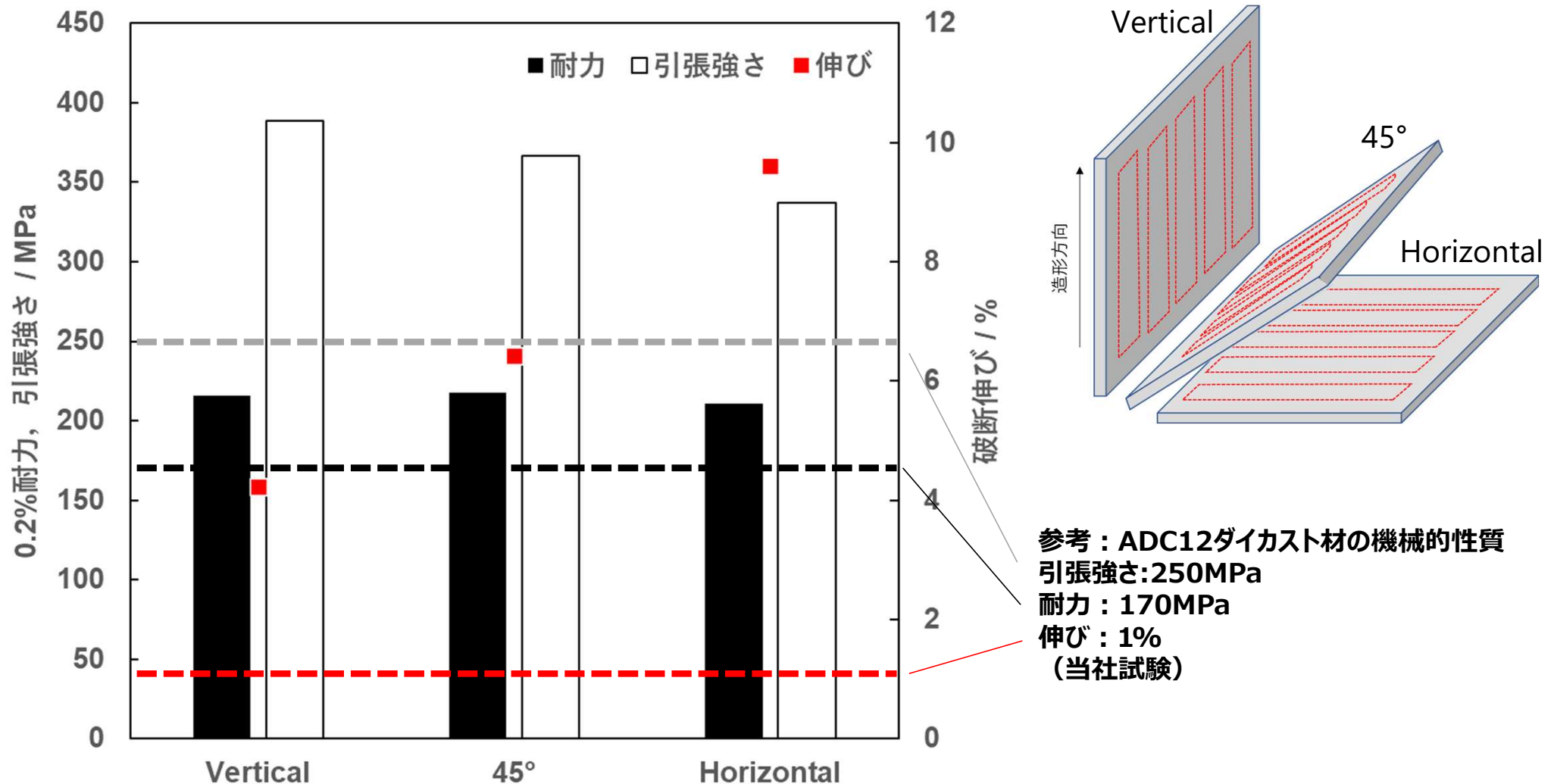
造形面に対し垂直
(造形方向に対し水平)



ADC12ダイカスト材の金属組織

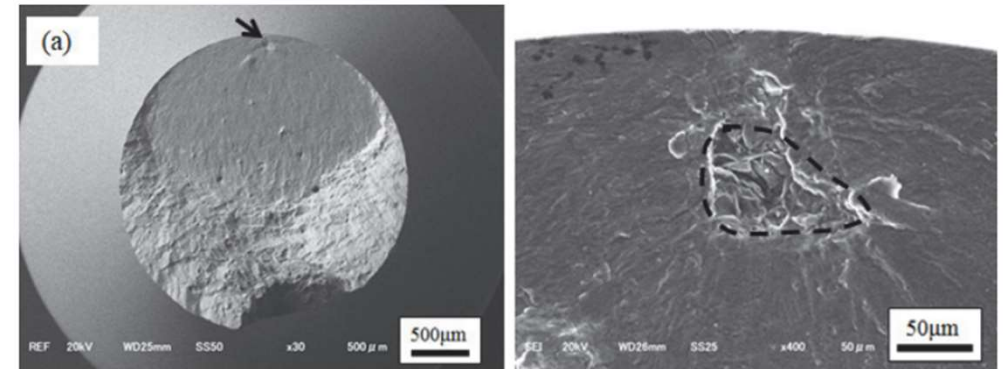
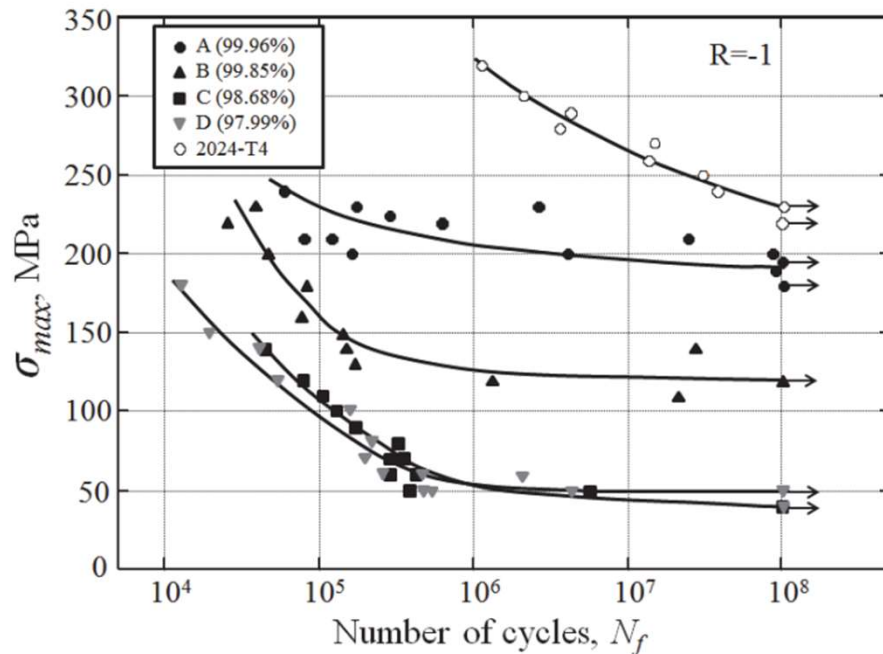
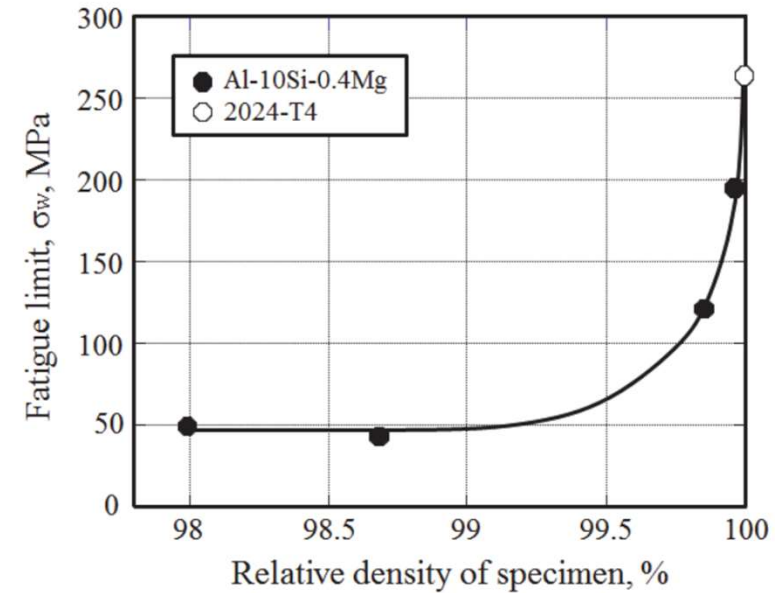
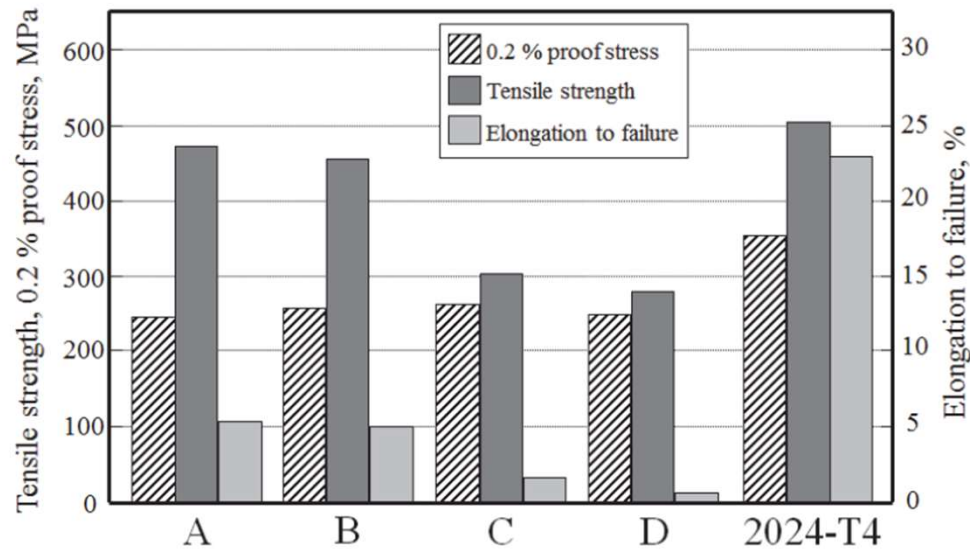
Al-10Si-0.4Mg合金の金属組織

PBF製Al-10Si-0.4Mg合金材の機械的性質



ダイカスト材よりも強度，延性共に優れる。
造形方向により異方性を有する。

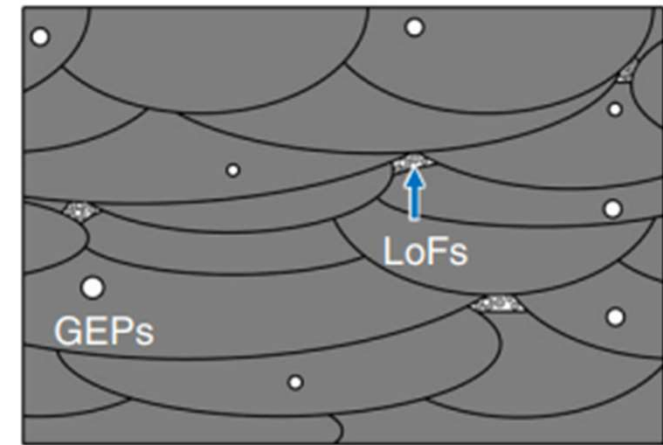
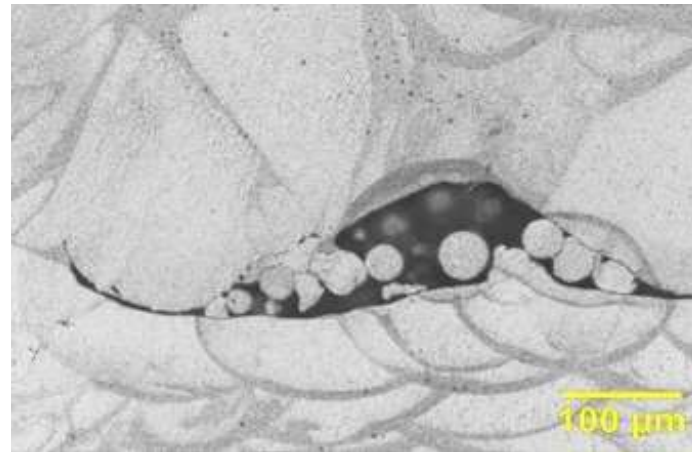
疲労強度に及ぼす内部欠陥の影響



空隙（欠陥）を起点としてき裂が発生。
相対密度の低下と共に疲労強度が低下。

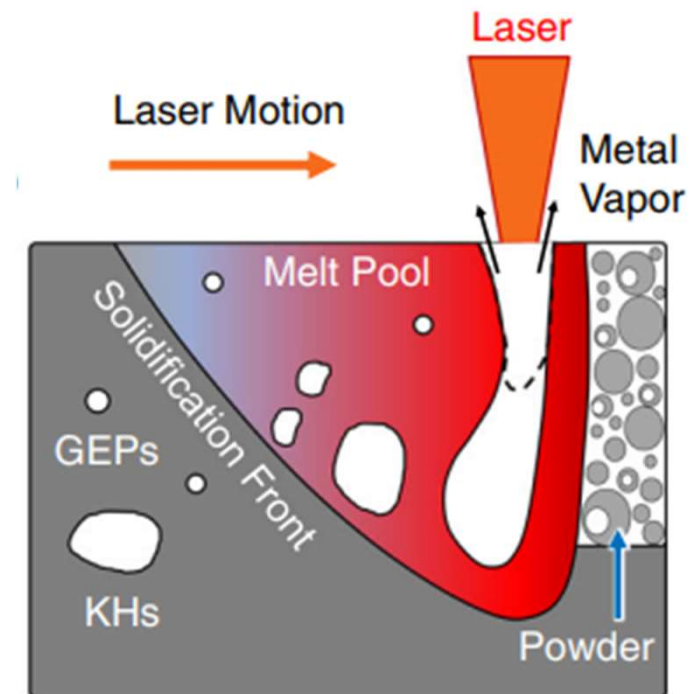
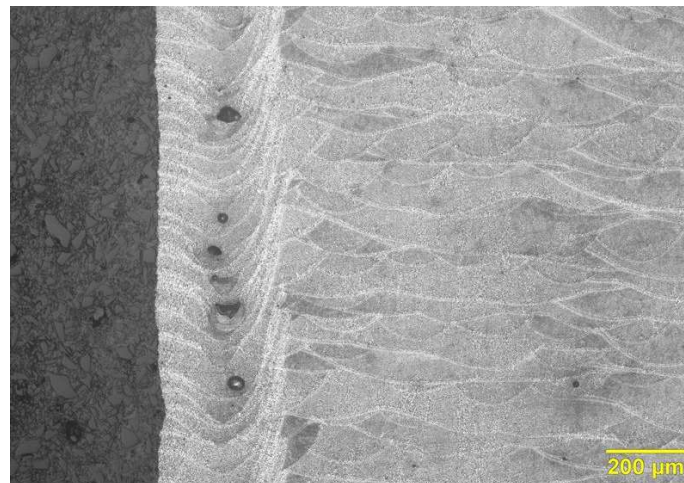
未熔融欠陥 Lack of Fusion

投入エネルギー不足

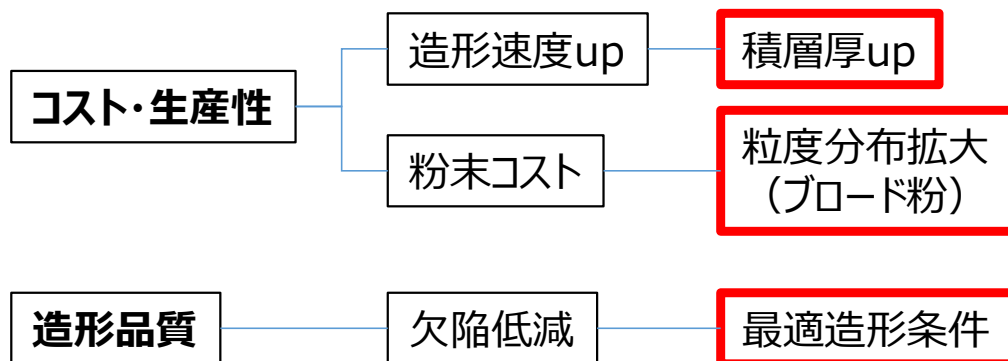


キーホール欠陥 Key Holes

投入エネルギー過多



コスト・生産性と造形品質の両立



静岡県工業技術研究所
Industrial Research Institute of Shizuoka Prefecture

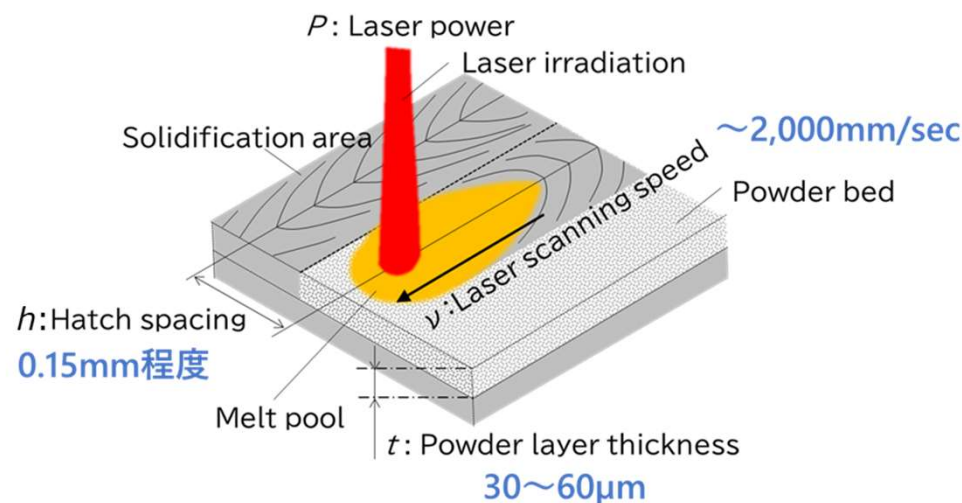


一般社団法人粉体粉末冶金協会 2024年度春季大会（第133回講演大会）

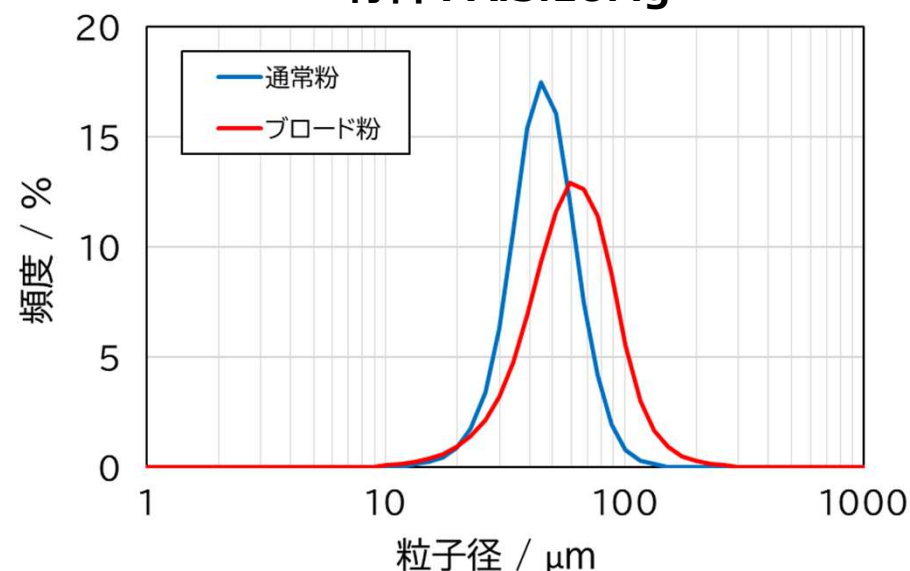
レーザ積層造形によるアルミニウム合金 ブロード粉末の緻密化に及ぼす積層厚さの影響

（静岡県工業技術研究所浜松工業技術支援センター）
○望月智文、植松俊明、大澤洋文、田光伸也、木野造成
（東洋アルミニウム株式会社） 楠井 潤
（ヤマハ発動機株式会社） 渡邊慧太、栗田洋敬
（近畿大学） 京極秀樹

富国・有徳の美しい“ふじのくに”
静岡県

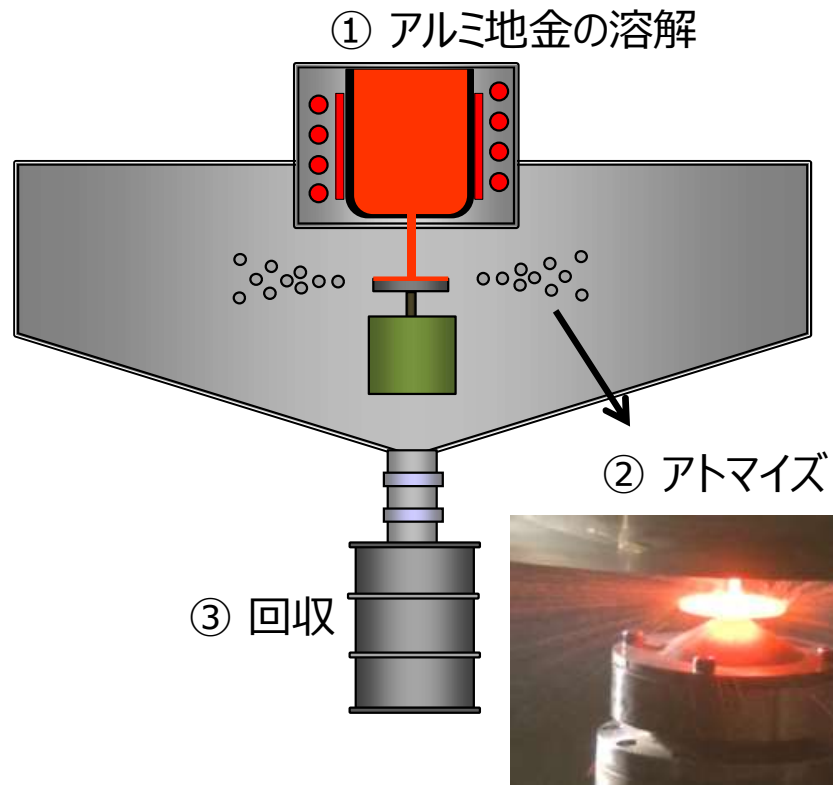


材料 : AlSi10Mg



造形速度 = f(積層厚, レーザ走査速度, ハッチ間隔)

製造設備模式図



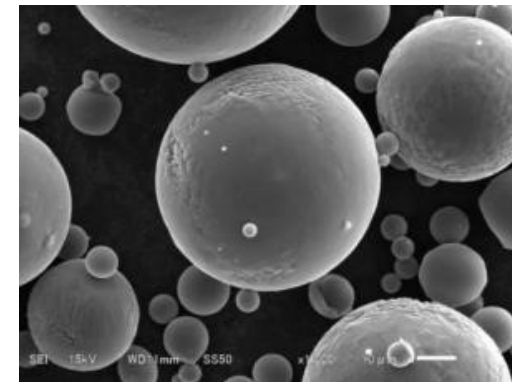
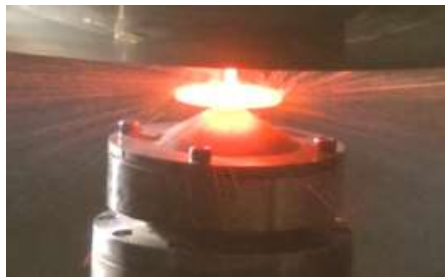
プロセスの特徴

- 完全不活性雰囲気
- 遠心噴霧



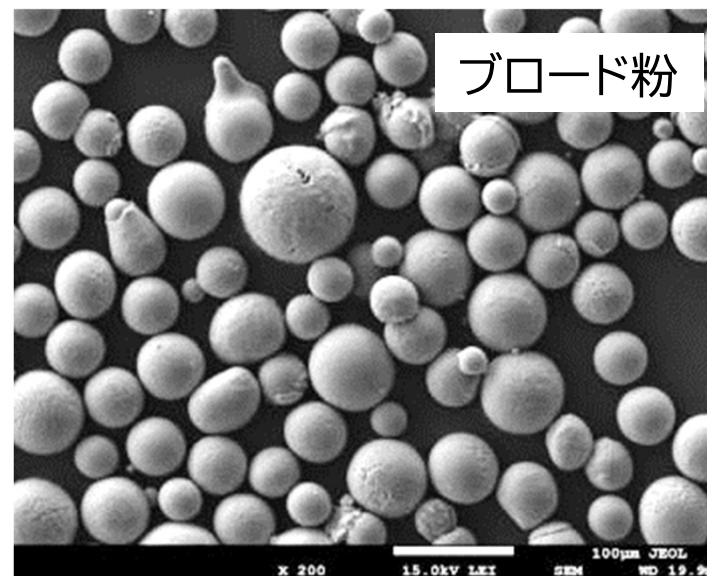
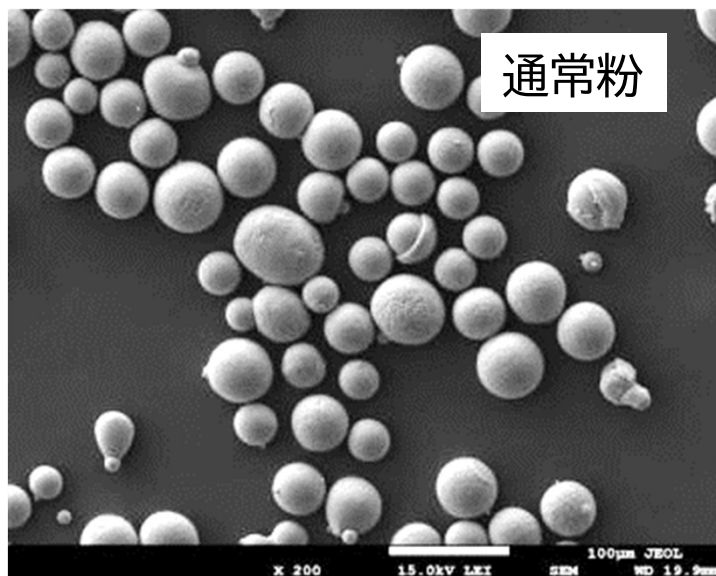
粉末の特徴

- 真球に近い形状
- 3D積層造形に適した粒径
- 5 μ m未満の微粒子が無い



4cmの円盤がMax. 120,000rpmで回転

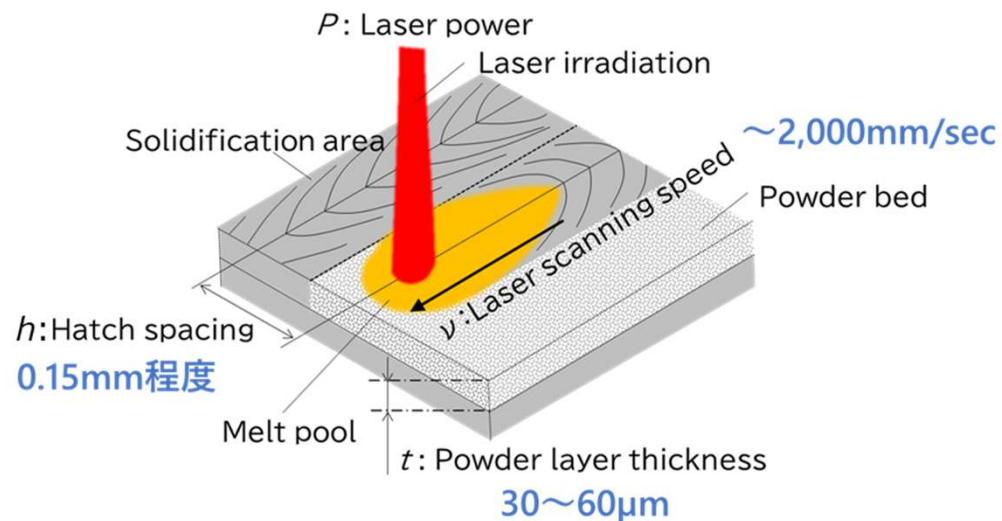
材料：AlSi10Mg合金



形状	D ₁₀ / µm	D ₅₀ / µm	D ₉₀ / µm
通常粉	27.68	44.87	64.83
ブロード粉	31.48	61.83	95.40

形状	見掛密度 g/cm ³	充填率※ %	流動度 s/50g
通常粉	1.44	53.9	流動しない
ブロード粉	1.48	55.6	47.0

※ 真密度：2.66g/cm³から計算

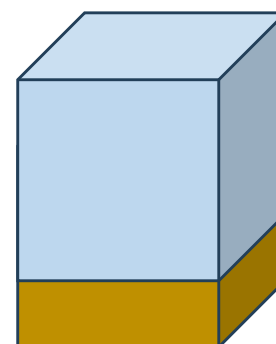


積層厚(μm)	60, 90, 120, 150, 180
レーザ出力(W)	500~670
走査速度(mm/s)	350~2150
ハッチ間隔(mm)	0.17

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \text{ (J/mm}^3\text{)} \quad 10 \sim 70 \text{ J/mm}^3$$



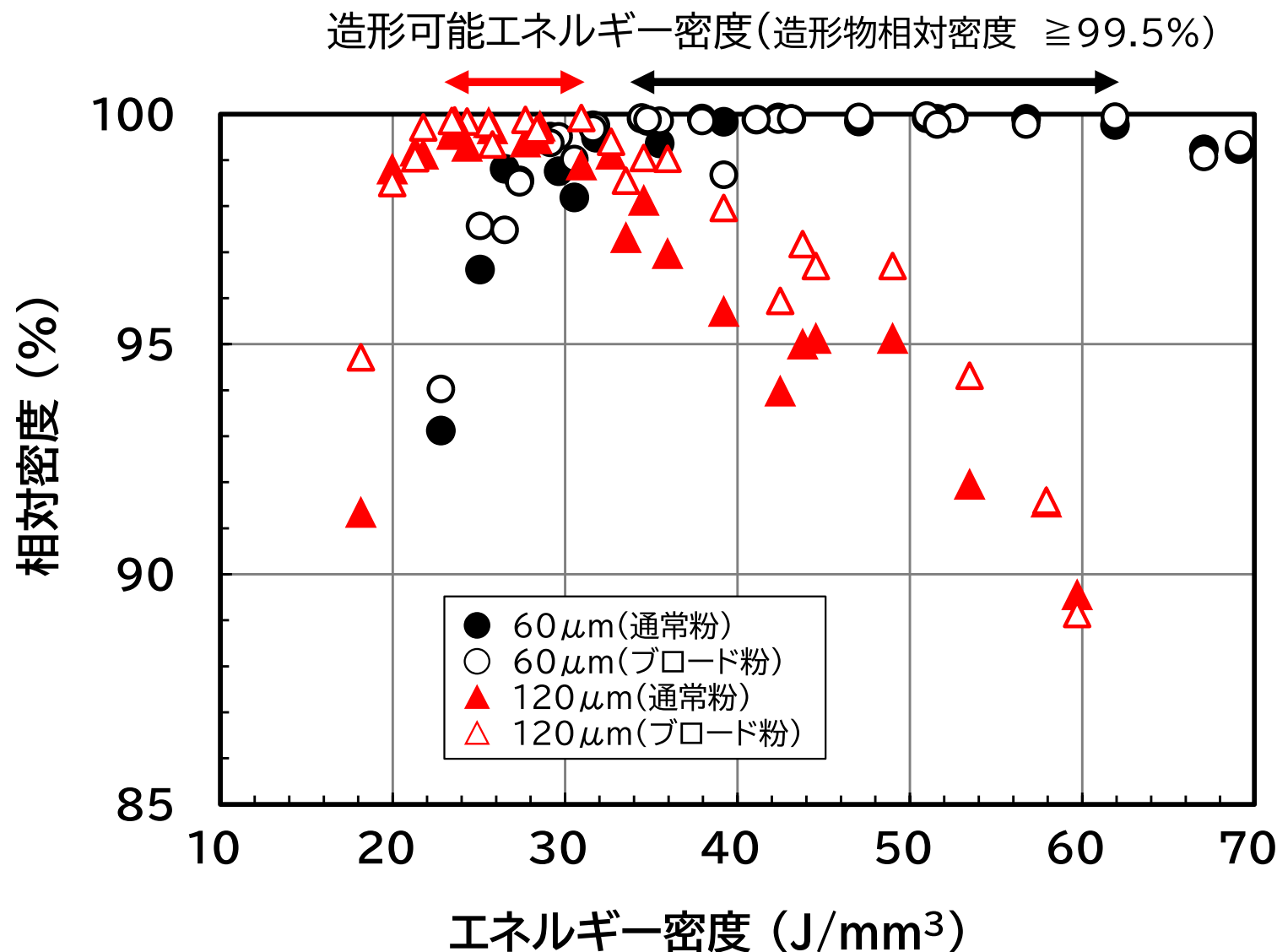
予備加熱 : 150℃
雰囲気 : N²ガス



試験片 : 10x10x10mm

サポート : 10x10x4mm

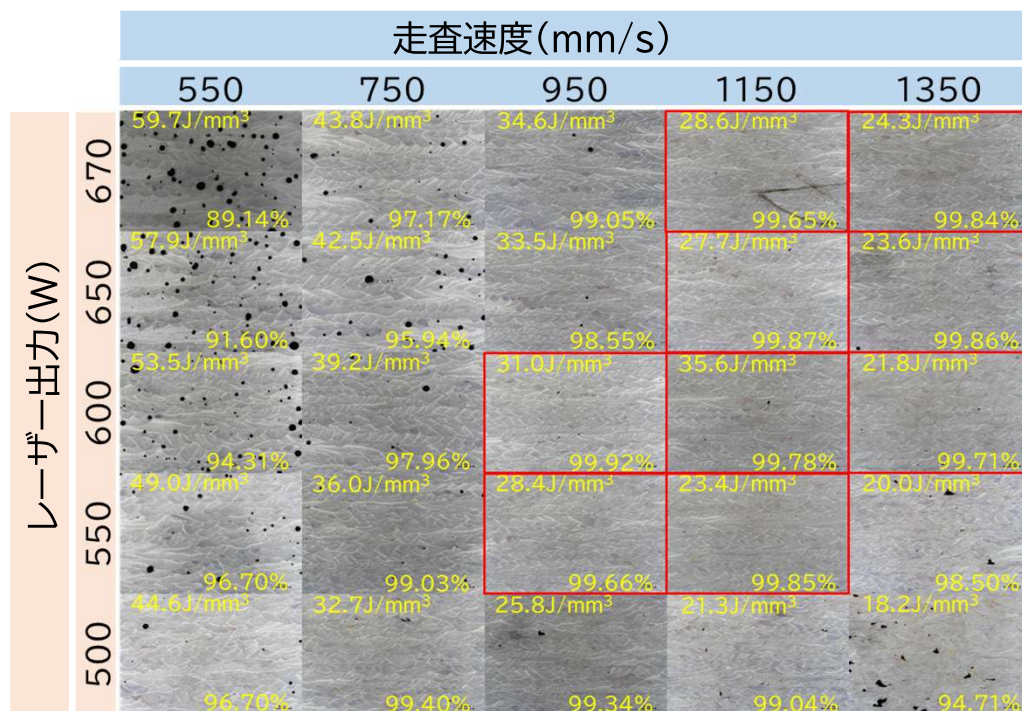
浜松工業技術支援センター保有 SLM280



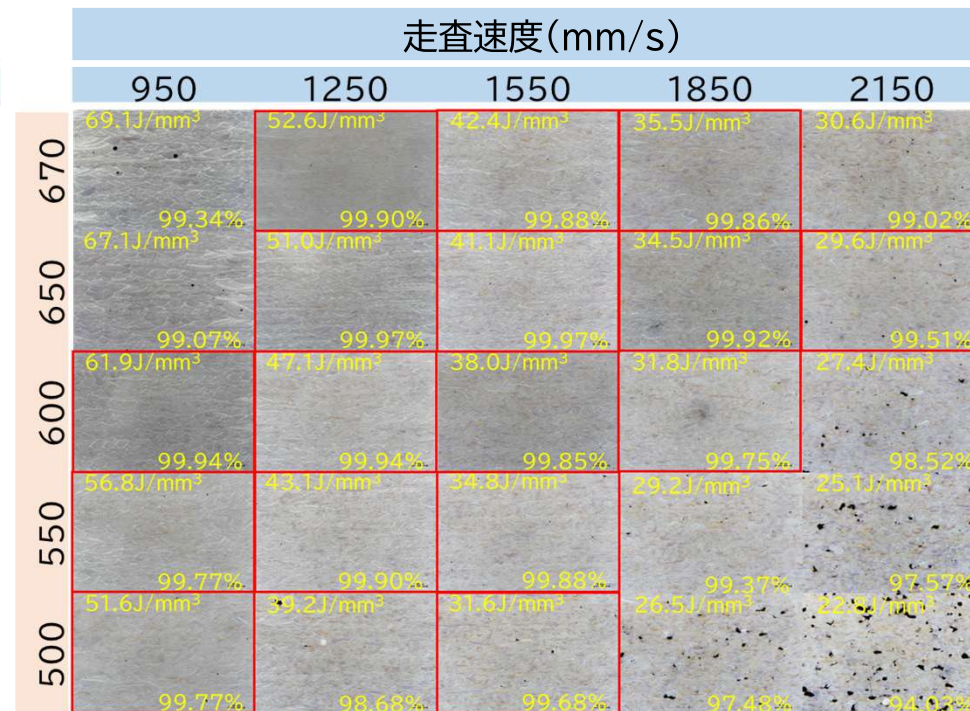
・通常粉とブロード粉の同一造形条件での造形
✓積層厚120 μm ではブロード粉の方が造形物の相対密度が高い

・積層厚さup
✓造形可能エネルギー密度は、低下し、範囲が狭くなる

□: 相対密度 $\geq 99.5\%$ (造形可能範囲)



120 μ mブロード粉



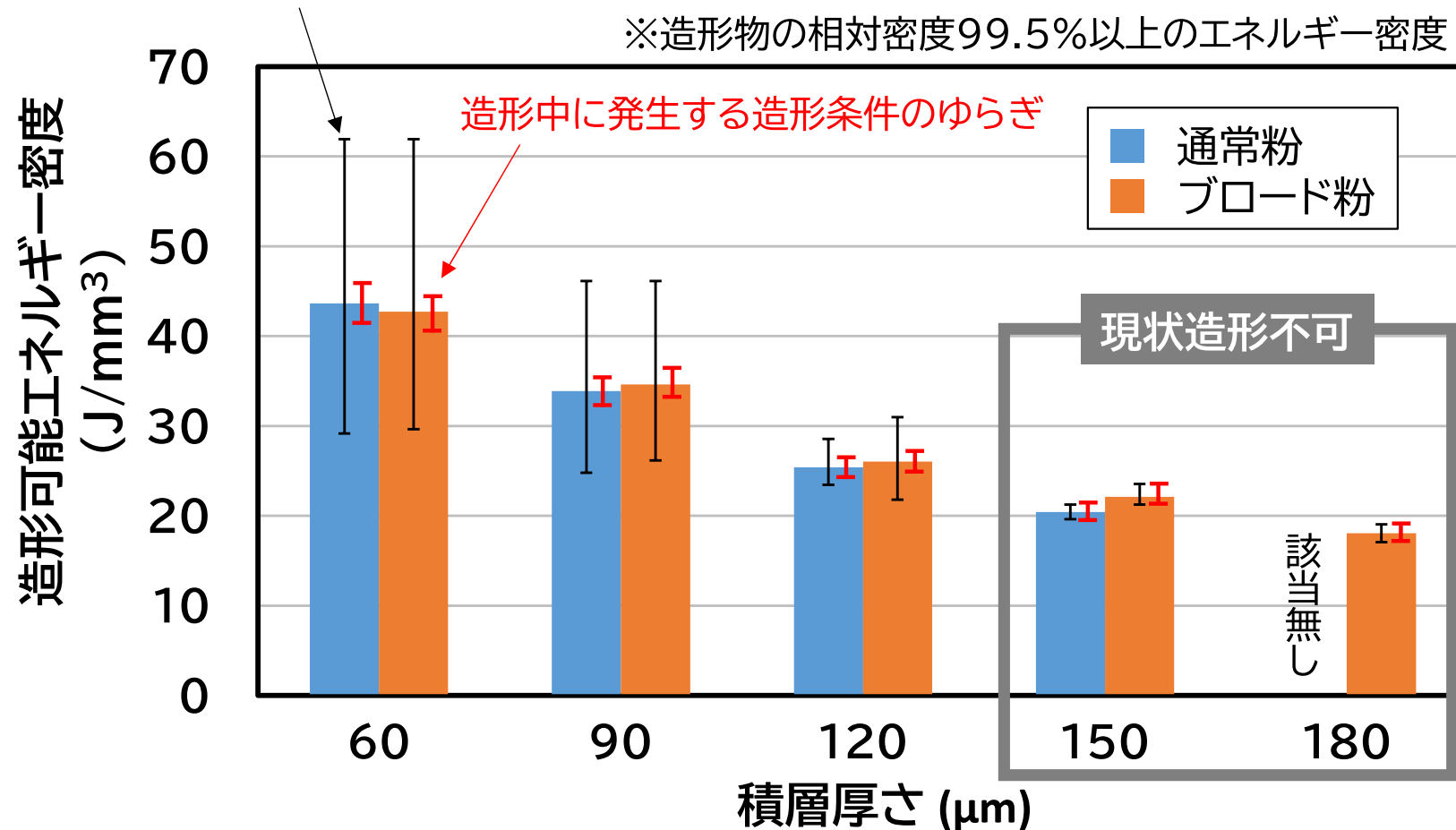
60 μ mブロード粉

・積層厚さup

- ✓造形可能エネルギー密度は、低下し、範囲が狭くなる
- ✓エネルギー密度が小さくても球形の欠陥が発生(エネルギー過多)

各積層厚における造形可能エネルギー密度

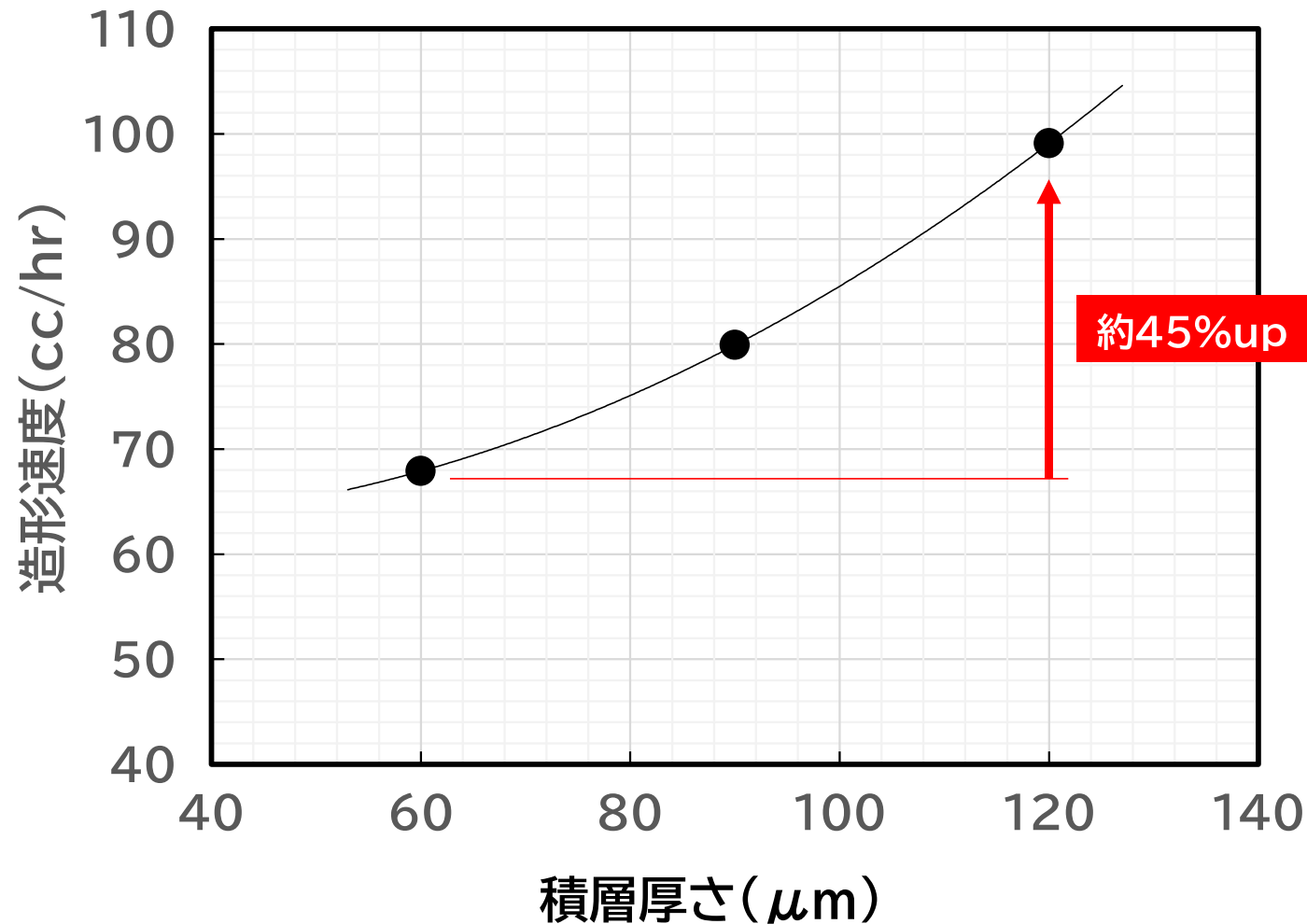
99.5%以上の密度が得られる条件範囲



・積層厚さup

✓積層厚150μm以上では、安定的に緻密体を得ることが現状困難

積層厚アップによる造形速度向上効果



- ✓積層厚さ120 μm以上で造形速度45%程度向上可能
- ✓造形速度 = 積層厚さ × レーザ走査速度 × レーザ走査間隔 より
リコート回数削減による高速化も期待できる

Bugatti



<https://idarts.co.jp/3dp/bugatti-largest-3d-printed-brake-caliper/>

Audi



Metal 3D printed water connectors for the Audi W12 engine.

ウォーターパイプ (リプレイスメントパーツ)

<https://www.3dprintingmedia.network/volkswagen-additive-manufacturing/>

BMW



<https://idarts.co.jp/3dp/metal-3d-printed-parts-bmw-i8-roadster/>

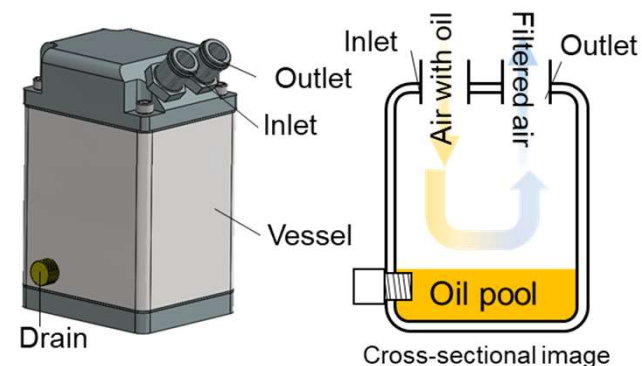
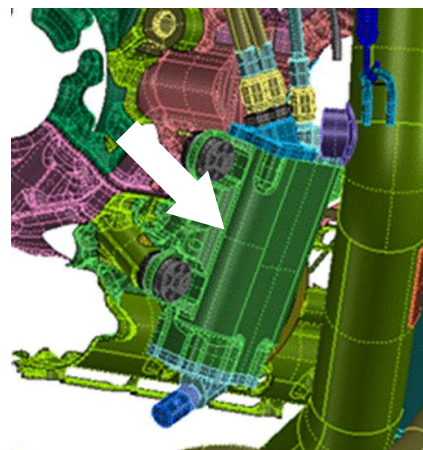
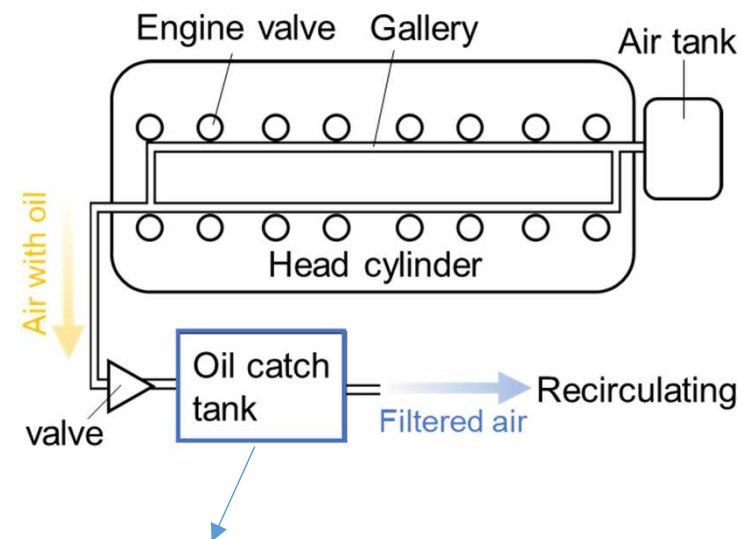
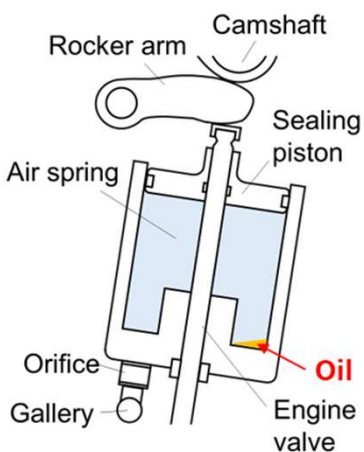
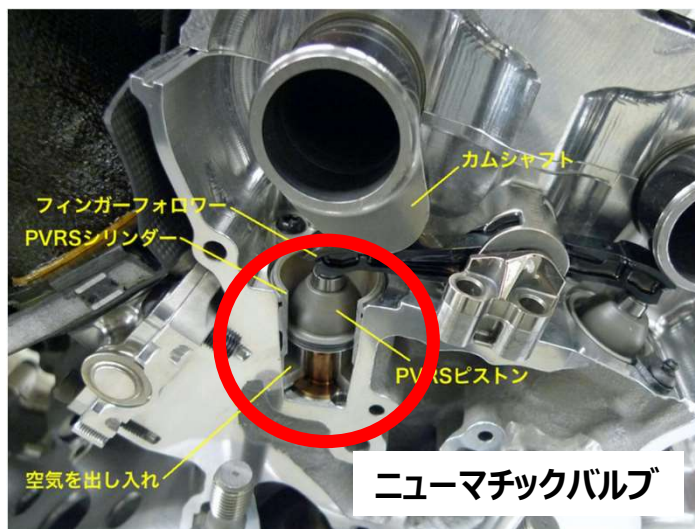
MotoGP / F1



金属×3DP×Automotiveでは商材、部品ともに限定的ではあるが適用事例が増えつつある。

オイルキャッチタンクとは？

超高回転型エンジンに使用されるニューマチックバルブ（空圧バルブ）システムの圧力回路内に配置されるオイル捕集用ドレンタンク。



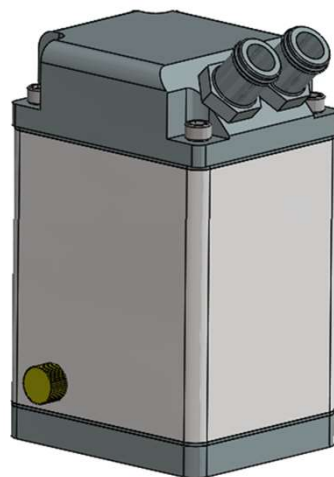
目的/目標

従来工法では達成不可能な軽量化限界の探索

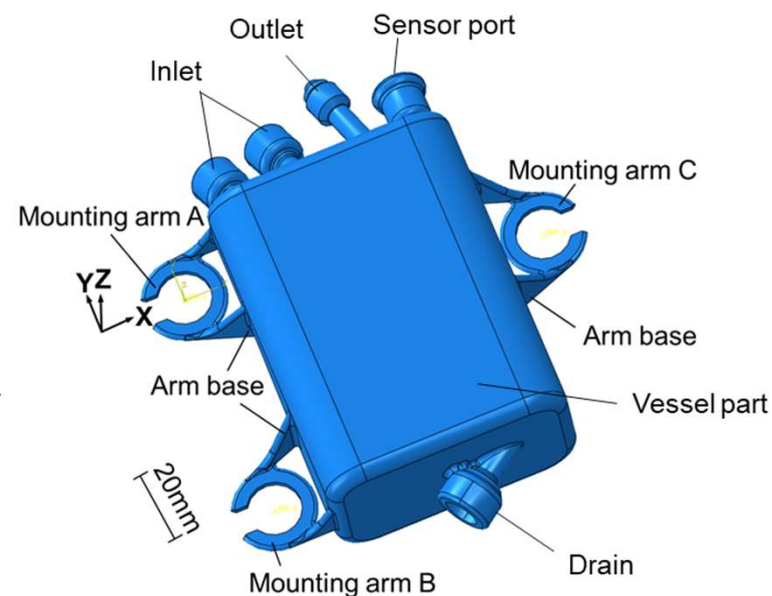
要求事項

Durability	Pressure resistance	Internal pressure of 1.5MPa at 150°C
	Vibration resistance	40G at 150°C
Structure	Inner capacity	200cc
	Quantity of port	5
	Quantity of mounting arm	3

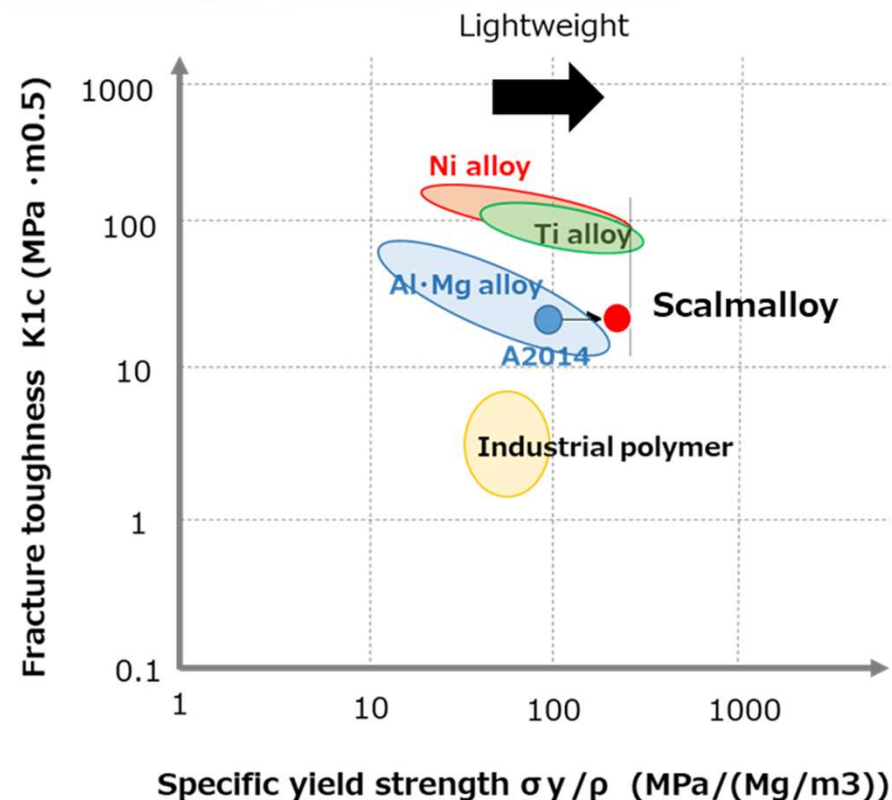
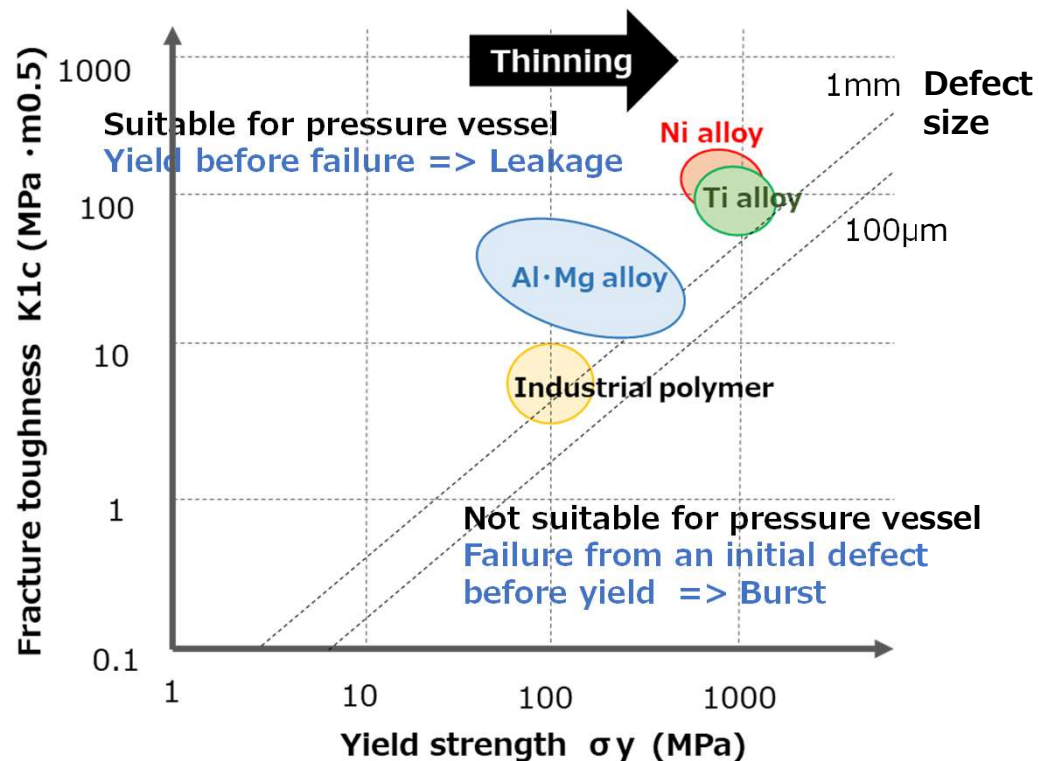
デザインコンセプト



3部品ボルト締結
2014-T6

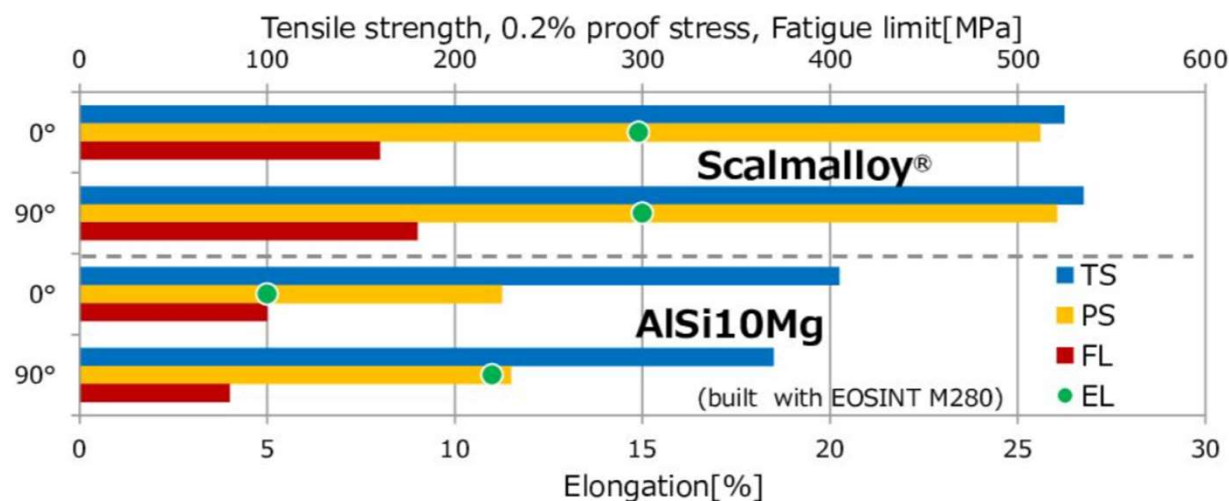


超薄肉一体構造



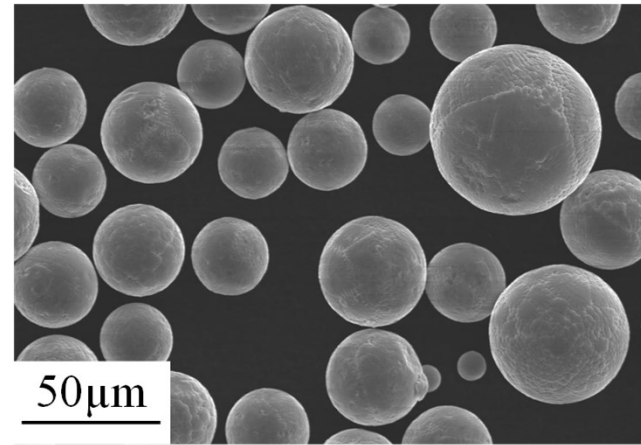
Scalmalloy

AlMg4.5Sc0.7Zr0.3
Density: 2.67g/cm³

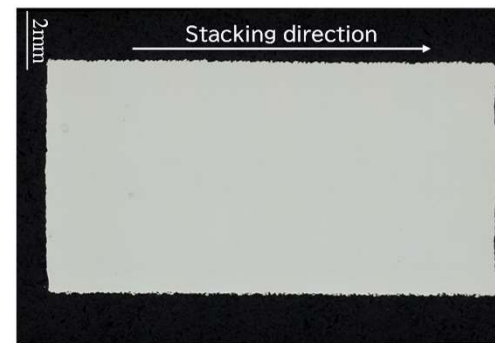
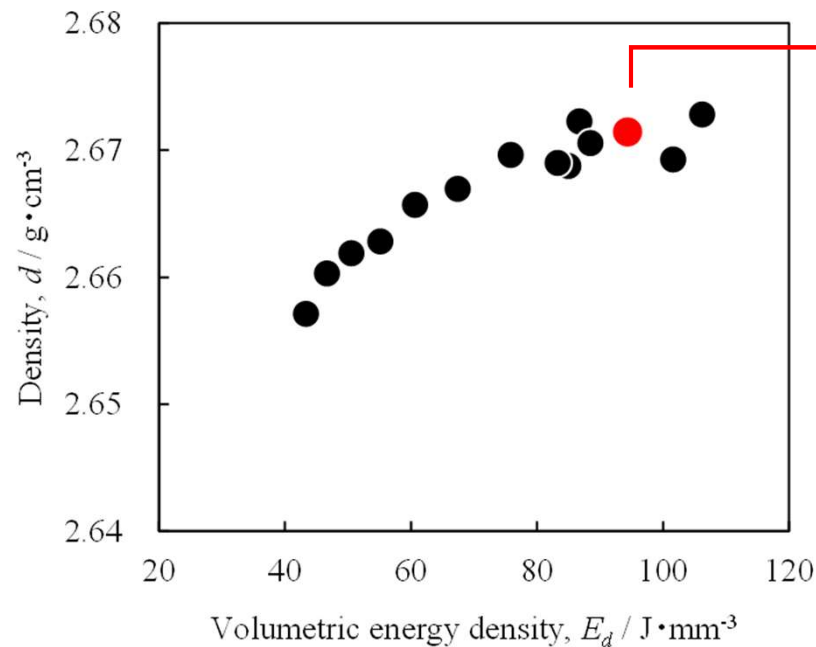




LUMEX-Avance25 (松浦機械製作所)



d_{10} :28.6 μ m, d_{50} :43.4 μ m, d_{90} :65.0 μ m



欠陥は認められない

Optimized parameters

Laser power : 340W

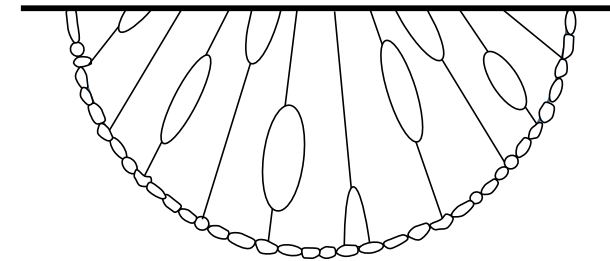
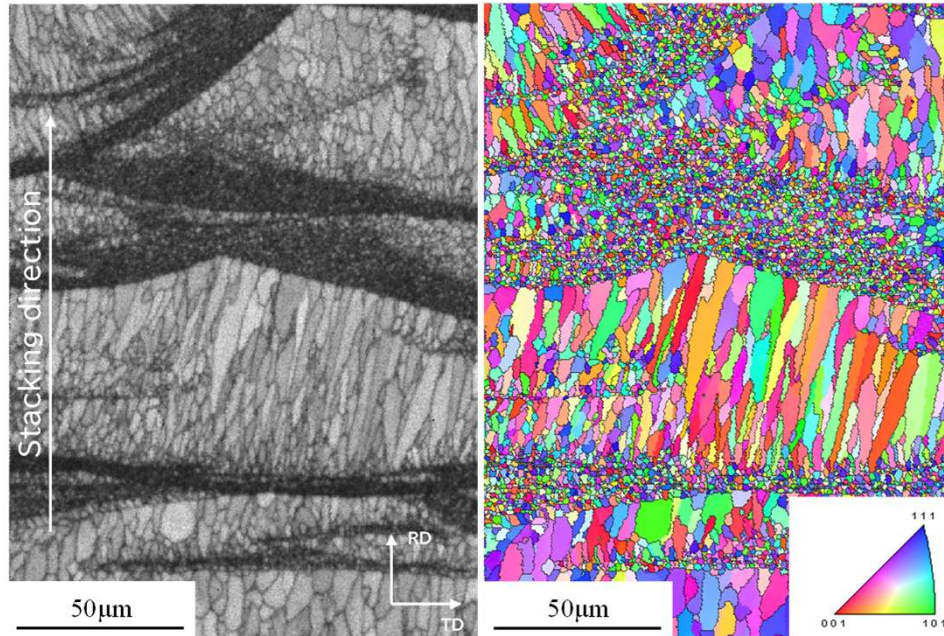
Laser scanning speed : 900mm/sec

Hatch spacing : 0.1mm

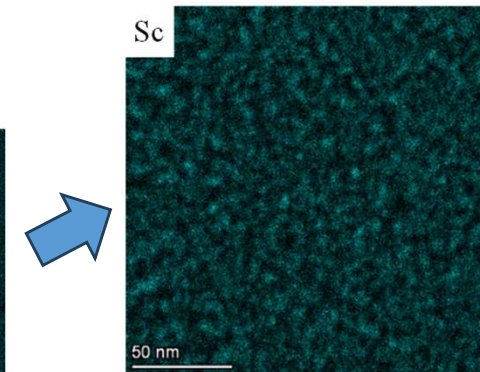
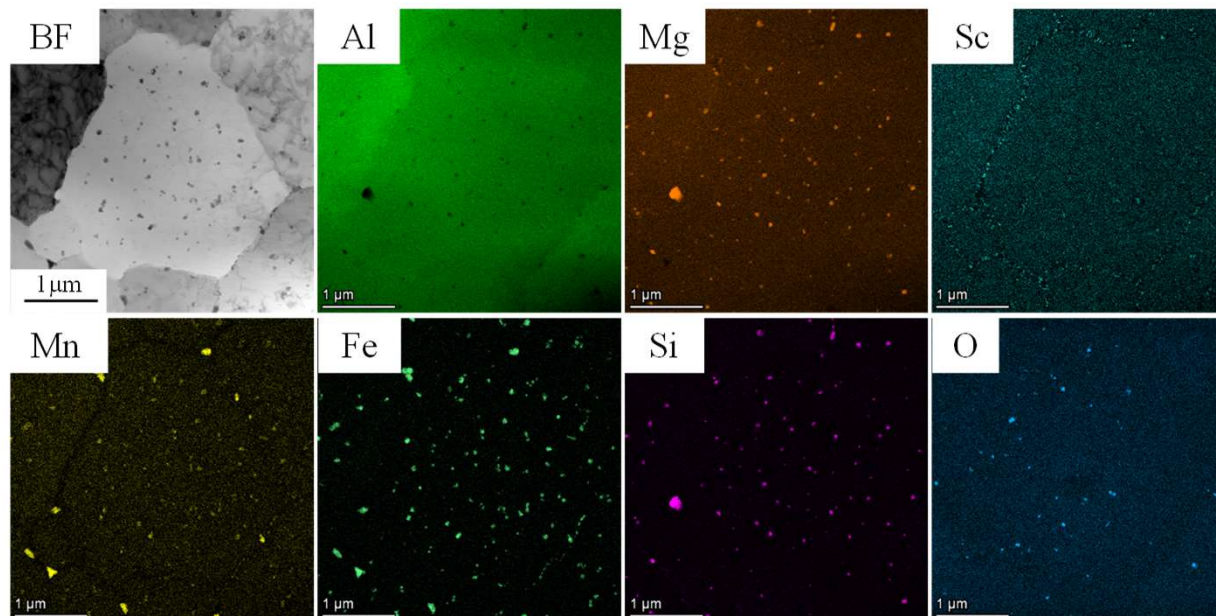
Layer thickness : 0.04mm

Volumetric energy density : 94.4J/mm³

造形後325°C×4hr → 空冷



メルトプール境界近傍：等軸晶 1-3μm
メルトプール内部：柱状晶 2-20μm

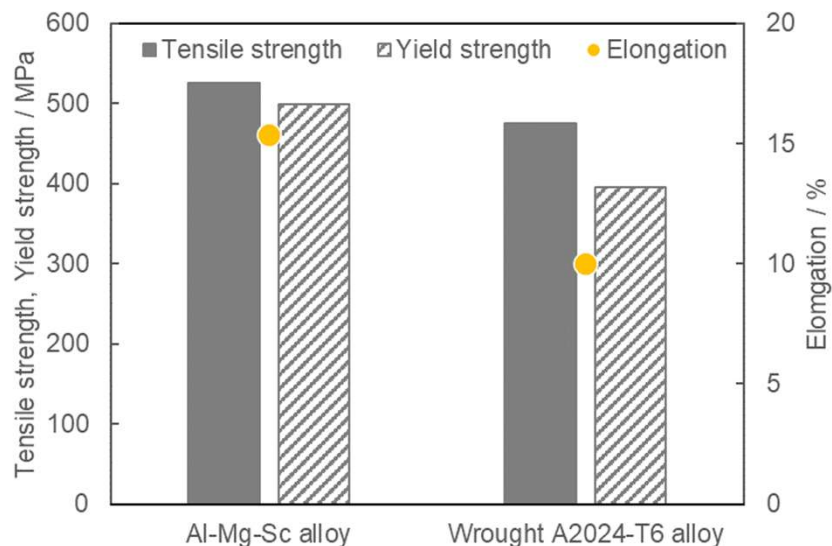


析出物

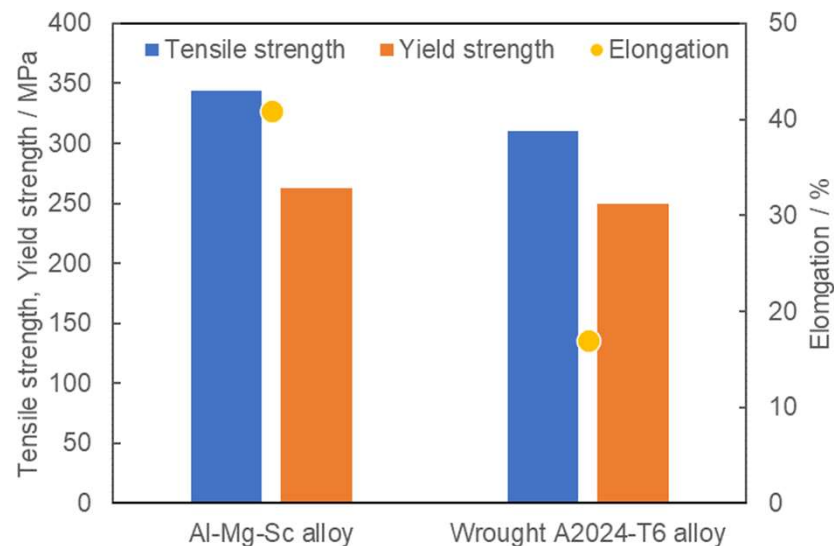
- ・ Al_3Sc 析出物 (約5nm)
- ・ Fe-Mn系析出物
- ・ Mg-Si系 (Mg_2Si 等)

MgはAlマトリックスに固溶

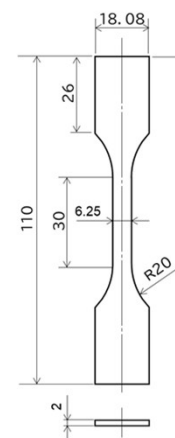
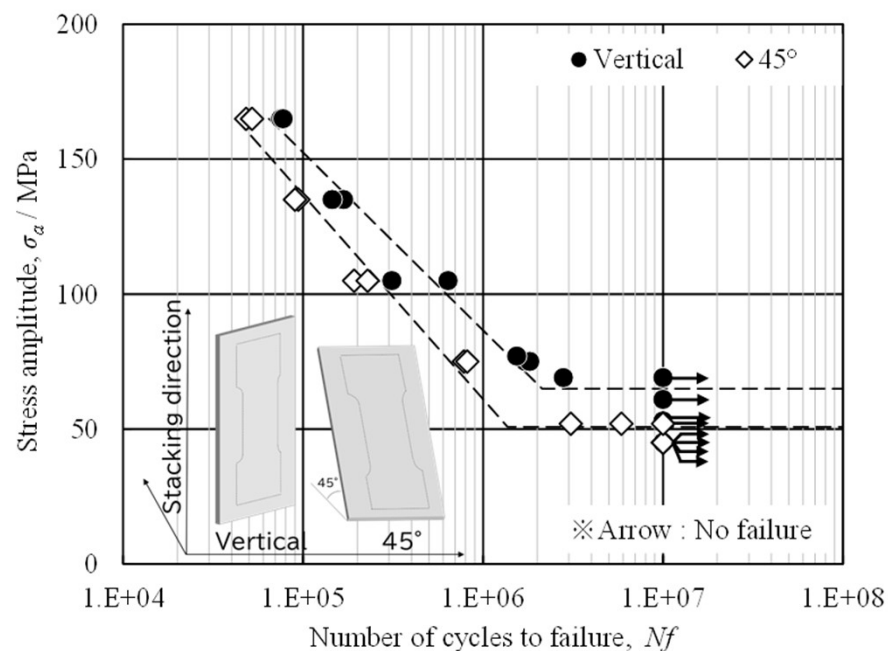
常温



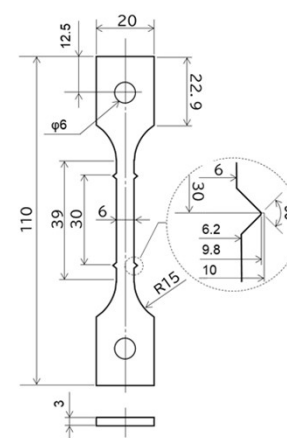
150℃



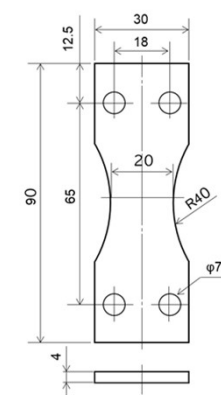
150℃



Tensile test coupon
at ambient temperature



Tensile test coupon
at 150℃



Fatigue test coupon
at 150℃

引張試験片
全面機械加工

平面曲げ試験片
外周機械加工

FEM解析条件

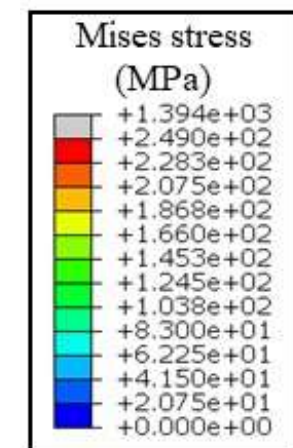
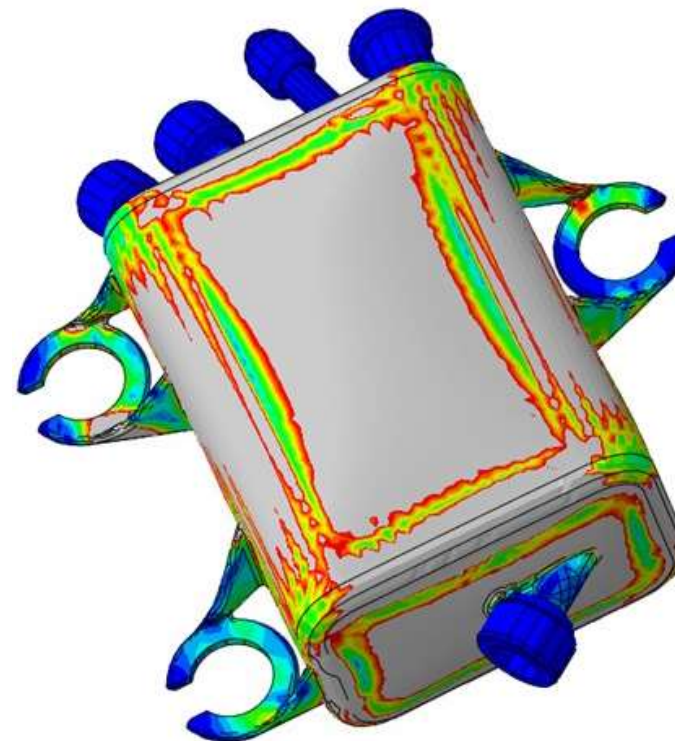
Material Characteristic	Young's modulus	64.4GPa
	Poisson's ratio	0.33
Boundary condition	Mounting arm A	Completely fixed
	Mounting arm B	Fixed along Y and Z axis
	Mounting arm C	Fixed along X and Z axis
Load	Internal pressure	1.5MPa
	Vibrational acceleration	40G along Z axis

FEM解析結果（ミーゼス応力）

■ : 150℃での耐力を上回る箇所

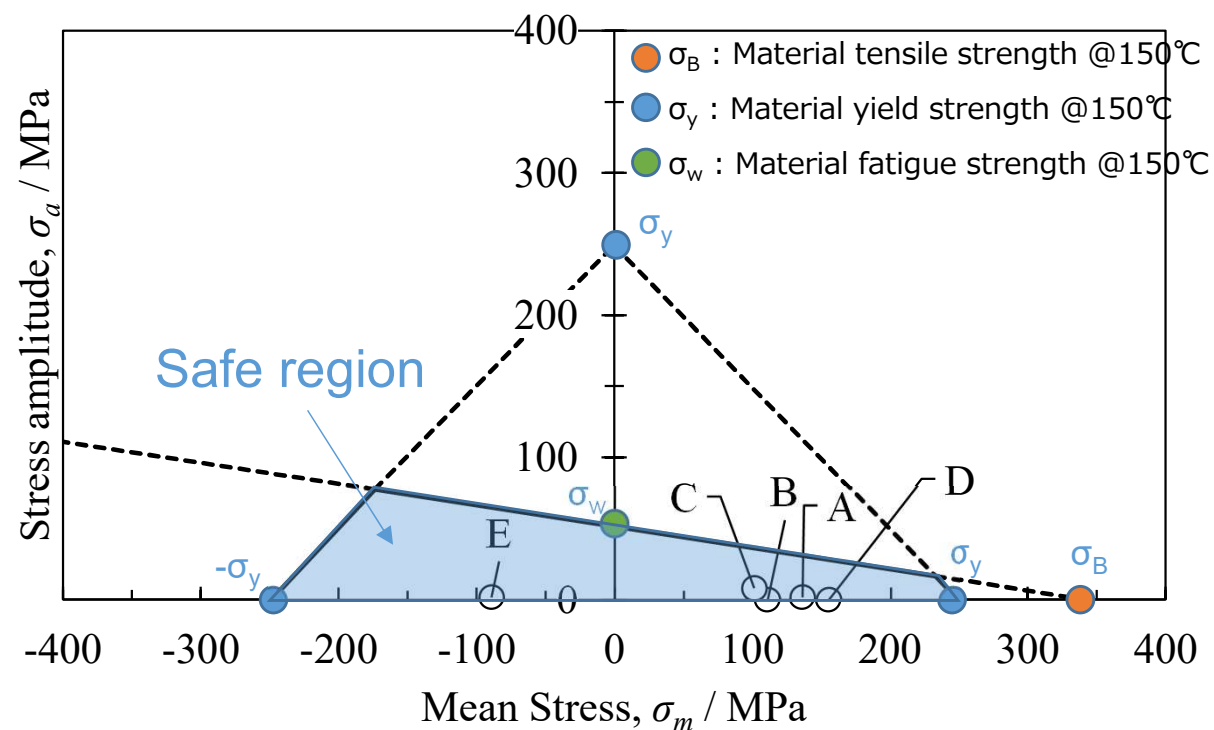
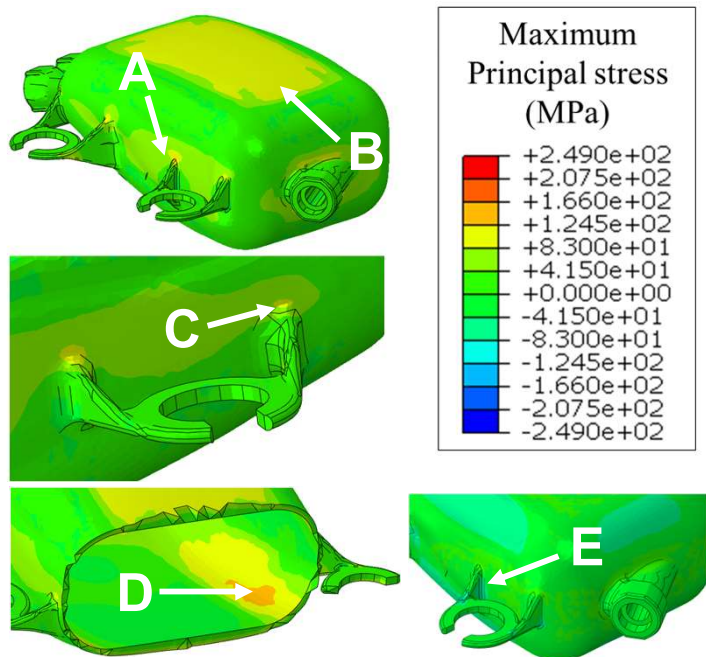
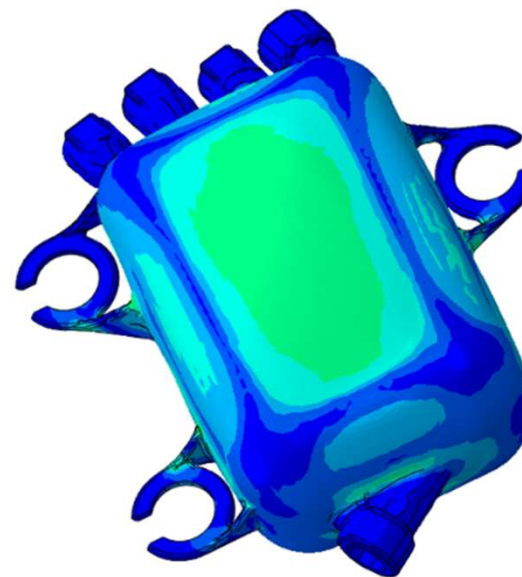
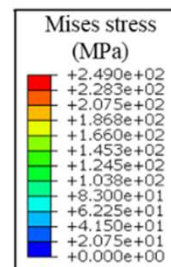
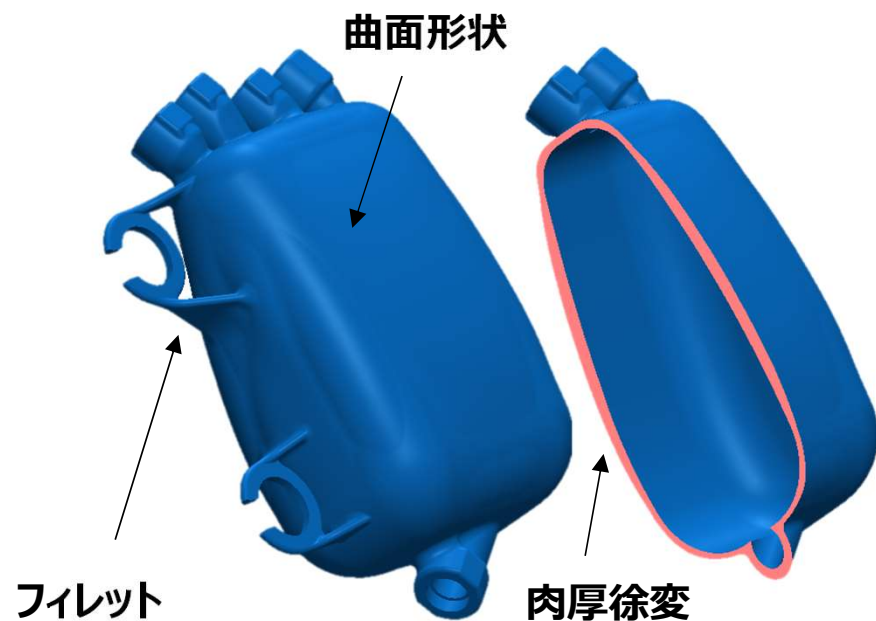


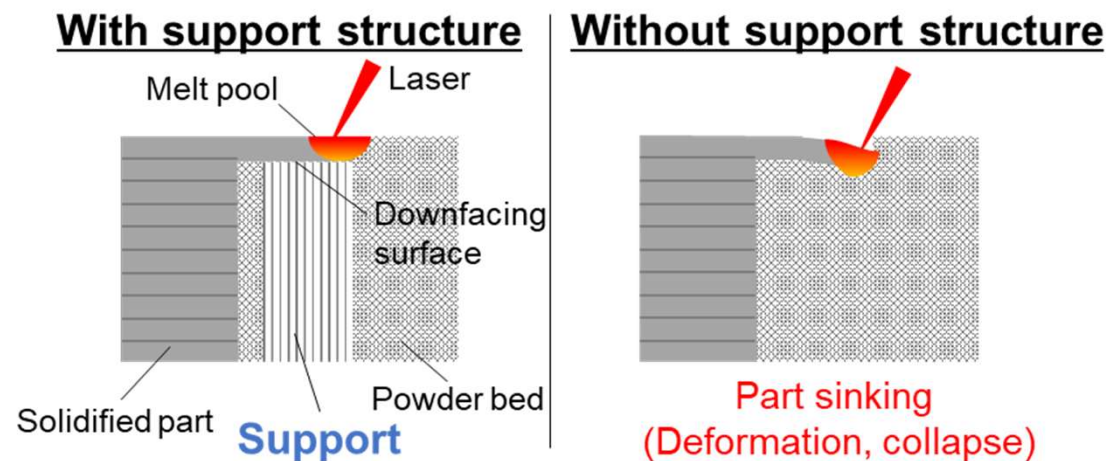
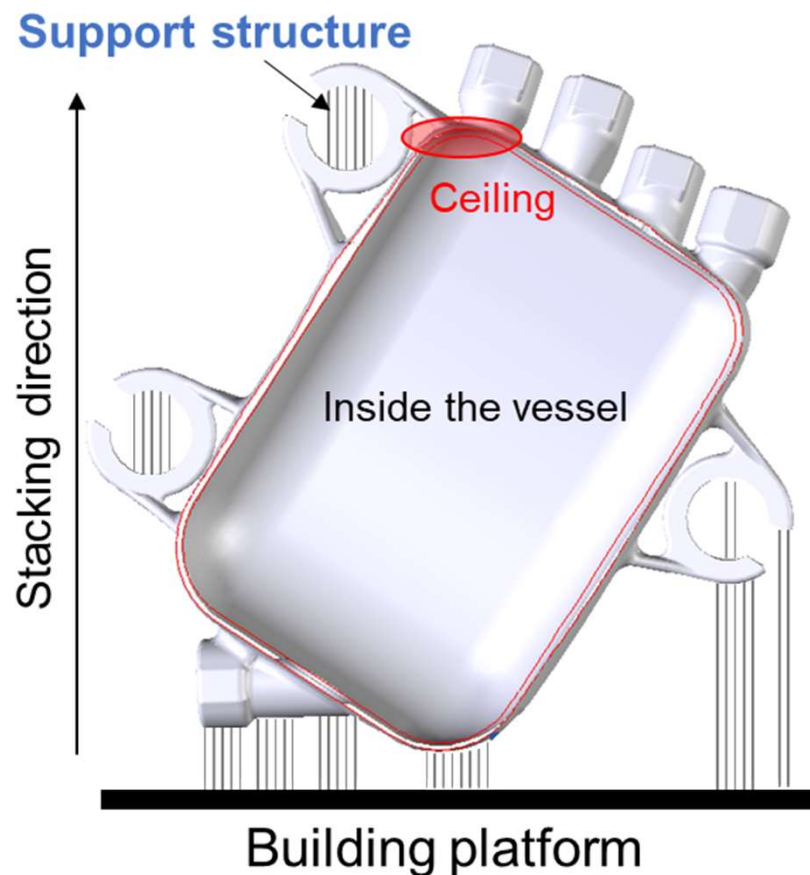
設計の見直し



胴体部 t0.5mm

タンク形状の再設計および強度検証





造形条件の最適化により
中空内部Ceiling部分のサポートレス化を達成



PBF専用高強度Al-Mg-Sc材の採用

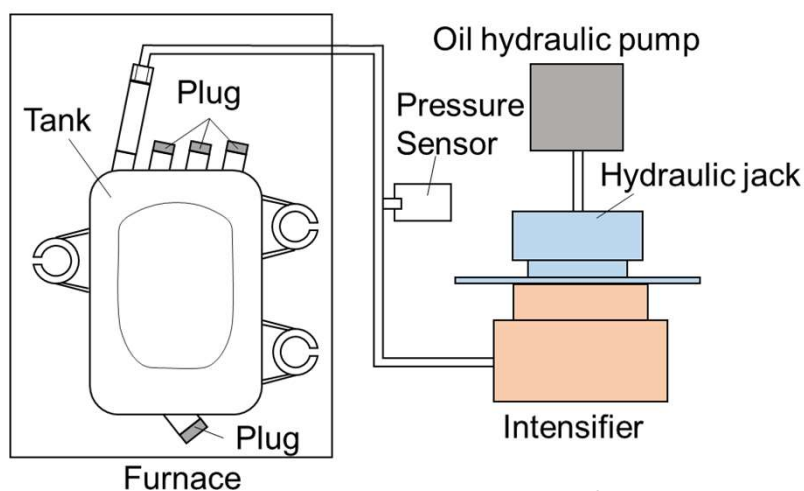
モノリシック構造と最適化された壁厚分布

X線CTで欠陥検出無し

150℃, 1.5MPaの耐圧試験をクリア
(破損や著しい変形無し)

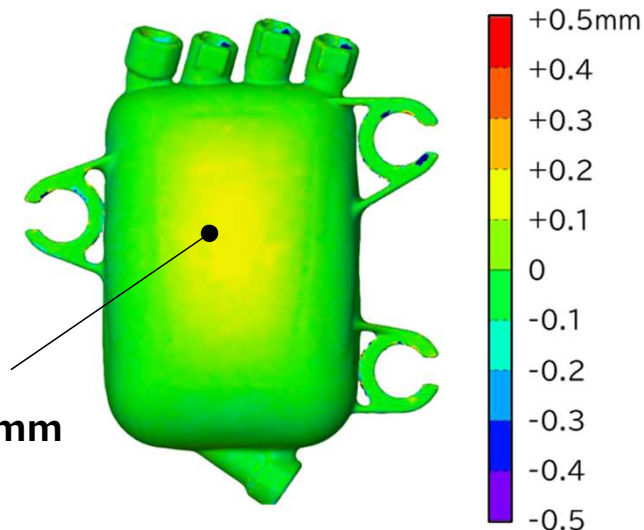
重量110g (従来比63%軽量化)

耐圧試験



1.5MPa@150℃ x 4hr

Max. +0.14mm





活用ステージ	課題
部品機能研究開発	形状/構造による価値創出，材種の拡大
開発試作	造形品質，欠陥検査
アフターパーツ	品質保証（全数検査など）
スペアパーツ（補給部品）	品質保証の仕組み（材料，工法違い）
量産部品	コスト（設備費），生産性

金属3D積層造形展開のためにはサプライチェーン全体での課題解決が必要

AM普及に向けた業界横断的取り組み

DENSO
Crafting the Core

第9回 ものづくりワールド 大阪

AMで自動車部品量産を目指す取り組み
仲間と進める第一歩

2024年10月3日

寺 亮之介

株式会社デンソー

生産革新センター

先進プロセス研究部 ADM研究室



AM部品普及に向けて
輸送機器業界横断的な取り組みがスタート



標準化に向けて
品質保証技術の確立を目指す

AM基盤を開発する企業の壁を越えた枠組み

私たちの
ミッション

①ダイカストと等価品質で作れる
AM技術を開発し実証

②材料・工法・品質保証を標準化
モビリティ部品で使い倒す

モビリティ実装
認証スキーム構築

トヨタ自動車
日産自動車
ホンダ技研
ヤマハ発動機
⋮

他自動車メーカー/系列仕入先様の
参画/情報共有も開発と並行し推進

開発企業

東洋アルミ

DMG森精機

豊田中央研究所

JAMPT

東金属産業

アイシン

JTEKT

豊田自動織機

材料開発・供給

工程内モニタリング技術

造形・プロセス標準化

製品を用いた検証

DENSO 主幹

年	24	25	26	27	28	29
大日程	材料制御技術		中間報告▲	完了報告▲	各社製造開始	
	モニタリング技術			ロバスト検証		

ご清聴，ありがとうございました