

材料からみた3Dプリンティングの 現状と将来動向

～DfAM/DXを視野に考察～

横浜国立大学 成長戦略教育研究センター 連携研究員
東北大学 大学院医工学研究科非常勤講師

理学博士 萩原恒夫
2021年11月17日
E-mail:ts.hagiwara@gmail.com

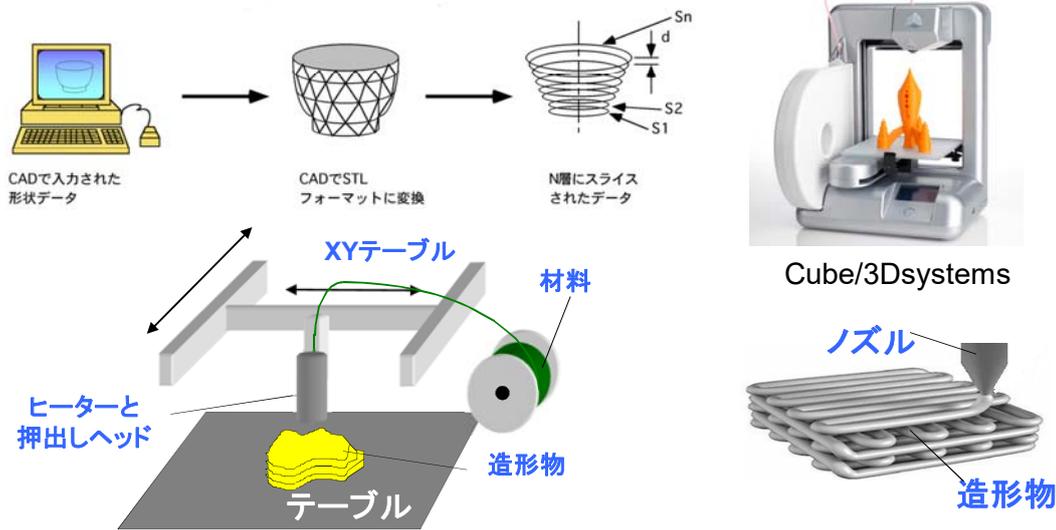
<http://www.thagiwara.jp>

目次

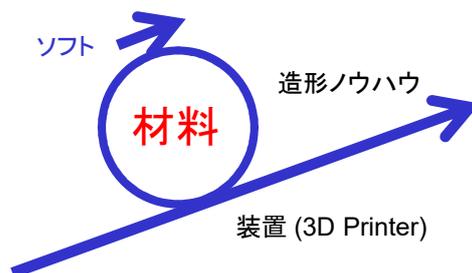
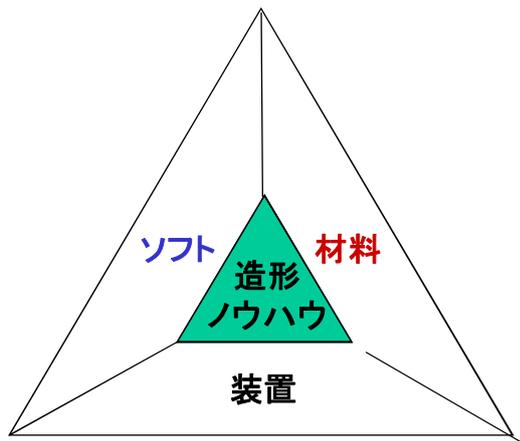
1. はじめに
 - 3D プリンティング(AM)とは
2. 3Dプリンティングを取り巻く環境
 - 市場、用途
3. 各造形法とその材料、現状と課題
4. 3D プリンティング材料から見たDfAM, DX
5. まとめ

YNU Additive Manufacturing (=3DPrinting)

3次元の形状データ(CADデータ)をもとに
 光硬化性樹脂、熱可塑性樹脂、粉末樹脂、粉末金属などの材料をレーザー光、電子ビーム、インクジェット、溶融押出などの刺激により、一層ずつ、くっつけて積み重ねて目的の立体形状とする技術(三次元積層技術)
 Additive Manufacturing (AM) = 3D Printing (3DP), 装置を3Dプリンタ



YNU AM(3Dプリンティング)の技術



液槽光重合(VPP)機



材料噴射(MJT)機



粉末床溶融(PBF)機

積層技術(略称)	英名	別名	材料	手段	特長	用途
液槽光重合法 (VPP)	Vat Photo-Polymerization	光造形法, SLA	光硬化性樹脂	LASER, LED	高精度、高精細大型、	試作
材料噴射法 (MJT)	Material Jetting	PolyJet法, MJM法など	光硬化性樹脂 ワックスなど	インクジェット	比較的簡易 多彩な表現	形状確認 鑄造
材料押し出し法 (MEX)	Material Extrusion	熔融樹脂積層法, FDM法, FFF	ABS, PCなどの 熱可塑性樹脂	熱	簡易, ABS~スー パーエンブラ	形状確認 高性能試作
粉末床熔融法 (PBF)	Powder Bed Fusion	粉末焼結法, SLS, SLM, EBM HSS	PA12, PP粉末, 金属粉末	LASER, 電子線 インクジェット/熱	高性能試作 実部品(PA12粉, 金属粉)	試作 製品
結合剤噴射法 (BJT)	Binder Jetting	インクジェット法, Z-Printer法	石膏粉, 砂 水系バインダー	インクジェット	高速, フルカラー	フィギュア 砂型鑄造
シート積層法 (SHL)	Sheet Lamination	シート積層法, LOM法	紙, プラスチック シート, 金属シート	LASER, カッターナイフ	簡易 フルカラー	立体地図
指向エネルギー 堆積法(DED)	Directed Energy Deposition	LENS法, DED法	金属粉末, 金属ワイヤ	LASER	超高速	金属部品
ハイブリッド	Hybrid		金属粉末 熱可塑性樹脂ペ レット	LASER + 切削 熱 + 切削	精度・表面性	金属製品, 型 大型樹脂製品

ASTMでは7分類、最近ではハイブリッドを含めて8分類へ

略称は3英文字表記: VPP, PBF, MEX, BJT, MJT, SHL, DED

- 2012年からの3Dプリンターブームは一段落したが、コロナ禍でも着実に発展
 - 低価格機: コロナ禍でも2020年は75万台出荷、累計400万台前後へ
 - DX, DfAM、サプライチェーン確保で今後急速回復に期待
- 装置の(超)高速化・大型化・高性能化・自動化が進行
- 最終製品を3Dプリンターで製造へ
 - 金属のAM造形が大きく発展。航空機部品や医療用インプラント
 - PEI, PEEKなどのスーパーエンブラ; 航空機部品、医療用インプラント
 - セラミック造形やCFRP複合材等の造形が発展
 - 液槽光重合法も再び注目(高速DLP機の登場で最終製品を)
- AMの医療・歯科への応用は着実に進行中
- AMをDXの牽引に期待; 今後は自動車産業も含めた全産業を対象に発展
- 2020年代半ばに材料市場は5,000億円を予測 (2020年: 2,200億円)
 - 幅広い種類の積層材料に; CFRP複合材、スーパーエンブラの利用が加速
 - 材料の発展で、AMの応用拡大が一層期待される。

YNU 3Dプリンティングの世界市場 (Wohlers Report 2021)

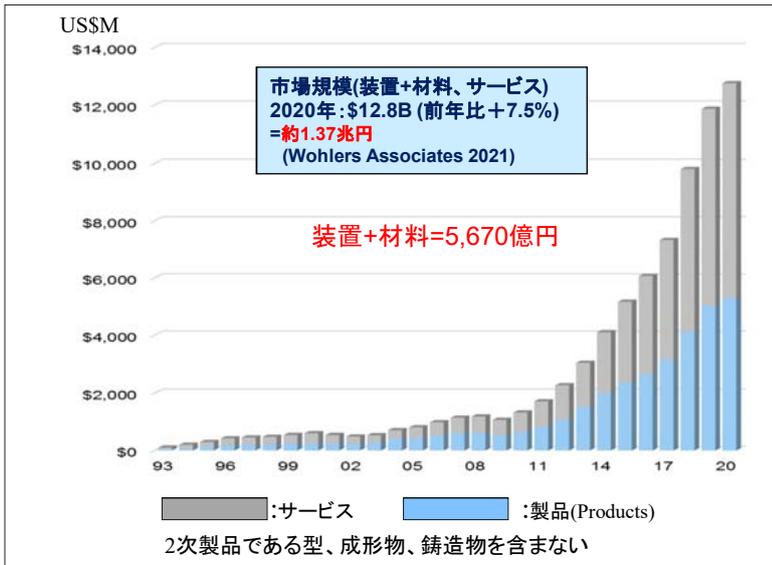


Exhibit 11: Primary Global AM Market
US\$ in millions, unless otherwise stated



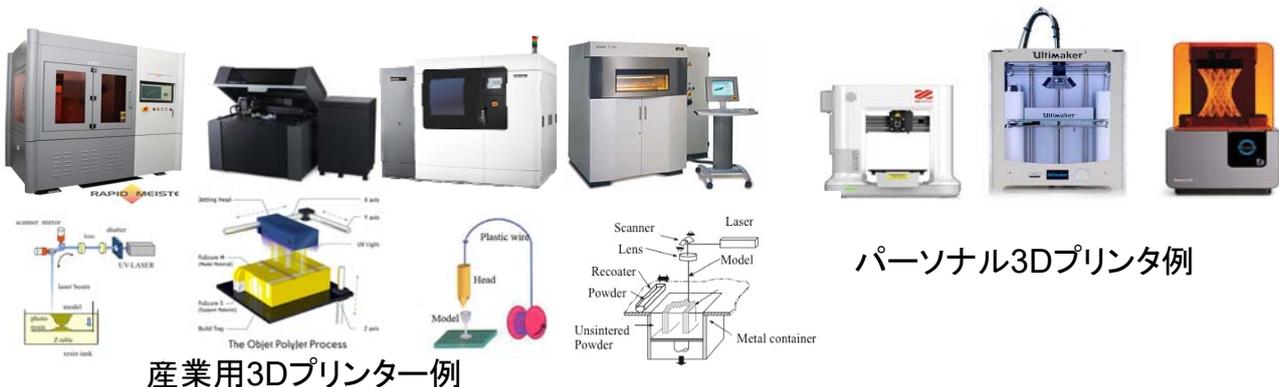
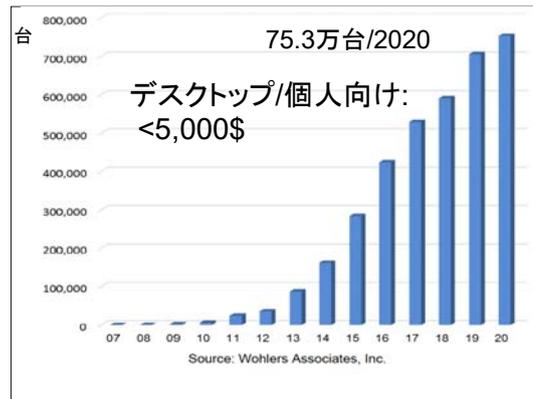
Source: Credit Suisse estimates.

- 2027年には6兆円の市場に(Smithers Pira)
- 2025年に2兆円市場 (formnext2019)
- 世界市場: USD 49.74 Billion by 2025, CAGR of 25.5% from 2018 to 2025. (Kenneth Research)

クレディ・スイス証券2013年予測

「2020年の姿を見事に予測」

YNU w/w 3Dプリンター市場 (Wohlers Report 2021)



産業用3Dプリンター例

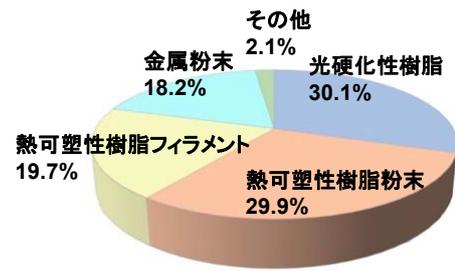
パーソナル3Dプリンター例

2020年の3D Printer市場: US\$12.8B (前年比 7.5%増)

装置: \$3,014M (増減なし)
 産業用: 21,029台 (8.5%減)、
 Personal 75.3万台 (6.7%増)

材料のみ US\$2,105M (9.9%増)
 サービス US\$7,454M (9.2%増)

材料	販売額	推定出荷量 (トン)
光硬化性樹脂:	US\$635M 699億円 (30.1%)	2,330
熱可塑性樹脂粉末:	US\$629M 692億円 (29.9%)	6,820
金属粉末:	US\$383M 421億円 (18.2%)	2,150
熱可塑性樹脂フィラメント:	US\$414M 455億円 (19.7%)	4,550
その他; 石膏粉末など:	US\$ 44M 48億円 (2.1%)	480



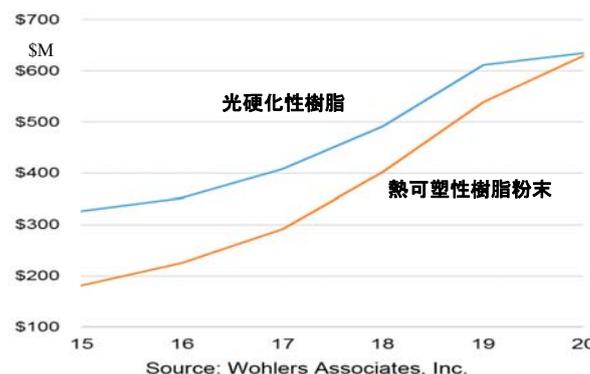
2020年 (Wohlers Report 2021)



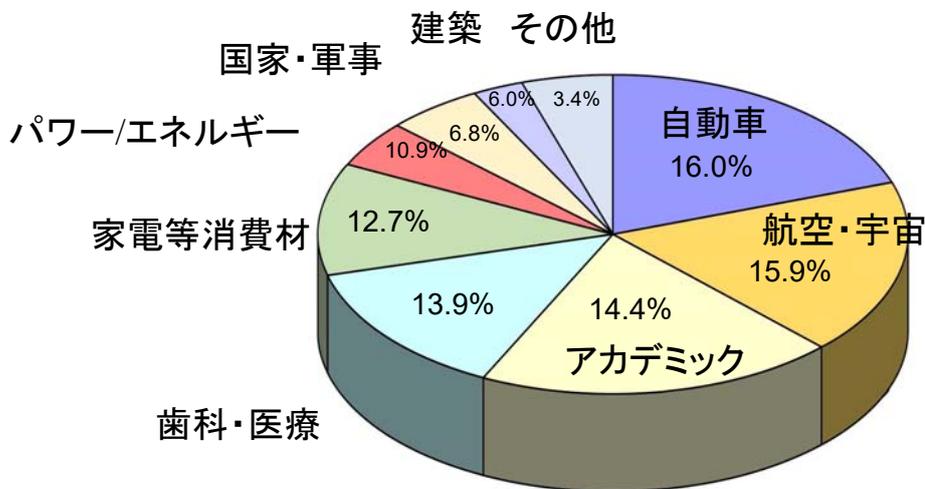
	2017	2018	2019	2020
Ceramic	24	23	33	36
Composite	100	138	175	219
Metal	498	693	844	988
Polymer	496	700	969	1222
Sand	5	5	5	5
Wax	16	15	15	16

Source: Senvol

Source: Senvol



- 製品開発のためのデザイン検証、製品試作
- 高付加価値工業最終製品
 - 航空・宇宙産業
- 宝飾
 - 手作業からデジタルへ
- 医療・歯科への応用
 - 人体の各種パーツは個人差が大きいため、個別の寸法に対応できる3Dプリンタが最適
- コンシューマ向け
 - カスタムデザイン、
 - 芸術、個人表現、ホビー



Wohlers Report 2021

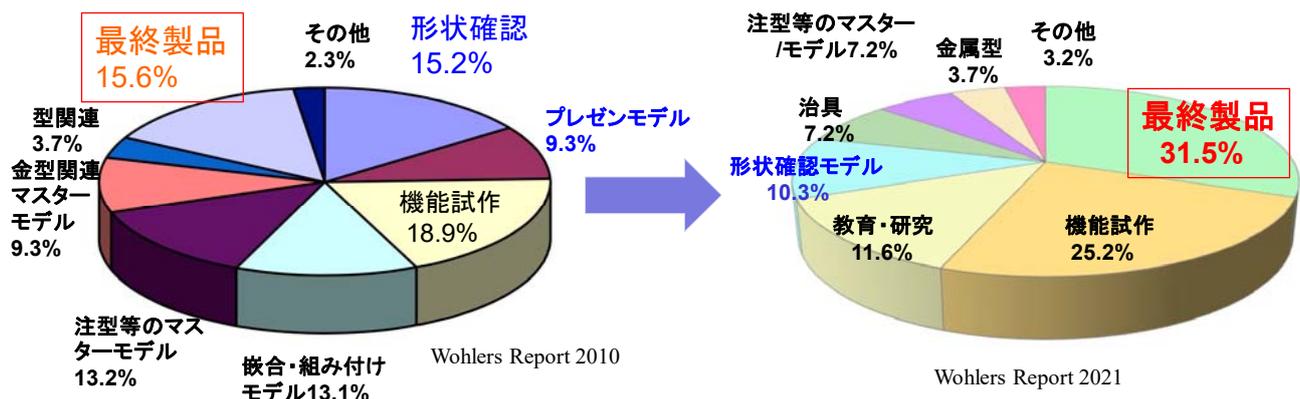
YNU 3Dプリンター導入で得られるメリットは

アナログからデジタルへ; まさにDXの先駆け

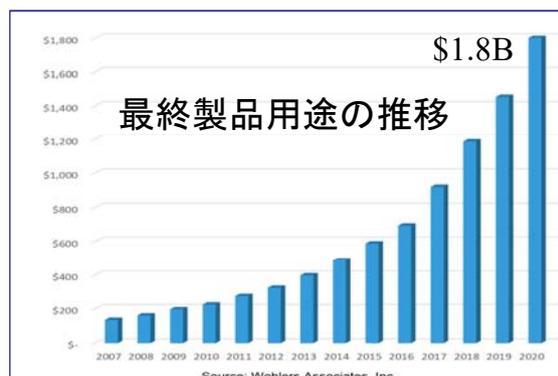
1. 開発期間の短縮
 - デザインから試作までを短期間に
2. 設計から試作への品質向上
3. 切削では加工できない形状の作製(造形)が可能
4. コストの削減
 - 最終製品と同等の試作品の作製が容易
5. 在庫管理が容易に
 - スペアパーツにかかっていた在庫管理が不要
 - パーツをモノではなくデータで管理(DX)
6. 物理的な「モノの輸送」を「データ通信」に置き換え、「地産地消」を実現する。

YNU

用途の推移



AM市場: 2009→2020
1,200億円 → 1.37兆円
材料市場
220億円 → 2,315億円
市場は10倍以上に拡大
最終製品の割合: 2倍に
15.6% → 31.5%



YNU 現状、最終製品はPBF法がほとんど

- 金属粉末床溶融(SLM, EBM)

- 航空機部品
- 特殊金属製品
- 膝等のインプラント



松浦機械



GE Additive

- 樹脂粉末床溶融(SLS, HSS)

- 自動車内装部品
- オフィス機器の内装部品
- 靴(インナーソール)、メガネフレーム
- 人工骨等のインプラント(PEKK, PEEK)



ランボルギーニ



TPU



PEEK Spine/OPM



YNU 材料押し出し法の利用も

スーパーエンプラ航空機部品



Stratasys社Fortus機でPEI (ULTEM 9085)樹脂: Airbus 350 XWBの製造に1,000部品

<http://www.stratasys.com/>

CFRP/樹脂押し出しでドローン



Markforged

ONYX ONE/PRO

https://www.ricoh.co.jp/3dp/lineup/fdm/onyx_pro_one/

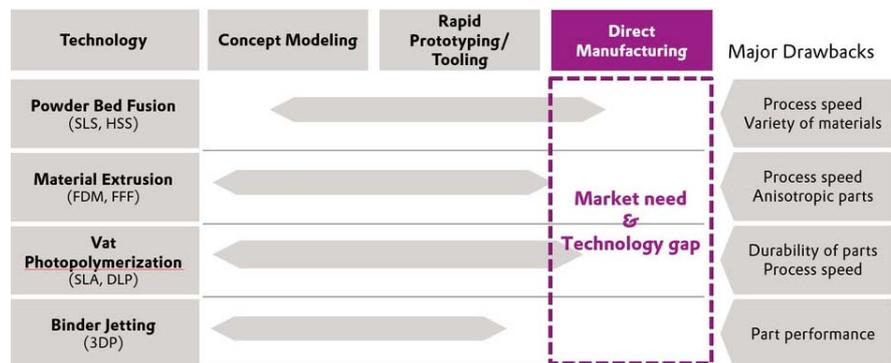
- 工業製品の部品、製品
- 自動車や電化製品の補修部品
- (航空宇宙用など)AMでしか作れない形状の部品、製品の製作
- 人工歯、矯正器具、入れ歯などの歯科用品
- 補聴器、制御可能な義手、義足
- 外科用足場、人工骨、人工臓器
- 芸術、表現、個々人の嗜好品



Next 21/BJT

YNU 工業製品では「何が求められるか？」

- 既存の製品と同等の物性
- 外観品質
- 耐久性
- 精度
- 価格
- 納期



<https://3d-printing.evonik.com/en/additive-manufacturing-innovation>

- 3DP独自の構造の場合、性能が出れば既存の材料と異なっても利用へ
- 現状の製品のイメージからの脱却が必要
→ DfAMの取り組み

材料の現状と課題

19

YNU

各方式とその代表的な材料

方式	装置メーカー例	材料		主用途
		カテゴリー	具体例	
液槽光重合/LASER	3D Systems	光硬化性樹脂	エポキシ/アクリレート・ハイブリッド	試作分野
	CMET	光硬化性樹脂	エポキシ/アクリレート・ハイブリッド	試作分野
	EnvisionTEC	光硬化性樹脂	エポキシ/アクリレート・ハイブリッド	試作分野
液槽光重合/DLP	DWS, Formlabs	光硬化性樹脂	(メタ)アクリレート系	宝飾、歯科、試作など
	EnvisionTEC	光硬化性樹脂	(メタ)アクリレート系	宝飾、歯科
材料噴射/Ink-Jet	Carbon (Carbon3D)	光硬化性樹脂	(メタ)アクリレート系/架橋性樹脂	靴底、高性能試作
	3D Systems	光硬化性樹脂	アクリレート系/ワックス	宝飾・歯科
結合材噴射/Ink-Jet	Stratasys(Objet機)	光硬化性樹脂	アクリレート系	形状確認・歯科
	3D Systems (Z)	石膏	石膏/水	デザイン・フィギュア
	ExOne	砂	砂+バインダー樹脂(フラン樹脂など)	砂型鑄造
粉末床溶融/LASER	Voxeljet	砂、PMMA粉	砂 or PMMA+バインダー樹脂	砂型鑄造、消失模型
	HP	PA粉末	PA12/赤外線吸収剤、赤外線	試作、生産?
	EOS	PA粉末、金属粉	PA12, PEEK, SUS, Ti, Al, Co-Cr	試作、生産、歯科
	3D Systems	PA粉末、金属粉	PA12, SUS, Ti(合金), Al, , Co-Cr	試作、生産
粉末床溶融/EB	アスペクト	PA粉末、PP粉末	PA12, PP, PPS, Ti(合金)	試作、生産
	ARCAM	金属粉	Ti (合金), Co-Cr	医療、生産
材料押出し(FDM)	Stratasys	熱可塑性樹脂ワイヤ	ABS, ASA, PC, PEI, PA12, PEKK	試作、生産、形状確認
	武藤, Ultimaker	熱可塑性樹脂ワイヤ	PLA, ABS	形状確認、ホビー
	その他RepRap機	熱可塑性樹脂ワイヤ	PLA (ABS), PEEK	形状確認、ホビー

1. 液槽光重合法(VPP)

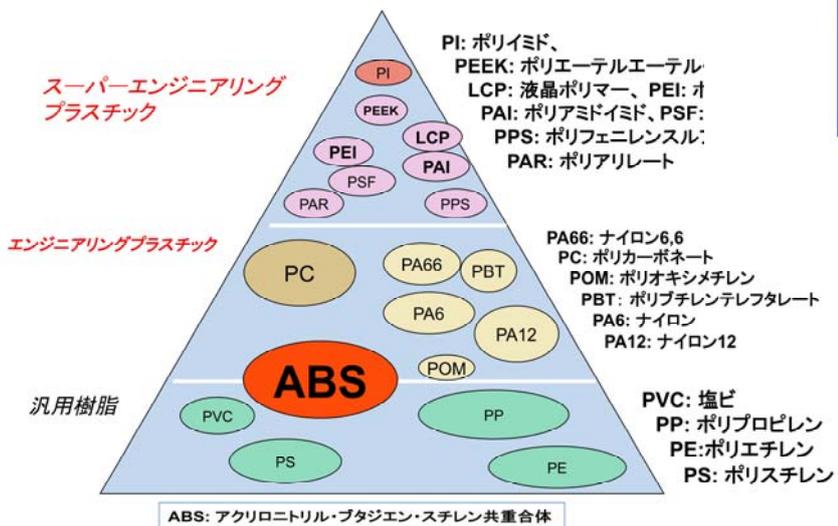
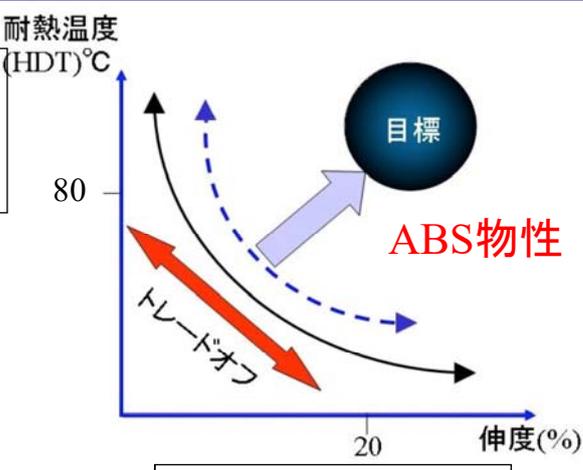
	大型液槽光重合機 自由液面	小型液槽光重合機 規制液面	DLP機 規制液面
光源	固体レーザー, 355nm	LDレーザー, 405nm	405nmLED, UVランプ
装置の特徴	上方からレーザー照射, 空気に接している	透明窓材下方からレーザー照射, 空気に接していない	透明窓材下方から光照射, 空気に接していない
材料の特徴	エポキシ/アクリレートのハイブリッド樹脂 硬化速度は少し遅いが収縮率が小さく、反りが少ない。耐熱・靱性を併せ持つ材料開発が難しい。	(ウレタン) アクリレート樹脂 硬化速度は速く、収縮率が大きく、反りが出やすい。メタクリレート化合物が利用できるため生体適合性が高い。	(ウレタン) アクリレート樹脂 硬化速度は速く、収縮率が大きく、反りが出やすい。メタクリレート化合物が利用できるため生体適合性が高い。
スキーム	<p>スキーマ: スキャナーミラー、レーザー、レンズ、自由液面、光硬化性樹脂、造形テーブル</p>	<p>スキーマ: 造形テーブル、樹脂トレイ、レーザー、スキャナーミラー</p>	<p>スキーマ: 3D-object, Movable building platform, Resin, DLP mirrors, Projector</p>

液槽光重合法(VPP)の代表的用途

	大型液槽光重合機 自由液面	小型液槽光重合機 規制液面	DLP機 規制液面
造形サイズ	600~800mmサイズ	150~200mmサイズ	100~200mmサイズ
特徴的用途	大型試作、嵌合テスト	宝飾、歯科、小型部品試作	宝飾、歯科、小型部品試作
代表的造形物	<p>代表的造形物: 大型透明樹脂部品、SOLIZE</p>	<p>代表的造形物: 宝飾品、歯科模型、小型部品</p>	<p>代表的造形物: 宝飾品、歯科模型、小型部品</p>

YNU 一次目標性能はABS樹脂性能

- なぜABS性能なのか?
 - 工業製品の多くの筐体に利用
 - 生活環境下での物性にバランス



ABS樹脂
 HDT(高荷重): 80°C
 Izod(ノッチ): ~200J/m
 水分吸収率: ~0.3%

VPP用樹脂の目標
 HDT(高荷重): >80°C
 Izod(ノッチ): >50J/m

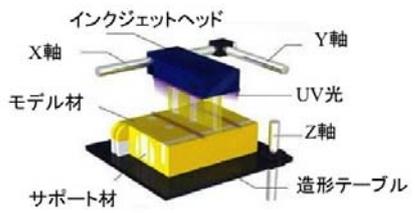
YNU 2. 材料噴射法(MJT)



Stratasys J750



ProJet MJP 3600s/3Dsystems



光硬化性樹脂を積層



光硬化性樹脂/ワックスを積層

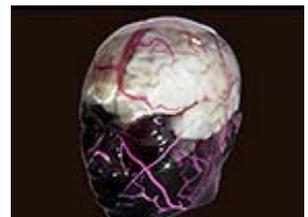
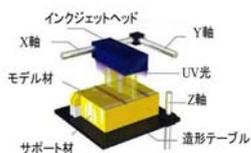
What is PolyJet 3D Printing?

From Stratasys HP

光硬化性樹脂の材料噴射法の例



Stratasys J750



神戸大・杉本医師の例

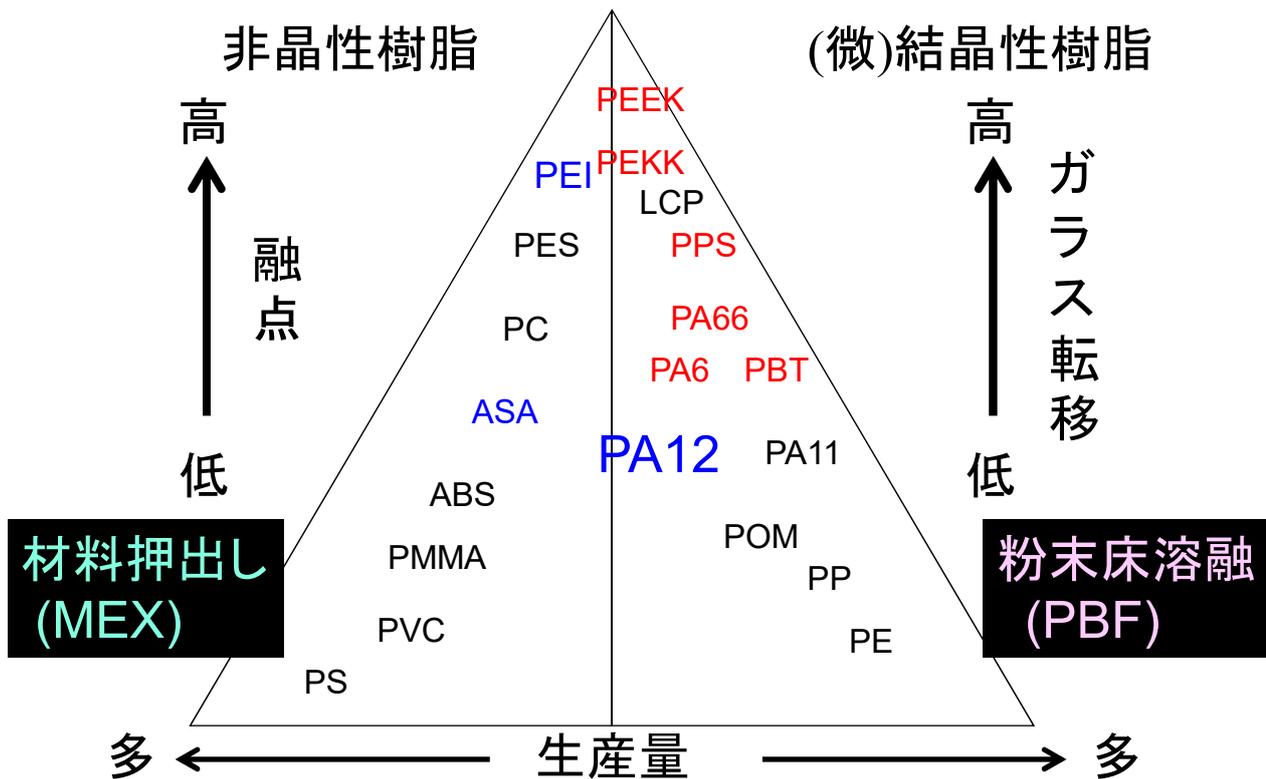
<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/COLUMN/20130624/487213/>

材料	硬質色付き樹脂	硬質色付き樹脂	硬質色付き樹脂	マルチカラー硬質樹脂	硬質透明樹脂	硬質透明材料	硬質半透明樹脂	PPライク樹脂
	VeroWhitePlus VeroBlackPlus VeroGray	VeroBlue	DraftGrey	VeroCyan VeroMagenta VeroYellow	VeroClear	VeroUltraClear	RGD720	Rigur
カラー	白、黒、グレー	青	グレー	シアン、マゼンタ、イエロー	透明	透明	黄半透明	アイボリー
材料	高耐熱樹脂	ABSライク樹脂	ラバーライク樹脂					生体適合性樹脂 ^{※2}
	RGD525	デジタルABS	TangoGray	TangoBlack	TangoBlackPlus	TangoPlus	Agilus30	MED610
カラー	白	アイボリー、グリーン ^{※1}	グレー	黒	黒	半透明	半透明、黒、白	透明



表現は極めて多彩。耐熱性、吸水率に不満
 HDT<50°C; 夏場注意
 吸水率 ~1.5%, cf. ABS=~0.3%
 材料開発 → 用途が拡大

YNU 熱可塑性樹脂の3Dプリンティング



YNU 3. 材料押出し法/Stratasys社の例



Stratasys F900



ASA



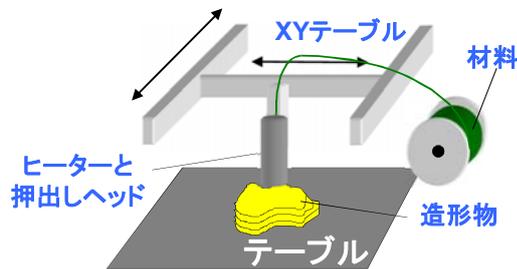
Nylon CF



PEI(ULTEM)



PEKK



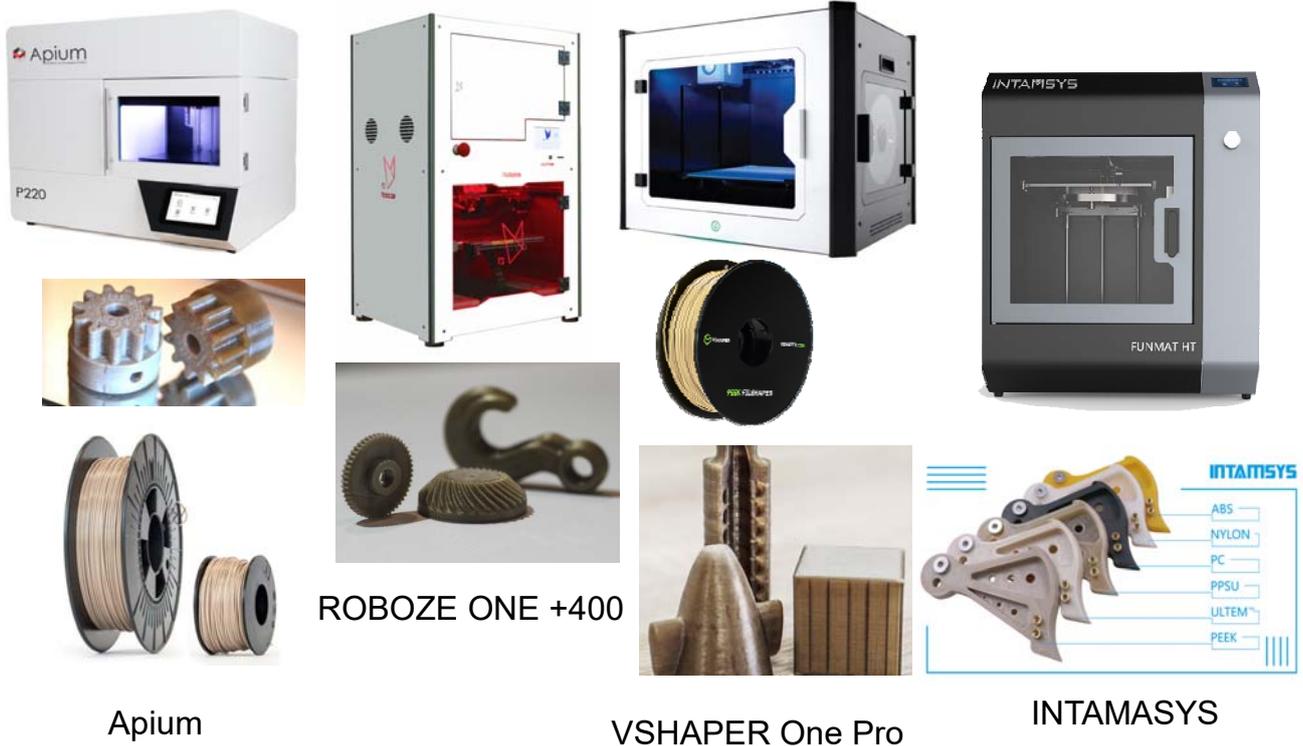
YNU 材料押出し用樹脂/ストラタシス(丸紅情報システムズHP)

ASA	ABS-M30	ABS-M30i	ABS-ESD7	ABS-CF10	TPU 92A	Diran 410MF07	PLA	PC	PC-ISO
耐候性 表面の美観	汎用性	生体適合性	静電気拡散性	炭素繊維強化 高剛性	柔軟性(ショアA硬 度:92) 衝撃吸収	高靱性 耐摩耗性	安価・コンセプト検 証向き	高引張強度	生体適合性、強度
PC-ABS	NYLON6	NYLON12	NYLON12 CF	ULTEM™9085	ULTEM™1010	Antero 800NA	Antero840CN03		
高耐熱 耐衝撃性	耐衝撃性 耐摩耗性 耐薬品性	高衝撃強度 高疲労耐性	高強度 耐疲労性	耐熱性 難燃性 米国連邦航空局認証	耐熱性 耐薬品性 米国食品接触認証	耐薬品性、 低アウトガス	静電気放電(ESD)性 低アウトガス性 耐摩耗性		
PPSF	ST-130								
耐熱性、耐薬品性	耐熱性、可溶性								

- ・ 殆どの(非晶性)熱可塑性樹脂が利用可能
- ・ 精度・造形速度とともに向上し、高性能化に拍車
- ・ DX向け材料の筆頭
- ・ DfAMで欠点をカバーし、メリットを強調可

Stratasys: 大型・廉価 F770を発売

YNU 材料押出し普及機でPEEK造形へ



Apium

VSHAPER One Pro

INTAMASYS

YNU 10倍高速造形機の出現/EssentiumHSE

Essentium HSE 280i HT

Metal US\$170 PEI 9085 US\$562.5 PEEK US\$446

FlashFuse™ ZX Tensile Strength

Strain (mm/mm)	FlashFuse™ (MPa)	Injection Molded (MPa)	FFF (MPa)
0	0	0	0
0.05	55	55	55
0.1	55	55	55
0.15	55	55	55
0.2	55	55	55
0.25	55	55	55

FlashFuse™ Process

Z-Direction Thermal Profile

Temperature (°C) vs Z Position (mm)

FlashFuse™ (solid line) vs Control (dashed line)

3D Printed Part (Resistor) <https://essentium3d.com/pages/flashfuse>

YNU ダイレクトペレット樹脂押し出し機の台頭

- S-lab: GEM2100GD, 茶室 (国内)
- ExtraBold: EXF-12 (国内)
- Arburg: freeformer200, 300 (独)
- Bigrep: WorkCenter500 (独)
- Titan Robotics : Atlas-H (米)
- JuggerBot 3D: P3-44 (米)
- Siemens/CEAD (独-蘭); AM Flexbot等
- Yuizumi (中国3位の射出成形機メーカー)
- WASP; PEEK3D Printer; DeltaWASP 3MT Industrial (mサイズ) (伊)
- Titan Robotics : Atlas-H
- Pollen AM/ PP 3D; Pam (仏)
- DISCOVERY 3D Printer (蘭)
- Gigabot X: リサイクルペレット
- Colossus: 移動式大型3Dプリンター(家具など)



Arburg: freeformer



S-lab: GEM2100GD



Titan Robotics : Atlas-H



ExtraBold: EXF-12



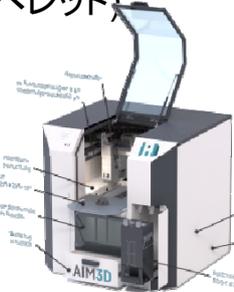
Siemens/CEAD

YNU 材料押し出しで金属造形も

- 金属含有ワイヤ、金属含有ペレット機の発展
- MIM(Metal Injection Molding)市場を視野
 - Markforged Metal X 機; ステンレス、アルミ～銅
 - Essentium HS 180S (BASF製金属含有ワイヤ)
 - AIM3D (MIM用ペレット)
 - Desktop Metal



Desktop Metal



AIM3D



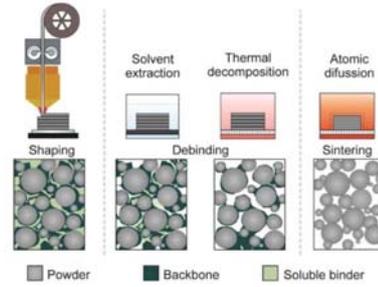
Essentium HSEと BASFの金属含有ワイヤ



Markforged/Metal X

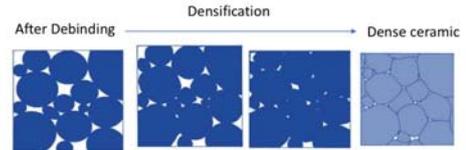
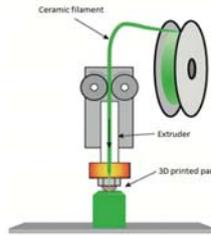
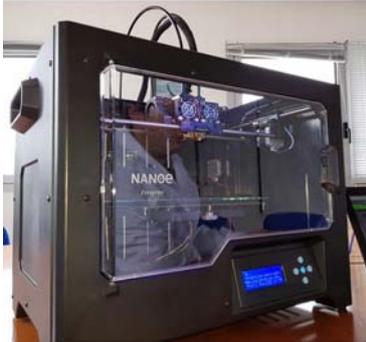


Zetamix process

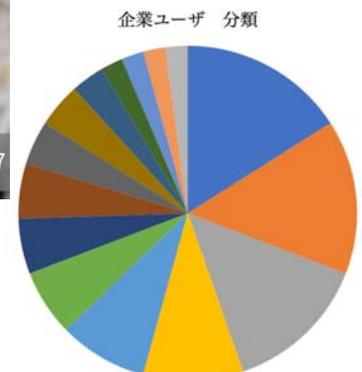
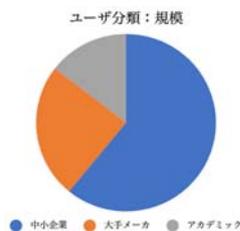


Typical density after sintering: 99% for ceramic, 90 to 95% for metals

- Going from 50 – 60 % green density to 90 – 99% sintered density implies a linear shrinkage of 15 – 20%

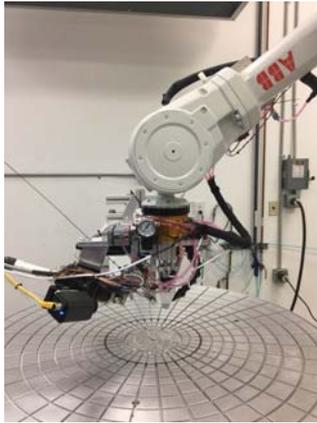


- Markforged: 2013年設立、急成長 15,000台以上販売(W/W), 国内は1,000台弱, 中小メーカーが主、これから自動車業界へも

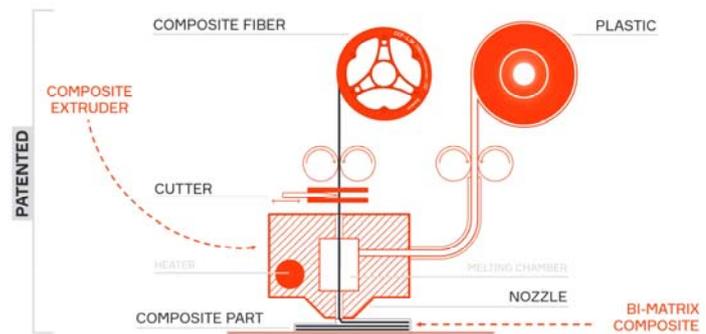


データ提供: markforged Japan; 2018実績

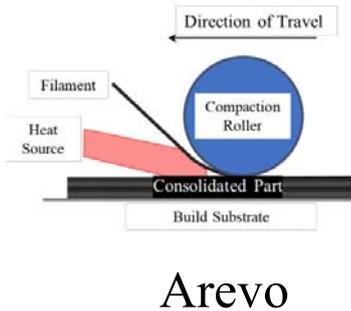
YNU CFRP強化材料押出し法の急成長(つづき)



SPECIALLY FORMULATED FOR THE TECHNOLOGY



Anisoprint

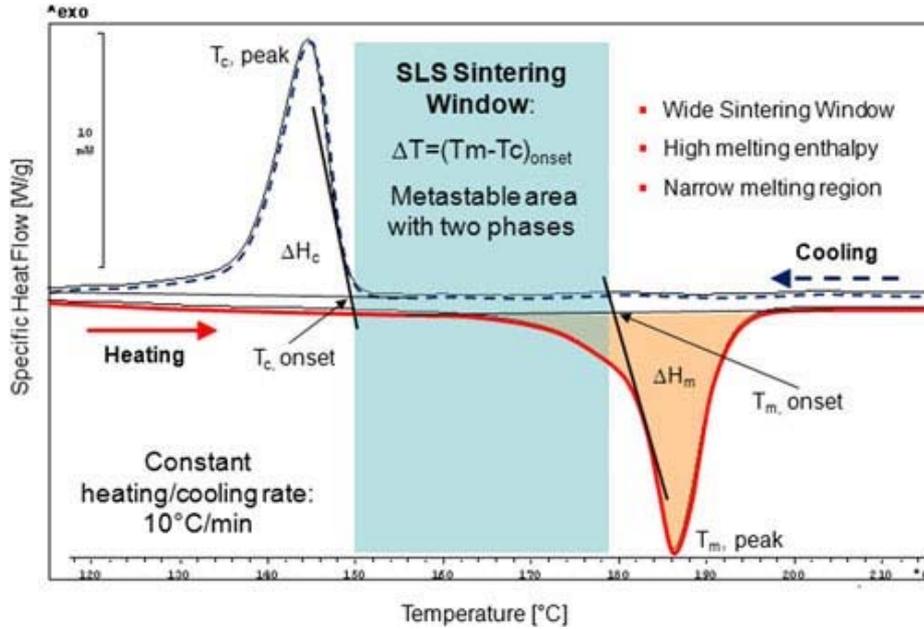


Arevo



YNU 材料押出し用材料のまとめ

- 大手化学会社(BASF, Henkelなど)の参入により材料開発が加速
- 樹脂ペレットを直接造形する大型装置が次々に上市
- パーソナル3DP機は75万台/2020年販売; 基本PLA系ワイヤ機だが、
 - **Stratasys社の温度管理チャンバー特許切れで** ABS, ABS/PC, PA12/CF, スーパーエンプラ(PEEK)などの利用拡大が止まらない。
 - 精度・造形速度は年々向上, 10倍速機(Essentium)の出現も
 - **DXのためのDfAM化へ展開が進む**
- 材料押出しの、セラミック造形、金属造形の展開も進む
 - アイデア次第で材料が拡大しビジネスチャンス大
- CFRP/材料押出しで新しい世界が広がる。



J. Mater. Res., Vol. 29, No. 17, Sep 14, 2014

- 融解・結晶化挙動がシャープ: 精細な形状を再現しやすい
- $T_m - T_c$ 温度差が大きい: 造形条件幅が広い
- 機械的特性: 強度と伸度の両立
- 耐熱性: 半結晶性樹脂、融点近くまで剛性を維持
- 耐薬品性: 油脂類に強い耐性
- 比較的安価

ARKEMA 井上稔氏 第5回AMシンポジウム@東大生研



PA12GB/アスペクト社



PA12/DMM.com



PA11, 12/都立産技研

- 材料拡大が着実に進行, PA6, PA66, PPS, PBT
- 東レのPPS造形が拡大 → DMM.com, 八十島



ナイロン6+GB/アスペクト社



PPS, PPS+GB/東レ



PPS+GB/アスペクト社



PBT/アスペクト社

アスペクト社の
高温造形機



小型装置 RaFaEl II 150-HT



PP1200: BASFの戦略製品



<https://www.prodways.com/en/material/pp-1200/>

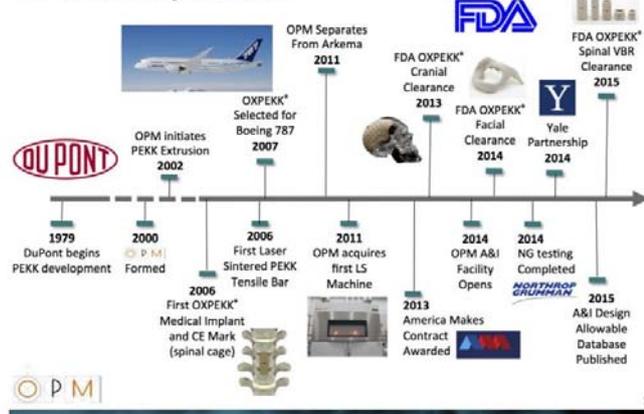
YNU PBF機のPEEK, PEKKの利用が加速

• PEEK



PEKK/OPM

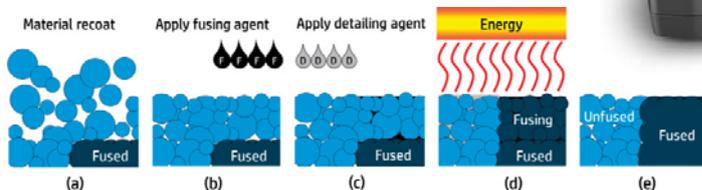
OPM Activity Timeline



EOS P810
PEKK用PBF機
リフレッシュレート:40%
造形サイズ
700x380x380mm
2本の70Wレーザ

YNU IJTとヒータによるPBF(HSS)が台頭

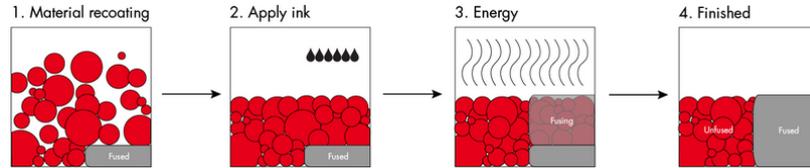
PA12粉末の例



HP Jet Fusion 4200シリーズ

<https://proto3000.com/service/3d-printing-services/technologies/hp-multi-jet-fusion-binderjet-3d-printing-services-mjf/>

- HP: 5200シリーズでPPパウダーのHSS造形開始
- voxeljet: 砂型のBJT機の専用機から
PPパウダーのHSS造形へ



<https://www.voxeljet.com/company/news/voxeljet-ag-expands-its-3d-printing-materials-portfolio-for-high-speed-sintering-hss/>



HP: 5200



voxeljet: VX200

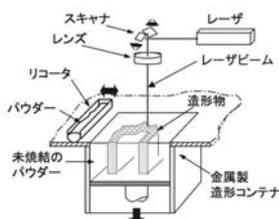
- Direct Manufacturing(直接製品) の拡大すすむ
- Tm-Tc温度差 → 造形可能温度域の制限を意識
- エンプラ → スーパーエンプラへの流れ
PA12 → PA6, PPS, PBT → PEEK, PEKK
- PEEK, PEKKなどは、航空機部品や医療用途として発展
- 材料の改良, 装置の改良, 造形方法の改良が進む
 - 低温造形も: 東大・新野ら、LSS GmbHのRAPTOR
 - IJT/ヒータのHSS機の急拡大
- PP材料の展開で自動車関連への応用展開も拡大
レーザ機, HSS機
- 廉価PBF機にも期待: Fromlabs Fuse1機, XYZ機,
SinterIt, Sintratecは装置を拡充

PBFによる金属3Dプリンティング

YNU 4.2 粉末床溶融結合法(PBF:レーザー)/金属造形



EOSINT M280/EOS

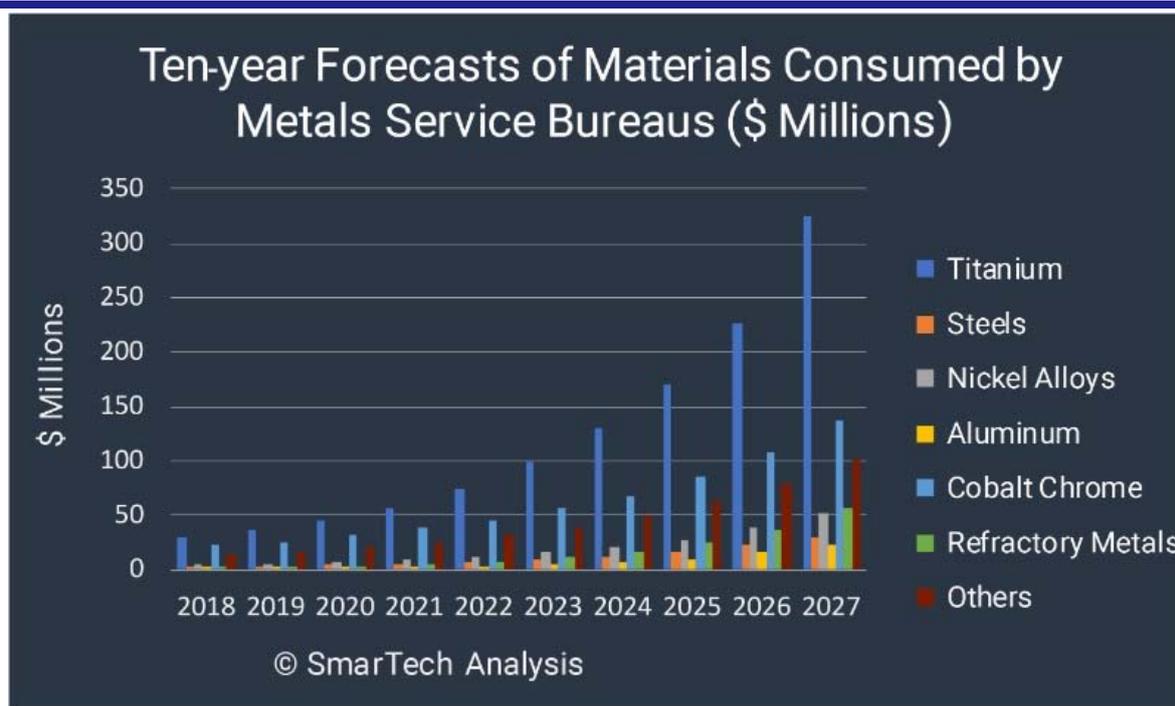


NTT-data エンジニアリング前田氏、
第4回AMシンポジウム資料より

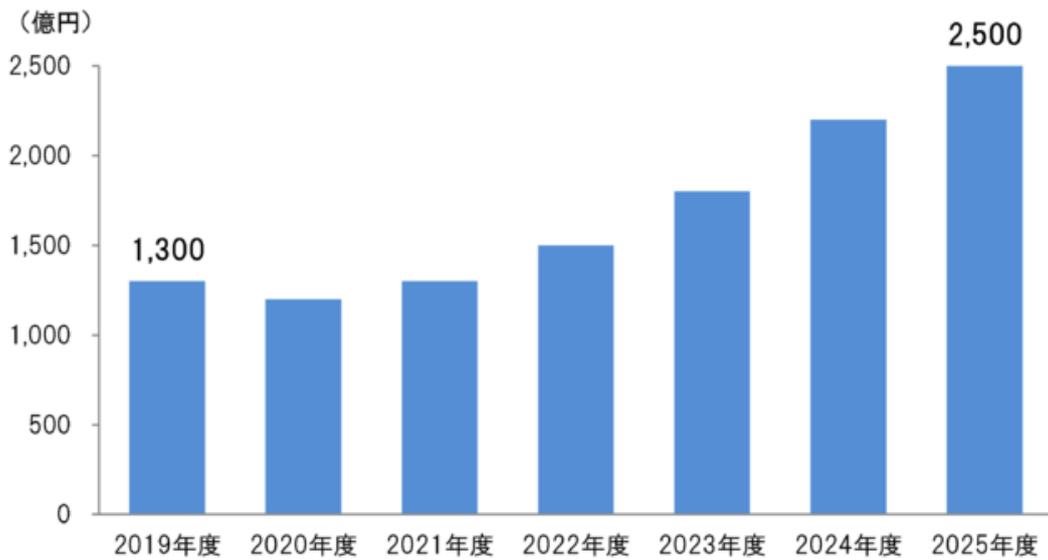
表3 レーザ焼結用金属材料 (EOS 社の場合) 素形材Vol56, 47(2013)

名称	成分	特徴	主な用途
Aluminium AL1Si10Mg	アルミニウム合金	優れた機械特性 (強度、硬度)、軽量	自動車、モーターレーシング、航空
CobaltChrome MP1	コバルト-クロム-モリブデン主体の超合金	優れた機械特性 (強度、硬度) 軽量、耐食性、耐熱性	タービン、医療用インプラント
CobaltChrome SP2	コバルト-クロム-モリブデン主体の超合金	生体適合性、歯科用に認証取得 (CE0537)	歯科用 (クラウン、ブリッジ等)
DirectMetal 20	ブロンズ主体	微細形状の再現性、速い造形速度 容易な後加工	小~中ロット射出成形金型 機能試験用試作部品
MaragingSteel MS1	マレージング鋼	良好な機械加工性 熱処理で 54HRC まで硬化	量産金型、アルミダイカスト金型 高機能部品
NickelAlloy IN625	ニッケル-クロム合金	高い引張り / クリーブ破断強度 耐食性、高耐熱性	航空、モータースポーツ 海洋関係、化学工業向け部品
NickelAlloy IN718	ニッケル-クロム合金	高い引張り / クリーブ破断強度 耐食性、高耐熱性	航空、モータースポーツ 海洋関係、化学工業向け部品
StainlessSteel GP1	ステンレス鋼 17-4/1.4542/SUS630	優れた機械特性 (強度、硬度)、延性	機能試験用試作品、小ロット部品 耐久性や延性の必要な部品
StainlessSteel PH1	ステンレス鋼 15-5/1.4540	析出硬化状態で 45HRC の硬度	機能試作部品、小ロット製品 強度と硬度が必要な部品
Titanium Ti64	Ti6Al4V 軽合金	軽量、高強度、耐食性、生体適合性、生体結合性	医療用インプラント
Titanium TiCP	純チタン	軽量、高強度、耐食性、生体適合性、生体結合性	医療用インプラント、工業用部品、熱交換器、医療機器

金属3Dプリンティング材料は



YNU 世界の金属3Dプリンタ市場予測



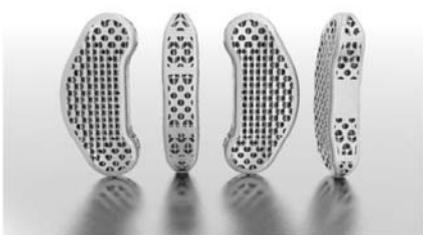
予測 日本能率協会2021.2.25

<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000027.000035568.html>

YNU インプラント作製例/PBF;EOS社

医療インプラント (生体親和性の向上)

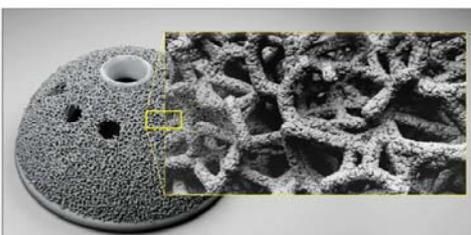
NTT DATA



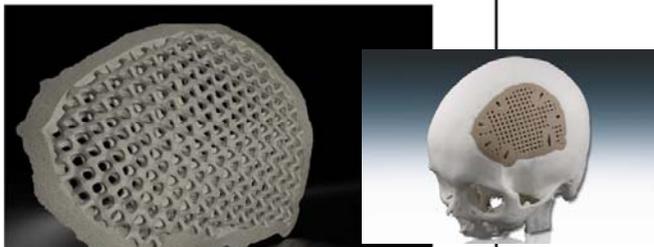
脊椎固定用インプラント



脛骨トレイ (膝関節インプラント)
・応力遮蔽の対策



寛骨臼 (かんこつきゅう、股関節の一部)インプラント
・骨の成長によるインプラントとの親和促進



頭蓋骨インプラント (PEEKによる造形)
・Custom-IMD project

Copyright © 2021 NTT DATA ENGINEERING SYSTEMS Corporation

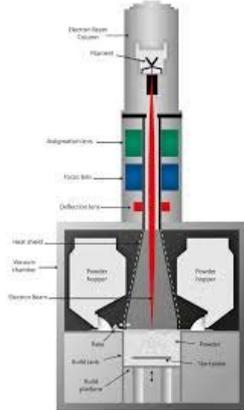
NTT-data エンジニアリング前田氏、第4回AMシンポジウム資料より



ARCAM Q10



航空機エンジン部品



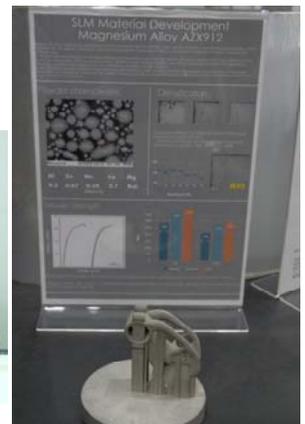
Cu/EOS



Cu/EOS



Cu合金/Arcam



Mg合金/EOS

2、市場動向：市場規模予測

2019年 NEDO 『TSC Foresight』セミナー (第3回)



TSC Nanotechnology & Materials Unit

- 航空機用途への実用化が開始、また一部の金型へ適用が進みつつある
- 今後製造現場への導入が増え、装置・材料・造形品共に市場の拡大が予測される。

装置/金属粉末/造形品 ごとの市場規模予測

	造形装置	金属粉末材料	造形品
現在	1,223億円(2017年)	110億円(2016年)	-
予測 (2030年)	6,500億円	5,000~6,500億円	約2兆円

造形品市場規模予測 (金属積層造形技術の寄与分のみ)

2030年予測市場規模

金額：金属積層造形プロセスを用いた造形部品市場、()内は各分野の全体金属製品市場規模



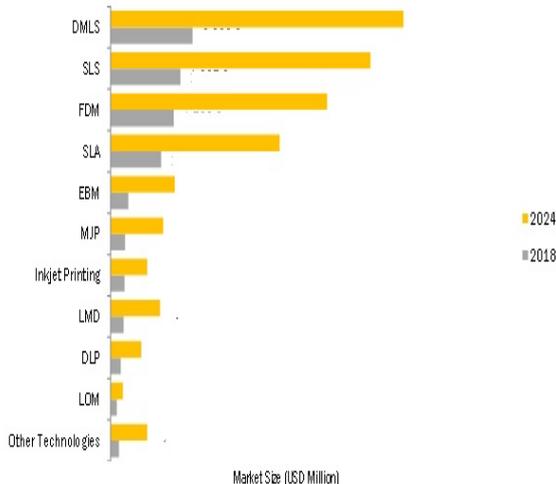
出典：各種市場規模予測データを基にNEDO 技術戦略研究センター作成 (2018)

6

YNU

粉末床溶融法(PBF)のまとめ

3D Printing Market Size, By Technology, 2018 Vs. 2024 (USD Million)

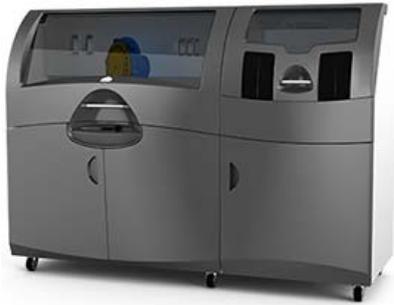


©2019 MarketsandMarkets Research Private Ltd. All rights reserved.

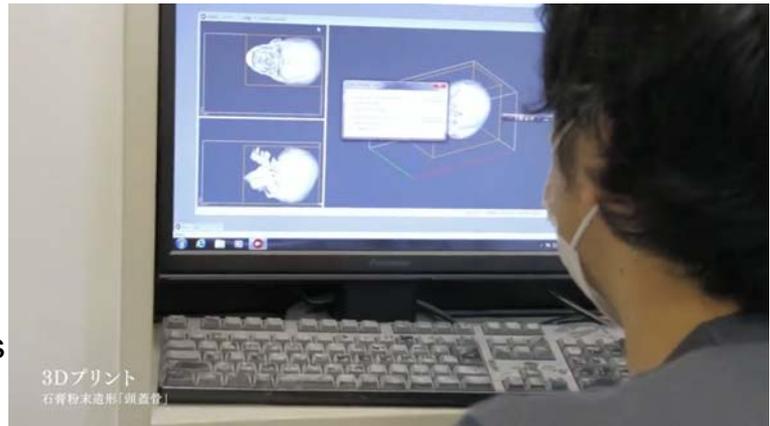
MarketstandMarkets Research Private Ltd. 2019

- PA12を中心に最終製品製造が拡大
- 自動車向けPPパウダーに熱い目(BASF)
- IJT/PBF機(HSS) ; HP, voxeljet、Stratasysも; レーザPBF方式と競合
- PEEK, PEKK, PPS等スーパーエンブラの造形拡大へ
- 装置の大型化・高速化、後処理の簡素化
- 低価格PBF機も充実
- 金属PBF機が大きく普及。
- 金属PBF機を追って、金属含有ワイヤ、金属含有ペレット、金属BJT機が続々台頭
- 金属造形は高性能な高付加価値製品を製造可能。業務の改善に繋がる。
- 金属造形はDXに好都合

5. BJT/石膏プリンタ



ProJet 660Pro/3DSystems



デザイン検証/ProJet

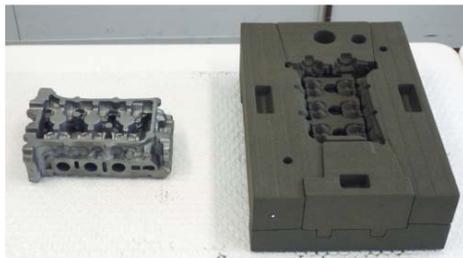


JMC



<https://www.3d-printout.com/system/inkjet/>

BJT/砂型プリンタ、鑄造例



ダイハツ/ExOne砂型



S-Max/ExOne



SCM-1800/シーメット

BJTによる金属造形の台頭

- 金属粉末をバインダーで固着し、形状を作成後脱脂しその後、焼結して金属製品を得るものでMIMと類似。Ceramic造形にも応用可。
- ExOne, Desktop Metal, Digital Metal, HP, GEなど



Production System P-50 / Desktop Metal

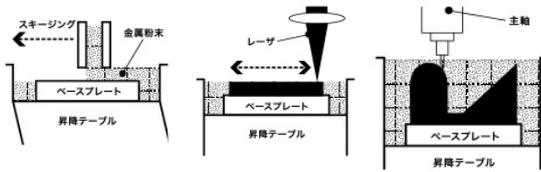


X1 160Pro/ExOne

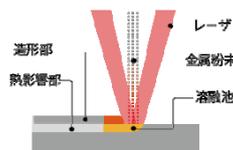
ExOneの造形例

Hybrid 3D Printing

- 金属PBF + 切削: 松浦機械

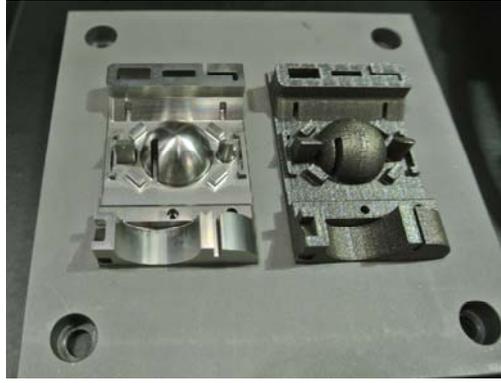


- DED + 切削: DMG/MORI, MAZAKなど



- MEX + 切削: 榎本工業, タイタン・ロボティクス



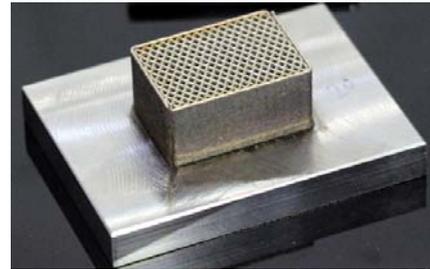


松浦機械 LUMEX Avance25造形物

MAZAK: インテグレックスi 200sAM造形
<https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00369787>

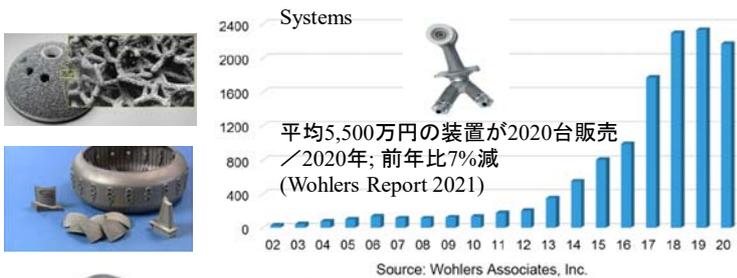


ソディックOPM機造形物



OKUMA: MU-6300V LASER EX造形
<https://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1611/18/news051.html>

金属3Dプリンティングが隆盛、だが頭打ちに



そして、今後は:

1. 金属代替
 - 樹脂造形物の高性能化、エンプラ化、スーパーエンプラ化
 - 複合材料、コンポジット材料
2. セラミック造形
3. バイオ3Dプリンティング



YNU 新AM法の出現や改良が急速に進む

1. 金属造形

- MEX機で金属造形技術の台頭(Markforged, Desktop Metal)
- BJTで金属造形(Desktop Metal, ExOne, HP, Stratasys 他)
- SPEE3D (金属粉末の超速度吹付)が生産機を発表



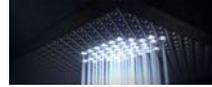
BASF/PP Powder



HP/Metal Jet

2. 粉末床熔融造形(PBF)

- PPS, PEEK, PEKKなどのスーパーエンブラ
- フッ素樹脂PFAの技術が確立(ダイキン)
- 自動車向けPP粉末も大きな市場と予測(BASF)
- ダイオードレーザ100万個配置の高速機(Laser Profusion/EOS)



INTAMASYS/PEEK



SPEE3D

3. 材料押し出し(MEX)

- 廉価版PBF機の高性能化(SinterIt, XYZ, Formlabs など)
- MEX普及機でスーパーエンブラ造形の大衆化
- 超高速MEX機が本格稼働 (Essentium HSE)



ExOne/Metal

4. セラミック造形

- BJTでの材料拡大
- MEXでセラミック造形 (NANOe)
- 光硬化性樹脂でセラミック造形の普及 (3D Ceram-Shinto, Lithoz, Adomatec)

5. シリコンの造形(シーメット, Wacker, 東レ・ダウ他)



ダイキン/PFA



Markforged Metal X



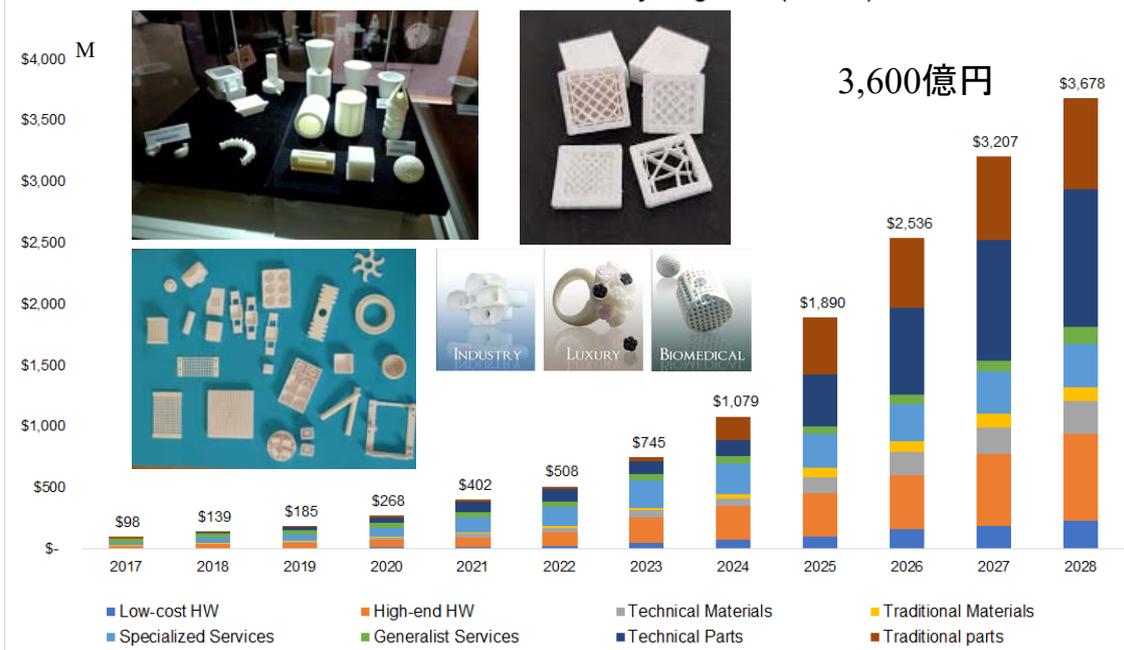
voxeljet/Ceramic 3D Printing



Essentium HSE

YNU セラミック3D造形が今後急成長と予測

Ceramics AM: Total Market Forecast by Segment (\$USM) 2017 - 2028



SmarTech Publishing expects the ceramics AM market to generate upwards of \$3.6 billion by 2028, driven by application revenues and hardware revenues. Source: *SmarTech Publishing*



3D Ceram/Ceramaker
 ・ ペースト状樹脂をUVレーザーで硬化



LITHOZ/CeraFab7500
 ・ 高粘度樹脂をDLP方式で硬化

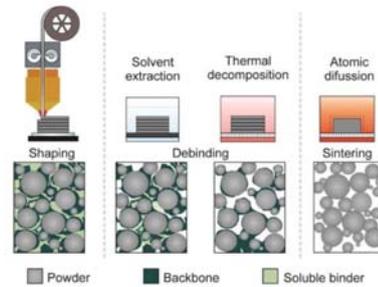


ADMATEC/Admaflex 130
 ・ PETフィルム上で硬化



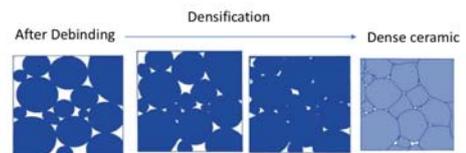
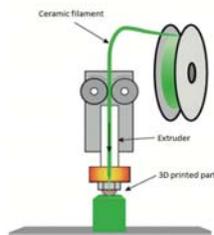
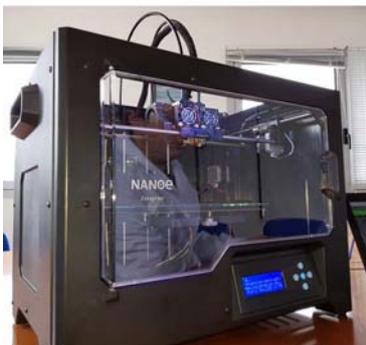
Formlabs/Form2

Zetamix process



Typical density after sintering: 99% for ceramic, 90 to 95% for metals

Going from 50 – 60 % green density to 90 – 99% sintered density implies a linear shrinkage of 15 – 20%



YNU 複合材料の3D造形で最終製品へ

- セラミック入り光硬化性樹脂(VPP)



3DSystems/Accura Bluestone

- CF入りMEX材料

- CF 入りNylon12, CF入りPP, NylonX, CARBONX
CF入りABS, その他GF入りPP

- CF入りPBF・PA12材料

- EOS Carbomide, Windform



NylonX



Nylon CF

- MEXで長繊維を積層

- Markforged/Nylon/CF
– Anisoprint



Nylon/CF



Windform

- CF不織布を積層 (SHL方式)

- Impossible Objects, SELCOM1



Anisoprint造形物



Impossible Objects造形物

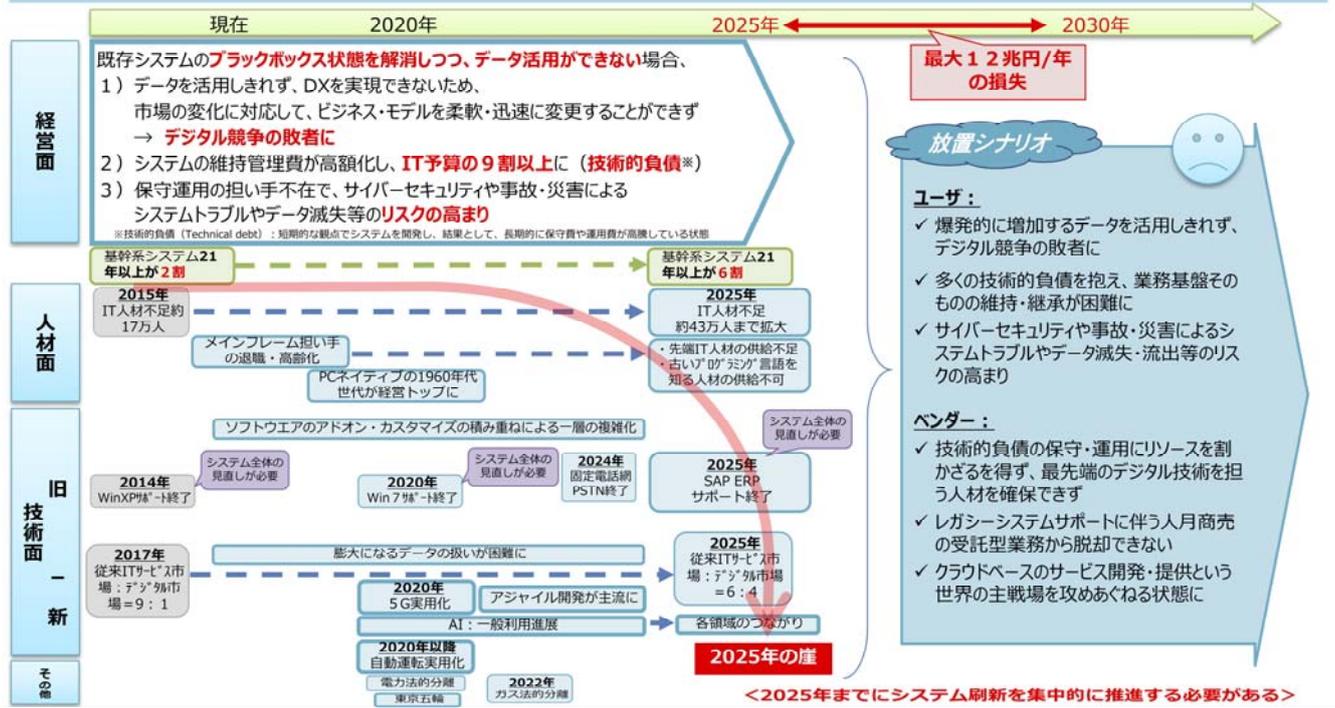
DfAMとDXを考えてみる

3Dプリンティング(AM)は
デジタルデータによるものづくり

2025年の崖 (2018年9月経産省DXレポート)

多くの経営者が、将来の成長、競争力強化のために、新たなデジタル技術を活用して新たなビジネス・モデルを創出・柔軟に改変するデジタル・トランスフォーメーション(=DX)の必要性について理解しているが...

- ・ 既存システムが、事業部門ごとに構築されて、全社横断的なデータ活用ができなかったり、過剰なカスタマイズがなされているなどにより、複雑化・ブラックボックス化
 - ・ 経営者がDXを望んでも、データ活用のために上記のような既存システムの問題を解決し、そのためには業務自体の見直しも求められる中(=経営改革そのもの)、現場サイドの抵抗も大きく、いかにこれを実行するかが課題となっている
- この課題を克服できない場合、DXが実現できないのみでなく、2025年以降、最大1.2兆円/年(現在の約3倍)の経済損失が生じる可能性(2025年の崖)。



© Tsuneo HAGIWARA

YNU

「2025年の崖」のその後

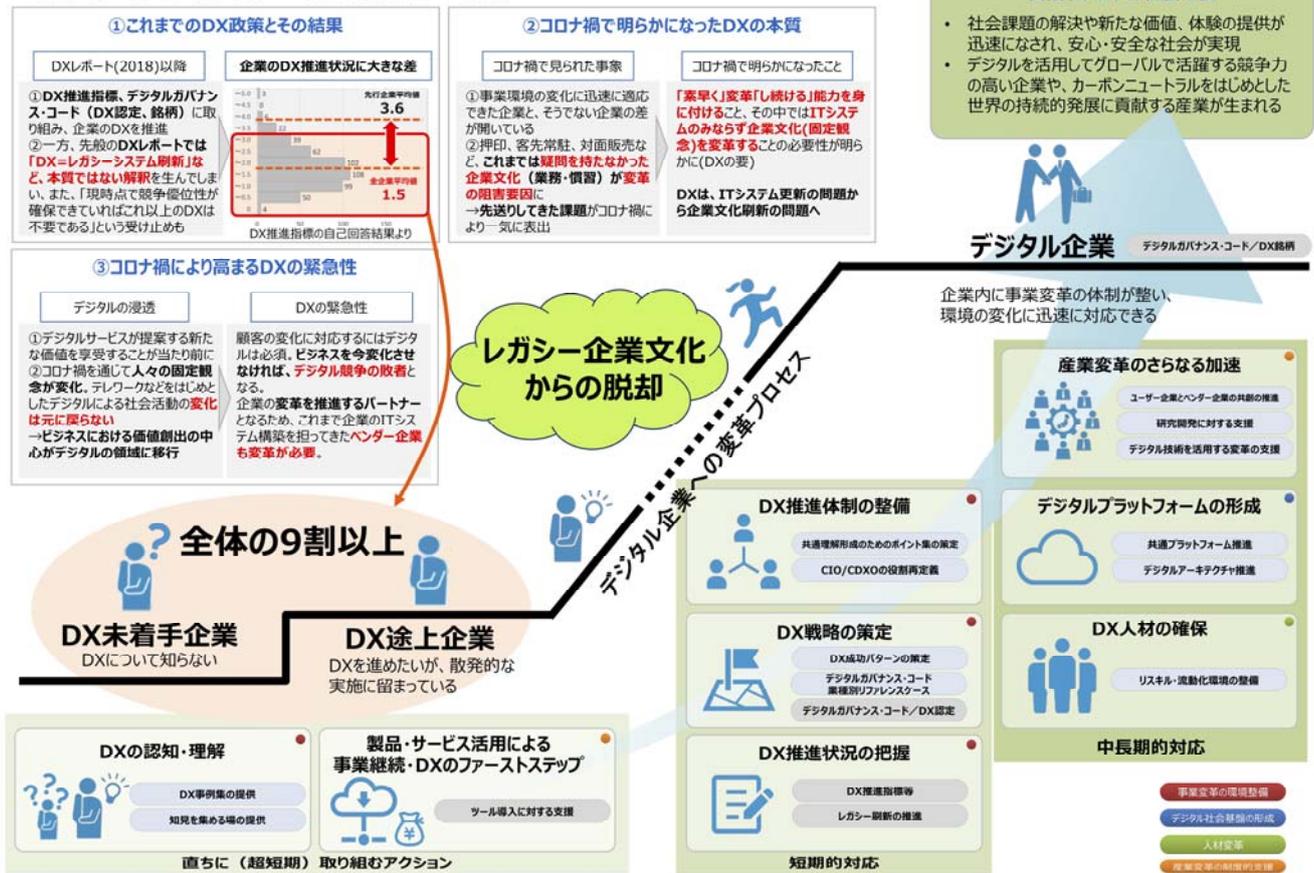
- ・ 競争力維持・強化のために、デジタルトランスフォーメーション(DX)の推進が求められる。
- ・ 「レガシーシステムの抱える問題解消のためには、2025年までにシステム刷新を集中的に推進する必要がある」
- ・ 「ITシステムの刷新のみならず、企業文化を変革することが、DXの本質」
- ・ 日本企業の9割以上が「DX未着手」か「散発的な実施のみ」の現状
- ・ 老朽化・複雑化・ブラックボックス化した既存システムが、DX推進の障壁となっている。

<https://diamond.jp/articles/-/266922>

© Tsuneo HAGIWARA

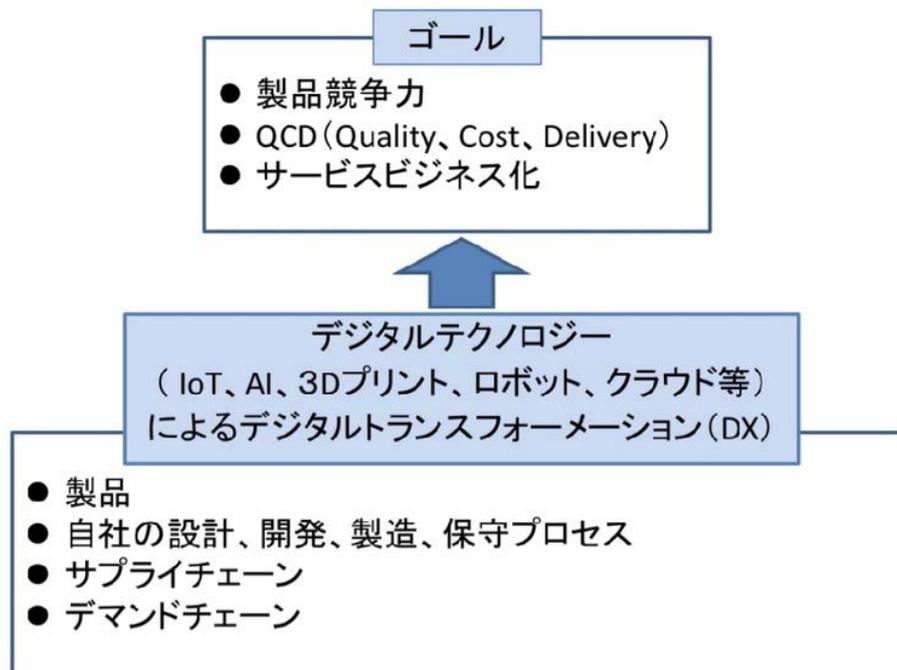
72

DXレポート2のサマリー（DX加速シナリオ）



YNU

製造業におけるDXのゴール



大和 敏彦 (ITi代表取締役) 2018年5月21日

「工場」は生産力の礎となる大発明であり、ものづくりを発展させるイノベーションの源だった。しかし、ひとつの拠点でつくれるものは限られており、設備投資にコストがかかる。

一方、実用化が始まった「新たな3Dプリント技術」では組立ラインが統合され、サプライチェーンは短縮され、量産品も個別にカスタマイズできる。

元『MITテクノロジーレビュー』編集長兼発行人のJASON PONTINIによる、

「未来の生産現場」より

WIRED 2018.09.27

利点は

- 性能分析や軽量化。
形状の確認にとどまらない、設計支援ツールへ
- プレゼンテーション効果を高め、商談もスムーズに
- 強く、精密な型を、3Dプリンターで。
従来工法の枠を超えた、多彩なツーリング。
- 治具や検査器具、搬送資材など、自在に広がる活用法
- 品質の安定、コストカット、高付加価値化。
3Dプリンターによる一体化、省パーツ化の効能。
- 保守パーツのデータ管理による無駄のカット。

YNU DXとAfAM

- DXとは「データやデジタル技術を使って、顧客視点で新たな価値を創出していくこと」
- DXと3DPrintingの関連
 - パーツの3D CADデータだけを通常管理し、必要な時にそこから3Dプリントする(デジタル在庫)。
 - 「デジタル在庫」用の3Dプリンタを選ぶということは、「最終製品用の3Dプリンタを選ぶ」。
- DfAM:
 - Design for Additive Manufacturing(DfAM)の考え方のもと、関連部品全体を3Dプリンタ用に改訂する。
トポロジー解析が手始め。

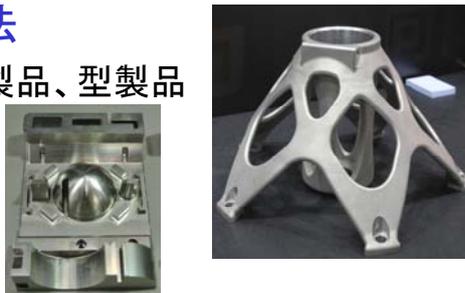
積層技術(略称)	材料	特長	課題	DfAMから造形物は	DXの視点で
液槽光重合法 (VPP)	光硬化性樹脂	高精度、高精細	材料の物性が不足 長期信頼性不足	△	△~○
材料噴射法 (MJT)	光硬化性樹脂 (ワックスなど)	比較的簡易 多彩な表現	材料の物性が不十分 長期信頼性不足	△	△~○
材料押出法 (MEX)	ABSから スーパーエンブラ	簡易 実部品も可	造形精度 物性の異方性に難	○~◎	◎
粉末床溶融法 (PBF)	PA12, PP粉末、 金属粉末	高機能性試作 実部品	材料が限定 装置が高価	◎	◎
結合剤噴射法 (BJT)	石膏粉、砂、金属粉 樹脂バインダー	高速、フルカラー 金属鑄造、 MIM系技術	材料の限定 金属造形物の精度	△~○	○~◎
シート積層法 (SHL)	紙、プラスチックシート、 金属シート	簡易 フルカラー	造形物形状に制限 (オーバーハング部)	×~△	△
指向エネルギー堆積 (DED)	金属粉末、 金属ワイヤ	高速、 肉盛溶接的	造形精度 装置が大がかり	○~◎	△~○
ハイブリッド	金属粉末 熱可塑性樹脂ペレット	精度向上のために 切削をプラス	造形コストと生産性	◎	◎

YNU DfAMのための3DP材料について

- 材料押し出し法(MEX)
 - PEEK, PEIなどスーパーエンブラ
 - CFRPコンポジット
 - PA-CFコンポジット
- 粉末床溶融法(PBF)
 - PA12とその複合材料, PP, 金属粉末
- Hybrid法
 - 金属製品、型製品
- 液槽光重合法、材料噴射法
 - 材料開発次第で今後期待



ストラタシスFDM造形物



トポロジー解析モデル:2017/1/20 3DPrinter展



3Dプリンティングの今後の展望

- 金属造形が大きく伸びてきたが、鈍化、今後は金属からプラスチックへと展開が開始
- 最終製品を目指したVPP用樹脂開発に期待
- 樹脂造形(PBF, MEX)では高付加価値のスーパーエンブラの利用が加速
- 高速焼結(HSS=インクジェットとヒータ)が今後更に拡大しDXの担い手に
- **低価格MEX機で多材料が利用可能、PEIやPEEK等で特殊部品の製造に展開。**
- **MEXの大型、高速造形機が次々に出現、ダイレクトペレットMEX機にも期待(樹脂コンパウンドで高性能化=DfAM, DXとの相性良好)**
- CFRP 3Dプリンティングが大きな伸び; 高性能な最終製品への近道
- セラミック3Dプリンティングにも今後大きな伸びが予想される。



EOSINT-P 810/EOS
PEKK用PBF機



PEKK/OPM社



PEEK/Victrex社



PEEK材料押出し(MEX)



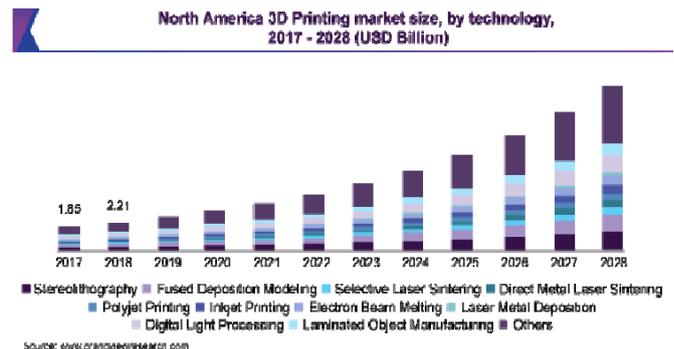
ROBOZE +400



HP 5200s



3Dプリンティング市場の予測は



北米市場の予測

Grand View Research, 2021

世界市場と予測

- 2020年1.37兆円市場 (Wohlers Report2021)
- 2025年には2兆円市場 (formnext2019)
- 2027年には6兆円の市場に(Smithers Pira)
- 2026年には6.9兆円(Mordor Inteligence, 2020)
2021→2026 約30%成長予測
- IDTechEx: 2030年には材料だけで4.7兆円を予測

- AM(3DPrinting) はコロナ禍でも着実に発展
 - コロナ収束後はDX, DfAM、サプライチェーン確保で今後急速回復に期待
- AM(3DPrinting)装置の(超)高速化・大型化・高性能化・自動化が進行
- **最終製品をAMで製造へ**
 - 金属のAM造形が大きく発展、航空機部品や医療用インプラント
 - PEI, PEEKなどのスーパーエンブラ; 航空機部品、医療用インプラント
 - セラミック造形やCFRP複合材等の造形が発展
 - **液槽光重合法も再び注目(高速DLP機の発展で最終製品へ)**
- AM(3DPrinting)でDXの牽引に期待: 今後は自動車産業も含めた全産業を対象に発展
- AM(3DPrinting)は医療・歯科への応用は着実に進行中
- 2020年代半ばに材料市場は5,000億円を予測 (2020年: 2,200億円)
 - 幅広い積層材料、CFRP複合材、スーパーエンブラの利用が加速
 - **DfAM, DXへには造形材料のより一層の研究開発が必要**

ありがとうございます。

質問・コメント歓迎

萩原恒夫 (HAGIWARA, Tsuneo)
E-mail: ts.hagiwara@gmail.com

<http://www.thagiwara.jp>