

3Dプリンティングの新技术・新材料

横浜国立大学 成長戦略研究センター 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

2019年06月19日

E-mail:ts.hagiwara@gmail.com



© Tsuneo HAGIWARA

June 19, 2019@YNU

目次

1. 概要
2. 3Dプリンティングの最新動向
3. 今後の展望
4. まとめ

- 2012年からの3DPブームは一度落ち着いた後、着実に発展
低価格機: 2018年は59万台出荷、累計300万台へ
- 装置の(超)高速化・大型化・高性能化が進行
- 新規な造形方式も多数出現
- 金属の3D造形が続伸; 航空機部品を中心にますます発展
- スーパーエンブラ、セラミック、複合材(CFRP)などの3DPが発展
 - 2028年にはセラミック3DP市場が3900億と予測
- 液槽光重合法も再び注目
 - 最終製品を目指す高耐熱・高靱性樹脂の開発が進行
- Mass Customization, IoT, Industrie 4.0, Society 5.0から直接製造が発展
 - 航空機産業で3DPの実用化進む。今後は自動車産業も視野
- 造形材料の開発で、3DPの応用がますます拡大すると推定
- 近い将来3DPは製造業の中心に位置するものと期待
- 医療・歯科への応用は着実に進行
 - Bio3DPにも今後要注目

3D プリンティング(AM法)一覧

積層技術	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	感光性樹脂	LASER, LED	高精度、高精細 大型、	試作
粉末床溶融 結合法(PBF)	Powder Bed Fusion	粉末焼結法, SLS, SLM, EBM	PA12粉末、金属粉	LASER, 電子線	実部品(PA12粉, 金属粉)	試作 製品
材料押出法 (MEX)	Material Extrusion	溶融樹脂積層法, FDM法, FFF	ABS, PCなど	熱	簡易, ABS～スー パーエンブラ	形状確認 高性能試作
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
材料噴射法 (MJT)	Material Jetting	PolyJet法, MJM法など	感光性樹脂 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 鋳造
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(DED)	Directed Energy Deposition	LENS法, DED法	金属粉末	LASER	金属	金属部品
ハイブリッド	Hybrid		金属粉末	LASER + 切削	精度・表面	金属製品 型

ASTMでは7分類、最近ではハイブリットを含めて8分類へ

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

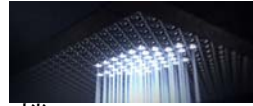
1. 金属造形

- 材料押し出し(MEX)機で金属造形
- バインダーージェットティング(BJT)で金属造形
- 光硬化性樹脂で金属造形
- SPEE3D (金属粉体の超速度吹付)



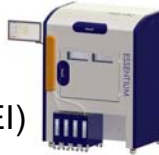
2. 粉末床溶融造形(PBF)

- PEKK専用機
- 100万個配置のD-Laser, 超高速PBF機
- 廉価版PBF機 多数出現; 普及に弾み



3. 材料押し出し(MEX)

- MEX普及機でスーパーエンブラ(PEEK, PEI)
- 10倍速MEX機誕生(EssentiumHSE)



4. 高耐熱・高靱性光硬化性樹脂への挑戦

5. セラミック造形

- BJT, MJTやMEXでセラミック造形
- 光硬化性樹脂でセラミック造形



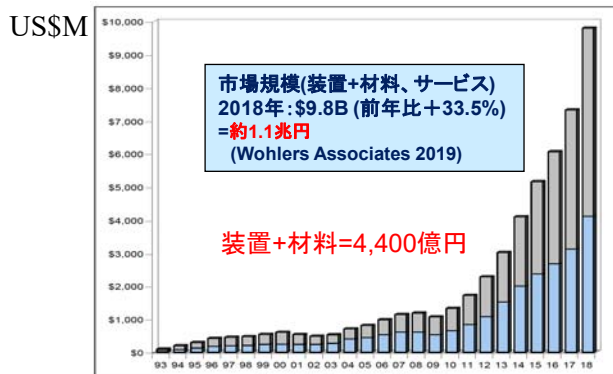
6. その他

- HPのMulti Jet Fusionのカラー化、多材料化
- シリコンの3D造形(3M, 東レ・ダウ他)
- フッ素樹脂(PTFE, PFA, PVDF)の3D造形

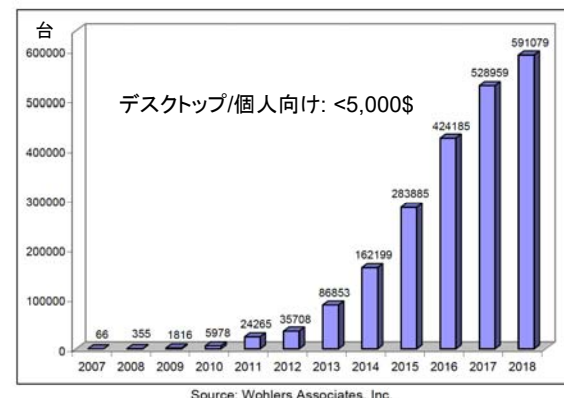
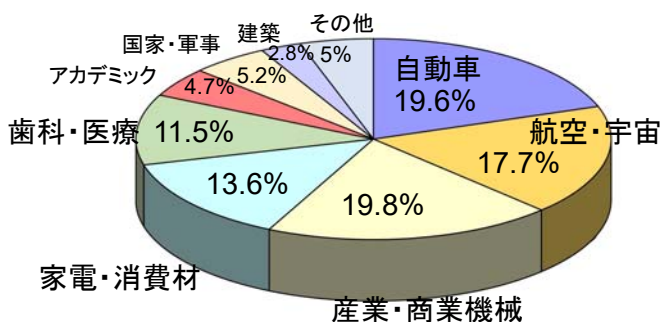


5

市場の伸びは? (Wohlers Report 2019)



■ : サービス ■ : 製品(Products)
2次製品である型、成形物、鋳造物を含まない



Wohlers Report2019(2019年3月版):

2018年の3D Printer市場: US\$9,800M = 1.1兆円
産業用:19,285台

Personal 59.1万台;

サービス US\$5,673M = 6,300億円

材料のみ US\$1,495M = 1,660億円

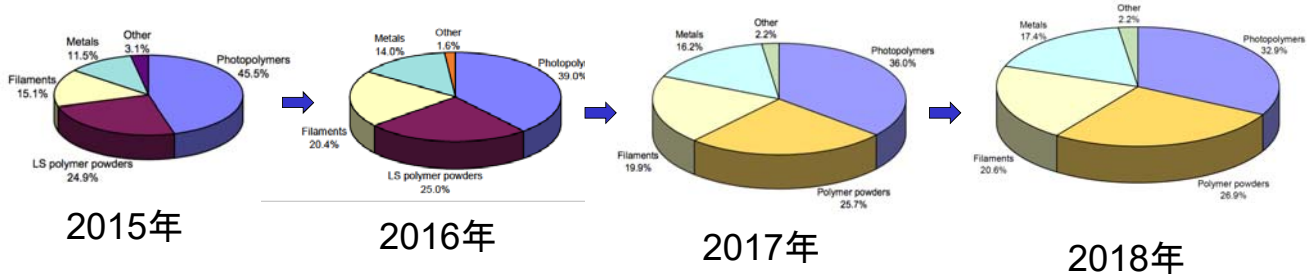
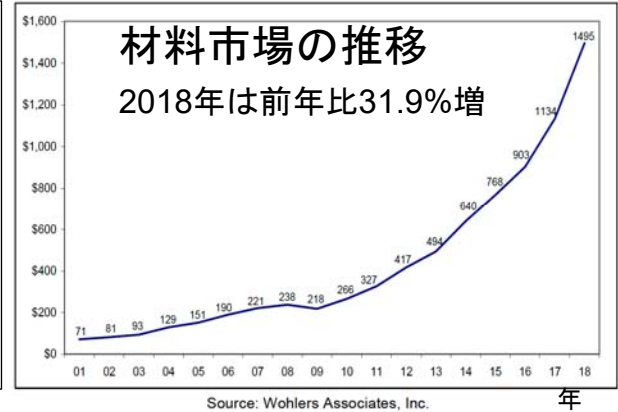
光硬化性樹脂: US\$492M 550億円 (33%)

粉末床溶融材料: US\$402M 450億円 (27%)

金属粉末材料: US\$260M 290億円 (17%)

溶融押し出し(FDM)材料 US\$308M 335億円 (21%)

その他; 石膏粉末など: US\$ 33M 35億円 (2%)



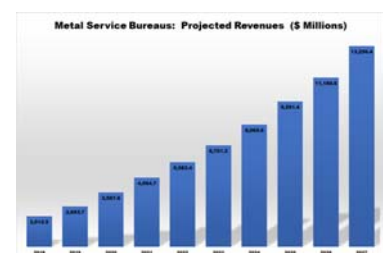
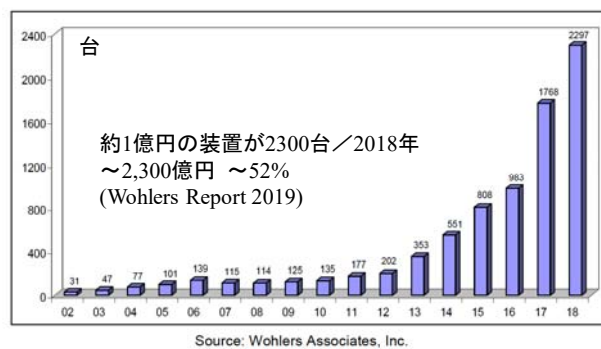
7

© Tsuneo HAGIWARA

今、どんな状況か?

金属3Dプリンティングが隆盛

2027年には\$13,300M



SmarTech report (2018)on Metal 3D Printing

そして、今後は:

1. 金属代替

- 樹脂造形物の高性能化、スーパーエンブラ化
- 複合材料、コンポジット材料

2. セラミック造形

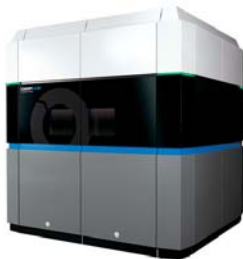
3. バイオ3Dプリンティング

8

© Tsuneo HAGIWARA

金属造形の動向は？

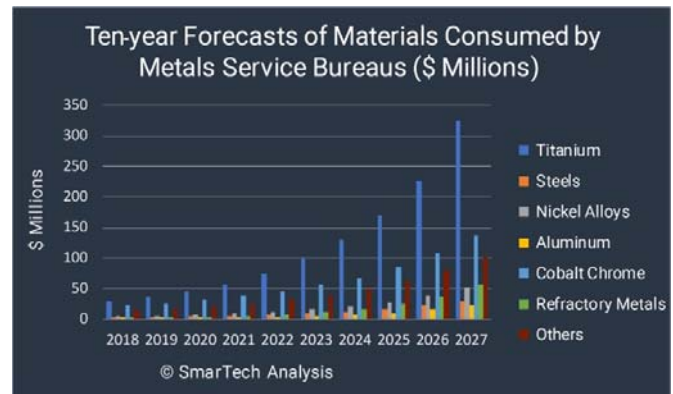
1. 金属PBF機の高速化、大型化が進む。廉価機も。
2. 新規金属造形法が次から次に出現
 - SPEE3D (金属粉体の超速度吹付)
 - 材料押出し(MEX)機で金属造形
 - バインダーージェットティング(BJT)で金属造形
 - 光硬化性樹脂で金属造形
 - 今後も新しい造形方式の出現が予測
3. 金属材料の予測推移は？



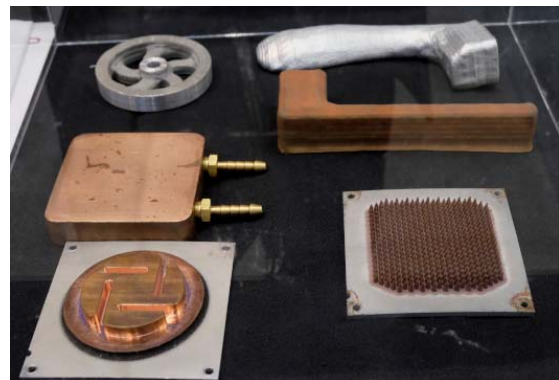
GE Additives; A.T.L.A.S.
Table size: 950x810x300mm



XACT metal



SPEE3D/音速金属吹きつけ方式



Printed on
LightSPEE3D high
speed metal printer

Part cost
Champion mode
¥2375
Production mode
¥1360

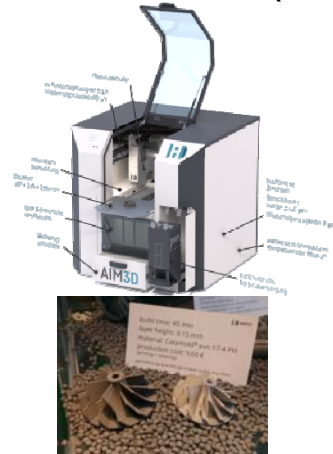
Printing time
Champion mode 15m
Production mode 4.5m

CPU watercooling block

- Desktop Metal
- AIM3D
- Markforged
 - MIM(Metal Injection Molding)市場を視野
 - 樹脂バインダー金属(ワイヤ, ペレット)



Desktop Metal

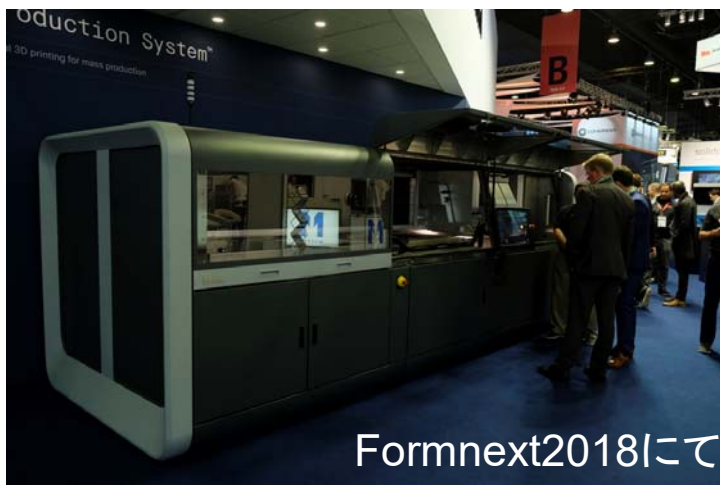


AIM3D



Markforged

11



Formnext2018にて



- BJTで金属造形し、脱脂、焼成
- MIM分野
- サポート界面に工夫(セラミック)
- H13 tool steel , Cuなど



12

HPのMetal Jetプリンター(BJT)



Formnext2018にて



© Tsuneo HAGIWARA

Stratasys/金属造形(BJT)の提案



金属粉末(アルミや鉄)を敷き、層全体を押圧後造形物の周囲となるところにバインダーを塗布して造形。造形後は脱脂、焼成

Liquid metal 造形システム、Xeroxが買収



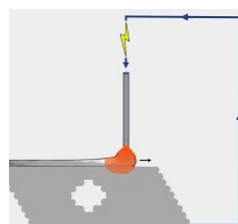
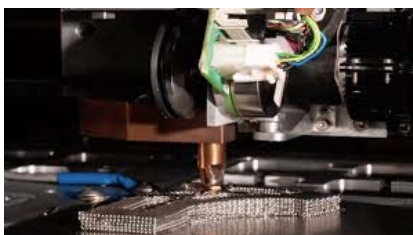
15

© Tsuneo HAGIWARA



特徴:

1. 高速
2. 金属材料が安価
3. 広範囲の金属
4. 装置が単純で信頼性が高い



- ・ 金属ワイヤに電流を流して溶かして積層。PBFの高価な金属粉末が不要、
- ・ 金属MEX

16

© Tsuneo HAGIWARA



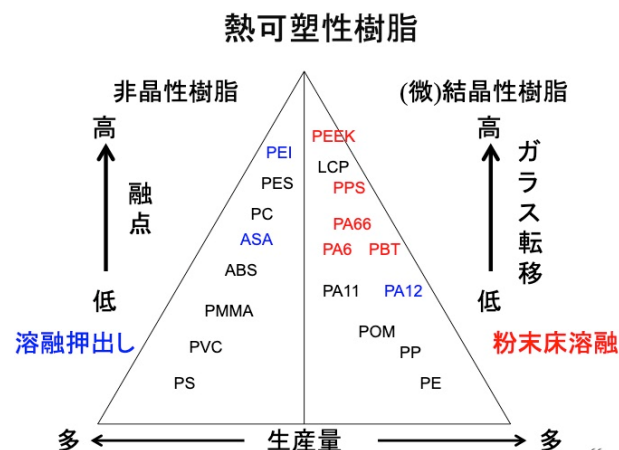
- ・ 水性スラリーを圧送
- ・ 2ステップで複雑で頑丈な金属部品を3Dプリント
- ・ 高速、簡単
- ・ 脱バインダーが不要

17

© Tsuneo HAGIWARA

粉末床熔融造形(PBF)では？

1. スーパーエンブラのPBF造形; PEEK, PEKK, PPS, PBT など
2. PEKK専用機の発売; EOS P810機
3. 100万個のDiode-Laser配置の超高速PBF機
4. PBF機で医療向けセラミック(HAp)造形も



18

© Tsuneo HAGIWARA

YNU PPS/CF, PPS/GB, PBT/アスペクト



PPS+CF



小型装置 RaFaEl II 150-HT (アスペクト)



PPS+GB, PPS+CF



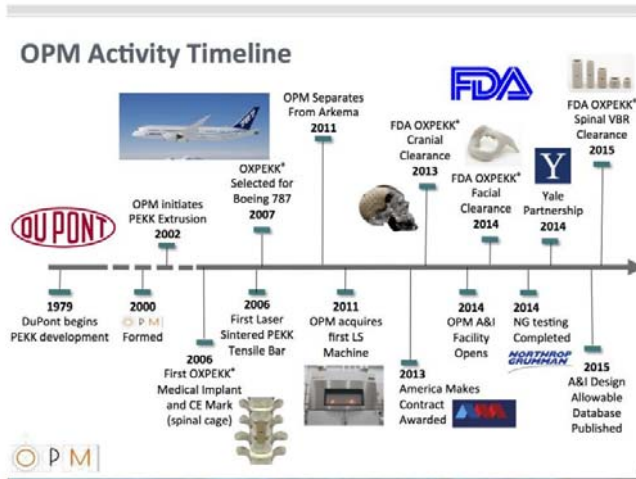
PBTの例

YNU PBF機のPEEK, PEKKの利用が加速

• PEEK



PEKK/OPM



PEKK用PBF機
EOS P810

ボーイング社と共同で開発, PEKK: OPM社製

HT-23: CF強化PEKK素材、航空・宇宙向け

リフレッシュレートは40%

EOSINT P810: 700x380x380mm造形サイズ

2本の70Wレーザー:



https://www.eos.info/systems_solutions/eos-p-810

21



100万個のDL, 5KW, 10倍の高速造形

22

低価格PBF機が次々に登場



Sharebot(伊)



Norge (英)



SintraTech (ポ)



Formlabs/ Fuse1 (米)



SinterIt(スイス)



23

材料押し出し(MEX)の話題は?

1. 廉価版MEX機の高性能化
2. MEX普及機でスーパーエンブラ(PEEK, PEI, PA/CF)
3. 10倍速MEX機誕生(Essentium HSE)
4. ペレットを用いるダイレクト造形
5. 低価格MEX機でフルカラー (MEX + インクジェット)

Stratasys: PEKK系,高性能熱可塑性樹脂
(Antero 800NA)

XYZ: da Vinci Color

24



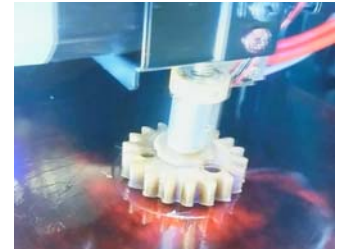
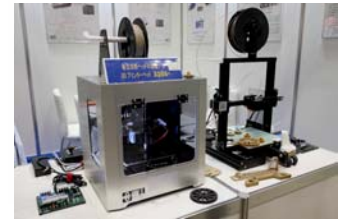
Apium (IBINDEMA TEC)



ROBOZE ONE +400

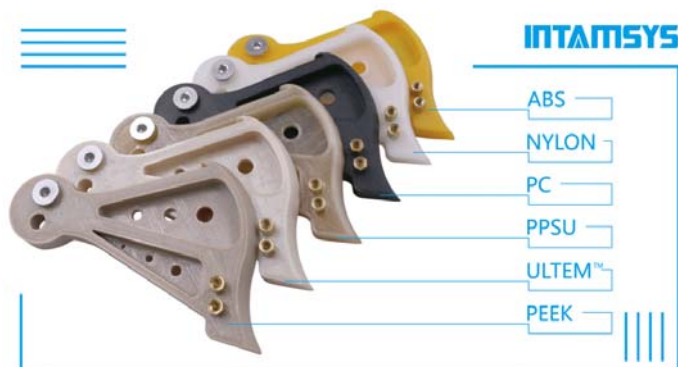


VSHAPER One Pro



AFIT社
500℃高温ヘッド開発
PEEK用
TCT2019Tokyoにて

25



10倍高速MEX機/EssentiumHSEの出現



Essentium 180-S



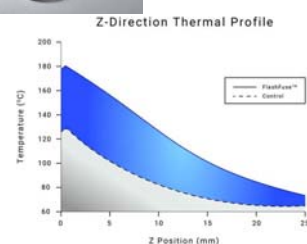
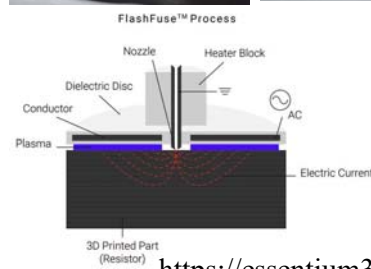
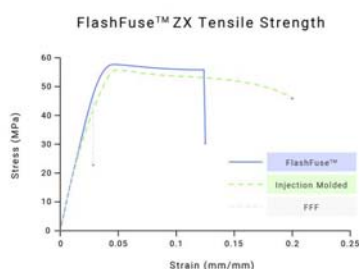
Metal US\$170



TPU US\$95



PEEK US\$170



<https://essentium3d.com/pages/flashfuse> 27

© Tsuneo HAGIWARA

樹脂ペレットを直接造形(大型造形)へ



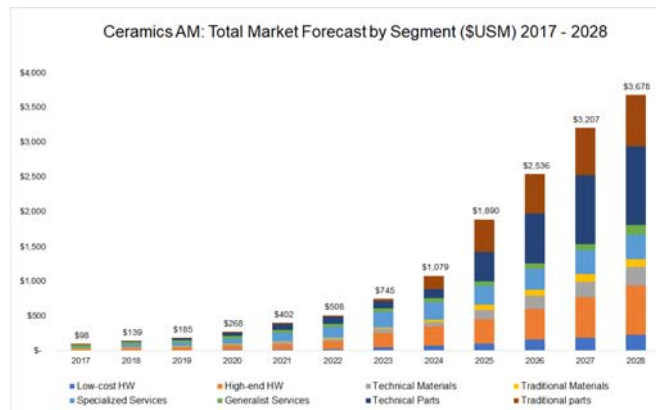
ExtraBold社: エスラボと共同で超大型機をDMS2018で展示(ペレット溶融積層方式の国産3Dプリンタ)

エスラボ: 1時間で3kgのペレット出力に対応したペレット溶融積層方式の国産3Dプリンタ「GEM444」

<https://twitter.com/unosuke>

YNU セラミックの3D造形が今後大きく発展

1. BJTでセラミック造形
2. MEXでセラミック造形
3. 光硬化性樹脂でセラミック造形
4. PBFでセラミック造形



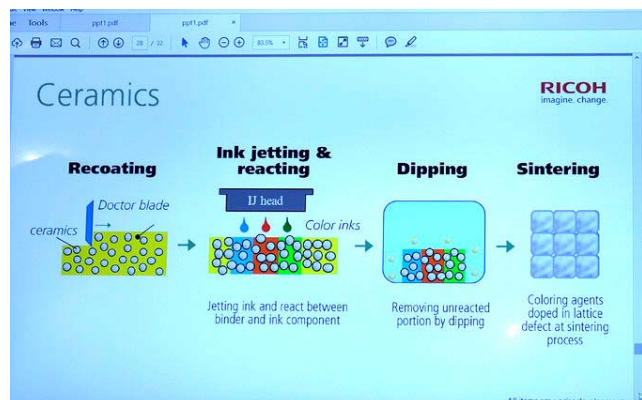
SmarTech Publishing expects the ceramics AM market to generate upwards of \$3.6 billion by 2028, driven by application revenues and hardware revenues. Source: SmarTech Publishing

29

© Tsuneo HAGIWARA

YNU

BJTでセラミック造形



WZR Ceramic Solutions GmbH



RICOHの研究開発

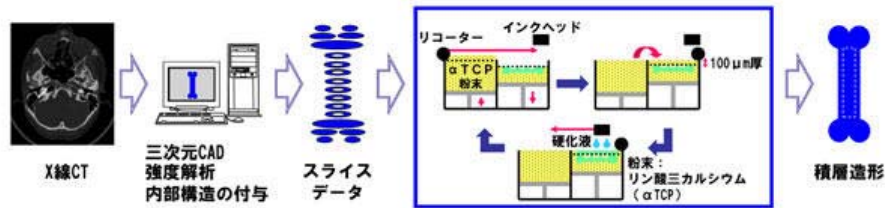
30

© Tsuneo HAGIWARA

YNU 結合材噴射型3Dプリンターで「人工骨」

2018年4月17日に厚生労働省より製造販売承認を取得。5月より販売開始

CTデータに基づいた3D ink-jet printerによる積層造形



ヒト臨床試験: 顎骨発育不全による顔面非対称の26歳女性



世界初
同化する
3Dプリント人工骨

<http://makerslove.com/19763.html>

<http://www.tetrapod.t.u-tokyo.ac.jp/sakai-tei/research.html>; 東大/理研 → Next 21

31

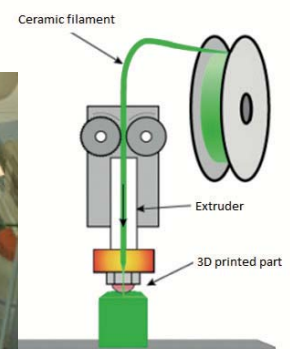
© Tsuneo HAGIWARA

YNU 材料押し出し(MEX)でセラミック造形



WZR Ceramic Solution

Renbach, Germany
<http://www.wzr.cc>



Nanoe

32

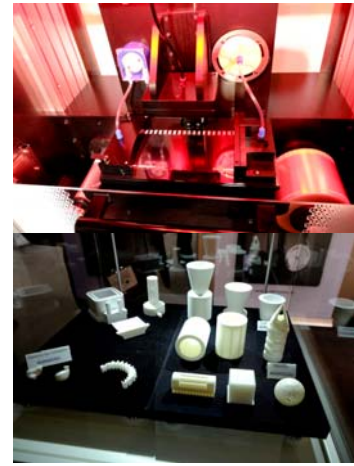
© Tsuneo HAGIWARA



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 1300
・ PETフィルム上で硬化



Formlabs/Form2

33



SZ-1000, 300x300x50mm
250mW, 355nmレーザー



切頭八面格子(ラダー構造)



グラファイト構造



ラティスパイプ



人工骨(ファントム)

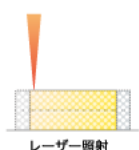
4

造形物作成(造形工程)

造形機で各層毎にスラリー材料を塗布し、
レーザーを照射し 3D 造形物を作成します

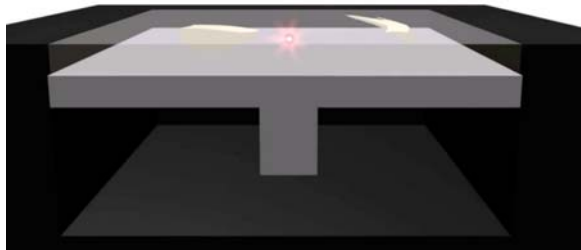
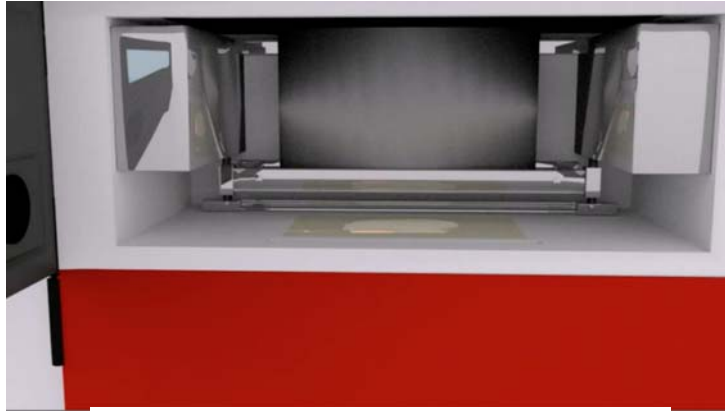


材料塗布

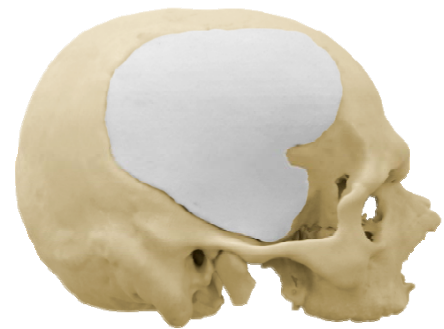


レーザー照射

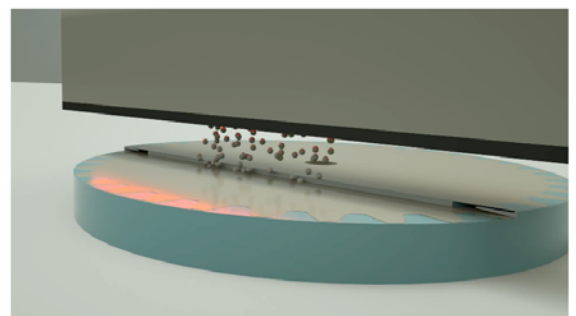
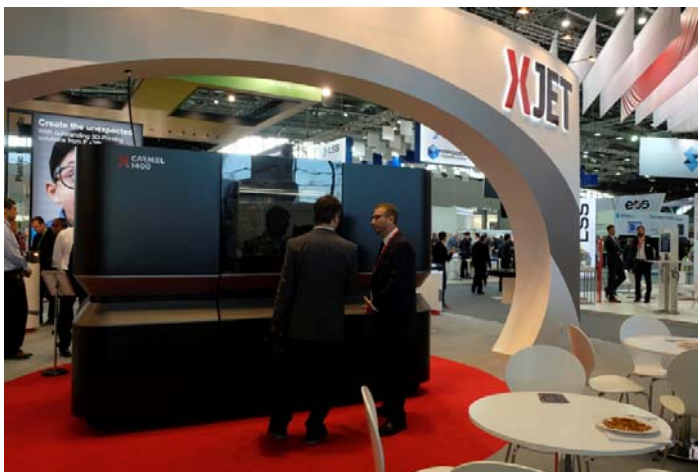




<http://www.osseomatrix.com>



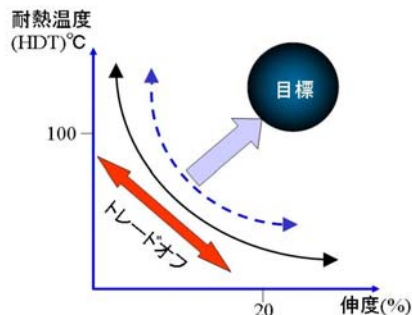
35



36

- 顧客はより高い性能: 高耐熱・高靱性樹脂を期待
 - 最低 ABS物性: 壊れにさ + HDT >80℃
 - 市場は最終製品への利用をつよく希望 → ABS性能
- 方策:
 - 相分離構造、高分子量化、分子間結合力の増加、

靱性成分添加など



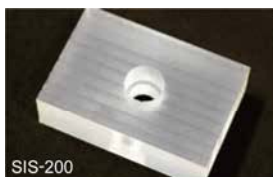
光造形用樹脂開発

新しい挑戦が続いている

37

© Tsuneo HAGIWARA

他材料との比較		SL 5530		SIS-200		Accura PHOENIX	
項目	単位	熱処理なし	熱処理あり	熱処理なし	熱処理あり	熱処理なし	熱処理あり
曲げ弾性率 (ASTM D790)	Mpa	2972-3392	2785-3075	3000-3150	3800-4100	2140-2330	2290-2410
曲げ強さ (ASTM D790)	Mpa	109-120	42-59	100-105	150-170	96-100	123-139
引張弾性率 (ASTM D638)	Mpa	2854-3130	3213-3689	2100-2600	3200-4000	2340-2640	2640-2940
引張強さ (ASTM D638)	Mpa	57-63	22-27	20-25	35-50	45-61	52-77
荷重たわみ温度 (ASTM D648 @0.45Mpa)	℃	68	173	70	220<	83	137
(ASTM D648 @1.82Mpa)	℃	56	114			64	103

樹脂粘度
~260mPa·sHDT:
高荷重 140℃
低荷重 220℃<SIS-200
切削加工性も良好SIS-200
160℃×2時間のアニール後もセルフタップが可能
(割れや欠けが起こりにくい)SL 5530
160℃×2時間のアニール後はセルフタップが難しい
(割れや欠けが起こる)3Dプリント試作品制作
金属3Dプリント受託
3Dプリンター販売・レンタル

SOLIZE Products株式会社

Web: www.solize-products.com
Mail: info.sp@solize-group.com

DMS2018にて

38

© Tsuneo HAGIWARA

YNU 高温造形(Hot Lithography/cubicure社)



- 高粘度樹脂組成物
~120°Cで樹脂を注入して
- 70°Cで405nm(375nm)レーザーで光造形(下面照射)する。
- ABS物性や高耐熱狙い。
例: 高荷重HDT:75°C,
伸度:10~20%
- ウィーン工科大学発ベンチャー
- Lithozと同じルーツ

39

© Tsuneo HAGIWARA

YNU

Carbon社の2段階反応

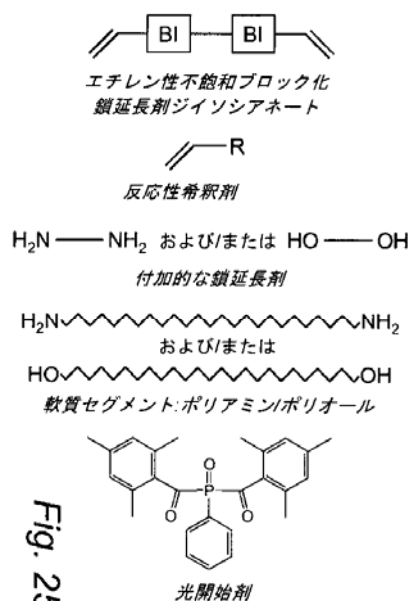
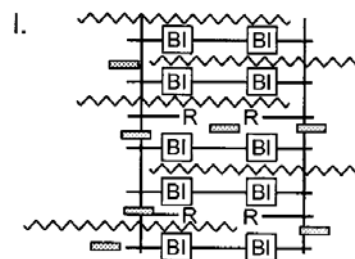
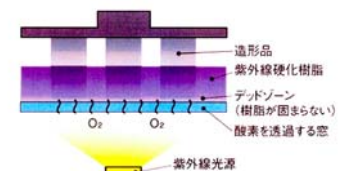
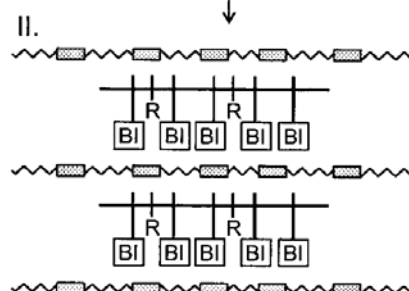


Fig. 25C

UV硬化



熱硬化



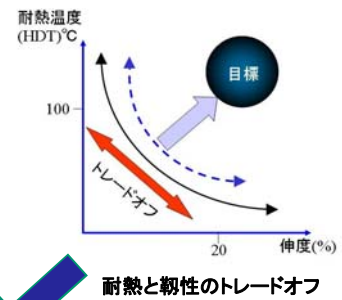
図A 米Carbon3D社のCLIP(Continuous Liquid Interface Production)方式
 積層ではなく連続的に造形することから、従来の70~100倍の高速化が図れるという。米Carbon3D社の資料を基に本図作成。



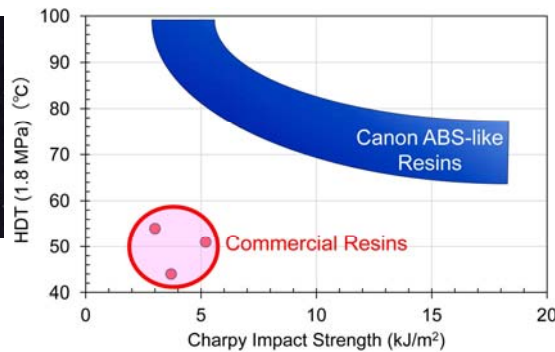
(特表2017-524566)

© Tsuneo HAGIWARA

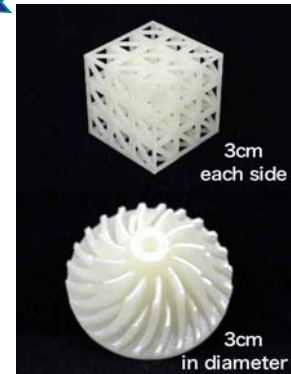
	ABS樹脂	ABS like	POM like	POM樹脂
粘度 (mPa・s/25°C)	-	-	-	-
比重 (25°C)	1.04	-	-	1.4
曲げ強度(MPa)	70	59	77	79
曲げ弾性率(GPa)	2.3	1.6	2.2	2.3
衝撃強度(KJ/m2)シャルピー	16.1	11.3	1.3	6
熱変形温度(°C)/高荷重	80~100	71	91	95



ABS like



データはキヤノン提供



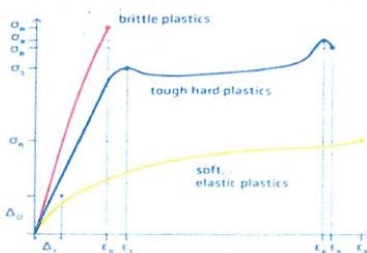
POM like

41

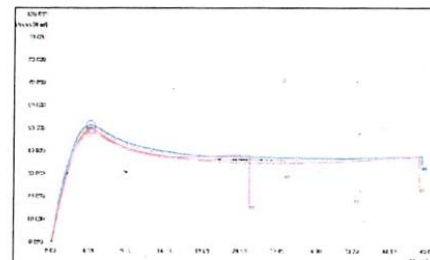
Tera Harz® T-65N Technical Data

Test Item	Test Method	Result
Tensile Modulus	DIN ISO 527-2 Type 5A	2045,97 MPa not tempered 1777,01 MPa tempered @ 70°C
Tensile Strength	ASTM D638	50 Mpa tempered @ 23°C
Elongation@break	DIN ISO 527-2 Type 5A	47,44 MPa not tempered 47,43 MPa tempered @ 70°C
Impact Strength	ISO 179 A unnotched @2J	58.165 KJ/m² not tempered

General plastics tensile strength



Tera Harz tensile strength



1. HPのMulti Jet Fusionのカラー化、多材料化、高速化
2. シリコーンの三次元造形(東レ・ダウ他)
3. フッ素樹脂PTFE (3M),
PFA (ダイキン), PVDF (アルケマ) 等の立体造形
4. CFRPの立体造形 (Mkforged, Impossible Obj.
理科大・松崎ら、Continuous Compositesなど)
5. ゲル3Dプリンティング (山形大・古川ら)
6. リアクティブ3Dプリンティング(神戸大G・SIP): ゴム
架橋導入

43

© Tsuneo HAGIWARA

HP Jet Fusionカラー機& 5200series

580/540



580/540: 190 x 332 x 248 mm \$110,000~
 380/340: 190 x 254 x 248 mm \$58,000~

5200s

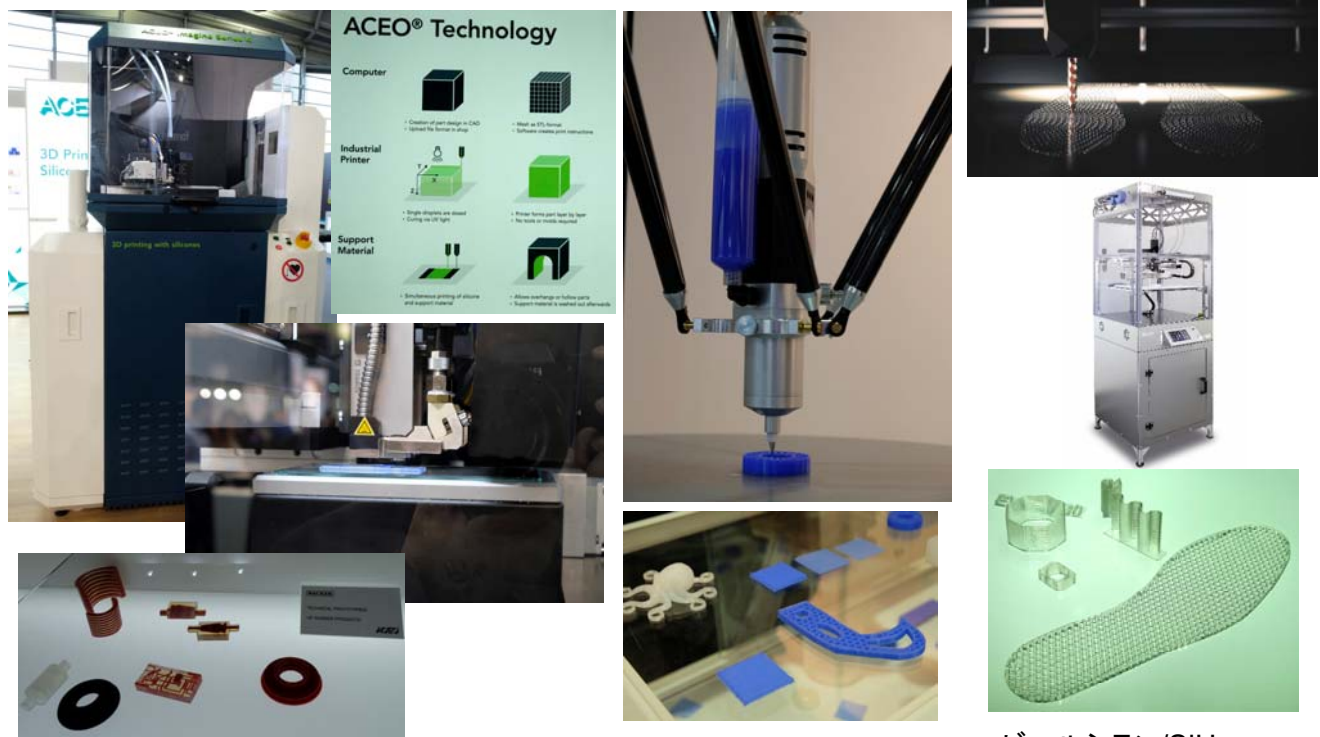


5200: 380 x 284 x 380 mm
 造形エリアは4200と同じ
 造形スピード: 最大5058 cm³/hr
 造形厚み: 0.08 mm
 造形細かさ: 1200 dpi
 造形材料: PA12, PA11が主

44

© Tsuneo HAGIWARA

シリコーンの立体造形



光硬化性シリコーン: MEX+UV

常温硬化シリコーン:デルタ型MEX

ビニルシラン/SiH
UV光反応

45

フッ素系樹脂の立体造形



PVDFのMEX造形/ARKEMA



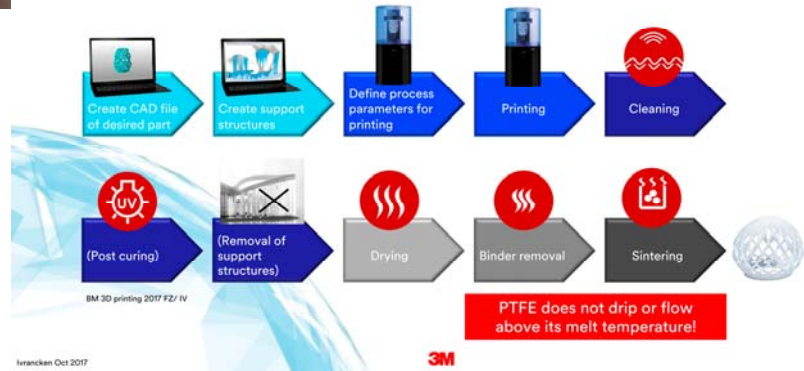
PFAのPBF造形/ダイキン工業

46



The process

Printing parts using Stereolithography with 3M produced PTFE formulation:



<https://www.3ders.org/articles/20160916-3m-makes-non-stick-ptfe-polymers-3d-printable-through-new-patent-pending-tech.html>

47

© Tsuneo HAGIWARA



CBAM-2/Impossible Objects



Composite Prepreg /Semipreg roll
Glass, Carbon or Aramid fibers
and Nylon 6, Nylon 11, Nylon 12, PEEK, PEKK,
PC, etc.

EnvisionTEC/SLCOM1



Markforged/Mk two



Impossible Objects

<http://www.fabbaloo.com>

48

© Tsuneo HAGIWARA

ラバー用3Dプリント方式



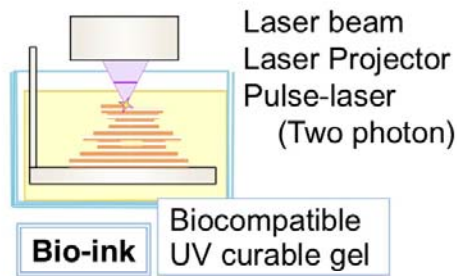
49

バイオ3Dプリンティングのレベル分類

レベル1：	非生体適合性材料による3Dプリンティング →医学モデル・臓器モデルへの応用 →治療用治具，医療機器部品への応用
レベル2：	生体適合性材料による3Dプリンティング →細胞と接触する器材への応用 →埋め込み型人工材料・人工臓器への応用
レベル3：	生分解性材料による3Dプリンティング →再生医工学のscaffold作製への応用
レベル4：	生きた細胞を含む3Dプリンティング →細胞プリンティング（細胞とゲルでの積層造形） →スフェロイド・細胞シートによる積層造形 →プレ組織による積層造形（積層アセンブリ）

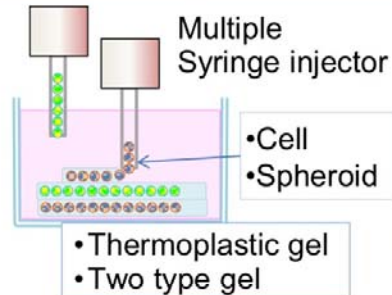
50

(A) Bio-Stereo Lithography

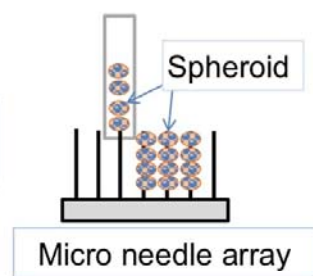


(B) 3D Bio-Plotter / Printer / Dispenser

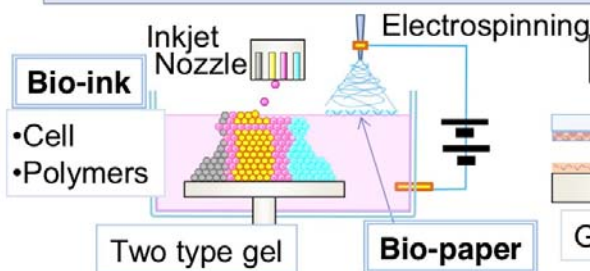
B-1) Extrusion



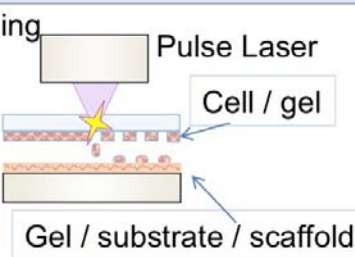
B-2) Manipulation



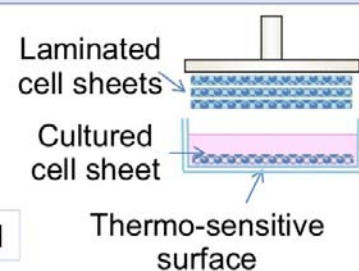
(C) Inkjet 3D Bioprinter / Electrospinning



(D) Bio-Laser Printer (LIFT/MAPLE-DW)



(E) Cell sheet Lamination



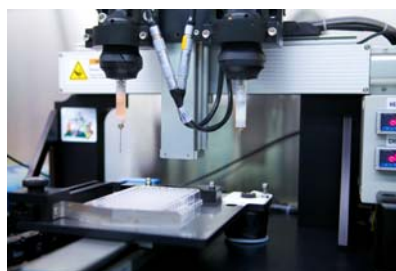
© Tsuneo HAGIWARA

中村真人; 心臓, 49(11) 2017より

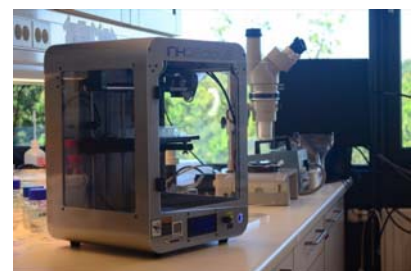
バイオ3Dプリンターの例



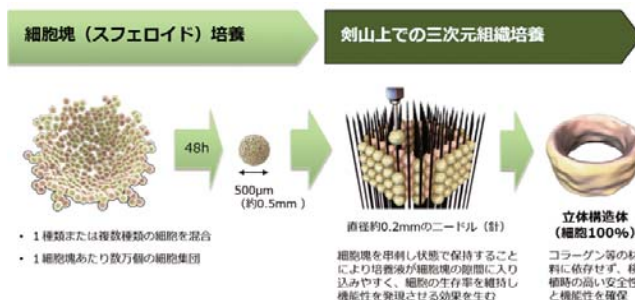
EnvisionTEC



Organovo



CELLINK



サイフューズ



積層技術	材料	現状材料の詳細	注目事項
液槽 光重合法(VPP)	感光性樹脂	エポキシ/アクリレート/オキセタン	ABS物性, HDT80°C/靱性を求 めて開発が進む
粉末床溶融 結合法(PBF)	PA12粉末、 金属粉	PA12 SUS, Co-Cr, TiAl	PPS, PEEK, PEKKのスー パーエンブラ造形へ期待 Cu, Mg, LD高速機
材料押出法(MEX)	熱可塑性樹脂ワイヤ	ABS, PEI, PA12 金属入り樹脂ワイヤ	PEEK, PEKK, PA12+CF CF/PA, 金属/ABS, MIM材料 超高速(x10)造形機
結合剤 噴射法(BJT)	石膏粉、砂、PMMA粉 水系バインダー	←	MIM分野を狙う金属造形 セラミック造形, 金属造形
材料噴射法(MJT)	感光性樹脂など	ウレタンアクリレート/アクリレート	高剛性, デジタルモールドイン グ 金属造形, セラミック造形
シート 積層法(SHL)	紙、プラスチックシート	紙, PVC	金属シート CF不織布積層
指向エネルギー 堆積(DED)	金属粉末	各種金属粉	多品種材料
ハイブリッド	金属粉末	各種金属粉	メルトレイヤー方式(MAZAK) に期待

- BASF: PA6粉末, **VPP樹脂**, 特殊MEXワイヤ
PA6をImpossible Object, VPP樹脂をPaxis, Origin, XAAR 等へ展開
- Solvay: PPSUワイヤ, PBF用PEEK
- DowDuPont: MEX用ワイヤ
- Sabic: 各種MEXワイヤ; PC, PEI, ABS, PPE
- Evonik: PBF用PA12, PEBA, High HDT PA, PEEK, Nano Composites
- Victrex: PBF用PEEK, MEX用 PAEK, PEEKワイヤ
- Arkema: PBF用PA, **PEKK, VPP樹脂用モノマー**
- 東レ: PBF用PPS粉末
- 東レ・ダウ: **シリコンゴム造形**
- 3M: 光硬化性樹脂利用PTFEの造形
- ダイキン工業: **PFAのPBF造形**
- 三菱ケミカル: MEXワイヤ各種樹脂
- 日本合成: MEX用水溶性サポート材
- クラレ: MEX用水溶性サポート材
- ユニチカ: MEX用高機能PLAワイヤ
- 大塚化学: 3DP用新規フィラー



BASF社の積極的取り組み

- 金属造形が今後も3DPで重要な位置(Ti系、Co-Cr系が主要)
- 樹脂造形では高付加価値のスーパーエンブラの利用が加速
 - PBFで最終製品の製造
 - ・ PBFはPA12中心から、PPS, PBTも。更にPEEK, PEKKへ
 - ・ PEEKは材料のリサイクル性で難あり、今後の材料・装置の開発が望まれる。
 - ・ リサイクル性の優れたPEKKとその装置の開発が進む
 - MEX方式は装置が簡便で多材料が利用可能であり、PEIで航空・宇宙に展開
10倍のMEX高速造形機も出現、より大きな発展が期待。
→低価格機でもPA/CFやPEI, PEEK, PEKKなどのスーパーエンブラの造形へ
 - MEXでペレット利用の超大型造形機が(S-Labo. TITANなど)出現



EOSINT-P 810

PEKK用PBF機



PEKK/OPM社



PEEK/Victrex社



ROBOZE +400

PEEK材料押出し(MEX)



55

有り難うございました。

萩原 恒夫 (HAGIWARA, Tsuneo DSc.)

E-mail: ts.hagiwara@gmail.com

<http://www.thagiwara.jp>