

5G, 6G時代の3Dプリンティングポリマー材料

横浜国立大学 総合学術高等研究院

萩原恒夫

2023年7月14日/Online

E-mail: ts.hagiwara@gmail.com

<http://www.thagiwara.jp>



AGENDA

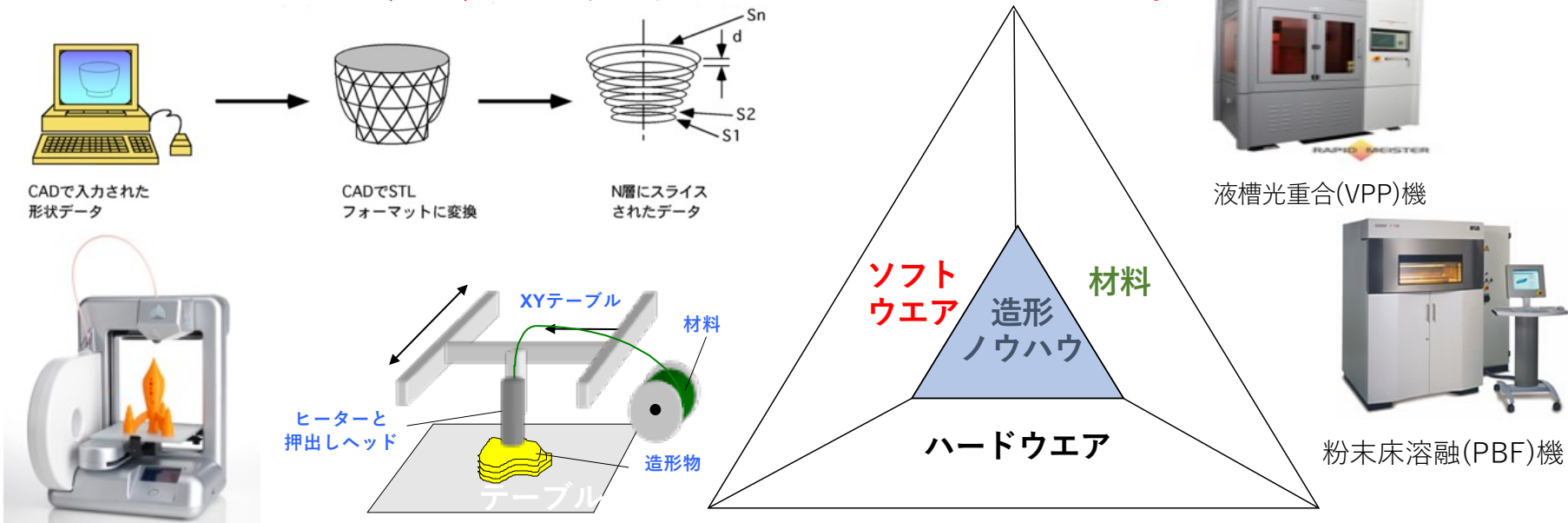
1. 3Dプリンティング(AM)とは
2. 3Dプリンティング(AM)の市場
3. 3Dプリンティング(AM)の用途
4. 5G, 6G時代に向けて
5. 5G, 6Gに向けた3Dプリンティングの現状
 - ① 低誘電性高分子材料
 - ② ESD (Electro Static Discharge)対応樹脂材料
6. AMの市場予測とまとめ

3Dプリンティング(AM)とは

3Dプリンティング(Additive Manufacturing=AM)とは

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、溶融押出しなどの刺激により、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で、Additive Manufacturing (AM) と呼び簡易的に

3D プリンティング (3DP) と呼び、装置を3Dプリンターと呼んでいる。



3Dプリンティング(AM)方式一覧

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	液状光硬化性樹脂	LASER, LED	高精度, 高精細 大型～小型	デザイン検証 試作
粉末床溶融結合法 (PBF)	Powder Bed Fusion	粉末焼結法, SLS, SLM, EBM HSS	PA12, PA11, PP粉末 金属粉	LASER, 電子線 インクジェット/ハロゲン ランプの熱	装置が大がかり 高速(HSS)	機能試作 最終製品、部品
材料押出法(MEX)	Material Extrusion	溶融樹脂積層法, FDM法, FFF	ABS, PCなどの熱可塑性樹脂	加熱	簡易, ABS～スーパー エンブラ	形状確認、試作 高性能部品
結合剤噴射法(BJT)	Binder Jetting	インクジェット法, Z-Printer法	石膏粉、砂、金属粉 樹脂、水系バインダー	インクジェット	高速, フルカラー MIMライク	フィギュア 砂型、金属部品
材料噴射法(MJT)	Material Jetting	PolyJet法, MJM法など	液状光硬化性樹脂 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 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 オーバーハング不得意	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, 金属ワイヤ	LASER, アーク放電	高速, 肉盛り溶接	金属部品
ハイブリッド	Hybrid	金属光造形法	金属粉末 熱可塑性樹脂ペレット	LASER + 切削 熱 + 切削	高精度・表面性	金属製品、型 大型樹脂製品

ASTMでは7分類、ハイブリッドを加えて8分類へ(略称は3英文字表記)

産業用3Dプリンター(AM装置)の例 (\$5,000以上) YNU



液槽光重合(VPP)
ATOMm8000/CMET



粉末床熔融積層(PBF)
EOSINT P730/EOS



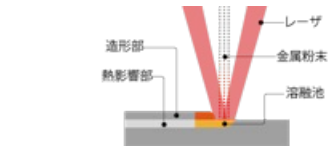
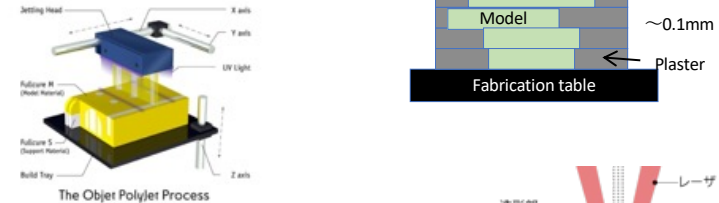
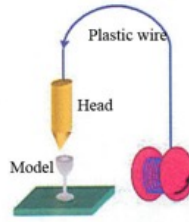
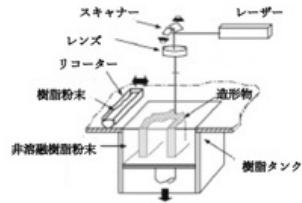
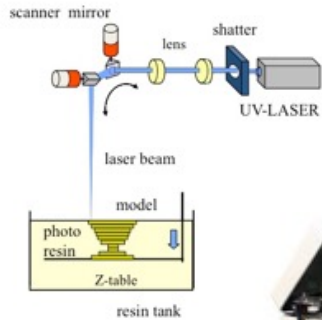
材料押し出し(MEX)
F123/Stratasys



材料噴射(MJT)
J750/Stratasys



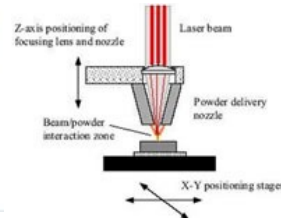
結合材噴射法(BJT)
Projet660/3DSYSTEMS



シート積層(SHL) / MCor



DED/OPTOMECH

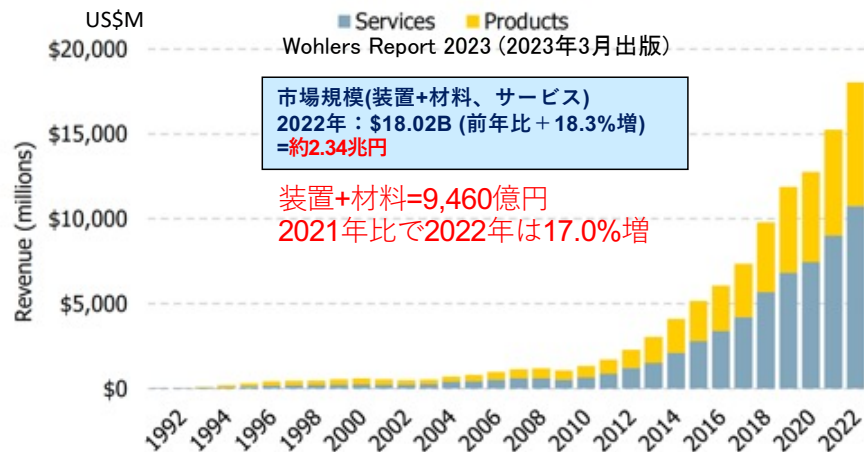


Hybrid (DED + 切削)
MAZAK/インテグレックスiAM

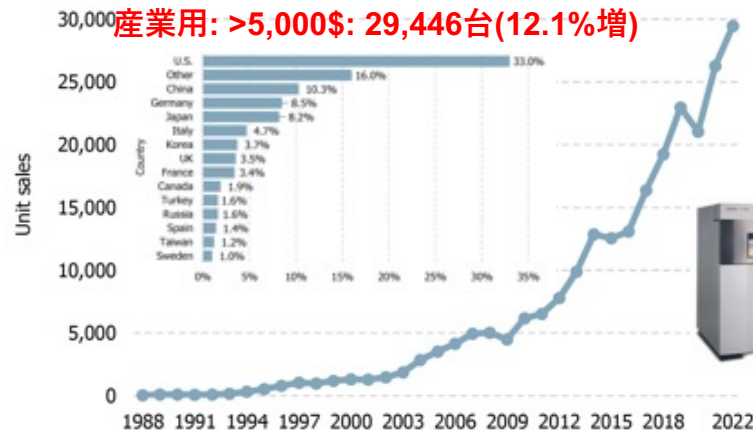


3Dプリンティング(AM)ビジネスの世界市場(2022年状況)

Wohlers Report 2023

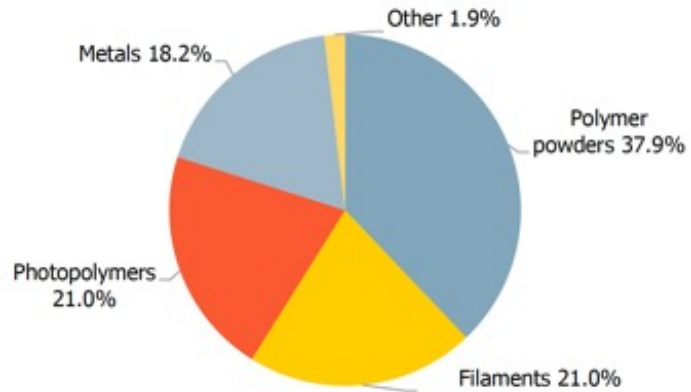


■:サービス ■:製品(Products)
2次製品である型、成形物、鋳造物を含まない



3Dプリンティング(AM)材料の現状

Wohlers Report 2023 **YNU**

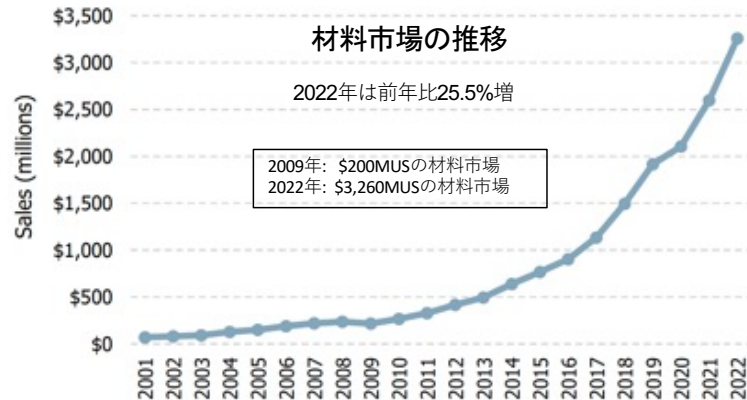
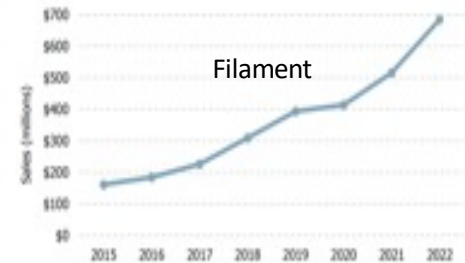
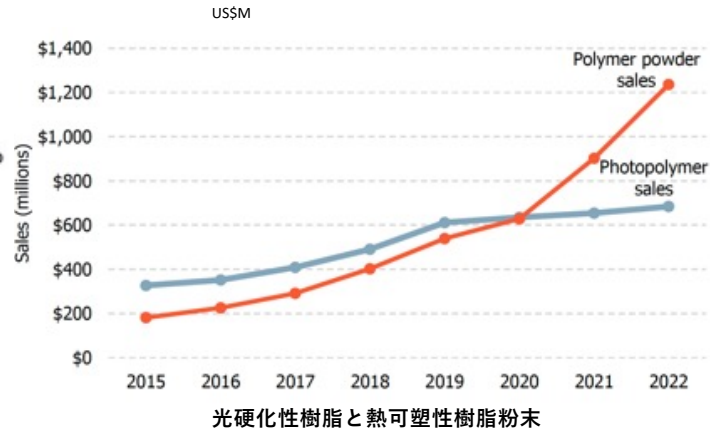


2021と2022年の比較

- ・ 総額25.5%増
- ・ 熱可塑性樹脂粉末の割合が最大 34.7→37.9%;
今後更に拡大が予測

2012年: \$417Mの材料市場
2022年→ \$3,260(7.8倍)

2022年 (Wohlers Report 2023)



1. アイデアを簡単に具現化できる。
2. 複雑な形状や幾何学的な構造を持つ製品を作成することが得意
3. デザインやサイズを自由に変更し、個別のニーズや要件に合わせて製品を作成することができる。
4. 製品の開発サイクルを短縮し、コストを削減することができる。
5. 材料の無駄を最小限に抑えることができ、オンサイトでの製造が可能であり環境負荷も軽減できる。
6. 小ロット生産やオンデマンド生産に適している。製品の需要に合わせて柔軟に生産することができる。
7. デジタルでのものづくりが行え、情報漏洩のリスクが低減できる。

どんなところに利用されているか

- 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
- 建築用途にも展開が進む
- 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

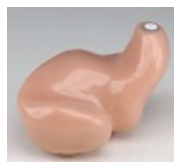


AMを利用する最終製品製造の将来の姿は

- 工業製品の部品、製品 ----->DX, 5G, 6G向け
自動車や電化製品の補修部品、部品製造
- (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, DfAM
- 人工歯、歯科矯正、入れ歯などの歯科用品
- 補聴器、制御可能な義手、義足、矯正用のヘルメット
- 外科用足場、人工骨、人工臓器
- 芸術・表現~個々人の嗜好品
- 建築、船舶
- 食品



3DCeram



ETEC



DWS



矯正用ヘルメット
ARKEMA



東大・新野研究室



Next 21

- 高速かつ低遅延の通信
 - 大容量通信
 - インターネット・オブ・エブリシング (IoE) の発展
 - AIとの統合
 - エネルギー効率の向上
 - セキュリティの強化
-
- 3Dプリンティングはどんな役割が果たせるか

Technology evolution (10年毎)



Creating new value for markets (20年毎)

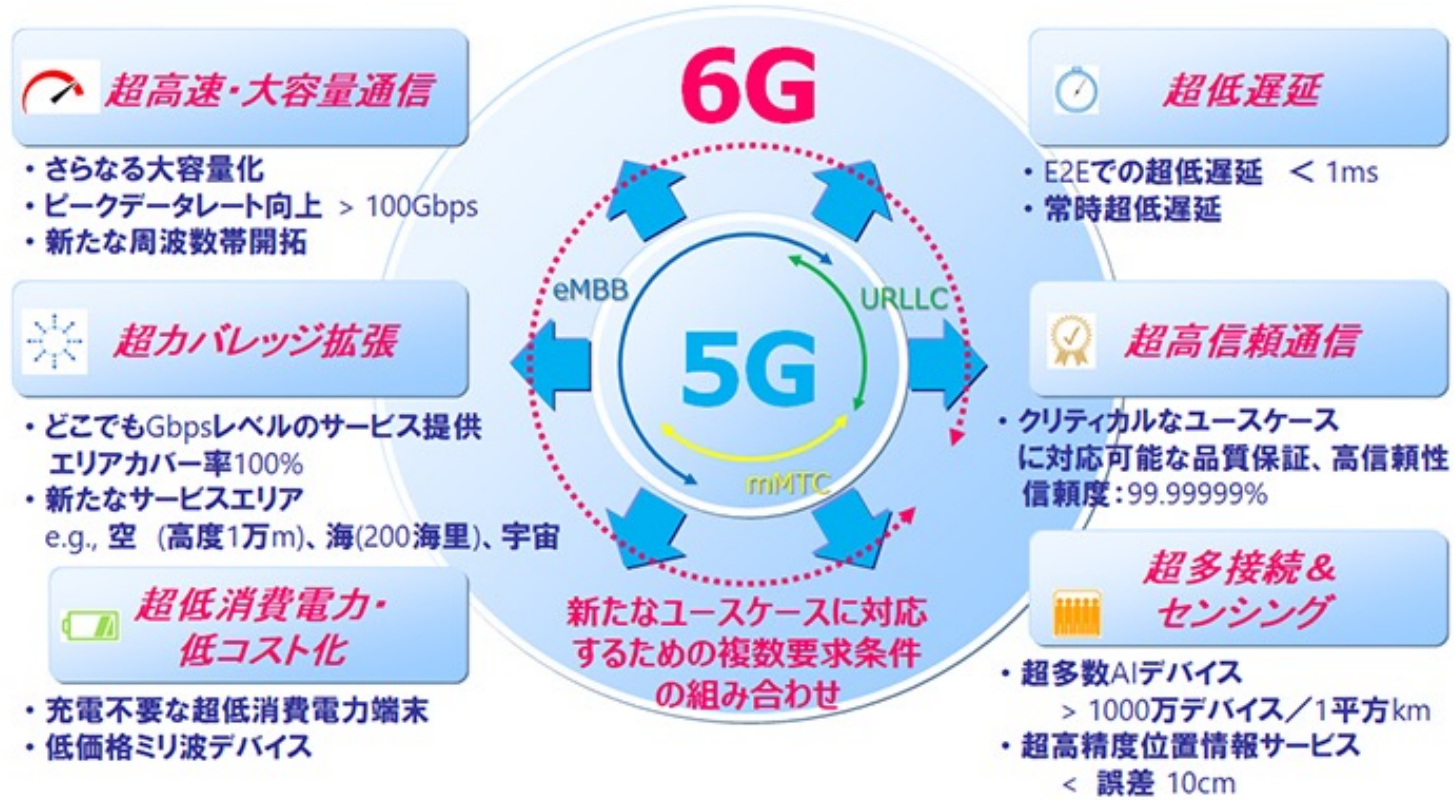
<https://robotstart.info/2020/01/22/5g-evolution-6g.html>

各世代と周波数帯

	2010年代	2020年代	2030年以降
	4G 700M~ 3.5GHz帯	5G 3.7G/4.5GHz帯 +28GHz帯(ミリ波)	6G 90G~300GHz帯 (サブテラヘルツ波)
下りの 最大 通信速度	1Gbps 前後	4Gの 約10倍	5Gの 10倍以上
想定される アプリや サービス	メール、 Webブラウザ	動画配信や 投稿、SNS	メタバース、 高品質な オンライン会議

<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/02097/060600007/>

5G evolution、6Gの技術コンセプトイメージ YNU



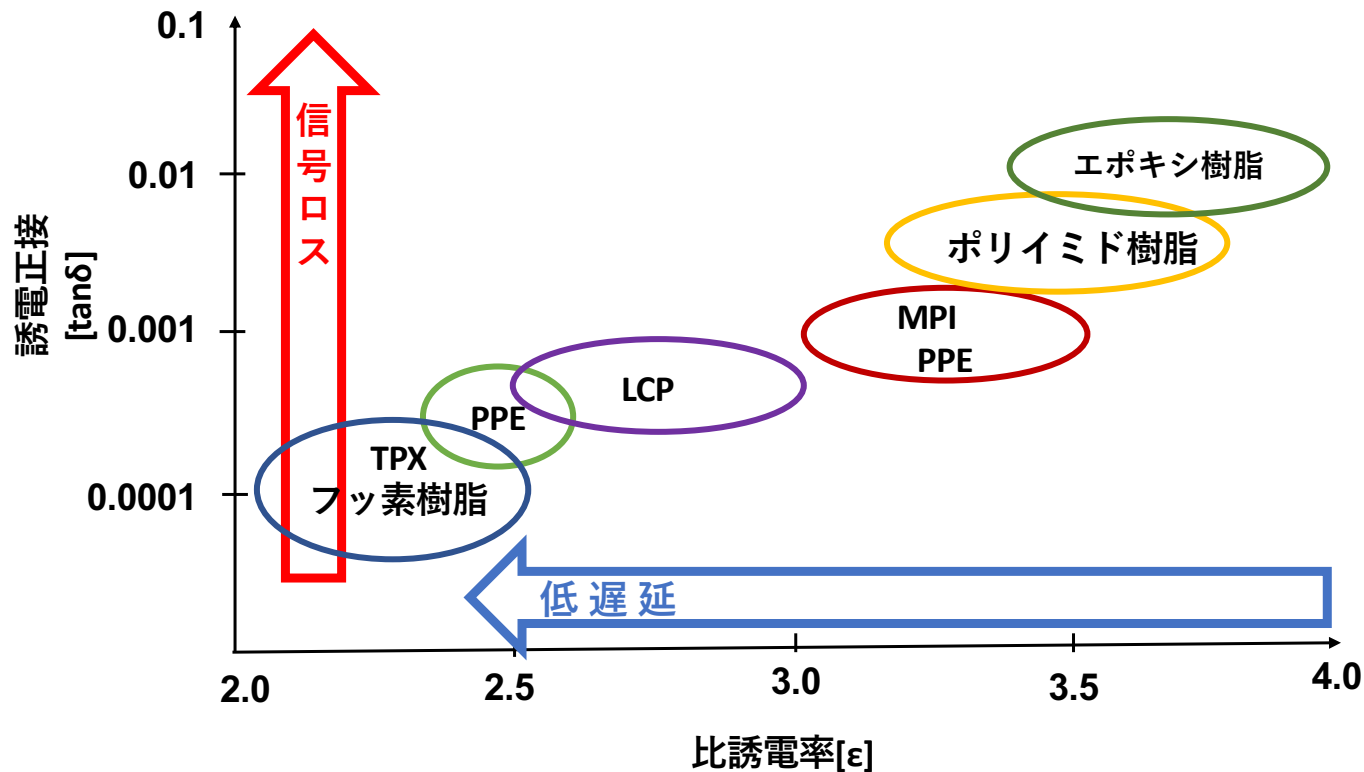
https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2020/01/22_00.html

5G, 6Gに向けた3Dプリンティング材料

- 低誘電性高分子材料
- ESD 対応樹脂材料

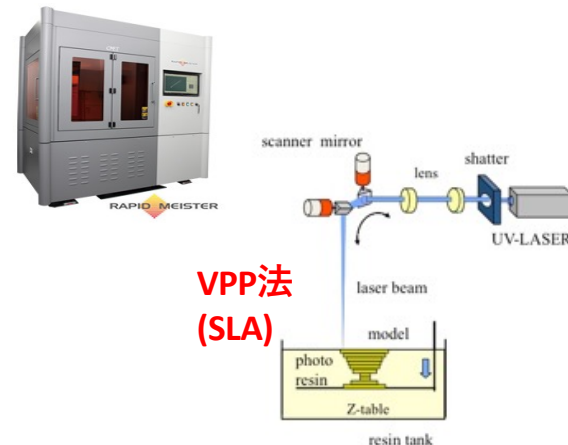
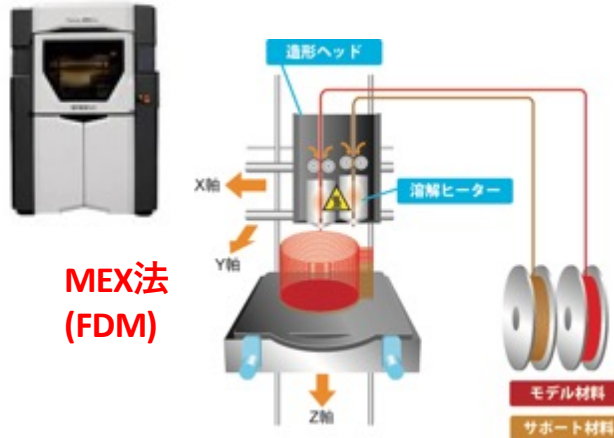
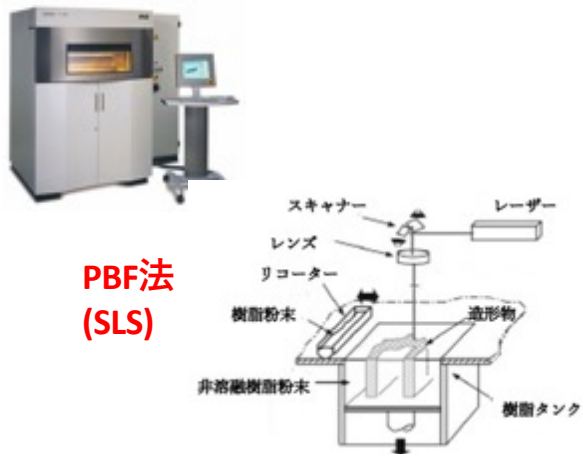
- 5G, 6Gネットワークの最も革新的な部分は高周波数対応技術
- 対応デバイスは基板とパッケージの双方のレベルにおける伝送損失を減らすために低誘電損失材料が必要
- 低誘電性高分子材料
 - (a) ポリテトラフルオロエチレン等のフッ素樹脂
 - (b) ポリエチレン、ポリプロピレンなどのポリオレフィン系の熱可塑性樹脂
 - (c) ポリフェニレンエーテル樹脂
 - (d) 液晶ポリマー
 - (e) マレイミド樹脂
- 低誘電性光硬化性樹脂

ポリマー材料と誘電率



低誘電性材料のための3Dプリンティング法

積層技術	別名	材料	手段
粉末床溶融結合法 Powder Bed Fusion= PBF	粉末焼結法, SLS HSSも	(微)結晶性熱可塑性樹脂 粉末	LASER インクジェット/ハロゲン ランプの熱(HSS)
材料押出法 Material Extrusion=MEX	溶融樹脂積層法, FDM法, FFF	非晶性熱可塑性樹脂	加熱
液槽光重合法 Vat Photo Polymerization=VPP	光造形法, SLA	液状光硬化性樹脂	LASER, LED



- 低誘電性高分子材料

誘電率2.5以下、誘電正接0.0020以下(岩手大学 大石好行教授)

- a. ポリテトラフルオロエチレン等のフッ素樹脂

- ・ ダイキン工業 PFA; PBF法

- b. ポリエチレン、ポリプロピレンなどの ポリオレフィン系の熱可塑性樹脂

- ・ 今のところ報告はない

- c. ポリ フェニレンエーテル樹脂

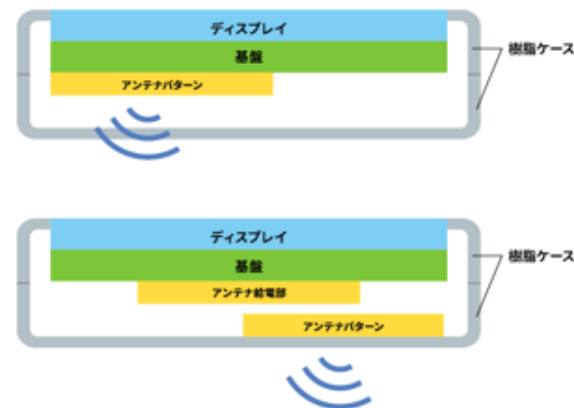
- ・ 旭化成 Xyron; MEX法

- 低誘電性光硬化性樹脂

- A) ARKEMA

- B) Recreate

- C) Fortify



スマートフォン内部の部品レイアウト例

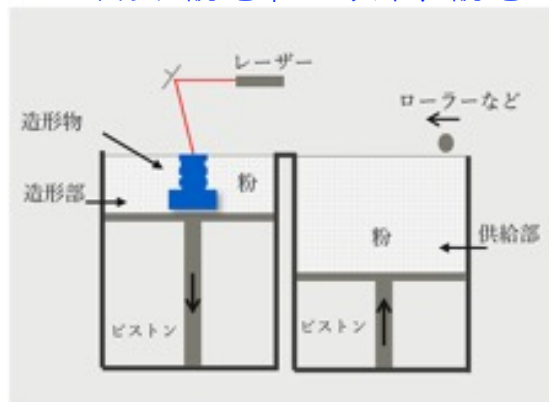
<https://plabase.com/news/8383>

ダイキン工業 PFA のPBF法の例



		PFA	PTFE
誘電率	10^6Hz	2.1	2.1
誘電正接	10^6Hz	0.0008	0.0002

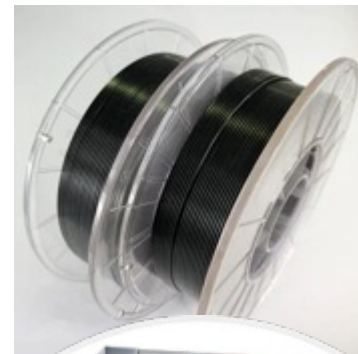
目安: 誘電率2.5以下、誘電正接0.0020以下



アスペクト社 RaFaEl II 300HT

<https://www.daikinchemicals.com/jp/magazine/report-additive-manufacturing-pfa.html>

旭化成 PPE樹脂Xyron/ホッティーポリマー(MEX法) YNU



誘電率: 2.8~2.9/1GHz,
誘電正接: 0.0005~0.003/1GHz

ARKEMAによる低誘電性光硬化性樹脂

ARKEMA pro14729、pro14730、pro14731

DIELECTRIC RESINS PERFORMANCE



DIELECTRIC CONSTANT (Dk)

- Standard Dk > 4.0
- Mid Dk: 3.5~4.0
- Low Dk: 3.0~3.5
- Ultra low: < 3.0

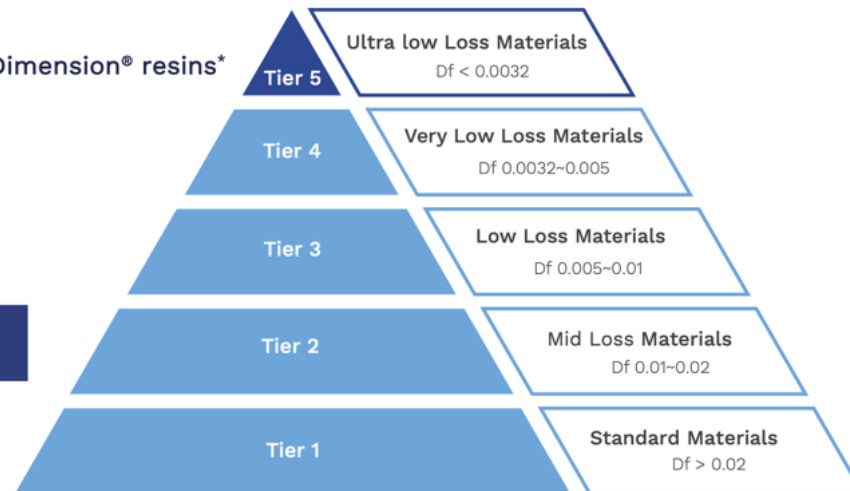
N3xtDimension® resins
2.5~2.9

DISSIPATION FACTOR (Df)

- Ultra low loss Df < 0.0032
- Very low loss Df: 0.0032~0.005
- Low loss Df: 0.005~0.01
- Mid loss Df: 0.01~0.02
- Standard Df > 0.02

N3xtDimension® resins
<0.00302

N3xtDimension® resins*



* Based on IPC standard testing method TM-650 2.5.5.13

目安: 誘電率2.5以下、誘電正接0.0020以下

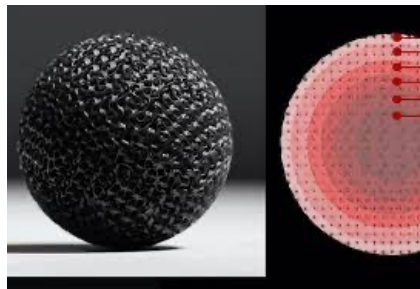
Fortify の低誘電性樹脂/Rogers Corp.

MATERIAL PROPERTIES

	LOW LOSS 2.8	LOW LOSS 4.9*
Dielectric Constant (SPDR @ 10GHz)	2.77	4.9
Dissipation Factor (SPDR @ 10GHz)	0.0044	0.0039
Moisture Absorption (wt% gain; 24hr @ 50C)	<0.08%	<0.1%
Decomposition Temperature (TGA 5% wt loss)	313 °C	>280 °C
Outgassing (ASTM E595, vacuum; TML < 1.0% CVCML < 0.10%)	Pass	Pass

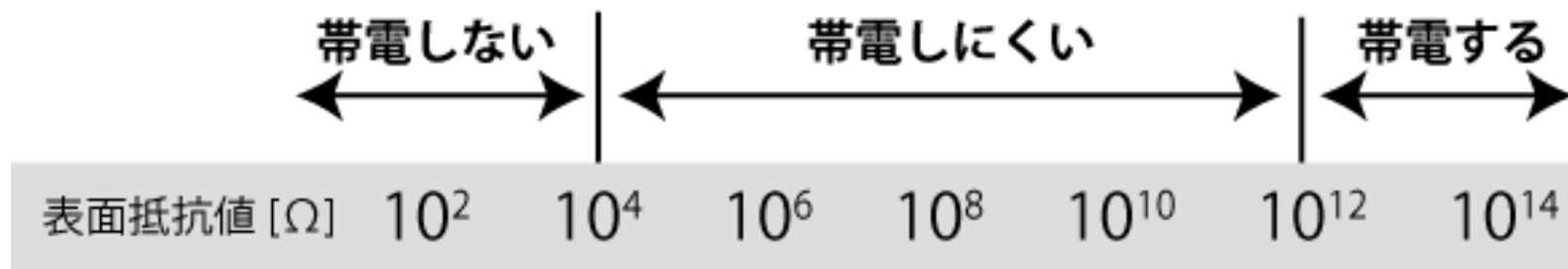
*PRELIMINARY DATA

目安: 誘電率2.5以下、誘電正接0.0020以下



5G, 6Gに向けた3Dプリンティング材料

- 低誘電性高分子材料
- ESD 対応樹脂材料



ESD値: $1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^{12} \Omega$
(従来目安: $1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^9 \Omega$)

<https://www.finepack.co.jp/article/003/>

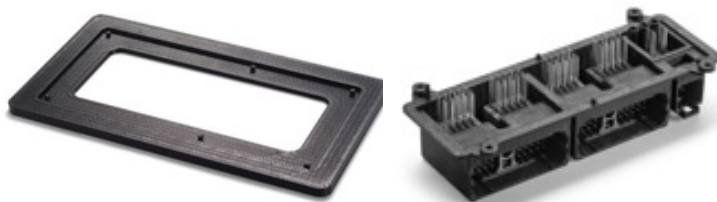
材料押出し(MEX)法によるESD対応

熱可塑性樹脂にCF, CNT、グラファイト)を含有させて所望の抵抗値とする。

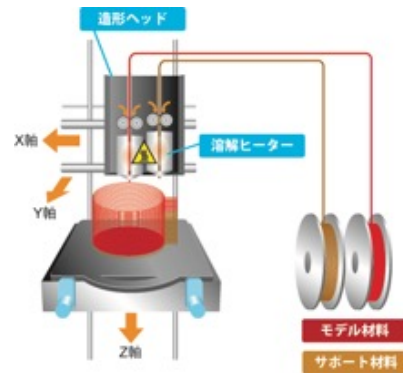
ABS、PLA、PA、PET、PETG、PEKK、TPU

Stratasys社: ABS-ESD7材料;
グラファイト含有ABS
表面抵抗: $10^4 \sim 10^9 \Omega$

Markforged社: Onyx ESD;
チョップドカーボンファイバー含有PA
表面抵抗: $10^5 \sim 10^7 \Omega$



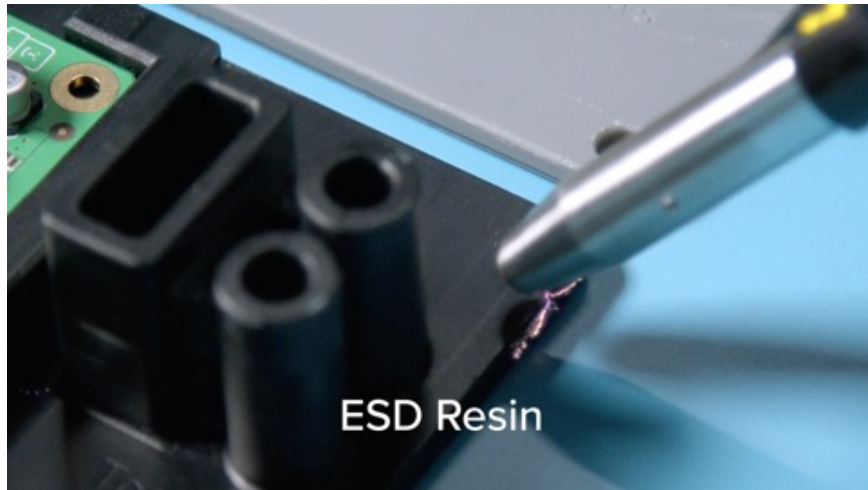
ABS-ESD7造形物/Stratasys



Onyx ESD造形物による筐体/Markforged



FormlabsのESD 対応光硬化性樹脂



表面抵抗値: $10^5 \sim 10^8 \Omega/\text{sq}$
体積抵抗値: $10^5 \sim 10^7 \Omega\text{-cm}$
水分吸収率(24h後): 0.7%
比重: 1.116
表面硬度(Shore D): 90



Formlabs/Form3+

Reqcreate ESD 対応光硬化性樹脂紹介Video YNU



Liqcreate ESD 対応樹脂 物性値

Description	Method	Properties [1]
Viscosity/25°C		1,150 mPa · s
Density		1.18 g/cm ³
Tensile strength	D638	37 MPa
Elongation at break	D638	5 – 10%
Tensile modulus	D638	1.9 GPa
Flexural strength	D790	83 MPa
Flexural modulus	D790	2.1 GPa
IZOD Impact notched	ISO 180	3.30 kJ/m ²
IZOD Impact notched	D256	30 J/m
Water sorption	D570-98	3.84%
Degradation temperature	Internal method	>250°C[2]
HDT-B 0.45 MPa	ISO75	51°C
HDT-A 1.80 MPa	ISO75	43°C
Surface resistivity	AE30-ANSI	10 ⁵ – 10 ⁷ Ω/sq
Volume resistivity	AE30-ANSI	10 ⁵ – 10 ⁷ Ω-cm
Shore D Hardness	D2240	82



¹⁾Post-cured 30 minutes with LED curing at 60° C in the Wicked Engineering Curebox. These values may vary and depend on individual machine processing and post-curing.

²⁾Softening above HDT, but no cracking in part up to 250° C

HenkelのESD 対応樹脂: Loctite 3D IND 380 YNU

PROPERTIES

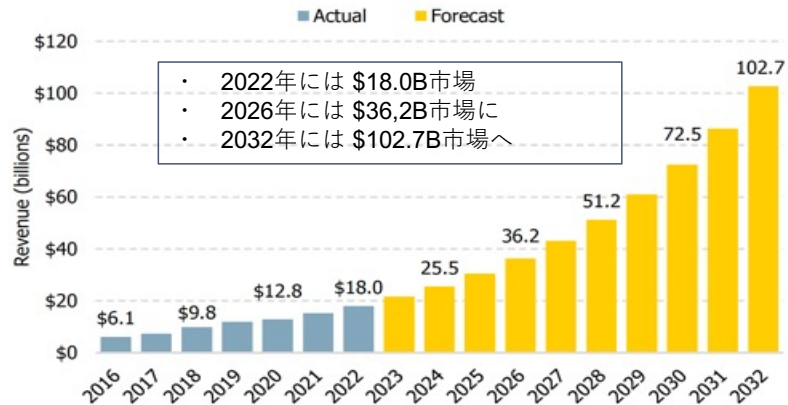
Mechanical Properties	Measure	Method	Post Processed (Broad Spectrum UV)
Tensile Stress at Break	MPa	ASTM D638	50-70
Young's Modulus	MPa	ASTM D638	3100-3300
Strain at Break	%	ASTM D638	2-3
Flexural Strength	MPa	ASTM D790	100-120
Flexural Modulus	MPa	ASTM D790	3500-3800
Flexural Strain at Break	%	ASTM D790	2.5-3.5
Other Properties			
IZOD Impact Strength (Notched)	J/m	ASTM D256	13-16
HDT at 0.455 MPa	°C	ASTM D648	200-230
HDT at 1.82 MPa	°C	ASTM D648	140-170
Surface Resistivity	Ω	ASTM D257	$10^6 - 10^8$
Shore Hardness (5s)	D	ASTM D2240	90-95
Water Absorption (24 hr)	%	ASTM D570	<0.5
Solid Density	g/cm ³	ASTM D1475	1.2 - 1.3

Liquid Properties	Measure	Method	Value
Viscosity (25°C, 77°F)	cP	ASTM D7867	5000 - 10000
Liquid Density	g/cm ³	ASTM D1475	1.1 - 1.2



表面抵抗: $10^6 \sim 10^8 \Omega$

3Dプリンティング市場の予測



市場予測/Wohlers Report 2023



- 日本の3Dプリンティング市場は、2025年には約25億ドルとなる予測
- APAC全体では2025年までに82億ドルとなる予測であり、日本はAPAC全体の約30%を占めることが想定されている

デロイト・トーマツ社の予測(2022.06.07)

世界市場と予測

- 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 Intelligence, 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
- 2020年代半ばに材料市場は7,000億円を予測 (2022年: 4,200億円)

<https://www.youtube.com/watch?v=1trrByYzHKM>

まとめ

➤3Dプリンティング(AM)はコロナ禍でも着実に発展

今後はDX, DfAM、サプライチェーン再構築で今後急速に発展が予想

➤AM装置の(超)高速化・大型化・高性能化・後処理を含めた自動化が進行

➤最終製品を3Dプリンティング(AM)で製造へ

- ・ 今後は5G, 6G世代に向けて3Dプリンティングが大きな役割

- ・ 低誘電性材料やESDセーフなどの多様化が進む

 - 低誘電性材料; PFA, PPE

 - ESD材料; MEX, VPP用光硬化性樹脂

➤2022年度の3Dプリンティング材料市場はw/wで4,200億円 (2021年:3,000億円)、
年率20%以上で成長

→ DX, 5G&6G材料指向で造形材料のより一層の研究開発が活発になることを期待

Thank you!

2023年7月14日

萩原恒夫 (Tsuneo HAGIWARA, PhD)

E-mail: ts.hagiwara@gmail.com

<http://www.thagiwara.jp>

