

進化する3次元造形技術 —3Dプリンタ(等)の進歩—

Saha et al., *Science*, **366**, 105–109 (2019)

Jung et al., *Nature*, **592**, 54–59 (2021)

Kelly et al., *Science*, **363**, 1075–1079 (2019)

Regehly et al., *Nature*, **588**, 620–624 (2020)

3次元形状を自由に作成できる3Dプリンタは、工業分野における試作品製作の高速化、複雑な形状をもった部品の製造、個人での各種小物の立体化など、さまざまな用途に使われるようになってきている。

非常に大きな可能性をもつ3Dプリント技術であるが、まだまだ問題点・改善すべき点は多く機能向上への要望は強い。

今回は、3Dプリンタの基礎を簡単に解説したあと、3次元造形技術に関連した4本の論文を紹介する。

1. 3Dプリンタの基礎

3Dプリンタを実現するにはいくつかの手法があり，それぞれ得手不得手が異なる．
まず最初に，代表的な3つの手法である

- ・ FDM方式（熱溶解積層方式）
- ・ SLS方式（粉末焼結積層方式）
- ・ SLA方式（光造形方式）

の原理や特徴について紹介する．

1-1. FDM (Fused Deposition Modeling) 方式

一般の人がイメージする3Dプリンタの方式であり，安く作れることから安価な3Dプリンタとして数多く出回っている．

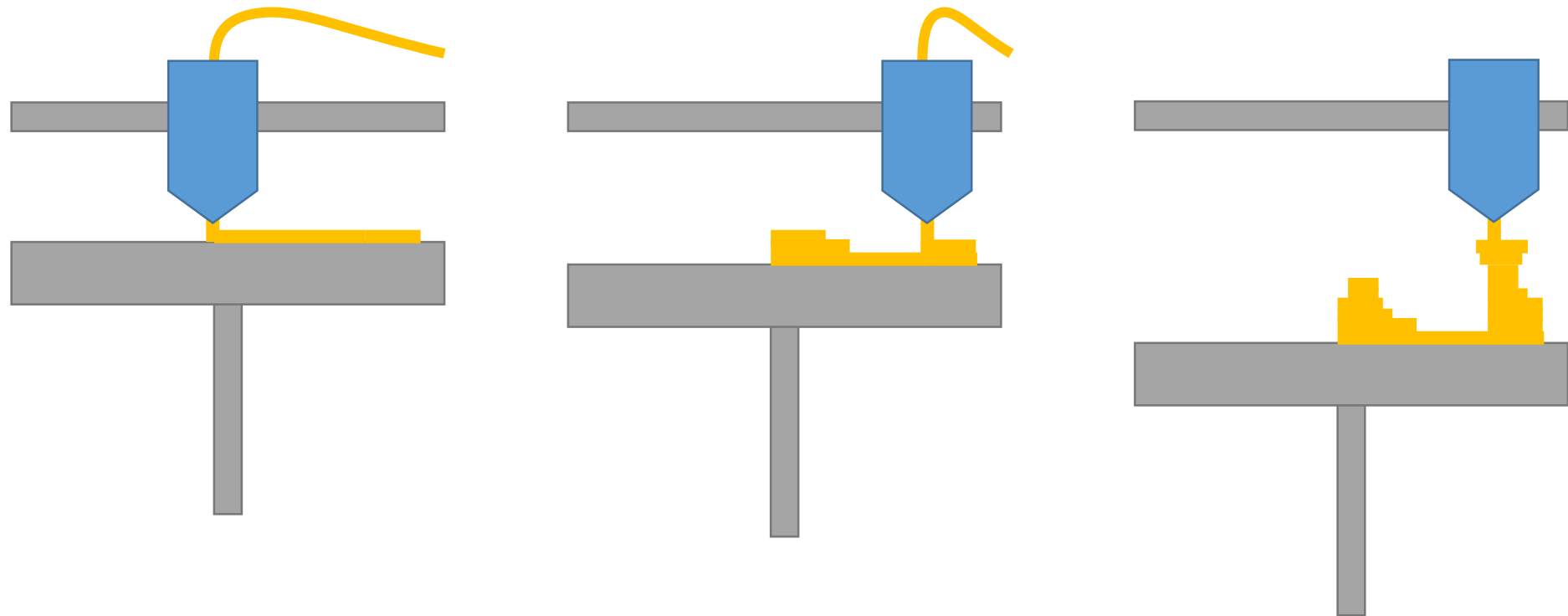
原理としては，ノズルの先から加熱により溶かした樹脂を少しずつ押し出し，少しずつ塗り重ねるように積層させていくことで3次元の物体を作成する．



Amazonでの販売例

FDM方式の原理

- ・ XY方向に可動するノズルの先端から溶けた素材を射出.
- ・ 1層作り終わったら, ステージを一段下げる
- ・ 次の層をプリント (以下ループ)





Ultimaker社

<https://www.youtube.com/watch?v=B1DOjAYvdJQ>

※動画は何百倍速にもなっている。

実際の印刷速度は、数十mm/s程度のことが多い。
これは樹脂を射出するヘッドを動かす速度がこの
速度で動く、ということを表している。
さらに積層方向の分解能を0.1 mmにしようと思え
ば、高さ10 cmの物体を作るだけでも1000層分を
印刷しなくてはならない。

このため、3次元物体の「印刷」にはかなりの時間
がかかる。例えば前項のネフェルティティの胸像
の印刷時間は14時間23分である。

(大きなものだと、数日かかることもある)

1-2. SLS (Selective Laser Sintering) 方式

一般向けではなく，工業用途で使用されている．
基板上に粉末を薄く均一に塗り，必要な個所のみ
レーザーで加熱し融解させる．

一層作り終わったらさらに上に粉を一層分塗り，
以下同じ事を繰り返し積層していく．

この手法では，レーザーの高温により原料粉末が
融合していくので，金属でできた3次元構造を容易
に作成することができ，企業における多品種少量
生産や，実働する機械部品の試作品製造に向いて
いる．

TIRI

東京都立産業技術研究センター

<https://www.youtube.com/watch?v=5KVb69CSTXU>

1-3. SLA (Stereolithography) 方式

いわゆる「3Dプリンタ」としては最古の方式。
昔は高かったが、最近では一般向けに各種の装置
が売られている。

上に積層していく他の2方式とは異なり、最下段で
樹脂に選択的に光を当て硬化させ、上に引き上げ
ていく、という方式になる。

精度が高く、FDL方式よりもなめらかで高精細な
立体が作れる。

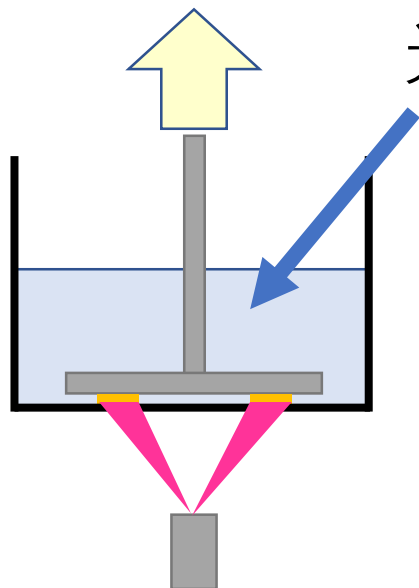


Amazonでの販売例

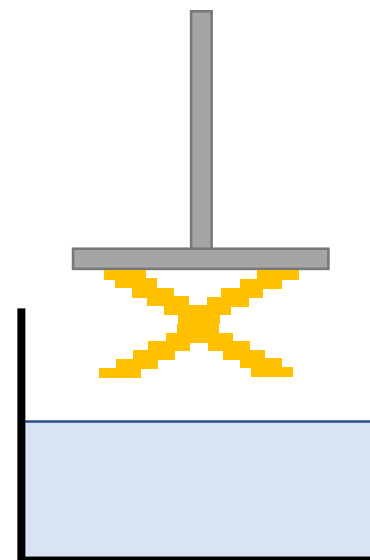
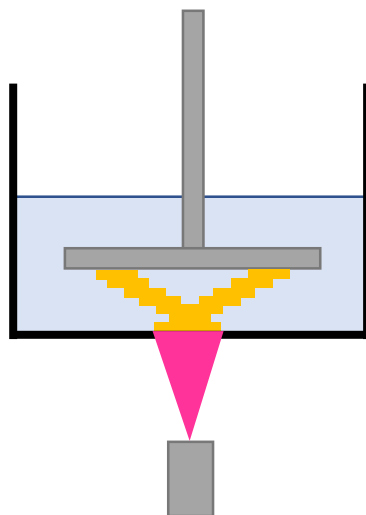


少しずつ引き上げる

光硬化性樹脂の溶液
(光で固まる)



下から光を照射



The Ultimate Guide to Stereolithography

How SLA Works



(現在の) 3Dプリンタには

- ・ いくつもの長所
- ・ いくつもの短所

が存在している.

どんな長所を活かすか？

どうやって短所を克服するか？

2. 3Dプリンタに関連する 近年のいくつかの研究を紹介

2-1. サブミクロンでの造形の実現

"Scalable submicrometer additive manufacturing"
S. K. Saha et al., *Science*, **366**, 105–109 (2019)

この論文の手法のポイント

- ・ 二光子吸収の利用
- ・ フェムト秒レーザーの利用
- ・ Digital Micromirror Deviceによる面露光

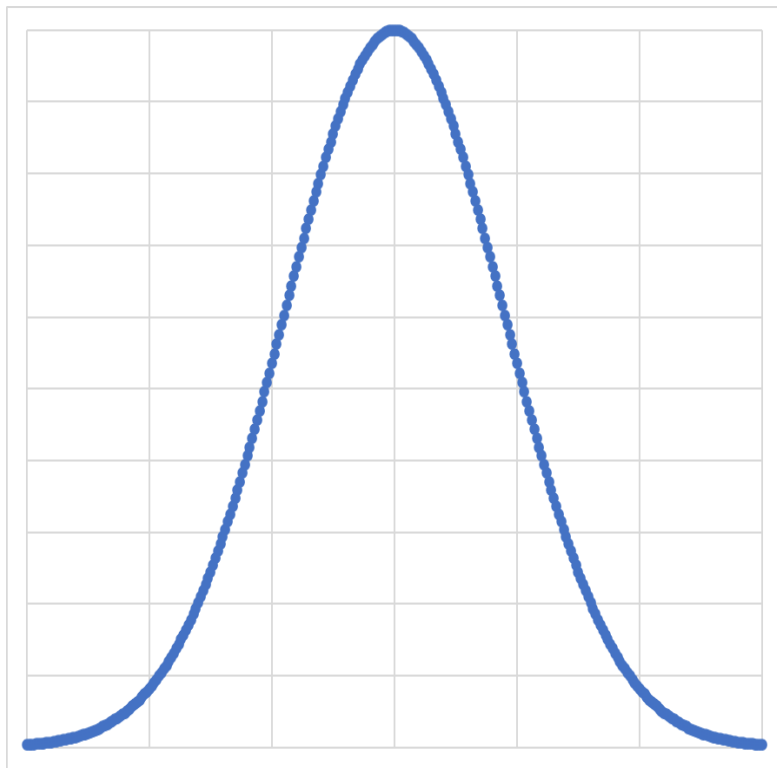
・二光子吸収

反応を起こすのに ΔE のエネルギーが必要なとき、通常は ΔE 以上のエネルギーを持つ波長の光を照射しないと反応を起こせない。例えば、 $5 \times 10^{-19} \text{ J}$ のエネルギーが必要な反応なら、400 nm以下の波長の光を照射しないと反応が起こらない。

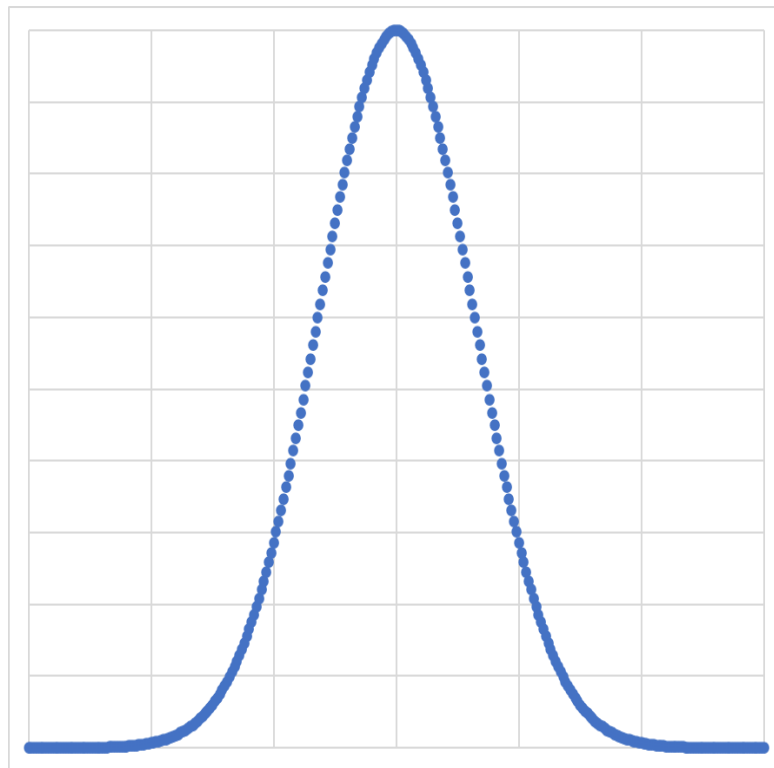
しかし確率は低いが、分子が2つの光子を同時に吸収し反応を起こす場合がある。この場合、光子のエネルギーは半分でよい（前述の例だと800 nmの光でも反応が起こる）。

通常の光反応が起きる確率は光の強度に比例するが、二光子吸収では光の強度の二乗に比例して反応が起こる。

二光子吸収の反応確率のプロファイル



通常の光の強度
(横軸：位置)



二光子吸収の場合
(横軸：位置)

※二光子吸収の反応確率は低いので、実際の縦軸方向の値はかなり小さくなる

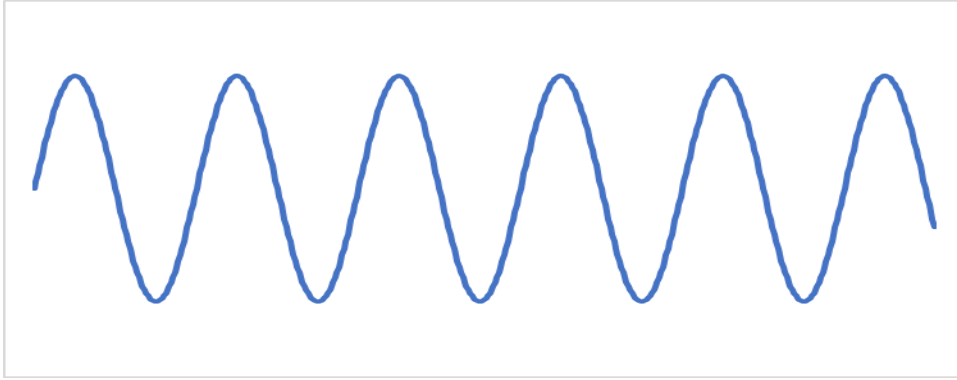
- ・フェムト秒レーザー

パルス幅（1発のレーザーパルスの持続時間）がフェムト秒（ 10^{-15} 秒）程度の極短パルス．

※瞬間のエネルギー密度は非常に高いが，平均のエネルギーは低くなる．

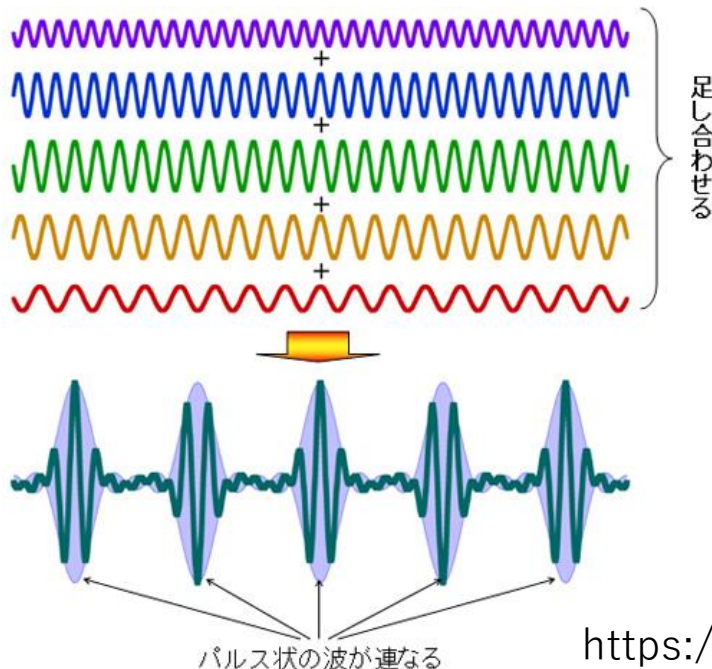
また，波長と同程度の短いパルスとなるので，もはや単一波長ではなくなる（その波形は，無数の波長の光の足し合わせでしか表現できない）．このため，フェムト秒パルスはさまざまな波長の足し合わせ（多色光）になる．

通常の光（サイン波）



- ・ 波長一定
- ・ 繰り返し続く

超短パルス（フェムト秒レーザーなど）



DMD (Digital Micromirror Device)



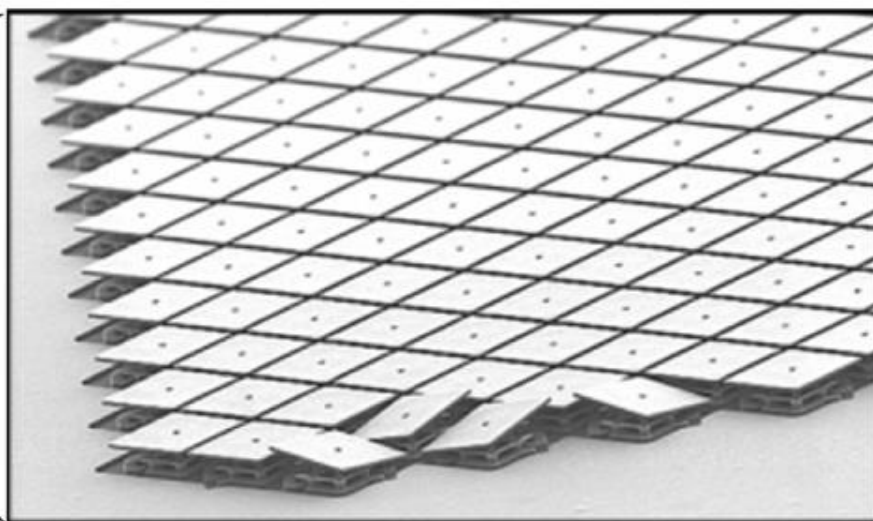
※DLP (Digital Light Processing) とも言う。
DLP自体は光造形式の3Dプリンタでもすでに
使われている。

マイクロミラーのピッチ：7.6 μm
画素数：1920 × 1080
最大切り替え速度：1446 Hz

Texas Instruments
DLP6500



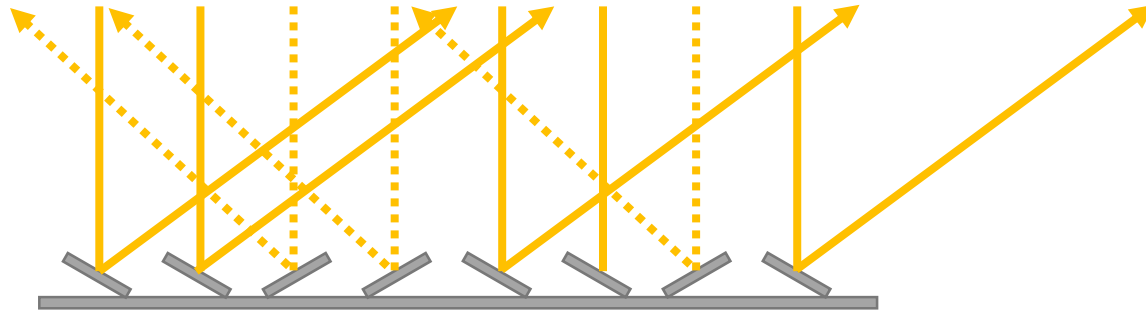
Digital Micromirror Device
(DMD)



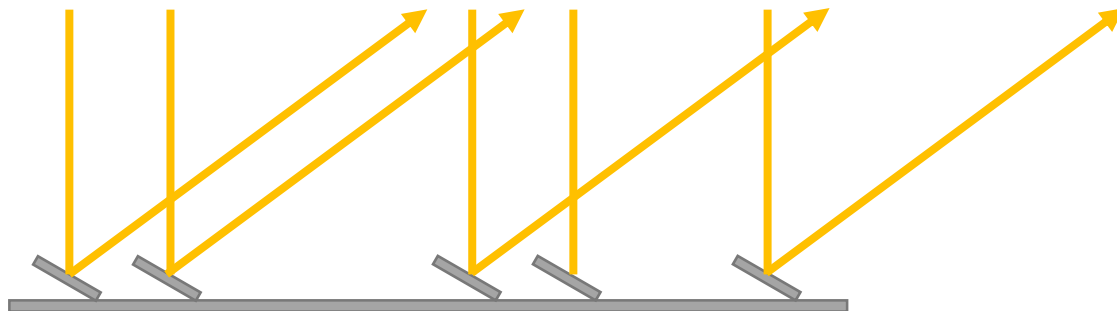
Array of micromirrors

TI社の製品情報ページより

DMDは波長に近いサイズの無数の鏡を駆動して、特定のドットのみの反射を起こすことができる。



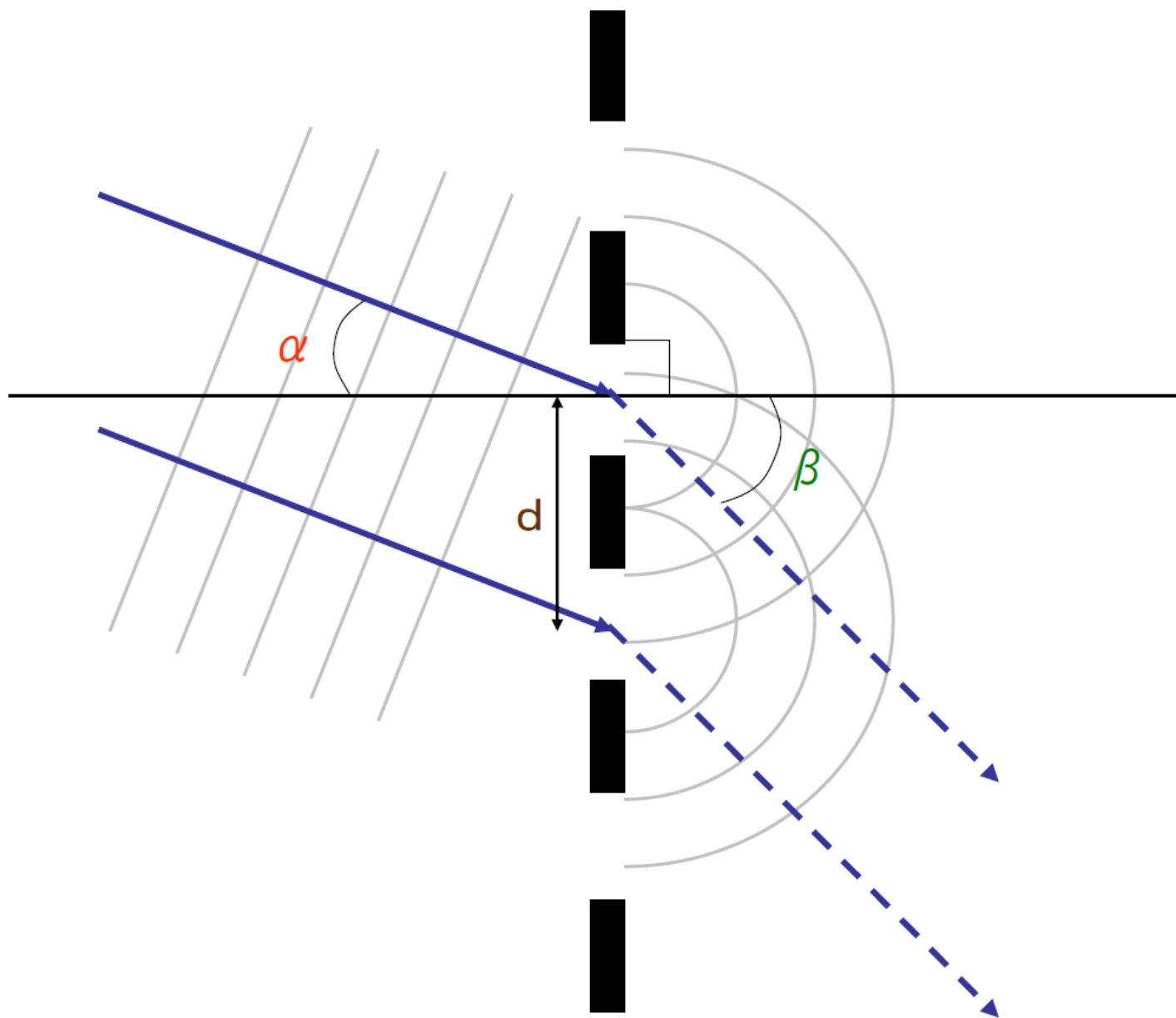
上図の場合，右側の受光者にとっては下図のようなミラーを用意したことと同じ意味になる。

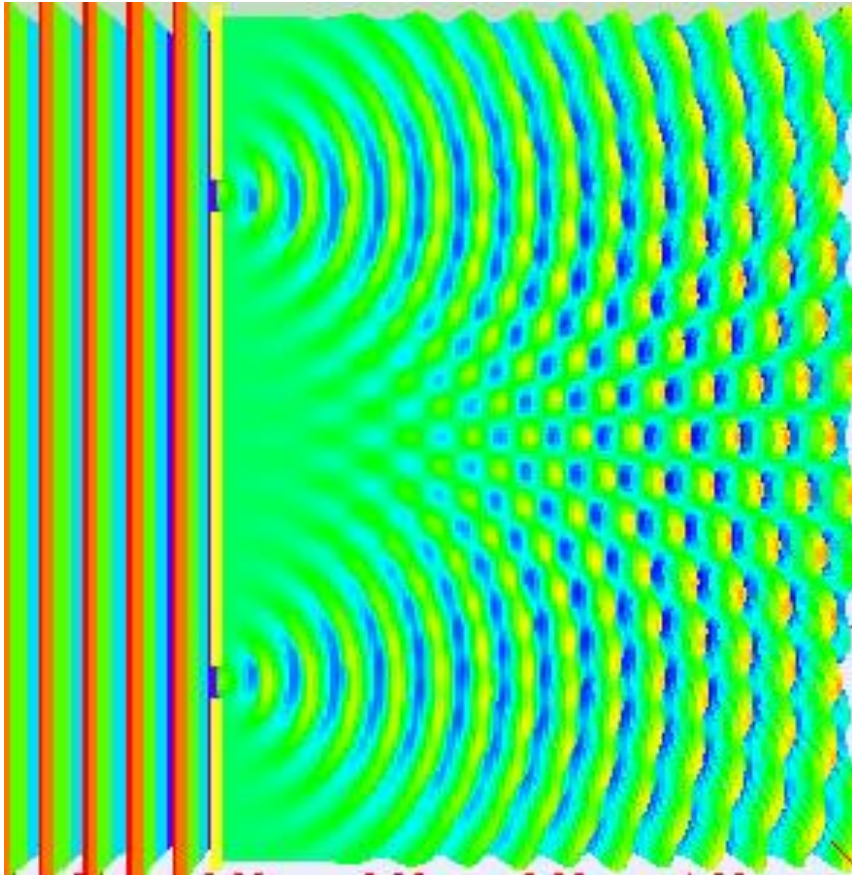


DMD（内の各ミラー）で反射された光は，波同士が重なり合うことで干渉を起こす（回折現象）．

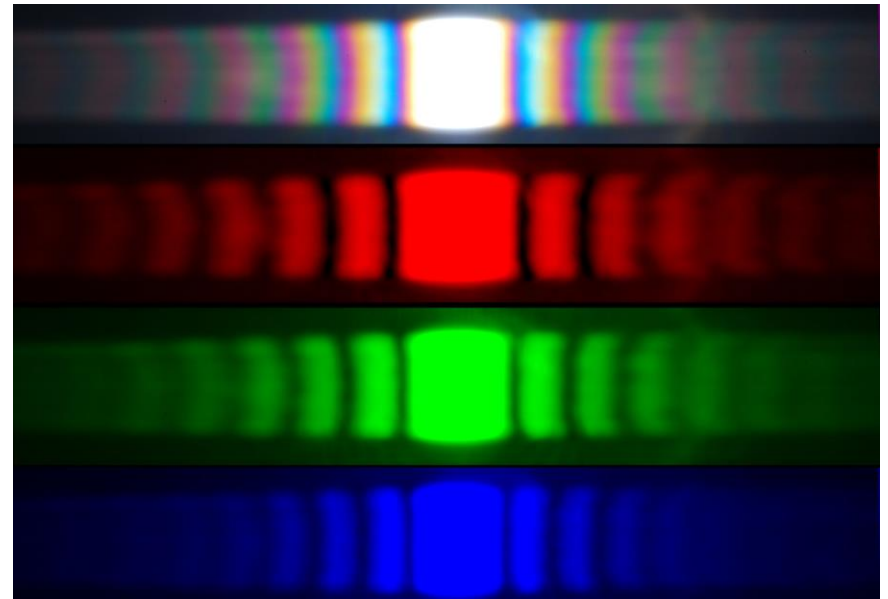
個々のミラーのon/offを切り替えられるということは，どんな干渉模様が起こるのかを動的にコントロールできる，ということである．

つまり照射される光形状（強い光が当たる位置）を自由にコントロールできることになる．





回折の模式図



波長により回折角は異なる

改めて、この論文の手法のポイント

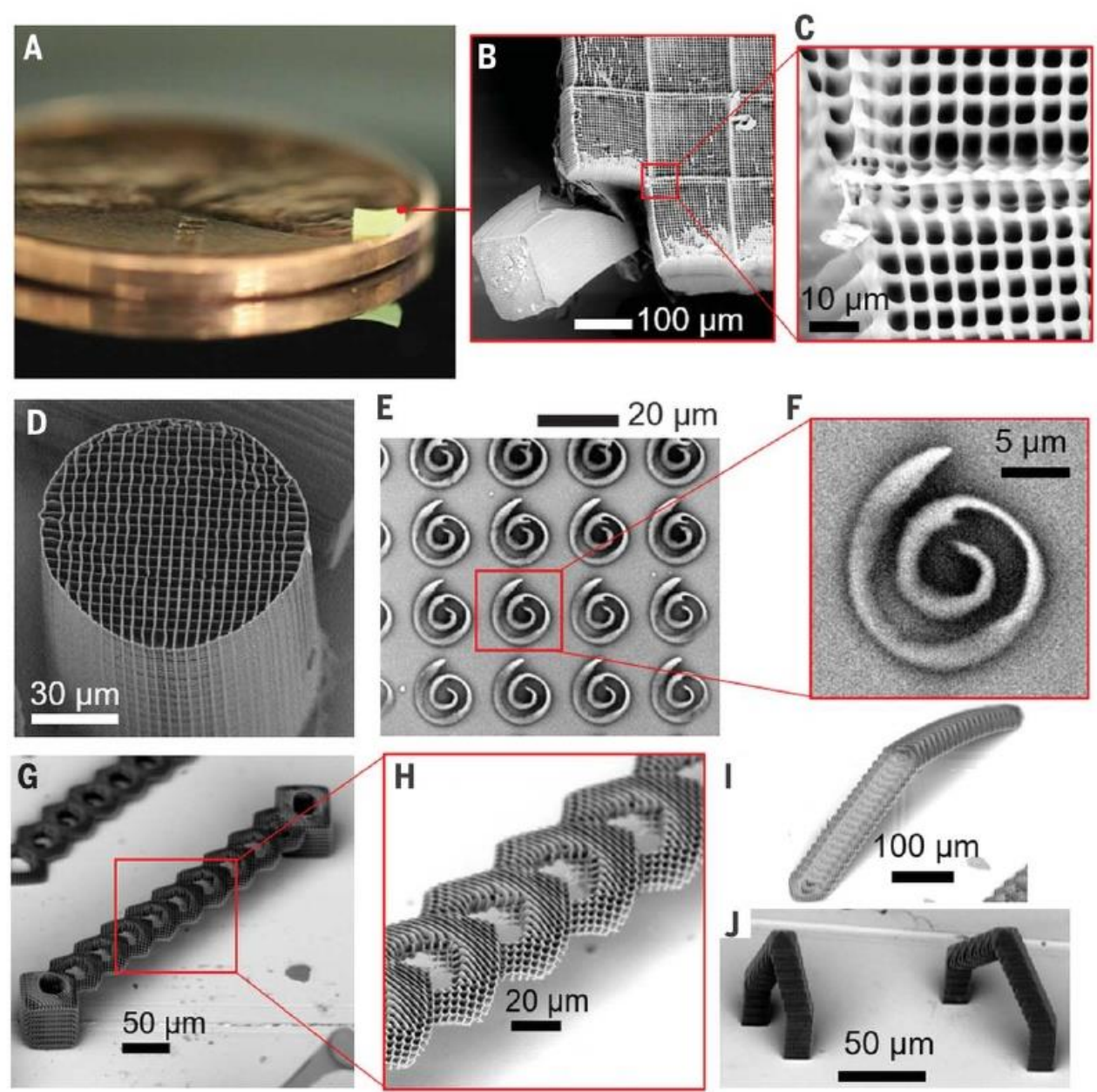
- ・ 二光子吸収の利用
- ・ フェムト秒レーザーの利用
- ・ Digital Micromirror Deviceによる面露光

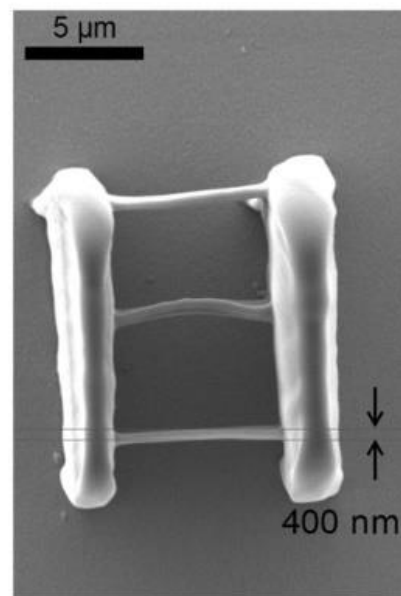
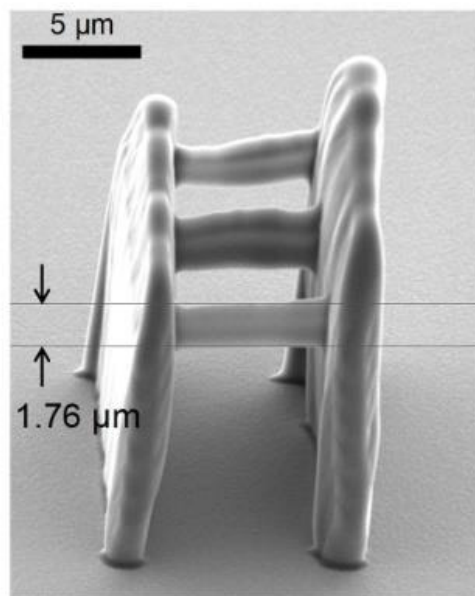
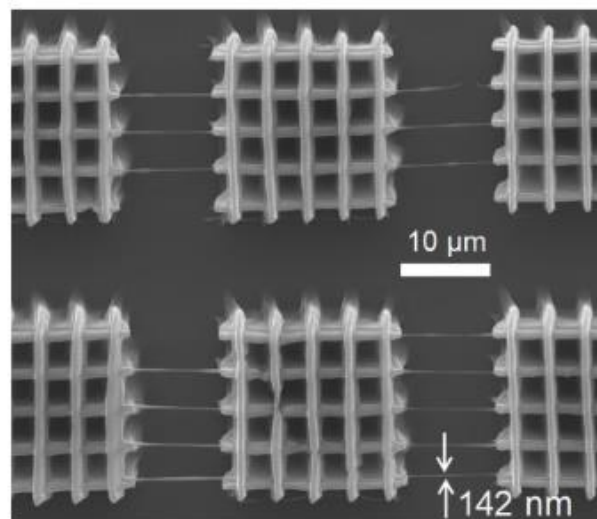
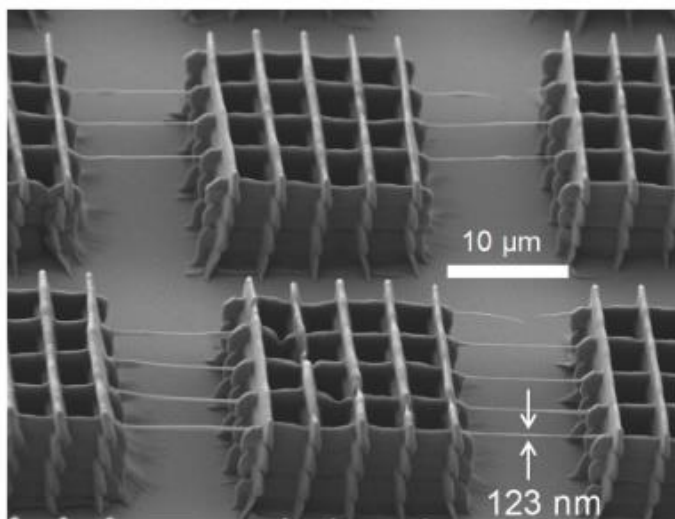
通常の手法とこの論文の手法の比較イメージ動画

Serial two-photon lithography

<https://science.sciencemag.org/content/suppl/2019/10/02/366.6461.105.DC1> より

実際に作成した3次元構造（印刷時間：数分程度）





この論文の手法の長所と欠点

長所

- ・ 分解能が高い
- ・ サブミクロンスケールの構造を，比較的高速に作成することができる．
- ・ そこそこの面積まで作成可能

短所

- ・ 干渉縞を利用しているので，完全に自由な構造を作れるわけではない．
- ・ 装置が高価（フェムト秒レーザーなど）
- ・ そもそも，このサイズの構造をオンデマンドで作ることにどの程度需要があるのか？

2-2. エアロゾルジェットを使った ナノ構造の堆積

"Three-dimensional nanoprinting via charged aerosol jets"
W. Jung et al., *Nature*, **592**, 54–59 (2021)

- ・ 近年注目される材料：メタマテリアル

波長以下の微細な構造を作りこんだ物体

微視的にはコイルやコンデンサ等が光（の電場や磁場）に応答するため，一般的な「屈折率」とはちょっと違う応答を示す（負の屈折率など）．

この結果，通常の物質では実現できない奇妙な屈折や反射などを実現できる．

メタマテリアルで起こせる奇妙な現象の例

クローク：全方向から来た光が，物体を迂回し正反対から抜けるので，物体が無いかのように見える（外部から見えない）。

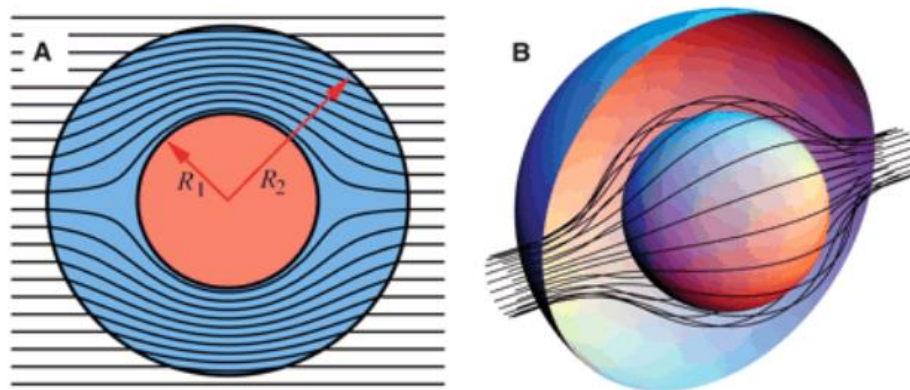


図4 透明マントを進む光

スーパーレンズ：波長限界を超えた非常に細かい構造まで結像できる，古典光学を超えたレンズ。

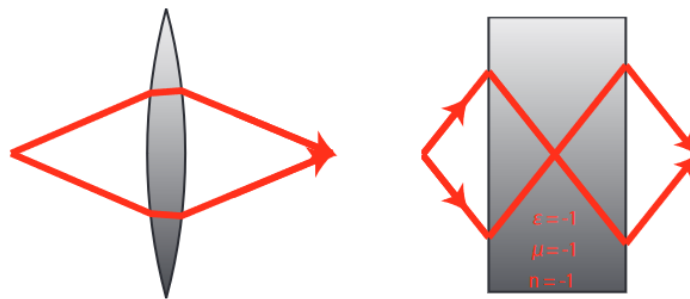


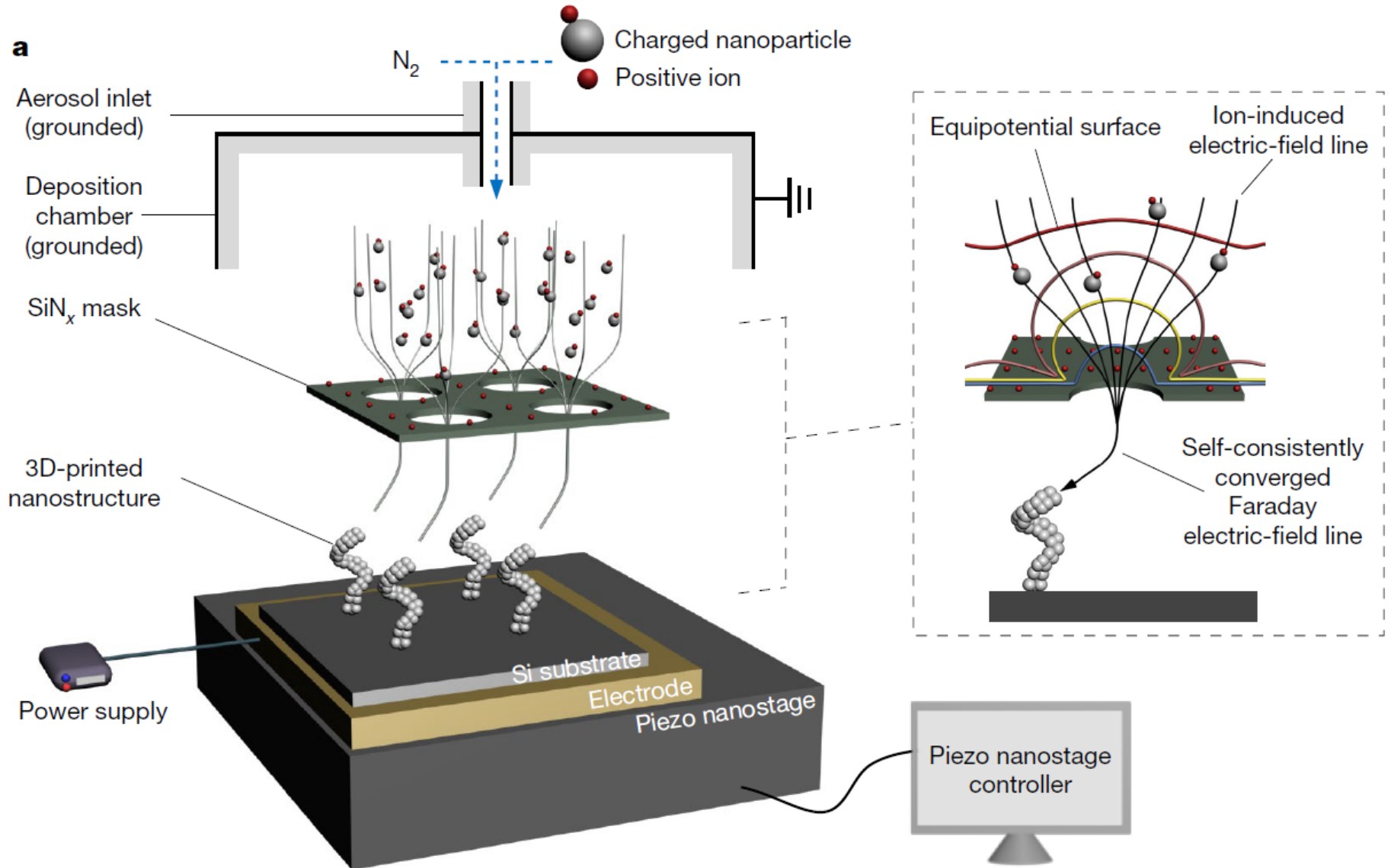
図5 通常のレンズと NIM を使ったレンズ（スーパーレンズ）の光路の違い

メタマテリアルを実現するには、波長以下程度のサイズの金属構造（「C」とか「D」のような構造や、らせん構造など）を、広い面積で無数に作成する必要がある。

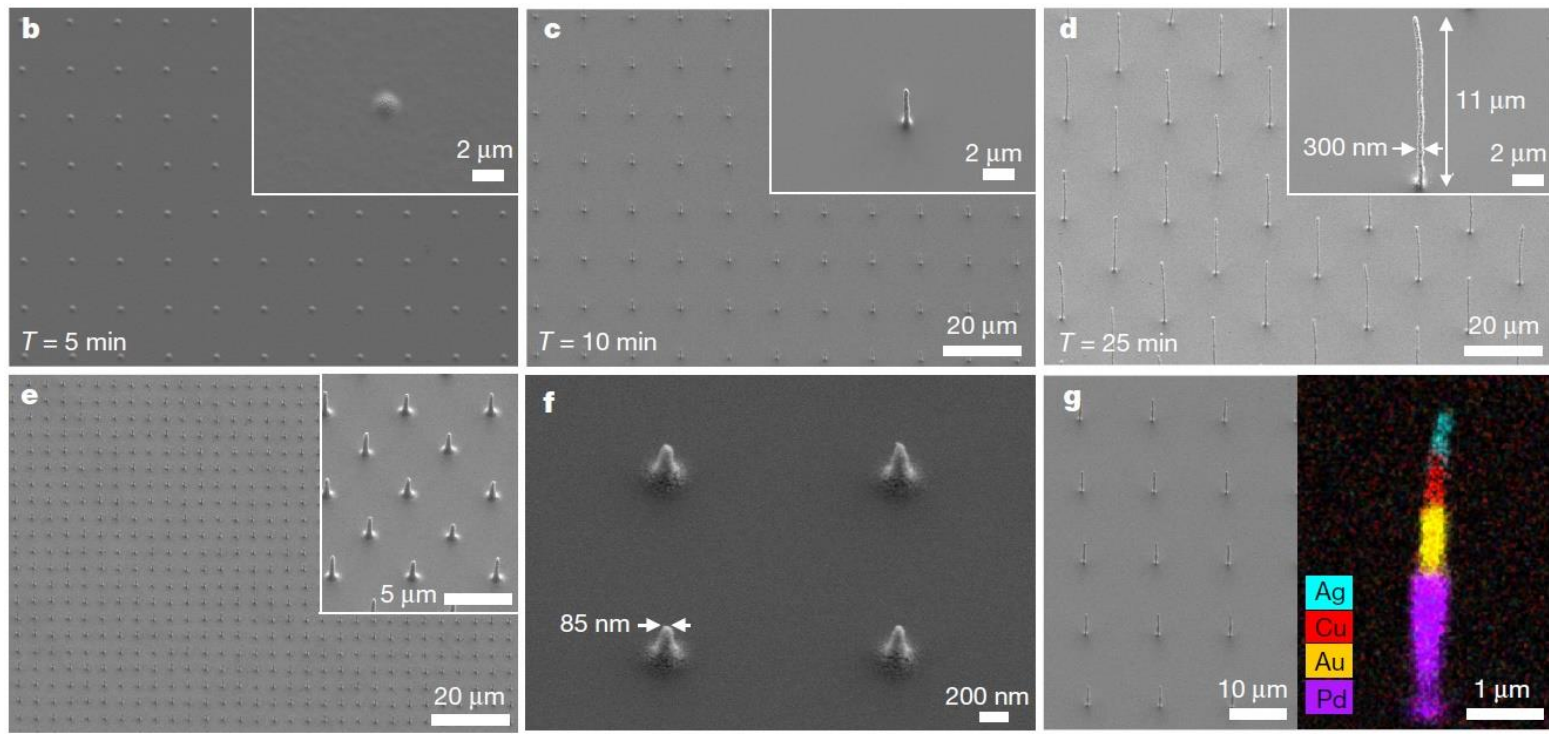
→ 一つ一つ作るとコストが高い。どう簡略化？

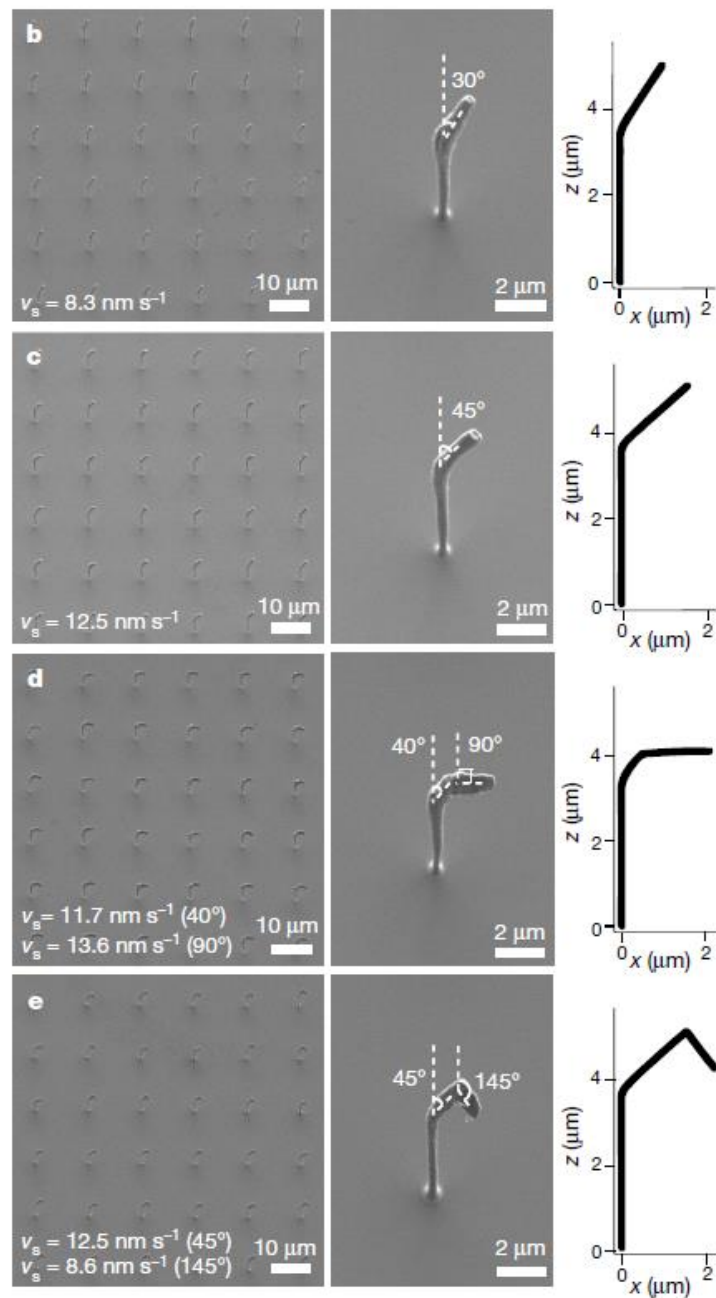
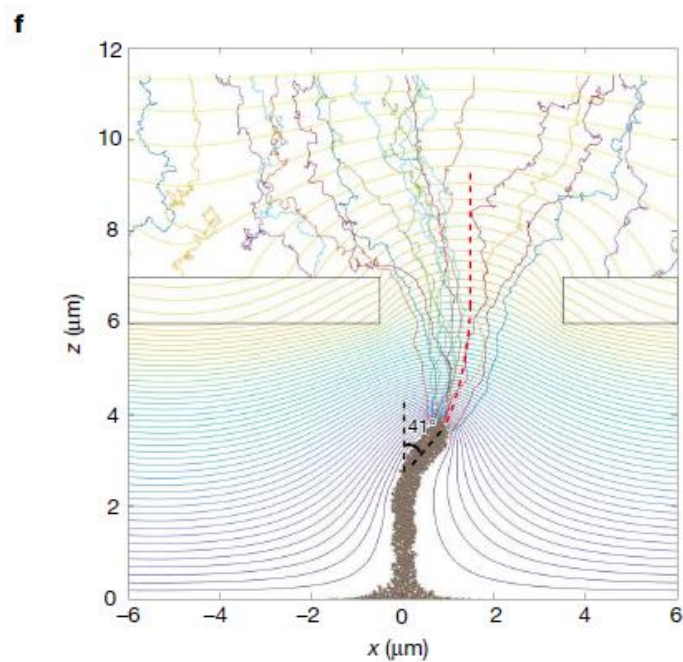
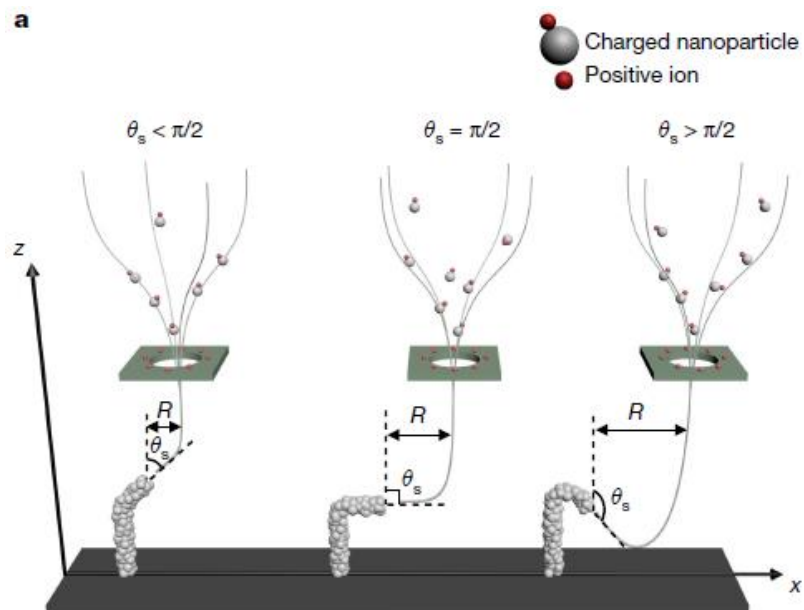
同じ構造を、同時に多数作成できるような手法は開発できないか？

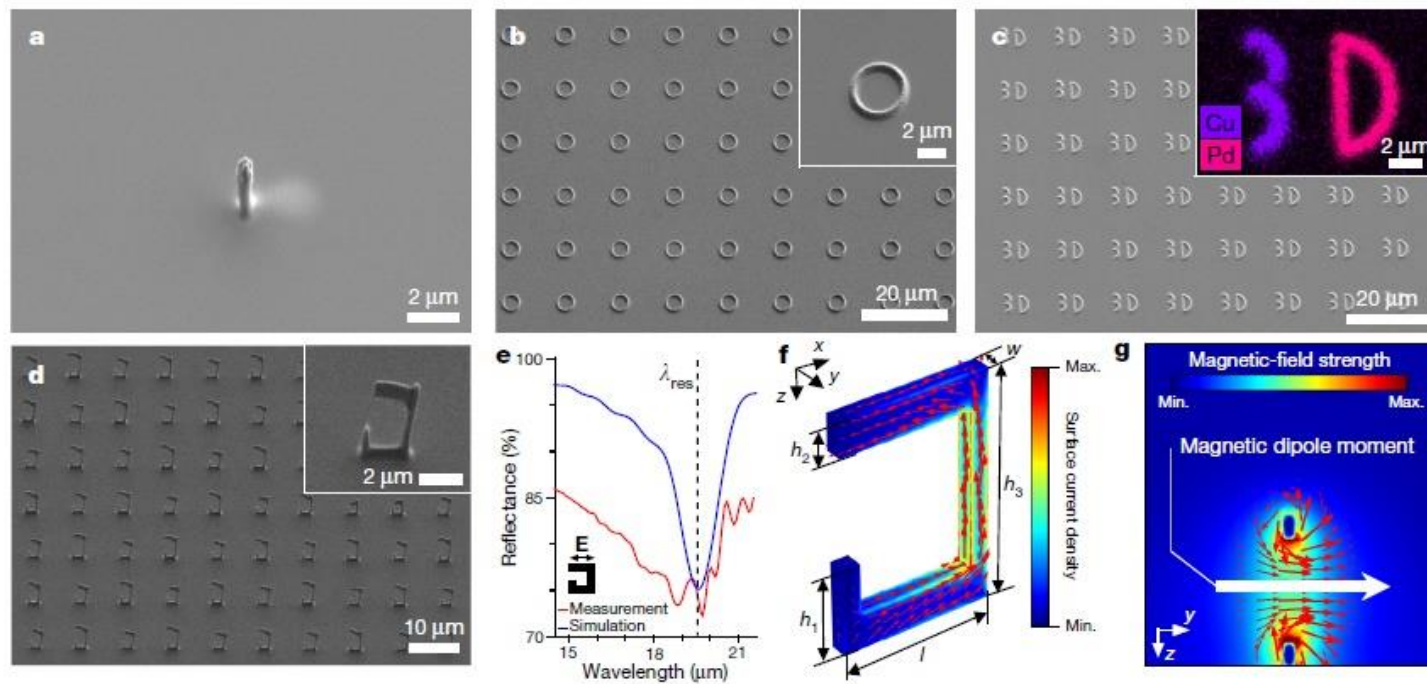
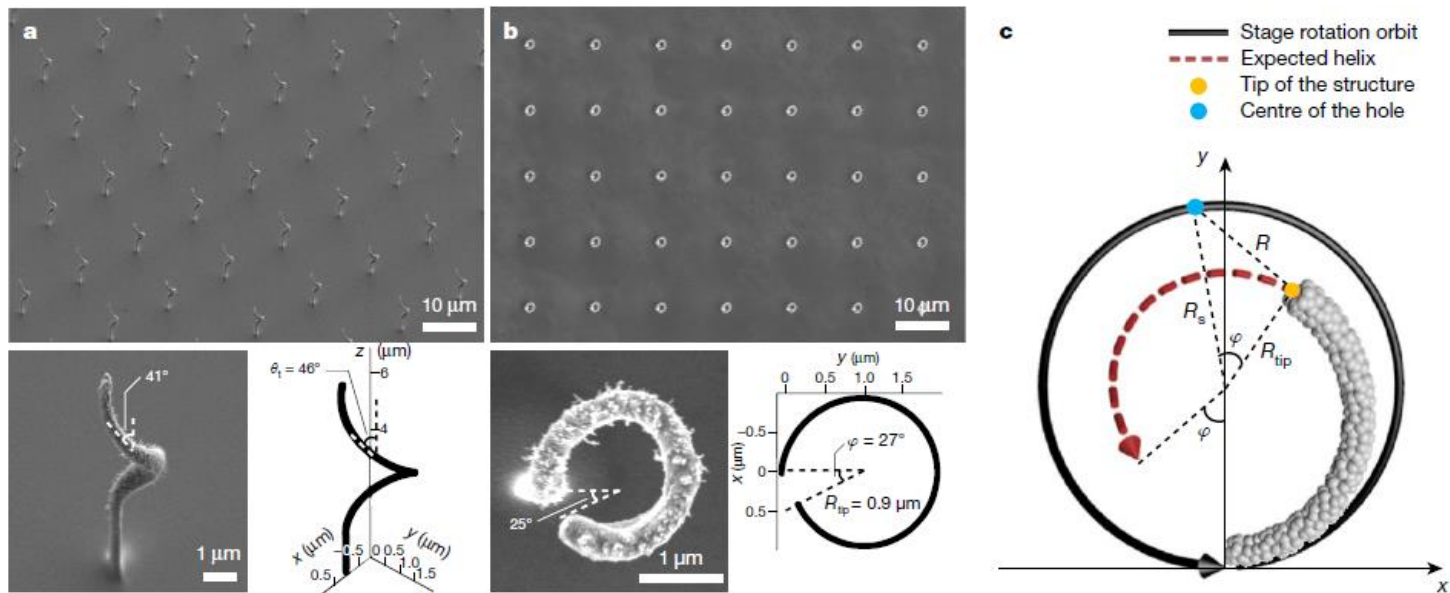
半導体素子の製造で用いられるマスクの技術を、 3次元構造の作成に応用



- マスクの帯電による集束（微細構造が作成可能）
- マスクを前後左右に動かすことで，複雑な構造を描画できる
→ うまく動かすと，3次元的な構造も作成可
- 異なる金属を順番に堆積させることで，複数の材料が積層した複合ナノ構造も作成できる







この論文の手法の長所と欠点

長所

- ・ オーバーハングした構造も作成可能
- ・ マスクを準備しておけば，同じ形状のものを量産できる
- ・ そこそこの面積まで可能でメタマテリアル向き

短所

- ・ 並列した同じ構造の量産しかできない
（複雑で大きい3次元構造には不向き）
- ・ マスクを作成する必要がある
- ・ 装置自体はそこそこ高価

2-3. 複数方向からの光照射による 立体構造の造形

"Volumetric additive manufacturing via
tomographic reconstruction"

B. E. Kelly et al., *Science*, **363**, 1075–1079 (2019)

3Dプリンタが遅いおもな理由：

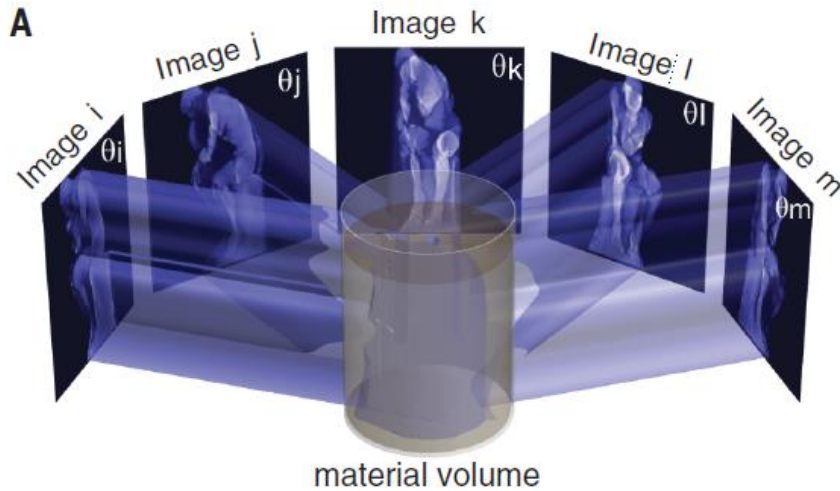
一部ずつ，少しずつ構造を作っていくから

ならば，どうにかして一度に全体を作ってしまうようなことはできないか？それができれば，劇的に製造時間が短くなる（ハズ）．

一気に広い体積（面積）を作る → 光が有効．

現状のSLAやSLS方式は，一層ずつ作成している．これを，一気に体積全体を硬化させるように改良できれば良い．

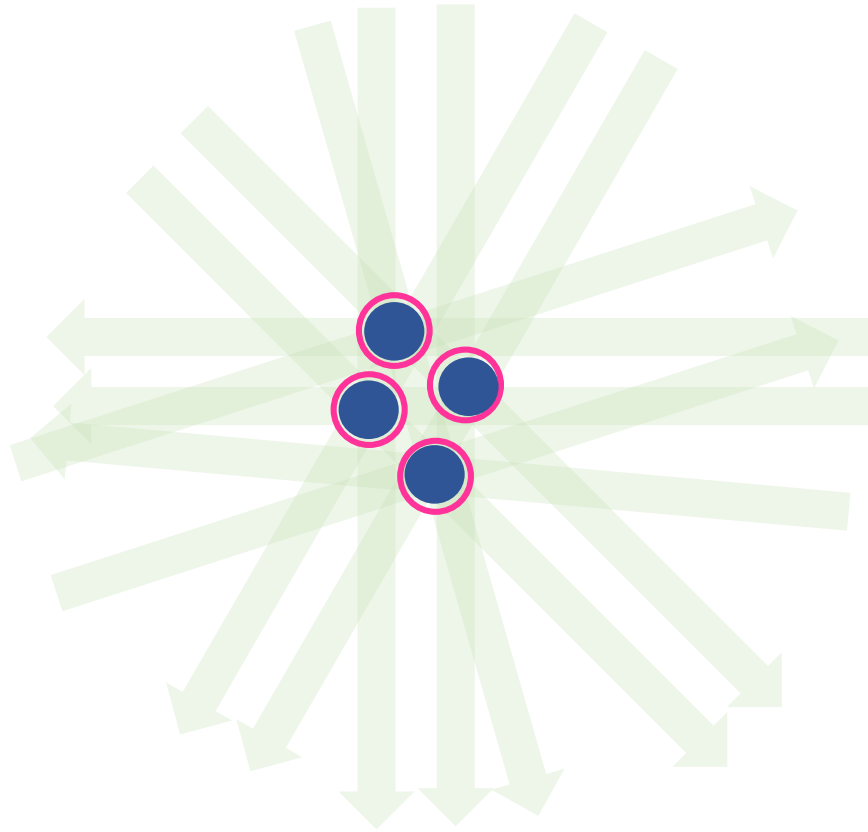
「3次元構築を，3次元読み取りの逆過程と見る」
樹脂を硬化させる光を，いろいろな方向から照射



光が多く重なった部分が
硬化し，そうでない場所
は固まらない
→ 立体を素早く造形.

※これは，CTスキャンなどの断層撮影の逆過程と
みなせる.

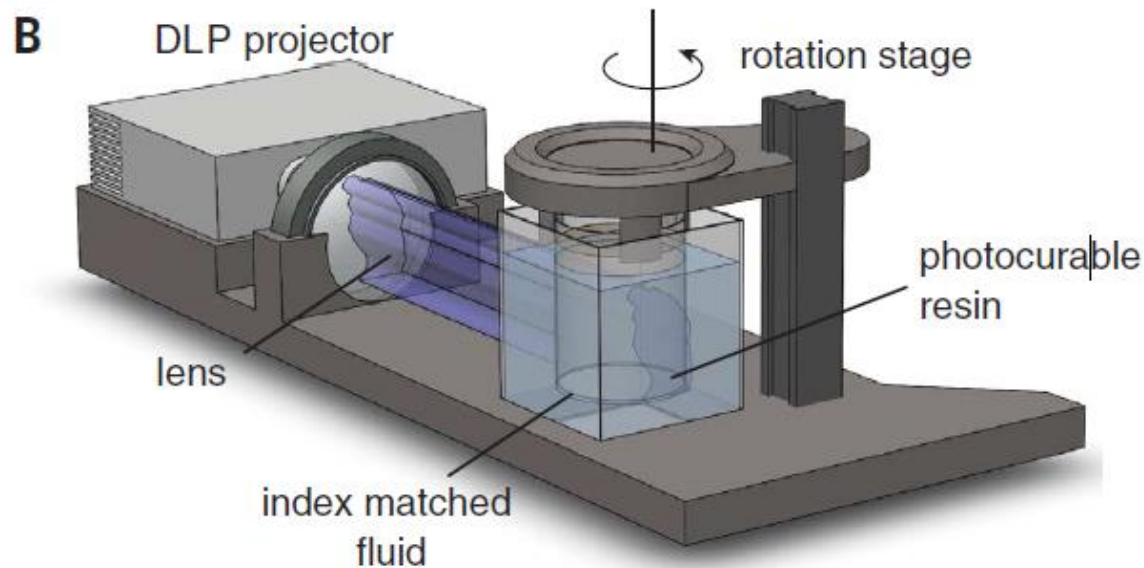
例：いろいろな方向からうまい具合に光を当てると、
特定の場所のみで重なりが大きく、そこだけ
固まる。

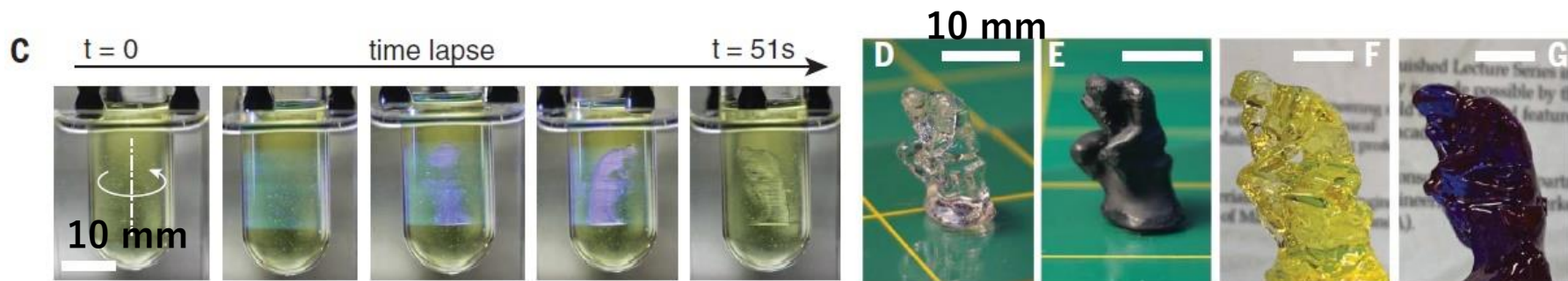


実際には，無数の方向から光を当てるのは難しいので樹脂の方を回転させ，プロジェクターを使って面状の光を当てる．

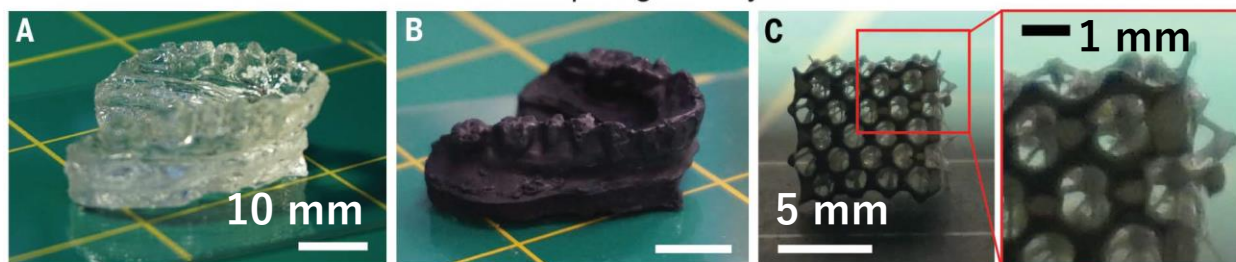
（回転中に樹脂が動かないよう，粘度の高い樹脂を使用する．）

光強度は，プロジェクターの各ドットの明るさで調整可能．





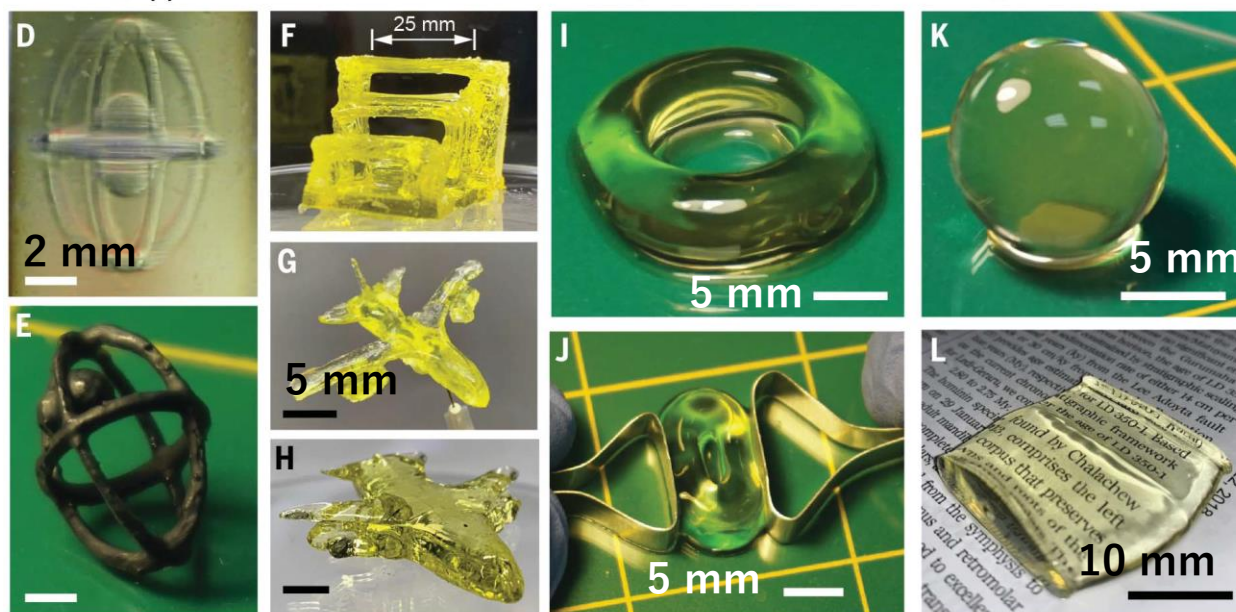
Complex geometry



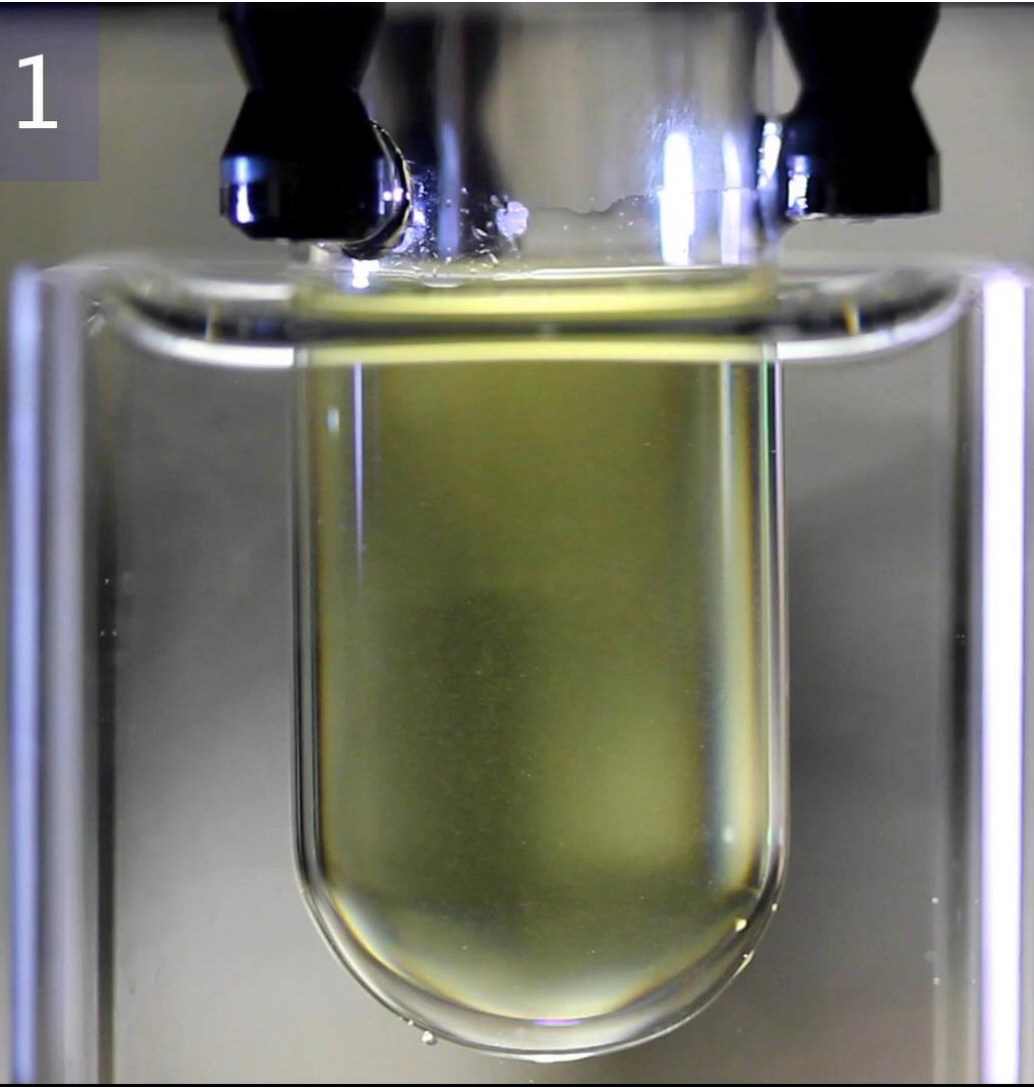
Support-free fabrication

Soft materials

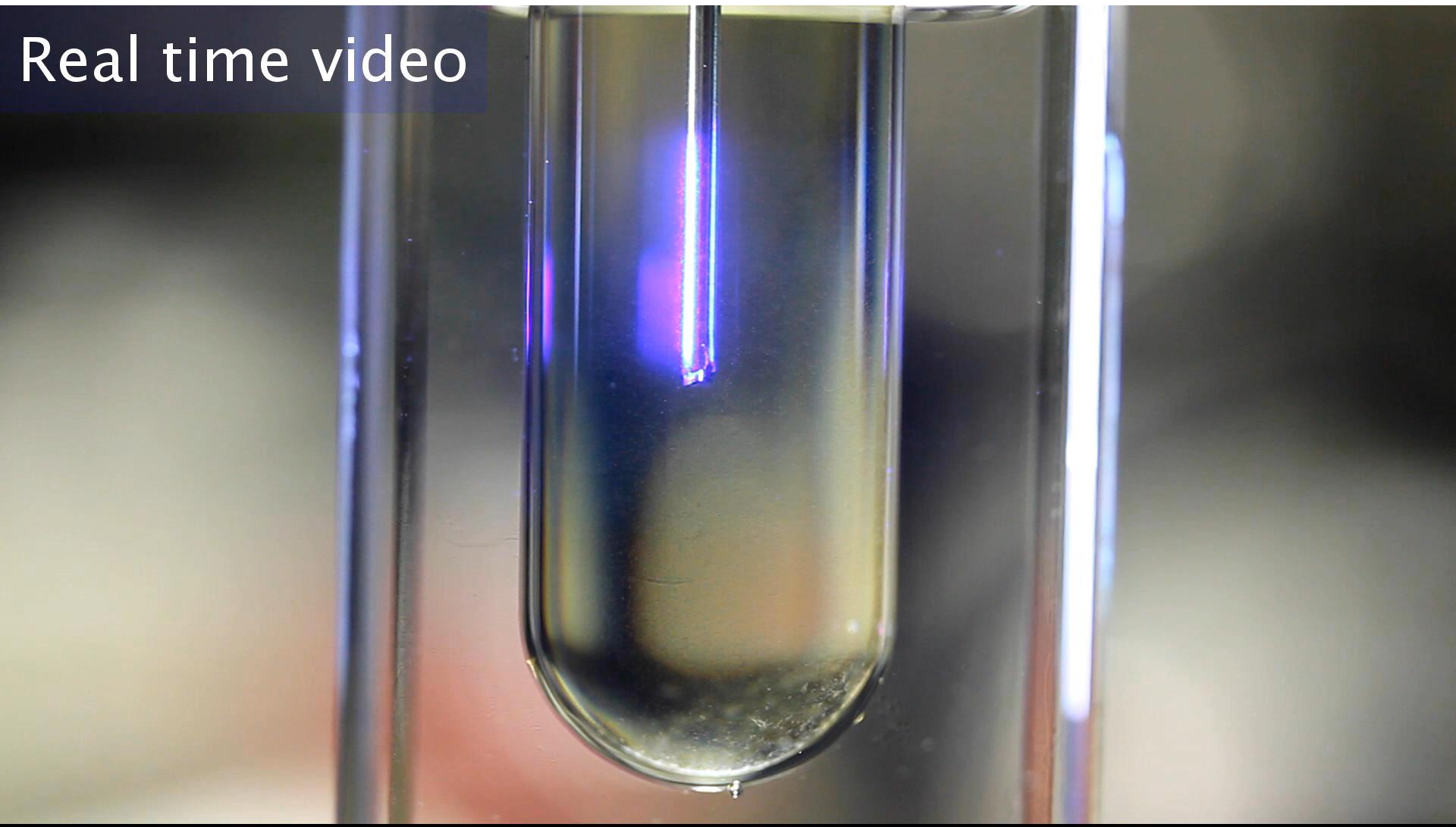
Smooth finish



00:00.01

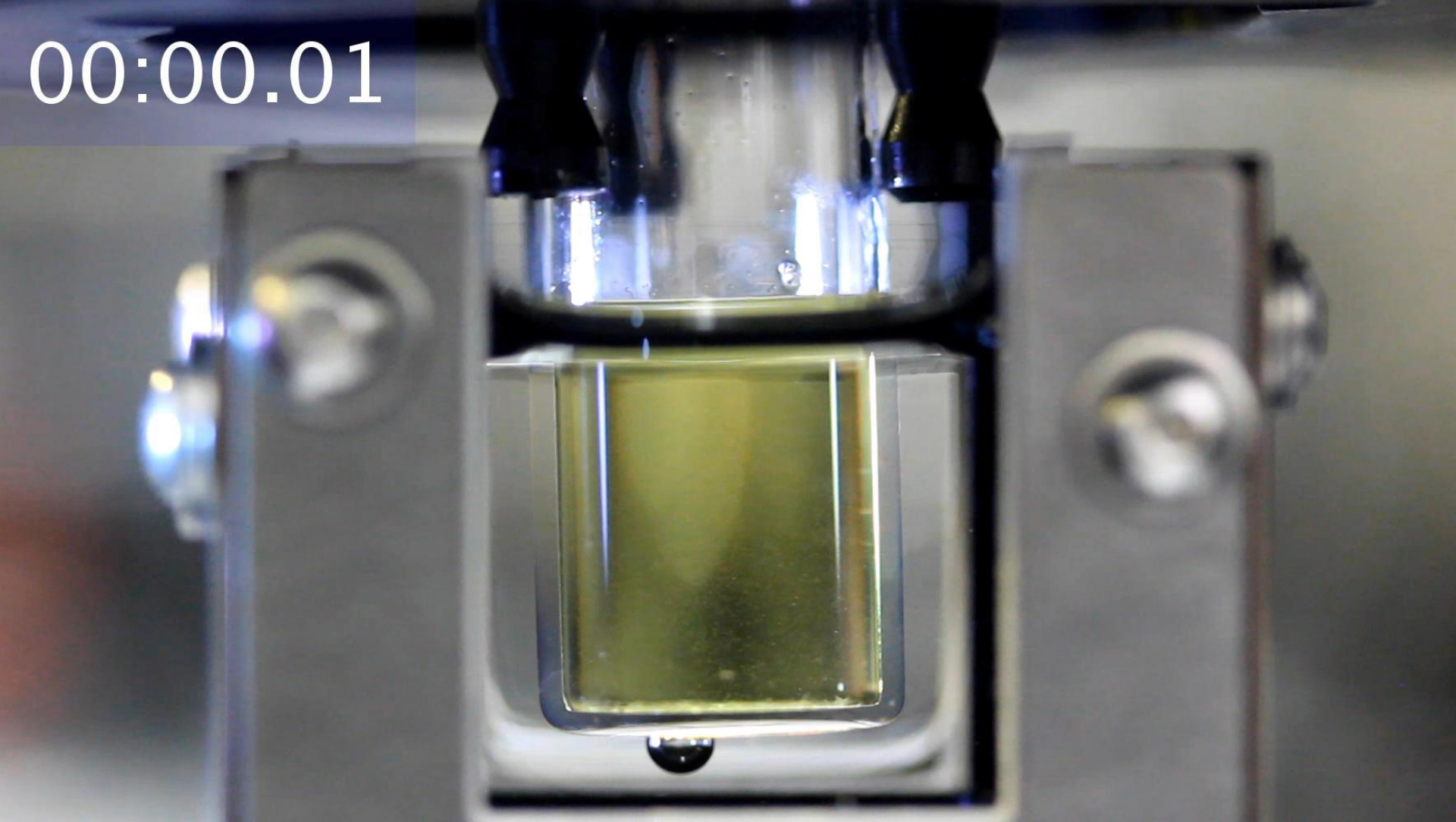


Real time video



<https://science.sciencemag.org/content/suppl/2019/01/30/science.aau7114.DC1> の
https://science.sciencemag.org/highwire/filestream/721909/field_highwire_adjunct_files/3/aau7114s3.mov

00:00.01



<https://science.sciencemag.org/content/suppl/2019/01/30/science.aau7114.DC1> の
https://science.sciencemag.org/highwire/filestream/721909/field_highwire_adjunct_files/4/aau7114s4.mov

この論文の手法の長所と欠点

長所

- ・作成速度がとにかく速い
- ・装置は比較的安価
- ・入れ子構造などそこそこ複雑なものも作成可能

短所

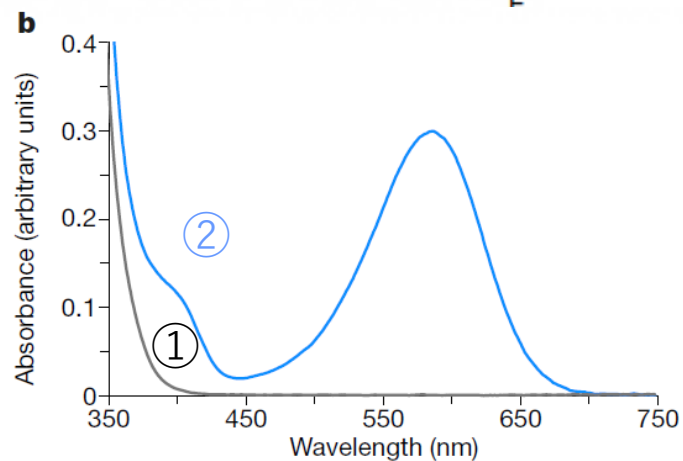
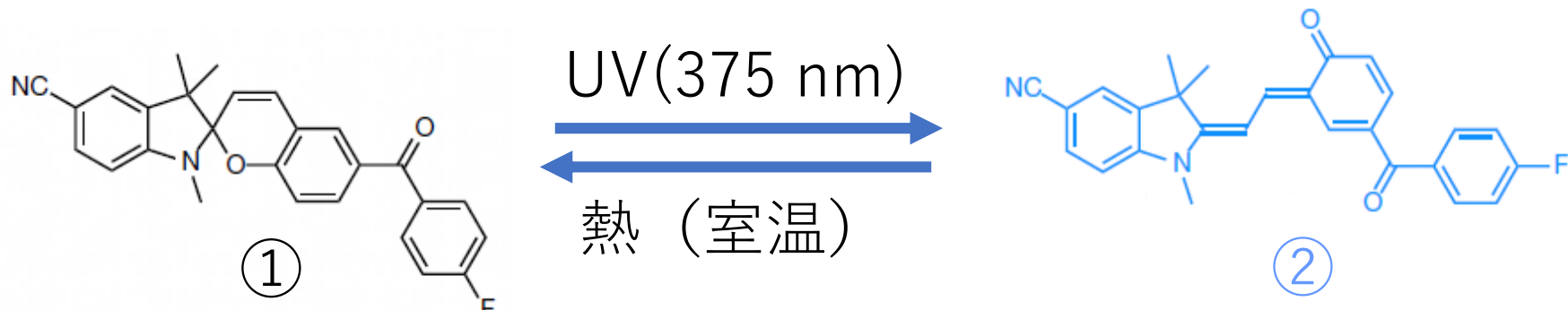
- ・原料が高粘度のものに限られる
- ・ピンポイントの硬化はできないため、精密な構造を作るには限界がある
- ・あまり大きい構造は原理的に作れない（内部まで光を浸透させられない）

2-4. 2種類の光による立体造形 "Xolography"

"Xolography for linear volumetric 3D printing"
M. Regehly et al., *Nature*, **588**, 620-624 (2020)

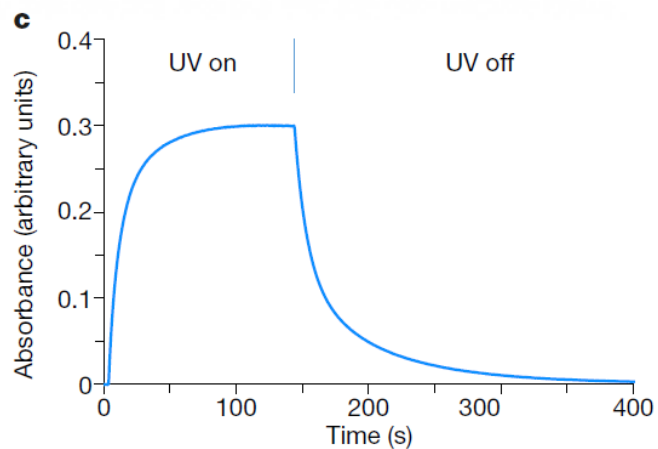
ある範囲を一気に硬化させる体積的 (volumetric) 3Dプリンティングには、印刷精度が甘くなりがちだったり、大きな物体は作りにくい（かなりの量の光を当てないといけないので、本来硬化しないでいてほしい部分まで固まってしまう）といった欠点がある。

この論文では、その欠点を克服するために、2つの異なる波長の光を使ってラジカルを発生させる、という新たな手法を開発している。



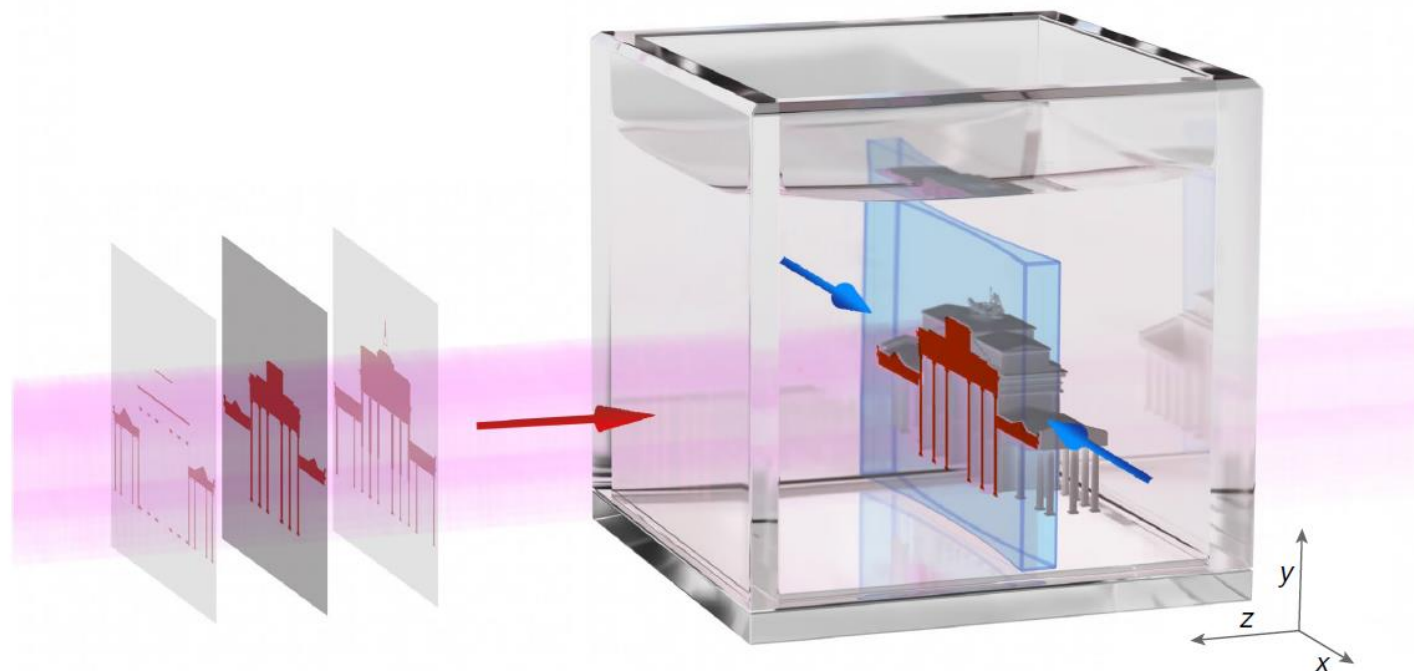
可視光
(450~700 nm)

ラジカル生成
(重合開始剤)



- 2種類の光が当たったところだけラジカルが生成 → 硬化
- ラジカルを生成 → ラジカル重合する全樹脂が使用可能.

この手法の原理



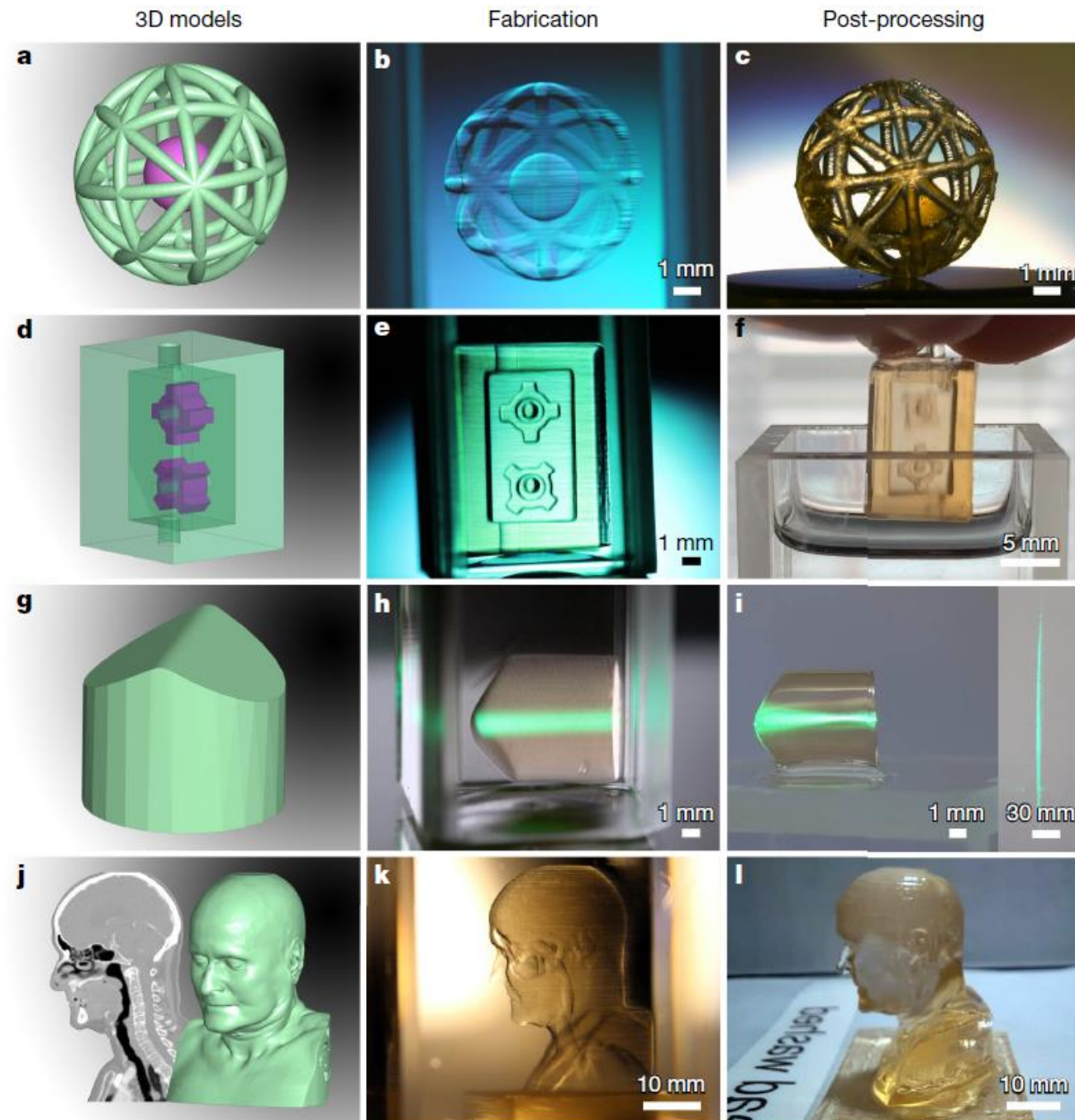
- 薄層状に横から紫外レーザーを照射
※この薄層自体をz軸方向に順次スキャン
- 作りたい形状をプロジェクターでz方向から照射
※現在のUVの位置に合わせた形状を投影
- 交点でのみ重合が起こる

入れ子構造

歯車

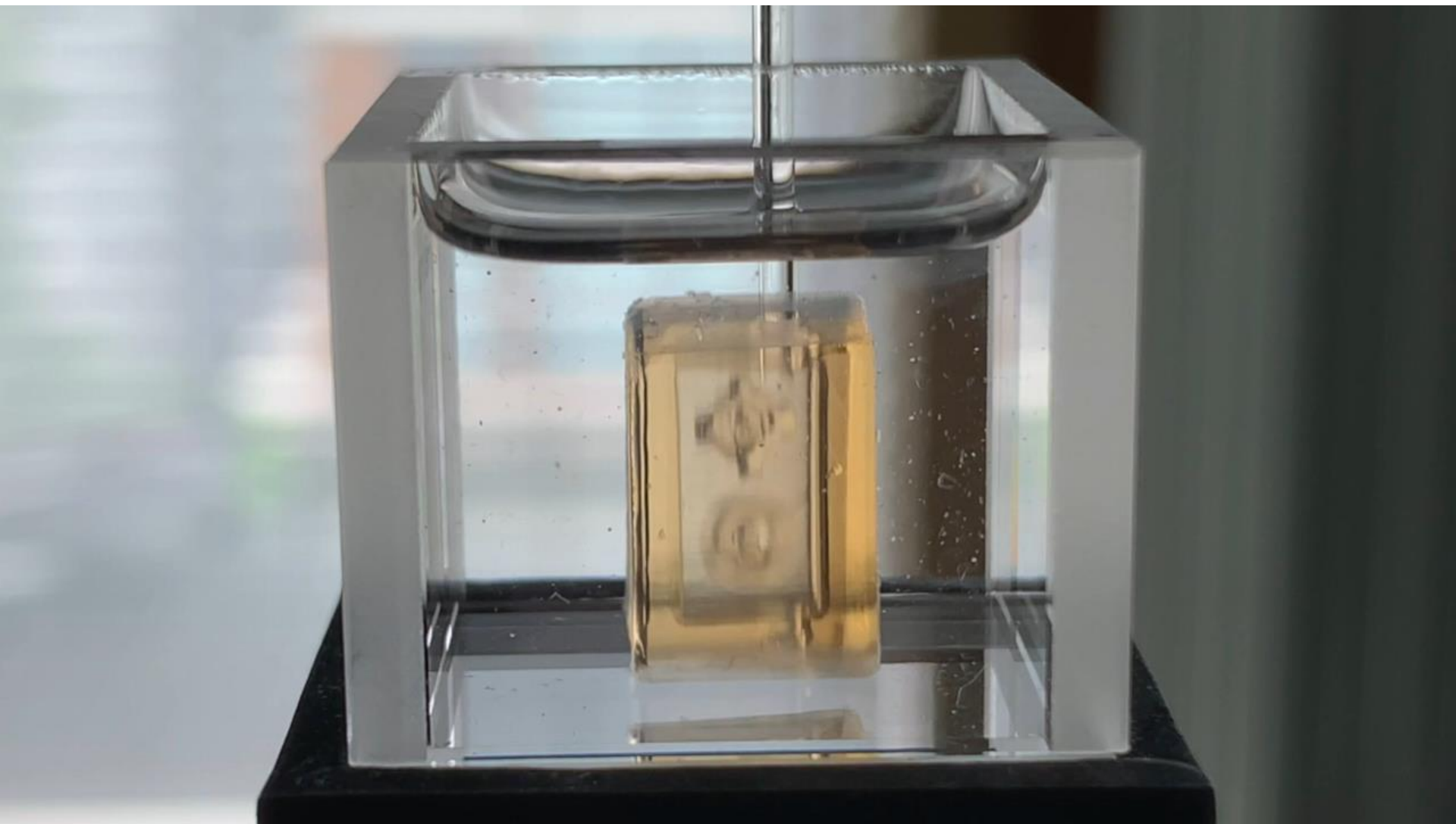
レンズ
(透明素材)

複雑な
内部構造

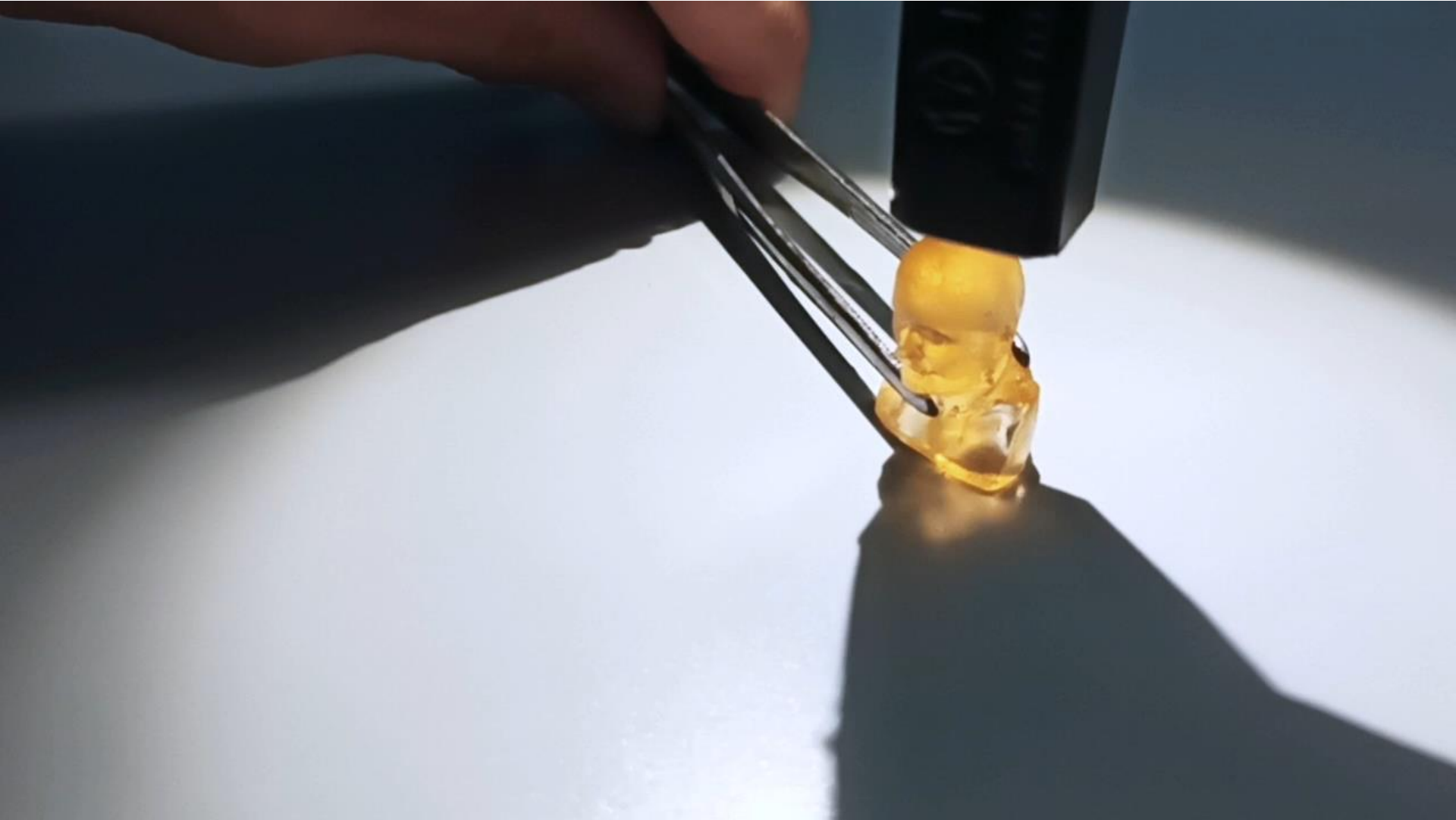


実際の印刷時の様子（最初の方は8倍速）

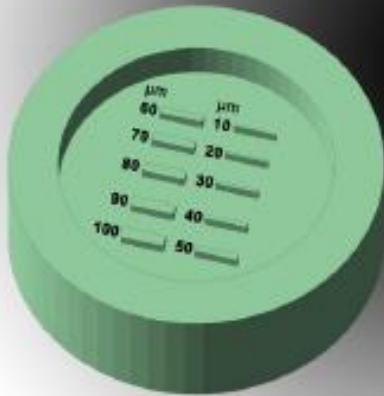




かなり硬くなる素材も使用可能



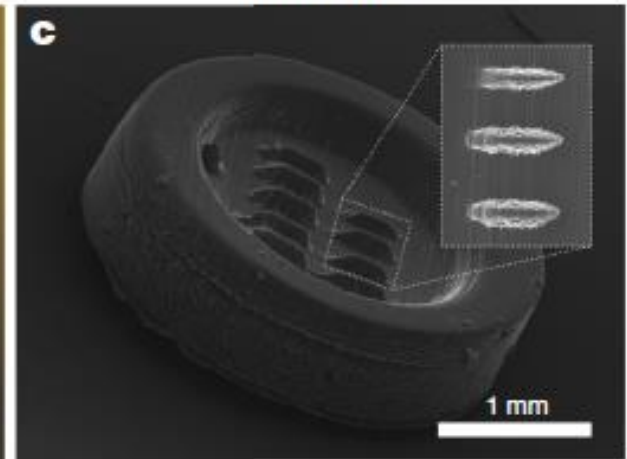
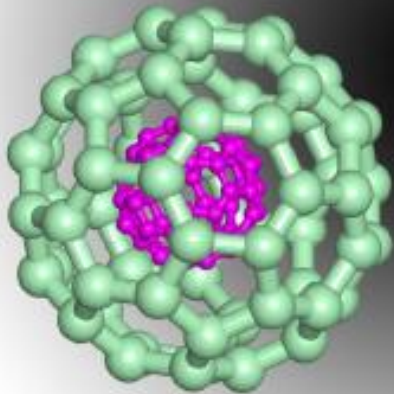
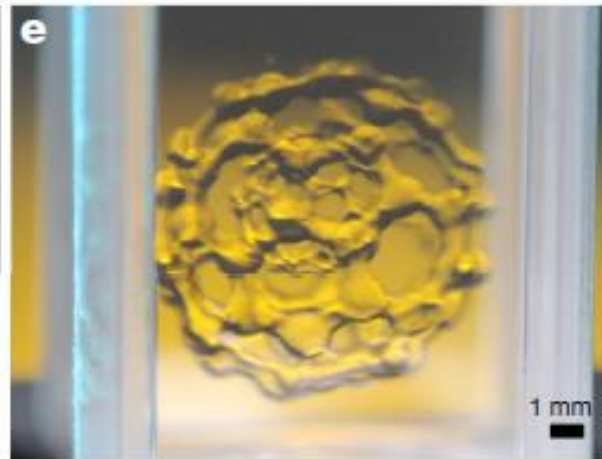
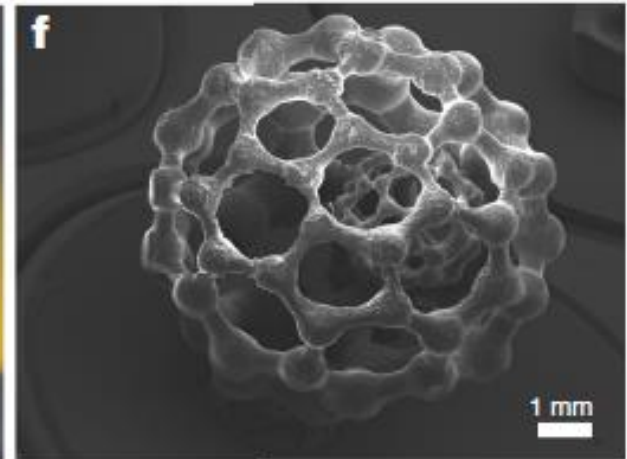
3D models

a

Fabrication

b

SEM image

c**d****e****f**

なお、開発者は一般販売しようとしている模様
(本当に販売されるかはわかりませんが……)

この論文の手法の長所と欠点

長所

- ・ 特殊なものは重合開始剤だけなので、さまざまな樹脂を使用可能
- ・ 作成速度がかなり速い
- ・ 分解能も結構高い

短所

- ・ あまりに大きいものは作成が困難
- ・ より分解能を上げるには、重合開始剤の再設計が必要（励起状態から戻る速度を上げる必要）