

## 4D Printing & Fabrication

# 4Dプリンティング&ファブリケーション

- The Creation of New Value beyond Dimensions -
- 次元を超えた新しい価値の創造 -

# 4DFF

inkcube.org

慶應義塾大学 SFC研究所

藤井 雅彦



inkcube.org



SFC  
YOKOHAMA NATIONAL UNIVERSITY



Great achievements and contributions to inkjet technologies and evolution concept to three-dimensional technology

Johann Gutenberg Prize受賞

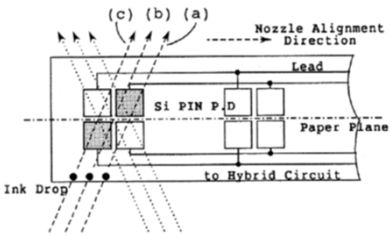


1985                      1990                      2004                      2008                      2019

**Continuous Ink Jet**

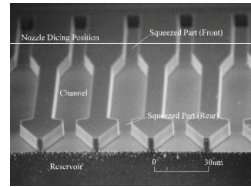
**Thermal Ink Jet**

**Applications of Ink Jet**



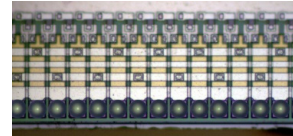
**Single Drop Detector**

M. Fujii, Optical Drop Sensor of Continuous Ink Jet Printer, 19th Imaging Technology Conference, 1988



**800dpi MEMS Printhead**

M. Fujii, New Thermal Ink Jet Printhead with Improved Energy Efficiency Using Silicon Reactive Ion Etching, The Journal of Imaging Science and Technology, Vol. 43, No. 4, 1999



**Micro-Lens Array**

M. Fujii, Issues and Approaches Imposed on Ink Jet for The Progress of Printed Electronics, Transactions on The Japan Institute of Electronics Packaging, Vol. 3, No. 1, 2010

**3D Printing**



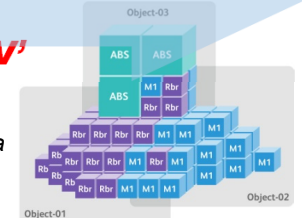
**High Quality 3D Printer**

**3D Data Handling**

**3D**

**Voxel-Based 3D Data Format 'FAV'**


T. Takahashi & M. Fujii, Unrestricted 3D Structure Modeling and Seamless Data Flow to 3D Printers Using Voxel-based Data Format FAV (Fab-able Voxel), IS&T's NIP32, 2016



**Why 4D?**



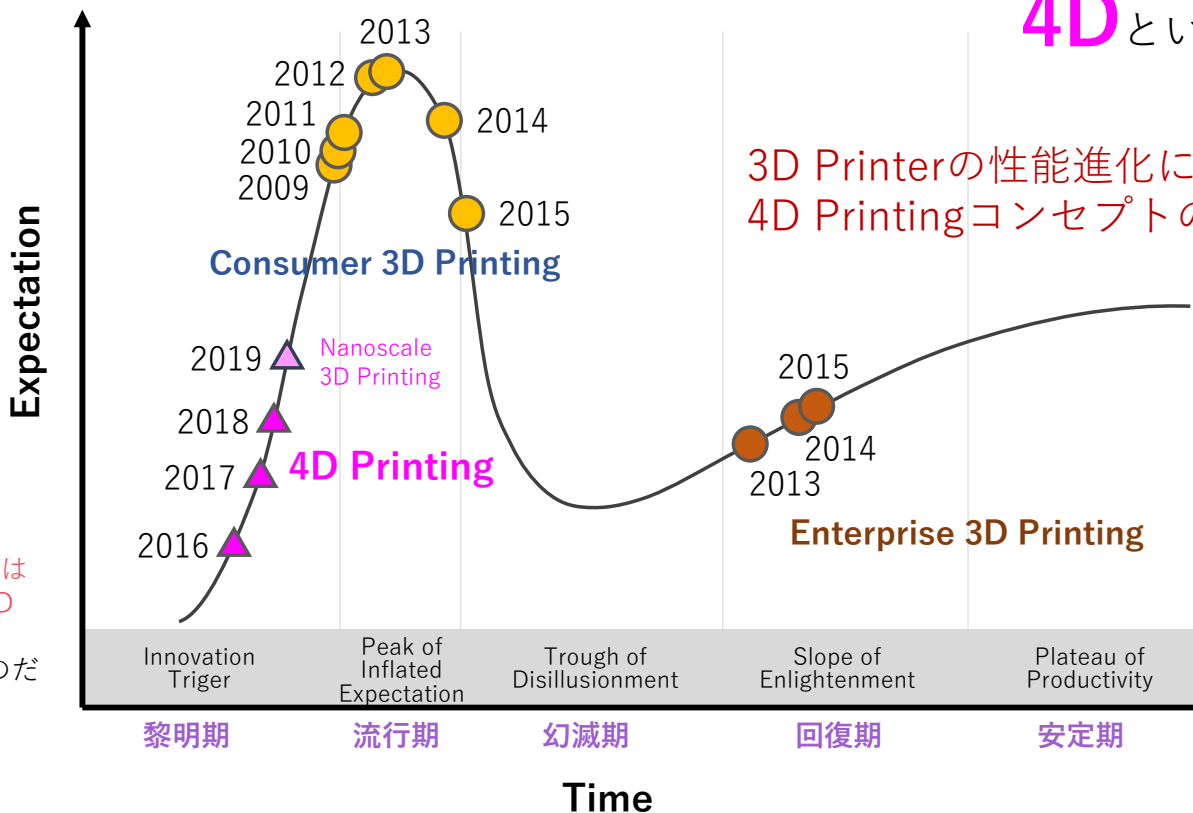
- What is 4D Printing
- Examples of 4D Printing
  - ‘FAV’ Forming the Basis of 4D Printing
  - Introduction of Activities for 4DFF



# What is 4D Printing

# 新興技術のハイブサイクル

## ガートナーのHype Cycle



3D Printing消滅の翌年(2016年)から  
4D Printingが登場

3Dの次は

**4D**という安易さもなくはない

3D Printerの性能進化により,  
4D Printingコンセプトの具現化が進展したのも事実

ガートナーのHype Cycleでは  
2019年からはNanoscale 3D  
Printingに変わった  
(4D Printingの定義がないのだから当然呼び方は変わる)

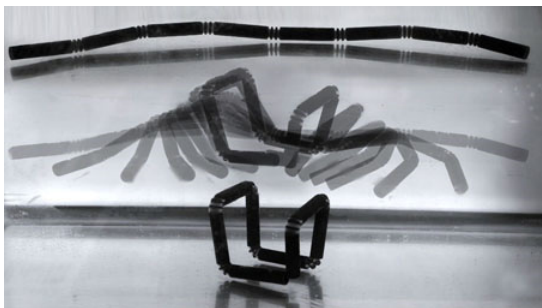
出典：Gartner 2018 Press Release  
<https://www.gartner.com/en/newsroom>

## The Emergence of "4D printing" (@TED, 2013)



By **Skylar Tibbits** (MIT)

形状の時間変化・・・意図してデザイン  
**Self-Assembly** (自己構築)



—MITの同僚—  
(2010)



**田中 浩也** (慶應義塾大学)

**DfAM** (Design for Additive Manufacturing)  
と **社会実装**

—Voxelの  
共同研究  
(2015~)  
4DFF研究会  
設立  
(2019)



**藤井 雅彦** (元富士ゼロックス)

**New Definition of 4th D, DABoF,  
FAV for 4D**



単なる4Dに関する研究事例の発表ではなく、「4D」自体をテーマに掲げた学会(コンファレンス)が生まれている



日本画像学会(4DFF研究会) & 慶應義塾大学SFC研究所ファブ地球社会コンソーシアム

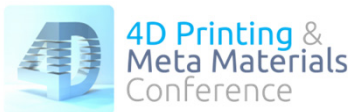
## Conference on 4D and Functional Printing (4DFP/4DFF)

2019年, 2020年も開催



アメリカ電気化学会 (ECS)

## First International Conference on 4D Materials and Systems (4DMS)



Jakajima

## 4D Printing & Meta Materials conference

What is '4D Printing' ?

## 4D Printingとは?

Markets and Markets社予測：  
4D Printing市場は2017年の2810万ドルから  
2025年には5億3780万ドルに増加し、CAGR  
は43%に達する。

# 4D Printing is HOT topics!

What is '4D Printing' ?

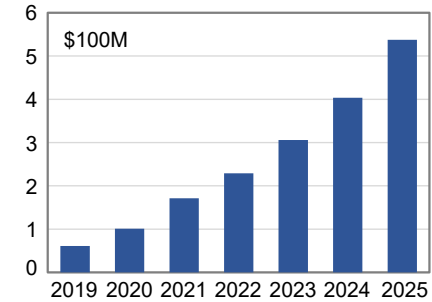
What is a definition of '4D Printing' ?



What WIKIPEDIA says?

the printed product reacts with parameters within the environment (humidity, temperature, etc.,) and changes its form accordingly.

環境要因(湿度, 温度など)に反応し, それらに応じて形を変化させる製造物.  
(ウィキペディアより)





## 従来の4D Printing (4D Printer)の定義

### 4D Printingとは

時間や物理・化学刺激(熱, 電磁力等)により変化する  
3D形状を作り出すこと



形状変化

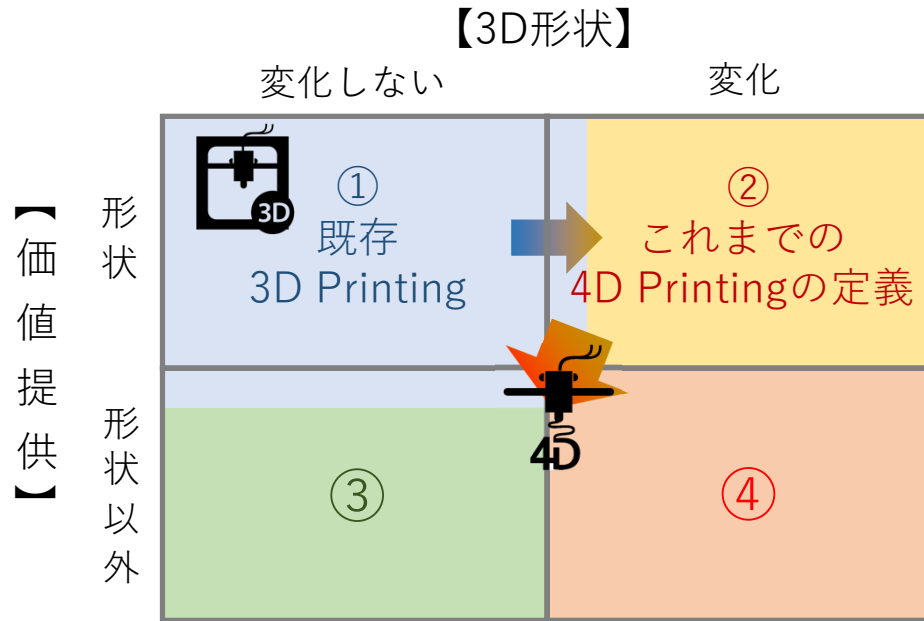


Function  
機能



新しい価値の創出こそが  
4番目の軸(4D)と考える

# 4D Printingとは：新しい定義



時間, 物理刺激(光・熱)による形状変化  
(象限②)

(内部/外部)構造や材料による機能や物性の再現  
により, 新しい価値を創出  
(象限③ / ④)

新規価値創出を4番目の軸(4D)

## 4DFF研究会の設立

機能のデザイン(実現)は大学を中心にかなり様々な取り組み(手段, アプリケーション)が行われている。

具体的な価値(ビジネス)まで提案できているものは少ない(企業の参画は少ない)。



研究者のネットワーク, 発表の場(コンファレンス・論文誌)の提供が必要。



2019年1月



4DFF研究会 設立

4D and Functional Fabrication

<https://sig4dff.org/>

代表 : 田中浩也

運営委員長 : 藤井雅彦



コンファレンス : Conference on 4D and Functional Fabrication開催



論文誌 : Journal of 4D and Functional Fabrication発行(2020年9月)

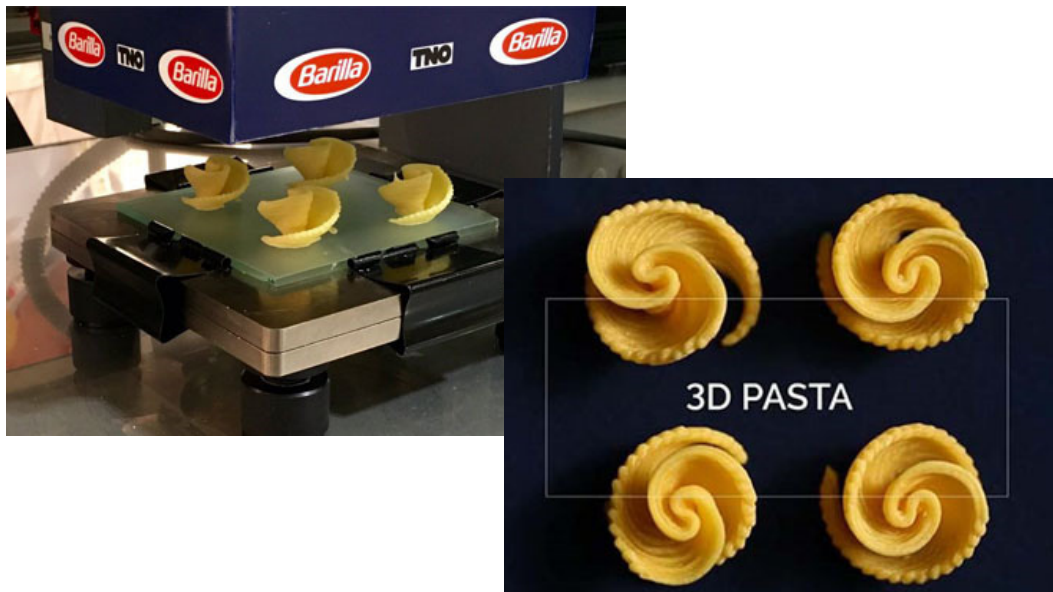


# Examples of 4D Printing

## 4D Printingの事例(1) [物理刺激]

TNO(オランダ)は、Food 3D printingの先進的な研究・開発を行なっている。

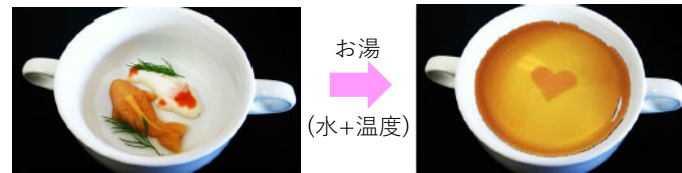
パスタを3Dプリンタで造形。形が楽しいだけでない。



出典：M Noort, 3D-Printed Cereal Food, Cereal Food World, Vol. 62, No. 6 (2017)

- 例えば最適な[茹で加減=熱]で形状変化  
→花が開いて(アルデンテ)お知らせ。
- TNOは**触感と味覚の関係**の研究，デザインへの反映。(介護食等への応用)
- **必要な栄養分(薬剤成分)の添加**も(3Dプリンタによる)Food Printingの目指すところ

山形大学の鯉恋ゼリー



鯉ゼリー

恋ゼリー

出典：「やわらかものづくり革命」古川英光 (2019)

形状

剛性変化により変形

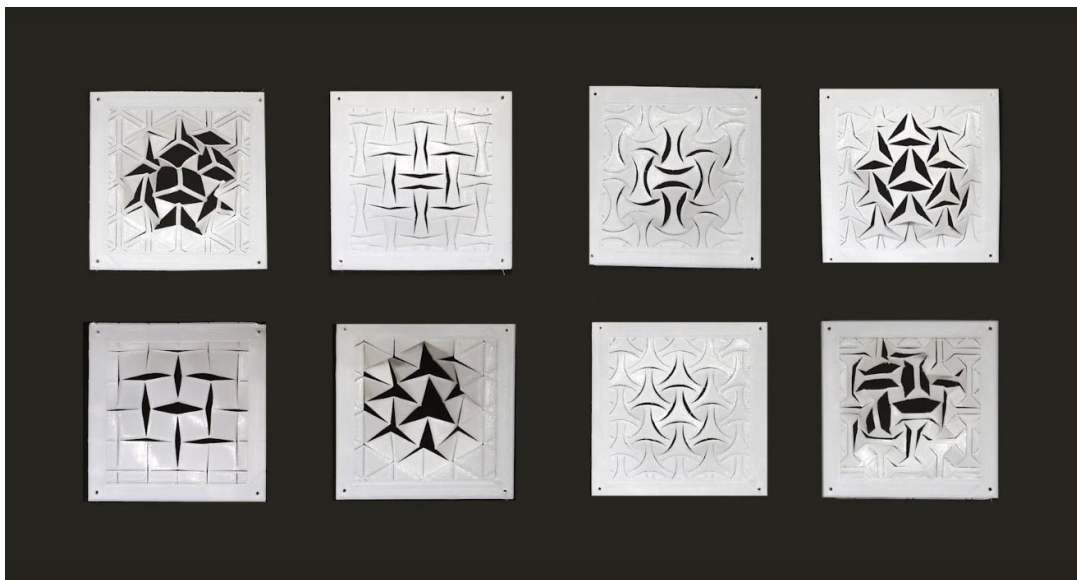
機能

最適ゆで加減で開く

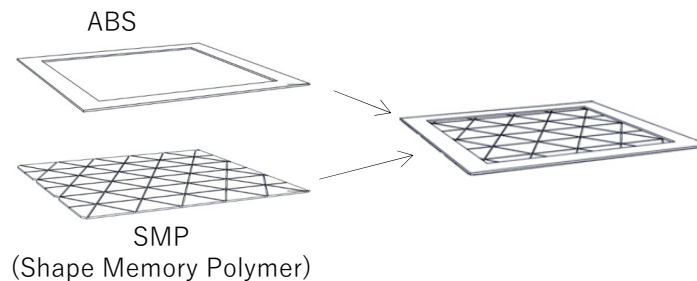
価値

(簡単に)美味しいパスタを提供

# 4D Printingの事例(2) [物理刺激]



出典：<https://www.youtube.com/watch?v=Syn7TaX90Ik&feature=youtu>



温度(気温)上昇で空隙が生じ、風の力でさらに開く



田中浩也(慶應義塾大学), 竹中工務店, キョーラク, ユニチカ  
'Reflective Panel' Project

形状

形状記憶ポリマーに亀裂

機能

温度と風で空隙開く

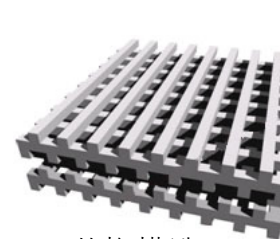
価値

室温の自動調整

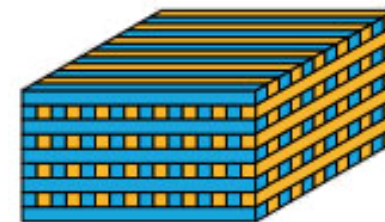
# 4D Printingの事例(3) [内部構造]

井桁構造(Bi-matrix)による **接合機能**, **物性値(ヤング率)の制御**

ナイロン(PA)とポリプロピレン(PP)を接着剤で接合するのは難しい。



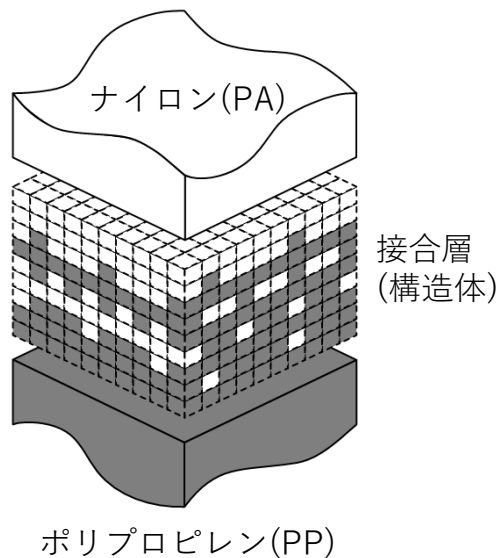
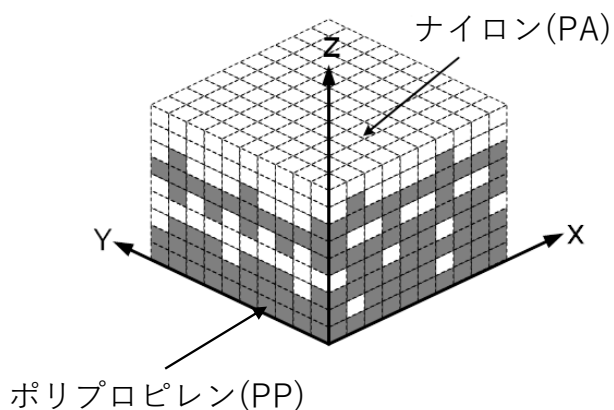
井桁構造



Bi-matrix

3Dプリンタ(FDM方式)で、PAとPAを徐々に割合を変えながらBi-Marix構造を造形。  
上下層の同じ材料同士は熱溶着し、その間の別材料は挟まれて動けない

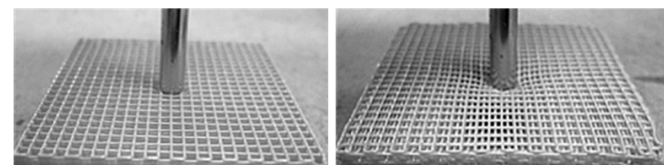
**接合機能**



接着しない材料同士の接合

出典：JIS B 9641 「3Dモデル用FAVフォーマットの仕様」解説書(当間, 武藤工業)

**ヤング率の制御**



井桁の位相をずらすことによる、(同一材料での)ヤング率の制御

形状

異種材料の井桁構造

機能

異種材料の接合機能

価値

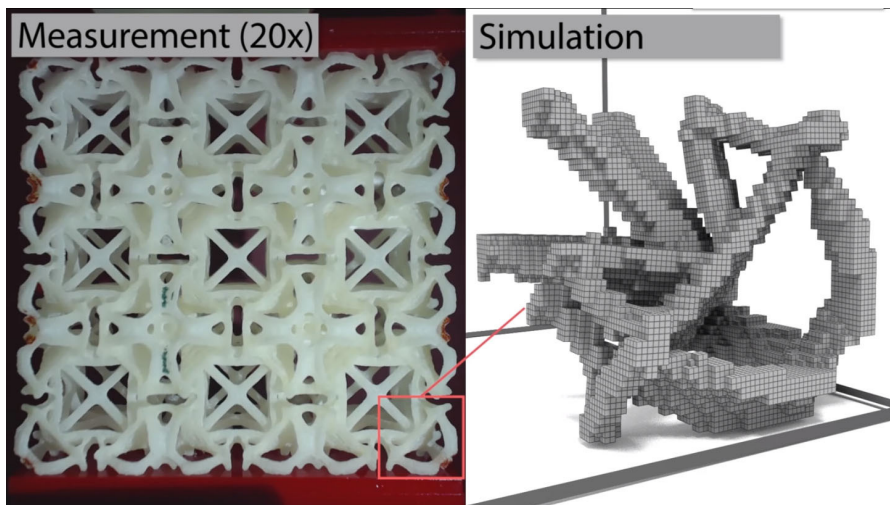
新しい機能素材



# 4D Printingの事例(4) [内部構造]

**メタマテリアル**：人工的に新規な物理特性を付加した造形物

自然界には存在しない**負のポアソン比**を示す構造体（縦方向に縮むと横方向にも縮む）



- 既存造形技術(切削加工, 射出成形)で作っていたものを, 3Dプリンタで作り方を変えるだけでも価値(カスタマイズ, デリバリー変革)は生まれる.

しかし

3Dから4Dへの  
ジャンプ

- **3Dプリンタでしか出来ないこと**(複雑な内部構造, 材料混ぜ合わせ, 色付け)をすることが, **価値を創造する. 4Dプリンティング**につながる.

出典 : Desai Chen, Computational discovery of extremal microstructure families, Science Advances, Vol.4 (2018)

必要な物理特性が得られる微細構造を自動的に計算する手法を見つけ出した

形状

内部微細構造

機能

負のポアソン比

価値

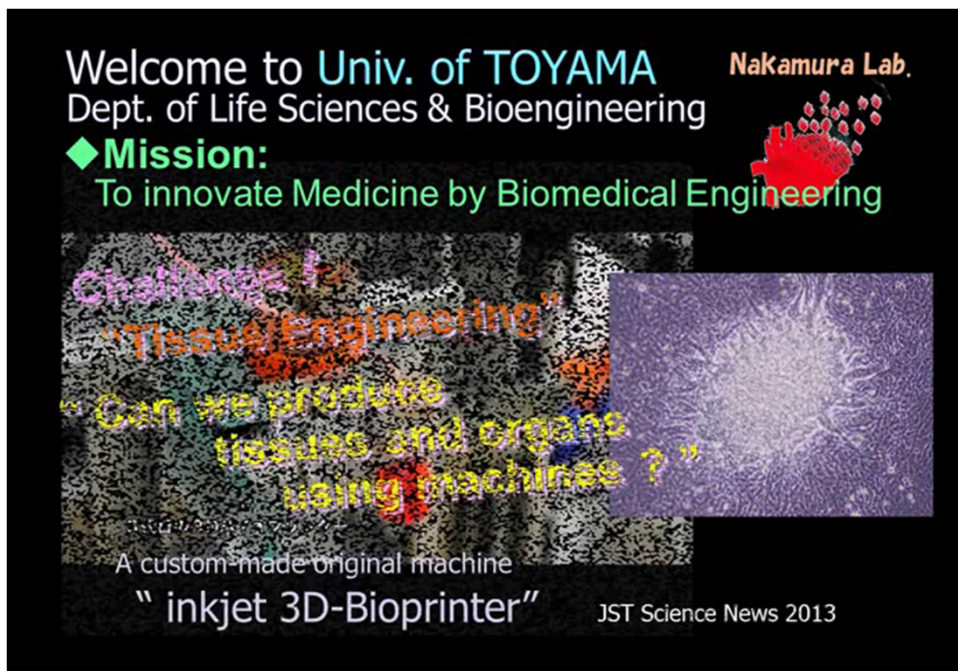
?(衝撃吸収材)



## 4D Printingの事例(5) [臓器再生]

究極の機能の1つは**生命**を支える人体機能。

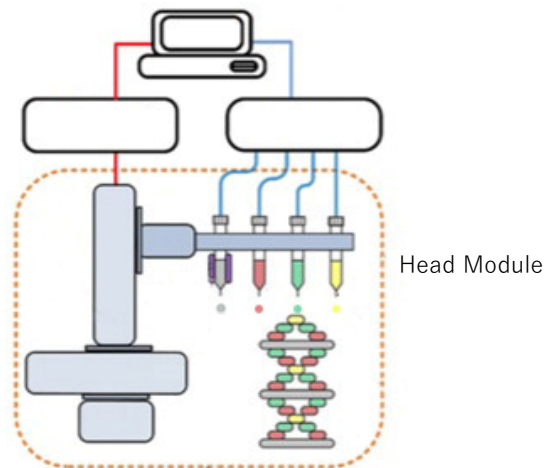
幹細胞(Stem細胞)によりシート状,あるいは単純な無構造ではなく,立体的な臓器に成長させるには,(3Dプリンティング技術等により)立体的に複数の幹細胞を積み上げる必要がある。



出典：中村真人研究室HP(<http://pse.eng.u-toyama.ac.jp/bio7A/index.html>)

臓器再生(臓器復元)も4Dプリンティングの1つであり,3Dプリンティング技術を使った臓器再生の研究も進んでいる。

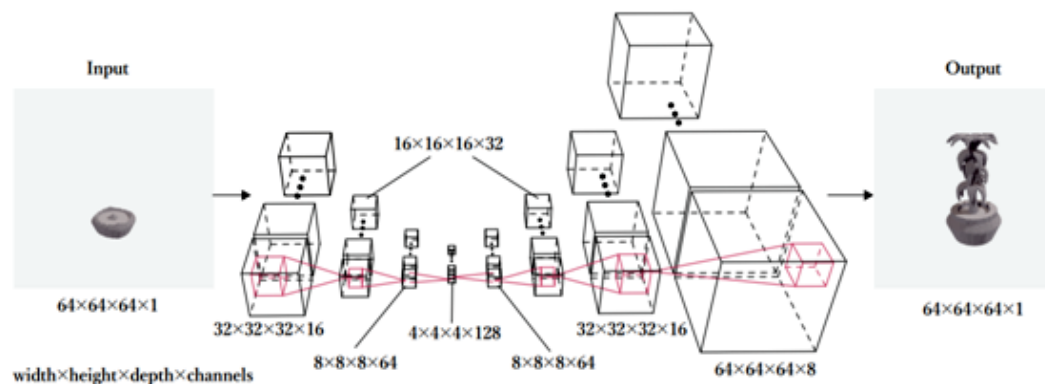
中村真人(富山大学), 境慎司(大阪大学), 中山功一(佐賀大学)他



出典：Hyun-Wook Kang, A 3D bioprinting system to produce human-scale tissue constructs with structural integrity, Nature Biotechnology volume 34, pages 312–319 (2016)

# AIによる形状変化

AIによって初期形状を変化(デザインプロセス)



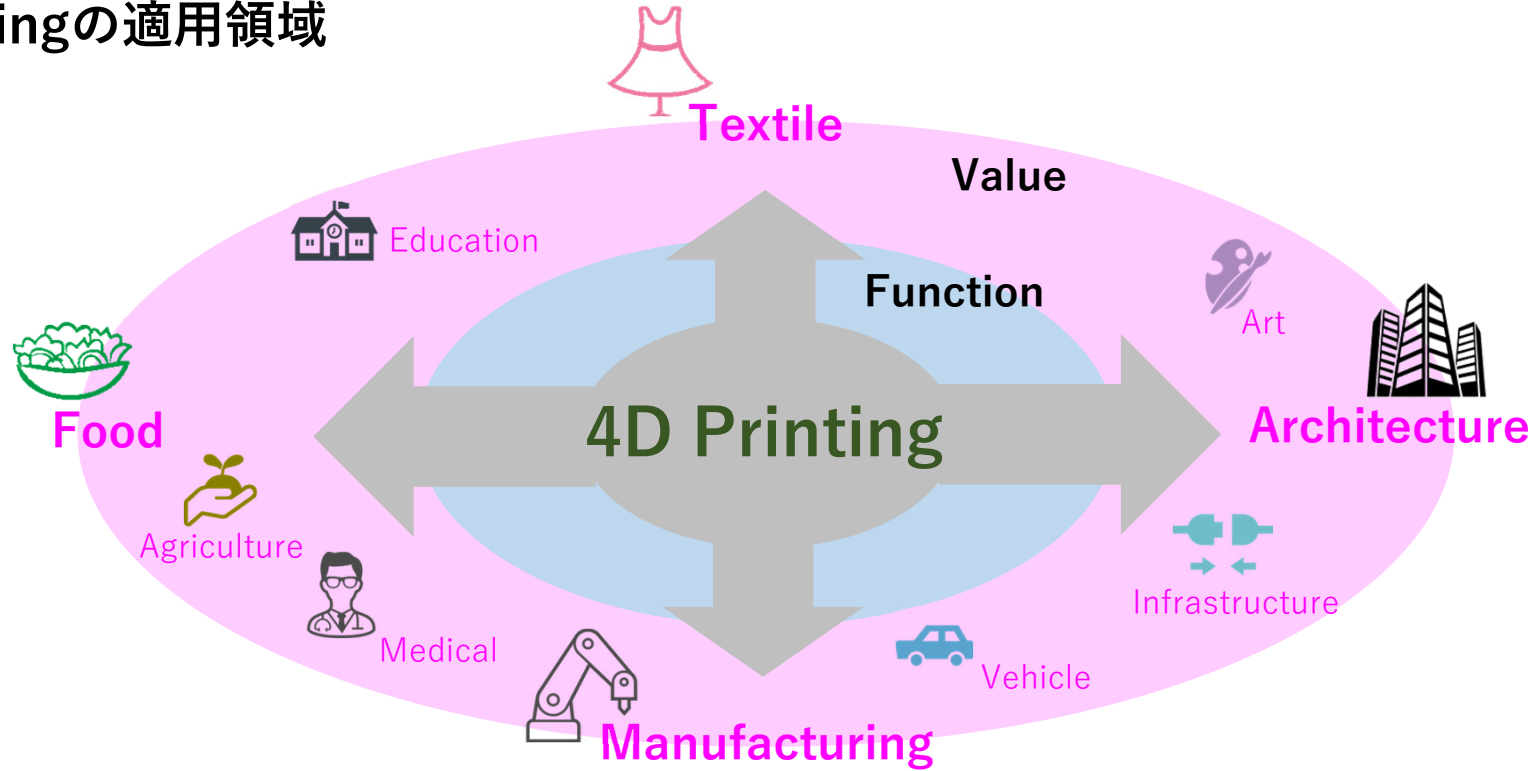
成長モデル(アルゴリズム)を学習.

さらにAIにより

動画提供：守矢拓海（慶應義塾大学SFC研究所）

- 立体形状(外形状)から骨の形を推定し、内部構造を付加.
- あるいは骨の形から外形状を推定し、外形状を付加した構造体をデザインする研究も行なわれている.

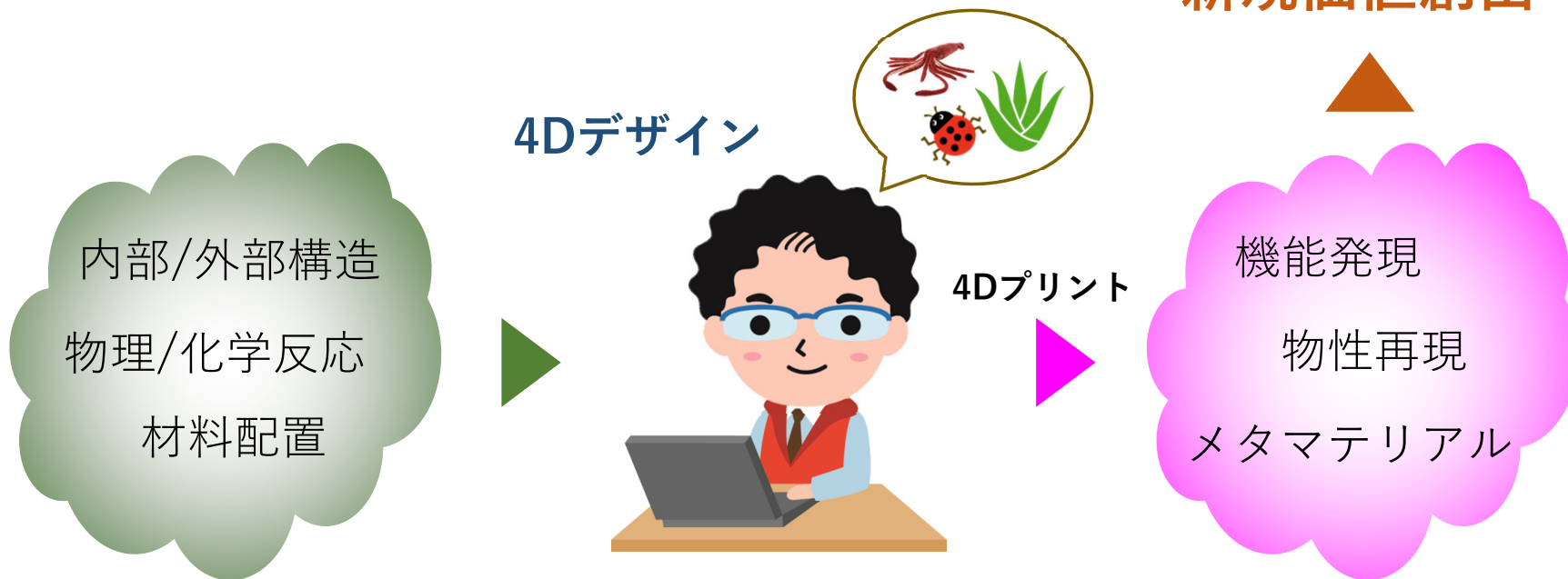
# 4D Printingの適用領域



- 機能の実現については多くの提案(研究)がある
- 一方、価値の創出(具体例, ビジネス例)に結びついているものはまだ多くない
- (この領域の研究の中心は大学)

# 4Dデザイン – 既知概念を超える

## 新規価値創出



複雑系，統一的な理論が整備されていない

3D CAD Designerが  
3D Printer(複雑な内部構造)に追いついていない状況なのに

生物に学ぶ(生体模倣=**Biomimetics**)  
<Bioinspired>

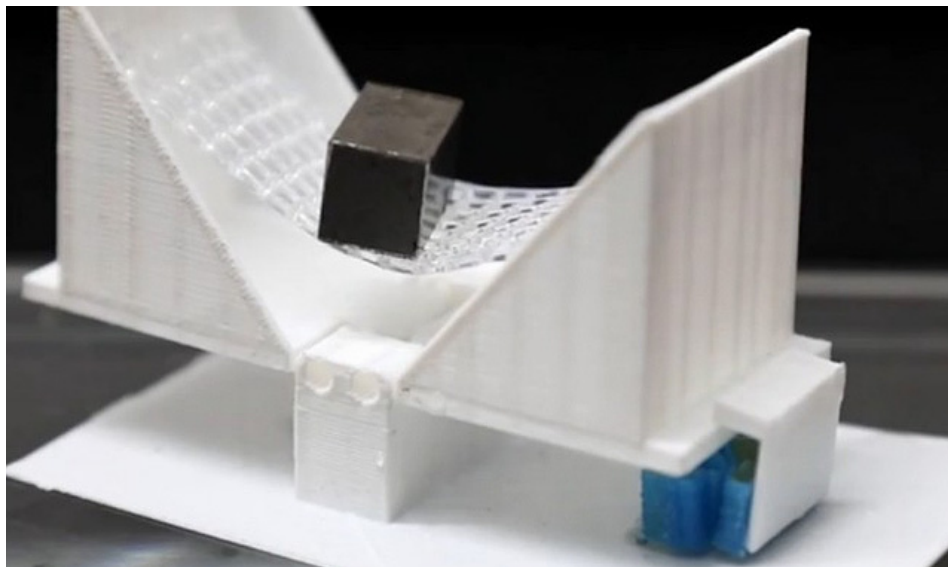
## 4Dデザイン – Biomimeticsに学ぶ

ハエトリグサ(Venus Flytrap)のメカニズムから、無電源の**ANDゲート**を模倣デザイン  
(University of Pennsylvania's School of Engineering and Applied Science)

**OR**や**NAND**ゲートも開発



ハエトリグサ



造形材料(シリコン, ゲル)にガラス, あるいはセルロースファイバを混ぜることで特定方向のみに伸びる.

トルエン→シリコン, 水→ゲルの反応で双安定性を確保.

加重&反応の**AND**ゲート

出典 : Yijie Jiang, Bifurcation-based embodied logic and autonomous actuation, Nature Communications, (2019) 10:128

# 4Dデザイン – 機能データベース[DABoF]の提案

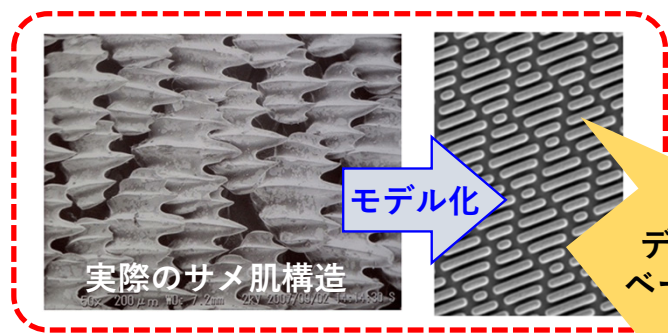


数十  $\mu\text{m}$  間隔の周期的な溝構造

機能：低流体抵抗, 抗菌性



表面塗装に応用し, 燃費効率向上



モデル化

実際のサメ肌構造

データベース化

DABoF



inquiry  
低流体抵抗

商品化応用

データベースから  
機能を発現する構造/反応を引用

微細表面/内部構造  
材料情報  
物理/化学反応

紐付け  
(関連付け)

発現機能



DABoF : DAtaBase of Functions

出典：藤井雅彦, 日本画像学会誌, Vol. 58, No. 4, pp.385-388 (2019)



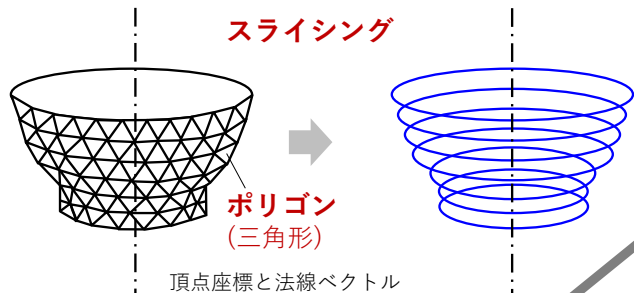
# **‘FAV’ Forming the Basis of 4D Printing**

- Extension from 3D to 4D -



# 3Dデータフォーマット

## Mesh-Base



**AMF** (Additive Manufacturing File Format)・・・現在versionは1.2  
ISO TC261/ASTM F42で標準化。しかし現在は停止状態。

**3MF** (3D Manufacturing Format)・・・現在versionは1.2.3  
HP, MSなどのコンソーシアムが提案。Windows8.1からドライバを標準装備。

**STL**  
(Stereo lithography)

3D Systemsが3D CAD用に30年以上前に提案

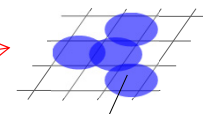
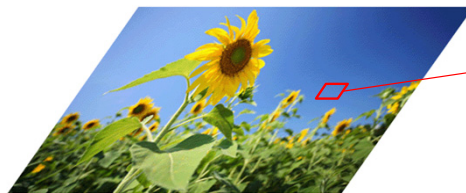
- ・色データや物質データを持たない。
- ・隙間や重なりが生じる場合がある。
- ・複雑な内部構造の記述ができない
- ・合成(演算)が難しい

表面の色は  
**VRML**  
(Virtual Reality Modeling Language)

**OBJ**

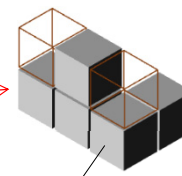
## Voxel-Base

▲ 2次元画像



基本画像単位  
→画素=PIXEL

▲ 3次元物体



基本立体単位  
→VOXEL

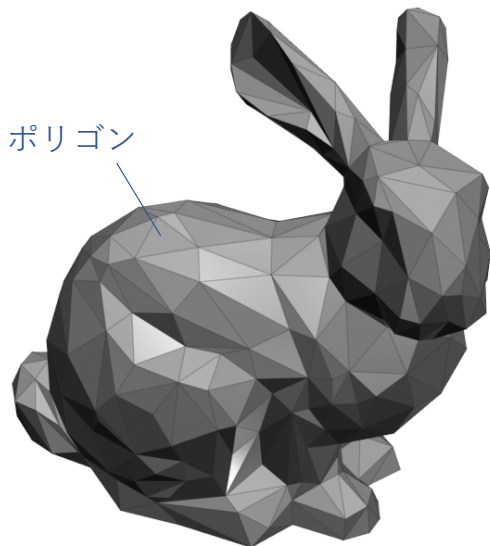
複雑な内部構造もデザイン可能

- ・色情報
- ・材料情報
- ・リンク情報
- ・ユーザー定義情報

**FAV** (Fabricatable Voxel)  
富士ゼロックスと慶應義塾大学が2016年に提唱したボクセルベースの新しいフォーマット。



# ボクセルによる立体物の表現



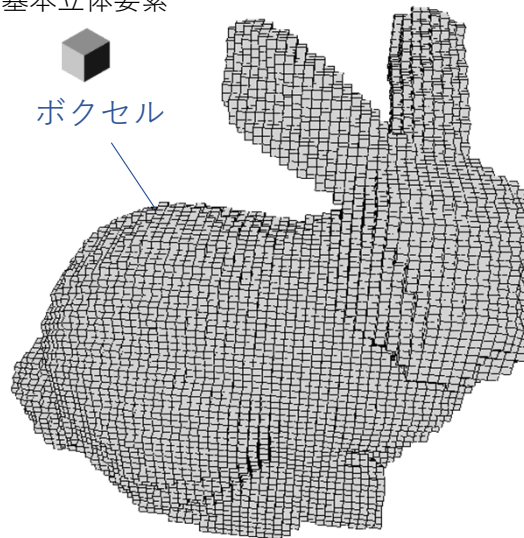
ポリゴンで(表面)形状を近似

**STL**

基本立体要素

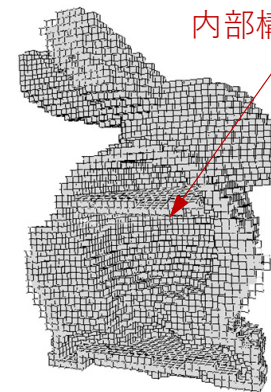


ボクセル



ボクセルで立体を表現

**FAV**

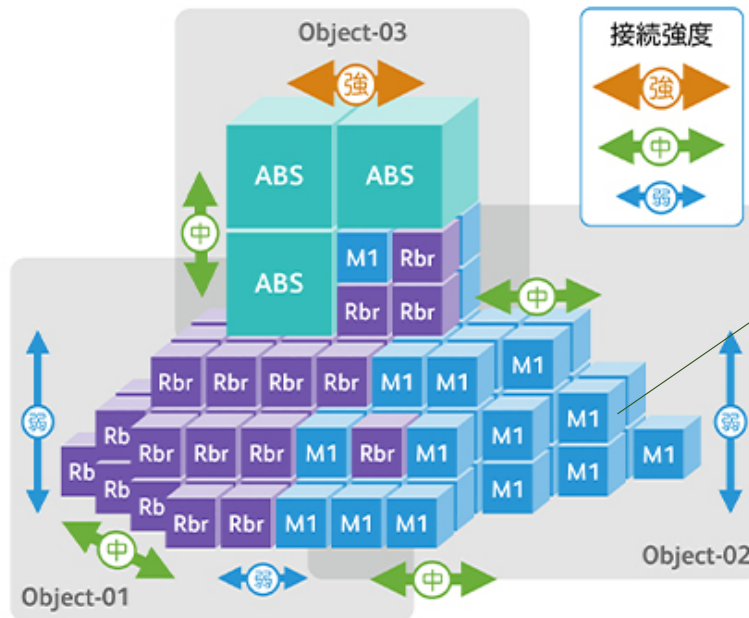


内部構造の表現が可能

# 3Dデータフォーマット'FAV'

富士ゼロックスと慶應義塾大学 田中浩也教授との共同研究

ボクセル例



世界最高水準の3Dモデルの表現が可能

各ボクセルに保持できる情報

- 色情報
- 材料情報
- リンク情報(隣接ボクセル関係)
- ユーザー定義情報

FAV = FabricatAble Voxel

仕様書ダウンロード

<https://www.fujixerox.co.jp/company/technical/innovation/3d>

ウィキペディア

<https://ja.wikipedia.org/wiki/FAV>



## 4D実現のための情報保持フォーマットFAV (1)

? 価値創造(提供)するための情報を、どのように3Dデータ(形状データ)に保持するのか

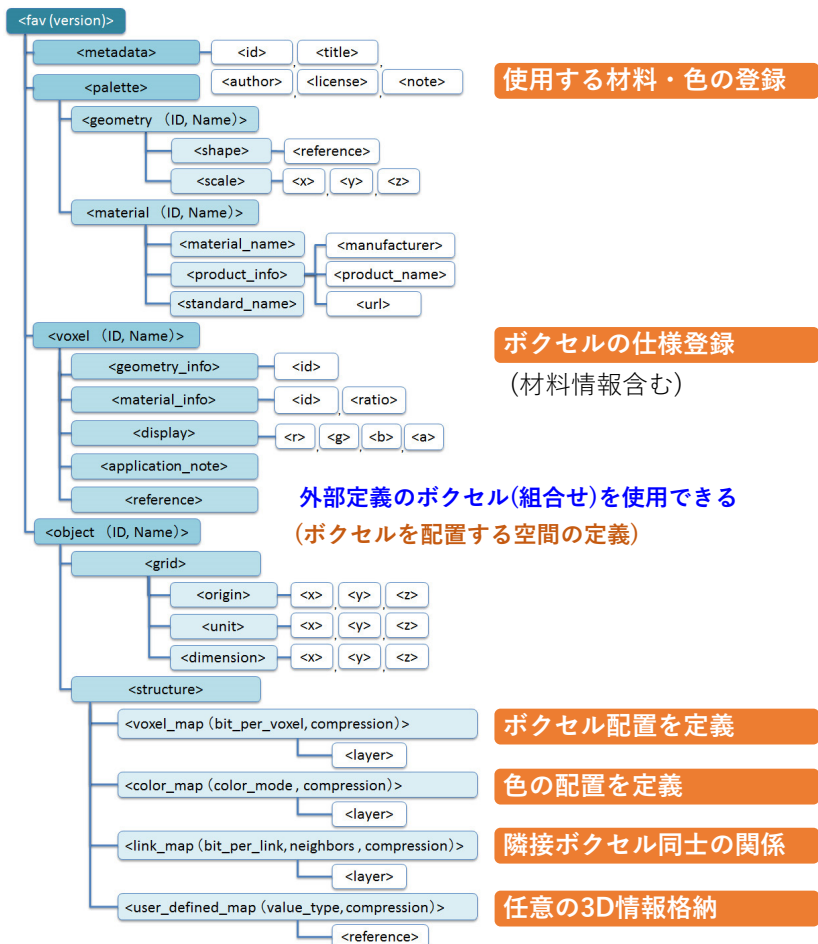
Feature (Attribute)	Mesh-Base		Voxel-Base
	STL	3MF, AMF	FAV
3D形状(外形)	○	○	○
3D形状(内部微細構造)	×	×	○
色	×	△	○
材料	×	△	○
リンク(隣接関係)	×	×	○
ユーザー定義情報(属性)	×	△	○

4D創出のための  
機能実現

- **FAV**は、4Dとしての価値(機能)を発現するための各種情報(材料、微細構造、反応レベル、時間依存等)を保持できる。
- 4D Printingを実現するための基本データフォーマットとしての役目を果たすことができる。

# 4D実現のための情報保持フォーマットFAV (2)

## FAVはXML\*で記述



2015

- 富士ゼロックスと慶應義塾大学がボクセルベースのデータハンドリング技術の共同研究開始

2016

- ボクセルベースデータフォーマットFAV(ver. 1.0)発表

3Dプリンタ用フォーマット

2017

- 慶應義塾大学COIに「ボクセル利活用分科会」設立  
FAVの3Dプリンタ出力以外への活用方法議論, 新しい仕様(追加仕様)検討→FAV ver. 1.1

汎用3Dモデル用フォーマット

2018

- FAVのJIS化委員会設立→JIS原案(FAV ver. 1.1a)策定

2019

- JIS制定(B 9442)



最新のFAV(1.1a)の仕様書は

<https://www.fujixerox.co.jp/company/technical/communication/3d/fav.html>



複雑な内部構造, 異種材料の混合表現可能



フルカラーの表現可能



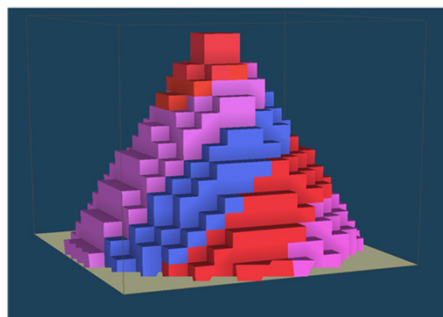
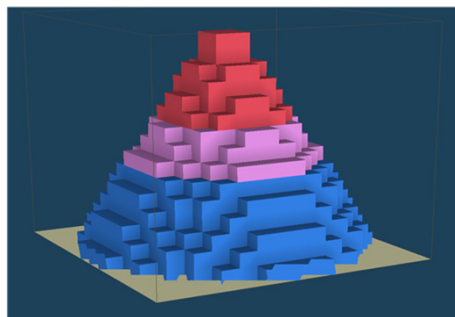
接合力の異方性など



シミュレーション結果, 物性変化等

\* Extensible Markup Language

# 4D実現のための情報保持フォーマットFAV (3)

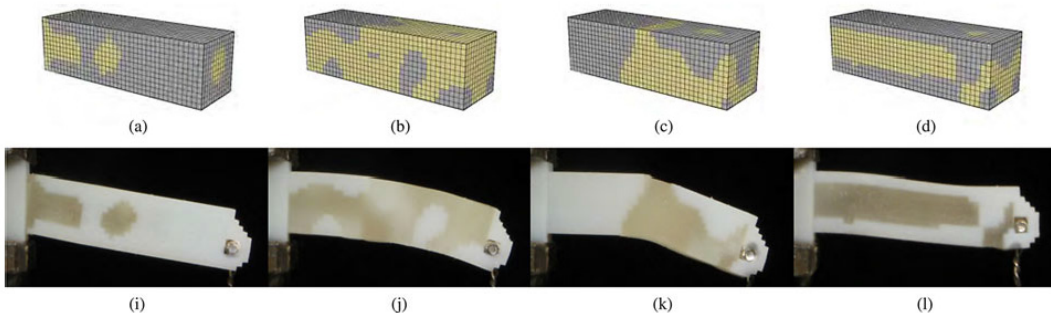


- ポリ乳酸(硬い)
- 熱可塑性エラストマ(軟らかい)
- シリコーン(軟らかい)

硬さの異なる材料を立体配置. 配置方法を変えることで, 応力に対する変形を変えることができる.

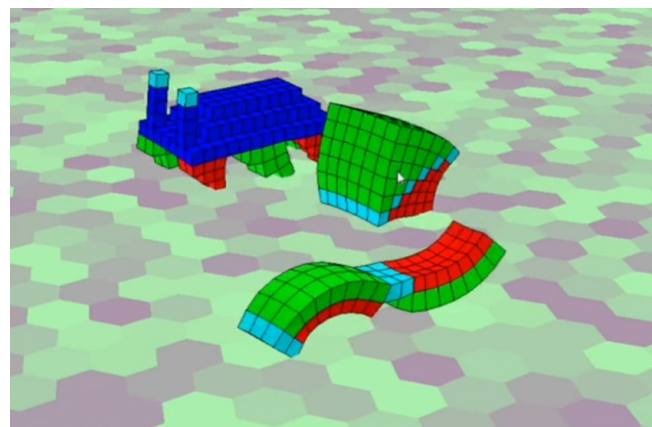
→ 複合材料の構造体をFAVで表現可能

出典: JIS B 9641 「3Dモデル用FAVフォーマットの仕様」解説書(林田, JSR)



出典: J. Hiller, Automatic Design and Manufacture of Soft Robots, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, VOL. 28, NO. 2, (2012)

物性値変化で可動: **Soft Robot**



出典: Ben Finio, VoxCAD Tutorial Design and Simulate Soft Robots



**Introduction of Activities for 4DFF**



# 4DFF研究会：4DFFコンファレンス


## 4DFF研究会のスコープ：

これまでの3D造形・再現技術を超えていく新しい価値創造を目指した研究・開発



## キーワード：

マテリアルデザイン，ハードウェア(3Dプリンタ等)，ソフトウェア(モデリング，シミュレーション，DfAM等)，制度・法律，ビジネスモデル(サステナビリティ他)，流通，SDGs，最適化，表現・文化(アート，エンターテイメント等)，生活(教育，衣食住，健康，インフラ等)，QOL，たのしさ，うれしさ，おもしろさ


2018.10.11

 **4DFP 2018** 基調講演：落合陽一．招待講演18件

2019.10.10

 **4DFF 2019** 基調講演：宮前義之．招待講演4件，一般発表20件  
大学：15/20 (75%) 

2019.10.15~10.16 (オンライン)

 **4DFF 2020** 基調講演：山中俊治．招待講演2件，一般発表29件  
大学：21/29 (72%)

- ・ インクジェット型AM における積層界面の光学的性質
  - ・ 機能性タンパク質から味や香りまで，機能性印刷におけるピエゾインクジェットヘッドの可能性
- 他4件のインクジェット技術を活用した発表



# 4DFF研究会：論文誌（電子ジャーナル）



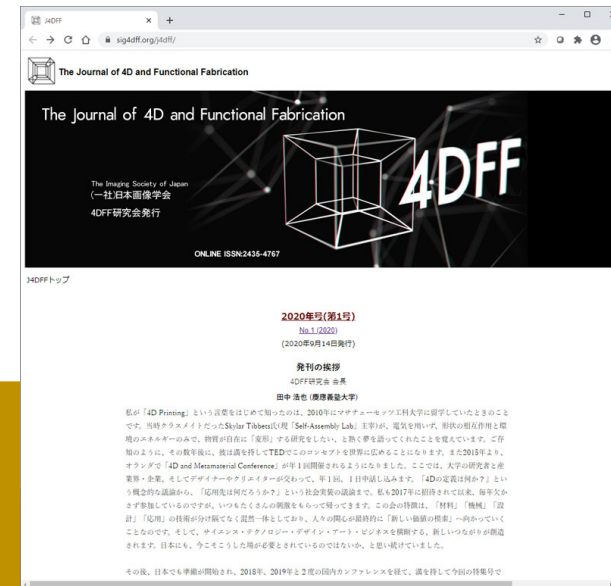
査読あり/オープンアクセス電子ジャーナル



## The Journal of 4D and Functional Fabrication

2020.9.14に第1号(2020年号)発行

- 3Dプリントを活用した形状記憶・衝撃吸収メタマテリアル開発
- ExpandFAB—熱膨張素材による造形後にサイズ・形状可変なファブリケーション—
- PaperPrinting—紙のデジタルファブリケーションとデザイン—
- 感温性フィラメントを用いた事後的にカスタマイズが可能な3Dプリント・スプリントの有用性検証



<https://sig4dff.org/j4dff/>

第2号(2021年号)の投稿締め切りは2021年2月28日

- 4DFF研究会は、コンファレンスと論文誌を持った学術団体となり、日本国内で4DFFを推進する基盤が整った。
- インクジェット技術の展開方向の1つとして、ぜひとも関心を持っていただきたい。（協賛団体も募集中）



## まとめ

- 4D Printing (4D Printer)は話題先行の面もあるが、専門のコンファレンスや学術団体が立ち上がるなど徐々に本格的研究が始まっている。
- これまでは時間・物理刺激による3D形状変化が4Dと言われていたが、形状の価値だけではない**新規価値の創出を4番目の軸**と考え、**4D(4DFF)と定義する**。  
この研究領域を活性化し、研究者のネットワーク形成のために**4DFF研究会**を設立。
- 機能の実現については多くの提案があるが、価値の創出に結びついているものは少なく、企業研究の参画に期待したい。
- 形状と機能を実現し、新しい価値を創出する技術手段としてインクジェット技術(機能材料付加、材料の混ぜ合わせ、複雑な内部構造)は極めて有効な手段である。
- 4Dデザイン(モデリング)にBiomimetics を取り入れることも有効であり、機能と構造/物理・化学反応を紐付けたデータベース(**DABoF**)の構築を提案している。
- 機能発現につながる情報(属性)を保持できる3Dデータが必要であり、ボクセルベースの3Dデータフォーマット**FAV**の活用が期待される。

ご清聴ありがとうございました。



**inkcube.org**

<https://www.inkcube.org>



<https://sig4dff.org>