

2022.1.14

1

(公財) 科学技術交流財団

第6回「建設技術のデジタル革新に関する研究会」

# 材料のかたたちが創る多様な機能・ 金属3Dプリンタが造る新しいかたち

名古屋大学 大学院工学研究科

物質プロセス工学専攻

小橋 眞

[kobashi.makoto@material.nagoya-u.ac.jp](mailto:kobashi.makoto@material.nagoya-u.ac.jp)

# 自己紹介

## 所属

名古屋大学 大学院工学研究科  
物質プロセス工学専攻

## 専門分野

材料プロセス開発

## 所属学会

軽金属学会、粉体粉末冶金協会、  
金属学会、鋳造工学会、塑性加工学会

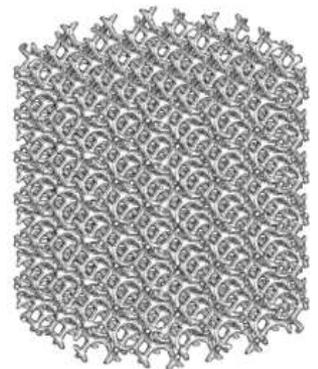
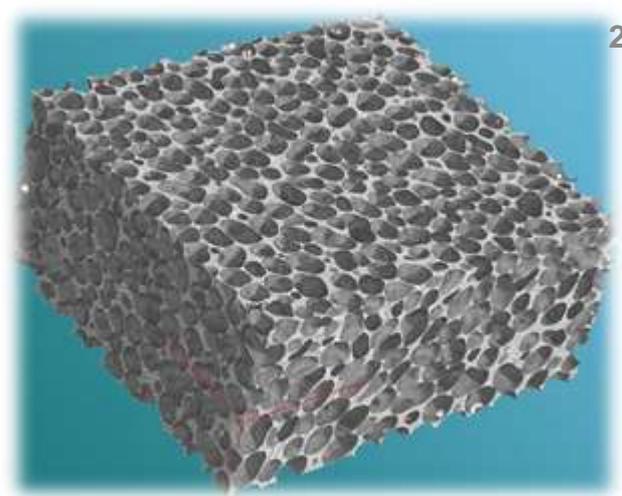
## 現在の研究課題

複合材料、 ポーラス材料

異材接合（樹脂/金属）

Additive Manufacturing (積層造形、3DP)

👉 メゾスケールの構造制御（形態制御）



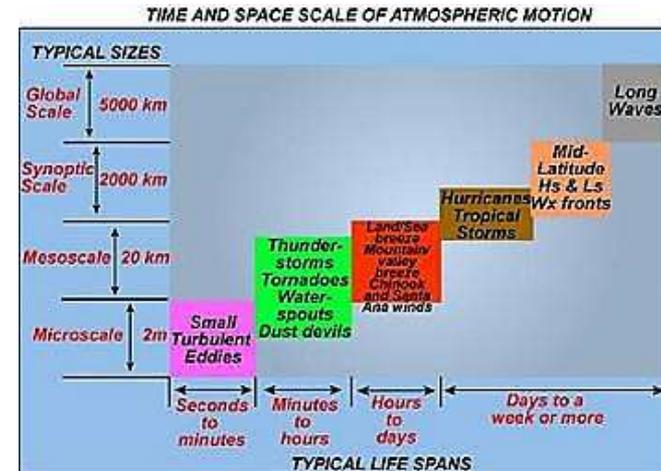
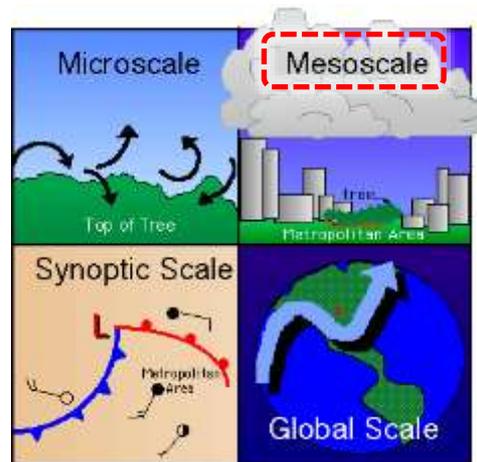
# 本日の内容

1. かたちによる機能発現・ポーラス金属
2. 金属Additive Manufacturingの紹介
3. 金属Additive Manufacturingの材料科学
4. ラティス構造体の力学特性
5. ラティス構造体の利用

# メゾスケール? ミクロとマクロの間

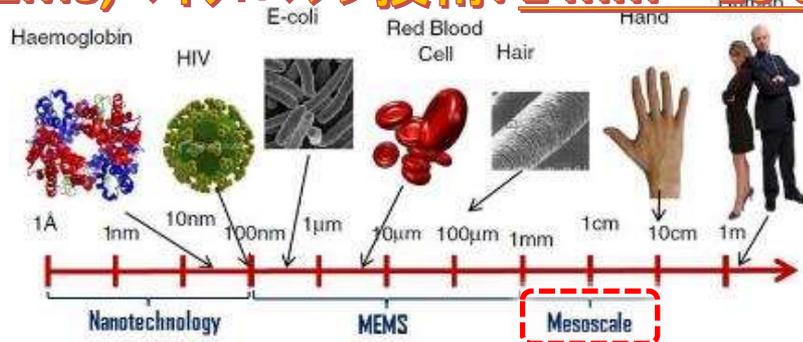
Meteorologists classify weather phenomena into four classes or scales based on horizontal coverage and duration. The four scales are: microscale, mesoscale, synoptic scale, and global scale. <http://www.shodor.org/os411/courses/411c/module04/unit01/page01.html>

気象学:  
2m~20 km

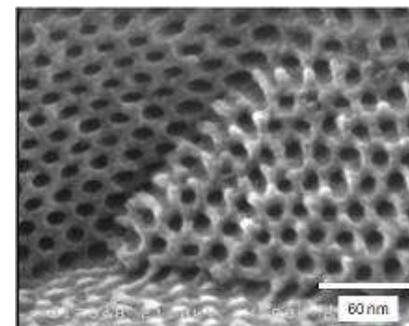


Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) are a class of miniature devices and systems fabricated by micromachining processes. Figure 1 shows relevant dimensional scale alongside biological matter.

**MEMS, マイクロマシン技術: 1 mm ~ 10 cm**



According to IUPAC notation, microporous materials have pore diameters of less than 2 nm and macroporous materials have pore diameters of greater than 50 nm; the mesoporous category thus lies in the middle.



触媒:

2~50 nm



[www.chem-station.com](http://www.chem-station.com)

大阪大学 西山研究室  
<http://www.cheng.es.osaka-u.ac.jp/nishiyamalabo/research/329.html>

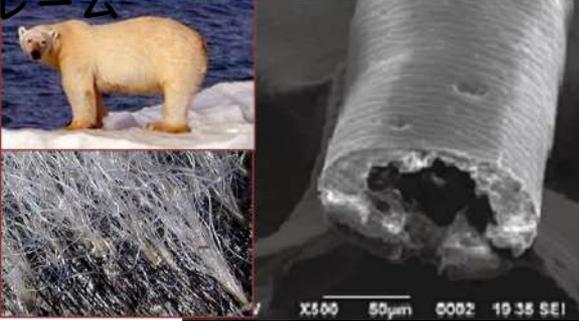


# 自然界のメゾスケール構造と機能

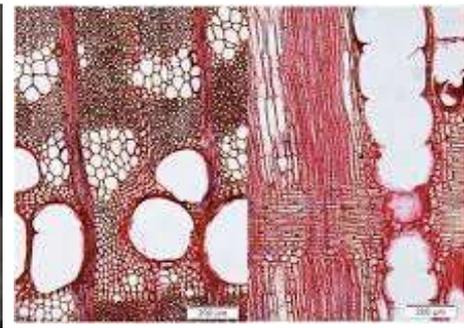
熱輸送  
トナカイの毛細血管



断熱  
北極熊の毛



物質輸送  
植物（ケヤキ）の道管



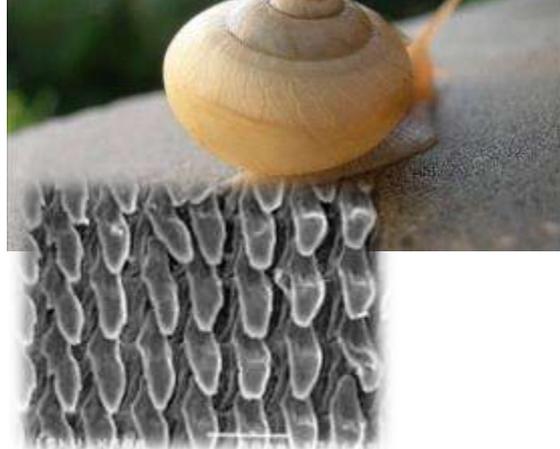
保温・保湿  
アワフキムシの巣



吸着  
イモリ



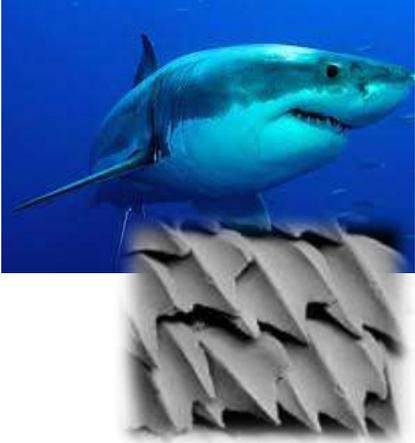
防汚性  
カタツムリ



超低摩擦  
食虫植物



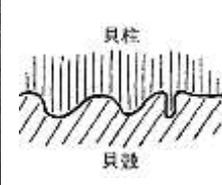
低抵抗  
サメの肌



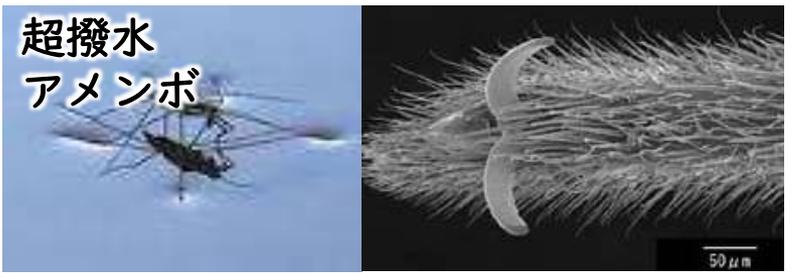
吸音  
雪の結晶



接合  
貝柱/貝殻

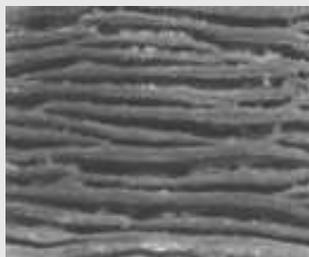
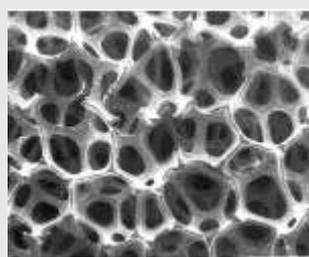
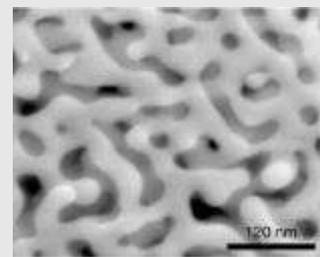


超撥水  
アメンボ

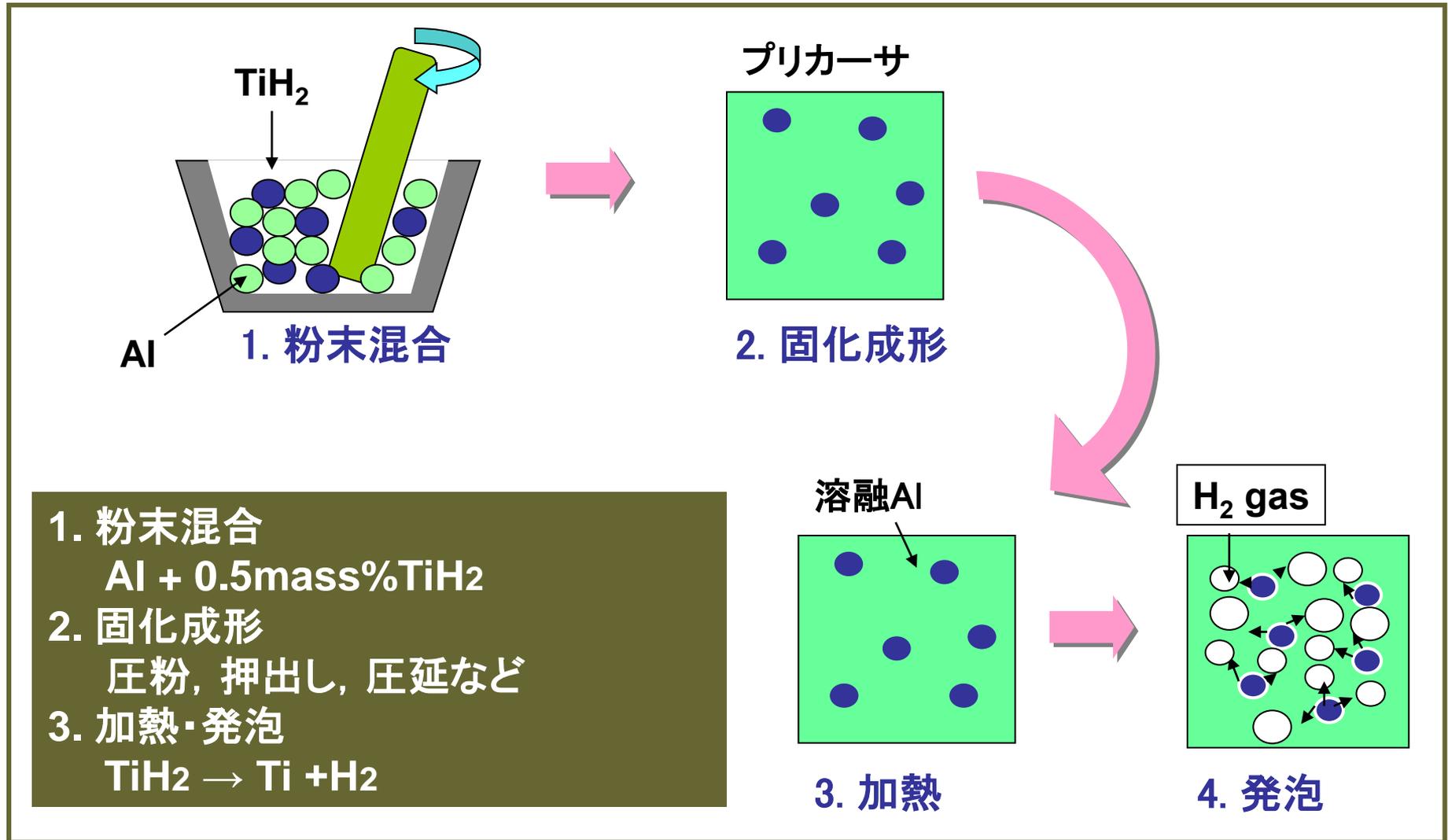


# 様々なポーラス形態

表 様々な気孔形態と特徴・用途 (M.F. Ashby, et. al., Metal Foams: A Design Guide)

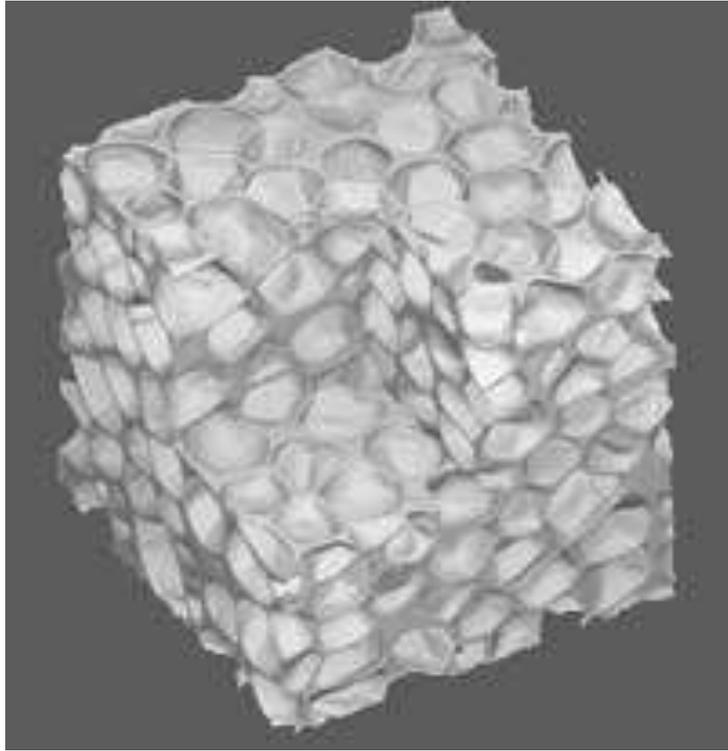
名称	0次元構造 独立気孔	1次元構造 ロータス気孔	2次元構造 へん平気孔	3次元構造 連通気孔	3次元構造 ナノ気孔
気孔					
性質	<p>I値<sup>2</sup>-吸収 超軽量 高比剛性 振動吸収能</p>	<p>I値<sup>2</sup>-吸収 高比剛性 振動吸収能 流体透過性</p>	<p>低熱伝導率 熱伝導率異方性</p>	<p>流体透過性 異材保持性 毛細管力発現</p>	<p>流体透過性 異材保持性 毛細管力発現 巨大表面積</p>
用途	<p>軽量構造材 サト<sup>1</sup>イ<sup>1</sup>材 衝撃吸収材 剛性補強材 吸音材/制振材 置き中子 電磁波遮蔽材 浮体</p>	<p>熱交換器 マイクロ流路</p>	<p>高融点/耐食性 断熱材</p>	<p>熱交換器 フィルター材料 蓄熱体保持材 生体材料 樹脂強化材 触媒担持</p>	<p>スーパーキャパシタ<sup>1</sup>電極 触媒</p>

# プリカーサ法によるポーラスアルミニウム製造方法

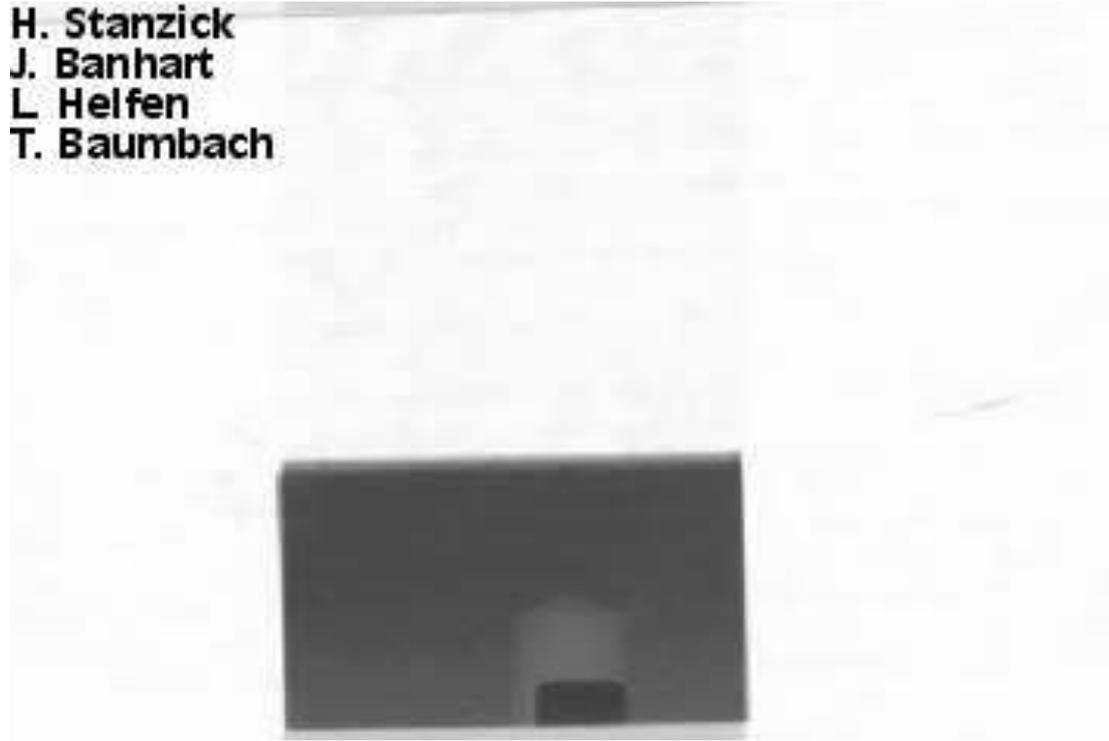


Brief illustration of powder processing route

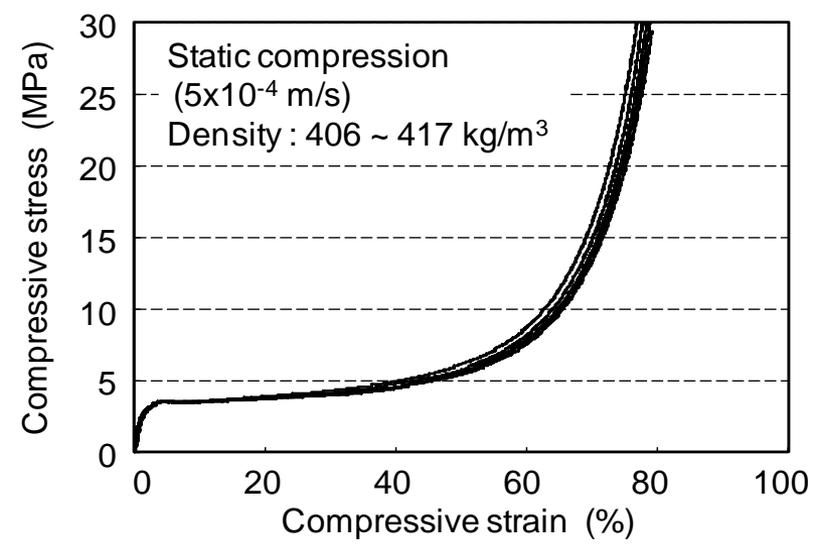
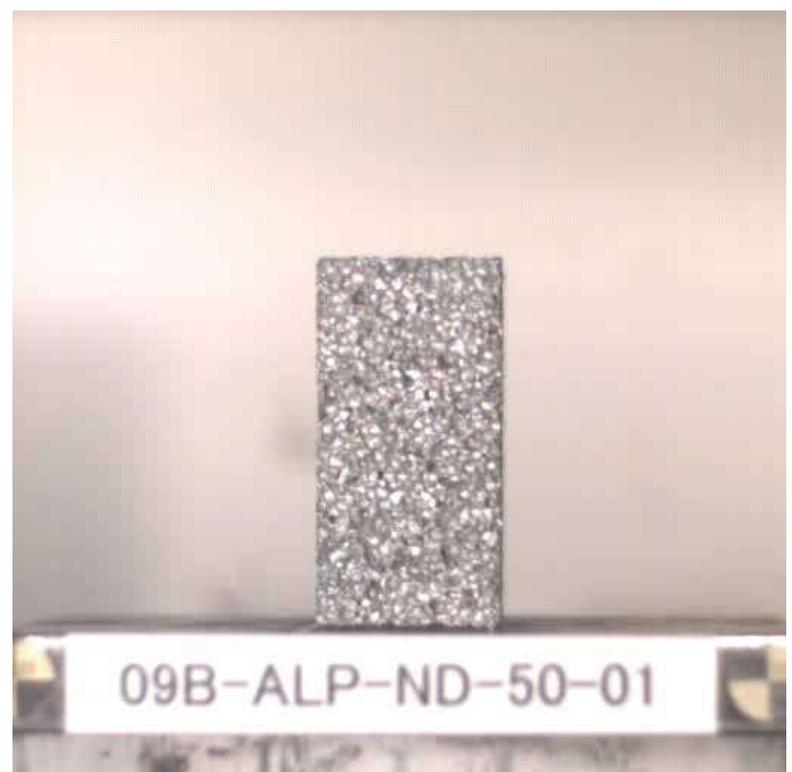
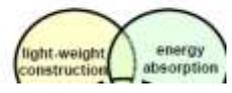
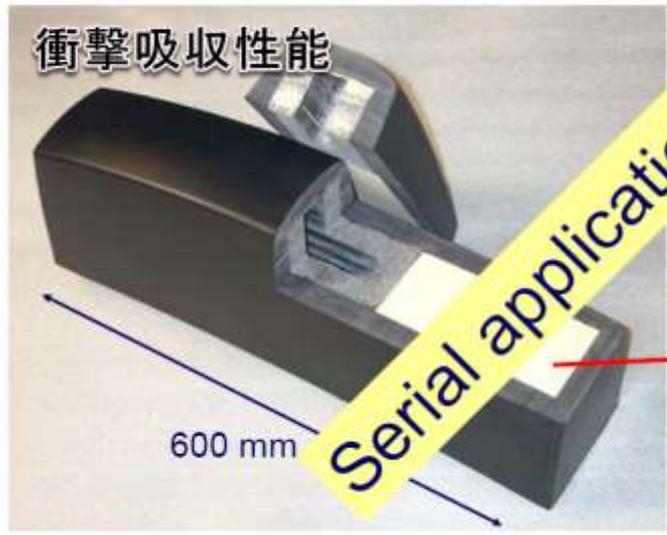
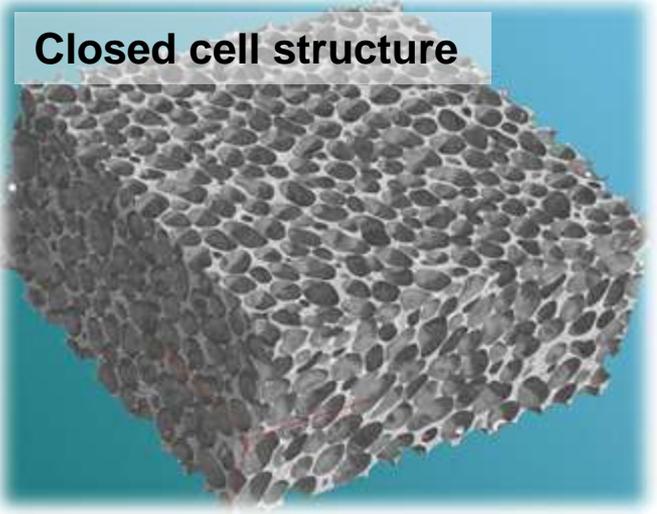
# プリカーサの発泡の様子



H. Stanzick  
J. Banhart  
L. Helfen  
T. Baumbach

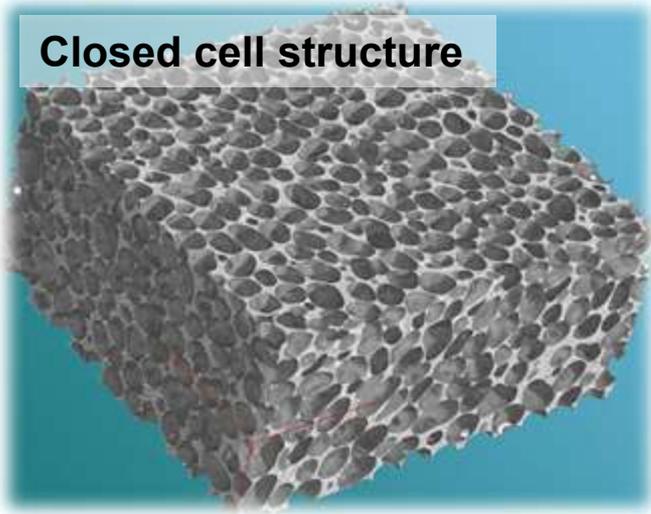


# ポラス材料の特徴と用途



# ポラス材料の特徴と用途

Closed cell structure



剛性補強

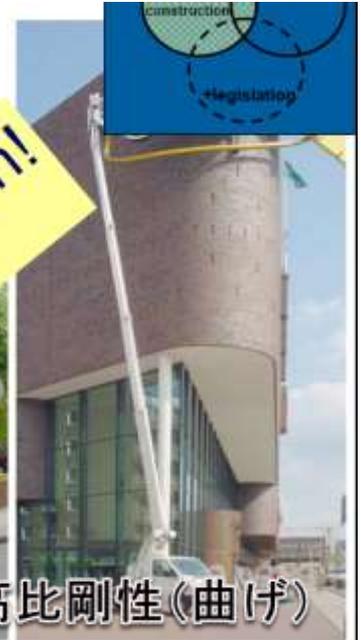


Euro-B drivers licence

> less than 3500 kg total weight

- 25 m working height
- 11 m outreach

Serial application!  
100 parts/year



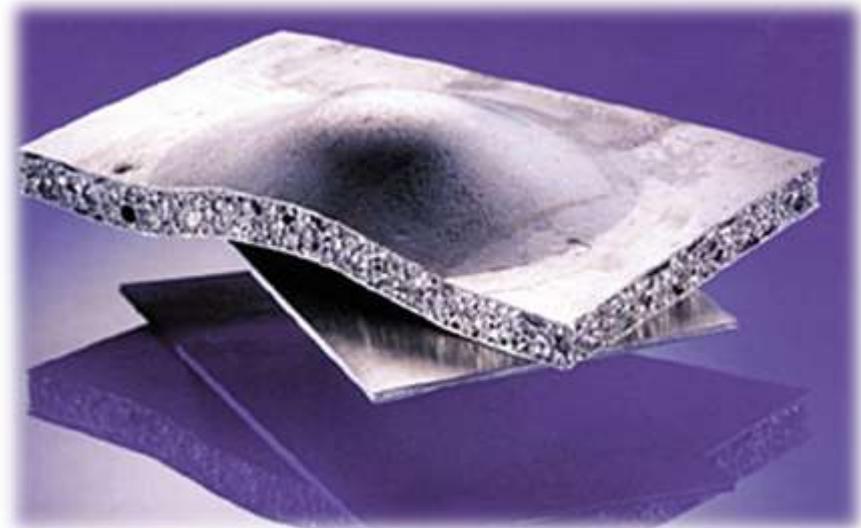
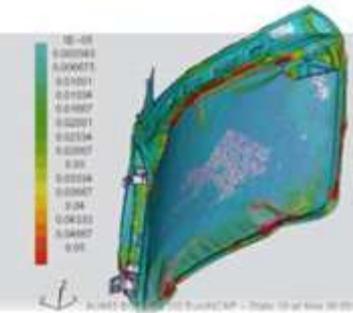
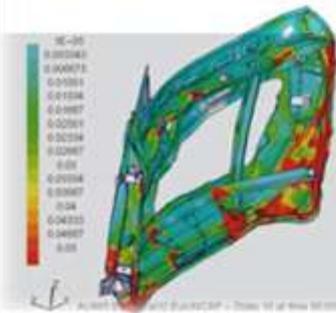
高比剛性(曲げ)



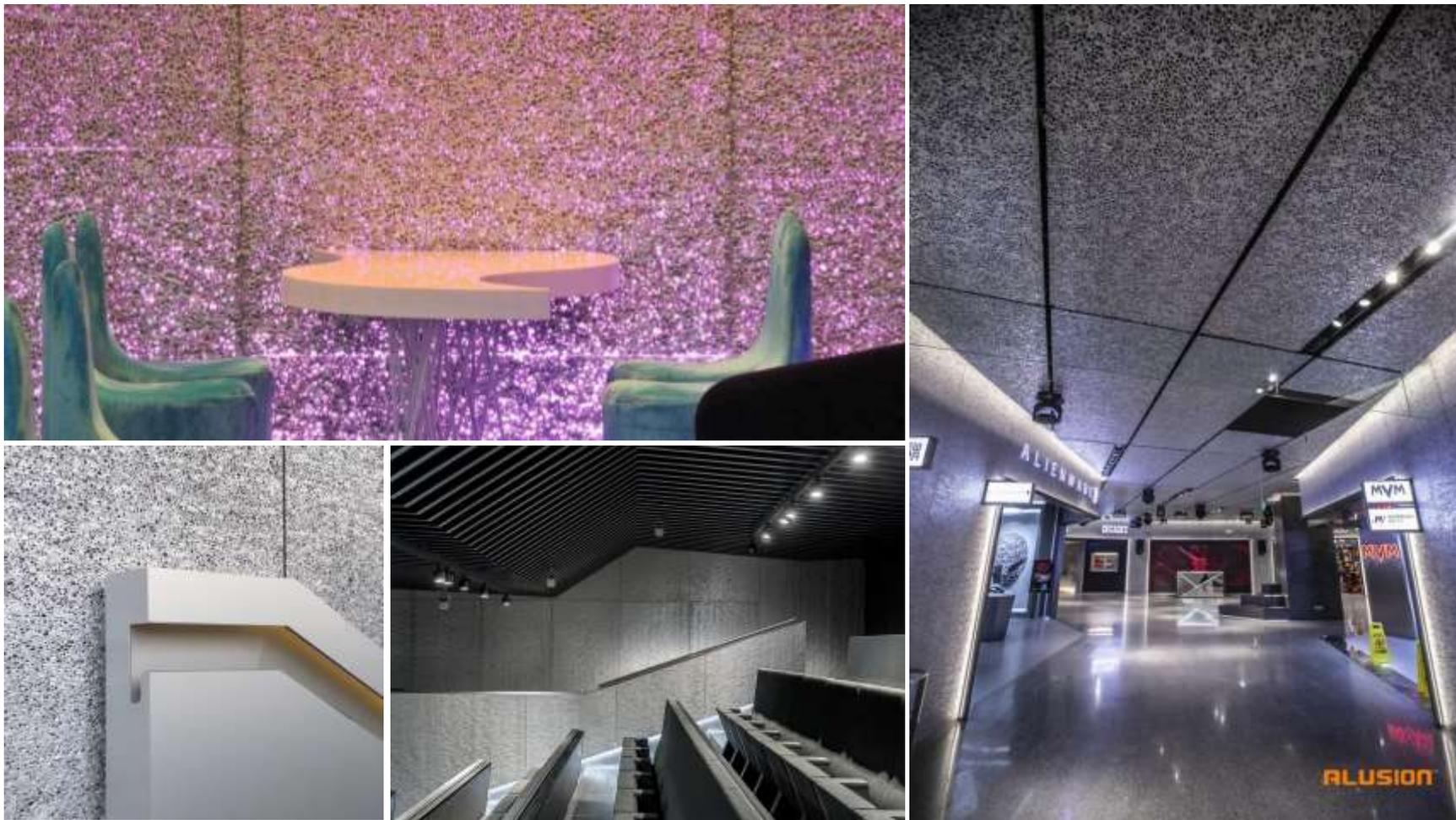
Ursprüngliche Lösung  
Original solution



AFS-Lösung  
AFS solution



# ポーラス材料の特徴と用途



[Gallery of Stabilized Aluminum Foam Medium Cell Panel - Alusion™ - 3 \(archdaily.com\)](#)

[Gallery of Aluminum Foam Facades: Architecture Rich in Texture, Porosity and Brightness - 14 \(archdaily.com\)](#)

[Alusion™ By Cymat Technologies Ltd.さん \(@AlusionbyCymat\) / Twitter](#)

# 本日の内容

1. かたちによる機能発現・ポーラス金属
2. 金属Additive Manufacturingの紹介
3. 金属Additive Manufacturingの材料科学
4. ラティス構造体の力学特性
5. ラティス構造体の利用

# Additive Manufacturing (付加製造, 積層造形)

一般的な創形プロセス



切削



鑄造



鍛造

Additive Manufacturing



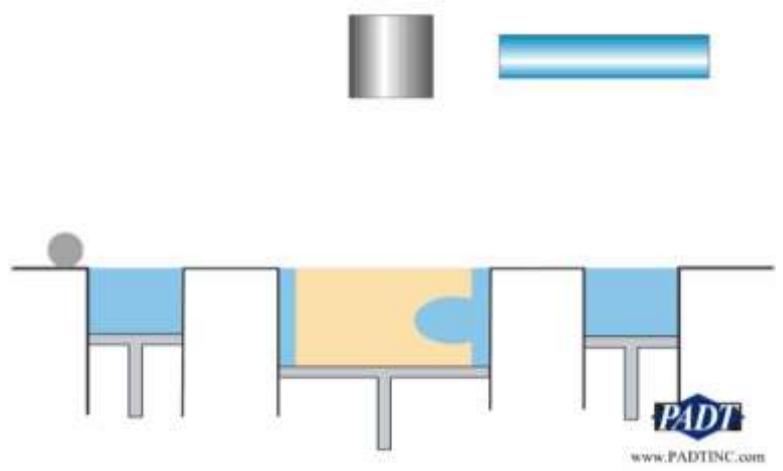
付加・積層



# 粉末床溶融結合（PBF）法

## PBF : Powder Bed Fusion

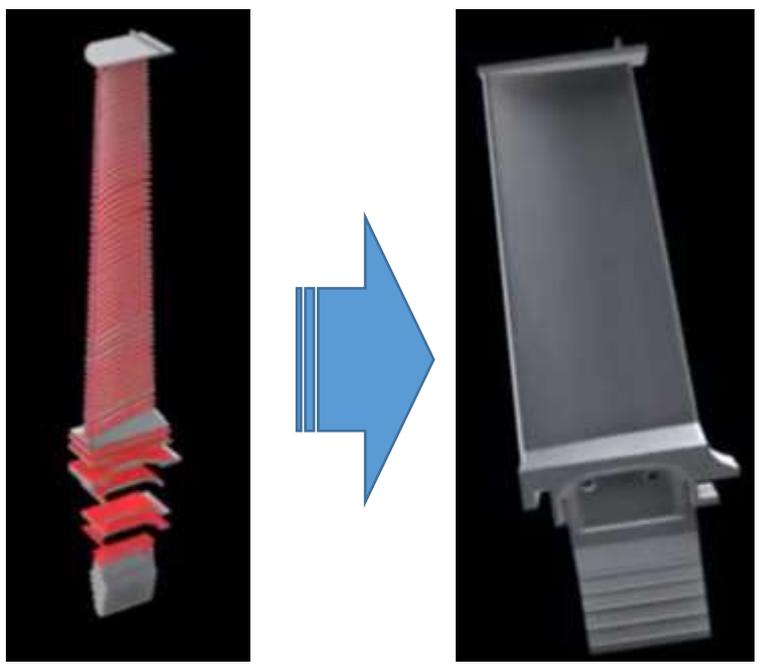
粉末      床      溶融



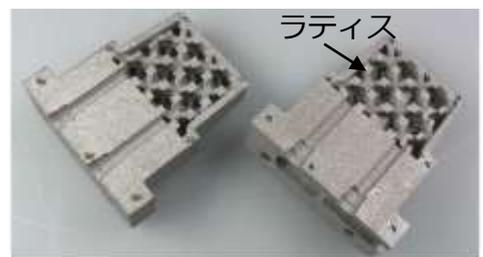
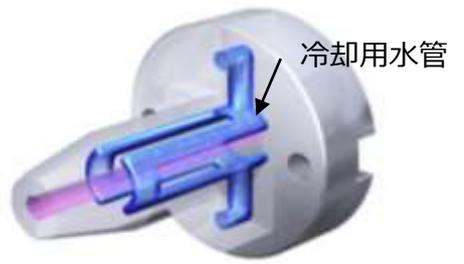
Web page: PADT inc.  
<http://www.padtinc.com/blog/tag/selective-laser-sintering>



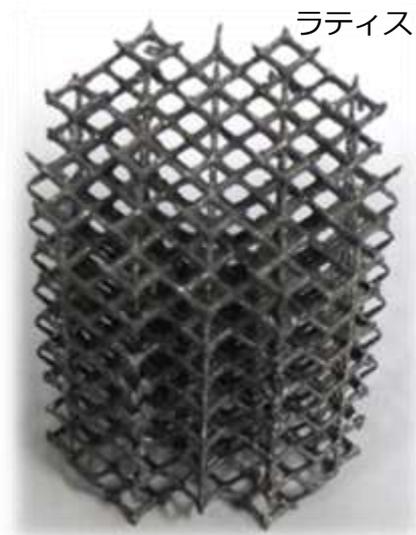
粉末床（Powder bed）にレーザーを照射している様子



外形状と内形状を造形可能

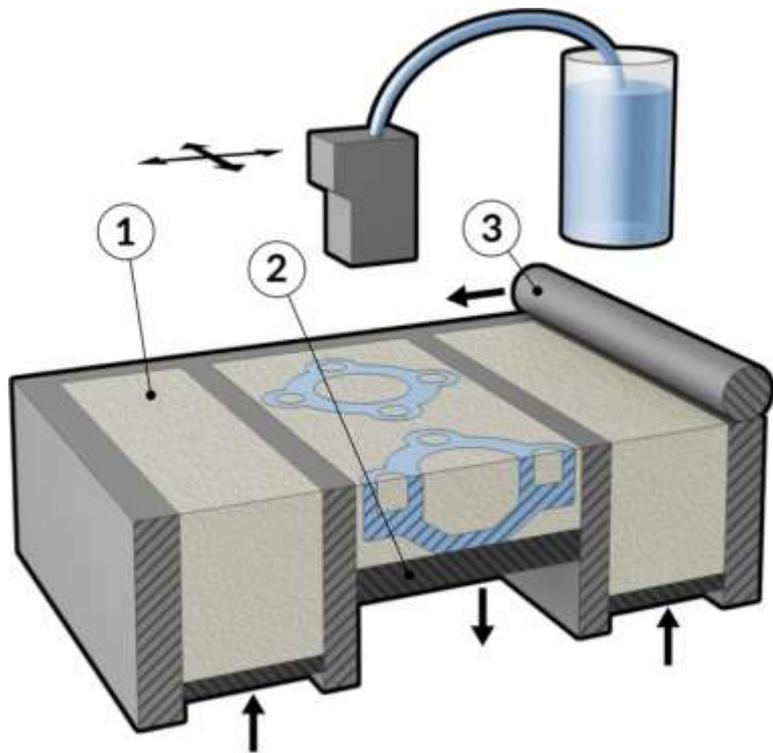


ラティス水路金型のカットモデル



ラティス

# バインダーージェットティング (BJT) 法

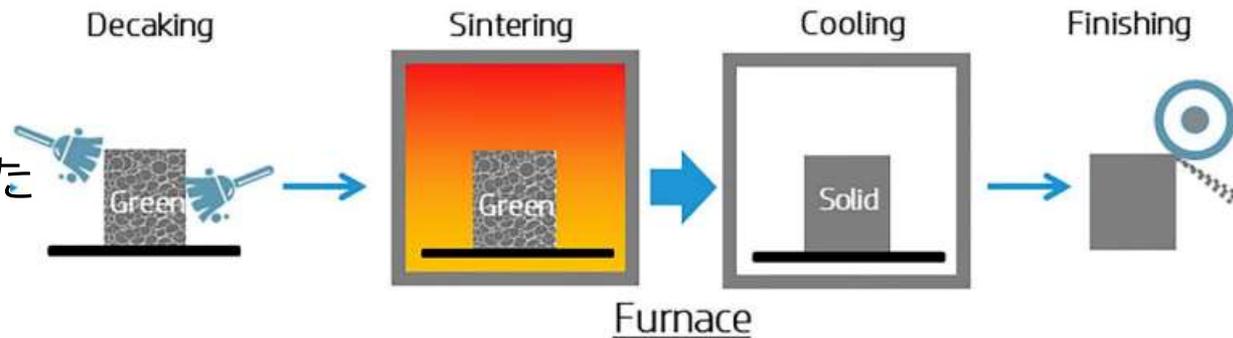


MANUFACTURINGGUIDE

<https://www.manufacturingguide.com/en/binder-jetting>

<https://manufactur3dmag.com/binder-jetting-works/>

1. 粉末を敷設
2. 固めたい部分だけに  
バインダーを吐出
3. バインダーで硬化された  
粉末を取出
4. 焼結



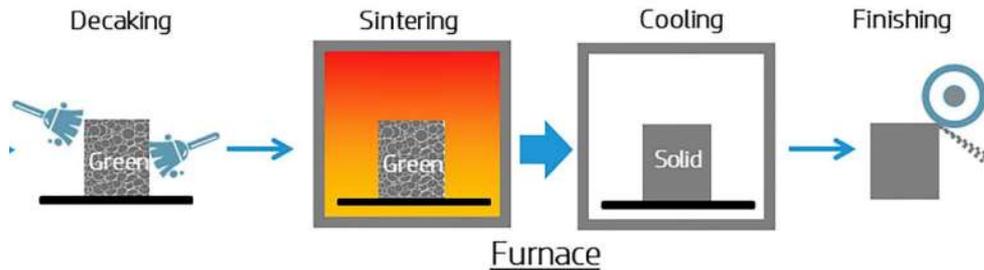
<https://www.digitalalloys.com/blog/binder-jetting/>



Inkjet Printheads dispensing binding agent

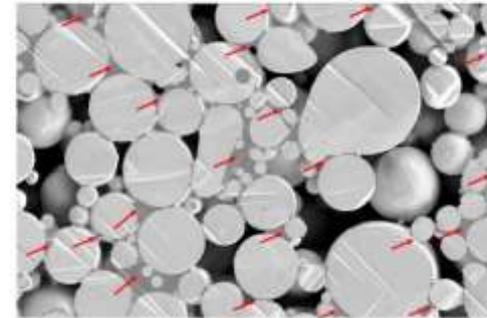


# バインダーージェットティング (BJT) 法 その2

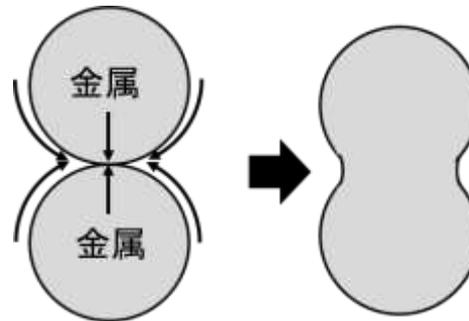
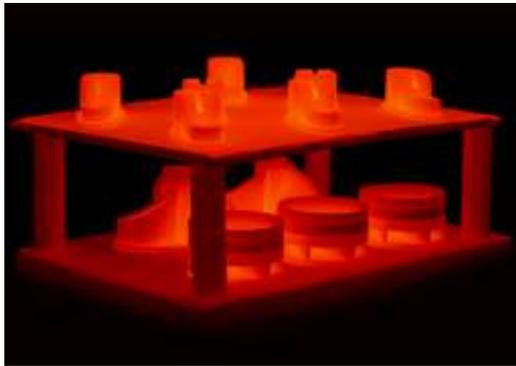


<http://www8.hp.com/h20195/v2/GetPDF.aspx/4AA7-3333EEW.pdf>

Micrograph of cross-section of an HP Metal Jet green part showing metal particles and cured binder (red arrows)



<http://www8.hp.com/h20195/v2/GetPDF.aspx/4AA7-3333EEW.pdf>



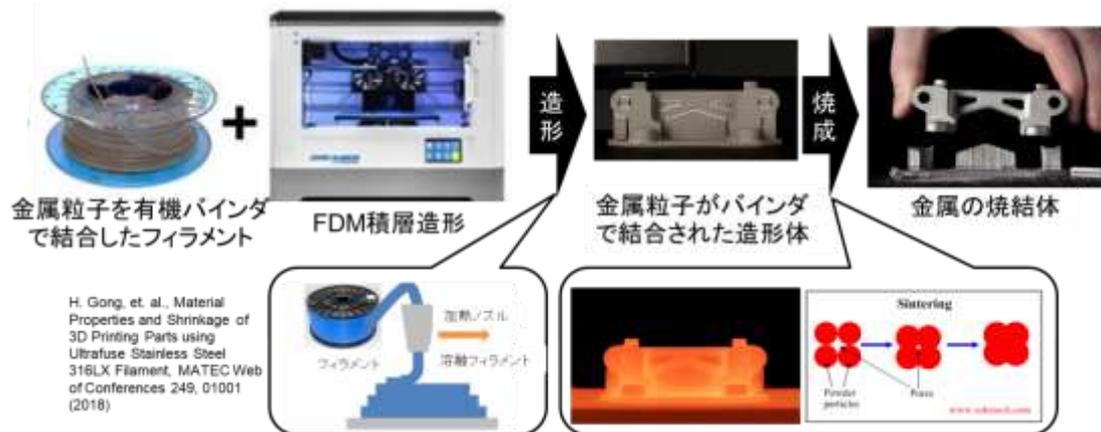
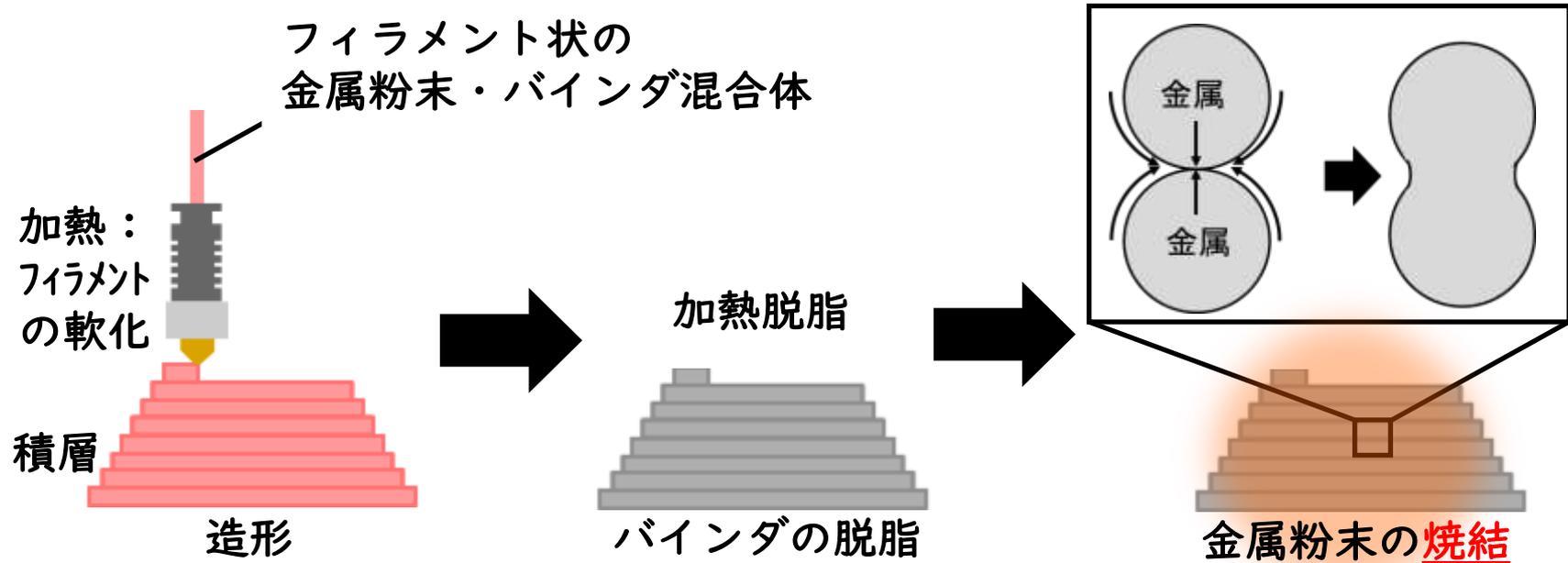
<http://polymertek.com/inject/metal-mim/process/>

<https://www.digitalalloys.com/blog/binder-jetting/>

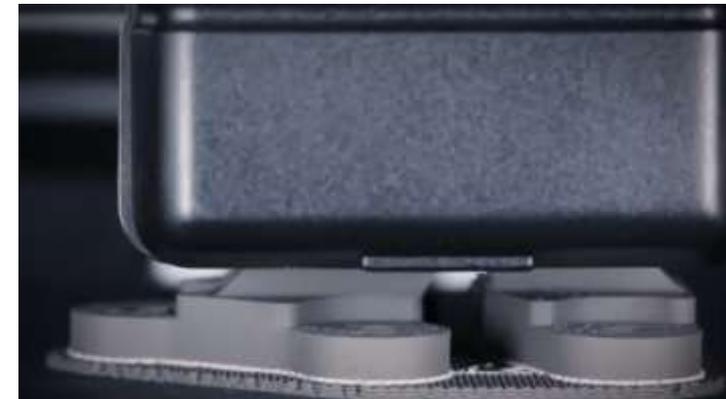
1. Building Platformに粉末を敷設
2. 固めたい部分だけにバインダーを吐出
3. バインダーで硬化された粉末を取出
4. 焼結

# 熱溶解積層 (FDM) 法

## FDM : Fused Deposition Modeling (熱溶解積層法)

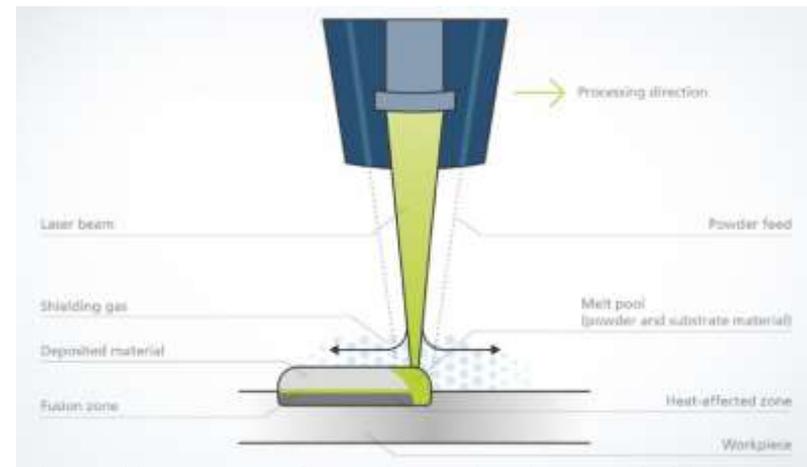
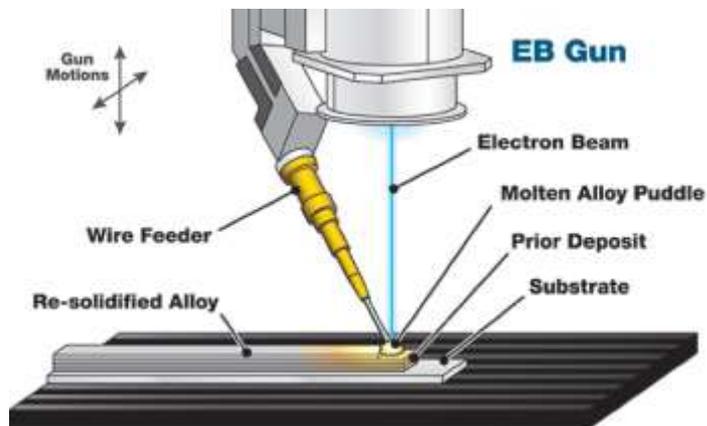


H. Gong, et al., Material Properties and Shrinkage of 3D Printing Parts using Ultrafuse Stainless Steel 316LX Filament, MATEC Web of Conferences 249, 01001 (2018)



# 指向性エネルギー堆積 (DED) 法

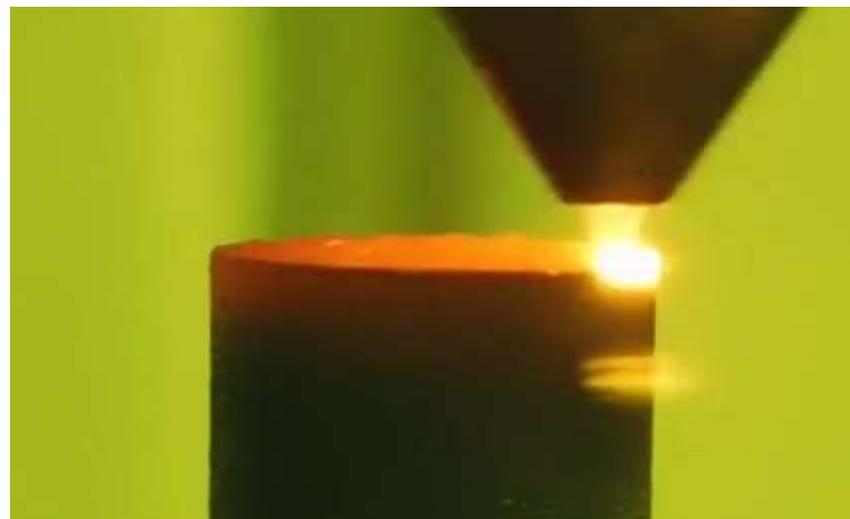
## DED : Directed Energy Deposition



[https://www.trumpf.com/en\\_US/applications/additive-manufacturing/laser-metal-deposition-lmd/](https://www.trumpf.com/en_US/applications/additive-manufacturing/laser-metal-deposition-lmd/)



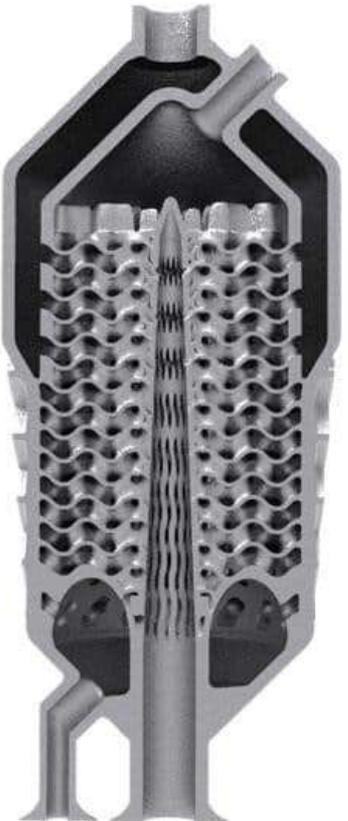
電子ビーム、アークなどでワイヤを溶かし基板上に堆積させる方式



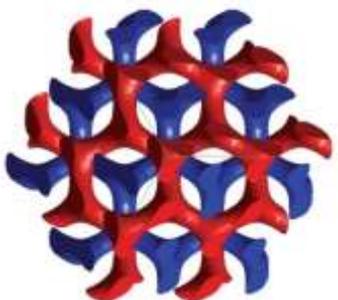
電子ビーム、レーザなどで基材の一部を溶かし、そこに粉末を噴射し堆積させる方式

# Additive Manufacturingで実現するユニークな形状

### ジャイロイド構造

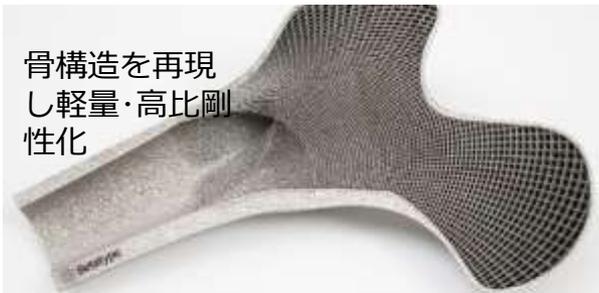


### 熱交換

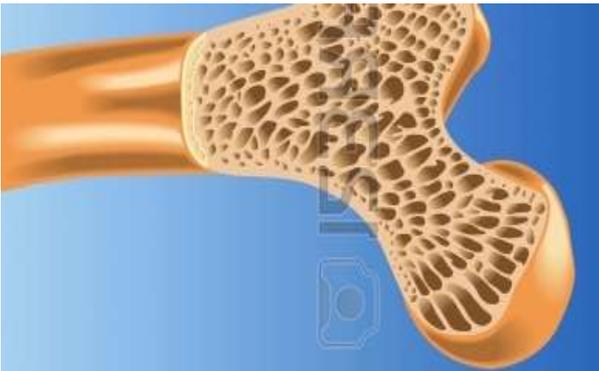


空間を二つの領域に分割する曲面  
境界面積が広いので熱交換などに利用

### ポラス構造



骨構造を再現し軽量・高比剛性化



### 軽量高剛性

### 大型中空構造



シームレスな大型中空構造

### 高密閉性

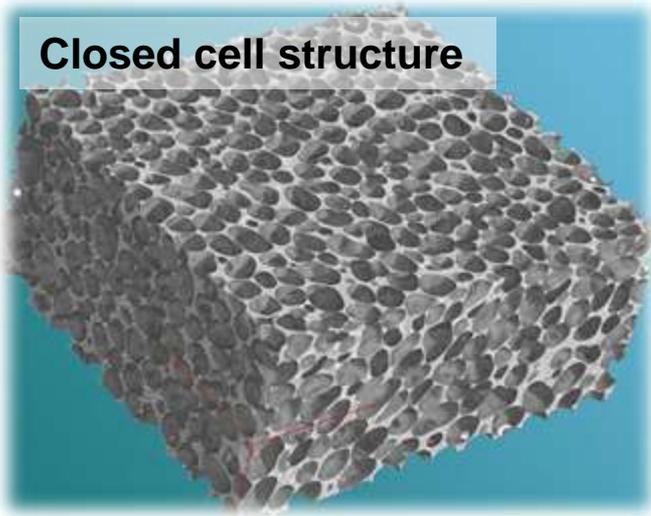
MONOist: モノづくり最前線レポート 2019.07.11 [https://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1907/10/news011\\_2.html](https://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1907/10/news011_2.html)  
JULY 19, 2018, MARCH 21, 2021 BY LESLIE LANGNAU [HTTPS://WWW.MAKEPARTSFAST.COM/](https://www.makepartsfast.com/)  
MAIKI VLAHINOS AND RYAN O'HARA, NTOPOLOGY  
[HTTPS://WWW.AEROSPACEMANUFACTURINGANDDESIGN.COM/](https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/ntoology-heat-exchanger-design-simulation/)  
<https://www.todaysmedicaldevelopments.com/article/renishaw-additive-manufacturing-orthopedic-implants/>  
<https://johncarlosgaez.wordpress.com/2015/08/11/the-physics-of-butterfly-wings/>

# 本日の内容

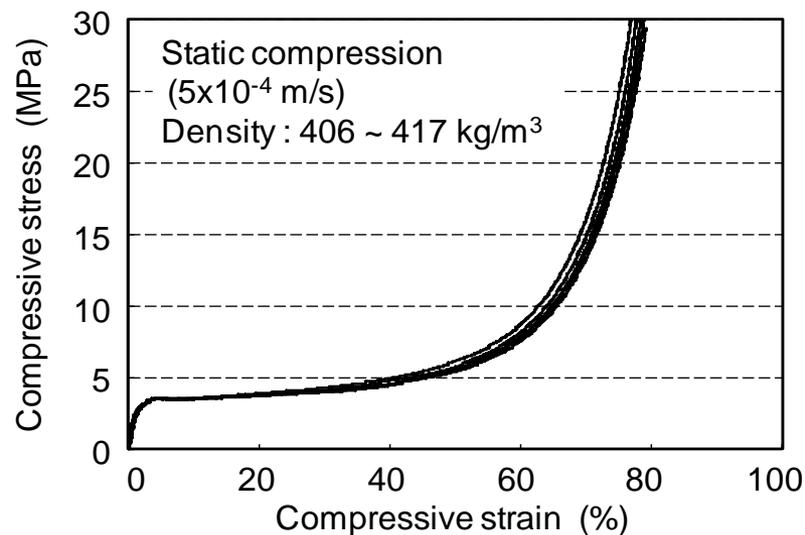
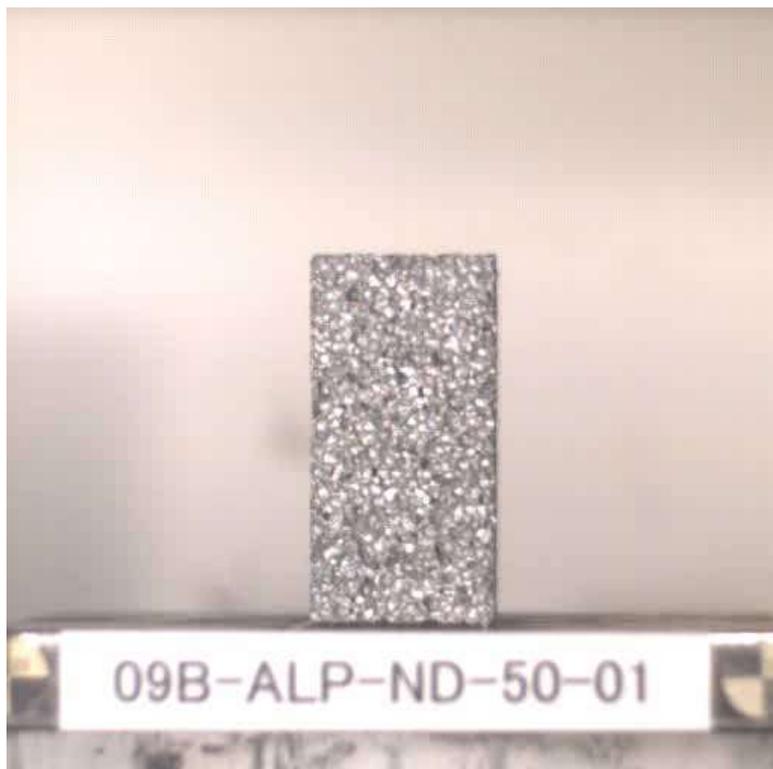
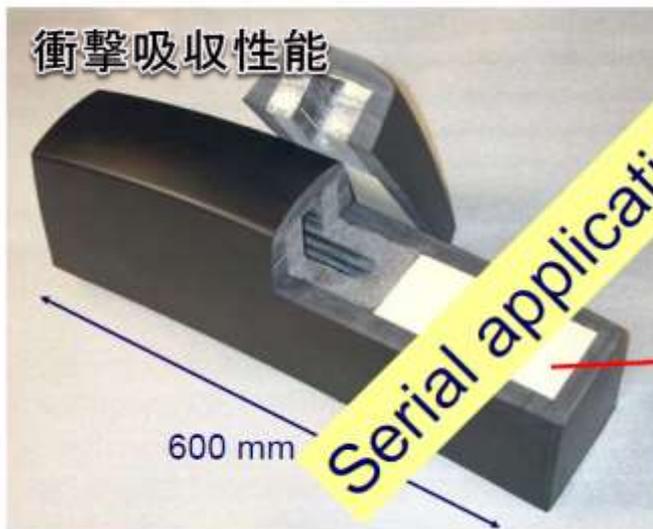
1. かたちによる機能発現・ポーラス金属
2. 金属Additive Manufacturingの紹介
3. 金属Additive Manufacturingの材料科学
4. ラティス構造体の力学特性
5. ラティス構造体の利用

# ポラス材料の特徴と用途

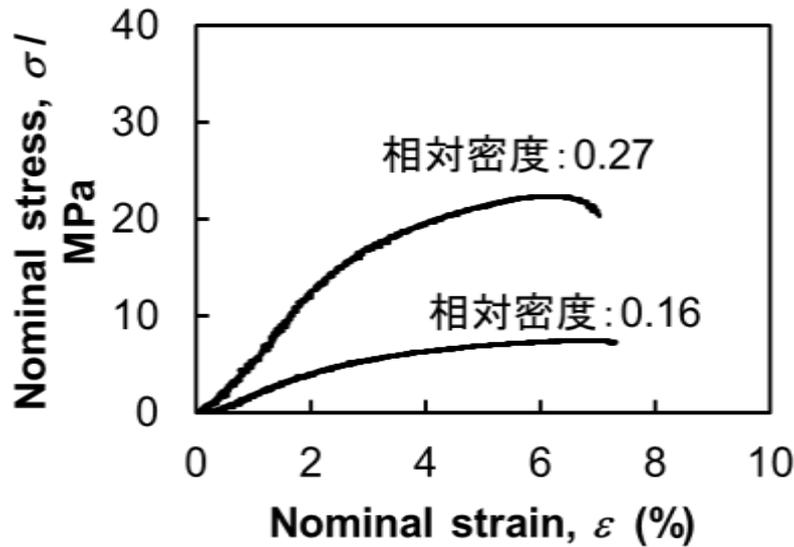
Closed cell structure



衝撃吸収性能

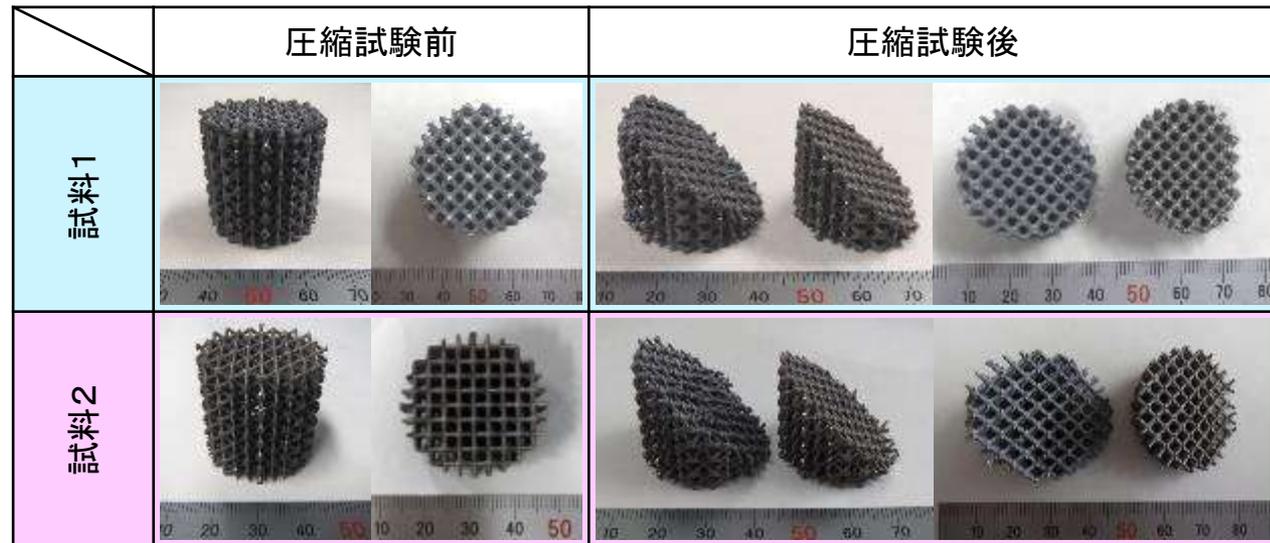
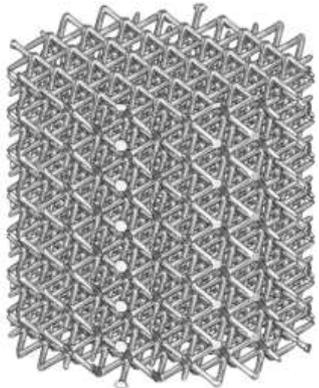


# 造形まま材 (AB材) の圧縮試験結果 (BCC構造)

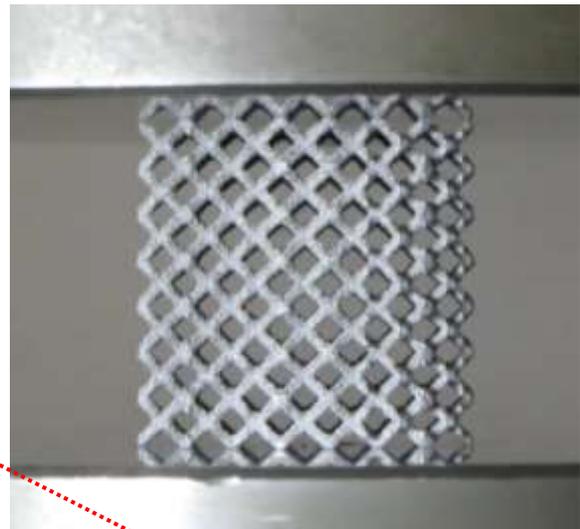
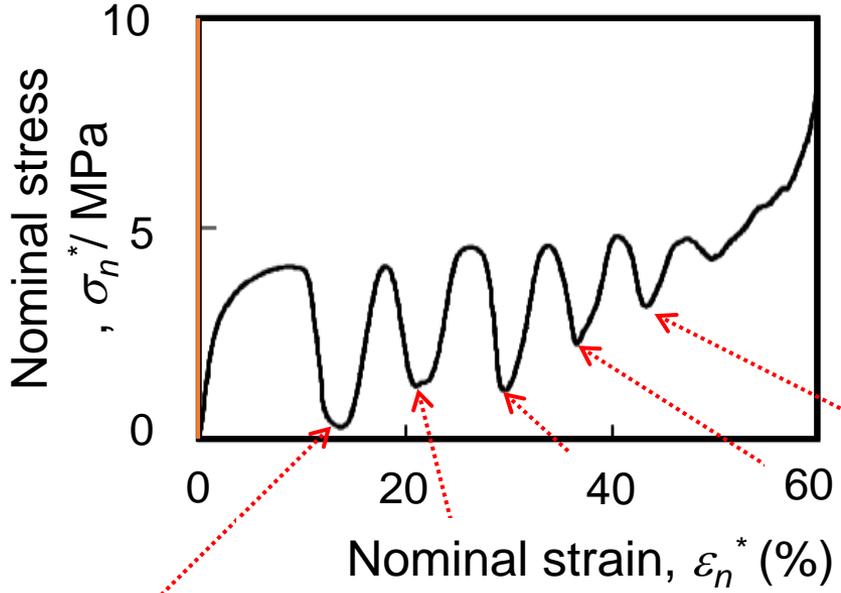


試料 1, 2 とともに公称ひずみ  
7%付近で破断  
圧縮軸と45°をなす方向で破断

	相対密度 R.D. / -	破断応力 $\sigma_F$ / MPa	破断ひずみ(%) $\varepsilon_F$ / -
試料1	0.27	20.4	7.03
試料2	0.16	7.17	7.29

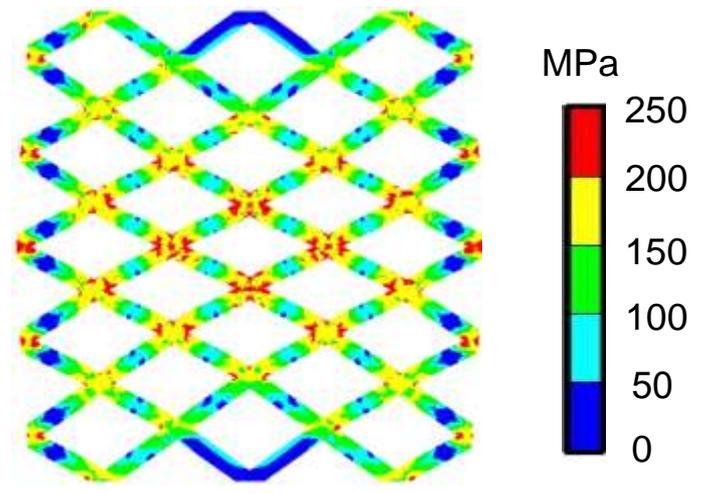
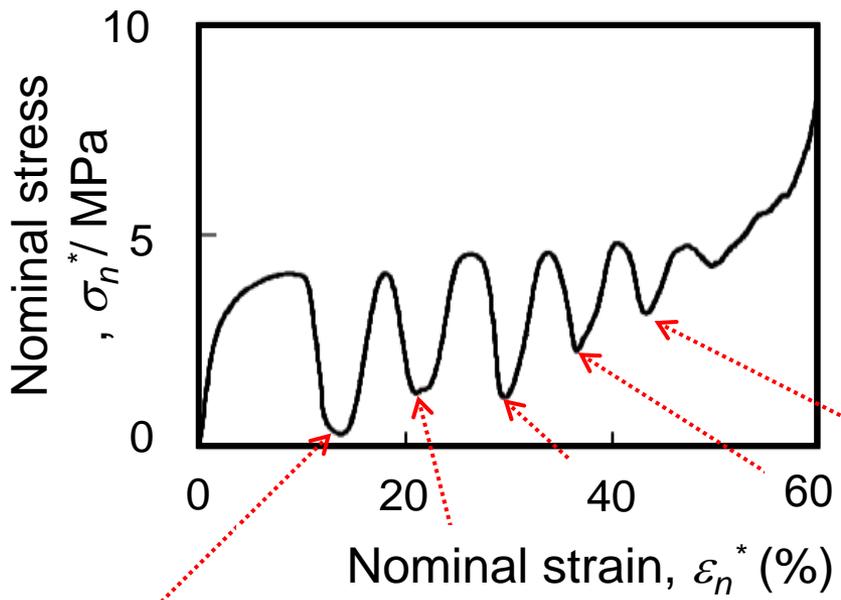


# ラティス構造体の圧縮変形における課題点～シエアバンド形成～



シエアバンド形成に伴って、S-Sカーブに大きな応力振幅が発生

# ラティス構造体の圧縮変形における課題点 ~シェアバンド形成~

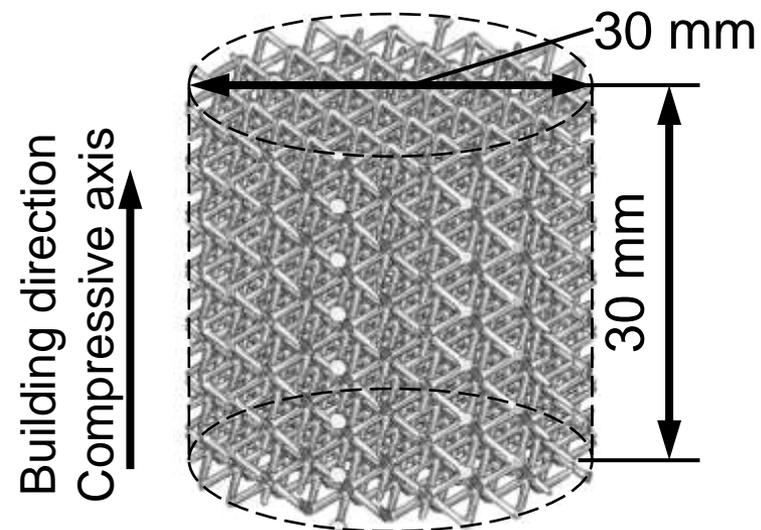


シェアバンド形成に伴って、S-Sカーブに大きな応力振幅が発生

# 圧縮試験に使用したラティス構造体

## 体心立方格子型

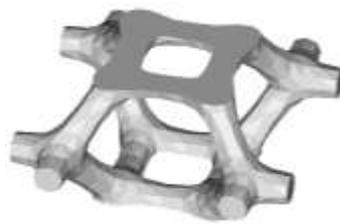
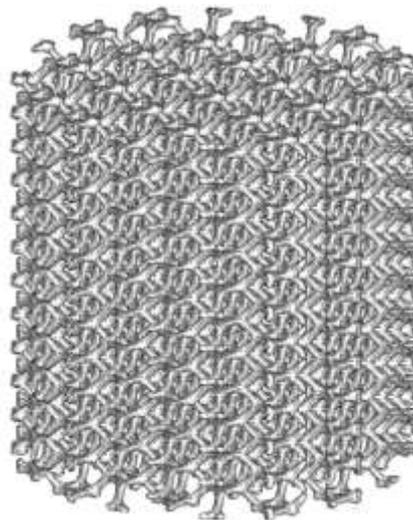
(body centered cubic; BCC)



高さ: 約4.2 mm  
幅: 約4.2 mm

## 六角型

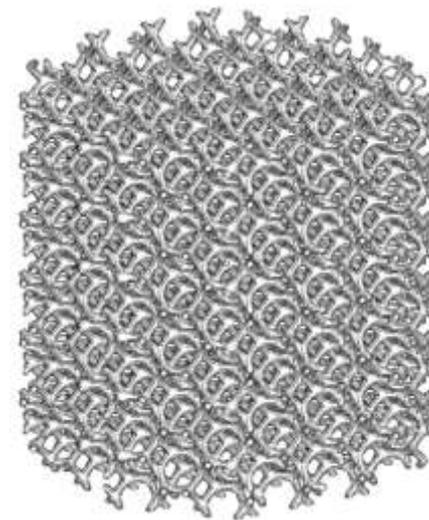
(Hexa)



高さ: 約2.5 mm  
幅: 約5.0 mm

## 切頂八面体型

(truncated octahedron; TO)

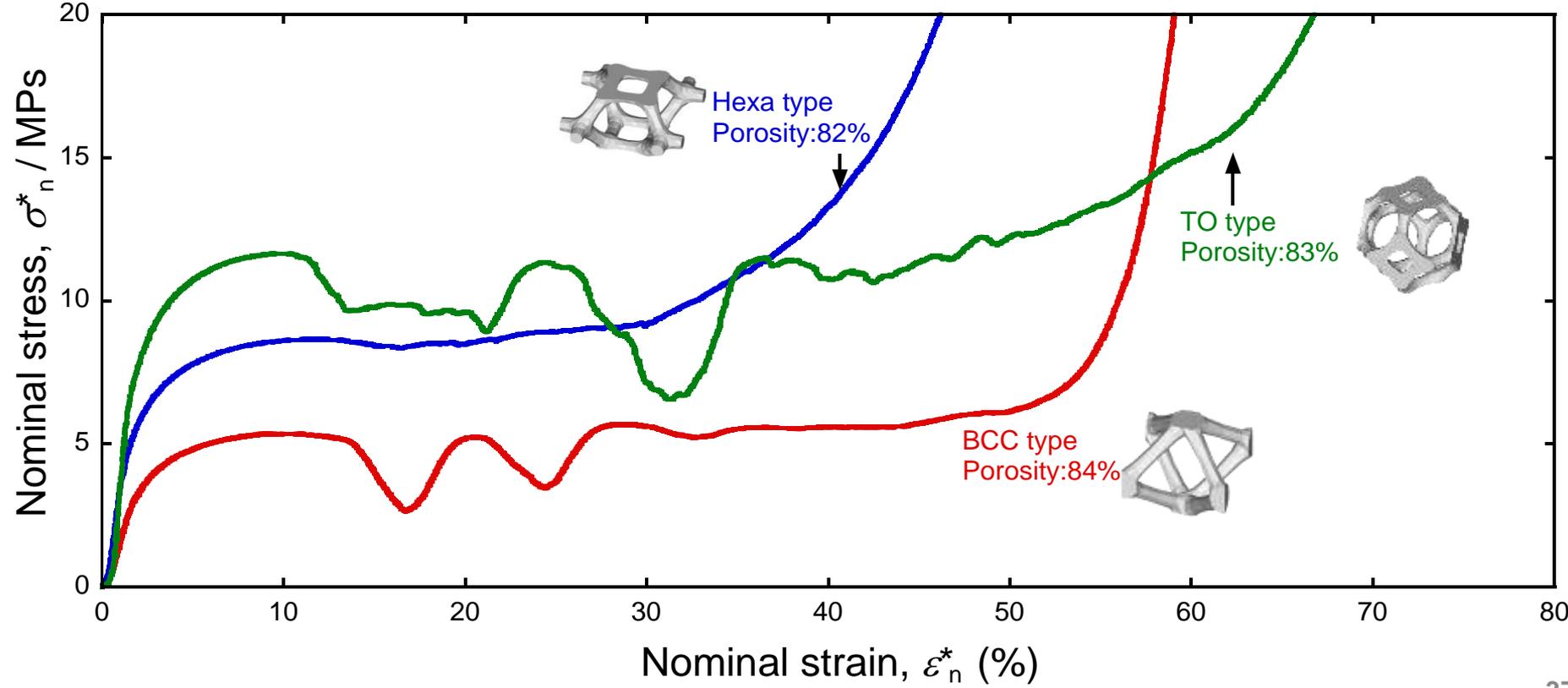
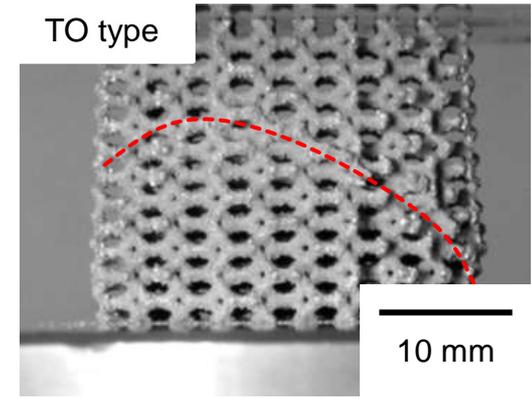
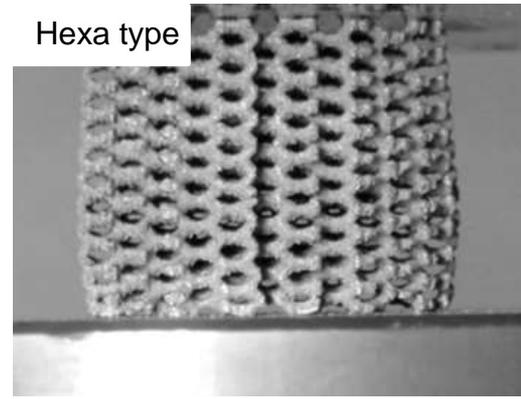
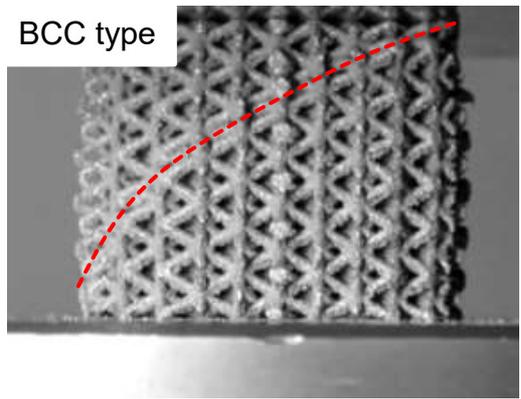


高さ: 約4.7 mm  
幅: 約4.7 mm

クロスヘッド速度 : 4.0 mm min<sup>-1</sup> (初期公称ひずみ速度 : 2.17×10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>)

# 300°C/2 h熱処理を施した異なるラティス構造体の圧縮特性

$\varepsilon_n^* = 20\%$



# 圧縮荷重を付与したラティス内のミーゼス相当応力分布

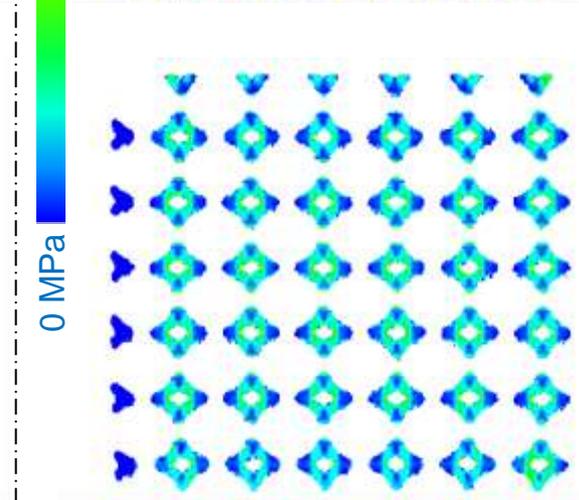
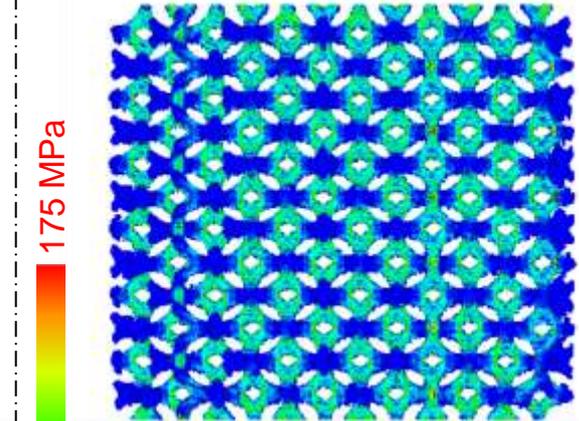
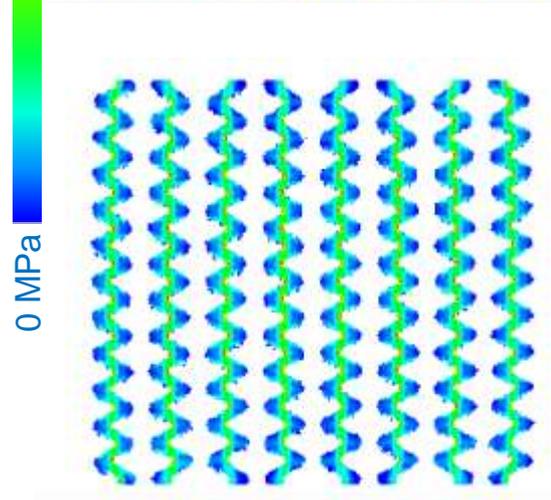
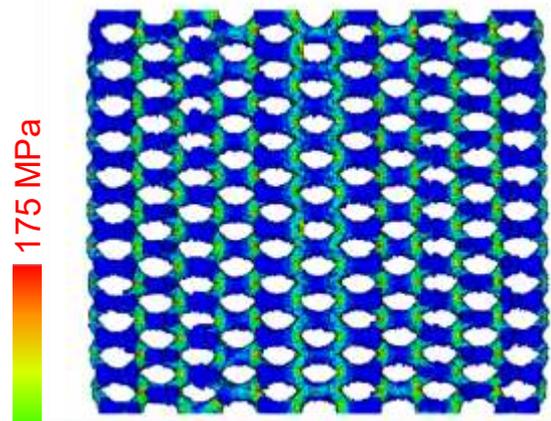
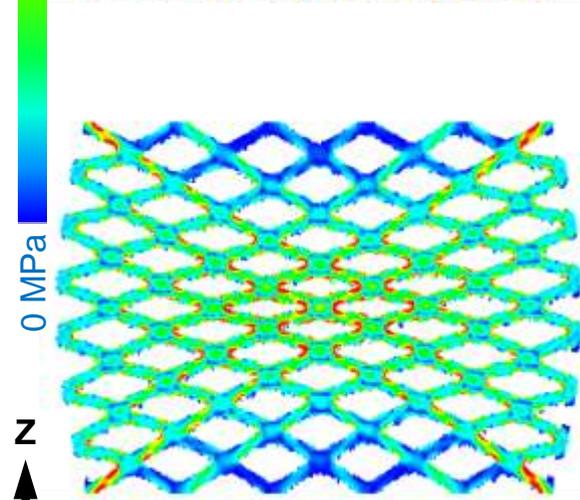
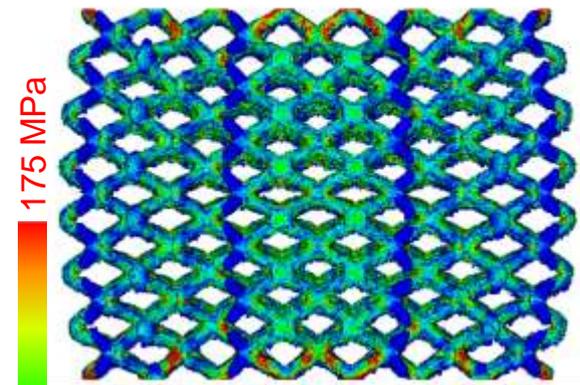
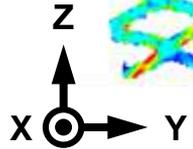
## BCC Type

## Hexa. Type

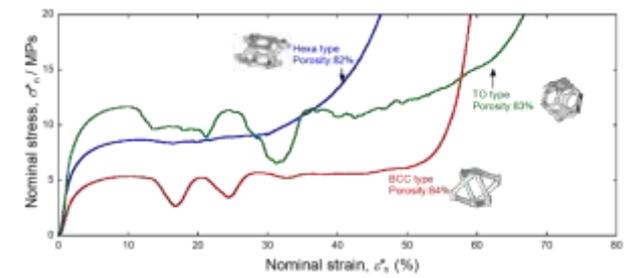
## TO Type

Side view

Vertical plane



ボクセルFEMによるミーゼス相当応力の分布



# 圧縮方向の投影イメージと圧縮後のラティス

TO-Type

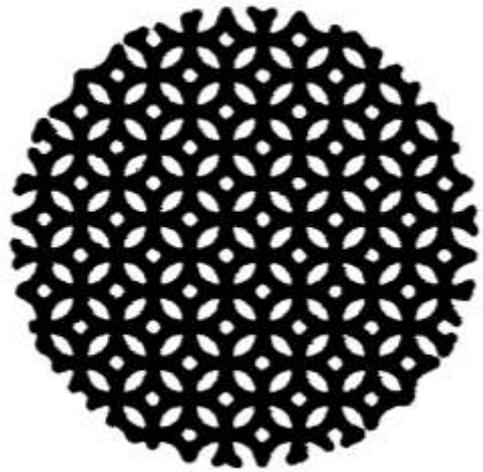
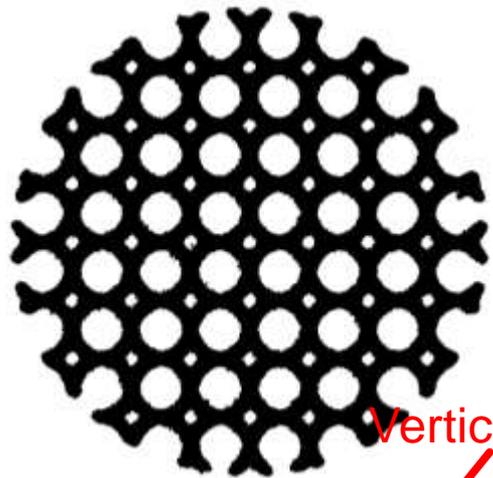
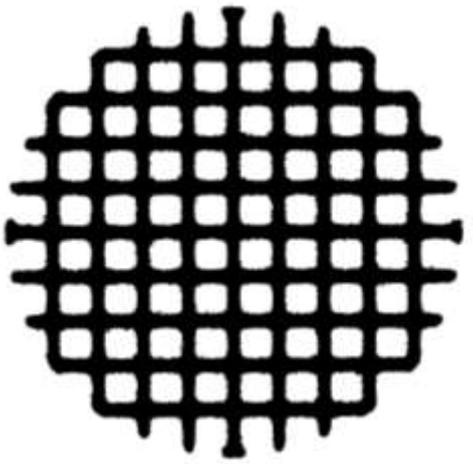
Relative density: 0.169

BCC-Type

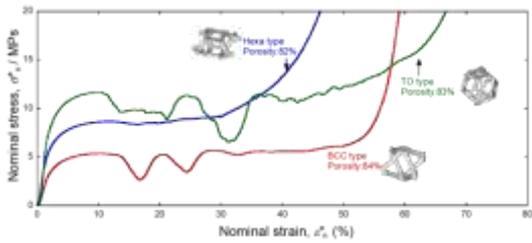
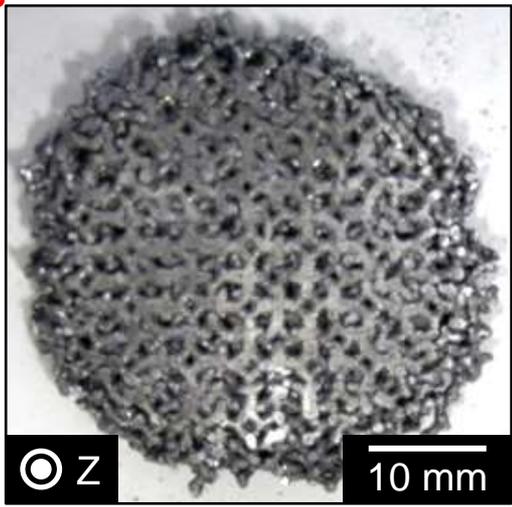
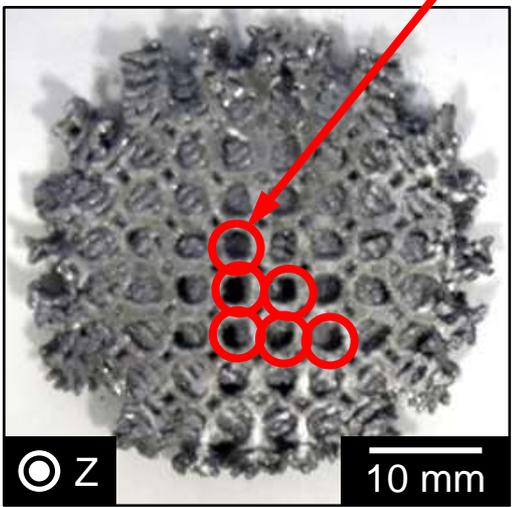
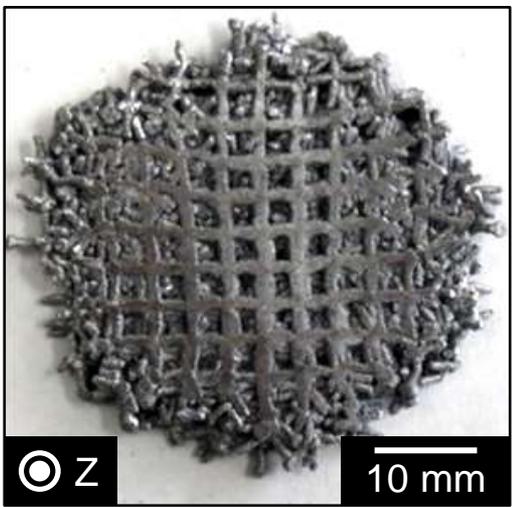
Relative density: 0.164

Hexa.-Type

Relative density: 0.177



Vertical holes



◎ Z

10 mm

◎ Z

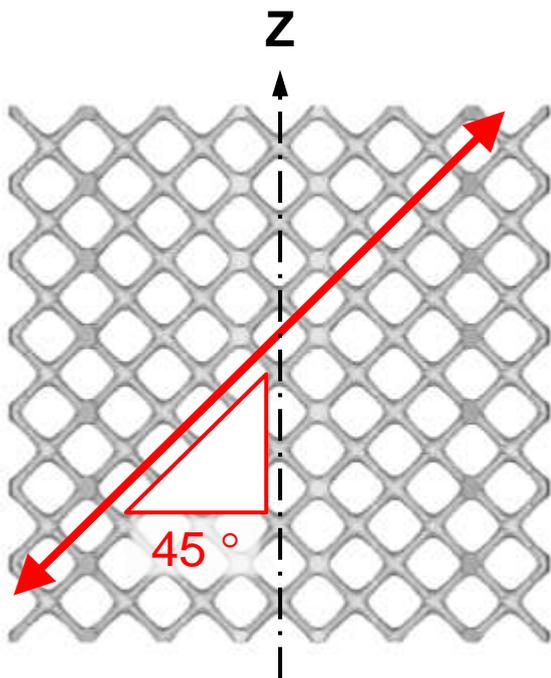
10 mm

◎ Z

10 mm

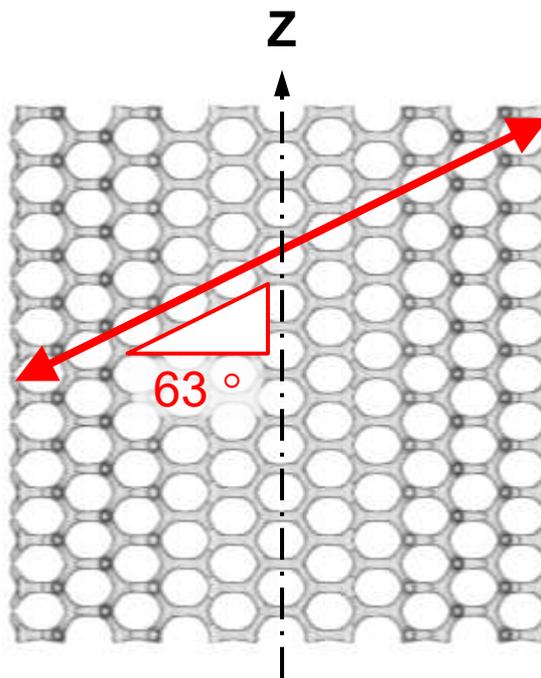
# 圧縮軸と垂直な方向のラティス投影イメージ

BCC-Type  
Relative density: 0.164



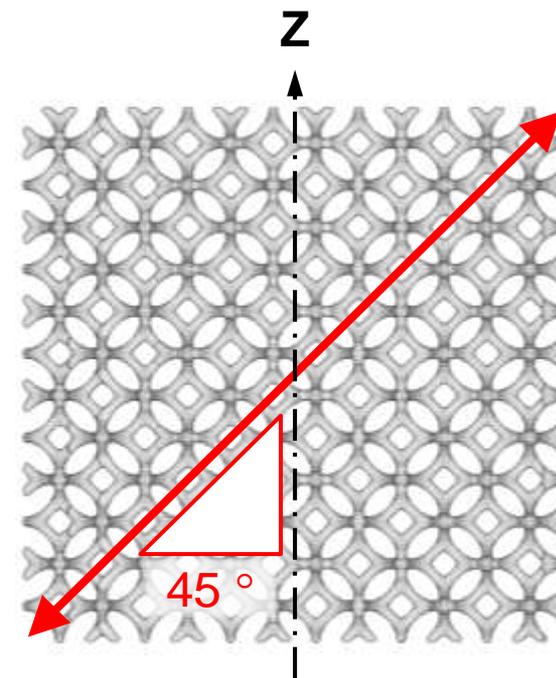
X-Type

Hexa.-Type  
Relative density: 0.177

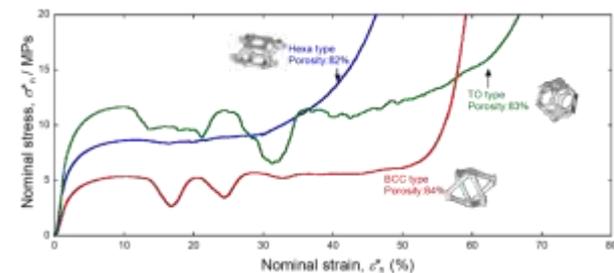


Hexa.-Type

TO-Type  
Relative density: 0.169

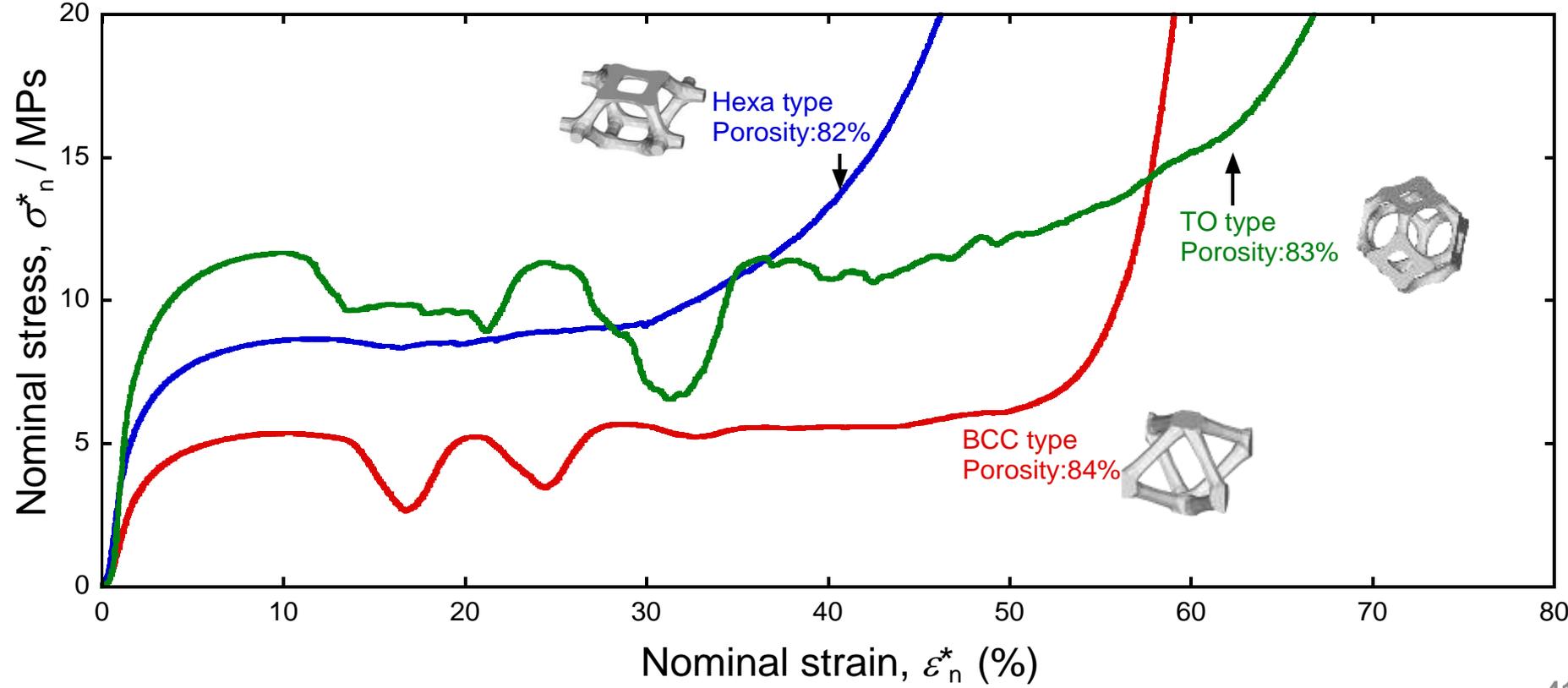
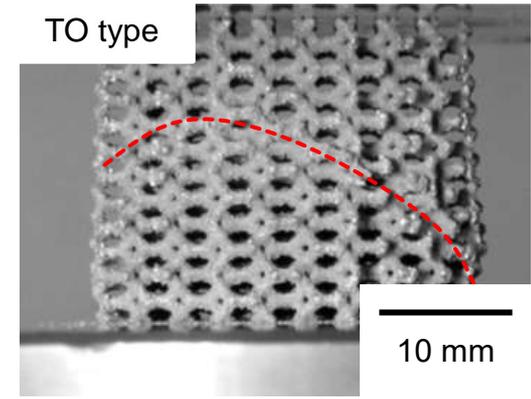
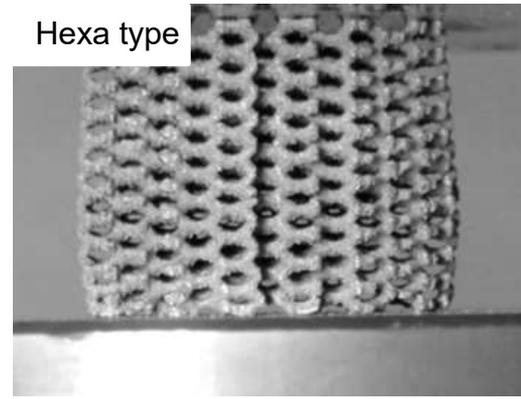
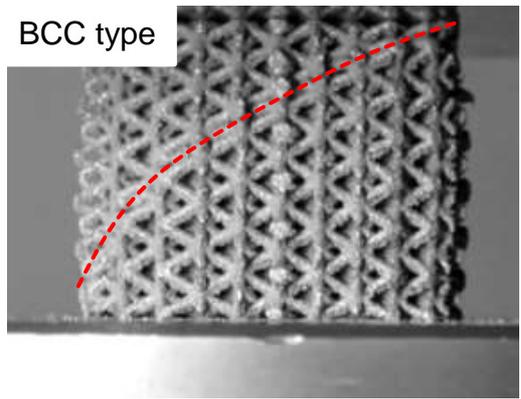


Octa.-Type

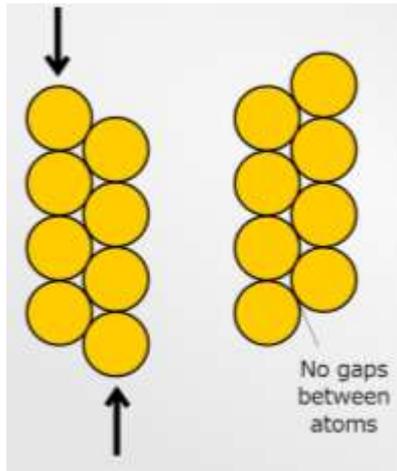
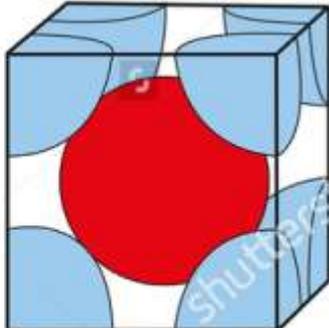
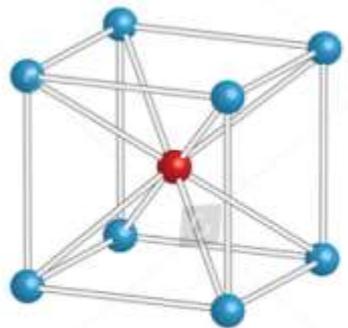
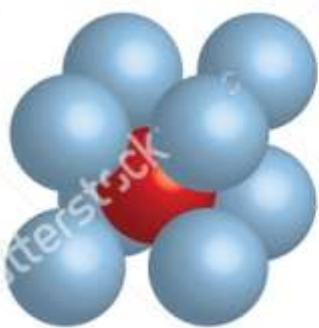


# 300°C/2 h熱処理を施した異なるラティス構造体の圧縮特性

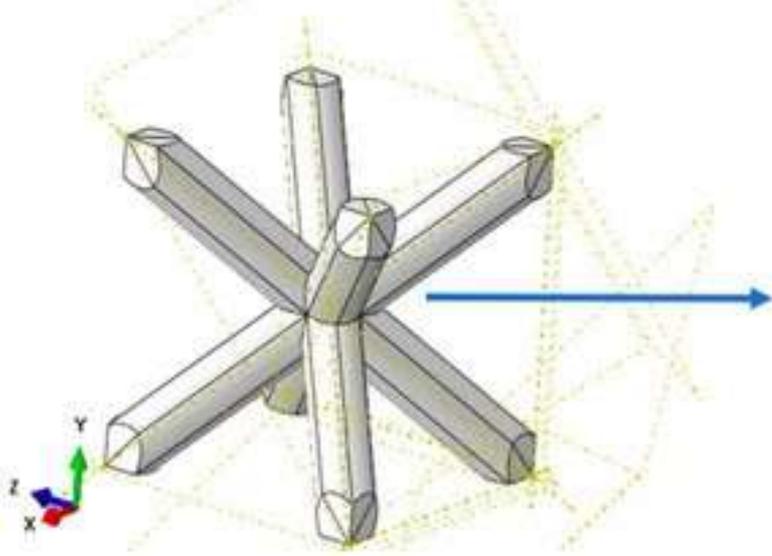
$\varepsilon_n^* = 20\%$



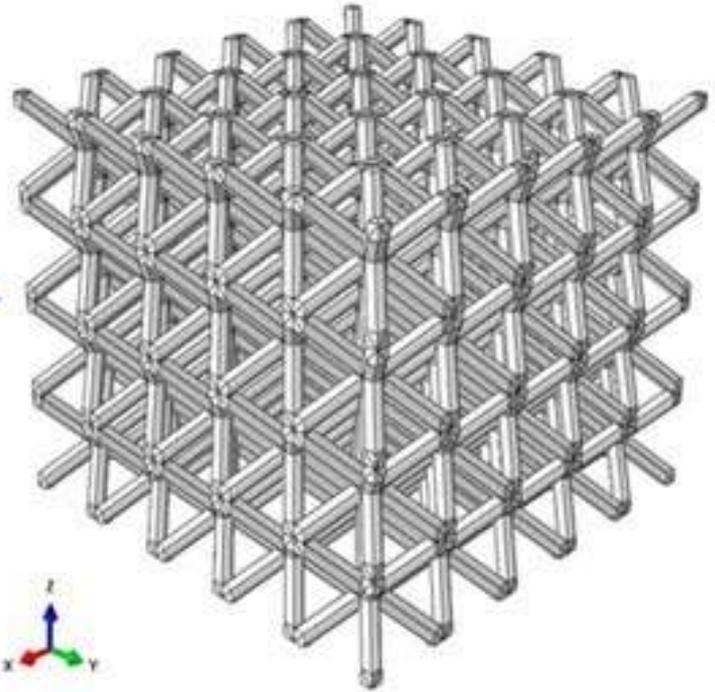
# BCC結晶構造とラティス構造



cubic body-centered (bcc)



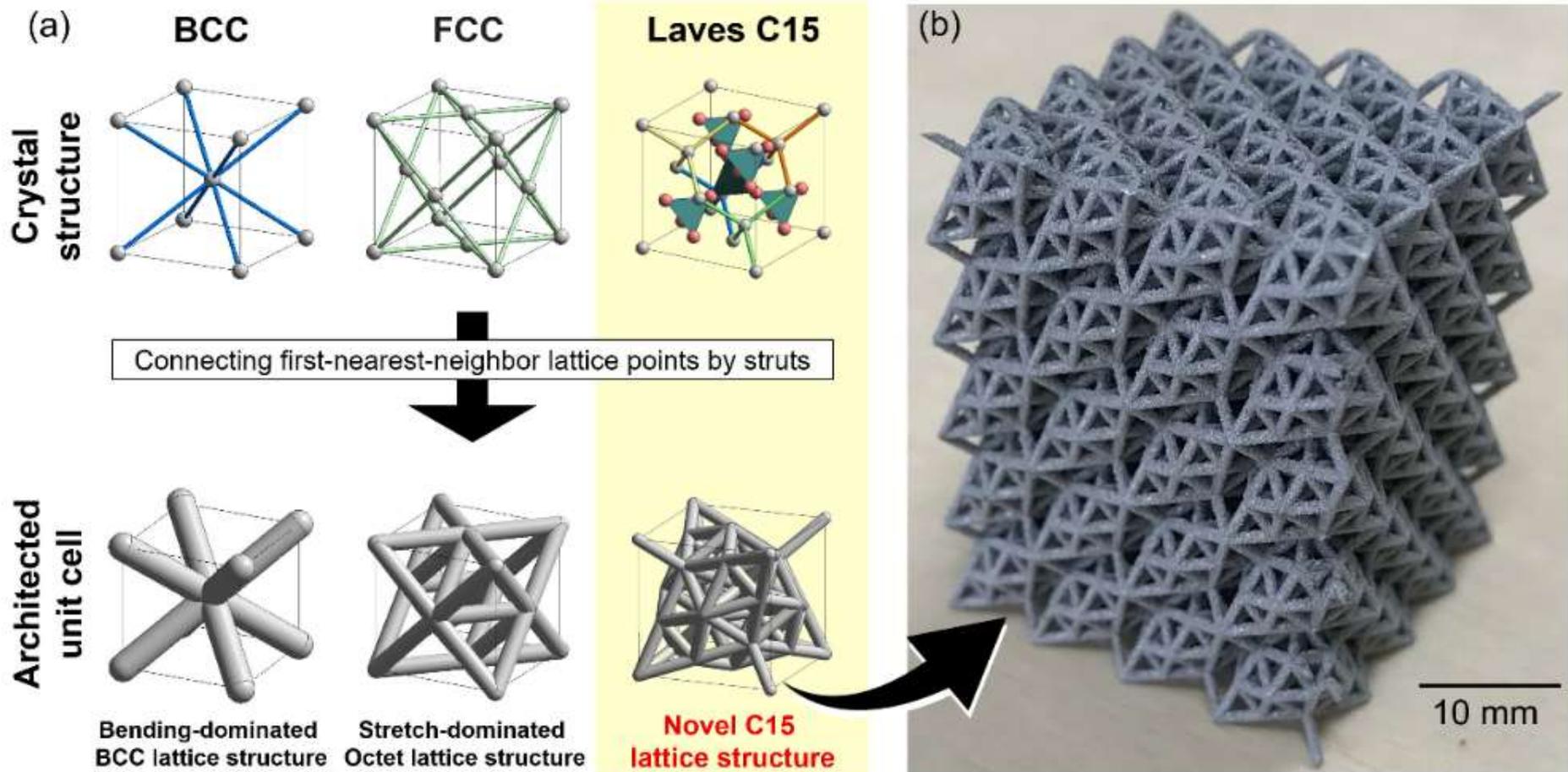
(a) BCC unit cell



(b) BCC lattice structure

# 積層造形で造る結晶構造模倣ラティス

❖ C15 A<sub>2</sub>B型Laves相の結晶構造を基にしたラティス構造

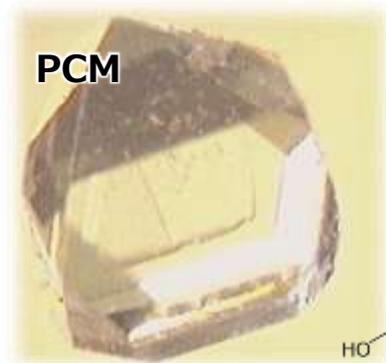


# 本日の内容

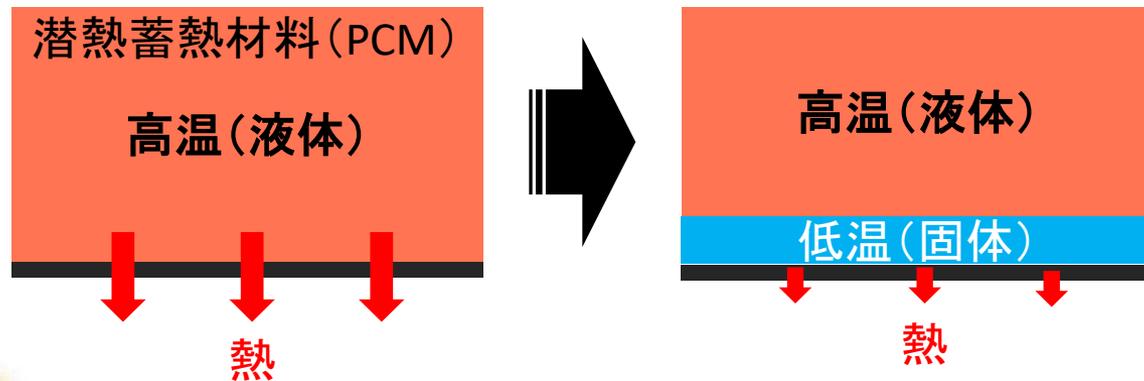
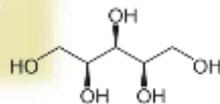
1. かたちによる機能発現・ポーラス金属
2. 金属Additive Manufacturingの紹介
3. 金属Additive Manufacturingの材料科学
4. ラティス構造体の力学特性
5. ラティス構造体の利用

# 熱交換性能・蓄熱ハイブリッド

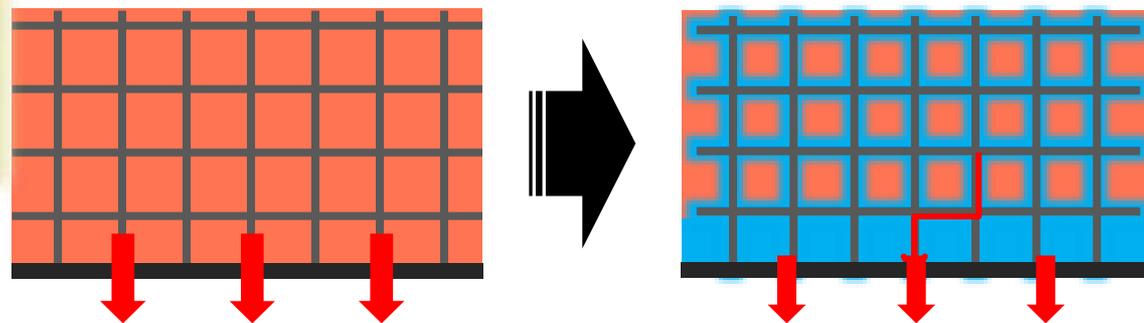
**潜熱蓄熱剤 (PCM)** : ○融点近傍の定温で大量の熱を貯蔵  
×熱伝導率が低い



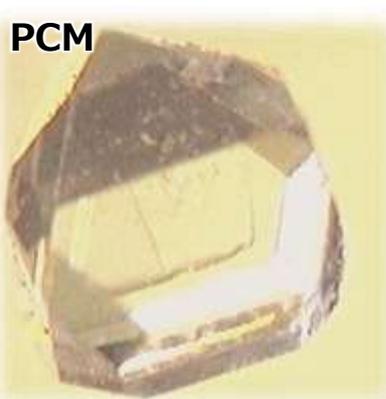
PCM



ポラス金属との複合化

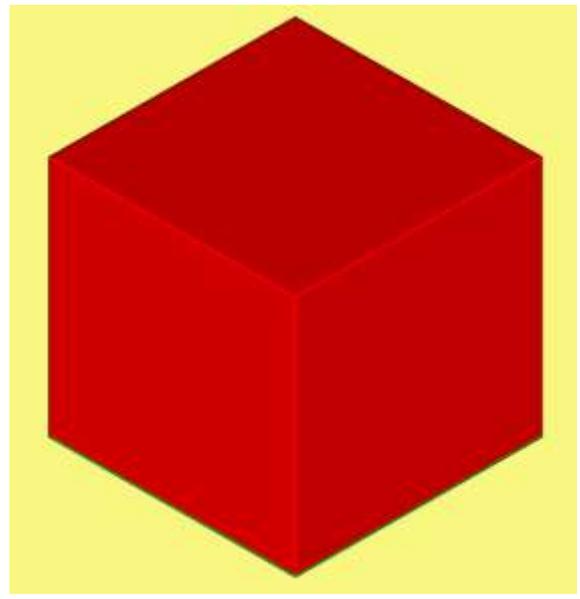
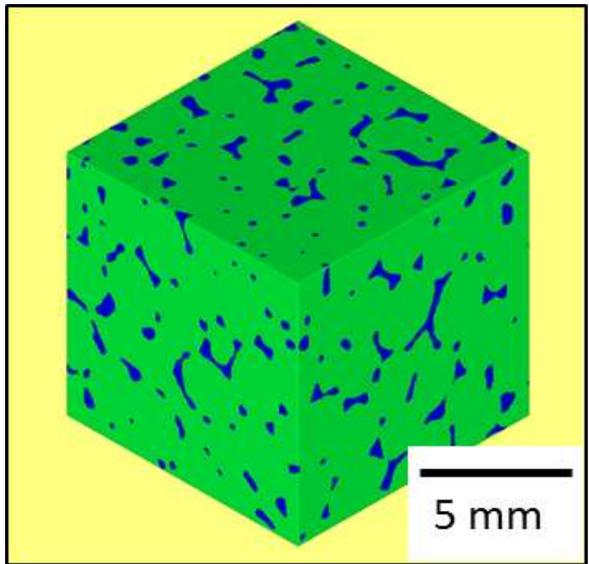
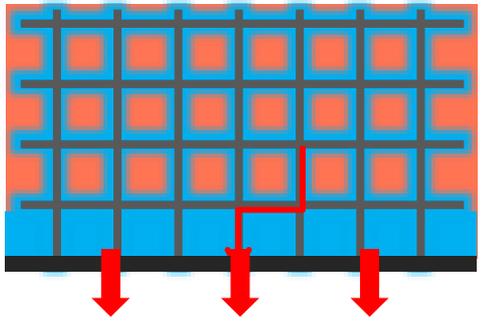
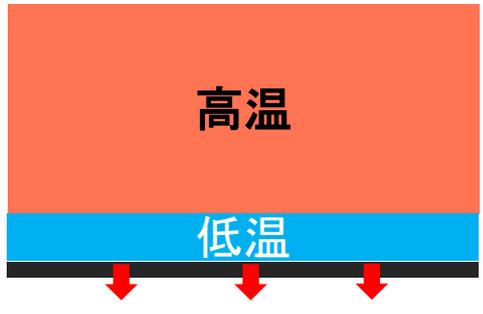


- ◆ 金属が連続しているので熱伝導率が大幅に向上する。
- ◆ 等方的に熱伝導率を向上する。

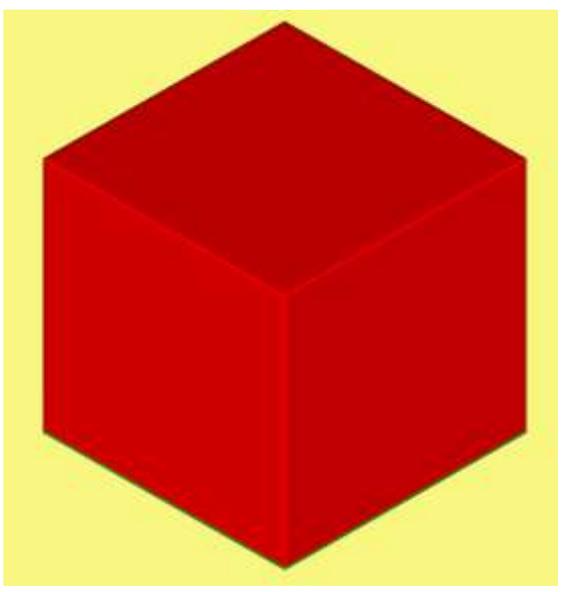


蓄熱複合材

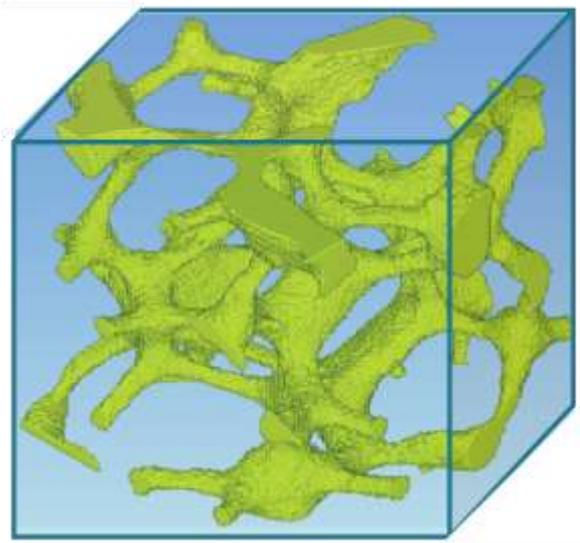
# PCMとPCM/Al hybridの放熱挙動



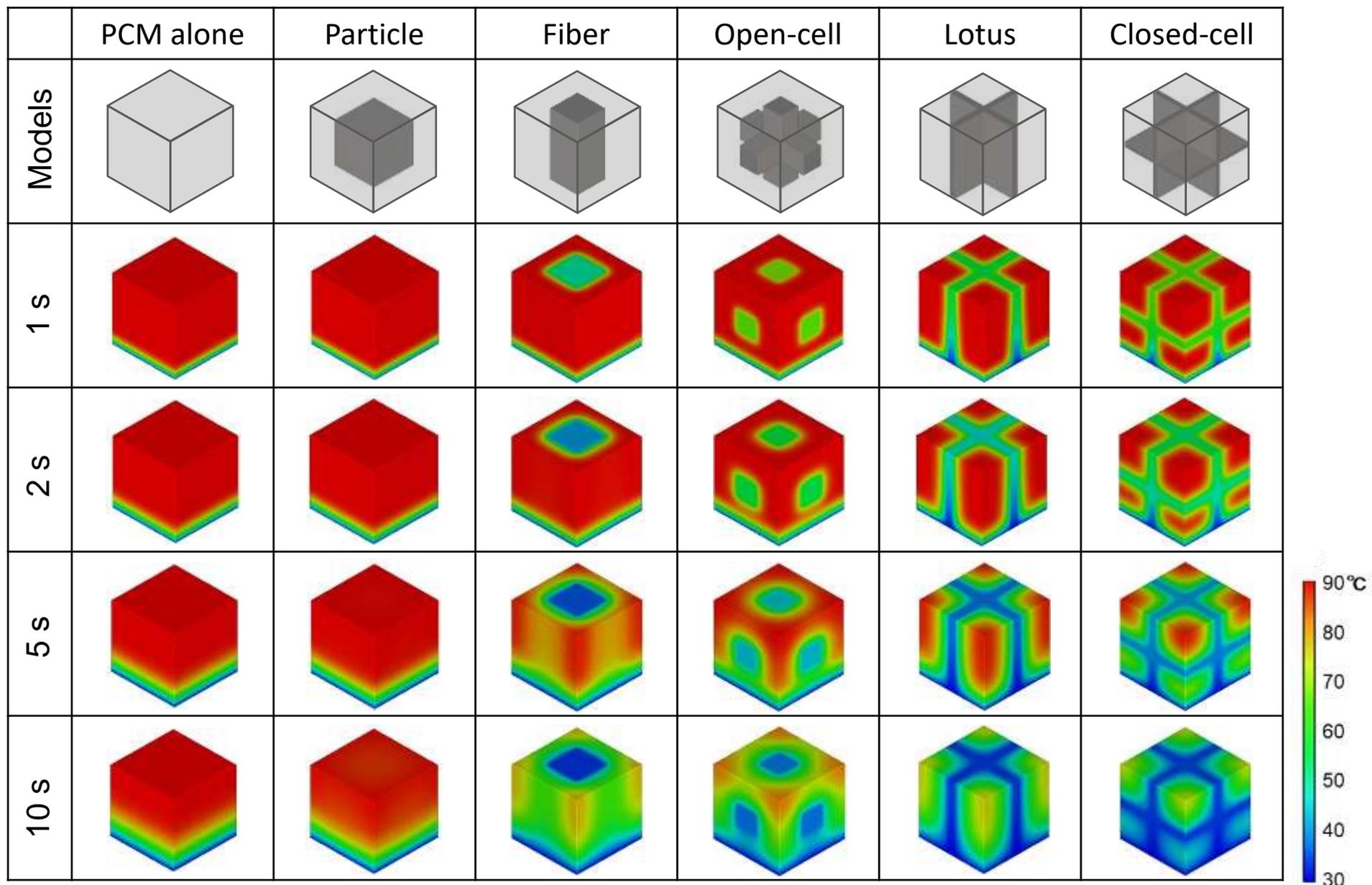
(左)PCMのみ



(右)PCM/Al hybrid

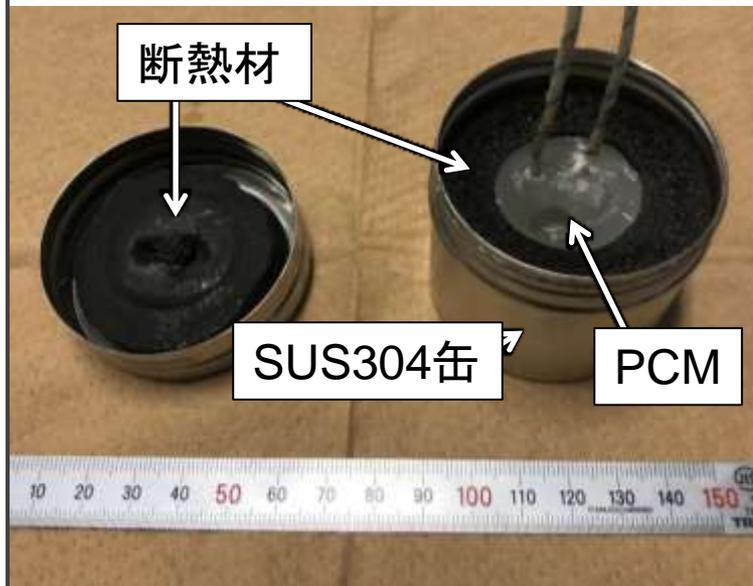
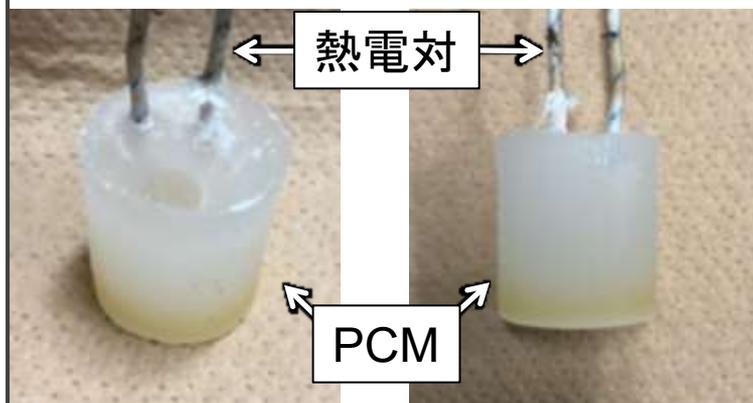


# PCMとPCM/AI hybridの放熱挙動

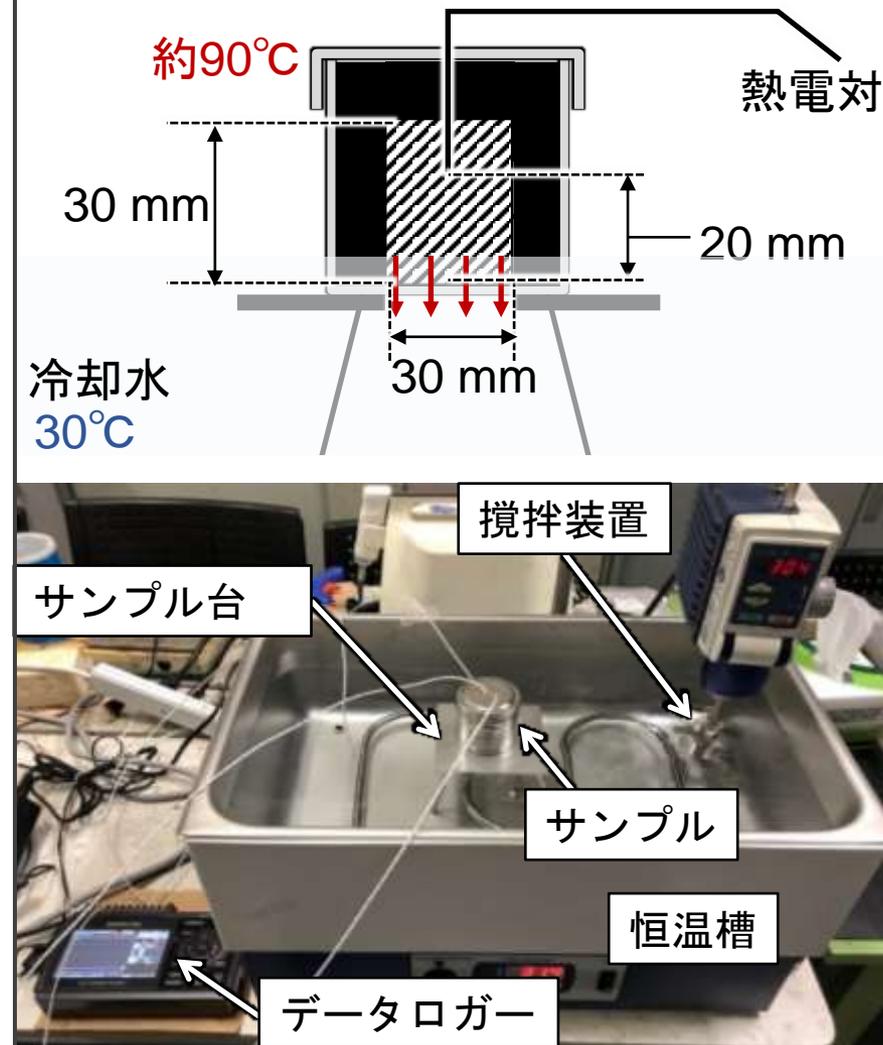


# 実験方法 | 放熱特性の評価

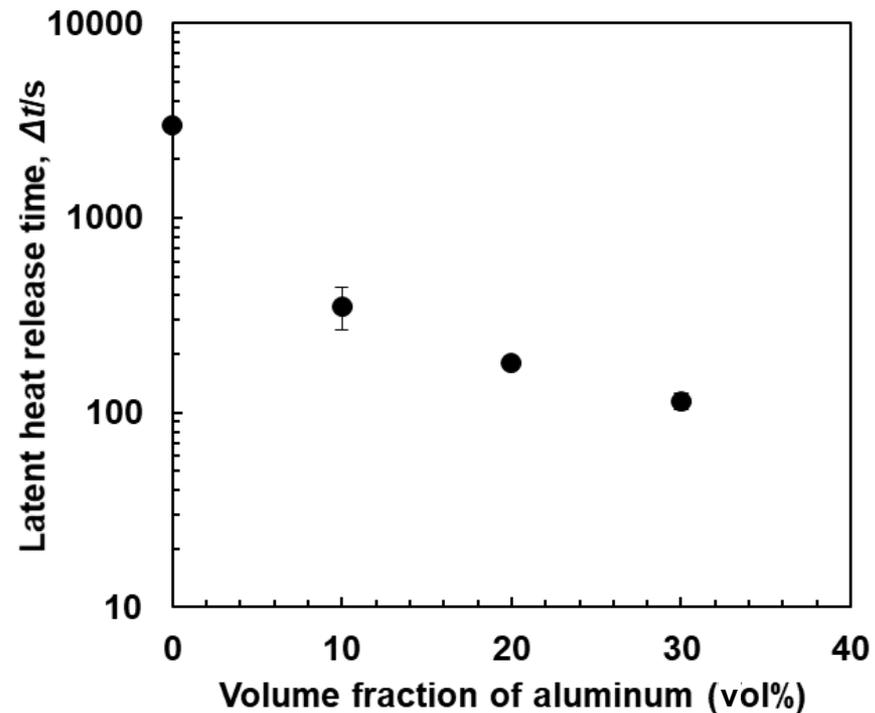
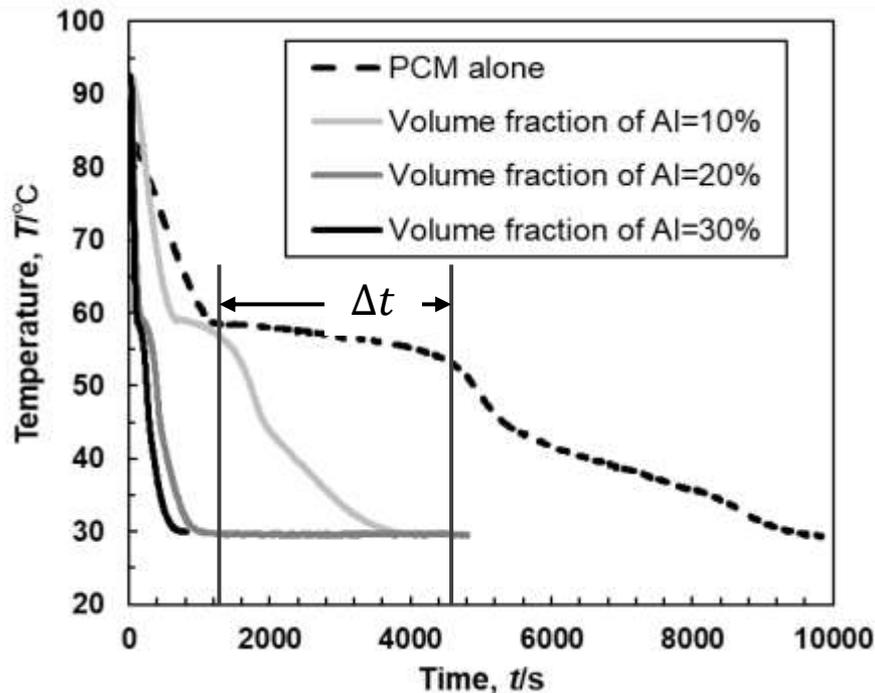
## サンプル外観 (PCM単体)



## 放熱試験セットアップ外観

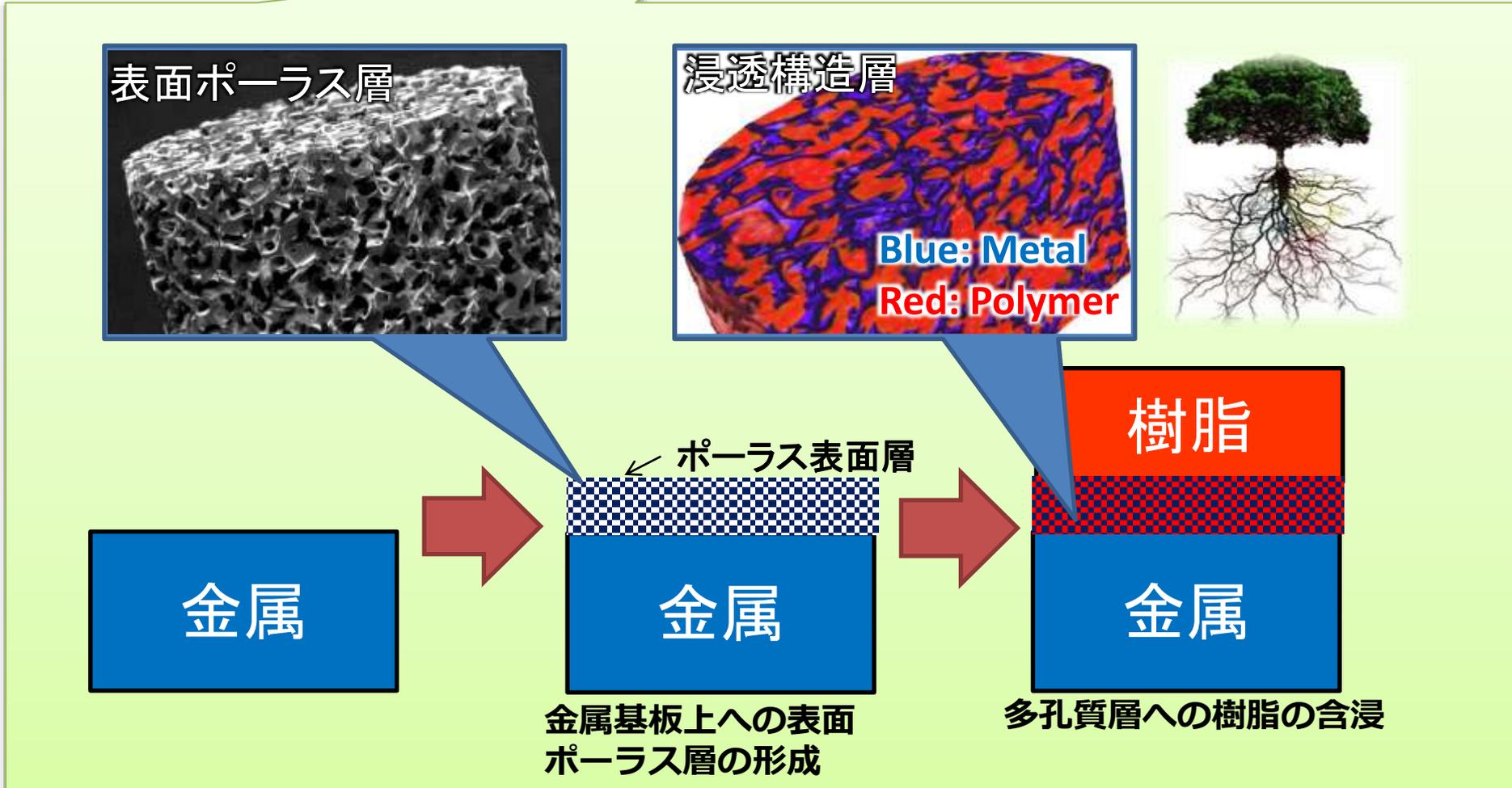


# 実験結果 | 放熱特性の評価



- Alを10 vol%複合化させることで、潜熱放出時間はPCM単体に比べて約10分の1と大きく短縮。
- Al体積率を増加させたことによる潜熱放出時間の短縮は、ハイブリットの見かけの熱伝導率向上によるものであると考えられる。

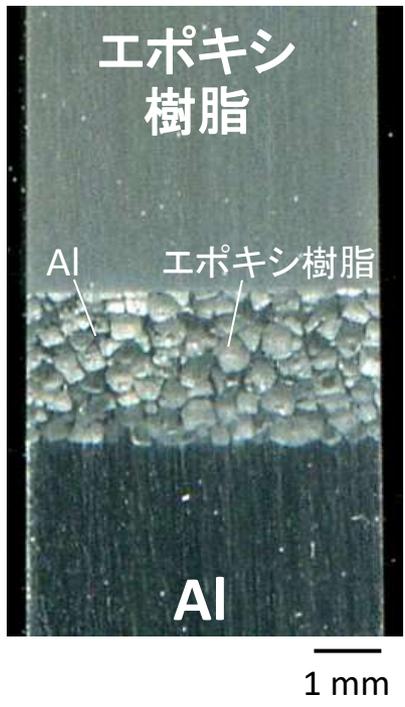
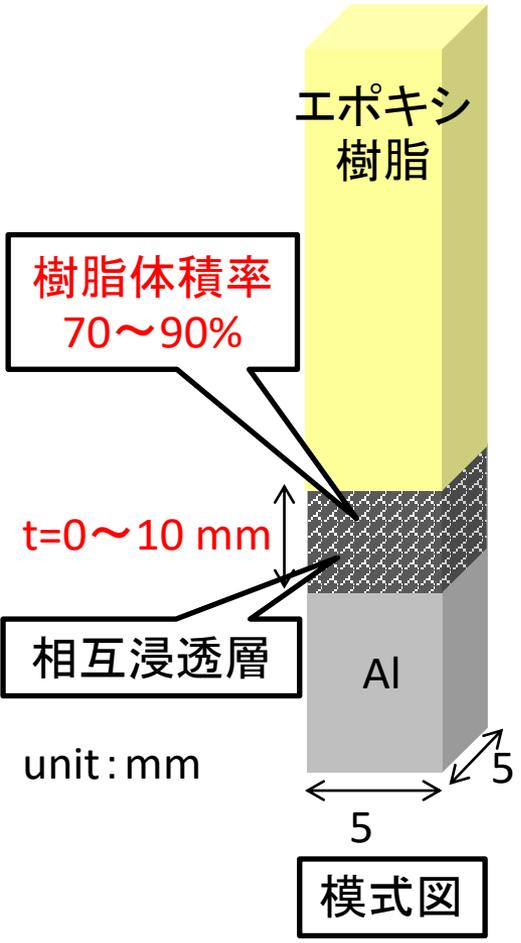
# 樹脂と金属の接合



気孔径：数十～数百 $\mu\text{m}$ , 厚さ：百 $\mu\text{m}$ 以上

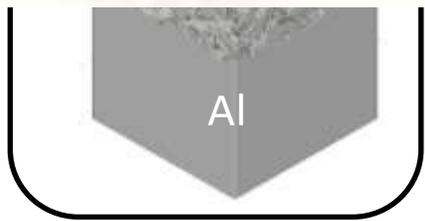
# 樹脂/金属接合用インターフェース

Alとエポキシ樹脂の接合体を作製

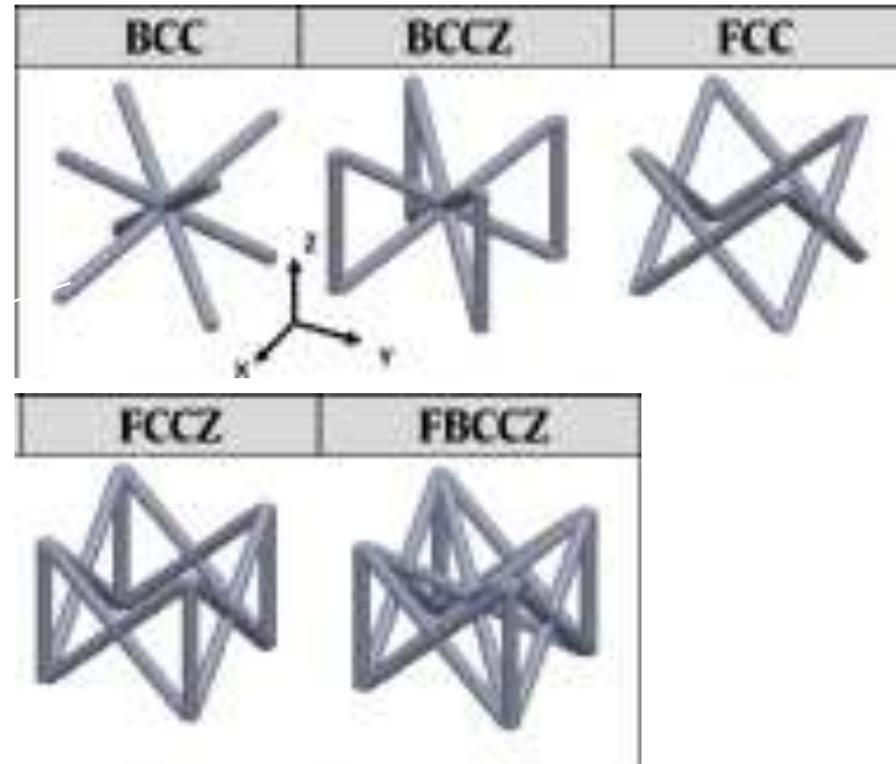
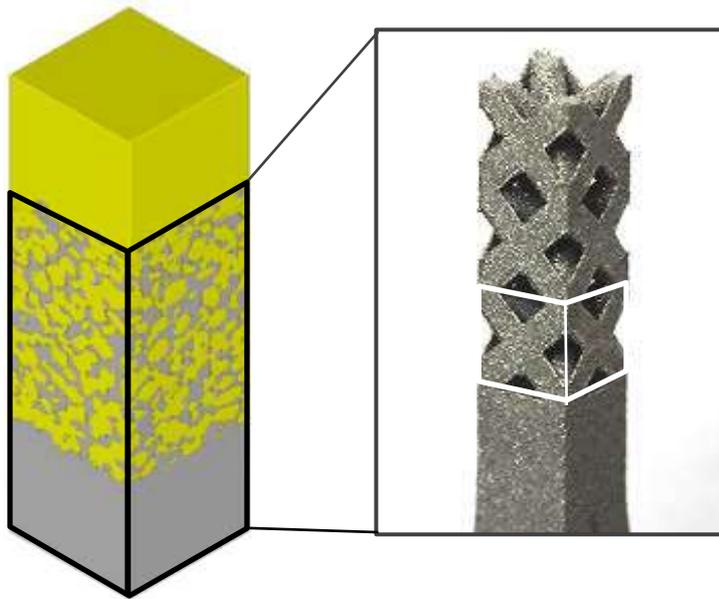


外観写真  
(相互浸透層拡大)

X線CT像



# 樹脂と金属の接合



## Research topic

- The effect of unit cell on the joint strength.
  - Using BCC, BCCZ, FCC, FCCZ and FBC CZ.
  - Investigate the change of joint strength.
- The effect of unit cell topography on the joint strength.
  - Using graded lattice structure.
- Optimizing the structure.

# さいごに

## 従来の材料開発

- 結晶構造
- 結晶方位
- 析出物

**構造**敏感な特性（耐力、強度、伸び）  
に効果あり  
・転位論、フェーズフィールド、  
第一原理

## 私が目指している材料開発

- メソスケール  
**構造制御**

→ かたちで制御困難な特性を見掛け上制御  
可能（ヤング率、熱容量、熱伝導率）  
新機能も創出可能

Shape

かたちが創る機能  
かたちを造る技術。。。設る？