金属積層造形による傾斜機能多孔質構造体の創成

Creation of Functionally Graded Porous Structures with Metal Additive Manufacturing

水谷正義*
Prof. Masayoshi MIZUTANI

The authors have created a highly unique structures that combine gradient functionality and porosity by using metal additive manufacturing (AM) to create Ryzhoid Porous Structure (RPS) and control their internal microstructure. This paper presents a specific example of this approach. The findings from this research could lead to novel structures with multiple synergistic functionalities, such as those used in implant structures. The application scope of this method is not limited to the biomedical field but is expected to have a wide range of applications.

Key Words: functionally graded porous structures, microstructure, metal additive manufacturing

1．傾斜機能多孔質構造体という考え方

工業製品の多くの部材は鋳造あるいは粉末焼結法によって製造されている．これらの製造工程で気泡のような鋳造欠陥や焼結欠陥は通常，工業製品の機能性や有効性を阻害する有害な欠陥とみなされてきた．そのため，工業製品の性能を維持するためには可能な限り空孔率を低下させた高密度の材料を製造することが不可欠である．一方，この欠陥を「機能的な構造」の一部として捉えた場合，複数の空孔を有する金属材料は「多孔質金属材料」と総称される[1)]．このような特異な構造がもたらす工業的な利点としては，軽量化，高比強度，高衝撃吸収性，制振性，断熱性などが挙げられる．さらに，空孔がある特定の方向に，あるいは一方向に伸長していれば，空孔の伸長方向に依存して構造に異方性をもたらすばかりでなく，物理的，化学的，生物学的，または機能的にも異方性を生じさせることが可能であり，多くの分野での活用が期待されている[2)]．

また，そうした構造体に機械的性質の異方性を持たせるためには，その内部の金属組織を制御する，という考え方もあり得る．例えば，金属単結晶は結晶方位に応じて弾性率の異方性を持っているが，一般の金属材料は微小な結晶の集合体で構成される多結晶金属であり，この結晶が十分に小さく結晶方位がすべての方向に一様に分布しているため，多くの金属材料の機械的性質は等方性を示すとされている[3)]．ただし実際は，金属材料は製造工程に応じて，凝固，塑性変形，再結晶，変態などの現象を経るため，結晶方位が特定の方向に配向し，それに応じて機械的性質にも異方性が生じる．この結晶粒が特定の方向に配向した状態を集合組織と呼ぶ[4)]が，この集合組織を適切に制御することができれば，機械的性質の異方性を任意に生み出すことが可能であるとも考えることができる．

*東北大学グリーン未来創造機構グリーンクロステック
研究センター　教授
（兼）東北大学大学院工学研究科
（兼）東北大学大学院医工学研究科

2．傾斜機能材料としての人骨

人骨は，骨密度が高い皮質骨と網目状に張り巡らされた繊維質上の海綿骨から形成される[5)]．この骨りょう構造は，人体が日常的にさらされる複雑な力学的環境に最適化するようにモデリングされた傾斜機能材料である[6)]．この特異な構造により，人骨は軽量かつ高剛性・高強度といった優れた特性を備えている．

この構造に倣い，現在ではこの人骨のような傾斜機能材料（多孔質構造）をインプラントに活用する試みが多くなされている．インプラントの多孔質化は，生体的あるいは力学的な適合性を向上させるという点で非常に有

用である．例えば，多孔質化によりインプラントの見かけの弾性率を低減することで，インプラント－骨界面における力学的応力遮蔽の緩和が期待できる．また，骨芽細胞は 100 ～ 200 μm 以上の径を持つ空孔内部で成長が活発化するという性質を利用して，空孔内部での骨形成を促すことでインプラント－骨界面の結合を向上させるという考え方も採用されている[7), 8)]．すなわち，多孔質構造はインプラントの課題解決や高機能化を達成するために重要な因子となる．

多孔質構造体の作製にはこれまでに多くの手法が提案されている．代表的な作製手法として，ガスインジェクション法[2)] やスペーサー法[9)] が挙げられる．ガスインジェクション法は，溶融金属が凝固するまでの間にガスを吹き込み，内部に気泡を生成させることで多孔質な構造体を作製する手法である．本手法は他手法に比べてコストが低い一方，空孔形態の制御が難しいという問題もある．

スペーサー法は水溶性の物質（塩化ナトリウムなど）からなるスペーサー粒子を鋳造や焼結などの手法で材料中に配置し，水洗や加熱により取り除くことで粒子の形状に準じた空孔を材料中に残留させる手法である．本手法は高精度な空孔制御が可能であり，空孔同士が連結した開気孔の導入も可能である．一方，焼結あるいは溶融のための加熱中に母相金属と反応せず，かつ焼結中や焼結後に簡便に除去できるスペーサー粒子の選定が必要となる．

3．根状多孔質構造体の提案[10)]

極めて高い形状設計自由度をもつ金属積層造形（Addtive Manufacturing：AM）は，内部多孔質構造が幾何学的あるいは機能的にデザインされた多孔質構造体の作製に非常に適した手法である．AM による多孔質構造の作製プロセスは多くの場合，**図1**のような最小単位構造の設計から始まる．この単位構造はユニットセルと呼ばれ，全体構造の特性を決定づける重要な要素である[11)]．ユニットセルの最適設計にはしばしばトポロジー最適化[12)] などの解析的手法が採用される．設計されたユニットセルは造形物外形状の設計空間に周期的に当てはめられることで，最終的な全体構造を得る（**図2**）．空孔の分布や形状は計算機による設計の段階で任意に操作可能であり，空孔形態の制御という点では，従来手法を大きく上回る自由度を発揮する．ただし，AM の性

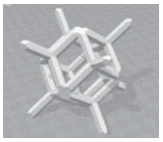


図1　ユニットセルの3D モデル
3D model of unit cell

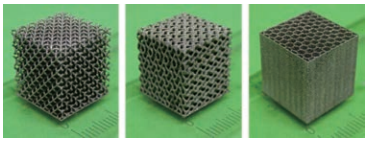
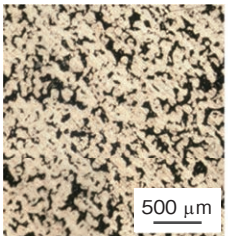
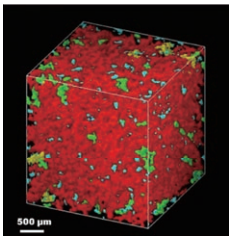


図2　AM により造形された多孔質構造体
Porous structure created by additive manufacturing



RPS材料の断面画像



空孔可視化画像
（赤：連結孔）

図3　RPS の内部構造
Internal structure of rhizoid porous structure

質上，オーバーハング形状では造形不良が生じる可能性が高いため，構造中のはりの寸法や角度については慎重な検討がなされるべきである．また，空孔が互いに独立した閉気孔の形態をとる場合は，造形に使用されなかった粉末が空孔内に残留するため，それを抜き出すための貫通孔を設ける必要がある．その場合，全体構造の機械的強度は設計値よりも低下することに留意しなければならない．

こうした考え方に対して著者らは，AM による造形物内部に形成される空孔欠陥を利用した構造を提案しており，連結空孔の特徴的な形状から根状多孔質構造（Rhizoid Porous Structure：RPS）と名付けた．RPS は**図3**に示したような数十～数百マイクロメートルオーダの閉気孔および開気孔を有し，その空孔率はレーザ走査速度などの造形条件によって任意に制御可能である．**図4**に造形時のエネルギ密度と空孔率の関係を示す．ここで，エネルギ密度 E_d [J/mm^3] とは造形時に単位体積当たりに投入される熱量を指しレーザ強度 p [W]，積層厚 t [mm]，走査幅 d [mm]，走査速度 s [mm/s] を用いて以下の式で定義される．

$$E_d = \frac{p}{tds} \tag{1}$$

現時点で，空孔率は最大で約 45% の値を達成しており，エネルギ密度の増加に伴って 5 % 付近の値に漸近

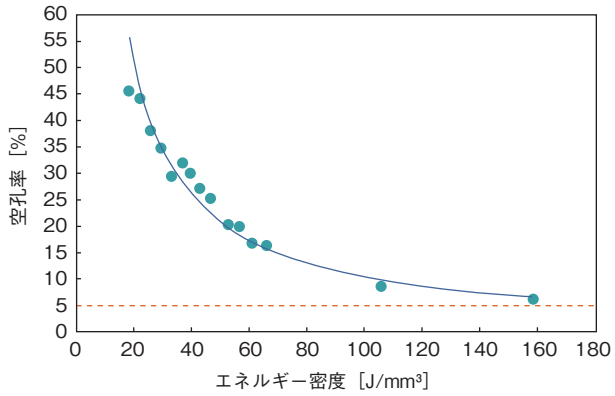


図4　エネルギ密度と RPS の空孔率の関係
Relationship between energy density and porosity of rhizoid porous structure

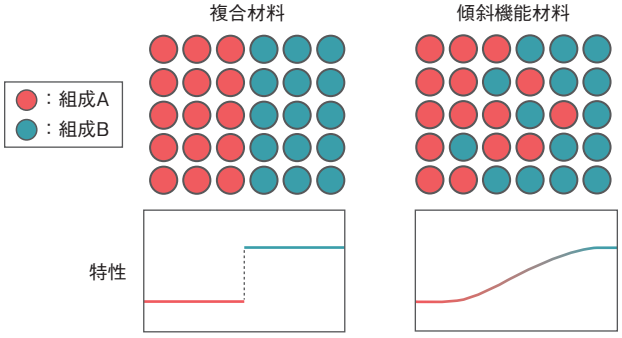


図5　傾斜機能材料の組成および特性変化
Composition and property changes of functionally graded materials

していくという傾向が**図4**のグラフから予想されている．また，使用材料粉末の粒度分布が粉末床におけるレーザの吸収率に影響を与え，空孔形成の促進および抑制に寄与することが示唆されている．

本手法では専用の設計ソフトウェアなどを使用せずに，AM による簡便な方法で多孔質構造を作製することが可能となる．また，ユニットセルを用いた設計的手法では形状の再現が困難であるような数ミリメートルオーダの設計対象物に対しても多孔質構造を付与することが可能である．さらに，設計領域に対して部分的に異なった造形条件を適用することによる空間的な空孔率分布の制御も可能であり，空孔率が傾斜的に変化する傾斜多孔質構造体の造形も可能になる．なお，空孔形成の規則性については詳細な調査を進めており，高い自由度での空孔形態制御を試みている．最終的には，力学的あるいは機能的な事前設計から適切な造形条件を導出し，所望の特性を有する多孔質構造体をニアネットシェイプで実体化するプロセスの確立を目指している．

4．RPS を応用した傾斜多孔質構造体の創成 [10)]

「空間的に一つの機能から他の機能へと連続的または段階的に変化する一体の材料」を傾斜機能材料と呼ぶ [13)]．**図5**に 2 種類の組成からなる傾斜機能材料の概念図を示す．諸特性が大きく異なる二つの材料を接合した複合材料は，巨視的界面において特性が不連続的に変化するため，剥離や応力集中による破壊の起点になり得る．一方，傾斜機能材料では組成が連続的に変化しているため，特定の接合界面が存在せず，諸特性も連続的に変化している．これにより，構造全体の強度を確保しながら，複数の機能を相乗的に備えた複合材料が実現される．このような傾斜機能材料の典型的な例が人骨である．**第2章**で述べた通り，人骨は高密度の皮質骨と無数の空孔を有する海綿骨からなる階層構造を有している．その境界領域は空孔率が連続的に変化する傾斜構造であり，付加された外力は内部の海綿骨へとスムーズに伝達・分散される．これによって人骨は構造全体で外力を支えることか可能となり，軽量化と高強度の相反する二つの要素を両立している．

本研究で提案する RPS を応用した高機能性インプラントもまた，単一のインプラント体において複数の機能を傾斜的に有する傾斜機能材料として提案できる．インプラントの多孔質化によってもたらされる大きな利点の一つは弾性率の低減である．しかしこの場合，多孔質化による強度の低下は避けることができないため，設計領域全体を均一の多孔質構造で構成することは現実的ではない．したがって，特定の領域では空孔の形成を抑制し緻密化することで，最低限の構造強度を確保する必要がある．また，空孔によって得られる副次的な機能の一つに金属－骨界面における接合強度の向上が挙げられる．これは空孔によって誘起される孔内骨成長（イングロース）を利用したもので，インプラントと骨の強固な結合や界面における応力集中の緩和が期待される．したがって，インプラント表層部には特定の空孔率をもつ多孔質面を配置することが，生体適合性の点で非常に有効であると考えられる．以上の設計理念に基づいたインプラント用構造の概念を**図6**に示す．本構造は設計領域を部分的に多孔質化あるいは緻密化し，それぞれの領域が先述した異なる機能を担っている．各領域の空間的な遷移は空孔率の変化に付随し，かつ遷移領域は骨に見られるような傾斜構造となっている．以下，空孔率が連続的ある

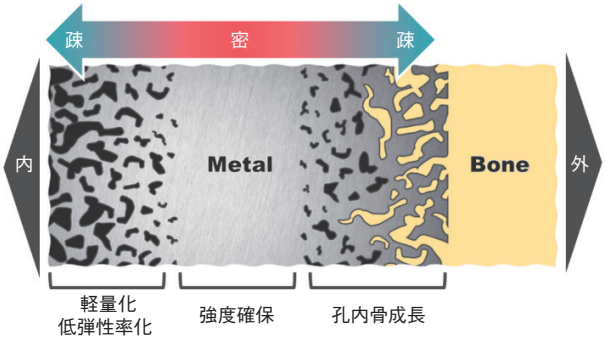


図6　RPS を応用した傾斜多孔質構造の概念図
Conceptual diagram of gradient porous structure using rhizoid porous structure

いは段階的に変化する構造を傾斜多孔質構造と称する．

その中で本稿では，分割した設計領域をそれぞれ異なる条件で造形することで，径方向に沿った空孔率勾配を有する傾斜多孔質構造体を創成した結果を紹介する．

5．径方向への多孔質構造の傾斜化

本稿では径方向に沿って空孔率が傾斜的に変化する傾斜多孔質構造体を創成した結果を示す．具体的には，ϕ5 mm，高さ 10 mm の構造体を造形するのに際し，設計領域を幅 0.5 mm の円筒形領域に区分し，それぞれの領域に異なる走査速度を割り当てた．設計領域の区分を**図7**に示す．各領域は内側から順番に Section 1，2…とした．同図中の空孔率は，7 mm 角立方体を標準試験片として CT スキャンにより算出した値を採用している．本研究では内側から外側にかけて空孔率が増加する傾斜変化パターンを動径方向傾斜，その逆を内心方向傾斜としている．レーザ走査は設計領域の外周に沿って，外側から内側に向かって造形が進行するアウトライン走査を採用した（**図8**）．なお，上記以外の具体的な造形条件については本稿では省略する．

図7　サンプル造形時の設計領域区分
Design area division during sample production

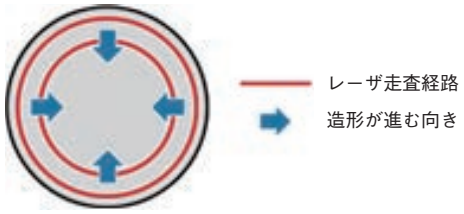
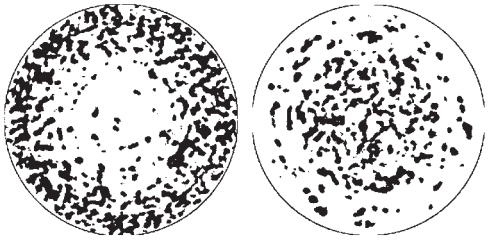
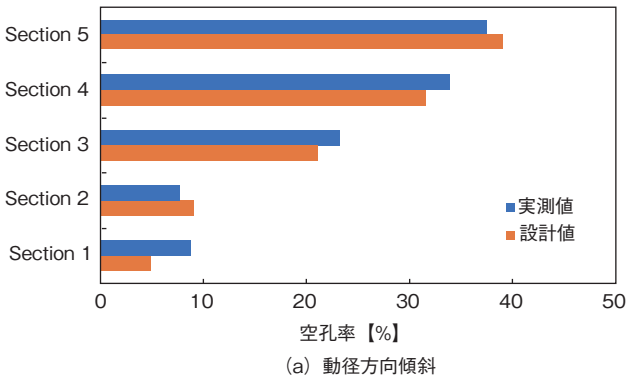


図8　アウトライン走査の模式図
Schematic diagram of outline scanning

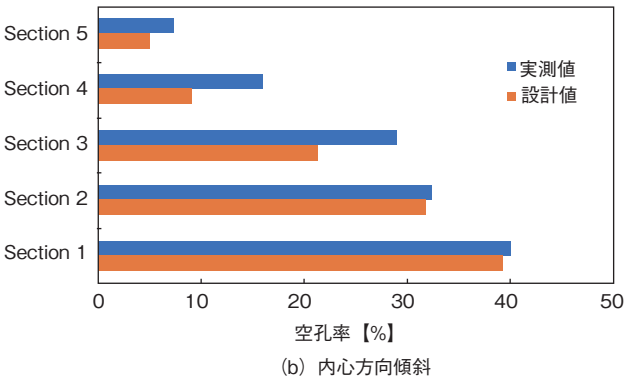


(a) 動径方向傾斜　(b) 内心方向傾斜

図9　径方向へ傾斜化した多孔質構造
Radially graded porous structure



(a) 動径方向傾斜



(b) 内心方向傾斜

図10　空孔率のプロファイル
Porosity profile

造形した試験片の CT スキャン後の二値化画像を**図9**に，Section ごとの空孔率プロファイルを**図10**に示す．二値化画像からは，両パターンにおいて傾斜方向

に沿って空孔率が変化する様子が確認され，Section 間の巨視的界面は見受けられなかった．また空孔率プロファイルからも空孔率の傾斜的な変化が確認された．とくに**図10**より，二値化画像から算出した空孔率の実測値と設計値との差は，おおよそ 1 ～ 3% 程度であり，概ね一致した値となっている．すなわち，傾斜領域の分割によって空孔率を径方向に沿って傾斜可能であることが示されたといえる．ただしその一方で，Section3，4 では実測値と設計値との差が 5% 程度であり，誤差が大きくなっている．この点については，造形条件と空孔の生成挙動の関係をさらに深く掘り下げながら検討を進めているところである．

6．機能の傾斜化のための金属組織制御

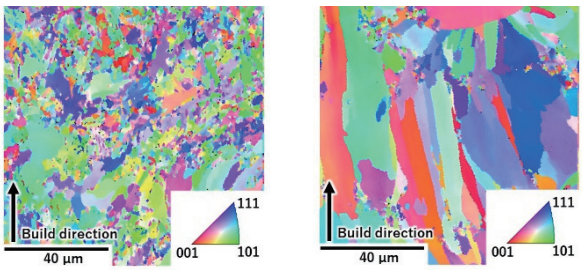
前章までは，空孔率を傾斜的に変化させた構造体を作製することにより，機能の傾斜化（具体的には機械的性質の傾斜化）を達成しようとする内容について述べた．一方，機械的性質を傾斜させるための手段として，金属組織の異方性を利用することも考えられる．例えば金属組織は，結晶の粒径や形状，結晶方位の異方性から，ミクロ・マクロな機械的性質に影響を与える[14]．とくに前章までででも利用した金属積層造形においても金属組織を考慮した設計・造形を行うことにより，造形物に機械的性質の異方性を持たせることが可能であることがすでに報告されている[15]．ただし，金属積層造形は造形時に材料の急加熱・急冷却過程を経ることから，造形物内部の金属組織が複雑になることも報告されている[15), 16]．要するに造形物の金属組織を制御するには造形条件と金属組織の関係性の解明が必須事項であり，本章ではこの点について事例を紹介する．

図11に異なる二つの造形条件で作製したサンプル（Cube1 と Cube2）の結晶方位の分布を色別表示した結晶方位 Map (Inverse pole figure Map：IPF Map) を示す．同図 (a) から Cube1 では粒径が約 1 μm の結晶粒と粒径約 10 μm の結晶粒が観察された．同図 (b) から Cube2 では幅 10 μm，長さ 40 μm 程度の積層方向と平行な縦長の結晶粒が観察され，縦長の結晶同士の界面に粒径 1 μm 程度の結晶が観察された．このように造形条件が変わることで結晶粒のサイズや方向が大きく変化することがわかる．

この点についてまず Cube2 の縦長の結晶について考察する．この結晶の形状は鋳造品に見られる柱状晶に類似している．柱状晶とは溶融金属が冷却される際に生じる凝固組織の一つであり，冷却面と垂直に成長することが知られている[17]．そこで金属積層造形の凝固過程について考える．造形時にレーザで加熱された領域は金属粉末が溶融し溶融池を形成する．凝固は溶融地の下部から始まると考えられるので，凝固組織は積層方向に成長していき柱状晶となる．その結果，造形物内に縦長の柱状晶と類似した組織が形成されたことが考えられる．しかし同様の造形過程をもつ Cube1 には縦長の結晶が見られず，凝固現象とは違う現象が生じている可能性が考えられる．

次に Cube1 と Cube2 に見られた結晶粒形状の違いについて考察するため，レーザ走査速度とレーザ走査幅を変更した Cube3 を造形し，結晶方位解析を行った．**図12**に結晶粒を面積で色分けした面積比較 Map を示す．**図12**中の緑色の部分は結晶粒面積 10 μm^2 以下の結晶，青色の部分は結晶粒面積 100 μm^2 以上の結晶を表している．同図から Cube3 には緑色で示した結晶が微細な領域と，青色で示した縦長の結晶が存在する領域が交互に存在する特徴的な構造になっていることがわかる．このとき，スケールバーから，微細な結晶の領域は幅約 80 μm，間隔は約 120 μm である．

Cube3 の特徴的な結晶構造を考察するために，Cube3 のレーザ走査条件を整理する．**図13**に Cube3 の横断面図と縦断面図の模式図を示す．赤い領域がレー



(a) Cube 1　(b) Cube 2

図11　各造形体の IPF マップ
Inverse pole figure map of each structure

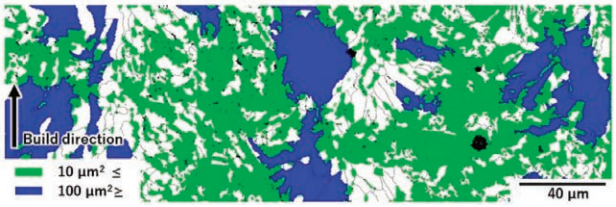


図12　結晶粒の分布（Cube 3）
Grain distribution (Cube 3)

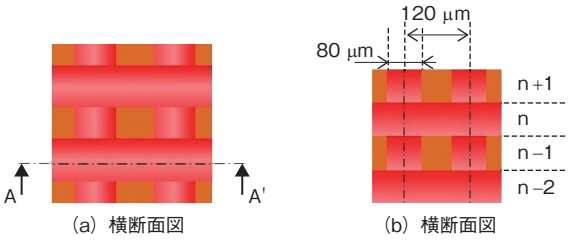


図13 造形時のレーザ走査軌跡の模式図（Cube 3）
Schematic diagram of laser scanning trajectory during modeling (Cube 3)

ザ走査領域である．縦断面図の切断線は AA´ である．n は 0 以上の整数であり，積層数を示している．縦断面図から n 層と n-1 層のレーザ掃引が交差する領域と交差しない領域が交互に存在することがわかる．このレーザ掃引の違いが Cube3 の特徴的な構造を生成したと考えた．

まずは交差する領域を考える．n 層のレーザ走査時に，n 層は**図11** のときの考察同様に凝固組織が生じる．それに対しすでに凝固組織が形成されている n-1 層は，n 層レーザ走査時に再加熱される．その結果 n-1 層では溶融，もしくは固相変態が生じ，凝固組織が微細組織へと遷移した可能性が考えられる．

次に交差しない領域を考える．別の造形実験で積層厚 60 μm の造形に成功しているため，積層厚 60 μm 毎のレーザ走査であっても金属粉末は溶融・凝固していると考えられる．下層組織の微細化について考えると，積層厚 60 μm 毎のレーザ照射の場合，再加熱されるのは n-2 層になる．この場合 n-2 層の温度が組織遷移の生じる十分な温度に達さず，凝固現象による縦長の組織が残存したと考えられる．

これらの結果は，研究のごく一例であるが，これだけ見ても AM における造形条件を適切に設定することで結晶構造を制御できる可能性が伺える．

7. まとめ

著者らは，金属積層造形（AM）によって創成される空孔と金属組織の変化を応用することで，題目に示した「傾斜機能多孔質構造体」を創成することを狙っている．その中で本稿では著者らが提案する RPS という非常にユニークな構造を応用した高機能性インプラントの内部構造を提案し，その実現に際して必須である傾斜多孔質構造体の創成に成功した事例を紹介した．また，AM における急加熱・急冷却過程を経て造形される構造体の内部組織の変化を，造形条件と関連付けて考察した事例も紹介した．これらの結果を踏まえると，「傾斜機能多孔質構造体」の実装はすぐそこだと感じる．

参考文献

1）金武直幸：ポーラス金属の可能性と将来展望，日本機械学会機械材料・材料加工部門ニューレスター，52 (2015) 1.
2）小橋　眞：ポーラスメタルの現状と展望，軽金属，55，7 (2005) 327-332.
3）長嶋晋一：金属材料の集合組織と異方性，材料，32，358 (1983) 705-715.
4）長嶋晋一：集合組織，日本金属学会 (1966).
5）John Banhart，Denis Weaire：On the Road Again；Metal Foams Find Favor，Physics today，55，7 (2002) 37-42.
6）中嶋英雄：ポーラス材料学　多孔質が創る新機能材料，内田老鶴圃 (2016) 2.
7）Garrett E. Ryan，Abhay S. Pandit，Dimitrios P. Apatsidis：Porous titanium scaffolds fabricated using a rapid prototyping and powder metallurgy technique，Biomaterials，29，27 (2008) 3625-3635.
8）B. Vamisi Krishna，Susumita Bose，Amit Bandyopadhyay：Low stiffness porous Ti structure for load-bearing implants，Acta Biomaterialia，3，6 (2007) 997-1006.
9）袴田昌高，馬渕　守：スペーサー法による微細孔ポーラス金属の創成と特性評価，軽金属，62，8 (2012) 313-321.
10）水谷正義：金属積層造形による傾斜多孔質構造体の創成（根状多孔質構造体 (RPS：Rhizoid Porous Structure) の提案とその応用），日本設計工学会誌，59，12 (2024) 583-589.
11）W. Tao，M. C. Leu：Design of lattice structure for additive manufacturing，ISFA2016 (2016) 326-327.
12）M. P. Bendsoe，O. Sigmund：Topology Optimization：Theory，Methods and Applications，SpringerVerlag (2003).
13）上村誠一，野田秦稔，篠原嘉一，渡辺義見：傾斜機能材料の技術発展，シーエムシー出版 (2009) 5-6.
14）松原英一郎ほか：金属材料組織学，朝倉書店 (2011) 183.
15）Nima Shamsaei et al.：Effects of building orientation and heat treatment on fatigue behavior of selective laser melting 17-4 PH stainless steel，International Journal of Fatigue，94，2 (2017) 218.
16）MOHESEN SEIFI et al.：Overview of Materials Qualification Needs for Metal Additive Manufacturing，JOM，68，3 (2016) 747.
17）中江秀雄：結晶成長と凝固，アグネ承風社 (1998) 120.