スマート・アディティブ・マニファクチャリングと構造次元制御

Structural Dimension Control in Smart Additive Manufacturing

桐原 聡秀*
Soshu KIRIHARA

Key Words: Structural Dimension, Stereolithography, Ultraviolet Laser, Nanoparticles Paste

1. はじめに

任意形状の断面を積層し、複雑構造の立体を作製するプロセスは、1980年代にラピッド・プロトタイピングとして考案され、樹脂試作品の高速成型法として活用された。その発展を大きく推し進めたのが、工作機械のコンピュータ支援であり、1990年代における高速計算コアや大容量メモリの実用化も、新しい産業革命とも称される時代の流れを牽引した^{1),2)}。

2000年に入ると、ナノテクノロジーが急速に発展し、高品質の微粒子が安定して市場に供給されはじめ、樹脂のみならず金属やセラミック粉体を用いた、実用部材の造形プロセスが国内外で検討されはじめた。2010年を過ぎた頃には、高エネルギー密度の電子ビームやレーザービームを搭載した、アディティブ・マニファクチャリング装置が開発され、実用材料の造形プロセスが現実化した^{3),4)}。

本稿では、セラミック部材の造形を主たるテーマとして、紫外線レーザーを用いた積層造形プロセスをいくつか紹介する。構造次元の制御に即した幾何学設計や、空間的な物質やエネルギー伝搬の特性評価についても、試作サンプルの造形を通じて詳細を述べる。

2. 実用材料の積層造形

金属部材の造形においては、高強度ビームを熱源として金属粉体へ照射し走査することで、連続的な溶融凝固により固体薄層を描画しつつ、工程を繰り返しながら積層し造形を達成する。高融点の素材を用いながら、緻密な金属組織が得られ、凝固時の冷却過程を最適化することで、結晶方位の制御も可能になってきた⁵⁾。

これに対して、セラミック部材の造形では、粉体素材に極めて高強度のレーザービームを照射することで、微小領域における溶融凝固は実現できたが、断面を積層しつつ層間を接合する過程において、熱衝撃に起因する微細亀裂が生じ、部材の機械的強度は望めなかった。

比較的粒径の大きいセラミック粉体を用いて、レーザー描画と連続焼成により、意図的に気孔を導入してポーラス組織を形成し、大型のセラミックフィルタや水洗パーツの作製が試みられ、プロセスの成功事例として報告された⁶⁾。

光造形法は、アディティブ・マニファクチャリングの一種であり、紫外線照射により重合硬化する、液体の樹脂素材を用いるのが特徴である⁷⁾⁻⁹⁾。著者らの研究グループでは、液体樹脂に金属やセラミック微粒子を分散し、独自に調合したペースト状の素材を造形に用いている^{10),11)}。

平板ステージに微粒子ペーストを平滑塗布して、Fig. 1のごとく紫外線レーザー走査し、任意形状の2次元断面を描画する。塗布ならびに描画工程を繰り返し、積み重ねつつ各層を接合し、複雑形状の3次元構造を作製する。電気炉を用いた脱脂ならびに焼結処理を経れば、様々な金属やセラミック部材が作製できる^{12),13)}。

最近の研究において著者らは、平板に塗布した微粒子ペーストへ、高強度の紫外線レーザーを照射すると、樹脂を熱分解しつつ、加熱された微粒子を焼結できることを見出した¹⁴⁾。セラミック部材の緻密造形は困難とされているため、現時点での最有力候補として捉え、紫外線レーザー造形

Fig. 1 A schematically illustrated stereolithographic additive manufacturing using resin paste with nanoparticles.

*大阪大学 接合科学研究所 (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘11番1号)
Joining and Welding Research Institute, Osaka University (11-1 Mihogaoka, Ibaraki, 567-0047 Osaka, Japan)

法と称して開発を進めている。

紫外線レーザー造形では、模式的に描いた Fig. 2 のごとく、微粒子ペーストへ高強度ビームを照射すると、樹脂成分のアブレーションにより、急激な蒸発膨張からの反作用が生じ、残された粉体粒子が垂直に圧縮される。レーザー描画による脱脂焼成を経て、水平方向への収縮はほとんど見られず、粒子分散量に起因する線収縮が垂直方向のみに観察される¹⁵⁾。

照射した紫外光が、有機成分を燃焼させつつ無機粒子を加熱する間に、微粒子ペースト中の特定領域にとどまる機構として、アンダーソン局在が挙げられる¹⁶⁾。分散した微粒子間で光波が強く散乱され、伝搬方向が様々な方向に変化し、多重反射とともに特定の領域に留まり、電磁場の振動エネルギーが局在化する。

分散した粒子間の散乱距離が、入射した光波長と同等である場合に、限定された領域で効果的な局在が生じる。緻密なセラミック組織を得るには、樹脂ペーストへの分散にはナノ微粒子が望ましく、光局在による効率的な脱脂と焼成を達成するには、波長が粒子径や間隔と同程の紫外線レーザーが最適である。

3. 構造次元の設計制御

アディティブ・マニュファクチャリングでは、断面を積層して構造体を作製する。これらの平面や立体などの単純な形状では、構造次元が整数値を示すが、複雑な形状になると異なる値を示す。

構造次元の数学的な定義について考え、計算手法を模式的に Fig. 3 へ示す。ある立体を $1/S$ の小片に縮小したとき、Fig. 3 (a) のごとく、もとの立体は小片を N 個含む状態である。このとき、立体の構造次元 D は方程式 $N = S^D$ で定義される¹⁷⁾。

線状構造 Fig. 3 (b) であれば、 $1/2$ の小片が 2 個含まれるので、方程式に代入すると $2 = 2^1$ で 1 次元である。平面構造 Fig. 3 (c) であれば、 $1/2$ の小片が 4 個含まれ、 $4 = 2^2$ で 2 次元である。立体構造 Fig. 3 (d) は、 $1/2$ の小片を 8 個含むので、 $8 = 2^3$ で 3 次元である。以上のように、小片を周期的に配列した図形は、構造次元として整数値を示す。

Fig. 2 A cross-sectional schematic of laminated layers obtained through ultraviolet laser lithography.

構造次元が整数値を示さない図形として、フラクタルパターンに注目する。Fig. 4 はメンジャースポンジと呼ばれる図形である。Fig. 4 (a) のように、立方体を $3 \times 3 \times 3 = 27$ の小片に分割し、面心ならびに体心位置から合計 7 個を抜き取る。これは Stage 0 と呼ばれる。Fig. 4 (b) のように、残された小片に対して、分割と抜き取りを繰り返すと、全体と相似なパターンが小部分に現れ、Stage 1 が形成される。

このように幾何学的な操作を続けると、さらに精密な自己相似性の実現し、フラクタル図形として複雑さを増す。Fig. 4 (c) は Stage 2 の構造体であり、 $1/3$ の小片が元の立体に 20 個含まれ、前述の式から $20 = 3^D$ となり、 $D = 2.73 \dots$ が値として得られる。以上のように、小片を自己相似的に

Fig. 3 A schematically illustrated definition of structural dimension (a) and calculation examples in line (a), plane (b) and solid (c) models.

Fig. 4 The schematically illustrated modeling sequence to design Menger sponge fractals with self-similar patterns. Graphics (a), (b) (c) are Stage 0, 1 and 2, respectively.

配列した図形は、構造次元として非整数を示す。

光造形法により作製した、周期構造と自己相似構造を **Fig. 5** に示す^{18),19)}。チタニア粒子を 10 vol.% 含む、エポキシ樹脂製で作られている。この誘電体は、周波数 10 ~ 20 GHz で電磁波を透過し、反射や吸収特性は示さない。

はじめに、**Fig. 5 (a)** の周期構造にマイクロ波を照射したところ、周波数 15 GHz 付近で反射が生じた。誘電体の周期的な配列において、電磁波のブラッグ回折が生じ、強い反射挙動を示したと考えられる。

つぎに、**Fig. 5 (b)** の自己相似構造にマイクロ波を照射したところ、周波数 15 GHz 付近で吸収が生じた。誘電体へ多数の角孔が穿たれ、増大した内部表面で電磁波が多重散乱し、顕著な吸収挙動を示したと考えられる。

誘電体の周期的ならびに自己相似的な構造は、それぞれフォトリソグラフィクリスタルおよびフラクタルと称される。いずれも同じ素材で構成され、それ自体は電磁波を透過する

Fig. 5 Dielectric models with periodic pattern (a) and self-similar pattern (b) fabricated by the stereolithography.

のに対して、構造に沿った反射や吸収特性を示す。

幾何学構造を媒体とすれば、電気・磁気・熱・力・流体・拡散など、物質やエネルギーの伝搬を制御できる。材料物性ではなく構造機能である。整数次元の周期構造は、連続的な物質の配列により、反射ならびに遮蔽機能を示す。非整数次元の自己相似構造は、内包空洞や比表面積の増加により、吸収ならびに変換機能を示す。

4. 整数次元の光造形

アルミナ微粒子をアクリル樹脂に混合し、光造形プロセスを実施した。微粒子溶射の騒音低減をめざした、ヘルムホルツ共鳴構造の設計製造について紹介する²⁰⁾。

微粒子溶射はセラミックコーティング技術の一種である^{21),22)}。酸素と水素の混合ガスを噴出させてフレイムを形成し、セラミックス微粒子を導入しつつ吹き付け、金属基材上に皮膜を高速形成できる。極めて汎用性の高いプロセ

スであるが、高速噴流由来の騒音が発生する²³⁾。

流体音響解析を用いて溶射噴流から発生する騒音を予測し、ノイズスペクトルに即した吸音帯域形成を検討した。施工時の聴覚負担を軽減できると期待し、最適化された吸音構造について光造形法による試作を進めた。

ガスフレイム溶射を対象に、流体・燃焼・音響解析を用いて騒音を評価した。はじめに、燃焼流体解析によりガスフレイムを再現し、有限要素シミュレータを用いた流体解析 (CFD: Computational Fluid Dynamics) を実施した。乱流解析ソルバーには空間平均モデル (LES: Large Eddy Simulation) を用いた。

後の音響解析に必要な渦流挙動を確実に予測しつつ、すべての渦流を直接的に計算するため、直接数値解析 (DNS: Direct Numerical Simulation) より効率的に研鑽するよう設定した。さらに、音響解析の実行においては、混合ガスの圧力・温度・流速の時系列データを入力し、解析時間 0.5 s で時間間隔 1.0×10^{-5} s と設定した、非定常解析により結果を収集した。

得られたフレイム解析をもとに、音響解析ソフトウェアにより騒音スペクトルを予測計算した。ガスフレイムの圧力・温度・流速分布をもとに音響解析した、ノズル付近における騒音スペクトルでは、周波数 3 ~ 12 kHz にわたり 100 dB 以上の音圧レベルが見られた。これらの騒音は聴覚器官に悪影響を及ぼす恐れがあるとされ、吸音装置の装着などにより抑制されなければならない。

ガスフレイムの騒音吸収をめざして、ヘルムホルツ型の吸音器を設計した^{24), 25)}。特定の周波数領域に対して、音圧レベルを抑制する手段として有効であり、大きな円形空洞に短い開口管を接続して、Fig. 6 のごとく設計された。

空洞内の体積を V 、開口管の長さを L 、開口管の断面積を S として定義した。入射した疎密波の運動は、開口管内で空気ばねの振動に変換される。発生した空気振動のエネルギーは、開口管内部境界において摩擦熱として消費される。吸収する音響周波数の帯域は、空洞内の空気復元力から説明される。

共鳴器の吸音周波数は $f = c/2\pi (S/LV)^{1/2}$ で記述される。ここで c は音速である。共鳴器の材質物性は、内部空気振動により変形しない、十分な剛性を仮定している。

ここで、レーザ強度を 100, 150, 200, 250 mW と変化させて、寸法 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ の平板に直径 100, 250, 500, 1000 μm の丸穴が穿たれた、膜状サンプルを系統的に得た。デジタル式光学顕微鏡で膜状サンプルを観察し、膜厚から光硬化深度を計測するとともに、円孔半径から光散乱による寸法影響を評価した。

ヘルムホルツ共鳴器を設計するとき、Fig. 6 において $V = 905 \text{ mm}^3$, $L = 2 \text{ mm}$, $S = 12.5 \text{ mm}^2$ とするならば、 $f = 4.5 \text{ kHz}$ が得られる。特定の周波数に対しては吸音特性が見込めるが、広帯域にわたる効果は期待できない。そこで、同形状の吸音器を Fig. 7 のごとく複数接続して、空洞体積の

増加と振動効果の連成を狙い、結節点から 4 配位方向に共鳴器を繋げた。

単体および連結共鳴器の吸音性能を Fig. 8 に示す。複数連結された共鳴器が、3 ~ 5 kHz の帯域で吸音効果を発揮している。空洞体積の増加により、中央の共鳴器がより低い周波数の音波を吸音し、吸音周波数の帯域を広げている。開口管の境界面積も増加し、空気振動が熱エネルギーとして消費され、より大きな吸音特性が得られた。

光造形における、レーザ強度と硬化深度の関係について Fig. 9 の右軸に示す。レーザ強度が大きくなると硬化深度

Fig. 6 A schematically illustrated Helmholtz resonator designed by using the computer graphic application.

Fig. 7 The cross sectional view of modulated Helmholtz resonator with connected multi chambers.

Fig. 8 Noise absorption spectra of Helmholtz resonators with single and multi cavities by an acoustic simulation.

Fig. 9 Numerical variations of solidification depth (right) and dimensional tolerances (left) according to the irradiation power on ultraviolet laser beam drawing.

Fig. 10 A cross sectional view of fabricated acrylic model with alumina particles dispersion by the stereolithographic additive manufacturing.

も増加しており、光造形における積層厚さ $100\ \mu\text{m}$ を上回るため、良好な層間接合が実現された。

光造形における、レーザ強度が描画寸法に与える影響について、**Fig. 9** の左軸にあわせて示す。光強度 $200\ \text{mW}$ で造形すると、大きな寸法影響 $300\ \mu\text{m}$ が認められる。これに対してレーザ強度 $150\ \text{mW}$ の造形では、比較的小さな寸法誤差 $200\ \mu\text{m}$ 程度に収まっている。

レーザ強度を $150\ \text{mW}$ として、寸法影響 $200\ \mu\text{m}$ をオフセット量として設定し、ヘルムホルツ共鳴器の精密な造形をめざした。複数の吸音空洞を有するヘルムホルツ吸音器を **Fig. 10** に示す。寸法精度は $\pm 10\ \mu\text{m}$ が達成された。

5. 非整数次元の光造形

自然界のゆらぎパターンを解析し、関数として人工的な設計構造へ導入し、表面への自然な凹凸付与を試みた²⁶⁾。セラミック製のゆらぎ構造を光造形し、緩やかで効率的な流体制御について紹介する。

蛍の瞬きや木目の模様など、自然界に存在する現象や形状には、ゆらぎパターンが存在する。それらの変動は、平

Fig. 11 The numerical variations of power spectral density for cycle frequencies in natural waiving patterns including a typical $1/f$ fluctuation in natural patterns.

Fig. 12 The graphic model of cylindrical tube with the fluctuated inner wall (a) and water stream lines visualized by a computational fluid dynamics.

均值からの差分と見なせるため、時間や空間的な波動として解析できる^{27),28)}。ゆらぎパターンを単純波の総和としてフーリエ級数展開し、周波数と振幅の関係を描くと、パワースペクトル密度 (PSD: Power Spectral Density) が得られ、反比例曲線である“ $1/f$ ゆらぎ”が現れる²⁹⁾。

これとは逆の数学的操作をたどれば、構造体へゆらぎパターンを付与できる。ゆらぎ関数として $P = 1/f^\gamma$ を設定すれば、**Fig. 11** のごとく、仮想的な PSD 曲線が描ける。曲線上の点を一定差分 Δf として周波数 $f_1 \sim f_n$ をとると、対応する PSD 値 $P_1 \sim P_n$ が決まり、フーリエ逆変換を経れば、自然波形 $W(\theta) = A_0 + \sum \{A_n \cos(f_n \theta) + B_n \sin(f_n \theta)\}$ が得られる。

区間長 L の波形を半径 r で回転させれば、**Fig. 12** (a) のごとく、ゆらぎ内壁パターンの円筒管が設計できる。ゆらぎ関数の累乗指数 $\gamma = 1$ 、フーリエ逆変換の周波数領域 $f_R = 2^4 \sim 2^5$ 、管半径 r と管全長 L のアスペクト比 $A_S = 0.2$

として調整し、自然波形のプロファイルを最適化した。ゆらぎ管の設計寸法は全長 $L = 100 \text{ mm}$ で半径 $r = 20 \text{ mm}$ とし、内部には水の移動として流速 10 m/s を想定した。

有限要素シミュレータ (Cybernet: ANSYS Fluent) により、流体解析 (CFD: Computational Fluid Dynamics) を実行したところ、Fig. 12 (b) のごとく、直線的な流体プロファイルが得られた。ゆらぎ表面の凹凸付近では、細かい渦や小さな乱流が見られるが、管内中央では流速がほぼ一定になり、安定した流れを示すことが分かる。

ゆらぎ構造次元は、Fig. 13 のごとく、Divider-Counting 法で計算できる³⁰⁾。直径 R の円をゆらぎパターンに沿い配列するとき、その個数 N との関係から、構造次元 $\log N = -D \log R$ が得られる。

ゆらぎパターンの両端長が 1 であると、Fig. 13 (a) のごとく、直径 1 の円が 1 個含まれるので、 $R = 1, N = 1$ である。Fig. 13 (b) のごとく、直径 $1/8$ が 10 個と、0.2 倍の直径 $1/40$ が 1 個含まれるなら、 $R = 1/8, N = 10.2$ である。複数の R と N の関係について、両対数グラフへ記入して直線近似すると、傾きが構造次元を表し $D = 1.134$ として計算される。

構造次元が非整数であるので、ゆらぎ曲線はフラクタルであり、自己相似性を示すことが分かる。規則性のない多様な表面凹凸により、Fig. 12 (b) のごとく、様々な大きさの小渦が多数発生し、水流に対する内壁の干渉を減らし、中央に直線的な流れが形成されたと考えられる。

光造形法を用いて、ゆらぎ内壁を有する円筒管を作製した。アクリル系の光硬化性樹脂へ、平均粒径 560 nm のアルミナ粒子を $55 \text{ vol. \%}$ で分散し、微粒子ペーストを調合した。平板上へ層厚 $100 \mu\text{m}$ で平滑塗布したペースト表面に、波長 355 nm の紫外線レーザーを焦点径 $100 \mu\text{m}$ で照射し、描画速度 2000 mm/s で積層造形を実施した。

Fig. 13 Mathematical calculations of structural dimensions in fluctuated patterns by using Divider-Counting method.

内壁にゆらぎ凹凸を付与した、アルミナ分散アクリル管を Fig. 14 (a) に示す。ゆらぎ管へ水道水を垂直落下させ、勾配 40° に固定した様子を Fig. 14 (b) に示す。流れる水の幅が広く、表面にまとわりつく様子が観察され、壁面干渉の低減が機能していると考えられる。

管内壁の凹凸パターンを最適化した、ゆらぎ関数の各種パラメータは、その他の構造体表面の改質にも応用できる。完全球体の表面にゆらぎパターンを付与した、グラフィックモデルと光造形構造体を Fig. 15 (a), (b) に示す。赤道面における流水のストリームラインもあわせて表示した。構造体にまとわりつく水流が見られ、外面へのゆらぎパターン付与と、流体制御の可能性が伺える。

Fig. 14 The cross sectional views of cylindrical tubes with fluctuated inner walls fabricated by the stereolithography (a) and a water flow profile on the half cylindrical tubes (b).

Fig. 15 The visualized stream lines on an equatorial plane of the spherical model with the optimized fluctuation in the surface wavy pattern (a), and the fabricated acryl model with alumina particles by using the stereolithography.

6. 紫外線レーザー造形

セラミック部材の直接成型の実例として、アルミナとチタニア部材の紫外線レーザー造形について紹介する³¹⁾。

アルミナ部材の紫外線レーザー造形では、アクリル系の液体樹脂に光ならびに熱硬化性は付与せず、平均粒径 500 nm の微粒子を 60 vol. % で分散した。微粒子ペーストをガラス基板に厚さ 100 μm で平滑塗布し、波長 355 nm の紫外線レーザーを焦点径 50 μm に絞り、照射強度 800 mW として走査速度 200 mm/s で描画した。

アルミナ製のマイクロ格子を Fig. 16 (a) に示す。基本構造としての 4 配位格子では、立方体の中心から 4 本の円柱が等角度で展開する。円柱の直径に対する長さの割合をアスペクト比として定義し、この値を 1.5 に設定してある。ユニットセルの格子定数を 3 mm として設計すると、円柱の直径と長さは 0.8 mm ならびに 1.2 mm となった。

デジタル顕微鏡による寸法計測により、造形誤差は $\pm 5 \mu\text{m}$ 以下に収まった。X 線解析によりアルミナ格子の結晶構造は α 相と同定され、残留炭素の回折ピークも観察され

なかった。アルキメデス法により測定した、アルミナ格子の相対密度は 97.5 % であった。

アルミナ格子に大気中で加熱処理を施し、組織の更なる緻密化を試みた。加熱温度 1300 $^{\circ}\text{C}$ で保持時間 2 hs の熱処理を加えると、相対密度が 99.5 % の緻密組織が得られた。加熱処理における線収縮は 1 % 未満であり、造形で達成した寸法精度を損なうことなく、複雑形状のセラミック構造体が成型できた。

紫外線レーザー造形による脱脂焼成を経た、チタニア製マイクロ格子を Fig. 16 (b) に示す。直接造形においては、光や熱硬化性を有しないアクリル樹脂へ、平均粒径 270 nm のチタニア粒子を 50 vol. % で混合し、波長 355 nm 紫外線レーザーを照射した。

焦点径 10 μm のビームにより 2 次元描画し、層厚 10 μm で 3 次元積層した。残留炭素の低減と寸法精度の向上をめざし、走査速度 100 mm/s ならびに入射強度 700 mW として、造形条件が最適化された。

チタニア造形体では、アスペクト比 1.5 の円柱が 4 配位で展開し、格子定数 240 μm の周期構造を形成している。光学顕微鏡観察から、寸法精度 $\pm 5 \mu\text{m}$ と測定された。

格子断面の X 線解析から、結晶構造はアナタースとルチルの 2 相混合と判明し、レーザー照射により、相転移温度近くまで加熱されたことがわかる。焼結密度は 97% に達することが、アルキメデス法により実測された。

チタニア格子を大気中 1350 $^{\circ}\text{C}$ で 2 hs 加熱し、結晶構造をルチルへと最終的に変態させたところ、熱処理後の格子定数は 240 μm であり、熱処理による線収縮は 1% 以下にとどまった。組織中に亀裂や空孔などは観察されず、焼結密度は 99.5% に達した。

7. おわりに

光造形アディティブ・マニファクチャリングによる、構造次元制御として、ヘルムホルツ吸音器による騒音抑制と、ゆらぎ内壁管による流体制御について紹介した。また、セラミック部材を直接成型法として、紫外線レーザー造形によるマイクロ格子の作製についても紹介した。

将来的に、アディティブ・マニファクチャリング技術が発展し、大型のセラミック部材が作製できたとしても、最大寸法は 1 m 程度と予想している。さらなる大型化には、部材を次々に組み合わせるなど、新しい施工法の発案が必要になるだろう。

部材同士を効率的に勘合・締結し、空間的に配列させるプロセスにおいても、構造次元を鑑みた施工が求められる。整数次元を示す周期配列を造り上げれば、物質移動やエネルギー伝搬の反射体や障壁となりうる。非整数次元を示す自己相似配列を造り上げれば、吸収や変換をになう、機能性構造体としての利用が期待できる。

積層造形された部材の配列には、産業用ロボットや自立型ドローンが活躍することは間違いなく、ブロック方式の

Fig. 16 The ceramic micro lattices with four coordination numbers. The alumina (a) and titania (b) patterns were fabricated by using ultraviolet laser lithography.

アディティブ・マニファクチャリングが、必要とされる時代が来ると考えている。

参考文献

- 1) J.A. McDonald, C.J. Ryall, D.I. Wimpenny: Rapid Prototyping Casebook, Wiley (2001).
- 2) S.C. Danforth, A. Safari, J. Ballato, A. Bandyopadhyay, R.V. Weeren, A. Bandyopadhyay: Process for forming of photonic band-gap structures, US Patent, 5 (1999) 997.
- 3) L.J. Kumar, P.M. Pandey, D.I. Wimpenny: 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies, Springer (2020).
- 4) B. Dutta, S. Babu, B.H. Jared: Science, Technology and Applications of Metal Additive Manufacturing, Elsevier (2019).
- 5) K. Hagihara, T. Nakano, M. Suzuki, T. Ishimoto, S. yalatu, S.-H. Sun: Journal of Alloys and Compounds, **696** (2017) 67.
- 6) T. Mühler, C.M. Gomes, J. Heinrich, J. Günster: Int. J. Appl. Ceram. Technol., **12** (2015) 18.
- 7) Y. Marutani, and T. Kamitani: J. Photopolymer Science and Technology, **10** (1997) 187.
- 8) C. Sun and X. Zhang: Sensors and Actuators, **101** (2002) 364.
- 9) J. Lee, I. Lee and D. Cho: Microelectric Eng., **83** (2006) 1253.
- 10) S. Kiriara, M. Takeda, K. Sakoda and Y. Miyamoto: Solid State Commun., **124** (2002) 135.
- 11) S. Kiriara, M. Takeda, K. Sakoda, K. Honda and Y. Miyamoto: J. Eur. Ceram. Soc., **26** (2006) 1861.
- 12) S. Kiriara, D. Sano and M. Kaneko: Tsinghua Sci. Tech., **14** (2009) 160.
- 13) S. Kiriara, T. Niki and M. Kaneko: Ferroelectrics, **387** (2009) 102.
- 14) K. Nonaka, S. Kiriara: Journal of Materials Science Forum, **941** (2018) 2196.
- 15) S. Kiriara: Materials, **11** (2018) 835.
- 16) P.W. Anderson: Physical Review, **109** (1958) 1492.
- 17) J. Feder: Fractals, Plenum Press, New York, (1988).
- 18) S. Kiriara, Y. Miyamoto, K. Takenaga, M.W. Takeda, K. Kajiyama: Solid State Communications, **121** (2002) 435.
- 19) S. Kiriara, M.W. Takeda, K. Sakoda, K. Honda, Y. Miyamoto: Journal of European Ceramic Society, **26** (2006) 1861.
- 20) 木佐貫祥一郎、桐原聡秀：スマートプロセス学会誌、**7** (2018) 238.
- 21) S. Kiriara, Y. Itakura: Quarterly J. Japan Welding Soc., **33** (2015) 148s.
- 22) K. Takai, T. Yoshioka, S. Kiriara: Quarterly J. Japan Welding Soc., **33** (2015) 49.
- 23) 日本騒音制御工学会、騒音制御工学ハンドブック、技報堂 (2001).
- 24) 安田仁彦：機械音響学、コロナ社 (2004).
- 25) 鈴木浩平：機械工学のための振動・音響学、サイエンス社 (1989).
- 26) 野崎浩寿、桐原聡秀：スマートプロセス学会誌、**7** (2018) 233.
- 27) 武者利光：ゆらぎの医学、秀潤社、(1985) 175.
- 28) 武者利光、ゆらぎの科学 3、森北出版 (1993) 86.
- 29) 武者利光：自然界の 1/F ゆらぎの不思議、講談社、(1980).
- 30) 山田俊雄：情報地質、**8** (1997) 177.
- 31) S. Kiriara: Ceramics in Modern Technologies, accepted.

代表者メールアドレス

桐原聡秀 kirihara@jwri.osaka-u.ac.jp