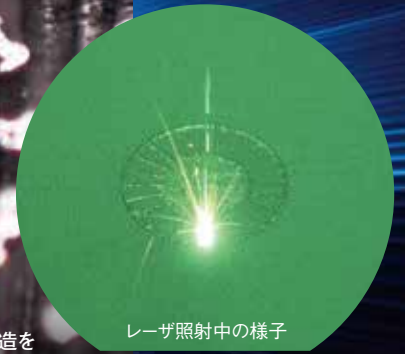




積層造形最前線

開発されたチタン製の脊椎固定用スペーサでは、椎体骨との接触面に積層造形技術によって画期的な微細構造を実現している。その構造は一方向に伸展する孔と孔表面の微細な溝からなる“ハニカムツリー構造”である。

資料提供：大阪大学大学院工学研究科中野貴由教授



レーザー照射中の様子

金属積層造形—新たな可能性への挑戦

ものづくりを大きく変えると期待される金属積層造形技術。従来のプロセスでは難しかった複雑形状の造形が可能であることに加えて、最近では、金属材料の「材質」の制御により特性の改善や新機能の発現を目指した研究開発が活発化している。金属積層造形技術の応用例を含めて、最新の研究動向を紹介する。

広がる金属積層造形の可能性

近年、広く知られるようになった「3D プリンタ」は、2009年にASTM規格により「Additive Manufacturing (AM,付加製造)」と定義された。今号ではわかりやすく、日本で普及している「積層造形」を表現に用いる。

積層造形技術の特長は3D-CAD等の3次元データから直接製品を造形できることである。金型が不要となり、従来のプロセスでは難しかった3次元複雑形状品が製造できる。外形状だけでなく内部構造をも作り込むことができる。例えば細かな格子状の構造体を形成して、軽量化や断熱効果などの機能を効果的に付与することができる。また傾斜構造体や複層構造体も製造可能であり、内部と外部の素材が異なったり、複数の素材の組成が連続的に変化したりする構造体の造形が可能となる。

このような特長に加えて、近年の最新の研究では、金属積層造形技術によって金属材料の微細組織や原子配列といった「材質」の制御が可能となっている。こうした材質制御に関する先進的な取り組みは、大阪大学大学院工学研究科にて2014年に設立された異方性カスタム設計・AM研究開発センター（センター長：中野貴由教授；以降、AMセンター）において、最先端の二種類の金属積層造形装置（レーザービーム方式と電子ビーム方式）（図1）を駆使しながら実施されている。例えば、中野貴由教授らは2017年に、ビーム照射条件の緻密な調整により熔融池形状を制御することで、原子配列が一様にそろった単結晶の形成に成功した

だけでなく、ビームのスキャンストラテジー（スキャンの長さ、方向、回数などのパターン）を変えるだけで、部位ごとに原子配列の向きを制御可能であることを、世界に先駆けて発見した。図2はBCC構造を有する β 型Ti-15Mo-5Zr-3Al合金に対して、レーザービーム方式の金属積層造形法を使用し、原子配列制御を行った例である。このような原子配列制御を活かして、製品の部位毎にヤング率を変え、異なる機能を発揮させることも可能になっている（図3）。AMセンターでは、こうした原子配列制御を、チタン合金をはじめとし、ニッケル合金、鉄合金、銅合金といった多種の社会基盤材料、タンゲステンなどの超高融点材料、さらにはハイエントロピー合金といった最先端金属材料へ適用可能としており、原子配列制御可能な材料の範囲はますます拡大している。

金属積層造形技術を活かした生体材料の開発

今年の8月、金属積層造形技術の普及を目指し、AM研究会のキックオフミーティングが日本金属学会の主催で大阪大学吹田キャンパスにおいて開催された。企業や研究機関、官公庁など300機関に所属する約600人が参加し、関心の高さが伺えた。今後、2026年4月をめどに日本AM学会の設立を目指すという。既に大阪大学AMセンターでは、企業や大学、国研と連携しつつ多数の幅広い研究プロジェクトを実施している。

AMセンターの最新の注目すべき取り組みの1つが、生体材料の開発である。特に人工骨・骨関節材料は、患者ごと



図1 大阪大学・異方性カスタム設計・AM研究開発センターが保有する主な装置 資料提供: 大阪大学大学院工学研究科中野貴由教授

に異なる骨格形状にフィットする必要がある、さらに投薬歴や成長・老化などの時間経過情報を反映した、患者ごとにカスタマイズされた生体機能を発揮することが求められる。そのため、形状と材質の自在な制御を得意とする金属積層造形技術は最適な手法と言える。

現在、人工骨・骨関節材料の多くにはチタン等の生体親和性に優れた金属材料が使用されている。ところが、こうした金属材料は骨と比較してヤング率が高く、骨との間のヤング率差によって、骨に健全な応力が負荷しなくなる「応力遮蔽」が生じ、骨の萎縮と脆弱化が進んでしまう。そのため、あたかも骨のように振る舞う金属材料が求められる。図2に示す原子配列制御による低ヤング率化は、応力遮蔽を抑制するための重要な戦略である。

このような材料を実現するために大阪大学大学院工学研究科の中野貴由教授らは骨の微細構造と機能の解明を行った。その結果、生体骨は階層構造を持ち、コラーゲン線維と生体アパタイト結晶からなる配向化複合体であり、コ

ラーゲン線維方向とアパタイト結晶のc軸はほぼ一致し、骨部位に応じた異方性を示すことがわかった。骨の強度は骨密度よりも骨配向性との間に強い相関関係を示す。骨の欠損部が骨組織で埋まり、正常な力学機能を発揮ようになることを「骨癒合」と言うが、強固な骨癒合を獲得するためには高い骨配向性が求められる。しかしながら、実際の骨の再生過程では骨配向性の回復と、結果としての強度の回復には長い期間を要する(図4)。

この骨配向性に着目し、大阪大学、北海道医療センター、帝人ナカシマメディカルにより共同開発されたチタン製の脊椎固定用スペーサは、椎体骨との接触面に積層造形技術によって画期的な微細構造を実現している。これはハニカムツリー構造と名付けた、一方向に伸展する孔と孔表面の微細な溝からなる。レーザービーム方式金属積層造形法による造形条件の高度な制御によって、細胞への働きかけが可能な幅および深さが100~200 μmの微細な一方向性溝構造が精密に作製されている。この微小な溝には骨を形成する骨芽細胞が配

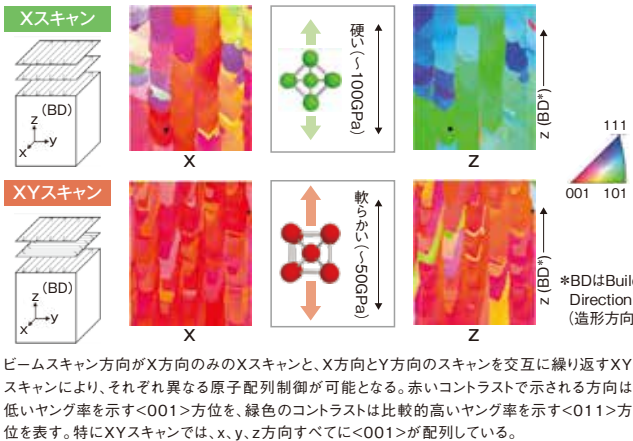


図2 金属積層造形による異方性原子配列制御 資料提供: 大阪大学大学院工学研究科中野貴由教授

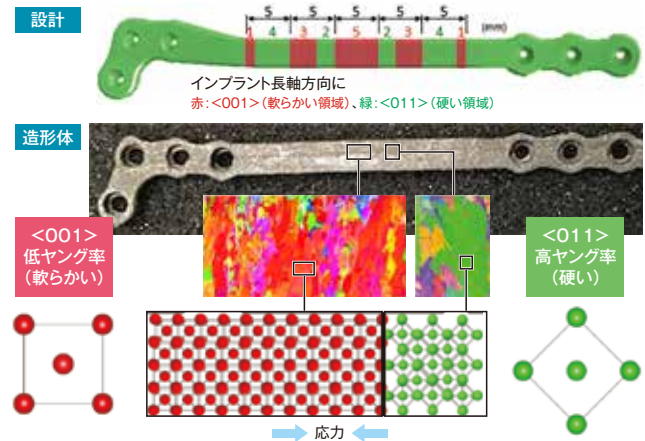


図3 結晶方位制御異方性インプラント 資料提供: 大阪大学大学院工学研究科中野貴由教授

図2 金属積層造形による異方性原子配列制御

図3 結晶方位制御異方性インプラント

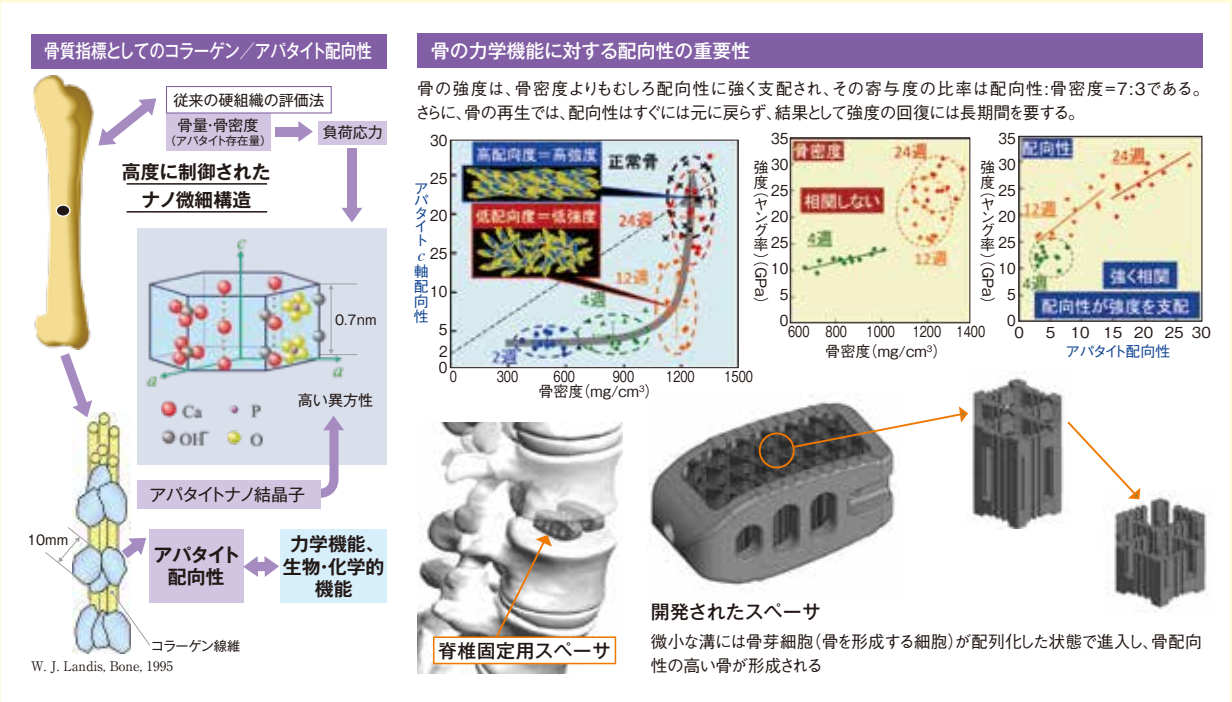


図4 骨配向性の理解に基づく脊椎固定用スぺーサの開発

資料提供: 大阪大学大学院工学研究科中野貴由教授

列化した状態で進入し、進入した骨芽細胞が細胞配列方向と平行に並んだコラーゲン線維を産出する。コラーゲンの上に生体アパタイト(図4に示す水酸アパタイト $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ に対し、種々の陽、陰イオンが置換したもの)がその *c* 軸とコラーゲン線維方向がほぼ平行となるように析出していくことにより骨配向性の高い骨の形成が示されている。

開発されたスぺーサは椎間板ヘルニアや柱管狭窄症、脊椎すべり症など脊椎疾患の治療に使用され、手術によって除去された椎間板の代替として椎体間の高さを保持するとともに、椎体骨と機能的に融合し、固定されることで、背骨の矯正や修復を行う。従来、このような脊椎疾患の治療には、患者自身の骨を採取・粉碎してスぺーサ内部に充填し、これによって骨癒合の促進を図っていたが、患者自身の骨を採取する際に痛みがあるなど、患者の負担の問題があった。さらに、近年の脊椎疾患患者数の増加を背景とし、患者に優しく早期に脊椎機能の回復を可能とするスぺーサの開発が待ち望まれていた。本製品は今年の9月に大規模臨床応用が開始され、実用化に向けた取り組みが進展している。

航空機エンジンのタービブレードへの応用

生体材料の他にも、幅広い分野での活躍が期待されている金属積層造形技術であるが、なかでも航空宇宙産業

へは早くから適用が進んできた。航空宇宙部品は複雑な形状の部品が多く、自由な形状を造形できる積層造形技術とは相性が良い。また積層造形技術により肉厚増強が必要な接合部の削減や部品形状の最適化による軽量化を図ることができる。さらに多くの高価な先端材料が使用されているが、積層造形技術によりニアネットシェイプ造形ができ、投入する材料の量が抑えられるため、コスト低減につながる。

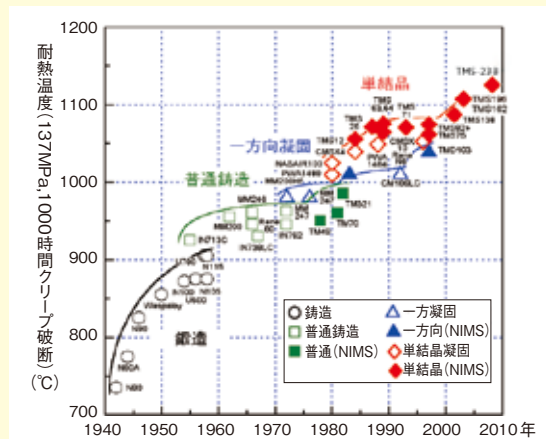


図5 ニッケル基超合金の耐熱温度向上

ふえらむ Vol.16(2011)No.11掲載資料(資料提供:物質・材料研究機構)を元に作成

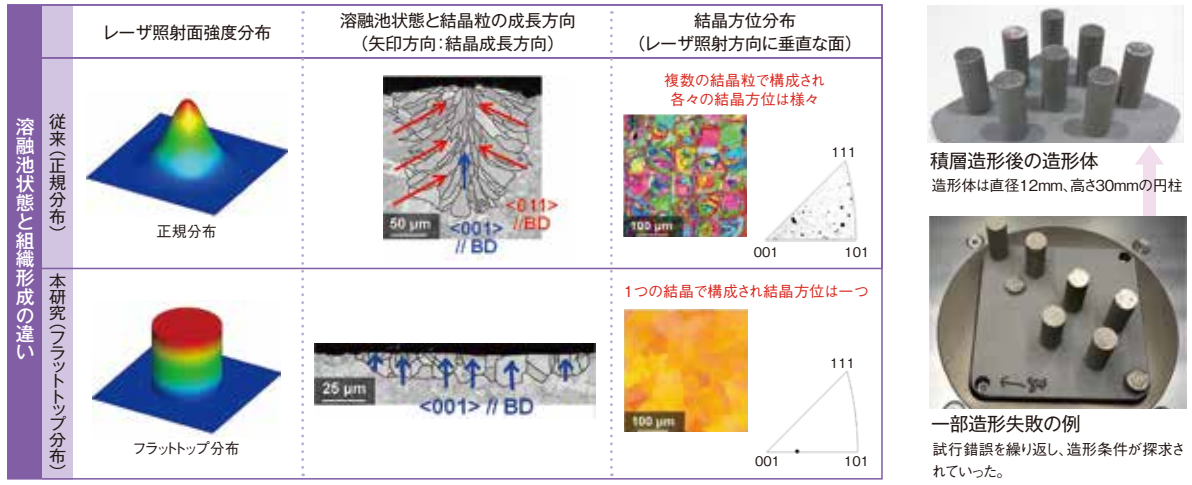


図6 レーザビーム方式の積層造形法を使用した単結晶の造形

資料提供: 物質・材料研究機構北嶋具教主幹研究員

近年、航空機が排出する温室効果ガスの削減がこれまで以上に求められており、航空機エンジンの更なる高効率化のため、エンジンのガス温度の高温化が進んでいる。近年のタービン入口ガス温度は1500℃を超えており、さらに次世代エンジンではいっそうの高温化が進むと考えられている。

タービンブレードに使用されるニッケル基超合金はこれまで、普通鋳造による多結晶材、一方向性凝固による柱状晶材、単結晶凝固による単結晶材と移行し、これによって耐熱温度が向上してきた(図5)。現在、エンジンのタービンブレードに使用されるニッケル基超合金は単結晶凝固による単結晶材で、その耐熱温度は1100℃超となっている。これにコーティングやガス冷却を施すことで1500℃超の環境で使用されている。

多結晶材や柱状晶材は結晶粒界に亀裂が発生しやすいが、単結晶材は亀裂が発生しにくく、タービンブレードに働く大きな遠心力に耐える高温強度を持つ。そのため、部品形状の複雑化や軽量化が進む航空機エンジンでは、高温強度に優れる単結晶の利用が有利であり、単結晶の作製には、前述のように金属積層造形技術が強力なツールとなる。

このほど、物質・材料研究機構の北嶋具教主幹研究員らと大阪大学AMセンターの共同研究により、レーザビーム方式の積層造形装置を使用して、一般的な正規分布レーザ(照射面強度分布が正規分布に従う)のみならず、照射面強度分布が一樣なフラットトップレーザによっても単結晶が造形可能であることを、純ニッケルを用いて報告した。フラットトップレーザでは、造形条件を最適化することで溶融池の

形状を平面状に制御することができ、凝固時の結晶成長方向をビーム照射方向とほぼ平行に制御することで、凝固時に結晶がぶつかってできる結晶粒界や、歪みで導入される線状と面状の欠陥密度を抑制することができ、単結晶を得ることができた(図6)。

この研究成果は今年6月、AM分野の論文誌「Additive Manufacturing Letters」誌にオンライン掲載されると、瞬間に最もダウンロード数の多い論文となった。

今後は単結晶に成長する際の結晶方位選択メカニズムの解明を進めるとともに、10元素からなる実用化ニッケル基超合金へと対象を拡張する。この場合、条件によっては凝固割れが発生する可能性があるため、凝固割れを回避する技術開発をめざす。さらには単純な円柱から複雑形状に拡張した場合の結晶粒の成長挙動も調査していく予定である。

これまで積層造形技術は複雑形状の造形ばかりが目目されてきたが、最近ではむしろ材質を、さらには形状と材質を同時に、高度に制御するためのテクノロジーとしての新たな可能性への挑戦が始まっている。金属積層造形法は、従来の形状を中心とした製品設計指針を大きく変革し、材質と結果としての機能を部位に応じて制御した新たな発想からのカスタム製品の創製を可能とする。こうした金属積層造形法ならではの新しい製品設計・開発コンセプトに基づき、多くの高付加価値製品が創出されることで、本邦における金属積層造形技術が世界をリードするものづくり技術へと発展していくことが期待される。

●取材協力: 大阪大学大学院工学研究科中野貴由教授、物質・材料研究機構北嶋具教主幹研究員