

超高温セラミックスを簡素化する レーザ焼結法

米ノースカロライナ州立大(North Carolina State University)の機械工学および航空宇宙工学の教授であるシェリル・シュ氏(Cheryl Xu)率いるエンジニアらによって開発された新しい焼結法は、レーザを利用して液体または粉末状態の原料を、極限環境下において超高温に耐える必要のある宇宙、防衛、原子力分野に応用できる可能性を秘めた、セラミック材料に変換する。

2200°Cを超える温度にも達する炉を使用する従来の焼結法とは異なり、シュ氏のグループが開発したレーザ焼結法は、炉を必要とせず、より高速で、シンプルで、必要となるエネルギーははるかに少ない。このレーザ焼結法は炉の代わりに、真空チャンバと積層造形装置の不活性環境を利用する。

「極超音速飛行、宇宙探査、先進的なエネルギー・システムの極限環境に耐えられるセラミックスを製造するためのより良い方法が求められていること

に触発された」とシュ氏は述べた。「炭化ハフニウム(hafnium carbide : HfC)のような材料は、卓越した耐熱性を備えることからこのような用途に理想的だが、従来の製造方法は非常に低速で、消費エネルギーが高く、柔軟性に欠ける。レーザエネルギーを利用してこのプロセスを根本的に簡素化できないだろうかと、われわれは考えた」。

SLRP

同チームの新しい手法は、「Selective Laser Reaction Pyrolysis (SLRP)」というもので、最初に、ポリマー前駆体の薄膜を基材上に塗布するか、または金型に流し込む。120Wのレーザで表面を走査して材料を加熱すると、二元的な変換が開始する。この変換では、まずポリマー鎖間に架橋が形成され、続いて固体が熱分解されてHfCセラミックスとなる。

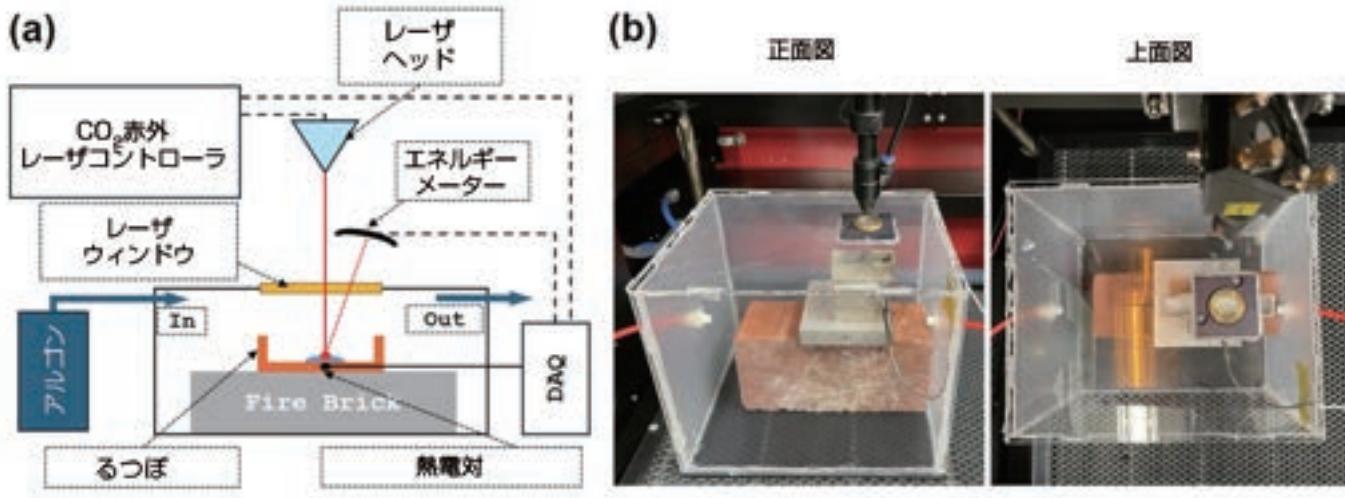
「CO₂赤外レーザ(波長: 10.6 μm)を

使用して、HfCの液体ポリマー前駆体を選択的に加熱する」とシュ氏は説明した。「レーザによって局所的な熱エネルギーが印加され、数秒以内に温度が2000°C以上にまで急上昇する。これによって、ポリマーの架橋反応と熱分解が単一工程で引き起こされ、液体がナノ結晶セラミックスへと変換される。このプロセスは、局所的な光熱変換のおかげで制御可能性と効率に優れおり、3次元構造用のコーティングの精密な製造が可能である」。

液体からHfC結晶へのこの変換全体が数分以内に生じ、「大型炉を使用する必要がなくなる。炭素繊維複合材のような纖細な材料も、損傷を与えることなくコーティングできる」と、シュ氏は述べた。

パラダイムシフト

この研究成果は、超高温セラミックス製造にパラダイムシフトをもたらす



チームの装置の構造図

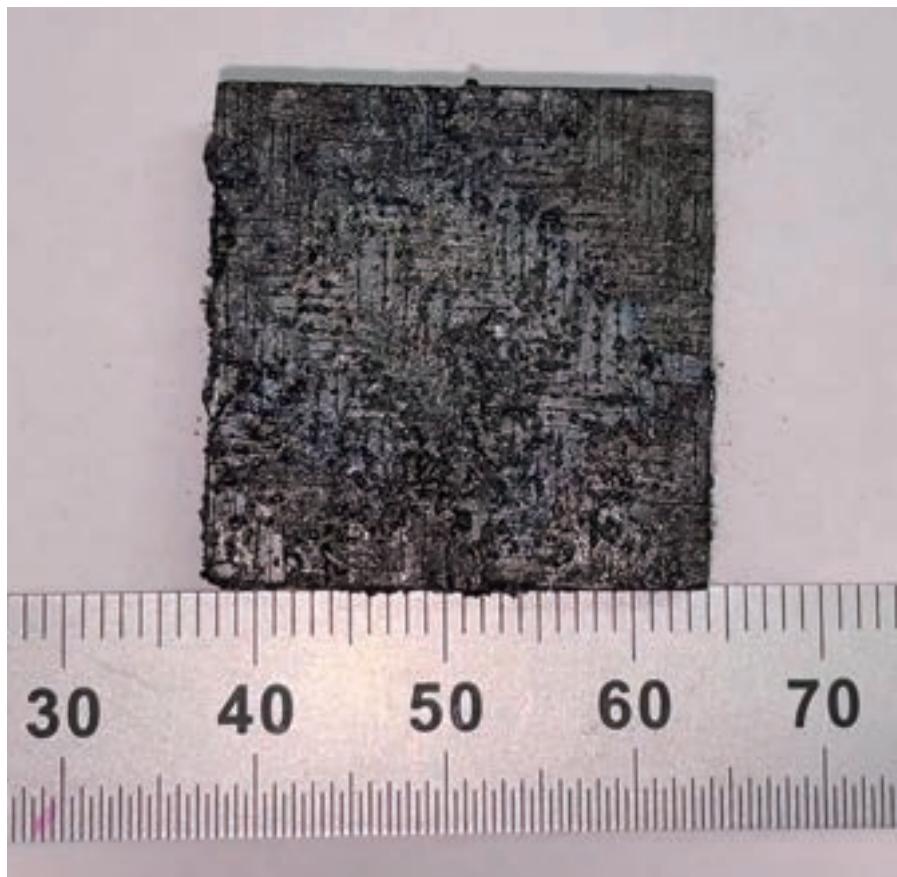
ものである。「従来の炉焼結は数時間から数日を要し、膨大なエネルギーを消費する」とシュ氏は述べた。「われわれのレーザ手法は数分で処理が完了し、局所的に作用するため、部品全体の加熱にエネルギーを浪費することはない。また、複雑な形状やデジタル製造も可能で、積層造形の機敏性をこの種の極限材料にもたらす」。

当然ながら、いくつかの課題を乗り越えなければならなかった。「エネルギー吸収の制御と欠陥の回避は、どちらも難しかった」とシュ氏は述べた。「均一な変換を確保するためにポリマーの化学的性質を最適化する必要があり、プロセスを微調整するために熱活性化剤や光活性化剤を試した。C/Cのような導電性複合材料をコーティングする際の熱流管理には、良好な接着性と相純度を確保するための慎重な熱工学設計が必要である」。

チームにとって最も印象深い瞬間の1つは、優れたナノ結晶構造を持つ純相のHfCが、炉を使うことなくレーザのみを使用して、簡単な液膜から生成されるのを見たときだった。

「もう1つの胸躍る成果は、従来の焼結法では実現不可能だった、C/Cコンポジットに対する強固な付着性を持つHfC層のコーティングに成功したことだ」とシュ氏は述べた。「初めてこれがうまくいったのを見た時は、心が浮き立った。長年にわたる製造上のボトルネックを、われわれがレーザによって克服したからだ」。

チームは、このレーザ焼結法でHfCをコーティングしたサンプルの難燃性を調べるために「トーチテスト」を行い、プロパン炎の炎を約1900°Cの最大温度で5分間吹き付けた。「炎に曝露した後のサンプルは、炭素基材の損傷が比較的少なく、それは、超高温



トーチテスト後：約1900°Cのプロパン炎に5分間曝露した後のサンプルは、炭素基材の損傷が少なく、それは、このコーティングの超高温時の耐酸化性を示している

コーティングの高温時の耐酸化性を示している」とシュ氏は述べた。

今後の計画について、チームは既に、高品質コーティングと粉末合成を実証済みである。「さらなる技術改良により、2~5年以内に航空宇宙や防衛分野のコーティングへと移行できる可能性がある。われわれは、この手法の拡大と商用化を支援してくれるパートナーを積極的に探している」とシュ氏は付け加えた。

資金提供と 協力パートナーを求めて

シュ氏とそのチームは現在、いくつかの方向性を模索している。その方向性とは、炭化ジルコニウム(ZrC)や炭化タンタル(TaC)などの他の超高温セ

ラミックス(ultrahigh-temperature ceramics: UHTC)へとこのプロセスを拡張すること、完全に積層造形によるUHTC部品を製造するための3Dプリント手法を開発すること、そして、1つの部品の中でセラミック特性が可変となる組成傾斜材料を開発して、高度な熱防護性を備えた多機能材料を実現することである。

「最も重要な点としてわれわれは、この技術を航空宇宙、防衛、エネルギーなどの業界における実用的な応用へと移行するための資金提供と協力パートナーも、官民双方のセクターから積極的に募っている」とシュ氏は述べた。

お問い合わせは、cheryl.xu@ncsu.eduまで。

(SALLY COLE JOHNSON)