

# レーザーによるチタン薄板の表面改質

エアアナ・フー、ダニエル・ウエルタ・ムリーリョ、アロンザ・ブラウン、  
クリントン・コールマン

レーザー表面改質は、体内に埋め込み可能な微細構造をチタンに作成し、チタン表面の色を変化させる。色変化は、パーツやコンポーネントの永続的な識別に利用することができる。

この数十年間で、レーザー技術などの出力ビーム処理によって、切断、溶接、マーキングが可能であることは、はっきりと実証されている。今では、電子ビームとレーザー加工によって、表面ストラクチャリングや表面改質が可能であることが示されている。

チタンは、航空宇宙、自動車、民生製品など、さまざまな業界分野において、非常に広く利用される材料である。鍛造、鋳造、機械加工、積層造形といった多数の処理に適した、生体適合性金属であるため、生体医学の分野では、人体に埋め込むインプラント（埋め込み型医療機器）の材料として適している。

最も広く使用されているチタン合金Ti-6Al-4Vは、整形外科用インプラントや、ステント、縫合糸、用具、器具の主要な金属材料として、長い間使用されている。それから派生したTi-6Al-4V ELIも、生体医学用合金として普及している。ELIは、「Extra Low Interstitials」の略である（酸素、鉄、炭素などの不純物量ができるだけ少なくなるように、Ti-6-4の化学成分が調整されている）。3Dプリント（レーザー積層造形）で製造された、チタン製インプラントコンポーネントの例を、**図1**に示す。

レーザーを使用して、チタンの表面ストラクチャリングを行うことにより、個々のケースに固有の輪郭や形状を溶融と急速凝固によって形成し、表面積

を大きくした微細構造を作成することができる。その輪郭形状と構造は、硬組織と軟組織の両方の成長を促進し、人体内の埋め込み領域に対するインプラントの機械的な嵌合性を実現する。器具や用具については、表面が握りやすいことも、人間工学的な観点と取り扱いの面で望ましい場合が多い。

## 動作の仕組み

金属薄板のレーザー表面ストラクチャリングでは、高集束のレーザービームを金属表面に照射することによって、急速に凝固する溶融池を生成する。ビームを溶融池上ですばやくラスト走査することによって、構造を作成することができる。チタンは反応性の高い金属だが、空気中の酸素に触れると、強粘着性の酸化皮膜が直ちに形成されるため、空気中では安定している。この皮膜は、オングストローム単位の厚さで、破損しても酸素が存在すればほぼ瞬時に自己修復される。チタンは、表面酸素に対する親和性が極めて高いために、他の金属を熱処理する際のゲッターとして使用される場合がある。興味深いことに、この強粘着性の酸素皮膜は、非集束のレーザービームで除去可能である。新しい酸化皮膜が形成されるときにはアニーリング効果が観測され、酸化皮膜の厚さに応じた色変化が生じる。これは、チタンを加熱炉で加熱着色する処理に似ている。レーザーを



図1 積層造形によるチタン製コンポーネントは、生体医学用途に非常に適している。(a)は顔面用、(b)は腰ソケットのインプラント。

使用した表面形状の作成と色の変更は、組織接着などの医療用途や、識別目的やGo/No Goゲージのための色の利用に対して、興味深い処理である。

独トルンプ社 (TRUMPF) は、「TruMark Station 5000」に搭載された、1064nmの赤外波長で動作し、20Wの平均出力を備えた、(イッテルビウムファイバ) ナノ秒レーザー「TruMark 5020」を使用して、いくつかのレーザー表面改質試験を行った。ビーム集光とデリバリには、焦点距離160mmのf $\theta$ レンズを備えた、2次元ガルバノスキャナ「SCANcube 10」を使用した。この光学設定で、110×110mmの走査領域サイズと67 $\mu$ mのスポット径が得られる。材料には、厚さ1～3mmのTi-6Al-4V薄板を使用した。レーザービームは、パルス周波数とパルス幅をパラメータとして、変更及び調整することができる。

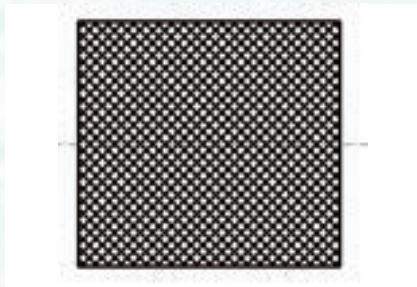


図2 作成されたピラミッド構造。

図2は、作成されたピラミッド型の構造を示している。表面積を大きくした格子編みの表面構造は、組織接合に利用できる可能性がある。スクリプトプログラムを使って、赤いライン(Y方向、画像の左上)、青いラインの順にラスタ走査し、所望の深さを達成するために、その処理をX回繰り返す。表面構造は、1 $\mu$ m(細かい)から500 $\mu$ m(粗い)の範囲である。

図3(a)は、ベルクロ(Velcro)という金属に似た、作成構造を示している。レーザを金属に当てる位置を示す、「X」の印(図の右側)を目標としてレーザビームをラスタ走査すると、図に示されているスパイクが生成される(左側)。この処理は、パーカッション穴あけ加工に似ている。各X目標をシングルパルスで複数回(最大100回)照射する。図3(b)は、45度のラインでレーザをラスタ走査した結果である。レーザが1つ前のラインと十字交差する、興味深い形状が得られている(レーザからのさらなるエネルギーが、金属表面に照射される)。

上述のとおり、チタンは、既存の酸化皮膜が破損または除去されると、新しい酸化皮膜が簡単に生成される。レーザによって印加される熱により、従来の加熱炉による加熱着色に似た、アニリング処理が生じる。色は、酸化皮膜の厚みを通した光の屈折によって現れる。異なる色を生成するには、レ

ーザビームの集光を少し緩くしてスポット径を大きくし、物質に印加されるエネルギー密度を制御する。それによって、エネルギー密度をチタンの融点以下にする。レーザ処理後には、新しい酸化皮膜が形成され、200℃までの温度耐性を備えた色が生成される。

### その他の機能

レーザ処理は、光の屈折によってチタン表面の色を変化させることもできる。色は、空気に触れたすべてのチタン表面に生成される、強粘着性の酸化皮膜の厚さによって異なる。色変化は、物質の化学組成に大きく依存する。しかし実験では、パーツやコンポーネントの永続的な識別に利用できることが示されている。パラメータをさらに最適化することによって、従来のチタン陽極酸化処理とは異なる他の色も、生成できる可能性がある。

チタンやチタン合金に対する従来の陽極酸化処理は、十分に確立されているが、この処理では、深い赤色(朱色から緋色)、深い青色、エメラルドグリーンとして人間の目が解釈する、特定の色を実現することはできない。形成される酸化皮膜の厚みが、それらの波長に対応しないためである。Pantoneカラーにおいてそれらの色は通常、185～187、192、199～200の赤色と、280～282、286、287、288、294～295、541の青色である。緑色では、例えば、315～316、322、323、330、335、336、564、662が、陽極酸化処理ではほぼ実現できない可能性がある。しかし、レーザパラメータをさらに最適化することによって、従来の陽極酸化処理では難しかったこれらの色や、その他の所望の色を生成できる可能性がある。将来的には、 $\beta$ 相の体積率の増加に伴って、色がどの

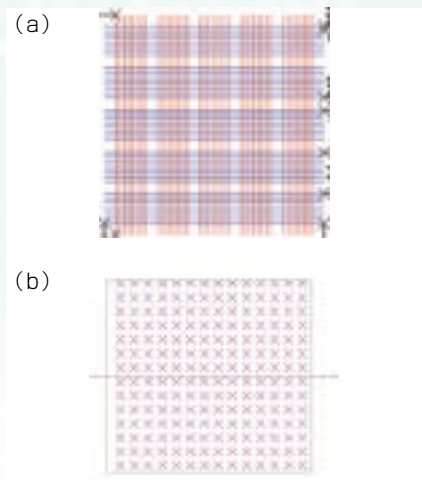


図3 接着構造(a)と、45度パターン(b)。

ように変化するかというのも、興味深いテーマである可能性がある(Ti-6242などのほぼ $\alpha$ 型の合金、 $\alpha$ - $\beta$ 型合金であるTi-6-4、Ti-15-3-3-3などの $\beta$ 相の安定度が非常に高い合金のCPチタンを比較する)。

レーザによる表面着色と表面ストラクチャリングは、航空宇宙業界においても、全く新しい可能性を切り拓くものである。チタン製翼桁など、陽極酸化処理槽の中で浸液するのが非常に難しい、特に大きな構造部品に対しては、小さな領域だけ着色または改質する能力は、魅力的である。微細構造の作成に使うか、着色に使うかに関わらず、レーザ技術は、チタンとチタン合金の処理に、数多くの魅力的な可能性をもたらす。

### 著者紹介

エリアナ・フー博士(Eliana Fu, Ph.D.)は、独トランプ社のレーザ技術センター(TRUMPF Laser Technology Center)に所属する航空宇宙及び医療担当業界マネージャー。ダニエル・ウエルタ・ムリーリョ博士(Daniel Huerta Murillo, Ph.D.)は、同レーザアプリケーションエンジニア。アロンザ・ブラウン(Alonza Brown)は、同パルスレーザアプリケーション責任者。クリントン・コールマン(Clinton Coleman)は、同TruMark製品及びプロジェクトマネージャー。e-mail: eliana.fu@trumpf.com URL: www.trumpf.com