

チタン:大きな可能性を秘めたハイテク素材



比重に対する強度の比率が良好なため、チタン合金は航空機の軽量構造によく使用されます

カスタマイズされた上質な工具でより効率的な加工を

当初、軍用偵察機のエンジンや機体にのみ使用されていたチタンは、その優れた特性により、長い間私たちの日常生活に欠かせないものとなっています。民間航空機の部品からスマートフォンやノートパソコンの筐体、ゴルフクラブなどのスポーツ用品、時計や宝飾品、さらには医療用インプラントに至るまで、主にハイテク機器や高級製品に使用されています。ただし、軽金属の機械加工には落とし穴があります。しかし、適切な加工戦略と調整された切削工具があれば、費用対効果の高い加工が可能です。

「チタンは一種の『スーパー素材』です」と、ハンブルク工科大学(TUHH)の生産管理技術研究所(IPMT)の生産工学教授であるJan Dege工学博士は述べています。「チタン合金は、比重に対する強度の比率が良好であるため、航空の構造部品などの軽量構造用に特に人気があります。この軽金属は焼もどし鋼とほぼ同等の強度を持ちながら、40%以上も軽いのです。また、チタンは耐熱性、耐食性にも優れています。酸化皮膜が金属を不動態化するため、塩素ガス、海水、アルカリ溶液、アルコール、冷酸などの腐食性の強い媒体に対して高い耐食性を発揮します。もう一つの貴重な利点は、その生体適合性です。チタン製のインプラントは、一般的に免疫学的拒絶反応を引き起こしません」

チタンはまだ比較的若い素材です。1791年にイギリス人のWilliam Gregorによって発見され、1944年から大規模生産が可能になりました。それ以降、世界各地へ広まってきました。20年前、世界中で約60,000トンの金属チタンが加工されていましたが、10年前は143,000トン、今日では約300,000トンが消費されていると推定されています。さらに、チタンは希少金属ではなく、0.565%と地殻中で9番目に多い元素です。つまり、一般的に容易に入手できるということです。



エネルギー集約型生産

では、なぜハイテクで高級な機器でのみ使用されることが多いのでしょうか。「チタンは非常に高価です。これは、複雑な製造工程によるものです」とJan Dege氏は説明します。「この素材は、純粋な金属の形で見つかることはほぼありません。それは、エネルギー集約的なクロール法を使用してイルメナイトまたはルチルという鉱物から抽出され、さらに再溶解を繰り返すことによって技術的に使用可能な金属に加工しなければなりません。チタン合金Ti-6Al-4Vの生産には、1kgあたり約108kWhが必要です。これは、アルミニウム合金の製造に必要なエネルギー(17kWh/kg)の6倍に相当します。チタンは原料価格が高いだけでなく、CO2排出量も高いのです。」

このため、チタンをリサイクルすることは、経済的にも環境的にも非常に賢明です。しかし、ここには問題があります。今日、特に航空宇宙産業では、多くのチタン部品がプレート材料または自由鍛造半製品からフライス加工されています。機械加工プロセス中に、酸化、冷却潤滑剤の残留物、異物、工具の粒子が、切り屑をひどく汚染し、リサイクルが困難になります。そのため、切り屑は高水準にリサイクルされるのではなく、鉄鋼生産の添加剤としてよく使用されます。一方、純チタンは材料サイクルに完全に戻すことができます。リサイクルは、クロール法で製造されたもとのチタンと一緒に再溶解して行われます。

洗練された加工

チタンの使用が制限されるもう一つの理由は、その困難な加工要件にあります。チタンは機械加工が難しい材料の1つです。加工における最初のハードルは、高い引張強度と低い熱伝導率の組み合わせです。前者は工具の刃先に大きな機械的ストレスをもたらし、後者は工具に顕著な熱負荷がかかります。これは、鋼とは異なり、加工物や切りくずを介して放散される熱が非常に少ないためです。同じ切削速度では、チタンを加工するときの温度は、鋼を加工するときの2倍になることがあります。「刃先の熱負荷を軽減するために、切削速度は通常 $v_c = 60\text{--}90\text{ m/min}$ に落とされます。さらに、弾性率が比較的低いため、逃げ面にスプリングバックが発生し、摩擦熱が増加します。これにより、切断工程の生産性が著しく制限されます」とJan Dege氏は言います。



チタンは医療技術や歯科技術など、今や私たちの日常生活に欠かせないものとなっています。しかし、機械加工は簡単ではなく、カスタマイズされた上質な工具が必要です

CemeConのラウンドツール製品マネージャーであるManfred Weigandは、このように付け加えます。「特に高温ではチタンが付着する傾向があるため、加工がさらに難しくなります。冷間圧接されたチタンは工具の刃先に付着します。次の切り屑と一緒に剥がされると、接着が緩むだけでなく、コーティングや下地の一部も剥がれる可能性があります。その結果、刃先にマイクロチップングが発生し、最悪の場合、工具が破損し、少なくとも摩耗が進行します。」

さらに、すべてのチタンが同じというわけではありません。広く使用されている α - β 合金Ti-6Al-4Vに加えて、Ti-5Al-5Mo-5V-3CrやTi-10V-2Fe-3Alなどのニア β 合金が航空宇宙産業で使用されるようになってきています。これらは強度と高温硬度が高いため、Ti-6Al-4Vと比較してさらに工具摩耗が大きくなり、切削速度と送り速度がさらに低下します。他のチタン合金は、例えば医療技術やインプラント分野で使用されています。

正確に調整された全てのパラメーター



„「総じて、チタン加工に伴う大きな課題は、最初は難しく思えるでしょう。ただし、すべてのパラメーターを知っている人にとっては、非常に有利なのです。超硬基板、工具形状、コーティング、CNCプロセス設計を、使用する合金や工作機械に合わせて微調整することで、経済的な加工プロセスを実現します」“

Jan Dege 工学博士、ハンブルク工科大学（TUHH）生産管理技術研究所（IPMT）生産工学教授

ここでは、切削工具の「保護カバー」としてのコーティングが特に重要です。特にシリコンを含むコーティングは、チタンの加工において他のソリューションとは一線を画しています。その一例が、HiPIMSコーティング材料SteelCon®をベースにしたコーティングです。Manfred Weigandは次のように説明します。「SteelCon®は熱に対する優れた断熱性を発揮し、工具に熱をほとんど通しません。これはチタンなどのように、非常に熱伝導率が低い素材にとって特に有利です。SteelCon®がなければ、高硬度材を加工する際に必然的に発生する高温によって超硬合金が脆化し、工具が損傷してしまいます。」



展望：生産の最適化のために

チタン部品の製造におけるCO2排出量を削減し、資源を節約し、より経済的に生産するために、特に航空宇宙産業では、ニアネットシェイプの半製品の使用が増加しています。これらは精密鍛造部品であると同時に、積層造形された半製品でもあります。

ハンブルク工科大学 (TUHH)のIPMT

ハンブルク工科大学の生産管理技術研究所 (IPMT) は、生産に関する基本的な課題の研究と、産業応用のためのモデル、方法、プロセスの開発に取り組んでいます。2つの研究所部門は緊密に連携しています。生産管理部門は、特に生産プロセスの編成に重点を置いています。生産技術部門では、CFRPやチタンなどの最新工業材料の加工に関する革新的なプロセスが研究されており、特に大型製品の加工能力は際立っています。

Jan Dege工学博士は、2022年から生産工学の教授を務めています。以前は、Premium AEROTEC社（ドイツ）でさまざまな管理職を歴任し、航空構造部品の高性能加工用の工具やプロセス、機械の開発と設計に携わっていました。また、大学の研究と産業応用を繋ぐ役割を果たしてきました。現在の研究分野は、特に航空宇宙産業向けの、機械加工製造プロセスです。複合材料（CFRP、アルミニウム、チタン）の手動および半自動ドリル加工、繊維強化プラスチック製部品のトリミングと研削、アルミニウムおよびチタン合金の高性能フライス加工などです。また、Manufacturing Innovations Network (MIN) の理事であり、ドイツ研究振興協会 (DFG) と Industrial Collective Research (IGF) の専門家でもあります。

<https://www.tuhh.de/ipmt/das-ipmt>

SteelCon®

チタン

HiPIMS

SteelCon®

Premium tools

difficult-to-machine materials

医療技術

航空機産業

軽量構造

航空

Smartphone and laptop case

IPMT of TUHH

Dr Jan Dege

Watchmaking Industry