

第31回青葉工学研究奨励賞



広い温度範囲で動作する新しいTi-Al基形状記憶合金の開発

東北大学
学際科学フロンティア研究所
助教 許 勝

金属は強く変形させると、元の形には戻らない—これは私たちが日常的に感じている物質の“当たり前”である。しかし材料科学の世界には、この常識を覆す特別な金属が存在する。形状記憶合金である。応力によって内部の結晶構造が変化し（マルテンサイト変態）、その構造が元に戻ることで、10%にも及ぶ大きな変形から復元できる。この性質は超弾性と呼ばれる。高強度を保ちながらゴムのように滑らかに伸び縮みするという特性をもつNi-Ti合金は、医療デバイスや精密アクチュエーターなど、多くの分野で活発に利用されている。

しかし、この“魔法の金属”にも弱点がある。それは温度への脆弱性である。多くの形状記憶合金は室温付近でこそ優れた性能を示すものの、 -150°C 以下ではマルテンサイト変態による機能が失われ、逆に 100°C 以上では塑性変形が先に発生してしまう。温度環境が大きく変動する宇宙空間では特性を保つことが難しく、NASAが提案した超弾性エアレスタイヤのような先端技術においても、温度依存性が課題になると指摘されてきた。「極低温から高温まで使える、軽くて強い形状記憶合金をつくる」—これは長年、実現が難しいとされてきたテーマである。私たちの研究は、この課題に真正面から取り組むところから始まった。

■ 軽量・高強度・広温度域の超弾性材料を目指して

数ある金属の中で私たちが着目したのは、軽量で比強度に優れるチタン (Ti) とアルミニウム (Al) であった。Ti-Al系状態図の詳細解析を通じ、合金設計に関して丁寧に検討した。鍵となったのは、bcc構造の β 相である。この相はマルテンサイト変態を起こしやすく、形状記憶特性の母相として適しているが、Ti-Al二元合金単独では相安定性が十分でない。そこで私たちは、 β 相を規則化・安定化させるために少量のクロム (Cr) を添加する戦略を採用した。この設計により得られたTi-Al-Cr形状記憶合金は、比重4.36という軽さを保ちつつ、800 MPaを超える強度と7%以上の可逆ひずみという大きな室温超弾性を示した。これは従来のTi系超弾性合金のおよそ2倍に相当し、Ni-Ti合金にも匹敵する性能である。しかし、驚きの瞬間はここからだった。

■ -269°C から $+127^{\circ}\text{C}$ — 宇宙の温度幅を丸ごとカバー

本合金を極低温試験機により4 K (-269°C) まで冷却し引張試験を行ったところ、多くの予想に反して、除荷後に試料は元の形状へと戻った。同様に400 K ($+127^{\circ}\text{C}$) でも超弾性が確認され、 -269°C から $+127^{\circ}\text{C}$ までという前例の少

ない広い温度範囲で超弾性が発現することが明らかとなった^[1]。図1に示すように、各温度で得られた負荷—除荷曲線はいずれもフラグ状の超弾性ループを描き、幅広い温度域で優れた特性が得られる。この温度範囲は地球上の環境を大きく超え、月面や火星の温度条件にも対応可能であることを示唆している。

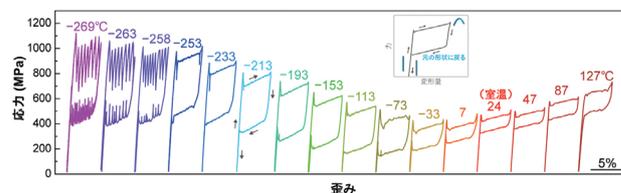


図1 Ti-Al-Cr合金の各温度での超弾性変形応力—歪み曲線^[1]。

■ 広温度域超弾性をもたらす“異常格子安定性”

なぜこれほど広い温度域で超弾性が維持されるのか。その理由を探るため、まずJ-PARCにおいてその場中性子回折実験を行い、変形中の相変態を原子スケールで追跡した。その結果、Ti-Al-Cr合金では $B2 \leftrightarrow B19$ の可逆マルテンサイト変態が生じていることが確認された。これはTi合金では比較的にまれな挙動である。さらに解析を進めると、低温領域で Clausius-Clapeyron 関係（温度と変態応力の比例関係）が成立しないことが明らかになった。低温ほど母相格子が“硬くなる”弾性硬化が起こり、変態核生成には逆に高い応力が必要となるためである。その結果、従来形状記憶材料には見られない負の変態応力温度依存性が現れ、極低温を含む広い動作温度範囲においても超弾性特性が維持された。この特異な挙動は熱力学だけでは説明が難しく、私たちは核生成の動力学に基づく新しい解釈を導入することで、広温度域超弾性の原理を明らかにした。

■ 宇宙・水素・極低温技術へ—未来をひらく材料へ

Ti-Al-Cr合金は、“温度に縛られない超弾性”という新しい材料特性を有しており、超弾性エアレスタイヤ、極低温アクチュエーター、液体水素用部材など、幅広い応用可能性が示唆される。また、本研究で示された異常格子安定性に基づく挙動は、形状記憶合金の理解に新しい視点を与えるものである。Ti-Al-Cr系超弾性合金は、極限環境下で使用される機械要素や機能部材に対し、新たな選択肢を提供し得る材料として、今後の展開が期待される。

[1] Y. Song, S. Xu et al.; Nature, 638 (2025), 965-971.