

(699) チタン合金の最近の進歩の材料学的諸問題

東北大学金属材料研究所 和泉 修

工業的に実用チタン合金の開発が模索されるようになってから約四半世紀余、既に数多くの優れた合金が実用に供されている。そして今や宇宙から深海に亘る広範な空間で、構造・機能両材料として、次世代文明の一翼を担うものと期待が寄せられている。本セッションでは既に昨年数人の講師により、工業的・金相学的立場から発展現状のサーベイがなされたので、今回は最近のトピックスの中からエンジン部材としての耐熱チタン合金、変形能に優れたβチタン合金、未知の分野であるチタンを含む金属間化合物、そして粉末冶金や超塑性を利用したプロセス技術を取上げ、それらの動向を材料学的観点から眺めてみたい。

(1) 耐熱チタン合金：チタン合金はα=β変態を有し、β相はb.c.c.で耐熱性が期待されないため、耐熱合金の開発は主にα合金乃至α+β合金に對して行われた。α相安定化合金元素として唯一のものはAlであるが、添加量を多くすると規則相Ti₃Alを生じて脆化するためSn, Zrなどの中性的元素を複合添加する試みがなされ、このようにして初期に開発された合金にTi-5Al-2.5Snがあり、クリープ性や引張り性が約300℃まで保証された。しかしエンジンの性能向上のためα単相合金では改善に限界があるため、合金開発の眼はα+β二相合金に向けられた。ここに誕生したのがTi-6Al-4V, Ti-7Al-4Mo, Ti-4Al-2Sn-4Mo-0.5Si (IMI550)などであり、耐用温度は350~400℃に上昇した。さらに高温クリープ性改善の必要が生じ、一時的near-α合金が創出された。すなわちα相を固溶強化し、加えて少量のβ相を分散させて成形性、クリープ強度を補強しようという発想である。この種の合金にTi-8Al-1V-1MoやIMI679などがあり、耐用温度は400~470℃に改善された。

ところでその後ジェットエンジンの大規模改良、超音速機の出現に伴い、耐熱合金にもさらに苛酷な性能が求められた。その最大ものはクリープ抵抗である。その頃までのα+β合金の熱処理はすべてα+β領域で行われていたが、このクリープ抵抗改善の要求はnear-α合金をβ処理することでかなえられた。β処理により得られる針状組織が改善に寄与したのである。しかしそのままでは韌性に欠けるので熱処理や組成に検討が加えられ、数種の近near-α合金が開発され、耐用温度は520℃に及んだ。さらにその後の研究で、エンジン部材としてはクリープ抵抗や引張り強さはさることながら、疲労抵抗がより優先されるべき基本的性質であると見做されるようになった。そして検討の結果、疲労強度はクリープ抵抗の場合とは逆にα+β処理材の方が優れることがわかった。この相反する因果関係は合金開発を甚だ困難なものにした。これを打開するため合金組成の選択は勿論のこと、加工・熱処理プロセス技術の綿密な検討が図られた。そしてβ結晶を微細にするような鍛造条件、多段再結晶熱処理の適用により6-2-4-2SやIMI829が開発され、耐用温度は550℃に上昇した。さらに組成を調整してβトランザスの傾きを緩やかにし、α+β処理をしやすいクリープ・疲労両特性を両立させたIMI834が開発され、耐用温度は600℃にまで到達するに至った。

一方チタンは元素活性な金属であり、500℃以上の高温長時間使用で特性が劣化する。この対策として表面に白金などの貴金属をプレーティングする方法が検討され、膜厚1μm程度でも顕著な効果があることが確かめられている。

(2) β型チタン合金：近年チタン合金はα+β合金(Ti-6Al-4V)よりもさらに高強度・高韌性を有する合金が要求されるようになり、β安定化元素を多く含む熱処理性に優れたnear-β合金、あるいは加工性・韌性に優れたβ型合金へと関心が向けられている。β型合金の研究は他のチタン合金にくら

べると立遅れていたが、最近の研究によると b.c.c. 合金でありながら優れた塑性性と共、特異な塑性挙動を示すことが明らかとなって来た。特異な塑性挙動とは、合金組成に応じて $\{332\}\langle 113 \rangle$ という珍しい変形双晶の発生と双晶内での ω 相の析出、そして高濃度になると通常のすべり変形に遷移することなどが明らかにされた。これらの変形機構の変化は材料の変形能や機械的性質と深い関わり合いを持つ。変形双晶が発生すると低い降伏強度、大きな均一伸び・破断伸びを来し、すべりが発生すると高い降伏強度、小さい加工硬化率、大きな絞りと小さな伸びを来す。この構造不安定性に由来する変形挙動の変化は、既に開発された実用 β 型合金についても成立することが明らかとなり、今後の合金開発の大きな指針となり得よう。

β 型チタン合金の特筆すべきもう一つの変形挙動は、高温変形で超塑性にも匹敵する大きな変形能を有することである。しかも超塑性の場合の如き組織微細化の必要は少なく、精密部材の製造に今後合理的展開を示すであろう。

(3) チタン系金属間化合物 : 例えば TiFe が水素吸蔵材として、また TiNi が形状記憶合金として実用化の模索が続けられていることは周知のことである。金属間化合物の特異挙動が最近注目を集めている。従来の合金とは違い、温度上昇につれ却って強度が増大するという耐熱材料としてうってつけの金属間化合物が最近次々と見つかっている。TiAl もその一つで軽量(比重 3.6)耐熱材料として期待され、目下延性改善の努力が各方面でなされている。この結晶構造は f.c.c. 系の $L1_0$ 型で、異常性の機構は未解の段階である。同じ f.c.c. 系の $L1_2$ 型金属間化合物の異常性については最も広範に研究されており、粒界脆性の機構とそれへの対策が最近解明されるようになった。そして優れた高温強度と共に変形能をも具備した $L1_2$ 型金属間化合物が模索出来るようになり、 Co_2Ti もその成果の一つである。

(4) プロセス技術の発展

i) 粉末成形 : 近年活性金属であるチタンに対しても、粉末製造の技術確立の努力が精力的になされ、加えて HIP, CIP などの高圧装置の開発と相俟って、粉末を素材とするチタン合金の near-net-shape 成形体の実用化に明るい見通しが得られるようになった。粉末成形体の難点は空隙、不純物、汚染などによる脆性、クリープ性、疲労性などの劣化であり、特に活性なチタンの場合にはそれが著しいとされていた。素材は各金属粉末を合金組成に応じて混合する方法、予め合金化したものを粉砕やアトマイズにより粉体化する方法などにより得られ、これを圧粉・焼結・加工・熱処理することにより、最近では鋳物、鍛造材に匹敵するものが得られるようになった。粉末法の特徴は near-net-shape に成形出来るため材料費の節減が期待されることのほか、微粒子なすばが故にバルク材では得られない効果を利用することが出来る。例えば組織微細化による超塑性現象の発現、機械的性質(耐疲労性)の改善、さらには粉末製造時の急冷条件を利用して強制固溶体の形成と均一微細析出相の華出などである。

ii) 超塑性 : $\alpha + \beta$ 二相チタン合金と条件が整えば典型的な超塑性を示し、既に成形加工に実用されている。変形機構については相変わらず統一した理解は得られていないが、チタン合金の場合は β 相が変形の大部分を担っているとの報告が多く、Ti-6Al-4V に拡散速度の速い β 安定化元素 (Fe, Ni, Co) を添加すると、遅い元素 (Mo) 添加材よりも超塑性特性は良く取えるという。また水素添加により β 相比を増大させると超塑性変形能が大いに改善され、変形後に脱水素すれば元の合金の性質を回復出来る。その他組織安定化のための添加元素の効果や粉末成形からのアプロ-チなどの試みがなされている。

参考文献

- (1) 金属チタンとその応用 : 草造・村上・木村・和泉 編 (1983), 日刊工業新聞社。
- (2) Titanium, Net Shape Technologies : Ed. F.H. Froes, D. Eylon (1984), A.I.M.E.
- (3) Titanium, Science & Technology : Ed. G. Lütjering, et al. (1985), D.G.M.