連携記事

自動二輪車の各種部品へのチタンの適用

Application of Titanium and Its Alloys for Various Parts of Motorcycles

川上　哲
Akira Kawakami
新日鐵住金（株）
チタン・特殊ステンレス事業部
チタン・特殊ステンレス技術部
商品技術第一室　主幹

1 はじめに

チタンは、鋼や銅などに比べて軽い、アルミニウムなどに比べて比強度が高い、これらの金属に比べて耐食性が高いなどの優れた特長を有する。国内では、主に、海水に対する優れた耐食性を活かして、海水を冷媒とする板式熱交換器（PHE）や復水器と呼ばれる大型の熱交換器、海水淡水化プラント等に大量に使用されてきた。その後、メガネフレームやゴルフクラブフェース等の民生品への適用を経て、自動二輪車のマフラーに採用された歴史を持つ。このように用途拡大を続けてきた結果、国内のチタン展伸材の需要量は、漸増ながらも右肩上りを続けており、2015年には15千Ton／年超のマーケット規模を有している[1]。

チタン・チタン合金の高い比強度を活用している用途として、航空機分野が第一に挙げられるが、次に挙げられるのが二輪車の各種部品である。二輪車のうち、スーパースポーツと呼ばれるカテゴリーは、レスポンスの良い走りを要求される。また、オフロード車やモトクロッサーと呼ばれるカテゴリーは、ダートや山間部などの悪路でも軽快な走りを要求される。これらの高級二輪車、特にフラッグシップモデルを中心として、各二輪車メーカーは、より魅力的な二輪車を世に送り出すべく、凌ぎを削っている。その結果、各メーカーの粋を尽くしたテクノロジーがこれらの車には特に多く込められている。

そのため多少高価であっても、高い機能や優れた特性を有する材料が高級二輪車部品に適用される機会は少なくない。特に、軽量化を常に要求される高級二輪車においては、チタン・チタン合金の出番も少なからず存在する。本稿では材料メーカーの立場から、二輪車の各種部品にチタンが使われている事例について、燃料タンクに紙面の多くを割きながら紹介する。

2 二輪車の各種部品へのチタンの適用例

2.1 コネクティングロッド（コンロッド）

ピストンの上下運動を回転運動に変えるコンロッドを軽量化すると、エンジンレスポンスが改善される上に、コンロッド周りのエンジン部品も軽量化することが可能になるなど、二輪車にとっては特に効果が大きい[2]。これまでに、レーサーレプリカや限定車のコンロッドには、$\alpha+\beta$型チタン合金（以下、$\alpha+\beta$合金）で最汎用のTi-6Al-4Vが主として使われてきており[3]、切削加工または型鍛造することにより製造されてきた。

一方、2015年モデルよりヤマハYZF-R1、R1Mに搭載されているSuper-TIX®51AF（Ti-5Al-1Fe）製コンロッド（図1）は、チタン合金では世界初の適用となるFS（Fracture Splitting）法で製造されている[4]。コンロッド製造プロセスや製造性、特性評価などの詳細については本特集記事の別稿[5]に記載されているので、ここでは省略する。Super-TIX®51AFは$\alpha+\beta$

図1　2015年モデルYZF-R1に搭載されたSuper-TIX®51AF製コネクティングロッド

合金であり、図2に示すようにTi-6Al-4V同等の強度を有すると同時に、良好な熱間加工性および切削加工性を有することを特長とする[6]。特に、切削加工性については、ドリル刃に折損や摩耗が生じない最大切削速度がTi-6Al-4Vよりも高いことが分っている[7]。コンロッドでは、ボルトを通すための穴を空ける必要があるため、ドリル穴加工性が良好であることも、この合金がスーパースポーツのコンロッドに採用された一因である。

2.2 エンジンバルブ

スーパースポーツを主とする高級量産車のエンジンバルブにチタン合金が使われるようになってから、20年以上経っている。エンジンバルブも往復運動するエンジン部品であり、コンロッドと同様に、軽量化すると周りのエンジン部品を軽量化可能というメリットがある。また、高い回転数でエンジンを回すことの多いスーパースポーツやモトクロッサーでは、エンジンバルブの軽量化はレスポンスを改善する効果が大きい。

吸気エンジンバルブには、Ti-6Al-4V[7]およびSuper-TIX®523AFM（Ti-5Al-2Fe-3Mo）[9]に種々の耐摩耗処理[10]を行ったものが使われている。後者では、Ti-6Al-4Vよりもβ安定化元素の添加量を増やし高強度を狙って設計された合金であり、図2に示すようにTi-6Al-4Vよりも高強度を有する。当該合金はTi-6Al-4Vよりも高い疲労特性を有している[11]ことから、吸気エンジンバルブへの使用量は増えてきている。

一方、排気エンジンバルブには、航空機エンジン向けに開発されたNear α型合金が主に使用されている[12]。特に、800℃での疲労強度がSUH35（Fe-0.55C-9Mn-21Cr-4Ni-0.45N）と同等であり、高い比強度（特に、疲労強度／密度）を有するためである。また、近年、排気エンジンバルブ用にTi-7Al-2Mo-0.2Si-0.15C-0.2Nbが提案されており、既に使用されているNear α合金同等の高温強度を有すると報告されている[13]。

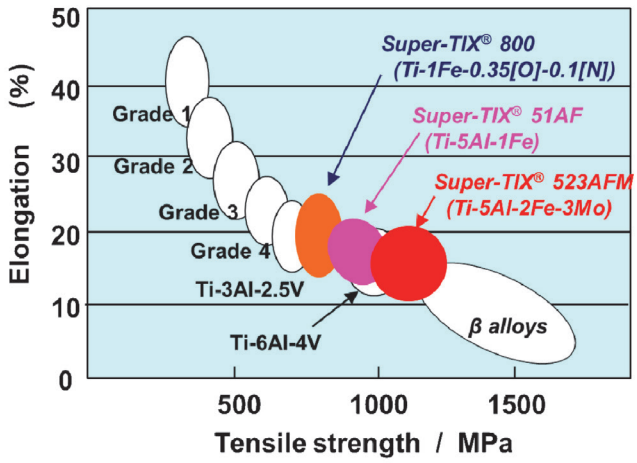

図2　各種チタンの室温での強度・延性バランス

2.3 排気管

エギゾーストパイプからサイレンサー、テールエンド等を含む排気系部品は、素材使用量が多いため、鉄鋼材料に替えてチタンを使用することによる軽量化効果は大きい。また、フェライト系ステンレス鋼に比べ、チタンはヤング率と線膨張係数が小さいことから、熱膨張・収縮の繰返しに伴う発生応力が半減することから熱疲労特性上も有利である[12]。さらに、チタン特有のテンパーカラー（焼け色）や、かん高いエギゾーストノートもチタンマフラーのファンを増やしてきた。

元々、排気管用にはJIS 2種純チタン（TP340C）が採用されたが、700℃以上の高温に長時間晒される部品については、材料メーカー各社が開発したマフラー向け耐熱チタン合金が主に使用されている。高温強度改善に効果のあるAl、Siを含有させた合金としては、Ti-0.5Al-0.45Si-0.5Nb[14]、Ti-0.5Al-0.35Si[15]、Ti-0.45Si-0.25Fe[16]、Ti-0.1Fe-0.35Si-0.25Ce[17]などが開発されており、二輪車を中心に使用されている。ただし、Alは高温強度だけでなく室温強度も上昇させて延性低下を招くことがあり、室温での加工性を悪化させることがあるため、元々の添加量は多かったが0.5％程度の添加量に落ち着いている。

これに対し、CuはTi中でAlよりも高温での固溶強化能は強い一方、Alと異なり室温で双晶変形の活動を阻害せず、1％程の添加では純チタン同様の冷間加工性を維持するという特性を有する[18]。この特性を活用して、Ti-1Cu[19]、Ti-1Cu-0.5Nb[20]、Ti-1Cu-1Sn-0.35Si-0.2Nb[21]が開発され、二輪車を中心に使用されている。

エンジンバルブ、排気管やここでは触れていない部品へのチタン適用については、12）に詳細に記載されているので、参考にして頂きたい。

3 燃料タンク

3.1 燃料タンクへのチタンの適用

燃料タンクの軽量化は、燃費改善とともに重心を低くすることによる操縦性の安定化につながることから、二輪車にとって重要な課題である[22,23]。近年では、昔から使われている表面処理鋼板の一部を代用するよう軽量素材が採用されるようになってきている。そのうち、高密度ポリエチレン（HDPE）を主とする樹脂は比重が0.95程度と小さく、既に燃料タンク素材として多用されている。一方、2020年に施行されるEURO5では燃料ガス透過規制が厳格化される見通しであり、厳しい燃料透過規制を樹脂タンクで満足するにはエチレンビニルアルコール共重合樹脂（EVOH）やポリアミド等

をバリア層として含み多層に積層しなければならず[24]、厚手化は避けられない。部分的には6～7 mm程度の厚みが必要になると考えられ、その場合、同一容積の燃料タンクで0.7 mm厚のチタン製タンクの方が40%程軽くなると試算される。

樹脂以外の軽量素材として、比重2.65程度の5000系を中心とするアルミニウム合金がある。アルミニウム合金は軽比重である反面、延性が低い上にランクフォード値（r値）が小さく、プレス加工による成形はあまり得意ではない。さらに、熱伝導度が高いため溶接時に突合せ部に溶接入熱が集中し難く、鉄用の溶接設備では溶け落ちしやすい。また、スポット溶接でも高い電極加圧力を付与する必要がある。これらの課題より、通常の設備でアルミニウム合金製燃料タンクを製造しようとすると厚手化は避けられないと考えられるが、特殊な溶接法を開発し、比較的薄手のアルミニウム合金製タンクを製造している例もある[25]。

一方、チタンは優れた深絞り成形性を有することが知られている。図3に、各種金属のr値と限界絞り比の関係を示す。限界絞り比はr値の増加に伴い単調に上昇することから、アルミニウム合金よりもr値が高いチタンでは限界絞り比が高くなる。その特性を活かし、チタン製マグカップ等は深絞り加工により製造されている。また、一般にチタンは加工硬化係数（n値）が小さく、張り出し成形性はあまり高くないとされるが、今回、燃料タンクに適用された純チタンJIS 1種材（TP270C）では、チタンα相を固溶強化するOの添加量を低減させ低強度・高延性化が図られており、プレス加工用低炭素鋼同等の張り出し成形性を有する。燃料タンク向け鋼板と同等強度であることもあり、量産二輪車の燃料タンク用素材としては、プレス成形性の良好なTP270Cが最適である。

チタンを溶接する場合、チタンは熱伝導度が低いことから、溶接入熱が突合せ部に集中しやすく溶け落ちは起り難い。そのため、薄手材の使用が可能である。ただし、チタンはOの固溶限が高く酸化が進むとOが過剰に固溶して脆くなってしまうため、アーク溶接の際は、アルゴンなどのシールドガスを使用したTIG溶接が最適である[26]。一方、溶接が短時間で行われればOは過剰には固溶し難いので、二輪車燃料タンクで通常行われているシーム溶接やスポット溶接は可能である。図4にスポット溶接時の溶接電流とナゲット径の関係を示すが、電極加圧力など、鉄のスポット溶接と同様の条件にて、電流値のみ調整すれば溶接可能である。

こうして、t0.7mmのTP270Cを使用した場合、アルミニウム合金がt1.2mm以上であれば、燃料タンクの重量は同等かチタン製の方が軽量となる。また、チタンでは防食のための塗装は不要であることと、現行の鉄製燃料タンクの製造ラインを併用すると共に、リサイクルスクラップを活用することにより、製造コストを抑えることが可能である。ただし、鉄と同じ製造ラインでプレス成形性や溶接性を確保するには、少々のチューニングが必要である。

3.2　燃料タンクへのチタン適用の課題と対策

チタン薄板をプレス成形して燃料タンクを加工する場合、鉄鋼材料との大きな違いは、①板面内異方性が強いこと、②熱伝導度が小さく金型とかじりやすいこと、③スプリングバックが大きいことである。このうち、①、②については、素材を調製することで対策可能である。

室温で安定なチタンα相の結晶構造は稠密六方晶（HCP）であること、すべり変形の変形方向は底面内に含まれる[27]ことから、強い集合組織を呈する場合、底面（または六方晶のc軸）が配向する方向により、板面内異方性の強さが決る。ここで、TP270Cのような純チタンを一方向熱・冷延して焼鈍すると、Split-TDタイプのBasal-texture（B-texture）と呼ばれる集合組織を呈する（主に $(02\bar{2}5)[2\bar{1}\bar{1}0]$[28]）。チタンα相のc軸が、板面法線方向から板幅方向に30～35°傾いた向きに強く集積した集合組織である。純チタンα相では、室

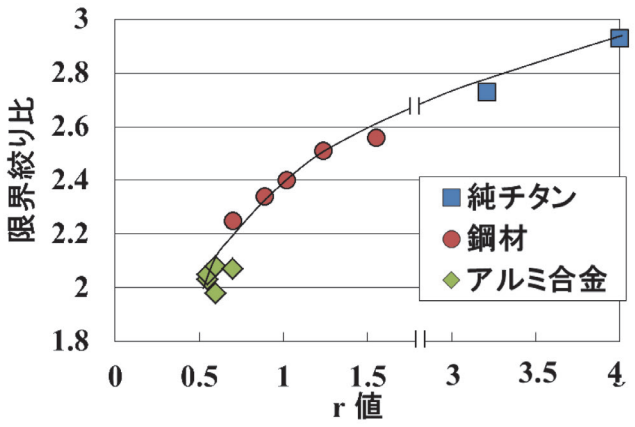

図3　各種金属のr値と限界絞り値の関係

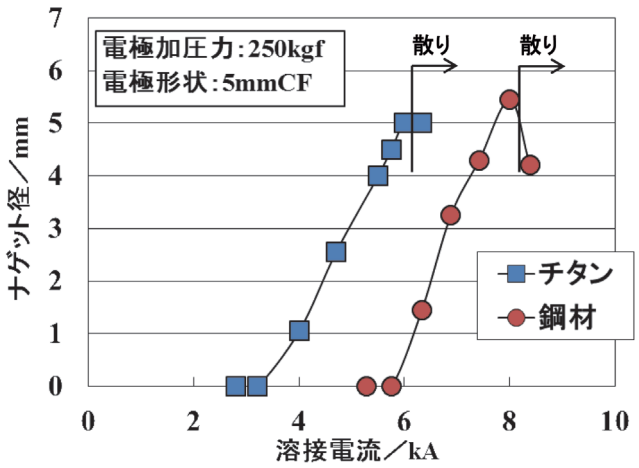

図4　鉄およびチタンのスポット溶接性

温で双晶変形も活発でありc軸に近い向きに変形方向を有する。そのため、Transverse-texture（T-texture）と呼ばれ、α相の底面が板幅方向に強く配向した集合組織（$(\bar{1}2\bar{1}0)[10\bar{1}0]$）を呈すると共に、Oを添加して強化されており双晶変形が活動し難いα＋β合金一方向熱延材[29]に比べると、板面内異方性は弱い。それでも、圧延方向と板幅方向から見て集合組織は対称的ではないため、純チタンでも板面内異方性は生じる[30]。一方、純チタンで焼鈍温度を低くすると、$(02\bar{2}5)[2\bar{1}\bar{1}0]$の集積度は低下しランダム化が進む[28]。それに伴い、低温焼鈍によりr値の板面内異方性は低下し、プレス成形性の異方性は弱められると考えられる。

また、低温焼鈍を行うことにより結晶粒が細かくなると、プレス後の表面に発生するしわが目立たなくなる効果も生む。図5に示すように、結晶粒が粗い場合、表面に発生するしわは深くなるが、細粒材ではしわは殆ど発生していない。深絞り加工され、表面品質を要求される燃料タンク向けでは、

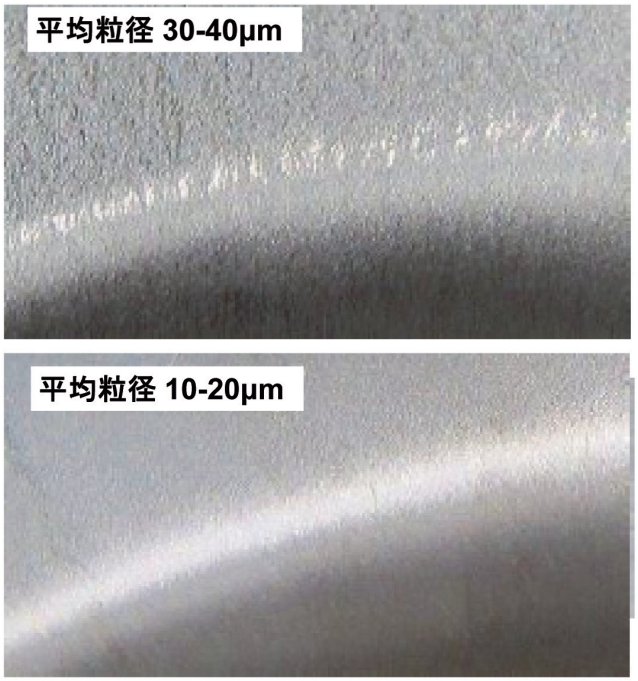

図5　プレス成形後の表面品質に及ぼす結晶粒径の影響

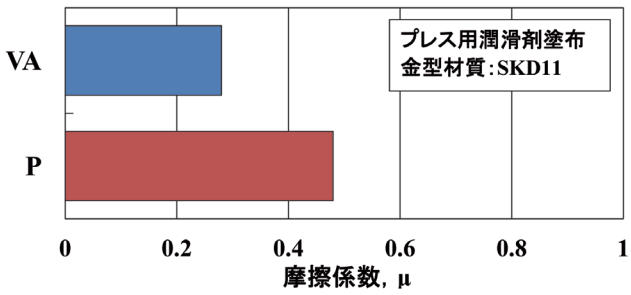

図6　真空焼鈍まま材および真空焼鈍後酸洗した場合の摩擦係数

プレス後の表面に発生するしわを抑える観点からも細粒材が好ましい。

次に、プレス時の金型との接触によるかじり発生を抑えるには、真空バッチ焼鈍で生成した薄い表面酸化皮膜が有効である。図6に、真空焼鈍ままと真空焼鈍後に酸洗した薄板で摩耗試験を行った時の摩擦係数を示すが、真空焼鈍まま材の方が摩擦係数は低くなっている[31]。本条件下では、真空焼鈍により生成した薄い酸化皮膜を有する冷延板表面に潤滑油が均一に分布し、潤滑効果が高かったためと考えられる。したがって、燃料タンクをプレス加工する際にかじり発生を抑えるには、真空焼鈍仕上げが好ましい。

以上の結果より、燃料タンク向け薄板素材として、真空バッチ焼鈍で細粒化したTP270Cが最適である。さらに、メーカーの協力により燃料タンク量産上の技術課題の解決を経て、量産二輪車（ホンダ2017年モデルCRF450R（図7）、2018年モデルCRF250RおよびCBR1000RR SP（図8））へのチタン製燃料タンク搭載が世界で初めて実現した。量産上の技術課題およびその解決法については、本特集記事の別稿に記載されるので、ここでは割愛する。

図7　2017年モデルCRF450Rに搭載されたTP270C製燃料タンク

図8　2018年モデルCBR1000RR SPに搭載されたTP270C製燃料タンク構造イメージ図

4. まとめ

比強度の高いチタン・チタン合金は、二輪車のエンジンバルブ、マフラーに長年使われてきた。また、近年では、高比強度に加え、優れた熱間加工性や切削加工性を活用して、量産スーパースポーツのコンロッドに使用されると共に、優れたプレス成形性や溶接性を活用して、量産モトクロッサーやスーパースポーツの燃料タンクに使用されるようになった。これら部品のチタン化が実現したのは、材料メーカーと二輪車・部品メーカーが一体となり、チタンの特性と製造上の課題を良く理解して部品のパフォーマンスと製造コストをうまくバランスできたためと考える。二輪車にとって燃費および走行性能を改善するため、軽量化は今後も極めて重要な課題であり、チタンは各種部品の軽量化に直接寄与する有効な金属であると信じている。今後とも、二輪車・部品メーカーと材料メーカーが強くタッグを組んで、二輪車の各種部品へのより一層のチタンの適用を推し進めて行きたい。

参考文献

1) 山出善章, 北河久和, 小池磨：軽金属, 67 (2017), 67.
2) 土居航介, 久保田剛, 村上剛：チタン, 64 (2016) 1, 40.
3) 萩原好敏, 高橋恭, 村上敦, 丸井勇治：Honda R & D Tech. Rev., 2 (1990), 227.
4) 鈴木貴晴, 久保田剛, 橘内透, 浅野峰生, 高橋一浩：軽金属, 67 (2017) 2, 50.
5) 久保田剛, 高橋一浩：ふぇらむ, 23 (2018) 11, 585.
6) 藤井秀樹, 高橋一浩：新日鉄技報, 375 (2001), 99.
7) 藤井秀樹, 前田尚志：新日鉄住金技報, 396 (2013), 16.
8) 丸井勇治, 高橋恭：Honda R & D Technical Review, 14 (2002) 1, 149.
9) 高橋一浩, 森健一, 國枝知徳, 藤井秀樹：日本金属学会講演概要, (2008), 124.
10) 富永忠良, 鈴木多喜夫, 竹内仁司, 藤井秀樹：自動車技術会論文集, 35 (2004) 1, 135.
11) 山下義人, 高山勇, 藤井秀樹, 山崎達夫：新日鉄技報, 375 (2001), 11.
12) 藤井秀樹：塑性と加工, 56 (2015) 654, 530.
13) 笠鳥晋司, 丸井勇治, 小野公輔, 大山英人：自動車技術会予稿集, (2017), 466.
14) T. Yashiki：Ti-2007 Sci. & Tech., (2007), 1387.
15) 多田宏一郎, 逸見義男：R & D 神戸製鋼技報, 60 (2010) 2, 42.
16) Y. Kosaka, S. P. Fox and K. Faller：Ti-2007 Sci. Tech., (2007), 1403.
17) L. Wager and O. Schauerte：Ti-2007 Sci. Tech., (2007), 1371.
18) 藤井秀樹, 高橋一浩, 森健一, 川上哲, 國枝知徳, 大塚広明：まてりあ, 48 (2009) 11, 547.
19) H. Otsuka, H. Fujii, K. Takahashi and M. Ishii：Ti-2007 Sci. Tech., (2007), 1391.
20) 藤井秀樹：自動車技術, 59 (2005) 11, 36.
21) 森健一, 髙橋一浩, 藤井秀樹, 大塚広明：CAMP-ISIJ, 27 (2014), 529, CD-ROM.
22) 平野浩平, 千原裕基：自動車技術会予稿集, (2018), 1.
23) K. Hirano and Y. Chihara：JSAE20179049, SAE 2017-32-0049, (2017)
24) 福富洋志：自動車軽量化材料ー開発から応用までー, シーエムシー出版, (2006), 197.
25) 安永稔之, 平野啓典, 矢野真介, 都丸雄吾, 佐川勇輝, 渡邊隆志, 藤原英樹：Yamaha Motor Tech. Rev., (2015), 35.
26) 上瀧洋明：チタンの溶接技術, 日刊工業新聞社, (2000), 35.
27) 草道英武：金属チタンとその応用, 日刊工業社, (1992), 41.
28) H. Inoue and N. Inakazu：ICOTOM 8, ed. by J.S.Kallend and G.Gottstein, TMS, (1988), 997.
29) 川上哲, 高橋一浩, 國枝知徳, 藤井秀樹：CAMP-ISIJ, 21 (2008), 1627, CD-ROM.
30) 石山成志：チタン, 54 (2006) 1, 42.
31) 高橋一浩, 林照彦, 高山勇, 爲成純一, 弘正規, 國岡信哉：CAMP-ISIJ, 16 (2003), 1198.

(2018年8月28日受付)