

自動車部品へのチタン適用による軽量化と将来

Applications of Titanium and Its Alloys for Weight Reduction of Automobiles

岳 辺 秀 徳*
Hidenori TAKEBE

高 橋 一 浩
Kazuhiro TAKAHASHI

抄 録

近年では排気ガス規制などによって車体の軽量化はより一層重要な課題となっている。そのため、高強度鋼、チタン、アルミニウム、マグネシウム、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) などを用いたマルチマテリアル化が進んでいる。自動車部品の軽量化について、チタンは古くから自動車部品の軽量化に用いられてきた材料の1つであり、その実例と今後の課題、また、将来展望について述べた。

Abstract

Recently, weight reduction of automobile is an important problem because of various regulations for automobiles. Therefore, multi material automobiles applied, such as high strength steel, titanium, aluminum, magnesium and carbon fiber reinforced plastic (CFRP) have been produced. In weight reduction of automobiles, titanium is a material used for a long time. This paper described applications, retained tasks and future of titanium for weight reduction of automobiles.

1. はじめに

自動車では安全装置の搭載などによる車体重量が増加する一方で排出ガス規制の厳格化が求められており、車体軽量化は重要な課題である。自動車の軽量化には素材の比強度を向上させることが重要であるため、鋼では高強度鋼の開発が進められ¹⁾、チタン、アルミニウム、マグネシウムなどの軽量金属や炭素繊維強化プラスチック (CFRP) などによるマルチマテリアル化も行われている²⁾。チタンによる自動車部品の軽量化は1980年代からレース車を中心に行われており、コネクティングロッド、エンジンバルブ、サスペンションスプリングなどへチタンが適用されてきた。しかし、チタンは高性能である反面、高コストであるため、現在でもレース車や高級車での適用に限られている。

日本製鉄(株)では素材の低コスト化のため、従来から汎用チタン合金に用いられてきたVやMoなどの高価合金元素を安価汎用元素で代替したSuper-TiX[®]シリーズを開発しており³⁾、これらが自動車部品へ適用されてきた。また、さらなる低コスト化のために原料となるスポンジチタンの革新的精錬プロセスの開発が進められている⁴⁾。一方、部品製造では素材よりも加工のコストの方が大きな割合を占めているため、それを削減する取り組みも必要である。例

えば、被削性を改善した材料開発⁵⁾やチタン特有の異方性を考慮したプレス成形手法である。これらの取り組みの結果、これまでにチタン化が進められた自動車部品や残された課題と今後の展望について紹介する。なお、ここで取り上げていない部品については過去の報告、解説などをご参照いただきたい⁶⁻⁸⁾。

2. チタン化された自動車部品

2.1 エンジンバルブ

図1に各種チタン合金の引張強度と温度の関係を示す。駆動系部品において軽量化することはレスポンス性向上、周辺部品への負荷低減という効果があり、単純な部品重量変化以上の効果が得られる。300~400℃程度で用いられる吸気エンジンバルブでは、Ti-6Al-4Vが一般的に用いられるが、より高強度である日本製鉄開発材 Super-TiX[®] 523AFM (Ti-5Al-2Fe-3Mo)も適用されている。一方、チタンは500℃を超えると急激に強度低下することから、700℃程度の環境で使用される排気エンジンバルブでは使用できる材質は限定的とされ、500℃を超えても耐熱鋼 SUH35 相当の高い高温強度を有する Ti-1100 (Ti-6Al-2.75Sn-4Zr-0.4Mo-0.45Si) や Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si (以降 Ti-6242S) が採用されている。また、排気エンジンバルブでは疲労強

* 鉄鋼研究所 チタン・ステンレス研究部 主任研究員 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

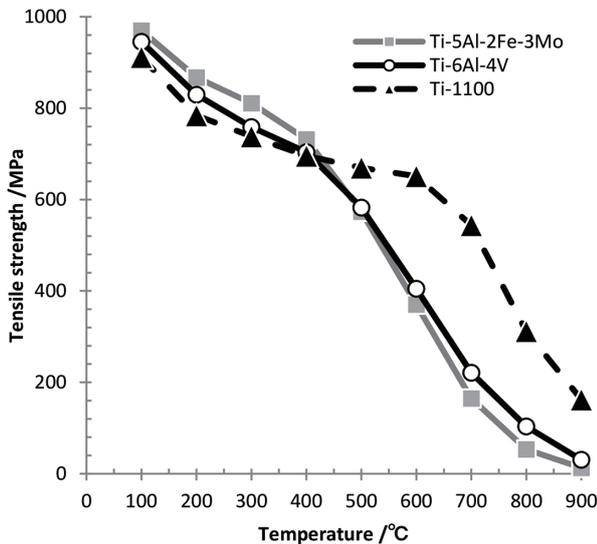


図1 各種チタン合金の引張強度と温度の関係
 試験素材は $\alpha + \beta$ 域で減面率95%以上の熱間圧延した丸棒とし、Ti-5Al-2Fe-3Mo、Ti-6Al-4Vは750°C、1h、空冷の熱処理、Ti-6Al-2.75Sn-4Zr-0.4Mo-0.45Si (Ti-1100)は1100°C、20min、空冷の β 溶体化を行った後に750°C、1h、空冷の熱処理を行った。
 Tensile strength of Ti-5Al-2Fe-3Mo, Ti-6Al-4V and Ti-1100 as a function of temperature
 Materials were round bars hot rolled of area reduction of 95% or more in $\alpha + \beta$ region. Ti-5Al-2Fe-3Mo, Ti-6Al-4V were treated at 750°C for 1h followed by air cooling. Ti-1100 was solution treated at 1100°C for 20min and 750°C for 1h followed by air cooling.

度もさることながらクリープ強度が重要であるため、耐クリープ性に優れた針状組織で用いられることが多い。

ほかにも耐熱チタン合金は、Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-2.8Mo-0.7Nb-0.35Si-0.06Cや、近年開発されたTi-7Al-2Mo-0.2Si-0.15C-0.2Nbなどがあるが、Ti-6242Sと同等レベルである⁹⁾。また、エンジンバルブでは摺動部が存在するが、チタンは耐摩耗性に劣るためCrNや大気酸化などで耐摩耗性を向上させている。しかし、CrNは高価であり、安価な大気酸化法では酸化中のクリープ変形や酸化硬化層による疲労特性の劣化が生じる。そのため、耐摩耗性を酸化処理で行う場合には適切な酸化条件にすることで疲労特性の劣化を最小限に抑制している¹⁰⁾。今後はより厳しい環境での適用に向けて、チタン合金の高温特性向上だけでなく、耐摩耗性と疲労強度を両立させる低コスト表面処理技術が必要である。

2.2 コネクティングロッド

コネクティングロッドでは軽量化によってレスポンス性向上やエンジンの高回転化が可能となる。特に、二輪自動車ではエンジンの回転数が高いために、高い比疲労強度(疲労強度/質量)が求められる¹¹⁾。一方、チタンは熱間加工や切削、研磨など加工コストも大きくなるため、特性だけでなく素材や製造コストの低減が必要である。例えば、日



写真1 Ti-5Al-1Fe製コネクティングロッド
Ti-5Al-1Fe connecting rod

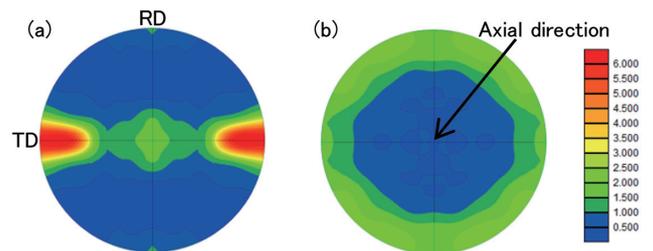


図2 Ti-5Al-1Feの(a)熱間圧延板と(b)丸棒の(0001)極点図
 (0001) pole figures of Ti-5Al-1Fe (a) Hot-rolled to sheet and (b) Hot-rolled to round bar

本製鉄では安価汎用合金元素を用いたSuper-TIX®51AF (Ti-5Al-1Fe)は、熱間変形抵抗がSCM420と比較すると同等かやや高い程度であり、Ti-6Al-4Vと比較すると15~20%低減されている。さらに、ドリル切削性(所定の切削穴長さを加工可能な最大切削速度)も約15%向上している。

また、製造性にも優れ、摺動部の耐面圧を確保することが可能である銅製コネクティングロッドで採用されているFS (Fractured Splitting) 工法での製造が可能である。汎用のTi-6Al-4Vでは高靱性であるためにFS工法に必要な脆性破面を得難いが¹²⁾、Ti-5Al-1FeではTi-6Al-4Vよりも低靱性であり、脆性破面が得られやすくなっている。そのため、ヤマハ発動機(株)ではTi-5Al-1Feを用いてFS工法によるコネクティングロッドを製造し、2015年にYZF-R1に搭載された(写真1)。これによって、銅製と比べて約20%の軽量化を達成している。

しかし一方で、チタンのヤング率は鋼の半分程度であるため鋼製と同等の剛性確保のために肉厚とならざるを得ず、チタン化による軽量化効果を十分には得られていない。この解決策としては異方性の強いチタンの結晶方位制御が効果的である。主相である α 相(hcp構造)の[0001]を配向させることで高ヤング率化が可能である¹³⁾。実際に熱間圧延板では β 単相域に加熱して一方向熱間圧延を行うことで板幅方向に α 相の[0001]を配向させ(図2(a))、板幅方向のヤング率は140~150GPaまで高めることが可能であ

る。ただし、鋼と比べると 150 GPa でも約 70%であり、さらなる高ヤング率化も望まれる。また、丸棒では量産品の多くが α 相の [0001] を軸方向に配向できていない(図 2(b)) ため、丸棒軸方向のヤング率は 100~110 GPa 程度であり、結晶方位制御による高ヤング率化は実現されていない。今後は、コスト面では熱間加工性や切削・研磨性の向上、特性面では高ヤング率化が材料に求められる課題になると考えられる。

2.3 排気系部品

排気系部品ではチタンは主に二輪自動車のマフラーに意匠性と軽量化の点で採用されてきた。しかし、環境対策として排ガス温度が上昇しており、これまで用いられてきた JIS2 種工業用純チタンでは耐熱性が不十分となってきた。そのため、種々の耐熱チタン合金が開発されている。排気系部品は薄板を成形加工して製造されるため、室温での加工性と高温特性の両立が要求される。一般的にチタン合金では高温強度の向上に Al を利用する場合、チタンの加工性に大きく寄与する双晶変形を抑制するため、高温強度は向上するが加工性も低下してしまう。一方、Cu は高温での固溶強化能が大きく、双晶変形の抑制の程度が小さいため室温での加工性を維持することが可能であった。

そこで、日本製鉄では室温での加工性を維持しながら高温強度を向上させる Cu を活用した Super-TIX[®]10CU (Ti-1Cu), Super-TIX[®]10CUNB (Ti-1Cu-0.5Nb), Super-TIX[®]10CSSN (Ti-1Cu-1Sn-0.35Si-0.2Nb) を開発してきた^{14,15)}。加えて、排気系材料では路面凍結防止のために用いられる融雪剤による耐高温塩害性の評価が必要となる場合がある。日本製鉄開発材に用いている Cu は高温塩害を促進してしまい、Si, Nb は抑制することが示唆されている¹⁶⁾。また、高温塩害は、1) NaCl 蒸気とチタン酸化膜の反応によって Cl ガスを生成し、2) Cl ガスと母材元素との反応によって揮発性塩化物を形成、3) 塩化物が酸化されることで Cl ガスを発生する現象の繰り返しによって進むと報告されている¹⁷⁾。したがって、大気酸化を抑制する添加元素である Nb, Si は酸素の供給を抑制することで塩化物の酸化を抑制できると考えられる。

図 3 に高温塩害試験後の断面組織を示す。CP-Ti (Commercial Pure Titanium) では局所的な酸化が発生しており、Super-TIX[®]10CUNB では CP-Ti よりも局所的な酸化は抑制され、Super-TIX[®]10CSSN ではさらに抑制された。この結果から高温塩害を促進する Cu を含有していても Nb, Si の複合添加によって高温塩害の抑制が可能である。今後、排気系材料へのチタン適用については高温特性の向上は重要であるが、直近の四輪自動車での採用実績が限定生産されたトヨタ自動車(株)LEXUS LFA、日産自動車(株)GT-R といった高級車に限定されていることからわかるように、低コスト化が大きな課題である。

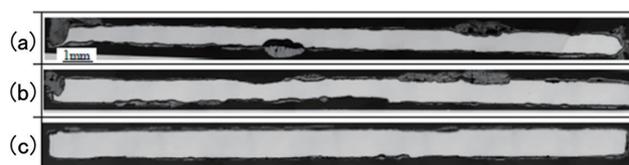


図 3 700°Cでの高温塩害試験(5 サイクル)後の断面写真
試料は(a)工業用純チタン(CP-Ti)、(b)Super-TIX[®]10CUNB、
(c)Super-TIX[®]10CSSN であり、表面をエメリー紙 #400 仕上げし、1) 5%NaCl 水溶液に 1h 浸漬、2) 大気中で 700°C、
23h 保持を 1 サイクルとして行った。

Cross section micrographs of specimens after the 5-cycle high temperature salt damage tests at 700°C

Specimens are (a) Commercial pure titanium (CP-Ti), (b) Super-TIX[™]10CUNB and (c) Super-TIX[™]10CSSN. Specimen was grinded by emery paper #400. A test cycle was followed; 1) Dipped for 1h in 5%NaCl aqueous solution, and 2) Oxidation at 700°C for 23h in air.



写真 2 チタン製燃料タンク
Titanium fuel tank

2.4 燃料タンク

二輪自動車の燃料タンクは比較的高い位置にあることから軽量化による低重心化によって操作性が向上すると期待される。これまでは表面処理鋼板が用いられており、現在では樹脂も多く用いられている。しかし、樹脂は燃料透過規制によって厚手化が避けられず、重量はあまり減少していない。一方、チタンを用いることで約 40%の軽量化が可能である(写真 2)。チタン化と同様に燃料タンクのアルミニウム化も検討されるが、従来の量産設備を活用する場合には高い熱伝導率のために入熱集中により溶け落ちやすい。そのため、アルミニウムは厚手化が必要であり、チタンの方が軽量化できる場合も多い。

一方で、チタンを燃料タンクに採用するには、十分なプレス成形性を有することが重要であり、チタン特有の異方性や金型との焼き付き、低ヤング率起因によるスプリングバックを考慮する必要がある。特に、金型との焼き付きはチタンのプレス成形の最大の課題である。焼き付き防止のために金型とチタンの接触を回避すべくシート潤滑剤を用いる場合もあるが、量産性を考えた場合には従来通りの流体潤滑が望ましい。チタン薄板では焼鈍+酸洗もしくは真空雰囲気焼鈍の 2 種類の焼鈍を行っているが、真空雰囲気

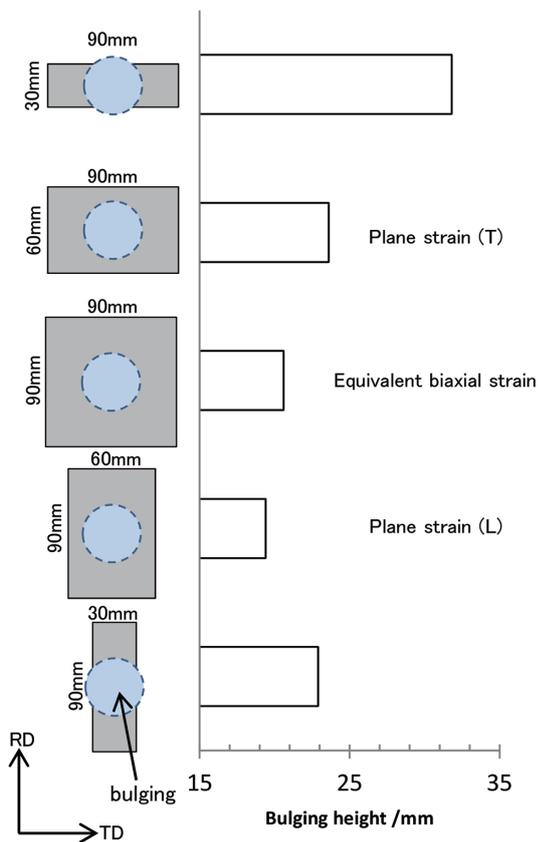


図4 JIS 1 種工業用純チタン薄板における球頭張出高さ張出試験の潤滑剤は厚さ 50 μ m のテフロンシートを用いて行った。
Bulging height of JIS class 1 commercially pure titanium sheet in spherical bulging test
50 μ m-thick teflon sheet was used for lubricant of bulging test.

での焼鈍を行うことにより表面には薄い酸化皮膜が形成されることで金型との焼き付きが軽減され、さらに部分的に金型材質を変更することで流体潤滑でもプレス成形が可能となった¹⁸⁾。また、プレス成形時の板取り方向は重要な要素である。

図4にJIS1種工業用純チタン薄板の球頭張出高さと板取り方向の関係を示す。一般的にL方向(圧延方向に平行)の単軸引張試験の伸びはT方向(板幅方向)よりも大きい、球頭張出試験ではT方向を長手に採取する方が加工性に優れる。また、L方向単軸引張は結晶粒径依存性が大きい、等二軸引張やT方向単軸引張では結晶粒径依存性が非常に小さい¹⁹⁾。このような特異な挙動は集合組織や双晶変形に関連する影響であるが、いまだに十分に理解されているとは言えない。そのため、シミュレーションにも統一的に反映できておらず、試行錯誤しているのが現状である。

3. 自動車部品へのチタン適用の将来展望

航空機や高級二輪自動車(オートバイ)ではマルチマテリアル化が進んでいる。航空機ではボーイング社 B787 や

エアバス社 A350 で、おおよその質量比にて複合材 50%、アルミニウム 20%、チタン 15%、鋼 10%であり、複合材の適用比率が一代前の機体に対して3~5倍に増加した²⁰⁾。この複合材の比率増加に伴い、異種材料接触腐食や熱膨張差の観点からチタンの比率も増加した。二輪自動車では、1000cc スーパースポーツオートバイで質量比にて鋼 40%、アルミニウム 35%、樹脂 10%、他金属(チタン、マグネシウム) 8%、125cc コミュータでもアルミニウムと他金属(チタン、マグネシウム)が増加しており、合わせると鋼の比率を超える^{21, 22)}。航空機は燃費、高級二輪自動車は運動性能(エンジン性能、操縦性等)を重視して軽量化を追求してきた結果と考えられる。

チタンの密度は鋼の6割弱であることから比強度で比較すると、強度 440MPa 級で伸びが 30% の汎用工業用純チタン薄板は鋼板の 780MPa と、強度 800MPa 級で伸び 20% の高強度チタン薄板は鋼板の 1.4GPa と、同等である。さらに、航空機等で使用されている Ti-6Al-4V やゴルフクラブヘッドやコネクティングロッドに使用されている Ti-5Al-1Fe は強度 900~1000MPa であることから、鋼の 1.6~1.7GPa 級に相当しており、高いポテンシャルを持つ。

また、構造材料として比剛性の観点では、曲げ剛性の場合、密度が支配的になることから、金属材料のなかでチタンの比強度・比剛性バランスは決して悪くない。使用環境では 100~200 $^{\circ}$ C 以上ではアルミニウム合金やマグネシウム合金の強度は大幅に低下することから、チタン合金がさらに優位と言える。このような特徴から、これまで紹介した部品への適用が進んでいる。また、自動車では電気自動車(EV)化が進められており、それに伴う変化にも対応する必要がある。加えて、今後の自動車部品へのチタン適用は低コスト化が最大の課題であり、これを克服できるかがかぎとなる。

3.1 意匠性

燃費、安全性能、エンジン性能とは異なる自動車の付加価値を生み出す軸として、デザインや加飾に代表される意匠性が挙げられる。四輪自動車では外装、マフラー、内装を中心に、二輪自動車では燃料タンク、エンジン、サスペンション、ブレーキといった機能部品までもが意匠性を含むデザインの対象となる。チタンでは塗装とは異なり、大気酸化や陽極酸化による酸化皮膜の厚さ制御によって様々な干渉色を発現することができる。

また、干渉色と素地の組み合わせによって、質感と色調を調整しチタン特有の意匠性を付与することもできる。加えて、干渉色では部材の曲線や光の当たり方によって自然なグラデーションを表現できる特徴もある。自動車部品では軽量化と相まって、二輪自動車を中心にマフラーやボルトに適用されている。日本製鉄ではこれらに加えて建築物の屋根、壁やマグカップなど人の目にとまり外観が重要視

される用途において、意匠性チタンブランド TranTixxii を展開している。また、自動車の様々な部品や内外装に適用した場合を想定し、光の当たり方や酸化皮膜厚さによって異なる色調をコンピュータグラフィックス (CG) によって再現が可能である。

3.2 光触媒効果

一般的な光触媒はバインダーによって光触媒効果を有する粒子を保持しているが、光触媒効果を強力にするとバインダーが分解されるため、十分に効果を発揮できていない。しかし、酸化皮膜を形成する陽極酸化を進展させて光触媒効果を有する皮膜をチタン表面に形成させることで、効果を最大限に発揮するチタン材を開発した^{23,24)}。これは紫外線照射にて、光触媒工業会の判定基準を上回る光触媒活性 (抗かび性, 抗菌性, 窒素酸化物除去性能, ホルムアルデヒド除去性能) を発揮し、またインフルエンザウィルスを死滅させる効果も確認されている。加えて、KI 法 (I イオンの酸化による溶液色の変化で活性を評価) およびメチレンブルー分解性能試験により可視光応答性も示す。

3.3 非磁性

TRIP 鋼や準安定オーステナイト系ステンレス鋼は、冷間加工によってマルテンサイト変態を生じるため、冷間加工量の増加に伴い比透磁率が増加し磁性を持つようになる。しかし、チタンは冷間加工をいくら加えても比透磁率が 1.00 から変化せず非磁性である。耐食性や比強度と非磁性の組み合わせが要求される部品への適用が期待される。

3.4 自動車の EV 化

EV 化の潮流のなかで部品点数の減少、カーシェアに代表されるモビリティとしての自動車の利用方法の変化、成熟社会における部品や車のライフサイクルコストなどの観点から、将来的に価値の変化や多様化が起こる可能性がある。例えば、リサイクルではなく、部品の長寿命化や共通化によるリユースを考えた場合、耐食性の高いチタンは通常の使用環境では防食のための塗装が不要であることから、リユース部品に好適だと考えられる。

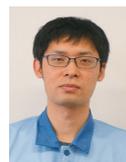
4. おわりに

チタンによる自動車部品の軽量化事例とともに今後の課題について紹介した。近年、新たに量産車に採用されたコネクティングロッドや燃料タンクは、日本製鉄の安価元素活用および低コスト加工を意識した合金開発だけでなく、部品メーカー、自動車メーカーとの共同推進によって実現することができた事例である。チタンは潜在的に優れた特性を有しているが、十分に発揮できていない用途も多く、より一層の共同推進が必要である。また、意匠性を用いた魅力ある製品開発や注目されていない特性の活用は EV 化

などの変化の中で重要な役割を果たす可能性もある。素材メーカーとしてチタンの情報発信を強化するとともに、今後も部品メーカー、自動車メーカーとの共同推進によって自動車分野の発展に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 高橋学: 工業材料. 65 (12), 21 (2017)
- 2) 千葉晃司: 工業材料. 65 (12), 16 (2017)
- 3) 藤井秀樹 ほか: 新日鉄技報. (375), 99 (2001)
- 4) 岳辺秀徳 ほか: 工業材料. 65 (12), 31 (2017)
- 5) 中村貞行: 電気製鋼. 60 (3), 272 (1989)
- 6) Wager, L. et al.: Ti-2007 Science and Technology. 2007, p. 1371
- 7) 山下義人 ほか: 新日鉄技報. (375), 11 (2001)
- 8) 藤井秀樹: 塑性と加工. 56 (654), 530 (2015)
- 9) 笠島晋司 ほか: 自動車技術会 2017 年春季大会学術講演会講演予稿集. 466 (2017)
- 10) 藤井秀樹 ほか: 新日鉄技報. (378), 62 (2003)
- 11) 久保田剛 ほか: ふえらむ. 23 (11), 11 (2018)
- 12) 土居航介 ほか: チタン. 64 (1), 40 (2016)
- 13) Zarkades, A. et al.: The Science, Technology and Application of Titanium. Oxford, Pergamon Press, 1970, p. 933
- 14) 大塚広明: チタン. 60 (2), 26 (2012)
- 15) 森健一 ほか: CAMP-ISIJ. 27, 529 (2014)
- 16) 屋敷貴司: チタン. 59 (1), 7 (2011)
- 17) 原基 ほか: 日本金属学会誌. 62 (8), 691 (1998)
- 18) 川上哲: ふえらむ. 23 (11), 6 (2018)
- 19) 鋸屋正喜 ほか: 鉄と鋼. 72 (6), 649 (1986)
- 20) 中沢隆吉 ほか: Japan Forging Association "JFA". 45 (1), 17 (2014)
- 21) 鈴木貴晴: 軽金属溶接. 53, 77 (2015)
- 22) 鈴木貴晴 ほか: 軽金属. 67 (2), 50 (2017)
- 23) 金子道郎 ほか: チタン. 63 (2), 44 (2015)
- 24) Kaneko, M. et al.: Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology. 4, 369 (2014)



岳辺秀徳 Hidenori TAKEBE
鉄鋼研究所 チタン・ステンレス研究部
主任研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



高橋一浩 Kazuhiro TAKAHASHI
鉄鋼研究所 チタン・ステンレス研究部
上席主幹研究員 工学博士