

技術解説

非鉄構造材料

Non-Ferrous Structural Materials (Titanium, Aluminum)

藤 井 秀 樹*
Hideki FUJII佐 賀 誠
Makoto SAGA

1. はじめに

新日本製鐵は、鉄鋼分野で培った技術を背景に、さらにこれを独自に進展させることで、構造用非鉄金属材料技術の発展にも貢献してきた。本章ではその代表素材であるチタンおよびアルミニウムについて紹介する。

2. チタンおよびアルミニウム分野における技術開発の歩み

当社チタン事業は1983年に、強力な鉄鋼製造設備を活用する形で薄板、厚板、棒線、管の製造販売を開始して以来、優れた耐食性、軽量、高強度等のチタン特有の特性を活用しつつ市場を拡大し、現在は工業用純チタン薄板製品を中心に、トップクラスのチタン展伸材製造メーカーに成長した。当然のことながら、チタンの精錬・溶解方法は鉄鋼とは大きく異なることから、当社は、インゴットないしスラブを購入し、熱間圧延以降の工程を、主として鉄鋼設備を用いて、一部チタン製造専用設備を使用することで最終製品を製造している。

しかし、最終製品の材質特性には、添加元素あるいは不純物元素成分をはじめとしたインゴット品質が多大な影響を及ぼしており、当社は、最大のインゴット購入先である東邦チタニウム(株)と金属チタン原料であるスポンジチタンやインゴット製造技術(溶解工程)、合金を含む材質特性向上に係る研究開発も鋭意実施し、優れた品質のチタン製品を世に送り出してきた。また、その優れた品質と新たな独自の視点から実施した研究開発成果を武器に、合金を含む様々な独自製品を開発し、既存市場である化学、電力分野の一層の拡大はもとより、土木、建築、自動車、家電等のいわゆる民生品分野での新規市場を発掘することで、チタン産業界およびチタンを使用する様々な産業界の発展に貢献してきた。

一方、当社アルミニウム事業は、1964年に当時の八幡製鉄(株)、昭和電工(株)、米国のカイザーアルミニウム(株)が共同で設立したスカイアルミニウム(株)まで遡

る。その後1990年代初頭、米国で議論された厳しい自動車燃費規制法案への対応を図るために日本車も車体の軽量化が必須課題となり、鋼材の高強度化に加えて、軽量素材であるアルミニウム合金の適用が進展すると予見し、当社はスカイアルミニウム(株)との提携を強化、自動車アルミニウム共同事業を立ち上げた。さらに2003年には、スカイアルミニウム(株)と古河電気工業(株)の軽金属部門が統合し、国内最大のアルミニウム圧延会社古河スカイ(株)が誕生し、現在、当社が自動車アルミニウム共同事業の営業窓口と研究開発を、古河スカイ(株)が製造と研究開発を担当する共同事業体制を確立している。

自動車へのアルミニウム材料適用は、ボディや足廻り用板材ならびに押出材などで特に進んでおり、さらに拡大する傾向にある。自動車へのアルミニウム適用における材料技術の大きなポイントは鋼板と比較して劣る“加工性”で、当社は古河スカイ(株)と共同でボディ用として強度と優れた加工性を併せ持つ5000系(Al-Mg系)合金、塗装時の焼き付け処理により高強度化し(塗装焼付け硬化性)、かつ高い加工性を兼ね備えた6000系(Al-Mg-Si系)合金板材の開発を進めてきた¹⁾。加えて各種押出材、バンパー補強部品、足廻り部材の開発も手掛けている。

3. 工業用純チタン製品製造技術開発および新規市場開拓

工業用純チタンは展延性に富み、比較的加工しやすいことから、鉄鋼ミルを活用した圧延製品の製造に適した材料である。しかし、鋼とは根本的に異なる特性も多々有している。例えば、極めて活性な金属で圧延ロールや周辺機器と焼き付きやすい、ヤング率が低い、水素を吸収しやすく高温酸化しやすい、結晶構造(最稠密六方晶)起因の強い材質異方性を有する、非磁性である等である。また、鉄鋼に比べ著しく高価な金属であることから、製造工程における歩留まり向上は事業の成否に係る重要課題である。

これら鉄鋼材料と根本的に異なる特性、命題を十分理解したうえで鉄鋼ミルでの製造を行う必要があり、チタン専

* 鉄鋼研究所 薄板材料研究部 主幹研究員 工博 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

用の理想的なミルで製造を行った場合に比べると、必ずしも最適な製造条件ではないかもしれないが、当社の場合、名古屋製鐵所(分塊圧延)、広畑製鐵所(熱間圧延)、光製鐵所(冷間圧延、溶接管、棒線)、八幡製鐵所(厚板)にて高品質の展伸材を製造している。なお、現在は光製鐵所工程の大部分、八幡製鐵所工程は、新日鐵住金ステンレス(株)の所属であるが、新日鐵グループとして強い連携の下、チタン製品の安定製造に取り組んでいる。

このような工程で製造された純チタン製品であるが、2章で述べたように、発電所の復水器、熱交換器、化学プラントなどの拡大する既存市場へのチタン安定供給の責務を果たすと同時に、海水淡水化プラント、土木・建築分野、眼鏡フレームや携帯家電を中心とした民生品分野における新規市場開拓に当社は重要な役割を果たしてきた。

土木分野では、チタンの優れた耐食性を活用し、橋梁、海洋構造物の防食にチタンが多用されている。例えば、古くは東京湾横断道路アクアラインの橋脚部の干満・飛沫帯の防食にCuをインサート材として使用した当社独自のチタンクラッド銅板²⁾が使用され(1999年市村賞受賞)、最近では、2010年秋に運用を開始した羽田空港D滑走路の棧橋部の裏面、側面の防食に約1 000 tonのチタン薄板が使用されている。

建築分野では、独自の表面仕上げや陽極酸化法で発色させた独特の風合いや色彩のチタンが、文化財やランドマーク的な建築物の屋根や壁に使用されている。例えば、図1に示す京都光悦寺本堂などでは、旧来の日本瓦に匹敵する風合いを独特のアルミニウムナブラスト処理³⁾で実現し、旧来の文化的価値を維持しながら酸性雨等による劣化から文化財を保護する役割が評価され、2003年度グッドデザイン賞(数寄屋研究所心傳庵木下孝一棟梁、光悦寺山下智昭住職と共同受賞)、2004年度大谷美術館賞を受賞している。

また、日本の伝統建築物の屋根の多くは銅葺きで緑青の独特の色合いが文化的価値を高めているが、この緑青色もアルミナブラスト+陽極酸化によりチタン製屋根に付与することが可能となり、北野天満宮宝物殿などで適用されたほか、最近も採用例が増えている。また、最近では、浅草寺宝蔵門(図2)や本堂の屋根にもアルミナブラスト仕上



図1 チタン製屋根を葺いた光悦寺本堂



図2 チタン製屋根瓦を葺いた浅草寺宝蔵門と鬼瓦

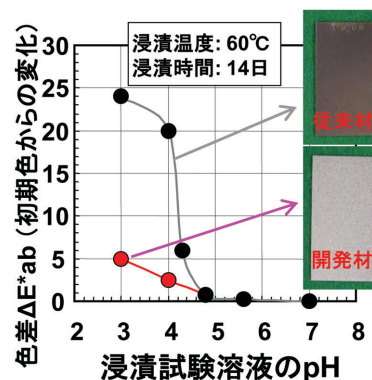


図3 耐変色処理を施したチタン(開発材)と通常材の酸性環境暴露時の色差変化

げのチタン瓦が、さらに意匠性の高い鬼瓦(図2)にもチタンが使用されており、日本瓦の風合いに加え、軽量チタンの使用により約1/5の軽量化が達成され耐震性向上も図られている。宝蔵門は2006年度大谷美術館賞を清水建設(株)、(株)カナメ、ルーフシステム(株)、(株)響コーポレーションと共同で、また本堂は、2010年度の同賞を浅草寺、清水建設(株)と共同受賞している。

このチタン製屋根の大きな課題は、長期使用中に色が変化するいわゆる変色問題であった。しかし当社の研究開発により、この変色は、チタン表面にTiCやFが付着すると、酸性雨によって表面の酸化皮膜が成長し、その結果干渉色が発生することにより生ずることが解明され^{4,5)}、表層炭素を十分に除去する製造技術の改良で、変色を防止する技術が確立している。図3は、変色対策を施した開発材と一般材を酸性環境に曝した際の色の変化を示しており、開発材の優れた耐変色性が示されている。この技術は、2004年日本金属学会技術賞⁶⁾を受賞している。

また、建築分野と同様にチタン表面の意匠性付与技術を駆使し、数多くの各種携帯用家電製品の筐体へもチタンが適用されている。その際、面内異方性の強いチタン薄板のプレス成形には、当社開発の異方性を考慮した高精度数値シミュレーション技術⁷⁾が活用されている。

4. 高機能独自チタン合金の開発および用途開拓

本来チタンが有する高耐食性に意匠性や加工技術を組み合わせることで、工業用純チタンの市場が大きく拡大して

きたのに対し、軽量、高強度を最大の武器とするチタン合金は、宇宙・航空機産業でこそ主要材料の地位を占めていたが、一般工業用途あるいは民生品への適用は、1990年代までは必ずしも進んでいるとは言い難い状況であった。その最大の理由は“コスト”であり、当社は1990年代の半ばから、素材コスト低減技術、製造コスト低減技術、ユーザー含めた利用加工技術の開発を総合的に展開することで、非航空機分野におけるチタン合金の適用拡大を推進してきた。

その研究開発成果の一つが、汎用チタン合金で多用されている高価元素（V，Moなど）を排し、あるいは低減し、安価汎用元素を中心に構成された当社独自チタン合金群“Super-TiX®シリーズ”⁸⁻¹⁰⁾である。チタン合金の総素材コストに占める合金元素コストの割合は高々10%程度であるが、これに加えて、製造技術の工夫やいくつかの高機能特性を付与することで、現在は、各種自動車部品、船舶関連部品、高速回転機械部品、スポーツ用品、特殊装身具など、様々な用途に多用されるようになっている。

図4は、V，Moのすべてあるいは一部を安価汎用 β 安定化元素のFeで置き換えた開発合金と従来合金の強度、延性を示す模式図である。図中mod.CP(modified commercially-pure titanium)は厳密には純チタンに属する材料で、Feを多めに添加することで結晶粒径の制御性を高め、二輪車のマフラーなどに使用されている。Super-TiX®800は、Ti-1%Fe-0.35%Oを基本成分とし800MPa程度の引張強度を有する合金で、チタン合金の熱間加工性を低下させる原因の一つとなっているAlを含まないことから、優れた熱間加工性を有しており、厚板、熱・冷間圧延薄板、棒線など幅広い製品が製造されている。

また、Super-TiX®51AFは、Ti-5Al-1Feを基本組成としO量で微妙な強度調整をした合金で、ELI(Extra Low Interstitials)グレードから標準グレードの最汎用チタン合金Ti-6Al-4V並みの強度を有している。この合金は、軽量、高強度に加え、Ti-6Al-4Vよりも優れた熱間加工性や高ヤング率を活用し、丸棒や熱間圧延コイル薄板製品が量産さ

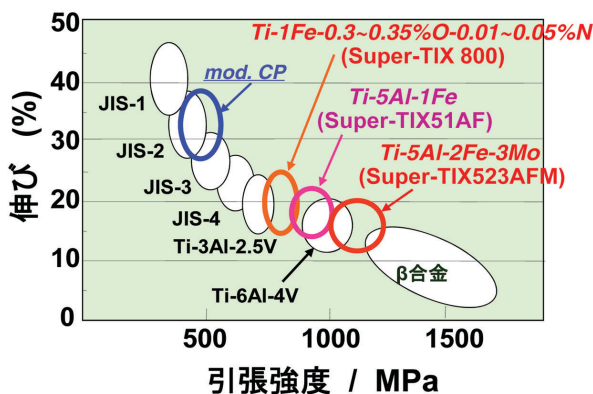


図4 安価汎用元素のFeを配した当社独自合金の強度、延性の関係(模式図)

れ、図5(a)に示すゴルフクラブなどに使用されている。さらに高強度のSuper-TiX®523AFM(Ti-5Al-2Fe-3Mo)は、大型鋳塊を製造する際に問題となるFeの凝固偏析の影響を避けるため、高価元素のMoを3%添加せざるを得なかったが、それを上回る高強度、高疲労強度を達成した合金である。この合金の線材は、二輪車を中心とした吸気エンジンバルブ(図5(b))に使用されている。

さらにこの合金は、熱処理によってさらに高強度化することも可能で、また、通常の焼鈍を施した材料が示す950MPa程度の0.2%耐力を420MPa程度まで大幅低下させることが可能で(加工や熱処理で元の強度水準に戻すことも可能)、冷間加工をしやすくしたり、通常110GPa程度のヤング率を β 型合金並みの70GPa程度にまで下げることができるなど、特異な性能を発現させることも可能である^{10,11)}。現在これらの特徴を活かした用途開拓も鋭意進められている。なお、これらの特異な現象は、 $\beta \rightarrow \alpha'' \rightarrow \alpha'$ の二段階の加工誘起マルテンサイト変態に起因した現象であることが、詳細な組織解析により明らかとなっている^{10,11)}。

これらFeを添加した高強度合金シリーズに加え、純チタン並みの優れた冷間加工性と耐熱性を兼ね備えたCu添加合金Super-TiX®10CU(Ti-1Cu)やSuper-TiX®10CUNB(Ti-1Cu-0.5Nb)が開発されており¹²⁻¹⁴⁾、図6に示すように自動車のマフラー・排気系に冷間圧延薄板が多用されてい

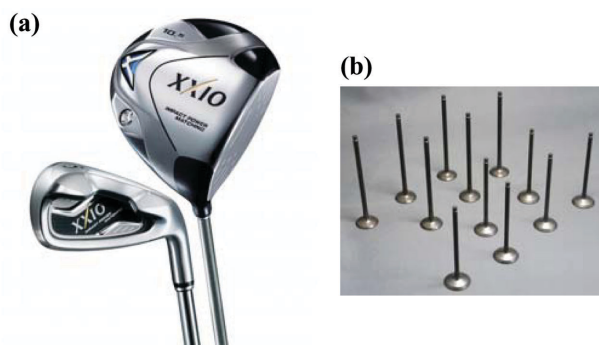


図5 (a) Super-TiX®51AF製ゴルフクラブヘッドXXIO(SRIスポーツ(株)製)、(b) Super-TiX®523AFM製二輪エンジンバルブ(愛三工業(株)製)



図6 Super-TiX®10CU(NB)製マフラーの例

る。高温強度はCuの固溶強化によるもので、室温における優れた加工性は、純チタンの優れた加工性の源泉である双晶変形がCu添加しても損なわれないという新知見に由来している。すなわち、室温では低強度・高加工性、高温では高強度という都合のよい特性を兼ね備えた合金で、この新知見ならびにその応用が評価され、本合金は、2010年度日本金属学会技術賞を受賞している¹⁴⁾。

以上のように、当社は、汎用の航空機用合金ではなく安価汎用元素を活用した合金を独自に開発し、新規用途展開を図ってきた。特に自動車部品用途への展開は、ITA（米国チタン協会）の第1回用途開発賞（Titanium Application Development Award）を2007年に受賞している。

5. 軽量化ニーズに応える自動車用アルミニウム材料の開発

常温でのプレス成形性が鋼材に比べて劣るというアルミニウム合金の課題を克服するため、当社と古河スカイ(株)は本田技研工業(株)と共同で、材料を高温に加熱して延性を高め、成形に要する時間を従来よりも短縮した高速高温ブロー成形技術を開発し(図7)、その技術に適合する高温ブロー成形用5000系板材を開発した。5000系合金の延性は通常の引張試験条件下で約30%であるのに対して、高温においては粒界すべりやsolute drag（固溶Mgによる転位の移動の動的な引きずり）効果によって優れた高温変形能を有している(図8)¹⁵⁾。この高速高温ブロー成形用



図7 高温ブロー成形の概要。融点直下の温度にて成形

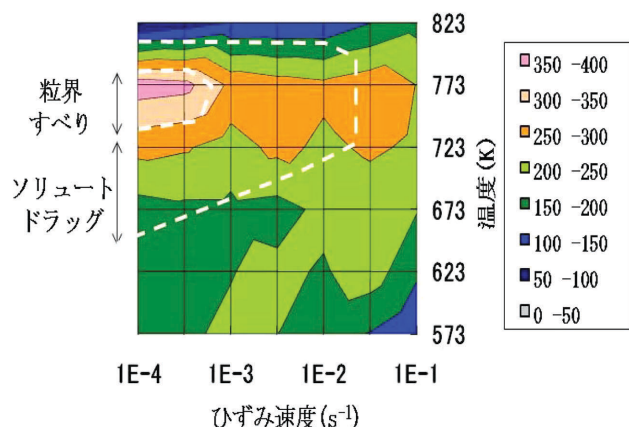


図8 5000系Al合金(5182)の高温延性に及ぼす温度と歪速度の影響¹⁵⁾

5000系材料は、古河スカイ(株)が有する高温ブロー成形用超塑性アルミニウム合金“アルノービ”の技術をベースに、上記の特性を活用して開発された。また、この開発合金は、一般的な高温ブロー成形に用いられる超塑性アルミニウム合金のような特殊な製造方法を必要としないため、高生産性で廉価であり、加えて、強度低下の原因となる高温加工中の結晶粒粗大化抑制を合金成分の最適化によって実現している¹⁶⁾。

また、アルミニウム合金製の自動車サブフレームは、従来は管を常温でハイドロフォーム成形するなどで製造していたが、成形性に限界があった。そこで、材料を高温加熱して延性を高め、空気圧で成形する“熱間バルジ成形法”を開発し、アルミニウム合金管としては初の融点直下の高温における熱間成形を実現した。また、この技術に適合する熱間バルジ成形用5000系押出材を開発した。この材料も、成形中の結晶粒の粗大化を添加元素の配合比率の最適化によって抑制し高強度を維持している¹⁶⁾。

このようなアルミニウム合金の成形限界を飛躍的に拡大した技術開発成果などにより、アルミニウム合金でも複雑形状に成形することが可能となり、2004年に本田技研工業(株)のレジェンドに適用され、従来の鋼板製と比較してトランクリッドフレームは47%、サブフレームは38%の軽量化を実現した。また、鋼板でも不可能な深い立体形状の魅力あるデザインが可能となった(図9)¹⁷⁾。

これらの技術開発によって、本田技研工業(株)、古河スカイ(株)ならびに当社は、2004年度の日経優秀製品・サービス賞の“最優秀賞”を受賞した他、2004年度日本アルミニウム協会賞“技術賞”を受賞した。

一方、塗装焼付け硬化性によって高強度が得られ、薄肉軽量化が可能な6000系合金は現在ではボディパネル用材料として主流をなしている。この6000系合金は、その複雑な析出・クラスター形成現象、結晶組織内の第二相分布や結晶粒の方位（集合組織）等を総合的に制御することによって、塗装焼付け硬化性をはじめパネル用途として要求される種々の特性を両立されている^{18,19)}。例えば、塗装焼



図9 高温ブロー成形により加工されたトランクリッドインナー。当社と古河スカイ(株)が開発した廉価合金を使用

付け硬化性に関しては熱処理時の強化相である β 相析出に大きな影響を及ぼす70℃前後を境に形成される複数のクラスターを自在に活用することによって、プレス成形時の加工硬化と塗装焼付け処理での析出強化により軟質鋼板と同等の強度を実現している。また、6000系合金が多用されるエンジンフード等の部品ではアウターパネルでインナーパネルをかしめて一体化させるためのヘム曲げ加工が必要とされるが、第二相粒子や集合組織等の曲げ性への影響^{20, 21)}を踏まえた組織制御によって良好な特性が付与されている。

さらに、6000系アルミニウム合金を自動車ボディーへ適用する際には加工後の外観品位もまた非常に重要な性能の一つである。プレス成形時に大きな加工歪が加わるとリジング模様という圧延方向に平行な縞状の表面模様が発生して外観性能上問題になる場合がある。このリジング模様は、模様に沿って特定方位の結晶粒が存在して同一の変形挙動を示すために凹凸が発生する現象と考えられており^{18, 19)}、当社と古河スカイ(株)は、ユーザーの厳しい要求レベルに応えるべく、アルミニウム合金ならびに鋼板開発で培った金属組織制御技術を駆使し、強加工してもリジング模様が発生しにくい6000系アルミニウム合金の開発を行っている(表1, 図10)。本材料は意匠性等から大きな加工が必要とされる部位においても優れた外観性能を有しており、設計自由度拡大へ貢献し得る材料として期待されている。

さらに当社と古河スカイ(株)は、アルミニウム合金適用部品の構造開発にも取り組んでいる。アルミニウム合金の自動車ボディーへの適用において最も進展しているエンジンフードの重要性能の一つに、歩行者の頭部が自動車のエ

ンジンフード等に衝突した際に受ける衝撃を低減する“歩行者頭部保護特性”がある。鋼板の利用技術開発知見を活用し、この特性に優れかつアルミニウム合金適用の利点である軽量を損なわないフードインナー構造の開発にも取り組んでいる。

6. まとめ

以上紹介したように、鉄鋼分野で培った技術をさらに独自に発展させ、チタン、アルミニウムも大きく発展してきた。最後にこれら非鉄金属材料の将来展望を述べまとめたい。

最近の航空機産業におけるチタン合金需要の伸びは著しく、また、海水淡水化プラントや発電所復水器など純チタンの需要も堅調であり、今後10年間にチタン需要は倍増する可能性すら報告されている。しかしチタンの優れた特性は未だ十分に活用されておらず、さらに大きなチタンの潜在需要が存在すると考えられている。この状況を打破し、優れた耐食性、軽量、高強度などの魅力的なチタンの特性を人類が十分に享受できるようになるには、さらなるコスト低減が最大の課題である。本報で紹介した添加合金元素のコスト低減や一般的な製造コスト低減をさらに押し進めるとともに、より革新的な精錬～溶解の上工程技術の開発に取り組むことがチタンの将来の発展には不可欠である。

また、アルミニウム合金に関しては、一段と強化される方向の自動車燃費規制に呼応し、高強度鋼材の適用が進むとともに、アルミニウム合金の適用も拡大することが予想される。アルミニウム合金の軽量、錆びにくい、熱伝導率が高いなどの本来特性に加え、本報で紹介した複雑形状への加工技術や加工後も高品位表面を確保する技術も、アルミニウム合金の適用拡大には多大な貢献をするものと期待されている。今後、自動車用鋼材開発で培った当社の技術力と古河スカイ(株)のアルミニウムの技術力を合わせた総合力を背景に、さらなる技術革新を成就させることが、自動車用アルミニウム合金の一層の発展には重要である。さらには、高強度鋼材やアルミニウム合金等を適材適所に活用したマルチマテリアル構造提案も車体軽量化へ貢献し得るものと期待される。

表1 開発アルミニウム合金および通常アルミニウム合金のリジング発生状況(○:リジングはほとんど確認できず, △:中程度の発生, ×:重度の発生)

材料	歪量 (%)				
	4	8	12	16	20
通常材	○	○	△	△	×
開発材	○	○	○	○	△

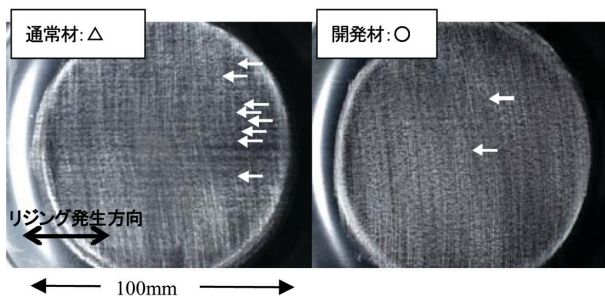


図10 歪量16%の加工を施した時の開発材と通常材のリジング発生状況。加工後表面をサンドペーパーで磨き、リジング模様をより顕在化

参考文献

- 1) Furukawa-sky Review. (3), 1 (2007)
- 2) 山本彰夫, 中村 宏, 西山泰行, 倉橋降郎:新日鉄技報. (352), 30 (1994)
- 3) 紀平 寛, 正木基身, 清水寛史, 田籠直子:新日鉄技報. (375), 89 (2001)
- 4) 高橋一浩, 金子道郎, 林 照彦, 武藤 泉, 為成純一, 徳野清則:鉄と鋼. 90, 278 (2004)
- 5) 金子道郎, 高橋一浩, 林 照彦, 武藤 泉, 徳野清則:鉄と鋼. 89,

- 833 (2003)
- 6) 金子道郎, 高橋一浩, 林 照彦, 徳野清則, 武藤 泉: まてりあ. 43, 61 (2004)
- 7) 伊丹美昭: 材料とプロセス. 20, 1403 (2007)
- 8) 藤井秀樹: チタン. 50, 33 (2003)
- 9) 藤井秀樹: ふえらむ. 15, 686 (2010)
- 10) 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, 547 (2009)
- 11) Kunieda, T., Takahashi, K., Mori, K., Fujii, H.: Proc. of Ti-2011, Baijing, 2011, to be published
- 12) 大塚広明, 藤井秀樹, 高橋一浩: チタン. 55, 282 (2007)
- 13) Otsuka, H., Fujii, H., Takahashi, K., Ishii, M.: Ti-2007 Sci. and Tech., ed.by Niinomi, M., Akiyama, S., Ikeda, M., Hagiwara, M., Maruyama, K.: JIM. 2007, p.1391
- 14) 大塚広明, 藤井秀樹, 橋一浩, 正木基身, 佐藤麻里: まてりあ. 49, 75 (2010)
- 15) 潮田浩作: 未来材料. 7, 14 (2007)
- 16) Furukawa-sky Review. (1), 40 (2005)
- 17) Nippon Steel Monthly: 152, 1 (2005)
- 18) 村松俊樹: 軽金属. 53, 490 (2003)
- 19) 戸次洋一郎: 自動車技術. 65, 29 (2011)
- 20) 佐賀誠, 佐々木行雄, 菊池正夫, 朱岩, 松尾守: Proceedings of ICAA-6. 1996, p.821
- 21) 竹田博貴, 日比野旭, 高田健: 軽金属. 60, 231 (2010)



藤井秀樹 Hideki FUJII
鉄鋼研究所 薄板材料研究部
主幹研究員 工博
千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511



佐賀 誠 Makoto SAGA
鉄鋼研究所 薄板材料研究部 主幹研究員

執筆協力



清水寛史 Hiroshi SHIMIZU
チタン事業部 営業第三グループ
マネジャー



金子道郎 Michio KANEKO
鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部
主幹研究員 工博



堂本孝志 Takashi DOMOTO
チタン事業部 営業第三グループリーダー



村田明博 Akihiro MURATA
自動車鋼板営業部 自動車アルミグループ
マネジャー



笠野雅史 Masafumi KASANO
チタン事業部 営業第一グループ
マネジャー



戸次洋一郎 Youichirou BEKKI
古河スカイ(株) 技術研究所 第一研究部
理事 部長



大澤 弘 Hiroshi OSAWA
チタン事業部 企画・調整グループ
マネジャー