

新日鉄住金(株)の独自チタン合金

Titanium Alloys Developed by Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation

藤井 秀樹*
Hideki FUJII前田 尚志
Takashi MAEDA

抄 録

新日鉄住金(株)が構造部材用に開発した独自チタン合金を紹介した。これら合金は、自動車部品や一般民生品を中心とした非航空機分野への適用を念頭に開発された合金で、実際、これら分野への適用が進んでいる。紹介した合金は、FeやCuをはじめとした安価汎用元素を活用した合金や、旧来の合金元素であるVやZrを有効活用した合金など多岐にわたり、いずれも特徴的な機能を有する合金である。これら合金は、加工、熱処理、接合、各種環境下での特性など、利用加工技術も充実しており、汎用合金と比べてもそんな色のない使いやすさを特徴の一つとしている。

Abstract

Titanium alloys as structural materials developed by NSSMC are introduced. Those alloys were developed for aiming at being used in the field of non-aviation industries including automotive parts and utility goods, and actually applied in these fields. The alloys introduced in this article are developed with various alloy design bases ; for example, utilization of inexpensive and common alloying elements such as Fe and Cu, and the effective extraction of advantages of conventional alloying elements, such as V and Zr. As a result, all of the alloys have characteristic high-functions. Surrounding technologies needed for actual use such as forming, heat treatment, welding etc. in addition to materials properties in the actual circumstances during the use are fully prepared, and the alloys are as user-friendly as the conventional alloys.

1. 緒 言

純チタン製品は、チタンが本来有する高耐食性を武器に、意匠性や加工技術をさらに組み合わせることで、既存の電力、化学分野に加え、土木、建築、一般民生品用途に市場が拡大してきた。これに対し、純チタンでは不十分な過酷な腐食環境に対しては、微量ながら白金族元素を添加した高耐食性チタン合金が開発され使用されてきた。また、軽量、高強度を武器とする高強度チタン合金は、宇宙・航空機産業の主要金属材料の地位を築いており、今後もこの特性を活かしたチタン合金の巨大市場はますます発展が期待されている。

新日鉄住金(株)でも、統合前2社保有の独自技術を武器に、純チタンならびにチタン合金両方の市場拡大活動を展開し、高い市場評価を得るに至っている。

例えば、塩化物環境において優れた耐食性を示す純チタンは、高温高濃度塩化物環境下で隙間腐食を起こすことが

あり、このような環境では、Pdを0.12～0.25%含むTi-Pd合金(JIS11～13種やASTM Gr.7等)の適用が一般に推奨されている。しかし、Pdのような希少貴金属の使用は微量とはいえ、材料価格が非常に高価となる。これに対し、ほぼ同等の耐食性を有しながらPd量の少ない経済型のSMI-ACE®(Ti-0.05Pd, Ti-0.05Pd-0.3Co)を独自合金として開発している。これら合金はASTM Gr.17, Gr.30として登録されている。また、Pdよりも価格安定性の高いRuを活用したTICOREX®(Ti-0.5Ni-0.05Ru)を技術導入し、独自ブランド材として薄板製品を中心に製造販売を行っている。この合金も、高温高濃度塩化物環境下で優れた耐隙間腐食性を有する合金で、ASTM Gr.13として登録されている。これら独自耐食合金については、本誌別論文“耐食チタン合金の特性と適用事例”に詳細解説されており参照いただきたい。

また、航空機部品で要求される厳しい品質水準を安定して満たすことのできる製造方法を開発し、航空機エンジン

* 鉄鋼研究所 チタン・特殊ステンレス研究部長 工博 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

ブレード素材として Ti-6Al-4V 丸棒や、国産ロケット H2A/B の Ti-6Al-4V 製分離ばねなどを提供している。これら分野での技術開発や商品に関しては、本誌内の“航空機用チタンの適用状況と今後の課題”で詳細報告されており、そちらを参照いただきたい。

一方、一般工業用途、自動車部品ほか民生品などの構造部材用の高強度チタン合金は、“高コスト”がネックとなり、1990 年台までは必ずしも適用が進んでいるとは言い難い状況であった。そこで 1990 年台半ばから、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、非航空機分野においてもチタン合金の適用拡大を推進してきた。

汎用チタン合金で多用されている V, Mo などの高価なレアメタルを排し、あるいは低減し、Fe, O, N, Cu などの安価汎用元素を使用合金元素として添加した独自高機能チタン合金群“Super-TIX® シリーズ”¹⁻⁴⁾はその一例である。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% 程度であり必ずしも高いものではないが、さらに製造技術の工夫や高機能特性を付与することで、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、現在では、様々な用途にて多用されるようになってきている。また、高価レアメタルを多用するも、そのコストを十分上回る高機能特性を具備した β 型チタン合金も開発されており⁵⁾、民生品を中心に活用されている。これら、構造部材用に開発された新日鐵住金(株)独自のチタン合金を本稿で紹介する。

2. Fe を活用したチタン合金

一般に高強度 $\alpha+\beta$ 型チタン合金は、 α 相を強化する元素として Al を添加し、組織微細化など組織制御しやすい二相合金とするために V, Mo などの β 相安定化元素が一定量添加されている。この β 相安定化元素のすべてあるいは一部を安価汎用 β 安定化元素の Fe で置き換えた各種チタン合金を 1990 年代より開発してきた。図 1 は、これら Fe 添加型独自合金と従来合金の強度、延性を示す模式図である。正確には工業用純チタンの範疇の低合金系から汎用の Ti-6Al-4V を上回る強度水準の合金まで、幅広い強度範囲をカバーしている。

Fe 添加独自チタン合金は、Ti-Fe-O-N 系合金と Ti-Fe-Al 系合金に大別できる。Ti-Fe-O-N 合金は、図 1 中、mod.CP (modified commercially-pure titanium) と標記された材料や Super-TIX®800 が該当する。mod.CP は厳密には工業用純チタンに属する材料であるが、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^{1,6,7)}は、Ti-1% Fe-0.35% O を基本成分とし 800 MPa 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である Al を含まないことから、図 2 に示すように、Gr.4 純チタン並みの

優れた熱間加工性を有しており、厚板、熱間・冷間圧延薄板、棒線など幅広い製品が製造されている。ただし、優れた熱間加工性とは裏腹の関係になるが、この Ti-Fe-O-N 系合金は、熱間～温間域の強度は、Al 添加型合金に比べると低くなるので、使用に際しては温度上昇に伴う強度低下代を十分に把握しておく必要がある^{1,6,7)}。

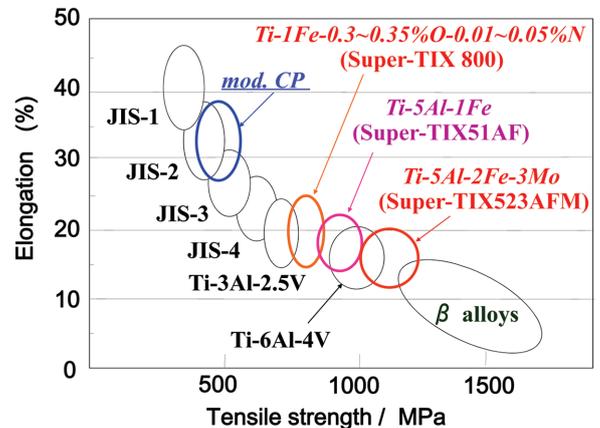


図 1 新日鐵住金(株)開発の Fe 添加チタン合金の強度と延性の関係 (模式図)

Relationship between strength and ductility of NSSMC's Fe-added titanium alloys (schematic representation)

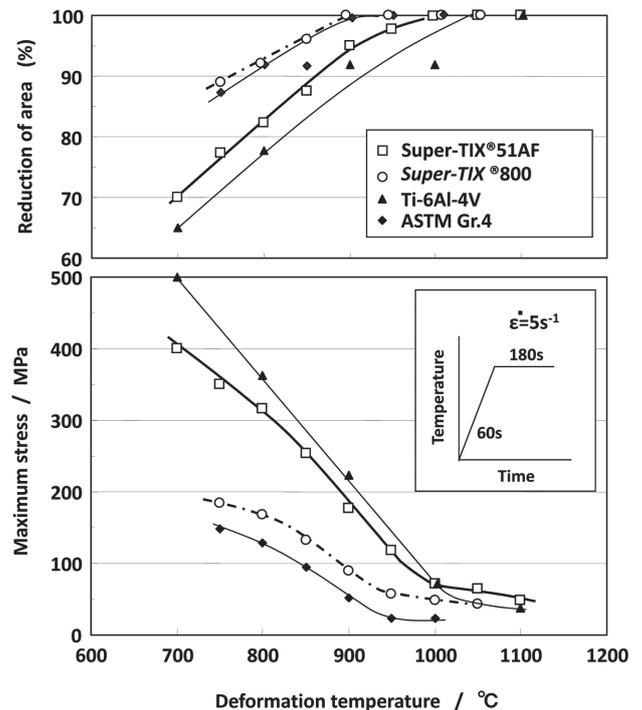


図 2 β 域加熱/徐冷した Super-TIX®51AF, Super-TIX®800, Ti-6Al-4V, ASTM Gr.4 純チタンの熱間加工性 (上段: 絞り, 下段: 変形抵抗) グリーブル試験機を使用して評価

Hot deformation characteristics of Super-TIX®51AF, Super-TIX®800, Ti-6Al-4V, and ASTM Gr.4 commercially pure titanium, evaluated using Gleeble tester

Upper: reduction of area and lower: maximum deformation stress. Materials were heat treated above the β transus followed by slowly cooled.

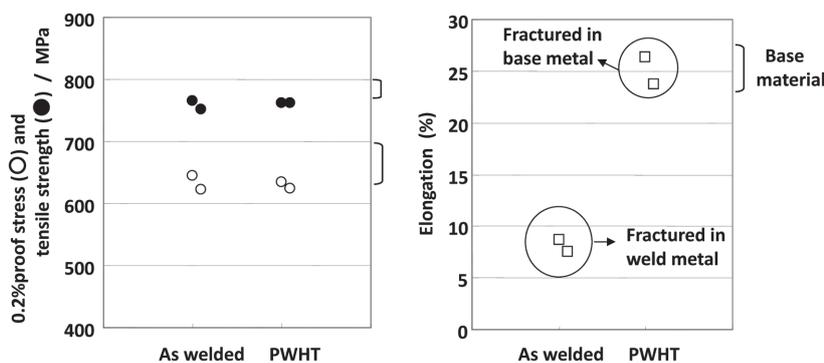


図3 Super-TiX®800のTIG溶接継ぎ手の引張特性
板厚5mm, 3パス溶接, 共金溶加棒を使用, 後熱処理(PWHT)により溶接金属の延性が向上
Tensile properties of Super-TiX®800 TIG weld joint of 5mm-thick plate

3-pass welding was performed using matching filler wire. Post weld heat treatment (PWHT) is effective for raising ductility of the weld metal.

このTi-Fe-O-N系合金は、個々の合金元素の添加量を厳密に規定するのではなく、酸素当量 ($O_{eq} = [O] + 2.77 [N] + 0.085 ([Fe] + [Ni] + [Cr])$, [X]は元素Xの添加量)で添加元素あるいは不純物元素の総量を規制することで、スクラップや低級スポンジチタンなど使用原料の自由度を増す工夫がなされている。この合金は、TIG溶接など一般的なチタン、チタン合金の溶接法で十分溶接可能である^{7,8)}。ただし他の高強度 $\alpha+\beta$ 型チタン合金同様、溶接後の急冷時に脆弱なマルテンサイトの微細針状組織が生成しやすいので、図3に示すように、700~800℃で後熱処理することが推奨されている^{7,8)}。

またO添加量を若干減じ、Nを意図的に増量したSuper-TiX®800N (Ti-1% Fe-0.3% O-0.05% N)も開発されており、Super-TiX®800より高耐食性⁷⁾、高衝撃靱性が必要とされる用途に使用されている。この合金ではNの添加法として、高融点で未溶融介在物残存の懸念のあるTiNは使用せず、Fe-N母合金($Fe_4N \sim Fe_3N$)をN源として使用している。

もうひとつのグループであるTi-Fe-Al系チタン合金群には、Super-TiX®51AFやSuper-TiX®523AFM (Ti-5Al-2Fe-3Mo)が該当する^{2,3,7)}。このTi-Fe-Al系チタン合金は、図4に示すように α 相強化元素のAlおよび β 相強化元素のFe含有量に及ぼす強度水準を調査し、大型鋳塊を製造した際のFe偏析やAlの熱間加工性に及ぼす影響などを考慮の上、成分を決定している²⁾。例えば、Ti-6Al-4V ELI (Extra Low Interstitials) ~ Ti-6Al-4V標準材相当の強度を示し、Ti-6Al-4Vよりも1% Al添加量を低くし、熱間変形抵抗をTi-6Al-4Vよりも低くした(図2)Ti-5Al-1Feを基本組成とする合金としてSuper-TiX®51AFが開発されている。

この合金は、O量で微妙な強度を調整可能^{2,7)}で、標準的なO濃度である0.15%ではTi-6Al-4V ELI並みの強度であるが、0.2%を超えるOを添加するとTi-6Al-4V標準材並みの強度を得ることができる。またこの合金は、軽量、高強度に加え、上記の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(以下、圧延)コイル薄板製品が量産

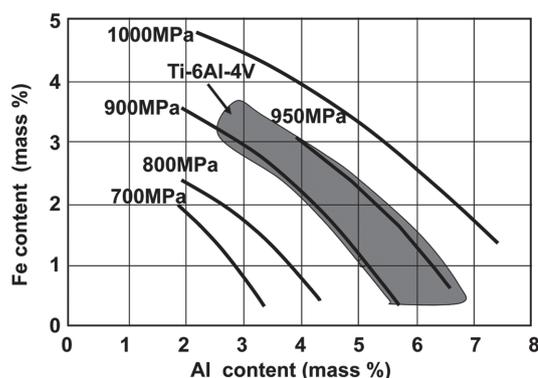


図4 Ti-Al-Fe三元合金の引張強度に及ぼすAlおよびFe添加量の影響

O添加量は約0.06mass%で試験片は熱延棒から切り出した。図中の線は、図中の数字で示した引張強度の等強度線。Ti-6Al-4V (ELIおよび標準グレードを含む)の強度レベルも灰色領域で示す。

Effects of Al and Fe contents on tensile strength of Ti-Al-Fe ternary alloys
Oxygen contents are around 0.06mass% and the specimens were taken from the hot-rolled bars. Lines in the graph show the same tensile strength depicted by each figure. Strength level of Ti-6Al-4V (including ELI and standard grades) is also shown with dark area.

され、ゴルフクラブなどに使用されている⁹⁾。このSuper-TiX®51AFの熱延ストリップ薄板に関しては、本誌“Ti-Al-Fe系チタン合金Super-TiX®51AF熱間圧延ストリップの開発”に詳細が紹介されており参照いただきたい。

このSuper-TiX®51AFよりもさらに高強度の合金を得るには、図3に基づくと、さらにAlやFeの添加量を増やす必要がある。しかし、これ以上のAl添加は熱間加工性を低下させ、低コスト合金の特徴が失われる可能性があり、また2%を超えてFeを添加すると凝固偏析が激しくなり大型の鋳塊が製造しにくくなる。そこで、Feの増量は2%までとし、それ以上の β 安定化元素添加は、高価希少金属ではあるが3%のMoを添加したSuper-TiX®523AFM (Ti-5Al-2Fe-3Mo)が開発されている³⁾。当然ながら、Super-TiX®523AFMはTi-6Al-4Vを上回る高強度、高疲労強度を

特徴としており、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に使用されている^{3,10)}。

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あり、加えて、焼鈍材の有する950MPa程度の0.2%耐力を420MPa程度まで大幅低下させ室温での加工性を向上させることも可能である。もちろん加工硬化や後熱処理で元の強度水準に戻すことも可能である。また、通常110GPa程度のヤング率をβ型合金並みの70GPa程度にまで下げるなど、特異な性能を発現させることも可能である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、これら特異な性能は、β→α'→α'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¹¹⁾。これら特徴については、本技報の“高強度チタン合金 Super-TIX®523AFM の機械的特性に及ぼす熱処理条件の影響”でも詳細に報告されており、併せて参照いただきたい。

さて、上記のようなFeを添加した合金は、室温～中温域ではFeTiが平衡相である。しかしその生成速度が遅いことから、実質的にα+β型チタン合金として取り扱うことが可能である。そのため450℃以上の温度域に長時間曝すと平衡相のFeTi相が生成し延性、靱性を低下させるなどの弊害を招く恐れがある。

写真1に、750℃、1h、空冷の焼鈍を行ったTi-2.2% Fe-0.1% O-0.05% NおよびTi-5Al-2Feを、450℃で、1024hまたは2048h時効した際にβ相内に生成したFeTi相の透過電子顕微鏡組織を示す^{12,13)}。残留β相がα相とFeTi相に分解しているが、両相とも等軸であり共析反応生成物ではない。時効時にまず残留β相中にα相が生成し、それに伴ってFeが濃化したβ相が規則化することでFeTi相に変態したと考えられている¹³⁾。もう少し低温の300～350℃に長時間曝すと、Ti-Fe-O-N系合金では、強度上昇とともに明瞭な延性低下を示す¹²⁾。従来この現象はTiとO、Nの規則相の生成によるものと考えられてきたが¹²⁾、近年透過電子顕微鏡技術の発展に伴い、長時間時効時に残留β相中にω相が析出したり、α相中にFeの整合析出相が生成するなどの新知見が得られている¹⁴⁾。

このFeTi相は、Ti-Fe-O-N系、Ti-Al-Fe系合金とも、溶体化処理/急冷+時効処理からなる強化熱処理を行うと、比較的短い時効処理時間(4h程度)で生成する^{12,13,15)}。ただし組織は写真1のような形態とは異なり、写真2に示すように、焼鈍材溶体化処理後の冷却中に生成したマルテンサイト相の界面に微細析出する¹⁵⁾。また、Moを添加しβ相安定度を高めたSuper-TIX®523AFMでは、Thermo-Calcによる平衡状態図計算では500℃付近でFeTi相を生成するが、実用的な曝露時間の範囲では、実際にはFeTiの生成

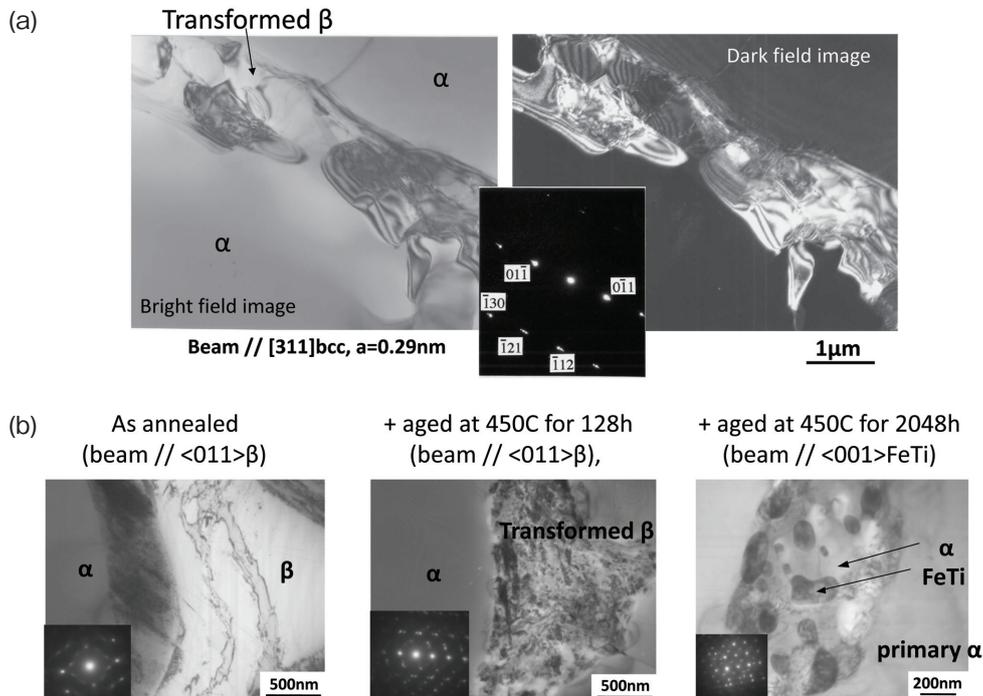


写真1 Fe含有 Super-TiX 合金焼鈍材に生成するFeTi

(a) 750℃、1h、空冷の焼鈍後、450℃、1024h時効したTi-2.2%Fe-0.1%O-0.05%Nの透過電子顕微鏡(TEM)組織
 (b) 750℃、1h、空冷の焼鈍後、450℃で最長2048h時効したTi-5%Al-1%Fe(Super-TiX®51AF)の透過電子顕微鏡組織
 FeTi formation in annealed Fe-added Super-TiX alloys

(a) TEM observations for Ti-2.2%Fe-0.1%O-0.05%N annealed at 750℃ for 1h followed by air cooling, plus subsequently aged at 450℃ for 1024h.

(b) TEM observations for Ti-5%Al-1%Fe(Super-TiX®51AF) annealed at 750℃ for 1h followed by air cooling, plus subsequently aged at 450℃ for max. 2048h.

は確認されていない¹³⁾。

このように、Ti-6Al-4Vなどの汎用合金と類似の特性を有する一方、O, N, Feという特殊な主要合金元素添加合金特有の現象も多く、熱処理条件や使用温度環境の設定には注意が必要である。これら注意点については末尾の参考文献を参照いただきたい。

3. Cuを活用したチタン合金

Fe添加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-

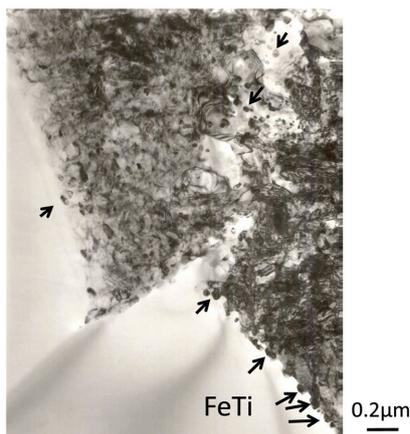


写真2 940°C, 1h, WQの溶体化処理後、500°C, 8h, 空冷の時効処理を行ったTi-5%Al-1%Fe (Super-TIX®51AF)中に生成したFeTi相粒子(矢印)

FeTi particles (arrows) in Ti-5%Al-1%Fe (Super-TIX®51AF) aged at 500°C for 8h (followed by air cooled) after solution treatment at 940°C for 1h followed by water quenched

TIX®10CU (Ti-1Cu) や Super-TIX®10CUNB (Ti-1Cu-0.2Nb)が開発されており^{4, 16, 17)}、自動車のマフラー・排気系に冷間圧延(以下、冷延)薄板が使用されている。高温強度はα相中に最大2.2mass%固溶する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¹⁶⁾に由来している。

写真3は、工業用純チタン ASTM Gr.1, Gr.2 および Ti-1% Cuの薄板(焼鈍材)を3, 5.5 および 10.5%引張変形させた試料の光学顕微鏡断面組織である¹⁶⁾。Ti-1% Cuは、純チタン1種と同程度あるいはそれ以上に多数の変形双晶が低歪みの段階から発生しており、Cu添加はAlとは異なり、双晶変形を抑制しない、あるいはむしろ誘発する働きがあることを示している。双晶変形の生じにくい高温域における固溶強化能はAlと同程度かそれよりもむしろ高く、室温加工性と高温強度を両立させたまさに都合のよい合金である。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¹⁸⁾。

この合金の優れた特性に関しては、本誌“自動車排気部材用Ti-Cu系合金薄板の開発”に紹介されているので参照いただきたい。また、上記記事にも記載しているとおり、このTi-Cu系合金にさらに固溶添加元素を追加した新しい合金が開発されている。この新合金は、500°C以上の高温域における強度がTi-1Cu, Ti-1Cu-0.5Nbの約1.5倍、純チタン2種の約3倍であり、室温加工性はJIS 2種またはASTM Gr.2と同等である。より高温化する排気系への適用が進められている。

	Elongation (tensile strain) (%)		
	3%	5.5%	10.5%
Ti-1.0Cu			
Gr.1			
Gr.2			

写真3 3, 5.5 および 10.5%引張変形したGr.1, Gr.2 および Ti-1Cu (Super-TIX®10CU)の組織
Microstructures of Gr.1, Gr.2 and Ti-1Cu (Super-TIX®10CU) tensile deformed by 3, 5.5 and 10.5%

以上のように、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により、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。

4. β型チタン合金

新日鐵住金(株)は、米国TIMET社で開発されたTimetal®LCBの線材、Ti-15V-3Cr-3Sn-3Alの線材や薄板の製造実績もあり、二輪車のサスペンションスプリングや眼鏡フレーム等へ適用されてきた。一方、上記Ti-15V-3Cr-3Al-3SnやTi-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr(β-C)など、従来のβ型合金に比べ、高温での変形抵抗が小さく、冷間加工性のより良好なβ型合金SSAT-2041CF(Ti-20V-4Al-1Sn)を開発し高級自転車の後輪ギア用素材やスキーストックに適用されている。スキーストックは優れた耐衝撃強度や振動減衰性が評価され、2008年には冬季オリンピックでも使用された。このSSAT-2041は、溶体化処理ままでは他のβ型合金より柔らかく加工性に優れ、時効処理により他のβ合金並みの強度を得ることができるという特徴を有している。

図5に、本合金(850℃溶体化処理材)および他のチタン、チタン合金の冷間鍛造性を示す⁹⁾。β型チタン合金は、成形限界は高いものの変形抵抗が高いという難点があったが、本合金は、他のβ型合金と同様の高い冷間成形能を有する一方、他のβ型合金よりも変形抵抗が低く、加工しやすい合金であることが示されている。また、図6^{19,20)}に示すように、溶体化処理(850℃)後に時効処理を行うことで、他のβ型合金と同様の1200MPa以上の引張強度を得ることができる。

5. その他の合金

以上紹介した合金以外にも、使用環境に応じてこれらを若干成分変更した合金も開発されている。また、4.で紹介

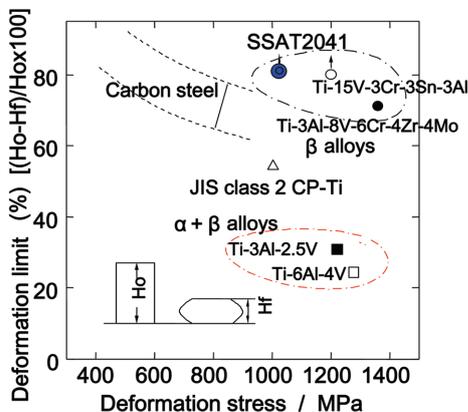


図5 SSAT2041(850℃で溶体化処理)および他のチタン合金、純チタンの冷間鍛造性
Cold forgeability of SSAT2041(solution treated at 850℃) and other titanium and its alloys

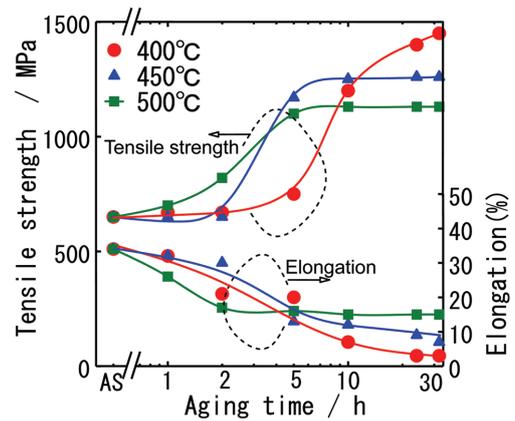


図6 SSAT2041(850℃で溶体化処理)の400～500℃における時効特性
Aging characteristics of SSAT2041(solution treated at 850℃) at 400 - 500℃

介したSSAT-2041におけるVと同様、一般的なチタン合金への添加合金元素であるZrの効果をも有効利用したSSAT-10CF(Ti-10Zr)、SSAT-18CF(Ti-18Zr)が開発されている²¹⁾。これら合金は、Zrの効果で微材結晶粒からなる組織を特徴とし、工業用純チタンでは達成できなかった強度水準と、耐傷付き性、表面研磨性、成形性を両立させており、Tiと同様に生体適合性に優れたZrの特徴を活かし、眼鏡フレームや時計などに適用されている。

6. 結 言

新日鐵住金(株)が構造部材用に開発した独自チタン合金を紹介した。これら合金の多くは、自動車部品や一般民生品を中心とした非航空機分野への適用を念頭に開発された合金で、実際、これら分野への適用が進んでいる。

これら合金の開発では、各添加元素の特性に及ぼす影響を的確に把握し、加工熱処理による組織制御技術を駆使している。これら基礎研究に基づいた合金開発が新日鐵住金(株)の最大の武器であり、さらなる高機能合金の開発や高機能特性発現プロセス開発に向け、現在も基盤メタラジの強化を図っている。

また、加工や接合などの利用加工技術開発、使用される環境での特性データ蓄積、使用環境を考慮した使用上の注意点整備なども十分に行われており、汎用合金と比べてもそんな色のない使いやすさを特徴の一つとしている。

今後も、新日鐵住金(株)の強みである基盤メタラジを活用した機能向上研究開発や、利用加工技術・データの充実を継続し、これら独自合金の適用拡大を通して、チタン産業およびチタンを使用されている産業界のいっそうの発展に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 藤井秀樹 ほか：新日鉄技報。(375), 94(2001)
- 2) 藤井秀樹 ほか：idem. 99(2001)

- 3) 森 健一 ほか：チタン. 55 (2), 34 (2007)
 4) 大塚広明 ほか：チタン. 55 (4), 282 (2007)
 5) 高橋渉 ほか：住友金属. 41 (2), 181 (1989)
 6) Fujii, H. et al.: Titanium '95 Science and Technology. UK, TIM, 1996, p. 2309
 7) 藤井秀樹 ほか：チタン. 49, 171 (2001)
 8) Fujii, H. et al.: Ti-2003 Science and Technology. DGM, 2004, p. 737
 9) 藤井秀樹 ほか：新日鉄技報. (391), 177 (2011)
 10) Mori, K. et al.: Ti-2003 Science and Technology. The Nonferrous Metals Society of China, 2011, p. 2232
 11) Kunieda, T. et al.: idem. 2011, p. 1049
 12) Fujii, H. et al.: Ti-2003 Science and Technology. DGM, 2004, p. 1107
 13) Mori, K. et al.: Ti-2007 Science and Technology. JIM, 2007, p. 729
 14) Mitsuhashi, M. et al.: CAMP-ISIJ. 26, 439 (2013) CD-ROM
 15) 藤井秀樹 ほか：まてりあ. 48, 547 (2009)
 16) Otsuka, H. et al.: Ti-2007 Science and Technology. JIM, 2007, p. 1391
 17) Otsuka, H. et al.: Ti-2007 Science and Technology. JIM, 2007, p. 251
 18) 大塚広明 ほか：まてりあ. 49, 75 (2010)
 19) 高橋渉 ほか：住友金属. 44 (5), 58 (1992)
 20) 霜鳥潤 ほか：住友金属. 49 (4), 25 (1997)
 21) 長島啓介 ほか：住友金属. 49 (4), 73 (1997)



藤井秀樹 Hideki FUJII
 鉄鋼研究所 チタン・特殊ステンレス研究部長
 工博
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



前田尚志 Takashi MAEDA
 鉄鋼研究所 チタン・特殊ステンレス研究部
 前部長 Ph.D
 (現一般財団法人金属系材料研究開発センター
 鉄鋼材料研究部長)