

自動車排気系用高性能チタン合金 Super-TIX®10CU (NB)の開発

大塚 広明¹⁾ 藤井 秀樹¹⁾ 高橋 一浩²⁾
正木 基身³⁾ 佐藤 麻里³⁾

1. はじめに

チタン・チタン合金の自動車部品用途への適用は、地球温暖化防止(CO₂排出量削減、燃費向上)を目指した部品軽量化のニーズの高まりを背景に、近年急激な伸びを示しており、今後もこの傾向は持続していくと考えられている⁽¹⁾。チタン材が適用される自動車部品は、エンジンバルブ、サスペンションスプリング、コネクティングロッドから排気系部品まで多岐にわたる⁽¹⁾。この中で適用が先行したのは排気系部品である。排気系部品にはエキゾーストマニホールドからテールキャップまでの様々な形状の部品があるが、現在、国内では二輪車のエキゾーストパイプおよびマフラー(消音器)を中心に年間およそ1000トンの市場が形成されており、四輪車への適用も今後進展していくものと期待されている。

しかしながら、四輪車では、エキゾーストパイプが外気に曝されず空冷効果があまり期待できない場合があり、また、二輪車でも排ガス浄化触媒装置に近い部分ではより排気ガスの温度が高くなる傾向にあり、工業用純チタンよりも耐熱性(高温強度、耐酸化性)に優れるチタン合金が求められている。こうした中でいくつかの排気系用チタン合金が開発されている⁽²⁾⁻⁽⁶⁾。その一方で、排気系部品はその機能を十分発現するために複雑な形状をしており、また最終製品(車両)の意匠性を大きく左右する位置に配されることから複雑な加工を強いられることも多く、厳しい加工に耐えうる加工性(室温における伸び、曲げ性、張り出し成形性、深絞り性)が要求される。そこで筆者らは、工業用純チタン並みの冷間加工性を有しながら、工業用純チタンよりも大幅に高温特性の優れるチタン合金の開発に取り組んだ⁽⁵⁾⁽⁶⁾。本稿では、開発合金の設計概念と諸特性、および実用化の状況について述べる。

2. 合金設計

自動車排気系用チタン合金には以下3点の特性が求められる。

- (1) 600℃以上の高温において十分な強度を有し、長時間使用しても強度の低下が小さいこと、
- (2) 700℃以上の高温において酸化による減肉が小さいこと、
- (3) 室温において、JIS2種やASTM Gr.2純チタン(以下Gr.2)と同等以上の成形性(曲げ性、張り出し特性、深絞り性等)を有すること、である。

上記(1)を実現させる方法として、高温において α 相に対する固溶強化能の大きい置換型元素のAlやSnを添加することが、また(2)の実現のためには、Siを微量添加する場合が多い。このように、高温用チタン合金では、Al, Sn, Siを添加するのが通例であるが、これらの元素は、室温強度も増加させ、工業用純チタンの優れた冷間加工性が損なわれてしまうという課題を有する。特にAlは積層欠陥エネルギーを増大させ、室温における工業用純チタンの高加工性の根源である双晶変形を抑制するため、冷間加工性に悪影響を及ぼす。そこで筆者らは、準安定状態を含め α 相にある程度固溶し、高温域では固溶強化能を発揮する一方、室温双晶発生を抑制しない元素を、合金元素選択範囲を β 安定化元素にまで拡大して探索し、合金設計を行った。

具体的な設計概念は以下のとおりである。

- ① 平衡状態にて最大2.1 mass% α 相に固溶し、かつ過飽和に固溶されやすい(平衡相のTi₂Cuが析出しにくい)置換型元素Cuを添加する。
- ② 室温における高加工性維持のため、酸素含有量を汎用のJIS2種やGr.2ではなくJIS1種やGr.1相当とする。
- ③ β 相へのCu濃化による α 相中への固溶量減少を避けるため、強い β 安定化元素で不純物元素のFe量を極力少なくする。

このような設計概念を基に開発されたのがSuper-TIX®10CU(Ti-1Cu)である(Super-TIX®は新日本製鐵㈱の登録商標)。本合金は、排気系用途として700℃までの使用を想定している。さらに高温における耐酸化性が必要な部品用に、Nbを添加したSuper-TIX®10CU NB(Ti-1Cu-0.5Nb)を開発した。Nb添加は室温における加工性に影響を与えずに耐

* 新日本製鐵株式会社

技術開発本部鉄鋼研究所鋼材第一研究部：

1)主幹研究員 2)主任研究員 3)チタン事業部マネージャー
Development of High-performance Titanium Alloys “Super-TIX®10CU(NB)” for Automobile Exhaust Systems; Hiroaki Otsuka, Hideki Fujii, Kazuhiro Takahashi, Motomi Masaki, Mari Sato (Nippon Steel Corporation)

2009年10月30日受理

酸化性を向上させることができ、その原子価数により、チタンの酸化スケール中の酸素拡散を抑制する働きがあるため⁽⁷⁾、特に優れた高温耐酸化性が得られる。この合金は排気系用途として800℃付近までの使用を想定している。

3. 開発合金の特性

200 kg 真空アーク (VAR) 2 回溶解、熱間鍛造、熱間圧延、冷間圧延、焼鈍 (750℃, 1 h) により板厚 1 mm の Super-TIX®10CU (NB) の薄板を作製し、同程度の板厚の Gr.1 および Gr.2 とともに、室温から高温域における強度特性を引張試験により比較評価した。

(1) 室温における機械特性

表 1 に室温における機械特性を示す。伸びは板の長手 (L) 方向、45° (D) 方向、および幅 (T) 方向とともに、Gr.2 に比べて大きく、Gr.1 に近い。また、長手方向の 0.2% 耐力は Gr.2 よりも小さい。これは、Cu 添加が双晶発生を抑制せず、工業用純チタン並みの低耐力と高延性が維持できることによる。

(2) 高温強度

500～700℃における Super-TIX®10CU (NB)、および Gr.2 の引張強度を図 1 に示す。高温域では Cu の固溶強化能

表 1 Super-TIX®10CU (NB), ASTM Gr.1, 2 純チタン (CP-Ti) の室温機械特性。

	方 向	0.2%耐力/ MPa	引張強さ/ MPa	伸び (%)
S-TIX®10CU	L	195	408	45
	D	230	364	47
	T	273	366	37
S-TIX®10CUNB	L	228	433	50
	D	252	387	50
	T	294	384	38
Gr.1 CP-Ti	L	181	313	51
	D	205	280	55
	T	228	305	39
Gr.2 CP-Ti	L	251	383	36
	D	260	351	38
	T	279	368	32

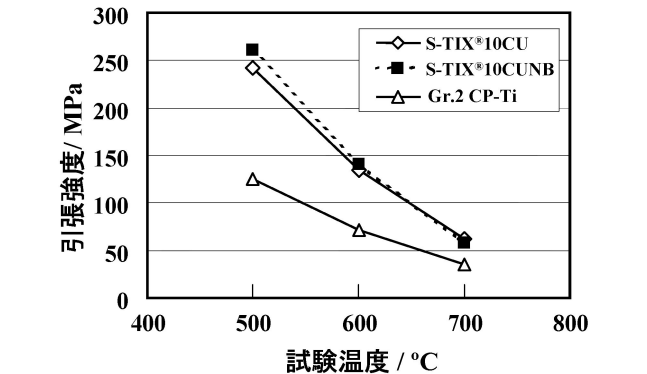


図 1 Super-TIX®10CU (NB), ASTM Gr.2 純 Ti (CP-Ti) の高温引張強度。

が発揮され、Super-TIX®10CU (NB) は 500～700℃において Gr.2 の約 2 倍の引張強度を示した。

図 2 は、600℃における Super-TIX®10CU と Gr.2 の高温曲げ疲労試験結果 (S-N 曲線) である。Super-TIX®10CU の 600℃における疲労特性は、優れた高温強度を反映し Gr.2 に比較して非常に優れている。10⁷ サイクル (未破断) での疲労強度は約 80 MPa で、Gr.2 の約 2 倍、600℃における引張強度 (図 2) の約 60% である。700℃における疲労強度も Gr.2 の約 2 倍である。

(3) 耐高温酸化性

図 3 は、Super-TIX®10CU (NB), Gr.2, Ti-3Al-2.5 V の 500～800℃, 200 h 大気中加熱後における酸化増量である。Ti-3Al-2.5 V の酸化増量が 500℃ではやや小さく、700℃でやや大きいのを除けば、500～700℃において、これら 4 つの材料で耐酸化性に大きな違いは無い。一方、800℃においては、Super-TIX®10CUNB の酸化増量が著しく小さく、特に優れた耐酸化性を示している。この合金の 800℃における酸化増量は Gr.2 のおよそ 1/7 である。一方、表 1 に示したように Nb の添加は室温の機械特性にほとんど影響を与えない。

図 4 に 800℃, 100 h 大気中曝露した後の表層断面組織を示す。Super-TIX®10CUNB の酸化スケールは Gr.2, Super-TIX®10CU に比べて著しく薄く、Gr.2 と Super-TIX®10CU では酸化スケールが剥離しているのに対し、この合金では剥離は全く認められなかった。

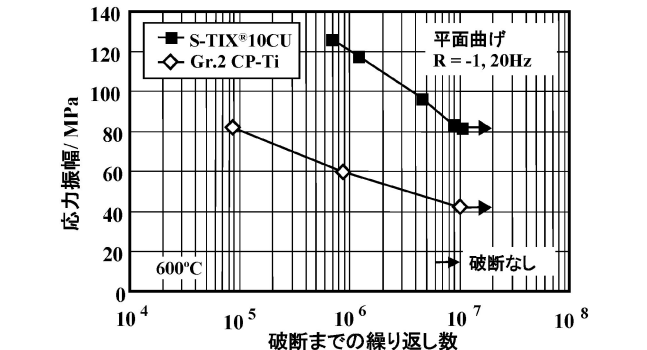


図 2 600℃大気中における Super-TIX®10CU と ASTM Gr.2 純 Ti (CP-Ti) の S-N 曲線。

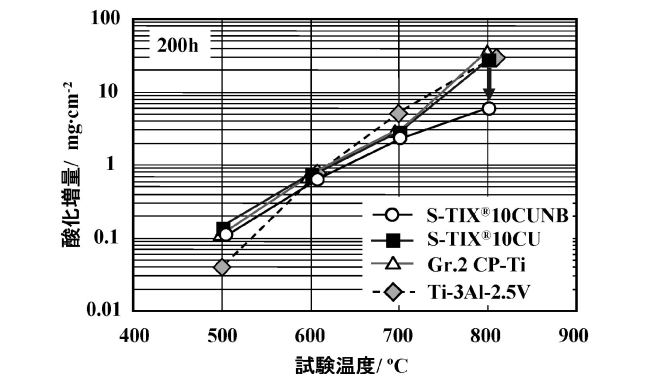


図 3 Super-TIX®10CU (NB), ASTM Gr.2 純チタン (CP-Ti), Ti-3Al-2.5 V の高温酸化特性。

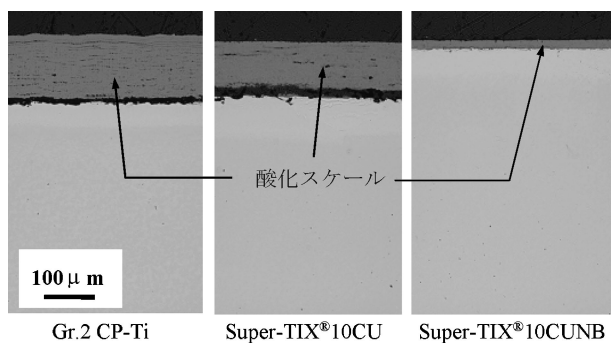


図4 Super-TiX®10CU (NB), ASTM Gr.2 純チタン (CP-Ti)の800°C 100 h 曝露後の断面組織。

4. 成 形 性

750°C, 1 h の最終焼鈍を施した Super-TiX®10CU (NB) の伸びは、表1に示すように、L方向、D方向、T方向の3方向とも、Gr.2を大きく上回っており、極めて高延性である。この高延性を反映して、板厚1 mm程度では、L方向、T方向とも完全密着曲げ加工が可能である。Super-TiX®10CU (NB) のエリクセン値は、しわ押さえ力5 tonの場合、12.5 mmでGr.2 (10.5 mm)を上回り、Gr.1 (13 mm)並の高い値である。一方、Super-TiX®10CU (NB) のL方向のr値は1.5程度で若干低い。良好な深絞り性を得るためには、より高いL方向のr値が必要であるが、これは最終熱処理条件を変えることにより解決することができる。690°C以下の焼鈍をした材料ではr値は向上し、例えば、690°C, 10 h 焼鈍した場合、r値は2.5となる。これはTi₂Cuの析出や粒成長に関連して形成された集合組織の特徴による⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁸⁾。

実機材では、多くの場合670°C, 10 h の最終焼鈍した材料が製造され市販されている。図5はこの条件で焼鈍した厚さ0.5 mmのSuper-TiX®10CU板の角筒絞りの例である。コーナーRが1 mmという極めて厳しい条件にもかかわらず全く問題なく成形可能である。

5. 特許および実用化状況

本Super-TiX®10CUおよびSuper-TiX®10CUNBの基本特許は2004年に日本および海外各国へ出願され⁽⁹⁾、その他関連特許3件⁽¹⁰⁾も同様に国内外に出願されている。これらの合金は冷延コイルシートが実機量産され、現在、市販の二輪・四輪車の排気系部品として使用されている。例えばSuper-TiX®10CUは2007年頃からスズキGSXシリーズ(図6(a))のマフラーの耐熱性が要求される部位に使用されている。また2009年から日産GTR spec-Vのマフラー(図6(b))に使用され、ステンレス鋼比30%の大幅な軽量化を実現している⁽¹¹⁾。四輪の量産車に標準搭載されたのは日本初である。また、Super-TiX®10CUNBは、ヨーロッパ最大の排気系部品メーカー、Akrapovicのマフラー(図6(c))に使用されている。これらはいずれも、本合金が室温における高加工性と高い高温強度、高耐酸化性を有していることによるもので、合金設計および製造条件の設定が適切であったことを示している。

6. ま と め

自動車排気系用Super-TiX®10CUおよびSuper-TiX®

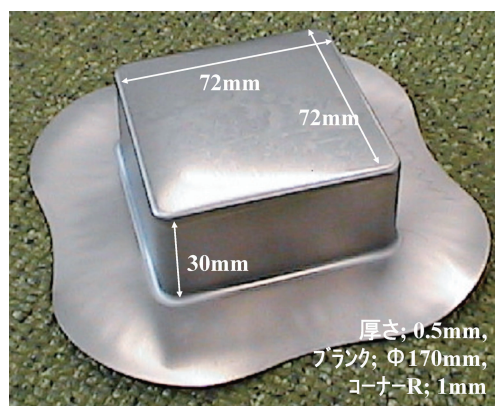


図5 0.5 mm厚 Super-TiX®10CU (670°C 10 h 焼鈍)板の角筒絞り試験後の外観。



図6 Super-TiX®10CU (NB)のマフラー適用例。

10CUNBの合金設計概念およびその優れた特性を紹介した。これらの合金は、Cu添加と低酸素化、および必要に応じNbを添加するという、従来の合金設計思想に無い新しいコンセプトによって誕生し、室温における優れた加工性と高い高温強度、耐酸化性を両立させている。Super-TiX®10CUおよびSuper-TiX®10CUNBは、これらの特長を活かし、自動車排気系用材料として今後ますます適用例が拡大し、車両の軽量化、ひいては地球温暖化防止に貢献するものと期待されている。

文 献

- (1) 小田高士：第61回白石記念講座テキスト，ISIJ，(2009)，89-108.
- (2) 奈倉功和，屋敷貴司：R&D 神戸製鋼技報，**54** (2004)，38-41.
- (3) Y. Kosaka, S. P. Fox, K. Faller and H. Reichman: *Cost-affordable Titanium Symposium Dedicated to Professor Harvey Flower*, TMS The Minerals, Metals & Materials Society, (2004), 69-76.
- (4) 屋敷貴司，山本兼司：R&D 神戸製鋼技報，**55** (2005)，42-47.
- (5) H. Otsuka, H. Fujii, K. Takahashi and M. Ishii: *Ti-2007 Science and Technology*, ed. by M. Niinomi, S. Akiyama, M. Ikeda, M. Hagiwara, K. Maruyama, JIM (2007), 1391-1394.
- (6) H. Otsuka, K. Takahashi, Y. Itami, H. Fujii and K. Tokuno: *ibid.*, 251-254.
- (7) O. Kubaschewski, B. E. Hopkins: *Oxidation of Metals and Alloys, Second Edition*, Butterworths, London, (1967), 25-26.
- (8) 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)，547-554.
- (9) 特開2005-298970.
- (10) 特開2007-186778，特開2009-30140，特開2009-68026.
- (11) 黒浜達夫，木嶋 淳，伊藤猛志郎，大塚広明：自動車技術会学術講演会前刷集，No. 99-09 (2009)，17-20.