

## 自動車排気部材用Ti-Cu系合金薄板の開発

## Development of Ti-Cu Alloy Sheets for Automobile Exhaust Systems

大塚 広明\*  
Hiroaki OTSUKA藤井 秀樹  
Hideki FUJII高橋 一浩  
Kazuhiro TAKAHASHI森 健一  
Kenichi MORI

## 抄 録

1 mass%のCu添加と低酸素含有量、800°Cまでの耐酸化性が必要な場合はNbを添加する、という独自の合金設計により、高温耐熱性と室温での加工性の両方を併せ持つ自動車排気部材用合金を開発した。本合金は、高温で使用される場合に一般的に添加されるAl, Si, Sn等の元素を含まない。これらの元素は室温での加工性を低下させてしまうため、その代わりに高温における固溶強化元素としてCuを添加した。同時に、チタンの優れた加工性に不可欠な双晶の生成を十分享受できるように、酸素含有量をGr.1純チタン並みに抑えた。Ti-1mass%Cu (Super-TIX®10CU) は、Gr.2純チタンの約2倍の高温強度、高温疲労強度を有するだけでなく優れた耐高温クリープ特性を有する。Ti-1mass%Cu-0.5mass%Nb (Super-TIX®10CUNB) は、Super-TIX®10CUと同等の室温加工性を維持しつつ800°Cまでの耐酸化性を向上させた合金である。最近、いくつかの固溶強化元素を加え、先の2合金よりもさらに高温強度を高めたTi-Cu合金が開発されている。

## Abstract

**Titanium alloys having excellent performances at elevated temperature and good formability at room temperature for automobile exhaust systems have been developed based on the unique alloy design concept that 1mass% Cu, together with low oxygen content, was added, and 0.5mass% Nb was furthermore added in case oxidation resistance at temperatures up to 800°C was necessary. They do not include any conventional alloying elements, such as Al, Si and Sn, which are often added to titanium alloys used at elevated temperatures and lower their formability. In place of them, Cu was added as a solid solution hardening element at high temperature. The oxygen content was lowered together as that in Gr.1 pure titanium(CP) to enjoy the active mechanical twinning at room temperature which is indispensable for excellent formability. The alloy, Ti-1mass%Cu(Super-TIX®10CU), actually has high strength and high fatigue strength (twice as high as those of Gr.2) as well as excellent creep resistance at elevated temperatures. The other alloy, Ti-1mass%Cu-0.5mass%Nb(Super-TIX®10CUNB), has improved oxidation resistance at temperatures up to 800°C with keeping excellent formability equivalent to that of Super-TIX®10CU. Recently a new Ti-Cu alloy which was added some solid solution hardening elements for higher strength at elevated temperature than the former two Ti-Cu alloys has been developed.**

## 1. 緒 言

Cu単独およびCuとNbを複合添加したTi-Cu系チタン合金薄板は、2006年に二輪車へ、2009年には四輪車へ搭載されたのを皮切りに、Super-TIX®10CU, Super-TIX®10CUNBの商品名で広く自動車排気系部材として使用されている<sup>1,2)</sup>。自動車排気系部材は、エンジンに近い部位や排ガス浄化触媒装置に近い高温部位等、高温になる箇所で使用されるため、高温強度と耐酸化性に優れたチタン合

金が必要される一方、量産排気系部材として、複雑かつ厳しい加工に耐えなければならない。すなわち、排気系用材料には、優れた高温強度、耐高温酸化性のみならず、室温における十分な伸び、優れた曲げ性や張り出し性、および深絞り性等が必要とされる。

高温強度向上には固溶強化が有効であるが、固溶強化は一方で室温では加工性に影響を与える懸念がある。本合金の研究開発では、固溶強化添加元素としては使用例の少ないCuを選択することにより、高耐熱性(高温強度)と高

\* チタン・特殊ステンレス事業部 チタン技術部 主幹 博士(工学) 東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071

加工性という二つの相反する特性を両立させることに成功した。

本稿では、Ti-Cu 系合金の合金設計概念と高温の機械特性、耐酸化特性を中心とした高温耐熱特性、および高温使用時に注意を要する高温クリープ特性、室温における加工性についての研究結果と近年の使用状況を紹介する。また、最近、Super-TIX®10CU, Super-TIX®10CUNB よりさらに高温強度を高めた新しい Ti-Cu 系合金も開発しており、この合金についても簡単に紹介する。

## 2. 自動車排気部材用 Ti-Cu 系合金の設計

排気系部材は、エンジンに近い部位や排ガス浄化触媒装置に近い部位等、比較的高温になる箇所でも使用されるため、特性として優れた高温強度と耐酸化性が求められており、いくつかのチタン合金薄板が開発されている<sup>3-5)</sup>。一方、排気系部品はその機能発現のために複雑な形状をしていたり、また最終製品（車両）の意匠性付与のため複雑な加工を強いられることも多く、厳しい加工に耐える必要がある。すなわち、排気系用部材は、優れた高温強度、耐高温酸化性のみならず、室温における十分な加工性、成形性が要求される。

自動車排気部材用チタン合金に求められる特性は以下4点に集約される。

- (1) 600℃以上の高温において十分な強度を有し、長時間使用後に強度低下が小さいこと
- (2) 700℃以上の高温において酸化による減厚が十分小さいこと
- (3) 室温において、JIS 2種や ASTM Gr.2 純チタン（以下 Gr.2）と同等か、それ以上の成形性（曲げ性、張り出し特性、深絞り性等）を有すること
- (4) 600℃以上の高温において、0.2%耐力より低い一定荷重が長時間加わっても変形が十分小さいこと、すなわち耐クリープ特性に優れること

(1) の実現、すなわち高温における強度を上昇させるには、Ti-3Al-2.5V に代表されるように、高温において  $\alpha$  相に対する固溶強化能の大きい置換型元素の Al を添加するケースが多い。一方、(2) の実現、すなわち高温における耐酸化性を向上させるためには、微量の Si を添加するケースが多い。このように、高温で使用可能なチタン合金を設計する場合、Al, Si を添加するのが一般的である。しかし、これらの元素は、室温強度も増大させてしまうという課題を有している。すなわち、純チタンの優れた冷間加工性が損なわれる。特に Al は積層欠陥エネルギーを増大させるため、室温における純チタンの高加工性の根源である双晶変形を抑制し、冷間加工性を低下させてしまう恐れがある。

こうした課題を克服するため、

- 準安定状態を含め  $\alpha$  相にある程度固溶し、高温域で十分な固溶強化能を発揮する元素、

かつ、

- 室温における加工性を阻害しない、すなわち双晶発生を抑制しない元素、

を、選択範囲を  $\beta$  安定化元素にまで拡大して検討した結果、Cu が適していることを見出した。

添加元素の Cu が双晶生成に影響を与えないことを確認するため、引張歪を導入した Ti-1Cu 中の双晶生成状況を Gr.1 および Gr.2 と比較したところ、数%の引張変形により Ti-1Cu では Gr.1 と同程度、Gr.2 より高頻度で双晶が生成していた<sup>6)</sup>。すなわち、チタン材料の成形性において重要な役割を持つ双晶生成が Ti-Cu 系合金では維持または促進され、室温において十分な加工性を有することを示している。

具体的な合金設計概念は以下の通りである。

- ① 平衡状態で 2.1 mass% まで  $\alpha$  相に固溶し、かつ過飽和に固溶されやすい（平衡相の  $Ti_2Cu$  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を維持するため、汎用の JIS 2種や Gr.2 ではなく JIS 1種や Gr.1 相当の酸素含有量とする。
- ③  $\beta$  相への Cu 濃化による  $\alpha$  相中への固溶量減少を避けるため、不純物元素で、強い  $\beta$  安定化元素の Fe の含有量を極力抑える。

このような設計概念を基に開発されたのが、自動車排気部材用 Ti-Cu 系合金の基本形 Ti-1Cu (Super-TIX® 10CU) である。本合金は、排気系用途として 700℃までの高温を想定したもので、Cu の固溶強化と Gr.1 並みの低酸素量により、高温強度と室温高加工性が実現されている。

一方、500～800℃における高温耐酸化性については、Ti-1Cu は純チタンとほぼ同等か若干良い程度であり、特に 800℃においては、両者ともに酸化が著しく進行する。こうした中で、800℃程度の高温においても耐酸化性が必要な排気系用途には Nb を 0.5 mass% さらに添加し、耐酸化性を向上させた合金を開発した。Nb は、チタン酸化スケール中の酸素拡散を抑制する働きがあるため、耐酸化性を向上させることができる<sup>7)</sup>。また、Nb は  $\alpha$  相に 1.5～4.5 mass% まで固溶し（500～800℃）、高温強度を低下させず、 $\alpha$  相中の Cu の固溶量を減少させる  $\beta$  相も生成しない。さらに、Nb は室温における加工性に影響を与えない。

このように、Ti-1Cu-0.5Nb (Super-TIX®10CUNB) は、排気系用途として 800℃付近までの一時的使用を想定して設計、開発された合金である。また、高温強度がさらに要求される排気系用途に対しては、500～800℃における高温強度が Super-TIX®10CU や Super-TIX®10CUNB の約 1.5 倍ある新しい Ti-Cu 系合金が最近開発されている。

Ti-Cu 系合金の設計の考え方を表す概念図を図 1 に示す。横軸は室温における成形性、縦軸は耐熱温度（使用可能な温度）である。本図は、Al, Sn, Si 等の添加は使用可能な温度を上昇させるが、成形性を低下させてしまうこと、一方、

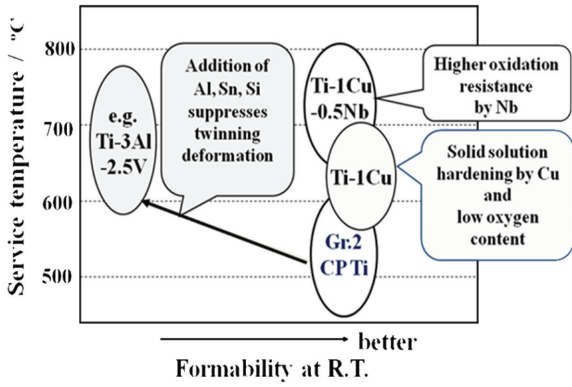


図1 Ti-1Cu-(0.5Nb)の合金設計概念  
Image of design concept of Ti-1Cu-(0.5Nb) alloys

Cu, Nbの添加は成形性に影響を与えず耐熱温度を上昇させることが可能であることを示している。なお、最近開発されたTi-Cu系新合金も、室温の加工性を維持しながら高温強度を向上させている。

### 3. 開発合金の特性

上記考え方で設計した合金の特性を以下に紹介する。各種特性（高温特性、機械特性、成形性、耐クリープ性）の測定には、200kg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°C, 1h）により作製した板厚1mmのTi-1CuおよびTi-1Cu-0.5Nbの薄板を用いた。比較材としては、同程度の板厚の純チタン製品（Gr.1, Gr.2）を用いた。

#### 3.1 高温特性

500～700°CにおけるTi-1Cu, Ti-1Cu-0.5Nb, およびGr.2の引張強度を図2に示す。Cuの固溶強化能により、この温度域において、Ti-1CuおよびTi-1Cu-0.5Nbは、Gr.2の約2倍の引張強度を有する。ちなみにTi-1CuとTi-1Cu-0.5Nbの高温引張強度はほぼ同じであり、0.5mass%のNbの添加

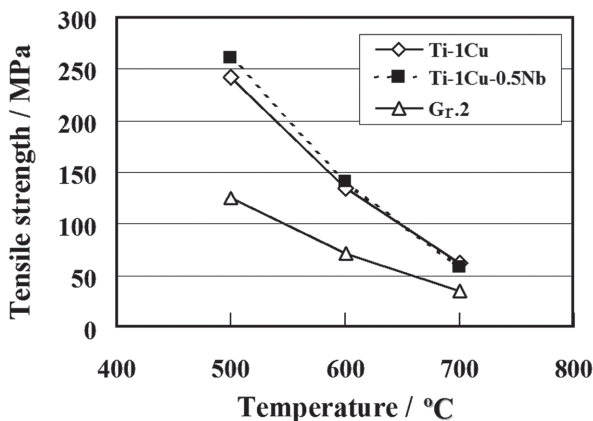


図2 Ti-1Cu および Ti-1Cu-0.5Nb, Gr.2 薄板の高温強度  
Tensile strength at elevated temperature of Ti-1Cu, Ti-1Cu-0.5Nb and Gr.2 sheets

は強化にはほとんど寄与していない。

Ti-1Cuの600°Cにおける高温曲げ疲労試験の結果（S-N曲線）を図3に示す。Gr.2に対する高温強度の優位性を反映して $10^7$ 回（未破断）での疲労強度も、Gr.2の約2倍であった。疲労強度値は600°Cにおける引張強度（図2）の約60%である。700°Cにおける疲労強度もGr.2の約2倍であった。

Ti-1Cu, Ti-1Cu-0.5Nb, Gr.2, Ti-3Al-2.5Vの500～800°C, 200h大気中加熱後の酸化増量を図4に示す。Ti-3Al-2.5Vの酸化増量が500°Cではやや小さいが、500～700°Cにおいて、これら4つのチタン材料の酸化増量はほぼ同等である。一方、800°Cにおいては、Ti-1Cu-0.5Nbは、他の3チタン材料に比べ高い耐酸化性を示しており、同温度における酸化増量はGr.2のおよそ1/7である。800°Cでの長時間曝露により表面に形成された酸化スケールは、Ti-1Cu-0.5Nbでは剥離しにくい。他の3つのチタン材料では容易に剥離する。800°C, 100h大気中曝露した後の表面層断面を図5に示す。Ti-1Cu-0.5Nbの酸化スケールは、Gr.2, Ti-1Cuに比べて薄く、剥離もない。800°C付近の高温において高温耐酸化性が必

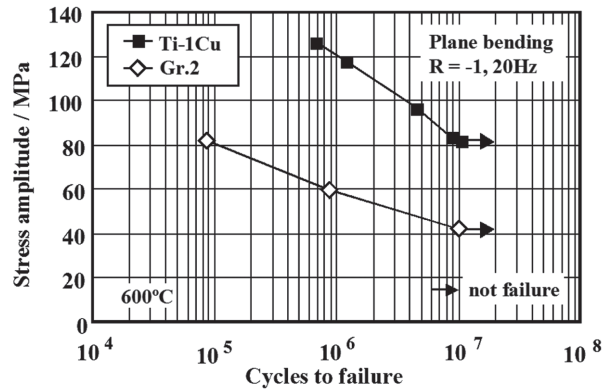


図3 Ti-1CuとGr.2薄板の600°CでのS-N曲線  
S-N curves of Ti-1Cu and Gr.2 at 600°C in air

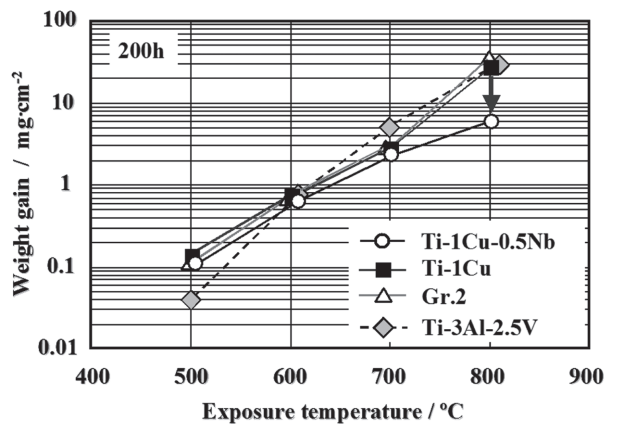


図4 Ti-1Cu-0.5Nb および Ti-1Cu, Gr.2, Ti-3Al-2.5Vの  
大気中高温酸化特性  
Oxidation properties at elevated temperature of Ti-1Cu-0.5Nb, Ti-1Cu, Gr.2 and Ti-3Al-2.5V Specimens were exposed in air



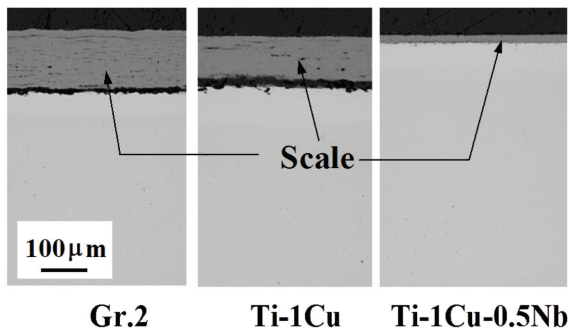


図5 Gr.2 および Ti-1Cu, Ti-1Cu-0.5Nb の 800°C 100h 大気曝露後表面層断面  
Cross section of surface layer of Gr.2, Ti-1Cu and Ti-1Cu-0.5Nb after exposure at 800°C for 100h in air

要な場合、Nb 添加が有効である。

### 3.2 機械特性・成形性

表1に、750°C、1hの最終焼鈍を施した Ti-1Cu-(0.5Nb) および Gr.1, Gr.2 製品の引張特性を示す。Ti-1Cu-(0.5Nb) の長手 L 方向, 対角線 D 方向, 幅 T 方向の3方向の伸びは、Gr.2 を大きく上回っており高延性である。この高延性により、L 方向、T 方向とも板厚 1mm の薄板の完全密着曲げ加工が可能である。Ti-1Cu-(0.5Nb) のエリクセン値は、しわ押さえ力 5 ton の場合 12.5mm で、Gr.2 (10.5mm) を上回り、Gr.1 (13mm) 並である。一方、Ti-1Cu-(0.5Nb) の L 方向の r 値 (ランクフォード値) はやや低く 1.5 程度である。良好な深絞り性が求められる場合、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得ることができる。例えば、690°C、10h 焼鈍した場合、r

表1 Ti-1Cu および Ti-1Cu-0.5Nb, Gr.1, Gr.2 の室温機械特性

長手方向 (L), 対角線方向 (D), 幅方向 (T) Ti-1Cu と Ti-1Cu-0.5Nb の最終焼鈍温度は 750°C 1h

Tensile properties at room temperature of Ti-1Cu, Ti-1Cu-0.5Nb, Gr.1 and Gr.2 sheets in longitudinal(L), diagonal(D) and transverse(T) directions Ti-1Cu and Ti-1Cu-0.5Nb were subjected to final annealing at 750°C for 1h

	Direction	0.2%PS (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Ti-1Cu	L	195	408	45.2
	D	230	364	46.9
	T	273	366	36.5
Ti-1Cu-0.5Nb	L	228	433	50.4
	D	252	387	49.5
	T	294	384	37.6
Gr.1 CP-Ti	L	181	313	50.8
	D	205	280	55.1
	T	228	305	39.0
Gr.2 CP-Ti	L	251	383	36.3
	D	260	351	37.6
	T	279	368	32.2

値は 2.5 に向上する。

図6に、650～750°Cで焼鈍した Ti-1Cu の L 方向 r 値と全伸びを示す。全伸びは高温で焼鈍したものほど高くなっているが、r 値は小さくなっている。図7は 670°C、690°C 焼鈍の高 r 値材と、比較的 r 値の小さい 750°C 焼鈍材の (0002) 極点図である。前者は極点図の中央部 (Center Pole) への集積がやや大きくなっている<sup>8,9)</sup>。このように、本合金は、焼鈍条件で Ti<sub>2</sub>Cu の析出や粒成長に関連して形成する集合組織を変化させ、異方性の制御が可能である。

図8はこの 690°C で焼鈍した厚さ 0.5mm の Ti-1Cu 板の角筒絞りの例である。高めの r 値の焼鈍条件を選択した本材は、コーナー R が 1mm の極めて厳しい加工条件ながら、問題なく成形できた。

### 3.3 耐クリープ性

実機製造した板厚 1.5mm の Ti-1Cu および JIS 2 種純チタン冷間圧延焼鈍板を試験材として高温クリープ特性を調査した。試験温度は 650°C とした。これは、排気系部品の常用使用温度として便宜的に設定した温度である。最初に、高温引張試験で 0.2% 耐力を測定し、クリープ試験応力を設定した。クリープ試験は高温引張試験と同形状の試験片

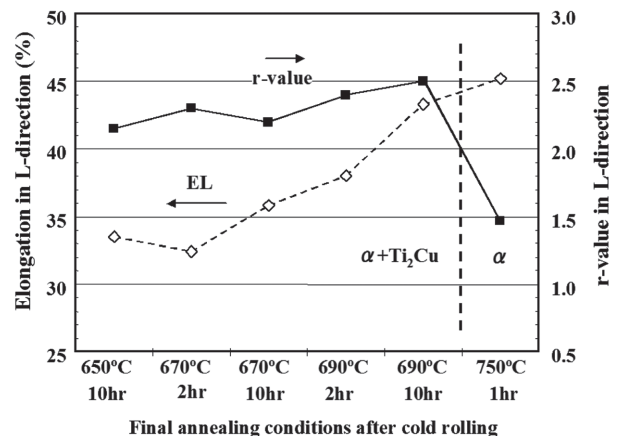


図6 1.5mm 厚 Ti-1Cu 材の L 方向 r 値に及ぼす最終焼鈍条件の影響

Influence of final annealing conditions on elongation and r-value in longitudinal direction in Ti-1Cu sheets of 1.5mm in thickness

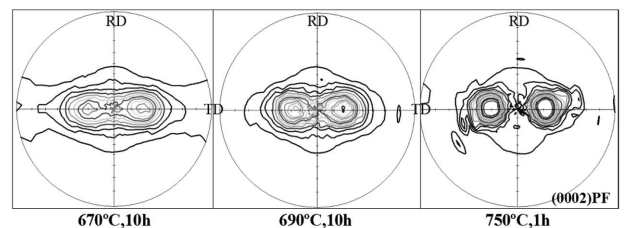


図7 Ti-1Cu 薄板の (0002) 極点図  
焼鈍温度: a) 670°C 10h, b) 690°C 10h, c) 750°C 1h  
(0002) Pole figures of Ti-1Cu sheets annealed  
a) At 670°C for 10h, b) At 690°C for 10h and c) At 750°C for 1h

(全長 120mm, ゲージ長 35mm, 平行部幅 10mm) を用いて, 大気中にて実施した。なお, 試験材の断面試験観察により, 試験中の酸化の影響は僅少であるとみなしている。

クリープ試験における試験応力を, 10, 20, 40MPa に設定した。これらは, 650°C における Ti-1Cu の 0.2% 耐力の 14, 28, 56%, JIS2 種純チタンの 0.2% 耐力の 32, 65, 129% に相当する。試験応力 40MPa は JIS2 種純チタンの 0.2% 耐力を上回るが, 同一条件での試験を優先し実施した。また, クリープ試験は基本的に破断まで行ったが, 一部はマイクロ組織観察用試料採取のため途中で中断した。

図 9 に, 3% クリープ変形を生じる時間と試験応力の関係を示す。Ti-1Cu と JIS2 種純チタン材の結果を比べると, いずれの応力下でも 3% クリープ変形までの時間は Ti-1Cu の方が JIS2 種純チタンよりも長い。すなわち, これは 650°C における耐クリープ性は Ti-1Cu の方が JIS2 種純チタンより優れていることを意味している<sup>10)</sup>。

クリープ試験材の内部組織を観察することにより, Ti-1Cu の耐クリープ特性が優れる理由について考察した。図

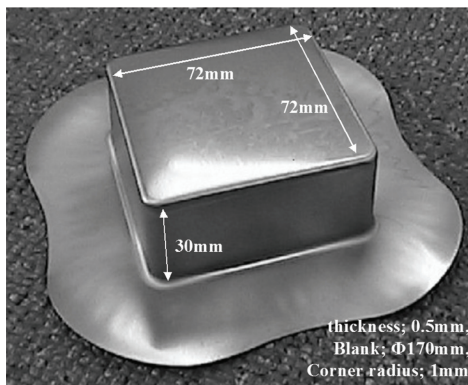


図 8 670°C 10h 焼鈍した 0.5mm 厚 Ti-1Cu 薄板の角筒絞り  
Rectangular drawn cup of Ti-1Cu sheet of 0.5mm in thickness, annealed at 670°C for 10h

10 (a) は, 650°C 20MPa 試験応力下で約 25% の歪が導入された Ti-1Cu のクリープ試験片の透過電子顕微鏡 (TEM) 観察による内部組織である。粒内には転位が比較的高密度で見られ, 一部はネットワーク (亜粒界) を形成している。このことはクリープ変形した Ti-1Cu が典型的な回復組織であることを示している。粒内および粒界に見られる  $Ti_2Cu$  (エネルギー分散型 X 線分光 (EDX) で確認) は, クリープ変形中に析出したものではなく, 析出はあっても極少量であり, 固溶 Cu 量は試験中ほぼ一定であったと推察される。

一方, 図 10 (b) は純チタンの内部組織である。純チタンでは, 650°C, 20MPa の応力下で Ti-1Cu とほぼ同程度の 25% のクリープ歪が導入されたにもかかわらず, 亜粒界が認められた程度で, 転位密度は, Ti-1Cu より低い。

以上から, Ti-1Cu では, Cu の固溶による固溶硬化と高転位密度による加工硬化がすべりを抑制し, この効果が細粒組織である等のクリープ促進効果を上回り, 優れた耐ク

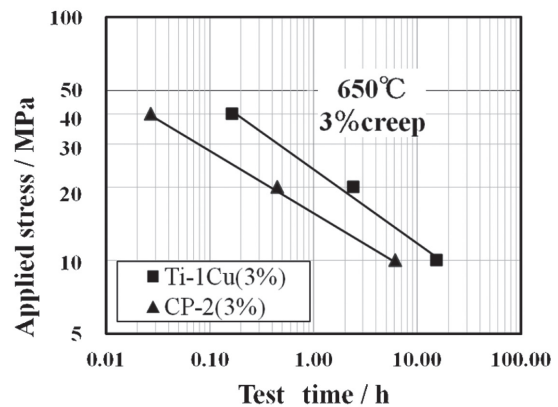


図 9 650°C における試験応力と 3% クリープ変形を生じる時間の関係  
Relationship between applied stress and time needed to be deformed to 3% creep strain at 650°C

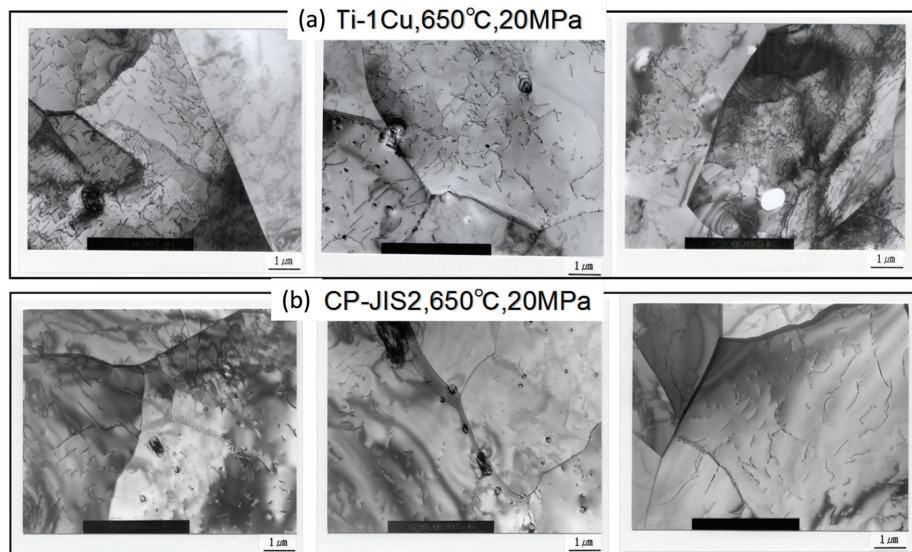


図 10 650°C, 試験応力 20MPa で 25% 変形した (a) Ti-1Cu と (b) 純チタン 1 種材の TEM 組織  
TEM micrographs of (a) Ti-1Cu and (b) CP Class-1 deformed 25% by the stress of 20MPa at 650°C





図 11 Ti-1Cu-(0.5Nb) の二輪車，四輪車排気部材への適用例  
Examples of application of Ti-1Cu-(0.5Nb) for motorbike and automobile exhaust systems

リーブ性が得られたものと考えられる。

#### 4. 自動車排気部材への適用

高温強度と耐酸化性に優れた Ti-1Cu および Ti-1Cu-0.5Nb 合金は，Cu 添加と低酸素化，および必要に応じ Nb 添加という，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，Super-TIX®10CU および Super-TIX®10CUNB として，自動車排気系用材料として既に広く応用されている。例として，Super-TIX®10CU は 2007 年頃からスズキ GSX シリーズ（二輪車）のマフラーで特に耐熱性が要求される部位に使用されている（図 11(a)）。

また 2009 年から日産 GT-R spec-V，現在は GT-R EGOIST のマフラー（エキゾーストパイプからテールパイプフィニッシャーまで，図 11(b)）に使用され，ステンレス鋼製に比べ大幅な軽量化を実現している<sup>11)</sup>。また，Super-TIX®10CUNB は，ヨーロッパ最大の排気系部品メーカー，Akrapovic で，二輪用（図 11(c)）のみならず四輪用のマフラー（図 11(d),(e)）の一部に使用されている。これらはいずれも，本合金の室温における高加工性と高い高温強度，高耐酸化性，耐高温クリープ性が評価され，活用されたものと考えている。

#### 5. さらなる高温高強度合金の開発

以上述べたように，Ti-1Cu および Ti-1Cu-0.5Nb は，自動車排気系用材料として世間に認知され広く応用に供され始めているが，排気部材として一般的に使用されるフェライト系ステンレス（例えば SUS436JIL）と比較した場合，高温耐熱性に関して，まだ十分とは言えない。今後さらなる普及のためには，高温耐熱性のさらなる向上が不可欠である。筆者らは最近 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を開発した。開発合金の高温引張強度を図 12 に示す。500℃以上の高温域における高温強度は Ti-1Cu，Ti-1Cu-0.5Nb に比べて約 1.5 倍，純チタン 2 種材に比べ約 3 倍の，高温強度の著しく高い，新しい Ti-Cu 系合金

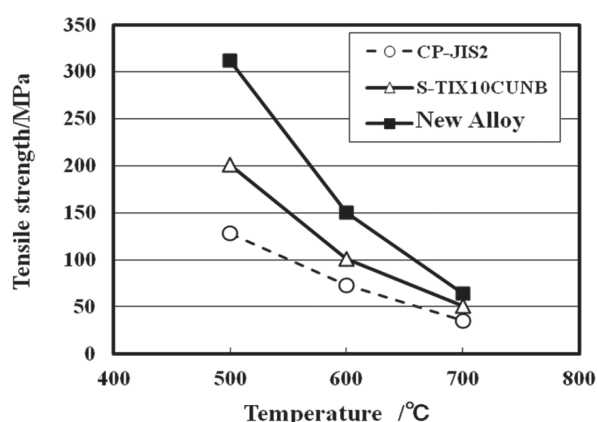


図 12 最新開発合金と従来材の高温強度  
Tensile strength of the recently developed alloy at elevated temperature compared to the conventional ones

である。本合金も製造条件調整により，ほぼ純チタン 2 種材並みの室温加工性を有している。

#### 6. 結 言

固溶強化添加元素として Cu を選択することにより，自動車排気系用材料 Ti-Cu 系合金を開発した。それぞれ 700℃，800℃までの使用を想定した Ti-1Cu および Ti-1Cu-0.5Nb は，実際に排気部材として既に広く使用されている。また，800℃までの高温強度を同上合金に比べてさらに向上させた新しい Ti-Cu 系合金も開発した。これらの合金は，高耐熱性（高温強度）と高加工性という二つの相反する特性を併せ持ち，今後ますます自動車排気系材料としての幅広い適用が期待される。

#### 参考文献

- 1) 大塚広明：チタン. 60 (2), 26-32 (2012)
- 2) 大塚広明，藤井秀樹，高橋一浩，正木基身，佐藤麻里：まてりあ. 49, 75-77 (2010)
- 3) 忝倉功和：R&D 神戸製鋼技報. 54 (3), 38-41 (2004)

- 4) Kosaka, Y., Fox, S.P., Faller, K., Reichman, H.: Cost-affordable Titanium Symposium Dedicated to Professor Harvey Flower. TMS The Minerals, Metals & Materials Society, 2004, p. 69-76
- 5) 屋敷貴司, 山本兼司: R&D 神戸製鋼技報. 55 (3), 42-47 (2005)
- 6) 藤井秀樹, 前田尚志: 新日鉄住金技報. (396), 16-22 (2013)
- 7) Kubaschewski, O., Hopkins, B.E.: Oxidation of Metals and Alloys. Second Edition. Butterworths, London, 1967, p. 25-26
- 8) Otsuka, H., Fujii, H., Takahashi, K., Ishii, M.: Ti-2007 Science and Technology. Ed. Niinomi, M., Akiyama, S., Ikeda, M., Hagiwara, M., Maruyama, K., JIM, p. 1391-1394, 2007
- 9) Otsuka, H., Takahashi, K., Itami, Y., Fujii, H., Tokuno, K.: Ref. 8), p. 251-254, 2007
- 10) Otsuka, H., Kawakami, A., Fujii, H.: Ti-2011 Proceedings of the 12th World Conference on Titanium. Ed. Lian Zhou, Hui Chang, Yafeng Lu, Dongsheng Xu, The Nonferrous Metals Society of China, 2012, p. 2215-2219
- 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, 17-20 (2009)



大塚広明 Hiroaki OTSUKA  
チタン・特殊ステンレス事業部  
チタン技術部 主幹 博士(工学)  
東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071



高橋一浩 Kazuhiro TAKAHASHI  
鉄鋼研究所 チタン・特殊ステンレス研究部  
主幹研究員



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



森 健一 Kenichi MORI  
鉄鋼研究所 チタン・特殊ステンレス研究部  
主幹研究員