

チタンおよびチタン合金の楽器への応用

新家 光雄*・武田 淳仁**・赤堀 俊和**・戸田 裕之**
 鈴木 亨***・渡邊 勝美****・山下 正文*****・曾根 圭司*****

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 55, No. 12 (2005), pp. 642-645

Application of titanium and its alloys to musical instruments

Mitsuo NIINOMI*, Junji TAKEDA**, Toshikazu AKAHORI**, Hiroyuki TODA**,
 Toru SUZUKI***, Katsumi WATANABE****, Masahumi YAMASHITA***** and Keiji SONE*****

Keywords: titanium alloy, musical instrument, elastic modulus, density, metal allergy

1. はじめに

以前、アトリエと呼ばれる金管楽器の手作り工房にて、金属アレルギーを有するトランペット奏者からのマウスピースの改良依頼があると聞いた。マウスピースには、黄銅(Cu-Zn系合金)あるいは洋白(Cu-Ni-Zn系合金)が用いられ、銀めっきを施したものが多い¹⁾。近年の純金属単体の細胞毒性評価にて、黄銅および洋白の構成元素である銅およびニッケルが細胞毒性を示すことが指摘されており(図1)²⁾、また特にニッケルはアレルギーを引き起こしやすい金属元素であることも指摘されている²⁾。銀等でのコーティングおよびめっきでは、ある程度の使用期間中に下地金属が露出し、金属ア

レルギー奏者にとって、マウスピースの長期間の使用が困難となることは明らかである。また、銀の細胞毒性は決して低くない。アトリエでは、そのような奏者には、マウスピースの唇との接触部を削り、プラスチックを貼ることで対処している。しかし、マウスピースは、奏者の唇を支える役割を持つので、奏者の唇と接触するマウスピースの部分の微妙な形状が演奏の成否に大きく影響する。そのため、この部分は、楽器本体から取り外し可能になっており、演奏者が自身に合ったものを選択して使用している。また、長期間使用したマウスピース内部には、多量の主として緑色を呈する腐食生成物(さび)が観察され、その経口からの生体毒性が懸念される。このようなことから、楽器用マウスピース等では、生体毒性

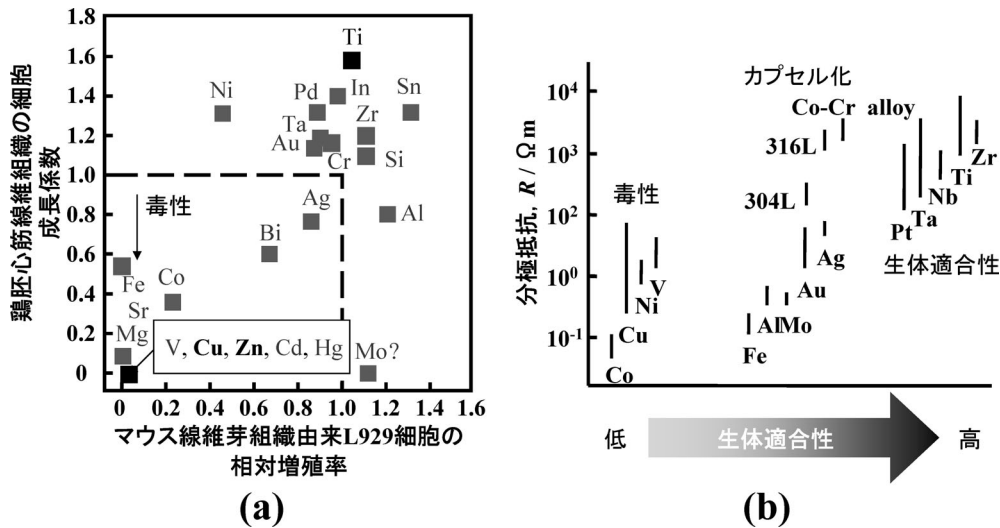


図1 金属の生体適合性：(a) 純金属単体の細胞毒性，(b) 純金属単体，Co-Cr合金および生体用ステンレス鋼の生体適合性と分極抵抗との関係

* 東北大学金属材料研究所 (〒 980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1)。Institute for Materials Research, Tohoku University (2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi 980-8577).

** 豊橋技術科学大学生産システム工学系 (豊橋市)。Department of Production Systems Engineering, Toyohashi University of Technology (Toyohashi-shi, Aichi).

*** 合資会社鈴廣金属工業 (西尾市)。Suzuhiro Metal Industry Co., Ltd (Nishio-shi, Aichi).

**** 渡辺精工株式会社 (西尾市)。Watanabe Seiko Co., Ltd (Nishio-shi, Aichi).

***** 西尾市役所 (西尾市)。Nishio City Municipal Office (Nishio-shi, Aichi).

***** ヤマハ株式会社 (静岡県磐田郡)。Yamaha Co. (Iwata-gun, Shizuoka).

受理日：平成 17 年 4 月 26 日

の指摘がなく、かつアレルギーを引起しにくい金属材料を用いることが要求されるようになってきている。このような目的に適合する金属材料としてチタンおよびチタン合金が候補として取り上げられつつある。そこで、本稿では、人に優しい金管楽器用材料としてのチタンおよびチタン合金について述べる。

2. 金管楽器

楽器に送り込まれる空気によって発音する楽器は、管楽器に分類される。さらに、管楽器は、木管楽器と金管楽器とに分類される。金管楽器に分類される楽器には、トランペット、トロンボーン、ホルンおよびチューバ等がある。いずれも人間の唇をリードとして発音させるので、発音形態の分類から、「リップリードの楽器」と分類され、これに属する管楽器が金管楽器である。これら金管楽器は構造的に共通点を持ち、マウスピース、マウスパイプ、バルブ、チューニングスライドおよびベルといった部分の分類がそれぞれの金管楽器に当てはまる。

金管楽器には、人類の歴史とともにかなり古くから黄銅を始めとする銅合金が用いられてきた³⁾。すなわち、いずれの金管楽器においても、唇はマウスピースと接するため、前述したように金属アレルギーを発現する可能性があり、実際にそのような事例が発生している。

銅合金は、外観的に美しいこと、さらに、展延性がよく、加工性がよいことから金管楽器用材料として多用されている。一番の理由としては、加工のしやすさ等も挙げられるが、その音色が古くから金管楽器の音色として音楽の中での位置を保ってきたからである。

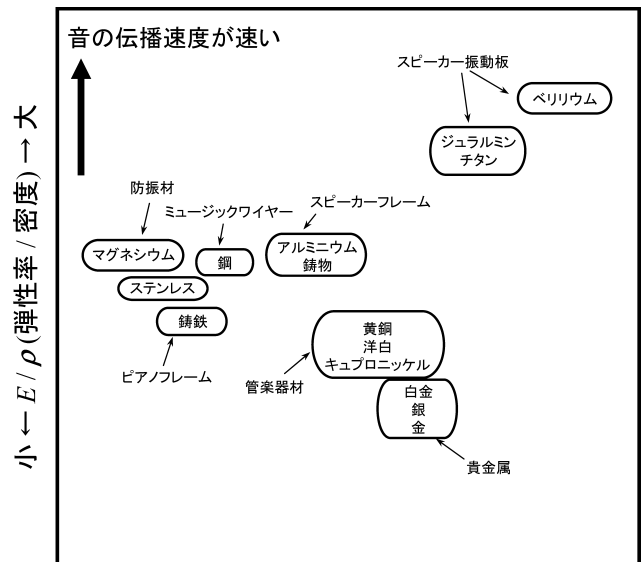
3. 金属の音響的性質

金管楽器の音は、マウスピースとベルとの間の空気柱の振動が第一ではあるが、管体も振動し、表面から音が放射される。当然、材料によって音色にも相違が生じることになる。金管楽器の発音原理については後述する。銅合金以外のステンレスやアルミニウムで楽器を作る試みもあったようだが、加工性を別としてもその音色にはどうしても違和感が残り、使い物にならなかったと言う⁴⁾。

従来から音響用材料としては、 E (弾性率)/ ρ (密度) の値が高いものがよいと言われている。すなわち、軽く曲がりにくい材料がよいことになる。 E/ρ の値が大きいということは、理論的に音の伝播速度が速いことになる。

一方、音の振動を材料の内部で吸収しない方がよいと言われている。この点からは、音響材料では、内部減衰率の低いことが望ましいことになる。

図2⁵⁾に現在使われている楽器用の金属材料における E/ρ の値と内部減衰率との関係を示す。楽器用の金属材料としては内部減衰率の低いものがよいようである。さらに、楽器の場合、音色も大切にキンキンとした音は好まれないので、 E/ρ は思ったよりも高くない値であることが推察できる。一般に、内部損失の少ない材料ほど響きがよく、艶があって硬い、つまり金属らしい音色であると言われている⁴⁾。しかし、音色については数値等による表現ができないので、紙面ではこの程度しか記述できないのが残念である。



大 ← 音の減衰 → 小
図2 金属の音響的性質

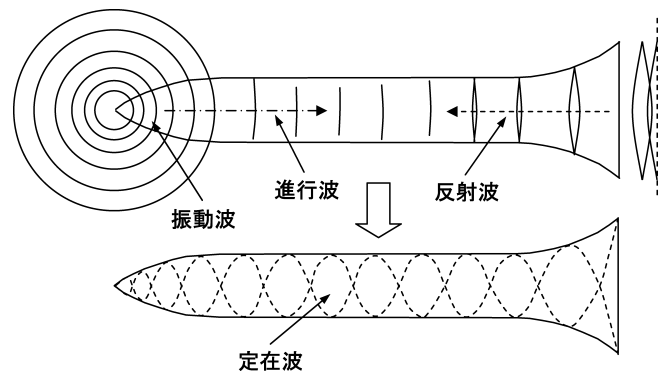


図3 金管楽器の発音原理模式図

4. 金管楽器の発音原理とマウスピースの役割

図3に金管楽器の発音原理を模式的に示す。演奏者の口から送り込まれた空気はマウスピースの部分で振動波を起す。これがベルの部分で管の内部に向かって反射する反射波となる。この反射波と次の進行波が共鳴し合っ、定在波という図に示したような波が起こり、これがベルの部分から管外に放射されて聴衆の耳に達するわけである。また、金管楽器のマウスピース側は閉鎖となり、全音域で、常に音圧(定在波の中の空気の膨張収縮による圧力差)が最大となる。したがって、マウスピースは、板厚分布からくる重量の変化、材質および加工法による物性の変更等により、楽器から発生する音を、最も効率よく変化させることができる重要な部分の一つである。この重要な役割を持つマウスピースは、リム、カップ、スロートおよびバックボアの径バランスと、重量、材質およびその他の物性との協調で成り立っている(図4)。スロート内径(例えば、ヤマハスタンダードモデルで約4mm)を直径で0.1mm変更しても、吹奏感に大きな影響を及ぼすと報告されている⁷⁾。そのため、ヤマハ(株)では製品のスロート内径の誤差が設計基準寸法に対して±0.025mmの範囲に納まるように品質管理を行っている⁷⁾。

このマウスピースの総合バランスが上手く奏者の状態と同調した場合に、初めてマウスピースはその能力を最大限に発

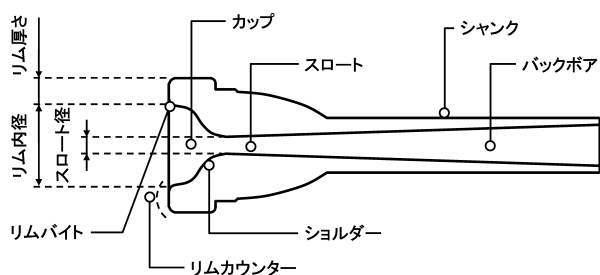


図4 マウスピースの断面模式図



図5 TITANOVIATION® ヤマハ 17C4 タイプマウスピースの外観写真

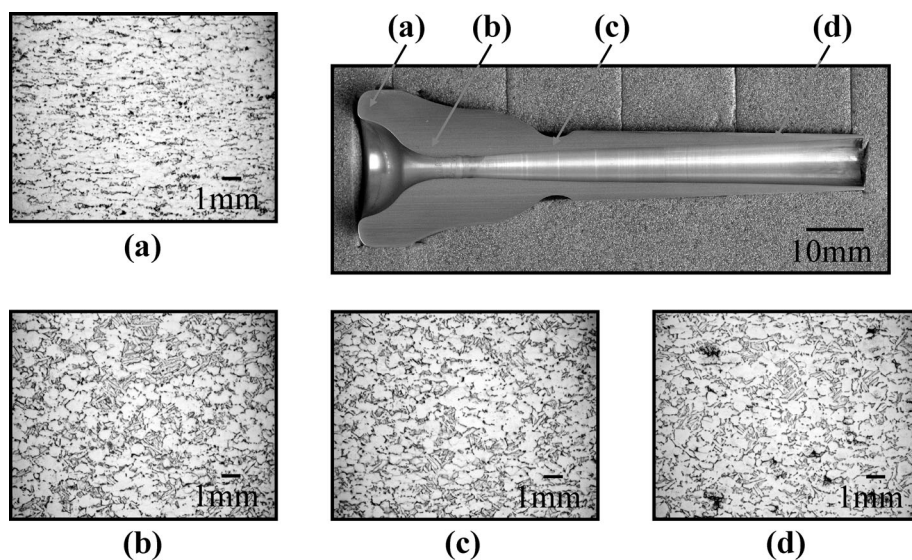


図6 TITANOVIATION® ヤマハ 14C4 タイプマウスピースの断面写真およびその各部のマイクロ組織の光学顕微鏡写真：
(a) リム、(b) スロート、(c) スロート中央および (d) シヤンク

揮することができる⁷⁾。

5. チタンの特性

チタンの特性として、まずは「軽くて、強くてさびない」ことが挙げられる⁶⁾。また、チタンの持つ「生体毒性および金属アレルギーを示さない」という特性は他の金属材料が持ち得ない特性である²⁾。このようにチタンは、他の金属材料では持ち得ない非常に優れた特性を示す素晴らしい金属材料である。

音に関する特性もまた、図2において黄銅および洋白と比較して右上に位置することから優れていることがわかる。

6. 既存のチタン製マウスピース

筆者らはヤマハ(株)の協力を得て、既存のチタンおよびチタン合金製マウスピースについて調査した。その結果、オーストリアの Anton Paar® GmbH が TITANOVIATION® シリーズにてチタン合金製マウスピースを 14 種類市販していた⁸⁾。その内、3 種類はヤマハのマウスピースとほぼ同一形状であった。TITANOVIATION® に用いられている材料および加工法等を調査するためにそれら 3 種類から、カップ深さの異なる 2 種類(ヤマハ 14C4 タイプおよび 17C4 タイプ)を購入した。日本で購入すると送料、保険および手数料を含めて 1 本約 2 万円であった。図5および図6に TITANOVIATION® のヤマハ 14C4 タイプの概観、断面および断面のマイクロ組織の光学顕微鏡写真を示す。調査した結果、TITANOVIATION® に用いられている材料は、Ti-6Al-4V 合金 (grade 5) 圧延材であり、機械加



図7 ヤマハ 11C4 マウスピースの外観写真

工にて作製されていた。洋白等の従来材が用いられている代表的なマウスピースの形状であるヤマハ 11C4 の概観写真を図7に示す。ヤマハ 11C4 の外形と比較して TITANOVIATION® ヤマハ 14C4 タイプのそれは簡素化されている。さらに、TITANOVIATION® ヤマハ 17C4 タイプの外形は 14C4 タイプのそれと同形状であった。カップおよびスロート形状のみヤマハモデルをコピーしたようである。推測であるが、加工コストを低減させるために外形を簡素化したと考えられる。

TITANOVIATION® に用いられた Ti-6Al-4V 合金に含まれる V もまた生体に対して細胞毒性を示すことが指摘されている(図1)。さらに、TITANOVIATION® をヤマハ(株)のテストプレイヤーが試奏したところ、既存の黄銅製マウスピースと比較して音に深みがなく、軽い音であった。Ti-6Al-4V 合金 ($E=113.8\text{ GPa}$ および $\rho=4.43\text{ Mg/m}^3$) の E/ρ は 25.7 であり、黄銅 ($E=98\text{ GPa}$ および $\rho=8.63\text{ Mg/m}^3$) のそれは 11.4 である。それゆえ、上述したように E/ρ が高すぎるのが原因であると考えられる。

7. 人に優しいチタン製マウスピース

筆者らは黄銅および洋白と比較して音が減衰せず、耐食性に優れ、生体に対し無毒性であるチタンに注目し、人に優しいチタン製マウスピースを開発することを目的とし、チタンの金管楽器への適用の可能性を調査・検討している。その一部を紹介する。

筆者らは金属の音に影響を及ぼす因子として、 E/ρ に注目した。黄銅の E/ρ は 11.4 である。また、純チタン (JIS 2 種: $E=102\text{ GPa}$ および $\rho=4.51\text{ Mg/m}^3$) のそれは 22.6 である。そのため、純チタンでは黄銅と比較して音の伝播速度が速く、金管楽器に用いた場合、TITANOVAION® と同様にキンキンの高い音を発生すると考えられる。ただし、後述するように、音楽のジャンルによっては、このような音が好まれる場合もある。したがって、チタンの弾性率を低下させ、密度を増加させる必要がある。そこで、生体に対し無毒性な元素の中で、チタンに添加することで弾性率を低下させることが可能で、かつチタンより密度が高い元素としてニオブおよびタンタルを選択した。ニオブおよびタンタルの密度は、それぞれ 8.56 Mg/m^3 および 16.65 Mg/m^3 である。

Ti-Nb 系合金では、Nb 添加量を 10, 20, 40 および 50 mass% とした。Ti-Ta 系合金では、Ta 添加量を 20, 40, 60 および 80 mass% とした。各純金属を総量 50 g となるように秤量後、非消耗式アーク炉にて溶製した。その後、1273K にて 21.6ks 保持後水冷の均質化処理を施した。得られた各合金の弾性率および密度は、それぞれ自由共振法およびアルキメデス法にて測定した。

図 8 に Ti-Nb 系合金および Ti-Ta 系合金の弾性率および密度を示す。Ti-Nb 系合金の弾性率は、Ti-40 mass% Nb にて最小値を示す。その値は、56 GPa である。また、Ti-Ta 系合金の弾性率は、Ti-60 mass% Ta にて最小値を示す。その値は、74.2 GPa である。したがって、純チタンに Nb および Ta を添加することで弾性率は、それぞれ最大で 28% および 45% 程度低下する。Ti-Nb 系合金および Ti-Ta 系合金の密度は、ニオブおよびタンタルの添加量の増加に伴い顕著に増加する。

図 9 に Ti-Nb 系合金および Ti-Ta 系合金の E/ρ を示す。Ti-Nb 系合金および Ti-Ta 系合金の E/ρ は、ニオブおよびタンタルの添加量の増加に伴い、それぞれ 10.4~16.3 および 7.38~14.7 の範囲にて変化している。本研究にて目標値としたのは、黄銅と同等の 11.4 である。Ti-Nb 系合金および Ti-Ta 系合金ともにニオブおよびタンタルの添加量を変化させることで目標値を満たすことがわかる。

さらに、時代が変われば音の好みも変わるように楽器に求められる音も変わってくる。例えば、華やかに高音域を演奏するリード奏者には E/ρ の値が高いチタン合金が好まれるであろう。Ti-Nb 系合金および Ti-Ta 系合金は、ニオブおよびタンタルの添加量を変化させることで E/ρ の値を黄銅以下から黄銅の 2 倍程度まで制御することが可能であり、広範囲に音を変化させることが可能であろうことが推察される。

8. 最後 に

筆者らは、ヤマハ(株)との共同開発にて人に優しいマウスピース用材料の開発に取り組んでいる。上述したようにマウスピースの形状もまた音に影響を及ぼすため、TITANOVAION®

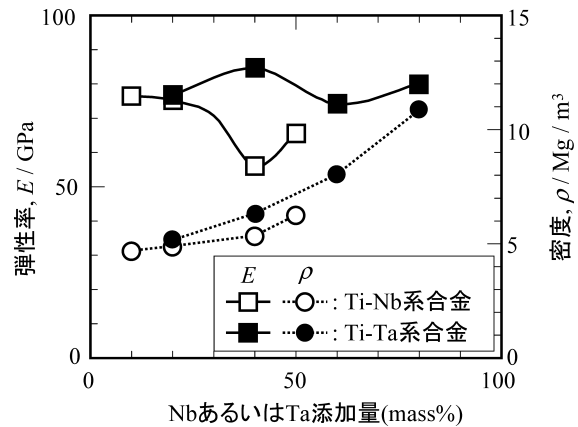


図 8 Ti-Nb 系合金あるいは Ti-Ta 系合金の弾性率および密度と Nb あるいは Ta 添加量との関係

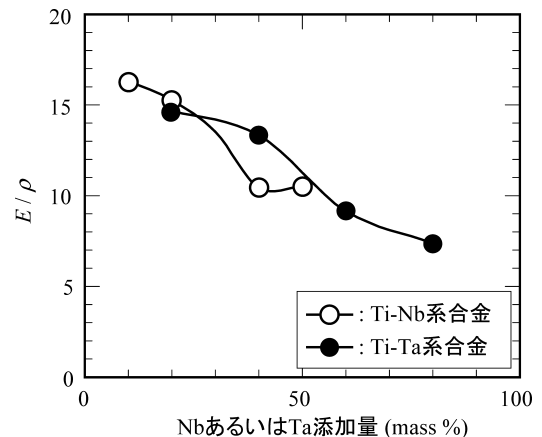


図 9 Ti-Nb 系合金あるいは Ti-Ta 系合金の E/ρ と Nb あるいは Ta 添加量との関係

のように外形の加工を簡素化することは許されない。そこで、切削加工コストを省くために、精密鑄造を用いたマウスピースの開発にも取り組んでいる。現在、純チタンを用いた精密鑄造にてヤマハモデルのマウスピースの試作段階に至っている。今後、本研究で得られた Ti-Nb 系合金および Ti-Ta 系合金にて人に優しいマウスピースを試作し、金属アレルギーに苦しむトランペット奏者に提供したいと考えている。

このように音と金属との関係は、いまだわからないことが多く、音色については数値等による表現ができない。それゆえ、今後の研究によって、人に優しく、楽器により適した金属材料が開発され応用されれば、安全で安心な素晴らしい音の楽器が生まれる可能性が大きい。金属材料にとって楽器分野は、夢多き分野である。

参考文献

- 1) 竹内明彦：素形材, **27** (1986), 19-23.
- 2) 新家光雄：機能材料, **20** (2000), 36-44.
- 3) 竹内明彦, 渡辺泰男, 若松邦光：月刊新素材, **3** (1992), 54-57.
- 4) 石本祐吉：金属, **68** (1998), 650-653.
- 5) 佐田岳夫：電気製鋼, **64** (1993), 269-275.
- 6) 財団法人チタン協会編：チタンの世界, 日本チタン協会, (1995).
- 7) ヤマハ株式会社ホームページ, URL: <http://www.yamaha.co.jp/>
- 8) Anton Paar® GmbH ホームページ, URL: <http://www.titanovation.com/>