連携記事

歯科治療と金属材料
Metals for Dental Treatments

塙　隆夫
Takao Hanawa
東京医科歯科大学
生体材料工学研究所　教授

1 はじめに

歯科治療は材料への依存度が高く、歯科治療技術は歯科材料の開発と改良によって進歩してきたといっても過言ではない。これは、歯質が再生しない組織であり、欠損した場合には人工物で修復するしかなかったためである。医療分野では、金属は古くから歯科材料として利用され、少なくとも2500年前のエジプトでAuのワイヤーが歯の固定に使われていた[1)]。また、充填修復を行うために、Au箔や融点の低いSnが使用され、次いでアマルガムが使われている。義歯床用にはCo-Cr合金が、歯科修復鋳造用にはAu合金が開発され、これらは現在でも使用されている。ここでは、歯科治療に使用される金属材料の用途、種類、特徴について、診療の種類に従って概要を述べる。表1に歯科での金属の用途と種類を、表2に歯科用金属材料に関するISO規格を、表3にJIS規格を示す。

2 歯冠修復

2.1 成形充填

齲蝕（虫歯）や外傷などの理由で歯冠（歯の口腔内に露出している部分）の形態あるいは機能の一部が損なわれた場合、材料による修復が行われる。

臼歯の咬合面（噛み合わせる面）や前歯の隣接面などでの小さい欠損の場合、可塑性のある修復材を窩洞（病巣部を除去し適切な形態を付与した欠損部）に充填、成形した後に硬化させることによって修復を行う。Auの展延性を利用したAu箔の圧接充填と歯科用アマルガム充填が代表的な金属成形充填法である。Ag、Sn、Cuを主成分とするアマルガム合金粉末（主成分はAg_3Snで表される金属間化合物）とHgを練和した可塑性のアマルガム泥を充填し、硬化後研磨仕上げを行う（図1）。アマルガム充填修復は治療効果や操作性に優れているため、変色や破折などの欠点も有するが古くから広

表1　歯科用に使用されている主な金属材料

用途	金属材料
充填材	Au箔、Ag-Sn(-Cu)アマルガム
インレー、クラウン、ブリッジ、クラスプ、義歯床	Au-Cu-Ag合金、Au-Cu-Ag-Pt-Pd合金、Ag-Pd-Cu-Au合金、Ag-(Sn-In-Zn)合金、Ti、Ti-6Al-7Nb合金、Co-Cr合金、SUS304鋼、SUS316L鋼
硬質レジン前装鋳造冠、陶材焼付鋳造冠	Au-Pt-Pd合金、Ni-Cr合金
ろう材	Au-Cu-Ag合金、Au-Pt-Pd合金、Ag-Cu合金、Ag-Pd-Cu-Zn合金
歯科インプラント（歯根部）	Ti、Ti-6Al-4V合金、Ti-6Al-7Nb合金
矯正用ワイヤー	SUS316L鋼、Co-Cr合金、Ti-Ni合金、Ti-Mo合金
磁性アタッチメント	Sm-Co合金、Nd-Fe-B合金、Pt-Fe-Nb合金、SUS444鋼、SUS447J1鋼、SUS316L鋼
治療器具（注射針、バー、スケーラー、歯周プローブ、歯科用ピンセット、メス、骨膜剥離子など）	SUS304鋼など

表2　歯科用金属材料に関するISO規格

ISO 1942-5：1989	Dental vocabulary -- Part 5：Terms associated with testing
ISO 3630-1：1992	Dental root-canal instruments -- Part 1：Files, reamers, barbed broaches, rasps, paste carriers, explorers and cotton broaches
ISO 7405：1997	Dentistry -- Preclinical evaluation of biocompatibility of medical devices used in dentistry -- Test methods for dental materials
ISO 22674	Dentistry -- Metallic materials for fixed and removable restorations and appliance
ISO 9333：2006	Dentistry -- Brazing materials
ISO 14801：2003	Dentistry -- Fatigue test for endosseous dental implants
ISO 15841：2006	Dentistry -- Wires for use in orthodontics
ISO 24234：2004	Dentistry -- Mercury and alloys for dental amalgam
ISO 10271：2001	Dental metallic materials -- Corrosion test methods
ISO 22674：2006	Dentistry -- Metallic materials for fixed and removable restorations and appliances
ISO/TR 11175：1993	Dental implants -- Guidelines for developing dental implants
ISO/TS 11405：2003	Dental materials -- Testing of adhesion to tooth structure
ISO/TS 14569-2：2001	Dental materials -- Guidance on testing of wear -- Part 2：Wear by two- and/or three body contact
ISO/TS 17576：2004	Dentistry -- Corrosion tests for amalgam
ISO/TS 22911：2005	Dentistry -- Preclinical evaluation of dental implant systems -- Animal test methods
ISO 5832-2：1999	Implants for surgery -- Metallic materials -- Part 2：Unalloyed titanium
ISO 5832-3：1996	Implants for surgery -- Metallic materials -- Part 3：Wrought titanium 6-aluminium 4-vanadium alloy
ISO 5832-11：1994	Implants for surgery -- Metallic materials -- Part 11：Wrought titanium 6-aluminium 7-niobium alloy
ISO 6475：1989	Implants for surgery -- Metal bone screws with asymmetrical thread and spherical under-surface -- Mechanical requirements and test methods
ISO 13782：1996	Implants for surgery -- Metallic materials -- Unalloyed tantalum for surgical implant applications
ISO 16428：2005	Implants for surgery -- Test solutions and environmental conditions for static and dynamic corrosion tests on implantable materials and medical devices
ISO 16429：2004	Implants for surgery -- Measurements of open-circuit potential to assess corrosion behaviour of metallic implantable materials and medical devices over extended time periods
ISO 20160：2006	Implants for surgery -- Metallic materials -- Classification of microstructures for alpha＋beta titanium alloy bars

く臨床応用されてきた。式（1）の反応、つまりHg中にAgとSnが溶け出すことによる偏晶反応により融点が上昇し硬化する。また、Cuが多い組成の合金では式（2）の反応で硬化する。

$$Ag_3Sn(\gamma相)+Hg = Ag_3Sn(\gamma)+Ag_2Hg_3(\gamma_1)+Sn_8Hg(\gamma_2) \cdots\cdots(1)$$

$$Ag_3Sn(\gamma)+Ag\text{-}Cu+Hg = Ag_3Sn(\gamma)+Ag_2Hg_3(\gamma_1)+Cu_6Sn_5(\eta') \cdots\cdots(2)$$

アマルガムは硬化体であってもHgを多量に含むため、仕上げ切削による診療室廃液への、あるいは使用中に口腔内へのHgの溶出が懸念され、アマルガムの安全性については多くの議論がなされた[3)]。しかし、歯質接着性を有し審美性にも優れたコンポジットレジン（高分子マトリックス中にセラミックス粒子をフィラーとして含む複合材料）が開発され、現在ではほとんどコンポジットレジンが使用されている。

2.2　鋳造歯冠修復

歯冠の欠損部が大きく、修復物に強度が必要な場合、口腔外で作製された金属鋳造体を歯科用セメントで合着することにより修復を行う。欠損部の形態により、周囲を歯質に囲まれた窩洞に適合するインレーと、歯冠を覆うように修復するクラウンに大別される（図2）。また、クラウンによる修復の前準備として欠損部分を補う支台築造という方法がよく用いられる。

図3に鋳造歯冠修復の工程を示す。まず、歯質を削り修復に適する形態を与え（窩洞形成）、修復を施す歯列および対合歯列の型（印象）を採るとともに、対咬（噛み合わせ）関係を記録する（咬合採得）。次に、採得した印象、咬合関係によって石膏模型を作製し、この上でろう（ワックス）原型を調製する。このろう原型を埋没、焼却して鋳型とし、鋳造を

表3　歯科用金属材料に関するJIS規格

JIS T 0302：2000	金属系生体材料のアノード分極試験による耐食性の評価方法
JIS T 0304：2002	金属系生体材料の溶出試験方法
JIS T 0306：2002	金属系生体材料の不動態皮膜のX線光電子分光法（XPS）による状態分析
JIS T 0301：2000	金属系インプラント材料の細胞適合性評価方法
JIS T 7401-1：2002	外科インプラント用チタン材料 ― 第1部：チタン
JIS T 7401-2：2002	外科インプラント用チタン材料 ― 第2部：チタン　6ーアルミニウム　4ーバナジウム合金展伸材
JIS T 7401-5：2002	外科インプラント用チタン材料 ― 第5部：チタン　6ーアルミニウム　7ーニオブ合金展伸材
TR T 0001：1997	金属系インプラント材料の細胞適合性評価方法
TR T 0002：1997	金属系インプラント材料の耐食性の電気化学的評価方法
JIS T 6002：2005	歯科用金属材料の腐食試験方法
JIS T 6118：2005	歯科メタルセラミック修復用貴金属材料
JIS T 6123：2005	固定式歯科修復物用非貴金属材料
JIS T 6001：2005	歯科用医療機器の生体適合性の前臨床評価ー歯科材料の試験方法
JIS T 6121：2005	歯科メタルセラミック修復用金属材料
JIS T 6101：2005	歯科用ニッケルクロム合金線
JIS T 6102：2005	歯科用ニッケルクロム合金板
JIS T 6104：2005	歯科用コバルトクロム合金線
JIS T 6105：1991	歯科非鋳造用金銀パラジウム合金
JIS T 6106：1991	歯科鋳造用金銀パラジウム合金
JIS T 6107：1991	歯科用金銀パラジウム合金ろう
JIS T 6108：2005	歯科鋳造用銀合金
JIS T 6109：2001	歯科アマルガム用合金
JIS T 6110：1984	歯科用易溶合金
JIS T 6113：1994	歯科鋳造用14カラット金合金
JIS T 6114：1994	歯科鋳造用14カラット金合金用プラスメタル
JIS T 6115：1998	歯科鋳造用コバルトクロム合金
JIS T 6116：2000	歯科鋳造用金合金
JIS T 6116：2000/AMENDMENT 1：2005	歯科鋳造用金合金（追補1）
JIS T 6122：2005	貴金属含有量が25％以上75％未満の歯科鋳造用合金
JIS T 6124：2005	歯科非鋳造用金合金
JIS T 6125：2005	歯科非鋳造用低カラット金合金

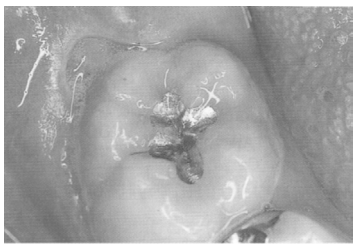
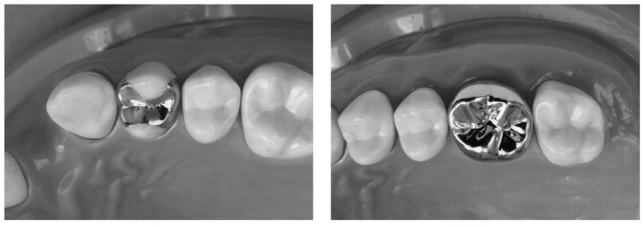


図1　アマルガム充填修復[2)]



インレー　　クラウン

図2　インレーとクラウン

行う。歯科鋳造法はロストワックス法の一種である。鋳造体を模型上および口腔内で調整、研磨仕上げし、歯科用セメントで合着するが、セメント層の厚さは数10μmであり、歯科鋳造では極めて高い精度が要求される。セメント層が厚いと露出したセメント層から崩壊が始まり、飲食物や唾液から細菌が入り込むことで二次齲蝕が起こったり、鋳造体が脱落したりする。この鋳造精度を達成するために、鋳型材（歯科では埋没材という）に石英やクリストバライトといったシリカを使い、硬化膨張および熱膨張によって鋳造収縮を補償している。

金属鋳造体を用いる歯冠修復、欠損補綴では、一般に小型の修復物では軟らかく展延性に富む合金が、大型の補綴物では強く変形しにくい合金が適用される。クラウンには、金属のみの全部鋳造冠だけでなく、審美性を高めるために鋳造冠の一部（唇面など）を歯冠色材料で作製した硬質レジン前装鋳造冠および陶材焼付鋳造冠がある。陶材焼付鋳造冠は図4に示すような構造で、鋳造体の上にセラミックス（歯科用陶材）が溶着されている。インレーやクラウンを、セラミックスやコンポジットレジンのみで作製した審美性修復物も開発されている。

インレー、クラウン、後述のブリッジ、クラスプなどの歯科修復物に使用される歯科鋳造用合金は、国内ではAu合金、Ag合金、Ti、Ti合金である。

歯科鋳造用Au合金はAu-Ag-Cu系合金であり、優れた耐食性を示すとともに展延性に富み、鋳造性、適合性に優れている。タイプ別Au合金（保険適用外）は、Auの含有量および機械的性質に従って4つのタイプ（タイプ1～4）に分かれている（表4、表5）。Au含有量の多いタイプ1（軟質）は単純インレーに、タイプ2（中硬質）は複雑インレーやクラウンに、タイプ3（硬質）はクラウンやブリッジに、タイプ4（超硬質）は強度を必要とする義歯床、義歯維持装置、ブリッジなどに使用される。タイプ3とタイプ4は熱処理によって硬化させることができる。Znは鋳造の際の脱酸剤として添加されている。この他に、22K～14Kに分類されるカラット別金合金（保険適用外）、タイプ4と同等の機械的性質を示す白金加金（保険適用外）、タイプ4合金のAuを減少させAgを増やした低カラット金合金（用途により一部保険適用可）が使用されている。

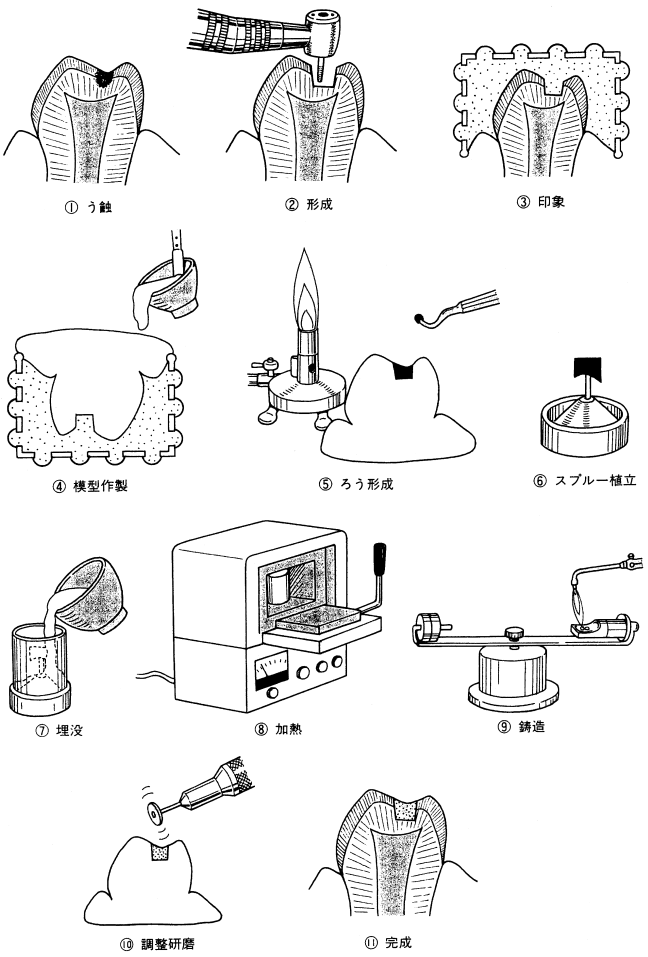


図3　歯科鋳造の工程

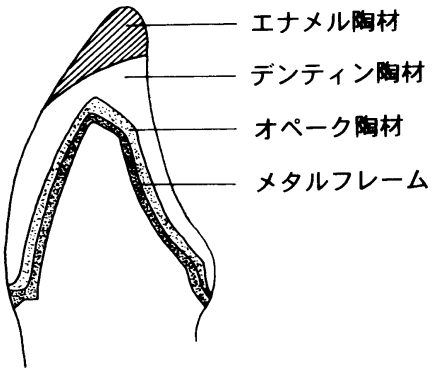


図4　金属焼付陶材の断面図

表4　歯科鋳造用金合金の特性（JIS T6116，歯科鋳造用金合金）

種類	熱処理の方法	ビッカース硬さ HV	耐力 MPa	伸び %	液相点 ℃
タイプ1	軟化	50以上 90未満	80以上	18以上	1050以下
タイプ2	軟化	90以上 120未満	180以上	12以上	
タイプ3	軟化	120以上 150未満	240以上	12以上	
タイプ4	軟化	150以上	300以上	10以上	
	硬化	220以上	450以上	2以上	

前歯の修復に多く使用される陶材焼付鋳造冠用の金合金では、鋳造体上で陶材を焼成するため、融点が高く設定されている。また、陶材との接合強度を高めるために、InやSnといった非貴金属元素が添加されている。合金中にCuやAgを含むと陶材の着色の原因となるため、Cuは含有せず、Agの添加量も微量である（表6）。Ni-Cr合金（保険適用可）は陶材焼付用として使用されているが、現在国内では生産が自粛されている。

Au合金の代用としてAg合金が使用されている。歯科では金銀パラジウム合金と呼ばれるAg-Pd-Cu-Au合金（表7：保険適用可）が多く使用されている。Agは口腔内で容易に硫化し黒変するため、これを防止するためにPdが、強度を向上させるためにCuが、耐食性を向上させるためにAuが含まれている。また、Agを主成分とし、Sn、In、Znなどを添加した低融銀合金（保険適用可）は、支台築造用に使用される。

Ti（保険適用外）は、融点が高い、湯流れがわるい、鋳造収縮率が大きい、鋳型材との反応性が高いなどの欠点があり、歯科鋳造への応用がむずかしかった。しかし、鋳造機、鋳型材の進歩によりTiの歯科鋳造技術は長足の進歩を遂げ、現在では実用化されている。また、Ti-6Al-7Nb合金も鋳造用として使用されている。

これらの歯科用合金の耐食性については、優れた解説[4-6]があるので参照していただきたい。また、口腔内では、洗口剤に含まれるフッ化物によってTiが腐食する例が知られている[7,8]。歯科鋳造に代わる成型法として、CAD/CAMが実用化されており、Tiの他、セラミックスでの成形が可能になっている。

3 歯内療法

齲蝕の程度が進み象牙質を通過すると歯髄が細菌に侵される。歯髄の細菌感染を治療するためには、感染した歯髄を除去するとともに歯髄周囲の根管を機械的に拡大し化学的に清掃する必要がある。機械的根管拡大に使用される用具が歯科用リーマー、ファイルである（図5）。根管を拡大形成するためには適度な弾性、剛性が必要であり、ステンレス鋼製のものが広く用いられてきた。近年、湾曲した根管でも良好な根管形成が可能なTi-Ni超弾性合金製のファイル（図6）が臨床応用されるようになり、性能、能率の両面で注目されている。Ti-Ni合金ファイルは切削性能が低いため、従来一般的であった手による操作ではなく、専用エンジンの回転を用いて操作する。

4 欠損補綴

4.1 ブリッジ（橋義歯）

1本～数本の歯が欠損している場合、2本～数本の歯を支台歯（義歯を支持、維持するために用いられる歯）として連

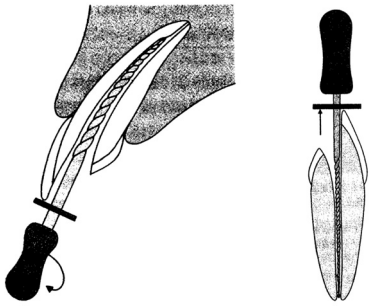


図5 リーマとファイル

表5 歯科鋳造用金合金の組成範囲

タイプ	成分 mass%					
	Au	Ag	Cu	Pd	Pt	Zn
1	80.2～95.8	2.4～12.0	1.6～6.2	0～3.6	0～1.0	0～1.2
2	73.0～83.0	6.9～14.5	5.8～10.5	0～5.6	0～4.2	0～1.4
3	71.0～79.8	5.2～13.4	7.1～12.6	0～6.5	0～7.5	0～2.0
4	62.4～71.9	8.0～17.4	8.6～15.4	0～10.1	0.2～8.2	0～2.7

表6 陶材焼付用金合金の代表的組成（mass%）

Au	Pt	Pd	Ag	その他
85	8	4	1	2

表7 歯科鋳造用金銀パラジウム合金の組成範囲（mass%）

	Au	Pd	Cu	Ag
12%Auタイプ	12	20～25	10～15	45～63
20%Auタイプ	20	20	9～15	40～49

結し、形態と機能を回復する方法である（図7）。比較的小型のブリッジの場合には一塊として鋳造する場合もあるが、多数歯にわたる場合には、いくつかの部分に分けて鋳造し、ろう付け用合金でろう付けあるいはレーザーなどを用いて溶接する。欠損部に相当する部分は人工歯で補われる。前歯部では審美性が重要な要素となるため、クラウンの場合と同様に硬質レジン前装冠や陶材焼付冠が用いられる。

歯科用ろう付け用合金（ろう材）としては、金ろう、銀ろう、金銀パラジウムろうがある。金ろうはAu-Cu-Ag合金を基本とし、Au含有量は58～84％で、融点を下げるためにZnやSnが添加されている。陶材焼付鋳造冠のろう付け用では、陶材焼付時の融解と変形を防ぐため、液相点と固相点が高くなるようにPtやPdが添加されている。銀ろうは、Ag-Cu合金を基本とし融点を下げるために多量のZnが添加されておりステンレス鋼線やコバルトクロム合金線（Co-Cr-Ni-Mo合金）のろう付けに使用される。金銀パラジウムろうは、AuとPdの合計が30％以上であり、融点を下げるためにCuとZnの含有量が多い。ろう付け部分は、異種金属が接触しているためガルバニー電流による変色や腐食がみられる[2)]。

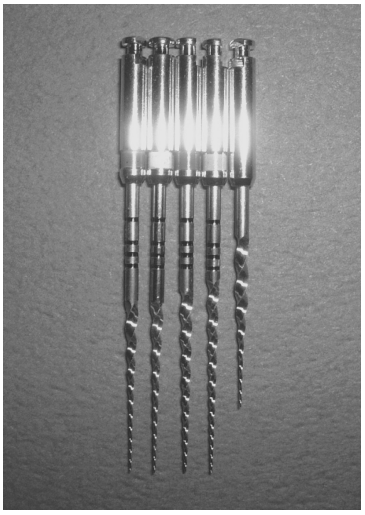
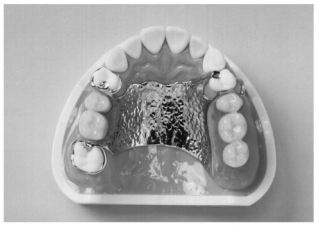


図6　Ti-Ni超弾性合金ファイル

ブリッジ



金属床の部分床義歯

図7　ブリッジと部分床義歯

4.2　有床義歯

歯の欠損およびそれに伴う周囲組織の減退を形態的に補い、機能性、審美性の回復を目的とする取り外し可能な補綴物で、残存歯のある場合の部分床義歯（図7）と全部床義歯（総義歯）がある。強度や装着感を高めるために、有床義歯の体部である義歯床の骨格部分にも金属を用いたものを金属床義歯と呼び、一般的には精密鋳造法によって作製される。金属床にはCo-Cr合金、Tiが使用されている。義歯の脱落を防止するための維持装置には、支台歯を取り巻くように金属線を設定するクラスプ（鉤）、支台歯に取り付けられる部分と義歯に組み込まれる部分の組み合わせにより維持力を発揮するアタッチメントなどがある。クラスプには合金線を屈曲加工して用いる線鉤と鋳造法によって作製する鋳造鉤があり、加工用白金加金やステンレス鋼が使用される。

最近では磁石の吸引力を維持力に利用する磁性アタッチメントも開発されている[9, 10)]。磁石構造体としてSm-Co合金とNd-Fe-B合金が、キーパーとしてSUS444相当のFe-19Cr-2Moステンレス鋼やSUS447J1相当のFe-30Cr-2Moステンレス鋼が使用されている。強磁性と耐食性、小型化を同時に達成するための工夫が進められている。

4.3　歯科インプラント

歯の欠損を補綴するため、口腔組織に人工物を埋植するのが歯科インプラントで、その部位により粘膜内、骨膜下、歯内骨内、骨内インプラントなどが試みられてきた。現在では顎骨内に埋植する骨内インプラントが主流であり、この方法によって広く臨床応用されるようになっている。歯科インプラントは、図8に示すように歯根部（フィクスチャー）、支台部（アバットメント）、上部構造からなる。歯根部は歯槽骨内に埋入され、その一部は軟組織と接触し、半生体内である口腔内にも露出する。しかも、天然歯と歯槽骨を結合し緩衝

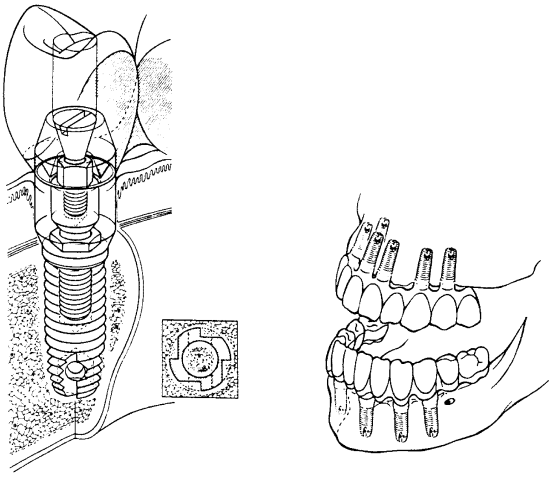


図8　歯科インプラント

材の役割を果たしている歯根膜が、歯科インプラントと歯槽骨との間には存在せず、人工的な歯根膜も実用化されていない。このため、硬組織適合性、軟組織適合性、抗菌性あるいは耐食性が、その接触する部位に応じて要求される。歯槽骨内に埋入される歯根部は、現在ほとんどが純Ti製である。

歯科インプラント成功の鍵は、細菌が常に存在する口腔内環境において歯根部が歯槽骨に固定されるかどうかにある。Tiには、osseointegrationといわれる光学顕微鏡レベルで骨組織と密着する性質があることが早くから明らかになっている。また、骨組織の侵入と機械的嵌合による固定を狙って、酸化チタン多孔体を表面に形成させたものも市販されている。また、表面に骨誘導能のあるバイオセラミックスをコーティングすることにより硬組織適合性の改善を図っているものもある。

5 他の歯科用途

5.1 歯科矯正

矯正用ワイヤーは、歯を目的の位置に移動させるための矯正力を発揮させるために用いられる金属性ワイヤーで、ステンレス鋼、Co-Cr合金、Ti-Ni合金、Ti-Mo合金などのものがある。特に、超弾性を応用したTi-Ni合金ワイヤーは、歯の移動に適する矯正力を持続的に発揮することから広く臨床応用されている（図9）。

歯科矯正治療では、歯や歯列を移動するために多様な装置が用いられる。例えば、狭窄した上顎の歯列をスクリューや比較的太いワイヤーで広げる拡大装置、歯列に固定した主線と、これにろう付けされた弾線やフックからなる弧線装置、レジン床に唇側誘導線、クラスプ、弾線などを組み合わせた床矯正装置などがある。また、歯を正しい位置に移動させた後、再発を防ぐために用いられる保定装置としても様々な形態のものが使用される。各種の矯正装置には、Co-Cr合金やステンレス鋼の線材が屈曲加工して用いられる。

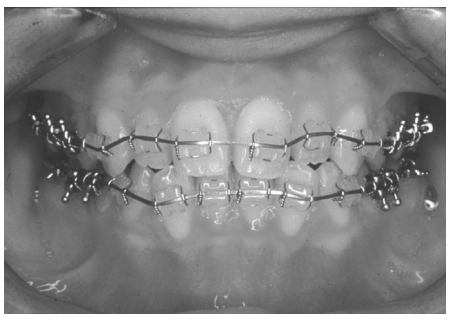


図9　ブラケットに装着された矯正用Ti-Ni合金アーチワイヤー

5.2 顎顔面補綴

顎骨骨折や顎矯正手術において骨片を固定するため、整形外科と同様な骨接合プレート（ボーンプレート）が用いられるが、口腔外科では小さいサイズのミニプレートが使用されることが多い。Ti製のものが主流で、骨面に沿うように屈曲調整してから骨片にスクリューで固定される。その他、顎顔面の再建手術には、歯科インプラントやTi製の各種再建プレートなどが使用される。

5.3 予防・治療用器具

切削用のバー、歯石除去のためのスケーラー、歯周ポケットの深さを測る歯周プローブ、歯科用ピンセット、メス、抜歯の際に使用される骨剥離子が金属製であり、主にSUS304ステンレス鋼製である。

6 おわりに

歯科用金属材料は、強度および破壊靭性値が大きいこと、延性が大きいこと、精密鋳造による成形が可能であることから広範囲使用され、長い間歯科治療を支えてきた。しかし、金属の宿命として金属色を呈するため、歯冠修復の目的では、審美性の点からセラミック材料や高分子材料に移行していくのは自然の流れである。一方、その他では依然として金属材料の使用が必須であり、今後も使用され続けると考えられる。

参考文献

1）安田克廣：日本金属学会報，15（1976），497.
2）宮崎隆，中嶌裕，河合達志，小田豊編：臨床歯科理工学，医歯薬出版，（2006）132，194.
3）岡部徹，塙隆夫：歯科材料・器械，6（1987），357.
4）高田雄京：材料と環境，49（2000），454.
5）高田雄京：防錆管理，46（2002），329.
6）高田雄京：防錆管理，46（2002），370.
7）中川雅晴，松家茂樹：まてりあ，41（2002），802.
8）W. Wilhelmsen and A.P. Grande：Electrochim. Acta，32（1987），1469.
9）奥野攻：日本金属学会報，32（1993），6.
10）奥野攻：歯科材料・器械，26（2007），291.

（2008年1月15日受付）