学術レポート

A new super elasto-plastic Ti alloy (Gummetal) simplifies treatment procedure

「GUMMETAL矯正ワイヤー」の臨床応用

歯学博士　長谷川　信

はじめに

わが国でもようやく「良い歯並び」に対する意識が一般化してきたために、歯列矯正に対する需要は増加傾向にある。矯正患者、中でも成人患者の割合が増えるに従い動的治療期間の短縮はますます要請されるところとなっている。患者さんにとって矯正装置、なかんずくマルチブラケット装置は必要悪ともいうべきものであり、美しいかみ合わせを獲得するための矯正治療といえども、そのための治療装置は不快な上に長期にわたる装着を強いられるとあっては成人患者ならずとも受診を躊躇するのは当然といわねばなるまい。そこで歯の移動を効率化して装置装着期間の短縮を図る試みはブラケット等の治療装置の工夫改良、あるいは骨代謝に対するアプローチなど多方面から行われ、それぞれに一定の成果を挙げつつあるとはいえ、未だ抜本的効率化がなされたとはいいがたい。一方、動的治療に伴う不具合には、強い疼痛や歯根吸収がある。かつてエッジワイズ法の強大な矯正力の弊害に対する反省から、ループを駆使したラウンドワイヤーや細い角ワイヤーを使った多様なライトワイヤー法が注目された時期もあった。しかし屈曲手技の煩雑さやコントロールの困難さから次第に敬遠され、術式の単純化と洗練を経て、現今のようにいくつかのストレートワイヤー法に収斂するにつれ再び矯正力が強まる傾向があった。本レポートでは現在の矯正臨床で最も要請される事項、すなわち1）歯の移動の精密な三次元的コントロールを2）シンプルな装置で3）持続的な弱い力で効率的に達成すること、この3つを同時にめざす材料と方法について概説する。

矯正ワイヤーと新素材

矯正ワイヤーは歯の移動の原動力であるにもかかわらず、実は変化の少ない部材でマルチブラケット法黎明期の金合金ワイヤー以降は、RMO社製コバルトークローム系合金（以下CoCrと略す）エルジロイワイヤーがデファクトスタンダードとなり、以来70年以上にわたって近似した

開咬症例

生体用金属として認可されている代表的金属材料

生体用金属材料	代表的合金	主な元素	ヤング率 GPa	引張強度 MPa
貴金属	金銀パラジウム	Au-Ag-Pd	＞250	900
ステンレス鋼	SUS316	Fe-Cr-Ni-Mo	200	860
コバルトクローム合金	Elgiloy（green）	Co-Cr-Ni-Mo	181	1956
チタン	純チタン１種	Ti	110	420
ニッケルチタン合金	ナノティノル	Ti-Ni	105	700
α＋βチタン合金	ASTM F136	Ti-Ai-V	85	860
βチタン合金	GUMMETAL	Ti-Nb-Ta-Zr	60	1100

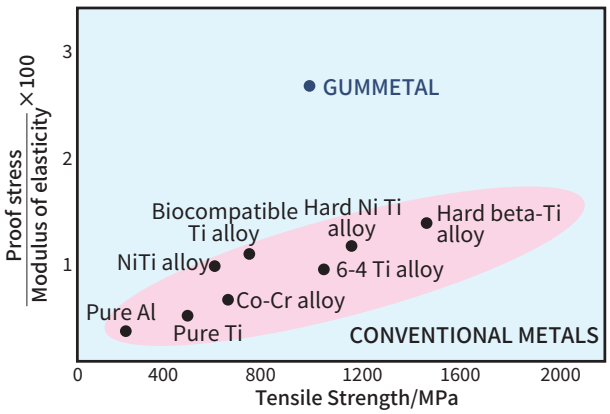
クロム、ニッケル、バナジウムには細胞毒性あり

特性のステンレススチールとともに主役を務めている。またTweed以来、治療法の変遷が遅々として感じられるのも、おしなべてCoCrワイヤーの特性をベースとして編み出されてきたのでおのずと制約があったと考えることもできる。画期的新材料は金属学および加工技術の進歩に伴い、77年になって登場したチタン系ワイヤーを待たねばならなかった。チタンおよびその合金は近年の歯科材料界で最も成功を収めた金属である。生体親和性をはじめすぐれたチタンの諸特性は矯正用ワイヤー、義歯の金属床、インプラント体等に広く応用されており、中でもチタンとニッケルをほぼ等量含有する合金（以下NiTiと略す）は超弾性と形状記憶というきわめてユニークな特性ゆえに矯正用ワイヤーに好適であった。NiTiワイヤーは特に動的治療の初期段階を飛躍的に単純化すると同時に過大な矯正力を抑制し、ヒステリシス特性を利用して持続的矯正力を実現したことから治療手技の簡略化と疼痛の抑制および治療期間の短縮に大いに貢献した。しかし、この超弾性とヒステリシス特性は反面成型性の欠如を意味するので屈曲操作はほぼ不可能であり、個別に歯の三次元的コントロールを必要とする中期、仕上げ期の治療に応用するのは困難であったので、NiTiワイヤーはあくまで治療初期の使用にとどまり、最終的な咬合の完成にはコンベンショナルなステンレススチールや、CoCr製ワイヤーを使用せざるを得なかった。近年になりCo-Cr合金およびステンレススチール、NiTi合金で殆どを占めてきた矯正ワイヤー材料にベータチタン合金が加わった。

いわゆるチタン合金は常温における組織相の違いからα型、β型などに分類され、このうち体心立方結晶構造のβ型合金は冷間加工が可能なことから用途に応じて様々な処方、製法が考案され種類を増やしつつある。

GUMMETALワイヤーの開発

2003年、豊田中央研究所（愛知県愛知郡）金属基盤研究室で、極めて大きい弾性変形能をもつにもかかわらず容易に賦型できること、極めて低いヤング率にもかかわらず高強度というそれぞれ相反する条件を同時に満たす新しいベータ型チタン合金「GUMMETAL®」が開発された。（図-1）この合金は基本合金組成がTi-25%mol（Ta+Nb）-Zr-O、組成平均の価電子数e/aが約4.24、Dv-Vaクラスター法による結合次数Boが約2.87、d電子軌道のエネルギーレベルMd値が約2.45eVという3つのマジックナンバーを満たし①40～60GPa以下の超低ヤング率と1000MPa以上の高強度を同時に達成しているほか、一般金属材料のほぼ10倍（2.5%）の弾性変形能をもちNiTi合金のような ②超弾性的特性を発現する。GUMMETALの組織像は合金製造過程の冷間強加工の結果、絡み合ったフィラメント状を呈し、（図-2、3）③容易に塑性変形できるがその際、通



しなやかさと強度の相関における GUMMETAL の独自な特性を示す模式図

図 -1

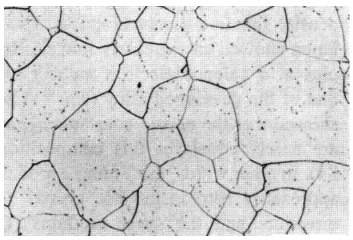


図 -2

一般的金属の組織像

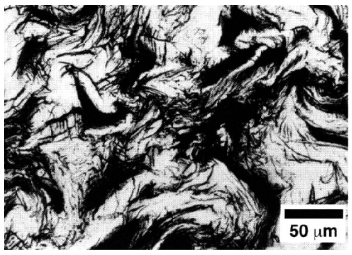


図 -3

GUMMETALの組織像
細かいフィラメント状の組織が絡み合ったマーブル模様を呈する
（資料提供：豊田中央研究所）

常金属でみられる結晶構造の転位機転が生じないことに大きな特徴がある。またGUMMETALにはNiTi合金のような応力誘起マルテンサイト変態がないのでこの超弾性的変形能は④ヒステリシスのない真の弾性変形であること、またその挙動は⑤降伏点までが曲線で往復すること（フックの法則に従わない唯一の金属）、この無転位変形機構のため賦型に伴う⑥加工硬化を全く生じないこと、など特異な性質がある。（図-4、5）またすべての組成元素はいわゆるバイオマテリアルに属しており、⑦有害金属を全く含有しないことも含めこれらの特性はどれもが矯正ワイヤーのみならず歯科用線材として極めて好都合である。そこで術者の意図を正確かつシンプルに治療に反映できる矯正ワイヤーを実現して動的治療を可及的に効率化することを目的としてGUMMETAL矯正ワイヤーを開発した。伸線、賦型には熱処理を避け冷間加工することでGUMMETAL独自の特性を保全し、ワイヤー表面の性状も最適化してワイヤーブラケット間摩擦を他βチタン線の約1/2に低減することができた。

GUMMETAL矯正ワイヤーとは

GUMMETALの独自な特性を生かした矯正ワイヤーは

①きわめてしなやかで超弾性的な性質をもちながら自在に屈曲できる。

②屈曲時の感覚にチタン合金にありがちな曲げ難さがなくむしろエルジロイより扱いやすい。

③ヒステリシスのない高いスプリングバック特性があり、矯正力を術者の所望どおりにコントロールできる。

④ニッケル等の重金属を含まず為害性がない。

⑤加工硬化がなく口腔内での破折がほとんどない。

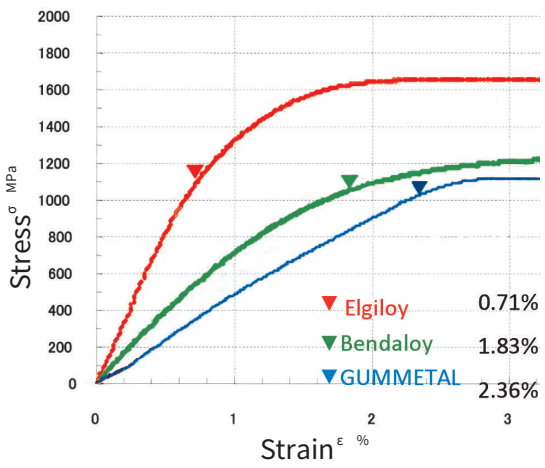
⑥摩擦が小さく小臼歯抜去症例のスライディングにも好適である。

等の性質をもち、これらはCoCrあるいはステンレスワイヤーの単なる代替に留まらず、治療手技の効率化、治療法の単純化、ひいては治療期間の大幅短縮にも寄与できる可能性がある。

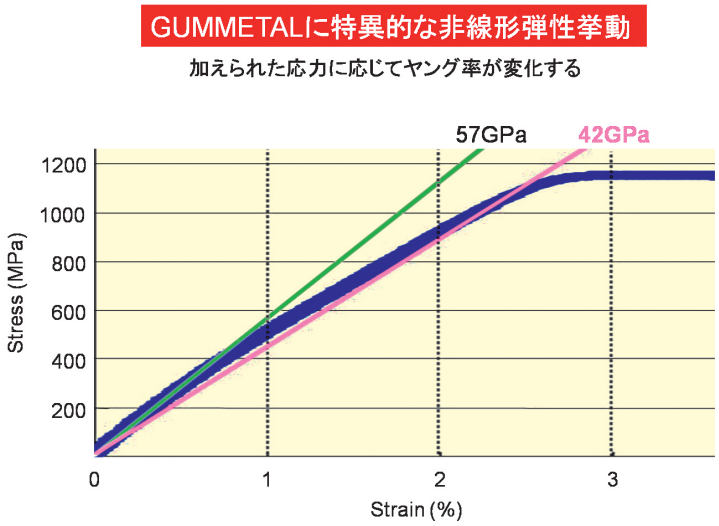
GUMMETAL矯正ワイヤーの臨床応用

マルチブラケット法による動的治療中の歯の三次元コントロールには文字通りあらゆる移動様式が含まれるが、機能的かつ安定した咬合を確立するうえでとりわけ重要なファクターが歯列の整直（up righting）を含む歯のバーティカルコントロールである。GUMMETALワイヤーの各移動様式に対する詳述は別の機会に譲り、ここでは従来比較的困難とされてきたバーティカルコントロール時のアクティブトルクについて症例をあげて略述するにとどめる。

臼歯部のコントロールには動的治療の可及的早期から歯を三次元コントロールすることが重要である。いうまでもなく歯のcenter of resistanceとブラケットの位置が異なる以上、いかなる歯の移動に



CoCr 及びβチタン系ワイヤーの応力歪曲線
図 -4



各合金の応力歪様式の模式図
図 -5

も意図せぬ傾斜を伴うので、角ワイヤーによるトルクコントロールを早期から駆使できることが望ましい。しかし動的治療初期に従来のCoCrやステンレスワイヤーでは物性的に装着すること自体が困難であり、かといってNiTiワイヤーでは装着はできるものの術者の意図を反映させる屈曲操作が不可能である。そこでGUMMETALの特異な性質、すなわちNiTiよりもしなやかでありながら、自在に屈曲できることを生かした角ワイヤーに所望のカーブとそれに応じたアクティブトルクを付与して治療術式を可及的に単純化し、治療目標への道筋を、最短化することが可能である。

いわゆるストレートワイヤー法にはそれぞれに工夫を凝らしたブラケット形態、なかんづくスロットインクリネーションがある。しかしその数値は治療終盤で所望の歯軸傾斜を反映させるためのいわばパッシブトルクであって、動的治療のメインともいうべき歯のup rightingやバーティカルコントロールを行う際のアクティブトルクを発生させることを目的としていない。いうまでもなく術前の不正咬合は千差万別であり必要とするバーティカルコントロールの量もそれぞれに異なる。臼歯の頬舌的歯軸傾斜もさまざまなので、ワイヤーに加えるべきアクティブトルク量は歯の移動量に応じて調節できることが望ましい。

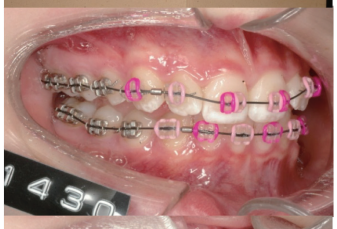
バーティカルコントロール

AngleⅠ級Ⅱ級の過蓋咬合症例では抜歯、非抜歯を問わず咬合挙上の優先順位が高く動的治療の初期から着手できることが望ましい。強過ぎるSpee弯曲を解消して咬合平面の平坦化をはかるにはワイヤーに調節弯曲（compensating curve）を付与するが、その強さに合わせて適切なlingual crown torqueを与えて不測の臼歯部頬側傾斜および前歯部のflare outを抑止する。 GUMMETALワイヤーは非常に高い弾性変形能ときわめて低いヤング率をあわせもっているので早期から無理なく装着できるのみならず、アクチベート量を大きくとって持続的かつ強過ぎない力をワイヤー交換なしに適用できる。（症例1）

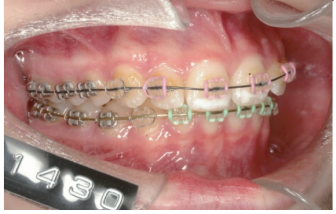
一般的にAngleⅡ級2類症例はmesioないしはbrachyタイプが多く、咬合を挙上し前歯軸を整直してアンテリアガイダンスを適正化することでおのずとⅡ級関係が改善する例が多い。GUMMETALワイヤーのreversed curve of Speeおよびcompensating curveはアクティブトルクと連動して徐々に活性化量をreduceしていくがワイヤー自体を交換する必要はない。本症例は全身的成長発育のスパートを利用できたこともあって

症例1　過蓋咬合を伴うAngle II 級2類

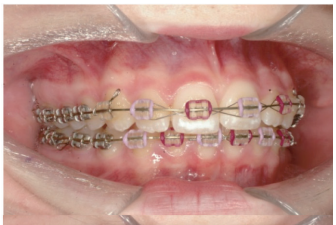
1-1 年齢 12 歳 0 ヶ月の白人女児 Angle II 級 2 類初診時模型



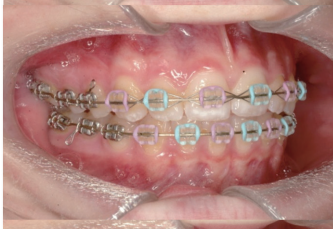
1-2 治療開始時　上下顎ともにφ.016NiTiラウンドワイヤーでレベリングを開始



1-3 治療開始約3週間後　上顎は.016NiTiワイヤーを継続使用、下顎は.016×.022GUMMETALワイヤーに交換し、積極的な咬合挙上を開始する。



1-4 治療開始約2ヵ月後　上顎を.018×.022GUMMETALワイヤーに交換し前歯軸の整直と圧下、咬合挙上を図る。下顎は前回ワイヤーを継続使用



1-5 治療開始約3ヵ月後　前歯軸、オーバーバイトともにほぼ良好、術前の過蓋咬合を鑑みover treatmentを開始する

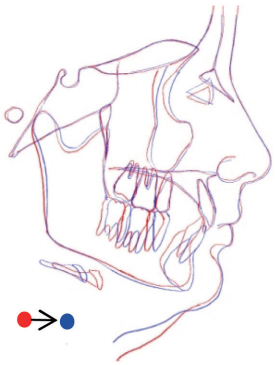
1-6 治療開始約５ヵ月後　装置撤去、保定開始する。
使用したワイヤーは上下顎ともに .016NiTi、GUMMETALアイデアルアーチを各１本であった。

きわめて効率的に動的治療を終えることができた。

開咬症例の多くはdolichoタイプであり、後方臼歯部のディスクレパンシーによる大臼歯部の高位を伴う近心傾斜がみられる。したがって第三大臼歯を抜去してディスクレパンシーを解消したのちに臼歯部全体をen masseにup rightingする。その際、下顎の不測の後方回転を絶対に抑止することが重要なので.018x.022以上のGUMMETALアイデアルアーチにtip back bend量に見合ったアクティブトルクを加える。GUMMETALワイヤーはきわめてしなやかなのでフルサイズのワイヤーでも容易に挿入することができる。

下顎の側方偏位は、臼歯部咬合高径の左右差に起因する例が多い。成長発育に余力がある症例では、程度に応じて臼歯部のバーティカルコントロールによって左右咬合平面を調和させることが重要である。このように左右で力系が異なる場合には、意図しない顎位の変化を招きやすく、より慎重な歯軸コントロールが要求される。GUMMETALワイヤーの自在に調節できるアクティブトルクは治療のゴールへの道筋を外さぬために極めて有利である。

1-7　1-8

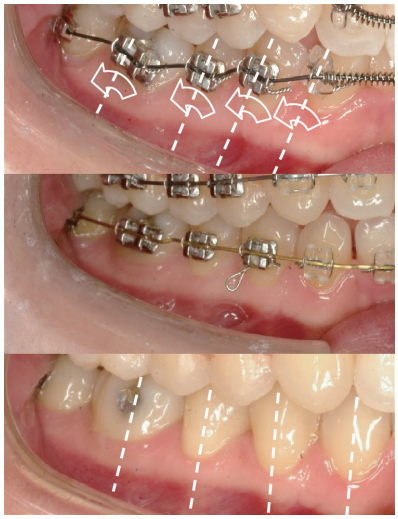


1-9

レベリング開始から2ヶ月程度で角ワイヤーによるアクティブトルクを加味したバーティカルコントロールを開始できたためにovertreatmentを含め約5ヶ月で動的治療を完了した。

一般的にAngle II 級2類症例はmesioないしはbrachyなタイプが多く、咬合を挙上し前歯軸を整直してアンテリアガイダンスを適正化することでおのずと II 級関係が改善する例が多い。GUMMETALワイヤーのreversed curve of Speeおよびcompensating curveはアクティブトルクと連動して徐々に活性化量をreduceしていくがワイヤー自体を交換する必要はない。本症例は全身的成長発育のスパートを利用できたこともあってきわめて効率的に動的治療を終えることができた。

症例 2　臼歯部の up righting



2-1

2-2

2-3

27 歳　白人女性、Angle I 級叢生

主訴の中でも最も頻度の高い前歯叢生では、上下の顎間関係を問わず臼歯部の近心傾斜を伴う例が多い。前歯部レベリングに先立って臼歯部をup rightingすることでボート漕ぎ効果（boat rowing effect）によるアベイラブルスペースを生み出すことができる。これは小臼歯抜去を回避できる可能性を増やすのみならず、機能的な咬合の獲得、保定期以降の咬合安定に非常に効果的である。

症例 3　19歳9ヶ月　日本人女性　Angle I 級開咬dolichoタイプ

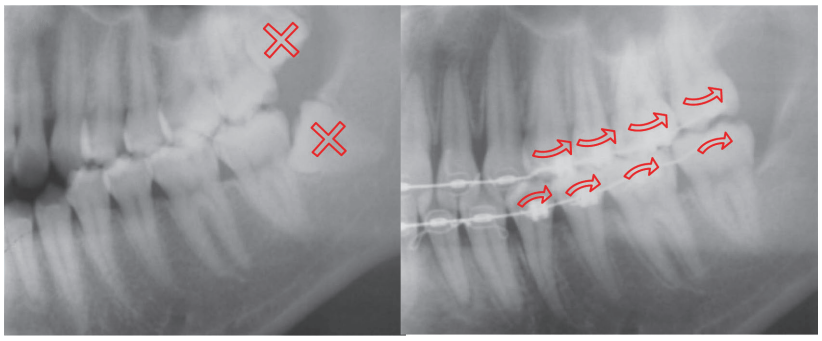
3-1　上顎には GUMMETAL オープンコイルを付加したφ.016NiTi、下顎はφ.018GUMMETAL ラウンドワイヤー

3-2　約1.5ヵ月後上顎は.018×.022 GUMMETALアーチワイヤーに交換、下顎は前回ワイヤーを再活性化

3-3　約3ヵ月後下顎も.018×.022 GUMMETALワイヤーに交換し強いtipback bendとup&down エラスチックで被蓋の改善を図る。

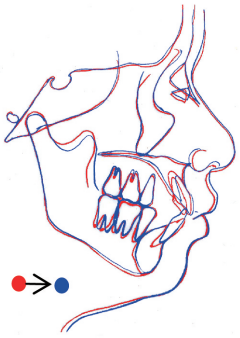
3-4　充分な over bite を確認して動的治療を終了した。動的治療期間は約7ヶ月であった。

3-5　3-6



上下第三大臼歯抜去で得られたアベイラブルスペースに臼歯部全体をup rightした。その結果すべての近心歯根膜腔に顕著な拡大が見られる。

3-7　3-8



3-9

動的治療前後の重ね合わせで臼歯部のup rightingとわずかであるが下顎のclosing rotationが認められる。

開咬症例の多くはdolichoタイプであり、後方臼歯部のディスクレパンシーによる大臼歯部の高位を伴う近心傾斜がみられる。したがって第三大臼歯を抜去してディスクレパンシーを解消した後に臼歯部全体をen masseにup rightingする。その際、下顎の不測の後方回転を絶対に阻止することが重要なので.018×.022以上のGUMMETALアーチワイヤーにtip back bend量にあったアクティブトルクを加える。GUMMETALワイヤーはきわめてしなやかなのでフルサイズでも容易に挿入することができる。
開咬のみならず通常の叢生症例でも臼歯部全体が近心傾斜している例は非常に多くup rightingすることでいわゆるboat rowing effectによってアベイラブルスペースを得ることができる。

症例 4　下顎側方偏位　17 歳 3 ヶ月　白人女性　Angle III級下顎左方偏位

4-1　治療開始時、上下顎ともに.016NiTiラウンドワイヤーで若干レベリングしてGUMMETAL角ワイヤー挿入の準備をはかる。

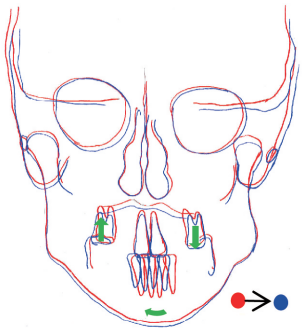
4-2　治療開始約2ヶ月後、上下顎ともに.018×.022GUMMETALワイヤーに交換。左側臼歯部の咬合高径を増加させ、右側では減少させることで下顎位の改善を図る。それぞれのバーティカルコントロールに対応したアクティブトルクを屈曲する。

4-3　治療開始約4ヶ月後、正中が一致し、左側臼歯部cross biteもほぼ解消した。一般に側方偏移症例は動的治療後ある程度の後戻りが予想されるのでover treatmentを開始する。

4-4　治療開始約8ヶ月後、over treatment継続中。臼歯部咬合のdetailingを図る。

4-5　9.5ヵ月後、装置撤去。正中をover correctionし咬合高径が高すぎた右側臼歯部をあえてopen biteとし、左側には緊密な咬合を与える。

4-6　4-7



4-8

咬合平面の左右差を改善し顎位を誘導した。大臼歯部のバーティカルコントロールは従来比較的困難であったが、非常にしなやかなGUMMETALはフルサイズワイヤーの使用を早期から可能にするので術者の意図を正確に反映した歯の移動を容易に実行できる。

4-9　保定1年0ヶ月、正中が一致し、右側臼歯部open biteが解消しつつある。

下顎の側方偏位は、臼歯部咬合高径の左右差に起因する例が多い。成長発育に余力がある症例では、程度に応じて臼歯部のバーティカルコントロールによって、左右咬合平面を調和させることが重要である。このように左右で力系が異なる場合には、意図しない顎位の変化を招きやすく、より慎重な歯軸コントロールが要求される。GUMMETALワイヤーの自在に調整できるアクティブトルクは治療のゴールへの道筋を外さぬために極めて有利である。

まとめ

機能的咬合を確立し動的治療後の長期安定を得るには歯軸の整直（up right-ing）を含む歯のバーティカルコントロールが重要である。GUMMETALワイヤーは個々の症例における治療開始時の異常の程度、あるいは治療のステージごとに変化するアクティブトルクを必要に応じて調節することで常時最適かつ持続的矯正力を発揮させることができる。またGUMMETALのヤング率はNiTiよりも低いので高度のアライメントをせずとも無理なく装着が可能である。特に過蓋咬合や開咬の治療においてはきわめて早期から積極的なアクティブトルクを加味したバーティカルコントロールを実施できるので動的治療期間の大幅な短縮が可能である。同様にレベリング以降のワイヤー交換を実質的に不要にするのでワイヤー交換に伴う一時的とはいえ過大な力や疼痛、延いては歯根吸収等の不具合を回避し動的治療の単純化と効率化に寄与できるものと思われる。

認証番号 222AKBZX00025000 管理

＜参考文献＞

1. T.Saito et al：Multifuncutional Alloys Obtained via a Dislocation-free Plastic Deformation Mechanism, Science, Vol 300（2003）, pp.464～467
2. 多機能新合金“ゴムメタル”, 日本機械学会誌　Vol.106（2003）No.1020　P61
3. 古田忠彦他：多機能新チタン合金“ゴムメタル”の開発，まてりあ，第43巻（2004），第２号、P154-156
4. HASEGAWA SHIN：A new super elasto-plastic titanium alloy simplify orthodontic procedure, 第 65 回日本矯正歯科学会大会誌（2006）, p375
5. 長谷川信他：新しい超弾塑性チタン合金の応用, 第66回日本矯正歯科学会大会誌（2007）, p167
6. 長谷川信他：新しい超弾塑性チタン合金ワイヤーによる治療時間の短縮化について, 第67回日本矯正歯科学会大会誌（2008）, p178
7. 長谷川信他：新しい超弾塑性チタン合金の特性と術式の単純化について，第68回日本矯正歯科学会大会誌（2009）, p194

発行：株式会社 JM Ortho
〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台 2-2 御茶ノ水杏雲ビル 14F
TEL 03-5281-4711　　FAX 03-5281-4716

ゴムメタル ® は豊通マテリアルの商標です。 平成 21 年ものづくり中小企業製品開発等支援補助金（試作開発等支援事業）