

インコ法による矯正用ステンレス鋼製ワイヤーの色調コントロール

國見 亮 太^{1,2} 梶 本 昇¹ 丸 田 道 人¹
佐 藤 平³ 玉 置 幸 雄² 都 留 寛 治¹

Color control of orthodontic stainless steel wire by INCO method

Ryota KUNIMI^{1,2}, Noboru KAJIMOTO¹, Michito MARUTA¹,
Taira SATO³, Sachio TAMAOKI² and Kanji TSURU¹**Keywords** : Stainless steel, Orthodontic wire, Color control, INCO method, Surface modification

Recently, orthodontic stainless steel wire (SUS wire) with white coating has attracted attention due to the increasing demand for esthetics, while an alternative method for improving esthetics is required because partial detachment of the coating layer has been clinically reported. Therefore, in this study, we investigated color control of SUS wire by the formation of an oxide layer on its surface using the INCO method.

Color tone of SUS wire could be controlled by this method, and SUS wire with a having color shade close to that of natural teeth was obtained depending on the experimental conditions. The relative amounts of Cr and O in the chemical composition of SUS wire were increased with increasing processing time, so that coloration was caused by optical interference of a chromium-based oxide layer formed after processing. The static friction force against the metal bracket, Vickers hardness, elastic modulus, and maximum strength of SUS wire with a color shade close to that of natural teeth showed no significant difference compared with those of non-treated SUS wire, but corrosion resistance was improved.

キーワード : ステンレス鋼, 矯正用ワイヤー, 色調制御, インコ法, 表面改質

近年の審美性要求の高まりにより, ステンレス鋼製矯正用ワイヤー (以下, SUS ワイヤー) に白色コーティングを施した製品が利用可能になったが, コーティング層が部分的に剥離する問題が報告されており, SUS ワイヤーの色調を制御する新たな手法が望まれる. そこで, 本研究ではステンレス鋼に酸化被膜を形成するインコ法による色調コントロールを試みた.

インコ法により SUS ワイヤーの色調を変化させることが可能であり, 処理条件によっては, 未処理と比較して歯冠色に近い色調を得ることができた. 処理時間が増加するにつれ, SUS ワイヤー表面の Cr および O の量が増加したことから, 着色は Cr を主成分とする酸化被膜の形成による光の干渉作用と推察される. 歯冠色に近い色調を有した SUS ワイヤーのメタルブラケットに対する静止摩擦力, ビッカース硬さ, 弾性係数および引張強さは未処理の SUS ワイヤーと有意差は認められず, 耐食性は向上することがわかった.

緒 言

ステンレス鋼製の矯正用ワイヤー (本論文では SUS

ワイヤーと表現する) はニッケルチタンワイヤーやチタンモリブデンワイヤーなどの他の矯正用ワイヤーよりも高い弾性係数および引張強さを持つため, 前歯の後方移

原稿受付 2021年12月2日, 受理 2022年2月1日

¹ 福岡歯科大学 歯科医療工学講座 生体工学分野 (〒814-0193 福岡県福岡市早良区田村 2-15-1)² 福岡歯科大学 成長発達歯学講座 矯正歯科学分野 (〒814-0193 福岡県福岡市早良区田村 2-15-1)³ 福岡歯科大学 歯科医療工学講座 材料工学分野 (〒814-0193 福岡県福岡市早良区田村 2-15-1)¹ Section of Bioengineering, Department of Dental Engineering, Fukuoka Dental College (2-15-1 Tamura, Sawara-ku, Fukuoka 814-0193)² Section of Orthodontics, Department of Oral Growth and Development, Fukuoka Dental College (2-15-1 Tamura, Sawara-ku, Fukuoka 814-0193)³ Section of Biomaterials, Department of Dental Engineering, Fukuoka Dental College (2-15-1 Tamura, Sawara-ku, Fukuoka 814-0193)

動から治療の最終段階の細部調整にまで用いられる代表的な矯正用線材である。最近では歯列矯正を求める患者の審美性に対する意識の高さと相まって、治療途中で使用する矯正装置にも審美性が要求されるようになった。例えば、SUSワイヤーに対する審美性を改善するために、高分子コーティングやロジウムコーティングを施したコーティングワイヤーなどが商品として販売されている。しかし、これらの製品は、使用中のコーティング層の剝離やブラケットとワイヤー間の高い摩擦抵抗の問題が報告されており¹⁻³⁾、これらに変わる新たな手法の開発が期待される。

ステンレス鋼の色調を変える発色技術としては、古くは重クロム酸ナトリウムの溶融塩浴に浸漬し酸化させる「クロム酸酸化法」、NaOHとPbO₂を含む水溶液に浸漬する「アルカリ酸化法」、Na₂Cr₂O₇とK₂Cr₂O₇の溶融塩浴に浸漬する「溶融塩法」などが報告されているが^{4,5)}、現在はインコ法⁵⁻⁹⁾と呼ばれるクロム酸-硫酸混合液に浸漬する方法が主流となっている。インコ法による発色は、ステンレス鋼の表面に酸化被膜を形成させ、酸化被膜による光の干渉色を利用したものである。この干渉色は酸化被膜の膜厚によって変化するため、処理時間で膜厚を変えることにより、色調の制御ができる。さらに、表面には緻密な酸化被膜が形成されるため、コーティングと比較して剝離は生じにくい。

審美性は個人の美的感覚により違いはあるが、天然歯に近い色調に合わせることは審美性獲得の要件の1つである。本研究では、矯正用ワイヤーに使用されているSUS304グレードのSUSワイヤーに対し、インコ法を適用し、歯牙色に近づくよう色調コントロールを試みた。さらに、本処理がSUSワイヤーのブラケットに対する静止摩擦力、機械的特性および耐食性に与える影響についての検討を行った。

材料および方法

1. 試料および試薬

SUSワイヤー（ステンレススチールワイヤー 0.017 inch×0.025 inch, 3M）を試料として用いた。実験に使用した試薬（アセトン, 85 mass%正リン酸（H₃PO₄）, 95 mass%硫酸（H₂SO₄）, 酸化クロム（CrO₃（VI）））はすべて富士フィルム和光純薬製の試薬特級を用いた。

2. インコ法による着色処理

SUSワイヤー試料の表面を均質化するために、電解研磨を施した。超音波洗浄機（ASU-6M, アズワン）を用いて、アセトン中でSUSワイヤーを脱脂した後、定電流直流電源（GS200, 横河電機）の陽極にSUSワイヤーを、陰極に白金ワイヤー（白金線, ニラコ）をセットした。陰極の白金ワイヤーは反応表面積が陽極の5倍

以上となるようセットした。H₃PO₄（85 mass%）とH₂SO₄（95 mass%）の7:3混合溶液に浸漬し、電流密度350 mA/cm², 60℃で5分間電解研磨した。

次に、着色処理を行った。電解研磨したSUSワイヤーをH₂SO₄（500 g/L）とCrO₃（VI）（250 g/L）の等量混合溶液に浸漬し、80℃で80分、100分および120分処理を行った。

最後に、硬膜処理を行った。定電流直流電源の陽極に白金ワイヤーを、陰極に着色処理を行ったSUSワイヤーをセットした。陽極の白金ワイヤーは反応表面積が陰極の5倍以上となるようセットした。CrO₃（VI）（250 g/L）とH₃PO₄（2.5 g/L）の等量混合溶液に浸漬し、電流密度2 mA/cm²の条件で、25℃で5分間処理を行った。一連の処理のフローチャートを図1に示す。

以下、得られた試料はそれぞれ、未処理のSUSワイヤーをSUS-N、電解研磨したSUSワイヤーをSUS-EP、電解研磨後に着色処理時間80分で処理したSUSワイヤーをSUS-80、着色処理時間100分で処理したSUSワイヤーをSUS-100、着色処理時間120分で処理したSUSワイヤーをSUS-120と記載する。

3. キャラクターゼーション

1) 外観観察

目視により表面処理した試料の色を観察した後、実体顕微鏡（Leica S9i, Leica Microsystems）を用いて試料の写真を撮影した。また、試料の寸法をマイクロメーター（クーラントブルーフマイクロメータ MDC-25MX, Mitutoyo）で測定し寸法変化の平均値を算出した。

2) 色彩測定と色差の導出

色彩測定はSilvaらの方法を参考に行った¹⁰⁾。未処理SUSワイヤーおよびインコ法処理SUSワイヤーを試料とし、10 mmの長さで切断したワイヤーを14本並列に配置し、得られた平面を色彩測定に用いた。色彩測定には分光色測計（CM-2600d, コニカミノルタ）を用い、光源はD65を選択し、SCI（Specular Component Include）法でL*a*b*の計測を行った。本実験で作製した試料に加え、市販のホワイトコーティングワイヤー（WC）（TPステンレスワイヤー, TP Orthodontics Japan）の色彩も測定した。色標準としてA2.0, A3.0, A3.5のレジンプロック（SHOFU BLOCK HC HARDII, 松風）を使用し、SUS-N, SUS-EP, SUS-80, SUS-100, SUS-120およびWCの色差を以下の式から求めた。

$$\Delta E^*_{ab} = ([\Delta L^*]^2 + [\Delta a^*]^2 + [\Delta b^*]^2)^{1/2}$$

3) 表面性状の評価および元素分析

インコ法を用いた表面処理によるSUSワイヤーの表面性状の変化を調べた。表面形態は、走査型電子顕微鏡（SEM）（S-3400N, Hitachi High Technologies）を用いて観察した。表面粗さは、ISO4287に準拠して測定を

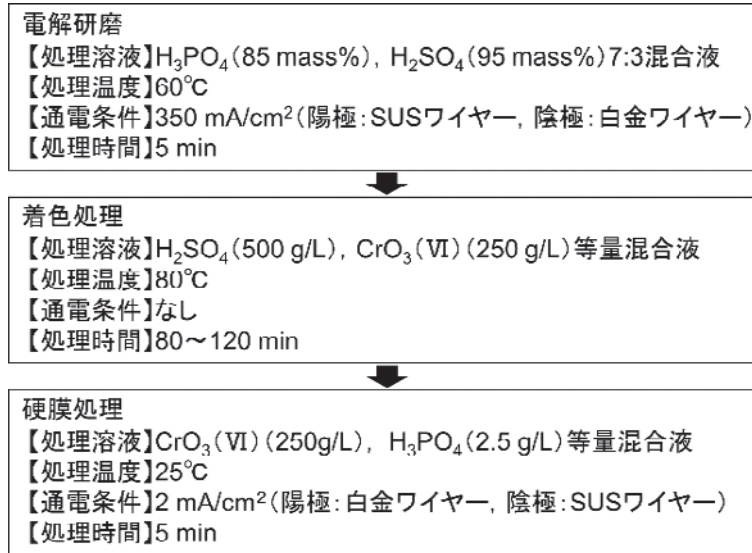


図1 インコ法による着色処理のフローチャート

行った。3Dレーザー顕微鏡(VK-9710K, KEYENCE)を用いて、50×50 μmの領域の三次元凹凸構造から最大高さ(Sz)および算術平均高さ(Sa)を測定した。試料数8で測定を行い、平均値と標準偏差を求めた。

次いで、電界放出形走査電子顕微鏡(SU8220, Hitachi High Technologies)に付属されたEDS分析装置(XFlash 5060FlatQUAD, Bruker)を用いて表面の元素分析を行った。

4) メタルブラケットに対する静止摩擦力の評価

メタルブラケットに対する静止摩擦力の測定は、Redlichらの方法を参考として行った¹¹⁾。実験装置を図2に示す。実験装置に接着された下顎第二小白歯用メタルブラケット(OPA-Kメタルブラケット, トミー)にSUSワイヤーをモジュール(Colored Ligatures Elastomers, American Orthodontics)で結紮し、試料下端には150gの分銅を固定した。万能材料試験機(AGS-J, 島津製作所)を用いて試料をクロスヘッドスピード10 mm/minで5 mm牽引した。得られた最大荷重を静止摩擦力として記録した。試料数3で測定を行い、平均値と標準偏差を求めた。

5) 機械的特性の評価

インコ法によるSUSワイヤーの表面処理によって機械的特性が変化しているかどうかを調べた。硬さはビッカース硬さとして評価した。測定にはマイクロビッカース硬さ試験機(MXT50, MATSUZAWA)を用い、荷重200 gf, 荷重負荷時間15秒の条件で測定した。さらに、引張強さと弾性係数をJIS T6530:2017に従って評価した。万能材料試験機(AG-100kNX, 島津製作所)を用いて、標点間距離200 mmとしてクロスヘッドスピード1.5 mm/minで引張試験を行った。得られた応力-ひず

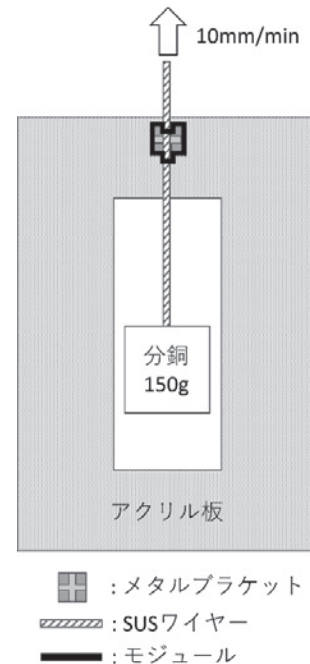


図2 静止摩擦力試験の装置模式図

み曲線から引張強さおよび弾性係数を求めた。試料数4で測定を行い、平均値と標準偏差を求めた。

6) 耐食性の評価

耐食性測定は、歯科用金属材料の腐食試験方法(JIS T6002)に従い、NaCl溶液中における動電位分極測定を行った。試験装置にはポテンショスタット(ECstat-301, イーシーフロンティア)を用いた。参照電極にAg/AgCl電極(内用液:飽和KCl水溶液)を、対極には白金電極を用いた。試験溶液の0.9 w/v% NaCl水溶液は1%乳酸水溶液および4%水酸化ナトリウム水溶液

を用いて pH を 7.4 に調整したものを用いた。試験溶液は耐食性測定直前に、窒素ガスで十分にバブリングして使用した。試料を 25℃ の試験溶液に漬け、2 時間自然浸漬電位を測定した後、自然浸漬電位より 150 mV 低い電位から 1 mV/s の速度で掃引し、アノード分極を測定した。得られた測定値を 25℃ の飽和カロメル電極 (Saturated Calomel Electrode, SCE) 照合値に換算し、アノード分極曲線を作成した。ステンレス鋼の孔食電位測定方法 (JIS G 0577) を参考に、得られたアノード分極曲線の $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ に対応する電位を孔食電位として読み取った。試料数 3 で測定を行い、平均値と標準偏差を求めた。

7) 有意差検定

得られた測定値は、t 検定および一次元配置分散分析 (One-way ANOVA), Tukey 多重比較 ($\alpha=0.05$) にて統計解析を行った。

結 果

1. 外観観察

SUS-N, SUS-EP, SUS-80, SUS-100 および SUS-120 の実体顕微鏡写真を図 3 に示す。SUS-80 では着色を認めなかったが、SUS-100, SUS-120 では発色を認めた。SUS-100 では金色に、SUS-120 では黒味を帯びた金色に呈色した。また、各試料のワイヤー径は $5.2 \pm 1.2\%$ 減少した。

2. 色彩と色差

SUS-N, SUS-EP, SUS-80, SUS-100, SUS-120 および WC の L^* , a^* , b^* の測定値を図 4 に示す。着色処理

時間が 100 分から 120 分の間で L^* , a^* , b^* の値が大きく変化し、色調が大きく変化した。明度を表す L^* 値は SUS-N に比べ電解研磨を行った SUS-EP では増加し、その後、着色処理時間が増すと L^* 値は減少した。赤緑の変化を示す a^* 値は電解研磨では増減せず、その後、着色処理時間が増すと増加し、赤味が増した。黄青の変化を示す b^* 値は電解研磨により減少し、その後、着色処理が 100 分までは処理時間に応じて増加し、黄味が増したが、100 分から 120 分にかけては顕著に減少し、青みが増した。WC は、SUS-N と比較して L^* 値が大きく (明るく)、 a^* 値は小さく (緑味が大きく)、 b^* 値は小さい (青味が大きい) 色調であった。

色標準 (A3.5, A3.0, A2.0) に対する SUS-N, SUS-EP, SUS-80, SUS-100, SUS-120 および WC の色差を図 5 に示す。A3.5, A3.0 および A2.0 に対する色差は SUS-

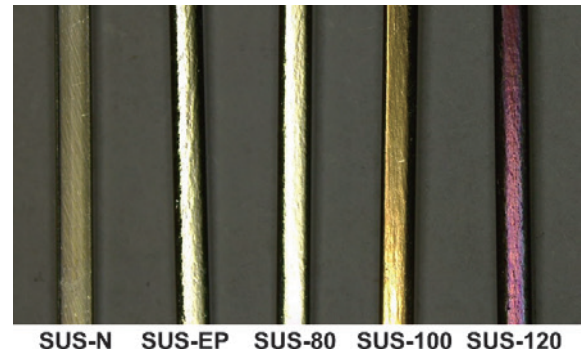


図 3 各試料の外観

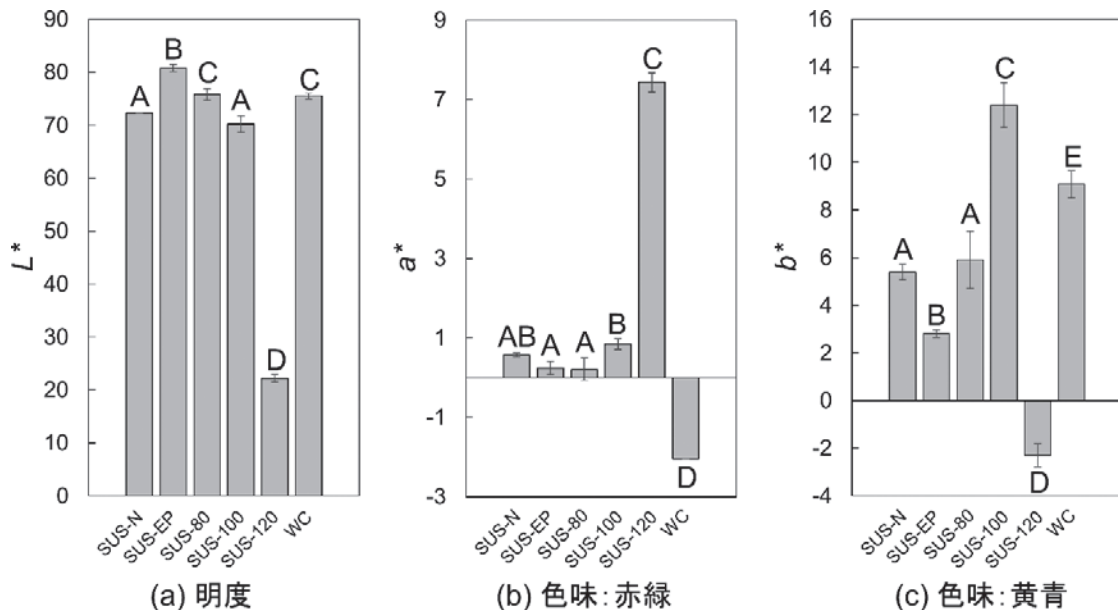


図 4 各試料の色空間パラメータ
異なる記号は有意差を認める: $p < 0.05$

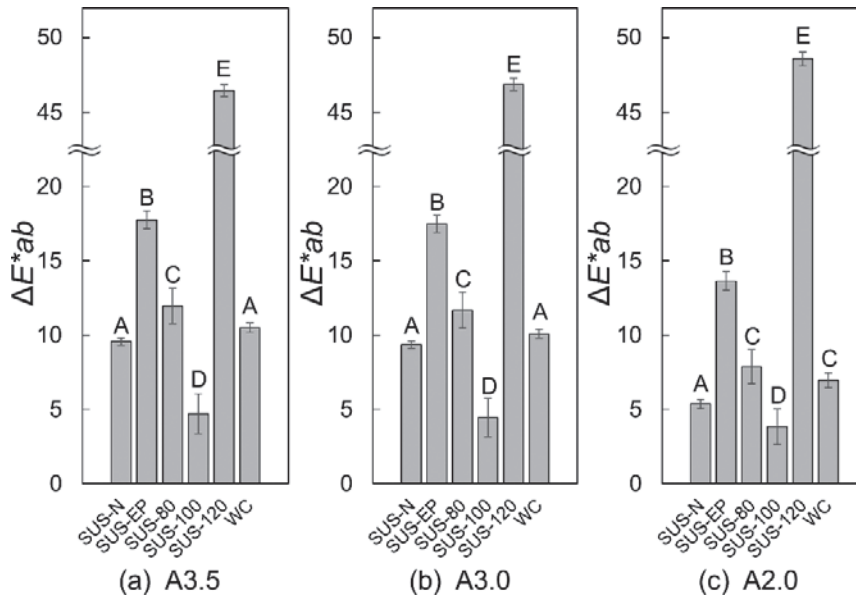


図5 標準色との色差
異なる記号は有意差を認める： $p < 0.05$

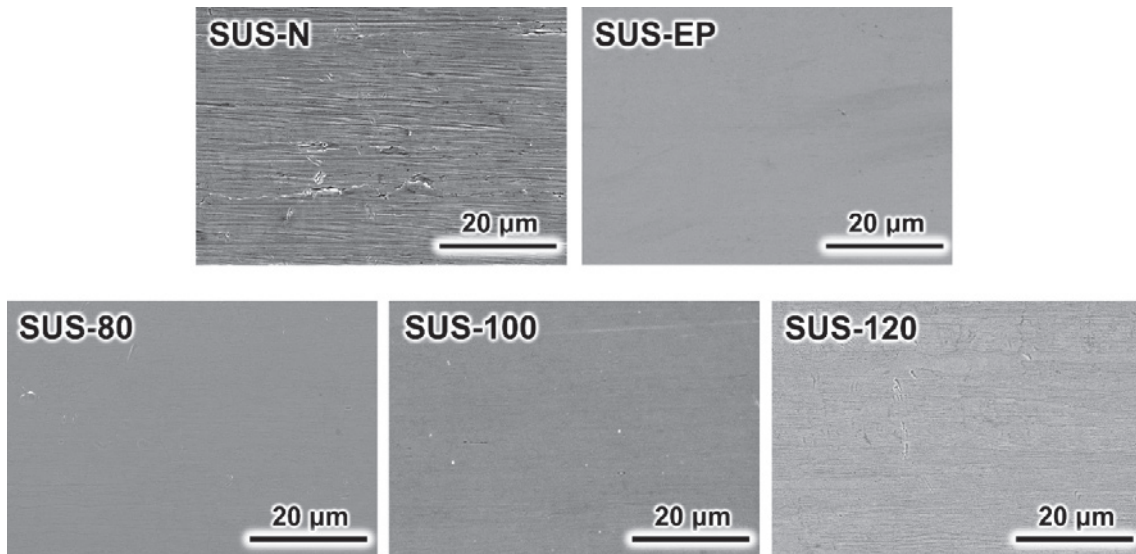


図6 各試料の表面形態

100が最も小さく、SUS-120で値が最も大きかった。すべての色標準に対して、SUS-100はWCよりも色差が小さかった。

3. 表面性状と元素分析

SUS-N, SUS-EP, SUS-80, SUS-100 および SUS-120 の表面を電子顕微鏡で観察した結果を図6に示す。SUS-Nの表面には長軸に沿った研磨痕が観察されたが、SUS-EPの表面には観察されなかった。また、SUS-EPから着色処理時間に伴って、粗造な表面構造に変化した。

SUS-N, SUS-EP, SUS-80, SUS-100 および SUS-

120の最大高さ S_z の比較を図7に示す。 S_z はSUS-Nが最も高く、電解研磨を行うことで有意に減少した(SUS-EP)。SUS-EPと80分間着色処理したSUS-80では S_z に有意差は認められなかったが、SUS-EPと100分間以上着色処理を行ったSUS-100およびSUS-120の間では S_z が有意に増加した。

一方、算術平均高さ S_a は、SUS-N, SUS-EP, SUS-80, SUS-100, SUS-120の間で有意差を認めず、すべての試料の S_a 値は $0.2 \mu\text{m}$ よりも有意に小さかった。

SUS-N, SUS-EP, SUS-80, SUS-100 および SUS-120の表面元素分析結果を表1に示す。Fe, Cr, Niは

表 1 各試料表面の元素組成

Composition (mass%)	SUS-N	SUS-EP	SUS-80	SUS-100	SUS-120
Fe	77.30	77.39	76.72	74.84	68.12
Cr	19.59	19.70	20.14	21.96	28.02
Ni	2.28	2.16	2.30	2.22	2.35
O	0.83	0.75	0.84	0.98	1.51

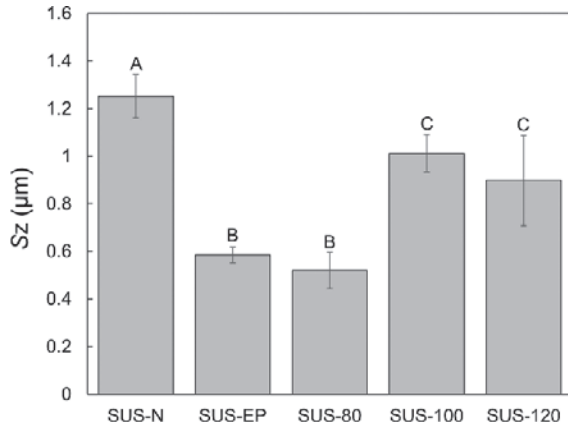


図 7 各試料の表面粗さ (Sz)
異なる記号は有意差を認める: $p < 0.05$

SUS ワイヤの構成成分であり, O は表面の酸化物による. 電解研磨により O の割合は減少し, その後の着色処理に伴って O の割合が増加する傾向が認められた. O 以外の構成元素の比率は SUS-N で Fe : Cr : Ni = 78 : 20 : 2, SUS-EP で Fe : Cr : Ni = 78 : 20 : 2, SUS-80 で Fe : Cr : Ni = 78 : 20 : 2, SUS-100 で Fe : Cr : Ni = 76 : 22 : 2, SUS-120 で Fe : Cr : Ni = 69 : 29 : 2 であり, 着色処理に伴って, Cr の比率が相対的に増加する傾向が認められた.

4. メタルブラケットに対する静止摩擦係数

SUS-N と SUS-100 のブラケットに対する静止摩擦係数の比較をそれぞれ図 8 に示す. SUS-N の静止摩擦係数は 450 ± 29 mN の値を有し, SUS-100 では, 460 ± 51 mN の値を示した. 統計処理によると, ブラケットに対する静止摩擦係数に関して処理の有無による有意差は認められなかった.

5. 機械的特性

SUS-N と SUS-100 のビッカース硬さ, 引張強さ, 弾性係数の比較をそれぞれ図 9 (a), 図 9 (b), 図 9 (c) に示す. SUS-N のビッカース硬さ, 引張強さおよび弾性係数の値はそれぞれ, 419.6 ± 2.7 HV, 1.89 ± 0.12 GPa, 179.05 ± 30.99 GPa の値を有し, SUS-100 のビッカース硬さ, 引張強さおよび弾性係数の値はそれぞれ, 418.1 ± 2.1 HV, 1.85 ± 0.05 GPa, 212.45 ± 68.70 GPa を

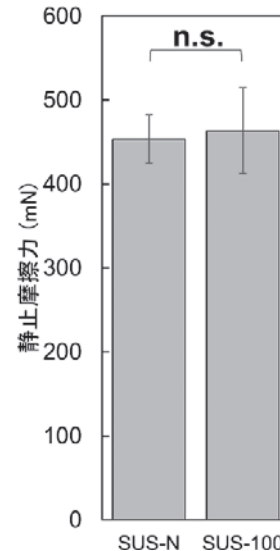


図 8 メタルブラケットに対する静止摩擦係数の比較
n.s. : $p > 0.05$

示した. 統計処理によると, ビッカース硬さ, 引張強さおよび弾性係数に関して処理の有無による有意差は認められなかった.

6. 耐食性

SUS-N と SUS-100 の代表的なアノード分極曲線の比較を図 10 に, 孔食電位の比較を図 11 に示す. SUS-N では電位の増加に伴い電流密度が増加したが, SUS-100 では電位を増加させても電流密度がほとんど変化しない領域が広く認められた. また, SUS-N よりも SUS-100 の分極曲線は右下側へシフトし, 耐食性の向上が認められた. SUS-100 の孔食電位 (1.03 ± 0.20 V v.s. SCE) は SUS-N の孔食電位 (0.53 ± 0.15 V v.s. SCE) より有意に大きい値を示した.

考 察

1. 矯正用 SUS ワイヤへのインコ法の適応について

我々は, 既存の SUS ワイヤに適用可能な簡便な手法で SUS ワイヤの色調を改善できないかと考え, ステンレス製品の着色に工業的に用いられているインコ法^{5~9)}に着目した. インコ法とは, ステンレス鋼の表面を硫酸とクロムの混合液で溶解しながら酸化被膜を形成

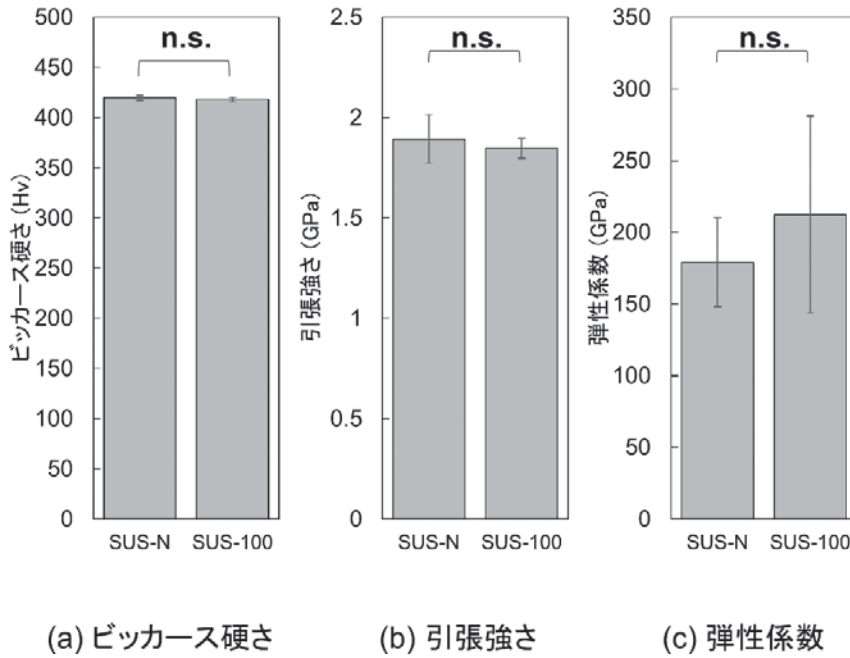


図9 機械的性質の比較
n.s. : $p > 0.05$

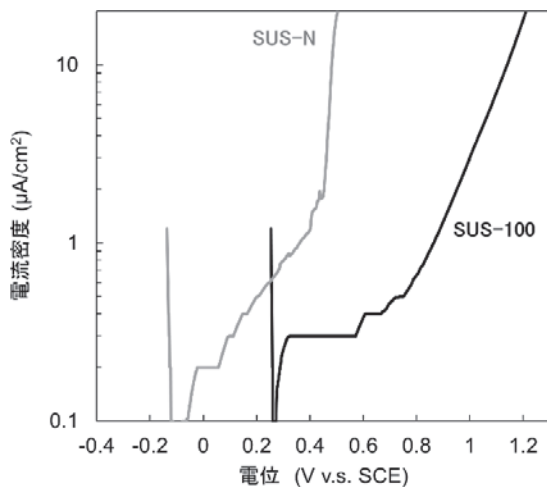


図10 アノード分極曲線の比較

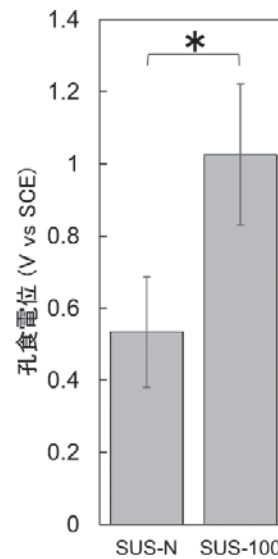


図11 孔食電位の比較
* : $p < 0.05$

させたのち、電解クロメートにて形成した酸化被膜を安定させる処理の総称であり、酸化被膜の形成により光による干渉色を付与する方法である。

従来のインコ法では、処理前に窒素雰囲気下焼鈍処理 (BA 処理) を行うことにより表面の均質化を行うことが推奨されている⁹⁾。しかし、SUS304 の BA 処理は 1000℃ を超える加熱処理であり¹²⁾、矯正用ワイヤーに BA 処理を施した場合、大幅な弾性係数の低下を伴う機械的特性の低下を認めた。そのため、弾性による形状の復元を利用する矯正治療において、BA 処理を行った矯正用 SUS ワイヤーでは必要な矯正力を発揮できないこ

とが懸念されたため、本研究では BA 処理を行わずに着色処理を試みた。まず、市販されている矯正用 SUS ワイヤーにインコ法を施したところ、安定して着色することができなかった。表面を SEM にて観察したところ、ワイヤーの長軸に沿った研磨傷や切削片を認めた。このことから、製造の過程で生じる研磨傷や表面の不純物により着色が阻害されていることが原因と考えられた。そこで、まず、矯正用 SUS ワイヤーに電解研磨を施すこ

とで表面の均質化を試み、その後、インコ法による処理を行うと、80分から120分の着色処理において安定して色調を変化させることができた。インコ法の前処理として電解研磨が有効であることが示された。

ステンレス鋼の電解研磨はリン酸-硫酸混合液中で通電するのが一般的である¹³⁾。SUSワイヤーに対して、リン酸-硫酸混合比7:3、電流密度350 mA/cm²で電解研磨を行うと、着色したワイヤーの寸法が $5.2 \pm 1.2\%$ 減少したが、ワイヤー表面の研磨痕が消失し、引張強さ、弾性係数に有意差を認めなかったため、前処理条件として採用した。

2. 色調変化について

インコ法は基材表面に酸化被膜を形成させ、酸化被膜の膜厚によって変化する光の干渉を利用して色調を変化させる技術である^{5~9)}。電解研磨により表面を均質化した後、着色処理時間が80分から120分にかけて色調が変化したのは、着色処理時間に応じて形成する酸化被膜の膜厚が増加したためと考えられる。一方、光の干渉が生じる膜厚はミクロンオーダー以下と報告されており⁹⁾、120分の着色処理で明度の著しい低下を伴う色調変化が生じたのは、生じた酸化被膜の膜厚が光の干渉が可能な膜厚よりも大きくなったためと考えられる。色差 ΔE^*_{ab} は比較対象との色度の近さの指標である。最も標準色(A3.5, A3.0, A2.0)に近かったのはSUS-100であり、審美性が高いとされるWCよりも標準色に近かった。すなわち、WCよりもSUS-100は一般的な歯冠色のA3.5, A3.0, A2.0と区別が付きにくい。審美性の価値観は個人により異なるが、SUS-100は歯冠色に近いという点では審美的に優れているといえる。

3. 表面性状および構成元素について

SEMで観察された表面性状(図6)とSz値(図7)の傾向は概ね一致していることから、SUSワイヤー表面の研磨痕が電解研磨で消失し、その後の着色処理および硬膜処理によって表面に被膜が形成し、表面性状が粗造になったと考えられる。

Sz値に対してSa値で有意差が認められなかったのは、Szが凹凸の高さを直接反映するのに対し、Saは凹凸の差を平均化しているため、大きな傷の影響を受けづらいためだと考えられる。しかし、Sa値が $0.2 \mu\text{m}$ 以下であることは、次のような意味がある。Bollenらの*in vivo*の報告によると、算術平均粗さRa値が $0.2 \mu\text{m}$ 以上に増加すると、プラークの付着が増加するとされている¹⁴⁾。本研究で測定した算術平均高さSaはRaを面に拡張したパラメータであり、Sa値とRa値は相関し、Sa値はRa値よりもやや大きな値となる傾向があることから¹⁵⁾、Sa値が $0.2 \mu\text{m}$ 以下であればRa値は $0.2 \mu\text{m}$ よりも小さいと言える。すなわち、Sa値が $0.2 \mu\text{m}$ 以下で

あればプラークの付着に影響がないと言え、本処理で得られたすべての試料はSa値が $0.2 \mu\text{m}$ 以下であり、プラーク付着の面で臨床上問題になることはないと考えられる。

出口は、インコ法による発色被膜の元素構成は2/3がOであり、残り1/3がCr, Fe, Niで構成されると報告している⁷⁾。本実験で用いたSEM-EDXによる表面化学組成分析では、試料表面に存在する酸化被膜のみならず、深さ方向に存在する下地(SUSワイヤー)の組成を含む分析値が得られる。SUSワイヤーの化学組成がCr:18-20%, Ni:8-10.5%(カタログ値)であることを踏まえて分析値(表1)をみると、SUS-N表面には酸化被膜(不動態膜)が存在し、電解研磨によりOの割合が相対的に低下していることから酸化被膜の一部が溶解したと推察される。実際に図3に示す通り、電解研磨によりワイヤー径がわずかに減少した。さらに、インコ法による着色処理時間の増加に伴って、CrとOの割合が相対的に増加していることから、前述の出口らの報告を踏まえ、SUS-N表面にはCrに富んだ酸化被膜が形成していると推察した。

4. メタルブラケットに対する静止摩擦力について

静止摩擦力は表面粗さの影響を受ける。SUS-NとSUS-100の比較において、ブラケットに対する静止摩擦力に有意差が認められなかったのは、表面の平均的な凹凸を示すSa値においても両者で有意差がなかったためだと考えられる。したがって、本来の矯正用SUSワイヤーのメタルブラケットに対する静止摩擦力に影響を及ぼさずに、表面の色調を変化させられることが示された。

5. 機械的性質について

SUS-NとSUS-100の比較において、ビッカース硬さ、引張強さおよび弾性係数に有意差が認められなかったことから、SUS-100の表面に形成したCrに富む酸化被膜は極めて薄膜なため、合金本来の機械的性質に影響しなかったと推察した。したがって、本来の矯正用SUSワイヤーの機械的特性に影響を及ぼさずに、表面の色調を変化させられることが示された。

6. 耐食性について

分極曲線において、電位が増加しても電流密度がほとんど変化しない場合の原因の一つは不動態であるとされる。SUS-100では電位が増加しても電流密度がほとんど変化しない領域が広く存在し、SUS-Nにはそのような領域がほとんど認められなかったことから、インコ法によってSUSワイヤー表層に酸化被膜が形成していることが裏付けられた。また、この不動態域が存在する分、SUS-100の分極曲線はSUS-Nの分極曲線よりも右下にシフトしており、孔食電位が増加したと考えられ、耐食

性の向上に酸化被膜の形成が関与していると推測される。SUS ワイヤーはもともと臨床応用に耐えうる耐食性を持つが、インコ法による処理で耐食性をさらに向上させることが可能であることが示された。

結 論

歯科矯正用ステンレスワイヤーにインコ法を適用したところ以下の結論が得られた。

1. 電解研磨を行ったのち、インコ法に準じて着色処理、硬膜処理を行うことで、SUS ワイヤーの色調を変化させることが可能であった。
2. 着色処理を 100 分行うと、メタルブラケットに対する静止摩擦力、ピッカース硬さ、引張強さ、弾性係数および耐食性を低下させずに、一般的な歯冠色との色差を小さくすることが可能であった。

文 献

- 1) Elayyan F, Silikas N, Bearn D. Ex vivo surface and mechanical properties of coated orthodontic archwires. *Eur J Orthod* 2008 ; 30 : 661-667.
- 2) da Silva DL, Mattos CT, Simao RA, de Oliveira Ruellas AC. Coating stability and surface characteristics of esthetic orthodontic coated archwires. *Angle Orthod* 2013 ; 83 : 994-1001.
- 3) Muguruma T, Iijima M, Yuasa T, Kawaguchi K, Mizogushi I. Characterization of the coatings covering esthetic orthodontic archwires and their influence on the bending and frictional properties. *Angle Orthod* 2017 ; 87 : 610-617.
- 4) 東海林喜雄. ステンレスの着色法. *金属表面技術* 1958 ; 9(1) : 29-32.
- 5) 辻敬之助, 中川洋一. ステンレス鋼を素材とする表面処理技術の現状. *鉄と鋼* 1980 ; 66 : 1017-1027.
- 6) 出口武典. ステンレス鋼の発色. *表面技術* 1990 ; 41 : 207-211.
- 7) 出口武典. ステンレス鋼の発色技術. *まてりあ* 1995 ; 34 : 1073-1076.
- 8) 高村久雄. ステンレス鋼の着色. *色材協会誌* 1989 ; 62 : 543-547.
- 9) 竹内 武. ステンレス鋼の着色処理. *実務表面技術* 1986 ; 33 : 440-445.
- 10) da Silva DL, Mattos CT, de Araújo MVA, de Oliveira Ruellas AC. Color stability and fluorescence of different orthodontic esthetic archwires. *Angle Orthod* 2013 ; 83 : 127-132.
- 11) Redlich M, Mayer Y, Harari D, Lewinstein I. In vitro study of frictional force during sliding mechanics of "reduced-friction" brackets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003 ; 124 : 69-73.
- 12) 浦山精一, 神谷昭彦, 小西康夫. ステンレス鋼の光輝焼鈍について. *川崎製鉄技報* 1970 ; 4 : 49-59.
- 13) 今岡睦明. ステンレス鋼の高い耐食化のためのアノード処理条件の検討. *鳥取県産業技術センター研究報告* 2020 ; 23 : 37-40.
- 14) Bollen CML, Papaioannou W, Van Eldere J, Schepers E, Quirynen M, Van Steenberghe D. The influence of abutment surface roughness on plaque accumulation and peri-implant mucositis. *Clin Oral Impl Res* 1996 ; 7 : 201-211.
- 15) 吉田 瞬, 大竹佳織, 川邊和宏, 香川美仁, 磯野宏秋, 杉林俊雄. ショットブラスト加工表面の表面性状評価パラメータ. *軽金属* 2011 ; 61 : 187-191.