（ 様式D－２ ）
（ 別　　紙 ）

令和４年度　海外派遣研究員研究報告書

令和５年１１月８日

日本大学理事長　　殿
日本大学学長　　殿

所　　属　　歯学部（総合歯学研究所）
資格・氏名　　准教授・納村泰弘

令和４年度海外派遣研究員（中期）の研究実績を，下記のとおり報告いたします。

記

１　区　　分　　中期

２　研 究 課 題

接着性保定装置の線材料における腐食および機械的性質の解明に関する研究

３　派 遣 期 間　　西暦　2023 年　3 月　5 日　～　　2023 年　9 月　2 日

４　派　遣　先　　ノルウェー王国　（オスロ）

５　研 究 目 的

口腔内に用いられる金属は、イオンの漏出による細胞毒性、金属アレルギーのような副作用が引き起こされるため、その生体適合性が重要な選択因子として考えられている。矯正歯科治療において、装置であるブラケットやワイヤーは、比較的短期間でも歯を動かす動的治療期間で 2,3 年口腔内に装着されている。さらに治療された歯列を維持する保定期間において固定として用いるワイヤーは、口腔内にほぼ永久的に装着される。したがって、その保定期間に用いられるワイヤーについては、特に生体適合性、安全性に着目して選択されることが理想的である。これまでのところ、その保定期間に用いられるワイヤー金属は、ステンレススチールやコバルトクロムの合金が殆どであり、組成としてニッケルが多く構成されているため、副作用による細胞毒性、金属アレルギーが、以前より懸念材料として考えられていた。

そのため、生体親和性の高い合金での永久保定を行うことを目的に、訪問先オスロ大学と歯科材料北欧研究所との共同プロジェクトとして基礎的研究を企画した。研究期間内においては、まず欧州および本国で利用できる新しい合金線の調査を行い、その選択された試料が、口腔内で長期維持安定するための評価として、組成分析、漏出量測定や表面形態解析などの実験を企画実行して、データの収集解析を予定した。

６　研 究 概 要

歯列弓の長径、幅径は生涯を通じて減少し、長期的には犬歯間の幅に影響を与える可能性がある。そのため、矯正歯科装置撤去後の歯列弓の形状と幅径を維持することは、長期の安定にとって重要な要素である。犬歯間保定装置には、歯列弓形状の維持に優れた太くて丸いステンレス鋼ワイヤーが使用されていた。しかしながら、太いワイヤーでは生理的な歯の可動性が低下してしまうため、接着不良や脱離のリスクが高くなる可能性がある。さらに、これらの太いワイヤーは患者にとってやや不快なものになる。1977 年に Zachrisson によって紹介された、すべての前歯に舌側で接着するマルチストランド固定リテーナー (FR) は、矯正歯科治療現場で広く使用されるようになり、治療後の前歯配列の安定性維持のためのゴールドスタンダードとなっている。しかし、現在において材料科学とコンピュータ支援設計製造 (CAD/CAM) の進歩により、より効果的と思われる新しいタイプの 接着性リテーナーの開発が可能になった。

近年欧米を中心に開発されたカスタムメイドの CAD/CAM リテーナーは、隣接面間の位置的調整に優れており、最高の精度を実現すると言われている。したがって、咬合干渉を引き起こすことがより少なく、舌への刺激や異物感が少なく、歯の安定性が優れている。また、CAD/CAM のニッケル (Ni) チタン (Ti) 角型ワイヤーは柔軟性が高く、生理的な歯の移動を可能にし、脱離率を低減できる可能性があると報告されている。さらに Ni-Ti ワイヤーは微生物の定着や歯垢形成に耐性があるため、歯周組織への健康という観点においてとても生体適合性がある。また、その優れた弾性と寸法安定性は製造プロセス後も維持されることが確認されている。しかしながらそれら以外でも、曲げ試験に関する生体力学的分析に加えて、保持ワイヤーの強度についても評価する必要がある。初期のリテーナーの脱離は、主に接着部の破損が原因であることが多いが、保定観察後期のリテーナーの故障については主にワイヤー自体の破損が原因であることが示されている。また一般に接着性リテーナーは、非常に長期間口腔内に存在するため、微生物の定着とプラークの形成を最小限に抑えて歯周組織への健康を促進することに加え、酸性の口腔環境に耐えうる、元素組成と耐腐食性も評価する必要がある。

したがって、ヨーロッパにおいて近年用いられている CAD/CAM リテーナーを含む接着性リテーナーの元素組成、耐食性、機械的特性を評価し、それらの機械的特性と生体適合性の観点から、新規の CAD/CAM 接着性リテーナーの検証を行った。

７　研究結果・成果

材料

既存のものを含め流通しているリテーナーワイヤーは、次のものを調べた。 4 種類の strand ワイヤー、すなわち、Wildcat (WT、GAC International、Bohemia、NY、USA)、Penta-one (PT、Masel、Carlsbad、CA、USA)、Penta twist retainer wires (GT、Gold`n Braces、Lake St. Louis、MO、USA)、および Twistflex retainer wire（TT、3MUnitek、Bracknell, UK)、1 種類のチェーンタイプのワイヤー、Ortho FlexTech (OC、Reliance Orthodontic Products、Itasca、IL、USA)、2 種類の丸型ソリッドワイヤー、すなわち round retainer wires（GR、Gold'n Braces）と Blue Elgiloy（BR、Rockey Mountain Orthodontics Europe、Strasbourg、France)、および 1 種類の CAD/CAM square wire、Memotain (MS、CA Digital、Hilden、Germany)になる。

接着性リテーナー線の元素組成

MS を除くすべてのリテーナーには Cr、Mn、Fe、Ni が含まれていた。さらに、BR には Co が含まれていた。 MS には Ni (49 wt.%) と Ti のみが含まれていた。 金（Au）メッキのリテーナー GT および GR は、マトリックスに Fe および Cr を含み、主に外層に Au を含んでいた。 Ni はすべてのワイヤーに存在していた。 BR と MS を除く他のすべてのリテーナーワイヤーの主要元素は Fe と Cr であった。 また、すべてのステンレス鋼ワイヤー (WT、PT、GT、TT、OC、GR) では、18 wt.% の Cr と 8 wt.% の Ni が検出された (Table 1)。

Table 1 Elemental composition (wt%) in each wire group by EDX analysis

Wire group		Fe	Cr	Ni	Co	Mn	Mo	Au	Ti	Al	Si
WT		72	18	7	-	1	0	-	0	2	0.5
PT		71	19	9	-	1	-	-	-	-	0.7
GT	Layer	7	2.5	0	-	0	-	90	-	-	0
	Matrix	70	17	9	-	1	-	3	-	-	-
TT		70	20	8	-	2	0.2	-	-	-	0.8
OC		70	18	10	-	1	1	-	-	-	0.8
GR	Layer	20	7	0	-	-	-	73	-	-	0
	Matrix	72	20	8	-	-	-	0	-	-	1
BR		17	21	16	40	2	4	-	-	-	1
MS		-	-	49	-	-	-	-	50	-	0.4

Abbreviations: WT, Wildcat twisted wire; PT, Penta-one twisted wire; GT, Penta twist gold plated wire; TT, Twistflex twisted wire; OC, Ortho FlexTech chained wire; GR, Round gold-plated round wire; BR, Blue Elgiloy round wire; MS, Memotain square wire.

接着性リテーナー線の耐食性

pH 2.3 の乳酸試験溶液の ICP 分析の結果を Table 2 に示す。各元素の値は 7 日あたりの μg/cm^2 で示されている。 どのリテーナーにも、ISO 22674:2022 で制限値として設定されている 200 μg/cm^2 を超える漏出は見られなかった。 Au メッキされたリテーナーワイヤーは、WT と同様に総イオン漏出量が最も多かった。GT (68.8μg/cm^2) は GR (20.3 μg/cm^2)よりも 3 倍多い漏出量を示した。PT と BR はそれぞれ 0.3 μg/cm^2 と 0.4 μg/cm^2 であった。また他のワイヤーよりも多くの Ni を含む CAD/CAM リテーナー (MS) には、測定可能な漏出は検出できなかった。

Table 2 Leakage of ions (μg/cm^2) detected by ICP in each wire group.

Wire group	Au	Co	Cr	Mo	Mn	Fe	Nb	Ti	Dy	Cd	Ni	Be	Pb	Total
WT	<1	<1	4	<1	<1	28.5	<1		<1	<1	2.6	<1	<1	35.1
PT	<1	<1	<1	<1	<1	0.3	<1		<1	<1	<1	<1	<1	0.3
GT	<1	<1	10.8	<1	0.4	52.2	<1		<1	<1	5.4	<1	<1	68.8
TT	<1	<1	1.9	<1	<1	12.1	<1		<1	<1	1.1	<1	<1	15.1
OC	<1	<1	<1	<1	<1	6	<1		<1	<1	0.4	<1	<1	6.4
GR	<1	<1	3.7	<1	<1	15.4	<1		<1	<1	1.2	<1	<1	20.3
BR	-	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	-		-	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.4
MS								<1		<1	<1	<1	<1	<1

Abbreviations: WT, Wildcat twisted wire; PT, Penta-one twisted wire; GT, Penta twist gold plated wire; TT, Twistflex twisted wire; OC, Ortho FlexTech chained wire; GR, Round gold-plated round wire; BR, Blue Elgiloy round wire; MS, Memotain square wire.

リテーナー線の機械的性質

リテーナーの Vickers 硬さ（HV0.3）値は 632 HV0.3 (WT) から 317 HV0.3 (MS) の範囲であった (Table 3)。 残りのリテーナーの値は 400～600 HV0.3 であった。strand 線（WT、PT、GT、TT）は、他のワイヤー（OC、GR、BR、MS）に比べて HV0.3 値が大きかった。また OC と MS の平均 HV 値は最も小さく、有意差を認めた (図 1)。 ソリッドワイヤー (GR および BR) については、他のワイヤーよりも有意に高い引張強度を示した。また OC および MS については、最も低い引張強度を示した (Table 3、図 2)。

Table 3 Vickers hardness (HV0.3), tensile strength (N), and tensile stress (MPa) in each wire

Wire group	HV0.3	Tensile strength	Tensile stress
WT	631.5 (8.1)	111.6 (10.7)	985.8 (95.1)
PT	530.5 (12.1)	164.7 (19.7)	723.5 (81.9)
GT	506.3 (8.6)	151.3 (11.9)	660.3 (50.9)
TT	583.9 (8.9)	451.0 (73.9)	875.7 (145.1)
OC	338.8 (29.2)	68.4 (2.5)	207.0 (7.9)
GR	441.2 (6.3)	685.4 (10.3)	1510.0 (21.0)
BR	424.8 (23.7)	778.2 (3.5)	1535.0 (22.9)
MS	317.3 (6.6)	109.1 (21.0)	720.4 (53.1)

Values are given as mean (standard deviation (SD)) all in HV0.3, Strength, and Stress. Abbreviations: WT, Wildcat twisted wire; PT, Penta-one twisted wire; GT, Penta twist gold plated wire; TT, Twistflex twisted wire; OC, Ortho FlexTech chained wire; GR, Round gold-plated round wire; BR, Blue Elgiloy round wire; MS, Memotain square wire.

一方引張応力に関しては、WT、PT、GT、MS、TT 間に統計的有意差は検出されなかった (Table 4、図 3)。またソリッドワイヤーGR、BR は、ツイストワイヤーや MS に比べて約 2 倍の引張応力値を持っていた。OC は全てのワイヤーの中で最も低い引張応力を示した。

したがって、欧米で新規に利用されている CAD/CAM リテーナーワイヤーは、測定不能なイオン漏洩により高い生体適合性を備えていることが示された。しかし、比較的低い硬度と低い引張強度を示し、強度の面において検討の余地のある見解を得た。

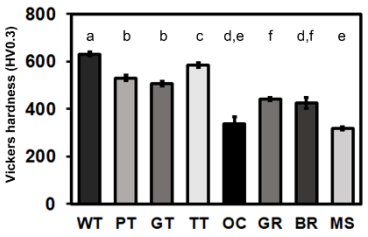


図 1 ビッカース硬さ（HV0.3）。 バーの上の異なる小文字は、有意差を示します (p < 0.00178)。 より線（WT、PT、GT、TT）は他の線種（OC、GR、BR、MS）に比べて硬度が高かった。Abbreviation: WT, Wildcat twisted wire; PT, Penta-one twisted wire; GT, Penta twist gold plated wire; TT, Twistflex twisted wire; OC, Ortho FlexTech chained wire; GR, Round gold-plated round wire; BR, Blue Elgiloy wire; MS, Memotain square wire

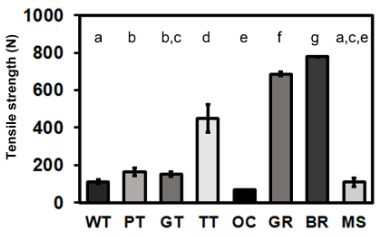


図 2 最大引張強さ。 バーの上の異なる小文字は、有意差を示します (p < 0.00178)。 OC と MS の引張強さはワイヤーの中で最も小さかった。
Abbreviation: WT, Wildcat twisted wire; PT, Penta-one twisted wire; GT, Penta twist gold plated wire; TT, Twistflex twisted wire; OC, Ortho FlexTech chained wire; GR, Round gold-plated round wire; BR, Blue Elgiloy wire; MS, Memotain square wire

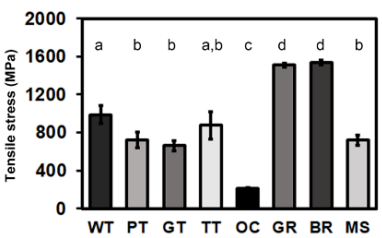


図 3 引張応力。 バーの上の異なる小文字は、有意差を示します (p < 0.00178)。 MS の引張応力は撚り線 (PT、GT、TT) の引張応力と同様でした。 Abbreviation: WT, Wildcat twisted wire; PT, Penta-one twisted wire; GT, Penta twist gold plated wire; TT, Twistflex twisted wire; OC, Ortho FlexTech chained wire; GR, Round gold-plated round wire; BR, Blue Elgiloy wire; MS, Memotain square wire

最後に、本研究の実施内容としては矯正歯科材料の基礎的研究の一端でありますが、得られた知見は今後の矯正歯科治療に役立ち、臨床応用発展へ寄与するものと考えております。