

フックによる矯正用ワイヤーの固定機構について

藤田 一隆

大学院歯学独立研究科 硬組織疾患制御再建学講座
(主指導教員：山田 一尋 教授)

松本歯科大学大学院歯学独立研究科博士（歯学）学位申請論文

Fixing mechanism of orthodontic wire by hook

Kazutaka FUJITA

Department of Hard Tissue Research, Graduate School of Oral Medicine
(Chief Academic Advisor : Professor Kazuhiro YAMADA)

The thesis submitted to the Graduate School of Oral Medicine,
Matsumoto Dental University, for the degree Ph. D. (in Dentistry)

要旨

現在，歯科矯正治療では主にマルチブラケット装置が用いられている．その治療の中で，歯を移動するために用いるエラスティックゴムやコイルスプリングを矯正用ワイヤーに取り付ける際に様々なフックが用いられている．フックには，ワイヤーを屈曲するタイプ，真鍮線を自在ろう着するタイプ，既製フックをかしめるタイプなどがある．ろう着するタイプとワイヤーを屈曲するタイプは専門的な技術を必要とする．一方，クリンパブルフックは口腔内で装着できる，チェアタイムが短縮できる，専門的な技術を必要としないなどの利点があるが，フックがかしめた場所からずれるという欠点がある．そこで我々は，この既製フックの固定の強化を目的とし，ワイヤーとフックにサンドブラスト処理を行い，ワイヤーとフック間の摩擦抵抗を検討することとした．

本研究には，ワイヤーには 0.017×0.025inch ステンレススチール(SS)-角形ワイヤー(以下，SS ワイヤー)，0.017×0.025inch Nickel Titan (NiTi)-角形ワイヤー(以下，NiTi ワイヤー)の 2 種類を使用し，既製フックにはクリンパブルフック(以下，フック)を使用した，クリンピングプライヤーは先端形状が三角と四角の 2 種類を使用した．

ワイヤーにフックをかしめた際の摩擦抵抗の計測では，かしめる力の大きさを一定にする為に，万能試験機の圧縮機能を用いた．また，ワイヤーとフック間の摩擦抵抗の計測には万能試験機の引き抜き機能を用いた．このワイヤーにフックをかしめる摩擦抵抗の実験から，ワイヤーにフックをかしめる力 10kgf でワイヤーにフックが接触することが示され，35kgf で摩擦抵抗の増加が終了したことより，本研究では 15kgf を摩擦抵抗の計測における弱い力とし，35kgf を強い力とした．

ワイヤーにフックをかしめた際のワイヤーの変形の検討では，弱い力 15kgf ではほとんど変形が認められず，強い力 35kgf では変形が認められた．この結果から，口腔内でワイヤーにフックを装着する際に強い力(35kgf)でかしめるとワイヤーに変形が生じる為，ワイヤーの口腔外における再調整が必要となることが示された．

ワイヤーへのサンドブラスト処理は Karasawa らの方法に準じて，処理距離 20mm，処理時間 5 秒×4 方向，処理気圧 0.5MPa，処理方向ワイヤーの長軸方向に対して垂直にサンドブラスト処理を行った．また，フックへのサンドブラスト処理は同条件で処理時間を 5 秒 1 方向にて行った．表面粗さの計測場所は，ワイヤーはフックと接する面を計測し，フックは，サンドブラストしやすい場所(以下，フックⒶ)とフックがワイヤーに接している場所(以下，フックⒷ)の 2 か所を計測した．試験片の表面粗さの計測は共焦点レーザー顕微鏡にて行った．サンドブラスト処理後の表面粗さの検討では SS ワイヤー，NiTi ワイヤーは共にまんべんなくサンドブラスト処理され，両者共にサンドブラスト未処理に対し，有意に大きな表面粗さを認めた．また，フックではサンドブラスト処理と未処理の間に有意差は認められなかった．これより，矯正臨床においてワイヤ

一へのサンドブラスト処理は表面粗さの増加に有効であることが示された。

サンドブラスト処理の有無によるワイヤー-フック間に発生する摩擦抵抗の比較では、四角のプライヤーで、**35kgf** でかしたサンドブラスト未処理のワイヤーとフックの組み合わせに対し、**15kgf** でかしたサンドブラスト処理のワイヤーとサンドブラスト未処理のフックの組み合わせとワイヤーとフックにサンドブラスト処理した組み合わせが有意に大きな摩擦抵抗を示した。三角のプライヤーでは同じ条件で同等の摩擦抵抗を示した。以上の結果から、サンドブラスト処理によりワイヤーの表面粗さは変化して、摩擦抵抗が有意に増加し、フックのみのサンドブラスト処理ではフックの表面粗さは変化せず、摩擦抵抗の増加に影響ないことが示された。

本研究より、ワイヤーへのサンドブラスト処理により、弱い力(**15kgf**)でフックをかしても臨床的に十分な固定が得られることが示された。

緒言

矯正治療において、マルチブラケット装置にエラスティックゴムやコイルスプリングを用いる際には、矯正用ワイヤーを屈曲するタイプ、真鍮線を自在ろう着するタイプ、既製フックをかきめるタイプ(クリンパブルフック)等の様々な種類のフックが用いられている。ワイヤーを屈曲するタイプと自在蝟着するタイプは特殊な技術を必要とする。一方、ワイヤーにかきめて付けるフックは特殊な技術を必要とせず、ワイヤーを口腔内に入れた状態でかきめることが可能であるなど、利便性に優れている¹⁾。しかし、フックをワイヤーにかきめた際には、ワイヤーに摩擦抵抗によって固定されている為、ワイヤー表面とフック内面で起こる摩擦抵抗を上回る力が加わった場合にはフックの位置がずれる問題が生じる²⁻²³⁾。このずれを抑えるためにかきめる力を大きくすると、フックを介してワイヤーの変形が生じる。これらの問題点は臨床上望ましくない結果である。

一方、Karasawaら²⁾は矯正用ワイヤーにサンドブラスト処理を行うことで、矯正用ワイヤーとブラケットの間の摩擦抵抗が大きくなり固定に有利であることを報告している。

そこで我々は、フックとワイヤーに対するサンドブラスト処理による摩擦抵抗の増加を計測し、ワイヤーにフックを確実に固定する方法を検討した。

試料及び方法

1) 試料

表 1 に示すように、本研究には 0.017×0.025inch ステンレススチール(SS)-角形ワイヤー (Standard Rectangular Wire, 3M Unitek, California, USA) (以下, SS ワイヤー), 0.017×0.025inch Nickel Titan(NiTi)-角形ワイヤー (Nitinol Classic, 3M Unitek, California, USA) (以下, NiTi ワイヤー) の 2 種類のワイヤーを使用し, フックはクリンパブルフック (矯正用アタッチメント, TP Orthodontics Japan, Tokyo, Japan) (以下, フック) を使用した. ワイヤーにフックをかしめる際のクリンピングプライヤーには, 先端形状が三角 (TP Orthodontics Japan, Tokyo, Japan, 以下, 三角のプライヤー) と四角 (BIODENT CORPORATION, Tokyo, Japan 以下, 四角のプライヤー) の 2 種類のタイプを使用した.

2) ワイヤーにフックをかしめる力の計測

ワイヤーにフックをかしめる際の加重を調整する為に, 万能試験機 (Model 5582, Instron Ltd, Buckinghamshire, UK) の圧縮機能を用いた. 図 1 に示すようにプライヤー用アタッチメントを下部ジグに設置し, 床と平行になるようクリンピングプライヤーを固定したのち, クロスヘッドに円柱状のアタッチメントを装着し, クリンピングプライヤーの圧縮を行った. 圧縮条件はクロスヘッドスピード 15.0mm/min で行い, 円柱状アタッチメントがプライヤーの柄に接触した時点からフックの応力の変化を計測した (図 1). 試験片は, 三角と四角のプライヤーを用いてワイヤーを挟まずかしたものの, SS ワイヤーを挟んでかしたものの, NiTi ワイヤーを挟んでかしたものそれぞれに対し 5 個ずつ作成した.

ワイヤーにフックをかした試験片の摩擦抵抗の計測は, 万能試験機を用いた引き抜き試験によって計測した⁷⁻¹⁰⁾. 図 2 に示すように, 万能試験機の下部ジグに臼歯用ブラケット (0.018inch Rectangular single tube, TOMY INTERNATIONAL INC. Tokyo, Japan) が溶接されたステンレススチール板を挟み, 上部ジグにフックがかしめられたワイヤーを挟んだ. 引き抜き条件は, クロスヘッドスピード 1.0mm/min, 引き抜き距離 2.0mm とした. 試験片は SS ワイヤーに三角と四角のプライヤーで 15kgf, 20kgf, 25kgf, 30kgf, 35kgf, 40kgf でかしたものをそれぞれ 10 個ずつ作成した.

3) ワイヤーとフックの表面粗さの計測

ワイヤーへのサンドブラスト処理は Karasawa らの方法²⁾に準じて, 処理距離 20mm, 処理時間 5 秒×4 方向, 処理気圧 0.5MPa, 処理方向はワイヤーの長軸方向に対して垂直にサンドブラスト処理を行った (図 3). また, フックへのサンドブラスト処理は同条件で処理時間を 5 秒 1 方向にて行った (図 4).

表面粗さの計測場所は, ワイヤーはフックと接する面 (図 5) を計測し, フックは, 図

5に示すようにサンドブラストしやすい場所(以下、フック④)とフックがワイヤーに接している場所(以下、フック⑤)の2か所を計測した。SSワイヤー、NiTiワイヤー各10個にサンドブラスト処理を行い、行わないもの10個をコントロール群とした。フックは10個にサンドブラスト処理を行い、行わないもの10個をコントロール群とした。試験片の表面粗さは共焦点レーザー顕微鏡(Laser Scanning Microscope OLS3000, オリンパス株式会社, 新, 東京都, 日本)にて面粗さの計測を行った⁷⁻¹¹⁾。

4) ワイヤーとフック間の摩擦抵抗の計測

サンドブラスト処理によるフックとワイヤー間の摩擦抵抗の計測を行った組み合わせは、サンドブラスト未処理フック(CF)とサンドブラスト未処理ワイヤー(CW), サンドブラスト処理フック(BF)とサンドブラスト未処理ワイヤー(CW), サンドブラスト未処理フック(CF)とサンドブラスト処理ワイヤー(BW), サンドブラスト処理フック(BF)とサンドブラスト処理ワイヤー(BW)の4通りを、三角、四角のそれぞれのプライヤーで、15kgfと35kgfの力でかした後に計測した。ワイヤーにフックをかした試験片の摩擦抵抗の計測は万能試験機を用いた引き抜き試験によって計測し(図2)試験片はそれぞれ10個ずつとした。摩擦抵抗の計測値は矯正治療中のフックは静止している状態として静摩擦力を用いた²⁾。

統計

ワイヤーとフックの表面粗さの比較及びワイヤーとフックに対するサンドブラスト処理の有無によるワイヤー-フック間に発生する摩擦抵抗の比較は多重比較検定を用い、その後Scheffe検定にて分散分析を行った。

結果

1)

2) ワイヤーにフックをかしめる力の計測

万能試験機の圧縮機能を利用し、ワイヤーにフックをかしめる際の加重の変化によるクロスヘッドの移動様相を調べた結果を図6に示す。三角のプライヤーと四角のプライヤーどちらにおいても約3kgf(線①)でグラフの傾斜がゆるやかになり、約10kgf(線②)以降でフックのみの群では同じ傾斜を保っていたが、ワイヤーにフックをかした群は傾斜が急になった。

三角と四角のプライヤーでかしたSSワイヤーとフックの摩擦抵抗の結果を図7に示す。三角と四角のプライヤーにおいて、かしめる力が15kgfから20kgf, 20kgfから25kgf, 25kgfから30kgf, 30kgfから35kgfでは摩擦抵抗の有意な増加がみられたが、

35kgf 以上では摩擦抵抗の増加がみられなかった。また、2つのプライヤー間で有意な摩擦抵抗の差は認められなかった。

ワイヤーにフックをかしめた時のワイヤーの変形を図 8 に示す。弱い力(15kgf)では三角のプライヤーと四角のプライヤー共に SS ワイヤーで変形が認められなかったが、NiTi ワイヤーでは三角のプライヤーで 3° 、四角のプライヤーで 2° の変化がみられた。強い力(35kgf)では SS ワイヤーと NiTi ワイヤー共に三角のプライヤー(SS: 6° , NiTi: 7°)と四角のプライヤー(SS: 5° , NiTi: 6°)で変形が認められた。

これらのことから、本研究ではワイヤーにフックが接触する 10kgf から 5kgf 増加した 15kgf を摩擦抵抗の計測における弱い力とし、フックとワイヤーの摩擦抵抗の増加がみられる 35kgf を摩擦抵抗の計測における強い力としてサンドブラスト処理による摩擦抵抗を検討することとした。

3) フックとワイヤーの表面粗さの計測

ワイヤー表面の共焦点レーザー顕微鏡像を図 9 に示す。サンドブラスト未処理では NiTi ワイヤーが SS ワイヤーに比べやや粗造な面を示したが、サンドブラスト処理後はどちらも同等に粗造になり、サンドブラスト処理の効果が認められた。

フック表面のサンドブラスト処理の共焦点レーザー顕微鏡像観を図 10 に示す。サンドブラスト未処理では、フック⑥の表面がフック④に比べ粗造な面を示したが、サンドブラスト処理後はフック④、フック⑥共に粗造になり、同等に表面処理されているのが示された。

フックとワイヤーの共焦点レーザー顕微鏡で測定した表面粗さの結果を図 11 に示す。サンドブラスト未処理の SS ワイヤー、NiTi ワイヤー、フック④、フック⑥の表面粗さは、それぞれ $0.18\pm 0.05\mu\text{m}$ 、 $0.44\pm 0.07\mu\text{m}$ 、 $0.61\pm 0.14\mu\text{m}$ 、 $1.55\pm 0.52\mu\text{m}$ を示した。サンドブラスト処理の SS ワイヤー、NiTi ワイヤー、フック④、フック⑥の表面粗さは、それぞれ $1.12\pm 0.19\mu\text{m}$ 、 $0.98\pm 0.11\mu\text{m}$ 、 $0.97\pm 0.12\mu\text{m}$ 、 $1.94\pm 0.59\mu\text{m}$ を示した。

サンドブラスト処理の SS ワイヤーと NiTi ワイヤーは、共にサンドブラスト未処理の SS ワイヤーと NiTi ワイヤーに対し、それぞれ有意に大きな表面粗さを認めた。しかし、フック④、⑥のサンドブラスト処理とサンドブラスト未処理と比較では、サンドブラスト処理の有無による表面粗さの差は認められなかった。

4) サンドブラスト処理の有無によるワイヤー-フック間に発生する摩擦抵抗の比較

ワイヤーとフックの間のサンドブラスト処理の有無による摩擦抵抗の結果を図 12 と図 13 に示す。三角のプライヤーで SS ワイヤーを 15kgf の力がかしめたワイヤーとフック間の CFBW($1828.6\pm 331.7\text{gf}$)と BFBW($1952.0\pm 430.7\text{gf}$)の摩擦抵抗は CFCW($206.5\pm 47.9\text{gf}$)と BFCW($176.9\pm 88.0\text{gf}$)に対し有意に大きな値を示した。四角のプライヤーで 15kgf の力がかしめたワイヤーとフック間の CFBW($3372.5\pm 746.6\text{gf}$)と BFBW($3332.8\pm 746.6\text{gf}$)の摩擦抵抗も CFCW($238.6\pm 36.6\text{gf}$)と BFCW($222.7\pm 109.4\text{gf}$)に対し有意に大きな値を示した。

三角のプライヤーで SS ワイヤーを 35kgf の力でかしめたワイヤーとフック間の BFCW(7748.9±217.0gf)と CFBW(7641.0±81.2gf)と BFBW(7623.2±40.5gf)の摩擦抵抗は CFCW(1742.4±98.8gf)に対し有意に大きな値を示した. 四角のプライヤーで NiTi ワイヤーを 35kgf の力でかしめたワイヤーとフック間の BFCW(7748.9±217.0gf)と CFBW(7641.0±81.2gf)と BFBW(7603.7±58.4gf)の摩擦抵抗も CFCW(1612.0±120.1gf)に対し有意に大きな値を示した.

三角のプライヤーで NiTi ワイヤーを 15kgf の力でかしめたワイヤーとフック間の BFCW(933.7±229.3gf)と CFBW(1919.2±513.9gf)と BFBW(1558.3±443.1gf)の摩擦抵抗は CFCW(103.1±31.4gf)に対し有意に大きな値を示した. 四角のプライヤーで 15kgf の力でかしめたワイヤーとフック間の CFBW(2961.8±668.8gf)と BFBW(2670.9±349.0gf)の摩擦抵抗は CFCW(718.7±116.3gf)に対し有意に大きな

値を, BFCW(1320.1± 102.5gf)に対しては有意差を示さなかった.

三角のプライヤーで NiTi ワイヤーを 35kgf の力でかしめたワイヤーとフック間の BFCW(7881.0±102.5gf)と CFBW(7831.3±89.1gf)と BFBW(7928.3±73.1gf)の摩擦抵抗は CFCW(1803.0±116.8gf)に対し有意に大きな値を示した. 四角のプライヤーで NiTi ワイヤーを 35kgf の力でかしめたワイヤーとフック間の BFCW(7631.8±466.8gf)と CFBW(7624.4±430.5gf)と BFBW(7785.9±154.1gf)の摩擦抵抗は CFCW(1845.6±64.2gf)に対し有意に大きな値を示した.

また, 強い力(35kgf)と弱い力(15kgf)の比較では, SS ワイヤー, NiTi ワイヤー共に四角のプライヤーでは, 弱い力(15kgf)でかしめた CFBW, BFBW の摩擦抵抗は, 強い力(35kgf)でかしめた CFCW に対し有意に大きな値を示した. 三角のプライヤーでは弱い力(15kgf)でかしめた CFBW, BFBW の摩擦抵抗は, 強い力(35kgf)でかしめた CFCW とほぼ同等の値を示した.

考察

本研究に用いたクリンパブルフックはワイヤーを口腔内に装着した状態でワイヤーにフックを取り付けることが可能であり, ワイヤーへのフックのろう着, ワイヤーのベンディングが不要な為, ワイヤーの口腔内からの着脱が不要, 特殊な技術を必要とせずチェアタイムが短縮できる, 専門的な技術を必要としないなどの利点があげられる. しかし, 強い力でワイヤーにフックをかしめないと矯正力を加えた際にフックの位置がずれる問題がみられる.

ワイヤーにフックをかしめる力の計測では, かしめる力約 3kgf からフックのみの群とワイヤーにフックをかしめた群は共にかしめた力に対するクロスヘッドの移動距離が増加していることからフックの変形が起こっていることが示された. その後, 10kgf

から三角のプライヤーと四角のプライヤーでワイヤーにフックをかしめたものでは、かした力に対するクロスヘッド移動距離が減少することから 10kgf においてワイヤーがフックに接触することが示唆された。

ワイヤーにフックをかしめた際の摩擦抵抗の実験から、15kgf から 35kgf の間では摩擦抵抗の有意な増加がみられたが 35kgf 以上では摩擦抵抗の増加は見られなかった。また、かしめる力 25kgf 以下では摩擦抵抗が矯正臨床に必要な 1000gf^(1,2) に満たなかった。これは、矯正臨床において、ワイヤーとフックが接触するかしめる力が 10kgf 以上であれば、ワイヤーにフックを固定することが可能だが、25kgf 以下のかしめる力においては、大きな矯正力(1000gf 以上)がフックに加えられた場合、フックがかしめられた場所からずれる可能性があることが示唆された。この 25kgf のかしめる力とは女性の平均握力(文部科学省, 平成 25 年度, 30 代女性の最大平均握力 28.61kgf)に近い値であり、通常、成人女性の場合、最大握力でワイヤーにフックをかしめても、フックがかしめた場所からずれる場合が多いことが示唆された。

三角のプライヤーと四角のプライヤーによるワイヤー変形の有無では、弱い力(15kgf)を用いてワイヤーにフックをかしめた場合、SS ワイヤーの変形は認めず、NiTi ワイヤーではわずかに変形が認められた。一方、強い力(35kgf)を用いてワイヤーにフックをかしめた場合には、三角と四角のプライヤーは共に SS ワイヤーと NiTi ワイヤーで変形を認めた。これは、口腔内においてワイヤーにフックを装着する際、強い力(35kgf)でかしめるとワイヤーに変形が生じ、ワイヤーを着脱し、口腔外におけるワイヤーの再調整が必要となることが示唆された。一方、弱い力(15kgf)でワイヤーにフックをかしめると SS ワイヤーに変形が生じない為、ワイヤーの口腔外における再調整が不要で、ワイヤーを口腔内に装着した状態でワイヤーにフックを取り付けることが可能であることが示唆された。

サンドブラスト処理によるワイヤー表面の共焦点レーザー顕微鏡像の観察では、サンドブラスト未処理ワイヤーでは、NiTi ワイヤーは SS ワイヤーに対し大きな表面粗さを示した。しかし、サンドブラスト処理後の NiTi ワイヤーと SS ワイヤーは同等の表面粗さを示した。また、表面粗さの計測の結果、SS ワイヤーと NiTi ワイヤー共に、サンドブラスト処理ワイヤーはサンドブラスト未処理ワイヤーに対し有意に大きな表面粗さを示した。これは、ワイヤーの製造工程及び、材質の違いにより SS ワイヤーと NiTi ワイヤーの間に表面粗さの差が認められても、ワイヤーに対するサンドブラスト処理が均一に行われ、SS ワイヤーおよび NiTi ワイヤーに対しカーボランダムパウダーによるサンドブラスト処理が有効であることが示された。

サンドブラスト処理によるフック内面の共焦点レーザー顕微鏡像の観察では、サンドブラスト未処理フックのサンドブラスト処理しやすい場所④に対し、ワイヤーにフックが接触する場所⑤は大きな表面粗さとばらつきを示した。これは、部位⑤には製造上のバリがあり、それにより部位④に対し、大きな表面粗さと、ばらつきを示したと推察さ

れた。また、サンドブラスト処理後のフックの表面粗さは増加していたが、サンドブラスト未処理フックの表面粗さと有意差を認めなかった。これは、フックの④と⑤の部位の表面粗さがサンドブラスト処理前にすでに大きな表面粗さを示していたこと、フックの形状からワイヤーに比べカーボランダムパウダーの到達が困難だったことによると推察された。

サンドブラスト処理の有無によるワイヤー-フック間に発生する摩擦抵抗の比較から SS ワイヤーにフックをかしめた際の摩擦抵抗は、弱い力(15kgf)でかしめた場合、三角と四角のプライヤー共に CFCW, BFCW に対し CFBW, BFBW は有意に大きな摩擦抵抗を示した。これは、サンドブラスト処理により有意に SS ワイヤーの表面粗さが増加し、フックではサンドブラスト処理で表面粗さに有意差を示さなかったことによると推察された。

一方、強い力(35kgf)では、三角と四角のプライヤーは共に、BFCW と CFBW に有意差がみられなかった。これはワイヤーにフックをかしめた際のワイヤーの変形を検討した実験から強い力(35kgf)では、ワイヤーの変形が生じていることにより、BFCW の摩擦抵抗が大きくなっていることによると推察された(図 8)。

プライヤーの違いによる摩擦抵抗の差については SS ワイヤーに弱い力(15kgf)でフックをかしめた場合、三角のプライヤーでかしめた CFBW, BFBW に比べ四角のプライヤーでかしめた CFBW, BFBW の方が有意に大きな摩擦抵抗を示した。また、NiTi ワイヤーに弱い力(15kgf)でかしめた場合、三角のプライヤーでかしめた CFBW, BFBW に比べ四角のプライヤーでかしめた CFBW, BFBW の方が摩擦抵抗が大きい傾向を示した。これは弱い力(15kgf)でかしめた場合、三角のプライヤーに比べ四角のプライヤーの方がワイヤーへの接触面積が大きい為、大きな摩擦抵抗を得られることによると推察された。強い力(35kgf)でかしめた場合、2つのプライヤーの間に差は見られなかった。これはワイヤーにフックを 15kgf から 40kgf でかしめた時の摩擦抵抗の実験結果から、35kgf から 40kgf にて摩擦抵抗の有意な増加が認められなかったことから、ワイヤーにフックがかしまる限界に達した為、プライヤー間の摩擦抵抗に有意差が認められなかったことによると推察された。

一方、NiTi ワイヤーにフックをかしめた際の摩擦抵抗は、弱い力(15kgf)でかしめた場合、三角のプライヤーでは CFCW に対し BFCW, CFBW, BFBW は有意に大きな摩擦抵抗を示し、BFCW に対し CFBW のみ有意に大きな摩擦抵抗を示した。四角のプライヤーでは SS ワイヤーと同様に CFCW, BFCW に対し CFBW, BFBW は有意に大きな摩擦抵抗を示した。これは SS ワイヤーに比べ NiTi ワイヤーの表面粗さは元々大きい為、BFCW の摩擦抵抗が大きい値を示したことによると推察された。一方、強い力(35kgf)では、三角と四角のプライヤーは共に、BFCW と CFBW に有意差がみられなかった。これはワイヤーにフックをかしめた際のワイヤーの変形を検討した実験から、強い力(35kgf)ではワイヤーの変形が生じていることによると推察された(図 8)。

クリンパブルフックは特殊な技術を必要とせずにアーチワイヤーにフックを装着できる利点を有するが、大きな矯正力(1000gf)に対応するためにかしめる力 25kgf が必要で、アーチワイヤーにフックを固定するために女性の平均握力が必要である。本研究の結果からワイヤーのサンドブラスト処理によりワイヤーの摩擦抵抗を増加することで弱い力(15kgf)で固定を可能になることが示唆された。

今回使用した SS ワイヤーおよび NiTi ワイヤーは角型ワイヤーの為、引き抜き試験時にトルクが発生することが示唆された。その為、Karasawa ら方法²⁾に準じて上部ジグに回転装置を設置し、引き抜き試験時に発生するトルクの解消を行うこととした。矯正臨床において、トルクの摩擦抵抗への影響は小さくなく、発生するトルクは完全に取り除くか、意図的に定量のトルクを付与することが実験の再現性を確立するために必要である。しかし、定量のトルクを付与するためにトルクの管理を行うことは装置を複雑化させ、実験の再現性を低下させる可能性が考えられた為、引き抜き試験装置の上部ジグに回転装置を介在させ、もっとも基礎的なフック-ワイヤー間の摩擦抵抗の計測を行うこととした。さらに、本実験では、唾液¹²⁻¹⁵⁾、抵抗中¹⁶⁻²²⁾、歯列弓形態²³⁾などの口腔内環境を実験装置に再現することなく摩擦力の計測を行った。その結果、より再現性が高い状態で各試験片の摩擦抵抗を比較することができた。しかし、より臨床的に摩擦抵抗を検討するために、今後様々な臨床的要素を取り入れた摩擦抵抗の検討が必要と考えられた。

謝辞

稿を終えるにあたり、本研究に終始御懇篤なる御指導、御校閲の労を賜りました松本歯科大学大学院硬組織疾患制御再建学講座山田一尋教授、松本歯科大学歯科理工学講座永澤栄教授に謹んで深甚なる感謝の意を表します。また本研究に際し、御協力を頂きました皆様、ならびに松本歯科大学歯科矯正学講座の唐澤基央先生、津村智信先生に重ねて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 海原 康孝, 青木 梢, 三宅 奈美, 香西 克之 (2007) クリンパブルフックとセクショナルワイヤーを用いた少数歯の咬合誘導. 小児歯誌 45 : 92-96
- 2) Karasawa M, Tsumura T, Fujita K, Ito M, Nagasawa S, Yamada K (2015) Study on the frictional properties between bracket and wire by sandblast processing. *Orthod Waves* : 48-53.
- 3) 野田隆夫, 岡本安生, 浜中人士 (1993) 矯正用ワイヤーの摩擦特性—静摩擦係数による評価—. 日矯歯誌 52 : 502-8.
- 4) Thorstenson GA, Kusy RP, (2001) Resistance to sliding of self-ligating brackets versus conventional stainless steel twin brackets with second-order angulation in the dry and wet (saliva) states. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 120 : 361-70.
- 5) Thorstenson GA, Kusy RP, (2002) Comparison of resistance to sliding between different self-ligating brackets with secondorder angulation in the dry and saliva states. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 121 : 472-82.
- 6) Krishnan M, Kalathil S, Abrahamc KM (2009) Comparative evaluation of frictional forces in active and passive self-ligating brackets with various archwire alloys. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 136 : 675-82.
- 7) Frank CA, Nikolai RJ (1980) A comparative study of frictional resistances between orthodontic bracket and arch wire. *Am J Orthod* 78 : 593-609.
- 8) Doshi UH, Bhad-Patil WA (2011) Static frictional force and surface roughness of various bracket and wire combinations. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 139 : 74 -9.
- 9) Choi SH, Kang DY, Hwang CJ (2014) Surface rough ness of three types of modern plastic bracket slot floors and frictional resistance. *Angle Orthod* 84 : 177-183.
- 10) Pizzoni L, Ravnholt G, Melsen B (1998) Frictional forces related to self-ligating brackets. *Eur J Orthod* 20 : 283-291.
- 11) Monteiro MR, da Silva LE, Elias CN, Vilella OV (2014) Frictional resistance of self-ligating versus conventional brackets in different bracket archwire-angle combinations. *J Appl Oral Sci* 22 : 228-234
- 12) 平下斐雄, 山本照子, 歯は動く—矯正歯科臨床の生物学的背景—第1版 33-34, 医歯薬出版株式会社, 東京.
- 13) Baker K, Nieberg L, Weimer A, Hanna M (1987) Frictional changes in force values caused by saliva substitution. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 91 :

316-20.

- 14) Chang CJ, Lee TM, Liu JK (2013) Effect of bracket bevel design and oral environmental factors on frictional resistance. *Angle Orthod* 83 : 956-65.
- 15) Pratten DH, Popli K, Germane N, Gunsolley J (1990) Frictional resistance of ceramic stainless steel orthodontic brackets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 98 : 398-403.
- 16) Keith O, Kusy RP, Whitley JQ, (1994) Zirconia brackets: an evaluation of morphology and coefficients of friction. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 106 : 605-14.
- 17) 野田隆夫, 岡本安生, 浜中人士 (1993) 矯正用ワイヤーの摩擦特性—結紮線, ブラケットとの摩擦—. *日矯歯誌* 52 : 502-8.
- 18) 神山光男, 佐々木俊則 (1973) ブラケットの幅と摩擦について. *日矯歯誌* 32 : 286-9.
- 19) 小田義仁, 森本徳明, 山口和憲, 山内和夫 (1992) ブラケットとワイヤーの間の摩擦力に関する研究, 一幅径の異なる三種類のステンレスブラケットの摩擦力の比較—. *中・四矯歯誌* 4 : 45-50.
- 20) 山口和憲, 小田義仁, 森本徳明, 山内和夫 (1992) ブラケットとワイヤーの間の摩擦力に関する研究—simulation model における抵抗荷重と矯正力作用ポイントの影響—. *広歯誌* 24 : 263-72.
- 21) 山口和憲, 小田義仁, 森本徳明, 山内和夫 (1992) ブラケットとワイヤーの間の摩擦力に関する研究—セラミックブラケットとステンレスブラケットの比較—. *広歯誌* 24 : 273-80.
- 22) 山口和憲, 小田義仁, 杉山拓紀, 森本徳明, 丹根一夫 (1994) 結紮がワイヤーとブラケット間の摩擦力に及ぼす影響について. *広歯誌* 26 : 324-30.
- 23) Olson JE, Liu Y, Nickel JC, Walker MP, Iwasaki LR (2012) Archwire vibration and stick-slip behavior at the bracket-archwire interface. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 142 : 314-22.
- 24) 田中典子, 植木 信, 清村 多, 松村知佐, 武山治雄, 鐘ヶ江晴秀 (2001) 矯正用ワイヤーとブラケットのフリクションに関する研究. *明海大歯誌* 30 : 231-41.

図の説明

表 1

実験に使用した矯正材料

図 1

万能試験機を用いた圧縮試験

円柱状アタッチメントが下方に移動し、プライヤーの柄を押すことによってワイヤーにフックを一定の力でかしめた。

図 2

万能試験機を用いた引き抜き試験

バックルチューブにフックをかしめたワイヤーを通し、上方に引き抜くことでワイヤーとフック間の摩擦抵抗を計測した。

図 3

ワイヤーへのサンドブラスト処理方法

ワイヤーを4分の1回転ずつさせながら、4方向からワイヤーの長軸に対し垂直にサンドブラスト処理を行った。

図 4

フックへのサンドブラスト処理

ワイヤーと同条件により、1方向からサンドブラスト処理を行った。

図 5

表面粗さの計測場所

図 6

ワイヤーにフックをかしめる際のクロスヘッドの移動距離

- ① フックの変形開始
- ② ワイヤーにフックが接触開始

図 7

ワイヤーにフックを 15kgf から 40kgf でかしめた時の摩擦抵抗

*: $p < 0.05$, Scheffe

図 8

三角のプライヤーと四角のプライヤーによるワイヤーの変形の有無

図の左上がワイヤーとプライヤーの種類を示し、右上がかしめた際のワイヤーの変形した角度を示す.

図 9

サンドブラスト処理によるワイヤー表面の共焦点レーザー顕微鏡像

図の左上がワイヤーの種類で、右上は顕微鏡の倍率を示す.

図 10

サンドブラスト処理によるフック表面の共焦点レーザー顕微鏡像

図の左上がフックの計測場所で、右上は顕微鏡の倍率を示す.

図 11

共焦点レーザー顕微鏡による表面粗さの計測

*: $p < 0.05$, Scheffe

図 12

SS ワイヤーをかしめた際の摩擦抵抗の計測

C: サンドブラスト未処理(コントロール) B: サンドブラスト処理

W: ワイヤー F: フック

*: $p < 0.05$, Scheffe

図 13

NiTi ワイヤーをかしめた際の摩擦抵抗の計測

C: サンドブラスト未処理(コントロール) B: サンドブラスト処理

W: ワイヤー F: フック

*: $p < 0.05$, Scheffe

| | サイズ (inch) | 形状 | 材質 | 製品名 | 会社 | 略 |
|---------|---------------|-------------|-----------|---------------------------|--------------------------------------|----------|
| アーチワイヤー | 0.017 x 0.025 | 角型 ストレート | ステンレススチール | Standard Rectangular Wire | 3M Unitek, Monrovia, California, USA | SSワイヤー |
| | 0.017 x 0.025 | 角型 ストレート | ニッケルチタン | Nitinol Classic | 3M Unitek, Monrovia, California, USA | NiTiワイヤー |
| フック | | | | クリンパブルフック | TP Orthodontics Japan, Tokyo, JPN | フック |
| ブライヤー | | 三角 | | クリンパブルフックブライヤー | TP Orthodontics Japan, Tokyo, JPN | 三角のブライヤー |
| | | 四角 | | 矯正ブライヤー/クリンピング | BIODENT CORPORATION, Tokyo, JPN | 四角のブライヤー |

表1 実験に使用した矯正用材料

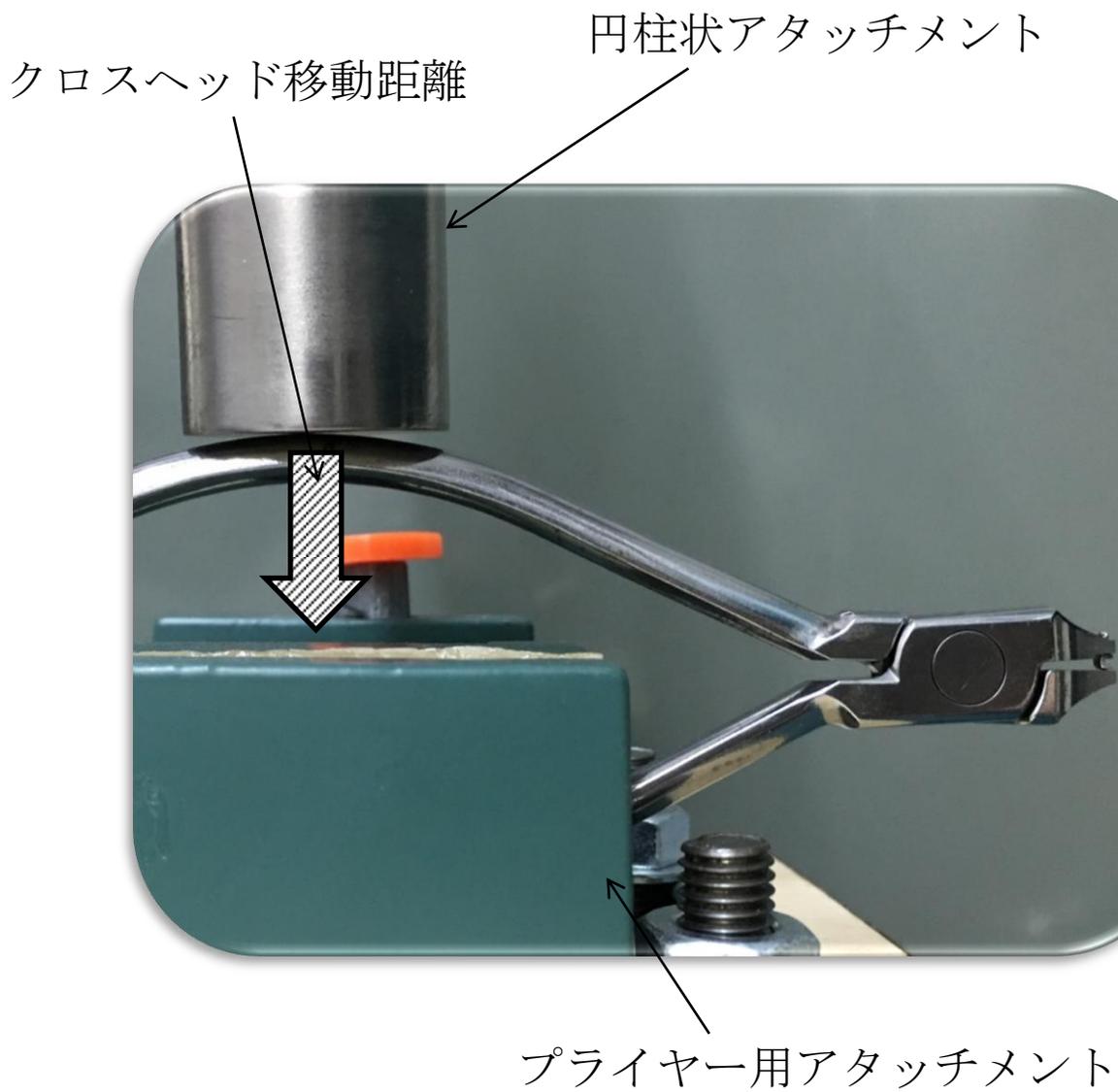


図1 万能試験機を用いた圧縮試験

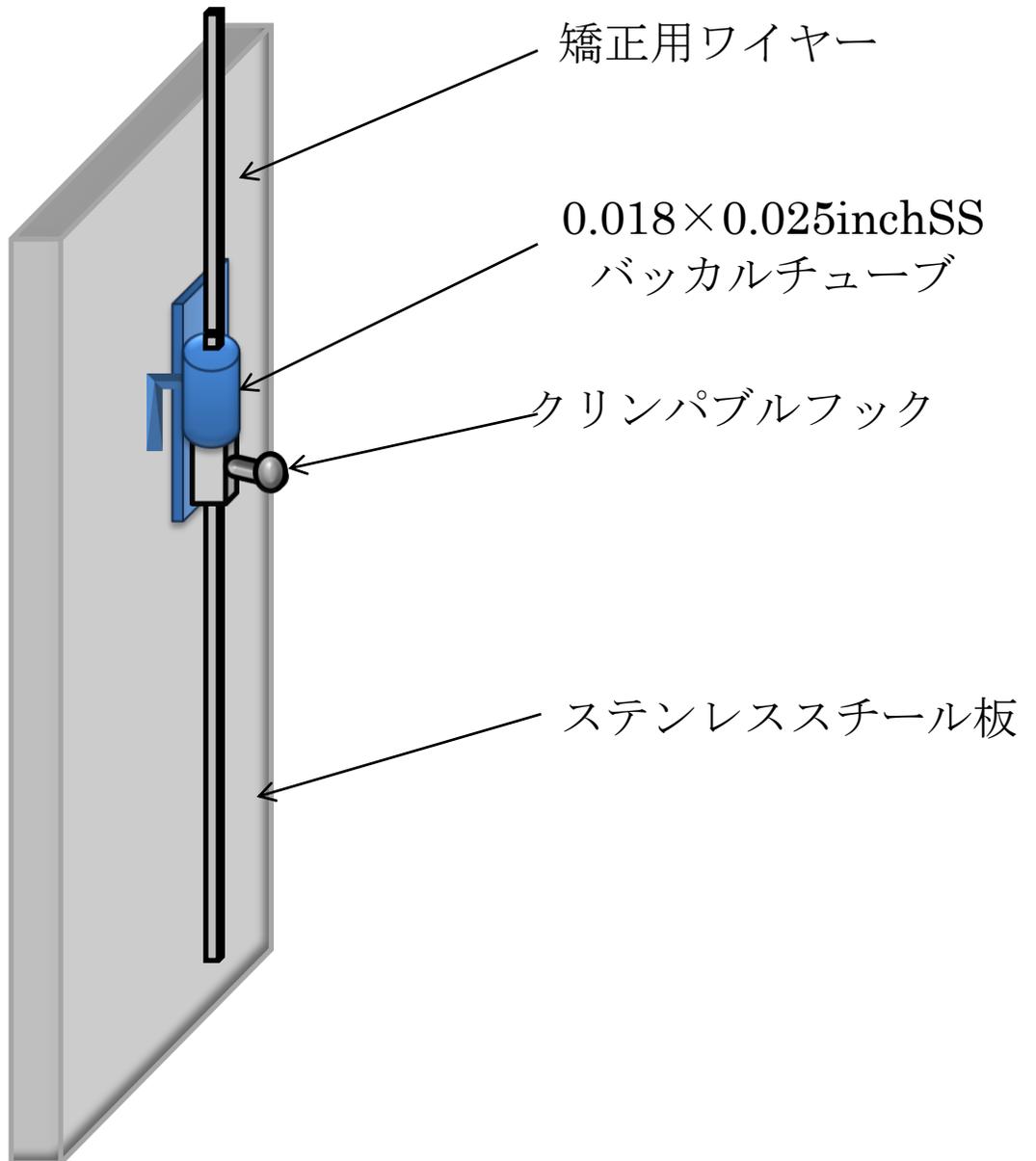


図2 万能試験機を用いた引き抜き試験

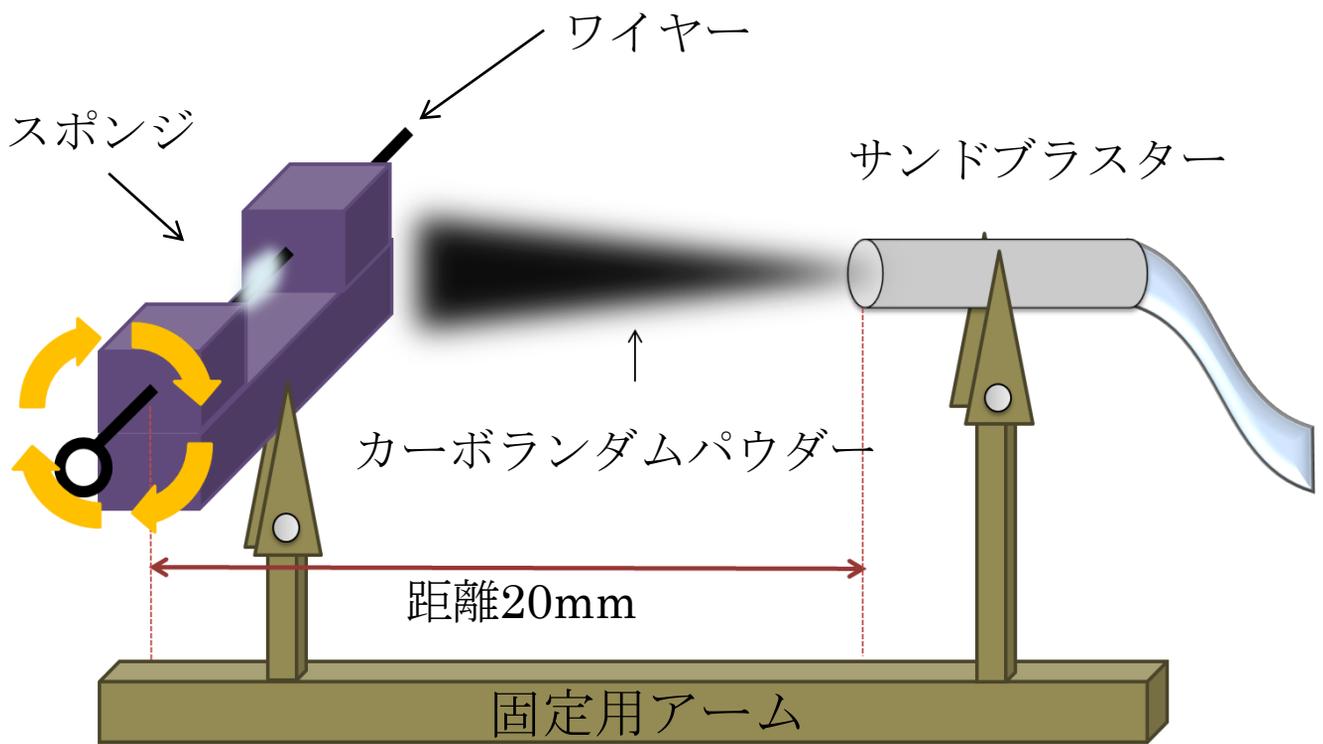


図3 ワイヤーへのサンドブラスト処理

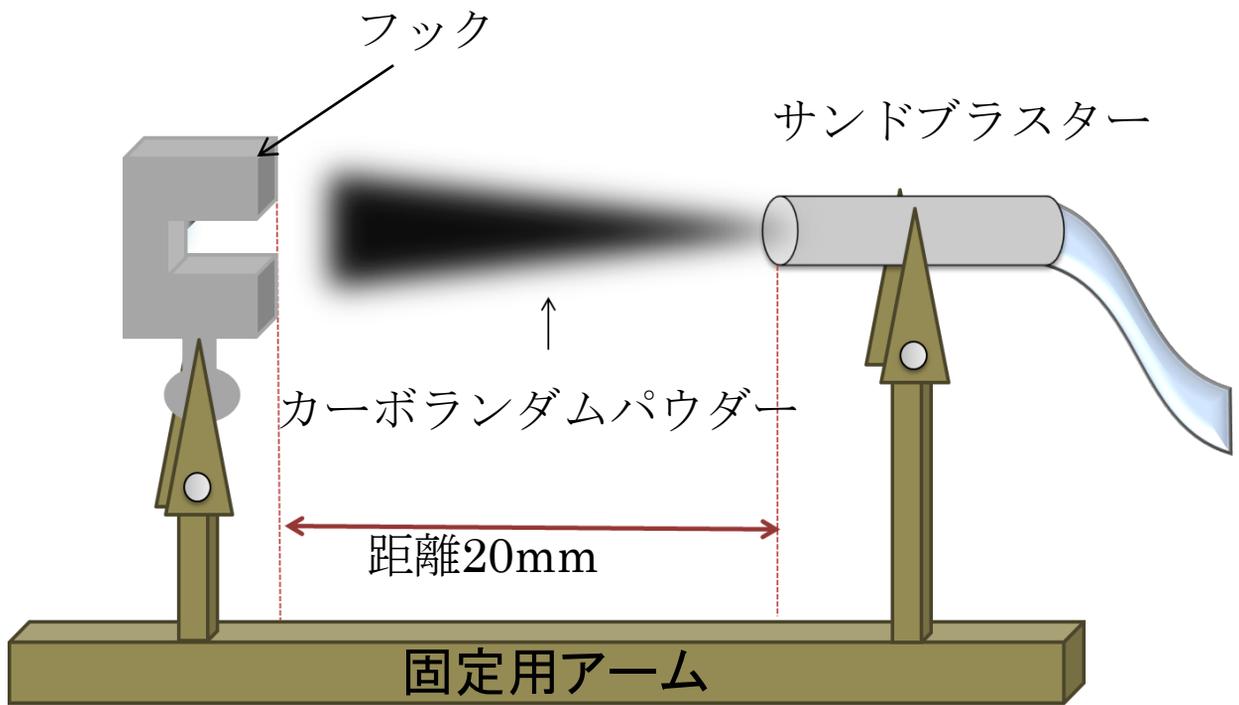


図4 フックへのサンドブラスト処理

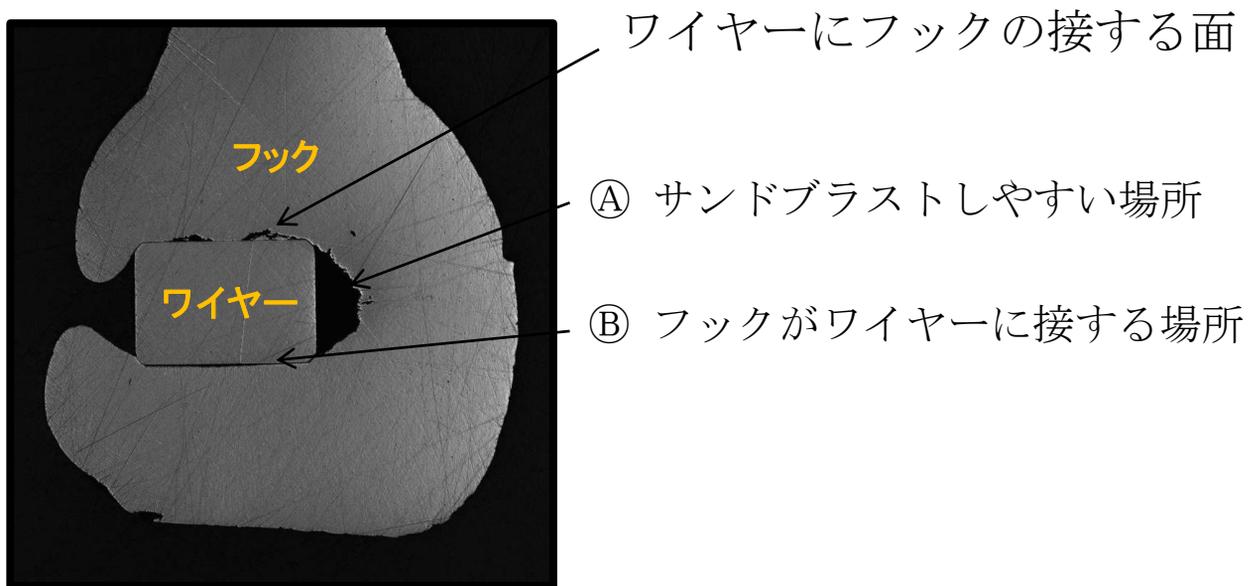


図5 表面粗さの計測場所

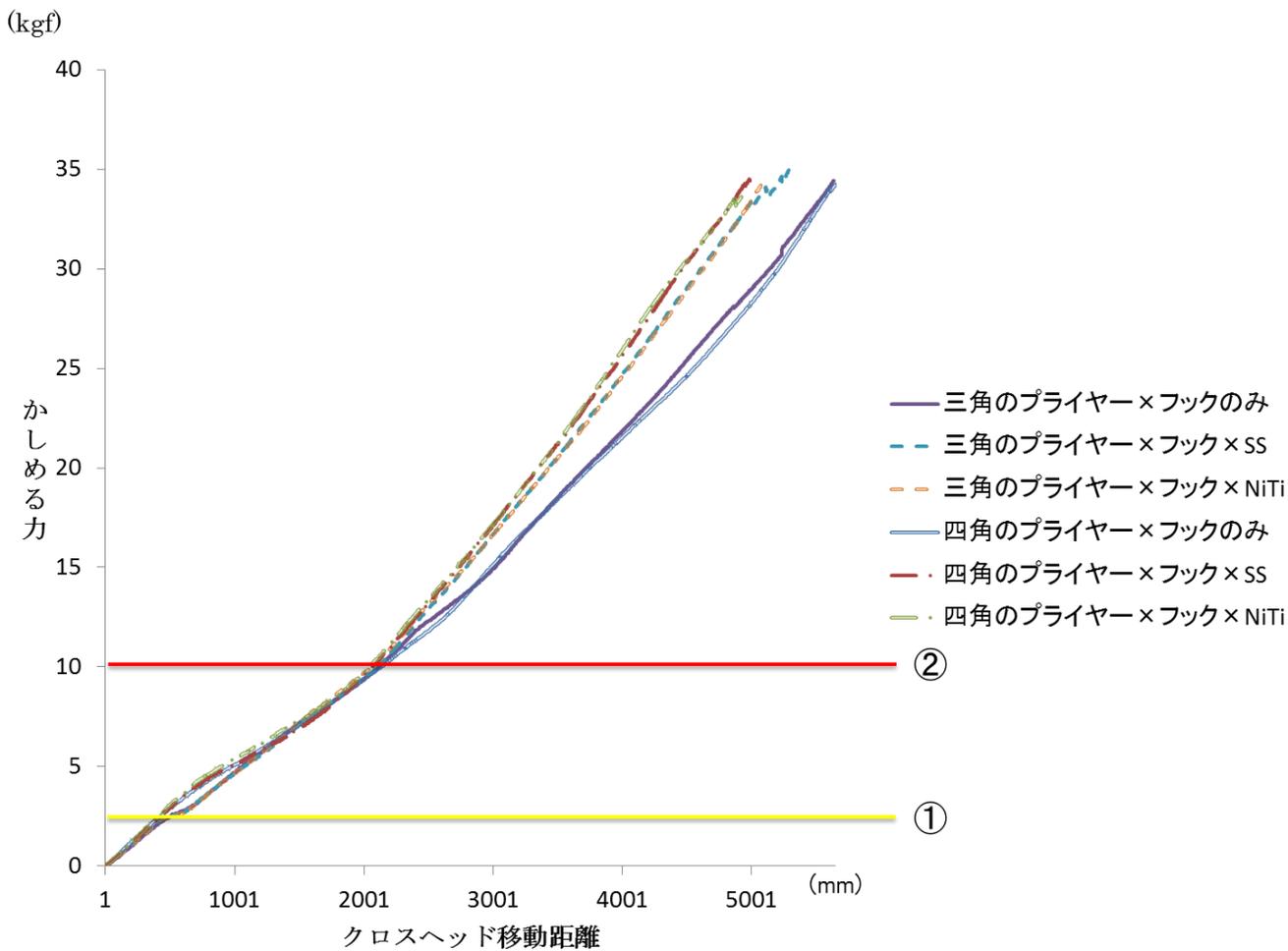


図6 ワイヤーにフックをかしめる際のクロスヘッドの移動距離

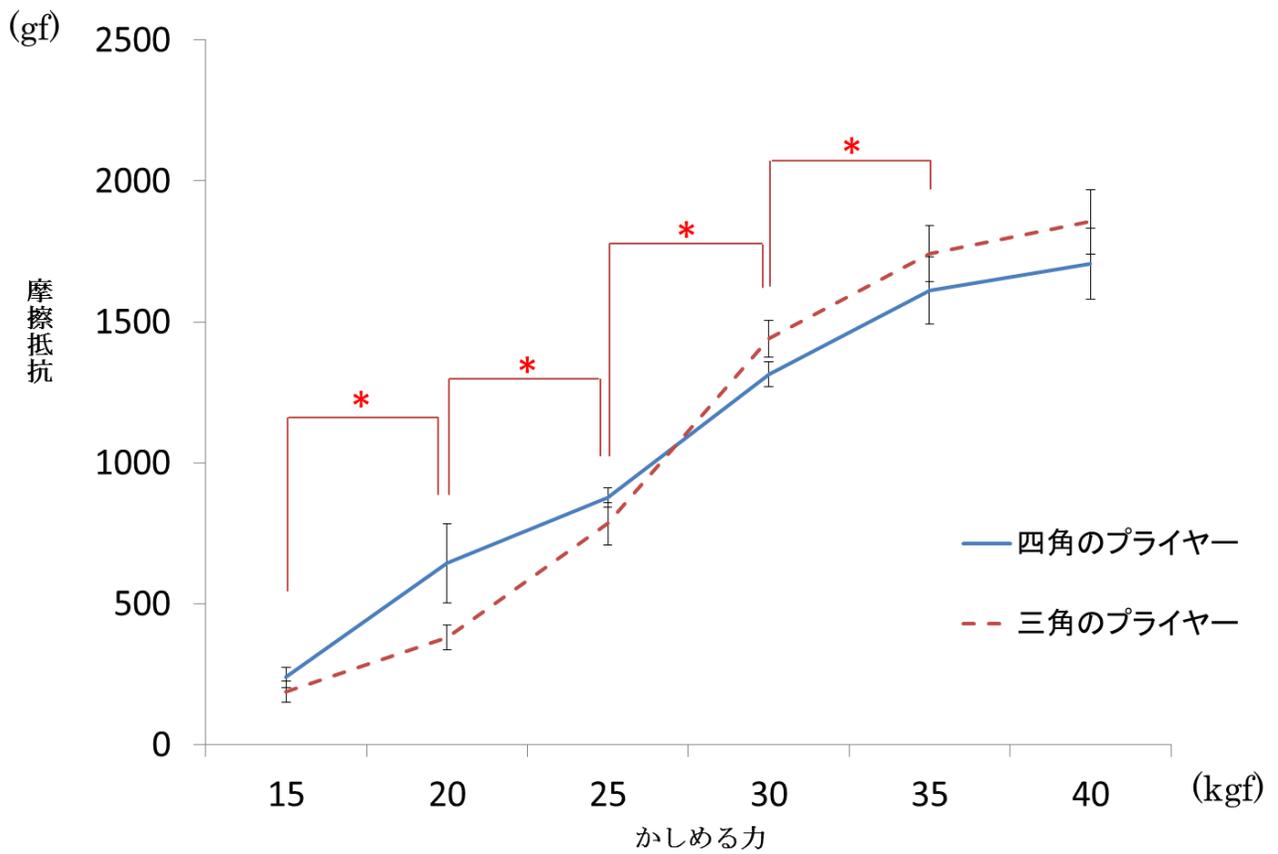


図7 ワイヤーにフックを15kgfから40kgfでかしめた時の摩擦抵抗

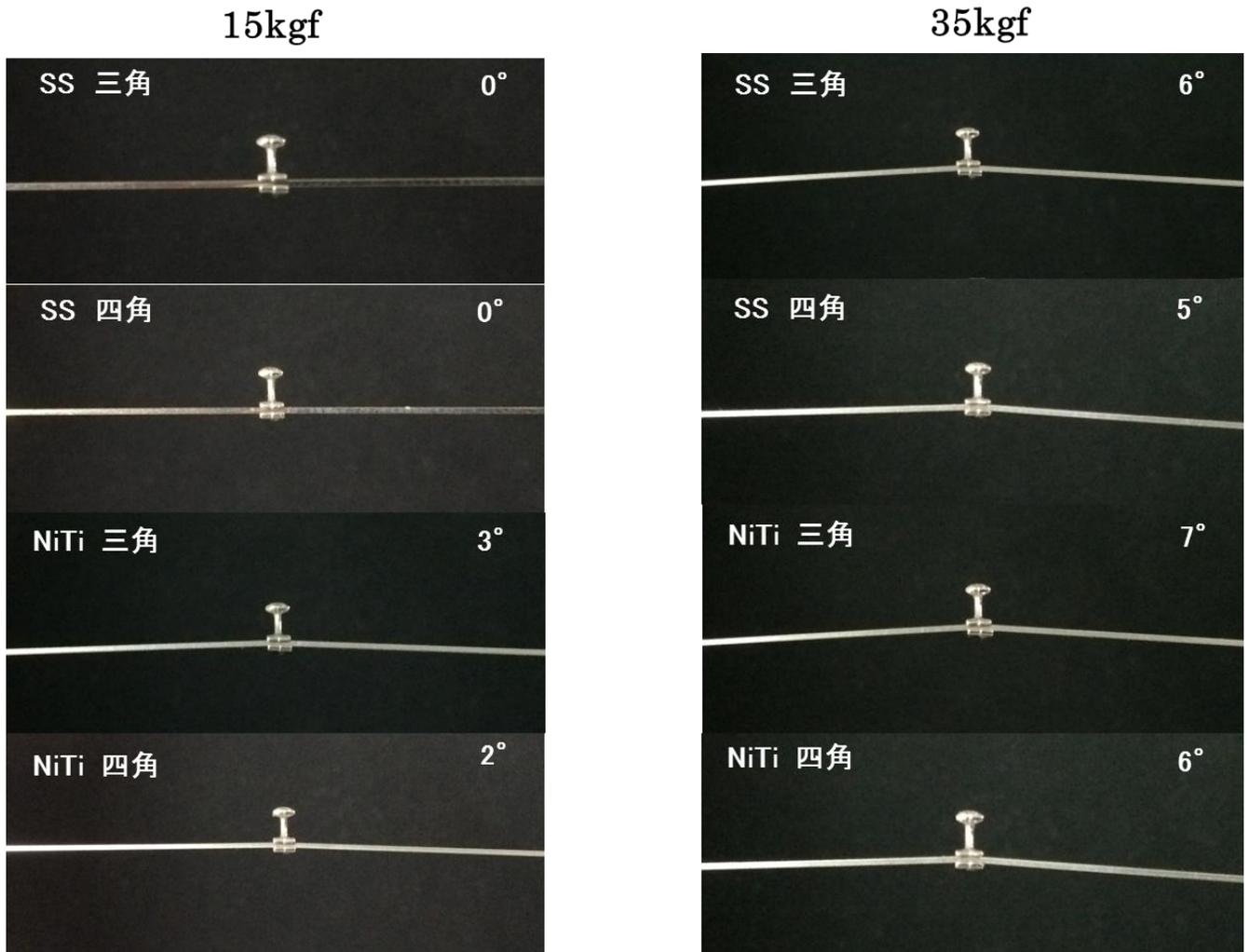


図8 三角のプライヤーと四角のプライヤーによるワイヤー変形の有無

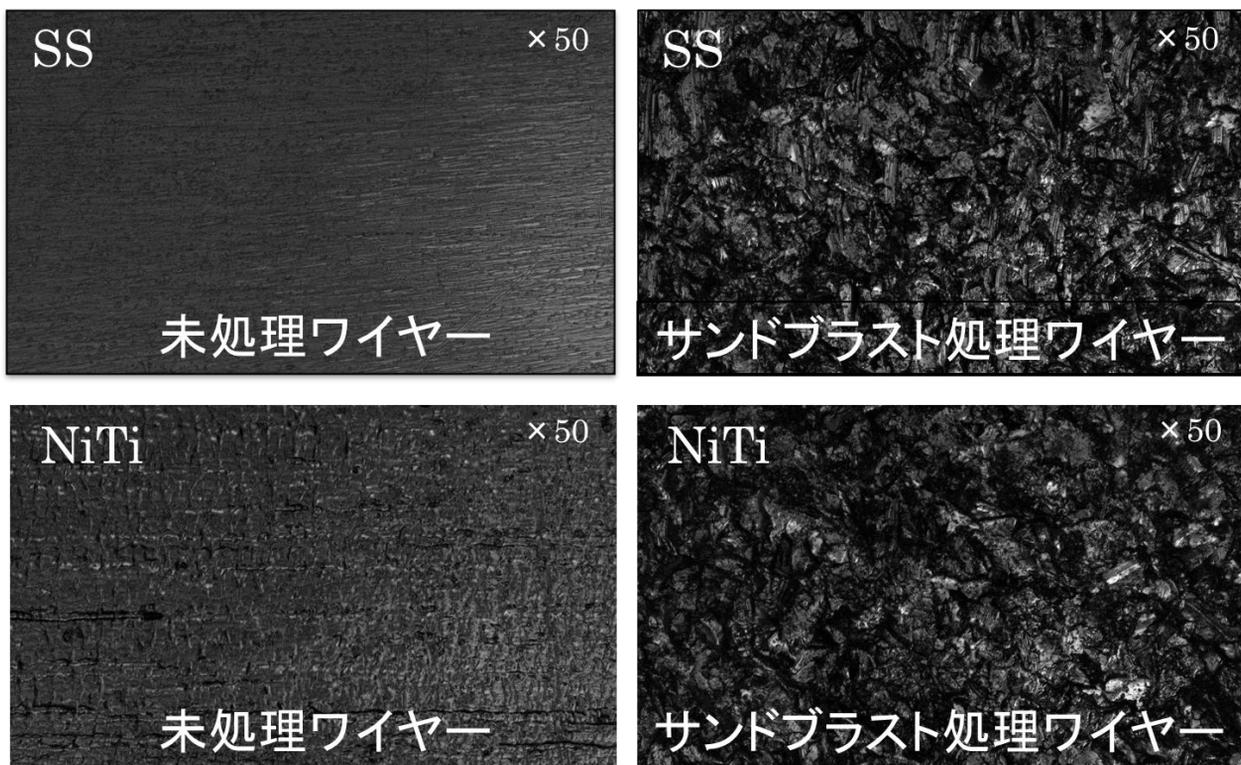


図9 サンドブラスト処理によるワイヤー表面の
共焦点レーザー顕微鏡像

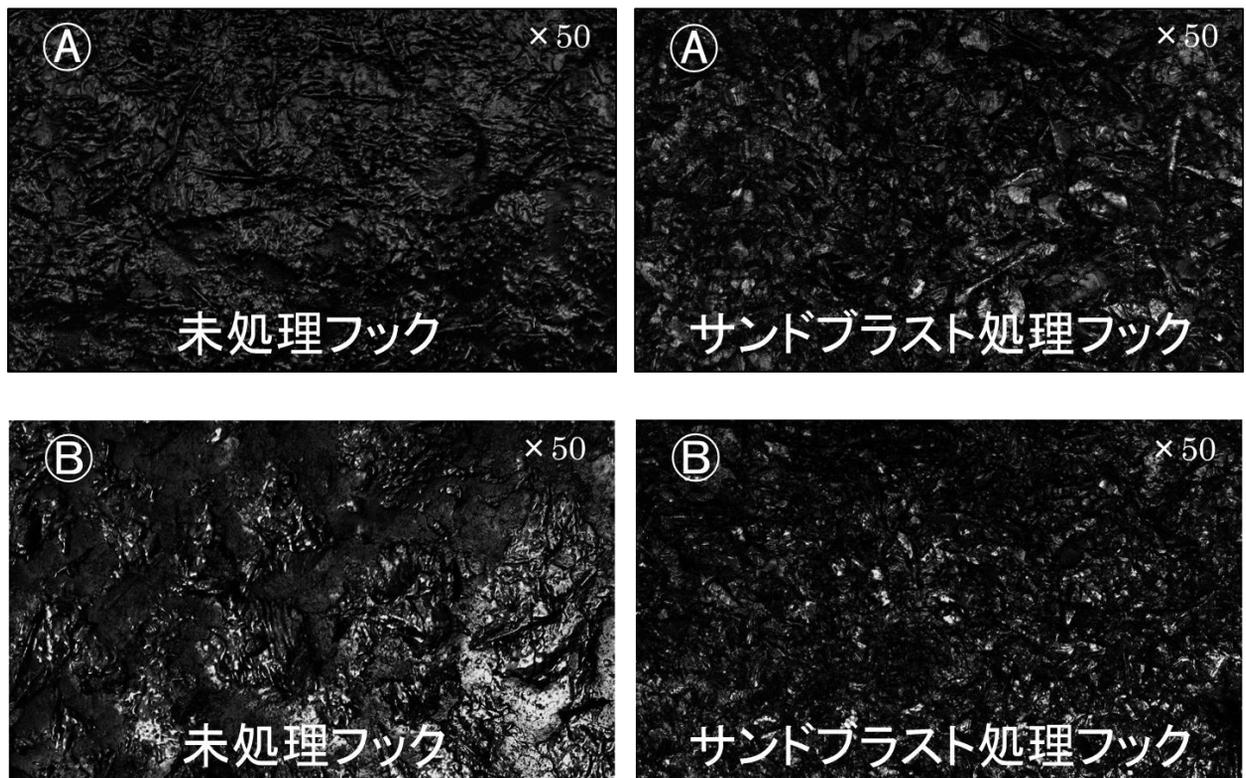


図10 サンドブラスト処理によるフック表面の
共焦点レーザー顕微鏡像

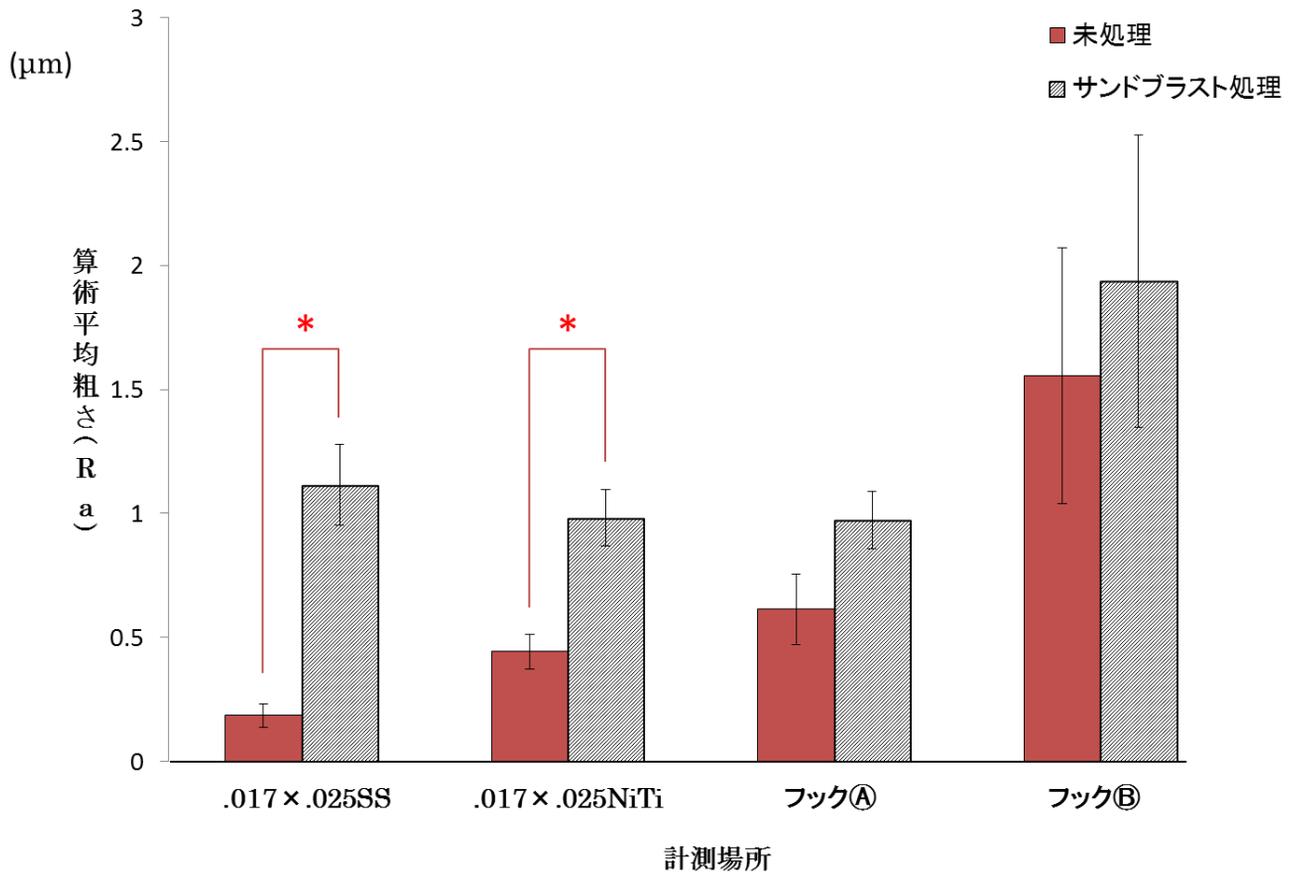


図11 共焦点レーザー顕微鏡による表面粗さの計測

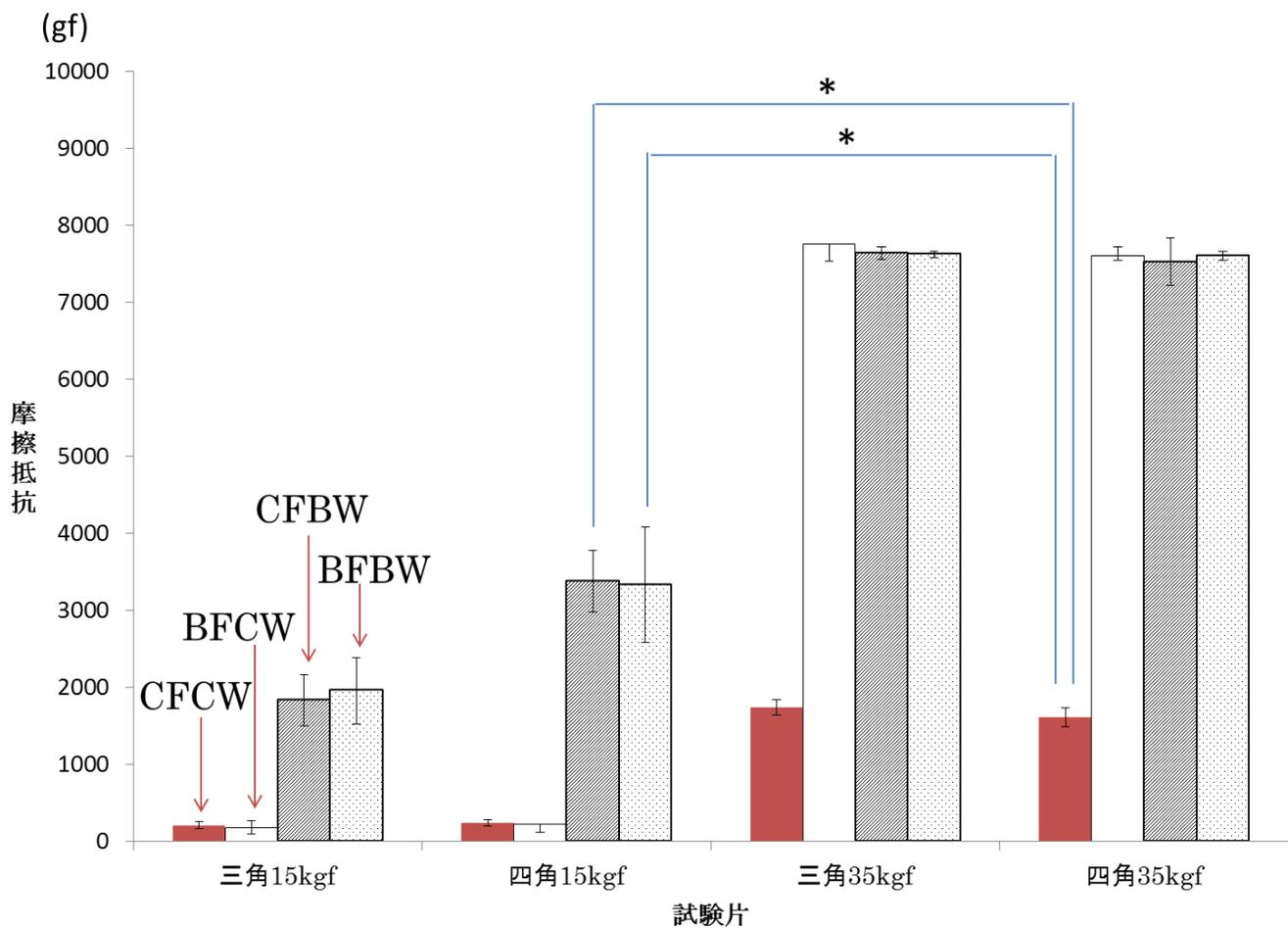


図12 SSワイヤーをかした際の摩擦抵抗の計測

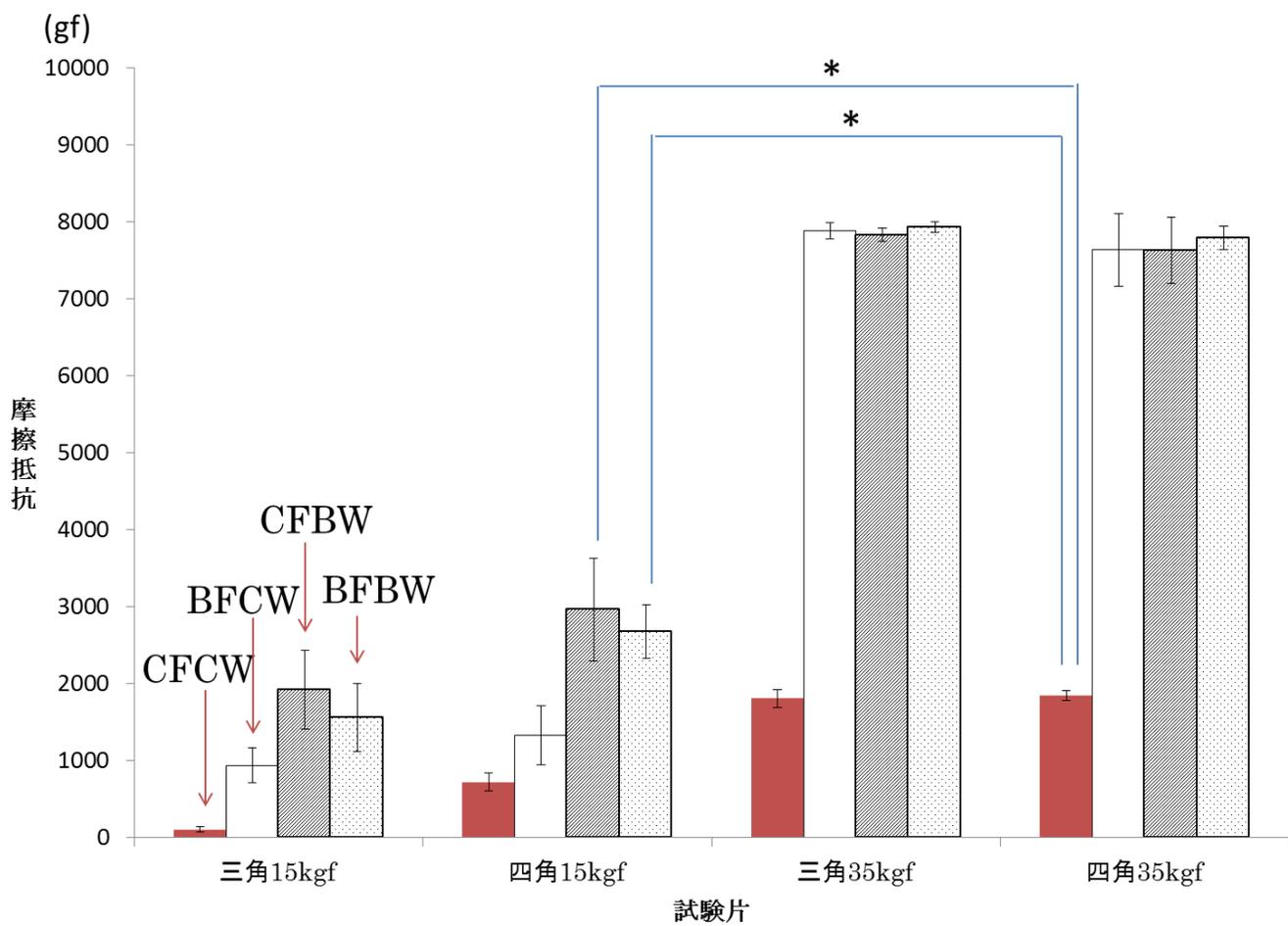


図13 NiTiワイヤーをかした際の摩擦抵抗の計測