

ブラケットとワイヤー間の摩擦力に関する研究

—変化する抵抗の大きさを考慮した摩擦力—

山口 和憲, 小田 義仁, 森本 徳明
丹根 一夫

Study on Frictional Force between Brackets and Wires

—Association between Frictional Force and Retarding Force of Coil Spring—

Kazunori Yamaguchi, Yoshito Oda, Noriaki Morimoto and Kazuo Tanne

(平成5年9月30日受付)

緒 言

ワイヤーとブラケットの摩擦力は両者間の接触部位における摩擦係数と垂直力の積で表される¹⁻³⁾。そのうち、摩擦係数は表面の性状、硬さなどの素材から検討され、金属、プラステイク、セラミックなどのブラケットに対するワイヤーの摩擦力が比較検討されてきた⁴⁻¹¹⁾。さらに、ブラケットとワイヤー間に働く垂直力に及ぼす要因については、ブラケットの溝の大きさに対するワイヤーの太さ、ブラケットの幅径などの材料の形状^{2,4,7,12)}に関する要因のほかに、結紮の方法¹³⁾、歯の移動に対する歯周組織の抵抗の大きさ¹⁴⁻¹⁹⁾、あるいは矯正力の作用点^{10-12,18)}などが検討されてきた。このような要因によって決定される摩擦力には静止摩擦力と運動摩擦力があることが知られ、ブラケットとワイヤーの摩擦力では滑り始める最大静止摩擦力が取り上げられている⁴⁾。

著者らは、ブラケットとワイヤー間に働く垂直力に及ぼす因子として歯の移動に対する抵抗の大きさ、及び矯正力の作用点を取り上げ、抵抗荷重におもりを用いたシミュレーションモデルを使用して牽引力に及ぼす影響について検討を行ってきた。その結果、上記二つの因子がブラケットの牽引力を左右する大きな要因であることがわかった^{12,17)}。

一方、歯周組織の外力に対する抵抗の大きさは、歯の変位(歯周組織の歪み)と共に変化するため²⁰⁻²²⁾

一定ではなく常に変化すると考えられる。著者ら¹⁸⁾は、荷重に対してたわみ量が比例的に増加するコイルスプリングを抵抗として用いた時の牽引力の大きさを計測し、すでに報告した。しかし、計測した牽引力の中にコイルスプリングの抵抗の大きさが含まれること、あるいは牽引中のコイルスプリングの抵抗の大きさが不明であるなどの問題があった。

本報告では、歯の移動に対する抵抗としてコイルスプリングを用い、牽引力とコイルスプリングの抵抗の大きさを同時に計測し、牽引点の影響を比較検討した。

方 法

I. ブラケットとワイヤーの固定法および牽引方法
ブラケットとワイヤーの固定法および牽引方法はすでに報告した方法^{12,17,18)}に従った。また、牽引点の設定は、藤田ら²³⁾の報告した日本人の上顎犬歯歯冠及び歯根長の平均値を参考に歯の長軸上でブラケットの溝相当部(歯冠中央部)と、溝より6.0 mm、及び9.0 mmの位置に point 1 と point 2 及び point 3 の牽引点をそれぞれ設定した(図1)。また、抵抗としたコイルスプリングはブラケットの溝から12.0 mmの点(歯根の長さのおよそ1/2)²⁴⁾に取り付けた(図1)。使用したワイヤーは0.016インチ×0.016インチのステンレス鋼ワイヤー(Hi-T, 3M-ユニテック社)でブラケットは wide twin (トミーインターナショナル社)である。

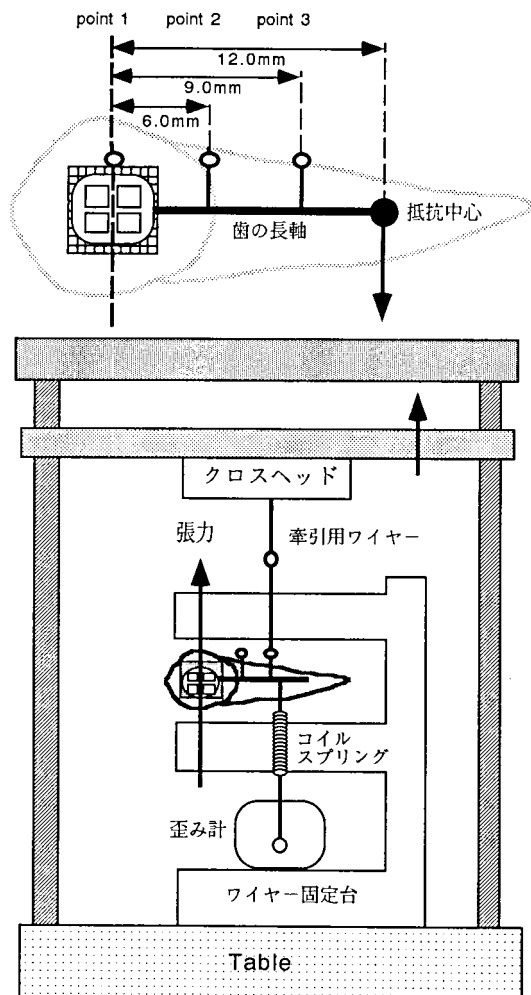


図1 牽引力とコイルスプリングの抵抗の大きさの計測

II. 牽引力とコイルスプリングの抵抗の大きさの計測方法

ワイヤーに対して歯の長軸が垂直になるよう万能試験機のカロスヘッドからの牽引用ワイヤーを牽引点に固定した。次いで、コイルスプリングを歯の長軸に

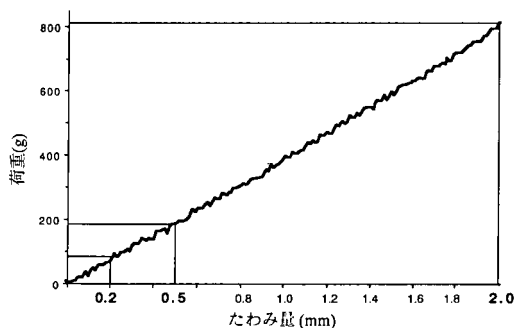


図2 コイルスプリングの荷重とたわみ量との関係

垂直になるように、抵抗中心とワイヤー固定台に固定したストレンゲージ (LVS, 共和電業, 東京) との間に固定した (図1)。図2 は用いたコイルスプリングの荷重とたわみ量との関係であり, 80 g, 175 g 及び 820 g の荷重によって 0.2 mm, 0.5 mm 及び 2.0 mm のたわみを生じた。ストレンゲージの零調整後, 牽引力をゼロに調節して毎秒 0.1 mm の速度で 2.0 mm の牽引を行なった。牽引力及びコイルスプリングによる抵抗の大きさは A/D コンバータ (MacLab/2e, AD インステウルメンツ社, オーストラリア) を介してマイクロコンピュータに入力し連続して記録した。計測は 6 回行ない, 牽引点の移動量が 0.2 mm と 0.5 mm 及び 2.0 mm における抵抗の大きさと牽引力の最大値, 及び牽引力からコイルスプリングの抵抗の大きさを差し引いた力を摩擦力 (ブラケットとワイヤーの結さつによる抵抗力) としてと求め, 牽引部位との関係を分散分析によって検討した。

結 果

I. 異なる部位からの牽引による牽引力と抵抗の大きさの最大値 (表1, 図3)

牽引部位の 0.5 mm の牽引力では, point 1 を牽引した時の抵抗の大きさと牽引力は, 55.1 ± 2.5 g, 240.5 ± 10.4 g であり, point 2 及び 3 から牽引した時の 111.2 ± 5.7 g, 246.9 ± 7.6 g, 142.4 ± 8.3 g, 264.1 ± 15.2 g より有意 ($p < 0.05$) に小さかった。同様に,

表1 異なる牽引部位からの牽引による牽引力と抵抗の大きさ

	0.2 mm の牽引		0.5 mm の牽引		2.0 mm の牽引	
	抵抗の大きさ	牽引力	抵抗の大きさ	牽引力	抵抗の大きさ	牽引力
point 1	12.4 ± 1.5	150.4 ± 14.4	55.1 ± 2.5	240.5 ± 10.4	271.5 ± 2.7	581.7 ± 8.1
point 2	44.6 ± 6.2	139.2 ± 18.6	111.2 ± 5.7	246.9 ± 7.6	441.8 ± 3.5	655.5 ± 8.8
point 3	52.4 ± 1.1	110.0 ± 9.9	142.4 ± 8.3	264.1 ± 15.2	527.4 ± 29.6	720.3 ± 11.5

* : $p < 0.05$

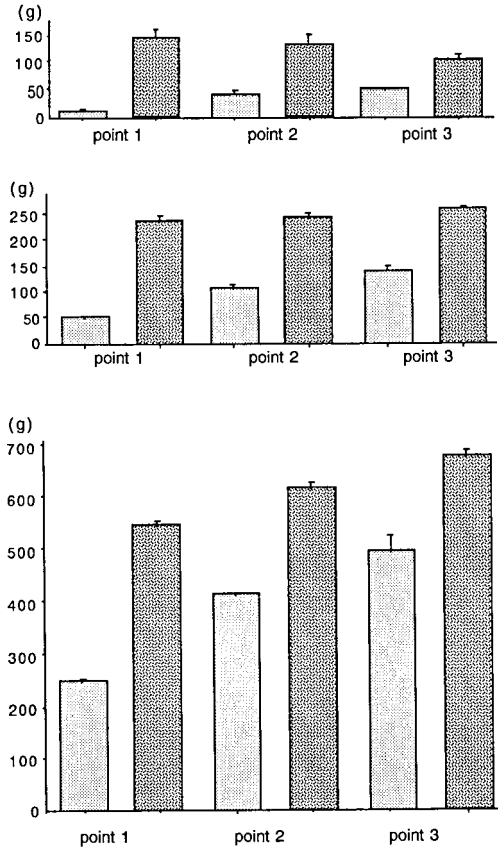


図3 各 point を 0.2 mm (上段), 0.5 mm (中段) 及び 0.2 mm (下段) 牽引したときのコイルスプリングの抵抗の大きささと牽引力の最大値の比較
 □: コイルスプリングの抵抗の大きさ
 ■: 牽引力

2.0 mm の牽引でも point 1 を牽引した時の牽引力と抵抗の大きさが point 2 及び 3 を牽引した時より有意に小さかった。一方, point 1 と 2 及び 3 を 0.2 mm 牽引した時の抵抗の大きさは 12.4 ± 1.5 g, 44.6 ± 6.2 g, 52.4 ± 1.1 g であり, 0.5 mm 及び 2.0 mm を牽引した時と同様に point 1 を牽引した時の方が有意に ($p < 0.05$) 小さな値を示した。しかし, point 1 を牽引した時の牽引力は 150.4 ± 14.4 g であり point 2 及び 3 を牽引した時の 139.2 ± 18.6 g 及び 110.0 ± 9.9 g より有意に ($p < 0.05$) 大きな値を示した。さらに, point 3 より牽引した時の抵抗の大きさが, コイルスプリングのみを牽引した時の抵抗の大きさに近い値を示していた。

II. コイルスプリングの抵抗の大きさに対する牽引力及び摩擦力の関係

図4 は抵抗の大きさ及び牽引力の時間的推移を示

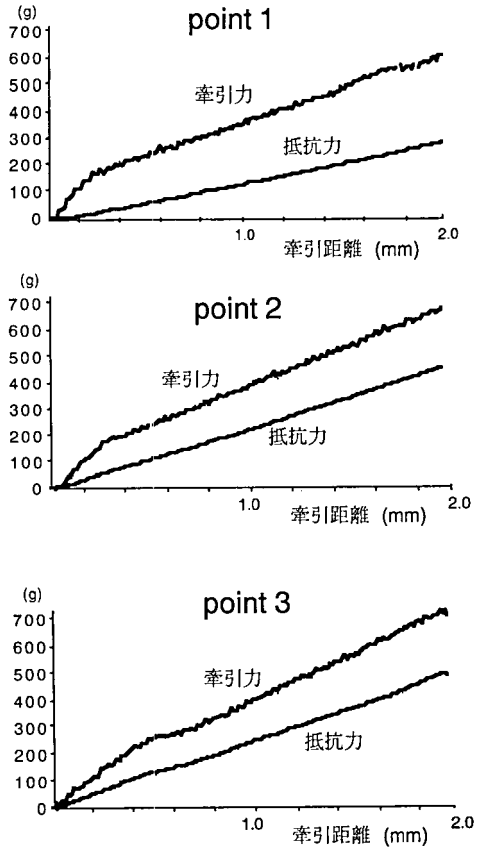


図4 異なる牽引部位からの牽引における抵抗の大きさと牽引力の経時的変化

す。コイルスプリングによる抵抗の大きさは直線的に増加し, point 1 を牽引した時の勾配が point 3 を牽引した時の値より小さかった。一方, 牽引力については, 初期の勾配がその後の増加の勾配より大きな値を示した。さらに, 抵抗の大きさと牽引力から抵抗力を差し引いた摩擦力との関係を見ると (表2, 図5),

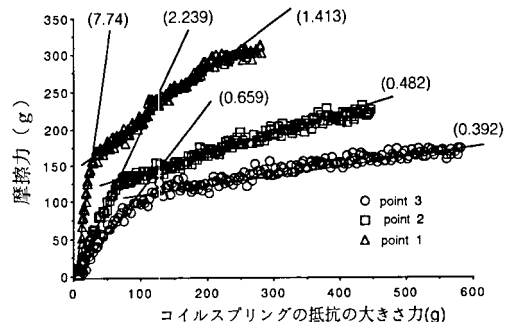


図5 抵抗力と摩擦力の関係
 カッコ内の数字は各直線の勾配を示す

表2 異なる牽引部位における抵抗の大きさと摩擦力との関係

	point 1	point 2	point 3
slope 1	7.740±0.258	2.239±0.349	0.659±0.02
	*** ***		
slope 2	1.413±0.460	0.482±0.041	0.392±0.137
	*** ***		

*** : p<0.01

point 1 を牽引した時の抵抗の大きさに対する摩擦力の増加の初期勾配 (slope 1) は 7.740 ± 0.258 であり、point 2 及び 3 を牽引した場合の 2.239 ± 0.349 と 0.659 ± 0.02 よりも有意に ($p < 0.01$) 大きい値を示した。その後の勾配 (slope 2) も、point 1 を牽引した時の値は、point 2 及び 3 を牽引した時より有意に ($p < 0.01$) 大きかった。

考 察

ブラケットとワイヤーが滑り始める前の最大静止摩擦力の値は摩擦係数と垂直力 (接触力) の積として表され^{1,2)}、静止摩擦力より大きな矯正力が加わると、ワイヤーを介したブラケットすなわち歯の移動が始まる。運動摩擦は同様に定義され、静止摩擦係数より運動摩擦係数が小さいため静止摩擦より小さいものの、通常、ブラケットとワイヤー間の摩擦力は動き始める瞬間の最大静止摩擦力をもって表現されている⁴⁾。本研究においては、牽引力はある周期を持つ波形として記録され、振幅の山が各時点の最大静止摩擦と考えられ、牽引中の最大値をブラケットの牽引力として求めた。

移動中に抵抗の大きさが変化しないおもりを用いた場合、おもりを抵抗中心に吊した後に牽引力の零調整を行なったので、計測した牽引力にはおもりの荷重は含まれない^{12,17)}。一方、抵抗にコイルスプリングを用いた場合にも、牽引開始時に牽引力及び抵抗力の零調整を行なっているが、牽引と共にコイルスプリングの抵抗の大きさが牽引力に含まれることになる。

コイルスプリングの抵抗の大きさが含まれた牽引力を見ると、0.2 mm 牽引した場合には、point 1 を牽引した時の牽引力は point 2 及び 3 を牽引した時より大きかったが、0.5 mm 及び 2.0 mm 牽引した場合、逆に point 1 を牽引した時の牽引力は point 2 及び 3 を牽引した時より小さかった。これは、牽引量が増えるとコイルスプリングの抵抗の大きさが増加して牽引力に含まれたためと考えられる。

次に、牽引力からコイルスプリングの抵抗の大きさ

を差し引いた摩擦力をみると、牽引の初期及び後期を通じて point 1 を牽引した時の抵抗の大きさの増加に伴う摩擦力の増加は、point 3 を牽引するよりはるかに大きいことがわかる。また、各牽引点を 0.2 mm, 0.5 mm, 2.0 mm 牽引した時のコイルスプリングの抵抗の大きさは、point 3 を牽引した時がもっと大きく、point 3 を牽引した時の大きさはコイルスプリングのみを牽引した時の抵抗の大きさに近似していた。しかし、point 1 と 2 より牽引した場合のコイルスプリングの抵抗の大きさは、コイルスプリングのみを牽引した荷重よりはるかに小さい値であった。このことは、point 1 及び 2 からの牽引では、牽引部位の移動量とコイルスプリングを固定した抵抗中心の移動量が一致せず、歯の長軸が傾斜移動したことを示している。このような長軸の傾斜移動によって摩擦力が増加するものと考えられる。

以上のことより、抵抗の大きさが変化する時にも各瞬間の牽引力は point 3 を牽引する方が point 1 を牽引するよりも摩擦力が小さいことが明かである。しかし、牽引力で考えると、抵抗の大きさが摩擦力に比べてはるかに大きくなると、point 3 を牽引する方が大きくなることになる。

運動速度が一定で、かつ、抵抗の大きさが一定なおもりの場合には牽引力 (この場合には最大静止摩擦力) が一定であると考えられる。今回の抵抗の大きさが変化する場合においても、運動速度が一定であり、抵抗の大きさに対応した各時点の牽引力を計測しているものと考えられ、牽引力からコイルスプリングの抵抗の大きさを差し引いた力を摩擦力と定義した。ワイヤーは 20.0 mm の距離に 2.0 kg の張力で固定することでワイヤーのたわみを規定したが、牽引力の中にはブラケットとワイヤー間の摩擦力のほかにワイヤーの変形力などが含まれると考えられる。今後、さらに牽引力に含まれる摩擦力、ワイヤーのたわみ力などを検討したい。

ま と め

シミュレーションモデルにおいて、用いる抵抗の大きさが変化する場合、抵抗の大きさが牽引力に含まれるため、本研究では、牽引力と抵抗力を同時に計測し、牽引力から抵抗力を差し引いた力 (摩擦力) を求め牽引部位との関係を検討した。

その結果、

1. 0.2 mm の移動では、point 3 を牽引するよりも point 1 を牽引する方が牽引力が大きく、0.5 mm 及び 2.0 mm の移動では逆に point 3 を牽引する方が大きかった。

2. この時のコイルスプリングによる抵抗の大きさは point 3 で最も大きく、コイルスプリングのみを牽引した時の力に近かったが、point 1 と 2 でははるかに小さかった。

3. 牽引力からコイルスプリングの抵抗の大きさを差し引いた摩擦力は、point 1 を牽引した場合が最も大きかった。

以上のことより、抵抗の大きさが変化する牽引において、抵抗の大きさが変化しない場合と同様に牽引部位の選択が摩擦力に大きな影響を与えていることがわかった。

文 献

- 1) Thurow, R.C.: Edgewise orthodontics. ed. 3, Saint Louis, 1972, C.V. Mosby Co., 161-164.
- 2) 神山光男, 佐々木俊則: ブラケットの幅と摩擦について. 日矯歯誌 32, 286-289, 1973.
- 3) Andreasen, G.F. and Quevedo, F.R.: Evaluation of friction forces in the 0.022" × 0.028" edgewise bracket in vitro. *J. Biomech.* 3, 151-160, 1970.
- 4) Frank, C.A. and Nikolai, R.J.: A comparative study of frictional resistances between orthodontic bracket and arch wire. *Am. J. Orthod.* 78, 593-609, 1980.
- 5) Kusy, R.P., Whitley, J.Q., Mayhew, M.J. and Bukthal, J.E.: Surface roughness of orthodontic arch wire via laser spectroscopy. *Angle Orthod.* 58, 33-45, 1988.
- 6) Kusy, R.P. and Whitley, J.Q.: Coefficients of friction for arch wires in stainless steel and polycrystalline alumina bracket slots, I. The dry state. *Am. J. Orthod. Dentofac, Orthop.* 98, 300-312, 1990.
- 7) Kapila, S., Angolkar, P.V., Duncanson, Jr. M.D. and Nanda, R.S.: Evaluation of friction between edgewise stainless steel brackets and orthodontic wires of four alloys. *Am. J. Orthod. Dentofac, Orthop.* 98, 117-126, 1990.
- 8) Angolkar, P.V., Kapila, S., Duncanson, Jr. M.G. and Nanda, R.S.: Evaluation of friction between ceramic brackets and orthodontic wires of four alloys. *Am. J. Orthod. Dentofac, Orthop.* 98, 499-506, 1990.
- 9) Pratten, D.H., Popil, K., Germane, N. and Gunsolley, J.C.: Frictional resistance of ceramic and stainless steel orthodontic brackets. *Am. J. Orthod. Dentofac, Orthop.* 98, 398-403, 1990.
- 10) 山口和憲, 小田義仁, 森本徳明, 山内和夫: 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—. 広大歯誌 24, 273-280, 1992.
- 11) 山口和憲, 河田俊嗣, 吉田 恵, 小田義仁, 京面伺吾, 森本徳明, 山内和夫: ブラケットとワイヤーの間の摩擦力に関する研究—Ceramic bracket と Fiberglass Reinforced Plastic bracket—. 広大歯誌 25, 153-158, 1993.
- 12) 小田義仁, 森本徳明, 山口和憲, 山内和夫: ブラケットとワイヤーの間の摩擦力に関する研究—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—. 中四国矯歯誌 4, 45-50, 1992.
- 13) Riley, J.L., Garrett, S.G. and Moon, P.C.: Frictional forces of ligated plastic and metal edgewise brackets. *J. Dent. Res.* A21, 58-98, 1979.
- 14) Tidy, D.C.: Frictional force in fixed appliances. *Am. J. Orthod. Dentofac, Orthop.* 96, 249-254, 1989.
- 15) Drescher, D., Bourauel, D.P. and Schumacher, H.: Frictional force between bracket and arch wire. *Am. J. Orthod. Dentofac, Orthop.* 96, 397-404, 1989.
- 16) Drescher, D., Bourauel, C. and Schmacher, H.A.: Optimization of arch guided tooth movement by the use of uprighting springs. *Euro. J. Orthod.* 12, 346-353, 1990.
- 17) 山口和憲, 小田義仁, 森本徳明, 山内和夫: 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—. 広大歯誌 24, 263-272, 1992.
- 18) 山口和憲, 河田俊嗣, 吉田 恵, 小田義仁, 森本徳明, 山内和夫: ブラケットとワイヤー間の摩擦力に関する研究—抵抗荷重の校正について—. 広大歯誌 25, 148-152, 1993.
- 19) 倉島晃一: 歯周組織の力学的性状に関する研究 (とくに歯根膜および歯槽骨について). 口病誌 36, 20-42, 1969.
- 20) 三浦不二夫: 歯科矯正学最近の進歩. 医歯薬出版, 175-184, 1972.
- 21) Muhlemann, H.R.: A method for measuring tooth mobility. *Oral Surg., Oral Med., Oral Path.* 4, 120, 1951.
- 22) Frankel, V.H. and Burstein, A.H.: Orthopedic Biomechanics. Lea & Febiger, Philadelphia, 96-117, 1971.
- 23) 藤田恒太郎: 歯の解剖学. 金原出版, 東京, 京都, 14版, 43, 1967.
- 24) Pedersen, E., Andersen, K. and Gjessing, P.E.: Electronic determination of center of rotation produced by orthodontic force system. *Euro. Orthod. Soc.* 12, 272-280, 1990.