

コイル挿入力測定センサーによるコイル挿入力 発生パターンに関する研究： コイル挿入方法，挿入速度の違いによって決まる コイルと動脈瘤壁との摩擦状態の検討から

松原功明¹⁾ 宮地 茂¹⁾ 永野佳孝^{2,3)} 大島共貴¹⁾ 細島 理¹⁾ 泉 孝嗣¹⁾
齋見有史¹⁾ 錦古里武志¹⁾ 若林俊彦¹⁾ 佐野明人²⁾ 藤本英雄²⁾

Experimental Study of Generation Pattern of Coil Insertion Force using an Force Sensor System: Investigation of Friction State between Coil and Aneurysm Wall determined by Difference of Coil Insertion Method and Insertion Speed

Noriaki MATSUBARA¹⁾ Shigeru MIYACHI¹⁾ Yoshitaka NAGANO^{2,3)} Tomotaka OHSHIMA¹⁾
Osamu HOSOSHIMA¹⁾ Takashi IZUMI¹⁾ Akihito TSURUMI¹⁾ Takeshi KINKORI¹⁾
Toshihiko WAKABAYASHI¹⁾ Akihito SANO²⁾ Hideo FUJIMOTO²⁾

1) Department of Neurosurgery, Nagoya University Graduate School of Medicine
2) Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology
3) New Product Development R&D Center, NTN Corporation

●Abstract●

Object: In endovascular coil embolization for a cerebral aneurysm, coil insertion is usually performed simply by advancing the coil-delivery wire steadily, without any torque handling. However, the relation between coil insertion force and coil/microcatheter behavior is complex and has not been sufficiently investigated. In this experiment, the authors measured the coil insertion force and observed the coil and catheter-tip movement during aneurysm embolization. Thus, the generation pattern of coil insertion force was investigated and the most suitable insertion method and speed were discussed.

Methods: A new sensor device which consists of a Y-connector was developed. The sensor principle is based on an optical system measuring how much the coil-delivery wire slightly bends in response to the insertion force. Using this device, experimental coil embolizations were performed with silicone aneurysm models. The manipulations were done by hand or by machine at a constant speed. The sensor continuously monitored the mechanical force during the insertions. The coil movement was observed on a microscopic image. The pattern of coil insertion force and the time distribution ratio of the force were analyzed.

Result: With manual insertion, the coil insertion force was mainly induced by the stop and advance movement of the wire generated in synchrony with the push-pull-push movement of the surgeon's hand. With mechanical insertion, the insertion speed caused a difference in the force pattern. With the coil movement, the friction between the coil and aneurysm wall was determined by insertion method and insertion speed. Thus, the friction state (static friction or kinetic friction) affected the mechanical force.

Conclusion: It was demonstrated that the friction state influenced the generation pattern of coil insertion force. Applying the proper insertion method and insertion speed to maintain the kinetic friction state between the coil and the aneurysm wall might provide less stressful coil insertion force and safer embolization.

●Key Words●

cerebral aneurysm, coil embolization, friction state, insertion force, sensor

1) 名古屋大学大学院医学系研究科 脳神経外科

2) 名古屋工業大学大学院 工学研究科

3) NTN株式会社 商品開発研究所

<連絡先: 松原功明 〒466-8550 名古屋市昭和区鶴舞町65番地 E-mail: mnoriaki0817@yahoo.co.jp>

(Received February 17, 2010 : Accepted June 1, 2010)

はじめに

脳血管内治療は、近年急速に発展してきた治療方法であり、特に、脳動脈瘤に対するコイル塞栓術はその代表的な治療法の一つである¹³⁾。脳動脈瘤コイル塞栓術は、マイクロカテーテル内からコイルデリバリーワイヤーを前進させることによって、コイルを瘤内に順に挿入し充填していく手技である。通常のカテーテルやガイドワイヤー操作と違って、ワイヤーをひねる操作(トルク操作)を必要とせず、コイルの挿入操作自体は単純な押し(時に引き)の動きである。しかし、コイル挿入操作と、コイルやカテーテルの挙動やコイル挿入力との関わりは単純なものではない。そして、その関わりについては、術者は手元の操作感等から経験的に感じとっているものの、客観的に分析されていないのが現状である。今回、

術者によるコイル挿入と機械による一定速度でのコイル挿入についてそれぞれ、コイル挿入力を測定した。そして、コイル挿入力の変化とコイルの挙動やカテーテル先端の動きとの関係を検討することで、コイル挿入力の発生パターンを分析し、最もストレスなくコイルが挿入できる挿入方法と挿入速度の条件について考察した。

方法

脳動脈瘤コイル塞栓術時のコイル挿入力を、デリバリーワイヤーの「たわみ」から光学的センサーによって測定する装置が開発され、Matsubaraらによって報告されている^{1,3,7-9)}。この装置は、Yコネクター内部の構造に屈曲を加えることで、コイル挿入力によって生じるデリバリーワイヤーの「たわみ」を発生させる。そして、このワイヤーの「たわみ」による位置の変化を、LEDから

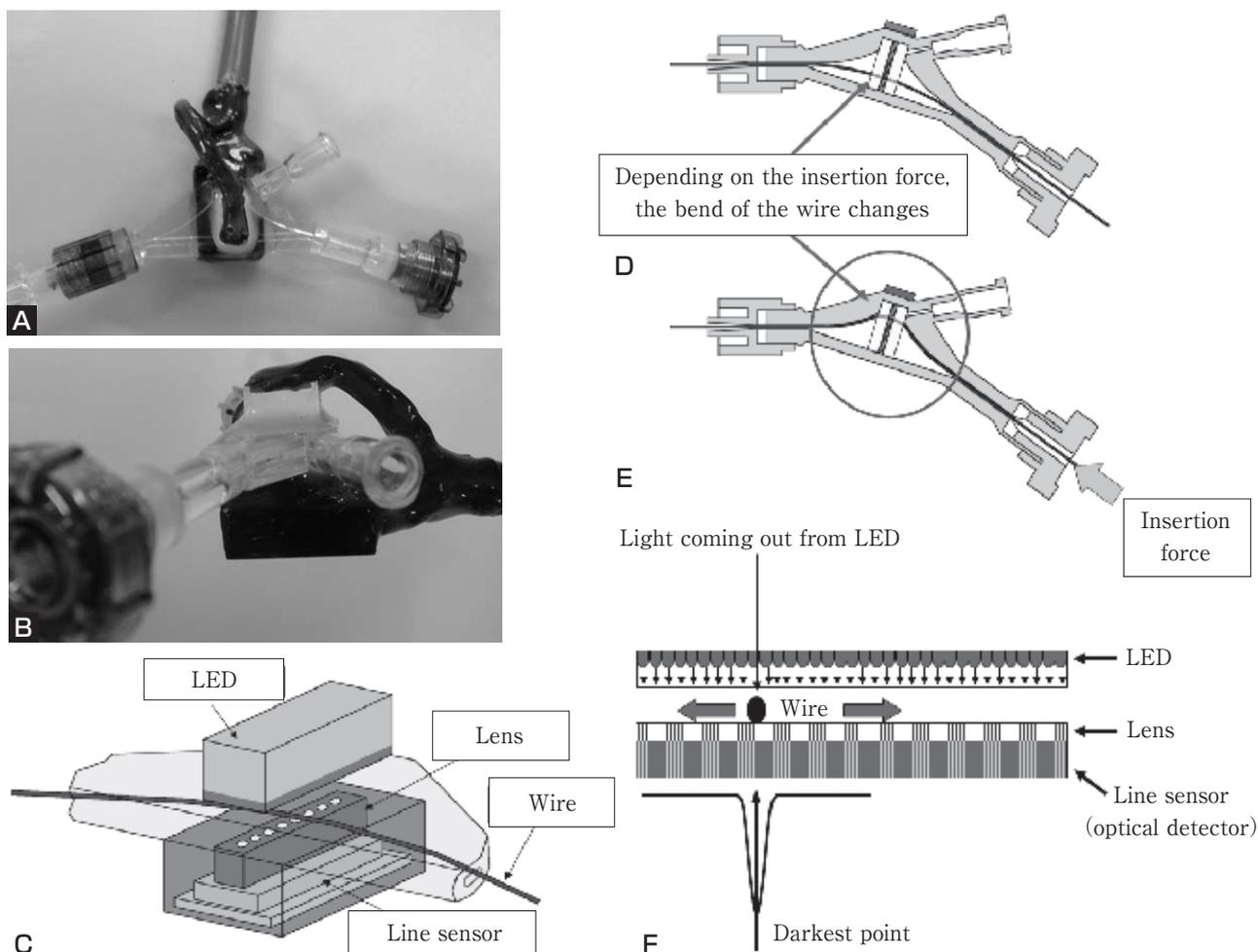


Fig. 1 A and B : Photograph illustrating the newly developed sensor. C : Schematic showing the optical force sensor. D and E : Schematics showing the optical system. D : Without insertion force, the coil-delivery wire does not bend. E : With insertion force, the wire bends. F : The sensor optically detects the position of the bending wire.

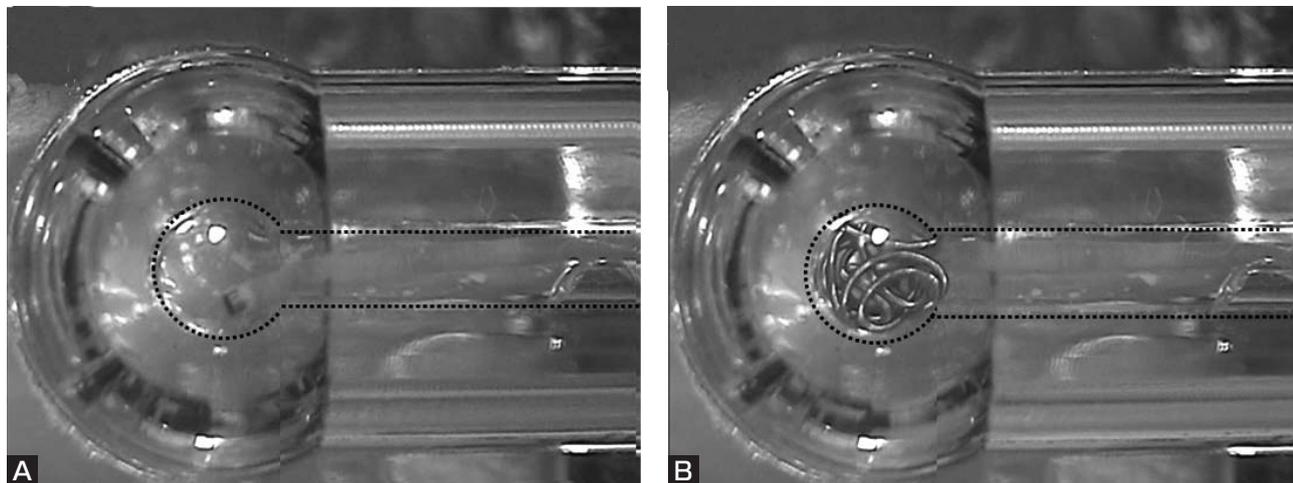


Fig. 2 Photographs of the silicone aneurysm model. Dotted lines showing the inner lumen of the aneurysm.

A : The aneurysm is not filled with a coil, B : The aneurysm is filled with a coil.

発せられる光によってできたワイヤーの影から光学的センサーで検出する。その「たわみ」の位置情報を基にコイル挿入力を計算する仕組みである (Fig. 1)。本装置の最大の特徴は、手元のYコネクタ部でコイル挿入力が測定できることである。

本装置を用いて、1) 通常の手技で術者がコイルを挿入した場合、2) 一定の挿入速度で機械によってコイルを挿入した場合について、シリコン動脈瘤モデルを用いて、塞栓中のコイル挿入力を測定した。

シリコン動脈瘤は分岐のないterminal typeの瘤で、直径は4及び5 mm、親血管の径は2 mmのものを使用した (Fig. 2)。これに径3-6 mmの各種コイル (GDC10 2D Soft 3 mm-8 cm, GDC10 3D 3 mm-4 cm, GDC10 3D 5 mm-10 cm, GDC10 3D 6 mm-15 cm; Boston Scientific Neurovascular, Natick, MA, USA) をfirst coilとして挿入した。マイクロカテーテルはほぼ直線状に配置し、その先端は瘤の正中に固定した。脳血管内治療専門医を術者としてデータを収集した。また、この条件下で、コイルが逸脱せずに瘤内に納まるスピードを検討した予備実験の結果から、機械によるコイル挿入時のスピードは0.5 [mm/s], 1.0 [mm/s] に設定した。コイル挿入力とコイルやカテーテルの挙動との関係を見るために、顕微鏡にて塞栓中のコイルとカテーテル先端の動きを観察した。

結果

コイル挿入力の測定データはFig. 3の通りであった。術者の場合、挿入力は手の往復運動に伴って鋸歯状のパ

ターンを示した。機械による挿入の場合、3Dコイルでは鋸歯状のパターンに近かったが、helicalコイルではコイル挿入後半に1-2回のピークを示す所見がみとめられた。

最大コイル挿入力についてまとめたものをFig. 4に示す。術者の平均挿入スピードは、2.8-3.4 [mm/s] であった。術者、機械とも最大挿入力は、0.23-0.30 [N] の間であり、1.0 [mm/s] では、0.25 [N] に集中していた。コイルの挙動やカテーテル先端の動きの観察から、その発生はいずれもカテーテルのペインティング動作時であった。

術者、挿入速度0.5 [mm/s], 1.0 [mm/s] それぞれの、挿入操作中の挿入力の時間割合をFig. 5に示す。術者の場合、挿入力は0.20-0.25 [N] に低いピークを1つ示した。機械による挿入の場合、1.0 [mm/s] のスピードでは0.05-0.10 [N] に強いピーク点が1つ存在し、一方0.5 [mm/s] ではピーク点が存在しなかった。コイルとカテーテル先端の挙動に関して、0.5 [mm/s] に比べて1.0 [mm/s] で、カテーテルのペインティングの発生が少なかった。

考察

脳動脈瘤コイル塞栓術時のコイル挿入操作は、トルク操作を伴わず、単純にワイヤーを前進させる動きである。しかし、その手技自体は決して容易なものではなく、その習得に訓練を要することはよく知られている⁵⁾。1990年代以降、脳動脈瘤コイル塞栓術は急速に広まったものの¹²⁾、コイル挿入操作とコイルやカテーテルの挙動やコ

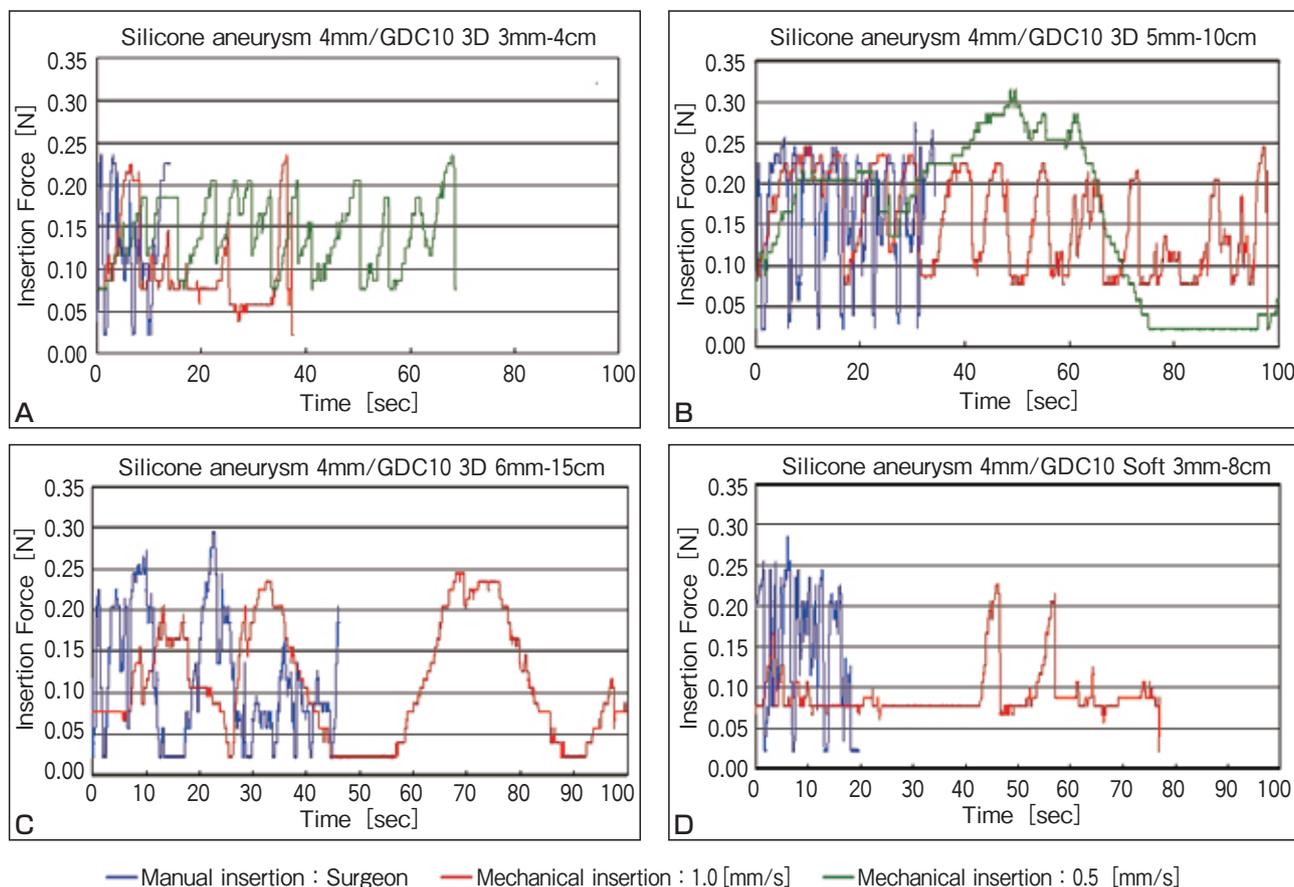


Fig. 3 The coil insertion force obtained with silicone aneurysms is demonstrated. **A** : Data with GDC10 3D 3mm-4cm in a 4-mm aneurysm. **B** : Data with GDC10 3D 5mm-10cm in a 4-mm aneurysm. **C** : Data with GDC10 3D 6mm-15cm in a 5-mm aneurysm. Data obtained over 100 seconds are not described here to simply compare the force pattern. **D** : Data with GDC10 2D Soft 3mm-8cm in a 4-mm aneurysm. For manual insertion, the saw-like (repeated peak) force pattern is described. For mechanical insertion, the force pattern differs with the insertion speed.

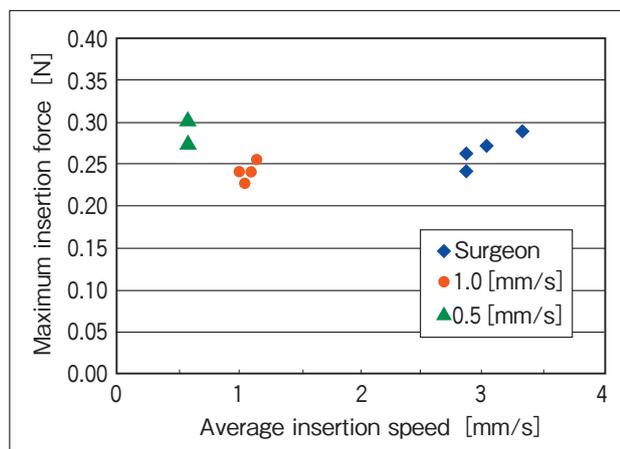


Fig. 4 The maximum coil insertion force is plotted according to the insertion speed, reaching the range of approximately 0.23-0.30 [N] regardless of insertion speed.

イル挿入力の発生パターンについて、客観的に分析された報告は乏しく、熟練者の経験に基づいた意見がほとんどである^{4,11)}。本研究では、術者によるコイル挿入と機械による一定速度での挿入についてコイル挿入力を測定し、コイル挿入力の発生パターンについて分析した。コイルの種類、形状やサイズとコイル挿入力に関する研究については、すでにMatsubaraらが報告しているため²⁾、本稿では最もストレスなくコイルが挿入できる挿入方法や挿入速度の条件について、コイルと瘤壁との摩擦状態に注目して考察を行った。

1. 挿入力の発生パターン

術者の場合、3Dコイル、helicalコイルにかかわらず、鋸歯状の発生パターンが認められた。術者の挿入速度は速く、速い挿入速度自体が、コイル挿入力に影響を及ぼした可能性も考えられるが、主には手の往復運動に伴う

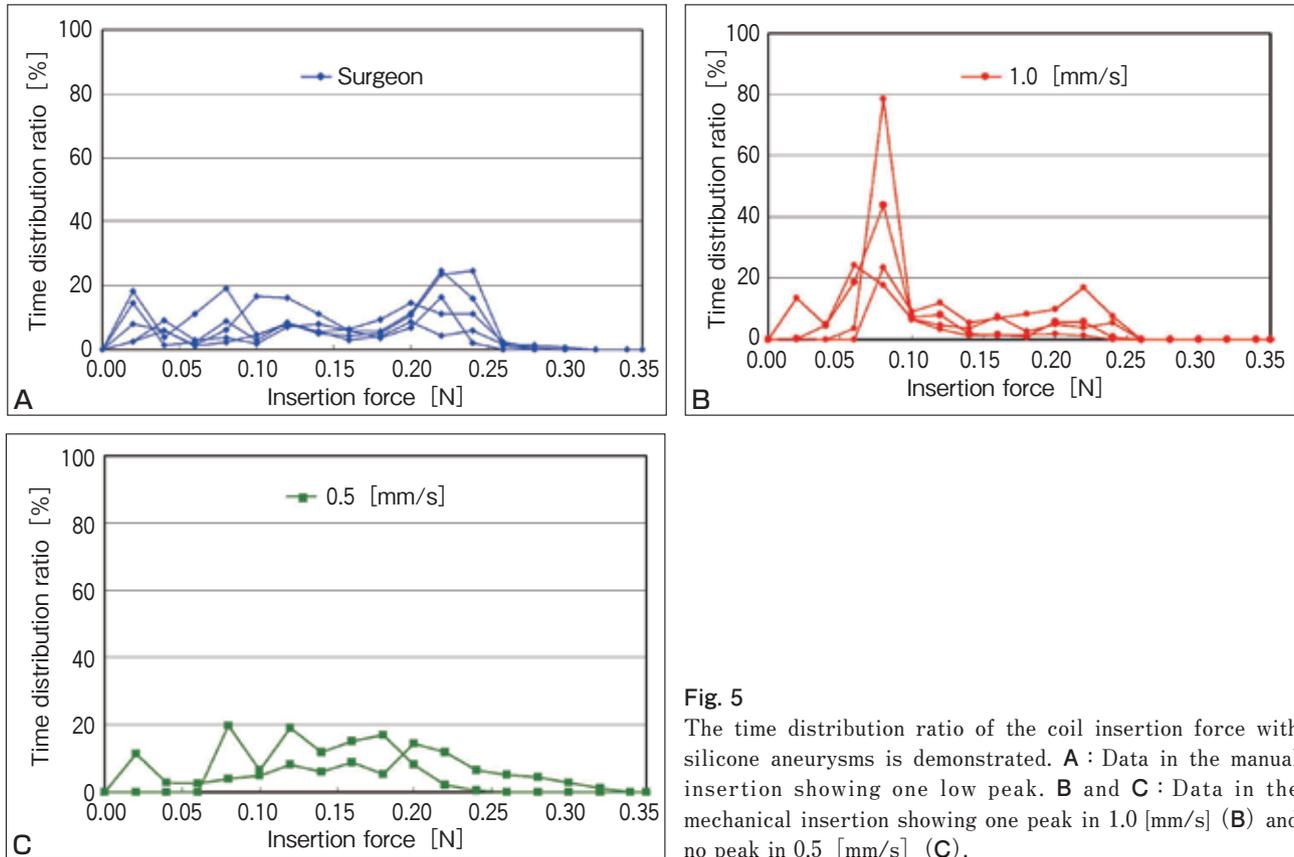


Fig. 5 The time distribution ratio of the coil insertion force with silicone aneurysms is demonstrated. **A** : Data in the manual insertion showing one low peak. **B** and **C** : Data in the mechanical insertion showing one peak in 1.0 [mm/s] (**B**) and no peak in 0.5 [mm/s] (**C**).

前進と停止操作の繰り返しによって、挿入力のピークが断続的に発生したものと考えられた。

機械による挿入の場合、3Dコイルでは鋸歯状のパターンに近く、helicalコイルでは終盤に1-2回のピークを示す所見が認められた。これはコイルの特性による影響と考えられた²⁾。

2. 最大挿入力

シリコン動脈瘤モデルでは、術者、機械のスピードにかかわらず最大挿入力は、0.23-0.30 [N] の間であり、その発生はカテーテルのペインティング動作時であった。コイルが瘤壁とスムーズに滑るとき挿入力は上昇せず、瘤壁と滑らない時にカテーテルのペインティングが発生していた。ペインティングが発生する時の挿入力は大きく、最大挿入力となり、術者・機械いづれでもカテーテルのペインティングが最低1回は発生していたため、最大挿入力はほぼ等しくなったと考えられる。なお、ペインティングが発生せずに、コイルがそれ以上瘤内に進入できない場合には、挿入力が蓄積し、コイルが瘤外に出たり、kick backによってマイクロカテーテル先端が瘤外へ逸脱したりする³⁾。

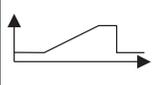
3. コイル挿入力の時間割合

術者の場合、挿入力の分布には1つの低いピークが認められた。コイルの挙動との関係进行分析すると、停止から前進操作に移る時に、コイル挿入力が発生していた。一度停止した後、再び前進する際に、動脈瘤壁とコイルの滑りがスムーズな場合は挿入力が上昇しないが、スムーズに滑らない場合に、ペインティングが短時間で発生し0.20-0.25 [N] に分布のピークを形成したものと考えられた。

機械による一定速度での挿入では、挿入速度1.0[mm/s]の場合、挿入力の分布に1つのピーク（弱い力）が認められた。このスピードでは、瘤壁とコイルがスムーズに滑っていることが多いため、ペインティングの発生が少なかったことが主な要因と考えられた。

挿入速度0.5 [mm/s] の場合は、挿入力の分布に明確なピークが認められなかった。コイルの挙動の観察から、コイルは瘤壁を滑らず、先端は静止した状態でゆっくりとコイルが充填されていき、ある瞬間にペインティングを起こしていた。1回のペインティングまでの時間が長く、徐々に挿入力が上昇していく過程で、その分布が均

Table 1 Summary of the differences between the coil insertion methods during the embolization with silicone aneurysms. Friction state between the coil and the aneurysm wall is the most important factors affecting the coil insertion force.

Insertion method (speed)	Insertion	Insertion speed	Friction state	Painting of catheter	Coil movement against aneurysm wall	Maximum force	Insertion force pattern
Manual (Surgeon)	Advance and stop repeatedly	Usually fast	Static friction	Frequent	Hardly slide	No remarkable difference (0.23-0.30 [N])	
Mechanical (1.0[mm/s])	Constantly advance	Moderate	Kinetic friction	Rare	Smoothly slide		
Mechanical (0.5[mm/s])	Constantly advance	Slow	Static friction	Sometimes	Stuck and released at moment of painting		

一化されたと考えられた。

これらの実験結果から、動脈瘤壁に対してコイルが滑るかかどうかは、挿入方法と挿入速度によって決定される摩擦状態に依存していることが推測された。それぞれの特徴をまとめると以下ようになる。

術者の場合は、手の往復運動に伴いデリバリーワイヤーが停止から前進する際に、コイルと瘤壁との間に静止摩擦が作用する。そして、静止摩擦によってコイルが滑るのよりも先にペインティングが発生する傾向がみられる。

挿入速度0.5 [mm/s] の場合、挿入速度が遅いために静止摩擦によって静止状態が維持されてコイルが滑らない状態が続く、ある瞬間にペインティングを起こし力が解放されることとなる。一方、1.0 [mm/s] では、コイルが動き出すと動摩擦状態を維持して、コイルが動脈瘤に対してスムーズに滑るような動きを示す (Table 1)。

クロウンの法則から、常に (最大) 静止摩擦力は動摩擦力より大きいことが知られており、コイルと瘤壁がスムーズに滑る動摩擦状態を維持できるように適切な挿入速度を設定すれば、コイル挿入力の上昇を回避できる可能性がある。ただし、3Dコイルのように、ペインティング動作に伴いコイル塊の形状が変化することによって良好なframeを形成する場合があります、ある程度の静止摩擦状態が発生するスピードの方が良い状況も想定される。状況に応じた挿入速度を的確に設定することができれば、機械による一定速度でのコイル自動挿入が、臨床の場合においても有望である可能性が示唆された⁶⁾。

4. 今後の研究課題

今後、ある程度コイルが瘤内に入った状態での評価や動脈瘤の親動脈との位置関係や形状の違いによる挿入力発生パターンの分析等、さまざまな条件下における研究が必要と考える。その他、脳動脈瘤コイル塞栓術においては、コイルの挿入とともに、マイクロカテーテル操作が必要となる場面も多い。そのため、コイル挿入力とマイクロカテーテル操作との関連についての分析も必要と考えている。また、先述の通り、コイル塞栓術においては、瘤のタイトパッキングとともに、いかにうまくコイルフレームを形成するかも重要なポイントである¹⁰⁾。今回の実験では、コイル挿入操作やコイル挿入力とコイルの展開形状についての十分な検討はされておらず、今後の研究課題である。

結 論

コイル挿入操作と挿入速度によってコイルと瘤壁との摩擦状態 (静止摩擦状態か動摩擦状態) が決まり、コイル挿入力の発生パターンに影響することが判明した。コイルと瘤壁の間の動摩擦状態を維持できるような挿入方法が設定できれば、最もストレスなくコイルが挿入できると考えられた。

文 献

- 1) Matsubara N, Miyachi S, Nagano Y, et al: A novel pressure sensor with an optical system for coil embolization of intracranial aneurysms. J Neurosurg 111:41-47, 2009.
- 2) Matsubara N, Miyachi S, Nagano Y, et al: Evaluation of

- the characteristics of various types of coils for the embolization of intracranial aneurysms with an optical pressure sensor system. *Neuroradiology*. Published online Jun 3, 2010. DOI: 10.007/s00234-010-0722-5.
- 3) 松原功明, 宮地 茂, 大島共貴, 他: 光学的センサーによる脳動脈瘤塞栓用 coil の挿入力測定装置の開発. *JNET* 2:113-118, 2008.
 - 4) 松本康史, 江面正幸: 破裂動脈瘤. 吉田 純, 宮地 茂編, 脳血管内治療の Do's & Don'ts 第2版, 東京, 医学書院, 2006, 60-62.
 - 5) Miyachi S, Okamoto T, Kobayashi N, et al: Nagoya University training system for neuroendovascular therapists. *Interventional Neuroradiol* 10 (Suppl 1): S103-106, 2004.
 - 6) 永野佳孝, 佐野明人, 松原功明, 他: 脳動脈瘤コイル塞栓術用ワンサージョン手術システムの開発. *J JSCAS* 11:244-245, 2009.
 - 7) Nagano Y, Sano A, Sakaguchi M, et al: Development of force sensor for a linear object. *Proceeding of Institute of Electrical and Electronics Engineers Conference on Sensors 2006*:823-826, 2006.
 - 8) 永野佳孝, 佐野明人, 坂口正道, 他: 極細かつ長尺の線状体用力センサの開発—脳動脈瘤コイル塞栓術への適応—. *計測自動制御学会論文集*. 44:278-284, 2008.
 - 9) 永野佳孝, 佐野明人, 坂口正道, 他: 脳動脈瘤コイル塞栓術用センシングシステムの開発—血管モデルと In vivo の模擬瘤を用いた挿入力の評価—. *J JSCAS* 10:147-153, 2008.
 - 10) 中澤和智, 太田剛史, 今村博敏, 他: コイルの特性を考慮した脳動脈瘤内塞栓術—そのコンセプトと実験的データより—第22回脳神経血管内治療学会総会講演集. 11-16, 2006.
 - 11) 根本 繁: 未破裂動脈瘤. 吉田 純, 宮地 茂編, 脳血管内治療の Do's & Don'ts 第2版, 東京, 医学書院, 2006, 85-90.
 - 12) Prestigiacomo CJ: Historical perspectives: the microsurgical and endovascular treatment of aneurysms. *Neurosurgery* 59 (Suppl 3): S39-47, 2006.
 - 13) Richling B: History of endovascular surgery: personal accounts of the evolution. *Neurosurgery* 59 (Suppl 3): S30-38, 2006.

要 旨

JNET 4:84-90, 2010

【目的】 脳動脈瘤モデルにおいてコイル挿入力の測定を行い、コイルやカテーテル先端の挙動との関係を検討することで、コイル挿入力の発生パターンを分析した。そして、よりストレスなくコイルが挿入できる挿入方法と挿入速度の条件について考察した。**【方法】** Yコネクター内のワイヤーの「たわみ」を光学的センサーで計測することでコイル挿入力を測定する装置が開発されている。本装置を用いて、術者が挿入した場合、一定の挿入速度で機械的に挿入した場合について、コイル挿入力を測定した。同時に、顕微鏡で塞栓中のコイルやカテーテルの動きを観察した。**【結果】** 術者による挿入の場合、手の往復運動による影響がみられ、停止から再び動き出す際に静止摩擦が作用していた。機械による挿入の場合、挿入速度によってコイル挿入力の発生パターンに違いがみられ、瘤壁とコイルの間の摩擦状態（静止摩擦状態か動摩擦状態か）が影響していた。**【結論】** 挿入操作と挿入速度によってコイルと瘤壁との摩擦状態が決まり、挿入力の発生パターンに影響することが判明した。コイルと瘤壁の間の動摩擦状態を維持できるような挿入条件が設定できれば、ストレスなくコイルが挿入できると考えられた。