応力凍結法による変形性膝関節症における腓骨切除法の有効性と適応条件に関する実験的検討*

前 崎 信 孝^{*1}, 江 角 務^{*2}, 蜂 谷 将 史^{*3}

Experimental Examination on the Effects and Adaptation Condition of the Fibula Excision Method Using the Stress Freezing Method on the Osteoarthritic Knee

Nobutaka MAEZAKI^{*4}, Tsutomu EZUMI and Masashi HACHIYA

^{**} Graduate School of Engineering, Shibaura Institute of Technology,
3-7-5 Toyosu, Koto-ku, Tokyo, 135-8548 Japan

There is much interest in the affects of osteoarthritis on load distribution in the knee and the development of suitable therapies. The fibula excision method is relatively simple method. However, few studies have examined the dynamic state of the knee and the adaptative condition after the procedure. In this paper, we examined the effects the of the fibula excision method on the meniscus, using the photoelastic 3-dimensional stress freezing method and a pressure gauge. Our results suggest that the fibula excision method is effective in minor osteoarthritis cases.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Photoelasticity, Biomechanics, Knee Joint, Osteoarthritis, Osteotomy

1. 緒 言

変形性膝関節症(膝関節 OA: Osteoarthritis)は、代表的な変形性関節症のひとつであり、病院外来に通院する患者数は年間 90 万人と推測される。その症状は膝関節内にある軟骨が、擦り減るなどの変形を呈し、膝の内側あるいは外側に疼痛を生じる。主に膝の内側に疼痛を訴訴とする場合が多い。進行によっては歩行困難となる場合もある。変形性膝関節症はその外観や検査結果から、内反変形性膝関節症(O脚)と外反変形性膝関節症(X脚)に分類される。発症の原因として、外傷や関節炎の既往、年齢、肥満、性の 4 項目が変形性膝関節症のトリガーとして明らかになっている。40 歳頃から発症率は高くなり、高齢者に発症する頻度が高く、男性:女性では 1:4 の発症率である。原因として、肥満や膝関節周辺の筋力の不均衡など力学的因子が指摘される⁽¹⁾⁽⁹⁾。

現在、腓骨切除法が、手術の一手法として挙げられる。この術式は、内反変形性膝関節症(O脚)を対象とし、術式も比較的簡便で患者の体力的負担も軽く、患者の大多数が高齢者である現状から最適な術式である。この術式は、

腓骨の骨幹部を部分切除することにより、下肢のアライメントを補正する術式であり、他の手術にも応用されている。変形性膝関節症の診断は、下肢アライメントを測定するのが一般的である。図 1 に内反変形性膝関節症の X 線写真を、図 2 に腓骨切除法のスケッチ図と、FTA の計測位置を示す⁽¹⁾⁽²⁾。FTA とは、膝関節を形成する大腿骨の中心軸と脛骨の中心軸がなす角度を測定したもので、その測定角度によって変形型の診断や手術侵襲量の指針とする。FTA は、正常膝が 172° ~ 176°、内反変形性膝関節症(O脚)では FTA 180° 以上、外反変形性膝関節症(X脚)では FTA 170° 以下とされている。図 3 に下肢アライメントを示す。しかし、医学においては、治療ガイドラインを模索しているのが現状である⁽³⁾。

Fig.1 Osteoarthritic knee Fig.2 Fibula excision method

* 原稿受付 2007 年 10 月 4 日.

^{*1} 正員, 芝浦工業大学大学院工学研究科 (〒 135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5).

^{*2} 正員, 芝浦工業大学工学部.

^{*3} 横浜南共済病院整形外科 (〒 236-0037 横浜市金沢区六浦東 1-21-1).

E-mail: m605505@shibaura-it.ac.jp

Fig.3 Girdle alignment

本研究では、変形性膝関節症に適用される腓骨切除法の有効性について検討した。健康状態、術前である内反変形性膝関節症(O脚)や術後の膝関節を再現し、片足立位時を想定し実験を行った。手術の影響を力学的に把握することは重要である。本実験では、変形性膝関節症の診断指針であるFTAや、半月板の残存状態が手術の成果にどう影響するかを明らかにした。三次元応力凍結法や圧力ゲージを用い、腓骨切除法の有効性及適用範囲について検討した。

2 試験片モデルおよび実験方法

2・1 三次元応力凍結法 供試材となる光弾性材料のエポキシ樹脂は等方等質体であるが、生体骨(海綿骨、緻密骨、骨髄から構成)は異方異質体である。そのため、ヤング率 E が均質な材料と、非均質な材料との比較解析に生じる誤差について指摘される。よって、エポキシ樹脂の使用には、骨との定量的誤差について検討が必要となる。これについて、西田らは、骨を模して、異なるヤング率 E のエポキシ樹脂を異層に配して実験を行った。その結果より、ヤング率 E の誤差は10%程度であり、中実単層構造として実験を行っても定量的誤差が小さいため、より定量的な再現性を期待できることが報告されている。また、骨の力学特性は、性差、個人差があるが30~50歳の成人男子の大腿骨で、平均張力137.30MPa、弾性限度100.82MPa、伸び0.0125で応力除去によるひずみの回復率は95%以上と報告されている。骨質は完全に近い弾性体として考えることができ、光弾性材料や光弾性実験を扱うのにも好都合である。これらの報告を基に、骨全体の応力分布可視化に有力な実験解析法である本法を採用した⁹⁾⁽¹¹⁾。また、本実験で用いたシリコンゴムの機械的性質は、硬度JIS A43、引張り強さ2.2MPa、伸び率170%である。

2・2 実験方法 本研究では、三次元応力凍結法を用いた実験解析を行った。実験機材に医学生体骨格モデルを用い、大腿骨と脛骨や腓骨など左側膝関節

を構成する骨格の試験片モデルを作製した。供試材にエポキシ樹脂(ARALDITE B CT200+HARDENER HT901)を重量比100:30で混合)を選択した。実験に際し、大腿骨モデルと腓骨、脛骨モデルを組み合わせ膝関節とする。より正確な垂直負荷がかかるように、シリコンを用いて作製した筋肉パーツを治具として使用した⁷⁾。応力凍結の際には、凍結荷重として107.8Nを負荷した。関節軟骨の再現には、硬さHS29の陶芸用粘土(Sculpey III・米国ポリフォーム社)を用いて再現した⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。図4に試験片モデルを示し、図5に荷重装置を示す。応力凍結終了後、立位状態や特にFTAを維持した状態で、厚さ5.5mmに約12枚程度にスライスを行った。スライス片は、膝の内側からナンバリングした。図6にスライス方向を示し、図8にスライス片を示す。

Fig.4 Model specimen

Fig.5 Load device

Fig.6 Slice position

Fig.7 Model peaces

3 実験結果および考察

3・1 半月板の重要性 本実験では、半月板の重要性の検討を行うにあたり、表1のType I~IIIより比較を行った。FTAを正常膝である176°と固定し、半月板をシリコンゴムおよびポリウレタン樹脂の性質の異なるもので再現した。同様に、半月板が完全に摩擦損失し、大腿骨と脛骨・腓骨を直接接触する状態を再現した。その実験条件を表1に示し、実験パラメータを表2に示す。応力凍

結法による光弾性しま写真と応力分布図（接触点では主応力差）は、図8に大腿骨について、図9に脛骨についてその一例を示す。

Table 1 Parameter of Type I～III

Type	FTA	Material of meniscus
I	176°	Silicone rubber
II		Polyurethane
III		No

Table 2 Properties of silicone rubber and polyurethane resin

Resin	Hardness (JIS A)	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]
Silicone rubber	43	2.2	170
Polyurethane	60	15	430

Fig.8 Isochromatic fringe pattern (Femur)

Fig.9 Isochromatic fringe pattern (Tibia)

図8および9の Type I と II より、膝関節では、ほぼ同様の応力分布状態が見られた。FTA176° の正常膝のアラ

イメントの状態を再現したことから、正常な大腿骨と脛骨・腓骨の接触状態を示すものとわかった。半月板は約 60% が水分であり、水を含んだスポンジのような状態で存在する。また、極めて重要な荷重支持、衝撃荷重の吸収、関節の安定性および関節の潤滑に関する力学的機能特性がある。例えば、膝関節伸展時において膝関節に作用する荷重の 20% を吸収し、約 50% を伝達すると考えられている。また、半月板は内側よりも外側の方が厚いとされており、膝関節外側における荷重の分散に大きく影響している。

一方、Type III では、Type I と II と異なる応力分布状態が見られた。大腿骨では接触部で応力の集中が見られ、脛骨では脛骨骨幹部にも影響が見られた。これより、膝関節間にある半月板は膝関節接触部の応力を分散させるだけではなく、骨幹部についても応力の集中を緩和させるなど骨伝達に重要な役割があることがわかった。力学的に応力集中は、集中荷重によって発生することから、膝関節においても集中荷重となり、変形を促進する状態であることがわかった。また、変形性膝関節症では組織的に、骨棘の形成が見られるが、これは過度の応力により形成されることが知られている⁽⁴⁾。Type III における応力分布状態や応力値は、高次に達しており、過大な応力の分散のため、接触表面積を広げることを目的に骨棘が形成されるものと推測された。

3・2 腓骨切除法の有効性に関する検討 本実験では、正常膝と内反変形性膝関節症(O脚)およびその重度や、腓骨切除法術後に関する応力状態について比較検討を行った。その際、FTA や半月板の残存状態を考慮し、以下の表3のように実験条件を決定した。なお、腓骨切除法は、Type D と E において腓骨を骨幹部にて 10mm 切除した状態を再現した。

Table 3 Parameter of Type A～E

Type	FTA	Meniscus	Operation
A	176°	All	No excision
B	186°	All	No excision
C	186°	Half	No excision
D	186°	All	excision
E	186°	Half	excision

3・2・1 Type A : 正常膝(FTA176°/ 半月板全面残存)

本実験で得られた Type A の等色線しま写真と応力分布図の一例を大腿骨について図10に、脛骨について図11に示す。縦軸に最大圧縮応力 σ_{max} を、横軸にスライス No. をとりグラフ化したものを図12に示す。

Type A 正常膝の大腿骨では図10から、内側と外側でほぼ均等な応力分布を示した。脛骨側では図11から、内

側よりも外側に高い応力が発生した。これは FTA176° はやや外側型(X 脚)となるため、このような分布を示したと考えられる。図 12 から正常な膝関節は外側に荷重がかかり易いといえるが、内側と外側に発生する応力の差は小さく、力学的に安定しているといえる。特に OA の発症を考えた場合、応力集中は発生し難く、軟骨の摩耗は進行しないと考えられる。この結果は、健康膝に均等な応力分布、もしくはやや外側(内側 40 パーセント、外側 60 パーセントの負荷分担)に応力が分布することが望ましいとする整形外科分野の見解とも一致する。全体的に応力値が低く、分布範囲も広いため膝関節部にかかる荷重が効率よく分散されており、正常な膝関節は安定しているといえる⁽¹⁾⁽⁴⁾。

3・2・2 Type B：軽度の内反変形性膝関節症 (FTA186° / 半月板全面残存) 本実験で得られた Type B の等色線しま写真と応力分布図の一例を大腿骨について図 13 に、脛骨について図 14 に示す。縦軸に最大圧縮応力 σ_{max} を、横軸にスライス No. をとりグラフ化したものを図 15 に示す。

Type B では図 13 と 14 から、脛骨側の内側において応力分布範囲が Type A よりも狭いことが確認できる。半月板は全面に残存しているが、FTA が 186° であるために膝の外側に 60% の応力が分布したものと考えられる。このことから、FTA が正常でなければ、半月板が荷重を均等に分散することができず、FTA の変化が半月板の摩耗変形に深く関わりと推測された。衝撃などが加わる歩行時や階段の昇降時などでは、膝の内側に高い応力が発生することが予想される。また、図 15 のグラフから、大腿骨では内と外の応力はほぼ同じであり、脛骨では外側に応力が発生した。一般に O 脚では内側に高い応力が発生するとされるが、この結果より、O 脚でも軟骨が残存し静荷重のみが負荷する場面では、内外に力が分布するのではないかとと思われる。

3・2・3 Type C：重度の内反変形性膝関節症 (FTA186° / 半月板外側のみ残存、内側半月板消失)

本実験で得られた Type C の等色線しま写真と応力分布図の一例を大腿骨について図 16 に、脛骨について図 17 に示す。縦軸に最大圧縮応力 σ_{max} を、横軸にスライス No. をとりグラフ化したものを図 18 に示す。

Type C では図 16 と 17 から、半月板が消失した内側の箇所において高次の応力集中が確認された。これは、半月板の役割である荷重分散が行われず、応力が集中したと考えられる。図 18 からは、本来、直接接触がない脛骨の中央に存在する顆間隆起部においても、高次の応力集中が確認された。これは OA の症状の特徴である骨棘の発生と関係する。骨は軟骨が摩耗し骨同士がぶつかり合

うと損傷し、屈伸運動などを行う際は、疼痛を生じる。この結果は、内反変形性膝関節症で膝の内側に力が集中し、さらに疼痛の原因は脛骨の顆間隆起部に発生した骨棘が原因とする整形外科分野の見解とも一致している⁽¹⁾⁽⁴⁾。よって、骨同士が接触しないよう FTA を補正するとともに、骨棘を切除する治療を行う必要がある。

以上のことから、OA の症状により膝関節に発生する応力は異なる。特に軟骨が摩耗すると応力集中を起こし、顆間隆起部での接触が生じることから、軟骨の摩耗を予防することが重要である。軟骨の摩耗には FTA が関係し、FTA の補正が予防法に繋がると考えられる。

3・2・4 Type D：軽度の内反変形性膝関節症に対する腓骨切除法術後(FTA176° / 半月板全面残存) 本実験で得られた Type D の等色線しま写真と応力分布図の一例を大腿骨について図 19 に、脛骨について図 20 に示す。縦軸に最大圧縮応力 σ_{max} を、横軸にスライス No. をとりグラフ化したものを図 21 に示す。

Type D では図 19 と 20 から、膝の内側と外側に力が均等に分布することがわかった。図 21 から応力値や応力分布の状態が、正常型である Type A とほぼ同様の結果を示し、力学的に安定であるといえる。腓骨を切除したことで FTA が補正されたことを示し、正常膝と同様に膝の内側に生じる荷重の分散が改善されたと考えられる。軽度の内反変形性膝関節症に対して腓骨切除法は有効であることが示唆された。

3・2・5 Type E：重度の内反変形性膝関節症に対する腓骨切除法術後(FTA176° / 半月板外側のみ残存、内側半月板消失) 実験で得られた Type E の等色線しま写真と応力分布図の一例を大腿骨について図 22 に、脛骨について図 23 に示す。縦軸に最大圧縮応力 σ_{max} を、横軸にスライス No. をとりグラフ化したものを図 24 に示す。

Type E では図 22 と 23 から、大腿骨側と脛骨側とも膝の内側において高次の応力集中が確認された。この応力分布状態は腓骨切除前である Type C とほぼ同様である。しかし、図 24 から脛骨の顆間隆起部の接触に関する応力は確認されなかった。重度の内反変形性膝関節症では Type D のような改善は見込めないものの、顆間隆起部の骨棘を原因とする疼痛の徐痛手術として、ある程度有効性があるものと考えられる⁽³⁾。

以上から、腓骨切除法は軽度の内反変形性膝関節症治療に有効である。重度の内反変形性膝関節症治療には、高位脛骨骨切り術をはじめとする FTA 補正治療は重度の患者に対して行うことが妥当と推測される。また、腓骨切除法による FTA の補正を行っても、半月板の残存状態によって治療効果が異なることがわかった⁽¹⁾⁽²⁾。

Fig.10 Isochromatic fringe pattern of Type A (Femur)

Fig.14 Isochromatic fringe pattern of Type B (Tibia)

Fig.11 Isochromatic fringe pattern of Type A (Tibia)

Fig.12 Stress distribution of Type A

Fig.15 Stress distribution of Type B

Fig.16 Isochromatic fringe pattern of Type C (Femur)

Fig.13 Isochromatic fringe pattern of Type B (Femur)

Fig.23 Isochromatic fringe pattern of Type E (Tibia)

Fig.24 Stress distribution of Type E

3・3 腓骨切除法の適応条件に関する検討 本研究では、光弾性応力凍結法を用いて膝関節に発生する応力分布を解析するとともに、厚さ 2mm 直径 6mm のセグメントタイプの小型圧力センサ(共和電業・PSM)を用いて膝関節間に発生する圧力を測定した。圧力ゲージの利点として、連続的に結果を得られることである。本研究では FTA を徐々に変化させていき、FTA の変化が膝関節にどのような影響を与えるのか観察した。供試体は応力凍結法に用いた供試体と同様のエポキシ樹脂製の膝関節、脛骨・腓骨モデルを使用した。また荷重装置も同様のものを用いたが、負荷荷重については圧力センサの特性から、応力凍結実験時の 1/11 である 9.8N で実験を行った。

圧力センサの設置位置は、膝関節は大腿骨と脛骨が接触する内側と外側に応力が発生することが確認していることから、接触する位置に小型圧力センサを設置した。

3・3・1 健常膝関節の検討 図 25 は健常膝関節の実験の結果を、図 26 は腓骨切除法後の結果に示す。グラフ中、縦軸は圧力値、横軸は FTA を示す。

実線が膝関節の内側、破線は外側に発生した圧力を示す。

図 25 から、健常膝関節では、FTA が小さいとき(X 脚傾向)、やや外側に高い圧力が発生する。FTA が大きく(O 脚傾向)になるにつれ、外側の圧力は減少し内側の圧力が増加することがわかった。内側と外側の圧力が等しくなるのは、FTA178° 前後であることが確認された。膝関節が安定する最適な FTA は、178° 前後であるといえ、一般に正常な FTA は 176° であることから、この結果は妥当であり、これまでの光弾性応力凍結法においても同様の結果を得た。

Fig.25 Pressure distribution of no excision

3・3・2 腓骨切除法後の検討 図 26 から腓骨切除後では、FTA が小さいとき(X 脚傾向)外側、FTA が大きいとき(O 脚傾向)では内側に圧力が発生した。内側と外側の圧力が等しくなるのは FTA が 173° ～ 183° 付近であり、腓骨切除前と比較して範囲が広いことがわかる。これは、腓骨を切除することにより FTA が補正され、膝関節が安定する FTA の範囲が広がったと考えられる。

Fig.26 Pressure distribution of fibula

3・3・3 FTA と適応条件の検討 各 FTA における内側と外側の圧力を合計したものを全体の圧力とし、内側、外側の圧力が占める割合を算出した。

健常膝関節についての結果を図 27 に、腓骨切除後についての結果を図 28 に示す。縦軸は割合(%), 横

軸は FTA を示す実線が膝関節の内側、破線は外側に発生した圧力の割合を示している。

図 27 より、健常膝関節では、FTA178° 前後において内側と外側の圧力の割合がほぼ等しくなるが、FTA が変化するとその割合は急激に変化する。特に FTA が 171° ～ 181° の範囲においては割合の変化が大きく、FTA の 1° や 2° 変化が膝関節に多大な影響を与えられとえられる。しかし、図 28 の腓骨切除後では、FTA が 174° ～ 183° 付近において圧力の割合がほぼ等しい。膝関節は力学的に安定しているといえる。したがって、腓骨切除法は FTA174° ～ FTA183° の軽度の OA 患者に対しての適応が特に有効であると考えられる。

Fig.27 Percentage of pressure in no excision

Fig.28 Percentage of fibula excision

4. 結 言

本研究は、内反変形性膝関節症に対する治療手術である腓骨切除法を取り上げた。健常状態、術前や術後の片足立位時を想定し、その応力状態や治療効果について三次元応力凍結法を用いて解析した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 腓骨切除法は、軽度の内反変形性膝関節症 FTA186° 前後、かつ半月板が多く残存しているケースにおいて、有効であることが示唆された。
- (2) FTA の補正を行っても、半月板の残存状態によって腓骨切除法の治療効果が異なることがわかった。

文 献

- (1) Koshino T, A cause of a disease, diagnosis, and medical treatment of Knee arthropathy Orthopedics department, **43**, (1992), pp.1629-1638.
- (2) Kurokawa H., Orthopedics operation No.5 Operation of Knee joint, *Nakaya-mashoten*, (1995), pp.139-167.
- (3) Deie M., Yasumoto M., Ochi M., Remedy guideline of knee Osteoarthritis, *The Journal of the Hiroshima, medical Association*, **55-12**, (2002), pp.1013-1016.
- (4) Isekame F., Sueyasu m., Mizushima T., Around deformation characteristic knee arthropathy, *Clinical Orthopedic Surgery*, **10**, (1975), pp.303-313.
- (5) Fujii H., Hachiya M., and Yamada K. and others, Longterm result of operation of Salter pelvic osteotomy to vestigial remnant subdislocation, *Orthopedics department*, **50-7**, (1999), pp.689-693.
- (6) Guoan Li, Kenji Kawamura, Peter Barrance, Edmund Y.S.Chao, and Ken Kaufman: Prediction of Muscle Recruitment and Its Effect on Joint Reaction Forces during Knee Exercises. *Annals of Biomedical Engineering. The Joournal of the Biomedical Engineering Society*, **26**, (1998), pp.725-735.
- (7) Joseph M. Mansour, Fred A. Wentorf, and Kurt M. DeGoede: In Vivo Kinematics of the Rabbit Knee in Unstable Models of Osteoarthritis *Annals of Biomedical Engineering. The Joournal of the Biomedical Engineering Society*, **26**, (1998), pp.353-360.
- (8) Kenneth J. Fischer, Chris R. Jacobs, Marc E. Levenston, and Dennis R. Carter: Observations of Convergence and Uniqueness of Node-Based Bone Remodeling Simulations. *Annals of Biomedical Engineering. The Joournal of the Biomedical Engineering Society*, **25**, (1997), pp.261-268.
- (9) Takahashi S. and others, Photo mechanics, sankaidou, (1997), pp.8-15.
- (10) Tsuji J., Nishida M. and Kawata K., Photoelasticity experiment method, Nikkan Kogyo Shimbun Co., (1965), pp.109-115.
- (11) John W. Xerogeanes, Ross J. Fox, Yoshi Takeda, Hyoun-Soo Kim, Yasuyuki Ishibashi, Gregory J. Carlin, and Savio L.-y. Woo: A Functional Comparison of Animal Anterior Cruciate Ligament Models to the Human Anterior Cruciate Ligament. *Annals of Biomedical Engineering. The Joournal of the Biomedical Engineering Society*, **26**, pp.345-352, (1998).
- (12) Fujiki H., Ishikawa H., Yshuda K., Change and the influence of knee joint contact force by the total knee replacement, *Transactions of the Japan Society Of Mechanical Engineers thesis collection A*, **65-629**, (1999), pp.187-193.
- (13) Asano S., Ezumi T. and Hachiya M., A Study on The Characteristics of The Dynamics of Osteoarthritis Treatment Using Photoelastic Method, *Journal of Japanese Non Distractive Inspection*, **53-9**, (2004), pp.566-571.
- (14) Maezaki N., Ezumi T., and Hachiya M., Experimental Examination on the Therapeutic Postoperative Course of Ospharthritis by Stress Freezing Method, *Transactions of the Japan Society Of Mechanical Engineers thesis collection A*, **71-703**, (2005), pp.500-506.