応力凍結法による股関節症治療の術後経過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 Therapeutic Postoperative Course
of Ospharthrosis by Stress Freezing MethodNobutaka MAEZAKI^{*4}, Tsutomu EZUMI and Masashi HACHIYA^{**} Graduate School of Engineering, Shibaura Institute of Technology,
3-9-14 Shibaura, Minato-ku, Tokyo, 108-8548 Japan

As congenital hip dislocation residual subluxation is the aftereffect of congenital hip dislocation, it is characteristic that the ailment remains. Hip joint disease is typically said to be difficult to treat within the medical orthopedic field. Although an exact cure is desired, when taking into consideration factors such as the operation method used and the age of the patient at the time of the operation, there is still no conclusive method at present because of the differences in medical treatments and other varying dynamics. In this research, the Salter method for pelvis osteotomy, including the operation method specific to this disease, was adopted. It was performed in order to fully understand the stress states. A Comparative examination of the states immediately after the operation and 6 weeks after the operation using the Salter method and comparison with a normal joint, was carried out using the 3-dimensional stress freezing method for analysis. It was found that, the states of stress on the hip joint immediately after the operation and 6 weeks after of the operation, were almost the same as for a normal joint. This finding corresponds to the treatment policy of the medical field for the results of a dynamic examination, and it has therefore been understood that this is a steady dynamically operation method.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Biomechanics, Stress Concentration, Stress Relaxation, Bearing Strength

1. 緒 言

生体の一関節である股関節は、生体関節の中でも最大荷重関節であり、歩行する際に最も重要な関節である。臼状関節特有の力学条件のために疾患の種類と数が、他の関節に比して圧倒的に多いことが報告されている⁽¹⁾。その症例の一つに、先天性股関節脱臼症 (CDH: Congenital Dislocation of the Hip) と、その後遺症である先天性股脱遺残性亜脱臼症がある。いずれも股関節形成異常を呈す模式的に難治な股関節疾患である。図 1(a) に健全股関節を、(b) に先天性股関節脱臼症の股関節の状態を示す。この疾患は図 1(b) に示すように、大腿骨骨頭部が寛骨臼蓋から脱臼して不安定な状態となり、発育とともに歩行困難や股関節に悪影響を与える疾患である^{(2)~(6)}。

現在、行われている治療の一手法である骨盤骨切り術は、人工関節を用いる人工関節置換術と並んで、重要性の高い治療法である^{(7)~(12)}。しかし、骨盤骨切り

術後の股関節と健全股関節や、その力学状態を解析した例は少なく、その治療効果や再評価に関する緊急の解明が待たれている。

本研究では、先天性股関節脱臼症および先天性股脱遺残性亜脱臼症に対する治療手術法である骨盤骨切り術 Salter 法を取上げる。安定した股関節を形成するべく、骨盤を大きく矯正させた手術後の力学状態は大きく変化しており、股関節における応力状態を把握することは重要であると考えられる。本実験では、手術による影響を実験的に考慮し、骨盤骨切り術 Salter 法による術直後、術 6 週間後および健全状態の生体股関節の応力状態について調べ比較検討する。解析手法には、光弾性実験三次元応力凍結法を用いた。

2. 先天性股関節脱臼症および
先天性股脱遺残性亜脱臼症

先天性股関節脱臼症および先天性股脱遺残性亜脱臼症は、整形外科疾患の中でも、模式的に難治性の高い股関節疾患として報告されている⁽¹⁾。その原因として、胎内での筋肉や靱帯などの伸展異常による先天的な内因と、出産時の骨盤位分娩や育児の仕方などの後天的な外因などが考えられている。先天性股関節脱臼症が発見されると、矯正や整復を目的とした機械的治

* 原稿受付 2004 年 2 月 18 日。

^{*1} 学生員、芝浦工業大学大学院 (〒108-8548 東京都港区芝浦 3-9-14)。^{*2} 正員、芝浦工業大学。^{*3} 横浜南共済病院 (〒236-0037 横浜市長沢区六浦東 1-21-1)。

E-mail: m403115@sic.shibaura-it.ac.jp

療法が開始される。

しかし病状の改善が見られない場合、先天性股関節脱臼症の後遺症である先天性股脱脱残性亜脱臼症として引続き治療を行う。痛みを伴うことはごく稀で、寛骨臼蓋が浅く臼蓋形成不全を伴うなどの特徴を持つ。そのまま放置しておくと、変形性股関節症へと進展するため、早期発見となるべく早い時期に治療を行うことが必要となる。

3. 骨盤骨切り術

先天性股関節脱臼症および先天性股脱脱残性亜脱臼症に対する治療手術として、骨盤骨切り術が考案され、改良を加えた変法を含め数多く試みられている。骨盤骨切り術には Salter 法や Pemberton 法、そのほかに Chiari 法などがあるが、いずれの術式も骨盤側を骨切りすることにより、大腿骨骨頭との当たり具合を改善することを基本概念とする⁽¹³⁾。これにより臼蓋自体の方向異常を矯正し、強固な臼蓋を形成することで、整合性の良い股関節を獲得することに目的および特徴がある。

骨盤骨切り術は、患者自身の股関節の温存が可能で

(a) Normal joint (b) Dislocated joint

Fig. 1 Congenital dislocation of the hip joint

(a) Operation before (b) Operation after

Fig. 2 Salter method

あるため、再評価が進められている。その選択の仕方や、さらにより的確な手術手技を確立することが要求されているのが現状である。

3・1 骨盤骨切り術 Salter 法 Salter 法は、手技が比較的簡単であり、関節軟骨を温存しつつ関節腔内を変化させることなく、恥骨結合を利用するのが特徴である^{(114)~(118)}。その手技は、寛骨にて骨切りを行い、腸骨をくさびとして成形した移植骨を用いる術式である。図 2 に、Salter 法の手技を示す。また、Salter 法と Pemberton 法の術式の特徴と比較について、表 1 に示す⁽⁴⁾。術式を選択する際は、脱臼の状態や両術式の特徴をよく検討することが重要となる。

4. 三次元応力凍結法および

試験片モデル作製

4・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、ち密骨、骨髄から構成)は異方異質体である^{(2)~(15)}。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 を持った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、定量的誤差が小さいため、中実単層構造としてもある程度、定量的な再現性を期待できることが報告されている^{(19)~(22)}。したがって、本研究では生体骨についてある程度再現性があり、骨全体の応力分布可視化に有力

Table 1 Feature of Salter method and Pemberton method

Operating type / Feature	Advantage	Disadvantage
Salter	(1) The technique is an easy, lowbleeding, physiological, ideal method. (2) It adjusts when a young child and steep of cup is not remarkable.	(1) The transplant bone collapses easily. (2) Here is little movement of the tip bone.
Pemberton	(1) The hemorrhage can be little, it forms along the cotyloid cavity and stabilizes. (2) It adjusts when the cup is steep in the age length child.	(1) When it is non-physiological (2) And transforms the femur head, the femur head cannot be corrected to the hip joint.

な実験解析法である本法を採用した。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 A 43、引張強さ 2.2 MPa、伸び率 170% である。

4・2 試験片モデル作製 以上の事項を考慮に入れ、複雑な構造を呈する骨格系と筋肉系を再現できる試験片モデルの作製を精密に行う。

そこで、Salter 法の術直後、術 6 週間後および健常股関節の応力状態を解析するにあたり、股関節を構成する寛骨と仙骨から成る骨盤と、大腿骨の試験片モデルの作製を行った。実機材に、Salter 法の術直後、術 6 週間後および健常股関節の形状を呈した生体骨格標本モデルを用い、シリコンゴムにて鋳型を作製した。この鋳型を用い、鋳込みによる試験片モデルの作製を行った。供試材の光弾性材料には、エポキシ樹脂 (ARALDITE B CT200+HARDENER HT901 を重量比 100:30 の割合で混合) を選択した。図 3(a) に術前の先天性股脱遺残性亜脱臼症と、(b) に術 6 週間後における股関節の X 線写真の一例を参考に示す⁽⁴⁾⁽⁶⁾。図 4 に作製した試験片モデルを示す。

4・2・1 寛骨試験片モデル 先天性股関節脱臼症は、生体股関節の左側に多く発症することが報告されている⁽²⁾。そこで本研究では、左側寛骨に Salter 法の

(a) Before operation (b) 6 weeks later

Fig. 3 State of hip joint by X-ray

Fig. 4 Model specimen (Salter method on immediately after)

再現を行った。図 5(a) に Salter 法による左側治療寛骨を、(b) に左側健常寛骨を示す。

4・2・2 Salter 法術直後試験片モデル 術直後では、骨切りと移植骨の挿入が行われる。また同時に、移植骨近傍に空洞ができる状態となるため、これを再現した。図 6(a) に術直後の移植骨部周辺を示す。

4・2・3 Salter 法術 6 週間後試験片モデル 術 6 週間後では、骨の特性である自己修復が行われることが知られている⁽²⁾。よって、術直後に存在した空洞部分が埋まる状態を再現した。図 6(b) に術 6 週間後の移植骨部周辺を示す。

4・2・4 大腿骨モデルおよび関節軟骨 大腿骨は中空軸形状を呈しているため、シリコンにて中子を作製し、実物同様に直径 12 mm の中空モデルを再現した。実験の際、大腿骨下端に 10° の角度を付け、下部を石こうで固定し使用する。また、大腿骨骨頭部と寛骨臼蓋部の間に存在する関節軟骨を、陶芸用粘土 (Sculpey III・ポリフォーム社) を用い、実物同様に厚さを 4 mm として再現した。図 7(a) に大腿骨モデルを、(b) に関節軟骨を示す。

4・3 骨格モデル 作製した各左側寛骨試験片モデルと、右側健常寛骨および仙骨を組合わせて骨盤モデルとする。なお、仙骨と寛骨の間にある仙陽靱帯と両恥骨部にある恥骨結合靱帯を、シリコンゴムを用い

(a) Operative by Salter method (b) Normal hip bone method

Fig. 5 Left hip bone model specimen

(a) Immediately after (b) 6 weeks later

Fig. 6 Transplant bone and neighborhood part in Salter method

て再現した。図8に骨盤モデルを示す。

5. 実験方法および試験片スライス

5・1 実験装置および方法 本研究では、生体の片足立位時を想定し実験を行った。荷重装置内にて、骨盤モデルと大腿骨モデルを組合せ股関節骨格の再現を行う。一方、筋肉系の再現では、片足立位時に中殿筋に体重の約3倍の力が作用することから、この力を3本のスプリングにより1本当たり2.5 cm 伸ばし、合計73.5 Nの負荷がかかるよう再現した。応力凍結負荷では、試験片モデルの骨盤に対し垂直荷重24.5 Nを載荷した。図9に応力凍結時の実験状態を示す。

Fig. 7 Femur model specimen and cartilage

Fig. 8 Pelvis model

Fig. 9 Load device

なお、応力凍結サイクルは、炉内と試験片モデルの温度が、125°Cで均一となる4時間後に凍結実験荷重24.5 Nを負荷し4時間保持した後3°C/hで、一定の常温温度まで徐冷した⁽²³⁾。

5・2 試験片スライス 応力凍結を行った後、Salter法の術直後と術6週間後の左側治療寛骨、左側健常寛骨、各左側大腿骨をX-Y軸の応力分布を見るため、おのおの厚さ5.5 mm間隔でスライスをした。スライス後には、耐水ペーパーを用いて鏡面仕上げを施す。図10に寛骨および大腿骨における試験片モデルのスライス方向を示す。

6. 実験結果および考察

6・1 Salter法術直後股関節の応力状態 Salter法の術直後における寛骨部の等色線しま写真の一例を図11, 12におのおの示し、応力分布図の一例を図13

Fig. 10 Model slice

Fig. 11 Isochromatic fringe pattern of transplant bone part (immediately after on Salter method)

Fig. 12 Isochromatic fringe pattern of cup part (immediately after on Salter method)

に示す。大腿骨部の等色線しま写真の一例を図14に、その応力分布図を図15におのおの示す。

移植骨周辺の応力状態を示す。図11(a)のSlice No.1より移植骨周辺では、寛骨と接触する移植骨端面に圧縮応力が確認された。また、(b)Slice No.10より、支点の役割を果たす大坐骨切痕近傍や、その近傍にある臼蓋内部については応力が高くなることがわかった。これは、移植骨の挿入によってできた空洞部が一種の切欠きとなっており、寛骨全体を支えるため

Fig. 13 Stress distribution chart of cup part (immediately after on Salter method)

Fig. 14 Isochromatic fringe pattern of femur part (immediately after on Salter method)

Fig. 15 Stress distribution chart of femur part (immediately after on Salter method)

に生じた応力であると考えられる。

また、図12と図13の(a)Slice No.8および(b)Slice No.9は、大腿骨骨頭と接触する寛骨臼蓋内部の応力状態を示すものである。臼蓋内部の応力状態は、分布も広く顕著な集中もなく応力値もほぼ均一となり安定していることがわかった。

一方、大腿骨では、図14と図15の(a)Slice No.5および(b)Slice No.6の骨頭部においては、応力の集中は見られなかった。臼蓋部と骨頭部との接触表面積が増えたためと考えられる。その反面、大腿骨骨幹部にて応力が確認された。他の大腿骨スライス片についても、ほぼ共通して大腿骨骨幹部を中心とした圧縮応力の集中が顕著に見られた。

6・2 Salter 法術6週間後股関節の応力状態

Salter法の術6週間後における寛骨部の等色線しま写真の一例を図16に示し、応力分布図の一例を図17におのおの示す。また、大腿骨部の等色線しま写真の一例を図18に、応力分布図を図19におのおの示す。

術6週間後では自己修復により、移植骨の挿入に伴ってできた空洞部が埋まった状態での実験結果となる。

寛骨では、移植骨が存在していた部分は図16と図17の(a)Slice No.5から(b)Slice No.6より、空洞部が埋まったことで、術直後の図11の(a)Slice No.

Fig. 16 Isochromatic fringe pattern of cup and hip bone part (6 week later on Salter method)

Fig. 17 Stress distribution chart of cup and hip bone part (6 week later on Salter method)

1や大坐骨切痕近傍の(b)Slice No. 10の、空洞部に関連する応力が緩和される傾向があることがわかった。したがって、Salter法の術6週間後では、股関節を安定させる役割を担う中殿筋の筋力伝達は、模式的に健常寛骨に近い筋力伝達になったものと考えられる。

(a) Slice No. 5 (b) Slice No. 6

Fig. 18 Isochromatic fringe pattern of femur part (6 week later Salter method)

(a) Slice No. 5 (b) Slice No. 6

Fig. 19 Stress distribution chart of femur part (6 week later on Salter method)

(a) Slice No. 14 (b) Slice No. 15

Fig. 20 Isochromatic fringe pattern of cup and hip bone part (normal joint)

(a) Slice No. 14 (b) Slice No. 15

Fig. 21 Stress distribution chart of femur part (normal joint)

しかし、同写真で腸骨部分を見てみると、健常状態よりも大きな応力がかかっていたことがわかった。

したがって、腸骨へは力学的に刺激が大きいものであったと考えられる。また、臼蓋内部では、術直後と比べほとんど変わらぬ応力状態であった。顕著な集中もなく、応力値もほぼ均一となり安定していることがわかった。

一方、大腿骨では、図18と図19の(a)Slice No. 5および(b)Slice No. 6より、直後と同様に骨頭部では応力の集中は見られなかった。その反面、Slice No. 5では大腿骨頸部に、Slice No. 6では大腿骨骨幹部の2箇所を中心とした圧縮応力の集中が顕著に見られた。

6.3 健常股関節の応力状態と比較検討 健常股関節における寛骨部の等色線しま写真の一例を、図20に示し、応力分布図を図21におおのに示す。大腿骨部の等色線しま写真の一例を図22に、応力分布図を図23におおのに示す。

寛骨臼蓋部では、図21と図22の(a)Slice No. 14および(b)Slice No. 15より、臼蓋内部の応力状態は分布も広く顕著な集中もなく、応力値もほぼ均一とな

(a) Slice No. 5 (b) Slice No. 6

Fig. 22 Isochromatic fringe pattern of femur part (normal joint)

Fig. 23 Stress distribution chart of femur part (normal joint)

り安定していることがわかった。

したがって、寛骨では術直後と術6週間後と同じ応力値と応力分布を示すため、股関節内は術直後から術6週間までの期間を健常状態と比較しても、力学的に安定であったと考えられる。しかし、術6週間後では、腸骨に大きな応力が確認された。過度の応力は損傷につながる原因であるが、骨の自己修復に必要な、その後の形状変化による応力であったものと伺える。力学的に骨への刺激が大きく、骨の自己修復が促進された結果であると考えられる。

一方、大腿骨では、図22と図23の(a)Slice No.5および(b)Slice No.6より直後、術6週間後と同様に骨頭部では応力の集中は見られなかった。その反面、大腿骨頸部に応力が見られた。その他の大腿骨スライス片に、ほぼ共通して大腿骨頸部を中心とした圧縮応力の集中が顕著に見られた。術直後と比較して応力分布に違いがあるが、応力値はあまり変わらないため大腿骨への影響は少ないものと考えられる。

特に大腿骨では術直後、術6週間後および健常大腿骨の骨頭部に共通して、無応力状態を示す零次しま特異点の確認された。よって、変形の恐れの可能性が少なく、このことから力学的に股関節が安定であることが考えられる。また、医学整形外科分野では、将来的にも大腿骨頭部が変形しないよう注意を払い、治療を行うとの治療指針がある⁽²⁾。

したがって、術直後、術6週間後および健常大腿骨の骨頭部と同寛骨臼蓋内部で安定した応力状態であり、医学分野治療指針とが一致しているため、このSalter法は力学的に良好な手術であるといえる。

7. 結 言

本研究では、先天性股関節脱臼症および先天性股脱遺残性亜脱臼症の治療に当たり、骨盤骨切り術Salter法を取上げた。術直後、術6週間後および健常股関節の応力状態について、三次元応力凍結法を用いて解析した。この結果、次の知見が得られた。

(1) 術後の臼蓋内部の応力状態は、一定であり安定していることがわかった。

(2) 術後の大腿骨骨頭部では、無応力状態であり変形する可能性が少ない。

(3) 骨盤骨切り術Salter法は、股関節内の応力状態は安定しており、力学的に良好な術式であるもの

と考えられる。

文 献

- (1) 伊藤鉄夫, 股関節整形科学, (1976), 111-145, 金芳堂.
- (2) 寺山和雄・ほか1名, 標準整形外科学第6版, (1996), 462-477, 医学書院.
- (3) Pemberton, P. A., Pericapsular Osteotomy of the Ilium for Treatment of Congenital Subluxation and Dislocation of the Hip, *J. Bone Joint Surgery*, **47-1, A** (1965), 65-86.
- (4) 蜂谷将史・藤井英世・山田勝久, 先天性股脱遺残性亜脱臼に対するSalter法・Pemberton法, 関節外科, **18-2** (1999), 109-115.
- (5) 寺山和雄・片山治, 整形外科アプローチ股関節の痛み, (1998), 23-113, 南江堂.
- (6) 山田順亮, これだけは知っておきたい先天性股関節脱臼診療ポイント, (2002), 71-90, 金原出版.
- (7) 但野茂・鶴岡隆好・落合宏・佐々木剛宏, 正常大腿骨と人工股関節の三次元応力解析, 機論, **60-569, A** (1994), 278-284.
- (8) 片山博生・平井恒夫・井上望・山本英毅, 海綿骨の最適構造解析による人工関節の力学的適合性評価のための定式化, 機論, **60-575, A** (1994), 1706-1712.
- (9) 白崎芳夫・立石哲也・草場敦, 人工関節のバイオメカニクス研究, 機論, **63-610, A** (1997), 1256-1259.
- (10) 但野茂, 人工関節置換大腿骨と前方固定脊椎の三次元リモデリングシミュレーション, 機論, **64-622, A** (1998), 1744-1751.
- (11) 宮本進・水口義久・平野彰一, 成長ひずみによる人工股関節ステムの形状最適化, 機論, **65-629, A** (1999), 180-186.
- (12) 蜂谷将史・浦島庄三・井上博昭・高橋賞, セメントレスPCA人工股関節のカップ設置角における臼蓋部の応力に関する研究, 関東学院大学工学総合研究所報第22号, (1997), 25-30.
- (13) 伊丹康人, 股関節の病気のすべて, (1988), 120-141, 日本股関節研究振興財団.
- (14) 石田勝正・ほか4名, Salter法骨盤骨切り術の経験と考察, 整形外科, **23-8** (1972), 651-663.
- (15) 山田勝久, 先天性股脱臼血整復の適応と問題点, 臨床整形外科, **8-2** (1973), 119-137.
- (16) 藤井英世・蜂谷将史・山田勝久・ほか2名, 遺残性亜脱臼に対するSalter法骨盤骨切り術の長期成績, 整形外科, **50-7** (1999), 689-693.
- (17) 石田勝正・ほか3名, 骨盤骨切り術の最新の手技, 整形外科, **33-11** (1982), 1317-1322.
- (18) 石田勝正・ほか3名, Salter, Pemberton手術例の追跡調査その1, 整形外科, **28-6** (1977), 461-467.
- (19) 泉田重雄, 先天性股脱における減捻骨切り術, 臨床整形外科, **8-2** (1973), 148-153.
- (20) 高橋賞・ほか13名, フォトメカニクス, (1997), 8-15, 山海堂.
- (21) 高橋賞・大道寺達, 光弾性法による応力解析の理論と実例(4), 例えば, 内燃機関, **25-5** (1986), 73-81.
- (22) 辻二郎・西田正孝・河田幸三, 光弾性実験法, (1965), 109-115, 日刊工業新聞社.
- (23) 前崎信孝・江角務・梅崎栄作・高橋賞・蜂谷将史, 日本機械学会山梨講演会講演論文集, (2002-10), 233-234.