

頰椎後方除圧術の 各術式における力学的検討

氏名 橋口 彰

所属 山口大学大学院医学系研究科

システム統御医学系専攻 整形外科学分野

平成 29 年 10 月

目次

| | | |
|----|--------|----|
| 1. | 要旨 | 1 |
| 2. | 研究の背景 | 3 |
| 3. | 目的 | 4 |
| 4. | 方法 | 5 |
| 5. | 結果 | 8 |
| 6. | 考察 | 9 |
| 7. | 結論 | 13 |
| 8. | 図・図説明文 | 14 |
| 9. | 参考文献 | 21 |

1 要旨

2 〔要旨〕

3 【目的】 頸髄症は頸椎の加齢による変化に動的因子が加わり、手指巧緻運動障害、
4 歩行障害をきたす疾患である。多椎間除圧が必要な症例では頸椎後方除圧術が選択さ
5 れ良好な成績が報告されているが、各術式を力学的に検証した報告はない。

6 【方法】 生後10ヵ月の家兎5羽の第3～5頸椎を用いて、第2頸椎下半分から第6
7 頸椎上半分を摘出した。第2頸椎を固定器に固定し、第6椎体尾側を固定器に固定し
8 た。固定器に2.5°、5° および7.5° と回転変位を与え、各々の変位角に対す
9 る負荷トルクを計測した。家兎頸椎CTを撮影し、第3—5椎体の2椎間を抽出した。
10 そのCT各スライスにおいて皮質骨の外縁と海綿骨の外縁のポイントを取り、有限要
11 素法ソフト ANSYS に入力し、有限要素法頸椎モデルを作成した。術前モデル、椎弓切
12 除モデル、Z-Plasty 椎弓形成モデル、French open door 椎弓形成モデル、open door
13 椎弓形成モデル、en bloc 椎弓形成モデルを作成し、前述した負荷トルクを与え、モ
14 デルがどの程度変位するかを調べた。【結果】 In Vitro の実験から、2.5°、5°
15 および7.5° と回転変位を与えるには、各々0.02289 ニュートンモーメント(Nm)、
16 0.057552Nm, 0.099408Nm必要であった。この荷重を有限要素モデルに下縁プレー
17 トに与えた。同様の荷重を与えた場合、椎弓切除モデルは術前モデルよりも変位角度
18 が大きかった。術前モデルと Z-Plasty モデルではほぼ同様の変位を認めた。 French

- 1 open door 椎弓形成モデル、open door 椎弓形成モデル、en bloc 椎弓形成モデル及
- 2 び椎弓形成モデルは術前モデルよりも変位角度が小さい傾向にあった。【考察】各々
- 3 の術式間には制動性などに特徴があり、各術式の力学的特性は症例に応じた術式選択
- 4 の際に参考になる可能性が示唆された。

1 【研究の背景】

2 頸椎症性脊髄症 (Cervical Spondylosis Myelopathy; CSM) および頸椎後縦靱帯骨
3 化症 (Cervical ossification of Posterior longitudinal ligament ; C-OPLL) の
4 患者において、多椎間の脊髄除圧を必要とする場合椎弓形成術、椎弓切除術および後
5 方除圧固定術を選択することが多い。1970 年以來、さまざまな椎弓形成術の術式が
6 開発、報告、発展し、安定した術後成績が得られている¹⁻⁵。頸椎椎弓形成術は大きく
7 正中縦割式と片開き式に大別される。椎弓形成術は、椎弓切除術よりも力学的におよ
8 び臨床的に優れていると報告されているが^{6, 7}、椎弓形成術は各術式とも長期成績は
9 安定しており、一般的には術式間に大差はないとされている。⁸⁻¹³

10 一方で、臨床的に頸椎椎弓形成術の異なる術式間の椎間可動域や不安定性に差があ
11 るとする論文も見られる^{14, 15}。しかし、同一施設で別々の椎弓形成術を比較した論文
12 は少なく、コンセンサスは得られていない^{16, 17}。また、頸椎の異なる後方除圧術の術
13 式間の力学的特徴を検証した報告は少ない¹⁸。

14

15

1 【目的】

2 実際の臨床において同一の条件下の頸椎に複数の術式を施行することは不可能で
3 あり、各術式の力学的特性を検証することは困難である。また、そのような報告もな
4 い。本研究では、頸椎から有限要素法3次元頸椎モデルを作成し、その後頸椎術前モ
5 デル、頸椎椎弓切除術および複数の頸椎椎弓形成術モデルを作成し、各術式間の力学
6 的特性を検証した。

7

1 【方法】

2 In vitro

3 生後10ヵ月の家兎5羽の第3～5頸椎を用いて行った。第2頸椎下半分から
4 第6頸椎上半分を摘出し、椎体を含む骨、椎間板、前縦靭帯、後縦靭帯、黄色靭帯、
5 関節包、棘間靭帯のみとした。次のC2, C3椎体上半分を固定器に固定し、C5
6 とC6椎体下半分を固定器に固定した。

7 C5, 6を固定している固定器に2.5°、5°および7.5°と椎体を背側及び
8 頭側方向に回転変位を与え、各々の変位角に対する負荷トルクを計測した。アクチ
9 ュエーター（安川電機）と小型トルク変換器（共和電業製）を用い、その変位角に必
10 要な荷重を測定した。

11 その後、家兎頸椎CTを撮影し、C3～C5椎体の2椎間を抽出した。そのCT
12 各スライスにおいて皮質骨の外縁と海綿骨の外縁のポイントを取り、椎体前縁頂点を
13 (0, 0)として、X, Y座標データをマッピングした。C5椎体下縁をZ軸の0
14 として、座標を構築した。このデータをANSYS (Southpointe275 Technology Drive
15 USA)に入力し、C3椎体中央からC5椎体中央のモデルを作成した(図1)。これを
16 術前モデルとした。

17 その後椎弓切除モデル、Z-Plasty椎弓形成モデル、French open door椎弓形成モ
18 デル、open door椎弓形成モデル、en bloc椎弓形成モデル、Double door椎弓形成

1 モデルを作成した (図 2)。

2 各術式について述べる。Z-Plasty 椎弓形成は椎弓を薄く削り、椎弓を Z 状に切離し、
3 後方に持ち上げて椎弓同士を結紮する (時間短縮のため、椎弓の片方を切離し開大す
4 る椎弓もある)。

5 French open door 椎弓形成は、椎弓を縦割し、糸で椎弓を観音開きで開大固定する
6 ものである。

7 open door 椎弓形成は椎弓群を一侧では完全切離、他側では flexible となるまで
8 にとどめ、開大固定する。

9 En Bloc 椎弓形成は椎弓群を任意の脊柱管拡大位に維持するため、切離・浮
10 上した椎弓と関節突起部に骨片を挿入する。Double door 椎弓形成モデルは棘突起を
11 縦割した後、開大した棘突起間に棘突起スペーサーを置いて締結開大固定する¹⁵⁾。

12 また、椎弓形成モデルのうち、French open door 椎弓形成モデルでは、椎弓を開く
13 角度を 10、20、30 及び 40° に変化させたモデルを作成した (図 3)。

14 モデルの作成方法は椎弓切除モデルをまず作成し、各々のモデルの椎弓を椎弓切除
15 モデルに取り付ける方法をとった。椎弓形成モデルの椎弓と椎間関節内側の間は癒
16 合していると想定し、固定されているものとした。ヒンジの厚さは、骨癒合をしたと
17 想定して、開大した椎弓と同じ厚さにした。厚さは Z-Plasty 椎弓形成のみ椎
18 弓の厚さを半分にしたが、他の術式では椎弓は削らないため差はないように設定した。

1 正常モデルのメッシュモデルの総要素数は 29925 で、皮質骨、海面骨、終板、線維
2 輪基質、髓核および関節軟骨を 8 節点で拘束され完全に一体となる設定とした。メッ
3 シュモデルを誤差が出ないように、左右対称にメッシュを作成した。また、靭帯を 2
4 節点の cable element、椎間関節を contact element とした。材料定数は過去の文献
5 を参考にした^{19, 20}。

6

7 有限要素法 回轉變位モデル

8 椎体の上縁と下縁に面全体が回転設定できるように、プレートを設置した。プレー
9 トと椎体は拘束されているものとし、プレートと椎体の摩擦係数が影響を及ぼさない
10 ようにした。その後、C 5 椎体側に設置したプレートに荷重を与えた (図 4)。下
11 端のプレートに In vitro で計測した 2. 5°、5° および 7. 5° 背側及び頭側に
12 回轉變位に必要であった荷重を与え、そのプレートの座標の変位を計測し、プレート
13 の回転角を求めた。

14

15

1 【結果】

2 In Vitroの実験から、 2.5° 、 5° および 7.5° と回転変位を与え
3 るには、各々0.02289 ニュートンモーメント (Nm)、0.057552Nm, 0.099408Nm必
4 要であった。

5 有限要素法モデル

6 この荷重を有限要素モデルに下縁プレートに与えた (図3)。同様の荷重を与えた
7 場合、椎弓切除モデルは術前モデルよりも変位角度が大きかった。術前モデルと
8 Z-Plasty モデルではほぼ同様の変位を認めた。 French open door 椎弓形成モデル、
9 open door 椎弓形成モデル、en bloc 椎弓形成モデル及び Double door 椎弓形成モデ
10 ルは術前モデルよりも変位角度が小さかった。また en bloc 椎弓形成モデル及び
11 Double door 椎弓形成モデルは、変位角度は術前モデルや他3つのモデルに比べて小
12 さかった (図5)。

13 French open door 椎弓形成モデルでは、椎弓を開く角度を10、20、30及び 40° に
14 変化させたモデルに荷重を与えると、開大角度が増すにつれ変位角度が減少する傾向
15 にあった (図6)。

16

17

1 【考察】

2 CSM や OPLL に対する頸椎手術における力学的特性に関する検討は過去複数な
3 れ、後方除圧術は重要な役割を示してきた⁹⁻¹³。前方の圧迫因子が大きい場合には、
4 除圧効果に限界があることは報告されているが、多くの症例に対して使用され、良好
5 な成績を収めている²¹⁻²⁵。田口らは Z-plasty 椎弓形成術の良好な成績を報告してい
6 る⁹。Open door 椎弓形成術では、Satomi ら、Ogawa ら、Chiba らが安定した成績を報
7 告している¹⁰⁻¹²。Chiba らは術後の椎間の制動性に関しても報告した。Nakashima ら
8 は french open door 椎弓形成術が成績良好であることを報告した。Seichi らは
9 double door 椎弓形成術後に椎間可動性が 36° から 8° に減少したと報告した¹³。こ
10 れらをまとめると椎弓形成術は臨床的にも力学的にも優れた術式であると考えられ
11 る。しかし、これら各術式の応力解析を行った報告は少ない。

12 また、頸椎術後の動的因子に関して多くのバイオメカニクスの研究が報告されてい
13 る。Saito らは2次元の有限要素法モデルを使用し、椎弓切除モデルに関する検討を
14 行い、後方成分の靭帯（黄色靭帯、棘上/棘間靭帯）の切除によりその負荷は椎間関
15 節に移動し、椎体に負荷が生じやすくなるとした²⁶。Voo らは椎間関節切除モデルの
16 解析を行い、anulus にかかる負荷が増すことを報告した²⁷。Toh らは家兎頸椎を用い、
17 筋肉が dynamic stabilizer として頸椎全体のアライメントを保持する役割があると
18 している。一方で、黄色靭帯が隣接椎間の椎弓同士を結合し、static stabilizer と

1 して椎間の安定性に寄与しているとしている²⁸。Zdeblickらは関節包切除実験におい
2 て、50%以上の関節包切除で椎間不安定性が増加することを報告した²⁹。これらは椎
3 間安定性における後方要素の重要性を示唆している。

4 このように頸椎のバイオメカニクスの研究は多数なされており、手術の内容により
5 力学的な変化があることは報告されている。椎弓形成術が椎弓切除術に比較して椎間
6 の制動性に優れていることは概ねコンセンサスが得られている^{6, 7, 14, 15, 30, 31}。しか
7 し、椎弓形成術の術式間の力学的検討を行った論文は少ない^{19, 32}。

8 さらに有限要素法を用いて正常モデル、椎弓形成モデル、椎弓切除モデルの解析を
9 行い、その力学的特性を検証した報告はなく、本研究が最初である。

10 Ratliffらは頸椎椎弓形成術に関するReviewでopen door椎弓形成術で46%、
11 double door椎弓形成術で50%の可動域の減少を認めるとし、今回の解析結果である
12 double door椎弓形成術の方が制動されるという結果を支持していた¹⁴。また、田口
13 らは椎弓切除とZ Plasty椎弓形成を比較し、Z Plasty椎弓形成が椎弓切除に比べ
14 優位に制動性が高いと報告し、今回の解析結果と一致していた⁹。林らはopen door
15 椎弓形成術に対してdouble door椎弓形成術の方が制動性が高いと報告し、今回の解
16 析結果を支持していた。林らの論文でopen door椎弓形成モデル（術前平均38°、術
17 後平均20°で、可動域の平均の差は18°）とdouble door椎弓形成モデル間（術前
18 平均39°、術後平均15°で、可動域の平均の差は24°）の術後可動域の差を見ると、

1 C2-7 間で平均 6 度の差を認めた。今回の我々の有限要素法の結果では 0.099408Nm で
2 差は 0.36° 程度であったが、これは 2 椎間のみの解析とヒトより小さいウサギのモデ
3 ルであったためと考えており、椎間を増やし、モデルのサイズを修正するなどすれば
4 より差が大きくなると考えられた。

5 しかしながら、これらは臨床研究であり、同じモデルを検討していない。Kode らは
6 human cadaveric specimens を使用して、正常モデル (術前モデル)、椎弓切除モデル、
7 椎弓形成モデル (open door 椎弓形成だが文献を読むと en-bloc 椎弓形成に近
8 い) を使用して、2Nm の力を加え、動きに有意差があるかを検証した³³。この結果
9 では、椎弓切除と正常 (術前モデル) とは有意差があるが、椎弓形成モデルと術前モ
10 デルでは、有意差がないとしている。 今回の結果で、2Nm の 1000 分の 1 の力である
11 0.002289Nm の条件で見ると、術前モデルと椎弓切除モデルの角度の差は 0.42° であ
12 り、術前モデルと en-bloc 椎弓形成モデルの角度の差は 0.23° であった。この 0.23
13 -0.42 の間に有意差があると考えた。0.057552Nm 及び 0.0099408Nm での各術式の差
14 を見ると、open door 椎弓形成と French door 椎弓形成は術前や Z-plasty よりも安定
15 する傾向があるが、術前モデルと Z-plasty、open door 椎弓形成、French door 椎弓
16 形成はほぼ同等の力学的特徴があると考えられた。

17 また en bloc 椎弓形成と double door 椎弓形成は、open door 椎弓形成と French door
18 椎弓形成よりも安定する傾向があり、術前モデルと Z-plasty 椎弓形成より有意差を

1 もって安定する可能性が示唆された。

2 この研究の限界点としては、2椎間しか検討していない、頸椎全体の前弯や後弯の
3 アライメントを考慮していない、椎弓形成した椎弓や人工骨移植部が周囲の骨成分と
4 癒合していると想定している、他の軟部組織の影響を受けていない点である。また、
5 年齢による骨強度・椎間板の変性を考慮していない。さらに計算を容易にするため、
6 左右対称にメッシュを作成している点にある。また、術後癒合したと想定した時期の
7 解析であり、長期間経過した解析ができない点である。また、あくまでコンピュータ
8 シミュレーションであり、統計的な有意差などは述べるできない点にある。

9 今回の解析において、椎弓形成モデルは術前モデルより同荷重を与えられた際変位
10 が少なかった。さらに椎弓形成モデルは術前モデルや椎弓切除モデルよりも制動性に
11 優れていた。椎弓形成術は椎弓、黄色靭帯が後方へ移動する。そのため、椎弓形成術
12 は椎間の回転中心から椎弓・黄色靭帯の距離が大きくなり、椎間の制動性が高くなる。
13 同様に、椎弓の開大角度が増すと椎弓・黄色靭帯の後方への距離が大きくなるため角
14 度により安定性が増したと考えられた。各々の椎弓形成術、及び開大角度の差で、各
15 術式は力学的な特徴を持っていることがわかった。椎弓形成術を使用する場合、各術
16 式により特徴があるため、症例に応じた術式を検討すべきである。

17

1 【結論】

2 有限要素法を用いて、2椎間の頸椎椎弓切除、術前、各種 椎弓形成術モデルを作
3 成し、力学的検討を行った。 各々の術式間や同様の手術でも開大角度により制動性
4 などに特徴があり、各術式の力学的特性は症例に応じた術式選択の際に参考になる可
5 能性が示唆された。

6

7 【謝辞】

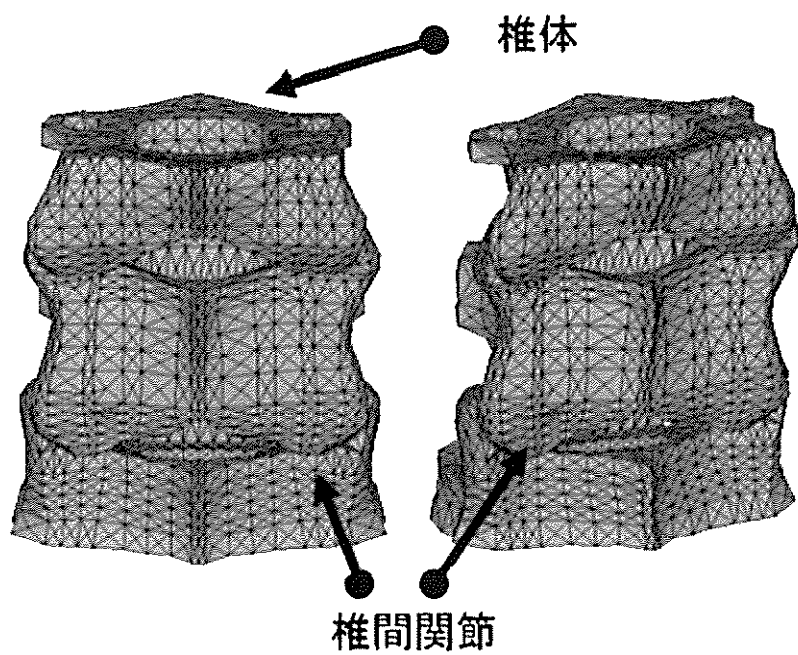
8 今回の研究にご協力頂いた、宇部短期大学環境衛生科学科 柗 軍先生に厚く御礼
9 申し上げます。

10

1 図・図説明文

2 図. 1. 第3頸椎-5頸椎有限要素法モデル。

3



4

5

6

7

8

9

10

11

1 図2 モデルを作成した。: A; 椎弓切除モデル (laminectomy model) , B; Z-plasty
2 model, C; open door 椎弓形成モデル, D; French open door 椎弓形成モデル, E; an
3 en-bloc 椎弓形成モデル F; double door 椎弓形成モデル.

4 A; laminectomy

B; Z-plasty

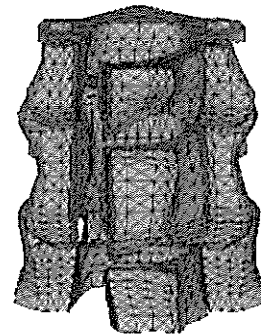
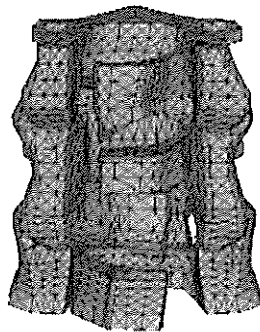
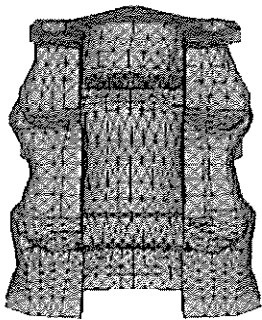
C; open door

5

6

7

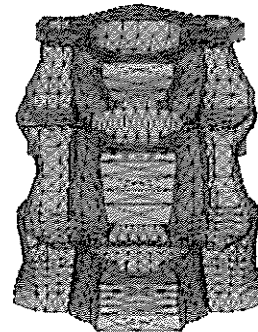
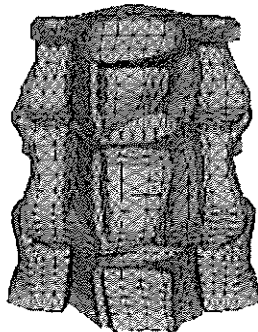
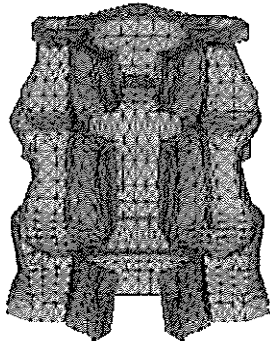
8



D; French door

E; en bloc

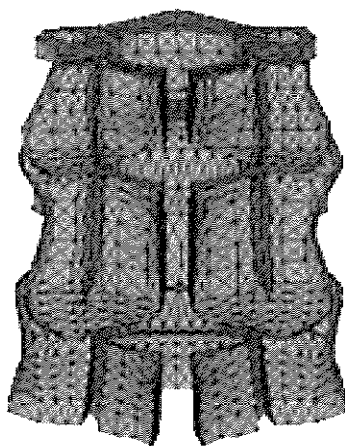
F; double door



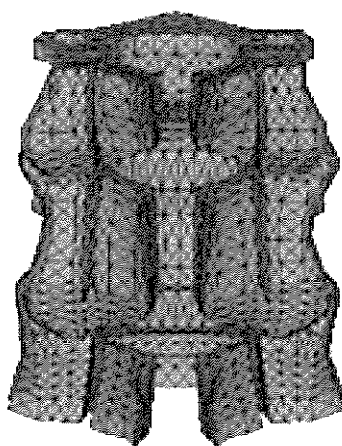
- 1 図3. モデルを作成した。French open door 椎弓形成モデルで後方の開大角度を 10° 、
- 2 20° 、 30° 、 40° のモデルを作成した。

French door

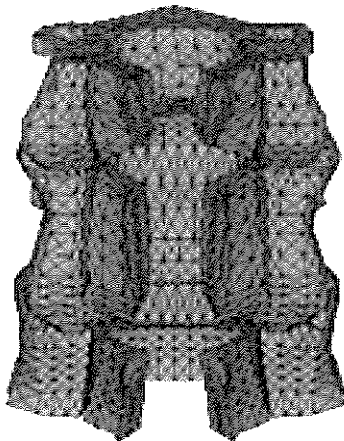
10°



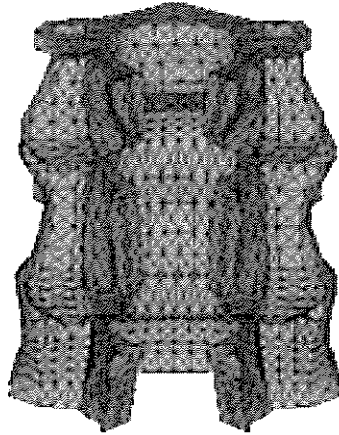
20°



30°



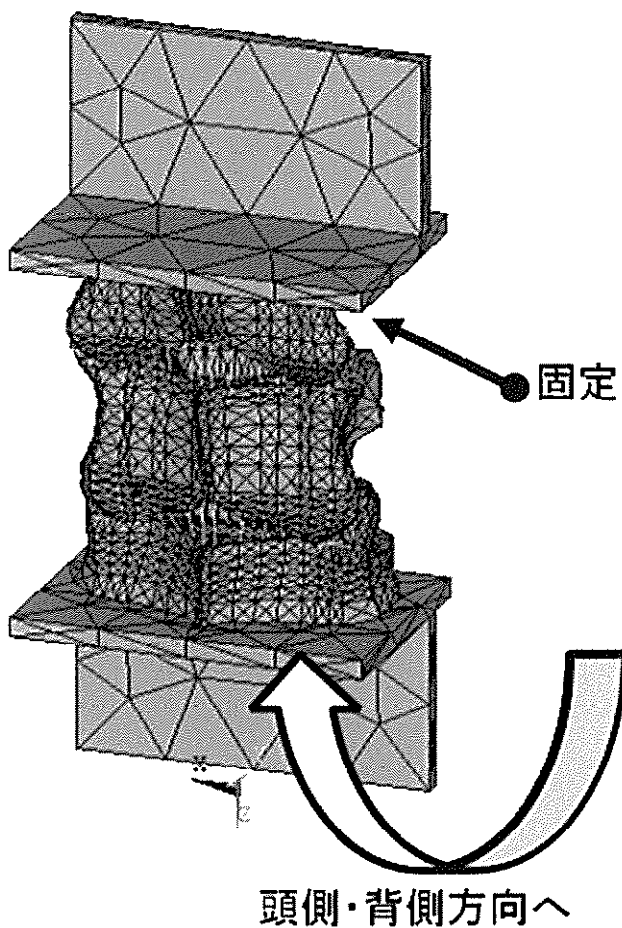
40°



3

4

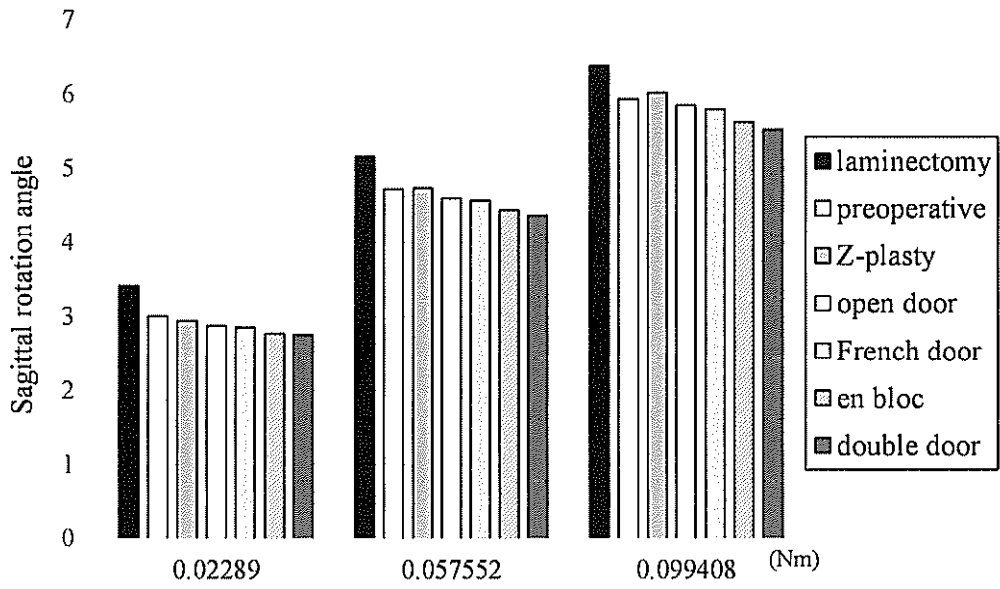
- 1 図4. 椎体の上縁と下縁に面全体が回転設定できるように、プレートを設置した。プ
- 2 レートと椎体は拘束されているものとし、プレートと椎体の摩擦係数が影響を及ぼさ
- 3 ないようにした。その後、C5椎体側に設置したプレートに2.5°、5° および
- 4 7.5° 回転変位に必要であった荷重を与え、そのプレートの(X, Y, Z)座標の
- 5 変異を計測し、プレートの回転角を求めた。



6
7
8
9

1 図5. 7.5° 変位 (sagittal rotation) させるのに必要な力は 0.02289 Newton meter
2 (Nm), 0.057552 Nm, および 0.099408 Nm であった。その同じ力を各有限要素法モデ
3 ルに加えた。French open door 椎弓形成モデル、open door 椎弓形成モデル、en bloc
4 椎弓形成モデル及び Double door 椎弓形成モデルは術前モデルよりも変位角度が小さ
5 かった。また en bloc 椎弓形成モデル及び Double door 椎弓形成モデルは、変位角度
6 は術前モデルや他 3 つのモデルに比べて小さかった。

A



B

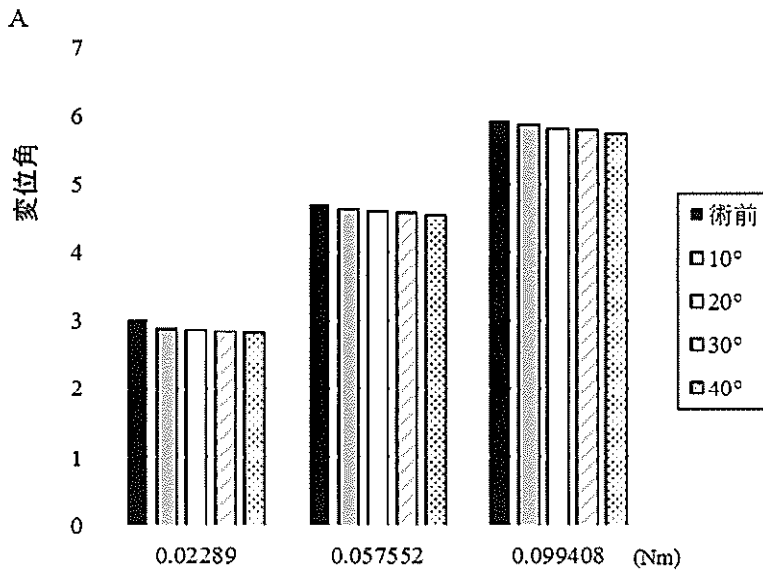
| | 0.02289(Nm) | 0.057552(Nm) | 0.099408(Nm) |
|--------------|-------------|--------------|--------------|
| laminectomy | 3.43 | 5.17 | 6.39 |
| preoperative | 3.01 | 4.72 | 5.94 |
| Z-plasty | 2.95 | 4.74 | 6.03 |
| open door | 2.88 | 4.6 | 5.86 |
| French door | 2.86 | 4.57 | 5.8 |
| en bloc | 2.78 | 4.44 | 5.62 |
| double door | 2.76 | 4.37 | 5.52 |

1

2

3

- 1 図6. French Door 椎弓形成術では差は小さいものの、開大角度が増加するにつれ変
- 2 位角は小さくなり、より制動性が増した。



B

| | 0.02289 | 0.057552 | 0.099408 |
|-----|---------|----------|----------|
| 術前 | 3.02 | 4.72 | 5.94 |
| 10° | 2.89 | 4.63 | 5.89 |
| 20° | 2.87 | 4.59 | 5.83 |
| 30° | 2.86 | 4.57 | 5.8 |
| 40° | 2.84 | 4.54 | 5.75 |

3

4

1 参考文献

- 2 1. Kawai S, Sunago K, Doi K, Saika M, Taguchi T. Cervical lamioplasty (Hattori' s
3 method) procedure and follow-up results. Spine 1998;13: 1245-50.
- 4 2. Kurokawa T, Tsuyama N, Tanaka H. Double door laminoplasty. Bessatsu Seikei
5 Geka 1982; 2: 234-40.
- 6 3. Miyazaki K, Kirita Y. Extensive simultaneous multisegment laminectomy for
7 myelopathy due to the ossification of the posterior longitudinal ligament
8 in the cervical region. Spine 1986;11(6) : 531-42.
- 9 4. Hirabayashi K, Watanabe K, Wakano K, Suzuki N, Satomi K, Ishii Y. Expansive
10 open-door laminoplasty for cervical spinal stenotic myelopathy. Spine. 1983;
11 8 (7) : 693-9
- 12 5. Itoh T, Tsuji H. Technical improvements and results of laminoplasty for
13 compressive myelopathy in the cervical spine. Spine. 1985; 10 (8) : 729-36.
- 14 6. Fields MJ, Hoshijima K, Feng AH, Richardson WJ, Myers BS. A biomechanical,
15 radiologic, and clinical comparison of outcome after multilevel cervical
16 laminectomy or laminoplasty in the rabbit. Spine. 2000; 25 (22) : 2925-31.
- 17 7. Nowinski GP, Visarius H, Nolte LP, Herkowitz HN. A biomechanical comparison
18 of cervical laminoplasty and cervical laminectomy with progressive

- 1 facetectomy. Spine. 1993; 18 (14) : 1995-2004.
- 2 8. Okada M, Minamide A, Endo T, Yoshida M, Kawakami M, Ando M, et al. A
3 prospective randomized study of clinical outcomes in patients with cervical
4 compressive myelopathy treated with open-door or French-door laminoplasty.
5 Spine. 2009; 34 (11) : 1119-26.
- 6 9. Taguchi T. New MOOK of Orthopaedic. 1st ed. Tokyo (Japan) : Kanehara Co; 1999.
7 Chapter 12 (2), Long term results of surgical procedures of Cervical
8 spondylosis myelopahty; p. 198-204.
- 9 10. Satomi K, Nishu Y, Kohno T, Hirabayashi K. Long-term follow-up studies of
10 open-door expansive laminoplasty for cervical stenotic myelopathy. Spine
11 1994; 19 (5) :507-10.
- 12 11. Ogawa Y, Chiba K, Matsumoto M, Nakamura M, Takaishi H, Toyama Y. Postoperative
13 factors affecting neurological recovery after surgery for cervical
14 spondylotic myelopathy. J Neurosurg Spine. 2006; 5 (6) : 483-7.
- 15 12. Chiba K, Ogawa Y, Ishii K, Takaishi H, Nakamura M, Maruiwa H, et al. Long-term
16 results of expansive open-door laminoplasty for cervical
17 myelopathy--average 14-year follow-up study. Spine. 2006; 31 (26) :
18 2998-3005.

- 1 13. Seichi A, Takeshita K, Ohishi I, Kawaguchi H, Akune T, Anamizu Y, et al.
2 Long-term results of double-door laminoplasty for cervical stenotic
3 myelopathy. *Spine* 2001; 26 (5) : 479-87.
- 4 14. Ratliff JK, Cooper PR. Cervical laminoplasty: a critical review. *J Neurosurg.*
5 2003. 98 (3 Suppl) :230-8.
- 6 15. Heller JG, Raich AL, Dettori JR, Riew KD. Comparative effectiveness of
7 different types of cervical laminoplasty. *Evid Based Spine Care J.* 2013.
8 4 (2) :105-15.
- 9 16. Nakashima H, Kato F, Yukawa Y, Imagama S, Ito K, Machino M, et al. Comparative
10 effectiveness of open-door laminoplasty versus French-door laminoplasty in
11 cervical compressive myelopathy. *Spine.* 2014; 39 (8) : 642-7
- 12 17. Hayashi K, Yone K, Matsunaga S, Abematsu M, Kamizono J, Haruta K, et al. A
13 comparative study of open-door laminoplasty and french-window laminoplasty
14 for treatment of cervical multisegmental spondylotic myelopathy. *Seikeigeka*
15 *to Saigaigeka.* 2002; 51 (2) : 312-4.
- 16 18. Puttlitz CM, Deviren V, Smith JA, Kleomstueck FS, Tran QN, Thurlow RW, et
17 al. Biomechanics of cervical laminoplasty: kinetic studies comparing
18 different surgical techniques, temporal effects and the degree of level

- 1 involvement. *Eur Spine J.* 2004; 13 (3) : 213-21.
- 2 19. Goel VK, Clausen JD. Prediction of load sharing among spinal components of
3 a C5-C6 motion segment using the finite element approach. *Spine.* 1998; 23 (6) :
4 684-91.
- 5 20. Yang K, Hu J, White NA, King AI, Chou CC, Prasad P. Development of numerical
6 models for injury biomechanics research: a review of 50 years of publications
7 in the Stapp Car Crash Conference. *Stapp Car Crash Journal.* 2006; 50: 429-90.
- 8 21. Tani T, Ushida T, Ishida K, Irai H, Noguchi T, Yamamoto H. Relative safety
9 of anterior microsurgical decompression versus laminoplasty for cervical
10 myelopathy with a massive ossified posterior longitudinal ligament. *Spine.*
11 2002; 27 (22) : 2491-8.
- 12 22. Taniyama T, Hirai T, Yamada T, Yuasa M, Enomoto M, Yoshii T, et al. Modified
13 K-line in magnetic resonance imaging predicts insufficient decompression of
14 cervical laminoplasty. *Spine.* 2013; 38 (6) : 496-501.
- 15 23. Iwasaki M, Okuda S, Miyauchi A, Sakaura H, Mukai Y, Yonenobu K, et al..
16 Surgical strategy for cervical myelopathy due to ossification of the
17 posterior longitudinal ligament: Part 2: Advantages of anterior
18 decompression and fusion over laminoplasty. *Spine.* 2007; 32 (6) : 654-60.

- 1 24. Seichi A, Chikuda H, Kimura A, Takeshita K, Sugita S, Hoshino Y, et al.
2 Intraoperative ultrasonographic evaluation of posterior decompression via
3 laminoplasty in patients with cervical ossification of the posterior
4 longitudinal ligament: correlation with 2-year follow-up results. J
5 Neurosurg Spine. 2010; 13(1): 47-51.
- 6 25. Yamazaki A, Homma T, Uchiyama S, Katsumi Y, Okumura H. Morphologic
7 limitations of posterior decompression by midsagittal splitting method for
8 myelopathy caused by ossification of the posterior longitudinal ligament in
9 the cervical spine. Spine. 1999; 24(1): 32-4.
- 10 26. Saito T, Yamamuro T, Shikata J, Oka M, Tsutsumi S. Analysis and prevention
11 of spinal column deformity following cervical laminectomy. I. Pathogenetic
12 analysis of postlaminectomy deformities. Spine. 1991;16(5): 494-502.
- 13 27. Voo LM, Kumaresan S, Yoganandan N, Pintar FA, Cusick JF. Finite element
14 analysis of cervical facetectomy. Spine. 1997; 22(9): 964-69.
- 15 28. Toh S, Kawai S, Saika M, Taguchi T, Tominaga S, Yamagata S, et al. An
16 experimental study on role of the posterior structure of cervical spine.
17 Yamaguchi-Igaku. 1992; 41: 77-86.
- 18 29. Zdeblick TA, Abitbol JJ, Kunz DN, McCabe RP, Garfin S. Cervical stability

- 1 after sequential capsule resection. Spine 1993; 18 (14) : 2005-8
- 2 30. Baisden J, Voo LM, Cusick JF, Pintar FA, Yoganandan N. Evaluation of cervical
3 laminectomy and laminoplasty. A longitudinal study in the goat model. Spine.
4 1999; 24 (13) : 1283-8.
- 5 31. Fields MJ, Hoshijima K, Feng AH, Richardson WJ, Myers BS. A biomechanical,
6 radiologic, and clinical comparison of outcome after multilevel cervical
7 laminectomy or laminoplasty in the rabbit. Spine. 2000; 25 (22) : 2925-31.
- 8 32. Kode S, Gandhi AA, Fredericks DC, grosland NM, Smucker JD. Effect of
9 multilevel open-door laminoplasty and laminectomy on flexibility of the
10 cervical spine: an experimental investigation. Spine. 2012; 37 (19) :
11 E1165-70.

12