

①

頸椎後縦靱帯骨化症の頸椎周囲の

応力に関する生体力学的研究

Biomechanical Evaluation Around the
Cervical Spine in Patients with
Ossification of the Posterior
Longitudinal Ligament

大竹進

Susumu Otake

弘前大学医学部整形外科学教室

(主任 原田征行教授)

Department of Orthopedic Surgery,
Hirosaki University, School of Medicine
(Director: Prof. S. Harata),
Hirosaki, Japan

本文 27枚

表 4枚

和文抄録 1枚

図 19枚

英文抄録 1枚

Key words:

Biomechanics of cervical spine,

Ossification of the longitudinal
ligament

Rigid body-spring model method

Facet joint inclination in the cervical
spine

Cervical spine ligaments

和文抄録

頸椎後縦靱帯骨化症における生体力学的な検討を行った。

骨化症例の椎間関節は正常例に比較し、有意に水平化していた。

剛体バネモデルにて、頸椎周囲の応力解析を試みた。症例により、また、高位により後縦靱帯の応力値は異なっていた。骨化症例の検討では、後縦靱帯の応力値が正常例より大きい高位に骨化が存在し、骨化症の成因を検討するにあたり、局所的力学的因子の分析が重要と思われた。

頸椎の前縦靱帯、後縦靱帯、黄色靱帯の応力-歪み曲線を求め、縦弾性係数を求めた。

後縦靱帯の浅層と、深層の受け持つ応力について検討した結果、40%と60%であった。

頸椎前方固定モデルでの応力測定で、2椎間下位の後縦靱帯に加えられた荷重が、上位の後縦靱帯に伝達された。

Abstract:

This study was undertaken to investigate the biomechanical evaluation around the cervical spine in patients with ossification of the posterior longitudinal ligament (OPLL).

Facet joint inclination of the cervical spine in the sagittal plane was investigated by observing cervical x-ray films.

In patients with OPLL, the inclination was significantly more horizontal than the control group.

The rigid body-spring model was applied to analyse stress distribution around the cervical spine.

The tensile stress on the ossification level of the cervical posterior longitudinal ligament(PLL) was higher than in the control group. It seems that

OPLL appeared at the level of the pathologically increased load which stimulated the activity of osteoblasts. Length changes in the ligaments of human cervical spines were investigated in order to find the load-deformation curve and the Young's modulus.

The Young's modulus of five cervical PLL ranged from 21.36MPa to 97.02MPa. Those of two anterior longitudinal ligament were 122.5MPa and 103.2MPa and that of one ligamentum flavum was 14.21MPa.

It was also found that 60% of the stress on PLL was taken by the deep layer and 40% by the superficial layer.

目次

I. 緒言

II. 目的

III. 頸椎後縦靱帯骨化症の形態的特徴

— 頸椎椎間傾斜角について —

IV. 剛体バネモデル法による

頸椎周囲の応力解析

V. 頸椎の各脊柱靱帯の力学的特性

VI. 考察

VII. 結語

I. 緒言

股関節、膝関節をはじめいろいろな関節での生体力学的な検討が変形性関節症の病因、病態の解明に大きな成果をあげている¹⁾。脊柱についてもWhite, A.A., Panjabi, M.M.^{2,3)}をはじめとして多くの研究者によって検討されてきた^{2,2)}。しかし、頸椎については、その形態的特徴から、頸椎周囲の応力の解析はむずかしく、多くの生体力学的研究は頸椎不安定性を中心に進められてきた。しかし、頸椎周囲の応力の解析は、頸椎の不安定性はもちろん、術後の頸椎変形発生の原因究明にも重要と思われる。

一方、頸椎後縦靱帯骨化症は月本^{2,6)}が1960年に報告して以来注目され研究が進められていが、その成因を検討するにあたり、靱帯の骨化の過程が、骨組織と同様に、靱帯にかかる応力が増加することによりosteoblastic stimulationを受けるとすれば^{1,7)}、後縦靱帯の応

力の測定および局所的力学的因子の分析が重要と思われる。

II. 目的

1. 頸椎後縦靱帯骨化（以下 O P L L と略す）の存在する高位の形態的異常に注目し、特に X 線写真上の頸椎椎間関節傾斜角と O P L L 発生との関連について検討することを目的にした。

2. 頸椎の後縦靱帯に生じる応力について解析し、正常例と O P L L 例との後縦靱帯の応力の違い、椎弓切除例の応力の変化について検討することを目的にした。

3. 頸椎周囲の応力解析にあたり、頸椎の各脊柱靱帯の縦弾性係数を選定する必要があるため、各脊柱靱帯の応力－歪み曲線を求め、縦弾性係数・ヤング率を選定することを目的に引張り試験を行った。

以下 III. IV. V. について分析検討した。

Ⅲ．頸椎後縦靱帯骨化症の形態的特徴

－ 頸椎椎間関節傾斜角について －

(1) 対象

弘前大学整形外科に 1976 年から脊柱靱帯骨化症として登録されている 344 例のうち、正しい頸椎側面像が得られ、椎間関節が明瞭に撮影されている 79 例を対象にした。

骨化症例は、男性 47 例、女性 32 例で、年齢は、31 才から 78 才、平均 55.7 才であった。

また、国立療養所岩木病院に受診した頸椎捻挫症例のうち骨傷の明かでない症例 45 例、男性 24 例、女性 21 例、年齢は、16 才から 67 才、平均 39.1 才を対照群として、OPLL 症例と比較検討した。

(2) 方法

椎間関節傾斜角の測定法としては、各椎体上縁にひいた線と椎間関節のなす角度を測定した。椎間関節は、上位頸椎では、直線状に撮影されるが、下位頸椎では、円弧状を呈する

ものもあり、この場合は、前屈位で上下の関節が接する部分に対する接線を引き、椎間関節の基準線とした（図1）。

OPLL群はOPLLのある高位と、ない高位に分けて、それぞれの椎間関節傾斜角を測定し、比較検討した。その場合、C2の骨化にはC2／3の椎間関節、C3の骨化には、C3／4の椎間関節というように下位の椎間関節を対応させた。

また、高位別にOPLLのある高位の椎間関節傾斜角と対照群の椎間関節傾斜角を比較し検討した。

（3）結果（表1）

いずれかの高位にOPLLの存在するOPLL群79例中C2にOPLLが存在したのは、41例で、C2／3の椎間関節の傾斜角は、 51.3 ± 1.0 度（平均値 \pm 標準誤差）であった。

また、C2にOPLLのない38例の傾斜角は、 56.5 ± 1.0 度で、OPLLが存在

する症例の傾斜角が有意に小さく椎間関節は水平化していた。同様にC3にOPLLのある症例のC3／4の傾斜角とOPLLのない症例のC3／4の傾斜角、C4とC4／5、C5とC5／6、C6とC6／7の傾斜角については、表1のごとくであった。

OPLL群内において、いずれの高位においても、OPLLがある場合の方が、椎間関節が水平化していた。さらに、統計学的にも、C3／4の傾斜角を除いては、全ての高位で骨化高位の椎間関節傾斜角が有意に水平化していた。

骨化が存在する高位の傾斜角と対照群の同じ高位の傾斜角の比較でも、骨化高位の傾斜角が全ての高位で小さく有意に椎間関節は水平化していた。

IV. 剛体バネモデル法による

頸椎周囲の応力解析

(1) 対象および方法

正常例およびOPLL症例の側面X線写真を用いて、剛体バネモデル法にて頸椎周囲の応力を解析した¹⁵⁾。さらに、椎弓切除モデルの応力についても検討した。

頸椎部の各組織をバネで置き換え(図2)、バネ定数は、各連結体の分割部分の体積値を設定し決めた(表2)。荷重は、頭の重心に体重の0.07倍を下向きに加え²⁾、後縦靱帯が緊張する前屈時の応力について解析したが、1例については、中間位でも応力解析を試みた。

(2) 結果

(2) - 1 正常例の応力計算

正常例では、各組織の縦弾性係数、ポアソン比は、文献を参考に想定し^{3), 11), 18), 21), 24), 29), 30)}(表3)、応力計算を行った。後

縦靱帯の応力値は、各椎間により異なっており、とくにC5/6の後縦靱帯に大きな引っ張り応力が生じていた（図3）。

中間位での応力解析では（図4）、後縦靱帯にはほとんど応力が働いていなかった（図5）。また、後方の各靱帯、椎間板、関節包に加わる応力も前屈位に比較し小さかった。

さらに黄色靱帯、棘上靱帯、棘間靱帯の縦弾性係数が低下すると後縦靱帯に大きな引っ張り応力が生じていた。

（2）-2 椎弓切除例の応力計算

正常例の第4頸椎の椎弓を切除した場合の後縦靱帯の応力について検討した（図2）。

その結果、椎弓切除前に対し、C3/4では、78%、C4/5では94%も後縦靱帯の応力値が増大していた（図6）。

（2）-3 骨化症例の応力計算

対照群に比し有意に椎間関節が水平化している骨化症例につきも応力を解析し検討した。一般に靱帯が骨化していると、ここで受け持

つ応力は大きくなるが、後縦靱帯が骨化していない状態を想定し応力解析を行った。

(2) - 3 - 1 上位連続型骨化症例 (図7)
C3 / 4 の後縦靱帯に大きな応力が働いていた (図8)。この例では、後縦靱帯が骨化する以前より応力の分布が、正常例とは異なっており、また、高い応力値を示した高位に一致して C2 - 4 まで骨化が存在した。

(2) - 3 - 2 連続型骨化症例 (図9)
正常例に比し各レベルで後縦靱帯の応力は大きく、とくに C4 / 5、C6 / 7 高位で著明であった (図10)。この例では、C2 - 6 まで、連続型の骨化が存在した。

(2) - 3 - 3 分節型骨化症例 (図11)
C3 / 4 以下での後縦靱帯の応力値が正常例より大きかった (図12)。この例では、C4, 5, 6 に分節型の骨化が存在していた。

V. 頸椎の各脊柱靱帯の力学的特性

(1) 実験材料

遺体解剖時、病理解剖時に得られた17才から62才の5体の新鮮頸椎、胸椎を用いた。頸椎、胸椎は椎弓根部で切断し脊椎前方部分を一塊として摘出したほか、1例では、後方要素も含めて一塊に摘出した。材料は、-80度で保存し、実験に際しては、ビニール袋内にて常温にて解凍して用いた。

(2) 方法

負荷を測定するのには、日本光電社製一般用引張型ロードセルLT-Fを用い、靱帯の伸びは日本光電社製心収縮力ピックアップTH-612T(変位型)を用いた。ピックアップは靱帯に4-0ナイロン糸にて固定後瞬間接着剤アロニアルファ-を用いて固定した(図14)。それらを、それぞれ接続アンプAP-601Gに接続して、心電計のレコーダーに記録した(図15)。

引っ張り負荷は、徒手的に記録を見ながら行ったが、引っ張り速度は、 0.1 mm/sec 前後であった。

各靱帯について2回測定し、測定した靱帯の断面積は、メスにて切断後方眼紙と一緒に写真撮影し引き延ばした後計測し、各靱帯の応力-歪み曲線を求めた（図16）。

さらに、縦弾性係数の選定にあたり、比例式を成立させるべき範囲の指定、即ち応力値の上限を指定する必要があるが、今回は、 0.98 MPa と設定し、縦弾性係数を求めた。

（3）結果

（3）-1 各脊柱靱帯の縦弾性係数（表4）
頸椎後縦靱帯は5例について応力-歪曲線を求め、 0.98 MPa の応力値から縦弾性係数をもとめた。縦弾性係数は、 21.36 から 97.02 MPa であった。年齢との関連は認められなかった。

頸椎前縦靱帯は、17才と40才の症例で測定し、 122.5 および 103.19 MPa

であった。

頸椎黄色靱帯は、62才の症例で測定し、 14.21 MPa であった。

(3) - 2 頸椎後縦靱帯の浅層と深層の受け持つ応力について

まず、後縦靱帯の応力 - 歪曲線を求め、応力が、 0.98 MPa の負荷は、約 2.0 Kg であった。続いて浅層のみを切離し、 0.98 MPa 負荷時の伸びと同じ伸びの時の負荷を求めた。その結果、浅層を切離した後の深層が受け持った力は、 1.2 Kg であった。

以上より、後縦靱帯の応力が、 0.98 MPa の時、深層は約60%、浅層は約40%の応力を受け持っていると推定された。

(3) - 3 下位脊柱運動が上位後縦靱帯の応力に及ぼす影響について。

- 頸椎前方固定部位の応力についての検討 -
C4からC7まで各椎体を2本の釘にて固定

し、胸椎部の後縦靱帯を引っ張り C 5 / 6 後縦靱帯に加わる応力を測定した (図 1 7) 。

T 8 高位の後縦靱帯を引っ張り C 5 / 6 の後縦靱帯の伸びを測定したが、C 5 / 6 の伸びは観察されなかった。その後、1 レベルずつ後縦靱帯を各椎体から剥離して引っ張り、同様に C 5 / 6 の後縦靱帯の伸びを測定した。

その結果、C 7 / T 1 間まで後縦靱帯を椎体から剥離後後縦靱帯を引っ張ると初めて C 5 / 6 の後縦靱帯の伸びがみられた。

C 5 / 6 の後縦靱帯の 2 Kg に対する伸びを測定し、同様に胸椎部で後縦靱帯を 2 Kg で引っ張った時の伸びを測定し比較した。

C 7 下縁から後縦靱帯を剥離した状態では、C 5 / 6 の後縦靱帯に伝達される応力は、約 4 % であった。同様に C 7 の中間まで剥離した後でも、約 4 % であったが、C 7 の上縁まで剥離後引っ張ると、約 2 5 % の応力が C 5 / 6 の後縦靱帯に加わっていた。

VI. 考察

OPLLの成因を検討するにあたり、全身性骨化因子として、HLAとの関連をはじめ、遺伝学的研究²⁵⁾および、糖代謝異常⁵⁾をはじめ、内分泌、骨代謝に関する研究⁹⁾が進められている。また、同時に、局所的因子として、椎間板変性、局所に加わる外傷^{4), 23)}、椎間関節傾斜角と関連した研究¹⁶⁾も進められている。

1980年、岡田¹⁶⁾は、OPLLの発生原因として、頸椎椎間関節が水平化していること、また、骨化の増大も傾斜の程度と関係していると報告している。今回の計測でも、岡田の報告と同様にOPLL例では、対照群に比較し全ての高位で椎間関節が水平化しており、さらに骨化の高位と対応させた、椎間関節の傾斜角は、さらに水平化していることが、統計学的にも裏づけられた。

頸椎椎間関節傾斜角の求め方については、岡田は、基準線として椎体後縁の線を用いてい

るが、変形性変化があったり、骨化により椎体の後縁、前縁、下縁が不明瞭になることが多いので、今回は、椎体上縁に引いた。

さらに椎間関節は、上位頸椎では、直線状であるが、下位頸椎では、円弧状を呈するものもあり、この場合は、前屈位で上下の関節が接する部分に対する接線を引き、椎間関節の基準線とした。

これは、後縦靱帯は、機能的には、頸椎の前屈時に緊張し、さらに椎間関節は、後屈時には、前方が開大し、後方のみで接することもあるが、前屈時には、上方の関節突起が前方にすべり、上下の関節は平行になることを考慮したためである⁶⁾。

骨化の高位と、1つ下位の椎間関節を対応させて検討したのは、第1に頸椎の運動は、椎間関節によって規定され、椎間関節は、instant center of rotationを中心とする同心円上にはほぼ位置していること²⁸⁾(図18)、第2に後縦靱帯は、椎体の辺縁部で強く結合し

12)、13)、19)、さらに前屈時のレントゲン写真を詳しく調べてみると、後縦靱帯の走行は、各椎体の上縁で、angulationがつき、前屈時には機能的に各椎体上縁でより強く結合していると思われること(図19)を考慮したためである。

頸椎の応力解析の方法として、剛体バネモデル法^{8)、10)、15)}は有限要素法²⁸⁾に比較して、はるかに容易であり、計算結果の精度もよい。今回は、縦弾性係数、ポアソン比を設定して数値計算を行った。この場合、椎間板を基準にし、その他は、比例値で表している。このため、変位については拡大されているか、もしくは、縮小されている値が得られる。しかし、応力については、精度の良い結果が得られる。

縦弾性係数については、種々の報告があるが、測定の条件なども一定ではなく、数値にはか

なりのばらつきがある。多くの生体材料の応力-歪み線図は、曲線となるので、比例式を成立させるべき範囲の指定、即ち応力値の上限を指定する必要がある。また、正確な応力値を剛体バネモデルで求めるためには、靱帯の縦弾性係数が既知となっていなければならない、自己矛盾が成立する。しかし、これは今後応力解析の計算を繰り返すことにより、また多くの例の生体材料の応力-歪み線図を得ることにより、解決できると思われる²⁰⁾。

骨化症例と正常例の比較については、荷重条件、個体差など、まだ問題があると思われるが、骨化症例の剛体バネモデルによる後縦靱帯の応力解析で、後縦靱帯が骨化する以前から、骨化高位に大きな応力が生じていたことは注目される。

後縦靱帯の応力値に影響する因子としては、荷重条件、椎間板や後方の各脊柱靱帯の変性度のほか、椎間関節傾斜角、椎体や棘突起の

大きさなどの骨形態が考えられる。

今回の応力解析では、椎間板の前方、および後方の各靱帯組織に大きな応力が働き、同部の縦弾性係数の低下により、後縦靱帯の応力が増加した。また、椎弓切除モデルでも、後縦靱帯の応力値は椎弓切除前に比較し70-90%も増加していた。

臨床的にも、椎間板の変性にともない、あるいは、椎弓切除後に骨化の増大が見られることもあるが、これらの症例の頸椎周囲の応力解析も骨化症の成因解明に有用と思われる。

椎間関節の水平化と、後縦靱帯の応力の増加は、直接的にはむすびつかないと思われるが、椎間板に対しては、剪断力が働き変性を引き起こすことが考えられる。その結果として後縦靱帯の応力値はさらに増加すると考えられる。また、椎間関節の水平化と関連した他の骨形態の特徴によって応力値が大きくなって

いることも考えられ、椎体、棘突起の大きさなど詳細な骨形態についての検討が必要と思われた。

靱帯の主な構成要素は、膠原線維と、弾性線維と基質からなる²⁷⁾。弾性繊維の含有率は、靱帯によって異なり、黄色靱帯と、項靱帯で多いといわれる¹⁴⁾。縦弾性係数の測定でも後縦靱帯が、21.36から97.02 MPaであったのに対し、黄色靱帯は14.21 MPaと低い値であった。今後さらに加齢による縦弾性係数の変化、OPLL症例の縦弾性係数の検討が必要と思われた。

一般に靱帯組織では、荷重条件により force-distraction responseは異なるといわれる³¹⁾。さらに渡辺³²⁾による後縦靱帯の引っ張り試験では、椎体中央部、椎間板部、隅角部の順に、大きな伸びを示すといわれ、各種生体材料の材料定数を求めるに当たり、測定条

件による誤差を最小限にするための工夫が必要と思われた。

さらに、in vitroでの靱帯の反応と、生理的条件下でのresponse、とくにin vivoでの靱帯の反応についても検討していく必要があると思われる⁷⁾。

後縦靱帯は、浅層と、深層の2層に分けられ、浅層線維は、解剖学的に3-4椎体に渡っているといわれる^{6), 27)}。

この2層の受け持つ応力について検討した結果は、浅層40%と深層60%であった。

さらに、2椎間下位の後縦靱帯に加えられた荷重が上位の後縦靱帯に伝達されたことは、頸椎の前方固定後骨化が増大する症例があることとあわせて考えると興味深い。

また、脊柱の後弯と靱帯骨化との関連について考えられているが⁴⁾、胸椎部の後弯は、頸椎後縦靱帯の固有張力(pre-stress)は、増大していることが考えられ、姿勢に関連した、

生体力学的検討も重要と思われた。

骨化の進展を分析すると、上位頸椎では、頭側に向かっておこり、下位では、分節型の骨化が、尾側に向かっておこりやすいといわれる。頸椎の運動を分析すると、前屈時、C 1 / 2, C 2 / 3, の動きは少なく、angulationも少ないため、C 3 で固定された後縦靱帯は、頭部と一緒に移動し、このため、C 1, 2, 3 では、頭側に向かう tensile stress を受け、これとは逆に C 4 より下位の後縦靱帯は、尾側に向かう tensile stress を受けていると思われる。このように靱帯と椎体の結合の程度による違いによって生じられる tensile stress の方向の検討も重要と思われた。

VII. 結語

(1) 頸椎後縦靱帯骨化症例の椎間関節は、正常例に比較し、有意に水平化していた。さ

らに、骨化部位に対応する椎間関節は、さらに水平化していた。

(2) 剛体バネモデルにて、頸椎周囲の応力解析を試みた。症例により、また、高位により後縦靱帯の応力値は異なっていた。後方の脊柱靱帯の変性や、椎弓切除モデルでは、後縦靱帯の応力値は増加した。骨化症例の検討では、後縦靱帯の応力値が正常例に比較し大きい高位に骨化が存在していた。

(3) 頸椎の前縦靱帯、後縦靱帯、黄靱帯の応力-歪み曲線を求め、縦弾性係数を求めた。

(4) 後縦靱帯の浅層と、深層の受け持つ応力について検討した結果、40%と60%であった。

(5) 頸椎前方固定モデルでの応力測定で、2椎間下位の後縦靱帯に加えられた荷重が、上位の後縦靱帯に伝達された。

稿を終えるにあたり、剛体バネモデル法に関しご指導いただきました神奈川大学工学部伊

藤勝悦教授ならびに実験にご協力いただきました
日本光電東北株式会社岩崎芳樹氏に心か
ら深謝いたします。