

椎間となる椎間応力のカットオフ値は 2.30kPa であった（感度 78.8%、特異度 78.8%）。対照椎間群で 2.30kPa を上回った椎間はなかった

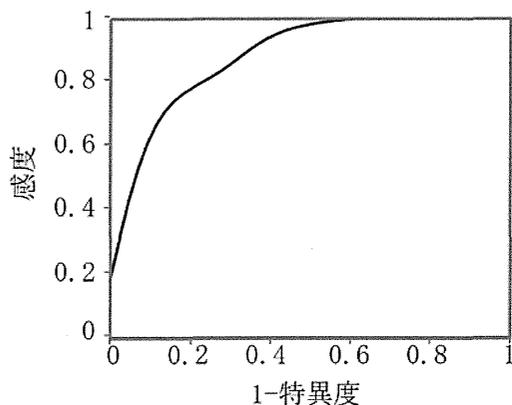


図 6 ROC 曲線

3. 術前の高輝度椎間における椎間応力は平均 3.16 ± 0.86 kPa であり、術後は平均 1.38 ± 0.43 kPa であった。高輝度椎間における椎間応力は、術後有意に低下した ($p < 0.0001$) (図 7)。

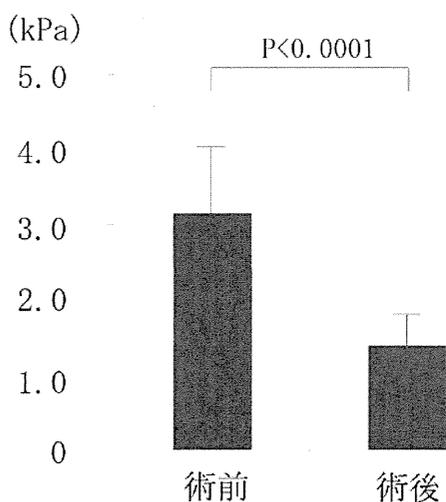


図 7 術前後の高輝度椎間における応力

D. 考察

本研究において、頸髄症患者の T2 高輝度

椎間、等輝度椎間の髄内応力が対照群に比べて有意に高かった。中でも組織変性を示すと考えられる髄内 T2 高輝度を示す椎間の応力が極めて高く、髄内 T2 高輝度の出現と髄内応力は強く関係していることが示された。頸髄症では圧迫により生じる脊髄内の高い応力により神経組織が障害されると考えられる。

Matsumoto らは髄内 T2 高輝度領域と脊髄症の責任椎間が一致すると述べた (J Neurosurg Spine 2:535, 2005)。高い応力が髄内高輝度変化と頸髄症発症を引き起こすと考えられた。ROC 解析で T2 高輝度をきたす閾値は 2.30 kPa であった。脊髄症状がない対照群では、この閾値を超えた症例はなかったことを考えると、脊髄症発症の閾値が存在することと考えられた。すなわち脊髄組織はある程度の応力が負荷されると、症状を示すと考えられる。

これまで脊髄の有限要素法解析に関する幾つかの研究があった。Kato らは、FEM による脊髄圧迫のシミュレーションから、脊髄前後径の減少に対する髄内応力増大は一定ではなく、圧迫率が 40% を超えると著しく髄内応力が増大することを報告した (J Neurosurg Spine 12: 301 2012)。本研究においても、脊髄前後径率が 71% を下回ると著しく応力が増大した。

本研究では、除圧手術により高輝度椎間の応力が有意に低下した。手術により脊髄への圧迫が減少することにより、応力が低下したと考えられる。そして、その結果機能回復が生じると考えられた。

本研究では矢状断正中像のみで髄内応力を評価しており、傍正中の圧迫は正しく評価していない可能性がある。しかし、髄内

応力を矢状断像から求めることは横断像では表すことのできない頭尾側を含めた脊髓の形態と矢状面アライメントを反映することができる利点を有している。

頸髄症の病態には動的因子が重要な役割を果たしていることが知られているが、本研究は静的圧迫のみを評価している。本研究で、静的な状態の応力と髄内 T2 高輝度領域の出現に強い関係がみられ、高輝度領域が出現する応力の閾値が存在した。本研究により静的な圧迫が直接、脊髓の変性や症状の発現に与える影響が明らかになった。

E. 結論

頸髄症患者の脊髓内応力を解析した。高い髄内応力が神経変性や脊髓症状の発症に関係していた。

F. 健康危険情報

総括研究報告書にまとめて記載。

G. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

高橋康平ら 頸髄症における有限要素法を用いた髄内応力分布に関する研究 第13回圧迫性脊髓症研究会 2012.1 東京

高橋康平ら 頸椎症患者における頸椎椎弓形成術前後での髄内応力変化に関する検討 第41回日本脊椎脊髓病学会 2012.4 久留米

高橋康平ら 髄内応力が頸髄症発症に与える影響について 第85回日本整形外科学会総会 2012.5 京都

小澤浩司ら 有限要素法解析による頸髄症の機能診断 第119回中部日本整形災害

外科学会 2012.10 福井

H. 知的財産権の出願・登録状況

なし

圧迫性頸髄症患者を対象とした経頭蓋刺激筋誘発電位による
術中モニタリングのアラームポイントに関する研究

研究分担者 大川 淳 東京医科歯科大学医歯学総合研究科整形外科学分野教授

研究要旨 経頭蓋刺激筋誘発電位（以下 TCE-MEP）による術中モニタリングは一般化しつつあるが、アラームポイントは定まっていない。過去の手術症例の TCE-MEP 波形変化を、起源をもとに脊髓路と脊髓分節に分けて解析し、各々に対するアラームポイントを検討した。

頚椎手術に TCE-MEP モニタリングを使用した 357 症例を対象とし、全例について振幅変化率とその起源（脊髓路と脊髓分節）、術後麻痺の有無を調べた。TCE-MEP 波の消失は 43 例で認めたが、これらの症例に術後麻痺を認めず、分節由来と考えられる波形の振幅が 4.5%と 27%に減少した 2 例で術後麻痺を認めた。アラームポイントを仮に 30%と設定した場合、両者の麻痺を予防することが可能だが、106 例（30.3%）が偽陽性症例となった。一方、アラームポイントを脊髓路由来に対して波形消失、分節由来に対して 30%として別々に設定した場合、感度と特異性は 100%と 83.7%となり、実用的なレベルと考える。アラームポイントをその変化の起源で分けることにより、偽陽性症例を減らしより安全に手術を行うことが出来ると考えられる。

A. 研究目的

脊髄手術における TCE-MEP による術中脊髄モニターは、運動路のモニターが可能であり、侵襲的な操作を必要せず、分節的な灰白質の評価や索路を左右別に評価できるということから、近年定着しつつある。しかしながら、麻酔薬の影響を受けやすく術中の波形変化が大きいため、脊髄障害のアラームポイントは未だ定まっていない。われわれの過去の経験において、アラームポイントを一律に波形消失と設定したところ数例の術後筋力低下を経験したが、いずれも手術操作を行った高位に相当する分節の支配する上肢の筋力低下のみ出現し、長索路障害による筋力低下は認めなかった。また TCE-MEP は脳幹部以下の皮質脊髄路の

ほぼ全長を評価できるとされているが、その反面で、その電位変化には脊髄索路の障害に起因するものと脊髄分節の障害に起因するものが混在する。以上よりわれわれは、長索路障害と分節性障害に対する TCE-MEP のアラームポイントは区別して考える必要があるのではないかと考えた。

そこで頚椎手術症例の術中電位変化を長索路と分節由来に分けて解析することにより、長索路と分節性の機能障害について各々のアラームポイントを検討した。

B. 研究方法

対象は 2003 年 4 月から 2010 年 4 月の期間に当院において、頚椎手術を行った 357 例であり、全例に対して TCE-MEP による術中

モニタリングを行った。

麻酔は完全静脈麻酔で行い、鎮痛薬としてフェンタニルまたはレミフェンタニル、鎮痛薬としてプロポフォールをともに持続投与した。筋弛緩薬は臭化ベクロニウムまたは臭化ロクロニウムを原則として麻酔導入時のみ使用し、電気刺激による体動が大きく手術の妨げとなる場合のみ、最小限の濃度で一定量を持続投与した。

誘発電位の測定は、侵襲性のある手術操作を行う直前と直後、手術操作のない時でも 15-30 分に 1 回の頻度でおこなった。記録部位は両側上腕二頭筋、小指外転筋、短母趾屈筋に加え、上位頸椎レベルの除圧が必要な症例では三角筋からも測定した。また硬膜外電極の設置が困難であった 3 例を除き全例で経頭蓋刺激脊髄誘発電位 (TCE-SCEP) も測定した。

術者へのアラームは TCE-MEP 波形の消失に加え、併用する TCE-SCEP 波形変化、または障害を起こしうる直前の手術操作のいずれかを伴う場合に行った。なお TCE-SCEP は振幅 50%以下への低下を有意な波形変化とした。アラームを発した際には、術者は手術操作を休止する、もしくは波形消失の原因となると考えられる要因に対して処置を加えた。

今回の検討においては、短母趾屈筋の電位を長索路のモニターとし、三角筋・上腕二頭筋・小指外転筋の電位はその支配脊髄高位が除圧範囲に含まれる場合は分節のモニターとし、除圧範囲より下位のレベルにある場合は長索路のモニターと定義した。調査項目は術中の長索路由来・分節由来それぞれの TCE-MEP 波形の変化、術者へのアラームの有無、術後筋力低下の有無とした。

波形振幅のコントロールとしては、原則として直前に測定した波形振幅を採用した。

C. 研究結果

対象とした 357 例のうち評価可能な再現性のある TCE-MEP 波形が得られた症例は 350 例であった。術中に波形振幅の変化が見られた症例とその振幅の変化率の関係を表 2 に表わす。波形の得られた 350 例のうち術中に一度でも波形の消失を認めた症例は 48 例 (13.7%) であった。波形消失のあった 48 例のうち 15 例にはアラームを発し、アラーム後の対応により波形の回復が見られた症例は 10 例、手術終了時まで波形回復の見られなかった症例が 5 例であったが、いずれの症例においても術後筋力低下は出現しなかった。またアラームを出さなかった 33 例においても術後筋力低下は起こらなかった。一方、術中に波形消失のなかった残りの 302 例のうち 2 例で術後筋力低下が出現した。

術後筋力低下を認めた 1 例は頸椎 OPLL に対して C2-7 の前方除圧固定を行なった症例であり、頸椎前方展開時に左上腕三頭筋の振幅が皮切直前に比較して 4.5%まで低下を認めた。波形の消失が無いこと、除圧操作以前の変化であること、脊髄誘発電位に変化を認めないことから経過観察していたが、術直後から左三角筋と上腕二頭筋の筋力が術前 MMT5 から 1-2 への低下を認めた。除圧操作以前に認めた変化ではあるが、術前に C3/4, 4/5 の高度の狭窄があることから、手術体位をとる際に過度の頸椎過伸展となり前角への圧迫が生じたものと考えられた。

2 例目は、C2-5 の髄膜腫に対して椎弓切

除・腫瘍切除を行った症例で、腫瘍剥離操作時に同側の三角筋と上腕二頭筋の振幅が剥離開始前のそれぞれ27%、21%に低下した。波形消失がないことに加え、TCE-SCEPの電位変化も認めなかったため、アラームを出さずそのまま経過観察したところ、術直後から左三角筋と上腕二頭筋の筋力が術前MMT5から3への低下を認めた。

D. 考察

われわれと同様に波形振幅をパラメータとして用いる方法については過去に幾つか報告されているが、そのアラームの対象が長索路障害と分節性障害に区別されている報告は存在しない。

本検討では術中に波形振幅が4.5%に低下した1例と27%に低下した1例に術後筋力低下を認めており、アラームポイントを30%に設定することでいずれの術後筋力低下を防ぐことも可能であったと考えられる。しかしアラームポイントを一律に30%以下への振幅低下とすると、本検討の場合では106例(30.3%)が陽性となってしまう、False Positive例が著しく増加する。本検討で見られた術後筋力低下はともに術中の髄節性障害により生じたものと考えられるため、髄節性障害と長索路障害のアラームポイントを別々に設定することによってFalse Positive例を減らすことが出来るのではないかと考えた。

長索路、分節性それぞれのアラームポイントを波形消失から50%以下への振幅低下まで10%ごとに設定し、今回の対象症例に対してモニタリングを行った場合の結果を表2,3に表す。長索路の障害による術後筋力低下は見られなかったため、アラームポイ

ントを波形消失とすることにより長索路の障害は回避でき、特異度は91.3%となる。分節性の術中電位変化においては波形振幅が4.5%に低下した1例と27%に低下した1例に分節性障害による筋力低下があったため、アラームポイントを27%以上に設定する必要がある。アラームポイントを30%以下への振幅低下とすると、感度100%、特異度90.4%となり実用的に妥当なものと考えられる。

TCE-MEPは下行性のインパルスが前角細胞を発火させ、その結果末梢筋が収縮して発生する複合筋活動電位を記録するものであり、索路の神経伝導が保たれていても下行性のインパルスが前角細胞の興奮閾値をわずかに下回るだけでも波形は消失する。一方、分節由来の筋電図変化は前角以遠への侵襲に対する反応も含むため、索路への侵襲によっておこるシナプスを介した電位変化と比べ、より直接的に侵襲を反映するものと考えられる。また実際には殆どの筋が多重神経根支配を受けているため、単一レベルの前角・前根への侵襲による電位変化は他の神経支配によりマスクされることがある。以上より分節性の電位変化に対しては、長索路の電位変化に対してよりも高めにアラームポイントを設ける必要があると考えられる。

TCE-MEPのアラームポイントを一貫して波形消失とした場合、我々が対象とした症例群においては2例の分節性障害による術後筋力低下を防ぐことができなかった。しかし長索路・分節由来の電位変化に対してアラームポイントを別々に設定し、分節由来に対しては30%以下への振幅低下と設定することで、術中の神経障害を予防し得た

と考えられる。頰椎手術をより安全に行うために、また False Positive 例を減らして手術を円滑に行うためにも、長索路・分節由来の電位変化に対してアラームポイントを別々に設定するべきであると考ええる。

E. 結論

アラームポイントをその変化の起源で分けることにより偽陽性症例を減らし、より安全に手術を行うことが出来ると考えられた。

F. 健康危険情報

総括研究報告書にまとめて記載。

G. 研究発表

1. 論文発表

Enomoto M, Okawa A et al. Increase in paravertebral muscle activity in lumbar kyphosis patients by surface electromyography compared with lumbar spinal canal stenosis patients and healthy volunteers. J Spinal Disord Tech. 2012 Aug;25(6):E167-73. PMID: 22614265

Sakaki K, Okawa A et al. Warning thresholds on the basis of origin of amplitude changes in transcranial electrical motor-evoked potential monitoring for cervical compression myelopathy. Spine (Phila Pa 1976). 2012 Jul 1;37(15):E913-21. PMID: 22322375

Yamada T, Okawa A et al. Hybrid grafting using bone marrow aspirate combined with porous β -tricalcium phosphate and

trephine bone for lumbar posterolateral spinal fusion: a prospective, comparative study versus local bone grafting. Spine (Phila Pa 1976). 2012 Feb 1;37(3):E174-9. PMID: 21673618

2. 学会発表

Yoshii T, Okawa A et al. Dynamic Changes in Spinal Cord Compression in Cervical Ossification of the Posterior Longitudinal Ligament Evaluated by Kinematic Computed Tomography Myelogram. The 40th Cervical Spine Research Society Annual Meeting 2011.12 Chicago, USA

Yoshii T, Okawa A et al. Porous/Dense Composite Hydroxyapatite For Use In Anterior Cervical Discectomy and Fusion. The 40th Cervical Spine Research Society Annual Meeting 2011.12 Chicago, USA

無線超小型 3 軸加速度センサを用いた頸椎症性脊髄症に対する歩行時解析（第 2 報）

研究分担者 西村浩輔、遠藤健司、鈴木秀和、宍戸孝明、山本謙吾
東京医科大学大学整形外科

研究要旨 先行研究により、3 次元加速度計の計測による正常人と頸髄症による異常歩行の歩行分析で痙性跛行では波形に高振幅多相波が出現することが発見された。今回、頸髄症の重症度と波形分析による、転倒危険性の予知に関する検討を追加した。歩行障害のない軽症例においても、一歩行周期での多相波は増加していた。大転子部の前後加速度と多相波の出現が CSM 歩行障害の初期に現れ、仙骨部での加速度の増加が易転倒性の指標となる可能性があると考えられた。これらの知見は転倒危険因子の予測となりうる可能性があると考えられた。

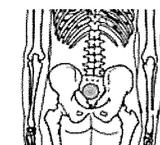
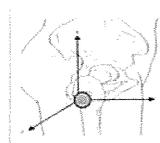
A. 研究目的

転倒によって脊髄損傷となる頸椎 OPLL 患者は多いが、頸椎 OPLL 患者の歩行機能を研究することで、転倒予防ができればならば脊髄損傷を減少することができる考えた。本研究で、三次元加速度計¹⁾を使用した歩行機能について検討した。

均数を 5 回に設定し、被験者は 10m の連続歩行を 3 回のモニタリングを行い、最も安定した波形を記録した（図 1）。研究は、学内倫理委員会の承認を得て、被験者との十分なインフォームドコンセントの後に了解を得て行われた。

B. 研究方法

健常な成人 20 例：男性 16 例女性 4 例
平均年齢 34.7 歳、平均 BMI 23.4 と、痙性歩行障害を主訴とする自立歩行が可能な CSM 患者 15 例（男性 13 例女性 2 例）平均年齢 63.2 歳、平均 BMI 23.3 を対象とした。3 軸加速度センサは小型無線ハイブリットセンサ WAA-006 を用いた。CH1 に圧フィルムを接続し足底に設置し、歩行周期のマーカースとした。CH2 は大転子部に CH3 は仙骨部に設置した。上下、前方、左右方向の加速度をそれぞれ X、Y、Z 軸と設定した。サンプリング数は 5ms、時間平



測定部位：

- Ch1: 踵部センサ
- Ch2: 大転子部センサ
- Ch3: 仙骨部センサ

歩行距離：10m の連続歩行

歩行速度：
被験者の自然な速度での歩行

図1 測定方法

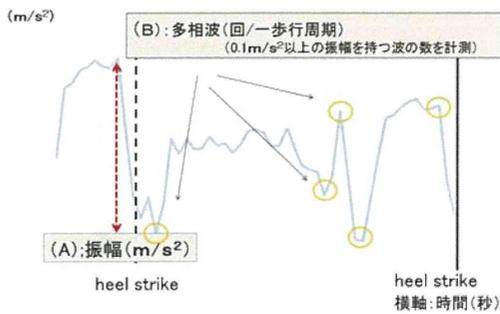


図2 波形分析

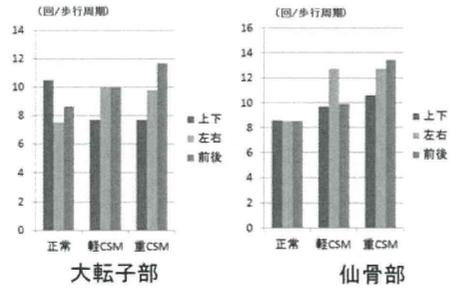


図4 重症度別の多相波

C. 研究結果

① 正常群とCSM群の加速度

CSM群では大転子部において、上下方向は有意に増加をみとめたが、仙骨部においては有意差を認めなかった。

② 正常群とCSM群の多相波数

大転子部、仙骨部ともにCSM群で有意に大きい傾向があった。

③ CSM群の重症度別の加速度

軽症群では、大転子仙骨部ともに変化はみとめなかったが、重症群の子部において、上下前後方向で加速度の増大を認めた。仙骨部においては内外側方向に軽度増大傾向をみとめた(図3)。

④ 多相波においては軽症時、有意に多い傾向にあった(図4)。

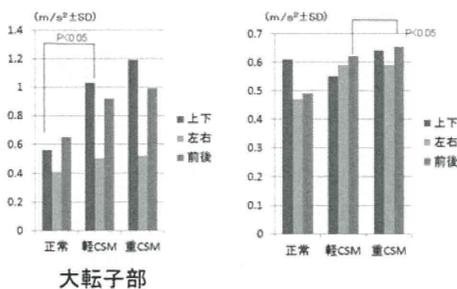


図3 重症度別の加速度

D. 考察

近年、運動器不安定症という概念が述べられており、「高齢化により、バランス能力および移動歩行能力の低下が生じ、閉じこもり、転倒リスクが高まった状態」と定義されている。しかし頸髄症、OPLLに対するバランス異常、平衡機能に関する研究は少ない。後縦靭帯骨化症(OPLL):外傷は、予後不良因子(OPLLガイドライン2005)であり、15/156(9.6%)は、外傷で悪化(Matsunaga S et al. 2008 Spine)²⁾であるという報告もある。また、遠藤ら³⁾の先行研究において頸椎OPLLの転倒の背景には痙性障害に加えて、体幹前方傾斜、深部知覚障害、脊椎不撓性による平衡機能障害が加わり、転倒しやすい状態となっている可能性が示唆されている。

頸椎症性脊髄症性による歩行障害⁴⁾⁵⁾易転倒性となり頸髄損傷の発症など重大な後遺症を引き起こす可能性がある。しかし、歩行障害、転倒予防に対する客観的な手術適応の尺度は不明である。痙性歩容異常を評価するため、以前より加速度センサの応用が試みられてきたが、センサが有線であったため大掛かりな測定環境を要し臨床での使用が困難であった。今回我々は無線超小型3軸加速度センサを用い脊髄症患者

の歩行解析を行い、健常者の歩行パターンと比較検討をおこなった⁶⁾。

今回の計測では、正常群とCSM群の比較において歩行周期は有意差は認めなかった。また3軸とも多相波を認め、最大振幅の増加は大転子部にて顕著に表れた。Grade別の比較より、歩行障害のない軽症例においても、多相波の増加を認めた。また、症状が進行するにつれ、仙骨部の加速度での変化を認める傾向にあった。

痙性歩行の歩容の特徴

我々が了承し得た範囲では脳性麻痺、片麻痺の歩容の特徴の報告は多数認めるが、頸髄についての報告は少ない。立脚期における膝関節の過伸展が特徴であると、Moorheadらは述べている。また鈴木らは、腓腹筋の反射性収縮を反映し、同側の骨盤、体幹と運動するようであると述べている。今回の結果より、歩行障害のない頸髄症患者は、立脚肢に比べ仙骨部での不安定性は軽度であった。症状の進行とともに、仙骨部での不安定性が出現すると推測される。仙骨部での加速度の増加を認める場合、転倒危険の警鐘と判断することができるか今後の検討としたい

E. 結論

小型センサを用い、健常者とCSM患者の大転子部、仙骨部における3軸方向の加速度を比較検討した。歩行障害のない軽症例においても、一歩行周期での多相波の増加を生じていた。仙骨部での加速度の増加が易転倒性の指標となる可能性があると考えられた。加速度センサを用い歩行解析を行うことで、CSM患者の歩容異常の解析が可能

であった。

F. 健康危険情報

総括研究報告書にまとめて記載

G. 研究発表

学会発表

- 1) 西村浩輔、遠藤健司、山本謙吾ほか：第41回脊椎脊髄病学会発表
- 2) 西村浩輔、遠藤健司、山本謙吾ほか：第61回東日本整形災害外科学会発表

H. 知的財産権の出願・登録状況

特になし

参考文献

- 1) Turcot K et al.: Three-dimensional pattern of knee linear accelerations during treadmill walking on an asymptomatic and osteoarthritis populations. *Gait Posture*, 2006, 24, 144-146.
- 2) Matsunaga S et al. Radiographic predictors for the development of myelopathy in patients with ossification of the posterior longitudinal ligament: a multicenter cohort study. *Spine* 33, 2008.
- 3) 遠藤健司 他：頸椎 OPLL の全脊椎アライメントと平衡機能に関する研究, 脊柱靭帯骨化症に関する調査研究班平成20年度報告書, 2008.
- 4) Engsberg JR et al: Spasticity, Strength, and Gait Changes After Surgery for Cervical Spondylotic Myelopathy, *SPINE* 28,

E136-E139, 2003.

5) Malone A et al: Gait impairment in cervical spondylotic myelopathy: comparison with age- and gender-matched healthy controls. Eur Spine J 21, 2433-6, 2012.

6) 西村浩輔 他: 無線超小型3軸加速度センサを用いた頰椎症性脊髄症に対する歩行時解析(第1報)、脊柱靱帯骨化症に関する調査研究班平成23年度報告書, 2012.

有限要素法を用いた胸椎後縦靭帯骨化症の応力解析に関する研究

研究分担者 西田周泰，田口敏彦，寒竹 司，今城靖明，鈴木秀典，吉田佑一郎
山口大学整形外科

研究要旨 【目的】胸椎後縦靭帯骨化症(OPLL)による胸髄症は進行性で手術療法が選択されることが多い。しかし、術後神経症状が悪化する症例も認める。今回予後不良因子と言われる嘴状型 OPLL を力学的に検討した。【方法】有限要素解析ソフト Abaqus /CAE6.9.3 を使用し、3次元脊髓モデルを作成した。脊髓前方に嘴状型 OPLL モデルを設置し、伊藤らの提唱した再狭窄部位上下椎での頭側椎体後上縁と尾側椎体後下縁と骨化最頂点を結んだ角度、局所骨化角(Local ossification angle; LOA)を用いて、椎弓を設置した LOA 20°、25° 及び 30° の術前圧迫モデルを作成した。その後圧迫を加えたまま椎弓を後方に変位させた固定術を施行した後方除圧後固定モデルを作成、さらに固定せず術後後弯が進行し、脊髓が前方に変位した後方除圧後非固定モデルを作成した。【結果】術前圧迫モデルでは、LOA20°、25°、30° と角度が増すにつれ、脊髓全体に応力上昇を認めた。後方除圧後固定モデルでは、前索・前角の応力の軽度上昇を認めるも、術前圧迫モデルに比べ応力が低下した。後方除圧後非固定モデルでは、LOA20° モデルでも脊髓全体に術前 LOA30° 圧迫モデルと同等の応力上昇を示した。【考察】術前圧迫モデルから、嘴状型 OPLL の LOA が 20° を上回ると症状が増悪する可能性が示唆された。後方除圧後固定モデルからは、LOA30° であっても脊髓内の応力が低下し、後方除圧単独でも脊髓内応力が低下する事がわかった。後方除圧後非固定モデルからは、不安定性を残し脊髓が前方に変位する余地を残せば、LOA20° であっても脊髓内応力が術前と同等に応力が上昇することが分かった。従って、嘴状型 OPLL では LOA を減少させる前方除圧術か、後方除圧術を施行する場合はインストルメントによる固定術を併用する必要があると考えられた。

A. 研究目的

胸椎後縦靭帯骨化症 (Ossification of the posterior longitudinal ligament in the thoracic spine ; T-OPLL) は、前方から骨化した靭帯が胸髄を圧迫することで胸髄症を発症する疾患である。進行性で、保存的加療は無効な事が多く、通常手術療法が選択される。複数の術式が報告されているが、一定した見解は得られておらず、術後麻痺が進行する症例も認める。厚生省研究班は、T-OPLL を線状型、嘴状型、連続

波状型、連続棒状型、及び2つ以上の型を合併する混合型に分けているが、松山らは、骨化形態を嘴状型と平坦型に分け、後方除圧後、麻痺の進行した症例はすべて嘴状型であり、予後不良因子と報告している。¹ 今回力学解析手法の一つ、有限要素法 (Finite Element Method; FEM) を使用し、後方除圧の有効性及び、不安定が残存した場合の脊髓内力学解析を行い、FEM を脊髓の応力解析に応用した。

FEM による応力解析の目的は、力学的特

性を加味した3次元脊髓モデルを使用して、脊髓圧迫シュミレーションを行い、圧迫性脊髓障害メカニズムの解明を行うことである。圧迫性脊髓障害メカニズムが本モデルにより証明できれば、将来的に検討を重ね、各症例に応じた脊髓障害の分析・手術治療を行うタイミングなどの検討も可能になると考えられる。今回3次元FEMモデルを使用し、予後不良因子と言われる嘴状型T-OPLLの術前圧迫モデル、後方除圧後非固定モデル、及び後方除圧後固定モデルを作成し、脊髓の応力解析を行った。術前の圧迫程度によりどの程度脊髓内の応力が上昇するのか、その圧迫のある状態で後方除圧によりどの程度応力が低下するか、不安定性が残存した場合の麻痺進行する理由、及び胸椎OPLL後方において除圧後に固定が必要である理由を検討したので報告する

B. 研究方法

FEM解析に関して、FEM解析ソフトABAQUS 6.9-3 (Dassault Systems Simulia Corp. USA)を使用した。灰白質、白質、軟膜からなる3次元脊髓モデルを作成した。解析計算を容易にするため、歯状靭帯、髄液圧、硬膜及び神経根などは考慮しなかった。軟膜はその有無により脊髓内の応力分布に差が有意に現れるため、モデルを作成した。²モデルの作成方法は、X-Y軸により灰白質、白質及び軟膜の半分の座標をプロットし、それをZ軸方向に胸椎の2椎体分の長さに伸ばした。通常脊髓も含め人体が左右対称ということはないが、メッシュを左右対称に切ることによって解析を容易にするため、また脊髓の左右差の程度を証明する論文がなく根拠がないため、今回は左右対称に設定した。その後、脊髓前方に圧迫因子として

台形状の嘴状型T-OPLLを脊髓Z軸の中央に設置した。脊髓後方には、T-OPLL症例のCT-myelographyより求めた椎弓の座標をプロットし、骨性要素を作成した(図1)。軟膜・白質・灰白質の材料定数(ヤング率及びポアソン比)は、過去の牛脊髓応力緩和試験(長期静止データおよび文献を参考に設定した。^{3,4}ヒト生体の脊髓の材料定数を計測することは困難であり、Ichiharaら³は、ウシ頸髄から灰白質と白質を採取し、引張試験を行い、そのデータから灰白質と白質の物質特性を求めた。その結果は、灰白質は白質よりも硬く、脆いというものであった。Xin-Feng¹⁵らは、ヒトと牛の脳や脊髓組織の障害パターンが類似しているため、牛の材料定数をヒトのものとして適用することは妥当であるとしている。このデータを弾性・粘弾性データとしてAbaqus6.9-3に入力し解析を行った。嘴状型T-OPLLと椎弓は脊髓圧迫の際に影響を受けない十分に硬い材料定数とした。

灰白質、白質及び軟膜は摩擦係数無限大(拘束している)として設定した。脊髓と椎弓は髄液の存在を加味し、摩擦なしとした。OPLLと脊髓は、接触している面は摩擦係数無限大(拘束)とし、他の面は摩擦なしと設定した。

境界条件の設定は、本来脊髓の頭側・尾側に脊髓が伸びており、そこで固定されていると考え頭側・尾側の面をX, Y, Z軸方向をすべて固定した。

メッシュ分割は、1メッシュ20節点の6面体メッシュとし、総要素数11,095、総節点数64,724とした。

術前脊髓の圧迫の程度として、伊藤らの提唱した局所骨化角(Local Ossification

Angle ; LOA) を使用した。⁵ LOA とは、CT もしくは MRI の sagittal 像で測定し、狭窄部から見て椎体後方上縁と OPLL 頂点を結ぶ線と OPLL 頂点と椎体後方下縁の線のなす角度である (図 2)。伊藤らは、術後 LOA 28° 以上で成績に有意差が出るため、LOA 28° 以下になるよう前方除圧を行うか、後方除圧の際 LOA 28° 以上であれば固定術を併用すべきと報告した。この報告を参考に、今回術前圧迫モデルとして、椎弓を X, Y, Z 軸に固定した状態で、脊髄に嚙状型 OPLL により LOA 20°、25°、及び 30° の圧迫を加えた。

その後、各 LOA で圧迫を加えたまま、椎弓切除及びインストルメント固定を行ったと想定し、椎弓を後方にシフトした後方除圧後固定モデルを作成した。このモデルは術前と LOA が同一で一定である。

後方除圧後非固定モデルとして、Tokuhashi らの術中エコー所見の報告から、術後成績良好な脊髄浮上陽性例と、術後麻痺が進行した脊髄浮上陰性例の軸位像を参考に、浮上例に対して術後麻痺が進行した症例の脊髄が 50° の角度を有していることから、脊髄後方中央縦割部から約 50° 方向に変位を加え、不安定性のある脊髄が前方にシフトしたと想定した。⁶

合わせて、9つの応力解析を行い、応力上昇の最も強いスライスで応力分布を評価した。

C. 研究結果

各モデルの応力分布図を図 3A-C に示す。応力値に応じた色分けが右グラフである。

術前圧迫モデルでは、LOA 20° では応力上昇は灰白質と前索の一部のみと軽度であ

った。LOA25° では、灰白質、前索、側索及び後索と脊髄内部に全体的に応力が上昇した。LOA30° では、LOA25° に比べさらに脊髄内応力が上昇した。術前圧迫モデルでは LOA の角度が増すにつれ、応力が脊髄前方から徐々に脊髄全体に上昇した (図 3A)。

後方除圧後固定モデルでは、LOA20° で前索に経度応力上昇を認めるのみであった。LOA25° で灰白質前方 (前角) の応力が上昇し、LOA30° で後角にも若干の応力上昇を認めた。後方除圧後固定モデルでは、LOA の角度が増すにつれ前索・前角に応力上昇を認めるも、術前圧迫モデルの各 LOA と比較すると明らかに術前に比べ応力が低下していた (図 3B)。

後方除圧後非固定モデルでは、LOA 20° で灰白質、前索、側索及び後索すべてに応力が上昇した。LOA25°、LOA30° では、嚙状型 OPLL により圧迫されているスライスで灰白質、白質、前索及び後索の脊髄内応力がさらに上昇、側索の応力上昇範囲も広範になった。(図 3C)。

D. 考察

T-OPLL は保存的加療では胸髄症の改善は期待できず、外科的加療が選択される。⁷⁻¹⁰ T-OPLL の術後改善率が低い理由として、元々上位・中位胸椎は後弯しており後方除圧単独では後弯が進行する可能性、頸椎と比較し前方除圧が困難であることが挙げられている。¹ 最も一般的に行われている後方除圧術であるが、Yamazaki らによる椎弓切除後麻痺進行例に後方 instrumentation を行い、麻痺が改善したという報告¹¹ や、Nakanishi らによる椎弓切除直後、電位低下を認めた症例に instrumentation を追加

し、電位が回復したという報告からは Instrumentation による後弯矯正、固定の有効性が示唆される。¹²

また、Matsuyamaらは、T-OPLLを形態別に嘴状型と平坦型に分け、術後麻痺が進行した症例はすべて嘴状型であったと報告している。¹ これは、後方除圧後に胸椎の後弯が進行し、脊髄が前方にシフトして圧迫されるためとしている。そのため、固定術を勧めているが、嘴状型か平坦型かどうかは、視覚的な分類にとどまっている。また術式とその術後成績に関する報告は認められるが、術前の圧迫程度を評価した論文はない。伊藤らは、LOAという概念を用い、術後LOA 28°以上で成績に有意差が出るため、LOA 28°以下になるよう前方除圧を行うか、後方除圧の際LOA 28°以上であれば固定術を併用すべきと報告した。

今回我々は、これら後方除圧の有効性と、LOAの報告を基に、T-OPLLのLOAに応じた術前圧迫モデル、後方除圧後固定モデル及び後方除圧後非固定モデルを作成し、FEMを用いて脊髄内の応力解析を行った。

3次元脊髄モデルを使用した応力解析の最終目標は、臨床症状を説明できるよう発展させ、将来的には各個人に合わせた除圧の範囲などの手術計画をオーダーメイドで作ることができるようになることである。脊髄の応力解析に関しては、報告はまだ少なく、Katoら¹³⁻¹⁵、Xin-Feng^{16,17}ら及びNishida¹⁸らの報告を認めるのみである。

今回の解析において、術前モデルからはLOA 20°を超えると脊髄内に応力が上昇し、LOA 20°以上で症状が増悪する可能性が示唆された。後方除圧後固定モデルからは、例えLOA 30°であっても、脊髄内の応力は

低下し、後方除圧固定術の有効性が示唆された。しかし、後方除圧後非固定モデルでは、LOA 20°でも脊髄内の応力が上昇した。このことから不安定性の余地を残せばLOA 20°であっても症状が増悪する可能性があると考えられた。

E. 結論

今回我々は、3次元FEMを使用し、嘴状型OPLLの術前圧迫モデル、後方除圧後固定モデル及び後方除圧後非固定モデルを作成し、脊髄内応力解析を行った。

LOA 20°以上であれば、LOAを減少させる前方除圧術か、後弯進行を予防する目的でインストルメントを併用した固定術が望ましいと考えられた。

今回のモデルにより、この3次元FEM脊髄モデルが臨床報告に合致することが示された。

文献

1. Matsuyama Y, Yoshihara H, Tsuji T, Sakai Y, Yukawa Y, Nakamura H. Surgical Outcome of Ossification of the Posterior Longitudinal Ligament (OPLL) of the Thoracic Spine: Implication of the Type of Ossification and Surgical Options. *Journal of Spinal Disorders & Techniques* 2005; 18: 492-497.
2. Cecilia P, Jon S, Richard M. The importance of fluid-structure interaction in spinal trauma models. *J Neurotrauma* 2011; 28: 113-25.
3. Ichihara K, Taguchi T, Sakuramoto I, Kawano S, Kawai S. Mechanism of the spinal cord injury and the cervical spondylotic myelopathy: new approach

- based on the mechanical features of the spinal cord white and gray matter. *J Neurosurg* 2003; 99(3 suppl): 278-285.
4. Tunturi AR. Elasticity of the spinal cord, pia and denticulate ligament in the dog. *J Neurosurg* 1978; 48:975-979.
 5. Ito K, Yukawa Y, Horie Y, Kato F. Surgical treatment for ossification of posterior longitudinal ligament in thoracic spine: Influence of local ossification angle. *Rinsyo Seikeigeka (Japanese)* 2008; 43: 539-542.
 6. Tokuhashi Y, Matsuzaki H, Oda H, Uei H. Effectiveness of Posterior Decompression for Patients With Ossification of the Posterior Longitudinal Ligament in the Thoracic Spine: Usefulness of the Ossification-Kyphosis Angle on MRI. *Spine* 2006; 31: E26-E30.
 7. Fujimura Y, Nishi Y, Nakamura M, Toyama Y, Suzuki N. Longterm follow up study of anterior decompression and fusion for thoracic myelopathy resulting from ossification of the posterior longitudinal ligament. *Spine* 1997; 22: 305-11.
 8. Tomita K, Kawahara N, Baba H, Kikuchi Y, Nishimura H. Circumspinal decompression for thoracic myelopathy due to combined ossification of the posterior longitudinal ligament and ligamentum flavum. *Spine* 1990; 15: 1114-20.
 9. Tsuzuki N, Hirabayashi S, Abe R, Saiki K. Staged spinal cord decompression through posterior approach for thoracic myelopathy caused by ossification of posterior longitudinal ligament. *Spine* 2001; 26: 1623-30.
 10. Yonenobu K, Korkusuz F, Hosono N, Ono K. Lateral rhachotomy for thoracic spinal lesions. *Spine* 1990; 15: 1121-5.
 11. Yamasaki M, Okawa A, Koda M, Goto S, Minami S, Moriya H. Transient paraparesis after laminectomy for thoracic myelopathy due to ossification of posterior longitudinal ligament. *Spine* 2005; 30: 343-346.
 12. Nakanishi K, Tanaka N, Nishikawa K, Fujimoto Y, Ochi M. Positive effect of posterior instrument after surgical posterior decompression for extensive cervicothoracic ossification of the posterior longitudinal ligament. *Spine* 2005; 30: E382-386.
 13. Kato Y, Kataoka H, Ichihara K, Imajo Y, Kojima T, Kawano S et al. Biomechanical study of cervical flexion myelopathy using a three-dimensional finite element method. *J Neurosurgery Spine*. 2008; 8(5): 436-441.
 14. Kato Y, Kanchiku T, Imajo Y, Ichihara K, Kawano S, Hamanaka D et al. Flexion model simulating spinal cord injury without radiographic abnormality in patients with ossification of the longitudinal ligament: the influence of flexion speed on the cervical spine. *J Spinal Cord Med*. 2009; 32(5), 555-559.
 15. Kato Y, Kanchiku T, Imajo Y, Kimura K, Ichihara K, Kawano S et al.

- Biomechanical study of the effect of the degree of static compression of the spinal cord in ossification of the posterior longitudinal ligament. *J Neurosurgery Spine*. 2010; 12: 301-305.
16. Xin-Feng Li, MSc T, Li-Yang Dai. Three-dimensional finite element model of the cervical spinal cord. *Spine*. 2009; 34: 1140-1147.
17. Xin-Feng Li, MSc T, Li-Yang Dai. Acute central cord syndrome. *Spine*. 2010; 35: E955-E964.
18. Nishida N, Kato Y, Imajo Y, Kawano S, Taguchi T. Biomechanical study of the spinal cord in thoracic ossification of the posterior longitudinal ligament. *J Spinal Cord Med*. 2011; 34(5): 518-522.

VIII. 外科的治療-頸椎

頚椎後縦靭帯骨化症に対する前方除圧固定術の中長期成績

高知大学医学部整形外科

研究分担者 公文雅士、谷 俊一、木田和伸、田所伸朗

研究要旨 我々は多椎間にわたる骨化巣を呈する症例でも骨化占拠率が 50%を超えるものに対しては前方除圧固定術（前方法）を適用し、これまでに有効な治療法であることを報告してきた。今回、その中長期成績と JOA スコア悪化因子につき検討を行った。結果、平均 JOA スコアは術前 8.5 点、最大改善時 13.7 点、最終観察時 12.5 点であり、術後有意な改善を認め、最終観察時まで維持されていた。JOA スコア改善率が 20%以上低下していた症例は 10 例あり、そのうち骨化伸展による脊髄症状の再悪化により後方除圧を追加した症例を 3 例に認め、術後も長期にわたり定期的な経過観察が必要であると考えられた。

A. 研究目的

頚椎後縦靭帯骨化症(OPLL)による脊髄症を呈する症例のうち、骨化が多椎間にわたる症例でも最大骨化占拠率が 50%を超えるものに対しては前方法を適用してきた。我々が行っている前方法は OPLL が存在する全てのレベルに行うのではなく、MRI で認める主要な脊髄圧迫に対する除圧を目的とし、最大で連続する 3 椎間（2 椎体亜全摘）までに限った除圧と腸骨移植を行うものである。

今回術後 5 年以上経過観察できた症例の中長期手術成績につき検討したので報告する。

B. 研究方法

対象は 1991 年以降、当科で頚椎 OPLL に対し前方法を行い、術後 5 年以上経過観察し得た 29 例（男性 24 例、女性 5 例）である。手術時年齢は平均 62.3 歳、OPLL のタイプ分類は、連続型 13 例、分節型 1 例、混合型 9 例、限局型 6 例であり、術前 CT にお

ける骨化占拠率は平均 56.3%であった。除圧固定の範囲は、単椎間 8 例、2 椎間 15 例、3 椎間 6 例であった。術後経過観察期間は平均 9 年 6 か月であった。臨床的評価は JOA スコアにて行い、術後最終観察時において、最大改善時に対して 20%以上改善率が低下していた症例につき悪化要因を検討した。

（倫理面での配慮）

本研究は、手術前の病態および手術後の経過を後ろ向きに検討したものであり、倫理面での問題はないと考えられる。また、収集した個人情報に関しては遺漏のなきよう管理し、研究に使用した。

C. 研究結果

平均 JOA スコアは術前 8.5 点、最大改善時 13.7 点で有意な改善を認め ($P<0.05$)、最終観察時 12.5 点であった。JOA スコア平均改善率は最大改善時 59.8%、最終観察時 45.2%であった。最終観察時に最大改善時と比較し、JOA スコア改善率が 20%以上低下し

ていた症例につき、検討を行ったところ、10例に認めた。その10例のうち脊髄症状の再悪化を6例に認め、その要因としては骨化伸展5例、固定隣接椎間障害1例であった。これらの内、骨化伸展例の3例に対して椎弓形成術を施行していた。残りの4例の悪化要因は腰部脊柱管狭窄症発症3例、多発性脳梗塞発症1例であった。

D. 考察

当科では前方除圧固定術を行う際、移植骨として腸骨を使用しているが、採骨できる腸骨の長さには限界があり、除圧固定範囲は最大2椎体亜全摘つまり3椎間までに限られる。そのため、広範な骨化巣を有する例では、術後骨化巣が遺残し、その後経過とともに骨化伸展に伴う術後成績の悪化が危惧される。当科では以前に骨化巣を全切除した症例と選択的に切除した症例とで術後成績を比較したところ、遺残骨化巣の有無で術後成績に有意な差は認めず、また、遺残骨化巣の伸展の有無においても術後成績に差は認めなかった。

しかし、今回の検討から経過中骨化伸展が原因となり、再手術を要する症例も一部に認められ、術後も長期にわたる定期的な経過観察が必要であると考えられた。

E. 結論

頸椎 OPLL に対する前方法の中長期成績はおおむね良好であるが、経過中に残存骨化巣の伸展により、脊髄症状の再悪化を認める症例があり、定期的な経過観察と継続する必要があると考えられた。

F. 健康危険情報

総括研究報告書にまとめて記載。

G. 研究発表

1. 論文発表

(1) 頸椎 OPLL の治療 高齢者の頸椎症性脊髄症に対する単椎間手術 —脊髄誘発電位の術前・術中記録と術式の工夫—
木田和伸, 田所伸朗, 公文雅士, 谷俊一, 関節外科 31(5): 26-31, 2012.

2. 学会発表

(1) 高齢者頸椎症性脊髄症に対する経皮的脊髄誘発電位診断に基づいた選択的椎弓形成術. 木田和伸, 田所伸朗, 公文雅士, 阿漕孝治, 谷口慎一郎, 谷俊一, 第118回中部日本整形外科学会災害外科学会・学術集会 (大阪市), 2012. 4. 6-7.

(2) 広範な頸髄内高輝度変化を呈し、術後速やかに改善した頸椎症性脊髄症の1例. 田所伸朗, 木田和伸, 公文雅士, 中島紀綱, 加藤友也, 谷俊一, 第118回中部日本整形外科学会災害外科学会・学術集会 (大阪市), 2012. 4. 6-7.

(3) 高齢者頸椎症性脊髄症に対する経皮的脊髄誘発電位診断に基づいた単椎間椎弓形成術. 木田和伸, 田所伸朗, 公文雅士, 喜安克仁, 谷口慎一郎, 武政龍一, 川崎元敬, 池内昌彦, 谷俊一, 第85回日本整形外科学会学術総会 (京都市), 2012. 5. 17-20.

(4) 頸椎症性 C5 麻痺における三角筋複合筋活動電位と保存療法の成績. 田所伸朗, 木田和伸, 武政龍一, 池内昌彦, 川崎元敬, 谷俊一, 第85回日本整形外科学会学術総会 (京都市), 2012. 5. 17-20.

(5) 頸椎変性疾患に対する PEEK cage および Dynamic plate を用いた単椎間前方除圧固定術. 木田和伸, 公文雅士, 喜安克仁, 武政龍一, 田所伸朗, 谷俊一, 第 119 回中部日本整形外科災害外科学会・学術集会 (福井市), 2012. 10. 5-6.

(6) 頸椎後縦靭帯骨化症に対する前方除圧固定術の中長期成績. 公文雅士, 木田和伸, 田所伸朗, 谷俊一, 第 119 回中部日本整形外科災害外科学会・学術集会 (福井市), 2012. 10. 5-6.

(7) 経頭蓋電気刺激による下行性脊髄誘発近接電場電位の記録法と波形解析: 単椎間頸髄圧迫例における検討. 田所伸朗, 谷俊一, 木田和伸, 石田健司, 武政龍一, 池内昌彦, 川崎元敬, 永野靖典, 公文雅士, 南場寛文, 第 27 回日本整形外科学会基礎学術集会 (名古屋市), 2012. 10. 26-27.

(8) 経頭蓋電気刺激による下行性脊髄誘発近接電場電位の記録法と波形解析: 単椎間頸髄圧迫例における検討. 田所伸朗, 谷俊一, 木田和伸, 石田健司, 武政龍一, 池内昌彦, 川崎元敬, 永野靖典, 公文雅士, 南場寛文, 第 42 回日本臨床神経生理学会学術大会 (東京都), 2012. 11. 8-10.

(9) 頸部脊髄症における上肢後索機能評価システムの改良. 芥川知彰, 谷俊一, 石田健司, 池内昌彦, 木田和伸, 第 42 回日本臨床神経生理学会学術大会 (東京都), 2012. 11. 8-10.

(10) 頸椎後縦靭帯骨化症に対する多椎

間前方除圧固定術 20 年後に移植骨骨折のため頸髄症を再発した 1 例. 高谷将悟, 木田和伸, 田所伸朗, 喜安克仁, 公文雅士, 武政龍一, 谷俊一, 第 45 回中国・四国整形外科学会 (倉敷市), 2012. 11. 10-11.

H. 知的財産権の出願・登録状況

(予定を含む。)

1. 特許取得

本研究においてはなし

2. 実用新案登録

本研究においてはなし

3. その他

本研究においてはなし