

原 著

家兎を用いた服部式頸椎椎弓形成術の
術後頸椎支持性に関する実験的研究

齊藤良明

山口大学医学部高次統御系・整形外科講座 宇部市南小串1丁目1-1 (〒755-8505)

Key words : 頸椎, 椎弓形成術, 椎弓切除術, 後弯変形, 生体力学

はじめに

脊髄圧迫病変に対する頸椎後方手術の目的は、頸椎後方部分を除去することによって間接的に脊髄圧迫因子から除圧を図ることである。後方進入法としての椎弓切除術はその歴史も古く、解剖学的に前弯を呈する頸椎部において脊髄は頸椎の後方に位置しているため、除圧を目的とする場合には理にかなった手術術式といえる。しかし、頸椎後方部分を切除するために、後方支持組織の減弱や、硬膜背側の瘢痕組織の形成による二次的な脊髄への圧迫の可能性など術後の問題点が懸念されるようになってきた。このような椎弓切除術の欠点を補うべく、1971年に教室の服部名誉教授は後方支持組織として椎弓の一部をサージエアトムにて菲薄化してZ字状に脊柱管を拡大する服部式頸椎椎弓形成術¹⁾を考案し、これ以降、各種の椎弓形成術が開発されてきた。われわれは服部式頸椎椎弓形成術が術後の頸椎アライメント異常の発生を予防し長期に渡って良好な術後成績が得られていることを報告してきた。しかし、それを裏付ける基礎的実験は十分とは言えない。そこで本研究において、家兎を用いたin vivo実験を行い、椎弓切除術を対象として術後頸椎支持性に関してX線学および生体力学的に検討し、術後のアライメント異常の発生の原因について考察した。

対象と方法

頸椎椎体に骨端線が残存する日本白色家兎23羽を実験の対象とした。実験に先立ち各家兎頸椎に異常がないことをX線で確認した。

手術方法

家兎にpentobarbital sodium 2 ml/kgを用いて鎮静を加え、vecuronium bromideで筋弛緩を得て気管内挿管を行い、nitrogen monoxideとsevofluraneで術中管理を行った。腹臥位にて頸椎を前屈位に保ち、約7 cmの後方正中切開を加えた。棘突起を指標として項靭帯に棘突起縁まで縦切開を加え、傍脊筋を椎弓に沿って外側は椎間関節に至るまで十分に剥離展開した。第3～第7頸椎椎弓を確認した後、第3～第6棘突起を削除し、この第3～第6椎弓に対して以下の操作を行った。手術後はいずれも頸椎の外固定は行わず通常の飼育を行った。

A 椎弓切除群11羽（以下切除群）：椎弓を顕微鏡下にmicromotor（中西社製）を用いて脊柱管側骨皮質に至るまで菲薄化し、椎間関節の内側部に椎弓を切離し、第3～第6頸椎椎弓を黄色靭帯を含めて切除した。

B 椎弓形成群12羽（以下形成群）：われわれが教室で行っている方法に準じて椎弓形成術を行った。すなわち、露出した椎弓を内側骨皮質に至るまで菲薄化した後に、C4とC6椎弓中央部を横切して、前額面でZ字状になるように椎間関節の内側で

平成15年4月22日受理

側溝を作成する。次いで分割された3部分を脊髄に損傷を加えないように愛護的に交互にhinge状に持ち上げて脊柱管の拡大を行い、各椎弓が拡大位に保持されるように隣接椎弓切離端をナイロンで縫着させた。

X線学的検討方法

以上2群に対して、術前、術直後、術後2、4、12週目に頸椎側面機能撮影を行った。X線撮像は、静脈麻酔下に家兎を側臥位として撮像した。X線学的アライメント異常として、術後後弯変形と椎体前方すべり発生の有無について術式別に χ^2 乗検定を行った。アライメント異常の発生時期はアライメント異常の発生した週をend pointとしてKaplan-Meier法によって検討した。椎体前方すべりについては、椎体後縁にて下位椎体に対して上位椎体が1mm以上転位しているものを有意なすべりとして評価した。

生体力学的検討方法

力学的強度の検討では、X線撮像と同時期に定期的に家兎を屠殺し、C2からC7に至るまで頸椎を摘出して直ちに-40度で凍結保存した。計測時に凍結標本を室温で解凍して骨靱帯組織に損傷を加えないように、十分に筋組織を除去して試験試料を作成した。C5椎体が水平位となる位置で、C2-3およびC6-7椎間関節が固定されないように、C2椎体の上半分とC7椎体の下半分をpolymethylmethacrylateで埋没固定させ、アタッチメント付き試料を完成させた。試料作成中は組織を湿性に保った。上下のアタッチメントをアクチュエーター（安川電機製：50W, 3000rpm）とトルクメーター（共和電気製：1.96 Newton-meter；以下Nm）を装置した自作の頸椎構造強度試験装置に設置した。次いで、ACサーボモーターで試料の前後屈方向に角速度 $\omega=10[deg/sec]$ でトルクを負荷し時間に対する負荷トルクデータを得た。得られたデータから、変位角 $\theta[deg]=時間t[sec] \times 変位角速度\omega[deg/sec]$ の計算により時間を変位角に変換して頸椎の変位角と負荷トルクの関係を得た。なお、頸椎屈曲伸展における最大変位角は、予備実験に基づいて頸椎損傷を起こさなかった伸展30度と屈曲20度に設定した。こうして、伸展におけるトルク値（E）と屈曲における

トルク値（F）を計測して術式間での術後頸椎強度の経時的变化、X線学的アライメント異常との関連性について検討した。コントロールグループには手術操作を加えていない5つの頸椎を使用した。

結 果

X線学的検討結果

両術式別のX線学的アライメント異常の発生は、椎体すべりを形成術で12羽中1羽（8%）、切除術で11羽中5羽（45%）に認め形成術で有意に椎体すべりの発生率が低下していた（ $p<0.05$ ）。後弯変形は形成術で2羽（17%）、切除術で6羽（55%）に認められたが両術式間に有意差は認められなかった（ $p=0.053$ ）（表1）。アライメント異常発生時期をKaplan-Meier法によって検討すると、多くは術後早期に発生しており、椎体すべりは平均3.6週、後弯変形は平均3.7週であった。

生体力学的検討結果

F値平均は形成術で $0.084 \pm 0.021Nm$ 、切除術では $0.06 \pm 0.028Nm$ であり形成術で有意に高値を示していた（ $p<0.05$ ）。E値においては形成術で平均 $0.198 \pm 0.061Nm$ に対して切除術では平均 $0.145 \pm 0.065Nm$ と形成術で高値を示す傾向があったが有意差はなかった（ $p=0.087$ ）。術後経時的F値変化についてみると、形成術では術後12週に至るまで切除術に比べて高値を示しており、非処置頸椎と同様の範囲内の値であった。しかし、切除術では術直後の値は $0.038 \pm 0.013Nm$ であり、非処置頸椎よりも低値を示していた（図）。アライメント異常とトルク値との関連性についてみると、椎体すべりを有している群ではE値、E/F値およびF/E値において有意に値が低下していた（ $p<0.05$ ）が、後弯変形との間には有意な関連性を認めなかった（表2）。

	形成術	切除術	P Value
椎体すべり [no. (%)]	1 (8)	5 (45)	$p<0.05$
後弯変形 [no. (%)]	2 (17)	6 (55)	$p=0.053$

表1 術後頸椎アライメント異常発生率

両術式間での術後椎体すべりの発生率は形成術で有意に低値を示した。後弯変形発生率も形成術で低値となる傾向にあった。

椎体すべり

	有 (n=6)	無 (n=17)	P Value
E	0.13 ± 0.04 Nm	0.19 ± 0.06	< 0.05
F	0.08 ± 0.02	0.07 ± 0.03	NS
E/F	1.61 ± 0.33	2.89 ± 1.08	< 0.05
F/E	0.64 ± 0.14	0.39 ± 0.14	< 0.05

Values are mean (SD).

後弯変形

	有 (n=8)	無 (n=15)	P Value
E	0.16 ± 0.07	0.17 ± 0.09	NS
F	0.093 ± 0.03	0.076 ± 0.03	NS
E/F	1.97 ± 1.05	2.24 ± 0.98	NS
F/E	0.63 ± 0.29	0.58 ± 0.41	NS

Values are mean (SD).

表2 アライメント異常とトルク値との関連性

椎体すべりを有する群では有意にトルク値の低下を認められたが、後弯変形との間には関連性は認められなかった。

E：伸展30°におけるトルク値

F：屈曲20°におけるトルク値

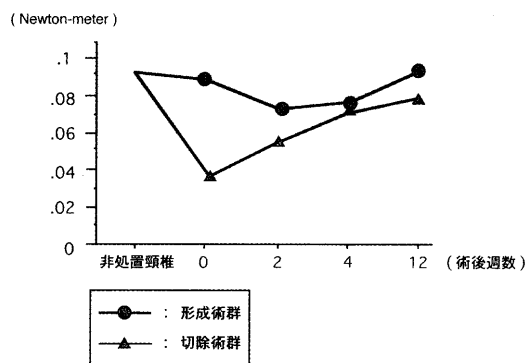


図 術式別術後F値の推移

図の灰白部分は非処置頸椎のトルク範囲を示す。形成術では術後12週に至るまで非処置頸椎と同様の範囲内であったが、切除術では術直後に著しい低値を示した。

考 察

頸椎椎弓切除術による脊髄圧迫病変の除圧は多椎間に及ぶ頸椎症性脊髄症に対して広く用いられてきた²⁻⁶⁾。しかし、特に若年者において術後にアライメント異常が生じやすいことが指摘されており⁷⁻¹⁰⁾、この欠点を補うべく服部式頸椎椎弓形成術が考案された¹⁾。これまでの当科での術後成績から、術後のアライメント異常は切除術で約33.3%に発生したのに対して形成術では16.4%と有意に低く、形成術は術後アライメント異常を予防する点で有意に優れていることは臨床的事実であった¹¹⁾。術後アライメント異常の発生する原因について、Simら⁸⁾は脊椎内の安定要素である骨・靭帯による支持性の損失が関与すると述べており、生体力学的研究^{12, 13)}や有限要素法による検討^{14, 15)}からも手術侵襲に伴う頸椎自体

の支持性の低下が原因とされている。そこで、今回は骨端線の残存した家兎を対象に生体力学的実験を行い、アライメント異常の原因について検討した。直立歩行のヒトと四足動物の家兎では頸椎に加わる負荷が異なるため、錠¹⁶⁾は動物実験の結果を直ちに人体に適應するには慎重でなければならないと述べている。一方、Fieldsら¹⁷⁾は家兎の頸椎にはヒトと比べて絶えず前屈方向に負荷が加わっているため、手術に伴う生体力学的変化がより敏感に反映されると述べている。本研究は術式別の支持性の比較研究を目的としているため、家兎を対象として検討を行った。

術後アライメント異常は家兎においても認められ、椎体すべりの発生率は切除術で有意に高く、すべりの生じた頸椎ではE値が有意に低下していた。このことから、椎弓切除術後の後方の骨・靭帯支持組織を失った頸椎では各椎体との連結性を失っており、従ってすべりが生じやすいと考えられる。しかし、形成術では椎体すべりの発生率が低いことから、隣接椎体間の安定性には椎弓とそれに付着する黄色靭帯が主にかかわっていると考えられた。一方、後弯変形に関しては発生の有無とE値およびF値との関連性は認められなかったが、トルク計測時には既に支持性が獲得されている可能性があるため、後弯変形発生の原因を知るためには術後経時的な強度の推移についての検討が必要である。F値は形成術では術直後から高値を示し術後12週に至るまで正常頸椎とほぼ同様の強度を維持していたが、切除術では術直後は有意に低値を示しており、両術式間で相違を認めた。術直後におけるF値の相違は、形成術で

は隣接椎弓を縫着したナイロン糸が棘間靭帯や黄色靭帯と同程度の頸椎屈曲に対する張力を担っているために生じたと推測している。また、術後経過とともに増大してくるF値については、Kimura¹⁸⁾や野中¹⁹⁾が組織学的検討からhinge grooveにおいて骨形成が生じることを観察しており、この組織修復に伴う骨性支持が屈曲に対する強度を増大させていると考えた。Kaplan-Meier法による検討から後弯変形が術後早期に発生しており、更に切除術で発生率が有意に高いことを考え合わせると、術後早期のF値が非処置頸椎より低下している症例では後弯変形の発生に注意する必要がある、この点で形成術は切除術に比べて優れていた²⁰⁾。

一方、後弯変形に関して頸椎後方筋群の関与が重要であるとする報告も多く^{2, 21, 22)}、Nolanら²³⁾はsemispinalisおよびsemispinalis capitisの両筋が頸椎の伸展位保持に基本的に重要な筋であり、起立筋は動的stabilizerとしての役割を持つとしている。教室の野村ら²⁴⁾は頸椎後方手術前後における頸椎後方筋群のCT値の観察から、術後の頸椎では後屈力が低下することを指摘しており、以上のことから後弯変形発生のメカニズムは、術後早期の骨靭帯支持性が低下し易変形状態にある頸椎に後方筋群の張力低下が加わることで発生し、更に術後経過において骨形成に伴う骨性支持が加わることで完成すると考えている。

また、Cattell²¹⁾やRaimondiら²⁵⁾は成人での脊椎安定性は変性が強くなるにつれ脊椎自体に依存してゆくものに対して、若年者では各種靭帯、傍脊柱筋および脊椎のそれぞれが成長のバランスを保ち、主に軟部組織が可動性を抑制することで安定性が保持されると述べている。従って、若年者に頸椎後方手術を行う場合には、術後早期から骨靭帯支持性が保たれている形成術がfirst choiceとなる。一方、全身状態に伴って手術時間の短縮が要求される高齢者などで、変形性頸椎症変化を伴っている症例では切除術も適応となり、頸椎後方手術を行う場合には適応を選び術式を選択することが重要であると考えられた。

結 語

家兎に対して服部式頸椎椎弓形成術および椎弓切

除群を行い、術後の頸椎支持性に関して以下の結果を得た。

1. 形成術では切除術に比べて椎体すべり ($p<0.05$) と後弯変形 ($p=0.053$) のいずれも発生率は低かった。
2. F値に関して、形成術では術後12週に至るまで非処置頸椎と同様の範囲内にあったが、切除術では術前の状態に回復するまでに約3週間を要していた。
3. 術後早期のF値がアライメント異常の発生に関連していた。
4. 形成術は頸椎後方要素を温存することによってアライメント異常を予防できる有用な術式である。

謝 辞

稿を終えるにあたり、終始懇切なる御指導と御校閲を賜りました山口大学高次統御系整形外科学講座河合伸也教授に深甚なる感謝の意を表します。また、本研究に際し、御助言と御協力を戴いた田口敏彦助教授に深謝致します。頸椎構造強度試験装置の製作に御協力戴いた山口大学大学院理工学研究科羽鳥敦司氏並びに河野俊一教授に深謝致します。

参 考 文 献

- 1) Kawai S, Sunago K, Doi K, Saika M, Taguchi T. Cervical laminoplasty (Hattori's Method) procedure and follow-up results. *Spine* 1989; **13**: 1245-1250.
- 2) 有馬 亨. 椎弓切除後の頸椎柱の変化. 脳・神経外傷 1969; **1**: 71-78.
- 3) Eiselberg A. Über eine bemerkenswerte Gestaltsveränderung der Wirbelsäule nach einer aus gedehnten Laminektomie wegen Rückenmarktumors. *Arch Orthop Unfallchir* 1930; **28**: 132-138.
- 4) Guigui P, Benoist M, Deburge A. Spinal deformity and instability after multilevel cervical laminectomy for spondylosis myelopathy. *Spine* 1998; **23**: 440-447.
- 5) Katsumi Y, Honma T, Nakamura T. Analysis

- of cervical instability resulting from laminectomies for removal of spinal cord tumor. *Spine* 1989 ; **14** : 1171-1176.
- 6) Mikawa Y, Shikata J, Yamamuro T. Spinal deformity and instability after multilevel cervical laminectomy. *Spine* 1987 ; **12** : 6-11.
 - 7) Lonstein JE. Post-laminectomy kyphosis. *Clin Orthop* 1977 ; **128** : 93-100.
 - 8) Sim FH, Svien HJ, Bickel WH, Janes JM. Swan-neck deformity following extensive cervical laminectomy. *J Bone Joint Surg Am* 1974 ; **56** : 564-580.
 - 9) Tachdjian MO, Matson DD. Orthopaedic aspect of intraspinal tumors in infants and children. *J Bone Joint Surg Am* 1965 ; **47** : 243-248.
 - 10) Yasuoka S, Peterson HA, MacCarty CS. Incidence of spinal column deformity after multilevel laminectomy in children and adults. *J Neurosurg* 1982 ; **57** : 441-445.
 - 11) 齊藤良明, 田口敏彦, 金子和生, 橋口 彰, 河合伸也. 服部式頸椎椎弓形成術と頸椎椎弓切除術の治療成績の比較検討. *整形外科* 2001 ; **50** : 6-8.
 - 12) Cusick JF, Pintar FA, Yoganandan N. Biomechanical alterations induced by multilevel cervical laminectomy. *Spine* 1995 ; **20** : 2392-2399.
 - 13) Nowinski GP, Visarius H, Ing D, Nolte LP, Herkowitz HN. A biomechanical comparison of cervical laminectomy with progressive facetectomy. *Spine* 1993 ; **18** : 1995-2004.
 - 14) Kumaresan S, Yoganandan N, Pintar FA, Voo LM, Cusick JF, Larson SJ. Finite element modeling of cervical laminectomy with graded facetectomy. *J Spinal Disord* 1977 ; **10** : 40-46.
 - 15) Saito T, Yamamuro T, Shikata J, Oka M, Tsutsumi S. Analysis and Prevention of spinal column deformity following cervical laminectomy: Pathogenetic Analysis of Postlaminectomy Deformities. *Spine* 1991 ; **16** : 494-502.
 - 16) 鏡 邦芳. 中下位頸椎の安定性: 生体力学的検討. *脊椎脊髄ジャーナル* 1991 ; **4** : 527-534.
 - 17) Fields MJ, Hoshijima K, Feng AHP, Richardson WJ, Myers BS. A biomechanical, radiologic, and clinical comparison of outcome after multilevel cervical laminectomy or laminoplasty in the rabbit. *Spine* 2000 ; **25** : 2925-2931.
 - 18) Kimura I, Shingu H, Nasu Y. Long-term follow-up of cervical spondylotic myelopathy treated by canal-expansive laminectomy. *J Bone Joint Surg Br* 1995 ; **77** : 956-961.
 - 19) 野中昭宏. 頸椎椎管拡大術に関する実験的研究 - 主として瘢痕の推移について -. *日外室* 1982 ; **51** : 945-960.
 - 20) Baisden J, Voo LM, Cusick JF, Pintar FA, Yoganandan N. Evaluation of cervical laminectomy and laminoplasty: A longitudinal study in the goat model. *Spine* 1999 ; **24** : 1283-1289.
 - 21) Cattell HS, Clark GL. Cervical kyphosis and instability following multiple laminectomies in children. *J Bone Joint Surg Am* 1967 ; **49** : 713-720.
 - 22) Ishida Y, Suzuki K, Ohmori K, Kikata Y, Hattori Y. Critical analysis of extensive cervical laminectomy. *Neurosurgery* 1989 ; **24** : 215-222.
 - 23) Nolan JP, Sherk HH. Biomechanical evaluation of the extensor musculature of the cervical spine. *Spine* 1988 ; **13** : 9-11.
 - 24) 野村耕三. 頸椎疾患における等尺性頸筋筋力に関する臨床的検討. *山口医* 1988 ; **37** : 137-152.
 - 25) Raimondi AJ. Laminectomy and total reconstruction of the posterior spine arch for spinal canal surgery in children. *J Neurosurg* 1976 ; **45** : 555-560.

Experimental Study of Postoperative Cervical Stability after Hattori's Procedure for Cervical Laminoplasty in Rabbits

Yoshiaki SAITO

*Dept of Orthopedics, and, Human Science
Yamaguchi University School of Medicine,
1-1-1, Minamikogushi, Ube, Yamaguchi 755-8505, Japan*

SUMMARY

The purpose of this study is to compare the postoperative cervical support after laminoplasty with that after laminectomy radiographically and biomechanically in an animal model. Twenty-three Japanese white rabbits were assigned to undergo laminectomy (11 rabbits) or laminoplasty (12 rabbits). Lateral radiographs of the cervical spine were obtained to evaluate the presence of kyphosis and anterior vertebral slip. After the rabbits were killed, biomechanical testing was performed with the use of a cervical structural strength testing system of our own design. The incidence of vertebral slip was significantly lower in the laminoplasty group (8%) than in the laminectomy group (45%). The incidence of kyphosis was 17% in the laminoplasty group as compared with 55% in the laminectomy group ($p=0.053$). On biomechanical testing, the torque values at flexion 20 degree (F) remained within normal limits for up to 12 weeks after operation in the laminoplasty group. In the laminectomy group, about 3 weeks were required for recovery to the preoperative level. The results suggest that postoperative malalignment is related to the F value early after operation. We conclude that the Hattori's procedure for cervical laminoplasty is an effective technique that permits reconstruction of posterior cervical elements.