実験的片開き頸椎管拡大術における応力の分布と構造上の安定 —有限要素解析法による検討—

Stress Distribution and Construct Stability in an Experimental Cervical Open-Door Laminoplasty Model —Three-dimensional Finite Element Analysis—

長島 弘泰^{*1} 弓削 康平^{*2} 谷山 竜介^{*2} 高尾 洋之^{*1}
大橋 洋輝^{*1} 磯島 晃^{*1} 谷 諭^{*1} 阿部 俊昭^{*1}

Hiroyasu Nagashima, M.D., Kohei Yuge, Ph.D., Ryusuke Taniyama, Hiroyuki Takao, M.D.,

Hiroki Ohashi, M.D., Akira Isoshima, M.D., Satoshi Tani, M.D., Toshiaki Abe, M.D.

Abstract

Background : Open-door cervical laminoplasty requires devices such as stay sutures (SS), laminar spacers (LS), and titanium mini-plates (TM) to keep the elevated lamina open. However, the significance and differences in the effects of each of these devices remain unclear. This study aimed at investigating the role of these devices, using a 3-dimensional finite element (FE) model.

Methods : An FE bone model of the fifth cervical vertebra was constructed. Its lamina was elevated by guttering at the hinge site, simulating an open-door technique (G model). SS, LS, and TM were added to the G model, simulating laminoplasty with SS (SS model), LS (LS model), and TM (TM model), respectively. Compression loading force was applied to the elevated lamina in 2 directions of the horizontal plane, and the stress distribution response was analyzed.

Results : The peak Mises stress which integrates the stresses in multiple directions into a unified vector was concentrated at the hinge region in the G and SS model. In the LS and TM model, the peak Mises stresses were observed in the connecting regions between the LS and the lateral mass, and the TM and the elevated lamina, respectively. The Mises stress in the hinge region was minimal in the LS model. Moreover, the bony peak Mises stress and the maximum deformation were minimal in the LS model.

Conclusions : This stress distribution study clearly demonstrated that the placement of artificial implants such as LS and TM determined the stress concentration at the hinge region during laminoplasty with SS. The results of deformation studies showed that LS was best for stabilizing the elevated lamina. Based on this analysis, we suppose that the use of LS for stabilization of the hinge region might yield favorable results over other devices in open-door laminoplasty.

(Received : September 27, 2012 ; accepted : March 6, 2013)

Key words

cervical spine, open-door laminoplasty, laminar spacer, finite element model, stress distribution

^{*1} 東京慈恵会医科大学脳神経外科／〒105-8461 港区西新橋 3-25-8〔連絡先：長島弘泰〕

Address reprint requests to : Hiroyasu Nagashima, M.D., Department of Neurosurgery, Jikei University School of Medicine, 3-25-8 Nishishinbashi, Minato-ku, Tokyo 105-8461, Japan

^{*2} 成蹊大学理工学部

Fig. 1

A three-dimensional model of the C5 vertebra with elevated lamina in an open-door fashion : G model with gutters ; SS model with stay sutures ; TM model with titanium mini-plates ; and LS model with laminar spacers.

緒言

頚椎症性脊髄障害の手術療法の1つとして「片開き頚椎管拡大術」が平林ら¹⁾により1977年に開発されて以来、わが国はもとより諸外国においても expansive open-door laminoplasty と呼ばれて広く行われるようになり、その変法、改良法が数多く報告されている²⁻¹²⁾。それらの方法における根本的な相違点の1つとして、椎弓の挙上を維持する方法の違いが挙げられる。

平林らの原法は、laminar spacer (LS) や titanium mini-plate (TM) などの人工移植物を使用せず、stay suture (SS) を用いて椎弓の挙上を保つものである^{10,13,14)}。最近では同様な目的で anchor screw などを使用した文献が散見され、現在も LS などを使用しない同術式の有効性が報告されている^{3,4,13,15)}。ほかの大部分の手術法は、挙上椎弓の再閉鎖予防のために LS を使用しており、そのうえで挙上椎弓の安定や良好な骨癒合を目的とした LS の材質や形状の変更、最近では軸性疼痛の軽減や頚椎可動性の維持を目的とした後頸筋群の温存などの変法が報告されている^{6,7,16-19)}。一方、TM で挙上椎弓を維持する方法は、挙上椎弓と外側塊の間にできる間隙に TM を設置し、挙上椎弓端と外側塊にスクリューで固定する方法であり、スクリュー固定による安定性と操作の簡便性が特徴である^{2,7-9,20)}。これらの手術方法の有用性を臨床的に検討した報告は多いが、挙上椎弓の維持法の違いがもた

らす基礎的な構造力学上の相違を検討した研究はきわめて少ない。

そこでわれわれは、SS, TM, LS を用いた片開き頚椎管拡大術の構造力学上の相違を比較検討することを目的として、3次元有限要素解析モデル (3D finite element model : FEM) を用いた解析を行った。本稿では、挙上椎弓に負荷を加えた際の、椎弓や TM, あるいは LS に生じた応力分布の変化から、それぞれの構造力学上の相違について検討し、報告されている臨床結果と比較し考察した。

対象および方法

今回使用した FEM は第5頚椎の模型より作製し、その椎弓を片開き法で挙上した (Fig. 1)。このモデルの蝶番部の骨に幅 0.6 mm、深さ 3.7 mm、水平より 26.4 度の切り込みを入れ、gutter を作成したものを G モデルとした。SS に使用する縫合糸のモデル化には、長さに対して断面が非常に小さい物体の解析を行う際に用いられるビーム要素を用い、直径が 0.5 mm のチタン製と設定した。この縫合糸モデルを挙上椎弓に2本取り付け、外側塊上に他端をボール支持 (並進自由度を拘束、回転自由度は自由) で固定したものを SS とし、SS を用いた片開き頚椎管拡大術後における蝶番の骨癒合前の状態を想定した。G モデルに TM を装着したモデルを TM モデルと

Fig. 2 A schematic view of the implant

- a : Schematic representation of the actual implant (Laminoplasty Basket) demonstrating a cage with small apertures and 2 arms.
b : A mini-plate made by removal of the cage from the laminar spacer.
c : Laminar spacer simulating Laminoplasty Basket.

し、TM を用いた片開き頸椎管拡大術後における蝶番の骨癒合前の状態を想定した。G モデルにチタン製 LS を使用したモデルを LS モデルとし、LS を使用した片開き頸椎管拡大術後における蝶番の骨癒合前の状態を想定した。使用した LS の材質は ELI チタン (extra low interstitial elements titanium) で、形状は Fig. 2 a に示した (Laminoplasty Basket : L-Basket ; Ammtec, Tokyo)¹⁹⁾。また、TM は L-Basket のスペーサー部分を除去して作成した (Fig. 2 b)。TM および LS のスクリュー部分は一体化させた。スクリューは骨モデルに小孔を開けて「ボルト結合拘束」を行った。拘束条件に関し、骨とスクリュー結合部は「軸一致」と「ボルト締め付け結合」(締め付け力 15N)、骨とプレートの接触面は「一致」と「面接触」とした。これらのモデルを要素に分割し、骨、TM、LS に生じる応力と変位を解析した。FEM の作成と解析にはコンピューターソフトウェア CATIA (ARGO GRAPHICS Inc., Tokyo) を用いた。

使用した骨とチタンの材料特性は Table 1 に示した。荷重条件は、x 方向に 5N、y 方向に -2N、大きさ 5.385N の分布荷重を骨にかけたものを横荷重、y 方向に -6N の分布荷重を与えたものを上荷重とした (Fig. 3)。この荷重は 600 g 弱のおもりを挙上椎弓上に置いた程度のものであり、日常生活で生じ得る負荷を想定した。

Table 1 Material properties of titanium and bone

	Titanium	Bone
Young modulus [N/m ²]	1.14e+11	8.75e+9
Poisson's ration	0.36	0.261
Density [kg/m ³]	4,460	1,456
Thermal expansion [Kdeg]	9.5e-6	2.36e-5
Yield strength [N/m ²]	8.25e+8	4.18e+7

Fig. 3 Loading force of the elevated lamina

- a : Oblique compression.
b : Direct compression.

Table 2 Peak Mises stress and maximum deformation in each model

		Peak Mises stress [MPa]		Maximum deformation [mm]
		Bone	TM/LS	
Oblique compression	G model	14.4		0.116
	SS model	2.55		0.022
	TM model	3.04	13.3	0.00793
	LS model	2.18	8.26	0.00403
Direct compression	G model	33.4		0.300
	SS model	11.5		0.114
	TM model	3.20	40.3	0.00841
	LS model	1.50	8.08	0.00385

結 果

横荷重および上荷重に対する各モデルの最大 Mises 応力と最大変位を Table 2 に示す。Mises 応力とは、負荷によって物質内に生じる多方向の応力を一軸化した数値である。ここで留意すべき点は、TM モデルと LS モデルはボルト接合拘束を行っているため、これらのモデル同士の最大 Mises 応力の単純比較は可能だが、これらのモデルと G モデルや SS モデルの最大 Mises 応力の単純比較はできないことである。G モデルと SS モデルの最大 Mises 応力の単純比較は可能である。また、SS モ

Fig. 4

The Mises stresses in the C5 vertebra. Peak stresses of 28.6 MPa and 14.1 MPa were observed in the hinge region of the G model under oblique and direct compressive loading, respectively. Corresponding peak stresses of 11.5 MPa and 2.55 MPa were observed in the hinge region of the SS model ; 39.4 MPa and 31.5 MPa, in the region connecting the TM with the elevated lamina in the TM model ; and 17.5 MPa and 16.6 MPa, in the region connecting the LS with the lateral mass in the LS model.

Fig. 5

A detailed sectional view of the elevated lamina and an inserted screw in the TM and LS model showing greater stress at the screw in the TM model than in the LS model, and the deformation is to make the screw backout in the TM model.

Fig. 6

A detailed sectional view of the hinge region in the TM and LS model showing that stress distribution is higher in the TM model than in the LS model.

デルの解析は骨の応力のみであり，牽引糸や外側塊上の固定部の応力は含まれていない．G モデルと SS モデルを比較すると，最大 Mises 応力，最大変位はともに SS モデルで減少し，特に横荷重における骨の応力の減少は著明であった．TM モデルと LS モデルを比較すると，LS モデルの最大 Mises 応力，最大変位はともに減少し，

特に上荷重で LS 内に生じる応力の減少は著明であった．最大変位において LS モデルは横荷重，上荷重ともに最小であった．

それぞれの荷重における応力分布図を Fig. 4 に示す．これらの図における横荷重に対する変形は，G モデルで 100 倍に，SS モデル，TM モデルと LS モデルは 500 倍

に増幅し明瞭化した。また、上荷重に対する変形は G モデル、SS モデルで 50 倍に、TM モデルと LS モデルは 500 倍に増幅し明瞭化した。Mises 応力の分布をみると、G モデルと SS モデルでは横荷重、上荷重ともに蝶番付近に集中し、最大 Mises 応力は蝶番部で生じた。TM モデルと LS モデルでは蝶番部の応力集中が抑制され、TM モデルでは挙上椎弓と TM の結合部に、LS モデルでは外側塊と LS の結合部に最大 Mises 応力が生じた。横荷重における挙上椎弓とスクリューの断面図では、TM モデルでは LS モデルよりスクリュー付近に応力が集中し、変形によってスクリューを引き抜く力が加わっていた (Fig. 5)。また、蝶番部の断面図にて、TM モデルの蝶番部には LS モデルより高い応力分布を認めた (Fig. 6)。

■ 考 察

数値解析法の 1 つである有限要素解析の医学への応用は、1970 年代より試みられ²¹⁾、その後コンピューター技術の発展に伴う急速な解析能力の向上により、頭部外傷の発生メカニズムの解明などに用いられている^{22~25)}。脊椎脊髄分野でも、この手法は instrumentation における強度解析、また頸髄損傷や腰椎分離すべり症のメカニズムの解明などに応用されている^{26~28)}。しかし、片開き頸椎管拡大術の際の挙上椎弓における力学的負荷などの解析において、本手法はほとんど応用されていない。

今回使用した解析モデルにおいて、蝶番部の応力分布は TM や LS の有無により顕著に変化した。G モデルと SS モデルでみられた明らかな蝶番部への応力集中は、ほかのモデルでは認めなかった。本解析では、牽引糸をチタン製の直径 0.5 mm と設定しており、実際より強固なものとして評価した。また、牽引糸の支持点も固定としたが、実際には支持点も負荷に応じて移動することが予想される。より強固に挙上椎弓を固定したと考えられるモデルにおいて、蝶番部に応力が集中した結果は、SS を用いた術式における合併症として蝶番の破綻をきたしやすいことを示唆している。臨床報告でも、Satomi ら²⁹⁾は 204 例中 4 例の蝶番落下による上肢運動障害を報告し、これらの症例の中にはスペーサーを使用しない術式が含まれている。また、Yonenobu ら³⁰⁾は、手術時における gutter 作成の際に、椎弓の可動性を確認しながら注意深く掘削することの重要性を強調しており、今回の解析は、それを裏付ける結果といえる。

また、挙上椎弓の閉鎖は、SS を用いた術式における問題点の 1 つであり、術後早期合併症としての報告が散見

される^{1,2,18,31,32)}。今回の結果においても、TM や LS の使用により挙上椎弓の安定性がきわめて高くなることは、負荷に対する TM モデルと LS モデルの最大変位が SS モデルより著明に減少したことから明らかである。しかし、今回の解析モデルにおいて、LS 非使用手術における挙上椎弓の閉鎖が臨床上の問題になるかどうかは不明である。臨床報告において Matsumoto ら¹³⁾は、LS 非使用症例において術後 3 カ月まで挙上椎弓は徐々に閉鎖したがそれ以降は安定したと報告しており、蝶番の骨癒合後には椎弓の安定が得られることを示唆している。

一方、TM と LS を使用した場合、荷重による応力はこれらと骨との接合部に集中した。特に TM モデルで挙上椎弓断端の接合部に、結合を外そうとする力が働くことが今回の解析で明らかになった。臨床的にも Rhee ら⁷⁾は、TM を用いた片開き法を報告し、椎弓側のスクリューの離脱が 2.3% に生じ、スクリューを 2 個装着することで離脱を予防し得たと報告しており、今回の結果と符合する。さらに今回の解析では、LS を使用することで、このスクリュー部分と蝶番部に生じる応力分布はともに軽減されることが示唆された。よって、LS 使用手術は、より優れた挙上椎弓の維持と蝶番の安定が期待できる。

今回使用したモデルは 1 つの椎体のみを使用したシンプルなものであり、ゆえに、挙上椎弓の維持法の違いによる応力の変化を解明する目的において、明瞭な結果を得ることができた。Tadepalli ら³³⁾も、1 椎体の片開き頸椎管拡大術モデルを屍体頸椎と FEM にて作成し、挙上椎弓への荷重実験の結果、FEM の生体力学的解析の有用性を報告している。しかし、本モデルは、頸椎の屈曲、伸展、回旋などによる応力の解析には適さず、また、頸椎高位により椎体・椎弓の形状が異なる点を考慮していないなど、実際の症例に即していない点があり、今後の課題であると考ええる。

■ 結 語

片開き頸椎管拡大術の FEM において、SS を用いたモデルでは応力は蝶番部に集中し、TM や LS の使用により蝶番部の応力は著明に減少した。TM を使用した場合、挙上椎弓と TM との接合部に応力が集中し、同部のスクリューが離脱するような変位を認めた。LS の使用により挙上椎弓との接合部の応力分布は減少し、変位も最小であった。よって LS は、挙上椎弓の維持という本来の目的以外に、蝶番を安定させる効果をもつと考えた。

文 献

- 1) Hirabayashi K, Watanabe K, Wakano K, et al : Expansive open-door laminoplasty for cervical spinal stenotic myelopathy. *Spine* **8** : 693-699, 1983
- 2) Roselli R, Pompucci A, Formica F, et al : Open-door laminoplasty for cervical stenotic myelopathy : surgical technique and neurophysiological monitoring. *J Neurosurg* **92** : 38-43, 2000
- 3) Wang HQ, Mak KC, Samartzis D, et al : "Spring-back" closure associated with open-door cervical laminoplasty. *Spine J* **11** : 832-839, 2011
- 4) Chen HC, Chang MC, Yu WK, et al : Lateral mass anchoring screws for cervical laminoplasty : preliminary report of a novel technique. *J Spinal Disord Tech* **21** : 387-392, 2008
- 5) Yang SC, Niu CC, Chen WJ, et al : Open-door laminoplasty for multilevel cervical spondylotic myelopathy : good outcome in 12 patients using suture anchor fixation. *Acta Orthop* **79** : 62-66, 2008
- 6) Prahraj SS, Vasudev MK, Kolluri VR, et al : Laminoplasty : an evaluation of 24 cases. *Neurol India* **48** : 249-254, 2000
- 7) Rhee JM, Register B, Hamasaki T, et al : Plate-only open door laminoplasty maintains stable spinal canal expansion with high rates of hinge union and no plate failures. *Spine* **36** : 9-14, 2011
- 8) Park AE, Hellar, JG : Cervical laminoplasty : use of a novel titanium plate to maintain canal expansion—surgical technique. *J Spinal Disord Tech* **17** : 265-271, 2004
- 9) O'Brien MF, Peterson D, Casey AT, et al : A novel technique for laminoplasty augmentation of spinal canal area using titanium miniplate stabilization. A computerized morphometric analysis. *Spine* **21** : 474-483, 1996
- 10) Vitarbo E, Sheth RN, Levi AD : Open-door expansile cervical laminoplasty. *Neurosurgery* **60** : S154-S159, 2007
- 11) Herkowitz HN : Cervical laminoplasty : its role in the treatment of cervical radiculopathy. *J Spinal Disord* **1** : 179-188, 1988
- 12) Herkowitz HN : A comparison of anterior cervical fusion, cervical laminectomy, and cervical laminoplasty for the surgical management of multiple level spondylotic radiculopathy. *Spine* **13** : 774-780, 1988
- 13) Matsumoto M, Watanabe K, Tsuji T, et al : Risk factors for closure of lamina after open-door laminoplasty. *J Neurosurg Spine* **9** : 530-537, 2008
- 14) Hirabayashi K, Miyakawa J, Satomi K, et al : Operative results and postoperative progression of ossification among patients with ossification of cervical posterior longitudinal ligament. *Spine* **6** : 354-364, 1981
- 15) Iwasaki M, Okuda S, Miyauchi A, et al : Surgical strategy for cervical myelopathy due to ossification of the posterior longitudinal ligament : Part 1 : Clinical results and limitations of laminoplasty. *Spine* **32** : 647-653, 2007
- 16) Tani S, Isoshima A, Nagashima H, et al : Laminoplasty with preservation of posterior cervical elements : surgical technique. *Neurosurgery* **50** : 97-101, 2002
- 17) Tanaka N, Nakanishi K, Fujimoto Y, et al : Expansive laminoplasty for cervical myelopathy with interconnected porous calcium hydroxyapatite ceramic spacers : comparison with autogenous bone spacers. *J Spinal Disord Tech* **21** : 547-552, 2008
- 18) Hosono N, Sakaura H, Mukai Y, et al : En bloc laminoplasty without dissection of paraspinal muscles. *J Neurosurg Spine* **3** : 29-33, 2005
- 19) Tani S, Suetsuna F, Mizuno J, et al : New titanium spacer for cervical laminoplasty : initial clinical experience. Technical note. *Neurol Med Chir (Tokyo)* **50** : 1132-1136, 2010
- 20) Chen G, Luo Z, Nalajala B, et al : Expansive open-door laminoplasty with titanium miniplate versus sutures. *Orthopedics* **35** : e543-548, 2012
- 21) Ward CC, Thompson RB : The development of a detailed finite element brain model. *Proc. 19th STAPP Car Crush Conf.* 641-674, 1975
- 22) 村上成之, 中村紀夫, 西本哲也, 他 : 側頭部衝撃におけるびまん性脳損傷の発生機序についての一考察—二次元有限要素法を用いた脳内応力分布の検討から. *神経外傷* **22** : 110-116, 1999
- 23) Nishimoto T, Murakami S : Relation between diffuse axonal injury and internal head structures on blunt impact. *J Biomech Eng* **113** : 140-147, 1998
- 24) 高尾洋之, 村上成之, 西本哲也, 他 : 有限要素法モデルを用いた脳挫傷の発生メカニズム. *交通科研資* **48** : 77-78, 2007
- 25) Watanabe D, Yuge K, Nishimoto T, et al : Simulation of a human head subject to a lateral rotational impact and study on the cause of a diffuse axonal injury. *Int J Vehicle Safety* **5** : 333-344, 2011
- 26) Puttlitz CM, Goel VK, Traynelis VC, et al : A finite element investigation of upper cervical instrumentation. *Spine* **26**, 2449-2455, 2001
- 27) Imajo Y, Hiiragi I, Kato Y, et al : Use of the finite element method to study the mechanism of spinal cord injury without radiological abnormality in the cervical spine. *Spine* **34** : E83-87, 2009
- 28) 西良浩一 : 腰椎分離症—Spinal surgeon が知っておくべき State of the Art. *脊髄外科* **25** : 119-129, 2011
- 29) Satomi K, Ogawa J, Ishii Y, et al : Short-term complications and long-term results of expansive open-door laminoplasty for cervical stenotic myelopathy. *Spine J* **1** : 26-30, 2001
- 30) Yonenobu K, Oda T : Posterior approach to the degenerative cervical spine. *Eur Spine J* **12** (Suppl 2) : 195-201, 2003
- 31) Kaminsky SB, Clark CR, Traynelis VC : Operative treatment of cervical spondylotic myelopathy and radiculopathy. A comparison of laminectomy and laminoplasty at five year average follow-up. *Iowa Orthop J* **24** : 95-105, 2004
- 32) Okada M, Minamide A, Endo T, et al : A prospective randomized study of clinical outcomes in patients with cervical compressive myelopathy treated with open-door or French-door laminoplasty. *Spine* **34** : 1119-1126, 2009
- 33) Tadepalli SC, Gandhi AA, Fredericks DC, et al : Cervical laminoplasty construct stability : an experimental and finite element investigation. *Iowa Orthop J* **31** : 207-214, 2011