三次元有限要素法による腰椎の応力解析 (関節突起間部を 3D-C T 像と比較して)

宮崎医科大学整形外科教室

坂 本 武 郎・田 島 直 也
平 川 俊 一・田 代 宏 一
帖 佐 悦 男・鳥取部 光 司

Three-Dimensional Finite Element Analysis of Lumbar Vertebrae (Compared with 3D-CT at the Pars Interarticularis)

by

Takero Sakamoto, Naoya Tajima,
Shunichi Hirakawa, Koichi Tashiro,
Etsuo Chosa and Koji Totoribe

Department of Orthopaedic Surgery,
Miyazaki Medical College, Japan

This study was done clarify the biomechanical factors causing spondylolysis using a three-dimensional finite element method and 3D-CT.

The geometry of the finite element model is based on the L5 posterior element of a 29-year-old man.

Simulated loads were applied to the surface of the superior and the inferior facets vertically.

Stress distribution results indicate that there were high stresses in the pars interarticularis, especially the ventral cortical bone. The results of finite element studies and the general lesion of spondylolysis were in agreement, and were confirmed with 3D-CT.

It is suggested that stress is an important factor in the etiology of spondylolysis and that 3D-CT is a valuable tool in diagnosing the incipient stage of this disorder.

Key words : three-dimensional finite element method (三次元有限要素法), 3D-CT, stress (応力), spondylolysis, (脊椎分離症)

はじめに

腰椎椎間関節におけるストレスは、腰椎分離症の病態に関与していると考えられ、臨床上重要である。今回、力学的解析手段として最近用いられつつある三次元有限要素法を用いて腰椎のモデルを作成し、腰椎椎弓関節突起間部における応力について解析しその発症

に関する力学的検討を行ない、また、腰椎分離症患者の 3D-C T 撮影を行い比較検討したので報告する。

方 法

解析モデルは、29 歳男性の第 5 腰椎の C T 撮影を行い、これらを重ねた形状をもとに可能なかぎり忠実に三次元腰椎後方部分モデルを作製した。また、解析

モデルは、左右対称とし、椎弓根、上下関節突起、横突起、椎弓板、棘突起よりなり、皮質骨、海綿骨、関節突起軟骨を区別した。

解析要素は、8 節点 6 面体で構成されるソリッド要素を用い、要素数は、皮質骨 1028、海綿骨 488、関節軟骨 60 とし、要素総数 1576、節点総数 2408 に分割した。

解析に際して、各要素の Young 率と Poisson 比は、Shirazi-Adl ら^{5, 6)}の文献を参考に決定した。皮質骨、海綿骨、関節軟骨の Young 率と Poisson 比は、各 12 000、0.3、100、0.2、1、0.3 とし、等方弾性体としてあつかった (表 1)。

表 1 物質特性値

	ヤング率(MPa)	ポアソン比
皮 質 骨	12000	0.3
海 綿 骨	100	0.2
椎 間 関 節 軟 骨	1	0.3

荷重条件としては、両上関節突起および下関節突起の関節軟骨面に垂直に 1MPa の均一分布荷重をあたえた。また、拘束条件としては、椎弓根椎体側を絶対拘束とした。

このモデルにおいて、応力分布について解析、検討し、腰椎分離症患者の 3D-CT と比較検討した。なお有限要素法解析は、NEC 製パーソナルコンピューターと SRAC 製 COSMOS/M を用い、3D-CT は東芝性 TCT-900S を用いて撮影、解析した。

結 果

関節突起間部に応力集中部位を認めた (図 1)。さらに、この部位での要素応力の平均値は、腹側皮質骨、背側皮質骨、海綿骨の順に高値をとる傾向にあった。

この方向の 3D-CT 像では、関節突起間部で斜位型の分離が認められた。

3D-CT の側面像、底面像では分離部がはっきりするまで不要な部分を削りとり、関節突起間の分離部を確認した (図 2)。

図 1 三次元有限要素法応力分布図
関節突起間部に応力集中部位を認める。

考 察

腰椎分離の成因については、諸説があるが、椎弓関節突起間部など脊椎の構築的脆弱部におけるストレスが関与していると考えられている。佐口³⁾、山崎⁷⁾によると、関節突起間部の分離部の形態は、斜位型が多いことを報告している。今回、我々の皮質骨、海綿骨、関節軟骨を区別した三次元有限要素法解析においては、関節突起間部に応力集中部位を認めた。また、応力集中部位は、上関節面直下の高さで上内方より下外方に向かう斜位型となり、臨床上多くの腰椎分離を認める部位と一致した。さらにこの部位での応力は、腹側皮質骨、背側皮質骨、海綿骨の順に高値をとる傾向にあり、小林ら²⁾の CT で、初期に腹側に分離が認められたことを力学的解析により裏付けることになった。腰椎後方は、三次元的複雑な形態を有しているため、単純 X 線写真だけでは立体的に十分理解しがたいことがある。そこで我々は空間的位置関係の把握が容易となり、任意の面から見た立体像を形成できる 3D-CT^{1, 4)}を用いることにより、分離部の三次元的形態把握を行った。現在の 3D-CT は被爆量も少なくなったため臨床的に分離症の症状を呈し X 線上診断の確定しない症例に有用と考える。

さらにこの部位での応力は、腹側皮質骨、背側皮質骨、海綿骨の順に高値をとる傾向にあるので、今後は、初期分離例の 3D-CT を撮影し、初期に腹側に分離が認められることを検討したい。

ま と め

- 1) 三次元有限要素法により、皮質骨、海綿骨、椎間関節軟骨を区別して第 5 腰椎椎弓モデルを作成し応

図2 3D-C T像

- (a) 背面像
- (b) 側面像
- (c) 斜位像
- (d) 底面像

(b) (d) は分離部が明確になるところまで削ってある。

力分布をもとめ、3D-C T像と比較検討した。

- 2) 応力集中部位は、上関節面直下の高さで上内方より下外方に向かう斜位型となり臨床で多くの腰椎分離症を認める部位と一致し、これを3D-C Tにて確認した。
- 3) 関節突起間部での応力は、腹側皮質骨、背側皮質骨、海綿骨の順に高値を示し、初期分離が腹側から起こることを裏づける結果となった。

参 考 文 献

- 1) 小林正之他：脊椎・脊髓疾患に対する三次元C Tの意義。Orthopaedics.42：23-30. 1991.
- 2) 小林良充他：成長期脊椎分離症における腰痛。臨床整形外科災害外科，34：1327-1332，1991.
- 3) 佐口享史：脊椎分離症の椎弓に関する研究。日整会誌，46：105-123，1972.
- 4) 佐藤雅人他：三次元表面再構成法の整形外科領域への臨床応用。臨整外，22，8：911-919，1987.
- 5) Shirazi-Adl A., et al.: Mechanical response of a

lumbar motion segment in axial torque alone and combined with compression. Spine, 11 : 914-927, 1986.

- 6) 山元功他：有限要素法による全腰椎動態解析。整形外

科バイオメカニクス, 11 : 17-19, 1989.

- 7) 山崎裕行：脊椎分離症の成因に関する力学的検討。近畿大医誌, 14 : 213-224, 1989.