

腰椎のイメージベースモデルによる 脊椎分離過程の解明

静岡大学
聖隷病院

○坂井田喜久
小林 良充

静岡大学〔院〕塚本 大徳

Finite Element Analysis of Spondylolysis Process Using Image Based 3D Lumbar Spine Models

Yoshihisa SAKAIDA, Hironori TSUKAMOTO, and Yoshimitsu KOBAYASHI

1. 緒言

成長期スポーツ選手の腰椎分離症の多くは、関節突起間部に発生¹⁾²⁾し、関節突起間部の応力集中による骨折が主原因と考えられているが、椎弓部での一側分離やその後の完全分離過程の解明には至っていない。また、椎弓部以外のたとえば椎体等の腰椎分離についても原因は明らかになっていない。

本研究は、腰椎の関節突起間部とそれ以外の部位に生じる腰椎分離の発生メカニズムを解明するために、腰痛患者の腰部断層写真から腰椎全体をモデル化したイメージベースドモデルを作成し、有限要素法解析による腰椎の応力解析結果から腰椎分離について検討した。

2. 解析方法

2.1 L5 腰椎の抽出と3次元モデルの作成 Fig.1 に示す腰部断層写真から腰椎の皮質骨、海綿骨、椎間軟骨を分離し、L5 腰椎の皮質骨と海綿骨から構成される3次元モデル (Fig.2 参照) を作成した。腰部断層写真は Tiff 形式に画像変換した後、画像処理ソフト (RATOC 製) により皮質骨、海綿骨、椎間軟骨をそれぞれ抽出し、断層画像間を補間して3次元化した。なお、3次元モデルは、椎体下面が xy 平面とほぼ平行となるように回転操作し、一辺 0.75 mm の8節点立方体要素で要素分割した。Table I は、皮質骨と海綿骨に与えた弾性係数 E 、 ν を示す³⁾⁴⁾。モデルの要素数と節点数は 130,291、180,463 で、その内、皮質骨の要素数と節点数は、93,902、131,838 であった。

2.2 腰椎の応力解析 腰椎の応力解析は、有限要素法ソフト ANSYS より行った。解析は、Fig.2 に示すように椎体下面を z 方向に拘束した状態で、左右の上関節突起と

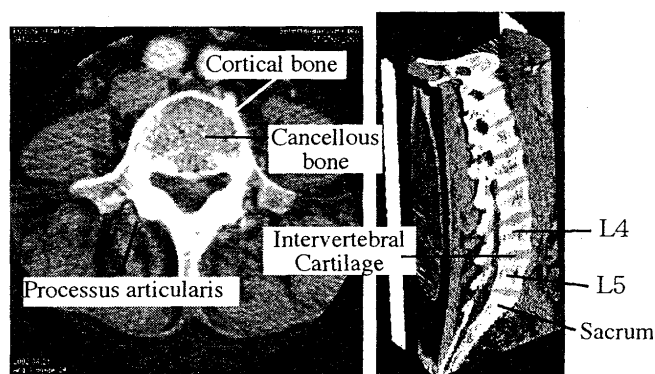


Fig.1 CT images of lumbar spine.

下関節突起の片側① (回旋運動) または両側①と② (伸展運動) に同じ強制変位量を与えた。なお、L5 腰椎は、L4 腰椎、または仙椎と、上下関節突起間の椎間関節を介して干渉する。よって、回旋と伸展時の強制変位は、関節突起部の干渉面に垂直な方向に与えた。

3. 解析結果および考察

3.1 回旋または伸展運動による腰椎の一側分離 前報⁵⁾ では安静時に腰椎に発生する応力場を解析し、安静時や立位、座位の状態で発生する主応力は最大でも 17.5MPa 程度で、椎体皮質骨中央の海綿骨との界表面や側外面の円周方向、上下関節突起の干渉面、椎弓外面① (Fig.4 参照) などに高い引張応力が分布するが、応力場はほぼ左右対称で、椎体骨折はもとより、椎弓部での一側分離は発生しないと考えられる。

一方、スポーツ時に腰椎間の上下関節突起が干渉する運動には、回旋運動と伸展運動がある。Fig.3(a) と Fig.3(b) は、回旋または伸展運動時に発生する第一主応力分布を示す。また、第一主応力の上位 5 点の発生位置と応力値、主応力方向を Table II にまとめて示した。なお、Fig.4 に①-⑤の発生点を示した。また、応力値は、第一主応力の最大値を 1 として規格化し、 l_1 、 l_2 、 l_3 は各軸との方向余弦である。今回の解析では、上下関節突起間の椎間関節との接合部を干渉面と定義したため、前報の解析結果⁵⁾ と若干異なる応力場となったが、回旋運

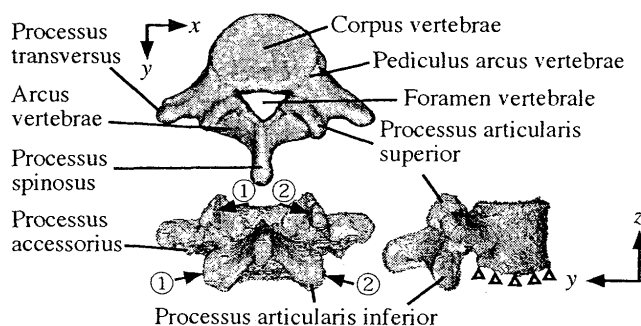


Fig.2. Finite element model and analysis conditions.

Table I. Stiffness of lumbar vertebrae³⁾⁴⁾

	Cortical bone	Cancellous bone
Young's modulus, E (GPa)	12.0	0.1
Poisson's ratio, ν	0.3	0.2

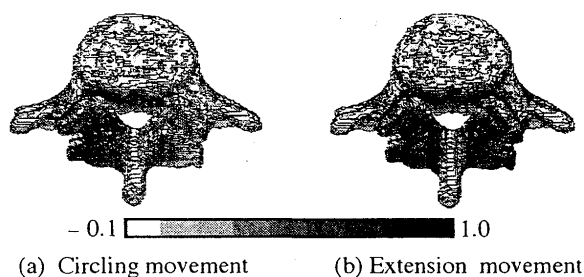


Fig.3. Maximum principal stress field, σ_1 , during exercise.

Table II. Maximum principal stress and direction cosine generated during circling and extension movements.

	1st	2nd	3rd	4th	5th
Location	(E)	(F)	(G)	(D)	(H)
σ_1	1.00	0.46	0.28	0.28	0.25
l_1	0.516	-0.310	-0.462	0.538	0.843
l_2	0.776	0.778	0.550	0.587	0.532
l_3	0.363	0.547	-0.696	-0.605	0.076
	1st	2nd	3rd	4th	5th
Location	(E)	(C)	(F)	(A)	(H)
σ_1	1.00	0.88	0.70	0.62	0.43
l_1	0.513	0.690	-0.326	-0.428	0.862
l_2	0.780	-0.534	0.776	0.769	0.505
l_3	0.358	0.488	0.540	0.475	0.035

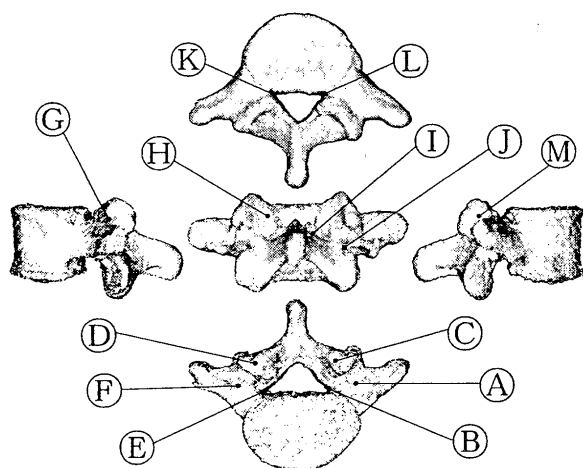


Fig.4. Typical maximum principal stress points generated during circling and extension movements.

動時には、Fig.5(a)に主応力をベクトル表示したように、強制変位を与えた上下関節突起部と椎弓との境界線（図の断面 α ）上に、境界面を引き裂くような引張応力が点在しており、断面 α での一側分離が最も骨折の危険性が高い部位と判断できる。

同様に、伸展運動時に発生する代表的な主応力をベクトル表示すると、Fig.5(b)のようになる。伸展運動では関節突起の両側①と②に強制変位を与えているので、巨視的にはほぼ左右対称に近い応力場となっているが、強制変位を与えた上下関節突起部と椎弓との境界線上に働く主応力の大きさや方向は、左右で大きく異なる結果となった。今回のモデル対象となった患者の腰椎は、椎弓部の上縁と下縁の骨の厚みは左右で大きく異なり、左上縁の厚さは右骨の1/5と非常に薄い。よって、伸展運動においても断面 α での一側分離が最も骨折の危険性の高

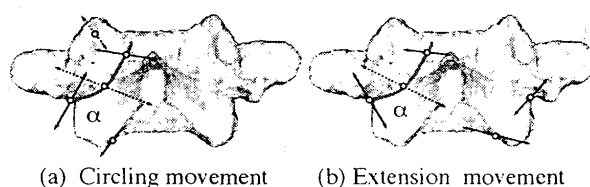


Fig.5. Predicted unilateral spondylolysis portions during circling and extension movements.

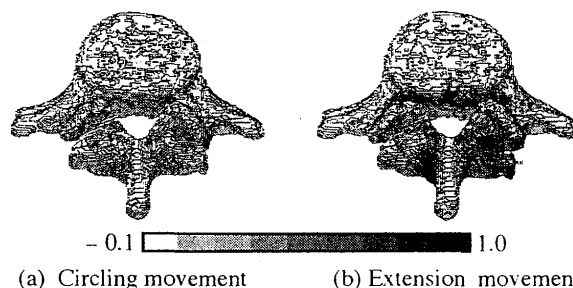


Fig.6. Maximum principal stress field, σ_1 , during circling and extension movements after unilateral spondylolysis.

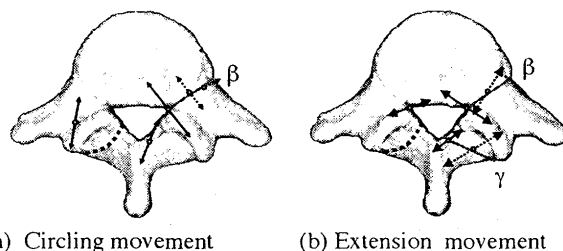


Fig.7. Predicted secondary spondylolysis portions after unilateral spondylolysis.

い部位と判断した。断面 α での一側分離は、関節突起部での発生件数が高い部位¹⁾⁶⁾⁷⁾とほぼ一致する。

3.2 一側分離後の分離過程（2次骨折）前節より、回旋運動や伸展運動時の主応力により関節突起部と椎弓との境界断面 α での一側分離が発生すると予測した。本節では、断面 α で一側分離が生じた後、さらに回旋運動や伸展運動を継続した場合に腰椎に発生する応力場を解析した。Fig.6(a)とFig.6(b)は、一側分離後に回旋①および伸展運動を行ったときの第一主応力分布を示す。なお、図は実際の変位を77倍に拡大したものである。前節と同様に、主な主応力をベクトル表示したものをFig.7(a)とFig.7(b)に示す。

一側分離後、さらに上下関節突起①に回旋運動を継続させると、Fig.7(a)に示したように、椎弓根の頭側と椎体との接合界面④に第一主応力の最大値が発生し、第二位の主応力発生点⑧と、副突起と椎弓根の尾側との境界点⑨とを結ぶ断面 β で骨折する危険性が高い。また、伸展運動を継続した場合は、同じ断面 β の他に、椎弓部の断面 γ で骨折する可能性も高い。どちらが2次骨折部位となるかは、今後破壊シミュレーションを実施して判定する予定である。なお、断面 β での骨折は剣道選手の症例¹⁾とほぼ一致している。以上、腰椎のイメージベースドモデルを用いた有限要素法解析により、腰椎の分離過程を解明できる可能性が高いことがわかった。

4. 結言および参考文献（省略）