

特発性側彎症の力学的成因仮説に基づく臨床形態の分類

Classification of Clinical Deformities Based on Hypothesis of Mechanical Etiology for Idiopathic Scoliosis

○ 正 笹岡 竜 (名大院) 面高 俊樹 (名大院) 正 青山 大樹 (名大院) 正 畔上 秀幸 (名大院)

Ryu SASAOKA, Toshiki OMODAKA, Taiki AOYAMA, Hideyuki AZEGAMI, Graduate School of Information Science, Nagoya University, 1 Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601

Key Words: Biomechanics, Idiopathic scoliosis, Individual modeling, Growth, Buckling, Finite element method

1. はじめに

脊柱の生理的彎曲に異常をきたす疾患は側彎症と呼ばれる。その中でも椎体やそれを取りまく筋、靭帯に際立った異常が見られない状況で、成長期に発症する側彎症は、原因不明の意味を含めて特発性側彎症と呼ばれてきた。特発性側彎症の成因について、これまで医学界では、メラトニンなどのホルモン異常に着目した仮説が注目されてきた。しかしながら、脊柱は体形を保持する力学的な機能を有しており、治療法も装具による矯正術や手術による金属棒とフックあるいはねじを用いた固定術であることを考えれば、生理学的成因と合わせて、力学的成因も治療法を開発する上での基礎となる重要な役割を担っている。

著者らは、これまで脊柱有限要素モデルを用いた数値解析と脊柱模型を用いた実験により、特発性側彎症の成因として、成長期における急激な椎体成長による座屈説を提唱してきた^{(1),(2)}。これまでの結果から、成長する部位を変化させた4次と6次の座屈モードが、それぞれシングルとダブルカーブに対応した多様な側彎形態と類似であることを確認した⁽³⁾。

一方、著者らは、座屈説に基づけば、座屈現象の発生を遅らせるための最適な補強部位を、形状最適化理論の応用により解析可能であることを示した⁽⁴⁾。実際、臨床分類ごとの最適な補強部位の解析結果は、治療方針の経験則を裏付ける結果になっていた。さらに、形状最適化理論の応用により、X線写真やCTなどの医用画像に合わせて既存の脊柱有限要素モデルを変更するモーフィング法を開発した⁽⁵⁾。

そこで、これらの成果を応用すれば、患者固有の側彎形態を有する脊柱有限要素モデルをモーフィング法により構築し、一方で、正常な脊柱モデルの椎体が成長したときの座屈モードを解析し、両者の相関を評価することによって、患者固有の成因となる成長パターンが特定できる可能性がある。患者固有の成長パターンが特定されれば、患者固有の自然経過予測や最適治療部位の特定、治療経過予測などが期待できる。本研究では、実際の臨床データを用いて、患者固有の成長パターンの特定を試みた。

2. 方法

患者の側彎形態は、前報^{(3),(4)}の脊柱有限要素モデルを用いてモーフィング法により制作した。一方、代表的な座屈モードは、正常な脊柱有限要素モデルから、前報⁽³⁾と同様に成長部位を変化させた49ケースの座屈解析の結果を用いた。ただし、本研究では、患者の側彎形態では頸椎の位置が正常位置に保たれていることから、頸椎C2とC7を上下の自由度を残して固定した。したがって、必ずしも4次がシングル、6次がダブルカーブではなくなる。患者の側彎形態と座屈モードとの相関係数 ρ は、正常な脊柱有限要素モデルの領域 $\Omega \in \mathbb{R}^3$ を基準にして、患者の側彎形態をモーフィング法で変形したときの変位 $\mathbf{u} : \Omega \mapsto \mathbb{R}^3$ と座屈モード $\mathbf{v} : \Omega \mapsto \mathbb{R}^3$ を用いて次式で定義し、有限要素法で計算した。

$$\rho = \frac{(\mathbf{u}, \mathbf{v})_{(L^2(\Omega))^3}}{\sqrt{(\mathbf{u}, \mathbf{u})_{(L^2(\Omega))^3}} \sqrt{(\mathbf{v}, \mathbf{v})_{(L^2(\Omega))^3}}}, \quad (\mathbf{u}, \mathbf{v})_{(L^2(\Omega))^3} \equiv \int_{\Omega} \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} \, d\Omega \quad (1)$$

3. 結果

図1, 3, 表1, 2にシングルカーブの結果を、図2, 4, 表3, 4にダブルカーブの結果を示す。前報⁽³⁾で、シングルカーブは局所的

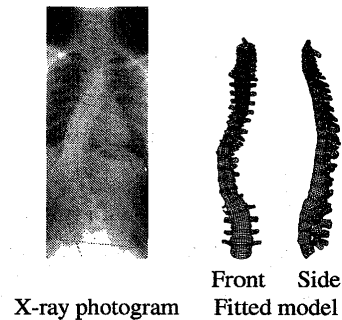


Fig. 1 Case 1 with single curve

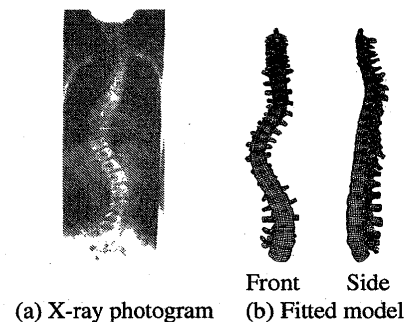


Fig. 2 Case 2 with double-major curves

な成長で発生し、ダブルカーブは広域的な成長で発生することを考察したが、これらの結果はそれを裏付ける結果になっている。

なお、本研究は、川上紀明医師(名城病院整形外科)よりデータ提供をいただいた。ここに謝意を表する。

文献

- (1) H. Azegami, S. Murachi, J. Kitoh, Y. Ishida, N. Kawakami, and M. Makino. Etiology of idiopathic scoliosis: Computational study. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, No. 357, pp. 229–236, 12 1998.
- (2) R. Sasaoka, H. Azegami, S. Murachi, J. Kitoh, Y. Ishida, N. Kawakami, M. Makino, and Y. Matsuyama. Investigation of buckling phenomenon induced by growth of vertebral bodies using a mechanical spine model. *JSME International Journal Series C*, Vol. 46, No. 4, pp. 1382–1387, 12 2003.
- (3) 竹内謙善, 畔上秀幸, 笹岡竜, 村地俊二, 鬼頭純三, 石田義人, 川上紀明, 後藤学, 牧野光倫, 松山幸弘. 特発性側彎症の成因に関する数値シミュレーション(多様なモードの成因). *脊柱変形, 日本側彎症学会誌*, Vol. 16, No. 1, pp. 11–16, 12 2001.
- (4) K. Takeuchi, H. Azegami, S. Murachi, J. Kitoh, Y. Ishida, N. Kawakami, and M. Makino. Study on treatment with respect to idiopathic scoliosis: Sensitivity analysis based on buckling theory. *JSME International Journal Series C*, Vol. 44, No. 4, pp. 1059–1064, 12 2001.
- (5) R. Sasaoka and H. Azegami. Construction of finite-element models conforming to prescribed boundary shapes. *日本計算工学会論文集*, No. 200500002, pp. 1–6, 1 2005. (Paper No.200500002 published January 21, 2005).

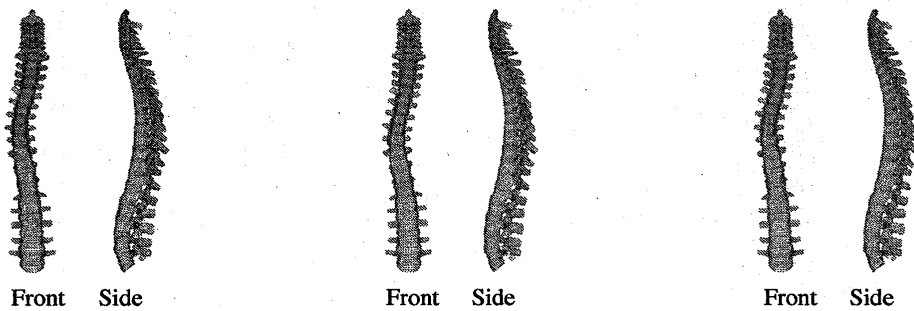
Table 1 Coefficients of correlation with respect to the most similar buckling mode for Case 1 with single curve

Center	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	L1	L2	L3
n=5	0.008	0.950	0.953	0.954	0.939	0.964	0.964	0.840	0.961	0.959	0.502	0.949	0.436
n=7		0.954	0.957	0.958	0.908	0.965	0.964	0.962	0.957	0.953	0.949	0.949	
n=9			0.959	0.958	0.963	0.963	0.962	0.958	0.952	0.948	0.947		
n=11				0.962	0.963	0.962	0.959	0.900	0.006	0.948			
n=13					0.962	0.959	0.956	0.953	0.951				
n=15						0.956	0.953	0.953					
n=17							0.953						

T: Thoracic vertebra, L: Lumbar vertebra, n : Number of growth vertebrae

Table 2 Mode numbers of the most similar buckling mode for Case 1 with single curve

Center	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	L1	L2	L3
n=5	4	3	3	3	2	4	4	2	2	2	2	2	1
n=7		4	5	4	2	2	2	2	2	2	2	2	
n=9			4	4	3	2	2	2	2	2	2		
n=11				4	3	2	2	1	3	2			
n=13					3	2	2	2	2				
n=15						2	2	2					
n=17							2	2					



(a) Second mode at T5-T11 growth (b) Fourth mode at T7-T11 growth (c) Fourth mode at T6-T10 growth

Fig. 3 The best fitted buckling modes for Case 1 with single curve

Table 3 Coefficients of correlation with respect to the most similar buckling mode for Case 2 with double-major curve

Center	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	L1	L2	L3
n=5	0.469	-	0.269	0.292	0.459	0.357	0.113	-	0.270	0.091	0.439	0.349	0.620
n=7		0.149	0.158	0.207	0.476	0.374	0.196	0.044	0.269	0.468	0.557	0.550	
n=9			0.460	0.473	0.442	0.346	0.137	0.234	0.223	0.586	0.591		
n=11				0.458	0.411	0.291	0.005	0.658	0.524	0.578			
n=13					0.329	0.124	0.158	0.382	0.467				
n=15						0.104	0.280	0.340					
n=17							0.296						

Table 4 Mode numbers of the most similar buckling mode for Case 2 with double-major curves

Center	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	L1	L2	L3
n=5	5	-	4	5	2	2	2	-	6	4	6	5	5
n=7		6	5	4	3	3	4	4	4	5	5	5	
n=9			4	4	4	4	4	4	4	5	5		
n=11				4	4	4	4	3	4	5			
n=13					4	4	4	4	4				
n=15						4	4	4					
n=17							5						

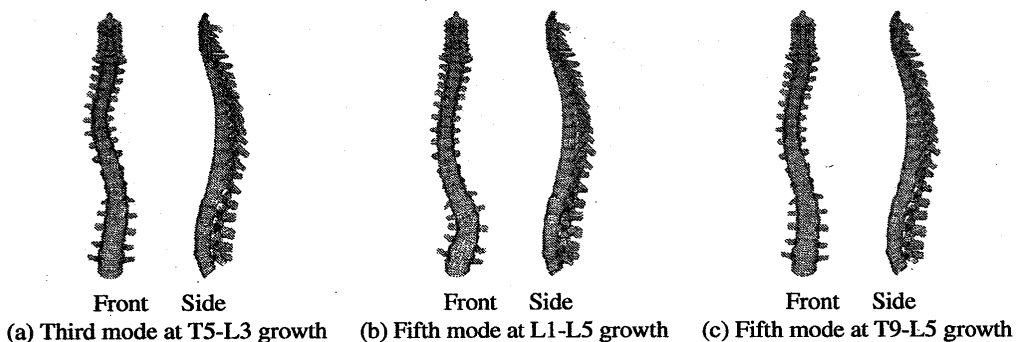


Fig. 4 The best fitted buckling modes for Case 2 with double-major curves