

脊柱力学模型による特発性側彎症の成因説明

Etiology Study on Idiopathic Scoliosis Using a Mechanical Spine Model

正 笹岡 竜 (豊橋技科大院)

正 畔上 秀幸 (豊橋技科大)

川上 紀明 (名城病院)

Ryu SASAOKA, Graduate school of Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi
Hideyuki AZEGAMI, Toyohashi University of Technology
Noriaki KAWAKAMI, Orthopaedic Surgery of Meijyo Hospital, 1-3-1 Sannomaru, Naka-ku, Nagoya

Key Words: Idiopathic Scoliosis, Growth, Buckling, Mechanical Spine Model, Experimental Modal Analysis

1. はじめに

脊柱の生理的彎曲に異常を来す疾患は一般に、側彎症と呼ばれる。中でも、椎体やそれを取り巻く靭帯に際立った異常の見られない状態で突然発症する側彎症は、特発性側彎症と呼ばれる。

我々は胸郭付脊柱有限要素モデルを用いた数値シミュレーションによって、特発性側彎症の成因が椎体の成長に伴う4次あるいは6次(側屈2次あるいは3次)の座屈現象であるとする座屈説について検討してきた^{(1),(2)}。一方、座屈説を実験的に検証する試みも行ってきた⁽³⁾。そこでは、成長機構を有する長方形断面柱を構築し、成長による座屈実験を行った。しかしながら、上端の角度拘束がなければ座屈現象は観測されず、生理的彎曲と椎間関節を組み込んだ精密な力学模型による座屈実験が必要とされた。そこで、著者らは、数値シミュレーションで使用した脊柱有限要素モデルの形状データに基づいた精密な脊柱模型を構築し、椎体の成長による座屈現象を振動実験によって検出することを試みた⁽⁴⁾。しかしながら、この実験でも座屈らしい現象を観測するためには脊柱上端の僅かな負荷が必要であった。その原因として、椎間関節の剛性不足を考察した。

本研究では、これまでの結果を踏まえて、椎間関節の材質を違えた3体の力学模型を構築し、椎体の成長に伴うそれらの動特性の変化を振動実験によって計測し、その結果から側屈2次に注目した座屈現象の検出を試みた。

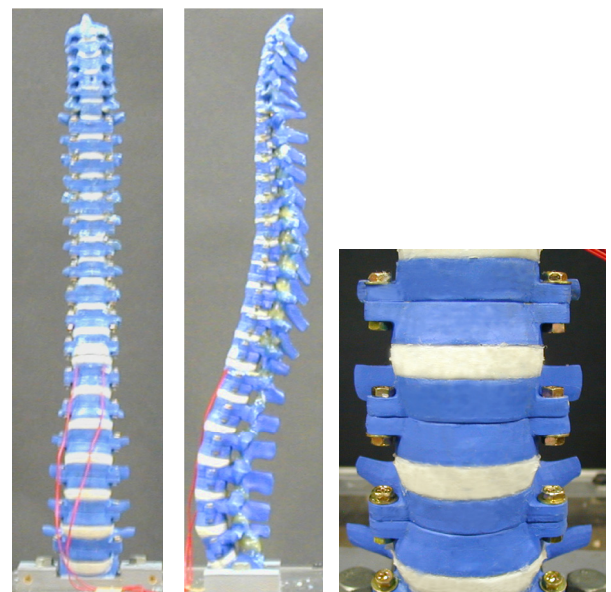
2. 脊柱力学模型

本研究で使用した脊柱力学模型を図1に示す。本模型は、第1頸椎から仙骨上端部までの椎骨、椎間板、椎間関節で構成されている。各構成要素の幾何学的形状は、数値シミュレーションで使用した胸郭付き脊柱有限要素モデル⁽⁵⁾の表面データを使用した。椎骨と椎間板は、ケミカルウッド(サンモジュールMH, (有) 田木屋商店)を用いて3次元切削加工機(MODELA MDX-15, ローランド ディージー(株))で原型を切り出し、型取り用シリコン(信越シリコン KE-14, 信越化学工業(株))でメス型を製作した。椎骨は、そのメス型を用いて、硬質無発泡ポリウレタン(HEI-CAST, (株) 平泉洋行)で成形した。椎間板は、シリコンRTVゴム(信越シリコン KE-17, 信越化学工業(株))で成形した。一方、椎間関節は、椎骨間の隙間に充填剤を注入することで製作した。その充填剤には、次の3種類を選んだ。

- A シリコン系充填剤(バスコーク, セメダイン(株))
- B 変成シリコンポリマー(サイレックス, コニシ(株))
- C 常温硬化カラーウレタンゴム(ADAPT 80L, 発売元 国際ケミカル(株))

それぞれで構築した脊柱模型をモデルA, B, Cと呼ぶことにする。椎体と椎間板の接着にはシリコン系充填剤(バスコーク, セメダイン(株))を使用した。モデル構築の際、椎骨間の相対位置精度を確保するために、専用の治具をラピッドプロトタイプングシステム(熱溶解樹脂押出積層造形装置, Genisys, Stratasys Inc.)で製作した。有限要素モデルと比較すると、胸郭部が省略され、椎間板の髄核、椎骨の骨端輪、硝子軟骨板、海綿骨がそれぞれ均質材質として簡略化されている。有限要素モデルでは椎間関節のYoung率が7.5MPaであったが、モデルCで9MPa(メーカー仕様)、モデルAおよびBは、感触から判断して、それよりも小さな値と推測される。

椎体の成長は、有限要素法解析と同様、仙骨部固定、上端部自由の下で第4胸椎から第10胸椎までの椎体を成長させた。この際、椎体の成長は、Dicksonら⁽⁶⁾の指摘や著者ら^{(4),(7)}の検討結果を考慮して、各椎体を上下中央面で分断し(図1(c))、椎体前方に様々な厚さの板を挿入し、ネジで締結した。有限要素法の線形座屈解析では、成長変形が増加していく過程で現れる分岐現象として解析されていたが、本実験ではネジ締結を施した時点で座屈が発生するか、あるいは発生し易い状態をつくり上げたことになる。



(a) front view (b) side view (c) enlarged front view

Fig. 1 Mechanical spine model constructed in this study

3. 振動実験による座屈現象の検出

椎体前方に板を挿入し、ネジ締結した状態で、側屈 1 次の座屈変形が観察された。その変形を矯正する過程（第 5 頸椎付近を中央に引き寄せる過程）で安定的な側屈 2 次の座屈モード状の変形が観察された。本研究では、このときの変位やひずみの変化を計測することは困難であると判断して、側屈 2 次の座屈モードに対応した固有振動モードに着目し、固有振動数の変化を計測することにした。実際、連続体を有限自由度に近似したとき、剛性マトリクスの変化 ΔK による r 次の振動固有値（固有振動数の 2 乗）の変化 $\Delta\lambda^{(r)}$ は、質量マトリクス M とその固有振動モードベクトル $\phi^{(r)}$ を用いて次式で与えられる。

$$\Delta\lambda^{(r)} = \frac{\phi^{(r)T} \Delta K \phi^{(r)}}{\phi^{(r)T} M \phi^{(r)}} \quad (1)$$

ただし、 $(\cdot)^T$ は転置を表す。座屈現象は剛性の低下 ($\phi^{(r)T} \Delta K \phi^{(r)} < 0$) をもたらすことから、座屈が発生した状態、あるいは発生し易い状態では振幅に依存して座屈が発生し、対応する固有振動数は低下することが予想される。

本実験では、加振器で第 5 頸椎を左右に加振した。加振器から駆動棒を介して取り付けられた力ピックアップと 6 つの加速度ピックアップを用いて 17 箇所の伝達関数を応答点移動により計測し、実験モード解析システム (VIBRANT-GEN, 丸紅ソリューション (株)) を用いて本模型の 1 次から 4 次までの固有振動モードを計測した。その結果を図 2 に示す。この結果より、2 次の固有振動モードが側屈 2 次の座屈モードに対応することを確認した。そこで、2 次の固有振動数に注目し、第 11 胸椎前方表面の左右に貼付した 2 枚のひずみゲージの出力差 (曲げひずみ) からひずみ周波数応答関数を計測し、その結果から 2 次の固有振動数を評価した。なお、椎体に挿入した板の質量による影響は、板を表面に付着させた場合とさせない場合の比較から誤差の範囲内であることを確認した。

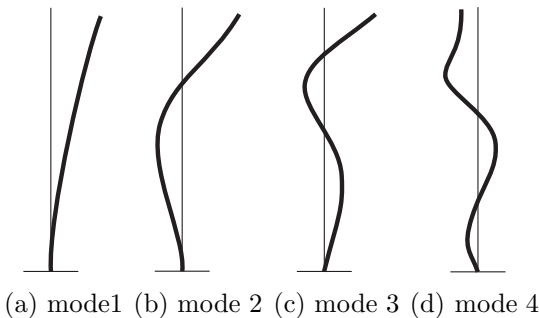


Fig. 2 Natural vibration modes

4. 結果

振動実験による固有振動数の変化を図 3 に示す。モデル B と C において、総成長量 (挿入板厚さの和) の増加に伴って固有振動数が減少する結果となった。モデル A ではこれらの変化が見られなかった。

5. 考察

成長量の増加に対して固有振動数が減少したことは、質量の変化が無視できる程度であったことを考慮すれば、剛性の低下を意味する。分岐型の座屈現象は剛性の低下を伴

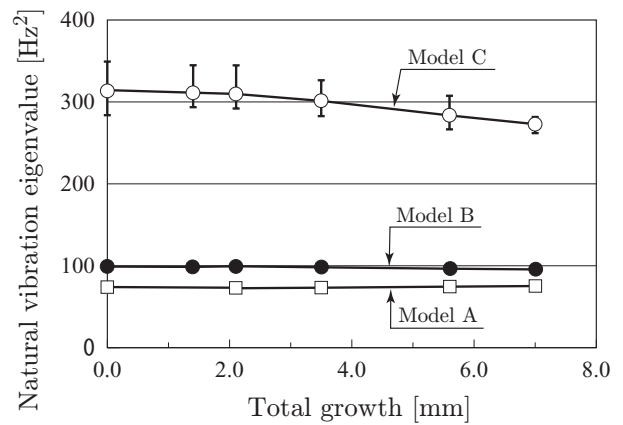


Fig. 3 Variations of the second natural frequencies with growth of vertebral bodies

うことから、本実験のモデル B と C で観測された固有振動数の低下は座屈現象の発生を意味すると考えられる。

また、本研究で構築した脊柱模型のモデル全体にわたる曲げ剛性を調べた結果、Lucas ら⁽⁸⁾による韧带付屍体脊柱の横曲げ実験 (横荷重 0.5N を作用させた場合) の結果と比較して、モデル A, B, C の結果はそれぞれ 45%, 47%, 113% であった。この比較から、モデル C が現実の脊柱の曲げ剛性に最も近いと考えられる。

これらの考察から、特発性側彎症は椎体の成長に対する椎間関節の剛性による抵抗が引き起こす座屈現象であるとする仮説を補強する結果になると考えられる。

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) 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.
- (3) 畔上秀幸, 村地俊二, 鬼頭純三, 石田義人, 川上紀明, 牧野光倫. 特発性側彎症の成因に関する力学模型実験. 脊柱変形, 日本側彎症学会誌, Vol. 13, No. 1, pp. 29–32, 12 1998.
- (4) 笹岡竜, 竹内謙善, 畔上秀幸, 村地俊二, 鬼頭純三, 石田義人, 川上紀明, 牧野光倫, 松山幸弘, 後藤学, 稲生秀文, 吉原永武. 脊柱特発性側彎症の成因に関する力学模型実験 - 精密な脊柱力学模型を用いた検討 -. 脊柱変形, 2002. (投稿中).
- (5) 竹内謙善, 畔上秀幸, 村地俊二, 鬼頭純三, 石田義人, 川上紀明, 牧野光倫. 特発性側彎症の成因に関する数値シミュレーション (数値モデルの精密化). 脊柱変形, 日本側彎症学会誌, Vol. 14, No. 1, pp. 25–28, 12 1999.
- (6) R. A. Dickson, J. O. Lawton, I. A. Archer, and W. P. Butt. The pathogenesis of idiopathic scoliosis (biplanar spinal asymmetry). *J. Bone and Joint Surg.*, Vol. 66B, pp. 8–15, 1984.
- (7) 竹内謙善, 笹岡竜, 畔上秀幸, 村地俊二, 鬼頭純三, 石田義人, 川上紀明, 牧野光倫. 脊柱特発性側彎症の成因に関する計算力学的研究 (重力に抗する骨構築に起因した座屈説). 日本計算工学会論文集, Vol. 4, pp. 153–160, 5 2002.
- (8) D. B. Lucas and B. Bresler. Stability of the ligamentous spine. *Biomechanics Laboratory Rpt.* 40, Univ. of California, 1961.