

特発性側弯症発症メカニズムの非線形座屈解析による検討

孫 涵^{*1}, 畔上 秀幸^{*2}

Study on pathogenic mechanism of idiopathic scoliosis by nonlinear buckling analysis

Han SUN^{*1} and Hideyuki AZEGAMI^{*2}

^{*1,*2} Graduate School of Information Science, Nagoya University
A4-2(780) Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

Received 27 April 2015

Abstract

The present paper describes the numerical results by the finite-element method of unstable phenomena of the spine induced by the growth of vertebral bodies in order to investigate the cause of the idiopathic scoliosis. In the previous study, through the linear buckling analysis using simple plate models, we confirmed the existence of the buckling phenomena, and made clear the region of geometrical parameters in which the buckling phenomena occur. These results support the buckling hypothesis as a cause of initiation of the idiopathic scoliosis. However, this theory is valid for infinitesimal deformation and is not applicable to estimate the stability for post-buckling behavior. In this study, we conduct post-buckling simulations caused by the growth of vertebral bodies considering the geometrical nonlinearity using the simple plate model and spine models with full width and half width. From the results, the existence of the non-linear buckling phenomena are confirmed in the simple plate model and the spine model with half width. Moreover, after the non-linear buckling phenomena, stable deformations are obtained excepting each one case in the simple plate model and the spine model with half width. However, the magnitudes of the post-buckling deformations are too small to explain the pathogenesis of the severe deformity observed in patients of idiopathic scoliosis.

Key words : Biomechanics, Finite element method, Buckling, Finite deformation theory, Idiopathic scoliosis, Growth

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巻く筋や靭帯に際立った異常が見出されない状況で、急峻な発育を示す思春期の女子に多く発症する回旋を伴う右凸の側彎症は、成因不明の意味を込めて特発性側彎症と呼ばれてきた。高度の特発性側彎症に至っては、心理的な苦痛に加えて、疼痛や胸郭変形を伴う心肺機能の低下を来す場合がある。特発性側彎症の病因に関して、これまで様々な仮説が唱えられてきた。

医学の観点からは、特発性側彎症の病因について次のような仮説が唱えられてきた (Lowe, et al., 2000; 日本側彎症学会編, 2013)。それらは (1) 遺伝的要因, (2) 生理的要因 (メラトニン異常, 血小板カルモジュリン異常), (3) 結合織異常, (4) 骨・軟骨構造異常, (5) 傍脊柱筋異常, (6) 神経系異常に関わる仮説などである。しかしながら、それらの中から決定的な要因は見つけられていない。さらに、それらが互いに関連するとしても、病因なのか2次

No.15-00293 [DOI:10.1299/transjsme.15-00293]

^{*1} 正員, 名古屋大学情報科学研究科 (〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町)

^{*2} 正員, フェロー, 名古屋大学情報科学研究科

E-mail of corresponding author: sun.han@a.mbox.nagoya-u.ac.jp

的な結果なのかに関して様々な見方がある。また、それらの仮説において、特発性側彎症の発症と進行が成長期に集中することから、成長が何らかの関与をしていることは広く認められている。

脊柱は体幹の姿勢を保持する構造力学的な機能を持ち、成長は構造の変化を意味する。そこで、例えば生理的要因が病因であると仮定しても、特発性側彎症に至る過程では、構造力学的な発症のメカニズムが存在すると考えられる。上記仮説の中で、骨・軟骨構造異常は構造力学的な発症メカニズムの有力な候補となる。この仮説に関するこれまでの研究は、次の2つに大別される。(1) 不均衡成長説と(2) 座屈説である。前者は成長そのものが左右非対称であるとする仮説であり、後者は成長そのものは左右の均衡が取れていても、前後の成長速度の違いにより、内力が発生し、より安定した別の変形に飛び移る現象(座屈現象)であるとする仮説である。ただし、これらは二者択一ではなく、互いに関連していると考えられる。

最初に、不均衡成長説に関する研究について紹介する。不均衡成長説を支持する研究は次のようである。Normelli, et al. (1985) は、側彎症患者の左肋骨付近の血流量が多いことに注目し、左肋骨が右肋骨よりも長くなっていることを指摘した。さらに、Sevastik, et al. (1990) は、左肋骨が右肋骨よりも先行して成長することによって、胸椎の右回旋とそれに伴う右凸の彎曲が生じるという仮説を提唱した。Stokes and Laible (1990) は、左肋骨の過成長による胸郭の変化を簡略な有限要素モデルを使って解析し、軽度の彎曲までは再現できることを示した。一方、それらに対して、批判的な見方や研究は次のようである。左肋骨付近の血流量が多いことは、彎曲が起こったことによる二次的な結果であるとの見方もできる。また、Stokes and Gardner-Morse (1991) は、簡略化された脊柱有限要素モデルを用いて、椎体の上下方向の成長に左右の不均衡が生じた場合の変形と、不均衡成長ではないが脊柱後部の靭帯による拘束(tethering)が存在する下で成長が起こった場合の変形を解析している。しかし、臨床のような彎曲は現れなかったことを報告している。Stokes, et al. (1996) は、ラットの尾を使って、様々な負荷を与えた場合の成長を計測し、Hueter-Volkman 則(負荷が作用する方向に骨が変形する)に従っていることを明らかにし、彎曲のためには不均一な負荷が必要であることを示唆した。しかし、その負荷が何によって発生するかということは明確にはされていない。さらに、椎弓根の成長が左右非対称になることが回旋と彎曲を生むとする仮説も古くから唱えられてきた。しかし、Huyh, et al. (2007) は、簡略化された構造要素で構成された脊柱有限要素モデルを用いて、椎弓根の非対称な成長による脊柱の変形を解析したが、臨床でみられるような変形は得られなかったことを報告している。

次に、座屈説に関する研究について紹介する。Arkin (1950) は、脊柱を左右方向を板厚として前後方向に広がりをもったゴム板(左右方向よりも前後方向の剛性の方が高い)とみなし、それを面内で前後方向に曲げるとよじれること、ゴム板を上から押すと横に曲がることを用いて特発性側彎症のメカニズムを説明した。面内の曲げモーメントや上からの力に関しては体重や前後の成長速度の違いによる内力などが想定される。Somerville (1952) は、椎体と椎間板を円柱とみなしたモデルを作成し、後方に取り付けた紐を短くすることで前彎をもつ脊柱モデルを作成し、前に曲げると回旋が起こり、上から押すと回旋が増すことを使って特発性側彎症のメカニズムを説明した。Roaf (1977) も円盤を3本の長さの異なるワイヤでつなげたモデルを使って上から押すと回旋が起こることを示し、特発性側彎症の回旋が起こるメカニズムを説明した。これらは、力学的な観点からは、前後の曲げ変形から回旋を含む左右の曲げ変形に移行する座屈現象であることを模型を使って表現していたと考えられる。座屈という用語を用いた仮説は、Lucas and Bresler (1961) が提唱した。彼らは、成人男性の死体から摘出した靭帯付脊柱を用いた曲げ実験の結果から各椎体間の曲げ剛性を算出し、Euler 座屈の理論を適用することにより、胸椎上端に重りを乗せたときの座屈荷重を推定した。その結果、胴体部の重量程度で座屈が発生することを指摘した。Andriacchi, et al. (1974) は、椎体に剛体要素を用いた3次元脊柱有限要素モデルにより、Lucas らの仮説と胸郭の影響について調べた。その結果、胸郭があることによって座屈荷重が3倍程度に増加し、胸郭が脊柱の安定化に寄与することを示唆した。篠田, 村地 (1976, 1977) は、胸郭による拘束に注目し、特発性側彎症は胸郭による拘束の下で脊柱が急激に成長することによる座屈現象であるとする仮説を唱えた。さらに、Dickson, et al. (1984) は、症例と標本の観察に基づいて、成長期では胸椎の後彎が著しく減少していることに注目し、椎体(椎骨の椎間板に接した部分)の成長による座屈現象であるとする仮説を提唱した。Porter (2000) は、脊髄の短縮が脊椎後方部分の成長を拘束することが胸椎の後彎を減少させているとする仮説を提唱した。Chu, et al. (2006) は、脊髄の長さの増大に比べて、脊柱の成長が早いことが脊柱の不安定化の要因であるとする仮説を提唱した。

一方、著者ら(Azegami, et al., 1998; 竹内他, 2001) は、これまで、Dickson, et al. (1984) の指摘に注目し、椎体の

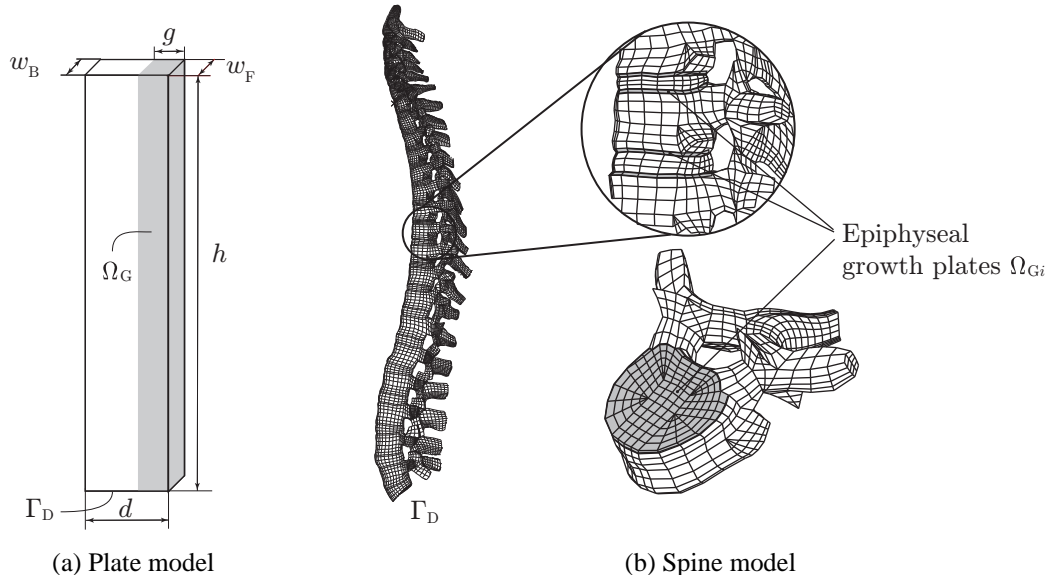


Fig. 1 Spine models

成長に伴う線形座屈解析を脊柱有限要素モデルを用いて行い、臨床でみられる様々な側弯変形が4次と6次の座屈モードとして得られることを示した。その際、3次以下の低次モードはすべて脊柱上端で変位が最大となるモードであったことから、姿勢を制御する筋の作用によってそれらのモードの発生は抑えられると考えられた。さらに、Aoyama, et al. (2008) は、姿勢制御の作用を上端につけたばねでモデル化し、非線形座屈解析を試みた。その結果、側弯変形を含む座屈現象が確認された。しかし、そのときの最大振幅は1mmに満たない程度であった。

これらの研究において、二つの課題が残されていた。一つは、同じ脊柱有限要素モデルを使用しても、商用のソフトウェアによっては座屈モードが得られない場合があったことである。その原因として、三角柱状の5面体要素などが使われていたことが考えられた。もう一つは、4次あるいは6次モードから分岐した後の成長変形を大変形を考慮して解析することができなかったことである。前者の課題に対しては、著者ら Sun and Azegami (2015) は、簡単な板状の有限要素モデルを用いて、底面のみを固定した下で、板の前方部分のみを成長(膨張)させたときの線形弾性変形解析とその変形によって引き起こされる座屈現象を複数のソフトウェアを用いて解析し、ソフトウェアに依存しない座屈現象が発生する幾何学的条件が存在することを明らかにした。さらに、生理的彎曲や脊柱後部の穴構造がその幾何学的条件に及ぼす影響を評価し、椎体の成長に伴う座屈説の妥当性を裏付ける結果を得た。

本研究では、2つ目の課題について取り組んだ。すなわち、線形座屈解析で得られた臨床と類似の座屈モードから分岐した後の成長変形を大変形理論に基づいて求めることを試みる。そのために、本研究では、臨床と類似の座屈モードを初期不整にもつ脊柱モデルを用いて、非線形成長変形を有限要素法によって解析する。なお、Aoyama, et al. (2008) の研究では、座屈モードを初期不整にもつ脊柱モデルを用いた解析は行われなかった。本研究の解析によって明らかにしたいことは、座屈現象が発生した後の成長変形は安定であるのか、さらに、臨床でみられる側弯変形まで座屈説で説明できるのかを明らかにすることである。

2. 解析モデル

本研究では、図1に示すような板モデルと脊柱モデルが使われた。図1(a)の板モデルは、前報 Sun and Azegami (2015) で使用されたものと同じで、幅 $w_F = w_B = 6\text{mm}$ 、奥行 $d = 50\text{mm}$ 、高さ $h = 600\text{mm}$ である。有限要素には、4面体2次要素が使われ、要素数 265812 および節点数 403781 である。図1(b)の脊柱モデルは、竹内他 (2001) によって開発された胸郭なし脊柱有限要素モデルで、要素数 59356、節点数 69658 である。

3. 有限要素法による解析方法

本研究では、これらのモデルを用いて、次のような有限要素法解析が行われた。前報 Sun and Azegami (2015) では、大変形を考慮した成長変形問題と非線形座屈問題の弱形式が示され、それを基にして線形座屈問題の支配方程式(弱形式)と有限要素法による数値解析の方法について説明された。本論文では、本研究で使われた成長変形問題と非線形座屈問題に焦点をあてて、再度それらの弱形式を示すことにする。また、本研究では、有限要素法解析には Abaqus 6.12 (Dassault Systèmes) が使われた。

3.1 正常モデルの成長による線形弾性問題

脊柱全体の領域を $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ とする。 \mathbb{R} は実数全体の集合を表す。板モデルの場合には図 1 (a) の $\Omega_G \subset \Omega$ の領域を成長する領域とする。ただし、前報 Sun and Azegami (2015) で、前額面からの奥行 g (図 1 (a) 参照) が 10mm のときに最も座屈が発生しやすかったことから、本研究では $g = 10\text{mm}$ が採用された。脊柱モデルの場合には $\mathcal{V} = \{\text{T4}, \dots, \text{T10}\}$ を成長する椎体番号の集合として、 $\Omega_G = \cup_{i \in \mathcal{V}} \Omega_{Gi} \subset \Omega$ を成長する領域とする。ただし、T4 は第 4 胸椎を表す。また、 Ω_{Gi} は図 1 (b) に示す硝子軟骨板と骨端輪の領域を表す。このような椎体選ばれた理由は、竹内他 (2001) が、解析を行ったモデルの中で最も座屈が発生しやすい部位は上記の \mathcal{V} であったと報告していたためである。第 5 腰椎 (L5) の底面(仙骨と椎間板で繋がっている境界)を $\Gamma_D \subset \partial\Omega$ とかき、 Γ_D 上で変位は $\mathbf{0}_{\mathbb{R}^3}$ と仮定する。なお、本論文では $\partial\Omega$ は Ω の境界を表し、 $\bar{\Omega} = \partial\Omega \cup \Omega$ と表す。

骨の成長を非弾性体積ひずみの発生により次のようにモデル化する。 $p: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ を成長パターンを表す場所の関数として、

$$p(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0.01 & \mathbf{x} \in \Omega_G \\ 0 & \mathbf{x} \in \Omega \setminus \bar{\Omega}_G \end{cases} \quad (1)$$

とおく。 $\lambda \in \mathbb{R}$ を成長の大きさを与える変数とする。このとき、骨の成長を表す非弾性体積ひずみを

$$\mathbf{E}_G(\lambda, \mathbf{x}) = \lambda p(\mathbf{x}) \mathbf{I} \quad (2)$$

とおく。ただし、 $\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ を単位行列とする。

このような定義のもとで、 $\lambda = 1$ のときの \mathbf{E}_G を $\mathbf{E}_G(1)$ とかくことにする。初期ひずみとした線形弾性問題の解(変位)を \mathbf{u}_0 とかく。この問題の弱形式は次のように表される。「任意の $\mathbf{v} \in U$ に対して

$$a(\mathbf{C}\mathbf{E}_L(\mathbf{u}_0), \mathbf{E}_L(\mathbf{v})) = a(\mathbf{C}\mathbf{E}_G(1), \mathbf{E}_L(\mathbf{v})) \quad (3)$$

が成り立つような $\mathbf{u}_0 = (u_{0i})_{i \in \{1,2,3\}} \in U$ を求めよ。」ただし、 U は Γ_D 上で $\mathbf{u} = \mathbf{0}_{\mathbb{R}^3}$ を満たす変位 $\mathbf{u}: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^3$ の集合とする。また、

$$\mathbf{E}_L(\mathbf{u}) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)_{ij} \quad (4)$$

を線形ひずみ、 $\mathbf{C}: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^{3 \times 3 \times 3 \times 3}$ を剛性とする。また、双 1 次形式 $a(\cdot, \cdot)$ を $\mathbf{S} = (\sigma_{ij})_{ij}: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^{3 \times 3}$ と $\mathbf{E} = (\epsilon_{ij})_{ij}: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^{3 \times 3}$ に対して

$$a(\mathbf{S}, \mathbf{E}) = \int_{\Omega} \mathbf{S} \cdot \mathbf{E} \, dx = \int_{\Omega} \sum_{(i,j) \in \{1,2,3\}^2} \sigma_{ij} \epsilon_{ij} \, dx \quad (5)$$

と定義する。

3.2 正常モデルの成長による線形座屈問題

3.1 節で説明された線形弾性問題の解 \mathbf{u}_0 に対して、線形座屈問題の弱形式は次のように表される。「任意の $\mathbf{v} \in U$ に対して

$$a(\mathbf{C}\mathbf{E}_L(\mathbf{w}), \mathbf{E}_L(\mathbf{v})) = -\zeta a(\mathbf{C}(\mathbf{E}_L(\mathbf{u}) - \mathbf{E}_G(1)), \mathbf{E}_B(\mathbf{w}, \mathbf{v})) \quad (6)$$

を満たす $\zeta \in \mathbb{R}$ と $\mathbf{w} \in U$ を求めよ。」この固有値問題の解を求めることを線形座屈解析とよぶことにする。また、 $r \in \{1, 2, \dots\}$ 次の固有値 ζ_r と固有ベクトル $\mathbf{w}_r \in U$ をそれぞれ r 次の荷重比例係数 (load proportionality factor) と線形座屈モードとよぶことにする。

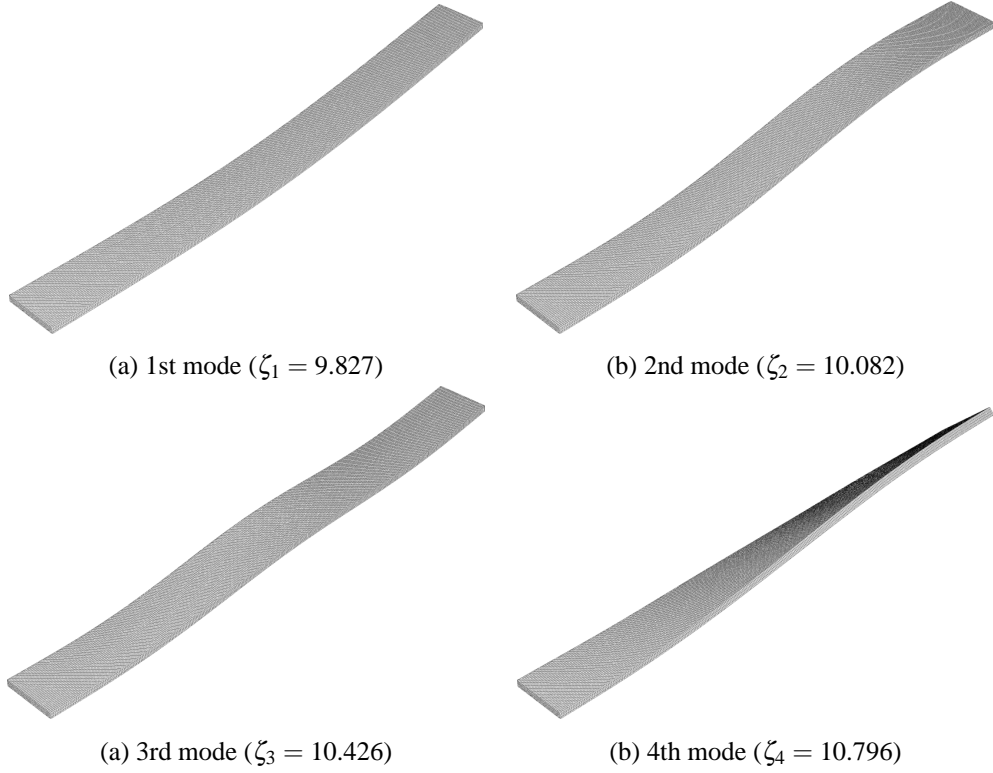


Fig. 2 Linear buckling modes of plate model

3.3 線形座屈モードを初期不整にもつモデルの成長による非線形弾性問題

本研究では, r 次の線形座屈モードを初期不整にもつ板モデルと脊柱モデルを用いて, $\mathbf{E}_G(\lambda)$ が発生したときの幾何学的非線形性を考慮した変形を求める. まず, 正常モデル上の点 $\mathbf{x} = (x_i)_i \in \Omega$ が $\mathbf{y}(\mathbf{x}) = \mathbf{x} + \alpha \mathbf{w}_r(\mathbf{x})$ に移動したときの領域を Ω_r とかくことにする. α は初期不整の大きさを調整する実数である. また, 式 (5) において積分領域を Ω_r に変更した双 1 次形式 $a(\cdot, \cdot)$ を $a_r(\cdot, \cdot)$ とかくことにする. この問題の弱形式は次のように表される. 「 λ が与えられたとき, 任意の $\mathbf{v} \in U$ に対して

$$a_r(\mathbf{C}(\mathbf{E}(\mathbf{u}) - \mathbf{E}_G(\lambda)), \mathbf{E}'(\mathbf{u})[\mathbf{v}]) = 0 \quad (7)$$

が成り立つような $\mathbf{u} \in U$ を求めよ.」ただし, $\mathbf{E}(\mathbf{u})$ は Green-Lagrange ひずみであり, 次のように定義される. $\mathbf{x} \in \Omega$ に対して, $\mathbf{y}(\mathbf{x}) = \mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})$ とおく. このとき, 変形勾配テンソル

$$\mathbf{F}(\mathbf{u}) = \left(\frac{\partial y_i}{\partial x_j} \right)_{ij} = \mathbf{I} + \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)_{ij} \quad (8)$$

を用いて,

$$\mathbf{E}(\mathbf{u}) = (\varepsilon_{ij}(\mathbf{u}))_{ij} = \frac{1}{2} (\mathbf{F}(\mathbf{u}) \mathbf{F}^T(\mathbf{u}) - \mathbf{I}) = \mathbf{E}_L(\mathbf{u}) + \frac{1}{2} \mathbf{E}_B(\mathbf{u}, \mathbf{u}) \quad (9)$$

と定義される. ただし, $\mathbf{E}_L(\mathbf{u})$ は式 (4) の定義に従う. また,

$$\mathbf{E}_B(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \frac{1}{2} \left(\sum_{k \in \{1,2,3\}} \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial v_k}{\partial x_j} \right)_{ij}, \quad (10)$$

$$\mathbf{E}'(\mathbf{u})[\mathbf{v}] = \frac{1}{2} \left\{ (\mathbf{F}'(\mathbf{u})[\mathbf{v}])^T \mathbf{F}(\mathbf{u}) + (\mathbf{F}(\mathbf{u}))^T \mathbf{F}'(\mathbf{u})[\mathbf{v}] \right\} = \mathbf{E}_L(\mathbf{v}) + \mathbf{E}_B(\mathbf{u}, \mathbf{v}), \quad (11)$$

$$\mathbf{F}'(\mathbf{u})[\mathbf{v}] = \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right)_{ij} \quad (12)$$

である. この大変形問題の解を求めることを非線形成長変形解析とよび, その解を非線形成長変形とよぶことにする. この非線形成長変形解析では座屈が発生することを仮定して, 弧長増分法 (Riks 法) により非線形成長変形

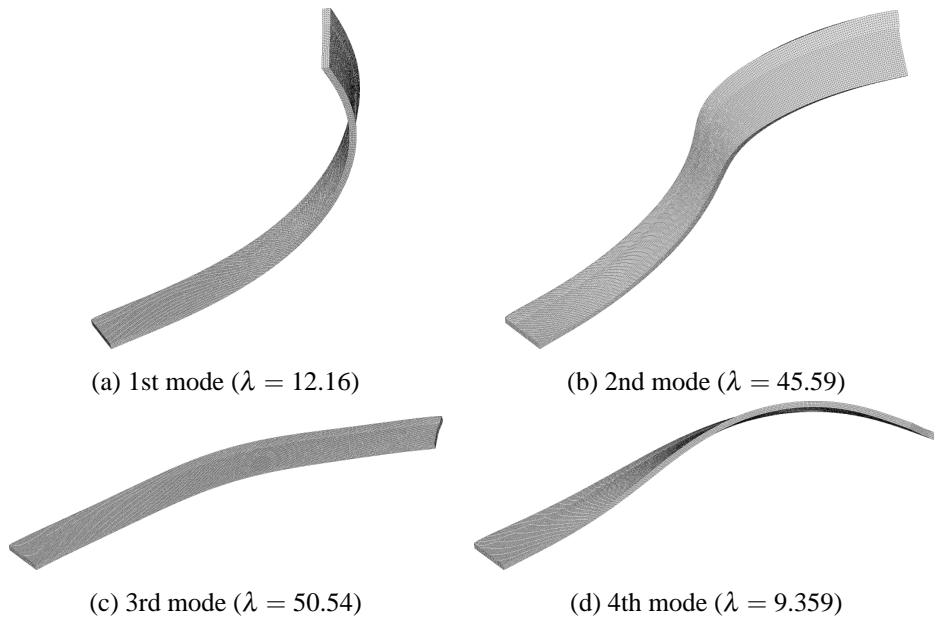


Fig. 3 Nonlinear growth deformations of plate model with initial imperfections of linear buckling modes

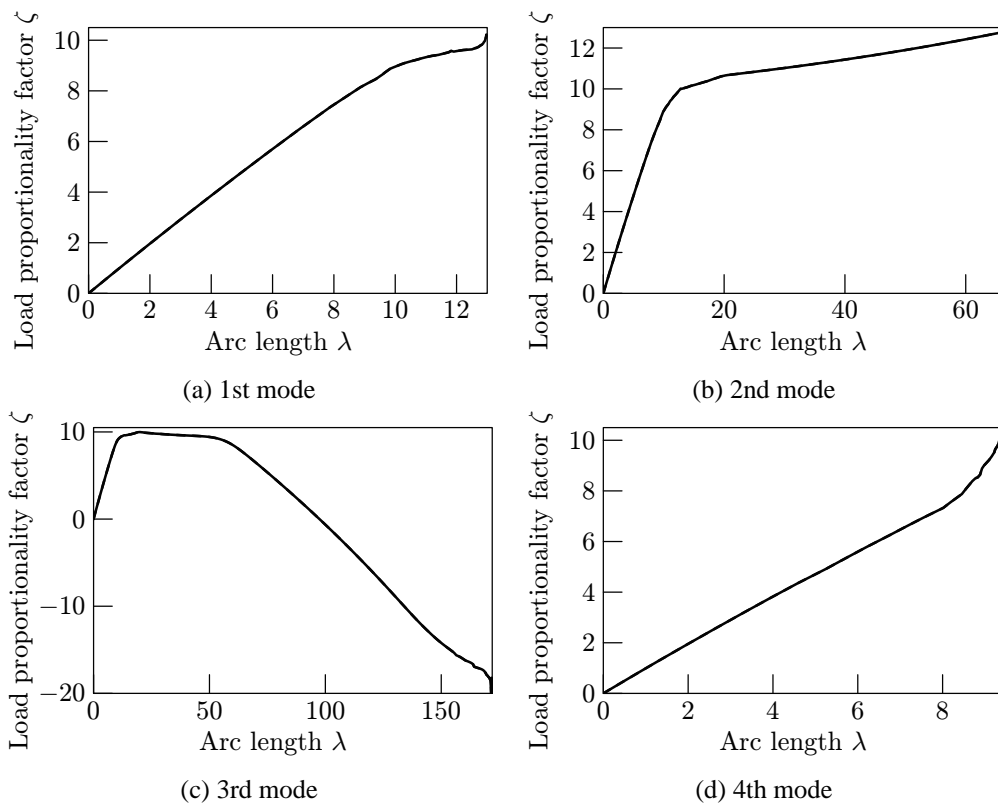


Fig. 4 History of load proportionality factor for plate model

を求める。ここで、弧長 (arc length) とは、荷重比例係数 ζ と節点変位で構成されたベクトルのノルムとして定義される。弧長増分法とは、弧長に対する増分を与えて、その増分の範囲で式 (7) を満たす解を求める計算を繰り返す方法である。

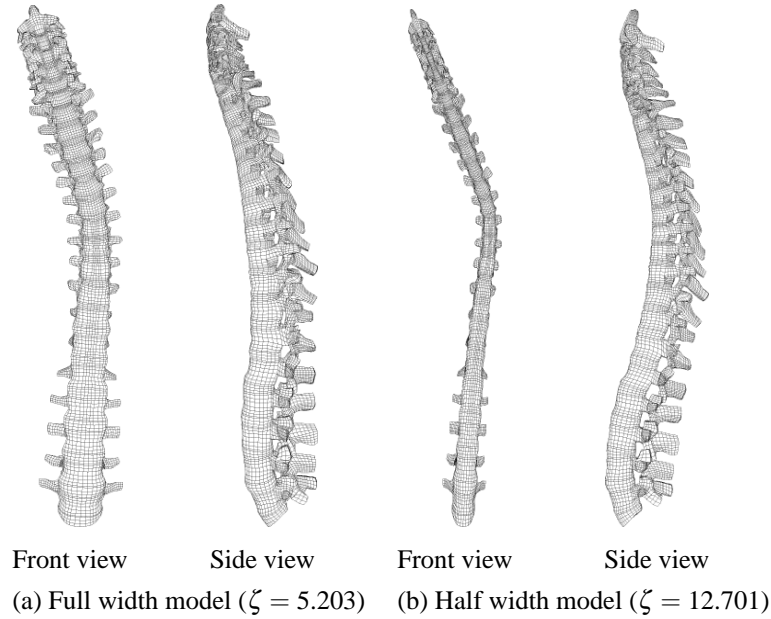


Fig. 5 The fourth linear buckling modes of spine models

Table 1 Load proportionality factor at the fourth buckling ζ_4 with respect to depth of growth domain Ω_G

Depth of growth domain (mm)	ζ_4
5	4.1408
10	3.555
15	4.0477

4. 板モデルの解析結果

板モデルを用いたときの線形座屈解析と非線形成長変形解析の結果を示す。図2に1次から4次までの線形座屈モードを示す。キャプションにそのときの荷重比例係数 ζ_r を示す。前報 Sun and Azegami (2015) では、板の幅 $w_F = w_B = 16\text{mm}$ のときの結果が図示されていたが、本論文では $w_F = w_B = 6\text{mm}$ が仮定された。その理由は、後で説明されるように、大変形が追跡できた例を示すためである。このような幅を選んだ場合には、臨床でみられるような側方に弯曲するモードは2次と3次モードとして得られた。

これらの1次から4次までの線形座屈モードを初期不整にもつ板モデルに対する非線形成長変形解析により、次のような結果が得られた。1次から4次までの初期不整の大きさは上端において $\alpha w_1 = 5.0\text{ mm}$ 、 $\alpha w_2 = 6.0\text{ mm}$ 、 $\alpha w_3 = 5.9\text{ mm}$ (上端) および $\alpha w_4 = 5.0\text{ mm}$ となるように作成された。図3に非線形成長変形の様子を示す。キャプションに成長の大きさを与える変数 λ の値が示されている。また、弧長に対する荷重比例係数の履歴を図4に示す。これらの結果において、3次モードを初期不整にもつ板モデルでは、弯曲が左右に反転するような大きな変形が起こりながら、荷重比例係数が負になるような変形まで得られた。初期不整の大きさを変更しても同様の結果が得られることが確認された。また、3次モード以外を初期不整にもつ板モデルでは、弧長増分を小さくしても解が見つからない状況に陥り、解析が打ち切られた。

5. 脊柱モデルの解析結果

脊柱モデルを用いたときの線形座屈解析と非線形成長変形解析の結果を示す。線形座屈解析により、竹内他 (2001) の結果と同様の座屈モードを含む多くの座屈モードが得られた。それらの中から臨床でみられるシングルカーブに似た4次の座屈モードを図5(a)に示す。また、左右の幅(横幅)を1/2にした脊柱モデルを用いた場合の4次の座屈モードを図5(b)に示す。

本研究では、また、成長する領域 $\Omega_G = \cup_{i \in \mathcal{V}} \Omega_{Gi}$ (T4 から T10 までの硝子軟骨板と骨端輪) を前額面から奥行

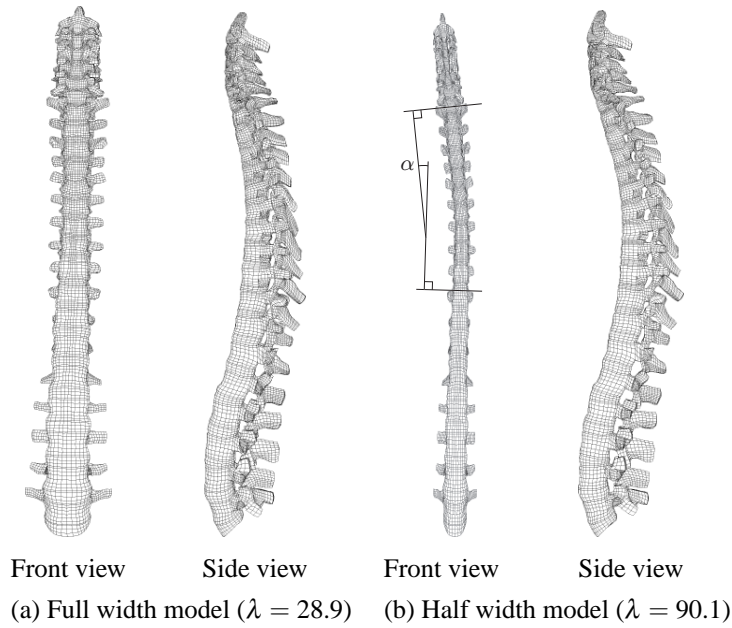


Fig. 6 Nonlinear growth deformations of spine models with initial imperfections of the fourth linear buckling modes

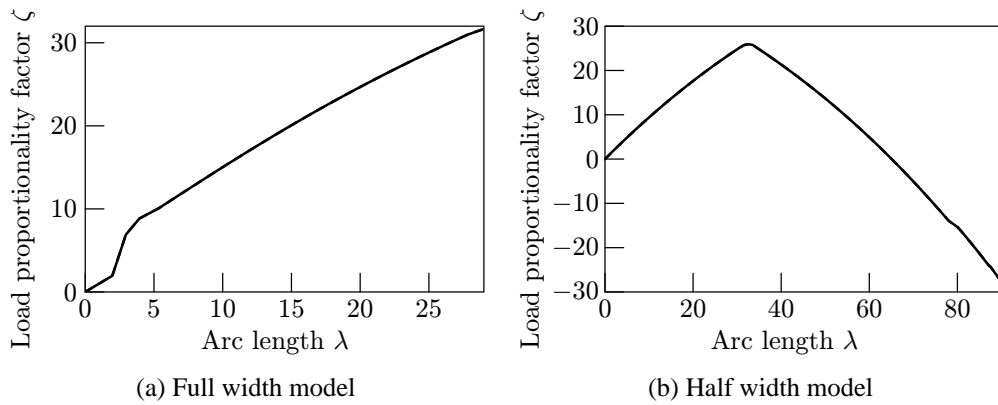


Fig. 7 History of load proportionality factor for spine models

5mm, 10mm および 15mm までの領域 (有限要素分割による凹凸あり) に変更した場合の線形座屈解析も行われた。これらの場合にも臨床でみられるシングルカーブに似た 4 次の座屈モードが得られた。成長する領域の前額面からの奥行に対する 4 次の座屈が発生するときの荷重比例係数 ζ_4 を表 1 に示す。これらの結果から、前額面からの奥行が 10mm のときに最も 4 次の座屈が発生しやすいことを示している。この結果は前報 Sun and Azegami (2015) で示された板モデルの結果と一致する。

4 次の線形座屈モードを初期不整にもつ脊柱モデルと横幅を 1/2 にした脊柱モデルに対して、非線形成長変形解析を行った。その結果、どちらのモデルを用いても、成長する領域 $\Omega_G = \cup_{i \in \gamma} \Omega_{Gi}$ の前額面からの奥行を表 1 のように変更してみても、上端で変位が最大となるような横曲げの 1 次モードが得られるのみで、臨床でみられるシングルカーブのような変形は得られなかった。初期不整の大きさを大きくしても同様の結果しか得られなかった。

そこで、姿勢を制御する筋の作用を考慮して、脊柱モデルの第 7 頸椎前方境界中央の節点を水平面内で固定する (上下方向には運動できる) 境界条件を付加した。そのような境界条件の下で脊柱モデルと横幅 1/2 脊柱モデルを用いて非線形成長変形解析を行った。初期不整は、T7-T8 椎間板の中央における αw_r の大きさが脊柱モデルのとき 16.64mm となるように、横幅 1/2 脊柱モデルのとき 8.41mm となるように与えられた。その結果、成長する領域 $\Omega_G = \cup_{i \in \gamma} \Omega_{Gi}$ を表 1 のように選んだ場合には座屈現象は観察されなかった。 $\Omega_G = \cup_{i \in \gamma} \Omega_{Gi}$ に硝子軟骨板と骨端輪の全体が選ばれたときには、図 6 のような変形が得られた。キャプションに成長の大きさを与える変数 λ の値が示されている。また、弧長に対する荷重比例係数の履歴を図 7 に示す。これらの結果において、横幅を 1/2

にした脊柱モデルでは、弧長が32を過ぎたときに荷重比例係数が増加から減少に転ずる履歴が得られた。この履歴から、非線形座屈現象が発生したと考えられる。座屈後は弧長の増加(荷重比例係数の減少)に伴い側方への彎曲が起り、 λ と ζ がそれぞれおよそ90と-30のときの変形を図6(b)に示す。このときのCobb角 α は7.5°であった。ここで、Cobb角とは、各椎体の傾斜角を計測し、それらの差の最大値として定義される。座屈後の変形は単調で、徐々に振幅が増加し、図6(b)の変形に至った。一方、脊柱モデルでは初期不整の大きさを大きくしてもこのような非線形座屈は発生しなかった。

6. 考 察

本研究では、線形座屈解析で得られた臨床モードと類似の座屈モードから分岐した後の成長変形を大変形理論に基づいて求めることによって、座屈現象が発生した後の成長変形が安定であるのか、さらに、臨床でみられる側彎変形まで座屈説で説明できるのかを明らかにすることが目的とされた。それらの目的に対して、次のように考察される。

線形座屈モードから分岐した後の成長変形を、本研究では、線形座屈モードを初期不整にもつ脊柱モデルに非弾性体積ひずみでモデル化された成長が発生したときの大変形とみなして、非線形成長変形解析によって調べた。その結果、板モデルでは、図4の(a)から(c)のように、 $\zeta = 10$ の近傍で弧長に対する荷重比例係数の傾きに変化が現れたことから非線形座屈現象が発生したと思われる。その後の安定性に関しては、1次と2次(図4の(a)と(b))の場合には弧長の増加に対して荷重比例係数が増加していることから安定であったが、3次(図4の(c))の場合には弧長の増加に対して荷重比例係数が減少する不安定な大変形が得られた。また、横幅を1/2にした脊柱モデルでは、図7(b)のように、弧長が32を過ぎたときに弧長に対する荷重比例係数の傾きが変化していることから、ここで非線形座屈現象が発生したと考えられる。その後は、弧長の増加に対して荷重比例係数が減少する不安定な結果が得られた。これらの結果から、線形座屈モードの初期不整をもつ場合には不安定な変形を生む場合が存在することが確認された。この結果は、Aoyama, et al. (2008)の解析では得られなかった新しい知見である。しかしながら、不安定な変形が起こるためには、横幅を1/2にした脊柱モデルの場合には、 $\zeta = 25$ のときに不安定化したことから、 $0.01 \times \zeta = 0.25$ より、25%の体積ひずみが Ω_G に発生する必要があることになる。それ以外の場合には安定であったことが明らかになったことも本研究の成果である。

さらに、臨床でみられる側彎変形まで座屈説で説明できるのかという課題に対しては、次のように考察される。図6(b)は臨床モードと類似の変形となっている。しかし、弧長が90で、荷重比例係数が非現実的な-30に至ってもわずかな変形しか得られなかった。このことから、座屈説は、特発性側彎症の発症の病因にはなり得るが、症状が進行した後の病因にはなり得ないと考えられる。

7. 結 言

本論文では、脊柱特発性側彎症の構造力学的な病因を解明することを目指して、板モデルと脊柱モデルを用いて、椎体の成長に伴う座屈現象とその変形を初期不整にもつときの大変形が、幾何学的非線形性が考慮された有限要素法によって解析された。その結果、板モデルと横幅を1/2にした脊柱モデルに対して、非線形座屈現象が発生することが確認された。その現象が発生した後は、多くの場合に安定であるが、不安定な場合も存在することが確認された。しかしながら、安定であっても不安定であっても、それらのCobb角は最大7.5°であった。臨床では、Cobb角が25°~45°のときに中度と診断され、15°未満のときには正常と判定されることから、この結果は、正常の範囲に留まっている。このことから、本研究で検討した脊柱モデルと数値解析法の範囲では、特発性側彎症が進行した後まで座屈説で説明することは難しいと考えられる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人堀科学芸術振興財団の研究助成を受けた。ここに謝意を表する。

文 献

- Andriacchi, T., Schultz, A., Belytschko, T. and Galante, J., A model for studies of mechanical interactions between the human spine and rib cage, *Journal of Biomechanics*, Vol. 7, No. 6 (1974), pp. 497–507.
- Aoyama, T., Azegami, H. and Kawakami, N., Nonlinear buckling analysis for etiological study of idiopathic scoliosis, *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol. 3, No.3 (2008), pp. 399–410.
- Arkin, A. M., The mechanism of rotation in combination with lateral deviation in the normal spine, *Journal of Bone and Joint Surgery*, Vol. 32, No.1 (1950), pp. 180–188.
- Azegami, H., Murachi, S., Kitoh, J., Ishida, Y., Kawakami, N. and Makino, M., Etiology of idiopathic scoliosis: Computational study, *Clinical Orthopaedics and Related Research*, Vol. 357 (1998), pp. 229–236.
- Chu, W. C., Lam, W. W., Chan, Y. L., Ng, B. K., Lam, T. P., Lee, K. M., Guo, X. and Cheng, J. C., Relative shortening and functional tethering spinal cord in adolescent idiopathic scoliosis?: study with multiplanar reformat magnetic resonance imaging and somatosensory evoked potential, *Spine*, Vol. 31, No.1 (2006), pp. E19–E25.
- Dickson, R. A., Lawton, J. O., Archer, I. A. and Butt, W. P., The pathogenesis of idiopathic scoliosis biplanar spinal asymmetry, *J. Bone and Joint Surg.*, Vol. 66-B, No.1 (1984), pp. 8–15.
- Huynh, A-M., Aubin, C. E., Rajwani, T., Bagnall, K. M. and Villemure, I., Pedicle growth asymmetry as a cause of adolescent idiopathic scoliosis: a biomechanical study, *European Spine Journal*, Vol. 16, No. 4 (2007), pp. 523–529.
- 日本側彎症学会編, 川上 紀明, 宇野 耕吉 責任編集, 側彎症治療の最前線 基礎編 (2013), 医薬ジャーナル社.
- Lowe, T. G., Edgar, M., Margulies, J. Y., Miller, N. H., Raso, V. J., Reinker, K. A. and Rivard, C. H., Etiology of idiopathic scoliosis: Current trends in research, *Journal of Bone and Joint Surgery (American volume)*, Vol. 82, No. 8 (2000), pp. 1157–1168.
- Lucas, D. B. and Bresler, B., Stability of the ligamentous spine, *Biomechanics laboratory rpt.* (1961), Univ. of California, San Francisco.
- Normelli, H., Sevastik, J. and Akrivos, J., The length and ash weight of the ribs of normal and scoliotic persons, *Spine*, Vol. 10, No. 6 (1985), pp. 590–592.
- Porter, R. W., Idiopathic scoliosis. The relation between the vertebral canal and the vertebral bodies, *Spine*, Vol. 25, No. 11 (2000), pp. 1360–1366.
- Roaf, R., *Spinal Deformities* (1977), J. B. Lippincott Company, Philadelphia and Toronto.
- Sevastik, J., Agadir, M. and Sevastik, B., Effects of rib elongation on the spine. Distortion of the vertebral alignment in the rabbit, *Spine*, Vol. 15, No.8 (1990), pp. 822–825.
- 篠田 達明, 村地 俊二, こどもの生長と特発性そくわん症 - そくわん症の成因に関する考察, こぼと学園のあゆみ, 愛知県心身障害者コロニー, Vol. 6 (1976), pp. 11–32.
- 篠田 達明, 村地 俊二, 特発性そくわん症のなりたち - いわゆる「鳥かご理論」について -, こぼと学園のあゆみ, 愛知県心身障害者コロニー, Vol. 7 (1977), pp. 4–12.
- Somerville, E. W., Rotational lordosis; the development of single curve, *Journal of Bone and Joint Surgery (British Volume)*, Vol. 34-B, No.3 (1952), pp. 421–427.
- Stokes, I. A. F. and Gardner-Morse, M., Analysis of the interaction between vertebral lateral deviation and axial rotation in scoliosis, *Journal of Biomechanics*, Vol. 24, No. 8 (1991), pp. 753–759.
- Stokes, I. A. F. and Laible, J. P., Three-dimensional osseo-ligamentous model of the thorax representing initiation of scoliosis by asymmetric growth, *Journal of Biomechanics*, Vol. 23, No. 6 (1990), pp. 589–595.
- Stokes, I. A. F., Spence, H., Aronsson, D. D. and Kilmer, N., Mechanical modulation of vertebral body growth, *Spine*, Vol. 21, No.10 (1996), pp. 1162–1167.
- Sun, H. and Azegami, H., Existence of buckling phenomena as a pathogenic mechanism of idiopathic scoliosis, *Journal of Biomechanical Science and Engineering* (2015), DOI:10.1299/jbse.14-00315.

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, 日本側弯症学会誌, Vol. 16, No. 1 (2001), pp. 11–16.

References

- Andriacchi, T., Schultz, A., Belytschko, T. and Galante, J., A model for studies of mechanical interactions between the human spine and rib cage, *Journal of Biomechanics*, Vol. 7, No. 6 (1974), pp. 497–507.
- Aoyama, T., Azegami, H. and Kawakami, N., Nonlinear buckling analysis for etiological study of idiopathic scoliosis, *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol. 3, No.3 (2008), pp. 399–410.
- Arkin, A. M., The mechanism of rotation in combination with lateral deviation in the normal spine, *Journal of Bone and Joint Surgery*, Vol. 32, No.1 (1950), pp. 180–188.
- Azegami, H., Murachi, S., Kitoh, J., Ishida, Y., Kawakami, N. and Makino, M., Etiology of idiopathic scoliosis: Computational study, *Clinical Orthopaedics and Related Research*, Vol. 357 (1998), pp. 229–236.
- Chu, W. C., Lam, W. W., Chan, Y. L., Ng, B. K., Lam, T. P., Lee, K. M., Guo, X. and Cheng, J. C., Relative shortening and functional tethering spinal cord in adolescent idiopathic scoliosis?: study with multiplanar reformat magnetic resonance imaging and somatosensory evoked potential, *Spine*, Vol. 31, No.1 (2006), pp. E19–E25.
- Dickson, R. A., Lawton, J. O., Archer, I. A. and Butt, W. P., The pathogenesis of idiopathic scoliosis biplanar spinal asymmetry, *J. Bone and Joint Surg.*, Vol. 66-B, No.1 (1984), pp. 8–15.
- Huynh, A-M., Aubin, C. E., Rajwani, T., Bagnall, K. M. and Villemure, I., Pedicle growth asymmetry as a cause of adolescent idiopathic scoliosis: a biomechanical study, *European Spine Journal*, Vol. 16, No. 4 (2007), pp. 523–529.
- Japanese Scoliosis Society ed., Kawakami, N. and Uno K., responsible ed., *The forefront of scoliosis treatment: Basic course* (2013), Iyaku (Medicine and Drug) Journal Co., Ltd (in Japanese).
- Lowe, T. G., Edgar, M., Margulies, J. Y., Miller, N. H., Raso, V. J., Reinker, K. A. and Rivard, C. H., Etiology of idiopathic scoliosis: Current trends in research, *Journal of Bone and Joint Surgery (American volume)*, Vol. 82, No. 8 (2000), pp. 1157–1168.
- Lucas, D. B. and Bresler, B., *Stability of the ligamentous spine*, Biomechanics laboratory rpt. (1961), Univ. of California, San Francisco.
- Normelli, H., Sevastik, J. and Akrivos, J., The length and ash weight of the ribs of normal and scoliotic persons, *Spine*, Vol. 10, No. 6 (1985), pp. 590–592.
- Porter, R. W., Idiopathic scoliosis. The relation between the vertebral canal and the vertebral bodies, *Spine*, Vol. 25, No. 11 (2000), pp. 1360–1366.
- Roaf, R., *Spinal Deformities* (1977), J. B. Lippincott Company, Philadelphia and Toronto.
- Sevastik, J., Agadir, M. and Sevastik, B., Effects of rib elongation on the spine. Distortion of the vertebral alignment in the rabbit, *Spine*, Vol. 15, No.8 (1990), pp. 822–825.
- Shinoda, T. and Murachi, S., The growth of children and Idiopathic Scoliosis - A Hypothesis for the Mechanisms of Development of Scoliosis, *Kobato gakuen no ayumi*, Aichi Prefectural Colony, Institute, Vol 6 (1976), pp. 11–32 (in Japanese).
- Shinoda, T. and Murachi, S., The Origins of Idiopathic Scoliosis - on the cage theory, *Kobato gakuen no ayumi*, Aichi Prefectural Colony, Institute, Vol. 7 (1977), pp. 4–12 (in Japanese).
- Somerville, E. W., Rotational lordosis; the development of single curve, *Journal of Bone and Joint Surgery (British Volume)*, Vol. 34-B, No.3 (1952), pp. 421–427.
- Stokes, I. A. F. and Gardner-Morse, M., Analysis of the interaction between vertebral lateral deviation and axial rotation in scoliosis, *Journal of Biomechanics*, Vol. 24, No. 8 (1991), pp. 753–759.

- Stokes, I. A. F. and Laible, J. P., Three-dimensional osseo-ligamentous model of the thorax representing initiation of scoliosis by asymmetric growth, *Journal of Biomechanics*, Vol. 23, No. 6 (1990), pp. 589–595.
- Stokes, I. A. F., Spence, H., Aronsson, D. D. and Kilmer, N., Mechanical modulation of vertebral body growth, *Spine*, Vol. 21, No.10 (1996), pp. 1162–1167.
- Sun, H. and Azegami, H., Existence of buckling phenomena as a pathogenic mechanism of idiopathic scoliosis, *Journal of Biomechanical Science and Engineering* (2015), DOI:10.1299/jbse.14-00315.
- Takeuchi, K., Azegami, H., Sasaoka, R., Murachi, S., Kitoh, J., Ishida, Y., Kawakami, N., Gotoh, M., Makino, M. and Matsuyama, Y., Numerical simulation on etiology of idiopathic scoliosis : Modal investigation, *Spinal deformity, the journal of Japanese Scoliosis Society* , Vol. 16, No. 1 (2001), pp. 11–16 (in Japanese).