

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 15 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21500453

研究課題名（和文） 先天性胸郭変形症に対する矯正手術における、術後形態予測システムの開発

研究課題名（英文） Development of a simulation system to predict postoperative thorax shape in surgical correction for pectus excavatum

研究代表者

永竿 智久(NAGASAO TOMOHISA)

慶應義塾大学・医学部・講師

研究者番号：20245541

研究成果の概要(和文): 漏斗胸は胸郭の陥没変形を主症状とする先天性疾患である。漏斗胸の治療方法として近年行われているのは、肋間より U 字型の金属矯正バーを胸骨の後面に挿入したのち、バーを 180 度回転することにより胸郭中央部の陥没を修正する方法(ナス手術)である。この方法は手技的には簡便ではあるが、施術したあとに胸郭がどのような形態をとるのが予測しにくいという不利点を伴っていた。そこで申請者らは、有限要素法を用いた 3 次元力学シミュレーションにより、同手術法を施行した後の胸郭形態を予測する方法を開発した。

研究成果の概要(英文): Pectus excavatum, or funnel chest, is a type of congenital deformity where the thorax presents concavity at its central part. In the currently most popular correction method for the pectus excavatum, U-shaped bars are placed beneath the sternum and rotated to elevate it. Although this correction method is easy to perform, prediction of postoperative thorax shape had been remained as a challenging problem with this method. By using the finite element method, the authors developed a technique to perform the prediction of postoperative thorax shapes after the correction.

交付決定額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用システム

キーワード：バイオメカニクス・シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

先天性胸郭変形症である漏斗胸に対しては、金属バーによる胸骨挙上術(ナス法)が広く行われているが、症例によってはバーの挿入により胸郭が予測外の形態変化を生じる場合もある。こうした予測外の変化が生じると患者は手術結果に満足しないし、仮にそうした予測外の変化に手術中に対応しようとすると肋骨・胸骨の骨切りやプレート固定

などの追加的操作が必要となり、医療コストならびに手術リスクも上昇する。したがって漏斗胸に対して金属矯正バーによる手術を行うにあたっては、矯正バーの挿入により胸郭の形態がどのように変化するのかを事前に予測していることが望まれる。ただし、同じく漏斗胸と言っても、胸郭の形・骨の硬さ・ならびに陥没の度合いは個々の患者によって異なっているから、矯正バーを挿入した

後に、胸郭の形態がどのように変化を遂げるのかを予測することは困難であった。

2. 研究の目的

そこで、漏斗胸に対してパー挿入による矯正治療を行うと、どのような形態を呈するのかを予測するシステムを構築することを目的として本研究を立案した。本研究は工学的技術の一つである、有限要素法を応用した構造解析を行う。同法はある物体に外力が作用した際に、それがどの程度変形するのかを予測する工学的技術である。本法を応用することにより個別の患者の胸郭につき、矯正パーを用いて前方に胸骨を押し上げる力学シミュレーションを行う。このシミュレーションシステムのノウハウを確立すれば、胸郭が術後にどのような形態を呈するのかを前もって知ることができる。ゆえにこうしたシステムの確立を目的として本研究を行った。

3. 研究の方法

本研究は平成 21 年より平成 23 年までの 3 年間にわたり 3 段階に分けて研究を行った。各段階においてなしたことを以下に列挙する。

(1) 基礎的物性値のデータ収集

力学的に妥当な胸郭モデルを作成するためには、胸骨・肋骨・肋軟骨に対して正確な物性値の割当てを行い、伸縮性を考慮した靭帯によって結合し、関節機能を適切にモデリングすることが求められる。これらに必要なデータを以下の方法により得た。

まず胸骨および肋骨のヤング率については、Kopperdahl の式に基づき、CT 値に基づいて計算される骨密度(BMD)から計算した。

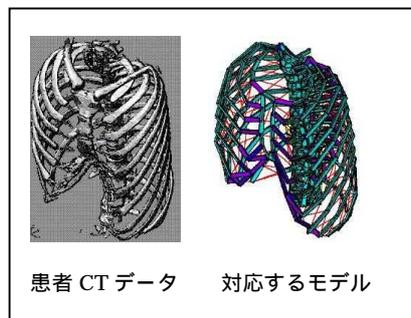
肋軟骨のヤング率については、小耳症の手術の歳に生じる余剰軟骨に対して引張り試験を行うことにより実測した。

胸郭を構成する靭帯および筋肉をモデル化するに当たっては、非線形的特性を正確に再現することが必要である。このために、新鮮屍体から採取された靭帯組織に対して引張り試験を行うことにより、靭帯・肋間筋・横隔膜の力 伸展率 曲線を求めた。

(2) シミュレーションモデルの作成

患者胸郭の CT スキャンを行い、DICOM データ形式に変換した。続いてその DICOM データを 3 次元画像処理ソフト 3D Doctor (Able Software Co. USA)を用いて立体表示し、それをトレースすることにより胸郭の輪郭データを得た。さらに前段階で得られた構成要素の力学的特性をモデル各部分に与えた上で、有限要素分割を行った。この操作を行うことにより、正確な形態と正確な力学的特性をともに備えた有限要素モデルを作成することができる。こうして作成された有

限要素モデルに対して構造解析シミュレーションを行うことで、対象とする胸郭の力学的挙動を予測することができるようになった。かくのごとき手法によって作成されたモデルの一例を以下に示す。左側は患者の CT データ、右側はそれをもとに構築された胸郭有限要素モデルである。

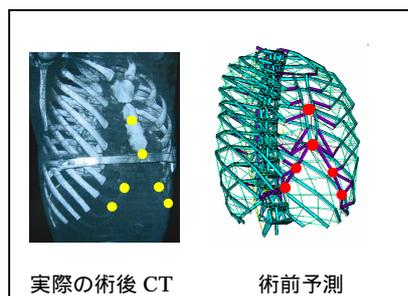


(3) 臨床応用

以上述べた方法により、おのおのの漏斗胸患者について有限要素モデルを作成しうる。こうして作成された有限要素モデルを用いると、矯正パーを挿入することにより胸郭がどのように変形を呈するのかを予測することが出来る。この技術を平成 21 年から 23 年にかけて慶應大学病院にて漏斗胸手術を受けた患者のうち、18 人に対して応用した。個別の患者に対して有限要素モデルを作成し、力学的シミュレーションを行うことで術後にどのような形態を呈するのかを前もって予測した。そして実際に術後に得られた胸郭の形態と比較を行った。さらに術後形態を CT にて評価し、シミュレーションによって予測される形態との比較を 3 次元座標にて行った。もしも両者の整合性が不良な場合には、モデリングプロセスのいずれかの段階において正しく処理が行われていないことを示すので、どの点につき問題があるのかを作成のプロセスを逆にたどりながら再検証した。こうした臨床結果とのフィードバックを通じてモデリングシステムの妥当性を改善して行くことにより、できるだけ正確な予測が可能となるようにシステム全体を精緻化させていった。

4. 研究成果

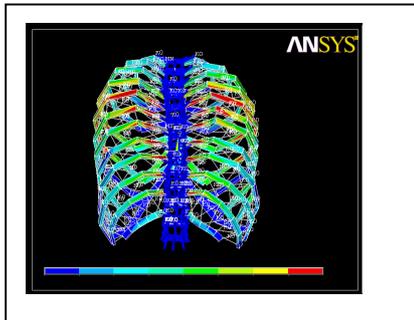
(1) およその術後形態予測が可能になった
開発した形態予測システムを用いて臨床症例 24 例につき、術後形態の予測を行った。実際に予測を行った例を下図に示す。



左図は実際に手術を行った後の胸郭の状態、右は術前に予測された胸郭の形態を示している。両者は良好な整合性を見せており、シミュレーションによる予測の正確性を例証している。かくのごとく、個別の漏斗胸患者に対しておよその術後形態を予測することが出来るようになった。この研究成果については「5 主な発表論文等」の に発表している。

(2) 術後疼痛の予測が可能になった

漏斗胸に対する胸郭矯正術の術後には、強い疼痛を自覚する患者が多い。これは矯正バーの装着の結果として、胸郭上に強い応力が発生するためである。術後疼痛を有効にコントロールするためには、疼痛の局在を的確に予測する必要がある。前もって胸郭上のどの部位に高い応力が発生するのかを予測することができれば、その部分に特に強い疼痛が発生することが予測出来るから、術後のペインコントロールをうまく行うことができ、患者の苦痛を軽減することになる。本研究は「目的」に記したごとく、術後の胸郭形態を予測することを本来の目的として立案された。しかし有限要素モデルを用いて解析計算を行う過程で、胸郭に発生する応力の分布も事前に評価が出来るようになった。この結果、個々の患者に対して術後疼痛が著しい部位はどこになるのかが予測できるようになった。

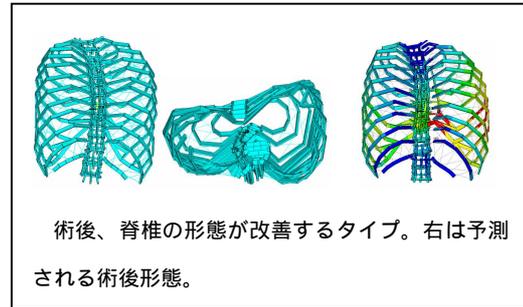


例えば上はある成人患者に対して矯正手術を行った際に、どの部分に疼痛が生じるのかを応力を解析することにより予測した結果である。第5肋骨の後部(背側)に疼痛が生じ易いのが予測されており、事実その部位の疼痛を患者は術後に訴えた。この研究成果については「5 主な発表論文等」の に発表している。

(3) 脊椎側弯との関係が解明された

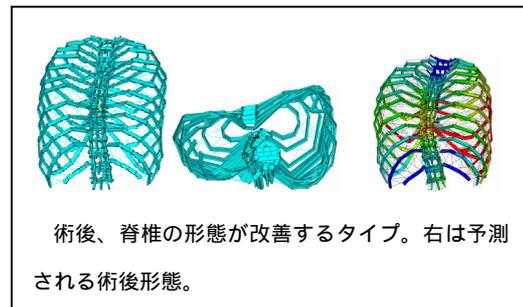
漏斗胸は胸郭の陥没を主徴とする先天疾患であるが、脊椎の変形を主徴とする側弯症とは文字通り表裏一体の関係にあり、事実、両疾患はかなり高い頻度で併発する。脊椎側弯が併存する場合に矯正手術を行うと、側弯が改善するという報告と、増悪するという報

告の双方があり情報が交錯している状態であった。本研究において脊椎側弯患者に対して術後形態を予測するうちに、術前の弯曲パターンと、その術後形態には一定の法則性があることが発見された。



例えば上図のように、胸郭前方の陥没の程度の強い側から、陥没の程度の弱い側に向かって脊椎が弯曲している場合には脊椎の弯曲は矯正される。

この反面、下図に示すごとく胸郭前方の陥没の程度が強い側から、陥没の程度の弱い側に向かって脊椎が弯曲している症例においては、脊椎の弯曲は増悪する。



上記の法則の発見は本研究の計画時に直接意図されたものではなし。しかし今後、脊椎側弯と漏斗胸を併有する患者に対して手術の適応を決定する上で非常に有用な法則であり、筆者らは本研究の最大の成果と考えている。これについては米国胸部外科学会の公認雑誌に発表した(「5 主な発表論文等」の)。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

Nagasao T, Noguchi M, Miyamoto J, Jinag H, Ding WJ, Shimizu Y, Kishi K. Dynamic Effect of the Nuss Procedure on the Spine in Asymmetric Pectus Excavatum. J Thoracic Cardiovascular Surgery. 140: 1294 -1299, 2010. (査読あり)

Nagasao T, Miyamoto J, Ichihara K, Jiang H, Jin H, Tamaki T. Age-Related Change of Postoperative Pain Location after Nuss Procedure for Pectus Excavatum. *European J Cardio-Thoracic Surg.* 38; 203-208, 2010. (査読あり)

永竿智久、宮本純平、緒方寿夫、中島龍夫
漏斗胸手術に伴う胸郭形態変化の予測システムの開発 日本形成外科学会誌 第29巻7号 pp412-420, 2009. (査読あり)

〔学会発表〕(計 5 件)

1. Nagasao T. Effective Reconstruction for Thoraces with Sternum Defects. The 21st Sino-Japanese International Meeting of Plastic Surgery, Fukuoka, Japan. November 2-4, 2011

2. Nagasao T. Prediction of Thoracic Shape after the Nuss Procedure. The 20th Sino-Japanese International Meeting of Plastic Surgery, Shanghai, China. November 2-4, 2010

3. Nagasao T. Prediction of the postoperative thorax shape after the Nuss procedure. The 19th China-Japan International Meeting of Plastic Surgery, Shanghai, China. August 20-21, 2010.

4. 永竿智久、宮本純平、緒方寿夫、貴志和生：
ナス法の脊椎に対する影響 第53回日本形成外科学会総会 金沢 2010年4月7-9日

5. 永竿智久、宮本純平、中島龍夫：
ナス法において矯正バーの挿入が脊椎に及ぼす影響について 第19回日本シミュレーション外科学会 東京 2009年10月31日

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

受賞

平成21年度日本形成外科学会学術奨励賞
受賞(漏斗胸手術における術後形態予測システムの開発)

ホームページ等

慶應義塾大学病院形成外科のホームページ
において漏斗胸の紹介を行っている

(<http://www.keio-prs.com/routo/>) その紹介の中で本研究において開発した形態予測システムを紹介し、漏斗胸を有する国民に対して情報を提供している。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永竿 智久 (NAGASAO TOMOHISA)

慶應義塾大学・医学部・講師

(研究者番号 2024541)

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

玉木保 (TAMAKI TAMOTSU)

日本工業大学・機械工学科・教授

(研究者番号 10049695)