

令和 3 年 4 月 21 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K12034

研究課題名(和文) 漏斗胸に対するプレート矯正治療に伴いうる、脊椎の彎曲を予測する診断システムの開発

研究課題名(英文) Development of Prediction System for Spine Morphology in Treatment of Pectus Excavatum

研究代表者

永竿 智久 (NAGASAO, Tomohisa)

香川大学・医学部・教授

研究者番号：20245541

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：漏斗胸に対する矯正の過程で、脊椎が彎曲してゆく場合がある。われわれは、手術に伴って脊椎に作用する力を事前に計算し評価することで、脊椎彎曲のリスクが評価できると考えた。そこで手術を力学的にシミュレーションする技法を開発し、それを用いて脊椎の彎曲の術前・術後における変化と、脊椎に働く力の相関を評価した。12人の患者について脊椎に作用する力と、脊椎のコブ角の変化に正の相関を認め、力学シミュレーションを用いて脊椎の変形が予測されることが判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

漏斗胸の発生頻度は高く、500人に1人である。本邦においても毎年、多くの施設で手術が行われている。しかし症例によっては必ずしも良好な結果は得られない。漏斗胸は前胸部の変形疾患であるが、胸部と背部は文字通り表裏一体であるので、一定頻度の患者においては脊椎の側弯を併発している。こうした患者に対して通常の方法で手術を行うと、脊椎の側弯が悪化することがある。この事実について症例報告が散見されるが、広く外科医の知るところには至っていない。本研究の施行はこの問題点を明示化し、合併症の回避を啓蒙する点と、それを回避する方法を示唆した点で、意義を有する。

研究成果の概要(英文)： The spine often gradually deforms during the correction of the thorax in the treatment of pectus excavatum. Surgeons need to avoid this complication to achieve optimal results. So, we conducted the present study to create a system to predict this complication. We innovated a dynamic technique to simulate the correction. Specifically, we developed a technique in which thoraxes of the patients are transformed computer models. By using these simulation models, we calculated the stresses working on the spines of the patients. Then we evaluated the co-relation between the Cobb angle and the stresses working on the spine. Positive co-relation exists between the two data, suggesting the deformity of the spine is predictable by dynamic simulation.

研究分野： 形成外科学

キーワード： 漏斗胸 形成外科 有限要素法 バイオメカニクス

1. 研究開始当初の背景

漏斗胸は胸部が凹んでいる先天疾患である。漏斗胸に対してはチタン製の矯正バーを使用した矯正治療が行われる（図1）。装着したバーの効果により胸部の凹みは矯正される。

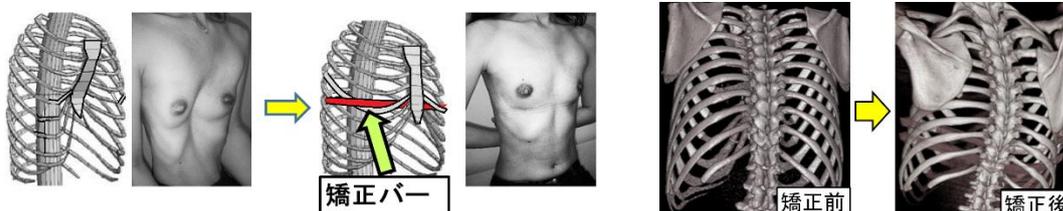


図1：漏斗胸に対する矯正治療

図2：脊椎の弯曲

この矯正を行う過程で、脊椎が次第に弯曲してゆく場合がある（図2）。弯曲が著しい場合には、脊椎に対する修正の手術が新たに必要になり、患者にとって身体的・精神的に、非常に大きな負担となる。さらに、いったん脊椎の側弯が生じてしまうと、仮に脊椎の形態を修正する再手術を行ったとしても、修正することは難しい。ゆえに、漏斗胸の治療を行うにあたっては、脊椎の側弯が生じ得ないか否か、事前に予測することが必要である。もしも術後に脊椎の側弯が発生する可能性があるのならば、矯正バーの装着による方法以外の治療法を選択すべきである。

2. 研究の目的

われわれは、手術に伴って脊椎に作用する力を事前に計算し、評価することで、脊椎側弯のリスクを評価することができると考えた。漏斗胸ではほとんどの場合、胸部の凹み方は対称でなく左右いずれかに偏っている。ゆえに凹んだ部分は斜め上に向って拳上される。拳上された部分はもとの凹んだ状態に戻ろうとするのでバーに対して反力を及ぼす（図3）。

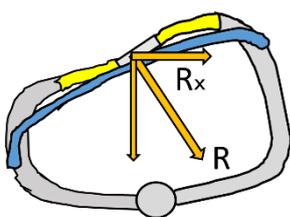


図3：バーの装着後に発生する反力

この反力は水平方向の成分を伴う。この成分の影響を受けて脊椎は左右に弯曲して行く。脊椎が左右に弯曲する傾向は、水平成分に作用する力の大きさに比例すると考えられる。いかなる状況において、脊椎の弯曲が起こりやすいのかを解明するために研究を行った。

3. 研究の方法

以下の研究計画を立てた。

- ①漏斗胸の手術を力学的にシミュレーションする技法を開発する
- ②開発した技法を実際の臨床症例に応用して、矯正治療をシミュレーションする。
- ③個々の症例を治療するにあたって、脊椎に働く力を算出する。

④脊椎の弯曲を示す尺度（コブ角）の術前・術後における変化を評価する。

⑤コブ角と、脊椎に働く力の相関を評価する。脊椎に作用する力がいかなる程度を超えると、コブ角の増加率が大きくなるのか（すなわち、脊椎の弯曲が増悪するのか）を検証する。

4. 研究成果

2021年4月の段階においては第4段階まで研究が進行している。個々の段階についての経由を以下に述べる。

①漏斗胸の手術の力学シミュレーション

報告者らは、研究申請の段階（2018年）において、胸壁の前部については手術を再現（もしくは予測）するシミュレーション技法をすでに開発していた。患者胸郭のCTデータから画像処理ソフトを用いて胸郭部分のデータを抽出し、3次元モデルに変換する。このモデルに適切な物性値（ヤング率・ポアソン比）を割り当てて適切な負荷条件を付与すれば、胸壁の前壁がいかに変形するかを予測することができる。この技術の基本的な部分については、われわれは2017年までに開発していた。

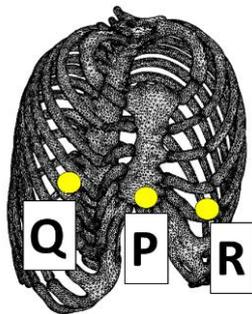


図4：作成したモデル

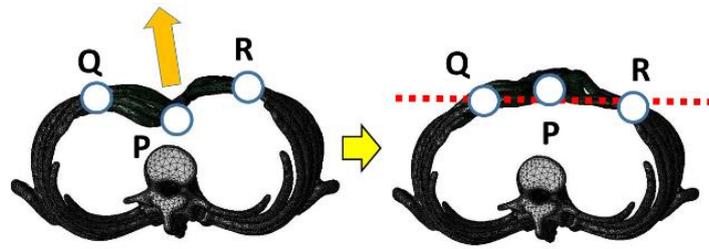


図5：力学計算による手術のシミュレーション

しかし、脊椎に作用する力を正確に算出することは困難であった。脊椎の弯曲を論じる上では図6に示す如く、おのおのの椎体に作用する力を算出する必要がある。

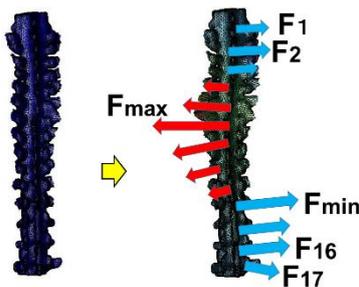


図6：おのおのの椎体に作用する力の算出が必要である

研究の開始期においては、この力を正確に算出することが出来なかった。その主たる理由は、椎骨と椎間板の分離が行えなかったからである。

胸郭の形態はCTデータより分離するが、椎間板と骨のCT値は近いために、自動的に弁別が出来なかった。

そこでまず、椎間板と骨の分離を行う作業から開始した。CT値の閾値を設定することにより両者の弁別を行う方法を当初は試みたが、椎間板のCT値にはばらつきが多いため、自動的に弁別を行う方法は現段階（2021年4月）においても開発ができていない。CT値以外に、形態認識の要素を組み込めば、椎間板を自動的に弁別することは

可能であろうという着想には至っているが、かくのごときプログラムの開発は本研究の直接の目的ではないので、手作業による抽出を行うことに決定して研究を続行した。各患者について椎間板部分の抽出を行う操作は 2 時間程度を要するが、抽出は可能であり、図 7 に示す如く脊椎の形態を正確に再現したモデルが作成できるようになった。



図 7: 椎間板を正確に再現した胸郭モデル

②開発した技法の実際の臨床症例への応用

次いで問題になったのは、計算の解を得ることである。胸郭の形態を予測する計算は汎構造解析ソフト (LS-DYNA) を用いて陰解法により行うが、解析対象の自由度が大きい場合には計算が収束しない。脊椎が骨のみで構成されていた旧型モデルにおいては、胸郭の一部に外力を加えた時に、胸郭形態がいかに変わるのか算出することはさほど困難ではなかった。この理由は脊椎を一本の連結した「棒」としてとらえていたためである。これに対し、椎間板の形態を正確に反映させた場合には、脊椎は別個に移動しうる物体となり、運動の自由度が大きくなる。これがゆえに計算において要求される自由度が増し、解析が収束しなかった。この点については、数理的側面から解析技法を (情報処理サービス JSOL より有償のサポートを受けつつ) 改善し、脊椎を正確に再現したモデルにおける漏斗胸の手術シミュレーションを行うことが可能になった。図 8 ~ 図 9 に解析の例を示す。

図 8 は術前の状態である。

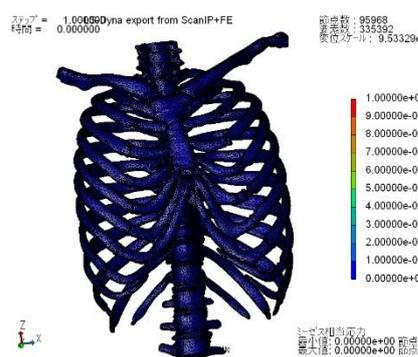


図 8: 術前の状態

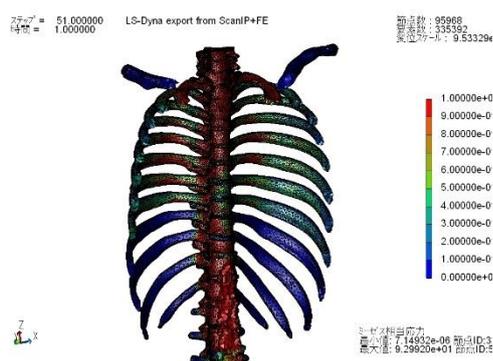


図 9: 脊椎に発生する応力の分布図

これに対して漏斗胸手術を施行すると、胸郭の各部に応力が生じる。図 9 はその分布図の 1 例である。

さらに、脊椎の各点に対して作用する力の方向性についても評価ができるようになった (図 10)。

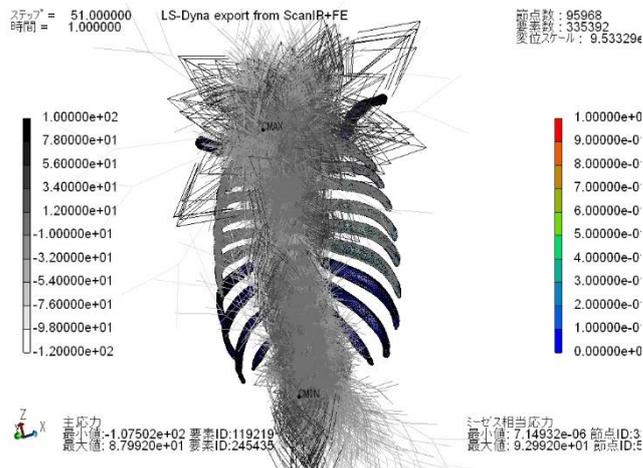


図 10: 脊椎に作用する力の方向を示す、ベクトル図

③個々の症例を治療するにあたって、脊椎に働く力を算出する

このように、漏斗胸の矯正治療に伴って脊椎に作用する力の方向と大きさについては、おのこの患者について個別に数量化することが可能になった。そこで 2019 年後半より、実際の臨床症例に本システムを適応し、12 人の患者について脊椎に作用する力の評価が完了している。

④脊椎の湾曲を示す尺度（コブ角）の術前・術後における変化を評価する

漏斗胸の手術後に脊椎の形態は変化するが、変化は緩徐に生じる。コブ角の変化を判定するには少なくとも 1 年半の経過観察が必要である。現段階においては 8 人の患者について結果が得られている。

⑤コブ角と、脊椎に働く力の相関の評価

上述のごとく、脊椎に作用する力の定量評価ならびにコブ角の変化については、それぞれ計測の手法については開発が完了している。ただし現段階（2021 年 4 月）の段階においては解析を行うデータサンプルは未だ十分ではない。2022 年度を目標に研究を完結する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nagasao T, Aizezi N, Noguchi M, Morotomi T, Kudo H, Kogure T.	4. 巻 53
2. 論文標題 Bone-cartilage proportion in deformed ribs of male pectus excavatum patients.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J Plast Surg Hand Surg.	6. 最初と最後の頁 143-148
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/2000656X.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nagasao T, Aizezi N, Noguchi M, Morotomi T, Kudo H, Kogure T.	4. 巻 53
2. 論文標題 Bone-cartilage proportion in deformed ribs of male pectus excavatum patients.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J Plast Surg Hand Surg	6. 最初と最後の頁 143-148
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/2000656X.2018.1554532.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 永竿智久
2. 発表標題 漏斗胸の治療
3. 学会等名 日本シミュレーション外科学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohisa NAGASAO
2. 発表標題 Prediction of Body Shape by Biomechanical Technic
3. 学会等名 World Society of Simulation Surgery（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

むねのかたち研究室
<https://www.med.kagawa-u.ac.jp/~keisei/routo/>
世界に誇る最新技術
<https://www.med.kagawa-u.ac.jp/~keisei/routo/about/only/tech.php>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------