

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500553

研究課題名(和文)呼吸運動のシミュレーション評価による、胸郭の欠損パターンに応じた至適再建法の解明

研究課題名(英文)Elucidation of Optimal Reconstruction Methods for Various Thoracic Defects

研究代表者

永竿 智久(Nagasao, Tomohisa)

香川大学・医学部・准教授

研究者番号：20245541

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：胸郭に生じうる欠損のパターンは多岐にわたるが、どの部位にどのような大きさの欠損が生じると、どの程度呼吸機能が低下するのかに関して解析は行われていない。

本研究においては胸郭運動を正確に模したコンピューターシミュレーションモデルを作成し機能評価を行うことで、胸壁欠損の大きさと部位が呼吸機能に与える影響を解明した。

欠損が側方下部に存在する場合、患側胸郭の換気量は、正常の片側胸郭の換気量の約40パーセントとなり、他の欠損タイプにおける換気量(62-88パーセント)に比して小さくなる。すなわち側方下部に欠損を有する胸郭においては、他の部位に比して低い換気機能を呈する。

研究成果の概要(英文)：Treatment of thoracic defects is a challenging clinical issue. The present study elucidates the relationship between the locations of thoracic defects and loss of respiratory function.

10 sets of three-dimensional finite element models were produced from computed-tomography data of 10 persons, and categorized as Normal Type models. These models were modified by removing part of the thorax and categorized as Defect Type models. Varying the location of the defects, 6 types of Defect models were produced from each of the 10 Normal models; the defects were made on the anterior-superior, anterior-inferior, lateral-superior, lateral-inferior, posterior-superior, and posterior-inferior regions of the thorax. Among the 6 types of defect, the degree of functional loss was greatest with those defects on the lateral-inferior part of the thorax. Hence, in treating clinical cases where defects are expected to occur in this region, effort should be made to minimize the area of the defect.

研究分野：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 胸郭 呼吸

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

胸部外傷や肺・胸壁腫瘍の切除により胸郭に欠損が生じると、胸郭に不連続性が生じるために呼吸運動は損なわれる。呼吸運動は生命維持に不可欠であるゆえ、これを損なう可能性のある欠損が生じる場合には、適切な再建を行って機能の回復をはかる必要がある。この点、小範囲の欠損に対してはいかなる再建方法を用いてもそれほど差異は生じない。しかし一定の領域を超える欠損に対しては、再建方法の選択に迷う場合が多い。たとえばどのような材料を用いて胸郭の再建を行うべきか、再建素材の問題をとって考えたとき、胸壁欠損の再建材料としては、テフロンメッシュや金属プレートが用いられる。メッシュを用いた再建は簡便ではあるが、剛性を欠くので奇異呼吸を惹起する可能性がある（図1）。

一方、プレートを用いて再建を行う場合には、何本のプレートを使用するのか・どの部位を固定するのかを決定しなくてはならないが、この判断は容易ではない。

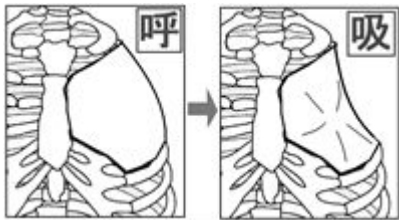


図1：メッシュを用いて再建を行った場合の問題点

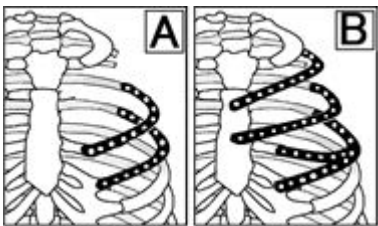


図2：プレートを用いて再建を行った場合の問題点

用いるプレートの数が少ないほど操作は簡便で感染のリスクも小さいが、心肺臓器の保護性は低くなる（図2A）。逆にプレート固定の箇所を多くすると（図2B）保護性は高まるが、力学的拘束が強くなり、胸郭は動きにくくなるからである。

このように、選択しうる再建法が複数ある場合には、それぞれ一長一短を有していることが多い。加えて臨床において遭遇する胸郭

欠損のタイプは、部位・範囲の点でかなりの多様性を示す。このため、胸壁再建にあたり、再建外科医は最良の方法の選択をめぐって悩むことが少なくない。この現状をかんがみ、われわれは胸郭欠損をタイプ分類した上で、おのこの欠損タイプに対して最適な再建法を示す、理論的な指針が必要であると考えられるようになった。

2. 研究の目的

そこで本研究においては、あらゆるタイプの胸郭欠損のそれぞれにつき、呼吸機能の点からみて最適な再建法を示すプロトコルを作成することにし、3点の到達目標を設定した。第1は、胸郭の呼吸運動を正確に再現する力学的シミュレーションシステムを構築することである。第2に、開発したシミュレーションシステムを実際の臨床に応用して患者の術後呼吸パターンを術前に予測し、実際の結果と比較・検証しつつシステムの精度を向上させることである。第3は胸郭欠損を網羅的に類型化した上で、各類型について選択しうる再建方法を列挙した上で、換気量が最大となる再建法をベストと考え、類型別にまとめあげることである。

3. 研究の方法

第1期：呼吸運動をシミュレーションするシステムの構築

患者のCTデータから、画像処理ソフトウェア（Rhinoceros）を用いて胸郭の形状データを抽出し、汎有限要素構造解析ソフトウェア（ANSYS Workbench）に移行する。形状基準点を梁要素で連結することにより、骨および軟骨を再現したモデルを作成する。また、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、作成したモデルに対して運動特性として反映させる。関節は複数のバネの集合体としてモデル化を行う。このことにより、呼吸筋の収縮・伸展に伴ってダイナミックに拡張と収縮をする胸郭のシミュレーションモデルが作成される。

第2期：シミュレーションシステム実用と精度向上

呼吸筋を模したバネ要素に収縮・伸展負

荷を加えることにより、呼吸運動をシミュレーションする。この作業を行うことにより、再建胸郭が呼気から吸気状態への推移に伴って呈する形状の変化が予測できる。この上で胸郭が呼吸に伴い呈する体積変化を計算し、これを換気量とみなす。このシミュレーションシステムを実際の臨床症例に実用する。胸壁の部分切除が予測される症例において術前後に呈すると予測される呼吸機能の変化につき、まずシミュレーションを用いて予測しておき、これを実際の計測結果と対照する。仮に両者の間に良好な整合性が認められない場合には、モデリングの際に用いた物性値・計算法を再検証しシステムの精度を向上させる。

第3期：欠損タイプ別の再建プロトコルの作成

胸郭上における局在に基づき、胸郭欠損のタイプ分類を行う。局在は前上部・前下部・側上部・側下部・後上部・後下部など6通りに分類する。さらに欠損の広さについて分類する。これら複数の要因からなる欠損パターンのそれぞれに対して、いかなる再建を行えば機能が最大になるのかを、開発しておいたシステムを用いて解明し、欠損のパターンに応じた再建プロトコルを作成する。

4. 研究成果

(1) 呼吸機能の評価するシミュレーションモデルの構築に成功した

図3に示すごとく、各患者のCTデータに基づき胸郭をモデル化する技法を開発した。

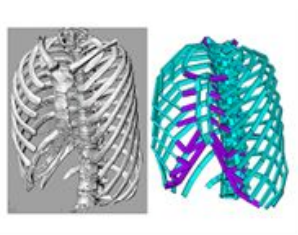


図3：3次元モデル作成技法の開発

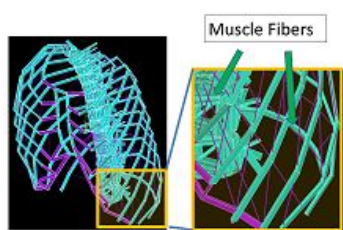


図4：胸郭呼吸筋のモデル化

さらに、図4で示すごとく胸郭を構成する硬組織の間隙に存在する呼吸筋をもバネ要素でモデル化することに成功した。これにより呼吸運動が正確にシミュレーションできるようになった。

(2) 欠損を有する胸郭の呼吸機能の評価が可能になった

図5に示すごとく、各種の欠損を有する胸郭モデルを作成することができるようになった。この成果により、例えば「ある胸郭の上部に4肋間にわたる欠損が存在する場合には、肺活量が何パーセント低下するのか」といった問題を定量的に評価することができるようになった。

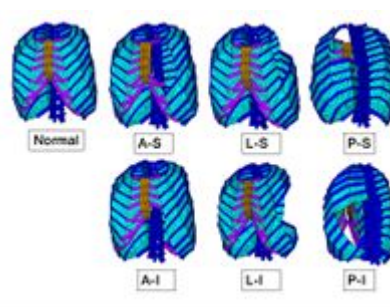


図5：各種欠損モデルの作成

(3) 代表的な欠損パターン毎に、呼吸機能の低下を評価し、またその結果、どのような欠損パターンの時に呼吸機能が最も低下しやすいのかを解明することができた

図6で示すごとく、吸気および呼気の状態において胸郭が呈する体積の変化に基づき、胸壁のどの部分に欠損が存在すると、呼吸筋群が同等の力で作用した場合に呈する換気量の低下分を定量化し、評価を行った。

この結果、欠損が側方下部に存在する胸郭モデルにおいては、患側胸郭の換気量は、正常の片側胸郭の換気量の約40パーセント(38 - 45パーセント)になる。この低下率は、他の欠損タイプのモデルにおける換気量(62 - 88)よりも大きいことが解明された。

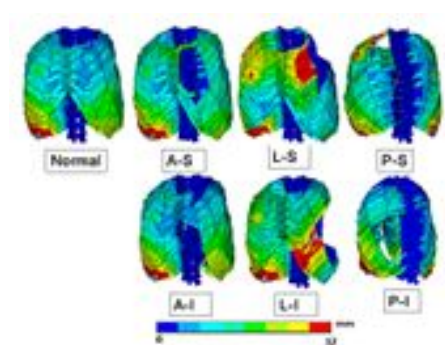


図6：各種欠損に対応する吸気終末の状態

この結論に基づけば、側方下部に欠損を有する胸郭においては、他の部位に欠損を有する胸郭に比して低い換気機能を呈すること

になる。よって、胸郭の側方下部に欠損が生じることが予測される臨床症例においては、欠損の大きさを最小限のものとすることが推奨される

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

1. Nagasao T, Hamamoto Y, Tamai K, Kogure T, Takano N, Tanaka Y. Scoring of Deformed Costal Cartilages Reduces Postoperative Pain after Nuss Procedure for Pectus Excavatum Thoracic Cardiovascular Surgeon (in press) (査読有り)
2. Nagasao T, Shimizu Y, Morotomi K, Takano N, Jiang H, Kishi K. Irregular Location of Major Pectoral Muscle Can Be a Causative Factor of Pectus Excavatum. Medical Hypotheses. 82:512-517, 2014. doi: 10.1016/j.mehy.2014.01.023. (査読あり)
3. Hatano A, Nagasao T, Cho Y, Shimizu Y, Takano N, Kaneko T, Kishi K. Relationship between Locations of Thoracic Rib Defects and Loss of Respiratory Function - A Biomechanical Study. Thoracic and Cardiovascular Surgeon. 18:118-128, 2013. doi: 10.1055/s-0033-1338107 (査読有り)
4. Hatano A, Nagasao T, Shimizu Y, Jin H, Kaneko T, Cho Y, Jiang H, Kishi K. A biomechanical study regarding the effect of tissue harvesting from the thorax on its movement during respiration. Computer-Aided Surgery. 18:118-128, 2013, (査読有り)
doi: 10.3109/10929088.2013.777120.
5. 永竿智久、清水雄介、畑野麻子、貴志和生 胸郭の各種欠損が胸式呼吸の機能に及ぼす影響と、それを再建する意味についてのバイオメカニクス研究 胸郭再建のプロトコル作成に向けて日本形成外科学会会誌 第32巻11号 pp803-818, 2012.
Doi (査読有り)

〔学会発表〕(計4件)

1. Nagasao T. Launching into the Ocean of "Cosmetic Thoracic Surgery. The 12th Korea-Japan Academic Meeting of Plastic Surgery. Seoul, Korea, May 15-17, 2014 (ソウル)
2. Nagasao T. Computer-Aided Prediction of Post-Operative Thorax

Shapes in Pectus Excavatum Surgery.
2013 Assembly of Chest Wall Interest
Group of European Cardio-Thoracic
Association, Seoul, South Korea 2013.

ソウル

3. 永竿智久、畑野麻子、清水雄介、貴志和生： 胸骨骨髄炎による胸骨の部分切除は胸式呼吸の程度をどの程度損なうのか 第56回日本形成外科学会総会 東京 2013年4月(ホテルニューオータニ)
4. 永竿智久： 欠損を有する胸郭の運動パターンを解析するモデリングシステムの開発 第21回日本形成外科学会基礎学術集会 福島 2012年10月(猪苗代プリンスホテル)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕 受賞

第55回日本形成外科学会総会(平成24年)最優秀ポスター賞(「形成外科手術に起因する部分欠損を伴う胸郭の、呼吸パターンに関するバイオメカニクスの解析(畑野麻子・永竿智久)

ホームページ等
香川大学形成外科 医学 工学研究グループのホームページ
(<http://biomedical-engineering-research.org/>)において本研究の成果につき報告を

行い、胸壁再建に携わる外科医および形成外科医がアクセスしやすいように公表している。

6 . 研究組織

(1)研究代表者：

永竿 智久 (Nagasao Tomohisa)

香川大学・医学部・准教授

研究者番号 20245541

(2)研究分担者

(なし)

(3)連携研究者：

高野 直樹 (Takano Naoki)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号 10206782