

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 18 日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25862005

研究課題名(和文)有限要素法を用いた顎矯正手術後の顎骨内応力解析による術後変化予測とその臨床応用

研究課題名(英文) Prediction of postoperative stability by an analysis of stress distribution in jaw after orthognathic surgery using finite element analysis.

研究代表者

丹原 惇(Nihara, Jun)

新潟大学・医歯学系・助教

研究者番号：10636228

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、手術を併用した矯正治療である外科的矯正治療における術後変化について生体力学的な見地から解明しようとするものである。治療前のCT画像から3次元顎骨モデルを作成し、有限要素法という工学的手法を用いて、咀嚼力が加わった際の術後の位置変化を予測した。その結果、実際の術後変化として起こる変化を再現することが可能であり、有限要素法による術後変化の予測は治療計画立案に有効であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study was to clarify the postoperative changes after orthognathic surgery from biomechanical point of view. We tried to evaluate the postoperative displacement of bony segment using finite element analysis under the situation of mastication force loading. As a result of this study, the postoperative changes of bony segment after orthognathic surgery which was observed in the clinical situation could be reproduced and the postoperative prediction using finite element analysis must be useful for diagnosis and planning for surgical orthodontic treatment.

研究分野：歯科矯正学

キーワード：外科的矯正治療 術後安定性 有限要素解析

## 1. 研究開始当初の背景

近年、矯正臨床において顎変形症患者に対する外科的矯正治療の割合は年々増加している。新潟大学医歯学総合病院においても、その割合は全患者数の20%以上を占めるに至っている。外科的矯正治療適用症例の増加は、顎矯正手術の治療技術や安全性の向上、咬合機能の改善に留まらず美的調和に対する患者ニーズの高まりが大きな要因と考えられ、今後もさらに増加するものと予想される。顎変形症例においては、診断基準や適応症の選択基準、術式、偶発症など幅広く研究が進められている。しかしその一方で、術後変化や安定性については未だに不明な点が多く、特に長期的な安定性に関するコンセンサスは得られていない。

我々はこれまでに、骨格性下顎前突症患者を対象に下顎枝垂直骨切り術後の変化について側面セファログラムを用いて詳細に分析し、長期的安定性が確立していることを確認した。また同時に、術後短期間において経時的に下顎骨の位置変化が生じ、術後3か月間で下顎骨が後方への回転変化を示すことを初めて明らかにし、この変化が付着する咀嚼筋の作用によって惹起される可能性を示唆した(図1)。

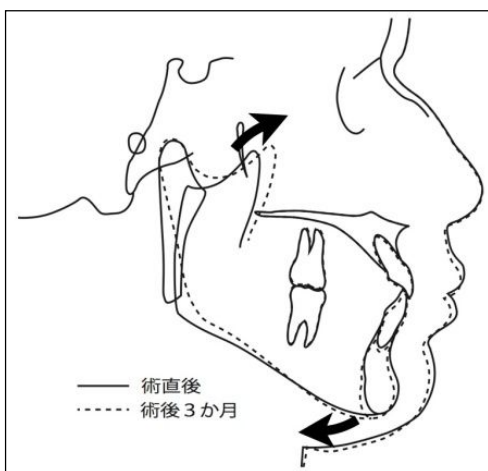


図1 下顎枝垂直骨切り術の術後変化

術後安定性に関するこれまでの研究では、おもに術後の形態変化を捉えることに主眼

がおかれ、形態変化からその原因を探るといえば後ろ向きの研究が主体であった。しかし、術後における長期安定性の研究を進めていく中で、硬軟組織の変化だけでは術後変化を引き起こす要因を見つけ出すことは困難であるとの考えに至った。そこで、顎矯正手術によって引き起こされる筋機能の変化を考慮し、術前の状態から術後変化を予測するという、いわゆる前向きの研究手法でなければ研究成果を実際の治療体系の中に組み込むことは難しいと考え、術後経時的に影響を与えていると推察される筋機能による応力の変化に着目すべきとの着想に至った。本研究モデルは、有限要素法を用いた応力解析により顎矯正手術施行後の構造的変化の要因を説明しようとするもので、初診の状態から術前の咬合状態を予測・構築した上で、術後に作用する顎骨内応力の予測と術後変化とを関連づける新しい試みである。顎矯正手術施行後の顎骨の位置変化は治療ゴールの設定および治療結果の評価とも密接に関わっており、外科的矯正治療の診断・治療計画立案にあたってはその変化を十分把握しておくべきものであるが、これまでの治療体系ではその予測が困難であった。本研究では、顎矯正手術施行後の咀嚼筋による下顎骨内応力分布の変化と術後形態変化との関連性を明らかにして初診の段階における予後の把握を的確なものとし、また、機能に配慮した術後変化を治療計画に組み込み、より安定した治療結果の獲得を目指すものである。

## 2. 研究の目的

顎変形症例における顎矯正手術後の三次元画像モデルを作成し、そのモデルに咀嚼筋の作用を付加させた際の顎骨内応力分布を解析する。その解析結果から術後の応力シミュレーションを行い、実際に生じた構造的変化と比較・検証することで、術後における下

顎骨内応力変化と形態変化との関連性を明らかにする。さらに、得られたデータを元に、顎矯正手術によって変化した筋機能を考慮した術前・術後矯正治療システムの体系化を図る。

### 3. 研究の方法

本研究では、以下の手順で顎矯正手術後の顎骨内応力の解析と術後変化の検証を行った。

#### (1) 3次元画像モデルの作成

顎変形症患者の初診時 CT から、三次元画像モデルを作成した。実際の顎変形症の初診時に撮影した MDCT 画像を 3次元骨形態モデリングソフトウェア TRI-3D/BON (RATOC 社、東京) に読み込み、各スライスから CT 値をもとに骨断面形態をトレースし、モデリングを行った (図 2)。この際、菲薄な構造物である歯根膜は CT 画像の解像度から最小単位が 0.43mm であることから、3次元メッシュモデルの精度を考慮し、2倍した 0.86mm の厚みを持った均一な領域として設定した。モデルの領域は解析時間とモデリング効率を考慮し、上顎骨は頬骨弓の下方のみとし、後方部は翼状突起までとした。

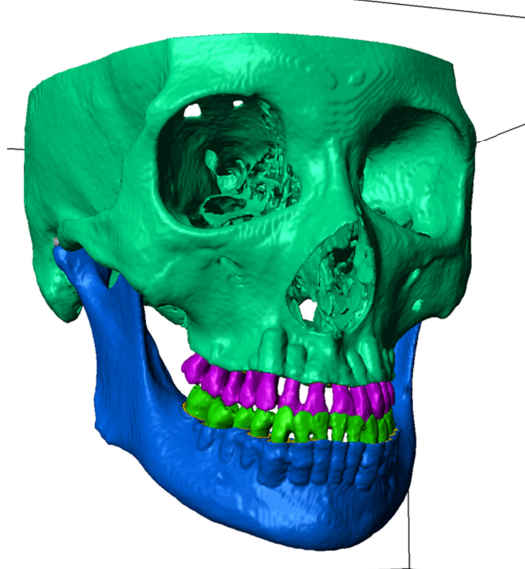


図 2 CT から作成した画像モデル

#### (2) モデルの生体等価性試験

作成したモデルの生体等価性を検討するために、対象症例でオクルーザルフォースメーター (ジーシー、東京) を用いて両側大臼歯部および前歯部における咬合力を測定した。作成した三次元モデルの顎骨に、初診時 CT から抽出した咀嚼筋について、長軸方向に対して直行する面において、各筋の最大断面積を算出した。最大作用時の筋力を片側 250Nf と仮定し、断面積の比率に応じた筋力を筋附着部位相当部に加重し、実際の咬合力データと比較して最大作用筋力に対する割合を算出した。本研究では、各筋とも 25%程度とすることで生体等価性が保たれることが明らかとなったため、以降の解析における荷重条件として採用した。

#### (3) 術後予測モデルの作成

信頼性が確認された術前予測三次元画像モデルを用いて、セファログラムを参考にし、実際の手術と同様に下顎枝を分割・移動し、術後三次元画像モデルを作成した。本研究では最も骨片の位置変化が顕著に現れると予測される下顎枝垂直骨切り術を想定して術後予測モデルを作成した (図 3)。

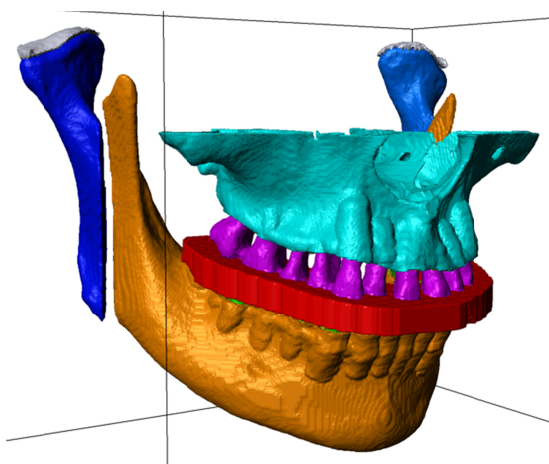


図 3 術後予測画像モデル

#### (4) 有限要素解析

術後予測モデルを有限要素解析ソフトウェア Autodesk Simulation Mechanical 2016



(Autodesk Inc, US)へ読み込み、メッシングおよび材料設定、荷重条件の設定を行った。拘束条件は上顎骨上部および関節円板上面を完全拘束とした。上下顎歯列は顎間固定を想定して歯冠部にプリントモデルを介在させて連結とした。生体等価性試験にて採用された咀嚼筋の荷重条件を、各筋の起始・停止部位の解剖学的構造物の代表点間に荷重することとした(図4)。

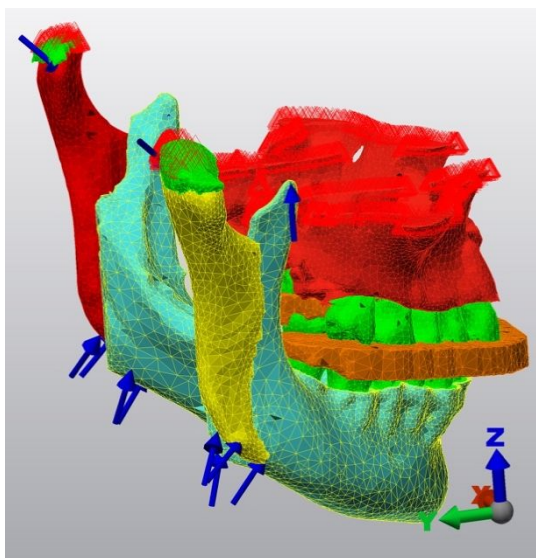


図4 解析用メッシュモデルと荷重条件

#### (5)解析結果と実際の術後変化との比較

実際に起こった術後の形態変化と下顎骨内応力分布および骨片の変位様相の関連について比較、解析を行った。

#### (6)術後の咀嚼筋による応力変化を考慮した術前・術後矯正治療システムの体系化

### 4. 研究成果

#### (1)主な成果

本研究では、初診時におけるCT画像から3次元モデルを作成し、予測される術後モデルを用いて有限要素解析による術後変化の予測を試みた。その結果、我々が側面セファログラム分析によって明らかにした術後変化と同様の骨片変化を認めた(図5)。近位

骨片は下顎頭を中心に前上方へ回転し、遠位骨片は筋突起部が上方へ持ち上がりながら、オトガイ部は後下方へ変位した。この変化は、我々が過去に報告している術後3ヶ月で起こるとされる adaptive rotation に対応する位置変化であり、本研究で行った術後変化予測のシミュレーションによって実際の症例における術後変化が再現可能であることが示唆された(図6)。今回の荷重条件が咀嚼筋の作用であることから、術後変化としての adaptive rotation は咀嚼筋の作用によって惹起される可能性が極めて高いことが裏付けられた。また、有限要素法を用いた応力解析の結果をもとに術後変化を可視化することで、術後変化を3次的に予測することが可能となった。

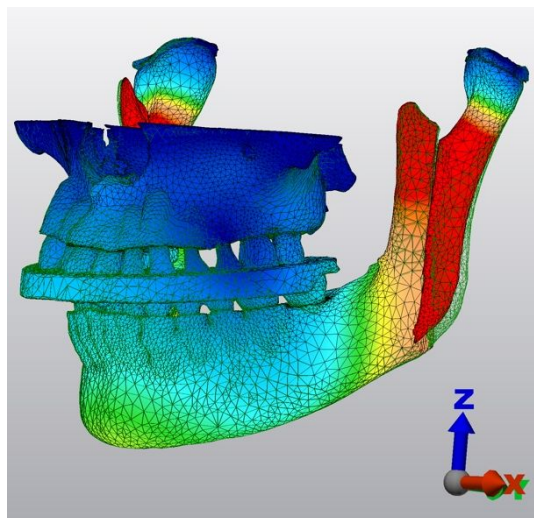


図5 術後変位

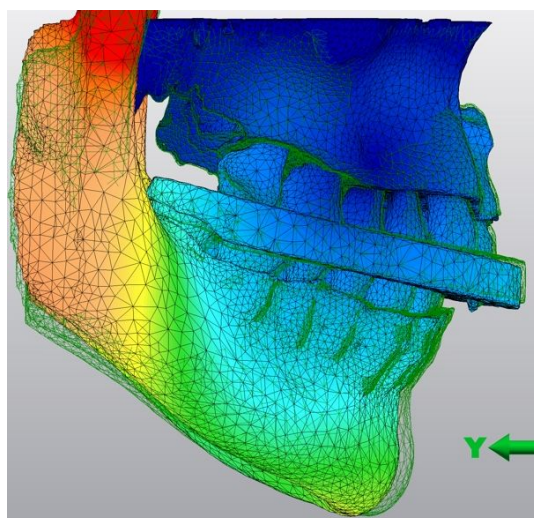


図6 側面から見た術後骨片の位置変化

(2)得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

これまでの術後変化は主に形態的な分析がほとんどで、国内のみならず海外の文献においてもその原因については推測の域を出なかった。そのような現状の中で、本研究は生体力学的な理論の裏付けを持って術後変化について言及することが可能となり、術後変化予測に新しい知見を加えたという点からもインパクトがあったのではないかと推察された。

(3)今後の展望

本研究によって術前の状態から術後の骨片の変化様相についておおよその予測が可能であり、有限要素解析を治療計画立案に応用することが有益であることが明らかとなった。その一方で、現時点では完全な変化量の予測と完全な術後形態の把握は困難であることから、今後も継続して再現性の高い物性値の設定や接触条件の模索、顎顔面軟組織の影響など本研究で採用していない要因についても解析条件として検索していくことが不可欠であると考えられた。

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2件)

Nihara J, Gielo-Perczak K, Cardinal L, Saito I, Nanda R, Uribe F.: Finite element analysis of mandibular molar protraction mechanics using miniscrews. Eur J Orthod. 査読有、37巻、2015、95-100.

永井嘉洋, 西山秀昌, 丹原 惇, 田中礼, 八巻正樹, 林 孝文, 齋藤 功: 顎顔面形態の評価に有用な3次元計測点の再現性に関する研究. 日骨形態誌、査読

有、23巻、2013、S145-S155.

〔学会発表〕(計6件)

丹原 惇: 矯正歯科と FEA シミュレーション. Autodesk Simulation Day 2015 招待講演, オートデスク本社(東京都中央区), 2015年12月11日, プログラム URL”[http://static-dc.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/campaigns/aif2015/Simulation\\_Day\\_2015\\_flyer.pdf](http://static-dc.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/campaigns/aif2015/Simulation_Day_2015_flyer.pdf)”, 2015.

Jun Nihara, Flavio Uribe, Ravindra Nanda, Isao Saito: Finite element analysis of mandibular molar protraction with sliding mechanics and orthodontic anchor screw. 第74回日本矯正歯科学会大会, 福岡国際会議場(福岡県福岡市), 2015年11月18-20日, 抄録集: 143頁, 2015.

丹原 惇, 高橋 功次朗, 森田 修一, 小林 正治, 池田 順行, 林 孝文, 齋藤 功: 偏位を伴う骨格性下顎前突症例のセファロメトリックプレディクションにおける移動量の左右差と正中部移動量との関係. 第25回特定非営利活動法人日本顎変形症学会総会・学術大会, ベルサール神田(東京都千代田区), 2015年6月4-5日, 日顎変形誌 25(2): 153頁, 2015.

丹原 惇, Uribe フラビオ, ナンダ ラビンドラ, 齋藤 功: 歯科矯正用アンカースクリューを用いた下顎大臼歯近心移動メカニクスの有限要素解析. 第73回日本矯正歯科学会大会, 2014年10月20-22日, 幕張メッセ(千葉県千葉市), 抄録集: 187頁, 2014.

Nihara J, Uribe F, Cardinal L, Nanda R, Saito I: Finite element analysis of mandibular molar protraction with sliding mechanics and miniscrews. The 6th World Implant Orthodontic Conference Anaheim (USA), 2014.10.3-2014.10.5.

Jun NIHARA, Krystyna GIELO-PERCZAK,  
Lucas CARDINAL, Ravindra NANDA,  
Flavio URIBE, Isao SAITO: Finite  
Element Analysis of Molar Protraction  
Mechanics Using Miniscrews. The 3rd  
International Symposium on Human  
Resource Development towards Global  
Initiative, Krabi (Thailand),  
2013.12.20-2013.12.22, abstract  
book: 105 頁, 2013.

〔その他〕

丹原 惇: 株式会社 CAE ソリューションズ  
ユーザ事例紹介「シミュレーションで探る  
歯の移動メカニクス歯科矯正学の世界に  
新たな可能性を切り拓く」.

URL”[http://www.cae-sc.com/ed-autodes  
k-simulation-mechanical/ed-autodesk-si  
mulation-mechanical-0001.html](http://www.cae-sc.com/ed-autodesk-simulation-mechanical/ed-autodesk-simulation-mechanical-0001.html)”, 2015.

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

丹原 惇 (NIHARA, Jun)

新潟大学医歯学系・助教

研究者番号：1 0 6 3 6 2 2 8