

構造物を構築するセル・オートマトン法による下顎骨形状の考察

Study of Mandibular Shape by Cellular Automaton Method

○伊能教夫（東工大），小関道彦（東工大），加藤一郎（東工大），槇宏太郎*（昭和大）

Norio INOU, Michihiko KOSEKI, Ichiro KATO and Koutarou MAKI*

Department of Mechanical and Control Engineering, Tokyo Institute of Technology

*Department of Orthodontics, Showa University

This study discusses mandibular shape from a standpoint of structural stability under the masticatory conditions. We use a cellular automaton method to explore a stable structure which is satisfied with plural biting conditions. The method automatically generates the structural shape once the initial shape and the mechanical conditions are given. We apply this method to a mandible of a rat. The masticatory conditions are set as four kinds of biting ways, which are supposed to be exerted on the mandible. The cellular automaton model generates a similar mandibular shape of a rat as well as the human mandible in our previous report. The effect of the initial shape on the structural formation is also discussed.

Keywords: Mandibular shape, Mastication, Structural formation, Cellular automaton, Biomechanics.

1. はじめに

顎骨は動物によってさまざまな形状をしている。筆者らは、顎形状と咀嚼の仕方には密接な関係があると考え、バイオメカニクスの立場から考察を行っている。これまでに、サルとシカの顎骨形状が咀嚼状態と関係があることを生長変形法の原理 [1] で説明可能なことを示した [2]。また、ヒトの下顎骨については、三次元物体を議論することが可能なセル・オートマトン法を用いてヒトの顎骨とよく似た構造体を得られることを示した [3]。今回はセル・オートマトン手法をラットに適用した例を紹介し、顎骨形状と咀嚼の関係について考察する。また、力学構造物の形状安定性という観点から顎骨形状を考察する。

2. シミュレーション手法

セル・オートマトンモデルを用いた構造物生成アルゴリズムの概略は以下の通りである [2]。

Step1: 初期形状としてのセルの配置。

Step2: 荷重条件および境界条件の設定。

Step3: セルに生じる応力を有限要素解析で計算。

Step4: 応力を評価しヤング率を変更。

（応力の高いセルはヤング率を増大させ、低いセルは減少させる。）

Step5: セルの消滅と誕生。

（不要なセルは削除し、セルが必要な箇所には新たに配置する。）

Step6: Step1 に戻って計算を継続。

（各セルの力学状態が収束するまで数値計算を繰り返す。）

返す。）

以上の手順にしたがってシミュレーションを実施すると全てのセルの応力状態（相当応力値）が均一化されてくる。なお、Step4 で変更するヤング率は、みかけ上のヤング率である。また、ヤング率が大きいほど材料強度が高いとし、ヤング率と目標強度の関係を非線形関数で表現している。この非線形性によってヤング率も一つの値に集約化されてくる。

3. ラット下顎骨の構造生成シミュレーション

ラットの咬合条件を設定し、構造生成シミュレーションを行った。初期形状は直方体（40x30x20セル要素）とした。ラットの咀嚼筋の荷重および歯牙荷重の値は、文献及び解剖による観察から推定し、咬合状態として (a) 両奥歯噛み締め、(b) 前歯噛み締め、(c) 右奥歯噛み締め、(d) 左奥歯噛み締めの4種類の咬合状態を想定した。推定した (a), (b), (c) の力学状態を図1に示す ((d) は (c) の左右を逆にした力学状態なので図は省略する)。

咀嚼筋力の推定には図2に示すラット下顎骨の実形状も参考にした。すなわち、ラットの下顎は、薄い平板状をしており、下顎前方が張り合わされている（簡単に二つに分離できる）。このため下顎前方部には水平方向の力はほとんど働いていないと予想される。このため、モーメントバランス計算を行いながら、各咀嚼筋力を微小修正しながら水平方向成分の力が最小となる咬合条件を探った。

構造生成シミュレーションは各力学状態について

応力解析を行い、各セル要素について4つの力学状態の中で最も高い応力値をそのセル要素の参照すべき応力値として行った。シミュレーション結果を図3に示す。初期形状が単純な直方体からスタートしてもラットの下顎骨に近い構造体が生成されている。これは下顎形状が咀嚼条件に対して構造力学的にみて安定した構造体であると解釈することができる。つまり、咀嚼の様式によって顎骨の基本的な形状が力学的に規定されていると言える。

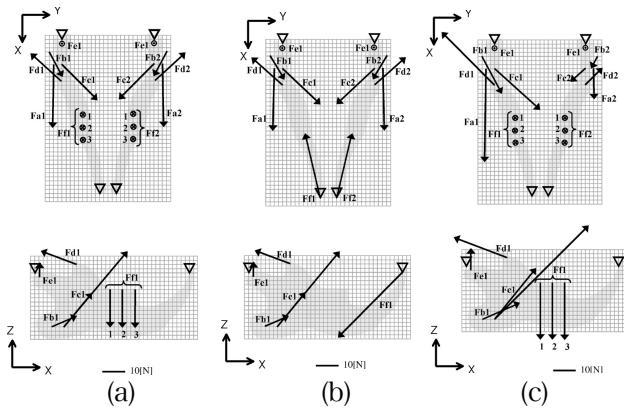


Fig. 1 : Mastichatory conditions of a rat.

(a): bilateral biting, (b): biting at the anterior teeth, (c): unilateral biting on the right side.

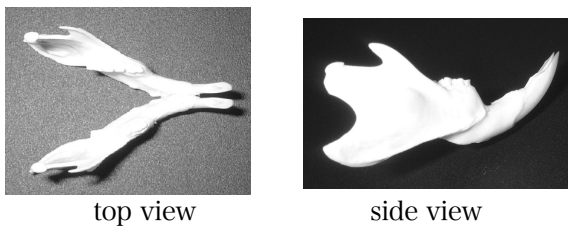


Fig. 2 Mandible of a rat

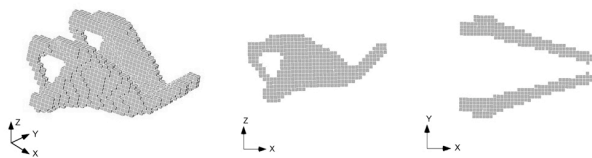


Fig. 3 Result by the cellular automaton method.

4. 考察

セル・オートマトン法では最終形状に初期状態が大きく影響を与えることが知られている。図3のシミュレーション結果では、顎骨後方部に空孔が生じている箇所が実形状と異なっている。この差異が初期形状によって生じているのではないかと考えた。そこで図4 (a)に示すように後方部に空間的制約を設定した初期形状に変えてシミュレーションを行った。シミュレーション結果を図4 (b)に示す。下顎

形状は直方体を初期形状にした場合よりも実形状に近い構造が得られている。

ラットの発生過程では、下顎骨後方の切れ込みに相当する部分は、初期の段階から出来上がっているようである [4]。つまり骨成長の過程で空間的制約による形状制御が働いているように見える。セル・オートマトン手法によって示される初期形状が最終形状に及ぼす影響は、成長を伴う骨形状変化の一端を示しているように思える。

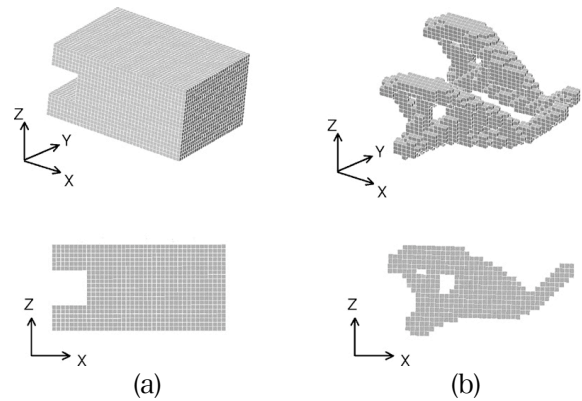


Fig. 4 Change of initial shape (a) and the final structure (b).

5. おわりに

咀嚼の仕方と下顎骨の形には構造力学的な関係があることをセル・オートマトン法を用いて示した。現時点では、ヒトとラットについてのシミュレーション結果にとどまっているが、他の動物の下顎骨でも同様の結果が得られるのではないかと予想している。各種動物の咀嚼データが入手可能ならば、シミュレーションを行ってみたいと考えている。

参考文献

- [1] 梅谷, 平井: 生長変形法による構造材の適応的最適形状の決定, 日本機械学会論文集, Vol.42, pp.3754-3762 (1972)
- [2] 伊能, 飯岡, 楨: 下顎骨の生体力学的研究 - 咬合時における応力分布とその力学的考察 -, 第2回顎顔面バイオメカニクス学会講演論文集, pp.47-48(1994)
- [3] 伊能, 下平, 小林: 力学構造物を自己組織化するセル・オートマトン (ローカルルールによって生じるシステム全体の挙動), 機論 A, 61-586, pp.1416-1422(1995)
- [4] 倉谷滋: 動物進化形態学, 東京大学出版会 (2004)