

〔学位論文〕

3次元有限要素法によるインプラント傾斜埋入モデルの下顎骨の構築と応力解析

仲井 太心

北海道医療大学歯学部歯学研究科・口腔機能修復再建学系クラウンブリッジ・インプラント補綴学分野

Analysis of FEA mandible model with some tilted-implants by 3D-FEM

Taishin NAKAI

Division of Fixed Prosthodontics and Oral Implantology, Department of Oral Rehabilitation, School of Dentistry,
Health Sciences University of Hokkaido

緒 言

近年、無歯顎患者に対して、インプラント体をオトガイ孔、または上顎洞を避けて遠心傾斜埋入することで骨増生による長期治療期間を回避でき、さらに4本のインプラント埋入でカンチレバーも付与できるAll-on-4コンセプトによる治療法が多く用いられている。しかし、一般的にカンチレバーは、歯やインプラント体および周囲骨に対して過酷な条件と考えられており、カンチレバー付きインプラント補綴における10年生存率は61%と低いという報告もある。All-on-4コンセプトの症例が増え、年数が経過するに従ってインプラント体の破折や骨吸収によるインプラント体の脱落報告なども増加する可能性も考えられる。しかしAll-on-4コンセプトは臨床先行型であり、十分な解析が行われていない。そこで本研究では、ヒト乾燥骨骨体標本のCTデータとマイクロCTから採得したインプラントデータをもとに現実に近い有限要素モデルを構築した。また、閉口筋の付着部位に荷重を付与し、さらに下顎骨のたわみやねじれを阻害しない最適な拘束条件を検討したうえで、過去の検討よりも詳細なAll-on-4コンセプトの有限要素解析を行った。

材 料 と 方 法

下顎骨モデルは、標準的な骨質を有するヒト乾燥下顎骨骨体標本を水中に浸漬しヘリカルCT（PROSPEED F II, GE）で0.6 mmスライスの条件下で撮像して構築した。インプラント体は、Nobel Biocare社製Brånemark Mk III（直径4.0 mm、長さ7.0～15.0 mm）をマイクロCT（MCT-12505MF(H), 日立メディコ）を用いて撮像して

モデル化した。アバットメントは、30度の角度付きと垂直のものを直径4 mmの円錐台形態としてCADでモデル化した。上部構造は、顎堤弓に沿った高さ3 mm、幅5 mmのプレートとしてCADでモデル化した。

All-on-4コンセプト有限要素モデル（以後TILTモデル）は、有限要素解析ソフト（Mechanical FINDER Version 6.0, 計算力学研究センター）を用いて構築した。遠心インプラント体2本を遠心に30度傾斜させ、頬舌の角度は顎堤弓に添わせた。埋入深度は、インプラント体頸部近心を完全埋入した。前方インプラント体は、垂直に2本のインプラントを頸部まで埋入するように構築した。アバットメントを装着し、その上に上部構造を設置した。TILTモデルにおける右側遠心アバットメント遠心面が下顎骨と接触しないように、アバットメント周囲骨を除去した。カンチレバーの長さは14 mmとした。

比較対照として、オトガイ孔間に垂直に4本インプラントを埋入したSTモデルと垂直に5本埋入したTRONTモデルを用いた。両モデルにおいて、カンチレバーの長さは19 mm、インプラント長径は7～15 mmとした。

要素分割は、ANSYS ICEM CFD Version 11.0で行った。メッシュサイズは、下顎骨を0.3～1.2 mm、インプラント体、アバットメントおよび上部構造は、0.3 mm（倍率：3倍）とした。

骨における各要素のヤング率は、ソフトの規定に従い、CT値から骨密度を求め、さらにKeyak et al.の公式を用いて導出した。ポアソン比は0.4とした。インプラント体、アバットメントおよび上部構造は純チタンのデータを用いた（ヤング率108 GPa, ポアソン比0.19）。

荷重条件は、閉口筋である咬筋、側頭筋および内側翼

突筋を想定して、各筋付着部位に荷重点を付与した。荷重の大きさは、右側カンチレバー最遠心部に反力として250 N発生するように設定した。

拘束条件は、最も現実の咬合咀嚼状態に近似した条件とした。すなわち、左右下顎頭一点ずつを頭尾方向（Z軸）および前後方向（Y軸）に拘束、右側カンチレバー最遠心部頬舌の midpoint 一点をZ軸方向のみ拘束し、回転を非拘束とした部分的拘束条件とした。

データの採取は、インプラント体頸部周囲骨を覆う大きさの球状領域を定義し、インプラント体頸部平均相当応力及び最小主応力を評価した。

結 果

インプラント体頸部に発生した平均相当応力は、TILTモデルにおける右側遠心インプラント体頸部周囲骨が最も高い値を示した。また、どの埋入形態においても、インプラント長径が長くなるほど右側遠心インプラント体頸部の応力は、減少する傾向を示した。

TILTモデルにおいては、インプラント頸部周囲骨に発生する最小主応力はインプラント長径が長くなるほど減少する傾向が認められた。埋入形態の影響を見てみると、TILTモデルにおける最小主応力は他のモデルと比較して2～4倍高く、右側遠心インプラント周囲骨においては200 MPaを超過することが分かった。

考 察

本研究では、All-on-4コンセプトの詳細な有限要素解析を行い、インプラントの周囲骨に発生する応力を評価した。その結果、インプラント長径が長くなるにつれて、荷重点に最も近いインプラント頸部周囲骨応力は減少したことから、長径を長くすることによって応力を軽減できることが分かった。

しかし、TILTモデルは垂直埋入モデルと比較して、最小主応力が2倍から4倍に増大することが示され、いずれのインプラント長径においても200 MPaを超えていることから、下顎骨に骨折を及ぼす可能性のある過大な応力が生じていることが示唆された。それに対してST

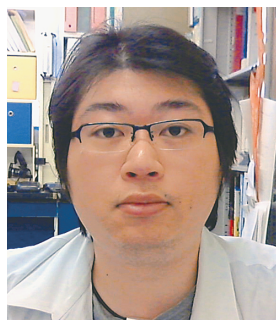
モデルとTRONTモデルにおける応力は、TILTモデルと比較し明らかに低い値を示した。したがって、TRONTモデルおよびSTモデルは、カンチレバーを有する上部構造体を装着する場合には、TILTモデルよりも適した方法であることが確かめられた。

過去の研究では、皮質骨と海綿骨から成る単純2層のモデルが用いられ、実際の咬合状態を反映していない。下顎骨基底面を完全に拘束した条件下で応力解析が行われてきた。それに対して本研究では、有限要素モデルを実際の下顎骨とインプラント体のCT画像から構築しており、有限要素解析ソフトも開発時点において実際の大腿骨とモデル化した大腿骨の応力を比較検証し、高い相関性が得られているシステムを使用した。また拘束条件も詳細に検討し、実際の咬合状態に近い条件を再現し、骨に発生する応力の絶対値をより適切に評価しているため、従来の有限要素解析よりも信頼性の高い知見が得られたものと考えられる。

結 論

1. すべてのモデルにおいて、右側遠心インプラント体頸部の周囲骨に発生する平均相当応力は、インプラント長径が長くなるにつれて減少した。
2. TILTモデルの右側遠心インプラント頸部周囲骨の最小主応力は、STおよびTRONTモデルよりも大きく、すべてのインプラント長で脛骨骨折の危険性のある200 MPaを超過した。
3. 4本垂直埋入モデルと5本垂直埋入モデルの最小主応力は、All-on-4コンセプトモデルよりも明らかに小さく、下顎骨におけるカンチレバーを有したインプラント治療には垂直埋入が適している。

以上の結果から、下顎におけるAll-on-4コンセプトでは、荷重点に最も近い傾斜埋入インプラント体の周囲骨に高い応力が集中することが分かった。したがって傾斜埋入インプラントよりも垂直埋入インプラントのほうが優れていることが明らかとなった。



仲井 太心

平成12年3月 東京都立富士高等学校 卒業

平成18年3月 日本歯科大学新潟歯学部 卒業

平成23年3月 北海道医療大学歯学部大学院歯学研究科博士課程 修了