

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20791441
 研究課題名 (和文)
 生体アパタイトの配向性をも考慮に入れた顎骨の高分解能・大規模有限要素解析
 研究課題名 (英文)
 Computational jaw bone simulation using high-resolution finite element analysis
 considering alignment and texture of biological apatite crystallites
 研究代表者
 松永智 (MATSUNAGA SATORU)
 東京歯科大学・歯学部・助教
 研究者番号：70453751

研究成果の概要 (和文)：

我々は有限要素解析法 (FEM) に着目し、顎骨海綿骨が力学的立場から担う役割の解明を進めた。骨梁構造を忠実に再現した精密モデルを作製し、顎骨の微細構造を考慮した荷重伝達機構を明らかにするとともに、顎骨の生体アパタイト結晶配向性をシミュレータに反映させることで、より精度の高い解析が可能となった。

研究成果の概要 (英文)：

We focused on finite element method (FEM) to clarify biomechanical role of cancellous bone architecture. The precise FE-model contained trabecular bone structure was made from micro-CT images and we carried out 3D-FEM to visualize load transfer paths. In addition, we put in the data of alignment and texture of biological apatite (BAP) crystallites for jaw bone simulator, so we could demonstrate high-quality analysis with multi-scale simulator.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：歯学・補綴系歯学

キーワード：顎口腔機能学

1. 研究開始当初の背景

歯科においてはメカニカルストレスが顎

骨に多大な影響を及ぼすという認識があるにもかかわらず、マイクロメートルオーダー、

すなわち顎骨の骨梁構造にまで考慮した荷重伝達機構を明らかにしようという研究は世界的にも少ないのが現状であった。我々は有限要素解析法 (FEM) に着目し、顎骨海綿骨が力学的立場から担う役割の解明を進めている。高野直樹教授 (慶應義塾大学理工学部機械工学科) と共同で始動したプロジェクトは、解析シミュレータ開発と研究成果を報告するまでに至っていた。一方で、マイクロ CT データから海綿骨骨梁一本一本をマイクロ単位でボクセル有限要素に分割すると膨大な要素数 (1000 万-2000 万メッシュ) となり、32 ビット PC の限界をはるかに超えてしまうため、現状では分解能を落として解析しなければならないという問題点が明らかであった。

2. 研究の目的

本研究の目的を次の 2 点とした。

1) 高分解能撮像分解能のままの要素寸法で高精度 FEM を実現する。その手段として、

I) 64 ビット PC での大規模解析を行う方法で、顎骨全体のマクロモデルに骨梁構造を反映した均質化材料モデルを適用するマルチスケール解析を行う。

II) 撮像分解能が応力解析精度に及ぼす影響を解明する。具体的には、対象骨を分解能を変えてマイクロ CT 撮像し、均質化法により解析するマクロ特性値から違いを考察する。

2) 顎骨における生体アパタイト結晶の配向性を計測し、解析に反映させる。その手段として、

微小焦点 X 線回折装置を用いたヒト顎骨の BAp 配向計測から、歯牙を有する顎骨荷重伝達機構の特殊性を解析に反映させる。

3. 研究の方法

64 ビット PC での大規模解析として顎骨全体のマクロモデルにマルチスケール解析を行った。I) VOXELCON2007 版で 1000 万-2000 万メッシュの大規模解析を達成した後、

II) 顎骨全体のマクロモデルに骨梁構造を反映した均質化材料モデルを適用するマルチスケール解析を行った。このために 1) 顎骨の特徴部位からユニットセルモデルを抽出し、均質化材料定数を整理したデータベースを作成、2) 海綿骨領域を等価材料モデルとする FEM メッシュの生成、3) 解析と結果評価、の手順をとった。

計算結果の可視化及び評価には、高野教授と共同で開発している顎骨用シミュレータを用いた。同時にマルチスケール法とモルフォロジー分析法を用いた高分解能応力解析もこのソフトウェアを用いて行った。これは慶應義塾大学理工学部機械工学科と東京歯科大学解剖学講座の双方に設置され、解析が行われた。

同時に撮像分解能が応力解析精度に及ぼす影響を検証を行った。対象骨を分解能を変えてマイクロ CT 撮像し、①各 CT に基づき、骨梁構造の観察から違いを考察する。②各 CT に基づき、均質化法により解析するマクロ特性値から違いを考察する。③高分解能・高精度 FEM に対するマイクロ CT 撮像の指針について考察する。④高分解能 CT からボクセル要素サイズを大きくした場合と、低分解能 CT から生成するボクセル要素とで違いの比較を行った。

BAp 配向の計測は微小焦点 X 線回折法を用いて行った。これは大阪大学大学院工学研究科中野貴由教授らの研究によって確立された方法である。具体的には顎骨レジン包埋試料を薄切し、関心領域における X 線回折を測定することで BAp 結晶の c 軸配向性を算出した。さらに、パラメータ最適化支援ソフト AMDESS を用いて力学の逆解析手法を応用することで、荷重分担に最適な BAp 配向を逆算して実測データとの比較を行った。

4. 研究成果

顎骨骨梁構造を含むマイクロCTデータから解像度を落とさない要素寸法での大規模解析が可能となり、1000万-2000万メッシュの有限要素解析を行うことができるようになった。これはいままでマクロレベルでしか解析できなかった従来から、骨梁構造を考慮に入れたマイクロメートルオーダーでの解析が可能になったことを意味し、およそ画期的であった。具体的には、ビーグル犬を用いたインプラント埋入試料、ヒト下顎骨インプラント埋入モデル、無歯顎下顎骨における高精度解析を行い、荷重伝達経路を予測することができた。最大主応力のベクトル表記により、これまで応力集中としてとらえていたシミュレーション結果を応力の大きさと方向として表現でき、変位モードを併用することで海綿骨構造が果たす生体力学的な役割を考察できたことは大きな成果である。

同時に撮像分解能が応力解析制度に及ぼす影響について考察するために、医療用CT及びマイクロCTを用いて撮像した海綿骨形態の情報を含む解析モデルを作製した。同一の力学的解析結果について比較検討を行ったところ、明確な応力値の差はみられなかったことから、医療用CTを用いた臨床応用の可能性が示唆された。

さらに、顎骨における皮質骨および海綿骨の生体アパタイト結晶(BAp)配向性の計測を行い、下顎頭と下顎第一大臼歯部および下顎中切歯部における皮質骨のBAp配向性を算出した。結果として下顎骨の歯槽部と基底部はBAp優先配向性に大きな違いがあり、基底部では近遠心的に配向しているのに対して、歯槽部では歯の植立方向に強い優先配向性が認められた。この結果は顎骨シミュレータに反映される予定であり、その予備実験として、パラメータ最適化支援ソフトAMDESSを用いて力学の逆解析手法を応用することで、

荷重分担に最適なBAp配向を逆算して実測データとの比較を行った。これにより、BAp配向の力学的役割の一端を解明し、シミュレータにBAp配向のパラメータを反映させるためのデータベースが更新された。

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6件)

- ① Matsunaga, S., Okudera, H., Abe, S., Tamatsu, Y., Hashimoto, M., Ide, Y. The influence of bite force on the internal structure of the mandible through implant. *Journal of Oral Biosciences*, 50(3) : 194-9, 2008 (査読有り)
- ② Someda, H., Saka, H., Matsunaga, S., Ide, Y., Nakahara, K., Hirata, S., Hashimoto, M. Age estimation based on three-dimensional measurement of mandibular central incisors in Japanese. *Forensic Science International*, 185(1-3) : 110-4, 2009 (査読有り)
- ③ Sugisaki, M., Agematsu, H., Matsunaga, S., Saka, H., Ide, Y. Three-dimensional analysis of the internal structure of the mandibular condyle in dentulous and edentulous jaws using micro-CT. (査読有り) *Cranio*, 27(2) : 78-87, 2009
- ④ Ohashi, T., Matsunaga, S., Nakahara, K., Abe, S., Ide, Y., Tamatsu, Y., Takano, N. Biomechanical role of peri-implant trabecular structures during vertical loading. *Clinical Oral Investigations*, 2009 (in press) (査読有り)
- ⑤ Matsunaga, S., Shirakura, Y., Ohashi, T., Nakahara, K., Tamatsu, Y., Takano, N., Ide, Y. Biomechanical role of peri-implant cancellous bone architecture. The

International Journal of Prosthodontics, 2009(in press) (査読有り)

⑥ Agematsu, H., Ohnishi, M., Matsunaga, S., Saka, H., Nakahara, K., Ide, Y. Three-dimensional analysis of pulp chambers in mandibular first deciduous molars. Pediatric Dental Journal, 20(1) : 1-6, 2010 (査読有り)

[学会発表] (計7件)

① 松永智, 大橋卓史, 中原賢, 田松裕一, 高野直樹, 井出吉信, 骨梁構造を考慮した顎骨の大規模マルチスケール解析, 第28回日本骨形態計測学会 総会・学術大会, 日本骨形態計測学会誌, 18 : 83, 2008

② 松永智, 大橋卓史, 中原賢, 田松裕一, 高野直樹, 井出吉信, ヒトインプラント周囲骨梁構造におけるマルチスケール解析, 第38回日本口腔インプラント学会 総会・学術大会, 日本口腔インプラント学会誌, 21 : 265, 2008

③ 松永智, 大橋卓史, 中原賢, 田松裕一, 高野直樹, 井出吉信, インプラント周囲荷重伝達機構の解析, 第21回日本歯科医学会 総会・学術大会, 日本歯科医師会誌, 61 : 134, 2008

④ 松永智, 大橋卓史, 中原賢, 田松裕一, 高野直樹, 井出吉信, 顎骨の骨梁構造を考慮したマルチスケール解析, 第50回歯科基礎医学会 総会・学術大会, Journal of oral biosciences, 50 : 136, 2008

⑤ 松永智, バイオメカニクス分野からみた骨梁の再生, 第6回日本再生歯科医学会学術大会・総会, 日本再生歯科医学会学術講演会抄録集 : 30, 2008

⑥ Matsunaga, S., Ohashi, T., Nakahara, K., Tamatsu, Y., Takano, N., Ide, Y. Analysis of loading mechanism in the trabecular bone around the dental implant

fixtures using multi-scale method. Japan-China Dental Conference, Program&Abstracts, 125, 2009

⑦ 松永智, 大橋卓史, 中原賢, 田松裕一, 高野直樹, 井出吉信, インプラント周囲骨梁構造が果たす力学的役割, 第114回日本解剖学会 総会・学術大会, 日本解剖学会誌, 84 : 138, 2009

[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◇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]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松永智 (MATSUNAGA SATORU)
東京歯科大学・歯学部・助教
研究者番号 : 70453751

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :