

機関番号： 11301
 研究種目： 若手研究（B）
 研究期間： 2009～2010
 課題番号： 21791878
 研究課題名（和文） FEA と CT 画像解析に基づくメカニカルストレスと骨代謝反応に関する検討
 研究課題名（英文） Investigation of mechanical stress and bone metabolism based on FEA and CT image analysis.
 研究代表者
 重光 竜二（SHIGEMITSU RYUJI）
 東北大学・病院・医員
 研究者番号： 00508921

研究成果の概要（和文）：本研究は、今後更に広く臨床に応用されるインプラント治療の発展を目標として、食物を咀嚼した場合など負荷が加わる状況下において、インプラントおよびこれを支持する骨との生体力学的なバランス関係を良好に保つための要件を検索した。その結果、インプラントの骨に対する埋入方向をコントロールすることにより周囲の負荷を低減することが可能であることが分かった。本研究の結果は、各々の症例に最適なインプラント治療を行う上で非常に有益である。

研究成果の概要（英文）：The present study aimed to development of implant treatment in clinical situation. In this study, we were concerned with a biomechanical relation between implant and peri-implant bone under the mastication. It is concluded that changing implant direction reduced the stress in the peri-implant bone .The result of this study is informative to the implant treatment for each case.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：歯科補綴学一般

1. 研究開始当初の背景

歯科臨床におけるインプラント治療は骨量・骨質などの解剖学的要因が考慮されているのみであり、インプラントの長期経過を決定する生体力学的な概念は欠如している。

2. 研究の目的

本研究では被験者の CT データおよび生体内実測荷重を用いて、生体力学的個体差を反映した FEA 応力解析を行い、インプラント周囲組織の力学挙動を明らかにすることを目的とした。さらに、インプラント周囲組織にお

ける力学挙動に影響をおよぼす因子を検索し、将来的に周囲組織の負荷のコントロールにつながるインプラント設計システムの構築に資することを旨とした。

3. 研究の方法

本研究は被験者に対するインフォームドコンセントを得て、東北大学大学院歯学研究科倫理委員会の承認のもとに行われた。被験者は62歳の女性であり、上顎にフルデンチャーおよび下顎に4本支台のインプラントオーバーデンチャーが装着されている。



図1 被験者口腔内所見

(1) 生体力学的個体差を反映した FEA モデルの構築・解析

①骨形状のモデル化

被験者の CT データをもとに骨形状抽出ソフトウェア (MECHANICAL FINDER, RCCM, 日本) を用いて骨形状を STL 形状として抽出し, 同 STL 形状を汎用有限要素解析ソフトウェア (PATRAN, MSC Software, 日本) にてインポートして骨形状をモデル化

②インプラント形状のモデル化

被験者 CT データを基にインプラント埋入位置・埋入角度を計測し, モデル上でインプラント形状を作成し埋入.

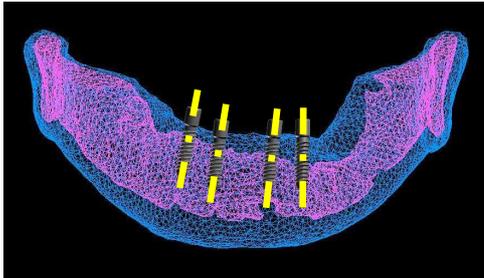


図2 個体差を反映した FEA モデル

③荷重条件の入力

インプラントに加わる荷重の大きさ, 方向を三次元的にリアルタイム測定するシステムを用いて得られた生体内測定荷重を荷重条件として入力する. 測定タスクは最大咬み締め時, 咀嚼運動時 (ピーナッツ咀嚼・ガム咀嚼) とした.

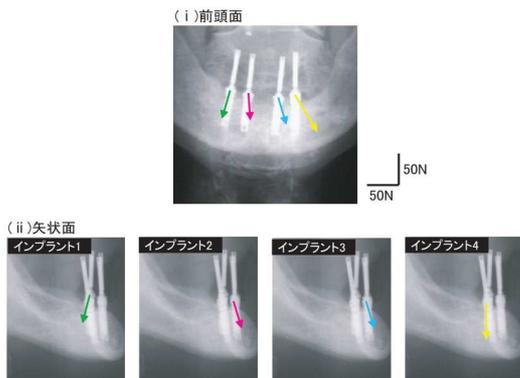


図3 最大咬みしめ時の荷重ベクトル

④解析

モデルに対して材料特性および拘束条件を設定し, 汎用有限要素解析ソフト (MARC, MSC Software, 日本) にてインプラント周囲骨において発生する応力成分の応力分布・応

力値を解析した. 材料特性は報告から引用した.

	ヤング率(MPa)	ポアソン比
implant	106330	0.34
皮質骨	14400	0.34
海綿骨	480	0.23

表1 材料特性

(2) 解析結果の分析

各荷重条件での von Mises 応力について評価値 $\sigma_R \cdot V_R$ を定義し評価を行った. 評価値 $\sigma_R \cdot V_R$ は下顎骨全体のうち各インプラント周辺領域を $\Omega := \cup_{i \in I} \Omega_i^e$ を選択することとし, その領域の体積を $V = \int_{\Omega} dV$ とする. ここで, N_{elem} は各インプラント周辺で選択した有限要素の数であり, Ω_i^e は各要素の領域で, $\Omega_i^e \cap \Omega_j^e = \emptyset (i \neq j)$ である. 要素 Ω_i^e の体積を $V_i^e := \int_{\Omega_i^e} dV$ とする. 各要素の中心点 x_i での von Mises 応力 σ_i を用いて評価することとし, 要素内での応力は一定とみなす ($\sigma(x) := \sigma(x_i), \forall x \in \Omega_i^e$) 応力の小さい順に要素番号 i を付ける ($\sigma_1 < \dots < \sigma_{N_{elem}}$). ここで次の応力評価値 $\sigma_R \cdot V_R$ を定義する.

$$\sigma_R := \sum_{i \in I^+} \sigma_i V_i^e / \sum_{i \in I^+} V_i^e \quad V_R := \sum_{i \in I^+} V_i^e$$

$I^+ := \{j^+ \in \{1, \dots, N_{elem}\} | \sum_{i \in I^+} V_i^e = V^+\}$ であり, V^+ は 50mm^3 とし Ω 中で上位の大きな応力が発生している領域の体積を, 評価値 σ_R は領域 $\Omega^+ := \cup_{i \in I^+} \Omega_i^e$ での平均応力をそれぞれ意味する. 今回, 基準 σ^* は 3.0MPa とした. 評価値 σ_R (MPa): インプラント周囲骨における応力集中部位上位 50mm^3 の要素の平均応力 評価値 V_R (mm^3): インプラント周囲骨における 3.0MPa 以上の応力が発生している部位の体積

(3) インプラント埋入方向による影響の考察

(1)の手法により被験者を再現した FEA モデル (以下 original) にくわえて, インプラント埋入方向を最大随意噛み締め時 (以下 MVC 時) に加わる荷重ベクトルと一致させた FEA モデル (以下 change) を作成した. この change に対しても original 同様に評価値による分析を行った.

4. 研究成果

(1) MVC 時の応力分析

インプラントの埋入方向を荷重方向と一致させることにより original モデルと比較して change モデルの評価値 σ_R は (表. 4 に示すように $44.2 \sim 73.8\%$ となった). original モデルと change モデルを比較した場合, implant1~4 すべてにおいて評価値 $\sigma_R \cdot V_R$ での応力集中の緩和が見られた. これは, change モデルは, インプラント埋入方向を荷重ベクトルと一致させているため, インプラントおよびインプラント周囲骨に対してモーメントを発生させる側方力が加わっていないことが影響していると考えられる.

また、評価値 V_R での低減効果が評価値 σ_R での低減効果よりも顕著であった。つまり、荷重ベクトルを変化させていないにもかかわらず、インプラント周囲骨において 3.0MPa 以上の応力が発生している要素が減少したことから、インプラント埋入方向を変化させることで応力集中を緩和できることが確認された。

MVC (ノルム合計:192.8N)			
		評価値	
		σ_R (MPa)	V_R (mm ³)
implant1 (44.0N)	original	2.46	7.07
	change	1.69	0.14
	低減率	31.1%	98.0%
implant2 (41.5N)	original	2.16	2.71
	change	1.59	0.18
	低減率	26.2%	93.5%
implant3 (43.5N)	original	2.26	8.09
	change	1.30	0.10
	低減率	42.4%	98.8%
implant4 (63.8N)	original	5.03	47.20
	change	2.23	0.08
	低減率	55.8%	99.8%

表2 MVC時の応力評価値

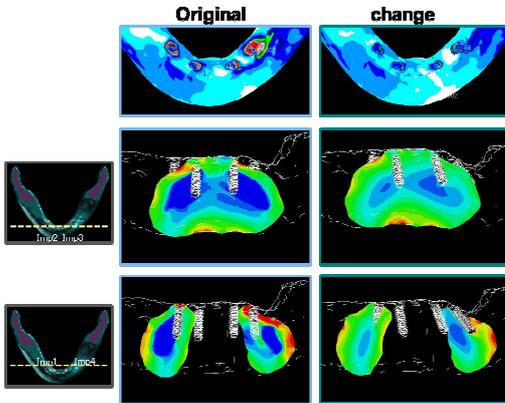


図4 MVC時の von Mises 応力コンター図

(2) ガム咀嚼時の応力分析

荷重ノルム合計のピークでは、originalモデルと比較してchangeモデルの評価値 σ_R は表3に示すように 84.6~102.6%となった。各インプラントの荷重ノルムのピークでは、originalモデルと比較してchangeモデルの評価値 σ_R は表4に示すように 47.9~102.6%となった。評価値 $\sigma_R \cdot V_R$ の比較では、荷重ノルムの合計のピーク、および各インプラントにおける荷重のピークどちらの場合においても implant1, 2, 4 では応力集中の緩和が見られたが、implant3 では応力集中を起こした。また、implant2, 3 に加わる荷重ノルムは、MVC時と比較して小さいにもかかわらず評価値 $\sigma_R \cdot V_R$ は、MVC時よりも高い値を示した。これは、インプラント埋入方向と荷重ベクトルの角度差が応力集中に対して大きな影響を与えることに起因している。実際に implant2,3 は荷重ベクトルとの角度差は他の implant に比べて大きかった。また、咀嚼時には、瞬間的に MVC 時以上の応力集中を起こしていることが明らかになった。

ガム咀嚼:ノルム合計が最大			
116.1N time:1.875(sec)		評価値	
		σ_R (MPa)	V_R (mm ³)
implant1 (22.3N)	original	3.06	18.60
	change	2.59	8.30
	低減率	15.4%	55.4%
implant2 (29.8N)	original	3.03	17.30
	change	2.91	15.00
	低減率	4.0%	13.3%
implant3 (32.8N)	original	3.45	25.50
	change	3.54	26.80
	低減率	-2.6%	-5.1%
implant4 (31.2N)	original	3.61	27.50
	change	3.38	26.70
	低減率	6.4%	2.9%

表4 ガム咀嚼時の応力評価値 (荷重ノルム合計が最大時)

ガム咀嚼:各インプラントの荷重が最大			
		評価値	
		σ_R (MPa)	V_R (mm ³)
implant1 (36.6N:time=3.500)	original	1.79	2.88
	change	1.44	0.09
	低減率	19.6%	96.9%
implant2 (30.6N:time=1.900)	original	3.08	18.20
	change	2.96	16.50
	低減率	3.9%	9.3%
implant3 (32.8N:time=1.875)	original	3.45	25.50
	change	3.54	26.80
	低減率	-2.6%	-5.1%
implant4 (47.2N:time=2.225)	original	3.55	25.60
	change	1.70	0.23
	低減率	52.1%	99.1%

表5 ガム咀嚼時の応力評価値 (各インプラント荷重最大時)

(3) ピーナッツ咀嚼時応力分析

荷重ノルム合計のピークでは、originalモデルと比較してchangeモデルの評価値 σ_R は表.6に示すように 57.1~103.7%となった。各インプラントの荷重ノルムのピークでは、originalモデルと比較してchangeモデルの評価値 σ_R について表に示すように 43.3~109.5%となった。荷重ノルムの合計のピーク、および各インプラントにおける荷重のピークどちらの場合においても、ガム咀嚼の場合と同様に、implant1, 4 では応力集中の緩和がみられたが、implant2, 3 では、応力集中を示した。

ピーナッツ咀嚼:ノルム合計が最大			
166.1N time:2.700(sec)		評価値	
		σ_R (MPa)	V_R (mm ³)
implant1 (56.0N)	original	3.64	33.70
	change	2.50	3.29
	低減率	31.3%	90.2%
implant2 (29.9N)	original	2.98	15.90
	change	3.09	18.90
	低減率	-3.7%	-18.9%
implant3 (25.5N)	original	3.22	20.60
	change	3.33	22.90
	低減率	-3.4%	-11.2%
implant4 (54.8N)	original	4.52	37.10
	change	2.58	7.54
	低減率	42.9%	79.7%

表6 ピーナッツ咀嚼時の応力評価値 (荷重ノルム合計最大時)

ピーナツ咀嚼の場合でも、ガム咀嚼の場合と同様に荷重ノルムが MVC 時に比べて小さいにもかかわらず、original, change 双方のモデルにおいて評価値 $\sigma_R \cdot V_R$ は MVC 時より大きな値を示す場合があります、インプラントに対する荷重方向の影響が大きいことが明らかになった。

ピーナツ咀嚼:各インプラントの荷重が最大			
		評価値	
		σ_R (MPa)	V_R (mm ³)
implant1 (61.3N:time=1.025)	original	2.89	12.90
	change	2.38	3.86
	低減率	17.6%	70.1%
implant2 (33.1N:time=1.025)	original	2.21	5.31
	change	2.42	7.97
	低減率	-9.5%	-50.1%
implant3 (33.6N:time=3.350)	original	4.42	42.90
	change	4.49	43.10
	低減率	-1.6%	-0.5%
implant4 (61.3N:time=4.325)	original	4.62	36.70
	change	2.00	0.87
	低減率	56.7%	97.6%

表7 ピーナツ咀嚼時の応力評価値
(各インプラント荷重最大時)

以上の結果からインプラント埋入方向を MVC 時における荷重ベクトルの方向に変化させたことにより MVC 時のみならず咀嚼運動時の応力集中の緩和が認められた。すなわち、本研究における知見は生体力学的考慮に基づいたインプラント埋入方向の決定によりインプラント周囲骨における応力伝達を制御できることを示唆している。

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1件)

- ① 重光竜二, 松本哲哉, 石井優, 石川太郎, 依田信裕, 山川優樹, 池田清宏, 佐々木啓一
有限要素法を用いた歯科インプラント義歯の顎骨内応力解析
社団法人日本機械学会 2010 年度年次大会, 講演論文集, Vol.5:25-26 査読無

[学会発表] (計4件)

- ① Y. Gunji, N. Yoda, R. Shigemitsu, T. Matsumoto, H. Kobari, T. Kawata, T. Kuriyagawa and K. Sasaki
Relationship between 3-D Load, Stress and Lateral Guidance of Implant
IADR GENERAL SESSION ,
2010 年 4 月 3 日, Miami (USA)
- ② 松本哲哉, 石井優, 重光竜二, 石川太郎, 山川優樹, 依田信裕, 川田哲男, 池田清宏, 佐々木啓一
インプラント埋入方向による周囲骨の応力低減効果-口腔内実測荷重に基づく有限

要素解析

日本補綴歯科学会東北・北海道支部総会
2009 年 10 月 24 日, 岩手県歯科医師会館

- ③ T. Matsumoto, Y. Ishii, R. Shigemitsu, N. Yoda, T. Kawata, H. Suenaga, K. Kubo, Y. Yamakawa, K. Ikeda and K. Sasaki

Comparison of stress distribution by changing the implant alignment

2nd Meeting of the IADR PAPF 1st Meeting of the IADR APR

2009 年 9 月 22 日, WUHAN (China)

- ④ 松本哲哉, 石井優, 重光竜二, 石川太郎, 山川優樹, 田村崇, 依田信裕, 川田哲男, 池田清宏, 佐々木啓一

有限要素法を用いたインプラント埋入方向の最適化によるインプラント周囲骨応力分布の低減効果に関する検討

第 6 回東北大学バイオサイエンスシンポジウム, 2009 年 6 月 16 日, 仙台

6. 研究組織

(1) 研究代表者

重光 竜二 (SHIGEMITSU RYUJI)

東北大学・病院・医員

研究者番号: 00508921

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: