

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 17 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24592955

研究課題名(和文)時間を考慮した in silico 動解析による破壊現象予防法の確立

研究課題名(英文) In silico dynamic analysis for prevention of fracture phenomena

研究代表者

山口 哲 (Yamaguchi, Satoshi)

大阪大学・歯学研究科(研究院)・講師

研究者番号：30397773

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000 円

研究成果の概要(和文)：歯科材料の進化に伴い、欠損部分を修復する治療の短期的臨床成績は大きく向上した。そして、これらの治療に関して重視されているのが長期耐久性の評価と予測である。しかしながら、応力が負荷された条件下での耐久性を簡便で正確に評価する方法はない。そのため、臨床予後に関連する要因が多岐にわたる歯科インプラント治療の長期耐久性は予測不可能である。また、高齢者の歯の破折が頻発するようになり、各々の歯の状態に応じた耐久性予測に基づいて破折予防法を策定する必要がある。そこで本研究では、歯や歯槽骨、ならびに歯科修復材料の破壊現象を、コンピュータシミュレーションを用いて精密かつ簡便に解析できる新規システムを構築した。

研究成果の概要(英文)：Short term clinical results of restorative treatment for defect repair have been improved with the evolution in dental materials. Next target is the evaluation and prediction of long term clinical performance. However, there were no simple and accurate method for evaluating the clinical performance under the stress loading conditions. For instance, the prediction of long term clinical performance of dental implant was impossible because of a broad range of prognosis factors. Tooth fracture for aged person was frequently occurred while they could preserve tooth for long periods. Thus, prevention method for the tooth fracture must be designed based on prediction of clinical performance according to tooth conditions. In this study, simple and accurate system by computer simulation was developed for analysis of fracture phenomena of tooth, alveolar bone, and restorative materials.

研究分野：歯科医用工学・再生歯学

キーワード：歯学 バイオメカニクス 動的破壊解析 有限要素法 粒子法

1. 研究開始当初の背景

非感染性の歯の硬組織疾患の1つである破折は、人が歯を長期間にわたって使用することが主な原因となっていることから、一般的に予防が困難であり、特に歯根破折は歯の喪失に直結することが多く、その予防・診断・治療については分野を超えた総合的なアプローチが必要であると言われている。また、これまで歯根破折は全て抜歯の適応とされてきたが、近年では早期に診断して接着治療をすれば十分に保存可能となってきた。しかしながら、生体組織、非生体組織間の接着界面では、機械的性質の違いから界面が剥離し、微小なクラックが発生し成長することにより、再度破折を引き起こす可能性がある。さらに、抜歯された場合には、歯科インプラント治療がより一般的な欠損補綴治療の一方法となっており、現在、インプラント治療の成功の基準のひとつに、デンタルX線写真上で高さ2mm以内の水平的な骨吸収という基準があるが、この骨吸収の原因は、技術の進歩、発展にも関わらず、いまだ明らかになっていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、歯根破折、歯質と修復物の接着界面における剥離、インプラント周囲の骨吸収などに挙げられる歯や骨の生体組織内、あるいは歯と修復物、骨とインプラントなどの界面で起こる破壊現象（破折、剥離、吸収）に着目し、時間を考慮した動解析による *in silico* 破壊シミュレーションにより、これらを理解し、新しい予防、あるいは longevity を延ばす方法論を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

歯根歯折、歯と修復物の接着界面の剥離、インプラント周囲の骨吸収に見られる破壊現象の動解析を *in silico* でシミュレーションし、新しい予防、あるいは longevity を延ばすための方法論を確立することを目標として研究を遂行した。これを達成するために、歯や骨のX線マイクロCTあるいはCT画像からの領域抽出の結果をもとに複層構造からなる解析用の3次元CADモデルの作製、有限要素法による破壊（破折、剥離、吸収）シミュレーションの実施、といった研究を段階的に遂行した。

4. 研究成果

1) 歯質・骨あるいは歯科材料のX線CT画像からの領域抽出

破壊解析の入力データとして用いるために、無料で公開されているう蝕歯のX線マイクロCTデータよりエナメル質、象牙質、歯髄、う蝕部を抽出し天然歯領域の再現を試みた(図1)。歯と歯が接している領域のように、各領域間のCT値が近く境界が不明瞭な場合には、独自に開発したソフトウェアにより抽出を試みた。

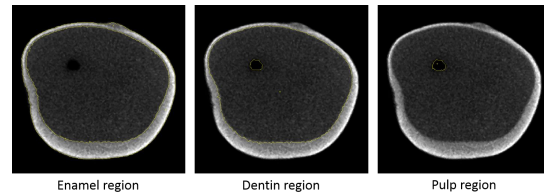


図1. 領域抽出

2) 抽出結果から解析用の三次元CADモデルの作製

抽出した結果を三次元再構築することにより、解析用の三次元CADモデルを作製した。これらのモデルをもとに天然歯モデル(図2)、う蝕部をコンポジットレジンで修復したことを想定した修復歯モデルを作製した。加えて、抜去した歯の治療モデルとして、皮質骨と海面骨からなる上顎骨モデルに、アバットメント、アバットメントスクリュー、インプラント体からなるインプラントモデルを埋入したモデルを作製した。皮質骨と海面骨の形態やサイズについては公開されている日本人の平均モデルを参考にし、インプラントモデルについてはデザインの差異をその部分だけに限定して比較、検証できるCADモデルを独自に設計した。さらに、エナメル質については、マイクロレベルのCADモデルを作製し異方性を再現した。

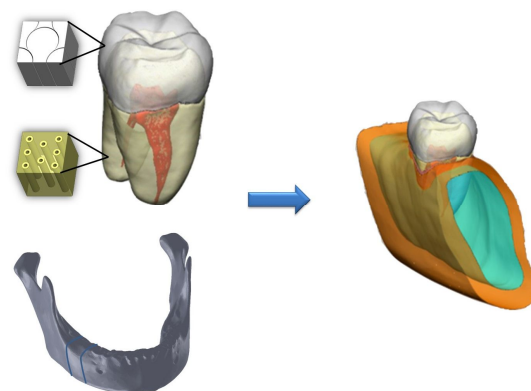
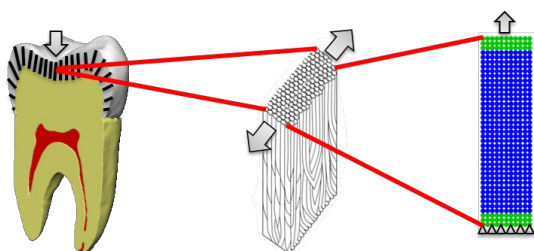


図2. CADモデル

3) 破壊解析の実施と評価

咬合力等の荷重によって生じる歯質・骨や歯科材料の破折メカニズムを明らかにするために、これまで、コンピュータによる三次元有限要素解析を用いた数多くの研究が行われてきた。それらの中には、歯質・骨の複層構造や歯科用複合材料をある程度精密に再現したものもあるが、いずれの解析においても、等方性材料として扱われている。しかしながら、本来、微細構造レベルでは異方性を示す組織や材料もあり、これまでの研究では実際の歯質・骨や歯科材料で起こる破折現象を再現できていない可能性があった。すなわち、エナメル小柱やコンポジットレジン



Bajaj D. et al., 2009

フィラーの形態などの微細な特徴に起因する異方性を再現しなければ、厳密にミクロレベルでの初期破折発生のメカニズムを理解することは難しい。そこで、メッシュ生成を全く必要としない粒子法に着目し、これらの構造の再現を試みた(図3)。

図3. エナメル微細構造粒子モデル

本研究の成果は、解析モデルを構成する粒子毎に物性を変化させることにより、ミクロレベルの構造が複雑であっても容易に解析できることから、得られた結果をもとに破折メカニズムを理解し、新たな予防法を確立できる可能性がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計9件)

[1] Yamaguchi S, Yamada Y, Yoshida Y, Noborio H, Imazato S: "Development of three-dimensional patient face model that enables real-time collision detection and cutting operation for a dental simulator." *Dent Mater J* 31. 1047-1057 (2012), 査読有

[2] Yamanishi Y, Yamaguchi S, Imazato S, Nakano T, Yatani H: "Influences of implant neck design and implant-abutment joint type on peri-implant bone stress and abutment micromovement: three-dimensional finite element analysis." *Dent Mater* 28. 1126-1133 (2012), 査読有

[3] Machado LS, Bonfante EA, Anchieta RB, Yamaguchi S, Coelho PG: "Implant-abutment connection designs for anterior crowns: Reliability and failure modes." *Implant Dent* 22. 540-545 (2013), 査読有

[4] Yamaguchi S, Yoshida Y, Noborio H, Murakami S, Imazato S: "The usefulness of a haptic virtual reality simulator with repetitive training to teach caries removal and periodontal pocket probing skills." *Dent Mater J* 32. 847-852 (2013), 査読有

[5] Ono S, Yamaguchi S, Kusumoto N, Nakano T, Sohmura T, Yatani H: "Optical impression method to measure three-dimensional position and orientation of dental implants using an optical tracker." *Clin Oral Implants Res* 24. 1117-1122 (2013), 査読有

[6] Yamaguchi S, Coelho PG, Thompson VP, Tovar N, Yamaguchi J, Imazato S: "Dynamic finite element analysis and moving particle simulation of human enamel on a microscale." *Comput Biol Med* 55. 53-60 (2014), 査読有

[7] Yamanishi Y, Yamaguchi S, Imazato S, Nakano T, Yatani H: "Effects of the implant design on peri-implant bone stress and abutment micromovement: three-dimensional finite element analysis of original computer-aided design models" *J Periodontol* 85. e333-e338 (2014), 査読有

[8] Yamaguchi S, Tsutsui K, Satake K, Morikawa S, Shirai Y, Tanaka HT: "Dynamic analysis of a needle insertion for soft materials: Arbitrary Lagrangian-Eulerian-based three-dimensional finite element analysis." *Comput Biol Med* 53. 42-47 (2014), 査読有

[9] Yamaguchi S, Satake K, Yamaji Y, Chen YW, Tanaka HT: "Three-dimensional semiautomatic liver segmentation method for non-contrast computed tomography based on a correction map of locoregional histogram and probabilistic atlas." *Comput Biol Med* 55. 79-85 (2014), 査読有

〔学会発表〕(計 19 件)

[1] 山西康文, 山口 哲, 中野 環, 今里 聡, 矢谷博文: "インプラントデザインの違いがインプラント周囲骨の応力分布に及ぼす影響" 第 42 回日本口腔インプラント学会・学術大会. (20120920-20120920). 大阪市

[2] 山口 哲, Coelho Paulo, Nick Tovar, Thompson Van, 今里 聡: "粒子法による複合組織の動的破壊解析～歯質ミクロ構造を対象とした有限要素法との比較検証～" 第 61 回日本歯科理工学会学術講演会. (20130414-20130414). 東京都

[3] 山西康文, 山口 哲, 中野 環, 今里 聡, 矢谷博文: "インプラントデザインの違いがインプラント周囲骨の応力分布に及ぼす影響" 第 42 回日本口腔インプラント学会・学術大会. (20120920-20120920). 大阪市

[4] 山口 哲, Coelho Paulo, Nick Tovar, Thompson Van, 今里 聡: "粒子法による複合組織の動的破壊解析～歯質ミクロ構造を対象とした有限要素法との比較検証～" 第 61 回日本歯科理工学会学術講演会. (20130414-20130414). 東京都

[5] Yamaguchi S: "Multiscale *in silico* evaluation of mechanical response for composite materials" Joint Symposium for Japan Society for Adhesive Dentistry and University of Minnesota. (20130617-20130617). Minnesota (USA)

[6] Yamaguchi S: "In *silico* analysis of relationship between implant design and peri-implant bone stress" The 2nd Japan-Thailand-Korea Joint Symposium & Current Opinion in Implantology and Current Opinion in Oral Health Promotion. (20131206-20131206). Seoul (Korea)

[7] Yamaguchi S, Coelho PG, Tovar N, Thompson VP, Imazato S: "Particle simulation for dynamic analysis of tooth's physical properties" 2nd Meeting of the IADR & Asia Pacific Region (20130821-20130821). Bangkok (Thailand)

[8] Katata C, Ono S, Kawanishi Y, Yamaguchi S, Imazato S: "Three-dimensional finite element analysis of tooth considering anisotropic microstructure" 2nd Meeting of the IADR & Asia Pacific Region. (20130821-20130821). Bangkok (Thailand)

[9] 山口 哲, Coelho PG, Tovar N, Thompson VP, 今里 聡: "粒子法による複合組織の動的破壊解析-歯質ミクロ構造を対象とした有

限要素法との比較検証" 第 61 回日本歯科理工学会学術講演会. (20130414-20130414). 東京都

[10] 森脇大喜, 中野 環, 山口 哲, 小林靖宣, 小野真司, 山西康文, 矢谷博文: "骨量の不足した上顎臼歯部に用いたショートインプラントに関する力学的検討" 第 122 回日本補綴歯科学会学術大会. (20130518-20130518). 福岡市

[11] 山口 哲, 今里 聡: "マルチスケールコンピュータ解析による歯科用コンポジットレジン機械的性質の評価" 第 62 回日本歯科理工学会学術講演会. (20131020-20131020). 新潟市

[12] Moriwaki H, Nakano T, Yamaguchi S, Yamanishi Y, Ono S, Kobayashi Y, Imazato S: "Comparison of short implant with bicortical anchorage and 13 mm length implant with sinus augmentation on bone stress distribution in maxilla" EA0 23rd Annual Scientific Meeting. (20140926-20140926). Rome (Italy)

[13] Matsuoka T, Nakano T, Yamaguchi S, Yamanishi Y, Ono S, Yatani H: "Effects of implant-abutment connection type on inter-implant stress and abutment micromovements: in *silico* study" Indonesia Japan Prosthodontic Society Joint Meeting 2014. (20141031-20141031). Bali (Indonesia)

[14] Yamaguchi S, Mehdawi IM, Imazato S: "Prediction of Flexural Strengths of Composite Resins by in *silico*-analysis" 93rd General Session & Exhibition of the IADR. (20150311-20150311). Boston (USA)

[15] 山口 哲, Mehdawi Mohamed Idris, 今里 聡: "コンピュータ解析による歯科用コンポジットレジンの曲げ強度予測" 第 64 回日本歯科理工学会学術講演会. (20141005-20141005). 広島市

[16] 森脇大善, 中野 環, 山口 哲, 小野真司, 矢谷博文: "上顎臼歯部複数歯欠損におけるショートインプラントの埋入本数と補綴設計の違いが周囲骨に及ぼす力学的影響" 公益社団法人日本口腔インプラント学会第 44 回学術大会. (20140913-20140913). 東京都

[17] 松本修治, 梶川ひとみ, 児島さやか, 山口 哲, 今里 聡: "インプラント/周囲骨の結合割合と結合強度の関連性の検討" 大阪大学歯学会第 118 回例会. (20140724-20140724). 吹田市

[18] Yamaguchi S, Yamanishi Y, Coelho PG, Tovar N, Thompson VP, Imazato S: “ Fatigue resistance analysis of dental implants with different implant/abutment connections ” 62nd Annual Meeting of Japanese Association for Dental Research. (20141204-20141204). Osaka (Japan)

[19] 山口 哲: “ 歯科における破壊現象の予防法確立を目指した in silico 研究 ” 第40回生物機械システム研究会 . (20140606-20140606). 大阪市

〔その他〕

<http://web.dent.osaka-u.ac.jp/~techno/welcome.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

山口 哲 (YAMAGUCHI SATOSHI)
大阪大学・歯学研究科・講師
研究者番号：30397773

(2)研究分担者

佐々木淳一 (SASAKI JUNICHI)
大阪大学・歯学研究科・助教
研究者番号：50530490