

## [解説論文]

## 実験進化学手法によるセメント質誘導型の アパタイト人工歯根の開発

西原 克成\*, 立川 統\*\*,  
田中 順三\*\*\*, 広田 和士\*\*\*

### Development of Gomphotic Artificial Root by Means of Experimental Evolutionary Research Method.

Katsunari NISHIHARA\*, Osamu TACHIKAWA\*\*,  
Junzo TANAKA\*\*\*, Kazushi HIROTA\*\*\*

#### Abstract

In this paper the development of a hybrid type artificial root with cementum, which resembles the mammalian gomphotic tooth is presented. Artificial roots with a corrugated configuration made of sintered hydroxyapatite were fabricated and implanted into the jawbone of dogs and Japanese monkeys. These dogs were separated into two groups during the experiment; 1) The first group was fed with a soft diet. 2) The second group was fed with a solid diet.

After a fixed period dogs were sacrificed and specimens were recovered. Histopathological observation by light microscopy as well as by SEM was carried out. Specimens with a mirror surface were prepared for element analysis using microanalyzer KeveX 8000. Following results are obtained:

- 1) Gomphotic artificial roots with cementum were developed in the solid diet group.
- 2) Ankylotic artificial roots were obtained in the soft diet group.
- 3) Differentiation of mesenchymal cells was proved to be controlled by biomechanical stimuli.

**Key Word:** Artificial root, Microanalysis, Ankylosis, Hydroxyapatite, Gomphotic tooth, Cementum, Biomechanics

#### 1. 緒言

脊椎動物を定義する物質はヒドロキシアパタイト・コラーゲン複合体の骨格である。また、太古

原稿受付 1996年3月14日, 受理1996年10月14日

\* 東京大学医学部口腔外科学教室

\*\* Department of Oral Surgery, Faculty of Medicine, University of Tokyo

\*\*\* 東京大学理学部鉱物学教室

\*\*\* Mineralogical Institute, Faculty of Science, University of Tokyo

\*\*\* 科学技術庁無機材質研究所

\*\*\* National Institute for Research in Inorganic Materials

の体制を保つ軟骨魚類(サメ, エイ)や円口類(メクラウナギ, ヤツメウナギ)と両生類以上の脊椎動物とを区別する器官は, 造血を行う骨髓組織(アパタイト・コラーゲン複合器官)である。一方, 哺乳類の定義は, その分類名称が示すごとく哺乳のシステムにある(Linne)<sup>1)</sup>。このシステムは, 一般に, 長ずると咀嚼を行う歯つまりセメント質と歯周靱帯と固有歯槽骨(alveolar bone proper)の三者をそなえた釘植歯による咀嚼システムに変化する。従って釘植歯が哺乳類を定義する唯一の物質的基盤ということになる。リンネ以後当代一流の最先端の学者が, 競って歯の研究

を行ったのは釘植歯が哺乳類を規定する唯一の器官だったためである<sup>2)</sup>

ここで、脊椎動物の定義も、原始と両生類以上の動物の区別も、哺乳類を定義する器官を構成する物質も、すべてアパタイトとその様態にあることに気付く。脊椎動物の進化がアパタイト骨格系を主導として起こっているといわれるゆえんである(Halstead)<sup>3)</sup>。しかも水棲か陸棲かで造血の場が決まり、丸呑みか吸啜の後の咀嚼かで歯・顎・口腔のシステムが変わるから、進化は重力など力学的な要因で起こっていることは疑う余地がない。

哺乳類は、共通してtribosphenic型の臼歯を持ち(Simpson)<sup>4,5)</sup>。歯は植立する顎骨の部位(場)に従って切歯、犬歯、臼歯の三種類の歯種に分化する(Butlerの場の理論)<sup>6)</sup>。これは、化石爬虫類の骨性癒着の歯から靱帯結合の歯に進化する際に、複雑な関節骨が力学対応して聴覚伝音系骨格と、単一の側頭骨一下顎骨関節つまり顎関節へと変化し、上下顎の部位により歯に加わる力の特性が大略三種類に分化したためと考えられる。つまり骨性癒着の歯が靱帯結合の歯に進化することにより、力学対応による形態変更が可能となり、応力分散に適した最適形状システムを持ったためと考えられる。

今日のデンタルインプラントの発想には、以上述べたような歯に関する学問が関与する余地が殆ど皆無に等しい。Cuvieが言っているように、高等生命体の各器官には臓器の相関性(器官の相関性の原理)があるから、ある動物(哺乳類)の器官を別のシステム(爬虫類)のそれに換えようと思ったら、関連するすべてを変えなければならない。人間に骨性癒着の歯を植えたければ、顎関節の関節骨を化石爬虫類のように4対に増やさなければ、永続的機能は果たせないのである。骨性癒着の人工歯根は力学的刺激を受けても骨の正常なりモデリングを維持することができないからである<sup>7,8)</sup>。

骨性癒着のデンタルインプラントは、義歯の延長線上にあり、従って生体臓器の代替としての人工器官とはいえず、装具の一種ということになる。骨性癒着のインプラントでは、力学的刺激が有効に顎骨のリモデリングを誘導することができないから、経時的に周囲骨が滝壺状の破壊を生ず

ると同時に、根尖周囲の骨が消失する<sup>7,8)</sup>。本研究はこれらを明らかにするとともに、力学的刺激と生体材料の特性の協同作用のもとに、天然歯と同様のセメント質を誘導できる人工歯根を開発することを目的として、10年間に及ぶ成犬および成猿を用いた実験をまとめたものである。

著者はすでに、哺乳類、鳥類、軟骨魚類、円口類の筋肉内にアパタイト人工骨を移植し、人工骨髄造血巣を異所性のみならず異種性に誘導することに成功したが<sup>9-11)</sup>、これは未分化間葉細胞から高次機能細胞を直接誘導するという、本来起こり得ないと考えられていた現象を、生体力学刺激を人工骨に負荷して実現させたものである。つまりこれは各種動物を用いて生体力学刺激を作用させることにより、本来骨髄を持つことのない種においても、未分化間葉細胞から、異所性ならびに異種性に高次機能細胞を誘導することにより、細胞レベルの分化誘導(異所性局所性の進化)を実現したものである。この手法を実験進化学手法と呼んでいる<sup>12,13)</sup>。

化石爬虫類から哺乳類の歯への進化は、骨性癒着する前の萌出途上の歯に、常習的な揺振りが加われば自動的に生ずると考えられる。従って、現生の動物に、天然歯の材質と形態的特徴をそなえた人工歯根を作り、これを植立し、進化で加わったと同等の力学刺激を作用させれば、セメント質と歯周靱帯と固有歯槽骨が生ずることが予想される。何となれば、セメント質は線維骨(Weidenreich)<sup>14)</sup>であり、シャーピー線維を埋入する線維骨は機能対応で間葉細胞から生ずるはずのものだからである。この手法もまた、先の人工骨髄と同様に実験進化学手法と呼んでいる<sup>12)</sup>。本人工歯根は、生物の形態に特徴的なゆるやかな波状形を有し、歯冠に加わる力が有効に分散される形態となっている<sup>15-27)</sup>。本研究では成犬と成猿を用いてアパタイト人工歯根を植立し、咀嚼による力学刺激を負荷した群と免荷した群に分けた。一定期間経過後に一部を抜去し、標本作製し走査型電子顕微鏡(SEM)にて観察を行なうとともに、さらにマイクロアナライザーにて人工歯根表面の石灰化物の解析を行った。またこれらの一部を屠殺して病理組織標本作製し光顕像と走査電顕像とを比較した。その結果、本人工歯根は

セメント質誘導型であることを検証することができた。

## 2. 実験方法

### 2-1 成犬の実験

10年間にわたる種々の研究をまとめたものである。実験手法の概略を記する。用いた成犬の総数は雑種オス12頭で、成猿の総数は日本猿オス3頭であった。各犬の左側上下顎に4本ずつアパタイト人工歯根を植立した。植立部位は上下顎小白歯部であり、抜歯後に5ミリ径のトレフィンで人工歯根用のソケットを形成して植立した。術後1週間までは軟食を与え、その後は1日1回固形食を与えた群と数か月間軟食（ペディグリーチャム）を与えた群とに分けた。固形食を与えた群では、1か月、2か月、6か月、12か月、24か月経過時に抜去して人工歯根表面のSEM像の観察を行った。軟食を与えた群では骨性癒着が予想されたので、抜去によるSEM像の観察を行わず、屠殺して切片を作製した。次いで抜去した人工歯根をエポキシ樹脂に包埋し、人工歯根のセメント質形成部の鏡面研磨標本作製し、マイクロアナライザー（KeveX 8000）で観察した。また、人工歯根表面の石灰化物をFTIRで分析した。一方、2か月、4か月に屠殺したものについてパラフィン包埋し10 $\mu$ mの厚さの病理組織標本作製し、Masson Trichrome染色、HE染色をほどこし光顕にて観察を行った。12か月経過時に屠殺したものについては、標本を樹脂包埋して研磨標本作製し、マイクロアナライザーにて定性的ならびに定量的に解析を行った。

### 2-2 成猿の実験

健常な3頭のオスの成猿の左側上下顎小白歯と左側上顎中切歯を抜去しアパタイト人工歯根を各1本ずつ合計9本を植立した。成犬の実験と異なり機能群と非機能群の分類は、連続冠による固定群を非機能群とし、単独植立群を機能群として分けた。つまり非機能群では1年経過時に両側の隣接歯を形成し、人工歯根に荷重が加わらないように連続冠で固定した。一方、人工歯根を固定しないで単独植立で機能させた群を機能群とした。餌はすべての猿に固形食とバナナを定期的にと与えた。機能群は、手術後2年経過時に、非機能群で

は橋義歯装着後1年経過に屠殺して標本作製した。パラフィンにて包埋後約7 $\mu$ mの厚さの切片を作製し、Masson Trichrome染色とtoluidine blue染色を施し、病理組織学的に比較観察を行った。

## 3. 実験結果

### 3-1 成犬の所見

#### 1) 病理組織所見

軟食群では骨性癒着状態が観察された(Fig. 1)。

固形食群は歯周支持構造の形成された状態が観察され(Fig.2-a,b)、上皮付着も良好であった(Fig.3-a,b)。人工歯根の陥凹部には、明確な機能走行のある線維組織の形成が観察された(Fig.4-a,b, Fig.5)。Fig.2-bに示す状況について、有限要素法で応力解析した結果と、歯のvehicle systemを示すシェーマを骨性癒着歯(Fig.25)との対比のために示す(Fig.6-a,b, 7-a,b)。Fig.2-bに認められる皮質部の新生骨部(矢印)は、Fig.6-bの適度な応力が生じる領域に一致していた(矢印)。

#### 2) SEM像の観察結果

細胞の付着像から石灰化物の形成像線維組織付着のある石灰化物の形式、に至る経時的变化を示す像が観察された(Fig.8-a,b,c)。

#### 3) SEM像と病理組織所見の比較

楕円形で大きさがほぼ均等な細胞群が人工歯根の陥凹部に密に配列した像が、SEM像で観察された(Fig.10)。病理組織所見でこれらの細胞に相当する1列の細胞群が、人工歯表面の平行に走る線維の外側に観察された(Fig.4-6, 9-12)。また、線維組織を埋入した石灰化細胞が観察された(Fig.12-c,13)。

#### 4) マイクロアナライザー所見

抜去し破断した人工歯根と歯根周囲付着物のSEM像(Fig.14,15)を参考としてマイクロアナライザー用の鏡面研磨標本の作製を行い、分析を行った。マイクロアナライザーの観察にて沈着物が人工歯根表面に約10~20 $\mu$ mの厚さで認められた(Fig.16-19-a)。Fig.17は、Fig.16(30倍)の人工歯根表面に付着する石灰化物の拡大図(300倍)である。人工歯根に近い左側の石灰化物が歯周線維組織側(右)に比べて、より有機質に富んでいる状態が認められる。アパタイト人工歯根と周囲組織

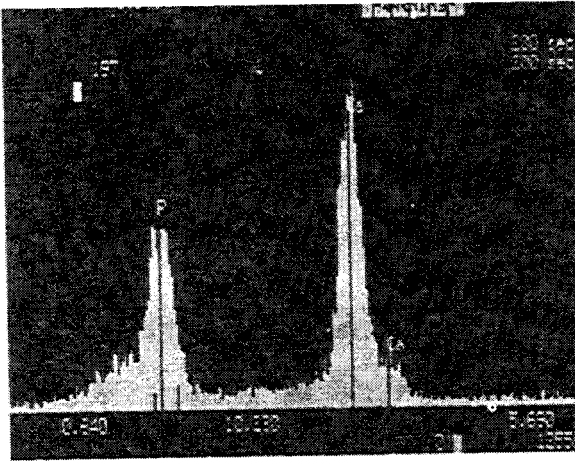


Fig. 19-b Components of artificial root cementum of Fig.19-a analyzed (by Kevex 8000)

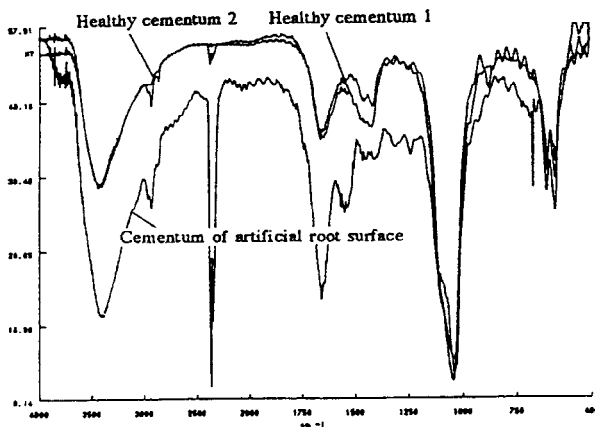


Fig. 20 FTIR patterns of healthy cementum and newly formed artificial root cementum (12 months)

を一体として包埋し、鏡面標本を作製して観察したマイクロアナライザーのX線マップ(Fig.18)では、沈着物にはリン酸とカルシウムが存在が明瞭に認められた(白矢印)。マイクロアナライザーの分析結果から沈着物の密度はアパタイト人工歯根より低く、固有歯槽骨より高いものであった(Fig.19-b)。沈着物が人工歯根表面から離れているのは、標本の作製操作によるアーティファクトである。摘出した人工歯根表面の石灰化物を削り取りFTIRにて解析した結果をFig.20に示す。天然歯根のセメント質と人工歯根表面に誘導された石灰化物のパターンがFTIRで一致していた。

### 3-2 成猿の所見

成猿では成犬とは異なり、植立した人工歯根は機能群、非機能群ともに、骨性癒着状態が観察された。非機能群では、十分な免荷が得られたこと

を示す骨性癒着が認められ、歯頸部の滴壺状の皮質骨の後退は認められなかったが、皮質骨部以外の骨は消失し、厚さが $5\mu\text{m}$ の骨が人工歯根表面に一層付着するのみであった(Fig.21-a,b, 23)。機能群では、歯頸部には炎症性の病変は全く認められなかったにもかかわらず、人工歯根に癒着した皮質骨は著明な滴壺状の皮質骨の後退が観察された(Fig.25-a,b)。これは骨性癒着の歯根に特有の皮質骨の後退パターンで、皮質部で人工歯根と癒着した部分の骨を除き、人工歯根周囲の骨髓腔の中の部分の骨が殆ど消失していた。骨の破壊像は有限要素解析結果における応力の集中部とよく一致しており、また一定の細い骨梁形成像もMisesの相当応力分布の境界線と一致していた(Fig.24-a,b, 25-a)。天然歯(Fig.22)と比較すると、骨性癒着の人工歯根は、固有歯槽骨を欠くのみならず、人工歯根植立部では顎骨の皮質骨から上顎洞底の皮質骨に至るまで萎縮が認められた(Fig.21-a,b)。

## 4. 考察

著者らは先に本研究で用いたものと同系のアパタイト人工歯根を用いて、機能下における人工歯根植立モデルの有限要素解析を行って発表した。解析結果と病理組織標本はよく一致した結果が得られた(Fig.2,6)。これらの研究をまとめて靱帯結合の歯にvehicle systemの概念を提唱した<sup>20,21)</sup>。

本報告の成犬の実験では、人工骨として人工歯根を用いて、咀嚼を行わない捕食歯(prehension)から咀嚼を専らとする釘植歯への進化で想定される生体力学刺激として、咀嚼による微小の揺すぶりを加えることにより、未分化間葉系細胞から歯周支持構造体として、セメント質(線維骨)、歯周線維組織、歯周微小血管群、固有歯槽骨が誘導されることを示した。これに対して、捕食歯のシステムである骨性癒着様式の歯は、成犬においては、植立後安静に保ちさえすれば実験的に得ることができた。しかし成猿では、単独植立により機能を加えても骨性癒着を示した。骨性癒着の人工歯根は皮質骨とのみ癒着が起り、根尖部の骨は厚さ $5\mu\text{m}$ ほどで歯根表面に付着して存在するが、肉眼的にはほぼ消失したように見えた。この人工歯根に力学負荷をかけると、リモデリングシ

ステムを持たない骨性癒着歯の周囲には滝壺状の陥凹が生じ、非感染性・非炎症性の皮質層の経時的後退が観察された (Fig. 25-a, b)<sup>22, 23)</sup>。

## 5. 結 論

進化は重力や光など広義の生体力学的環境が引き起こすとする Roux の思想に基づいて、現生の動物を用いて実験的に細胞レベルで進化の過程の力学作用を再現する実験方法を考案し、人工歯根の開発に適用した。これにより哺乳類を定義する器官を構成するセメント質が誘導される新しい概念の人工歯根を開発することができた。

本研究は、文部省科研費一般研究(B) 06455008, 試験研究(B) 06558119, 総合研究(A) 07309003の一環で行ったものである。

## 参考文献

- 1) アルフレッド S ローマー, 川島誠一郎訳, 脊椎動物の歴史. 動物社, 東京, 329-341, 1981.
- 2) 藤田恒太郎. 哺乳類の歯の系統発生, 科学, 28(12), 611-619, 1958.
- 3) L. B. Halstead, 田隅本生監訳, 脊椎動物の進化様式. 第1版, 法政大学出版局, 東京, 46, 61, 1984.
- 4) J.J. Simpson. Studies of The Earliest Mammalian Dentition. Dental Cosmos, 78(8), 791-800, 1936.
- 5) J.J. Simpson. Studies of The Earliest Mammalian Dentition. Dental Cosmos, 78(8), 940-953, 1936.
- 6) P.M. Butler. Studies on Mammalian Dentition. Proc. Zool. Soc., 109, 1-36, 1939.
- 7) K. Nishihara and S. Nakagiri. Biomechanical Investigation of Implant Failure in Bone-Bioceramics Junction System. Materials in Clinical Applications : 491-502, 1995.
- 8) 西原克成. 骨性癒着と靱帯結合の人工歯根の生体力学的比較研究. 第3回顎顔面バイオメカニクス学会学術大会講演論文集, 41-45, 1995.
- 9) K. Nishihara, T. Tange, K. Hirota and K. Kawase. Development of Hybrid Type Artificial Bone Marrow Using Sintered Hydroxyapatite. Bio-Medical Materials and Engineering, 4(1), 61-65, 1994.
- 10) K. Nishihara, T. Tange, H. Tokumaru, A. Yanai and Y. Hirayama. Study on Developing Artificial Bone Marrow Made of Sintered Hydroxyapatite Chamber. Bioceramics, 5, 131-138, 1992.
- 11) 西原克成. ハイブリッド型人工骨髄造血巣誘導へのアプローチ. 人工臓器, 24(1), 6-12, 1995.
- 12) 西原克成, 丹下 剛, 松田良一, 瀬野久和, 梁井 皎, 藤井和子, 田中順三, 広田和士. 実験進化学手法によるハイブリッド型人工器官の開発と新しい免疫学の概念. 人工臓器, 25(3) : 753-758, 1996.
- 13) 西原克成. 実験進化学手法による脊椎動物の特徴の解明. 第3回顎顔面バイオメカニクス学会論文集 : 25-27, 1995.
- 14) 藤田恒太郎. 歯の組織学. 第1版, 医歯薬出版, 東京, 141, 1988.
- 15) K. Nishihara, T. Kobayashi, and T. Akagawa. Studies on Periodontal Tissue Around a New Type Hydroxyapatite Artificial Root. Bioceramics, 3, 171-181, 1991.
- 16) K. Nishihara, T. Kobayashi, and T. Akagawa. Light Microscopic and SEM Observation of Tissue Around New Type Artificial Roots. Phosphorous Research Bulletin, 1, 185-190, 1991.
- 17) K. Nishihara and T. Akagawa. Comparative Studies on Periodontal Tissues Around New Type Artificial Roots Made of Zirconium Oxide, Titanium and Hydroxyapatite. Phosphorous Research Bulletin, 1, 179-184, 1991.
- 18) K. Nishihara and T. Akagawa. Case Report on Artificial Root Therapeutics. Bioceramics, 3, 183-192, 1991.
- 19) K. Nishihara and T. Akagawa. Clinical Applications of Hydroxyapatite Artificial Root of Fibrous Tissue Attachment Type. Bioceramics, 4, 223-230, 1991.
- 20) K. Nishihara, T. Kobayashi and T. Akagawa. Successful Periodontal Tissue Formation around New Type Hydroxyapatite Artificial Root. Transaction of Fourth World Biomaterials Congress. 381, 1992.
- 21) K. Nishihara, L. Jiang, T. Kobayashi, A. Yanai and S. Nakagiri. Studies on Functional Effect of Hydroxyapatite Artificial Root upon Surrounding Tissue -New concept for bone-bioceramics jointing system -. Bioceramics, 5, 333-342, 1993.
- 22) N. Motegi, T. Yoshida, M. Chiba, K. Ichioka, and K. Nishihara. Clinical Application of Artificial Root Therapeutics of the Connective Tissue Attachment Type. Apatite 1, 455-464, 1992.
- 23) K. Nishihara, T. Kobayashi and Y. Hirayama. Five Years' Successful Artificial Root Therapeutics with Newly Tailored Root. Abstract of 1993 IADR, 311, 1993.

24) K. Nishihara and T. Akagawa. Artificial Root Therapeutics Applied to Edentulous Cases with Concomitant Advanced Periodontal Disease. *Apatite*, 1, 465-470, 1992.

25) K. Nishihara, T. Akagawa and S. Nakagiri. Successful Artificial Root Therapeutics and New Concepts for Artificial Bone and Teeth. *Transaction of Fourth World Biomaterials Congress*, 592, 1992.

26) 西原克成, 中桐 滋. アパタイト人工歯根の周囲組織における応力分布の有限要素解析. *生体材料*, 10(4), 182-192, 1992.

25) 西原克成. 新様式のアパタイト人工歯根の治療成績について. *生体材料*, 11(3), 135-152, 1993.



Fig. 1 Artificial roots with ankylosis (3 weeks, without loading)



Fig. 2 (a)



Fig. 2 (b)

Fig. 2 (a)(b)- Gomphotic artificial root (16 weeks, with occlusal loading)

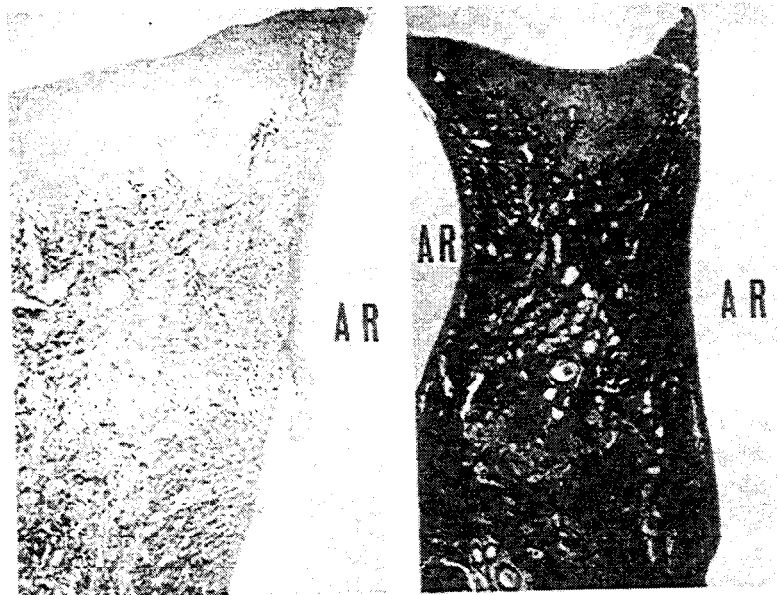


Fig. 3 (a)

Fig. 2 (b)

Fig. 3 (a)(b)-Epithelial attachment to the artificial root (16 weeks, with occlusal loading)  
AR: artificial root



Fig. 4 (a)



Fig. 4 (b)



Fig. 5 Fibrous tissue with functional orientation (12 weeks, with occlusal loading)

Fig. 4 (a) (b) -Fibrous tissue with functional orientation (8 weeks, with occlusal loading)

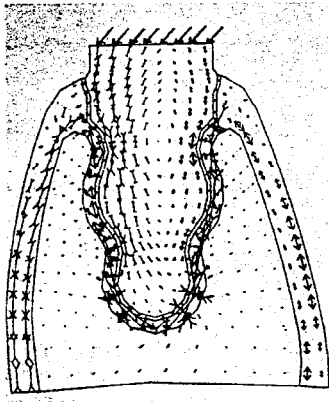


Fig. 6 (a)

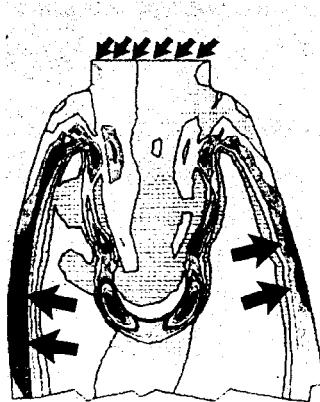


Fig. 6 (b)

Fig. 6 Finite element analyses  
(a) -Principal stress trajectory pattern  
(b) -Misses equivalent stress distribution pattern

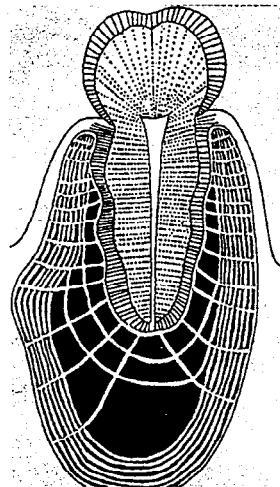


Fig. 7 (a)

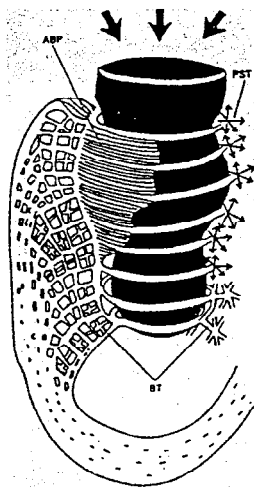


Fig. 7 (b)

Fig. 7 Schemata of the vehicle system of tooth  
(a) -Plane strain state  
(b) -Three dimensional state

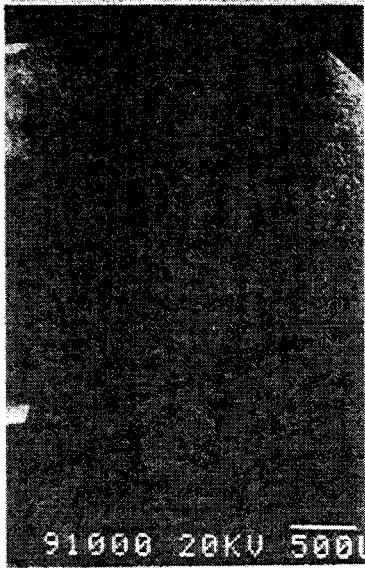


Fig. 8 (a)



Fig. 8 (b)

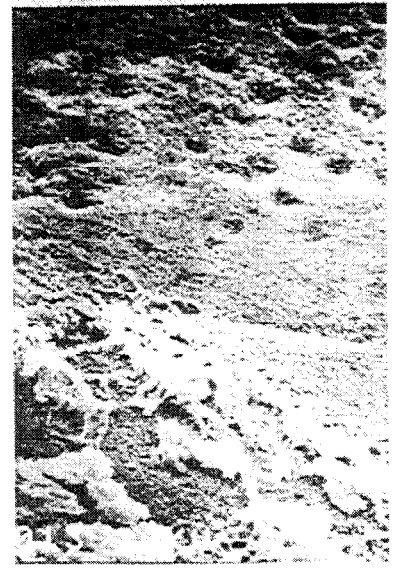


Fig. 8 (c)

Fig. 8 (a)-SEM of surface of artificial root (12 weeks, with occlusal loading)  
(b)-SEM of surface of artificial root (8 weeks, with occlusal loading)  
(c)-SEM of surface of artificial root (2 months, with occlusal loading)

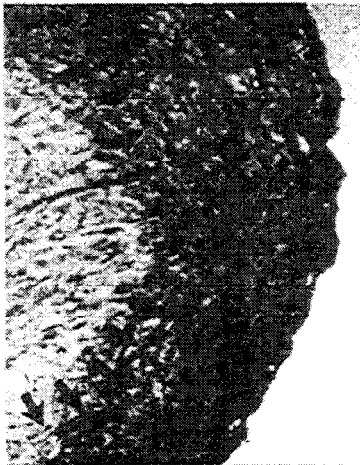


Fig. 9 Histological finding of the tissue around artificial root surface. Cells in a row (arrow) and angled fibers are observed (6 weeks, with occlusal loading).

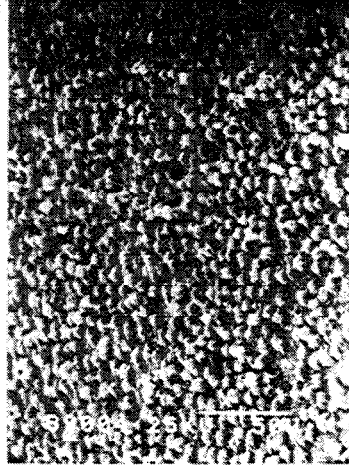


Fig. 10 SEM of cementoblasts on artificial root surface (9 months, with occlusal loading)

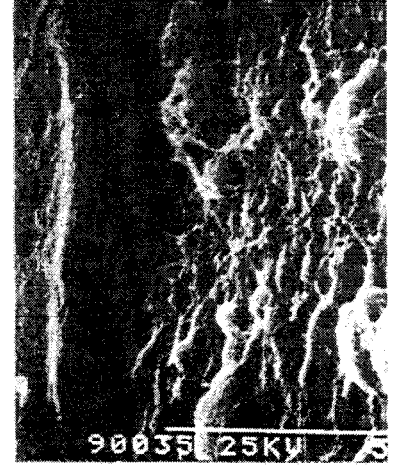


Fig. 11 SEM of attachment of calcified tissue upon artificial root surface (9 months)





Fig. 14 SEM of surface of artificial root (6 months, with occlusal loading)

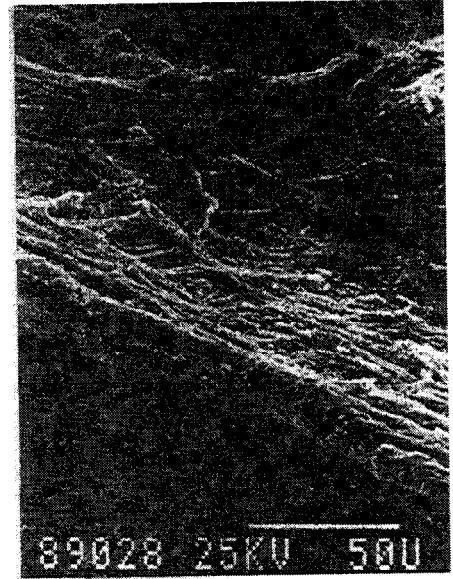


Fig. 15 SEM of decorticated cementum on artificial root Fig. 14

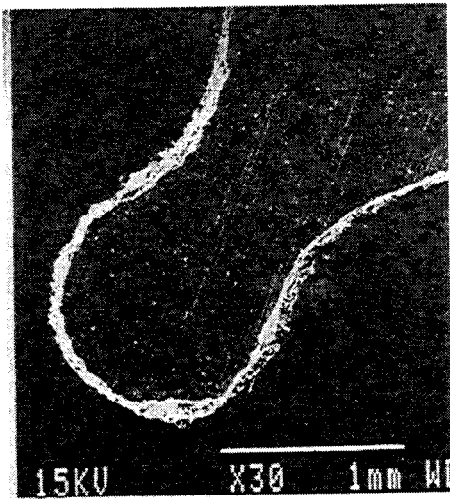


Fig. 16 Cementum observed by SEM for microanalyzer (24 months, with occlusal loading)

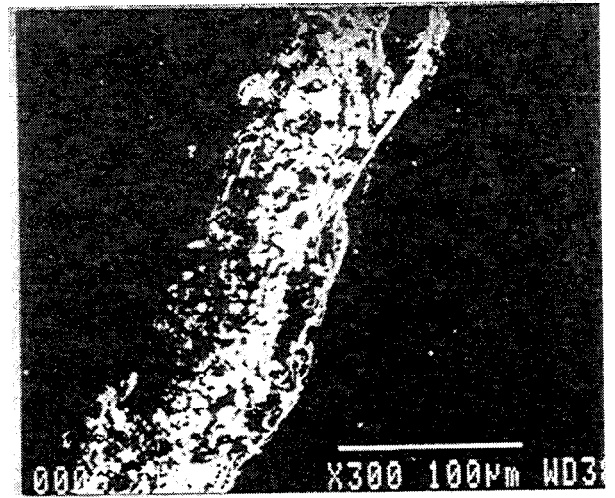


Fig. 17 The cementum of Fig. 16 detected by microanalyzer

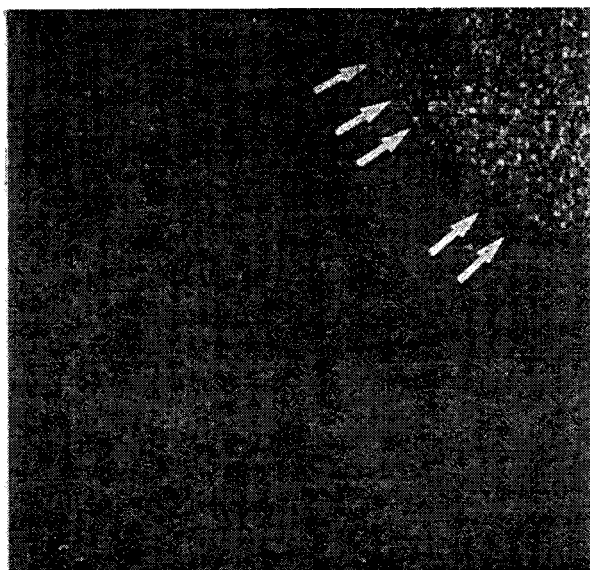


Fig. 18 X ray map, cementum is observed (arrows) (12 months, with occlusal loading )

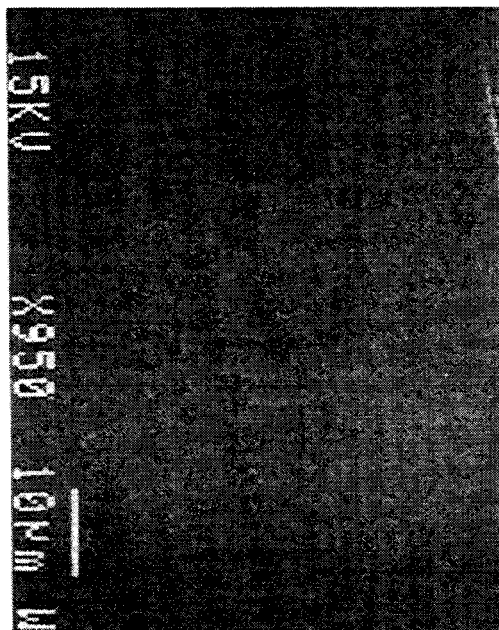


Fig. 19-a Cementum and cells attaching to apatite artificial root observed with polished specimen for microanalyzer (12 months)



Fig. 21 (a)

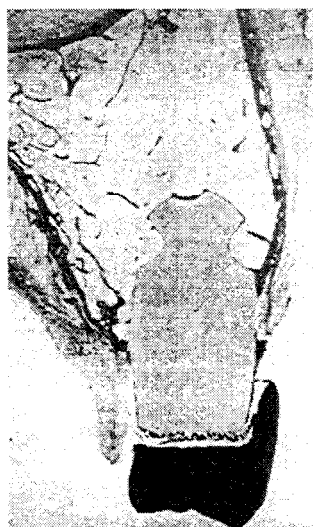


Fig. 22 (b)



Fig. 22 Natural tooth and jawbone for control of the Fig. 21

Fig. 21 (a) (b) -Ankylotic artificial root obtained by stress shielding of occlusion by crown splint (24 months, without occlusal loading)

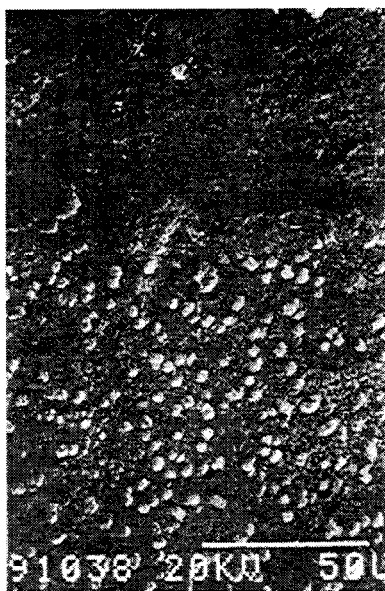


Fig. 12 (a)

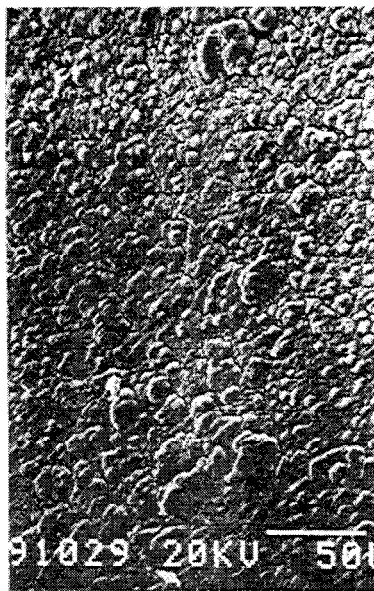


Fig. 12 (b)



Fig. 12 (c)

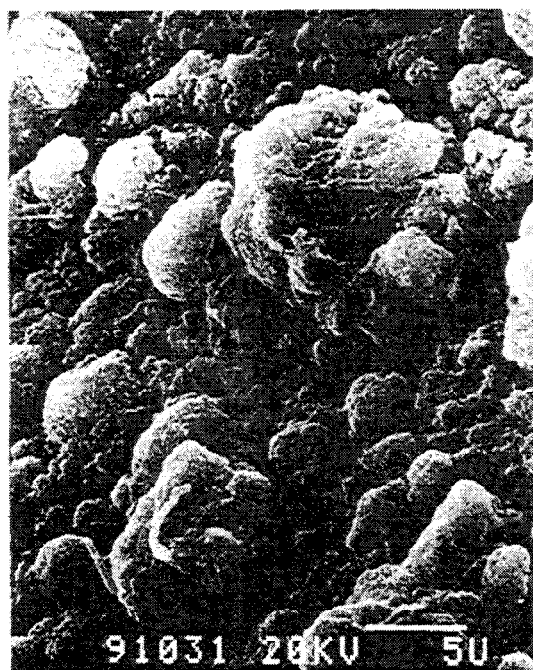


Fig. 12 (d)

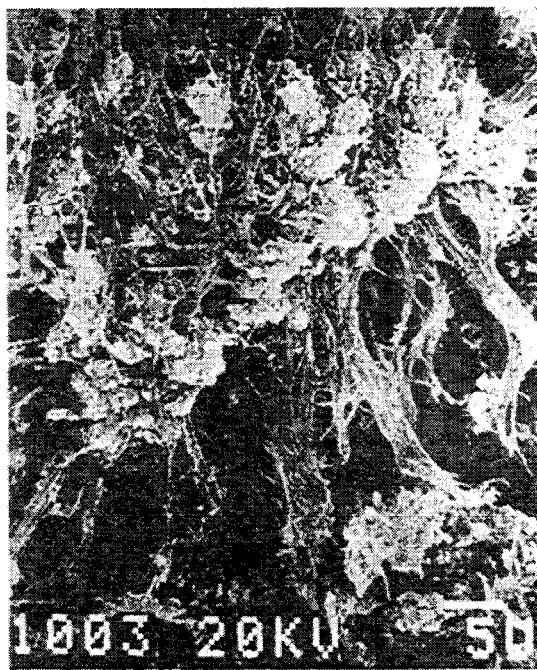


Fig. 13  
SEM of calcified cementum with fibers (24 months, with occlusal loading)

**Fig. 12**  
 (a)-SEM of calcified cementoblasts (12 months, with occlusal loading)  
 (b)-SEM of calcified cementoblasts (12 months, with occlusal loading)  
 (c)-SEM of calcified cementum with fibers (24 months, with occlusal loading)  
 (d)-SEM of calcified cementoblasts (12 Months, with occlusal loading)

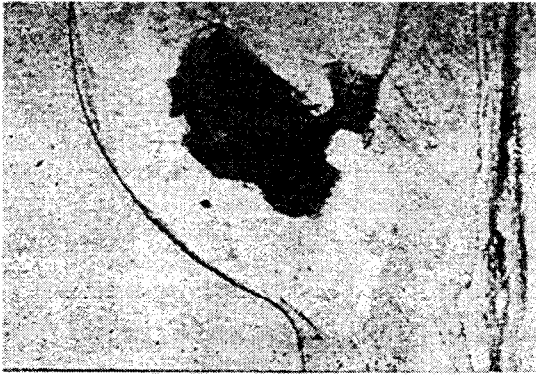


Fig. 23 Scanty bone formation around ankylotic artificial root (12 months, without occlusal loading)

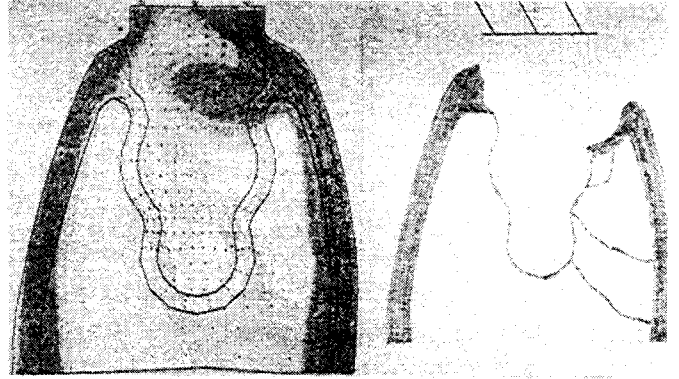


Fig. 24 (a)

Fig. 24 (b)

Fig. 24

(a)-Finite element analyses of ankylotic artificial root  
(b)-Schema of bone remodelling and absorption around ankylotic artificial root implanted in mandible with occlusal functions



Fig. 25 (a)



Fig. 25 (b)

Fig. 25 (a)(b)-Histopathological finding of ankylotic artificial root after occlusal function, cross section (12 months, with occlusal loading )

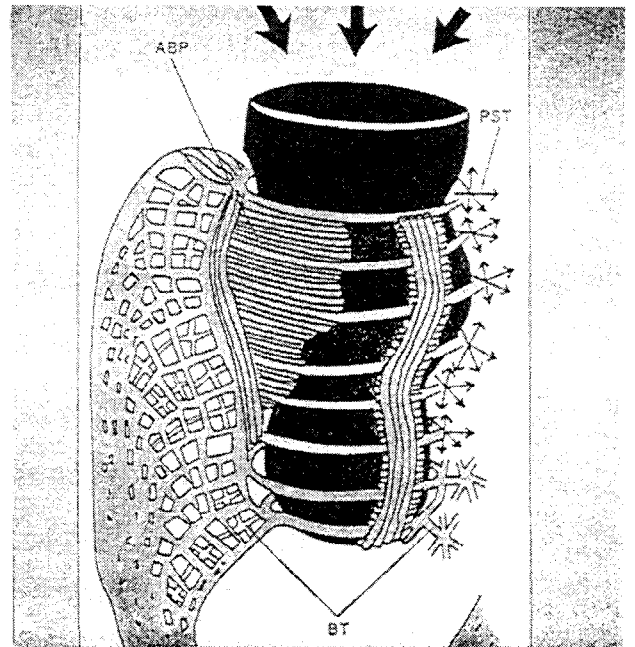


Fig. 26 Schema for gomphotic system, formation and remodeling of bone is continued by repeating biomechanical stimuli (according to the principal stress trajectory theory)