原 著

ヒト小児下顎骨体部の力学的特性に関する研究 —局所的な縦弾性係数と組織構造との関係—

時 岡 孝 寛 田 松 裕 一 井 出 吉 信

東京歯科大学大学院歯学研究科解剖学第一講座（主任：井出吉信教授）

〔受付：平成 11 年 4 月 1 日，受理：平成 11 年 5 月 25 日〕

Mechanical Properties of the Compact Bone of the Mandibular Bodies in Human Children —Relationship between the Local Elastic Modulus and the Histological Structure—

Takahiro Tokioka, Yuichi Tamatsu and Yoshinobu Ide

Department of Anatomy, Tokyo Dental College

1-2-2 Masago, Mihama, Chiba, 261-8502, Japan

[Received on April 1, 1999 ; Accepted on May 25, 1999]

Key words : child mandible / compact bone / elastic modulus / porosity ratio / bending test

Abstract : The purpose of this study was to investigate the relationship between the local elastic modulus and the internal structure of the compact bone of the mandibular bodies in human children.

Small specimens of 6 mm×0.4 mm×0.9 mm were obtained from the bone and the elastic modulus was measured by the three-point bending test. The surfaces of the specimen were observed serially by a scanning electron microscope and reconstructed three-dimensionally to clarify the correlation between the modulus and the internal bone structure. The porosity ratio was calculated based on the parameters obtained from the reconstructed test specimens.

The local elastic modulus at the lingual side was higher than that at the labial side. At the buccal or labial side, the modulus of the lower margin of the mandibular body was higher than that of the alveolar part. However, there were no differences in the location of the specimens at the lingual side. The modulus of the deciduous molar region was greater than that of the incisor region. Relatively high values of the modulus were obvious with decreasing angles to the mandibular plane. The specimens with a high value of the modulus showed low porosity of bone. Specimens with a long axis consistent with the running direction of Haversian canals indicated a high value of the modulus.

From these results, it is suggested that the location and difference of the local elastic modulus of the mandible may be related to the direction of the Haversian canals and the porosity of the bone.

抄録：下顎骨の有限要素解析には、縦弾性係数と骨の内部構造を詳細に把握する必要がある。本研究では、小児下顎骨の微小試験片の三点曲げ試験により縦弾性係数を測定することを目的とし、走査型電子顕微鏡を用いてその連続切片の三次元的観察を行い、縦弾性係数と骨の内部構造との関係を調べた結果、以下の結論を得た。小児下顎体部の局所的な縦弾性係数は、測定部位や方向により値が異なった。特に部位別では、唇側と舌側の相対する測定部位では舌側が大きな値を示した。方向別では、下顎下縁平面に対する角度が小さくなると値は大きく

なった。構築像から求めた骨の空孔率は、4.0—16.6%であった。縦弾性係数と空孔率の相関は、負の相関がみられた。同じ空孔率を示す試験片で骨構造を観察するとハヴァース管の走行が異なっていた。小児下顎骨の局所的な縦弾性係数の部位差、異方性には、空孔率の違いやハヴァース管の走行方向が大きく関与していることが示唆された。

緒 言

骨は、種々の外力に応じて形態を変化させ機能的に適応することが知られている¹⁻⁸⁾。歯牙が植立している顎骨は、咀嚼や咬合時に直接骨内に応力を受け形態的にもU字型を呈し、他の長管骨とは違い両側性関節という特殊な環境下にある⁹⁻¹²⁾。

このような特徴を示す下顎骨に最も関係の深い歯科医学では、これまでに不正咬合、顎変形症、下顎骨骨折に対する治療方針の基礎的根拠を提示するために、光弾性法、応力塗料法、ストレインゲージ法などを用いて応力分布を調べる研究が行われている¹³⁻¹⁵⁾。また近年、コンピュータの発達により有限要素法を用いた応力解析についても多数報告されている¹⁶⁻²³⁾。この方法を用いる際には、モデル化する対象物の物性パラメータを把握し、数理解析していかなければならない。なかでも緻密骨は、下顎骨骨質の大部分を占め、機械的抵抗性に大きく関与し中心的な役割を果たしている。そのため局所的な縦弾性係数を詳細に知る必要がある。しかし、その数値は解析を行う研究者によってさまざまな値が用いられ、また部位差や方向性の違いを考慮せず単一の数値を用いることが多い。しかも、その解析は二次元解析から三次元解析へと複雑さを増している。したがって、下顎骨の局所的縦弾性係数をより詳細に知ることが急務とされている。

下顎骨の縦弾性係数の測定に関しては、成人下顎骨を対象とした嶋田ら²⁴⁾、Robertsonら²⁵⁾、塩田²⁶⁾により、単一の縦弾性係数の値が報告されている。部位による違いについては、村上ら²⁷⁾が報告している。部位による違い、方向による違いについては、当教室の成人下顎骨の頬側緻密骨を対象とした田松²⁸⁾、成人、小児の頬側下顎枝を対象とした原²⁹⁾が報告している。しかしながら小児下顎骨の縦弾性係数の部位、方向を変えて測定し、それらの値の違いを決定づける要因について組織学的に検討を行った報告は少なく、下顎枝頬側緻密骨を対象とした原²⁹⁾をみるのみである。また本来立体的に表現されなければならない骨構造の観察も、二次元的観察が大部分である。そこで著者は、小児下顎骨体部の唇頬舌側緻密骨を部位と方向別に測定することを目的とし、その値の違いを決

定づける要因を組織学的構造の違いに求めた。組織学的観察には、走査型電子顕微鏡を用いた二次元的観察³⁰⁾を行った。さらに薄切による試料の変形、基準点の設定の問題により二次元でしかとらえることのできなかった骨構造を、連続切片法による三次元再構築法^{31,32)}の一つを確立し、立体的に骨構造を観察した。また得られたデータから骨形態計測を行い空孔率を求め、縦弾性係数との関係を詳細に検討した。

材料および方法

1. 試料および測定領域

試料は、東京歯科大学解剖学講座所蔵の小児乾燥下顎骨を使用し、骨疾患の認められない乳歯列期の10体を選定した。

Fig. 1-A The location of specimens.
labial and buccal side lingual side

Fig. 1-B The location of specimens.
labial and buccal side lingual side

測定領域は、同一方向で部位を変えて測定する領域と、同一部位で方向を変えて測定する領域を設定した。

同一方向で部位を変えて測定する領域として、試料の左側の唇頬側および舌側緻密骨を乳前歯部、乳臼歯部の4カ所に設定した。これらの各測定領域における試験片採取部位は、下顎下縁平面と平行に下顎下縁から歯槽部付近まで等間隔に下部、中部、上部の3カ所に分け、5部位とした (Fig. 1-A)。

同一部位で方向を変えて測定する領域は、試料の右側の唇頬側および舌側緻密骨の乳前歯部、乳臼歯部の4カ所を設定した。これらの領域における試験片の採取部位は、各々下顎下縁平面に平行な方向を0°方向として30°ごとに90°方向まで放射状とした (Fig. 1-B)。

2. 縦弾性係数

1) 試験片の加工方法

試験片の採取は、各々の測定領域の唇頬舌側緻密骨より注水下にて切離し、バンドソー (MARUTO TRIMMER Mc-130) を用いて、試験片を長径6 mmの直方体に加工した。また試験片の高径方向は、緻密骨の頬舌方向とした。次いで、検鏡標本作製の研磨装置 (MARUTO SPEEDLAP ML-150Dc) にて平行性を保ちながら注水下で高径0.4 mmに加工した。また、2枚のスライド

Fig. 2 The location of specimens.

ガラスを使用し HT 式硬組織研磨装置 (ハードティッシュ N-100) 上に置き、耐水ペーパーを用いて0.9 mmに加工した (Fig. 2)。加工された試験片を、自然乾燥後に温度20°C、湿度30%のデシケータ内で24時間以上保存した後に測定を行った。試験片は曲げ試験の直前にマイクロメータ (MITUTOYO SPM2-25DM) にて高径、幅径の計測を行った。

2) 縦弾性係数の測定

試験片の縦弾性係数の測定方法は三点曲げ試験を用いた。三点曲げ試験は田松²⁸⁾が開発した微小骨片曲げ試験機を使用した。試験装置は、試験片を置いて曲げ試験を行う試験機本体 (Fig. 3) に加え、ステッピングモーターと光位置検出素子 (PSD) の制御を行うコントローラ、および自動制御を行う汎用パソコン (NEC PC-9801vm) より構成されている。試験条件および入力項目は Table 1 に表した。曲げ試験による縦弾性係数 (E) の算出方法は、次式により行った。

$$E = \frac{PL^3}{4\delta wh^3}$$

P: 荷重量

L: 支点間距離

δ : 変位量

w: 試験片の幅径

h: 試験片の高径

3) 測定結果の処理

左側測定値は、測定領域ごとに下部、中部、上部に分け部位による値の違いについて検討を行った。また同領域で位置による違い、同位置で領域による違いについて、Tukeyのq検定およびt検定 (有意水準5%) を行った。右側は、測定領域ごとに試験片の採取角度と縦弾性係数の関係を調べた。大腿骨、脛骨および下顎骨で研究されている縦弾性係数の異方性^{28,29,33)}を、一方向繊維強化複合材料に近似させていることに従い、各角度ごとに複合

Table 1

0	負荷速度	20 Hz
1	除荷速度	20 Hz
2	試験片の幅径 (w)	mm
3	試験片の高径 (h)	mm
4	支点間距離 (L)	4 mm
5	最大荷重 (Pmax)	5.00 gf
6	最大変位 (Vmax)	0.2 mm
7	変位倍率 (0.1, 1, 10)	1 倍
8	実験番号	

材料としての推定値を計算し、実際の測定値と比較を行った。

一方向繊維強化複合材料の縦弾性係数は、強化主軸と θ のなす方向の縦弾性係数を $E(\theta)$ とすると次式で示される。

$$\frac{1}{E(\theta)} = \frac{\cos^4 \theta}{EL} + \frac{\sin^4 \theta}{Et} + \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta \times \left(\frac{4}{ELt} - \frac{1}{EL} - \frac{1}{Et} \right)$$

EL：強化主軸方向の縦弾性係数

Et：強化主軸と直角方向の縦弾性係数

ELt：強化主軸と 45° 方向の縦弾性係数

強化主軸方向の縦弾性係数は最大値を示すので、強化主軸方向の値 (EL) は領域内で測定された縦弾性係数の最大値を代入した。強化主軸と直角方向の縦弾性係数は最小値を示すので、強化主軸と直角方向の値 (Et) は領域内で測定された縦弾性係数の最小値を代入した。強化主軸と 45° 方向の値 (ELt) は、ポアソン比 (0.3) および剪断弾性係数 (6.0) を用いて下顎下縁平面に対し試験片の長軸が 45° の縦弾性係数を推定し、当教室の田松²⁸⁾、原²⁹⁾らが使用した値等を考慮して用いた。これらの値を代入して得られた曲線をグラフ上に表し、実際の測定値と比較検討を行った。

3. 試験片の観察

1) 三次元再構築像の作成方法

測定後の試験片をアクリル系レジンに包埋し円形のブロックとした。このブロックを研磨標本作製装置 (MARUTO SPEEDLAP ML-150Dc) を用いて厚さ 40 μ m ごとに研磨した。研磨面をイオンコーター (エイコーエンジニアリング SC-500A) による Au-Pd コートを施し、走査型電子顕微鏡 (日立製作所 S-2150) で 80 倍に拡大して連続的に観察した。試験片の研磨面をブロータイプ黒白写真用フィルム (FUJI NEOPAN-SS) へ 5 枚に分

けて撮影した。次いでこれらを印画紙 (FUJIBRO WP FM3) に焼き付けた。これらの像をトレースすることで、80 倍の 1 枚の試験片像を再現することができた (Fig. 4)。この各操作を一試料について 10 回繰り返し 10 枚の断面像を製作した。次いで CCD カメラにより各断面像のトレース像を多目的画像処理装置に入力後、ネットワークによりワークステーション上の三次元立体構築システム (ラトックシステムエンジニアリング TRI) にて三次元再構築を行った (Fig. 5)。また、再構築にあたっての基準点は、試験片の規格が統一してあるので 4 つの頂点とした。再構築には画像処理装置 (画像メモリサイズ 512×512 画素, 16 面, 1 画素, 8 bit, 256 階調, 画像演算速度 33 msec, 日本アビオニクス SPICCA-II) とホストコンピュータ (メインメモリ 5.6MB HD+616MB 光磁気ディスク日本電気 PC-9801DA) ならびにエンジニアリングワークステーション (メインメモリ 16MB+2.4GB HD 東芝 AS4260C) により構成されたものを用いた。

2) 空孔率の測定

試験片再構築像からハヴァース管とフォルクマン管の管腔構造総体積を測定した。またこの値を試験片の総体積で除し、百分率で表したものを空孔率とした。縦弾性係数と空孔率の関係を調べるため、左側下顎体部の下部、中部、上部の計測部位より各 1 試験片、計 12 本の空孔率の測定を行った。

3) 測定結果の処理

測定結果の処理は、縦軸に縦弾性係数、横軸に空孔率のグラフを描いた。また試験片の縦弾性係数と空孔率の相関関係を求めた。

4) ハヴァース管の走行方向

右側乳臼歯部の方向別で採取した測定後の 0° と 90° の 2 試験片の三次元再構築を行い、試験片長軸に対するハヴァース管の走行方向を観察した。

4. 唇舌的および頬舌的観察

1) 試料採取方法

左側の試験片採取後の緻密骨から下顎下縁平面に対して垂直にバンドソー (MARUTO TRIMMER MC-130) で頬舌断した面とした (Fig. 6)。採取した試料は、観察面と平行に検鏡標本作製の研磨装置 (MARUTO SPEEDLAP ML-150Dc) で厚さ 2—3 mm に加工した (Fig. 7)。

2) 試料の処理

試料を以下の手順に従い処理した。

① 砥石、耐水ペーパーによる研磨

Fig. 5 The direct method for three dimensional serial reconstruction.

Fig. 6 The image of six parts.

Fig. 7 The photographic sphere.

② 10% EDTA による 3 日間の脱灰処理

③ 水洗, 脱水, 凍結乾燥 (エイコーエンジニアリング ID-2 型)

④ 金パラジウムによるクールスパッタコーティング (VG Microtech SC-500A)

走査型電子顕微鏡 (日本電子データム JSM-6340F) で 80 倍にて観察した。

3) 観察領域

観察領域は, 同一方向で部位を変えて測定する領域 (左側) の乳前歯部, 乳臼歯部の緻密骨断面とした。また試験片採取部位に相当する唇頬側 (上部, 中部, 下部), 舌側 (上部, 中部, 下部) 緻密骨を計 6 部位に分割した (Fig. 6)。

結 果

1. 縦弾性係数

1) 部位別

① 乳前歯部

a) 唇側

左側から採取した 75 片の試験片について測定を行っ

た (Table 2)。最大値は, 下部で 11.4 GPa であった。次いで, 高い値を示したのは, 中部で 9.4 GPa であり, 最小値は, 上部で 6.9 GPa であった。測定領域全体で見ると, 下顎下縁部で最も大きな値を示し, 上部に近づくに連れて値は小さくなる傾向を示した (Fig. 8)。

b) 舌側

左側から採取した 44 片の試験片について測定を行った (Table 2)。最大値は, 下顎下縁平面に最も近い下部で 14.0 GPa であった。次いで高い値を示したのは, 上部で 12.9 GPa であった。最小値は, 中部の 12.1 GPa であった。測定領域全体としてみた場合, 3 部位による差はみられなかった (Fig. 8)。

② 乳臼歯部

a) 頬側

左側から採取した 80 片の試験片について測定を行った (Table 3)。最大値は, 下顎下縁平面に最も近い下部で 16.1 GPa であった。次いで, 高い値を示したのは, 中部で 13.6 GPa であった。最小値は, 上部で 11.1 GPa であった。測定領域全体で見ると, 下顎下縁部から歯槽部にかけて値は小さくなる傾向を示した (Fig. 9)。

b) 舌側

左側から採取した 42 片の試験片について測定を行った (Table 3)。最大値は、下顎下縁平面に最も近い下部で 14.7 GPa であった。次いで高い値を示したのは、中部で 13.9 GPa であった。最小値は、13.4 GPa であった。測定領域全体としてみた場合、3 部位による差はみられなかった (Fig. 9)。

③ 乳前歯部と乳臼歯部の比較

乳前歯部唇側と乳臼歯部頬側の同じ高さで縦弾性係数を比較すると、すべての部位で乳前歯部唇側のほうが値は小さかった。また、乳前歯部舌側と乳臼歯部舌側で同部位において値を比較すると、すべての部位で乳前歯部舌側のほうが値は小さかった (Table 2, 3)。

④ 唇頬側と舌側の比較

乳前歯部で、唇側と舌側の縦弾性係数を比較すると、

Table 2

	labial (GPa) avg±S. E.	lingual (GPa) avg±S. E.
lower	11.4±1.1	14.0±0.9
middle	9.4±0.6	12.1±1.1
upper	6.9±0.7	12.9±0.9*

Labial side			Lingual side		
location	lower	middle	location	lower	middle
upper	*		upper		
middle			middle		

* Significant difference ($p < 0.05$)

すべての部位で唇側が小さかった (Table 2)。特に上部において有意な差がみられた。乳臼歯部では頬側下部で値が大きかった (Table 3)。

2) 方向別

① 乳前歯部

a) 唇側

右側から採取した 53 片の試験片について測定を行った (Table 4)。最大値は、試験片を下顎下縁平面と平行に採取した 0° 方向で 13.9 GPa、最小値は下顎下縁平面と直角に採取した 90° 方向で 6.8 GPa であった。30° 方向は、9.9 GPa、60° 方向は、7.7 GPa であった。測定領域の全体としては、0° 方向から 90° 方向に向かうに従って縦弾性係数が減少する傾向を示した。また、それぞれの角度で値が異なり異方性がみられた。緻密骨を、一般工業材料で使用される一方向繊維強化複合材料と仮定し、強化主軸方向の縦弾性係数に最大値、直交する方向の縦弾性係数に最小値を代入して、実測値と重ねるとおおむね一致した (Fig. 10)。

b) 舌側

右側から採取した 29 片の試験片について測定を行った (Table 4)。最大値は、試験片を下顎下縁平面と平行に採取した 0° 方向で 15.3 GPa、最小値は下顎下縁平面と直角に採取した 90° 方向で 6.9 GPa であった。30° 方向は 12.3 GPa、60° 方向は 8.4 GPa であった。測定領域の全体としては、0° 方向から 90° 方向に向かうに従って縦弾性係数が減少する傾向を示した。また、それぞれの角度で値が異なり異方性がみられた。緻密骨を下顎下縁に沿った方向に強化主軸をもった一方向繊維強化複合材料とみなしたとすると、30° 方向を除き比較的理論値に近い傾向を

Fig. 8 Elastic modulus of the each location at the deciduous incisors region.

Table 3

	buccal (GPa) avg±S. E.	lingual (GPa) avg±S. E.
lower	16.1±0.7	14.7±0.5
middle	13.6±1.1	13.9±0.6
upper	11.1±0.9	13.4±0.8

Buccal side			Lingual side		
location	lower	middle	location	lower	middle
upper	*		upper		
middle			middle		

* Significant difference ($p < 0.05$)

Table 4

angle (Deg)	labial (GPa) avg±S. E.	lingual (GPa) avg±S. E.
0	13.9±1.4	15.3±0.8
30	9.9±1.1	12.3±1.6
60	7.7±0.9	8.4±1.0
90	6.8±0.7	6.9±0.6

示した (Fig. 10)。

② 乳臼歯部

a) 頬側

右側から採取した 55 片の試験片について測定を行った (Table 5)。最大値は、試験片を下顎下縁平面と平行に採取した 0°方向で 16.1 GPa、最小値は下顎下縁平面と直角に採取した 90°方向で 8.5 GPa であった。30°方向で 13.3 GPa、60°方向で 10.6 GPa であった。測定領域の全体としては、0°方向から 90°方向に向かうに従って縦弾性係数が減少する傾向を示した。また、それぞれの角度で値が異なり異方性がみられた。測定値を一方繊維強化複合材料と仮定した推定曲線と重ねると、30°方向の値について違いがみられた (Fig. 11)。

b) 舌側

右側から採取した 41 片の試験片について測定を行った (Table 5)。最大値は、試験片を下顎下縁平面と平行に採取した 0°方向で 15.7 GPa、最小値は下顎下縁平面と直角に採取した 90°方向で 9.1 GPa であった。30°方向は 13.0 GPa、60°方向は 9.9 GPa であった。測定領域の全体としては、0°方向から 90°方向に向かうに従って縦弾性係数が減少する傾向を示した。またそれぞれの角度で値が異なり異方性がみられた。一方繊維強化複合材料と仮

Fig. 9 Elastic modulus of the each location at the deciduous molars region.

Fig. 10 Relationship between angle and elastic modulus at the deciduous incisors region.

定した理論値に近似していたが、30°方向の値について少し異なりをみせた (Fig. 11)。

③ 乳前歯部と乳臼歯部の比較

乳前歯部唇側と乳臼歯部頬側で同方向について縦弾性係数を比較すると、すべての方向で乳前歯部唇側の値が小さかった (Table 4)。乳前歯部舌側と乳臼歯部舌側で同方向について縦弾性係数を比較すると、すべての方向で乳前歯部舌側の値が小さかった (Table 5)。

④ 唇頬側と舌側の比較

乳前歯部唇側と舌側で同方向について縦弾性係数を比較するとすべての方向で唇側の値が小さかった

Table 5

angle (Deg)	buccal (GPa) avg±S. E.	lingual (GPa) avg±S. E.
0	16.1±1.2	15.7±1.1
30	13.3±1.8	13.0±0.8
60	10.6±1.5	9.9±1.1
90	8.5±0.8	9.1±1.2

(Table 4)。乳臼歯部頬側と舌側で同方向について縦弾性係数を比較すると、大きな差はみられなかった (Table 5)。

2. 試験片の観察

1) 組織学的観察

部位別の縦弾性係数の値が、6.3 GPa を示した乳前歯部唇側上部の試験片は、管腔構造の占める割合が 10.9% と高く、ハヴァース管の直径も大きい像がみられた (Fig. 12)。

部位別の縦弾性係数の値が、16.6 GPa を示した乳臼歯部頬側下部の試験片は、管腔構造の占める割合が 4.8% と低く、ハヴァース管の直径も小さい像がみられた (Fig. 13)。

2) 空孔率と縦弾性係数

空孔率と縦弾性係数との相関は、相関係数 $r = 0.73$ ($Y = -0.802 X + 19.079$) と負の相関がみられた (Fig. 14)。

3) 縦弾性係数とハヴァース管の走行方向

方向別で採取した測定後の 2 試験片の三次元再構築を行った。再構築像から空孔率が 5.4% で縦弾性係数が 14.0 GPa を示した 0° 方向試験片と、空孔率が 6.0% で縦弾性係数が 10.8 GPa を示した 90° 方向試験片のハヴァース管の走向方向を観察した。0° 方向試験片では試験片の長軸に対してハヴァース管がほぼ平行に配列しているのがみられた (Fig. 15)。90° 方向試験片では試験片の長軸に対してハヴァース管が角度をもって走行しているのがみられた (Fig. 16)。

3. 唇舌的および頬舌的観察

1) 乳前歯部

縦弾性係数が小さかった唇側では、ハヴァース管の直径が大きく、楕円を呈する像が数多くみられた (Fig. 17)。縦弾性係数が大きかった舌側では、ハヴァース管の直径が小さく、正円を呈する像が数多くみられた (Fig. 18)。

Fig. 11 Relationship between angle and elastic modulus at the deciduous molars region.

2) 乳臼歯部

縦弾性係数にあまり大きな差がみられなかった頬側像 (Fig. 19) と舌側像 (Fig. 20) では、ハヴァース管の大きさ、形態もほぼ同様な像がみられた。

考 察

下顎骨は他の長管骨とは異なった状況下で複雑な形態を呈し⁹⁻¹²⁾、咀嚼運動のために種々の応力が加わる。このためさまざまな手法を用いて応力測定やシミュレーションが行われている¹³⁻²³⁾。さらに、解析ソフトの発達に伴い、必要となる基礎的データである縦弾性係数も詳細な値が求められているが、歯胚の影響や歯牙が植立し形態的に複雑である小児下顎骨に関する報告は少ない。そこで著者は、力学的にも興味のある小児下顎体部を用いて緻密骨の縦弾性係数をさまざまな部位、方向で測定した。また縦弾性係数の値と組織構造の関係についても検討を行った。

1. 縦弾性係数

成人下顎骨における縦弾性係数の測定は、村上ら²⁷⁾、田松²⁸⁾、原²⁹⁾によって測定が行われ、部位差、異方性が報告されている。なかでも原²⁹⁾は、成人と小児の下顎枝部における縦弾性係数を測定し、両者における差が組織学的構造の相違に左右されることを示唆していると報告した。しかし、小児下顎体部において局所的な縦弾性係数を測定した報告はない。そこで、小児下顎体部の唇頬舌側緻密骨より微小骨片を採取し、三点曲げ試験を行い縦弾性

係数の測定を行った。

1) 部位別

左側の唇頬舌側緻密骨の測定では、試験片の採取方向を下顎下縁平面と平行にし、下顎下縁から歯槽部にかけて部位を変えて調べた。

① 乳前歯部

a) 唇側

下部は値が大きく、上部にかけて値が小さくなる傾向を示した。これは、咀嚼や咬合時に左右顎関節からの応力が集中しやすい乳前歯部では機械的強度が必要であるためと考えられる。そのためオトガイ部に相当する下部では大きな縦弾性係数を示したと考えられた。また下部より上部の値のほうが小さいということは、外力が加わった時歪みやすいということである。このことから、食物切断時の乳切歯からの強大な咬合力を無理なく下顎下縁部へ伝達、吸収させると考えられた。また、歯槽部付近の縦弾性係数が小さいと報告した村上²⁷⁾、田松²⁸⁾の成人下顎骨との結果とも一致した。

b) 舌側

測定された値の平均値で比べると部位による違いがみられなかった。これは、村田¹⁴⁾の論説の中で成人下顎骨の前歯部舌側歯槽部骨質は、咬合時の大きな応力を合理的な形態をもって処理しているように乳前歯部舌側では均一な縦弾性係数を有すると考えられた。また正中部は、舌骨上筋群により常に応力が舌側緻密骨全域に作用すると推測される。そのため力学的強度が必要とされるので、どの部位においてもあまり縦弾性係数に違いがないと考えられた。

② 乳臼歯部

a) 頬側

乳前歯部より大きな咬合力を下顎下縁部に伝達し吸収させるため、上部から下部にかけて値は大きくなり、さらに乳前歯部より大きな値を示したと推測された。また下部は、下顎骨のフレーム的役割をしているため測定部位の中で最大値を示したと考えられた。

b) 舌側

部位による違いがみられなかった。下顎体内面には顎舌骨筋線の付着部が斜走しており、咬合時、咀嚼時に舌側緻密骨に応力が加わることが予測される。そのため、この応力に対して強度を保つべく安定した縦弾性係数を有するものと考えられた。

③ 乳前歯部と乳臼歯部の比較

田松²⁸⁾の報告では、成人下顎体部唇頬側緻密骨の下部から上部に向かうにつれ縦弾性係数が小さくなり、前歯部と臼歯部では、臼歯部のほうが大きな縦弾性係数を示

Fig. 14 Relationship between porosity ratio and elastic modulus.

した、と述べている。今回の小児下顎骨の結果からも同様な傾向がみられた。一般にヒト下顎骨は、基底骨と歯槽部、筋部に区別されるといわれている⁹⁾。基底骨は下顎骨の基礎となる部分、歯槽部と筋部は、成長発育に伴って二次的に付加される機能的な部分と仮定すると、基底骨に相当する下部では値が大きく、歯槽部に相当する上部では、値は小さくなる傾向を示した。また乳前歯部より乳臼歯部は、咀嚼筋が付着する筋部に近いため、値が大きかったと考えられた。このことから小児下顎体の縦弾性係数の部位差は、筋から受ける応力の影響や成長発育に伴う骨構造の違いが関与しているのではないかと示唆された。

2) 方向別

右側の唇頬舌側緻密骨では、試験片の採取を角度別に行った。下顎下縁平面を0°方向とし、90°方向まで30°ごとに測定した。

① 乳前歯部

a) 唇側

縦弾性係数は、0°方向すなわち下顎下縁平面と平行な方向で最も大きな値を示し、90°方向になるにつれて値が小さくなる傾向を示した。またそれぞれの角度で値が違い、明らかな異方性がみられた。また小川³⁴⁾、田松²⁸⁾、原²⁹⁾が、骨を一方向繊維強化複合材料と仮定し異方性について報告した結果と同様な結果が得られた。しかし90°方向において、舌側の同方向と比べやや大きな値を示した。Seipel³⁵⁾は、正中部で割線が歯槽部に向けて上下方向に立ち上がるように走行していると報告している。このことから緻密骨を複合材料と考えた場合の強化方向が

Fig. 17 Labial side of mandibular bone at the deciduous incisor region.

Fig. 18 Lingual side of mandibular bone at the deciduous incisor region.

舌側より複雑な変化を呈していると考えられた。

b) 舌側

縦弾性係数は、 0° 方向すなわち下顎下縁平面と平行な方向で最も大きな値を示し、 90° 方向になるにつれて値が小さくなる傾向を示した。また、それぞれの角度で値が異なり異方性がみられた。一方向繊維強化複合材料の理

論値に近い傾向を示したことについては、舌側面において付着する筋の作用による応力や咬合圧に対応するため、一方向繊維強化複合材料に近似し、比較的均質な構造であると考えられた。また 30° 方向は、顎舌骨筋の付着方向と近似しているため理論値に比べ大きな値を示したと推測された。

Fig. 19 Buccal side of mandibular bone at the deciduous molar region.

Fig. 20 Lingual side of mandibular bone at the deciduous molar region.

② 乳臼歯部

a) 頬側

縦弾性係数は、 0° 方向すなわち下顎下縁平面と平行な方向で最も大きな値を示し、 90° 方向になるにつれて値が小さくなる傾向を示した。それぞれの角度で値が異なり異方性がみられた。 30° 方向において一方向繊維強化複合材料の理論値に対して実測値が大きかった。これは、

Seipel³⁵⁾の報告のなかで、割線の方が特に外斜線の部分境界を下顎枝部から下顎体部で大きく変化しており、このことが強化主軸方向にも関係しているのではないかと考えられた。

b) 舌側

縦弾性係数は、 0° 方向すなわち下顎下縁平面と平行な方向で最も大きな値を示し、 90° 方向になるにつれて値が

小さくなる傾向を示した。それぞれの角度で値が異なり異方性がみられた。30°方向で理論値に比べ大きな値を示したことについては顎舌骨筋の付着方向と関係していると考えられた。90°方向において頬側の同方向と比べやや大きな値を示したことについては、頬側上部と舌側上部の空孔率の違いが示唆された。

③ 乳前歯部と乳臼歯部

乳臼歯部は、乳前歯部に比べ一方向繊維強化複合材料の理論値に近似しており、30°方向における値のばらつきを除けば力学的に安定しており長管骨様の性質を示したと考えられた。

2. 試験片の観察

非常に活発な成長過程を示す小児下顎骨緻密骨は、成人緻密骨とは異なり骨添加と骨吸収が急速に進行していると考えられる。そのため、栄養血管であるハヴァース管やフォルクマン管等の管腔構造がどの部位においても発達していると思われる。ゆえに小児緻密骨の局所的縦弾性係数の差異には、管腔構造の大きさの違いが関与すると示唆される。そこで、空孔率が試験片の縦弾性係数にどの程度関係するか三次元再構築像から得られたデータより求め検討した。

1) 組織学的観察

乳前歯部唇側上部の空孔率が10.9%と大きな値を示した試験片 (Fig. 12) は、縦弾性係数が6.3 GPaと小さく、乳臼歯部下部の空孔率が4.8%と小さな値を示した試験片 (Fig. 13) は、縦弾性係数が16.6 GPaと大きかった。空孔率に関しては、骨単位総面積に対するハヴァース管総面積が唇頬側上部で大きいという松坂³⁰⁾の結果と一致した。

2) 空孔率

① 乳前歯部における空孔率と縦弾性係数

原²⁹⁾は、小児下顎枝における空孔率は上部で10.8—14.7%、下部で8.0—13.2%と報告している。小児乳前歯部の空孔率は、5.6—16.6%であった。この部位における管腔構造の占める割合は下顎枝よりばらつきがあると考えられた。唇側と舌側の空孔率を比較すると舌側のほうが小さかった。下顎体内面には舌骨上筋群が付着しており、咬合時、咀嚼時に舌骨緻密骨に応力が加わることが予想される。そのため、この応力に対して強度を保つべく骨層板の割合が多くなり、空孔率が小さくなると考えられた。

② 乳臼歯部における空孔率と縦弾性係数

小児乳臼歯部の空孔率は、4.0—13.0%であった。原²⁹⁾の報告よりばらつきが大きかった。頬側と舌側の空孔率

を比較するとあまり差はなかった。また乳臼歯部の空孔率は、乳前歯部のそれに比べ小さかった。強大な応力が咬合時、咀嚼時に両側緻密骨に加わることが推測される。ゆえに力学的強度のある層板構造の占める割合が大きくなり、逆に空孔率は小さくなると考えられた。

3) 空孔率と縦弾性係数

空孔率と縦弾性係数の相関には、負の相関がみられた (相関係数 $r=0.73$)。同様な空孔率を示した試験片で縦弾性係数に開きが生じたのは、三点曲げ試験では試験片の上下面に大きな応力が生じ、その部位にある空孔の形態および大きさが試験片強度を左右する一因となることが考えられた。Brown³⁶⁾やHashin³⁷⁾、原²⁹⁾は、空孔は骨の機械的性質に大きく関与すると述べているように小児下顎骨部も同様であることが考えられた。

④ ハヴァース管の走行方向

同様の空孔率を示す0°方向試験片と90°方向試験片を比較すると、縦弾性係数が大きかった0°方向試験片 (Fig. 15) はハヴァース管が試験片の長軸とほぼ平行に配列していた。また、90°方向試験片 (Fig. 16) はハヴァース管が試験片の長軸に対してほぼ垂直に配列していた。これらのことから、ハヴァース管の方向性が縦弾性係数の異方性の一因であると考えられた。ゆえに比較的大きな値を示す試験片は、オステオンのハヴァース層板が試験片の長軸方向に配列しているので機械的抵抗性が強いと考えられる。逆に小さな値を示す試験片は、層板構造が試験片の長軸に角度をもって配列しているので機械的抵抗性が弱くなると考えられる。またオステオン、介在層板周囲の機械的抵抗性が弱いといわれているセメントライン³⁸⁾も、試験片の長軸に対して角度をもち応力が集中しやすくなり機械的抵抗性をさらに弱めていると考えられる。

3. 唇舌的および頬舌的観察

乳前歯部唇側像と舌側像を比較すると、縦弾性係数が小さい試験片が採取された唇側像 (Fig. 17) は、ハヴァース管の直径が大きく、楕円を呈する像が数多くみられた。また縦弾性係数が大きい試験片が採取された舌側像 (Fig. 18) は、ハヴァース管の直径が唇側に比べ小さく、また数も少なく正円を呈する像が数多くみられた。このことから咀嚼や咬合による応力の分布や付着する筋の応力に対する骨強度の違いが示唆された。Currey³⁹⁾、青地⁵⁾、中島¹¹⁾は、ハヴァース管の大きさ、分布密度、介在層板と骨強度について、管腔構造が大きければ機械的性質が低下すると述べている。ゆえに乳前歯部唇側の縦弾性係数が小さかったと考えられた。乳臼歯部頬舌側は、

乳前歯部に比べ強大な咬合圧に耐えうるために、ハヴァース管の直径が小さく管腔構造の占める割合も少なく機械的抵抗性が強い層板構造の割合が多くなると考えられた。

結 論

東京歯科大学解剖学教室所蔵ヒト小児乾燥下顎骨下顎体部の唇頬舌側緻密骨より種々の部位、方向で採取した微小骨片を用いて、局所的な縦弾性係数を測定した。また縦弾性係数と組織構造との関係について詳細に検討を行い、以下の結果を得た。

1. 唇頬側の縦弾性係数は歯槽部から下顎下縁部にかけて大きかった。しかし舌側は、位置による違いはなかった。
2. 同部位の縦弾性係数は、唇側より舌側のほうが大きかった。
3. 乳臼歯部の縦弾性係数は同部位、同方向において乳前歯部より大きかった
4. 縦弾性係数は、下顎下縁平面に対する角度が小さくなるにつれて大きくなった。
5. 方向別の縦弾性係数は、各角度で値が異なり異方性がみられた。
6. 小児下顎骨の局所的な縦弾性係数の部位差、異方性には、空孔率の違いやハヴァース管の走行方向が大きく関与していることが示された。

本論文の要旨は、第38回歯科基礎医学会総会(平成8年10月13日、神奈川)、第102回日本解剖学会全国学術集会(平成9年3月26日、愛知)、第17回日本骨形態計測学会(平成9年7月4日、香川)、日本機械学会100周年記念部門第10回バイオエンジニアリング講演会(平成10年1月23日、広島)、において発表した。

文 献

- 1) Caputo, A. A. and Standlee, J. P.: 設計と構造: 歯科臨床とバイオメカニクス. (伊藤秀美, 伊達和博訳), 1版, pp. 17—32, クインテッセンス出版, 東京, 1995.
- 2) Gjelsvik, A.: Bone remodeling and Piezoelectricity-1. *J. Biomech.* **6**: 69—77, 1973.
- 3) 鹿島隆雄: 咀嚼によって顔面頭蓋に生ずる応力分布から見た, 人顔面頭蓋の形態学的研究 第一編: 顔面頭蓋に生ずる応力の特色, 及び主応力方向とspaltlineとの関連性について. *歯科学報* **66**: 693—714, 1966.
- 4) Enlow, D. H.: Drift: Principles of bone remode-

- ling. (edited by Enlow, D. H.), First published, pp. 51—59, Charles C. Thomas, Springfield, 1963.
- 5) 青地 脩: 人の管状骨における層板構造の計測的研究. *京都府医大誌* **65**: 941—965, 1959.
- 6) 藤野 明: 下顎骨の応力伝達機構に関する研究, 第一編. *歯科医* **46**: 513—542, 1983.
- 7) Jacobs, C. R., Levenston, M. E., Beaupre, G. S., Simon, J. C. and Carter, D. R.: Numerical instabilities in bone remodeling simulations the advantages of a node-based finite element approach. *J. Biomech.* **10**: 449—459, 1994.
- 8) 須田立雄, 小澤英浩, 高橋栄明: 骨の科学. 1版, pp. 1—75, 医歯薬出版, 東京, 1985.
- 9) 一條 尚: 上・下顎骨の基本的な形態と構造の変化. *形成外科* **36**: 3—7, 1993.
- 10) 十河基文, 前田芳信, 堤 定美: 下顎骨骨梁の生体力学的研究, 第1報, 天然歯根周囲の骨梁パターンと咬合力の伝達経路について. *補綴誌* **37**: 505—513, 1993.
- 11) 中島 功, 近藤潤一, 藤原道夫: 下顎骨の力学的特性に関する研究—緻密質のヤング率並びにポアソン比について—. *歯科学報* **84**: 1951—1961, 1984.
- 12) 赤坂守人: 小児歯科学. 第1版, pp. 4—62, 医歯薬出版, 東京, 1996.
- 13) 芳本 忍: 咬合力に対する下顎骨の力学的反応について. *歯基礎誌* **18**: 286—310, 1976.
- 14) 村田美雄, 上山松吉, 今田晴雄: 咬合時に於ける下顎骨の主応力分布に就いての研究. *歯科学報* **59**: 399—405, 1959.
- 15) 増田孝雄: 下顎骨の構造並に力学的研究 3. 三次元光弾性実験による下顎骨の力学的研究. *口腔解剖研* **17**: 538—541, 1960.
- 16) Cook, S. D., Weinstein, A. M., Klawitter, J. J.: A three-dimensional finite element analysis of a porous rooted Co-Cr-Mo alloy dental implant. *J. Dent. Res.* **61**: 25—29, 1982.
- 17) Koolstra, J. H., van Eijden, T. M. G. J., Weijs W. A. and Naeije, M.: A three-dimensional mathematical model of the human masticatory system predicting maximum possible bite forces. *J. Biomech.* **21**: 563—576, 1988.
- 18) Knoell, A. C.: A mathematical model of an in vitro human mandible. *J. Biomech.* **10**: 159—166, 1977.
- 19) Hart, R. T., Hennebel, V. V., Thonpreda, N., Buskirk, W. C. and Anderson, R. C.: Modeling the biomechanics of the mandible: a three dimensional finite element study. *J. Biomech.* **25**: 261—286, 1992.
- 20) 佐多欣司郎: 有限要素法による乳前歯外傷時の応力解析とくに、下顎乳中切歯に加わる外力の荷重方向および荷重部位による相違について. *歯科医* **52**: 51—68,

- 1989.
- 21) 竹内 智, 岡 達, 市川康明, 川本眺万：下顎骨の外力による変形・破壊に関する実験的および数値解析的研究—第1報 ヒト骨の破壊特性について—, 日口外誌 **31** : 240—247, 1985.
- 22) 高野伸夫：小児下顎骨折の力学的研究, 歯科学報 **80** : 817—852, 1980.
- 23) 竹内 智, 岡 達, 市川康明, 川本眺万：下顎骨の外力による変形・破壊に関する実験的および数値解析的研究 第2報 下顎骨の三次元有限要素モデル化と変形・破壊の検討, 日口外誌 **31** : 248—263, 1985.
- 24) 嶋田 淳, 阪本栄一, 平沼康彦, 江場光芳, 島崎貴弘, 竹島 浩, 沖津光久, 細井秀男, 山本美朗, 角田豊作：ヒト下顎緻密骨質のヤング率とポアソン比, 明海歯学誌 **17** : 495—501, 1988.
- 25) Robertson, D. M. and Smith, D. C. : Compressive strength of mandibular bone as a function of microstructure and strain rate. *J. Biomech.* **11** : 455—471, 1978.
- 26) 塩田重利：人下顎骨および大腿骨緻密質の曲げ強度に関する研究, 口病誌 **26** : 69—86, 1959.
- 27) 村上敬宣, 近藤 晃, 原 芳道, 小林昌樹, 鶴 秀登, 岸根延幸：微小ぜい性材料の弾性係数測定法とその応用, 材料 **37** : 478—483, 1988.
- 28) 田松裕一：ヒト下顎骨唇側側緻密質の局所的縦弾性係数の測定に関する研究, 歯基礎誌 **36** : 306—329, 1994.
- 29) 原 俊浩：ヒト成人および小児下顎枝側側緻密骨の力学的性質に関する研究—縦弾性係数と骨単位の走行および空隙率との関係—, 歯基礎誌 **39** : 269—283, 1997.
- 30) 松坂賢一：ヒト下顎骨緻密質の構造に関する研究—部位, 年齢および歯牙の有無による比較—, 歯基礎誌 **36** : 435—459, 1994.
- 31) 三浦 岳, 小森 優, 高橋 隆, 塩田浩平：コンピュータグラフィックスによるヒト胚子連続切片からの三次元立体画像の再構築—フリーソフトウェア “NIH Image”を用いた試み—, 解剖誌 **70** : 353—361, 1995.
- 32) Odgaard, A., Anderson, K., Melesen, F., Jorgen, H and Gundersen, G. : A direct method for fast three-dimensional serial reconstruction. *J. Microsc.* **159** : 335—342, 1990.
- 33) 林 毅：複合材料工学, 第1版, pp. 504—517, 日科技連出版社, 東京, 1971.
- 34) 小川公平, 木村 賛, 石山昱夫：ヒト頸骨の方向依存性, 日本複合材料学会誌 **3** : 32—37, 1997.
- 35) Seipel, C. M. : Trajectories of the jaws. *Acta. Odontol. Scand.* **8** : 118—143, 1948.
- 36) Brown, S. D., Biddulph, R. B. and Wilcox, P. D. : A strength-porosity relation involving different pore geometry and orientation. *J. Am. Ceram. Soc.* **47** : 320—322, 1964.
- 37) Hashin, Z. : The elastic moduli of heterogeneous materials. *J. appl. Mech.* **29** : 143—150, 1962.
- 38) Schaffler, M. B., Choi, K., Milgrom, C. : Aging and matrix microdamage accumulation in human compact bone. *Bone.* **17** : 521—525, 1995.
- 39) Currey, J. D. : The effect of porosity and mineral content on the Young's modulus of elasticity of compact bone. *J. Biomech.* **21** : 131—139, 1988.

Fig. 3 Testing machine.

Fig. 4 Two-dimensional image.

Fig. 12 3-D reconstruction of a specimen at the labial side of the deciduous incisors. Upper region. Elastic modulus : 6.3 GPa Porosity ratio : 10.9% HC : Haversian canals

Fig. 13 3-D reconstruction of a specimen at the buccal side of the deciduous molars. Lower region. Elastic modulus : 16.6 GPa Porosity ratio : 4.8% HC : Haversian canals

Fig. 15 3-D reconstruction of a specimen at the buccal side of the deciduous molars. Angle : 0° Elastic modulus : 14.0 GPa Porosity ratio : 5.4% HC : Haversian canals

Fig. 16 3-D reconstruction of a specimen at the buccal side of the deciduous molars. Angle : 90° Elastic modulus : 10.8 GPa Porosity ratio : 6.0% HC : Haversian canals