成長期ラットの下顎骨に対する 食物の硬軟の影響に関する研究

— 骨塩量, 強度ならびに形態変化 —

高 橋 忠

九州歯科大学大学院歯学研究科小児歯科学専攻 (指導: 木村光孝教授)

平成 5 年 12 月 24 日受理

Effects of Dietary Physical Consistency
on the Rat Mandible in the Growth Stage
— Change of Bone Mineral Content, Compressive Strength and Morphology —

Tadashi Takahashi

Department of Pediatric Dentistry (Director: Prof. Mitsutaka Kimura)
Kyushu Dental College, Kitakyushu, Japan

The purpose of this research was to study the influence of the difference in dietary physical consistency, which is the representative factor of local environmental factors, on the morphology, the bone mineral levels and the physical strength of the mandibular bone in the growth stage.

Three-week-old rats of Wistar strain were used. Thirty rats were randomly divided into three groups: the hard diet group (control group), the kneaded diet group and the powdered diet group. All of the rats were fed for six weeks. After six weeks, the rats were sacrificed. Roentgenographic lateral cephalograms were taken to investigate the morphological changes of the mandible, and the mineral content of the mandibular bone by the microdensitometry method and mandibular physical strength by compressive test were examined.

The results were as follows,

1. The average compressive strength of each diet was 64.8 kg/cm^2 for the control group and 1.9 kg/cm^2 for the kneaded diet group.
2. There were no significant difference in body weight between the control group, the kneaded diet group and the powdered diet group throughout the experimental period.
3. The lateral cephalometric analysis showed the morphological changes at the mandibular ramus, including angular process. Morphologic reduction was found significantly in coronoid process of kneaded diet group and in coronoid process, condyle and angular process of powdered diet group.
4. The bone mineral content of alveolar bone and mentum was significantly lower in both the kneaded and the powdered diet group. Meanwhile at the region of the mandibular lower

margin and angular process, the content was significantly lower in powdered diet group.

5. Compressive strength of mandible was significantly lower in kneaded diet group and powdered diet group. The strength declined with decreasing of physical strength of diet.

From these results, it is suggested that the difference of dietary physical consistency influences not only morphological changes but also alteration in internal characteristic of mandibular bone in the growth stage.

Key words : Dietary physical consistency / Morphological change / Bone mineral content / Compressive strength / Rat mandible

緒 言

骨の成長発育に影響を及ぼす因子は互いに独立したものではなく、複合的に作用していることから、骨の成長発育の制御要因の解明は困難であることが過去の研究者によって報告されている^{1,2)}。とくに歯科領域においては、口腔領域特有の咀嚼機能が顎・顔面の成長発育に及ぼす影響について、咀嚼筋の切除による研究³⁻⁹⁾や、神経の切断による研究¹⁰⁻¹²⁾、抜歯による研究¹³⁾などの報告がみられる。このような一連の研究から、咀嚼機能の低下は、顎・顔面、とくに下顎骨の成長発育に強い影響を及ぼすと考えられてきた。

近年、日本人の食生活は、生活様式の多様化に伴い急激な変化を遂げている¹⁴⁾。そしてこの変化の特徴の一つとして加工食品に代表される食物の軟化が挙げられ、日常食品の約60%が軟らかいと感じる食品で占められるという報告もある¹⁵⁾。このような食生活の急激な変化は咀嚼機能を低下させ、それが不正咬合に代表される種々の現象を惹起していると考えられる¹⁶⁾。木村(1989)¹⁷⁾は臨床的立場から、咬合力の減少と下顎骨の小進化傾向を認めている。食物の軟化が顎骨の成長発育に及ぼす影響を検索した実験的研究は多くの研究者によって報告されているが、いずれもが顎骨の形態的な変化を検索したものである¹⁸⁻²⁶⁾。一方、骨の内部構造や強度といった問題に目を向けると、食物の軟化による咀嚼機能の低下がそれらに及ぼす影響を及ぼすかということ、いまだ明らかにされていない。当教室においては、山本(1989)²⁷⁾、首藤(1992)²⁸⁾は、食物の軟化による歯槽骨の変化を、竹中(1989)²⁹⁾、中園(1991)³⁰⁾は、下顎頭に及ぼす影響を検索している。しかし、食物の軟化が下顎骨の形態や内部構造、強度に及ぼす影響を研究した報告は極めて少ない³¹⁾。

本研究は、成長期ラットの下顎骨を用い、食物の軟化

が下顎骨の形態に及ぼす影響を及ぼすかということのみならず、骨の内部の変化や物性といった面にも着目し、骨塩量測定法と、下顎骨の圧縮による破砕強度試験を側方頭部 X 線規格写真撮影法とともに併用し、いささかの知見を得たので報告する。

材料ならびに方法

I. 材料

材料は、生後3週齢の Wistar 系雄ラットを30匹使用した。実験開始時の体重は40g前後であり、ラットは無作為に10匹ずつ3群に分け、それぞれ次のような飼育を行った。

対照群(固形飼料群)：ラット標準 CE-2 飼料(日本クレア)と水道水にて飼育した。

練飼料群：CE-2 粉末飼料を約1/2量の水道水で練和し、24時間室温にて自然乾燥させたものと水道水で飼育した。

粉末飼料群：CE-2 粉末飼料と水道水で飼育した。

なお、実験に使用した飼料および水道水は毎日交換し、飼育期間中自由に摂取させた。

各群の飼料の強度は、万能引張試験機(TENSILON UTM-III-500, オリエンテック社)を用いて圧縮試験により計測した。計測に用いた固形飼料および練飼料は、直径13.5mm、高さ15.0mmの円柱状試験片から得られた圧縮強さの値をもって各群の食物の硬軟の指標とした。

II. 方法

飼育6週間後に全てのラットを深麻酔下にて致死させた。直ちに頭部を採取し10%中性ホルマリン液にて固定した。

A. 側方頭部 X 線規格写真撮影

固定後、頭蓋骨の正中縫合部に沿って頭頂骨から下顎骨まで左右に分割し、ホルマリン固定されたラットの左

Fig. 1 Method to take the roentgenographic lateral cephalograms of the rats.

側頭蓋部の下顎骨歯槽部付近の軟組織を細心の注意を払って剥離し、オトガイ孔を露出させた。左側頭部の正中矢状面をフィルム面に接するよう固定し、オトガイ孔を焦点直下に設定した。X線規格写真撮影にあたっては歯科用オクルーザルフィルム（DF-49，イーストマンコダック社）を使用した。X線発生装置はSOFTEX ESM-2（ソフテックス社）を用い、管電圧30 kVp，管電流8 mA，撮影時間2秒，焦点-フィルム間距離60 cmに一定にし，側方からの頭部X線規格写真撮影を行った（Fig. 1）。現像および定着は，指定通りに行った。撮影にて得られた像（Fig. 2）をフィルムより印画紙上で4.0倍に拡大し，各計測点をトレースした。したがって，本実験における成績は，実際の長さの4倍である。

1. 座標分析

Fig. 3において，オトガイ孔を原点とし，MeとAgを結ぶ直線（下顎下縁平面）に平行および垂直な直線

Fig. 2 Roentgenographic lateral cephalogram of the rat.

Fig. 3 Reference points for coordinate analysis of lateral cephalograms.

1. Cr : The most posterior point of coronoid process
2. CC : The most distant point of the line Cd-Cr
3. Cd : The most posterior point of condylar head
4. GC : The most distant point of the line Go-Cd
5. Go : Gonion
6. Ag : Ante-gonion
7. MA : The most distant point of the line Me-Ag
8. Me : Menton
9. Id : Infradentale (labial side)
10. In : The lower insisor tip
11. Id' : Infradentale (lingual side)
12. Al' : The most distant point of the line Al-Id'
13. Al : The highest point of the mesial alveolar bone at the lower first molar
14. M₁ : The highest point of the mesiobuccal cusp of the lower first molar
15. M₃ : The highest point of the central cusp of the lower third molar

を、それぞれ座標軸 X, Y とした。計測点は、下顎骨の形態の特徴を表す 15 点を選び、各点から X 軸および Y 軸までの距離を 1 枚の X 線写真像について 2 回づつ行い、その計測値の平均値を座標値とした。

2. 実測長計測

座標分析法で得られた 15 点に加えて、点 Bi を定めて、実測長を計測した (Fig. 4, 5)。計測は、1/20 mm 盛りりのノギスで 5 回計測し、その平均値を実測長計測値とした。

3. 角度計測

側方頭部 X 線規格写真上で、Fig. 6 に示す 3 項目を計測した。計測は、精度 1/2 度の分度器で 5 回計測し、その平均値を角度計測値とした。

Fig. 4 Reference points and items for linear measurements of rat mandibular length.

Bi The alveolar base of the lower incisor

- ① Cd-Id: Mandibular length
- ② Go-Id: Mandibular body length
- ③ Al-Id': Length of lingual side of alveolar bone
- ④ Id'-M₃: Length of the lower dental arch
- ⑤ Cd-Bi: Distance from condylar head to the alveolar base of the lower incisor

Fig. 5 Reference points and items for linear measurements of rat mandibular height.

- ⑥ Cd-Go: Mandibular ramus height
- ⑦ Cd-Ag: Height of condylar head
- ⑧ Cr-Ag: Height of coronoid process
- ⑨ Al'-Me: Height of the central portion of alveolar bone

B. X 線学的観察

頭部より軟組織を剥離後下顎骨を摘出し、下顎骨舌側面をソフテックスフィルム (Softex film FR, 富士写真フィルム社) の撮影面上に密着させ、同時に Aluminium slope を貼って軟 X 線撮影を行った (Fig. 7)。撮影時の条件は、管電圧 28 kVp, 管電流 6 mA, 撮影時間 60 秒, 焦点-フィルム間距離 60 cm に一定した。一定条件下にて指定通りに現像、定着を行った後、軟 X 線写真像の肉眼的観察を行うとともに、マイクロフォトメーター (デンシトメーター PDS-15, コニカ社) を用いて骨塩量を測定した (Fig. 8)。測定に際しては、光束スリットを 0.1 mm/sec で測定部位上を透過させ、そこで得られたデータをレコーダー (マルチペンレコーダー R-50, コニカ社) に取り込み、チャートスピード 5 cm/min の設定で描出させた。測定時は、室内の照度をほ

Fig. 6 Reference points and items for angular measurements of rat mandible.

- ① AgMe<CdGo: Angle of mandibular plane to condylar head
- ② AgMe<CrGo: Angle of mandibular plane to coronoid process
- ③ CdGo<CdCr: Angle of condylar head to coronoid process

Fig. 7 Roentgenogram of rat mandible.

Fig. 8 Microphotometer.

Fig. 9 Arrow is scanning direction of alveolar bone and mentum.

(A magnification of alveolar bone of Fig. 7.)

ば一定にし、フィルムはマイクロフォトメーターのステージガラス上に常に密着させ、周囲の振動や、外部からの刺激などによりフィルムの位置が移動したり、測定値に影響しないように細心の注意を払った。測定法は石井(1986)³²⁾の方法を一部改変し、光束スリット幅 $10 \times 250 \mu\text{m}$ で行い、歯槽骨部、オトガイ部、下顎骨下縁部および角突起下縁部の骨上 $1,000 \mu\text{m}$ 幅の領域を scanning direction を $250 \mu\text{m}$ ずつ 5 回平行移動させて Fig. 9-11 に示す方法にて走査し、scanning pattern を描出した。5 回の scanning pattern のピーク値の平均値をその部位の骨塩量とした (Fig. 12-14)。

C. 下顎骨の圧縮による破砕強度試験

下顎骨の圧縮による破砕強度試験は、木村(1987)³³⁾の方法に準じ、咬合面から 6 mm を採取した試験片について、万能引張試験機 (TENSILON UTM-III-500, オリエンテック社) を用いて行った。試験片は $6 \times 6 \times 3 \text{ mm}$ の直方体に可及的に調整して試験に供し、クロスヘッ

Fig. 10 Arrow is scanning direction of the mandibular lower margin.

The masseter ridge which extends along the lateral surface and lower margin of mandible is found. (A magnification of Fig. 7.)

Fig. 11 Arrow is scanning direction of the lower margin of angular process.

(A magnification of angular process of Fig. 7.)

ドスピードは 2 mm/min とした。圧縮方向は、生体において生理的に力の加わる方向とした。圧縮試験により Fig. 15 のような荷重-変形曲線が得られたが、その最大荷重点を最大強さとして下顎骨の圧縮破砕強度を求めた。

以上の計測値は、各実験群ごとにその平均値および標準偏差を求め、平均値の差の有意性の検定には t 検定を用いた。

結 果

I. 飼料の圧縮破砕強度 (Table 1)

対照群の平均圧縮破砕強度は、 64.8 kg/cm^2 、練飼料群の平均圧縮破砕強度は 1.9 kg/cm^2 であった。

II. 体重

Fig. 12 Microphotogram of alveolar bone and mentum of rat mandible.

実験開始時の平均体重は、対照群が 40.8 g, 練飼料群が 40.5 g, 粉末飼料群が 40.3 g であり、以後、各群ともほぼ直線的な増加傾向を示した。飼育終了時の平均体重は、対照群が 343.3 g, 練飼料群が 351.6 g, 粉末飼料群が 325.8 g であった。飼育期間を通じて、対照群と実験群との間には有意差は認められなかった (Fig. 16)。

Ⅲ. 頭部 X 線規格写真計測

座標分析法, 実測長計測法ならびに角度計測法で得られた計測結果に基づいて、各群間における下顎骨の形態について比較し、検討を行った。

A. 座標分析

各計測点における対照群および実験群の平均座標値, 標準偏差および平均値の有意差の検定結果を Table 2 に示す。

Fig. 13 Microphotogram of the mandibular lower margin.

Cr: 対照群においては、深さ (X 成分) が 49.5 mm, 練飼料群が 48.9 mm, 粉末飼料群が 48.0 mm であり、対照群と実験群の間には有意差は認められなかった。高さ (Y 成分) については、対照群が 36.8 mm, 練飼料群が 34.9 mm, 粉末飼料群は 33.1 mm であった。対照群と比較して練飼料群は有意に小さな値を示し ($p < 0.05$), また、粉末飼料群も有意に小さな値を示した ($p < 0.01$)。

Cd: 深さは、対照群が 71.8 mm, 練飼料群が 72.0 mm, 粉末飼料群が 71.2 mm であり、対照群と実験群の間には有意差は認められなかった。高さについては、対照群が 26.8 mm, 練飼料群が 25.3 mm, 粉末飼料群が 24.5 mm であった。対照群と比較して粉末飼料群は有意に小さな値を示した ($p < 0.05$)。

Go: 深さは、対照群が 75.0 mm, 練飼料群が 72.7 mm,

Fig. 14 Microphotogram of the lower margin of angular process.

粉末飼料群が 72.6 mm であった。対照群と比較して粉末飼料群が有意に小さな値を示した ($p < 0.05$)。高さについては、対照群が - 5.1 mm, 練飼料群が - 5.1 mm, 粉末飼料群が - 4.8 mm であった。対照群と実験群との間にはそれぞれ有意差は認められなかった。

その他の計測点については、対照群と実験群の間に有意差は認められなかった。

以上の結果をふまえて、オトガイ孔を原点とし、下顎下縁平面に平行および垂直な直線を座標軸 X, Y として、各群の下顎骨形態を比較する目的で計測点を重ね合わせて検討した (Fig. 17)。それによると、形態的な変化は主に下顎枝部に顕著に現れていた。すなわち、飼料の強さの減少とともに筋突起は水平方向とともに垂直方

Fig. 15 Compressive test of rat mandible.

向への減少を示し、関節突起は水平方向の変化はほとんど認められないが垂直方向に大きな減少傾向が認められた。一方、下顎角部においては垂直方向の変化はほとんど認められないが、水平方向への減少が著しかった。その他の計測点においては変化はほとんど認められなかった。

B. 実測長計測

1. 長さに関する計測 (Table 3)

Cd-Id: 下顎骨長を示す Cd-Id は、対照群が 88.22 mm, 練飼料群が 88.16 mm, 粉末飼料群が 86.86 mm であった。対照群と実験群の間には有意差は認められなかった。

Go-Id: 下顎骨体長を示す Go-Id は、対照群が 83.81

Table 1 Types of diets and their compressive strength

	[kg/cm ²]		
	Control group	Kneaded diet group	Powdered diet group
Compressive strength (S.D.)	64.8 (5.9)	1.9 (0.2)	---

Fig. 16 Average gain in weight of the rats.

Fig. 17 Comparison of the mandibular form in the three groups at the end of the experiment (six weeks after the beginning of the experiment).

Table 2 Measurements of each reference point on a coordinate
(The roentgenographic landmarks of lateral cephalometry is mental foramen.)

[mm]

	Control group		Kneaded diet group		Powdered diet group	
	X	Y	X	Y	X	Y
	Mean (S.D.)	Mean (S.D.)	Mean (S.D.)	Mean (S.D.)	Mean (S.D.)	Mean (S.D.)
1. Cr	49.5 (2.7)	36.8 (1.7)	48.9 (2.9)	34.9 (1.3) *	48.0 (2.6)	33.1 (1.2) **
2. CC	43.9 (2.7)	26.8 (2.4)	44.8 (2.8)	25.5 (1.9)	44.2 (1.4)	25.3 (1.5)
3. Cd	71.8 (2.6)	26.8 (1.9)	72.0 (1.8)	25.3 (1.6)	71.2 (1.6)	24.5 (1.6) *
4. GC	60.4 (2.9)	4.5 (0.6)	60.3 (1.7)	4.3 (1.5)	59.4 (1.5)	4.0 (1.1)
5. Go	75.0 (2.1)	-5.1 (1.1)	72.7 (2.4)	-5.1 (1.4)	72.6 (1.7) *	-4.8 (1.3)
6. Ag	60.6 (1.7)	-14.1 (0.5)	60.5 (2.0)	-14.1 (0.6)	60.5 (1.5)	-14.0 (0.5)
7. MA	32.8 (1.7)	-9.1 (0.8)	32.9 (1.6)	-9.2 (0.4)	32.2 (1.1)	-9.1 (0.5)
8. Me	1.5 (1.0)	-14.1 (0.7)	1.4 (0.9)	-14.1 (0.5)	1.3 (0.7)	-14.0 (0.5)
9. Id	-8.8 (1.1)	-9.2 (1.0)	-9.4 (1.3)	-9.1 (1.0)	-9.1 (0.9)	-8.5 (0.9)
10. In	-35.5 (1.5)	24.8 (1.4)	-34.8 (2.3)	25.1 (1.8)	-34.9 (1.2)	26.1 (0.8)
11. Id'	-16.8 (0.9)	8.6 (0.6)	-16.6 (1.5)	8.8 (1.2)	-17.2 (1.0)	8.9 (0.7)
12. AI'	-0.9 (0.7)	2.6 (0.4)	-0.9 (0.6)	2.3 (0.5)	-1.2 (0.4)	2.3 (0.4)
13. Al	5.8 (0.7)	10.2 (0.5)	5.7 (1.1)	9.9 (0.6)	5.5 (0.6)	9.9 (1.0)
14. M ₁	7.6 (0.6)	16.0 (0.5)	7.5 (1.3)	16.0 (0.5)	7.3 (0.7)	15.8 (0.5)
15. M ₃	27.0 (0.9)	14.6 (0.9)	27.1 (1.2)	14.2 (1.0)	26.2 (0.7)	14.0 (1.0)

** p<0.01 * p<0.05

mm, 練飼料群が 82.00 mm, 粉末飼料群が 81.83 mmであった。対照群と実験群との間には有意差は認められなかった。

AI-Id': 上部歯槽骨長を示す AI-Id' は, 対照群が 22.64 mm, 練飼料群が 22.33 mm, 粉末飼料群が 22.58 mmで

あった。対照群と実験群の間には有意差は認められなかった。

Id'-M₃: 下顎歯列弓長径を示す Id'-M₃ は, 対照群が 44.23 mm, 練飼料群が 44.05 mm, 粉末飼料群が 43.78 mmであった。対照群と実験群との間には有意差は認められな

かった。

Cd-Bi：下顎切歯歯槽基底長を示す Cd-Bi は対照群が 30.20 mm，練飼料群が 30.09 mm，粉末飼料群が 29.69 mmであった。対照群と実験群との間には有意差は認められなかった。

2. 高さに関する計測 (Table 4)

Cd-Go：下顎枝高を表す Cd-Go は，対照群が 32.07 mm，練飼料群が 30.34 mm，粉末飼料群は 29.39 mmであった。対照群と比較して練飼料群は有意に小さな値を示した ($p < 0.05$)，また，粉末飼料群も有意に小さな値を示した ($p < 0.01$)。

Cd-Ag：顎関節突起高を示す Cd-Ag は，対照群が 42.39 mm，練飼料群が 40.94 mm，粉末飼料群は 39.98 mmで

あった。対照群と練飼料群との間においては有意差は認められなかった。一方，粉末飼料群は有意に小さな値を示した ($p < 0.05$)。

Cr-Ag：筋突起高を示す Cr-Ag は，対照群が 52.21 mm，練飼料群が 50.26 mm，粉末飼料群は 48.76 mmであった。対照群と比較して練飼料群は有意に小さな値を示した ($p < 0.05$)，また，粉末飼料群も有意に小さな値を示した ($p < 0.01$)。

AI'-Me：下顎歯槽骨中央部における高さを示す AI'-Me は，対照群が 16.84 mm，練飼料群が 16.56 mm，粉末飼料群が 16.50 mmであった。対照群と実験群との間には有意差は認められなかった。

3. 角度計測 (Table 5)

Table 3 Linear measurements of rat mandibular length

[mm]

	Control group	Kneaded diet group	Powdered diet group
Cd-Id (S.D.)	88.22 (3.00)	88.16 (2.03)	86.86 (2.39)
Go-Id (S.D.)	83.81 (3.39)	82.00 (3.07)	81.83 (2.20)
Al-Id' (S.D.)	22.64 (0.97)	22.33 (1.01)	22.58 (1.00)
Id'-M ₃ (S.D.)	44.23 (1.05)	44.05 (1.06)	43.78 (1.25)
Cd-Bi (S.D.)	30.20 (2.07)	30.09 (1.21)	29.69 (1.05)

Table 4 Linear measurements of rat mandibular height

[mm]

	Control group	Kneaded diet group	Powdered diet group
Cd-Go (S.D.)	32.07 (1.22)	30.34* (1.02)	29.39** (0.64)
Cd-Ag (S.D.)	42.39 (1.62)	40.94 (1.73)	39.98* (1.94)
Cr-Ag (S.D.)	52.21 (1.63)	50.26* (1.69)	48.76** (2.03)
AI'-Me (S.D.)	16.84 (0.42)	16.56 (0.52)	16.50 (0.43)

** $p < 0.01$ * $p < 0.05$

Table 5 Angular measurements of rat mandible

	[degree]		
	Control group	Kneaded diet group	Powdered diet group
AgMe $\angle$ CdGo (S.D.)	84.1 (2.2)	88.9** (3.2)	87.0 (3.3)
AgMe $\angle$ CrGo (S.D.)	59.0 (2.9)	59.6 (2.8)	56.6 (3.1)
CdGo $\angle$ CdCr (S.D.)	120.1 (4.1)	113.4** (3.5)	113.6* (5.6)

**p<0.01 *p<0.05

Fig. 18 Roentgenogram of alveolar bone and mentum.
Control group.

AgMe $\angle$ CdGo：下顎角を示す AgMe $\angle$ CdGo は、対照群が 84.1°，練飼料群が 88.9°，粉末飼料群は 87.0° であった。対照群と比較して練飼料群が有意に大きな値を示した (p< 0.01)。一方，粉末飼料群との間には有意差は認められなかった。

AgMe $\angle$ CrGo：筋突起角を示す AgMe $\angle$ CrGo は、対照群が 59.0°，練飼料群が 56.0°，粉末飼料群が 56.6° であった。対照群と実験群との間に有意差は認められなかった。

CdGo $\angle$ CdCr：関節・筋突起角を示す CdGo $\angle$ CdCr は、対照群が 120.1°，練飼料群が 113.4°，粉末飼料群は 113.6° であった。対照群と比較して練飼料群が有意に小さな値を示し (p< 0.01)，また，粉末飼料群も有意に小さな値を示した (p< 0.05)。

IV. X 線学的所見

A. 軟 X 線写真による肉眼的観察

1. 歯槽骨部およびオトガイ部

Fig. 19 Roentgenogram of alveolar bone and mentum.
Kneaded diet group.

Fig. 20 Roentgenogram of alveolar bone and mentum.
Powdered diet group.

Fig.21 Roentgenogram of the mandibular lower margin.
Control group.

Fig.24 Roentgenogram of the lower margin of angular process.
Control group.

Fig.22 Roentgenogram of the mandibular lower margin.
Kneaded diet group.

Fig.25 Roentgenogram of the lower margin of angular process.
Kneaded diet group.

Fig.23 Roentgenogram of the mandibular lower margin.
Powdered diet group.

Fig.26 Roentgenogram of the lower margin of angular process.
Powdered diet group.

歯槽骨部およびオトガイ部の軟 X 線写真についてみると、対照群における歯槽骨はほぼ均一な厚さをもって切歯を覆っている。オトガイ部では、オトガイ隆起の発達が顕著であり、全体的に骨梁が規則的に緻密に配列し、X 線透過性の低い像として観察された。練飼料群では、歯槽骨においては、対照群と比較してやや厚さが減少し切端部方向に移行するにつれて厚さが減少する傾向が認められた。オトガイ部では、対照群と比べてやや厚さが減少していた。全体的に骨梁の配列にわずかながら乱れが認められ、対照群と比較すると骨梁の数もやや減少していた。粉末飼料群では、歯槽骨部においては切端部方向に移行するにつれて歯槽骨の厚さが減少する傾向がより顕著になった。オトガイ部においては、オトガイ隆起の発達が対照群と比較して、明らかに減少し、全体的に骨梁の数の減少に加えて、配列の乱れも認められ、結果として X 線透過性の高い像として観察された (Fig. 18-20)。

2. 下顎下縁部

観察部位としては、下顎骨下縁部および角突起下縁部について行った。対照群においては、下顎骨下縁部および角突起下縁部とも骨梁は緻密に配列し、X 線透過性の低い像として観察された。下顎骨下縁部においては咬筋隆起の起始部から移行部にかけて、明瞭に描出されていた。練飼料群においては、骨梁の緻密な像が対照群に比べてやや減少していた。粉末飼料群においては、骨梁

の配列に乱れが認められ、骨梁の数も対照群と比べると減少し、全体的に X 線透過度が高い像として観察された。下顎骨下縁部から起始する咬筋隆起は対照群と比べるとやや不明瞭な像として観察された。 (Fig. 21-26)。

B. 骨塩量測定

1. 歯槽骨部における骨塩量 (Table 6)

歯槽骨部における骨塩量は、対照群が 1.72 mmAl, 練飼料群が 1.42 mmAl, 粉末飼料群が 1.44 mmAl であった。対照群と比較して練飼料群, 粉末飼料群とも有意に低値を示した ($p < 0.05$)。

2. オトガイ部における骨塩量 (Table 7)

オトガイ部における骨塩量は、対照群が 1.21 mmAl, 練飼料群が 1.01 mmAl, 粉末飼料群は 0.81 mmAl であった。対照群と比較して練飼料群は有意に低値を示し ($p < 0.05$)、また、粉末飼料群も有意に低値であった ($p < 0.01$)。

3. 下顎骨下縁部における骨塩量 (Table 8)

下顎骨下縁部における骨塩量は、対照群が 1.55 mmAl, 練飼料群が 1.37 mmAl, 粉末飼料群は 1.22 mmAl であった。対照群と練飼料群との間では有意差は認められなかった。一方、粉末飼料群は有意に低値を示した ($p < 0.05$)。

4. 角突起下縁部における骨塩量 (Table 9)

角突起下縁部における骨塩量は、対照群が 0.50 mmAl, 練飼料群が 0.44 mmAl, 粉末飼料群は 0.29 mmAl であった。

Table 6 Roentgenographic bone density of the alveolar bone

[mmAl]

	Control group	Kneaded diet group	Powdered diet group
Aluminium equivalent value (S.D.)	1.72 (0.11)	1.42* (0.07)	1.44* (0.10)

* $p < 0.05$

Table 7 Roentgenographic bone density of the mentum

[mmAl]

	Control group	Kneaded diet group	Powdered diet group
Aluminium equivalent value (S.D.)	1.21 (0.09)	1.01* (0.04)	0.81** (0.07)

** $p < 0.01$ * $p < 0.05$

Table 8 Roentgenographic bone density of the mandibular lower margin
[mmAl]

	Control group	Kneaded diet group	Powdered diet group
Aluminium equivalent value (S.D.)	1.55 (0.18)	1.37 (0.12)	1.22* (0.09)

*p<0.05

Table 9 Roentgenographic bone density of the lower margin of angular process
[mmAl]

	Control group	Kneaded diet group	Powdered diet group
Aluminium equivalent value (S.D.)	0.50 (0.06)	0.44 (0.07)	0.29** (0.02)

**p<0.01

Table 10 Compressive strength of rat mandible

[kgf/cm²]

	Control group	Kneaded diet group	Powdered diet group
Compressive strength (S.D.)	126.1 (8.1)	100.7** (5.2)	69.3** (8.2)

**p<0.01

た。対照群と練飼料群との間においては有意差は認められなかった。一方、粉末飼料群は有意に低値であった (p<0.01)。

V. 下顎骨の圧縮による破砕強度 (Table 10)

下顎骨の圧縮による破砕強度は、対照群は 126.1 kgf/cm²、練飼料群は 100.7 kgf/cm²、粉末飼料群は 69.3 kgf/cm² であった。対照群と比較して練飼料群、粉末飼料群とも有意に低値を示した (p<0.01)。

考 察

近年、日本の食生活は、食品加工技術、調理技術、食品保存技術の飛躍的な向上に伴い、生命維持のための食から、楽しむための食へとその性格を大きく変えた³⁴⁾。そしてこの食生活の変化を細谷ら (1986)¹⁴⁾ は3つの特徴で表している。第一は、栄養素が豊かになり容易に摂

取できるようになったこと、第二に加工食品の増加に代表される食物の軟化が顕著であり、あまり咀嚼しなくてもすむようになったこと、第三に、このような化学的、物理的な変化に加えて、食生活のパターンや摂取の仕方が非常に変化したことである。そしてこれら一連の変化は世界的にも、また歴史的にも例を見ないほど急激なものであると述べている。このような変化は、とくに成長発育期にある小児に対して多大な影響を及ぼすといわれ、井上 (1980)¹⁶⁾ は、人類の進化の過程において、食文化の変遷が咀嚼器官を退化させる要因になり得ると指摘し、幼稚園児の咀嚼様式を研究した横溝 (1992)³⁵⁾ は、現代の幼稚園児の約6割が咀嚼行動が未熟であるか、または咀嚼リズムの不安定化があるいわゆる噛めない子であると報告している。木村 (1989)¹⁷⁾ はこれら一連の問題を総合的に検索し、6歳児の下顎底部皮質骨の

厚さは1974年では3.76 mm, 1989年には3.60 mmと薄くなる傾向がみられ, 同様に下顎枝長, 下顎骨体長, 下顎長のいずれの項目も小さくなる傾向にあり, 加えて, 幼児期の咬合力も減少傾向にあると述べている。

以上の如く臨床的に食生活の変化, 食物の軟化が成長発育に及ぼす影響は指摘されているが, これらの現象を裏付けるための実験的研究はそのほとんどが主として形態的な検索によるものであった¹⁸⁻²⁶⁾。

一方, 骨の内部構造や骨の変化, 骨の強度といった面についての研究は僅少であり³¹⁾, 食物の軟化が下顎骨の形態変化や骨の変化, 強度といった面に及ぼす影響を総合的に検索する必要がある。そこで本研究では, 食物の軟化がラットの成長期下顎骨に及ぼす形態的变化, 骨変化, 強度変化を及ぼすかを検索した。

I. 実験方法

実験動物については今までに, ネコ⁴⁾, イヌ⁶⁾, サル¹⁰⁾などが用いられてきたが, とくにラットに関しては, 成熟期に達する期間が短く飼育が容易で, 1回の実験で多数飼育が可能であるなどの理由で多くの実験に供されている。なかでも成長発育を検索する研究においては, 遺伝的要因が成長発育に対して大きな影響を及ぼす因子となり得るとされているが^{1, 2)}, ラットの場合, 純系が得やすく個体間の変動が他の実験動物に比べて少ない。さらに, 花田 (1967)³⁶⁾ や関本ら (1977)³⁷⁾ によって, 顎顔面の成長発育に関する実験的研究の基準 (対照) が詳細に報告されていることもあり, 本研究には, 生後3週齢のWistar系雄ラットを使用した。

実験には, 固形飼料, 粉末飼料, そして粉末飼料を水道水で練和し, 室温で再硬化させた練飼料を用いた。飼料の強度の違いによる成長発育に対する影響を調べる研究では, 固形飼料と泥状に練った飼料を与えた研究^{18, 20, 21, 24, 25)}, 固形飼料と粉末飼料を与えた研究^{19, 23)}, 固形飼料と泥状飼料および泥状飼料を6日間摂取後1日間固形飼料を与えた研究²²⁾, 固形飼料と泥状飼料および液状飼料を与えた研究²⁶⁾などがある。固形飼料と粉末飼料あるいは泥状飼料の中間に位置する飼料としては, 山本 (1989)²⁷⁾, 首藤 (1992)²⁸⁾, 竹中 (1989)²⁹⁾, 中園 (1991)³⁰⁾, 木村ら (1991)³¹⁾ が用いている。今回使用した練飼料は, 粉末飼料を約1/2量の水道水で練和することにより, 形態が整え易くなり, また24時間室温で乾燥させても, 極端な変形やひび, 乾燥による脆弱化を避けることができた。また, 24時間毎に新しい飼料と交換したことにより, 飼料の変質や腐敗はなかった。固形飼料, 練飼料, 粉末飼料とも同一成分の飼料を

用いることにより, 栄養面に対する条件は一定であり, 栄養的条件の差異による影響はほとんどないものと考えられる。各群の飼料の強度は, 圧縮による破砕強度で, 固形飼料群が64.8 kg/cm²であるのに対して, 練飼料群は1.9 kg/cm²で, 固形飼料群の強さの約1/30である。柳沢ら (1985)¹⁵⁾ によれば, 官能検査を併用して食品のかたさを分類し, 日常食品の中でかたいと感じる食品と非常にやわらかいと感じる食品は圧縮強さの差も大きく, 圧縮法による測定で約30倍以上の差があると報告している。もちろん, ヒトとラットの食性や咀嚼様式, あるいは測定の方法の違いから単純に比較はできないが, 実験的研究において, 食物の軟化による影響を検討する上では, 練飼料群が対照群の飼料の強度の約1/30であることは妥当なものであると考えられる。

実験的研究に嚙歯目であるラットを用いるにあたっての, 切歯の摩耗とその調整本能について考察する。本来嚙歯目であるラットは, 切歯の伸びすぎをグライディングにより本能的に摩耗させる。Wattら (1951)¹⁸⁾ は, 軟らかい飼料を与えたラットでは, 飼育ケージを噛んだり, 常に切歯の咬耗を促すように自ら調節するのであらうと報告している。菊田 (1985)²⁴⁾ は, ラットの切歯の咬耗習慣による調節行動が顎の発育に及ぼす影響を研究し, ラットの上下切歯が常に咬合しないように人為的に削合したラットとそうでないラットとの成長発育程度と比較しているが, 切歯削合により成長発育程度に変化は認められなかったと報告している。本研究においては, 対照群, 練飼料群, 粉末飼料群とも実験条件として飼料の強度のみを変化させ, ケージ, 給餌箱など, ラットをとりまく他の環境条件を同一にすることにより, 各群間にみられる下顎骨の成長発育の変化は主に臼歯部における飼料の粉碎による咀嚼量の違いによるものと考えられる。以上のことより, 嚙歯目であるラットのグライディングに対する考慮はとくに必要ないものと考えられる。

II. 体重

ラットの体重については, 80日齢頃まではほぼ直線的に推移し, それ以後は傾斜は緩やかとなるとした花田 (1967)³⁶⁾ の報告, 性成熟期に相当する生後11週目まで急速に増加するとして関本ら (1977)³⁷⁾ の報告などがある。今回の実験においてもラットの成長発育期にある実験期間を通して対照群, 実験群ともほぼ直線的に推移した。体重は, 体長とも相関があるといわれ³⁶⁾, 全身の成長発育の程度を知る指標として用いられている。本実験においては, 平均体重は, 飼育終了時には対照群が

343.3 g, 練飼料群が 351.6 g, 粉末飼料群が 325.8 g であり, 各群間に有意差は認められなかった. 以上のことから, 各群のラットの全身的な発育状態はほぼ同程度であったものと思われる.

Ⅲ. 頭部 X 線規格写真計測

A. 計測方法

ラットの下顎骨の形態を比較検討する目的で, 側方頭部 X 線規格写真撮影法を用いた. 実験的研究において, 下顎骨の形態を検索する手段としては, その多くが下顎骨を頭蓋部より摘出し, 下顎骨の単体の乾燥標本として直接的に計測を行うか^{4, 6, 8, 9, 18-20, 23)}, あるいは X 線像として計測に供している^{3, 5, 7, 11, 26)}. 本研究では, 頭部を正中にて二分割し, 左側頭部内に包含される下顎骨を人為的な外力や乾燥によるひずみ等の影響を可及的に排除して形態計測を試みた. しかし, この方法の限界として考えられることは, 下顎骨の横方向の成長発育程度, すなわち, 正中矢状面からの筋突起や関節突起の距離といった三次元的な情報の乏しさが挙げられる. この問題の解決方法としては, 切断する以前の頭蓋骨の頭頂方向からの X 線規格写真撮影法を応用するなどが考えられ, 今後の検討課題としたい. したがって, 今回は側方向からの下顎骨の形態を中心に検討した.

座標分析を行うにあたって, 形態を比較する上での原点については, 顎顔面頭蓋の成長発育を分析した研究でいくつかの基準点がある. Simpson (1966)⁹⁾ や Whitley ら (1966)²¹⁾ は, 基底蝶形骨の近遠心的および上下の中点をヒトのトルコ鞍にあたる点として規定し, 花田 (1967)³⁶⁾ は基底蝶形骨と前蝶形骨との縫合部, すなわち蝶形骨間軟骨結合の最下点を基準点としている. これらの点は, 側方からの頭蓋骨全体の成長発育を検索するための研究で用いられている基準点であり, 本研究のように下顎骨の形態を比較する目的でこれらの基準点を用いた場合, 下顎骨の外部に基準点をおくことになるため, 採用しなかった. 本研究においては, 第一に下顎骨内部に基準点を設けるということ, 第二に下顎骨の成長発育に直接的な影響を受けない点であること, 第三に設定にあたっては誤差を生ずる恐れが極力小さく明確に明示できる点であることなどを考慮した. Arena ら (1979)³⁸⁾ によれば, オトガイ孔を含む下顎骨体内部, とくに下歯槽管周囲は比較的形態的に安定しているとされ, Vilmann ら (1985)³⁹⁾ は, オトガイ孔を含む下顎骨体部の成長は, 筋機能等の影響を比較的受けないとしている. さらに Moss (1960)⁴⁰⁾ は, 成長発育過程におけるオトガイ孔の位置は比較的安定しており, 下顎骨の

成長発育の程度を検索する上において一つの指標となり得ると報告している. 以上のことにより, 本研究ではオトガイ孔を下顎骨形態計測の基準点とした.

B. 側方頭部 X 線規格写真計測

下顎骨の成長要因については, 古くから多くの研究者によりさまざまな説が唱えられてきた. Sicher (1965)⁴¹⁾ や Scott (1967)⁴²⁾ は, 下顎骨の growth center としての下顎頭軟骨を重要視し, 遺伝因子がこの部位を制御すると考えた. これに対して, Moss (1960)⁴⁰⁾ や Moss ら (1968)⁴³⁾ は, 下顎骨の成長は, 主として functional matrix (機能母体) の成長と働きにより決定されるとした Ideas of the functional matrix (機能母体説) を唱えた. すなわち, 骨成長の制御は, 局所的後生因子か, 環境因子のいずれかによるとしている. これらに対し, 遺伝因子, 後生因子, 環境因子のそれぞれについて納得のいく部分もあるが, 説明できない部分もあるとして 3 つの因子を統合して新しい概念を提唱したのが Van Limbogh (1970)¹⁾ である. それによれば, 遺伝因子, 後生的因子, 環境因子のいずれもが否定しえない重要な要素であると考えている. さらに Moyer (1972)²⁾ は, それに加えて, 下顎頭は環境因子に大きく影響されるとした.

本研究のこの項目では, 局所的環境因子であるところの食物の軟化が, 下顎骨の形態にいかなる影響をあたえるかを検索したものであるが, 過去の研究報告を見るに, 食物の軟化により, 下顎骨の形態的变化は主として, 下顎枝部にその影響がみられるとした報告が多い^{18-20, 24, 25)}. Watt ら (1951)¹⁸⁾ は, ラットの軟食飼育実験において軟食飼育ラットの下顎骨の重量および体積の減少を認め, 加えて, 下顎枝部の面積の減少を報告し, Barber ら (1963)¹⁹⁾ は, 軟食飼育は, ラットの下顎関節部の成長に影響を及ぼし, 粉末飼料群のラットの下顎関節突起部の面積は固形飼料群のそれと比べ有意に小さかったと報告している. 本研究においては, Fig. 17 に示す如く重ね合わせ図でみた全体像としては, 形態的な変化がとくに下顎枝部に顕著に現れていた. すなわち, 練飼料群, 粉末飼料群は, 対照群と比べて筋突起, 角突起の縮小化が認められ, 下顎枝部の成長量が対照群と比べてやや劣る傾向が認められた. これらの結果は, 上記の研究結果^{18, 19)} とほぼ一致した所見であると考えられる.

次に下顎骨の各部の成長量について下顎骨を筋突起部, 関節突起部, 下顎角部, 下顎骨体部および歯槽突起部の 5 つのブロックに分けて以下各部位の変化を述べる.

まず、筋突起部についてであるが、本研究では、座標分析結果より練飼料群、粉末飼料群ともに座標値 Cr の高さの減少が認められた。実測長計測結果と併せて考えると、筋突起高を示す Cr-Ag の短縮が認められた練飼料群、粉末飼料群とも座標値 Ag の高さの変化がほとんどないことから、筋突起部の垂直方向への減少が、筋突起高を低下せしめたと考えられ、飼料の強度の減少が筋突起の成長発育に影響を及ぼしたと考えられる。食物の軟化が筋突起に対していかなる影響を与えるかという研究報告はほとんど見られないが、筋突起の正常な発育のためには、側頭筋の筋機能が重要な役割を演じることは、側頭筋切除の実験から明らかにされており^{3,4)}、筋突起は側頭筋の直接付着部位であることから、この変化が側頭筋の筋機能による何らかの影響を受けている可能性が考えられる。

顎関節部については、座標分析の結果から粉末飼料群に座標値 Cd の高さの減少が認められ、実測長計測結果より顎関節突起高を示す Cd-Ag および下顎枝高を示す Cd-Go の短縮がともに粉末飼料群に認められた。これは座標値 Ag, Go の高さにはほとんど変化が認められなかったことより、関節突起の垂直方向への成長の減少によるものと思われる。山本 (1989)²⁷⁾、首藤 (1992)²⁸⁾、木村ら (1991)³¹⁾ の研究においても、固形飼料群に対し軟食飼育群のラットの下顎枝高は有意に低値であったと報告しており、本研究の結果と一致している。伊藤ら (1982)²³⁾ は、軟食飼育によるマウスの継代実験を行っているが、その中で、第二世代以降から下顎枝高の低下は認められたが、第一世代間での比較では有意差は認められなかったとしている。これは、実験方法や計測方法の違い、あるいは動物種の違い等もあって一概に比較はできないが、関節突起部は、他の下顎枝部と比べて食物の軟化による影響が比較的弱く現れる可能性もあると考えられる。

下顎角部については、座標分析結果より粉末飼料群の座標値 Go の深さの減少が認められた。ラットの軟食飼育実験における下顎角部の成長量に関しては、Moore (1965)²⁰⁾ や Kiliaridis ら (1985)²⁵⁾ も、等しく軟食飼育群の下顎角部の成長の劣化を認めており、本研究の結果と一致した。下顎角部の成長は咬筋と内側翼突筋の筋機能の影響を顕著に受ける部位であることが知られているが⁵⁻⁹⁾、本研究の結果では、下顎角部の成長量が食物の軟化により変化したこと、下顎角部に付着する咀嚼筋群の機能の変化による何らかの影響を示唆するものである。下顎角を示す $AgMe \angle CdGo$ についてみると、本

研究の結果からは対照群との比較において練飼料群に有意差が認められ、下顎角が開大した所見が認められた。しかし粉末飼料群との比較においては有意差は認められなかった。これは、粉末飼料群における座標値 Cd の深さを示す値が減少したためであると考えられ、菊田 (1985)²⁴⁾ のラットの軟食飼育実験において、軟食飼育群のラットの下顎角が開大したとする所見とは一致しない。伊藤ら (1982)²³⁾ は、マウスによる軟食飼育継代実験において、第一世代間における下顎角の比較においては有意差は認められなかったとしているが、本研究も飼料の強度の減少により下顎角の開大は認められなかった。これは、下顎角部および関節突起部の成長量、とくに深さに対する成長量の相互関係により下顎角が示されるため必ずしも同一傾向を示さないためであると考えられる。

一方、下顎骨体部および歯槽突起部における形態的变化は、座標分析結果、実測長計測結果からほとんど認められなかった。下顎骨体部と歯槽突起部は直接的に筋の付着する部位ではないために咀嚼筋による影響が少なかったとも考えられるが、下顎骨体部および歯槽突起部は、二次的に咬合圧を受けることが考えられることから¹⁴⁻¹⁷⁾、本研究の結果のみで一概にこれらの部位は飼料の強度の変化により全く影響を受けなかったと断定することはできない。

Horowitz ら (1951)³⁾ はラットの、Avis (1959)⁴⁾ はネコの側頭筋の切除を行い、筋突起部の形態の縮小または消失を認め、神田 (1969)⁶⁾ はイヌの咬筋の切断を、Horowitz ら (1955)⁷⁾ はラットの咬筋の切除を、Simpson (1966)⁹⁾ はラットの内側翼突筋の切除を、Avis (1961)⁸⁾ はラットの咬筋および内側翼突筋の切除を行い、ともに下顎角部の成長劣化や消失を認めている。また、咀嚼筋支配神経を切断した実験的研究^{11,12)} においても下顎枝部の形態に著しい変化を認めている。そしてこれら一連の研究により、下顎骨、とくに下顎枝部の成長発育に咀嚼筋の機能は極めて大きな影響を与えることが示されている。本研究が食物の軟化による、より自然な環境下での実験であるため、筋の切除や神経の切断といった前述の研究とは一概に比較はできないが、軟食飼育したラットの咀嚼筋は、固形飼料で飼育したラットの咀嚼筋と比べ、重量が低下したとする報告や^{20,22,24)}、咀嚼筋の内部構造が弱体化したとする報告^{44,45)}、咀嚼筋機能が低下したとする報告もあり²¹⁾、これらを合わせて考えると、飼料の強度の違いにより、咀嚼筋機能に変化が生じ、それらの作用の違いから、直接的な筋付着部位で

ある筋突起や下顎角部の成長に大きく影響するものと推察される。一方、関節突起部については、深沢ら(1982)⁵⁾は咀嚼筋切除を行ったラットの下顎骨の成長発育についての実験的研究の中で、関節突起部の成長は、咀嚼筋機能の間接的作用に影響されるものの、その影響は筋突起や下顎角部に対する咀嚼筋機能ほどのものではないと述べている。咀嚼筋を切除し咀嚼筋機能のほとんどを排除した環境下での研究と、飼料の強度を変化させるのみでの自然な環境下での本研究とを同列に論じられないので、これもまた推論の域を脱し得ないが、食物の軟化により咀嚼筋機能が低下し、関節突起に対しては間接的にその影響が及んだことにより、関節突起の成長が変化したと考えるのが妥当であろう。

以上の結果をまとめると、下顎骨における形態の変化は主に下顎枝部において顕著であった。このことより、食物の軟化という局所的環境因子の変化は、下顎骨に対して、局所的、とくに咀嚼筋の直接付着部位である突起部において形態的な影響を及ぼし得ることが示唆された。

IV. X線学的評価

骨は常に代謝を繰り返す、また、内部の状態はさまざまな因子に常に左右されており、下顎骨においてもこの骨改造は例外ではない^{33, 46)}。骨の変化を定量的に評価し、判断する指標の一つに骨塩量の測定が挙げられる。骨塩量の測定は骨萎縮度の評価法としても多用され、骨粗鬆症をはじめとする代謝性骨疾患の診断や、治療経過の判定に用いられている⁴⁷⁻⁵⁰⁾。一方、歯科の分野においても牧ら(1993)⁵¹⁾が小児の成長期下顎骨における骨塩量に関する研究を行い、成長にともなう骨塩量の有意な増加を報告している。

本研究では、骨塩定量法の一つであるMD法(Microdensitometry method)を採用した。MD法は、X線撮影を基礎とし、アルミニウムスロープの濃度と測定目的部位のX線フィルム濃度を対比して評価する方法であり、アルミニウム当量に換算することにより、絶対評価が可能のため、各骨間や各組織間などの比較が容易であるという利点を有する⁵²⁾。一方、軟組織の存在によりX線透過性が変動する可能性が指摘されているが⁵⁰⁾、本研究においては、下顎骨を軟組織より摘出し、骨単体として実験に供したため、より厳密に骨塩量が測定できたものと考えられる。

本研究では、食物の軟化が下顎骨骨塩量にいかなる影響を及ぼすかを検索した。まず、歯槽骨部における骨塩量は、対照群と比較して練飼料群、粉末飼料群とも有意

に低値を示した。また、オトガイ部においても同様の結果が得られた。肉眼的観察においては、粉末飼料群のX線透過性が高いことから、骨の緻密性に欠ける所見がみられた。ラットの下顎骨における骨塩量を計測した研究は極めて少ないが、石井(1986)³²⁾は、実験的に骨粗鬆症を惹起させたラットにおける実験的研究において、歯槽骨部のX線写真濃度から測定される骨塩量の減少は骨梁の配列の乱れと骨梁数の減少による内部構造の変化によるものであり、骨の内部の状態を推測するには最良の方法であると述べている。山本(1989)²⁷⁾、首藤(1992)²⁸⁾、木村ら(1991)³¹⁾は、ラットの軟食飼育実験において飼料の強度の減少に伴い、歯槽骨部の骨塩量の低下を報告しており、本研究の結果はこれらの実験と一致した所見を呈した。一方、実験的研究において、ラットの下顎下縁における骨塩量を計測した研究は皆無であるが、本研究では、下顎骨下縁部および角突起下縁部について各群の骨塩量を計測した。それによると下顎骨下縁部および角突起下縁部ともに対照群と比較して、粉末飼料群が有意に低値を示した。肉眼的所見においても粉末飼料群は対照群と比べて全体的にX線透過度が高く、骨の緻密性に欠ける所見を呈していた。ラットの下顎骨において、下顎骨下縁部は咬筋隆起の起始部でもあり、この部位は咬筋深部の付着部位でもある^{8, 53)}。また、角突起下縁部は咬筋浅前部および内側翼突筋の付着部位でもある^{8, 53)}。咀嚼筋の直接付着部位における骨塩量の低下は、食物の軟化による咀嚼筋の弱体化^{20-22, 24, 44, 45)}による影響が多分に関与しているものと推察される。

骨に対する力学的因子の代表的なものとして荷重負荷が挙げられ^{54, 55)}、全身的な運動量の程度と荷重骨である脊椎骨の骨塩量には相関関係があり、全身運動が骨塩量を増加させる可能性があるとした報告^{56, 57)}や、無重力下状態に曝される宇宙飛行では、宇宙飛行士の荷重骨の骨塩量が低下したとする報告^{58, 59)}は、荷重負荷が骨塩量に有意に作用することを示唆している。Globusら(1984)⁶⁰⁾およびGlobusら(1986)⁶¹⁾は、6.5週齢および8週齢のラットを用いて、ラットの尾をケージより吊り下げ、前肢のみが体重を負担する状態にした実験を行っているが、非荷重骨となる腰椎骨と脛骨、および荷重骨となる上腕骨のCa量を測定し、非荷重により、腰椎骨では約25%の、脛骨では約15%のCaの減少を認め、一方、荷重骨である上腕骨についてはCa量の変動はみられなかったとし、局所的に骨に及ぼす荷重の減少が骨に変化を及ぼし得ることを報告している。以上のことより、荷重やメカニカルストレスが荷重骨の変化に影響す

る重要な因子の一つであるという考え方が一般的である。下顎骨について考えた場合、Globus ら (1984)⁶⁰⁾ は、重力に影響されない非荷重骨であるとしておいているが、下顎骨は stress-free な骨であるとする考え方は一般的ではないように思われる。それは、多くの研究者が指摘するように¹⁴⁻¹⁷⁾、下顎骨は咀嚼機能という口腔特有の機能の一端を担う重要な器官であり、常に咬合力という外力を受ける骨だからである。したがって、この立場から考えれば、本研究の結果から、咬合力の低下による下顎骨への荷重の低下が歯槽骨部およびオトガイ部の骨塩量を低下させる可能性のあることが考えられる。また、咀嚼筋直接付着部位の骨塩量の変化は、飼料の強度の相違による咀嚼筋機能の変化に起因するものと推察され、食物の軟化は下顎骨の骨塩量に有意に影響することが示唆された。

V. 下顎骨の圧縮による破砕強度

骨の物性に関しては古くから研究が行われ、骨の物理学的強度に関してはすでに 1700 年代半ばに Muschenbroek により研究論文として記述されたといわれる⁶²⁾。以後、骨の強度の測定はさまざまな種類の荷重を加えた場合の骨折の発生起序を知る目的として行われてきた⁶³⁻⁶⁵⁾。近年、医学の進歩により、骨の強度的研究の目的は、加齢による骨変化、骨粗鬆症、変形性関節症、慢性関節リウマチといった各種骨疾患との関連へと移ってきた⁶⁶⁻⁷²⁾。

本研究においては、飼料の強度の変化が下顎骨にいかなる物理的強度の変化を惹起するかを、圧縮荷重による破砕試験を用いて検索した。それによれば、対照群は 126.1 kgf/cm² と最も高い値を示し、次いで練飼料群の 100.7 kgf/cm²、粉末飼料群は 69.3 kgf/cm² という値を得た。対照群との平均値の差の検定では、練飼料群、粉末飼料群とも有意に低値を示し、飼料の強度の減少とともに、下顎骨の破砕強度は低下するという結果を得た。食物の軟化による下顎骨の破砕強度を検索した研究は極めて少ないが、木村ら (1991)³¹⁾ は、下顎骨の破砕強度は固型飼料群、練飼料群、粉末飼料群の順に小さくなると報告し、山本 (1989)²⁷⁾ も同様な傾向を認めている。本研究においてもこれらと一致した結果が得られた。

骨の圧縮強度に関しては主として加齢や各種骨疾患との関連で研究されている。Weaver ら (1966)⁶⁶⁾ は、ヒトの解剖遺体から得た腰椎骨と踵骨を用いて圧縮破砕強度と骨のミネラル量との関係を調べ、骨の圧縮破砕強度は、骨のミネラル含有量を知る上で重要な手がかりとなり、骨のミネラル含有量の減少と破砕強度の低下は加齢

に伴い、明らかに進行すると述べている。Bell ら (1967)⁶⁹⁾ はヒトの腰椎を用い、圧縮による破砕強度と骨の石灰化度との関係を検索し、加齢に伴う骨の石灰化度の低下に比べて破砕強度の低下が速かったと結論している。Galante ら (1970)⁷⁰⁾ は、ヒトの椎骨の圧縮破砕強度と骨の密度との関係を調べ、骨粗鬆症により多孔質な骨の割合が増加すると急激に骨の圧縮破砕強度は低下すると報告している。以上のいずれの報告においても、骨の圧縮による破砕強度は、骨の石灰化の程度、骨梁の形成状態、あるいは粗鬆化症状の有無といった項目を知る上で有効な指標である、という点では一致している。正常骨と病的な状態の骨の違い、あるいは下顎骨と椎骨といった骨種の違い等もあって一概には比較はできないが、実験的研究において骨標本の圧縮による強度判定は、骨の状態を知る上で有用であると考えられる。

飼料の強度の変化により下顎骨の圧縮破砕強度の変化がいかなる機序で行われているのかということは十分解明されておらず、不明な点も多い。食物の軟化によるラットの歯槽骨部における組織学的変化を観察した山本 (1989)²⁷⁾ や首藤 (1992)²⁸⁾ によれば、食物の軟化に伴い歯槽骨幅の減少およびハバース管周囲の骨小腔の減少および吸収窩の増加が認められたことで一致している。Lereim ら (1974)⁷¹⁾ は、ヒトの脛骨近位端の軟骨下骨を用いて変形性関節症や慢性関節リウマチといった骨疾患における骨強度を調べ、これらの骨疾患においては、骨の強度が低下したことを報告し、さらにこの研究を発展させて、これらの疾患の同部位における組織形態学的研究を行い、これらの研究から骨の強度と組織形態学的変化は密接な関係を有している可能性があるとして報告している⁷²⁾。これらのことから、飼料の強度の減少に伴い、ラットの成長期下顎骨に組織学的に変化が惹起され、これが下顎骨の圧縮による破砕強度の低下を招来する可能性があることが十分考えられる。

以上のことから、飼料の強度の減少は下顎骨の物理的強度に影響を及ぼす可能性が示唆された。

VI. 総合的評価

骨の成長発育に関する要因は種々の因子により影響を受けるとされている。Van Limborgh (1970)¹⁾ は、遺伝的因子、後生的因子、環境的因子の 3 つに分類し、それぞれが複合的に作用していると述べている。例えば、カルシウム等の栄養的因子に代表される一般的環境因子^{33, 46)}、ホルモン等の内分泌物質に代表されるような一般的後生因子^{73, 74)} が、下顎骨に及ぼす影響は今までに種々の研究者によって報告されているが、骨の成長発育

機序はいまだ不明の点が多いのも事実である。したがって、これらの因子1つ1つについて実験的に解明していく必要があると思われる。そこで本研究では下顎骨に対して局所的環境因子の代表的な要因でもあり、また臨床的にも問題となっている食物の軟化という現象を取り上げたわけであるが、これまでの食物の軟化による下顎骨に対する影響を検索した実験的研究は、主に成長発育に伴う骨の形態的变化を検索した研究が主流であった¹⁸⁻²⁶⁾。これは、主として歯科矯正学的見地から顎顔面領域における成長発育に形態的にいかなる変化が及ぶかということを目次的として行われてきたためであろう。骨の研究を単純に“量”と“質”という言葉で表現すれば、今までの研究は下顎骨の骨の成長量を形態的に解明しようとしてきたものと思われる。そこで本研究においては、成長期ラットに強度の異なる飼料を与えて下顎骨がいかなる変化を引き起こすかを形態すなわち“量”的变化のみならず、骨の変化や物性すなわち“質”的变化にも着目して検索を試みた。

臨床的には木村(1989)¹⁷⁾が、食生活の変化により顎骨は形態的に小さくなる小進化のみならず、骨折の多発といった虚弱化をも併発する可能性があり、咀嚼機能の低下による物理的刺激量の減少から、顎骨の強化はさらに劣化し、顎骨の成長も促進されないという悪循環に陥る恐れのあることを指摘している。本研究においては、実験的に食物の軟化による影響として、下顎骨に形態的变化が認められたのみならず、骨塩量の減少、および圧縮による破砕強度の低下が惹起される可能性のあることが結果として得られた。すなわち前述の言葉で表現すれば、下顎骨の“質”の面にも影響が及ぶ可能性のあることが示唆された。

したがって、今後、咬合力の低下や咀嚼機能の低下が、どのようにこれらの現象を惹起するのかといった機序の解明が必要になってくるであろう。今後この問題に関する詳細な研究が期待されるところである。

結 論

近年、日本人の食生活の変化が成長期にある小児の下顎骨に及ぼす影響が臨床的に問題となっているが、局所的環境要因の代表的な因子の1つである食物の軟化が成長期下顎骨に及ぼす影響は十分解明されていない。そこで今回著者は、成長期にある生後3週齢のWistar系雄ラットを用い、食物の軟化が成長期下顎骨に形態のみならず、骨の内部変化や骨の強度と行った面にいかなる影響を及ぼすかということを実験的に検索し、以下のよう

な結果を得た。

1. 飼料の圧縮破砕強度

飼料の圧縮破砕強度は、対照群が64.8 kg/cm²、練飼料群が1.9 kg/cm²であった。

2. 体重

実験開始時のラットの体重は40 g前後であり、以後ほぼ直線的に体重は増加した。実験終了時の平均体重は、対照群が343.3 g、練飼料群が351.6 g、粉末飼料群が325.8 gであった。対照群と実験群との間には有意差は認められなかった。

3. 頭部 X 線規格写真計測

側方頭部 X 線規格写真撮影による下顎骨の形態計測結果からは、座標分析より主に下顎枝部に形態的变化が認められた。すなわち、筋突起、関節突起、角突起に有意差が多く認められ、飼料の強度の低下とともに成長量の低下が認められた。実測長計測からは、高さに関する計測項目に有意差が多く認められ、下顎枝高、筋突起高が練飼料群、粉末飼料群ともに対照群と比較して有意に低値であった。また、関節突起高は粉末飼料群が対照群と比較して有意に低値を示した。角度計測からは関節・筋突起角が練飼料群、粉末飼料群ともに対照群と比較して有意に小さな値を示した。下顎角は、練飼料群が対照群と比較して有意に大きな値を示した。

4. X 線学的所見

齒槽骨部、下顎下縁部における肉眼的観察からは、対照群に比べて練飼料群は骨梁の数がやや減少していた。粉末飼料群は骨梁の数がさらに減少し骨の緻密性に欠ける所見を呈していた。骨塩量の測定結果からは、齒槽骨部およびオトガイ部においては、対照群と比較して、練飼料群および粉末飼料群はともに有意に低値を示した。一方、下顎骨下縁部および角突起下縁部における骨塩量は、双方の部位において、粉末飼料群が対照群と比較して有意に低値を示した。

5. 下顎骨の圧縮による破砕強度

下顎骨の圧縮による破砕強度試験からは、対照群と比べて練飼料群、粉末飼料群とも有意に低値を示し、飼料の強度の低下とともに下顎骨の破砕強度は減少した。

以上のことから、食物の軟化により、成長期下顎骨は形態的な変化のみならず、骨の内部や、物理的強度にもその影響が及ぶ可能性のあることが示唆された。

稿を終るにあたり、終始懇篤なるご指導、ご鞭撻ならびにご校閲の労を賜った恩師木村光孝教授に深甚なる敬意と感謝の意を捧げます。さらに、実験にご協力頂いた

九州歯科大学小児歯科学教室員各位にお礼を申し上げます。

本論文の要旨は、平成5年5月28日第31回日本小児歯科学会大会および総会(郡山)において発表した。

引用文献

- 1) Van Limburgh, J.: A new view on the control of the morphogenesis of the skull. *Acta Morphol. Neerl. Scand.* 8: 143-160, 1970.
- 2) Moyers, R. E.: *Handbook of orthodontics*. 3rd ed. Year Book Med. Pub. Inc., Chicago, 51-117, 1972.
- 3) Horowitz, S. L. and Shapiro, H. H.: Modifications of mandibular architecture following removal of temporalis muscle in the rat. *J. Dent. Res.* 30: 276-280, 1951.
- 4) Avis, V.: The relation of temporal muscle to the form of the coronoid process. *Amer. J. Phys. Anthropol.* 17: 99-104, 1959.
- 5) 深沢裕文, 坂本敏彦: 閉口運動に関与する筋群切除後のラット下顎骨の成長発育に関する形態学的研究. *日矯歯誌* 41: 521-530, 1982.
- 6) 神田昭司: 犬下顎骨の成長発育に関する実験的研究. *九州歯会誌* 23: 323-344, 1969.
- 7) Horowitz, S. L. and Shapiro, H. H.: Modification of skull and jaw architecture following removal of the masseter muscle in the rat. *Amer. J. Phys. Anthropol.* 13: 301-308, 1955.
- 8) Avis, V.: The significance of the angle of the mandible: an experimental and comparative study. *Amer. J. Phys. Anthropol.* 19: 55-61, 1961.
- 9) Simpson, C. D.: Experimental mandibular dysplasia. *Angle Orthod.* 36: 224-235, 1966.
- 10) Sarnat, B. G., Feigenbaum, J. A. and Krogman, W. M.: Adult monkey coronoid process after resection of trigeminal nerve motor root. *Amer. J. Anat.* 150: 129-138, 1977.
- 11) 菊池 哲: ラットの咬筋神経切断による下顎骨発育へ及ぼす影響について. *歯科学報* 77: 595-628, 1977.
- 12) 鷹 俊雄: ラットの下顎神経切断による顎顔面発育へ及ぼす影響について. *歯科学報* 79: 2305-2365, 1979.
- 13) 河野寿一: 抜歯が顎・顔面頭蓋と顎関節の成長発育に及ぼす影響について. *歯学* 65: 457-500, 1977.
- 14) 細谷憲政, 井上昌一, 吉田定宏, 深田英朗: 小児の食事の変化と口腔疾患. *デンタルダイヤモンド* 11: 14-41, 1986.
- 15) 柳沢幸江, 田村厚子, 赤坂守人, 寺元芳子: 食品の物性と摂食機能に関する研究. 第一報 食品物性の器械的測定, 並びに食品分類について. *小児歯誌* 23: 962-983, 1985.
- 16) 井上直彦: いわゆる discrepancy について, II, Discrepancy の成因. *日歯評論* 449: 151-161, 1980.
- 17) 木村光孝: 小児における顎骨小進化の予防. *歯科ジャーナル* 29: 1065-1073, 1989.
- 18) Watt, D. G. and Williams, C. H. M.: The effects of the physical consistency of food on the growth and development of the mandible and the maxilla of the rat. *Amer. J. Orthod.* 37: 895-928, 1951.
- 19) Barber, C. G., Green, L. J. and Cox, G. J.: Effects of the physical consistency of diet on the condylar growth of the rat mandible. *J. Dent. Res.* 42: 848-851, 1963.
- 20) Moore, W. J.: Masticatory function and skull growth. *J. Zool.* 146: 123-131, 1965.
- 21) Whiteley, A. T., Kendrick, G. S. and Matthews, J. L.: The effects of function on osseous and muscle tissues in the craniofacial area of the rat. *Angle Orthod.* 36: 13-17, 1966.
- 22) Beecher, R. M. and Corruccini, R. S.: Effects of dietary consistency on craniofacial and occlusal development in the rat. *Angle Orthod.* 51: 61-69, 1981.
- 23) 伊藤学而, 黒江和斗, 安田秀雄, 井上直彦, 亀谷哲也: 顎骨の退化に関する実験的研究. *日矯歯誌* 41: 708-715, 1982.
- 24) 菊田 徹: ラット脳頭蓋および顔面頭蓋の成長発育に及ぼす食物の硬度の影響. *鶴見歯学* 11: 141-170, 1985.
- 25) Kiliaridis, S., Engström, C. and Thilander, B.: The relationship between masticatory function and craniofacial morphology, I, A cephalometric longitudinal analysis in the growing rat fed a soft diet. *Eur. J. Orthod.* 7: 273-283, 1985.
- 26) Ito, G., Mitani, S. and Kim, J. H.: Effect of soft diets on craniofacial growth in mice. *Anat. Anz.* 165: 151-166, 1988.
- 27) 山本英次: 顎骨の成長に関する実験的研究. —食物の軟化による歯槽骨の変化—. *九州歯会誌* 43: 448-472, 1989.
- 28) 首藤洋治: 顎骨の成長に関するX線的, 光顕的ならびに走査電顕的研究. —食物の硬軟による歯槽骨の変化—. *九州歯会誌* 46: 574-595, 1992.
- 29) 竹中正史: 顎骨の成長に関する実験的研究—食物の硬軟による下顎頭の変化—. *九州歯会誌* 43: 669-692, 1989.
- 30) 中園志保: 顎骨の成長に関するX線的, 光顕的ならびに走査電顕的研究. —食物の硬軟による下顎頭の変化—. *九州歯会誌* 45: 1-23, 1991.
- 31) 木村光孝, 西田郁子, 牧 憲司, 高橋宙丈, 渡辺博文, 野沢典央, 堤 隆夫, 岡 裕美子: 食物の硬軟による成長期下顎骨の変化に関する実験的研究. *小児歯誌* 29: 291-298, 1991.
- 32) 石井貴三男: 成長期顎骨における実験的骨粗鬆症に関する研究. —とくに歯槽骨について—. *九州歯会誌* 40: 530-554, 1986.
- 33) 木村光孝: 成長期顎骨とカルシウム摂取. *歯科ジャーナル* 26: 871-885, 1987.
- 34) 覚道幸男: 咬合に関する生理学的要素. *歯医学誌* 9:

- 138-142, 1990.
- 35) 横溝正幸: 幼稚園児における咀嚼行動の発達に関する研究. 口腔衛生会誌 42: 277-306, 1992.
 - 36) 花田晃治: 頭部 X 線規格写真によるラットの顎顔面頭蓋の成長発育に関する研究. 口病誌 34: 18-74, 1967.
 - 37) 関本恒夫, 大竹章夫, 鈴木啓之, 柏木朗男, 宮尾真知子, 河野寿一, 原 秀一, 河内慶子, 服部吉秀, 渋井尚武: ラットの顎・顔面頭蓋の成長発育に関する研究. 歯学 65: 647-667, 1977.
 - 38) Arena, S. A. and Gianelly, A. A.: Resection of the mandibular body and its effect on mandibular growth. *Amer. J. Orthod.* 76: 218-222, 1979.
 - 39) Vilmann, H., Juhl, M. and Kirkeby, S.: Bone-muscle interactions in the muscular dystrophic mouse. *Eur. J. Orthod.* 7: 185-192, 1985.
 - 40) Moss, M. L.: Functional analysis of human mandibular growth. *J. Prosth. Dent.* 10: 1149-1159, 1960.
 - 41) Sicher, H.: Oral anatomy. 4th ed. C. V. Mosby, Saint Louis, 1965, 105-140.
 - 42) Scott, J. H.: Dento-facial development and growth. Pergamon press, Oxford, 1967, 65-137.
 - 43) Moss, M. L. and Rankow, R. M.: The role of the functional matrix in mandibular growth. *Angle Orthod.* 38: 95-103, 1968.
 - 44) Maeda, N., Kawasaki, T., Osawa, K., Yamamoto, Y., Sumida, H., Masuda, T. and Kumegawa, M.: Effects of long-term intake of a fine-grained diet on the mouse masseter muscle. *Acta Anat.* 128: 326-333, 1987.
 - 45) Maeda, N., Sato, M., Osawa, K., Kawasaki, T., Masuda, T. and Kumegawa, M.: Postnatal development of the mouse temporal muscle and effects of a fine-grained diet on the muscle spindle. *Anat. Anz.* 165: 177-192, 1988.
 - 46) 木村光孝, 牧 憲司, 木村京子, 松井秀成, 周 適宏, 児玉昭資, 宮崎圭一, Raymond L. Braham: 虚弱骨に対する食餌の影響に関する実験的研究. —歯槽骨の走査電顕的観察—. 小児歯誌 29: 743-754, 1991.
 - 47) 井上哲郎, 串田一博, 宮本繁仁, 矢島秀世, 伊丹康人, 山下源太郎: X 線像による骨萎縮度判定の試み. 骨代謝 13: 187-195, 1980.
 - 48) Camerom, J. R. and Sorenson, J.: Measurement of bone mineral in vivo: An improved method. *Science* 142: 230-232, 1963.
 - 49) Wilson, C. R. and Madsen, M.: Dichromatic absorptiometry of vertebral bone mineral content. *Invest. Radiol.* 12: 180-184, 1977.
 - 50) 林 泰史: MD 法. 臨放 35: 15-22, 1990.
 - 51) 牧 憲司, 葛 立宏, 木村京子, 荒牧利裕, 周 適宏, 山野博文, 野沢典央, 木村光孝: 小児期の下顎骨骨塩定量に関する臨床的研究. 小児歯誌 31: 404-411, 1993.
 - 52) 小西正良: Microdensitometry 法による数種動物の四肢骨密度の比較. 防医大誌 17: 22-33, 1992.
 - 53) Greene, E. C.: Anatomy of the rat. Hafner Publishing Co., New York, 5-84, 1963.
 - 54) Rubin, C. T. and Lanyon, L. E.: Osteoregulatory nature of mechanical stimuli: function as a determinant for adaptive remodeling in bone. *J. Orthop. Res.* 5: 300-310, 1987.
 - 55) Lanyon, L. E.: Strain-related bone modeling and remodeling. *Top. Geriatr. Rehabil.* 4: 13-24, 1989.
 - 56) Aloia, J. F., Vaswani, A. N., Yeh, J. K. and Cohn, S. H.: Premenopausal bone mass is related to physical activity. *Arch. Intern. Med.* 148: 121-123, 1988.
 - 57) Jónsson, B., Ringsberg, K., Josefsson, P. O., Johnell, O. and Birch-Jensen, M.: Effects of physical activity on bone mineral content and muscle strength in women: A cross-sectional study. *Bone* 13: 191-195, 1992.
 - 58) Mack, P. B. and Vogt, F. B.: Roentgenographic bone density changes in astronauts during representative Apollo space flight. *Amer. J. Roent.* 113: 621-633, 1971.
 - 59) Vose, G. P.: Review of roentgenographic bone demineralization studies of the Gemini space flights. *Amer. J. Roent.* 121: 1-4, 1974.
 - 60) Globus, R. K., Bikle, D. D. and Morey-Holton, E.: Effects of simulated weightlessness on bone mineral metabolism. *Endocrinology* 114: 2264-2270, 1984.
 - 61) Globus, R. K., Bikle, D. D. and Morey-Holton, E.: The temporal response of bone to unloading. *Endocrinology* 118: 733-742, 1986.
 - 62) Mayeda, T.: Ueber die Elastizität und Festigkeit der Knochensubstanz. *Mitt. med. Fak. Tokyo.* 17: 289-338, 1917.
 - 63) Evans, F. G., Lissner, H. R. and Pedersen, H. E.: Deformation studies of the femur under dynamic vertical loading. *Anat. Rec.* 101: 225-241, 1948.
 - 64) Evans, F. G. and Lebow, M.: Regional differences in some of the physical properties of the human femur. *J. Appl. Physiol.* 3: 563-572, 1951.
 - 65) Evans, F. G., Pedersen, H. E. and Lissner, H. R.: The role of tensile stress in the mechanism of femoral fractures. *J. Bone and Joint Surg.* 33-A: 485-501, 1951.
 - 66) Weaver, J. K. and Chalmers, J.: Cancellous bone: Its strength and changes with aging and an evaluation of some methods for measuring its mineral content. I. Age changes in cancellous bone. *J. Bone and Joint Surg.* 48-A: 289-299, 1966.
 - 67) Rockoff, S. D., Sweet, E. and Bleustein, J.: The relative contribution of trabecular and cortical bone to the strength of human lumbar vertebrae. *Calc. Tiss. Res.* 3: 163-175, 1969.
 - 68) Chalmers, J. and Weaver, J. K.: Cancellous bone: Its strength and changes with aging and an evaluation

- of some methods for measuring its mineral content.
- II. An evaluation of some methods for measuring osteoporosis. *J. Bone and Joint Surg.*, 48-A : 299-308, 1966.
- 69) Bell, G. H. and Dunbar, O. : Variations in strength of vertebrae with age and their relation to osteoporosis. *Calc. Tiss. Res.* 1 : 75-86, 1967.
- 70) Galante, J., Rostoker, W. and Ray, R. D. : Physical properties of trabecular bone. *Calc. Tiss. Res.* 5 : 236-246, 1970.
- 71) Lereim, P., Goldie, I. and Dahlberg, E. : Hardness of the subchondral bone of the tibial condyles in the normal state and in osteoarthritis and rheumatoid arthritis. *Acta Orthop. Scand.* 45 : 614-627, 1974.
- 72) Lereim, P. and Goldie, I. F. : Relationship between morphologic features and hardness of the subchondral bone of the medial tibial condyle in the normal state and in osteoarthritis and rheumatoid arthritis. *Arch. Orthop. Unfall-Chir.* 81 : 1-11, 1975.
- 73) 木村光孝, 牧 憲司, 木村京子, 太田和子, 今村隆子, 高江洲 旭, 秀島 治, Raymond L. Braham : 虚弱骨に対する高カルシウム食, 生理活性物質の併用療法に関する走査電顕的研究. —とくに下顎頭の変化—. *小児歯誌* 29 : 582-593, 1991.
- 74) 木村光孝, 牧 憲司, 稲川祐成, 渡辺 博, 若杉淳二郎, 曾我富美雄, 横本 満, 矢野目鎮照, Raymond L. Braham : カルシウム不足の成長期下顎頭に対するカルシトニン, 活性型ビタミン D₃ の併用療法. *小児歯誌* 30 : 69-79, 1992.