原 著 論 文

咬合支持と飼育飼料形態が下顎骨咬筋付着部に及ぼす影響

池田 和博

Histomorphometric Study on Occlusal-, Masticatory Alterations- and Age-Related Changes in the Attachment of Masseter Muscle to Rat Mandible

Yasuhiro Ikeda

Abstract : Fifty-four Donryu male rats were divided into three groups, the control group, the soft diet group (fed with powder diet containing the same components as solid one, from the 43rd week) and the molarless group (all molars were removed at 43 weeks and then fed with powder diet). At 47, 60 and 74 weeks, morphometries of mandibular bone by a handy microscope system and measurements of bone mineral density (BMD) by the image analyzing system were performed in addition to observations by light microscopy of the attachment of masseter muscle to mandible. The results obtained are as follows.

1. Occlusal- and masticatory alterations-related changes were observed in the attachment of the masseter muscle to mandible in addition to age-related changes.
2. The height of the mandibular ramus in the experimental groups were shorter than that of the control group, showing a statistical significance ($p < 0.01$).
3. BMD at the attachment of the masseter muscle to mandible in experimental groups was less than that of control group in each weeks, showing a statistical significance ($p < 0.01$).
4. BMD at the attachment of the masseter muscle to mandible in 60 and 74 weeks in experimental groups was less than that of the incisal alveolar bone, showing a statistical significance ($p < 0.05$).

Key words : masticatory function, bone mineral density, aging, rat, masseter muscle

I. 緒 言

咀嚼機能は、末梢の各々の感覚受容器からの種々の情報が³, 脳神経と脊髄神経を介して大脳皮質咀嚼野などの上位中枢やパターン・ジェネレーターがある脳幹などへ運び込まれて統合・制御され、体性あるいは自律性の遠心性情報として、筋をはじめとする末梢器官へフィードバックされることによって営まれる^{1,2)}。したがって、歯および歯根膜の喪失や咀嚼筋、表情筋、舌、口腔粘膜、唾液腺、顎骨な

どの顎口腔系組織・器官および中枢神経系の加齢に伴う劣化は、天然歯列者のみならず、全部床義歯装着者においても、咀嚼機能の低下につながる事となる³⁾。なお、近年、咀嚼機能と脳内循環血液量との関連についての報告^{4,5)}や、咬合干渉が睡眠障害や神経内分泌反応を含めた自律神経系の変化ならびに情動ストレスをもたらすことが報告^{6~8)}されており、咬合・咀嚼機能と全身の機能との関連が指摘され、高齢期における咀嚼機能を健全に維持することの重要性が強調されている。

加齢に伴う歯の喪失は、咀嚼機能の低下をもたらすばかりではなく、顎口腔系組織、特に下顎骨の形態的变化をもたらすことが報告されている^{9,10)}。特に、咀嚼機能が下顎骨の成長・発育に関与する大きな因子の1つであるとの観点から、矯正歯科学の分野においては、筋機能の変化に伴う下顎骨筋付着部の組織学的研究がなされている^{11~14)}。

北海道医療大学歯学部歯科補綴学第一講座 (主任・指導: 平井敏博教授)

Department of Removable Prosthodontics, School of Dentistry, Health Sciences University of Hokkaido (Chief and Director : Prof. Toshihiro Hirai)
平成7年2月10日受付

しかし、これらの研究は、成長期にある種々の実験動物の下顎骨について、咬合挙上との関連や骨形成との関連を検討したものである。一方、歯科補綴学の分野においても、筋の収縮により発現する咬合力の顎関節および下顎骨に対しての作用に関する多くの研究結果が報告されている¹⁵⁻¹⁷⁾。しかし、これらの研究はストレングージ法や光弾性法、有限要素法などを用いてのモデル実験であり、加齢あるいは摂食形態との関係は検討されていない。さらに、骨粗鬆症と下顎骨の形態や構造についての報告が散見されるが、義歯支持基盤である顎堤の吸収量との関連を中心として検索したものであり、下顎骨への咬合圧負荷あるいは筋圧負荷との関連についての記載はみられない^{18,19)}。

そこで、本研究では、高週齢ラットを用いて、生理的加齢変化に加えて、歯の欠損に伴う咬合高径の低下や咬合支持の喪失などの咬合関係の変化とそれに伴う飼育飼料の形態や性状が、下顎骨の形態や構造に及ぼす影響を検討することを目的として、主閉口筋である咬筋の下顎骨付着部を中心として、形態学的、組織学的観察により検討を行った。

II. 実験材料および方法

1. 実験動物と飼育条件

実験には、雄 Donryu ラット 54 匹を、生後 30 週齢で購入し、予備飼育期間を経た後、43 週齢の時点で 6 匹ずつの 9 群に分割した。すなわち、対照群として、全実験期間を通じて固形飼料（オリエンタル酵母工業社製飼育用 MF）にて飼育した 47 週齢群、60 週齢群、74 週齢群の 3 群、また、粉末飼料群として、43 週齢になった時点で固形飼料を同一成分の粉末飼料に変更して飼育した 47 週齢群、60 週齢群、74 週齢群の 3 群、さらに、臼歯切除群として、43 週齢になった時点で臼歯部歯冠部を切除するとともに、それまでの固形飼料を同一成分の粉末飼料に変更して飼育した 47 週齢群、60 週齢群、74 週齢群の 3 群、計

9 群である（図 1）。なお、飼育に際しては、各群ともに 1 ケージ（255×375×158 mm）あたり 2 匹ずつとし、白色蛍光灯による人工照明にて、午前 8 時から午後 8 時までを明期、午後 8 時から午前 8 時までを暗期とした。なお、実験期間中の飼料と水は自由摂取とした。

2. 体重および頭尾長の測定

実験期間中、2 週毎に体重を測定した。また、各観察週齢になった時点でエーテル吸入麻酔とペントバルビタール腹腔内注射による麻酔下にて屠殺し、頭尾長を測定した。なお、実験開始時（43 週齢）には、臼歯切除群の他に、対照群、粉末飼料群に対しても、同様の麻酔を施した。

3. 骨標本の作成

屠殺後、頭部を取り出し軟組織を除去した後、下顎骨を 4% パパイン水溶液に、60°C、6 時間浸漬し、ついで、96 時間十分に水洗を行った。乾燥は室温にて行い、乾燥下顎骨標本を得た。

4. 下顎骨標本における下顎骨体長ならびに下顎枝高の計測

下顎骨体長、下顎枝高の計測には、Microwatcher（三菱化成社製 VS-30 H 型）と画像計測システム KIP-110（三菱化成社製）を用いた。

計測に際しては、100×200 mm の赤色厚紙上の中央に 50×100 mm の黒色長方形薄紙を固定し、下顎骨体切歯部最下点と下顎角部最下点を結ぶ線を黒色長方形薄紙の一边と一致させた。さらに、下顎頭内側最突出点、下顎骨体切歯部最下点部内側最突出点および下顎角部最下点部内側最突出点の 3 点によって形成される平面が可及的に台紙と平行になるように歯科用ユーティリティワックスにて固定した。

計測点の設定は、浅野²⁰⁾の方法に準じて行った。すなわち、下顎骨体切歯部最下点・下顎角部最後方突出点間距離

図 1 飼育・実験条件

Time schedule of the experiment

図2 下顎骨における形態計測部位
Morphometry of rat mandibular bone

を下顎骨体長として、また、下顎頭最上方端・下顎下縁平面（下顎骨体切歯部最下点と下顎角部最下点間を結ぶ線）間距離を下顎枝高として、計測した（図2）。なお、両者の計測には5倍光学レンズを用いた。

5. 軟X線写真による相対的平均骨塩量の測定

下顎骨標本を印画紙（富士写真フィルム社製フジプロ WP FM 4 印画紙 1x）上におき、下顎頭内側最突出点、下顎骨体切歯部最下点部内側最突出点および下顎角部最下点部内側最突出点によって形成される平面が可及的に印画紙と平行になるように、歯科用ユーティリティワックスで固定した。なお、撮影条件は、管電圧 40 kVp、管電流 4 mA、撮影時間 120 秒、焦点・フィルム間距離 50 cm とした。得られた軟X線写真を用いて、下顎枝下縁咬筋附着部および下顎切歯上方歯槽突起部の相対的平均骨塩量を画像解析システム（ピラス社製 LA-525 R/8 M 型）にて測定した。すなわち、イメージスキャナーにて画像上の両部分をコンピュータに取り込み、関心領域内の測定を行った。なお、咬筋附着部の関心領域の設定に際しては、下顎切痕最前方点から下顎下縁平面に下した垂線と下顎下縁平面の平行線の下顎枝下縁部上交点を設定し、この点に接する上方および後方の 25×25 画素の正方形で囲まれた範囲を、さらに、下顎切歯上方歯槽突起部に 10×70 画素の長方形で囲まれた範囲を設定し（図3）、同部の相対的平均骨塩量を測定した。なお、測定に際しては、指定範囲内の各画素の輝度を 256 階調に分割し、各画素の輝度の平均値を相対的平均骨塩量指数として表示した。また、個々のフィルムにおける黒化度の補正には、軟X線写真上に骨標本とともに撮影したアルミステップ（日本 SOFTEX 社製）を用い、画像解析システムの濃度補正処理プログラムにて行った。

6. 研磨標本のコンタクトマイクロラジオグラフィーによる観察

下顎骨標本を未脱灰のまま脱水処理し、スチレン・モノマーに 48 時間浸漬した後、通法に従いポリエステル樹脂（Rigolac）に含浸し、下顎頭内側最突出点、下顎骨体切歯部最下点部内側最突出点および下顎角部最下点部内側

① 関心領域（咬筋附着部）
Interest region of attachment of
masseter muscle to mandible
② 関心領域（切歯上方部）
Interest region of incisal alveolar bone

図3 相対的骨塩量の測定部位
Region of Bone Mineral Density (BMD) measurement

最突出点によって形成される平面が可及的に樹脂包埋用モールドの底部と平行になるように包埋・重合を行った。重合後、樹脂ブロックを下顎骨体切歯部最下点と下顎角部最下点を結ぶ線およびこれに直交する線に平行となるようにトリミングした。その後、Cutting・Grinding System（EXAKT 社製）を用いて前頭断方向に、厚さ 70 μm の研磨標本作製した。得られた標本は softex type の CMR（日本 SOFTEX 社製 SOFTEX CSM-2 型）を用い、管電圧 10 kVp、管電流 5 mA、撮影時間 60 分、焦点・フィルム間距離 5 cm の条件で撮影し、コンタクトマイクロラジオグラムを得た。なお、フィルムは Kodak 社製 So-343 を用いて現像後、鏡見した。

7. 光学顕微鏡による観察

各観察週齢になったラットを、ペントバルビタール全身麻酔下にて開胸後、左心室から上行大動脈にカニユーレを挿入し、生理食塩水にて灌流後、2% パラホルムアルデヒド-2% グルタルアルデヒド混合固定液（Cacodylate 緩衝液）で 15 分間、室温で灌流固定した。その後、ただちに下顎骨を取り出し、同一の固定液にて 48 時間の浸漬固定を行った。次いで、0.1 M EDTA・2 Na (pH 7.3) にて 4 週間の脱灰を行い、咬筋附着部の相対的骨塩量測定部位に一致する部位にてトリミングを行った。その後、通法に従い、上昇エタノール系列で脱水処理を施し、EPON 812 に包埋した。切片の作成には MT-5000 Ultramicrotome（Sorvall 社製）を用い、前頭断面切片を作成後、トルイジン・ブルー染色を施して、光学顕微鏡にて観察を行った。

III. 実験結果

1. 体重および頭尾長の測定結果

実験に供したラットは、購入時から実験開始までの予備飼育期間中（30 週齢～43 週齢）に、100 g 前後の体重増加が認められた。

各群とも実験開始直後の 44 週齢に一時的な体重の減少が認められ、その後、対照群では 60 週齢まで緩やかに増加したが、それ以降、74 週齢まで体重の変化はほとんど認められなかった。また、粉末飼料群では、74 週齢までの緩やかな増加が認められた。しかし、臼歯切除群における術後の体重の減少は、他群に比して顕著であり、対照群と同等になるまでには約 20 週を要した（図 4）。

なお、実験期間を通して、各群における頭尾長の変化は認められなかった。

2. 下顎骨体長ならびに下顎枝高の計測結果

下顎骨体長は、すべての群において、実験期間を通して変化は認められなかった。また、対照群、粉末飼料群、臼歯切除群間には、ほとんど差異は認められなかった。

下顎枝高は、対照群において、加齢に伴う有意な増加が認められた。また、週齢と下顎枝高の間には有意な正の相関関係が認められた ($r=0.635$, $p<0.01$)。一方、粉末飼料群では、加齢に伴うわずかな増加が認められ ($r=0.287$, $p>0.05$)、臼歯切除群では、わずかな減少が認められた ($r=-0.14$, $p>0.05$)。また、下顎枝高の各週齢における各群間の比較では、対照群に対して、60 週齢と 74 週齢の粉末飼料群では、統計学的に有意な減少が認められた ($p<0.01$)。また、対照群に対して臼歯切除群では、すべての週齢において、統計学的に有意な減少が認められた ($p<0.01$)。なお、粉末飼料群と臼歯切除群との間には、各週齢とも、統計学的な有意差は認められなかった（図 5）。

図 4 実験期間のラット体重の変化
Body weight of rat

3. 相対的平均骨塩量の測定結果

咬筋付着部の関心領域における相対的平均骨塩量指数として表示した骨塩量の計測結果は、対照群において、47 週齢から 60 週齢にかけては加齢に伴い増加傾向が、また、60 週齢から 74 週齢にかけては加齢に伴い減少傾向が認められた。一方、粉末飼料群と臼歯切除群においては、47 週齢から 74 週齢にかけて漸次減少する傾向が認められた（図 6）。なお、切歯上方歯槽突起部においても、ほぼ同様の傾向が認められた（図 7）。

咬筋付着部における相対的平均骨塩量の各週齢における各群間の比較では、対照群に対して、60 週齢と 74 週齢の粉末飼料群では、統計学的に有意な減少が認められた ($p<0.05$)。また、対照群に対して臼歯切除群では、すべての週齢において、統計学的に有意な減少が認められた

a : 加齢と下顎枝高との関係

a : Relationship between ageing and height of mandibular ramus

	対照群 Control group VS 粉末飼料群 Powder group	対照群 Control group VS 臼歯切除群 Molerless group	粉末飼料群 Powder group VS 臼歯切除群 Molerless group
47 週齢 47 weeks	n.s.	* *	n.s.
60 週齢 60 weeks	* *	* *	n.s.
74 週齢 74 weeks	* *	* *	n.s.

* * : $p<0.01$

n.s., not significant

b : 下顎枝高の各週齢における各群間の有意差

b : Significance of difference based on analysis of variance

図 5 各週齢における下顎枝高

Mandibular ramus height in each groups and each weeks

図 6 咬筋付着部における相対的平均骨塩量指数
Bone mineral density at the attachment of masseter muscle to mandible

図 7 切歯上方歯槽突起部における相対的平均骨塩量指数
Bone mineral density at the incisal alveolar bone of rat mandible

図 8 各週齢の対照群に対する骨塩量の比
Bone mineral density (BMD) in experimental group to control group in each weeks

($p < 0.05$). なお、粉末飼料群と臼歯切除群との比較では、47 週齢と 60 週齢の両者間に、統計学的な有意差が認められた ($p < 0.05$) (表 1)。

切歯上方歯槽突起部における相対的平均骨塩量の 47 週齢における各群間の差は認められなかった。しかし、60 週齢および 74 週齢における臼歯切除群のそれは、対照群および粉末飼料群に比して有意に減少していた ($p < 0.05$) (表 2)。

表 1 咬筋付着部での相対的平均骨塩量指数の各週齢における群間の有意差
Significance of difference based on analysis of variance of BMD in the attachment of masseter muscle to rat mandibular bone

	対照群 Control group VS 粉末飼料群 Powder group	対照群 Control group VS 臼歯切除群 Molerless group	粉末飼料群 Powder group VS 臼歯切除群 Molerless group
47 週齢 47 weeks	n.s.	*	n.s.
60 週齢 60 weeks	*	*	*
74 週齢 74 weeks	*	*	*

* : $p < 0.05$
n.s., not significant

表 2 下顎切歯上方歯槽突起部での相対的平均骨塩量指数
Significance of difference based on analysis of variance of BMD in the rat Incisal alveolar bone

	対照群 Control group VS 粉末飼料群 Powder group	対照群 Control group VS 臼歯切除群 Molerless group	粉末飼料群 Powder group VS 臼歯切除群 Molerless group
47 週齢 47 weeks	n.s.	n.s.	n.s.
60 週齢 60 weeks	*	*	*
74 週齢 74 weeks	n.s.	*	*

* : $p < 0.05$
n.s., not significant

咬筋付着部と切歯上方歯槽突起部における骨塩量について、各週齢毎に、それぞれの対照群における骨塩量に対する、粉末飼料群ならびに臼歯切除群の骨塩量の比を検討したところ、60 週齢群および 74 週齢群では、粉末飼料群、臼歯切除群ともに、咬筋付着部の方が切歯上方歯槽突起部よりも有意に低い値を示した ($p < 0.05$) (図 8)。

4. コンタクトマイクロラジオグラム所見

47 週齢と 74 週齢の対照群、粉末飼料群、臼歯切除群の同一群内における比較では、咬筋付着部の著明な形態変化は認められなかった (図 9-a, b, c, 10-a, b, c)。しかし、対照群と臼歯切除群を比較すると、咬筋付着部の形態には顕著な差異が認められた。すなわち、対照群では咬筋付着部が傾側に突出し、さらに、下顎枝下縁が平坦になっているのに対し (図 9-a, 10-a)、臼歯切除群では咬筋付着部の突出がほとんどみられず、下顎枝下縁も円形あるいは凸型を呈していた (図 9-c, 10-c)。このような、対照群と臼歯切除群における形態変化は 47 週齢と 74 週齢いず

(a) 対照群 (×100) Solid diet group (×100) (b) 粉末飼料群 (×100) Powder diet group (×100) (c) 臼歯切除群 (×100) Molerless group (×100)

図 9 47 週齢における Contact microradiography (右側：咬筋付着部)
Contact microradiography at 47 weeks (Right : attachment of masseter muscle)

(a) 対照群 (×100) Control group (×100) (b) 粉末飼料群 (×100) Powder diet group (×100) (c) 臼歯切除群 (×100) Molerless group (×100)

図 10 74 週齢における Contact microradiography (右側：咬筋付着部)
Contact microradiography at 74 weeks (Right : attachment of masseter muscle)

れにおいても観察された。なお、粉末飼料群におけるこの部の形態は、対照群と臼歯切除群のその中間的な形態を呈していた (図 9-b, 10-b)。

対照群 47 週齢と臼歯切除群 74 週齢を比較すると、対照群における下顎枝下縁部の咬筋付着部では、下顎骨の深部までシャープー線維が侵入する像が観察された (図 9-a)。一方、臼歯切除群の同部では、シャープー線維の

侵入は浅層に留まっている像が観察された (図 10-c)。さらに、対照群では高石灰化を示すオステオンが顕著に観察されるのに対し、臼歯切除群では、ほとんど観察されず、下顎枝下縁部には吸収窩が観察された。なお、粉末飼料群におけるこの所見は、対照群と臼歯切除群の中間的な様相を呈していた (図 9-b, 10-b)。

(a) 対照群 (×250)

Control group (×250)

(b) 粉末飼料群 (×250)

Powder diet group (×250)

(c) 臼歯切除群 (×250)

Molerless group (×250)

図 11 47 週齢における下顎骨咬筋附着部の組織所見 (右側：咬筋附着部)

Light micrograph of the attachment of masseter muscle to mandible at 47 weeks (Right : attachment of masseter muscle)

(a) 対照群 (×250)

Control group (×250)

(b) 粉末飼料群 (×250)

Powder diet group (×250)

(c) 臼歯切除群 (×250)

Molerless group (×250)

図 12 60 週齢における下顎骨咬筋附着部の組織所見 (右側：咬筋附着部)

Light micrograph of the attachment of masseter muscle to mandible at 60 weeks (Right : attachment of masseter muscle)

5. 光学顕微鏡による組織所見

対照群, 粉末飼料群, 臼歯切除群におけるすべての観察週齢において, 咬筋附着部には, 筋線維が骨膜・層板骨を介してシャープピー線維へ移行している上方の部分 (上方咬筋附着部) と, 腱・線維軟骨を介してシャープピー線維へ移行している下方の部分 (下方咬筋附着部) が観察された (図 11-a, b, c, 12-a, b, c, 13-a, b, c). また, 対照

群の上方咬筋附着部では, 上下的に広い範囲で骨に侵入するシャープピー線維が観察され, 下方咬筋附着部では, 下顎骨の深部までシャープピー線維が侵入する像が観察された (図 11-a, 12-a, 13-a). 一方, 臼歯切除群の下方咬筋附着部では, シャープピー線維の侵入は浅層に留まっていた (図 11-c, 12-c, 13-c). なお, 粉末飼料群では, 対照群と臼歯切除群の中間的な様相が観察された (図 11-b,

(a) 対照群 (×250)

Control group (×250)

(b) 粉末飼料群 (×250)

Powder diet group (×250)

(c) 臼歯切除群 (×250)

Molarless group (×250)

図 13 74 週齢における下顎骨咬筋附着部の組織所見 (右側: 咬筋附着部)

Light micrograph of the attachment of masseter muscle to mandible at 74 weeks (Right: attachment of masseter muscle)

12-b, 13-b). 臼歯切除群 47 週齢の下方咬筋附着部には、破骨細胞が観察されたが (図 11-c). 同群 74 週齢においては、わずかに観察されるのみであった (図 13-c).

IV. 考 察

正常な咀嚼機能の発現には、顎関節を含む下顎骨、歯、咀嚼筋などの顎口腔系の調和が必要である。特に、咀嚼筋は咀嚼時における下顎運動の主役をなすものであり、咬合や咀嚼の力学的影響により、成長期の下顎骨には形態的变化がもたらされることが報告されている^{12,13,21)}。さらに、深沢と坂本²²⁾、Madeira²³⁾、Avis²⁴⁾は、ラット咬筋の切除実験を行い、咬筋附着部である下顎枝あるいは下顎角部に形態的な変化を認め、筋機能が下顎骨の形態変化に密接に関与していることを報告している。しかし、これらの研究は成長期のラットを用いたものであり、高齢期における咀嚼筋の下顎骨形態に及ぼす影響に関する報告はみあたらない。また、高齢無歯顎者の下顎骨にみられる骨の粗鬆化には、下顎骨に対する咬合・咀嚼圧の喪失が一因であるとの推測もなされており^{18,19)}、両者の関連を明らかにする必要がある。そこで、本研究では、43 週齢から 74 週齢まで飼育した高週齢ラットを用いて、下顎骨咬筋附着部の観察を行い、生理的加齢変化に加えて、歯の欠損に伴う咬合高径の低下や咬合支持の喪失などの咬合関係の変化および飼育飼料の形態が、下顎骨の形態や構造に及ぼす影響を検討した。

1. 実験方法について

ラットの寿命は 2~3 年であるため、比較的短期間に生理的加齢変化を観察することが可能である。また、ラット下顎骨の形態や大きさはヒトとの類似性が少ないものの、出生が明確で個体差が少なく、多数を一度に入手できること、さらに、飼育条件や口腔内環境条件の設定やその変更が比較的容易であることから、本研究においては、実験動物としてラットを用いた。なお、Donryu ラットは Wistar 系ラットに比して大型であり、形態計測および咬筋附着部などの観察部位の同定が容易であるなどの利点がある。

本研究においては、まず、生理的加齢変化を観察するために、全実験期間を通して固形飼料で飼育した対照群を設定した。また、飼育飼料形態による影響を観察するために、生後 43 週齢の時点で、固形飼料を同一成分の粉末飼料に変更して飼育した粉末飼料群を設定した。さらに、臼歯部における咬合支持の喪失による下顎骨への咬合圧および咬合高径の低下と、粉末飼料飼育に伴う咀嚼時咬筋活動量の低下を想定し、生後 43 週齢の時点で臼歯歯冠部を切除し、固形飼料を粉末飼料に変更して飼育する臼歯切除群を設定した。これら 3 群の設定により、飼育飼料形態による影響については、固形飼料群 (対照群) と粉末飼料群を比較し、咬合関係の変化による影響については、粉末飼料群と臼歯切除群とを比較することによって、2 つの要因を個別に比較することが可能となった。さらに、高齢期における加齢変化に加えて、咀嚼機能の低下と成長期以降の食物摂取状況の差異が下顎骨、特に、咬筋附着部の形態と構造に及ぼす影響についての検索が可能になったと考える。

ラットの成長は約8週齢前後でほぼ停止し、成熟期に入るとされている^{25,26)}。また、浅野²⁰⁾は、ラット下顎骨の成長量は生後8週齢までが大きく、12週齢から16週齢にかけては漸次減少し、16週齢以降はほぼ成熟期に達していると報告している。さらに三木²⁷⁾は、受精後12日から生後540日(約77週齢)までのラットの観察から、生後50日(約7週齢)以降はあまり成長がみられないことを報告している。これらのことから、本研究では、下顎骨の成長が完全に終了し、老化期にあると判断される30週齢にてラットを購入し、予備飼育期間を経て、43週齢の時点から実験を開始し、47週齢、60週齢、74週齢で観察を行った。

一般に老年病学の分野では、理想的な環境条件下での老化を生理的老化と定義し、疾病や種々のストレスが原因となって引き起こされる老化を病的老化と定義している²⁸⁾。このことから、本研究における臼歯切除群は生理的老化に加えて、臼歯歯冠の切除による咬合・咀嚼機能の低下が病的老化を進行させ、下顎骨の老化を促進させると考え、47週齢に加えて、60週齢および74週齢の標本を作成し、臼歯切除が病的老化を進行させる因子となり得るかを検討した。

乾燥骨標本における下顎骨体長と下顎枝高の計測には、マイクロウォッチャーVS-30 H型(三菱化成社製)とこれに接続した画像計測システムKIP-110(三菱化成社製)を使用した。なお、本装置の精度と再現性についての報告はすでになされており²⁹⁾、本研究への応用は有効であると判断した。下顎骨体長と下顎枝高の計測部位の設定に際しては、浅野²⁰⁾の方法に準じて計測点を選択した。なお、これら計測点は、咀嚼動態の差異や成長発育による下顎骨の形態的変化が的確に表出されやすいとされている。

本研究における、骨塩量の測定においては、咬筋付着部に加えて、対照として、下顎切歯上方歯槽突起部を関心領域とした。なお、測定に際しては、この指定範囲内の各画素の輝度を256階調に分割し、各画素の輝度の平均値を相対的平均骨塩量指数として表示する方法を用いた。本研究の試料は軟組織が付着していない乾燥骨であり、X線吸収のほとんどは骨塩によって生じていると考えられること、また、個々のフィルムにおける黒化度は撮影されているアルミステップと画像解析システムの濃度補正処理プログラムによって補正されていることから、相対的平均骨塩量指数は、指定した範囲内の骨塩含有量を評価し得るものと考ええる。

2. 結果について

1) 体重および頭尾長の測定結果について

本研究における体重の測定結果は、対照群に比較して粉末飼料群がすべての週齢において高い値を示していた。また、臼歯切除群では、切除後に体重の減少が認められたに

もかわらず、70週齢以降は対照群のそれよりも高い値を示していた。ラットの体重増加については、雄では70～80日(10～11週齢)にほぼプラトーに達し、その後も緩慢ながら1年以上にわたって増加し続けることが示されている^{30,31)}。さらに、マウスやラットを長期間飼育した際の飼料形態や性状による体重の変化に関しては、いくつかの報告がみられる。すなわち、伊藤ら³²⁾は15週齢のマウスの観察から、固形飼料群と練食飼料群、粉末飼料群との間に体重の差異がなかったことを報告している。また、秋山³³⁾は、自然食(押し麦、煮干、大豆)、固形飼料、粉末飼料にて飼育した9週齢のラットの観察から、飼料群間には体重差はなかったことを報告している。一方、三谷³⁴⁾は、20週齢のマウスの観察から、固形飼料群に比較して液食飼料群における肝重量、脂肪重量、頭尾長および体重は有意に高い値を示したことを報告している。また、黒江³⁵⁾は、60週齢のマウスの観察から、肥満との関連が深い肝臓重量や精巣周囲脂肪組織は、ともに固形飼料群に比較して液状飼料群の方が有意に高い値を示したことを報告している。これらの結果は、飼育飼料の形態や性状の差異によって、体重に変化が生ずることを示している。このことは、Diamondら³⁶⁾のエネルギーの摂り方と肥満との関係についての実験により説明できる。すなわち、彼等は食物を通常に咀嚼しながら摂取した場合と、同一の食物を流動食にして胃チューブを用い、直接胃に流し込んだ場合では、食後の静止代謝率(resting metabolic rate: RMR)が異なっていることを報告している。なお、食事誘発性体熱産生反応に関して鈴木³⁷⁾は、咀嚼により食物の味覚や痛覚に対する刺激が脳視床下部に伝達された後、交感神経系の活動が高まって血中にノルアドレナリンが分泌され、それに伴いエネルギー代謝の上昇をきたすが、咀嚼をしない食べ方では摂取エネルギーの体脂肪への蓄積効率を高めることにつながるとしている。本研究における実験終了時(74週齢)の粉末飼料群の体重が対照群のそれよりも高い値を示していたことは、これらの結果と一致するものである。

臼歯切除群における術後の体重の減少に関しては、麻酔に加えて大きな外科的侵襲が加えられたために飼料の摂取量が減少し、他群と同等になるまで長期間を要したものと考えられる。なお、本研究においては、対照群と粉末飼料群に対しても、臼歯切除群に対して行ったと同様の麻酔を施した。このために、対照群と粉末飼料群の44週におけるわずかの体重の減少が観察されたと考えられる。また、44週における体重は粉末飼料群の方が対照群よりも高い値を示したが、粉末飼料への飼料形態変更の影響が早期より表れていることを示唆していると考ええる。

頭尾長の変化に関して、黒江³⁵⁾は、2週から60週までのマウスの観察において、20週以降にほとんど変化がみられなかったことを報告している。本研究においても、実

験開始から 74 週齢までに頭尾長の変化が認められなかったことは、実験期間中ラットに成長発育がなかったことを裏付けており、このことから、本研究に用いたラットは成熟期を過ぎ、老化期にあると判断される。

2) 下顎骨体長および下顎枝高の計測結果について

下顎骨体長は、対照群、粉末飼料群、臼歯切除群において、実験期間を通して変化は認められず、また、対照群と粉末飼料群および臼歯切除群の間には、顕著な差は認められなかった。このことは、下顎骨体長は加齢ならびに咀嚼動態の変化による影響を受けないことを示唆していると考えられる。

一方、下顎枝高については、対照群では加齢に伴う有意な増加を、また、粉末飼料群ではわずかな増加を認めた。しかし、臼歯切除群ではわずかではあるが、減少が認められ、さらに、対照群に比して、すべての週齢において、統計学的に有意な減少が認められた。このことは、咬合支持の喪失と飼育飼料形態の変更が下顎骨形態変化に関与していることを強く示唆している。すなわち、高齢期においても、咀嚼作用がその重要な因子であることを示唆している。なお、対照群で認められた下顎枝高の加齢に伴う有意な増加は、下顎頭軟骨に起因していると考えられる。すなわち、橋川²⁹⁾は、60 週齢以降のラット下顎頭に軟骨層の存在を観察しており、さらに、成長が継続していることを報告しているように、下顎頭軟骨の成長は生涯、完全に停止することがないと考えられる。一方、下顎骨体は膜性化骨であるため、本研究における観察結果からも、成長は停止しているものと考えられる。

日常行われる咀嚼作用が下顎骨形態に及ぼす影響について、伊藤³⁸⁾は、日本古代人と現代人の顎骨を比較し、現代人においては、その大きさが縮小して、下顎角が開大していることを認めている。そして、これらの変化が、食文化の発達に伴う食物の粉碎化と栄養素の濃縮による咀嚼時の機能量の減少によって引き起こされ、次時代以降の不正咬合の増大の観点から咀嚼運動による下顎骨への機械的負荷の重要性を示唆している。なお、補綴学の分野においても、咀嚼時に歯や顎関節に加わる咬合力による下顎骨の力学的対応についての報告が多くなされており³⁹⁻⁴¹⁾、また、対合歯との接触状態の変化によって、下顎骨体の筋付着部の応力分布が変化することが報告されている⁴²⁾。これらの報告から、歯の欠損やそれに伴う歯の移動などによる咬合接触状態の変化や長期間にわたる偏った咬合・咀嚼圧の負荷が下顎骨の形態変化を引き起こすことは容易に想像される。

飼育飼料の形態や性状が顎骨形態に及ぼす影響については、Ito ら⁴³⁾、Bouvier⁴⁴⁾、Watt and Williams⁴⁵⁾ が、軟性食と固形食によって飼育した成長期のラットを比較し、軟性食による上下顎骨、下顎頭、上顎骨幅（左右第二臼歯遠心頬側咬頭頂間距離）の矮小化と狭窄を報告している。

しかし、飼育飼料の性状の変化に加えて、咬合関係の変化および加齢による顎骨の変化に関する形態計測学的報告はほとんどみられない。なお、橋川²⁹⁾は、本研究と同様な実験から、成熟期以降のラットにおける下顎枝高の変化は下顎頭形態の変化が大きな原因であることを指摘している。しかし、ラット咬筋は下顎枝を広く覆っており、咀嚼時の筋活動は下顎骨への大きな応力の負荷につながるため、下顎骨体部の骨改造に関与していることは十分に考えられる。したがって、臼歯切除群における下顎枝高の減少は、下顎頭部と咬筋付着部の両者における骨改造によってもたらされたものとの考え方が妥当であると思われる。

3) 骨塩量の測定結果について

Wistar 系ラットの下顎頭の骨密度 (bone density, bone mass) の加齢変化に関して、野々部⁴⁶⁾は、1 歳 (約 50 週齢) までは増加を認め、その後は、2 歳 (約 100 週齢) までに若干の減少を認めたことを報告している。また、橋川²⁹⁾は、Donryu ラットの下顎頭の測定から、最大値が 47 週齢にみられたことを報告している。しかし、ラット下顎骨筋付着部における骨密度の加齢変化についての報告はみられない。本研究において、対照群では 47 週齢から 60 週齢にかけて加齢に伴い増加傾向が、また、60 週齢から 74 週齢にかけては、減少傾向が認められたことは、下顎頭における peak bone mass と咬筋付着部のそれは、時期が異なっていることを示している。

飼育飼料の形態と骨塩量との関係については、下顎頭部で観察した橋川の報告がある²⁹⁾。すなわち、高週齢ラットにおいては、粉末飼料で飼育した群および歯冠を切除した時点から粉末飼料で飼育した群の下顎頭の骨塩量は、固形飼料で飼育した対照群に比べて、有意に減少したことを報告している。本研究によって、咬筋付着部の骨塩量もまた、飼育飼料形態の影響を受けていることが明らかとなった。すなわち、60 週齢と 74 週齢の粉末飼料群は各々の週齢の対照群に比して、骨塩量が有意に低下しており、さらに、臼歯切除群では、すべての週齢において、対照群に比して骨塩量の有意な低下が認められた。

咬筋付着部と切歯上方歯槽突起部における骨塩量の変化に及ぼす加齢および飼育飼料形態、咬合関係の影響を検討するために、各週齢毎に、それぞれの対照群の骨塩量に対する粉末飼料群ならびに臼歯切除群の骨塩量の比を算出した結果、60 週齢群および 74 週齢群では、粉末飼料群、臼歯切除群とも、咬筋付着部の方が切歯上方歯槽突起部よりも有意な低値を示していた。これらの結果は、加齢に加えて、粉末飼料飼育および臼歯切除による咬合高径の低下と咬合支持の喪失によって、力学的環境が変化し、骨の粗鬆化が促進されたために生じたものと推測される。なお、川崎と田中⁴⁷⁾は、ヒト下顎骨の非脱灰標本の観察から、下顎第一大臼歯の喪失により同側の下顎骨全体に緻密骨の菲薄化や骨梁の減少などの退行性的変化がみられたこと、ま

た、咀嚼筋附着部の下顎骨に退行性変化がみられたことを報告しており、形態学的観点からも、本研究の結果を裏付けていると考えられる。

一般に、骨量を維持、増加させるためには運動や加重などの物理的刺激が重要であるとされており、長期間臥床患者では椎体の骨量が1週間で1%減少し、数カ月では10~20%も減少するとの報告もある⁴⁸⁾。これらの報告と本研究の結果と考え合すると、下顎骨の病的老化を予防する観点からも、下顎骨へ対する咬合・咀嚼による適度な機械的刺激の継続が必要であり、高齢期における適正な咬合維持による咀嚼作用の重要性が示唆された。

4) コンタクトマイクロラジオグラムならびに組織学的所見について

咬筋附着部の組織学的観察において、同部には2つの部分が観察された。すなわち、筋線維が骨膜・層板骨を介してシャープー線維へ移行している上方の部分（上方咬筋附着部）と腱・線維軟骨を介してシャープー線維へ移行している部分（下方咬筋附着部）である。山田⁴⁹⁾は、咬筋附着部の骨組織の骨化様式がそれぞれ異なった形態学的特徴を示すことに着目し、同部を膜性化骨を呈する骨膜性附着部、鋸歯状の膜性化骨を呈する移行部、鋸歯状の線維軟骨性化骨を呈する腱性附着部に区分することを提唱している。このことに照らし合すると、本研究における上方咬筋附着部は骨膜性附着部に、また、下方咬筋附着部は腱性附着部に相当するものと考えられる。しかし、移行部の識別は不能であった。これは、山田⁴⁹⁾の観察部位が前頭断の第二臼歯部であるのに対し、本研究における観察部位が下顎枝咬筋附着部であったためと考えられる。

McNamara¹¹⁾は、成長期のサルを用いた咬合挙上実験を行い、下顎角の局所的な骨吸収を観察し、筋が元の長さに戻ろうとする力によって、筋・骨界面の附着部が移動するであろうことを推測している。また、山田¹⁴⁾は、咬合挙上に伴うラット下顎骨咬筋附着部の観察から、筋機能の変化が咬筋附着部の形態的变化をもたらすことを報告している。しかし、本研究における臼歯切除群は、これらの実験とは異なり、咬合高径が低下しており、また、咬合支持が喪失しているため、筋の緊張が解かれた状態にある。このような状態にもかかわらず、下方咬筋附着部には破骨細胞が出現し、咬筋附着部の骨吸収が生じ、さらに、筋附着部の位置に変化が認められた。本研究におけるこれらの所見は、筋機能が骨改造現象に多大な影響を与えるとするMcNamara¹¹⁾、山田¹⁴⁾らの考えを支持する結果と考える。

また、コンタクトマイクロラジオグラムで観察された対照群、粉末飼料群、臼歯切除群における咬筋附着部の形態的变化と光学顕微鏡で得られた各群の組織学的所見を考えあわせると、臼歯切除群における咬筋附着部の経時的変化には、以下の様相が推測された。すなわち、臼歯切除群47週齢の腱性附着部で観察された多数の破骨細胞は、咬

図 14 臼歯切除群における下顎骨下縁の変化
Schematic drawing of the lower border of rat mandible

- ①：咬筋
masseter muscle
- ②：腱性附着部（多数の破骨細胞が観察される）
Tendinous attachment of masseter muscle (many osteoclasts were observed)
- ③：腱性附着部
Tendinous attachment of masseter muscle (few osteoclasts were observed)
- ④：時間の経過に伴って生じた骨吸収
Bone resorption with aging

筋附着部から下顎骨下縁側にかけての骨吸収を惹起した。これにより、腱性附着部が上方に移動し、膜性附着部の附着範囲は減少した（図14）。また、腱性附着部が上方に移動することにより、咬筋の張力が減弱し、骨へ加わるmechanical stressがさらに減少し、骨吸収を進行させた。なお、このような咬合および咬合支持の変化は、加齢による骨代謝の低下と不調和を加速させる修飾因子となり得ると考えられる。したがって、本研究の結果は、高齢期における適正な咬合維持による筋機能の保全が、下顎骨を含めた顎口腔系の健康維持のために重要であることを示唆している。

V. 結 論

高週齢ラットを用いて、生理的加齢変化に加えて、歯の欠損に伴う咬合高径の低下や咬合支持の欠如などの咬合関係の変化、さらに高齢期における飼育飼料の形態や性状の変更が下顎骨の形態や構造に及ぼす影響を検討することを目的として、全実験期間を通して通常の固型飼料で飼育した対照群、生後43週齢になった時点で固型飼料を粉末飼料に変更して飼育した粉末飼料群、生後43週齢になった時点で臼歯部歯冠部を切除するとともに、それまでの固型飼料を粉末飼料に変更して飼育した臼歯切除群の3群を設定し、咬筋附着部を中心として、形態学的、組織学的観察により検討を行った。

得られた結果は以下の通りである。

1. 各群とも、下顎骨体長には、実験期間中、変化は認められなかった。一方、下顎枝高は、対照群において加齢に伴う有意な増加傾向が、また、粉末飼料群においてはわずかな増加傾向が、さらに、臼歯切除群においてはわずか

な減少傾向が認められた。また、各観察週齢における臼歯切除群の下顎枝高は、対照群に比較して有意に減少していた。

2. 対照群における咬筋付着部の相対的平均骨塩量指数は、60 週齢において最大値を示した。一方、粉末飼料群および臼歯切除群におけるそれは、47 週齢から 74 週齢にかけて漸次減少する傾向が認められた。また対照群に対して臼歯切除群では、すべての週齢において、統計学的に有意な減少が認められた ($p < 0.05$)。

下顎骨切歯上方歯槽突起部の相対的平均骨塩量指数は、各群とも、咬筋付着部のそれとほぼ同様の傾向を示した。

咬筋付着部と切歯上方歯槽突起部における骨塩量について、各週齢毎に、対照群の骨塩量に対する粉末飼料群、臼歯切除群の骨塩量の比を検討したところ、60 週齢群および 74 週齢群では、粉末飼料群、臼歯切除群とも、咬筋付着部の方が切歯上方歯槽突起部よりも有意に減少していた。

3. コンタクトマイクロラジオグラムの観察から、対照群における咬筋付着部の形態と臼歯切除群におけるそれとの間には、各週齢とも、顕著な差異が認められた。また、対照群では高石灰化を示すオステオンが顕著に観察されるのに対し、臼歯切除群では、ほとんど観察されず、一部に、吸収窩が観察された。なお、粉末飼料群におけるこれら所見は、対照群と臼歯切除群の中間的な様相を呈していた。

4. 光学顕微鏡による組織切片標本の観察から、咬筋付着部は、筋線維が骨膜・層板骨を介してシャープリー線維へ移行している上方の部分（上方咬筋付着部、骨膜性付着部）と腱・線維軟骨を介してシャープリー線維へ移行している部分（下方咬筋付着部、腱性付着部）が観察された。なお、上方咬筋付着部では、臼歯切除群の方が対照群よりも、上下的な付着範囲が縮小する傾向が認められた。また、臼歯切除群の同部では、シャープリー線維と腱線維の連続性が失われている像が観察された。一方、下方咬筋付着部では、臼歯切除群に比して対照群の方がシャープリー線維は深部まで侵入する像が観察された。また、臼歯切除群の 47 週齢における下方咬筋付着部には、多数の破骨細胞が観察されたが、時間の経過と共に減少した。

以上の結果から、生理的加齢変化に加えて、歯の喪失による咬合高径の低下と咬合支持の喪失、さらに、固型から粉末への飼育飼料形態の変化が下顎骨下縁、特に、咬筋付着部の形状および構造に明らかな影響を及ぼすことが確認された。このことは、高齢期における咬合関係の変化や摂取する食品の硬さの変化が下顎骨咬筋付着部における形態学的・組織学的変化をもたらすことを意味しており、咀嚼による適度な機械的刺激と筋機能に調和した咬合維持が、下顎骨を保全する観点からも、重要であることが示唆された。

稿を終えるに臨み、終始ご懇篤なご指導とご校閲を賜りました平井敏博教授に深甚なる謝意を表すとともに、多大のご教示とご校閲をいただきました本学歯学部口腔解剖学第一講座 矢嶋俊彦教授ならびに口腔外科学第一講座 金澤正昭教授に深く感謝いたします。また、本研究にご援助ご協力くださいました本学歯学部歯科補綴学第一講座の諸先生に厚くお礼申し上げます。

なお、本論文の一部は、第 5 回日本老年歯科医学会総会（平成 6 年 9 月、福岡）において発表した。

文 献

- 1) 中村嘉男：咀嚼運動の神経・筋メカニズム—顎運動を中心に— (1), (2), (3), 歯界展望, 63: 123~137, 297~316, 477~492, 1984.
- 2) 窪田金次郎：咀嚼システム, The Quintessence, 8: 682~687, 1989.
- 3) Hirai, T., Ishijima, T., Koshino, H. et al: Age-related change of masticatory function in complete denture wearers, Int J Prosthodont, 7: 442~448, 1994.
- 4) 千田道雄, 石川直欣, 石井賢二ほか：ポジトロン CT で測定した正常若年者と高齢者の咀嚼時の局所脳血流量の変化, 日咀嚼誌, 2: 49~54, 1992.
- 5) 船越正也：咀嚼と脳, 窪田金次郎編, 咀嚼システム入門, 211~224, 風人社, 東京, 1987.
- 6) Clark, G.T., Rugh, J.D. and Handelman, S.L.: Nocturnal masseter muscle activity and urinary catecholamine levels in bruxers, J Dent Res, 59: 1571~1576, 1980.
- 7) 武田悦孝：ヒト睡眠中の Bruxism に関する臨床研究—実験的咬合干渉付与前, 付与後, 除去後における筋電図, 脳電図, 呼吸曲線, 神経内分泌の反応, ならびに臨床的所見の経時的比較検討—, 歯学, 71: 276~337, 1983.
- 8) 萩原 彰, 小林義典：ヒト睡眠中の Bruxism に関する臨床研究—水平的咬合干渉付与前, 付与後, 除去後における筋電図, 脳電図, 呼吸曲線, 神経内分泌の反応, ならびに臨床的所見の経時的比較検討—, 歯学, 73: 946~1019, 1985.
- 9) 一條 尚：上下顎骨の形態と構造の変化, オーラル・マキシロフェイシャル・インプラント, 3: 155~165, 1989.
- 10) 浦郷篤史：口腔諸組織の加齢変化, 19~59, クインテッセンス出版, 東京, 1991.
- 11) McNamara, J.A.: Neuromuscular and skeletal adaptations to altered function in the orofacial region, Am Orthod, 65: 578~606, 1973.
- 12) Folke, L.A. and Stallard, R.E.: Condylar adaptation to a change in intermaxillary relationship, J Periodont Res, 1: 79~89, 1966.
- 13) Moss, J.P.: The soft tissue environment of teeth and jaws, Experimental malocclusion: Parts 2 and 3, Br J Orthod, 7: 205~216, 1980.
- 14) 山田一尋：咬合挙上に伴うラット下顎骨咬筋深層付着部の変化に関する組織学的研究, 日矯歯誌, 44: 611~626, 1985.
- 15) 十河基文, 前田芳信, 堤 定美ほか：下顎骨骨梁の生体力学的研究 第 1 報 天然歯根周囲骨梁パターンと咬合力の伝達経路, 補綴誌, 37: 505~513, 1993.

- 16) 沖本公繪, 宮武幸輔, 日永田裕子ほか: 臼歯部ブリッジの力学的検討—齒槽骨の吸収を伴う支台歯の場合 第1報—, 補綴誌, 32: 1067~1081, 1988.
- 17) 小林喜平, 岡野雅一, 城野利盛ほか: 赤外線応力画像法による下顎骨の力学的対応に関する基礎的研究—第2報 咀嚼筋ベクトルの大きさが下顎骨の力学的対応に及ぼす影響について—, 補綴誌, 37: 896~904, 1993.
- 18) Hirai, T., Ishijima, T., Hashikawa, Y. and Yajima, T.: Osteoporosis and reduction of residual ridge in edentulous patients, J Prosthet Dent, 69: 49~56, 1993.
- 19) Kribbs, P.J., Chesnut, C.H., Ott, S.M. et al: Relationship between mandibular and skeletal bone in a population of normal woman, J Prosthet Dent, 63: 86~89, 1990.
- 20) 浅野央男: ラット下顎骨成長に及ぼす外力の影響について, 日矯歯誌, 44: 12~30, 1985.
- 21) 花岡 宏: 咬合挙上時の閉口筋の順応性についての実験的研究, 九州歯会誌, 25: 71~85, 1971.
- 22) 深沢裕文, 坂本敏彦: 閉口運動に関与する筋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, 45: 521~530, 1982.
- 23) Madeira, M.C.: Radiographic changes in the trabecular pattern of the mandibular ramus following masseterectomy in growing monkeys, J Dent Res, 56: 543, 1977.
- 24) Avis, V.: The significance of the angle of the mandible: An experimental and comparative study, Am J Phys Anthropol, 19: 55~61, 1961.
- 25) 松岡 理: 実験動物からヒトへの外挿 1980 年度版, 43~51, ソフトサイエンス社, 東京, 1980.
- 26) 高橋和明: 実験動物の飼育管理と手技, 高橋和明, 信永利馬編著, 実験動物叢書 2, 238~257, ソフトサイエンス社, 東京, 1979.
- 27) 三木 毅: ラット顎関節の発生並びに発育に関する研究, 京大口科紀要, 12: 1~33, 1972.
- 28) 今堀和友: 基礎老年医学総論, 村上元孝, 太田邦夫, 今堀和友監修, 臨床老年医学体系 1, 4~13, 情報開発研究所, 東京, 1983.
- 29) 橋川美子: 加齢と咀嚼動態が高齢ラット下顎骨に及ぼす影響, 口病誌, 60: 440~468, 1993.
- 30) 石原正彦, 高橋寿太郎, 菅原七郎ほか: 実験動物学ラット, 講談社サイエンスフィク, 104~162, 講談社, 東京, 1984.
- 31) 日本クレア: クレア生産供給動物 (マウス・ラット) の参考データ集, 1~4, 日本クレア, 東京, 1985.
- 32) 伊藤学而, 黒江和斗, 安田秀雄ほか: 顎骨の退化に関する実験的研究, 日矯歯誌, 41: 708~715, 1982.
- 33) 秋山順史: 食生活の変化がラットの成長および行動の発達に及ぼす影響についての実験心理学的研究, 口科誌, 37: 127~142, 1988.
- 34) 三谷誠一: 飼料の粉碎化と液化がマウスの咀嚼器官と全身の発育に及ぼす影響, 日矯歯誌, 47: 249~250, 1988.
- 35) 黒江和斗: 下顎頭と下顎窩の加齢変化に及ぼす咀嚼の影響, 日矯歯誌, 50: 196~209, 1991.
- 36) Diamond, P., Brondel, L. and Leblanc, J.: Palatability and postprandial thermogenesis in dogs, Am J Physiol, 248: 75~79, 1985.
- 37) 鈴木正成: よく噛んで食べて, よく運動して一肥満退治の食べ方・生き方—, 日本歯科評論, 596: 111~122, 1992.
- 38) 伊藤学而: 軟食に対する咀嚼システムの硬組織の適応, 文部省特定研究「咀嚼システムの基礎的研究」総括班編, 咀嚼システムの形成と適応, 231~239, 風人社, 東京, 1980.
- 39) 村田美雄, 上山松吉, 今田晴隆: 咬合時における下顎骨の主応力分布に就いての研究, 歯科学報, 59: 392~405, 1959.
- 40) 杉村忠敬: 咬合力に対する歯および下顎骨の力学的反応機構に関する実験的研究, 補綴誌, 23: 512~536, 1979.
- 41) 大曲孝治, 池田 博, 岡本隆士ほか: 下顎 FEM モデルにおける咬合力の応力分布に関する研究, 補綴誌, 22: 574~579, 1978.
- 42) 渡瀬状子, 高村 浩, 岩田 徹ほか: 顎関節を含む下顎骨における咬合力の力学的影響に関する研究, 補綴誌, 25: 569~575, 1981.
- 43) Ito, G., Mitani, S. and Kim, J.H.: Effect of soft diets on craniofacial growth in mice, Anat Anz, 165: 151~166, 1988.
- 44) Bouvier, M.: Effect of age ability of rat temporomandibular joint to respond to changing functional demands, J Dent Res, 69: 1206~1213, 1988.
- 45) Watt, D.G. and Williams, C.H. M.: The effect of the physical consistency of food on the growth and development of the mandible and the maxilla of the rat, Am J Orthod, 37: 895~928, 1951.
- 46) 野々部憲志: ラット下顎頭の加齢的变化に関する組織学的ならびに組織形態計測学的研究, 愛院大歯誌, 30: 91~108, 1992.
- 47) 川崎堅三, 田中 秀: 小数歯の破壊および喪失に伴う下顎骨の形態と構造の変化—下顎第一大臼歯の重要性—, 歯界展望, 83: 414~435, 1994.
- 48) 折茂 肇, 水野有三: 骨粗鬆症, 老年歯科医学, 8: 1~13, 1993.
- 49) 山田一尋: 成長に伴うラット下顎骨咬筋深層附着部の移動様式に関する組織学的研究, 歯基礎誌, 27: 254~271, 1985.