

顎顔面骨格の形態形成に及ぼす咀嚼筋活動の影響： ラットの終日筋電図による検討

石 塚 泰 男

Influences of Masticatory Muscle Activity on Morphogenesis of the Craniofacial Skeleton: a Study with 24-hour EMG in Rats

Yasuo Ishizuka

(平成 8 年 6 月 5 日 受付)

緒 言

歯科矯正臨床においては、成長期の不正咬合者に対して顎顔面骨格の成長コントロールを目指したさまざまな治療が必要となるため、顎口腔機能と顎顔面形態の関連性を明らかにすることはきわめて重要である。機能と形態との係わりに関しては、人類の進化に伴い顎顔面形態にも変化が生じてきたとの報告が散見され¹⁻⁴⁾、古代から現代に至る顎骨の縮小を伴う形態変化について、時代の変遷に伴う食生態の変化、すなわち粗くて硬い食物から調理された軟らかい食物への移行につれて、咀嚼による機能量が減少してきたことがその関連因子として指摘されている^{2,4)}。

従来、顎口腔機能と顎顔面形態との関わりについて、ヒトでは咬合力や閉顎力⁵⁻⁷⁾、咀嚼筋活動⁶⁻¹⁰⁾あるいは咀嚼筋の大きさや走行¹¹⁻¹⁵⁾などを指標とした検討がなされ、両者の間に大きな関連のあることが確認されている。しかし、これらの研究は多くの場合、一時期における短時間の記録に基づいて筋の活動能力を観察しているに過ぎず、筋活動の大小が顎顔面形態の不調和をもたらすのか、あるいは骨格系の不調和が筋活動の変化を生じさせるのかは不明であった。

一方、顎顔面頭蓋の成長発育に及ぼす咀嚼筋活動の影響について、動物実験では、食餌の硬軟による筋活動の変化¹⁶⁻²³⁾や、顎運動に関与する筋の切断、切除²⁴⁻²⁶⁾あるいは支配神経の切除^{27,28)}などによる筋の

欠如や不活動に基づいて両者の関係が検討され、咀嚼筋機能の変化が顎骨の発育に影響を及ぼすことが明らかにされた。しかし、生理的状态下での咀嚼筋活動の様相についてはほとんど明らかにされておらず、どの時点の、どのような咀嚼筋活動の違いが顎顔面形態の形成に深く関わっているかについてはまったく不明である。

本研究では、顎顔面骨格および咀嚼筋の経日的な成長変化に加え、さらに、食餌の硬軟に応じて終日の咀嚼筋活動にどのような差が生じるのか、またラットの成長に伴いそれがどう変化するかを観察することにより、咀嚼筋機能の相違が咀嚼筋の成長発育や顎顔面骨格の形態形成に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

研 究 方 法

I. 実験動物

実験には4週齢のWistar系雄性ラット55匹を用い、無作為に固形飼料を用いた飼育群（以下固形群とする）29匹と、同じ成分の粉末飼料を用いた飼育群（以下粉末群とする）26匹の2群を設け、15週齢まで飼育した。実験は図1に示すタイムスケジュールに従い、

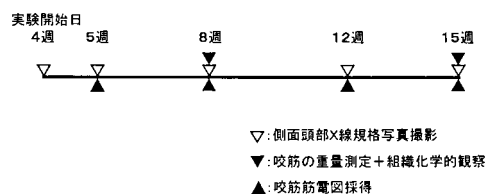


図1 タイムスケジュール.

広島大学歯学部歯科矯正学講座（主任：丹根一夫教授）本論文の要旨の一部は平成6年12月の第42回国際歯科研究学会日本部会（JADR）総会において発表した。

実験開始時である4週齢時に側面頭部X線規格写真撮影を行い、さらに実験期間中の5週齢、8週齢、12週齢、15週齢時に各群の9匹のラットについて側面頭部X線規格写真撮影を行った。また、8週齢、15週齢時のそれぞれ5匹のラットについて、咬筋の重量測定と組織化学的観察を行った。さらに、5週齢、8週齢、12週齢、15週齢時に固形群の15匹、粉末群の12匹について咬筋筋電図記録を行った(表1)。なお、終日の咬筋活動の分析は連続24時間の筋電図を記録できた場合に限って行った。また、周波数分析は各群、各週齢とも2匹についてのみ行った。

飼料にはマウス・ラット・ハムスター飼育繁殖用固形飼料およびこれと同一成分の粉末飼料(CE-2, 日本クレア, 東京)を用いた。水および飼料は十分に与え、自由に摂取できるようにした。また、動物飼育室内は蛍光灯による人工照明を行い、点灯は8時、消灯は20時とした。

表1 実験対象

	固形群	粉末群	計
側面頭部X線規格写真撮影	9	9	18
咬筋の重量測定 +組織化学的観察	5(5)	5(5)	10(10)
咬筋筋電図記録	15	12	27
計	29	26	55

(): 15週齢時において、側面頭部X線規格写真撮影後に屠殺し、咬筋の重量測定と組織化学的観察を行った個体数を示す。

II. 顎顔面頭蓋の形態分析

1. 側面頭部X線規格写真撮影

ベントバルビタールナトリウム 50 mg/kg (ネプタール 1 ml/kg, ダイナボット, 大阪)と硫酸アトロピン 0.5 mg/kg (硫酸アトロピン注射液タナベ 1 ml/kg, 田辺製薬, 大阪)の混合液をラット腹腔内に注入し、全身麻酔下で側面頭部X線規格写真を撮影した。撮影には、ラット&マウスX線規格撮影装置(RM-60, 朝日レントゲン, 京都)を用いた(図2)。撮影条件としては二次電流を6 mA, 照射時間を3.0 secに設定し、二次電圧を週齢に応じて25~35 KV_pの範囲で変化させた。

側面頭部X線規格写真撮影に際しては、X線発生装置の管球焦点から左右イヤーロッド中心までの距離を250 mm, そこからフィルム面までの距離を25 mmとした(図2)。フィルムには歯科用オクルーザルフィルム(DF-50, EASTMAN CODAK, Rochester)を用

ラット&マウスX線規格撮影装置(RM-60)

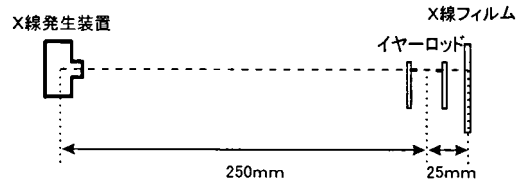


図2 側面頭部X線規格写真撮影時の幾可学的条件。撮影条件は二次電流を6 mA, 照射時間を3.0 secとし、二次電圧は週齢に応じて25~35 KV_pの範囲で変えた。

い、現像および定着は指示通り行った。

2. 側面頭部X線規格写真の計測

撮影した側面頭部X線規格写真をスキャナ(GT-9000, エプソン, 東京)を介して、400 dpiの解像度でパーソナルコンピュータ(Quadra 800, アップルコンピュータ, 東京)に取り込んだ後、ディスプレイに表示した5倍拡大像上で顎顔面頭蓋各部を代表する25計測点を設定した(図3, 表2)。計測点は, Kiliaridisら²²⁾の方法を参考にして設定し、さらに、下顎頭の位置をあらわすCo, ならびに、計測上の点としてIu, U1, U2からAN平面およびII, L1, L2, CoからGnPg平面に下した垂線上の点としてそれぞれIu', U1', U2'およびII', L1', L2', Co'を設定した。成長発育に伴う顎顔面頭蓋の形態変化を比較するために、距離計測項目(図3-A, 表3)および角度計測項目(図3-B, 表4)を設定し、ハイパーカードで作成したプログラムを用いて分析を行った。

III. 咀嚼筋活動の分析

1. 電極の設置および筋電図の記録

咀嚼筋のうち最も大きく、最大の機能力を発揮する咬筋を咀嚼筋の代表として選択し、その筋電図を記録した。

電極にはポリエチレンチューブ(外径0.8 mm)で被覆されたステンレス撚り線(直径0.2 mm)を用い、先端を1 mm露出させた。電極の設置に際しては、側面頭部X線規格写真撮影時と同様に、ネプタールによる全身麻酔下で頭部皮膚を剝離後、記録用の相極電極を咬筋浅層筋腹中央部まで皮下を貫通させ、その断端を筋膜上に設定した。記録用電極の位置は咬筋浅層における筋の走行と平行に3 mm間隔とし、電極の皮下での安定をはかるため頬骨弓に縫合、固定した(図4)。不関電極は頭部皮下に埋設し、記録用電極とともに歯科用アクリルレジジンおよび歯科用セメントで頭蓋骨に接着、固定した。なお、筋電図の記録を行う前

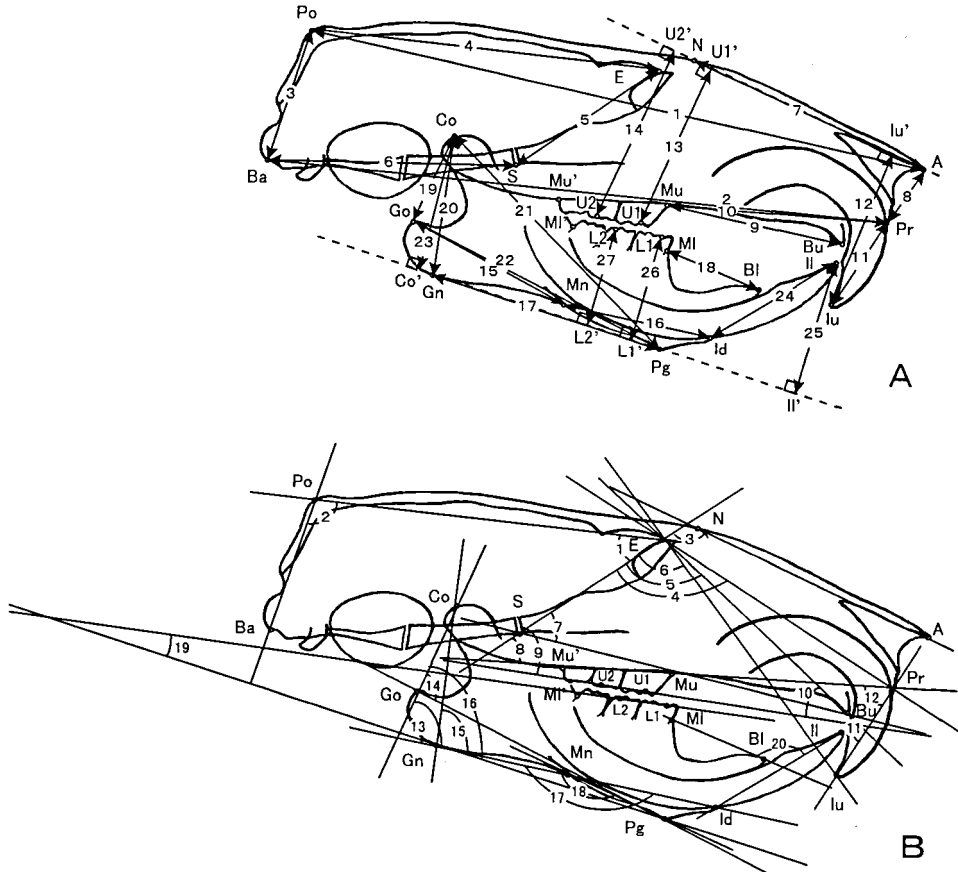


図3 側面頭部X線規格写真における計測点および計測方法。

- A : 距離計測項目
 1. Po-A, 2. Ba-Pr, 3. Po-Ba, 4. Po-E, 5. S-E, 6. S-Ba, 7. N-A, 8. A-Pr, 9. Mu-Bu, 10. Mu-Pr, 11. Pr-Iu, 12. Iu-Iu', 13. U1-U1', 14. U2-U2', 15. Go-Mn, 16. Mn-Id, 17. Gn-Pg, 18. MI-BI, 19. Co-Go, 20. Co-Gn, 21. Co-Pg, 22. Go-Pg, 23. Co-Co', 24. II-Id, 25. II-II', 26. L1-L1', 27. L2-L2'
- B : 角度計測項目
 1. PoE/SE, 2. PoBa/PoE, 3. AN/SE, 4. PrE/SE, 5. BuE/SE, 6. IuE/SE, 7. MuBu/SE, 8. MuPr/SE, 9. U1U2/SE, 10. BuE/U1U2, 11. PrIu/MuBu, 12. PrIu/MuPr, 13. CoGo/MnId, 14. CoGo/GoPg, 15. CoGn/GnPg, 16. CoGo/GnPg, 17. GnMn/MnId, 18. GnMn/MnPg, 19. L1L2/GnPg, 20. MIBI/IdII

に外科的侵襲からの一週間の回復期間を置いた。

筋電図の記録に際しては交流障害をはじめとしたノイズの混入を防ぐ必要があるため、電極からの距離を可及的に短くした状態で小型生体アンプ (HDX-82, Oxford Instruments, Abingdon; 規格 DC~ 800 Hz (±3 dB)) に接続した (図4)。なお、アンプ接続時にも麻酔が必要であったため、筋電図の記録開始は、ラットが麻酔から十分に覚醒し、実験装置に馴れるまで、リード線装着の数時間後とした。

筋電図の記録は、装置の破損を避けるために筋電図記録用ケージ内で行い、ラットには前後方向への運動のみ許容した。なお、運動を可及的に拘束しないように、ケージの大きさはワイヤーおよび内部に挿入した

アクリル板の位置を移動させることによって、ラットの成長に応じて変化させた (図5)。

2. 咬筋活動の記録および周波数特性の分析

終日の筋活動の記録、分析に先立って、ラットの咬筋バーストのパワースペクトルを求め、その周波数特性について検討した (図6)。筋電図の記録は前述の小型生体アンプにて生体信号を増幅後、FM 変調方式によるデータレコーダ (FMR-44, ソニー、東京) にてテープ速度 19 cm/sec で、磁気テープ (SIT80, ソニーマグネスケール、東京) に収録した。なお、データレコーダの周波数特性は DC~ 2000 Hz において平坦である。

記録した筋電図を実時間再生し、シグナルプロセッ

表2 側面頭部X線規格写真における計測点

Po	: 外後頭稜の最後点
N	: 鼻骨前頭縫合の最上点
A	: 鼻骨の最前点
E	: 前頭骨と篩骨後縁の最上縁点との交点
S	: intersphenoidal synchondrosis の最下点
Ba	: 後頭顆の最後下点
Pr	: 上顎歯槽突起の最下前点
Bu	: 上顎口蓋側歯槽突起正中中部尖端
Iu	: 上顎切歯切端
Mu	: 上顎歯槽骨と上顎第1臼歯近心面との交点
U1	: 上顎第1臼歯の近心窩
U2	: 上顎第2臼歯の遠心窩
Mu'	: 上顎骨と上顎第3臼歯遠心面との交点
Il	: 下顎切歯切端
Id	: 下顎歯槽突起の最上前点
Pg	: オトガイ隆起の先端すなわち下顎下縁の前方最下縁点
Mn	: antegonial notch 彎曲の最深点
Gn	: 角突起の最下縁点
Go	: 角突起の最後点
Ml	: 下顎歯槽骨と下顎第1臼歯近心面との交点
Bl	: 下顎舌側歯槽突起正中中部尖端
L1	: 下顎第1臼歯の近心窩
L2	: 下顎第2臼歯の遠心窩
Ml'	: 下顎骨と下顎第3臼歯遠心面との交点
Co	: 下顎頭の最外側端

表3 側面頭部X線規格写真における距離計測項目

全頭蓋	
Po-A	: 鼻骨最前点までの全頭蓋長
Ba-Pr	: 上顎歯槽突起までの全頭蓋長
脳頭蓋	
Po-Ba	: 後頭骨の高さ
Po-E	: 脳頭蓋の長さ
S-E	: intersphenoidal synchondrosis を境とした前頭蓋底の長さ
S-Ba	: intersphenoidal synchondrosis を境とした後頭蓋底の長さ
上顔面頭蓋	
N-A	: 鼻骨の長さ (顔面頭蓋の長さ)
A-Pr	: 顔面頭蓋前方部の高さ
Mu-Bu	: 上顎歯槽部の長さ
Mu-Pr	: 上顎歯槽部の長さ
Pr-Iu	: 上顎切歯の長さ
Iu-Iu'	: 上顎切歯を含む上顔面部の高さ
U1-U1'	: 上顎第一臼歯での上顔面部の高さ
U2-U2'	: 上顎第二臼歯での上顔面部の高さ

下顎骨	
Go-Mn	: 角突起の長さ
Mn-Id	: antegonial notch より前方の下顎骨体長
Gn-Pg	: 角突起を含まない下顎骨体長
Ml-Bl	: 下顎歯槽部の長さ
Co-Go	: 下顎枝長
Co-Gn	: 下顎枝長
Co-Pg	: 下顎骨長
Go-Pg	: 下顎骨体長
Co-Co'	: 下顎枝の高さ
Il-Id	: 下顎切歯の長さ
Il-Il'	: 下顎切歯を含む下顔面部の高さ
L1-L1'	: 下顎第一臼歯での下顔面部の高さ
L2-L2'	: 下顎第二臼歯での下顔面部の高さ

表4 側面頭部X線規格写真における角度計測項目

脳頭蓋	
PoE/SE	: 頭蓋底に対する頭蓋冠の上下的位置
PoBa/PoE	: 頭蓋冠の形態
上顔面頭蓋	
AN/SE	: 頭蓋に対する鼻骨の傾斜角
PrE/SE	: 頭蓋に対する上顎の上下的位置
BuE/SE	: 頭蓋に対する上顎の上下的位置
IuE/SE	: 頭蓋に対する上顎切歯の上下的位置
MuBu/SE	: 頭蓋に対する口蓋の傾斜角
MuPr/SE	: 頭蓋に対する口蓋の傾斜角
U1U2/SE	: 頭蓋に対する上顎咬合平面の傾斜角
BuE/U1U2	: 上顔面頭蓋に対する上顎咬合平面の傾斜角
PrIu/MuBu	: 上顎切歯傾斜角
PrIu/MuPr	: 上顎切歯傾斜角
下顎骨	
CoGo/MnId	: 下顎角
CoGo/GoPg	: 角突起の後方への突出度
CoGn/GnPg	: 下顎下縁平面に対する下顎枝傾斜角
CoGo/GnPg	: 下顎角
GnMn/MnId	: 角突起の下方への突出度
GnMn/MnPg	: antegonial notch 彎曲の程度
L1L2/GnPg	: 下顎下縁平面に対する下顎咬合平面の傾斜角
MIBl/IdIl	: 下顎切歯傾斜角

サ (DP1100, 日本電気三栄, 東京) にて A/D 変換後, 高速フーリエ変換 (FFT) により周波数分析を行った。分析対象はラットが飼料を咀嚼する際の筋放電とし, 安定した連続10波形を分析に供した (図7)。

分析用プログラムは Signal-BASIC で作成した。筋



図4 電極の設置。

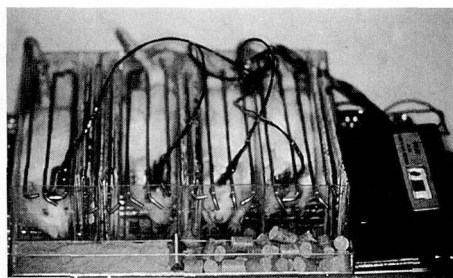


図5 筋電図の記録。

電図の各波形はディスプレイ上に表示した後、分析区間を決定し、10区間について加算処理を行った。周波数分析の条件として最高周波数を 1000 Hz、サンプリング定理に基づくサンプリング周波数を 2000 Hz、サンプリング時間を 500 μ sec とした。咀嚼運動時のバーストの持続時間を考慮して、解析時間を 100 msec、サンプリングポイントを 256 とした。以上の条

件での周波数分解能は 10 Hz である。

3. 咬筋の終日筋活動の記録および分析

連続24時間にわたる筋電図を終日筋電図採得分析システム²⁹⁾を用いて記録した。増幅された信号はダイレクトアンプを組み込んだ携帯用データレコーダ (HR-30J, ティアック, 東京; 規格 25~280 Hz (± 3 dB)) に収録した。なお、本機器ではテープ速度 1.5 mm/sec で、90分テープ 1 本に24時間の記録が可能である。

記録した筋電図はデータレコーダ (MR-30, ティアック, 東京) にて16倍速で再生し、フィルタを介して整流、平滑化した後、A/D コンバータを用いてサンプリング時間 1 msec でパーソナルコンピュータのメモリに収録した (図8)。本システムによる分析の際に設定可能な最小スライスレベルは生体上の電位で 8.9 μ V である。そこで、自発性筋放電を考慮して、0 レベルを 8.9 μ V に設定し、これを超える電位を示したひとつのバーストを 1 回の筋活動として捉えた。分析については、ノイズの混入を避けるため 17.7 μ V (以下 18 μ V とする) を最低レベルとし、さらにバーストの最大電位が約 300~400 μ V であったことを考慮して、97.9 μ V (以下 100 μ V とする) および 204.7 μ V (以下 200 μ V とする) をスライスレベルとして設定し、それ以上の電位を示したバーストの個数および持続時間を算出した (図9)。

(1) 時間帯ごとの咬筋活動

1日を4時間ずつの6区間に分割し、時間帯ごとに咬筋活動の総持続時間を検討した。筋活動の分析はスライスレベルを 100 μ V とし、終日に占める各時間帯

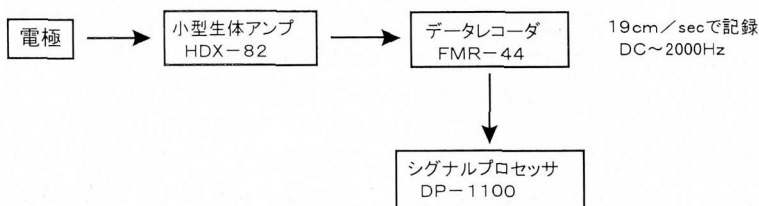


図6 咬筋活動の記録および周波数特性の分析のブロックダイアグラム。

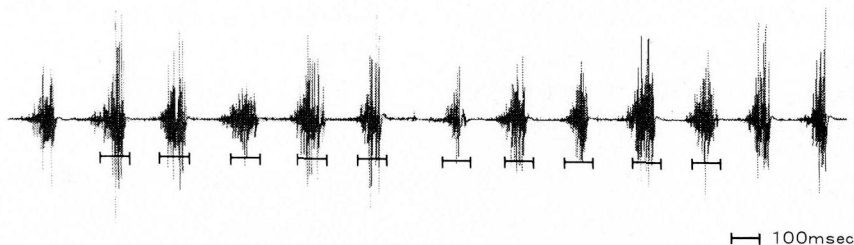


図7 周波数分析を行なう際の分析区間の設定。

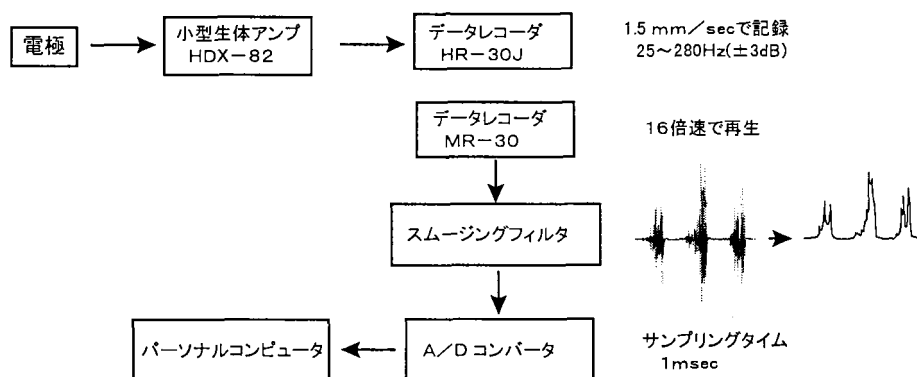


図8 終日咬筋活動の記録および分析のブロックダイアグラム。

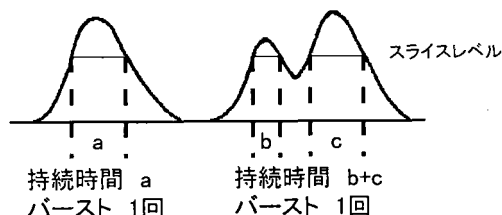


図9 筋電図分析法。

あるスライスレベルにおいて、左の波形では持続時間を a 、バーストを1回とし、右のように多峰性の波形では、持続時間を $b+c$ 、バーストを1回と数えた。

の百分率を算出した。

(2) 咬筋バーストの持続時間の分布

咬筋バーストの持続時間の変化を検討するために、バーストの持続時間の長さによって $32\mu\text{V}$ ごとに筋活動を分類し、各範囲の出現回数が終日に占める割合を算出した。なお、筋活動の分析においてはスライスレベルを $18\mu\text{V}$ とした。

(3) 終日の咬筋活動

$18\mu\text{V}$ 、 $100\mu\text{V}$ および $200\mu\text{V}$ をスライスレベルとして、それ以上の電位を示した終日の咬筋バーストの総持続時間と出現回数を求めた。さらに、どのような強さの筋活動が顎顔面骨格の形態形成に大きな影響を及ぼしているかを明らかにするために、 $18\mu\text{V}$ 以上 $100\mu\text{V}$ 未満、 $100\mu\text{V}$ 以上 $200\mu\text{V}$ 未満および $200\mu\text{V}$ 以上の電位を示した終日の咬筋バーストの総持続時間と出現回数を求めた。

IV. 咬筋重量の測定

8週齢および15週齢時にそれぞれ5匹のラットをエチルエーテルによる麻酔で屠殺し、咬筋を露出させた

後、筋附着部で切断、摘出した。重量の測定には精度 1mg の電子上皿天秤 (JP-300W, 長計量器製作所, 京都) を用い、その湿重量を計量した。測定値には左右の平均を採用した。

V. 咬筋の組織化学的観察

摘出した咬筋は生理食塩水に浸したガーゼで包んで静置し、摘出に伴う異常な収縮を取り除いた後、O.C.T. compound (TISSUE-TEK, Miles, Elkhart) で包含し、ドライアイス・アセトン混合液中で凍結を行った。試料はドライアイス中に約1時間放置し、アセトンを蒸発させた後、クリオスタットを用いて、筋腹中央部において前頭断方向に厚さ $8\mu\text{m}$ の新鮮凍結切片を作製した。筋線維を組織化学的にタイプ分類することを目的として、コハク酸脱水素酵素 (SDH) 染色を施した。筋線維のタイプ別比率を求める際には、最終倍率100倍で一視野内の筋線維 (合計約100~150本) をタイプ別に数えた。

解剖学的に咬筋は浅層と深層に分類され、さらに深層は3つの構成要素に分けられる^{30,31)}。しかし、筋電図の記録を行った咬筋筋腹中央部に相当する部位についてのみ、浅層と深層の組織化学的観察を行い、筋線維のタイプ別比率を求めた。

VI. 統計学的処理

飼料の違いによる影響を検討するために、それぞれの計算結果に対し、固形群と粉末群の平均値の有意差の有無を t 検定を用いて分析した。なお、有意性は5%および1%の危険率で検定した。

結 果

I. 体重の変化

実験期間中における体重の変化を図10および図11に

示す。頭部X線規格写真撮影を行ったラットの体重については、5週齢および6週齢において粉末群が固形群と比較して1%の危険率で有意に小さな値を示したが、7週齢以降については両群間で有意な差は認められなかった(図10)。

また、筋電図記録を行ったラットについては、すべての週齢において固形群と粉末群の間に有意な差は認められなかった。一方、頭部X線規格写真撮影を行ったラットと比較すると、粉末群と固形群のいずれも8週齢までは有意な差を認めなかったが、12週齢および15週齢では5%の危険率で有意に小さな値を示した(図11)。

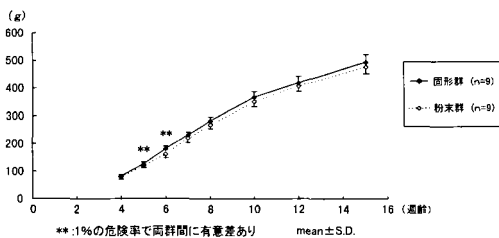


図10 側面頭部X線規格写真撮影を行ったラットの体重変化。

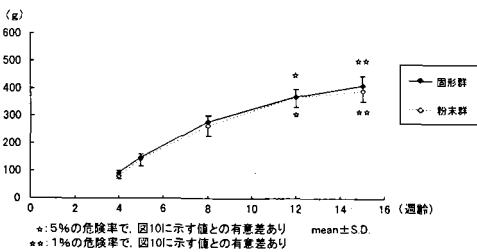


図11 筋電図記録を行ったラットの体重変化。

II. 側面頭部X線規格写真の分析結果(表5, 表6)

距離計測項目については、主として8週齢以降において両群間に有意差が認められるようになった。また、有意差を示した項目の多くは咀嚼筋活動の影響を直接受ける上顔面部や下顎骨に関するものであったが、全頭蓋長などの脳頭蓋の大きさについても差を認めた。角度計測項目については、すでに5週齢時から両群間で有意差を示した項目が多く、顎顔面骨格の大きさの違いと比較して、形態や成長方向の差異はより早期に発現していた。

1. 距離計測項目の変化

全頭蓋長(Po-AおよびBa-Pr)は8週齢以降、固形群が有意に大きな値を示した。脳頭蓋については、後頭蓋底の長さ(S-Ba)および後頭骨の高さ(Po-Ba)は

固形群が有意に大きな値を示した。また、鼻骨の長さ(N-A)も8週齢では固形群が有意に大きな値を示した。さらに、下顎枝の長さ(Co-GoおよびCo-Gn)については8週齢以降、固形群が有意に大きな値を示した。下顎骨体部の変化では、角突起の長さ(Go-Mn)および角突起を含む下顎骨体長(Go-Pg)については固形群が有意に大きな値を示したが、下顎骨長(Co-Pg)には有意差を認めなかった。また、角突起を含まない骨体長(Mn-IdおよびGn-Pg)については15週齢時を除いて有意な差を認めなかった。ただし、15週齢時におけるMn-Idは粉末群が有意に大きく、Gn-Pgは固形群が有意に大きかった。

上顎切歯の長さ(Pr-Iu)は、有意差はないが5週齢から固形群が大きな値を示す傾向にあった。また、下顎切歯の長さ(II-Id)は8週齢までは粉末群が大きな値を示したが、12週齢以降では固形群が大きな値を示す傾向にあった。しかし、切歯を含む顔面部の高さ(Iu-Iu'およびII-II')では上下顎で様相が異なり、Iu-Iu'は上顎切歯の長さ(Pr-Iu)と同様に固形群が有意に大きな値を示したが、II-II'は8週齢以降において、粉末群が有意に大きな値を示した。この変化は以下で述べるように粉末群の下顎切歯の傾斜角(MIBI/IdII)が12週齢以降において舌側傾斜を示したことと対応していた。

2. 角度計測項目の変化

頭蓋に対する鼻骨の傾斜角(AN/SE)および頭蓋に対する口蓋の傾斜角(MuBu/SE)の変化より、粉末群では上顔面複合体の反時計回転が5週齢以降に認められた。角突起の突出度(CoGo/GoPgおよびCoGn/GnPg)は5週齢以降、粉末群が有意に小さく、角突起の発育不良が示された。また、粉末群では下顎角(CoGo/MnIdおよびCoGo/GnPg)は開大を示し、本項目からも角突起の発育不良ないしは下顎頭の後方成長を認めた。

切歯の傾斜角は上下顎で様相が異なり、上顎切歯の傾斜角(PrIu/MuPr)は5週齢以降において粉末群が有意に大きく、唇側傾斜を示したが、下顎切歯の傾斜角(MIBI/IdII)は12週齢以降では、固形群が有意に大きく、上顎切歯とは逆に粉末群は舌側傾斜を示した。

III. 周波数特性

図12に咀嚼運動時における咬筋の周波数分布の1例を示す。固形群と粉末群のいずれにおいても、週齢によってパワー値は変化した。平均周波数および累積50%値には著明な差を認めなかった。しかし、両群とも8週齢時では他の週齢と比較して累積80%値は大きな値を示し、スペクトル分布がやや高周波域まで拡大する傾向が認められた。また、固形群は粉末群と比較

表5 距離計測項目の変化

		4 週 齢				5 週 齢			
		固形群		粉末群		固形群		粉末群	
		Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Total skull	Po-A	195.9	2.9	194.1	2.4	203.7	2.2	204.5	2.2
	Ba-Pr	181.8	2.4	180.0	2.2	195.1	2.1	194.2	2.2
Neurocranium	Po-Ba	47.6	0.6	47.0	0.6	51.0	1.1	49.3	0.9**
	Po-E	121.4	2.3	120.9	1.6	124.7	2.4	125.0	1.8
	S-E	62.7	0.7	62.5	0.8	64.1	1.2	64.9	1.1
	S-Ba	70.6	2.6	69.9	1.2	76.4	1.7	74.9	1.3
Upper viscerocranium	N-A	65.7	2.8	64.3	1.3	66.8	1.7	67.3	1.5
	A-Pr	20.0	1.2	19.0	0.8	21.4	1.4	20.3	0.8
	Mu-Bu	50.9	0.7	49.7	0.9	54.6	0.7	54.2	0.8
	Mu-Pr	61.6	1.1	60.8	1.0	66.8	0.9	66.8	1.1
	Pr-Iu	29.6	1.2	29.7	1.1	32.7	2.1	32.3	1.2
	Iu-Iu'	49.0	1.1	48.2	1.1	53.6	1.6	52.3	0.9*
	U1-U1'	52.0	0.8	51.6	0.8	54.2	0.9	54.2	0.8
U2-U2'	55.0	0.7	54.8	0.6	57.7	1.0	57.8	0.8	
Mandible	Go-Mn	37.4	1.9	36.7	1.1	41.4	1.5	41.7	1.4
	Mn-Id	58.0	1.3	57.3	1.9	58.7	2.5	58.1	1.6
	Gn-Pg	69.0	2.3	68.2	1.5	73.4	2.1	73.9	1.6
	Ml-BI	29.7	0.9	29.6	1.0	30.1	1.1	29.5	1.3
	Co-Go	29.7	1.2	29.6	0.9	32.1	1.3	32.5	1.4
	Co-Gn	38.8	1.4	39.0	1.2	43.0	1.4	43.7	1.4
	Co-Pg	86.7	2.0	85.3	1.7	93.6	2.1	94.9	2.0
	Go-Pg	79.9	1.7	78.8	1.6	86.4	2.4	86.6	1.8
	Co-Co'	37.6	1.6	38.1	1.1	41.7	1.5	42.2	1.7
	Il-Id	41.5	1.5	41.6	1.1	45.5	2.1	45.8	1.7
	Il-Il'	42.8	1.6	41.9	0.8	43.8	1.6	42.9	1.3
	L1-L1'	31.8	0.8	31.4	0.6	33.2	0.6	32.8	0.4
L2-L2'	30.0	1.0	30.5	0.8	32.0	0.9	31.6	0.5	

*: 5%の危険率で両群間に有意差あり

**: 1%の危険率で両群間に有意差あり

表6 角度計測項目の変化

		4 週 齢				5 週 齢			
		固形群		粉末群		固形群		粉末群	
		Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Neurocranium	PoE/SE	41.1	1.0	40.7	0.8	42.3	1.2	41.1	1.0*
	PoBa/PoE	85.4	1.8	85.3	0.9	87.9	1.6	88.2	1.5
Upper viscerocranium related to neurocranium	AN/SE	119.5	1.2	119.3	1.3	118.5	1.8	119.5	1.4
	PrE/SE	107.3	1.2	107.5	1.3	107.0	0.9	108.3	1.4*
	BuE/SE	95.6	1.6	95.1	1.3	96.0	0.7	96.8	1.2
	IuE/SE	87.5	1.1	87.3	1.3	86.5	1.4	88.1	1.1*
	MuBu/SE	45.8	1.3	46.3	1.4	46.9	1.0	45.4	1.7*
	MuPr/SE	34.7	0.9	34.5	1.3	39.6	1.7	35.2	1.5*
U1U2/SE	47.4	1.8	47.4	1.9	46.5	1.3	45.6	1.7	
Upper viscerocranium	BuE/U1U2	37.0	1.7	37.6	1.4	37.5	1.5	37.6	1.4
	PrIu/MuBu	73.8	3.3	74.6	1.6	69.8	2.5	72.1	1.9*
	PrIu/MuPr	62.7	2.2	62.8	1.3	59.9	2.2	61.9	1.7*
Mandible	CoGo/MnId	80.9	1.5	81.4	2.7	81.8	1.6	84.2	2.8*
	CoGo/GoPg	93.2	1.6	92.7	2.0	92.8	1.5	94.5	2.0*
	CoGn/GnPg	103.8	1.8	102.1	2.2	104.0	1.6	104.8	2.1
	CoGo/GnPg	87.5	1.4	86.5	2.1	86.3	1.6	88.0	2.6
	GnMn/MnId	177.6	1.8	176.1	1.7	176.1	2.1	175.9	1.4
	GnMn/MnPg	166.4	1.8	165.9	2.3	166.2	1.8	167.0	1.3
	L1L2/GnPg	5.0	2.7	2.9	1.8	4.0	2.0	3.3	1.8
	MlBI/IdIl	133.1	2.4	132.9	1.3	134.3	1.4	134.8	1.9

*: 5%の危険率で両群間に有意差あり

**: 1%の危険率で両群間に有意差あり

8 週 齡				12 週 齡				15 週 齡			
固形群		粉末群		固形群		粉末群		固形群		粉末群	
Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
234.3	2.1	228.3	2.1**	250.1	3.4	246.7	2.5*	258.8	3.3	254.6	2.5**
227.8	2.4	225.0	1.4**	247.9	3.1	244.8	1.7*	257.3	2.7	253.9	2.1**
57.7	1.4	55.5	1.2**	61.9	1.7	60.9	1.2	62.8	1.3	62.0	2.1
134.0	2.2	132.1	2.2	138.4	2.7	137.9	2.9	141.6	2.9	139.1	3.2
70.4	1.3	70.0	1.7	71.9	1.6	72.9	1.5	73.8	1.8	73.2	1.5
88.9	1.7	87.2	2.0	97.1	2.0	95.0	1.3*	101.4	1.7	99.0	2.1*
83.0	2.0	79.2	1.9**	91.3	1.7	90.2	2.5	94.1	2.8	93.5	3.4
24.2	2.1	25.8	1.5	28.5	1.9	29.2	1.9	28.8	0.7	28.7	1.4
64.3	0.7	63.8	1.3	71.6	1.2	70.8	1.6	74.1	1.5	73.7	2.2
79.9	0.8	78.9	1.2*	89.0	1.2	87.2	1.6*	92.0	0.8	90.9	2.0
36.9	1.1	34.9	0.7**	40.0	1.9	38.8	1.6	43.2	2.1	42.9	1.3
61.2	0.8	59.8	1.0**	67.6	1.2	67.5	1.0	71.1	1.7	71.2	1.6
62.2	0.4	61.8	0.9	66.2	0.7	66.4	0.6	68.0	0.8	67.9	0.9
66.7	0.8	65.9	1.2	70.9	0.8	70.9	0.9	72.8	1.1	72.5	0.8
55.2	1.3	54.6	1.6	66.2	1.7	65.5	2.4	70.4	2.2	68.3	1.6*
61.8	1.3	61.0	1.6	62.0	1.5	63.0	1.3	63.7	1.7	65.7	1.3*
85.6	2.3	83.7	2.4	93.5	2.5	92.3	2.8	101.4	1.9	98.9	2.5*
34.1	1.6	33.8	1.3	38.5	1.5	38.6	1.9	40.0	1.4	40.8	1.3
42.3	1.5	40.4	1.1**	47.3	2.3	44.6	1.1**	48.4	2.2	46.3	2.0*
55.2	1.0	53.1	1.2**	60.7	1.7	59.3	1.1*	61.9	1.5	60.6	1.0*
111.8	0.9	111.6	1.3	121.4	1.9	122.3	1.2	126.2	1.4	127.5	1.7
102.8	1.7	100.5	2.7*	112.9	2.2	111.4	1.7	118.4	2.5	116.2	1.7*
53.8	0.8	50.7	1.3**	59.3	1.7	57.2	1.1**	61.2	1.6	58.9	1.5**
56.4	1.9	58.0	1.4	63.6	2.2	62.5	2.2	66.8	1.8	65.5	1.5
53.5	1.3	55.5	1.9*	56.9	1.3	59.2	1.4**	61.2	1.8	62.8	2.3
40.0	0.5	39.9	1.2	44.5	0.7	44.5	1.2	46.7	1.0	47.3	1.6
38.3	1.2	38.3	0.9	42.7	1.0	41.5	1.0*	44.6	1.1	44.2	1.4

(單位：mm)

8 週 齡				12 週 齡				15 週 齡			
固形群		粉末群		固形群		粉末群		固形群		粉末群	
Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
43.9	0.8	44.1	1.3	45.5	0.9	45.4	1.4	46.0	1.1	47.1	1.5
95.1	1.2	95.8	1.3	97.9	1.1	97.5	1.6	99.8	1.1	98.7	2.1
114.9	1.4	117.1	1.9*	114.1	1.8	116.4	1.7*	113.5	2.6	114.6	1.6
105.7	1.7	106.2	1.4	105.1	1.7	105.9	1.7	105.1	2.3	105.7	1.1
94.8	1.1	96.4	1.3*	95.1	1.5	96.7	1.3*	94.9	1.8	96.5	1.1*
85.8	1.0	87.9	1.3**	86.3	1.2	87.7	1.4*	85.8	1.5	86.7	1.3
49.6	1.8	47.2	1.0**	50.8	2.7	48.1	1.6*	51.6	2.6	49.2	1.9*
40.0	2.9	39.5	1.0	42.4	2.4	40.8	2.2	42.6	2.9	41.5	1.7
45.7	2.2	45.1	1.9	45.8	2.6	44.7	1.4	45.6	2.8	45.4	1.7
39.5	1.3	38.5	2.3	39.1	1.6	38.6	1.5	39.5	1.5	38.3	2.1
68.1	2.2	69.1	2.3	68.2	2.6	70.5	2.7	70.3	1.8	72.0	2.0
58.4	1.5	61.4	2.1**	59.9	1.8	63.3	2.1**	61.3	1.6	64.3	1.9**
81.6	2.8	86.1	2.3**	80.8	1.9	84.3	3.4*	80.9	2.7	83.8	2.0*
90.9	2.3	95.1	2.1**	88.6	1.2	93.2	1.8**	88.3	1.6	93.0	1.1**
103.1	2.0	107.3	2.0**	102.0	1.9	105.2	2.6**	97.8	1.8	103.7	2.9**
84.4	2.8	89.2	2.7**	82.3	1.4	86.6	2.3**	81.8	1.8	86.9	1.6**
174.7	1.5	175.1	1.3	173.8	2.6	174.4	2.9	173.6	2.2	175.1	2.2
165.5	1.7	165.6	1.8	164.4	2.9	164.0	2.8	164.1	1.7	162.9	1.9
5.1	2.3	5.6	1.8	5.1	2.0	9.4	1.7**	6.4	2.5	9.3	2.0*
127.3	2.2	126.3	1.4	125.5	2.0	122.9	2.4*	125.9	2.0	119.2	2.8**

(單位：度)

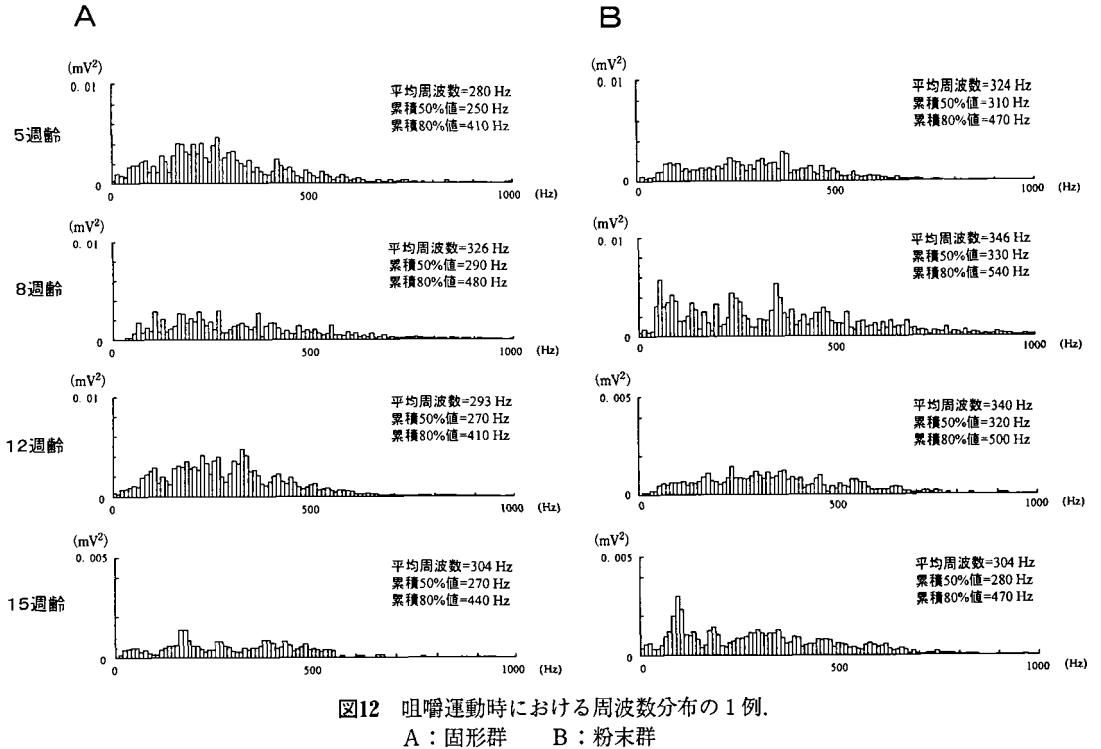


図12 咀嚼運動時における周波数分布の1例。

A：固形群 B：粉末群

して低周波成分が多く、平均周波数および累積50%値、累積80%値はすべての週齢において固形群が小さい傾向を示した。

IV. 終日の咬筋活動

1. 時間帯ごとの咬筋活動

咬筋バーストの総持続時間には暗期に増加し、明期に減少を示す一定の周期が認められた。時間帯で見ると、両群ともに、消灯時より急激に活動を開始し、暗期にあたる20～8時に高い筋活動を示した。また、点灯とともに活動は徐々に減少し、おおむね12～16時において最小の活動を示し、その後再び消灯時にかけて増加する傾向を示した。その周期の様相については週齢によってわずかな違いはあるが、両群間には大きな差は認められなかった (図13)。

2. 咬筋バーストの持続時間の分布

5週齢および8週齢において、粉末群では固形群と比較して短いバーストの割合が高かったが、週齢の増加とともにその差は減少した。バーストの持続時間の平均をみると、5週齢および8週齢については粉末群が固形群よりも有意に小さな値を示したが、12週齢および15週齢においては有意差が認められなくなった (図14)。

3. 咬筋バーストの総持続時間および出現回数

各スライスレベルを超える電位を示した筋活動をみると、咬筋バーストの総持続時間は5週齢ではすべてのレベルで固形群が粉末群より有意に大きな値を示したが、8週齢では100 μ Vを超える電位を示した筋活動においてのみ有意差を認めた。また、12週齢および15週齢ではいずれのレベルにおいても有意差を認めなかった (図15-A)。一方、咬筋バーストの出現回数については、18 μ Vを超える電位を示した筋活動において、5週齢で両群間に有意差を認めず、8週齢では粉末群が固形群の回数を上回っていた。しかし、100 μ V以上の電位を示した筋活動についてはいずれも総持続時間の場合と同様の差異が両群間で認められた (図15-B)。

2つのスライスレベル間の電位を示した筋活動についてみると、8週齢では18 μ V以上100 μ V未満の電位を示した筋活動では、粉末群が固形群よりも短い総持続時間を示したものの (図16-A)、出現回数では有意に大きな値を示した (図16-B)。100 μ V以上200 μ V未満の電位を示した筋活動については、100 μ V以上の電位を示した筋活動と同様の所見を認めた。

V. 咬筋重量の変化

咬筋重量は8週齢および15週齢のいずれにおいても

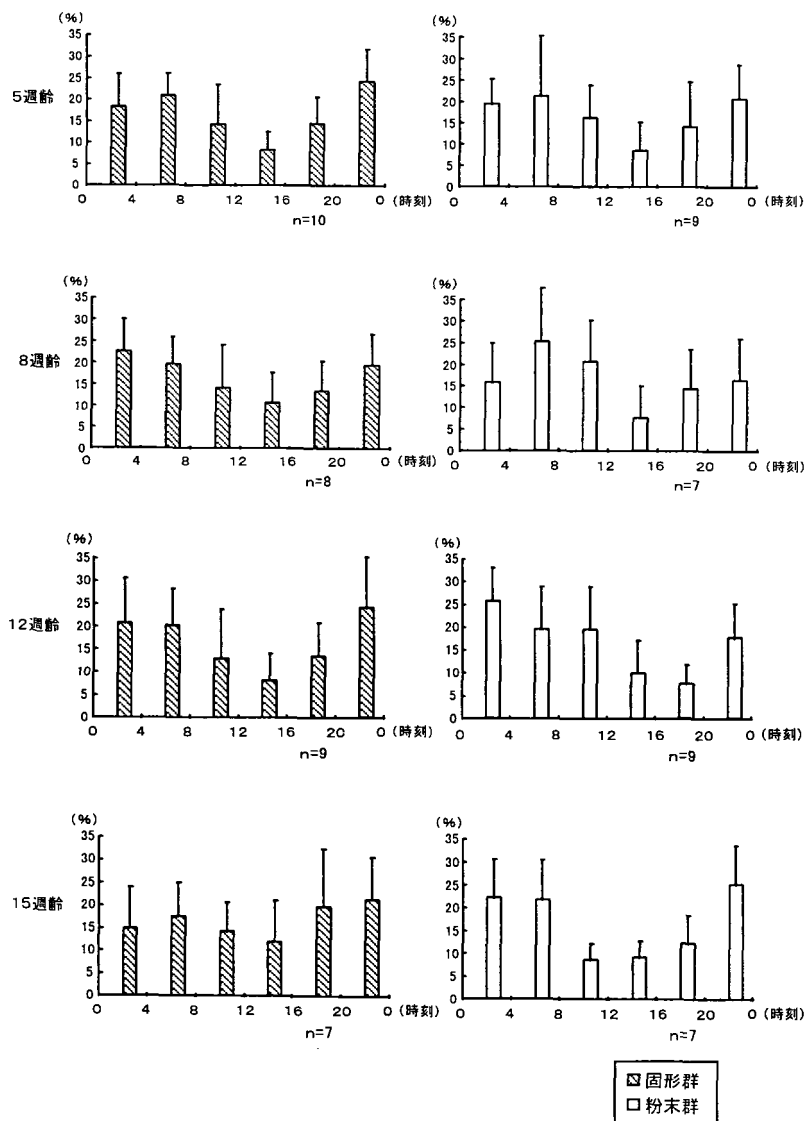


図13 咬筋活動の日内変動.

固形群が有意に大きな値を示し、粉末群における咬筋の発育不良が認められた (図17)。

VI. 咬筋の組織学的所見

筋線維径については8週齢および15週齢ともに、粉末群が固形群よりも小さい傾向を示した (図18)。浅層は intermediate muscle fiber と white muscle fiber のみからなっていたが、筋線維のタイプ別比率を求めたところ、固形群と粉末群の間でいずれの週齢においても有意な差は認められなかった。深層ではさらに red muscle fiber が認められたが、その構成比率には両群間に有意差は認められなかった。一方、intermediate

muscle fiber は8週齢および15週齢ともに固形群が粉末群よりも有意に大きな値を示し、white muscle fiber は有意に小さな値を示した (図19)。

考 察

I. 研究方法について

1. 実験動物について

ラットは各種の小動物の中でも生理的諸現象、ならびに性周期や月経終止期の関係、雑食であること、筋肉と臓器の重量比などがヒトに似ており、寿命の点から見てもあたかもヒトの一生を30分の1に縮小したのと同じであるといわれている³²⁾。また、出生が明らか

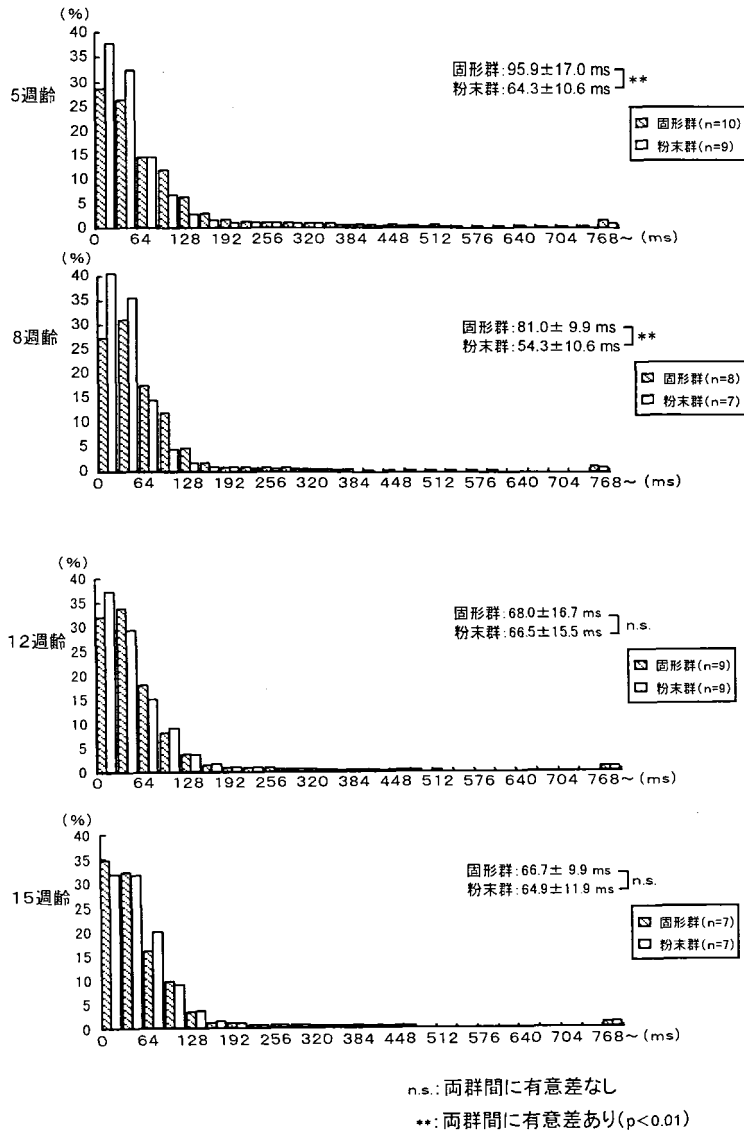


図14 咬筋バーストの持続時間の分布。

な純系を用いることができ、かつ同一条件下での飼育が容易なため個体間の変動が少ないと考えられる。さらに、生態あるいは顎骨や咀嚼筋の形態および機能について、すでに詳細な検討がなされているため、生育環境の違いによる咀嚼機能の変化とこれによる顎顔面骨格の发育への影響を検討するのに適している。

Maeda ら³³⁾は咀嚼筋の生後发育に関して、phase 1: 哺乳期 (生後0~14日), phase 2: 哺乳~咀嚼期 (生後15~30日), phase 3: 咀嚼期 (生後30日以降)の連続した3時期のうち、咀嚼筋の筋線維の发育はphase 3の期間中続くことを示した。本研究では

phase 3にあたる4週齢時から実験を開始したが、これは思春期性の成長スパートの直前から実験を開始することによって、咀嚼機能の違いが顎顔面骨格の成長に影響を及ぼすか否かを明らかにすることが可能と考えたためである。

2. 実験方法について

(1) 終日筋活動の測定について

顎顔面形態と咀嚼筋活動との関連性を明らかにするために、ヒトや動物を対象とした種々の研究が行われてきた。しかし、ヒトを対象とした研究⁵⁻¹⁰⁾では、一時期における短時間の筋の能力の観察がほとんどあ

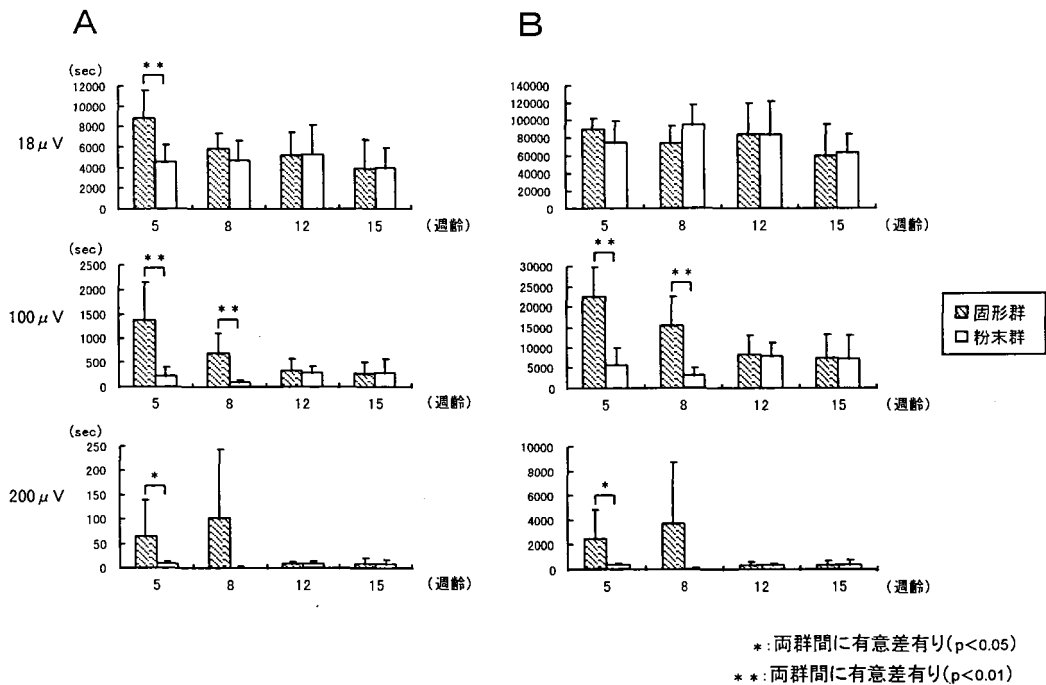


図15 咬筋バーストの総持続時間および出現回数。
 A：咬筋バーストの総持続時間 B：咬筋バーストの出現回数

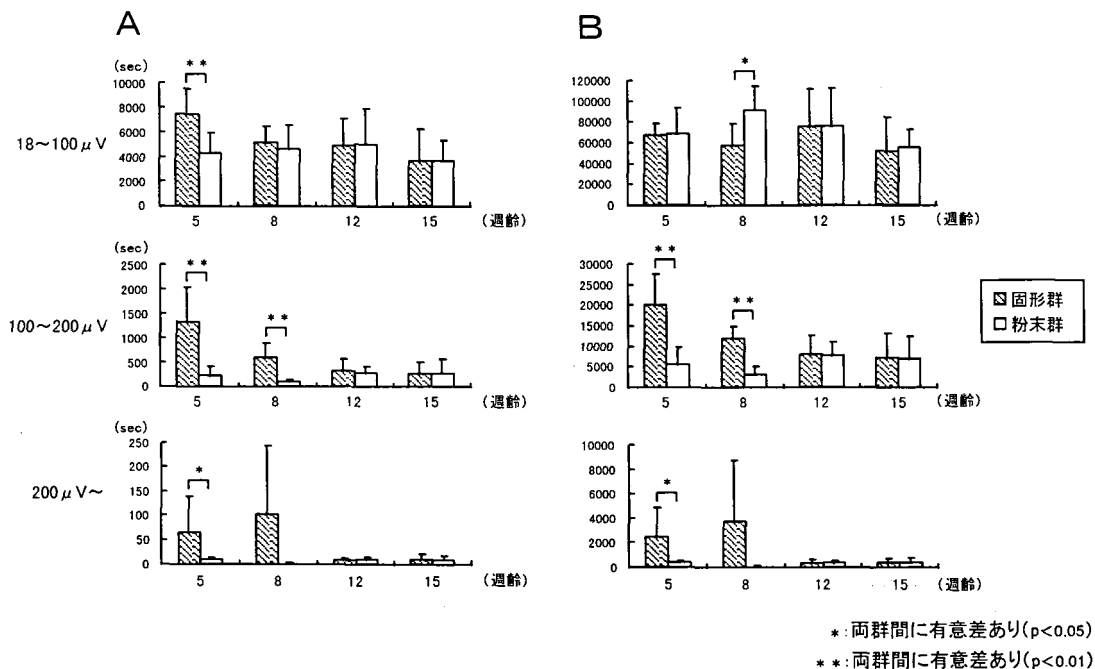


図16 咬筋バーストの総持続時間および出現回数。
 A：咬筋バーストの総持続時間 B：咬筋バーストの出現回数

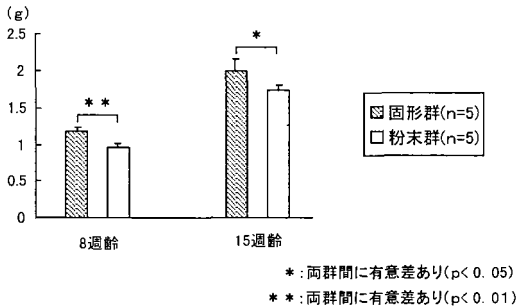


図17 咬筋重量の変化。

り、筋活動の大小が顎顔面形態の不調和をもたらすのか、あるいは顎顔面形態の不調和が筋活動の低下を生じさせるのかを明確にするには不十分であった。また、ヒトを対象として長時間の筋活動を検討した研究³⁴⁾においても、同一条件下で記録を行うことが困難であるため、個体間変動と日間変動が明確に区別されていない。動物実験において異なる飼料を与えることによって筋活動に差を生じさせ、それに基づいて顎顔面形態と咀嚼筋活動との関連性を検討した研究¹⁶⁻²⁴⁾でも、筋活動の差を明確に評価するための客観的データが示されていない。

一方、動物を用いて長時間の筋活動を記録する場合には、摂食、摂水や睡眠などの行動のほか、生理機能にも明暗と関係した日周変動があることを考慮しなければならない。すなわち、夜行性の齧歯類では、行動の日周期に系統差が存在するものの³⁵⁻³⁷⁾、その多くは夕刻より夜半にかけて活発な活動を繰り返すことが報告されている³⁵⁻³⁹⁾。終日の活動とその日周期について、従来は給餌、給水量の変化^{37,39)}やセンサーに対する反応³⁶⁾などに基づいて論じられてきた。しかし、給餌、給水量の変化では、摂食、摂水などの行動の結果を測定の対象としているため、顎運動や咀嚼筋活動そのものを直接評価することが困難であった。従来、ラットの顎運動のような小さな動きを計測する場合、X線映画法^{40,41)}や筋電図法⁴²⁻⁴⁴⁾などが用いられてきた。また、筋電図を用いた研究では、Thomasら⁴²⁾、Weijsら⁴³⁾がラットの下顎運動と咀嚼筋活動の関係を、Thomasら⁴⁴⁾は食物の種類によって、咀嚼筋の活動パターンに差異があることを、それぞれ報告した。さらに、摂食、摂水以外の行動に伴う咀嚼筋活動については適当な測定方法がなく、ほとんど検討されていない。

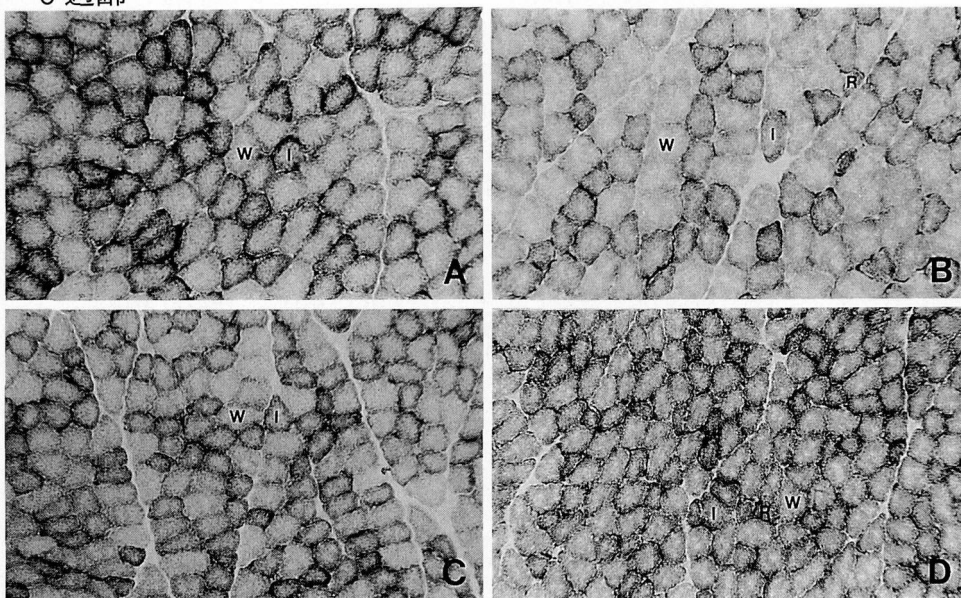
このように、従来の研究は特定の行動を短時間についてのみ記録し、分析しようとしたものであり、終日にわたる顎運動を直接検討したものとしては、平川

ら⁴⁵⁾、石塚ら⁴⁶⁾、Ishizukaら⁴⁷⁾の報告が見られるに過ぎない。また、一般的に行われている原波形をそのまま用いる方法では、長時間の筋電図を記録、分析するために膨大な量のデータ処理が必要になる。そのため、筋活動の記録、分析に多大な労力を要し、総実験個体数を増やすことが困難であった。このようなさまざまな問題点を排除するため、本研究では終日筋電図採得分析システム²⁹⁾を用いることにより終日の筋電図の記録を行った。それにより、テープの交換の必要がなくなり、また筋電図の再生時にフィルタを介して平滑化を行うことで、処理すべきデータ量の大幅な削減が可能になった。

(2) 終日筋電図採得分析システムの使用について
本システムにおいては、携帯用データレコーダの周波数特性(規格 25~280 Hz (±3 dB))に依存し、すべての周波数の筋放電を記録することは不可能である。一方、組織化学的な分類に基づく咀嚼筋線維のタイプ別比率は動物の種類によって異なっており⁴⁸⁾、また筋の生理的性質は筋線維のタイプ別比率によって規定されると考えられるため⁴⁹⁾、ヒトとラットでは咀嚼筋の収縮特性にも違いがあるものと推察される。しかし、ラットの骨格筋について周波数分布を検討した研究は見当たらず、その特性についてはまったく不明である。そこで、筋活動の測定に先立ち、ラット咬筋筋電図について周波数分析を行い、その特性について検討した。その結果、咬筋バーストの平均周波数および累積50%値は本データレコーダの規格周波数の範囲に含まれるか、わずかに超える程度であった。さらに、本システムでは記録した筋電図を再生する際に平滑化処理を施すことにより、多数の運動単位の干渉波からなる一群のバーストを一回の筋活動として捉えることになるため、筋活動時のピーク周波数を含め、約半数の周波数を記録できれば、平滑化処理後の波形の概形に大差はないものと考えられた。

なお、周波数分析における分析区間の設定に際して、解析時間より持続時間の短いバーストにおいてインターバルの波形も処理されている。しかし、咀嚼運動時の筋長の変化について三谷⁵⁰⁾は、バーストの立ち上がりは咬合負荷が加わった時点からであるため、それまでの電位の占める比率はきわめて小さく近似的に等尺性収縮とみなせると述べ、また笹井ら⁵¹⁾は低活動時のパワースペクトルは周波数域、ピーク強度とも非常に小さいとしていることから、その影響は少ないと考えられた。

8週齢



15週齢

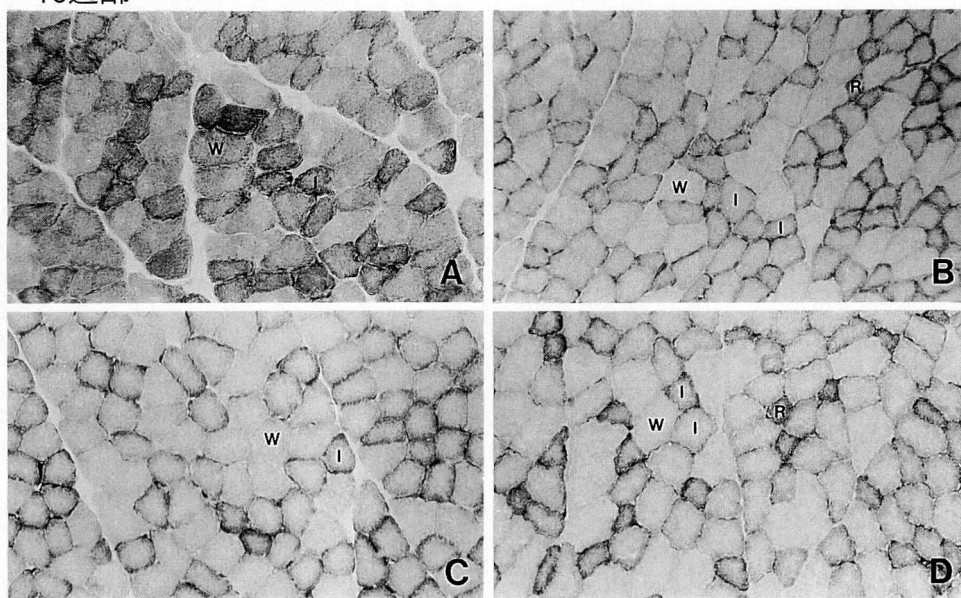


図18 咬筋の組織学的所見。

図中の R は red muscle fiber, I は intermediate muscle fiber, W は white muscle fiber を示す。
(SDH 染色 ×100)

A: 固形群 浅層 B: 固形群 深層 C: 粉末群 浅層 D: 粉末群 深層

II. 研究結果について

1. 顎顔面形態について

脳頭蓋の発育は神経系型に属し、脳自体の成長と密接に関係している⁵²⁾。また、Moore¹⁷⁾は、生後1ヶ月でラットの顔面頭蓋の成長は成熟ラットの約75%、

脳頭蓋の大きさは約93%に達すると報告している。そのため、脳頭蓋は咀嚼機能の影響を受けることが少なく、菊田²¹⁾も飼料の差によりほとんど影響を受けなかったと述べている。一方、Kiliaridisら²²⁾は摂取飼料の違いにより脳頭蓋の大きさや形態に有意差を認め

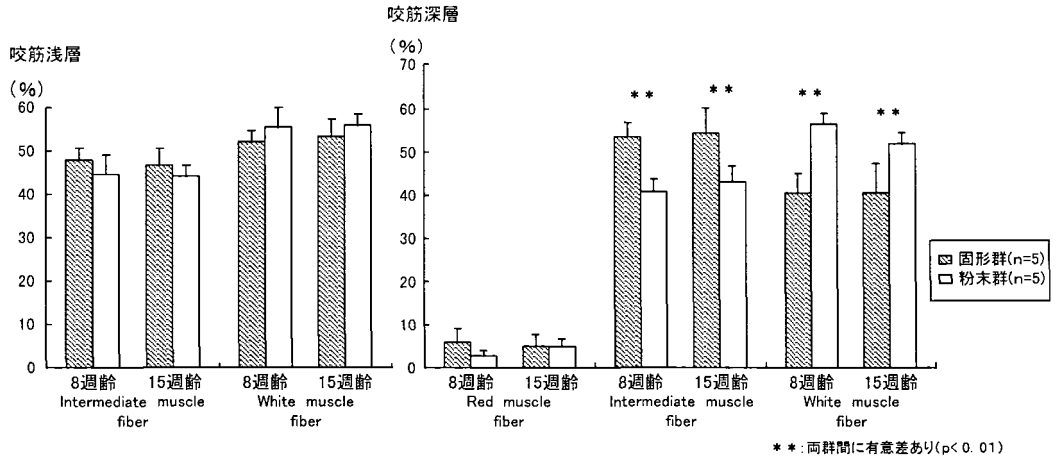


図19 咬筋における筋線維タイプ別比率.

た。しかし、体重の違いが形態の差に影響することを考慮して体重が一致する群間での比較を行った結果、有意差が見られなかったことから、咀嚼機能の脳頭蓋の成長に対する影響を否定した。

このように、脳頭蓋の発育に対する咀嚼機能の影響については否定的な所見が多い。しかし、頭蓋冠は脳の成長発育の影響を強く受けるが、脳頭蓋底は顔面頭蓋との境に位置することから、顎顔面骨格の成長発育との関連を有する⁵²⁾ことが推測される。本研究においては前頭蓋底の長さ(S-E)には差が認められなかったが、後頭蓋底の長さ(S-Ba)および後頭骨の高さ(Po-Ba)に有意差を認めた。これは、Kiliaridisら²²⁾の報告で体重差を考慮しなかった場合に有意差が認められた項目と一致していた。本研究では8週齢以降、両群間に有意な体重差が認められなかったため体重の調整は行っていないが、成長期を過ぎた12週齢以降においてもS-Baには有意差がなお見られたことから、脳頭蓋の発育に対して咀嚼機能は何らかの影響を及ぼしていることが示唆される。

上顔面複合体の成長量に関して、8週齢以降において全頭蓋長(Po-AおよびBa-Pr)や鼻骨の長さ(N-A)に有意差を認めたが、このほかの項目では著明な差を認めなかった。本研究では矢状方向の変化しか検討していないが、幅径の変化について、Wattら¹⁶⁾、Moore¹⁷⁾、BeecherとCorruccini¹⁸⁾、菊田²¹⁾は軟性食で飼育されたラットは固形食で飼育されたものと比較して頬骨弓や臼歯部の幅径が有意に小さかったと述べている。矢状方向の差よりも幅径の差の方が顕著であるのは、咀嚼筋の付着位置を考えれば容易に理解されることである。また、成長方向に関して、5週齢から粉末群は頭蓋に対する上顔面複合体の反時計回転を認

めたが、これはKiliaridisら²²⁾の報告と同様であった。以上の変化の原因として、Kreiborgら⁵³⁾は先天性筋異栄養症患者における顎顔面形態の変化から、上顎部の成長方向や幅径に対する咀嚼機能の影響について、下顎骨の後方回転に起因した二次的作用と考察している。また、Katsarosら⁵⁴⁾は鼻骨間縫合、鼻骨切歯骨縫合、切歯骨間縫合において、軟性食で飼育されたラットは固形食で飼育されたものと比較して縫合部の離開が少なかったと報告し、その要因として筋の収縮力の低下が縫合部に隣接する2つの骨片を離開する張力の低下を引き起こしたことを挙げ、筋の張力による縫合部への影響と顔面骨格の成長との関連性を強く示唆した。さらに、鼻の後方部では縫合部の離開量に差が少なかったと述べ、この理由を解剖学的な複雑さのためと考察している。このことは、本研究において上顔面複合体に対する咀嚼機能の影響が鼻骨領域の成長量と上顎部の成長方向の差にとどまったことを肯定するものである。

下顎骨は咀嚼機能の影響を最も強く受け、下顎枝の長さ(Co-GoやCo-Gn)あるいは角突起の長さ(Go-Mn)において2群間に著明な差を認めた。この所見は程度の差はあるが、顎運動に関与する筋の切断、切除²⁴⁻²⁶⁾あるいは支配神経の切除^{27,28)}などによる筋の欠如や不活動に伴う顎骨の形態変化に関する実験結果と同様であった。深沢²⁴⁾は、閉口筋の付着部位と関連して、直接筋が付着し、機能する筋突起部や下顎角部と、間接的に影響する関節突起や歯槽突起部に分け、前者においては筋の存在と機能が成長の主因であるとしている。本研究において、下顎角の大きさは5週齢から粉末群が有意に大きな値を示したのに対し、下顎枝の長さについては8週齢以降になって有意差を

認め、成長量の差と比べて、成長方向や形態の差がより早期に発現したことは、下顎骨の各部位における咀嚼機能の影響の違いを強く示唆するものである。すなわち、下顎角部は咬筋や内側翼突筋の直接の影響による形態変化を引き起こすが、下顎頭における軟骨性成長や骨の間質性成長に対する咀嚼機能の影響⁵⁵⁾は間接的であるため²⁴⁾、下顎枝の成長量の差の発現が遅れたものと考えられる。一方、下顎骨長 (Co-Pg) や骨体長 (Gn-Pg や Mn-Id) には著明な差を認めなかった。これらの部位には閉口筋が付着していないため咀嚼機能の影響を直接受けず、結果的に成長量の大きな差異が生じなかったものと考えられる。近年、歯と顎との大きさの不調和が顕著になっていることの原因として、咀嚼機能の低下による顎骨の大きさの減少を挙げたもの^{2,4)}と、逆に歯が大きくなったことが主な原因^{56,57)}で、むしろ顎は大きくなっている⁵⁸⁾とする報告がある。しかし、いずれか一方の意見が正しいと考えるよりも、Bjök と Skieller⁵⁹⁾の述べるように、成長に伴う顎の回転は歯の萌出経路を変え、結果として咬合や歯列空隙に影響を及ぼすことを考慮すれば、顎頭の後方成長と関連した下顎骨の後下方回転により、歯槽基底弓周長の相対的な大きさが減少するとともに下顎切歯の舌側傾斜により歯列弓周長が減少することから、叢生が生じやすくなると考えた方が妥当と思われる。

切歯の萌出量に関して、Kiliaridis ら⁶⁰⁾は軟性食で飼育したラットでは切歯の咬耗の減少により萌出量が低下するが、切歯を削合することにより、固形食で飼育したラットと同程度の萌出を示すことを報告し、切歯の位置が一定に維持される機構を示した。また、切歯の削合により顎顔面形態の差を生じなかったことから、顎顔面形態の変化は切歯の萌出量とは無関係で、咀嚼機能の違いに影響されると述べている。したがって、本研究において、切歯の萌出量および傾斜角に2群間で有意の差を認めたことは、咀嚼機能の違いによる直接的な変化というよりも、顎顔面形態の変化に伴う二次的な変化と推測される。

2. 咬筋活動について

(1) ラット咬筋の周波数特性について

ヒト以外の動物において、筋活動を周波数分析により検討した研究はまったく見られず、ラットの咬筋筋電図における周波数分布が週齢や摂取飼料の違いによりどのように変化するのはまったく不明である。

年齢差と周波数分布に関して、新出¹⁰⁾は小児 (III A ~ III B) および成人 (IV A 以降) の咬みしめ時の咀嚼筋筋電図について周波数分析を行い、小児と成人の咬筋活動の累積50%値に差がなかったとしている。ま

た、Sato⁶¹⁾は上腕二頭筋について調べた結果、小学生の男女間および小学生と成人男子の間には、パワースペクトルの著しい相違は観察されず、健康な被験者においては年齢差および性差の影響はないと報告している。一方、寶田ら⁶²⁾は小児 (II A) および成人の咬みしめ時とガム咀嚼時の咬筋と側頭筋筋電図について周波数分析を行い、いずれも小児と比較して成人のパワースペクトルは低周波域に多く分布していたと述べ、また、Yuen ら⁶³⁾も混合歯列期と比較して永久歯列期では平均周波数が低かったと報告している。一方、朝倉⁶⁴⁾はタッピング、クレンチングの際のピーク周波数について、側頭筋では歯列の成長により高い帯域に移行する傾向を示し、逆に咬筋では低い帯域に移行する傾向が認められたと述べている。以上の報告のように、年齢差が周波数分布に及ぼす影響については必ずしも統一した見解が得られていないのが現状である。

年齢の差による咀嚼筋活動の相違点として重要なもののひとつに咬合力の差があげられる。筋の張力は参加する運動単位の数と発火頻度およびその同期性により変化すると考えられる。咬合力の増加に伴って個々の運動単位の発火頻度が増大し、異なる運動単位の非同期的活動の増強によって、周波数域は拡大し、逆に同期性が増すことにより徐波成分の増加を認めるとされている⁵⁰⁾。さらに、運動単位の活動状態と周波数域に関して、Yemm⁶⁵⁾は小さいサイズの運動単位は閾値が低く、持続時間の短い発火をするとしていることから、この短い持続時間の発火がパワースペクトル周波数域の差となって表れると考えられる。また、Yemm⁶⁵⁾、Palla と Ash⁶⁶⁾は新たに参加する運動単位は小さいサイズから大きいサイズの順であるため、大きな咬合力では持続時間の長い、大きい運動単位が参加し、さらに運動単位間で同期性が増すため、周波数成分はより低域へ移行すると報告している。

組織化学的には、筋を構成する筋線維のタイプは筋の生理学的特性と一致しており⁶⁷⁾、筋を構成する fast twitch muscle と slow twitch muscle の構成比率により、周波数特性は変化すると考えられる。Yuen ら⁶³⁾は小児と成人の平均周波数の違いについて、成長により一部の type I 線維 (red muscle fiber) が type II 線維 (intermediate muscle fiber あるいは white muscle fiber) に変わるためであろうと推察している。

さらに、周波数特性への影響として筋の伸張による変化が考えられる。Sato⁶⁸⁾は上腕二頭筋、上腕三頭筋などにおいて筋の伸張により、周波数域は低域に移行すると述べ、鈴木⁶⁹⁾は咬合高径が高くなると咀嚼筋の周波数域は低域に移行し、低くなると高域に拡が

ると述べている。

以上の考察を本研究の結果に当てはめてみると、粉末群では固形群と比較して筋線維の発達が悪っていたことから、運動単位のサイズや筋線維の組成が異なることが原因となって摂取飼料の違いに伴う周波数分布の差異を生じたと考えられる。また、飼料によって咀嚼様式が異なり、固形群では摂食時に大きな咬合力を必要とすることや、咀嚼時の顎間距離が長くなることも原因と考えられる。また、週齢の差についても筋線維の組成の変化や咀嚼様式の変化を考えれば十分理解しうるものであるが、8週齢時のスペクトル分布が他の週齢と比較してやや高周波域まで拡大した理由については、本研究からは明らかにできなかった。

(2) 摂取飼料と咀嚼筋活動電位の大きさとの関連について

咀嚼運動は食品の物理的性状や大きさにより影響を受け、一般に硬い食品の咀嚼の方が高い咀嚼筋活動量を示すといわれている^{44,70,71}。このような食品の性状に応じた咀嚼運動の変化には、求心性感覚入力の間接が考えられている⁷²。

筋紡錘赤道部から発せられる求心性インパルスは脊髄で運動神経細胞に伝達され、あるいは脳幹部に異なる刺激を与えることによって遠心性のインパルスを変化させ、咀嚼筋の活動を調節するといわれている^{73,74}。Maedaら⁷⁵は粉末飼料によってマウスを長期間飼育した場合、咬筋、側頭筋の筋紡錘の発育は固形飼料によって飼育した場合よりも遅れたと報告している。咬合相における筋紡錘の活動上昇は下顎伸張反射を介して閉口筋の活動を高めることから⁷⁶、粉末群において咀嚼時に咬筋の活動電位が低いのは、筋紡錘の発育不良ともあいまって十分な筋紡錘の活動が得られないことが原因と考えられる。

(3) 終日の咬筋活動について

1) 咬筋活動の日内変動

咬筋パーストの時間帯ごとの総持続時間の割合については、両群間で著明な差が認められず、いずれも明暗周期に同調した24時間を周期とする規則的な日周リズムを示した。暗期に高い活動性を示したことは、ラットの夜行性動物としての特性を示していると考えられる。栗原³⁶は誘導電波感応方式測定法を用いてラットの自発運動を測定し、明期に低く暗期に高い、明暗周期に同調した規則的な日周パターンを呈することを報告した。斎藤ら³⁷はマウスの飲水行動量(リッキング回数)を調べ、同様の結果を示した。一方、平川ら⁴⁵は筋電図をもとにラットの顎運動の日内変動を検討し、行動量と明暗リズムの間に約2時間のずれがあったと報告した。本研究では4時間ごとの咬筋活

動時間の分析を行ったため、行動量と明暗リズムの間のずれまでは明らかにならなかった。斎藤ら³⁷は系統により日周リズムに差があることを報告しており、中には点燈、消燈の前後2時間において最も高い活動性を示す系統があるとしていることから、行動量と明暗リズムの関係をより詳しく調べるためには時間帯の区分をさらに短くする必要がある。しかし、咬筋活動の明暗周期に同調した日周変化を明らかにする上で、本研究で設定した4時間ごとの区分は十分であったと考えられる。

2) 週齢および飼料による咬筋活動の差

低い週齢のラットにおいて咬筋活動が大きな値を示したことについては、未熟な咀嚼能力を補うのに必要な咀嚼運動の増加あるいは成長期における所要摂取量の増大などが、その理由として考えられる。

咀嚼運動パターンは、動物の食性に応じて多種多様であるが、リズムカルに反復される顎と舌との協調運動である点が共通の特徴である。咀嚼リズムは基本的には、脳幹に存在するリズム発生器によって形成されるものであり、これが大脳皮質からの司令によって活性化されることにより、咀嚼運動が開始、遂行されると考えられる。実際の咀嚼運動では、中枢神経系は顎、口腔、顔面領域の受容器から口腔内の食物や顎、舌、顔面運動によって誘発される感覚情報を絶えず受容し、それに基づいて時々刻々食物の性状に適した顎運動や咬合力などを規定する司令を出していることが示唆されている⁷²。

一方、咀嚼機能の発達に関して、ガム咀嚼時の咀嚼リズムから、塩野⁷⁷はIIA期の小児においては、成人と比較して持続時間は長く、活動間隔と活動周期は短い咀嚼様式を示すと述べ、小児では成人と比較して粉碎能力が低いこと、咀嚼回数を多くすることにより劣っている咀嚼機能を補償しているものと推察した。また、アルバラードら⁷⁸はIIA期の小児は成人と比較して持続時間、活動間隔、活動周期の変動係数が大きく、咀嚼リズムが不安定であったとし、これは固有の咀嚼様式が十分に確立されていないためと考察している。

さらに、咀嚼機能に影響を及ぼすと考えられるものに唾液の分泌がある。JacobyとLeeson⁷⁹はラットの顎下腺について、生後4~5ヶ月でも発育は不完全であろうと述べている。さらに、WellsとPeronace⁸⁰、菊地ら⁸¹は、練食で飼育したラットでは咀嚼機能の低下と関連して唾液腺の萎縮が生じることを報告している。したがって、本研究で観察を行った5週齢や8週齢などの幼若ラットでは唾液の分泌が十分に行われていないことが考えられる。すなわち、終日の咬筋活

動に関して、18 μ Vのレベルにおいて粉末群の5週齢や8週齢などの幼若ラットでは咬筋パーストの総持続時間と比較して、出現回数が相対的に大きな値を示したが、この理由として、粉末群では唾液の分泌が不十分なことによる咀嚼障害や嚥下困難が考えられ、結果として咀嚼回数の増加を生じたと推測される。

ところで、軟性飼料で飼育されたラットは固形飼料のものと比較して、実験開始直後に体重の減少を示すことが知られている。この理由について Kiliaridis ら²²⁾は、ラットが軟性飼料を好まず、十分な量の飼料を摂取しないか、外的環境の変化に対する抵抗力の低下が原因ではないかと推察している。しかし、本研究においては、筋電図の記録を行ったラットでは固形群と比較して粉末群の体重の減少を認めなかった。そのため、粉末群での筋活動の減少は摂取飼料量の減少によるものではなく、筋機能の低下が原因であると考えられる。

3. 咀嚼筋について

飼料の硬度の違いによる咀嚼機能の変化と対応して、咀嚼筋重量および筋線維のタイプに変化の見られることが知られている。

液状あるいは粉末の飼料で飼育されたラットやマウスの咬筋重量は固形飼料のものよりも小さく^{17,18,21,82)}、また継代飼育による形質変化の蓄積も示唆されている¹⁹⁾。本研究においても8週齢、15週齢とも固形群と比較して粉末群の咬筋重量は有意に小さな値を示した。両群の体重には有意な差が認められなかったことから、飼料の違いによる摂取栄養量の差によるものではなく、咀嚼機能の低下を主因とした筋の発育不良と考えられた。

筋を構成する筋線維の組織化学的タイプは筋の生理学的特性と一致することが知られている⁶⁷⁾。一方、Maxwell ら⁸³⁾は、筋の酸化能力は筋活動の際の筋線維の参加頻度に応じて容易に変化すると述べ、勝田ら⁸⁴⁾は、持久的トレーニングに対しては酸化系酵素活性の増大、type I (red muscle fiber) または type II A (intermediate muscle fiber) などの酸化能力の高い筋線維の比率の増加が生じ、スプリントトレーニングによって解糖系酵素活性の増大、筋線維の肥大などが生じると述べている。タイプ別筋線維の咀嚼機能に応じた変化として、Maxwell ら⁸³⁾はアカゲザルのメスで長期にわたる全歯牙の欠如により、slow fiber (red muscle fiber) のみ萎縮したと報告し、アカゲザルのメスは強い力を通常使用していないため、fast fiber (intermediate muscle fiber および white muscle fiber) の萎縮がほとんど生じず、下顎位の保持や咀嚼のために必要な中程度の力の低下に順応して slow fiber の

みが選択的に廃用性萎縮を生じたと考察している。また、Kiliaridis ら⁸⁵⁾、山田²³⁾は固形飼料で飼育したラットでは粉末飼料で飼育したものと比較して咬筋浅層および深層ともに難疲労性の type II A 線維の比率が高かったと報告している。Hiimae と Houston³⁰⁾、Hiimae⁸⁶⁾によれば、ラットの咬筋浅層と側頭筋後方は下顎の前後運動に働き、切歯での捕食に際して重要な役割をしており、また、咬筋深層と側頭筋前方部は上下方向に走行し、臼歯部での強い噛みしめに関与しているといわれる。本研究では、深層のみ筋線維の構成比率が異なり、固形群は粉末群と比較して intermediate muscle fiber の割合が高く、white muscle fiber の割合が低下していた。これは咀嚼機能の差、すなわち固形飼料と比較して粉末飼料では臼歯部での咀嚼に要する力の強さや咀嚼時間の低下が咬筋深層における筋の発育や発達に影響を及ぼしたが、切歯部での飼料の捕食などの機能には大差がなかったため、咬筋浅層においては筋線維の構成比率に差異を生じなかったものと考えられる。

本研究結果からは、咬筋浅層と深層の機能の差が明らかではないが、咬筋全体としては成長期にあたる5週齢や8週齢時に、それ以降の時期と比較して旺盛な終日筋活動を示した。さらに、飼料の違いにより筋活動に差異が認められたことから、この時期における咀嚼機能の差が筋の発育、分化に強く影響を及ぼしていることが強く示唆された。

ところで、液状飼料や練状飼料あるいは低硬度固形飼料を用いた場合にも、飼料の性状と摂取に要する咀嚼機能に応じて咀嚼筋の発育に差が生じるとされている^{20,82)}。酒井²⁰⁾は低硬度固形飼料およびスポンジ状の飼料で飼育した場合に咀嚼筋の type II A 線維の比率の増加を認めたと述べ、この理由を飼料摂取のために臼磨様運動を要したためと推察している。すなわち、筋活動の良否と咀嚼筋の発育について論じる際にはその硬度のみならず、咀嚼性(かたさ×凝集性×弾力性)⁷⁰⁾に着目する必要があると考えられる。

一方、ヒトを対象とした研究では、Weijs と Hillen¹¹⁾、Kiliaridis と Kålebo¹²⁾は咀嚼筋の横断面の大きさと顎顔面形態との相関を、Gionhaku と Lowe¹³⁾は咬筋および内側翼突筋の体積と顎顔面形態との相関を認めている。また、顎顔面形態と咀嚼筋の幾何学的配置について Proctor ら¹⁴⁾は骨格的に過蓋咬合(closed-bite)の者は開咬の者に比べて咬筋浅層が頭蓋や上顎に対して垂直に走行していると述べ、Takada ら¹⁵⁾は咀嚼筋の走行は顎顔面の発育との間の相関が高かったと述べている。しかし、咀嚼筋の位置の不正が骨格の異常を直接引き起こすと考えるよりも、むしろ咀嚼筋活動の

大小が顎骨の形態変異を生じ、それに伴う二次的な筋の変位が顎骨の形成に相乗的な影響を及ぼすと考える方が妥当と思われる。

4. 咀嚼筋活動と顎顔面形態との関連について

咀嚼筋機能と顎顔面形態との関わりについてはこれまでも多くの研究がなされている。ヒトでは咬合力や閉顎力あるいは咀嚼筋活動が、過蓋咬合者では大きく、開咬者では小さいこと^{5,10)}、後顔面高などとの間に正の相関、下顎角や下顎下縁傾斜角などとの間に負の相関を有すること⁶⁻⁹⁾が報告されている。本研究においても、固形群と比較して下顎枝の短小、下顎角の開大などを認めた粉末群で咬筋活動電位が低下していたことは、これらの報告と一致した所見であった。しかし、従来の研究では筋の能力と顎顔面形態との関わりについて評価しているに過ぎず、筋活動が顎顔面形態の形成に及ぼす影響については不明であった。

これまで、顎顔面骨格の形態形成に影響を及ぼす咀嚼筋活動について、客観的データに基づく定量的な評価はほとんど行われていない。Miyamoto^ら³⁴⁾は成人男女の終日筋活動を調査し、強い咬みしめのほとんどは食事時においてであり、かつその総持続時間は約100秒に過ぎないこと、一方、極めて弱く、安静時にも認められる筋活動はその約20倍の時間であることを明らかにした。以上のことから、筋活動が形態に及ぼす影響のうち、その作用時間に注目した場合弱い筋活動の重要性が示唆され、本研究結果においても、成長期にあたる5週齢では18 μ V以上100 μ V未満の電位を示した筋活動で、固形群は粉末群よりも総持続時間が有意に大きな値を示し、弱い筋活動も顎顔面形態の形成に少なからず影響を及ぼしている可能性が示唆された。弱い筋活動の関わりについては、顎運動に関与する筋の切断、切除²⁴⁻²⁶⁾あるいは支配神経の切除^{27,28)}などによる筋の欠如や不活動に基づく過去の実験ではまったく明らかにできなかったことである。

ところで、雄ラットの顔面頭蓋各部の成長は、およそ生後60-80日頃までが旺盛であることが示されている⁸⁷⁾。ただし、部位によって成長の時期は異なり、脳頭蓋ではかなり早期に成熟型に達するのに対して、脳頭蓋から離れた上顔面は咀嚼系の成長様式に近く、全期間を通じて旺盛な成長を続けること、また下顎角部の成長は遅くまで(20-90日)続くこととされる⁸⁷⁾。本研究において摂取飼料の違いにより、顎顔面頭蓋の成長量あるいは形態や成長方向の差異を認めるようになった時期は5週齢ないし8週齢からであり、比較的早期から異なる成長を示すことが明らかとなった。この時期には筋活動の明確な差異を認めたにもかかわらず、それ以後の12週齢時や15週齢時にはいずれのレベルにおい

ても筋活動に大きな差異を認めなかったことは顎顔面骨格の成長の旺盛な時期における咀嚼機能の違いが顎顔面形態を決定する上できわめて重要であることを示唆している。一方、本研究では、咀嚼筋の活動能力と顎顔面形態との関連について直接比較することは行わなかったが、軟性飼料で飼育したラットにおいて、固形飼料で飼育したものと比較して筋線維タイプに変化の現れる時期と下顎骨の成長が少なかった時期とが一致していたとの報告²⁰⁾に見られるように、咀嚼筋の発達と顎顔面形態には密接な関係があることも示唆されている。本研究においても、粉末群では固形群と比較して咬筋重量の低下や筋線維の発達が劣っていたことから、筋活動の能力にも差異を生じるものと考えられ、咬筋の能力と顎顔面形態との間に従来の研究で認められたと同様な関連性が存在すると推測された。すなわち、成長期における咀嚼筋活動は顎顔面骨格の形態形成に影響を及ぼすのに対して、咀嚼筋の能力は筋の発育や顎顔面形態に影響され、形態変化に対してある程度の順応を示しうることが示唆された。

総 括

咀嚼筋活動が顎顔面骨格の形態形成に及ぼす影響を明らかにするために、食餌の硬軟に応じた顎顔面骨格の形態変化と終日の咀嚼筋活動の差異やその成長に伴う変化の様相について検討し、以下の結果を得た。

1. 顎顔面形態は飼料の違いにより、成長期のかなり早期から両群間に差異を認めた。とりわけ、成長量の差と比較して形態や成長方向の差異はより早期に発現することが明らかとなった。また、顎顔面各部の成長に対する咀嚼機能の影響の違いが示唆された。

2. 飼料摂取時における咬筋の周波数特性については、両群とも8週齢時には他の週齢と比較してスペクトル分布がやや高周波域まで拡大する傾向にあったが、平均周波数は週齢による著明な差を認めなかった。平均周波数および累積50%値、累積80%値はいずれの週齢においても固形群が小さい傾向を示した。

3. 咀嚼筋活動には暗期に増加し、明期に減少する日周期の存在が認められた。また、その周期の様相については両群間に大きな差を認めなかった。

4. 筋活動の平均持続時間は、5週齢および8週齢においては粉末群が有意に小さな値を示した。しかし、12週齢および15週齢においては両群間で著明な差を認めなかった。

5. 筋活動の総持続時間については、5週齢では高い電位レベルのみならず、低いレベルでも固形群が粉末群より有意に大きな値を示したが、8週齢では高いレベルのみ固形群が有意に大きな値を示した。12週齢

および15週齢ではいずれのレベルにおいても有意差を認めなかった。

6. 粉末群は固形群と比較して咬筋の重量が有意に小さく、筋の発育不良が認められた。また、筋線維のタイプ別比率について、咬筋浅層では両群間に有意差が認められなかった。しかし、粉末群の咬筋深層では intermediate muscle fiber の比率が有意に低下しており、筋の発達が遅れが認められた。

以上の結果より、顎顔面骨格の形態形成は成長期の咀嚼筋活動の影響を強く受けることが示された。さらに、筋活動については強い力のみならず、弱い持続的に働く力もその形態形成に重要な役割を果たしていることが示唆された。

謝 辞

稿を終えるにあたり、終始御懇篤なる御指導ならびに御校閲を賜りました本学歯科矯正学講座丹根一夫教授に深甚なる謝意を表します。また、貴重なる御助言、御校閲を賜りました本学口腔解剖学第一講座前田憲彦教授ならびに本学歯科補綴学第一講座赤川安正教授に深謝致します。

さらに、本研究を遂行するにあたり、多大なる御協力を頂いた本学歯科矯正学講座の教室員各位ならびに関係各位に心から感謝致します。

文 献

- 1) 井上直彦：歴史時代における咬合の退化。歯界展望 56, 435-444, 1980.
- 2) 亀谷哲也：中世日本人の顎顔面形態。歯界展望 56, 635-643, 1980.
- 3) 伊藤学而：中世日本人における discrepancy。歯界展望 56, 825-833, 1980.
- 4) 井上直彦：いわゆる discrepancy について。II. Discrepancy の成因。日本歯科評論 448, 151-161, 1980.
- 5) Ingervall, B. and Helkimo, E.: Masticatory muscle force and facial morphology in man. *Archs oral Biol.* 23, 203-206, 1978.
- 6) 田部孝治：咀嚼筋活動と顎顔面形態に関する研究。II. 咬筋の活動および閉顎力と顎・顔面形態との関係について。日矯歯誌 35, 255-265, 1976.
- 7) 谷口 勇：閉顎筋機能と顎顔面形態の垂直的因子との関係について。歯学 71, 945-969, 1984.
- 8) Møller, E.: The chewing apparatus. An electromyographic study of the action of the muscles of mastication and its correlation to facial morphology. *Acta Physiol. Scand.* 69, Suppl. 280, 1-226, 1966.
- 9) Ingervall, B. and Thilander, B.: Relation between facial morphology and activity of masticatory muscles. An electromyographic and radiographic cepha-

lometric investigation. *J. Oral Rehabil.* 1, 131-147, 1974.

- 10) 新出 淳：小児および成人前歯部開咬患者の形態的特徴と咀嚼筋機能に関する研究。日矯歯誌 45, 38-47, 1986.
- 11) Weijs, W.A. and Hillen, B.: Relationship between masticatory muscle cross-section and skull shape. *J. Dent. Res.* 63, 1154-1157, 1984.
- 12) Kiliaridis, S. and Kålebo, P.: Masseter muscle thickness measured by ultrasonography and its relation to facial morphology. *J. Dent. Res.* 70, 1262-1265, 1991.
- 13) Gionhaku, N. and Lowe, A.A.: Relationship between jaw muscle volume and craniofacial form. *J. Dent. Res.* 68, 805-809, 1989.
- 14) Proctor, A.D. and DeVincenzo, J.P.: Masseter muscle position relative to dentofacial form. *Angle Orthod.* 40, 37-44, 1970.
- 15) Takada, K., Lowe, A.A. and Freund, V.K.: Canonical correlations between masticatory muscle orientation and dentoskeletal morphology in children. *Am. J. Orthod.* 86, 331-341, 1984.
- 16) 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. *Am. J. Orthod.* 37, 895-928, 1951.
- 17) Moore, W.J.: Masticatory function and skull growth. *J. Zool.* 146, 123-131, 1965.
- 18) Beecher, R.M. and Corruccini, R.S.: Effects of dietary consistency on cranial and occlusal development. *Angle Orthod.* 51, 61-69, 1981.
- 19) 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.
- 20) 酒井秀彰：成長期ラットにおける各種硬度の飼料摂取による咀嚼筋の組織学的変化および下顎骨の形態計測学的変化。日矯歯誌 51, 126-141, 1992.
- 21) 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.
- 22) Kiliaridis, S., Engstöm, 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.
- 23) 山田 元：粉末飼料飼育が発育途上ラット咬筋並びに下顎骨形態に与える影響。岐歯学誌 19, 284-301, 1992.
- 24) 深沢裕文：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.
- 25) Avis, V.: The significance of the angle of the mandible: an experimental and comparative study. *Am. J. Phys. Anthropol.* 19, 55-61, 1961.
- 26) Horowitz, S.L. and Shapiro, H.H.: Modification of

- skull and jaw architecture following removal of the masseter muscle in the rat. *Am. J. Phys. Anthropol.* **13**, 301-308, 1955.
- 27) Washburn, S.L.: The effect of facial paralysis on the growth of the skull of rat and rabbit. *Anat. Res.* **94**, 163-168, 1946.
- 28) 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.
- 29) 山田建二郎, 須ノ内勇次郎, 渡辺八十夫, 石田真奈美, 宮本圭介, 蔡 吉陽, 米田尚登, 山田哲郎, 山内和夫: 終日筋電図採得分析システム. 廣大歯誌 **25**, 332-336, 1993.
- 30) Hiimae, K. and Houston, W.J.B.: The structure and function of the jaw muscles in the rat (*Rattus norvegicus* L.) I. Their anatomy and internal architecture. *Zool. F. Linn. Soc.* **50**, 75-99, 1971.
- 31) Hiimae, K.M.: Masticatory function in the mammals. *J. Dent. Res.* **46**, Suppl. 5, 883-893, 1967.
- 32) 小山良修, 今泉 清, 鈴木 潔, 田中利男: 飼育管理; ラット; 実験動物飼育管理の実際. 医学書院, 東京, 17-23, 1963.
- 33) Maeda, N., Hanai, H. and Kumegawa, M.: Post-natal development of masticatory organs in rats. I. Consecutive changes in histochemical properties and diameter of muscle fibers of the masseter superficialis. *Anat. Anz.* **149**, 319-328, 1981.
- 34) Miyamoto, K., Yamada, K., Ishizuka, Y., Morimoto, N. and Tanne, K.: Masseter muscle activity during whole day in young adults. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.* **110**, 394-398, 1996.
- 35) 辻敬一郎, 海老原史樹文: 齧歯類の行動と遺伝—マウスの研究を中心に—. 代謝 **17**, 495-508, 1980.
- 36) 栗原 久: F344/DuCrj (Fischer) 系ラットの行動特性; 自発運動および条件回避反応習得過程について. 実験動物 **29**, 327-333, 1980.
- 37) 斎藤 徹, 勝山 慎, 海老野耕一, 高橋和明: 雄マウスにおける飲水行動量 (リッキング回数) パタンの日周期リズムについて. 実験動物 **29**, 359-363, 1980.
- 38) 山内忠平, 野村達次: 実験動物の生体学; 実験動物学総論 (田嶋嘉雄編). 朝倉書店, 東京, 151-184, 1972.
- 39) Zucker, I.: Light-dark rhythms in rat eating and drinking behavior. *Physiol. Behav.* **6**, 115-126, 1971.
- 40) Weijs, W.A.: Mandibular movements of the albino rat during feeding. *J. Morphol.* **145**, 107-124, 1975.
- 41) Hiimae, K. and Ardran, G.M.: A cinefluorographic study of mandibular movement during feeding in the rat (*Rattus norvegicus*). *J. Zool.* **154**, 139-154, 1968.
- 42) Thomas, N.R. and Peyton, S.C.: Relationship of masseter electromyographic activity to mandible position in the freely-moving rat. *Archs oral Biol.* **28**, 1043-1046, 1983.
- 43) Weijs, W.A. and Dantuma, R.: Electromyography and mechanics of mastication in the albino rat. *J. Morphol.* **146**, 1-34, 1975.
- 44) Thomas, N.R. and Peyton, S.C.: An electromyographic study of mastication in the freely-moving rat. *Archs oral Biol.* **28**, 939-945, 1983.
- 45) 平川輝行, 本田栄子, 原 巖, 中村修一, 中原敏: ラットの顎運動を伴う日常行動の筋電図学的研究. 九州歯会誌 **44**, 788-804, 1990.
- 46) 石塚泰男, 丹根一夫: ラットの終日咀嚼筋活動に関する筋電図学的研究. 廣大歯誌 **27**, 275-280, 1995.
- 47) Ishizuka, Y. and Tanne, K.: Masticatory muscle activity during whole day in rat. *Dentistry in Japan* **32**, 83-85, 1996.
- 48) Suzuki, A.: A comparative histochemical study of the masseter muscle of the cattle, sheep, swine, dog, guinea pig and rat. *Histochemistry* **51**, 121-131, 1977.
- 49) 勝田 茂, 伊藤一生, 的場秀樹, 北浦 孝, 春日規克, 石原明彦: 骨格筋線維タイプの特徴とそれに影響を及ぼす因子. その I. 骨格筋線維の分類. 体力科学 **37**, 345-357, 1988.
- 50) 三谷春保: 咀嚼筋の筋電図. 神経進歩 **18**, 1086-1095, 1974.
- 51) 笹井浩司, 市橋正昭, 朝倉恒夫, 蒲生健司, 吉安高左郎, 伊藤裕一郎, 宮田友晴, 田村康夫, 吉田定宏: 小児咀嚼筋活動の FFT 解析に関する研究. 第 1 報. 再現性について. 小児歯誌 **24**, 475-482, 1986.
- 52) 亀田 晃: 頭部の成長発育; 歯科矯正学 (飯塚哲夫, 岩澤忠正, 瀬端正之, 本橋康助編). 3 版, 医歯薬出版, 東京, 23-45, 1991.
- 53) Kreiborg, S., Jensen, B.L., Møller, E. and Björk, A.: Craniofacial growth in a case of congenital muscular dystrophy. *Am. J. Orthod.* **74**, 207-215, 1978.
- 54) Katsaros, C., Kiliaridis, S. and Berg, R.: Functional influence on sutural growth. A morphometric study in the anterior facial skeleton of the growing rat. *Eur. J. Orthod.* **16**, 353-360, 1994.
- 55) 深沢裕文: 閉口運動に関与する筋群切除後のラット下顎頭の成長発育に関する研究. 日矯歯誌 **39**, 303-318, 1980.
- 56) 町田幸雄: 顎は小さくなっていない—軟食は叢生の原因ではない—. 日歯医師会誌 **48**, 4-11, 1995.
- 57) 進木亜希, 森本徳明, 天野有希, 竹本美保, 石塚泰男, 丹根一夫: 歯と顎の年代的差異. 日矯歯誌 **54**, 112-117, 1995.
- 58) 山内 積, 石原勝利, 白土祥樹, 佐藤亨至, 三谷英夫: 最近の日本人正常咬合者の顎顔面形態につ

- いて. 日矯歯誌 54, 93-101, 1995.
- 59) Björk, A. and Skieller, V.: Facial development and tooth eruption. An implant study at the age of puberty. *Am. J. Orthod.* 62, 339-383, 1972.
- 60) Kiliaridis, S.: The relationship between masticatory function and craniofacial morphology. III. The eruption pattern of the incisors in the growing rat fed a soft diet. *Eur. J. Orthod.* 8, 71-79, 1986.
- 61) Sato, H.: Power spectra of surface electromyograms of school children. 人類誌 91, 215-222, 1983.
- 62) 寶田 貫, アルバラード・ラリナガ・グアダルーベ, 西田文彦, 西野瑞穂: 咀嚼筋表面筋電図の周波数分析に関する研究—成長発達に伴う変化—. 小児歯誌 27, 884-894, 1989.
- 63) Yuen S.W.H., Hwang, J.C.C. and Poon, P.W.F.: EMG power spectrum patterns of anterior temporal and masseter muscles in children and adults. *J. Dent. Res.* 68, 800-804, 1989.
- 64) 朝倉恒夫: パワースペクトル解析による小児咀嚼筋の筋電図学的評価. 小児歯誌 27, 494-512, 1989.
- 65) Yemm, R.: The orderly recruitment of motor units of the masseter and temporal muscles during voluntary isometric contraction in man. *J. Physiol.* 265, 163-174, 1977.
- 66) Palla, S. and Ash, M.M., Jr.: Effect of bite force on the power spectrum of the surface electromyogram of human jaw muscles. *Archs oral Biol.* 26, 287-295, 1981.
- 67) Burke, R.E., Levine, D.N., Zajac, F.E., III, Tsairis, P. and Engel, W.K.: Mammalian motor units: physiological-histochemical correlation in three types in cat gastrocnemius. *Science* 174, 709-712, 1971.
- 68) Sato, M.: A problem in the frequency analysis of the electromyogram. *Electromyography* 6, 21-23, 1966.
- 69) 鈴木啓一: 咬合高径の筋電図学的診断に関する基礎的研究. 歯科医学 49, 181-204, 1986.
- 70) 田村厚子, 柳沢幸江, 寺本芳子, 赤坂守人: 食品の物性と接触機能に関する研究. 第2報. 食品の物性による筋電図学的考案. 小児歯誌 23, 984-992, 1985.
- 71) 有住和浩: 食品の硬さが咀嚼運動に及ぼす影響に関する実験的研究. 補綴誌 33, 1301-1312, 1989.
- 72) 中村嘉男: 咀嚼運動のリズム形成機構. 神経進歩 30, 237-250, 1986.
- 73) 森本俊文: 咀嚼筋固有感覚と顎運動・顎反射. 歯基礎誌 27, 1-15, 1985.
- 74) Morimoto, T., Inoue, T., Masuda, Y. and Nagashima, T.: Sensory components facilitating jaw closing muscle activities in the rabbit. *Exp. Brain Res.* 76, 424-440, 1989.
- 75) 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.
- 76) 森本俊文: 下顎位と下顎運動の調節機構 (その3) —下顎位, 顎運動の調節と筋紡錘の役割—. 歯界展望 57, 617-623, 1981.
- 77) 塩野幸一: 幼児の咀嚼筋活動様相に関する筋電図学的研究. 小児歯誌 16, 275-295, 1978.
- 78) アルバラード・ラリナガ・グアダルーベ, 寶田 貫, 西田文彦, 西野瑞穂: 成長発達に伴う咀嚼筋の筋活動量ならびに咀嚼リズムの変化に関する研究. 小児歯誌 27, 895-906, 1989.
- 79) Jacoby, F. and Leeson, C.R.: The post-natal development of the rat submaxillary gland. *J. Anat.* 93, 201-216, 1959.
- 80) Wells, H. and Peronace, A.A.V.: Functional hypertrophy and atrophy of the salivary glands of rats. *Am. J. Physiol.* 212, 247-251, 1967.
- 81) 菊地賢司, 三木真弓, 宮本幸子, 有田憲司, 西野瑞穂: 咀嚼が唾液腺の発達に及ぼす影響について. 小児歯誌 27, 427-435, 1989.
- 82) 吉田礼子: 液状飼料飼育マウスの咀嚼筋線維の分化と発達に関する研究. 日矯歯誌 54, 52-63, 1995.
- 83) Maxwell, L.C., McNamara, J.A., Jr., Carlson, D.S. and Faulkner, J.A.: Histochemistry of fibers of masseter and temporalis muscles of edentulous monkeys. *Macaca mulatta. Archs oral Biol.* 25, 87-93, 1980.
- 84) 勝田 茂, 伊藤一生, 的場秀樹, 北浦 孝, 春日規克, 石原明彦: 骨格筋線維タイプの特徴とそれに影響を及ぼす因子. そのII. 筋線維タイプに影響を与える因子. 体力科学 38, 13-26, 1989.
- 85) Kiliaridis, S., Engstöm, C. and Thilander, B.: Histochemical analysis of masticatory muscle in the growing rat after prolonged alteration in the consistency of the diet. *Archs oral Biol.* 33, 187-193, 1988.
- 86) Hiemae, K.: The structure and function of the jaw muscles in the rat (*Rattus norvegicus* L.) III. The mechanics of the muscles. *Zool. F. Linn. Soc.* 50, 111-132, 1971.
- 87) 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.