

## 原 著

## ラット頭蓋成長に伴う咬筋の力の大きさと方向の変化

岩 田 明 子<sup>1)</sup> 佐 藤 和 彦<sup>2)</sup> 矢 野 航<sup>2)</sup> 渡 邊 竜 太<sup>2)</sup>  
江 尻 貞 一<sup>2)</sup> 北 井 則 行<sup>1)</sup>

Study of developmental changes in the relative forces and their directions  
in 14 compartments in the rat masseter muscle

IWATA AKIKO<sup>1)</sup>, SATOH KAZUHIKO<sup>2)</sup>, YANO WATARU<sup>2)</sup>, WATANABE RYUTA<sup>2)</sup>, EJIRI SADAKAZU<sup>2)</sup>  
and KITAI NORIYUKI<sup>1)</sup>

ラット咬筋の成長に伴う変化を明らかにするために、各週齢のラット咬筋を14筋区画に分け、筋区画の筋力の大きさと方向の成長変化を検討した。

3~38週齢の雄性 Wistar 系ラット36個体を用い、咬筋を起始・停止領域の不連続な14筋区画に分け、筋重量と筋線維長を計測した。筋束太さを筋力指数と定義し、筋走向ベクトルを頭尾 (x)・背腹 (y)・側方 (z) 方向の成分で表した。各計測項目について週齢との相関を求めた。また、 $\mu$ CT 再構成画像を用いて、頭蓋の成長変化をシミュレーションし、咬筋の成長変化と比較した。

14筋区画すべての筋力指数と週齢との間に有意な相関が認められた。筋力指数増加は、表面の5区画で大きく、内側の3区画で小さい値を示すことから、咬筋表面の筋区画は内側の筋区画よりも、筋力指数が増加しやすいことが考えられる。最表層とその一層内側に位置する筋区画の筋力指数増加パターンは、咬筋全体のパターンに類似していることから、最表層とその一層内側の筋区画の成長が咬筋全体の成長に大きく影響していることが示唆される。咬筋全体の筋力指数は、3~5週齢に著しい増加が認められ、離乳と第三臼歯の萌出が筋力増加に影響すると考えられる。筋線維長と頭蓋サイズは15週齢以降緩やかな増加へと移行するが、筋重量と筋力指数は増加し続けることが明らかとなった。これは、成長期以降も続くラットの旺盛な摂食行動が要因と考えられる。筋線維の走向がx方向である表層では、x方向の筋力指数が大きく、y方向に走向する前方部の7区画では、y方向の筋力指数が大きかった。筋線維が斜め方向に走る後方部の6区画では、x・y方向の筋力指数がほぼ同等であった。

これらのことから、咬筋の成長には、筋区画の存在深さ、頭尾方向での位置および筋線維の方向が要因となっていることが示され、咀嚼機能や摂食行動が筋力に影響を及ぼしている可能性が示唆された。

キーワード：咬筋、成長、筋区画

*In order to understand developmental changes in the rat masseter, the relative forces and force directions in 14 compartments within this muscle were compared for 36 male Wistar rats, the ages of which ranged from 3 to 38 weeks. Fiber bundle thickness was calculated based on muscle weight and fiber length, then defined as the muscle force index (MFI). MFIs for each compartment were resolved into three force components, in the rostrocaudal (x), dorsoventral (y), and mediolateral (z) directions, and their quantitative data correlations with age were analyzed. Furthermore, the pattern of cranial change was simulated using  $\mu$ CT imaging, and compared with developmental changes in the masseter.*

*In all compartments examined, significant correlations existed between MFI and age, with MFI increases being larger for 5 superficial compartments and smaller for 3 deep compartments. MFIs in the*

<sup>1)</sup> 朝日大学歯学部口腔構造機能発育学講座歯科矯正学分野

<sup>2)</sup> 朝日大学歯学部口腔構造機能発育学講座口腔解剖学分野  
501-0296 岐阜県瑞穂市穂積1851

<sup>1)</sup> Department of Orthodontics, Division of Oral Structure, Function, and Development

<sup>2)</sup> Department of Oral Anatomy, Division of Oral Structure, Function, and Development

Asahi University School of Dentistry  
Hozumi 1851, Mizuho, Gifu 501-0296, Japan  
(平成28年5月27日受理)

*superficial layer and the most lateral compartments in the deep layer, as well as the sum of the MFIs of all masseter compartments, each increased in a similar manner. This finding suggests that developmental changes in the superficial layer and in the most lateral compartments in the deep layer may be most important for determining the growth pattern of the masseter force as a whole.*

*The sum of the MFIs of all masseter compartments rapidly increased from 3 to 5 weeks of age, which seems due to weaning and the eruption of the third molars. As for the sum of the fiber lengths of all masseter compartments, as well as for cranial size, little changes were seen after 15 weeks, but masseter mass and the sum of the MFIs of all masseter compartments continued to increase until 38 weeks. This latter finding may be due to active feeding behavior after periods of growth. In the superficial layer (which runs rostrocaudally), the x-component of its MFI was found to be larger than the other two components. Similarly, the 7 compartments oriented dorsoventrally in turn had larger y-components, with the last 6 posterior compartments having roughly equal x- and y-component values.*

*The present findings suggest that the mediolateral or rostrocaudal position of the compartments, their fiber directions, and feeding behavior may all play important roles in determining the growth pattern of the masseter.*

Key words: masseter, developmental change, component of muscle

## 緒 言

頭蓋顎顔面の成長発育を考慮することは、矯正歯科治療の診断、治療計画の立案のために必要不可欠である。そのため、矯正歯科臨床においては、古くから、頭部 X 線規格写真を用いて、頭蓋顎顔面の成長発育に関する研究が数多くなされてきた<sup>1-8)</sup>。また、骨格形態は筋の張力などによるメカニカルストレスの影響を受けることが知られており<sup>9)</sup>、頭蓋顎顔面領域においても、骨格形態が少なくとも局所的には生体力学によって決定されると理解されてきた<sup>10)</sup>。そこで、頭蓋顎顔面形態の発達を理解するために、成長に伴う咀嚼筋の変化を知ることは重要であり、成長により著しい形態的不調和を示した不正咬合者の咀嚼筋を正常咬合者と比較検討した研究が多く認められる<sup>11-15)</sup>。しかし、これらはいずれも成人被検者を対象として調べた報告で、ヒトにおいて、成長による咀嚼筋の変化を縦断的に調べた報告はない。そこで、ヒト以外の哺乳類を用いれば、さまざまな年齢の試料を調べることができるため、ヒト咀嚼筋の成長パターンを推測する手がかりになると考えられる。

咀嚼筋の中で咬筋は、ヒトにおいて、筋線維の走向が異なる7つの筋区画からなることが知られている<sup>16,17)</sup>。一方、ラットの咬筋は14筋区画に分離されることが報告されている<sup>18-22)</sup>。このように、複雑な内部構造を呈している咬筋の力を算出する場合、咬筋を一塊として力を求めるより、筋区画ごとの分力を合計した力を咬筋全体の力として求める方が、咬筋の力をより正確に評価できることは明らかである。さらに、筋

区画ごとの筋力の大きさだけでなく、筋の走向を調べることで、筋の付着部位による成長の違いを知ることができる。すなわち、各筋区画について、力の大きさと方向を知ることが、咬筋全体の筋力変化を知るために重要である。

成長に関する実験的研究としては、正常ラットを用いて、成長による骨格形態の変化<sup>23,24)</sup>や咀嚼筋形態の変化<sup>25,26)</sup>が検討されている。このうち、咀嚼筋形態を検討した研究のいずれも、咀嚼筋の筋区画を検討したものではなかった。また、家兎を用いて、咀嚼筋の筋区画における筋力を検討した研究<sup>27)</sup>があるが、幼獣および成獣の2群間での筋区画の筋力について比較検討したものであるため、成長をさまざまな年齢で連続的に調べて各筋区画の筋力変化を検討したものではなく、各筋区画の筋力を合成した力についても検討していなかった。以上のように、哺乳類の咀嚼筋についても、各筋区画の筋力を合成して筋全体の力を求め、成長に伴う変化を連続的に検討した研究は認められない。

本研究の目的は、さまざまな週齢のラットから取り出した咬筋を14筋区画に分け、各筋区画の筋力の大きさと方向の成長変化を検討し、咬筋全体の筋力について成長による変化を明らかにすることである。

## 材料および方法

### 1. 材料

3週齢から38週齢まで各週齢1個体ずつの雄性 Wistar 系ラット（中部科学資材、名古屋）36個体を、炭酸ガスにより安楽死させ、研究材料として用いた。

これらの材料は、8週齢の雌雄各3個体を交配させることによって得た。飼育中は固形飼料（オリエンタル酵母工業，東京）および水道水を自由に摂取できる状態にした。なお，本研究は朝日大学歯学部動物実験倫理委員会の承認（承認番号11-017）を得て行った。

## 2. 方法

### 1) 解剖学的データの採取

#### (1) 筋区画の付着部における中心点の記録

筋区画の分離をより正確に行うため，剥皮した頭部を10%ホルマリン溶液中で10日間固定した後，咬筋を合計14筋区画に分離した（図1）。付着部における中心点の記録に関しては筋区画を分離するたびに行った。起始部については上顎骨前頬骨陥凹から起始部の前端と後端までの距離を，停止部については下顎骨角突起先端から停止部の前端と後端までの距離をノギス

で計測・記録しておき，咬筋を頭蓋から除去した後に，その距離をもとに，それぞれの起始・停止部を左側頭蓋骨に印記した（図2）。

また，起始・停止部の中心点については，以下の方法により求めた（図3，表1）。

#### (2) 筋重量の計測

各筋区画の腱膜を除去し，40℃に設定した恒温器（CI-610，アドバンテック，東京）で10日間乾燥させた後，電子天秤（AB54-C，メトラー・トレド，東京）を用いて筋重量の計測を行った。

#### (3) 筋線維長の計測

筋線維長は，ノギスを用いて計測した腱膜のサイズ，頭蓋骨上に印記した起始・停止部の中心点間距離をもとに，SatoとIwakuの方法<sup>21)</sup>に従って近似値を算出した。

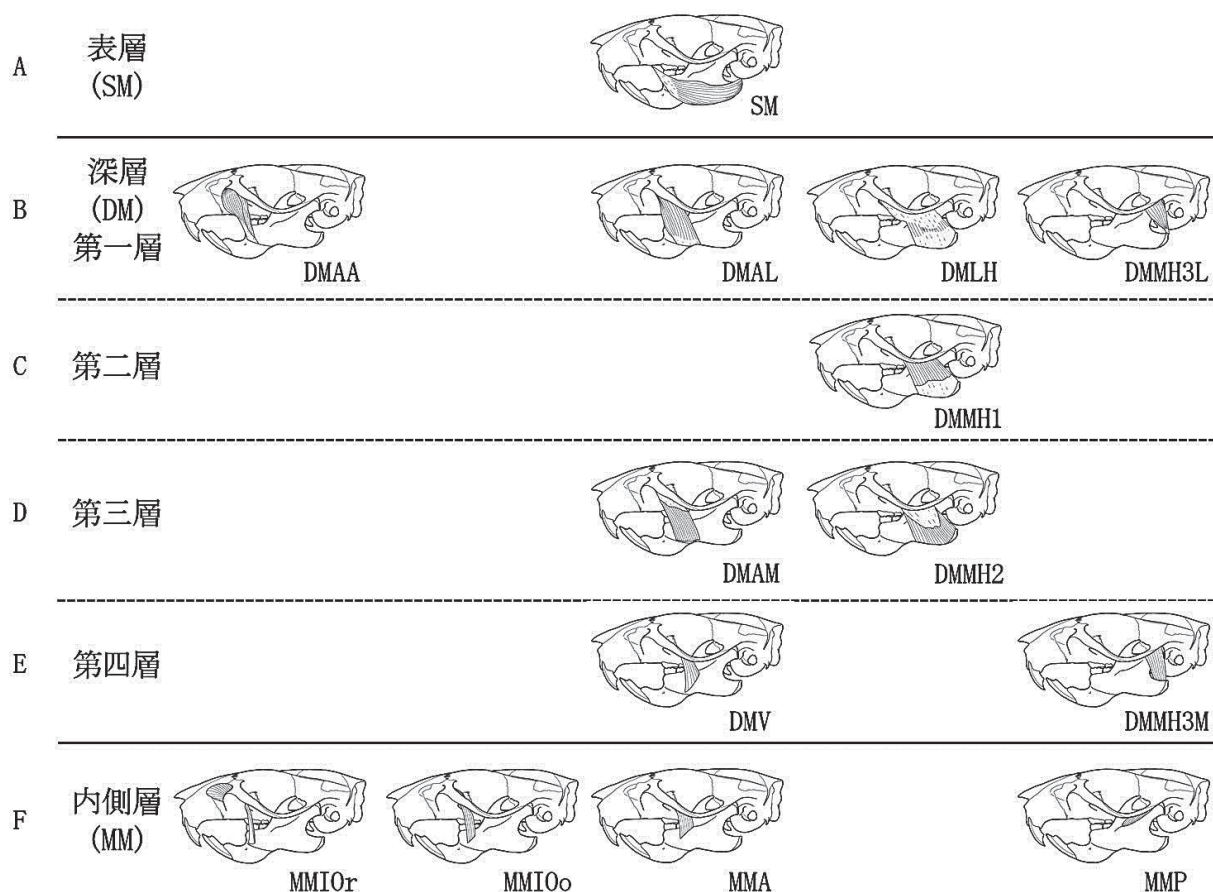


図1 ラット咬筋14区画の位置

(A 表層 (SM), B 深層第一層: 前前方部 (DMAA), 前外側部 (DMAL), 外側水平部 (DMLH), 内側水平部3外側部 (DMMH3L), C 深層第二層: 内側水平部1 (DMMH1), D 深層第三層: 前内側部 (DMAM), 内側水平部2 (DMMH2), E 深層第四層: 垂直部 (DMV), 内側水平部3内側部 (DMMH3M), F 内側層: 眼窩下部吻部 (MMIOr), 眼窩下部眼窩部 (MMIOo), 前部 (MMA), 後部 (MMP))



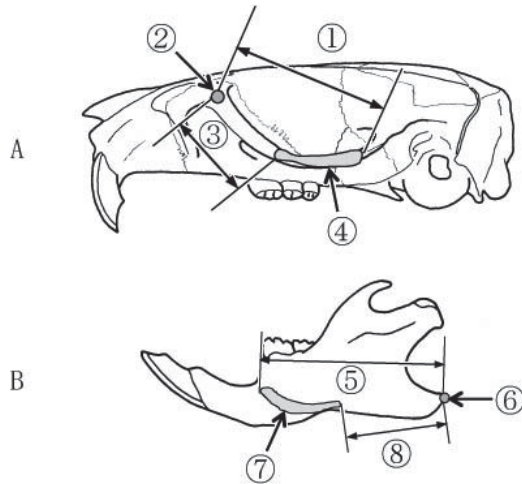


図2 A, 起始部の記録方法; B, 停止部の記録方法  
(A 筋起始部: ①後端までの距離②上顎骨前頬骨陥凹③前  
端までの距離④筋の起始部, B 筋停止部: ⑤前端までの距  
離⑥下顎骨角突起先端⑦筋の停止部⑧後端までの距離)

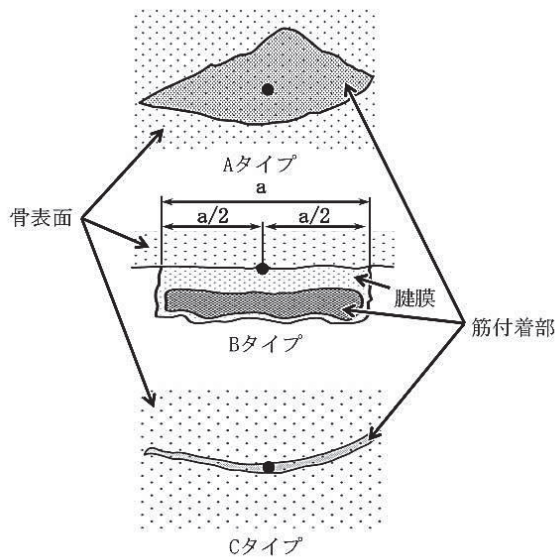


図3 筋附着部の中心点を求める方法  
(筋附着部の中心点を●で示す。Aタイプ: 形状が複雑な  
場合: 筋附着部を多角形に近似し, その重心を求める。B  
タイプ: 腱膜に附着する場合: 腱膜の骨表面への附着部  
の中点を求める。Cタイプ: 骨表面上に線状にみられる場合:  
線の中点を求める。)

## 2) 各筋区画の筋力の大きさと筋走向ベクトルの定量化 (1) 筋力の大きさの指数

筋力の大きさを解析するために, 筋重量を筋線維長で除した値の平方根, すなわち筋束太さを Muscle Force Index (筋力指数) と定義して求めた。

表1 各筋区画の起始・停止部のタイプ

	筋区画	起始部	停止部
表層	SM	Bタイプ	Cタイプ
深層第一層	DMAA	Cタイプ	Bタイプ
	DMAL	Cタイプ	Bタイプ
	DMLH	Bタイプ	Bタイプ
	DMMH3L	Cタイプ	Bタイプ
深層第二層	DMMH1	Cタイプ	Bタイプ
深層第三層	DMAM	Bタイプ	Cタイプ
	DMMH2	Bタイプ	Aタイプ
深層第四層	DMV	Cタイプ	Cタイプ
	DMMH3M	Cタイプ	Cタイプ
	内側層	MMIO <sub>r</sub>	Aタイプ
	MMIO <sub>o</sub>	Cタイプ	Bタイプ
	MMA	Cタイプ	Cタイプ
	MMP	Cタイプ	Cタイプ

(筋附着部の A タイプ, B タイプ, C タイプの定義については, 図3を参照。)

また, 14筋区画の筋重量の総和を14筋区画の筋線維長の総和で除した値の平方根を, 咬筋全体の筋力指数として求めた。

さらに, 筋力の増加パターンを調べるために, 各筋区画の筋力指数の最大値に対する相対的な筋力指数を, 各週齢で求めて, その変化を調べた。各筋区画の筋力指数の最大値は, 35週齢から38週齢までの筋力指数の平均値と定義した。

### (2) 筋走向の近似を示す値の算出

咬筋の起始・停止部の中心点の位置を定量化するために, 実体顕微鏡 (SZX9, オリンパス, 東京) 下で3.8倍に拡大した頭蓋を描画装置 (SZX-DA, オリンパス, 東京) により紙面上に記録した。すなわち, 頭蓋を中心咬合位において非可動化するため, 接着剤 (アロンアルファ, 東亜合成, 東京) を用いて下顎頭を側頭骨下顎窩に固定し, 頭蓋の左側面観で上顎両側第一臼歯の近心面が重なるようにした。なお, データ取得中は右側の頬骨弓を実体顕微鏡の試料台に粘土で固定し, 頭蓋が動くことのないように十分な注意を払った。

筋走向ベクトルは, 頭蓋骨上に印記した各筋区画の起始・停止部の中心点を結んだものと定義した。

筋走向ベクトルを三次元的に表すために, 座標軸を以下のように決定した。左側下顎頭上縁と頬骨弓後端部が交わる点を原点, 上顎両側第一臼歯近心面の最大豊隆点を結んだ直線の垂直二等分面を矢状面, 矢状面において上顎第一臼歯第一咬頭と第二臼歯第三咬頭の尖頭を結んだ直線に平行な方向を頭尾 (x) 方向, それと垂直な方向を背腹 (y) 方向と定義した (図4)。

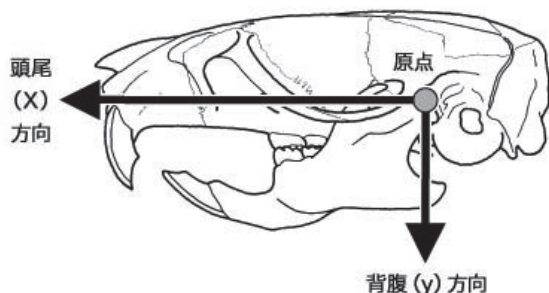


図4 XY座標の設定

また、各筋区画の走向ベクトルの側方成分 (Lz) については、Lx, Ly およびノギスを用いて計測した起始・停止間距離 (L) を用いて、以下の式により算出した。

$$Lz = \left| \sqrt{L^2 - (Lx^2 + Ly^2)} \right|$$

さらに、各筋区画における作用方向を各週齢間で比較するため、以下の式によって筋走向ベクトルの相対的な x 成分, y 成分, z 成分 (Relative Component : Rx, Ry, Rz) を計算した。

$$Rx \text{ (筋走向ベクトルの相対的な x 成分)} = Lx / L$$

$$Ry \text{ (筋走向ベクトルの相対的な y 成分)} = Ly / L$$

$$Rz \text{ (筋走向ベクトルの相対的な z 成分)} = Lz / L$$

また、各筋区画における x, y, z 方向への筋力指数 (Directional Relative Force : Fx, Fy, Fz) を以下の式によって計算した。

$$Fx \text{ (筋力指数の x 成分)} = \text{筋力指数} \times Rx$$

$$Fy \text{ (筋力指数の y 成分)} = \text{筋力指数} \times Ry$$

$$Fz \text{ (筋力指数の z 成分)} = \text{筋力指数} \times Rz$$

### 3) $\mu$ CT を用いた頭蓋成長の解析

#### (1) 頭蓋の $\mu$ CT 撮影と頭蓋モデルの作製

軟組織を取り除いた 3 週齢から 38 週齢までの頭蓋を  $\mu$ CT (ScanXmate-RB090SS, コムスキャンテクノ, 横浜) で撮影した後、エックス線断層画像を画像処理ソフト Amira (Visage Imaging, Berlin, Germany) で三次元再構成し、ヒストグラムに基づき骨組織の領域化を行い、表面モデルを作製した。

#### (2) 頭蓋サイズの算出

計 28 点の特徴点 (正中矢状平面上で頭蓋の縫合に基づいた解剖学的特徴点 10 点, 左側咬筋付着部に相当する 18 点) を各週齢頭蓋上に設定した後、以下の式を用いて頭蓋サイズを評価した。

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \{ (x_i - C_x)^2 + (y_i - C_y)^2 + (z_i - C_z)^2 \}}$$

$$\text{但し、} (C_x, C_y, C_z) = \left( \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \right)$$

各 28 点について、標本の重心からのベクトルのスカラー量を求め、その二乗の総和を平方根したものを頭蓋サイズとした。

#### 4) 統計処理

各筋区画における筋力指数, 筋走向ベクトルの相対的な x 成分, y 成分, z 成分 (Rx, Ry, Rz) および筋力指数の x 成分, y 成分, z 成分 (Fx, Fy, Fz) について、週齢との相関の有意性を Fisher の z 変換により検定を行った。なお、統計解析ソフトとしては StatView (Hulink 社, 東京) を用いた。

### 結 果

#### 1. 14 筋区画の筋重量, 筋線維長および筋力指数の成長に伴う変化 (図 5, 6, 7)

筋重量の大きい順に並べると、上位 3 筋区画は、表面に位置する SM, DMAA および DMLH で、下位 3 筋区画は、内側に位置する DMV, DMMH3M および MMA であった。

筋線維長の特に長い筋区画は DMAA と MMIO<sub>r</sub> で、特に短い筋区画は MMP であった。

筋力指数の大きい順に並べると、上位 3 筋区画は、表面に位置する SM, DMAA および DMLH で、下位 3 筋区画は、内側に位置する DMV, DMMH3M および MMA であった。

#### 2. 14 筋区画における筋力指数と週齢との相関 (表 2)

14 筋区画すべてにおいて、筋力指数と週齢との間に有意な正の相関が認められた。各筋区画のうち、表面に位置する SM, DMAA, DMAL, DMLH および DMMH3L では相関係数が 0.791~0.884 と大きく、内側に位置する DMV, DMMH3M および MMA では相関係数が 0.403~0.505 と小さい値を示した。

#### 3. 14 筋区画の相対的な筋力指数の増加パターン (図 8)

咬筋表面に位置する表層の SM, 深層第一層の DMAA, DMAL, DMLH および DMMH3L では、15 週齢頃まで急速な筋力指数の増加が認められ、それ以降も筋力指数の増加が認められた。深層第二層より内側に位置する DMMH1, DMAM, DMMH2, DMV, DMMH3M, MMIO<sub>r</sub>, MMIO<sub>o</sub>, MMA および MMP では、15 週齢頃まで急速な筋力指数の増加が認められ

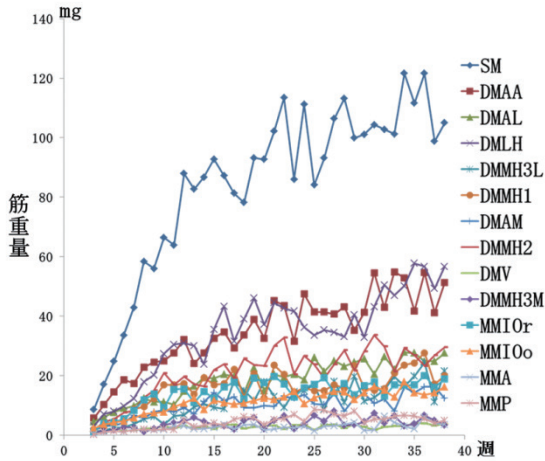


図5 成長に伴う14筋区画の筋重量の変化

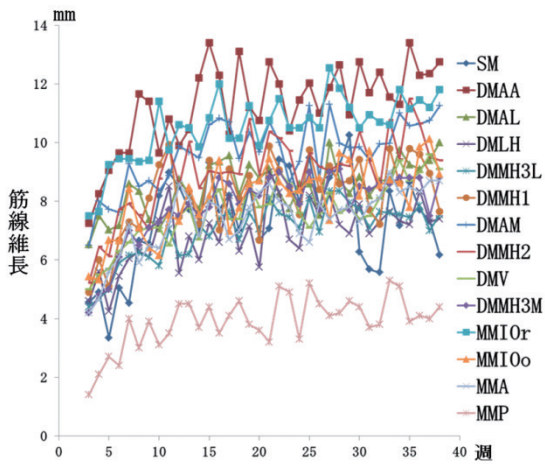


図6 成長に伴う14筋区画の筋線維長の変化

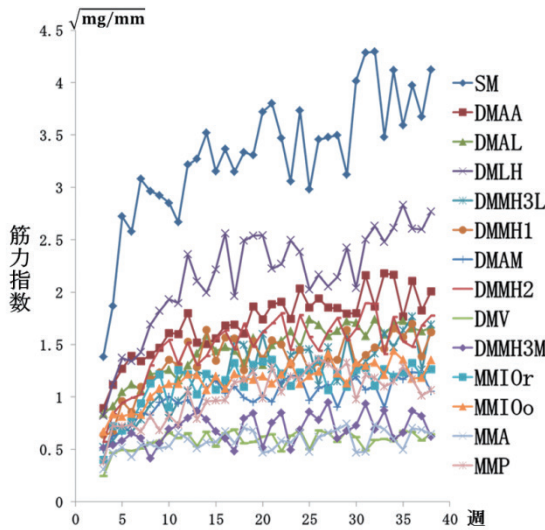


図7 成長に伴う14筋区画の筋力指数の変化

表2 14筋区画における筋力指数と週齢との相関

	筋区画	相関係数
表層	SM	0.791**
深層第一層	DMAA	0.853**
	DMAL	0.884**
	DMLH	0.802**
	DMMH3L	0.818**
深層第二層	DMMH1	0.673**
深層第三層	DMAM	0.730**
	DMMH2	0.722**
深層第四層	DMV	0.449**
	DMMH3M	0.403*
内側層	MMIO <sub>r</sub>	0.622**
	MMIO <sub>o</sub>	0.782**
	MMA	0.505**
	MMP	0.752**

(n=36, \*\*:p 値 <0.01, \*:p 値 <0.05)

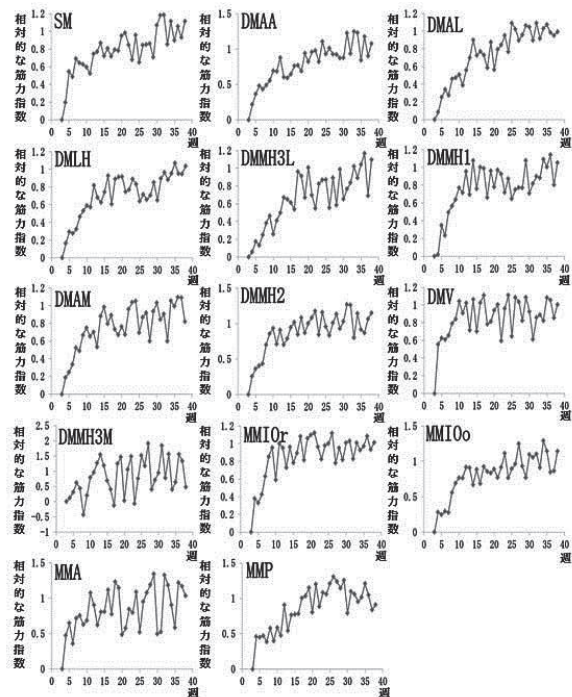


図8 14筋区画の相対的な筋力指数の増加パターン

るが、それ以降は緩やかな増加へと移行した。

#### 4. 成長に伴う咬筋全体の筋重量、筋線維長、筋力指数および頭蓋サイズの変化 (図9)

成長に伴う筋線維長と頭蓋サイズの変化は、15週齢頃まで急速に増加し、それ以降はゆるやかな増加へと移行することが示された。一方、成長に伴う筋重量と



筋力指数の変化は、15週齢頃まで急速に増加し、それ以降も筋重量と筋力指数は増加し続けることが明らかとなった。また筋力指数においては、3週齢から5週齢にかけて著しい増加が認められた。

5. 14筋区画における筋走向ベクトルの相対的な x, y, z 成分と週齢との相関 (表3)

DMMH3L, DMMH3M および MMP では、x 成分と週齢との間に有意な正の相関が、y 成分と週齢との間に有意な負の相関が認められた。このことから、DMMH3L, DMMH3M および MMP では、筋走向ベクトルの方向は、x 方向が増加する方向に y 方向が減少する方向に、成長に伴い変化することが明らかに

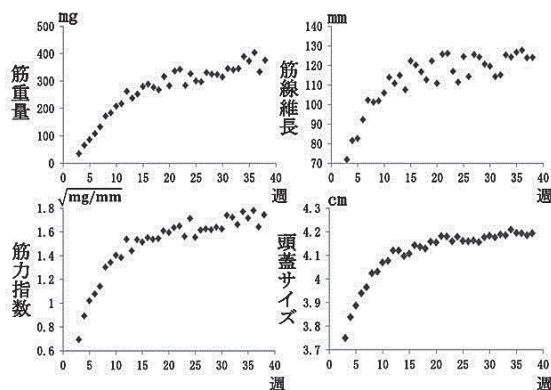


図9 成長に伴う咬筋全体と頭蓋サイズの変化

表3 14筋区画における筋走向ベクトルの相対的な x, y, z 成分と週齢との相関

筋区画	相関係数 (Rx)	相関係数 (Ry)	相関係数 (Rz)
表層 SM	-0.203	0.238	-0.238
深層第一層 DMAA	-0.330*	0.173	0.136
DMAL	-0.286	-0.560**	0.714**
DMLH	0.045	-0.049	0.103
DMMH3L	0.476**	-0.487**	0.059
深層第二層 DMMH1	0.045	-0.049	0.103
深層第三層 DMAM	-0.254	-0.653**	0.768**
DMMH2	0.225	-0.199	-0.157
深層第四層 DMV	-0.269	-0.350*	0.581**
DMMH3M	0.504**	-0.523**	-0.082
内側層 MMIOr	0.186	-0.151	-0.462**
MMIOo	-0.201	-0.458**	0.530**
MMA	-0.182	-0.551**	0.590**
MMP	0.647**	-0.480**	-0.145

(Rx: 筋区画走向ベクトルの相対的な x 成分, Ry: 筋区画走向ベクトルの相対的な y 成分, Rz: 筋区画走向ベクトルの相対的な z 成分, n=36, \*\*:p 値 <0.01, \*:p 値 <0.05)

なった。

DMAL, DMAM, DMV, MMIOo および MMA では、y 成分と週齢との間に有意な負の相関が、z 成分と週齢との間に有意な正の相関が認められた。このことから、DMAL, DMAM, DMV, MMIOo および MMA では、筋走向ベクトルの方向は、y 方向が減少する方向に z 方向が増加する方向に、成長に伴い変化することが明らかになった。

DMAA では x 成分と週齢との間に有意な負の相関が、MMIOr では z 成分と週齢との間に有意な負の相関が認められた。このことから、筋走向ベクトルの方向は、DMAA では x 方向が減少する方向に、MMIOr では z 方向が減少する方向に、成長に伴い変化することが明らかになった。

SM, DMLH, DMMH1 および DMMH2 では、すべての方向において、筋走向ベクトルの成分と週齢との間に有意な相関は認められなかった。このことから、SM, DMLH, DMMH1 および DMMH2 では、筋走向ベクトルの方向は、成長により特徴的な変化をしないことが明らかになった。

6. 14筋区画における筋走向ベクトルの成分別筋力指数と週齢との相関 (表4)

SM, DMAA, DMLH, DMMH3L, DMMH1 では、すべての方向において、成分別筋力指数と週齢との間に有意な正の相関が認められた。

表4 14筋区画における筋走向ベクトルの成分別筋力指数と週齢との相関

筋区画	相関係数 (Fx)	相関係数 (Fy)	相関係数 (Fz)
表層 SM	0.785**	0.760**	0.353*
深層第一層 DMAA	0.356*	0.852**	0.349*
DMAL	0.135	0.714**	0.793**
DMLH	0.759**	0.748**	0.517**
DMMH3L	0.791**	0.694**	0.461**
深層第二層 DMMH1	0.566**	0.672**	0.438**
深層第三層 DMAM	0.075	0.532**	0.831**
DMMH2	0.738**	0.621**	0.253
深層第四層 DMV	-0.016	0.277	0.618**
DMMH3M	0.571**	0.145	0.114
内側層 MMIOr	0.641**	0.583**	0.124
MMIOo	0.140	0.634**	0.623**
MMA	0.067	0.252	0.647**
MMP	0.792**	0.497**	0.259

(Fx: 筋区画走向ベクトルの x 方向への筋力指数, Fy: 筋区画走向ベクトルの y 方向への筋力指数, Fz: 筋区画走向ベクトルの z 方向への筋力指数, n=36, \*\*:p 値 <0.01, \*:p 値 <0.05)

DMMH2, MMIO<sub>r</sub>, MMPでは、x方向への筋力指数と週齢との間に有意な正の相関が、y方向への筋力指数と週齢との間に有意な正の相関が認められた。

DMAL, DMAM, MMIO<sub>o</sub>では、y方向への筋力指数と週齢との間に有意な正の相関が、z方向への筋力指数と週齢との間に有意な正の相関が認められた。

DMMH3Mではx方向への筋力指数と週齢との間に有意な正の相関が、DMVとMMAではz方向への筋

力指数と週齢との間に有意な正の相関が認められた。

7. 14筋区画における筋走向ベクトルの相対的なx, y, z成分と成分別筋力指数(図10, 図11)

次のような5つのパターンが認められた。

1) SMでは、x成分が最も大きく、次にy成分が大きく、z成分は極めて小さかった。この結果、成分別筋力指数も、同様の傾向を示した。

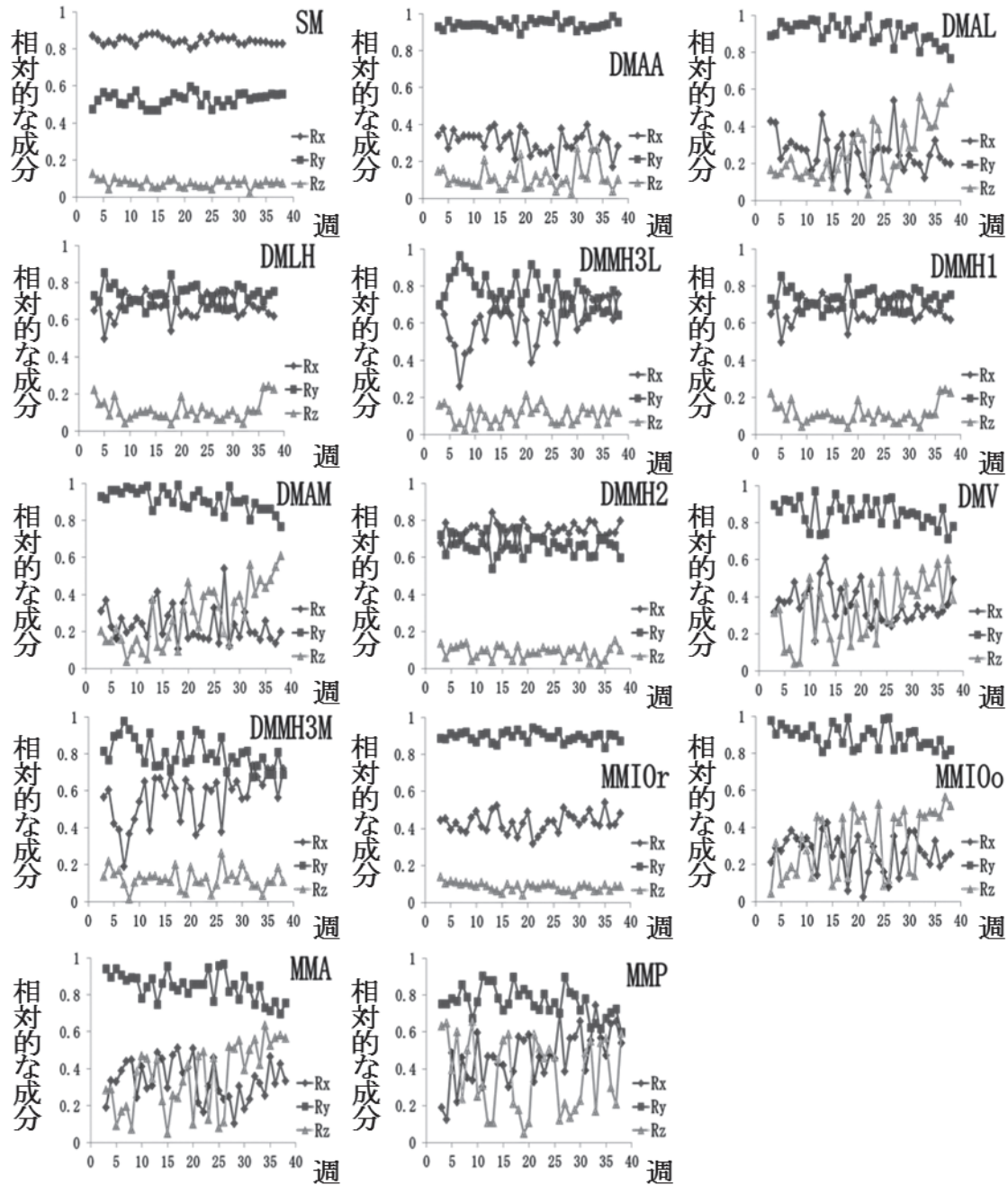


図10 14筋区画の走向ベクトルの相対的なx, y, z成分



- 2) DMAA と MMIO<sub>r</sub> では、y 成分が最も大きく、x 成分、z 成分の順に小さくなっていった。この結果、成分別筋力指数も、同様の傾向を示した。
- 3) DMAL, DMAM, DMV, MMIO<sub>o</sub> および MMA では、y 成分が最も大きく、x 成分、z 成分の大きさが同程度であった。この結果、成分別筋力指数も、同様の傾向を示した。
- 4) DMLH, DMMH1 および DMMH2 では、x 成分、y 成分が同程度に大きく、z 成分は極めて小さかった。この結果、成分別筋力指数も、同様の傾向を示した。
- 5) DMMH3L, DMMH3M および MMP では、最初は y 成分が最も大きかったが、成長につれて x 成分が y 成分に近づいていき、z 成分は極めて小さかった。この結果、成分別筋力指数も、同様の傾向を示した。

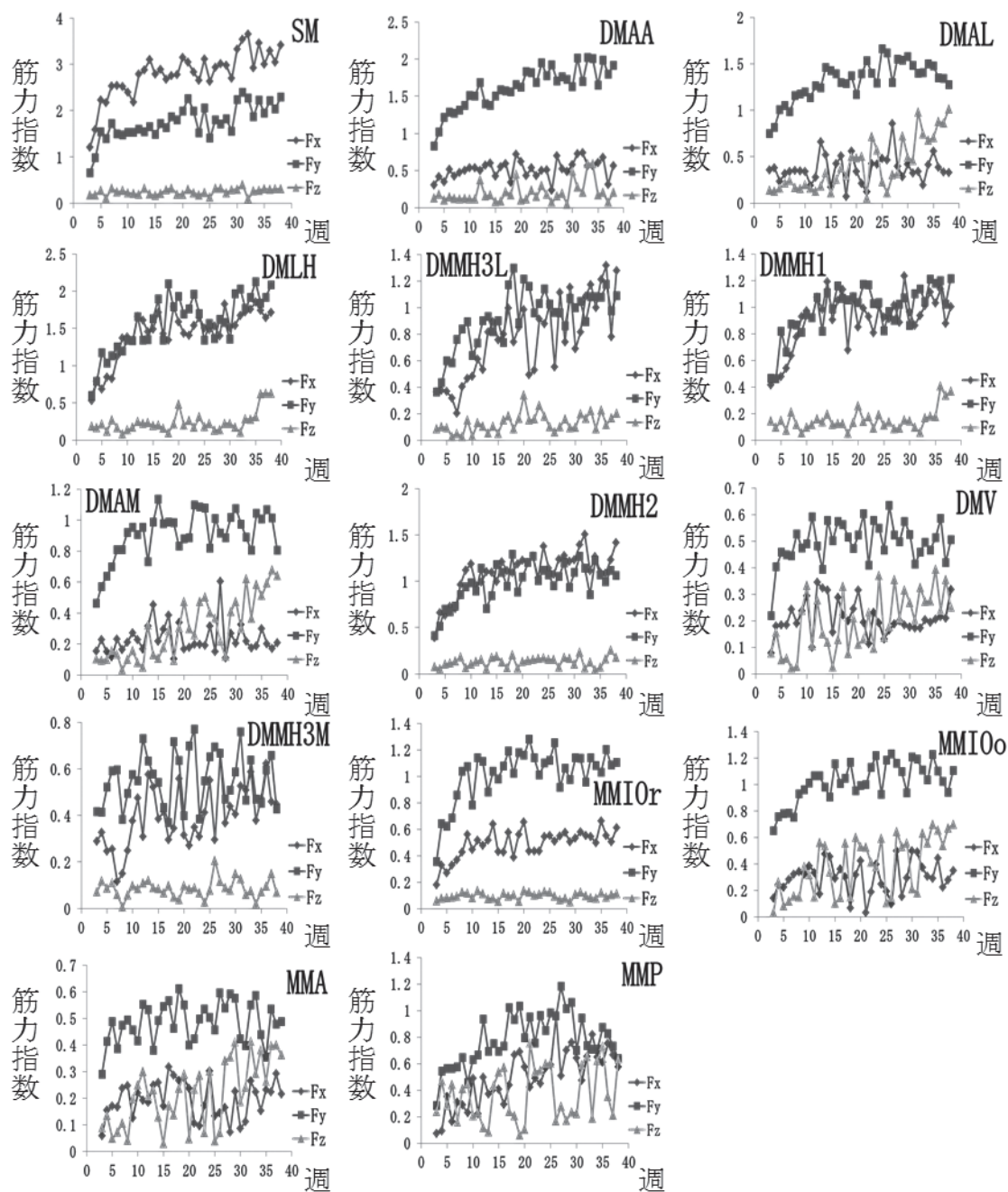


図11 14筋区画の成分別筋力指数

## 考 察

本研究では、咬筋の成長を検討するために、哺乳類の中でも比較的早期に成熟する Wistar 系ラットを用いた。Wistar 系ラットは、純系が得やすく、個体間の変異が少なく、飼育が容易であるなどの利点があり<sup>28)</sup>、成長発育による咬筋の形態的变化を調べるのに適していると考えられる。本研究で用いたラットでは、離乳時期が21日齢程度であり<sup>29)</sup>、最後方臼歯である第三臼歯の萌出時期が35日齢程度である<sup>23)</sup>と報告されている。また、30~40日齢で一次成長期、70~80日齢で二次成長期を迎え、145日齢で成長期がほぼ終了すると報告されている<sup>23)</sup>。離乳後の咀嚼による咬筋の変化を知るためには3週齢程度のラットから検索する必要があり、咬合完成前後における咬筋の変化を知るためには5週齢をはさんで数週齢のラットを検索する必要があると考えられる。そこで、本研究では、成長期のラットを調べるために、3週齢から38週齢までのラットを用いて検索を行い、ラットの成長発育における咬筋の変化を明らかにすることとした。

ラットの咬筋は、複雑な内部構造を持ち、付着位置と付着様式の異なる14筋区画に分けることができる<sup>22)</sup>。そのため、画像を用いた検索<sup>30)</sup>では、筋区画間の境界を判断することが困難であり、各筋区画を考慮しない筋断面の観察に限定されてしまうため、筋区画間の境界を判断して咬筋をそれぞれの筋区画へ分離することができる肉眼解剖学的手法を用いることとした。

筋力の大きさは、筋の断面積に比例することが知られている<sup>31,32)</sup>。このことから、本研究では、筋重量を筋線維長で除して求められる筋断面積の平方根、すなわち筋束太さを筋力指数として頭蓋成長に伴う咬筋の力の大きさの変化を解析するために用いた。

本研究において、14筋区画の筋力指数のうち、筋力指数が大きいのは表面に位置する筋区画で、筋力指数が小さいのは内側に位置する筋区画であったことから、咬筋表面の筋区画は、咬筋内側の筋区画に比べ筋力指数が大きくなりやすいことが考えられる。また、表面に位置する筋区画では筋力指数と週齢との間の相関係数が大きく、内側に位置する筋区画では相関係数が小さい値を示したことから、咬筋内側の筋区画は表面の筋区画よりも、週齢とともに筋力指数が増加しにくいことが考えられる。これは、側頭筋、咬筋を収容する骨格形態と同筋の断面積が相関しているとした報告<sup>12)</sup>を支持するものである。

表層と深層第一層の筋区画の筋力指数増加パターンは、咬筋全体の筋力指数の増加パターンに類似してい

たことから、咬筋全体の筋力の成長には、最表層とその一層内側に位置する筋区画の成長が大きく影響していることが示唆される。内側に位置する筋区画の筋力指数増加パターンは、頭蓋サイズの増加パターンに類似していたことから、咬筋内側に位置する筋区画は、頭蓋成長に伴った筋力の増加を示すことが示唆される。

成長に伴う咬筋全体の筋重量、筋線維長、筋力を近似する指数および頭蓋サイズの変化については、すべて15週齢頃まで急速に増加することが示された。特に、筋力指数に関しては、3週齢から5週齢にかけて著しい増加が認められた。離乳時期が21~22日齢、第三臼歯の萌出時期が35日齢程度と報告されている<sup>23,29)</sup>ことから、離乳および臼歯による咀嚼開始が、3週齢から5週齢にかけての筋力指数増加の原因であることが示唆される。また、15週齢以降の変化について、筋線維長と頭蓋サイズは緩やかな増加へと移行するが、筋重量と筋力指数は増加し続けることが明らかとなった。これは、成長期以降も続くラットの旺盛な摂食行動によって、咬筋の力の大きさが増大している可能性が考えられる。

筋走向ベクトルの方向と方向別筋力指数について、SMでは、頭尾成分が最も大きく、次に背腹成分が大きく、側方成分は極めて小さかった。これは、SMは頬骨弓の下方に起始し、その走向が主として頭尾方向に向いているためであると考えられる。DMAAとMMIO<sub>r</sub>では、背腹成分が最も大きく、頭尾成分、側方成分の順に小さくなっていった。これは、DMAAとMMIO<sub>r</sub>は頬骨弓より前方に起始し、その走向が主として背腹方向に向いているためであると考えられる。DMAL、DMAM、DMV、MMIO<sub>o</sub>およびMMAでは、背腹成分が最も大きく、頭尾成分、側方成分が同程度であった。これは、DMAL、DMAM、DMV、MMIO<sub>o</sub>およびMMAは頬骨弓の前方部に起始し、その走向が主として背腹方向に向いているためであると考えられる。DMLH、DMMH1およびDMMH2では、頭尾成分、背腹成分が同程度に大きく、側方成分は極めて小さかった。これは、DMLH、DMMH1およびDMMH2は頬骨弓の中央部に起始し、その走向が側面観において斜め方向であるためと考えられる。DMMH3L、DMMH3MおよびMMPでは、最初は背腹成分が最も大きかったが、成長につれて頭尾成分が背腹成分に近づいていき、側方成分は極めて小さかった。これは、DMMH3L、DMMH3MおよびMMPは頬骨弓の後方部に起始し、その走向が側面観において斜め方向であるためと考えられる。

ラットの咬筋は、咀嚼筋の中で最も複雑な構造を有

している。本研究では、筋内部構造の複雑性を考慮し、14筋区画に分離して、筋の機能特性のうち筋力および方向について、成長に伴う変化を明らかにすることができた。本研究結果から、咬筋の成長には、咀嚼機能や摂食行動が筋力に影響を及ぼしている可能性が示唆された。また、筋区画の存在深さや頭尾方向での位置、筋線維の方向が要因となっていることが示された。本研究で得られた結果は、ヒトの咬筋における成長に伴う変化を知るうえで役立つと考えられる。

## 結 論

本研究では、咬筋の成長に伴う変化を明らかにすることを目的とし、ラットの咬筋を14筋区画に分け、各筋区画が生み出す力の大きさと方向について週齢による変化を検討した。また、咬筋と頭蓋の成長変化を比較検討した。その結果は、以下のとおりである。

- 1) 咬筋表面に位置する筋区画は、咬筋内側に位置するものと比較して筋力指数が大きく、週齢とともに筋力指数は増加しやすいと考えられる。
- 2) 咬筋全体の筋力の成長には、最表層とその一層内側に位置する筋区画の成長変化が大きく影響していることが示唆された。
- 3) 筋線維長と頭蓋の成長に伴う変化は、15週齢頃まで急速に増加し、それ以降はゆるやかな増加へと移行することが示された。
- 4) 筋重量と筋力指数の成長に伴う変化は、15週齢頃まで急速に増加し、それ以降も増加し続けることが明らかになった。
- 5) 3週齢から5週齢にかけての著しい筋力指数の増加は、同時期に生じる離乳と臼歯咬合開始に起因するものと考えられる。
- 6) 成長期以降も筋重量と筋力指数が増加し続けるのは、ラットの旺盛な摂食行動が要因と考えられる。
- 7) 頭尾方向での筋区画の位置により頭尾、背腹、側方方向への筋力の成長パターンが異なることが示唆された。

これらの結果から、咬筋の成長には、筋区画の存在深さ、頭尾方向での位置および筋線維の方向が要因となっていることが示され、咀嚼機能や摂食行動が筋力に影響を及ぼしている可能性が示唆された。

## 文 献

- 1) Broadbent BH. A new X-ray technique and its application to orthodontia. *Angle Orthod.* 1931 ; 1 : 45-66.
- 2) Downs WB. Variation in facial relationships: their significance in treatment and prognosis. *Am J*

*Orthod.* 1948 ; 34 : 812-840.

- 3) 飯塚哲夫. 頭部 X 線規格写真による日本人小児の顔の成長に関する研究. *口病誌.* 1958 ; 25 : 260-272.
- 4) 坂本敏彦. 日本人顔面頭蓋の成長に関する研究. *Sella turcica* を基準として. *日矯歯誌.* 1959 ; 18 : 1-17.
- 5) Bjork A. Variations in the growth pattern of the human mandible: longitudinal radiographic study by implant method. *J Dent Res.* 1963 ; 42 : 400-411.
- 6) Ricketts RM. The keystone triad II. Growth, treatment, and clinical significance. *Am J Orthod.* 1964 ; 50 : 728-750.
- 7) Nanda SK. Morphology of the human chin from cephalometric measurements. *J Dent Res.* 1965 ; 44 : 828.
- 8) 和田清聡. 頭部 X 線規格側貌写真による顎・顔面頭蓋の個成長様相に関する研究. *阪大歯誌.* 1977 ; 22 : 239-269.
- 9) Frost HM. Wolff's law and bone's structural adaptations to mechanical usage: an overview for clinicians. *Angle Orthod.* 1994 ; 64 : 175-188.
- 10) Enlow DH. Wolff's law and the factor of architectonic circumstance. *Am J Orthod.* 1968 ; 54 : 803-822.
- 11) Gionhaku N and Lowe AA. Relationship between jaw muscle volume and craniofacial form. *J Dent Res.* 1989 ; 68 : 805-809.
- 12) Kitai N, Fujii Y, Murakami S, Furukawa S, Kreiborg S and Takada K. Human masticatory muscle volume and zygomatico-mandibular form in adults with mandibular prognathism. *J Dent Res.* 2002 ; 81 : 752-756.
- 13) Zepa K, Urtane I, Krisjane Z and Krumina G. Three-dimensional evaluation of musculoskeletal in Class II and Class III patients. *Stomatologija.* 2009 ; 11 : 15-20.
- 14) Trawitzki LV, Dantas RO, Elias-Junior J and Mello-Filho FV. Masseter muscle thickness three years after surgical correction of class III dentofacial deformity. *Arch Oral Biol.* 2011 ; 56 : 799-803.
- 15) Lee DH and Yu HS. Masseter muscle changes following orthognathic surgery: a long-term three-dimensional computed tomography follow-up. *Angle Orthod.* 2012 ; 82 : 792-798.
- 16) 吉川徹雄, 鈴木孝司. ヒトの咬筋の層分化—とくに浅側頭筋, 上顎下顎筋と頬骨下顎筋について—. *解剖誌.* 1962 ; 37 : 260-267.
- 17) 吉川徹雄. 新咬筋学説. *千葉医学.* 1976 ; 52 : 49-59.
- 18) Satoh K. Comparative functional morphology of mandibular forward movement during mastication of two murid rodents, *Apodemus speciosus* (Murinae) and *Clethrionomys rufocanus* (Arvicolinae). *J Morphol.* 1997 ; 231 : 131-141.
- 19) Satoh K and Iwaku F. Internal architecture, origin-insertion site, and mass of jaw muscles in Old World hamsters. *J Morphol.* 2004 ; 260 : 101-116.



- 20) Satoh K and Iwaku F. Comparison of masticatory muscle masses between cricetine and murine murids. *J Gifu Dent Soc.* 2004 ; 30 : 205-210.
- 21) Satoh K and Iwaku F. Jaw muscle functional anatomy in northern grasshopper mouse, *Onychomys leucogaster*, a carnivorous murid. *J Morphol.* 2006 ; 267 : 987-999.
- 22) Satoh K and Iwaku F. Masticatory muscle architecture in a murine murid, *Rattus rattus*, and its functional significance. *Mammal Study.* 2008 ; 33 : 35-42.
- 23) 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.* 1967 ; 34 : 18-74.
- 24) 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, 洪井尚武. ラットの顎・顔面頭蓋の成長発育に関する研究. *歯学.* 1977 ; 65 : 647-667.
- 25) Rayne J and Crawford GN. The growth of the muscles of mastication in the rat. *J Anat.* 1972 ; 113 : 391-408.
- 26) Hurov J, Henry-Ward W, Phillips L and German R. Growth allometry of craniomandibular muscles, tendons, and bones in the laboratory rat (*Rattus norvegicus*): relationships to oromotor maturation and biomechanics of feeding. *Am J Anat.* 1988 ; 182 : 381-394.
- 27) Weijjs WA, Brugman P and Klok EM. The growth of the skull and jaw muscles and its functional consequences in the New Zealand rabbit (*Oryctolagus cuniculus*). *J Morphol.* 1987 ; 194 : 143-161.
- 28) Clause BT. The Wistar rat as a right choice: establishing mammalian standards and the ideal of a standardized mammal. *J Hist Biol.* 1993 ; 26 : 329-349.
- 29) 鶴本明久. ラットのう蝕に及ぼす対咬歯抜去の影響. *口腔衛生会誌.* 1986 ; 36 : 53-65.
- 30) Baverstock H, Jeffery NS and Cobb SN. The morphology of the mouse masticatory musculature. *J Anat.* 2013 ; 223 : 46-60.
- 31) Hiimae K and Houston W. The structure and function of the jaw muscles in the rat (*Rattus norvegicus* L.). *Zool J Linn Soc.* 1971 ; 50 : 75-99.
- 32) Rayne J and Crawford GN. The relationship between fibre length, muscle excursion and jaw movements in the rat. *Arch Oral Biol.* 1972 ; 17 : 859-872.