

咬合時のサル上顎骨, 下顎骨, 頬骨および側頭骨の力学的応答

Dynamic response of the monkey maxillary, mandibular, zygomatic, and temporal bones during occlusion

神田昇平*, 藤本雅子**, 若城健介***, 小林八洲男*, 杉村忠敬*

Shouhei KANDA*, Masako FUJIMOTO**, Kensuke WAKAKI***,
Yasuo KOBAYASHI*, and Tadataka SUGIMURA*

Abstract: To clarify the deformation of each cranial bone by occlusal and masticatory forces and the mechanical properties of the entire cranium, vertical force was applied to the first molars by electrically stimulating the central area of the bilateral masseters in a monkey under anesthesia, and strain in the maxillary, mandibular, zygomatic, and temporal bones was measured. As a results: 1. During occlusion, since the zygomaticotemporal process was displaced in the antero-inferior direction due to contraction of the closing muscle, the entire zygomatic bone showed a rotation-like displacement in the postero-inferior direction setting the area near the zygomatic bone of the maxillary bone as the fulcrum. During this displacement, since a gap developed at the superior end of the zygomaticomaxillary suture, the maxillary bone was posteriorly displaced to fill this gap. This displacement markedly affects the morphology of the orbit in particular, becoming a cause of visual field constriction and color sense abnormalities. 2. Since the direction of temporal muscle contraction complicatedly changed depending on the characters and size of chewing substances, the temporal bone deformed in various ways. This suggested that deformation markedly affects the auditory and balance organs in the temporal bone. 3. It has been reported that the value of occlusal force is equal to the body weight of the individual. Although a large force is applied to the mandibular area in which the masseter and medial pterygoid muscles area inserted, this area is comparatively flat. On the other hand, the posterior area of the occipital bone is rough-surfaced. This suggests that a marked force is applied to the posterior area of the occipital bone. Considering these, to achieve mechanical balance of the cranium during occlusion, the inferior margin of the occipital bone is an important area for establishing the occlusal plane. This is considered to be a theoretical reason why occlusion derived indefinite complaints, such as dizziness, headache, stiff neck, difficulty in hearings, construction of the visual field, and color sense abnormalities, are frequently resolved when the extension plane of the occlusal plane is established passing the dens and inferior margin of the occipital bone.

Key words: occlusion, dynamic response, cranium, strain, monkey

1. 緒言

バランスのとれた身体を保持するためには, 身体の筋群が均衡することが必要である. しかし, ヒトは生活習慣をはじめとする多くの原因によって, 骨盤を中心にバランスを崩すことが多い. 筋群のバランスが崩れると, それらの筋が起始あるいは停止している骨の位置がずれ, このことは, その骨に起始あるいは停止している他の筋の走行をも本来の走行とは異なった方向へ収縮させることになる. 正常な状態で咬合や咀嚼をしていても, 頭蓋を構成する骨は変形する⁽¹⁻¹²⁾が, も

原稿受付日:2008年8月6日, 受理日:2008年11月16日

*朝日大学歯学部口腔機能修復学講座口腔生理学分野,

**朝日大学歯学部口腔病態医療学講座口腔外科学分野,

***朝日大学歯学部口腔機能修復学講座歯科補綴学分野

Department of Oral Physiology, Division of Oral Functional Science and Rehabilitation, School of Dentistry, Asahi University, *Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Division of Oral Pathogenesis and Disease Control, School of Dentistry, Asahi University, **Department of Operative Dentistry, Division of Oral Functional Science and Rehabilitation, School of Dentistry, Asahi University, Mizuho-city, Gifu, 501-0296 Japan

し、不正咬合をはじめとする何らかの原因によって上顎骨や下顎骨に起始や停止している筋群のバランスが崩れると、その結果、咬合力や咀嚼力が直接加わる上顎骨や下顎骨は、異常な変形をすることになる。このとき、上顎骨や下顎骨は正常な位置からずれるので、上下顎歯の咬合状態も異常になり、このような状態で咬合を続けていると顔面や頭蓋を構成する骨に伝播する力の方向や大きさが異常になり、咀嚼筋群、顔面筋群および表情筋群が本来の収縮すべき方向とは異なる方向へ収縮し、それが顔面の非対称や咬合の不調和の原因になる。さらに、これらの影響を受け、頸部や肩部および背側部の筋群もバランスを崩し、不定愁訴の原因になることが多い。このような症例を治療するときは、まず、筋群の不均衡を調整するために、スプリントを用いたり、歯を削合したり、あるいは抜歯などをして筋群のバランスを整えることから始める。しかし、きわめてわずかに歯を削合しても、あるいはスプリントを使用する部位や厚みによって、その影響は上下顎骨ばかりではなく、身体のきわめて広い範囲に影響をおよぼす。以上のことから、咬合時に頭蓋を構成する各骨はどのように変形するのか、そして、その結果、頭蓋全体はどのように変形するのかについてを知ることは、咬合治療おこなううえできわめて大切なことである。そこで、日本ザルを用いて咬合時の頭蓋の力学について検討した。

2. 材料および方法

1. 動物実験

1) 実験動物の麻酔および固定

成熟期のニホンザル5頭 (*Macaca fuscata fuscata*, 体重: 4.3~10.7kg) を Pentobarbital sodium (Nembutal, Abbott Laboratories, North Chicago, IL, USA) で全身麻酔し、サルが咬合するのに支障のないように無拘束で立位に固定した。なお、本実験は、朝日大学歯学部動物実験倫理委員会の承認(朝動倫 06-011)を受けている。また、実験は「臨床研究に関する倫理指針」(厚生労働省)、「ニホンザルの飼育管理及び使用に関する指針」(自然科学研究機構・生理学研究所)を遵守しておこなった。

2) ひずみの記録

(1) ストレインゲージの貼付

左側の上顎骨、頬骨、側頭骨および下顎骨を覆っている軟組織を、ストレインゲージを貼付するのに必要な範囲を電気メスを用いて除去し、上顎骨の犬歯および第一大臼歯の歯槽部ならびに頬骨上顎縫合部付近、頬骨の骨体部および頬骨弓前方部(頬骨側頭突起)、側頭骨の頬骨弓後方部(側頭骨頬骨突起)、下顎窩上部および下顎窩後部、下顎骨の犬歯および第一大臼歯の歯槽部に、通法にしたがって三軸ストレインゲージ

(KFC-2-D17-11L300, 抵抗値: $119.6 \pm 0.4 \Omega$, ゲージ率: $2.02 \pm 1.0\%$, 共和電業) を貼付した。なお、貼付したストレインゲージの表面を防湿剤 (Barrier B, BLH Electronics, Canton MA, USA) でコーティングした。

(2) ひずみの記録法

各測定部位のひずみは、通法にしたがって多用途測定記録装置 (RBL-85, 日本光電) のサーマルアレイレコーダー (WS-681G, 日本光電) で記録した。

(3) 主ひずみの量および方向の計算法

三軸ストレインゲージの各軸(左右, 45° および上下(体軸)の各方向)のひずみの量および性質(伸展あるいは圧縮)から、主ひずみの量および方向を計算した。

3) 咬合の方法

サルは全身麻酔されているので、自発的に咬合することができない。そこで、両側の咬筋の中央部を電気刺激装置 (SEN-3201 および SEN-3301, 日本光電), アイソレーター (SS-201J, 日本光電) および双極性白金針電極(極間距離: 10 mm) を用いて、両側同時に電気刺激 (Frequency: 1 Hz, Delay: 10 msec, Duration: 50 msec) して、開閉運動をさせた。なお、そのとき、左側上下第一大臼歯間に感圧紙 (A フィルムと C フィルムとを重ねて噛ませる) を挿入して、印記された赤色の濃度を咬合圧測定器 (FPD301, 富士写真フィルム) で測定し、咬合力が 15 kg になるように電気刺激の強さを調整した。

なお、実験は何も噛ませないで咬合のみをさせたととき、左側第一大臼歯で厚さ 3 mm あるいは 7 mm の金属板を噛ませて歯軸方向の力が加わるようにしたときについておこなった (Fig.1)。

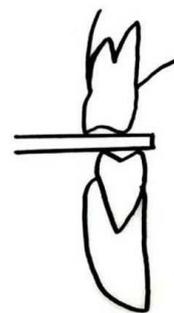


Fig. 1 Diagram illustrating how the metal plate was bitten

左側で金属板を噛ませたとき、当然、作業側と非作業側とでは咀嚼筋の活動に差が生じる。そこで、上下の歯の間に金属板を介在させないで咬合させたときは左右の咬筋を同じ電圧で、それに対して、左側第一大臼歯で金属板を噛ませたときは非作業側を作業側の 1/2 の電圧で刺激した⁽¹³⁾。

2. ヒトを用いた実験 (治療)

1) 対象者

身体の不調を訴えて、朝日大学歯学部附属病院に来院した患者2名。

患者1.

(1) 年齢・性別

23歳・女性.

(2) 主訴および症状の経過

主訴：両側の頸部から肩にかけての強烈な痛み.

症状：

- ①時々、耐え難いほどの身体のだるさと手足のむくみに襲われる.
- ②身体のだるさからくる身体の疲労感と頭痛とで眠れないことも多く、最近では睡眠導入剤を服用している.
- ③頭痛はいつも決まって、左のこめかみから始まる.そして、腹痛および嘔吐等の症状が続く.また、時々、生理が止まることもある.冬は極端な冷え性で、冷えからくると思われる身体の痛みで眠られないことが多い.

(3) X線写真像

上下左右の第一小臼歯は、歯科矯正のために抜歯した以外、歯列に大きな乱れは認められない.なお、上顎の両側に第三大臼歯が埋伏している (Fig.2).

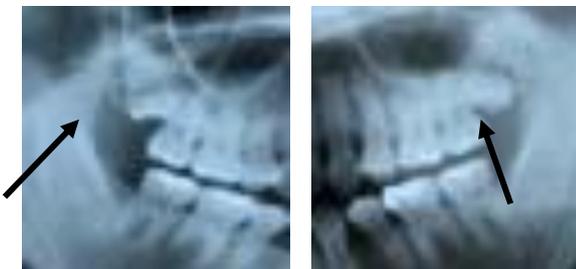


Fig. 2 Completely impacted bilateral third molars

患者2.

(1) 年齢・性別

44歳・男性.

(2) 主訴および症状の経過

主訴：強烈なめまいおよび眼振.

症状：

- ①朝、立てないぐらいひどいめまい、および眼振がおきた. マッサージをしてもらったが、さらにひどくなった. また、そのとき、嘔吐した.
- ②コンピューター断層撮影 (以後、CTと略す) には異常を認めないが、機能検査の結果、三半規管が悪くなっているとの診断が下された.点滴を受けたが、有効であるとは感じなかった.そして、その日はほとんど眠れなかった.翌日、身体がふらつく状態であったので、脳外科で検査を受けたが、異常は無いと診断された.その後、整体をしてもらってからは、す

こし楽になった.

- ③数日前から、側頭筋をはじめとする頭頸部の多くの筋が腫脹していた.

(3) X線写真像

上顎左側に第三大臼歯が埋伏している (Fig.3) 以外、歯列等にはとくに異常を認めない.



Fig. 3 Completely impacted leftside third molar

なお、本実験は、朝日大学歯学部倫理委員会の承認 (受付番号 17021) を受けている.

3. 実験結果

1. 動物実験の結果

三軸の各方向にあらわれたひずみの大きさおよび性質から、主ひずみの大きさ (ϵ_1 , ϵ_2) および方向 (θ) を計算した.

1) 主ひずみの量

咬合させたとき、総体的に最も大きかったのは下顎骨の大臼歯部で、以下、下顎骨の犬歯部、頬骨側頭突起、頬骨骨体の順であり、側頭骨下顎窩後部および側頭骨頬骨突起などのひずみはきわめて小さかった (Table 1).

厚さ3mmの金属板 (以後、うすい金属板という) を噛ませたとき、総体的に最も大きくひずんだのは上顎骨大臼歯部で、以下、下顎骨の大臼歯部、犬歯部、頬骨側頭突起の順であり、側頭骨下顎窩上部および側頭骨頬骨突起などのひずみはきわめて小さかった (Table 2).

厚さ7mmの金属板 (以後、あつい金属板という) を噛ませたとき、総体的に最も大きくひずんだのは下顎骨大臼歯部で、以下、上顎骨大臼歯部、下顎骨犬歯部、頬骨側頭突起の順であり、側頭骨下顎窩上部および側頭骨頬骨突起などのひずみはきわめて小さかった (Table 3).

また、うすい金属板を噛ませたとき、咬合時よりも主ひずみが増加したのは上顎骨の犬歯部および大臼歯部で、とくに物質を噛んだ大臼歯部の歯槽部のひずみが増加する割合は、犬歯部の歯槽部よりも大きかった.なお、両部位のひずみが増加するのは、伸展よりも圧縮の成分が大きかった.

Table 1 Quantity of principal strain ($\mu\epsilon$) and principal angle (θ) at each measuring position caused by occlusion

Position		ϵ_1	ϵ_2	θ
maxillary bone	canine alveolar area	231	-236	10
	first molar alveolar area	482	-991	-10
	zygomaticomaxillary area	77	0.6	-8
zygomatic bone	zygomatic body area	146	-280	-6
	zygomaticotemporal process area	279	-546	13
temporal bone	temporocozygomatic process area	3	-3	-23
	superior area of the mandibular fossa	24	-24	-3
	posterior area of the mandibular fossa	100	-65	-26
mandibula bone	canine alveolar area	406	-586	-30
	first molar alveolar area	745	-650	-17

Table 2 Quantity of principal strain ($\mu\epsilon$) and principal angle (θ) at each measuring position caused by biting of thin metal plate with first molar

Position		ϵ_1	ϵ_2	θ
maxillary bone	canine alveolar area	214	-191	10
	first molar alveolar area	419	-776	-10
	zygomaticomaxillary area	172	-80	35
zygomatic bone	zygomatic body area	227	-205	-10
	zygomaticotemporal process area	321	-272	8
temporal bone	temporocozygomatic process area	26	-12	-30
	superior area of the mandibular fossa	27	-50	-10
	posterior area of the mandibular fossa	158	-98	-27
mandibula bone	canine alveolar area	462	-680	-32
	first molar alveolar area	511	-868	-10

Table 3 Quantity of principal strain ($\mu\epsilon$) and principal angle (θ) at each measuring position caused by biting of thick metal plate with first molar

Position		ϵ_1	ϵ_2	θ
maxillary bone	canine alveolar area	128	-13	-16
	first molar alveolar area	45	-42	2
	zygomaxillary area	261	-82	30
zygomatic bone	zygomatic body area	252	-217	-31
	zygomaticotemporal process area	289	-253	-5
temporal bone	temporozygomatic process area	10	-24	-30
	superior area of the mandibular fossa	49	-75	-8
	posterior area of the mandibular fossa	53	-27	-34
mandibular bone	canine alveolar area	731	-945	-39
	first molar alveolar area	1005	-993	-28

この両部位以外では、側頭骨の下顎窩後部でひずみが増加する傾向が認められた。また、あつい金属板を噛ませたときも、うすい金属板を噛ませたときと同様の傾向が認められた。しかし、上顎骨の犬歯部および犬歯部では、うすい金属板を噛ませたときよりもひずみが増加する割合は小さかった。なお、圧縮する増加率が伸展する増加率よりも大きかったことは、うすい金属板を噛ませたときと同じであった。また、うすい金属板を噛ませたときに咬合時よりも増加する傾向が認められた側頭骨下顎窩後部は、噛ませる金属板を厚くすると、うすい金属板を噛ませたときよりもさらに増加する傾向が認められた。

2) 主ひずみの方向

(1) 上顎骨犬歯部の主ひずみの方向

咬合時には前後方向へ伸展し、体軸方向へ圧縮した。うすいあるいはあつい金属板を噛ませると、咬合時よりもわずかに時計回りに変わった (Fig. 4)。

(2) 上顎骨犬歯部の主ひずみの方向

咬合時も、うすい金属板を噛ませてもあつい金属板を噛ませても、前後方向へ伸展し、体軸方向へ圧縮した (Fig. 5)。

(3) 上顎骨の頬骨上顎縫合部付近の主ひずみの方向

咬合時とあつい金属板を噛ませたときとは前上方から後下方へ、また、うすい金属板を噛ませたときは歯

軸方向へ伸展した。なお、同部位は本研究でひずみを測定したうちで、方向が最も多様に変った (Fig. 6)。

以上の上顎骨の変形から、第一大臼歯に咬合力が加わると上顎骨の歯槽部は測定した部位によって多少異なるが、おおむね前後方向へ伸展した。しかし、測定した3か所の主ひずみの方向には差があり、とくに頬骨上顎縫合部は歯槽部とかなり異なっていた。

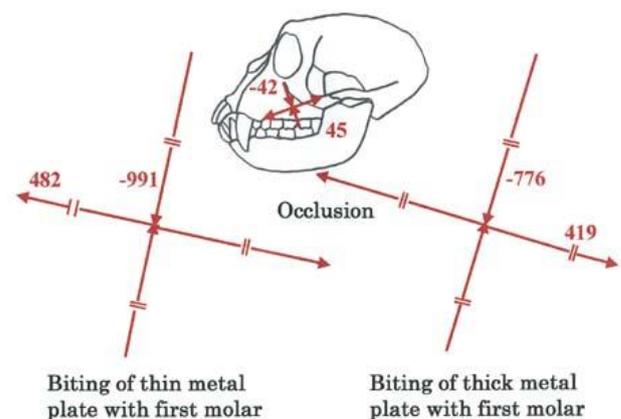


Fig. 4 The principal strain in the maxillary first molar alveolar area during occlusion and while biting metal plates with different diameters

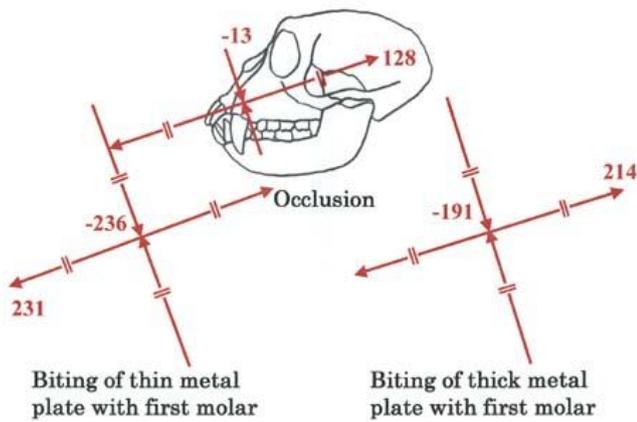


Fig. 5 The principal strain in the maxillary canine alveolar area during occlusion and while biting metal plates with different diameters

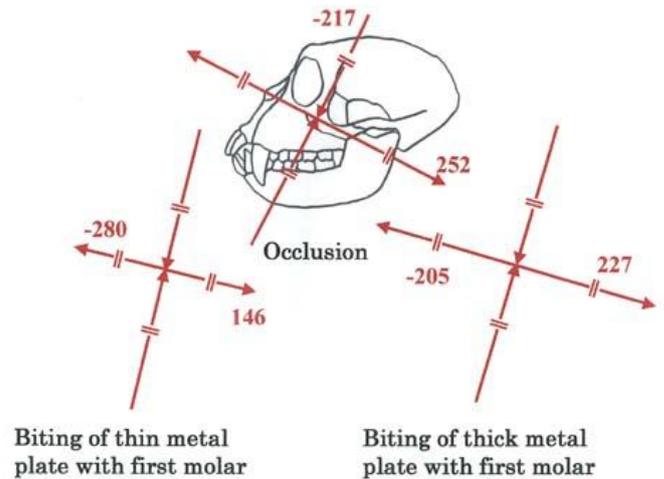


Fig. 7 The principal strain in the zygomatic body area during occlusion and while biting metal plates with different diameters

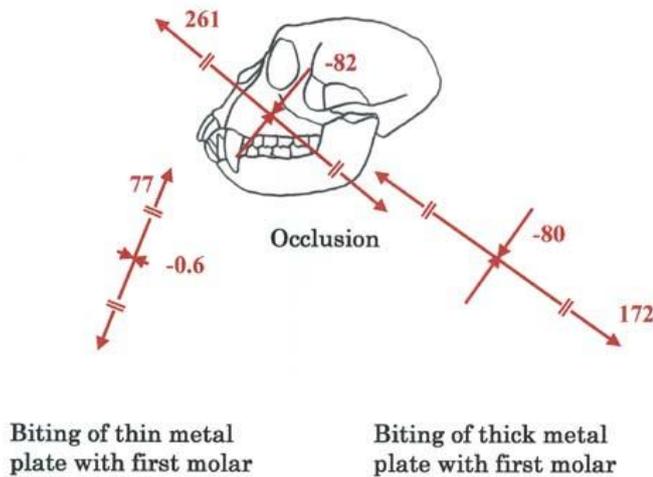


Fig. 6 The principal strain in the zygomaticomaxillary area of maxillary during occlusion and while biting metal plates with different diameters

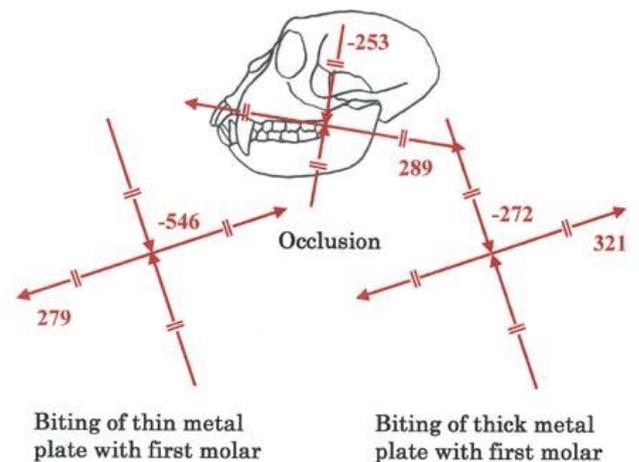


Fig. 8 The principal strain in the zygomaticotemporal process area of zygomatic during occlusion and while biting metal plates with different diameters

(4) 頬骨骨体部の主ひずみの方向

咬合時も、うすい金属板を噛ませてもあつい金属板を噛ませても、前上方から後下方へ伸展し、前下方から後上方へ圧縮した (Fig. 7).

(5) 頬骨側頭突起の主ひずみの方向

咬合時は、上顎骨の臼歯部と同様に前後方向へ伸展し、体軸方向へ圧縮した。うすい金属板あるいはあつい金属板を噛ませたときは、上顎骨の臼歯部ではわずかに前上方から後下方へ伸展する方向が変わったが、頬骨側頭突起では下前方から後上方へ伸展する方向が変わった (Fig. 8).

以上の頬骨の変形から、頬骨では全体的には上顎骨と同じように前後方向へ伸展するが、骨体部と咬筋の収縮力の強い影響力を受ける側頭突起とでは伸展する方向に違いが認められた。

(6) 側頭骨頬骨突起の主ひずみの方向

咬合時は前上方から後下方へ伸展した。しかし、うすい金属板やあつい金属板を噛ませると、伸展は上下方向へ変わった (Fig. 9).

(7) 側頭骨下顎窩上部の主ひずみの方向

咬合時も、うすい金属板を噛ませてもあつい金属板を噛ませても体軸方向へ伸展し、前後方向へ圧縮した (Fig. 10).

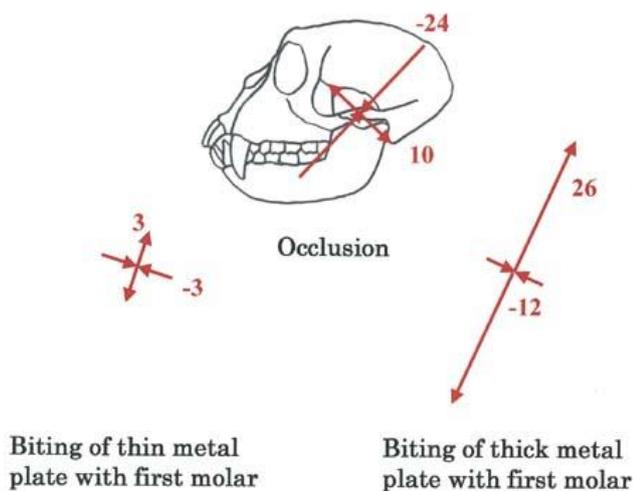


Fig. 9 The principal strain in the temporocozygomatic process area of temporal during occlusion and while biting metal plates with different diameters

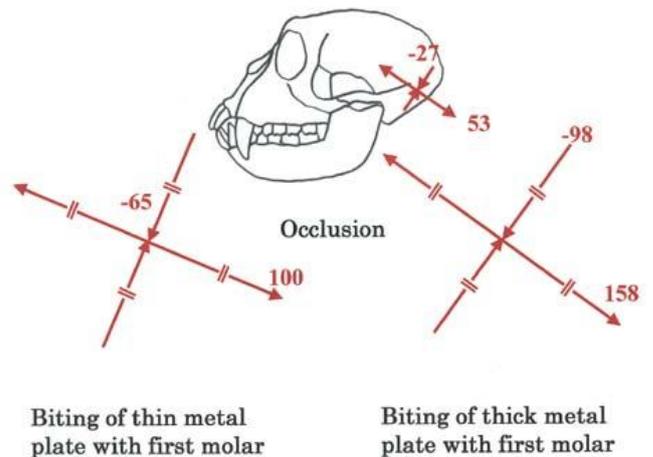


Fig. 11 The principal strain in posterior area of the mandibular fossa of the temporal during occlusion and while biting metal plates with different diameters

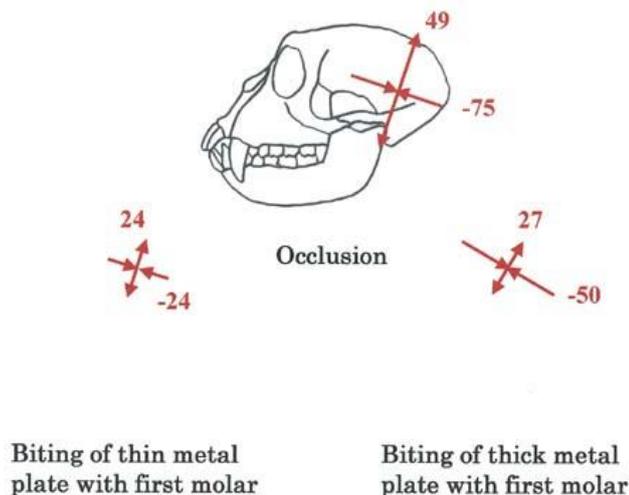


Fig. 10 The principal strain in superior area of the mandibular fossa of the temporal during occlusion and while biting metal plates with different diameters

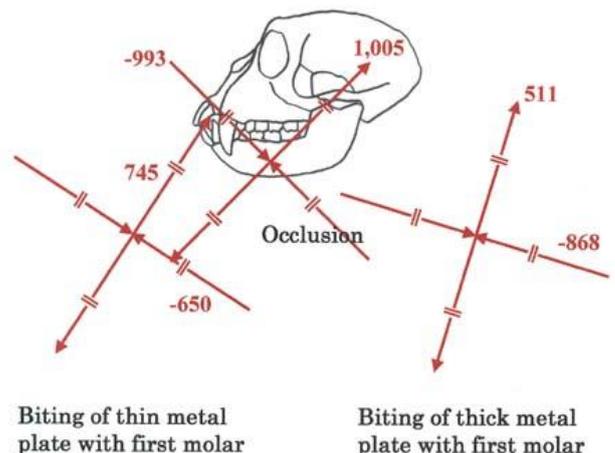


Fig. 12 The principal strain in the mandibular first molar alveolar area during occlusion and while biting metal plates with different diameters

(8) 側頭骨下顎窩後部の主ひずみの方向

咬合時も、うすい金属板を噛ませてもあつい金属板を噛ませても、前上方から後下方へ伸展し、前下方から後上方へ圧縮した (Fig. 11).

以上の側頭骨の変形から、側頭骨は第一大臼歯に力が加わる条件によって、伸展や圧縮する方向がきわめて多様に変わった。

(9) 下顎骨大臼歯部の主ひずみの方向

咬合時も、うすい金属板を噛ませたときも、また、あつい金属板を噛ませたときも前下方から後上方へ伸展し、前上方から後下方へ圧縮した (Fig. 12).

(10) 下顎骨犬歯部の主ひずみの方向

下顎骨大臼歯部とはほぼ同じ傾向を示した (Fig. 13).

以上の下顎骨の変形から、下顎骨は咬合させても大臼歯で物質を噛ませてもほぼ同じ方向へ伸展した。

これらのことから、多くの骨と隣接する頭蓋を構成する骨は咬合の様式によって多様に變形しやすいのに対して、単体の骨である下顎骨は咬合の条件を変えてもおおむね一定の方向へ變形することが明らかになった。

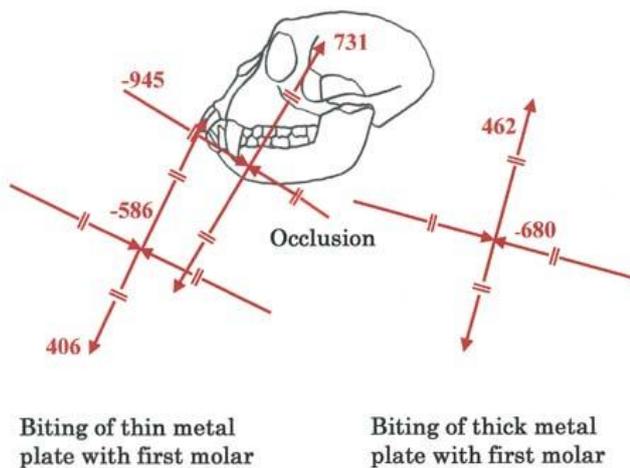


Fig. 13 The principal strain in the mandibular canine alveolar area during occlusion and while biting metal plates with different diameters

2. ヒトを用いた実験（治療）の結果

患者1は、最初に左側の埋伏歯を抜歯した。その結果、抜歯後、身体の左半分の痛みが楽になり、さらに、以前から耳の前方にあった違和感がかなり減少した。しかし、その後、以前の症状とは多少異なった不快感（不定愁訴）を訴えだした。約1か月後、右側の埋伏歯を抜歯した。その結果、多少の不定愁訴は残ってはいるが、従来の不快さのほとんどが解消した。その後、数本の上下顎歯の咬合面を改善した結果、訴えていた症状はほぼすべて解消した。

患者2は、残存していた左側の埋伏歯を抜歯したところ、多少の不快感は残ってはいるが、めまいおよび眼振のほとんどが解消した。今後は咬合平面の改善および数本の上下顎歯の形態修正ならびに咬合調整をおこなう予定である。

4. 考察

常に片側で重たい荷物を持つ習慣があったり、椅子に腰掛けるときに何らかの癖があったり、常に決まった側を下にして寝たり、独特のクセのある歩き方など、自分ではほとんど気がつかない習慣や習性があると、いつのまにか骨盤が左方や右方へ回転様の、あるいは片側が上がり下がりという上下的な変位や変形がおきる。骨盤が変位や変形すると、当然、腰椎、胸椎および頸椎など、骨盤から上部の脊柱は骨盤が変位や変形した方向へ向くので、これらの骨の方向と両足が向いている方向とは異なってくる。しかし、進むのは両足が向いている方向なので、必然的に両目は両足が向いている方向に向かわざるを得ない。この時点で、骨盤が変位や変形したことによって曲がった体軸

は、両目が両足の向いている方向へ向くことによって、再度、歪曲する。すなわち、先天的あるいは後天的な理由によって骨盤が変位や変形すると、骨盤を中心にして骨盤の上方と下方とにずれが生じ、それが原因で骨盤の上部の腰椎、胸椎および頸椎などに、また、下位の股関節などに「ずれ」が生じ、それに伴って左右の足の開き加減にも差が生じてくる。これらの「ずれ」が生じるということは、骨に起始や停止している筋群および腱群の走行や長さに差が生じていることを示している。このような現象がおきると、筋や腱が伸展する長さや速度の受容器である筋紡錘や腱紡錘が筋や腱に生じた異常を中枢に伝えるが、「ずれ」は他動的に骨格を正さない限り元へは戻りにくい。このような筋や腱の非生理的な状況が続くことによってセロトニン、アセチルコリン、ヒスタミン、ブラジキニン、 K^+ 、アンギオテンシンおよびオキシトシンなどの、いわゆる内因性発痛物質が誘発される。

筋群や腱群の非対称性に起因する非生理的現象は、頭蓋全体に不正なひずみを発生させ、このことは当然、咬合に影響をおよぼし、顎関節症をはじめとする不正咬合の大きな原因となる。また、逆に、不良補綴物を装着したり、抜歯後に適切な補綴処置を怠ったり、歯列不正などが原因で咀嚼筋群のバランスが崩れると、それらが誘因となって頭蓋を構成する骨群が位置の異常をおこす。すると、それらの骨に起始あるいは停止している筋群の伸展状況が変わり、それによって頸椎、胸椎および腰椎が変位や変形して、ひいては骨盤の位置異常を引き起こすことになる。骨盤の位置異常は、当然、股関節の左右上下のバランスにも影響を与え、結果的には姿勢を変えることになる。すなわち、身体的な先天的あるいは後天的な原因や咬合の状態などによって頭位が傾き、両肩の高さに違いが生じ、腰の回転および左右の足の指先の位置の異常など、多くの症状が容易に出現する。これらの現象は多くの筋のアンバランスによるもので、このような状態におちいると、臨床的には偏頭痛や頭部全体の頭痛、頸部および肩部の痛み、肩胛骨ならびに鎖骨周辺の痛みおよび背側部や腰部、股関節に痛みやしびれが発現する。このような症状を訴える患者さんの咬合を改善すると、比較的多くの場合、訴えている症状が改善されることをしばしば経験する。その治療のメカニズムは、咬合状態を変えることによって、誤った状況にある筋群ならびに腱群を本来のバランスのとれた位置へ戻し、それに伴って顔面や頭蓋および頸椎以下の骨群を本来の正常と考えられる位置へ戻すことである。このようにして、生体全体の姿勢を本来の正しい位置へ戻すと、多くの場合、訴えていた各種の症状が緩和することが多い。すなわち、咬合・咀嚼時の筋群の力を利用して身体全体の骨群の位置の異常を正し、その結果、身体の筋群

がバランスのとれた位置や走行へ導く治療をおこなうことが大切である。以上の述べてきたことから分かるとおり、この治療に欠かすことができないのは、自己の筋力から発揮される外力としての、本来あるべき方向へ作用する咬合力や咀嚼力の必要性である。したがって、頭蓋を構成する1つ1つの骨が咬合や咀嚼によって、どの方向へどの程度、変位や変形するのかを知り、その結果として、咬合や咀嚼によって頭蓋全体の動く状況について知ることが大切である。そこで、本研究では、とくに咬合の不調和によって多くみられる視野の狭窄、色覚の異常、難聴、耳鳴りおよびめまいなどの受容器が関与している上顎骨、頬骨および側頭骨の力学的応答について検討した。なお、本実験はヒトの咬合の不調和に起因する不定愁訴発症のメカニズムを解明するためにおこなったので、可能であればヒトを用いて実験することが望ましい。しかし、ヒトの骨に測定用のセンサーを直接貼付することはできないのでサルを用いて実験した。当然、ヒトとサルとでは頭蓋や頸椎の形態的容積的な違いが認められるが、ヒトに生じている症状を考えるのにサルで得られた実験結果がヒトに適応できると考えられる箇所について検討した。

実験にはニホンザル5頭を使用した。しかし、得られた結果には体重や雌雄および年齢などに由来するばらつきがあるため、本論文で報告する数値は5頭の平均ではなく、もっとも妥当だと思われるサルの結果について報告する。

なお、本研究によって、歯に咬合力や咀嚼力が加わると、頭蓋を構成する各骨は多様に変形することが分かったが、それぞれの骨が変形するパターンには当然それなりの理由がある。すなわち、上顎骨では、大臼歯部周辺とその他の部位とは異なる力の流れが認められた (Figs. 4-6)。大臼歯部に発生した力 (応力) は主に上顎結節方向へ進み、その応力を蝶形骨翼状突起の前方にある側頭下窩およびその上縁である下眼窩裂方向へ分散する (Fig. 4)。したがって、この応力の流れを乱すようなことがあると、応力は本来向かうべき側頭下窩や下眼窩裂方向へ向かえなくなる。また、上顎結節部には上顎神経の後上歯槽枝および後上歯槽動脈がとおる歯槽管の入り口である歯槽孔があり、上顎結節部に何らかの障害物があるとこれらの神経線維や循環に障害を与える可能性が考えられる。とくに、物質を噛ませると臼歯部歯槽部にはきわめて大きな応力 (ひずみ) が生じることから、この影響は無視できない。一方、上顎骨の他の部位に生じた応力は、歯槽突起、口蓋突起を経て、上顎骨骨体部を後上方へ向かい、頬骨骨体部や上顎骨頬骨突起を経て、頬骨側頭突起の方向へ向かう。これらの応力は、後述する頬骨の変形によって生じた頬骨上顎縫合部を埋め、上顎骨がある部

位を回転の支点として後方へ回転様の変位をする原動力となる (Fig. 14)。



Fig. 14 Transmissional direction of occlusal force in the maxillary bone

このように、咬合や物質を噛ませると、上顎骨はきわめて大きく、かつ、複雑に変形することが分かる。なかでも、本研究で測定した部位のうち、とくに頬骨上顎縫合付近の主ひずみの方向が噛むときの条件によってきわめて多様に变化したことから、同部位は噛むときの条件に最も大きく影響を受けるものと考えられる。さらに、咬合時や物質を噛ませたときの上顎骨口蓋突起および口蓋骨水平板のひずみを記録した報告⁽¹⁴⁾からも、上顎骨は全体としても如何に多様に変形するかが想定できる。

頬骨は実験結果の項で述べたように、骨体部と側頭突起とは異なった方向へ伸展した (Figs.7,8)。側頭突起にはきわめて大きなひずみが認められたことから分かるのとおり、ここからは強い収縮力を発揮する咬筋の表在筋が起始している。したがって、咬合したとき、あるいは物質、それも固い物質を噛んだときは、咬筋の収縮に伴って上顎骨の頬骨突起周辺を支点にして側頭突起は前下方へ回転様の変形をする。その影響を受けて、頬骨の骨体部は全体として後下方へ回転様に変形する (Fig. 15 A)。このとき、前述したように上顎骨と頬骨との縫合部、すなわち、頬骨上顎縫合の上方へ隙ができ (Fig. 15 B)、その隙を埋めるように上顎骨が上顎骨の頬骨突起周辺を支点として回転様の移動をする (Fig. 15)。

すなわち、上顎骨の後方移動がおきる。以上のことから、咬合や咀嚼時に上顎骨および頬骨に生じる変形は、①内側翼突筋および側頭筋とともに、咬筋が収縮する。②これらの筋群の収縮力によって、頬骨側頭突起が前下方へ変位する。③それにともない、頬骨全体が後下方へ変位・変形する。④頬骨の変位・変形に伴って、頬骨上顎縫合の上端に隙ができる。⑤上顎骨に生じた応力が、その隙を埋めるように後方へ変位・変形する (Fig. 16)。

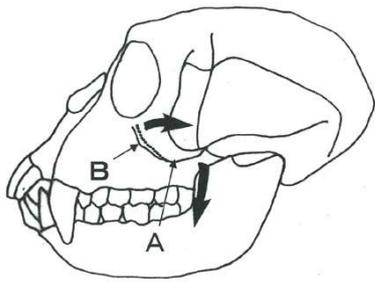


Fig. 15 Displacement direction of the zygomatic with occlusal force

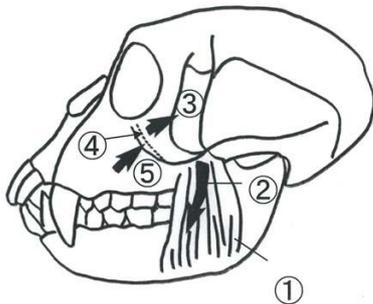


Fig. 16 Order of the deformation of the maxillary and zygomatic bones with occlusal force

頬骨の外側面には頬骨顔面孔が、側頭面には頬骨側頭孔が、そして眼窩面には頬骨眼窩孔があり、それぞれ神経および血管の通路になっている。したがって、上顎骨や頬骨が正常な変位をしているかぎり障害は生じにくい。が、全体的なバランスが崩れると、これらの相互的な位置がずれることになり、結果的には、何らかの症状が生じる原因になると考えられる。

側頭骨については、本実験では頬骨突起、下顎窩上部および下顎窩後部のひずみを測定した。頬骨突起は、いわゆる頬骨弓の後部を指し、ここからは咬筋の深部筋である深部後方が起始している。咬筋深部後方は咀嚼時、最大開口位から閉口路をとったとき、作業側の閉口筋群と協調して、非作業側の咬筋深部後方が咬頭嵌合位へ導く働きをしている^(13,15)。したがって、咬筋深部後方は、側方運動位から咬頭嵌合位へ導く舵取りの役目を果たしている。咬合力や咀嚼力を発揮している咬筋浅部が起始している頬骨側頭突起に比べてひずむ量がきわめて小さいのは当然である。また、咬合時および物質を噛ませたときは前下方へ伸展した。この現象は、深部後方の走行する方向によるものである。杉村ら⁽¹⁶⁾は本実験と同様に、麻酔下のサルの咬筋を電気刺激して側頭骨頬骨突起基部のひずみを記録し、基部は咬筋深部後方が走行する方向へ伸展していることを報告している。側頭骨下顎窩上部は下顎頭が各種の運動によって多岐にわたり変位してい

る下顎窩の上部であり、この部の変形や変位の状況から、顎関節部に生じる応力の大きさが想定できる。本実験の結果、同部位には大きなひずみは認められなかった。覚道ら^(17,18)は、死後直後の頭蓋を用いて、実験者の手で下顎運動をさせたときの側頭骨鱗部大脳面のひずみを記録して、同部位は顎運動の種類に応じてひずみの大きさや方向は多様に変わるが、生じるひずみの量は決して大きくなかったと報告している。本実験においても、咬合力が直接加わっている下顎骨および上顎骨の第一大臼歯歯槽部のひずみに比べて、側頭骨下顎窩上部のひずみはきわめて小さかった。また、ヒトの乾燥頭蓋の側頭骨下顎窩上部の内部に相当する側頭骨鱗部大脳面をかざすと、反対側の光が透けるほどきわめて薄いことが分かる (Fig. 17)。このような解剖学的構造の部位、すなわち、顎関節部に強く、しかも大きな応力が集中するとは考えられない。



Fig. 17 Thickness of the bone in the mandibular fossa on the cerebral surface of the squamous part of the temporal bone

側頭骨下顎窩後部は咬合させたときも物質を噛ませたときも、前上方から下後方へ伸展した。このことは、咬合時に、側頭骨の後部に隣接する後頭骨が下方へ変位していることを示している。後頭骨には頭長筋、前頭直筋、外側頭直筋、胸鎖乳突筋、後頭筋、大後頭直筋、小後頭直筋、僧帽筋、上頭斜筋および頭半棘筋などが、また、それ以外に縦束、翼状靭帯、歯尖靭帯、蓋膜、前下環椎後頭膜および後環椎後頭膜などの多くの靭帯や膜が付着している。後頭骨はきわめて複雑に動くことが想定される。後頭骨に付着している筋、靭帯および膜は、頭位が前傾しないように、すなわち、重力にさからって、重量が約 8kg といわれる頭部を真上に頂く直立の姿勢を保つように機能している。この機能はきわめて重要である。すなわち、体幹の前方に位置している下顎骨および舌骨は咬合、咀嚼、発音お

よび嚙下時には何の障害もなく自由に運動することができる。しかし、増齡的に筋力が弱ってきたり、何らかの身体的な疾患によってバランスが崩れると前傾姿勢になりやすいことはもちろん、側方へも傾くことも多い。バランスの崩れは、前述したように神経線維や血管を圧迫するので、何らかの不定愁訴の原因になりかねない。したがって、後頭骨に付着している筋群は、頭位、ひいては姿勢を維持するためにきわめて強く活動していると考えられる⁽¹⁹⁾。このことは、下顎骨の浅部咬筋の停止部が咬合したときや物質を噛んだときにきわめて大きな力が加わるにもかかわらず、比較的平坦な形状を示しているのに対して、後頭骨の最上項線よりも下方ではきわめて多くの凹凸が見られることから明らかである。すなわち、このことは、同部にいかに強い応力が発生しているかを示すものである。このように後頭骨は多様に変位や変形するので、後頭骨と側頭骨との間には隙ができやすく、したがって、側頭骨はその隙を埋めるかのように後方へ伸展するのであろう (Fig. 18)。

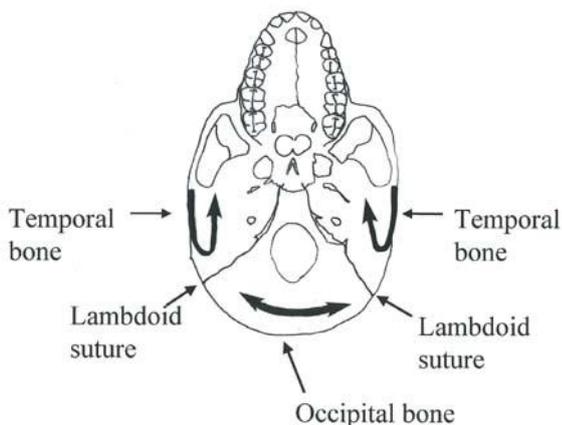


Fig. 18 Deformation patterns of the horizontal surface of the cranial base with occlusal force

ところで、側頭骨は測定した部位で変形する量も方向も異なっていた。このことは、側頭骨が咬合や咀嚼の条件によって周囲の骨の変形の影響を受けていること、および側頭筋の収縮方向がきわめて複雑に変わることによって起きていることを示唆するものである。したがって、側頭筋が主体となって機能するとき、すなわち、側方力が歯に加わったときに側頭骨が変位・変形するパターンを検討することは、きわめて重要である。

サルの下顎骨はイヌや家兎のように正中で分離せず、単一の独立した骨である。すなわち、頭蓋を構成する他の骨のように隣接する骨との間に骨縫合をもたない。したがって、下顎骨に加わった応力は他の骨へ分散しないので、そのまま下顎骨の応力として現れる。この

ことは、咬合時も臼歯で厚さの異なる物質を噛ませたときでも、常に噛ませた歯の歯槽頂部が大きくひずむことから理解できる。杉村⁽²⁰⁾もイヌを用いて本実験と同様の方法で実験し、下顎骨に現れる主ひずみは前上方から後下方へ圧縮し、前下方から後上方へ伸展したと報告している。また、Weijs and Jongh⁽²¹⁾も家兎を用いて同様の結果を得ている。

なお、本実験ではうすいあるいはあつい金属板を片側の第一大臼歯で噛ませたが、噛ませる金属板の厚さによっても各骨の反応に違いが認められた。すなわち、歯に加わった咬合力や咀嚼力は、頭蓋に伝播されるが、頭蓋を構成するそれぞれの骨は、咬合力や咀嚼力が加わった位置からの距離およびそれぞれの骨の形態に応じてそれらを緩衝する必要がある。実験の結果、うすい金属板を噛ませたときもあつい金属板を噛ませたときも、総体的に上顎骨の歯槽部、頬骨側頭突起、側頭骨の頬骨突起および下顎窩後部のひずみが増加する傾向が認められた。次に、咬合時に比べて増加する割合を調べると、うすい金属板を噛ませたときは上顎骨の歯槽部が、そして、あつい金属板を噛ませたときはうすい金属板を噛ませたときよりも上顎骨の頬骨上顎縫合部、頬骨、側頭骨および下顎骨でひずみが増加する割合が大きかった。このことは、うすい金属板はサルにとって、噛む厚さとしては無理なく噛むことができるので、噛む力が加わる骨、すなわち、上顎骨が主体になって応力を十分に緩衝することができるが、あつい金属板を噛ませると閉口筋群が伸展されすぎて噛みにくさを感じ、上顎骨だけでは十分に緩衝することができないために、頭蓋を構成する多くの骨がそれぞれの形状に応じて応力を緩衝していることを示している。このことは、上顎骨の頬骨上顎縫合部のひずみの状態からも良く理解できる。すなわち、うすい金属板を噛ませたとき、同部位は咬合時よりもきわめて小さなひずみしか認められなかった。しかし、上顎骨の歯槽部だけでは十分に応力が緩衝できなくなると、同部位へ伝わる応力が大きくなり、同部位が頬骨方向へ変位しながら応力を緩衝しようとしていることがわかる。ところで、橋本ら⁽⁹⁾は本研究と同様の方法を用いて、幼年期のサルと成熟期のサルとの咬合力緩衝機能の相違について実験し、幼年期のサルでは頭蓋が一体となって咬合力を緩衝しているが、成熟期のサルでは頭蓋を構成する各骨がそれらの骨の形状および位置に応じて緩衝していると述べている。本研究でも橋本らの研究を支持する結果を得た。また、側頭骨の下顎窩後部は、うすい金属板を噛ませたときも、あつい金属板を噛ませたときでもひずみ量は大きかった。このことは、側頭骨の下顎窩後部は側頭骨岩様部に含まれ、鱗乳突縫合を介して後頭骨に隣接している。後頭骨は大後頭孔の前部にある後頭顆で第一頸椎と隣接している。この

ことから明らかなように、後頭骨は頸椎と連動して咬合や咀嚼時の頭蓋の力学的なバランスを保つ役割を果たしている。このことから、後頭骨は比較的動きやすい骨であると考えられる。

以上、本実験でひずみを記録した骨を中心に考察したが、これらの考察をふまえ、改めて頭蓋を観察すると、上顎骨、頬骨および後頭骨は、スムーズな咬合や咀嚼をおこなうためには積極的に変位や変形する骨であるが、側頭骨や蝶形骨はあくまでもあまり変形してほしくない骨であるといえる。杉村ら⁽²²⁾は本実験と同様の方法を用いて、麻酔下のサル⁽²²⁾の蝶形骨体翼のひずみを測定し、咬合時でも片側で物質を噛ませても、生じるひずみの量はきわめて小さいこと、また、常に体軸（上下）方向に伸展していることを報告している。蝶形骨が常に体軸（体軸）方向へひずむ理由は、咬合や咀嚼時、すなわち咬筋が機能すると、蝶形骨の前方にある頬骨が蝶形骨の方向へ倒れ込むように変位・変形すること、また、側頭筋が収縮することによって側頭骨が蝶形骨を後方から圧迫するからであり、さらに、蝶形骨の下面の翼状突起後面の翼突窩に起始する内側翼突筋が、蝶形骨を下方へ強く引っ張るからである (Fig. 19)。

このように、咬合・咀嚼時、蝶形骨は頬骨および側頭骨から常に圧迫され、さらに内側翼突筋の収縮の影響を受ける。蝶形骨は頭蓋底の中央に位置し、左右の大翼は頭蓋の両側面を構成している。蝶形骨の解剖学的な位置から側頭骨、頭頂骨、前頭骨、篩骨、頬骨、上顎骨、鋤骨および口蓋骨など、多くの骨と縫合部をもっている。すなわち、咬合や咀嚼時に大きく変形することが本実験で明らかになった上顎骨や頬骨とも隣接している。さらには、蝶形骨は外側翼突筋、内側翼突筋、口蓋帆張筋、蝶下顎靭帯、翼棘突靭帯などの筋や腱が起始あるいは停止している。これらのことから、蝶形骨は多くの骨の変形や変位および蝶形骨に起始や停止している筋や靭帯の影響を受け、大きく変形しやすい骨であるとも考えられる。しかし、蝶形骨の体部はそのほとんどが蝶形骨洞で占められ、空洞状態である。このことは、多くの応力が加わってもそれらを巧みに緩衝しながら、体部を常に床に平行に保とうとしている形状とあいまって、まさに蝶形骨こそが頭部のバランスをとる中心的な役割を果たしていると考えられ、このことから、蝶形骨は頭部の力学的な中心ではないかと考える。したがって、もし、蝶形骨に応力が集中しやすくなると、当然、骨が大きくひずみ、その結果、蝶形骨上部にある各器官もその影響を受けることになる。しかし、蝶形骨にはきわめて重要なトルコ鞍や下垂体窩があり、さらには視神経や眼動脈がとおる視神経管、動眼神経、滑車神経、外転神経、その他、目に関する各神経および上眼静脈などがとおる上眼窩

裂、上顎神経がとおる正円孔、下顎神経がとおる卵円孔、および中硬膜動脈や下顎神経硬膜枝がとおる棘孔があることからわかるとおり、隣接する多くの骨からの応力に対して孔や裂が応力を緩衝し、蝶形骨洞と相まって可及な限り応力が集中しないような構造になっていると考えられる。

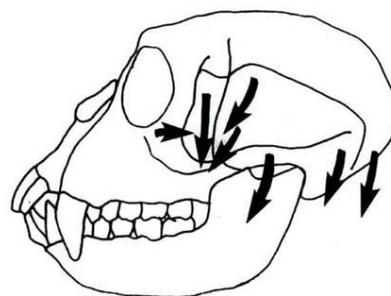


Fig. 19 Deformation patterns of the zygomatic, sphenoid, temporal and occipital bones with occlusal force

不定愁訴をもつ患者の埋伏智歯を抜歯後の症状の変化は、前述したメカニズムで十分に理解できる。しかし、両患者とも、不定愁訴の原因のひとつであろうと思われる埋伏智歯を抜歯したにもかかわらず、抜歯直後、一時的に爽快な気分になるが、すぐに再度、不快感を感じた。この理由は、咬合に異常をもつヒトの多くは実に多くの原因をもっていることが多い。すなわち、患者1は片側の埋伏智歯を抜歯後、きわめて楽になったが、すぐにまた不快な症状に戻った。これは、片側の原因が除去されたことによって一過的に楽になったが、まだ片側の埋伏智歯が残っているため、頭蓋底の水平板、蝶形骨および後頭骨の左右のバランスが十分にとれていないためである。患者2は片側の埋伏智歯だけが残っていたので、それを除去すれば、とりあえずは埋伏智歯によって崩れていたバランスがとれるようになったので、きわめて楽になったことは、本研究の結果からも明らかなことである。ところで、埋伏智歯をもつすべてのヒトが不定愁訴をもつのではなく、不定愁訴の原因のひとつが埋伏智歯であるといえる。したがって、埋伏智歯を抜歯すると原因のひとつが除去され、上顎骨へ加わる咬合力や咀嚼力が何の障害もなく頭蓋を伝播するようになるので、症状はきわめて軽くなる。このように、上顎骨に加わった咬合力や咀嚼力は、伸展ひずみの方向からも明らかなように上顎骨の後方へ集約されるように伝播される。なお、2人の症例について実験（治療）としたのは、智歯の存在が不定愁訴発症の原因のひとつであることが現在の歯科では常識になっていない。したがって、日常の

臨床において不定愁訴を持つ人に抜歯の必要性を説明する歯科医はほとんどいない。我々は智歯のうち、とくに上顎の埋伏智歯が不定愁訴発症のひとつの原因になりうることをサルを用いた本実験で確認できたので、患者さんに十分説明して抜歯し、満足できる結果を得た。このような経緯、からヒトの症例をあえて実験（治療）として扱った。ところで、Guzay⁽²³⁾は、円運動の法則と人間工学の立場とから下顎運動の様式を解析し、下顎の開閉運動も円運動の一部であるとし、下顎運動の中心は第二頸椎歯突起にあって、そこをとる水平軸が上顎歯と下顎歯とが接触する部位であること、そして、そのとき、下顎運動のエネルギーは上顎歯とおおって頭部に無理なく分散するべきである、というクオードランド理論を提唱している。したがって、この理論によれば、埋伏歯は咬合力や咀嚼力が上顎骨とおおって頭蓋に無理なく分散するためには、大きな障害物になることになる。また、楊ら⁽²⁴⁾は麻酔下の日本ザルの両側の咬筋を電気刺激して、片側で物質を噛ませたときの第一頸椎から第七頸椎のすべての頸椎の左右椎弓板のひずみを測定し、第一頸椎は頭部の台座として頭部と同方向へ変位するが、第二頸椎は第一頸椎とはまったく逆方向へ変位することを明らかにし、この現象は、頭部および第一頸椎が片側で噛むことにより頭部が過度に咀嚼側へ変位しないように第二頸椎がストッパーの役割を果たしている」と述べている。第二頸椎には他の頸椎には見られない突起をもち、その突起、すなわち、歯突起が第一頸椎の椎孔へ入り込んでいて、この歯突起が第一頸椎の動きをコントロールして、頭部の過度な変位を防ぐストッパーとしての役割を果たしていることから、ストッパーの役割をもつ第二頸椎歯突起は咬合や咀嚼時の力学的な中心といえる。また、杉村ら⁽¹⁴⁾は、咬合時および片側の犬歯、第二小臼歯ならびに第二大臼歯で3種類の厚さの異なる物質を噛ませたときの口蓋突起と口蓋骨水平板とのひずみを記録し、上顎骨口蓋突起に生ずるひずみの方向は物質を噛ませる部位や噛ませる物質によって異なるが、横口蓋縫合の後方である口蓋骨水平板では、どの歯でどの厚さの物質を噛ませても、伸展する方向はおおむね前後方向であったと報告している。このことは、物質を噛むことによって上顎骨口蓋突起に生ずる応力は、可能な限り応力が集中する部位に為害作用がないように応力を分散しやすい方向へひずむが、その応力が上顎骨口蓋突起の後縁である横口蓋縫合に達すると、その応力は口蓋骨水平板で可及な限り前後方向へ変えられ、スムーズに蝶形骨を通過して、第二頸椎歯突起方向へ後頭骨を伝播することを示すものである (Fig. 20)。

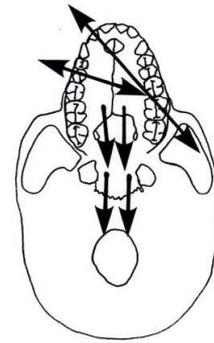


Fig. 20 The role of median palatine suture, transverse palatine suture and horizontal plate of palatine bone with occlusal force

以上のことから、咬合・咀嚼時に生じた応力は、Guzay⁽²³⁾が述べるように「頭部に無理なく分散する」のではなく、頭部に無理なく第二頸椎の歯突起方向へ集約することが望ましいといえる。もし、第二頸椎の歯突起方向へ集約せず、左右のバランスが崩れると、応力の通り道である蝶形骨が変位してバランスが崩れると、それが蝶形骨に隣接する後頭骨のバランスをも崩し、その結果、後頭骨が変位し、その変位が頸椎の変位や変形を引き起こし、咬合や咀嚼によって生じた応力が第二頸椎歯突起方向へ集約せず、それが不定愁訴の大きな原因になると考えられる。

5. 結論

咬合力や咀嚼力による頭蓋各骨の変位・変形の様式、ならびに頭蓋全体の力学的特性を明らかにするために麻酔下のサルの両側の咬筋中央部を電気刺激して咬合させたときの口蓋突起と口蓋骨水平板とのひずみを測定し、その結果から以下の結論を得た。

1. 閉口筋群が機能することにより頬骨全体が上顎骨の頬骨突起付近を支点として後下方へ回転様の変位し、そのとき生じる頬骨上顎縫合部の上端を埋めるように上顎骨は後方へ変位する。
2. 側頭骨は咬合や咀嚼の条件によって周囲の骨の変形の影響を強く受けていること、および側頭筋の収縮する方向がきわめて複雑に変わるなどにより、側頭骨は部位によって変形する量も方向も異なることから、多様に変形する骨である。
3. 単一の独立した骨である下顎骨は全体がほぼ一様に変形した。
4. 後頭骨の最上項線よりも下方ではきわめて多くの凹凸が見られることから、後頭骨の後部には頭部が前傾するのを強力に阻止する力が加わっていると考えられる。
5. 咬合・咀嚼時、蝶形骨の周囲の骨は蝶形骨を中心

に回転様の変位をしていることから、蝶形骨は頭部のバランスをとる中心的な役割を果たしていると考えられ、このことから、蝶形骨は頭部の力学的な中心であると考えられる。

6. 蝶形骨が異常に変位すると咬合・咀嚼に起因する応力が正常に蝶形骨に伝わらず、したがって、このことが後頭骨にも正確に伝わらないため、咬合・咀嚼による頭蓋の変位が第一頸椎へ正確に連動できなくなり、これにより頸椎全体に異常が生じる可能性が示唆された。

参考文献

- (1) 天野仁一朗. 咬合, 咀嚼運動および嚥下運動時の顎骨のひずみについて. *歯基礎誌* 12:52-87, 1970.
- (2) 石田 晃. 咬合力・咀嚼力および矯正力に対する頭蓋の力学的反応機構に関する実験的研究. *歯基礎誌* 14:323-341, 1972.
- (3) 丸川邦男. 咬合時のサル生体頭蓋の力学的反応について. *歯科医学* 48, 809-825, 1985.
- (4) Hylander WL. In-vivo bone strain as an indicator of masticatory bite force in *Macaca fascicularis*. *Arch Oral Biol* 31: 149-157, 1986.
- (5) Hylander WL and Crompton AW. Jaw movements and patterns of mandibular bone strain during mastication in the monkey *Macaca fascicularis*. *Arch Oral Biol* 31:841-848, 1986.
- (6) Hylander WL, Johnson KR, Crompton AW. Loading patterns and jaw movements during mastication in *Macaca fascicularis*: A bone-strain, electromyographic, and cineradiographic analysis. *Am J Phys Anthropol* 72:287-314, 1987.
- (7) Hylander WL, Johnson KR. The relationship between masseter force and masseter electromyogram during mastication in the monkey *Macaca fascicularis*. *Arch Oral Biol* 34:713-722, 1989.
- (8) Iwasaki K. Dynamic responses in adult and infant monkey craniums during occlusion and mastication. *J Osaka Dent Univ* 23:77-97, 1989.
- (9) 橋本和典, 杉村忠敬. サル頭蓋の咬合力緩衝機構における咬合物質の大きさの影響について. *歯科医学* 54:301-314, 1991.
- (10) Hylander WL, Johnson KR, Crompton AW. Muscle force recruitment and biomechanical modeling: An analysis of masseter muscle function during mastication in *Macaca fascicularis*. *Am J Phys Anthropol* 88:365-387, 1992.
- (11) Saijo S, Sugimura T. Dynamic response of the adult monkey maxilla to occlusal forces. *J Osaka Dent Univ* 27:1-22, 1993.
- (12) Bouvier M, Hylander WL. The mechanical or metabolic function of secondary osteonal bone in the monkey *Macaca fascicularis*. *Arch Oral Biol* 41:941-950, 1996.
- (13) Sugimura T, Inada J, Yoshida Y, Weij WA. Coordination patterns in rabbit masticatory muscles. *Jpn J Oral Biol* 39:263-267, 1997.
- (14) 杉村忠敬, 稲田條治. 咬合時のサル骨口蓋の力学的特性. *補綴誌* 41:385-392, 1997.
- (15) 中村優也, 松田宗久, 安達 潤, 小林八洲男, 丹羽金一郎, 杉村忠敬. 硬食品咀嚼時の咀嚼側と非咀嚼側との筋活動について. *顎顔面バイオメカ* 8:63-65, 2002.
- (16) 杉村忠敬, 稲田條治, 松本俊郎. 咬合時のサル側頭骨頬骨突起基部の力学的応答. *顎顔面バイオメカ* 2:51-58, 1996.
- (17) 覚道健治, 杉村忠敬, 木村明祐, 白数力也, 覚道幸男. 下顎運動および下顎位の変化に伴うサル側頭骨鱗部大脳面の力学的反応. *日顎誌* 3:56-65, 1991.
- (18) 覚道健治, 杉村忠敬, 諏訪文彦, 方 一如, 白数力也, 太田義邦. 下顎運動および下顎位の変化に伴う新鮮ヒト遺体顎関節下顎窩の力学的反応. *日顎誌* 7:116-124, 1995.
- (19) 藤本雅子, 若城健介, 兼松宣武, 杉村忠敬. 家兎咀嚼時の頭頸部の力学. *第14回顎顔面バイオメカ抄録集* 48-50, 2006.
- (20) 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. *歯基礎誌* 23:512-536, 1979.
- (21) Weij WA, Jongh J. Strain in mandibular alveolar bone during mastication in the rabbit. *Arch Oral Biol* 22:667-675, 1977.
- (22) 杉村忠敬, 稲田條治, 松本俊郎. 咬合物質の厚さに対する蝶形骨体翼の力学的反応. *顎顔面バイオメカ* 1:22-29, 1995.
- (23) Guzay CM. Quadrant Theorem: A viewable biophysical analysis & Prosthodontia orthodontia TMJ disorders. 22-35, DDS Pub (Chicago), 1979.
- (24) 楊 坤憲, 松田宗久, 安達 潤, 山仲 徹, 小林八洲男, 杉村忠敬. 片側第一大臼歯で咬合物質を噛ませたときのサル頸椎の力学的応答. *顎顔面バイオメカ* 9:5-22, 2003.