原 著

咬合状態の違いに対する顎関節の力学的応答

篠崎 直樹

東京医科歯科大学歯学部歯科矯正学第1講座（主任・指導：相馬邦道教授）

（1992年9月30日 受付）

Mechanical Response of Temporomandibular Joint Induced by Occlusal Change

Naoki Shinozaki

The First Department of Orthodontics, Faculty of Dentistry, Tokyo Medical and Dental University
(Chief and Director : Prof. Kunimichi Soma)

The purpose of this research was to investigate the mechanical effects on the temporomandibular joint influenced by the occlusal variations : the inclination of the upper incisor and the change of occlusal contacted position on the lower occlusal surface. For this purpose a theoretical study and a model experiment were performed.

In the theoretical study, the Rigid Body Spring Model was applied to the temporomandibular joint for analyzation of the stress distribution and movement of the condyle head under the various conditions of the joint. Furthermore, the model experiment could be performed to confirm three-dimensionally the findings attained by the theoretical study.

The results were as follows :

1. In the phase of the decreasing upper incisor inclination excessively, the direction of the temporomandibular joint force was be rotated counterclockwise and the magnitude of the joint force was be increased.

2. The movement of the condyle head (distance and direction) and the stress distribution of the disk were influenced by the various shapes of the joint and the mechanical properties of the surrounding soft tissues.

I. 緒 言

顎関節は、下顎頭と側頭骨下顎窩およびそれらの間に介在する関節円板より構成される。さらに、この顎関節を解剖学的見地より観察すると、

下顎頭前方部と側頭骨下顎窩の前方斜面において、骨梁の緻密化や線維性関節軟骨および皮質骨の肥厚の局在¹⁾が、また、関節円板の中央狭窄部において、無血管領域の存在が確認される²⁾。これらの構造的特徴は、耐圧能力と関連があると考え

えられ^{2,3)}、顎関節には圧力が作用されているものと推定される。Hylander^{4,5)}や Boyd⁶⁾は、サル (Macaca) を用いた動物実験により、咬みしめ時に顎関節に加わる圧力を実測している。ヒトにおいては、同部への直接の圧力測定が不可能であることより、Hatcher⁷⁾は、生体の形態に近似させた模型を用い、顎関節に加わる力を歪みゲージにて測定している。また、Pruim⁸⁾、Eijden⁹⁾および Barager^{10~12)}らは、生体構造を剛体として捉え、それら剛体間における力の釣合いという観点から、顎関節に対する力の理論的解析を行っている。しかしながら、同部への力学的作用の状態を、前者の模型実験では、歪みという媒体のみで、また、後者の理論的解析では、単に集中荷重として取り扱ったものであり、顎関節の形態や周囲の構造物の力学的特性を十分に考慮したうえで、同部にかかる荷重の方向や分布状態を精細に検討したものではなかった。

一方、近年、歯科医療の分野で顎関節疾患が注目されてきている。矯正臨床の場合においても、咬合時に不正顎位を呈するいわゆる機能的不正咬合の症例に同疾患の臨床症状がみられたり、また、治療による咬合の改善とともにそのような症状の緩解がみられたりする症例に日常しばしば遭遇するところである。この観点からすれば、この顎関節疾患の原因が多岐にわたるとはいえ、少なくとも咬合が関与していることは否めないところである¹³⁾。

そこで、上述の諸点を勘案し、本研究では咬合状態の違いに対する顎関節の力学的応答を検討する目的で、理論的解析と模型実験を行った。

理論的解析では、まず、剛体静力学的解析にて、下顎頭にかかる力の大きさと方向を求め、ついで、剛体ばねモデル解析にて、その力が、下顎頭をどのように変位させるか、また圧力として顎関節内にどのように分布するかを頭かにすることを行った。なお、この剛体ばねモデル解析法は、近年開発された一種の有限要素法であり、その特色として剛体間の滑りを解析可能とすることより¹⁴⁾、本研究では、特に、荷重下の下顎頭の挙動

を解明させるために適用した。

模型実験では、理論的解析で得られた所見を、三次元的な傾向として把握することを目的として、圧力センサにて顎関節模型における圧力分布を測定した。

Ⅱ. 方 法

咬合状態の違い (上顎前歯歯軸および咬合支持点の変化) が顎関節に作用する力に及ぼす影響を以下に記す理論的解析および模型実験により検討した。

1. 理論的解析

1) 剛体静力学的解析

静力学的モデルとして、剛体とみなした下顎骨上に、咬みしめ状態の咀嚼筋による筋力が作用し、その筋力が咬合部と顎関節部とで支持され、釣合いを保っているモデルを作成した。そして、このモデルにおいて、上顎前歯歯軸および咬合支持点を変化させ、下顎頭に加わる力の方向および大きさの変化を解析した。

(1) 設 定

下顎骨上の荷重点、および荷重としての筋力、また、可変条件としての咬合は以下のように規定した。

① 下顎骨上の荷重点

二次元剛体としての下顎骨上の荷重点を決定するための資料としては、下顎骨の形態に異常がなく、形態を表す各計測点が、日本人標準値¹⁵⁾の標準偏差内に入る成人男子 (19歳) より得られた側貌頭部 X 線規格写真を用いた。その写真上より、下顎骨における筋力の作用点、咬合支持点および下顎頭の荷重点の座標を計測した (表 1)。

なお、座標系は解析平面上における下顎頭の荷重点を原点とし、眼耳平面に平行に x 軸、それに垂直に y 軸を設定した (図 1)。

② 筋 力

咬みしめ時を想定したため、咀嚼筋のうち閉口時に関与する筋を選択した。すなわち、咬筋、側頭筋、内側翼突筋、外側翼突筋の 4 種の閉口筋である。なお、側頭筋は前部と後部の二つに分けて

図1 剛体静力学解析モデル

表1 荷重点の座標

筋の荷重点 (mm)				
咬筋①	内側翼突筋②	側頭筋前部③	側頭筋後部④	外側翼突筋⑤
(7.0, -62.0)	(7.0, -62.0)	(34.0, -12.5)	(34.0, -12.5)	(6.5, -2.0)

咬合の荷重点 (mm)		
下顎切歯⑥	下顎犬歯⑦	下顎第一大臼歯⑧
(80.0, -61.5)	(77.0, -60.5)	(53.5, -56.5)

表2 筋力の方向および大きさ

筋	最大筋力		筋力の方向	
	N	s. d.	度	s. d.
咬筋, 内側翼突筋	639	176	54.1	3.8
側頭筋前部	362	65	89.5	9.8
側頭筋後部	197	26	129.8	11.0
外側翼突筋	378	106	-10.0	0.0

扱った。

Pruim の報告⁸⁾をもとに, 筋力の作用方向 (x 軸の正方向となす角度) ならびに筋力の大きさを推定値として設定した (表2)。なお, 筋力の作

用方向は各咀嚼筋の起始部の中心と停止部の中心を結んだ直線方向とした。また, 筋力の大きさは, 咬みしめ時に各閉口筋の出力が最大であると仮定し, 筋の断面積より算出し求めた。

③ 咬合

a. 上顎前歯歯軸の変化

上顎前歯歯軸の変化が下顎頭に加わる力に対して与える影響を調べるためのモデルにおいては, 上顎前歯舌側面と下顎前歯切縁との間には摩擦がないものとし, また, 咬合力は上顎前歯舌側面に垂直なものと仮定した。また, 歯の接触は前歯部のみとし, 臼歯部は咬合に参加しないものとした (図1-(a))。

b. 咬合支持点の変化

咬合支持点の変化が下顎頭に加わる力に対して与える影響を調べるためのモデルにおいては、咬合支持点を下顎切歯の切縁から下顎第一大臼歯の位置まで順次変化させた。また、咬合支持点以外は咬合に参加しないものとし、咬合力の方向は咬合平面に垂直なものと仮定した(図1-(b))。

(2) 解析方法

剛体に作用する力が釣合って、剛体が静止している状態では以下の条件式を満足している。

x 方向の力の和は 0 ……………(i)

y 方向の力の和は 0 ……………(ii)

任意の軸まわりのモーメントの和は 0 ……………(iii)

(i), (ii), (iii)より条件式(欄外)を導き、各力学モデルに対して以下の関係式を得た。これらの関係式をもとに、上顎前歯歯軸の変化 θ_1 および咬合支持点の変化 x が下顎頭に加わる力 θ_c , F_c に対して与える影響を求めた。

① 上顎前歯歯軸の変化

上顎前歯歯軸 θ_1 と下顎頭に加わる力の方向 θ_c および大きさ F_c の関係式

$$\theta_c = \arctan \left\{ \frac{(FY \cos \theta_1 - \theta_{ct}) + M \cos \theta_1}{(FX \cos \theta_1 - \theta_{ct}) + M \sin \theta_1} \right\}$$

$$F_c^2 = (FX)^2 + (FY)^2 + \left\{ \frac{M}{\cos(\theta_1 - \theta_{ct})} \right\}^2 - \frac{2M(FX \sin \theta_1 - FY \cos \theta_1)}{\cos(\theta_1 - \theta_{ct})}$$

② 咬合支持点の変化

下顎切歯切縁から咬合支持点までの距離 x と下顎頭に加わる力の方向 θ_c および大きさ F_c の関係式

$$\theta_c = \arctan \left\{ \frac{(FY \cos(x-L)) + M \cos \theta_{oc}}{(FY \cos(x-L)) + M \sin \theta_{oc}} \times \frac{\sqrt{l^2 + (L-x)^2}}{\sqrt{l^2 + (L-x)^2}} \right\}$$

$$F_c^2 = (FX)^2 + (FY)^2 + \frac{M^2 \{ l^2 + (L-x)^2 \}}{(L-x)^2} + \frac{2M(FX \sin \theta_{oc} - FY \cos \theta_{oc}) \sqrt{l^2 + (L-x)^2}}{L-x}$$

図2 剛体ばねモデル解析の表示例

図3 正常形態のX線断層撮影像

2) 剛体ばねモデル解析

顎関節の形態および関節周囲軟組織の力学特性を導入した顎関節の剛体ばねモデルを作成した。ついで、前項の剛体静力学的解析により得られた下顎頭に加わる力をこのモデルに入力し、下顎頭の移動方向 θ_2 および移動距離 d を求めた。なお、下顎頭の変位角 θ , すなわち下顎頭に加わる力の方向 θ_1 と下顎頭の移動方向 θ_2 の差 ($\theta_1 - \theta_2$) についても検討を加えた。さらに、各ばね要素に加わる力を算出し、顎関節に加わる力の分布をも求めた(図2)。

(1) 設 定

① 下顎骨の形態

顎関節の形態がほぼ正常と思われるX線断層撮影写真(21歳, 女性)(図3)の透写図上におい

て, 関節結節および関節後結節の双方に接する直線を引き, 下顎頭により切り取られる線分の2等分点を下顎頭の荷重点とした。

そして, 下顎頭の荷重点から関節結節と関節後

下顎骨の剛体静力学モデルにおける条件式

① 上顎前歯歯軸の変化

力の釣合いより (条件(i), (ii))

$$FX + T \cos(\pi/2 + \theta_1) + F_c \cos \theta_c = 0$$

$$FY + T \sin(\pi/2 + \theta_1) + F_c \sin \theta_c = 0$$

モーメントの釣合いより (条件(iii))

$$M = T \times \sin\{\pi/2 - (\theta_{ct} - \theta_1)\}$$

② 咬合支持点の変化

力の釣合いより (条件(i), (ii))

$$FX - T \sin \theta_{oc} + F_c \cos \theta_c = 0$$

$$FY - T \cos \theta_{oc} + F_c \sin \theta_c = 0$$

モーメントの釣合いより (条件(iii))

$$M = -T \times \cos(\theta_{oc} + \theta_{ct})$$

また, $\theta_{oc}, \theta_{ct}, L, l, x$ の間に

$$\cos(\theta_{oc} + \theta_{ct}) = \frac{L - x}{\sqrt{l^2 + (L - x)^2}} \text{ が成り立つ}$$

ここで上の条件式に現れる変数はそれぞれ次を表している。

- F1 : 咬筋, 内側翼突筋の筋力の大きさ
 F2 : 側頭筋前部の筋力の大きさ
 F3 : 側頭筋後部の筋力の大きさ
 F4 : 外側翼突筋の筋力の大きさ
 cf1 : 咬筋付着部と下顎頭との距離
 cf2 : 側頭筋前部と下顎頭との距離
 cf3 : 側頭筋後部と下顎頭との距離
 cf4 : 外側翼突筋と下顎頭との距離
 θ_{cf1} : 眼耳平面と cf1 とのなす角度
 θ_{cf2} : 眼耳平面と cf2 とのなす角度
 θ_{cf3} : 眼耳平面と cf3 とのなす角度
 θ_{cf4} : 眼耳平面と cf4 とのなす角度
 θ_{r1} : 眼耳平面と咬筋とのなす角度
 θ_{r2} : 眼耳平面と側頭筋前部とのなす角度
 θ_{r3} : 眼耳平面と側頭筋後部とのなす角度
 θ_{r4} : 眼耳平面と外側翼突筋とのなす角度
 T : 咬合力
 θ_T : 眼耳平面と咬合力とのなす角度
 θ_1 : 眼耳平面と切歯路角とのなす角度
 F_c : 下顎頭に加わる力
 θ_c : 眼耳平面と下顎頭に加わる力とのなす角度
 ct : 咬合点と下顎頭との距離
 θ_{ct} : 眼耳平面と ct とのなす角度
 l : 原点から咬合平面におろした垂線の足までの距離
 L : 原点から咬合平面におろした垂線の足と下顎前歯部との距離
 x : 下顎前歯部と咬合支持点との距離
 $FX = F1 \cos \theta_{r1} + F2 \cos \theta_{r2} + F3 \cos \theta_{r3} + F4 \cos \theta_{r4}$
 $FY = F1 \sin \theta_{r1} + F2 \sin \theta_{r2} + F3 \sin \theta_{r3} + F4 \sin \theta_{r4}$
 $M = \{F1 \times cf1 \sin(\theta_{cf1} - \theta_{r1}) + F2 \times cf2 \sin(\theta_{cf2} - \theta_{r2}) + F3 \times cf3 \sin(\theta_{cf3} - \theta_{r3}) + F4 \times cf4 \sin(\theta_{cf4} - \theta_{r4})\} / ct$

図 4 剛体ばねモデル解析の設定

結節に向かってそれぞれ線分を引き、その間を荷重点を中心に5°間隔に等角度に分割した。そして、その分割線と下顎頭および下顎窩との交点に対し、後方から順番に、1～37番までの番号を付し、ディジタイザにてこの形態を数値化し要素化した。また顎関節の軟組織をばね要素としてモデル化するために、下顎頭および下顎窩の同一番号の点の間にばね要素を配置した。外側靱帯および蝶下顎靱帯の起始、停止部間にもばね要素を配置し、要素38、39番とした(図4)。

以下のような各ばね要素を、顎関節内の解剖学的位置関係を基に各種の関節周囲軟組織構造に対応させた。

- ばね要素 1番～13番：後部結合組織
- ばね要素 14番～21番：関節円板後方肥厚部
- ばね要素 22番～29番：関節円板中央狭窄部
- ばね要素 30番～37番：関節円板前方肥厚部
- ばね要素 38番：外側靱帯
- ばね要素 39番：蝶下顎靱帯

② 関節周囲軟組織の力学特性

それぞれの関節周囲軟組織に対し、解剖学的な性質を考慮して、以下のようなばね要素の力学特性を与えた。すなわち、関節円板相当部には圧縮力にのみ抵抗し、引張力には抵抗しないばねを、また外側靱帯と蝶下顎靱帯相当部には引張力には

表 3 関節円板および外側靱帯の力学特性

	弾性係数(N/mm ²)	ばね定数(N/mm)
ヒト関節軟骨(関節円板)	1.92×10	4.27×10 ²³
ヒト十字靱帯(外側靱帯)	2.00×10 ²	4.38×10

表 4 下顎頭に加わる荷重

	体重 (pound)	顎関節力 (N)
ヒト	128	650
サル	25	127

抵抗するが、圧縮力には抵抗しないばねを配した。また、後部結合組織相当部には、引張力にも圧縮力にも抵抗しないばねを配した。

関節円板や外側靱帯、蝶下顎靱帯の物性値に関しては、文献的にも報告はないことから、類似した組織として、関節円板にはヒト関節軟骨の、外側靱帯、蝶下顎靱帯にはヒト十字靱帯の力学特性¹⁶⁾をそれぞれ当てはめることとした。さらに、関節円板および靱帯の形態¹⁷⁾を考慮し、弾性係数をばね定数に換算した(表3)。なお、関節円板の各ばね要素のばね定数は、各ばねが対応する下顎窩と下顎頭とで囲まれる各面積を算出し、その面積比で比例配分することにより決定した。

③ 下顎頭に加わる力

下顎頭に加わる力の方向は、前項の剛体静力学的解析において、上顎前歯歯軸を150°から60°へ変化させた際の角度変化にほぼ対応させるようにした。すなわち、関節円板中央狭窄部に対して垂直な方向を中心に前方に15°、後方に75°の範囲で変化させた。なお、剛体静力学的解析では下顎頭に加わる力の大きさの変化傾向を知ることが目的としていたため、力の大きさは側頭筋後部を1とした比で表しており、絶対値は用いなかった。ここで、剛体ばねモデル解析では下顎頭に加わる力の絶対値を必要とするが、咬みしめ時に下顎頭に加わる力の大きさをヒトにおいて測定した報告はないことから、便宜的にサルにおいて実測された

図5 剛体ばねモデル解析のフローチャート

値を用い⁶⁾、その値を体重比で換算し、ヒトの下顎頭に加わる力の大きさとした(表4)。

(2) 解析方法

前項の設定で求めた下顎頭の荷重点に荷重を負荷した。ついで、関節内の下顎頭位を仮定して、各ばね要素における応力を求め、それらの合力の大きさが下顎頭に加わる荷重と等しくなる下顎頭位を探索するために、繰り返し演算処理を行った。また、その下顎頭位において、各ばねに加わる力を計算し、圧力分布を算出した(図5)。

2. 模型実験

顎関節模型内に作用する咬合状態の違いによる影響を、圧力センサを用いて測定した¹⁸⁾。

1) 圧力センサ

この圧力センサは、圧力変換素子に感圧導電ゴムを用い、その上下面にそれぞれ導出電極を直交するように配置し、さらにその上下両面を極薄ゴムシートにて被覆した構造を有するものである。導出電極としてのワイヤーは、コイル状に本研究用に特に加工したもので、伸縮性があり、また、圧力センサ全体としても伸縮性を有するものであ

図6 圧力センサの構造

る(図6)。

2) 実験装置

ヒト乾燥頭蓋標本より陰型を印象採得し、上下顎歯列弓、下顎骨、側頭骨下顎窩の模型を硬石膏にて作成した。ついで、各部が解剖学的に正しい位置となるように再構築した。圧力センサは、シリコンゴムにて作成した関節円板と下顎頭との間に挿入した(図7)。実験に際しては、下顎骨にワイヤーを介して、重錘による咬合力相当の荷重を加え、顎関節に加わる圧力を測定した。

3) 実験方法

咬合状態を以下のように変化させ、顎関節の圧力分布の変化を調べた。

(1) 上顎前歯歯軸の変化

上顎模型に適合する斜面板を作成し、上顎前歯の舌側面を 15° ずつ3段階に傾斜させ、下顎前歯との接触状態を変化させた。

(2) 咬合支持点の変化

咬合支持点を下顎切歯部、犬歯部、第一大臼歯部と順次移動させた。この際、咬合支持点にはレジンにより作成したピボットを置き、左右両側にて均等に接触するようにした。

Ⅲ. 結 果

1. 理論的解析

1) 剛体静力学的解析

(1) 上顎前歯歯軸の変化

上顎前歯部歯軸と下顎頭に加わる力との関係を図8に示す。図8-(a)、(b)の横軸は上顎前歯歯軸の角度 θ_1 を、図8-(a)の縦軸は下顎頭に加わる力の方向 θ_0 を、また図8-(b)の縦軸は下顎頭に加わ

図7 模型実験装置

図8 前歯部歯軸の変化と顎関節力との関係

る力の大きさ F_c を示している。

図より、 θ_1 が小さくなるほど、すなわち上顎前歯歯軸が舌側に傾斜するほど、下顎頭に加わる力の角度 θ_c は大きくなり、かつ大きさ F_c も大きくなった。また、その変化は直線的ではなく、歯軸が傾斜するほど増加の割合は大きくなった。

(2) 咬合支持点の変化

図9に咬合支持点の変化と下顎頭に加わる力との関係を示す。図9-(a)、(b)の横軸は下顎切歯から咬合支持点までの距離 x を、図9-(a)の縦軸は下顎頭に加わる力の方向 θ_c 、また図9-(b)の縦軸は下顎頭に加わる力の大きさ F_c を示している。

図より、 x が小さくなるほど、すなわち咬合支持点が近心に移動し、切歯に近づくほど、下顎頭に加わる力の角度 θ_c は大きくなったが、大きさ F_c は逆に小さくなった。しかし、その変化の度

合いは前歯部歯軸の変化における F_c 、 θ_c に比べて小さかった。

2) 剛体ばねモデル解析

(1) 変位角

図10に下顎頭に加わる力の方向(荷重方向) θ_1 と下顎頭の変位角 θ 、および移動距離 d との関係を示す。図10-(a)の横軸は、下顎頭に加わる力の方向 θ_1 を、縦軸は下顎頭の変位角 θ を表している。

$\theta_1 = 0^\circ$ ではほぼ $\theta = 0^\circ$ であるが、 θ_1 の絶対値が大きくなるとともに θ の絶対値も大きくなった。すなわち、下顎頭に対する荷重方向が関節円板中央狭窄部に対して垂直な方向から離れるにつれて、変位角 θ は大きくなった。

これは、下顎頭に対する荷重方向が関節円板中央狭窄部に対して垂直である時には下顎頭はほぼ荷重方向に変位するが、垂直方向から離れるにつ

図9 咬合支持点と顎関節力との関係

図10 顎関節力の方向と下顎頭の変位角および移動距離との関係

れて、下顎頭が大きく変位することを示す。

また、 $\theta_1 = 35^\circ$ 付近を境に変位角 θ の変化の傾向は逆転し、変位角の絶対値は小さくなった。

(2) 移動距離

図10-(b)の横軸は、下顎頭に加わる力の方向(荷重方向) θ_1 を、縦軸は下顎頭の移動距離 d を表している。下顎頭に対する荷重方向が変化することにより、同一の荷重に対しても、下顎頭の変位距離には相違がみられた。 $\theta_1 = 0^\circ$ すなわち下顎頭に対する荷重方向が関節円板中央狭窄部に対して垂直な時に、移動距離は 0.20 mm と最も小さかった。また、 $\theta_1 = 0^\circ$ を中心に荷重方向 θ_1 の絶対値が大きくなるほどこの値は大きくなった。また、この変位傾向は直線的ではなく、荷重方向が $\theta_1 =$

0° から離れるほど増加の割合は大きくなった。

また、ほぼ $\theta_1 > 45^\circ$ の範囲では靱帯に引張力が発生し、この値はほぼ一定であった。

(3) 圧力分布

図 18-(a) に下顎頭に加わる力の方向と圧力分布の関係を示す。すなわち、荷重方向 θ_1 が -15° (前方への荷重)、 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° とした時の、関節円板および靱帯に加わる圧力、下顎頭の移動方向および移動距離を表している。これによると $\theta_1 = 0^\circ$ の時に関節円板に加わる圧力はほぼ関節円板中央狭窄部付近に集中し、前方肥厚部、後方肥厚部には弱い力が均等に加わっていた。 $\theta_1 = -15^\circ$ の時に前方肥厚部に加わる圧力は増大した。 $\theta_1 = 30^\circ$ の時、後方肥厚部に加わる圧

図11 模型実験の結果（前歯部歯軸の変化）

図12 模型実験の結果（咬合支持点の変化）

力は中央狭窄部に加わる圧力とほぼ同等となり、また外側靱帯には引張力が認められた。 $\theta_1=45^\circ$ では、後方肥厚部に加わる力はさらに増大し、下顎頭の移動距離は大きくなった。 $\theta_1=60^\circ$ では、下顎頭の変位方向、移動距離および圧力分布は $\theta_1=45^\circ$ の場合と大きな変化はなかった。

2. 模型実験

圧力センサの64点の測定点で、ほぼ下顎頭全域を覆っている。また、圧力センサの中央部はほぼ下顎頭の頭頂部に対応している。出力結果を図11, 12に示す。各格子点の一つの測定点を表しており、圧力の大きさを高さとして示している。

1) 前歯部歯軸の変化

下顎頭と関節円板とは下顎頭の前後面全体で接触しているが、 $\theta_1=0^\circ$ において圧力は主に下顎頭前方斜面に加わっていた。

また、上顎前歯部舌側面が 15° , 30° と大きくなるにつれて、最大圧力の負荷位置は下顎頭前壁から下顎頭頭頂部に移行し、かつその大きさも大きくなった（図11）。

2) 咬合支持点の変化

咬合支持点が下顎切歯、犬歯、第一大臼歯の位置と変位した時に、圧力の大きさにはあまり差がみられず、圧力は主に下顎頭前壁に加わっていた（図12）。

IV. 考 察

1. 剛体ばねモデル解析

本研究で用いた剛体ばねモデル解析は、従来の力学解析モデルに比して、解析対象物の特性を有効に反映する手法であり、特に、本項においてその特色と適用に際しての考慮点について若干の考察を加えることとする。

1) 剛体ばねモデル

剛体ばねモデル (Rigid-Body-Spring-Model, RBSM)¹⁹⁾ は本来、工学領域で接触問題を解析するために用いられてきた手法である。このモデルは、任意形状の剛体が互いにある接触境界面上に分布したばねによって連結され、荷重を受け互いに接触しながら釣合っているモデルである。このようなモデルでは、要素の変位はその重心の変位だけで表現でき、接触問題の本質である境界面上の滑りの表現が可能となっている。従来のいわゆる有限要素法ではこの種の滑りの表現が難しいとされてきたが、この剛体ばねモデルは、この滑りを考慮に入れたモデルであるため、接触問題の解析に適しているといわれている。ここで、剛体要素を骨、ばね要素を軟骨と置き換えてみると、剛体ばねモデルはまさに関節モデルと考えることができることから、整形外科領域で関節の挙動を解析する手法として用いられるようになってきた^{20~24)}。この手法では、剛体要素間の各ばねのばね定数を任意に変化させる、すなわち、軟骨等の物性値を任意に変化させることが可能であることから、軟骨等の変性を表現することができるとされている。また、ばね自体の性質も圧縮力には抵抗するが引張力に抵抗しないもの、引張力にのみ抵抗するもの、また剪断力に抵抗するものなど自由に設定することが可能であるという特色を有する。

以上のことから、種々の条件下における関節の挙動を解析するうえで、本手法は非常に簡便で有用な手法であると思われる。

2) ばね要素の設定

周囲軟組織に対して、ばね要素の設定を行った

が、その解剖学的背景について考察を加える。関節円板は線維性軟骨により形成され、圧縮荷重に対して、荷重の分配能や衝撃吸収能を有しているといわれている²⁵⁾。関節円板から連なる線維束は、下顎頭の内外側に付着し、円板と下顎頭との位置関係を規定しているが下顎頭の動きを規制する能力は有していない²⁶⁾。また、その外側は幾重にも線維層が取り巻いており、その最外側の線維層は外側靱帯と呼ばれている²⁷⁾。この外側靱帯は頰骨突起と下顎頭外側後縁との間を結んでおり、関節包の補強とともに、下顎頭の運動を制限している。しかしながら、その解剖学的な性質および位置関係から、下顎頭の圧縮方向への動きおよび後上方への動きは制限できないと考えられる^{27, 28)}。靱帯には他に副靱帯として、蝶下顎靱帯と茎突下顎靱帯が存在する。蝶下顎靱帯は下顎骨の開閉運動の際の回転軸になると考えられている。また、茎突下顎靱帯は、茎状突起から下前方に向かう靱帯で通常は弛緩しており、下顎の突出時のみに緊張するとされているが、この両者とも下顎の運動への寄与は小さいものと考えられる¹⁷⁾。関節円板の後方部には二重層といわれる疎な結合組織が存在している。この二重層は関節円板より起こる上層と下顎頭から起こる下層により構成されている。上層の線維は弾性線維を有し、開口の際に前方に転位した円板を後方に引き戻す役割を果たし、下層は円板と下顎頭との位置関係を規定していると考えられる²⁹⁾。さらに、下顎頭の後退時にはこの二重層の偽性海綿状静脈叢が膨張し緩衝的役割を演じるとされているが、下顎頭の運動を制限するほど積極的な役割はないといわれている³⁰⁾。

そこで、関節周囲構造物が下顎頭の動きを規定する能力を評価するために関節軟骨、関節円板には圧縮力には抵抗するが引張力には抵抗しないばね要素を、外側靱帯、蝶下顎靱帯には、引張力には抵抗するが圧縮力には抵抗しないばね要素を、また茎突下顎靱帯、関節包、二重層には圧縮力にも、引張力にも抵抗しないばね要素を配した。このようにばね要素の配置を行うことにより、下顎

頭の動きが関節周囲構造物により影響を受けている様相を比較的正確に表現できたものと思われる。

2. 顎関節に作用する因子

1) 顎関節外の因子

(1) 筋力

本研究における筋力の方向および大きさの設定方法は以下のようにした。筋力の方向を推定する方法としてはこれまでに筋力の方向が筋束の重心を通るとするものと、筋の起始、停止を結んだ直線を筋力の方向とするものがあった。この両者を比較すると各筋の部分における方向を評価する目的では前者が適しているが、全体的な方向を評価する目的では両者にあまり差がないといわれている³¹⁾。本研究では、咬みしめ時を想定しており、各筋力の全体としての作用方向のみが問題となることから、その起始、停止を結んだ直線をその筋の作用方向とした。また筋力の大きさは、咬みしめ時に、筋の出力が最大であると仮定し、筋の断面積に比例するものとした。

そして、剛体静力学的解析では、剛体である下顎骨に対しこの筋力が作用し、顎関節部と咬合部とでその筋力を支持し、下顎骨が静止している状態を設定した。さらに、その設定のもとに咬合を変化させ、下顎頭に加わる力の変化を観察した。そこで、咬合状態を一定とし、筋力を変化させるという設定においても下顎頭に加わる力が影響を受けることが考えられることから、以下のように各咀嚼筋の方向を変化させ、下顎頭に加わる力に及ぼす影響を調べた。

上顎前歯を舌側に傾斜させる過程において、上顎前歯歯軸を文献¹⁵⁾よりほぼ平均値である 110° に固定し、咬筋、側頭筋前部、側頭筋後部の筋力の方向を標準偏差の2倍の範囲で変化させた。その結果、下顎頭に加わる力の方向は、咬筋で 6.7° 、側頭筋前部で 13.6° 、側頭筋後部で 2.6° と変化し、側頭筋前部の影響を最も受けていた。また、下顎頭に加わる力の大きさについては、咬筋が有意に関与していた(図13, 14)。

この結果を臨牀的に解釈すると、咬筋、側頭筋

図13 筋力の変化が顎関節力の方向に与える影響

図14 筋力の変化が顎関節力の大きさに与える影響

前部に異常筋緊張が起こり、筋力の方角や大きさに変化が生じると、顎関節に対して異常負荷が加わりやすく、顎関節に影響を及ぼすと考えられる。

咬筋、側頭筋前部は他の咀嚼筋に比べて筋紡錘の数が多く³²⁾、また圧痛点数も多い³³⁾ことから、筋緊張を起こしやすい筋であると解剖学的に解釈できる。そこで、咬合異常やそれに伴う下顎変位、また精神的ストレス等によって^{34, 35)}、筋に異常な刺激が加わると、咀嚼筋のうち筋緊張高進を起こしやすい咬筋、側頭筋前部が影響を受け、下顎頭に加わる力が変化し、顎関節に対して悪影響を及ぼすと推定できる。すなわち、顎関節は咀嚼筋のなかでも咬筋や側頭筋前部の影響を受けや

すく、またこれらの筋は特に筋緊張を起こしやすい筋と考えることができることから、咀嚼筋に対して刺激が加わると下顎頭に加わる力は影響を受けやすいと考えられる。

また、このように下顎頭に加わる力は変化しやすく、方向が後方に向く状況が存在することが示されたが、顎関節の後方部の軟組織は前述のように、内腔の大きな静脈が多く存在し、海綿静脈洞に類似した構造を有している。この海綿静脈洞は血液が静脈洞に滞留することによって下顎頭が後方に押された際に、緩衝装置として働くと考えられているが積極的役割はないと考えられる³⁰⁾。すなわち、下顎頭に加わる力が後方を向くと本来圧力に対して抗しうる能力をもたない二重層を圧迫する

ことになる。二重層には、痛みの主な受容器である自由神経終末が多く分布しており、この部位に急性あるいは慢性的に機械的圧迫が加えられると、この刺激により、炎症や浮腫が起こり、それにより産生された発痛物質が自由神経終末を刺激して、顎関節に痛みを生じるものと思われる³⁶⁾。

(2) 咬 合

咬合の変化が顎関節に影響を与えることは種々の報告により示されている^{37~42)}。顎関節症の原因のなかでも咬合異常が発症原因に占める割合は特に大きいと考えられている¹³⁾。また、矯正治療等により咬合の再編成を行う過程でこの臨床症状の改善をみた例も報告されていることから⁴³⁾、咬合が顎関節に対して大きな影響を及ぼしていることが示唆される。

そこで、咬合状態の違いにより顎関節はどのような影響を受けているかが問題となる。従来の研究において、咬頭嵌合位の位置で左右の小臼歯、大臼歯部が咬合を支持し、咬合状態が安定していると思われる状態では、顎関節にはあまり過大な力は加わらず、この安定状態が崩れた時にはじめて顎関節の力学環境が変化し、顎関節に影響を及ぼすと報告されている⁴⁴⁾。咬合が不安定な状態とは、咬合の接触面積が咬頭嵌合位に比して小さい状態と考えることができるが、本研究において、点接触状態である嵌合支持点の変化しても、下顎頭に対して加わる力はあまり影響を受けないことが示されたことから、咬合が点接触状態であっても両側性に支持されている場合には、下顎頭はあまり影響を受けないものと思われる。そこで、今後、この安定状態を崩す要因を考えるためには、片側性の咬合支持等の条件設定を行う必要があるものと思われる。

また、上顎前歯歯軸が過度に舌側に傾斜した状態で下顎頭に加わる力は影響を受けることが示されたが、文献的に上顎前歯が舌側に傾斜し、上顎前歯の舌側面に誘導されて下顎が後方に導かれる症例において有意に顎関節に症状がみられる例が多いという報告があり⁴⁵⁾、本研究の結果と臨床的に一致している。

図15 急傾斜形態のX線断層撮影像

2) 顎関節内の因子

関節の動きは以下の事項によって規定されている⁴⁶⁾。

- (i) 関節面の形態
- (ii) 関節包や靭帯等の関節周囲構造物のもっている制御力
- (iii) 関節内圧

すなわち、関節は二つの相対する骨で形成され、これらの骨面は軟骨におおわれ、さらにその外側は滑液を含む関節包に包まれた構造を有しており、腱を介して筋により動かされている。そこで、関節の動きを規定していると思われる要因のうち、顎関節内の因子として、形態の変化、また関節周囲構造物の変化について考察を加えた。

(1) 関節面の形態

文献的に関節結節後方斜面の傾斜角が急角度である症例に、顎関節症状として関節円板の転位を起こしやすいという報告がある⁴⁷⁾。そこで、断層X線撮影像より関節結節後方斜面の傾斜が急角度であると思われる症例(35歳、女性)(図15)について、関節結節後方斜面の傾斜角がほぼ正常と思われる形態と比較し、関節円板および靭帯に加わる力の間に、どのような相違がみられるかを剛体ばねモデル解析にて検討を試みた(図16, 18-(a), (b))。この症例の患者は臨床症状として右顎関節にクリック音および疼痛を有し、また開口障害を伴うことから種々の検査を行い、復位を伴う関節円板の前方転位と診断されたものである。

図16 顎関節力の方向と下顎頭の変位角および移動距離との関係
(正常形態と急傾斜形態の比較)

その結果、下顎頭に加わる力の方向（荷重方向） θ_1 と下顎頭の変位角 θ の関係を示す図16(a)において、正常形態に対し急傾斜形態における曲線が全体的に左側に変移する様子がみられた。すなわち、同一の荷重方向に対して、急傾斜形態においては、下顎頭の変位方向が後方を向く傾向が示された。また、下顎頭の移動距離に関しても同様の傾向がみられるが、急傾斜形態の値は正常形態に比較して、全体的に小さかった。

(2) 関節周囲構造物の変化

本研究では、関節円板に対し、正常と思われる力学特性を与え、顎関節の挙動を調べた。そこで、関節円板の力学特性を変化させることにより、顎関節が受ける影響について剛体ばねモデル解析により検討した。

文献的に関節円板は形態変化を起こしやすいといわれている⁴⁸⁻⁵¹⁾。和嶋らはこの変化を表5のように4型に分類している⁵²⁾。そして、この分類のうち、E型、P型の発生頻度が高いと述べていることから、剛体ばねモデル解析において関節円板にE型、P型の形態変化に対応して、要素のばね特性を設定し、正常形態とE型、P型とを比較し関節円板および靱帯に加わる力の間にどのような相違がみられるかを検討した。組織の力学特性には変化はないものとし、E型では、後方肥厚部の厚みの30%増加、またR型では前方肥厚部と後方肥厚部の厚みの30%減少に対応するようにはばね要

表5 関節円板の形態変化（一部改編）⁵²⁾

type	形 態	発生率 (%)
E type	enlargement of posterior band	31.7
R type	reverse	5.0
P type	biplanar	21.6
V type	biconvex	0
変形(一)	no change	41.7

E type : biconcave であるが、posterior band が厚くなり上下面は convex となっている

R type : 円板は biconcave であるが、anterior band が posterior band より厚い

P type : 上下面が平面上になっている

V type : 中央が最も厚く、一塊状になっている

素のばね定数を設定した(図17, 18-(a), (c), (d))。

その結果、下顎頭への荷重方向と下顎頭の変位角を示す図17-(a)において、正常形態に対してE型では全体的に左側に、またP型では $\theta_1 > 0$ の時に全体的に右側に変移する様子がみられた。また、P型においては、 $\theta_1 > 0$ の範囲で荷重方向と変位方向との差は小さくなり、関節円板に対して、位置的に安定させる力となっていた。また、移動距離に関しては荷重方向が $\theta_1 = 0$ を越えて大きくなると、正常形態に比してE型では大きく、P型では小さくなる傾向が示された。

3. 今後の応用

顎関節の病的状態として、顎関節症と呼ばれる

図17 顎関節力の方向と下顎頭の変位角および移動距離との関係
(関節円板の力学特性を変えた場合)

疾患が存在する。しかし、この疾患の原因は一つではなく多岐にわたるとされている。すなわち、筋の機能障害による MPD 症候群^{53,54)}や関節円板の位置異常に起因する顎関節内症⁵⁵⁾等、顎関節症はそのなかにさまざまな病態を包括する症候群と考えることができる。このように複雑な病態を把握するために日本顎関節学会は顎関節症の分類を発表した⁵⁶⁾。これは顎関節症を病態により分類したもので全部で5種類に分かれている。そして、この分類をさらにその原因により整理すると、顎関節内の因子（関節円板、靱帯、関節包、下顎窩、下顎頭の形態等）、顎関節外の因子（筋力等）さらに精神的因子に分けることができる。本研究における理論的解析モデル、すなわち、剛体静力学的解析および剛体ばねモデル解析はこのなかでも顎関節内因子および顎関節外因子について検討を加えることのできる手法であり非常に有効なものである。

顎関節は三次元的に複雑な形態を有する関節であり、また左右の顎関節は下顎骨体により結合され、互いにその運動を規制し合う複関節であるという構造的特徴を有している。そこで、左右の顎関節の形態に差異があったり、左右の筋力の協調性が崩れると、左右の顎関節に加わる力は容易に変化しうることが考えられる。つまり、顎関節の力学環境を詳しく捉えるためには、今後、この解

析系を現状の二次元モデルから三次元モデルに拡張する必要がある。

今回は模型実験を基に咬合状態の違いが顎関節に与える影響を三次元的傾向として捉えたところ、理論解析における結果の傾向とほぼ一致した。そこで、今後、顎関節に作用する関節内、外の因子について検討することのできるこの理論解析を三次元的に拡張することにより顎関節に加わる力をさらに生体に近いかたちで把握できるものと思われる。

また、本研究では咬みしめ時を想定しており、下顎骨の動きや関節円板の動きを考慮していなかったが、顎関節内障の原因である関節円板の転位は主として下顎の開閉口運動時に起こる現象であると思われることから、この理論解析系に関節円板の動きなどの運動要素を加えることにより、より臨床的な解釈が可能になるものと思われる。

V. 結 論

咬合状態の違い（上顎前歯歯軸の変化、咬合支持点の変化）が顎関節に与える力学的影響を解析することを目的として、理論解析（剛体静力学解析、剛体ばねモデル解析）および模型実験を行い、以下の結論を得た。

剛体静力学的解析より

1) 上顎前歯歯軸が過度に舌側に傾斜すると、

図18 顎関節力の方向と圧力分布の関係

下顎頭に加わる力は変化した。すなわち、下顎頭が後方に誘導されるように力の方向が変化し、かつその大きさも大きくなった。

2) 咬合支持点が近遠心的に変化しても、顎関節に加わる力は 1) と比べてほとんど影響を受け

なかった。

剛体ばねモデル解析より

3) 下顎頭に加わる力が関節円板中央狭窄部に対して垂直に作用する時には、下顎頭はほぼ荷重方向に移動し、かつその移動距離も最小であっ

た。さらに、垂直方向から離れるにつれて、下顎頭は荷重方向から変位する傾向を示し、かつその移動距離も大きくなる傾向を示した。しかし、これらの傾向は一定ではなく、関節周囲構造物の力学特性に依存した。

4) 下顎頭に加わる力の方向が変化することにより、関節円板に加わる圧力分布および靱帯に働く引張力は影響を受けた。すなわち、下顎頭に対する荷重方向が関節円板中央狭窄部に垂直に作用する方向から離れるにつれて、圧力は関節円板前方肥厚部、関節円板後方肥厚部に分散し、関節周囲構造物に対する圧力分布が変化した。

5) 3), 4)より下顎頭の移動距離、移動方向および関節円板に加わる圧力は関節の形態や関節周囲構造物の力学特性により、大きく影響を受けた。

模型実験より

6) 上顎前歯歯軸を変化させる過程で、下顎頭に加わる圧力の最大値は、ほぼ下顎頭前方斜面に加わっていたが、上顎前歯歯軸が舌側に傾斜するほど、圧力の最大値は頭頂部に移行した。

7) 咬合支持点が近遠心的に変化しても、圧力分布に大きな変化はみられなかった。

謝 辞

稿を終えるにあたり、ご懇篤なご指導とご校閲の労をとられた東京医科歯科大学歯学部歯科矯正学第1講座、相馬邦道教授に深甚なる謝意を捧げます。

工学的立場からご指導ならびにご校閲の労をとられた東京医科歯科大学医用器材研究所精密機械部門、宮入裕夫教授に深く感謝いたします。

また、直接、懇切なるご教示、ご助言を賜りました本学医用器材研究所精密機械部門、高久田和夫助教授に心から感謝の意を表します。さらに、多くのご助言をいただきました本学歯科矯正学第1講座、石田哲也助手に厚くお礼申し上げます。

さらに、本研究に際し、ご援助、ご協力をいただきました歯科矯正学教室の諸先生、医用器材研究所精密機械部門の皆様にも厚くお礼申し上げます。

本論文の一部は第31回日本 ME 学会大会(平成4年5月、東京)において発表した。

文 献

- 1) Scheman, P.: The condyle fossa relationship: A new look at the anatomy of the human TMJ. NY-State Dent. J. 53: 25-29, 1987.
- 2) 間宮 信, 岩淵 通, 高橋和人: 関節円板の血管構築と微細血管の超微細構造について, 第1報/成犬の関節円板について. 神奈川歯学 16: 218-226, 1981.
- 3) Dempster, D. W., Feruguson-Pell, M. W., Mellish, R. W. E., Feb, C., Parisien, M. V., Horbert, W. and Cochran, G. V. B.: Relationships among cancellous bone structure and strength in the iliac crest and the lumbar spine. J. Bone miner. Res. 4 (suppl 1): s 191, 1989.
- 4) Hylander, W. L. and Bays, R.: An in vivo strain-gauge analysis of the squamosal-dentary joint reaction force during mastication and incisal biting in the *Macaca mulata* and *Macaca fascicularis*. Arch. Oral Biol. 24: 689-697, 1979.
- 5) Hylander, W. L.: An experimental analysis of temporomandibular joint reaction force in Macaque. Am. J. Phys. Anthropol. 51: 433-456, 1979.
- 6) Boyd, R. L., Gibbs, C. H., Mahan, P. E., Richmond, A. F. and Laskin, J. L.: Temporomandibular joint forces measured at the condyle of *Macaca arctoides*. Am. J. Orthod. 97(6): 472-479, 1990.
- 7) Hatcher, D. C., Faulkner, M. G. and Hay, A.: Development of mechanical and mathematical models to study temporomandibular joint loading. J. Prosthet. Dent. 55 (3): 377-384, 1986.
- 8) Pruim, G. J., De Jongh, H. J. and Ten Bosch, J. J.: Forces acting on the mandible during bilateral static bite at different bite force levels. J. Biomech 13: 755-763, 1980.
- 9) Van Eijden, T. M. G. J., Klok, E. M., Weijers, W. A. and Koolstra, J. H.: Mechanical capabilities of the human jaw muscles studied with a mathematical model. Arch. Oral Biol. 33(11): 819-826, 1988.
- 10) Barager, F. A. and Osborn, J. W.: A model relating patterns of human jaw movement to biomechanical constraints. J. Biomech 17(10): 757-767, 1984.
- 11) Barager, F. A. and Osborn, J. W.: Efficiency as a predictor of human jaw design in the sagittal plane. J. Biomech 20(5):

- 447-457, 1987.
- 12) Osborn, J. W. and Baragar, F. A. : Predicted pattern of human muscle activity during clenching derived from a computer assisted model : symmetric vertical bite forces. *J. Biomech* 18(8) : 599-612, 1985.
 - 13) 小林義典 : 顎関節症の病因における咬合の役割. 藍 稔, 他編, 顎関節症の診断と治療, 咬合からのアプローチ. 東京, 1985, 医歯薬出版, 7-32.
 - 14) Kawai, T. : A new element in discrets analysis of plane strain phoflens. *Seisan Kenkyu* 29 : 204-207, 1977.
 - 15) 飯塚哲夫, 石川富士郎 : 頸部X線規格写真による症例分析法の基準値について—日本人成人男女正常咬合群—. *日矯歯誌* 16(1) : 4-12, 1957.
 - 16) Mabuchi, K., Hayatsu, K., Fujie, H. and Yamamoto, M. : Stiffness of canine stifle joint ligaments at relatively high rates of elongation. *J. Biomech Eng* 113 : 404-409, 1991.
 - 17) 上條雍彦 : 口腔解剖学 2. 筋学. 東京, 1966, アナトーム社, 付9-28.
 - 18) 篠崎直樹, 高久田和夫, 宮入裕夫, 相馬邦道 : 感圧導電ゴムを用いた圧力センサーの顎関節模型への適用. *歯材器* 11(6) : 1019-1022, 1992.
 - 19) 川井忠彦 : 科学技術計算と計算機シミュレーション, 生産研究 37(12) : 515-523, 1985.
 - 20) An, K. N., Himeno, S., Tsumura, H., Kawai, T. and Chao, E. Y. S. : Pressure distribution on articular surfaces : application to joint stability evaluation. *J. Biomech* 23(10) : 1013-1020, 1990.
 - 21) 大根田 豊, 増原健二, 高倉義典, 玉井 昭, 山下正道, 海野正登, 奥村元昭 : 三次元剛体バネモデルによる足関節の応力分布について. *整形外科バイオメカニクス* 6 : 315-319, 1984.
 - 22) 大根田 豊, 尾崎二郎 : 剛体バネモデルによる肘関節の応力解析. *整形外科バイオメカニクス* 12 : 115-117, 1990.
 - 23) 井手隆俊, 山本泰宏, 立木 繁, 赤松巧也 : 中手指節関節における荷重実験と computer simulation. *整形外科バイオメカニクス* 12 : 119-131, 1990.
 - 24) 姫野信吉, 西尾篤人, 川井忠彦, 竹内則雄 : 股関節の求心性と接触圧分布について—第1報 : 小児股関節をめぐって—. *臨整外* 16(9) : 835-845, 1981.
 - 25) Walliams, P. L., Warwick, R., Dyson, M., Bannister, L. eds. : *Grays Anatomy*. 37ed., Edinburgh, 1989, Churchill Livingstone, 459-544.
 - 26) Rees, L. A. : The structure and function of the mandibular joint. *Br. Dent. J.* 96 : 125-133, 1954.
 - 27) 黒川悦郎 : 顎関節外側靱帯についての組織学的観察. *口病誌* 53(2) : 508-535, 1986.
 - 28) 大村欣章 : 顎関節外側壁の線維構成に関する組織学的観察. *口病誌* 51(3) : 465-492, 1984.
 - 29) 木野孔司, 大西正俊, 塩田重利, 一條 尚 : 顎関節の内腔壁表面形態についての観察—上関節腔の関節鏡所見に対応した組織学的検討—. *日口外誌* 27(10) : 1379-1389, 1981.
 - 30) Zenker, W. : Das retroarticulare plastische Polster des Kiefergelenkes und seine mechanische Bedeutung. *Z. Anat. Entwickl.-Gesch.* 119 : 375-389, 1956.
 - 31) Jensen, R. H. and Davy, D. T. : An investigation of muscle lines of action about the hip : A centroid line approach vs the straight line approach. *J. Biomech* 8 : 103-110, 1975.
 - 32) Kubota, K. and Masegi, T. : Muscle spindle supply to the human jaw muscle. *J. Dent. Res.* 56 : 901-909, 1977.
 - 33) 石橋克禮 : 筋, 筋膜疼痛機能障害症候群と顎関節内症—その機能異常の様相について—. *日口外誌* 33 : 1071-1078, 1987.
 - 34) Banasik, P. M. and Laskin, D. M. : Production of masticatory muscle spasm and secondary tooth movement : An experimental model for MPD syndrome. *J. Oral Surg.* 30 : 941-948, 1972.
 - 35) Watt, D. M. : Recording the sounds of tooth contact ; A diagnostic technique for evaluation of occlusal disturbances. *Int. Dent. J.* 19 : 221-238, 1969.
 - 36) 石橋克禮 : 顎関節部痛. *歯科ジャーナル* 18 : 858-860, 1983.
 - 37) 大西正俊 : 顎関節異常—下顎頭形態の変化と適応についての検索. *日歯医師会誌* 41 : 27-34, 1988.
 - 38) Solberg, W. K., Bibb, C. A., Nordström, B. B. and Hansson, T. L. : Malocclusion associated with temporomandibular joint changes in young adults at autopsy. *Am. J. Orthod.* 89 : 326-330, 1986.
 - 39) 佐藤博信 : 補綴処置前後の断層X線写真でみた顎関節の骨異常像. *顎関節研究会誌* 第7回総会記事 : 17, 1986.
 - 40) 檜山達郎 : 抜歯による実験的咬合変化が顎関節に及ぼす影響に関する病理組織学的研究. *口病誌* 35 : 598-612, 1968.
 - 41) Furstman, L. : The effect of loss of occlusion upon the mandibular joint. *Am. J.*

- Orthod. 51 : 245-261, 1965.
- 42) Zamma, T. : Adjuvant-induced arthritis in the temporomandibular joint of rats. *Infect & Immun* 39 : 1291, 1983.
 - 43) 三村 博, 大西正俊, 石川 剛, 半田秀穂, 三浦不二夫 : 顎関節症に対する矯正学的検討—関節円板の内方転位を伴った顎関節症の1治験例—. *日顎誌* 1(2) : 94-109, 1989.
 - 44) Körber, K. (田端恒雄他訳) : ケルバーの補綴学, 第I巻, 東京, 1982. クインテッセンス出版, 135-139.
 - 45) Dawson, P. E. : Evaluation, diagnosis, and treatment of occlusal problems. St. Louis, 1989, The C. V. Mosby Co.
 - 46) Cailliet, R. (荻島秀男訳) : 軟部組織の痛みと機能障害 (2nd, ed.). 東京, 1992, 医歯薬出版, 12.
 - 47) Atkinson, W. B. and Bates, R. E. : The effects of the angle of the articular eminence on anterior disk displacement. *J. Prosthet. Dent.* 49(4) : 554-555, 1983.
 - 48) 鈴木 禎 : 各種動物の顎関節円板にみられる軟骨細胞の分布並びに機能的意義について. 3. 実験的咬合異常によって生ずるラット顎関節部の変化, 特に顎関節円板の変化について. *歯科学報* 71 : 1337-1348, 1971.
 - 49) Hansson, T. and Nordström, B. : The thickness of the soft tissue layers and articular disc in temporomandibular joint with deviation in form. *Acta. Odontol. Scand.* 35 : 281-288, 1977.
 - 50) 喜久田利弘, 福田仁一, 山田長敬 : 片側歯牙欠損によるサル顎関節円板の病理組織学的研究. *日口外誌* 29 : 190-199, 1983.
 - 51) Scapino, R. P. : Histopathology associated with malposition of the human temporomandibular joint disk. *Oral Surg.* 55 : 382-397, 1983.
 - 52) 和嶋浩一, 三田雅彦 : 顎関節内障における関節円板の形態変化に関する研究. *日顎誌* 1(1) : 139-150, 1989.
 - 53) Travell, J. G. : Myofascial pain dysfunction-The trigger point manual. Baltimore, 1983, Williams & Wilkins, 1-164.
 - 54) Laskin, D. M. : Etiology of the pain-dysfunction syndrome. *J. Am. Dent. Assoc.* 79 : 147-153, 1969.
 - 55) Farrar, W. B. : Diagnosis and treatment of anterior dislocation of the articular disc. *N. Y. Dent. J.* 41 : 348-351, 1971.
 - 56) 日本顎関節研究会 : 顎関節疾患及び顎関節症の分類案, 第7回顎関節研究会誌 : 135-136, 1987.