

## 頭蓋骨モデルを用いた閉口終末位における顎関節ひずみ

入 江 庸 介   安 村 真 一   長谷川 信 乃  
田 村 康 夫

### Bone Distortion of the Condyle in the Occlusal Phase on a Skull Model.

IRIE YOUSUKE, YASUMURA SHINICHI, HASEGAWA SHINOBU and TAMURA YASUO

本研究は、頭蓋骨モデルを用いて咬合干渉が閉口運動時の関節頭と上顎第一大臼歯の骨表面ひずみに及ぼす影響について検討したものである。

咬合干渉は、下顎第一大臼歯部にメタルインレーを装着することにより付与し、干渉のタイプにより、最大嵌合位から咬合を挙上した垂直型(N型)、下顎骨を近 遠心に偏位させるM、D型、そして下顎骨を頬舌側に偏位させるB、L型の5種類とした。計測項目は、それぞれの咬合干渉と閉口時における骨表面の最大主ひずみと主ひずみ方向を測定した。さらにナソヘキサグラフ<sup>®</sup>を用いて顎運動を記録し、咬合接触前後の下顎の偏位方向と各主ひずみ方向との相関についても検討した。その結果、干渉のないときの下顎頭と上顎第一大臼歯部における最大主ひずみは、開口量が10、15、20mmと増加するにつれて有意に増大したが、主ひずみ方向はほぼ一定であった。N型咬合干渉時での最大主ひずみは、下顎頭内側部で著しく増加し、他の部位では減少した。咬合干渉による下顎偏位と主ひずみ方向との間には、下顎頭内側部と第一大臼歯歯冠部共に、近遠心方向において有意な相関が認められた。

以上のことから、閉口終末位において、咬合関係が安定している場合には、下顎骨が安定した位置にあるが、咬合干渉を与えた場合には下顎骨が不安定な位置となって、干渉側の下顎頭部、上顎第一大臼歯部にかかる最大主ひずみおよび主ひずみ方向が変化し、顎関節部への負荷が変化することが明らかとなった。

キーワード：閉口終末位、閉口運動、顎関節ひずみ、シミュレーション、咬合干渉

*The purpose of this study was to discuss the influences of occlusal stress on distortion of the condyle in the temporomandibular joint (TMJ) and the upper first molar in the occlusal phase.*

*Five types of occlusal interference were prepared with metal inlays on the first molar of the mandible, which were adjusted to raise the bite vertically (N type) and to shift the mandible mesio-distally (M, D type) and bucco-lingually (B, L type). Measurement was simulated in a skull model, and the maximum principal strain (MPS) and principal strain direction (PSD) were measured. Furthermore, jaw movements were recorded just before and after occlusal contact using a Gnathohexagraph<sup>®</sup>, and the relationship between PSD and mandibular shift for each occlusal interference type was evaluated.*

*The MPS of the condyle and the upper first molar significantly increased with an increase of the jaw-opening distance, such as 10, 15, 20 mm, but the PSD of both did not change.*

*When N-type occlusal interference was applied, the MPS was significantly increased on the medial side and decreased in the other parts of the condyle.*

*A significant correlation between PSD and mandibular shift was observed in the X-axis (mesio-distal direction) of both the medial side of the condyle and the first molar crown.*

*In conclusion, it was suggested that the MPS and PSD of both the condyle in the TMJ and the first molar on the interference side were changed and the strain increased due to occlusal interferences.*

Key words: Occlusal phase, Jaw movements, Bone distortion of the condyle, Simulation experiment, Occlusal interferences

## 緒 言

近年、若年者において顎の機能的な異常を訴える者が増加する傾向にあるといわれ、この異常の原因の一つとして、顎関節症が挙げられている。若年者における顎関節症発症は、成長発育による歯列・咬合の変化が関係していることも報告されている<sup>1,2)</sup>。咬合が安定している場合には、閉口終末位において、咀嚼筋群が協調した状態にあり、さらにそのとき上下顎歯列の相対する咬頭と斜面が最大面積で接触している。咬頭が密接に嵌合した状態では、下顎頭は顎関節窩内で安定した位置に保たれ、生理的な負荷がかかり、顎関節部の正常な構造や機能の維持に重要な役割を担っているとされている<sup>3)</sup>。それに対して、早期接触や咬合干渉などの咬合接触の異常が存在する場合には、下顎頭位は不安定となり、顎関節部に非生理的負荷がかかり、下顎骨や下顎頭は変位や変形を来し、関節円板の転位や穿孔が、顎関節異常の誘因の一つになると考えられている<sup>3)</sup>。そのため、咬合時の顎関節部にかかる負荷や、骨表面に生ずる表面ひずみの大きさ、方向について検討することは、顎関節部の正常な構造や機能の維持を考える上で重要である。しかし、直接ヒトの顎関節周囲の負荷や表面ひずみの大きさ、方向を測定することは不可能である<sup>4-16)</sup>。これまでも、頭蓋骨モデルを作製し顎運動時における顎関節部や歯に生じる表面ひずみの分布を測定し、顎関節部に及ぼす影響に関する検討はされてきているものの、いずれも頭蓋骨モデルの構造が複雑な上、顎関節部と歯の表面ひずみについて同時に測定し検討された研究はほとんどない<sup>5-10)</sup>。

そこで本研究は、咬合干渉が閉口運動時の閉口終末位における顎関節部に及ぼす影響について検討することを目的として、顎関節部に生じる骨および歯の表面ひずみについて実験した。

### 材料および方法

#### 1. 測定用頭蓋骨モデルの構築

市販のエポキシレジン製頭蓋骨模型(ニッシン社製、P10-SB.1)を用いてフランクフルト平面が床と平行になるように鉄柱にて固定し、下部には安定を図るために土台を置いた(図1)。

閉口運動を可能にするために、顎閉口筋をシミュレートし、咬筋と側頭筋の左右合計4筋を選択して、その咬筋、側頭筋相当部共に前方と後方の各2か所にエクステンションスプリング(SAMINI社製、SUS304-WPB、以下スプリングと略記)を装着した。頭蓋骨モデルの各咀嚼筋相当の起始部、停止部にばね用ボス

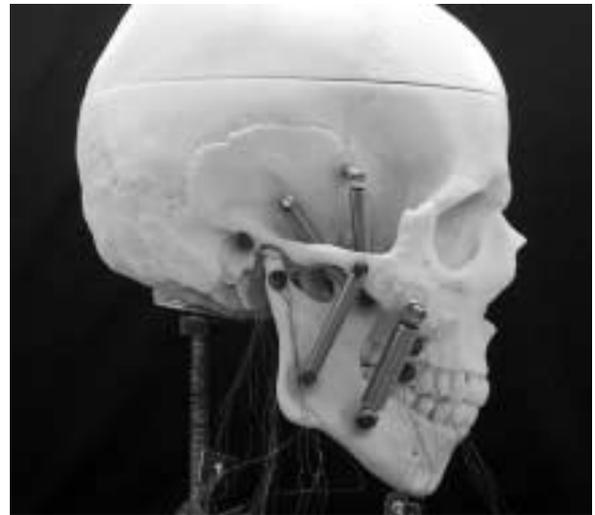


図1：測定用頭蓋骨モデルの構築

ト(SAMINI社製、S45C)を埋め込み、即時重合レジン(GC社製、UNIFAST)にて固定した。スプリングの作用方向は解剖学的所見を基にして、咬筋前方部は頬骨弓下縁から下顎角外面、咬筋後方部は頬骨弓下縁後方から下顎枝、側頭筋前方部は側頭骨側頭窩から下顎枝筋突起、側頭筋後方部相当部は側頭骨側頭窩鱗部から下顎枝筋突起にスプリングを装着した。スプリング張力の強さは、これまでの報告を参考にし、咬筋前方部、咬筋後方部、側頭筋前方部および側頭筋後方部を、各々7.5、10.1、14.2、8.3の比の力に設定した<sup>5-10,14-16)</sup>。

関節円板には、厚さ平均2.0mmに調整した歯科用シリコーン印象材デュプリコーン®(松風社製)を用い、側頭骨下顎窩と下顎頭上方部と関節結節との間に介在させた<sup>17,18)</sup>(図1)。

次に頭蓋骨モデルの咬合関係を検討した。頭蓋骨モデルの咬合調整法および咬合関係の評価方法は、閉口距離を上下顎右側中切歯部切端間距離20mmに設定し、その位置から10回閉口運動を行わせた。閉口方法は、頭蓋骨モデル下部の土台部分に中空用アンカー(八幡ねじ社製、ヨーオレ)を設置し、頭蓋骨モデルのオートガイ棘部にばね用ポストを埋め込み、即時重合レジンにて固定した。両部にスプリングを開口距離20mmになるように固定し、アンカーからばねのフックをはずすことで閉口運動を行わせた。そして、閉口終末位において臼歯部が、左右均等に咬合接触するよう咬合調整を行った。

咬合調整方法は、デンタルプレスケール(富士フィルム社製、50H-Type R、以下プレスケールと略記)<sup>9-23)</sup>と専用分析機 Occluzer®(富士フィルム社製、FPD-703)を用いた。プレスケールを上顎歯列に合わせて固定し

た状態で閉口させ、閉口終末位の咬合状態を採得した。咬合接触させた後のプレスケールは、数時間冷暗所に保管し発色剤の化学反応の安定を図った後、Occluzer<sup>®</sup>にて咬合の重心位置<sup>19-23)</sup>を分析した。咬合接触の評価は、咬合調整前後の咬合接触面積、平均咬合圧および咬合力から、各々の非対称性指数(Asymmetry Index, 以下 A.I.と略記)および変動係数を算出し、咬合の左右的な安定性について確認した。A.I.は、McCarrollら松田ら<sup>24,25)</sup>の方法に準じて、以下の式で求めた。A.I.(%)=(R-L)/(R+L)×100 (R:右側, L:左側)

## 2. 測定用頭蓋骨モデルの各部における表面ひずみの測定

頭蓋骨モデルを用いて、右側下顎頭部および上顎右側第一大臼歯部の閉口終末位における各部の表面ひずみを測定した。本実験におけるブロックダイアグラムを図2に示す。

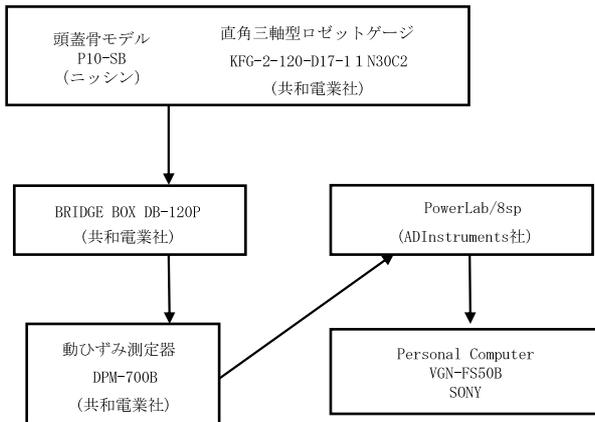


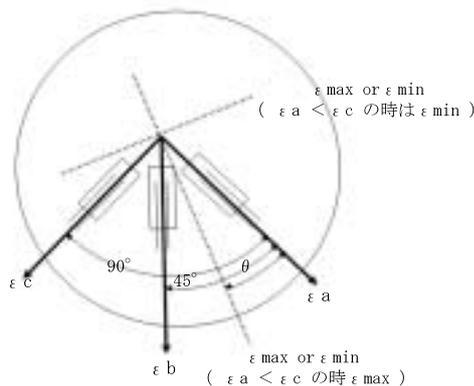
図2: 本実験系におけるブロックダイアグラム

頭蓋骨モデルの右側下顎頭前方部、後方部、外側部、内側部と上顎右側第一大臼歯類側歯冠部および頬側根尖歯槽骨表面部の計6か所に、直角三軸型ロゼットゲージ(共和電業社製, KFG-2-120-D17-11N30C2, 抵抗値120.0±0.8Ω, ゲージ率2.08±1.0%, 以下ひずみゲージと略記)を貼付した。閉口終末位にひずみゲージから得た電気抵抗値を、BRIDGE BOX(共和電業社製, DB-120P)を介して、動ひずみ測定器(共和電業社製, DPM-700B)にてひずみを増幅・整流後、PowerLab/8sp<sup>®</sup>(ADInstruments社)に記録し、パーソナルコンピュータ(SONY社製, VGN-FS50B)上にて解析した。

ひずみゲージは、加えられた力に応じて発生する機械的な微小変化であるひずみを電気信号として検出するものであり、三軸それぞれに信号を受けて、計算式からその部位での表面的な最大主ひずみと主ひずみ方向を算出することが出来る特性を有しているものである<sup>26)</sup>。構成する3つのリニアゲージから得られた値を、それぞれε<sub>a</sub>, ε<sub>b</sub>, ε<sub>c</sub>で表す。ε<sub>a</sub>を基準に得られた値が(+ )の時は時計回りに主ひずみ方向が働いたことを示し、(- )の時は反時計回りに主ひずみ方向が働くことを示す(図3)。

ひずみゲージの貼付位置は、床に対して垂直でかつ下方方向にε<sub>b</sub>がくるように接着剤(共和電業社製, STRAIN GAGE CEMENT, CC-33A)を用いて固定した(図3)。

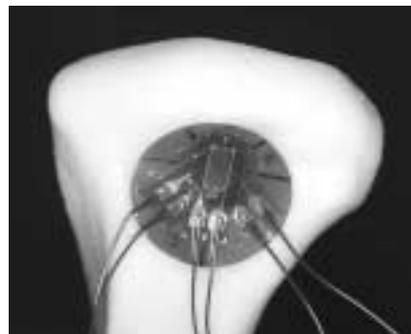
本研究の計測点は、図4に示すように閉口終末位における電圧(V)とした。閉口距離を10, 15, 20mmと設定を変化させ、各閉口距離とも30回閉口運動を行わせ、閉口終末位における最大主ひずみ(ε<sub>max</sub>)および



$$\text{最大主ひずみ: } \varepsilon_{\max} = 1/2 \{ \varepsilon_a + \varepsilon_c + 2\sqrt{((\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2)} \}$$

$$\text{主ひずみの方向: } \theta = 1/2 \tan^{-1} \left( \frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \right)$$

図3: 三軸型ロゼットゲージの構造と算出式および直角三軸型ロゼットゲージ貼付例



直角三軸型ロゼットゲージ貼付例  
(下顎頭前方部)

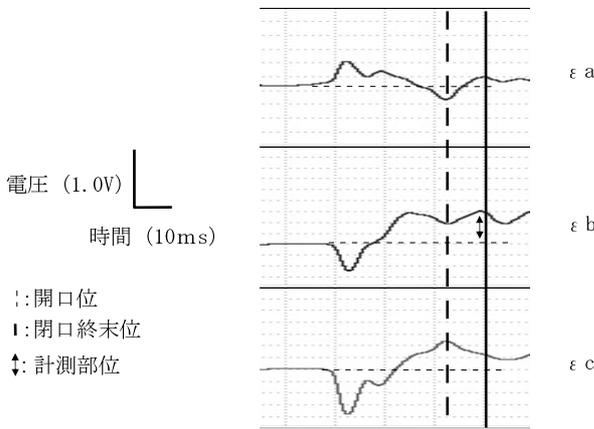


図4：閉口運動時の下顎頭内側部におけるひずみ曲線の一例

主ひずみ方向（角度）の開口距離による違いについて検討した。

統計処理は、開口距離間で分散分析(ANOVA)を行い、その後、開口距離10mm と他の15, 20mm との比較を多重比較検定（Fischer の PLSD）で行った。

### 3. 実験的咬合干渉と表面ひずみ

下顎右側第一大臼歯遠心頬側咬頭頂部に実験的咬合干渉を与え、早期接触時における顎関節部および上顎第一大臼歯部の最大主ひずみと主ひずみ方向について検討した。咬合干渉は以下5種類とした。下顎が咬合接触時に偏位せず、高さのみを上げ咬合干渉を与えた中立型(N型)、下顎が近心方向に偏位する近心型(M型)、遠心方向に偏位する遠心型(D型)、頬側方向に偏位する頬側型(B型)、舌側方向に偏位する舌側型(L型)の5種類である(図5)。咬合干渉の付与には鑄造金属冠を作製した。頭蓋骨モデルの上下顎歯列をアルギン酸印象材(GC社製)にて印象採得し、歯科用超硬質石膏(GC社製、ニューフジロック)にて上

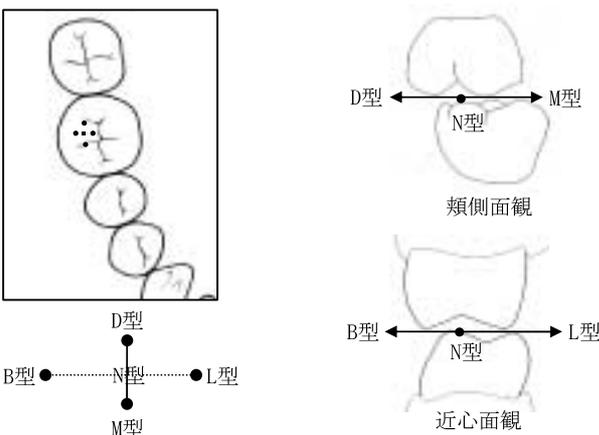


図5：付与した各咬合干渉部位と偏位方向

下顎歯列模型を作製し、VERTICULATOR咬合器(JELENKO社製)に上下顎歯列模型を装着し、厚さ0.35mmのシートワックス(GC社製)を下顎右側第一大臼歯部に圧接した。5つの型の咬合干渉を与えるために、半調節性咬合器デナー・マーク®(Teledyne Hanau社製)に上下顎歯列模型を再装着し、圧接したシートワックスに直径1.0mmのリテンションピース(ERKODENT社製)を、各干渉型の部位にあわせてワックスアップ後埋没した。鑄造金属冠の材料として歯科鑄造用合金(徳力本店社製、GPタイプ)を用い、鑄造後研磨処理を行い、干渉部の高さが1.35mmとなる鑄造金属冠を作製した(図6)。鑄造金属冠を下顎右側第一大臼歯部にハイボンドテンポラリーセメントソフト(松風社製)にて仮着した。

開口距離10mmから各30回閉口運動を行い、右側下顎頭前方部、後方部、外側部、内側部と上顎右側第一大臼歯頬側歯冠部および頬側根尖歯槽骨表面部の最大主ひずみと主ひずみ方向を算出した。

また同時に三次元6自由度顎運動測定装置ナソヘキサグラフ®を用い、咬合接触時の下顎切歯点の動きを測定記録した(図7)。

測定は、頭蓋骨モデルをフランクフルト平面と床が平行になるように固定し、頭蓋骨モデルの頭部にヘッドフレーム、下顎切歯部に専用クラッチにて固定した

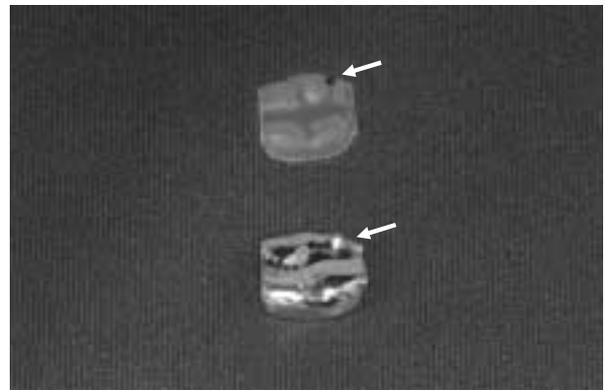


図6：作製した鑄造金属冠  
(上段がワックスアップ時、下段が鑄造研磨後、は干渉部)



図7：ナソヘキサグラフによる下顎切歯点の動きの記録風景

フェイスボウを装着し、上顎に対する下顎切歯点の運動を測定した。その際、基準点を上顎は左側眼窩下縁および左右外耳道上方に、下顎は左右下顎頭の中点、左右下顎第一大臼歯部近心頬側咬頭頂および下顎右側中切歯近心切縁隅角部とした。下顎切歯点の動きは、前後方向において移動軸の前方を(+)とするX軸、左右方向において移動軸の左方を(+)とするY軸、上下方向において移動軸の上方を(+)とするZ軸とし、切歯点の移動距離後の三次元座標値(X, Y, Z)、およびこれらの値から $(U) = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$ の計算式で算出される三次元的移動距離のユークリッド値(U)を算出した。そして、閉口終末位における下顎頭内側部と上顎第一大臼歯冠部の各咬合干渉型における主ひずみ方向と下顎切歯点座標値との相関を検討した。

なお開口距離10mmで得た最大主ひずみと主ひずみ方向の値を本研究のコントロール群(C型)として用いた。それゆえ、咬合干渉時の最大主ひずみの大きさの比較は、C型の最大主ひずみを基準値として、各咬合干渉型の最大主ひずみを%に換算して示した。

統計処理は、同一開口距離間の各干渉型の最大主ひずみと主ひずみ方向については、分散分析(ANOVA)および多重比較検定(FischerのPLSD)を行った。また、各咬合干渉型における主ひずみ方向と下顎切歯点座標値との相関については、単回帰分析を用い評価した。

## 結 果

### 1. 測定用頭蓋骨モデルの構築

図8にプレスケールによる咬合接触状態の比較を示す。本頭蓋骨モデルでは咬合調整前には左側小臼歯部付近に強く接触し、重心は前后的には第二小臼歯部であって、左側に偏位していた。咬合調整後は、左右の咬合接触バランスが安定し、重心は左右的にほぼ中央に、また前后的には第一大臼歯部に位置していた。

咬合接触面積、平均咬合圧、咬合力の各A.I.値および変動係数は共に咬合調整前と比較して、咬合調整後

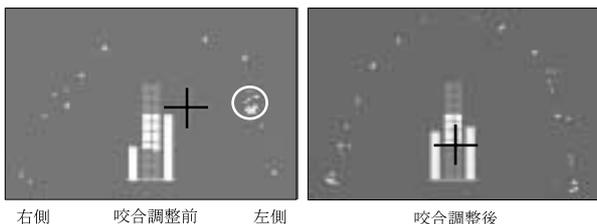


図8：測定用頭蓋骨モデルの咬合調整前後の咬合接触状態の比較

左右咬合圧の割合

- ・標準的咬合バランス(右図)
- ・標準から少しはずれた咬合バランス(左図)
- (○は強い接触を示し、+は重心位置を示す)

(n=10)

		咬合調整前	咬合調整後
咬合接触面積	A. I.	-37.46	-1.19 ***
変動係数		0.28	0.06
平均咬合圧	A. I.	3.42	-3.21
変動係数		0.14	0.08
咬合力	A. I.	-41.81	-5.53 ***
変動係数		0.27	0.15
		A. I. (%)	
		***: p<0.01	

表1：咬合調整前後における非対称性指数(A.I.)と変動係数の比較

の値が有意に小さくなり閉口終末位における咬合の左右バランスが安定し、また試行回数によっても安定していることが確認出来た(表1)。

このことから閉口終末位における咬合接触関係の安定性と再現性は向上し、測定用頭蓋骨モデルを構築することが出来た。

### 2. 測定用頭蓋骨モデルの各部における表面ひずみの測定

各開口距離での最大主ひずみと主ひずみ方向を表2に示す。

下顎頭部における最大主ひずみは、各開口距離とも前方部が一番大きく、次いで外側部、後方部、内側部の順であった。また各部位とも開口距離10mmと比較して20mmでは、最大主ひずみは有意に大きい値を示した。

下顎頭部における主ひずみ方向は、各開口距離とも前方部が内下方向、後方部が外下方向、内側部が後下方向、外側部が前上方向を示した。主ひずみ方向は下顎頭後方を除き有意に変化していた。下顎頭前方部は開口距離の増加に伴い、平均41.3度から35.7度へと、より内方に変化していた。内側部は、平均26.0度から40.4度へと、より下方へ変化していた(表2, 図9)。また外側部は-44.5度から-52.0度へと、より前上方へと変化していた(表2, 図10)。

上顎第一大臼歯頬側歯冠部、頬側根尖歯槽骨表面部の最大主ひずみは、開口距離の増大に伴い、最大主ひずみは大きい値を示した。また主ひずみ方向は上顎第一大臼歯頬側歯冠部が前方向、頬側根尖歯槽骨表面部が下方向を示した。両部位の主ひずみ方向は、ともに開口距離が増大しても、ほぼ同一方向を示した(表2, 図11)。

このことから最大主ひずみの大きさは開口量に伴い増大し、主ひずみ方向は開口量に関係なくほぼ一定であった(図12)。

(n=30)

		最大主ひずみ	主ひずみ方向
開口距離10mm (コントロール)	下顎頭前方部	120.0±12.7	41.3±3.4
	下顎頭後方部	44.6±11.9	-8.8±6.2
	下顎頭外側部	55.5±12.0	-44.5±3.8
	下顎頭内側部	13.1±1.4	26.0±4.9
	大臼歯歯冠部	11.7±3.0	-39.8±9.4
開口距離15mm	下顎頭前方部	124.0±10.2	40.1±1.5
	下顎頭後方部	46.2±19.4	-13.2±5.4 **
	下顎頭外側部	80.9±15.1 **	-55.1±2.0 **
	下顎頭内側部	17.4±2.0	37.0±7.5 *
	大臼歯歯冠部	15.7±2.1 *	-24.0±2.8
開口距離20mm	下顎頭前方部	127.0±31.3 **	35.7±2.9 **
	下顎頭後方部	46.9±14.6 **	-8.6±5.5 **
	下顎頭外側部	86.2±11.1 **	-52.0±2.5 **
	下顎頭内側部	18.4±2.6 **	40.4±5.5 **
	大臼歯歯冠部	41.9±8.4 **	-44.8±11.7 *
	大臼歯根尖部	41.5±19.3 *	40.0±14.5

最大主ひずみ: ( $\epsilon$ :  $10^{-6}$ ) 主ひずみ方向: (度)  
\*:  $p<0.05$ , \*\*:  $p<0.01$

表2: 各開口距離の最大主ひずみと主ひずみ方向の平均値と標準偏差

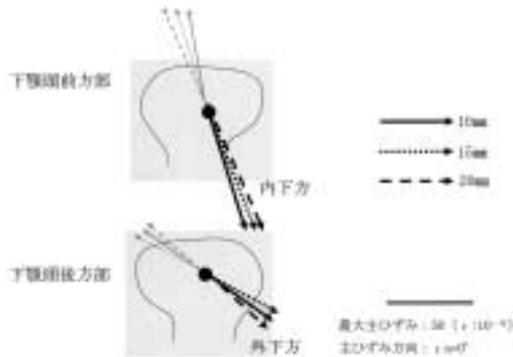


図9: 下顎頭前後方部における最大主ひずみと主ひずみ方向

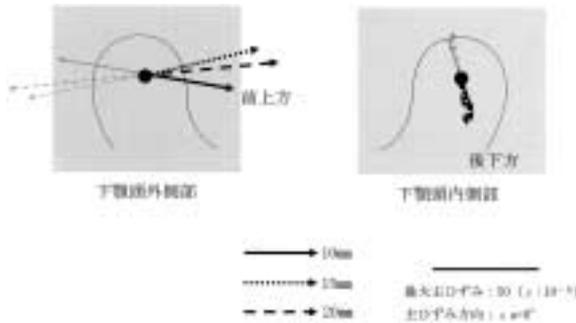


図10: 下顎頭内外側部における最大主ひずみと主ひずみ方向

### 3. 実験的咬合干渉と表面ひずみ

#### 1) 各測定部位における最大主ひずみと主ひずみ方向の変化

各測定部位における最大主ひずみと主ひずみ方向の変化を表3および図13に示す。

##### (1) 咬合干渉 N 型 (図14 16)

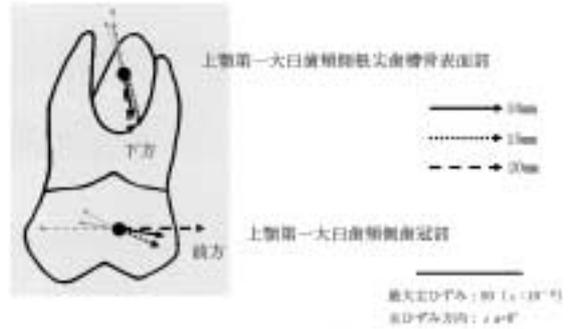


図11: 上顎第一大臼歯部の最大主ひずみと主ひずみ方向

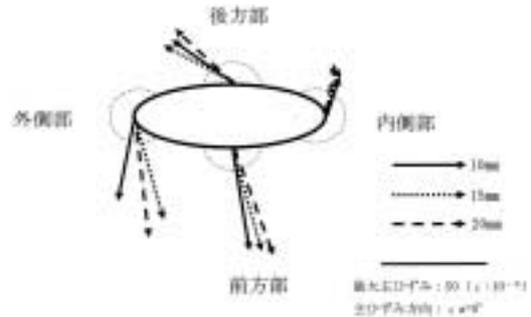


図12: 下顎頭部における最大主ひずみと主ひずみ方向

下顎頭前方部では最大主ひずみは $26.2 \pm 7.9$ であり、C型に対して21.9%の大きさに減少していた。主ひずみ方向は内下方向で、C型に対してより内方に変化していた。

下顎頭後方部では最大主ひずみは $29.3 \pm 11.4$ であり、C型に対して65.7%の大きさに減少していた。主ひずみ方向は外下方向で、C型に対してより内方に変化していた。

下顎頭外側部では最大主ひずみは $50.2 \pm 21.0$ であり、C型に対して90.5%の大きさであった。主ひずみ方向は前下方向で、C型に対してより下方に変化していた。

下顎頭内側部では最大主ひずみは $26.6 \pm 2.7$ であり、

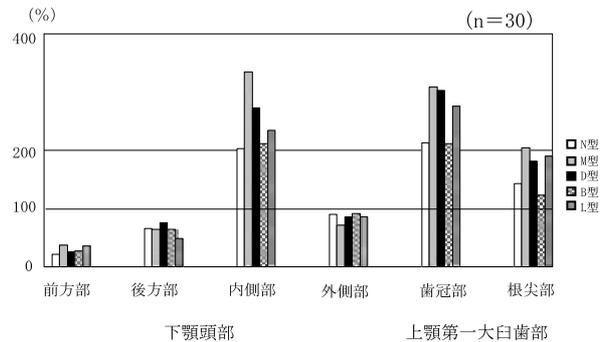


図13: C型を基準(100%)とした各干渉型の最大主ひずみ変化

(n=30)

最大主ひずみ	C型	N型	M型	D型	B型	L型
下顎頭前方部	120.0±12.7	26.2±7.9 ※※※	44.4±10.0 ※※※	30.9±10.0 ※※※	32.7±9.4 ※※※	43.5±8.1 ※※※
下顎頭後方部	44.6±11.9	29.3±11.4 ※※	28.4±7.1 ※※	33.6±12.5 ※	28.5±10.5 ※	22.0±8.7 ※※
下顎頭外側部	55.5±12.0	50.2±21.0	39.6±13.6	47.3±14.9	50.8±12.0	47.6±19.7
下顎頭内側部	13.1±1.4	26.6±2.7 ※※	43.9±5.6 ※※※	35.8±8.7 ※※※	27.9±7.9 ※※※	30.8±15.0 ※※※
大臼歯歯冠部	11.7±3.0	33.5±5.0 ※※※	48.5±9.2 ※※※	47.6±7.2 ※※※	33.2±11.2 ※※※	43.3±7.2 ※※※
大臼歯根尖部	32.1±4.4	45.9±13.1	65.7±6.2 ※※※	58.2±17.6 ※※	39.5±12.1	60.8±15.6 ※※※
主ひずみ方向						
下顎頭前方部	41.3±3.4	0.9±9.2 ※※※	-21.0±7.8 ※※※	2.9±15.1 ※※※	-0.6±9.4 ※※※	1.7±5.2 ※※※
下顎頭後方部	-8.8±6.2	29.8±9.0 ※※※	27.6±5.2 ※※※	13.0±7.6 ※※※	5.4±5.0 ※※※	37.2±3.9 ※※※
下顎頭外側部	-44.5±3.8	30.2±11.2 ※※※	34.3±5.4 ※※※	41.1±2.1 ※※※	22.5±1.5 ※※※	33.1±9.8 ※※※
下顎頭内側部	26.0±4.9	-32.7±4.4 ※※※	-40.9±1.5 ※※※	-42.1±3.5 ※※※	-38.2±3.3 ※※※	-42.0±3.3 ※※※
大臼歯歯冠部	-39.8±9.4	-21.1±3.3 ※※※	-47.8±4.9 ※※※	-38.7±8.7 ※※※	26.0±3.3 ※※※	32.2±6.2 ※※※
大臼歯根尖部	37.2±15.3	-33.5±7.2 ※※※	-14.9±1.8 ※※※	-7.1±18.6 ※※※	-41.0±5.1 ※※※	-51.9±6.0 ※※※

最大主ひずみ (ε : 10<sup>-6</sup>)      主ひずみ方向 (度)

※ : p<0.05, ※※ : p<0.01, ※※※ : p<0.001

表3 : 各咬合干渉型における最大主ひずみと主ひずみ方向

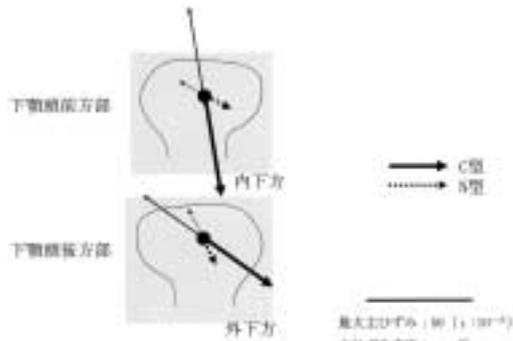


図14 : N型咬合干渉の下顎頭前後方部の最大主ひずみと主ひずみ方向

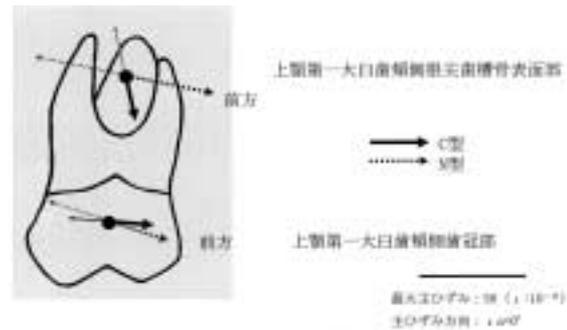


図16 : N型咬合干渉における第一大臼歯部の最大主ひずみと主ひずみ方向

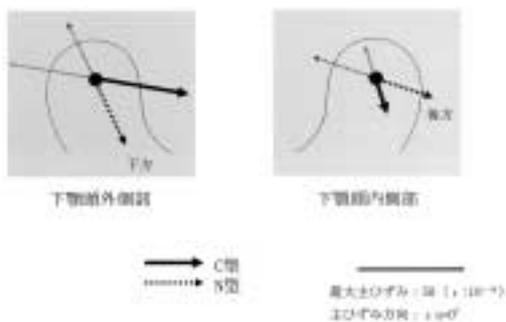


図15 : N型咬合干渉における下顎頭内外側部の最大主ひずみと主ひずみ方向

ずみは45.9±13.1であり、C型に対して143.0%の大きさであった。主ひずみ方向は前下方向で、C型に対してより前上方に変化していた。

(2) 咬合干渉 M型 (図17 19)

下顎頭前方部では最大主ひずみは44.4±10.0であり、C型に対して37.0%の大きさに減少していた。主ひずみ方向は内下方向で、C型に対してより内方に変化していた。

下顎頭後方部では最大主ひずみは28.4±7.1であり、C型に対して63.6%の大きさに減少していた。主ひずみ方向は外下方向で、C型に対してより内方に変化していた。

下顎頭外側部では最大主ひずみは39.6±13.6であり、C型に対して71.3%の大きさに減少していた。主ひずみ方向は前下方向で、C型に対してより下方に変化していた。

下顎頭内側部では最大主ひずみは43.9±5.6であり、C型に対して333.8%の大きさに増加していた。主ひずみ方向は後方向で、C型に対してより後上方に変化

C型に対して202.5%の大きさに増加していた。主ひずみ方向は後下方向で、C型に対してより後方に変化していた。

上顎第一大臼歯類側歯冠部では最大主ひずみは33.5±5.0であり、C型に対して213.2%の大きさに増加していた。主ひずみ方向は前下方向で、C型に対してより下方に変化していた。

上顎第一大臼歯類側根尖歯槽骨表面部では最大主ひ

していた。

上顎第一大臼歯類側歯冠部では最大主ひずみは $48.5 \pm 9.2$ であり、C型に対して308.3%の大きさに増加していた。主ひずみ方向は前方向で、C型とほぼ同一方向であった。

上顎第一大臼歯類側根尖歯槽骨表面部では最大主ひずみは $65.7 \pm 6.2$ であり、C型に対して204.9%の大きさに増加していた。主ひずみ方向は前下方向で、C型に対してより前上方に変化していた。

(3) 咬合干渉 D型 (図17 - 19)

下顎頭前部では最大主ひずみは $30.9 \pm 10.0$ であり、C型に対して25.8%の大きさに減少していた。主ひずみ方向は内下方向で、C型に対してより内側に変化していた。

下顎頭後部では最大主ひずみは $33.6 \pm 12.5$ であり、C型に対して75.3%の大きさに減少していた。主ひずみ方向は外下方向で、C型に対してより外側に変化していた。

下顎頭外側部では最大主ひずみは $47.3 \pm 14.9$ であり、C型に対して85.2%の大きさに減少していた。主ひずみ方向は下方向で、C型に対してより下方に変化していた。

下顎頭内側部では最大主ひずみは $35.8 \pm 8.7$ であり、C型に対して272.7%の大きさに増加していた。主ひずみ方向は後方向で、C型に対してより後方に変化していた。

上顎第一大臼歯類側歯冠部では最大主ひずみは $47.6 \pm 7.2$ であり、C型に対して302.6%の大きさに増加していた。主ひずみ方向は前方向で、C型とほぼ同一方向であった。

上顎第一大臼歯類側根尖歯槽骨表面部では最大主ひずみは $58.2 \pm 17.6$ であり、C型に対して181.4%の大きさに増加していた。主ひずみ方向は前下方向で、C型に対してより上方に変化していた。

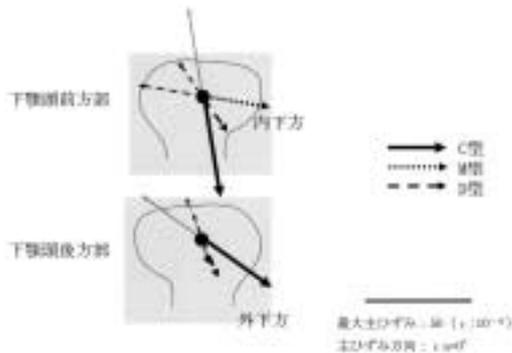


図17: M, D型咬合干渉の下顎頭前後部の最大主ひずみと主ひずみ方向

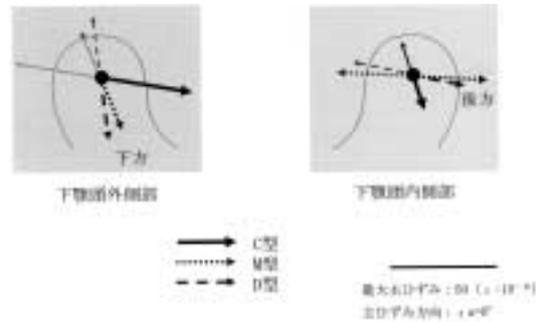


図18: M, D型咬合干渉における下顎頭内外側部の最大主ひずみと主ひずみ方向

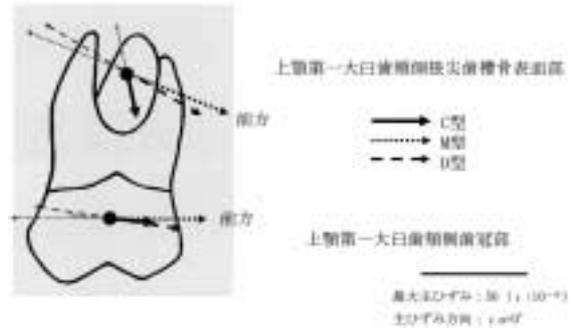


図19: M, D型咬合干渉における第一大臼歯部の最大主ひずみと主ひずみ方向

(4) 咬合干渉 B型 (図20 - 22)

下顎頭前部では最大主ひずみは $32.7 \pm 9.4$ であり、C型に対して27.2%の大きさに減少していた。主ひずみ方向は内下方向で、C型に対してより内側に変化していた。

下顎頭後部では最大主ひずみは $28.5 \pm 10.5$ であり、C型に対して63.9%の大きさに減少していた。主ひずみ方向は外下方向で、C型に対してより下方に変化していた。

下顎頭外側部では最大主ひずみは $50.8 \pm 12.0$ であり、C型に対して91.5%とやや減少していた。主ひずみ方向は前下方向で、C型に対してより下方に変化していた。

下顎頭内側部では最大主ひずみは $27.9 \pm 7.9$ であり、C型に対して212.1%の大きさに増加していた。主ひずみ方向は後方向で、C型に対してより後方に変化していた。

上顎第一大臼歯類側歯冠部では最大主ひずみは $33.2 \pm 11.2$ であり、C型に対して211.5%の大きさに増加していた。主ひずみ方向は前下方向で、C型に対してより下方に変化していた。

上顎第一大臼歯類側根尖歯槽骨表面部では最大主ひずみは $39.5 \pm 12.1$ であり、C型に対して123.2%の大

きさに増加していた．主びずみ方向は前方向で，C型に対してより前方に変化していた．

(5) 咬合干涉L型 (図20 - 22)

下顎頭前方部では最大主びずみは $43.5 \pm 8.1$ であり，C型に対して36.3%の大きさに減少していた．主びずみ方向は内下方向で，C型に対してより内方に変化していた．

下顎頭後方部では最大主びずみは $22.0 \pm 8.7$ であり，C型に対して49.2%の大きさに減少していた．主びずみ方向は外下方向で，C型に対してより下方に変化していた．

下顎頭外側部では最大主びずみは $47.6 \pm 19.7$ であり，C型に対して85.8%の大きさに減少していた．主びずみ方向は前下方向で，C型に対してより下方に変化していた．

下顎頭内側部では最大主びずみは $30.8 \pm 15.0$ であり，C型に対して234.2%の大きさに増加していた．主びずみ方向は後方向で，C型に対してより後方に変化していた．

上顎第一大臼歯類側歯冠部では最大主びずみは $43.3 \pm 7.2$ であり，C型に対して275.3%の大きさに増加していた．主びずみ方向は前下方向で，C型に対してよ

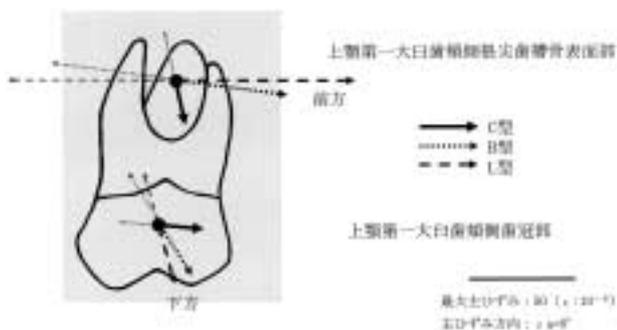


図22: B, L型咬合干涉における第一大臼歯部の最大主びずみと主びずみ方向

り下方に変化していた．

上顎第一大臼歯類側根尖歯槽骨表面部では最大主びずみは $60.8 \pm 15.6$ であり，C型に対して189.6%の大きさに増加していた．主びずみ方向は前方向で，C型に対してより上方に変化していた．

以上より咬合干涉を与えた場合には，最大主びずみは下顎頭部では内側部の有意に増大し，その他の部位は低下していた．また上顎第一大臼歯部では有意に増大した．

主びずみ方向は下顎頭外側部では下方に変化した．

2) 各咬合干涉型における主びずみ方向と下顎切歯点座標値との相関

N型のX, Y座標およびU値と下顎頭内側部間で有意な正の相関が認められ，N型のX座標，U値と上顎第一大臼歯類側歯冠部間で有意な正の相関が認められた．

M型のX座標と下顎頭内側部間で有意な正の相関が認められ，M型のX, Z座標，U値と上顎第一大臼歯類側歯冠部間で有意な正の相関が認められた．

D型のX座標，U値と下顎頭内側部で有意な正の相関が認められ，D型のX座標，U値と上顎第一大臼歯類側歯冠部間で有意な正の相関が認められた．

B型のX, Z座標，U値と下顎頭内側部間で有意な正の相関が認められ，B型のX, Z座標，U値と上顎第一大臼歯類側歯冠部間で有意な正の相関が認められた．

L型のX座標と下顎頭内側部間で有意な正の相関が認められ，L型のX, Y座標と上顎第一大臼歯類側歯冠部間で有意な正の相関が認められた (表4)．

以上より各咬合干涉型における下顎頭内側部および上顎第一大臼歯類側歯冠部の主びずみ方向と下顎切歯点座標値との相関については，前後方向を示すX軸との相関が多くみられた．

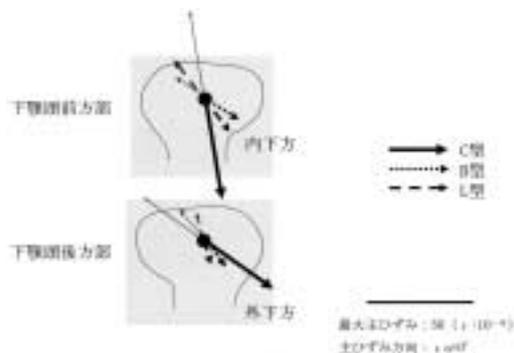


図20: B, L型咬合干涉の下顎頭前後方部の最大主びずみと主びずみ方向

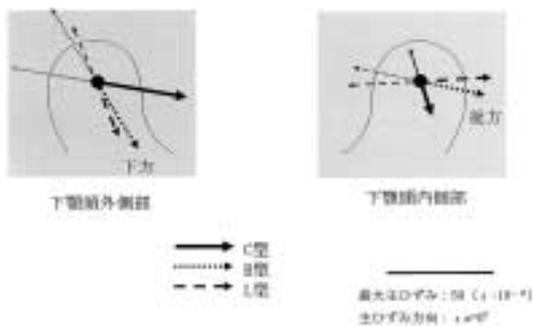


図21: B, L型咬合干涉における下顎頭内外側部の最大主びずみと主びずみ方向

	咬合接触時 (0ms) (n=10)			
	X	Y	Z	U
C型	—	—	—	—
N型	0.81 **	0.76 *	0.20	0.64 *
	0.84 ***	0.44	0.41	0.70 ***
M型	0.68 *	0.59	0.45	0.58
	0.81 ***	0.54	0.65 *	0.68 *
D型	0.89 ***	0.56	0.62	0.91 ***
	0.87 ***	0.63	0.58	0.76 *
B型	0.79 ***	0.05	0.74 **	0.74 ***
	0.84 **	0.29	0.80 ***	0.81 ***
L型	0.96 ***	0.24	0.10	0.47
	0.78 ***	0.64 *	0.05	0.05

上段：下顎頭内側部

※： $p < 0.05$ , ※※： $p < 0.01$ , ※※※： $p < 0.001$

下段：上顎第一大臼歯歯冠部

表4：各咬合干渉型における下顎頭内側部および上顎第一大臼歯歯冠部の主ひずみ方向と下顎切歯点座標値との相関

## 考 察

現在まで、顎口腔領域における顎関節部や歯の表面ひずみについてのシミュレーション実験は、数多く行われてきた。高信ら<sup>27,28)</sup>は、咀嚼ロボットを開発し、咀嚼運動をシミュレートし咀嚼運動制御機構の定量的かつ動的な工学モデルを構築する研究を行ったが、ロボットの構築が複雑なうえ、顎関節部の表面ひずみについては触れていない。また有限要素法<sup>8-16)</sup>を用いた研究も多く報告されている。これは顎関節部負荷を数学的解析によって求める方法であるが、複雑であることや、算出された顎関節部負荷についての妥当性を実証した研究はなく、正当性についてはいまだ明らかではない<sup>5-7)</sup>。また山下ら<sup>29,30)</sup>は被験者を用い、下顎臼歯部のクラウン、ブリッジにひずみゲージを直接貼付して閉口時における頬側部の表面ひずみについて検討を行っている。これは温度変化によるひずみゲージの変化や、同一被験者において同じ咬合力での実験が困難であるという欠点を有している。しかも顎関節部と歯の表面ひずみを個々に測定したものであり、同時計測した研究ではない。これらのことから、構造が複雑でなく、再現性のある頭蓋骨モデルを構築し、顎関節部と歯の表面ひずみを同時測定することで顎関節部と歯の関係を知る必要性を考え、市販の頭蓋骨模型を用いて閉口終末位におけるシミュレーション実験を行い、顎関節や歯へ及ぼされる負荷の変化について検討を行うことにした。

本研究で咀嚼筋群としては、咬筋および側頭筋の左右側計4筋を用いた。内側翼突筋は、付着部位や走行および咬みしめ時の機能が咬筋とほぼ等しいこと、また外側翼突筋は咬合力に関与せず、表面ひずみの作用方向に無関係であると報告されている<sup>31,32)</sup>ことから、内側翼突筋と外側翼突筋の設置を行わなかった。側頭

筋については高信ら<sup>27,28)</sup>、阿部ら<sup>33-35)</sup>が、側頭筋後方部のみと、前後方部両方を設置したシミュレーション実験を行い、筋突起を中心とする扇形で両部を設置することで、よりヒトの生体に近いモデルを示したことで、また側頭筋後方部には、下顎頭を下顎窩に対して安定した位置に誘導する働きがあることから、本研究では咬筋前方部と後方部および側頭筋前方部と後方部を選択した。

ひずみゲージの貼付位置として、歯では上顎第一大臼歯とした。これは各歯の咬頭嵌合位における咬合小面が、上下顎とも第一大臼歯が最も多いことや<sup>36)</sup>、第一大臼歯の咬合圧が最も大きい<sup>37-40)</sup>こと、また第一大臼歯の咬みしめ強度と咬合接触との関係は、臼歯部全体に適用できる<sup>41,42)</sup>との報告から第一大臼歯を選択した。また下顎骨は、咬合接触時に骨体部が振動し、ひずみゲージに影響を及ぼす<sup>41,42)</sup>ことが考えられる。このことから上顎第一大臼歯を本研究の被験歯として用いた。ひずみゲージは、応力測定の対象物の表面に発生する表面ひずみを測定するもので、荷重直下の部位を直接測定できない。そのため、下顎頭においては下顎頭頂部の周囲である下顎頭前方部、後方部、外側部、内側部の四か所を貼付位置とした。

咬合接触関係の検討には、咬合紙法、シリコンブラック法やT-scan system<sup>®</sup>、プレスケール<sup>®</sup>を用いる方法がある。咬合紙法では、咬合時の重心の位置を判断することが出来ない。シリコンブラック法では、模型から撤去時に希薄部の破損の恐れがあることや、撤去後の変形もあり、また咬合時の重心の位置を判断することが出来ない。T-scan system<sup>®</sup>は重心位置の測定は可能であるが、センサの柔軟性に欠け、下顎の変位を招く可能性があることや、センサの構造上、不感応域が存在し正確性に欠ける<sup>19)</sup>。そこで今回最も咬頭嵌合位に近い状態で、歯列全体に加わる咬合圧を捉えることができ、さらに重心位置の測定も可能なプレスケール<sup>®</sup>を咬合関係の評価に用いた<sup>19-23)</sup>。

本研究に用いた市販の頭蓋骨模型における咬合調整前の咬合接触関係は、左側小臼歯部に強い咬合接触が認められ、重心は左側に偏位していた。数回の咬合調整を行い咬合関係について検討することで、重心が左右的に中央に偏り、A.Iおよび変動係数が小さくなった。これによって正確な咬合接触が与えられた。

田中ら<sup>8-10)</sup>は有限要素法を用い、下顎頭前方部の最大主ひずみが一番大きく、次いで外側部、後方部、内側部の順であると報告している。本研究でも同様の結果が得られた。開口距離10, 15, 20mmにおける最大主ひずみと主ひずみ方向については、最大主ひずみの大きさは、各部位とも開口距離の増大に伴い大きい値

を示した。これは開口距離の増加に伴いスプリングの伸張が大きくなることから、閉口時の衝撃が増大し各計測部位に伝播する負荷が増大するためと考えられた。また主ひずみ方向は、下顎頭部では前方向あるいは前上方向に働くことが報告されていることが多い<sup>5, 8-10, 15, 16, 43-45</sup>。本研究においては、外側部が前上方向を示しているものの、他の部位は下方向を示した。これは外側部が前上方向に圧縮ひずみが働き、その他の部位において引っ張りひずみが働いたと考えられ、下顎頭頂部を中心に周囲の応力分布が示された。過去の報告との違いは、今までは下顎骨全体がどの方向に変位したかを述べているのに対して<sup>35, 43-48</sup>、本研究は各部位の主ひずみ方向を示したことによると思われる。また下顎頭部におけるひずみを水平的にみると、図12に示すように、前方向および内方向に回転（ねじれ）するようなひずみが生じていることが分かった。

咬合干渉の影響について上顎第一大臼歯部の主ひずみ方向は、山下ら<sup>29, 30, 37</sup>は、上顎第一小臼歯部にクラウンを装着し頬側歯頸部および口蓋側歯頸部にひずみゲージを貼付し、最大咬みしめ時の表面ひずみを測定し、頬側歯頸部付近において、歯軸方向への圧縮ひずみと直角方向への引っ張りひずみが働くことが報告されている。本研究でも頬側根尖歯槽骨表面部は歯軸方向に圧縮ひずみ、歯冠部に対し直角方向への引っ張りひずみが働いた。上顎第一大臼歯部は舌側部が咬合接触時の機能咬頭側であるため、舌側部には根尖方向への圧縮ひずみが働き、また非機能咬頭側では、歯冠側への引っ張りひずみが働いたためと考えられた。本研究で頬側根尖歯槽骨表面部のひずみゲージを貼付した位置は非機能咬頭側であることから、歯冠側へ働いたと考えられた。

各干渉型において、干渉側下顎頭部に下方向の表面ひずみが働いたことは、両側咀嚼筋相当部が同時に閉口運動し、両側の筋力が等しいモデルのため、干渉側が先に咬合接触し同部が支点となり、下顎骨が非干渉側にたわみ、干渉側下顎頭部は頭蓋から離れる方向の下方向へ、また非干渉側下顎頭部は頭蓋に近い方向へ偏位しようとした<sup>35, 43-49</sup>と考えられた。干渉側下顎頭部において内側部は著しく最大主ひずみは増大し、それ以外の部位の最大主ひずみが減少したことは、閉口終末位において、早期接触によって干渉部が支点となって、非干渉側が上方向に偏位したことにより干渉側では下方向へ、干渉側下顎頭部が内方向に引っ張られることとなり、内側部に大きな表面ひずみが生じたと考えられた<sup>5</sup>。また上顎第一大臼歯部の最大主ひずみが大きくなったことは、咬合干渉部に咬合力が集中したためと考えられた。

下顎頭内側部および第一大臼歯冠部の主ひずみ方向と下顎切歯点座標値との相関については、各咬合干渉ともX軸との高い相関が認められた。これは咬合干渉による下顎骨のたわみが前後方向の偏位として一定方向の相関を示したが、頬舌方向には明瞭な偏位を示さなかったものと解される。実験計画段階では、各咬合干渉型により下顎はそれぞれ干渉の方向に滑走あるいは偏位が生じるものと予測していた。しかし、実際は左右スプリングのバランスがとれていることや、早期接触と対合歯との間の滑走が小さくまた下顎骨の頬舌的偏位が小さかったものと考えられた。

ヒトにおいては、咬合干渉がみられる場合には、反射性制御がみられ、同側の閉口筋に抑制反射が生じ、同側の咬筋が抑制されることや、その部を避けた咬合、閉口速度の変化といった対応がみられる<sup>25</sup>。本研究は頭蓋骨モデルを用いており、神経や筋の働きがなく、また骨とエポキシといった素材の違いを有するが、本シミュレーション実験の結果は、咬合干渉時にみられる下顎頭への負荷の変化の参考の一助となると考えられた。

## 結 論

頭蓋骨モデルを構築し、閉口運動時の閉口終末位の顎関節部における骨および歯の表面ひずみについて、シミュレーション実験を行い、以下の結果を得た。

1. 構築した頭蓋骨モデルは、閉口終末位における咬合接触関係の安定性と再現性に優れ、今後の実験に有用であることが示唆された。
2. 咬合接触状態が安定している場合には、開口距離の増大に伴い、最大主ひずみは大きくなった。また閉口終末位での最大主ひずみは下顎頭前方部が最も大きく、外側部、後方部、内側部の順に小さくなっていった。
3. 下顎頭部、上顎第一大臼歯部に生ずる主ひずみ方向はほぼ一定であるが、部位によって角度の変化がみられた。
4. 下顎頭における表面ひずみを水平的にみると、前方および内方にねじれによる回転するようなひずみが生じていた。
5. 咬合干渉を与えた場合には、下顎頭部では内側部の最大主ひずみは有意に増大し、その他の部位は低下していた。また上顎第一大臼歯部での最大主ひずみは有意に増大していた。
6. 咬合干渉を与えた場合には、下顎頭外側部の主ひずみ方向は下方に変化した。
7. 各咬合干渉型における下顎頭内側部および上顎第一大臼歯冠部の主ひずみ方向と下顎切歯点座標値と

の相関については、前後方向を示す X 軸との相関が多くみられた。

これらのことから、閉口終末位において、咬合関係が安定している場合には、下顎骨が安定した位置にあるが、これに対して咬合干渉を与えた場合には、下顎骨が不安定な位置となっており、干渉側の下顎頭部、上顎第一大臼歯部にかかる最大主ひずみおよび主ひずみ方向が変化し、顎関節部への負荷が変化することが明らかとなった。

本論文の要旨は、第51回朝日大学歯学研究科発表会（平成17年12月9日、岐阜）において発表した。本論文の一部は第43、44回日本小児歯科学会大会および総会（平成16年5月22日、福岡、平成17年5月26日、仙台）、第18回日本顎関節学会総会学術大会（平成17年7月31日、島根）、第19回日本顎頭蓋機能学会学術大会（平成17年9月11日、大阪）において発表した。

#### 引用文献

- 1) 原田 洋, 長谷川信乃, 山田 賢, 西 英光, 田村康夫. 若年者における顎関節症状の発生頻度第1報. 日顎誌. 2002; 14: 170-183.
- 2) 原田 洋, 長谷川信乃, 田村康夫. 若年者における顎関節症状の発生頻度第2報. 日顎誌. 2004; 16: 185-190.
- 3) 福島俊士, 平井敏博, 古屋良一. 臨床咬合学. 第1版第3刷. 東京: 医歯薬出版株式会社; 1995: 33, 86.
- 4) 新井 泉, 田中義浩, 新木敏之. 歯周組織の咬合力支持機構の解析. 顎機能誌. 2002; 8: 107-116.
- 5) 窪木拓男. 顎関節部負荷ならびに顎関節構造の対負荷特性に関する生物力学的研究 第1編 近似的顎関節負荷モデルの構築. 岡山歯誌. 1990; 9: 179-195.
- 6) 窪木拓男. 顎関節部負荷ならびに顎関節構造の対負荷特性に関する生物力学的研究 第2編 片側噛みしめ時ならびに片側咀嚼時における顎関節部負荷の導出およびその検証. 岡山歯誌. 1990; 9: 197-217.
- 7) 窪木拓男. 顎関節部負荷ならびに顎関節構造の対負荷特性に関する生物力学的研究 第3編 実験的顎関節部負荷が顎関節構造に及ぼす影響. 岡山歯誌. 1990; 9: 219-227.
- 8) 田中栄二. 噛みしめ時における顎関節部の応力に関する生物力学的研究. 阪大歯誌. 1993; 38: 131-160.
- 9) Tanaka E, Rodrigo D P, Miyawaki Y, Lee K, Yamaguchi K, and Tanne K. Stress distribution in the temporomandibular joint affected by anterior disc displacement: a three-dimensional analytic approach with the finite-element method. *J Oral Rehabil.* 2000; 27: 754-759.
- 10) Tanaka E, Tanaka M, Watanabe M, Delpozo R, and Tanne K. Influences of occlusal and skeletal discrepancies on biomechanical environment in the TMJ during maximum clenching: an analytic approach with the finite element method. *J Oral Rehabil.* 2001; 28: 888-894.
- 11) 住吉周平. 顎関節の生体力学的シミュレーション 潤滑機構の役割について. 口外誌. 1998; 44: 168-182.
- 12) Katona TR. The effects of cusp and jaw morphology on the forces on teeth and the temporomandibular joint. *J Oral Rehabil.* 1989; 16: 211-219.
- 13) Ito T, Gibbs C H, Marguelles-Bonnet R, Lupkiewicz S M, Young H M, Lundeen H C, and Mahan P E. Loading on the temporomandibular joints with five occlusal conditions. *J Prosthe Dent.* 1986; 89: 363-382.
- 14) 重田浩樹, 岡田 裕, 小椋 正. 3次元有限要素簡易モデルを用いた顎関節部負荷の解析に関する研究. 日顎誌. 2001; 13: 356-363.
- 15) 重田浩樹, 岡田 裕, 井出吉信, 山崎要一. 下顎頭の形態変化が顎関節に及ぼす生体力学的影響 その1 下顎頭の変位について. 日顎誌. 2003; 15: 245-252.
- 16) 重田浩樹, 岡田 裕, 井出吉信, 山崎要一. 下顎頭の形態変化が顎関節に及ぼす生体力学的影響 その2 関節円板の変位について. 日顎誌. 2003; 15: 253-259.
- 17) 飯田 昭. ヒト顎関節の解剖学的研究 特に有歯顎と無歯顎の差異について. 歯科学報. 1972; 72: 1319-1371.
- 18) 高村 浩, 丸山剛郎. 顎関節の構造変化に関する研究 肉眼的観察. 補綴誌. 1984; 28: 49-59.
- 19) 服部佳功, 奥川博司, 渡辺 誠. Dental Prescale を用いた歯列における咬合力測定. 補綴誌. 1994; 38: 835-841.
- 20) 佐久間重光, 加藤賢吾, 栗田鉄也, 村上 弘, 伊藤裕. 咬合圧分布による咬合の評価に関する研究 第1報. 愛院大歯誌. 1998; 36: 69-72.
- 21) 佐久間重光, 加藤賢吾, 山本一道, 荒木章純, 伊藤裕. 咬合圧分布による咬合の評価に関する研究 第2報. 愛院大歯誌. 1998; 36: 247-250.
- 22) 加藤賢吾, 佐久間重光, 勝瀬誠二, 村上 弘, 荒木章純, 伊藤 裕. 咬合圧分布による咬合の評価に関する研究 第3報. 愛院大歯誌. 1998; 36: 689-693.
- 23) Sunardi Grace Lusiana, 佐久間重光, 穂積英治, 山本司将, 加藤大輔, 吉田真琴, 伊藤 裕. 垂直的咬合干渉付与による各歯が負担する咬合力の変化について. 愛院大歯誌. 2001; 39: 1-9.
- 24) McCarroll R S, Naeije M and Hansson T L. Balance in masticatory muscle activity during natural chewing and submaximal clenching. *J Oral Rehabil.* 1989; 16: 441-446.
- 25) 松田成彦, 長谷川信乃, 篠田圭司, 田村康夫. 閉口時の咬合偏位が小児咀嚼筋非対称性指数に及ぼす影響. 小児歯誌. 1997; 35: 706-714.
- 26) 高橋 賞, 河井西安. ひずみ測定入門. 第1刷. 東京: 大成社; 2001: 138, 139.

- 27) 高信英明, 高西淳夫, 加藤一郎. 咀嚼ロボットの開発研究 線形計画法を利用した顎関節力の軽減. 日咀嚼誌. 1992; 2: 71-77.
- 28) 高信英明, 高西淳夫, 加藤一郎. 頭蓋骨モデルを用いた咀嚼ロボットのメカニズムと側頭筋の力ベクトル可変機能を用いた顎関節力の最適軽減. 日咀嚼誌. 1993; 3: 43-50.
- 29) 山下潤朗. 機能下におけるクラウンおよびブリッジの表面ひずみに関する研究. 補綴誌. 1996; 40: 952-963.
- 30) 川和篤史. 咬合力によって生ずる補綴物の表面ひずみに関する研究 クラウンと3ユニットブリッジ. 口病誌. 2002; 69: 1-14.
- 31) 伊藤建一, 林 豊彦, 宮川道夫. 2次元静力学モデルを用いた咀嚼筋による顎関節負荷の調節性の解析. 信学技報. 1995; 68: 33-40.
- 32) 山田慎也, 林 豊彦, 中村康雄, 伊藤 綾, 中嶋新一, 小林 博, 山田好秋. 自律顎運動シミュレータ JSN/2A における顎関節負荷の検出とその調節. 信学技報. 2001; 135: 89-96.
- 33) 阿部 誠, 林 豊彦, 伊藤建一. 顎関節負荷の調節における側頭筋後部と顎二腹筋の機能 2次元剛体ばねモデルを用いた静力学的解析. 信学技報. 1999; 145: 33-40.
- 34) 阿部 誠, 林 豊彦, 伊藤建一, Paul Medina. 顎関節負荷の調節における側頭筋後部の機能 両側かみしめ実験データを用いたモデル解析. 信学技報. 2000; 156: 67-72.
- 35) 阿部 誠, 林 豊彦, 中村康雄, 伊藤建一. 各咀嚼筋筋力が顎関節負荷に与える影響 3次元剛体顎モデルを用いた数値シミュレーション. 信学技報. 2002; 170: 61-66.
- 36) 中尾勝彦. 正常天然歯列における咬合小面と歯牙接触に関する研究 (咬頭嵌合位). 補綴誌. 1970; 14: 1-21.
- 37) 岡田大蔵. 噛みしめ強さの違いによる歯の変位と咬合接触 咬頭嵌合位. 補綴誌. 1998; 42: 1013-1023.
- 38) 益田高行, 三浦宏之, 加藤 均, 古木 譲, 長谷川成男. 咬合力による上顎臼歯部歯周組織の歪みの三次元的測定. 補綴誌. 1996; 40: 154-159.
- 39) 兒玉 定. 咬合圧が顎関節部に及ぼす影響に関する研究. 歯科学報. 1975; 75: 143-169.
- 40) 青木たまよ, 林 豊彦, 中嶋新一, 小林 博, 宮川道夫. 自律顎運動ロボットの顎体と咬合力センサーの試作. 信学技報. 1993; 75: 115-122.
- 41) Fischman B. The rotational aspect of mandibular flexure. *J Prosthet Dent.* 1990; 4: 483-485.
- 42) Koriath T W P, Hannam A G. Deformation of the human mandible during simulated tooth clenching. *J Dent Res.* 1994; 73: 56-66.
- 43) 井上 匡. 咬合力による下顎の変位に関する研究 第1報 実験方法の確立. 補綴誌. 1988; 32: 1132-1140.
- 44) 井上 匡. 咬合力による下顎の変位に関する研究 第2報 顎頭の変位の分析. 補綴誌. 1989; 33: 215-224.
- 45) 姜 婷. 噛みしめ時における顎頭の変位および下顎のたわみ. 口病誌. 1992; 59: 142-159.
- 46) 竹内 智, 岡 達, 市川康明, 川本眺万. 下顎骨の外力による変形・破壊に関する実験的および数値解析的研究 第1報 ヒト骨の破壊特性について. 口外誌. 1985; 31: 240-247.
- 47) 竹内 智, 岡 達, 市川康明, 川本眺万. 下顎骨の外力による変形・破壊に関する実験的および数値解析的研究 第2報 下顎骨の三次元有限要素モデル化と変形・破壊の検討. 口外誌. 1985; 31: 248-263.
- 48) 森沢 紳, 青野 宏, 笹川 紳, 山本美朗, 角田豊作. 下顎枝矢状分割法におけるひずみの分布. 城歯大紀要. 1985; 14: 400-407.
- 49) 藤野 明. 下顎骨の応力伝達機構に関する研究. 歯科医学. 1983; 46: 513-542.