

Experimental study of morphological changes and stress distribution analysis using Rigid Bodies Spring Model In the craniomandibular joint after condylar internal rotation

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/9354

内方回転させた下顎頭の形態学的変化に関する実験的検討 ならびに剛体ばね理論による応力分布解析

金沢大学医学部医学科歯科口腔外科学講座 (主任: 山本悦秀教授)

上 木 耕 一 郎

外科的顎矯正手術の中で最も高頻度に応用される下顎枝矢状分割術では、分割骨片の強固な固定により顎関節に強い負荷が生じることが推察される。この負荷による顎関節の形態学的変化を検討することを目的に動物実験を行った。実験に際し片側の下顎骨体を短縮させることにより非短縮側の下顎頭に偏位、特に内方回転を付与する実験系を考案し、この偏位が顎関節に及ぼす影響を肉眼的、組織学的に検討し、さらに剛体ばね理論を用い応力分布についても解析した。実験には体重3kg (12から16週齢) 日本白色種家兎、雄性を用いた。全身麻酔下で右側臼歯部後方に歯科用エンジンで5mm間隔の切断線を加え下顎骨を部分切除した。前方と後方の骨片の切断面を接合させ右側下顎骨体を短縮させた状態でワイヤーにて固定した。摘出した頭蓋骨、下顎骨に計測点を設定しノギスを用いて3次元的に測定した。また顎関節の組織標本を作製し観察した。各計測項目の関連性を統計学的に解析した上で、下顎骨の剛体ばね理論モデルを作成し、側面方向からの2次元的な下顎頭表面の接触圧分布を求めた。また軸方向からは幾何学的に接触圧分布を考察した。その結果、肉眼的に回転側(非短縮側)の下顎頭を中心に強い形態変化が認められ、同時に対側(短縮側)にもわずかな2次的変化を生じた。計測学的には、下顎頭内外側径(medio-lateral width of the condyle) (Com-Col) において、2週目以降回転側が対側に比べ有意に高値を示した。下顎頭前後軸と内外軸のなす角すなわち下顎頭角(condylar angle) (CA) では4週以降、回転側が対側よりも低値を示し、回転側外側下顎頭高(lateral condylar height) (Colh) が他の下顎頭より大きな値を示す傾向があった。また組織所見では2週目で回転側下顎頭前外方で増殖層は圧排された状態で細胞が密であったが、肥大層の厚径は増加し細胞数の増加が認められた。8週目においては反対に肥大層の厚径は減少していた。さらに、これらの結果に基づき、側面方向での応力解析を行った結果、術後2週目以降経時的に対側に比べ回転側下顎頭が力学的に不安定になる傾向が示された。実際の摘出下顎骨の上方面観では回転側下顎頭前外方では過大な負荷により扁平に圧迫されたものが多く、回転側外側下顎頭高(lateral condylar height) (Colh) が高値を示したことから、下方へ面積を増加させ応力の分散をはかったことが推測された。

Key words craniomandibular joint, sagittal split ramus osteotomy, morphological changes, stress distribution, rigid bodies spring model

緒 言

近年、顎変形症に対する意識の向上により外科的矯正手術を希望する患者が増加している。本手術は咬合、発音など機能的な面と同時に審美的な面も改善するという要素を含んでいるため患者の性別では女性が男性に比べ相当多いといわれている^{1)~3)}。また顎変形症の種類は多様で、本邦において頻度の高い順にみると下顎前突症、次いで下顎非対称、開咬症^{1)~3)}であるが、実際に個々の患者の顎変形は3次元的に様々であり複数の病名が重複することがある。これらの症例に対する治療法として顎骨骨切り術が現在広く行われている。下顎ではその切離の部位から骨体部や下顎枝部で行われる方法と歯槽部のみを骨切りする方法とに分けられるが、中でも下顎枝矢状分割骨切り術は応用範囲の広さから最も多く用いられている。本法は分割した両骨片を固定した場合の接触面積が大きく、また術後の合併症の少ない優れた方法であるが、移動骨片の軽度の後戻りや

下歯槽神経領域の麻痺などの問題点が挙げられている^{4)~6)}。さらに、近年、分割した骨片間をワイヤーによる圍繞結紮法などによる柔軟性の高い固定法からスクリューやプレート等による比較的強固な固定法を使用する傾向にあり、これにより顎間固定期間の短縮が図られた反面、顎関節への影響がより問題となってきた^{7)~12)}。すなわち両骨片の固定時に下顎頭を含む近位骨片が変位する結果、下顎頭位が関節窩に対し微妙に変化し、顎関節に持続的に負荷がかかることが主な原因であると言われている^{13)~20)}。その防止のため、近位骨片を完全に3次元的に術前の状態に戻すという完全復位の考え方が存在する一方、骨片の位置、方向が術後変化することがあってもその変位が極端でなければ障害を残すことなく順応するという考え方もありなお議論の多いところである^{20)~21)}。このように、手術により生じる顎位、咬合の変化がもたらす顎関節の形態学的変化は非常に重要な問題でありながら、X線、コンピューター断層X線撮影(computed tomography, CT)、核磁気共鳴映像法(magnetic

平成9年9月17日受付, 平成9年10月22日受理

Abbreviations: RBSM, rigid bodies spring model

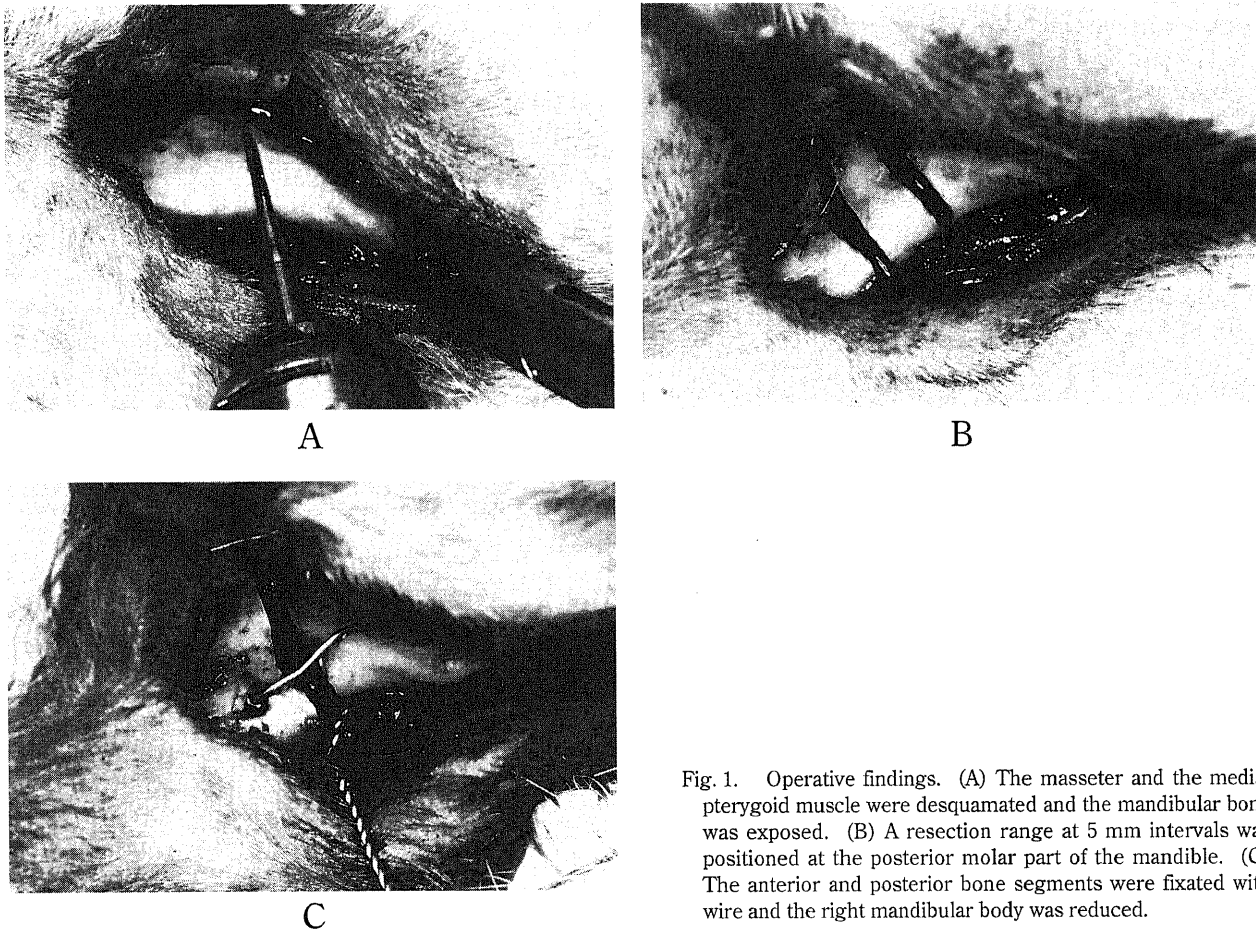


Fig. 1. Operative findings. (A) The masseter and the medial pterygoid muscle were desquamated and the mandibular bone was exposed. (B) A resection range at 5 mm intervals was positioned at the posterior molar part of the mandible. (C) The anterior and posterior bone segments were fixated with wire and the right mandibular body was reduced.

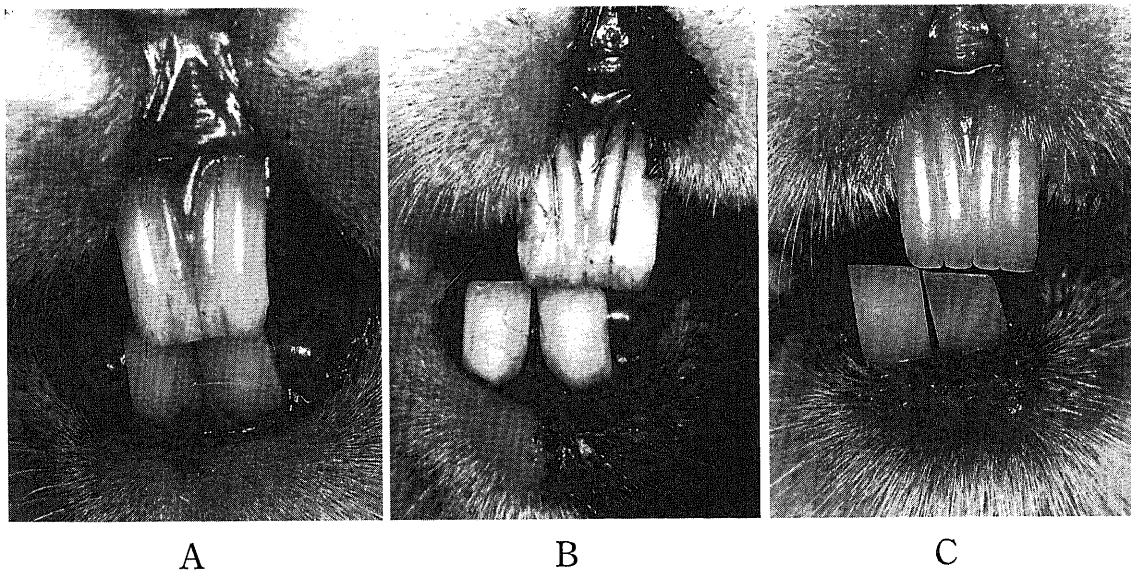


Fig. 2. Oral findings in a rabbit. (A) Preoperative. (B) Immediately after surgery. (C) After 2 weeks. Although the mandibular median was aligned with the maxillary median in the preoperative stage, immediately after operation, mandibular median was deviating to the right of the maxillary median. Two weeks postoperatively, mandibular right deviation and incisal abrasion were observed.

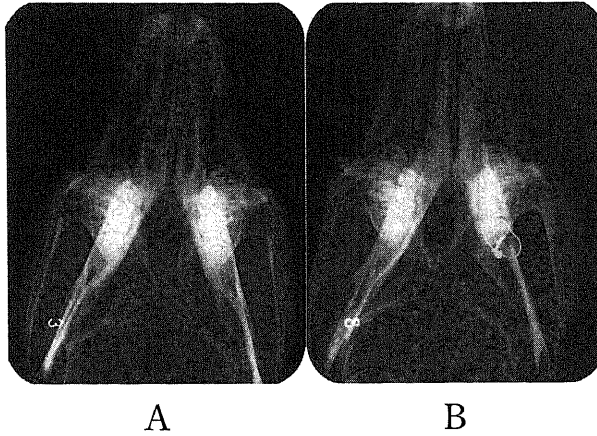


Fig. 3. Axial X-ray photographs. (A) Preoperative. (B) Immediately after surgery. Although the mandible was bilaterally symmetrical in the preoperative stage, immediately after surgery the mandible was deviating to the right.

resonance imaging, MRI)などの所見からの検索にはおのずと限界があり、臨床的にその変化を把握するのは困難といえる。そこで下顎頭の内方回転を中心とする位置、角度変化によって生じる顎関節の形態的变化を、実験動物を用いて基礎的に検討することとした。

実験動物の顎関節部に対して外的負荷を与える方法としては主に咬合挙上や下顎を前後的に偏位させる装置を用いた実験や片側臼歯に斜面板を長時間装着し咬合異常を起こさせ顎関節の反応をみる実験など数多く考案されている²⁰⁻²⁷⁾。しかしこれらの実験では下顎側方偏位はある時間を経て2次的に生じたものであり、外科矯正による瞬時の顎位、咬合の変化による顎関節の反応とは若干異なるものである。外科矯正手術後、特に下顎枝矢状分割骨切り術直後には咀嚼運動を行っていないにもかかわらず下顎頭の位置、角度変化が生じており顎関節に持続的な負荷がかかっていると考えられるからである。教室の松本²⁸⁾は本邦で高頻度にみられる下顎前突症に対して施行される矢状分割術において、分割骨片の強固な固定により生じやすい下顎頭の外側偏位と内方回転のうち、前者を想定した実験系を考案し、その推移を解明した。

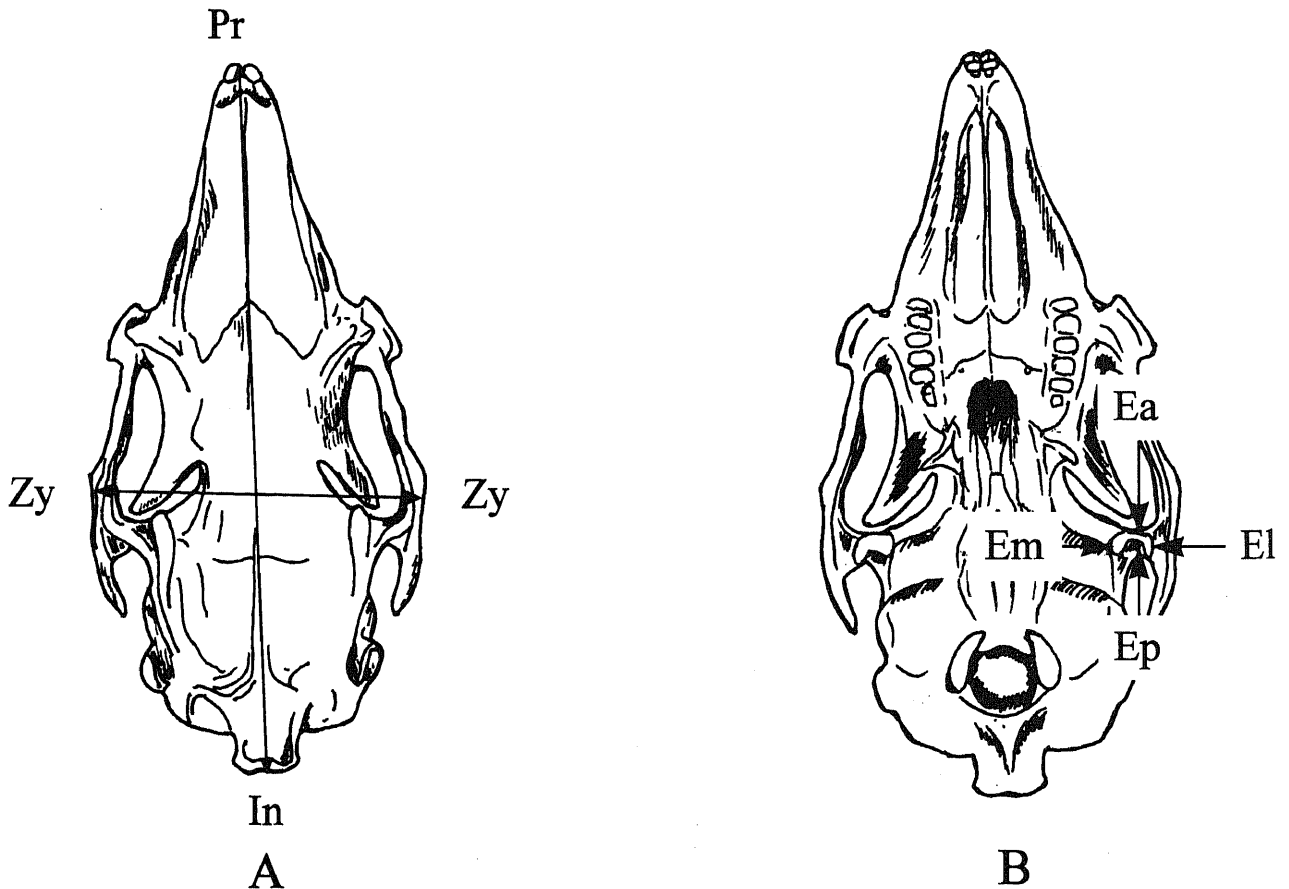


Fig. 4. Schematic drawing of the cranial bones of a rabbit. (A) Superior view. (B) Inferior view. Pr, most anterior point of the maxillary incisal alveolus; In, most posterior point of the protuberantia occipitalis externa; Zy, most lateral point of the zygomatic arch; Em, most medial point of the articular eminence; El, most lateral point of the articular eminence; Ea, most anterior point of the center of the articular eminence; Ep, most posterior point of the center of the articular eminence; Pr-In, antero-posterior length of the skull (distance between Pr and In); Zy-Zy, maximum width of the zygomatic arch (distance between Zy and Zy); Ea-Ep, anterior-posterior length of the articular eminence (distance between Ea and Ep); Em-El, medio-lateral width of the articular eminence (distance between Em and El).

そこで本研究では、本手術によりに発生する下顎頭の位置変化のうち、特に内方回転を付与する実験系を考案し、その偏位が顎関節に及ぼす影響を肉眼的、組織学的変化を明らかにし、さらに剛体ばね理論を用いて応力分布の変化を解析することを目的に実験を行った。

材料および方法

I. 実験動物

実験には体重3kg (12から16週齢) 日本白色種家兎、雄性 (北陸実験動物) を用いた。

II. 実験方法

ネンブータル (大日本製薬, 大阪) 30mg/kg を耳静脈から静注することで導入し、手術の経過中必要に応じ増量し、全身麻酔下にて実験を行った。右側顎下部を剃毛し消毒した後、8万分の1エピネフリン含有2%キシロカイン (藤沢薬品, 大阪) 1.8ml を術野に広範囲に注入し麻酔を行った。下顎骨臼歯部下縁に相当するところで電気メスにて1.5cmの切開を加え、下顎骨下縁を露出した後、顎角部からさらに後方に向かい顎二腹筋、顎舌骨筋、咬筋と内側翼突筋の前縁を剥離した。次に臼歯部後方に歯科用エンジンで5mm間隔の切断線を加え下顎骨を部分切除した (図1A, B)。前方と後方の骨片にそれぞれ内外皮質骨に貫通させた直径1mmの穴を形成し、切断面を接合することにより右側下顎骨体を短縮させた状態でワイヤー (歯科用ステンレス鋼線0.4mm, 三金工業株式会社, 栃木) にて固定した (図1C)。この結果、上顎前歯正中に対し下顎前歯正中は右側 (短縮側: 以降、対側と呼称) に偏位し、下顎骨全体は軸位方向から見て右側に偏位した状態になり、これにともない左側 (非短縮側: 以降、回転側と呼称) 下顎頭は位置と角度の変化を生じた。創

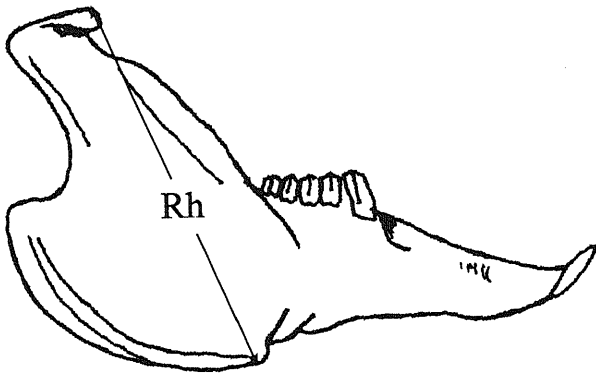


Fig. 5. Schematic drawing of the lateral view of the mandible. Rh, ramus height.

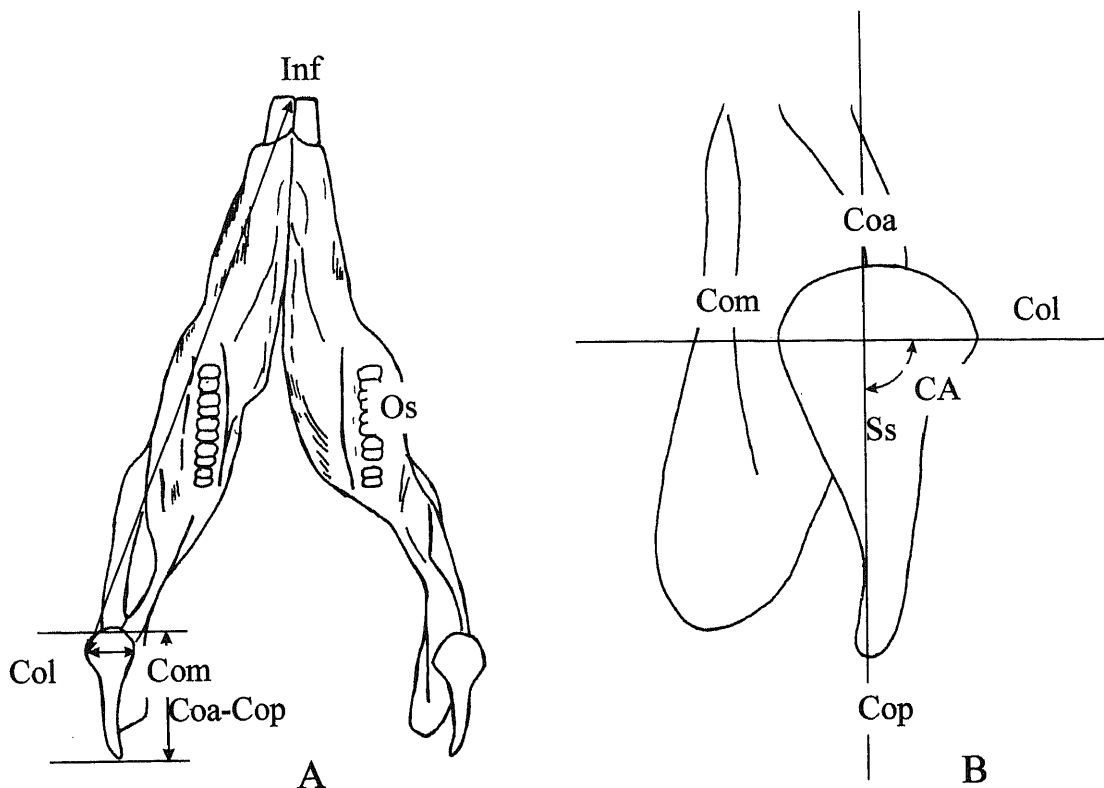


Fig. 6. Schematic drawing of the superior view of the mandible. (A) The whole mandible. (B) Magnification of the condyle. Inf, most anterior point of the mandibular incisal alveolus; Coa, most anterior point of the condyle; Cop, most posterior point of the condyle; Com, most medial point of the condyle; Col, most lateral point of condyle; Inf-Col, mandibular length (distance between Inf and Col); Coa-Cop, anterior-posterior length of the condyle (distance between Coa and Cop); Com-Col, medio-lateral width of the condyle (distance between Com and Col); Ss, condylar square in the superior view; CoA, angle between Com-Col and Coa-Cop; Os, occlusal square.

部を抗生剤入り生食水で洗浄し吸収糸にて閉鎖縫合した。術後、下顎前歯の右側偏位を肉眼的に確認すると同時に軸位方向での頭部X線写真で確認した(図2, 3)。咀嚼効率、咬合力等が低下することを考慮し、飼料は実験動物用固形飼料RC4(オリエンタル酵母, 東京)を水道水を含ませ軟化して、飲料水は水道水を自由摂取させた。確実に側方偏位を生じさせるために、予備実験において短縮幅を検討したところ短縮幅が小さすぎると明らかな偏位が生じず、また5mmを越えると摂食障害を起こしたため至適短縮幅を5mmとした。手術は40羽に施行しこれを

偏位群とし、同様に下顎骨下縁を露出し歯科用エンジンで同部位に切断線を加えただけで完全に骨折させなかった30羽を対照群としてそれぞれ術後2週, 4週, 8週, 12週, 24週において屠殺した。

Ⅲ. 摘出頭蓋骨の作製

各週の実験群につき6羽の家兎と各対照群4羽の家兎を術後2, 4, 8, 12, 24週目にネブプタールによる全身麻酔下に開胸術を行い、左心室にカニューレーション後、右心房を切開して生理食塩水(大塚製薬, 東京)にて還流、窩血後断頭し、3日間

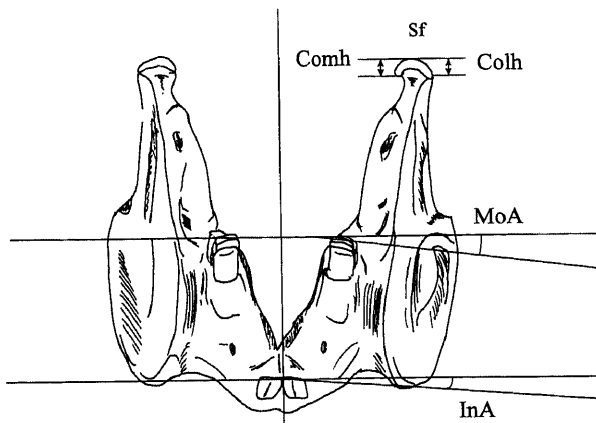


Fig. 7. Schematic drawing of the frontal view of the mandible. InA, inclination angle of incision; MoA, inclination angle of the molars; Sf, condylar square in the frontal view; Comh, medial condylar height; Colh, lateral condylar height.

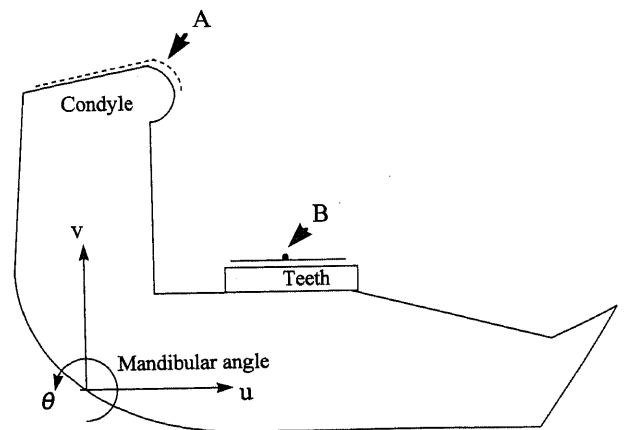


Fig. 8. Rigid bodies spring model (RBSM) of mandible of the rabbit. (A) 36 integration points are positioned on the condylar surface. (B) One integration point of part of the tooth is determined. Parallel displacement (u, v) and rotation θ are determined in relation to the mandibular angle.

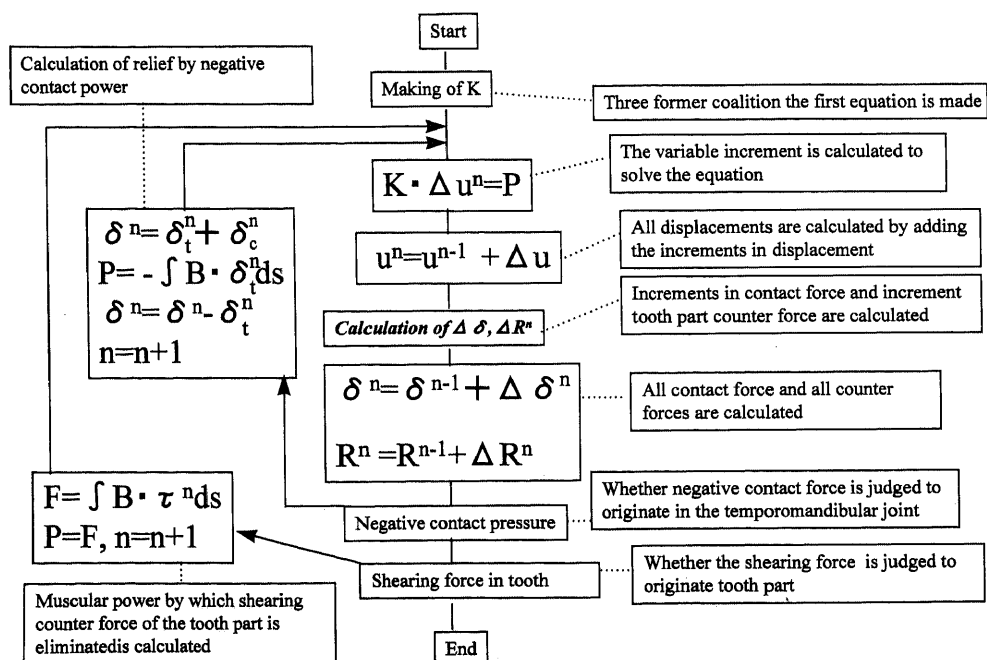


Fig. 9. Flow chart for analysis. In accordance with the loops in this figure, convergence calculations are carried out repeatedly.

10%中性緩衝ホルマリンにて固定を行った。その後軟組織を除去し骨を露出させた。

IV. 下顎頭、頭蓋骨の肉眼所見ならびに実長測定

摘出した頭蓋骨、下顎骨の変化を肉眼的に観察すると共に、それぞれ計測点を設定し、ノギスを用いて3次元的に測定した(図4, 5)。

1. 計測点

上顎切歯間歯槽突起最前先端点 (most anterior point of the maxillary incisal alveolus) (Pr), 外後頭隆起 (most posterior point of the protuberantia occipitalis externa) (In), 頬骨突起最外側点 (most lateral point of the zygomatic arch) (Zy), 関節結節最内側点 (most medial point of the articular eminence) (Em), 関節結節最外側点 (most lateral point of the articular eminence) (El), 関節結節中央狭窄部最前点 (most anterior point of the center of the articular eminence) (Ea), 関節結節中央狭窄部最後点 (most posterior point of the center of the articular eminence) (Ep), 下顎切歯間歯槽突起最前先端点 (most anterior point of the mandibular incisal alveolus) (Inf), 下顎頭最前点 (most anterior point of the condyle) (Coa), 下顎頭最後点

(most posterior point of the condyle) (Cop), 下顎頭最内側点 (most medial point of the condyle) (Com), 下顎頭最外側点 (most lateral point of the condyle) (Col)

2. 計測項目

頭蓋骨前後径 (anterior posterior length of the skull) (Pr-In), 最大頬骨弓幅 (maximum width of the zygomatic arch) (Zy-Zy), 関節結節前後径 (anterior-posterior length of the articular eminence) (Ea-Ep), 関節結節内外径 (medio-lateral width of the articular eminence) (Em-El), 下顎骨長 (mandibular length) (Inf-Col), 下顎枝高 (ramus height) (Rh), 下顎頭前後径 (anterior-posterior length of the condyle) (Coa-Cop), 下顎頭内外側径 (medio-lateral width of the condyle) (Com-Col)

V. 頭部規格写真による検討

下顎骨を水平な台にのせ左右顎角部、下顎骨下縁が、最も安定した状態に設置し上方から撮影した。前方からは閉口時に頭蓋骨正中線がカメラのレンズに垂直になるように下顎骨を設置し撮影した。次に左右側方からの写真を撮影した後、画像をパーソナルコンピューター (Power Macintosh7200/90, Apple Computer, California, USA) に読み込み画像処理ソフト (NIH

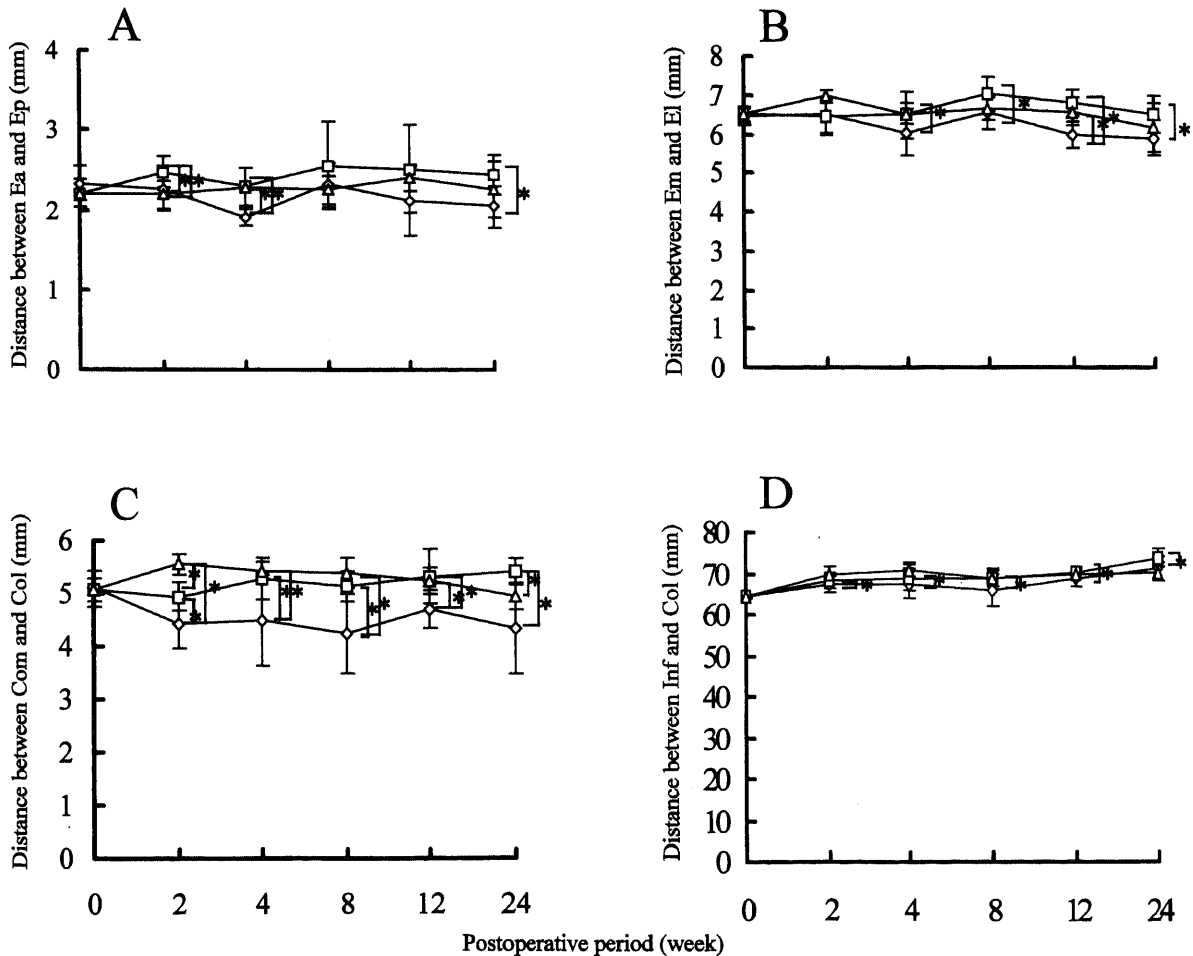


Fig. 10. Changes in measurements of the extracted mandible. (A) Changes in the distance between Ea and Ep. (B) Change in the distance between Em and El. (C) Change in the distance between Com and Col. (D) Change in the distance between Inf and Col. ◇, right side. □, left side. △, control group. Data are presented as $\bar{x} \pm SD$. Wilcoxon signed-ranks test was used for comparison of the left and right side. Mann-Whitney's U test was used for comparison with the control group. * $p < 0.05$.

image, フリーソフトおよび canvas3.5, Deneba Soft ware, Miami, USA) にて, それぞれの投影方向から次の項目を測定した (図6, 7).

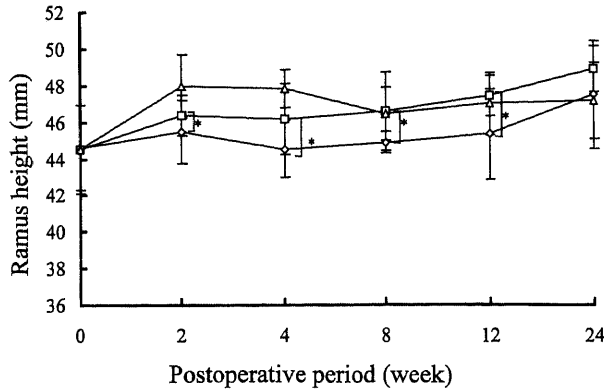
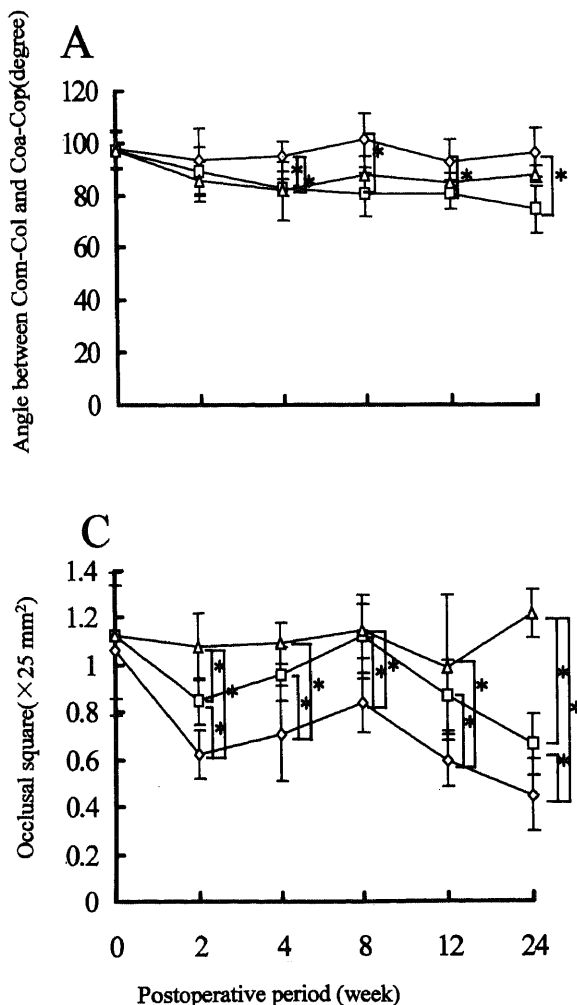


Fig. 11. Change of Rh. \diamond , right side. \square , left side. \triangle , control group. Data are presented as $\bar{x} \pm SD$. Wilcoxon signed-ranks test was used for comparison of the left and right side. Mann-Whitney's U test was used for comparison with the control group. * $p < 0.05$.



1. 上面方向

下顎頭面積 (condylar square in the superior view) (Ss), 下顎頭角 (Condylar angle) (CA) すなわち下顎頭前後軸と内外軸のなす角, 咬合面積 (occlusal square) (Os)

2. 前面方向

切歯傾斜角 (inclination angle of incision) (InA), 臼歯傾斜角 (inclination angle of the molars) (MoA), 下顎頭面積 (condylar square in the frontal view) (Sf), 内側下顎頭高 (medial condylar height) (Comh), 外側下顎頭高 (lateral condylar height) (Colh)

Ⅵ. 組織標本の作製方法

各実験群につき2羽の家兎と各対称群2羽の家兎を術後2, 4, 8, 12, 24週目にネブタールによる全身麻酔下に開胸術を行い, 左心室にカニューレション後, 右心房を切開して生理食塩水 (大塚製薬, 東京) にて還流, 寫血後断頭し, 3日間10%中性緩衝ホルマリンにて固定を行った. その後18% EDTAにて約1か月間脱灰を行った. 脱灰終了後, パラフィン包埋を行い水平断にてマイクロトームを用いて6 μ mの切片を作製し, ヘマトキシリン・エオジン染色を行い, 組織学的検討を行った.

Ⅶ. 統計学的検討

すべての計測項目結果は左右差を抽出し統計処理ソフト (Stat View, ABACUS Concepts, California, USA) を用いて比較検討した. 左右側の比較にはウィルコクソン符号付順位和検

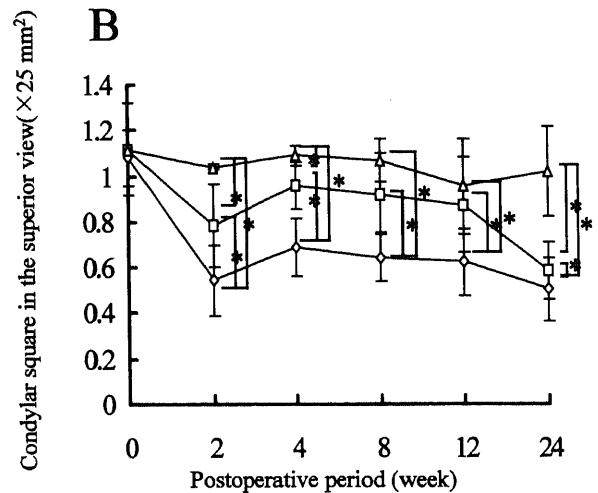


Fig. 12. Changes in measurements obtained from the superior view. (A) Changes in CoA. (B) Changes in Ss. (C) Changes in Os. \diamond , right side. \square , left side. \triangle , control group. Data are presented as $\bar{x} \pm SD$. Wilcoxon signed-ranks test was used for comparison of the left and right side. Mann-Whitney's U test was used for comparison with the control group. * $p < 0.05$.

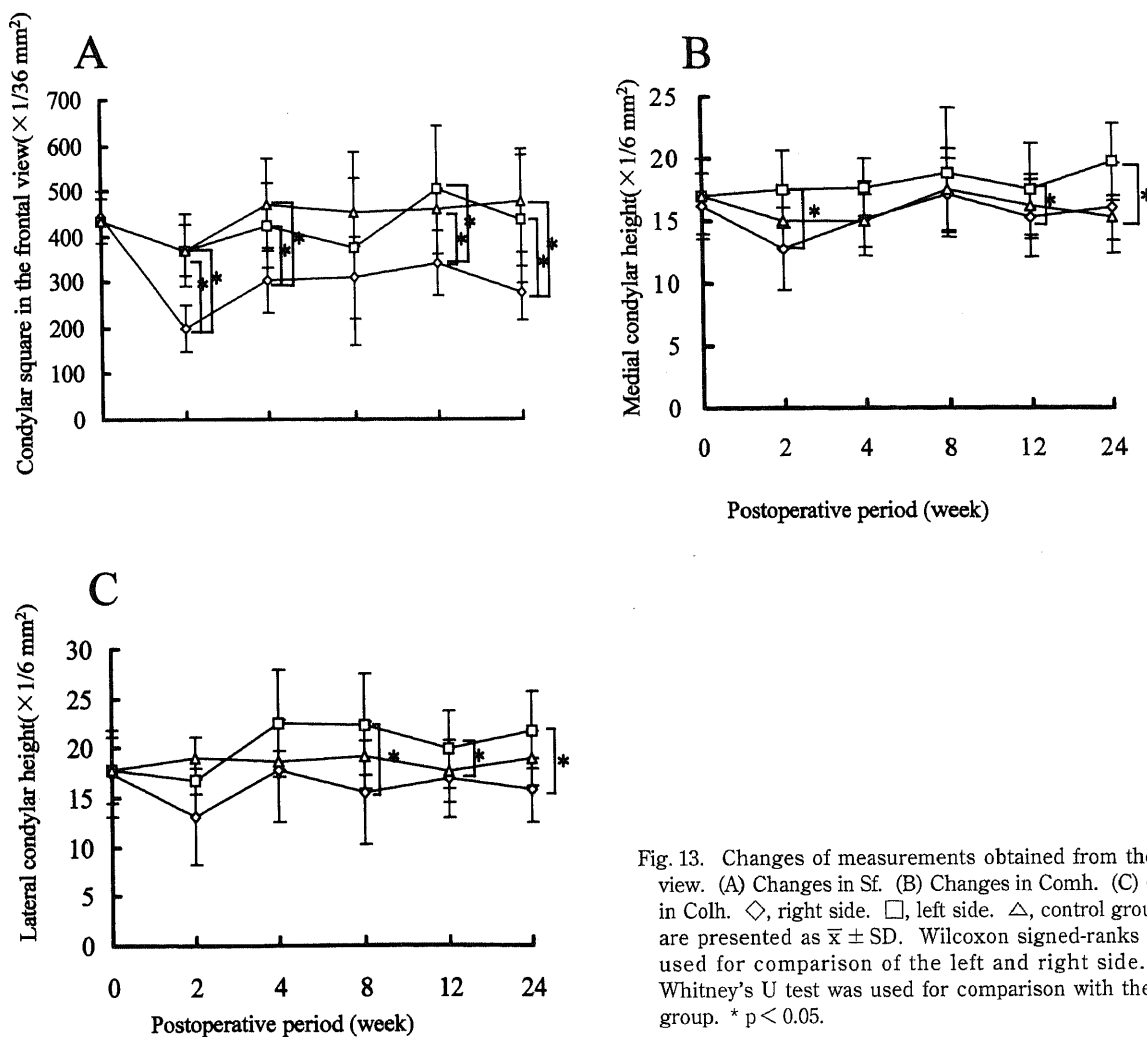


Fig. 13. Changes of measurements obtained from the frontal view. (A) Changes in Sf. (B) Changes in Comh. (C) Changes in Colh. \diamond , right side. \square , left side. \triangle , control group. Data are presented as $\bar{x} \pm \text{SD}$. Wilcoxon signed-ranks test was used for comparison of the left and right side. Mann-Whitney's U test was used for comparison with the control group. * $p < 0.05$.

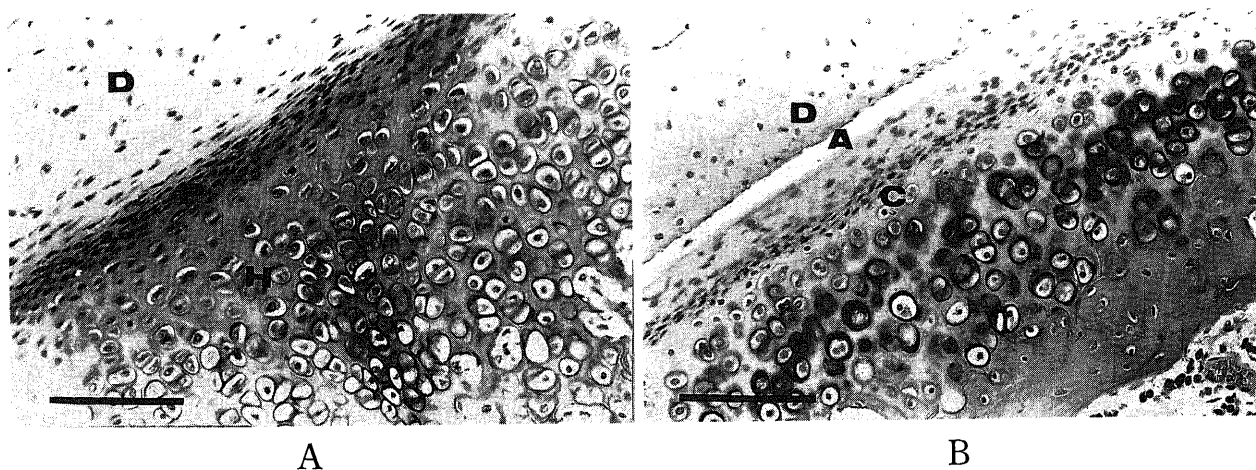


Fig. 14. Typical light microscopic findings of antero-lateral side (A) and antero-medial side (B) in left condyle after 2 weeks. D, disc; C, condyle; P, proliferation zone; H, hypertrophy zone; A, articular cavity. Bar indicates $100 \mu\text{m}$. The articular cavity became narrower or disappeared. Proliferation zone was compressed and the density of cells increased and hypertrophy zone became thicker at the antero-lateral side of the left condyle. HE stain, original magnification $\times 80$.

定 (Wilcoxon signed-rank test) を, コントロール群との比較にはマンホイットニーU検定 (Man-Whitney's U test) を用い, 5%未満の危険率をもって有意とした。

また下顎頭の肉眼レベルにおける形態変化を下顎骨の他の部位との関連性を把握するために統計処理ソフトを用いて多変量解析を行った。とくに下顎頭面積Ssに対する各項目による重回帰関数を求め, さらに変数選択-重回帰分析 (stepwise regression analysis) を行った。

Ⅷ. 力学的検討

剛体ばね理論モデル (rigid-bodies spring model, RBSM) を用い, 下顎頭の表面接触圧分布を側面方向から2次的に検討した。左右側面方向から規格写真を撮影し下顎頭と歯牙, 下顎顎角部をトレースし, 解析にはPC9821Xa13 (日本電気, 東京), グラフテックデジタイザー KD3320 (グラフテック, 東京) により各設定項目を入力し, 演算を行った。下顎頭表面の積分点は36点設定し, 剛体ばね理論の1要素モデルを用いてモデル化し

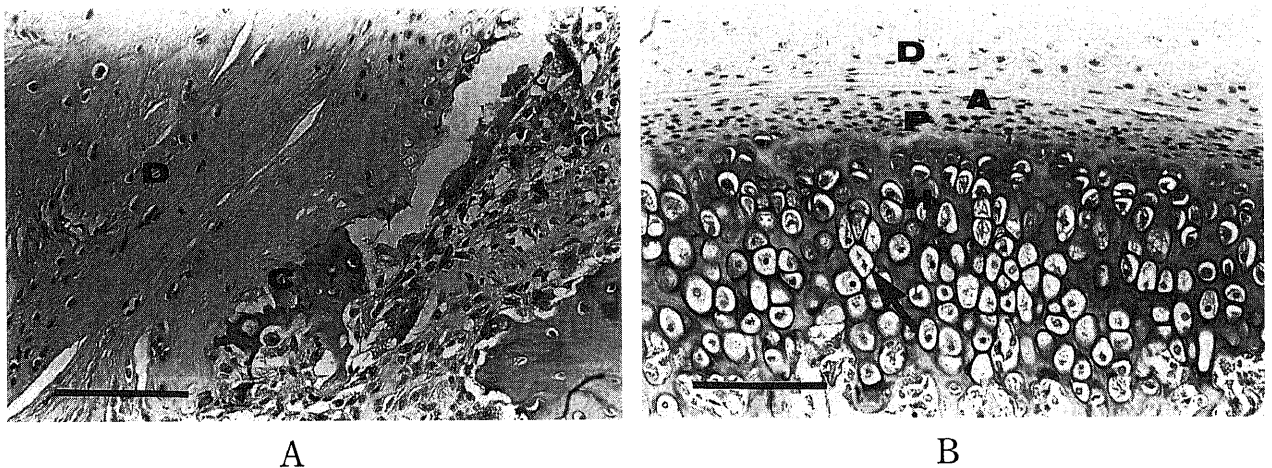


Fig. 15. Typical light microscopic findings for (A) the anterior side and (B) antero-medial side of the left condyle after 8 weeks. D, disc; C, condylar cartilage; P, proliferation zone; H, hypertrophy zone; A, articular cavity. Bar indicates $100\mu\text{m}$. The articular cavity disappeared and the thickness of cartilage zone decreased at the anterior side of the left condyle. An arrow indicates expanded lacunae in hypertrophy zone. HE stain, original magnification $\times 80$.

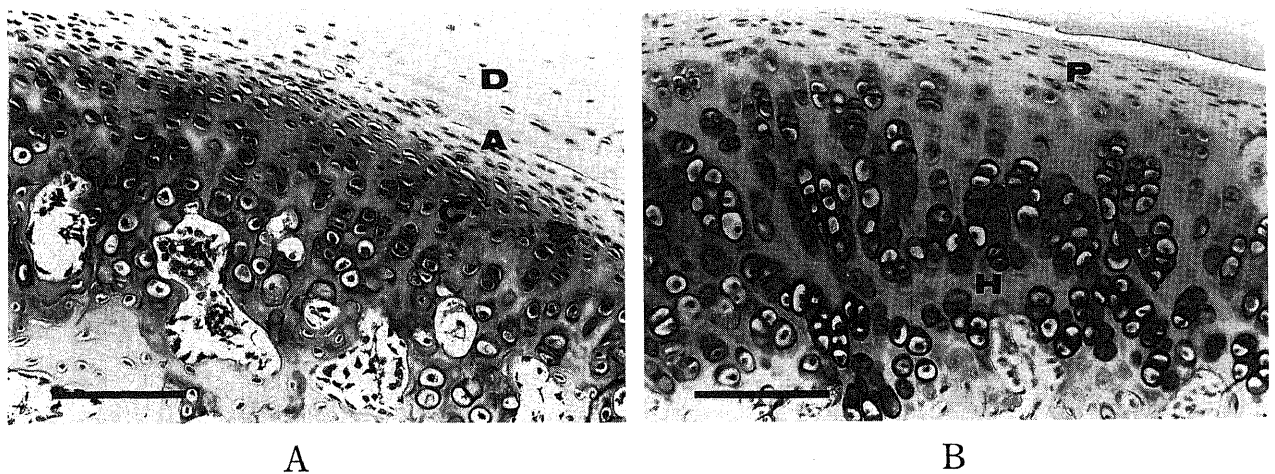


Fig. 16. Typical light microscopic findings for (A) the antero-lateral side and (B) the antero-medial side of the left condyle at after 12 weeks. D, disc; C, condylar cartilage; P, proliferation zone; H, hypertrophy zone; A, articular cavity. Bar indicates $100\mu\text{m}$. The density of cartilage cells at the antero-lateral side of the condyle was increased more than that at the antero-medial side of the condyle. An arrow indicates the columns of cartilage cells. HE stain, original magnification $\times 80$.

た。本モデルでは術後も骨片間が強固に固定されているものとして下顎骨全体を1要素として考えており、平行変位 (u, v) と回転 (θ) の3自由度を下顎角部に設けた。筋力による外力はこの自由度設定位置に作用するものとし、咀嚼筋の筋力はすべてこの点の外力に換算した。

関節窩と下顎頭で構成されている顎関節には、下顎頭の輪郭に沿って接触圧を計算するための積分点を設けた。また、この部分は比較的滑らかであり、垂直方向の表面力、すなわち接触圧のみ伝達するものとし、せん断方向に対しては抵抗しないものと仮定して積分点毎に垂直ばねのみを設けた。

歯牙部の反力は臼歯部に設定して計算した。剛体ばね理論では、モーメント反力も計算されるため、積分点が1点でも歯牙部の分布反力を表現することができる。この部分では垂直ばねとせん断ばねを設けた (図8)。

本解析の流れは、顎関節部に生じた負の接触圧を再配分する

ループと歯牙部に生じた矛盾するせん断反力を打ち消す筋力の発生2つの大きなループから構成されている。

負の接触圧を再配分する計算は次の手順で行った。

第一段階：所定の筋力に対する積分点の接触圧を求める。

第二段階：前回の接触圧の中で負の接触圧があれば、一旦、負の接触圧を取り除き、釣り合いを保つための拘束を加える。

第三段階：このような拘束力は実際には存在しないので等大異符号の力を加える。第二段階と第三段階を負の接触圧が無視できるまで繰り返す。

上述の顎関節部における接触に関するループを負の接触圧が無視できる程度に収束するまで繰り返した後、歯牙部のせん断反力をチェックし、もし矛盾するせん断反力 (下顎骨が大きく前後的に移動してしまう力) が生じていれば、それを打ち消す力を筋力として与え、再度顎関節における接触に関する繰り返し計算を行った。この過程を矛盾するせん断反力が無視できる

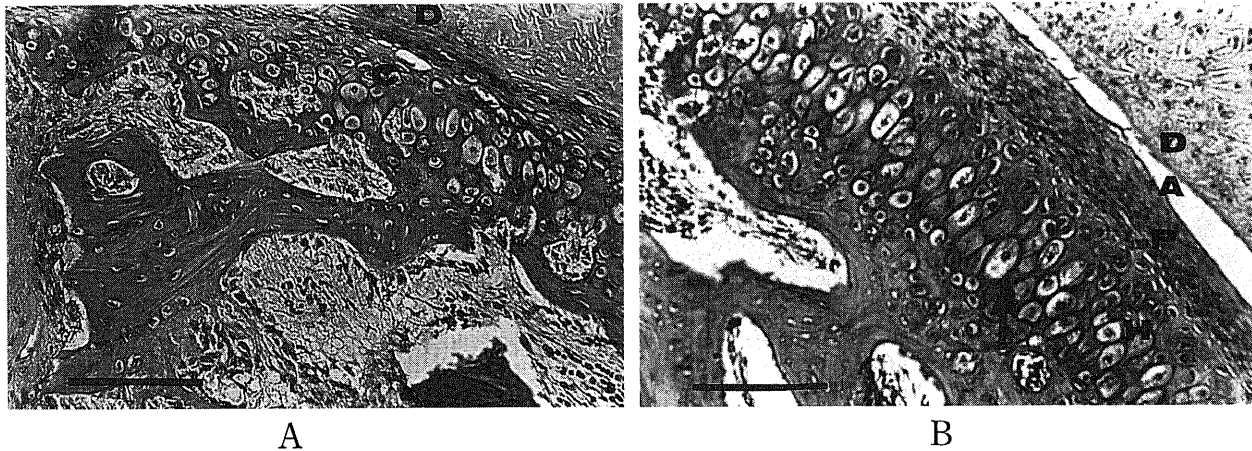


Fig. 17. Typical light microscopic findings for the anterior side of the right condyle (A) after 2 weeks. The thickness of cartilage zone decreased. (B) after 8 weeks. An arrows indicates expanded lacunae in hypertrophic zone. D, disc; C, condylar cartilage; P, proliferation zone; H, hypertrophy zone; A, articular cavity. Bar indicates $100\mu\text{m}$. HE stain, original magnification $\times 80$.

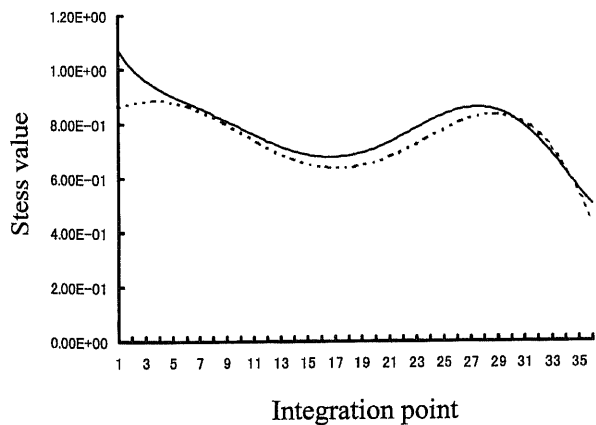


Fig. 18. Stress distribution changes in the condyle. Stress distribution on the condylar surface is expressed with the multiple clause approximation methods. Point 1 is most posterior and point 36 most anterior. —, non-operative side. ----, operative side.

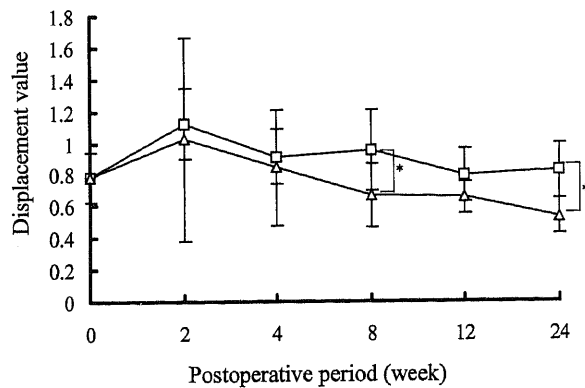


Fig. 19. Changes in the displacement volume obtained as a result of analysis with the rigid bodies spring theory. \square , left side. \triangle , right side. Data are presented as $\bar{x} \pm \text{SD}$. Wilcoxon signed ranks test was used for comparisons of the left and right side. * $p < 0.05$.

まで繰り返した (図9).

以上のように、接触問題の場合には余分な力を取り去り、筋力の修正にはそれを打ち消す力を追加するのが本解析手法の特徴である。

解析結果は3段階あり、第1に歯牙部のせん断ばねを無視し

た場合の結果で、下顎骨は全体的に前方に移動し、顎関節の接触圧分布も前方に集中している。この状態は歯牙を咬合させた瞬間の状態と考えられる。

第2に歯牙部によりせん断力を受け持った状態である。歯牙部にせん断ばねを設けるとこのような摩擦に抵抗する不自然な

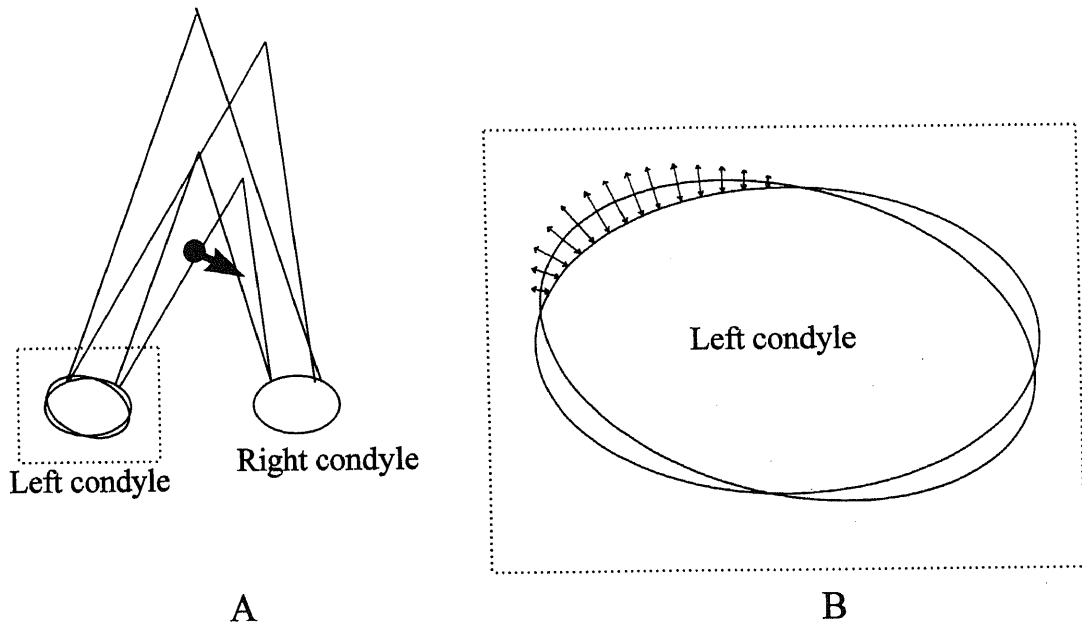


Fig. 20. Schematic representation of stress distribution in the temporomandibular joint from the superior view. (A) Whole mandibular image. An arrow indicates direction of mandibular deviation. (B) Magnification of the left condyle. Arrows indicate stress distribution on the left condylar surface. The shortest distance between an optional point on the ellipse rotated after osteotomy and the corresponding point on the original ellipse are equal to relative stress.

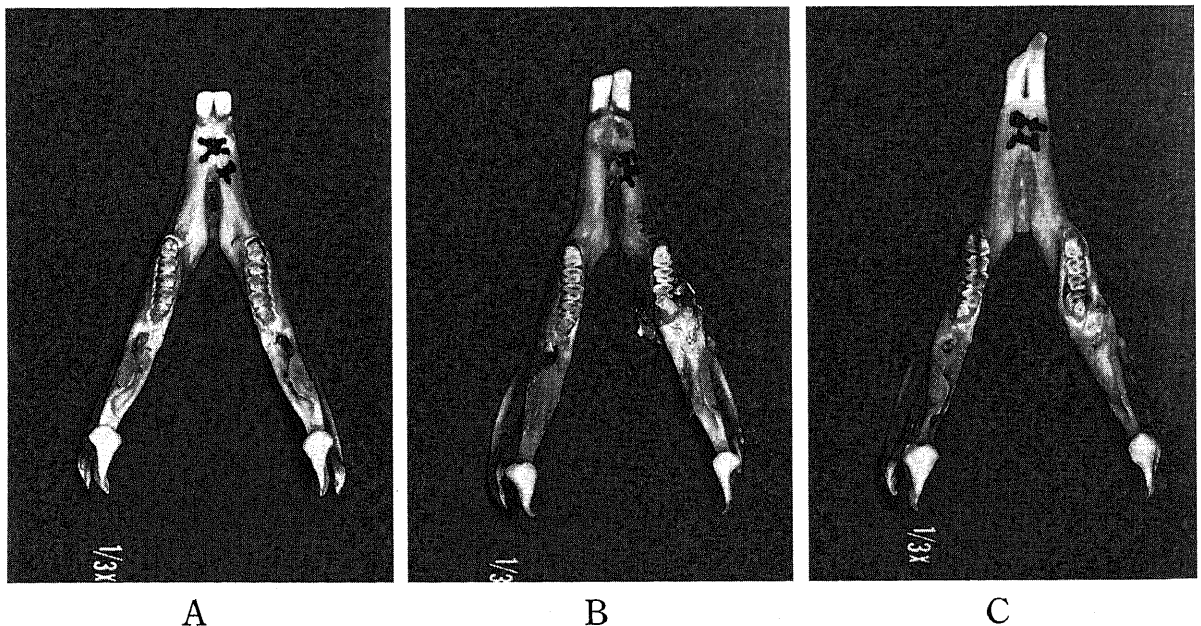


Fig. 21. Changes in the extracted mandibular bone from the superior view. (A) Preoperative. (B) After 2 weeks. (C) After 8 weeks. A comparison with the preoperative mandible shows that the antero-lateral side of the left condyle is pressed to be flat.

せん断反力が生じる。

この不自然な反力を筋力で打ち消した結果が第3の結果である。これが最大咬合力を発揮し得る最終的な結果であり、歯牙部の反力はほぼ真上にむいており、不自然なせん断力は筋力で打ち消されている。このときの筋力の向きは収束計算により修正され、はじめに入力した向きよりも上方を向いている。

この応力解析から、同時に安定となる下顎骨の変位量を算出した。この場合、下顎骨の安定とは下顎頭表面にできるだけ均等に応力が分布している状態であると仮定している。

さらに、軸位方向からは幾何学的な下顎骨の移動から考察した。

成 績

I. 肉眼的所見

各実験期間を通じ肉眼的には、回転側の下顎頭を中心に形態変化が認められた。すなわち回転側下顎頭前外方部では扁平な状態になったものが多く認められた。また全体的に下顎頭は対照群、回転側、対側の順に小さくなる傾向がみられたが対側では一定の形態変化の特徴は得られなかった。そこで次に実長計測により、形態変化の様相を経時的に検討した。

II. 実長計測による項目別結果

Pr-In, Zy-Zyにおいて実験群対照群間に有意差は認められなかった。

Ea-Epでは2週目で回転側が対照群に比べ有意に高値を示し

た。同時に対側よりも高値を示した。4週目で回転側が対側、対照群に対し高値を示した。12週目でも回転側が対側に対し有意に高値を示した(図10A)。Em-EIにおいても4週から24週で回転側が対側より高値を示し、12週で対側が対照群よりも低値を示した(図10B)。

Coa-Copにおいて両側の有意差は認められなかったがCom-Colにおいては、2週目以降回転側が対側に比べ有意に高値を示した。さらに2週、4週、8週、12週では対照群に対し対側が有意に低値を示した。2週では、対照群が回転側よりも高値であったが、しだいにその順序は入れ替わり24週では回転側が対照群よりも有意に高値であった。(図10C)。

Inf-Colにおいては2週目以降、両側に有意差が認められたが、対照群との有意差は得られなかった。実験群において下顎切歯正中は上顎切歯正中に対し明らかに右側に偏位していたことが認められた(図10D)。

Rhにおいては、2週目から12週目まで回転側が対側よりも有意に高値を示した(図11)。

III. 頭部規格写真による項目別結果

CAでは4週以降、回転側が対側よりも低値を示した(図12A)。8週以降では、対照群の値は対側より小さく回転側よりも大きい傾向がみられた。

Ssにおいては2週以降で回転側が有意に高値を示した。2週以降、対照群の値が最も大きく、次に回転側、対側の順番である傾向があった(図12B)。

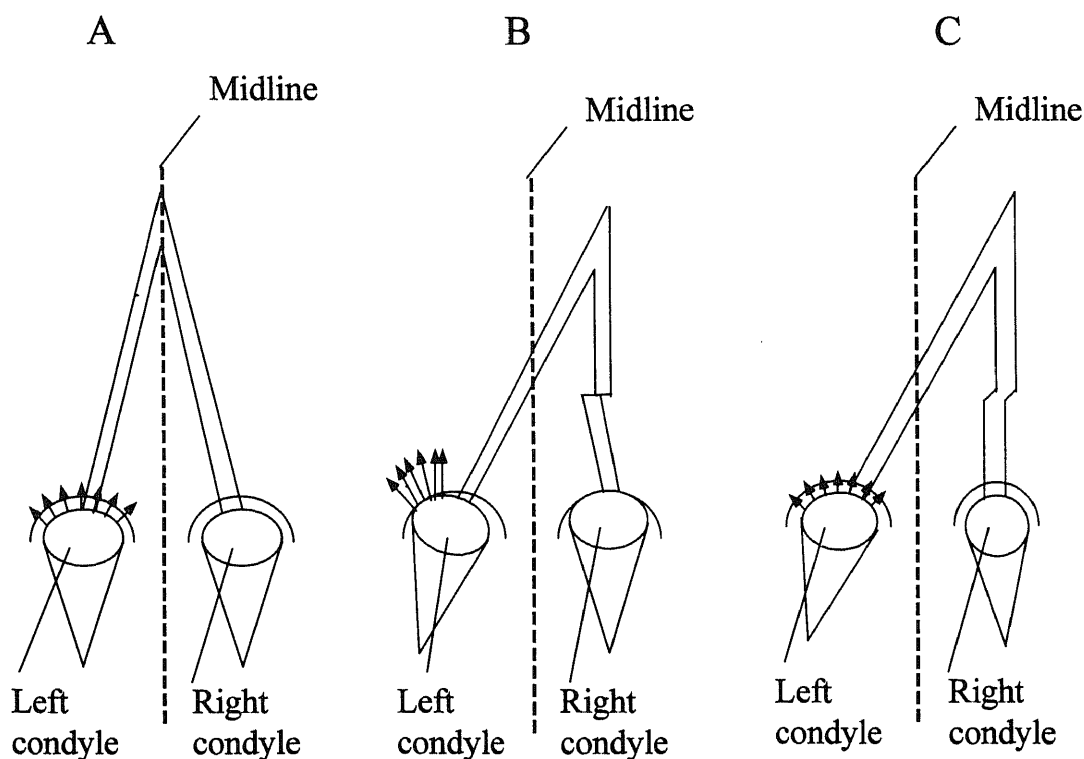


Fig. 22. Schematic representation of stress distribution changes in the left condyle from the superior view. (A) Preoperative. (B) After 2 weeks. (C) After 8 weeks. Arrows on the left condylar surface show stress distribution, and length of arrows indicate relative stress degree. Although stress was concentrated on the antero-lateral side of the left condyle immediately after the operation, it was modified by morphological changes in the condylar surface and had become distributed equally over the condylar surface after 8 weeks.

Osでは、2週目以降、回転側が対側よりも有意に大きく軸位方向投影面での咬耗面積の左右差が明らかになった。対照群の値は2週目以降の実験群の回転側の値よりも高値を示す傾向があった(図12C)。

実験群のInAでは2週目以降、経時的に値は増加傾向にあるものの個体間のばらつきが大きくなる傾向にあった。

MoAでは2週目と4週目、8週目、24週目において回転側が対照群よりも有意に高値を示した。また8週目と24週目では回転側が対側よりも有意に高値であった。実験群の回転側の値は、経時的に増加傾向にあったが個体間のばらつきが大きくなる傾向が示唆された。

Sfでは2週目、4週目、12週目、24週目において対側が回転側、対照群に比べて有意に低値を示した(図13A)。

Comhにおいて、2週目と12週目では回転側が対側よりも有意に高値を示し、24週目では回転側が対照群よりも有意に高値を示した。しかし2週目以降回転側が対側、対照群よりも大きくなる傾向があった(図13B)。

Colhでは8週以降、回転側が対側の下顎頭高よりも有意に大きな値を示した。4週目以降、回転側、対照群、対側の順番に大きくなる傾向があった(図13C)。

IV. 組織学的所見

術後2週目において回転側下顎頭前外方には肉眼的に関節腔が認められず、この部位で圧迫されていたことが推測された。また肉眼組織所見では増殖層は圧排された状態で非薄化し細胞が密であったが、肥大層の厚径は増加し細胞数の増加が認められた(図14A)。一方、回転側下顎頭前内方では関節腔の拡大が認められたが、ほぼ正常であった(図14B)。

術後8週目においても2週目と同様、回転側下顎頭前外方において肉眼的に関節腔は認められず、組織学的には軟骨層全体として厚径の減少がみられ、前方においては軟骨層の消失が認められた(図15A)。前内方では関節腔の拡大と肥大層の軟骨小腔の拡大が認められ非圧排所見が得られた。(図15B)。

術後12週目では回転側下顎頭左側前内外方に肉眼的に関節腔が認められた。組織学的に前外方は前内方に比べ、細胞密度は増加し厚径の減少がみられた(図16A)。前内方では軟骨層の肥大層では柱状配列が認められた。(図16B)。

一方、対側下顎頭は、前方に牽引される状態になると考えられるため2週目では組織学的に前方の軟骨層の非薄化が認められた(図17A)。しかし8週目では前方で軟骨小腔の拡大が認められたが、ほぼ正常な状態となっていた(図17B)。

しかしワイヤーによる極めて強固とは言えない固定だったこと、左側片咀嚼によって右側は非作業側になったことからその変化は実験動物間で非常に多様であり、一定の見解を得るには至らなかった。

V. 統計学的結果

Ssに対する各項目の重回帰分析を行った。実験群の両側下顎頭面積と対照群の回転側下顎頭面積について重回帰分析を行った。用いた項目は、Pr-In, Zy-Zy, 同側のRh, InA, 同側のMoA, 同側のOsである。

それぞれのSsを求める重回帰関数は以下のとおりであった。

実験群の回転側 $Ss = 0.579 - 0.003 \times (\text{Pr-In}) + 0.003 \times (\text{Zy-Zy}) - 0.001 \times (\text{Rh}) - 0.004 \times (\text{InA}) + 0.002 \times (\text{MoA}) + 0.562 \times (\text{Os})$ と表され、相関係数0.700, 自由度調整R2乗0.381, $P = 0.0027$ であった。

実験群の対側 $Ss = -0.663 - 0.002 \times (\text{Pr-In}) + 0.019 \times (\text{Zy-Zy}) + 0.005 \times (\text{Rh}) - 0.002 \times (\text{InA}) + 0.002 \times (\text{MoA}) + 0.619 \times (\text{Os})$ と表され、相関係数0.789, 自由度調整R2乗0.541, $P < 0.0001$ であった。

対照群の左側 $Ss = 0.179 - 0.011 \times (\text{Pr-In}) + 0.009 \times (\text{Zy-Zy}) - 0.020 \times (\text{Rh}) - 0.009 \times (\text{InA}) + 0.009 \times (\text{MoA}) + 0.509 \times (\text{Os})$ と表され、相関係数0.763, 自由度調整R2乗0.456, $P = 0.0042$ であった。

同様に同項目を用いて変数選択一重回帰関数 (stepwise regression) を行ったところ以下のとおりであった。

実験群の回転側 $Ss = 0.239 + 0.676 \times (\text{Os})$, 相関係数0.646, 自由度調整R2乗0.400, $P < 0.0001$

実験群の対側 $Ss = 0.198 + 0.672 \times (\text{Os})$, 相関係数0.747, 自由度調整R2乗0.545, $P < 0.0001$

対照群の左側 $Ss = 0.480 + 0.510 \times (\text{Os})$, 相関係数0.651, 自由度調整R2乗0.401, $P = 0.0002$

つまり実験群の両側、対照群のいずれにおいても、Ssと同側のOsが選択され高い相関が得られた。

VI. 力学的評価

側面方向での下顎頭応力解析の結果、回転側、短縮側において若干の相違があったがほぼ同様な高低変化をとる応力分布曲線を描いた(図18)。統計的に応力分布状態に有意な左右差を認めたものが、2週目では2/6(33.3%)、4週目、8週目、12週目ではそれぞれ3/6(50.0%)、24週目では5/6(83.8%)であった。これらは、単に各36ポイントの応力の相対的大きさを比較した結果であるが、下顎頭が下顎窩に対しより安定かどうかを見る指標としてより簡潔に判断できる変位量について考慮した。平行変位(u, v)と回転(θ)の大きさを $u^2 + v^2 + \theta^2$ として換算し表した結果、変位量では8週目と24週目に回転側下顎頭の変位量が有意に大きかった。また24週目の対側下顎頭の変位量は対照群よりも有意に小さい値を示した。つまり、本モデルにおいて変位量が大きかった8週目、24週目において回転側下顎頭は力学的に不安定であったと推察できる(図19)。

軸位方向では、単純に幾何学的に考察した。術前の下顎頭形態の際には、下顎頭の応力はわずかに前方に加わるだけであり、ほとんど外力は加わっていないものと考えられる。しかし術後には、急激な左側下顎頭内外径の内方回転により、幾何学的変化が生じる。下顎頭前方部を楕円で近似させモデル化した場合に、この長軸をわずかに回転させた楕円ともとの楕円との重なりのない部分の面積が下顎頭の接触圧を表していると考えられる。回転させた楕円上の任意の点ともとの楕円との最短距離がその点での応力の大きさに相当するものと考えられる。すなわち、回転側下顎頭前外方に圧縮応力が生じると推測し得る(図20)。

実際に摘出した下顎骨を観察してみると、上方からの観察では回転側下顎頭前外方では圧迫を受け扁平な状態のものが多く、回転側Colhが高値を示したことから下顎頭は同部位における負荷の大きさ、方向に対応するために下方にその圧迫部分の軟骨層の面積を増加させ、応力の分散をはかったことが推測された(図21, 22)。

考 察

今日、顎矯正手術の術式はほぼ確立されており、その中でも頻繁に用いられる術式は下顎枝矢状分割術である。この方法

は分割面の骨の接触面積を広くとることができ、また術後の合併症の少ない優れた方法であるが、後戻りや下歯槽神経の麻痺などの問題点が指摘されている⁴¹⁻⁴³。最近ではチタンプレートやスクリューなどの強固な固定により術後まもなく、経口での食事摂取が可能となり、患者の苦痛は軽減してきている。しかし、遠位骨片の分割面と近位骨片の分割面を無理に一致させ、下顎骨接合部での輪郭線に段差を与えないように固定を行うことから下顎頭を含む近位骨片の変位が生じる。これにより顎関節は、咀嚼運動を行わなくても持続的に異常な負荷を受けていることが考えられる。

近年、顎変形症患者に対し顎矯正手術を施行することが社会的にも認識されるようになってきている。同時に顎関節症に対する認識の向上も認められるようになり、顎関節症を併せ持つ顎変形症患者に遭遇することも稀ではない。一方、外科的顎矯正手術を施行する際には術後の顎関節症をできるだけ軽減するよう考慮することが良好な予後に大きく関わってくる。

すなわち、近位骨片をどの位置に整復固定するかが重要な問題であり、術後の下顎頭の角度変化、位置変化を防ぐために様々な近位骨片の復位方法が考案されている。3次元的に厳密に近位骨片を復位する方法から、下顎頭の位置が下顎窩から大きく逸脱していないことを触診により判定する方法まで各種考えられている^{40,41}。しかし、近位骨片復位装置を用いても、術後の軸位方向X線写真において下顎頭の角度変化、位置変化が生じているという報告もある³⁹。Epkerら⁴⁰は、顎関節への悪影響を防ぐ方法として、下顎枝矢状分割術においては、分割部での皮質骨の切離を勧めている。Ellis⁴¹は、器具を用いた復位が本当に必要なかどうかについて広範に文献検索を行い、器具を用いて外側骨片（今日の近位骨片）を復位しようという考え方は魅力的ではあるが検討すべき問題が多いと述べている。このように、近位骨片を完全に3次元的に術前の状態に戻すという完全復位の考え方が存在する一方、骨片の位置、方向が術後変化することがあっても、その変位が極端でなければ障害を残すことなく順応するという考え方もあり明確な見解は得られていない^{40,41}。

White⁴²は75名の顎矯正手術患者の術前術後に顎関節徴候、症状について診察し、術前49.3%の患者に顎関節徴候、症状を認めたが、その内の89.1%が術後に顎関節徴候、症状を見たと報告している。また術前顎関節徴候、症状のみられなかった38名、50.6%のうち7.9%が術後に顎関節徴候、症状が出現し、全体としてみれば、顎矯正手術を行うことで、顎関節徴候、症状には良い結果をもたらせるとしている。白石ら⁴³は、下顎枝矢状分割術単独施行例278例の術前術後の顎関節症状（クリック、開閉口時痛）について検討し、骨片固定法としてワイヤー固定を採用した43例中、術前に顎関節症状を認めた8例中4例が術後顎関節症状の消失をみたが、一方術前に顎関節症状を認めなかった35例中8例に術後顎関節症状を認めたと報告し、またスクリュー固定を採用した235例では術前顎関節症状を認めなかった182例中23例に術後顎関節症状の発現を認め、一方術前に顎関節症状を認めた53例中34例が、術後顎関節症状の消失をみたと報告している。術前の顎関節症状が術後消失する場合と、術前に認められなかった顎関節症状が術後認められるようになる場合もあり現状では予測が困難といえる。このように、顎位の変化と下顎頭の位置、角度変化が顎関節組織にどのような影響を与えるかについては臨床的に不明な点が少なくない。

また、顎関節機能異常の患者に対して積極的に下顎頭の負担軽減をはかるために下顎枝垂直骨切り術が用いられることも多い⁴⁴⁻⁴⁶。これは骨切り後、近位、遠位骨片を固定しないため、外側翼突筋により下顎頭の前下方への移動が生じ下顎頭と円板や後部結合組織との間隙が増大し、負荷が軽減するため症状改善を見ると考えられている。しかし、この術式は骨片固定を行わないため、顎間固定期間が長くなるという欠点も持ち合わせている。また、下顎頭の過剰な偏位は経年的に復位していく傾向があるとされている。

通常ヒト顎関節の機能面は、関節軟骨の局在からも推測されたとおり、側頭骨関節隆起後方斜面と下顎頭の前関節面である。機能時において、関節隆起の後方斜面に対して下顎頭の関節面と関節円板の中央狭窄部が対応し、この両者の位置関係はいかなる開口域においてもおおむね崩れることなく機能的複合体(functional complex)を形成している。また、滑液が関節円板によって隔てられた上下関節腔に存在し、関節軟骨、関節円板の無血管領域における栄養供給、老廃物の排泄、関節面間の潤滑の役割を果たしている。そして正常機能時におけるヒト顎関節は多くの場合、圧縮力を受けており、牽引力を受けるのは咬合点が歯列遠心位に位置した場合のみで、しかも噛みしめ側の顎関節にのみ生じることが知られている^{47,48}。Druzinskyら⁴⁹は哺乳類の歯列は顎関節に牽引力が生じるほど遠心位には形成されないと推察し、Itoら⁵⁰も同様にヒト顎関節は牽引力が生じないように反射的に調節されている可能性があるかと推察している。

顎関節の圧縮力に対抗する組織解剖的要素は下顎頭、関節隆起上を覆っている関節軟骨ならびにその間に介在する線維軟骨様組織である関節円板がその主役を担っている。窪木^{47,48}は、顎関節負荷受圧組織の圧縮特性が加圧直後の瞬間的変形相とその後持続的に負荷が加わることによって生じるクリープ相によって特徴づけられ、瞬間的変形相における顎関節部負荷の絶対量よりも持続的負荷による顎関節負荷組織に対する影響の方が著しいと述べている。Mowら⁵¹は、荷重直後の瞬間的変形相ではコラーゲン線維と軟骨細胞の瞬間的変形が生じ、その後生じるクリープ相では関節軟骨内での構造水の移動が生じることによって一定負荷下での持続変形が生じるとしている。Kempsonら⁵²や、秋月ら⁵³も一定荷重を生体外の条件で関節軟骨に加えることで圧縮曲線を描き、関節軟骨の物理的圧縮曲線は荷重直後の瞬間的変形相とその後生じる放物線状のクリープ相を示すことを明らかにしている。また、Linn⁵⁴は、関節軟骨の対時間変形量は持続的な負荷を与えた方が間欠的な負荷を与えた場合に比べて大きいことを実験的に証明している。

実験的に顎関節に外的刺激を加え顎関節組織にどのような変化が起きるかを観察する方法として従来より選択されてきた手法は、咬合を挙上したり下顎を前後に偏位させる装置を用いたものがほとんどであり²¹⁻²³、実験的に下顎骨骨切り術を行い下顎頭に位置、角度変化を生じさせその変化を検討したものはない。

成長期ラットを用いて片側性抜歯による下顎頭軟骨の厚径への影響を検索した松山²⁹は、抜歯側では下顎頭軟骨層の厚径の菲薄化を示したのに対し、非抜歯側では対照群と同程度の厚径を呈したことを報告している。また成熟した個体を用いた喜久田³⁰は両側に組織変化を生じたとし、ラットを用いた鈴木³¹は抜歯側の下顎頭軟骨の内側は厚いが、外側では薄く、非抜歯側

ではこれとは逆の現象が出現したと述べている。上保³⁰⁾は、装置によるラット下顎骨偏位で、3日後から対照群に比べ偏位側、非偏位側の両側で非薄化がみられ、その後は大きな変動はなく、14日以降はわずかながら厚径の拡大を呈し、対照群の値に近づいて行き、軟骨層の厚径の可逆的な反応を認めたとしている。Furstman³⁰⁾はラット臼歯の抜歯により咬合異常を惹起し、下顎頭軟骨層の厚径の非薄化を招いたことについて、これを咬合異常による下顎頭の非可逆的な早期老化現象であると解釈している。

Ghafariら³⁰⁾は下顎の前方偏位により、増殖層の軟骨細胞の増殖による厚径の拡大、骨化促進による肥大層の非薄化が同時に起こるとし、下顎頭軟骨の成長促進を認めている。また Petrovicら³⁰⁾はラットの下顎を機能的に前方に偏位させた場合、増殖層、成熟層の厚径拡大を招き、軟骨層厚径は厚くなるとし、また反対にチンキップによる下顎の後方偏位に対し増殖層は非薄化し、二次的に軟骨層厚径が薄くなると報告し、増殖層の細胞増殖の程度により増殖層や成熟層の厚径は変化することを指摘した。

本実験では家兎を用いたが、家兎は顎関節症の実験として多く用いられ、下顎頭が水平面である程度の大きさを有するため、肉眼的にも形態を観察するのに適している。下顎骨骨切り術により直ちに顎位、咬合の変化と同時に下顎頭の位置角度変化を生じさせた。これにより、右側下顎骨の短縮により下顎骨は瞬時にして右方偏位を生じ左側下顎頭内外側軸は内方に回転する。本邦に多い下顎前突症に対し下顎枝矢状分割術を行い、さらに遠位骨片を後方移動後に両骨片を強固に固定すると下顎頭は外側に張出しつつ、内方回転する傾向にある。教室の松本³⁰⁾は下顎骨を外方に偏位させた際の変化を実験的に観察した。そこで著者はこれをさらに発展させ内方回転を付与する実験を行った。

本実験において術後の下顎頭の力学的考察を行うことは非常に重要であるが、実際に筋力、咬合力、顎関節における接触圧を正確に計測することは不可能であり、骨格、歯牙の形態からの幾何学的情報から、計算上応力分布状態を推察する必要がある。

まず下顎頭に対する各計測項目との幾何学的な関連を把握するために、統計学的手法を用いた。下顎頭面積を目的変数とした重回帰関数を求め、さらに変数選択-重回帰分析を行ったところ、複数の計測項目を用いるよりも、同側の咬合面積だけを説明変数とした関数の方が、より有用であることが判明した。

また、我々は側面方向からの2次元的な顎関節応力分布状態を求めるための計算を試みた。今回の実験家兎において、咬合面積と同側の下顎頭面積に正の有意な相関が得られたことから、歯牙の咬合力はおもに同側の下顎頭に反映されるとみなし、左右一対として機能する下顎骨をあえて左右別々に考え、剛体ばね理論を用い応力解析を行うことにした。

RBSMは極限解析に対する離散化解析法の一つとして、川井によって考えられたモデルである。剛体ばね理論モデルは要素自身を剛体であると仮定し、要素境界面上分布したばねの仕事を用いて集中化されたエネルギーを評価する方法である⁵⁰⁾。一般に固体は粒の集団でできており、物質は限りなく細かい粒子の集団の階層構造でできていると解釈することができる。そこで、固体を荷重を受けても変形しない粒の集団にモデル化した場合に、一つ一つの剛体は互いに接触面を通じて力を伝え、全体として粒の山は釣り合っていると考えることができ、圧力分布は接触面に分布した法線バネ(法圧力にのみ抵抗)と剪断バ

ネ(接触面に平行な面内に働く剪断力に抵抗)系により連結されていると考えることができる。そしてこのバネ系に適当な応力-歪関係式を導入し、相隣る二つの要素の剛体変位の関数として接触面に分布するバネ系に貯えられる歪エネルギーならびに外力のポテンシャルを求め、その総和をとって剛体-バネモデルに全体系のポテンシャルエネルギーを計算し、ポテンシャルエネルギーの停留原理より力の平衡方程式が導出できることから、それを解けば問題とする剛体要素間の接触圧分布が決定される。このように、本モデルは、剛体とばねから構成されるモデルであることから、剛体ばねモデルと呼ばれている⁵⁰⁾。咀嚼運動は咀嚼筋がバランスよく機能し行われるが、顎関節の負荷は咬合力が生じた時に最も影響が及ぼされる。最大咬合力を発揮する時下顎骨は挙上が支配的になるものと考え、本研究では特に挙上に関与する筋力を外力として捉えることにした。

CAで左側が右側よりも低値を示したことから下顎頭の開閉口軸は元の状態に戻るような変化をし、偏位した顎位のまま開閉口運動が円滑に行えるような対応をしたと考えられる。組織所見で2週目で回転側下顎頭前外方で増殖層は圧排された状態で細胞が密であったが、肥大層の厚径は増加し細胞数の増加が認められたことから負荷に対し対応しようとする傾向が伺われる。8週目においては反対に肥大層の厚径は減少しているが、組織切片は水平断面にしすぎない。摘出下顎骨でみると、上方から観察すると回転側下顎頭前外方では圧迫を受け扁平な状態のものが多かったが、回転側 Colh が高値を示したことから下顎頭は同部位における負荷の大きさ、方向に対応するために下方にその圧迫部分の軟骨層の面積を増加させ、応力の分散をはかったことが推測された。すなわち、2週目においては軟骨の細胞を深部へ増加させることで負荷に対応し、時間の経過した8週目においては3次元的に接触面積を増すことで単位面積あたりの下顎頭軟骨の負荷をできるだけ緩衝するような変化が起こっていると考えられた。

側面方向からの剛体ばね理論モデルによる解析では、術後2週目から経時的に右側に比べ左側下顎頭が不安定になる傾向が示唆された。これは右側に偏位した状態で固定したことで、術後の間もない顎関節への負荷が軽減していく一方で、骨格、咬合状態による2次的な顎関節への負荷が不規則に増加していくことによると考えられる。回転側下顎頭の位置、角度変化により加わる負荷の部位は回転側下顎頭前外方と予想し得るが、右側下顎頭は、前方に牽引される状態になることが考えられる。右側の方が安定であったことは、骨切り術の固定にワイヤーを用いた結果、右側下顎頭を含む骨片の位置が柔軟に対応したことと推察された。

本実験のように、まず始めに顎偏位を起こさせた場合には、咬合状態はこれに対応し、咬合斜面は正常に比べ急傾斜を呈し、顎位に合った咬合の適応が生じたと思われる。この咬頭傾斜により下顎右方偏位を誘導する力が生じるため、結果的に後戻りを防ぐこととなった。同時にこれによる下顎頭の負荷も増大していったことが考えられた。

また本実験においては、顎関節だけでなく、下顎頭を成長の中心とする下顎骨全体としての形態変化も認められた。Rh下顎枝高は術後2週から12週まで対側の方が回転側よりも有意に小さい値を示したことや、咬合状態、咬合状態、咬合面積などから、回転側偏咀嚼癖が惹起されていることが考えられた。また対照群、実験群回転側、対側の順番に大きい下顎頭面積を示

したことから、下顎骨右側偏位により咀嚼機能、咬合力の低下があったことが示唆された。これらのことは手術により咬合と骨格を変更したことによる形態変化に伴い下顎骨と周囲の筋肉の機能的な順応が生じ、さらにこの機能的な適応が二次的な形態変化を生んだ結果と考えられる。つまり幾何学的な変化は同時に力学的な変化を生じさせ、その結果、その後の骨格形態の成長変化を招いたと考えられる。

中納³⁶⁾は、咬合斜面板をラットの上顎切歯に装着し下顎の左方偏位を誘導した結果、右側下顎骨長が長く、また左側下顎枝高が高くなる傾向を示し、左右下顎骨の骨密度および咬筋筋線維の代謝活性にも有意差を示したとしている。これらの結果から上顎接着型の斜面板による咬合異常は右側顎骨を前後的に、また左側顎骨を上下的に優位な成長をもたらしたとしている。左側下顎骨は機械的圧迫力を右側は機械的牽引力を受けたためと解釈している。

佐藤³⁷⁾は生後28日のラットの左側咬筋神経切断術を行ったところ、手術側の下顎頭幅径は生後35日において対照比小であったが、経時的に回復し、生後42日、49日には対照と差がなくなったとしている。非手術側の下顎頭幅径は生後35日において対照と差がなかったが、経時的に肥大し、生後49日では対照に比大で、下顎頭幅径は有意に左右差を示したと述べている。この報告は力学的変化が直接、骨格に影響を与えたものと解釈できる。

さらに骨格と同様に重要な因子として歯牙による咬合が挙げられる。正常な家兎の歯牙は一生伸び続けるため対合歯同士の咬耗により咬合は安定しており顎関節に加わる負荷は比較的小さいことが考えられる。垂直的に、下顎骨を挙上するときの反力は歯牙と顎関節に分配されるわけであるが、歯牙が常に伸び続けることを咬耗により調整し、歯牙と顎関節の応力分布を常に調整していることが考えられる。当然、骨格全体による調整も同時に起こっているが、より微妙で、早期の調整機能を持ち合わせているのは歯牙による咬合であると考えられる。手術群で生じた咬頭傾斜は咬合力を単に垂直的にだけでなく側方力を生じさせることになることから顎関節に対する応力を考慮するときには重要な因子であるといえる。

下顎頭への負荷の影響を考慮する上で個体の成熟度は非常に重要な因子である。つまり適応能力と成熟度がどれほど関与しているかという問題である。Hinkerら³⁸⁾は成熟したサルの下顎を前方に偏位させて得られた顎関節部の変化は病理的な異形成であるとしている。McNamaraら³⁹⁾はこの顎関節部の反応は若い動物か、成熟した動物かで大きく影響されるとしている。中野⁴⁰⁾は、生後1-3日の家兎の細胞周期は9-12時間と従来の報告よりも著しく短時間であったとし、実験動物の成熟度による軟骨細胞の分化の相違を示している。

本実験では成熟家兎を用いて下顎頭の形態変化を観察したが、手術後、正常な組織像を得るのに約12週間必要であった。しかし、下顎頭軟骨の細胞周期の長いヒトの下顎頭形態変化にはかなりの時間を要することが考えられ、これだけで応力バランスを調整しているとは考えにくい。そこで、実際には形態変化による応力緩和と同時に、近位骨片の後戻りによる位置変化による応力緩和が作用していると考えられる。

本実験では、骨切り後にも関節円板が下顎頭を包含している状態が維持されており、円板の形態も適応していた。ヒトにおける顎関節症状に認められる円板の変位は全く認められなかつ

た。円板の変位が生じやすい解剖学的形態のヒトでは、円板が常に負荷のかかる部分に位置しているとは限らない。ヒトでは関節窩と下顎頭の間を介し力を伝播するはずの円板が変位している可能性もある。ヒト顎関節では下顎頭の位置の制限が非常に小さいため滑走運動が存在するが、家兎では下顎頭の位置制限が大きいため滑走運動が存在しないことが円板の形態適応を容易に出現させたと考えられる。また咬合様式、顎関節の応力分布がヒトと家兎では明らかに異なっていることを考慮することが必要である。

顎矯正手術において術後の顎間固定を極力少なくし、なおかつ後戻り、顎関節症状をなくすためには固定を行う際に顎関節における応力を考慮することが重要であると考えられた。

結 論

臨床において下顎枝矢状分割術を施行すると下顎頭は微妙に偏位する。本実験ではその偏位を想定し固定後の下顎頭の経時的な形態変化を観察する目的で、家兎下顎骨の片側に骨短縮術を行って非短縮側に内方回転を付与した顎関節を中心にその変化を観察し、以下の結果を得た。

1. 肉眼的には内方回転側の下顎頭を中心に形態学的変化が認められた。すなわち回転側下顎頭前外方部では扁平な状態となったものが多く認められた。また全体的に下顎頭は対照群、実験群の回転側、対側の順に小さくなる傾向がみられたが実験群の対側では一定の形態変化の特徴は得られなかった。

2. 実測長による結果では回転側Com-Colにおいて、8週目以降対側(短縮側)に比べ有意に高値を示し、4週以降、回転側Colhが対側の下顎頭高より大きな値を示す傾向があった。すなわち、回転側下顎頭は同部位における負荷の大きさ、方向に対応するために圧迫部分の面積を増加させ応力の分散をはかったものと推察した。

3. 術後2週目の組織所見において回転側下顎頭前外方で、肥大層の厚径の増加と細胞数の増加により負荷に対応し、術後8週目においては、軟骨層全体の厚径は減少していた。術後12週目では左側前内方に柱状配列が認められたがほぼ正常な組織像に回復していた。

4. 剛体ばね理論モデルにより側面方向での応力解析を行った結果、術後2週目以降経時的に対側に比べ回転側下顎頭が力学的に不安定になる傾向が示唆された。実験群の両側、対照群のいずれにおいても、Ssと同側のOsの高い相関が得られた。

以上、本実験結果から、下顎頭の内方回転を中心とする経時変化による負荷に対し顎関節は、これを緩衝する形態に変化し順応することが示された。

謝 辞

稿を終えるに臨み、終始御懇篤なる御指導と御校閲を賜りました恩師、金沢大学医学部歯科口腔外科学講座山本悦秀教授に深甚なる謝意を表します。また直接御指導頂きました金沢大学医学部歯科口腔外科学講座中川清昌助教授に深く感謝し、本研究の遂行に際し多大な協力を頂きました小松市民病院歯科口腔外科の松本成雄先生、金沢大学医学部歯科口腔外科学講座の結城由夫先生、高桜大輔先生を始め諸先生方に感謝いたします。また、剛体ばね理論による顎関節応力解析プログラム作成および解析について御指導を賜りました明星大学理工学部土木学科竹内則雄教授、東京理科大学工学部電気工学科川井忠彦教授に深甚なる感謝の意を表します。

本論文の要旨は、第6回日本顎変形症学会(平成8年6月7日、仙台)で発表した。

文 献

- 1) 高橋 克, 陳 亮宏, 宮木克明, 西田光男, 村上賢一郎, 兵 行忠, 飯塚忠彦. 当科における過去13年間の顎変形症に対する外科的矯正術570例の臨床的検討. 日顎変形誌 1: 92-98, 1991
- 2) 久保諒修, 金 建三, 寺野敏之, 鈴木伸二郎, 覚道健治, 虫本浩三, 白数力也, 土井純子, 高橋一郎, 木下善之介. 大阪歯科大学第一口腔外科における顎矯正手術の臨床統計的観察. 日口診誌 2: 128-137, 1989
- 3) 吉屋 誠, 杉森正英, 堀口英之, 清水敬久, 岩瀬正泰, 南雲正男, 大森史枝, 柴崎好伸, 木村義孝. 顎矯正手術を施行した305名(314例)の臨床統計的観察. 日顎変形誌 6: 137-144, 1996
- 4) 中川清昌, 松本成雄, 上木耕一郎, 山本悦秀. 下顎枝矢状分割術の術式および術中・術後管理の改良による術後継発症の検討. 日顎変形誌 4: 108-114, 1994
- 5) Nakagawa K, Ueki K, Matsumoto N, Takatsuka S, Yamamoto E, Ooe H The assessment of trigeminal sensory nerve paresthesia after bilateral sagittal split osteotomy. Modified somatosensory evoked potentials recording method. J Cranio maxillofac Surg 25: 97-101, 1997
- 6) 松尾 朗, 千葉博茂, 内田 稔. 矢状分割術後に現れる下顎骨の構造変化. 日口外誌 36: 1633-1652, 1990
- 7) 道脇幸博. 下顎前突症に対する外科的矯正術(下顎枝斜状切離咬合改善術)後の下顎骨の経時的位置変化と後戻りに関する研究. 口科誌 38: 131-159, 1989
- 8) Rotskoff KS, Herbosa EG, Villa P. Maintenance of condyle-proximal segment position in orthognathic surgery. J Oral Maxillofac Surg 49: 2-7, 1991
- 9) Will LA, Joondeph DR, Hohl TH, West RA. Condylar position following mandibular advancement: Its relationship to relapse. J Oral Maxillofac Surg 42: 578-588, 1984
- 10) 福田廣志, 橋本賢二, 式守道夫, 上田吉生, 松下文彦, 山口万枝. 日本における下顎に対する顎変形症手術の実態調査1, 手術術式, 骨片固定法および顎間固定について. 日顎変形誌 5: 76-83, 1995
- 11) 福田廣志, 橋本賢二, 式守道夫, 上田吉生, 松下文彦, 山口万枝. 日本における下顎に対する顎変形症手術の実態調査2, 術前, 術後矯正治療, 外側骨片の復位について. 日顎変形誌 5: 224-235, 1995
- 12) 山本悦秀, 石川信廣, 鈴木純一, 平塚博義, 永井 格, 小浜源郁. 小白歯部まで延長する下顎枝矢状分割・ミニプレート固定法に関する検討. 日口外誌 35: 1554-1563, 1989
- 13) Stroster TG, Pangrazio KV. Assessment of condylar position following bilateral sagittal split ramus osteotomy with wire fixation or rigid fixation. Int J Adult Orthod Orthognathic Surg 9: 55-63, 1994
- 14) 迫田隅男, 大迫恒伸, 芝 良祐, 黒江和斗. 下顎枝矢状分割法における骨片固定法の違いが術後の顎位の変化に及ぼす影響—圍繞結紮固定法とミニプレート固定法—. 日顎変形誌 1: 99-104, 1991
- 15) Raveh J, Vuillemin T, Ladrach K, Sutter F. New techniques for reproduction of the condyle relation and reduction of complications after sagittal ramus split osteotomy of the mandible. J Oral Maxillofac Surg 46: 751-757, 1988
- 16) Leonard M. Preventing rotation of the proximal fragment in the sagittal ramus split operation. J Oral Surg 34: 942, 1976
- 17) Hiatt WR, Schelkun M, Moore DL. Condylar positioning in orthognathic surgery. J Oral Maxillofac Surg 46: 1110-1112, 1988
- 18) Lindqvist C, Söderholm AL. A simple method for establishing the position of the condylar segment in sagittal split osteotomy of the mandible. Plast Reconstr Surg 82: 707-709, 1988
- 19) 石井宏昭. 外側骨片位置復元法を応用した下顎枝矢状分割術ネジ止め固定術の術後変化に関する研究. 日顎変形誌 2: 97-116, 1992
- 20) 新井一仁, 新井 孝, 石川晴夫, 高森 等, 松尾 朗, 内田 稔. 下顎枝矢状分割術における外側骨片位置復元法. 歯学 80: 502, 1992
- 21) 葛西一貴. 顎・顔面頭蓋の成長発育に関する四次元的研究—ミニプタの下顎骨に対する成長抑制について—. 日矯歯誌 43: 157-184, 1984
- 22) 今村正史. 下顎を偏位させた際のラット下顎頭軟骨の反応. 口病誌 40: 457-475, 1973
- 23) Easton JW, Carlson DS. Adaptation of the lateral pterygoid and superficial masseter muscles to mandibular protrusion in the rat. Am J Orthod Dentofacial Orthop 97: 149-158, 1990
- 24) Rashed MZ, Sharawy MM. Histopathological and immunocytochemical studies of the effect of raised occlusal vertical dimension on the condylar cartilage of the rabbit. Cranio 11: 291-296, 1993
- 25) Charlier JP, Petrovic A, Herrmann SJ. Effects of mandibular hyperpropulsion on the prechondroblastic zone of young rat condyle. Am J Orthod 55: 71-74, 1969
- 26) Spitzer WJ, Pesch HJ. Animal studies of the effects of distal occlusion on the TMJ. D Tsch Zahnärztl Z 46: 585-588, 1991
- 27) Curtis DA, Kapila S, Curtis T, Miller A. Vertical dimension increases in the adult rhesus monkey: a pilot study. J Prosthet Dent 67: 701-707, 1992
- 28) Gazit D, Ehrlich J, Kohen Y, Bab I. Effect of occlusal (mechanical) stimulus on bone remodelling in rat mandibular condyle. J Oral Pathol 16: 395-398, 1987
- 29) 松山達郎. 抜歯による実験的咬合変化が顎関節におよぼす影響に関する病理組織学的研究. 口病誌 35: 58-72, 1968
- 30) 喜久田利弘. 片側歯牙欠損によるサル顎関節の病理組織学的研究. 九州歯会誌 34: 254-274, 1980
- 31) 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じ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
- 32) 上保 基. 下顎の側方偏位がラット下顎骨の細胞動態に及ぼす影響に関する研究. 歯学 79: 1520-1546, 1992
- 33) Furstman LL. The effect of loss occlusion upon the mandibular joint. Am J Orthod 51: 245-261, 1965
- 34) Ghafari J, Degroote C. Condylar cartilage response to continuous mandibular displacement in the rat. Angle Orthod 95: 49-57, 1986

- 35) Petrovic AG, Stutzmann JJ, Oudet CL. Control processes in the postnatal growth of the condylar cartilage of the mandible. *Rev. Iberoam Ortod* 6: 11-58, 1986
- 36) 中納治久. 下顎骨非対称誘導ラットにおける下顎骨形態および咀嚼筋組織の変化について. *日矯歯誌* 55: 111-125, 1996
- 37) 佐藤康守. 咬筋の左右不均衡が下顎頭部の成長発育に及ぼす影響. *阪大歯学雑誌* 31: 137-164, 1986
- 38) 松本成雄. 外側に偏位させた下顎頭の肉眼的ならびに組織学的変化に関する実験的研究. *十全医学誌* 104: 689-702, 1995
- 39) 金 俊熙, 迫田隅男, 芝 良祐. 下顎枝矢状分割術施行後の6症例の外側骨片の位置的变化. *日顎変形誌* 5: 89-94, 1995
- 40) Epker BN, Wessberg GA. Modifications in the sagittal osteotomy of the mandible. *J Oral Surg* 25: 157-159, 1977
- 41) Ellis E. Condylar positioning devices for orthognathic surgery: Are they necessary. *J Oral Maxillofac Surg* 52: 536-552, 1994
- 42) White CS. Prevalence and variance of temporomandibular dysfunction in orthognathic surgery: a review of incidence & management. *Int J Adult Orthod Orthognathic Surg* 7: 7-14, 1992
- 43) 白石 芳, 横江義彦, 宮木克明, 陳 亮宏, 西田光男, 村上賢一郎, 飯塚忠彦. 顎変形症手術の前後における顎関節症状の推移に関する臨床統計的観察. *日顎変形誌* 3: 147-153, 1993
- 44) Bell WH, Yamaguchi Y, Poor MR. Treatment of temporomandibular joint dysfunction by intraoral vertical ramus osteotomy. *Int J Adult Ortod Orthognathic Surg* 5: 9-27, 1990
- 45) Hall HD, McKenna SJ. Further refinement and Evaluation of intraoral vertical ramus osteotomy. *J Oral Maxillofac Surg* 45: 684-688, 1987
- 46) Campbell W. Clinical radiological investigations of mandibular joints. *Br J Radiol* 38: 401-421, 1965
- 47) 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* 9: 179-195, 1990
- 48) 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* 9: 219-227, 1990
- 49) Druzinsky RE, Greaves WS. A model to explain the posterior limit of the bite point in reptiles. *J Morphol* 160: 165-168, 1979
- 50) Ito T, Gibbs CH, Marguelles BR, Lupkiewicz SM, Young HM, Lundeen HC, Maha PE. Loading on the temporomandibular joints with five occlusal conditions. *J Prosthet Dent* 56: 478-484, 1986
- 51) Mow VC, Lai WM. Mechanics of Animal Joints. *Ann Rev Fluid Mech* 11: 247-288, 1979
- 52) Kempson GE, Freeman MA, Swanson SA. The determination of a creep modulus for articular cartilage from indentation tests of the human femoral head. *J Biomech* 4: 239-250, 1971
- 53) 秋月 章, 武井経憲. 関節軟骨および関節液に対する物理的アプローチ (伊丹康人, 西尾篤人編). *整形外科MOOK* 32: 38-47頁, 金原出版, 東京, 1984
- 54) Linn FC. Lubrication of animal Joints. *J Bone Joint Surg Am* 49: 1079-1098, 1967
- 55) 川井忠彦, 竹内則雄. コンピューターによる極限解析シリーズ2-離散化極限解析プログラミング-, 1-8頁, 培風館, 東京, 1990
- 56) 川井忠彦. 整形外科領域におけるコンピューターの応用-計算機支援バイオメカニクスのすすめ-. *骨, 関節, 靭帯* 1巻3号: 293-302, 1988
- 57) Hinker JJ, Ramfjord JJ. Anterior displacement of the mandible in adult rhesus monkeys. *J Prosthet Dent* 16: 503-512, 1966
- 58) McNamara JA, Jr; Carlson DS. Quantitative analysis of temporomandibular joint adaptations to protrusive function. *Am J Orthod* 76: 593-611, 1979
- 59) 中邨純子. 器官培養下における幼弱兎の下顎頭の成長について-3H-thymidine オートラジオグラフィによる観察-. *口病誌* 45: 618-636, 1978

Experimental study of morphological changes and stress distribution analysis using Rigid Bodies Spring Model In the craniomandibular joint after condylar internal rotation Kouichirou Ueki, Department of Oral and Maxillofacial Surgery, School of Medicine, Kanazawa University, Kanazawa 920 — J. Juzen Med Soc., **106**, 514 — 532 (1997)

Key words craniomandibular joint, sagittal split ramus osteotomy, morphological changes, stress distribution, rigid bodies spring model

Abstract

Sagittal split ramus osteotomy is a procedure most frequently applied in orthognathic surgery. When bone segment fixation is carried out together with jaw deviation and changes in occlusion, the condyle often causes changes of the position and of the longitudinal axis angle in the articular fossa. The reason for these changes is speculated to be that abnormal external loads are being exerted onto the temporomandibular joint. Therefore, the purpose of this study was to macroscopically and histologically examine morphological changes in the craniomandibular joint of animals, changes which could have been caused by changes in the position and angle of the condyle. A method was established to correlate changes in the position and angle of the condyle with mandibular lateral deviation. Adult male Japanese white rabbits (body weight 3 kg, 12 to 16 weeks old) were used for this experiment. After a resection range at 5 mm intervals was positioned with a dental engine on the posterior molar parts of the mandibule, mandibular body osteotomy was performed under general anesthesia. Anterior and posterior segments were fixated with wire in association with 5 mm reduction of the right mandibular body. After measuring points were determined on the extracted cranial bone and mandibule, these two items were measured three dimensionally with a caliper. The relevancy of each measurement was analyzed statistically. Preparation of a two dimensional rigid bodies spring model (RBSM), allowed us to identify contact stress distribution on the condylar surface dynamically on the lateral view. In addition, contact stress distribution was studied geometrically on the axial view. After 2 weeks, the left side showed significantly higher values for medio-lateral width of the condyle (Com-Col) than the right side (reduction side) ($P < 0.05$). After 4 weeks, the left side showed lower values than the right side for the Condylar angle (CA), that is, the angle between medio-lateral width of the condyle (Com-Col) and antero-posterior length of the condyle (Coa-Cop), while the left lateral condylar height (Colh) showed higher values than the other condylar heights ($P < 0.05$). As the result of stress analysis using RBSM, it was concluded that the left condyle tends to be more unstable than the right one after 2 weeks. Histological findings after 2 weeks showed pressure on the proliferation zone and high density at the antero-lateral side of the left condyle. After 8 weeks, though the thickness of the hypertrophy zone had decreased, the number of cells had increased. However, the condylar surface of the extracted mandible was pressed flat because of the excessive load at the antero-lateral side of the left condyle. This suggested that the morphological changes of the condyle caused dispersion of increasing downward stress in the area, because the left lateral condylar height (Colh) showed higher values than the other condylar heights.