原 著 論 文

顎関節の再構築と運動解析

田中 英央

Three-Dimensional Reconstruction of Temporomandibular Joint Osseous Components Using Tomography and Analysis of Condylar Movements with Six Degrees of Freedom

Hideo Tanaka

Abstract : For evaluation of stomatognathic function it is of great importance to investigate the spatial relationship between the mandibular condyle and the temporal-bone articular fossa (condylar position). The purpose of this study is to analyze the condylar position quantitatively not only at intercuspation but also during jaw movements. A three-dimensional reconstruction of the temporomandibular joint (TMJ) is made by the corrected lateral tomography, which is coupled with the jaw movement data recorded by a jaw tracking device (MM-JI) ; and then the condylar movements with six degrees of freedom are described on the graphic terminal.

I examined changes of the bony joint spaces in 8 subjects (16 TMJs) at intercuspation and during sagittal and lateral border movements. The results are as follows :

1. An analysis of the relationship between the position of the condyle and that of the kinematic condylar point (KCP) showed that 1) in case the KCP is located anterosuperior or superior to the condyle, the posterosuperior or the posterior portion of the condyle approaches the eminentia or the fossa in the maximal opening and the hinge movement during the sagittal border movement ; and 2) in case the KCP is located medial to the condyle, the posterior portion of the working-side condyle approaches the fossa during the lateral movement.

2. The condylar position at intercuspation had influences on that during jaw movements.

Key words : jaw movement, three-dimensional reconstruction, joint space

I. 緒 言

徳島大学大学院歯学研究科歯科補綴学第2講座(指導:坂東
永一教授)

Department of Fixed Prosthodontics, Graduate School of
Dentistry, The University of Tokushima (Director : Prof.
Eiichi Bando)

平成3年10月7日受付

正常な顎機能を営むためには顎関節の形態と顎頭
(下顎頭)運動との調和は不可欠である。咬合異常に起
因した顎機能異常者の中には、関節窩に対して顎頭が
変位している場合も多く認められる。顎頭の変位は関

節円板の転位をはじめとする軟組織の異常を引き起こすだけでなく、硬組織に対しても負荷となり顎関節に形態変化をもたらすものと考えられる。関節窩および関節結節に対する顎頭の位置関係（顎頭位）を解析することは、顎機能異常の発症機序を解明する上で重要であり、顎頭位の評価法に関する研究は今日まで数多く報告されてきた¹⁻¹⁵⁾。有歯顎者において顎頭位を評価する場合、従来主として咬頭嵌合位における顎頭位が解析の対象とされてきたが、下顎運動時の顎頭位についての報告は少なくいまだ不明な点も多く残されている。近年、顎運動測定法の開発によって顎頭運動を3次元6自由度でとらえる解析が進み^{16,17)}、顎頭部における任意の点の運動について多くのことが明らかになってきた。しかし顎関節を立体としてとらえ、立体の運動として顎頭運動を解析したものは、ヒト新鮮屍体を用いた大石¹⁸⁾、川畑¹⁹⁾の研究があるにすぎない。

本論文では、X線断層撮影法を用いて測定した顎関節の形態をグラフィックターミナル上に再構築し、顎運動測定器から得られた顎運動データとの対応を図ることにより顎頭の立体運動を再現し、咬頭嵌合位のみならず各種下顎運動時の顎頭位を定量的に解析したので報告する。

II. 研究方法

1. 顎関節の再構築方法

1) X線断層面決定治具の製作

上顎歯列弓とX線断層写真から得られる顎関節との3次元的な位置関係を知るために、X線断層面決定治具を製作した(図1)。この治具はアクリル板上に標線としてスチールワイヤを貼付したもので、断層面がこ

の標線と交わることによりX線断層写真上では標点として現れる。この標点の位置関係から上顎歯列に対する断層面の3次元的な位置の決定が可能となる。治具の基本構造は鈴木¹⁷⁾の製作したX線断層面決定治具に準じた。今回新たに矢状方向（顎頭の外側極と内側極とを結んだ顎頭長軸に対して垂直）の断層面決定のための標線を貼付したアクリル板（以下横板という）を下顎骨下縁の下に設定し、前頭方向（顎頭長軸に対して平行）のそれ（以下縦板という）を顎関節に対応する部位に設定し、その両方を連結した。治具は上顎歯列の唇頬側面に固定され、個人の顎顔面の形態あるいは顎頭長軸の水平角（顎頭長軸が前頭面となす角）に応じて調節が可能である。なおスチールワイヤの貼付は3次元測定器（ミットヨ社製マイクロコードFN 503）およびこれに付属する顕微鏡を使用して行った。

2) 撮影方法

矢状方向、前頭方向とも断層面が顎頭を通る条件を求めるために、体軸位撮影を行い顎頭長軸の水平角を求めるとともに断層深度を決定した^{20,21)}。次に上顎歯列に治具を装着した状態でX線断層撮影装置（シーメンス社製オプチプラニマート、最大振角45°、5重スパイラル軌道）によって撮影を行った。同時多層断層撮影にて前頭方向は1回、矢状方向は断層深度を変えて2回行った。多層カセットを使用することにより、1回の照射につき断層深度が2mmずつ異なる5枚の断層写真を得ることができる。したがって再構築のために使用する写真は前頭方向5枚、矢状方向10枚である。撮影時の顎位は咬頭嵌合位1顎位である(図2)。

図1 X線断層面決定治具

図2 X線断層写真上の顎関節像および標点
矢状方向（左）と前頭方向（右）

3) 3次元再構築

まず関節窩、関節結節および顎頭の骨の輪郭をX線写真上に直接トレースした。顎関節とともに撮影された標点を基準にX線写真上に座標系を設定し、3次元測定器およびこれに付属する顕微鏡を用いてトレースの2次元座標を読み取り、得られたデータを3次元測定器のホストコンピュータ (IBM 社製 PS 5560) にいったん格納した後、ミニコンピュータ (DEC 社製 MicroVAX 3800) に転送した。次に入力したデータを標点の位置関係から求めた断層像の拡大率で除すとともに、X線写真上に設定した座標系から歯列上に設定した生体咬合平面座標系 (後述) に変換した。さらに変換後のデータを3次のスプライン関数にて補間シヤフレームモデルとした。

4) 再構築の精度

再構築の精度を求めるために乾燥頭蓋骨8体、左右側16顎関節を用いた。歯列上に設定した座標系 (咬合平面座標系) における顎頭の輪郭形状を3次元測定器によって測定し、これをX線断層写真から得られた同一座標系の再構築像と比較した。精度の評価方法として、座標変換によって生じる誤差 (以下位置の誤差という) とX線写真上でのトレースおよび再構築を行う過程で補間によって生じる誤差 (以下形態の誤差という) についてそれぞれ算出した。位置の誤差については、グラフィックターミナル上で再構築像を3次元測定器によって測定した輪郭形状に重ね合わせるに要する移動量の絶対値とした。両方を可及的に重ね合せた後、形態的にみた顎頭のほぼ中心の点から顎頭の再構築像および測定による輪郭形状に対して任意の方向に直線を引き、それぞれこの直線に近接する3点によって定まる面を求めた。直線とこれらの面との交点を算出し、顎頭の中心の点とそれぞれの交点との距離の差の絶対値を求め、その最大値を形態の誤差とした。

2. 下顎運動の測定

ディジタル方式顎運動測定器 (MM-JI)²²⁾を用いて、後述する被験運動について測定した。測定データはミニコンピュータ (DEC 社製 PDP 11/34 A) に格納した後、顎関節の形態データと同じミニコンピュータに転送した。

3. 再構築像と顎運動データとの対応および顎頭運動の再現

顎運動測定器の座標系で得られた6自由度顎運動

データは生体咬合平面座標系に変換することにより、再構築像と同一の座標系で取り扱うことが可能となる。顎運動データは任意の点の位置ベクトルの変換行列として4次の正方行列で表現されており、再構築像の各点の位置ベクトルにこの変換行列を掛け合せることにより、測定した任意の顎位での顎頭位が再現できる。なお顎頭運動のグラフィック表示にはグラフィックターミナル (EVANS & SUTHERLAND 社製 PS 390) を使用した。

4. 座標系および各座標系間の変換行列

1) 座標系の設定

(1) 測定器座標系 (上顎座標系: Su, 下顎座標系: SI)

ディジタル方式顎運動測定器の上顎顔弓に設定した座標系を上顎座標系 (Su), 下顎顔弓に設定した座標系を下顎座標系 (SI) とする。上下顎顔弓を固定した状態で両座標系は一致する。

(2) 生体咬合平面座標系 (Sb)

上顎歯列弓上の基準点、すなわち上顎左右中切歯の近心切端隅角間の中点 (以下切歯点という) と左右上顎第1大臼歯または第2大臼歯の中心窩の3点で規定される面を咬合平面とする。この3点の重心を原点、原点と切歯点を結んだ直線をX軸、咬合平面上でこれに直交する直線をY軸、咬合平面の法線方向をZ軸とする座標系を生体咬合平面座標系 (Sb) とする。

(3) 模型咬合平面座標系 (Sc)

模型上で生体咬合平面座標系と同一の定義で規定される座標系。

(4) X線断層面決定治具座標系 (Sf)

X線断層面決定治具 (横板および縦板) に印記した3標点によって規定される座標系。

(5) X線写真座標系 (Ss)

X線断層写真上 (矢状方向および前頭方向) の標点によって規定される座標系。

2) 各座標系間の変換行列の算出

各座標系間の変換行列 (4次の正方行列) をそれぞれ A1, A2, A3, A4, A5 とする (図3)。

(1) 下顎座標系 (SI) と上顎座標系 (Su) (A1の算出)

顎運動測定器の検出機構部に組み込まれた8個の磁気スケールから得られるデータより、測定した任意の顎位におけるA1を算出した。

図3 座標系および各座標系間の変換行列の相互関係

A1～A5はそれぞれ4次の正方行列である変換行列

SI: 測定器下顎座標系 Su: 測定器上顎座標系

Sb: 生体咬合平面座標系 Sc: 模型咬合平面座標系

Sf: X線断面層面決定治具座標系 Ss: X線写真座標系

(2) 上顎座標系 (Su) と生体咬合平面座標系 (Sb) (A2の算出)

上顎顔弓と上顎歯列との位置関係を測定するために治具（以下生体標点測定針という）を用いた。生体標点測定針の先端の下顎顔弓に対する3次元座標は、あらかじめ上下顎顔弓を固定した状態で測定している。上顎顔弓を上顎歯列に固定し生体標点測定針を下顎顔弓に固定した状態で、生体標点測定針の先端を上顎歯列弓上の基準点に一致させ測定した点の座標からA2を算出した。

(3) 模型咬合平面座標系 (Sc) と生体咬合平面座標系 (Sb) (A3の算出)

A3は単位行列とした。

(4) X線断面層面決定治具座標系 (Sf) と模型咬合平面座標系 (Sc) (A4の算出)

上顎模型にX線断面層面決定治具を固定した状態で、3次元測定器によって模型上の基準点の座標を測定し、3次元測定器の座標系を模型咬合平面座標系に設定する。この座標系においてX線断面層面決定治具の横板および縦板それぞれに印記した3標点の座標を測定し、その値からA4を算出した。

(5) X線写真座標系 (Ss) とX線断面層面決定治具座標系 (Sf) (A5の算出)

X線断面層面決定治具座標系における治具の横板および縦板上に貼付されたワイヤの位置は、貼付時の測定により明らかになっている。X線断面層写真上の標点の位置関係からA5を算出した。

5. 解析方法

1) 運動論的顎頭点の解剖学的位置

矢状面限界運動軌跡と左右側方限界運動軌跡を矢状面に重ねて投影した場合に、その上下的な厚みが最も小さくなる点が運動論的顎頭点である¹⁷⁾。それぞれの被験者における顎頭および関節窩に対する運動論的顎頭点の位置関係について左右側で調べた。

図4 顎頭に設定した座標系

生体咬合平面座標系において再構築した顎頭（左）とその最上点から5mm下方の水平断面（右）

図5 関節窩に設定した座標系

XY, YZ平面は顎頭に設定した座標系の各平面に平行、ZX平面は同一とした

(1) 顎頭に設定した座標系

左右側それぞれの顎頭について、以下の条件で規定される座標系を設定した。生体咬合平面座標系において再構築した顎頭の最上点から5mm下方の水平断面の、左右および前後幅のそれぞれを2分する直線の交点を原点とした。XY平面は咬合平面に平行な面とし、原点を通り顎頭の長軸方向に平行な直線をY軸、これに直交する直線をX軸、咬合平面の法線方向をZ軸とした(図4)。すなわちZX平面はX線断面層撮影における矢状方向の断面面に、YZ面は前頭方向の断面面にそれぞれ平行となる。

(2) 関節窩に設定した座標系

XY, YZ平面は顎頭に設定した座標系のそれぞれの平面に平行とし、ZY平面は同一とした。ZY平面上で

表 1 被験者

被験者 番号	年齢	性別	顎頭長軸の水平角 (右/左)(°)	顎頭間距離 (mm)	顎頭の左右径 (右/左)(mm)	顎頭の前後径 (右/左)(mm)	顎頭の前頭面形態 (右/左)
1	27	男	16.0/12.0	110.3	23.2/24.1	8.9/ 9.0	convex /convex
2	26	男	20.0/13.0	101.2	19.6/18.1	9.3/10.0	round /round
3	38	男	15.0/14.0	104.1	22.5/21.8	9.5/10.0	convex /convex
4	28	男	20.5/17.0	110.8	24.9/25.2	8.9/ 8.9	convex /convex
5	26	男	26.5/26.0	109.5	19.4/19.7	12.4/10.6	round /convex
6	53	男	10.5/13.0	101.6	21.6/21.7	9.6/10.2	convex /convex
7	29	男	27.0/26.0	113.3	20.6/20.7	8.6/ 7.9	convex /convex
8	26	男	5.0/ 5.0	105.3	17.9/20.0	10.8/ 9.8	flat /convex
平均(S.D.)	31.6(9.5)		17.6(7.6)/ 15.8(7.2)	107.0(4.6)	21.2(2.3)/ 21.4(2.3)	9.8(1.3)/ 9.6(0.9)	

再構築像の関節結節最下点を通り咬合平面に平行な直線と、関節窩最上点を通り咬合平面に垂直な直線との交点を原点とした(図5)。

2) 下顎運動時の関節窩および関節結節に対する顎頭の近接部位面積の変化

X線断層撮影法を用いて再構築した顎関節の形態データと顎運動データとの対応を図り、グラフィックターミナル上で顎頭運動を再現したときの関節窩、あるいは関節結節の骨の輪郭形状と顎頭のそれとに囲まれる空間を関節空隙と定義する。下顎運動時の関節空隙の変化の様相を定量的に評価するために、まず顎頭の再構築像の各測定点における関節窩、あるいは関節結節との最短距離を計算し、その最短距離が2 mm未満の部位を両者間の近接部位とした。この時点で近接部位は点の集合である。次に顎頭上である1点に対して最も近い2点を選び、これら3点で作られる三角形の面積を算出し、これをすべての点について求め、その総和から重複する三角形の面積を引いた値を顎頭上の近接部位面積とした。咬頭嵌合位および被験運動時の任意の顎位における顎頭上の近接部位面積を算出し、その変化について調べた。

6. 被験者

被験者は以下の条件を満たす成人男性8名で、左右側16顎関節を解析の対象とした(表1)。

- ① 疼痛、開口制限、雑音などの臨床症状のない者、
- ② X線所見として顎関節に著しい形態変化の認められない者、
- ③ 被験運動が比較的滑らかに行える者。

表中、顎頭長軸の水平角は体軸位X線写真上で顎頭の外側極と内側極を結ぶ直線が頭部固定用の左右のイヤードを結ぶ直線となす角度とし、顎頭間距離は同じ写真上で左右側顎頭の中央の点を求めその2点間

距離とした。また生体咬合平面座標系において再構築した顎頭の最上点から5 mm下方の水平断面の長軸方向の幅を左右径(長径)、これに垂直となる方向の幅を前後径(短径)とした。顎頭の前頭面形態についてはYaleの分類²³⁾に従った。

7. 被験運動

被験運動は、①矢状面限界運動および②左右側方限界運動とした。それぞれの運動は以下の通りである。

- ① 咬頭嵌合位より接触滑走させながら前方運動を行い前方限界咬合位まで運動した後、前方限界路上を最大開口位まで開口し、ひきつづき後方限界路上を後方限界咬合位まで閉口し咬頭嵌合位にもどる。
- ② 咬頭嵌合位から接触滑走を行い側方限界咬合位まで運動し、ひきつづき側方限界路上を最大開口位まで開口する。

III. 研究結果

1. 再構築の精度

乾燥頭蓋骨8体、左右側16顎関節を用いて誤差を算出した結果、位置の誤差は平均 0.32 ± 0.08 mm、形態の誤差は平均 0.41 ± 0.14 mmであった。

2. グラフィックターミナル上での顎頭運動の再現

顎頭運動のグラフィックターミナル上への出力例として、矢状面限界運動における3顎位(咬頭嵌合位、前方限界咬合位、最大開口位)について示す(図6)。図中、顎頭上に赤で表示した部位は関節窩および関節結節に対して顎頭が2 mm未満で近接する部位である。実際には、演算により1顎位ごとに形態データと運動データとの対応を図り、顎頭位をグラフィック

図 7 顎頭に設定した座標系における運動論的顎頭点の位置

図 8 関節窩に設定した座標系における運動論的顎頭点の位置

ターミナル上に出力するため、顎頭運動が動画として再現できる。

3. 運動論的顎頭点の解剖学的位置

被験者 8 名、左右側 16 顎関節について、顎頭および関節窩に設定した座標系における運動論的顎頭点の位置を示す(図 7, 8)。いずれの被験者においても運動論的顎頭点は解剖学的にみた顎頭内に存在していた。顎頭に設定した座標系における運動論的顎頭点の位置(以下 kcp-condyle と表現する)と関節窩に設定した座標系における運動論的顎頭点の位置(以下 kcp

-fossa)を比較した場合、それぞれのばらつきを標準偏差で示すと X 方向(前後方向)で右側 1.45 mm, 左側 1.18 mm (kcp-condyle), 右側 1.23 mm, 左側 1.08 mm (kcp-fossa), Z 方向(上下方向)で右側 1.23 mm, 左側 0.92 mm (kcp-condyle), 右側 1.01 mm, 左側 0.77 mm (kcp-fossa) となり、いずれも関節窩に設定した座標系における運動論的顎頭点の位置のばらつきが顎頭に設定した座標系におけるそれよりも小さかった。

図 9-a 顎頭上の近接部位面積の変化 (被験者 3, 矢状面限界運動)

ICP: 咬頭嵌合位 MP: 前方限界咬合位 MO: 最大開口位
TP: 後方限界路上の変曲点 CR: 後方限界咬合位

——: 切歯点の移動量: 運動論的顎頭点の移動量
|||||: 顎頭上の近接部位面積

図 9-b 顎頭上の近接部位面積の変化 (被験者 3, 右側方限界運動)

ICP: 咬頭嵌合位 RS: 右側方限界咬合位 MO: 最大開口位

4. 下顎運動時の顎頭上の近接部位面積の変化

被験者 3 における顎頭上の近接部位面積の変化について示す(図 9)。被験者 3 は左右側の運動論的顎頭点が顎頭に設定した座標系における原点, すなわち顎頭のほぼ中央に位置する。図 9-a は矢状面限界運動における顎頭上の近接部位面積の変化を, 切歯点および運動論的顎頭点の咬頭嵌合位からの移動量(実距離)とともに示している。左図は右側顎頭, 右図は左側顎頭である。横軸は時間を示し, 横軸上の略号は各運動における代表的な顎位(矢状面限界運動の場合, 咬頭嵌合位, 前方限界咬合位, 最大開口位, 後方限界路上の

図 9-c 顎頭上の近接部位面積の変化 (被験者 3, 左側方限界運動)

ICP: 咬頭嵌合位 LS: 左側方限界咬合位 MO: 最大開口位

変曲点, 後方限界咬合位, 咬頭嵌合位)である。縦軸は顎頭上の近接部位面積(縦実線), 切歯点の移動量(実線)および運動論的顎頭点の移動量(破線)を示す。近接部位面積のうち, 上段は顎頭が関節窩最上部より前方の関節窩あるいは関節結節に近接する部位(以下前方近接部位という)の面積を示す。換言すれば前方近接部位は咬頭嵌合位で顎頭前上方が関節結節後斜面に, また矢状面限界運動における前方限界咬合位で顎頭前上方が関節結節最下点付近に, さらに最大開口位で顎頭後上方が関節結節前斜面にそれぞれ近接する部位である。下段は顎頭が関節窩最上部より後方の関節窩に近接する部位(以下後方近接部位という)の面積を示す。さらに上段の図中に示した横線は, X線断層写真上で関節窩最上点と関節結節最下点間の実距離を, 矢状方向の 10 枚の断層写真のうちトレース可能な 7~10 枚で平均した値で, 顎頭が関節結節を乗り越えたかどうかの指標とした。つまり運動論的顎頭点の移動量を示す破線がこの横線と交わる点で顎頭が関節結節最下点に位置する。図 9-b は右側方限界運動, 図 9-c は左側方限界運動における顎頭上の近接部位面積の変化を示したものである。

矢状面限界運動において前方滑走運動を開始すると同時に顎頭は移動を開始し, 前方限界咬合位で関節結節最下点付近に位置する。前方限界咬合位から前方限界路上を開口するにつれ切歯点および運動論的顎頭点の移動量は増し, 最大開口位で最大となる。この間顎頭は関節結節を乗り越え, 回転を伴いながら前上方に移動する。最大開口位から後方限界路上を閉口するに

図 11-a 顎頭上の近接部位面積の変化 (被験者 1, 矢状面限界運動)

ICP: 咬頭嵌合位 MP: 前方限界咬合位 MO: 最大開口位
TP: 後方限界路上の変曲点 CR: 後方限界咬合位
——: 切歯点の移動量: 運動論的顎頭点の移動量
||||||: 顎頭上の近接部位面積

図 11-b 顎頭上の近接部位面積の変化 (被験者 1, 右側方限界運動)

ICP: 咬頭嵌合位 RS: 右側方限界咬合位 MO: 最大開口位

つれ顎頭は後方へ移動し再び関節結節を乗り越え、後方限界路上の変曲点ではすでに関節窩内にもどっている。ここから蝶番運動によって閉口し、後方限界咬合位をへて咬頭嵌合位の顎頭位に至る。被験者 3 の場合、矢状面限界運動における前方近接部位の面積は、多少の減少が認められるものの著しい変化は示さなかった。また後方近接部位は咬頭嵌合位および蝶番運動時に認められた。側方限界運動における側方滑走運動時に、作業側顎頭の運動論的顎頭点がほぼ水平面の回転中心となり、作業側顎頭の移動は認められない。一方平衡側顎頭は側方限界咬合位で関節結節最下点付近

図 11-c 顎頭上の近接部位面積の変化 (被験者 1, 左側方限界運動)

ICP: 咬頭嵌合位 LS: 左側方限界咬合位 MO: 最大開口位

に位置する。側方限界路上を最大開口位まで開口する過程で、平衡側顎頭が作業側顎頭の前方移動を待って、両側顎頭が関節結節を乗り越える。被験者 3 の場合、側方限界運動における前方近接部位の面積は、作業側顎頭では関節結節を乗り越える付近あるいは乗り越えてから最大開口位に至るまでの間で、平衡側顎頭では側方限界咬合位付近で多少の減少が認められた。また後方近接部位は側方滑走運動時に作業側顎頭で認められた。

図 10 は被験者 3 の矢状面限界運動時の代表的な顎位における顎頭位 (左側) を、再構築像としてグラフィックターミナル上に出したものである。図中、赤で表示した部位は顎頭の再構築像の各測定点における関節窩および関節結節との最短距離が 1 mm 以上 2 mm 未満の部位を示し、青で表示した部位はその距離が 2 mm 以上 3 mm 未満の部位を示す。図中の 1 は咬頭嵌合位、2 は前方限界咬合位、3 は最大開口位、4 は後方限界路上の変曲点での顎頭位である。矢状面限界運動において 1 mm 未満で近接する部位は存在しなかった。

次に左右側の運動論的顎頭点が顎頭内で前上方に位置する被験者 1 および内方に位置する被験者 6 について示す。被験者 1 の前方近接部位の面積は、各限界運動における最大開口位付近で著しく増大する傾向が左右側で認められた (図 11-a, b, c)。また後方近接部位が咬頭嵌合位でほとんど認められないにもかかわらず、矢状面限界運動における蝶番運動時に認められた。この傾向は、関節窩に対して顎頭がより後方に位置する右側顎頭で強かった。図 12 は被験者 1 の矢状面限界

図 13-a 顎頭上の近接部位面積の変化 (被験者 6, 矢状面限界運動)

ICP: 咬頭嵌合位 MP: 前方限界咬合位 MO: 最大開口位
TP: 後方限界路上の変曲点 CR: 後方限界咬合位

—: 切歯点の移動量: 運動論的顎頭点の移動量
■■■■: 顎頭上の近接部位面積

図 13-c 顎頭上の近接部位面積の変化 (被験者 6, 左側方限界運動)

ICP: 咬頭嵌合位 LS: 左側方限界咬合位 MO: 最大開口位

おける顎頭位 (左側) の出力例で, 図中の 1 は咬頭嵌合位, 2 は左側方限界咬合位での顎頭位である。側方運動における作業側顎頭の後方への移動と顎頭後方での近接部位の出現が確認できる。

IV. 考 察

1. 研究方法について

1) 測定法について

顎頭運動を動態として観察するにはX線を用いる方法 (X線映画法, X線ビデオ法) や核磁気によるもの (MR 撮像法) があり, 特定の顎位における顎頭位を観察するには CT, X線断層撮影法などがあげられる。これらはいずれも直接的な方法である。これに対して本研究で用いた方法は, 測定器を上下顎歯列に固定して上下顎歯列の相対的な運動を測定し, 顎口腔系を剛体と仮定して顎頭の立体運動を再現するもので, いわゆる間接測定法である。X線を用いる方法により, 運動時のあらゆる顎位における顎頭位を観察するには被爆の点で問題がある。近年, 医療の各方面に取り入れられてきた MR 撮像法は顎関節にも応用され, 連続する顎頭位を画像としてつなぎ合わせるにより一連の運動として観察することが可能で, 軟組織を含めた顎関節の運動を定性的に解析するには最適である。しかし撮像に時間がかかるため, 厳密な意味で連続した運動を記録することはできない。また一定時間その顎位を保持することが困難な最大開口位などにおける顎頭位の観察も実際には不可能である。さらに精度の点から定量的な解析を行うには十分とはいえない。本研究で

図 13-b 顎頭上の近接部位面積の変化 (被験者 6, 右側方限界運動)

ICP: 咬頭嵌合位 RS: 右側方限界咬合位 MO: 最大開口位

運動における顎頭位 (右側) の出力例で, 図中の 1 は咬頭嵌合位, 2 は前方限界咬合位, 3 は最大開口位, 4 は後方限界路上の変曲点, 5 は蝶番運動時の顎位での顎頭位である。これにより最大開口位および蝶番運動時に顎頭後上方もしくは後方に近接部位が現れるのが視覚的に理解できる。被験者 6 の各限界運動における前方近接部位の面積の変化の傾向は, 被験者 3 の場合に類似しているものの, 側方限界運動における側方滑走運動時あるいは側方限界咬合位付近で, 作業側顎頭に後方近接部位の面積の著しい増大が認められた (図 13-a, b, c)。図 14 は被験者 6 の左側方限界運動に

は、ほぼ剛体とみなし得る顎関節の硬組織に注目し、顎頭位の観察に最も適したX線断層撮影法を用いて、咬頭嵌合位1顎頭で撮影したX線断層写真から再構築を行い、顎運動測定器から得られた顎運動データとの対応を図ることにより顎頭の立体運動を再現した。

2) 顎関節の3次元再構築について

X線断層撮影法を用いた顎関節の3次元再構築についてはすでに鈴木¹⁷⁾が報告しているが、今回、矢状方向の断層撮影に加え新たに前頭方向の断層撮影を行い再構築の精度を向上させた。すなわち前頭方向の断層撮影を行うことにより、矢状方向の断層撮影では不鮮明となる顎頭内外側の形態情報が増すだけでなく、中央部付近の各断層面間の位置関係を再構築する際にも、矢状方向と前頭方向それぞれの位置情報を互いに補正することが可能である。

3) 再構築の精度について

再構築の精度の評価方法として、X線断層写真から得られたデータから再構築する過程で生ずる位置の誤差と形態の誤差について算出した。X線断層面決定治具に貼付したワイヤの位置関係により、測定データをX線写真座標系から生体咬合平面座標系に変換するとき生じる位置に関する誤差と、X線写真上でのトレースの誤差やワイヤフレームモデルにするときの補間による誤差などの形態に関する誤差とは、明らかにその成因を異にするものであり、その両者を区別した。したがって総合的に再構築の精度を評価するには、位置の誤差と形態の誤差との和を考慮しなければならない。両者の和 0.73 ± 0.16 mmはX線断層撮影法による像自体の誤差を含めた総合的なものであり、この程度の誤差は顎運動データとの対応を図り顎頭運動を再現するのに必ずしも大きな値ではない。

4) 顎頭位の評価方法について

顎頭位を評価するためにこれまで報告されてきた方法の多くは、矢状方向のある断面における2次元での評価方法である。これに対して小倉¹²⁾、牛田¹⁵⁾の研究は、いずれもX線断層撮影法を用いて顎頭上の各測定点から関節窩に対する距離を計測することによって、関節隙を3次元的な空間として評価している。本研究では、関節窩および関節結節に対する顎頭の3次元的な位置関係を評価するために、顎頭の再構築像の各測定点における関節窩および関節結節との最短距離を計算し、その最短距離が2 mm未満の部位を両者間の近接部位として顎頭上の近接部位面積を算出した。さらに解析の対象とした顎頭位は、咬頭嵌合位のみならず

各種下顎運動時のあらゆる顎位における顎頭位であり、関節空隙の変化の様相を定量的に解析した。咬頭嵌合位および被験運動時に関節窩および関節結節に対して顎頭が1 mm未満で近接する部位は被験者8名のいずれにおいても存在しない。また2 mm以上3 mm未満で近接する部位は広範囲にわたり解析を複雑にするため、近接部位の評価は2 mm未満を基準とした。また近接の程度を表現するため近接部位を面積で評価した。

5) 被験運動について

本研究で行った被験運動は矢状面限界運動および左右側方限界運動である。これらの運動は咬頭嵌合位を出発点として一定方向に下顎を動かし、その運動範囲が最大となるように行うものであり、特に切歯点における運動軌跡が指標とされてきた²⁴⁾。限界運動は咀嚼や開閉口などの日常的な機能運動とは明らかに異なるが、その再現性は高く、経時的にも咬合に著しい変化がなければ常に一定した運動軌跡を示す²⁵⁾。

2. 運動論的顎頭点について

河野は矢状面内における種々の下顎運動経路が顎頭付近で収束することを実験的に証明して全運動軸を定義したが²⁶⁾、立体運動においても全運動軸上の点が運動を解析する上での基準点になり得ることが明らかにされてきた²⁷⁾。塩澤¹⁶⁾は顎頭中心点、鈴木¹⁷⁾は運動論的顎頭点をそれぞれ定義し、基準点を求める際に矢状面内運動だけでなく側方運動を考慮することによって、2次元的な概念である全運動軸を3次元に拡張した。

1) 運動論的顎頭点の算出法について

運動論的顎頭点は矢状面限界運動軌跡と左右側方限界運動軌跡を矢状面に重ねて投影した場合に、その上下的な厚みが最も小さくなる点であり、従来よりグラフィックターミナル上で試行錯誤で求めてきた。本研究では運動論的顎頭点の3次元座標を以下の方法により求めた。① 矢状面限界運動軌跡と左右側方限界運動軌跡により、その上下的な厚みが最小となる点を左右側においてグラフィックターミナル上で求める。② ①で求めた2点を結ぶ線上で側方滑走運動の作業側における移動量が最も少ない点をそれぞれ求める。この方法によれば運動論的顎頭点が一義的に定まるだけでなく、これらの点は側方運動においてほぼ回転の中心となるので、側方限界運動における側方限界咬合位付近で作業側顎頭の後方近接部位の面積が増大するといった前述の現象を解明するのに有利となる。

被験者 1 と同傾向の被験者を ●, 被験者 6 と同傾向の被験者を ▲, その両者と同傾向の被験者を ■ でプロットする。

図 15 顎頭に設定した座標系における運動論的顎頭点の位置

2) 運動論的顎頭点の位置について

(1) 座標系の設定について

顎頭あるいは関節窩に対する運動論的顎頭点の位置関係は、設定する座標系によって影響を受ける。本研究で顎頭あるいは関節窩に設定した座標系は、通常の臨床における X 線断層写真の撮影方向を考慮して、Y 軸は顎頭長軸方向に平行とし、X 軸はこれに垂直とした。顎頭に設定した座標系の原点は水平的には再構築像の中央の点とし、上下的には顎頭の最上点から 5 mm 下方の位置とした。これは被験者 8 名における顎頭の前後径の平均が右側 9.8 mm, 左側 9.6 mm であり、矢状方向からみた顎頭の外形を近似的に半径 5 mm の円とみなし得るためである。本研究では前頭方向の断層撮影を行っているものの、関節窩に設定した座標系における Y 方向（顎頭の長軸方向）に関しては、関節窩の解剖学的な形態により原点を定めることが困難であると判定し、関節窩に対する顎頭の Y 方向の変位を解析の対象から外した。

(2) 運動論的顎頭点の解剖学的位置について

矢状面限界運動における最大開口位および蝶番運動時に顎頭後上方もしくは後方が関節結節あるいは関節窩に近接する傾向は、被験者 1 の他に被験者 5, 7 にも認められ、これらは運動論的顎頭点が顎頭内で前上方もしくは上方に位置した。また側方滑走運動時に作業側顎頭後方が関節窩に近接する傾向は、被験者 6 の

他に被験者 5 にも認められ、これらはいずれも運動論的顎頭点が顎頭内で内方に位置した。図 15 は顎頭に設定した座標系における運動論的顎頭点の位置の分布（図 7）のうち、被験者 1 および被験者 6 と同傾向の被験者を選び、それぞれ同印でプロットしたものである。この結果、各限界運動における顎頭上の近接部位面積が特定の顎位で著しく増大することなく滑らかに変化する被験者（2, 3, 4, 8）は、いずれも運動論的顎頭点が顎頭内で後外方に位置していた。

図 16 は被験者 3 の左側顎関節の再構築像に、運動論的顎頭点および運動論的顎頭点の前後および上下の点（5 mm 前後, 5 mm 上下）における矢状面限界運動軌跡を矢状面に重ねて投影したものである。この被験者における運動論的顎頭点の運動軌跡は関節結節の形態に類似している。運動論的顎頭点に比較してその前後および上下の点の運動軌跡は、上下的な厚みが増すとともに軌跡の様相も異なる。すなわち前方の点の運動軌跡は前方限界路が後方限界路の上方にあるのに対して、後方の点の運動軌跡はこの逆となる。また上下の点の運動軌跡は前方限界路と後方限界路とが交叉し、上方の点の運動軌跡は咬頭嵌合位から最大開口位に至るまでの間でそれぞれの限界路が交叉するまで、前方限界路が後方限界路の下方にあるのに対して、下方の点の運動軌跡はこの逆となる。これらは全運動軸の前後および上下の点の解析結果と一致する²⁶⁾。さらに運

動論的顎頭点の前後および上下の点の運動軌跡において、より後方でより下方の点の最大開口位の位置は咬頭嵌合位に比較して上方にある。図 17 は被験者 1 の右側顎関節の再構築像に、運動論的顎頭点および運動論的顎頭点の前後および上下の点 (5 mm 前後, 5 mm 上下) における矢状面限界運動軌跡を矢状面に重ねて投影したものである。被験者 1 は運動論的顎頭点が顎頭内で前上方に位置し、顎頭後方において運動論的顎頭点からの距離が大きくなっている。顎頭の後方の点の運動軌跡を観察すると、最大開口位で関節結節前斜面に近接し、蝶番運動時には咬頭嵌合位より上方の運動経路をとっている。このことは最大開口位および蝶番運動時に顎頭上の近接部位面積が増大することと符号する。図 18 は被験者 6 の左側顎関節の再構築像に、運動論的顎頭点および運動論的顎頭点の内外の点 (5 mm, 10 mm 内外) における左側方限界運動軌跡を水平面に重ねて投影したものである。左側方滑走運動時に作業側となる左側顎頭の運動論的顎頭点がほぼ水平面内の回転中心となるため、被験者 6 のように運動論的顎頭点が顎頭内で内方に位置する場合、側方限界咬合位で顎頭後方が関節窩に近接することになる。

また図 7, 8 に示したように関節窩に設定した座標系における運動論的顎頭点の位置のばらつきは、X, Z 方向とも顎頭に設定した座標系におけるそれよりも小さい。このことは運動論的顎頭点の位置が顎頭に依存するのではなく、むしろ関節窩あるいは関節結節に依存することを示唆するものである。つまり顎頭が変位することによって運動論的顎頭点の顎頭に対する位置関係は変化するが、関節窩に対してはその影響は少ないと考えられる。

3. 近接部位について

被験者 3 のように咬頭嵌合位で顎頭前上方が関節結節後斜面に、矢状面限界運動における前方限界咬合位で顎頭上方が関節結節最下点付近に、最大開口位で顎頭後上方が関節結節前斜面にそれぞれ近接し、各運動における近接部位面積が滑らかな変化を示すとき、顎頭運動からみて正常に機能している状態であると考えられる。これは関節窩および関節結節に対して顎頭が関節円板最薄部を介して運動していることに相通じる¹⁸⁾。したがって被験者 1, 5, 7 にみられるような矢状面限界運動における最大開口位および蝶番運動時に顎頭後上方もしくは後方が関節結節あるいは関節窩に著しく近接する傾向や、被験者 5, 6 にみられるような側

方滑走運動時に作業側顎頭後方が関節窩に著しく近接する傾向は、介在する軟組織の影響を無視することはできないが、関節窩、関節結節および顎頭に負荷を及ぼすものと推察できる。顎頭が関節窩あるいは関節結節に著しく近接する部位はいずれも共通して顎頭後上方もしくは後方であり、X線写真上で認められる顎頭後面に発生する陥凹 (concavity) の好発部位に一致する^{28,29)}。

4. 顎頭位、顎頭運動および顎頭の形態相互の関係について

河野²⁶⁾が指摘するように関節窩と接触する顎頭の関節面が全運動軸を中心とした円弧に一致すれば、矢状面内全運動に対する顎路は上下的に幅の全くない線状の運動路となる。しかし実際には運動の収斂する点が顎頭の中央に存在するとは限らない。本研究では顎頭の形態と運動との関連性を解明するために、運動の収斂する点が顎頭中央に位置する場合、顎頭内で前上方もしくは上方に位置する場合および内方に位置する場合について考察してきた。さらに運動の収斂する点が顎頭内で前後あるいは上下に位置する要因の 1 つに、関節窩に対する顎頭の変位をあげた。例えば顎機能異常者にみられる顎頭の後方変位あるいは後下方変位は、咬頭嵌合位において顎頭に負荷を及ぼすだけでなく、運動の収斂する点を顎頭に対して相対的に前方あるいは前上方に移動させ、運動時に顎頭後上方もしくは後方が関節窩あるいは関節結節に近接する状況を生じさせ、ひいては形態的に陥凹を引き起こすものと考えられる。すなわち咬頭嵌合位の顎頭位そのものが下顎運動時の顎頭位に影響を及ぼし、顎頭に形態変化を引き起こす可能性が示唆された。

運動の収斂する点が顎頭内で内方に位置する場合、換言すれば側方運動における回転中心が作業側顎頭の内方に位置し顎頭後方が関節窩に近接する要因には、顎頭の変位以外に側方運動時の歯の接触様式 (ガイド) などが関与すると考えられるが、本研究では解明できない。

V. 結 論

1. X線断層撮影法を用いて測定した顎関節の形態をグラフィックターミナル上に再構築し、顎運動測定器から得られた顎運動データとの対応を図ることにより顎頭の立体運動を再現した。

2. 被験者 8 名, 左右側 16 顎関節における運動論的顎頭点は解剖学的にみた顎頭内に存在した。

3. 顎頭に対する運動論的顎頭点の位置関係より以下のことが明らかとなった。

1) 運動論的顎頭点が顎頭内で前上方もしくは上方に位置する場合, 矢状面限界運動における最大開口位および蝶番運動時に顎頭後上方もしくは後方が関節結節あるいは関節窩に近接する。

2) 運動論的顎頭点が顎頭内で内方に位置する場合, 側方滑走運動時に作業側顎頭後方が関節窩に近接する。

4. 運動論的顎頭点の前後あるいは上下的な位置は, 顎頭よりもむしろ関節窩あるいは関節結節に依存することが示唆された。

5. 咬頭嵌合位における顎頭位が下顎運動時の顎頭位に影響を及ぼし, 顎頭に形態変化を引き起こす可能性が示唆された。

稿を終えるにあたり, 終始ご懇篤なるご指導とご校閲を賜りました坂東永一教授, 中野雅徳助教授, ご教授を賜りました上村修三郎教授に深甚なる謝意を表します。また特別なご配慮を頂いた徳島大学歯学部歯科放射線学講座の教室員の方々ならびに撮影の苦勞をいとわずご協力を頂いた歯科放射線科診療放射線技師の方々に感謝の意を表します。さらに本研究の被験者の皆様ならびに歯科補綴学第 2 講座の教室員の方々に厚くお礼を申し上げます。

本研究の一部は文部省科学研究費補助金 (特別研究員奨励費) に依った。

文 献

- 1) Ricketts, R.M. : Variations of the temporomandibular joint as revealed by cephalometric laminagraphy, *Am J Orthod*, 36 : 877~898, 1950.
- 2) Madsen, B. : Normal variation in anatomy, condylar movements, and arthrosis frequency of the temporomandibular joints, *Acta Radiol Diagn*, 4 : 273~288, 1966.
- 3) 河野正司 : 下顎の矢状面内運動に対応する顎頭運動の研究, 第一報 断層 X 線規格写真による観察, *補綴誌*, 12 : 337~349, 1968.
- 4) Gerber, A. : Kiefergelenk und Zahnokklusion, *Dtsch Zahnärztl Z*, 26 : 119~141, 1971.
- 5) Weinberg, L.A. : Correlation of temporomandibular dysfunction with radiographic findings, *J Prosthet*

- Dent*, 28 : 519~539, 1972.
- 6) Weinberg, L.A. : An evaluation of asymmetry in TMJ radiographs, *J Prosthet Dent*, 40 : 315~323, 1978.
- 7) Blaschke, D.D. and Blaschke, T.J. : A method for quantitatively determining temporomandibular joint bony relationships, *J Dent Res*, 60 : 35~43, 1981.
- 8) Blaschke, D.D. and Blaschke, T.J. : Normal TMJ bony relationships in centric occlusion, *J Dent Res*, 60 : 98~104, 1981.
- 9) Katzberg, R.W., Keith, D.A., Ten Eick, W.R. et al : Internal derangements of the temporomandibular joint : An assessment of condylar position in centric occlusion, *J Prosthet Dent*, 49 : 250~254, 1983.
- 10) 早坂正博, 高橋健二, 片岡保夫ほか : Sectograph による顎頭位の研究, 第 1 報 各下顎位における顎頭位について, *補綴誌*, 27 : 550~572, 1983.
- 11) Dumas, A.L., Moaddab, M.B., Willis, H.B. et al : A tomographic study of the condyle/fossa relationship in patients with TMJ dysfunction, *J Craniomandib Pract*, 2 : 315~325, 1984.
- 12) 小倉 壽 : X 線断層撮影法による顎関節症の診断に関する研究, 一顎関節隙の三次元的計測一, *歯放線*, 24 : 81~99, 1984.
- 13) 高橋和裕 : 顎関節機能障害の診断学的研究, 第三報 顎頭位の定量的 X 線診断, *東北歯誌*, 4 : 173~184, 1985.
- 14) Pullinger, A. and Hollender, L. : Variation in condyle-fossa relationships according to different methods of evaluation in tomograms, *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 62 : 719~727, 1986.
- 15) 牛田正行 : X 線断層写真による顎関節隙の 3 次元解析, *愛院歯誌*, 26 : 479~513, 1988.
- 16) 塩澤恭郎 : 下顎任意点の運動解析, 第 2 報 下顎限界運動の立体的解析, *補綴誌*, 26 : 148~164, 1982.
- 17) 鈴木 温 : デジタル方式下顎運動測定器による下顎限界運動の 6 自由度解析, *補綴誌*, 31 : 712~725, 1987.
- 18) 大石忠雄 : 下顎運動の立場からみた顎関節構造の研究, *補綴誌*, 11 : 197~220, 1967.
- 19) 川畑博昭 : 矢状面における各種顎頭位の研究, 特に顎頭安定位について, *補綴誌*, 15 : 403~429, 1971.
- 20) 細木秀彦, 上村修三郎 : 顎関節側面断層撮影法の規格化に関する試みとその精度, *歯放線*, 26 : 116~124, 1986.
- 21) 細木秀彦, 上村修三郎 : 顎関節側面断層撮影法の再現性, *歯放線*, 27 : 33~38, 1987.
- 22) 藤村哲也, 坂東永一 : デジタル方式顎運動測定器の開発, *補綴誌*, 35 : 830~842, 1991.
- 23) Yale, S.H. : Radiographic evaluation of the temporomandibular joint, *J Am Dent Assoc*, 79 : 102~107, 1969.
- 24) Posselt, U. : Physiology of Occlusion and Rehabilita-

- tion, 25~64, Blackwell Scientific Publications, Oxford and Edinburgh, 1968.
- 25) 坂東永一：成人前期における咬合の管理からみた顎運動要素の補綴学的意義，関根 弘編，咬合の育成と維持，151~169，クインテッセンス出版，東京，1991.
- 26) 河野正司：下顎の矢状面内運動に対応する顎頭運動の研究，第二報 マルチフラッシュ装置による矢状面運動軸の解析，補綴誌，12：350~380，1968.
- 27) 長谷川成男，藍 稔，河野正司ほか：下顎限界運動における全運動軸の立体的測定，補綴誌，19：434~443，1975.
- 28) Mongini, F.: Influence of function on temporomandibular joint remodeling and degenerative disease, Dent Clin North Am, 27：479~494，1983.
- 29) 上村修三郎，岩崎裕一，細木秀彦ほか：機能に伴う顎関節骨形態の適合性変化，一下顎頭後面の陥凹について一，歯放線，30：211~218，1990.

図 6 顎頭運動のグラフィックターミナル上への出力例
矢状面限界運動における3顎位（咬頭嵌合位，前方
限界咬合位，最大開口位）

図10 矢状面限界運動における顆頭位(左側)の出力例(被験者3)
1. 咬頭嵌合位 2. 前方限界咬合位
3. 最大開口位 4. 後方限界路上の変曲点

図12 矢状面限界運動における顆頭位(右側)の出力例(被験者1)
1. 咬頭嵌合位 2. 前方限界咬合位
3. 最大開口位 4. 後方限界路上の変曲点
5. 蝶番運動時の顎位

図14 左側方限界運動における顆頭位(左側)の出力例(被験者6)
1. 咬頭嵌合位 2. 左側方限界咬合位

図16 左側顎関節の再構築像および運動論的顆頭点の前後・上下の点における矢状面限界運動軌跡(被験者3)
ICP:咬頭嵌合位 MP:前方限界咬合位 MO:最大開口位
TP:後方限界路上の変曲点 CR:後方限界咬合位

図17 右側顎関節の再構築像および運動論的顆頭点の前後・上下の点における矢状面限界運動軌跡(被験者1)
ICP:咬頭嵌合位 MP:前方限界咬合位 MO:最大開口位
TP:後方限界路上の変曲点 CR:後方限界咬合位

図18 左側顎関節の再構築像および運動論的顆頭点の内外の点における左側方限界運動軌跡(被験者6)
ICP:咬頭嵌合位 LS:左側方限界咬合位
MO:最大開口位