原 著 論 文

下顎運動の運動学的特性

藤村 哲也

Kinematical Characteristics of the Mandibular Movement

Tetsuya Fujimura

Abstract : The objective of this research was to study the kinematical characteristics of the mandibular movement using a new method of analysis of jaw movements with six degrees of freedom. The full range of mandibular positions at the incisal point were recorded accurately by a digital type jaw movement analyzer. The results were as follows :

1. The three-dimensional movement space model was produced with 11,620 jaw position data both at the incisal and condylar points.
2. The Z-value, which determines the upper and lower width of jaw movement space, was regarded as a useful parameter to represent the kinematical characteristics of the mandible.
3. The jaw movement characteristic curve for the Z-value showed a singular point at the condyle.
4. The condylar point was the most important point used to represent the mechanisms of mandibular movements in three dimensions.

Key words : six degrees of freedom jaw movement, movement space of mandible, kinematical characteristics

I. 結 言

顎運動については、古くから非常に多くの研究が行われてきた^{1,2)}。これらの研究は、顎運動測定器の開発³⁾とともに発展し、現在では6自由度の測定器が開発され、上下顎を剛体とみなした場合には、その動きを完全に測定できるまでに至っている。

これに伴い、下顎運動の様態も徐々に解明され、切歯点や顎頭点における特定点の運動については、すでに詳細な報告が行われている⁴⁾が、下顎の全運動範囲を対象とした研究は少ない。

二次元解析では、矢状面内運動を対象としたUlrich⁵⁾など、多くの研究があるが、なかでもPosselt^{6,7)}や佐久間⁸⁾、河野⁹⁾は詳細な研究結果を報告している。また、三次元解析においては、Posselt¹⁰⁾や根本¹¹⁾が詳細な報告をしている。しかし、三次元解析についての報告は、切歯点前方の1点のみを対象とした結果であり、下顎全体を対象としたものではない。

著者は、切歯点がとり得る全運動範囲の顎位を高精

徳島文理大学工学部情報システム工学科
Information Science and Systems Engineering, Faculty of
Engineering, Tokushima Bunri University
平成5年5月24日受付

度に測定し、新たに考案した 6 自由度解析法を用いて下顎運動の運動学的特性を詳細に追究した。

II. 研究方法

1. 被験者

被験者は、個性正常咬合を有する健康な 36 歳の成人男子有歯顎者 1 名である。なお、この被験者は、鈴木¹²⁾が報告した研究結果を参考にし、次の条件を満たす者として選択した。

- 1) 顎口腔系に特に異常が認められないこと。
- 2) 各限界運動において、運動軌跡が滑らかで再現性が良く、しかも左右の側方運動が対称的であること。
- 3) 咬頭嵌合位、前方限界咬合位、側方限界咬合位、最大開口位が明確であること。

2. 測定

被験運動は口頭で指示し、頭部固定や手指による誘導のない自由な状態で切歯点がとり得る全運動範囲の顎位を 6 自由度で測定した。

測定器は、デジタル方式顎運動測定器¹³⁾を用いた。運動データは、リアルタイムでミニコンピュータ (DEC 社製 PDP 11/34 A) へ収集し、切歯点の運動を立体的にモニタしながら磁気ディスクに記録した。

測定を行うにあたり、まず、生体標点測定用プローブで、上顎歯列弓上の左右上顎中切歯近心隅角部の中点と左右上顎第 1 大臼歯の中心窩を計測し、この 3 点でできる平面を基準にして、測定時の座標系を設けた¹³⁾。

下顎運動の測定は、咬頭嵌合位、連続的な限界運動、および離散的な運動の順に毎秒 50 顎位の収集速度で行った。

1) 連続的な限界運動

連続的な限界運動は、被験者に以下に示した経路の運動を行うよう指示し、その時の一連の運動データを収集した。

(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のち、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を通して咬頭嵌合位まで閉口する矢状面内限界運動。

(2) 咬頭嵌合位より接触滑走させながら側方運動を行い、側方限界咬合位まで運動したのち、側方限界路上を最大開口位まで開口する左右の側方限界運動。

図 1 測定時のモニタ画面

(3) 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のち、歯を接触滑走させながら限界路上を側方限界咬合位に至る運動。

2) 離散的な運動

離散的な運動の測定方法は、まずコンピュータのメモリ上に、切歯点部のデータ収集範囲の立体格子を限界運動路のデータを参考にして設け、立体格子に最初に到達した顎位をその立体格子の代表顎位として収集した。立体格子は、接触滑走運動面付近と最大開口位付近を 1 辺 0.5 mm の立方体とし、その他は 1 辺 1 mm の立方体として設けた。

被験者が効率よく正確な運動を行えるようにモニタ画面を制作した。モニタ画面は、被験者が切歯点を目的とする立体格子へ容易に動かせるように、切歯点の顎位をリアルタイムで観察できる部分と収集の終わった立体格子が表示される部分からなる。具体的には、図 1 に示す 3 つの部分で構成した。

(1) 矢状面

切歯点が矢状面方向からモニタできる部分であり、先に測定した矢状面内限界運動軌跡を指標にデータ収集範囲を示し、切歯点の上下、前後方向の動きが光点でリアルタイムに表示され、その軌跡も同時に描かれる。

(2) 水平面

データ収集範囲内の収集が終わった立体格子を上方からモニタし、前後、左右方向の収集状況が観察できる部分であり、収集範囲内に設けた立体格子に切歯点が到達すると、その立体格子に対して収集の終了を示す印が表示される。

(3) 水平断面

水平面で表示された上下的に重なった立体格子の表示を補うための部分であり、データ収集範囲内の立体

格子が、水平面と同じ表示方法で上層から層毎に数字で示した位置へ表示される。

測定は、閉口位から6層毎に最大開口位まで行い、被験者には下顎を自由に動かしてモニタ画面上の立体格子を塗りつぶすよう指示した。

3. 解析

収集した運動データをもとに、切歯点および顎頭点における運動空間の三次元モデルを製作し、詳細にその形状を観察した。その結果、上下顎を剛体とみなした下顎運動の運動学的な解析には、下顎上の1点を対象とするのではなく、6自由度で解析するという新たな視点での解析が望ましいと考えるに至った。

本研究では、右手系の直交座標系をそれぞれ上下顎に設定し、上顎を基準とした下顎の6自由度の運動を上下顎座標系間の相対的な位置関係として、互いに独立した6個の変数で表す解析方法を考案し、すでに明らかにされている連続的な限界運動を参考として、離散的な運動を検討した。

1) 座標系

座標系は、咬合平面座標系を基準にとり、咬頭嵌合位で上下顎座標系が重なるように設定した。

咬合平面座標系を設定するにあたり、まず上顎歯列弓上の左上上顎中切歯近心隅角部の中点（以下上顎切歯点と呼ぶ）および左上上顎第1大臼歯の中心窩の3点を含む平面を上顎咬合平面と定めた。座標系は上顎切歯点を原点とし、3点の重心と上顎切歯点を通る直線をx軸、上顎切歯点を通る上顎咬合平面の法線をz軸、両軸に垂直な直線をy軸となるように設定した。各座標軸の方向は上顎切歯点を基準に、前方、左側方および上方が正である。下顎座標系の原点は、咬頭嵌合位で上顎切歯点と一致する点とした。また、便宜的に、この原点の運動を切歯点の運動とみなした。

2) 下顎上の点の運動¹³⁾

測定した下顎運動は、測定器の座標系であり、下顎上の点の運動を得るためには咬合平面座標系で、しかも咬頭嵌合位で上下顎座標系を重ねた状態に変換しなければならない。

したがって、変換の行列 T は、

$$T_i = B^{-1} M_i I^{-1} B \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$(i=1, 2, 3, \dots, n)$$

ただし、 M は測定した下顎運動の行列、 B は咬合平面座標系への変換の行列、 I は咬頭嵌合位の行列を示し、各行列は4行4列の正の直交行列である。ま

図2 回転運動の3変数

た、 i は下顎運動の各顎位を示す。

これより座標系間の関係を用いて、上顎座標系からみた下顎上の点の運動は、

$$X_i = T_i X' \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

$$X_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{pmatrix}, \quad X' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$T_i = \begin{pmatrix} l_{11} & l_{21} & l_{31} & x_{01} \\ m_{11} & m_{21} & m_{31} & y_{01} \\ n_{11} & n_{21} & n_{31} & z_{01} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

X は上顎座標系の位置ベクトル、 X' は下顎座標系の位置ベクトルをそれぞれ示す。

3) 6自由度変数

下顎運動を6自由度の運動として解析する場合、上顎に対する下顎の位置を指定するには、互いに独立した6個の変数が必要である。

上顎座標系と下顎座標系間の関係は、すでに(2)式の変換の行列 T で求めた。互いに独立した6個の変数は、変換の行列 T から並進運動と回転運動の各変数に分離できる。並進運動の3個の変数は、変換の行列 T の要素 x_0, y_0, z_0 を用いることとした。また、回転運動の3個の変数は、下顎座標系の y' 軸を基準にとり、 y' 軸と上顎座標系 x - y 平面間の角度を θ_x 、 y' 軸を x - y 平面に正射影した直線と上顎座標系の y 軸間の角度を θ_y 、および y' 軸のまわりの回転量を θ_z と定めた（図2）。

これより、回転運動の3個の変数を求めると、

$$\left. \begin{aligned} \theta_x &= \sin^{-1} n_2 \\ \theta_y &= \sin^{-1} (-n_1/\cos \theta_x) \\ \theta_z &= \sin^{-1} (-l_2/\cos \theta_x) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

ただし, l_2 , n_1 , n_2 は変換の行列 $\mathbf{T}$ の要素であり, また, 上顎座標系 $\{0; e_x, e_y, e_z\}$ に対する下顎座標系 $\{0'; e'_x, e'_y, e'_z\}$ の方向余弦でもある。

4) 解析点

顎運動表示の基準点⁴⁾である切歯点と左右の顎頭点を対象として, 各点の運動空間を検討した。さらに, 下顎全体の運動特性や運動学的な特異点を検討するため, 下顎座標系の切歯点, 右顎頭点, 左顎頭点にそれぞれ座標系と同方向の直交軸を設け, 軸上の各点における運動空間の特徴を抽出した。

左右の顎頭点については, 河野⁹⁾の方法に準じて, 矢状面内限界運動における左右の顎頭点付近で全運動軸を求め, 次に, すべての連続的な限界運動データから, 全運動軸上の点の運動軌跡を対象にして, 種々な部位の断面を観察し, 運動軌跡形状が上下的に最も薄くなる点をディスプレイ上の立体像から視覚的に求めた。

5) 解析装置

運動空間の形状や運動経路は, 三次元グラフィックス・スーパーコンピュータ (Stellar Computer 社製 GS 1000) を使って立体的に観察した。また, 三次元モデリングマシン (三井造船社製 COLAMM-300) を用いてアクリレート系樹脂の立体模型を製作し, 実際に手にとって立体模型を観察することでブラウン管の像からは得にくい情報を得た。その他の数値計算は, ワークステーション (DEC 社製 VAX Station 2000) で行った。

III. 結 果

被験者は, 切歯点の運動限界内に設けたすべての立体格子へ下顎を動かすことができた。

1. 運動空間の大きさと形状

測定した運動空間の概要を知る目的で, その大きさと形状を求めた。

測定した切歯点の全運動空間の顎位分布を図 3 に示し, この顎位に対応した左右の顎頭点における分布を図 4 に示した。また, これらの運動空間の大きさを表 1 に示した。図中の実線は, 連続的な限界運動軌跡であり, 点は離散的な運動で得られた各立体格子内の顎

位である。収集した顎位は, 連続的な限界運動が 1,227 点で, 離散的な運動が 10,393 点である。

1) 切歯点の全運動空間 (図 3)

切歯点の全運動空間において, 滑走面が凹凸の複雑な形状を示すのに対し, 咬合接触のない部分の水平断面は, 後方変曲点付近まで菱形状の四角形であり, さらに開口した部分で四角形の角が崩れ円形となって最大開口位で点になる。菱形状の四角形の後部は, 後方歯牙接触位より変曲点付近まで後方限界路を頂点とする明確なゴシックアーチを示している。

連続的な限界運動と離散的な運動の最外側部は, 右側方変曲点より下方の部分と後方変曲点付近を除いて, 全体的に一致しているといえる。

2) 顎頭点の運動空間 (図 4)

顎頭点の運動空間において, 矢状面では円弧状の細長い形状を示し, 水平面では後方の咬頭嵌合位付近で比較的幅が狭く, 前方になるに従って徐々に広がり, 最前方の最大開口位付近で急に丸みを帯びている。また, 水平面では密度の高い部分が内側に分布し, 咬頭嵌合位から前方に延び, 密度の高い部分と低い部分が明確に区別できる。

左右の運動空間の形態は, 細部で形が異なるものの全体的にはよく似ている。

連続的な限界運動と離散的な運動の最外側部を比較すると, 表 1 に示したように, それぞれの大きさは, 前後方向 (X), 上下方向 (Z) でほぼ同じ値である。しかし, 左右方向 (Y) および矢状面からみた円弧の上下的な最大厚み (t) の値については, 連続的な限界運動の方が小さく, 離散的な運動の 46~64% である。

3) Posselt's Figure⁶⁾

全運動空間の外観をより詳細に観察するため, ソリッドモデルの Posselt's Figure を三次元グラフィックス・ディスプレイ上に表示し, また, 三次元モデリングマシンで実物大と 2 倍大の立体模型を製作した。製作にあたって, 外観は全運動空間の最外側点を抽出し, 3 次 Bezier 曲線¹⁴⁾を適用して, 250 μ m 間隔の補間を行った。

図 5 は, 被験者の左前上方よりみた Posselt's Figure とその滑走面部を拡大したディスプレイ画面を示す。Posselt's Figure の形状は, 後方変曲点付近を境に上下で大きく異なり, 上部では連続的な限界運動の各経路にあたる部分が稜をなす菱形柱であるのに対し, 下部では最大開口位を頂点とする逆円錐形を示し

図 3 切歯点の全運動空間

X, Y, Z : 各座標軸方向の大きさ (最大値-最小値)

t: 後方限界路の接線に対し垂直な方向の最大幅 (最外側顎位間の距離)

水平断面：断面部位を示す直線を中心とする上下方向の厚み内に分布した顎位を水平面に表示

図 4 顆頭点の運動空間

X, Y, Z: 各座標軸方向の大きさ (最大値-最小値)

t: 矢状面が示す円弧の接線に対し垂直な方向の最大厚み (最外側顎位間の距離)

前頭断面：断面部位を示す直線を中心とする前後方向の厚み内に分布した顎位を前頭面で表示

表 1 運動空間の大きさ

大きさ	連続的な限界運動			離散的な運動		
	切 歯 点	右顎頭点	左顎頭点	切 歯 点	右顎頭点	左顎頭点
X	39.43	21.31	20.97	40.21	21.46	21.17
Y	29.43	2.97	2.95	30.57	5.52	5.34
Z	53.48	6.01	6.45	53.58	6.17	6.47
IP-MO	61.51	21.08	20.95	61.54	21.16	20.90
t	13.66	0.56	0.87	14.03	1.22	1.36

X, Y, Z, t は図 3, 図 4 に示す大きさ

単位 (mm)

IP-MO は咬頭嵌合位と最大開口位間の距離

表 2 運動空間の 6 自由度変数値

変数	連続的な限界運動			離散的な運動		
	最小値	最大値	大きさ	最小値	最大値	大きさ
x_0 (mm)	-30.38	9.05	39.43	-30.54	9.67	40.21
y_0 (mm)	-14.92	14.51	29.43	-15.96	14.61	30.57
z_0 (mm)	-53.48	0.00	53.48	-53.51	0.07	53.58
θ_x (度)	-3.34	3.17	6.51	-3.35	3.21	6.56
θ_y (度)	-2.09	39.98	42.07	-2.11	40.01	42.12
θ_z (度)	-7.61	7.24	14.85	-8.03	7.59	15.62

図 5 全運動空間の立体モデル

三次元グラフィックス・ディスプレイ上に表示した切歯点の全運動空間

た。上部は、滑走面、前方面および後方面に分離でき、滑走面を上方からみると左右に長い菱形の四角形であり、後方部の突出した先端が咬頭嵌合位に相当し、連続的な限界運動の各経路に相当する部分が凸状の稜として観察できる。前方面は、左右の面から構成され、両方の面が外側に凸の緩い曲面であり、前方限界開口路を境に鈍角で交わっている。また、後方面も左右の面から構成され、両方の面が内側に凹のきわめて緩い球面であり、後方限界路を境に鈍角で交わっている。さらに、前方面と後方面は、互いに左右の側方

限界路を境にして鋭角で交わっている。一方、下部は、後方変曲点の付近から急に細くなり、最大開口位へ収束している。

2. 運動空間の 6 自由度変数

切歯点がり得た運動範囲における下顎上の各点の位置は、6 自由度の各変数値と下顎上の点の座標値によって決まる。したがって、運動空間を構成する顎位の 6 自由度の各変数は、空間の特徴を調べるうえで重要である。

表 2 は、連続的な限界運動と離散的な運動に対して、顎位を 6 自由度の変数 x_0 , y_0 , z_0 , θ_x , θ_y , θ_z に分離し、それぞれの最小値、最大値および範囲の大きさを求めた結果である。両運動間の、最小値、最大値および範囲の大きさには、ほとんど差がみられない。並進運動を表す変数 x_0 , y_0 , z_0 の各値は、原点が切歯点であるために、切歯点の運動空間の大きさと等しく、回転運動を表す変数は、矢状面内の回転に相当する変数 θ_y が特に大きく、前頭面内の回転に相当する変数 θ_x と水平面内の回転に相当する変数 θ_z の最小値、最大値は、絶対値がほぼ等しい対称的な値を示した。

3. 6 自由度変数値と運動空間内の位置との関係

離散的な運動で得られた顎位の 6 自由度の回転運動

の変数 θ_x , θ_y , θ_z を大きさ別に分け, その大きさに相当する顎位を色分けして切歯点と左顎頭点で表し, 両者の位置関係を調べた。図 6 の a, b, c 中の実線は, 連続的な限界運動の軌跡を表す。変数 θ_x , θ_y , θ_z においては, 0 度を基準に, θ_x 値を 1 度間隔, θ_y 値を 5 度間隔, θ_z 値を 2 度間隔でそれぞれ分割した。ただし, 両端については, 残った大きさによって間隔を調整した。

図 6 の a は, 前頭面内の回転に相当する変数 θ_x を 8 分割した結果である。切歯点では, 左右方向に規則性がみられ, 値の大きいものほど左側方に分布している。この変化に対応して, 左顎頭点では, 角度が大きくなるに従い, 分布は中央部の内側から前後へと徐々に広がる。-1.0~0.0 度では顎路の全体へ広がり, しかも前方の密度も高い。つづいて, 0.0~1.0 度では後方へ分布が移り, さらに角度が大きくなると咬頭嵌合位付近へ収束していく様子が観察できる。

図 6 の b は, 矢状面内の回転に相当する変数 θ_y を 9 分割した結果である。切歯点では, 上下方向に明確な分布の規則性が観察できる。この変化に対応して, 左顎頭点では, 負の角度で顎路の後方に分布していたものが, 0.0~5.0 度では前方へ分布が広がり, さらに角度が大きくなるに従い分布が前方へ移動し, 最大値になると空間の最前方部に分布が集中する様子が観察できる。

図 6 の c は, 水平面内の回転に相当する変数 θ_z を 8 分割した結果である。切歯点では, 左右方向に明確な分布の規則性が観察できる。左顎頭点では, 角度が小さいときに空間内側の中央部にあった分布は, 角度が大きくなるにつれて全体へ広がったのち, 咬頭嵌合位方向へ収束している。この分布は, 変数 θ_x の場合と類似した状態を示すが, 0 度付近を境として分布の方向が左右に分かれ細かい部分では異なっている。

並進運動を表す変数 x_0 , y_0 , z_0 に対しても, 同様な処理を行った。その結果, 切歯点で前後方向に明確な分布を示す変数 x_0 の場合, 顎頭点では特に分布の規則性はみられなかった。また, 切歯点で左右方向に明確な分布を示す変数 y_0 は, 変数 θ_z の場合と同様な結果を示し, さらに, 切歯点で上下方向に明確な分布を示す変数 z_0 でも, 変数 θ_y の場合と同様な結果を示した。

4. 顎頭点からみた切歯点の運動

これまでの結果は, 主に切歯点からみた顎頭点の動

図 7 顎頭点からみた切歯点の運動空間
左顎頭点の運動空間を 1 mm 間隔に分割して得られた顎位の分布

きを示した。しかし, 上下顎の関係を機構学的に考えた場合, 切歯点よりもむしろ顎頭点に運動を決める要素がある。したがって, 左右の顎頭点の運動空間を咬頭嵌合位から 1 mm 間隔の距離で分割し, それぞれ分割した空間内の顎位がどのような特性を持った集まりであるかを検討した。

図 7 は, 左顎頭点の運動空間を分割して求めた顎位に対し, 切歯点および右顎頭点をとる位置を三次元的に示した結果である。図は, 被験者の左前方よりみた運動空間を示し, さらに, この図に示す矢印の方向からみた図を, 四角の枠の中に示した。図より, 左顎頭点で分割されたそれぞれの空間に対応する顎位は, 切歯点において, 分割された左顎頭点の各運動空間を中心とする球面の層で構成されているように観察できる。また, 右顎頭点において, 切歯点ほど明確ではないが, 運動空間内で内側から外側に向かって層状の円弧が描かれていた。

右顎頭点で同様な処理を行った場合も, ほぼ同じ結果が得られた。

5. 下顎の運動空間

下顎上の点がり得る運動空間は, 切歯点および左右の顎頭点の結果からもみられるように, 部位によって異なった大きさや形状を示す。下顎全体の運動特性さらには運動学的な特異点を検討するにあたって, 下顎座標系の切歯点, 右顎頭点, 左顎頭点にそれぞれ座標系と同方向の直交軸を設け, 軸上の各点における運動空間の大きさを求めた (図 8)。

縦軸に運動空間の各座標軸方向の大きさをとり, 横軸に対象の座標軸をそれぞれとって, 座標値を一方向

図 8 各座標軸に対する運動空間の変化

X, Y, Z: 各座標軸方向の大きさ (最大値-最小値)

I: 切歯点の座標値, R: 右顆頭点の座標値, L: 左顆頭点の座標値

にのみ変化させたときの運動空間の大きさの変化を X, Y, Z の特性曲線で示した。なお、図中に切歯点および左右の顆頭点に対応する座標値を参考のために示した。

図 8 の a は、切歯点および左右の顆頭点の座標値に対し、 x' 座標値のみ 0 から -200 mm まで 1 mm 間隔で変化させたときの各点の運動空間の大きさを示す。結果から、顆頭点を通る x' 軸上の点の運動空間の大きさは、X, Y, Z とともに、左右でほとんど差がみられない。また、切歯点と顆頭点を通る x' 軸上の点については、Y, Z で同じ傾向を示すのに対し、X では異なった変化を示す。特に注目すべき結果として、左右の顆頭点を通る x' 軸上の点の Z における変化は、左右ともに両顆頭点付近が最小値である V 字形を示す。

次に、 y' 座標値のみ -150 mm から 150 mm まで 1 mm 間隔で変化させた点の運動空間の大きさを図 8 の b に示す。左右の顆頭点を通る y' 軸上の点について

は、 x' 軸の場合と同様に左右でほとんど差がみられない。また、切歯点と顆頭点を通る y' 軸上の点については、それぞれ運動空間の大きさは異なるが、傾向は同じである。中でも特に注目すべき結果として、左右の顆頭点を通る y' 軸上の点の Z における変化は、両顆頭点の間で最小値を示し、顆頭点を境として両側で距離に比例して増加している。

さらに、 z' 座標値のみ 0 から 100 mm まで 1 mm 間隔で変化させた場合の結果を図 8 の c に示す。左右の顆頭点を通る z' 軸上の点の運動空間の大きさは、他の場合と同様に左右でほとんど差がみられない。また、切歯点と顆頭点を通る z' 軸上の点については、大きさは異なるが Y で同じ傾向を示すのに対し、X ではやや異なり、Z では全く異なった変化を示す。特に、顆頭点を通る z' 軸上の点の運動空間の Z における変化は、両顆頭点を中心に左右でほぼ対称的な変化を示す。

IV. 考 察

1. 研究方法について

1) 被験者について

本研究は、多数の被験者から平均的な結果を得る方法ではなく、代表的な被験者を選び、その被験者の下顎運動について詳しく追究する方法を用いている。したがって、被験者の選択は最も重要である。

被験者の下顎運動については、塩澤¹⁵⁾、鈴木¹²⁾らが報告した結果などからみても、正常有歯顎者の典型的な例である。また、本被験者の顎関節の構造や機能については、田中¹⁶⁾によって関節窩および関節結節に対し、顆頭が関節円板最薄部を介して正常に機能¹⁷⁾している例として詳細に報告されている。

このように、明らかにされた参考資料が十分整っており、新たに考案した解析法を適用する被験者として最適であったと考えられる。

2) 測定について

Posselt¹⁰⁾ や根本¹¹⁾らは、切歯点前方の 1 標点を対象とした三次元の運動を記録したが、いずれも下顎の 1 標点の動きのみである。したがって、これらの研究では、下顎運動の解析に必要なデータとして十分な情報が得られているとはいえない。これに対し、本研究では、著者らが開発したデジタル方式顎運動測定器¹³⁾を用いることにより、リアルタイムで切歯点の動きがモニタでき、切歯点がとり得た詳細な全運動範囲

の顎位を6自由度で高精度¹⁸⁾に測定することが可能となった。

測定器の精度については、解析範囲内で170 μm 以下の空間指示精度¹³⁾が得られている。また、運動空間の精度に相当する立体格子間隔については、測定に5時間程度要したことから、被験者の疲労度を考慮するとほぼ限界の値である。

測定方法については、リアルタイムで観察できるモニタ画面を制作した結果、運動空間の塗りつぶし作業が容易になり、測定時間が短縮された。

被験者の運動については、切歯点の運動限界内に設けたすべての立体格子内に切歯点を動かすことが可能であった。その結果、被験者にリアルタイムで表示できるモニタ画面をみせることで滑走面付近と最大開口位付近に対して、0.5 mm 範囲内の空間位置制御ができ、それ以外でも1 mm 範囲内の空間位置制御ができることが確認できた。

2. 運動空間の大きさと形状について

1) 大きさについて

切歯点の連続的な限界運動と離散的な運動の間では、前後(X)、左右(Y)、上下(Z)の各方向の大きさが一致しているが、右側方変曲点や後方変曲点の下方では、連続的な限界運動経路が離散的な運動の最外側点より少し内側にある。これらの部位では、連続的な限界運動経路の再現性もやや悪く、安定しない運動の特徴がでてるように考えられる。

顎頭点の連続的な限界運動と離散的な運動の間では、前後方向(X)、上下方向(Z)で大きさが一致しているが、左右方向(Y)や矢状面からみた上下幅(t)では、連続的な限界運動経路が離散的な運動の最外側点より内側にあり、連続的な限界運動と離散的な運動との違いが、特に表れている。

また、切歯点で全運動空間の最外側顎位であっても、顎頭点では必ずしも運動空間の最外側顎位を示さなかった。さらに、切歯点と同じ位置を示しても、その位置に至る運動経路によって顎位を構成する6自由度の各変数の値は異なり、下顎上の他の点で同じ位置を示すとは限らないデータが得られた。

以上の結果は、切歯点での測定データから顎頭点など他の部位を推定するときには非常に慎重に行わなければならないことを示している。

2) 形状について

切歯点の運動空間は、Posselt¹⁰⁾、根本¹¹⁾らの報告

と同様に菱形柱であった。しかし、さらに明らかにになった点は、連続的な限界運動経路が菱形柱の稜を成し、左右の前方面は外側に凸状の緩い曲面を示し、左右の後方面は内側に凹状のきわめて緩い球面を示していたことである。

顎頭点に対する運動空間の形状については、Posselt¹⁰⁾や他の研究者の報告^{12,15,19)}がある。しかし、切歯点がり得た全運動範囲を測定して求めた形状ではなく、顎頭点に対する運動空間の形状については、不明の点が多く残されている。

顎頭点の運動空間の形状は、顎頭点の位置の選び方によって異なる。したがって、本研究では、河野⁹⁾の方法を基に全運動軸上ですべての連続的な限界運動データから立体的に決定した。その結果、菊の花びらの形状に類似した運動空間が得られた。矢状面からの観察では、河野⁹⁾、長谷川¹⁹⁾、塩澤¹⁵⁾、鈴木¹²⁾らが報告した矢状面投影図とほぼ同様に、単純な円弧状の形を示した。前頭断面でみると上面と下面は上方に凸の形状を示したが、各部位の前頭断面形状は一樣でなく、顎関節部の形態からの影響と思われる形状を示した。

また、咬頭嵌合位付近の関節窩内と思われる位置で、川畑²⁰⁾が報告した前後移動許容範囲と思われる部分が約1 mm 程みられた。前頭断面の凸状の稜にあたる部分は、連続的な限界運動の矢状面内限界運動経路にあたり、河野⁹⁾の全運動軸の結果や、川畑²⁰⁾の解剖的な報告とも一致し、空間の上下幅は顎頭の全長にわたって約0.7 mm であった。

図4に示したように、左右の顎頭点の運動空間内で測定データの分布は、内側に密度の高い部分が観察できた。このことは、顎関節が生体の中で唯一左右の関節が連結された特殊な構造であることに由来すると考えられる。

3. 6自由度変数と運動空間内の位置について

6自由度の各変数値を一定の大きさに分割し、切歯点と顎頭点の運動空間内でその分布を調べた結果、前頭面内の回転に相当する変数 θ_x と水平面内の回転に相当する変数 θ_z では、切歯点の左右方向に規則性がみられ、矢状面内の回転に相当する変数 θ_y では、切歯点の上下方向に規則性がみられた。

この結果より、6自由度の各変数値と運動空間内の位置との間には、明確な関係があるように考えられ、統計学的手法を用いて、その関係を追究した。統計

表 3 6 自由度変数値と運動空間内の位置との関係

変数	切 歯 点			右顎頭点			左顎頭点		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
x_0	1.00	-.04	.89	-.48	.12	.17	-.39	.10	.02
y_0	-.04	1.00	-.03	.49	.68	-.59	-.47	.69	.59
z_0	.89	-.03	1.00	-.73	.01	.45	-.68	-.00	.34
θ_x	-.03	.89	-.01	.39	.40	-.65	-.42	.43	.67
θ_y	-.92	.03	-.99	.71	-.03	-.39	.66	-.02	-.27
θ_z	-.06	.99	-.03	.48	.66	-.53	-.49	.67	.58

数値は 6 自由度変数値と座標値との相関係数

学的な手法として、離散的な運動顎位を対象に 6 自由度の各変数値と切歯点および左右顎頭点の位置を表す各座標値との相関係数を求めた (表 3)。

求め方として、離散的な運動データは、滑走面、最大開口位付近で立体格子間隔が異なること、切歯点と顎頭点で運動空間の大きさや形状が異なることなどの問題があるが、ここでは、離散的な運動データすべてをもちいて単純に計算した。

結果について、切歯点の各値は、切歯点が座標原点であるため、変数間の相関係数を示しており、残った変数間では、変数 $\theta_x \cdot \theta_y$ 間で 0.01、変数 $\theta_x \cdot \theta_z$ 間で 0.84、変数 $\theta_y \cdot \theta_z$ 間で 0.03 を示した。各変数間においては、変数 z_0 と変数 θ_y 、変数 θ_x と変数 θ_z がともに従属的な関係である。

表 3 と図 6 の a, b, c の結果を対応させると、変数 θ_x では、切歯点で y 座標、左顎頭点で z 座標、変数 θ_y では、切歯点で z 座標、左顎頭点で x 座標、変数 θ_z では、切歯点で y 座標、左顎頭点で y 座標との関係が明らかとなり、表 3 の相関係数によって、図 6 の a, b, c に示した分布の特徴が明確に表現できる。

図 6 の b の変数 θ_y を分割して得られた切歯点における矢状面投影図の分布は、佐久間⁹⁾が矢状面内運動範囲に顎頭の等回転曲線を示した報告と同様の結果である。これは、左右の顎頭点の運動空間内の位置によって並進運動ならびに回転運動の大きさが決まっている結果の表れであり、三次元でも佐久間の考えが適用できる。図 6 の a, c は、変数 θ_x 、 θ_z に対する等回転曲線を示す結果である。

4. 下顎の運動学的な特性について

図 8 の a, b, c に示した結果より、各座標軸において左右の顎頭点を通る Z の特性曲線は、河野⁹⁾、林ら²¹⁾、藤村ら²²⁾が報告した顎頭点の等厚曲線の変化、長谷川ら¹⁹⁾、塩澤¹⁵⁾、鈴木¹²⁾が報告した顎頭点付近の

運動軌跡の変化、坂東²³⁾が報告した下顎任意点の運動軌跡の変化をそれぞれ最もよく表し、また、特性曲線の特異点と顎頭点の位置も一致している。このことより、運動空間の上下方向の大きさを示す Z は、下顎の運動学的な特性を示すパラメータとして有用であることが明らかになった。

さらに解析をすすめるため、Z が決定される運動空間の上下方向の最大値の顎位と最小値の顎位の 6 自由度変数の値について検討した。

図 9 は、縦軸に 6 自由度変数値の大きさをとり、横軸に右顎頭点を通る対象の座標軸をそれぞれとって、一方向にのみ変化させたときの Z が決定される最大値の顎位と最小値の顎位の 6 自由度変数値の変化を示した。図 9 の a は、図 8 の a の右顎頭点を通る座標軸の Z に対応した結果である。同様に、図 9 の b は、図 8 の b の右顎頭点を通る座標軸の Z に対応した結果で、また、図 9 の c は、図 8 の c の右顎頭点を通る座標軸の Z に対応した結果である。図 9 の a, b, c ともに右顎頭点の座標値 R の付近で 6 自由度の各変数値が大きく変化している様子が観察できる。

並進運動の変数は、最小値を示す顎位の変数 x_0 と変数 z_0 が大きな値を示す以外は 0 mm 付近の値であり、回転運動の変数は、最小値を示す顎位の変数 θ_y 以外は 0 度付近の値を示している。この結果は、右顎頭点が運動の特異点であることを示しており、特異点では、最小値の顎位の変数 x_0 値、 z_0 値、 θ_y 値以外、変数値が 0 に近い値をとるため特性曲線の Z が小さくなる。この結果からも明らかであるように運動空間の上下方向の大きさ Z を対象とした特性曲線は、下顎運動の運動学的な特性をよく表しており、また、その特異点は、運動学的な基準点になりうるものであるといえる。

次に、特性曲線の特異点である右顎頭点の動きを追究すると、右顎頭点の運動空間では、図 10 に示した

図 10 右顎頭点の回転特性
縦軸：各変数の回転角度，横軸：咬頭嵌合位からの距離

回転特性が得られた。図 10 の各横軸は、運動空間を咬頭嵌合位から 1 mm 間隔の距離で分割した位置を示し、各縦軸には、分割したそれぞれの空間に対する各変数 θ_x , θ_y , θ_z が示す範囲の上限値、下限値および範囲の大きさを示した。この結果から、咬頭嵌合位より顎路長の 3/4 付近までは、各空間で顎頭が回転できる範囲は決まっているように考えられ、回転の自由度もほぼ一定している。しかし、顎路の前方 3/4 付近から最大開口位では、急激に自由度がなくなり、この部分の変化に対応する切歯点の運動は、最大開口位に収斂している。左顎頭点でも変数 θ_x , θ_z の上下限値の符号が逆になる点を除いては、全く同様の特性が得られた。

以上の結果は、顎運動に対して顎頭点が機構学的にみて三次元的にも下顎の動きを単純に表現できる代表的な点であることを示しているものである。

5. 運動空間の形成について

下顎上の点の運動空間は、左右の顎頭点が剛体条件を保ちつつ運動空間内を移動すると同時に、左右の顎頭点間の軸まわりの回転を行うことにより形成されることができると考えることができる。具体的には、顎頭点の運動空間内における位置とその位置でとり得る回転範囲の関係が図 10 に示されており、その関係を切歯点で表した結果が図 7 である。

6. 今後の課題

本研究では、立体格子へ到達した最初の顎位を代表値として収集し、解析を行った。しかし、到達できる顎位は、運動方向によって異なることがあるので、運動方向にも考慮した研究をすすめたい。

また、本研究で切歯点の全運動空間を明らかにする

ことはできたが、この顎位で得られた結果が顎頭点での全運動空間を表しているかどうかは不明であり、今後この点についても検討をすすめたい。

V. 結 論

1. 切歯点および顎頭点における各運動空間の立体モデルを製作し、形状を観察して以下の知見を得た。

1) 切歯点がり得た運動空間の形状は、連続的な限界運動経路が稜を成す菱形柱で、左右の前方面が外側に凸状の緩い曲面を示し、左右の後方面が内側に凹状のきわめて緩い球面を示した。

2) 上記に対応して顎頭点がり得た運動空間の形状は、菊の花びらの形状に類似しているが、各部位の前頭断面形状は一樣でなく、顎関節部の形態からの影響と思われる形状を示した。

2. 下顎運動の 6 自由度解析に新たな視点からの方法を導入し、以下の知見を得た。

1) 運動空間の上下方向の大きさ Z を対象とした特性曲線が下顎運動の運動学的な特性を示す。

2) 顎頭点は、その位置が特性曲線の特異点に一致しており、運動学的に下顎の動きを単純に表現できる代表的な点である。

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徳島大学歯学部坂東永一教授、中野雅徳助教授に深甚なる謝意を表します。

本論文の要旨の一部は、第 81 回日本補綴歯科学会学術大会 (1989 年 5 月 27 日、長野) において発表した。

本研究の一部は、文部省科学研究費補助金 (一般研究 C、課題番号 04671209) に依った。

文 献

- 1) 石原寿郎：下顎運動に関する最近の研究，口病誌，30：81～99，1963.
- 2) 長谷川成男：咬合学序説 機能的咬合面形態を求めて，第1版，51～104，医歯薬出版，東京，1988.
- 3) 坂東永一，鈴木 温：顎運動の計測法と計測器，石岡靖，小林義典，長谷川成男ほか編，顎口腔機能分析の基礎とその応用，44～53，デンタルダイヤモンド社，東京，1991.
- 4) 長谷川成男：顎運動の概念と基本運動，石岡 靖，小林義典，長谷川成男ほか編，顎口腔機能分析の基礎とその応用，36～43，デンタルダイヤモンド社，東京，1991.
- 5) Ulrich, J.: The human temporomandibular joint, kinematics and actions of masticatory muscles, J Prost Dent, 9: 399～406, 1959.
- 6) Posselt, U.: Studies in the mobility of the human mandible, Acta Odontol Scand, 10: Supple 10, 1～160, 1952.
- 7) Posselt, U.: Range of movement of the mandible, J Am Dent Assoc, 56: 10～13, 1958.
- 8) 佐久間孔毅：マルチフラッシュ装置による有歯顎の前後および開閉運動の研究，口病誌，26：1511～1536，1959.
- 9) 河野正司：下顎の矢状面内運動に対応する顎頭運動に関する研究 第2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.
- 10) Posselt, U.: Movement areas of the mandible, J Prosth Dent, 7: 375～385, 1957.
- 11) 根本一男：有歯顎の下顎切歯点における3次元運動限界の研究，補綴誌，6：1～40，1962.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) Rogers, D.F. and Adam, J.A. (山口富士夫)：Mathematical elements for computer graphics (コンピュータグラフィックス，154～161，日刊工業新聞社，東京，1982) 1976.
- 15) 塩澤恭朗：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.
- 16) 田中英央：顎関節の再構築と運動解析，補綴誌，36：264～278，1992.
- 17) 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.
- 18) 林 豊彦：顎運動の計測，バイオメカニズム会誌，12：157～163，1988.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 林 豊彦，加藤一誠，石岡 靖：非線形最適化アルゴリズムによる全運動軸点の自動検索法について，顎機能，3：29～35，1985.
- 22) 藤村哲也，鈴木 温，池田隆志ほか：全運動軸の定義について，顎機能，3：37～44，1985.
- 23) 坂東永一：情報量が多く操作の容易な下顎運動測定器の開発，昭和60年度科学研究費補助金（一般B）研究成果報告書，1～179，1985.

θ_x の分割

図 6-a

 θ_y の分割

図 6-b

 θ_z の分割

図 6-c

図 6 分割した 6 自由度変数値の大きさ別分布
分割基準: 下限値 < 6 自由度変数 ≤ 上限値

図 9 各座標軸に対する 6 自由度変数の変化
 x_0, y_0, z_0 : 並進運動の変数, $\theta_x, \theta_y, \theta_z$: 回転運動の変数
R: 右顎頭点の座標値