顎位, 顎運動の表現方法について

The Representation of Jaw Position and Jaw Movement

鈴木 温

Atsushi SUZUKI

徳島大学歯学部歯科補綴学第2講座

Dept. of Fixed Prosthodontics, School of Dentistry, The University of Tokushima

1. はじめに

顎運動の研究においては、上顎に基準座標系を設定し、この基準座標系に対する下顎の運動を測定解析することが多い。

しかし、顎運動は上顎と下顎を剛体と見做した場合には、2つの剛体の相対的な運動であるから、どちらの剛体を基準とするかによってその表現方法は全く異なったものとなる。またパントグラフなどの描記法によって顎運動を測定する際においても、描記板と描記針を上顎と下顎のどちらに装着するかによって、その運動軌跡は全く異なったものとなる。

したがって顎運動の研究においては、上顎と下顎のどちらに基準をおいたものであるかを明確にした上で、測定、解析をすすめる必要があり、顎運動に関する用語も併せて整理されなければならない。

そこで上顎に基準座標系を設定した場合の顎運動を「下顎運動」と呼び、下顎に基準座標系を設定した場合を先に坂東ら¹⁾が提案したように「相補下顎運動」と呼び、両者を合わせて「顎運動」と呼びたい(表1)。

また、下顎の位置を表す言葉に「下顎位」、

「顎間関係」があるが、これも同様に何を基準とした位置であるかを明確にしておく必要がある。したがって、上顎に対する(上顎座標系における)下顎の位置を「下顎位」と呼び、下顎に対する(下顎座標系における)上顎の位置を「相補下顎位」と呼び、両者をあわせて「顎位」あるいは「顎間関係」と呼びたい(表1)。

従来より、Arcon型咬合器とCondylar型咬合器の運動再現能に関する議論が多くなされてきたが、これらの中には基準座標系の設定など解析法に問題があると思われるものもある。こういった混乱を引き起こさないためにも、下顎運動と相補下顎運動を等価に考察できる概念が必要であるが、そのためには、まず両者を統一的に表現する方法が必要である。

2. 研究方法

数学的手法を用い、下顎運動と相補下顎運動を統一的に表現できる方法について理論的検討を行った。

また、顎口腔系に異常の認められない32歳の男性1名を被験者に選び、顎運動測定を行い、実験的検討を行った。なお顎運動測定は、ディジタル方式下顎運動測定器¹⁾を用いて行った。

表1 上下顎の相対的な運動と位置を表す用語についての提案

下顎運動	顎運動
mandibular movement	jaw movement
相補下顎運動	jaw motion
complementary mandibular movement	
下顎位	顎位
mandibular position	jaw position
相補下顎位	(顎間関係)
complementary mandibular position	(jaw relation)

図 1. 2次元運動の表現方法を示す模式図
(原点の平行移動とそのまわりの回転)

図 2. 2次元運動の表現方法を示す模式図
(不動点のまわりの回転)

表 2. 2次元運動の表現方法を示す式
(原点の平行移動とそのまわりの回転)

$$\begin{aligned} \text{下順運動} \quad W &= R \cdot W' + T_0 \\ \text{相補下順運動} \quad W' &= R^{-1} \cdot W + T_0' \\ \text{但し} \quad T_0' &= -R^{-1} \cdot T_0 \end{aligned}$$

W : 上順座標上の点の位置ベクトル
 W' : 下順座標上の点の位置ベクトル
 R : 回転行列 (2行2列)
 T_0 : 下順座標系の原点移動を表すベクトル
 T_0' : 上順座標系の原点移動を表すベクトル

$$W = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad W' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \quad T_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} \quad T_0' = \begin{pmatrix} x_0' \\ y_0' \end{pmatrix}$$

$$R = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

表 3. 2次元運動の表現方法を示す式
(不動点のまわりの回転)

$$\begin{aligned} \text{下順運動} \quad W &= R \cdot (W' - T_c) + T_c \\ \text{相補下順運動} \quad W' &= R^{-1} \cdot (W - T_c) + T_c \end{aligned}$$

W : 上順座標上の点の位置ベクトル
 W' : 下順座標上の点の位置ベクトル
 R : 回転行列 (2行2列)
 T_c : 不動点の位置ベクトル

$$W = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad W' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \quad T_c = \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix}$$

$$R = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

3. 結 果

1) 2次元運動の表現方法

順運動が純粋な矢状面内運動のみの場合は、2次元3自由度の運動ということができる。

この運動の表現方法の1つとして、第1に、上順あるいは下順に設けた座標系上のある点の translation とそのまわりの rotation で表す方法がある。このある点は任意にとることが可能であり、そのとり方により rotation は変化しないが、translation は変化する。一般的にはこの点を原点にとれば、任意の点の運動を算出したりするのに都合がよい。

Rotation がゼロでない一般的な場合においては、ある点の translation とこの点のまわりの rotation とみなした運動を、別の特殊な点のまわりの1つの rotation とみなすことが可能である。換言すれば、剛体が2次元運動をする際に、

translation がゼロである特殊な不動点がただ1点必ず存在するということである。

この不動点を基準に考えると、すべての点の動きは、この点のまわりの rotation として理解することができる。このように、第2の表現法として、特殊な不動点のまわりの回転で表す方法がある。

但し、rotation がゼロで translation のみの運動においては、不動点を定めることはできないが、すべての点について運動量、運動方向とも全く等しく、運動を理解するのは容易である。

以下にこの2つの方法を用いた一般的な2次元の順運動の表現方法について検討する。なお第1の方法については、ある点として原点を選んだ。

図1, 2は2つの表現方法を示す模式図であり、図に示すように運動がゼロのときは上下順

は一致しているものとした。またそれぞれについてベクトルと行列を用いて顎運動を表現したのが表2、3である。表中ハッチングを施した部分が下顎運動と相補下顎運動で異っている。

図1および表2に示す第1の方法では、下顎運動における x_o 、 y_o および相補下顎運動における x_o' 、 y_o' は、運動後のある顎位における移動座標系の原点 O' 、 O の基準座標系での位置ベクトルを表している。この2つの位置ベクトルは異ったものであり、座標系を入れ替えると、translationが変化することを意味する。

図2および表3に示す第2の方法では、下顎運動と相補下顎運動の両者について、特殊な不動点を表す位置ベクトル(x_c 、 y_c)は共通であり、唯一の違いは下顎運動における回転行列 R が相補下顎運動ではその逆行行列 R^{-1} に変わっている点、すなわち回転の方向が逆になっていることである。このように第2の方法では、基準座標系と移動座標系の2つの座標系について、この不動点は共通であり、下顎運動と相補下顎運動を全く等価に扱うことができる。

また図2は、基準となる顎位では上下顎に設けた座標系が一致している場合に、基準となる顎位と他の別の顎位との間で求まる不動点を示しているが、一般的には任意の2顎位間で不動点が1つ求まり、この2顎位間の関係はこの点を基準に考えることが可能である。

自由度とパラメータの数についてみると、第1の方法は、移動座標系の原点の移動量 x_o 、 y_o および回転角 θ の3つ、第2の方法は、不動点の座標値(x_c 、 y_c)、および回転角 θ の3つであり、2つの方法ともすべてのパラメータは互いに独立しており、3自由度の運動を表現するのに必要十分なパラメータの数を有している。

つぎに、顎運動の実測データについて解析を行い、得られた具体的な不動点について検討する。

図3から図6に咬頭嵌合位と各顎位との間で求まる不動点の例を示す。図中の顎運動軌跡は実線が下顎運動、破線が相補下顎運動である。

図3は咬頭嵌合位と最大開口位の関係を示すものであり、切歯点、臼歯部、顎頭点、および不動点のそれぞれの部位における顎運動軌跡を同時に示した。図において、咬頭嵌合位におけるある点をPとする。この点が最大開口位にお

図3．咬頭嵌合位と最大開口位の関係

図4．咬頭嵌合位と最大開口位の関係

いて、下顎運動を行い点Qに、相補下顎運動を行い点Q'に移ったとする。不動点をCとすれば、下顎運動の回転角 $\angle PCQ$ と相補下顎運動の回転角 $\angle PCQ'$ は相等しく、咬頭嵌合位から最大開口位への回転角の大きさを表す。また図では点Pを切歯点にとってあるが、臼歯部、顎頭点、あるいは不動点を除くどのような点にとってもこの関係は成り立つ。したがって、回転角は任意の点について等しい。

なおここで言う不動点とは、途中の経路については問題としない2顎位のみに関する不動点という意味であり、図からもわかるように、不動点における運動軌跡は、下顎運動、相補下顎運動の両者について咬頭嵌合位と最大開口位が一致しているが、途中の経路は異なる。

図4は、咬頭嵌合位において、咬頭嵌合位と最大開口位との間で求まる不動点から等しい距離にある点は、最大開口位においてもまたこの不動点から等しい距離に存在することを示すものである。不動点を中心にもつある円周を想定すると、咬頭嵌合位においてこの円周上に存在する点は、下顎運動、相補下顎運動を問わず、途中の運動軌跡は選んだ点によって異なるものの、最大開口位においてもまた同じ円周上にあり、それ以外には存在しない。

咬頭嵌合位と前方限界運動路上における各顎位との間で求まる不動点を図5に示す。前方限界運動路上における顎位が咬頭嵌合位に近づくほど、不動点は後下方へ移動し、切歯点から遠ざかる（第72回日本歯科補綴学会学術大会において発表）。

同様に、咬頭嵌合位と後方限界運動路上における各顎位との間で求まる不動点を図6に示す。Centric relationでは、髁番軸（回転中心）が求まり、この軸のまわりでほぼ純粋な髁番運動を行えることがよく知られている。後方限界路上のどの顎位を選んでも、この場合不動点は髁番軸の近くに求まる。

2) 3次元運動の表現方法

顎運動は一般的には6自由度の運動であり、上下顎を剛体と見做した場合には、剛体の運動の中で最も複雑な運動である。

2つの剛体の6自由度の相対的な運動は、それぞれの剛体に設けた座標系の関係で表現する

図5. 咬頭嵌合位と前方限界運動路上の各顎位との間で求まる不動点

図6. 咬頭嵌合位と後方限界運動路上の各顎位との間で求まる不動点

図 7. 3次元運動の表現方法を示す模式図
(軸に沿った平行移動と軸のまわりの回転)

ことができる。その方法として、第1に2次元運動と同様に、ある点をどちらかの座標系の上にとり、この点の translation とそのまわりの rotation で表現することができる。2次元運動においては、translation がゼロになる特殊な不動点が1点求まったが、3次元運動においてはこのような不動点は一般に存在しない。しかし、運動量が最小となる点が求まり、この点はある直線の上に存在する。

Rotation がゼロでない一般的な場合においては、この運動量が最小である点の集合、すなわちある軸を基準に考えると、すべての点の動きはこの軸に平行な translation とこの軸のまわりの rotation として理解することができる²⁾。

但し、rotation がゼロで translation のみの運動においては、この直線を一義的に決めることはできないが、2次元運動と同様に、すべての点について運動量、運動方向が同じであり、運動を理解することは容易である。

図7はこの軸を基準とした運動の表現方法を示す模式図である。図に示すように、基準となる顎位では上下顎に設けた座標系は一致しているものとする。運動がおこると上下顎は離れ、ある顎位をとる。このとき、上顎に対して下顎がこの軸に沿ってだけ平行移動するとともにこの軸のまわりに θ だけ回転したとみなしたのが下顎運動であり、上顎が反対の方向に平行移動し、かつ反対の方向に回転したとみなしたのが相補下顎運動である。

表 4. 3次元運動の表現方法を示す式
(軸に沿った平行移動と軸のまわりの回転)

$$\text{下顎運動} \quad W = R \cdot (W' - T_a) + T_a \cdot n$$

$$\text{相補下顎運動} \quad W' = R^{-1} \cdot (W - T_a) + T_a \cdot n$$

W : 上顎座標系上の点の位置ベクトル

W' : 下顎座標系上の点の位置ベクトル

R : 回転行列

T_a : 軸上のある点の位置ベクトル

n : 軸に平行な単位ベクトル

t : 軸に沿った平行移動量

$$R = \begin{pmatrix} n_1^2 + [1 - n_1^2] \cos \theta & n_1 n_2 [1 - \cos \theta] - n_3 \sin \theta & n_1 n_3 [1 - \cos \theta] + n_2 \sin \theta \\ n_1 n_2 [1 - \cos \theta] + n_3 \sin \theta & n_2^2 + [1 - n_2^2] \cos \theta & n_2 n_3 [1 - \cos \theta] - n_1 \sin \theta \\ n_1 n_3 [1 - \cos \theta] - n_2 \sin \theta & n_2 n_3 [1 - \cos \theta] + n_1 \sin \theta & n_3^2 + [1 - n_3^2] \cos \theta \end{pmatrix}$$

$$W = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad W' = \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} \quad T_a = \begin{pmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{pmatrix} \quad n = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix}$$

表4にこの関係をベクトルと行列を用いて示す。ハッチングを施した部分が下顎運動と相補下顎運動で異なっている。

両者を比較すると、相補下顎運動を表す式は、下顎運動における回転行列 R がその逆行列 R^{-1} に、すなわち行列 R の各要素のパラメータである θ が $-\theta$ に、平行移動量 t が $-t$ に変わっているだけである。

運動の自由度についてみると、3次元空間に軸を定義するのに4要素、軸に沿った translation、および軸のまわりの rotation がそれぞれ1つずつ、合計で6要素であり、6自由度の運動を表すことが可能である。

このように下顎運動と相補下顎運動は、この軸を基準にすると全く対称の運動であると言える。以後この軸を「顎間軸」Intermaxillary Axis と呼びたい。

以下に、実測した6自由度の顎運動データを解析して求めた具体的な顎間軸について検討を加える。

図8、9に咬頭嵌合位と他の1顎位との間で求まる顎間軸の具体例を示す。なお、生体と顎間軸の位置関係を示す下顎骨の schema は、顎間距離を110 mmとした。また、両者の位置関係は生体計測により可及的に対応させてあるが、現段階では完全な一致は得られていない。

図8、9に示す4種類の図は、左からそれぞれ前頭面、水平面、矢状面への投影図、および鳥瞰図であり、同一のものを別の方向から見た

図 8. 咬頭嵌合位と左側方咬合位との間で求まる顎間軸

図 9. 咬頭嵌合位と右側方咬合位との間で求まる顎間軸

図である。

顎間軸は 3 次元空間における直線として定義されるが、図では長さ 100 mm の線分として表した。

図 8 に顎位 2 として左側上下顎犬歯が edge to edge になる左側方咬合位を選んだ場合に、顎位 1 の咬頭嵌合位との間で求まる顎間軸を示す。なお、顎位 2 における切歯点の位置は、限界運動路上に・印をつけて明示した。

この顎間軸を基準とすれば、顎位 1 から顎位 2 への運動を下顎運動とみなした場合には、下顎がこの軸に沿って 0.03 mm だけ前上外方へ平行移動するとともにこの軸のまわりで 2.02 度だけ回転したとすることができる。一方、同じ運動を相補下顎運動とみなした場合には、上顎がこの軸に沿って 0.03 mm だけ後下内方へ平行移動す

るとともにこの軸のまわりで下顎運動と逆の方向に 2.02 度だけ回転したとすることができる。

図 9 に顎位 2 として右側方咬合位を選んだ場合に求まる顎間軸を示す。このとき、顎位 1 から顎位 2 への運動の顎間軸に沿った平行移動量は 0.00 mm、この軸のまわりの回転量は 2.08 度であった。

図 8, 9 に示すいずれの場合も、顎間軸は作業側顎頭の近くを通り、前上外方から後下内方へ向う軸として存在している。

図 10 に咬頭嵌合位から左側方限界運動路を行い、最大開口位へ至る運動路における 32 顎位と、咬頭嵌合位との間で求まる 32 本の顎間軸を示す。

同様に、図 11 に右側方限界運動路上の 36 顎位と咬頭嵌合位との間で求まる 36 本の顎間軸を示す。

図10. 咬頭嵌合位と左側方限界運動路上の各顎位との間で求まる顎間軸

図11. 咬頭嵌合位と右側方限界運動路上の各顎位との間で求まる顎間軸

以上の2つの図における切歯点の下顎限界運動軌跡のうちで、実線で示した運動軌跡が図10では左側方限界運動、図11では右側方限界運動である。

側方滑走運動において、回転中心はほぼ作業側顎頭付近に存在し、作業側顎頭の運動量が少ないことはよく知られているが、2つの図はこの事実を端的に表していると言えよう。

4. 考察

顎運動における任意の2顎位間の関係についてみると、運動量最小の点として、一般に2次元運動においては不動点、3次元運動においては顎間軸が求まり、この不動点、顎間軸を基準に考えることで、任意の部位の運動を容易に知ることができる。

3次元運動が2次元運動と異なる点は、一般に

translationがゼロである不動点が存在しないことである。3次元運動において、顎間軸に沿ったtranslationがゼロである特殊な場合は、不動点が存在するということであり、この運動は顎間軸と直交する平面上での回転運動である。また、一般的な3次元運動をその運動で求まる顎間軸と直交する平面に投影して考えた場合には、その平面上での運動は2次元運動と全く同じ取り扱いが可能であり、平面上での1つの回転運動と考えることができる。

2次元運動は3次元運動の特殊な場合とみなすことができるので、以下に3次元運動において求まる顎間軸について考察する。

第1に、顎間軸を基準に考えると、上顎または下顎はこの軸に沿って平行移動するとともにこの軸のまわりで回転するので、上顎あるいは下

顎上のそれぞれの点の運動方向，運動量が整然とする。

第2に，顎間軸は座標系の設定方法にかかわらず固有のものであり，下顎運動と相補下顎運動は，この軸を接点として全く対称な運動とみなすことができ，両者を全く対等に取り扱うことができる。すなわち，軸を表すパラメータは下顎運動と相補下顎運動で等しく，軸に沿った平行移動と軸のまわりの回転は，それぞれ大きさが等しく方向が逆である。

第3に，顎運動に調和した上下顎の咬合面形態を考えると，顎運動を点の運動軌跡としてとらえると考えづらい。顎間軸を基準にすれば，顎運動を点の集合としての立体と立体の相対的な運動として取り扱うことができ，咬合面形態を考えやすくなる。

臨床では，上下顎の模型を咬頭嵌合位で咬合器に装着し，チェックバイトを利用して偏心位の調整を行うことがしばしばあるが，この場合のチェックバイトが有している情報量は，この2顎位間で求まる顎間軸が有している情報量と全く等しい。

5. おわりに

顎運動のモデルには，軸を下顎に固定した下顎運動モデルとして全運動軸，その反対に軸を上顎に固定した相補下顎運動モデルとして相補全運動軸があり，それぞれに対応する顎運動のシミュレータとしてArcon型咬合器，Condylar型咬合器が存在する（第70回日本歯科補綴学会学術大会において発表）。

これに対し，顎間軸は任意の2顎位間については，軸を上顎と下顎の両者に固定したモデルであると言うことができ，Arcon型咬合器とCondylar型咬合器を全く同様な考え方で取り扱うことができる。

今回，このように下顎運動と相補下顎運動を同時にかつ等価なものとして扱うことのできるモデルとして顎間軸という概念を提唱した。

今回報告した顎間軸の例は，顎機能に異常の認められない1名の被験者についてのものであり，このモデルを表すパラメータのもつ意味を客観的に評価することは，現段階では困難である。よって，今後症例を増やすとともに，さらに解析をすすめ，顎間軸の正常像について明らかにしていく所存である。

6. まとめ

下顎運動と相補下顎運動を統一的に取り扱うための方法として，顎運動をある2顎位間で求まる顎間軸を基準として表現することを提案した。

この顎間軸というモデルを用いることによって，顎運動はこの軸に沿った平行移動とこの軸のまわりの回転運動の2つのパラメータによって完全に表現し得るので，定量的に理解しやすくなり，かつ今まである点の運動軌跡として理解することの多かった顎運動を，上下顎の相対運動としてとらえることが容易になった。

文 献

- 1) 坂東永一ほか：ディジタル方式による下顎運動測定，下顎運動機能とEMG論文集，昭和58年度，137 - 143，1984.
- 2) Spoor, C.W. and Veldpaus, F.E. : Rigid body motion calculated from spatial co-ordinates of markers, J. Biomechanics, 13 : 391 - 393, 1980.