原著論文

コンピュータシミュレーションによる顎運動と 咬合面形態に関する研究

山内 英嗣

Computer Simulation on the Occlusal Facet in Relation to Jaw Movement

Eiji Yamauchi

Abstract: Occlusal surface that is employed for occlusal reconstruction is commonly determined by the clinician's experiments. There are no superior kinematics and scientific evidence that reveal occlusal shape. The purpose of this study was to establish a kinematics standard that determines the morphology of occlusal facet. In this study, a computer simulation model was developed to analyze three-dimensional interocclusal relationship during excursive movement. The main experiment involved the following investigations by using this computer simulation study.

1. Eighty-four types of simulated excursion were utilized to design corresponding jaw movement surfaces.
2. These jaw movement surfaces were investigated by analyzing interocclusal distance and interocclusal angle during excursion.

The results of this study showed that 29 types of simulated excursion could provide stable occlusal contacts at both intercusp and lateral jaw positions, while others produced interference during excursion. Further researches will be required to confirm the fundamental relationship between jaw movement kinematics and ideal occlusal morphology.

Key words: occlusal facet, jaw movement, computer simulation

I. 緒 言

顎運動に調和し機能的に望ましい咬合面形態を解明することは、歯学における最も重要な課題の1つである。

日常臨床でしばしば直面する問題として、FGPやオクルーザリコンストラクションの症例などで、最初に与える対合歯の咬合面形態によっては意図する咬合接触状態が得られないことがある。顎運動や咬合に関する数多くの研究が古くから行われてきたにもかかわらず、この例に挙げ

たように、咬合面形態をどのように与えるかという具体的な基準は未だに確立されていない。顎運動と調和した咬合面形態に関する研究として、古くは、全部床義歯の安定を得るための人工歯咬合面形態のあり方に関する研究¹⁻³⁾などがあるが、運動論の立場からこの課題に取り組もうとするものであった。解析幾何学の手法を用いたこの種の研究は、立体的解析とはいうものの、点の運動軌跡をそのまま咬合面形態として扱い、下顎上のある1点と上顎咬合面との接触関係について論じているにすぎない⁴⁾。しかしながら、実際の咬合接触は上下顎の咬合小面間の接触であり、滑走運動時の接触関係を論ずるにはそれぞれの咬合小面を点ではなく立体的形態として捉えた上で、6自由度の顎運動解析を行う必要がある。

1985年、鈴木⁵⁾は上下顎を等価とみなすことのできる顎間軸モデルを提唱した。これにより、顎運動と関連させて

徳島大学大学院歯学研究科歯科補綴学第二講座（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7年12月1日受付

咬合面形態を定量的に研究する道が拓かれたといえる。1988年、美馬⁹⁾は鈴木⁸⁾の顎間軸モデルを応用して、顎運動がある条件を満たす時、顎運動軌跡に沿った面が咬合面形態決定の基準となるとし、これを咬合参照面と命名した。すなわち、「咬合参照面に一致した上下の咬合接触を与えれば、咬頭嵌合位ならびに偏心位において上下顎咬合小面どうしが緊密に接触する、もしくは両者間の距離が最小となる」というものである。実際に咬合面を製作する場合、このような基準があればクリアランスを与えたい部位についてはこの基準面から必要量を削除して、接触させたい部位だけを残せばよいといえる。また、咬頭嵌合位では接触させて偏心位で離開させるためには、その部分の咬合小面の傾斜を咬合参照面の傾斜より緩くすればよい。さらに、美馬は咬合参照面上の1運動方向に対応する曲線を要素(element)と呼び、それぞれの要素に対して顎運動が満たすべき条件について理論的に解析を行っている。しかしながら、種々の運動方向へ運動した時の各要素間の関係がどうなるか、つまり、離開するのか、接触滑走するのか、あるいは干渉となるのかについては言及していない。すなわち、美馬によって示された条件は、クリアランスが最小となる咬合小面を作製するための必要条件であるが、十分条件であるかどうかは不明である。咬合面を製作するに当たっては、顎運動のどのような要因が咬合参照面の各要素間の関係にどのように影響するのかを明らかにしておく必要がある。その方法としては理論的に解析することが望ましいが、2次元的な解析に比べて要素数が多く複雑となるため、本研究では計算機シミュレーションの手法を用いて検討した。

II. 研究方法

1. 研究方法の概要

研究方法を詳述する前に概要を示す。

生体の顎運動は単純化して表現することとして、半調節性咬合器における運動を参考にモデルの作製を行った。

半調節性咬合器は、指導要素の位置によって4種類の顎運動様式に分類されている⁶⁾。それぞれの運動様式について、顎路角や切歯路角および側方ウイングの傾斜角度を変え、84個の顎運動モデルを設定した。各条件において、平均的右側臼歯部点⁷⁾での前方、側方および両者の間を埋める中間の滑走運動経路から得られる顎運動面(jaw movement surface)を構築する。なお、用語の混同をさけるために以下の定義を新たに行った。すなわち、ある点から各方向への滑走運動経路に沿った曲面を顎運動面と呼び、この顎運動面に一致させて咬頭嵌合位で全面接触させた上下顎咬合小面が、偏心位でも干渉しない時、この顎運動面を咬合参照面(occlusal reference surface)とした。

この顎運動面に一致させて、咬頭嵌合位において全面で

図1 Location of the coordinates for computer simulation study
設定した座標系

接触する上下顎の咬合小面を設定し、各種滑走運動をそれぞれで行わせ、その時の咬合接触関係を解析して、顎運動面が咬合参照面となるか否かについて数値計算の手法により検討した。併せてコンピュータグラフィックの手法を用い視覚的観察も行った。

2. 解析に用いた顎運動モデル

1) 座標系の設定と各部位に与えた座標値

座標系(図1)は咬頭嵌合位における顎間軸をY軸、さらに左右側顎頭点の midpoint を原点にとり、切歯指導板の矢状切歯路角および側方ウイング角が0°の時、この切歯指導板に平行でY軸を含む平面がX-Y平面となるような右手直交座標系を設定した。

各部の座標値として、切歯指導針先端(ST)は $X=120.0$, $Y=0.0$, $Z=-70.0$ を左側顎頭点(CL)には $X=0.0$, $Y=55.0$, $Z=0.0$, 右側顎頭点(CR)は $X=0.0$, $Y=-55.0$, $Z=0.0$ を与えた(単位mm)。

2) 顎運動の様式

顎路型咬合器は顎路指導部が上顎に存在するか、あるいは下顎に存在するかによりArcon型とCondylar型に分類される。また、切歯指導板の位置についても上下顎のいずれにも設定できるので、これらの組合せにより4種類の顎運動様式が存在する。この4種類の顎運動様式を顎路指導部が上顎で切歯指導板が上顎のものを「A型」、顎路指導部が上顎で切歯指導板が下顎のものを「A'型」、顎路指導部が下顎で切歯指導板が上顎のものを「C型」、顎路指導部が下顎で切歯指導板が下顎のものを「C'型」と分類し⁶⁾、これらを生体の顎運動のシミュレータとした。

3) 咬合器指導要素の調節

今回検討した咬合小面は、それぞれの顎運動モデルから

得られた下顎の滑走運動のうち、前方滑走運動と右側方滑走運動および両者間のすべての中間滑走運動に対応する曲面である。

実験的顎運動モデルを作る上で設定した指導要素の角度は、矢状顆路角と矢状切歯路角が 10° 、 40° 、 60° 、側方ウイング角は 0° 、 15° 、 30° である。なお、側方と中間滑走運動には以下のような条件を与えた。

(1) 側方滑走運動は作業側顆頭を中心とした回転運動とする。

(2) 中間滑走運動の作業側顆頭は与えられた顆路傾斜において前方 (X-Z 平面内) にのみ運動するものとする。

ここで、河野ら⁸⁾に準じて矢状切歯路角が矢状顆路角より大きい場合を正回転型、小さい場合を逆回転型とした。

3. 顎運動面の構築

1) 顎運動の算出法

与えた運動は切歯指導釘の先端が咬頭嵌合位から 4 mm まで滑走する運動であり、その運動経路上の 0.01 mm ごとの 401 顎位を算出した。まず切歯指導釘先端 (ST) の位置を求め、前述の条件に従って、左右側顆頭点 (CL, CR) の位置を求めた。次いで、この 3 点の 3 次元座標より上顎に対する下顎の位置関係を表す 4 行 4 列の座標変換行列を求めた^{9,10)}。なお、A 型と C 型は上顎に指導板があり、下顎の指導釘がこれに沿って運動するため、下顎運動を表す座標変換行列が直接得られる。しかしながら、A' 型と C' 型については下顎に指導板があり、上顎の指導釘がこの上を運動するため、まず相補下顎運動を表す座標変換行列を求め、この逆行列である下顎運動を表す座標変換行列を算出した。

以上の計算はワークステーション (DEC 社製, VAX STATION 4000) を用い、倍精度で演算を行った。

2) 顎運動面の構築法

異なった顎運動様式を持つ 4 種類のモデルについて前方および後方の指導要素を上述のように設定し、平均的右側臼歯部点 ($X=40.0$, $Y=-30.0$, $Z=-35.0$) における各種下顎滑走運動経路をもとにして顎運動面を構築した。顎運動モデルは前述の条件の組合せ (A, A', C, C' の 4 通り $\times$ 矢状顆路角 10° , 40° , 60° の 3 通り $\times$ 矢状切歯路角 10° , 40° , 60° の 3 通り $\times$ 側方ウイング角 10° , 15° , 30° の 3 通り) でできる 108 組のうち、矢状顆路角と矢状切歯路角がともに 10° または 60° の平行移動となる条件を除いた 84 組であり、この 84 個の顎運動面について解析を行った。図 2 は、顎運動面構築に用いた運動経路の 1 例で、A 型で矢状顆路角 40° 、矢状切歯路角 60° 、側方ウイング角 15° (C 40 I 60 W 15, 以後矢状顆路角を C, 矢状切歯路角を I, 側方ウイング角を W と表すこととする) の顎運動モデルで得られた顎運動面をグラフィックターミナル上に出し、右側前上方より観察したものである。前方滑走運動

経路が紫色、右側方滑走運動経路が水色、両経路間が中間滑走運動経路である。なお、中間滑走運動経路の間隔は切歯指導板上で前方滑走運動から 5° 間隔とし、側方滑走運動経路を超えないこととした。これにより得られる顎運動面は 12~17 経路の、各経路それぞれ 401 個の座標データより構成されることとなる。

図 3 は、構築した顎運動面をワイヤーフレームモデルとして出力したものである。なお、ワイヤーフレームの表示に際しては各運動経路の 0.2 mm 間隔のデータを用いた。

図 4 は、得られた顎運動面上に顎咬合小面を一致させ、咬頭嵌合位で下顎咬合小面上顎咬合小面に全面接触させた時、前方滑走運動で切歯指導釘の移動距離が 1.0 mm となる顎位における状態を表示したものであり、緑色で表した面が上顎咬合小面、赤色が下顎咬合小面である。この上下顎咬合小面の位置関係を以下に示すような方法により評価した。

4. 各種滑走運動時の上下顎咬合小面の接触関係

1) 解析に用いた滑走運動と顎位

接触状態を評価するために用いた滑走運動は前方滑走運動、右側方滑走運動および臼歯部の解析点において 2 経路をほぼ 3 等分するような 2 種類の中間滑走運動である。例えば、A 型で C 40 I 60 W 15 の場合 (図 2) では前方滑走運動、右側方滑走運動および前方滑走経路から、8, 11 番目の 2 種類の中間滑走運動である。上下顎咬合小面の接触状態は 4 種類の滑走運動において切歯指導釘での移動距離が 1.0, 2.0 および 3.0 mm となる顎位について解析した。

2) 接触関係の評価方法

上下顎咬合小面の接触関係は咬合小面間の離開量および離開角を求め解析した。

離開量は大久保¹¹⁾の方法に準じて次のように求めた。下顎咬合小面を構成する任意の点 (L) に対して、最も近接する上顎咬合小面を構成する点 (U) を選択する。次に、点 U と点 U に隣接する上顎咬合小面上の 4 点によってできる 4 つの平面に対する L からの垂直距離のうち、最も短いものを上下顎咬合小面間の離開量とした。離開角については下顎咬合小面の頂点となる点 P_L と下顎咬合小面を構成する任意の解析点 L を結ぶ直線と、点 P_L と前述の離開量を算出した垂線の足 (U') を結ぶ直線とのなす角を求め、これを上下顎咬合小面の離開角とした (図 5)。

III. 結 果

1. 顎運動様式による咬合接触状態の比較

1) 咬合小面離開角

表 1 は、各滑走運動方向に対して、切歯点で 1.0, 2.0, 3.0 mm の各移動位における咬合小面離開角の平均を、それぞれの顎運動様式ごとに表したものである。全体を概観

図2 Computer graphics of simulated excursive movements (Type A, sagittal condylar angle: 40°, sagittal incisal angle: 60°, lateral wing angle: 15°)
顎運動面構築に用いた滑走運動経路
(A型で矢状顎路角40°, 矢状切歯路角60°, 側方ウイング角15°の顎運動モデル)

図3 Computer graphics of jaw movement surface made up by using simulated excursive movements (Type A, sagittal condylar angle: 40°, sagittal incisal angle: 60°, lateral wing angle: 15°)
構築した顎運動面
(A型で矢状顎路角40°, 矢状切歯路角60°, 側方ウイング角15°の顎運動モデル)

すると、それぞれの条件でA型に対してC'型が、A'型に対してC型がちょうどプラスマイナスの符号が逆となる傾向がみられた。A型では正回転でクリアランスが、逆回転で干渉が生じ、C'型では逆に正回転で干渉が、逆回転でクリアランスが生じた。A'型とC型では必ずしも一定の傾向ではなかったが、正回転でも逆回転でもA'型がクリアランスの、C型が干渉の傾向を示した。また、顎路と切歯路の関係でみると、A型とC'型においては下顎の回転量が大きくなるほど、クリアランス量や干渉量が大きくなるような傾向がみられたが、A'型やC型ではそのような

図4 Upper and lower occlusal facets at 1 mm protrusive position from ICP (Type A, sagittal condylar angle: 40°, sagittal incisal angle: 60°, lateral wing angle: 15°)
前方滑走運動1.0 mm 移動位における上下顎咬合小面
(A型で矢状顎路角40°, 矢状切歯路角60°, 側方ウイング角15°の顎運動モデル)

図5 Calculation method for interocclusal distance and angle

L: Given point on the lower occlusal facet, U: The closest point to L on the upper occlusal facet, U1, U2, U3, U4: Four points surrounding U on the upper occlusal facets, $\alpha 1, \alpha 2, \alpha 3, \alpha 4$: Four reference planes including points U, U1, U2, U3 and U4, d: The shortest perpendicular line from L to four reference planes, U': The intersection on the shortest perpendicular line and selected reference plane, PL: The right side mandibular molar point, θ : The angle made with line PL-L and PL-U'
離開量および離開角の算出法

L: 下顎咬合小面を構成する任意の解析点, U: Lと最も近接する上顎咬合小面を構成する点, U1, U2, U3, U4: Uと隣接する上顎咬合小面を構成する点, $\alpha 1, \alpha 2, \alpha 3, \alpha 4$: UとU1, U2, U3, U4からできる平面, d: Lから4平面に下ろした垂線のうちの最短距離, U': dを求めた1平面にLから下ろした垂線の足, PL: 下顎右側臼歯部点, θ : 点PLと点Lを結ぶ直線と点PLと点U'を結ぶ直線とのなす角

傾向は認められなかった。側方ウイング角については、A型とC'型ではこれが大きくなるほどクリアランス量や干渉量が小さくなるような傾向を示したが、A'型やC型ではむしろ逆の傾向を示した。矢状顎路角と矢状切歯路角が

表 1 Mean degrees of interocclusal angle during simulated excursive movements
各顎運動モデルにおける滑走運動時の平均離開角

Sagittal condylar angle	Sagittal incisal angle	Lateral wing angle	A Type	A' Type	C Type	C' Type
10°	60°	0°	0.60	-0.08	0.08	-0.58
		15°	0.56	0.01	-0.01	-0.53
		30°	0.49	0.09	-0.07	-0.45
10°	40°	0°	0.34	0.03	0.00	-0.32
		15°	0.31	0.14	-0.11	-0.29
		30°	0.27	0.22	-0.21	-0.25
40°	60°	0°	0.23	-0.06	0.06	-0.22
		15°	0.21	0.02	-0.03	-0.20
		30°	0.19	0.09	-0.09	-0.18
40°	40°	0°	0.00	0.00	0.00	0.00
		15°	0.00	0.11	-0.11	0.00
		30°	0.00	0.19	-0.20	0.00
60°	40°	0°	-0.22	-0.02	0.00	0.21
		15°	-0.21	0.11	-0.14	0.20
		30°	-0.19	0.22	-0.24	0.18
40°	10°	0°	-0.31	0.02	-0.04	0.29
		15°	-0.28	0.13	-0.16	0.28
		30°	-0.24	0.25	-0.26	0.24
60°	10°	0°	-0.56	-0.03	-0.01	0.53
		15°	-0.51	0.09	-0.15	0.50
		30°	-0.44	0.24	-0.26	0.43

unit : °

同角度の条件では、離開角はほぼ 0° かあるいは非常に小さい値を示したが、側方ウイング角が大きくなるにつれて A' 型ではクリアランス量が C 型では干渉量が増加するような傾向がみられた。

滑走運動方向によって咬合小面間の接触状態が異なっていた。種々の顎運動モデルのうち、正回転、逆回転および回転量のほとんどない 3 つの条件を選び、各運動方向における離開角の変化を顎運動様式別にグラフに表した (図 6-a, b, c)。正回転モデル (C 40 I 60 W 15) の場合、A 型では前方、中間、側方のいずれの運動方向においても 1.0, 2.0, 3.0 mm と、切歯点での移動量が増すにつれて離開角は大きくなりクリアランス量が増加したのに対して、C' 型では逆にマイナスの離開角が大きくなり、干渉量が増加した。運動方向別でみると両タイプとも前方滑走運動時よりも側方滑走運動時の方が離開角の絶対値が小さくなる傾向がみられた。また、A' 型と C 型では滑走運動の方向によって離開角の符号が異なり、いい換えれば、ある運動方向ではクリアランスがあるが、別の方向への運動では干渉を生ずるというように一定の傾向を示さなかった (図 6-a)。一方、逆回転モデル (C 40 I 10 W 15) の場合には正回転モデルの逆の傾向を示し、移動量が増すにつれて C' 型では離開角が増加するのに対し、A 型ではマイナスの離開角が増加し干渉の度合いが大きくなった。また、A' 型および C 型では前方滑走運動において他の方向と離開角の符号が逆になることがあり一定の傾向を示さなかった (図 6-b)。回転量のほとんどないモデル (C 40 I 40

W 15) の場合では A および C' 型ではいずれの運動方向についても離開角はほぼ 0° でありほぼ全面で接触したのに対して、A' 型ではいずれの方向においても移動量が増えるに伴い離開角は徐々に増加し、C 型では逆にマイナスの離開角が大きくなり干渉量が増える傾向にあった (図 6-c)。

2) 離開量

表 2 は、下顎咬合小面上の各解析点と上顎咬合小面との距離の、各運動方向 1.0, 2.0, 3.0 mm 移動位における全データの平均値、最大値および最小値を 84 個の顎運動モデルについて示している。平均値についてみると各モデル間での傾向は当然のことながら離開角と同様である。また、最大値は咬合小面上の全解析点で最もクリアランス量が大きい (干渉量が小さい) 点の離開量を示しており、最小値はその逆を示しているが、回転量が大きい条件においてクリアランス量および干渉量の最大値が大きい傾向がみられた。干渉量の最大値が最も大きい値を示したのは、逆回転で C 60 I 10 の A 型モデルの約 28~30 μm 、および正回転で C 10 I 60 の C' 型モデルの約 18~24 μm であった。一方、クリアランス量の最大値が最も大きい値を示したのは、逆回転で I 10 C 60 の C' 型モデルの約 27~29 μm 、正回転で C 10 I 60 の A 型モデルの約 18~24 μm であった。

1 μm 以下の干渉量は干渉とはみなさないという条件を設定すれば、どの滑走運動においても干渉を生じないのは、正回転と C 40 I 40 の A 型、逆回転と C 40 I 40 の C' 型、C 40 I 60 W 0、C 40 I 40 W 0 の C 型および C 40 I 40

W 0, C 40 I 40 W 15 および C 40 I 40 W 30 の A' 型の合計 29 個であり、他のモデルでは咬合小面上のいずれかの部位に干渉が存在した。

図 6 Interoocclusal angle for each excursive movement
 a : Sagittal condylar angle : 40°, sagittal incisal angle : 60°, lateral wing angle : 15°
 b : Sagittal condylar angle : 40°, sagittal incisal angle : 10°, lateral wing angle : 15°
 c : Sagittal condylar angle : 40°, sagittal incisal angle : 40°, lateral wing angle : 15°
 各滑走運動における咬合小面離開角
 a : 矢状顎路角 40°, 矢状切歯路角 60°, 側方ウイング角 15° の場合
 b : 矢状顎路角 40°, 矢状切歯路角 10°, 側方ウイング角 15° の場合
 c : 矢状顎路角 40°, 矢状切歯路角 40°, 側方ウイング角 15° の場合

2. A 型モデルにおける咬合小面内の部位別接触状態

滑走運動の咬合接触状態は咬合小面内の部位によってそれぞれ異なっていた。A 型モデルについて、下顎咬合小面の頂点 (P_L) から 1.0 mm 離れた各経路上の点における離開量を比較した。正回転 (C 40 I 60 W 0, C 40 I 60 W 15, C 40 I 60 W 30), 逆回転 (C 40 I 10 W 0, C 40 I 10 W 15, C 40 I 10 W 30) の各条件における部位別の離開量をグラフに示した (図 7-a, b, c, d, 図 8-a, b, c, d)。側方ウイング角の大小で多少の違いはあるが傾向は類似しており、ほとんどの部位において側方ウイング角が小さいほど、正回転ではクリアランスが、逆回転では干渉量が大きかった。また、それぞれの運動経路に対応する咬合小面上の部位が、正回転ではクリアランスが、逆回転では干渉量が最も大きかった。すなわち、正回転の前方滑走運動時を例にとれば、前方経路寄りの部位でクリアランス量が大きく、側方寄りの部位になるほどクリアランス量が小さくなるという傾向である (図 7-a)。

IV. 考 察

1. 顎運動モデルを用いたシミュレーション実験について

本研究は美馬の提案した咬合参照面を 6 自由度的な概念へと発展させて、咬合面形態決定のための運動論的基準を確立することを目的としており、明確な基準を持たないまま経験的に行ってきた従来の術式を、理論的根拠を持ったものへと変えていくために必要な研究である。美馬の提案した咬合参照面をさらに発展させる上で、可能ならば理論的解析によって、立体的な咬合参照面成立のための必要かつ十分条件を明らかにすることが望ましい。しかしながら、6 自由度顎運動と立体的形態を関連づける理論は複雑であったので、計算機シミュレーションの手法を採用した。この手法の利点としては、生体測定や咬合器上で行うハード的な実験では種々の制約や限界があるのに対して、ありとあらゆる条件を設定して計算機上で実験を行うことができることであり、モデルの設定が適切であれば有効性は高い。

生体の滑走運動をガイドする上下顎歯のガイド面、関節窩および関節結節と顎頭のそれぞれの関節面は複雑な曲面をしており、いずれも顎運動の指導要素となっている。顎運動において、どちらの曲面がガイドとして運動経路に強く影響しているかは、それぞれの解剖学的形態や運動の種類によって異なる。生体のあらゆる顎運動に対応するようにモデルを設定することが望ましいが、単純化したものとなるように、半調節性咬合器を参考にして顎運動モデルを設定した。そこで、野村ら⁶⁾に準じて指導要素が上顎にあるか下顎にあるかにより 4 種類の運動様式に分類して、顎路および切歯路を平面とし、対顎の点と接触しながら誘導

表 2 Mean length of interocclusal distance during simulated excursive movements
各顎運動モデルにおける滑走運動時の平均離開量

Sagittal condylar angle	Sagittal incisal angle	Lateral wing angle	A Type		A' Type		C Type		C' Type	
			Mean(Min	Max)	Mean(Min	Max)	Mean(Min	Max)	Mean(Min	Max)
10°	60°	0°	5.47(-0.13	24.31)	-0.43(-10.00	13.79)	0.44(-3.55	9.71)	-5.43(-23.94	0.35)
		15°	4.76(-0.08	21.86)	0.31(-9.26	5.40)	-0.35(-5.47	8.94)	-4.70(-21.41	0.25)
		30°	3.91(0.00	18.31)	0.83(-8.11	6.49)	-0.83(-6.76	7.83)	-3.99(-17.80	0.37)
10°	40°	0°	3.45(-0.04	16.37)	0.49(-5.52	5.02)	-0.30(-4.52	5.36)	-3.43(-16.11	0.11)
		15°	2.98(-0.02	15.32)	1.61(-5.31	8.41)	-1.38(-8.09	5.07)	-3.13(-15.06	0.35)
		30°	2.57(-0.01	13.40)	2.33(-4.97	11.89)	-2.22(-11.73	4.70)	-2.60(-13.13	0.30)
40°	60°	0°	2.21(0.00	9.42)	-0.47(-4.43	0.44)	0.46(-0.47	4.27)	-2.25(-9.46	0.15)
		15°	2.05(0.00	8.82)	0.33(-4.36	3.96)	-0.40(-4.24	4.09)	-2.05(-8.85	0.11)
		30°	1.74(0.00	7.63)	0.84(-4.10	5.94)	-0.91(-6.27	3.79)	-1.78(-7.64	0.15)
40°	40°	0°	0.00(0.00	0.00)	0.00(0.00	0.00)	0.00(0.00	0.00)	0.00(0.00	0.00)
		15°	0.01(0.00	0.06)	1.19(-0.06	5.76)	-1.20(-5.59	0.00)	0.01(0.00	0.06)
		30°	-0.01(-0.12	0.05)	2.03(-0.32	9.98)	-2.04(-9.69	0.12)	0.04(-0.01	0.33)
60°	40°	0°	-2.66(-12.47	0.03)	-0.33(-3.70	4.31)	0.18(-4.18	3.26)	2.64(-0.08	12.36)
		15°	-2.41(-12.34	0.02)	1.23(-3.64	5.62)	-1.42(-5.73	3.18)	2.55(-0.28	12.23)
		30°	-2.25(-11.41	0.02)	2.45(-3.39	11.47)	-2.53(-11.03	2.92)	2.32(-0.27	11.31)
40°	10°	0°	-3.32(-14.58	0.02)	0.08(-2.71	5.70)	-0.19(-5.56	2.53)	3.39(-0.35	14.56)
		15°	-3.13(-14.48	0.03)	1.37(-2.69	6.45)	-1.52(-6.48	2.49)	3.24(-0.37	14.46)
		30°	-2.75(-13.24	0.05)	2.73(-2.47	10.08)	-2.76(-10.34	2.26)	2.75(-0.16	13.20)
60°	10°	0°	-6.31(-29.25	0.04)	-0.63(-8.11	9.97)	0.32(-9.75	7.27)	6.36(-0.65	28.40)
		15°	-6.05(-29.67	0.06)	0.85(-8.17	10.89)	-1.25(-10.48	7.30)	6.21(-0.71	28.81)
		30°	-5.44(-27.90	0.13)	2.68(-7.71	12.04)	-2.82(-12.35	6.80)	5.38(-0.34	26.97)

unit : μm

するという条件を付与した。また、各指導要素の調節角度は中野¹²⁾、上田ら¹³⁾の顎運動測定結果を参考にした。すなわち、前方滑走運動の下顎回転量は0°とし、矢状顎路角および矢状切歯路角をともに40°とした。また、側方滑走運動データから側方ウイング角15°を算出して、生体の平均的な顎運動モデルとした。さらに、正回転および逆回転の傾向を特徴づけるために、回転量の絶対値が大きくなるような角度設定もモデルに加えた。

なお今回は、モデルを単純化するために、側方滑走運動については作業側顎頭が回転中心となるという条件を与えたが、これは、真柳の回転型¹⁴⁾に相当するものであり、がたのないいわば理想的な状態を想定したものである。さらに、前方滑走運動については顎頭は前下方への移動を、中間滑走運動については両者の中間的運動を与えた。以上のモデルにより、典型的な健康者についてはかなりよくシミュレートできたと考えられるが、真柳の滑走型¹⁴⁾や、顎機能障害者の顎運動様式についての解析は今後の課題である。

2. 結果について

指導要素の位置より分類した4種類のモデルのうち、正回転の顎運動ではA型、逆回転の顎運動ではC'型で咬合参照面を得やすいのに対して、A'型やC型では今回設定した条件ではほとんどの場合に咬合小面内の一部が離開し、一部が干渉するという傾向がみられた。A型、C'型

では正の方向への回転が大きくなるほど、離開量または干渉量が大きくなり、側方ウイング角については、大きくするほど平均的な離開量は減少する傾向にあったが、A'型、C型ではこれとは逆の傾向を示した。A型、C'型は切歯路と顎路がともに上下顎の同側にあるタイプであるのに対して、A'型、C型では各指導要素が上下顎別々にあることがこのような傾向をもたらしたと思われる。

A型モデルにおいて、咬合小面内の部位による接触状態の違いを調べたところ、それぞれの運動経路に対応する部位が正回転の条件ではクリアランスが、逆回転では干渉量が多いという結果が得られた。本研究に用いたモデルにおいて、いずれの運動方向、あるいは、いずれの部位においても常に均等な接触状態を示すものはなかった。また、A型、C'型において、干渉量や離開量の絶対量についてみると回転量が大きくなるとクリアランス量や干渉量が増加し、最大値が30 μm 程度となる部分も存在した。この量の評価について2つの見方があると思う。間接法術式での誤差¹⁵⁾や歯の動揺などを考慮すれば非常に小さい量であり、無視してもよい大きさである。したがって、どのような顎運動様式であっても、また咬合器の様式にこだわらなくても、顎運動経路に沿った顎運動面は常に咬合参照面となり、これを基準にして咬合面形態を与えさえすれば、咬頭嵌合位のみならず偏心位でもよく噛む咬合面形態が得られるという見方である。もう1つは、歯冠修復における咬合の誤差を20 μm ¹⁶⁾ないしは10 μm ¹⁷⁾以内にもっていく

図7 Interocclusal distance at 1 mm protrusive position from ICP

(Type A, sagittal condylar angle: 40°, sagittal incisal angle: 60°)

a: Protrusive excursion, b: Protrusive intermediate excursion, c: Lateral intermediate excursion, d: Lateral excursion

A型で矢状顎路角 40°, 矢状切歯路角 60°の顎運動モデルにおける部位別の咬合小面離開量 (1.0 mm 移動位)

a: 前方滑走運動, b: 前方寄りの中間滑走運動, c: 側方寄りの中間滑走運動, d: 側方滑走運動

べきであるとする主張や、さらに、将来CAD/CAMで咬合面形態を製作する場合に要求されるであろう精度からすれば決して小さい値ではないとする見方であり、著者もこの立場に立っている。

3. 今後の展望

咬合参照面は、咬合小面を付与するための運動論的な基準となるものである。本研究で作製した84個の顎運動モデルに対して、咬合参照面が求まったものと求まらないものがあつた。咬合参照面が求まらない顎運動モデルは、咬合参照面の要素となるべき顎運動経路がすでに美馬の条件を満たしていなかった。したがって、今回設定した条件の他に、作業側顎頭の外側への移動や、さらにはあらゆる方向へ移動するといった条件について検討を行うとともに、理論的な解析も行わなければならない。本研究において、咬合接触状態の立体的な解析を計算機シミュレーションで行う方法はほぼ確立したといえるので、あとは必要な条件を選択し、それぞれのパラメータを与えればよい。また、コンピュータグラフィックによる視覚的観察も併せて行っているため、咬合面形態と6自由度顎運動を関連づけて解析する上で重要な、顎間軸^{5,18)}の空間的位置などについても容易に知ることができる。顎間軸の位置と咬合参照面の立体的関係を検討することで、咬合参照面の成立条件を理論的に解明することができると思われる。これにより、咬合面決定のための運動論的な基準が確立するはずである。

咬合参照面の臨床的意義と関連づけて、中野¹⁹⁾は顎運動を考慮して機能的な咬合接触を与えていく手順について述べているが、これに新たな表現を加え以下に概要を示す。咬頭嵌合位については、咬合採得によって適切な顎位が決定しているという前提にたつ。顎運動測定による顎頭運動の診断を行い、顎頭運動に異常がなければこれを咬合器上に再現して、これと調和した歯のガイドを決定する。ガイドの傾斜を決定する上で、顎路との調和¹²⁾を考慮するとともに、運動論的な観点から、顎頭運動に対応して咬合参照面が得られるように歯のガイドを設定する。側方運動のガイドは犬歯が中心的役割を果たすが、側方滑走運動を誘導する咬合小面の向きは顎頭運動の障害となりにくい、上顎の近心咬合小面と下顎の遠心咬合小面が接触誘導するM型²⁰⁻²²⁾とする。次いで、対合歯として最初に与える臼歯部の咬合面形態を決定する。どの位置に咬合平面を設定するか、どの部位で噛ませ、あるいはどの部位にクリアランスをどれだけ与えるかは、主として機能的な研究や臨床的研究などによって基準が決められる。ある部位において、咬頭嵌合位でも偏心位でもよく噛む咬合接触を与えたい場合には、咬合参照面に一致させて咬合小面を作ればよいが、偏心位で離開させたい場合には、必要なクリアランス量に応じてその部位の咬合参照面より緩い傾斜の咬合小面を作る。咬合参照面より急な傾斜の咬合小面を最初に与え

図 8 Interocclusal distance at 1 mm protrusive position from ICP

(Type A, sagittal condylar angle: 40°, sagittal incisal angle: 10°)

a: Protrusive excursion, b: Protrusive intermediate excursion, c: Lateral intermediate excursion, d: Lateral excursion

A型で矢状顆路角 40°, 矢状切歯路角 10°の顎運動モデルにおける部位別の咬合小面離開量 (1.0 mm 移動位)

a: 前方滑走運動, b: 前方寄りの中間滑走運動, c: 側方寄りの中間滑走運動, d: 側方滑走運動

てしまうと、対顎の咬合面のワックスアップにおいて、咬頭嵌合位でも噛まない咬合面ができあがるし、咬頭嵌合位で無理に噛ませるクラウンを製作すれば咬頭干渉をひきおこす。以上のようにして、片顎の咬合面形態を決定する。最後に、咬頭嵌合位で安定した咬合接触が得られるように、対顎の咬合面形態を与え、これによって意図する咬合接触が完成する。

このように、咬合参照面は咬合面形態を与えるための、あるいは咬合面形態の診断における重要な基準である。さらに今後、新たな咬合器の開発や CAD/CAM を用いたクラウンの製法²³⁻²⁵⁾を開発する上でも咬合面の決定基準は必要であり、本研究をさらに発展させてその確立を目指したい。

V. 結 論

84 種の顎運動モデルを作り、咬合参照面が存在するかどうかを計算機シミュレーションにより検討した。その結果、咬合参照面が存在するものと存在しないものがあった。咬合参照面が存在しないモデルでは、咬合参照面の要素となるべき顎運動経路が美馬の条件を満たしていなかった。今後、さらなる研究が必要である。

稿を終えるに臨み、終始ご懇切なるご指導ならびにご校閲を賜りました坂東永一教授、中野雅徳助教授に深甚なる謝意を表します。また、ご教示とご助言を賜りました歯科理工学講座浅岡憲三教授、ならびに歯科補綴学第一講座松本直之教授に感謝の意を表します。さらに、本研究にご協力頂きました歯科補綴学第 2 講座の教職員の方々に厚くお礼を申し上げます。

なお本研究の一部は文部省科学研究費補助金 (一般研究 B, 課題番号 07457472) に依った。

文 献

- 1) Gysi A. Handbuch der Zahnheilkunde IV 1~171, Berlin: Urban und Schwarzenberg, 1929.
- 2) 矢崎正方. 下顎運動の解剖学的研究 特に義歯の咀嚼能率に及ぼす関係に就いて. 歯科学報 34: 103-161, 590-636, 707-721, 791-840, 1929.
- 3) 長谷川成男. Gysi 咬合小面学説の再検討 その 1 理論的検討. 補綴誌 6: 128-156, 1962.
- 4) 美馬さとみ. 顎運動に調和した咬合小面の形態. 補綴誌 32: 624-638, 1988.
- 5) 鈴木 温. 顎位, 顎運動の表現方法について. 顎機能 3: 127-134, 1985.
- 6) 野村孝太郎, 長谷川成男, 坂東永一ほか. Arcon Type 咬合器と Condylar Type 咬合器について 第 1 報 矢状面内運動における検討. 補綴誌 14: 204-212, 1970.
- 7) 長谷川成男, 真柳昭紘, 荒井 泉. 下顎運動要素の歯牙路への

- 影響 その1 算出法. 補綴誌 24: 54-58, 1980.
- 8) 河野正司, 塩沢育己, 中野雅徳. 前方滑走運動の歯牙指導要素としての切歯路の研究. 補綴誌 19: 426-433, 1975.
- 9) 舟久保太, 根本一男. 半調節性咬合器の運動経路に関する理論的研究 第5報 剛体の滑走と回転およびパントグラフによる剛体運動の計算方法. 補綴誌 25: 259-274, 1981.
- 10) 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.
- 11) 大久保由紀子. 咬合接触の3次元解析システムの開発. 補綴誌 36: 53-63, 1992.
- 12) 中野雅徳. 側方滑走運動における顆路と歯牙路に関する研究. 補綴誌 19: 461-479, 1976.
- 13) 上田龍太郎, 坂東永一, 中野雅徳ほか. 顎口腔機能診断のための6自由度顎運動パラメータの検討. 補綴誌 37: 761-768, 1993.
- 14) 真柳昭紘. 側方滑走運動における顆頭運動に関する研究. 補綴誌 14: 158-182, 1970.
- 15) 松下和夫, 塩沢育己, 長谷川成男ほか. 模型の製作法が鑄造冠の咬合の高さに及ぼす影響. 補綴誌 29: 1143-1149, 1985.
- 16) 田中伐平. 咬頭嵌合位における補綴物の高さが顎口腔系に及ぼす影響. 補綴誌 19: 666-692, 1976.
- 17) 池田隆志, 横山正秋, 久保吉廣ほか. 強い咬合接触が顎口腔系に及ぼす影響—症状および歯の移動, 咬合接触状態の変化について—. 顎機能 6: 81-86, 1988.
- 18) 大久保由紀子. 空口運動時と咀嚼運動時の顎間関係の相違. 顎機能 11: 127-132, 1993.
- 19) 中野雅徳, 坂東永一. ブリッジの咬合—前歯と臼歯—. 歯科ジャーナル 37: 349-356, 1993.
- 20) Coffey JP, Mahan PE, Gibbs CH et al. A preliminary study of the effects of tooth guidance on working-side condylar movement. J Prosthet Dent 62: 157-162, 1989.
- 21) 中野雅徳, 竹内久裕, 坂東永一. 咬合診断. 坂東永一, 三谷英夫, 上村修三郎ほか編, アドバンスシリーズ2 顎機能障害新しい診断システムと治療指針 138-144, 東京: 医歯薬出版, 1993.
- 22) 佐藤 裕, 中野雅徳, 坂東永一ほか. 側方運動のガイドの変化が顎運動に及ぼす影響. 補綴誌 39・94 回特別号: 47, 1995.
- 23) 疋田一洋, 上田康夫, 内山洋一ほか. CAD/CAM による純チタンクラウンの作製. 補綴誌 36・87 回特別号: 134, 1992.
- 24) 深瀬 敦. CAD/CAM によるクラウン製作システムの開発に関する研究. 神奈川歯学 27: 431-446, 1993.
- 25) Sohmura T, Takahashi J. Improvement of CAD to produce crown by considering occlusion. Dent Mater J 12: 190-195, 1993.