咀嚼時における口唇周囲軟組織の動きに関する空間的構造分析

—主成分分析の応用—

坂口 究, 川崎貴生*

北海道大学大学院歯学研究科歯学臨床系専攻

*北海道大学歯学部歯科補綴学第一講座（主任：川崎 貴生教授）

〔受付：平成10年 8 月27日〕

A spatiostructural analysis of perioral soft tissue movement during mastication

—Application of the principal component analysis—

Kiwamu Sakaguchi, Takao Kawasaki*

Division of Clinical Dentistry, Graduate School of Dentistry, Hokkaido University

*Department of Prosthetic Dentistry I, School of Dentistry, Hokkaido University

(Director: Prof. Takao Kawasaki)

〔Received: August 27, 1998.〕

Key words: perioral soft tissue movement, principal component analysis (PCA), principal component, degree of freedom, time-series data

Abstract: The first aim of this study was clarify whether principal component analysis (PCA), one of the multi-variate analysis, can reduce the number of degrees of freedom of perioral skin movement (i.e., time-series data with 45 degrees of freedom). The second was to evident whether the analysis of the movement of perioral soft tissue during mastication by the application of PCA is useful to evaluate masticatory movement and stomatognathic functions.

The subjects were 15 persons with natural dentition and 4 complete denture wearers. The chosen experimental food for this study was sufficiently softened chewing gum.

The results of analysis showed that over 97% of the perioral soft tissue movement (time-series data with 45 degrees of freedom) during mastication with natural dentition could be expressed by a search up to the 3rd principal component. Therefore, the perioral soft tissue movement during mastication with natural dentition could be expressed as movement with a 3-dimensional variable. Similarly, perioral soft tissue movement during mastication in complete denture wearers could be expressed as movement with a 4-dimensional variable. Moreover, the time analysis of the movement of perioral soft tissue during mastication was possible by the application of the principal component score graph.

The results of this study showed that the spatiostructural and time analysis of the movement of perioral soft tissue during mastication was possible by the application of the PCA, one of the multivariate analysis, and that elucidation of this movement by this analysis would be useful to evaluate masticatory movement and stomatognathic functions.

抄録 本研究は、咀嚼時の口唇周囲軟組織皮膚表面上の15測定点の運動（45自由度をもつ時系列データ）から、咀嚼運動を代表する総合的指標（主成分）を多変量統計解析の一手法である主成分分析法を応用して抽出し、より低い自由度に還元することが可能であるかを検討するとともに、この解析法が咀嚼運動、そして顎口腔機能の評価法として有効であるかを検討することを目的として行った。

被験者には、健常有歯顎者15名と上下総義歯装着者4名を選択した。また、被験食品には、十分軟化したチューインガムを用いた。

45自由度の時系列データに対して、主成分分析法を応用して解析した結果、健常有歯顎者の咀嚼時の口唇周囲軟組織皮膚表面の運動は、第3主成分まで求めれば、その運動（45自由度の時系列データ）の97%以上が表現できた。つまり、健常有歯顎者の咀嚼時の口唇周囲軟組織皮膚表面の運動は、3自由度（3次元変量）の運動として十分表現可能であることが示された。同様に、上下総義歯装着者の運動は、4自由度（4次元変量）の運動として十分表現可能であることが示された。また、還元された主成分を主成分得点の時系列変化として捉えることにより、咀嚼時の口唇周囲軟組織皮膚表面の運動を時間的にも定量的に解析することができた。

以上のことから、咀嚼時の口唇周囲軟組織皮膚表面の運動は、多変量統計解析法の一手法である主成分分析法により、空間的、かつ時間的にも定量的に解析可能であることが示され、咀嚼運動および顎口腔機能の評価法として、本解析方法の有効性が示唆された。

I. 緒 言

歯学の研究領域の中で、咀嚼の分野は重要な領域である。咀嚼と精神活動、あるいは咀嚼と全身との関係が注目されているにも関わらず、未だに不明な部分が多い。また、咀嚼運動に関する研究は比較的詳しく検討されているが、咀嚼時の下顎の運動を解析するものがほとんどである。咀嚼運動は、顎顔面の総合的な活動であり、摂食から嚥下に至るまで円滑に営まれる運動であるが、こうした一連の運動において、口唇・頬という口唇周囲軟組織は下顎運動と密接に関係し、特有の挙動を示す。つまり、これら軟組織は、一連の咀嚼運動のなかで食塊形成や、食塊を適切な位置に移送・保持したり、嚥下に際しては、口腔の前方閉鎖などの重要な役割を担っており、円滑な咀嚼運動と協調している¹⁻⁵⁾。このことから、咀嚼運動時の口唇周囲軟組織皮膚表面の運動を把握・解析して、口腔機能における位置付けを明確にすることは、咀嚼運動評価、さらに顎口腔機能評価につながると考えた。これまで、X線テレビ映画法^{6, 7)}、モアレ縞^{8, 9)}、ステレオ写真¹⁰⁻¹²⁾、ステレオ画像¹³⁻¹⁶⁾等により口唇周囲軟組織の運動解析が行われてきたが、この運動を非接触・3次元・多点時系列で解析し、かつすべての測定点を総括して、空間的・時間的に解析を行った研究は報告されていない。

現在、顎運動は、上下顎をそれぞれ個別の剛体とみなした条件下で営まれる6自由度の運動として解析できる¹⁷⁻¹⁹⁾とされているが、咀嚼時の口唇周囲軟組織皮膚表

面の運動は、剛体の運動ではない。ゆえに、口唇周囲軟組織皮膚表面上のそれぞれの測定点は、独立した運動をする。したがって、各測定点の運動を表現するには3つの変数、つまり3自由度が必要となる。そこで、咀嚼時の口唇周囲軟組織皮膚表面の運動を、15測定点の運動¹³⁾で評価しようとする、45自由度をもつ膨大な変数の数の運動となる。しかし、これでは咀嚼時の口唇周囲軟組織皮膚表面の運動を評価するにはあまりに変数が多く、解析方法として問題がある。

そこで本研究では、多変量統計解析の一手法である主成分分析法²⁰⁻²³⁾ (principal component analysis) を応用して、咀嚼時の口唇周囲軟組織皮膚表面上の15測定点の運動（45自由度をもつ時系列データ）から、咀嚼運動を代表する総合的指標（主成分；principal component）を抽出し、より低い自由度に還元することが可能であるかを検討した。また、咀嚼時の口唇周囲軟組織皮膚表面の運動を主成分分析法により解析する手法が咀嚼運動、そして顎口腔機能の評価法として有効であるかについても検討した。

II. 方 法

1. 被験者

被験者には、歯の欠損がなく、顎関節に雑音、運動障害、疼痛や頭頸部の各筋に自発痛、圧痛が認められず、咬合干渉や著しい歯列不正が認められない健常有歯顎者15名（年齢23～30歳、平均25.9歳）、および上下総義歯

装着後3年以上経過し、自覚的、他覚的にもその審美性および機能性に十分満足が得られていて、臨床的に予後良好と判断した上下総義歯装着者4名（年齢56～74歳、平均65.5歳）を選択した。

2. システムの概要

本システムは、頭部を軽く固定するものの測定コードやクラッチ、マグネットなどの測定機器を顎顔面領域に装着することなく、無拘束状態でより生理的な咀嚼運動が記録できる。また、咀嚼時の口唇周囲軟組織皮膚表面の動きを0.1mm程度の精度で、3次元多点時系列で解析することができるシステムである。本システムの基本的な原理は、顔面皮膚上に貼付した測定点を、左右2台のCCDカメラで観測し、そのとき生じる視差に三角測量の原理を応用して、測定点の3次元座標値を計測するものである。

1) 構成

構成は、左右2台のCCDカメラ（SONY社製・XC-75）からのアナログ電気信号を、自作のSwitching Circuitによって1/60 secごとに左右を切り替え、左右2台のCCDカメラから每秒30フレームずつ送られてくる画像を同期させ、每秒30フレームの画像とし、Video Data Recorder（SONY社製・EVO-9650）に記録、保存した。そして、記録した画像データをビデオキャプチャリング後 Unix Work-Station（Sun microsystems 社製・SPARC station 20）に入力し、Work-Station上で3次元時系列データおよび主成分分析の計算を行った。本システムのブロックダイアグラムを図1に示す。

図1 ブロックダイアグラム

Fig. 1 Block diagram

2) システムの座標系

カメラ座標系（個々のカメラレンズ中心を原点とした座標系）での測定点の位置を認識し、次にカメラキャリブレーションにより得られたカメラパラメーター²⁴⁾を用いて、認識した左右それぞれの測定点を、カメラ座標系から計測座標系に座標変換した。そして、得られた左右1組の測定点から計測座標系での3次元座標値を算出した。

左右カメラは、それぞれ内方に角度を付けて配置し、カメラレンズ中心間距離 (Ol-Or) は、約300mm、被写体—カメラレンズ中心間距離 (Ol-A, Or-A) は、約600mmの範囲で計測した。fl, fr は、それぞれのカメラの焦点距離、Pは計測座標系の原点、(al, bl), (ar, br)は、測定点のカメラ座標系への射影点を計測座標系に変換した点を表す（図2）。

さらに、生体の運動を評価しやすくするために、計測座標系から生体基準座標系（カンベル平面座標系）に座標変換した。カンベル平面の算出においては、精度向上のため、顔面皮膚に設定したカンベル平面上に8個の測定点を設定し、最小二乗法を用いてカンベル平面を求めた。なお、鼻翼の左右側方端の中点を生体の正中矢状面上に位置させ、これを原点とした。また、X軸は左右方向で左方を正、Y軸は上下方向で上方を正、Z軸は前後方向で前方を正とした。

3) 計測方法

計測方法は、被験者の計測範囲皮膚表面に白色のどうらんを塗布したあと、直径約1mmの黒色の測定点を含

図2 システム座標系（計測座標系）

Fig. 2 The coordinates of the system

図3 測定点図

Fig. 3 The target points of the measurements

図4 システム全景図

Fig. 4 Overall view of the system

んだ自作のシールを、上下口唇、オトガイ部、左右口角結節部および頬部に合計15個の測定点を貼付した（図3）。

その後、頭部（前頭部、後頭部、後頸部）を固定した状態で、計測用椅子に座らせ、十分軟化したチューインガム（ロッテ社製、フリーゾーン）を自発的な周期で、咀嚼側を規定し閉唇咀嚼させた（図4）。

データのサンプリングは、咀嚼開始5ストロークからの数ストローク（5秒間）を記録した²⁵⁾。そして、各被験者ごとに連続する30フレーム（1秒間）の主成分分析を行った。

3. 3次元座標値の算出

1) カメラキャリブレーション

計測座標系において、既知の座標値をもつカメラキャリブレーション用の平板上の8点と、これに対応するカメラ座標系上の8点（計測座標系のカメラ座標系への透視射影点）から f （カメラの焦点距離）、 $l \cdot m$ （計測座標系上の方向余弦）、 P （カメラ座標系から見た計測座標系の原点）を求め、これらからカメラパラメーター（ ψ , θ , ϕ ：それぞれカメラのX軸、Y軸、Z軸方向の傾き、および計測座標系からみたカメラレンズ中心）を求めた。ここで求める未知数は8変数（ $l \cdot m$ は、拘束条件1とした）であるから、誤差を含んでいなければ既知の座標4点で未知数は求まるが、画像解析では必ず量子化誤差が含まれる。そこで、この求める変数の精度をあげるために既知の座標を8点設定し、最小二乗法を用いてカメラパラメーターを求めた。

2) 測定点の座標値算出

画像処理は、画像データに対して移動平均法によるフィルタリングを行い、ピクセル濃度値を補正した。そし

て、補正した画像データの質により自動的に閾値を変動させ、2値化画像処理を行った。ここで画像平面内における測定点の認識が可能となる。次に、認識したそれぞれの測定点に対して連結成分を自動認識し、ラベリングを行った。

測定点の座標値算出は、精度を上げるために、サブピクセルオーダーで求める必要性があった。そこで、ラベル付けされた各測定点に対して、横、縦をそれぞれ x 座標、 y 座標、そして輝度値を z 座標として、測定点を3次元図形と見なし、最小二乗法にて2次曲面近似した。そして、2次曲面の最陥凹点、つまり輝度値が最小となる位置を求め、これを測定点の座標値とした。

3) 3次元座標値の算出方法

得られた測定点の座標値は、左右それぞれのカメラ座標系での座標値である。そこで、カメラパラメーターを用いて、左右それぞれのカメラ座標系でのカメラレンズ中心および測定点の座標値を計測座標系に座標変換した。そして、計測座標系に座標変換したカメラレンズ中心および測定点の2点を用いて、左右それぞれについてこれらの2点を通る直線を求めた。したがって、1つの測定点に対して2本の直線が求まる。同じ測定点を左右2台のカメラで計測しても、ステレオ画像解析では、量子化誤差が存在するので2直線が1点に交わることはない。ゆえに、2本の直線が最短距離となる直線上の点を求め、これらの点の midpoint を測定点の3次元座標値とした。そして、得られた3次元座標値を計測座標系から生体基準座標系（カンペル平面座標系）に座標変換した。

4. 多点時系列データの解析

これまで述べた算出方法によって、各測定点ごとに3

表1 主成分分析について

Table 1 Data used for the principal component analysis

variable frame	x1	y1	z1	...	x15	y15	z15
0	x1,0	y1,0	z1,0	...	x15,0	y15,0	z15,0
1	x1,1	y1,1	z1,1	...	x15,1	y15,1	z15,1
2	x1,2	y1,2	z1,2	...	x15,2	y15,2	z15,2
...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...
30	x1,30	y1,30	z1,30	...	x15,30	y15,30	z15,30

$x_{i,j}$: x component with frame j of target i
 $y_{i,j}$: y component with frame j of target i
 $z_{i,j}$: z component with frame j of target i

自由度の時系列データが得られる。この45自由度の時系列データの中から、咀嚼時の口唇付近の運動を最も表現している総合的指標（主成分）を抽出して、その運動を解析するのに必要な自由度を求めるため、多変量統計解析の手法である主成分分析法を応用して解析を行った。

5. 主成分分析法

1) 主成分の算出

表1は、主成分分析を行うにあたり、扱ったデータを例示した。変量(x1, y1, z1)には、測定点1の変量を、以下同様に、(x15, y15, z15)には、測定点15の変量を表示した。これらの時系列データから、45×45の分散共分散行列を求めた。そして、求めた分散共分散行列の固有値 λ_m ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \lambda_4 \geq 0$)を求め、次に、固有値 λ_m ($m=1, 2, 3, 4$)から固有ベクトル($a_{m1}, a_{m2}, a_{m3}, \dots, a_{m43}, a_{m44}, a_{m45}$) ($m=1, 2, 3, 4$)を求めた。ただし、固有ベクトルは、 $a_{m1}^2 + a_{m2}^2 + a_{m3}^2 + \dots + a_{m43}^2 + a_{m44}^2 + a_{m45}^2 = 1$ ($m=1, 2, 3, 4$)とした。

最大固有値 λ_1 の固有ベクトル($a_{11}, a_{12}, a_{13}, \dots, a_{143}, a_{144}, a_{145}$)から第1主成分、2番目に大きい固有値 λ_2 の固有ベクトル($a_{21}, a_{22}, a_{23}, \dots, a_{243}, a_{244}, a_{245}$)から第2主成分、以下同様にm番目の固有値 λ_m の固有ベクトルから第m主成分を求めた。第m主成分($m=1, 2, 3, 4$)は、表現すると次のような線形結合の式(1次式による合成変量)で表現できる。

$$a_{m1}x1 + a_{m2}y1 + a_{m3}z1 + \dots + a_{m43}x15 + a_{m44}y15 + a_{m45}z15$$

2) 寄与率、累積寄与率の算出

・第m主成分の寄与率(%)

$$= \lambda_m / (\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{45}) \quad (m=1, 2, 3, 4)$$

表2 寄与率・累積寄与率（健常有歯顎者）

Table 2 The proportion and cumulative proportion in natural dentitions

	1st P.C.	2nd P.C.	3rd P.C.
Proportion (%)	59.5 (5.5)	28.8 (5.9)	8.9 (3.6)
Cumulative Proportion (%)	—	88.2 (3.9)	97.2 (0.9)

( ): S.D.

・第1～第m主成分の累積寄与率(%)

$$= \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_m / (\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{45}) \quad (m=1, 2, 3, 4)$$

各被験者について寄与率、累積寄与率を求め、そしてさらに、健常有歯顎者、上下総義歯装着者それぞれについて、被験者全員で各主成分の寄与率、累積寄与率の平均値および標準偏差を求めた。

3) ベクトル図

1つの固有値から45個の成分をもつ固有ベクトルが求まるが、各主成分の固有ベクトルのグラフには、XY成分の30個の固有ベクトル成分から、各測定点の咀嚼運動時の前頭面観像を表示した。また、グラフ化にあたりデータが小さかったので20倍にして表示した。

4) 主成分得点表

本研究における主成分得点表は、45次元空間において各フレームにおける15測定点の位置から、主成分直線に射影したとき求まるデータ（主成分得点）を150フレーム連ねて表示した。つまり、主成分を主成分得点の時系列データとして表現した。

還元されたそれぞれの主成分に対して、主成分得点の時系列軌跡の最下点から最下点までを1周期とし、各被験者、それぞれ還元された主成分について、咀嚼周期の平均値(sec)、および変動係数((S.D./平均値)×100)(%)を計算した。そしてさらに、健常有歯顎者、上下総義歯装着者それぞれについて、被験者全員で各主成分の咀嚼周期、変動係数の平均値および標準偏差を求めた。

Ⅲ. 結 果

健常有歯顎者15名および上下総義歯装着者4名における咀嚼時の口唇周囲軟組織皮膚表面上の15測定点の運動、つまり45自由度の時系列データに対して、主成分分析法を応用して解析したところ、以下の結果を得た。

1. 寄与率(Proportion)、累積寄与率(Cumulative Proportion)

表3 寄与率・累積寄与率（上下総義歯装着者）

Table 3 The proportion and cumulative proportion in complete denture wearers

	1st P.C.	2nd P.C.	3rd P.C.	4th P.C.
Proportion (%)	60.1 (1.2)	24.3 (2.8)	9.3 (2.8)	3.0 (1.1)
Cumulative Proportion (%)	—	84.4 (3.1)	93.6 (1.3)	96.6 (0.2)

( ): S.D.

1) 健常有歯顎者（表2）

第1主成分（以下1st P.C.とする）、第2主成分（以下2nd P.C.とする）、および第3主成分（以下3rd P.C.とする）の寄与率の平均と標準偏差は、それぞれ59.5% (5.5), 28.8% (5.9), 8.9% (3.6) であった。

また、2nd P.C., 3rd P.C.までの累積寄与率の平均と標準偏差は、それぞれ88.2% (3.9), 97.2% (0.9) であった。

以上より、3rd P.C.まで求めれば咀嚼時の口唇周囲皮膚表面の運動の97.2%を求めることができた。

したがって、健常有歯顎者の咀嚼時の口唇周囲軟組織

皮膚表面の運動は、3自由度（3次元変量）の運動として十分表現可能であることが示された。

2) 上下総義歯装着者（表3）

1st P.C., 2nd P.C., 3rd P.C., および第4主成分（以下4th P.C.とする）の寄与率の平均と標準偏差は、それぞれ60.1% (1.2), 24.3% (2.8), 9.3% (2.8), 3.0% (1.1) であった。

また、2nd P.C., 3rd P.C., そして4th P.C.までの累積寄与率の平均と標準偏差は、それぞれ84.4% (3.1), 93.6% (1.3), 96.6% (0.2) であった。

以上より、4th P.C.まで求めれば咀嚼時の口唇周囲皮膚表面の運動の96.6%を求めることができた。

したがって、上下総義歯装着者の咀嚼時の口唇周囲軟組織皮膚表面の運動は、4自由度（4次元変量）の運動として十分表現可能であることが示された。

2. ベクトル図

1) 健常有歯顎者

図5～図7は、15名の被験者の代表例で、左側咀嚼時のベクトル分布図を前頭面観にて表示した。咀嚼運動時の各測定点は、それぞれベクトルで示される直線上の運動を示した。

図5 第1主成分（健常有歯顎者）
Fig. 5 The vector figure of 1st P.C. (natural dentition)

図6 第2主成分（健常有歯顎者）
Fig. 6 The vector figure of 2nd P.C. (natural dentition)

図7 第3主成分(健常有歯顎者)
Fig. 7 The vector figure of 3rd P.C. (natural dentition)

図8 第1主成分(上下総義歯装着者)
Fig. 8 The vector figure of 1st P.C. (complete denture wearer)

1st P.C.のベクトル分布図(図5)は、主に上下方向の運動成分を示した。また、下方の測定点ほど咀嚼側方向で、かつ大きなベクトル成分を示し、なかでも下顎運動を想定して設定したオトガイ正中部測定点が、1番大きなベクトル成分を示した。

2nd P.C.のベクトル分布図(図6)では、横方向で、かつ咀嚼側と非咀嚼側とでは反対方向の運動成分となった。一部正中に位置する上唇正中・下唇正中・オトガイ正中測定点は、他の測定点に比べ、側方成分が少なく、主として上下方向の運動成分を示した。

3rd P.C.のベクトル分布図(図7)では、全体的に咀嚼側方向の運動成分を示した。

2) 上下総義歯装着者

同様に、図8～図11は、4名の被験者の代表例で、左側咀嚼時のベクトル分布図を前頭面観にて表示した。

1st P.C.のベクトル分布図(図8)は上下方向の運動成分を示し、2nd P.C.のベクトル分布図(図9)は、主に上下方向でかつ咀嚼側方向の運動成分を示したが、一部上唇部測定点には、横方向の運動成分がみられた。

3rd P.C., 4th P.C.のベクトル分布図(図10, 11)では、主に横方向でかつ咀嚼側と非咀嚼側とでは反対方向の運

図9 第2主成分(上下総義歯装着者)
Fig. 9 The vector figure of 2nd P.C. (complete denture wearer)

図10 第3主成分 (上下総義歯装着者)

Fig. 10 The vector figure of 3rd P.C. (complete denture wearer)

図11 第4主成分 (上下総義歯装着者)

Fig. 11 The vector figure of 4th P.C. (complete denture wearer)

動成分がみられた。しかし、一部3rd P.C.の上唇部測定点、非咀嚼側頬部測定点、そして4th P.C.の上唇部測定点の運動成分は、同じ主成分内の他の測定点に比べ大きな運動成分で、かつ横方向ではない運動成分がみられた。

3. 主成分得点表 (Principal component score graph)

1) 健常有歯顎者

15名の被験者の主成分得点表から以下のことが分かった。

1st P.C., 2nd P.C., および3rd P.C.の咀嚼周期 (Cycle Time) の平均と標準偏差は、0.73sec (0.10), 0.74sec (0.11), 0.73sec (0.11) であった。図12に代表例を示す。

また、それぞれの主成分の変動係数 (Variable Coefficient) の平均と標準偏差は、6.96% (2.85), 7.37% (2.42), 9.19% (4.83) であった (表4)。

2) 上下総義歯装着者

同様に、4名の被験者の主成分得点表から以下のことが分かった。

1st P.C., 2nd P.C., 3rd P.C., および4th P.C.の咀嚼周期の平均と標準偏差は、1.18sec (0.28), 1.22sec (0.32),

1.14sec (0.25), 1.14sec (0.20) であった。図13に代表例を示す。

また、それぞれの主成分の変動係数の平均と標準偏差は、7.23% (1.56), 10.49% (4.11), 16.12% (3.09), 16.54% (8.90) であった (表5)。

以上より、主成分分析の結果、健常有歯顎者、上下総義歯装着者ともに還元されて求まるそれぞれの主成分には周期性のあることが分かった。また、上下総義歯装着者は、健常有歯顎者と比較し、還元されたそれぞれの主成分において咀嚼周期が延長し、かつ変動係数の結果から、咀嚼リズムが不安定である傾向がみられた。

IV. 考 察

1. 計測システムについて

動画像に対して、三角測量の原理を利用する場合、左右2台のCCDカメラからの電気信号を同期させる必要がある。そのため本システムでは、左右2台のカメラから毎秒30フレームずつ送られてくる画像 (解像度640×480/1フレーム) を、毎秒30枚の画像として記録・保存した。しかし、この方法ではそれぞれのカメラから得

図12 主成分得点表 (健常有歯顎者)

Fig. 12 Principal component score graph in natural dentition

表4 咀嚼周期・変動係数 (健常有歯顎者)

Table 4 The cycle time and variable coefficient in natural dentitions

	1st P.C.	2nd P.C.	3rd P.C.
Cycle Time (sec)	0.73 (0.10)	0.74 (0.11)	0.73 (0.11)
Variable Coefficient (%)	6.96 (2.85)	7.37 (2.42)	9.19 (4.83)

( ): S.D.

られる情報は、640×240の画像情報となり、情報の損失が起きている。より精度を高めるためには、それぞれのカメラからのデータを同期させるとともに、画像データを640×480の情報として保存・記録することが考えられる。

2. 生体基準座標系について

本システムでは、生体基準座標系を、顔面の運動計測、顎運動計測によく用いられる基準平面の1つであるカン

ベル平面に求めた。この平面は、前方基準点である鼻翼下点が皮膚上にあり、再現性も高い。計測精度の観点からは、計測対象である口唇付近に近く、計測視野を広げる必要がないので、システムの精度を落とすことなく、画像データに取り込むことができるなどの理由からカンベル平面を選択した。

3. 測定点について

複雑な動きをする口の周囲には走行と形態の異なる筋があり、口角結節や筋肉板を作っている²⁶⁾。したがって、目的とする筋を特定し、測定点を設定することは困難である。しかし、口唇は口輪筋に、頬部は頬筋によって主に構成されており、両筋は口角付近で密接に吻合している^{27, 28)}。

角倉²⁸⁾は口輪筋は、赤唇近くの内方(縁部)では、口裂を輪状に囲むよう走行し、頬筋は、咬筋の前方で、上下的には耳垂切痕と下顎角との間に、さらに前方は口角を頂点とした三角形の中に含まれ、その部分では他筋との重なりも少ないと報告している。そこで本研究では、測定点5～8, 10, 11は、口輪筋を想定して赤唇縁沿い

図13 主成分得点表（上下総義歯装着者）

Fig. 13 Principal component score graph in complete denture wearer

表5 咀嚼周期・変動係数（上下総義歯装着者）

Table 5 The cycle time and variable coefficient in complete denture wearers

	1st P.C.	2nd P.C.	3rd P.C.	4th P.C.
Cycle Time (sec)	1.18 (0.28)	1.22 (0.32)	1.14 (0.25)	1.14 (0.20)
Variable Coefficient (%)	7.23 (1.56)	10.49 (4.11)	16.12 (3.09)	16.54 (8.90)

( ): S.D.

に、そして1～3, 13～15は、頬筋の上部・中央・下部筋束を想定した。また、4, 12は、口角結節³⁰⁾を、想定して設定した（図3）。

Jemtら³⁰⁾は、オトガイ部の下顎運動計測点としての有用性を検討する目的で、咀嚼時におけるオトガイと下顎切歯点の動きをSelspot systemを用いて同時記録した。その結果、咀嚼リズムについては、両者で差が認められず有効なパラメーターとして利用できると報告している。

このことから測定点9は、下顎運動（特に上下方向）を近似する測定点として、下唇の口輪筋に影響を受けない範囲で下方に、そして極力皮膚の変形の少ないところに設定した（図3）。

4. 頭部固定について

咀嚼時の顔面皮膚上に不動点となりうる点として設定できる部位には、前額部が挙げられるが、フレーム内に入れると画像情報の質が低下することと、前額部の動きもありうることから、座標変換による頭部動揺補正は無理だと考えた。

咀嚼時の頭部の動きを抑えるため、本システムでは、頭部を前頭部、後頭部、後頭部の3点で固定した。咀嚼時の下顔面の動きは、口唇周囲に局限しているので、これらの固定が顔表面の運動に与える影響はほとんどなかったと考える。

5. 被験食品について

咀嚼運動は、食品の質や量によって変化することが明らかにされている。咀嚼機能を咀嚼運動の分析、特に安定性から評価する際には、質や量ができる限り変化しな

い被験食品が要求される。

十分軟化したチューインガムは、咀嚼の進行に伴う硬さや量の変化が少なく、咀嚼経路や運動リズムの安定性がよいことから、咀嚼運動の機能的分析に適していることが報告されており^{31, 32)}、咀嚼機能の定量的評価には最適であることが確認されている^{25, 33)}。

6. 主成分分析法の結果について

1) 寄与率、累積寄与率および固有ベクトルについて

少ない主成分での累積寄与率が高いことは、多変量を低次元の変量で表現できることを意味している。また、各主成分の固有ベクトルは運動の方向を表しており、それぞれの主成分の意味を判断するのに利用できる。

(1) 健常有歯顎者の固有ベクトル

図5の結果から、1st P.C.は、主に上下方向の運動成分を示し、かつ下方の測定点ほど大きなベクトル成分で、咀嚼側方向の運動成分を示したことから、咀嚼運動時における下顎運動によって、受動的に引き起こされる軟組織の動きが、口唇周囲軟組織皮膚表面の動きに現れたものであると考えられる。

つまり、咀嚼時の口唇周囲軟組織皮膚表面の運動の主たる因子は、下顎運動の影響によるものであると推察される。

図6の結果から、2nd P.C.は、下顎運動の影響によるものとは考えにくい運動成分である。角倉²⁸⁾は、咀嚼運動中、口輪筋は口裂を閉じて食塊の口腔外への逸出を防ぎ、頬筋は食塊を咬合面上に移送、保持すると共に頬粘膜の咬傷を防ぐように機能していると報告している。これは、2nd P.C.の運動方向が主に横方向で、咀嚼側と非咀嚼側とは反対方向の運動成分を示し、一部正中に位置する測定点が、上下方向の運動成分を示したことを説明できる。

つまり、咀嚼時の口唇周囲軟組織皮膚表面の運動の従たる因子として、表情筋独自の運動が描出されたと推察できる。

図7の結果から、3rd P.C.の固有ベクトルは咀嚼側方向に向かっており、下顎の咀嚼運動における側方運動成分の影響が現れていると考えられる。このことは瀬高¹³⁾、平野¹⁵⁾の報告と一致している。咀嚼側口角結節部および咀嚼側頬部中央、下方測定点の運動成分には、下顎運動の影響とは考えにくい成分がみられたが、これらの運動は、運動方向からガムを咬合面へ移送・保持する方向の運動成分であると考えられる。

つまり、3rd P.C.は、下顎運動によって受動的に引き起こされる軟組織の動きと、表情筋活動によって起こる軟組織独自の動きが混在しているものと推察される。

(2) 上下総義歯装着者の固有ベクトル

図8の結果から、1st P.C.は、上下方向の運動成分を示し、健常有歯顎者(図5)同様、咀嚼運動時における下顎運動によって、受動的に引き起こされる軟組織の動きが、口唇周囲皮膚表面の動きに現れたものであると考えられる。

ただ、上唇部測定点の動きは、健常有歯顎者(図5)と比べると大きかった。高齢者では、主に真皮の変化と皮下脂肪の減少により、老化による皮膚の皺、たるみ、弾力低下等の皮膚の性質変化^{34, 35)}が起きて、上唇が下垂している³⁶⁾。したがって、老化により上唇が下垂し、運動の始点が下方に移動したため、健常有歯顎者と比べると、上唇部測定点の動きが大きくなったと考えられる。また、機能時の上顎義歯の動き³⁷⁻³⁹⁾によると思われる影響が、上唇部測定点にみられた可能性も考えられる。

図9の結果から、2nd P.C.は、上下方向の動きが主であり、かつ全体的に咀嚼側方向の運動成分を示した。このことから、咀嚼時の下顎運動の側方運動成分の影響が現れていると考えられる。この運動成分が2nd P.C.として抽出されたことは、健常有歯顎者にみられた口唇周囲軟組織独自の運動成分が少ないことを意味している。その理由に、上下総義歯装着者の場合、機能時の義歯の動揺を回避するために、あるいは歯根膜喪失により運動・感覚機能が低下して⁴⁰⁻⁴⁵⁾、生理的フィードバック機構が作用するために運動領域(特に開口量および側方移動量)が減少し^{46, 47)}、その結果、口唇周囲軟組織独自の運動成分が少なくなったことが考えられる。また、加齢に伴う運動・感覚機能の低下^{34, 47-52)}および老化による皮膚の性質変化から口唇周囲軟組織の運動機能が低下して、軟組織独自の運動成分の寄与率が低くなったことも考えられる。

図10, 11の結果から、3rd P.C., 4th P.C.は、主に横方向で、かつ咀嚼側と非咀嚼側とは反対方向の運動成分がみられ、健常有歯顎者の2nd P.C.(図6)にほぼ近似しているといえる。しかし、これらの主成分の特徴として、上唇部の運動成分が大きく、他の測定点の運動成分は小さくなっている。

これらの固有ベクトルは、咀嚼側と非咀嚼側の運動方向が逆であり、咀嚼時の下顎の運動が影響していると考えられるより、咀嚼時の咬傷を避けたり、あるいは食塊を咬合面へ搬送する軟組織独自の動きと考えられる。また、機能時の義歯の動き、つまり義歯の沈下あるいは浮上が口唇周囲軟組織の運動として現れることが十分考えられるが、それが3rd P.C.なのか4th P.C.なのかについては明らかではなかった。義歯の動揺の影響は、それぞれの固

有ベクトルの中に包含されているものと考えている。

また、口唇周囲軟組織独自の運動が2つの主成分として抽出されたことは、健常有歯顎者にみられる円滑な軟組織運動というより、機能時の義歯の動揺、あるいは習慣的に獲得した義歯の動揺を抑える挙動などが加わった結果、健常有歯顎者と比べ運動の円滑さが欠けていることを意味していると考えている。また、このことが、上下総義歯装着者で主成分が1つ増えた原因でもあると考えている。

2) 主成分得点表

本研究のデータは多変量で、45次元空間の点として分布しており、それらが時間とともに変化する。そこで、主成分を主成分得点の時系列データとして捉え、咀嚼時の口唇周囲軟組織皮膚表面の運動を、時間的にも定量的に解析するために主成分得点表を応用した。

これまで健常有歯顎者と総義歯装着者の咀嚼運動を比較検討した研究^{46, 47, 53-55)}において、健常有歯顎者、上下総義歯装着者ともに咀嚼周期は安定しているが、上下総義歯装着者の場合、咀嚼周期が延長し、かつ咀嚼リズムが不安定であると報告されている。本解析の結果、健常有歯顎者、上下総義歯装着者ともに還元されて求まるそれぞれの主成分で同様の結果が得られた。

また、健常有歯顎者、上下総義歯装着者ともに1st P.C.から2nd P.C.,そして2nd P.C.から3rd P.C.といったように主成分の寄与率が下がるにつれ、変動係数が大きくなる傾向にあった。これは、情報の損失が増加するため当然の結果であると考ええる。ただ、上下総義歯装着者の変動係数は、健常有歯顎者と比べ、各主成分で大きくなっている。これは、情報の損失増加に加え、歯根膜の喪失あるいは加齢による運動・感覚機能の低下、さらに義歯の動き等の複数の因子が絡んだためであると推察できる。

7. 本解析方法による咀嚼運動評価について

本手法は、口唇周囲軟組織皮膚表面の運動解析において、それぞれの測定点を個々に解析するのではなく、全ての測定点を一括して捉え、その運動を主に空間的に解析するものである。全ての測定点を一括して捉えることの意義は、運動の評価を局所(あるポイント)ではなく、領域で捉えることができるところにあると考える。つまり、口唇周囲軟組織の運動は、その解剖学的、生理学的背景からそれぞれが無相関に運動するのではなく、相関をもって運動しているので、その運動評価にあたっては、領域で捉えることは重要である。

また、咀嚼運動の滑らかさ(巧緻性)を評価するとき、空間的な滑らかさおよび時間的な滑らかさの両方につい

て評価しなければならない。空間的に滑らかな運動とは、運動を支配しているいくつかの独立した運動成分が、運動することにより、より少ない運動成分で表現できる運動のことをいう。そして一般には、運動の自由度が高いか低いかで、その運動が空間的に滑らかな運動か、ぎこちない運動かを評価することができる。

本手法は、45自由度という多変量の運動を、より低い自由度に還元することができ、その還元されたそれぞれの主成分の時間的な評価も行うことができた。具体的には、還元されたより低い自由度、およびその還元されたそれぞれの主成分のベクトル図の評価により空間的な滑らかさを、そして、主成分得点表からは時間的な滑らかさを評価することができた。

したがって、本研究から多変量統計解析法の一手法である主成分分析法は、咀嚼運動の客観的な評価法として有効であることが示唆された。

V. 結 論

本研究において健常有歯顎者15名、上下総義歯装着者4名の咀嚼時の口唇周囲軟組織皮膚表面の運動、すなわち45自由度をもつ時系列データに対して、主成分分析法を応用して解析したところ、以下の結論を得た。

1. 健常有歯顎者の咀嚼時の口唇周囲軟組織皮膚表面の運動は、第3主成分まで求めれば、その運動(45自由度の時系列データ)の97%以上が表現できた。つまり、健常有歯顎者の咀嚼時の口唇周囲軟組織皮膚表面の運動は、3自由度(3次元変量)の運動として十分表現可能であることが示された。
2. 上下総義歯装着者の運動は、4自由度(4次元変量)の運動として十分表現可能であることが示された。
3. 咀嚼時の口唇周囲軟組織皮膚表面の運動は、多変量統計解析法の一手法である主成分分析法により、空間的、かつ時間的にも定量的に解析可能であることが示され、咀嚼運動および顎口腔機能の評価法として、本解析方法の有効性が示唆された。

謝辞

稿を終えるにあたり、本研究の機会を与えて下さり研究の細部にわたり直接ご指導を賜り、始終ご懇切なご助言を頂きました北海道大学大学院工学研究科電子情報工学専攻情報メディア工学講座メディア工学分野川嶋稔夫助教授に深甚なる感謝の意を表します。また、本研究の推進にあたり多大なるご助言、ご協力を頂きましたセコム(株)開発センター戸田真志博士に深く感謝します。さら

にご助言、ご示唆を頂きました北海道大学歯学部歯科補綴学第一講座山田亨助手に感謝致します。最後に、本研究にご協力下さいました北海道大学歯学部歯科補綴学第一講座および北海道大学大学院工学研究科電子情報工学専攻情報メディア工学講座メディア工学分野の教室員各位、ならびに被験者としてご協力下さいました方々に厚くお礼申し上げます。

本論文の一部は、第97, 98回日本補綴歯科学会学術大会（平成9年5月, 10月）、日本顎口腔機能学会第15回学術大会（平成10年4月）、76th General Session of the IADR（June, 1998）において発表した。

文 献

- 1) 覚道幸男：歯と口腔の臨床生理, 237-238, 永末書店, 京都, 1966.
- 2) 河村洋二郎：口腔生理学, 66-69, 158-184, 永末書店, 京都, 1973.
- 3) 上条雍彦：臨床解剖学の立場からみた咀嚼・嚥下運動時の顎・顔面・口腔粘膜の形態変化について（その2）, 歯科学報, 74：1491-1498, 1974.
- 4) 井出吉信：口腔軟組織の咀嚼時における役割, the Quintessence, 4：176-184, 1985.
- 5) 羽賀通夫：咬合学入門, 1-14, 医歯薬出版, 東京, 1997.
- 6) 森田芳和：X線テレビ映画法による機能時の口唇の動的観察3.正中矢状面での口唇の変化について, 歯科学報, 79：1599-1620, 1979.
- 7) 大森明彦：X線テレビ映画法による頬粘膜の運動変化について, 歯科学報, 79：1757-1813, 1979.
- 8) 橋本 淳：モアレ縞応用による顔面の動的観察—表情運動の変化について—, 歯科学報, 73：1507-1560, 1973.
- 9) 橋本 淳：モアレ縞応用による顔面の動的観察—咀嚼運動の変化について—, 歯科学報, 73：1818-1847, 1973.
- 10) 安藤秀二：35mmカメラによる三次元形態測定システム 第1報 システムの開発と臨床応用のための基礎的研究, 補綴誌, 29：1388-1402, 1985.
- 11) 水口俊介：口腔機能時における顔表面の動き, 補綴誌, 30：1359-1373, 1986.
- 12) 近藤修司：無歯顎者における顔表面の動き, 口病誌, 57：393-420, 1990.
- 13) 瀬高昌士：咀嚼時口唇付近の動きに関する多点時系列解析, 北海道歯誌, 15：89-107, 1994.
- 14) 熊谷 宏, 平野恭吉, 水口俊介ほか：咀嚼時におけるオトガイ部皮膚表面の動き—咀嚼運動計測点としての有効性—, 補綴誌, 39：1132-1141, 1995.
- 15) 平野恭吉：有歯顎者における咀嚼時口唇の動き, 補綴誌, 39：1142-1153, 1995.
- 16) 張 仁彦, 山縣健佑, 下平 修ほか：咀嚼時の口腔・顔面運動経路の3次元解析：健常有歯顎者について, 昭和歯誌, 17：136-153, 1997.
- 17) 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.
- 18) 松山剛士, 荒井良明, 河野正司ほか：新たに開発した顎運動システムによる機能時の上顎運動と下顎運動の3次元解析, 補綴誌, 38・91回特別号：142, 1994.
- 19) 常磐 肇, 三浦不二夫, 桑原洋助ほか：汎用型顎口腔機能総合解析システムの開発, 顎機能, 3：11-24, 1996.
- 20) 河口至商：多変量解析入門 I, 35-51, 森北出版, 東京, 1973.
- 21) 脇本和昌：多変量統計解析法, 数学セミナー, 28：26-31, 1989.
- 22) 田中 豊, 垂水共之：統計解析ハンドブック 多変量解析, 88-99, 共立出版, 東京, 1996.
- 23) 有馬 哲, 石村貞夫：多変量解析のはなし, 79-126, 東京図書, 東京, 1997.
- 24) 堀口敏男：単眼視による既知平面図形の距離／姿勢の一測定法, 第3回日本ロボット学会学術講演会：295-296, 1985.
- 25) 志賀 博, 小林義典：咀嚼運動の分析による咀嚼機能の客観的評価に関する研究, 補綴誌, 34：1112-1126, 1990.
- 26) 並木俊雄：日本人口唇の解剖学的研究その2. 口唇を形成する筋束に関する研究, 歯科学報, 59：611-634, 1959.
- 27) 上条雍彦：口腔解剖学2. 筋学, 223-250, アナトーム社, 東京, 1966.
- 28) 角倉 紳：咀嚼運動時における口輪筋と頬筋の筋活動に関する研究, 歯科学報, 91：871-907, 1991.
- 29) 宮尾尚文, 石川欣弥, 武石醇作：口角結節 (Modiolus) の解剖学的研究, 歯科学報, 73：153-156, 1973.
- 30) Jemt, T. and Hedegard, B.: The relative movements of the chin and the mandible during chewing, J Oral Rehabil, 9：253-258, 1982.
- 31) 柴田孝典：下顎前突症における顎運動機能に関する

- 研究, 歯科学報, 81 : 241-265, 1981.
- 32) 瑞森宗弘 : 咀嚼運動分析による顎口腔機能診断に関する研究, 阪大歯誌, 32 : 105-136, 1987.
- 33) 三田貢司, 小林義典 : 咀嚼機能の筋電図学的評価に関する臨床的研究, 歯学, 76 : 711-760, 1988.
- 34) 平井敏博, 長尾正憲, 林 都志夫 : 高齢者の顎口腔系と義歯—その文献的考察—, 歯界展望, 68 : 1095-1109, 1986.
- 35) 黒瀬信行 : 加齢による皮膚変化, 折茂 肇編, 新老年学, 831-833, 東京大学出版会, 東京, 1992.
- 36) 上条雍彦 : 口輪筋, 表情筋, モダイアラスなどと前歯との関連, 歯界展望, 48 : 33-40, 1976.
- 37) 田中 球生 : 上顎総義歯の機能時動揺に関する研究—前歯部の動揺量について—, 補綴誌, 32 : 654-667, 1988.
- 38) 今井守夫 : 上顎全部床義歯の動揺に関する研究 第2報 機能時の義歯の動揺と関連する因子の分析, 補綴誌, 32 : 936-946, 1988.
- 39) 大石 旭, 羽田 勝, 松本直之 : 上顎全部床義歯の動揺と関連因子の研究 第1報各部床翼の長さが咬みしめ時の動揺に及ぼす影響, 補綴誌, 36 : 136-148, 1992.
- 40) Jerge, C.R. : The neurologic mechanism underlying cycle jaw movements, J Prosth Dent, 14 : 667-681, 1964.
- 41) Kawamura, Y., Tsuru, H. and Funakoshi, M. : The relation between the vertical dimension and the function of dentures, Dent Bull Osaka Univ, 1 : 13-25, 1960.
- 42) 荻野 章 : 歯根膜によるコントロール機序に関する臨床的研究—特に少数残存歯症例の場合—, 補綴誌, 20 : 585-600, 1976.
- 43) 山科 透, 藤井秀世, 棟久信宏ほか : 歯周感覚が咀嚼筋活動に及ぼす影響に関する研究, 補綴誌, 21 : 525-532, 1977.
- 44) 高藤道夫 : オーバーデンチャー装着者の口腔感覚に関する研究, 補綴誌, 26 : 1-12, 1982.
- 45) 森本俊文 : 咀嚼力の調整に關与する歯根膜感覚の役割, 歯医学誌, 8 : 18-24, 1989.
- 46) 伊崎克弥 : ヒトの咀嚼運動経路の分析—正常有歯顎者および総義歯装着者について—, 補綴誌, 29 : 657-674, 1985.
- 47) 鹿野洋一 : 総義歯装着者の咀嚼機能評価に関する臨床的研究—正常有歯顎者と総義歯装着者の咀嚼運動の比較について—, 補綴誌, 34 : 318-332, 1990.
- 48) 平井敏博, 田中 収, 越野 寿ほか : 加齢と舌運動の巧緻性について—超音波診断装置による観察—, 補綴誌, 33 : 457-465, 1989.
- 49) Feldman, R.S., Kapir, K.K., Alman, J.E. et al. : Aging and mastication: changes in performance and in the swallowing threshold with natural dentition, J Am Geriatr Soc, 28 : 97-103, 1980.
- 50) Baum, B.J. and Bodner, L. : Aging and oral motor function: Evidence for altered performance among older persons, J Dent Res, 62 : 2-6, 1983.
- 51) 藤澤浩四郎 : 咀嚼機能にかかわる神経・筋系の老化, 日本歯科評論, 500 : 147-151, 1986.
- 52) 佐藤昭夫, 堀田晴美 : 神経系と老化, 折茂 肇編, 新老年学, 107-126, 東京大学出版会, 東京, 1992.
- 53) Jemt, T. : Chewing patterns in dentate and complete denture wearers-recorded by light-emitting diodes, Swed Dent J, 5 : 199-205, 1981.
- 54) 竹前健彦 : 咀嚼運動相からみた全部床義歯装着者の咀嚼リズムに関する研究, 補綴誌, 27 : 285-291, 1983.
- 55) 瀬高昌士, 坂口 究, 川崎貴生ほか : 咀嚼時口唇付近の動きに関する多点時系列解析 第2報 顔面皮膚の部位別動態に関する検討, 北海道歯誌, 17 : 72-80, 1996.