原著論文

ヒトの咀嚼経路の個人内，個人間変動

村上 任尚¹⁾，岩松 正明²⁾，佐藤 智昭¹⁾，服部 佳功¹⁾

¹⁾ 東北大学大学院歯学研究科口腔機能形態学講座加齢歯科学分野

²⁾ 東北大学病院総合歯科診療部

〔受付：平成24年12月5日〕

Inter- and intra-individual variations in chewing trajectories in humans

Takahisa Murakami¹⁾, Masaaki Iwamatsu²⁾, Chiaki Satoh¹⁾, Yoshinori Hattori¹⁾

¹⁾ Division of Aging and Geriatric Dentistry, Department of Oral Function and Morphology,
Tohoku University Graduate School of Dentistry

²⁾ Division of Comprehensive Dentistry, Tohoku University Hospital

[Received: December 5, 2012]

Key words: chewing trajectory, intra-individual variability, principal component analysis

Abstract: There are wide intra- and inter-individual variations in human chewing trajectories. This study aimed to develop the way of describing the intra-individual variations in chewing trajectories and investigate their inter-individual resemblances. The chewing trajectories of 12 healthy males who chewed gum in the right side of their mouth were recorded. Overall cycle shape was described with 123 variables consisted of three-dimensional coordinates of total 41 points at which the durations of the opening and closing phase of a chewing cycle was divided into 20 parts equally. The intra-individual variations in 200 chewing trajectories were evaluated with the principal component (PC) analysis based on a variance-covariance matrix of the variables. The variation in the trajectories that was accounted for by each PC was visualized as a reconstructed curve by using an inverse eigenvector matrix. In all subjects, the first PC was related to the changes in the gape width in each subject. Among the other PCs, which were selected by means of the scree plot analysis, two were related to the changes in the jaw-opening direction in the frontal or sagittal planes, and other one was related the width between the opening and closing trajectories. The above 4 PCs explained 74% to 87% of the variances in each of the subjects. Moreover, among the 7 PCs, which account more than 95% of the variations of the total of 2,400 chewing trajectories of all the subjects, 4 showed the similar effects on the trajectory changes as mentioned above. Inter-individual resemblances were present among the intra-individual changes in the chewing trajectories. This would suggest that the subjects utilized identical strategies in controlling chewing trajectories.

抄録 ヒトの咀嚼経路には大きな個人内、個人間変動を認める。本研究の目的は、咀嚼経路の個人内変動における特徴を明らかにするとともに、その特徴について個人間での類似性の有無を検討することにある。健康成人男子12名において右側片側ガム咀嚼時の下顎切歯点の咀嚼経路を記録した。各咀嚼周期の開口相と閉口相それぞれに所要時間を20等分する計41の計測時点を設け、各時点の下顎切歯点の3次元座標、計123変数により、その周期の咀嚼運動経路を記述した。各被験者について記録が古い順に選んだ200周期の咀嚼経路をこの方法で記述して分散共分散行列に基づく主成分分析に供した。各主成分が咀嚼経路に及ぼす影響は、固有ベクトル行列の逆行列を用いて経路の再構成を行って視覚化した。その結果、いずれの被験者においても第1主成分は経路の大きさの変化に関連し、スクリープロットにより選ばれたその他の主成分には前頭面ならびに矢状面内における開口方向、開閉口路間の幅径の変動に関与するものが含まれた。上述4主成分の寄与率の合計は、各被験者で74～87%に及んだ。さらに全被験者の咀嚼経路を合わせた計2,400周期について同様の解析を行ったところ、選ばれた7主成分中の4主成分は、先述した4種の主成分と経路への影響が定性的に類似し、その寄与率の合計は84%であった。上述の知見は、咀嚼経路の著しい個人差にも関わらず、咀嚼経路の調節機序が個人間で共有される可能性を示唆するものと考えられた。

キーワード：咀嚼経路、個人内変動、主成分分析

I. 緒 言

咀嚼を遂行する筋活動は、脳幹の中枢性パタン発生器によって生成され、顎顔面口腔領域からの感覚情報や上位中枢からの情報による変調を受ける¹⁾。その結果、咀嚼の経路や運動速度は、食物の量や硬さなどに応じて変化する^{2,5)}。その一方で、同一食品を摂取した場合であっても咀嚼経路には個人差があり、咀嚼経路と咬合の形態学的特徴のあいだに密接な関連があること^{6,7)}や、咬合を変化させるとただちに咀嚼経路が変化する⁸⁾ことが知られている。こうした知見から、ヒトはさまざまな経路の咀嚼運動を行う能力をもちながら、顎顔面や歯の形態、咬合などの条件に適った特定の動作のみを選び、用いている可能性が推察される。この推察の妥当性を検討するには、まず各周期の咀嚼経路を適切に記述し、比較する方法の開発が必要である。しかし咀嚼経路は滑らかな曲線で、咬頭嵌合位と最大開口位の2点のほかには明瞭な標識点がない。時間軸上でも、これら2点の時点によって1周期を開口相、閉口相、咬合相の3相に区別できるに過ぎない。これほど標識点に乏しい形態の場合、標識点の座標や位置関係などに基づいて形状を比較する一般的な方法では、その特徴を解析したり比較したりすることはままならない。

そこでこれまでに著者らは、標識点を用いずに経路全体を解析対象とする方法として、2次元画像の輪郭の記述に用いる楕円フーリエ記述子⁹⁾を採用した。楕円フーリエ記述子を用いて前頭面内咀嚼経路を定量的に記述

し、咀嚼を重ねることで生じる経路の変動を主成分分析により解析する方法を導入したのである¹⁰⁾。主成分分析は、多数の観測要素の変動を、より少数で互いに独立した要素の変動によって記述しなおす統計手法である^{11,12)}。この研究では、咀嚼経路の変動の88.2～96.4%がわずか3個の主成分、つまりは3つの互いに独立な変動の重なりによって生じていることが示された。このことは、咀嚼運動の制御において、観察された独立な変動の数と同数の制御要素が関与している可能性を推察させた。さらに、各被験者で観察された独立な変動は、その形態的特徴が被験者間で似通っており、咀嚼運動の制御が個人間で共通である可能性をも伺わせた。

しかしこの研究で用いた楕円フーリエ記述子には、咀嚼経路研究に応用する場合に無視できない欠点がある。第1に、咀嚼の進行に伴って一般に開口量は減少するが、経路の大きさを標準化する楕円フーリエ記述子ではこの変化が捉えられない。第2に、この方法で捉えた閉曲線（輪郭）には始点も終点もないため、咬頭嵌合位、最大開口位といった本来ならば標識点として扱われるべき点の位置情報も失われるのである。

そこで本研究では、楕円フーリエ記述子の代わりに、Buschang ら¹³⁾が咀嚼経路の記述に応用した方法を改変して用いることとした。咀嚼周期の3相のうち、下顎切歯点の運動を伴う開口相と閉口相に着目し、それぞれの所要時間を20等分した各時点の座標値によって経路を記述するというもので、1周期の経路は周期時間にかかわらず41の時点の3次元座標、計123の変数によって

記述される。この方法の特徴は、各相内で生じる運動速度の変化など時間に依存する変化が一部保存されることと、経路情報の詳細が保存されることである。

Buschang ら自身はこの方法と階層線形モデルを併用し、咀嚼経路の性差などの検出に成功しているが、著者らは本記述法と主成分分析を併用する方法を考案した。本研究では、この方法により各個人の咀嚼経路の変動を解析し、それらに個人間で共通の特徴が見出せるか否かを明らかにして、咀嚼運動の制御が個人間で共通であるという先に述べた仮説の検証を試みた。

Ⅱ. 方 法

1. 被験者

成人男性12名（25～31歳，平均 26.8 ± 2.1 歳）を被験者とした。第3大臼歯以外の歯の欠損や齲蝕がないこと、顎口腔系に機能異常やその既往を認めないこと、大きな歯冠修復物や著しい歯列不正がないことを選択基準とした。各被験者には本研究の主旨および内容を十分に説明し、書面で研究参加の同意を得た。なお研究実施に先立ち、東北大学大学院歯学研究科研究倫理委員会の承認を得た。

2. 被験運動

各被験者に、座位にてチューイングガム（クール・ミント・ガム，ロッテ社製）1枚を右側片側で咀嚼するよう指示した。ガムはあらかじめ本人が咀嚼して十分軟化したものを用い、1回の試行は約30秒間の連続した咀嚼とした。同じ試行を、各被験者5回ずつ、十分な休息をはさんで反復した。

3. 顎運動の記録

咀嚼経路の記録には磁気式下顎運動測定装置（K7/CMS, Myotronics-Noromed 社製，米国）を用い、下顎切歯の唇側歯頸部に貼付した磁石の運動経路を記録した。装置のアナログ出力（前後，左右，上下方向の座標を示す）をサンプリング周波数3 kHzでA/D変換し、デジタル・データ・レコーダ（RD-145T, TEAC 社製）に記録した。

4. 咀嚼経路の記述

連続記録した下顎運動軌跡から、志賀らの方法¹⁴⁾を参考に咀嚼咬合相を同定し、次いで咀嚼周期を分離した。咬合相の同定方法は以下の通りである。

咬頭嵌合位の下方2 mmを閾値に設定し、運動経路の

上下成分が閾値より上の区間を抽出した。次に、抽出した各区間で上下成分の平均と標準偏差を求め、平均値より標準偏差の2倍分上方に新たな閾値を設定して、上下成分が新たな閾値より上の区間を改めて抽出した。この閾値設定と区間抽出の操作をもう一度繰り返し、得られた区間を咬合相候補区間とした。

次に、隣り合う2つの咬合相候補区間によって挟まれた区間をそれぞれ開閉口相候補区間として抽出した。この候補区間の持続時間の平均と標準偏差を求め、平均持続時間に標準偏差の2倍分を加えた時間よりも持続時間の長い候補区間は、食塊の移送などのため咬頭嵌合位に至ることなく閉口から開口に移行した場合など非典型的なものともみなして分析対象から除外し、それ以外を選択した。選択した咀嚼周期（開閉口相区間）は、最大開口位を境に開口相と閉口相に分割し、各相をその所要時間で20等分する時点、計41の時点を設定し、各時点の座標を求めた。当該時点の運動経路座標が存在しない場合には近傍2時点の座標を時間で内分し、推定した。以上により、各周期の咀嚼経路を123の変数を用いて記述した。

計5回の試行から得られた咀嚼周期（開閉口相区間）の数は被験者毎に異なり最少は220周期であった。そこで、被験者毎に時系列順に古いものから200周期を抽出し、各被験者の咀嚼経路データとした。

5. 咀嚼経路の変動の主成分分析

各周期123変数で記述した咀嚼経路、各被験者200周期、全被験者計2,400周期の変動を、分散共分散分析に基づく主成分分析に供した。主成分の解釈は一般に必ずしも容易ではない。そこで本研究では、各主成分が増減した際の咀嚼経路を数学的に再構成し、主成分の変動が咀嚼経路に及ぼす影響を視覚化した。

主成分分析では、変数をベクトルとして捉え、そのベクトルに第*i*主成分の固有ベクトルを*i*行の成分とする正方行列を乗じることで、集約先であるベクトル、すなわち主成分得点を得る。逆を返せば、主成分得点ベクトルに上述の正方行列の逆行列を乗ずることで元の変数ベクトルが得られる。したがってこの方法を利用することで、任意の主成分得点ベクトルを与える変数ベクトルを求めることが可能である。数学的特性から主成分得点の平均は0である。そこで、特定の主成分の変化が咀嚼経路に及ぼす影響を明らかにする場合、その主成分の得点のみを任意の量だけ0から変化させ、それ以外の主成分の得点は平均値の0とする主成分得点ベクトルを用意し、先の正方行列の逆行列を乗じて咀嚼経路を再構成し

表1 咀嚼経路の被験者内変動を説明する主成分の寄与率〔%〕
括弧内は累積寄与率を示す。

Table 1 Contribution ratios (%) of the principal components, which explain the intra-individual variability of the chewing trajectories
Cumulative ratios are presented in parentheses.

Subject	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
PC1	38.4 (38.4)	47.4 (47.4)	60.1 (60.1)	59.8 (59.8)	48.9 (48.9)	56.7 (56.7)	47.0 (47.0)	55.5 (55.5)	73.8 (73.8)	48.5 (48.5)	44.8 (44.8)	43.7 (43.7)
PC2	25.2 (63.6)	18.7 (66.1)	17.0 (77.1)	14.4 (74.2)	21.1 (70.0)	13.2 (69.9)	15.2 (62.2)	18.4 (73.9)	10.6 (84.4)	17.9 (66.5)	23.7 (68.5)	25.4 (69.1)
PC3	12.8 (76.4)	10.5 (76.6)	9.7 (86.8)	8.2 (82.4)	7.9 (77.9)	9.6 (79.5)	11.8 (74.0)	8.5 (82.4)	5.4 (89.8)	10.5 (76.9)	8.1 (76.5)	11.7 (80.5)
PC4	7.5 (83.9)	7.6 (84.2)	5.5 (92.3)	4.8 (87.2)	5.7 (83.6)	7.4 (86.9)	7.5 (81.5)	4.8 (87.2)	3.3 (93.1)	6.9 (83.9)	7.1 (83.6)	5.9 (86.4)
PC5	5.3 (89.2)	5.1 (89.3)	2.1 (94.4)	4.5 (91.7)	4.1 (87.7)	4.1 (91.0)	6.7 (88.2)	4.6 (91.9)	2.4 (95.5)	4.8 (88.7)	5.2 (88.8)	3.7 (90.0)
PC6	3.6 (92.8)	4.5 (93.8)	1.7 (96.1)	2.6 (94.3)	3.3 (90.9)	2.1 (93.1)	4.3 (92.5)	3.3 (95.2)	1.4 (96.9)	3.9 (92.6)	3.7 (92.5)	2.4 (92.4)
PC7	1.9 (94.8)	1.7 (95.5)	1.2 (97.4)	1.6 (96.0)	2.3 (93.2)	1.7 (94.9)	2.2 (94.6)	1.6 (96.8)	0.8 (97.8)	2.2 (94.7)	1.7 (94.2)	2.0 (94.4)

た。本研究では、各主成分の変動幅を標準偏差の2倍とした。

6. 解析

本研究における解析は、3行程からなる。

第1は、各被験者の咀嚼経路の変動要素を抽出する行程である。各被験者より記録した200周期の咀嚼経路に主成分分析を行い、主成分とその寄与率を求め、主成分の順位と固有値の関係を示すスクリープロットの変曲点の位置により採択する主成分数（変動要素数）を決定した。主成分の順位低下に伴う固有値の減少量が大きく変化するところが変曲点で、それより上位の主成分のみを採択する方法である。採択した個々の主成分の変動が咀嚼経路に及ぼす影響を先に述べた方法で再現し視覚化した。

第2は、第1行程で認めた各被験者の変動要素を被検者間で比較する行程である。

第3は、第1行程で被験者別に行ったのと同じ解析を、全被験者から得た2,400周期の咀嚼経路に対して行う行程である。第1行程と同様にスクリープロットに基づいて採択する主成分数を決定し、その個数の主成分によって各被験者の咀嚼経路変動がどの程度説明されるかを明らかにした。

Ⅲ. 結 果

1. 各被験者の咀嚼経路の変動

12名の被験者に30秒間のガム咀嚼試行を5回行わせ、各個から220～340周期の運動経路を得た。そこで各被験者200周期の咀嚼経路を抽出して主成分分析に供したところ、全被験者で経路の変動の93%以上が7つの主成分（PC1～PC7）で説明された〔表1〕。

これら主成分が経路に及ぼす影響を検討するため、各主成分得点の標準偏差の2倍分の変動の影響を可視化したところ、主成分毎に経路変動への影響が異なった（図1）。

2. 各被験者に認める咀嚼経路の変動の被験者間での異同

各被験者で咀嚼経路の変動要素（主成分）を求めてそれぞれの影響を可視化し、それを被験者間で比較したところ、全被験者に共通する以下の4種の影響を認めた（図2）。

第1は、経路の大きさの変動である。経路の外形はほぼ相似で、主として大きさが変化した。一部の被験者では大きさの変化にわずかな形状の変化を伴った。大きさの変動に関わる主成分の寄与率は38.4～73.8%で、すべての被験者で寄与率のもっとも大きい第1主成分（PC1）に該当した。

図1 咀嚼経路の個人内変動に関わる主成分
各主成分が経路に及ぼす影響（被験者A）.
点線は平均経路，実線は標準偏差の2倍
分だけ主成分得点が増減した際の経路を示
す．咀嚼経路の変動が主成分ごとに異なる
ことがわかる．同様の結果は全被験者に認
められた．

Fig. 1 The principal components associated with intra-individual variability of the chewing trajectory

The effects of each principal component on the chewing trajectory were visualized for Subject A. The dotted line shows the mean trajectory, and the solid lines show the trajectories when the principal component score either increased or decreased by twice its standard deviation. Each principal component had different effects. Similar results were observed for all subjects.

第2は，前頭面内における開口方向の変動である．咬頭嵌合位と最大開口位を結ぶ仮想的な開口方向の前頭面内での変化がもっとも顕著で，経路の形状や大きさの変化は一般に乏しかった．この主成分の寄与率は5.4～25.4%で，第2～第4主成分（PC2～PC4）に該当した．

第3は，矢状面内における開口方向の変動である．咬頭嵌合位と最大開口位を結ぶ仮想的な開口方向の矢状面内での変化がもっとも顕著で，経路の形状や大きさの変化は一般に乏しかった．寄与率は2.1～9.6%で，第3～第6主成分（PC3～PC6）に該当した．

最後の第4は，開・閉口路間の幅径の変動である．一部の被験者では前頭面，矢状面内での開口方向の変化や，経路形状の変動を伴った．寄与率は0.8～11.4%で，第3～第7主成分（PC3～PC7）に該当した．

これら4種の変動に関わる4つの主成分の寄与率の合

計は73.9～87.0%であった〔表2〕．

3. 被験者間の咀嚼経路の変動

全被験者に共通する咀嚼経路の変動要素を抽出する目的で，全2,400周期の咀嚼経路を対象に主成分分析を行った結果，7個の主成分が採択され，累積寄与率は95.1%に及んだ．これら7個の変動要素が咀嚼経路に及ぼす影響を視覚化したところ，先に述べた4種の主成分の影響をもつ4主成分を認めた（図3）．これら4主成分の寄与率の合計は83.8%であった．

4. 被験者間の咀嚼経路の変動要素からみた個人内変動

全被験者に共通する変動要素（主成分）と，被験者各個の変動要素の関係を明らかにするため，前項の4主成分が被験者各個の咀嚼経路に及ぼす影響（寄与率）を

図2 咀嚼経路の個人内変動の個人間での類似性

点線は平均経路，実線は標準偏差の2倍分だけ主成分得点が増減した際の経路を示す。いずれの被験者においても，経路の大きさ，前頭面・矢状面それぞれにおける開口方向，経路の幅径に与える主成分が含まれた。

Fig. 2 Inter-individual resemblance in the intra-individual variability of the chewing trajectories

The dotted line shows the mean trajectory, and the solid lines show the trajectories when the principal component score either increased or decreased by twice its standard deviation. The principal components, which associated the gape size, gape direction in the frontal and sagittal planes, and the width between the opening and closing trajectories were observed in all of the subjects.

表2 各被験者共通の4種の咀嚼経路変動に与える主成分（上段）とその寄与率（下段）[%]
4つの主成分の寄与率の合計は73.9%～87.0%に分布した。

Table 2 The four principal components (upper row) and their contribution ratios (lower row) (%), which associated with the typical variations commonly, observed in all subjects
The total of the contribution ratios ranged from 73.9 to 87.0%.

Subject	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Gape size	PC1 38.4	PC1 47.4	PC1 60.1	PC1 59.8	PC1 48.9	PC1 56.7	PC1 47.0	PC1 55.5	PC1 73.8	PC1 48.5	PC1 44.8	PC1 43.7
Gape direction in frontal plane	PC2 25.2	PC2 18.7	PC2 17.0	PC2 14.4	PC2 21.1	PC4 7.4	PC2 15.2	PC2 18.4	PC3 5.4	PC2 17.9	PC2 23.7	PC2 25.4
Gape direction in saggittal plane	PC4 7.5	PC4 7.6	PC5 2.1	PC3 8.2	PC6 3.3	PC3 9.6	PC4 7.5	PC3 8.5	PC6 1.4	PC4 6.9	PC3 8.1	PC4 5.9
Width	PC6 3.6	PC6 4.5	PC7 1.2	PC6 2.6	PC3 7.9	PC6 2.1	PC6 4.3	PC5 4.6	PC7 0.8	PC6 3.9	PC5 5.2	PC3 11.4
Total contribution ratio	74.7	78.2	80.4	85.1	81.1	75.8	73.9	87	81.5	77.2	81.7	86.4

図3 咀嚼経路の個人間変動に関わる主成分
全被験者の咀嚼経路、計2400周期に対して行った主成分分析の結果を図1と同様に図示した。点線は平均経路、実線は標準偏差の2倍分だけ主成分得点が増減した際の経路を示す。図2の4種の変動が、第1～4主成分として抽出されている。

Fig. 3 The principal components associated with inter-individual variability of the chewing trajectory
The effects of the principal components which associated with the variability of the chewing trajectories of all subjects, total 2400 cycles, are visualized in the same way as Fig. 1. The dotted line shows the mean trajectory, and the solid lines show the trajectories when the principal component score either increased or decreased by twice its standard deviation. The 4 individual variations shown in Fig. 2 were observed as the effects of the first 4 principal components.

求めた。その結果、各主成分の各被験者における寄与率は、同じ被験者の同様の影響を有する主成分の寄与率とほぼ同等であった(表2, 3)。また4主成分の寄与率の合計は70%以上で(表3)、各被験者の4種の主成分の寄与率の合計と同等であった。

IV. 考 察

これまで咀嚼経路は、前頭面内の開口路と閉口路に基づいて定性的に分類され、開口路が常に閉口路より非咀嚼側に位置するノーマル型、その反対のリバース型、開閉口路が交叉するもので開口初期の経路がノーマル型の場合はクロスオーバー型、リバース型であるものはリバースクロスオーバー型などと呼ば分けられてきた^{3, 15, 16)}。しかしこうした定性的分類は、あくまで前頭面に投影した経路を観察しているにすぎず、経路を3次元的に捉えて個人内変動を個人間で比較するという本研究への応用は難しい。

一方、幾何学的形態測定学の方法に基づく咀嚼経路解析は、その定量性ゆえに本研究には好適だが、幾何学的形態測定学的前提である標識点に乏しいことから、3次元的な咀嚼経路の変動の詳細をつぶさに記述するためにはこの方法の応用にも困難が予想された。標識点とは、ある規則によって形態間に対応付けられ、形態間で相同であることが先験的に想定できる点をいう¹⁷⁾。しかし、咀嚼経路は全体としては滑らかな曲線で、明確な変曲点にも乏しいため、咬頭嵌合位や最大開口位を除いて明らかな形態的特徴点は存在しない。そのため従来の研究では、咀嚼側や非咀嚼側への側方変位量が最大となる点などを標識点に準じて用いている¹⁸⁾。たしかにそれらは同一の基準で複数の咀嚼経路から一意に抽出できるが、一部の特徴のみに着目しているに過ぎず、それぞれの咀嚼経路間で形態学的、運動学的に同一の性質を具える保証はない。たとえば咀嚼側への側方変位量が最大となる点は、同じくノーマル型の経路であっても、よりグラインディングの傾向の強い経路では閉口路の半ばに位置するであろうし、チョッピングの傾向の強い経路では閉口路の冒頭、最大開口位付近に位置することになる。それらの点における運動速度も当然異なると予想される。したがって、それらの点が咀嚼運動に関して同じ性質を具えると考えすることは困難であり、経路全体の変動をつぶさに捉えるという本研究の目的を遂行するためには不十分であった。

本研究が採用したBuschangらの方法¹³⁾は、同じく標識点を追加するものであるが、その基準を形態的特徴

表3 全被験者の咀嚼変動を説明する主成分のうち被験者間で共通の4種の咀嚼経路変動に関わる主成分が、各個人の経路変動を説明する割合[%]

Table 3 Proportion of variable factors related to variations of the 4 types to variations of individual pathways (%)

Subject	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Gape size	32.6	42.3	52.5	50.2	29.5	47.6	45.1	50.9	69.7	46.1	43.9	32.3
Gape direction in frontal plane	25.6	17.7	19.9	17.6	30.4	8.8	11.8	14.0	3.8	14.9	22.4	28.1
Gape direction in sagittal plane	8.0	10.8	2.9	9.6	8.1	9.8	10.5	11.4	2.9	8.3	7.1	9.5
Width	5.5	7.9	4.8	6.4	8.6	8.2	7.1	6.5	8.1	6.2	7.3	12.0
Total contribution ratio	71.7	78.7	80.0	83.8	76.6	74.3	74.5	82.8	84.5	75.4	80.7	81.8

に求める代わりに、咀嚼各相における時間軸上の位相に求めたものと解釈できる。この方法では、咬頭嵌合位を原点とする右手座標系で咀嚼経路を記述するため、咬頭嵌合位と最大開口位の情報は温存される。また、隣接する時点間の座標の距離がその区間の運動速度を反映することなどから、時間要素に関わる情報を一部保存していることも特徴の一つである。

咀嚼経路の記述にこの方法を、またその変動の解析に主成分分析を採用したところ、主成分得点から再構成された咀嚼経路が各被験者の咀嚼経路やその変動の特徴をつぶさに再現することが示され、この記述方法が本研究の目的に対して好適なものであることが確認された。前述した楕円フーリエ記述子の欠点であった咀嚼経路の大きさや向き情報の保存が可能なることも、本法の有利な理由である。現時点で明らかな本法の欠点は、開口相、閉口相の所要時間が標準化によって失われることである。

次に、咀嚼経路の個人内変動について述べる。緒言に記したように、著者らは楕円フーリエ記述子で記述した前頭面内咀嚼経路が、寄与率5%以上の2～3個の主成分によって、88.2～94.1%まで記述できること、またこれら主成分は、それぞれ経路の幅径、彎曲、最大開口位付近と咬頭嵌合位付近の幅径の相反的变化に関与することを示した¹⁰⁾。一方、本研究から、咀嚼経路の変動に関わる7成分が検出され、うち4個は経路の大きさ、前頭面ならびに矢状面内における開口方向、そして前頭面内における幅径の変化に関与していた。これらは、楕円フーリエ記述子によって経路を記述した場合に標準化の過程で失われてしまう情報を捉えたものと考えられる。

咀嚼動作の変動に着目した研究として、自由咀嚼中のウサギを材料に、各周期の咀嚼筋筋電図積分値の変動を主成分分析により解析した Weijs らの検討¹⁹⁾がある。ここで変動の70～90%の説明に要した主成分数は3個であった。一方、麻酔下のウサギ大脳皮質に電気刺激を与えて様々な下顎運動を誘発し、その際の開口筋と閉口筋の活動量の変動を同じく主成分分析に供した Widmer ら²⁰⁾によれば、その変動は3ないし6個の主成分によって説明できるという。主成分分析は、変動を互いに独立な線形変化の線形和として表現する。しかし、筋活動量と筋力など様々な面で非線形の挙動を示す生体現象の変動が、線形関係のみによって記述可能であるとは考えがたく、非線形関係を主成分分析に供した場合、冗長な主成分が検出されると考えられる。この点を考慮しても、咀嚼経路の変動要素数は少数と考えることが、現時点の知見に照らして妥当と推察される。加えて、全被験者に共通する咀嚼経路の変動要素を抽出する目的で全2,400周期の咀嚼経路を対象に主成分分析を行った結果、抽出された7個の主成分のうちの4個は被験者個々において認められた4種の影響を具えており、その4主成分で80%を超える累積寄与率を有していた。このことは各被験者の変動要素が少数であるのみならず、そのいくつかを全被験者が共有する事実を示唆すると考えられた。

今回の被験者にはチョッピング型とグライインディング型という対蹠的な特徴の経路の咀嚼を行う被験者が含まれた。たとえば被験者Cは総じてチョッピング型の経路を呈し、従来の定性的分類にしたがえばノーマル型は31周期(15.5%)、クロスオーバー型は157周期

図4 経路幅径の変動と定性的な咀嚼経路分類の関係

クロスオーバー型の咀嚼経路（平均経路，開口路○，閉口路●）を示す被験者Cでは，第4主成分が経路幅径の変動に関与した．この主成分の得点が増加するとノーマル型（開口路◇，閉口路◆），減少するとリバース型（開口路△，閉口路▲）に変化する．

Fig. 4 Relationship between the effects of the principal component, which associated the width of the chewing trajectory, and qualitative classification of the chewing trajectory

In Subject C whose mean chewing trajectory was classified quantitatively as the “reversed type” (opening phase, ○; closing phase, ●), the fourth principal component was associated with the changes of the width of the chewing trajectory. When the score of this principal component increased, the trajectory changed to the “normal type” (opening phase, ◇; closing phase, ◆). In contrast, the trajectory changed to the “reversed type” (opening phase, △; closing phase, ▲), when the score decreased.

(78.5%)，リバース型は12周期（6.0%）という割合であった．一方，これら3種の経路は幅径の変動を示す第4主成分得点のみを増大もしくは減少することにより再現される（図4）．この知見は，3種の特徴的な経路がそれぞれ独立したものではなく，むしろ連続的に変化する経路形状のうち，特徴的なものを選んで捉えたに過ぎないことを推察させるものであった．

以上に述べた本研究の結果は，ヒトの咀嚼経路が，比較的少数の変動を重ね合わせたものとしてほぼ完全に表現できることを示すものであった．独立な変動要素の存在が，その背景に独立な制御要素の存在を示唆するとすれば，咀嚼系の制御上の自由度も，また小さいことになる．すなわち本研究の結果は，咀嚼における制御要素が

少数かつ個人間で共通である可能性を示唆すると考えられた．

謝 辞

稿を終えるにあたり，多大なるご助力を頂きました東北大学大学院歯学研究科加齢歯科学分野の教室員各位に厚く御礼申し上げます．

なお，本研究の一部は84th General Session & Exhibition of the International Associations for Dental Research (2006, Australia)，第35回日本顎口腔機能学会学術大会（2005，札幌），および第50回東北大学歯学会（2006，仙台）において発表した．

文 献

- 1) Lund JP. Mastication and its control by the brain stem. *Crit Rev Oral Biol Med* 1991; 2: 33-64.
- 2) Lundeen HC, Gibbs CH. *Advances in occlusion*. Boston: John Wright PSG; 1982, 18-19.
- 3) Pröschel P, Hofmann M. Frontal chewing patterns of the incisor point and their dependence on resistance of food and type of occlusion. *J Prosthet Dent* 1988; 59: 617-624.
- 4) Horio T, Kawamura Y. Effects of texture of food on chewing patterns in the human subjects. *J Oral Rehabil* 1989; 16: 177-183.
- 5) Hiimeae KM, Heath MR, Heath G et al. Natural bite, food consistency and feeding behaviour in man. *Archs Oral Biol* 1996; 41: 175-189.
- 6) Ogawa T, Koyano K, Umemoto G. Inclination of the occlusal plane and occlusal guidance as contributing factors in mastication. *J Dent* 1998; 26: 641-647.
- 7) Shiga H, Kobayashi Y, Arakawa I et al. Relationship between pattern of masticatory path and state of lateral occlusal contact. *J Oral Rehabil* 2009; 36: 250-256.
- 8) Belser UC, Hannam AG. The influence of altered working-side occlusal guidance on masticatory muscles and related jaw movement. *J Prosthet Dent* 1986; 53: 406-413.
- 9) Kuhl FP, Giardina CR. Elliptic Fourier features of a closed contour. *Comp Graph Ima Proc* 1982; 18: 236-258.
- 10) Hattori Y, Shimizu Y, Satoh C, Watanabe M. Masticatory motion is controlled in humans by a limited set of muscle synergies. *Tohoku J Exp Med* 2010; 220: 217-222.
- 11) 木下栄蔵. 多変量解析入門. 東京: 啓学出版; 1987.
- 12) 高倉節子. 主成分分析と因子分析 (多因子モデル) の特色について. *数理科学* 1982; 225: 11-16.
- 13) Buschang PH, Hayasaki H, Throckmorton GS. Quantification of human chewing-cycle kinematics. *Archs Oral Biol* 2000; 45: 461-474.
- 14) 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* 1990; 34: 1112-1126.
- 15) Ahlgren J. Masticatory movement in man. In: Anderson DJ, Matthews B, editors. *Mastication*. London: Wright; 1976, 119-130.
- 16) 秋山仁志, 志賀博, 小林義典. 咀嚼運動の機能的分析 — 正常者における前頭面でみた切歯点の経路のパターン —. *補綴誌* 1991; 35: 609-621.
- 17) Slice DE, Bookstein FL, Marcus LF, Rohlf FJ. A glossary for geometric morphometrics. In: Marcus LF, Corti M, Loy A, Naylor GJP, Slice DE editors. *Advances in morphometrics*. New York: Plenum Press; 1996, 531-551.
- 18) 田村彰英, 中村俊弘, 石川晴夫. Angle I 級叢生症例の矯正治療前後の咀嚼運動: 開口量, 咀嚼幅, 運動経路の安定性について. *日矯歯誌* 2000; 59: 256-262.
- 19) Weijs WA, Sugimura T., van Ruijven LJ. Motor coordination in a multi-muscle system as revealed by principal components analysis of electromyographic variation. *Exp Brain Res* 1999; 127: 233-243.
- 20) Widmer CG, Carrasco DI, English AW. Differential activation of neuromuscular compartments in the rabbit masseter muscle during different oral behaviors. *Exp Brain Res* 2003; 150: 297-307.