原著論文

モーション・キャプチャーによる調音運動の三次元解析： 健常有歯顎者について

山縣 徹哉 山縣 健佑 河野 勇治

Analysis of Orofacial Movements during Speech by 3 D Motion Capture in Adults with Normal Dentition

Tetsuya Yamagata, Kensuke Yamagata and Yuhji Kohno

Abstract: Orofacial movement trajectories during speech were monitored in 10 dentulous young adults pronouncing the test sentence: [sakura-no-hana-ga-saki-majita].

Methods: Retro-reflective markers, which were recorded as reflective points with clear outlines when illuminated with infrared strobe lights, were used to provide trajectory data at the following reference points: the modiolus (Mo), menton (Me), vermilion border of lower lip (LL); and incisal point (IP). The facial markers of each subject were located and automatically tracked during pronunciation with the use of six video cameras to provide six different perspectives, and the video data were collected with a data station (Vicon 370, Oxford Metrics). Each time frame during which each consonant was pronounced was identified on the basis of its waveform and sound spectrogram. The movement of each facial target during each time frame was tracked automatically by a work station (Vicon 370), and the three-dimensional (3-D) coordinated data were transferred to a computer. The results of photogrammetric measurement during pronunciation of each tested consonant were analyzed with a 3-D analyzer (Movias 3 D, nac).

Results: Specific trajectories were apparent during pronunciation of [s], [m], and [ʃ] among other consonants and vowels in the test sentence. The results revealed that mandibular movements (IP) were greater than orofacial movements (Me, LL) during pronunciation of [s]. In contrast, orofacial movements (Me, LL) were greater than mandibular movements (IP) during pronunciation of [m].

Key words: speech, motion analysis, orofacial movements, test sentence, motion capture

I. 緒 言

無歯顎あるいは咬合改善を伴う補綴処置においては、口腔周囲の生理的活動に適応した歯列の設定が重要であるが、その適否は下顎や舌等の口腔内組織の動作だけではなく、顔面にも影響する。このことから、機能時の顔貌や口腔運動の様相は、口腔内の状況に応じた代償的運動によ

てさまざまに異なり、それらの観察によって機能改善の程度を評価できると思われる。特に調音では、口腔周囲の組織の動作が関与する。

そこで、顔面運動の観察のため 16 mm 映画法^{1~5)}、高速 VTR システム^{6~8)}を用いて、主として発音時の切歯点、口唇および皮膚上の標点の矢状面内の運動経路が解析されてきた。さらに正中矢状面以外の部位を含めて立体的な運動経路を解析することによって咀嚼および調音時の口腔運動の実態を把握できるものと考えられる⁹⁾。そのため、著者らは多点の運動経路の記録と立体構築が可能なモーションキャプチャー・システム^{10~12)}を導入し、健常有歯顎者について咀嚼時の口腔・顔面運動経路の三次元解析を報告を

昭和大学歯学部第二歯科補綴学教室（主任：山縣健佑教授）
The Second Department of Prosthodontics, Showa University
School of Dentistry (Chief: Prof. Kensuke Yamagata)
平成 10 年 6 月 4 日受付

した¹³⁾。

本研究では、調音中の顔面の運動経路を定量化し、経路の動態から無歯顎者の発音機能を評価することを想定して、まず健常有歯顎者について、計測方法と各計測項目の標準値の検討を行った。

II. 研究方法

1. 被検者

被検者は、口腔や発音器官および聴覚に特に異常がないと思われる健常有歯顎者10名（年齢25～31歳：平均27.3歳、男性6名・女性4名）である。

2. 被検音

被験語彙は、短文「桜の花が咲きました」である。これを通常の会話の速さ、声の大きさを3回繰り返して発音させた。これは山縣¹⁴⁾が発音試験用標準日本語彙として提案したもので、[s, ʃ, t, k, r, n, h, ʊ, m, a, i, u, o] など多くの子音、母音を含んでいるが、本研究では、これらのなかで下顎、口唇の運動が直接、影響すると考えられる歯音 [s]、歯茎音 [ʃ]、両唇音 [m] について主として解析した。

3. 標点

標点は、澤田ら⁹⁾の方法に従い、プラスチック球（直径約4 mm）の表面に反射テープ（3 M 社製）を貼付して作製した。これを被検者の顔面皮膚上に皮膚用粘着材で貼付し、コールドスポットにより照明すると円形の光点として記録できる（図1）。

4. 計測部位

顔面の計測部位は、鼻下点（SN）、上口唇の赤唇部上縁（上口唇：UL とする）、下口唇の赤唇部下縁（下口唇：LL とする）、左右モダイオラス部（Mo とする）、オトガイ（Me とする）および下顎前歯正中唇側部よりワイヤーを口腔外へ延長し、口唇の前方約30 mm に付着した標点（切歯点：IP とする）である。このワイヤーを接続するクラッチ（JM-0115：ONO SOKKI 社製）は、即時重合レジンを介して下顎前歯部に圧接、成形したのち歯科用瞬間接着剤を用いて接着した。この他、鼻根、鼻尖、左右頬骨弓部に標点を貼付し、鼻尖を不動点と仮定し、これと鼻根、左右頬骨弓骨頂部を結ぶ立体を頭蓋の参照点として3基準平面の設定および頭部の変位補正に使用した。

5. 運動経路の記録方法

6台のHigh Speed Video Camera（V-133：nac 社製）からなるモーション・キャプチャーシステム（Vicon 370：Oxford Metrics 社製）を用い、サンプリングレート200

Hz で記録した。

カメラ位置と計測空間の立体的な座標を規定するため、まず、計12個のコントロールマーカー（素材は、標点と同様）を配列したキャリブレーションチャートを置き、6方向からコールドスポット（150 W ハロゲン光源 PCL-NSX：日本ピー・アイ社製）で照明し、6台のHigh Speed Video Camera で撮影した。このビデオ画像をDatastation（Vicon：Oxford Metrics 社製）によりデジタル化し、Workstation（Vicon：Oxford Metrics 社製）へリアルタイムで転送する。このビデオデータ上でチャートのコントロールマーカーの三次元座標と各カメラで記録した二次元座標を対照して、計測空間の座標系を設定した。

計測空間内に被検者を座らせて以下の撮影を行った。すなわち、頭部を固定せずに自由に発音させ、被検者の顔面を6方向からHigh Speed Video Camera で撮影する。

ビデオ映像はDatastationによりデジタル化し、Workstationへリアルタイムで転送・記録される（図2）。同時に音声マイクによりアナログデータとして記録した。

なお、各被検者の標点の運動の原点を設定するため、発音前に中心咬合位へ誘導し、記録した。

6. 解析方法

Workstation上で各マーカー像の輪郭を抽出して円形に変換し、その中心を各計測点の座標とした。こうして定めた各基準点と計測点の座標点にラベリングをすることに

図1 Retro-reflective markers on the reference points illuminated with a cold spotlight
計測点上に反射性標点を付着しコールドスポットライトで照明した

図 2 The motion capture and analysis system.

#1-#6, High-speed video cameras (V-133) ; Vicon 370 Datastation, data station used for collection of video data ; Vicon 370 Workstation, 3D coordinator and measuring system ; Movias, software for 3D trajectory analysis ; DSP Sona-Graph 5500, sound spectrograph ; DAT, DTC-2000 ES SONY ; MIC, microphone

モーションキャプチャーと解析システム

#1-#6, High-speed video cameras (V-133) ; Vicon 370 Datastation, ビデオデータの収集に用いた ; Datastation, Vicon 370 Workstation, 3次元構築と測定のためのシステム ; Movias, 3次元経路解析のためのソフトウェア ; DSP Sona-Graph 5500, 周波数分析装置 ; DAT, DTC-2000 ES SONY ; MIC, マイクロフォン

より立体構築した。さらにデータを三次元運動解析ソフトウェア (Movias : nac 社製) に導入し、運動経路の解析を行った。

なお、運動解析ソフトに導入して頭部の変位を補正した後の座標データは、すべて移動平均フィルター法による同一条件のスムージングを行った。

7. 運動経路の解析区域の設定

被検者の顔面の撮影と同時にマイクから入力した音声を DSP Sona-Graph (Model 5500 : KAY 社) に導入し、周波数分析図を表示する。図 3 は time-wave および Spectrogram (ソナグラム) の 1 例である。こうして得たソナグラムと Vicon モニター画面上のアナログデータによる time-wave とを対照して各子音の発音時点を規定した。さらに図 4 に示すように「桜の花が咲きました」発音中の各計測点の矢状面内の上下的移動量を示した Sweep 図上

図 3 Representative spectrogram (bottom) and time wave (top) analyzed by the DSP Sona-Graph with segmentation for measurement of test sounds [s], [m], and [ʃ] in the test sentence

DSP Sona-Graph によるサウンドスペクトログラム (下段) とタイムウェーブ (上段) の代表例。被験文章中の被検音 [s], [m], [ʃ] を計測のために区切ってある

図 4 Vertical trajectory during the pronunciation of the test sentence. [s], [m], and [ʃ] indicate duration of pronunciation of [s], [m], and [ʃ], respectively. Sn, subnasal ; UL, vermillion border of upper lip ; IP, incisal point ; Mo, Modiolus ; LL, vermillion border of lower lip ; Me, menton 被験文章発音中の上下運動経路

[s], [m], [ʃ] の記号は、それぞれ [s], [m], [ʃ] 発音の持続区間を示す。Sn, 鼻下点 ; UL, 上口唇の赤唇部上縁 ; IP, 切歯点 ; Mo, モディオラス ; LL, 下口唇の赤唇部下縁 ; Me, オトガイ

に発音開始と終了時点、および、文中の [s], [m], [ʃ] 発音開始と終了時点などのタイムシーケンスナンバーを記入した (図中に縦線で示す)。

図 5 Schematic diagram of values analyzed

Cub, volume of the rectangular solid encompassing the entire trajectory; TH, mean of the 3D angles created by differences in the direction of the preceding and subsequent trajectories at each measured point

解析項目の模式図

Cub, 経路全体を含む直方体の体積; TH, 各計測時点の前後の経路の方向の差で形成される3次元的な角度の平均

8. 解析項目

三次元運動経路解析用ソフトにより「桜の花が咲きました」全体、および文中の [s], [m], [ʃ] 発音中の運動経路について以下のパラメーター (図 5) について演算した。

① 経路を含む直方体の体積 (立体移動範囲: Cub)。② 計測区分開始点から終了点までの空間的移動距離累計 (TL)。③ 計測区分開始点と終了点との2点間直線距離 (SL)。④ TL と SL の距離の比率 (T/S), すなわち迂回度で計測区分開始点から終了点までの曲線度を表す。⑤ 進行方向に対する変更角度の平均 (方向変更角度: TH), すなわちジグザグ度を表す。なお、各計測時点での立体的な変更角度 (θ) は、矢状面 (θ_s), 前頭面 (θ_f), 水平面 (θ_h) の各面への投影角度の合計, すなわち, $\theta = \theta_s + \theta_f + \theta_h$ とした。さらに, TH は計測区分内の θ の平均, すなわち, $TH = \sum \theta / n$ で表した。⑥ 計測開始点から終了点までの所要時間。⑦ 移動速度 (mm/s) (V) である。

III. 結 果

1. 「桜の花が咲きました」発音時の全運動経路の解析結果

図 6 に代表的な 1 名の被検者の「桜の花が咲きました」発音中の切歯点, 下口唇, オトガイ, モダイオラスの全運動経路の 3 平面投影を示した。

表 1-a に一元配置分散分析の結果を示す。部位間で Cub, TL は 1%, TH, SL は 5% の水準の有意性を示した。

図 7 は各計測点の全運動経路の Cub, TL, TH 解析項

目の平均値と検定 (平均値の差の t 検定) 結果である。モダイオラスは他の部位に対して TL, Cub, TH のすべてで有意差が認められる。その他の部位では, 切歯点は下口唇, オトガイに対して Cub が有意に小さい ($p < 0.05$)。

2. 子音別の運動経路の解析結果

図 8 は, 図 4 のようにして規定した全被検者 (10 名) の [s], [m], [ʃ] 発音時の各部位の運動経路を, 中心咬合位を基準として重ね合わせた図である。

3. [s], [m], [ʃ] 発音時の運動経路の解析結果

各計測項目について部位と音を因子とする二元配置分散分析の結果 (表 1) と平均値の差の検定 (最小有意差法) (表 2) を示す。

Cub は部位間で 5% の水準で有意性が認められ平均値の差の検定 (最小有意差法) では, モダイオラスと下口唇, オトガイ間および切歯点とオトガイ間に有意差が認められる。

TL は音, 部位ともに 1% の水準の有意性である。平均値の比較では, 音では, [ʃ] と [s], [m] の間, 部位ではモダイオラスはすべてに対して, また切歯点とオトガイ間では有意差が認められた。

SL は部位間で 5% の水準の有意性がある。平均値の比較では, モダイオラスと下口唇, オトガイ間で有意差が認められた。

T/S は音間で 1% 水準の有意性であり, 平均値の比較では, [s] と [m], [ʃ] 間で有意差が認められた。

TH は音, 部位ともに有意性はないが, 平均値の比較では, [m] と [ʃ] 間で有意差が認められた。

図 9-a~c には, 各子音ごとに各部位の各解析項目の平均値と相互の t 検定結果を示した。

[s] では Cub はモダイオラスに対してオトガイは有意 ($p < 0.05$) に大きい。TL はモダイオラスに比較して, 切歯点, 下口唇, オトガイは有意 ($p < 0.01$) に大きい。

[m] では, Cub はモダイオラスに比較してオトガイは有意 ($p < 0.05$) に大きい。また平均値は切歯点より下口唇とオトガイは大きい。TL は, モダイオラスは他のすべてに対して有意に小さい。また, 切歯点は下口唇とオトガイに対して有意 ($p < 0.01$) に小さい。この他, モダイオラスはオトガイに対して SL が有意 ($p < 0.05$) に小さく, TH は下口唇, オトガイに対して有意 ($p < 0.05$) に大きい。

[ʃ] でもモダイオラスは TL が切歯点, 下口唇 ($p < 0.05$), オトガイ ($p < 0.01$) に対して有意に小さく, SL もオトガイよりは有意 ($p < 0.05$) に小さい。

図 10-a~d には, 各計測項目について部位別に [s], [m], [ʃ] の運動経路の平均値と音間の検定結果をまとめた。

表 1 Results from analysis of variance (sound, site)
分散分析表 (被験音, 部位)

		Cub	TL	SL	T/S	TH
		F	F	F	F	F
(a)	site	7.0812 **	8.1153 **	4.2429 *	0.1550	3.9511 *
(b)	sound	2.3287	5.1515 **	1.0800	11.0081 **	2.8344
	site	3.9561 *	12.5727 **	3.9714 **	0.1448	0.5253

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

(a): Entire test sentence (1-way ANOVA)

(b): During [s], [m] and [ʃ] sounds (2-way ANOVA)

表 2 Mean difference (Protected least significant difference)
平均値の差の検定 (最小有意差法)

			Cub	TL	SL	T/S	TH
			P	P	P	P	P
sound	s	m	0.0625	0.5725	0.1550	0.0023 **	0.3325
	s	ʃ	0.9803	0.0157 *	0.3177	0.0000 **	0.1657
	m	ʃ	0.0660	0.0031 **	0.6694	0.1409	0.0195 *
site	Mo	IP	0.4523	0.0029 **	0.0686	0.9674	0.7184
	Mo	LL	0.0137 *	0.0000 **	0.0055 **	0.9679	0.3736
	Mo	Me	0.0038 **	0.0000 **	0.0023 **	0.5945	0.2592
	IP	LL	0.0826	0.0517	0.3233	0.9354	0.5960
	IP	Me	0.0295 *	0.0137 *	0.2027	0.5666	0.4415
	LL	Me	0.6507	0.5921	0.7729	0.6226	0.8102

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

切歯点では, TL が [m] より [s] が有意 ($p < 0.05$) に大きく, T/S も [ʃ] より [s] が有意 ($p < 0.05$) に大きい。下口唇では TL が [ʃ] に対して [s] ($p < 0.05$) と [m] ($p < 0.01$) が大きく, [ʃ] は TH が有意 ($p < 0.05$) に大きい。オトガイでは TL が [ʃ] に対して [s] ($p < 0.05$) と [m] ($p < 0.01$) が有意に大きい。モダリオラスでは有意差はなかった。

4. 発音中の運動速度の経過

図 11 に発音中の各部位の運動速度の経過の変化を示す。それぞれ, 発音開始と発音終了の中央を原点とし, その前後の各時点での速度の全被験者の平均値と標準偏差 (1 SD) の範囲を表してある。

IV. 考 察

発音機能と義歯の形態との関連は古くから注目され, Silverman^{15,16)}, Pound^{17~20)} は [s] 発音位を下顎位の設定に利用する臨床的な手法を提唱した。また [s], [ʃ] の発音時に最小発音間隙となることを利用した咬合高径の設定あるいはチェック法も有力である。一方, [m] 発音時には下顎安静位に近い顎位になるといわれ, 咬合採得に

利用されている²¹⁾。日本語音の調音時の下顎や口腔の運動についてもいくつかの報告があるが^{22~24)}, 日本語は一般に子音に母音が後続する母音止め, あるいは開口音言語 (ほとんどすべての外国語は閉口音言語) であるため子音単独の発音は困難であり, 特に, 子音の調音様式の動的特性については明確ではないので, 上記の臨床術式を無歯顎者などへ適応するにはさらに検討の必要がある。

調音動作は流動的であり, 前後の音によって子音産生中にも下顎位は変化するが, 特に, 田中²⁵⁾は, [s] 発音中央位が一定位置になることを報告した。また, 山縣ら^{1~5)}は, 連続発音中の子音の下顎位を計測し, 有歯顎者では, サ行先行子音 [s], [ʃ] が, 個人差はあるが一定の下顎位となることを認めた。しかし, 無歯顎者では, 義歯装着や咬合高径の変化などの口腔内条件に即応して, 調音運動も変化することを報告した^{1~5)}。

これらの研究においては下顎の切歯点の運動を観察しているが, 無歯顎者の臨床における下顎位の計測ではオトガイ皮膚上に基準点を設ける。そのため下顎骨と皮膚上点の挙動の関連性を知る意義がある。その観点から, 金⁶⁾は, 切歯点と皮膚上計測点とで [m] 発音中の運動方向の違いを報告した。さらに調音動作開始時から音の発生時までの運動経路の解析⁷⁾および短文発音中の切歯点, 口唇, 皮膚

図 6 Representative trajectories at IP, LL, Me, and Mo projected to each of three planes (sagittal plane, Sag; frontal plane, Front; horizontal plane, Horiz) during pronunciation of the test sentence by one subject. The origin is the position of each monitored point on centric occlusion
 代表的な被検者 1 名の被験文章発音中の切歯点、下口唇、オトガイ、モダイオラスの全経路の 3 平面投影 (矢状面, Sag; 前頭面, Front; 水平面, Horiz). 原点は各計測点 (標点) の中心咬合位時における位置

上点の矢状面内の運動経路も報告されている⁸⁾。

われわれは、さらに立体的な顔面運動経路を解析するため、高速 VTR を用いて切歯点と口唇、皮膚上の標点の運動を 2 方向から記録し、経路を三次元解析する方法を開発した^{26,27)}。これによって、無歯顎者の発音時⁹⁾、無歯顎

者²⁸⁾および口蓋裂症例²⁹⁾の咀嚼時の顔面運動について報告した。また、モーション・キャプチャーシステムを用いて多点の運動経路の記録を可能とし、咀嚼時の顔面運動を解析した¹⁰⁻¹³⁾。

本研究では、これらのシステムを応用して、短文発音の

図 7 Comparison of the measured items of the trajectory during pronunciation of the entire test sentence

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ (by a Student's t-test)

被験文章全体の発音中の全経路の計測項目の比較

全体と文中の歯音 [s], 歯茎音 [ʃ], 両唇音 [m] の運動経路について検討した。

1. 音声との同期法について

本研究では、実際の会話に近い発音の実態を観察するため、自然な文章発音中の調音活動を計測したが、子音の持続時間は短いため、子音発生時点を同定するには聴覚による判定は不可能である。また、音を低速再生しても聴覚印象が変化するので判別は困難である。そこで、本研究では顔貌の運動経路の記録と同時に音声を入力し、周波数分析によって得たソナグラム（声紋パターン）上で各音の判別を行い、これをモーション・キャプチャーのディスプレイ

図 8 Superimposition of the trajectories for all 10 subjects at each measured point during pronunciation of [s], [m], and [ʃ] sounds in the test sentence

全被験者 10 名の被験文章中の [s], [m], [ʃ] 発音中の各計測部位の運動経路の重ね合わせ

図9 Comparison of trajectories among measured points during pronunciation of the consonants [s], [m], and [ʃ]

* p < 0.05, ** p < 0.01

(a), [s]; (b), [m]; (c), [ʃ]

子音 [s], [m], [ʃ] 発音中の各計測部位間での経路の比較

上の音声波形のアナログデータと対照して、各子音の発音時点を規定した。この方法で特徴のある音の発生区域は求められるが、これだけでは、映像と音声の同期は不完全である。そこで、発光標点を設けた「カチンコ」で映像と音を記録することにより、ソナグラムとビデオおよびアナログデータの3者の正確な同期を行った(図4)。すなわち、「桜の花が咲きました」発音中の各計測点の矢状面の上下的移動 Sweep 図にソナグラムと time-wave (図3) から規定した発音開始と終了時点、および、文中の [s], [m], [ʃ] 音の発生開始と終了時点を記録し、それぞれ

のタイムシーケンスナンバーを求めた。

2. 運動経路の記録および解析方法について

1) 標点と計測部位について

標点は、球形ビーズを反射テープで覆い、球状に成形した。これをコールドスポットで照明することにより、輪郭が明瞭で均一な輝度をもつ円形の反射像として録画できるので、異なる方向からの多数点の立体計測が可能である。また、サークルフィッティング法により重心の座標を自動計測するので、標点自体の大きさにかかわらず精密な計測

図 10 Comparison of trajectories among [s], [m], and [ʃ] pronunciation for each measured point

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

(a), Cub; (b), TL; (c), SL; (d), T/S; (e), TH

各計測部位における [s], [m], [ʃ] 発音の経路の比較

が可能である。また、皮膚へは、皮膚用粘着材を用いて簡単に付着できるので被検者への負担が少ない。

切歯点は、ワイヤーで口腔外に延長したが、ワイヤーはできるだけ下口唇に沿わせて屈曲し、運動の障害を最小限とした。

標点は、切歯点の他、両側モダイオラス部、オトガイ部および上口唇、下口唇に設定したが、本報告では、これらのうち主として下口唇、オトガイ部、右側モダイオラス部について解析した。上下口唇は口唇音の調音動作での主体であり、モダイオラスは表情筋の拠点として顔面運動の正否に影響すると思われる。また、オトガイは下顎骨の動きに最も近いと思われるが、調音動作での両者の動態の差異を知る必要がある。

2) Motion capture system について

計測空間の座標系を規定するため、標点を既知の座標に立体的に配置したキャリブレーションチャートを作成した。これによって自由な位置にカメラを設置することが可能となった。本研究では6台のカメラで被写体の前方、左右および上下方向から撮影したが、各カメラは同期信号で制御され、映像信号は完全同期している。このため、立体的な配置の標点を死角がなく捉えることができた。特に、

被写体の下方にカメラを設置することにより、オトガイ下部など水平あるいは垂直2方向からでは撮影困難であった部位の計測も可能となった。

各カメラが記録した映像をデジタル化し、Workstationに記録すると、標点はモニター上に白色の円形像として表示される。このデジタル画像をもとに立体構築を行う。すなわち、複数のカメラにより形成される各標点中心の交点を三次元化するGSI技法により、各計測点の三次元座標系列を自動算出する。次に、各計測点をラベリングして立体構築が完了するが、この作業の後には自動追尾が行える³⁰⁾。

この段階のディスプレイ上では、スティックアニメーション表示、運動軌跡、計測点間距離、運動速度などを同時に観察できるが、さらに座標データを運動解析ソフトに導入することにより、頭部の変位補正を行った。これは、計測点の他に設置した標点、すなわち鼻尖を頭蓋に対する不動点と仮定し、これと鼻根、さらに左右頬骨弓骨頂部を直線で結ぶことにより形成される立体を頭蓋の代表とし、鼻尖と左右頬骨弓骨頂部を含む平面、すなわち、カンペル平面に平行な面を基準とした自動的な座標変換による。このため頭部の機械的固定は不要であり、被検者の自然な動

図 11 Sequential changes in velocity for IP, LL, and Me during pronunciation of [s], [m], and [ʃ] in the test sentence
被験文章中の [s], [m], [ʃ] 発音時の切歯点, 下口唇, オトガイの運動速度の経時的変化

作の環境が得られると思われる。

なお、著者らは、頭蓋側へのマーカーの設定法について立体的な配列で標点を付着した眼鏡、ヘッドギアの装着および立体マーカーを上顎歯列に固定する方法も行っている³¹⁾。これらに比して、本研究の標点を皮膚上に直接貼付する方法は測定精度はやや劣る。しかし、無歯顎者、高齢者へ適用する際の被検者への身体的、心理的な負担の軽減を勘案すると本方法が最適である。さらに、水平基準面をカンペル平面に一致させられることも、無歯顎あるいは歯列異常症例への適用に有効である。また、通常の発音動作の範囲では、マーカー貼付部の皮膚の移動は小さいので、

本研究の目的にかなうと思われる。

3) 解析項目について

本研究の解析項目は、山縣³²⁾が運動経路の複雑さを表現するために定義したものである。T/S は迂回度であり、値が小さいほど直線的な運動経路である。また、TH はジグザグ度で値が小さいほどスムーズな運動経路である。

二元配置分散分析の結果 (表 1-b) では、TL は音と部位の両因子での有意性が認められる。Cub と SL は部位の因子で、T/S と TH は音の因子での有意性が認められる。また、T/S の平均値の差の検定では [s] は [m], [ʃ] に対して有意 ($p < 0.01$) に大きい (表 2)。このように各

項目とも経路の解析に有効である。

3. 解析結果について

1) 「桜の花が咲きました」全体の運動経路について

「桜の花が咲きました」発音中の各計測点の矢状面の上下の移動量を示した Sweep 図 (図 4) をみると全体としては、切歯点、下口唇、オトガイは、ほとんど類似した変動パターンである。しかし、[s], [ʃ] の発音中にはいずれも上方へ移動するが、[m] では下口唇、オトガイは上方へ移動するのに、切歯点の移動は少ない。また上口唇は、[m] のときのみ下方へ運動している。

このように、[s], [m], [ʃ] では、それぞれの調音方法を反映した運動パターンを示す。

代表的な被検者の全運動経路 (図 6) をみると下口唇とオトガイは運動経路が類似しており、切歯点に比べて、前後的な運動が大きい。特にオトガイでは、中心咬合位時の位置を前上方へ越える部分がみられる。モダイオラスでは、全被検者の運動経路を中心咬合位を基準として重ね合わせてみても、ほぼ全部が共通の運動範囲に含まれ、集中している。

文章発音中の全運動経路のようなサイクリックな経路を表現するパラメーターとしては Cub, TL, TH が適し、SL, T/S は有効ではない。分散分析の結果でも Cub, TL, TH, SL は部位間での有意性がみられた (表 1-a)。そこで、前 3 者の計測結果を図 7 に示したが、モダイオラスは他のすべての部位に対して TL, Cub が有意に小さく、TH が大きく、運動範囲が狭くパターンが異なることを示している。その他の部位では切歯点の Cub が下口唇、オトガイに対して有意 ($p < 0.05$) に小さく、文章発音全体の運動範囲は下顎の運動範囲が下口唇、オトガイより小さいことを表している。

2) [s], [m], [ʃ] 音発生中の運動経路について

全被検者の [s], [m], [ʃ] 音発生中の各計測点の運動経路 (図 8) をみると、[s] では、いったん、前上方へ向かう閉口から後下方の開口へ向かう往復のパターンが多いが、前頭面での左右的なズレは小さい。T/S は、表 2 のように全部位の平均値では [s] は [m], [ʃ] に対して有意 ($p < 0.01$) に大きい。これは往復運動であるためである。切歯点の運動範囲は、比較的狭く集中して最上方位で中心咬合位に接近しているのに対して、下口唇、オトガイでは前後の要素が大きく、中心咬合位時の位置よりも下方に離れている者が多い。

このように、歯音 [s] の調音では、下顎前歯切端が上顎前歯に接近して最小発音間隙を保つという動作の特徴が文章発音中にも表れている。しかし解析結果では、切歯点では TL, すなわち音発生から終了までの間の移動距離累計は [s] が [m] より有意 ($p < 0.05$) に大きく、往復運動であるため移動の範囲は狭いが距離は長いことを示してい

る (図 10-b)。

[m] 発音時の切歯点、下口唇、オトガイの運動範囲は、被検者間では、それぞれ異なるが、下口唇、オトガイの運動のパターンは被検者内では類似しており、閉口から開口に向かう運動である。切歯点の運動範囲は比較的狭く、最上方位で中心咬合位の 2~5 mm 下方に位置するのに対して、下口唇、オトガイの運動範囲は大きく、特にオトガイは最上方位が中心咬合位時の位置を上方に越えている者が多い。図 9-b の計測結果でも、切歯点に比較して下口唇とオトガイはともに TL が有意 ($p < 0.01$) に大きい。

これは、両唇音 [m] の調音では、下顎は下顎安静位に近い位置になり、切歯点は上顎前歯と間隙を保つのにに対し、上下口唇は閉鎖するため、上口唇は下方へ、下口唇は上方へ移動することを反映している。この動作は、図 4 の上下移動経路にも明確に表れており、オトガイもこの口唇の動作に連動して下顎骨上を軟組織がスライドして上方に移動することを示している。

[ʃ] 発音時の運動経路の特徴は、全体に運動範囲が狭いことである。[s], [m] に比較して、特に下口唇、オトガイの運動範囲が狭く、発音開始点からやや下方に移動するが、発音終了まではほぼ一定位置に停まる。そのため、臨床的な下顎位の設定時に最小発音間隙を観察するには [s] よりも適する可能性がある。解析結果 (図 10-b) でも、TL はオトガイ、下口唇では [s] ($p < 0.05$), [m] ($p < 0.01$) に対して有意に小さい。

ソナグラム (図 3) で明らかのように、本研究の試験語彙である「桜の花が咲きました」の子音環境では「シ」の後続母音は無声化され、空白のポーズとなっている。これは、子音終了の時点ですでに、次の「i」ではなく [t] の調音の準備に入っていることを示している。このため母音に相当する区間でも子音部の調音動作が持続するためと思われる。

以上の結果は、[s] の発音中には切歯点すなわち下顎の移動量 (移動距離累計) が大きく、逆に [m] の発音中には下顎よりも下口唇とオトガイ、すなわち顔面皮膚の移動量が大きい。[ʃ] では、特にオトガイと下口唇すなわち顔面皮膚の移動量が小さいことを裏付けている。

3) 発音中の運動速度の経過について

[s], [ʃ], [m] 発音中の運動速度の経過の変化を図 11 に示したが、それぞれ、各被検者の発音開始から発音終了までの中央を発音中央位と仮定した。

[s] では、切歯点、オトガイ、下口唇ともに、原点を底としたすりばち型であり、発音中央位でほぼ静止し、その前後で加速することを表している。

[m] では、切歯点は発音開始時点から速度が遅く、横這いであるが発音終了に向かってやや速くなる。これに対してオトガイと下口唇は、発音開始からいったん速度が上昇し、発音中央位に向かって減速した後に加速していく。

中央位での速度も切歯点や [s], [ʃ] 発音時の各部位よりも大きく、連続的に移動していることがわかる。

[ʃ] では、全体に [s], [m] より小さく、切歯点、オトガイ、下口唇ともに経過中の変化は少なく、発音開始から発音終了に向かってさらに小さくなる。すなわち、発音中を通じてほぼ静止した状態であることを示している。

このように、各子音の調音中の運動速度の経時的な変化からも、各部位の動作の特徴が明らかになった。

V. 結 論

健常有歯顎者について文章および文中の [s], [m], [ʃ] 発音時の下顎と口唇、顔面の三次元運動経路の解析を行った。被検者の顔面標点をモーション・キャプチャーシステムを用いて記録し、音声のアナログデータと Spectrogram (ソナグラム) を対照して各音の発音時点を規定した。その結果以下の所見が得られた。

1. 文章発音中の全運動経路では、Cub, TL, SL, TH は部位間での有意性が認められた。モダイオラスは他のすべての部位に対して TL, Cub が有意に小さく、運動範囲が狭い。切歯点の Cub は下口唇、オトガイに対して有意 ($p < 0.05$) に小さく、運動範囲は切歯点 (下顎) が下口唇、オトガイより小さい。

2. [s] では、切歯点の TL, すなわち音発生から終了までの間の移動距離累計は [m] より有意 ($p < 0.05$) に大きく、移動の範囲は狭いが距離は長いことを示している。

3. [m] では、TL が切歯点に比較して下口唇とオトガイはともに有意 ($p < 0.01$) に大きい。

4. [ʃ] ではオトガイ、下口唇の TL が [s], [m] に対して有意に小さい。

以上の結果は、[s] の発音中には切歯点すなわち下顎骨の移動量 (移動距離累計) が大きく、逆に [m] の発音中には下顎骨よりも下口唇とオトガイ、すなわち顔面皮膚の移動量が多い。[ʃ] では、特にオトガイと下口唇すなわち顔面皮膚の移動量が小さいことを示唆している。また [s], [m], [ʃ] 発音中の運動速度の経時的な変化からも各部位の動作の特徴が明らかになった。

したがって皮膚上の計測点によって発音位を観察する際には、特に [s], [m], [ʃ] の発音時の下顎骨と皮膚の動態の違いを配慮すべきである。

稿を終えるにあたり、本研究にご協力くださいました被検者諸氏ならびに種々のご援助ご協力をいただきました本学第二歯科補綴学教室の諸先生方に謹んで感謝の意を表します。

本研究の要旨は、第 95 回日本補綴歯科学会学術大会 (1996 年 5 月 31 日, 6 月 1 日, 広島) において発表した。

なお、本研究の一部は、平成 7~9 年度文部省科学研究補助金基盤

研究 B, 課題番号 07457477 にて行った。

文 献

- 1) 関谷俊治, 牟田悟朗, 井田博久ほか. 有歯顎者および義歯装着者の発音時の下顎運動. 補綴誌 24 : 689-702, 1980.
- 2) 牟田悟朗, 関谷俊治, 戸高勝之ほか. 義歯装着者の発音時下顎運動に関する研究. 補綴誌 26 : 697-709, 1982.
- 3) 山縣健佑, 高林成日己, 土田 裕ほか. 義歯の咬合高径の変化が発音時下顎位に及ぼす影響. 補綴誌 26 : 12-21, 1982.
- 4) Yamagata K, Tanaka O, Tsumita M et al. The use of phonetics in determining the vertical dimension of occlusion. J Showa Univ Dent Soc 2 : 139-147, 1983.
- 5) 山縣健佑, 高林成日己, 土田 裕ほか. 発音法による義歯咬合高径の設定に関する研究. 補綴誌 28 : 622-629, 1984.
- 6) 金 修澤. ハイスピード・ビデオによる発音時の口腔運動の計測. 補綴誌 32 : 486-498, 1988.
- 7) 古川 周, 山縣健佑, 金 修澤ほか. 調音時の切歯点および顔面の運動経路の解析. 昭歯誌 12 : 147-163, 1992.
- 8) 中出智也, 山縣健佑, 北川 昇ほか. 文章発音中の顔面および下顎運動の解析. 昭歯誌 15 : 59-75, 1995.
- 9) 澤田 久, 山縣健佑, 張 仁彦ほか. 無歯顎者の発音時の口腔運動経路の 3 次元解析. 昭歯誌 16 : 125-151, 1996.
- 10) 張 仁彦, 山縣健佑, 麻生克之ほか. 3 次元多点動作解析システム (Vicon 370) による口腔運動の計測 その 1. 調音運動. 補綴誌 39・93 回特別号 : 110, 1995.
- 11) 麻生克之, 山縣健佑, 張 仁彦ほか. 3 次元多点動作解析システム (Vicon 370) による口腔運動の計測 その 2. 咀嚼運動. 補綴誌 39・93 回特別号 : 111, 1995.
- 12) 張 仁彦, 山縣健佑, 麻生克之ほか. 多点動作 3 次元解析システムによる口腔運動の計測. 補綴誌 39・94 回特別号 : 44, 1995.
- 13) 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. 昭歯誌 17 : 136-153, 1997.
- 14) 山縣健佑. 発音試験用標準日本語彙に関する研究. 補綴誌 8 : 173-217, 1964.
- 15) Silverman MM. Accurate measurement of vertical dimension by phonetics and the speaking centric space. Dental Digest 57 : 308-311, 1951.
- 16) Silverman MM. Determination of vertical dimension by phonetics. J Prosth Dent 6 : 465-471, 1956.
- 17) Pound E. The mandibular movements of speech and their seven related values. J Prosth Dent 16 : 835-841, 1966.
- 18) Pound E. Utilizing speech to simplify a personalized denture service. J Prosth Dent 24 : 586-600, 1970.
- 19) Pound E, Murrell JA. An introduction to denture simplification. J Prosthet Dent 26 : 570-580, 1971.
- 20) Pound E. Controlling anomalies of vertical dimension and speech. J Prosthet Dent 36 : 124-135, 1976.
- 21) 山縣健佑. 診療計画. 補綴臨床別冊 補綴の診療計画とその診査 12 : 59-70, 1979.
- 22) 関根 弘. 調音時の下顎運動に関する研究 第 1 報. 歯科学報 59 : 1249-1264, 1959.

- 23) 関根 弘. 調音時の下顎運動に関する研究 第 2 報. 歯科学報 59 : 1265-1274, 1959.
- 24) 三谷 卓. 両唇音と歯音ならびに母音発音時の下顎切歯点矢状面運動について. 歯科医学 30 : 1081-1116, 1967.
- 25) 田中 收. 日本語 S 発音時の下顎運動に関する研究. 補綴誌 24 : 628-646, 1980.
- 26) 下平 修, 澤田 久, 山縣健佑ほか. 無歯顎者の口腔運動の高速 VTR による三次元解析. 補綴誌 37・89 回特別号 : 162, 1993.
- 27) 綾野伸吾, 山縣健佑, 麻生克之ほか. 全部床義歯装着者の機能時の 3 次元口腔運動解析 その 1. 調音時の口腔運動経路. 補綴誌 37・90 回特別号 : 47, 1993.
- 28) 飯島裕之, 山縣健佑, 北川 昇ほか. 無歯顎者の咀嚼時の口腔・顔面運動経路の 3 次元解析. 補綴誌 41 : 61-70, 1997.
- 29) 飯島裕之, 山縣健佑, 北川 昇ほか. 口蓋裂症例の咬合改善処置における咀嚼時顔面運動経路の 3 次元解析. 昭歯誌 16 : 427-450, 1996.
- 30) Macleod A, Miorris JRW, Lyster M. Highly accurate video generation for automatic 3D trajectory calculation. SPIE 1356 : 12-18, 1990.
- 31) 下平 修, 山縣健佑, 河野勇治ほか. 顔面と下顎骨上仮想点の咀嚼・発音時の運動経路の解析. 補綴誌 42・99 回特別号 : 76, 1998.
- 32) 山縣健佑. 調音時の顔面, 口腔運動経路の 3 次元解析. 平成 4 ~6 年度科学研究費補助金 (一般研究 B) 研究成果報告書 (課題番号 04454490) 3 : 1995.