原	著
---	---

部分床義歯の印象採得条件の違いが欠損部顎堤粘膜の 印象面形態に及ぼす影響について

佐 藤 雅 之

東京医科歯科大学歯学部歯科補綴学第1講座（主任・指導：藍 稔教授）

（1995 年 12 月 8 日 受付）

Influence of Various Impression Procedures for Mandibular Distal Extension Removable Partial Denture on Displacement of Residual Ridge

Masayuki Sato

The First Department of Prosthodontics, Faculty of Dentistry, Tokyo Medical and Dental University
(Chief and Director : Prof. Minoru Ai)

In order to investigate the influence of various impression procedures on the morphology of the partially edentulous mucosal tissue precisely, a new 3-D measurement system based on a binocular-temporal gradient method was devised. The greatest advantage of the system is that the amounts of substance and minute deformation of the object can be easily measured simultaneously. The accuracy of the system is 0.1mm and 10mm in the substance measurement and in the deformation measurement respectively.

Three parameters selected for the impression procedure were the space between the inner surface of the tray and the mucosal tissue, the flow of impression material and the size of tray. It was found that the amount of displacement in the mucosal tissue was increased as the thickness of space on the tray was reduced or the viscosity of the impression material was increased in partially edentulous patients. Moreover, the large tray caused greater displacement around the margin than the small one.

I. 緒 言

部分床義歯は歯および粘膜の両方に支持を求めることが多いので、その製作に当たっては一般に機能時における両者の被圧変位量の違いを考慮に入れなければならない。欠損部顎堤粘膜は残存歯に比べて被圧変位量が大きく、義歯負担時には安静時とは形態が異なると考えられることから、印象採得の際の欠損部顎堤粘膜に対する扱いが問題になる^{1,2)}。しかし実際に、印象採得における条件

の違いが印象面の形態にどのような影響をもたらすかに関しては、これまで種々研究が行われてきたにも関わらず未だ不明な点が多い。

その原因の一つに測定方法があげられるであろう。すなわち、従来の方法の多くは接触型の測定装置を用いており、採得した印象面を直接測定しようとする接触により印象面を変形させ、正確な形状測定が困難であった。そのため、印象から石膏模型を作り、そのうえで計測する方法も行われたが、その場合には、印象から石膏に置き換え

る際の寸法変形が誤差として含まれ、十分な精度を得ることが困難であった。

また、印象条件を変えたときの粘膜の動態については、シミュレーションモデルの印象についてはすでに多数の報告がなされている³⁻⁷⁾が、実際の口腔内で採得された印象についての報告は少なく⁸⁻¹¹⁾、特に印象面形態の直接観察例は稀有である。

さきに当教室の耿⁵⁾は、印象面の形態を直接測定するための新たな非接触型計測システムを開発した。このシステムでは異なる条件で採得した2つの印象面形態の違いを三次元的に高い精度で測定可能である。しかし、この測定法では印象条件の違いが相対変化量でのみ表されるために、その結果からは対象となる印象面と条件の違いによる微小変形的位置関係を正確に把握することが困難であった。

今回この欠点を補うため、測定対象物の実体つまり印象面と、その微小変形量とを同時に測定できるステレオ型時空間微分三次元計測システムを開発した。本システムは基本的には、測定対象物に明暗模様のパターンを投影する一軸移動機構と2台の汎用のテレビカメラから構成され、その投影パターンの動きに対し微分型アルゴリズムを適応して、テレビカメラに映る対象物の奥行き方向の量を測定するものである。

本研究ではこのステレオ型時空間微分三次元計測システムを用いて、被験者の顎堤粘膜について印象条件の違いがその印象面の形態にいかなる影響を及ぼすか検討を行った。

II. ステレオ型時空間微分三次元計測システム

1. 装置の構成

本システムは、対象物の三次元的な絶対量とこの対象物の変形前後における三次元的な微小な形態の違いを非接触方式で測定するものである。本論文では前者を実体計測、後者を微小変形計測とする。実体計測では左右のカメラの画像データをもとにカメラに写る対象物の光軸方向の高さを測定し、一方微小変形計測では対象物の変形前、後

の画像データをもとにカメラに写る対象物の光軸方向の変位を測定する。この装置は耿^{5,12)}が用いた三次元微小変形測定装置を発展させたものであり、ランダムな縞模様を対象物に投影するための2台のプロジェクタ (COSMICAR 社製レンズ 25 mm 1:1.4)、プロジェクタを固定する微動ステージ駆動用のステッピングモーター (中央精機社製 PS-120 EXY)、2台の CCD カメラ (SONY 社製 XC-77)、そしてシステム制御用のコンピュータ (Sun Microsystems 社製 SS-4) から構成されている (図 1, 2)。この装置では実体計測と微小変形計測で異なる縞模様を用いるため、それぞれの縞模様を投影するために2台のプロジェクタを配置した。

2. 基本原理

実体計測に関して、対象物上の座標系を (x, y, z) とし、カメラ I の CCD 面上の座標系を (X, Y) 、カメラ II の CCD 面上の座標系を (X', Y') とする。図 3 に示すように左右カメラの距離を D 、基準面までの距離を H とし ($D \ll H$)、カメラ I を対象物の正面に、カメラ II を中心よりずれた位置に置く。カメラ I に固定された XY 軸と対象物の xy 軸は平行とする。2台の CCD カメラの

図1 ステレオ型時空間微分三次元計測システム

図2 本システムのブロックダイアグラム

図3 測定原理

なす角度を θ とし、対象物のある1点 $A(x, y, z)$ について考えると、この点が投影されるカメラ I の CCD 面上の X 座標、 Y 座標はそれぞれ

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \frac{\alpha}{1 - \frac{z}{H}} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (1)$$

と表せる (α は定数)。同様にカメラ II の CCD 面上の X' 座標と Y' 座標はそれぞれ

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} = \frac{\alpha}{1 - \frac{z'}{\sqrt{H^2 + D^2}}} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \quad (2)$$

と表せる。ここで x', y', z' を x, y, z で表すと $y' = y$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

と書け、(2)式は

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} = \frac{\alpha}{1 - \frac{(-x\sin\theta + z\cos\theta)}{\sqrt{H^2 + D^2}}} \begin{pmatrix} x\sin\theta + z\cos\theta \\ y \end{pmatrix} \quad (3)$$

となる。 $H \ll x, z$ とすると(1)式と(3)式はそれぞれ $X + \alpha x$

$$X' \cong \alpha (x\sin\theta + z\cos\theta) \quad (4)$$

と近似できる。さらに2台のカメラのなす角 θ が $\theta \ll 1$ とみなせるとき(4)式は

$$X' \cong \alpha (x + z\sin\theta) \quad (6)$$

となる。したがって(4)式と(6)式により X, X' と z とは

$$z = \frac{X' - X}{\alpha \sin\theta} \quad (7)$$

の関係で示される。よって同一の点が2台のカメラに投影されたときの投影位置の差の量 $X' - X$ から z が求められ、これが対象物のカメラの光軸方向の高さとなる。

しかし、ここで2台のカメラの像を見比べたとき、一方の像内の点が高方のどの点に対応しているかを判定するのは一般に困難とされている¹³⁾。そこで本システムではプロジェクタで縞模様を投影し、それを動かしたときの複数枚の画像系列を用いることにより、2台のカメラの像内の対応する点を判別するようにしている。

いまランダムな縞模様を投影しながらそのプロジェクタが z 軸に沿って速度 v で移動したとき、対象物上の光強度場は $f(x, y, z, t) = f_0(x, y, z - vt)$ と表せる。測定対象物である散乱表面 S の高さを $z = S(x, y)$ と表すと、カメラ I での光強度の経時的変化 $F_1(X, Y, t)$ は

$$F_1(X, Y, t) = \gamma_1(x, y) f_0(x, y, S(x, y) - vt) \quad (8)$$

と表せ、同様にカメラ II での光強度の経時的変化 $F_2(X', Y', t)$

$$F_2(X', Y', t) = \gamma_2(x, y) f_0(x, y, S(x, y) - vt) \quad (9)$$

と表せる。これらと(6)式の関係から、左右のカメラの像の時系列は

$$F_2(X', Y', t) = \frac{\gamma_2(x, y)}{\gamma_1(x, y)} F_1(X + \alpha z \sin\theta, Y, t) \quad (10)$$

なる関係で表される。 γ_1, γ_2 は対象物上の反射率および角度によって決まる関数である。いま対象物上のある1点について注目し、その時系列をみる

のであれば γ_1/γ_2 は定数であるから、カメラ I の点 (X, Y) の明るさの時系列はカメラ II の点 $(X - \alpha z \sin \theta, Y)$ における明るさの時系列の定数倍である。それゆえに投影パターンが不均一で各点 (X, Y) ごとに明るさの時系列が異なっているのであれば、以下のようにカメラ I とカメラ II の明るさの時系列の相関関係を求めればよい。このとき相関

$$\alpha(d) = \frac{|\int F_1(X, Y) F_2(X - d, Y) dt|^2}{\int \{F_1(X, Y)\}^2 dt \int \{F_2(X, Y)\}^2 dt} \quad (11)$$

は $d = \alpha z \sin \theta$ のとき最大となる。よって各 (X, Y) ごとに(11)式の $\alpha(d)$ が最大となる d を探索すれば、対応する点の高さ z が求められる。

微小変形の測定原理については、すでに耿⁵⁾および篠田¹²⁾が詳細に述べているが、実体計測と同様に z 軸に沿って速度 v でプロジェクタが移動して光強度 $f(x, y, z, t) = f_0(x, y, z - vt)$ を生成するとする。変形前の対象物表面 S_1 を $z = S_1(x, y)$ で表したとき、 z 軸上の CCD 面上での光強度 $g_1(X, Y, t)$ は

$$g_1(X, Y, t) = r_1(x, y) f_0(x, y, S_1(x, y) - vt) \quad (12)$$

となる。ただし、 r_1 は対象物上の反射率と角度によって決まる関数である。次に、全く同条件で変形後の対象物表面 $S_2: z = S_1(x, y) + \Delta S(x, y)$ に対して同様に $g_2(X, Y, t)$ を観察すると

$$\begin{aligned} \frac{g_2(X, Y, t)}{r_2(X, Y)} &= f_0(x, y, S_1(x, y) - vt) \\ &= \frac{g_1(X, Y, t - \alpha(X, Y))}{r_1(X, Y)} \end{aligned} \quad (13)$$

ただし

$$\alpha(X, Y) = \frac{\Delta S(x, y)}{v} \quad (14)$$

である。このように変形前の表面 S_1 と変形後の表面 S_2 に対する動画データ g_1, g_2 を各画素ごとに考えると、一方の時系列データはもう一方のデータに対し、 ΔS に比例した時間軸方向のシフトと反射率で決まる強度方向への拡大を受けている。ここでは各画素ごとに時間軸のシフト $\alpha(X, Y)$ を推定することにより、対象物の微小変形量 $\Delta S(x, y)$ を(14)式から決定している。

本測定ではプロジェクタの 1 ステップあたりの

移動量を実体計測では 1.0 mm、微小変形計測では 200 μm とし、40 ステップ移動した。1 ステップ移動するごとに CCD カメラで対象物の像を 1 枚撮影し、全ステップ分の画像をコンピュータに取り込んだ。微小変形計測の場合にはこの過程を変形前と変形後の対象物に対して行い、これらの画像データをもとに対象物の微小変形量の最良推定値を算出した。ここで得られる微小変形量とは変形後の対象物を基準に変形前の対象物をみたものであり、得られたデータが正の時は変形前の対象物が変形後の対象物よりカメラ I の方向でカメラ寄りであることを示している。また実体量については変形前の実体量を計測し、変形後の実体については微小変形計測で得られた差分データを変形前のデータに加算することによって得ている。画像データの 1 画素の大きさは縦横 80 μm である。

III. 測定装置の精度評価のための基礎的実験

本システムは微小変形量と実体量を同一の装置で、高い分解能と精度を維持しながら測定できることが原理的な特徴であるが、実際的に測定するうえでの精度を確かめるために以下の実験を行った。

1. 実体計測

1) 実験方法

本システムを用いて実体計測を行った際の測定精度を評価するために、既知の大きさの立体を測定した。測定対象物はマイクロメータ付きステージ上に固定した 2 枚の白色の亚克力板である(図 4)。この装置は一方の亚克力樹脂が CCD カメラの光軸方向に移動し、2 枚の間に一定の段差が生じるようになっている。亚克力板の移動量は 0, 1, 2, 5, 10 mm である。測定領域は $4.0 \times 4.0 \text{ mm}$ (50 $\times$ 50 個の測定点) である。それぞれの移動量について 3 回測定を行い、その値を平均した。

2) 結果

図 5 は 5 mm の移動に対する測定結果である。4.95 mm を中心に $\pm 0.1 \text{ mm}$ の範囲でデータが

図4 既知の移動量与えられる
測定対象物

図5 5 mmの移動に対する実体計測の結果

図6 既知の微小変形の計測の際の三次元透視図
a: 0 μm , b: 100 μm , c: 200 μm , d: 500 μm , e: 1,000 μm

分布した。他の移動量に関しても同様の分布が得られた。

2. 微小変形計測

1) 実験方法

本システムの微小変形計測の測定精度を評価す

るために、既知の微小変形の付与が可能な対象物を測定した。使用した対象物は実体計測に使用したのと同じである。本実験で付与した微小変形量は、0, 100, 200, 500, 1,000 μm である。コンピュータによる処理の際に縦横2画素ずつ合計

4画素を測定点とした。測定領域は 7.2×7.2 mm (30×30 個の測定点)である。それぞれの移動量について3回ずつ測定を行い、それぞれの測定点について平均値を求めた。

2) 結果

図6は900個の測定点から得られた微小変形の三次元透視図である。各図ともそれぞれの微小変形量を忠実に再現していることが確認できる。また図7は微小変形量を $200 \mu\text{m}$ としたときの変形部分の測定結果である。付与した微小変形量の $200 \mu\text{m}$ を中心に $\pm 10 \mu\text{m}$ の範囲にデータが分布した。他の微小変形量についても同様の結果が得られた。

以上より本システムでは測定が1 mmの範囲であれば、その変形量を $\pm 10 \mu\text{m}$ の範囲で測定が可能といえる。

3. 自由変形をする物体の計測(実体計測と微小変形計測の併用例)

1) 実験方法

欠損部顎堤粘膜の印象時の変形量は既知ではなく、また均一に変形するとは限らない。そのため自由変形をする対象物について、実体計測と微小

変形計測の両者を用いて測定し精度検定を行った。対象物は図8にあるように白色の亚克力板に直径40 mmのゴム製の球面を接着したものである。これは球面の裏側中央にワイヤーの一端が、そしてマイクロメータにワイヤーの他端が固定されている。マイクロメータがこのワイヤーを引くとゴム製の球面が変形するようになっている。今回の実験では、ワイヤーの引く量を0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mmと規定した。

2) 結果

図9は実体計測と微小変形計測より得られたデータをもとに描いた三次元透視図である。微小変形計測の三次元透視図についてみると、ワイヤーによって引かれた量に応じて三次元透視図の中央付近を最大とした凸状にみえる正の変形、つまりカメラと反対方向の変形をしていることがわかる。一方、変形前後の実体計測の結果をみると、ワイヤーによって引かれた量に応じて球面の中央付近を最大として凹状に変形を起こしていることがわかった。

図7 200 μm の微小変形計測の測定結果

図8 自由変形を起こすことが可能な測定対象物

図9 自由変形をする物体の測定結果
a：変形前の実体，b：変形後の実体，c：微小変形

表1 被験者

被験者	年齢	性別	欠損部位	印象採得部位
A	60	F	$\overline{67}$	$\overline{67}$
B	54	F	$\overline{7-5}$	$\overline{7-5}$
C	55	F	$\overline{7-5 4-7}$	$\overline{4-7}$
D	61	M	$\overline{7-5 67}$	$\overline{7-5}$

IV. 印象採得条件の違いが欠損部顎堤粘膜の印象面形態に及ぼす影響について

印象条件を変化させた場合の顎堤粘膜の形状について、各条件ごとの印象面形態を実体計測し、さらに各条件間のその相対的な違いを微小変形計測により検討した。

1. 方法

1) 被験者

被験者は、下顎臼歯部に歯牙欠損を有する義歯装着経験者で、顎口腔系になんら機能異常が認められない男性1名および女性3名の計4名(54～61歳、平均57.5歳)である(表1)。

2) 計測準備

(1) 作業用模型

それぞれの被験者にアルジネート印象材により下顎残存歯列および欠損部顎堤の印象採得を行った後、研究用模型を製作し、その模型上で機能印象用個人トレーを製作した。トレーは常温重合型トレー用レジン(GC社製オストロンII)を用いて製作したが、残存歯部にパラフィンワックス(GC社製BASE PLATE PARAFFIN WAX)1枚分のスペーサを置き、欠損部にはスペーサを置かなかった。この個人トレーを用いて被験者の口腔内で可動粘膜に相当する印象辺縁部分に対してモデリングコンパウンド(Kerr社製Impression Compound)により筋圧形成を行った後、ポリサルファイドラバー印象材(GC社製シュールフレックスFレギュラー)で印象採得した。この印象にただちに超硬石膏(GC社製ニューフジロック)を注入し、作業用模型を製作した。

(2) 口腔内装置

完成した作業用模型上で以下の口腔内装置を製作した。

(a) トレー挿入規定装置

図10は実験用トレーを口腔内の定位置に挿入するためのトレー挿入規定装置で、被験者の下顎

図10 トレー挿入規定装置
a: ガイドレール, b: 前歯被覆部

図11 粘膜面印象用トレー
a: 金属部, b: レジン部, bは可撤式になっており, aとねじで固定されている

前歯を被覆する形状とし, Co-Cr 合金 (三金工業社製サンコリウム) で製作した。この前歯被覆部分の上面は実験用トレーを支えるため, トレー挿入方向に垂直な平面とし, また挿入方向を規定するためにこの面に3本のガイドレールが植立されている。この装置を仮着用セメント (松風社製ハイボンドテンポラリーセメント硬性) で歯列に固定した。

(b) 粘膜面印象用トレー

図11は粘膜面印象用トレーで, レジン部と金属部で構成されている。

レジン部は作業用模型上の欠損部分に常温重合型トレー用レジン (GC社製オストロンII) を圧接して製作したが, 欠損部の粘膜の加圧条件を変え

るために形態の異なる3種類を製作した。つまり, 粘膜面と印象面との間に空隙がないもの, 空隙があるもの, そして床縁の短いものの3種類である。空隙があるものは, 作業用模型上に厚さ1.4mmのパラフィンワックス (GC社製) をスペーサとして置き空隙量を規定した。辺縁の短いものは, 空隙を設けずに辺縁の位置を3mm内側に設定した。

一方, 金属部はCo-Cr合金 (三金工業社製サンコリウム) で製作し, 実験用トレーが定位置に挿入できるように上記のトレー挿入規定装置と適合させるものである。レジン部と金属部の連結部分はコンポジットレジン (クラレ社製クリアフィルFIIニューボンド) で製作し, ねじにより強固に連結した。

(c) トレー保持装置

印象採得時の印象保持圧を規定するため, トレー保持装置を製作した。図12は口腔内にこれを装着した状態である。保持装置上部と下顎下縁を手指で挟みトレーを保持するような構造とした。トレー上部と接触する部分にはロードセル (ST-研究所製LM6-5) を設置し, 保持圧を導出した。

3) 測定方法

図12 トレー保持装置

(1) 印象材

本実験で使用した印象材はポリサルファイドラバー印象材のレギュラータイプとインジェクションタイプ(GC 社製シュールフレックス F)の2種類である。

(2) 印象採得方法

通法に従い印象材を45秒間練和し、30秒間で印象用トレーに注入した。口腔内挿入の際には印象用トレーを挿入規定装置のガイドレール上に置き、手指により可及的に一定の速度になるように挿入した。挿入圧接に要した時間は約3秒である。印象用トレーが口腔内で定位置に納まった後、保持装置と手指により犬歯部で保持圧が1 kgf となるようモニタリングしながらトレーを保持した。口腔内で10分間保持した後印象を撤去した。

(3) 形状計測

口腔内で採得された印象を清掃後、ステレオ型時空間微分三次元計測システムにより印象面を直接測定した。形状計測の際に測定範囲が一定になるようにジグ(図13)を製作し、印象用トレーを

図13 トレー固定用ジグ
a: 粘膜面印象用トレー, b: トレー固定部, c: 台座. bにaをねじで固定できるようになっている. cは図1の対象物の位置に固定される

これに固定した。測定範囲は印象用トレーの全範囲が可及的に含まれるように設定した。測定点の1単位は縦横0.8 mmの正方形とした。

本研究における形状計測の検討対象としては以下の3項目である。

1. 印象材のフローが一定でトレーに空隙がある場合とない場合
2. トレーの空隙の条件が一定で印象材のフローを変えた場合
3. 印象材のフローとトレーの空隙の条件が一定で、トレーの大きさを変えた場合

2. 測定結果

- 1) 印象材のフローが一定でトレーに空隙がある場合とない場合の印象面形態

図14は被験者Dの実体計測および微小変形計測の測定結果に基づいて描いた三次元透視図である。また図15は全被験者の測定領域中央部の頬舌の断面図であり、トレーに空隙がある場合とない場合の形態の差異を示す。

レギュラータイプの印象材の場合、全被験者において空隙のあるものより空隙のないもののほうが全体的に粘膜が変位する結果となった。部位別にみると、実体の断面図(図15)からわかるように頬側の粘膜では辺縁付近のほうが顎堤頂粘膜より変位の差が大きく、どの被験者も顎堤の形態が凸から凹に変化する点すなわち変曲点付近から変位が急に大きくなる傾向がみられた。その量は顎堤頂付近から頬側の変曲点付近までは約200~300 μm の範囲であったが、変曲点付近よりトレーの辺縁に近づくとき最大で800~1,000 μm の範囲になった。舌側の粘膜は、空隙のあるものより空隙のないもののほうが変位が大きく現れる傾向があったが、その量や部位について特徴的な傾向はみられなかった。

インジェクションタイプの印象材の場合、顎堤頂付近から頬側の変曲点までの変位量はレギュラータイプと同様の傾向であったが、変曲点からトレー辺縁までの範囲では、レギュラータイプよりも大きく変位していた。舌側については逆にレギュラータイプを用いたときのほうが大きく変位

図 14 トレーの空隙のある場合とない場合を比較したときの三次元透視図 (被験者 D)

a: 空隙のあるトレーの印象面, b: 空隙のないトレーの印象面, c: レギュラータイプのときの微小変形, d: インジェクションタイプのときの微小変形

していた。

2) トレーの空隙の条件が一定で印象材のフローを変えた場合の印象面形態

図 16 は被験者 A の実体計測および微小変形計測の測定結果に基づいて描いた三次元透視図である。また図 17 は全被験者の測定領域中央部の頬舌的断面図であり、レギュラータイプを用いたときとインジェクションタイプを用いたときの形態の差異を示す。

空隙のないトレーを用いた場合には、頬側では全被験者とも辺縁付近においてレギュラータイプのほうがインジェクションタイプより約 300~500 μm の範囲で変位が大きく現れた。顎堤頂部では被験者 A, B, C でレギュラータイプよりインジェクションタイプのほうが変位が大きく現

れ、被験者 D ではインジェクションタイプよりレギュラータイプのほうが変位が大きく現れたが、その量は 100 μm 以下であった。舌側では、辺縁付近でインジェクションタイプよりレギュラータイプのほうが変位が大きく現れる傾向があったが、その量や部位には特徴的な傾向はみられなかった。

印象用トレーに空隙がある場合には、全被験者で頬側では辺縁付近で最も大きく変位し、特にレギュラータイプのほうが大きく変位していた。その量は被験者 A では約 660 μm 、被験者 B, C では約 250 μm 、被験者 D では約 980 μm となった。顎堤頂部付近では被験者 B, C, D でレギュラータイプよりインジェクションタイプのほうが変位が大きく現れ、その量は 100 μm 前後だった。また舌側

図 15 a 空隙がある場合とない場合を比較したときの頬舌的断面
 使用した印象材はレギュラータイプ、実線：空隙あり、破線：空隙なし

図 15 b 空隙がある場合とない場合を比較したときの頬舌的断面
 使用した印象材はインジェクションタイプ、実線：空隙あり、破線：空隙なし

図16 印象材のフローを変化させたときの三次元透視図 (被験者 A)
 a: レギュラータイプの場合の印象面, b: インジェクションタイプの場合の印象面, c: 空隙のあるトレーの場合の微小変形, d: 空隙のないトレーの場合の微小変形

では辺縁付近でレギュラータイプのほうがインジェクションタイプより粘膜は大きく変位していた。また被験者 B, C については頬側辺縁付近の変位量より舌側辺縁付近の変位量のほうが大きかった。

3) 印象材のフローとトレーの空隙の条件が一定でトレーの大きさを変化させた場合の印象面形態

図18は被験者 C の実体計測および微小変形計測の測定結果に基づいて描いた三次元透視図である。また図19は全被験者の測定領域中央部の頬舌的断面図であり、辺縁の長いトレーを用いたときと短いトレーを用いたときの印象面の形態の差異を示す。

レギュラータイプを用いたときには被験者 A, B, C では辺縁の短いトレーより辺縁の長いトレーを用いた場合のほうが粘膜は全体的に変位し

ており、その傾向は顎堤頂部付近を最小に辺縁部に向かって大きくなった。顎堤頂部付近から頬側斜面では辺縁の長いトレーのほうが100 μm 程度大きく変位しており、頬側辺縁では辺縁の長いトレーのほうが1,000 μm 程度と大きく変位した。被験者 D については、顎堤頂部付近で辺縁の短いトレーのほうが長いトレーを用いた場合より300 μm 前後粘膜は大きく変位していたが、辺縁付近では辺縁の長いトレーのほうが短いトレーの場合より約1,000 μm 程度大きく変位していた。

インジェクションタイプを用いたときには、被験者 A, B, D で顎堤頂部付近の狭い範囲で辺縁の短いトレーのほうが辺縁の長いトレーの場合よりも大きく変位しているものの、それ以外の部位では辺縁の長いトレーの場合のほうが短いトレーより1,000 μm 前後大きく変位していた。被験者 C では辺縁の短いトレーより辺縁の長いトレーを用

図 17 a 印象材のフローを変化させたときの頬舌の断面
使用したトレーは空隙のないもの。実線：レギュラータイプ，破線：インジェクションタイプ

図 17 b 印象材のフローを変化させたときの頬舌の断面図
使用したトレーは空隙のあるもの。実線：レギュラータイプ，破線：インジェクションタイプ

図18 トレーの大きさを変化させたときの三次元透視図(被験者C)
a: 大きいトレーの場合の印象面, b: 小さいトレーの場合の印象面, c: レギュラータイプの場合の微小変形, d: インジェクションタイプの場合の微小変形

いたほうが全体的に変位が大きく、その傾向は顎堤頂部付近を最小に辺縁部に向かって大きく変位していた。辺縁部では、辺縁の長いトレーのほうが短いトレーを用いた場合より $1,300 \mu\text{m}$ 程度大きく変位していた。

全被験者にみられた頬側辺縁付近における辺縁の長いトレーによる粘膜の変位については、実体の断面からわかるように顎堤の形状の変曲点を境に顎堤頂側より辺縁側の方が変化の程度が大きかった。

V. 考 察

遊離端義歯に代表される歯根膜粘膜負担性の部分床義歯を製作する際には、荷重時における歯と粘膜の変位量の違いを考慮に入れなければならない。歯と粘膜の両者ともに解剖学的形態を再現し

た印象から製作された義歯では、支台歯への負担が過剰となり支台歯への悪影響が考えられる。そこで粘膜面の印象に対して義歯の機能状態を再現することにより支台歯への過剰な負担を回避し、義歯として十分な機能を発揮できるようにすることが重要である。つまり粘膜部に対しては機能状態の印象、すなわち機能印象を行わなければならない。従来より機能印象の有用性については種々検討されている^{3,8-11,19-22}。Watt¹⁹⁾は下顎遊離端義歯を1週間装着した後の顎堤の形態は、加圧印象より得られた顎堤粘膜の形態に近似していたと報告している。Leupold^{20,21)}は既製トレーによるアルジネート印象とアルタードキャスト法により製作した義歯の垂直的変位量を測定して、後者の方法で製作した義歯の方が沈下量が少なかったと報告している。また、Matsumoto³⁾は下顎臼歯欠損の

図 19 a トレーの大きさを変えたときの頬舌的断面
使用した印象材はレギュラータイプ。実線：大きいトレー，破線：小さいトレー

図 19 b トレーの大きさを変えたときの頬舌的断面
使用した印象材はインジェクションタイプ。実線：大きいトレー，破線：小さいトレー

シミュレーションモデル上でレジン製個人トレーを用いたラバー印象を行った際、顎堤粘膜の変形量は義歯の沈下量とほぼ近似していたと報告している。さらに古宇田⁸⁾は、加圧印象と無圧印象が義歯の適合性に対する影響を検討し、加圧印象による義歯のほうが適合性がよかったと述べている。

このように、部分床義歯を製作するうえで機能印象法の重要性が強調されているが、それに伴う粘膜の動態については未だ十分に解明されているとはいえない。これは、印象採得の際の印象材の性状、トレーと粘膜との間隔、トレーの圧接速度、トレーの保持圧などが粘膜の変形に複雑に関係するためと考えられる。本研究では、新たに開発したステレオ型時空間微分三次元計測システムを用い、弾性印象材の印象面を非接触方式で直接測定することにより、印象採得時の粘膜面の動態を明らかにすることを目的として実験を行った。

1. 研究方法

1) ステレオ型時空間微分三次元計測システム

(1) 本システムの特徴

三次元形状の測定法は大きく接触計測と非接触計測に大別できる。従来より印象面の測定にはその簡便さから接触計測法が多く用いられてきたが、直接測定では印象面が変形する恐れがあり、また石膏模型に置き換えたうえでの測定では石膏硬化時の寸法変化や測定針の接触時の滑りなどによって正確な形状計測が容易ではなかった。耿ら^{5,12)}は非接触計測法としての三次元微小変形測定装置を開発し、これによる印象面の測定を行った。この装置は印象条件の違いによる印象面の差異を測定するうえで、他のホログラム干渉¹⁵⁾、モアレ縞¹⁴⁾やスペックル¹⁶⁾などを用いた非接触計測法に劣らない高い測定精度を維持しつつ、深くえぐれた面を安定に測定することができ、さらに対象物の色による影響が少ないのが特徴である。

本研究で用いたシステムは、この三次元微小変形測定装置の利点を活かし、さらに結果の分析能力を高めるために微小変形形状と対象物の絶対形状とを測定できるよう改良したものである。具体的には、従来のシステムにカメラを一台追加し、

両眼視法により三次元形状を取得するようにした。一般に両眼視法では左右一対の画像データの対応点を検出するのが困難であるといわれている¹³⁾が、本システムでは、対象物に対してランダムな縞模様を投影移動させたときの対象物上の経時的な光強度の変化を測定し、その得られた光強度の経時的波形が左右で一致する点を検索することで左右の画像の対応点を検出している。このときシステムの測定精度は、固定された左右のカメラと対象物との位置関係以外に、プロジェクタの移動等の精度に直接影響されない。

本システムは対象物の絶対量と比較対象物の相対誤差量とを測定する装置である。それぞれの測定に際しては、投影する縞パターンを変更する以外は同一の装置を用いるために、カメラと対象物の位置関係を変更することなく実体量と微小変形量を高い精度で測定できる。さらに非常に短時間での測定が可能となったため、採得した印象面を直接測定するに当たっての印象材の経時的な変形はあまり問題にする必要はなくなった。

(2) 測定精度の検討

計測システムの測定精度を評価するための基礎的実験を行ったが、実体計測については、カメラの光軸方向の対象物の変化に対して ± 0.1 mmの範囲で測定結果が収束し、形状も正確に再現され、これは顎堤粘膜の形状を再現するには十分は精度と判断された。

また微小変形計測については、対象物に微小変形を加えたとき、どの測定結果においても ± 10 μ mの測定精度が得られることがわかった。これらの結果は、耿らの三次元微小変形計測装置にCCDカメラの補正および縞パターンの改良を加えたためと考えられる。

さらに顎堤粘膜のように予測し難い自由変形を起こす物体の測定の場合の精度検定も行ったが、満足な結果が得られた。つまり、ゴム球の変形について微小変形計測の結果をもとに描いた三次元透視図から変形前後の相対的な変形量はある程度わかるものの、変形後に対象物がどのような形状になったのかを正確に判断するのは困難であっ

た。それに対して、微小変形計測と実体計測の測定結果を併せた変形前後の三次元透視図を描くことにより、ゴム球の中央付近がくぼむように変形していることが容易に理解できるようになった。つまり、本システムで新たに加えた実体計測により微小変形計測のみの欠点が補われ、ミクロ的にもマクロ的にも変形の様相が正確に捉えられるようになった。

2) 被験者

被験者はいずれも義歯装着者で、現在使用している義歯は日常生活をする上で特に問題はなく、欠損部顎堤は極度の吸収がなくほぼ標準的な形態を呈し、粘膜面には義歯による著しい圧痕は認められなかった。

3) 粘膜面印象用トレー

本実験では、欠損部顎堤の印象面形態のみを比較するため、印象用トレーは欠損部顎堤のみを印象採得するものとした。このトレーは顎堤部に適合するレジン部が可撤性で、ねじにより3点で金属部に固定される。トレーは、辺縁の位置を臨床で用いられる筋圧形成後の個人トレーと同様にする必要があるので、あらかじめ個人トレーを用いてポリサルファイドラバー印象材により機能印象を行った模型より製作した。加圧印象を想定したものについては、トレーには空隙を設けなかった。これに対するコントロールでは空隙の量を1.4 mmとし、粘膜に印象採得時の圧があまりかからない状態を設定した。また、辺縁の筋圧形成の有用性を検討するために辺縁の短いトレーも用意した。松元⁴⁾は、コンパウンドの変形や破折を考慮すると筋圧形成の必要な部分のコンパウンドの量は3 mm程度でよいと述べていることから、辺縁の短いトレーは筋圧形成後の加圧印象を想定したトレーより辺縁を3 mm短く設定した。

4) 印象用トレーの圧接条件

実際の臨床では、印象採得の際にトレーを口腔内で所定の位置まで圧接し、そのままトレーを保持する必要がある。星野⁷⁾は口腔内でのトレーの圧接速度を測定し、平均118.0 mm/minであったと述べている。また松元²⁾は口腔内でのトレーの

保持圧を測定し、約1 kgfであったと述べている。そこで本実験では、印象用トレーの挿入方向規定用のガイドレールの長さが約7 mmであることから、トレーの挿入時間を約3秒に規定し、速度も可及的に一定になるように保ちながら手指にて挿入した。挿入後は保持装置を用いて、印象採得を行う欠損側の犬歯上で手指による圧が1 kgfとなるようモニタリングしながら保持した。

5) 形状計測

微小変形計測では条件の異なる2つのトレーの印象面の相対誤差を計測する。そのためにはカメラの前では、比較すべき2種類の印象面を口腔内の位置関係に正確に再現して固定する必要がある。そこで本研究では形状計測用のジグを製作した。このジグには印象用トレーの金属部を直接固定することができ、これによりCCDカメラと金属部の位置関係が固定される。そのため形状計測の際の操作は印象用トレーのレジン部を金属部と着脱するだけとなり、CCDカメラに対するトレーの位置再現精度もレジン部と金属部と間の着脱精度のみで決まることとなる。ジグの位置再現精度は、平均0.988 μm で標準偏差は1.309 μm であった。これは特殊な方法を用いず比較的簡便な方法で製作したにも関わらず、従来の三次元的位置再現法^{5,26)}と比べて高い再現精度となった。

形状計測で得られた結果から印象面全体の加圧状況を把握するために、実体量と微小変形量について三次元透視図を作成した。また、これらのデータをもとに頬舌的な断面図も作成したが、断面の部位については、測定領域のうちで頬棚の最も幅がある部位、すなわち測定領域の中央部とした。

2. 研究結果

1) 印象材のフローが一定でトレーの空隙がある場合とない場合の印象面形態

印象用トレーの空隙の量を変化させた場合の顎堤の形状を検討したものに、平井⁹⁾、田中¹⁰⁾、Matsumoto³⁾、耿⁵⁾などの報告がある。平井は下顎片側臼歯部欠損の顎堤粘膜形状を測定し、顎堤頂部は頬舌側部に比較して変位量が小さかったと述べている。これに対して田中も同様の顎堤粘膜の

形状を測定しているが、顎堤頂部は頬舌側部に比較して変位量が大きかったと述べている。Matsumoto はシミュレーションモデル上で個人トレーを用いた実験で、顎堤頂部での変形が最も大きく 0.31 mm であったと述べている。また耿は頬側部の変位量が最大であったと述べている。

本研究では、空隙があるトレーより空隙のないトレーを用いた場合のほうが粘膜が大きく変位したが、部位別には顎堤頂付近よりも頬、舌側とも辺縁部のほうが変位の程度が強く、特に辺縁に近づくに従って変位量が大きくなっていった。これは、田中の報告と一致していた。また舌側については、空隙のあるトレーより空隙のないトレーを用いたほうが大きく変位する傾向はあったものの、量や部位による特徴的な傾向がみられなかった。これは印象採得時の被験者の嚙下や舌の移動に伴い、トレーの下にある舌側の顎堤粘膜がトレー印象面を圧迫したことによるものと考えられる。

レギュラータイプおよびインジェクションタイプについて、トレーの空隙の有無による印象面への影響を比較すると、辺縁付近ではレギュラータイプよりインジェクションタイプを用いたときのほうが空隙による影響を受けやすかった。これは、辺縁付近ではレギュラータイプよりインジェクションタイプのほうが印象材による粘膜の変位が少なく、印象面形態はトレーの内面の形状に影響を受けているためと考えられる。

2) トレーの空隙の条件が一定で印象材のフローを変化させた場合の印象面形態

印象材のフローを変化させたときの印象面形態は、トレーの空隙の有無に関係なく、頬側辺縁でレギュラータイプのほうが大きく変位していた。これはフローの悪い印象材のほうがフローのよい印象材よりも粘膜の変位量が大きくなり、トレーの条件が同じ場合には変位量は印象材のフローに依存することが考えられる。レギュラータイプの場合とインジェクションタイプの場合との粘膜の変位量の差が空隙のないトレーの場合には 300~500 μm の間に収束したのに対し、空隙のあるトレーでは 250~980 μm と分布幅が大きく

なったのは、空隙のあるトレーのほうが印象材の絶対的な厚みが大きく、トレー内での印象材の流れが空隙のないトレーよりも複雑になったと考えられる。そのために被験者の顎堤の形態やトレーをとりまく筋などの影響によって被験者間で変位量に大きな開きが生じたと考えられる。顎堤頂付近でインジェクションタイプがレギュラータイプより変位しているのは、インジェクションタイプの流出が頬側辺縁において粘膜により妨げられた際に、トレー内で対流したために顎堤頂付近で大きく変位する傾向が現れたと考えられる。

平井⁹⁾は強密接様式のトレーと弱密接様式のトレーにより、異なる印象材を用いて顎堤粘膜の形状を計測しており、弱密接様式のトレーの場合顎堤粘膜の加圧量は印象材の性状に支配されているが、強密接様式のトレーでは印象材の性状による変位量の差はほとんどなかったと述べている。本研究では、空隙のないトレーを用いたとき、すなわち平井の研究での強密接様式のトレーの場合、顎堤頂付近での粘膜の変位量は 100 μm 以下と印象材の性状による影響は少ないと考えられるものの、辺縁付近では印象材の性状による影響は大きくフローの悪い印象材のほうが大きく変位する傾向があった。空隙のあるトレーでは、平井が述べているように粘膜の変位の状態は単純に印象材の性状に支配されてはいなかった。これは、平井が用いている印象用トレーは既製トレーを用いているのに対し、本研究では筋圧形成したトレーに空隙を与えたものであり、粘膜を変位させる要素として印象材だけでなくトレーの内面の形態も関与していることにより結果に差異が生じたと考えられる。

3) 印象材のフローとトレーのスペーサの量が一定でトレーの大きさを变化させたときの印象面形態

粘膜負担の大きい部分床義歯では、義歯床の咬合圧負担能力の増大を図り義歯の安定と支持を獲得するために、義歯床を可及的に大きく設定することが必要である。この状態を印象面に印記するためには、印象採得時にトレー辺縁を筋圧形成を

し、辺縁部での印象材の流出を防止することで床下粘膜の加圧印象が得られるといわれている^{1,23,24)}。

印象用トレーの辺縁の長さを変化させたときの印象面形態を検討してみると、レギュラータイプを用いた場合、4人中3人で辺縁の短いトレーより辺縁の長いトレーの方が大きく変位する傾向が認められ、顎堤頂付近を最小に辺縁部で最大になるように変位していた。また顎堤頂付近で辺縁の短いトレーのほうが辺縁の長いトレーより変位する傾向にある場合でも辺縁付近では長いトレーのほうが変位する傾向にあった。このように、辺縁付近での変位の傾向については、特に頬舌の断面の結果からわかるようにトレーの辺縁の位置の相違が印象面形態に直接影響しており、これは印象材の流れによる変位というよりもむしろトレー辺縁の形態そのものに変位量の差が依存していると考えられる。

インジェクションタイプを用いた場合、辺縁付近では辺縁の長いトレーのほうが短いトレーより大きく変位する傾向が認められた。顎堤頂付近では狭い範囲で4人中3人が辺縁の短いトレーのほうが長いトレーより大きく変位する傾向があったが、それ以外の部位では辺縁の長いトレーのほうが短いトレーより大きく変位する傾向にあった。辺縁での変位についてはレギュラータイプの印象材を用いたときと同様に、印象材による変位量の差というより印象用トレーの辺縁の形態に影響されていると考えられる。

以上より、印象条件の相違により欠損部顎堤粘膜は種々の変位を示すことが確認されたが、印象面形態を決定する因子にはトレーの圧接速度、トレーの加圧部位、加圧方向など他にも多く考えられ、これらとのかかわり合いについてもさらなる検討が必要であると考えられる。

VII. 結 論

部分床義歯の印象採得条件の相違が、欠損部顎堤粘膜の形態に及ぼす影響を検討する目的で、新たに非接触方式によるステレオ型時空間微分三次

元計測システムを開発した。下顎の Kennedy 1 級あるいは 2 級の欠損様式を有する被験者について、印象用トレーの空隙量、使用する印象材のフローならびにトレーの大きさの違いをパラメータとして印象採得を行い、その印象面について本システムで形状計測を行った結果、以下の結論を得た。

1. 計測システムの精度評価

1) 実体計測については、既知の大きさを有する対象物を測定した結果、10 mm 程度の大きさの物体に対しては、 ± 0.1 mm の誤差で測定可能であることがわかった。これは粘膜印象面の形状を測定するうえでは十分な精度であると考えられる。

2) 微小変形計測については、既知の微小変形量を与えた測定の結果、変形量が 1 mm 程度であれば $\pm 10 \mu\text{m}$ の誤差で測定可能であった。これは顎堤の変形量を計測するには十分な精度であると考えられる。

3) 実体計測と微小変形計測を併用した場合、予測のつかない変形に対しても変形の様相を正確に把握することが可能であることがわかった。

2. 印象採得条件の違いが欠損部顎堤粘膜の印象面形態に及ぼす影響について

1) 空隙のあるトレーより空隙のないトレーのほうが粘膜の変位が大きくなる傾向にあり、これは顎堤頂を最小に頬側辺縁付近で最大となった。舌側では粘膜が変位したが一定の傾向はみられなかった。

2) 印象材のフローの違いについては、頬側辺縁付近と舌側辺縁付近ではレギュラータイプのほうがインジェクションタイプより大きく変位した。顎堤頂付近ではインジェクションタイプのほうがレギュラータイプより変位していることが多かった。

3) 辺縁の長い印象トレーを用いたほうが短いトレーの場合と比較して辺縁付近がより大きく変位する傾向がみられた。

謝 辞

稿を終えるに臨み、ご懇篤なるご指導とご校閲を賜りました藍 稔教授に謹んで感謝の意を表します。さらに、終始懇切なるご指導とご教示をいただきました歯科補綴学第一講座、岡部良博講師と山下秀一郎助手に心からお礼申し上げます。また、終始格別のご指導、ご教授をいただきました東京大学工学部計測工学科、安藤 繁助教授と東京農工大学工学部電子情報工学科、篠田裕之講師に心から感謝いたします。ならびに、本研究に際し、ご援助、ご協力いただきました歯科補綴学第一講座の諸先生方、ならびに被験者の方々に心よりお礼申し上げます。

本研究の要旨の一部は、平成6年11月、第92回日本補綴歯科学会学術大会において発表した。

文 献

- 1) 藍 稔：小部分床義歯学。東京、1986、学建書院、132-135.
- 2) 松元 誠：遊離端義歯。東京、1980、医歯薬出版、151-164.
- 3) Matsumoto, M.: An experimental investigation for analyzing the influence of impression procedures in clinical technique. The Bull of Tokyo Medical Dent Univ. 17: 345-356, 1970.
- 4) 松元 誠：部分床義歯の印象法。DE 22: 1-11, 1972.
- 5) 耿 啓還：部分床義歯における印象採得条件の相違が欠損部顎堤粘膜の微小形態変化に及ぼす影響について。口病誌 60: 35-53, 1993.
- 6) 関根 弘、田島篤治、海洲馨一、溝上隆男、岡田京子、平井泰征、前田佳英：有床義歯のための印象方法に関する基礎的ならびに臨床的研究 第3報 粘弾性を有する被印象体の印象時における変位状態について。歯科学報 71: 2167-2172.
- 7) 星野 亨：印象採得法の基礎的検討 第2報 トレーのスペーサとベントについて。補綴誌 26: 322-340, 1984.
- 8) 古宇田 昌：印象法が遊離端義歯の適合性に及ぼす影響について。補綴誌 25: 142-153, 1981.
- 9) 平井泰征：有床義歯における印象時の粘膜の被圧状態が印象面形態に及ぼす影響に関する実験的研究。歯科学報 71: 1835-1869, 1971.
- 10) 田中 淳：印象圧の相違が顎粘膜形態および義歯の適合性に及ぼす影響に関する研究。補綴誌 26: 455-471, 1982.
- 11) 松津雅道：印象採得法の相違が顎粘膜形態および義歯の適合性に及ぼす影響に関する研究 下顎片側遊離端欠損症例について。補綴誌 28: 341-357, 1984.
- 12) 篠田裕之、耿 啓還、山下秀一郎、藍 稔、安藤 繁：口腔粘膜の変形測定とその微分型立体計測システム。計測自動制御学会論文集 29: 963-972, 1993.
- 13) 尾上守夫：画像処理ハンドブック。東京、1987、昭晃堂、392-407.
- 14) Meadows, D. M.: Generation of surface contours by moire patterns. Appl. Opt. 9: 942-947, 1970.
- 15) Haines, K. and Hildebrand, B. P.: Counter generation by wavefront reconstruction. Phys. Letters. 19: 10-11, 1965.
- 16) Dainty, J. C.: Laser speckle and related phenomena. Topics in Applied Physics 9: 203-253, 1984.
- 17) 安藤 繁：微分両眼立体視法による多層立体知覚の基礎。計測自動制御学会論文集 24: 973-979, 1988.
- 18) Holmes, J. B.: Influence of impression procedures and occlusal loading on partial denture movement. J. Prosthet. Dent. 15: 474-481, 1965.
- 19) Watt, D. M., Macgregor, A. R., Geddes, M., Cockbun, A. and Boyd, J. L.: A preliminary investigation of the support of partial dentures and its relationship to vertical loads. Dental Practitioner 9: 2-15, 1958.
- 20) Leupold, R. J.: A comparative study of impression procedures for distal extension removable partial denture. J. Prosthet. Dent. 16: 708-720, 1966.
- 21) Leupold, R. J., Flinton, R. J. and Pfeifer, D. L.: Comparison of vertical movement occurring during loading distal-extension removable partial denture bases made by three impression techniques. J. Prosthet. Dent. 68: 290-293, 1992.
- 22) Vahidi, F.: Vertical displacement of distal-extension ridges by different impression techniques. J. Prosthet. Dent. 40: 374-377, 1978.
- 23) 大沢一博：下顎有床義歯における臼歯部舌側床縁の条件が義歯の維持に及ぼす影響に関する研究。歯科学報 74: 1511-1553, 1974.
- 24) 大澤 勤：下顎義歯における頬側床縁の設定基準に関する実験的研究。歯科学報 79: 2035-2083, 1979.
- 25) 星野 亨、潤米宏仁、久保田幸生、泉田一蔵、田島直孝、山田博明、山本克之、祇園白信仁、森谷良彦：印象採得法の基礎的検討 第1報 シミュレーションモデルと三次元的位置再現装置について。補綴誌 27: 759-766, 1983.