原著論文

三次元測定による全顎歯列の印象および模型の寸法精度

—ラバー系印象材の種類とトレー形態の影響—

石田 和弘

Accuracy of Complete Dental Arch Impressions and Stone Casts Using a Three-Dimensional Measurement System

— Effect on Accuracy of Rubber Impression Materials and Trays —

Kazuhiro Ishida

Abstract : The purpose of this study was to investigate and compare the accuracy of complete dental arch impressions and stone casts made from two kinds of impression materials (addition type silicone and polysulfide rubber) and trays (custom tray and modified custom tray).

In addition, the effect of quantity of gypsum was examined. Impressions were made from a metallic model of a simplified maxillary dentition. Impressions and stone casts were measured respectively using the three-dimensional measuring microscope.

The results were as follows :

1. Distortion of impressions was so small that the reproducibility of impressions was superior three-dimensionally.
2. These kinds of impressions and trays did not influence the accuracy of impressions but had an effect on the accuracy of the stone casts.
3. Generally, the setting expansion of gypsum in the impression occurred in all directions.
4. Arch widths and lengths on the stone casts tended to increase in number.
5. Stone casts made from an addition/type silicone impression material and a custom tray were the most accurate because the combination of the impression material and tray effectively suppressed the setting expansion of gypsum.
6. By controlling the quantity of gypsum, the accuracy of stone casts could be improved.

Key words : three-dimensional measurement, complete dental arch, accuracy of impression and stone cast

I. 緒 言

歯列模型は、作業用模型、対合歯列模型、診断用模型など多くの目的で使用され、補綴臨床においてはとりわけ重要な意味を持っている。

これまで、寸法精度の優れた模型を製作するために、印象材、模型材、歯列形態に関連するさまざまな要因についてコンパレーター、万能投影機などを用いて検討が行われてきた¹⁻²²⁾。近年、三次元座標測定機など測定機器の発達に伴い、模型の変形をより詳細にとらえるため三次元的な検討が行われている。

しかしながら、三次元座標測定機によるこれまでの歯列模型の寸法精度に関する研究⁵⁻¹¹⁾では、模型の計測のみであり、印象そのものの寸法精度^{14,23)}を詳細に検討したものはみあたらない。したがって、歯列模型の変形に対して印象の変形と模型材の膨縮による変形とが混在し、模型の変形に対する原因が明確に分析されていない。加えて、全顎歯列模型の寸法精度を三次元座標測定した研究でも、原型の形態がアンダーカットを有した天然歯列に近似したもの^{10,11)}は少ない。

この点、本研究に用いた全顎歯列原型¹⁰⁾は、歯牙にアンダーカットを有し天然歯列に類似した形態であり、さらに本三次元座標測定システム¹⁰⁾は、非接触式三次元座標測定のため、接触による印象の変形、模型の摩耗がなく各種要因の影響を受けて生じる原型-印象-模型の各段階における三次元的な変化を、正確に計測することが可能である。

そこで本研究は、精密印象として用いられているラバー系印象材の種類とトレー形態の組合せが、全顎歯列の印象および模型の寸法精度に及ぼす影響を明らかにすることを目的として実験を行い、あわせて模型材の量についても検討を加えた。

II. 材料および研究方法

咬合面上に標点を付与した金属製全顎歯列原型を用い、付加型シリコン・ラバー印象材とポリサルファイド・ラバー印象材、および個人トレーと試作トレーとの組合せについて、印象材、印象法、石膏注入量が歯列印象および歯列模型の寸法精度に及ぼす影響を三次元的に検討した。

1. 材 料

ラバー系印象材および模型材は、臨床において使用頻度が高く理工学的性質に優れた材料を使用した。

1) 印象材

実験に使用した印象材は、付加型シリコン・ラバー印象材のプレジデント・レギュラー (Coltène 社製, Batch No. 160986 07 2198) とポリサルファイド・ラバー印象材のシュールフレックス F・レギュラー (G-C 社製, Batch No. 261261) である。

2) 模型材

実験に使用した模型材は、超硬石膏のフジロック (G-C 社製, Batch No. 251161) である。

2. 実験器具および装置

1) 金属原型

金属製全顎歯列原型¹⁰⁾は、上顎天然歯列を単純化した形態で、歯列部が SUS 303 ステンレス製、台座部が炭素鋼製である (Fig. 1)。歯冠部には、前歯部唇側と臼歯部頬舌側の最大豊隆部 (歯頸側 1/3) 以下に、1mm のアンダーカットが付与してある。

歯列弓外の同一基準座標で原型と歯列模型の測定を可能にするため、台座部とトレーの位置関係を変化させることなく、歯列部のみを台座部から下方へ取り外すことができ、下方から印象内へ石膏を注入できるようになっている。台座には 3 本のトレー誘導棒があり、誘導棒のガイドによりトレーを一定位置に挿入でき、また誘導棒のストッパーにより印象材の厚みは約 3mm に規定される。

2) 標点および基準座標設定用標点

歯列原型咬合面上には、左側中切歯と左右側犬歯の切

Fig. 1 Standard reference model (Divided into three parts)

A : Dentition

B : Base with vertical rods and stops

C : Plate for fixing the stone cast

Fig. 2 Schematic representation of measuring points, standard points (A, B, C) and standard axes (X', Y', Z')

Fig. 3 Tray fixed to the reference model
(Top: Custom tray Bottom: Modified custom tray)

縁, 小臼歯・大臼歯部の各歯牙頬舌 2 カ所に標点があり, 台座上には 3 カ所 (A, B, C と表記する) の基準座標設定用標点を付与した (Fig. 2)。標点は, すべて硬度測定用ピッカース針を用い, 15 kg 荷重で刻印した。

3) トレー

印象採得に使用したトレーは厚さ 2~3 mm, 印象材を保持するため約 3 mm 間隔に直径 3 mm 程度の円形保持

孔を付与した真鍮製で, 歯列後端を含め歯冠部全体を被覆する通常の個人トレーと, トレー辺縁が咬合面より 3 mm 下の位置にあり, 個人トレーより辺縁の長さが 6 mm 短く歯牙の頬舌側アンダーカットを被覆しない形態の試作トレー (以後, 咬合面トレーと呼ぶ) の 2 種類である。

トレーの変形を防ぐため, 厚さ 10 mm のアルミ製フレームをトレー上面に連結固定し, 台座上の誘導棒に対応する 3 カ所の誘導孔を設けた (Fig. 3)。

3. 研究方法

1) 印象法

印象材の取り扱いにはメーカーの指示書に従い, 印象材の混合比はすべて重量比に換算し, 上皿電子天秤 (長計量器製作所社製 PD₂-300 W 型, 精度 1/100 g) により計量して用いた。印象材は練和紙上で 45 秒間スパチュラで練和したのち, 原型各標点部に手指で印象材を塗りつけ, その上から印象材を盛ったトレーをトレー誘導棒にそって所定の位置まで手圧で圧接した。トレーの保持孔より溢出した印象材をトレーに圧接後, ただちにトレー誘導棒のストッパーの位置でトレーを固定させるため 3 カ所ネジ止めた。

印象の撤去は練和開始より, プレジデントで 15 分後, シュールフレックスで 25 分後とした^{24, 25)}。

印象の撤去方法, すなわち原型歯列部の台座からの撤去方法は, 専用固定治具に原型を固定後, 万能引張圧縮試験機 (ミネベア社製 TCM 100 型) を用いて, 咬合面に垂直方向にクロスヘッドスピード 200 mm/min で行った。

2) 歯列模型の製作

印象撤去後 10 分以内に, 超硬石膏 (フジロック) をメーカー指示の混水比 $W/P=0.2$ で 15 秒間手練和したのち, 30 秒間真空練和し台座部に触れないように印象の歯冠部および歯槽部のみに注入した¹⁰⁾。咬合面トレーでは, 縮合型シリコーン・ラバー印象材のパテタイプで製作したフレームでボクシングしたのち, 石膏を注入した。ただちに模型固定板を用いてほぼ等間隔に設けた 5 カ所のネジで歯列模型を台座部に連結固定し, 相対湿度 100% の容器中に 1 時間放置後, 印象を撤去した。歯列模型の計測は, 24 時間室温中に放置したのちに行った²⁾。

歯列印象および歯列模型は, 印象材とトレーの組合せについて各 3 個ずつ, 計 24 個製作した。

以上, 印象採得および歯列模型の製作は, 室温 $23.0 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$, 相対湿度 $50 \pm 10\%$ の条件下で行った。

Fig. 4 Distances measured in arch length and width

Table 1 Two-way analysis of variance. Factors and Levels

Levels	Factors	
	A : Impression Material	B : Tray
1	PRESIDENT	Custom tray
2	SURFLEX F	Modified custom tray

3) 計測方法および分析項目

(1) 計測方法

原型・歯列印象・歯列模型の計測は、三次元座標測定機（ニコン社製工場顕微鏡 20 型の改良型、最小読み取り 1/1,000 mm）を用い、標点を反射照明の斜光照明下、明視野で 200 倍に拡大し非接触式で行った。

原型および歯列模型標点の計測は、各試料ごとに 3 回行い、その平均値を計測値とした。歯列印象の計測は、経時的寸法変化²⁶⁾の影響を避けるため各試料 1 回とした。

(2) 分析項目

歯列印象および歯列模型の変形を検討するため、計測値に対し適宜座標変換を行い、以下の項目について分析を行った。

① 基準座標による歯列模型の変形

分析のため台座上の 3 点 (A, B, C) で決定される基準座標への座標変換を行った (Fig. 2)。

a. 水平面投影における標点の移動

原型標点に対する歯列模型標点の移動を水平面投影したものを、水平面的標点の移動として検討した。

b. 矢状面投影における標点の移動

原型標点に対する歯列模型標点の移動を矢状面投影したものを、矢状面的標点の移動として検討した。

② 歯列印象および歯列模型の相対的な変形 (Fig. 4)

a. 左右方向（幅径）の変形

左右同名歯頬側標点および舌側標点を結ぶ線分をそれぞれ頬側幅径、舌側幅径として各標点の座標値から計算により求め検討した。

b. 前後方向（長径）の変形

左右同名歯頬側標点を結ぶ線分に、左側中切歯標点から下した垂線の線分の長さを長径とし算出して検討した。

なお、基準となる原型の幅径および長径は、10 回の計測値の平均値とした。幅径、長径の変化については、部位ごとに印象材およびトレーを要因とした二元配置分散分析 (Table 1 繰り返し数 3 回) を行った。

c. 咬合平面に対する標点の垂直的位置の変化

左側中切歯、左右第 2 大臼歯頬側標点で決定された咬合平面に対する歯列印象および歯列模型の各標点の垂直的位置変化を、原型と比較検討した。

III. 結 果

本研究では、前歯部方向を前方、臼歯部方向を後方、歯冠側方向を上方、歯頸側方向を下方、唇・頬側方向を外方、舌側方向を内方と略記する。

1. 基準座標による歯列模型の変形

1) 水平面投影における標点の移動 (Fig. 5~8)

いずれの方法で製作した歯列模型も全体としては、同様な変形傾向を示し、左側中切歯標点はほぼ前方へ、犬歯、小臼歯標点はほとんどが前外方へ、第 1 大臼歯ではほぼ同位置か前外方から外方へ、第 2 大臼歯では後外方ないしは後内方へ移動した。これは歯列模型が原型に比べて前後左右方向へ大きく変わったことを示している。しかしながら詳細にみると、個人トレーと咬合面トレーでは、標点の移動方向および移動量について相違がみられた。咬合面トレーでは、小臼歯から第 1 大臼歯の頬舌標点とも前外方へ平均 17 μm 広がる様相を示したのに対し、個人トレーでは、頬側標点が外方へ広がるもののその量は少なく平均 10 μm であり、舌側標点では外方へ広がるというより前方へ平均 10 μm 移動する傾向であった。

標点の移動量は、前歯部で大きく第 1 大臼歯が最も少ない傾向にあった。中切歯については、最大はシュールフレックス F・咬合面トレーで 48 μm 、最小はプレジデント・個人トレーで 25 μm であった。また、第 1 大臼歯では、咬合面トレーで平均 10 μm 、個人トレーで平均

Fig. 5 Distortion of stone cast in horizontal and sagittal plane (PRESIDENT-Custom tray)

Fig. 6 Distortion of stone cast in horizontal and sagittal plane (PRESIDENT-Modified custom tray)

Fig. 7 Distortion of stone cast in horizontal and sagittal plane (SÜRFLEX F-Custom tray)

Fig. 8 Distortion of stone cast in horizontal and sagittal plane (SÜRFLEX F-Modified custom tray)

4 μm の移動量であった。第2大臼歯については、いずれの組合せでも後外方あるいは後内方へ平均 9 μm 程度移動した。

個人トレーの場合、印象材間の相違が咬合面トレーの

場合より明らかで、シュールフレックス F の移動量の方がプレジデントより中切歯で 10 μm 、犬歯で 12 μm 大きかった。

2) 矢状面投影における標点の移動 (Fig. 5~8)

標点の移動方向は、いずれの歯列模型も類似した傾向を示し、ほとんどが上方へ移動した。また、前方歯標点ほど上方よりも前方へ移動する傾向が顕著で、上方への移動量は前歯部 (平均 4 μm) よりも大臼歯部 (平均 10 μm) で大きかった。

左側中切歯、左右側犬歯において、個人トレーに比べ咬合面トレーの方が上方より前方へ移動する傾向を示した以外は、上方への移動量は平均 8 μm で標点の移動方向、移動量についても印象材の種類およびトレー形態による違いはみられなかった。

水平面と矢状面を合わせた三次元的な標点の移動量を見ると、いずれの模型においても標点の位置により移動量は異なった。前歯部では中切歯において、シュールフレックス F・咬合面トレーで 48 μm と最大になり、プレジデント・個人トレーで 25 μm と最小になった。犬歯においては、シュールフレックス F・咬合面トレーで 37 μm と最大になり、プレジデント・個人トレーで 20 μm と最小になった。一方、大臼歯部は、前歯部に比べて移動量は小さく、最大でもプレジデント・咬合面トレーの平均 17 μm であった。全体として、標点の移動量は、咬合面トレー・プレジデントおよび咬合面トレー・シュールフレックス F で平均 23 μm と最も大きくなり、以下シュールフレックス F・個人トレーの平均 18 μm 、プレジデント・個人トレーの平均 14 μm であった。

2. 歯列印象および歯列模型の相対的な変形

1) 左右方向 (幅径) の変形 (Fig. 9~12)

(1) 歯列印象

歯列印象では、印象材の種類およびトレー形態の違いが寸法精度に及ぼす影響は少なく、各測定部における変形はきわめて小さかった。前方歯、後方歯という前後的な位置の違いによる差も認められなかった。各測定部位における原型に対する変化量は、頬側および舌側幅径で -6~4 μm の範囲にあり平均 -1 μm であった。

二元配置分散分析の結果、印象材において 4 L-4 L, 5 L-5 L, 6 L-6 L, トレーにおいて 7 L-7 L で有意差がみられたが (Table 2), いずれの部位においてもその差はきわめて小さなものであった。

(2) 歯列模型

歯列模型幅径の変化量は、印象材の種類およびトレー

Fig. 9 Dimensional change in arch width (PRESIDENT-Custom tray)

Fig. 10 Dimensional change in arch width (PRESIDENT-Modified custom tray)

Fig. 11 Dimensional change in arch width (SÜRFLEX F-Custom tray)

Fig. 12 Dimensional change in arch width (SÜRFLEX F-Modified custom tray)

Table 2 Results of two-way analysis of variance (Impressions)

Factors			
	A : Impression Material	B : Tray	A × B
3-3	—	—	—
4B-4B	—	—	—
5B-5B	—	—	—
6B-6B	—	—	—
7B-7B	—	—	—
4L-4L	8.53*	—	—
5L-5L	27.04*	—	—
6L-6L	11.72*	—	—
7L-7L	—	5.69*	—
l-7	—	—	—

* : significant ($p < 0.05$)

Table 3 Results of two-way analysis of variance (Stone casts)

Factors			
	A : Impression Material	B : Tray	A × B
3-3	12.01*	—	—
4B-4B	10.72*	20.34*	—
5B-5B	8.49*	63.04*	—
6B-6B	—	13.61*	—
7B-7B	—	62.82*	—
4L-4L	15.08*	27.77*	—
5L-5L	5.96*	38.08*	—
6L-6L	—	12.83*	—
7L-7L	—	15.33*	—
l-7	—	62.77*	—
Force of separation	61.11*	171.13*	14.52*

* : significant ($p < 0.05$)

Fig. 13 Dimensional change in arch length (PRESIDENT-Custom tray)

Fig. 14 Dimensional change in arch length (PRESIDENT-Modified custom tray)

形態の違いにより若干異なり、プレジデントよりシュールフレックスFの方が、個人トレーより咬合面トレーの方が、左右に大きくなる傾向にあった。プレジデント・個人トレーによる歯列模型において大白歯部舌側幅径が減少（ $-4 \sim -2 \mu\text{m}$ ）したほかは、歯列模型の幅径はいずれの部位でも増加し、増加量は前方歯で大きい傾向を示した。また舌側幅径より頬側幅径の方が増加量が大きい傾向であった。最も増加量が大きくなった部位はいずれの模型でも犬歯間幅径で、最大はシュールフレックスF・咬合面トレーで $46 \mu\text{m}$ 、最小はプレジデント・個人トレーで $27 \mu\text{m}$ であった。またいずれの模型でも第1大白歯ないしは第2大白歯で幅径の増加量が最も小さくなった。

二元配置分散分析の結果、印象材については6B-6B、6L-6L、7B-7B、7L-7Lを除くすべての部位で、トレ

Fig. 15 Dimensional change in arch length (SURFLEX F-Custom tray)

Fig. 16 Dimensional change in arch length (SURFLEX F-Modified custom tray)

Fig. 17 Vertical position of measuring points to occlusal plane (Representative example: PRESIDENT-Custom tray)

ーについては 3-3 を除くすべての部位で有意差がみられた (Table 3).

2) 前後方向 (長径) の変形 (Fig. 13~16)

(1) 歯列印象

歯列印象の長径 (l-7) の変化量は、 $-3 \sim 0 \mu\text{m}$ の範囲にあり平均 $-1 \mu\text{m}$ であった。このことは印象幅径と同様に、歯列印象の状態で原型をほぼ忠実に再現していることを示している。長径においては、印象材、トレーとも有意差は認められなかった (Table 2).

(2) 歯列模型

歯列模型の長径については、いずれも均等な増加傾向を示し、特に大きく増加する部位は認められなかった。

また歯列弓長径は、トレー間にはみられ (Table 3), 個人トレーで平均 $37 \mu\text{m}$, 咬合面トレーで平均 $54 \mu\text{m}$ であった。長径 (l-7) が最も増加したのはプレジデント・咬合面トレーで $54 \mu\text{m}$, 以下シュールフレックス F・咬合面トレーの $53 \mu\text{m}$, シュールフレックス F・個人トレーの $41 \mu\text{m}$, プレジデント・個人トレーの $33 \mu\text{m}$ の順であった。

3) 咬合平面に対する標点の垂直的位置の変化 (Fig. 17)

咬合平面に対する各標点の垂直的位置の変化量は、歯列印象および歯列模型ともに平均 $2 \mu\text{m}$ (最大 $7 \mu\text{m}$, 最小 $0 \mu\text{m}$) であり、印象、模型とも各標点の位置関係の

再現性はきわめて良好であった。したがって、原型標点の咬合平面に対する凹凸状態は忠実に再現された。また、印象材の種類およびトレー形態の違いによる影響もみられなかった。

IV. 考 察

歯列模型の寸法精度を検討する方法として多くの場合、歯列弓外に基準座標を設定し三次元座標測定機による測定が行われている⁵⁻¹¹⁾。

しかしながら、印象材の種類およびトレー形態の影響により、変形が印象の時点でどの程度生じ、さらに石膏を注入した後、模型がどのように変形するかについて、原型から歯列模型にいたるまでの変形の推移、特徴、変形量については明らかにされていない。

そこで本研究では、三次元座標測定システム¹⁰⁾を用い、歯列印象および歯列模型を別々に計測することにより、歯列模型の寸法精度に及ぼす影響をラバー系印象材の種類、トレーの形態、注入した石膏量について検討した。

1. 研究方法

1) 三次元座標測定システム

(1) 測定装置

三次元座標測定機¹⁰⁾は、工場顕微鏡 20 型（ニコン社製、最小読み取り 1/1,000 mm）をベースに、支柱と鏡筒との間で連動するようにポジションスケールを設置、三次元計測用に改良してある。計測値はデジタル表示部（Nikon MC-203）に表示されると同時に、GP-IB アダプター（Nikon MCA-13）を介しパーソナルコンピューター（SORD M 68/41）に収集され、空間的距離の計算などの各種演算処理、グラフィック処理、統計処理を行うことができる。また、透過照明および反射照明時には写真撮影、テレビモニターによる観察が可能である。反射照明では、明視野と暗視野が選択でき、微動載物台の移動量が左右 225 mm、前後 100 mm、鏡筒の上下が 200 mm と測定範囲が広い大型の試料の測定にも適している。

本研究では、ハロゲンランプの斜光照明により、明るくシャープな像として標点を確認することができた。

(2) 計測方法

計測は、原型歯列上に標点を設け、かつ歯列弓外の基準座標^{5-11, 27)}による三次元座標測定法である。したがって本システムは、原型から模型に移行した標点の移動がただちに模型の変形を表し²⁸⁾、その移動量が変形量の目

安となり、模型の寸法精度を検討する上で各種多角的な情報を素早く収集できる特徴を有している。

また、三次元座標測定には、接触式と非接触式とがある²⁹⁾が、わずかな接触圧でも変形の恐れのある印象を測定する場合は、非接触式で行う必要があり、今回の測定はすべて非接触式に行った。

しかし、光学系による非接触式の場合、軸面、アンダーカット領域などが測定できず、真上からみえる範囲での情報しか得られない欠点がある。したがって、目的によっては試料の向きを変えて計測するか、あるいは接触式と併用するなどの方法を考える必要がある。また本研究では原型の構造上、歯列印象については歯列弓外の基準座標による計測はできなかった。

(3) 測定精度

① 三次元座標測定機の精度

三次元測定機の各軸の送り精度は、X 軸方向では移動距離 150.000 mm で 0.006 mm、Y 軸方向では、90.000 mm で 0.007 mm、Z 軸方向では 15.500 mm で 0.004 mm であった。なお本研究での計測時送り量は、X 軸 68、Y 軸 69、Z 軸 15 mm 程度であった。

② 読み取り精度

ビッカース針で刻印した標点は、歯列印象および歯列模型上に明瞭に再現され、原型では任意の三点に対する同一標点の 5 回くり返し読み取り精度は、標準偏差の最大値で、X=2、Y=2、Z=3 μm であり、模型標点では、X=3、Y=4、Z=3 μm であった。また、印象標点では、X=1、Y=1、Z=1 μm であり、いずれのくり返し読み取り精度も優れていた。

以上、今回の非接触式三次元座標測定による測定精度は、本研究の目的に対して満足いくものであった。

2) 金属原型

本研究には当教室で用いている金属製全顎歯列原型¹⁰⁾の台座部標点、トレー誘導棒に改良を加えて使用した。原型は上顎天然歯列を単純化した形態で、アンダーカットの影響が検討できる。また、原型は 3 つの部分（歯列部・台座部・模型固定板）から構成され、台座上に付与した 3 標点で設定される同一の歯列弓外の基準座標による原型および歯列模型の三次元座標測定が可能である。

材質は、台座部が炭素鋼、歯列部がステンレス製で、十分な強度を有しており実験操作中の変形の恐れはなく、熱膨張係数も小さいため温度変化による膨縮変形も無視できる（熱膨張係数：炭素鋼 $11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、ステンレス $16.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）。

3) トレー

本研究ではトレー形態が歯列印象および歯列模型の寸法精度に及ぼす影響を検討するため、個人トレー³⁰⁾と試作トレー（咬合面トレー¹⁰⁾）とを使用した。特に個人トレーはアンダーカットの影響^{21,31)}を受け、印象撤去時におけるトレーの変形、印象剝離に対する考慮が必要である。そこで両トレーは、厚さ 10 mm のアルミニウム製フレームに固定、補強した。

また、印象材の保持方法については、保持孔、リムロック、接着剤、これらの併用などの方法があるが、今回は保持孔による^{17,18)}。

4) 印象法

長年にわたって精密印象材として使われているポリサルファイド・ラバー印象材（シュールフレックス F）と、近年開発され優れた理工学的性質³²⁾を持つ付加型シリコン・ラバー印象材（プレジデント）を採用した。

印象材の厚みは印象の寸法精度に影響し、これらに関して幾多の報告^{14,16,17,33)}がなされている。これらの報告を参考に本研究では印象材の厚みは両トレーとも約 3 mm に規定した。

印象の撤去方向⁴⁾および撤去時間^{4,22,34)}は、印象と模型の寸法精度に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、これらのことを考慮して印象撤去には万能引張圧縮試験機を使用し、方向と速度を一定とした。

撤去時の陰圧に関しては、内山ら³⁵⁾がラバーベース印象材では陰圧の影響は著明には現れないと報告しており、本実験では陰圧除去のための特別な操作は行わなかった。

歯列模型の計測結果において左右差がほとんどないこと、歯列印象の直接計測において、その変化量がきわめて小さいことから推測して、撤去スピードの影響や陰圧による印象の剝離、トレーの変形も生じなかったと思われる。

2. 歯列印象および歯列模型の寸法精度

1) 歯列印象

いずれの歯列印象についても原型の寸法をきわめて良好に再現していた結果（Fig. 9～16）から、印象の圧接から撤去時、さらに撤去後から石膏の注入・硬化まで、印象圧の影響²⁰⁾、印象の剝離やちぎれ、陰圧の影響^{22,35)}、トレーの変形等も生じていないことが示された。今回、印象材の保持は、トレーに付与した保持孔のみによったが、これも十分であることが確認できた。

印象撤去力は、個人トレーではプレジデントで平均 64.0 kg、シュールフレックス F で平均 39.5 kg であり、

咬合面トレーでは、プレジデントで平均 28.0 kg、シュールフレックス F で平均 20.0 kg となり、二元配置分散分析の結果、印象材とトレー形態の違いによる差異および交互作用が有意であった（Table 3）。この印象撤去力の違いは、アンダーカット部印象の有無、印象面積⁴⁾、印象材の理工学的性質等の違い^{36,37)}によって生じたと考えられる。

本研究ではラバー系印象材を用い適切と考えられる条件で印象法を一定としたため、どの組合せでも歯列印象の寸法精度が優れており、印象撤去力と印象の寸法精度との関係は認められなかった。しかし、臨床では撤去力が大きくなると、撤去時間の延長、印象の変形、印象の剝離やちぎれ、トレーの変形等の問題が生じることが推測される。印象撤去力が大きい印象材の場合は、保持力、トレーの強度が十分あるかどうか気をつけ、適宜印象面積を小さくしアンダーカット部をワックス等で埋め、撤去力を小さくすることも印象変形の危険性を減らし、加えて患者の負担軽減のために必要な操作であろう。

(1) 歯列印象の相対的な変形

歯列印象の幅径および長径に対する二元配置分散分析の結果（Table 2）、幅径において印象で 3 部位、トレーで 1 部位にのみ有意差が認められたが、その差は小さく印象材の種類、トレー形態の違いが、印象の寸法精度に及ぼす影響はほとんどないことが明らかになった（Fig. 9～16）。また、歯列模型の変形量と比べても小さく、前方歯、後方歯という前後的な位置による違いも認められなかった。さらに咬合平面に対する各標点の垂直的位置の変化量も小さく、水平面、矢状面共に印象の再現性はきわめて良好であった。

福永¹⁰⁾はアルジネート印象材による歯列模型の寸法精度に関する研究結果より、歯牙のアンダーカットが歯列模型の咬合面精度に影響を及ぼすことを示唆していることから、ラバー系印象材についても、特にプレジデントに比べて永久ひずみの大きなシュールフレックス F では、歯牙のアンダーカット、すなわちトレー形態の違いが歯冠部咬合面付近の印象精度にまで影響を及ぼす可能性が考えられた。しかし、本研究結果からみると、ラバー系印象材では、アンダーカット部の影響²¹⁾は歯列印象の咬合面部までは及ぼないことが示された。

2) 歯列模型

(1) 基準座標による歯列模型の変形

歯列模型は歯列弓が原型より水平的に拡大し、また上下的にも高くなる傾向を示したが、この傾向は従来の報告^{1,2,4,5,8,10,13)}と一致している。このような歯列模型の変

形は、歯列印象が原型を忠実に再現していることからみて、主として石膏の硬化膨張（フジロック：0.08%³⁸⁾）に起因すると考えられ、変形パターンおよび変形量は、原型の形態および石膏の膨張とその膨張を抑制する方向に働く因子（トレーと印象材）との相互作用によって決まると考えられる^{1,4,5)}。

① 水平面投影における標点の移動

標点の移動方向および移動量は、両トレー間で差違がみられた。咬合面トレーは、個人トレーに比べて変化が大きい傾向を示し、頬舌標点とも前外方あるいは後外方へ広がる様相を示した。これに対し個人トレーは、頬側標点が入外方へ広がるもののその量は少なく、舌側標点では外方へ広がるというより、前方あるいは後方にわずかに移動する傾向にあった。

この相違は、トレー形態に基づく石膏の硬化膨張抑制の違いによると推察される。すなわち、歯列模型が咬合面トレーで個人トレーより拡大したのは、トレー辺縁が個人トレーより6 mm 短く、アンダーカット相当部の石膏が個人トレーの場合より自由に膨張したためと思われる。

個人トレーで製作した歯列模型の場合、印象材間の相違が咬合面トレーの場合より明らかであった。これは、トレーの辺縁が長く石膏の膨張が抑制されている状態では、印象材の硬さおよび弾性ひずみの影響が現れやすいためと推察される。印象材の硬化後の硬さをデュロメーター タイプ A (UESIMA 製作所社製) で計測した結果、プレジデントは66で、シュールフレックスFの27より約2.4倍硬かった。また、A.D.A.S. No. 19の規格試験に準じ弾性ひずみを測定した結果、シュールフレックスFは6.6%で、プレジデントの2.3%³²⁾より約3倍の弾性ひずみであった。この硬さや弾性ひずみの差が石膏膨張に対する抑制効果の違いとして現れ、歯列模型の寸法精度の違いになったと思われる。このことは印象内での石膏の硬化膨張は、印象材の弾性値が小さいほど抑制されるという報告³⁹⁾と一致している。

② 矢状面投影における標点の移動

歯列模型標点の上下方向の移動は、平均8 μm 上方へ移動したが、これは石膏が硬化時に膨張したためと思われる。前歯部では臼歯部より上方への移動量が少ない傾向にあったが、これは前歯部が水平的に大きく前方へ移動した結果、上方への移動が小さくなったためであろう。また本研究結果では、頬側標点と舌側標点の間で上方への移動量に差は認められず、咬合面の傾斜^{5,7,8)}はみられなかった。

(2) 歯列模型の相対的な変形

① 左右方向（幅径）の変形

歯列模型の幅径の変形に関しては、分散分析の結果、多くの部位で印象材およびトレーの違いによる影響が示された。

幅径の変化量に関して、犬歯部幅径が最も大きくなり（最大：シュールフレックスF・咬合面トレー 46 μm 、最小：プレジデント・個人トレー 27 μm ）、後方歯にいくに従って変化量が全般的に小さくなった。特に犬歯間幅径が大きくなったのは、模型形態が馬蹄形のため、前歯部と小白歯部の石膏膨張が、トレーと印象材による膨張抑制をうけ隅角部にあたる犬歯部に集中し、犬歯部が前外方へ突出するかたちとなったためと考えられる^{7,8,40)}。各条件における歯列模型において、第1大臼歯付近は、標点の水平的移動量が小さく幅径の変化量も小さいことから、膨張と抑制が平衡に近づくところと考えられた。

大谷⁸⁾が下顎歯列作業模型の変形について、左右同名歯における支台歯間距離（幅径）は、前歯部から臼歯部にいくに従って増加量が小さくなり、臼歯部では原型より小さくなる部位があることを報告しており、本研究結果と同様の傾向を示していた。一方、重頭⁴⁾は、前歯部から大臼歯部にいくに従って幅径の変化量が増加すると本研究と異なった報告をしているが、これはトレーの材質の相違、注入する石膏量の影響などによると推察される。

② 前後方向（長径）の変形

前後方向の変形量に関しては、トレー間にはのみ有意差がみられ、個人トレーの方が変化量が小さかった。長径の変化量はI-3 からI-7まで順次増加し、I-7は個人トレーで平均37 μm 、咬合面トレーで平均54 μm 増加した。長径は重頭⁴⁾、大谷⁸⁾の報告と同様に増加傾向を示したが、これは石膏の硬化膨張によると考えられる。

3) 咬合平面に対する標点の垂直的位置の変化

基準座標による計測では、歯列模型の咬合面標点は全体として上方へ移動し、咬合平面設定のための3標点の空間的位置も変化した。しかし、標点間の相対的な上下的位置関係の変化を、咬合平面（左側中切歯・左右側第2大臼歯頬側標点を含む平面）を基準とし、その平面からの距離の変化として検討してみると、原型と比べて歯列印象および歯列模型の各標点は、原型標点の位置から平均2 μm （最大7 μm 、最小0 μm ）程度のきわめてわずかな変化量であった（Fig. 17）。すなわち、歯列印象および歯列模型において、標点相互の上下的位置関係の再現性はきわめて良好であることが確認できた。

歯列印象および歯列模型において、咬合平面に対する

Fig. 18 Dimensional change in arch width, Effect of quantity of gypsum on the accuracy of stone cast (PRESIDENT-Modified custom tray)

Fig. 19 Dimensional change in arch width, Effect of quantity of gypsum on the accuracy of stone cast (SURFLEX F-Modified custom tray)

標点の上下的位置関係の変化量が小さかったのは、標点の上方への移動量(平均 $8\mu\text{m}$)が水平面(前後, 左右)方向に比べて小さかったことが考えられる。

4) 石膏量の歯列模型の寸法精度に及ぼす影響

歯列模型の寸法精度に影響を及ぼす因子は種々考えられるが、今回の結果から歯列模型の変形は、主として石膏の膨張によるものと推察され、石膏量の多少によって、歯列模型の寸法が異なると考えられた。製作した歯列模型の重量を計測したところ、個人トレー模型で平均 35g 、咬合面トレー模型で平均 43g と約 8g の差が認められ、トレー形態によって模型の変形に違いがみられた1つの要因として、模型に要する石膏量の違いが考えられた。そこで咬合面トレーについて石膏量を 30g (30% 減)とし、石膏量が歯列模型の寸法精度に及ぼす影響について

Fig. 20 Dimensional change in arch length, Effect of quantity of gypsum on the accuracy of stone cast (PRESIDENT-Modified custom tray)

Fig. 21 Dimensional change in arch length, Effect of quantity of gypsum on the accuracy of stone cast (SURFLEX F-Modified custom tray)

検討した。

その結果、石膏量の減少によって幅径、長径の変化量は印象材の種類によりやや異なったものの、先に製作した咬合面トレーによる模型より小さく (Fig. 18~21)、標点の移動方向と移動量も、個人トレーによる模型と類似した傾向となり、歯列模型の寸法精度は向上した。すなわち、幅径ではプレジデントの 4B-4B で最大 $17\mu\text{m}$ (50%) 減少し、シュールフレックス F では、7B-7B で最大 $8\mu\text{m}$ (44%) 減少した。長径ではプレジデントで $19\mu\text{m}$ (35%), シュールフレックス F で $13\mu\text{m}$ (25%) 減少した。この結果から、歯列模型の寸法精度に及ぼす

石膏量の影響は大きいといえる。

しかしながら、石膏注入量を減らすことにより、咬合面トレーで製作した歯列模型の変化量が小さくなる傾向を示したものの、個人トレーより 5 g (14%) 少ない石膏量にもかかわらず、個人トレーで製作した歯列模型の変化量より全体としてさらに小さくなることはなく、石膏量だけでなくトレー形態も歯列模型の寸法精度に影響を及ぼしていることが確認された。すなわち、歯頸部付近まで辺縁のあるトレー（個人トレー）は石膏の膨張を抑制するために有効であることが示された。

臨床的には、模型は必要な部分が得られ、適当な強度があるならば、変形を小さくするため必要以上に石膏を注入することは好ましくないといえる。また、二次石膏により一次石膏模型に弧状変形^{6,41-43)}が引き起こされとの報告もあり、単に石膏量を減らすだけではなく適当量の石膏は注入し、過剰の注入を避けるべきであろう。

本研究においてラバー系印象材による印象精度はきわめて優れており、歯列模型の寸法精度に及ぼす主な因子はトレー形態および石膏の量であることが示された。また、今回の結果から、個人トレーのような石膏の硬化膨張を抑制できる形態が、歯列模型の寸法精度の向上のために有用であると思われた。今後さらに寸法精度に優れた歯列模型を製作するためには、膨縮を極力小さくした模型材の開発が必要であろう。

V. 結 論

上顎天然歯列を単純化した全顎歯列原型から、2種の印象材と2種のトレーを用いて採得した歯列印象および製作した石膏歯列模型を、非接触的に三次元測定し以下の結論を得た。

1. ラバー系印象材による歯列印象の寸法精度は、印象材、トレー形態の違いによる影響はなく三次元的に優れており、原型をほぼ忠実に再現した。
2. 歯列模型の寸法精度は、印象材およびトレー形態の違いによる影響を受け、印象材とトレーの組合せにより異なった。
3. 歯列模型の変形は、印象の寸法精度が優れていたことより、主として石膏の硬化膨張により生じ、また周囲の抑制（印象材およびトレー）により左右されることが確認された。
4. 歯列印象内の石膏の膨張は、全体として前後左右に広がる方向に生じ、第1大臼歯付近を中心に前方歯は前方へ、第2大臼歯は後方へ向かって膨張する傾向があ

り、第1大臼歯付近で前後的な膨張の方向が逆転した。

5. 歯列模型の幅径は、犬歯間が最も増加し、後方歯に向かうに従って減少する傾向にあり、大臼歯間で最も小さかった。また、舌側幅径に比べて頬側幅径の変化量の方が大きい傾向にあった。

6. 歯列模型の長径は、前後的な長さが増加するに従って順次変化量は増加したが、特に大きな膨張を示す部位はなかった。

7. 模型標点は上方へ移動する傾向にあるが、前方歯より後方歯の方が上方へ移動する傾向が強かった。しかし、印象、模型ともに咬合平面に対する各標点の垂直的位置関係の再現性は、きわめて良好であった。

8. 付加型シリコーン・ラバー印象材と個人トレーの組合せで石膏の硬化膨張抑制効果が最も高く、原型に最も近い寸法精度の歯列模型が得られた。

9. 石膏の量によって、絶対的な硬化膨張量を調節することにより、歯列模型の寸法精度の向上をはかることができた。

稿を終えるにあたり、終始本研究のご指導とご校閲を賜りました川和忠治教授、ならびに種々の研究上のご助言を賜りました古屋良一助教授に深甚な謝意を表します。また研究遂行上多大なるご支援を頂きました割田研司講師に深謝いたします。さらにご協力いただきました教室各位に心から感謝いたします。

本研究の要旨は、第77回日本補綴歯科学会学術大会（昭和62年5月29日、盛岡）および第12回日本歯科理工学会学術講演会（昭和63年9月25日、札幌）において発表した。

なお、本研究の一部は63年度文部省科学研究費補助金（No. 63480434）によった。

文 献

- 1) 中尾勝彦ほか：石膏歯列模型の寸法精度，補綴誌，15：178～185，1971。
- 2) 藤城鉄英：顎模型の寸法精度に関する研究，補綴誌，18：382～402，1975。
- 3) 金沢俊文：歯列模型ならびに欠損歯列模型の寸法変化に関する研究，補綴誌，22：385～406，1978。
- 4) 重頭直文：全顎歯列模型の寸法精度に関する研究—特に印象撤去方法による影響について—，広大歯誌，13：197～216，1981。
- 5) 鈴木 章：歯列模型の寸法精度に関する基礎的研究，歯学，71：449～474，1983。
- 6) 渡辺 明ほか：作業模型製作時の二次せっこう注入による歯列模型への影響について，歯学，73：1020～1052，1985。
- 7) 丸茂義二：前歯部架工義歯間接法作業模型の寸法精度に関

- する研究, 歯学, 72 : 980~1012, 1985.
- 8) 大谷和男: 作業模型における下顎歯列模型の変形について, 歯学, 73 : 590~628, 1985.
- 9) 四方田哲ほか: 下顎第一大臼歯欠損を伴う歯列模型の変形, 歯学, 73 : 1231~1254, 1985.
- 10) 福永秀樹: 歯列模型の寸法精度に関する研究—三次元計測システムの開発とアルジネート印象法に及ぼすトレー形態の影響について—, 補綴誌, 31 : 1021~1035, 1987.
- 11) 橋本邦彦: 有歯顎作業模型の再現性に関する三次元的研究—印象材の相違による影響の法線方向誤差からの検討—, 歯材器, 7 : 386~405, 1988.
- 12) Lin, Chang-Chi: Accuracy of impression materials for complete-arch fixed partial dentures, J Prosthet Dent, 59 : 288~291, 1988.
- 13) Linke, B.A.: Distortion analysis of stone casts made from impression materials, J Prosthet Dent, 54 : 794~802, 1985.
- 14) Valderhaug, J.: Dimensional stability of elastomeric impression materials in custom-made and stock trays, J Prosthet Dent, 52 : 514~517, 1984.
- 15) Stauffer, Jean-Pierre: Accuracy of six elastic impression materials used for complete-arch fixed partial dentures, J Prosthet Dent, 35 : 407~415, 1976.
- 16) 野川 勇: 間接法作業模型の寸法精度に影響する因子について チオコール・ラバー印象材ならびにシリコン・ラバー印象材による方法, 歯学, 56 : 396~414, 1968.
- 17) 初道守久: 架工義歯製作時における間接作業模型の寸法精度に影響する因子について, 歯学, 61 : 350~371, 1973.
- 18) 高津寿夫: 各種印象材の寸法精度の検定比較 その 1 各種検定条件による比較, 日歯保誌, 16 : 308~318, 1973.
- 19) 川和忠治: シリコン印象の精度に関する研究 第 1 報 単独支台歯の寸法精度, 補綴誌, 19 : 138~157, 1975.
- 20) 三間清行: シリコン印象法における印象圧の寸法精度に及ぼす影響について, 補綴誌, 21 : 579~602, 1977.
- 21) 松代浩明: アンダーカットの印象の精度に関する実験的研究, 阪大歯誌, 17 : 28~45, 1972.
- 22) 松代浩明ほか: 印象撤去速度がアンダーカットの印象精度に及ぼす影響, 補綴誌, 18 : 134~142, 1974.
- 23) 割田研司ほか: 方向の異なるポストの印象精度に関する研究 第 1 報 シリコン・ラバー印象材, 補綴誌, 26 : 721~733, 1982.
- 24) 木村幸平ほか: 理工学的諸性質からみた付加重合型シリコン印象材について, 補綴誌, 23 : 81~85, 1979.
- 25) 大澤雅博ほか: 付加型 Silicone 印象材に関する研究 第 1 報 付加型 Silicone 印象材の重合収縮について, 歯材器, 2 : 329~334, 1983.
- 26) Eames, W.B.: Accuracy and dimensional stability of elastomeric impression materials, J Prosthet Dent, 42 : 159~162, 1979.
- 27) 星野 享ほか: 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位置再現装置について, 補綴誌, 27 : 759~766, 1983.
- 28) Nicholls, J.I.: The measurement of distortion: Theoretical considerations, J Prosthet Dent, 37 : 578~586, 1977.
- 29) 戸塚 泰: 三次元測定器の検出器, 精密機械, 39 : 676~686, 1973.
- 30) 川和忠治ほか: よくわかるクラウン・ブリッジの印象採得, デンタルフォーラム, 東京, 1986.
- 31) De Araujo, P.A.: Effect of material bulk and undercuts on the accuracy of impression materials, J Prosthet Dent, 54 : 791~794, 1985.
- 32) 浜岡正憲ほか: 付加型シリコン印象材の理工学的性質について, 昭歯誌, 8 : 92~98, 1988.
- 33) Eames, W.B.: Elastomeric impression materials: Effect of bulk on accuracy, J Prosthet Dent, 41 : 304~307, 1979.
- 34) 宮川 修ほか: アンダーカットをもつ原型の撤去時および撤去後における弾性印象材の変形 (第 1 報 ポリサルファイドゴムの場合), 歯理工誌, 11 : 116~123, 1970.
- 35) 内山洋一ほか: 弾性印象材の残留変形に関する一考察, 補綴誌, 3 : 4~8, 1959.
- 36) Pamenius, M.: The clinical relevance of mechanical properties of elastomers, Dent Mater, 3 : 270~274, 1987.
- 37) Vieira, D.F.: The forces that oppose the withdrawal of impressions, J Prosthet Dent, 10 : 536~544, 1960.
- 38) 吉田隆一: 超硬質せっこうジーシーフジロック, DE, 40 : 16~17, 1977.
- 39) 杉下晴治ほか: 印象材中の硬せっこうの硬化時寸法変化について (第 2 報), 愛院大歯誌, 15 : 400~405, 1978.
- 40) 豊間 均: 模型用埋込材の硬化膨張に関する研究—欠損部が歯列弓彎曲部または直線部に存在する場合の模型の寸法変化の比較—, 日大歯学, 56 : 197~212, 1982.
- 41) 中村健吾ほか: せっこう模型の弧状変形, 第 35 回歯科理工学会学述講演会講演集, 16, 1978.
- 42) 藤口 武ほか: 模型の弧状変形について—第 1 報 模型材の種類と厚さの影響—, 歯科技工, 7 : 74~80, 1979.
- 43) 樽本 章: 二次石膏注入による間接法作業模型の変形について—三次元座標測定機による研究—, 歯学, 70 : 475~491, 1982.