

研 究

Digital light processing 方式で製作された模型の精度

柳澤 基

岩手医科大学歯学部補綴・インプラント学講座

(主任: 近藤 尚知 教授)

(受付: 2020年12月11日)

(受理: 2021年1月7日)

抄 録

本研究の目的は、Digital light processing (DLP) で作業用模型を製作する際、模型の構造が製作時の精度に与える影響を明らかにすることである。

顎堤上に5つの球を配置した上顎無歯顎の模型のデータを作成し、基準模型のデータとした。基準模型のデータから、全顎の模型のデータ、片顎の模型のデータを作成した。全顎の模型のデータは、厚さ3mmの中空型、厚さ5mmの中空型、および充実型の3種類を作成し、片顎の模型データは厚さ3mmの中空型のみ作成した。DLP方式の3Dプリンタを使用して、作成した模型データから実験用模型を製作し、模型上の球の中心点間距離を計測することにより、模型製作時の誤差を評価した。

中空型模型は、充実型模型と比較して統計学的有意に大きな誤差を示した。充実型模型は製作時の誤差が最も小さかった ($p < 0.05$, Kruskal-Wallis 検定)。また、全顎模型と片顎模型を比較すると、全顎模型の誤差が有意に大きかった ($p < 0.05$, Mann-Whitney の検定)。

本研究の結果から、模型の構造が製作時の精度に影響を与えていることが示唆された。

緒 言

近年、コンピュータ支援設計/製造 (CAD/CAM) に代表されるデジタル技術が急速に発展し、Additive Manufacturing (AM: 積層造形法) が歯科医療に応用される頻度が高くなっている¹⁾。国際標準化機構 International Organization for Standardization (ISO) と American Society for Testing and Materials International (ASTM International) の定義によると、AMとは、3D

模型データから立体形状を造形するため、材料を一層ずつ付加、結合し、製造する方法のことであり、3Dプリンタによる製造技術 (3Dプリンティング) が広く知られている²⁾。

1980年代に、最も初期のAM技術であるStereolithography (SLA) の概念が提唱された³⁾。SLAは光重合型の液体樹脂をバット内に満たし、その樹脂表面に対して選択的な光照射を行うことで重合層を積み重ね、立体形状を造形する方法である。現在、バット内の光重合型の液

Accuracy of cast manufactured by digital light processing
Motoki YANAGISAWA

Department of Prosthodontics and Oral Implantology, School of Dentistry, Iwate Medical University,
Morioka, Iwate, Japan
(Prof. Hisatomo KONDO)
19-1, Uchimaru, Morioka, Iwate 020-8505, Japan

岩手県盛岡市内丸 19-1 (〒020-8505)

Dent. J. Iwate Med. Univ. 46 : 1-18, 2021

体レジンに光照射によって重合させる AM は、ASTM により Vat Photopolymerization と分類されており、他の AM と比較して造形時間が短く、高精度で、造形物の表面が滑らかとなることが特徴とされる²⁴⁾。この特徴から Vat Photopolymerization は歯科医療にも応用されており、中でも SLA と Digital Light Processing (DLP) が多く使用されている。現在は、暫間被覆冠、外科用ガイド、個人トレー、または全部床義歯や補綴装置製作用の作業用模型など、様々な補綴装置が SLA と DLP によって製作されている⁴⁵⁾。

口腔内スキャナーによって口腔内の 3D 画像データが取得される場合、ソフトウェア上で補綴装置の設計を行えるため、実物の作業用模型が無くとも補綴装置を製作することが可能である^{6,7)}。ただし、補綴装置辺縁の適合や、隣在歯および対合歯との接触点を確認する必要がある場合、あるいは、フレームワーク上に陶材を築盛し、隣接面と咬合面の接触を付与する必要がある場合には、3D 画像データから作業用模型を製作し、その模型上で作業を行う^{5,6,8)}。しかしながら、製作した模型の誤差が大きく、物性

が低い場合には、補綴装置の精度にも影響を及ぼすことになる^{6,9,10)}。

現状では、上述のように作業用模型を含む補綴装置の製法として、3D プリンティング、中でも DLP 方式が広く臨床応用されている。しかしながら、光重合型の樹脂を用いて製作された模型は脆く、靱性が低いとする報告や、造形物の形状、および後重合処理時の光照射の条件によって、重合収縮量が異なるという報告があり、3D プリンティングの精度については不明な点が多い^{4,11,12)}。

3D プリンティングによる歯科模型の精度に関するこれまでの研究では、中空型模型の厚み、および大きさなどの模型の形状を変数とした模型製作時の誤差については、検証が不十分であった¹³⁻¹⁵⁾。また、模型製作後の経時的変形を観察した研究も少ない¹⁶⁻¹⁸⁾。後重合処理についても、光照射機への模型の配置、および光照射の方向を明確に記載した報告は無い。したがって、模型の形状と光照射方向が模型製作時の誤差と製作後の経時的変形へ与える影響を明らかにする必要があると考え、AM 装置の一種である DLP 方式の 3D プリンタについて、以下の実験を行った。

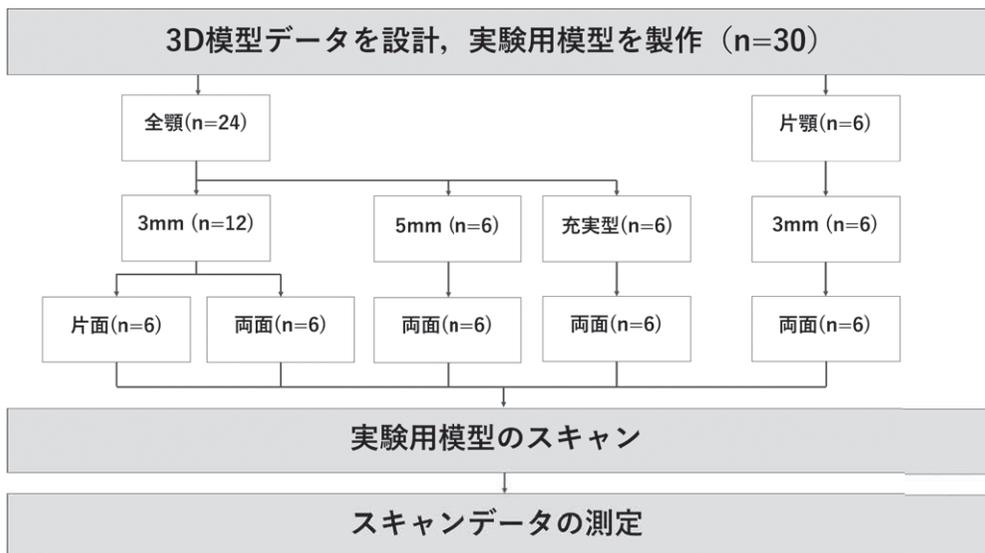


図1 実験フローチャート

材料・方法

1. 3D 模型データの作成

本研究の実験フローチャートを図1に示す。3D 模型データの作成には、上顎の無歯顎模型 (G2-402F-U, ニッシン, 京都, 日本) を使用した。上顎無歯顎模型を非接触式三次元測定機 (COMET6 16M, Carl Zeiss Optotechnik, Oberkochen, Germany) によりスキャンし, STL 形式の模型データとして取り出した。模型データを CAD ソフトウェア (Meshmixer, Autodesk, California, USA) で読み込み, CAD ソフトウェア上で模型データの顎堤上に半径 3 mm の球を 5 つ配置し, 全顎の 3D 模型データを作成した。球は, 右側第一大臼歯相当部 (S1), 右側犬歯相当部 (S2), 右側中切歯相当部 (S3), 左側犬歯相当部 (S4), 左側第一大臼歯相当部 (S5) に配置した (図2)。

1) 模型の大きさ

作成した全顎の 3D 模型データを正中線で分割し, 左側と口蓋部分を削除して, 右側のみの模型データに球 S1, S2, S3 が配置された片顎の 3D 模型データを作成した (図2)。

2) 中空型模型の外殻の厚み

メーカー研究所の経験などから中空型模型の外殻厚さは 3 mm が推奨されていたため, また過去の文献でも厚さ 3 mm で実験が行われていたため, 本研究では厚さ 3 mm での評価を中心に行うこととした¹³⁻¹⁶⁾。全顎および片顎の 3D 模型データに対して, CAD ソフトウェア Meshmixer を用いて中空化処理を行い, 外殻厚さ 3 mm の 3D 模型データを作成した。さらに, 全顎の 3D 模型データに関しては外殻厚さ 5 mm のデータと中空化処理を行わない充実型のデータを作成した (図3)。

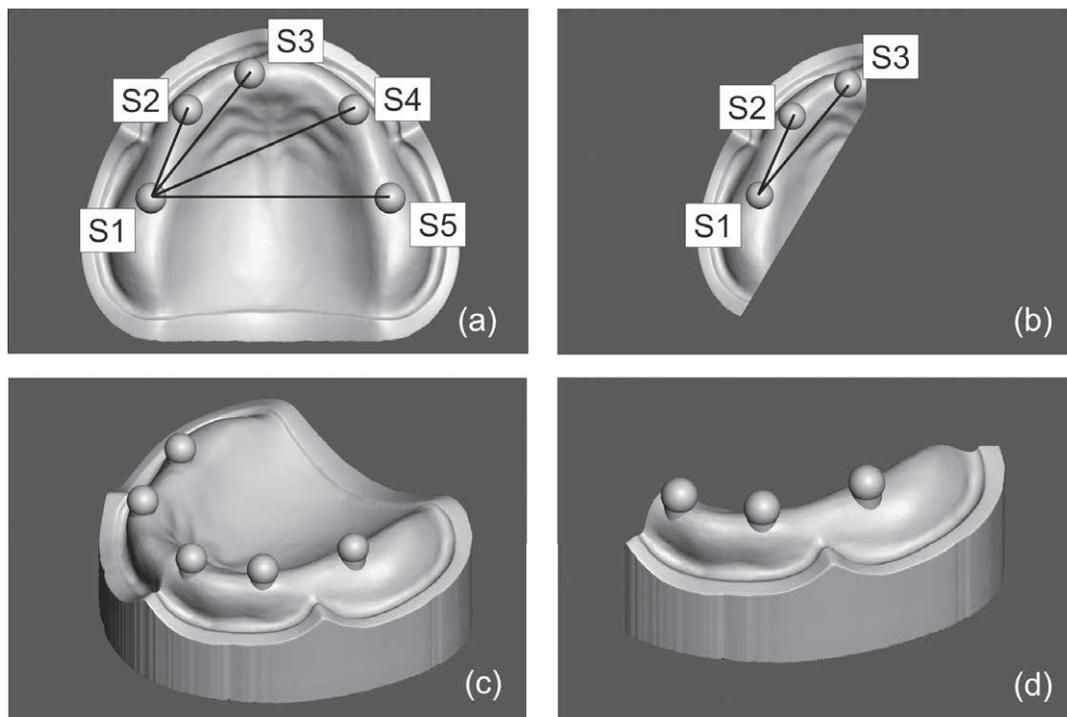


図2 3D 模型データの作成

(a), (c) 全顎, (b), (d) 片顎, S1 ~ S5 : 計測球

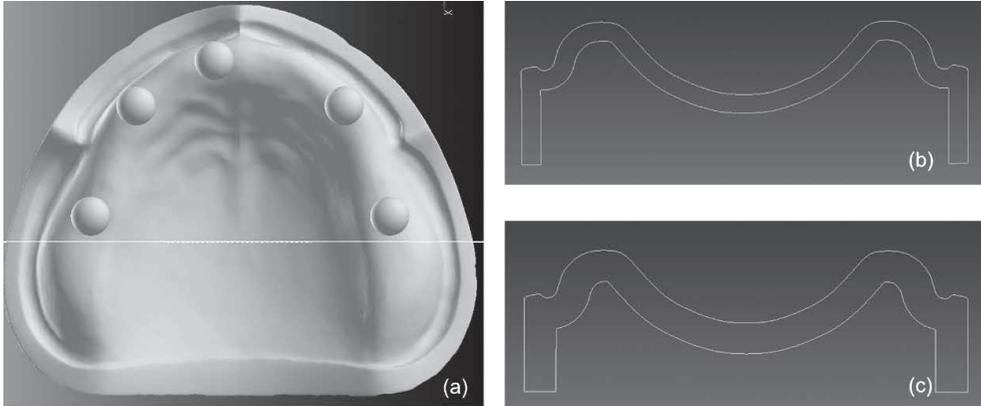


図3 中空型模型の外殻の厚み
3D 模型データ (a) の白線で切断, (b) 厚さ 3 mm の中空型模型の断面, (c) 厚さ 5 mm の中空型模型の断面

2. 実験用模型の製作

作成した 3D 模型データを STL 形式でスライシングソフトウェア (Netfabb Standard 2018.3, Autodesk, California, USA) に入力し, 3D 模型データの基底面に高さ 5 mm のサポートと高さ

1 mm のベースプレートを設置した. 造形角度は, 口蓋部の凹みによる吸引カップを除去でき, かつ球にサポート構造が必要ない 20° に設定し, 造形時の 1 層の厚さは 50 μ m に設定した. 設定したデータを, DLP 式の 3D プリンタ (CARES

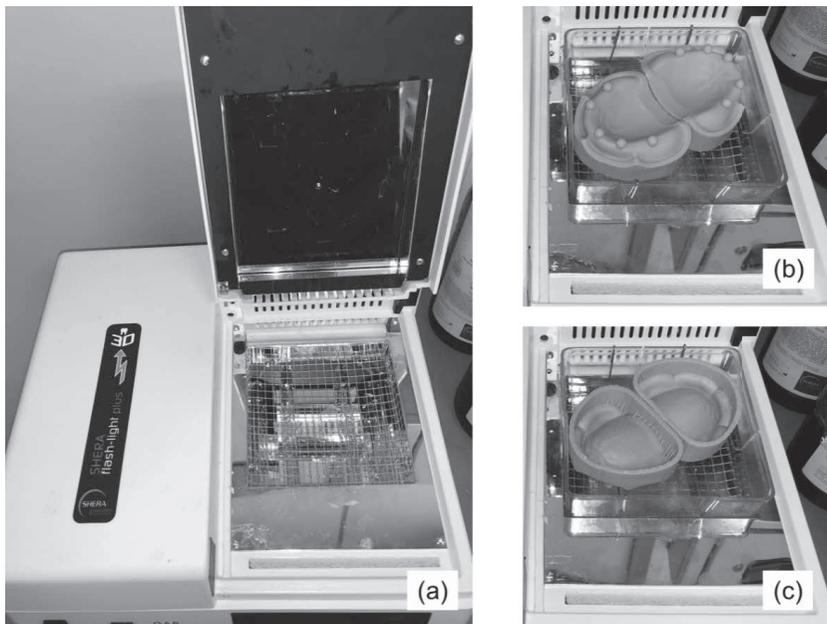


図4 光照射機への配置
(a) 光照射機, (b) 模型基底面側を光源に向けて配置, (c) 模型咬合面側を光源に向けて配置

P30, Straumann, Basel, Switzerland) に送信し、光重合型液体樹脂 (P Pro Master Model Dark beige, Straumann, Basel, Switzerland) を使用して、外殻厚さ 3 mm の中空型全顎模型を 12 個、外殻厚さ 5 mm の中空型全顎模型、充実型全顎模型、および外殻厚さ 3 mm の中空型片顎模型をそれぞれ 6 個、合計 30 個の模型を造形した。造形後、プラットフォームから模型を外し、70% イソプロパノール中で 5 分間超音波洗浄を行い、余剰レジン除去した。

洗浄後、光照射機 (SHERA flash-light plus, SHERA werkstoff-technologie, Lemförde, Germany) によって後重合処理を行った。外殻厚さ 3 mm の中空型全顎模型 12 個について、模型基底面と模型咬合面の両面から光照射する群と、模型基底面からのみ光照射する群の 2 群に分けた。両面から照射する群では、まず模型基底面側が光源を向くように配置して 2000 回照射し、その後模型を裏返してさらに 2000 回照射した。片面からのみ照射する群には、模型基底面側が光源を向くように配置し、4000 回照射した (図 4)。

最終的に、全顎・3 mm・片面照射 (以下、F3O と略称する)、全顎・3 mm・両面照射 (以下、F3T と略称する)、全顎・5 mm・両面照射 (以下、F5T と略称する)、全顎・充実型・両面照射 (以下、FST と略称する)、片顎・3 mm・両面照射 (以下、H3T と略称する) をそれぞれ 6 個ずつ、合計 30 個の実験用模型を製作した。

3. 実験用模型のスキャン

実験用模型を、非接触式三次元測定機 COMET6 16M (測定精度 ± 0.016 mm) でスキャンし、実験用模型のスキャンデータを得た。F3O, H3T のスキャンは製作当日のみにを行い、F3T, F5T, FST のスキャンは製作当日、7 日後、および 14 日後に行った。通常、歯科補綴装置を製作する場合、作業用模型上で行う操作は 2 週間ほどで終了すると考えられるため、本研究では製作当日から製作後 14 日目までの 3 つの時点で測定した。F3T, F5T, FST は、22 °C の室温で直射日光の当たらない環境下で保管した。

4. スキャンデータの計測

スキャンデータを STL 形式で取り出し、計測用の CAD ソフトウェア (spGauge, アルモニコス, 静岡, 日本) へ入力した。spGauge により実験用模型上の球 S1, S2, S3, S4, S5 (図 2 a, b) の中心点を算出し、S1-S2 間, S1-S3 間, S1-S3 間, S1-S5 間の中心点間距離を計測した。また、全顎 3D 模型データの各球の中心点間距離も同様に測定し、その計測値を基準となる真の値とした。

5. 統計解析

サンプルサイズの決定には検定力分析ソフト (G*Power3, Heinrich-Heine University, Düsseldorf, Germany) を使用した。類似する研究から効果量 $f=1.71$ と推測し¹⁹⁾、有意水準を 0.05、検出力を 0.95 に設定した際のサンプルサイズを計算した結果、本研究に必要なサンプルサイズは 1 群につき 3 個であった。しかし、1 群につき 10 個以上のサンプルサイズに設定している研究が多いことを考慮し、本研究におけるサンプルサイズは 1 群につき 6 個とした。統計学的解析には、統計解析ソフトウェア (SPSS version24, IBM, Illinois, USA) を使用した。Shapiro-Wilk 検定ではデータの正規性を仮定できたが、サンプルサイズが小さいことを考慮して、統計的検定にはノンパラメトリックな手法を選択した。2 群間の比較には Mann-Whitney の検定を行った。3 群間の比較には Kruskal-Wallis 検定を行い、多重比較法として Dunn の検定を使用し、Bonferroni 法により有意確率の値を調整した。また、それぞれの模型における製作 7 日後と 14 日後の経時的変形量の比較には、Wilcoxon の符号付順位検定を使用した。

結 果

全顎 3D 模型データの各球の中心点間距離を spGauge で 10 回計測し、その平均値を基準となる真の値とした。真の値は、S1-S2 間距離が 18.382 mm, S1-S3 間距離が 30.612 mm, S1-S4 間距離が 42.544 mm, S1-S5 間距離が 46.001 mm であった。また、spGauge で 10 回計測し

た際の測定誤差は、 ± 0.001 mmであった。本研究では、実験用模型の計測値と3D模型データの真の値を比較した際の差を、模型製作時の誤差とした。また、模型製作当日の計測値と各測定日の計測値を比較した際の差を、模型製作後の経時的変形量とした。各実験用模型の製作時の誤差を表1に示す。また、F3T、F5T、お

よびFSTにおける製作7日後と14日後の経時的変形量を表2に示す。なお、本研究においては得た計測値は正規分布を仮定していないため、結果は中央値と四分位範囲にて記載する。

模型の大きさによる影響を検証するため、F3TとH3Tの製作時の誤差を球間距離ごとに比較した。S1-S2間、S1-S3間距離ともに、F3T

表1 各実験用模型の製作時の誤差 (mm)

		H3T	F3T	F5T	FST	F3O
S1-S2	中央値	-0.015	-0.053	-0.042	0.005	-0.046
	四分位範囲	-0.031-0.002	-0.059-(-0.044)	-0.049-(-0.031)	-0.001-(-0.011)	-0.049-(-0.020)
S1-S3	中央値	-0.012	-0.098	-0.066	0.000	-0.082
	四分位範囲	-0.036-0.005	-0.107-(-0.091)	-0.075-(-0.048)	-0.006-0.006	-0.089-(-0.050)
S1-S4	中央値	—	-0.120	-0.056	0.010	-0.094
	四分位範囲	—	-0.137-(-0.103)	-0.074 -(-0.041)	0.007-0.021	-0.113-(-0.052)
S1-S5	中央値	—	-0.088	-0.024	0.043	-0.068
	四分位範囲	—	-0.107-(-0.060)	-0.037-(-0.013)	0.035-0.067	-0.095-(-0.019)

(H3T：片顎・厚さ3mm・両面光照射の模型，F3T：全顎・厚さ3mm・両面照射の模型，F5T：全顎・厚さ5mm・両面照射の模型，FST：全顎・充実・両面照射の模型，F3O：全顎・厚さ3mm・片面照射の模型)

表2 F3T、F5T、およびFSTの製作7日後と14日後における経時的変形量 (mm)

		F3T		F5T		FST	
		7日後	14日後	7日後	14日後	7日後	14日後
S1-S2	中央値	-0.002	-0.001	-0.001	0.002	-0.004	-0.001
	四分位範囲	-0.003-(-0.001)	-0.002-0.001	-0.002-0.001	0.001-0.003	-0.005-(-0.004)	-0.002-0.000
S1-S3	中央値	-0.003	-0.002	-0.004	0.001	-0.008	-0.003
	四分位範囲	-0.005-(-0.001)	-0.003-0.000	-0.005-(-0.002)	0.000-0.002	-0.009-(-0.007)	-0.004-(-0.001)
S1-S4	中央値	-0.002	0.000	-0.004	0.003	-0.012	-0.004
	四分位範囲	-0.004-0.000	-0.004-0.001	-0.006-0.000	0.001-0.005	-0.012-(-0.010)	-0.006-(-0.002)
S1-S5	中央値	-0.006	-0.004	-0.005	0.003	-0.013	-0.006
	四分位範囲	-0.007-(-0.004)	-0.006-(-0.001)	-0.006-(-0.002)	0.001-0.005	-0.015-(-0.011)	-0.009-(-0.002)

(H3T：片顎・厚さ3mm・両面光照射の模型，F3T：全顎・厚さ3mm・両面照射の模型，F5T：全顎・厚さ5mm・両面照射の模型，FST：全顎・充実・両面照射の模型，F3O：全顎・厚さ3mm・片面照射の模型)

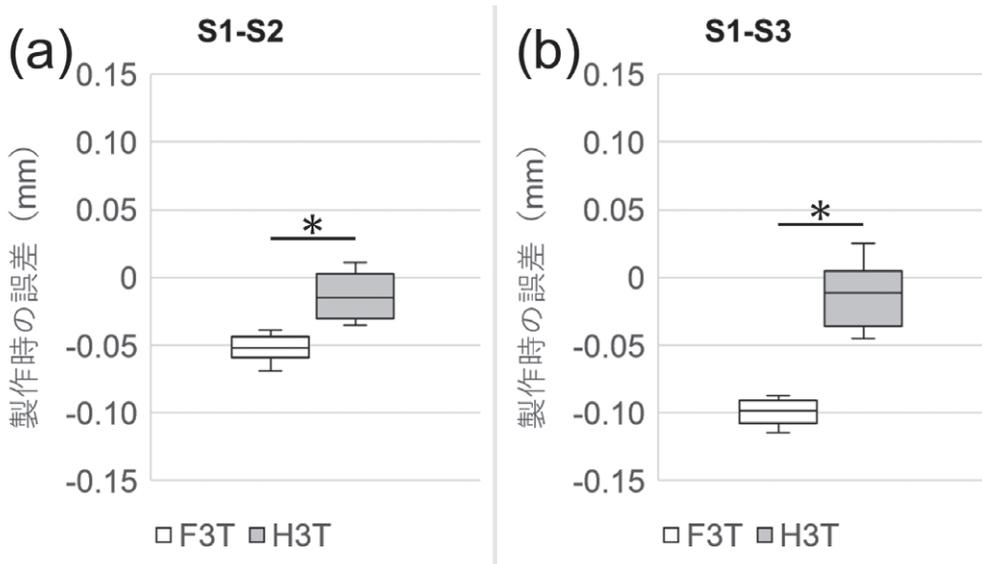


図5 模型の大きさによる誤差の比較

(a) S1-S2 間距離について F3T と H3T を比較.

(b) S1-S3 間距離について F3T と H3T を比較.

(Mann-Whitney の検定, * : $p < 0.05$, F3T : 全額・厚さ 3 mm・両面照射の模型, H3T : 片額・厚さ 3 mm・両面光照射の模型)

の誤差が有意に大きかった (図 5)。

模型外殻の厚みによる影響を検証するために、F3T、F5T、および FST の製作時の誤差を球間距離ごとに比較した。S1-S2 間、S1-S3 間、S1-S4 間、S1-S5 間の全ての球間距離において、FST のみが有意差を示した。S1-S2 間、S1-S3 間、および S1-S4 間距離においては FST の誤差が小さかったが、S1-S5 間距離では F5T の誤差の方が小さかった (図 6)。

光照射の方向が模型へ与える影響を検証するため、F3O と F3T の製作時の誤差を球間距離ごとに比較した。S1-S3 間距離のみ、F3T が有意に大きな誤差を示した (図 7)。

模型の厚みが模型製作後の経時的変形量に与える影響を検証するため、模型製作 7 日後と 14 日後における F3T、F5T、および FST の経時

的変形量を比較した。製作 7 日後においては、S1-S2 間、S1-S3 間、S1-S4 間、S1-S5 間の全ての球間距離において、FST の変形量が有意に大きかった (図 8)。製作 14 日後においては、S1-S2 間、S1-S3 間、S1-S4 間、S1-S5 間の全ての球間距離において、F5T と FST との間に有意差が見られ、FST の変形量が有意に大きかった (図 9)。また、各厚さの模型において 7 日後と 14 日後の経時的変形量を比較したところ、F3T では S1-S5 間距離のみに有意差が見られ、14 日後の経時的変形量が有意に小さい結果となった。(図 10)。F5T と FST では、S1-S2 間、S1-S3 間、S1-S4 間、S1-S5 間の全ての球間距離において有意差が見られ、14 日後の経時的変形量が有意に小さい結果となった (図 11, 12)。

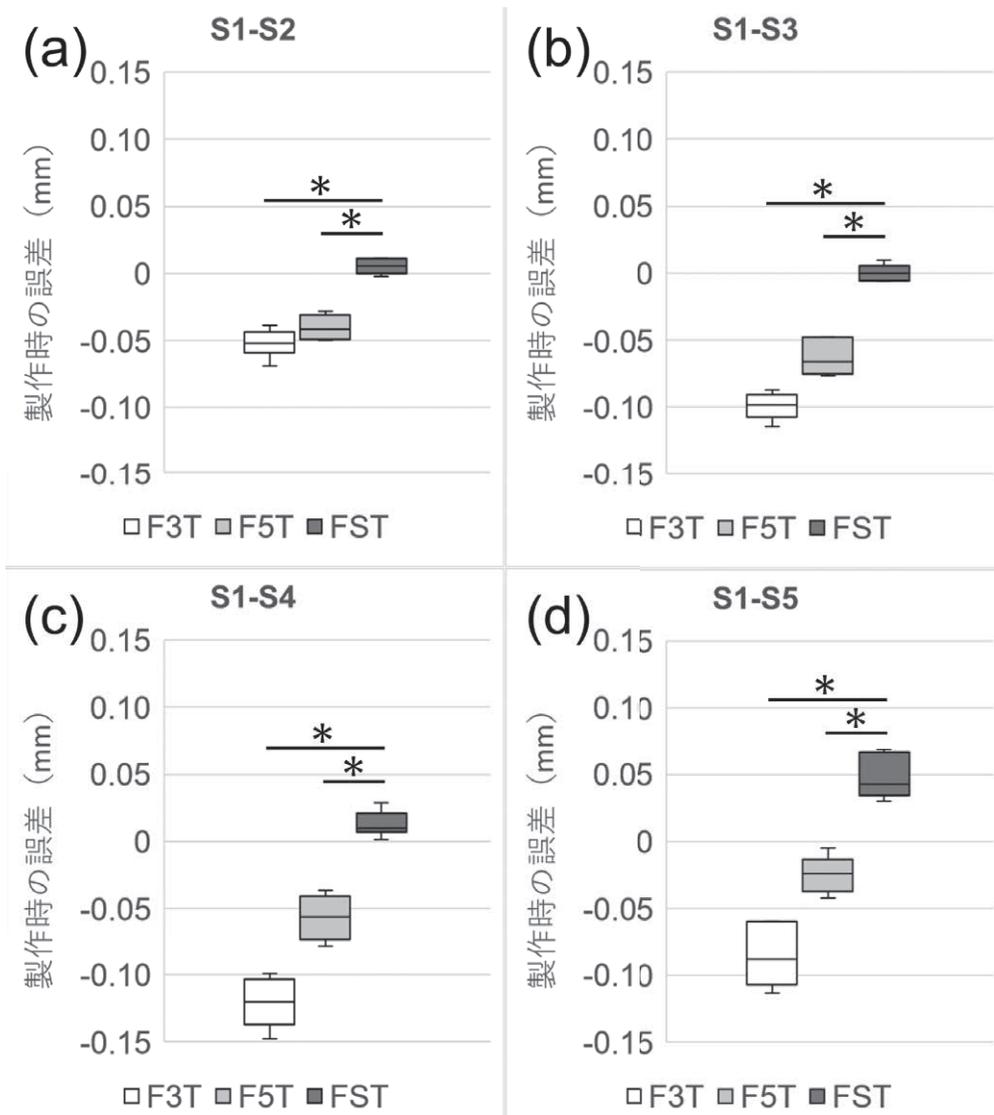


図6 模型の厚さによる誤差の比較

(a) S1-S2 間距離について F3T, F5T, および FST を比較.

(b) S1-S3 間距離について F3T, F5T, および FST を比較.

(c) S1-S4 間距離について F3T, F5T, および FST を比較.

(d) S1-S5 間距離について F3T, F5T, および FST を比較.

(Kruskal-Wallis 検定, * : $p < 0.05$, F3T : 全顎・厚さ 3mm・両面照射の模型, F5T : 全顎・厚さ 5mm・両面照射の模型, FST : 全顎・充実・両面照射の模型)

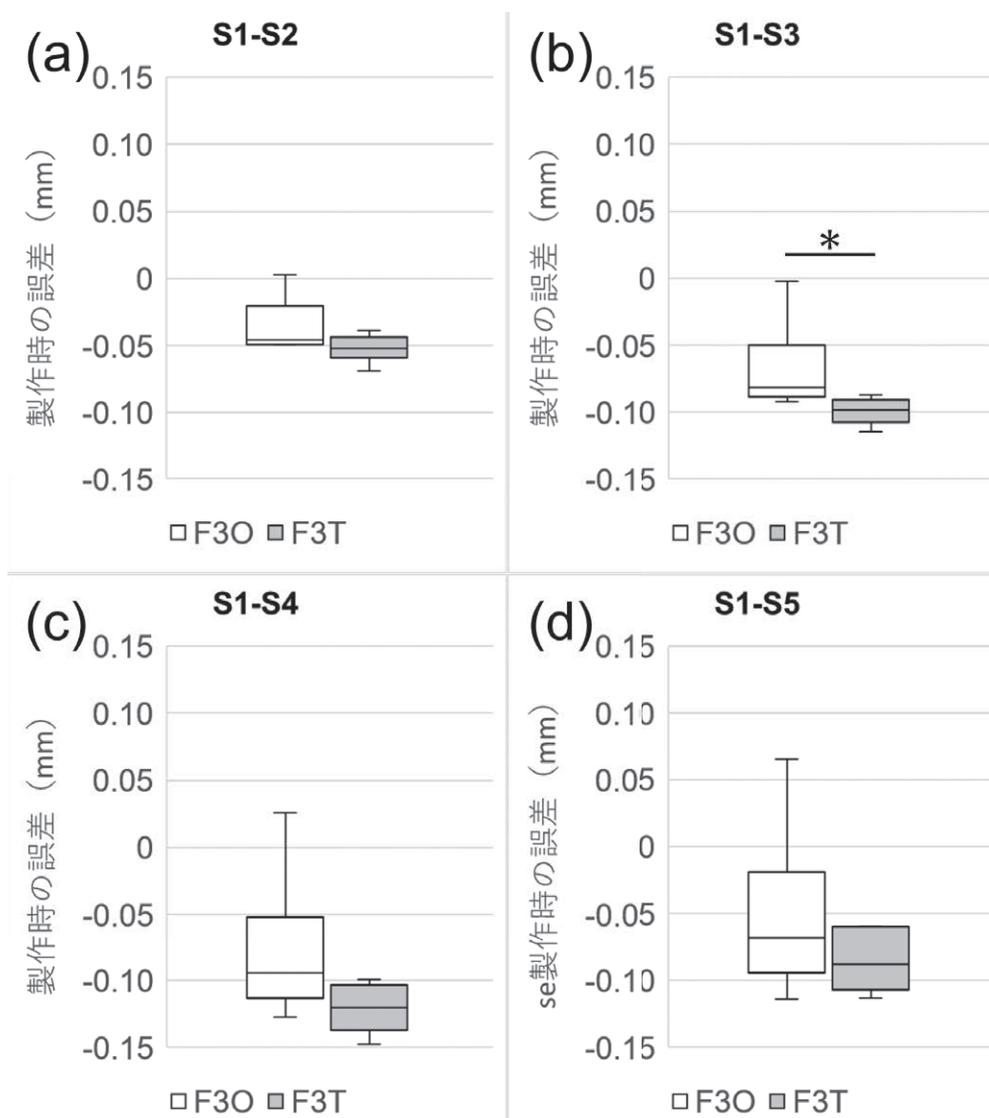


図7 光照射方向による誤差の比較

(a) S1-S2 間距離について F3O と F3T を比較.

(b) S1-S3 間距離について F3O と F3T を比較.

(c) S1-S4 間距離について F3O と F3T を比較.

(d) S1-S5 間距離について F3O と F3T を比較.

(Mann-Whitney の検定, * : $p < 0.05$, F3O : 全顎・厚さ 3 mm・片面照射の模型, F3T : 全顎・厚さ 3 mm・両面照射の模型)

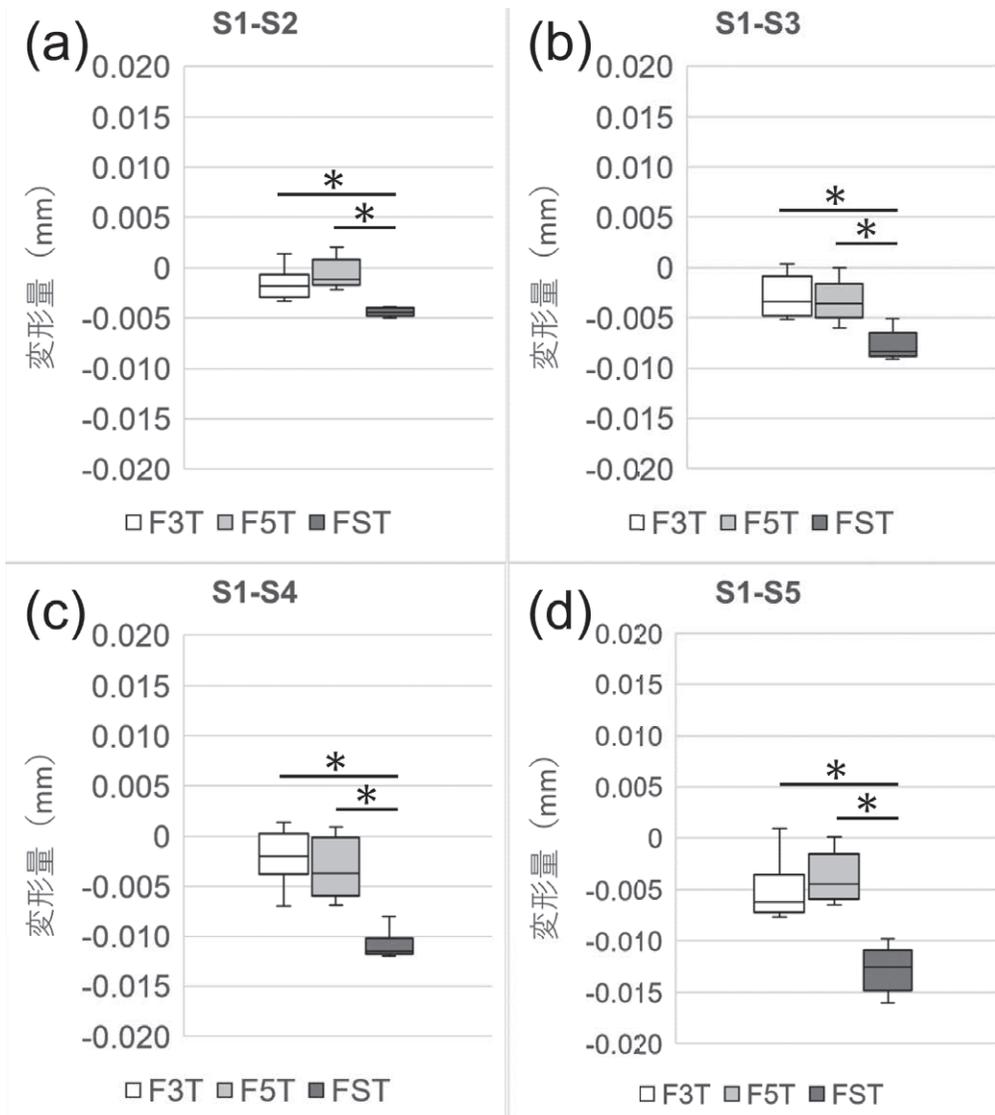


図8 模型製作7日後における、模型の厚さによる経時的変化量の差

(a) S1-S2 間距離について F3T, F5T, および FST を比較.

(b) S1-S3 間距離について F3T, F5T, および FST を比較.

(c) S1-S4 間距離について F3T, F5T, および FST を比較.

(d) S1-S5 間距離について F3T, F5T, および FST を比較.

(Kruskal-Wallis 検定, * : $p < 0.05$, F3T : 全顎・厚さ 3 mm・両面照射の模型, F5T : 全顎・厚さ 5 mm・両面照射の模型, FST : 全顎・充実・両面照射の模型)

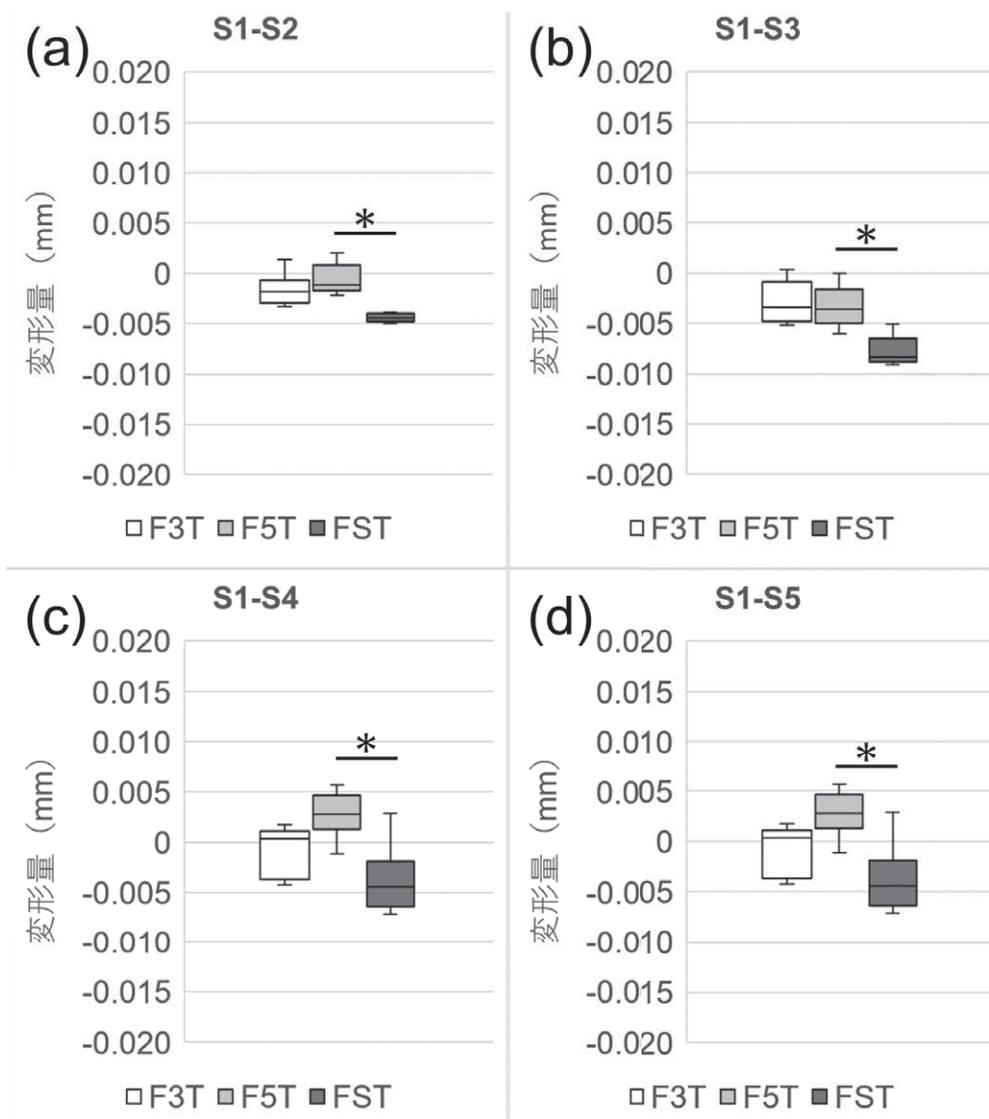


図9 模型製作 14 日後における，模型の厚さによる経時的变化量の差

(a) S1-S2 間距離について F3T, F5T, および FST を比較.

(b) S1-S3 間距離について F3T, F5T, および FST を比較.

(c) S1-S4 間距離について F3T, F5T, および FST を比較.

(d) S1-S5 間距離について F3T, F5T, および FST を比較.

(Kruskal-Wallis 検定, * : $p < 0.05$, F3T : 全顎・厚さ 3 mm・両面照射の模型, F5T : 全顎・厚さ 5 mm・両面照射の模型, FST : 全顎・充実・両面照射の模型)

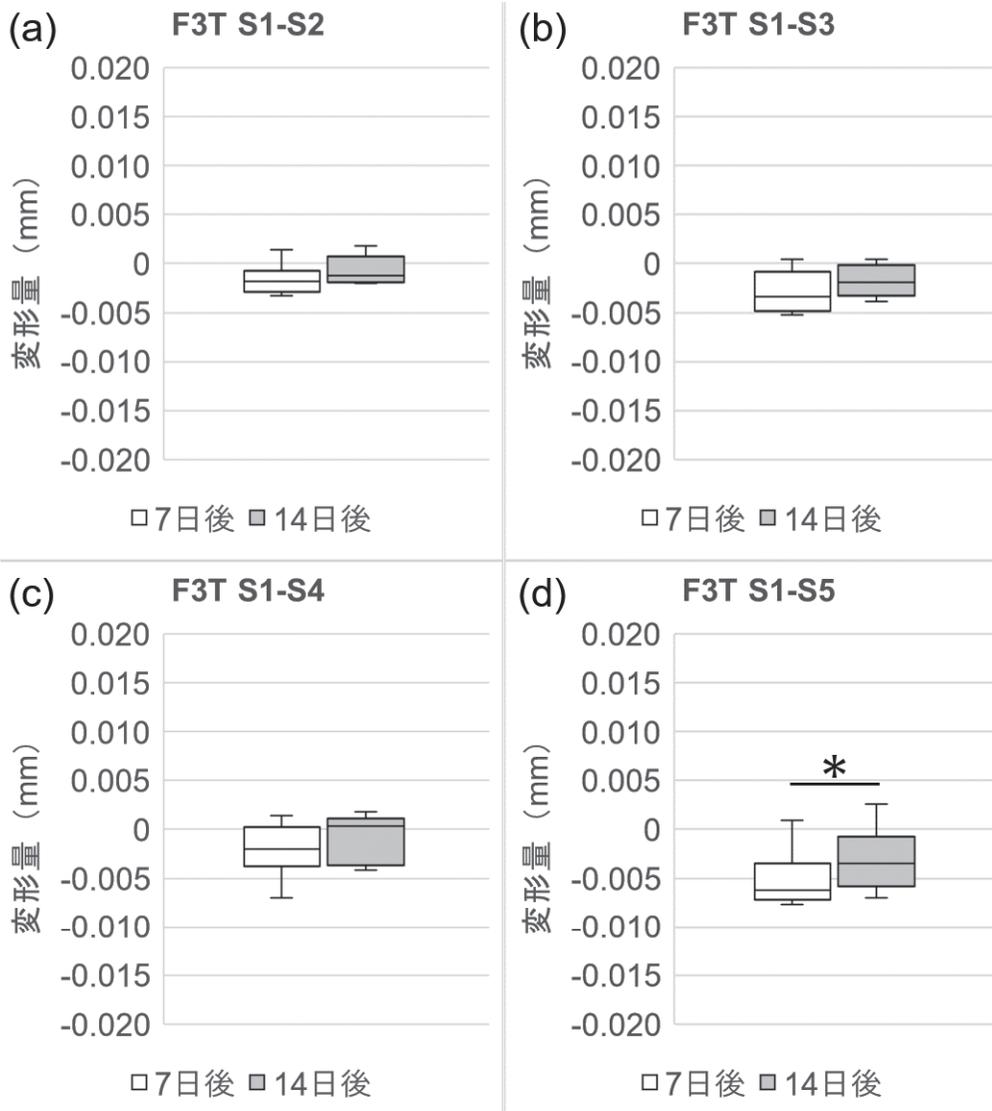


図 10 F3T における模型製作 7 日後と 14 日後の経時的変形量の比較
 (a) S1-S2 間距離, (b) S1-S3 間距離, (c) S1-S4 間距離, (d) S1-S5 間距離
 (Wilcoxon の符号付順位検定, * : $p < 0.05$, F3T : 全顎・厚さ 3 mm・両面照射の模型)

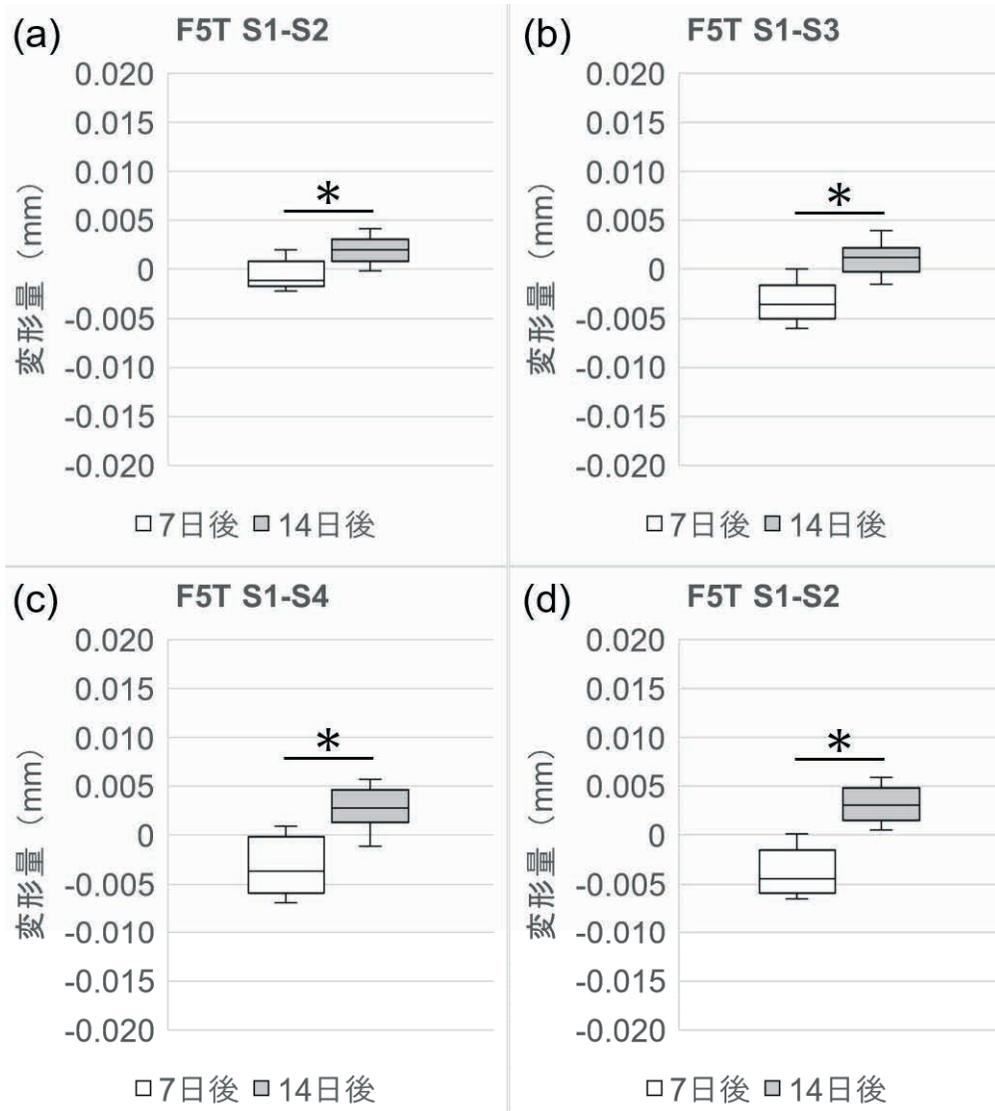


図 11 F5T における模型製作 7 日後と 14 日後の経時的変形量の比較
 (a) S1-S2 間距離, (b) S1-S3 間距離, (c) S1-S4 間距離, (d) S1-S5 間距離
 (Wilcoxon の符号付順位検定, * : $p < 0.05$, F5T : 全顎・厚さ 5 mm・両面照射の模型)

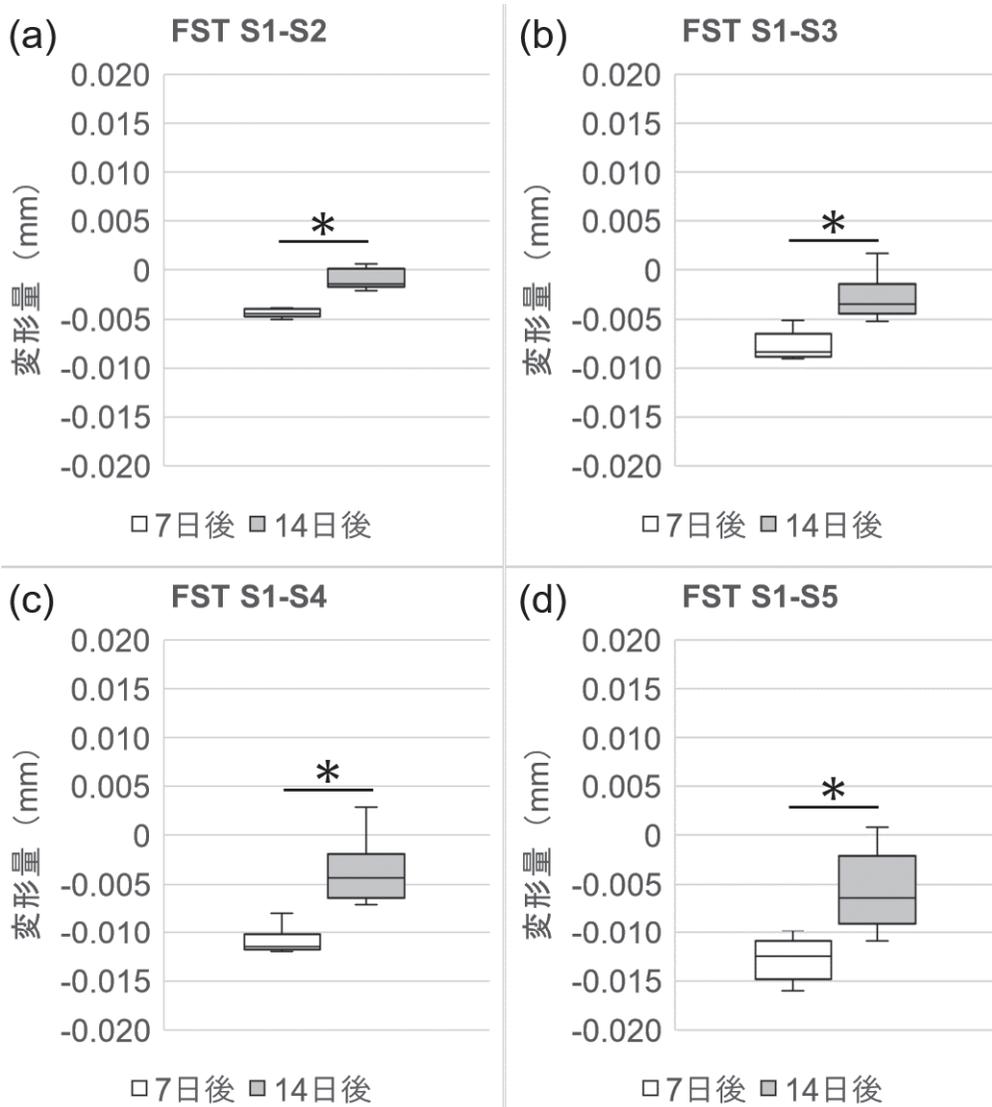


図 12 FST における模型製作 7 日後と 14 日後の経時的変形量の比較
 (a) S1-S2 間距離, (b) S1-S3 間距離, (c) S1-S4 間距離, (d) S1-S5 間距離
 (Wilcoxon の符号付順位検定, * : $p < 0.05$, F3T : 全顎・充実・両面照射の模型)

考 察

本研究の結果から、模型の大きさと厚み、および後重合処理時の光照射の方向が、実験用模型の製作時の精度に影響を与えることが確認できた。実験用模型製作後の経時的変形については、中空型模型と比較すると充実型模型の変形量が有意に大きく、また製作7日後と14日後を比較した場合は、14日後の経時的変形量が有意に小さくなる結果が得られたが、変形量の絶対値は非常に小さかった。

従来、作業用模型に関してはタイプ4硬質石膏（超硬質石膏）を用いて製作することがスタンダードとされてきたが、石膏の硬化膨張は避けられないという問題があり、歯科用石膏製品に関する国際規格（ISO 6873, Dental gypsum products）では、超硬質石膏では0～0.15%の線硬化膨張が認められている²⁰⁾。本研究では、充実型模型であるFSTは真の値よりわずかに大きく製作され、その増加率は0.02～0.09%であったことから、超硬質石膏の膨張率以下または少なくとも同等であることが示された。中空型模型では、すべての模型が真の値より小さく製作されていたが、これは光重合型レジンの重合収縮による変形であると考えられる。光重合型レジンを使用する3Dプリンティングでは、造形時および造形後の後重合処理時にレジンが重合収縮を起こし、最終的な製作物に誤差が生じることが報告されている^{13,21,22)}。

中空型模型の中でも、片顎模型であるH3Tは全顎模型であるF3Tと比較して誤差が有意に小さかった。Shinらの報告では、中空型模型の内部に支持構造を付与することで、模型造形時の誤差が減少するとされている¹³⁾。本研究のH3Tは、内部構造は中空型で支持構造の付与はしていなかったが、口蓋側の側壁が存在した。H3Tの口蓋側壁とおなじ構造がF3Tにあれば、模型内部を縦断する厚さ3mmの支持構造としてみなすことが出来るため、これが光照射による重合収縮へ抵抗する支持構造として働いた可能性がある。

中空型模型の厚みに関しては、外殻の厚さ3mmのF3Tが最も誤差が大きい結果となったが、これは薄い外殻では重合収縮への抵抗として不十分であったことと、模型が薄いことにより光照射による後重合処理が万遍なく行われ、それにより重合収縮量が大きくなったことが考えられる²³⁾。模型外殻を薄くすることで模型製作に必要な材料の量が少なくなり、コスト削減というメリットとなりうるが、精度を犠牲にしてしまう可能性がある。本研究では、3mmの中空型模型では、充実型の39%、5mmの模型では57%のレジン使用量で模型を製作することが出来た。しかしながら、厚みの薄い中空型模型では、模型の精度としては低くなる。厚さ3mmのF3Tでは、S1-S4間距離における製造時の誤差が最も大きく、-0.120mmであったが、歯科矯正のための診断用模型として用いるのであれば、0.25mm～0.30mmの誤差であれば臨床的に許容できるとする報告がある^{6,22)}。厚さ3mmの中空型模型は、診断用模型としては十分な精度があるが、作業用模型としては精度が不足している。したがって、最終的な製作物が求める精度によって、外殻の厚みを検討することが必要である。

後重合処理において光照射の方向を変えたF3OとF3Tの比較では、模型基底面側からのみ照射を行ったF3Oの方が、誤差が小さい結果となった。これは、光照射が模型基底面側に偏ることで、計測球の配置された模型咬合面側の重合収縮量が少なくなり、結果として誤差が少なくなったものと考えられる。使用した光照射機のボックスの蓋の裏側には光源と対面するように鏡面が設置されており、照射された光はボックス内を乱反射する構造となっているが、光照射を直接受ける面と反射光を受ける面では、重合収縮量が異なっている可能性がある。また、Wuらは、AMによる薄い造形物について、照射側と非照射側で重合収縮量に差が生じ、その結果として造形物が光源側に向かって湾曲することを報告している¹²⁾。光照射の方向により重合収縮量に差が生じると考えられるため、

後重合処理による変化の少ない模型の構造、形態を検討する必要がある。

模型製作後の経時的変形量に関しては、製作7日後ではF3T、F5Tと比較した際にFSTに有意な変形が見られ、最も大きな変形量を示したS1-S5間距離では-0.013 mmの変形量であった。また、製作14日後ではF5TとFSTとの間に有意差があり、F5Tでは0.003 mm、FSTでは-0.006 mmの変形であった。さらに、各模型における製作7日後と14日後の経時的変形量を比較すると、製作14日後の経時的変形量が有意に小さくなっていった。しかし、変形量の全ての測定値は、使用した非接触式三次元測定機の測定精度(±0.016 mm)以下であった。したがってDLP方式の模型製作における経時的変形量は無視できる範囲であることが示唆された。すなわち、DLP方式で製作した模型は製作当日から14日後までは変形しないため、製作当日からすぐに臨床操作に用いることが可能であると考えられる。

以上のことから、誤差の少ない作業用模型を製作する必要がある場合には、材料の消費量は多くなるが、模型の設計を充実型にすることが重要である。

本研究では、模型の形状による影響に焦点を当てているため、単一の3Dプリンタと単一の光重合型レジンおよび照射射機を用いて模型を製作した。そのため、現在では多種の光重合レジンが開発されているが、その材料間での比較はできなかった。将来的には、異なる光重合レジン、および異なる造形方式による模型製作時の誤差も検証すべきである。

結 論

DLP方式の3Dプリンティングによって作業用模型を製作する際には、内部を充実型にすることで良好な寸法精度を得られることが明らかとなった。中空型として製作する場合でも、片顎までの大きさであれば良好な精度が得られるが、全顎の模型を製作する場合は、作業用模型として必要な精度が得られない可能性がある。

経時的変形量に関しては、中空型、充実型ともに臨床的に許容できる範囲内であった。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、地方独立行政法人岩手県工業技術センター素形材プロセス技術部の皆様、ならびに岩手医科大学歯学部補綴・インプラント学講座の皆様には、温かいご指導ご鞭撻を賜りました。心より感謝申し上げます。

利 益 相 反

本研究において、公表すべき利益相反の事実はない。

文 献

- 1) Sun, J., & Zhang, F. Q. Sun J, Zhang FQ: The application of rapid prototyping in prosthodontics. *J Prosthodont.*, 21: 641-4, 2012.
- 2) International organization for standardization. "ISO/ASTM 52900:2015. Additive manufacturing — General principles — Terminology." ISO. 2015-12. <https://www.iso.org/standard/69669.html>. (参照 2020-12-4)
- 3) Charles W. Hull. "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography." Google Patents. 1986-11 <https://patents.google.com/patent/US4575330A/en>. (参照 2020-12-4)
- 4) Quan, H., Zhang, T., Xu, H., Luo, S., Nie, J., & Zhu, X.: Photo-curing 3D printing technique and its challenges. *Bioact Mater.*, 5: 110-115, 2020.
- 5) Revilla-León, M., & Özcan, M.: Additive Manufacturing Technologies Used for Processing Polymers: Current Status and Potential Application in Prosthetic Dentistry. *J Prosthodont.*, 28: 146-158, 2019.
- 6) Park, J. M., Jeon, J., Koak, J. Y., Kim, S. K., & Heo, S. J.: Dimensional accuracy and surface characteristics of 3D-printed dental casts. *J Prosthet Dent.*, S0022-3913: 30418-2, 2020.
- 7) Fasbinder D. J.: Clinical performance of chair-side CAD/CAM restorations. *J Am Dent Assoc.*, 137: 22S-31S, 2006.
- 8) Mörmann, W. H., & Schug, J.: Grinding precision and accuracy of fit of CEREC 2 CAD-CIM inlays. *J Am Dent Assoc.*, 128: 47-53, 1997.
- 9) Wettstein, F., Sailer, I., Roos, M., & Hämmerle, C. H.: Clinical study of the internal gaps of zirconia and metal frameworks for fixed partial dentures. *Eur J Oral Sci.*, 116: 272-9, 2008.
- 10) Persson, A. S., Odén, A., Andersson, M., & Sandborgh-Englund, G.: Digitization of simulated

- clinical dental impressions: virtual three-dimensional analysis of exactness. *Dent Mater.*, 25: 929-36, 2009.
- 11) Karalekas, D. Rapti, D. Gdoutos, E.E. Aggelopoulos, A.: Investigation of shrinkage-induced stresses in stereolithography photo-curable resins. *Experimental Mechanics*, 42: 439-444, 2002.
 - 12) Wu, D., Zhao, Z., Zhang, Q., Qi, H. J., & Fang, D.: Mechanics of shape distortion of DLP 3D printed structures during UV post-curing. *Soft Matter*, 15: 6151-6159, 2019.
 - 13) Shin, S. H., Lim, J. H., Kang, Y. J., Kim, J. H., Shim, J. S., & Kim, J. E.: Evaluation of the 3D Printing Accuracy of a Dental Model According to Its Internal Structure and Cross-Arch Plate Design: An In Vitro Study. *Materials (Basel)* ., 13: E5433, 2020.
 - 14) Rungrojwittayakul, O., Kan, J. Y., Shiozaki, K., Swamidass, R. S., Goodacre, B. J., Goodacre, C. J., & Lozada, J. L.: Accuracy of 3D Printed Models Created by Two Technologies of Printers with Different Designs of Model Base. *J Prosthodont.*, 29: 124-128, 2020.
 - 15) Sherman, S. L., Kadioglu, O., Currier, G. F., Kierl, J. P., & Li, J.: Accuracy of digital light processing printing of 3-dimensional dental models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.*, 157: 422-428, 2020.
 - 16) Joda, T., Matthisson, L., & Zitzmann, N. U.: Impact of Aging on the Accuracy of 3D-Printed Dental Models: An In Vitro Investigation. *J Clin Med.*, 9: 1436, 2020.
 - 17) Maria, R., Tan, M. Y., Wong, K. M., Lee, B., Chia, V., & Tan, K.: Accuracy of Implant Analogs in 3D Printed Resin Models. *J Prosthodont.*, In Press, 2020.
 - 18) Etemad-Shahidi, Y., Qallandar, O. B., Evenden, J., Alifui-Segbaya, F., & Ahmed, K. E.: Accuracy of 3-Dimensionally Printed Full-Arch Dental Models: A Systematic Review. *J Clin Med.* 9: 3357, 2020.
 - 19) Nestler, N., Wesemann, C., Spies, B. C., Beuer, F., & Bumann, A.: Dimensional accuracy of extrusion- and photopolymerization-based 3D printers: In vitro study comparing printed casts. *J Prosthet Dent.*, S0022-3913: 30748-6, 2020.
 - 20) International organization for standardization. "ISO 6873:2013 Dentistry — Gypsum products." ISO. 2013-04. <https://www.iso.org/standard/54423.html>, (参照 2020-12-4)
 - 21) Camardella, L. T., de Vasconcellos Vilella, O., & Breuning, H.: Accuracy of printed dental models made with 2 prototype technologies and different designs of model bases. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.*, 151: 1178-87, 2017.
 - 22) Hazeveld, A., Huddleston Slater, J. J., & Ren, Y.: Accuracy and reproducibility of dental replica models reconstructed by different rapid prototyping techniques. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.*, 145: 108-15, 2014.
 - 23) 平林 茂, 平澤 忠, 中西 敏: 可視光線重合型コンポジットレジン の硬化深さに影響を及ぼす諸因子について. *歯科材料・器械*, 3: 719-29, 1984.

Accuracy of cast manufactured by digital light processing

Motoki YANAGISAWA

Department of Prosthodontics and Oral Implantology, School of Dentistry, Iwate Medical University,

Morioka, Iwate, Japan

(Prof. Hisatomo KONDO)

[Received : December 11 2020 : Accepted : January 7 2021]

Abstract : The purpose of this study is to clarify the effect of cast structure on the accuracy of digital light processing (DLP) .

We created 3D model data of the maxillary edentulous jaw with five spheres and used it as the reference model data. The reference model data was edited to prepare full arch model data and half arch model data. Three types of full arch model data were prepared: a hollow type with a thickness of 3 mm, a hollow type with a thickness of 5 mm, and a solid type. On the other hand, one type of half arch model data was prepared: a hollow type with a thickness of 3 mm. Experimental casts were manufactured from the data of prepared models, using a 3D printer with DLP method, and the error of the casts was evaluated by measuring the distance between the center points of the spheres on the casts.

The error level of hollow casts was significantly higher than the error level of solid casts. ($p < 0.05$, Kruskal-Wallis test) . Moreover, when comparing the full arch cast with the half arch cast, the error of the full arch cast was significantly higher ($p < 0.05$, Mann-Whitney test) .

The results of this study suggest that the structure of the model affects the accuracy of DLP.

Key words : 3D printer, digital light processing, cast, accuracy