

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26460715

研究課題名(和文)放射線治療補助固定具を3Dプリンターで自動作成する造形技術開発に向けた基礎研究

研究課題名(英文) Feasibility basic study of three-dimensional printed device for head and neck immobilization in radiotherapy

研究代表者

武田 賢 (Takeda, Ken)

東北大学・医学系研究科・教授

研究者番号：60312568

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ヒト頭頸部模型をCT撮像したデータをソフトウェア上で加工し、3次元(3D)プリンターに転送して頭頸部固定具を作製した。比較対照として、放射線治療用固定具として実用化されている熱可塑性素材を用いて従来法(手作業)により頭頸部固定具を作成した。3Dプリンターで作製した頭頸部ファントムの固定具は、固定精度と線量特性の点で、従来法で作成した固定具と同等の性能を示し、臨床上、実用化できる可能性が示唆された。然しながら、CT撮像からデータを加工する迄に約2時間、3Dプリンターで出力するまでに約100時間程度の時間を要しており、今後の課題として、固定具の作成過程を効率的に短縮する必要があることが分かった。

研究成果の概要(英文)：We investigated the feasibility of a three-dimensional (3D) -printed head-and-neck (HN) immobilization device. We prepared a 3D-printed immobilization device (3DID) consisting of a mask and headrest with acrylonitrile-butadiene-styrene resin developed from the computed tomography data obtained by imaging a HN phantom. For comparison, a conventional immobilization device (CID) comprising a thermoplastic mask and headrest was prepared using the same HN phantom. We measured the setup error. Furthermore, we measured the changes in the dose due to the difference in the immobilization device material from the photon of 4 and 6 MV. The positional accuracy of the two devices was almost similar. When the thickness was the same, the dose difference was almost similar at a 50 mm depth. At a 1 mm depth, the 3DID-plate had a 2.9-4.2% lower dose than the CID-plate. This study suggested that the positional accuracy and dosimetric properties of 3DID were almost similar to those of CID.

研究分野：放射線腫瘍学

キーワード：放射線治療 患者補助固定具 3Dプリンター

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、本邦では高齢化の為に根治手術や全身化学療法の高齢患者が増加し、手術せずに治す、或いは癌による症状を緩和出来る放射線治療の需要が増加している。然し、本邦では放射線治療を担当する医療従事者（放射線治療医、放射線治療専任技師や医学物理士）の数がこの現状に対応出来る程、充分確保されているとは言い難い状況である。

(2) 放射線治療を安全且つ効果的に行う為に、照射時の体位保持を患者の体外から補助する固定具をしばしば必要とするが、その作成には緻密な手作的工程(可塑性素材を手作的に患者頭頸部にむらなく密着させ冷却して固める工程)が必要であり作成者の作成技術に依存する部分が多い。特に、視聴覚に関わる感覚器の多い頭頸部に照射する際の補助固定具は高い精度を必要とするため、熟練者でも小1時間程度、作成に時間を要する場合がある。元より体調が低下している患者に不動の姿勢を保持させて作成しているのが現状である。しかも、補助固定具の素材は経時的に改善されて来てはいるが、基本的な作業工程は、この20年以上、変化していない。今後に向け、補助固定具を自動で且つ可急的、正確に作成出来る精密な新技術の開発が必要である。

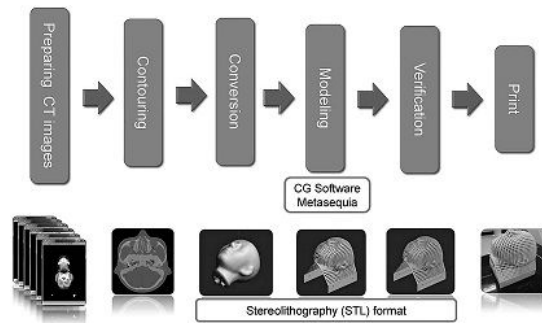
(3) この現状を踏まえ、申請者らは、工学の分野で発展の著しい3次元積層造形技術に着目した。医療の分野では、人工骨の作成に関する研究が報告されており、3次元(3D)プリンターの性能の向上と共に、CT画像データを3Dポリゴンデータ化して出力する技術が実現化して来ている。この技術を応用し、3Dプリンターによって放射線治療補助固定具を自動作成することが出来れば、患者は放射線治療を行う為に必要な治療計画CTを撮る間のみ(早い場合は1分弱等)一定の姿勢を保つことで体輪郭データ取得が可能であり、同データをポリゴン化し3Dプリンターに転送することで、ほぼ不用手的にテーラーメイドの放射線治療補助固定具が完成する。体表を正確にトレースした補助固定具が3Dプリンターにより作成することが可能になれば、患者と医療従事者の負担を軽減し、且つ、高精度放射線治療に的確に応用することで治療成績の向上も期待される。

### 2. 研究の目的

3Dプリンターを用いて、患者補助固定具を可急的に且つ精密に自動作成する造形技術の基礎研究を行い、特に使用頻度の高く、形状や凹凸度の個人差の大きな人体の頭頸部表面に適切にフィットさせる固定具を作成する為の課題探索とそれらの解決に向けた調査を行うことを目的とする。

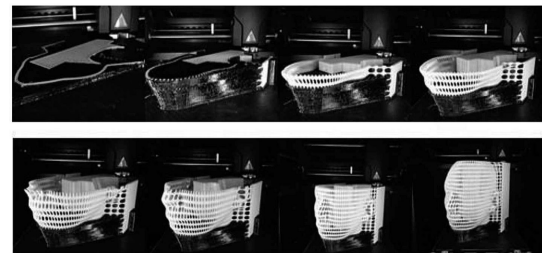
### 3. 研究の方法

(1) 3Dプリント固定具を作成する過程を以下の図に示す。



頭頸部ファントムをCT装置にてヘリカルスキャンによる撮影を行い、スライス厚1.25mmで再構成したdigital imaging and communication in medicine (DICOM)画像を取得した(Preparing CT images)後、頭頸部ファントム表面と空気層の閾値をOtsu thresholding法から求め、ファントム表面の輪郭を抽出した(Contouring)。次に3Dモデリングを行うソフトウェア(Metasequia v4.5(テトラフェイス社製))で読み込める様に、その輪郭データのDICOM形式をstereolithography (STL)形式に変換した(Conversion)。ファントム表面と固定具の間隔は0mmと2mmのものを作製し、マスクに相当する部分の厚みは3mmとした。ビルドアップ効果を考慮して、マスク部はメッシュ状に加工し、枕部分の内部をハニカム構造とした(Modeling)。その後、ポリゴンの断片化によるエラー等が無いを確認し、あれば修正した(Verification)。

モデリングしたデータを3Dプリンター(DimensionSST1200(Stratasys社製))に転送し、acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS)樹脂により、0.254mm間隔で積層造形を行った(以下の図)。



マスク部分の頭尾方向が積層方向となる様にポリゴンデータを配置した。

### (2) 固定精度の検討

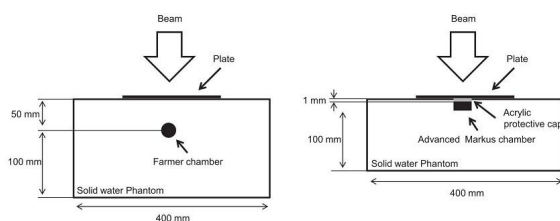
頭頸部ファントムに3Dプリンターで作製した固定具を装着し、CTを撮像した。レーザーポインターにより、CTの原点位置を固定具に記し、同部をアイソセンターとした治療計画をEclipse v11.0(Varian Medical System社製)で作成し、ExacTracシステム v5.5.6 (BrainLAB社製)を用いてマーキングした位

置とアイソセンターの変位量からセットアップ誤差を計測した。ファントムへの固定具の脱着とセットアップを 15 回、繰り返して行い、平行移動方向の vertical、longitudinal、lateral 方向と、回転移動方向の yaw、roll、pitch 方向についてのシフト量から固定精度を解析した。

比較対照として、頭部用固定具の ESFORM 頭部用(大)ESS-23(厚みは 1.75mm)(エンジニアリングシステムズ社製)と ESFORM 発砲スチロール枕(B)(エンジニアリングシステムズ社製)を用いて同じ頭頸部ファントムに合わせた固定具を従来法にて作製し、3D プリンターで作成した固定具の場合と同様に CT 撮像とセットアップ誤差を計測し、二つの固定具による固定精度を比較検討した。統計分析として JMP Prov11.0 (SAS 社製)の Student t 検定と F 検定を行い、 $p < 0.05$  の場合に有意差があるとした。

### (3) 線量特性の検討

ソフトウェア Metasequoia により 200mm × 200mm × 1.75mm の板をモデリングした後、ABS 樹脂を用いて 3D プリンターで出力した(3D-plate)。比較対照用として、孔の空いていないシェル ESS-17(エンジニアリングシステムズ社製)を 200mm × 200mm × 1.75mm 大にカットした(C-plate)。水当価固体ファントム solid water (Gammex 社製)と電離箱を使用して、腫瘍位置を想定した 50mm 深の線量と、皮膚を想定した 1mm 深の線量について、固定具材料の有無による線量特性について比較検討を行った(以下の図参照)。使用した電離箱は 50mm 深の場合、japan calibration service system (JCSS)校正された Farmer chamber Type 30006 円筒形電離箱(容積 0.6cm<sup>3</sup>)(PTW 社製)、1mm 深の場合、JCSS 校正された Advanced Markus chamber Type 34045 平行平板形電離箱(容積 0.02cm<sup>3</sup>)(PTW 社製)を使用した(以下の図)。



治療装置は Clinac iX(Varian 社製)の 4MV-X 線と Clinac 23Ex(Varian 社製)の 6MV-X 線、照射野は 10 × 10cm<sup>2</sup>、source-chamber distance (SCD) 100cm において電荷量を測定した。測定は 3 回行い、変動係数が 0.1%以下であることを確認した。また、3D-plate と C-plate の線量差 Diff(%)は、以下の式を用いて算出した。

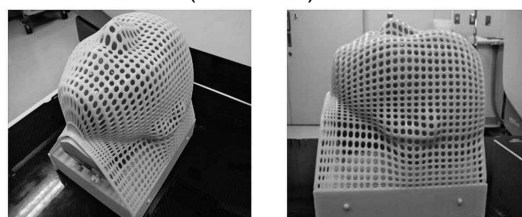
$$\text{Diff}(\%) = \frac{(3\text{D-plate} - \text{C-plate})}{(\text{C-plate})} \times 100$$

(4) Polylactic acid (PLA) 樹脂による試作  
上述の 3D モデリングデータから PLA 樹脂を用いた 3D プリントを試みた。

## 4. 研究成果

### (1) 3D プリンターによる固定具作製

頭頸部ファントムとの間隙を 0mm で設定して出力した固定具はファントムへの装着が困難であった。それに対し、間隙を 2mm で設定して出力した固定具は無理なくファントムに装着できた(以下の図)。



従来の熱可塑性の固定具は冷却時に収縮することで体表との密着が増し、セットアップ誤差が軽減することから、できるだけ間隙を小さくし密着度が上がる様な設定について引き続き今後の検討を要する。

尚、固定精度の検討は、間隙を 2mm で作製した固定具を使用して行った。

### (2) 固定精度

3D プリンターで出力した固定具のセットアップ誤差は vertical、longitudinal、lateral、yaw、roll、pitch 方向の平均 ±SD が各々、 $-0.28 \pm 0.09\text{mm}$ 、 $-0.02 \pm 0.07\text{mm}$ 、 $0.31 \pm 0.26\text{mm}$ 、 $-0.17 \pm 0.12^\circ$ 、 $0.08 \pm 0.17^\circ$ 、 $-0.31 \pm 0.08^\circ$  であった。従来製法の固定具は、 $0.29 \pm 0.05\text{mm}$ 、 $0.03 \pm 0.13\text{mm}$ 、 $0.84 \pm 0.26\text{mm}$ 、 $-0.15 \pm 0.16^\circ$ 、 $0.17 \pm 0.65^\circ$ 、 $-0.09 \pm 0.06^\circ$  であった。Student t 検定の結果、vertical、lateral、pitch 方向で有意差がみられた( $p < 0.05$ )が、その差は最大でも 1mm、 $1^\circ$  以内であった。また、F 検定の結果、longitudinal ( $p = 0.036$ )、roll 方向( $p < 0.0001$ )で有意差がみられ、3D プリントした固定具が従来製法の固定具よりも小さな値を示した。それ以外は同等の結果であった。3D プリンターで作製した固定具の固定精度は、日本放射線腫瘍学会の放射線治療計画ガイドライン<sup>1)</sup>における遵守すべき固定精度の範囲内に留まっており、その実用性が確認できた。

### (3) 線量特性

水当価固体ファントムにおける 50mm 深の固定具材料無の場合の線量を 100%とすると、

水当価固体ファントム上部に 3D-plate を配置した際は 6MV-X 線で 99.5%、4MV-X 線で 99.3%、C-plate を配置した際は 6MV-X 線で 99.4%、4MV-X 線で 99.3%となり、0.5%から 0.7%の線量低下がみられた。

同様に水当価固体ファントムにおける 1mm 深の固定具材料無の場合の線量を 100%とすると、水当価固体ファントム上部に 3D-plate を配置した際は 6MV-X 線で 151.1%、4MV-X 線で 137.1%、C-plate を配置した際は 6MV-X 線で 157.4%、4MV-X 線で 141.1%となり、41.4%から 57.4%の線量増加がみられた。

3D-plate と C-plate を比較すると、50mm 深では殆ど線量差は無かったが、1mm 深においては、C-plate に対する 3D-plate の線量は、6MV-X 線で 4.0%、4MV-X 線で 2.8%の線量低下がみられた。

50mm 深付近に位置する標的体積線量への影響は、従来法による固定具とほぼ同様と思われた。また、1mm 深の線量については、今回は板状の材料間での比較ではあるが、等しい厚みとすると、3D-plate の方が C-plate よりも線量低減できたことから、前者の方が皮膚線量を低減できる可能性が示唆された。然しながら、実際の従来法による固定具は作成時に一部が伸展させられるために全体としての厚さが不均一となることも考慮する必要がある。

#### (4) PLA 素材による試作

本研究では、3D プリント出力サービスを利用して固定具の 3D プリントを行ったが、一個あたりの材料費 (ABS 樹脂) と 3D プリントに掛る費用が約 30 万円程度必要であった。研究期間中に使用可能となった PLA 樹脂での 3D プリントに掛る費用が、ABS 樹脂の場合の約半額程度とのことで PLA 樹脂での試作を、研究後半で行った。弾力性のある ABS 樹脂に比べて、元々の材質が硬くて後加工がし難い性状のため、マスク状の造形は困難を極めた。現時点では、本研究目的の実用は難しいと思われた。

3D プリンターで作製した頭頸部ファントムの固定具は、従来法で作成した固定具と比べて、固定精度と線量特性の点で、ほぼ同等の結果が得られており、臨床上の実用化に向けての可能性が示された。

然しながら、本研究では、CT 画像から固定具をモデリングするのに約 2 時間、モデリングしたポリゴンデータを 3D プリントするのに約 100 時間程度の時間を要した。今後の課題として、作成過程の効率的な短縮を行う必要がある。今後、放射線治療補助固定具の 3D モデリングの過程に特化したソフトウェアや、固定精度を担保しながら時間を短縮でき

る 3D 造形方式の開発を検討している。

#### <引用文献>

1. 日本放射線腫瘍学会放射線治療計画ガイドライン 2012.  
<http://www.jastro.or.jp/guideline/child/php?eid=00007>

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Sato K, Takeda K, Dobashi S, Kadoya N, Ito K, Chiba M, Kishi K, Yanagawa I, Jingu K, Evaluation of the Positional Accuracy and Dosimetric Properties of a Three-dimensional Printed Device for Head and Neck Immobilization. Nihon Hoshasen Gijutsu Gakkai Zasshi.(査読有), 73(1), 2017, 57-65. DOI: 10.6009/jjrt.2017\_JSRT\_73.1.57.

〔学会発表〕(計 2 件)

Sato K, Takeda K, Dobashi S, Kishi K, Kadoya N, Yanagawa I, Evaluation of the positional accuracy and dosimetric properties of a three-dimensional printed device for head and neck immobilization. 第 72 回日本放射線技術学会総会学術大会, 2016/4/15, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市)

Sato K, Takeda K, Dobashi S, Kishi K, Kadoya N, Ito K, Chiba M, Jingu K, Positional accuracy valuation of a three-dimensional printed device for head and neck immobilization. European Society for Therapeutic Radiology and Oncology 35, 2016/5/1, Turin, Italy.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：

発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

武田 賢 (Takeda, Ken)  
東北大学・大学院医学系研究科・教授  
研究者番号：60312568

### (2) 研究分担者

角谷 倫之 (Kadoya, Noriyuki)  
東北大学・病院・助教  
研究者番号：20604961

### (3) 連携研究者

佐藤 清和 (Sato, Kiyokazu)  
東北大学・病院・診療技術部  
主任診療放射線技師  
研究者番号：90800144

土橋 卓 (dobashi, Suguru)  
東北大学・大学院医学系研究科・助教  
研究者番号：70399806

### (4) 研究協力者

伊藤 謙吾 (Ito, Kengo)  
東北大学・病院・助手  
研究者番号：40705076

千葉 瑞己 (Chiba, Mizuki)  
東北大学・病院・助手  
研究者番号：40756441