

博士論文（要約）

論文題目

3D プリンターを用いた腹部内臓動脈瘤の  
シミュレーションモデルに関する基礎研究と臨床応用

氏名 柴田 英介

## 論文の内容の要旨

論文題目 3D プリンターを用いた腹部内臓動脈瘤のシミュレーションモデルに関する  
基礎研究と臨床応用

氏名：柴田 英介

三次元（3D）造形技術は付加製造やラピッドプロトタイピングとして知られ、デジタルデータから3次元の物体を合成できる技術であり、医療の分野でも注目されている領域である。3次元造形には様々な作製方式があるが、その中でも最も安価で、世界中で広く使われている熱溶解蓄積法（FDM）がある。

今回我々は腹部内臓動脈瘤の血管内治療におけるシミュレーションをして臨床応用する目的でFDM法のプリンターを使用して中空モデルの作製を行った。作製過程において単純な構造と比較して、中空の血管モデルといった複雑な構造のモデルを作製するのは困難を伴う。通常モデルではサポート構造をモデルにつけてプリンターで作製するが、中空モデルでは内部はサポート構造なしでの作製が求められる。またFDMのプリンターでは層状に熱で溶かしたフィラメントを蓄積させてモデルを作製するが、モデルを作製する際に内部が空洞であると重力の影響で宙に浮いた部位ではフィラメントが垂れるなどの技術的な問題が発生しうる。この為、中空モデルを術前シミュレーションに応用するにあたり、作製したモデルの精度や正確度に関する基礎研究が必要であるが、過去の論文で腹部内臓動脈瘤モデルの中腔モデルについて精度や正確度の評価した論文はない。

我々はまず、①3次元構築の技術による血管中空モデルの作製方法を確立し、②脾動脈の中腔モデルにおいてモデル形状の作製毎のばらつき、精度を評価し、続いて③径の小さい狭窄モデルにおける精度を確認するため、門脈狭窄の中腔モデルにおいてモデル形状の作製毎のばらつき、精度を評価し、更に④複数の腹部動脈瘤に対して中空モデルを作製し、CTデータと作製したモデルを比較して正確度の検証を行った。最後に、これらの結果に基づき、⑤実際に血管内治療の術前シミュレーションにモデルを応用した。

今回まずは中空モデルのモデル形状の作製毎のばらつきを評価する目的で、CT血管造影で得られたデータを元に、3Dプリンターで同一の脾動脈瘤モデルを10個作製した。脾動脈瘤モデルの各モデル間の断面積の誤差はSD値で $5\text{mm}^2$ 以下（範囲：0.0–5.0）であり、モデル形状の作製毎のばらつきは少なく、精度が高いことが示唆された。

また中空モデルの細い部位でのモデル形状のモデル作製毎のばらつき、精度を評価する

ために、同一の門脈狭窄モデルを 10 個作製した。モデルを門脈の長軸と直行する断面で評価した際の各モデル間の断面積の相違は SD 値で  $4\text{mm}^2$  以下（範囲：0.8–3.9）であり、血管の細い部位でもモデル形状の作製毎のばらつきは少ないことが示唆された。

続いて2006年3月から2015年8月において真性腹部内臓動脈瘤に対して塞栓をした症例を抽出し、合計15個の動脈瘤について中空モデルをそれぞれの動脈瘤に対して作製した。オリジナルの画像とこれらのモデルの動脈瘤体積を測定し、更に動脈瘤に加えて流入・流出動脈を含めた全体の形態を評価することで正確度を確認した。オリジナルの画像とモデルで動脈瘤のサイズに有意差は認めなかった (Wilcoxon signed rank test, p-value = 0.56)。更に動脈瘤に加えて流入動脈・流出動脈の形態評価ではDice coefficient indexで $0.911 \pm 0.041$ （範囲：0.842–0.958）と高値であり、中空モデルの正確度が高いことが示唆された。

モデルの臨床応用については、中空ではない通常の血管モデルと、前述のように精度や正確度を評価した中空モデルと同様の手法で作製した血管の中腔モデルを使用して、術前シミュレーションにおける有用性について検討した。

血管モデルでは血管の位置関係を立体で直視できる。これにより解剖の理解を高めることや血管内治療におけるカテーテルやガイドワイヤーの適した形を考察することができた。更に中空モデルは血管内治療術前のシミュレーションに使用し、術前に計画した治療方法で塞栓物質のサイズや量、治療道具での血管選択の可否など多くのフィードバックを得ることができ、治療方針における検討に重要な役割を果たした。

3D プリンターの臨床応用の最終的な目的は、患者への治療の安全性、治療成功率向上を目指している。モデルを用いて血管内治療のシミュレーションを施行することで、患者、医学生への教育に利用できるだけでなく、若手の放射線科医の血管内治療の技術習得に役立つことで、将来的に患者の放射線被曝線量の低減、治療時間の短縮、合併症率の低下につなげていくことができると考える。