

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04557

研究課題名（和文）3Dプリンタ用PVA材料の構造および熱物性と適応部位の解明

研究課題名（英文）Study of Structural and Thermal Properties of PVA as 3D Printing Material for Body Parts Modeling

研究代表者

太田 信 (Ohta, Makoto)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：20400418

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：血管モデルは医療機器の評価やトレーニングに重要で、シリコンからゲルが使われるようになった。3Dプリンタで患者の血管形状を再現できるが、内部表面粗さの問題があった。本事業では表面形状の制御と測定方法の開発に成功し、ポリビニルアルコールハイドロゲルを使用して表面粗さを変化させた。力学的特性も再現し、医師の感触も良く似ていると評価された。これらのことから表面形状の変化が摩擦や操作感触に影響することが明らかになり、血管の感触再現に重要な知見と言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：血管表面摩擦力を制御する技術確立が本研究の重要な意義である。これまで表面摩擦は低く生体血管に近い方が良いとされてきたが、表面摩擦力は医療現場で重要とされていた。この技術確立できたことで、トレーニングシステムにおいて、より本物の疾患に近い血管モデルを提供できる可能性が高くなったことが社会的意義である。

研究成果の概要（英文）：Vascular models are important for medical device evaluation and training, and gels have come a long way from silicone; 3D printers can reproduce a patient's vascular geometry, but internal surface roughness has been a problem. The project successfully developed a method to control and measure the surface topography and used a polyvinyl alcohol hydrogel to change the surface roughness. The mechanical properties were also reproduced and the feel was evaluated to be very similar to that of a physician's touch. It is clear that changes in surface topography affect friction and operating feel, which is an important finding for reproducing the feel of blood vessels.

研究分野：生体医工学

キーワード：血管モデル 摩擦 カテーテル ポリビニルアルコール ハイドロゲル

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

血管モデルが、トレーニングツールとして非常に高く認識されている。これまでの血管モデルの開発ではカテーテルの挿入感覚の再現に着目が集まっていたため、材料の機械力学的性質として摩擦係数測定が盛んに行われた。既存の血管モデルでよく使用されるシリコン製のモデルは摩擦係数が高いため、模擬血液に界面活性剤を含めることで対応がなされた。しかしながら、泡が立つことや実験後の片付けの時間を要するなどの問題が生じた。一方申請者らは、PVA-H(ポリビニルアルコールハイドロゲル)を主成分とした材料を開発し、世界に先駆けて血管モデルに応用した。申請者らはハイドロゲルによる含水のため、水を模擬血液と使用しても血管として十分な低摩擦状態を再現することに成功した。医療従事者による官能試験では、PVA-H製の血管モデルの低摩擦力の性質によって人体の血管により近いカテーテルの手元操作感(力覚)が得られ、シリコン製のモデルよりも「本物の血管らしい力覚でカテーテルを操作していること」を再現することが示唆された(生体医工学会, 2017, 太田ら)。さらに、PVA-Hを直接抽出できる3Dプリンタを開発し、表面形状を変化させることの可能性が示唆された。

これまでの血管モデルは、専門医(脳神経血管内治療学会では基礎訓練5年以上、術者経験20例)になる前の医療従事者のためのトレーニングツールとして開発されてきた。このため、主に健康な臓器の物性や形状データから模擬されてきた。一方、さらに高度な目的である医療機器の評価や後進指導に携わるのは、専門医や指導医(術者経験200例)である。専門医以上が必要としているのは疾患患者でカテーテルを操作したときの操作感である。例えば、カテーテルで血管壁に接触したときのざらざら感・引っかかり感であり、この感覚があれば動脈硬化なので、この箇所は触れないようにするなど対応を専門医は行う。この引っかかり感はこれまでの血管モデルでは再現されていなかった。

### 2. 研究の目的

本申請の目的は、3Dプリンタで表面形状を変化させ、摩擦力を変化させることが可能か、その摩擦力の変化がカテーテル操作感に影響を与えるかを解明することである。

### 3. 研究の方法

3Dプリンタで表面形状を変化させ、その形状状態を3Dデジタイザで観測する。摩擦力の変化は摩擦係数測定を行う。さらに、血管モデルを作製し、専門医に操作感を評価してもらう。

### 4. 研究成果

表面形状は200 $\mu$ m程度で変化させることが可能であり、摩擦力も変化させることに成功した。また、その表面形状の違いにより専門家からは操作感が違うとの意見を抽出することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 11件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Haoran Wang , Hitomi Anzai , Youjun Liu , Aike Qiao , Jinsheng Xie , Makoto Ohta , Zhihan Lv	4. 巻 2020
2. 論文標題 Hemodynamic-Based Evaluation on Thrombosis Risk of Fusiform Coronary Artery Aneurysms Using Computational Fluid Dynamic Simulation Method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Complexity	6. 最初と最後の頁 8507273
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2020/8507273	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Khalid M Saqr , Simon Tupin , Sherif Rashad , Toshiki Endo , Kuniyasu Niizuma , Teiji Tominaga , Makoto Ohta	4. 巻 10
2. 論文標題 Physiologic blood flow is turbulent.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific reports	6. 最初と最後の頁 15492
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-72309-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Simon Tupin , Khalid M. Saqr , Makoto Ohta	4. 巻 61
2. 論文標題 Effects of wall compliance on multiharmonic pulsatile flow in idealized cerebral aneurysm models: comparative PIV experiments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00348-020-02998-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yujie Li , Yuuya Yoneyama , Haruo Isoda , Masaki Terada , Takafumi Kosugi , Takashi Kosugi , Mingzi Zhang , Makoto Ohta	4. 巻 29
2. 論文標題 Haemodynamics in a patient-specific intracranial aneurysm according to experimental and numerical approaches: A comparison of PIV, CFD and PC-MRI.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Technology and health care	6. 最初と最後の頁 253-267
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3233/THC-202252	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Khalid M Saqr , Sherif Rashad , Simon Tupin , Kuniyasu Niizuma , Tamer Hassan , Teiji Tominaga , Makoto Ohta	4. 巻 40
2. 論文標題 What does computational fluid dynamics tell us about intracranial aneurysms? A meta-analysis and critical review.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of cerebral blood flow and metabolism	6. 最初と最後の頁 1039
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/0271678X19854640	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Wang, H. , Wang, H. , Anzai, H. , Liu, Y. , Qiao, A. , Xie, J. , Ohta, M. , Ohta, M. , Ohta, M.	4. 巻 2020
2. 論文標題 A Hemodynamic-Based Evaluation of Applying Different Types of Coronary Artery Bypass Grafts to Coronary Artery Aneurysms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Complexity	6. 最初と最後の頁 9359340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2020/9359340	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Shimizu, Y. , Tupin, S. , Kiyomitsu, C. , Kitamura, K. , Takashima, K. , Ohta, M.	4. 巻 10
2. 論文標題 Development of a stereo dip-coating system for fabrication of tube-shaped blood vessel models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 6929
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-63718-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tupin, S. , Ohta, M.	4. 巻 13
2. 論文標題 Assessing porous media permeability in non-Darcy flow: A re-evaluation based on the Forchheimer equation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 2535-2535
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma13112535	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hitomi Anzai , Tomohito Watanabe , Xiaobo Han , Narendra Kurnia Putra , Zi Wang , Hisatoshi Kobayashi , Makoto Ohta	4. 巻 28
2. 論文標題 Endothelial cell distributions and migration under conditions of flow shear stress around a stent wire.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Technology and health care	6. 最初と最後の頁 345-354
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3233/THC-191911	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Naohiro Kobayashi, Yasutomo Shimizu, Ryota Nagano, Simon Tupin, Makoto Ito, Makoto Ohta	4. 巻 5
2. 論文標題 Development and Evaluation of PVA-H 3D Printed Blood Vessel Biomodels With Several Stiffness	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Conference Proceedings International Mechanical Engineering Congress & Exposition	6. 最初と最後の頁 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/IMECE2020-23525	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Simon TUPIN, Kei Takase, Makoto Ohta,	4. 巻 44(8)
2. 論文標題 Experimental analysis of pressure and flow alterations during and after insertion of a Multilayer Flow Modulator into an AAA model with incorporated branch	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 CardioVascular and Interventional Radiology	6. 最初と最後の頁 1251-1259
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00270-021-02835-z.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Makoto Ohta	4. 巻 29
2. 論文標題 Emerging Technologies for Heart Diseases	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Technology and Health Care	6. 最初と最後の頁 1047-1048
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3233/THC-212909	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 清水 康智, 于 凱鴻, 吉田 洋, 益田 泰輔, 庄島 正明, 松永 忠雄, Tupin Simon, 芳賀 洋一, 新井 史人, 原田 香奈子, 太田 信	4. 巻 43
2. 論文標題 血管内治療用臨床トレーニングのためのBionic-Vasculatureの開発とその評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 CI研究 : 日本脳神経CI学会機関誌	6. 最初と最後の頁 81-87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zi Wang, Narendra Kurnia Putra, Hitomi Anzai and Makoto Ohta	4. 巻 12
2. 論文標題 Endothelial Cell Distribution After Flow Exposure With Two Stent Struts Placed in Different Angles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Physiology	6. 最初と最後の頁 733547
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphys.2021.733547	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kohei Mitsuzuka, Yujie Li, Toshio Nakayama, Hitomi Anzai, Daisuke Goanno, Simon Tupin, Mingzi Zhang, Haoran Wang, Kazunori Horie and Makoto Ohta	4. 巻 13(2)
2. 論文標題 A Parametric Study of Flushing Conditions for Improvement of Angioscopy Visibility	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Functional Biomaterials	6. 最初と最後の頁 69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/jfb13020069	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yujie Li, Mingzi Zhang, Simon Tupin, Kohei Mitsuzuka, Toshio Nakayama, Hitomi Anzai, Makoto Ohta,	4. 巻 12
2. 論文標題 Flush Flow Behaviour Affected by the Morphology of Intravascular Endoscope: A Numerical Simulation and Experimental Study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Physiology	6. 最初と最後の頁 733767
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphys.2021.733767	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 13件）

1. 発表者名 Simon Tupin and Karim Mazeau
2. 発表標題 On the optimization of blood mimicking fluids optical and rheological properties
3. 学会等名 17th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Simon Tupin and Khalid M. Saqr
2. 発表標題 Development of averaged geometries for CFD benchmarking of intracranial aneurysmal flow
3. 学会等名 17th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naohiro Kobayashi, Ryota Nagano, Makoto Ito, Yasutomo Shimizu, Simon Tupin, Makoto Ohta
2. 発表標題 Development and Evaluation of PVA-H 3D Printed Blood Vessel Biomodels with Several Stiffness
3. 学会等名 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小池隼太, Shiddiq Hashuro, 小林直裕, Simon Tupin, 小助川博之, 戸塚厚, 太田信
2. 発表標題 超音波検査用バイオモデル材料のPVA-H 3Dプリンタへの応用
3. 学会等名 日本機械学会東北支部 第56期総会・講演会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 太田 信, Tupin Simon, 安西 眸, 于 凱鴻, Zhang Mingzi, 戸塚 厚, 小助川博之
2. 発表標題 生体組織モデルを用いた医療機器開発へ参加のお誘い
3. 学会等名 第61回 日本脈管学会総会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 太田 信
2. 発表標題 (骨)モデルの国際標準を進めるWG14への参加の勧め
3. 学会等名 医用立体モデルコンソーシアム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Muhammad Shiddiq Sayyid Hashuro, Simon Tupin, Daisuke Goanno, Makoto Ito, Kosuke Inoue, Toshiyuki Hayase, Makoto Ohta
2. 発表標題 Development of Transparent PVA-H Model with Scattering Ability for Ultrasound Usage
3. 学会等名 14th International Symposium on Advanced Biomedical Ultrasound (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuki Takeda, Hitomi Anzai, Mingzi Zhang, Kohei Mitsuzuka, Wang Haoran, Ai Kajiyama, Makoto Ohta
2. 発表標題 CFD analysis of AVF for hemodialysis
3. 学会等名 2ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL BIOFLUID 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Zi Wang, Narendra Kurnia Putra, Kako Yamasaki, Naofumi Ohtsu, Hisatoshi Kobayashi, Makoto Ohta
2. 発表標題 Endothelial Cells Distribution on the Stent Strut with Surface Treatment after the Flow Exposure
3. 学会等名 The 4th Symposium for The Core Research Cluster for Materials Science (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 戴 晨鳴, 吉田 洋, 松永忠雄, 鶴岡典子, 于 凱鴻, 清水康智, 太田 信, 庄島正明, 高嶋一登, 原田香奈子, 益田泰輔, 新井史人, 芳賀洋一
2. 発表標題 マイクロセンサを搭載した血管モデル
3. 学会等名 生体医工学シンポジウム2020,
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. S. S. Hashuro, Simon Tupin, 井上 浩介, 早瀬 敏幸, 太田 信
2. 発表標題 超音波血管撮像用PVA-Hモデルの開発
3. 学会等名 日本超音波医学会第93回学術集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Kohata, H. Anzai, M. Decroocq, S. Rit, C. Frindel, M. Ohta
2. 発表標題 Virtual Angiography System as a Platform for Blood Flow estimation
3. 学会等名 Lyon Saint Etienne & Nippon Scientific Network Engineering sciences Lyon Tohoku LyonSEN; ELyT Workshop 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Z. Wang, H. Anzai, Y. Kojima, N. K. Putra, J.-P. Rieu, N. Ohtsu, H. Taniho, M. Ohta
2. 発表標題 Endothelial cells distribution after the flow exposure experiment
3. 学会等名 Lyon Saint Etienne & Nippon Scientific Network Engineering sciences Lyon Tohoku LyonSEN; ELYT Workshop 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuki Takeda, Hitomi Anzai, Mingzi Zhang, Wang Haoran, Ai Kajiyama, Makoto Ohta
2. 発表標題 Assessing of the Relationship between WSS and TAV for Disturbed Flow on the Geometry of AVF for Hemodialysis
3. 学会等名 Eighteenth International Conference on Flow Dynamics - ICFD 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Simon Tupin, Mingzi Zhang, Yujie Li, Makoto Ohta
2. 発表標題 Dual-Stent Microstructural Characteristics and their Impact on Intra-Aneurysmal Haemodynamics
3. 学会等名 Eighteenth International Conference on Flow Dynamics - ICFD 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 太田信
2. 発表標題 生体モデルの研究開発と国際標準化
3. 学会等名 日本機械学会 第33回バイオエンジニアリング講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Muhammad Shiddiq Sayyid Hashuro, Makoto Ohta, Simon Tupin
2. 発表標題 Poly-Vinyl Alcohol Hydrogel (PVA-H) Ultrasound Phantom: PIV Feasibility for ground truth
3. 学会等名 UTM-IFS 3rd International Biofluid Symposium 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naohiro Kobayashi, Hiroyuki Kosukegawa, Makoto Ohta
2. 発表標題 Friction Measurement of 3D Printed Material for Blood Vessel Biomodels
3. 学会等名 UTM-IFS 3rd International Biofluid Symposium 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kotaro Daibo, Naohiro Kobayashi, Muhammad Shiddiq Sayyid Hashuro, Hiroyuki Kosukegawa, Kaihong Yu, Makoto Ohta
2. 発表標題 Establishment of a method for creating partially different blood vessel models
3. 学会等名 UTM-IFS 3rd International Biofluid Symposium 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

2020年 <a href="http://www.ifs.tohoku.ac.jp/bfc/html/Article2020.html">http://www.ifs.tohoku.ac.jp/bfc/html/Article2020.html</a>
--

## 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	岡本 吉弘  (Okamoto Yoshihiro)  (40776027)	国立医薬品食品衛生研究所・医療機器部・室長    (82601)	
研究分担者	安西 眸  (Anzai Hitomi)  (50736981)	東北大学・流体科学研究所・助教    (11301)	
研究分担者	庄島 正明  (Shojima Masaaki)  (80376425)	帝京大学・医学部・教授    (32643)	
研究分担者	TUPIN SIMON  (Tuipin Simon)  (40816394)	東北大学・流体科学研究所・特任助教    (11301)	削除：2021年5月11日

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計2件

国際研究集会 2ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL BIOFLUID 2020	開催年 2020年～2020年
国際研究集会 3rd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL BIOFLUID 2021	開催年 2021年～2021年

## 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関