

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H04504

研究課題名（和文）力学体系に基づいた間質液流れによる脳内老廃物除去機構の解明

研究課題名（英文）Clarification of a mechanism of removing metabolic waste in the brain by interstitial fluid flow

研究代表者

武石 直樹（Naoki, Takeishi）

京都工芸繊維大学・機械工学系・准教授

研究者番号：30787669

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,200,000円

研究成果の概要（和文）：脳間質液流れによる脳内老廃物除去機構に支持する力学の解明と、脳疾患の進行機序を説明する力学的概念の構築を目的に、実験計測に基づく数理モデルと数値シミュレーション研究を行った。実験計測で示された血管周囲腔内の脳脊髄液の流速を良好に再現するモデルの構築に加え、脈波動態から正味の脳脊髄液流速を推定する新たな流体力学的理論を示した。さらに、全脳レベルの脈波動態を解析し、上記の微小血管で計測される脈波を推定する経験式を提示した。最後に、細胞スケールの血流動態に着目した解析により、脈波による非定常血流場におけるレオロジー動態および酸素輸送動態を定量した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、脈波動態から脳内老廃物除去機構と密接に関わる脳脊髄液流れの流速を推定できることを示した。これは、脈波動態が脳内老廃物除去において生理学的重要な役割を担うことを示唆する。これらの知見は、脳内老廃物に関する除去機能や異常な蓄積の推定を目的とした、新たな脳内脈波計測技術の構築や脳機能計測機器の開発戦略に繋がる。

研究成果の概要（英文）：To clarify the dynamics regarding the removal of metabolic waste in the brain by interstitial fluid flow and constructing a mechanical concept that explains the progression mechanism of brain diseases, we conducted research on mathematical models and numerical simulations based on experimental measurement. Our numerical results showed the net CSF flow velocity collapses on the analytical solution derived from the lubrication theory in analogy with Taylor's swimming sheet. Next, we performed numerical simulations of the arterial pulsation in whole-scale cerebral arteries, constructed based on the medical image data, using one-dimensional mode, and successfully estimated aforementioned arterial pulsation in microvessels. These numerical results will serve as fundamental knowledge for modeling arterial-pulsation dependent CSF flow, and provide insight into a mechanism of removing metabolic waste in the brain by interstitial fluid flow.

研究分野：医工学

キーワード：脈波 脳脊髄液 脳動脈 流体力学 計算バイオメカニクス

1. 研究開始当初の背景

リンパ組織が存在しない脳では、如何にして脳内老廃物が除去されるのかは長らく大きな疑問であった。ヒト脳の重量は約 1400g (体重の約 2%程度) であるが、体のエネルギーの約 1/4 も消費していることから、多くの老廃物の排出が予想される。細胞間を満たす脳間質液の流れが老廃物の除去機構の一端を担っていることは指摘されてきたが[Cserr et al., *Immunol Today* 1992, 13:507-512], 脳間質液がどこへ排出されているのかは不明とされてきた。近年の実験観察によって、脳血管周囲に存在する血管周囲腔が脳代謝産物の流路となり、機能的にリンパ管に相当することがわかってきた[Weller et al., 2009, *Acta Neuropathol.* 117:1-4]. 脳内老廃物の一つであり、アルツハイマー病との関連が深い間質液中のアミロイド B ペプチド (A β) は、重合することで血液脳関門を越えにくくなり、除去されずに脳実質中に蓄積される。したがって、脳血管は血液の供給系としてだけでなく、老廃物の排除機構も担っていると言える[Mesquita et al., *Nature* 2018, 560:185-191]. これらの実験観察結果を踏まえ、脳内老廃物の除去機構を理解する新たな概念として、glymphatic system [Nedergaard, *Science* 2013, 28:1529-1530]が提唱されている。これは、動脈周囲の血管周囲腔を脳脊髄液が流れ、アストロサイトの足突起のアクアポリン 4 チャンネルを通じて脳内に水流れ込み、老廃物を洗い流して細静脈側の血管周囲腔に流れ出ていく排除機構の概念である。工学的観点からみた脳内老廃物の蓄積とは、分子スケールにおける物質相互作用と組織スケールにおける脳間質液の輸送のバランスが破綻した結果に他ならない。これまで、各種タンパク質の凝集に関する分子生物学的な知見は数多く示されてきたが、脳内老廃物の組織スケールにおける輸送と沈着のダイナミクスは依然として不明である。したがって、本研究課題における学問的問いとは、間質液流れによる脳内老廃物の排除機構が成立する力学的平衡状態とは何か、そしてその破綻機序とは何か、ということである。間質液流れによる脳内老廃物の排除機構の解明には、分子から組織スケールにおける力バランスを詳細に理解する必要があるが、異なる階層を繋ぐ解析手法は未だ確立されていない。そのため、アルツハイマー病をはじめ、特発性正常圧水頭症 (iNPH) や脳小血管病といった脳疾患の進行機序を説明する力学的背景は明らかにされていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、脳間質液流れによる脳内老廃物の排除機構が成立する力学的平衡状態やその破綻機序を解明し、脳疾患の進行機序を説明する力学的概念を構築することである。これまでに、多数の粒子の軌跡を追うことによって、局所的な脳間質液の流れ場が可視化されてきた[Mestre et al., *Nat. Commun.* 2018, 9:4878]. 一方、生化学的な実験手法によって、A β をはじめとする脳内老廃物の凝集に関わる分子の振る舞いも調べられてきた[Hashimoto et al., *Nat. Commun.* 2019, 10:2394]. しかしながら、これらの手法では、なぜ脳の特定の箇所あるいは全域に老廃物が蓄積されるのか、つまり、タンパク質の蓄積と輸送のバランスが破綻する力学的背景とは何か、という問いには完全には答えられない。本研究により、全脳間質液流れを解析する計算力学モデルを構築し、脳間質液流れによる脳内老廃物の排除機構が成立する力学を定量する。これらの知見に基づき、脳疾患の進行機序を説明する力学的概念について考察する。

3. 研究の方法

本研究では、分子スケールの物質相互作用を考慮した組織スケールの脳間質液流れを数理モデル化し、全脳間質液流れを解析する計算力学モデルを構築する。脳内老廃物の凝集と輸送は、反応移流拡散問題としてモデル化する。ここに、申請者が構築に成功した分子-細胞間の異なる階層間の力学場を連成する手法を導入することで、分子スケールの挙動をマクロな間質液流動場にボトムアップ的に組み込む。これにより、階層を超えた力バランスを詳細に解析することが可能となり、脳内老廃物の排除機構の本質に迫れる。全脳を対象とした間質液流れを解析するために、頭蓋内の脳の解剖学的構造から決定される巨視的流動場と、核磁気共鳴画像法 (MRI) の 4 次元位相画像から得られる選択的流動場を組み合わせた 3 次元脳間質液流路モデルを構築する。構築した流路モデルに対して全脳間質液流れと脳内老廃物の輸送について数値シミュレーションし、局所および大域的な脳老廃物の凝集と蓄積が生じる力学場を調べる。この計算は計算負荷が高く、かつ大規模なパラメトリック計算を必要とするが、申請者が独自構築した GPU 高速計算手法はこれを可能にするものであり、世界に例を見ない挑戦的な試みと言える。本研究では、脳内老廃物の分布を分子量 (代表スケール) と物質間相互作用 (接着力) を考慮した濃度場としてモデル化する。したがって、モデルの特性上、様々な脳代謝産物の輸送を普遍的に取り扱うことができるため、アルツハイマー病のみならず、iNPH や脳小血管病といった脳疾患に対する進行機序を説明する力学的概念を構築することができる。

4. 研究成果

実験計測に基づく数理モデルと数値シミュレーション研究を行った。はじめに、実験計測で示された血管周囲腔内の脳脊髄液の流速を良好に再現できるモデルを構築し、脈波動態から正味

の脳脊髄液流速を推定する新たな流体力学的理論を示した。この正味の流速は、血管壁の振幅や血管周囲腔の領域幅に対し、流体力学の潤滑理論に基づきスケールされることを明らかにした[Yokoyama, Takeishi, Wada, 2021, *J. Theol. Biol.* 523:110709].

次に、全脳レベルの脈波動態に着目した解析を行った。具体的には、ヒト脳動脈網の血管分岐世代毎の脈波伝ば動態を明らかにすることを目的に、MRI 画像に基づき 10 例の被験者個別脳動脈モデルを構築し、1次元血流解析を行った。これらの結果に基づき、血管周囲腔の CSF 流れが確認できる約数十マイクロメートルスケールの脳動脈血管の脈波伝ば動態を推測する経験式を提案した。

最後に、細胞スケールの血流動態に着目した解析により、脈波による非定常血流場におけるレオロジー動態および酸素輸送動態を定量した。特に、非定常血流場を想定した振動せん断流における赤血球懸濁液の動的粘弾性の定量に成功し、今後のレオロジー計測実験や物性評価手法に関する指針を示した[Takeishi et al., 2024, *Phys. Fluids* 36:041905].

本研究期間内に脳循環や代謝に関わる幅広い生体内バイオメカニクスに関する問題について取り扱い、査読付き国際雑誌論文として全 12 報を報告した。本研究により、脈波動態から脳内老廃物除去機構と密接に関わる脳脊髄液流れの流速を推定できることを示した。これは、脈波動態が脳内老廃物除去において生理学的重要な役割を担うことを示唆する。これらの知見は、脳内老廃物に関する除去機能や異常な蓄積の推定を目指した、新たな脳内脈波計測技術の構築や脳機能計測機器の開発戦略に繋がると期待している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takeishi Naoki, Santo Masaya, Yokoyama Naoto, Wada Shigeo	4. 巻 22
2. 論文標題 Numerical analysis of viscoelasticity of two-dimensional fluid membranes under oscillatory loadings	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Results in Engineering	6. 最初と最後の頁 102304 ~ 102304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rineng.2024.102304	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 Takeishi Naoki, Rosti Marco Edoardo, Yokoyama Naoto, Brandt Luca	4. 巻 36
2. 論文標題 Viscoelasticity of suspension of red blood cells under oscillatory shear flow	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 41905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0196272	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 Takeishi Naoki, Rosti Marco Edoardo	4. 巻 8
2. 論文標題 Enhanced axial migration of a deformable capsule in pulsatile channel flows	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 L061101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.8.L061101	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 Kageyama Shiori, Takeishi Naoki, Harada Naoki, Taniguchi Kao, Morita Keiichi, Wada Shigeo	4. 巻 60
2. 論文標題 Airway performance in infants with congenital tracheal stenosis associated with unilateral pulmonary agenesis: effect of tracheal shape on energy flux	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Medical & Biological Engineering & Computing	6. 最初と最後の頁 2335 ~ 2348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11517-022-02601-4	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 -

1. 著者名 Kageyama Shiori、Takeishi Naoki、Taenaka Hiroki、Yoshida Takeshi、Wada Shigeo	4. 巻 60
2. 論文標題 Fluid dynamic assessment of positive end-expiratory pressure in a tracheostomy tube connector during respiration	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Medical & Biological Engineering & Computing	6. 最初と最後の頁 2981 ~ 2993
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11517-022-02649-2	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 MORISHITA Takaomi、TAKEISHI Naoki、II Satoshi、WADA Shigeo	4. 巻 17
2. 論文標題 Assessment of cardiac function using the modified ejection fraction as an indicator of myocardial circumferential strain	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanical Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 22-00014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jbse.22-00014	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 Morita Keiichi、Takeishi Naoki、Wada Shigeo、Hatakeyama Tadashi	4. 巻 38
2. 論文標題 Computational fluid dynamics assessment of congenital tracheal stenosis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Pediatric Surgery International	6. 最初と最後の頁 1769 ~ 1776
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00383-022-05228-6	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 Takeishi Naoki、Yamashita Hiroshi、Omori Toshihiro、Yokoyama Naoto、Wada Shigeo、Sugihara-Seki Masako	4. 巻 952
2. 論文標題 Inertial migration of red blood cells under a Newtonian fluid in a circular channel	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2022.936	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 Morishita Takaomi, Takeishi Naoki, Ii Satoshi, Wada Shigeo	4. 巻 49
2. 論文標題 Effects of Left Ventricular Hypertrophy and Myocardial Stiffness on Myocardial Strain Under Preserved Ejection Fraction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Annals of Biomedical Engineering	6. 最初と最後の頁 1670 ~ 1687
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10439-020-02706-7	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 Yokoyama Naoto, Takeishi Naoki, Wada Shigeo	4. 巻 523
2. 論文標題 Cerebrospinal fluid flow driven by arterial pulsations in axisymmetric perivascular spaces: Analogy with Taylor's swimming sheet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Theoretical Biology	6. 最初と最後の頁 110709 ~ 110709
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jtbi.2021.110709	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 Takeishi Naoki, Shigematsu Taiki, Enosaki Ryogo, Ishida Shunichi, Ii Satoshi, Wada Shigeo	4. 巻 18
2. 論文標題 Development of a mesoscopic framework spanning nanoscale protofibril dynamics to macro-scale fibrin clot formation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of The Royal Society Interface	6. 最初と最後の頁 20210554
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsif.2021.0554	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 Takeishi Naoki, Yamashita Hiroshi, Omori Toshihiro, Yokoyama Naoto, Sugihara-Seki Masako	4. 巻 12
2. 論文標題 Axial and Nonaxial Migration of Red Blood Cells in a Microtube	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 1162 ~ 1162
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/mi12101162	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 -

[学会発表] 計27件(うち招待講演 2件/うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Naoki Takeishi
2. 発表標題 Numerical analysis of cellular flows spanning single red blood cell dynamics to bulk suspension rheology
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoki Takeishi, Marco Edoardo Rosti, Naoto Yokoyama, Luca Brandt
2. 発表標題 Numerical analysis of suspension rheology of red blood cells under oscillatory shear flow
3. 学会等名 6th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoki Takeishi, Marco Edoardo Rosti
2. 発表標題 Numerical analysis of the lateral movement of a deformable spherical capsule in pulsatile channel flows
3. 学会等名 The 3rd World Congress of ESCHM-ISB-ISCH2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 武石直樹, Marco Edoardo Rosti, 横山直人, Luca Brandt
2. 発表標題 振動せん断流れ場における赤血球懸濁液の粘弾性解析
3. 学会等名 日本流体力学会年会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 武石直樹, Marco Edoardo Rosti
2. 発表標題 管路内振動流場におけるカプセルの軸集中現象に関する数値解析
3. 学会等名 日本機械学会2023年度年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 武石直樹, Marco E Rosti, 横山直人, Luca Brandt
2. 発表標題 膜-流体連成解析による赤血球懸濁液の粘弾性解析
3. 学会等名 第46回日本バイオレオロジー学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoki Takeishi, Hiroshi Yamashita, Naoto Yokoyama, Masako Sugihara-Seki
2. 発表標題 Numerical analysis of the lateral movement of red blood cells in circular microchannels
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics & 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoki Takeishi, Marco E. Rosti, Naoto Yokoyama, Luca Brandt
2. 発表標題 Numerical analysis and modeling of suspension rheology of red blood cells
3. 学会等名 9th World Congress of Biomechanics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoki Takeishi, Hiroshi Yamashita, Toshihiro Omori, Naoto Yokoyama, Masako Sugihara-Seki
2. 発表標題 Axial and nonaxial migration of red blood cells under a Newtonian fluid in microchannels
3. 学会等名 14th World Congress of Biomechanics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 武石直樹, 山下博士, 大森俊宏, 横山直人, 和田成生, 関眞佐子
2. 発表標題 円管路内における赤血球の慣性移動に関する数値解析
3. 学会等名 日本流体力学会年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 武石直樹, 山頭雅也, 横山直人, 和田成生
2. 発表標題 2次元流体膜モデルを用いた振動圧力下における脂質二重膜の動的粘弾性解析
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 武石直樹, 山下博士, 横山直人, 関眞佐子
2. 発表標題 慣性効果による赤血球の円管路断面内の移動に関する数値解析
3. 学会等名 第66回理論応用力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoki Takeishi, Marco E Rosti, Naoto Yokoyama, Shigeo Wada, Luca Brandt.
2. 発表標題 Suspension rheology of red blood cells under oscillatory shear flow
3. 学会等名 ESCHM-ISCH-ISB 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoki Takeishi, Hiroaki Ito, Shigeo Wada.
2. 発表標題 Stability of a red blood cell in a narrow rectangular microchannel
3. 学会等名 25th ICTAM2020+1 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoki Takeishi, Hiroshi Yamashita, Naoto Yokoyama, Masako Sugihara-Seki, Shigeo Wada.
2. 発表標題 Numerical analysis of the inertial migration of the red blood cell in a channel
3. 学会等名 ESCHM-ISCH-ISB 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武石直樹, Marco E Rosti, 横山直人, 和田成生, Luca Brandt.
2. 発表標題 振動流下における赤血球濃厚懸濁液の数値解析
3. 学会等名 日本流体力学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武石直樹, 堀川健介, 横山直人, 和田成生.
2. 発表標題 無心注射による薬剤送達技術の確立に向けた真皮層中の薬液流れの数値解析
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武石直樹, 蔭山紫織, 谷口香緒, 森田圭一, 和田成生.
2. 発表標題 片肺欠損を伴う先天性気管狭窄患者の気管内気流解析と評価
3. 学会等名 第29回バイオフィジオロジー研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李佳龍, 武石直樹, 田中壽, 和田成生.
2. 発表標題 胸部大動脈ステント留置・バイパス接続による流路変更に伴う頸部血管系の脈波伝ばを考慮した血流動態解析
3. 学会等名 日本機械学会第32回バイオフィロントニア講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masaya SANTOU, Naoki TAKEISHI, Naoto YOKOYAMA, Tomohiro Ohtani, Shigeo WADA
2. 発表標題 Numerical analysis of lipid bilayer under oscillatory deformation using 2D fluid membrane model
3. 学会等名 The 11th Asian-Pacific Conference on Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山頭 雅也, 横山 直人, 武石 直樹, 大谷 智仁, 和田 成生
2. 発表標題 二次元流体膜モデルを用いた脂質二重膜の粘弾性評価
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Kageyama, N. Takeishi, H. Taenaka, T. Yoshida, S. Wada
2. 発表標題 DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL PLATFORM TO EVALUATE A POSITIVE END-EXPIRATORY PRESSURE IN POSTOPERATIVE PATIENTS WITH TRACHEOSTOMY
3. 学会等名 Summer Biomechanics, Bioengineering and Biotransport Conference (SB3C2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 蔭山紫織, 武石直樹, 妙中浩紀, 吉田健史, 和田成生
2. 発表標題 自発呼吸を考慮した三次元呼吸回路デバイス内の数値流体解析と 呼気終末陽圧評価
3. 学会等名 日本機械学会第32回バイオフロンティア講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 千田衣織, 武石直樹, 大谷智仁, 和田成生
2. 発表標題 無針注射を想定した薬液の高速射出の数値解析:真皮層内の分布予測
3. 学会等名 日本機械学会関西学生会2021年度卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大島直丈, 武石直樹, 大谷智仁, 和田成生
2. 発表標題 メソスコピックモデルによるフィブリン凝集塊の力学特性の評価
3. 学会等名 日本機械学会関西学生会2021年度卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoki Takeishi, Naoki Harada, Shiori Kageyama, Keiichi Morita, Shigeo Wada.
2. 発表標題 Numerical analysis of airflow in abnormal curved trachea
3. 学会等名 Summer Biomechanics, Bioengineering and Biotransport Conference (SB3C2020 Virtual Conference) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武石直樹, 堀川健介, 和田成生.
2. 発表標題 真皮層における射出薬液の分布予測にむけた計算力学モデルの開発
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会(web講演会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 佐久間 一郎、秋吉 一成、津本 浩平	4. 発行年 2022年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 544
3. 書名 医用工学ハンドブック	

1. 著者名 佐久間 一郎、秋吉 一成、津本 浩平	4. 発行年 2022年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 544
3. 書名 医用工学ハンドブック	

1. 著者名 日本生体医工学会、平田 雅之、齋藤 充弘、紀ノ岡 正博、和田 成生、伊井 仁志、大谷 智仁、武石 直樹、橋爪 誠、大城 理、岡山 慶太、坂田 泰史、河野 喬仁、村田 正治、佐久間 一郎、篠原 一彦、江藤 正俊、小林 聡、牟田口 淳、今田 憲二郎、家入 里志、山田 耕嗣、大西 峻、山家 智之、不二門 尚、松村 泰志、野村 泰伸	4. 発行年 2020年
2. 出版社 コロナ社	5. 総ページ数 224
3. 書名 医療に活かす生体医工学	

〔産業財産権〕

〔その他〕

個人ホームページ http://naoki-takeishi.sakura.ne.jp/jp/home.html Google Scholar https://scholar.google.co.jp/citations?user=rp9h9WQAAAAAJ&hl=ja# Research map https://researchmap.jp/ntakeishi

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	横山 直人 (Yokoyama Naoto) (80512730)	東京電機大学・工学部・教授 (32657)	

6. 研究組織（つづき）

	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	田中 壽 (Tanaka Hisashi) (40294087)	大阪大学・医学系研究科・教授 (14401)	

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0件

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