

令和 5 年 5 月 14 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H04100

研究課題名（和文）赤血球の運動に着目した開閉する心臓弁の流体構造連成解析手法の構築

研究課題名（英文）Fluid-Structure Interaction Modeling of Heart Valves and Red Blood Cells

研究代表者

滝沢 研二（Takizawa, Kenji）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：60415809

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、心臓弁近傍の血流動態について数値計算を用いたアプローチでその詳細を解明するための計算手法を構築するためのものである。一般には、心臓近傍では赤血球が流れに及ぼす影響を気にする必要がないが、接触によって流れを止める弁の近傍では長さスケールがゼロになるためその影響は無視できない。本研究はこのような視点から、物体の接触を含む流れの詳細について研究し、接触問題における流れの詳細を精度よく捉える手法を開発した。この研究では赤血球のモデル化や流入出のある流れの計算手法など付随する計算手法も提案している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、心疾患のうち閉鎖不全症といった「心臓弁膜症」に関連する弁の開閉と血流さらにはその構成要素である赤血球に焦点を当てた研究である。研究としては数値計算手法を新たに提案した。本研究は、将来的には個別性の高い心疾患の治療のためのオーダーメイド解析を実現することに貢献する。

研究成果の概要（英文）：This study is to develop a computational method to calculate blood flow near the heart valves accurately. In general, there is no need to be concerned about the effect of red blood cells on flow near the heart. However, the contact of the valves implies the length scale to be zero. From this perspective, this study investigated flow details, including the blood cells. This study also proposed accompanying computational methods, such as red blood cell modeling and a method for calculating flow based on inflow and outflow specified by traction conditions.

研究分野：数値計算

キーワード：流体構造連成解析 赤血球 接触 マルチスケール解析

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

心疾患は、癌に次ぐ国内第2位の死因である。その中でも心臓弁を対象とする外科的治療は年間10万件にも達し、全体の約半数を占める。心臓弁は、2、3枚の弁尖と呼ばれる膜で構成され、それらが接触することで血液の逆流を防ぐ重要な役割を持ち、心臓弁の疾患には、弁の開きが悪くなる狭窄症や、弁の閉まりが悪くなる閉鎖不全症といった「心臓弁膜症」がある。この弁膜症は、全身に血液を送り出す大動脈弁に頻発する。そこで本研究では、大動脈弁近傍を研究対象とする。

弁膜症は、老化に伴う硬化が原因となって発症するケースが増えている。治療法としては、人工弁への置き換えや、弁尖の形成等による外科的治療が一般的である。また、患者負担を減らすという観点から、開胸を要さない経カテーテルの大動脈弁治療 (TAVI) といった治療の選択肢が広がっている。これらの治療は重大な問題を取り除くことのみならず、その後に血液を効率良く送れるようにする、といった流体力学的視点が注目されている。一方で、心臓の弁近傍は血流が最も速く、その血行動態は未だ十分に解明されていない。従って、症状や患者に適した治療法の選択に対する科学的根拠の創出が不可欠である。しかし、広がる選択肢に対して十分な力学的根拠を示すことはできていない。本研究は、心臓の弁近傍は血流を理解するために、流体力学的視点からその流れを解明すべく計算機シミュレーションによってそれを実現する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、弁尖同士の接触を伴う血流を赤血球の挙動を含め詳細に明らかにすることである。これが達成されると、これまで詳細に理解できなかった心臓弁の接触部の血流が明らかになり、心臓弁膜症などの心臓弁疾患の機序の解明につながる。また、症状や患者に応じた治療法の開発への発展が期待される。目的を達成するために、本研究では数値計算を基軸とする。具体的には、弁を含む流体構造連成問題、高速流れ中の赤血球挙動、心臓弁開閉時の赤血球挙動の数値計算を実現するための定式化そしてその解法について研究する。

3. 研究の方法

接触問題に対して、正しい方程式を用いて記述できる手法 [1] をベースとする。本手法は、これまでの高精度な数値計算手法の基本を踏襲しながら、トポロジー変化に対応させた画期的なものである。異なるトポロジーをそれぞれ計算するこれまでの手法に対して、本手法は、トポロジーが変わるという動作として計算するものである。赤血球を含む血流解析を、流速が遅い場合は高精度な境界要素法 [2]、非定常性が強い場合は格子ボルツマン法 [3] と2つを軸とする。これらの手法をベースとし離散化としては主にアイソジオメトリック離散化を用い、全体として目的を達成できるような手法について研究する。

4. 研究成果

研究成果の特に計算手法に関する研究を種別に説明する。流体に対する研究として論文 [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] が挙げられる。これらを通して、アイソジオメトリック離散化により高精度に壁面近傍を捉える手法を示した離散化手法特有の安定化手法について論文 [5, 11, 9] において新しい定式化を提案している。特に、論文 [9] で考案した安定化手法の長さ計算法は厚みが限りなく小さくなる接触問題においてロバスト性を増す事に成功している。また、論文 [7] では境界層を捉えることが不十分な粗い格子を使用すると近傍の流れに計算手法特有の振動を伴ってしまうというのを突き止めその解決策の一つとして弱く境界条件を設定する手法が有効であることを示した。そして、時間方向の離散化を高精度にする事により時間刻みはばを大きくしても同等以上の精度が出ることを論文 [6] で示した。心臓に関する流れの研究では、流入量を規定できない場合が多い。これは流れる量もシステム全体で決定しなければならないという考えに基づく。この時、流入条件に対して、流速分布を固定しないとある流量 Q に対する流入エネルギーは無限に大きくなり得ることから計算条件に対する解が一意に定まらないという問題がある。この問題は流出境界からの流入として古くから知られいくつかの対策が施されてきた。論文 [10] では、流入境界にも類似の方法を活用する例が見受けられるが、その対処法は根本的に物理的な境界条件と合致しないということを用いて示している。その上で、血流のように比較的レイノルズ数の低い問題のために入り口境界をアイソジオメトリック離散化により2次元関数となるように規定する方法を提案した。これは円管の場合の解析解である。一方で、血流の場合は Womersley プロファイルと呼ばれるベッセル関数で表現され実際複雑形状ではこのような状況とも限らない。それでもこれまでの手法に比べると流れと必要な圧力差において妥当であることが計算においても示された。

血管壁のモデリングとしては、ゼロ応力状態に着目し、論文 [12, 13] において研究し、血管が座屈しにくいゼロ応力状態になっているであろうことを元に研究した。この手法は、論文 [14] でも利用され、心臓の拍動によって大きく変形する冠動脈の運動中も座屈しにくいという理論的妥当性をもつゼロ応力状態の推定に成功している。なおゼロ応力状態の推定のために2次元パラメータ空間で構造物を表現するシェルによるモデリング [15] を提案し使用した。この手法では、従来 Kirchhoff-Love シェルモデルでは厚み方向の変形を考慮しないが、超弾性体でもたらされ

る非線形性はこの変形を無視し難いと考えその変形を考慮する定式化を提案した。そしてこの手法では、厚み方向をこれまで通り平面応力状態の過程を行っていたが論文 [16] ではその平面応力近似をしない新たな手法を提案した。この手法は法線が曲がらないという仮定が Kirchhoff-Love シェルモデルから引き継がれているもののそれ以外は通常の 3次元モデルと同等であり、血管程度の厚みを想定した近似として非常に近似された項が少ないものとなった。そしてこの手法はさらに赤血球のモデリングに使えることがわかりその研究を実施した。赤血球は Skalak 構成則による膜モデルと Helfrich 構成則による曲げ剛性の 2つを合わせることで実現されている。これは両者とも膜厚みがゼロであるというモデリングであり実際非常に薄い膜であることから妥当なモデリングである。しかし、実はこのモデリングは非常に薄い連続体と見なし、先のシェルモデルとして定式化しても数学的にはほぼ同等であることがわかった。そして、モデルパラメータが少ないが赤血球のモデルの妥当性として用いられるベンチマークを試しても同様な形状を表現できることから十分妥当であると言える。これは弱形式でモデリングする場合に必要な空間微分の連続性の要件が小さくなることだけでなくモデリングとしてのシンプルさがあり新たなマルチスケールモデルの提案においても有力な手法であると捉えている。

移動格子法で高精度な流体計算を実現するには格子を移動するための手法も重要である。これまでに提案された“Mesh-Jacobian-based stiffening”は周期問題に対して、格子の内部形状が必ずしも同一にならないという問題があった。この問題に対し、論文 [17] では、ちょっとした工夫でこの問題が回避できるということを示した。また異なるアプローチとして、大変形に用いられる構造解析モデルを活用した定常解析により与えられた境界条件に対して同一の格子形状を生成する手法をこれまでに提案してきている。この方法では、応力の存在が格子形状を均一にするように働くであろうという想定のもと用いられてきたが論文 [18] においてパラメータ空間を直交するように変形するとは限らないという事実を示しその解決策として、パラメータ空間に依存した「支柱」のような繊維モデルを導入する手法を提案した。この方法を用いることで、物理的に意味のない「格子」というものに、パラメーター線が直交するように補正されやすいモデリングを実現した。心臓内部のようにねじれが大きい問題に対して有効であることが実際の利用で確かめられている。

計算手法の締めくくりとしては、アイソジオメトリック離散化において空間全域を滑らかにするために欠かすことのできない T-spline に関する研究で新たな提案をしたものがある。それは、2次元パラメータ空間で表現されるシェルなどと 1次元パラメーターで表現されるケーブル上のものを繋ぐための手法でこれまではアイソジオメトリック離散化の利点を失いかねない手法でそれを実現してきた。具体的には異なる次元のものがつながる箇所において滑らかさを落としてそれを接続してきた。その一つの方法はペナルティー法で、不連続な状態での接続である。これに対して、論文 [10] では、T-spline の概念を応用して滑らかに接続することを実現しその具体的手法を説明した。論文 [19] ではパラシュートの表面とケーブルの接続の例として紹介しているが、僧帽弁は「パラシュート」に例えられるように、腱索と呼ばれるケーブル上の構造が弁が裏返ってしまうことを防いでいる。

これらの計算手法の提案や開発を通して心臓弁に関する研究として主に論文 [4, 14, 20, 21, 10] においてその研究成果を発表した。まず、[4] では大動脈を流れる血流について、壁面近傍の解像度をあげることで壁面せん断応力の精度を確認した。この研究では、流れの周期性についても確認ができた。[20] では流体構造連成問題として心臓弁の解析を行い、弁の開閉によって生じる弁の上面下面の壁面せん断応力をそれぞれ計算することに成功した。また、論文 [21] では心臓弁のみならず左心室および大動脈を含む領域に拡張し上記に示した通り入り口・出口格差によって流れを決定することを実現した。さらに、文献 [22] では時間の高解像度化、壁近傍の高解像度化を実現した。これまで多くの数値計算を実施してきた経験として計算精度は空間解像度に依存すると考えてきたが本計算では時間解像度を高くすることによって捉えられる渦の量が格段に向上した (図 1)。これは、アイソジオメトリック離散化の空間解像度に対するポテンシャルに対して、時間精度が相対的に低下していたことが理由として挙げられる。また空間解像度を向上させる際、これまでの方法では T-spline を含む格子への適用が難しいことがわかり、今後の課題となった。

References

- [1] K. Takizawa, T.E. Tezduyar, A. Buscher, and S. Asada, “Space-time interface-tracking with topology change (ST-TC)”, *Computational Mechanics*, **54** (2014) 955–971, doi:10.1007/s00466-013-0935-7.
- [2] N. Takeishi and Y. Imai, “Capture of microparticles by bolus flow of red blood cells in capillaries”, *Scientific Reports*, **7** (2017) 5381, doi:10.1038/s41598-017-05924-7.
- [3] D. Matsunaga, Y. Imai, T. Yamaguchi, and T. Ishikawa, “Rheology of a dense suspension of spherical capsules under simple shear flow”, *Journal of Fluid Mechanics*, **786** (2016) 110–127, doi:10.1017/jfm.2015.666.
- [4] K. Takizawa, T.E. Tezduyar, and T. Sasaki, “Isogeometric hyperelastic shell analysis with out-of-plane deformation mapping”, *Computational Mechanics*, **63** (2019) 681–700, doi:10.1007/s00466-018-1616-3.
- [5] Y. Otoguro, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar, “Element length calculation in B-spline meshes for complex geometries”, *Computational Mechanics*, **65** (2020) 1085–1103, doi:10.1007/s00466-019-01809-w.

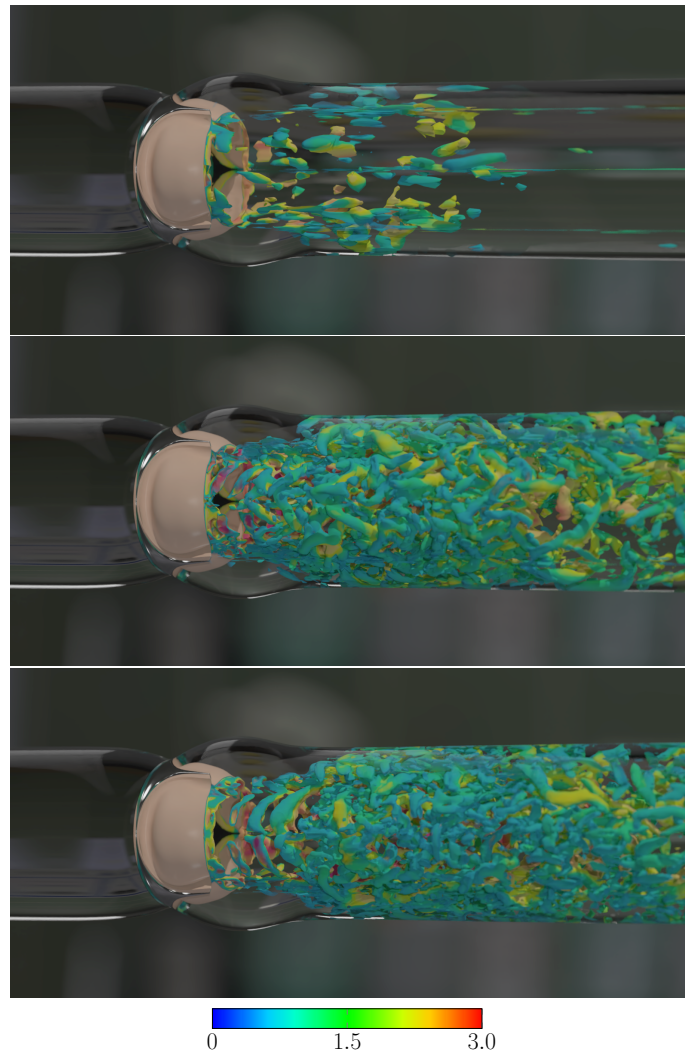


Figure 1: 心臓弁近傍の流れ. 速度勾配テンソルの第二不変量の等値面を速度の大きさ (m/s) で色付けしたもの. 時間刻み幅 $\Delta t = 5.00 \times 10^{-3}$ s (上), $\Delta t = 1.00 \times 10^{-3}$ s (中), $\Delta t = 1.00 \times 10^{-3}$ s かつ空間解像度を上昇させたもの (下)

- [6] Y. Liu, K. Takizawa, Y. Otaguro, T. Kuraishi, and T.E. Tezduyar, “Flow computation with the space–time isogeometric analysis and higher-order basis functions in time”, *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, **32** (12) (2022) 2445–2475, doi:[10.1142/S0218202522500579](https://doi.org/10.1142/S0218202522500579).
- [7] T. Kuraishi, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar, “Boundary layer mesh resolution in flow computation with the Space–Time Variational Multiscale method and isogeometric discretization”, *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, **32** (12) (2022) 2401–2443, doi:[10.1142/S0218202522500567](https://doi.org/10.1142/S0218202522500567).
- [8] Y. Liu, K. Takizawa, T.E. Tezduyar, T. Kuraishi, and Y. Zhang, “Carrier-domain method for high-resolution computation of time-periodic long-wake flows”, *Computational Mechanics*, **71** (2022) 169–190, doi:[10.1007/s00466-022-02230-6](https://doi.org/10.1007/s00466-022-02230-6).
- [9] K. Takizawa, Y. Otaguro, and T.E. Tezduyar, “Variational multiscale method stabilization parameter calculated from the strain-rate tensor”, *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, published online, doi:[10.1142/S0218202523500380](https://doi.org/10.1142/S0218202523500380), 2023, doi:[10.1142/S0218202523500380](https://doi.org/10.1142/S0218202523500380).
- [10] T. Terahara, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar, “T-splines computational membrane–cable structural mechanics with continuity and smoothness: I. Method and implementation”, *Computational Mechanics*, **71** (2023) 657–675, doi:[10.1007/s00466-022-02256-w](https://doi.org/10.1007/s00466-022-02256-w).
- [11] Y. Ueda, Y. Otaguro, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar, “Element-splitting-invariant local-length-scale calculation in B-spline meshes for complex geometries”, *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, **30** (2020) 2139–2174, doi:[10.1142/S0218202520500402](https://doi.org/10.1142/S0218202520500402).
- [12] T. Sasaki, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar, “Aorta zero-stress state modeling with T-spline discretization”, *Computational Mechanics*, **63** (2019) 1315–1331, doi:[10.1007/s00466-018-1651-0](https://doi.org/10.1007/s00466-018-1651-0).
- [13] T. Sasaki, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar, “Medical-image-based aorta modeling with zero-stress-state estimation”, *Computational Mechanics*, **64** (2019) 249–271, doi:[10.1007/s00466-019-01669-4](https://doi.org/10.1007/s00466-019-01669-4).
- [14] Y. Yu, Y.J. Zhang, K. Takizawa, T.E. Tezduyar, and T. Sasaki, “Anatomically realistic lumen motion representation in patient-specific space–time isogeometric flow analysis of coronary arteries with time-dependent medical-image data”, *Computational Mechanics*, **65** (2020) 395–404, doi:[10.1007/s00466-019-01774-4](https://doi.org/10.1007/s00466-019-01774-4).
- [15] K. Takizawa, T.E. Tezduyar, H. Uchikawa, T. Terahara, T. Sasaki, and A. Yoshida, “Mesh refinement influence and cardiac-cycle flow periodicity in aorta flow analysis with isogeometric discretization”, *Computers & Fluids*, **179** (2019) 790–798, doi:[10.1016/j.compfluid.2018.05.025](https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2018.05.025).
- [16] Y. Taniguchi, K. Takizawa, Y. Otaguro, and T.E. Tezduyar, “A hyperelastic extended Kirchhoff–Love shell model with out-of-plane normal stress: I. Out-of-plane deformation”, *Computational Mechanics*, **70** (2022) 247–280, doi:[10.1007/s00466-022-02166-x](https://doi.org/10.1007/s00466-022-02166-x).
- [17] P. Tonon, R.A.K. Sanches, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar, “A linear-elasticity-based mesh moving method with no cycle-to-cycle accumulated distortion”, *Computational Mechanics*, **67** (2021) 413–434, doi:[10.1007/s00466-020-01941-y](https://doi.org/10.1007/s00466-020-01941-y).
- [18] K. Takizawa, T.E. Tezduyar, and R. Avsar, “A low-distortion mesh moving method based on fiber-reinforced hyperelasticity and optimized zero-stress state”, *Computational Mechanics*, **65** (2020) 1567–1591, doi:[10.1007/s00466-020-01835-z](https://doi.org/10.1007/s00466-020-01835-z).
- [19] T. Terahara, K. Takizawa, R. Avsar, and T.E. Tezduyar, “T-splines computational membrane–cable structural mechanics with continuity and smoothness: II. Spacecraft parachutes”, *Computational Mechanics*, **71** (2023) 677–686, doi:[10.1007/s00466-022-02265-9](https://doi.org/10.1007/s00466-022-02265-9).
- [20] T. Terahara, K. Takizawa, T.E. Tezduyar, Y. Bazilevs, and M.-C. Hsu, “Heart valve isogeometric sequentially-coupled FSI analysis with the space–time topology change method”, *Computational Mechanics*, **65** (2020) 1167–1187, doi:[10.1007/s00466-019-01813-0](https://doi.org/10.1007/s00466-019-01813-0).
- [21] T. Terahara, K. Takizawa, T.E. Tezduyar, A. Tsushima, and K. Shiozaki, “Ventricle–valve–aorta flow analysis with the Space–Time Isogeometric Discretization and Topology Change”, *Computational Mechanics*, **65** (2020) 1343–1363, doi:[10.1007/s00466-020-01822-4](https://doi.org/10.1007/s00466-020-01822-4).
- [22] T. Terahara, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar, “Heart valve computational flow analysis with boundary layer and leaflet contact representation”, to appear in a special volume to be published by Springer, 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計33件（うち査読付論文 33件 / うち国際共著 31件 / うちオープンアクセス 24件）

1. 著者名 Y.Liu, K.Takizawa, Y.Otoguro, T.Kuraishi, and T. E.Tezduyar	4. 巻 32
2. 論文標題 Flow Computation with the Space-Time Isogeometric Analysis and Higher-Order Basis Functions in Time	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Mathematical Models and Methods in Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 2445-2475
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1142/S0218202522500579	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 Y.Liu, K.Takizawa, T. E.Tezduyar, T.Kuraishi, and Y.Zhang	4. 巻 71
2. 論文標題 Carrier-Domain Method for High-Resolution Computation of Time-Periodic Long-Wake Flows	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 169-190
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00466-022-02230-6	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 T.Kuraishi, K.Takizawa, and T. E.Tezduyar	4. 巻 32
2. 論文標題 Boundary layer mesh resolution in flow computation with the Space-Time Variational Multiscale method and isogeometric discretization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Mathematical Models and Methods in Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 2401-2443
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1142/S0218202522500567	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 T.Terahara, T.Kuraishi, K.Takizawa, and T. E.Tezduyar	4. 巻 38
2. 論文標題 Computational flow analysis with boundary layer and contact representation: II. Heart valve flow with leaflet contact	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Mechanics	6. 最初と最後の頁 185-194
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/jom/ufac013	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 T.Terahara, K.Takizawa, and T. E.Tezduyar	4. 巻 71
2. 論文標題 T-Splines Computational Membrane-Cable Structural Mechanics with Continuity and Smoothness: I. Method and Implementation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 657-675
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00466-022-02256-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 該当する

1. 著者名 T.Terahara, K.Takizawa, R.Avsar, and T. E.Tezduyar	4. 巻 71
2. 論文標題 T-Splines Computational Membrane-Cable Structural Mechanics with Continuity and Smoothness: II. Spacecraft parachutes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 677-686
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00466-022-02265-9	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 K.Takizawa, Y.Otoguro, and T. E.Tezduyar	4. 巻 -
2. 論文標題 Variational multiscale method stabilization parameter calculated from the strain-rate tensor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mathematical Models and Methods in Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218202523500380	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 Y. Taniguchi, K. Takizawa, Y. Otoguro, and T.E. Tezduyar	4. 巻 70
2. 論文標題 A hyperelastic extended Kirchhoff-Love shell model with out-of-plane normal stress: I. Out-of-plane deformation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 247-280
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00466-022-02166-x	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 T. Terahara, T. Kuraishi, K. Takizawa, and T.E. Tezduya	4. 巻 38
2. 論文標題 Computational flow analysis with boundary layer and contact representation: II. Heart valve flow with leaflet contact	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Mechanics	6. 最初と最後の頁 185-194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jom/ufac013	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 T. Kuraishi, T. Terahara, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar	4. 巻 38
2. 論文標題 Computational flow analysis with boundary layer and contact representation: I. Tire aerodynamics with road contact	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Mechanics	6. 最初と最後の頁 77-87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jom/ufac009	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 P. Tonon, R.A.K. Sanches, K. Takizawa, and T.E. Tezduya	4. 巻 67
2. 論文標題 A linear-elasticity-based mesh moving method with no cycle-to-cycle accumulated distortion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 413-434
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00466-020-01941-y	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 Hughes Thomas J. R., Takizawa Kenji, Bazilevs Yuri, Tezduyar Tayfun E., Hsu Ming-Chen	4. 巻 1
2. 論文標題 Computational Cardiovascular Analysis with the Variational Multiscale Methods and Isogeometric Discretization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Parallel Algorithms in Computational Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 151 ~ 193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-43736-7_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 該当する

1. 著者名 Ueda Yuki, Ootoguro Yuto, Takizawa Kenji, Tezduyar Tayfun E.	4. 巻 30
2. 論文標題 Element-splitting-invariant local-length-scale calculation in B-Spline meshes for complex geometries	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mathematical Models and Methods in Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 2139 ~ 2174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218202520500402	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 Tonon Patr?cia, Sanches Rodolfo Andr? Kuche, Takizawa Kenji, Tezduyar Tayfun E.	4. 巻 67
2. 論文標題 A linear-elasticity-based mesh moving method with no cycle-to-cycle accumulated distortion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 413 ~ 434
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00466-020-01941-y	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 T. Kuraishi, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar	4. 巻 29
2. 論文標題 Space-time Isogeometric flow analysis with built-in Reynolds-equation limit	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mathematical Models and Methods in Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1165-1185
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218202519410021	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 T. Sasaki, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar	4. 巻 63
2. 論文標題 Medical-image-based aorta modeling with zero-stress-state estimation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 1315-1331
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00466-019-01669-4	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 Y. Bazilevs, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar	4. 巻 29
2. 論文標題 Computational analysis methods for complex unsteady flow problems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mathematical Models and Methods in Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 825-838
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218202519020020	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 Y. Yu, Y.J. Zhang, K. Takizawa, T.E. Tezduyar, and T. Sasaki	4. 巻 63
2. 論文標題 Anatomically realistic lumen motion representation in patient-specific space-time isogeometric flow analysis of coronary arteries with time-dependent medical-image data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 395-404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00466-019-01774-4	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 K. Takizawa, Y. Ueda, and T.E. Tezduyar	4. 巻 29
2. 論文標題 A Node-Numbering-Invariant Directional Length Scale for Simplex Elements	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mathematical Models and Methods in Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 2719-2753
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218202519500581	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 Y. Otaguro, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar	4. 巻 65
2. 論文標題 Element length calculation in B-spline meshes for complex geometries	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 1085-1103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00466-019-01809-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 該当する

1. 著者名 T. Terahara, K. Takizawa, T.E. Tezduyar, Y. Bazilevs, and M.-C. Hsu	4. 巻 65
2. 論文標題 Heart valve isogeometric sequentially-coupled FSI analysis with the space-time topology change method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 1167-1187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00466-019-01813-0	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 T. Terahara, K. Takizawa, T.E. Tezduyar, A. Tsushima, and K. Shiozaki	4. 巻 65
2. 論文標題 Ventricle-valve-aorta flow analysis with the Space-time Isogeometric Discretization and Topology Change	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 1343-1363
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00466-020-01822-4	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 K. Takizawa, T.E. Tezduyar, and R. Avsar	4. 巻 65
2. 論文標題 A low-distortion mesh moving method based on fiber-reinforced hyperelasticity and optimized zero-stress state	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 1567-1591
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00466-020-01835-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 K. Takizawa, Y. Bazilevs, T.E. Tezduyar, and M.-C. Hsu	4. 巻 3
2. 論文標題 Computational cardiovascular flow analysis with the variational multiscale methods	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Engineering and Computation	6. 最初と最後の頁 366-405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.25073/jaec.201932.245	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 H. Ito, D. Matsunaga, Y. Imai	4. 巻 4
2. 論文標題 Shear viscosity of bimodal capsule suspensions in simple shear flow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 113601-None
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.4.113601	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 N. Takeishi, Y. Imai, S. Wada	4. 巻 14
2. 論文標題 Capture event of platelets by bolus flow of red blood cells in capillaries	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanical Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 18-00535
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jbse.18-00535	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 N. Takeishi, M.E. Rosti, Y. Imai, S. Wada, L. Brandt	4. 巻 872
2. 論文標題 Hemorheology in dilute, semi-dilute, and dense suspensions of red blood cells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 818-848
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2019.393	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 K. Takizawa, T. E. Tezduyar, and Y. Otoguro	4. 巻 62
2. 論文標題 Stabilization and discontinuity-capturing parameters for space-time flow computations with finite element and isogeometric discretizations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 1169-1186
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00466-018-1557-x	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 K. Takizawa, T.E. Tezduyar, H. Uchikawa, T. Terahara, T. Sasaki, and A. Yoshida	4. 巻 179
2. 論文標題 Mesh refinement influence and cardiac-cycle flow periodicity in aorta flow analysis with isogeometric discretization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computers & Fluids	6. 最初と最後の頁 790-798
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compfluid.2018.05.025	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 K. Takizawa, T.E. Tezduyar, and T. Sasaki	4. 巻 63
2. 論文標題 Isogeometric hyperelastic shell analysis with out-of-plane deformation mapping	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 681-700
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00466-018-1616-3	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 T. Sasaki, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar	4. 巻 63
2. 論文標題 Aorta zero-stress state modeling with T-spline discretization	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 1315-1331
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00466-018-1651-0	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 T. Kuraishi, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Space-time Isogeometric flow analysis with built-in Reynolds-equation limit	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mathematical Models and Methods in Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218202519410021	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 T. Sasaki, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Medical-image-based aorta modeling with zero-stress-state estimation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00466-019-01669-4	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34件(うち招待講演 13件/うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Kenji Takizawa
2. 発表標題 Space-Time Flow Computation with Contact Between the Heart Valve Leaflets
3. 学会等名 iHEART MCF2021 Conference-Modelling the Cardiac Function (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenji Takizawa
2. 発表標題 Challenges in Computational Cardiovascular Analysis
3. 学会等名 北陸応用数理研究会 2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷口 靖憲, 滝沢 研二, Tezduyar Tayfun E
2. 発表標題 Isogeometric離散化に基づく面垂直応力の厚み方向変化を考慮したKirchhoff-Loveシェル定式化の検討
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 南原 恵, 寺原 拓哉, 滝沢 研二, Tezduyar Tayfun E.
2. 発表標題 僧帽弁閉鎖を考慮した左心室内流体解析に関する基礎検討
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺原 拓哉, 滝沢 研二, Tezduyar Tayfun E.
2. 発表標題 アイソジオメトリック解析による接触を伴う心臓弁解析
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷口 靖憲, 滝沢 研二, Tezduyar Tayfun
2. 発表標題 Isogeometric 離散化に基づく面垂直応力を考慮したKirchhoff-Love シェル定式化-平面応力シェルとの比較・検討-
3. 学会等名 日本応用数理学会2021年度年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村 貴博, 寺原 拓哉, 乙黒 雄斗, 滝沢 研二, Tezduyar Tayfun E.
2. 発表標題 接触する心臓弁周囲の赤血球軌道追跡
3. 学会等名 第34回計算力学講演会 (CMD2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷口 靖憲, 滝沢 研二, Tezduyar Tayfun E.
2. 発表標題 Isogeometric 離散化に基づく面垂直応力の厚み方向変化を考慮した Kirchhoff-Love シェル: 境界条件式に関する考察
3. 学会等名 第34回計算力学講演会 (CMD2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 南原 恵, 寺原 拓哉, 谷口 靖憲, 滝沢 研二, Tezduyar Tayfun E.
2. 発表標題 僧帽弁解析に向けた接触問題に関する基礎検討
3. 学会等名 第34回計算力学講演会 (CMD2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齋藤 耀玖, 乙黒 雄斗, 寺原 拓哉, 後藤 圭, 滝沢 研二, TezduyarTayfun E.
2. 発表標題 医用画像を対象とした形状抽出における k-refinement および方向依存性
3. 学会等名 第34回計算力学講演会 (CMD2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 順平, 吾妻 駿人, 寺原 拓哉, 滝沢 研二, Tayfun E. Tezduyar
2. 発表標題 腹部大動脈瘤成長予測に対する流体および構造力学による検討
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村 貴博, 寺原 拓哉, 乙黒 雄斗, 滝沢 研二, Tayfun E. Tezduyar
2. 発表標題 心臓弁閉閉における赤血球解析のための基礎検討
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 南原 恵, 寺原 拓哉, 谷口 靖憲, 滝沢 研二, Tezduyar Tayfun E.
2. 発表標題 接触力を考慮した心臓弁解析と境界適合格子を用いた高精度流体解析
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Asai, Y., Ishida, S., Terahara, T., Takizawa, K., and Imai, Y.
2. 発表標題 Coupling isogeometric analysis with lattice Boltzmann method for simulating red blood cells in flows
3. 学会等名 11th Asian-Pacific Conference on Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅井悠佑, 石田駿一, 寺原拓哉, 滝沢研二, 今井陽介
2. 発表標題 流れの中の赤血球に対するIGA-LBM
3. 学会等名 第32回バイオフィロンティア講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅井悠佑, 石田駿一, 寺原拓哉, 滝沢研二, 今井陽介
2. 発表標題 カプセルの流動計算のためのIGA-LBM
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 滝沢研二
2. 発表標題 流体構造連成解析と時間・空間高精度化
3. 学会等名 第83回 ターボ機械協会総会講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 滝沢研二
2. 発表標題 心臓大血管の流体構造連成解析モデル
3. 学会等名 第84回日本循環器学会学術集会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenji Takizawa
2. 発表標題 Quality-Improving Mesh Relaxation, Low-Distortion Mesh Moving, and Element-Splitting-Invariant Local Length Scale
3. 学会等名 VIGA2020（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 津島 敦史, 石田 勝也, 寺原 拓哉, 滝沢 研二, Tayfun E. Tezduyar
2. 発表標題 筋線維を考慮した左心室変形に基づく流体解析
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 南原 恵, 寺原 拓哉, 平岡 諄巳, 滝沢 研二, Tayfun E. Tezduyar
2. 発表標題 血行動態解明に向けた僧帽弁近傍の流れ解析手法の基礎検討
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤圭, 齋藤耀玖, 寺原拓哉, 乙黒雄斗, 滝沢研二, Tayfun E. Tezduyar
2. 発表標題 CT画像から滑らかな形状を抽出するためのIsogeometric離散化に基づく計算手法
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥井祐貴, 上田祐暉, 滝沢研二, Tayfun E. Tezduyar
2. 発表標題 安定化有限要素法における退化要素の長さスケールの基礎検討
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三輪温, 滝沢研二, Tayfun E. Tezduyar
2. 発表標題 高階微分を利用した安定化アイソジオメトリック解析法の基礎検討
3. 学会等名 第34回数值流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林 遼太郎
2. 発表標題 左心室内における乳頭筋モデルが及ぼす流れへの影響
3. 学会等名 第33回数值流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Takizawa
2. 発表標題 Arterial Zero-Stress-State Estimation Based on KirchhoffLove Shell Model
3. 学会等名 APCOM2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Takizawa
2. 発表標題 SpaceTime Computational Analysis: It is Not Your Father 's Oldsmobile
3. 学会等名 AFSI2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 南原 恵
2. 発表標題 T-splineによる僧帽弁のモデリング
3. 学会等名 第32回計算力学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yohsuke Imai
2. 発表標題 Computation of complex physiological flows
3. 学会等名 Osaka University MEI-Center Summer School 2019 (Osaka) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今井陽介
2. 発表標題 体の中の複雑な流れを計算する
3. 学会等名 第90回バイオメクフォーラム(豊中市)(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今井陽介
2. 発表標題 体の中の流れを計算する
3. 学会等名 第14回東北大学REDEEMシンポジウム(東京都)(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenji Takizawa
2. 発表標題 Isogeometric Hyperelastic Shell Analysis with Out-of-Plane Deformation Mapping
3. 学会等名 IGA 2018: Integrating Design and Analysis (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenji Takizawa
2. 発表標題 Space-Time Computational Flow Analysis with Isogeometric Discretization and Special Space-Time Methods
3. 学会等名 International Workshop on Multiphase Flows: Analysis, Modelling and Numerics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 滝沢研二
2. 発表標題 Computational Mechanics in Cardiovascular Problems Methods and Applications
3. 学会等名 理化学研究所iTHEMS-東北大学AIMR連携ワークショップ「医学と数理の接するところ」(招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計6件

1. 著者名 K. Takizawa, T. Terahara, and T.E. Tezduyar	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 607
3. 書名 Current Trends and Open Problems in Computational Mechanics (Space-time flow computation with contact between the moving solid surfaces)	

1 . 著者名 T.E. Tezduyar, K. Takizawa, and T. Kuraishi	4 . 発行年 2022年
2 . 出版社 Springer	5 . 総ページ数 607
3 . 書名 Current Trends and Open Problems in Computational Mechanics (Space-time computational FSI and flow analysis: 2004 and beyond)	

1 . 著者名 Yamaguchi, T., Ishikawa, T., and Imai, Y. Editors	4 . 発行年 2018年
2 . 出版社 Elsevier	5 . 総ページ数 314
3 . 書名 Integrated Nano-Biomechanics	

1 . 著者名 K. Takizawa, T.E. Tezduyar, H. Uchikawa, T. Terahara, T. Sasaki, K. Shiozakii, A. Yoshida, K. Komiya, G. Inoue	4 . 発行年 2018年
2 . 出版社 Springer	5 . 総ページ数 480
3 . 書名 Frontiers in Computational Fluid-Structure Interaction and Simulation (Chapter 2)	

1 . 著者名 Y. Imai, D. Matsunaga	4 . 発行年 2018年
2 . 出版社 Springer	5 . 総ページ数 480
3 . 書名 Frontiers in Computational Fluid-Structure Interaction and Simulation (Chapter 6)	

1. 著者名 Y. Ootoguro, K. Takizawa, T.E. Tezduyar	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 480
3. 書名 Frontiers in Computational Fluid-Structure Interaction and Simulaiton (Chapter 10)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	今井 陽介 (Imai Yohsuke) (60431524)	神戸大学・工学研究科・教授 (14501)	

	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
研究協力者	寺原 拓哉 (Terahara Takuya) (10875305)	早稲田大学・理工学術員・助教 (32689)	

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1件

国際研究集会 Advances in Computational Fluid-Structure Interaction and Flow Simulation A Conference on New Methods and Challenging Computations	開催年 2019年～2019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		
米国	ライス大学	ブラウン大学	