早稲田大学 数物系科学拠点 数物系科学コース 修了報告書 （2019 年 4 月～2020 年 3 月）

数物系科学コース在籍期間 2017 年 4 月～2020 年 3 月 総合機械工学専攻 寺原 拓哉

博士学位受領大学	取得学位名	区分(課程・論文)	受領年月日
早稲田大学	博士（工学）	課程	2020 年 3 月 15 日

I. 論文

1. K. Takizawa, T.E. Tezduyar, **T. Terahara**, and T. Sasaki, "Heart valve flow computation with the integrated Space–Time VMS, Slip Interface, Topology Change and Isogeometric Discretization methods", *Computers & Fluids*, **158** (2017) 176–188.

2. 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 discretizations", *Computers & Fluids*, **179** (2019) 790–798.

3. K. Takizawa, T.E. Tezduyar, H. Uchikawa, **T. Terahara**, T. Sasaki, K. Shiozaki, A. Yoshida, K. Komiya, and G. Inoue, "Aorta flow analysis and heart valve flow and structure analysis", *Frontiers in Computational Fluid–Structure Interaction and Flow Simulation: Research from Lead Investigators under Forty – 2018* (2018) 29-89, 10.1007/978-3-319-96469-0_2.

4. **T. Terahara**, K. Takizawa, T.E. Tezduyar, M.C. Hsu, and Y. Bazilevs, "Heart valve isogeometric sequentially-coupled FSI analysis with the space–time topology change method", *Computational Mechanics*, published online, 2020.

5. **T. Terahara**, K. Takizawa, T.E. Tezduyar, "Ventricle-Valve-Aorta Flow Analysis with the Space–Time Isogeometric Discretization and Topology Change", *Computational Mechanics*, published online, 2020.

II. 受賞歴

1. ベスト **CFD** グラフィクスアワード, 第 33 回数値流体力学シンポジウム

III. 研究発表

国際学会

1. **T. Terahara**, K. Takizawa, T.E. Tezduyar, R. Kobayashi, and A. Tsushima, "Ventricle-valve-aorta flow analysis with the space–time isogeometric discretization and topology change", in *Proceedings of the Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM) 2019*, Taipei, Taiwan, 2019.

2. **T. Terahara**, K. Takizawa, T.E. Tezduyar, M.-C. Hsu, and Y. Bazilevs, "Heart valve sequentially-coupled FSI analysis with the ST-SI-TC-IGA", in *Proceedings of IGA 2018*, Texas, USA, 2018.

3. **T. Terahara**, K. Takizawa, T.E. Tezduyar, and T. Sasaki, "Heart valve flow analysis with the integrated Space–Time VMS, Slip Interface, and Topology Change methods and isogeometric discretization", in *Extended Abstracts of the 2017 Engineering Mechanics Institute Conference*, California, USA, 2017.

4. **T. Terahara**, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar, "Heart valve flow analysis with the integrated space–time variational multiscale, slip interface, and topology change methods and isogeometric discretization", in *Extended Abstracts of International Workshop on the Multi-Phase Flow; Analysis, Modeling and Numerics*, Tokyo, Japan, 2017.

他 8 件

国内学会

1. **寺原拓哉**, 塩崎健介, 小林遼太郎, 津島敦史, 滝沢研二, Tayfun E. Tezduyar, "心臓弁を含む左心室の解析", 第 32 回計算力学講演会, 埼玉, 2019.

2. **寺原拓哉**, 塩崎健介, 小林遼太郎, 津島敦史, 滝沢研二, Tayfun E. Tezduyar, "左心系の高精度流体解析", 第 24 回計算工学講演会, 埼玉, 2019.

3. **寺原拓哉**, 佐々木崇史, 塩崎健介, 滝沢研二, Tayfun E. Tezduyar, "弁葉近傍流れを解像した大動脈弁解

析”, 第 10 回血流会, 長野, 2018.

4. **寺原拓哉**, 塩崎健介, 小林遼太郎, 津島敦史, 滝沢研二, Tayfun E. Tezduyar, “Computational Analysis of the Blood Flow in the Aorta and Heart Valve with ST-SI-TC-IGA”, CREST・さきがけ・AIMaP 合同シンポジウム 2019, 東京, 2019.
5. **寺原拓哉**, 佐々木崇史, 塩崎健介, 滝沢研二, Tayfun E. Tezduyar, “弁形状の違いが流れに及ぼす影響”, 第 28 回バイオフロンティア講演会, 徳島, 2017.
6. **寺原拓哉**, 佐々木崇史, 塩崎健介, 滝沢研二, Tayfun E. Tezduyar, “弁葉近傍流れを解像するアイソジオメトリック離散化による流体解析”, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 埼玉, 2017.

IV. 2019 年度の研究概要

心臓弁の接触を伴う高精度流体解析のため、これまでに境界適合格子を用い、流体構造連成（FSI）解析で得られる複雑な動作に対しても流体解析を実現している。本年度は構築した流体解析手法を実際の形状に適用した解析を行うため、心臓弁を含む左心室から大動脈までの系を対象にした。ここで、実際の問題では、心臓は一方向の流れではなく、小さな逆流も生じている。通常、計算上で境界条件を決める際、流入には流速を、流出にはトラクションを与える。しかし、流入と定めた部分で流入出が起こる場合には適さない。さらには本来、系への流入出量は流入出口の圧力差と体積変化量から決まる解の一部である。そのため本研究では流入にもトラクションを与え、圧力差により駆動する解析を行う。流入口にトラクションを与える場合、流入するエネルギーに対して、速度プロファイルが一意に定まらないため、解が発散する。この問題に対して、二次の B-spline の一要素を流入面に設けることで解決した。レイノルズ数の低い流れは二次関数で表現可能であること、二次の B-spline の一要素は端点の速度が規定されており一点のみ未知数となることを利用して流入する速度プロファイルを規定する事ができる。本研究では、まず本手法を理論解が求まる単純な問題に適用するテスト解析を行った。テスト解析の後、本手法を左心室から大動脈までの系に適用する解析を行った。解析結果からは左心室の拡張によって左心室内に作られる大きな渦流の様子や、大動脈内で作られる螺旋構造を捉えることができた。また、心臓弁表面のせん断応力を算出し、左心室内で作られる非定常な流れによって、せん断応力分布にも非対称性が見られることを確認した。

V. 総括（2017 年 4 月～2020 年 3 月）

本研究は、心臓弁の高精度流体解析を目指したものである。物体表面近傍の速度変化が大きい部分を精度良く解析するためには境界に沿った解析格子を用いることが望ましい。物体同士の接触が流体場内で生じる心臓弁のような問題では、空間を表現する要素が押しつぶされ、トポロジー変化が生じる。この問題に対して、空間だけでなく時間方向にも離散化する space–time（ST）法を活かした ST topology change（ST-TC）法により、物体同士の接触による体積変化を捉える解析が可能となっている。しかし、ST-TC 法は心臓弁のような動きや接触位置が予測できない場合には適用できないという問題があった。本研究ではこの問題に対して、格子同士のスリップを可能にする ST slip interface（ST-SI）法と解析においても滑らかな基底関数を用いる ST isogeometric analysis（ST-IGA）法を併用し、ST-SI-TC-IGA 法を用いることで解決した。ここで本手法を心臓弁に適用する際には複数の課題が生じる。一つは格子の扱いである。弁尖の接触部分において、複雑な弁尖の動作に合わせ要素を押し潰すことや、押し潰したまま移動するといった精密な変形が求められる。これに対し、要素が押しつぶされる部分とそれ以外とで、格子生成法を変えることで解決した。2017 年度には構造解析によって得られた弁尖動作に対して、2018 年度には FSI 解析で得られた弁尖動作に対して高精度な流体解析をすることに成功した。また、本手法を実際の問題に適用する際には、境界条件として、流入口にもトラクション条件を与えた。この時、安定的に解くため、流入口に二次の B-spline の一要素を取り付ける方法を提案した。2019 年度には、これまでの手法を用いて、左心室から大動脈までの系に対して高精度流体解析を実現した。また、それぞれの解析において弁表面のせん断応力を算出し、これまで視ることのできなかった弁尖近傍の流れが弁尖に及ぼす影響について評価することが可能となった。