

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：32689

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22401

研究課題名（和文）接触を伴う流体现象の解明のためのT-spline動的細分化による計算手法の構築

研究課題名（英文）Local Mesh Refinement for Flow Analysis with Isogeometric Discretization and Topology Change

研究代表者

寺原 拓哉（Terahara, Takuya）

早稲田大学・理工学術院・助教

研究者番号：10875305

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：物体同士が接触する際の流れは、押し出されるようにして速い流れが生じ、周囲の流体場や物体そのものへ影響を及ぼす。この把握することの難しい接触する物体近傍の流れ場を、理論に基づく数値解析により明らかにする。本研究では、この流体现象を多くの問題に適用可能な手法にするため、高次の基底関数で表現した空間の局所的な細分化技術を本手法に導入した。最終的には実問題への適用例として、開閉する人工心臓弁周囲の流体場を解析し、弁が開く、閉じる瞬間、開いている時の複雑な流れ場の様子を効率よく明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物体同士が接触する中での流れ場は、観測することが難しく、数値解析においても接触による空間の変化を正確に捉えることが求められ難しい。本研究は物体同士の接触を伴う流体现象を解析することの出来る解析手法を、幅広い問題に適用可能で、効率良いものにする。本研究での実問題への適用例として選んだ心臓弁は心臓でも疾患の発症の多い部分であり、複雑な動作や形状、接触という問題から周囲の流体場を把握するのが難しい例である。そうした例に対しても周囲の流体場を把握することができる。

研究成果の概要（英文）：The fluid mechanics associated with contact between moving interfaces is challenging. The challenge is caused by the topology change computational domain. We use the moving-mesh method to represent the boundary layer near the contact surfaces accurately. We refine the mesh locally by using T-splines to have the desired accuracy. We have applied the method to artificial heart valve flow analysis, a cardiovascular fluid-structure interaction problem. The flow solution was high accuracy near the leaflet surfaces even when they came into the contact.

研究分野：計算工学

キーワード：ST-SI-TC-IGA T-spline 心臓弁流体解析

1. 研究開始当初の背景

物体同士の接触を伴う流体现象は、生体における心臓弁や鳥の羽ばたきから、人工物ではタイヤやエンジンバルブまで幅広く存在する。物体同士の接触とは、空間を押しつぶし流体を押しつける現象である。接触の瞬間には押し出される流体が速い流れとなり、周囲の流体場に影響を与える。例えば鳥の場合は羽の接触により生じる渦を利用して効率よく飛び、心臓弁の場合は接触の瞬間に生じる速い流れにより大きなせん断応力を受けてしまう。このように物体同士の接触による流れの変化を捉えることは無視できるものではなく、現象を理解する上で必要である。しかしこの流れの変化を捉えるには物体同士の接触により狭まり、押しつぶされる空間を正しく観測することが必要であり、実験等によるアプローチでは難しい。そのため接触部近傍でどのような現象が起きて、それが周囲にどのような影響を及ぼすのかが分かっていない例が非常に多い。

2. 研究の目的

本研究では理論に基づく数値解析により、接触を伴う流体现象を解明することを目指した。流体解析により接触による空間の変化を正確に捉えるためには、移動する境界に格子が追従する境界適合格子を用いることが望ましい。境界に適合した格子は接触する物体に追従するようにして変形する。つまり接触直前の物体周囲の格子は解像度が高くなり、接触時の物体周囲の格子は押し潰される。接触時とそれ以外とで空間の微分のとおり方が異なるため、解析することが難しいが、時空間の同時離散化を応用することで解決していた。加えて空間の離散化方法として、要素間になめらかな基底関数を持つ **B-spline** を用いることで接触部近傍の曲率の高い形状を曲体積要素で表現した。これにより、接触を伴う場合でも流体现象の解析を実現したが、接触部近傍の流れを捉えるためには不十分な点があった。一般的に流体解析では流れの変化の大きい、物体近傍で速い流れの生じる部分に高い解像度を必要とする。そのため、流体现象に合わせた格子解像度で解析することが求められる。接触を伴う流体现象には接触の瞬間に速くなる問題もあれば物体同士が離れている時に速い流れとなる問題も考えられる。しかし本解析手法では、接触部近傍の未知数の数が固定されており、流体場の状態に適した格子解像度を維持し続けることが難しい。これは **B-spline** が構造的な格子点配置を持つため、予め速い流れの生じる部分を細分化すれば格子全体が細分化されることとなり、計算コストの増大につながるためである。これには直交格子を使った解析等で用いられる、流体場の状態に合わせた局所的な細分化を行う適合細分化格子法が有効である。よって本研究では高次関数の一つとして **B-spline** で離散化された境界適合格子を適合細分化格子法に拡張し、接触を伴う流体现象の解析手法を信頼高く、効率よく、安定なものにすることをすることを目的とする。

3. 研究の方法

接触を伴う流体现象の解析手法を適合細分化格子法へアップデートするため、本研究では **B-spline** の拡張表現である **T-spline** の技術を用いる。 **T-spline** は構造的なパラメトリック空間を有する **B-spline** において、同一要素内で列ごとに異なる基底関数を用いることができる。これにより **T-spline** は非構造的な格子点配置を可能とし、局所細分化が可能である。

4. 研究成果

4. 1 T-spline による局所細分化の実現

本研究でははじめに **T-spline** の基底関数による局所細分化を2次元の例を基に行った。図1に **T-spline** で局所細分化した例を示す。 **B-spline**、 **T-spline** はその形状や物理量を変化させずに細分化することが出来る特徴がある。図1はそれぞれ **B-spline** で離散化した円筒形状、細分化された **B-spline**、局所細分化された **T-spline** となっており、赤い点が格子点、緑線が要素境界である。 **B-spline** が細分化によって全面が細分化されているのに対して、 **T-spline** は一部だけが細分化されており、要素境界がT字となっていることが分かる。このようなT字部分でも、 **T-spline** は高次の連続性を保持することができ、基底関数が不連続となる従来の適合細分化格子法に比べて優位性がある。

4. 2 T-spline を、接触を伴う流体解析手法に組み合わせた際の問題の解決

次に、 **T-spline** の基底関数を、接触を伴う流体解析手法に組み合わせる際に生じる問題への解決策を示した。図2に **T-spline** により細分化した物体同士の接触を伴う流体现象の解析格子の例を示す。黒点が格子点、市松模様の色付けは各要素を示したものである。緑と赤部分の要素が **T-spline** で細分化された部分である。接触を伴う流体现象の解析手法は、接触する物体と相手の面にある点同士を重ね、要素を押しつぶすことで空間の体積変化を表現する。接触の際、格子点同士が重なり接触した格子点同士の未知数を同一とみなすことでリメッシュすることを回避している。一方で、図2に示した例では、局所的に細分化することで物体上の格子点の数と押し潰される要素上の点の数が異なり、重ならない点が生じる。このような問題では従来の手法をその

まま適用することが出来ないため、工夫が必要となる。これに対する解決策を説明する。B-spline や T-spline における細分化は細分化前の n 個の制御点ベクトルを列とする P 、細分化後の \bar{n} 個の制御点ベクトルを列とする \bar{P} として、

$$\bar{P} = AP$$

のように、行列 $A \in \mathbb{R}^{\bar{n} \times n}$ により変換できる。すなわち、接触した時、細分化された部分の制御点における未知数を細分化されていない部分の未知数の線形和で表現することで、接触を伴う流体解析手法に対応する。

4. 3 実現象への適用：開閉する人工心臓弁の流体解析

T-spline を用いた 3 次元流体解析を人工心臓弁の実問題に適用した。本解析は人工心臓弁の性能試験を再現したもので、バルサルバ洞形状を有する直管の内部に人工心臓弁を配置し、弁尖は実際と同じ厚みを持つ形状を再現しており、弁尖と弁尖縁部分という異なるスケールを持つ複雑な形状である。さらには、流体構造連成解析に基づく複雑な動作を弁尖と管壁が有しており、3つの弁尖それぞれが異なる動作を持つ。この人工心臓弁に対して B-spline で離散化された格子を用いた流体解析から算出した、無次元距離 y^+ を基に、弁尖の流入側に対して近傍を 8 分の 1 になるように局所細分化した。局所細分化した格子の断面の様子を図 3 に示す。局所細分化した部分とその近傍の境目には T 字の要素境界がみられ、格子点数を大幅に増やすことなく、細分化することができている。解析結果として、速度勾配テンソルの第 2 不変量の正の等値面を速度で色付けしたものを図 4 に示す。弁が開いている時、閉じた直後の様子を示しており、周囲で作られる複雑な流れ場を捉えることに成功している。

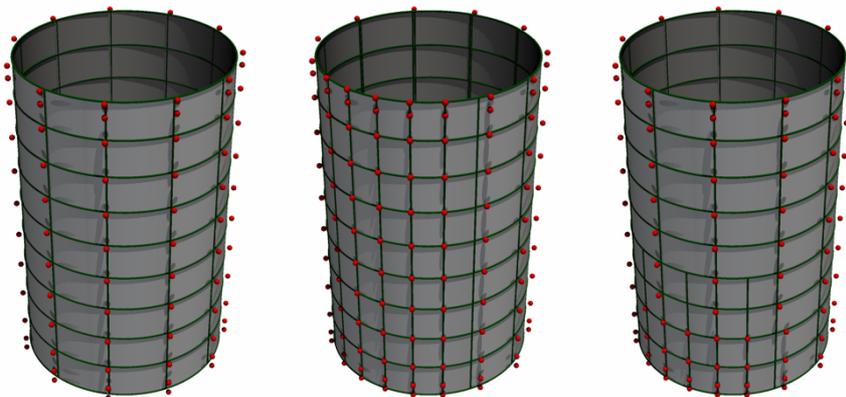


図 1 B-spline で離散化した円筒形状 (左), 円周方向に細分化した格子 (中), T-spline によって局所的に細分化した格子 (右). 赤点は制御点を, 緑線は要素境界を示す。

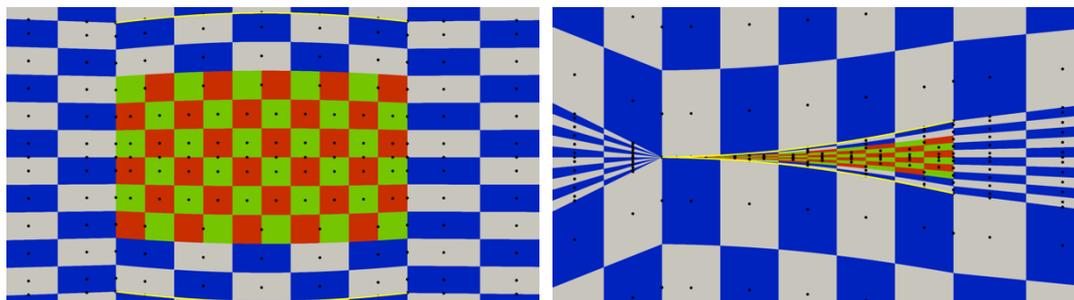


図 2 T-spline により細分化した物体同士の接触を伴う流体现象の解析格子の例。黒点が格子点, 黄線が物体の境界, 色付けされた区間がそれぞれの要素を示す。

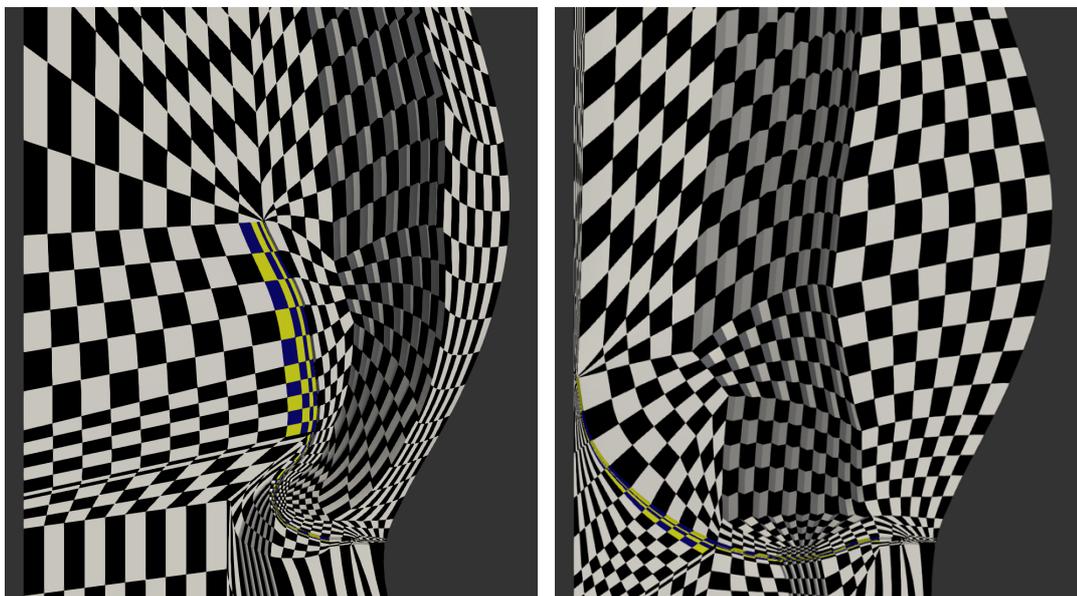


図 3 弁開時 (左), 弁閉時 (右) における人工心臓弁周囲の格子の断面. 市松模様が各要素をそれぞれ示す. 黄色と青色で色付けされた部分が T-spline により局所細分化された部分を示す.

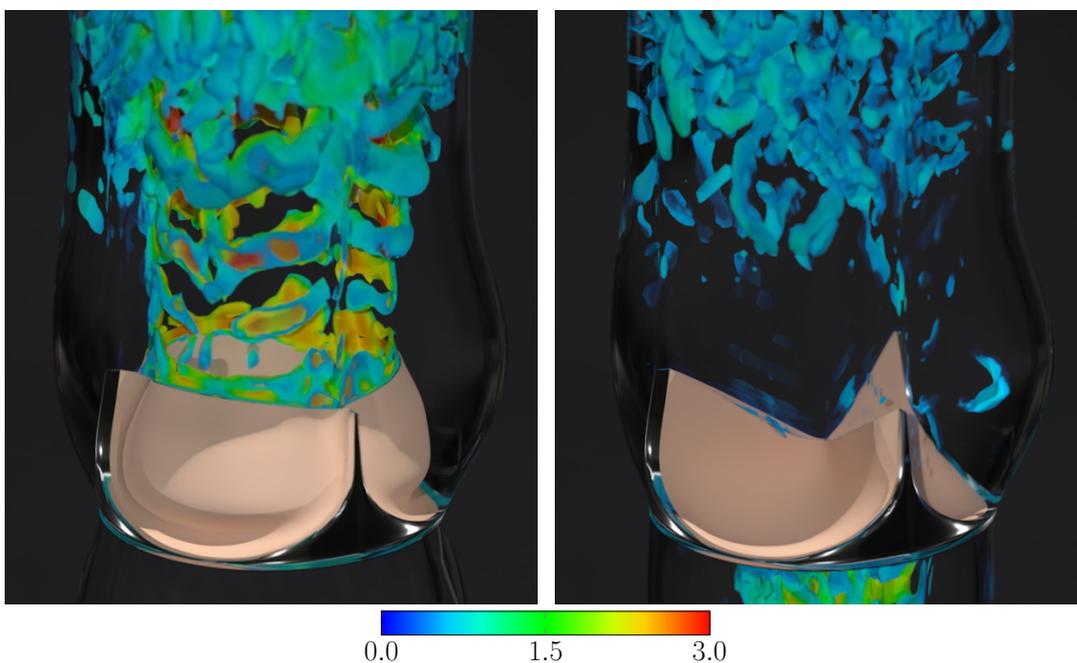


図 4 弁開時 (左), 弁閉時 (右) において速度勾配テンソルの第 2 不変量の正の等値面を速度 (m/s) で色付けしたもの.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 T. Kuraishi, T. Terahara, K. Takizawa, 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, 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

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

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 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 鈴木絢芽、乙黒雄斗、寺原拓哉、滝沢研二、Tezduyar Tayfun E.
2. 発表標題 T-splineを用いた傘の設計と性能評価
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 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 中村貴博、乙黒雄斗、寺原拓哉、滝沢研二、Tezduyar Tayfun E.
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 伊藤順平、吾妻駿人、寺原拓哉、滝沢研二、Tezduyar Tayfun E.
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 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 中村貴博、乙黒雄斗、寺原拓哉、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
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
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、Tezduyar Tayfun 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
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回バイオフロンティア講演会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 伊藤順平、寺原拓哉、齋藤耀玖、吾妻駿人、石田勝也、滝沢研二、Tezduyar Tayfun E.、竹原康雄
2. 発表標題 腹部大動脈瘤成長予測のための内皮細胞整列モデルの構築
3. 学会等名 第32回バイオフロンティア講演会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 寺原 拓哉, 滝沢 研二, Tezduyar Tayfun E.
2. 発表標題 弁尖厚みを考慮した心臓弁解析
3. 学会等名 第25回計算工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺原 拓哉, 滝沢 研二, Tezduyar Tayfun E.
2. 発表標題 T-splineを用いた心臓弁流体解析
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

〔図書〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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			
米国	Rice University			