

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760144

研究課題名(和文) 高次精度パラメトリック時空間モデルによる機械と流体の相互作用解析手法の開発

研究課題名(英文) Higher-Order Space-Time Parameterization and Modeling of Fluid and Object Interaction

研究代表者

滝沢 研二 (Takizawa, Kenji)

早稲田大学・高等研究所・准教授

研究者番号：60415809

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、機械と流体の相互作用を解析するための計算手法の開発である。流体の解析手法はこれまでに多く研究されてきており一定の成果を上げている。本研究の特徴は、この流体解析と周辺機械が起こす時間変化という空間のみならず時間のモデリングを行う点である。ここでは、3つの項目について取り組んだ。1つ目は運動方程式に着目し加速度が連続である条件を利用した時刻データの滑らかな記述手法の考案、2つ目は、弁の開閉のような空間のトポロジーが変わる問題を高精度に、そして高効率に、3つ目は回転体のようにそれ自身がトポロジーを変更せずとも、高精度な流体解析を実現するための格子を振れずに解析する手法の考案である。

研究成果の概要(英文)：This research is aimed to establish solving fluid mechanics equations for practical engineering problems. The important point in this research is that not only modeling on spatial discretization but also temporal discretization; space and time modeling. There are three topics. One is smoothness of the motion, which comes from acceleration continuity in dynamics. Second one is topology change in fluid domain, such as heart valve problems. The third one is how to treat rotating objects, such as wind turbine problems.

研究分野：機械工学

キーワード：数値流体解析 移動境界問題 トポロジー変化 熱流体解析 時間空間モデリング

1. 研究開始当初の背景

本研究は、流体と機械の相互作用に関する研究を行うための解析手法の開発である。流体機械は発電機やポンプなどエネルギーを取り出すことと利用するという両面に大きな役割を果たしている。この設計技術は古くから発達しており、近年はますます数値流体解析が多く利用されるようになってきている。

数値流体解析も古くから研究が行われ一定の成果を上げている分野である。一方で、未だ技術的に難しい問題も多くある。例えば、解析コストである。近年のスーパーコンピュータの発達に伴い非常に大規模な解析が出来るようになってきているが流体の基礎方程式である Navier-Stokes 方程式の直接解法から現実の工学問題に利用できる例は極めて少ない。そのため、モデル化をすることが必要である。そして、解析精度を高めるための多くの工夫を要するのである。本研究は、このような課題の中の一つである、移動境界問題に焦点を当てる。

移動境界問題は、流体解析の中でも難しい問題である。なぜなら流体は構造物と違い自然に存在する場についての方程式である。これが移動する周囲境界により受動的に変化し、その様子をモデル化する必要がある。このモデル化には、通常メッシュと呼ばれる空間同士の位置関係を示すものが必要である。これを使うことで、空間微分を表現し、これが解析に利用される。したがって、周囲との関係を示したコネクションを利用することが必要である。このコネクションが時々刻々と変わる問題は解析効率を上げることが難しく、また、解析精度を高めるためには、必要となる（境界層とよばれる勾配の大きい箇所）に多くの格子を使う必要がある。このような背景のもと、解析精度や効率を失わず、現在困難とされる類の移動境界問題の解析手法の確立が必要とされている。

2. 研究の目的

本研究では、機械と流体の相互作用の解析を行うに先立ち、流体とその周囲境界の空間モデリングに加え、時間方向をモデリング化する手法を考案する。一般に未来となる時間方向を予めモデル化することは困難であるため、モデリングするのは、時間方向をパラメータ化した仮想的な次元である。これを本研究では、パラメトリック時空間モデルと呼ぶ。このモデル手法を用い、背景にもある流体・機械の問題を高効率で、高精度に解析することを目的とする。本研究では次の3つについて研究を行う。

- (1) 移動の滑らかさに着目したモデリング。衝撃力を除けば、物体に働く力は連続的である。したがって、通常物体の加速度は連続的である。この滑らかさに着目した時空間モデリングが本項目の目的である。
- (2) 例えば、心臓弁のような流路に存在する

弁は、あるときに1つの空間を2つに分断する。これを空間のトポロジー変化と呼ぶ。また、トポロジー変化とならなくとも、拍手する動作のようにある空間が押しつぶされる動作は、前述の“コネクション”をもつ流体解析には極めて難しい問題である。本項目では、このトポロジー変化を含む問題の解析手法の構築を目的とする。

(3) 最後は、前述のとおり空間的なトポロジー変化が起きない問題であるが、事実上“コネクション”が絡まってしまうような、回転現象に対応する手法を考案することである。例えば、風車が回転する状況を考えてみると、風車の翼端の格子点は、回転に伴い地上とねじれて移動していくことになる。このような問題を高精度に、そして高効率に解決する手法開発が本項目の目的である

以上の3つを大きなテーマとし、流体・熱流体解析を工学的に意味のある効率的で高精度な解を得る手法を構築することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究では、これまで研究に用いてきた space-time (ST) 有限要素法と呼ばれる手法をベースとする。有限要素法は構造解析では業界標準であり、数学的証明も多くなされている使いやすく信頼のある解析手法である。時間変化には通常差分法が用いられている。一方 ST 法は、時間方向の離散化にも有限要素法を用いる手法である。この方法も古くから研究されてきたものであるが、工業的には利用されている例はあまりない。本研究では、この計算手法をベースとし、次の2点に着目して進める。

- (1) 高精度性を担保するため、従来の物体適合格子を用いた計算手法を利用する。
- (2) スーパーコンピュータでの解析を効率的にするため、解析中におきるコネクションの変化を極力小さくする。

これらの研究指針にそって、研究開発をし、実証するために多くの工学課題に取り組む。

4. 研究成果

ここでは研究成果を年次順ではなく、3つの研究目的にそって説明する。

- (1) 物体の滑らかさに着目した研究としては、羽ばたき羽根を利用した小型飛翔体 (MAV) を通し、研究を進めた。羽ばたきの様子は、イナゴの羽ばたきから得られたものである。イナゴの羽ばたきを高速度カメラで撮影し、そのデータを時間空間モデルにする。この際、空間記述に computer-aided design (CAD) で使われる non-uniform rational B-spline (NURBS) と呼ばれる基底関数を利用し、少ない点で複雑な形状を表現する。また、時間方向にもこの NURBS を利用する。この点が本研究の特徴で、この時間関数に3次多項式を利用する。これは、位置を3次多項式で表現すると、速度が2次多項式となり、加速度は1次多項式であるため、加速度の連続性を保てるのである。本手法による成果は、

主に 5. に示す主要な論文で⑤, ⑱, ㉓, ㉔, ㉕で発表している。図 1 にその解析結果の例を示す。また、図 2 に、3 次関数および 2 次関数による解析結果の比較を示す。2 次関数の場合は、力が不連続になっているのが分かる。これは、物理的に良い結果とはいえず、逆に、3 次関数を利用することの有用性が示された。

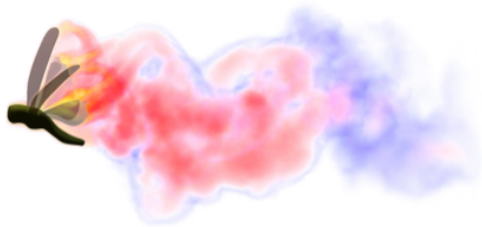


図 1 イナゴの羽ばたき解析

また、この研究より、なめらかなデータを作

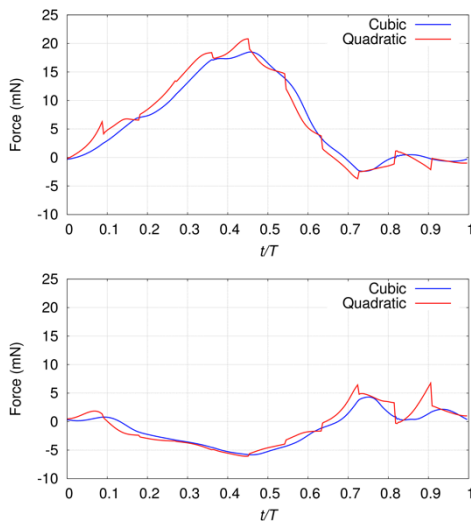


図 2 羽ばたきによる推進力、揚力の違いを 2 つのモデルで比較

る計算手法のアイデアを得た。これが、論文⑳で、なめらかなデータを逐次的に構築する手法を提案した。これにより、スーパーコンピュータを利用している際のデータアクセスによる速度低下も極めて少なくすることが可能となった。例えば、㉓の論文ではこの技術を使い効率的な解析を実現した。

(2) 2 つ目のテーマは、新しい解析手法を㉔で提案した。これは、空間が存在している、存在していないという状態ではなく、閉じる、または開くという動作をモデリングする点の特徴である。このことにより、閉じるという動作の 4 次元空間上で時間、空間微分を表現することが出来る点の特徴である。また、解析にはスーパーコンピュータで高効率に利用するために、マスタースレーブシステムと命名したデータ分散法を利用し、トポロジー変化の前後でのデータの保持形式を変化させない仕組みを提案した。これにより、従

来の計算手法と同等の計算効率をキープすることを実現した。この技術を用いた解析例は、主に、論文⑤, ⑧, ㉔, ㉕にて発表した。ここでは、論文⑧から図 3 で心臓弁を閉じる寸前および直後の流れの様子を示す。

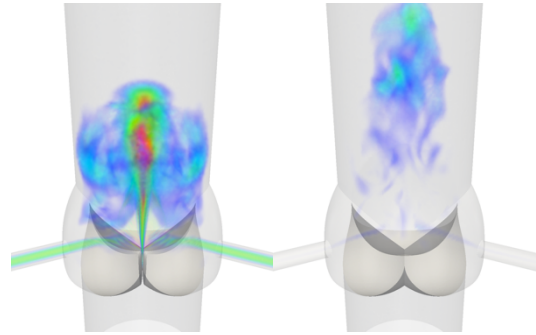


図 3 弁を閉める直前 (左)、直後 (右)

本研究手法は、はじめから目標としている高精度を保つことが分かっており、例えば、速度の微分量を正確に捉えられないと正しい答えを得られない、壁面剪断応力の解析が可能となった。このような手法と、トポロジー変化を組み合わせた例は過去になく本研究成果は高く評価され多くの招待講演につながった。

(3) 3 つ目は回転を伴う解析である。このような要求は、工学的に非常に多く、実際、多くの商用解析ソフトウェアにも搭載されている機能である。本研究では、高精度性、そ

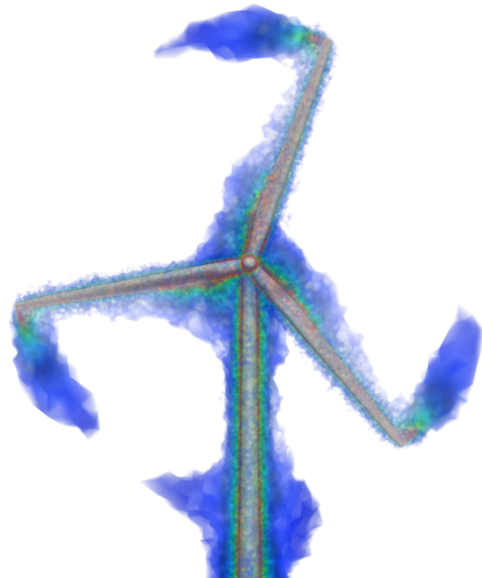


図 4 水平軸型風車の解析

して、解析効率および、本研究のその他のフレームワークに合致したものを研究した。最初に試した手法は、図 4 に示される (図は論文水平軸型風車へ移動格子法を用い格子を変形させながら解析する手法である。これは、(1) で使った手法を拡張し、剛体回転を正確に記述する新手法である (図 5 を参照)。本手法は 3 つのコントロールポイントを用いることで、円弧を正確に描き、これに対応す

る2次マッピングを利用して定角速度運動を表現する手法である。もちろん、単に定角速度運動を表現するのであれば、それだけのための特殊な手法も利用することができるが、本手法は前述のNURBSを使ったフレームワークに統合されているため、別の箇所では別の自由な変形を記述する事ができるという利点がある。

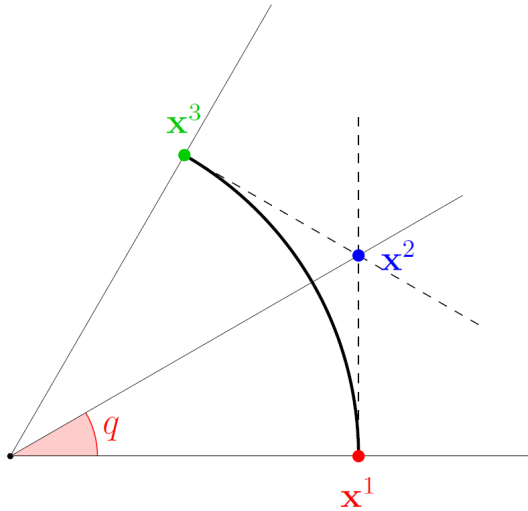


図 3 NURBS による円弧表現

本手法は、効率性と精度は保つことが出来たが、利用者の利便性が低かった。そこで、メッシュを切り離す手法の開発も行った。本手法を slip-interface formulation と名付け ST-SI という名目で論文②で発表した。図 6 に本手法による解析結果を示しており円弧形とエアfoil形の間この slip interface が存在するが注意深く観察しないとその境目は区別がつかないほど滑らかに解析されている様子がわかる。

最後に、本研究で行った(2)、(3)を組み合わせた解析について説明する。本研究は路面に設置しながら回転するタイヤの解析で、図 7 に模式図を示す。タイヤは(3)の項目に相当する回転部を含むため、周囲に slip interface を必要とする。そして、路面において領域が押しつぶされる解析であるため(2)で、提案した ST-TC 法を利用することが必要である。本件手法は3次元にも拡張され、解析がこれまでどおりの効率でできることが示されている。

以上の通り、目標の3つについて研究を進め、それらを用いた応用例を多く示すことが出来た。その他の論文などにもこれらの技術を利用し有用な成果を上げたことを加え本研究の成果報告とする。

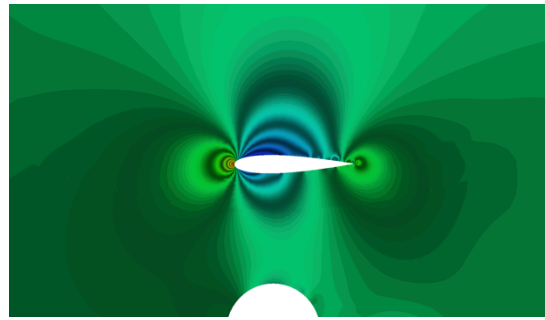


図 6 羽根が支柱を横切る様子

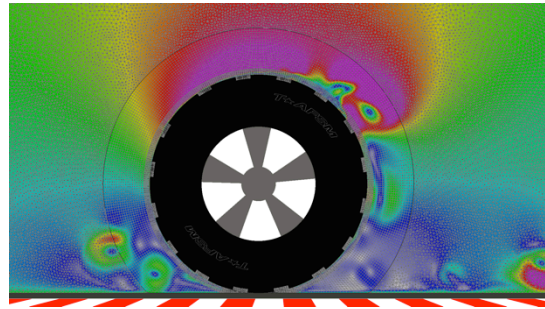


図 7 タイヤの解析例

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 32 件)

- ① Y. Bazilevs, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar, “New directions and challenging computations in fluid dynamics modeling with stabilized and multiscale methods”, *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, to appear, 2015.
- ② K. Takizawa, T.E. Tezduyar, H. Mochizuki, H. Hattori, S. Mei, L. Pan, and K. Montel, “Space-time VMS method for flow computations with slip interfaces (ST-SI)”, *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, to appear, 2015.
- ③ K. Takizawa, T.E. Tezduyar, and T. Kuraishi, “Multiscale ST methods for thermo-fluid analysis of a ground vehicle and its tires”, *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, to appear, 2015.
- ④ K. Takizawa, T.E. Tezduyar, and R. Kolesar, “FSI modeling of the Orion spacecraft drogue parachutes”, *Computational Mechanics*, published online, DOI: 10.1007/s00466-014-1108-z, December 2014, doi: [10.1007/s00466-014-1108-z](https://doi.org/10.1007/s00466-014-1108-z).
- ⑤ K. Takizawa, T.E. Tezduyar, and A. Buscher, “Space-time computational analysis of MAV flapping-wing aerodynamics

- with wing clapping”, *Computational Mechanics*, published online, DOI: 10.1007/s00466-014-1095-0, January 2015, [doi: 10.1007/s00466-014-1095-0](https://doi.org/10.1007/s00466-014-1095-0).
- ⑥ K. Takizawa, T.E. Tezduyar, C. Boswell, Y. Tsutsui, and K. Montel, “Special methods for aerodynamic-moment calculations from parachute FSI modeling”, *Computational Mechanics*, published online, DOI: 10.1007/s00466-014-1074-5, October 2014, [doi: 10.1007/s00466-014-1074-5](https://doi.org/10.1007/s00466-014-1074-5).
- ⑦ K. Takizawa, T.E. Tezduyar, R. Kolesar, C. Boswell, T. Kanai, and K. Montel, “Multiscale methods for gore curvature calculations from FSI modeling of spacecraft parachutes”, *Computational Mechanics*, **54** (2014) 1461-1476, [doi: 10.1007/s00466-014-1069-2](https://doi.org/10.1007/s00466-014-1069-2).
- ⑧ A. Corsini, F. Rispoli, A.G. Sheard, K. Takizawa, T.E. Tezduyar, and P. Venturini, “A variational multiscale method for particle-cloud tracking in turbomachinery flows”, *Computational Mechanics*, **54** (2014) 1191-1202, [doi: 10.1007/s00466-014-1050-0](https://doi.org/10.1007/s00466-014-1050-0).
- ⑨ K. Takizawa, R. Torii, H. Takagi, T.E. Tezduyar, and X.Y. Xu, “Coronary arterial dynamics computation with medical-image-based time-dependent anatomical models and element-based zero-stress state estimates”, *Computational Mechanics*, **54** (2014) 1047-1053, [doi: 10.1007/s00466-014-1049-6](https://doi.org/10.1007/s00466-014-1049-6).
- ⑩ K. Takizawa, T.E. Tezduyar, C. Boswell, R. Kolesar, and K. Montel, “FSI modeling of the reefed stages and disreefing of the Orion spacecraft parachutes”, *Computational Mechanics*, **54** (2014) 1203-1220, [doi: 10.1007/s00466-014-1052-y](https://doi.org/10.1007/s00466-014-1052-y).
- ⑪ K. Takizawa, T.E. Tezduyar, A. Buscher, and S. Asada, “Space-time fluid mechanics computation of heart valve models”, *Computational Mechanics*, **54** (2014) 973-986, [doi: 10.1007/s00466-014-1046-9](https://doi.org/10.1007/s00466-014-1046-9).
- ⑫ H. Suito, K. Takizawa, V.Q.H. Huynh, D. Sze, and T. Ueda, “FSI analysis of the blood flow and geometrical characteristics in the thoracic aorta”, *Computational Mechanics*, **54** (2014) 1035-1045, [doi: 10.1007/s00466-014-1017-1](https://doi.org/10.1007/s00466-014-1017-1).
- ⑬ K. Takizawa, “Computational engineering analysis with the new-generation space-time methods”, *Computational Mechanics*, **54** (2014) 193-211, [doi: 10.1007/s00466-014-0999-z](https://doi.org/10.1007/s00466-014-0999-z).
- ⑭ Y. Bazilevs, K. Takizawa, T.E. Tezduyar, M.-C. Hsu, N. Kostov, and S. McIntyre, “Aerodynamic and FSI analysis of wind turbines with the ALE-VMS and ST-VMS methods”, *Archives of Computational Methods in Engineering*, **21** (2014) 359-398, [doi: 10.1007/s11831-014-9119-7](https://doi.org/10.1007/s11831-014-9119-7).
- ⑮ K. Takizawa, Y. Bazilevs, T.E. Tezduyar, M.-C. Hsu, O. Øiseth, K.M. Mathisen, N. Kostov, and S. McIntyre, “Engineering analysis and design with ALE-VMS and space-time methods”, *Archives of Computational Methods in Engineering*, **21** (2014) 481-508, [doi: 10.1007/s11831-014-9113-0](https://doi.org/10.1007/s11831-014-9113-0).
- ⑯ K. Takizawa, Y. Bazilevs, T.E. Tezduyar, C.C. Long, A.L. Marsden, and K. Schjodt, “ST and ALE-VMS methods for patient-specific cardiovascular fluid mechanics modeling”, *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, **24** (2014) 2437-2486, [doi: 10.1142/S0218202514500250](https://doi.org/10.1142/S0218202514500250).
- ⑰ K. Takizawa, T.E. Tezduyar, and N. Kostov, “Sequentially-coupled space-time FSI analysis of bio-inspired flapping-wing aerodynamics of an MAV”, *Computational Mechanics*, **54** (2014) 213-233, [doi: 10.1007/s00466-014-0980-x](https://doi.org/10.1007/s00466-014-0980-x).
- ⑱ 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](https://doi.org/10.1007/s00466-013-0935-7).
- ⑲ K. Takizawa, H. Takagi, T.E. Tezduyar, and R. Torii, “Estimation of element-based zero-stress state for arterial FSI computations”, *Computational Mechanics*, **54** (2014) 895-910, [doi: 10.1007/s00466-013-0919-7](https://doi.org/10.1007/s00466-013-0919-7).
- ⑳ K. Takizawa and T.E. Tezduyar, “Space-time computation techniques with continuous representation in time (ST-C)”, *Computational Mechanics*, **53** (2014) 91-99, [doi: 10.1007/s00466-013-0895-y](https://doi.org/10.1007/s00466-013-0895-y).
- ㉑ K. Takizawa, T.E. Tezduyar, J. Boben, N. Kostov, C. Boswell, and A. Buscher, “Fluid-structure interaction modeling of clusters of spacecraft parachutes with modified geometric porosity”, *Computational Mechanics*, **52** (2013) 1351-1364, [doi: 10.1007/s00466-013-0880-5](https://doi.org/10.1007/s00466-013-0880-5).

- ② K. Takizawa, T.E. Tezduyar, S. McIntyre, N. Kostov, R. Kolesar, and C. Habluetzel, “Space-time VMS computation of wind-turbine rotor and tower aerodynamics”, *Computational Mechanics*, **53** (2014) 1-15, [doi: 10.1007/s00466-013-0888-x](https://doi.org/10.1007/s00466-013-0888-x).
- ③ K. Takizawa and T.E. Tezduyar, “Bringing them down safely”, *Mechanical Engineering*, **134** (12) (2012) 34-37.
- ④ K. Takizawa, B. Henicke, A. Puntel, N. Kostov, and T.E. Tezduyar, “Computer modeling techniques for flapping-wing aerodynamics of a locust”, *Computers & Fluids*, **85** (2013) 125-134, [doi: 10.1016/j.compfluid.2012.11.008](https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2012.11.008).
- ⑤ Y. Bazilevs, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar, “Challenges and directions in computational fluid-structure interaction”, *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, **23** (2013) 215-221, [doi: 10.1142/S0218202513400010](https://doi.org/10.1142/S0218202513400010).
- ⑥ K. Takizawa, K. Schjodt, A. Puntel, N. Kostov, and T.E. Tezduyar, “Patient-specific computational analysis of the influence of a stent on the unsteady flow in cerebral aneurysms”, *Computational Mechanics*, **51** (2013) 1061-1073, [doi: 10.1007/s00466-012-0790-y](https://doi.org/10.1007/s00466-012-0790-y).
- ⑦ K. Takizawa, D. Montes, S. McIntyre, and T.E. Tezduyar, “Space-time VMS methods for modeling of incompressible flows at high Reynolds numbers”, *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, **23** (2013) 223-248, [doi: 10.1142/s0218202513400022](https://doi.org/10.1142/s0218202513400022).
- ⑧ K. Takizawa, D. Montes, M. Fritze, S. McIntyre, J. Boben, and T.E. Tezduyar, “Methods for FSI modeling of spacecraft parachute dynamics and cover separation”, *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, **23** (2013) 307-338, [doi: 10.1142/S0218202513400058](https://doi.org/10.1142/S0218202513400058).
- ⑨ K. Takizawa, M. Fritze, D. Montes, T. Spielman, and T.E. Tezduyar, “Fluid-structure interaction modeling of ringsail parachutes with disreefing and modified geometric porosity”, *Computational Mechanics*, **50** (2012) 835-854, [doi: 10.1007/s00466-012-0761-3](https://doi.org/10.1007/s00466-012-0761-3).
- ⑩ K. Takizawa, K. Schjodt, A. Puntel, N. Kostov, and T.E. Tezduyar, “Patient-specific computer modeling of blood flow in cerebral arteries with

aneurysm and stent”, *Computational Mechanics*, **50** (2012) 675-686, [doi: 10.1007/s00466-012-0760-4](https://doi.org/10.1007/s00466-012-0760-4).

⑪ K. Takizawa, N. Kostov, A. Puntel, B. Henicke, and T.E. Tezduyar, “Space-time computational analysis of bio-inspired flapping-wing aerodynamics of a micro aerial vehicle”, *Computational Mechanics*, **50** (2012) 761-778, [doi: 10.1007/s00466-012-0758-y](https://doi.org/10.1007/s00466-012-0758-y).

⑫ K. Takizawa, B. Henicke, A. Puntel, N. Kostov, and T.E. Tezduyar, “Space-time techniques for computational aerodynamics modeling of flapping wings of an actual locust”, *Computational Mechanics*, **50** (2012) 743-760, [doi: 10.1007/s00466-012-0759-x](https://doi.org/10.1007/s00466-012-0759-x).

[学会発表] (計 39 件)

① K. Takizawa, S. Asada, T.E. Tezduyar, and A. Buscher, “Space-Time Interface-Tracking in Fluid Mechanics Computations with Contact between Moving Solid Surfaces”, 招待講演, 2015 年 3 月 17 日 台湾 (台北)

② K. Takizawa, T.E. Tezduyar, S. McIntyre, and N. Kostov, “Space-Time VMS Computation of Wind-Turbine Rotor and Tower Aerodynamics”, 招待講演, 2014 年 9 月 16 日, International Conference BAIL 2014 Boundary and Interior Layers, プラハ (チェコ)

③ K. Takizawa, and T.E. Tezduyar, “Computational Engineering Analysis with New-Generation Space-Time Methods”, Advances in Computational Fluid-Structure Interaction and Flow Simulation, 招待講演, 2014 年 3 月 19 日, 早稲田大学 (東京)

④ K. Takizawa, B. Henicke, A. Puntel, N. Kostov, and T.E. Tezduyar, “Space-Time Computational Techniques for Flapping-Wing Aerodynamics of a Locust”, Advances in Computational Mechanics (ACM 2013), 招待講演, 2013 年 2 月 24 日, San Diego, USA

[図書] (計 1 件)

① Y. Bazilevs, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar, “Computational Fluid-Structure Interaction: Methods and Applications”, Wiely, 2013 (404 ページ)

[その他]

ホームページ等

<http://www.jp.tafsm.org/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

滝沢 研二 (TAKIZAWA, Kenji)

早稲田大学・高等研究所・准教授

研究者番号: 60415809