

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K20287

研究課題名（和文）バルブの遊びを表現した接触挙動と流れの圧縮性の連成計算の実現

研究課題名（英文）Compressible-flow engine-valve analysis with response motion and contact

研究代表者

乙黒 雄斗（Otoguro, Yuto）

東京理科大学・理工学部機械工学科・助教

研究者番号：10801160

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究はバルブの開閉のような接触・解離を繰り返すような問題において流体と構造が連成する現象の計算手法を構築するものである。本研究では物体の接触を詳細かつ滑らかに表現する手法の構築を行った。高い連続性を用いた空間離散化手法と時間変化を記述できる定式化に基づいた新しい接触解析手法を提案することで、これまで課題であった滑らかな接触を実現し、バルブの接触によって生じる流体構造連成問題解析の基盤技術を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の主な学術的成果は、時間変動を記述できる構造計算手法を構築したことで柔軟な接触解析手法を提案したことと二つが挙げられる。これらの基本的なフレームワークは接触解析だけでなく、種々の連成解析にも有用であり、さらに計算格子生成の負荷低減が期待できる。したがって、これらのフレームワークを応用することで、産業界における現場等においてもCAEをより簡便に導入できることになり、設計・開発の可能性を高めることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：This research aims to develop a computational method for fluid-structure interaction problems such as valve opening and closing, where contact and detach are repeated. We have developed the method for describing the contact of objects. The new contact analysis method based on a spatial discretization using high continuity and a formulation that can describe time variation is proposed, which realizes smooth contact, proposes a fundamental method for fluid-structure interaction analysis caused by valve contact.

研究分野：計算力学

キーワード：接触解析 アイソジオメトリック解析 Space-Time法 トポロジー変化 移動境界問題

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

物体が高速で接触する際、その間に存在する流体は高速で流れ出し、図1のようなジェットが生じることがある。このようなジェットは圧縮性の挙動を示し、音速を超える場合は衝撃波が発生する。接触時の流れを実験的に得ることは難しく、数値計算によって流れ場を知ることが求められている。しかし、これまでの計算手法では詳細な現象を把握するには不十分である。

圧縮性流れは、壁面形状や摩擦、外部からの加熱などによって流れは大きく変動する。すなわち、境界条件が流れに及ぼす影響は大きい。接触を伴う流体構造連成問題においてこの影響はさらに複雑なものになる。接触部付近では流体の強い圧縮性が生じ、圧力波が上流へ伝播し領域全体の流れを制御しようとする。この圧力波は物体の変形に影響を及ぼすと考えられ、強い連成作用が予測される。そのため、精度の高い流れの記述だけでなく境界の表現にも高い精度が求められる。

## 2. 研究の目的

- 1) 境界適合格子を用いて接触を表現することのできる唯一の計算手法である ST-TC 法では、各時間ステップにおいて、ある点とある点が接触するかどうか、デジタルに接触を表現している。そのため、接触位置が伝播する場合でも接触箇所はある時刻に一度に接触をしてしまう。そこで、本研究では変形及び接触力の表現を滑らかに記述する計算手法の構築を行う。
- 2) 接触問題においては接触開始部の変位が滑らかでない場合は、流体力が不連続になる場合がある。接触部近傍では圧力波による強い連成作用が予測され、物体の挙動は不安定になることも予想される。したがって、接触アルゴリズムによって接触と剥離を繰り返す、振動のような不安定性を回避する必要がある。そこで接触フロントの滑らかな伝播を実現すること、及び柔軟な接触力の表現が可能な計算手法の構築を目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では物体の変形及び接触を滑らかに記述するため、物体及び挙動の表現に高次の基底関数を用いることでこれを解決する。そこで、(1) 時間・空間双方向に有限要素法で離散化を行う、Space-Time Isogeometric Analysis (ST-IGA) 法を用いた定式化、及び(2) Space-Time Slip Interface (ST-SI) 法に基づく定式化を用いる。以下ではそれぞれの方法について簡潔に説明する。

### (1) Space-Time 法による定式化

構造計算に対する Space-Time 離散化は数学分野においての利用(例えば[1])が見られるが工学分野ではほとんど用いられてこなかった。そこで構造計算における Space-Time 離散化による定式化及び実装が研究課題となる。この際の基底関数に高次の基底関数である Non-Uniform Rational B-spline (NURBS) 関数を用いることで形状・挙動ともに滑らかな記述を可能にする。

### (2) ST-SI 法に基づく定式化

滑らかな接触には先に述べた NURBS 関数による滑らかな物体の記述を用いることと、滑らかな接触を表現するための定式化としてこれまで流体計算に対して用いてきた ST-SI 法[2]のアイデアを構造計算の定式化に応用する。

## 4. 研究成果

### (1) Space-Time 法による定式化

まず、時間・空間ともに滑らかな記述を行うため、時間・空間双方向に有限要素法で離散化する Space-Time 有限要素法による定式化を行う。本研究では基底関数に、アイソジオメトリック解析で用いている NURBS 関数を用いるため未知数を変位のみで解析する、Single-field formation を用いる。時空間領域  $Q$  を時間方向に分割した、時間レベル  $t_n$  から  $t_{n+1}$  における時空

間領域を時空間スラブ  $Q_n$  と呼ぶ。  $Q_n$  における時空間境界を  $P_n$ ，スラブ間の不連続領域を  $\Omega_n$  と表記する。構造計算に対する Space-Time 定式化は以下ようになる。

$$\begin{aligned} & \int_{Q_n} \frac{d\mathbf{w}}{dt} \cdot \rho \left( \frac{d^2\mathbf{y}}{dt^2} - \mathbf{f} \right) dQ + \int_{Q_n} \frac{d\nabla\mathbf{w}}{dt} : \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{y}) dQ - \int_{(P_n)_h} \frac{d\mathbf{w}}{dt} \cdot \mathbf{h} dP \\ & + \int_{\Omega_n} \left( \frac{d\mathbf{w}}{dt} \right)_n^+ \cdot \rho \left( \left( \frac{d\mathbf{y}}{dt} \right)_n^+ - \left( \frac{d\mathbf{y}}{dt} \right)_n^- \right) d\Omega + \int_{\Omega_n} (\nabla\mathbf{w})_n^+ : \left( (\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{y}))_n^+ - (\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{y}))_n^- \right) d\Omega \\ & + \sum_{e=1}^{(n_{el})_n} \int_{Q_n^e} \frac{\tau}{\rho} \left( \rho \frac{d^2\mathbf{w}}{dt^2} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{w}) \right) \cdot \mathbf{r}_s(\mathbf{y}) dQ = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{y}$  は変位、 $\mathbf{w}$  は仮想変位、 $\rho$  は密度、 $\mathbf{f}$  は外力、 $\boldsymbol{\sigma}$  はコーシー応力、 $\mathbf{h}$  は時空間境界に採用する外応力ベクトル、 $\tau$  は時間の次元を持つ安定化パラメータであり、本研究では  $\tau = \frac{\Delta t}{2}$  としている。ここで、 $\mathbf{r}_s$  は残差であり以下の式で表される。

$$\mathbf{r}_s(\mathbf{y}) = \rho \left( \frac{d^2\mathbf{y}}{dt^2} - \mathbf{f} \right) - \boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{y}) \quad (2)$$

Single-field formulation では加速度の滑らかさを表現するため、高次の基底関数を用いる必要がある。本研究では 2 次の Bernstein 多項式を用いる。

## (2) ST-SI 法に基づく定式化

接触解析アルゴリズムとして、ST-SI 法に基づく定式化を行う。ST-SI 法の記述に当たって、SI における二つの面をそれぞれ “サイド A”， “サイド B” と表記する。SI に対して以下の付加項を導入することにより不連続要素間の計算を可能にすることより始める。境界項は二つのサイドに別々に追加され、それら全ての項は以下ようになる。

$$\begin{aligned} & - \int_{(P_n)_{SI}} \left( \frac{d\mathbf{w}_B}{dt} - \frac{d\mathbf{w}_A}{dt} \right) \cdot \frac{1}{2} (\mathbf{n}_B \cdot \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{y}_B) - \mathbf{n}_A \cdot \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{y}_A)) dP \\ & - \gamma \int_{(P_n)_{SI}} \frac{1}{2} \left( n_B \cdot \frac{d\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{w}_B)}{dt} - n_A \cdot \frac{d\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{w}_A)}{dt} \right) \cdot (\mathbf{y}_B - \mathbf{y}_A) dP \\ & + \int_{(P_n)_{SI}} \frac{C}{h} \left( \frac{d\mathbf{w}_B}{dt} - \frac{d\mathbf{w}_A}{dt} \right) \cdot (\mathbf{y}_B - \mathbf{y}_A) dP \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $(P_n)_{SI}$  は時空間スラブ中の SI 面、 $\mathbf{n}$  は単位法線ベクトル、 $\gamma$  は無次元定数、 $C$  は剛性によって決定される定数、 $h$  は要素長さである。

この定式化を用いて不連続要素を用いたテスト計算を行った (図 1)。テストは片持ち梁を対象に、梁の中央に不連続要素を配置する。左端を固定し、重力を付加した計算を行い、変形が滑らかに記述されるかどうかを確認する。計算格子の基底関数は 2 次の B-spline を用いている。図 1 より、梁中央の不連続要素を跨いで滑らかな変形が記述出来ていることが確認できる。

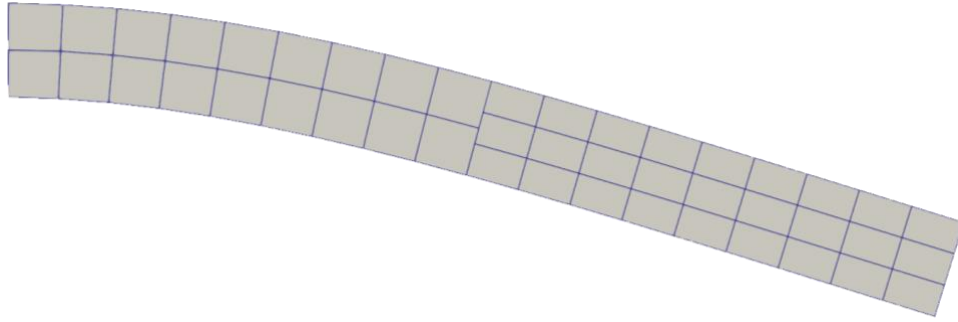


図 1: 片持ち梁の計算. 梁中央の SI を跨いで滑らかな変形が記述されている.

次に, 接触対象が剛体壁面のような変形対象では無い場合の定式化を行った. 式(3)におけるサイド A を剛体壁面とし, 接触位置を  $\mathbf{g}$  とした場合の ST-SI one-side 定式化は以下のように記述できる.

$$\begin{aligned}
 & - \int_{(P_n)_{SI}} \frac{d\mathbf{w}_B}{dt} \cdot (\mathbf{n}_B \cdot \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{y}_B)) dP \\
 & - \gamma \int_{(P_n)_{SI}} \left( \mathbf{n}_B \cdot \frac{d\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{w}_B)}{dt} \right) \cdot (\mathbf{y}_B - \mathbf{g}) dP \\
 & + \int_{(P_n)_{SI}} \frac{C}{h} \frac{d\mathbf{w}_B}{dt} \cdot (\mathbf{y}_B - \mathbf{g}) dP
 \end{aligned} \tag{4}$$

式(4)を Space-Time 法のフレームワークで行うことで接触解析を行う. 接触の判定と接触力の評価を時間方向の積分点ごとに行うことで時間ステップ内における接触挙動の変化を表現することができる. そこで, 式(4)の実装と評価点毎の接触点の検索アルゴリズムを実装した. これらの新たな解析手法を用いて滑らかな接触解析が実現できるかの検証を行った. 検証問題としては, 構造物が流体力によって移動・変形し, 剛体壁に接触する問題を対象として行った. 計算結果は図 2, 3 に示したように, 接触フロントが滑らかに移動するような条件においても安定的に計算できていることがわかる. 流体-構造連成問題で課題となることが想定される, 接触開始点の間に空間ができるような状態においても, 滑らかな変形と接触の表現を可能とした.



図 2: 接触開始点間が閉じている状態



図 3: 接触開始点間に空間ができる状態

以上の結果より, 研究開始時に目標としていた滑らかな接触表現する計算手法の構築が出来たと言える.

<引用文献>

- [1] T.J.R. Hughes and G.M. Hulbert, “Space-time finite element methods for elastodynamics: Formulations and error estimates”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **66**, pp. 339-363, 1988.
- [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*, **25**, pp. 2377-2406, 2015.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Otoguro Yuto, Takizawa Kenji, Tezduyar Tayfun E., Nagaoka Kenichiro, Avsar Reha, Zhang Yutong	4. 巻 64
2. 論文標題 Space--time VMS flow analysis of a turbocharger turbine with isogeometric discretization: computations with time-dependent and steady-inflow representations of the intake/exhaust cycle	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 1403 ~ 1419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00466-019-01722-2	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2件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 乙黒 雄斗
2. 発表標題 移動境界流体問題のSpace--Time法による定式化と複雑形状におけるIsogeometric離散化
3. 学会等名 第11回計算力学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuto Otoguro
2. 発表標題 Space--Time Computational Methods and Isogeometric Discretization for Flow Problems with Complex Geometries and Moving Boundaries and Interfaces
3. 学会等名 Advances in Computational Fluid--Structure Interaction and Flow Simulation A Conference on New Methods and Challenging Computations (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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
---------	---------