

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04007

研究課題名（和文）拘束の概念の拡張による流体構造連成問題の新たな表現法の構築と数値解析の高度化

研究課題名（英文）Development of an alternative coupling strategy and efficient numerical simulation techniques for the fluid-structure interaction problem based on enhancement of the constrained formulation

研究代表者

原 謙介（Hara, Kensuke）

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：70508259

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：3Dプリンタによる加工技術やAIを用いた構造最適化法等の援用を想定した次世代の構造設計において、部品の統合による機械全体の構築や流体構造連成など、モデルや物理現象の異なる多数のサブシステムを連成させる方法の高度化が重要な問題の1つである。本研究では、機構の動力学解析における拘束力を用いたジョイント結合と流体と構造の界面での力のつり合いを用いた連成法の間のアナロジーから着想を得た拘束の概念を拡張した新たな流体構造連成問題の解析体系の構築するとともに、この理論を基軸として、流体構造連成解析の数値解析法の構築を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マルチスケール・マルチフィジックス問題を対象とした高度な数値計算法をAI技術を利用した次世代構造最適化法や3Dプリンタによる加工技術と結びつける上で、部品の統合による機械全体の構築や流体構造連成など、モデルや物理現象の異なる多数のサブシステムを連成させる方法の高度化が鍵となっている。本研究では、機構の運動解析でジョイントの結合に用いる方法と流体と構造の界面での力のつり合いを用いた連成法の間のアナロジーから着想を得た、新しい流体構造連成問題の解析法の構築を行った。さらに、提案する方法が、流体と構造の連成現象を扱うための基礎理論に対して及ぼす影響について調査した。

研究成果の概要（英文）：The highly-developed numerical analysis is one of the most important techniques for the development of the next-generation mechanical design based on the AI technique, manufacturing technique using 3D printer and so on. In particular, methods to connect subsystems, such as mathematical description of joint components and the fluid-structure interaction, have a great influence on simulation results. This study develops a new analytical framework for the fluid-structure interaction problem based on the theory for constrained systems. The concept of the proposed formulation is based on the analogy between the dynamic equilibrium on the interface between the fluid and structure and mathematical treatments of the connection of mechanical components used in the structural dynamics. As a result, it is shown that the interaction between the fluid and structure can be expressed as the constrained system. Moreover, new numerical integration techniques for the constrained systems are developed.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：拘束系の力学 流体構造連成 マルチボディダイナミクス 微分代数方程式 ALE有限要素法

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年の計算機性能の向上と数値解析技術の発展により、高度なシミュレーションは構造設計分野で重要なツールとなっており、3D プリンタによる加工技術や AI を用いた構造最適化法等と結びつき、構造設計に新たな局面をもたらそうとしている。こうした技術の適用対象は現時点では部品レベルの構造設計であるが、今後は多数の部品を組み合わせた複雑な機械アセンブリに対して材料・振動・流体・熱・電気といった種々の力学の影響を考慮した、マルチスケール・マルチフィジックス問題へと適用範囲を広げていくことが極めて重要になる。しかしながら、マルチスケール・マルチフィジックス問題では、解析技術の進歩の反面、手法の多様化・複雑化が問題となっており、特に、現象のスケールの大きさや物理現象の異なる複数のサブシステムから全体系を構築する連成プロセスは、様々な連成の仮定や近似法、数値処理の方法(弱・強連成等)により複雑に構成されているため、結果のばらつきや重大な誤差を生む主要因の1つとなりうる重要な問題である。これに対し申請者は、マルチフィジックス問題の中でも連成の影響が大きいとされる流体構造連成問題に取り組む中で、流体と構造の界面での力を用いた連成法と、マルチボディダイナミクスにおける拘束力を用いた機構のジョイント結合の定式化の間にアナロジーを発見した。そして、この発見を発展させることで、拘束系の力学を切り口に流体構造連成問題に広く適用可能な包括的な解析体系を構築できると考え、本研究課題の着想に至った。

### 2. 研究の目的

#### (1) 拘束の概念を拡張した流体構造連成問題の新たな定式化

拘束系の解析力学を導入し、流体と構造の運動を連成させる拘束関係(一般に、位置・速度・加速度レベル)を導出する。そして、これらの拘束式を流体と構造の運動に関する微分方程式に付随させた微分代数方程式(Differential Algebraic Equations, DAE)により、流体構造連成問題を再構築する。非線形問題を扱うことが可能な手法の構築を目的とし、構造系(剛体・連続体)と流体系を主に有限要素法に基づいた物理モデルによって定式化する。

#### (2) 拘束系の運動方程式(微分代数方程式)に対する数値積分法の構築

拘束の概念の導入により流体構造連成問題を微分代数方程式という統一的な枠組みで表現するという本手法の特徴を活かし、流体構造連成問題に広く適用可能な DAE ソルバーの構築を目指す。具体的には、拘束の概念を導入して再構築した流体構造連成問題に対して有限要素法や Arbitrary Lagrangian-Eulerian 法(ALE 法)等を適用するとともに、拘束を用いたモデル統合により全体系の導出を行う拡大法を応用した解析法を構築する。拘束安定化法を併用し、流体と構造の連成における幾何学的整合性も向上や計算性の向上を目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 拘束を用いた流体構造連成問題の基礎理論の構築

構造系、流体系を各物理法則に則った形のサブシステムとしてモデル化する。そして、拘束系として定式化を行うため、流体構造連成系の Lagrangian の導出を行う。

導出した Lagrangian に対して拘束系の解析力学を導入し、流体と構造の連成を表す拘束関係の導出を行う。

流体と構造の連成を表す拘束関係を拘束式とし、Lagrange の未定乗数法を用いて流体構造連成系の Lagrangian の修正を行う。そして、拘束系の解析力学を用いて流体構造連成系の運動方程式の導出を行う。一般に各物理量の時間発展を表す微分方程式とそれらを結びつける拘束式から構成される微分代数方程式が導かれる。

#### (2) 数値モデルの構築

剛体(構造系)のモデルとしては、回転パラメータに着目して特異点回避が可能なクォータニオンを用いたモデルと、計算精度を保持しつつ計算自由度の低減が可能な増分型のモデルを構築する。さらに、連続体(構造・流体)に関しては、主に有限要素法に基づいた離散化を行う。また、妥当性の検証や後述の数値解析法を導入する際の試行プロセスを効率化するため、モデル近似を用いたモデルも構築する。

ALE 法に対して拘束系の力学理論の適用を行う。Lagrange 座標、Euler 座標、参照座標の間の代数関係を拘束式と考え、拘束の概念に基づいた ALE 法の計算メッシュの取扱法を構築する。

#### (3) 数値計算法の高度化・効率化

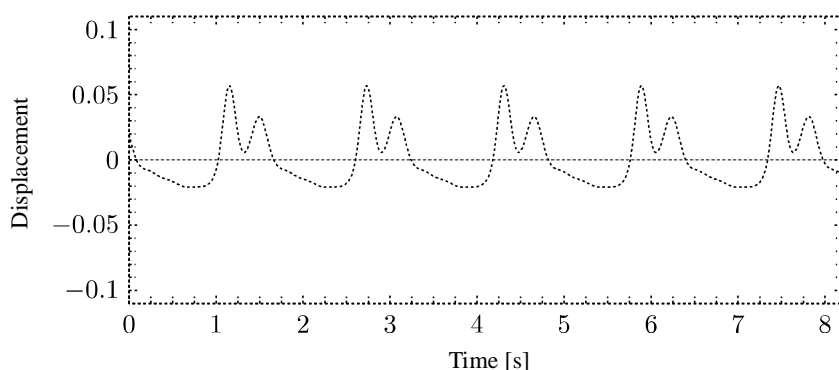
数値積分法(DAE ソルバー)の構築を行う。保存性の高いエネルギー・運動量保存スキームと、数値誤差による高周波成分の増加を抑えるための数値粘性を付した数値積分法の構築を行う。

拘束を用いて拡大法によって定式化を行なった場合、系の自由度が増加する反面、方程式自体は等価性を保持しつつ簡略化されることが多い。この特徴に着目し、方程式の離散化後の収束計算プロセスの中でシステムを縮約化する方法を構築する。

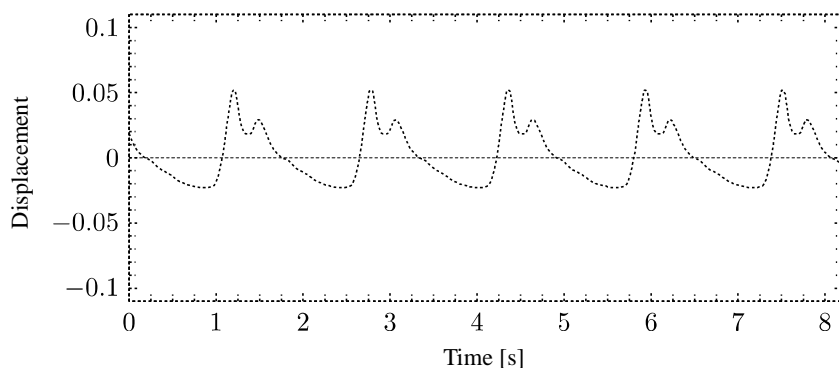
#### 4. 研究成果

(1) 流体系単体を対象として、ALE 有限要素法に基づいたモデルを構築するとともに、今後の提案手法の検証と数値解析法構築の際の試行に使用するためのモーダル近似に基づいたモデルの構築を行なった。また、MBD の技法の 1 つである拡大法を用いることにより、流体単体（スロッシング）の運動方程式を導出した。拡大法では、まず、流体系・構造系の運動を表す変数のうち、本来依存関係のあるものを一旦独立したものと別々に定式化し、そのあとで拘束条件を付加してそれぞれの運動を結びつける。この方法を用いた結果、各変数の時間発展を表す微分方程式と、連成関係や境界条件を表す拘束式からなる微分代数方程式が導かれた。なお、ここで導出した拘束式に時間微分を施すと、従来法と同様の運動方程式につながる変数間の関係式が導出できることが分かった。

(2) 提案する拘束系の理論に基づいた流体構造連成問題の定式化法・数値解析法の構築では、第一段階として、剛体と流体に関する流体構造連成モデル（同調スロッシングダンパー）の定式化を行い、拘束の概念を導入することで流体と構造の連成関係が導出できるかを検証した。まず、構造系と流体系の Lagrangian をそれぞれ導出した上で統合を行い、拘束系に対する解析力学を適用することで構造と流体の間の連成関係式（拘束式）を求め、全体系に関する微分代数方程式を導出した。具体的なモデルに関しては、剛体の運動に対しては、特異点などの数値的不安定性の問題を回避できることから、オイラーパラメータ（クォータニオン）の導入を試みたものの、予備解析によって計算性の低下が見られたため、もう一つの選択肢としてロドリゲスパラメータに代表されるベクトル表示による回転表現を導入した。さらに、この手法に対して定式化の途中で時間差分による近似を併用することで、数値計算の精度を保証しつつ計算自由度の低減が可能であることを確認した。次に流体系に関しては、前述の ALE 有限要素法に基づいたモデルとモーダル近似に基づいたモデルの構築を行なった。図 1 は同調液体ダンパーの使用の際に高い性能が得られると言われる低液深の場合液面揺動の時刻歴波形である。対象とした容器は、矩形で寸法は幅 400mm、奥行き 40mm、静止液深は 25mm であり、側壁近傍での液位の測定結果である。それ以外の計算条件は図中に示してある。この図より、低液深における特徴的な非線形挙動（高振動数成分の重畳）が確認でき、提案手法と実験結果がよく一致していることが確認できる。なお、高周波数成分の現れ方に若干の差（提案手法の方が強め）に出ているが、壁面の状態（材質や汚れ等）に起因するものであり、本モデルで対象外としている影響によるものである。



(a) 提案手法（ALE 有限要素法）による解析結果



(b) 実験結果（引用文献）

図 1 提案手法の妥当性の検証  
（励振振動数：最低次固有振動数の 1.03 倍，励振振幅：3mm）

(3) 導出した微分代数方程式を対象とした数値積分法の構築を行なった。提案手法では、Lagrange の未定乗数を介して各変数が陰的に連成するため、専用のソルバーが必要になる。ここでは、エネルギー・運動量保存の条件を満たすスキームによる差分近似と Newton-Raphson 法を組み合わせた微分代数方程式ソルバーを構築した。しかしながら、提案手法により導出した方程式は、一般的な従来法に比べて簡潔な方程式である一方で計算自由度は多くなる。そのため、運動方程式の離散化後の増分方程式を利用することで計算自由度を縮約する方法を構築した。さらに、上で述べた有限要素法で定式化された流体モデルに関しては減衰の影響が含まれていないため、流体の粘性によるエネルギー散逸をモーダル減衰によって表すモデルに対して、有限要素法によって得られた固有モードを用いた座標変換を施すことで、有限要素法を用いる場合にも利用可能な減衰モデルを構築した。さらに、提案手法では、拘束条件を利用して流体と構造間の連成や計算メッシュの制御を行うことから、数値粘性の効果により数値的安定性を向上させる手法 (Energy-decaying 法) の検討も行なったが、スキームの複雑化に伴う処理量の増加により、計算時間が増大することが問題となった。数値粘性のより細かな調整によって計算性が改善する可能性も残されているが、これまでの結果からは、エネルギー・運動量保存スキームと物理的に説明が可能な流体の粘性によるエネルギー散逸をモーダル減衰によって表すモデルとの組み合わせが計算時間・数値的安定性の観点からからバランスが良いと思われる。

(4) 手法の適用対象の拡大のため、構造系・流体系の双方の解析領域に大変形が発生する弾性平板のフラッタ問題に対して提案手法の適用を試みた。具体的には、フラッタ問題で用いられている代表的な方法の 1 つである渦格子法を用いたモデルに対して提案手法の適用を行った。このモデルに対しては、流体系の Lagrangian を定義することが可能であったため、提案手法によって構造と流体を連成させるための拘束関係を導出することができ、流体構造連成系の微分代数方程式を導出に成功した。なお、渦格子法を用いた場合には、定式化の段階で部分的に離散化処理を施した方が提案する流体構造連成解析法を適用しやすいことが分かった。さらに、渦格子法に基づいたモデルの場合には、流体と構造の連成に加え、構造系の後方の流れのモデルの切り替えも拘束を介して可能なことが分かった。また、解析力学の観点から各計算点における構造系・流体系の自由度の設定方法を検討することで、既存の方法の持つ物理的な意味の考察やそれに伴う問題点、さらに改善方法の予想も可能なことが分かった。

以上により、適用範囲の拡大に関しては課題がみられるものの、流体構造連成問題に対し、拘束系の力学問題という観点から着想を得た新たな解析法の構築することができた。今後は、既存の研究や実験との比較による妥当性検証をさらに進める予定である。さらに、流体系の定式化に関してより高度な力学理論を導入することにより、適用範囲拡大の際の課題の解決を試みる予定である。

#### < 引用文献 >

Kensuke Hara, Masahiro Watanabe, Application of the DAE approach to the nonlinear sloshing problem, Nonlinear Dynamics, No. 99, 2020, pp. 2065-2081.

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 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hara Kensuke, Watanabe Masahiro	4. 巻 99
2. 論文標題 Application of the DAE approach to the nonlinear sloshing problem	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nonlinear Dynamics	6. 最初と最後の頁 2065 ~ 2081
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11071-019-05399-3	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 原謙介
2. 発表標題 DAEソルバーを用いたALE有限要素法による非線形スロッシング解析
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kensuke Hara
2. 発表標題 A DAE approach to an interaction problem between a sloshing and a structural vibration
3. 学会等名 The 5th International Conference on Multibody System Dynamics 2018
4. 発表年 2018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
---------	---------