

平成 30 年 6 月 23 日現在

機関番号：51101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06200

研究課題名(和文)高性能基底関数を用いた高精度かつCADとの親和性の高い流体構造連成解析手法の構築

研究課題名(英文) Implementation of high-accuracy fluid-structure interaction analysis using high-performance basis function

研究代表者

丸岡 晃 (Maruoka, Akira)

八戸工業高等専門学校・産業システム工学科 環境都市・建築デザインコース・教授

研究者番号：30310973

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、流体構造連成問題を精度よく解析することを目的として、流れ場と構造物の境界・領域形状表現、および、流速、圧力、変位等の目的変数の近似に高性能基底関数を用いた新たな解析手法を開発した。高性能基底関数には、CADの形状表現に用いられる導関数に対して連続性を可能にするものを採用しており、一般的な有限要素法で用いられるラグランジュ補間に基づく基底関数と比べて、関数近似能力および形状表現能力に優れている。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed a new computational scheme with the aim of analyzing fluid-structure interaction problems highly accurately. In the present scheme, we have used a high-performance basis function to approximate boundary/domain shape representation of flow field and structure and unknown variables such as flow velocity, pressure, and displacement. The high-performance basis function allows continuity to the derivative, is often used for shape representation of CAD, and is superior to the function approximation ability and the shape expression capability as compared with the basis function based on the Lagrangian interpolation used in the general finite element method.

研究分野：工学

キーワード：流体構造連成 高性能基底関数 有限要素法 数値流体力学 NURBS 移動境界問題 自由界面流れ

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年, CAD を用いた設計者が, 設計の一環として解析評価を行えるような「設計者向け」の CAE が注目されている. このような CAD と CAE の融合によって, 開発時間やコストの削減が期待される. しかしながら, CAD と CAE ではデータ構成が異なるため, CAD による設計データから CAE に必要な入力データへの変換作業が煩雑になることや, CAE による解析結果を直接 CAD にフィードバックできない等の問題点が生じてくる.

(2) CAE の解析手法の一つである有限要素法では, Lagrange 補間によって形状表現や目的変数の近似が行われる. しかしながら, Lagrange 補間の難点として, 高次 Lagrange 補間を用いても要素境界で導関数が連続にならないことがあげられる. 一方, CAD では, 曲線・曲面の形状表現に B スプラインや NURBS (非一様有理 B スプライン) [引用文献 1 など] が用いられる. B スプラインや NURBS は, $p-1$ 階導関数まで連続にできるような p 次区分多項式の構築が可能となる. すなわち, 区分多項式の中で最も滑らかに目的変数を近似できる (図 1 に例を示す).

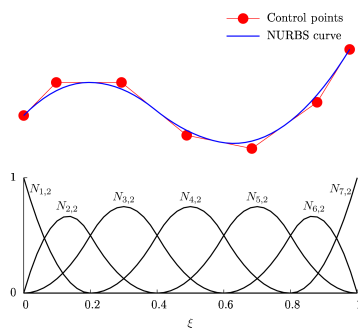


図 1 NURBS 曲線と NURBS 基底関数

Hughes らは, NURBS を用いた数値解析法としてアイソジオメトリック解析 [引用文献 2] を提案している. この中で, NURBS の適用によって, Lagrange 補間による従来の方法よりも解の高周波成分の収束精度が高いという精度面に対する優位性が示されている.

(3) 一方, 研究代表者らは, 移流拡散問題に対して 1 階導関数が連続になる 3 次 Hermite 単体要素を用いた特性 Galerkin 法を提案している [引用文献 3]. 単体要素 (2 次元: 3 角形要素, 3 次元: 4 面体要素) は任意形状に対する自動要素分割アルゴリズムが確立されていることから, 複雑領域問題に対しても 1 階導関数連続による高精度化を行うことができる. さらに, より関数近似能力および形状表現能力に優れた B スプライン基底関数を用いた手法に展開している [引用文献 4].

2. 研究の目的

このような背景から, 本研究の目的は, 流

れ場の中に置かれた構造物が流体力を受けて変形し, またその変形によって流れ場が変化するような流体構造連成問題を精度よく解析することを目的として, 流れ場と構造物の境界・領域形状表現および流速, 圧力, 変位等の目的変数の近似に高性能基底関数を用いた流体構造連成解析手法を構築する. 高性能基底関数とは, Hermite 補間に基づく基底関数や CAD の形状表現に用いられる B スプラインや NURBS のような導関数に対して連続性を可能にするものであり, 一般的な有限要素法で用いられる Lagrange 補間に基づく基底関数と比べて関数近似能力および形状表現能力に優れている. このような高性能基底関数の適用によって, 高精度かつ CAD との親和性の高い流体構造連成解析手法の構築が期待できる.

3. 研究の方法

(1) 第一段階として, これまで移流拡散問題において検討してきた, B スプライン基底関数を用いた特性 Galerkin 法 [引用文献 4] を, 非圧縮性 Navier-Stokes 問題に適用できるように拡張する.

(2) (1) で開発した手法を移動境界を有する問題に適用できるように拡張する.

(3) 流体構造連成問題では, メッシュの時間的急変によって不安定性が生じることがある (これは, (2) の研究成果から明らかになった). これを回避するための手法について検討する.

(4) 乱流場に対して本解析手法を適用することを目的として, 有限要素法分野で近年用いられる LES による乱流解析のための Variational Multiscale (VMS) 法, またその発展である Residual-based VMS (RBVMS) 法の検討を行う.

(5) (1) ~ (4) を実施する上で, 大規模モデルへの対応できるように, 解析コードの並列化等による計算高速化についての検討を行う.

4. 研究成果

(1) NURBS を用いた混合型 B スプライン近似に基づく新たな時間 2 次精度の特性 Galerkin 法を開発した (学会発表). ここで開発した手法では, B スプラインによって拡張された Raviart-Thomas 要素を用いることによって, これまでの有限要素法ではなし得なかった任意の点で発散フリーの流速場が得られるという特徴がある. Raviart-Thomas 要素では, 流速の各方向・各成分に対して異なる近似空間を選択している.

ベンチマーク問題による精度検証を行い, 粗いメッシュにおいても良好な精度を得ることができた. 図 2 は圧力に 2 次 B スプラインを用いたものである.

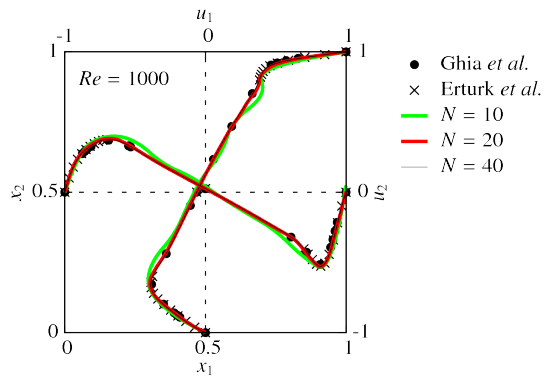


図2 キャビティ内流れの流速プロファイル

(2) 移動境界を有する問題として自由界面流れに適用できるように拡張した。自由界面の扱いには、当初は境界組み込み型手法による流体構造連成手法への展開を考慮して、流体解析を固定メッシュのみで行う界面捕捉法の適用を行ったが、界面付近で解が不安定になる傾向があり精度向上が得られなかったため、界面追跡法の一つである ALE (Arbitrary Lagrangian and Eulerian) 法を適用した。

正方形断面容器内のスロッシング解析による既存の実験結果と比較した精度検証を行い、良好な精度を得ることができた(学会発表)。図3に結果の一例を示す。

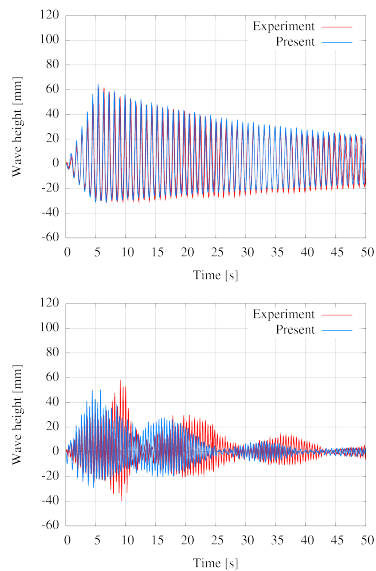


図3 スロッシング解析の一例
(上: 1次モード・下: 2次モード)

(3) メッシュの時間的急変によって不安定性を回避するために、流体解析手法の基礎式に、従来は非圧縮性モデルを用いてきたが、流体の僅かな圧縮性を考慮した Adiabatic Flow モデルを採用するようにした(雑誌論文, 学会発表)。孤立波の伝播解析による既存の実験結果と比較した精度検証を行い、良好な精度を得ることができた。図4に結果の一例を示す。

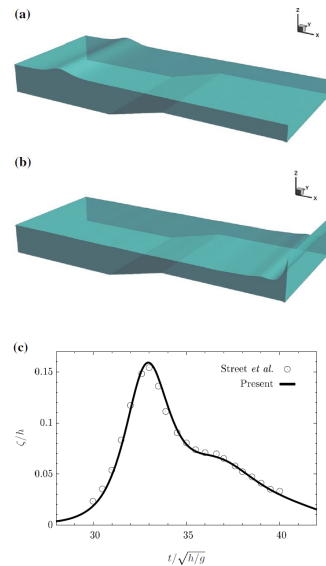


図4 孤立波伝播解析の一例

また、流体と構造の境界条件に対して、Niche の方法に基づく弱拘束型境界条件の導入を行った。これにより境界条件の強拘束による不安定性を回避できるようになった。また、この方法を、浅水流れの問題において、スリップ境界条件の問題にも適用できることを確認した(学会発表)。

(5) 乱流場に対応できるように Residual-based VMS (RBVMS) 法の開発を行った。また、乱流中で構造物まわりの流れの解析を行うために、流入変動風の作成についての検討も行った。図5に正方形角柱まわりの流れの乱流解析による既存の実験結果と比較を示す。

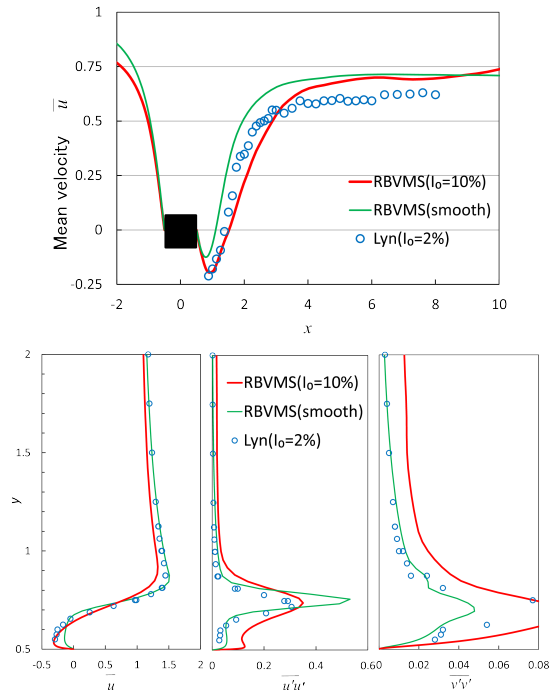


図5 正方形角柱まわりの乱流解析の一例
(上: 主流方向の平均風速分布
下: 角柱側面における風速性状)

ただし、乱流解析においては非常に多くの計算量を必要とすることから、高性能基底関数の適用と流体構造連成解析を行うには至らなかった。

[引用文献]

1. Piegl, W., Tiller, W.: "The NURBS Book, Second Edition", Springer-Verlag, 1997.
2. Hughes, T.J.R., Cottrell J.A., Bazilevs, Y.: "Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry, and mesh refinement", Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., 194, 4135--4195, 2005.
3. 丸岡 晃, 小保内 啓太, 奥村 弘: "移流拡散問題における Hermitian Characteristic Galerkin 法", Transactions of JSCES, Vol. 2008, 20080017, 2008.
4. 丸岡 晃, 山田 貴博: "移流拡散問題における B スプライン基底関数を用いた特性ラーキン法", Transactions of JSCES, Vol. 2012, 20120001, 2012.

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1件)

Akira Maruoka, Ichiro Uchiyama, Mutsuto Kawahara,
Finite element analysis of solitary wave propagation by acoustic velocity method,
Computational Mechanics, 査読あり,
Volume 59, Issue 1, 2017, pp.107-115,
<https://doi.org/10.1007/s00466-016-1337-4>.

[学会発表](計5件)

Joseph Galbreath, 丸岡 晃,
Weak imposition of slip boundary condition in the stabilized finite element formulation of shallow water equations,
平成 28 年度土木学会東北支部技術研究発表会,
東北工業大学(宮城県・仙台市), 2017.
丸岡 晃, 小山内 功宇太, 橋 亜紀穂,
平野 廣和,
正方形断面容器のスロッシング現象に関する数値流体解析,
第 71 回土木学会年次学術講演会,
東北大学(宮城県・仙台市), 2016.
内山 一郎, 丸岡 晃, 川原 睦人,
Adiabatic 流体モデルへの安定化有限要素法の適用,
第 21 回計算工学講演会,
朱鷺メッセ(新潟県・新潟市), 2016.

Akira Maruoka,

A Characteristic Galerkin Scheme Based on Divergence-free B-splines for Incompressible Flows,
The 34th JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology,
富山国際会議場(富山県・富山市), 2015.
Ichiro Uchiyama, Akira Maruoka, Mutsuto Kawahara,
Finite element analysis of acoustic velocity model,
The 34th JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology,
富山国際会議場(富山県・富山市), 2015.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丸岡 晃 (MARUOKA, Akira)

八戸工業高等専門学校・産業システム工学科 環境都市・建築デザインコース・教授
研究者番号: 3 0 3 1 0 9 7 3