

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K04759

研究課題名(和文) 高次IB - 最適化法に基づく極複雑空間音響流れの最適化計算法に関する研究

研究課題名(英文) Geometry optimization of sound-propagating flows in complex-shaped spaces based on a higher-order scheme

研究代表者

松浦 一雄 (Matsuura, Kazuo)

愛媛大学・理工学研究科(工学系)・准教授

研究者番号：20423577

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)：複雑空間の音響伝播を伴う圧縮性流れに関する新たな最適化手法を開発した。高次精度IB法および特性線に基づくインターフェース条件のアルゴリズムを開発した。特に、インターフェース条件の開発では、インターフェース上で格子点が一致していないnon-conformingな場合にも上述の条件を拡張し、自由に多格子領域を分布させられるようにした。開発した手法を、高次精度スキームに基づく圧縮性Navier-Stokes方程式のMPIによる分散並列流体解析ソフトウェアに組み込んだ。また本手法を、マッハ数6の極超音速気流において形成される境界層内に楔状の突起列を用いて縦渦列を導入させる問題に適用できた。

研究成果の概要(英文)：A new optimization method for compressive flows with sound propagation in complex space is developed. A higher-order accurate IB method and an interface condition based on characteristic lines are derived. In the development of the interface condition, it is extended for non-conforming cases where mesh points do not coincide on the interface. The developed method was incorporated into a fluid analysis software of compressible Navier-Stokes equation based on higher-order accuracy scheme, which is parallelized by MPI. This method was also successfully applied to the problem of introducing longitudinal vortices by wedge rows to a boundary layer formed under hypersonic flows of Mach 6.

研究分野：計算科学

キーワード：数値シミュレーション 流体 高次精度スキーム 最適化

1. 研究開始当初の背景

4次や6次といった高次精度数値スキームは1次や2次の低次精度スキームと比較するとステンシルを幅広く取る必要があるものの、計算誤差を一定値以下に低減するために必要な計算コストをトータルとして低減できるため、計算科学において盛んに用いられている。高次精度スキームは、ステンシルが広くとれる計算領域の十分内側では問題が生じないが、境界近傍ではその扱いにしばしば困難が生じる。

一般に、構造格子を用いた計算での境界の取り扱いには、境界形状に合わせて格子を生成する境界適合格子法、領域を複数格子ゾーンに分割して接合させるインターフェース法やオーバーセット法、埋め込み境界法 (Immersed Boundary 法、以下 IB 法) などがある。境界適合格子法は物理空間を計算空間に写像することにより微係数の計算が容易となるが、格子ゾーン分割無しの場合、構造格子では単一解析領域で格子生成することが困難な時が多くある。

特に、インターフェース法や IB 法は、構造格子に基づく高次精度スキームが抱える境界近傍での困難さを克服するものと大いに期待されるが、上述の高次スキームの計算精度を維持できる方法は未熟なレベルにある。

本研究は高次精度スキームによる複雑形状の取り扱いに関して、インターフェース法や IB 法の開発とそれを応用した研究を実施する。

2. 研究の目的

構造格子に基づく高次精度スキームは、効率よく高精度計算が行える一方、複雑形状境界の扱いに難点がある。本研究では、これを克服するため、高次精度による境界の取り扱い法を新たに開発した上で最適化法と融合し、音波の伝播を伴う圧縮性流れに関する先進的高精度最適化計算法を開発する。この方法を、極超音速流れ境界層の乱流促進に関する突起形状最適化問題に適用する。これらを通して、実世界の非線形極複雑形状における音伝播流れを対象として、安全・快適な環境・エネルギー利用技術の創出に関わる先進最適化技術を創出することが目的である。

3. 研究の方法

高次精度 IB 法および特性線に基づくインターフェース条件のアルゴリズムを開発する。これらの手法と最適化法を組み合わせた新たな最適化計算法を高次精度スキームの枠組みにおいて構築する。開発した手法は、これまで著者が開発してきた6次精度コンパクトスキーム-10次精度コンパクトフィルタリングに基づく圧縮性 Navier-Stokes 方程式の Message Passing Interface (MPI) による分散並列圧縮性流体解析ソフトウェアに組み入れリコンパイルし、統合した新たなソフトウ

エアを開発する。数値シミュレーションとして、直接シミュレーション (DNS) を想定する。

開発した方法を、スクラムジェットエンジンで問題となる、離散突起による層流境界層の層流-乱流遷移促進 (境界層トリッピング) の予測問題に適用する。

4. 研究成果

高次精度 IB 法および特性線に基づくインターフェース条件のアルゴリズムを開発した。これまで知られていた圧縮性流れの特性線に基づくインターフェース条件では、格子インターフェース上で格子点が一致している場合を扱っていた。そこで、格子インターフェース上で格子点が一致していない non-conforming な場合にも上述の条件を拡張し、自由に多格子領域を分布させ、複雑形状周りの流れが自由に扱えるようにした。開発したアルゴリズムは、著者が開発してきた6次精度コンパクトスキーム-10次精度コンパクトフィルタリングに基づく圧縮性 Navier-Stokes 方程式の MPI による分散圧縮性流体解析ソフトウェアに組み込み、リコンパイルされた新たなソフトウェアを開発した。円柱による音波の散乱問題、気流の中に置かれた物体周りの流れが有する周波数変動を計算値と文献値を比較し、アルゴリズムが精度良く機能することを確認した。

極超音速流れの境界層トリッピングに関する計算では、マッハ数6の極超音速気流において形成される境界層内に楔状の突起列を用いて縦渦列を導入させることができた。また、楔状突起列のみならず、半球による境界層トリッピングの計算を亜音速圧縮性流れに対しても実施し、境界層にヘアピン渦を導入するシミュレーションを実施することが出来た。

上述の開発が実現したことで、音響流れに関する新たな最適化手法を開発できた。

4.1 開発した非適合インターフェース条件

特性線に基づくインターフェース条件は Kim&Lee, AIAA J., 42(1), pp. 47-55 や Deng et al., AIAA J., 48(12), pp. 2840-2851 など過去に提案されているが、本研究に現れる非適合インターフェースを扱うために、理論の拡張を行う。基本的な方法ではまず、右領域 (領域 R) および左領域 (領域 L) のインターフェース上で保存量ベクトル  $Q_R$  および  $Q_L$  を以下の式に基づき求める。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \Big|_L = \tag{1}$$

$$(A_s^+) \Big|_L (RHS) \Big|_L + (A_s^-) \Big|_L (RHS) \Big|_R,$$

および

$$\left. \frac{\partial Q}{\partial t} \right|_R = \quad (2)$$

$$(A_s^+)|_R (RHS)|_L + (A_s^-)|_R (RHS)|_R.$$

次に,  $Q_R$  および  $Q_L$  を平均することにより, 一意の保存量ベクトルを得る.

$$Q^* = \frac{1}{2}(Q_L + Q_R) \quad (3)$$

ここで, 数式(1),(2)において,  $RHS$

$$\begin{aligned} &= J(RHS_C + s \cdot RHS_V) \\ &= J \left[ -\left( \frac{\partial F}{\partial \xi} + \frac{\partial G}{\partial \eta} + \frac{\partial H}{\partial \zeta} \right) + s \cdot RHS_V \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$A_s^- = P_{QVC} \text{diag} \left( \frac{1 - \text{sign}(\lambda_i)}{2} \right) P_{QVC}^{-1} \quad (5)$$

そして

$$A_s^+ = P_{QVC} \text{diag} \left( \frac{1 + \text{sign}(\lambda_i)}{2} \right) P_{QVC}^{-1} \quad (6)$$

である.

ここで,  $P_{QVC}$  は保存量ベクトル  $Q$  を特性量ベクトル  $V_C$  で偏微分して得られる  $5 \times 5$  型の行列である.

$$P_{QVC} \equiv \frac{\partial Q}{\partial V_C}. \quad (7)$$

$\lambda_i (i=1, \dots, 5)$  は以下のように定義される特性速度である.

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \lambda_2 = \lambda_3 = \tilde{u}, \\ \lambda_4 &= \tilde{u} + \tilde{a}, \quad \lambda_5 = \tilde{u} - \tilde{a} \end{aligned} \quad (8)$$

反変速度  $\tilde{u}$  は

$$\tilde{u} \equiv \xi_x u + \xi_y v + \xi_z w \quad (9)$$

と定義され, メトリックでスケーリングされた音速  $\tilde{a}$  は

$$\tilde{a} \equiv a \sqrt{\xi_x^2 + \xi_y^2 + \xi_z^2}. \quad (10)$$

と定義される.

上述の方法は, インターフェース上で領域  $R$  および  $L$  の格子点位置が一致していると仮定している。しかしながら, この研究では両領域からの格子点が一致しない状況が現れる。これに対処するため, 上述の方法を非適合ケースに対して拡張する.

まず領域  $L$  において, インターフェースの格子点上で  $(RHS)_L$  を求める。この領域は, 領域  $R$  においてインターフェース上の格子点で求めた  $(RHS)_R$  を受け取る。この  $(RHS)_R$  は領域  $L$  から見ると, 同じインターフェース上にあっても異なる格子点で定義されているため, ラグランジュ補間により,

領域  $L$  におけるインターフェース格子点に補間する。インターフェースを通過する際の渦の歪みを避けるため, 4 次の補間を利用した。ピッチ方向境界近くでは, 補間精度を維持するため周期境界条件に則り格子点をピッチ方向にコピーして補間した。領域  $R$  では, 同様の方法を実施し, 保存量ベクトルを更新した.

次に,  $Q_R^*$  および  $Q_L$  を平均することにより, 一意の保存量ベクトルを得る。

$$Q^* = \frac{1}{2}(Q_L + Q_R^*) \quad (11)$$

領域  $R$  では, 同様の方法を実施し, 保存量ベクトルを更新した。

## 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)

松浦一雄, 圧縮性遷移境界層における非線形渦動力学の全体シミュレーション, 平成 28 年度地球シミュレータアニュアルレポート, pp.153-158 (2017)

[学会発表](計5件)

K. Matsuura, Masahiro Inoue, Yuta Segawa, Takaya Kimura, Wireless high-speed continuous sensing of hydrogen leak by a quadrotor drone, *Proc. of 3<sup>rd</sup> international hydrogen technologies congress*, pp. 1-2 (2018).

松浦一雄, 圧縮性遷移境界層における非線形渦動力学の全体シミュレーション, 平成 28 年度地球シミュレータ利用報告会, pp. 1-4 (2017).

K. Matsuura, DNS Study on the effect of free-stream turbulence on hairpin-vortex evolution, *Proc. of the 44<sup>th</sup> national conference on fluid mechanics and fluid power*, pp. 1-4 (2017).

K. Matsuura, Numerical Analysis of a Straight Vortex Tube in a Laminar Boundary-Layer Flow, *Proc. of ECCOMAS Congress*, pp. 1-1 (2016).

K. Matsuura, Numerical Simulation of a Straight Vortex Tube in the Shear of a Laminar Boundary-Layer Flows, *Proc. of Asia Simulation Conference*, pp. 1-2 (2015).

[図書](計0件)

[産業財産権]

○出願状況(計0件)

名称:

発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

松浦 一雄 ( MATSUURA, Kazuo )  
愛媛大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号：20423577

研究者番号：

### (2)研究分担者

( )

研究者番号：

### (3)連携研究者

( )

研究者番号：

### (4)研究協力者

( )