

令和元年5月17日現在

機関番号：85406

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18021

研究課題名（和文）空力音の計算手法を直接数値計算へ円滑に移行させるための課題の克服

研究課題名（英文）Proposal of methods to improve problems in direct numerical simulation of aerodynamic sound

研究代表者

若松 裕紀（WAKAMATSU, YUKI）

海上保安大学校（国際海洋政策研究センター）・国際海洋政策研究センター・講師

研究者番号：30589304

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究における成果の1つ目は、非周期境界条件におけるコンパクトスキームの組み合わせの精度の次数の考え方の問題点を指摘したことである。具体的には、これまで、コンパクトスキームの精度の次数は境界に用いる差分スキームの影響を考慮していなかったが、本研究成果によって、コンパクトスキームの組み合わせの精度の次数は境界に用いる差分スキームの影響を受けることを数式を用いて明らかにした。本研究における成果の2つ目は、本研究で用いた計算条件においては、解像度の大きい陽的差分スキームは、コンパクトスキームと同様に空力音の数値計算に適することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の学術的な意義は、非周期境界条件におけるコンパクトスキームの精度の次数の考え方の問題点を指摘したことにある。具体的には、本研究成果によって、コンパクトスキーム組み合わせの精度の次数は境界に用いる差分スキームの影響を受けることを数式を用いて明らかにした。本研究成果の社会的な意義は、コンパクトスキームの組み合わせの精度の次数の課題を新たに明らかにするとともに、コンパクトスキームと陽的スキームを用いた場合の空力音の計算結果に与える影響について本研究で用いた計算条件において定量的に示したことにある。

研究成果の概要（英文）：The first result of this research is to clarify the problem of the concept of the order of accuracy of the combination of compact schemes in non-periodic boundary conditions. Specifically, conventionally, the order of accuracy of the compact scheme has not taken into consideration the influence of the difference scheme of the boundary, but according to this research, the order of accuracy of the combination of the compact schemes is influenced by the difference scheme used for the boundary was clarified using mathematical formulas. The second result of this research is that the high resolution explicit difference scheme under the calculation conditions used in this research are suitable for the computation of aerodynamic sound as well as the compact scheme.

研究分野：流体力学

キーワード：流体力学 数値計算

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

#### (1) 並列計算

近年、スーパーコンピュータの計算能力の向上は著しい。スーパーコンピュータの計算能力を十分に発揮させるためには、スーパーコンピュータの機種固有の特性に配慮するとともに並列計算に適したプログラミングが必要となる。このようなプログラミングにはきわめて高度な知識が必要となり、容易ではない。スーパーコンピュータでは、大規模な並列計算を行うため、並列計算にあまり適していないプログラミングでは、スーパーコンピュータの計算能力を十分に発揮できない。したがって、流体力学のシミュレーションをスーパーコンピュータで行う場合においても並列計算に適した計算手法を用いることが求められる。

#### (2) 空力音の数値計算

空気の流れから発生する音は空力音と呼ばれ、さまざまな機械から発生し、空力音低減の研究が多く行われている。空力音の低減の研究手法として、実験とシミュレーション、理論があり、スーパーコンピュータの計算能力向上により、現在では、実験だけでなくシミュレーションも盛んに行われるようになってきた。空力音のシミュレーションは主に2つの目的で行われる。機械などから発生する空力音の予測と空力音の発生メカニズムの解明である。機械などから発生する空力音の工業的な予測には、計算負荷が比較的小さい分離解法というシミュレーション方法が用いられることが多い。空力音の発生メカニズムの解明には、シミュレーションモデルを用いず、流体力学の方程式を解く直接数値計算というシミュレーション方法が適している。しかし、計算負荷が極めて大きく、現状では計算時間の制約から計算可能な領域の大きさを小さくせざるを得ないため、機械の実寸法を対象とするシミュレーションは困難な状況である。スーパーコンピュータの計算能力の飛躍的な向上によって、直接数値計算による空力音のシミュレーションが計算可能な対象が大きくなりつつあり、今後のスーパーコンピュータの性能向上の見込みを考慮すると、将来的には、直接数値計算による空力音のシミュレーションが工業的にも広く用いられるようになることが考えられる。そのため、将来の直接数値計算による空力音のシミュレーションが工業的にも広く用いられることを見据えて、現在の空力音の直接数値計算を行ううえで、課題となることを解決しておく必要がある。

#### (3) 空力音の直接数値計算の計算手法

空力音の数値計算においては、大気圧の10万分の1程度の圧力変動を十分に正確に計算できる必要があるため、特に計算方法の選択が重要となる。空力音の数値計算においては、解像度が高い、つまり、幅広い波数範囲において微分値を計算によって誤差が小さく近似できることが重要であり、コンパクトスキームが用いられることが多い。コンパクトスキームは乱流や空力音の計算など特に正確な計算が求められる場合に多く用いられてきた。しかし、コンパクトスキームは、並列計算への適用に困難な点がある。近年では、コンパクトスキームを並列計算に対応させる研究が行われているが、コンパクトスキームをスーパーコンピュータに適した並列計算に対応させることは容易なことではない。そのため、コンパクトスキーム以外の方法として、並列計算への対応が比較的容易な陽的な差分スキームを空力音の数値計算に用いるという研究が数多くされている。これまで、空力音の直接数値計算に使用できる陽的な最適化差分スキームが多数提案されてきた。これらの差分スキームでは、解像度を大きくするように差分スキームの係数を最適化している。これらの陽的スキームは高解像度である一方で、同じステンシル数で得られる最大の精度の次数と比較して精度の次数が低いという特徴がある。

空力音の数値計算において、これらの最適化陽的スキームをコンパクトスキームと同様に用いることができるか判断するためには、当然ながら、空力音の発生およびその計算結果の比較が必須である。しかしながら、陽的差分スキームの修正波数の比較や渦の移流は多数の論文でなされているものの、実際の空力音の数値計算に適用した場合に発生する空力音の計算結果への影響について比較を行った研究はなかった。

#### (4) コンパクトスキームの特性

コンパクトスキームは周期境界条件の場合だけでなく、非周期境界条件においても多く用いられる。非周期境界条件においてコンパクトスキームを用いる場合、計算領域の境界近傍においては、計算領域境界に対応した差分スキームを組み合わせる必要がある。そのため、数多くの境界コンパクトスキームが提案されている。コンパクトスキームは全点スキームであるため、境界近傍の境界コンパクトスキームの選択が境界近傍以外のノードにおける計算結果に影響を与える。境界コンパクトスキームとコンパクトスキームの組み合わせの性質を解析する場合にはその組み合わせと等価な陽的スキームの性質を解析することが適切であることを Sengupta(2013)が明らかにしている。差分スキームの特性として、精度の次数と解像度はきわめて重要である。

特に、境界コンパクトスキームの選択によって全ノードにおける解像度が影響を受けることは Sengupta(2013)によって明らかにされた。しかしながら、境界スキームとコンパクトスキームの組み合わせの性質を解析する場合、境界コンパクトスキームの選択による各ノードの精度の次数への影響についてはこれまで研究がされてこなかった。

## 2. 研究の目的

### (1) コンパクトスキームの精度の次数

空力音の正確な計算を小さい格子点数で行うためには、差分スキームの精度の次数は高いことがのぞましい。差分法による空力音のシミュレーションには、4次精度以上の差分スキームが用いられるのが一般的であり、中でも、6次精度コンパクトスキームは空力音の直接数値計算の陰的手法として標準的に用いられている。これまでのコンパクトスキームの組み合わせを考慮しない、テイラー展開のみを用いた精度の次数の解析においては、非現実的な前提における精度の次数しか求めることができず、実用上の課題の解決につながらない。そこで、本研究においては、非周期境界条件において境界を考慮して、コンパクトスキームと境界スキームを組み合わせる場合の各ノードの精度の次数への影響を数式で明らかにすることを目的とする。

### (2) 差分法の計算手法ごとの空力音の計算結果の解析

空力音のシミュレーションにおいては、遠方場への音波の伝播までシミュレーションする必要があり、一般的には境界近傍以外の領域の計算が計算負荷の大きな割合を占めることが多い。そこで、本研究においては、境界近傍以外において、空力音の直接数値計算において多く用いられる6次精度コンパクトスキームを計算負荷の小さい陽的スキームに置き換えることが空力音の計算上、適切であるかを具体的な渦運動から発生する空力音をシミュレーションすることによって定量的に明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) コンパクトスキームの精度の次数

一般的に空力音の直接数値計算は非周期境界条件で行われることがほとんどであるため、境界に対応させるため、中心コンパクトスキームと境界コンパクトスキームを組み合わせる。コンパクトスキームは、全点スキームであるため、あるノードで用いられるコンパクトスキームだけでは特性が定まらない。Sengupta(2013)によって提案されたコンパクトスキームの組み合わせと等価な陽的スキームを計算する方法を用いて、コンパクトスキームの精度の次数について、各ノードでの精度の次数を数式によって解析を行う。具体的には、コンパクトスキームと境界に陽的差分スキームまたは境界コンパクトスキームの組み合わせと等価な陽的スキームを逆行列によって計算し、それらの精度の次数をテイラー展開によって解析する。

### (2) 差分法の計算手法ごとの空力音の計算結果の解析

本研究は研究代表者がすでに開発した2次元圧縮性ナビエストークス方程式を用いた直接数値計算の計算コードを用いる。また、空力音の直接数値計算の陰的手法として標準的に用いられている6次精度コンパクトスキーム(Lele (1992))と10次精度コンパクトフィルタ(Gaitonde and Visbal (2000))の計算手法の組み合わせを境界近傍以外で陽的手法(陽的差分スキーム)によって代替させた場合の組み合わせを考慮した特性を直接数値計算で明らかにする。具体的には、同じ強さ、同じ直径の渦対2つを正面衝突させることによって発生する音を対象として、遠方場に設定した固定点における圧力変動の時間変化を用いる。

## 4. 研究成果

### (1) コンパクトスキームの精度の次数

コンパクトスキームと境界スキームを組み合わせる場合の各ノードにおける精度の次数について、逆行列を用いて等価な陽的スキームを計算し、それらをテイラー展開した場合の係数の比較によって精度の次数の解析を行った。この結果、境界に、境界コンパクトスキームを用いた場合でも陽的スキームを用いた場合でも、等価な陽的スキームの精度に、組み合わせは重大な影響を与えることを明らかにした。非周期境界条件におけるコンパクトスキームと境界スキームを対象として、境界を考慮しない場合の精度の次数が、境界を考慮する場合では得られない場合があることを明らかにした。本研究成果は、これまで着目されてこなかったコンパクトスキームの組み合わせの精度の次数を明らかにした点において、独創的かつ重要な研究成果であると確信している。

### (2) 差分法の計算手法ごとの空力音の計算結果の解析

本研究において境界近傍以外において、6次精度コンパクトスキームを陽的差分スキームに置き換えた場合の空力音の数値計算結果への影響を渦対の衝突によって発生する空力音を比較することにより検証した。6次精度コンパクトスキームの解像度よりも小さい解像度の4次精度陽的中心差分スキームにおいては、本計算条件においては、比較的小さい格子間隔を用いても6次精度コンパクトスキームの計算結果とは位相のずれおよび音波の振幅の差が観察され、この低解像度スキームは、本計算条件においては空力音の数値計算に不適当であることが明らかになった。低解像度スキームでは、渦度分布を適切に計算することができず、渦の移動速度の誤差が大きくなり、ほかのスキームを用いた場合よりも早く渦対同士が衝突したため、空力音の位相のずれが生じたと考えられる。

6次精度コンパクトスキームと同等以上の解像度を持つ最適化差分スキームおよび16次精度差分スキームを用いた場合では、いずれの格子解像度においても、それぞれの格子解像度での6次

精度コンパクトスキームの計算結果とほぼ同じ空力音の数値計算結果を得た。このことから、これらの高解像度スキームを用いることで空力音の数値計算においては 6 次精度コンパクトスキームを代替することが可能であると考えられる。これまで、コンパクトスキームを用いた場合と陽的スキームを用いた場合の空力音のシミュレーション結果に与える影響を同じ計算条件のもと明らかにした研究はなく、比較が困難であったが、本研究は統一した計算条件において、その影響を定量的に明らかにした点において空力音の計算手法の選択に資する研究成果であると確信している。

#### <引用文献>

- Tapan K. Sengupta, High accuracy computing methods fluid flows and wave phenomena, Cambridge University Press, 2013, 256-534  
Sanjiva K. Lele, Compact finite difference schemes with spectral-like resolution, Journal of Computational Physics, 103 巻, 1992, 16-42  
Datta V. Gaitonde, Miguel R. Visbal, Pade-type high order boundary filters for the Navier-Stokes equations, AIAA Journal, 38 巻, 2000, 2103-2112

#### 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

- 若松裕紀、コンパクトスキームの組み合わせの精度の次数 日本流体力学会年会 2018、2018 年  
若松裕紀、空力音の直接数値計算における陽的差分スキームの評価、第 30 回数値流体力学シンポジウム、2016 年

〔図書〕(計 0 件)

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、研究者個人に帰属されます。