

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15205

研究課題名(和文)アーキテクチャに依存しない超高精度かつ低散逸の複雑形状周り非定常乱流数値解析

研究課題名(英文)Turbulence simulation around complex geometries with high-order low-dissipative scheme

研究代表者

阿部 圭晃(Abe, Yoshiaki)

東北大学・流体科学研究所・助教

研究者番号：40785010

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):本研究では、航空機周りの流れに代表される複雑な形状周りの圧縮性流体に対し、物体の形状表現に優れた非構造格子による高精度の数値解析手法(流束再構築法)を適用することで数値安定性と精度を検証し、同手法の実用問題への適用可能性を議論した。具体的に、航空機着陸脚とエンジン低圧タービン翼周りの解析に取り組み、物体近傍で四面体セルを用いた計算格子上的不安定性が強く残ることを突き止め、更なる計算安定化が必要という課題が残された。また、同手法を様々な計算機環境で実行可能となるよう拡張し、ベクトル計算機を用いた高効率実行が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、航空機周りの流れに代表される複雑な形状周りの圧縮性流体に対し、物体の形状表現に優れた非構造格子による高精度の数値解析手法(流束再構築法)を適用することで数値安定性と精度を検証し、同手法の実用問題への適用可能性を示した。航空機着陸脚やエンジン低圧タービン翼周りの複雑な流れ場を流束再構築法により高精度に解析可能であることを実証した一方で、このような複雑な物体周りでは計算の不安定性が残されることも課題として示された。また、同手法を様々な計算機環境で実行可能となるよう拡張し、今後の計算機技術の進歩に合わせて更に高い精度で圧縮性流体を解析する基盤が整ったと言える。

研究成果の概要(英文):This study performs compressible turbulence simulation around complex geometries, e.g., flows around aircraft, using the high-order scheme with unstructured grid (more specifically, flux-reconstruction scheme: FR). The objective of this study is to demonstrate an applicability of the FR scheme to practical complex geometries based on the evaluation of numerical stability and accuracy. The simulation targets were aircraft landing gear and low-pressure turbine blade of aircraft engines, and the results indicated that the simulation using the present stabilization techniques becomes unstable on tetrahedral cells with second-order accurate shape function, which will be left as a future problem. Furthermore, the FR scheme has been extended to the use of variable computational architectures, and the efficient implementation for the vector computer were demonstrated using NEC SX-Aurora in this study.

研究分野：数値流体力学

キーワード：圧縮性流体 高精度手法 非構造格子

### 1. 研究開始当初の背景

航空宇宙分野において、複雑な形状を有する物体周りの流れやそれに起因する音響場を正確に理解する数値解析は、精密な設計が求められる環境適合性の高い航空宇宙機の開発などにおいて必要不可欠な技術である。しかし、特に重要な乱流の非定常解析においてその数値解析技術は未だ成熟したとは言い難い。特に、複雑形状周り的高精度離散化と低数値散逸性を両立した計算手法は限られており、我々はこれまで非構造格子を用いた高次精度解法に注目し、その研究開発を進めてきた。しかし、それらが実用的な複雑形状周りの解析に適用された例は未だに少ない。そのため、これまで多用されてきた簡易なベンチマーク問題では適用性の評価(計算安定性・精度の検証)が不十分であり、同様の手法が実用レベルにあるかどうかは詳細に検証する必要があると考えられる。また他の観点として、近年急速に発展する多様な計算機の性能を十分に活用し、高効率な実行が可能な計算手法であることも重要である。そのため、既存の CPU (Central Processing Unit) に基づく計算機だけでなく、他の計算機における同手法の適用性を高めることは、計算機の発展に合わせて解析精度を向上させていく上で不可欠な技術である。

### 2. 研究の目的

本研究では、近年複雑形状周り的高精度解法として注目される非構造格子高次精度手法の一種である流束再構築法 (Flux-Reconstruction: FR 法) を用い、航空機着陸脚周りや航空機エンジンの低圧タービン翼周りの非定常乱流解析等に適用することで、複雑形状への適用可能性(計算安定性と精度)を評価する。同時に、様々な複雑形状周りの圧縮性流体解析を従来の高次精度解法に基づき実施することで、本解析手法の有用性を示すことも目指す。また、FR 法を多様な計算機上で実行可能となるよう計算アルゴリズムと実装方法を詳細に検討し実行性能を評価することで、FR 法に基づく多様な計算機を用いた複雑形状周りの圧縮性流体解析技術の確立へと繋げる。

### 3. 研究の方法

本解析ではまず、BANC III ワークショップにて提案された 1/4-scale Partially-Dressed Nose Landing Gear (PDCC-NLG) に着目し、 $Ma=0.166$ ,  $Re=73,000$  (主脚柱径基準)  $=36,500$  (タイヤ径基準) の流れ場を対象とした複雑形状周りの流体解析を行った。計算格子は四面体セル(2次精度要素)で構成し、セル数は 65,126,228 とした。計算離散化は FR 法に基づき、助走計算として 2次精度(P1スキーム)、本計算に 5次精度(P4スキーム)と非線形項によるエイリアス誤差除去(dealiasing based on over integration)を行い、時間離散化は時間幅可変 RK45 スキームを用いた。また非粘性流束に Rusanov 流束、粘性評価は BR2 スキームとした。次に、同様の手法を用いて MTU 社(ドイツ)の提供する壁面付き低圧タービン翼周りの直接数値解析に取り組み、実験結果との比較を行なうことで本手法の実用問題での精度検証とした。最後に、多様な計算機への適用性を示すため、最新のベクトル計算機(NEC SX-Aurora)への実装を行うことで、従来の CPU 等の計算機の利用時には現れなかった問題点を洗い出し、ベクトル計算機に適した FR 法の実装を通じて実行性能の向上を行う。また既存の GPU とベクトル機との性能比較も行い、多様な計算機を用いた複雑形状周りの圧縮性流体解析技術の確立に向けた足掛かりとする。

### 4. 研究成果

まず、本研究で用いた FR 法ソフトウェア(PyFR)の並列計算性能を評価した。計算には複数の GPU (NVIDIA P100) を用い、その並列化性能を詳細に調べた。空間自由度数を 2,304,000 とした Strong scaling を表 1 に載せる。NGPU は GPU 数、TN は TCO メッシュを基準とした実行時間であり、P100 の Peak Flops である 4.7DP-TFPLOS/s を基準としたピーク性能も付記する。これによると、並列数の増加に伴い計算速度はほぼ比例して上がっており、400 並列までは実行効率 40% 以上の非常に高い効率で計算を実行出来ると分かる。これにより、大規模解析においても同手法が十分な効率で計算を行えることが示された。

Mesh	DoF (= $125 \times N_{ele}$ )	$N_{GPU}$	DP-PFLOP/s	% Peak DP-FLOP/s	$S_N$
TC5	288M	50	0.114	48.57%	1.00
TC5	288M	100	0.225	47.94%	1.97
TC5	288M	200	0.440	46.85%	3.86
TC5	288M	400	0.838	44.57%	7.34

表 1 : Strong scaling

次に、PDCC-NLG 周りの解析に FR 法を適用した結果を示す。助走計算における 2 次精度解析の

結果を図 1 に示す．一様流と主脚柱での無次元化時間で  $t=0.1, 5.5$  の瞬時渦構造（流速で色付け）が可視化されており，主脚周辺及びタイヤホイール表面近傍に乱流渦構造が捉えられていることが分かる．本計算を元に 5 次精度解析へと移行したが，エイリアス誤差除去による安定化等による数値安定化が達成出来ず，計算は不安定となった．

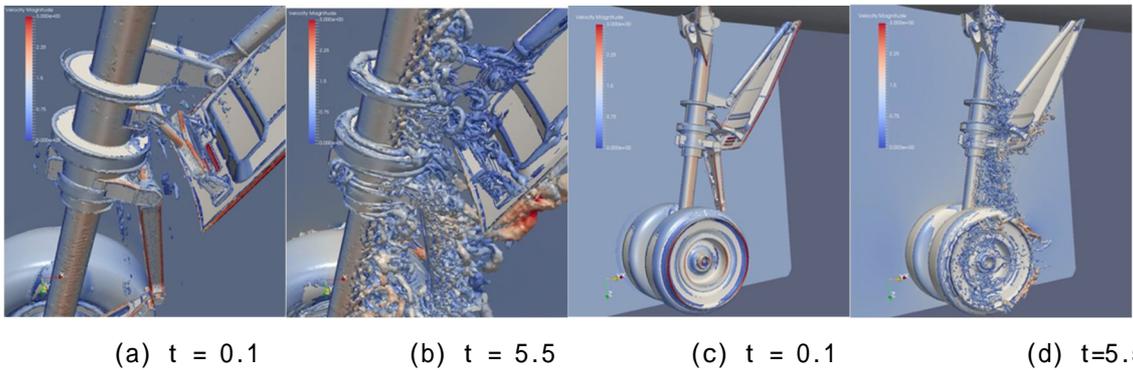


図 1：主脚周り渦構造の瞬時場（速度勾配テンソルの第 2 不変量を流速で色付け，(a)と(b)は拡大図，(c)と(d)は全体図， $t$  は一様流と主脚柱径で無次元化した時間）．

図 2 に，各セルの代表長（セル体積の 3 乗根）に基づく Courant 数の分布を示す．左図では  $y$  対称面における Courant 数分布を色付けで示し，物体近傍特に部材同士の繋ぎ目に存在する狭小空間で高くなっていることが分かる．今回はソルバーの関係上，全てを四面体セルで構成したことで特にメッシュの歪みが大きく生じたと考えられる．このような点が全ての解の定義点数に占める割合を図 2 右に示し，殆どのセルでは 0.5 あるいはそれ以下を達成している一方で，局所的に高い値を取るセルが全体の 1%にも満たないことが分かる．このような複雑形状に対する物体適合格子においては局所的に歪みの大きなセルが生じることは避け難く，既存の安定化技術を取り入れたソルバー側での安定化や，更なる高次精度化によって大きなセル（歪みが生じにくい）の採用を可能にすることが有望と考えられる．

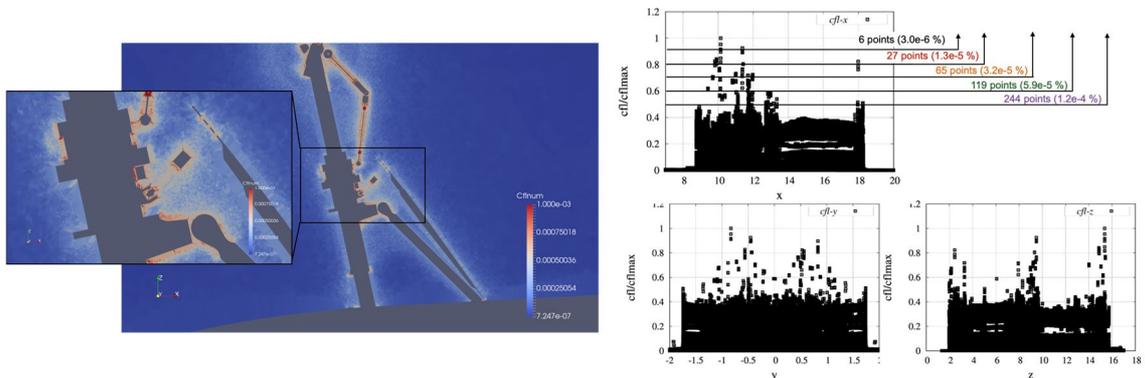


図 2：左はセル代表長に対する Courant 数分布（ $y$  対称面）の可視化，右は各方向（ $x, y, z$  座標）に対して全ての解の定義点の Courant 数を並べた 1 次元分布

次に，低圧タービン翼列周りの直接数値計算の結果を示す．本解析では，MTU Aero Engine 社の提供する MTU-T161 低圧タービン翼形状を対象とし，翼弦長 Reynolds 数 200,000，流入マッハ数 0.6 である．図 3 に瞬時流れ場と翼面上の Isentropic Mach number の時間平均量を示す．

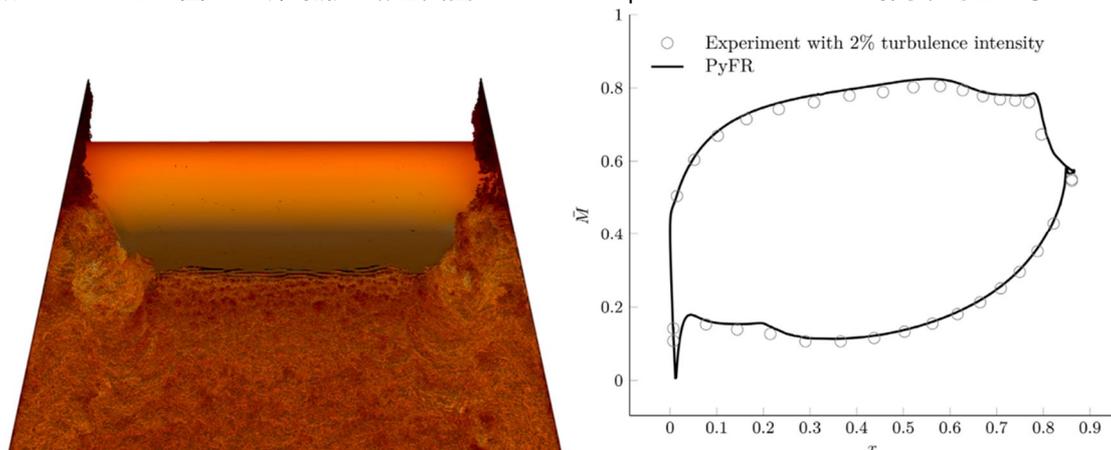


図 3：左は T161 低圧タービン翼周りの瞬時渦構造，右は翼表面の Isentropic Mach number 本解析で対称とした 3 次元形状は先の着陸脚よりも単純であり，解析は安定に行うことが出来

た．その結果，風洞実験値ともよく一致することが示され，本研究で用いた高次精度解法（FR法）がこのような実形状における圧縮性乱流を含む流れ場で有効であることを実証出来た．一方，同時に行なった低レイノルズ数（ $Re=90,000$ ）流れの解析では翼上面の後方で大きく流れが剥離する結果となり，実験結果と一致しなかった．これは風洞実験では流入に乱れが含まれる一方で数値計算ではそれを再現しておらず，乱流遷移を起こす低レイノルズ数域で差異が生じたと考えられる．本報告に示す高レイノルズ数流れの結果では数値的に乱れを入れていないものの，実験結果と良好に一致するため，そのような流入擾乱に対して高レイノルズ数域では流れ場が大きく変化しないことを示唆している．なお，低レイノルズ数域で流入擾乱を取り入れた数値解析も試行的に行い，実験結果と良好に一致する傾向を得た．これらにより，高精度解法による乱流の非定常解析は複雑形状周りでも実験結果と良好に一致する結果を生む可能性はあるものの，解析が高精度化したことにより，実験条件とより精密に一致した計算条件（本研究では流入擾乱）を用いる必要があることが分かった．また，そのような条件の不一致が流れ場に影響するかどうかは，本研究対象では特に乱流遷移に関連するレイノルズ数によって決まることが示唆された．本研究成果により得られた解析データは直接数値計算による詳細な統計量を含んでおり，論文と共に公開されている．これによりさらに高精度の乱流モデル構築や流体解析に活用されることを期待している．

次に，新たな計算アーキテクチャへの拡張（特にベクトルプロセッサ：NEC SX-Aurora）に重点をおき，FR法をベクトルプロセッサにおいて効率良く実装する方法について主に計算機科学の観点から検討を行なった．当該ソルバーを新たな計算アーキテクチャの利用が可能となるよう拡張を行う目的で，SX-AuroraにおけるPyFRの実行が可能となるよう試行的に実装を行い，小規模な並列化解析において実行性能の評価を行なった．この時，FR法に特有の1格子セルあたりの計算負荷が高いこと（1格子セルあたりに複数の解の定義点を有する）を活かし，当該プロセッサの特性に合わせて各計算カーネルをベクトル化する作業を行なった．その結果，既存のGPU（V100）と比較して数分の1程度の実行性能を達成可能となったが，更なる高速化に向けて計算カーネルのベクトル化とメモリバンド幅において課題が残ることが明らかとなった．

```
# -*- coding: utf-8 -*-
from pyfr.backends.base.generator import BaseKernelGenerator
class VecKernelGenerator(BaseKernelGenerator):
    def render(self):
        if self.ndim == 1:
            inner = '''
                int cb, ce;
                loop_sched_id(_nx, align, &cb, &ce);
                int nci = ((ce - cb) / SOA_SZ) * SOA_SZ;
                for (int _xi = cb; _xi < cb + nci; _xi += SOA_SZ)
                {{
                    #pragma _NEC ivdep
                    for (int _xj = 0; _xj < SOA_SZ; _xj++)
                    {{
                        {body}
                    }}
                }}
                for (int _xi = cb + nci, _xj = 0; _xj < ce - _xi; _xj++)
                {{
                    {body}
                }}
            '''.format(body=self.body)

# -*- coding: utf-8 -*-
from pyfr.backends.base.generator import BaseKernelGenerator
class VecKernelGenerator(BaseKernelGenerator):
    def render(self):
        if self.ndim == 1:
            inner = '''
                int cb, ce;
                loop_sched_id(_nx, align, &cb, &ce);
                #pragma _NEC ivdep
                for (int _xi = cb; _xi < ce; _xi++)
                {{
                    {body}
                }}
            '''.format(body=self.body)
```

Hardware	PyFR version	SoA size	OMP_NUM_THREADS	p=3	p=4	p=5
Titan V	Original		N/A	0.52	0.57	0.83
Aurora	Original	512	1	99.14	61.41	54.33
Aurora	Vectolized intcflux/ tflux	512	1	10.42	6.53	7.30
Aurora	Vectolized intcflux/ tflux	8	1	8.18	4.60	5.27
Aurora	Vectolized intcflux/ tflux	8	6	3.31	1.67	1.98

図4：上部に，計算カーネルのベクトルプロセッサ用書き換えを例示する．下部に，Taylor-Green 渦の解析に必要な1自由度あたりの計算時間( $10^{-9}$  s)の比較 (NVIDIA TitanV GPU and NEC SX-Aurora) を示す．

このようにFR法を用いた圧縮性流体ソルバーが実用的な工学問題（高レイノルズ数流れ，複雑形状周り）において高い精度を示したことは世界的にも新しく，非定常乱流解析におけるFR法と本ソルバーの有用性が確立されつつあると考えている．一方，計算安定性の改善や多様な計算機にて高効率な実装を行うためには，上述の各種課題が残されることも明らかにした．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Abe Yoshiaki, Sun Ziyao, Xiao Feng	4. 巻 93
2. 論文標題 Boundary variation diminishing algorithm for high order local polynomial based schemes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical Methods in Fluids	6. 最初と最後の頁 892 ~ 907
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/flid.4899	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 該当する

1. 著者名 Iyer A.S., Abe Y., Vermeire B.C., Bechlars P., Baier R.D., Jameson A., Witherden F.D., Vincent P.E.	4. 巻 226
2. 論文標題 High-order accurate direct numerical simulation of flow over a MTU-T161 low pressure turbine blade	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computers & Fluids	6. 最初と最後の頁 104989 ~ 104989
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compfluid.2021.104989	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6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Yoshiaki Abe, Freddie D. Witherden, Giorgio Giangaspero, Brian C. Vermeire, Arvind S. Iyer, Peter E. Vincent
2. 発表標題 High-performance Implementation of Inlet Turbulence Generation for GPU-based Parallel Computation
3. 学会等名 16th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiaki Abe, Shoji Iori, Tomonaga Okabe
2. 発表標題 Towards Fluid-structure Interaction using Assumed Mode Deformation Approach
3. 学会等名 16th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiaki Abe
2. 発表標題 Simulations of Flow over Low-Pressure Turbine Blades with PyFR
3. 学会等名 PyFR Symposium 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshiaki Abe, Freddie D. Witherden, Kazuhiko Komatsu, Brian C. Vermeire, Peter E. Vincent, Kozo Fujii
2. 発表標題 High-fidelity Flow Simulation around a Low-pressure Turbine Blade and Cross-platform Implementation with PyFR
3. 学会等名 Seventeenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020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