

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03869

研究課題名（和文）機械学習を活用した決定論的応力モデルの構築と流体最適設計への応用

研究課題名（英文）Deterministic stress modeling using machine learning and its application to design optimization

研究代表者

山田 和豊（Yamada, Kazutoyo）

岩手大学・理工学部・准教授

研究者番号：00344622

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：流体設計は高度な技術を必要とし、数値流体解析はその重要な手段のひとつとして活用されている。しかし、現在の流体設計は主に定常流れ解析に基づいており、非定常効果が考慮されていない。流体設計を高度化するためには、非定常効果を考慮した新たな数値解析技術が必要である。また、これにより革新的な流体設計への道が開けると期待される。本研究では、非定常効果に関連する流動を明らかにするとともに、決定論的応力によって非定常効果をモデル化し、これを導入した定常RANS解析を実施することにより、解析結果の予測精度について検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、非定常効果に関連する流動を明らかにするとともに、非定常効果をモデル化することで流体解析の高度化を試みた。本研究の成果は流体設計技術の発展へと展開され、産業界における技術革新と競争力の向上につながると期待される。流体設計の改善により、エネルギー効率が向上し環境負荷の低減に貢献し、新たな流体設計技術が普及することにより産業の発展に寄与すると期待される。

研究成果の概要（英文）：The design of fluid machines requires advanced technology, and numerical analysis is utilized as one of its crucial means. However, current design primarily relies on steady flow analysis without considering unsteady effects in the fluid machine. To advance the design technology, new numerical analysis techniques considering unsteady effects are necessary. It is expected that this will pave the way for innovative design. In this study, we elucidated the unsteady flow phenomena related to unsteady effects, and then we modeled unsteady effects with the idea of the deterministic stress and verified the prediction accuracy of the analysis results by conducting steady RANS analysis incorporating this modeling.

研究分野：流体工学

キーワード：数値解析 非定常効果 決定論的応力 流体最適設計 機械学習

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

流体設計では様々な性能要求に応えるため高度な技術が要求される。数値流体解析は、解析手法の成熟に伴い様々なソフトウェアが提供されており、積極的に流体設計に応用されるとともに、欠かせない重要な設計技術のひとつとなっている。また、ターボ機械の本質は非定常性にあることから、近年、計算機性能の進歩と相俟って、非定常流れ場の解析が行われるようになってきている。しかしながら、得られた知見や非定常解析技術それ自体を設計に応用することはできず、今日の数値解析を応用した流体設計は定常流れ解析に基づいており、非定常効果を取り入れた流体設計は実現されていない。さらに最近では、流体設計に最適化手法を導入した流体最適設計も行われるようになってきた。しかし、前述のとおり、流体解析手法は定常流れ計算に基づいており、真の最適解を見出すことは原理的に不可能であると考えられる。

### 2. 研究の目的

非定常性を考慮した流体設計技術の開発が実現されることで、設計空間の拡大や信頼性の向上、さらには新しい概念の流体機械の開発など、流体設計の革新へと繋がることが期待される。本研究では、真の最適設計を実現するために、機械学習を活用した決定論的応力モデルの構築し、非定常効果を考慮した流体設計技術を開発することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 解析対象

過去の研究から、高負荷圧縮機ほど、動静翼干渉による非定常性の影響が強く、性能予測が難しいことが知られる。そこで、本研究では解析対象として、図1に示す羽根付きディフューザを有する遷音速遠心圧縮機を選定した。圧縮機インペラは、フルブレード11枚、スプリッタブレード11枚、ディフューザは19枚の翼を有する。インペラのチップクリアランスは前縁から後縁まで一定である。インペラ出口径とディフューザ入口径との比は1.07であり、インペラとディフューザの半径方向隙間は小さい。なお、インペラ出口周速は約480m/sである。

#### (2) 計算手法

本研究では、1ピッチ定常RANS解析(RANS解析)および全周非定常RANS解析(URANS解析)を行った。定常RANS解析結果および非定常RANS解析結果を比較することにより、非定常効果による性能差を確認するとともに、非定常効果である決定論的応力を非定常RANS解析の結果から後処理により評価した。

計算には内製コードを使用した。三次元圧縮性Navier-Stokes方程式を支配方程式とし、セル中心型の有限体積法に基づいて離散化される。非粘性流束の評価にはSHUS(Simple High-resolution Upwind Scheme)を用い、三次精度のMUSCL法を組み合わせ高解像度化した。粘性流束はGaussの発散定理を用いて中心差分的に評価した。時間方向はEuler陰解法により離散化し、時間積分にはMFGS(Matrix Free Gauss-Seidel)陰解法を用いた。定常解析では、定常解への収束を加速するために、局所時間刻み法を使用した。また非定常解析では、各時間ステップで3回のニュートン反復を行い、時間精度を最大二次精度とした。なお、無次元時間刻みを0.001に設定した。このとき、インペラの回転周期は約9,000ステップに相当する。乱流モデルには、 $k-\omega_2$ 方程式モデルを採用した。

1ピッチ定常RANS解析の境界条件について述べる。インペラ上流の入口境界には全圧および全温、ディフューザ下流の出口境界には静圧をそれぞれ境界条件として与えた。壁面境界には、滑りなし条件および断熱条件を与えた。また、1ピッチ定常RANS解析では、周方向を周期境界とし、インペラとディフューザの領域境界(インターフェース)についてはmixing-planeを適用した。全周非定常RANS解析では、領域境界にsliding-meshを適用した。

#### (3) 計算格子

図2に、解析対象とした遠心圧縮機のインペラ部およびディフューザ部の計算格子を示す。なお、定常RANS解析では、インペラおよびディフューザそれぞれ1ピッチを解析領域としている。計算格子は、格子生成ソフトウェアAutoGrid5(cadence社)を用いて、すべて構造格子で作成した。インペラについては、フルブレードおよびスプリッタブレードの流れ方向にそれぞれ128点、96点、周方向に193点の計算格子を設定した。ディフューザには、流れ方向に116点、周方向に160点の格子を配置した。ハブからシュラウドまでのスパン方向に57点の格子を設定し、その内インペラのチップクリアランスには17点を割り当てた。1ピッチ合計の格子点数は約240万点である。また、全周非定常RANS解析に用いた全周の格子点数は全体で約3,300万点である。なお、壁面上の最小格子幅はすべて $y+1$ を満足するように十分小さい値を設定した。

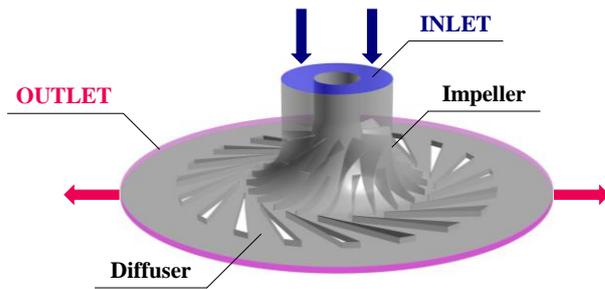


図1 遷音速圧縮機

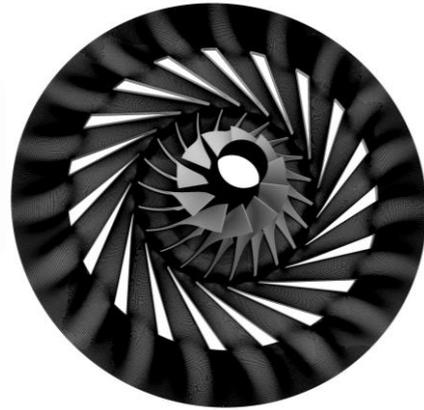


図2 計算格子

#### 4. 研究成果

##### (1) 決定論的応力 (deterministic stress) の評価

非定常効果として表される deterministic 応力を評価する。ターボ機械では、動静翼は相対的に運動し相互に干渉するため、流れ場は本質的に非定常となる。動静翼干渉に伴う流れの非定常性は周期的であり、流れ場中で生じる乱流や剥離等に起因した不規則な非定常性とは区別して考えることができる。ポテンシャル干渉や後流干渉のような動静翼干渉に伴う非定常流れの効果は、相互の流れ場に大きく影響する重要な現象である。定常流れの解析においては、この非定常効果は deterministic 応力と呼ばれモデル化される必要がある。しかしながら、現在適切なモデルがないため一般に無視されている。翼列干渉による非定常性は周期的であるため、レイノルズ分解におけるレイノルズ平均速度は、時間平均速度および翼列干渉による deterministic 変動速度に分解される。よって、速度は次式のように分解できる。

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i = \bar{u}_i + u''_i + u'_i \quad (1)$$

また、deterministic 応力  $R_{ij}$  は、次式で定義され、全周非定常 RANS 結果をもとに算出することができる。

$$R_{ij} = \overline{\rho u'_i u'_j} \quad (2)$$

図3は、ミッドスパンにおける deterministic 応力の分布を示している。同図には、deterministic 応力成分のうち、値の大きい  $\overline{\rho u'_r u'_r}$ 、 $\overline{\rho u'_\theta u'_\theta}$  および  $\overline{\rho u'_r u'_\theta}$  の成分が示されている。 $\overline{\rho u'_r u'_r}$ 、 $\overline{\rho u'_\theta u'_\theta}$  および  $\overline{\rho u'_r u'_\theta}$  はインターフェースの領域で値が大きい。 $\overline{\rho u'_r u'_r}$  および  $\overline{\rho u'_\theta u'_\theta}$  はディフューザ圧力面側前縁剥離と主流との間のせん断領域で大きな値を示している。さらに、ディフューザ入口では、ディフューザ負圧側および圧力面側に、それぞれ  $\overline{\rho u'_r u'_r}$  および  $\overline{\rho u'_\theta u'_\theta}$  の値が大きくなっている。ディフューザ前縁での流れの分岐に伴い、インペラ後流が変形される結果、高応力が発生していると考えられる。一方、 $\overline{\rho u'_r u'_\theta}$  をみると、半径方向と周方向の deterministic 変動は、前者では負の相関、後者では正の相関がみられる。

図4は各 deterministic 応力の子午面流れ方向変化を示している。 $\overline{\rho u'_r u'_z}$ 、 $\overline{\rho u'_\theta u'_z}$ 、 $\overline{\rho u'_\theta u'_z}$  は値が小さく子午面流れ方向にあまり変化がない。一方で、 $\overline{\rho u'_r u'_r}$ 、 $\overline{\rho u'_\theta u'_\theta}$ 、 $\overline{\rho u'_r u'_\theta}$  はインペラ後縁近傍からインターフェースにかけて値が上昇しており、特に  $\overline{\rho u'_r u'_r}$ 、 $\overline{\rho u'_\theta u'_\theta}$  は大きく上昇している。以上のように、非定常効果はインペラとディフューザ間を中心に発生し、翼列内部ではその効果は大きく減衰することが明らかにされた。

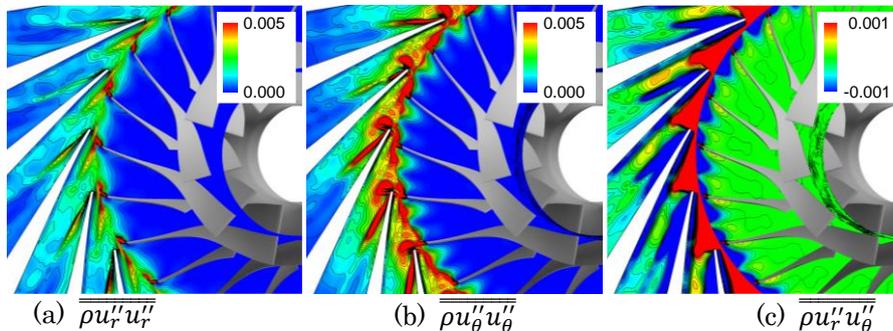


図3 ミッドスパンにおける決定論的応力の分布

##### (2) 非定常効果の導入

RANS 解析に deterministic 応力を導入することで、URANS の時間平均解を再現可能か評価する。そこで、RANS 解析に抽出された deterministic 応力を導入する。上述のように、全周非定常 RANS 解析から deterministic 応力テンソルを算出し、抽出された deterministic 応力テンソル

ルを直接定常 RANS 解析に導入し計算を実施する。

図5に圧縮機の性能特性として全圧比を示しており、定常 RANS 解析結果、全周非定常 RANS 解析結果、deterministic 応力を導入した定常 RANS 解析結果および実験解析結果について比較している。定常 RANS 解析および全周非定常 RANS 解析の結果が実験よりも全圧比を過大に評価していることがわかる。また、チョーク流量に関しては、数値計算の結果が実験と比べ数ポイント高流量側にある。全圧比およびチョーク流量の値は、数値計算と実験とで一致していないが、その差異は小さく性能特性は定性的に一致しているといえる。定常 RANS と非定常 RANS の結果を比較すると、非定常 RANS 解析の結果の方が全圧比を少し高く評価していることがわかる。deterministic 応力を導入した定常 RANS 解析結果は、非定常 RANS 解析結果と同様に全圧比を高く予測したが、非定常 RANS 解析結果と完全には一致していない。この要因のひとつには、定常 RANS 解析における mixing plane モデルの影響がある。なお、数値計算と実験の差異については、別途実施した DES 解析でも大きな改善が見られない。また、この差異は非定常効果以上に大きいと考えられることから、解析対象を変更することを検討している。

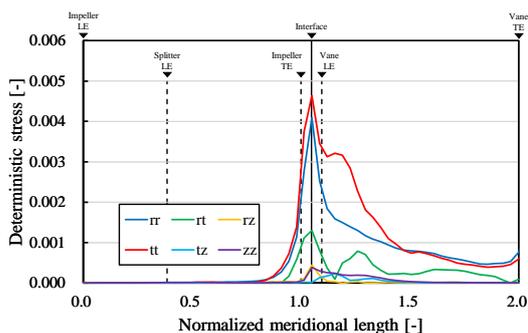


図4 決定論的応力の子午面方向分布

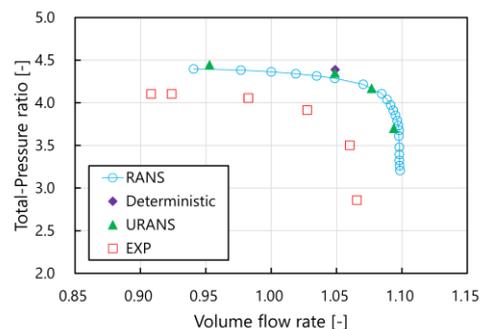


図5 全圧比特性の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 神山雄人, 山田和豊, 船崎健一, 深堀未久, 川崎聡
2. 発表標題 ロケットエンジン用超音速タービンの空力性能に及ぼす動静翼間距離の影響
3. 学会等名 日本航空宇宙学会北部支部2023年講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K.Yamada, K.Kubo, K.Iwakiri, Y.Ishikawa, H.Higashimori
2. 発表標題 Unsteady Effects of Blade Row Interaction on Flow Field and Aerodynamic Performance of a Transonic Centrifugal Compressor Impeller
3. 学会等名 ASME Turbo Expo 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久保浩介, 山田和豊, 岩切健一郎
2. 発表標題 遷音速遠心圧縮機における翼列干渉に伴う非正常効果の数値的研究
3. 学会等名 第49回日本ガスタービン学会定期講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久保浩介, 山田和豊, 岩切健一郎
2. 発表標題 羽根付きディフューザを有する遷音速圧縮機における非正常三次元内部流動場のDES解析
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 能美智, 山田和豊, 谷口直, 富田勲
2. 発表標題 遷音速遠心圧縮機における三次元はく離の流れ構造および非定常挙動のDES解析
3. 学会等名 第51回日本ガスタービン学会定期講演会
4. 発表年 2023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