

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01373

研究課題名(和文) データ同化による複雑内部流れ場の非定常三次元流動診断技術の高度化

研究課題名(英文) Advanced Diagnostic Technology for Unsteady Three-Dimensional Flow Phenomena in Complex Internal Flow Fields Using Data Assimilation

研究代表者

古川 雅人 (FURUKAWA, Masato)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：30181449

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：EFD解析とCFD解析の適用がいずれも容易でない内部流動問題として、翼列内の遷音速流動現象に着目した。まず、DESおよびLESを用いた大規模なCFD解析を実施することにより、対象の遷音速翼列で発生する三次元はく離の流れ構造および非定常挙動を詳細に調べた。次に、データ同化に必要な実験データとして、遷音速圧縮機のサージ現象に関する非定常流動データを感温塗料と圧力センサを用いて取得した。最後に、アンサンブルカルマンフィルタおよびAdjoint法を用いた2種類のデータ同化手法を構築し、遷音速翼列流れの乱流モデル定数の最適化および遷音速圧縮機動翼列からの漏れ流れ流量の同定にそれぞれ適用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

単流路当たり約13.5億セルの緻密な計算格子を用いたWall-resolved LES解析は、衝撃波を伴う遷音速流れについて国際的に初めての試みであり、衝撃波との干渉による境界層のはく離・乱流遷移・再付着を鮮明に捉えることができた。遷音速圧縮機のサージに関する非定常計測データは今まで国際的にも皆無であったものであり、特に逆流を伴うディープサージに関するデータは極めて貴重なものである。非逐次型データ同化手法であるAdjoint法を圧縮性Navier-Stokes方程式に適用することにより、実用問題としての遷音速翼列流れに対してEFD/CFD同化解析手法を構築できた成果は世界初のものである。

研究成果の概要(英文)：As an internal flow problem to which neither EFD analysis nor CFD analysis can be applied easily, transonic flow phenomena in blade rows are focused on. First, the flow structure and unsteady behavior of the three-dimensional separation phenomenon generated in transonic cascades considered were investigated in detail by performing large-scale CFD analyses using DES and LES. Next, as experimental data required for data assimilation, unsteady flow data on the surge phenomenon in a transonic compressor was obtained using a temperature-sensitive paint and pressure sensors. Finally, two types of data assimilation methods using the ensemble Kalman filter and the Adjoint method were constructed to optimize the turbulence model constants for the transonic cascade flows and to identify the leakage flow rate from the transonic compressor rotor, respectively.

研究分野：流体工学

キーワード：内部流れ CFD EFD データ同化 ターボ機械

1. 研究開始当初の背景

各種流体機械の高速・高負荷化にともない、その開発においては、非定常三次元内部流動を把握することによって、性能の改善や不安定流動現象(失速など)の回避を実現することが益々重要となった。しかしながら、その複雑な非定常三次元内部流れを精度良く計測することは容易でない。例えば、動翼列のように回転要素内の流動を、要素とともに回転する座標系から計測する場合、装置は極めて複雑なものとなる。また、LDVやPIVなどの非接触形計測法を利用すれば、絶対座標系から回転要素内の流れ場を計測できるが、複雑な流路形状ではレーザ光が届かずに計測できない領域が少なからず出てくる。さらに、MEMS化された超小型の流体機械では、その内部流動を計測すること自体が困難となっている。

以上のとおり、従来の実験流体力学(EFD)のみから、実用問題における複雑な「非定常」三次元内部流動を把握することには限界がある。一方、複雑な内部流れに対しても、定常流動解析であれば、計算流体力学(CFD)の適用が広く普及した。しかしながら、衝撃波と乱流境界層の干渉現象を含む遷音速翼列流れのような実用問題における複雑な「非定常」流れ場に対しては、CFD結果を鵜呑みにできないのが現状であり、計算結果の信頼性を検証した上で流れ場を解析する必要がある。すなわち、実用問題の複雑な「非定常」流れ場に対しては、EFD解析とCFD解析を併せて適用し、両者を補完し合うことが肝要である。

2. 研究の目的

前述のとおり、極めて複雑な非定常三次元内部流動現象を解明するためには、EFD解析とCFD解析とを相互に補完させ合いながら活用することが不可欠であるが、個別に実施されたEFD解析とCFD解析の両結果を単に比較検討することにより流動現象を解析するEFD/CFD併用解析(本申請のEFD/CFD同化解析とは区別)では、両解析結果を有機的に活用することに限界があり、複雑な非定常現象を解明することは容易でない。

そこで本研究では、データ同化手法に基づいて任意のEFD(計測)データをCFD計算に真に同化することにより、EFD(計測)で得られた実条件の影響を考慮した実流動現象の再現を可能にするEFD/CFD同化解析手法を構築する。本手法を翼列流れ(実用問題)に適用して、既存のEFDデータをCFD計算に同化させ、翼列内部の複雑な非定常三次元流れ場を再現することにより、本同化解析手法の妥当性を検証する。また、CFD解析との親和性に優れたEFD技術として、感圧塗料(PSP: Pressure Sensitive Paint)による圧力の面計測あるいは感温塗料(TSP: Temperature Sensitive Paint)による温度の面計測を導入し、その実用問題への適用方法を確立するとともに、データ同化に必要なEFDデータを取得する。なお、本研究において適用対象とする遷音速翼列流れ場で発生する流動現象を事前に把握するために、DES(Detached Eddy Simulation)およびLES(Large Eddy Simulation)を用いた大規模なCFD解析を実施することにより、遷音速翼列で発生する三次元はく離の流れ構造および非定常挙動を詳細に調べる。

3. 研究の方法

(1) EFD/CFD同化解析手法の構築

まず、逐次型データ同化手法であるアンサンブルカルマンフィルタを用いた同化解析手法の構築を行った。その際に、遷音速タービン翼列周りの流れ場に対して実施したLES解析の解析結果を模擬実験データとし、非定常RANS解析に用いた $k-\omega$ 二方程式乱流モデルのパラメータ推定(最適化)を行うことによって、手法の検証を行った。

次に、非逐次型データ同化手法であるAdjoint法を用いる同化解析手法の定式化ならびに数値スキームの構築を行った。Adjoint法を圧縮性Navier-Stokes方程式に適用するにあたって、陰的時間進行法および $k-\omega$ 二方程式乱流モデルを用いた定式化を行った。構築したEFD/CFD同化解析手法を遷音速圧縮機動翼列からの漏れ流れ流量の同定に適用することによって、手法の妥当性を検証した。

(2) 翼列流れ場における遷音速流動現象の把握

適用対象とする遷音速翼列で発生する、衝撃波を伴う三次元はく離の流れ構造および非定常挙動を詳細に調べるために、DESおよびLESを用いた大規模CFD解析を実施した。DES解析では $k-\omega$ 二方程式乱流モデルを用い、LES解析ではSGS(Subgrid Scale)モデルとしてWALEモデルを採用した。特に、LES解析においては、境界層の乱流遷移を精度良く予測するために、6次精度COMPACTスキームにより非粘性流束を評価するとともに、翼列の単流路当たり約13.5億セルの緻密な計算格子を用い、壁面モデルを用いずに壁面までせん断応力を直接評価するWall-resolved LES解析を実施した。

(3) データ同化に必要なEFDデータの取得

データ同化に必要な実験データとして、遷音速圧縮機のサージング現象に関する非定常流動データを、先ず圧力センサおよび熱線流速計を用いて取得した。

また、感圧塗料(PSP)あるいは感温塗料(TSP)は、計測対象壁面に塗布した塗料に光を照

射し、塗料からの燐光発光を光学計測するのみで、壁面の広範囲にわたる圧力あるいは温度分布の情報（面情報）を容易に取得できることから、CFD との親和性に優れた EFD 技術と位置付けられる。本研究では、ポリマータイプの感温・感圧塗料を用いた強度法により圧力あるいは温度分布を計測する EFD 技術を構築した上で、ディープサージに伴う逆流現象を感温塗料により非定常計測した。

4. 研究成果

(1) 翼列流れ場における遷音速流動現象の把握

遷音速軸流圧縮機の全段および全周を対象とした大規模 DES 解析により、圧縮機内部における三次元渦流れ構造を把握するとともに、位相固定平均化処理を適用することで、動静翼列干渉が流れ場に与える影響を調べた。その結果、静翼では、図 1 に示すとおり、大規模なハブ・コーナーはく離が発生し、負圧面側のハブ面上に足を持つハブ・コーナーはく離渦が形成される。ハブ・コーナーはく離領域の内部では、動翼の後流干渉により複数のはく離渦が発生し、下流側へ移流することで、流れ構造を時間的に大きく変化させることがわかった。

遷音速軸流圧縮機動翼列の単流路を対象として、約 13.5 億セルの緻密な計算格子を用いた WRLES 解析を実施した結果、翼圧力面境界層における乱流遷移、ならびに図 2 のとおり翼負圧面境界層における衝撃波との干渉によるはく離・乱流遷移・再付着を鮮明に捉えることができ、WRLES 解析は遷音速流動現象の細部まで把握することが可能であることがわかった。

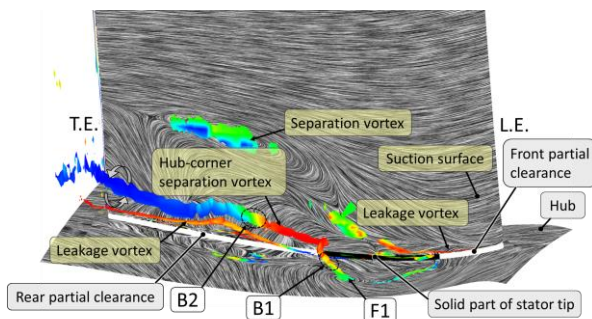


図 1 遷音速軸流圧縮機静翼での剥離形態

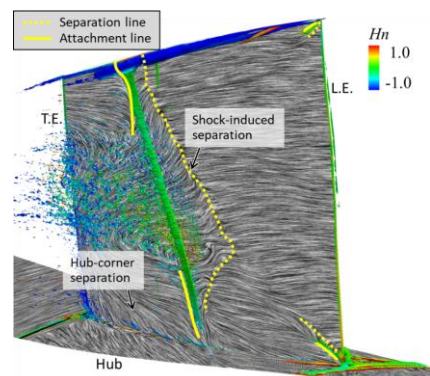


図 2 遷音速軸流圧縮機動翼での剥離形態

(2) データ同化に必要な EFD データの取得

遷音速圧縮機のサージ現象について、圧力センサおよび熱線流速計により非定常流動計測を行った結果、逆流を伴うディープサージに関する貴重な EFD データを世界で初めて取得できた。その計測結果の一例として、逆流発生期間の前後における非定常流動挙動を図 3 に示す。同図中の破線で囲まれた時間帯が逆流発生期間である。入口計測管（圧力センサ 1）および羽根車入口直前（圧力センサ 3, 4）の圧力は、逆流開始時に急上昇し、その後ほぼ一定値を保った後、逆流終了時に急降下して元の順流状態に戻っている。一方、出口計測管（圧力センサ 2）および羽根車下流のディフューザ（圧力センサ 5, 6）の圧力は、逆流開始時から徐々に降下し、

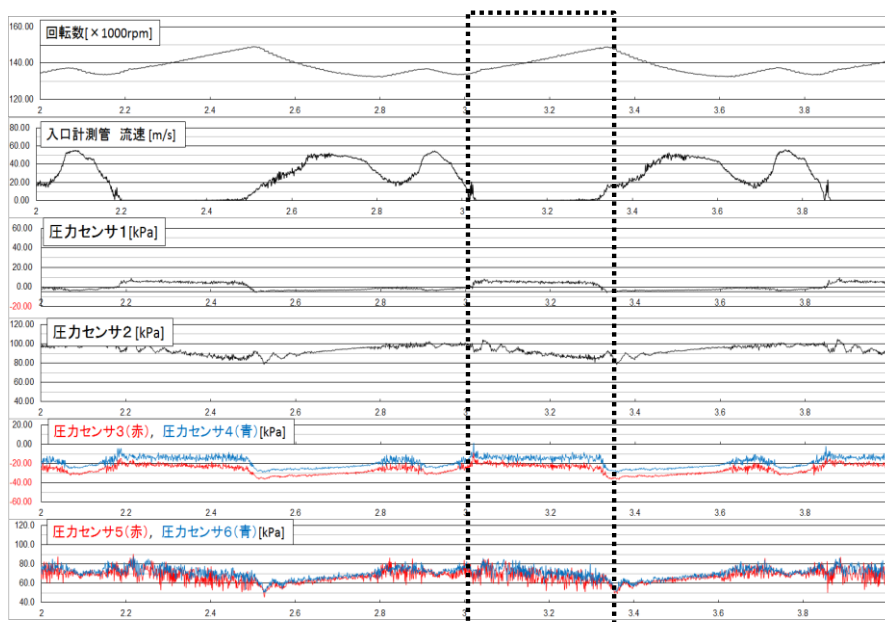


図 3 遷音速圧縮機のディープサージ発生時の非定常計測結果の時間履歴

逆流終了後から徐々に上昇した後に元の順流状態に戻っている。ディープサージが発生すると、羽根車上流と下流で逆流発生の前後における圧力の非定常挙動に差異があることがわかる。

図3中の入口計測管の流速において示されているとおり、逆流が発生すると昇圧された高温の空気が羽根車下流から熱線流速計まで到達し、熱線からの放熱作用が消失して熱線出力が得られなくなる結果、熱線流速計では逆流時の流速を計測することが出来なかった。そこで、新たに構築した感温塗料による温度分布の非定常計測手法をディープサージに伴う逆流現象の計測に適用した。その結果、温度分布の勾配から高温の逆流空気と常温の吸入空気との間の接触不連続面を同定し、管路軸方向2点におけるその接触不連続面の通過位相差から逆流空気の流速を算出した。

(3) EFD/CFD 同化解析手法の構築

逐次型データ同化手法であるアンサンブルカルマンフィルタを用いた EFD/CFD 同化解析手法を乱流モデルのパラメータ推定に適用した。具体的には、遷音速タービン翼列流れを対象にして、LES 計算結果に基づき $k-\omega$ 二方程式モデルのパラメータ最適化を行い、データ同化におけるアンサンブル数およびサンプリング領域の影響について調べた。最適化された二方程式モデルのパラメータを用いた URANS 解析を別の遷音速タービン翼列流れに適用することにより最適結果の汎用性についても検討した。

非逐次型データ同化手法である Adjoint 法に基づいた EFD/CFD 同化解析手法を、遷音速圧縮機動翼列におけるハブ面からの漏れ流れ流量の同定に適用した。図4に示す同化解析手法のアルゴリズムに従って、動翼列の下流断面にける全圧分布の実験結果 (EFD データ) を Adjoint 法に基づき圧縮性 Navier-Stokes 方程式に同化させ、漏れ流れ流量を同定することにより、EFD で得られた実条件の影響を考慮した CFD 解析結果 (図5中の朱色シンボル) を得ることができた。

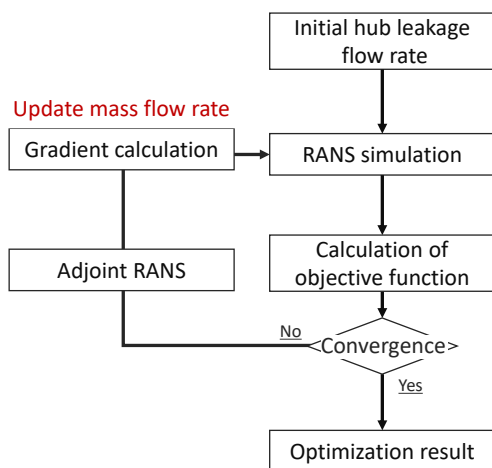


図4 Adjoint 法による EFD/CFD 同化解析手法

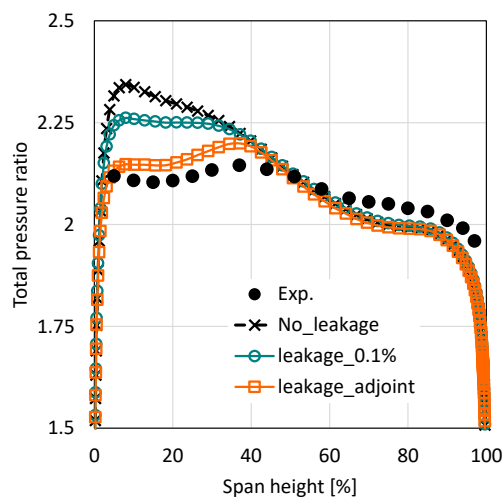


図5 Adjoint 法による EFD/CFD 同化解析手法の適用例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sasuga Ito, Masato Furukawa, Satoshi Gunjishima, Hiroki Usuki, Takafumi Ota, Yamada Kazutoyo	4. 巻 Paper No. GT2019-90791
2. 論文標題 Experimental Investigation of Surge Phenomena in a Transonic Centrifugal Compressor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the ASME Turbo Expo 2019	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/GT2019-90791	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 -

1. 著者名 S. Saito, K. Yamada, M. Furukawa, K. Watanabe, A. Matsuoka, N. Niwa	4. 巻 Paper No. GT2018-76480
2. 論文標題 Flow Structure and Unsteady Behavior of Hub-Corner Separation in a Stator Cascade of a Multi-Stage Transonic Axial Compressor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the ASME Turbo Expo 2018	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

1. 著者名 齋藤誠志朗, 古川雅人, 山田和豊, 松岡右典, 丹羽直之	4. 巻 第49巻, 第3号
2. 論文標題 遷音速軸流圧縮機動翼列における衝撃波を伴う乱流場のWall-Resolved LES解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ターボ機械	6. 最初と最後の頁 177-187
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 伊藤 流石, 古川 雅人, 山田 和豊, 真部 魁人
2. 発表標題 遷音速タービン翼列に対するアンサンブルカルマンフィルタの適用
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Yamada, S. Saito, M. Furukawa, A. Matsuoka, N. Niwa
2. 発表標題 Large Eddy Simulation of Stator Cascade Flow in a Transonic Axial Compressor
3. 学会等名 Asian Congress on Gas Turbine 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤誠志朗, 古川雅人, 山田和豊, 渡邊啓介, 松岡右典, 丹羽直之
2. 発表標題 遷音速多段軸流圧縮機の静翼列流れ場における損失生成メカニズム
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今関智博, 半田和也, 文吉周, 一志和樹, 森英男
2. 発表標題 感圧塗料を用いたターボ機械内壁面の圧力分布計測に及ぼす温度分布の影響検証
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤誠志朗, 古川雅人, 山田和豊, 松岡右典, 丹羽直之
2. 発表標題 遷音速多段軸流圧縮機における静翼列流れのLES解析
3. 学会等名 日本機械学会第96期流体工学部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森英男, 半田和也, 今関智博, 文吉周
2. 発表標題 感圧塗料を用いた内部流れ場の圧力分布計測における温度補正効果
3. 学会等名 日本機械学会第96期流体工学部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤誠志朗, 山田和豊, 古川雅人, 松岡右典, 丹羽直之
2. 発表標題 遷音速多段軸流圧縮機の静翼列における動静翼列干渉場のLES解析
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018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
研究 分担者	森 英男 (MORI Hideo) (70362275)	九州大学・工学研究院・准教授 (17102)	
研究 分担者	山田 和豊 (YAMADA Kazutoyo) (00344622)	岩手大学・理工学部・准教授 (11201)	

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
---------	---------