

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月23日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360085

研究課題名（和文） EFD/CFD融合解析による三次元内部流動診断技術の開発

研究課題名（英文） Development of Diagnostic Technique for Three-Dimensional Internal Flow Phenomena Using EFD/CFD Hybrid Analysis

研究代表者

古川 雅人（FURUKAWA MASATO）

九州大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30181449

研究成果の概要（和文）：

DES (Detached Eddy Simulation) 解析による CFD (Computational Fluid Dynamics) 結果と非定常壁面圧力計測による EFD (Experimental Fluid Dynamics) 結果とを用いる EFD/CFD 融合解析手法を構築することにより、三次元内部流動診断技術を開発した。この流動診断技術を駆使して、遷音速遠心圧縮機羽根車における旋回失速現象および翼先端漏れ渦の崩壊現象、軸流圧縮機動翼列における旋回失速の初生メカニズム、ならびに半開放形プロペラファンにおける非定常渦流れ現象を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

A diagnostic technique for three-dimensional internal flow phenomena has been developed by building a EFD/CFD hybrid analysis approach, in which CFD (Computational Fluid Dynamics) results obtained by DES (Detached Eddy Simulation) and EFD (Experimental Fluid Dynamics) results obtained by unsteady measurement of wall pressure have been combined. The present flow diagnostic technique has elucidated phenomena in the rotating stall and tip leakage vortex breakdown in transonic centrifugal compressors, flow mechanisms of the rotating stall inception in an axial flow compressor rotor, and unsteady vortical flow phenomena in a half-ducted propeller fan.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
2010年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2011年度	2,400,000	720,000	3,120,000
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：流体工学

キーワード：内部流動，実験流体力学，数値流体力学，融合解析

## 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、三次元内部流動を詳細に把握することによって、性能の改善や不安定現象（旋回失速など）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ー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、複雑な三次元内部流れ場を解析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、計算流体力学 (CFD) の適用が広く普及した。しかしながら、実用問題における複雑な流れ場では、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により、複雑な流動現象を解明することが必要である。

## 2. 研究の目的

上述の背景を踏まえて、本研究では、EFD 解析と CFD 解析を併用して、複雑な三次元内部流動現象を診断するための技術をまず構築することを目的とした。すなわち、計測が容易な領域でのみ流れ場を計測し、その EFD 解析結果から流動現象の大まかな様相を把握し、解明すべき問題点を抽出した上で、大規模な数値計算を実施して、計測では得られない複雑な内部流れの詳細を CFD 解析することにより、問題となる流動現象を解明する三次元内部流動診断技術を構築することを目的とした。

次に、本流動診断技術を翼列流れ（実用問題）に適用して、従来解明することが極めて困難であった失速点近傍での複雑な非定常三次元翼列流れ現象を診断することにより、本技術の妥当性を検証するとともに、対象の流動現象を解明することを目的とした。

さらに、CFD 解析との親和性に優れた EFD (計測) 技術として、感圧塗料 (PSP : Pressure Sensitive Paint) による壁面圧力計測を本流動診断技術に導入することを試みることも目的とした。

## 3. 研究の方法

まず、EFD (計測) 技術として、高応答圧力センサーによる壁面圧力計測による同時面非定常計測法を開発した。翼列の失速初生時に現れるような過渡的な流動現象まで捉えるためには、現象のスケールに対応した空間領域にわたる瞬時の流れ場を時系列で計測することが不可欠であることから、翼列の翼間 1 ピッチにわたるケーシング壁面圧力の同時面非定常計測法を開発した。具体的には、軸流動翼列のケーシング面上の矩形領域 (1 ピッチ領域) において、軸方向に 5 列、周方向に 6 列の千鳥状に配置した 30 個の高応答圧力センサーのすべてに個別にアンプを接続し、それらの出力を同時にサンプリングすることにより、壁面圧力の同時面非定常計測を行うシステムを構築した。さらに、得られた時系列の面データに対して、時空間内挿を施すことにより、空間分解能の高い圧力分布の時系列データを再構築した。

一方、CFD 解析手法としては、DES (Detached Eddy Simulation) 解析を用いた。翼列の失速予測に LES (Large Eddy Simulation) を適用する場合、現状の計算機資源では十分な計算格子点数をとることができず、実験で得られる失速点よりも大きな流量点から失速が発生する。この事は、乱流境界層に対する計算格子の空間分解能が足りず、LES により乱流の性状を正確に捉えることができない結果、乱流効果を過小評価して失速が早く発生していることを意味している。以上の観点から、本研究では、壁面近傍の境界層領域付近では RANS 計算を実施し、それ以外の領域では LES 計算を行う DES 解析を用いた。しかしながら、翼列のようなターボ機械において問題となる非定常流動現象では、はく離渦流れ構造が空間的に大きく変動することから、LES 領域と RANS 領域の決定にはこの渦流れ構造の非定常挙動を考慮する必要があることから、 $k-\omega$  の二方程式乱流モデルに基づいた DES 解析手法を採用した。この手法では、長さスケールとして  $k-\omega$  乱流モデルから算出される渦の乱れ長さスケールがとられて、流れ場の時間変化に応じて各計算セル毎に RANS 計算と LES 計算の選択が逐次なされる結果、大規模なはく離を伴う翼列の失速現象を高精度に予測可能である。

さらに、CFD 解析においては、特異点理論に基づく知的可視化技術を導入することによって、渦構造の可視化および限界流線のトポロジー解析を実施し、複雑な流れ場から流動現象を的確に抽出した。

#### 4. 研究成果

研究方法で述べた EFD/CFD 融合解析手法に基づく三次元内部流動診断技術を工学的な実用問題に適用することによって、その妥当性を調べるとともに、従来解明することが出来なかった非定常三次元流動現象を明らかにした。その成果をまとめると、以下のとおりである。

(1) シュラウドなしのプリッタ付き遷音速遠心圧縮機羽根車において、翼あたりの設計空力負荷が過大でない場合には、旋回失速の初生近傍で、フルブレードの翼端漏れ渦が隣接したスプリッタブレードの前縁と干渉し始める際に、スパイラル形の渦崩壊を起こすことがあること、この崩壊は一部の翼間のみで発生し、すべての翼間で同時に発生することはないこと、一方、旋回失速の発生時には、竜巻状のはく離渦を伴う旋回失速セルが形成されるが、失速セルのない健全な流れ場をもつ翼間ではフルブレードの翼端漏れ渦が崩壊しないことが明らかになった。

(2) シュラウドなしのプリッタ付き遷音速遠心圧縮機羽根車において、翼あたりの設計空力負荷が過大である場合には、上記(1)の流れ挙動が一変すること、すなわち、設計翼負荷が増大すると、漏れ渦が強くなると同時に翼列内の逆圧力勾配も増加することから、同じ大きさの翼端すき間であっても、低流量作動域で翼端漏れ渦のスパイラル形崩壊が全ピッチで発生し、その崩壊に伴う低エネルギー流体によるブロック効果は翼先端部の全周にわたって現れる結果、旋回失速の発生が抑制されて失速セルの形成が見られないことが明らかになった。

(3) 軸流圧縮機動翼列における旋回失速の初生メカニズムを解析した結果、翼先端部の小規模な前縁はく離が失速初生プロセスの発端を支配していること、この前縁はく離が竜巻状のはく離渦に成長し、隣接翼の圧力面側に移動して旋回失速の初生が始まること、竜巻状のはく離渦によるブロック効果が翼先端漏れ渦を翼前縁から上流側に吐き出すことが解明された。

(4) 半開放形プロペラファンの非定常渦流れ挙動を調べた結果、翼端渦自体に発現する非定常性は低いこと、翼端渦とケーシング面との相対運動に起因した非定常性が極めて高いこと、翼端渦とケーシング面との干渉から翼端渦とは逆巻きのはく離渦（縦渦）構造が形成され、このはく離渦が隣接翼の圧力面と干渉することがわかった。

(5) CFD 解析との親和性に優れた感圧塗料

(PSP) による壁面圧力計測を上記(4)の半開放形プロペラファンへ適用した結果、PSP 壁面圧力計測における高精度化を実現するためには、PSP と TSP (感温塗料) の重ね塗りによる温度補償が不可欠であることが明らかになった。

#### 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 9 件)

- (1) “Effects of Tip Leakage Vortex Breakdown on Unsteady Flow Fields at Near-Stall Condition in a Low-Speed Axial Flow Compressor Rotor with Large Tip Clearance”, Yamada, K., Kikuta, H., Furukawa M. and Gunjishima, S., Proceedings of International Gas Turbine Congress 2011 Osaka, Paper No. IGTC2011-56, (2011). (査読有)
- (2) “Unsteady and Three-Dimensional Flow Mechanism of Spike-Type Stall Inception in an Axial Flow Compressor Rotor”, Kikuta, H., Iwakiri, K., Furukawa M., Yamada, K., Gunjishima, S. and Okada, G., Proceedings of the ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, Paper No. AJK2011-22079, (2011). (査読有)
- (3) “Detached Eddy Simulation of Unsteady Flow Field and Prediction of Aerodynamic Sound in a Half-Ducted Propeller Fan”, Kusano, K., Jeong, J., Yamada, K. and Furukawa, M., Proceedings of the ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, Paper No. AJK2011-22048, (2011). (査読有)
- (4) “Development of Dual-Layer PSP/TSP System for Pressure and Temperature Measurements in Low-Speed Flow Field”, Moon, K., Mori, H., Ambe, Y. and Kawabata, H., Proceedings of the ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, Paper No. AJK2011-11020, (2011). (査読有)
- (5) “The Role of Tip Leakage Vortex Breakdown in Flow Fields and Aerodynamic Characteristics of Transonic Centrifugal Compressor Impellers”, Yamada, K., Furukawa, M., Fukushima, H., Ibaraki, S. and Tomita,

I., Proceedings of the ASME Turbo Expo 2011, Paper No. GT2011-46253 (2011). (査読有)

- (6) 「スプリッタ付遠心圧縮機インペラの非設計点における剥離渦流れ構造」, 山田和豊, 古川雅人, 福島久剛, 茨木誠一, ターボ機械, 第 39 巻, 第 6 号, pp. 332-339 (2011). (査読有)
- (7) “Comparative Study on Tip Clearance Flow Fields in Two Types of Transonic Centrifugal Compressor Impeller with Splitter Blades”, Yamada, K., Tamagawa, Y., Fukushima, H., Furukawa, M., Ibaraki, S. and Iwakiri, K., Proceedings of the ASME Turbo Expo 2010, Paper No. GT2010-23345 (2010). (査読有)
- (8) “Unsteady and Three-Dimensional Flow Phenomena in a Transonic Centrifugal Compressor Impeller at Rotating Stall”, Iwakiri, K., Furukawa, M., Ibaraki, S. and Tomita, I., Proceedings of the ASME Turbo Expo 2009, Paper No. GT2009-59516 (2009). (査読有)
- (9) “Explanation for Flow Features of Spike-Type Stall Inception in an Axial Compressor Rotor”, Yamada, K., Kikuta, H., Iwakiri, K., Furukawa, M., and Gunjishima, S., Transactions of the ASME, Journal of Turbomachinery, in print. (査読有)

[学会発表] (計 26 件)

- (1) 「DESによる軸流圧縮機動翼列の失速発現メカニズムの解析」, 喜久田啓明, 山田和豊, 郡司嶋智, 原靖典, 石飛悠希, 古川雅人, 第 25 回数値流体力学シンポジウム, 2011 年 12 月 19 日, 吹田市.
- (2) 「開放形プロペラファンにおける翼端渦の三次元流れ構造および非定常挙動」, 草野和也, 山田和豊, 古川雅人, 第 25 回数値流体力学シンポジウム, 2011 年 12 月 19 日, 吹田市.
- (3) 「遷音速遠心圧縮機羽根車の翼端漏れ渦崩壊が内部流れおよび空力性能に及ぼす影響」, 上野貴大, 福島久剛, 山田和豊, 古川雅人, 茨木誠一, 富田勲, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 2011 年 9 月 14 日, 東京都.
- (4) 「軸流圧縮機動翼列の失速点近傍における翼端もれ渦崩壊が非定常内部流れ場に及ぼす影響」, 喜久田啓明, 山田和豊, 郡司嶋智, 岡田豪基, 原靖典, 古川雅人, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 2011 年 9 月 14 日, 東京都.
- (5) 「感圧塗料を用いたプロペラファン翼

面上の圧力計測技術」, 案部雄一郎, 文吉周, 川幡宏亮, 森英男, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 2011 年 9 月 14 日, 東京都.

- (6) 「DESおよびFW-Hの式によるプロペラファンまわりの音圧レベルの予測」, 草野和也, 鄭宰昊, 古川雅人, 山田和豊, 第 24 回数値流体力学シンポジウム, 2010 年 12 月 21 日, 横浜市.
- (7) 「軸流圧縮機における旋回不安定擾乱の解析」, 喜久田啓明, 古川雅人, 郡司嶋智, 岡田豪基, 原靖典, 日本機械学会 第 88 期流体工学部門講演会, 2010 年 10 月 31 日, 米沢市.
- (8) 「シングルスプリッタ付き遷音速遠心圧縮機における旋回失速のDES」, 福島久剛, 玉川佑介, 山田和豊, 古川雅人, 茨木誠一, 日本機械学会第 88 期流体工学部門講演会, 2010 年 10 月 30 日, 米沢市.
- (9) 「ターボ機械における内部流動現象のEFD/CFDハイブリッド解析」, 山田和豊, 古川雅人, 喜久田啓明, 第 3 回EFD/CFD融合ワークショップ, 2010 年 1 月 25 日, 東京都.
- (10) 「軸流圧縮機における旋回失速初生の大規模DES解析」, 喜久田啓明, 岩切健一郎, 古川雅人, 第 23 回数値流体力学シンポジウム, 2009 年 12 月 16 日, 仙台市.
- (11) 「感圧塗料を用いた低速流れ場における計測技術の開発」, 吉本俊純, 森英男, 内田和徳, 田上博明, 日本機械学会第 87 期流体工学部門講演会, 2009 年 11 月 7 日, 名古屋市.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

古川 雅人 (FURUKAWA MASATO)  
九州大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号：30181449

### (2) 研究分担者

森 英男 (MORI HIDEO)  
九州大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：70362275

山田 和豊 (YAMADA KAZUTOYO)  
九州大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号：00344622

### (3) 連携研究者

なし