

〔特集〕 多彩なスケールの回転する流れ

ガスタービン回転キャビティ流れ

* 株式会社 IHI 技術開発本部 基盤技術研究所 高 和 潤 弥[†]
 IHI INC., Business Development Division 松 野 伸 介
 株式会社 IHI 航空宇宙事業本部 技術開発センター 久 枝 孝 太 郎

Unsteady Flow of Gas Turbine Rotating Cavity

Junya KOUWA, Reserch Laboratory, IHI Corporation

Shinsuke MATSUNO, Business Development Division, IHI INC.

Koutarou HISAEDA, Aero-engine & Space Operation, IHI Corporation

1 はじめに

航空産業は LCC(Low Cost Carrier) の発展や成長もあり、年々海外旅行者数が増え続けており、2014 年は海外観光者数が全世界で 11 億 3,300 万人と前年に対して 4.3%増加している。それに伴い、旅客機の需要も増えており、今後も増加する見込みにあることから、航空機の推進器である航空用エンジン需要も増えることが予想される。その航空用ガスタービンエンジンはメーカー間の競争の激化や、ICAO^{注1)} の基準を厳格化のため、低燃費/軽量化、低排ガス、低騒音、高信頼性がエンジンメーカーに求められている。そのため、主流部の翼列を始めとする機械要素みならず、シール等の二次空気やディスク周りの流れ・伝熱に関する設計高度化とシステムとしての性能向上が求められていることから、ディスク周りの流体・伝熱現象に着目する必要がある。

産業機械に見られる回転する流れとしては、航空機の翼端渦や曲り管内流の二次流れ、サイクロンやハードディスクドライブなどが挙げられるが、ガスタービンエンジンの圧縮機やタービンにも回転する流れが存在する。詳細は次節に譲るが、当該部に存在するディスクは構造上高い信頼性が求められることから、設計上高精度な応力解析・強度評価が要求され、そのため構造部品の

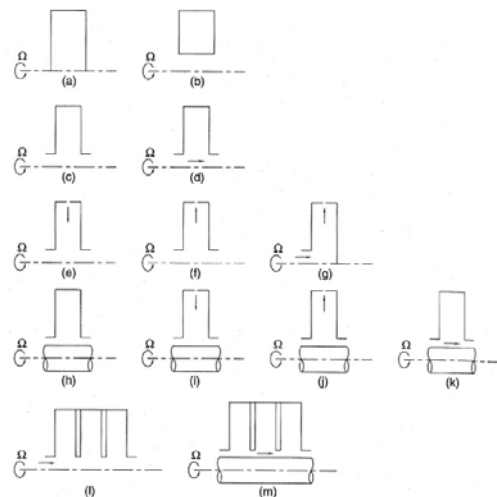


図 1 さまざまな回転キャビティタイプ¹⁾

温度分布を正確に評価する必要がある。

本稿では、ガスタービンに見られる回転流れとして、回転キャビティについて説明したのち、著者が実施した回転キャビティリグを用いた試験および LES による解析による検証結果について紹介する。

2 ガスタービン回転キャビティ

回転キャビティとは、キャビティ空間を構成する一部あるいは全部の壁面(ディスクやシュラウド)が回転軸を中心に回転しているキャビティを指す。図 1 にさまざまな回転キャビティタイプを示す¹⁾。中には回転軸に平行な軸流空気(axial throughflow, 例えば図 1 の d や k)や垂直の radial throughflow が存在する場合(e や i など)や、

* 〒 235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町 1

[†]E-mail: junya_kouwa@ihi.co.jp

注1) 国際民間航空機関(International Civil Aviation Organization)。国際民間航空が安全にかつ整然と発達するように、また、国際航空運送業務が機会均等主義に基づいて健全かつ経済的に運営されるように各国の協力を図ることを目的とする国連専門機関。

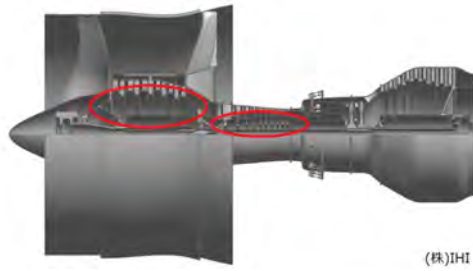


図2 ジェットエンジン断面図

軸にシャフトが存在するタイプもある。各壁面の温度やキャビティタイプにより回転キャビティ内部の流動が変化することが知られている。ガスタービン内での回転キャビティ空間としては、図2に一般的なジェットエンジンの断面図を示すが、丸印にて図示しているファンも含めた圧縮機の静翼ディスク、動翼ディスクおよびシュラウドやプラットフォームに囲まれた空間が回転キャビティとなっている。これらのキャビティ空間には、静翼と動翼の隙間やシールからガスが流入出し、運転条件によってガス温度や壁面温度が各所で異なる。そのため、回転キャビティ内部の流れは、静翼・動翼ディスクが混在することによって作り出される流れや温度差によって生じる自然対流の影響などにより複雑化することから、一つの研究分野として主に海外を中心に研究が進められている。

例えば、Longらは1990年代から精力的に研究しており、キャビティ空間が一つの回転リグ装置を用いて浮力パラメータである $\beta\Delta T$ やシュラウドの温度などのパラメータを振り、壁面の熱流束を計測して影響を調査した例や、複数キャビティに拡張したリグ装置によりLDAを用いた流れ計測や伝熱計測から多角的に現象理解を行った例が報告されている²⁻⁴⁾。また、数値解析に関する先行研究として、Bohnらが自身により設計したリグ装置で実施した試験の再現解析を行い、流れの構造を捉えた事例がある⁵⁾。また、KilfoilらはLongらが用いた多段リグ装置と実機高圧圧縮機を対象にEnhanced Mixing ModelをCFDに組み込みRANSによるCFD解析を行い、試験と比較検証を行っている⁶⁾。

回転キャビティにおけるガスの特徴無次元数は、空気の密度および粘性係数、回転数、平均軸流速度、キャビティおよび軸流空気孔径をそれぞれ $\rho, \mu, \Omega, W, r, a$ とし以下通りである。

- 軸流・回転レイノズル数 Re_z, Re_ϕ

$$Re_\phi = \frac{\rho\Omega r^2}{\mu} \quad (1)$$

$$Re_z = \frac{2\rho Wa}{\mu} \quad (2)$$

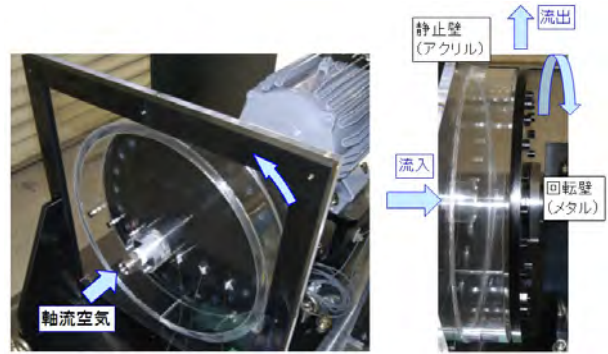


図3 キャビティリグ

- ロスビー数 Ro : 慣性力とコリオリ力の比。大きい方が軸流による慣性力が支配的になる

$$Ro = \frac{\text{Inertial Force}}{\text{Coriolis Force}} = \frac{W}{\Omega a} = \frac{\frac{1}{2}r^2 Re_z}{a^2 Re_\phi} \quad (3)$$

著者はこれまで実施されてこなかったPIVによる回転キャビティ内部の流動可視化を行い、ガス流量条件を変化させることでその流れ場への影響を調査し、またLESによる数値解析によってその流れ場の特徴が捉えられるか調査した。本試験を解説することで、回転キャビティ内部の流動現象を紹介する。

3 回転キャビティリグ試験

3.1 リグ装置

本試験のため、回転キャビティ内部を模したリグ装置を設計した。本稿で紹介するのはロータとステータが混在するリグ供試体の試験である。図3に使用した供試体を示す。光学計測を行うため、ステータ壁は透明の亚克力製としており、ロータは金属製としている。ステータ側の中心軸には $\phi 10$ の孔が設けられており、ガスが流入し、ステータとロータの間には5mmのスリットが設けられており、ガスが流入する。キャビティ空間の径は $\phi 300$ 、幅は52mmである。スリット下流は大気開放されている。

3.2 計測方法

キャビティ内部の非定常流れ場を把握するため、時系列PIVを用いて流れ計測を行った。カメラ1台で計測する平面内2成分計測とカメラ2台で計測する平面3成分計測をしている。最大1,600Hzの周波数で計測している。計測領域は、図4に示す通りであり、 $r-\theta$ 面と $r-z$ 面を計測した。図でPIVが3D-2C計測であり、S-PIVが3D-3C計測である。カメラの視野およびレーザの亚克力による反射光の影響によりキャビティ空間の一部の領域が欠損している。試験条件は図5のプ

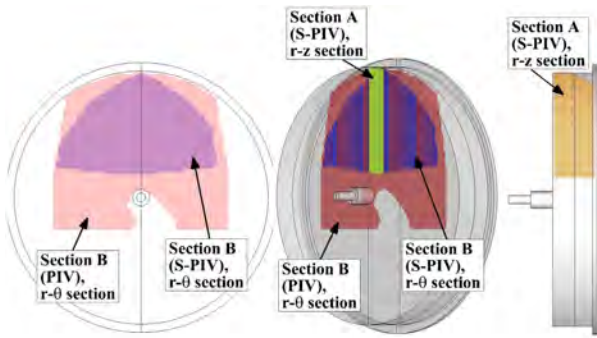


図4 PIVによる計測領域

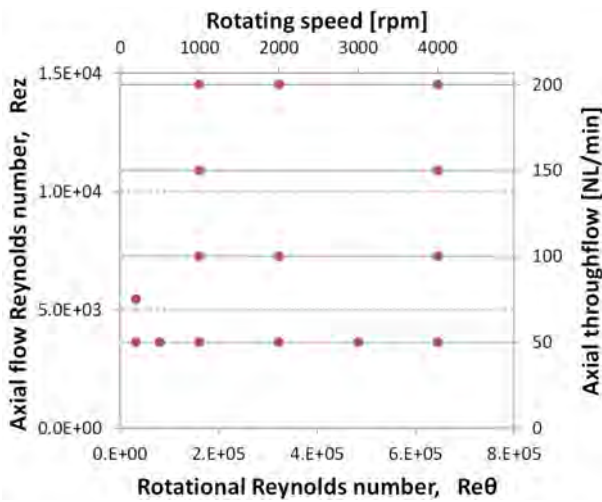


図5 試験条件

ロットの条件であり、軸流空気量およびロータ回転数を変えている。

3.3 結果

本供試体での流れ場として、仮にロータ壁が静止している場合を想定すると、ステータ側のφ10の孔より流入した空気がロータ壁面に衝突し、外径側に拡散するというものである。図6に回転数0rpm、軸流空気量50NL/minでのPIV計測結果を示す。左図は速度絶対値であるが、ロータ壁に衝突したガスが外径側まで流れ、シュラウド壁面付近をステータ側に向かって流れて大きな循環を形成していることが分かる。また、右図は各成分の速度変動値の絶対値であるが、この図からほとんど速度変動値がなく、非定常性は見られない。それに対して、回転数や軸流空気量を変化させた時の流れ場を見つめる。高速度カメラで撮影されたいくつかの条件での可視化画像を図7に示す。ここで、得られた可視化画像から共通の条件を分類した。その結果、表1に示すようなRo数の範囲により分類化することができ、本稿では高Ro、中Ro、低Ro条件に分けた。式3に示す通り、Ro数は慣性力とコリオリ力との比であり、回転キャビティ

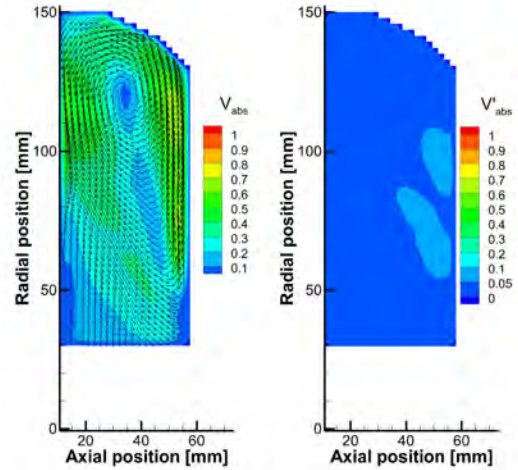


図6 回転数0rpm、軸流空気量50NL/minのPIV結果(左:速度絶対値、右:速度変動絶対値)

の分野では右項のように回転と並進流れの性状の比として式を変形して用いられる。そのため、Ro数が小さくなるにつれて軸流の影響が相対的に弱まることから、回転流れの不安定性が高まったと考えられる。PIV計測結果から、これらの流れ構造を詳細に把握する。図8に低Ro数条件(回転数4,000rpm、軸流空気量40NL/min)の時系列結果を示す。左上を始めとし、腕が回転する1周期をTとした時の1/4T毎経過後のベクトル図を示している。この図でキャビティロータの回転方向は反時計向きである。黒く見えているものがPIV用のトレーサー粒子(直径約1μmのセバシン酸ジエチルヘキシル)である。可視化断面はPIVの断面Bである。また、ベクトルは速度変動ベクトルである。結果、密なトレーサー粒子が内径側から外径側に伸びている"腕"が取り囲むように渦が生じていることが分かる。また、その"腕"は時刻と共に回転していることが分かり、回転する速度はロータの回転数よりも遅い。さらに図9に異なるRo数条件での同様の図を示す。Tは各条件での腕の回転一周期である。上段はRo=1.27、下段はRo=2.53の結果である。Ro数が大きくなるにつれ、"腕"の数が2本から3本、4本と増加していることが確認できた。Ro数は軸流Reと回転Reの比であることから、Roが増加するにつれて相対的に軸流空気の流れが強くなっていることになる。そのため、渦の安定化する本数が変化したと考えられるが、本メカニズムについては調査中である。なお、これらの結果は回転数を4,000rpmで固定して軸流空気量を振った結果であるが、同じRo数であれば、異なる回転数と軸流空気量を変化させても腕の本数は同じであることが分かっている。

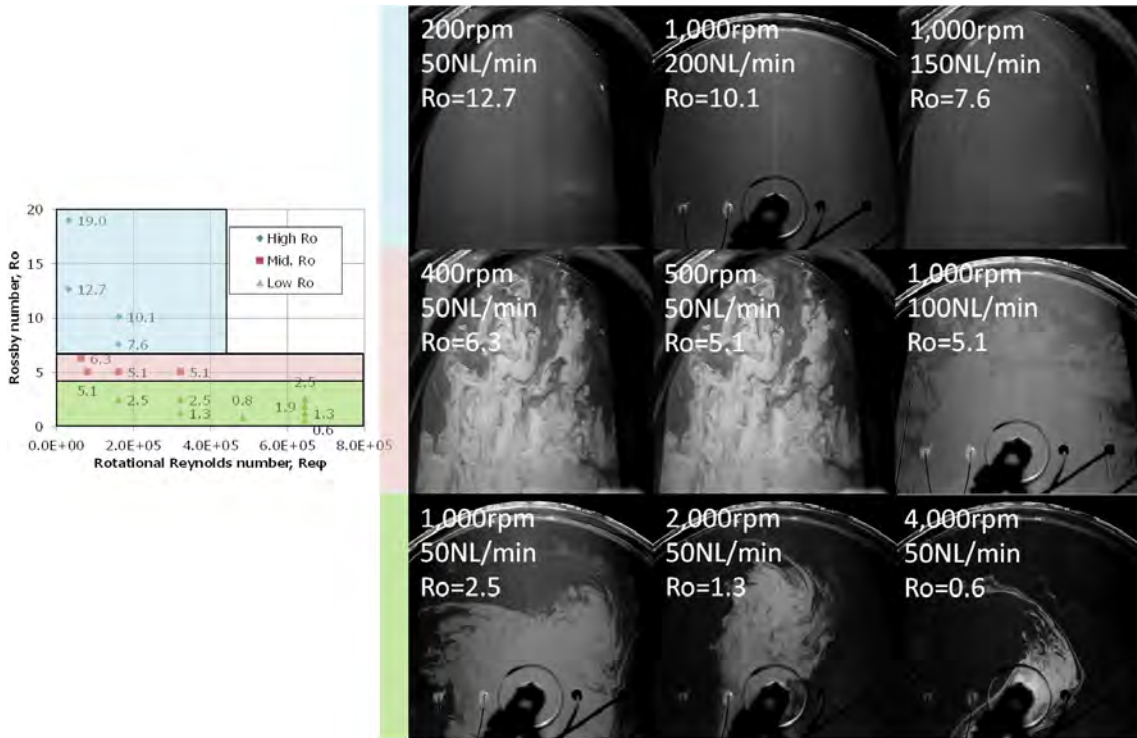


図7 トレーサー粒子の濃淡から分かる流れ場の違い

表1 流れ場の分類化

呼称	Ro 範囲	特徴
高 Ro 条件	$7 \lesssim Ro$	トレーサー粒子の濃淡は見られない。一様に拡散している。流れが定常的。
中 Ro 条件	$5 \lesssim Ro < 7$	トレーサー粒子の濃淡が見られるが、規則性はなくランダムな様相。流れの非定常性が生じ始めている遷移状態。
低 Ro 条件	$Ro \lesssim 5$	トレーサー粒子の濃淡がはっきりと見られ、規則性がある。流れは構造的で非定常的。

4 回転キャビティリグ試験解析

第3節で紹介した回転キャビティリグ試験の解析を実施し、複雑な流れ場の特徴を捉えられるか調査した。計算手法を表2に示す。形状は第3.1節で示したリグ供試体と同じである。境界条件はステータ壁面がすべりなし壁であり、ロータ壁面は移動壁として与え、回転数にモーターの回転数を与えている。φ10のステータ側流入孔を入口教会に設定し、軸流空気量を質量流入条件とし

て与え、出口は圧力出口条件として大気開放条件に設定している。壁面の伝熱条件は断熱条件である。計算格子は、壁面近傍は $y+ \sim 1$ とし、 $\Delta x+$ および $\Delta z+$ はそれぞれ最大で $\Delta x+ = 120$ 、 $\Delta z+ = 28$ である。

時間平均値を元に数値解析の時間平均場の妥当性を確認した。図10に軸方向中心断面での時間平均旋回速度分布を示す。この図から、概ねLESは計測と同等の結果であることがわかり、CFDは場の時間平均的な現象を模擬できていることが分かった。そこで、試験で確認された非定常現象を模擬できているか調査した。図11にある時刻から4msec.と8msec.経過した時刻の速度変動コンター図分布を示す。まず、速度分布およびベクトルを見ると、PIV計測結果と同様に面内に渦が出来ていることが分かる。その渦は時刻と共に回転軸に沿って回転していることが分かる。その周期はキャビティ回転の周期と異なることが分かっている。同様のことは図12からもわかる。この図からは高速度カメラ撮影時の画像で見られた"腕"と同様の現象が確認できる。比較的密度の低い領域と腕の形状が良い一致を示していることが分かる。なお、RANS解析では、3次元解析を行っても同様の流れ場を再現することはできなかったことから、これらの複雑な流れ場はφ10の孔から噴出したジェットの流れがキャビティ空間で変動することによって乱れを生んでいると示唆される。

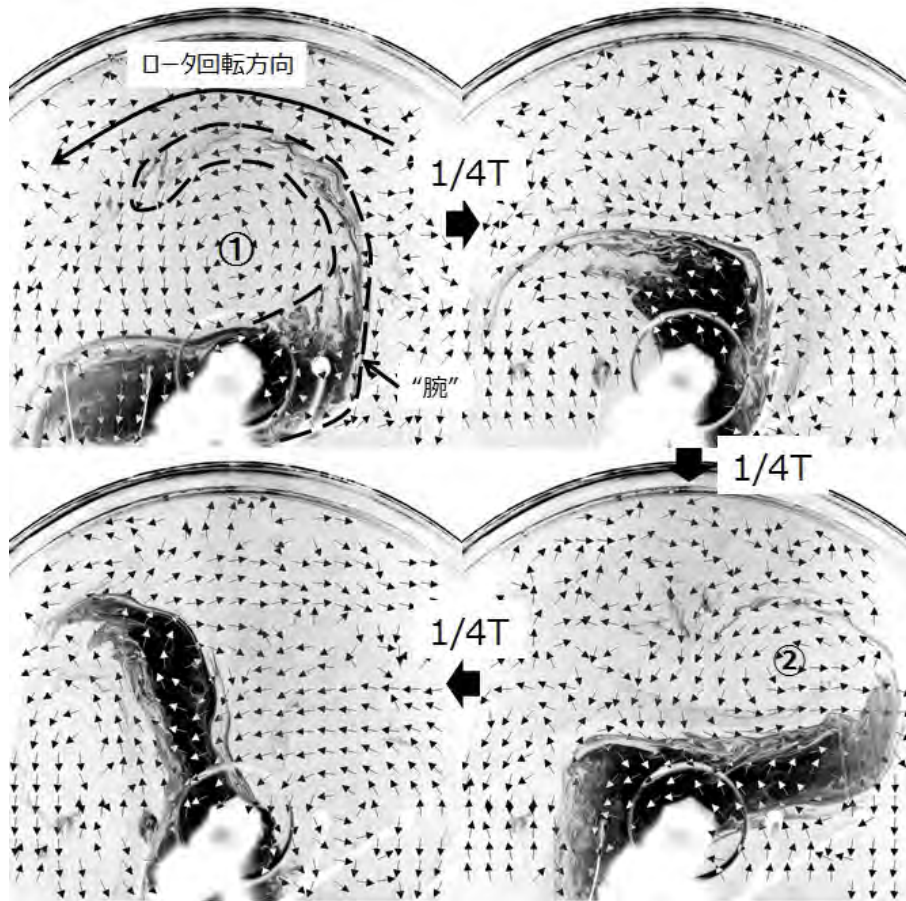


図8 回転数 4,000rpm、軸流空気量 50NL/min の PIV 結果 (T は本条件における腕回転の一周期)

表2 解析方法

計算方法	3次元, 圧縮性, 粘性, 全面乱流, 非定常
解析ソルバ	ANSYS Fluent ver.13.0
乱流モデル	LES
SGS モデル	Smagorinsky-Lilly モデル
時間刻み Δt	0.5[msec.]

5 結言

本稿では、回転する流れの一つとして回転キャビティの概要について述べ、著者が実施した回転キャビティリグ試験で得られた結果から、その流れ場について紹介した。 Ro 数によってキャビティ内部の流れ場は大別でき、さらに低 Ro 数条件に対しては、 Ro 数に依存して非定常性が変化する特徴的な流れ場であることが分かった。なお、この検証された数値解析方法によりキャビティ内部のガスの移動量を抽出し、部品の熱評価をすることで、数値解析を用いない手法よりも伝熱量の予測精度が60%向上することが分かり、設計技術力が向上している⁷⁾。また、本稿で紹介したリグ試験の詳細については、

文献^{8,9)}を参考されたい。

謝辞

本稿で紹介した回転キャビティリグ試験は、平成24年度経済産業省補助事業「環境適応型小型航空機用エンジン研究開発」の一環として実施されたものである。

引用文献

- 1) Child, Peter R. N.: *Rotating Flow*, ELSEVIER
- 2) Long, C. A.: Disk heat transfer in a rotating cavity with an axial throughflow of cooling air, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **15** (1994) 307-316
- 3) Long, C. A., Miche, N. D. D. & Childs, P. R. N.: Flow measurements inside a heated multiple rotating cavity with axial throughflow, *Int. J. of Heat and Fluid Flow* **28** (2007) 1391-1404
- 4) Long, C. A. & Childs, P. R. N.: Shroud heat transfer measurements inside a heated multiple rotating cavity with axial throughflow, *Int. J. of Heat and Fluid Flow* **28** (2007) 1405-1417
- 5) Bohn, D., Ren, J., Tuemmers, C., Investigation of the Unstable Flow Structure in a Rotating Cavity, *Proc. of*

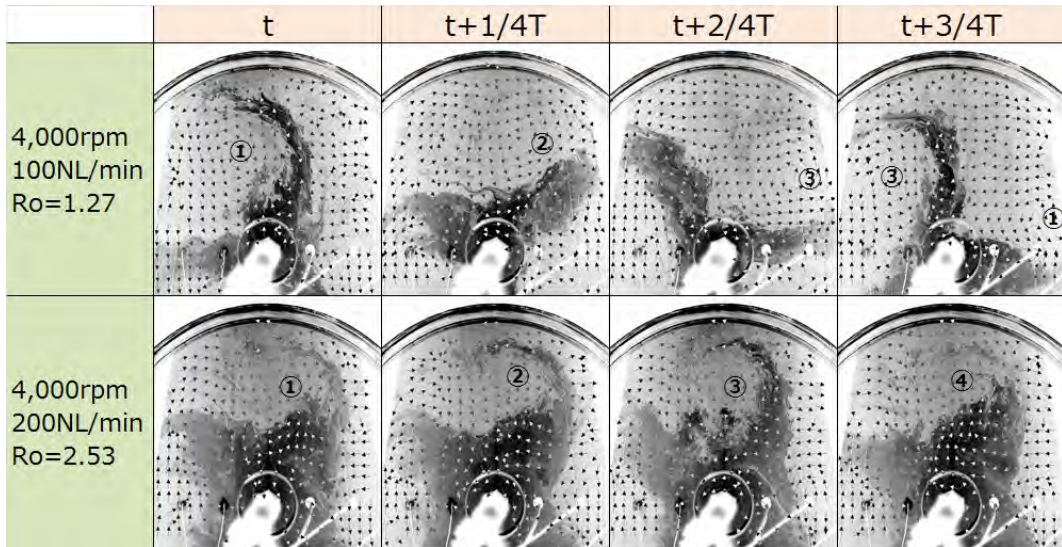


図 9 低 Ro 数条件における Ro 数の違いによる流れ場非定常性の変化 (T は各条件における腕回転の 1 周期)

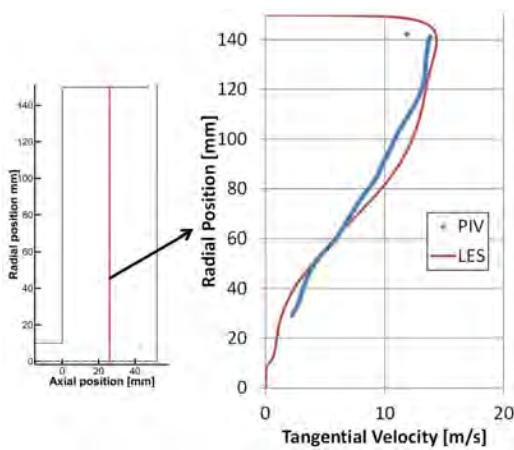


図 10 軸方向中心位置での径方向速度分布図

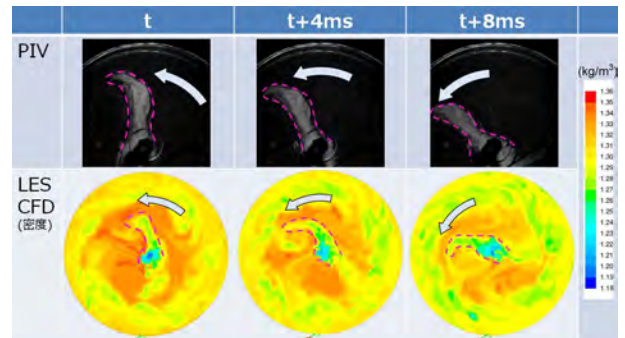


図 12 LES 解析結果 (密度)

GT2006, ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea and Air, May 8-11, 2006

- 6) Kilfoil, A. S. R. & Chew, J. W., Modelling of Buoyancy-Affected Flow in Co-Rotating Disc Cavities, *Proc. of GT2009*, ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air, June 8-12, 2009
- 7) Sasaki, Y.: Prediction of Heat Transfer with Cavity Flow Modeling for Engine Design, *Proc. of ASME Turbo Expo. 2014: Turbin Technical Conference and Exposition*, GT2014, June 16-20, Dusseldorf, Germany
- 8) 高和潤弥: 時系列 PIV による回転キャビティ内部の非定常流れ計測, 第 41 回日本ガスタービン学会定期講演会 (那覇), 2013
- 9) Kouwa, J.: Time-resolved Stereo PIV Measurements of Flow Fields Inside a Rotating Cavity, *Proc. of ASME Turbo Expo. 2014: Turbin Technical Conference and Exposition*, GT2014, June 16-20, Dusseldorf, Germany

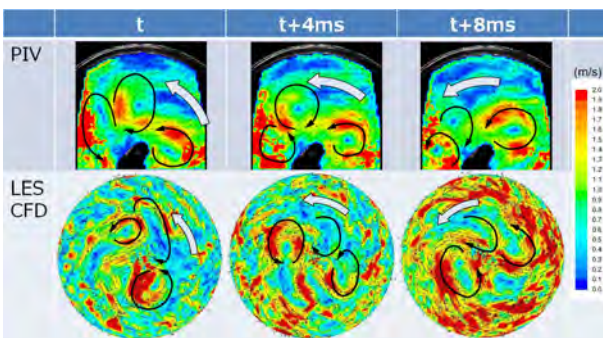


図 11 LES 解析結果 (速度変動値)