

令和元年6月27日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06050

研究課題名(和文)ドライガスシールにおける気体流れの可視化と溝形状による特性の比較

研究課題名(英文) Gas flow visualization in dry gas seal and comparison of characteristics by groove shape

研究代表者

落合 成行(Ochiai, Masayuki)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：40407995

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ドライガスシールの可視化によるメカニズムの解明と溝形状の最適化による特性向上を目的に研究を行った。新たに確立した可視化実験の結果と漏れ量測定結果から、メカニズムを考察した。一方で、新たに自己組織化アルゴリズムとして知られるセルオートマトン法の適用により、シール溝形状の最適設計を行った。最後にこれら一連の研究から得られた知見を活かして新たな溝形状を提案し、実験的に検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題は、ターボ機械に使用されるドライガスシールの気体膜流れの可視化と溝形状の最適化に挑戦するものである。本研究の学術的な意義としては、難易度の高いドライガスシールの気体膜流れの可視化(加振条件下も含めて)に取り組んでいる点、世の中に提案されている多種の溝形状に対して、最適な形状を提示する点にあると考える。ドライガスシールを利用するターボ機械に関わる産業は多く、社会的意義は高いと考える。

研究成果の概要(英文)：In this research, we researched for the purpose of elucidation of mechanism by visualization of dry gas seal and improvement of characteristics by optimization of groove shape. The mechanism was considered from the result of the newly established visualization experiment and the result of leakage measurement. On the other hand, the optimum design of the seal groove shape was performed by applying the cellular automaton method which is newly known as a self-organization algorithm. Finally, new groove shapes are proposed and verified experimentally by making use of the knowledge obtained from these series of studies.

研究分野：トライボロジー、設計工学

キーワード：トライボロジー ドライガスシール 可視化 最適設計 振動 PIV 自己組織化アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

ジェットエンジン、コンプレッサー、蒸気タービン、ガスタービンなどのターボ機械は、社会インフラを支える上で必要不可欠である。新興国の社会インフラの整備が急ピッチで進められている現在、ターボ機械の需要は増加しており、世界的なエネルギー事情が今後益々厳しさを増すことは明白である。このような背景から、ターボ機械の効率を向上させ CO2 排出量を削減することは極めて重要といえる。また上述のようなターボ機械を製造・販売するメーカーを数多く抱える日本にとっては、同機器の効率向上は我が国の産業競争力の強化に大きく貢献するものと考えられる。本研究課題は、このような背景の下、ターボ機械に多用される最重要機械要素の一つであるドライガスシールの特性向上を目的に企画した。

図1に、ドライガスシールの概略を示す。ターボ機械では、タービンなどにより加圧された気体が回転軸とハウジング間のわずかなすき間から漏れ出し、機器の効率を著しく低下させる問題が発生する。したがって、このような気体漏れを防止する必要がある。ドライガスシールでは、回転軸に図のような回転環を設け、その表面に溝を施すことにより動圧を発生させて極めて薄い気体潤滑膜を形成し、回転環を非接触支持する。ドライガスシールは、このように気体潤滑膜狭いすきまを保持できることから、気体漏れの防止能力が高く、シール要素の中でも特に優れた特性を有している。

気体潤滑膜の特性は、回転環の表面に施されるシール溝のパターンに大きく依存することが知られている。現在、ドライガスシールは数多くのメーカーにより製造されているがその溝形状は実に多用で、実際にどの溝形状がどの程度優れているのか比較検討した事例は少ない。このような比較はメーカーおよびユーザーにとって極めて関心が高い事項と思われるが、学術的に検討がなされていないのが現状であった。

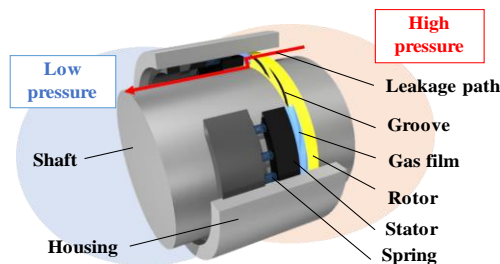


図1 ドライガスシール

2. 研究の目的

本研究課題では、このような問題を解決するために、シール溝における気体流れを可視化により比較検討する。申請者はこれまでに、スパイラル溝と最適化によって見出した漏れ量を最小化する独自の溝形状の二つのシールについて可視化による比較を試みた。同研究では、シール周囲の流れの可視化には成功したものの溝の施された面、すなわち気体膜内の流れの可視化までは残念ながら至らなかった。その理由は、気体膜が極めて薄く、また高速回転で流れが極めて速いことから難易度が高いためと考えられる。本研究では、更に難易度の高い加振条件下における気体膜内の可視化にも取り組み、気体漏れ量との関係を明らかにする。一方で、シール面に形成する溝形状の最適化によるシール特性の向上も目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、ドライガスシールの可視化によるメカニズムの解明と溝形状の最適化による特性向上を行った。具体的には、漏れ量測定と可視化を実施する測定手法を確立し実験の実施により両者の関連について考察を行った。シールが振動条件下にある状況における可視化についても取り組んだ。

一方で、自己組織化アルゴリズムとして知られるセルオートマトン法を新たに適用し、シール溝形状の最適設計を行った。最後にこれら一連の研究から得られた知見を活かして新たな溝形状を提案し、実験的に検証した。

以下に、可視化実験装置及び実験方法と、上記最適化の方法について記す。

(1) 実験装置および実験方法

図2にシール面を流れる空気の可視化実験装置図を示す。同図は、アクリルケース、ロータ、

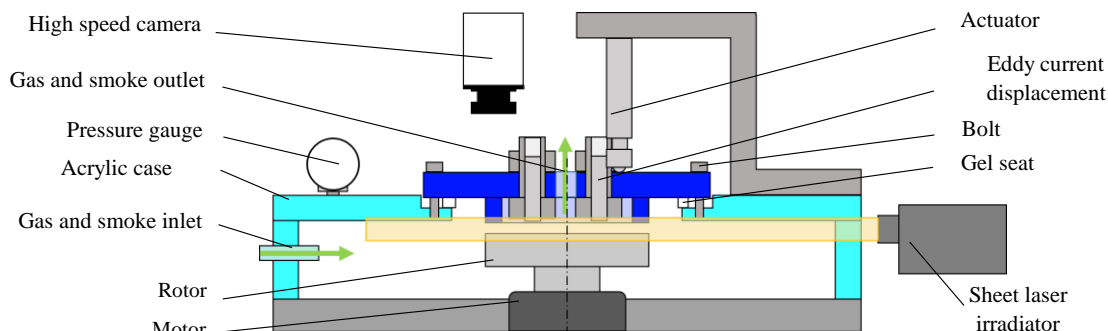


図2 可視化試験装置

アクリル製試験シールによって構成されている。ロータ下部は空気の漏れ量測定実験と同様の装置を使用しており、ロータ上部をアクリル製の実験装置に変更することで可視化を可能としている。実験では、トレーサ粒子を用いて可視化を行った。試験シールとロータの間に形成されるシールすきまは調整ネジとピエゾアクチュエータの押し付けにより調整される。試験シール中央には空気流出穴が設けられており、この穴と流量計をホースで繋ぐことで漏れ量の計測が可能となっている。ピエゾアクチュエータでは試験シールの加振を行えるようになっている。加振中のシールすきまは、試験シール3つの渦電流式変位計により計測した。

撮影結果の流速を評価するためにPIV解析により流速とその変化を求めた。その際、粒子の流れを平均化処理する必要がある。定常運転状態であれば平均化を行うことが容易であるが、本研究では加振条件下であるため、同期処理を行った。すなわち、振動の上下折り返し点における画像をピックアップし、画像処理を行った。

(2) 自己組織化アルゴリズムを用いたシール面溝形状の最適化

シール表面の溝形状により、ドライガスシールの特性は大幅に変わることが知られており、形状として、連続的な溝であるスパイラル溝から不連続であるディンプルまでこれまでに様々な形状が提案されている。これらを包括的に最適化することは極めて難しい問題であるが、研究代表者は、これをなし得る一つの手法として、自己組織化アルゴリズムとして知られるセルオートマトンによる溝パターン（テクスチャ）の最適化を試みた。

① ドライガスシールの性能解析

ドライガスシールは、テクスチャが施された回転環と、固定環との間に動圧を生じさせて気体膜を形成することで、高圧気体をシールする機械要素である。本研究では、気体膜厚さ h_r はあらかじめ任意の値を与えることとして計算を行った。ドライガスシールの各種特性を解析するにあたり、テクスチャが離散的に生じる本モデルに対しても容易に解析が行える点から、ダイバージェンスフォーミュレーション法(以下DF)法を用いた。軸の回転及びスキズ運動によってコントロールボリューム内に流入する気体の質量流量のつり合いから、レイノルズ相当式を求め、気体潤滑膜圧力の静的圧力成分および動的圧力成分を算出した。それらの圧力成分を用いて弾性係数 k と減衰係数 c 、および漏れ量 q を次式に基づいて算出する。また、外乱への抵抗力であるシール動剛性 K が算出される。

② CA法のルール

CA法によるテクスチャの作成手順を述べる。乱数を用いて初期のテクスチャ分布を作成し、注目セル自身と周囲の状態を変数として与えられたルールを参照し、自身の状態を更新する。この操作を全てのセルで行い同時に更新する。これを任意の回数行い、テクスチャ分布として使用する。

上記より、CA法においては注目セルに対する近傍を決定し、ルールを与える必要がある。代表的なノイマン近傍(Neumann neighborhood)とムーア近傍(Moore neighborhood)がある。図3にノイマン近傍による状態更新の例を示す。黒色のセルはテクスチャを持つセルを、白色のセルはテクスチャを持たないセルを表し、中心のセルが注目セルである。ノイマン近傍では、自身と左右上下の4方向を含む5つセルの状態を、ムーア近傍では、自身と左右上下と斜めを含む9つのセルの状態を変数とする。注目セルのテクスチャの有無は、関連セルのテクスチャの有無のすべての組み合わせに対応する。したがって組み合わせ数は、ノイマン近傍では32(2⁵)通り、ムーア近傍では512(2⁹)通りとなる。しかし、計算領域の境界となる要素については同様のルールを適用できないため、内・外半径部の境界セルには、計算領域の外に位置するセルを除いた境界近傍をそれぞれ与えた。なお、円周方向には周期境界条件を適用した。

前述した近傍を用いた状態の組み合わせに対応するルールをそれぞれSingle Neumann(以下S-N)、Single Moore(以下S-M)ルールと称す。また、より自由度を持たせるために、解析領域を半径方向、円周方向それぞれ2分割した4領域で異なるルールを適用する場合についても検討した。それぞれQuadruple Neumann(以下Q-N)、Quadruple Moore(以下Q-M)ルールと称す。これらのルールを適用し最適化した。

③ 最適化法

本最適化では、最適となるCA法のルールをGA法により進化的に獲得する手法(ECA法)を適用した。よって、ルール(組合せを数値化したもの)が設計変数に相当する。目的関数は漏れ量 q の最小化およびシール動剛性 K の最大化とし、制約条件は浮上に必要不可欠なシール開放力とした。

最適化の手順は、始めに計算諸元を入力し、ルール群の試行値を一様乱数により作成する。

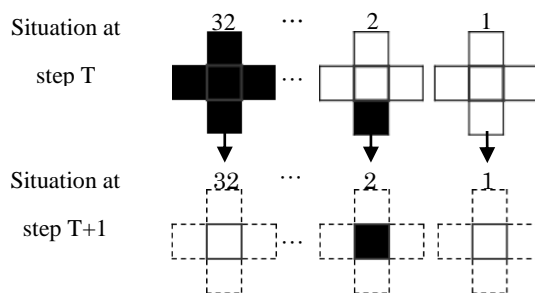


図3 セルオートマトンの代表例

次に、ルールに従ったテクスチャ分布を作成し、目的関数の値を算出する。1つのルールにおいてもテクスチャ分布のばらつきが発生するためこれを踏まえ、5回の平均値を目的関数として使用した。その後、各ルールから得られた目的関数を基にGA法により次世代のルール群の作成を行う。終了条件は多目的最適化であるため、指定した世代数に達したら終了とした。

4. 研究成果

前章で述べた方法に基づいて得られた本研究の成果のうち、代表的な3つについて以下に記す。

(1) 周期的外力を受けるドライガスシールにおける潤滑膜内流れの可視化

ドライガスシールは、高速回転機械に利用されることから、振動条件に曝されることが通常である。したがって、シールの弾性係数や減衰係数、振動波形の理論と実験などについての研究も多くなされてきた。しかしながら、振動と漏れ量の関係やその際のシール面内流れについては、明らかにされていない。そこで、加振条件下の流れの可視化について取り組んだ。

本研究では、1~3Hzの振動を与えた際の漏れ量の測定を行った。その結果、3Hzの振動を与えた際に漏れ量の増加が確認され、振動数の増加が漏れ量の増加に影響する可能性が示された。よって漏れ量に差異の現れた1Hzと3Hzの場合に注目して可視化実験を行った。

図4に試験シールを1Hzおよび3Hzで振動させ、シールすきまが最大、最小となる結果からお互いの流速をそれぞれ減算し、速度の変化を求めた結果をそれぞれ示す。同図中(a-1)、(b-1)が上昇時、(a-2)、(b-2)下降時である。結果より、振動数とシールすきまの変位方向の違うすべての結果で内周部と外周部の間の領域で速度境界が確認される。また、同図中に確認した流れの方向の概略を示す。結果よりシールすきまにおいて、図中に示す赤線を境界としたスクイズ流れが見られ、振動数の増加に伴い外周側に移動する様子が確認される。

漏れ量測定結果と境界の移動よりドライガスシールの漏れ量に対し、スクイズ効果の発生はすきま外との気体の流入・流出を促しシール性能を低下させるのではないかと考えられる。なお、実験した加振周波数は1Hzから3Hzと低周波数であるが、可視化のためにシールすきまも大きく設定していることから、潤滑膜の動特性解析の際に良く用いられるスクイズ数より換算すると、同数波数は数百Hzに相当する。このようなことから、今回得られた知見は有用と考える。

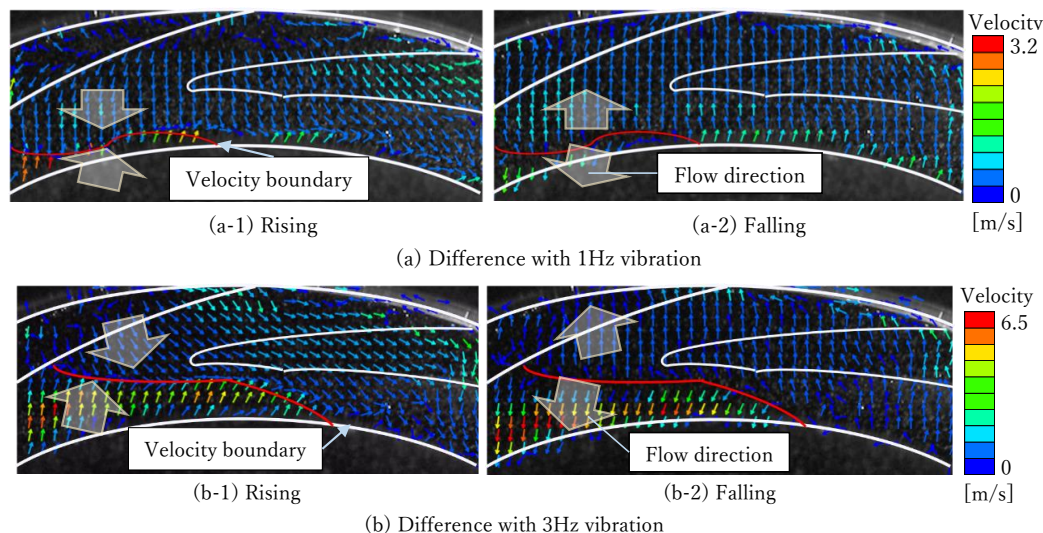


図4 加振条件下の可視化結果

(2) 自己組織化アルゴリズムを利用したドライガスシール面における溝パターンの可視化

本最適化における目的関数である漏れ量と動剛性はトレードオフの関係であるためパレート解を用いて検討を行った。図5に最適化によって得られた各ルールのパレート解を示す。横軸は動剛性 K を、縦軸は漏れ量 q を表す。グラフにおいては右下に近いほど目的関数を満たしている。

はじめに、ベースとした近傍による違いについて検討した。図5よりノイマン近傍をベースとしたS-N、Q-Nルールはムーア近傍をベースとしたS-M、Q-Mルールと比べて高い特性解が得られていることがわかる。よって、本最適設計においてはノイマン近傍をベースとしたルールが適切であると考えられる。

次にシール特性の面から最適化結果について考察した。本最適化において、漏れ量が最小、動剛性が最大となったものはQ-Nルールであった。しかし、S-Nルールが一部勝っている箇所もある。これらの比較を、テクスチャの分布と圧力より行った。図6にテクスチャの分布図を示す。図10(A)は漏れ量最小の場合を、(B)はQ-Nルールのパレート解中央の場合を、(C)はQ-Nルールに勝っているS-Nルールのパレート解を、(D)は動剛性最大の場合を示す。図(A)、

(B), (D)のテクスチャより, Q-Nルールでは, 分割した一領域にテクスチャが集中しポケットグループの様な分布を形成するルールを得ている. しかし, 漏れ量が最小となった(A)の内径側にはリング状のテクスチャが形成されている. リング状のテクスチャは(B)に示す Q-Nルールのパレート解中央付近の解まで確認され, 同リング状のテクスチャが無くなると同時に漏れ量が急激に増加し, 逆に動剛性は向上している. 式(3)に示す通り, 漏れ量は内径側の圧力勾配より算出するため, リング状テクスチャにより急激に内径側圧力を低下させ圧力勾配を緩やかにすることで, 気体漏れを抑制しているものと考えられる.

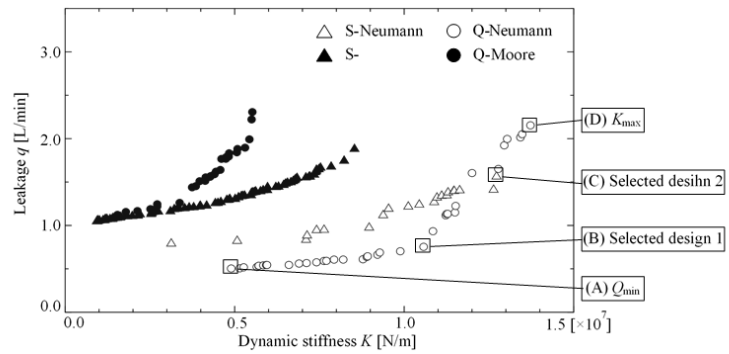


図5 最適化結果 (パレート解)

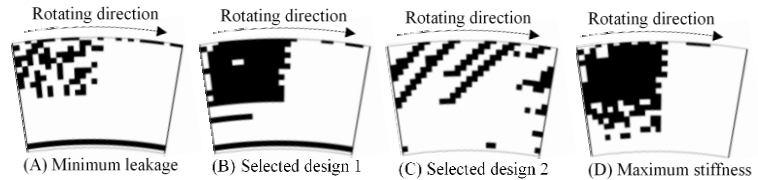


図6 最適化シール形状

一方, S-Nルールでは図6(C)よりスパイラルグループの様な分布を形成するため動剛性の面でQ-Nルールと並んだと考えられる.

(3) 正逆回転型ドライガスシールにおける内周リング溝の効果

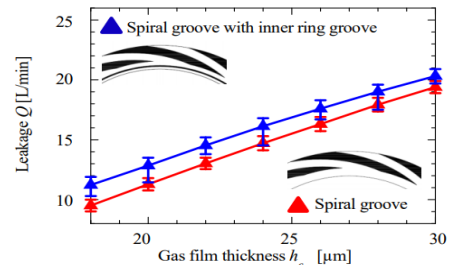
前節にて示した最適化の結果から, シール内周側に設ける円環状溝に漏れ量抑制効果があることがわかった. そこで, この結果を両回転対応のドライガスシールに適用することを試みた. すなわち, ドライガスシールでは, ターボ機械の停止時にチャンバー内の負圧が発生することで回転軸が逆回転することがある. この対策として, 左右対称のシール溝形状 (代表例: T型溝, ツリー型溝) が採用されることがしばしばある. しかし, 両回転用の溝は, シールとしての特性を犠牲にすることになってしまう. そこで本研究では, 上記円環状の溝の効果につき検討した.

① 漏れ量測定結果

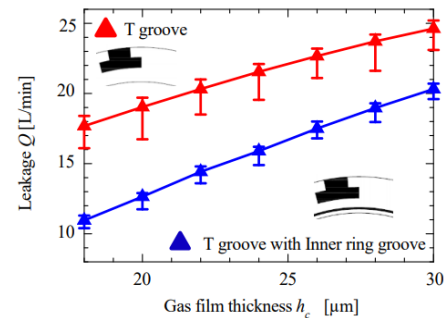
図7に漏れ量測定結果を示す. 図中(i)は片回転用の溝であるスパイラル溝における内周リング溝と漏れ量の関係を示す. (ii), (iii)に両回転用の溝における内周リング溝と漏れ量の関係を示す. 両図はそれぞれ縦軸が漏れ量, 横軸が空気膜厚さ, 各プロットは20回測定を行った漏れ量の平均値を表しており, エラーバーは測定値の最大値と, 最小値を示している. 図7(i)より, スパイラル溝に内周リング溝を施した場合, 内周リング溝を施す前と比較すると空気漏れ量が平均約9.3%増加することが確認された.

一方, 図7(ii)より T溝に内周リング溝を施した場合, 内周リング溝を施す前と比較すると空気漏れ量が平均約26.0%低減することが確認された. これについては以下のように考察した. 両回転用の溝部で発生する正圧と内周リング溝部で発生する負圧の圧力差が小さいため, T溝と内周リング溝の間での圧力勾配に大きな変化が無く, 半径方向に流れる空気の流れも変わらない. その結果, 内周リング溝によって発生する負圧の引き込みの影響を顕著に受け, 空気漏れを抑制したと考えた. さらに両回転用溝形状であるツリー溝に内周リング溝を施した際の空気漏れ量測定実験結果より, 内周リング溝を施す前と比較すると空気漏れ量が平均約15.8%低減することが確認される.

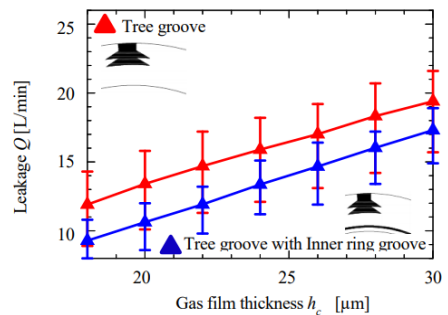
以上の結果より, 内周リング溝は両回転用溝に施した際に空気漏れ抑制効果を発揮し, 片回転用溝と同等



(i) スパイラル溝



(ii) T字溝



(iii) ツリー溝

図7 漏れ量測定結果

またはそれ以上のシール性能にまで向上することを確認した。これより、両回転用溝に内周リング溝を施すだけで両回転用溝の問題点である低いシール性能を改善し得ることが示された。

② 可視化結果

以上の結果が得られた理由について、T字溝の可視化結果から考察する。

図8に可視化結果(内周リング溝の有無による比較)を示す。図中(i)は撮影された可視化画像を、図中(ii)は得られた可視化映像に基づくPIV解析結果(内周リング溝の有無による比較)を示している。また同図に示す白線がシールの内周および外周とT溝の輪郭、赤線が内周リング溝の輪郭である。速度は最小値2.0 m/s、最大値14.0 m/sとし暖色に近いほど速く、寒色に近いほど遅い。図より、T溝に内周リング溝を施すことによりT溝周辺の低速の領域が拡大しているのが確認される。また、内周リング溝とT溝の間の粒子の流れを確認すると、内周リング溝を施す前は粒子が円の中心に向かって流れているのに対し、内周リング溝を施すと粒子の流れが円周方向に変化しているのが確認された。これは、内周リング溝によって空気が流れが円周方向に変化させられ空気漏れが抑制されたためと考えられる。また、内周リング溝とT溝の間に注目すると、内周リング溝に流れ込む粒子が加速しているのが確認される。これは、内周リング溝の負圧で内側から引込まれる流れの影響を受けるためと考えられる。

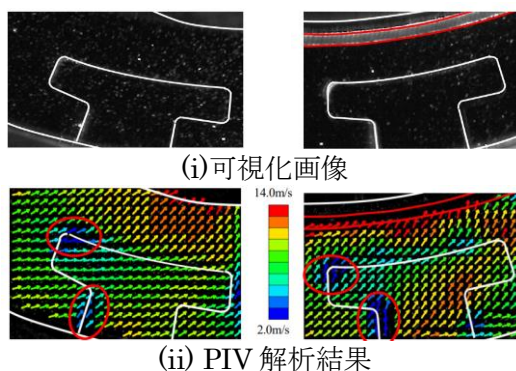


図8 加振条件下の可視化結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① 落合成行, 生井達也, 橋本巨, 加振状態のドライガスシールにおける気体膜の可視化, トライボロジスト (掲載決定)
- ② Daisuke SUZUKI, Shogo KODAMA, Masayuki OCHIAI, Yuta SUNAMI and Hiromu HASHIMOTO, ドライガスシールにおける気体流れの可視化実験 Journal of Advanced Science, 査読有, Vol. 28, 11005-1 -5

〔学会発表〕(計13件)

- ① Masayuki Ochiai, Optimization of Surface Texturing Using Cellular Automaton -Application to Dry Gas Seal-, 2018 STLE Tribology Frontiers Conference.
- ② Yosuke Aketo, Masayuki Ochiai, Hiromu Hashimoto, Visualization Experiment of Dry Gas Seals under Conditions of Bi-directional Rotation, 2017, The 6th World Tribology Congress 2017.
- ③ Masayuki Ochiai, Experimental Study of Flow Visualization on Dry Gas Seal Face, 2016, The 71st STLE Annual Meeting & Exhibition.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計2件)

名称: ドライガスシール

発明者: 落合成行、大家雄太

権利者: 東海大学

種類: 特許

番号: 特願2019-035286

出願年月日: 2019年2月28日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

http://ns.mech.u-tokai.ac.jp/~hashimoto_lab/index.html

6. 研究組織

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。