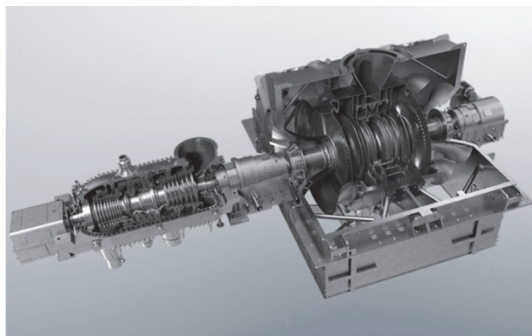


感圧塗料を用いた回転機械ラビリンスシール励振力の可視化

Visualization of Labyrinth Seal Force Acting on Rotating Machinery Using Pressure Sensitive Paint



西田 慎吾*1
Shingo Nishida

岩崎 真人*2
Makoto Iwasaki

大村 尚登*3
Naoto Omura

回転機械の信頼性向上のためには、運転中に作用する流体力の予測が極めて重要である。近年、流体力の評価に CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析技術が適用されているが、CFD 解析を検証し、高精度化するためには流体力の可視化計測技術が有力なツールとなる。三菱重工業株式会社では同検証技術として感圧塗料 (Pressure Sensitive Paint: PSP) を用いた非定常流体力の可視化に取り組んでいる。本研究では同技術を狭隘部の計測が可能となるように改良し、回転機械のシール部に適用して、CFD 解析結果と比較した。同計測結果より詳細な圧力分布を把握することができ、流体力の発生メカニズムの理解が進んだとともに、CFD 解析との差異を検証することで、今後の評価手法の高度化につなげることができた。

1. はじめに

回転機械の軸や翼端部には作動流体の漏れを抑制し、効率を向上することを目的としてラビリンスシールが用いられる。ラビリンスシールは図1に示すようなフィン構造を有し、フィンの狭隘部により翼端や軸貫通部での漏れを抑制する構造である。機器の高効率化のためにはこのフィン先端のクリアランスを極力小さくすることが望ましいが、同時にシール部分で回転機械の軸の自励振動を発生させるような流体力の増大を招くことが知られている。また、近年においては回転機械の単機容量の増加・高効率化に伴い、作動流体の高圧化・シール部寸法の大型化が進んでおり、自励振動の発生要因となるシール部の流体力を詳細に評価する必要性が高まっている。

従来、当該流体力の評価は単純形状のシール構造を対象に理論式で評価することが可能であるが、シールの高性能化に伴いシール構造も複雑なものが用いられているため、理論式による評価のみでは限界がある。また、CFD による評価も近年急速に拡大しているが、シール内部の流れが複雑であることから、CFD での再現精度に課題があるケースも見られ、CFD による評価手法の高度化のために、シール内部の圧力変動の詳細を可視化することが強く望まれる。

本研究では、応答速度特性に優れるポリマーセラミックタイプの感圧塗料 (PC-PSP) を用いて圧力変動を計測し、シール内部の圧力分布を可視化した。感圧塗料を受圧面とは反対側から励起光を照射して高速度カメラで計測することで、シール内部のような複雑な流路内での非定常計測を行うことに成功した。本研究で得られた非定常圧力変動の詳細な可視化結果を用いて、CFD で計算した圧力分布と感圧塗料での計測結果が、流れの剥離が発生する位置近傍で大きく異なることが明らかになり、CFD で使用する乱流モデルの改良のための基礎的な知見として重要な成果が得られた。

*1 総合研究所 振動研究部 技術士(機械部門)

*2 総合研究所 振動研究部

*3 総合研究所 ターボ機械研究部

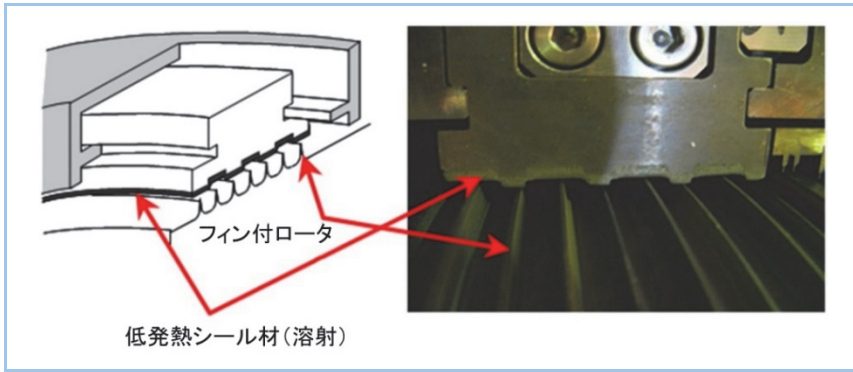


図1 ラビリンスシールの構造例

2. シール励振力の計測

2.1 シール励振力

回転機械の軸振動の運動方程式を軸のたわみ2方向に関する2自由度系で記述すると、次のように表現できる。

$$M \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} + K \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \end{bmatrix} \quad (1)$$

シール励振力は流体力として軸の振動応答に対応して発生する力であるため、この振動系の付加剛性・付加減衰として表現でき、次のようにマトリクスできる。

$$\begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{XX} & K_{XY} \\ K_{YX} & K_{YY} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C_{XX} & C_{XY} \\ C_{YX} & C_{YY} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} \quad (2)$$

シール励振力は図2に示すように、シール狭隙部へ旋回流れが流入することによって、軸振動を助長するような力が発生することが問題となり、式(2)における剛性マトリクスと減衰マトリクスを把握して安定判別計算を行うことで、軸系全体の自励振動の発生有無を計算することができる。

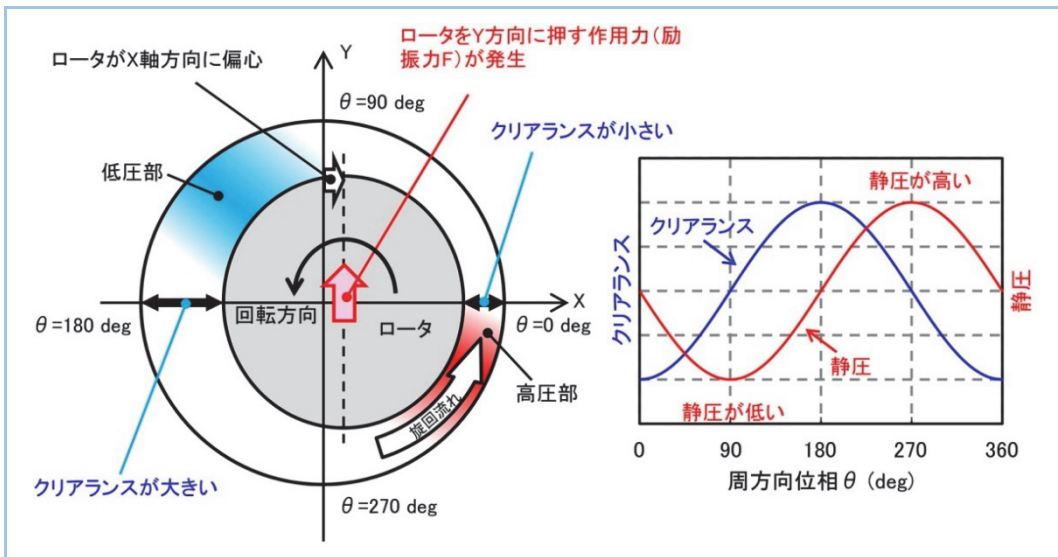


図2 ロータ振れ回り時の軸振動発生メカニズム

2.2 回転試験装置

シール励振力計測のための回転試験装置を図3に示す。同装置は一つのロータに2枚のディスクを有し、ディスク先端に計測に供するシールフィンが設置されている。圧縮空気を2枚のディスクの中央部より供給し、左右のシールフィン部を通過することで、軸方向の差圧をバランスする構造となっている。ロータは転がり軸受を介してかごばねで支持されており、軸端の電磁アクチュエータを使用してロータを振れ回り加振することで、シール部で発生する励振力をロードセルによって計測する構造となっている。本試験に使用したシールを図4に示す。シール部入口の旋回流れ

の強さを3孔ピトー管を用いて計測した。ロータ側とステータ側のフィンが交互に突き出すインターロッキングシール (ILS: Inter Locking Seal) と呼ばれる形式のシールを使用した。

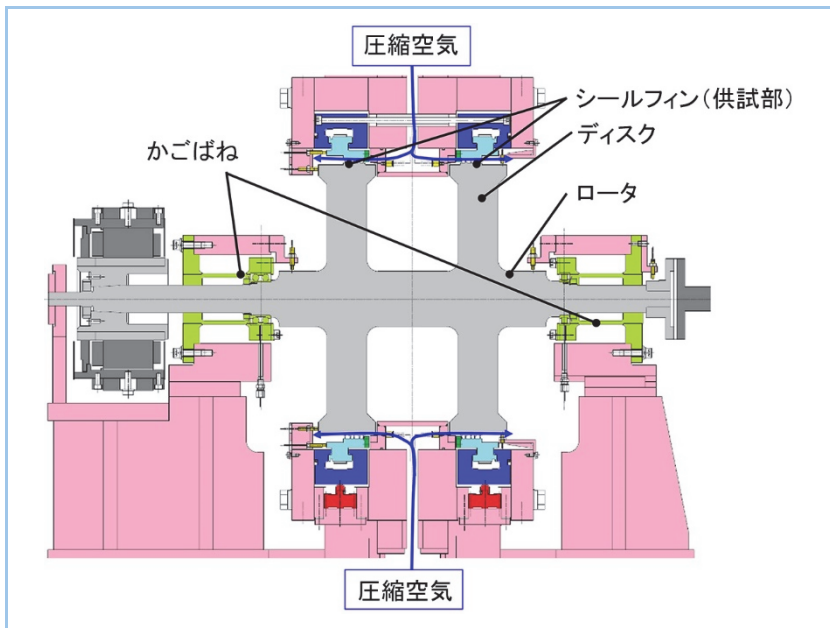


図3 シール励振力計測 回転試験装置

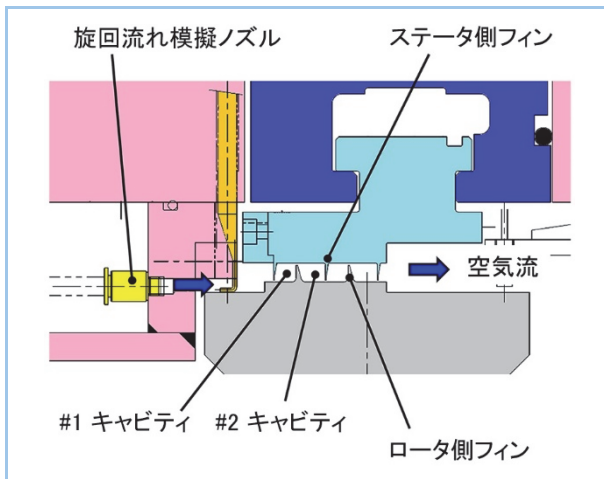


図4 供試シール構造

2.3 励振力計測結果

本試験においてはシールフィン部に流入する旋回流れの強度を変更して加振試験を実施した。計測結果を図5に示す。不安定振動の原因となるシール励振力剛性マトリクスの非対角項の大きさが旋回流れの強度に比例して増大している様子が確認できた。

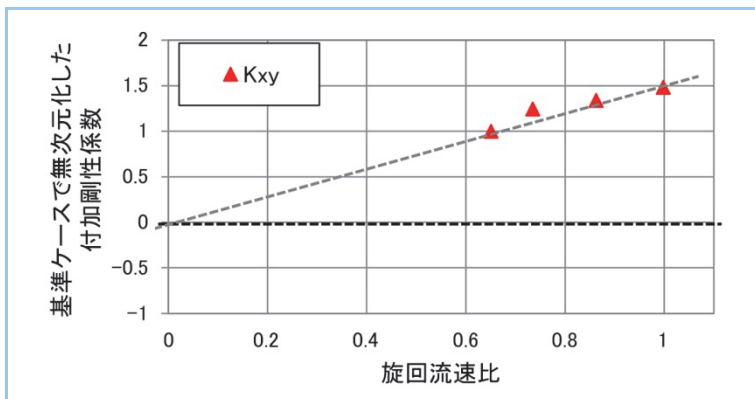


図5 シール励振力付加剛性係数計測結果

3. 感圧塗料による計測

3.1 感圧塗料

感圧塗料は酸素濃度に応じて発光強度が変化する色素であり、空気の静圧が変化すると酸素分圧が変化することから、静圧を感圧塗料の発光強度の変化として計測することが可能であり、圧力計測に応用されている。本試験に使用した感圧塗料は白金ポルフィリン系の色素を含有し、応答速度を高めるためにセラミックパウダーを混合したポリマーセラミックタイプタイプの感圧塗料である。本塗料は宇宙航空研究開発機構(JAXA)より提供を受けた。図6に感圧塗料計測の模式図を示す。感圧塗料を計測対象物の表面に塗布し、そこに紫外線等の励起光を照射する。すると各色素の特性に応じた波長の発光が酸素濃度に応じた強度で発生する。これを高速度カメラで計測することで、非定常圧力を可視化計測できる。

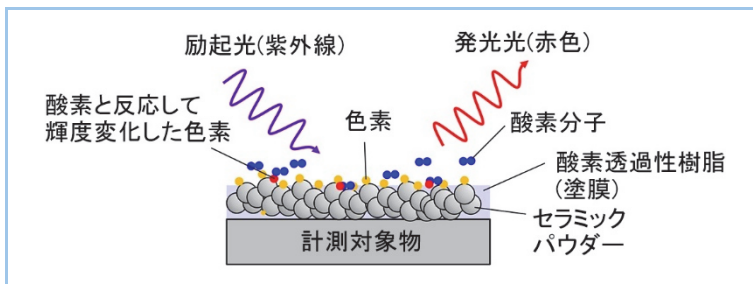


図6 感圧塗料計測原理

3.2 計測セットアップ

図7に感圧塗料の計測部を示す。感圧塗料の計測では基準画像からの輝度変化を評価する必要があるため、計測対象物は静止している方が計測精度面から有利である。このため、ケーシング側シールキャビティの壁面を計測対象とした。しかし、従来の計測手法では感圧塗料の受圧面(計測対象面)と励起光照射方向・カメラ設置方向が一致している必要があり、狭隘なシールキャビティ内面を計測することは現実的ではない。このため、本試験においては、感圧塗料の配合を最適化し、受圧面と反対側(すなわち、試験装置外側)から励起光を照射し、カメラ計測できるように改良を行った。供試シールは上流側から#1~#5まで5つのシールキャビティを有するが、感圧塗料による可視化計測対象は旋回流の影響を強く受け、不安定化力が比較的大きくなりやすい#1, #2キャビティとした。

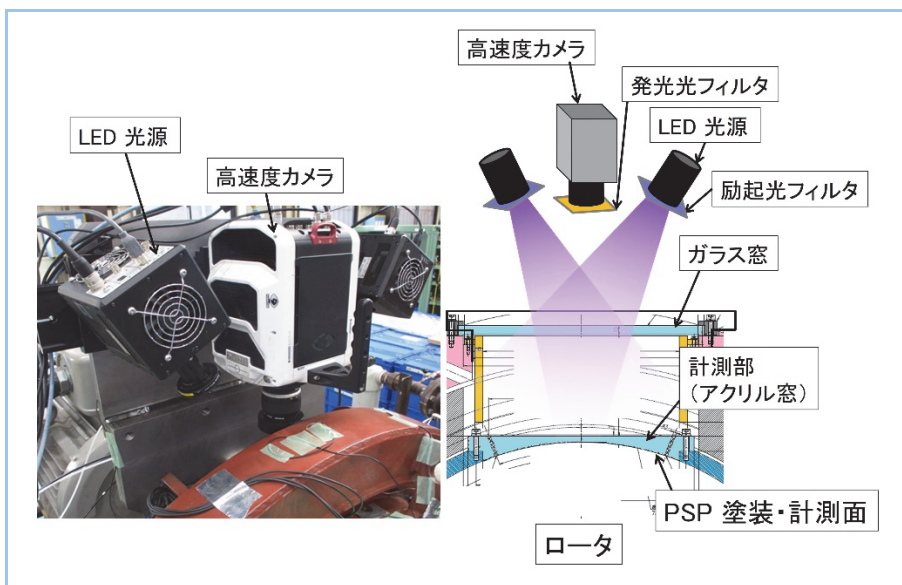


図7 PSP計測セットアップ

3.3 計測結果

シールキャビティ内部には感圧塗料の計測精度を検証する目的で小型圧力センサを設置した。加振試験時の感圧塗料による計測結果と圧力センサによる計測結果の比較を図8に示す。加振振動数における圧力変動レベルは両者でよく一致していることがわかる。加振によるロータの偏心位置と圧力変動の関係を明らかにするために、感圧塗料計測結果をロータ変位位相で平均化した。また、感圧塗料の色素の分散ムラなどを平均化する目的で、ロータ位相の変化を考慮して各計測位置での計測結果を平均化して評価した。平均化手法のイメージを図9に示す。平均化した計測結果を図10に示す。計測結果においてはロータ偏心位相に対してロータ振れ回り振動を助長する位相関係にシール励振力の高圧部が存在し、ロータの不安定振動を助長しているメカニズムがよく確認できる。また、シールキャビティ内部やシールフィン近傍の圧力分布が高精度に得られており、CFD 解析結果との比較に用いることができるデータを取得できた。

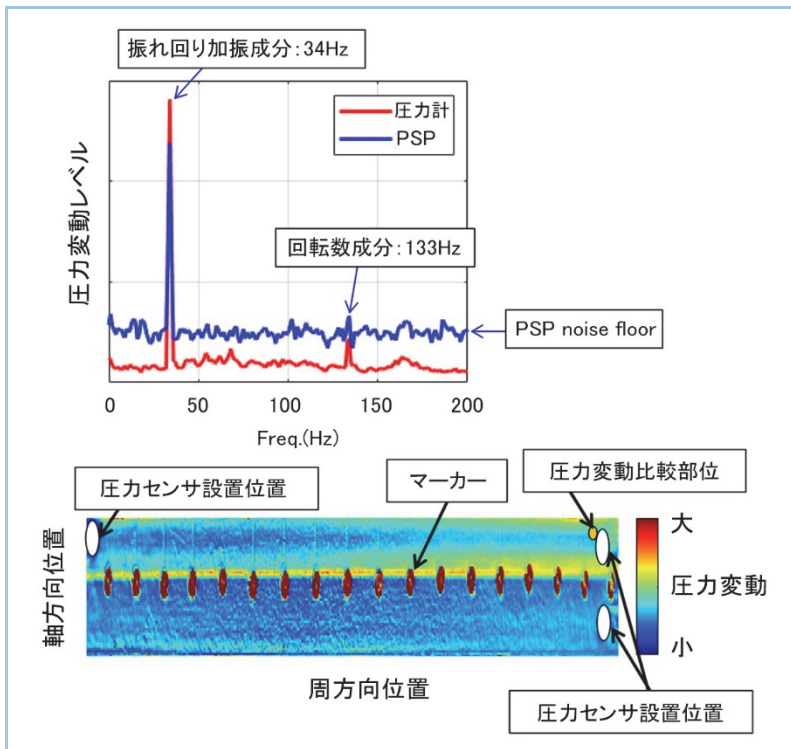


図8 感圧塗料と圧力センサの比較

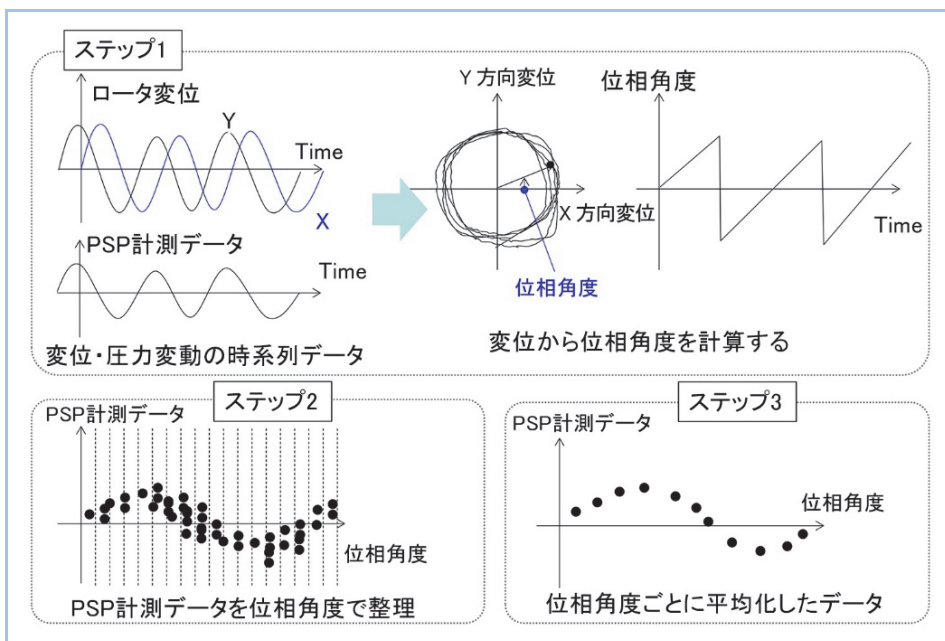


図9 位相平均化方法

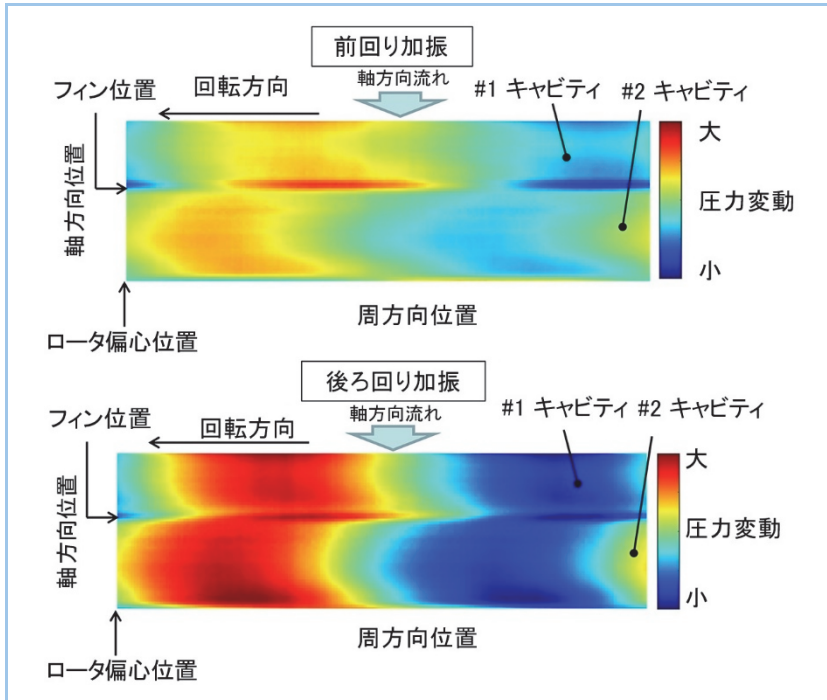


図 10 位相平均化後の計測結果

4. CFD 解析と考察

4.1 CFD 解析

シール励振力の予測手法として用いている CFD 解析の精度検証を行う目的で、CFD 解析を用いて励振力計測試験の再現解析を実施した。CFD 解析は乱流モデルとして SST $k-\omega$ RANS モデルを用いて、ロータの偏心を定常偏心として与えて、ロータの回転速度と振れ回り加振による相対速度を壁面速度として与える Whirling rotor method と呼ばれる定常解析手法を用いた。解析領域を図 11 に示す。解析領域は回転試験装置の片側のロータディスクのみを模擬し、ディスク間のキャビティ部や旋回流れを模擬するためのノズル部、排気流路部を試験装置と同じ寸法にてモデル化した。CFD の解析設定を表 1 に示す。

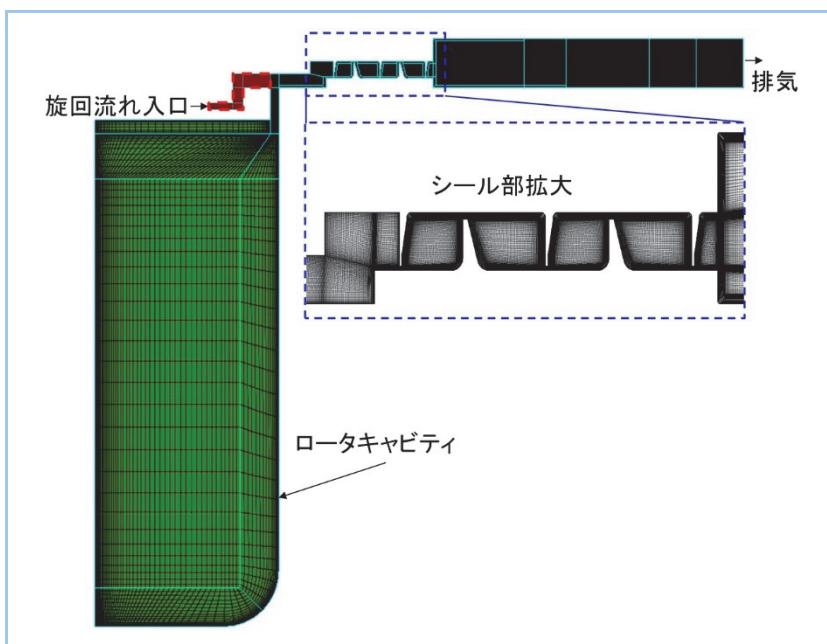


図 11 CFD 解析領域

表1 CFD 解析設定

		解析設定
計算手法	計算種別	定常計算 (ホワリングロータ法)
	解析ソルバ	三次元圧力-速度連成
流体	物性	空気
	密度変化	理想気体
	比熱・粘性・熱伝達率	温度の関数として設定
乱流条件	乱流モデル	RANS SST k- ω
	入口乱れ条件	5%
壁面モデル		断熱境界, 平滑面
偏心量		シールクリアランスの 10%
入口境界条件		質量流量
バイパス流れ境界条件		静圧条件
出口境界条件		静圧条件(大気開放)

4.2 CFD 解析結果と試験結果の比較

CFD 解析結果と感圧塗料計測結果を図 12 に示す。まず、シールキャビティ内部の圧力分布の傾向は両者でよく一致している。CFD 解析結果では流れが剥離する点において圧力分布の等圧線が強く折れ曲がる傾向が見られるが、感圧塗料の計測結果ではその傾向が緩い。感圧塗料においても十分な空間分解能を有することから、実際の剥離の様子が CFD と異なることを反映していると考えられる。シール励振力の付加剛性・付加減衰係数について、感圧塗料計測結果から算出した値と CFD 解析結果から算出した値の比較を図 13 に示す。両者の傾向は一致しているが、各シールキャビティの付加剛性・付加減衰係数のレベルを比較すると差異が認められる。CFD 解析結果と感圧塗料計測結果の差異は上述のような流れの剥離の再現精度等に起因すると考えられ、用いる乱流モデルの最適化等により高精度化することができると考えられる。

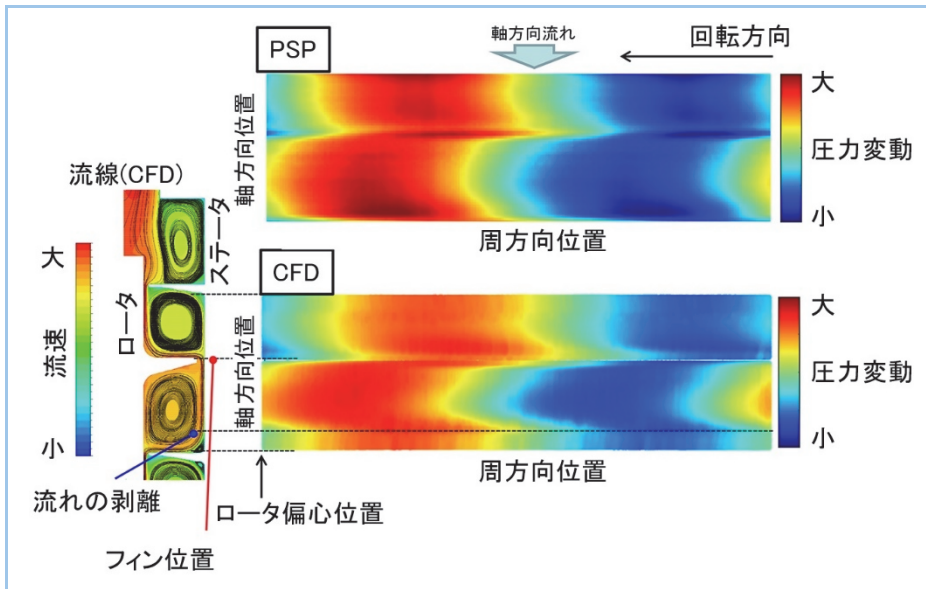


図 12 PSP 計測結果(上段)と CFD 解析結果(下段)の比較

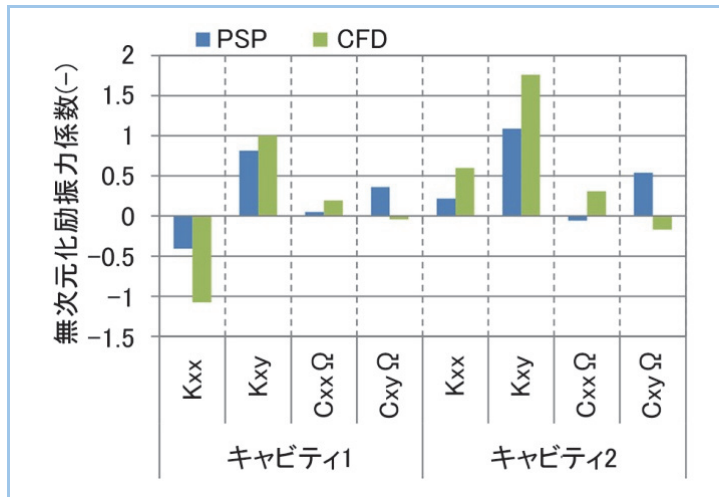


図 13 PSP 計測試験結果と CFD 結果の励振力係数比較

5. まとめ

回転機械の狭隘部の非定常圧力を可視化するために、裏面から計測する非定常感圧塗料計測手法を開発し、高精度・高精細の非定常圧力分布の計測に成功した。計測結果と CFD 解析結果を比較して、大域的な圧力分布特性が両者で一致すること、流れの剥離点の様相が異なることが明らかになった。このような詳細な計測結果をもとに、CFD 解析の高精度化が可能となり、今後一層の回転機械の信頼性向上に役立てることができる。また、本手法は他の回転機械や内部流れによる非定常圧力の可視化手法に応用することができ、様々な製品の流体励振力の発生メカニズムの解明や CFD 解析手法の高度化に貢献することが期待される。

参考文献

- (1) Nishida, S. et al., Visualization of Destabilization Force of Labyrinth Gas Seal Using Fast-Responding Pressure Sensitive Paint, ASME Turbo Expo, GT2021-58893