研究論文

CFDを用いたラビリンスシール空気圧シリンダ内の流れ解析*
(第1報: 乱流モデルを用いた3次元流れ解析と漏れ量の推定)

小 嵯 貴 弘**, 佐 野 学***

Analysis of Leakage Flow in a Labyrinth-Sealed Pneumatic Cylinder
with Computational Fluid Dynamics(1st Report: Three-Dimensional Flow Analysis with a Turbulence Model
and Estimation of Leakage Flow Rates)

Takahiro KOSAKI, Manabu SANO

A pneumatic cylinder with a labyrinth seal has considerably lower friction than that with a rubber seal has, because no mechanical contact between the piston and the cylinder tube exists. However, air leakage from clearance between the piston and the cylinder tube is inevitable. This paper focuses on an investigation on leakage flow through the labyrinth seal inside a labyrinth-sealed pneumatic cylinder based on computational fluid dynamics (CFD). The CFD analysis is conducted with an ANSYS FLUENT system and, by employing a turbulence model, the leakage flow around the labyrinth seal is simulated and visualized. From the CFD analysis results, the leakage rates are found and they are compared with experimentally measured data which are acquired by means of our constructed measurement apparatus. Furthermore, we define an index to quantitatively evaluate the intensity of the turbulent flow for reducing leakage and discuss the availability of the proposed index by applying it to some CFD analysis results.

Key words : Pneumatics, Pneumatic Cylinder, Labyrinth Seal, Computational Fluid Dynamics, Leakage Flow, Vorticity

1. 緒 言

空気の漏れを非接触で低減できるラビリンスシール¹⁾をピストンシールとして用いたラビリンスシール空気圧シリンダは、広く普及している弾性体シール空気圧シリンダと比較すると、極めて低摩擦であり、また、シールの固着現象も発生しない²⁾。したがって、弾性体シール空気圧シリンダでは不可能な高精度な力制御が実現できるため、主に産業機械においてビニールフィルム、糸などの張力制御に用いられている。その反面で、ラビリンスシールは弾性体シールよりも密封性能が低く空気漏れを避けることができない上、仕様を満たすために高い加工精度が要求されることが製造コストを押し上げている。このラビリンスシール空気圧シリンダにおける空気の漏れ量は加工のばらつき程度の寸法の違いでも変化するが、その詳細については十分

な解明に至っていない。そのため、漏れ特性に関する更なる知見を得ることは、今後の製造コスト削減へとつながることが期待できる。

一方、近年のコンピュータの高速化及び記憶装置の大容量化に伴い、数値流体力学 (CFD: Computational Fluid Dynamics) 解析ツールが工業界を中心に活用されるようになってきた。ラビリンスシール関連の分野においても、ラビリンスシールを採用した圧縮機³⁾やガスタービンのラビリンスシール⁴⁾⁵⁾などを対象としたCFD解析が行われている。

以上のような背景から、漏れ特性の把握及びシリンダの性能向上のために資する知見を得ることを目的とし、本研究では、ラビリンスシール空気圧シリンダを対象に、シリンダ内における空気の流れのCFDシミュレーションを行う。また、ラビリンスシール空気圧シリンダの空気の漏れ量を測定するための装置を構築し、漏れ量を測定するとともに、CFD解析結果から算出した漏れ量と比較することで、CFDにより漏れ量の推定が可能であることを示す。さらに、ラビリンスシールの膨張室内に発生する渦を含んだ流れが、漏れの減少に寄与する度合いを定量的に評価するための指標を提案し、その有用性について検討を加える。

*平成25年5月13日 原稿受付

**広島市立大学大学院情報科学研究科
(所在地 広島市安佐南区大塚東3-4-1)
(E-mail: kosaki@hiroshima-cu.ac.jp)***大阪学院大学情報学部
(所在地 大阪府吹田市岸部南2-36-1)

Fig. 4 Analysis model for labyrinth seal

Table 1 Dimensions of investigated labyrinth seal

		$\phi 50$
Clearance	[mm]	0.06
Thickness	[mm]	5
Width of groove	[mm]	3
Depth of groove	[mm]	2
Number of throttles		10

CFD解析のためのツールとしては、有限体積法を利用したFLUENTバージョン14、及びプリプロセッサ、ポストプロセッサ（ANSYS製）を用いた⁷⁾。解析に必要な一連の作業は、HP製ワークステーション（OS：Windows 7 Professional, CPU：Intel Xeon E5-2687W 3.1GHz, メモリ：32GB）上で実行した。

3.2 解析結果と測定結果

ラビリンスシール空気圧シリンダ内の流れを解析するにあたり、はじめに、供試シリンダの実際の寸法をもとに、シリンダのモデルをコンピュータ上に作成した。本研究では、十分に長いシリンダチューブ内の中央に、ラビリンスシールを備えたピストンが設置されるように作図した。作成したモデルをFig. 4に、ラビリンスシール各部の寸法をTable 1に示す。Fig. 4においては、シリンダチューブ部分は非表示としており、また、シリンダ内を満たしている空気を薄い灰色で表示している。このラビリンスシール周り及びラビリンスシール前後のシリンダチューブ内全域の空気の流れが解析対象である。

次に、作成したモデルに対し、メッシュの生成を実行した。後述する漏れ量のCFDによる計算結果が、測定結果に近い値となるように試行錯誤によりメッシュの細かさを決定し、結果として得られたメッシュをFig. 5に示す。これは、シリンダ断面のラビリンスシール部を拡大したものである。計算領域全体に生成されたメッシュのセル数は、合計で約1200万（格子点数約325万）であった。

以上により得られたメッシュを用い、FLUENTにより流れの数値計算を実行した。文献1)によれば条件により最終絞り片で閉塞状態となることから、音速を用いて文献1)に従ってレイノルズ数を算出すると3,400となる。そこで本

Fig. 5 Cross section of mesh

研究では乱流場と仮定した。さらに、輸送方程式数が異なる乱流モデルも試すなど、予備的な試行を種々行った結果、 $k-\epsilon$ 以外では収束解が得られず、なおかつ測定値に最も近い漏れ量が算出できたため、乱流モデルとしてはRealizable $k-\epsilon$ を選択した⁸⁾。また、計算においては、圧縮性・定常流れとし、解法としては密度ベースの陰解法を用いた。実際、CFD解析においては最終絞り片で部分的に閉塞状態となった場合があり、この場合の最終絞り片出口の平均流速を用いたマッハ数は0.75であった。境界条件としては、シリンダ出口（Fig. 4のシリンダ左端）を大気開放とし、シリンダ入口（Fig. 4のシリンダ右端）圧力を与えた。ただし、シリンダチューブは断熱とし、また、ラビリンスシール空気圧シリンダの実際の応用先であるビニールフィルムや糸の張力制御のように、力が釣り合ってピストンが静止した状態を想定している。シリンダ入口圧力を200kPa、20℃に設定したときの、シリンダ内の流れのシミュレーション結果をFig. 6に示す。Fig. 6(a)はラビリンスシール空気圧シリンダ内部におけるラビリンスシール周り全体の流れを3次元解析した結果の速度ベクトル図であり、また、Fig. 6(b)は1つの膨張室（第1膨張室）の軸方向断面を拡大した図、Fig. 6(c)は第9膨張室の軸方向及び円周方向の流れを拡大した図である。計算には、上述のコンピュータを用いて約3日間を要した。

ラビリンスシール空気圧シリンダの内部においては、Fig. 6(a)のように、主にラビリンスシールの各膨張室に沿ってラビリンスシール周りに空気の流れが発生し、さらに、Fig. 6(b), (c)に示されるように、膨張室内には空気の渦の発生が観測される。3次元的に見れば、これらが組み合わせられた流れとなっている。このように、絞り片→膨張室→絞り片…が繰り返して設けられていることにより、空気の漏出を妨げるような流れが生じて抵抗となり、ラビリンスの流体力学的効果となっていると考えられる。これに加え、空気が膨張室に流入すると、上述のような流れによって運動エネルギーが熱に変わって散逸するという熱力学的効果も寄与していると推察される。以上のように、乱流モデルを用いたCFD解析によりラビリンスシール周りの3次元的な

(a) Three-dimensional plots

(b) Velocity vectors in the first groove

(c) Velocity vectors in the 9th groove

Fig. 6 Velocity vector plots

流れがシミュレートされ、文献1)で述べられているような、ラビリンスシールによって空気の漏れが抑制される現象を可視化することができた。

さらに、シリンダ入口圧力を、ラビリンスシール空気圧シリンダで標準的に使用される圧力範囲である100kPaから250kPaまで、50kPa刻みで変え、各圧力条件に対してCFDシミュレーションを実行し、その結果から漏れ量を算出した。結果をFig.7に○記号で示す。比較のため、22節で述べた装置に供試シリンダを取り付け、供給側シリンダ室圧力の目標値を同様の条件に設定し、シリンダからの漏れ量を測定した結果もFig.7に□記号で示す。図より、CFD解析によって得られた漏れ量は、総じて測定値に近い値となっていることが確認でき、計算時間にかかるが、CFDシミュレーションがラビリンスシール空気圧シリンダの漏れ量の推定に適用可能であるといえる。

Fig. 7 Measured and computed leakage flow rate

Fig. 8 Distribution of labyrinth vorticity

Fig. 9 Relationship between leakage flow rate and the number of throttles

4. 漏れの抑制に関する検討

前述のラビリンスシールの各膨張室内で発生する渦を含んだ旋回するような流れは、漏れを減少させる役割を果たし、流れの乱れが大きいほどその効果は大きいと考えられる。そこで本研究では、膨張室内流れの乱れの程度、すなわち膨張室内流れが漏れを妨げる度合いを定量的に評価するため、次式で表されるラビリンス渦度と称する評価指標を提案する。

$$\Omega = \bar{v}r \quad (1)$$

ここで、 $\bar{v}$ は膨張室内における平均流速である。 r については、膨張室内において軸方向に回転しながら円周方向に旋回するような渦を強めることが漏れ量の減少へとつながる鍵であると考え、そのような渦の回転中心が膨張室の中央を通る円周付近に存在することから、ピストン中心から膨張室中央までの距離とした。すなわち、 Ω は、上述した漏れ量の減少に寄与すると考えられる渦の生成が多いほど低い値を示す指標である。この指標により有効な評価を得るためには、膨張室内全域に存在する円周方向の渦も含めた流速分布を求める必要があるが、実測は困難であり、CFD解析に特有の評価指標といえよう。

絞り片数 (n_t とする) が2, 4, 6, 8, 10のラビリンスシールピストンモデルを作成し、それぞれに対してCFD解析を実行してラビリンス渦度と漏れ量を算出した結果を

Fig. 8, Fig. 9に示す。Fig. 8は、膨張室ごとに上式のラビリンス渦度 Ω を算出し、ラビリンスシール右端中央を原点としてそこからの軸方向の位置に対してプロットしたものである。ただし、平均流速 $\bar{v}$ としては、各膨張室中央での半径方向断面を通る流れの流速分布から得られる絶対流速の平均値を用いている。また、シリンダ入口圧力は200kPaである。Fig. 8, Fig. 9より、絞り片数が増加するにつれ、ラビリンス渦度が全体的に通減していくとともに、漏れ量も低下していく。平均流速を算出した各膨張室中央の半径方向断面における流れを詳しく見ると、例えば絞り片数2の場合は、膨張室内の軸方向にはFig. 6(b)のような渦が生じているものの、円周方向には渦が少ないFig. 10(a)のような乱れが弱い流れとなったが、絞り片数が増えていくと軸方向の流れだけでなく円周方向の流れにもFig. 10(b)に示すような渦が散在する流れとなって、Fig. 10(a)よりもFig. 10(b)のほうが、漏れ流れの方向とは異なる円周方向の流れに多数の小さい渦が存在し、全体として漏れ流れを妨げるような作用（乱れ）が強くなっている。このような円周方向の渦の生成が多いほど流速が低下するため、それが反映されて Ω が低下している。したがって、ラビリンスシール空気圧シリンダ内部では、膨張室内において軸方向に回転しながら円周方向に旋回するような渦が発生し、それが漏れの抑制効果をもたらしている一因であるということが、本研究のCFD解析によって得られた知見であり、また、提案するラビリンス渦度は、漏れの抑制効果を定量的に評価でき、今後のラビリンスシール空気圧シリンダの改良に資する一つの指標として有用であると考えられる。

5. 結 言

本研究では、数値流体力学（CFD）に基づいてラビリンスシール空気圧シリンダ内における空気の流れのシミュレーションを行った。その結果、ラビリンスシールによって空気の漏れが抑制される現象が3次的に観測できた。また、漏れ量測定装置を構築し、それによる測定結果とCFD解析結果の比較から、CFDによる漏れ量の推定が可能であることが確認できた。さらに、ラビリンス渦度を提案し、これにより膨張室内における渦を含んだ流れが漏れの減少に寄与する度合いを定量的に評価可能であることを示した。

今後は、異口径のシリンダに対して同様の解析を行い、さらに、CFDによる解析を用いて、ピストン運動時の流れ解析を行うことや、ラビリンス渦度が小さくなる、すなわち漏れを抑える乱れが大きくなるラビリンス形状を求め、ラビリンスシール空気圧シリンダの改良を目指す。

謝 辞

本研究の遂行にご協力いただいたアズビルTACO株式会

(a) High labyrinth vorticity case

(b) Low labyrinth vorticity case

Fig. 10 Velocity vector plots in circumferential direction

社に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 小茂鳥和生：非接触シール論，コロナ社（1973）
- 2) 小嵯貴弘，佐野学：ラビリンスシール空気圧シリンダにおける摩擦力の算定，日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol. 33, No. 1, pp. 9-14（2002）
- 3) 藤貴洋，安江昭，三井浩司，平隼也，立山省吾：ラビリンス圧縮機のピストン形状最適化解析，日本製鋼所技報，Vol. 60, pp. 33-40（2009）
- 4) 大野貴雄，因幡和晃，戸田和之，山本誠：ラビリンスシール形状の最適化に関する研究，日本流体力学会年會講演論文集，AM05-15-006,（2005）
- 5) B.I. Soemarwoto, J.C. Kok, K.M.J. de Cock, A.B. Kloosterman, G.A. Kool, and J. F. A. Versluis：Performance Evaluation of Gas Turbine Labyrinth Seals Using Computational Fluid Dynamics, ASME Conf. Proc. of GT2007, Vol. 4, pp. 1207-1217（2007）
- 6) アズビルTACO株式会社ホームページ：http://www.taco-ltd.com/jpn/
- 7) アンシス・ジャパン株式会社ホームページ：http://ansys.jp/index.html
- 8) H.K. Versteeg and W. Malalasekera原著，松下洋介，齊藤泰洋，青木秀之，三浦隆利：数値流体力学 第2版，森北出版（2011）