

機械駆動用タービンのシール性能向上

Performance Improvement of Seals for Mechanical Drive Steam Turbines

広島製作所 佐々木公良*¹ 秦 聰*²
伊住 修*²
技術本部 竹永久邦*³

石油化学、アンモニア合成等の化学プラントで使用される機械駆動用蒸気タービンの効率向上は、プラント効率アップ、省エネルギー化、さらに機器の小型化を図る上で重要であり、特に、蒸気タービン内部での蒸気漏えい量の低減は性能向上に大きく影響する。そこで、ラビリンスシール及び動翼チップシールに対し形状改良を行い、流動解析及び可視化試験を実施した。ラビリンスシールについては、フィン斜めに設置したスラントフィン形状を採用し、その溝形状を可視化試験結果を基に改良することにより、蒸気漏えい量を現状型に比べ約1/4低減した。これによりタービン全体効率も向上した。チップシールについてはオブリークノズルを採用し、反動度分布のフラット化を図り、さらに、新型のアキシアルフィン構造と組合せることにより、チップリークを低減できることを確認した。今回開発した高性能ラビリンスシールは、既に実機に適用中である。

Improving the performance of mechanical drive steam turbines for petrochemical plants is very important for plant efficiency, economy, compact design and environmental compatibility. In particular decreasing the steam leakage in the turbine can improve the performance significantly. We focused on both the labyrinth seal and the blade tip seal. After CFD analysis and a model test were carried out in order to obtain the optimum groove depth and clearance, the slant fin type labyrinth seal, which has several fins inclined in the direction against the leakage flow, was chosen. This improved labyrinth seal can reduce the steam leakage remarkably, by one quarter of the existing one. For the blade tip seal, a combination of the newly designed axial fins and an oblique nozzle were applied to decrease the tip leak loss. The oblique nozzle optimizes the reaction distribution on the blade, so that the pressure difference on the blade is reduced and consequently the leakage around the blade tip can be decreased very successfully. The improved labyrinth seal has been actually applied to the several turbines.

1. ま え が き

石油化学、アンモニア合成等の化学プラントで使用される機械駆動用蒸気タービン⁽¹⁾の効率向上は、プラント効率アップ、省エネルギー化、さらに機器の小型化を図る上で重要であり、特に、蒸気タービン内部の蒸気漏えい量の低減は性能向上に大きく影響する。そこで、ロータと仕切板等の静止部品間の車室内蒸気漏れ防止に使用されるラビリンスシール及び動翼チップシールに対し、シール性能を向上するための形状改良を行い、解析・可視化試験を実施した。本報では、これらの検討結果及び実機への適用の概要を述べる。

2. 高性能ラビリンスシール

蒸気タービンのグラウンド部には、非接触シールとしてラビリンスシールが使用されている。ラビリンスシールについてはこれまで多くの研究⁽²⁾が行われているが、性能向上のためには一層の研究が必要である。

当社は、機械駆動用蒸気タービンのラビリンスシールを対象として、新型ラビリンスシールの開発を行った。

2.1 試験装置

シール性能を把握するために実機と相似の供試モデルを製作し、空気試験を行った。

なお、シールフィン先端厚さについては、加工・組立上の制約内とし、またスラント角については従来の軸方向距離の中に収まる範囲で流量係数が小さくなるように決定した。

試験装置系統及び供試モデルを図1に示す。

改良型ラビリンスシールはシールフィンの先端厚さを現状の0.3

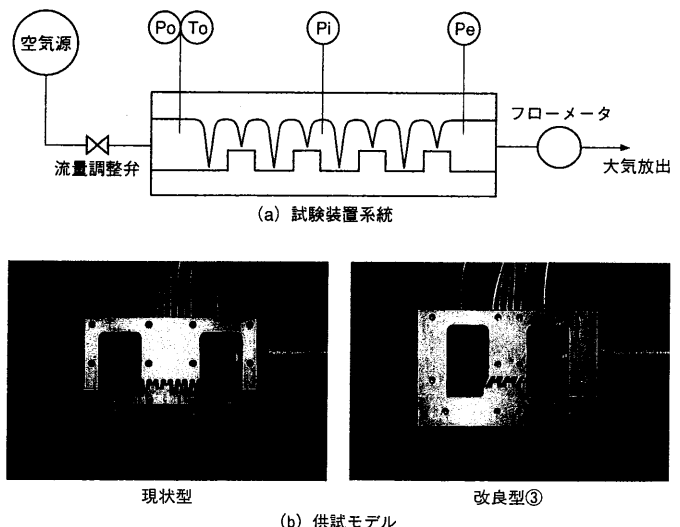


図1 試験装置系統及び供試モデル ラビリンスシールの性能試験装置の系統及びラビリンスシール供試モデルを示す。
Schematic diagram of seal test facility and tested model of labyrinth seal

mmから0.2mmと薄くし、かつスラント角25°のスラントフィン形状としたもので、それぞれ、溝の深さ、フィン枚数などを変更したものである。

空気試験では、各シール形状に対してシールの入口と出口の圧力比 P_o/P_e 及びクリアランスを変化させて、流量及び各部膨張室の圧力を計測した。

また、それぞれのシールに対してオイルフローによる内部流れの可視化試験を行った。

*¹ 原動機・風力機械技術部タービン設計課主査

*² 原動機・風力機械技術部タービン設計課

*³ 長崎研究所ターボ機械研究室主査 工博

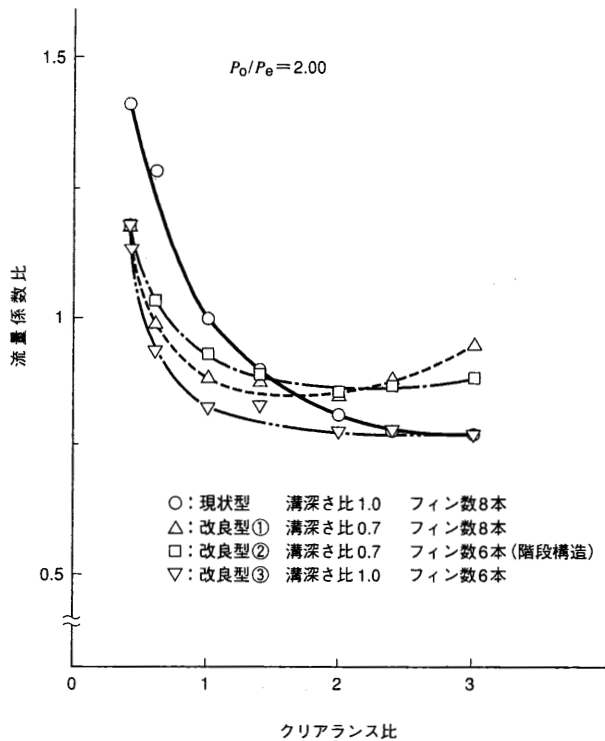


図2 流量係数比較 現状型と改良型のラビリンスシールの流量係数を比較して示す。
Comparison of discharge coefficient of labyrinth seal

2.2 試験結果

シール性能は式(1)で定義した流量係数 α を用いて比較した。

$$\alpha = \frac{G}{G_{th}} \quad (1)$$

ただし、 G は実測流量、 G_{th} は理論流量で式(2)から算出する。

$$G_{th} = FP_0 \sqrt{\frac{g}{RT_0}} \sqrt{\frac{1-\lambda^2}{n + \ln \frac{1}{\lambda}}} \quad (2)$$

ここで、

- P_0 : 入口全圧 (kg/m²)
- P_e : 出口圧力 (kg/m²)
- T_0 : 入口全温 (K)
- R : ガス定数 [(kg・m)/(kg・K)]
- F : 漏えい面積 (m²)
- λ : 圧力比 (P_e/P_0)
- n : フィン数

式(2)において、理論流量を算出する際、Martinの式を使用している。蒸気タービンの性能計算では、ラビリンスシールの理論流量としては一般的にMartinの式が用いられており、フィン数が多く ($n > 4$)、各段の圧力比が大きくない場合 ($\lambda > 0.6$) には、Martinの式は精度が良いとされている。

現状型シール及び改良型シールの流量係数比較を図2に示す。試験結果を要約すると次のとおりである。

機械駆動用タービンに適用するシールクリアランス及び溝深さの標準値を1.0とした。

- (1) 改良型シール (スラントシール) は、クリアランスが小さい (クリアランス比 < 1.6) 場合には、現状型よりも流量係数が小さく、シール性能は良好である。
- (2) 改良型のなかでも、溝深さ比1.0のシール形状 (改良型③) が流量係数が小さく、シール性能は良好である。



図3 可視化試験結果 クリアランスが小さい (クリアランス比1.0) とときの現状型と改良型③の可視化試験結果を示す。
Flow visualization result of labyrinth seal in case of small clearance

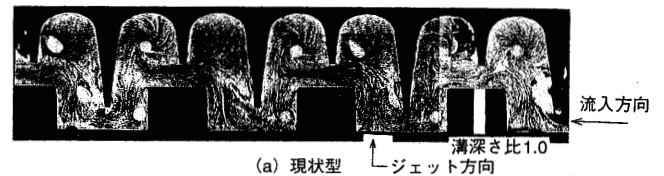


図4 可視化試験結果 クリアランスが大きい (クリアランス比3.0) とときの現状型と改良型①、③の可視化試験結果を示す。
Flow visualization result of labyrinth seal in case of large clearance

- (3) 改良型①及び②は、クリアランスが大きい (クリアランス比 > 1.6) 場合、現状型よりも流量係数が大きくなっている。

これは、溝深さ比が0.7と浅いために、長いフィンからのジェットの運動エネルギーがキャリーオーバーして短いフィンへの流入エネルギーとして利用されるためと思われる。

クリアランス比1.0のときの、現状型及び改良型③の可視化試験結果を図3に示す。これから、クリアランスが小さい場合 (クリアランス比1.0) には、現状型に比べて改良型③ではスラントシールフィン形状のため縮流が大きくなっており、その結果、流量係数が小さくなっていることが分かる。

また、クリアランス比3.0のときの現状型及び改良型①、③の可視化試験結果を図4に示す。

これから、クリアランスが大きい場合 (クリアランス比3.0) には、現状型及び改良型③ではフィンからの流出ジェットが確実に90°近い角度で方向転換をして流動しているのに対し、改良型①では90°よりも小さい角度 (約45°~60°) で方向転換をして流動していることが分かる。このフローパターンからクリアランスが大きい場合 (クリアランス比3.0) には、改良型①では溝深さが浅いために、フィンからの流出ジェットの運動エネルギーの一部がキャリーオーバーとして利用されていることが理解できる。

表1 ラビリンスシール励振力の解析結果

Calculation results of whirl exciting force for labyrinth seal

シール型式	現状型	改良型①	改良型②	改良型③
流量係数比	1.0 ※	0.76	0.81	0.73
入口出口圧力比	3.7	3.7	3.7	3.7
温度 (°C)	480	480	480	480
復元力 ばね係数 K_{xx} 相対比	1.0	0.96	1.05	0.74
励振力 ばね係数 K_{xy} 相対比	1.0	0.91	1.17	0.83
減衰力 減衰係数 C_{xx} 相対比	1.0	1.09	1.29	0.81
シール部不安定力 $K_{xy}-C_{xx}\omega$ 相対比	1.0	0.89	1.16	0.83
計算条件	ロータ回転数 Ω : 6 100 rpm ロータ固有振動数 ω : 4 200 rpm スワール比 Ω/ω : 0.6			

※クリアランス比0.6のときの流量係数を1.0とした

2.3 シール励振力の影響

ラビリンスシール部の軸方向に漏れる蒸気の周方向旋回成分の流れは、タービンロータに励振力として作用し、その励振係数が減衰係数に比べ大きい場合は不安定振動を発生させる。そこで、現状型と改良型のシール励振力に対する不安定性を実機条件で解析した。解析結果の相対比較を表1に示す。

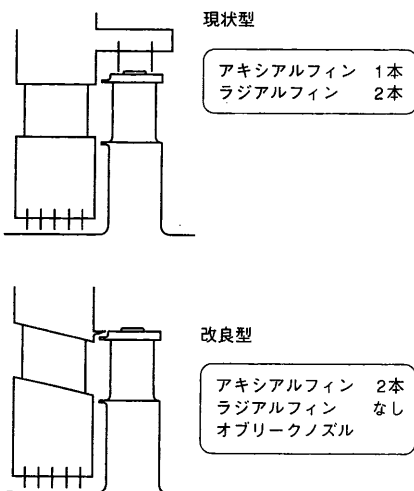
各シールにおけるばね係数、減衰係数には大きい差はないが、改良型②（階段構造）を除き、スラントフィン形状のシール部の不安定性は小さくなるのが分かる。

以上の試験及び解析結果から、現状型よりも漏れ量の少ない振動安定性の高い新型のラビリンスシールの設計法を確立し、高性能ラビリンスシールを実機へ適用中である。

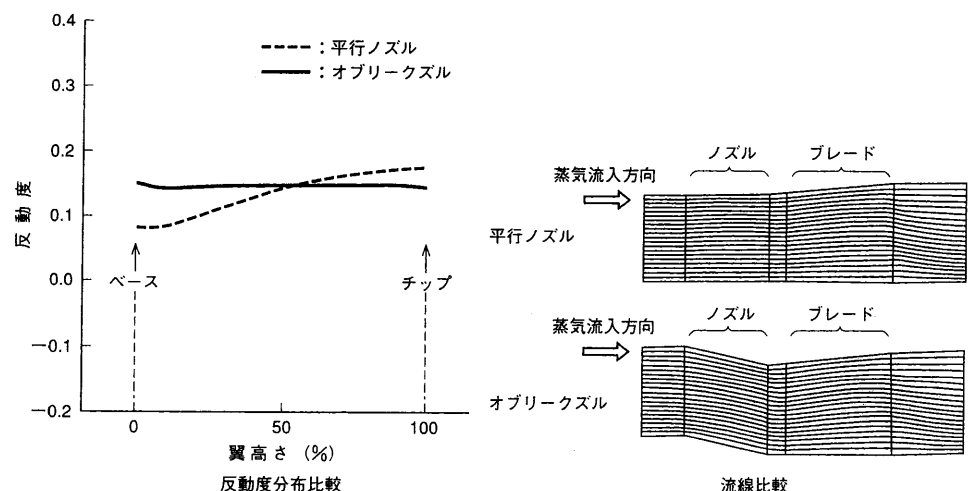
3. 高性能チップシール

機械駆動用蒸気タービンでは、当社独自で開発した高性能衝動翼が使用されており、動翼のチップシールにはラジアルフィンが使用されている。

衝動段のコスト低減と性能向上の両立をねらって、高性能の動翼チップシールフィンを開発した。



(a) シール部構造模式図



(b) フローパターン解析結果

図5 動翼チップシール部の構造模式図及びフローパターン解析結果

現状型と改良型の翼関係の比較及び完全三次元流動解析により求めた現状型と改良

Comparison of blade schematic diagram and flow pattern analytical results

3.1 改良型の特徴

現状型と改良型のシール部の構造模式図を図5(a)に示す。

改良型チップシールの特徴及びねらいは次のとおりである。

- ① オブリークノズル採用により、半径方向の反動度分布のフラット化を図り、動翼チップ側の圧力差を低減する。
- ② ラジアルフィンを除去し、新型のダブルアキシアルフィン構造を採用する。
- ③ 動翼チップ側のステップアップの最適選定を行う。

3.2 フローパターン

衝動段を対象として、平行ノズルとオブリークノズルを使用した段落のフローパターンを完全三次元流動解析により求めた。流れ線比較及び反動度分布の比較を図5(b)に示す。これから、平行ノズルに比べて、オブリークノズルではベースからチップにかけて反動度分布がフラット化していることが分かる。これはオブリークノズル採用により、ノズル出口で流れがうねり、その影響により半径方向の圧力こう配が小さくなるためである。

3.3 性能比較

アキシアルフィンの流量係数は、ステップアップ、オブリーク角、反動度などの関数である。風洞試験結果の例を図6に示す。

ここで、ステップアップは標準値を、アキシアルフィン流量係数は高反動の場合を正規化した。これから、ステップアップ比が大きいほど、反動度が小さいほどアキシアルフィンの流量係数比が小さく、チップ側の漏れ量が小さく性能が向上することが分かる。機械駆動用蒸気タービンの高圧段落を対象として、フローパターン解析結果、アキシアルフィンの試験結果を用いて段落性能を評価すれば、改良型段落は現状型段落に比べて約0.5%高性能となる。

4. 実機への適用

今回開発した高性能ラビリンスシール及び高性能チップシールを現在適用中あるいは計画中であるが、そのタービンの内部効率向上量について、実機を例に採り評価した。

4.1 高性能ラビリンスシールの適用効果

この新型ラビリンスシールを、既に8台の抽気復水型及び背圧型蒸気タービンの高圧側シール部に適用している。その一例として、図7に示す合成ガス圧縮機用5EH型（回転数12000rpm、

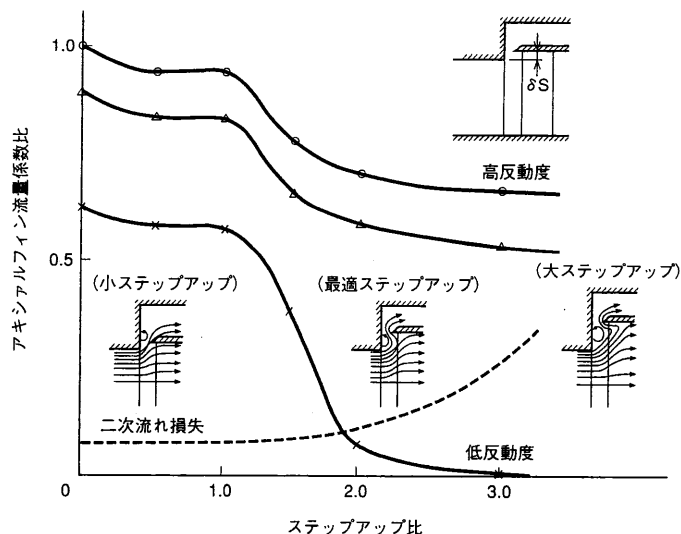


図6 アキシャルフィン流量係数 風洞試験で得られたステップアップとアキシャルフィンの流量係数の関係を示す。
Relation between step-up and axial seal fin flow coefficient obtained in wind tunnel test

定格出力約 16 000 kW 抽気復水型蒸気タービン) について効率向上量を検討した。

一段後からロータに沿って高圧シール部を通過し低圧側へ流れ、タービン出力に寄与しない蒸気漏えい量は、現状型ラビリンスシールに比べ改良型の場合は約 27 % 低減可能であり、定格出力に対して全体効率が約 1 % 向上する。全体効率が限界値に近く、翼素性能改良による効果が一般的に段当たり 1 % から 2 % という点を考慮すると、今回の効率向上策は適用範囲が広く非常に有効であると考えられる。

4.2 高性能チップシールの適用効果

適用対象である背圧型蒸気タービン 5 BH 型を例にとり、チップリーククロスを現状型と比較し、段当りの効率向上量を求めた結果を表 2 に示す。

アキシャル及びラジアルフィンを持つ現状型のチップリーククロス 1.54 % に対し、オブリークノズルを用いコスト低減のためにラジアルフィンをなくした改良型では 0.93 % であり、段当りの効率向上量は 0.6 % となる。現状型においてラジアルフィンをなくした場合を基準にすると 1.9 % の効率向上効果がある。

5. あ と が き

機械駆動用蒸気タービンの効率向上技術の中で、タービン内部の蒸気漏えい量低減に着目し、ラビリンスシール及びチップシールの構造改良による性能向上について報告した。

ラビリンスシールについては、フィン形状の適正化によりリー

タービン仕様

定 格 出 力	16000kW	主蒸気圧力	110kg/cm ² G
回 転 数	12000rpm	抽 気 圧 力	46kg/cm ² G
主蒸気温度	510℃	排 気 圧 力	0.12kg/cm ² atm

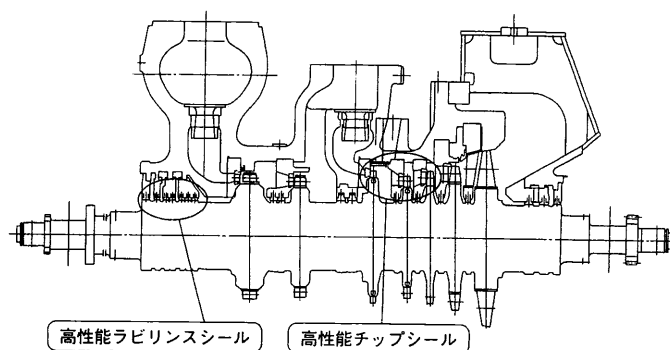


図7 適用タービンの構造断面図
Cross section of applied turbine

表2 改良型チップシールとオブリークノズルを組合せた場合のチップリーククロス計算結果の比較

Comparison of calculated tip leakage loss in combination of improved axial fins and oblique nozzles

ケース番号	形 状	フィン数 (本)		チップリーククロス (%)
		アキシャル方向	ラジアル方向	
1	現状型	1	2	1.54
2	現状型からラジアルフィン除去	1	なし	2.84
3	新型アキシャルフィンとオブリークノズルの組合せ	2	なし	0.93
計算条件		ノズル高さ: 21 mm 速度比 : 0.45 マッハ数 : 0.67		

ク量の大幅低減を実現し、全体効率も向上でき、既に多くの実機へ適用している。チップシールについては、アキシャルフィンの構造改良及びオブリークノズルとの組合せによりチップリーククロスを低減できることを確認した。

これらの最新応用技術による当社蒸気タービンの性能向上については、蒸気タービンメーカーに課せられた永遠の課題であり、今後も一層の高効率化を行い、地球環境も踏まえた省エネルギーに対する顧客ニーズにこたえたいと考えている。

参 考 文 献

- (1) 竹永ほか, 高圧力比衝動タービン段落の研究, ターボ機械 第 17 巻 第 11 号 (1989)
- (2) 小茂島, 非接触シール論, コロナ社 (1970)