

無給油式スクリュウ圧縮機の熱変形解析

井上隆夫*・中川知和**・藤田栄治***・浜川久男****

* ㈱コベルコ科研 ** 技術開発本部・機械研究所 *** 機械事業部・回転機技術部 **** 機械事業部・製造部

Thermo-elastic Analysis of Oil-free Screw Compressors

Takao Inoue・Tomokazu Nakagawa・Eiji Fujita・Hisao Hamakawa

A new EX series oil-free screw compressors, with a smaller rotor diameter than our conventional LZ series were developed for applications with low pressure and large capacity. These new compressors were designed with our original new rotor profile and a simplified cooling system. Finite element analysis was used to design the rotors and the casing. Deformation of the rotors and casing caused by the pressure and heating was calculated using thermo-elastic analysis. The new rotors were not cooled with oil. Moreover, the casing only has a partial cooling-jacket around the outlet nozzle.

まえがき = 新型スクリュウ圧縮機「EX シリーズ」開発に際しては、用途を低圧・大容量に特定することで、1 サイズ大きな当社従来型標準機の「LZ シリーズ」と同等の性能を保持することを目的とし、無駄のない簡素な設計をおこなっている。たとえば、スクリュウロータ（以下ロータと記す）に当社独自の歯型を採用することによる小型化と高速化、ロータの無冷却化によるロータ構造の簡素化、およびケーシング水冷ジャケット構造の簡素化などである。

一般に、スクリュウ圧縮機の構造は、ガスを圧縮する雄と雌の2本のロータとそれを収容するケーシング、およびそれらを補助する種々の機器から構成されている。プロトタイプとして試作したKS50EXは潤滑油などによる圧縮ガスの汚染がない無給油式スクリュウ圧縮機であるため、圧縮工程でのロータ間のガス圧は、雄雌ロータ間およびロータとケーシング間の隙間（以下ロータ隙間と記す）を微量とすることでシールされている。このため、これらロータ隙間は無給油式スクリュウ圧縮機の圧縮性能を保つために非常に重要である。

いっぽう、スクリュウ圧縮機の圧縮工程では、ガスは圧力が上昇するとともに温度も上昇する。これにより圧縮機のロータおよびケーシングが過熱して熱変形するとロータ隙間が変化するため、ロータ隙間拡大による容積効率低下やロータ隙間減少によるロータ同士の接触の危険性が考えられる。このため、従来はロータおよびケーシングを冷却して過熱および熱変形を防止することが多かったが、そのためにロータおよびケーシングの構造が複雑になっていた。そこで、プロトタイプ機KS50EXの開発では、有限要素法（FEM）をもちいて、ロータおよびケーシングの温度変化による熱変形およびガス圧力による変形を評価することで冷却システムの最適化をおこない、ロータの非冷却化およびケーシング水冷ジャケット構造の簡素化をおこなった。本稿では、これらFEM解析による検討結果を報告する。

1. 検討方針

先に述べたように、ロータおよびケーシングが変形あ

るいは膨張すると、ロータとケーシング間および雄雌ロータ間の隙間が変化する。無給油式スクリュウ圧縮機ではロータ間隙間に潤滑油がないために、これらの隙間が異常に変化すると次のような問題を生じる可能性がある。

ロータとケーシングの隙間もしくは雄雌ロータ間隙が設計値より小さくなると、ロータとケーシングもしくは雄と雌のロータが接触して運転不能になる。ロータとケーシングの隙間もしくは雄雌ロータ間隙が設計値より大きくなると、圧縮された高圧側のガスが低圧側に漏れて容積効率が低下する。

ロータとケーシングが変形する要因を大きく分類すると、ロータで圧縮した高圧側のガス圧力による機械的外力変形と、圧縮した高圧側のガスの温度上昇による熱変形の2種類にわけて考えることができる。これらの要因は、ロータおよびケーシングのそれぞれに作用するため、以下の四つの場合について検討することとした。

- (1) ガス圧力によるロータのたわみ
- (2) 加熱によるロータの熱変形
- (3) ガス圧力によるケーシングの変形
- (4) 加熱によるケーシングの熱変形

ただし、ケーシングが動的な振動特性を満足するよう高剛性に設計されていることから、(3)のガス圧力による静的な荷重では問題にならない充分の剛性を有していることが別途確認されていた。このため、本稿ではそのほかの(1)、(2)および(4)の要因について、FEM解析をもちいた検討結果を報告する。

2. 解析検討

2.1 ガス圧力によるロータのたわみの検討

新型「EX シリーズ」のロータでは、容積効率を高めるために歯数を減じたコンパクトな歯型を使用している。歯型を採用しかつ高速化することで、ロータ直径を小さく設計できるが、従来型「LZ シリーズ」と同等の容量を確保するためにロータ長は長くしている。ロータ直径が小さかつロータ長が長くなるとロータのたわみ抵抗（曲げ剛性）が小さくなるため、新型機ロータのガス圧力によるたわみが、運転実績のある従来型「LZ

シリーズ」のそれと同等であることを検討することとした。

なお、新型「EXシリーズ」の最高吐出圧力は従来型「LZシリーズ」の同容量機より若干低く設計されており、このことは吸入ガスと接する低圧部と圧縮ガスに接する高圧部の差圧によるロータたわみには有利となる。

FEM解析は、新型「EXシリーズ」の雄雌ロータ、および従来型「LZシリーズ」の雄雌ロータの計4ロータについて実施した。荷重条件では、雄雌ロータ間のシール線で分割された領域ごとに、圧縮の位相に対応したガス圧を面圧として負荷した。解析モデルの例を第1図に、解析でえられた変形分布を第2図、第3図に示す。

以上の計算結果から、新型「EXシリーズ」のガス圧力によるロータたわみ量は、最大値で比較すれば従来型「LZシリーズ」のそれと同等である。なお、発生応力も設計強度範囲内であることも確認されている。

2.2 加熱によるロータの熱変形

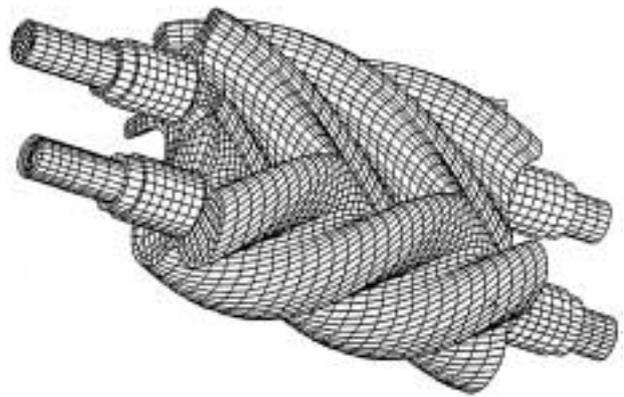
従来の無給油式スクリュウ圧縮機ではロータ中心に冷却孔を設けて油冷却していた。しかし、この構造ではロータと軸が溶接構造となるため、新型「EXシリーズ」では油冷機構を廃した非冷却ロータを採用することとした。そこで、非冷却化により従来型「LZシリーズ」よりも温度が上昇するロータの熱膨張量を評価するため、新型「EXシリーズ」および従来型「LZシリーズ」の雄雌ロータの温度分布および熱変形を求めた。

ロータの温度分布を計算するには、ロータで圧縮するガスの温度（外面雰囲気温度）およびロータ外表面でのガスとの熱伝達係数が必要となる。さらに、従来型「LZシリーズ」のロータでは、冷却油温度および中心孔での油との熱伝達係数が必要となる。

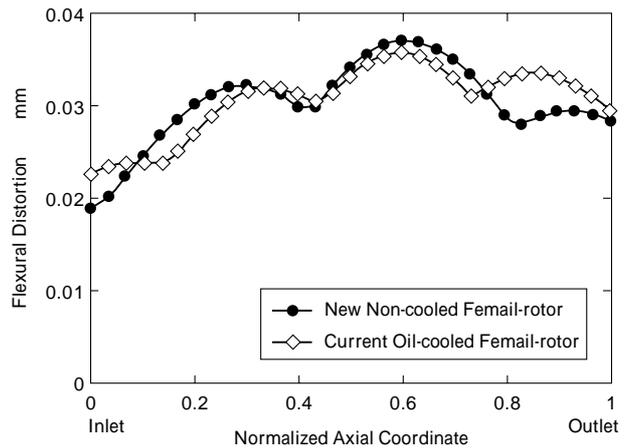
そこで、これらの境界条件を推定するために、比較的短時間でケーシングを分解可能な小型圧縮機をもちいて、ロータ表面温度計測実験をおこなった。この計測では運転停止直後にケーシングを分解して赤外線放射温度計でロータ表面の温度履歴を計測することにより、運転停止時のロータ表面温度を外挿することで求めた。ロータ外表面の雰囲気温度を軸方向位置ごとにロータが接触するガスの平均温度と仮定し、式(1)に示す乱流熱伝達モデルのJohnson・Rubesinの式¹⁾で計算した熱伝達係数を使用して、FEM解析で小型圧縮機のロータ温度を計算したところ、ロータ表面温度の計算結果と実測値がほぼ一致した。これから、ロータ外面の雰囲気温度および熱伝達係数は、新型「EXシリーズ」および従来型「LZシリーズ」の設計値（ガス温度、ロータ寸法および回転数）から同様に式(1)で計算した値をFEM解析にもちいることとした。

$$h = \frac{1}{l} \cdot Nu, \quad Nu = 0.0296 \cdot Pr^{2/3} \cdot Re^{4/5} \dots \dots \dots (1)$$

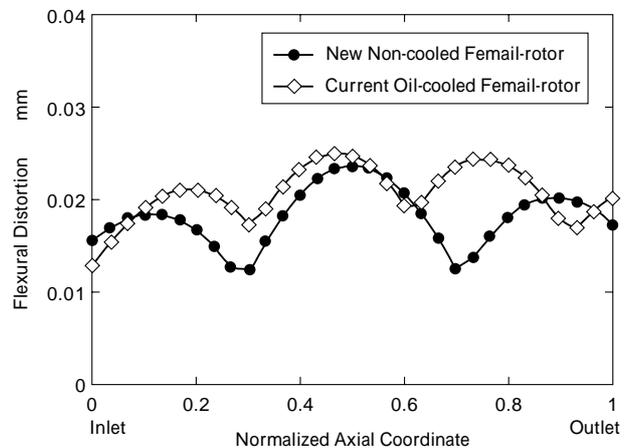
- ここで、 h : 熱伝達率
- : 熱伝導率
- l : 代表長さ
- Nu : ヌセルト数
- Pr : プラントル数



第1図 新型ロータの計算モデル
Fig. 1 FEA model for new screw-rotor



第2図 ガス圧力による新旧雌ロータのたわみ量比較
Fig. 2 Flexural distortion of new and current female-rotors under pressure

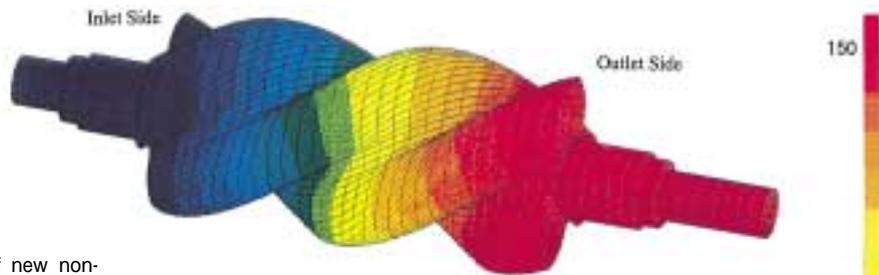


第3図 ガス圧力による新旧雄ロータのたわみ量比較
Fig. 3 Flexural distortion of new and current male-rotors under pressure

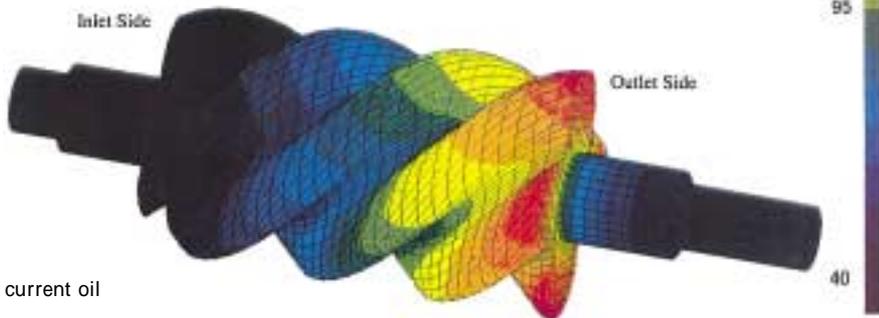
Re : レイノルズ数

いっぽう、従来型「LZシリーズ」ロータの油冷却孔内面については、雰囲気温度は冷却油の入側温度と出側温度の平均と仮定した。また、熱伝達係数は冷却油の熱収支から計算することとし、冷却孔で伝わる熱量が冷却油の温度上昇量と流量から計算される吸収熱量と等しいと仮定して求めた。

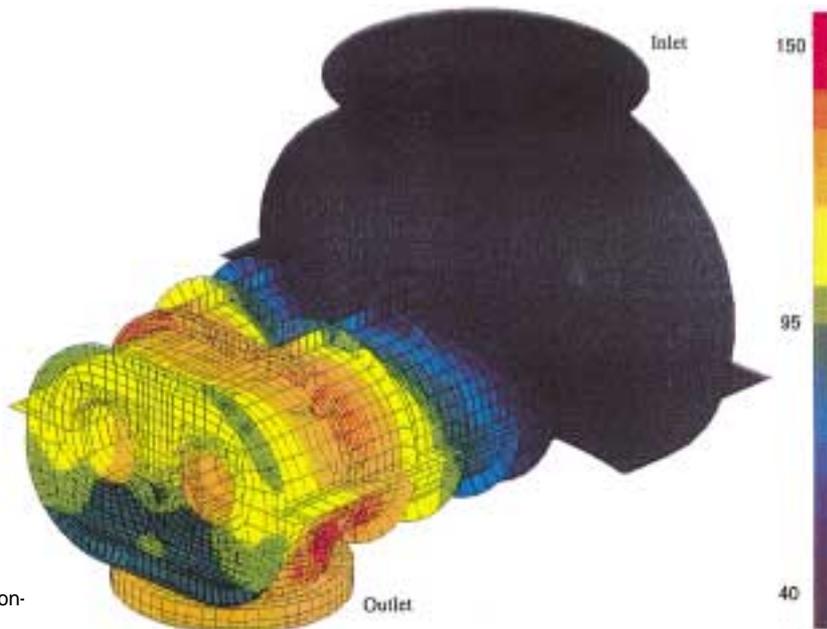
解析結果の例として、新型「EXシリーズ」ロータの温度分布を第4図に、従来型「LZシリーズ」ロータの温度分布を第5図に示す。これらから、非冷却の新型



第4図 新型雄ロータの温度分布
Fig. 4 Temperature distribution of new non-cooled male-rotor



第5図 従来型雄ロータの温度分布
Fig. 5 Temperature distribution of current oil-cooled male-rotor



第6図 非冷却ケーシングの温度分布
Fig. 6 Temperature distribution of non-cooled casing



第7図 部分冷却ケーシングの温度分布
Fig. 7 Temperature distribution of partial-cooled casing

ロータは、中心孔で油冷する従来型ロータよりも高温になることがわかる。そこで、この温度分布から膨張量を計算してケーシング軸受部の熱変形量とともに考慮し、ロータ同士の接触を回避しつつ圧縮性能を確保するための適切なロータ外径寸法を決定した。

2.3 加熱によるケーシングの熱変形

従来型「LZシリーズ」のケーシングは、ほぼ全面に水冷ジャケットを設けた複雑な形状の鋳物であり、高度な鋳造技術が要求されていた。そこで、新型「EXシリーズ」では鋳物構造簡素化とケーシング軽量化のために水冷ジャケットを簡素化することとし、条件(1)として水冷ジャケットを全廃した非冷却ケーシング、および条件(2)としてガスが高温になる吐出部近傍にのみ水冷ジャケットを設けた部分冷却ケーシングの2条件について、ケーシングの温度分布および熱変形量をFEM解析により検討した。

ケーシングの温度分布を計算するには、ロータと同様に雰囲気温度と熱伝達係数が必要となる。そこで、ケーシング内面では、雰囲気温度はその部位が接する代表的なガス温度、熱伝達係数はロータと同様に運転条件からJohnson-Rubesinの式をもちいて計算した。ケーシング外面は、水冷ジャケットを設ける場所と廃止する場所に分け、水冷廃止部は大気放冷として式(2)に示す層流熱伝達モデル²⁾をもちいて熱伝達係数を求め、水冷部では冷却水を雰囲気温度として、冷却ジャケット構造および冷却水流量からJohnson-Rubesinの式をもちいて熱伝達係数を計算した。

$$h = \frac{1}{l} \cdot Nu$$

$$Nu = C_1 \cdot Ra^{1/4}$$

$$C_1 = \frac{3}{4} \left(\frac{Pr}{2.4 + 4.9 \sqrt{Pr} + 5Pr} \right) \dots\dots\dots (2)$$

- ここで、 h : 熱伝達率
: 熱伝導率
 l : 代表長さ
 Nu : ヌセルト数
 Ra : レーレー数
 Pr : プラントル数

条件(1)の水冷ジャケットを全廃した非冷却ケーシングの温度分布を第6図に、条件(2)のガスが高温になる吐出部近傍にのみ水冷ジャケットを設けた部分冷却ケーシングの温度分布を第7図に示す。

条件(1)の計算結果から、水冷ジャケットを全廃して無冷却ケーシングとすると、吐出部近傍が150以上の高温になることがわかる。この温度分布から熱膨張量を計算し、ロータの熱膨張量とともに容積効率を試算したところ、ケーシングの熱変形量が過大なために容積効率が低下し、目標性能確保が困難なことがわかった。いっぽう、条件(2)の計算結果から、吐出部近傍のみを冷却すれば、ケーシング表面の最高温度は100程度となることがわかる。この温度分布から熱膨張量を計算して同様に圧縮性能を試算したところ、圧縮性能は低下せず、容積効率の目標値を確保できることが明らかになった。

むすび=新型無給油式スクリュウ圧縮機「EXシリーズ」(プロトタイプ機 KS50EX)の開発に際し、新たな設計項目についてFEM解析による検討をおこない、

- (1) 容積効率に優れた当社独自の歯型(雄:3枚,雌:5枚)ロータの軸剛性を検討した結果、ガス圧力による新型「EXシリーズ」ロータのたわみは、従来型「LZシリーズ」のそれと同等であることを確認した。
- (2) 軽量で簡素な構造とした非冷却ロータおよび部分冷却ケーシングの熱膨張量を検討してロータ寸法(隙間)を決定した結果、新型「EXシリーズ」は従来型「LZシリーズ」以上の容積効率を確保できることを確認した。

今後は、これらの検討結果および検討手法を他のスクリュウ圧縮機開発に活用し、さらに市場ニーズに合致した製品を開発していく所存である。

参考文献

- 1) たとえば、日本機械学会編：伝熱工学資料改定第4版，(1986)，p.46，日本機械学会発行．
- 2) たとえば、日本機械学会編：伝熱工学資料改定第4版，(1986)，p.69，日本機械学会発行．