

# 低圧・大容量無給油式スクリュ圧縮機「EX シリーズ」

藤田栄治\*・浜川久男\*\*

\*機械事業部・回転機技術部 \*\*機械事業部・製造部

## Oil-free Screw Compressors for Low Pressure & Large Capacity Use 「EX Series」

Eiji Fujita・Hisao Hamakawa

Major applications for oil-free screw compressors are found in styrene monomer, linear alkyl benzene and soda ash plants, where suction and discharge pressures are relatively low, but large capacity is needed.

To satisfy the market for competitive and reliable compressors, we have developed the oil-free EX series screw compressors by using our in-house rotor-profile development technology. The KS50EX model was designed, manufactured and shop tested to confirm performance and mechanical reliability. In this paper, the design concepts and test results of these shop tests are introduced.

まえがき = 家庭用のプラスチック系雑貨品や自動車部品およびコンピュータボードの原材料に幅広くもちいられているスチレンモノマプラントや高級アルコール系洗剤の原料となるリニアアルキルベンゼンプラントなどに代表される石油化学プラントでは、比較的低压であるが大容量の無給油式スクリュ圧縮機が要求される。この要求に対し、適用される用途を特定して圧縮機本体や付属システムの簡素化と小形化を図り、市場からの省スペース化や短納期化の要求に合致した無給油式スクリュ圧縮機「EX シリーズ」の市販を開始した。

「EX シリーズ」機は、当社独自で開発した新歯型を持ち、当社無給油式スクリュ圧縮機の1サイズ大きなロータ径の旧来の圧縮機に置き換わるものである。本稿では、この「EX シリーズ」を開発するにあたって、設計方針と試作したKS50EX 圧縮機本体の試運転での機械性能の把握と解析の結果について紹介する。

### 1. 設計仕様

無給油式スクリュ圧縮機がもっとも多くもちいられている用途の特徴として下記の項目が挙げられる。

- 1) 吐出ガス圧力が低压である。
  - 2) ガス中に異物が含有されている。
  - 3) 圧縮過程でポリマが生成される可能性がある。
  - 4) 圧縮熱を除去するためとガス中の異物を洗浄するために内部に注水をおこなう。
  - 5) 比較的大容量が要求される。
- 代表的な用途としては、
- ・スチレンモノマプラント用オフガス圧縮機
  - ・ブタジエン抽出プラント用圧縮機（低压段）
  - ・ソーダ灰プラント用 CO<sub>2</sub> 圧縮機
  - ・リニアアルキルベンゼンプラント用リサイクルガス圧縮機

第1表 仕様一覧表

Table 1 Specification table for KS50EX and KS63LZ

No.	Specification	KS50EX	KS63LZ
	Casing Design Pressure kPaG	343	490
	Maximum Continuous Discharge Pressure kPaG	294	441
	Maximum Continuous Speed rpm	5 880	4 500
	Maximum Theoretical Displacement Volume m <sup>3</sup> /h	60 000	57 000

などがある。

これらの用途に対しては当社の標準型式「LZ シリーズ」で対応してきたが、さらに適合した「EX シリーズ」を開発することとした。開発に際しては、まず、市場で要求される仕様を決定した。次にその仕様に基づいて、旧来の当社KS63LZに代る第1表に示す仕様のKS50EX型プロトタイプ機を製作し、十分な試運転をおこなって性能と機械的安定性が要求事項に合っていることを確認した。

いっぽう、占有面積やメンテナンスの容易性などに対する市場の要求に応じるため、以下を目標として開発をおこなった。

- 1) 圧縮機および付属品の簡素化による占有面積の削減 ... 20%
- 2) 圧縮機本体の重量軽減(保守用クレーン能力削減)... 30%
- 3) 圧縮機の納期短縮 ..... 10%

### 2. 設計概要

「EX シリーズ」機の開発は、前章に示したこれらの目標を達成するために以下に示すような設計を実施した。

#### 2.1 ロータ、ケーシングの最適化

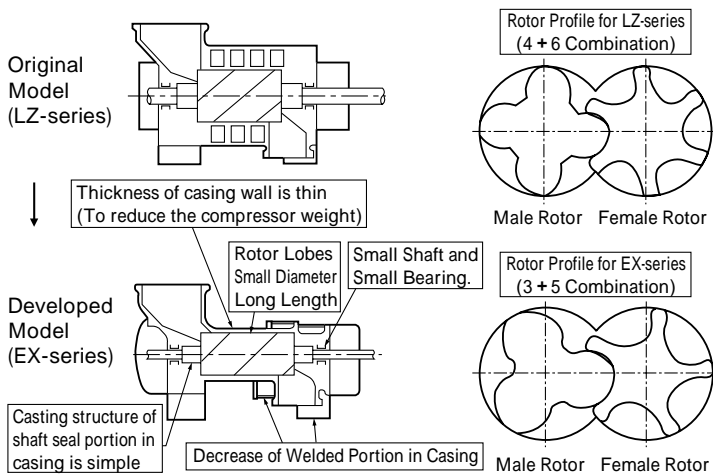
##### 1) ロータ設計

スクリュ圧縮機の理論行程体積 ( $V_{th}$ ) は次式で表される。

$$V_{th} = C \times D^3 \times L/D \times N \times 60 \text{ m}^3/\text{h}$$

- $C$  : 歯形によって決定される係数
- $L$  : ロータ長さ
- $D$  : ロータ径
- $L/D$  : ロータの長径比
- $N$  : 回転数

当社は歯形開発プログラムを保有しており、用途に応じた歯形を独自に開発し、採用してきた。今回の開発では、第1図に示すように「LZ シリーズ」機でもちいて



第1図 構造比較図  
Fig. 1 Comparative figure of structure

いるSRM社の標準ロータ歯数組合せ(雄:4枚,雌:6枚)から新歯形(雄:3枚,雌:5枚)に切り換え,ロータの長径比を増して行程体積を増大させた。

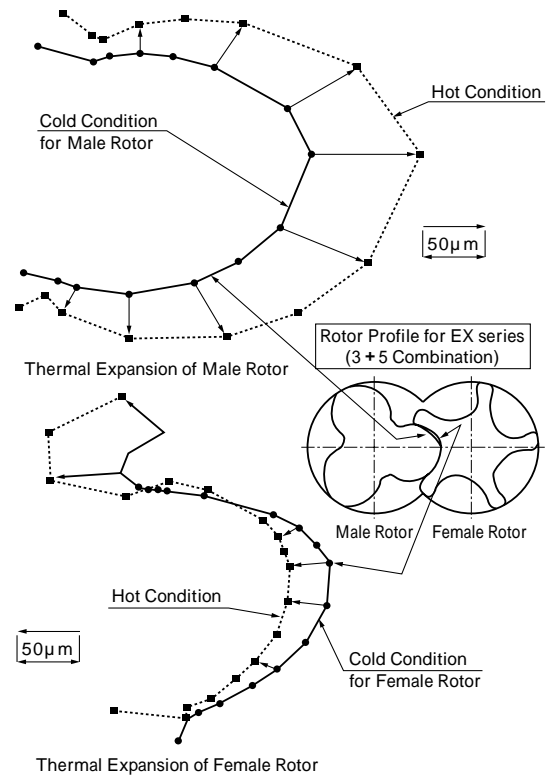
同一ロータ径においては,ロータ歯数が小さいほど,ロータ軸剛性は減少するが,歯溝空間容積は増加して処理容量が増大される。今回の特定された用途では,吸込と吐出の圧力差が小さく,ロータ軸に作用するガス荷重も小さいため「LZシリーズ」ほどのロータ軸剛性は要求されないので,FEM解析によるたわみ解析をおこない,ロータ軸剛性が機械強度上問題のないことを事前に予想した。また,圧縮熱に起因したロータ熱膨張によるロータ同士の接触を回避するために,従来はロータ内部に冷却穴を設け,潤滑油を冷却媒体として通していた。この冷却穴を設けるためには,ロータと軸を溶接する工程を必要としており,コストと納期に影響を与えていた。これを解決するため,第2図に示すようにFEMをもちいて,ロータ熱膨張解析を実施し,高温の吐出ガスでロータが熱膨張してもロータ内部冷却が不要となるロータ隙間を決定した。

## 2) ケーシング設計

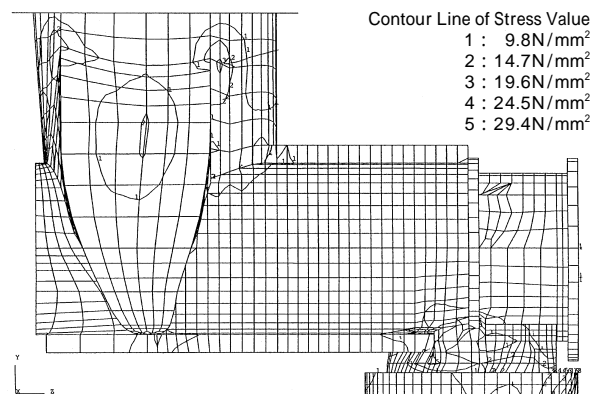
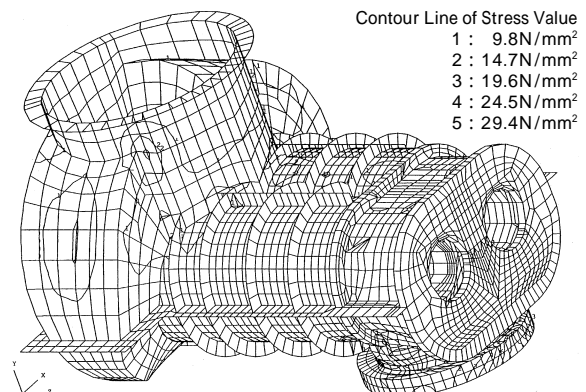
用途を低圧用に特定するため,ケーシング重量の軽減と構造の簡素化をおこなった。ケーシングについても,FEMによる耐圧強度解析をおこない,その結果に基づいて,ケーシング肉厚とリップの位置と形状を決定した。その強度解析の一例を第3図に示す。最大応力は,第3図の応力等高線3(作用応力=19.6N/mm<sup>2</sup>)であり,ケーシング材料(SCW480)の許容応力470N/mm<sup>2</sup>に対して十分な余裕を有している。

### 2.2 高速化

2.1節による新歯形の採用に加えて,ロータ回転数の高速化を図ることにより,ロータ歯部外径の呼び径を「LZシリーズ」機から1サイズ小形化することができた。高速化については,それまでの当社基準であった最高ロータ周速140m/sを167m/sまで増大することを目指した。このロータ周速は,スクリュウ圧縮機では世界最高レベルにある。ロータ固有振動解析と軸受温度評価を実施し,問題がないことを事前に予想した。



第2図 ロータ歯部熱膨張解析結果  
Fig. 2 Thermo-elastic analysis of rotor lobes



第3図 ケーシング耐圧解析結果  
Fig. 3 Pressure resistance analysis of casing

### 2.3 鋳物構造の簡素化

無給油式スクリュウ圧縮機のケーシングは,一般に構造が複雑であるので高度な鋳造技術が要求される。品質安定と工程短縮のために,鋳物業者の技量に依存しない構造が望まれていた。この構造を実現するために,圧縮過

程のガス温度によるケーシングの熱膨張をFEM解析により予想して構造の最適化を図り、とくに鑄造難易度が高い吐出ノズル周囲の冷却ジャケット部を簡素化した。

材質は、炭素鋼鑄鋼材 SCW480 を標準仕様とした。また、内部注水をおこなう場合のように耐食性が要求される時には、圧縮室ロータ部に数mm厚のオーステナイト系ステンレス材の肉盛溶接を施すこととした。この溶接肉盛は当社が1989年からスチレンモノオプガス用途に採用してきている確立された技術である。ステンレス鑄鋼一体ケーシングにくらべて経済的であり、ケーシングの熱歪みによる悪影響も回避できる。

#### 2.4 軸封システムの簡素化

従来、軸封システムには軸受の油膜をシール油膜として兼用したシール方式（軸受油膜シール）やメカニカルシールを主に採用してきた。スチレンモノオプガス用では、プラント内のユーティリティ用として使われる低圧蒸気を軸封媒体としたスチームシールを採用することにより、軸封周囲の配管が簡素化された。これによって、他のシール方式と比較して機器や計装品の個数を削減することが可能となり、シール部の付属配管も簡素化できた。スチレンモノマ以外の用途で軸受油膜シールやメカニカルシールの要求があった場合には、これらに対応できるようにも設計されている。

#### 2.5 必要潤滑油量の低減

新歯形採用にともないロータ軸径が減少し、軸受油量の低減を図ることができ、これによって、潤滑油装置のサイズの縮小を実現することができた。

#### 2.6 要求仕様を満足する構造

石油化学プラント用で一般的に適用される米国規格 AP1619 の要求を満足する構造とした。すなわち、ロータの軸振動は各ジャーナル軸受近傍でX-Y方向2点（合計8点）、軸移動は雄ロータ・雌ロータとも2点（合計4点）まで測定可能としている。

内部に注入した水や異物・ポリマの排出が容易なように、吐出ノズルをケーシング下部に置き下向けにした。また、保守の便宜性を考慮し、水平分割構造のケーシングとした。

#### 2.7 従来機と同等以上の性能の確保

性能に影響を及ぼすロータ歯形の隙間についてFEMによるロータの熱膨張解析を実施し、ロータ歯形隙間を決定した。なお、FEM解析においては、従来から蓄積したロータ実体温度的実測データに基づいて温度境界条件を設定している。

### 3. 試運転結果およびFEM解析の検証結果

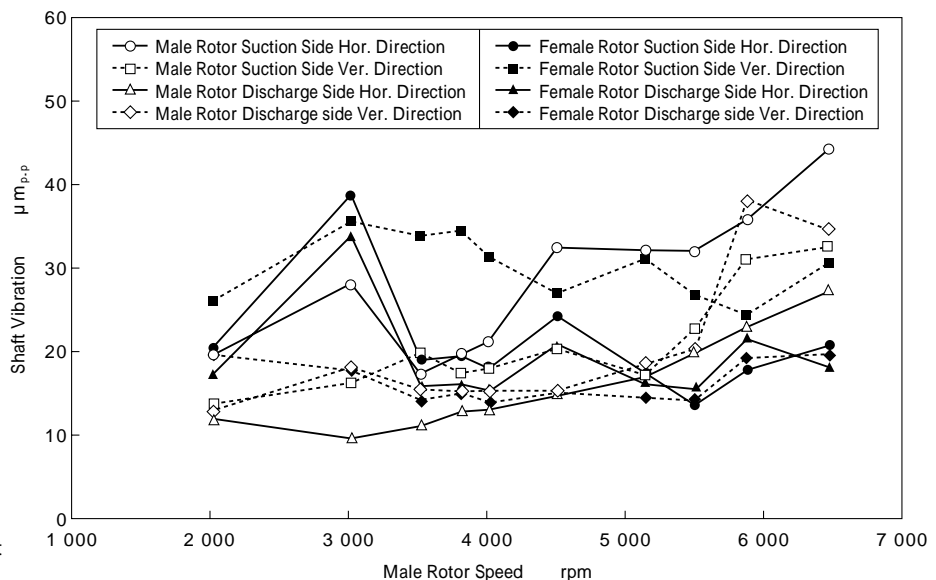
延べ約100時間の所内での空気運転をおこない、機械的に安定した状態で運転可能であることを確認するとともに、設計仕様に基づく運転においても問題がないことを確認した結果を以下に述べる。また、運転データからFEM解析の妥当性を検証する。

#### 3.1 機械的安定性

このクラスのスクリュウ圧縮機では、過去に例のない最高回転数でも、軸受温度や軸振動が許容範囲内で安定していることが確認できた。

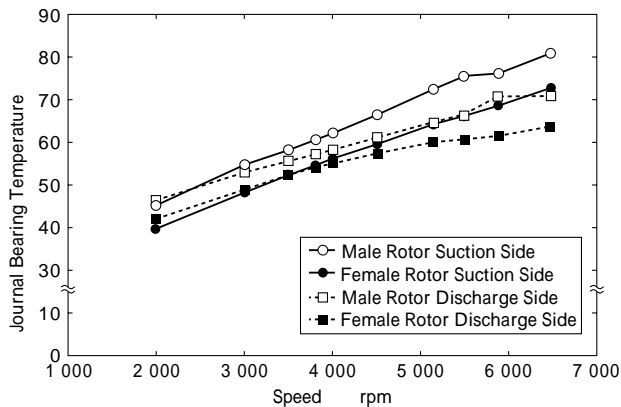
軸受油膜支持を考慮した雄ロータの横振動数固有値解析では、1次危険速度が9000rpmであり、最高許容回転数の5880rpm（ロータ周速167m/s）に対して153%の余裕率があった。第4図に示す所内試運転結果のように5880rpmまで昇速し、軸振動読取値がAP1619に基づく許容値54 $\mu$ mに対して、全般に39 $\mu$ m以下であった。また、トリップ速度6470rpm（ロータ周速184m/s）まで昇速し、15分間保持した際の軸振動値も47 $\mu$ mであり、上記最高許容回転数でも十分な余裕があった。

スクリュウ圧縮機は、ロータ自身の回転数とは別に、脈動周波数成分（雄ロータ回転数×ロータ歯数）の加振力を有している。一般にスクリュウ圧縮機の特徴として、この脈動周波数とロータ固有振動数が近接すると、共振作用による軸振動の増大が発生する。この振動は、回転体自身の回転数との共振ほど大きくはないが、今回の場合は、雌ロータの固有振動数と脈動周波数が近接しており雄ロータ3000rpm（雌ロータ1800rpm）付近で共振することが予想され、試運転でもその傾向は見られた。しかし、軸剛性が十分にあったため、軸振動は許容値以下であった。



第4図 軸振動測定結果

Fig. 4 Measured data for shaft vibration



第5図 ジャーナル軸受温度測定結果  
Fig. 5 Measured data for bearing temperature

ジャーナル軸受温度は、第5図に示すように5880rpmで78、6470rpmでも82.9であり、ホワイトメタルの最高許容温度125から決定した軸受温度許容値95以下であった。

### 3.2 性能

容積効率および軸動力について、事前の計算値と所内運転での実測性能との比較を第2表および第3表に示す。代表的な回転数である4000rpmでは、容積効率および軸動力ともに計算値とほぼ一致している。以上のように、目標性能を達成し、従来機と同等の性能が確保された。

### 3.3 FEM解析境界条件の検証結果

#### 1) ロータ

最高吐出温度(想定したすべての用途に対応可能な180)でも、ロータ接触を生じることなく連続運転が可能であり、ロータ熱膨張解析結果をもとに設定したロータ歯形隙間が適正であることが検証できた。また、圧縮機停止直後に熱電対をロータ表面に貼り付けて冷却の時間的変化を測定した。このロータ表面温度履歴を外挿して、運転時のロータ実温度を推定した結果、FEM解析に使用したロータ温度と一致していることを確認できた。

#### 2) ケーシング

耐圧強度は、515kPaG(設計圧力343kPaGの1.5倍)の耐圧試験を実施して、強度確認をおこなった。また、熱変形に対しては、ロータとケーシングの局所的な接触も生じず、熱膨張解析結果の妥当性が裏付けられた。ケーシング表面や吐出ノズル内部に熱電対を取付けて、運転中の実温度を計測し、FEM解析の温度境界条件が妥当であることも確認した。

むすび= 試作した当社の「EXシリーズ」無給油式スクリュウ圧縮機の代表形式KS50EXの試運転をおこない、所期の性能と機械的安定性を確認した。これにより、ユーザの要求仕様を満足し、品質的に安定した低圧・大容

第2表 容積効率比較表(4000rpm)

Table 2 Comparative table of volume efficiency at 4000rpm

	Volume Efficiency for Air	
	Calculation Data	Measured Data
Pressure Ratio = 7.0	84.0%	85.5%
Pressure Ratio = 6.0	85.0%	85.0%
Pressure Ratio = 3.0	95.0%	95.4%

第3表 軸動力比較表(4000rpm)

Table 3 Comparative table of shaft power at 4000rpm

	Shaft Power for Air	
	Calculation Data	Measured Data
Pressure Ratio = 7.0	100%	97.5%

第4表 EXシリーズ仕様一覧表

Table 4 Specification table for EX series

No.	Specification	KS40EX	KS50EX	KS63EX
	Maximum Continuous Discharge Pressure kPaG	294	294	392
	Maximum Continuous Speed rpm	6796	5880	4500
	Maximum Theoretical Displacement Volume m <sup>3</sup> /h	35400	60000	79000

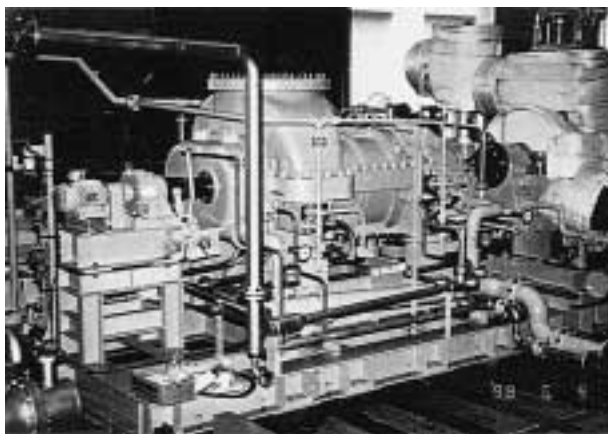


写真1 インドネシア向KS50EX形スチレンモノマガス圧縮機  
Photo 1 Styrene monomer gas compressor for Indonesia Model KS50EX

量用石油化学プラント向無給油式スクリュウ圧縮機を市場に送り出すことができた。「EXシリーズ」機にはKS40EX、KS50EX、KS63EXの3機種が準備されており、その仕様一覧を第4表に示す。おな、1998年6月に、インドネシア向スチレンモノマプラント用に写真1に示すKS50EX台1号機を出荷した。

今回、適用される用途を特定することによって、市場からの要求に合致した競争力のある圧縮機「EXシリーズ」が開発できた。今後他分野のプロセスガス用途の無給油式スクリュウ圧縮機においても、本開発機と同様な設計・製造手法をもちい、その用途で競争力のある圧縮機を市場に送り出していく。