

単段オイルフリースクリュー圧縮機

Single Stage, Oil Free Screw Compressors

電子関連、食品、化学などの産業で使われるオイルフリー圧縮機として、近年スクリーュー圧縮機が広く用いられるようになってきた。従来、これらのオイルフリースクリュー圧縮機は性能と信頼性の面から2段機が用いられていたが、需要の多い小容量機に対して2段機では、レシプロ式に比べて高価になるため、構造が簡単で安価な単段機が望まれていた。

そこで、コンピュータシミュレーションによって内部漏洩が少なく高効率な新歯形と、ロータ熱変形を補償した設計法を開発し、従来2段機でしかできないとされていた圧力比8を単段機で実現した。これにより、37~55kWの小形パッケージ形オイルフリースクリュー圧縮機を世界で初めて製品化したので以下に紹介する。

茂利英智* *Hidetomo Mori*
 糟谷勝彦* *Katsuhiko Kasuya*
 高橋康夫** *Yasuo Takahashi*
 鈴木 昭** *Akira Suzuki*

1 緒言

電子関連、食品、化学などの産業で広く使われている汎用オイルフリー圧縮機は一般にレシプロ式が多く用いられているが、近年スクリーュー式の信頼性が高く振動騒音の少ない点がユーザーに評価され、容量75kW以上のものは2段圧縮のスクリーュー式が主流になりつつある¹⁾。しかし、需要の多い75kW以下に対して構造の複雑な2段機ではレシプロ式に対して価格競争力がないため、今日まで国内外で製品化された例はなかった。このため、部品点数が少なく構造が簡単で安価な単段機が望まれていたが、単段機は2段機に比べ圧力比や吐出し空気温度が高いなど、その運転条件が著しく厳しいため、従来は効率と信頼性の面から開発が困難とされていた。

そこで日立製作所は、高圧力比で高効率を得られる新歯形を開発するとともに、効率と信頼性に大きく影響するロータ熱膨張の技術課題に関しては、あらかじめ熱膨張を考慮した新しい設計法を見だし、運転中のロータ間ギャップの最適化を図った。これによって、従来2段機でしかできないとされていた圧力比8を単段機で実現し、この成果をもとに世界で初めて37~55kWの小形オイルフリースクリュー圧縮機を製品化した。以下、本稿はこれについて紹介する。

2 単段圧縮機の技術課題

スクリーュー圧縮機は、ケーシング内で互いにかみ合う一對の雄ロータ・雌ロータの歯溝内にガスを閉じ込め、ロータを回転させることによって歯溝の容積を減少させガスを圧縮する回転容積形圧縮機である。圧縮中のガスの漏れは圧縮機の効率低下をもたらすので、雄ロータ・雌ロータやケーシングの間に形成されるギャップはできるだけ小さくし、ガスの漏れを防ぐ必要がある。油噴射式スクリーュー圧縮機では、これらのギャップに油膜を形成してシール効果を高めているが、オイルフリースクリュー圧縮機では、ギャップの大きさや形状によってシール効果を高める以外に手段はなく、これらの各部ギャップからのガスの内部漏洩が圧縮機の効率を左右する最大の要因である。

一例として、吐出し圧力 ゲージ圧力 7 kgf/cm^2 のオイルフリー空気圧縮機で、ロータ間ギャップによって圧縮機効率がどのように変化するか、シミュレーションした結果を図1に示

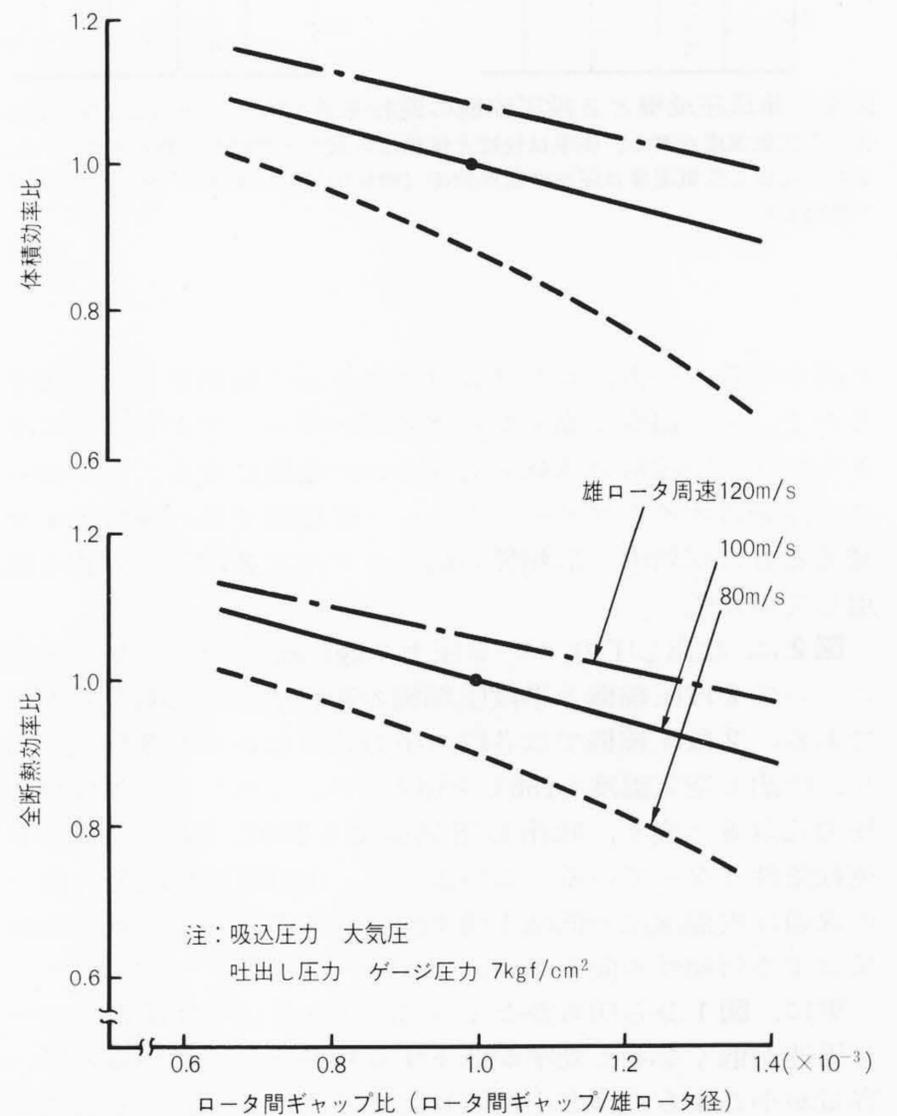


図1 ロータ間ギャップと圧縮機効率の関係 オイルフリースクリュー空気圧縮機で、ロータ間ギャップが圧縮機効率にどのように影響するか、シミュレーションした結果を示す。ロータ周速が低いほど影響の度合いが大きい。

す。同図は雄ロータ周速100m/s、ロータ間ギャップ比0.001のときの効率を1.0として示したものである。

ガスの内部漏洩とともに問題となるのは、ガスの温度とロータの熱膨張である。一般にガスは圧縮されると温度が上昇するが、内部漏洩があるときは高压高温側から漏れたガスが低压低温側のガスを加熱するので、圧縮ガスの温度はますます

* 日立製作所機械研究所 ** 日立製作所習志野工場海老名分工場

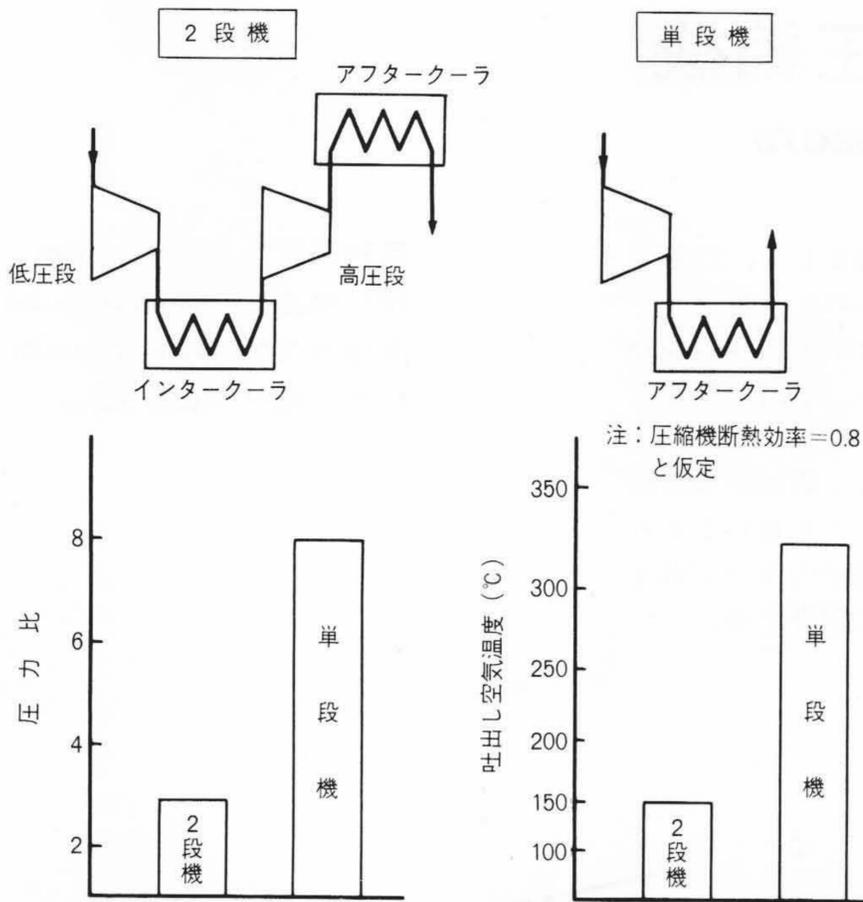


図2 単段圧縮機と2段圧縮機の運転条件比較 単段機は圧力比や吐出し空気温度が高く、従来は性能と信頼性の面から開発が困難とされていた。なお、吐出し空気温度は圧縮機断熱効率（機械損失を含まず。）を0.8と仮定して算出した。

す高くなる。一方、ロータはガスによって加熱され熱膨張するので、ガス温度が高くなると各部のギャップがしだいに小さくなり、圧縮機の運転を続けるのが危険になる。したがって、従来のオイルフリースクリー圧縮機では、圧力比4を超えるものは効率と信頼性の面からすべて2段圧縮方式を採用していた²⁾。

図2は、吐出し圧力 ゲージ圧力 7 kgf/cm²の汎用空気圧縮機について2段圧縮機と単段圧縮機の運転条件を比較したものである。2段圧縮機では各段の圧力比はたかだか3程度であり、吐出し空気温度も150℃を超えない。これに対し単段機の圧力比は8と高く、吐出し空気温度も300℃を超える厳しい運転条件となっている。このように、単段圧縮機開発の第一の課題は内部漏洩の低減と効率向上、第二はロータ熱膨脹対策による信頼性の向上といえよう。

更に、図1から明らかなように、スクリー圧縮機はロータ周速が低くなると効率が低下する特性をもっているため、容量が小さなものほど小径のロータを高速で駆動する必要があり、軸振動に対する配慮が要求される。これら小容量単段オイルフリースクリー圧縮機の開発に際し、考慮しなければならない技術課題をまとめると図3のようになる。

3 技術開発

これらの課題に対して、各部の要素解析及び基礎実験を通じて新技術の研究開発に努めたので、主なものについて以下に述べる。

3.1 新歯形

スクリーロータの歯形は、その良否が直接圧縮機の性能を左右する最も重要な因子であり、次の点に優れた歯形でなければならない。

(1) ロータやケーシングの間にガスの漏れを防ぐシールラインを形成すること。また、シールラインは短く、かつシール

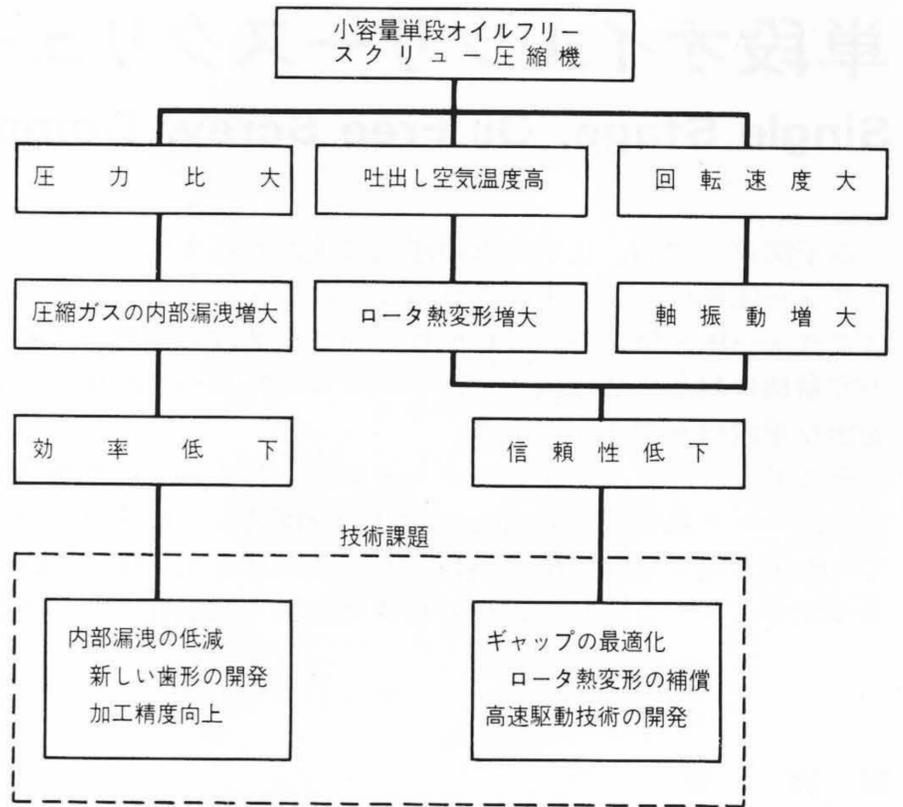


図3 単段圧縮機開発の技術課題 圧縮機の効率と信頼性の向上が主な技術課題である。

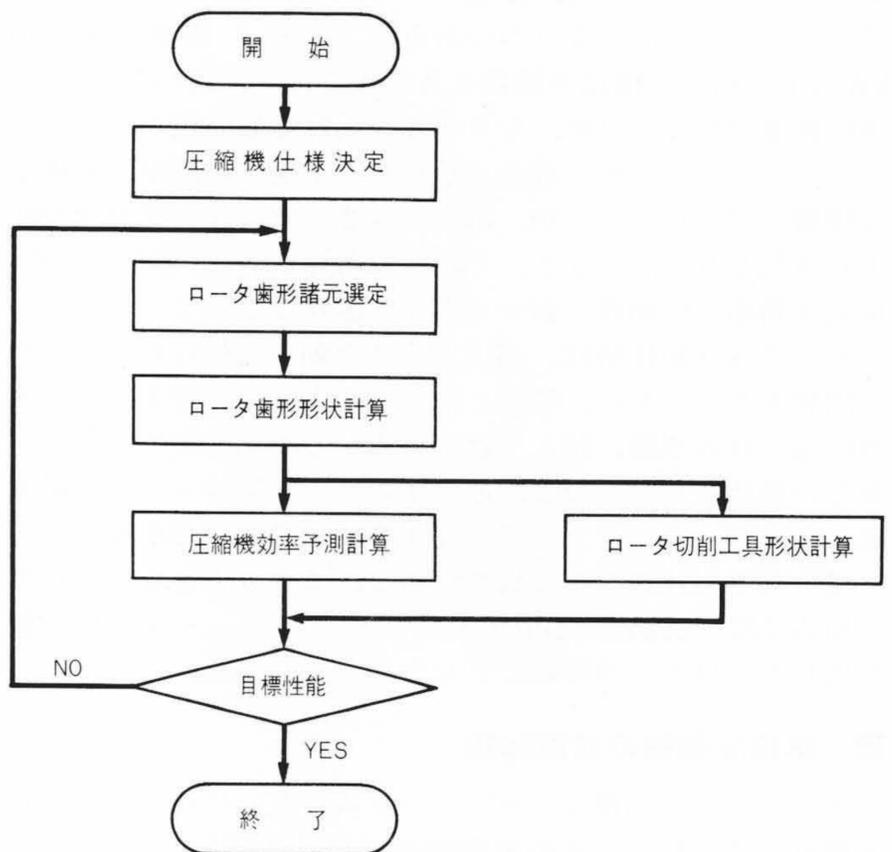


図4 歯形開発の手順 新歯形開発は、コンピュータを利用して図のような手順で進められる。

部分の形状がガスの漏れにくい形状であること。例えば、とがった角部によるシールよりも面シールのほうが望ましい。(2) 一般にロータやケーシング間のギャップは、ロータ径の $\frac{1}{1,000}$ 以下にする必要があり、ロータは特に高精度の加工を必要とする。したがって、加工性の優れた歯形でなければならない。

従来、これらの観点からいろいろな歯形が開発され使用されている。これらの歯形の開発には多大の労力と費用を要するので、コンピュータを利用したCAD(Computer Aided Design)が非常に有効な手段である³⁾。図4に日立製作所が用いた歯形開発の概要手順を示す。

このようにして種々の歯形を比較検討した結果、単段オイ

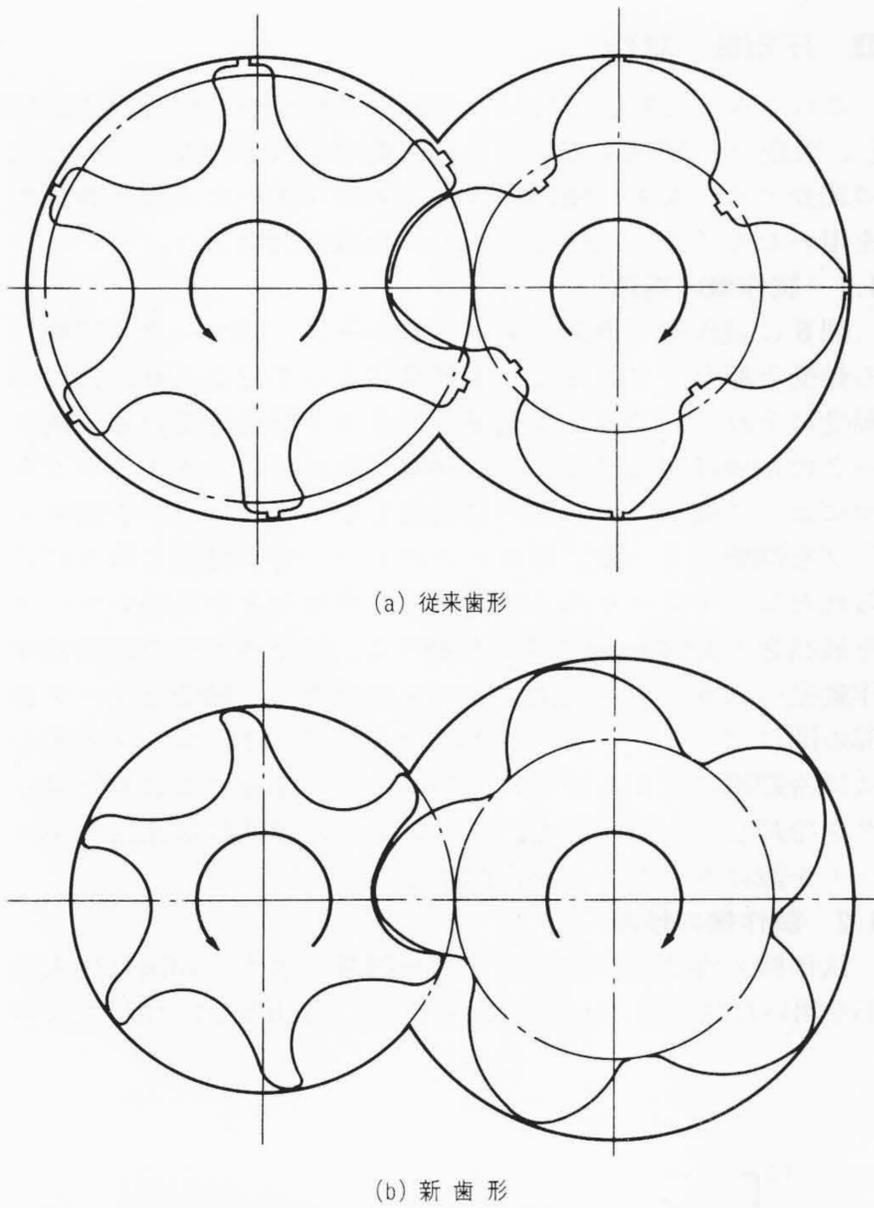


図5 新歯形と従来歯形 新歯形は従来歯形に比べて内部漏洩が少なく、高効率が期待できるとともに、加工性にも優れている。

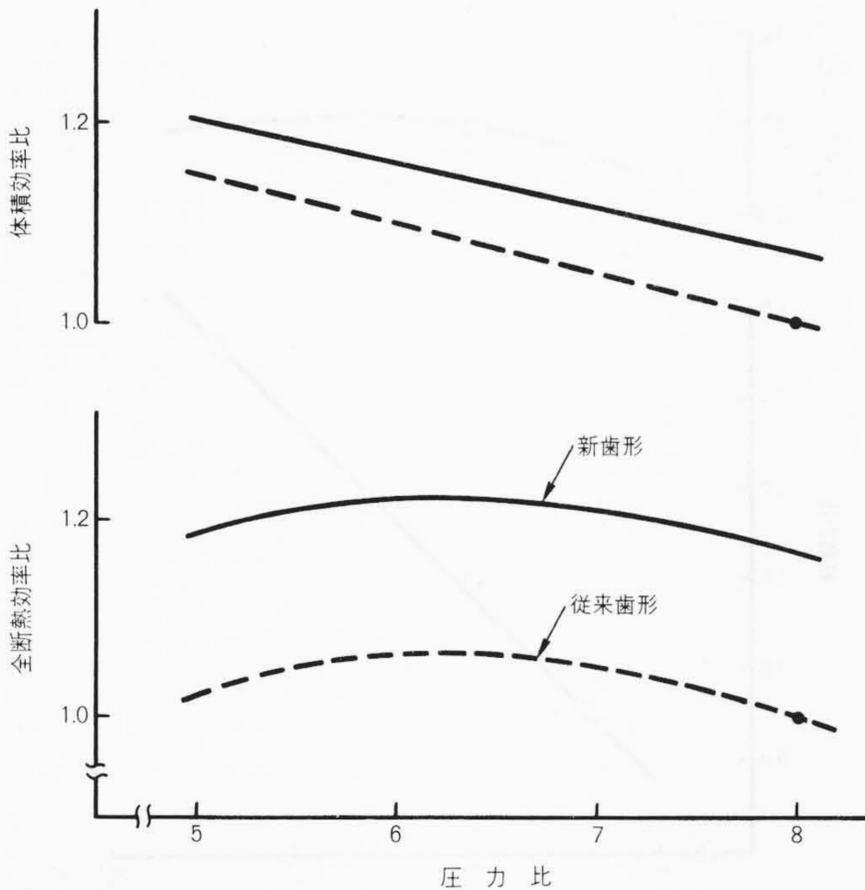
ルフリースクリーユ圧縮機用として、図5に示す新しい歯形を採用することにした。この新歯形は、従来の歯形に比べ下記に述べるような特長をもっている。

- (a) 雄ロータと雌ロータの歯数組合せとして、理論的に内部漏洩の少ない雄ロータ5枚、雌ロータ6枚の組合せとした。
- (b) ロータ間やロータとケーシング間のシールラインの不連続部分が短く、かつシール面が面シールとなるような歯形曲線を選定し、内部漏洩通路を小さくした。
- (c) 歯形曲線を生産性の高いホブ切削に適したものとし、ロータ加工精度を向上させ内部漏洩通路のギャップを小さくした。

オイルフリー空気圧縮機の性能をシミュレートした結果、図6に示すように新歯形は従来歯形に比べて体積効率で約7%、全断熱効率で約17%の効率向上が期待できることが分かった。

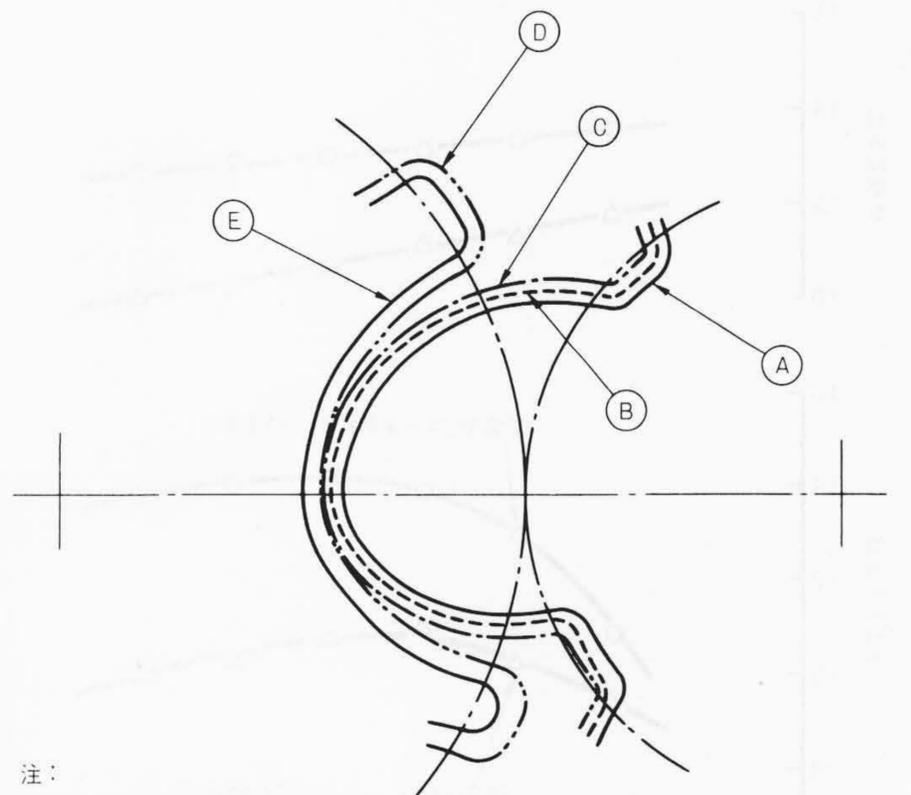
3.2 ロータ熱膨張の補償

圧縮機の信頼性と効率に大きく影響するロータ熱膨張の技術課題に対しては、あらかじめ熱膨張を考慮してロータ歯形やロータ切削用ホブを設計する方法を開発した。新設計法の基本概念を図7に示す。まず常温での雄ロータ、雌ロータのいずれか一方の歯形を基本歯形Aとし、このロータが熱膨張したときの歯形Bを求める。更に、歯形Bに対して圧縮機の信頼性を考慮したロータ間ギャップをもった歯形Cを求め、歯形Cにより相手側の歯形Dを創成することによって運転中のロータ間ギャップを最適化することができる。ホブは歯形Aと歯形Dを常温に戻したときの歯形Eを切削するように設計される。この新しい設計法によれば、従来のロータ熱膨張を考慮しない設計法に対して運転中のロータ間ギャップを約40~50%小さくすることができ、図1から明らかなようにロータ周速100m/sのとき約13%の全断熱効率の向上が期待できる。



注：吸込圧力 ゲージ圧力0kgf/cm²(大気圧)
 吸入温度 20℃
 ロータ周速 80m/s
 ロータ間ギャップ比 0.67×10⁻³

図6 新歯形と従来歯形の効率比較 新歯形と従来歯形を用いたオイルフリー空気圧縮機の効率をシミュレートした結果を示す。図は圧力比8での従来歯形機の効率を1.0として示した。



注：

- ① 常温での雄ロータ歯形
- ② 熱膨張後の雄ロータ歯形
- ③ タイミングギャップのバックラッシュなど、信頼性を考慮してギャップを設けた雄ロータ歯形
- ④ ③歯形によって創成される雌ロータ歯形
- ⑤ 常温での雌ロータ歯形

図7 ロータ熱膨張補償方法 ロータ熱膨張を考慮した歯形と加工法開発によって、運転中のロータ間ギャップを最適化することができた。

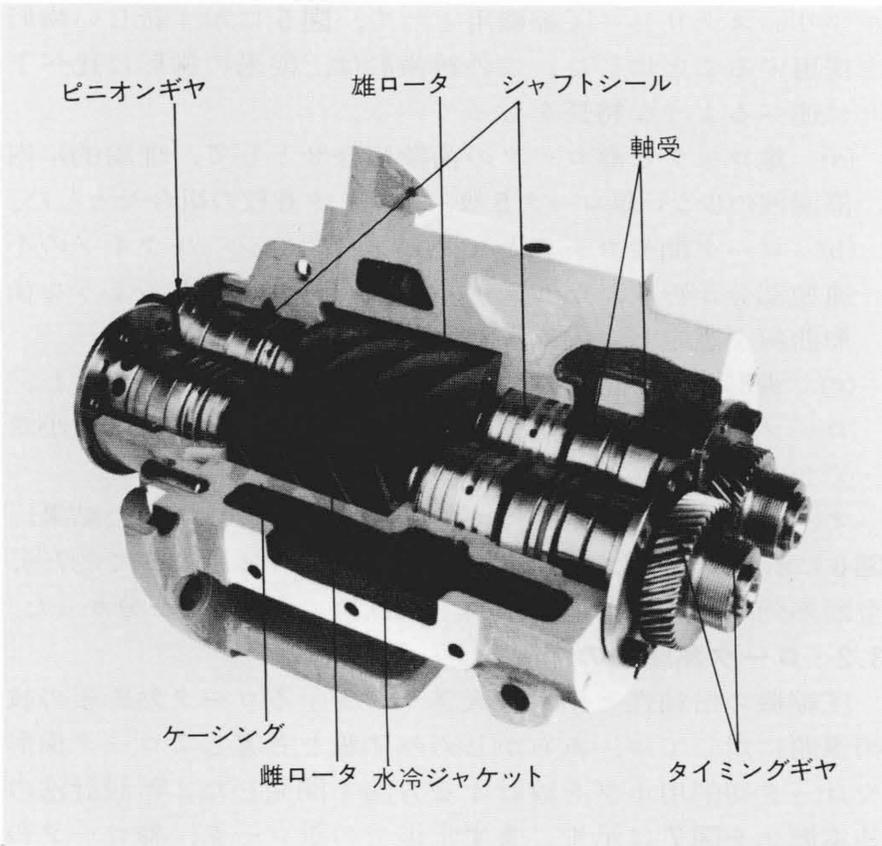


図8 試作圧縮機 37~55kWオイルフリー空気圧縮機の試作機内部構造を示す。

4 圧縮機の試作

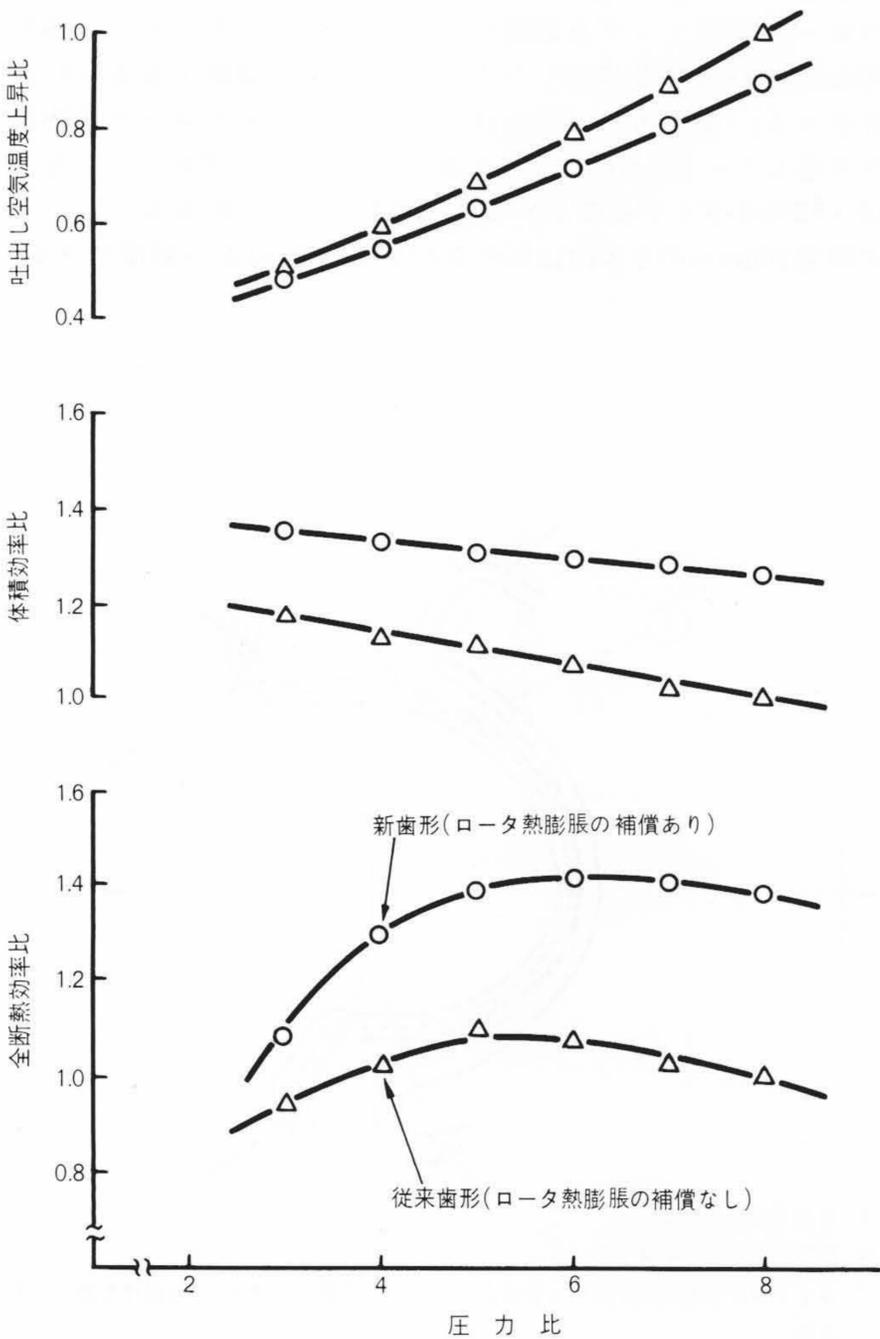
これらの成果をもとに、37~55kW実機相当の圧縮機を試作し、性能と信頼性双方の面から広範な試験を行なったので次に紹介する。なお、圧縮機は従来歯形を用いたものと新歯形を用いたものとを試作し、両者の比較も行なった。

4.1 試作機の構造

図8に試作機の構造を示す。雄ロータ、雌ロータは円筒ころ軸受と組合せアンギュラ玉軸受によって支えられ、二つの軸受はそれぞれラジアル荷重とスラスト荷重を受ける。両ロータの歯面は無潤滑なため、軸端に取り付けたタイミングギヤによって両ロータが互いに接触しないようにロータ間ギャップを調整している。雄ロータのもう一方の軸端に取り付けられたピニオンギヤは、増速機のブルギヤとかみ合いロータを最高2万4,000rpmで高速駆動する。軸受やギヤの潤滑油が作動室へ入り空気を汚染するのを防ぐため、軸受とロータ歯部の間にはシャフトシールが設けられている。ロータの軸心には冷却用の穴が明けられ、潤滑油の一部をここに導きロータを冷却している。また、ケーシングの周囲には水冷ジャケットを設けケーシングを冷却する。

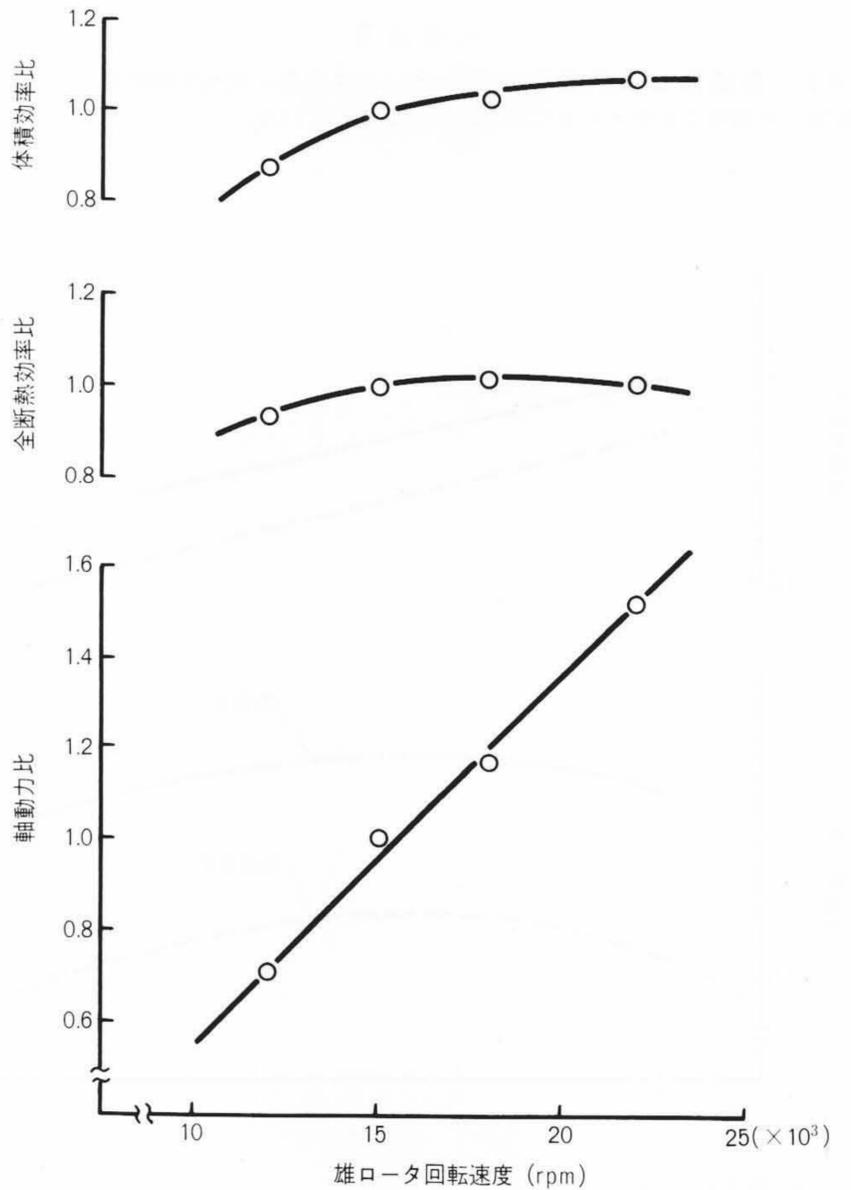
4.2 試作機の性能

試作機の性能試験結果の一例を図9に示す。同図は従来歯形を用いた試作機の仕様点での特性値を1.0とし、相対的な差



注：吸込圧力 ゲージ圧力0kgf/cm²(大気圧)
吸込温度 20℃

図9 試作機の性能試験結果 新歯形を用いた試作機と従来歯形を用いた試作機との性能を比較して示す。図は仕様点(圧力比8)での従来歯形機の特値を1.0として相対比較を示したものである。



注：吸込圧力 ゲージ圧力0kgf/cm²(大気圧)
吸込温度 20℃
吐出し圧力 ゲージ圧力7kgf/cm²

図10 新歯形を用いた試作機の特値 ロータ回転速度を変えたときの試作機の特値を示す。回転数1万5,000rpmのときの特値を1.0として示した。

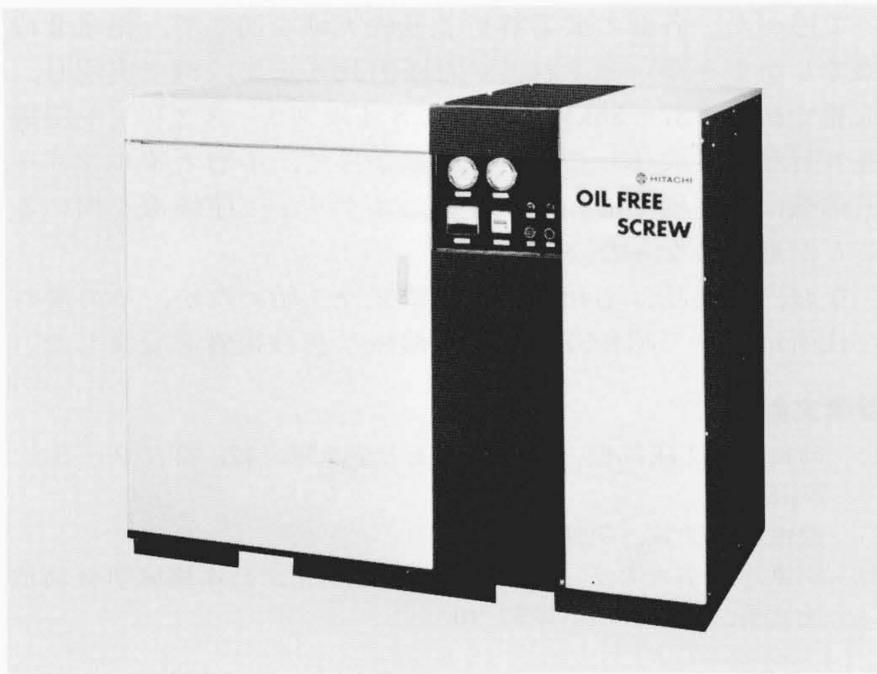
を示したものである。新歯形を用いた試作機は体積効率と全断熱効率が大幅に向上し、吐出し空気温度の上昇割合も小さい。この傾向は圧力比が高いところほど顕著であり、新歯形による漏洩損失低減効果の大きいことが分かる。単段圧縮機の仕様点である圧力比8では、新歯形を用いた試作機は従来歯形を用いたものに比べて、相対的に体積効率で27%、全断熱効率で38%と大幅な効率向上を得ることができた。回転速度を変えたときの新歯形試作機の特性を図10に示すが、広い範囲で安定した性能を示している。

これらの試験結果によって、新歯形を用いれば従来2段機でしかできないとされていた圧力比8を、単段機で実現できる見通しを得た。

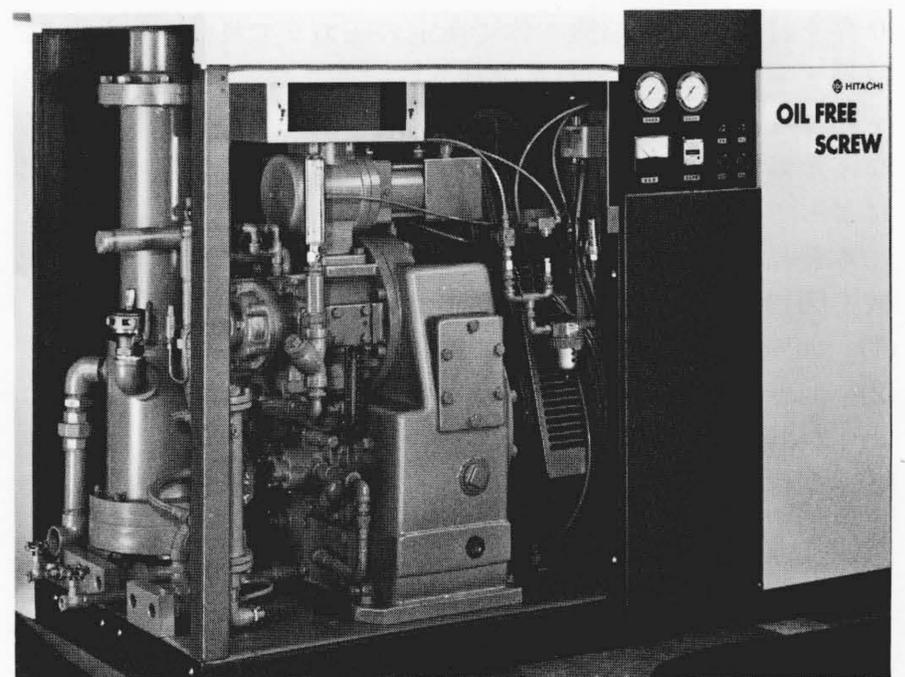
5 パッケージ形空気圧縮機

このように、要素解析と基礎実験によって単段機実用化の見通しを得たので、この成果を適用して37~55kWパッケージ形オイルフリー空気圧縮機を製品化した。図11にユニットの外観と内部構造を、図12に概略フローシートを示す。また、標準仕様を表1に示す。

圧縮機本体、増速機、電動機、アフタークーラ、オイルクーラ、容量制御装置、始動盤などはすべて共通ベース上に配置され、全体を防音カバーで覆ったパッケージ構造となっている。駆動方式はベルト増速とギヤ増速の2段増速方式とした。機種、電源周波数などによる吐出し空気量の変化は、圧縮機



(a) 外観



(b) 内部構造

図11 パッケージ形オイルフリー空気圧縮機 37~55kWユニットの外観及び内部構造を示す。全体を防音カバーで覆ったパッケージ構造となっており、ユニットの据付や運転が容易である。

表1 37~55kWパッケージ形オイルフリー空気圧縮機仕様 吐出し空気量は、吐出し圧力時に吐き出す空気量を吸込状態(大気圧)に換算した値を示す。

項目	機種 単位	DSP-37W			DSP-45W			DSP-55W		
		DSP-37W	DSP-45W	DSP-55W	DSP-37W	DSP-45W	DSP-55W	DSP-37W	DSP-45W	DSP-55W
吐出し圧力	ゲージ圧力 kgf/cm ²	7			4					
電源周波数	Hz	50/60								
吐出し空気量	m ³ /min	4.3	5.2	6.6	6.0	6.9	8.1			
吸込圧力・温度	—	大気圧・0~40℃								
吐出し温度	℃	水温+13℃								
吐出し管径	B	1 1/2								
駆動方式	—	ベルト掛け+ギヤ増速								
電動機出力	kW	37	45	55	37	45	55			
電源電圧	V	200/200, 220								
始動方式	—	△-△								
換気扇出力	kW	0.1								
冷却水水温	℃	32以下								
冷却水水量	l/min	60	80	60	80					
冷却水管径	B	アフタークーラ給水1B, オイルクーラ給水1/2B, 排水1B								
初期潤滑油量	l	13								
総重量	kg	750	780	800	750	780	800			
外形寸法	mm	幅1,550×奥行770×高さ1,200								
騒音	dB(A)	70			72					

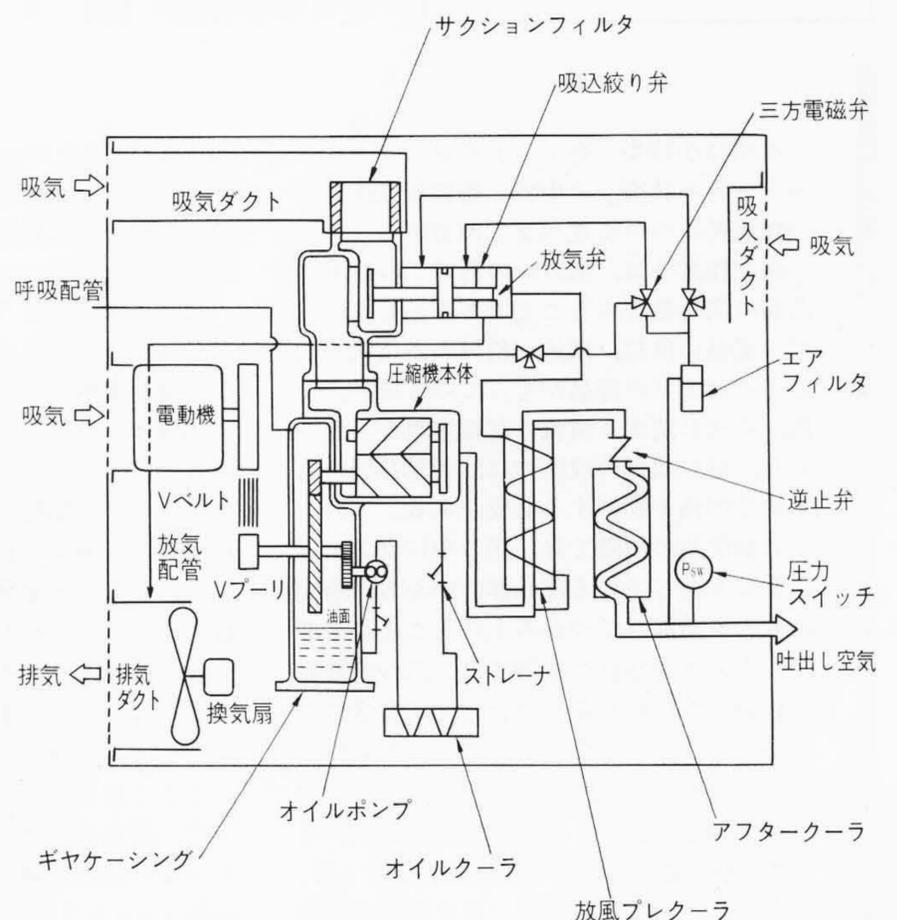


図12 ユニットの概略フローシート 圧縮機本体は、ベルトとギヤによって2段増速される。

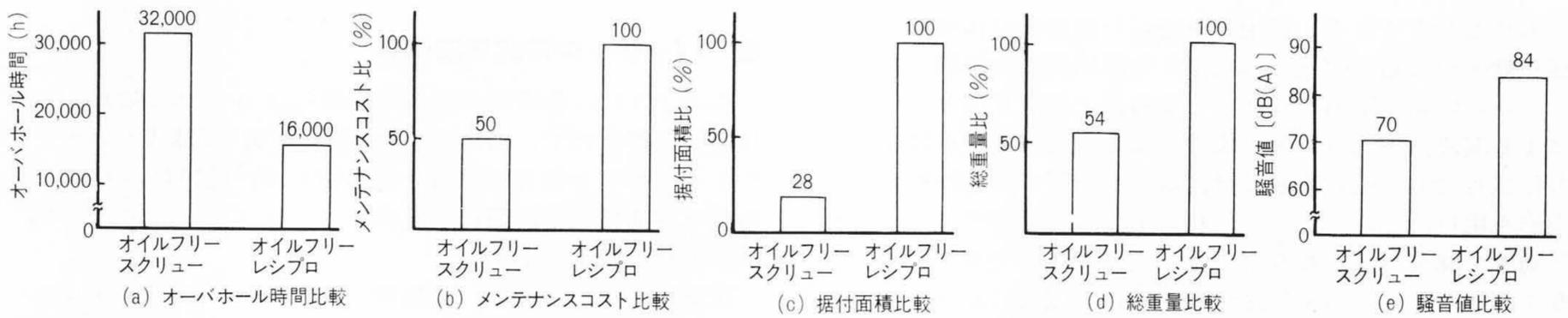


図13 単段オイルフリースクリー圧縮機とレシプロ式オイルフリー圧縮機の特長比較(当社比) スクリュー式はレシプロ式に対して、多くの特長をもっている。

回転速度を変えることによって対応しているが、この場合圧縮機本体と増速機は全機種共用とし、ベルト増速比を変化させている。空気は吸気ダクト、サクションフィルタ、吸込絞り弁を経由して圧縮機本体で所定の圧力まで昇圧されたのち、放風プレクーラでいったん冷却され、逆止弁、アフタークーラを経て吐き出される。防音カバー内は圧縮機、電動機、配管などからの放熱によって温度が上昇するので、別置の換気扇によって換気冷却する。

本製品と従来のレシプロ式オイルフリー圧縮機との特性比較を図13に示す。本製品は下記のような特長をもっている。

- (1) 世界初の小容量単段オイルフリースクリー圧縮機。
- (2) 回転形圧縮機のため振動が少なく、騒音はレシプロ式に比べ14dB低減。
- (3) 据付面積はレシプロ式の $\frac{1}{4}$ 、重量は $\frac{1}{2}$ と大幅に小形・軽量化。
- (4) レシプロ式のバルブのような摺動部品がないため、信頼性が高く長寿命であり、メンテナンスコストはレシプロ式の $\frac{1}{2}$ 。

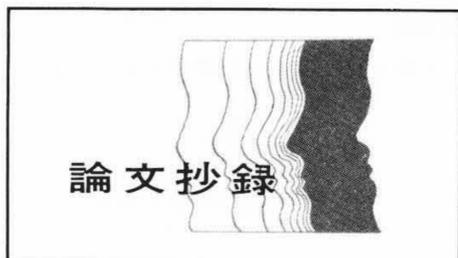
6 結 言

以上、単段オイルフリースクリー圧縮機開発の概要について述べた。各部の要素解析と基礎実験を通じて、従来2段機でしかできないとされていた圧力比8を単段機で実現し、世界で初めて37~55kWクラスのオイルフリースクリー圧縮機の製品化に成功した。本製品によって、小形オイルフリー圧縮機にも安価で信頼性に優れたスクリー圧縮機を用いることが可能になった。

なお、本製品は昭和57年5月に発売を始めたが、その優れた技術によって昭和57年度日本機械学会技術賞を受賞した。

参考文献

- 1) 白田, 外: 圧縮機の動向, 油圧と空気圧, 12, 3, 2~5 (昭56-5)
- 2) 機械工学便覧, 第10編, 第2章
- 3) 藤原, 外: スクリュー圧縮機の性能解析, 日本機械学会講演論文集, No.820-14(昭57-10)



組み立てるロボット

日立製作所 後藤達生
電気学会雑誌 100—9, 802~805 (昭57-9)

本稿は小特集「高インテリジェントロボットとその技術」の中で、特に組立作業での知能性について述べたものである。

組立作業とは、何らかの形で二つ以上の部品の間を結合することである。したがって、部品の供給、搬送、組付の各段階を通してそれぞれの部品がもっている形状、位置、姿勢に関する情報の認識処理が必要であり、更に組付の段階では、両部品間の力学的な関係を制御する必要がある。

部品供給の段階では、箱の中にランダムに重なり合っている部品群の中から、所定のものを識別してつかみ上げることが必要となる。また組付の段階では、二つの部品の相対的な位置や姿勢を合わせ、力学的に結合することが必要となる。これらの作業では、人間の場合でも視覚、触覚、力感覚といった繊細な感覚と手先の器用な動き、そして経験に基づく知識の利用が必要である。

上述した二つの機能は、組立作業実行段階での適応動作制御に関するもので、Bin

Picking 問題及びはめあい問題として、前者は主として視覚の応用、後者は触覚、力感覚の応用として知能ロボット研究の中心的課題となってきた。

組立作業でのもう一つの知能性は、ロボットに与える組立内容の命令理解機能である。現在実用されている産業用ロボットの大部分は、ロボットの動きを逐一記述指示する形のものが多い。しかし、多様な組立に対応できる知能ロボットでは、個々の動作ではなく図面や自然言語のような作業の目的に相当する命令を与えても、これを理解する能力のあることが望ましい。そして、その目的を遂行するのに必要な細かな作業の手順は、ロボット自身が作業環境や対象部品などを認識した上で決定し、実行していくことになる。命令の理解、環境のモデル化、組立順序の決定などの機能は、高いレベルの知能に属し、知識データベースを活用するかなり大がかりなソフトウェアシステムになる。スタンフォード大学、MIT、

そして日立の図面によって組み立てるロボットなどは、このような知能性に特徴をもつシステムであった。

次に、組立作業のなかで最も重要なはめあい作業では、穴を効率よく探索する動作が必要となる。適切な探索パターンを選定するとともに、過去の経験データに基づく習熟機能なども実現していくためには、ハンドリング手順を決定するための知能性が必要となる。

組立作業は、扱う部品の寸法や配置の精度とばらつき、形状の複雑さと材質、そしてはめあいでのクリアランスレシオと面取りの有無などによって、ロボットに要求される機能も大幅に異なってくる。筆者らが開発した柔軟機構を生かしたはめあい制御方式では、これらの問題を単純化している。

積木の世界が対象であった組立ロボットも、視覚認識能力と触覚制御能力の向上によって、複雑形状の柔軟物体の組立さえ可能となってきている。