

スクロール圧縮機とそのパッケージ形空調機への適用

Scroll Compressor and Its Application to Packaged Air Conditioner

店舗、オフィスなどで用いられるパッケージ形空調機の省電力、小形・軽量化をいっそう推進するための新しい回転式容積形圧縮機として、このたび2.2~3.75kWのスクロール圧縮機を実用化した。日立のスクロール圧縮機は、日立製作所独自の中間圧利用旋回スクロール支持機構と、量産に適した精密加工技術の適用によって、スクロール圧縮機の優れた圧縮原理を実現し、従来の往復動圧縮機に比べ体積で40%の小形化、重量で15%の小形化と平均10%の全断熱効率向上、約5dBの騒音低減を達成している。

日立スクロール圧縮機は、昭和58年3月から、店舗、オフィス用ヒートポンプ式天井つり形パッケージ形空調機に搭載し、発売している。

荒井信勝* Nobukatsu Arai
 小谷純久* Sumihisa Kotani
 内川直志** Naoshi Uchikawa
 寺田浩清** Hirokiyo Terada

1 緒言

昭和48年に端を発した石油危機以来、省エネルギー、省資源が産業界の最大の課題となっている。空調機についても省電力化、小形化が推進され、日立製作所は、圧縮機、熱交換器の効率向上やサイクル、制御の改善でこれに対応してきた。なかでも圧縮機の効率向上は、圧縮機が空調機の消費電力の大部分を占めるため、最も重要な課題として取り組んできた。

店舗、オフィスで用いられるパッケージ形空調機や家庭用ルームエアコンには容積形圧縮機が用いられている。従来は主として往復動圧縮機が用いられていたが、前述の省電力化及びこれに加えた小形・軽量化への対応から、効率、重量などの点で有利な回転式容積形圧縮機が採用されはじめ、日立製作所でも、図1に示すように、1.1kW以下はローリングピストン形、22kW以上はスクリー形に置き換えられている。しかし、1~15kWの機種では図2に示す2.2~3.75kWに代表される往復動形の効率改善もあり、往復動形をしのぐ回転式

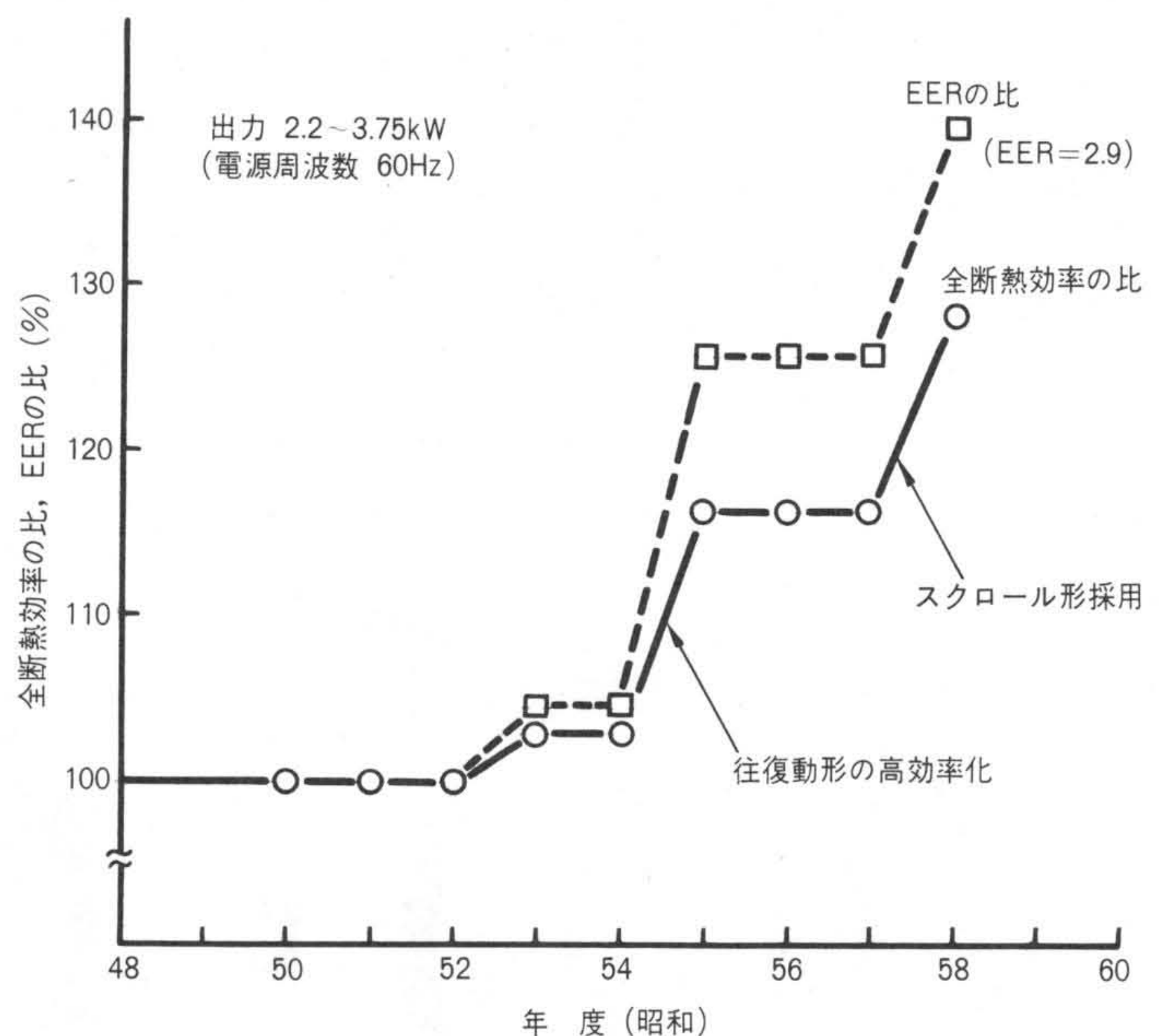


図2 空調機用圧縮機の性能の推移 昭和50年度製日立製作所2.2~3.75kW圧縮機の効率及びEERの平均値を100として示した。

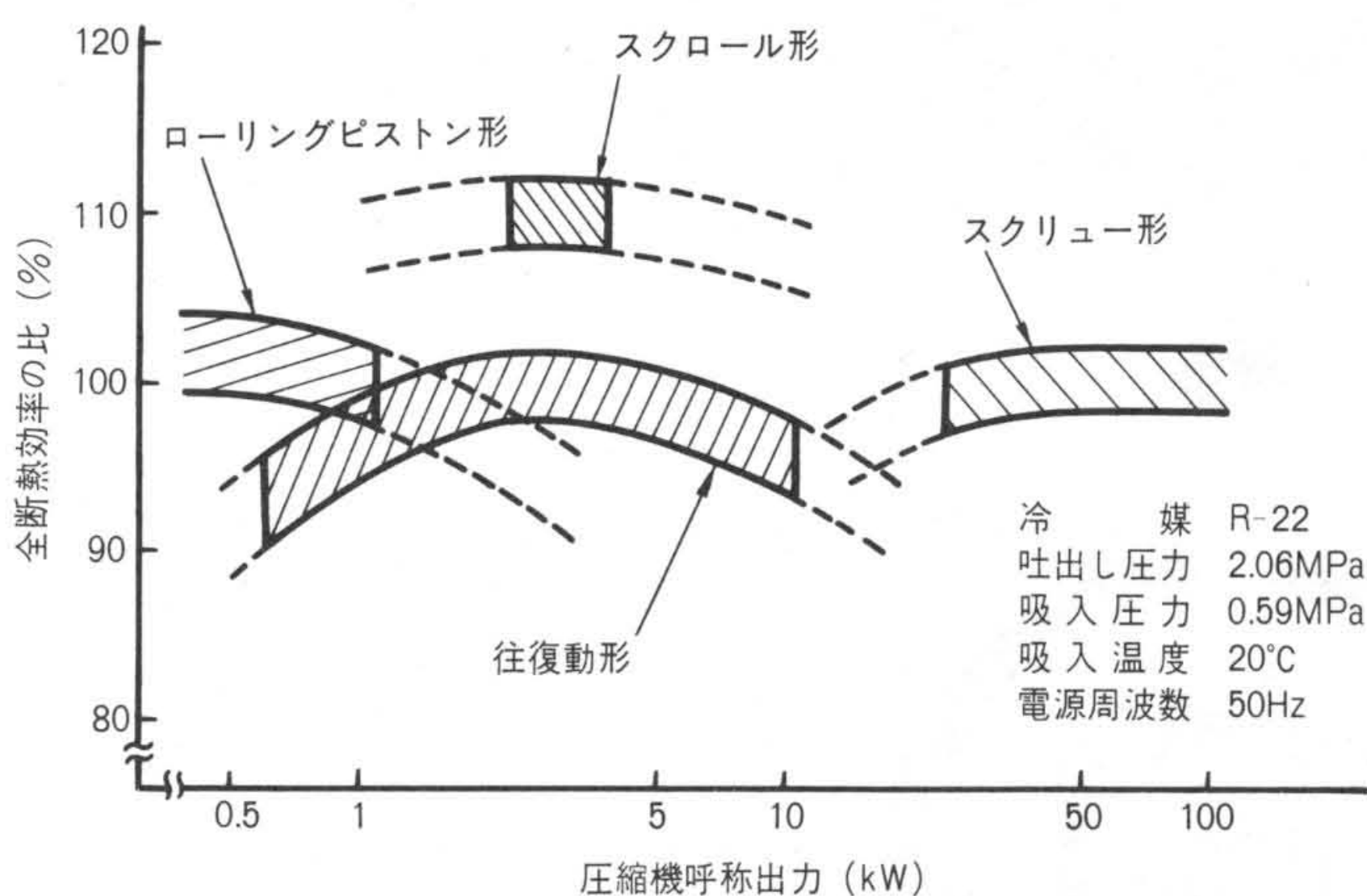


図1 空調機用圧縮機の性能比較(日立製作所密閉形) 2.2kW往復動形圧縮機の全断熱効率の平均値を100として、他容量、他形式の効率を効率のばらつきを考えて幅で示した

容積形圧縮機がなく、その開発・実用化が望まれていた。

日立製作所は、スクロール圧縮機が原理的に高い効率が期待でき、かつ1~15kWの容量で好適と考え、以前から開発に取り組んできた。スクロール圧縮機は既に1905年に発明¹⁾されていたがこれまで実用化されていなかった。その理由の第一には数ミクロンの精度が必要なスクロール部品の加工技術がなかったこと、第二には性能、信頼性を満足する機構がなかったことである。日立製作所は中間圧利用旋回スクロール支持機構を中心とする技術で、昭和55年にこの機構を確立し、以来量産に適した精密加工技術の確立と機構の信頼性向上とを図ってきた。この結果、開発に成功した2.2~3.75kW日立

* 日立製作所機械研究所 ** 日立製作所清水工場

スクロール圧縮機は、従来の往復動形圧縮機に比べて体積で40%小形化、重量で15%軽量化されたほか、平均10%の全断熱効率向上、約5dBの騒音低減など、数々の優れた特性を得た。本圧縮機は昭和58年3月から、ヒートポンプ式天井つり形パッケージ形空調機に搭載し、発売している。

2 原理と特徴

2.1 基本構成と原理

図3にスクロール圧縮機の基本構成を示す。ガスは固定スクロールと回転スクロールのラップ(渦巻要素)と、そのラップを保持する端板の間に形成される空間で圧縮される。固定スクロールは、外周部に吸入口、端板の中心部に吐出し口をもち、外周部で静止部品であるフレームに固定されている。回転スクロールは、クランク軸の回転に伴い、偏心量 ϵ を半径とする回転公転運動を行なう。この運動は、回転スクロールが自転せずに姿勢を一定に保ったまま、その中心を固定スクロールの中心の周りに円軌道運動させる運動である。オルダムリングはこの回転スクロールの自転を防止する部品であり、上面の突起が回転スクロール背面のキー溝に、下面の突起がフレームのキー溝に組み入れられている。

図4に圧縮原理を示す。固定スクロールと回転スクロールのラップは基本的に同形であり、位相が180度ずれた状態で、かつ各々の中心を“ ϵ ”離れた状態で組み合わせられている。この結果、両ラップの間に圧縮室が形成される。同図は、左上の図がラップ外周部の圧縮室が閉じた吸入完了状態を示し、回転スクロールの中心が時計回りに円軌道運動するときの様

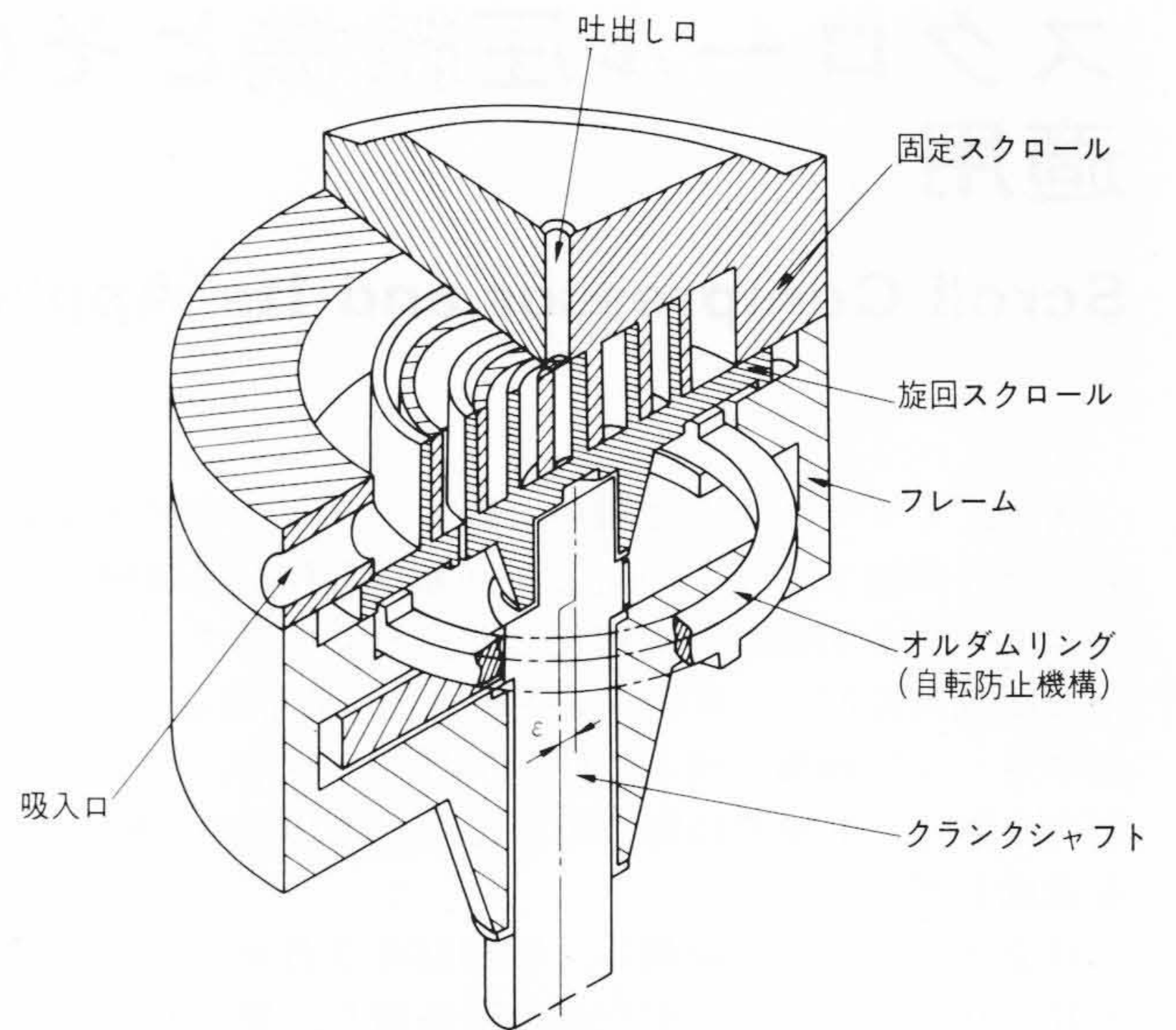


図3 スクロール圧縮機の基本構成 圧縮機構の構成部品は、固定スクロール、回転スクロール、フレーム、オルダムリング、クランクシャフトのわずか5部品から成る。

子を回転角90度おきに示している。これによって、圧縮室がラップ中心部へ向かって体積を縮小しながら移動する圧縮機構が理解されると思う。

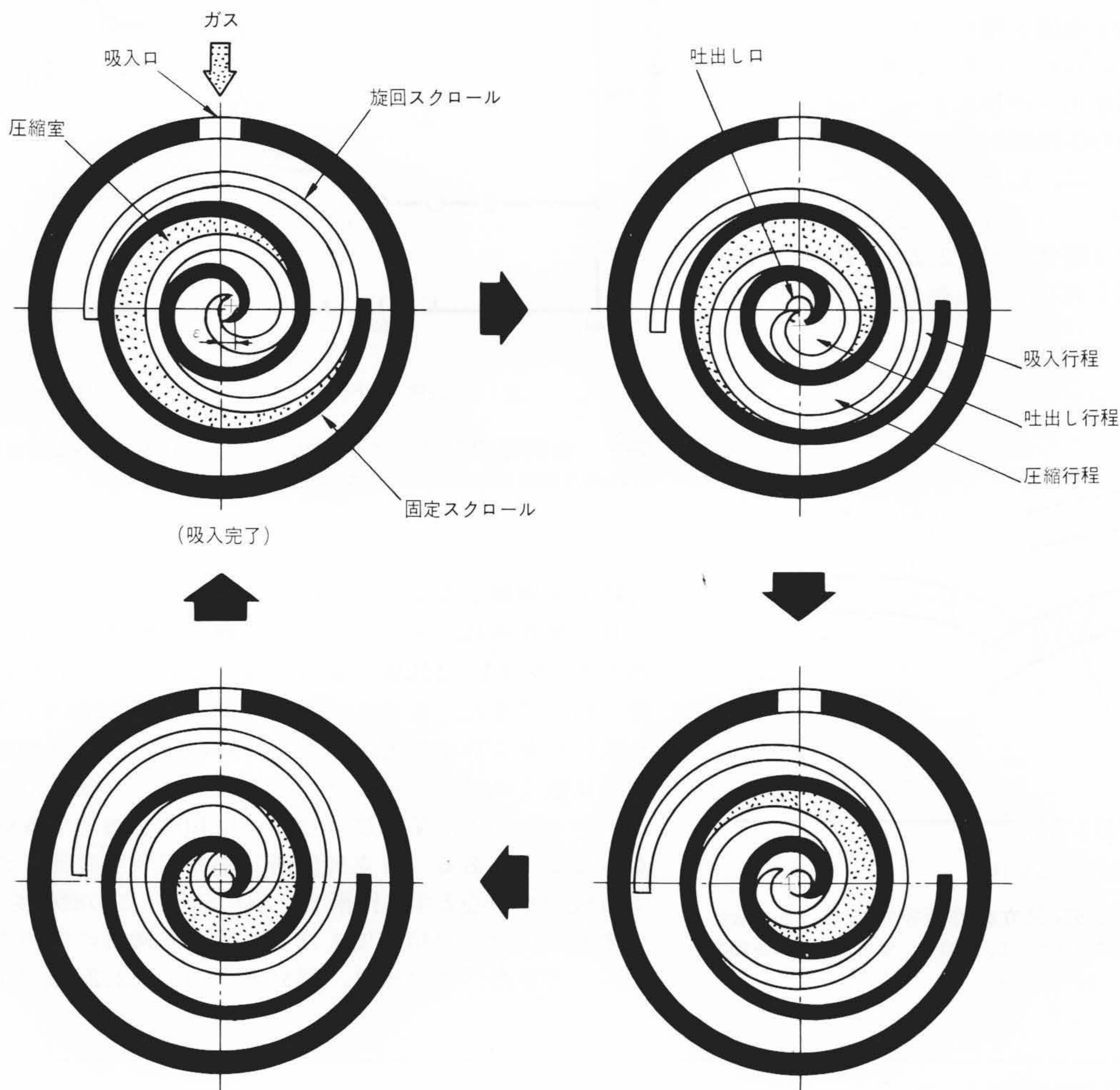


図4 スクロール圧縮機の圧縮原理 左上の図は吸入完了状態を示す。回転スクロールは自転を阻止された状態で、その中心(+)が固定スクロール中心(軸の交点)の回りを半径 ϵ で円軌道運動を行なう。

2.2 特 徴

圧縮要素が渦巻形をしていることから、次のような特徴がある。

(1) 圧縮ガスの漏れが少なく、高効率である。

吸入室と吐出し室が直接隣接せず、途中で中間圧の室が形成される。隣接する圧縮室の差圧は小さく、漏れが少ない。

(2) 吸入弁、吐出し弁が不要で、高効率、高信頼性である。

吸入室と吐出し室が直結しないので、弁が不要となる。弁は流体損失の原因、事故の原因となる。

(3) トルク変動が小さく、低振動、低騒音である。

巡回スクロールの1回転の間に、吸入、圧縮、吐出しの行程が同時に連続的に進行する。このため、1回転中の仕事量の変化、すなわち圧縮トルクの変動が小さい。図5に圧縮トルクの変化を他形式圧縮機と比較して示すが、往復動形やローリングピストン形に比べてトルク変動幅は約 $\frac{1}{10}$ と非常に小さい。

(4) 部品点数が少なく、高信頼性、小形・軽量である。

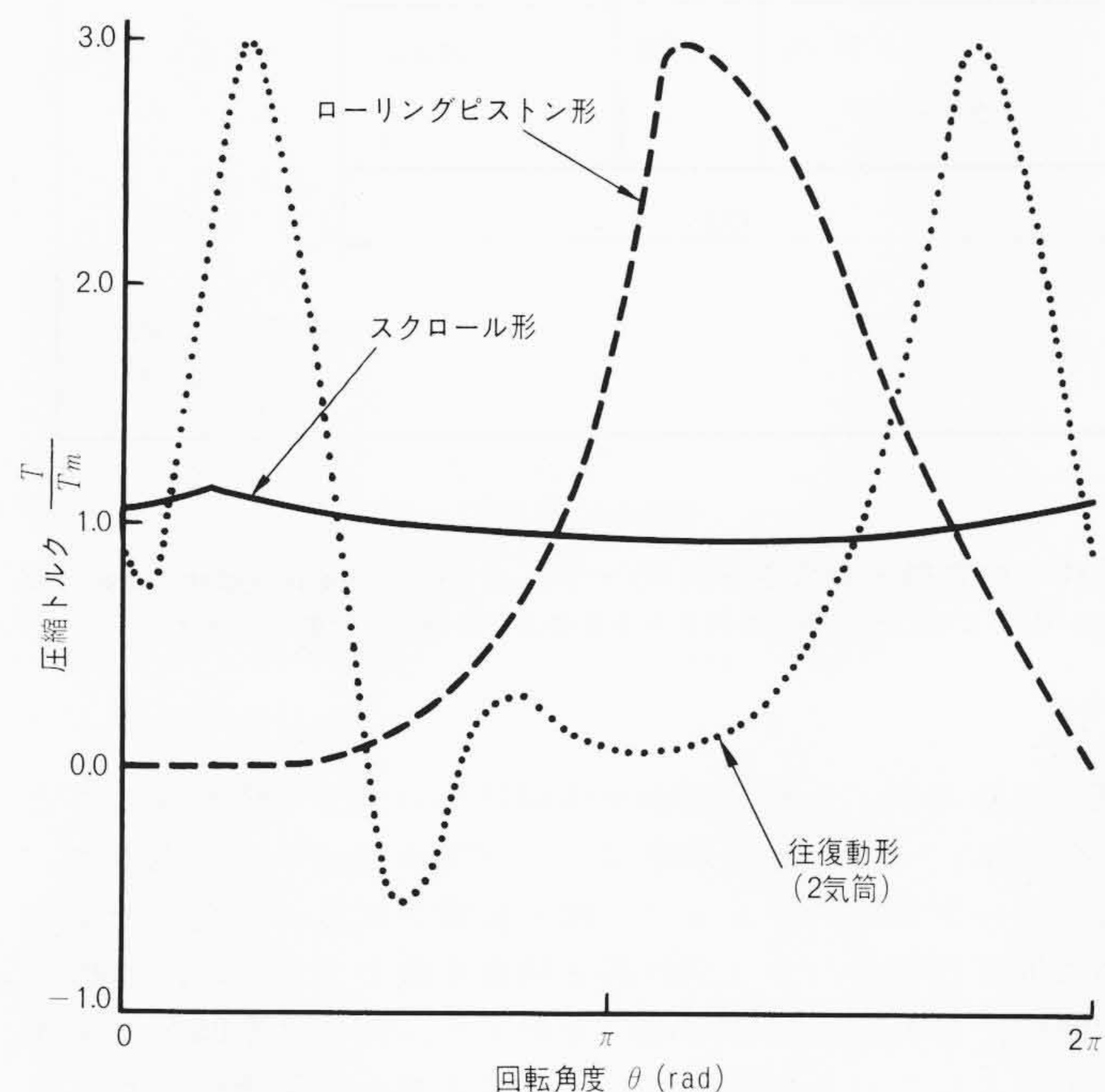
弁が不要なこと、消音器や脈動防止部品が不要なこと、防振構造が簡単なことなど、総合的に高い信頼性と小形・軽量化が達成される。

3 日立スクロール圧縮機の特徴と性能

3.1 中間圧利用巡回スクロール支持機構

スクロール圧縮機は前述のように優れた特徴をもちながら、これまで実用化され得なかったのは、数ミクロンの寸法精度を必要とするスクロール部品の加工の問題もあるが、それ以上にその特徴を生かす機構が実現できなかったことである。

図6に示すように、圧縮室内のガスの圧力は端板に作用して巡回スクロールを軸方向に押しつとともに、ラップ側面に作用する力が、その運動を止めようと作用し、巡回スクロールを傾ける。これらの力とモーメントに対抗して、巡回スクロ



注：T 各回転角度での圧縮トルク
T_m 1回転中の平均圧縮トルク

図5 圧縮トルクの変化 スクロール形圧縮機の圧縮トルクの変動は往復動形、ローリングピストン形の約 $\frac{1}{10}$ と小さい。

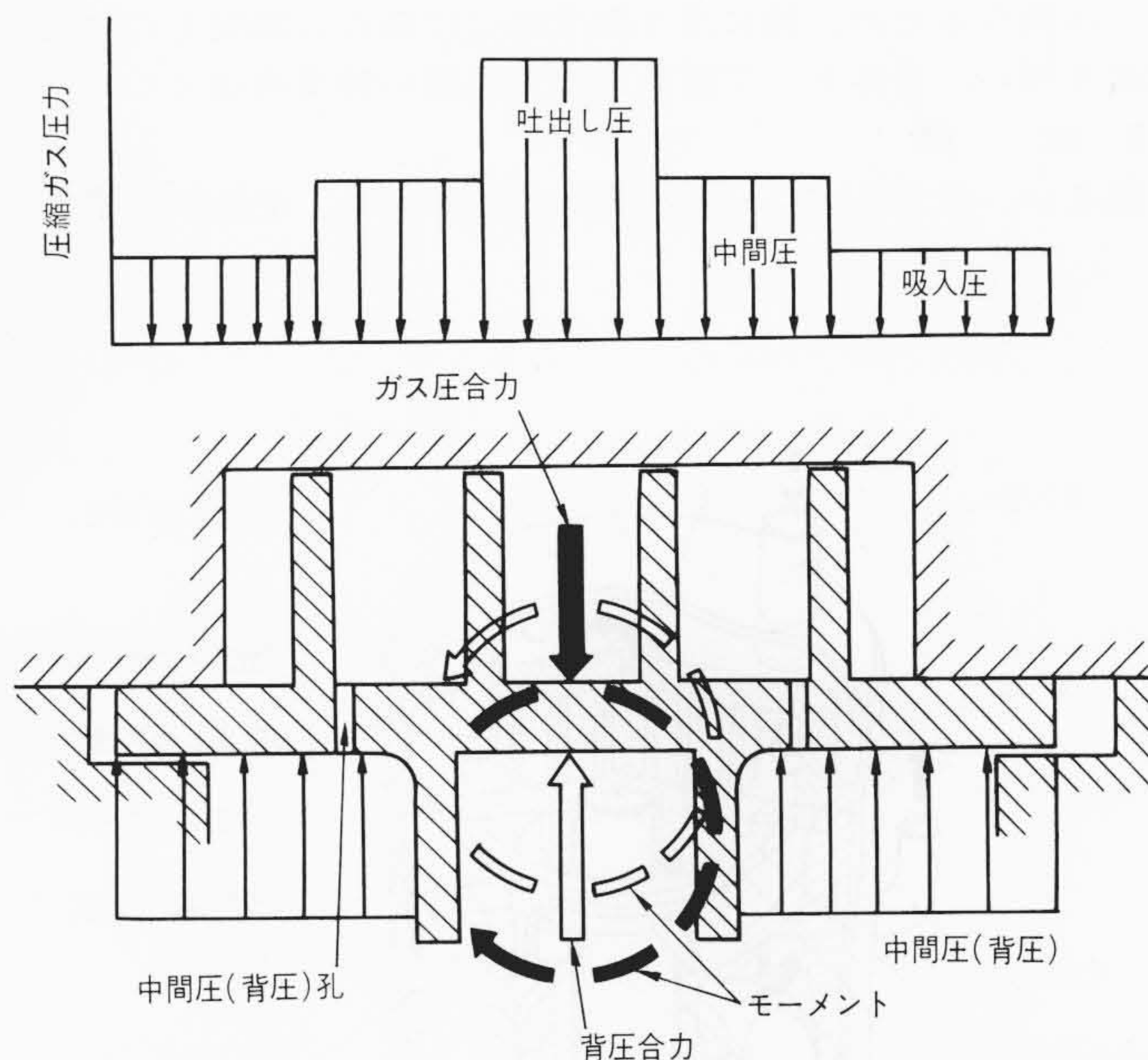


図6 巡回スクロールに作用する力とモーメント(中間圧利用巡回スクロール支持機構のモデル) 圧縮室内のガス圧による合力とモーメント(黒い太矢印)に対し、背圧による合力とモーメント(白い太矢印)を大きくし、巡回スクロールを固定スクロールに押し付ける。

ールの固定スクロールからの離脱を防ぐには、

- (1) 巡回スクロールの背面にガス圧をかけて押し付ける方法
 - (2) 巡回スクロールにばね力などを加えて押し付ける方法
 - (3) 巡回スクロールの背面で機械的に位置決めする方法
- がある。日立スクロール圧縮機では、(1)の方法のうち、ガス圧として圧縮行程途中の中間圧のガスを巡回スクロールの背面に導く機構で、性能、信頼性とも満足する圧縮機構を実現した。中間圧のガスは、図6に示したような巡回スクロール自身に設けられた小孔を介して、その背面に導入される²⁾。この方法の実現性は当初非常に疑問視されたが、実験と解析を進める中でこの方法がいろいろな点で優れていることが明らかになってきた。すなわち、押し付け力を運転圧力の変化に追従して適正な大きさになるように設定できるため、(1)の方法のうち高圧を付加する方法³⁾や(2)の方法に比べ、広い圧力範囲で作動を安定させ、かつ摺動面に加わる力を適正に保てること、また(3)の方法に比べると、摺動面に加わる力を約 $\frac{1}{10}$ にでき、かつ押し付け方式のためラップの先端ギャップを組立て誤差によらず微小にできることなどの利点である。

3.2 全密閉形構造とその信頼性

図7に空調機用全密閉形日立スクロール圧縮機の構造を示す。前述の中間圧利用巡回スクロール支持機構を、吸入ガス過熱が小さく、給油に有利な高压チャンバに収納した構造を採用した。

空調機用圧縮機は、高範囲で変わる運転圧力条件と、特にヒートポンプ運転時の液戻りによる液圧縮、冷媒による潤滑油の希釈、暖房と除霜の切換えによる運転圧力の急激な変化などに対し、軸受及び圧縮機構の信頼性が要求される。

本圧縮機では、巡回スクロールの端板外周部を数十ミクロンのギャップをもたせて、固定スクロールとフレームで挟み込む構造で、急激な圧力変化や起動・停止の繰り返しに対する圧縮機構の安定性を達成し、かつ液圧縮時には巡回スクロールが軸方向に逃げて異常負荷を生じないようにした。軸受は、軸受荷重の形態が従来の往復動形やローリングピストン

形とは異なるため、特に滑り軸受部には新たに開発した軸受構造を用い、全体として耐負荷限界の高い軸受構造とした。

3.3 性能

図8は、日立スクロール圧縮機の体積効率と全断熱効率の

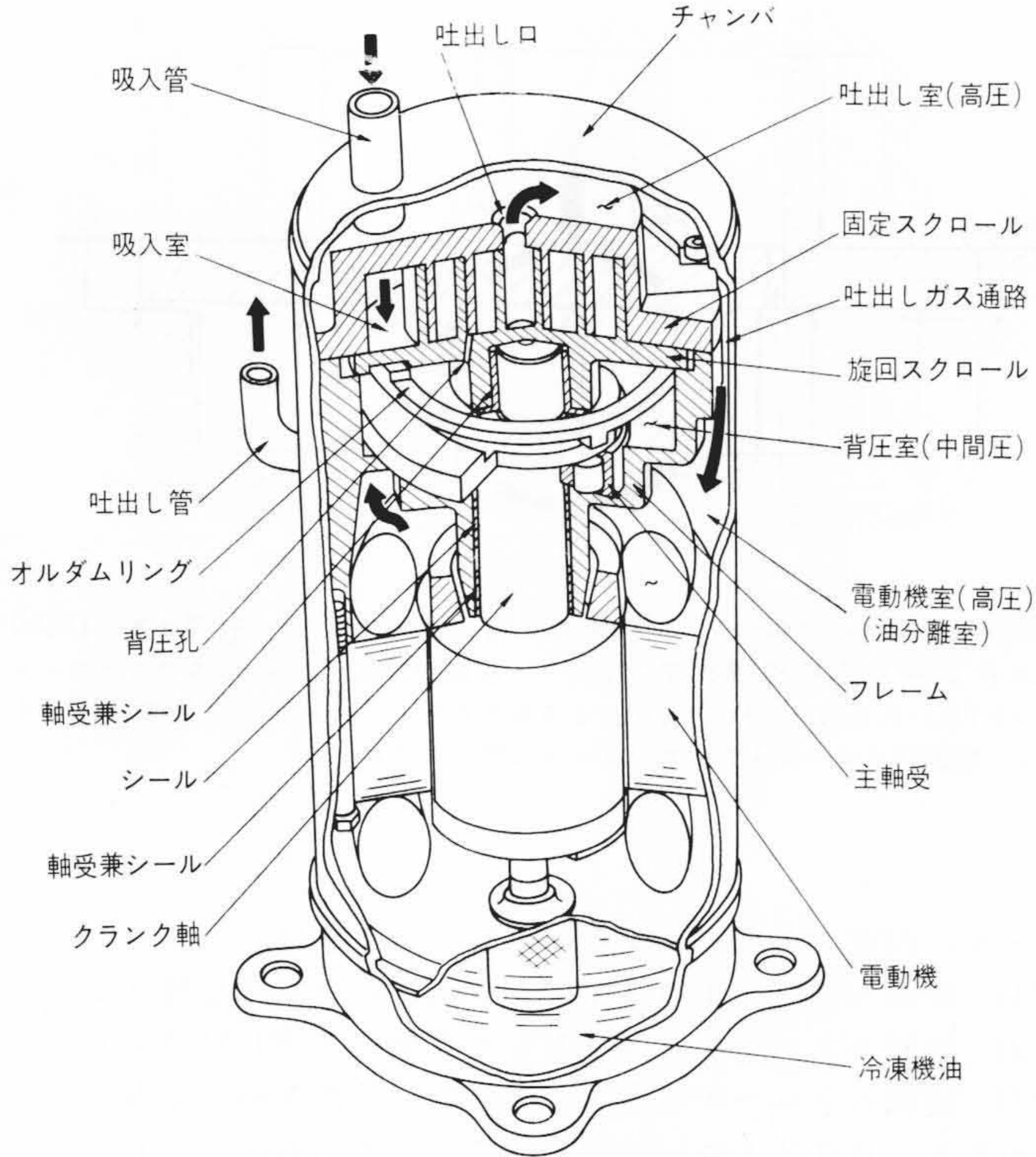


図7 全密閉形日立スクロール圧縮機の構造 黒太矢印は、ガスの流れを示す。冷媒は吸入管から吸い込まれ圧縮された後、吐出し口から吐出し室へ出る。次にフレーム外周部の通路を通して電動機室へ流れ、電動機の冷却、油分離を行なった後、吐出し管から外部へ送られる。

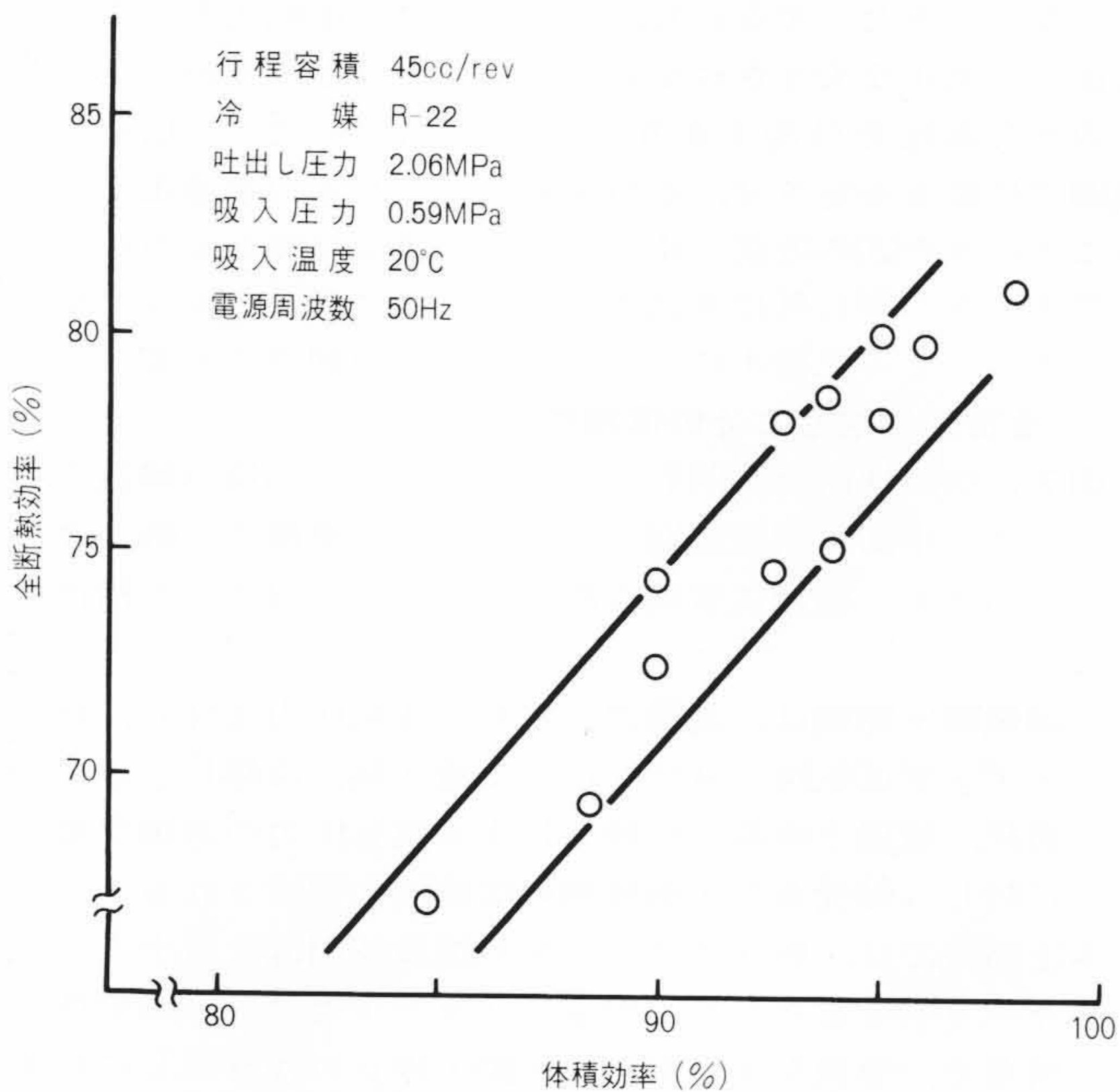


図8 体積効率と全断熱効率の関係 本実験結果は、スクロールラップ間のギャップ(ラップの先端ギャップ及び側面ギャップ)などを意識的に変えて、その性能の変化を調べたものである。

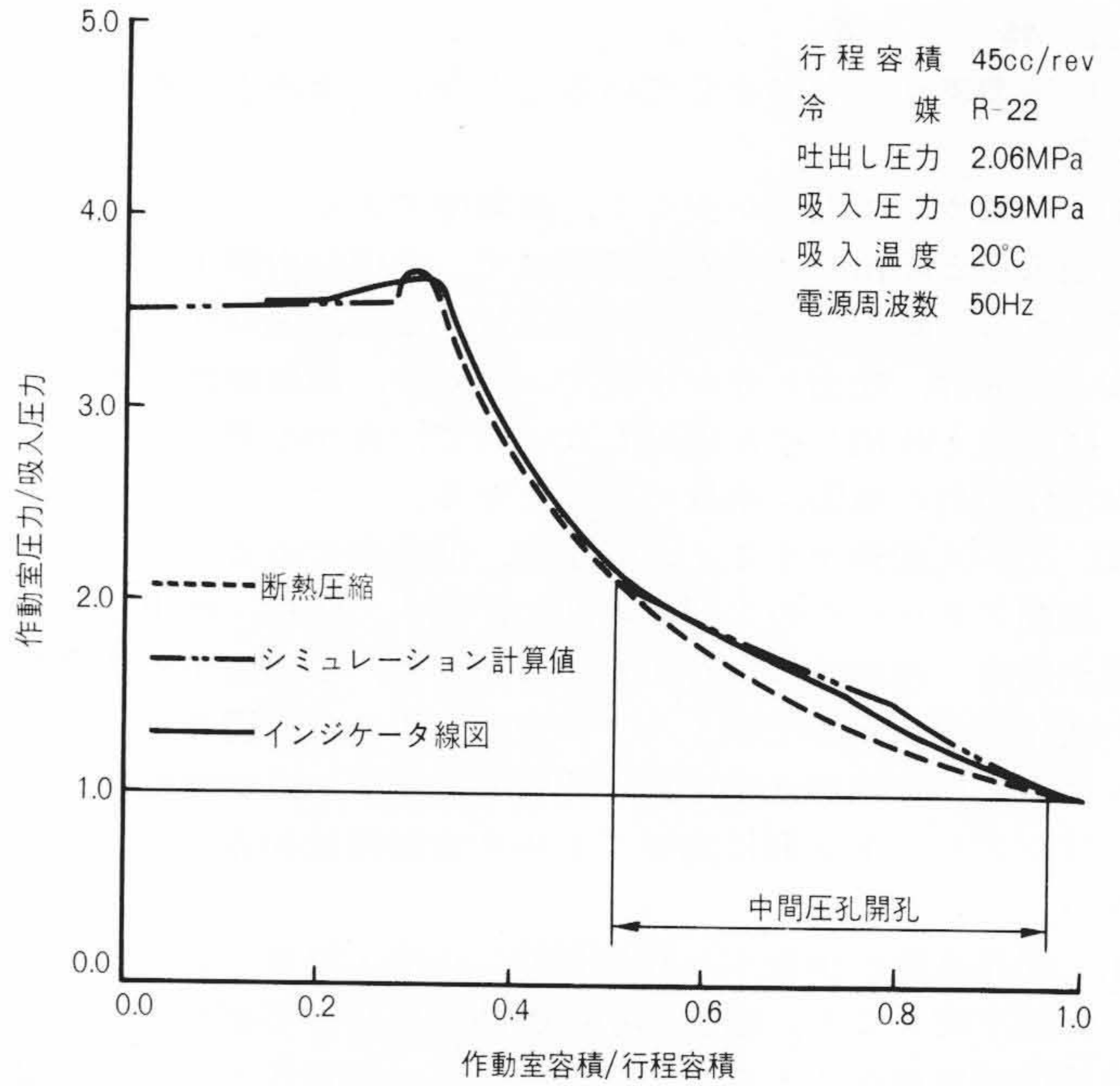


図9 日立スクロール圧縮機のインジケータ線図の一例 図示効率=断熱仕事/図示仕事(単純面積比)で示すと、この場合図示効率=94.5%となる。なおこのときの体積効率は95.0%である。

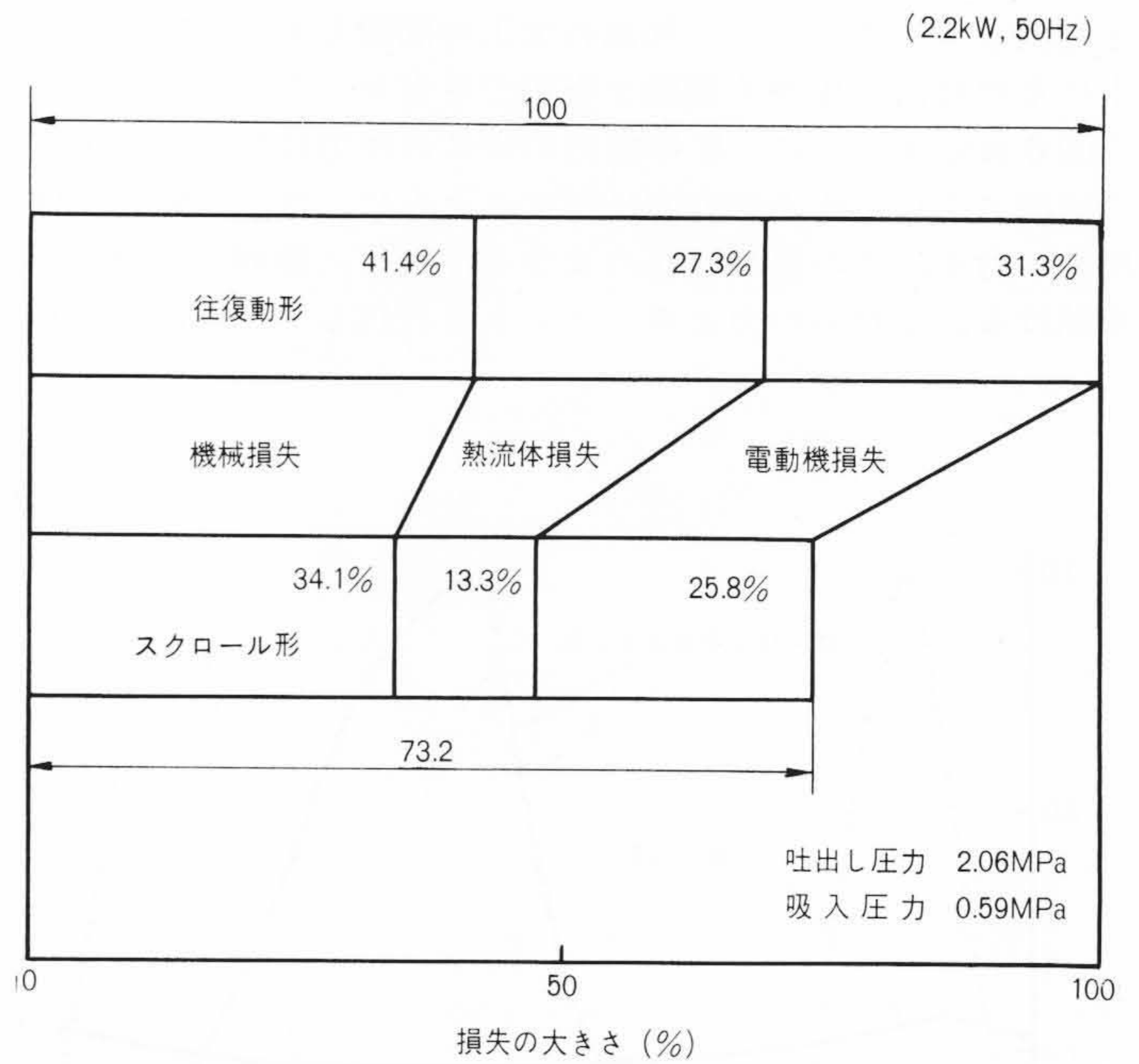


図10 動力損失の大きさ比較(一例) 日立往復動形圧縮機の全動力損失を100として、動力損失の大きさを全体及び各構成で比較して示す。

関係を示すが、全断熱効率が体積効率に大きく依存することが分かる。一方、体積効率はラップ間のギャップの大きさ、特にラップ先端のギャップに強く影響される。開発した量産精密加工技術は、ラップの高さ精度を数ミクロンに、端面の面粗さも1μm以下にすることができ、体積効率95%の達成を可能としている。図9は、日立スクロール圧縮機のインジケータ線図を示す。同図から漏れ損失、圧力損失などの動力損失の大きさを示す図示効率が得られる。中間圧孔でのガスの出入りが損失になっているが、その他の漏れ損失、圧力損

失は小さく、高い図示効率を示している。

図10に、日立スクロール圧縮機の動力損失分析の結果を示す。往復動圧縮機に比べ、漏れ、伝熱、流通抵抗などによる熱流体損失は $\frac{1}{3}$ 以下であり、機械損失も小さい。動力損失全体の大きさは、往復動形の全損失の約73%である。

図11に運転圧力比(吐出し圧力/吸入圧力)と効率の関係を示す。日立スクロール圧縮機は、運転圧力比の大きい条件でも往復動圧縮機に比べ高い効率が保たれ、したがって、ヒートポンプ式空調機へ適用した場合の省電力に特に有効である。

図12に従来の往復動圧縮機との騒音スペクトル比較を示す。騒音レベルは全周波数域で低く、全体で約5 dB低い。これは、吸入弁、吐出し弁が不要で、吸入から吐出しまでの行程が同時に連続的に行なわれる圧縮機構に負うものである。

4 パッケージ形空調機への適用

4.1 圧縮機の仕様とガスインジェクションサイクル

圧縮機の仕様を表1に示す。圧縮機の容量としては、従来の2.2kW、3.0kW及び3.75kWに加えて、それぞれをガスインジェクションによって容量アップした2.5kW、3.3kW及び4.4kWを製品化した。ガスインジェクションは、従来の往復動形では構造が複雑となり実施しにくかったが、スクロール形では比較的容易に実施できる。ガスインジェクションサイクル

表1 圧縮機の仕様 出力2.5kW、3.3kW、4.4kWのものは、ガスインジェクション機構をもつが、基本構造は各々2.2kW、3.0kW、3.75kWと変わらない。

項目	形式	300RH	330RH	400RH	450RH	500RH	600RH
	単位						
出力	kW	2.2	2.5	3.0	3.3	3.75	4.4
行程容積	cc/rev	45.0		62.4		78.0	
外りの寸法	外径	mm	177		177		177
	高さ	mm	378		430		430
重量	kg	31		36		37	
ガスインジェクション		不付	付	不付	付	不付	付

注：冷媒 R-22

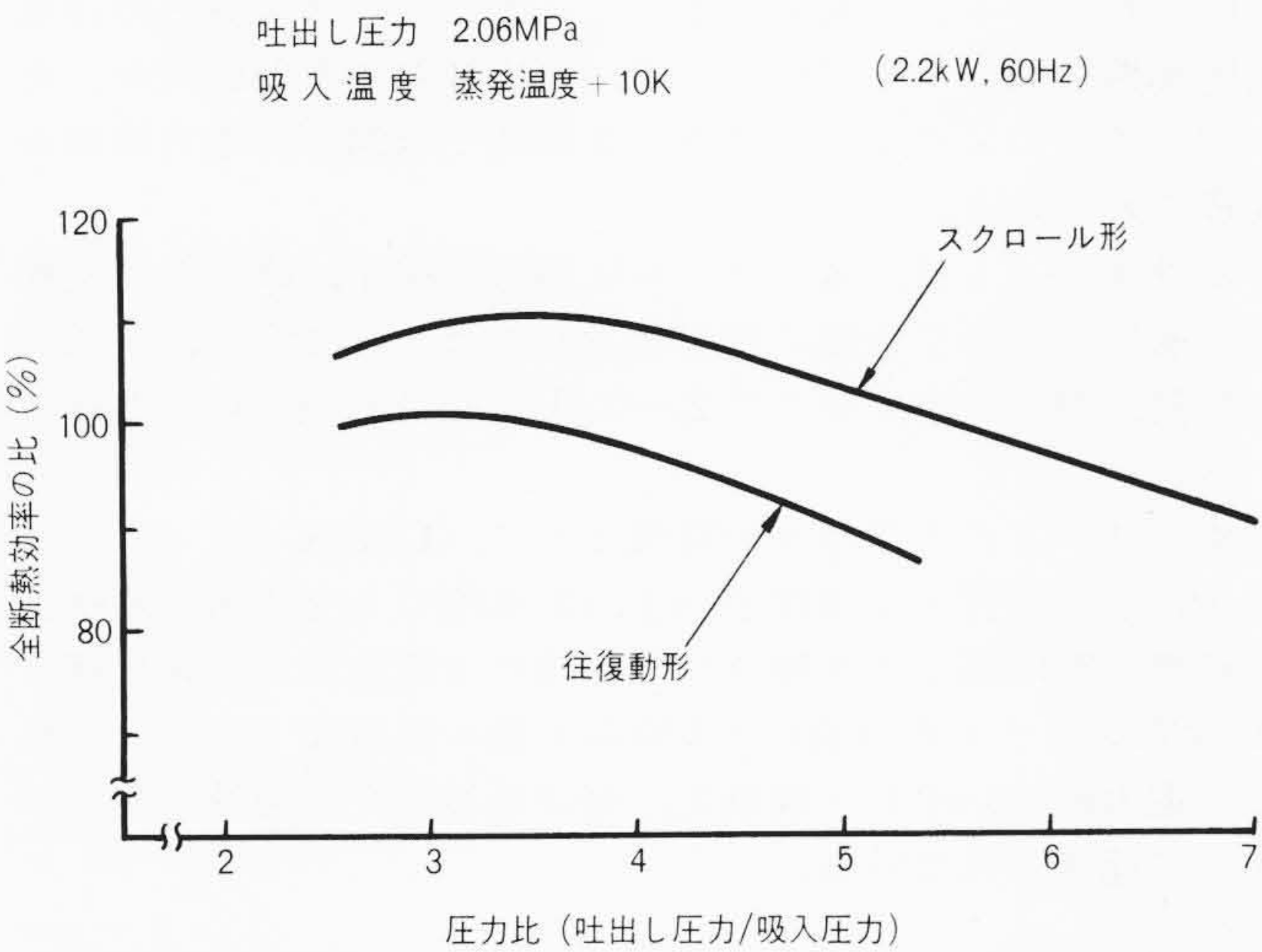
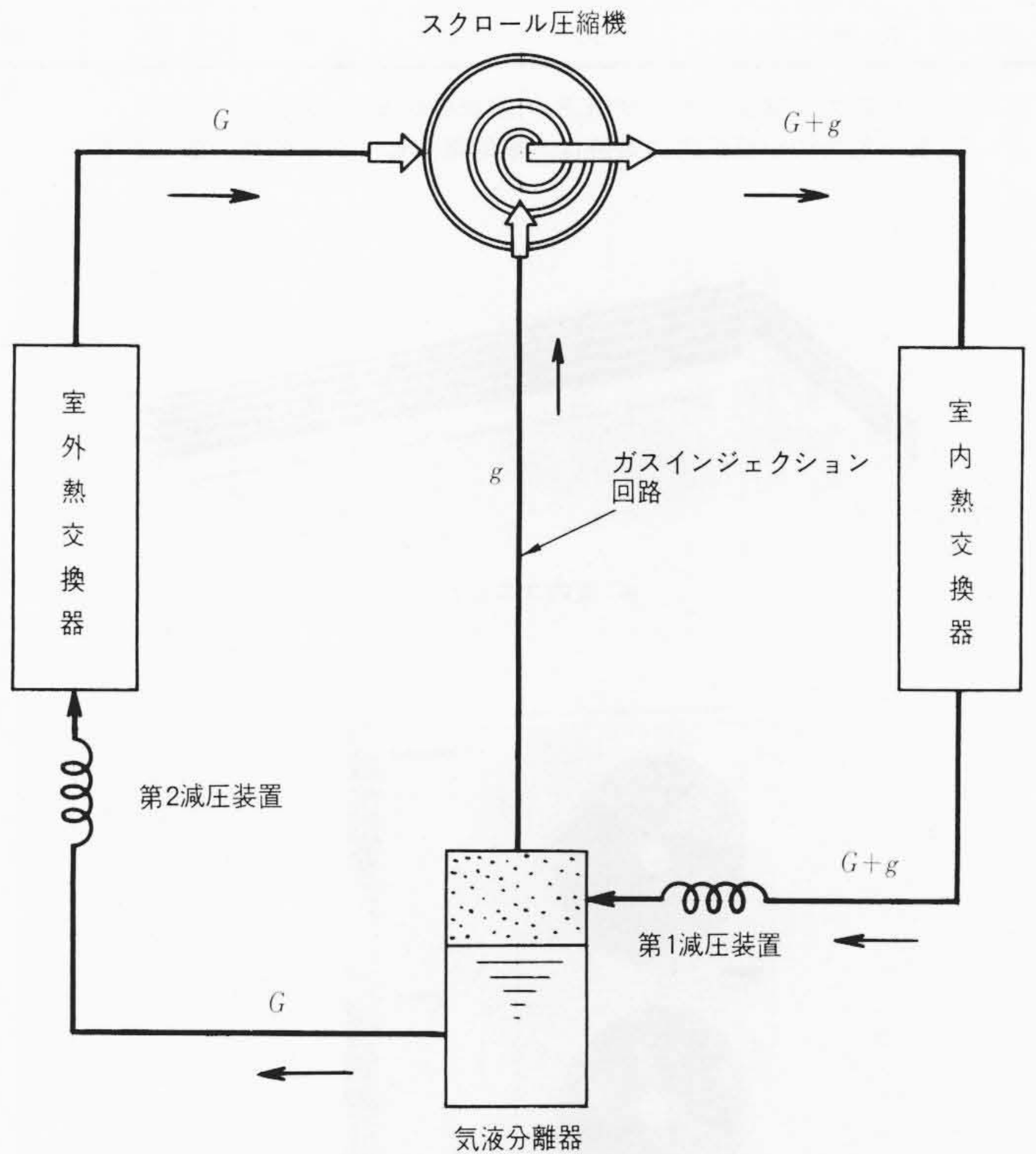


図11 圧力比特性の比較(一例) 圧力比3.5の点での当社往復動形圧縮機の全断熱効率の値(平均値)を100として、圧力比に対する効率の変化を示した。



注：1. gはインジェクション回路流量を、Gは主回路流量を示す。
2. 矢印は暖房時の冷媒の流れを示す。

図13 ガスインジェクションサイクル 気液分離器で分離したガスを、圧縮途中の圧縮室へインジェクションし、冷媒循環量を増大させる。

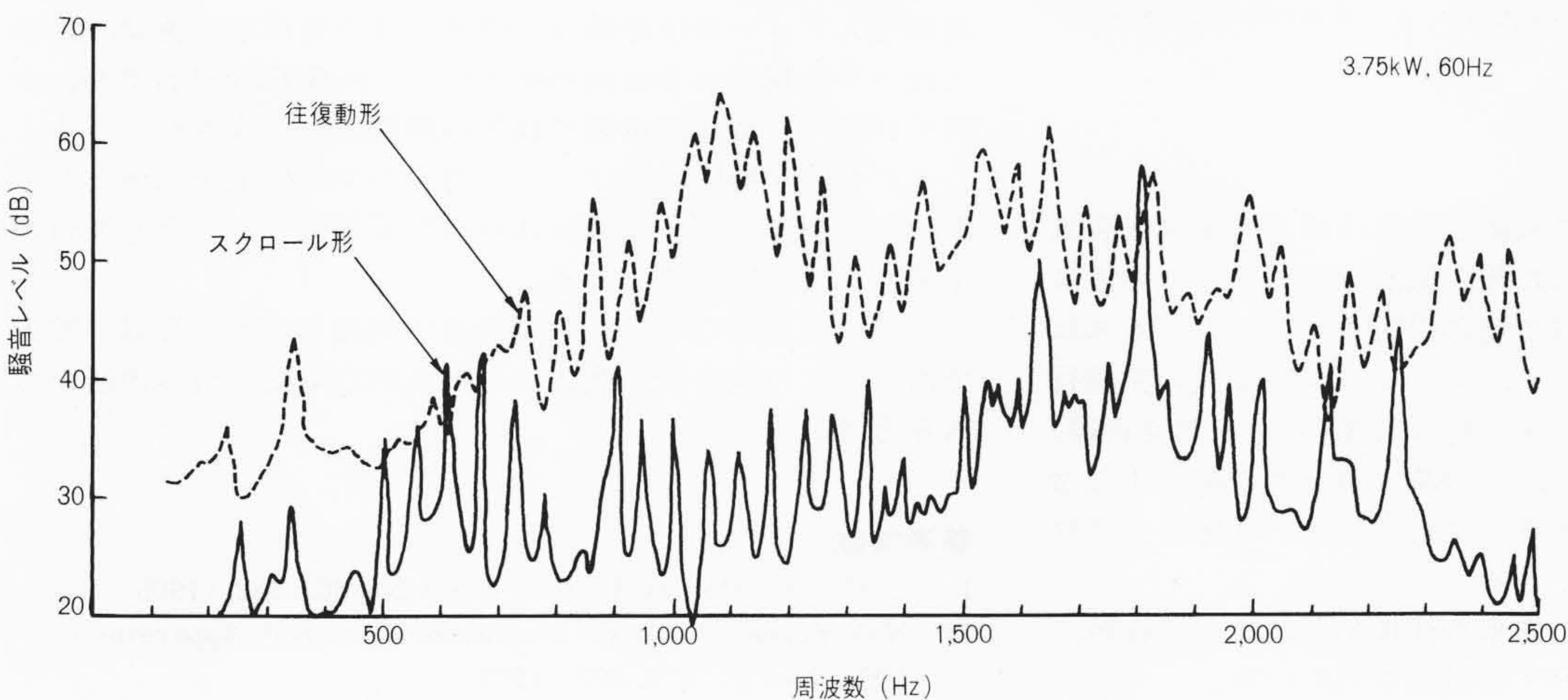


図12 騒音スペクトル比較(一例) 測定結果は、正面(銘板側周面)から1mの位置のものである(運転条件：吐出し圧力2.06MPa、吸入圧力0.59MPa、吸入温度20℃)。

表2 ヒートポンプ式天井つり形パッケージ形空調機の仕様 ガスインジェクション回路を備えたスクロール圧縮機の採用で、新たに2.5kW, 3.3kW及び4.4kWの中間機種をそろえた。

項目	形式	RPC-71H (室外RAS-71H)		RPC-80H (室外RAS-80H)		RPC-100H (室外RAS-100H)		RPC-112H (室外RAS-112H)		RPC-125H (室外RAS-125H)		RPC-140H (室外RAS-140H)		
		室内	室外	室内	室外	室内	室外	室内	室外	室内	室外	室内	室外	
		冷房能力	kcal/h	6,300/7,100		7,100/8,000		9,000/10,000		10,000/11,200		11,200/12,500		12,500/14,000
暖房能力	kcal/h	6,800/7,900 (8,600/9,700)		7,400/8,600 (9,200/10,400)		9,400/10,900 (12,000/13,500)		10,400/12,000 (13,000/14,600)		11,800/13,600 (14,400/16,200)		13,000/15,400 (15,600/18,000)		
EER(冷房時)	kcal/h·W	2.6/2.35		2.6/2.4		2.6/2.4		2.65/2.4		2.6/2.4		2.65/2.4		
圧縮機出力	kW	—	2.2	—	2.5	—	3.0	—	3.3	—	3.75	—	4.4	
外形寸法	高さ	mm	220	1,075	220	1,075	275	1,075	275	1,075	275	1,225	275	1,225
	幅	mm	1,265	850	1,265	850	1,265	1,060	1,265	1,060	1,580	1,060	1,580	1,060
	奥行	mm	625	285	625	285	625	345	625	345	625	345	625	345
製品重量	kg	30	80	30	84	39	95	39	100	46	108	46	115	

注：1. 冷房能力、暖房能力及びEERの値は50Hz/60Hzを示す。
2. 暖房能力の小括弧内の数値は、補助電気ヒータ運転時の値である。

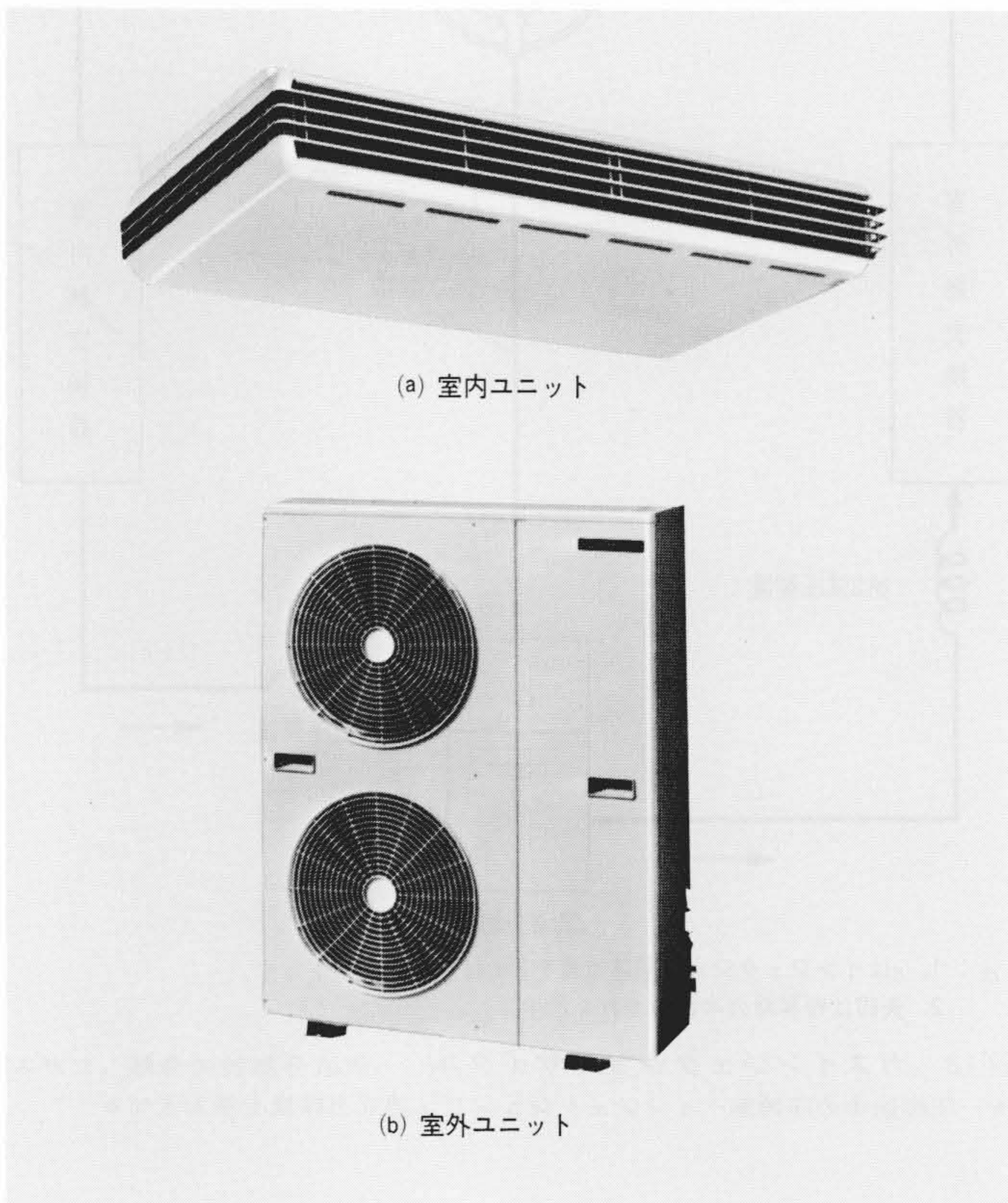


図14 ヒートポンプ式天井つり形パッケージ形空調機 室外ユニットは従来機に比べて大幅に薄形化されたほか、2～3dBの騒音低減が図られた。

の構成を図13に示す。高圧で凝縮した液冷媒を第1減圧装置によって中間圧まで膨脹させた後、気液分離器でガスと液に分離する。液は第2減圧装置で更に膨脹させる一方、ガスはインジェクション回路を通じて、スクロール圧縮機の圧縮行程中にインジェクションする。暖房時は凝縮器(室内熱交換器)を流れる冷媒循環量が増大し、冷房時は蒸発器で吸熱する冷媒のエンタルピー差が増大する。これにより、暖房能力及び冷房能力をおよそ15%向上できる。

圧縮機の寸法及び重量は、従来の往復動形に比べて容積で約40%、重量で約15%も小形・軽量化されている。

4.2 ユニットの仕様及び性能

ヒートポンプ式天井つり形パッケージ形空調機の仕様を表2に、外観を図14に示す。本シリーズは、スクロール圧縮機の搭載に加えて、スリット形フィンと内面溝付管から成る高性能熱交換器の適用、送風機及び送風機用電動機の高効率化も図られている。これらによって、本シリーズは従来の往復動圧縮機搭載シリーズに比べて、平均8%の電力節減が、更にガスインジェクション付きの3機種では24%の電力節減が達成されている。

室外ユニットは、スクロール圧縮機の採用、高性能熱交換器の適用によって大幅に薄形化されたばかりでなく、圧縮機の振動、騒音が小さいので2～3dBの騒音低減も達成されている。

本シリーズのそのほかの特徴として、(1)室内ユニットの軽量化による据付・工事性の向上、(2)温度むらを改善する吹出し機構、(3)暖房立上り時及び除霜時の冷風吹出し防止機構、(4)除霜システムの改良による除霜回数の低減などが挙げられる。電力節減、小形・軽量化、騒音低減及び快適性の向上がすべて達成されている。

5 結 言

原理的に優れたものでありながら、これまで実用化されなかったスクロール圧縮機を、中間圧利用旋回スクロール支持機構の技術と量産に適した精密加工技術の確立とによって、空調機用圧縮機として完成できた。開発した2.2～3.75kW空調機用スクロール圧縮機は、従来の日立製作所往復動圧縮機に比べ平均10%の全断熱効率の向上、約5dBの騒音低減、容積で40%の小形化、重量で15%の軽量化が達成されている。

スクロール形圧縮機は、この容量の空調機用圧縮機として実用化が望まれていた回転式容積形圧縮機としてその期待に十分こたえる圧縮機である。

今後の課題としては、空調機用圧縮機では適用容量の拡大であり、また他分野、例えば小形汎用空気圧縮機への適用であると考えられる。

参考文献

- 1) L. Creux : Rotary Engine, USP No. 801, 182 (1905)
- 2) N.O. Young : Positive Displacement Scroll Apparatus…… USP No. 3, 874, 827 (1975)