

(解説)

## スクリュウ圧縮機の開発と発展

大浜敬織\*・壺井 昇\*\*・久保和夫\*\*

\*機械カンパニー・圧縮機センター・回転機技術部 \*\*機械カンパニー・汎用圧縮機工場

### Past and Present Developments in Screw Compressors at Kobe Steel

Takao Ohama・Noboru Tsuboi・Kazuo Kubo

Kobe Steel manufactured the first Japanese screw compressor in 1955. Since that time, the company has continued to develop this technology and its applicability. Today, Kobe Steel is a leading screw compressor manufacturer, producing more than 10 000 units per year in three fields: air; refrigeration and air conditioning; and process gas. This paper introduces development in this field and related application expansions.

まえがき = スクリュ圧縮機は、容積式でありながら回転式の特性もあわせもち、高効率、コンパクト、長期連続運転性などの特徴により産業界で広く使用されている。

当社は 1955 年の技術導入直後から各種分野への適用と事業の拡大をすすめ、現在は 空気、冷凍・空調、プロセスガスの 3 分野で年間 10 000 台以上製作するまでになった。対応範囲も、容量はロータ直径 54mm で 11m<sup>3</sup>/h の世界最小からロータ直径 800mm で 75 000 m<sup>3</sup>/h の世界最大級までを、圧力は真空から世界最高レベルの 6.0MPa と広範囲までそろえており、世界に類のない総合スクリュウ圧縮機メーカーとなっている。本稿では、当社スクリュウ圧縮機の各分野における技術開発と発展の足跡について紹介する。

#### 1. スクリュ圧縮機の歴史と歯形開発

スクリュウ圧縮機の原理は、1878 年ドイツで考案された。その後 1934 年になって、スウェーデンの Ljungstroms Anturbin 社の Lysholm 技師によりガスタービンの空気圧縮用として遠心式の欠点であるサージングをなくした圧縮機として開発がすすめられた。しかし、当時はロータの加工技術がともなわず実用化されなかった。その後、同社の後身である Svenska Rotor Maskiner 社 (SRM 社) が切削技術を簡素化し、さらに英国の Holroyd 社がロータ歯切り盤を実用化して、広く世界各国で製作されるようになった。

当社は、1955 年に SRM 社より技術を導入し、1956 年国内初のスクリュウ圧縮機(写真 1)を製作・納入した。導入した技術はロータ室に潤滑油が入らない無給油式のものであり、導入後 5 年間で 200 台を超える圧縮機を製



写真 1 国産第 1 号スクリュウ圧縮機

Photo 1 First screw compressor manufactured in Japan

作している。これらには空気用のほか、天然ガス、酸素、都市ガス、コークス炉ガス、冷媒ガス用があり、当時、短期間にありとあらゆるガスに適用を拡大している。

1960 年に入り、液を含むガスや湿った不純物を含むガスに強いスクリュウ圧縮機本来の特徴に着目し、ロータ室内に多量の油を注入、その油で直接ロータを潤滑しながら回転させる油冷式の技術も開発され、空気用、冷凍機用として実用化した。その後、スクリュウ圧縮機の需要が工業用のみならず一般産業用にも拡大してきたことから、1973 年に汎用圧縮機工場を建設し、小型の空気圧縮機と冷凍機が専用特化した工場生産されるようになった。これ以降、当社スクリュウ圧縮機は、空気用、冷凍・空調用、プロセスガス用としてそれぞれの用途に応じた開発がなされ各分野で発展していった。

当社スクリュウ圧縮機を特徴づけるものとして、各分野、用途ごとに最適なロータ歯型を開発・採用していることがあげられる。技術導入当時は、対称歯形が無給油式・油冷式の両タイプで採用されていた。1965 年には前述の SRM 社が対称歯形より効率の良い非対称歯形を開発し、当社も 1968 年から実用化した。しかしながら、二度のオイルショックにより市場はさらに高効率の圧縮機を求めようになり、1980 年から当社独自で無給油式・油冷式それぞれの特性にあった高効率歯形(スーパーロータ)を開発<sup>1)</sup>した。

歯型により効率を向上させるには、単位行程体積あたりのロータ間のシール線の短縮、ロータ先端とケーシング間のシール(チップシール)線の短縮、雄・雌ロータ先端とケーシング間に形成されるブローホール面積の縮小、およびロータ歯溝間の圧力比の低減などが必要である。しかし、これらすべての項目を単純に最小化できるものではなく、新歯型開発時には効率への影響をシミュレーションしてロータ歯厚の極薄化や雄・雌ロータの直径が異なる異径ロータなどを取入れて歯型形状を決定した。

この結果、従来の SRM 歯型と比較して、ロータ間シール線の 5% 短縮、チップシール線の 18% 短縮、ブローホール面積の 38% 低減をおこなった歯型を開発

し、従来機比 8% の効率向上を達成した。いっぽう、油冷式では同様の手法にくわえ、潤滑油によるシール効果を最大限に引き出すために、シール部を従来の線から面にすることでロータ回転時に潤滑油がくさび型となってシール性が向上する 歯型を開発し、小型機では従来機比 20% の効率向上を達成した。歯形の変遷を第 1 図に示す。

この後当社独自の歯形理論を展開し、それを応用した歯型開発用シミュレーションプログラムを開発<sup>2)</sup>した。これは、従来の試行錯誤を繰り返す歯型設計プログラムと異なり、使用条件や一部の歯型設計条件を与えることによって自動的に最適歯型形状を導くソフトである。これにより、用途別最適歯形が従来の十分の一という短期間で開発できるようになった。現在では大型低压無給油式用歯型、高压給油式用歯型など 10 種類以上の歯型が実用化されている。また、このプログラムを拡張して、プロセスガス圧縮機の性能予測に応用しており、あらゆるガスの種類や圧力条件下で精度良く流量や軸動力を予測することが可能となっている。

## 2. 各分野の技術開発と発展の足跡

### 2.1 空気用スクリュ圧縮機

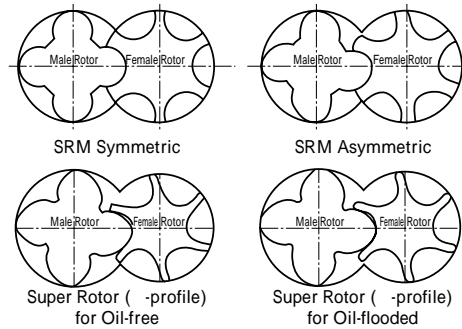
#### 2.1.1 油冷式

1963 年に汎用スクリュ空気圧縮機を国内で始めて製作・販売した。1967 年には圧縮機自体の高効率化に加え、容量調整装置としてスライド弁付を開発、部分負荷での動力特性も向上し、省エネルギー型の空気圧縮機として評価をえるにいたった。

1968 年には、ロータ歯形を従来の対称から非対称に改め性能が大幅に向上し、この成果により 1971 年には新幹線建設などの土木工用として数多く納入された。

1972 年には圧縮機全体を防音箱で覆ったパッケージ形(写真 2)の販売を開始、翌 1973 年には汎用コンプレッサの専用工場(大久保)が完成して汎用圧縮機事業がスタートした。パッケージ形は低騒音・低振動・省スペース・メンテナンスフリーが市場に評価され、往復動式からスクリュ式へ急速に置き換わっていった。その後 7.5kW, 11kW の小形クラスまでメニューを拡大すると同時に、サービス網、販売網も整備していった。

1980 年には“吐出空気パーージ”と“吸込み絞り”を



第 1 図 ロータ歯型の変遷

Fig. 1 Transition of screw rotor profile

組合せた新容量調整方式の省エネルギータイプ“スーパーエコノミーシリーズ”の販売を開始した。1981 年にはメンテナンス重視の“マイコン付”や圧縮空気に水分やゴミを含まず空気の質を向上させた“ドライヤ付”を開発してシリーズ化し、パッケージ形としての高品質化を業界に先がけておこなった。

1984 年には油冷式に適した前述の自社開発のスーパーロータを搭載したパッケージ形を開発、これにより圧縮機本体性能も大幅に向上し、スクリュ圧縮機のトップメーカーとしての地位を築いた。

1987 年には世界最小のシリーズ(1.5~3.7kW)を開発<sup>3)</sup>して超小形機分野への本格的参入を図ると同時に、ロータ、ケーシングの自動加工機を備えた最新鋭の播磨工場(兵庫県)が完成したこともあり、本格的な汎用量産事業がスタートした。技術的には、小型化にともなう効率の低下を防ぐために、油冷式で初めてロータ表面を特殊樹脂でコーティングしてロータ間の隙間を最小化すると同時に、潤滑油量の最適化をおこなった。

また、油冷式に欠かせない潤滑油の開発を潤滑油メーカーと共同しておこない、耐酸化寿命を従来比 5.7 倍と飛躍的に向上させた合成油を開発して、メンテナンスサイクルを大幅に延長した。さらには、潤滑油内の水分を自動的に除去する運転機能の追加によりドレン抜きも不要として日常メンテナンスも簡素化した。これらの結果、従来の工場空気用や土木工用などの産業用にとどまらず、歯科医院、ゴルフ場など医療・サービス業へも裾野が拡大していった。

この後、拡大した市場に対して本格的な市場調査をおこない、1993 年から 1995 年にかけて「静」小「楽」と「省エネルギー」を統一コンセプトとして、最適省エネルギー運転、メンテナンス表示機能を有する ITCS モニタ搭載の「助さんシリーズ 1.5~3.7kW」、「マーチシリーズ 5.5~11kW」、「ハンサムシリーズ 22~75kW」を開発・販売した。ここでは、パッケージ全体のさらなるコンパクト化と低騒音化のために、モータ、機器、熱交換器の放熱や冷却などの熱バランスをシミュレーションして機器の小型化と最適配置する手法および、当社研究所の騒音解析ソフトを活用した騒音寄与率を割り出しそれに基づく減音・遮音する手法がとられた。

現在は地球温暖化、環境、省エネルギー、省メンテナンスをテーマの中心としたフルモデルチェンジをおこなっており、これには業界で初めて永久磁石同期モータ(セ



写真 2 パッケージ形油冷式空気圧縮機

Photo 2 Packaged oil-flooded air compressor

写真3 インバータ使用油冷式空気圧縮機

Photo 3 Packaged oil-flooded screw air compressor using inverter



ンサレス IPM モータ)を採用して究極の省エネルギーともいえるインバータ使用機 22~75kW (写真3)を開発・販売している。この圧縮機を写真2の28年前の同一クラス22kWで比較すると、占有面積は40%減、風量は12%アップ、メンテナンス周期は8倍、騒音は15dB(A)低減しているのに加え、各種多機能化しており大幅に進歩していることがわかる。今後このインバータ使用機は小型機種へもシリーズを展開していく。

### 2.1.2 無給油式

無給油式空気圧縮機は、1956年の国産第1号機以来、空気分離装置などのプラント用を中心に製作されていた。しかし、これらは顧客の仕様に合わせた一品ごとの設計をおこなう非汎用タイプのために、空気用として安価で効率の良いものが望まれてきた。そこで、1974年に従来のスベリ軸受を持った非汎用タイプからメカニカルロスの低減と潤滑油系統の簡素化が可能なコロガリ軸受を採用し、さらには、1,2段ロータの組合せも固定化した準汎用タイプBTシリーズが開発された。

その後、さらに省エネルギー、省スペースのニーズが高くなったことを受け、1984年には高効率スーパーロータを採用したALシリーズ(75~150kW)が開発された。ALシリーズは前述のBTシリーズがロータを直列の串型に配置しているのに対し、増速ギヤの斜め上にスクリュ本体を2個配置するウイングタイプ(写真4)となっている。これは、2段機を高速回転させることによる高効率化と同時にコンパクト化も可能にした。いっぽう、小型機では単段の無給油式に適した雄5枚+雌6枚の専用スーパーロータ歯形を開発し、単段で吐出圧力700kPaまで昇圧できるALSシリーズ15kW~55kWが商品化された。その後、2段機・単段機あわせて15kWから250kWまでがシリーズ化され、計装空気用や半導体、薬品、食品用などの幅広い業界で使用されるようになった。

現在ではITCS モニタによる予防保全と最適な容量制御、さらには遠隔通信機能も標準装備したエメロードシリーズ(2段機15~250kW)としてモデルチェンジし、クラス最高レベルの効率、低騒音、省スペースを評価され幅広い分野で使用されている。

## 2.2 冷凍・空調用スクリュ圧縮機

### 2.2.1 冷凍機

冷凍機用としては1960年にフロンR11冷媒でビルの冷房用(120冷凍トン)に納入されたのが最初である。

1960年代後半になると生鮮食品の低温流通体制(コールドチェーン)の整備と需要量の増加にともない、冷

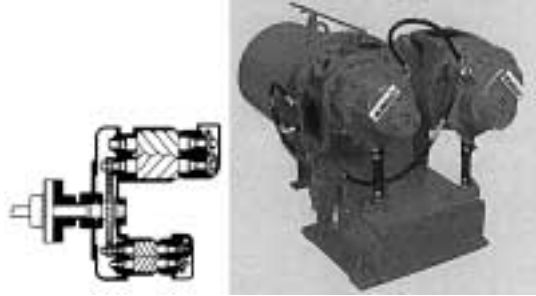
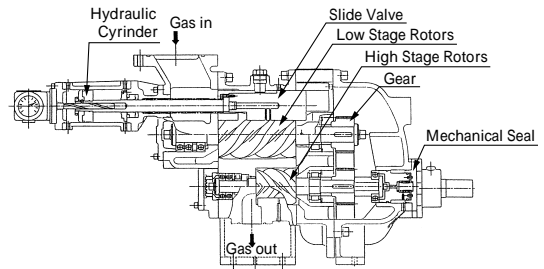


写真4 オイルフリーALシリーズ圧縮機本体  
Photo 4 Compressors and gear of oil-free AL series



第2図 2段冷凍機断面図

Fig. 2 2 sectional view of two-stage refrigeration compressor

蔵倉庫の大型化、被冷却物の低温化の傾向が強くなってきた。この需要に対し、圧力比が大きい超低温域(蒸発温度-30~-60)では効率面で往復動式や単段スクリュ圧縮機2台を組合わせたものが主体として使われていたが、1972年にモータ定格55~180kWクラスのコンパウンドタイプの2段冷凍機を業界で初めて商品化し、超低温用途でのスクリュ化を加速した。この冷凍機は、ロータを上下2段に積んだコンパクト設計、内蔵ギヤの交換で最適回転数が選択可能、吸込圧力が真空となる低温用途でも大気を吸込まない中間段圧下での入力軸配置などの特長を持つ画期的なものであった。第2図が当時開発した2段冷凍機の断面図である。

その後、被冷却物の多様化とオイルショックにより、大型機による集中冷却方式から省エネルギー化が図れる小型機による分散冷却方式へとニーズが変化した。技術的には、1980年代初頭の新歯型の開発、高粘度合成油の開発、コロガリ軸受の全面採用などのスクリュ圧縮機高効率化のための技術革新が、従来往復動式との効率差のために困難とされていた小型分野においてもスクリュ化を可能にし、1982年には22kW機を、1986年にはスクリュ冷凍機では世界最小の15kW機までを開発した。また、大型冷凍用としては小型機を複数台搭載して負荷に応じて台数を制御するマルチユニット方式(30~165kW)を開発・シリーズ化した。

冷凍運搬船においては、被冷却物が魚・肉類と野菜・果物類とでは冷却温度が大きく異なるため、どちらかに合った圧縮機的设计をすると他方の用途で効率が大幅に低下する。この問題に対し、内部圧縮比可変冷凍機を1982年に商品化した。これは、それぞれの運転条件で圧縮機固有の吐出ポートの大きさ、すなわち内部圧縮比を変えることにより最適運転ができるものである。

1990年前後になると、省エネルギー以外に冷媒ガスの外気への漏れに対する信頼性の向上、低騒音化、空冷化



写真5 水冷冷凍機ユニット  
Photo 5 Water cooled refrigeration compressor unit

などニーズが多様化してきた。これらに対し、1987年には軸シールを使用しない半密閉構造の冷凍機を商品化、1995年にはケーシング構造を見直し、冷媒ガス通路形状を最適化し、吐出サイレンサを装着したSHシリーズ(写真5)を商品化<sup>4)</sup>した。空冷型のSH15FAでは63dB(A)の低騒音を達成している。

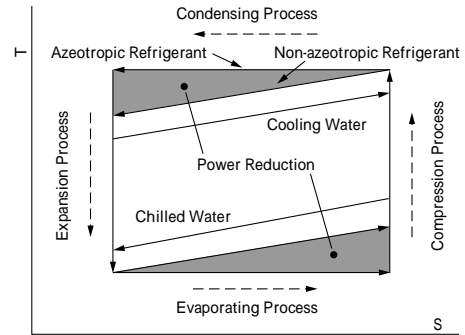
プロセス冷却用の工業用冷凍機の分野では、1964年日本で最初のアンモニア使用2段冷凍機を製作した。以降、蒸発温度 $-70$ までの各種化学・食品・薬品のプロセス冷却用、空気分離装置用、環境試験装置用として多数納入してきた。そのなかで特筆すべきものとしては、1991年に合成ゴムプロセス冷却用として $-60$ 世界最大級(ロータ径510mm)の単機2段タンデム+単段の3段圧縮スクリュ冷凍機(両軸2200kWモータ)を製作したこと、また、1999年にはオゾン破壊がない非共沸混合冷媒R404aを1段1000kW、2段1350kWの大型機に対して国内で初めて採用し、環境試験装置用に納入したことである。

最近では自然冷媒のアンモニアが見直され、安全性の面からその充填量を大幅に削減できる直膨式蒸発システムも開発されている。今後は、一般産業用では、オゾン層破壊や地球温暖化の恐れがなく地球にやさしいアンモニア冷凍機の使用が益々増加するものと思われる。また、工業用では、アンモニアに加え可燃性ではあるが自然冷媒のプロパン、プロピレンを冷媒とするものも増えてくるであろう。

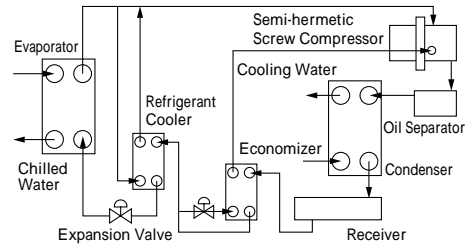
### 2.2.2 空調用ヒートポンプ

1970年代にはスクリュ式が、往復動式よりもコンパクトで大容量を処理できること、またターボ式よりも負荷追従性が良く広い圧力範囲で安定した性能を維持できることから、中大型ビルの空気熱源式冷暖房用として採用されるようになった。1号機は1972年に当社ビルへ300冷凍トンのものが納入された。その後、ユーティリティとしての冷却水が不要であることや立ち上がり早いことから、電算機センター向けや病院などの重要性の高い設備への採用が増えている。1993年にはフロン規制の対応機としてR22の代替冷媒であるR134aを使用したヒートポンプを商品化、1997年には500kWクラスまでの圧縮機を半密閉化し、装置のコンパクト化と冷媒ガスの大気への漏洩に対する信頼性を大幅に改善した。

また1985年から1992年には、新エネルギー・産業技



第3図 ローレンツサイクル(T-S)線図  
Fig. 3 Lorentz cycle (T-S) diagram



第4図 高効率チラーシステムフロー  
Fig. 4 System flow of ultra-high efficiency screw chiller

術総合開発機構の委託を受け、非共沸混合冷媒とプレート熱交を使用したローレンツサイクルにて従来機の約2倍の高効率を達成するスーパーヒートポンプシステム<sup>5)</sup>の基礎技術を確認した。その後のフロン規制、地球温暖化に対する環境保護の高まりから、上記技術を継承した高効率チラー<sup>6)</sup>を1999年より上市した。第3図はローレンツサイクル、第4図は高効率チラーのシステムフローを示す。高効率チラーは、従来機との比較で40%もの大幅な省エネルギー化を実現したもので、地球温暖化防止の観点からも高く評価されている。半導体産業などの比較的運転時間の長い用途で今後多くの採用が期待される。

### 2.3 プロセスガス用スクリュ圧縮機

プロセスガス分野においては、1980年までは無給油式を主体にあらゆるガスへ適用を広げてきた。可燃性や毒性ガスを扱う無給油式プロセスガススクリュ圧縮機の発展には軸シール技術が重要で、1965年に軸受油膜シールを当社が初めて実用化した。このシールは従来のシールガス注入式のカーボンリングシールに加え軸受の油をシール油膜として使用する方法で、ガスの圧縮機外部への漏れに対して飛躍的に信頼性を向上した。また、1970年後半には、メカニカルシール採用機を開発し、ブタジエンなどシールガスのプロセスガスへの混入が許されないプロセスやシールガスの確保ができにくい用途へも適用可能となった。

1980年までに多くの無給油式が納入され、とくにスチレンモノマオフガス、ブタジエンガス、リニアアルキルベンゼンプラント用循環ガス、プロピレンガス用では評価が高く数多く製作された。軸シールについては、1990年に静圧型ドライガスシールを採用したものを開発し、シアン化水素、塩素、ホスゲンなど腐食性・毒性の強いガスに対しより安定したシールを可能とした。静圧式ド

ライガスシールは、メカニカルシールに似た構造であるが、コスト面でもメカニカルシールより優位性がある場合も多く今後数多く採用されていくと考えられる。

プロセスガス用の油冷式スクリュは、1974年に空気圧縮機を改良して製鉄所コークス炉ガスの圧送用として国内第1号機が納入された。しかし、プロセスガス用としては認知が不十分であったことから、1980年以前までの納入実績は5台にすぎない。1980年に入ると、オイルショックにより、プロセスガス分野でも急速に省エネルギー志向が高まった。油冷式は、ロータ室に直接潤滑油を注入しているため、圧縮熱の冷却やロータ間のシールが効果的におこなわれて効率が高く、かつ、圧縮機内部に容量に応じて消費動力低減が可能なスライド弁が組み込まれ、省エネルギー性に優れた特性を持っており、1980年代前半からこれら油冷式のメリットが認められ急速に使用されるようになった。

その代表例には、従来無給油式が使われていた製鉄所コークス炉ガスや転炉ガス用、往復動圧縮機が使われていたナフサ分解都市ガス用、ヘリウム液化用がある。ヘリウム液化用では、ヘリウムガスが最終的に $\cdot 265$ 前後となるため、ガス内への不純物の侵入を極小にする必要がある。高性能油分離フィルタと活性炭フィルタを組み合わせることにより、油分 $0.1\text{vol ppm}$ 以下の清浄度を達成した。このような油分離技術の向上によって排出されるガスはほとんどオイルフリーと同等のレベルであり、メチルクロライド、水素など石油化学用でも使われるようになった。

1980年代後半になるとますます省エネルギーへのニーズが高まり、発電分野においてはガスタービンによるコージェネレーションシステムが各種産業で積極的に導入された。このガスタービン燃料用の圧縮機としては、ガスタービンの急激な負荷変動に強く、連続運転性の高いスクリュ式が最適機種として採用されるようになった。ガスタービンの燃料としては通常都市ガスや天然ガスが使われるが、製鉄副生ガスや各種オフガスが使われる場合、ガスの供給圧力と熱量が低いため、大容量で高圧縮比の圧縮機が必要となる。この場合、大容量に適した無給油式(DRY)を低圧段に、高差圧・高圧縮比に適した油冷式(WET)を高圧段に採用したDRY&WETの組合せ型スクリュ圧縮機を製作・納入した。写真6に組合せ型スクリュ圧縮機を示す。これは現在までの当社実績のなかで最大動力(6800kW)であり、まさに無給油式と給油式双方のガス圧縮機を製作している当社の高度な適用技術を示した圧縮機である。

現在、無給油式はガス中に重合物や不純物を含むスチレンモノマ用やリニアアルキルベンゼン用などの得意分野で確固たる地位を築いているが、低圧・大容量のこれらの用途で価格、納期、設置面積などをさらに改善すべく同サイズの圧縮機で従来機比32%増の容量を有する雄3枚+雌5枚のロータ歯形の圧縮機を開発<sup>7)</sup>し、エンドユーザの要求にこたえている。

油冷式は、効率が高く、高圧縮比や負荷変動に強いなど他の圧縮機にない優れた特徴があり、適用分野を広げ



写真6 DRY&WET 組合せスクリュ圧縮機 (ガスタービン燃料用)

Photo 6 DRY&WET combination screw compressor for gas turbine fuel

るために雄5枚+雌7枚の高圧用ロータ歯形を採用し最高使用圧力を従来の $3.5\text{MPa}$ から $6.0\text{MPa}$ レベルまで高めた圧縮機を開発<sup>8)</sup>した。とくに供給圧力(吸込圧力)が変動したり、容量が変動する天然ガス用途ではスライド弁により大幅な容量調整と省エネルギーがはかれることから、従来、往復動式、遠心式が使われていた領域で急速に油冷式スクリュ圧縮機の使用が拡大している。

むすび=今後の圧縮機には、設計点だけの高効率化だけでなく、実際に運転される領域全体を考えた省エネルギーや大気へのガスの放出・漏れの少なさなど“地球にやさしい”環境保護の観点からのニーズがより強くなってくと予想される。また、低騒音化、メンテナンスフリー化、予防保全を含めた遠方監視システムの確立なども従来以上のニーズになると考えられる。

当社のスクリュ圧縮機では、製造開始以来、様々な独自技術を創出し、ユーザとともに新しい分野・用途を開拓してきた。開発技術のなかには、世界初のものも多くあり、今後も様々なユーザニーズに応えるべく、さらなる新分野・新用途の拡大、新技術への挑戦と改良の努力を継続し、このスクリュ圧縮機を通じて産業界に貢献する所存である。

最後に、1955年以來のスクリュ圧縮機の発展に貢献いただいた国内外のスクリュ圧縮機技術者、および貴重なご意見、アドバイスをいただいたユーザ各位にあらためて感謝する次第である。

#### 参考文献

- 1) 松井 皓ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.33, No.2(1983) p.85.
- 2) 吉村省二：R&D 神戸製鋼技報，Vol.39, No.4(1989) p.105.
- 3) 松隈正樹ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.41, No.1(1991) p.4.
- 4) 壺井 昇：冷凍，Vol.70, No.810(1995) p.86.
- 5) 松井 皓ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.41, No.1(1991) p.8.
- 6) 神崎奈津夫ほか：日本機械学会公演論文，R03(2000).
- 7) 藤田栄治ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.49, No.1(1999) p.36.
- 8) 大浜敬織ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.49, No.1(1999) p.32.