

これからのオイルレス化を担うプロセス用 遠心圧縮機

New Oilless Era of Compressors for Process Use

福島康雄* *Yasuo Fukushima*

西田秀夫** *Hideo Nishida*

白井保充*** *Yasumitsu Shirai*



高比速度羽根車搭載オイルレス圧縮機 斜流羽根車を前段に搭載し、磁気軸受、非接触ガスシールの活用によってドライ化を可能とした。

石油化学プラントなど各種プロセスに用いられる圧縮機は、信頼性、経済性、保守性などに厳しい要求が課せられている。これらの要求を満足させるべく、高性能化を達成するための高比速度羽根車や、

潤滑や軸封に油をいっさい使用しないドライ化の技術が圧縮機に導入され始めている。これらの技術の調和により、圧縮機は新しい時代を迎えつつある。

* 日立製作所 土浦工場 ** 日立製作所 機械研究所 *** 日立製作所 機電事業部

1 はじめに

遠心圧縮機は、1980年前半までプラント設備の大形化に伴い、単機容量拡大の時代を迎え活況を呈していたが、その後の世界的な石油価格の低迷、発展途上国の債務超過などの諸要因によって需要は減退し、1985年には圧縮機の生産金額は1980年の約半分にまで落ち込んでしまうという時代を迎えた。

しかし、このころからプロセス用の圧縮機は単に容量の拡大、大形化という課題から性能の向上、高効率化へのアプローチが図られ現在に至っている。さらに、圧縮機の構成要素である軸受や軸封部分にも油を使用しない新しい技術が開発され、実用化に至っている。ここでは、これらの新技術を述べるとともに、今後の技術動向について考える。

2 高比速度化による効率向上

一つのケーシングに多数の羽根車を持つプロセス用多段遠心圧縮機では、初段から後段にいくに従って取り扱うガスの体積流量が減少するので、比速度も順次小さくなる。比速度が小さくなると摩擦損失の影響が増大し、羽根車の効率は低下する。したがって、初段にできるだけ比速度の大きい羽根車を採用し、後段の羽根車の比速度を大きくすることができれば、圧縮機全体の効率を向上することが可能となる。従来用いられてきた二次元羽根車では、比速度300～350の範囲が最も効率が高い¹⁾とされてきたが、これは比速度の低い範囲では摩擦損失が増大すること、比速度の高い範囲では流れの三次元性が

強まり、二次流れ損失、はく離損失が増大することの要因により、その中ほどに効率の高い領域が存在するためである。このため、圧縮機の高効率化を達成するためには、高比速度化の達成が大きな課題となる。

このことを模式的に表すと図1になる。二次元羽根車の高比速度側の効率低下の範囲は三次元羽根車で、また三次元羽根車の高比速度範囲は、斜流羽根車を採用できれば全体の効率を高く維持することが可能である。

2.1 高比速度羽根車

羽根車の性能に大きな影響を与える因子の一つに、羽根車入り口から出口までの相対速度分布があり、図2に示すように羽根車入り口から出口まで、局所的に大きな減速が生じないように滑らかな分布にすることが重要である。このような分布を与えるためには、羽根形状に制約が少ない三次元羽根車のほうが二次元羽根車に対して有利となる。一方、三次元羽根車では比速度500まで実用化が進んでいるが、さらに高比速度化を進めていくと流路幅(羽根高さ)に対するシュラウド側(側板側)の曲率が大きくなり、シュラウド側出口近傍での減速が増大して境界層がはく離し、効率が低下する。

これを防ぐために、出口の羽根先端を軸方向に傾斜させ曲率を抑えた斜流羽根車を開発し、比速度の限界を720まで上げることが可能となった(図3)。

2.2 高効率ディフューザ

羽根車が高比速度化されると、羽根車出口の流れは三次元性が強まりディフューザ入り口の流れは非常にひずんだものとなる。例えば、図4²⁾は比速度の異なる羽根車の出口の流れをピトー管を用いて測定したものである

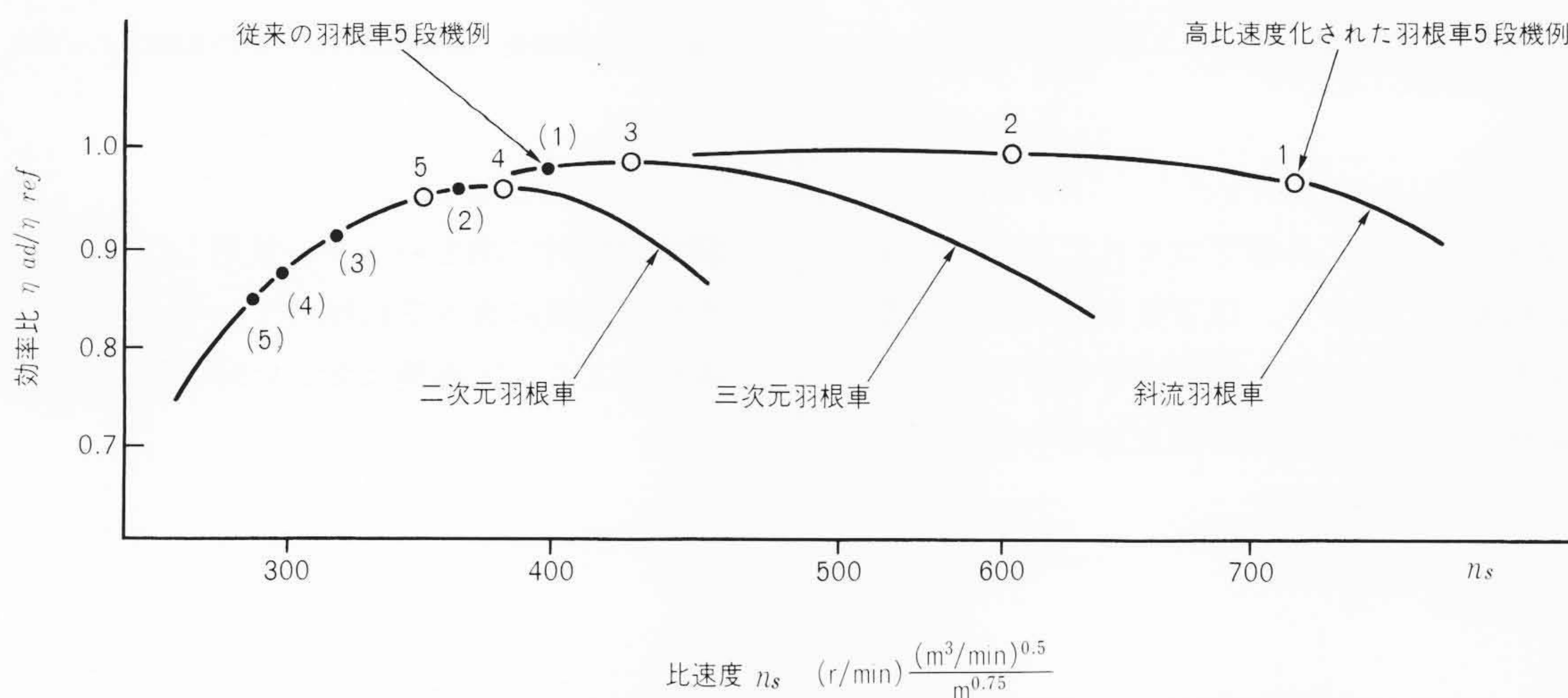


図1 羽根車の高比速度化が効率に及ぼす効果 初段に高比速度羽根車を採用することで、後段の羽根車の効率も改善される。

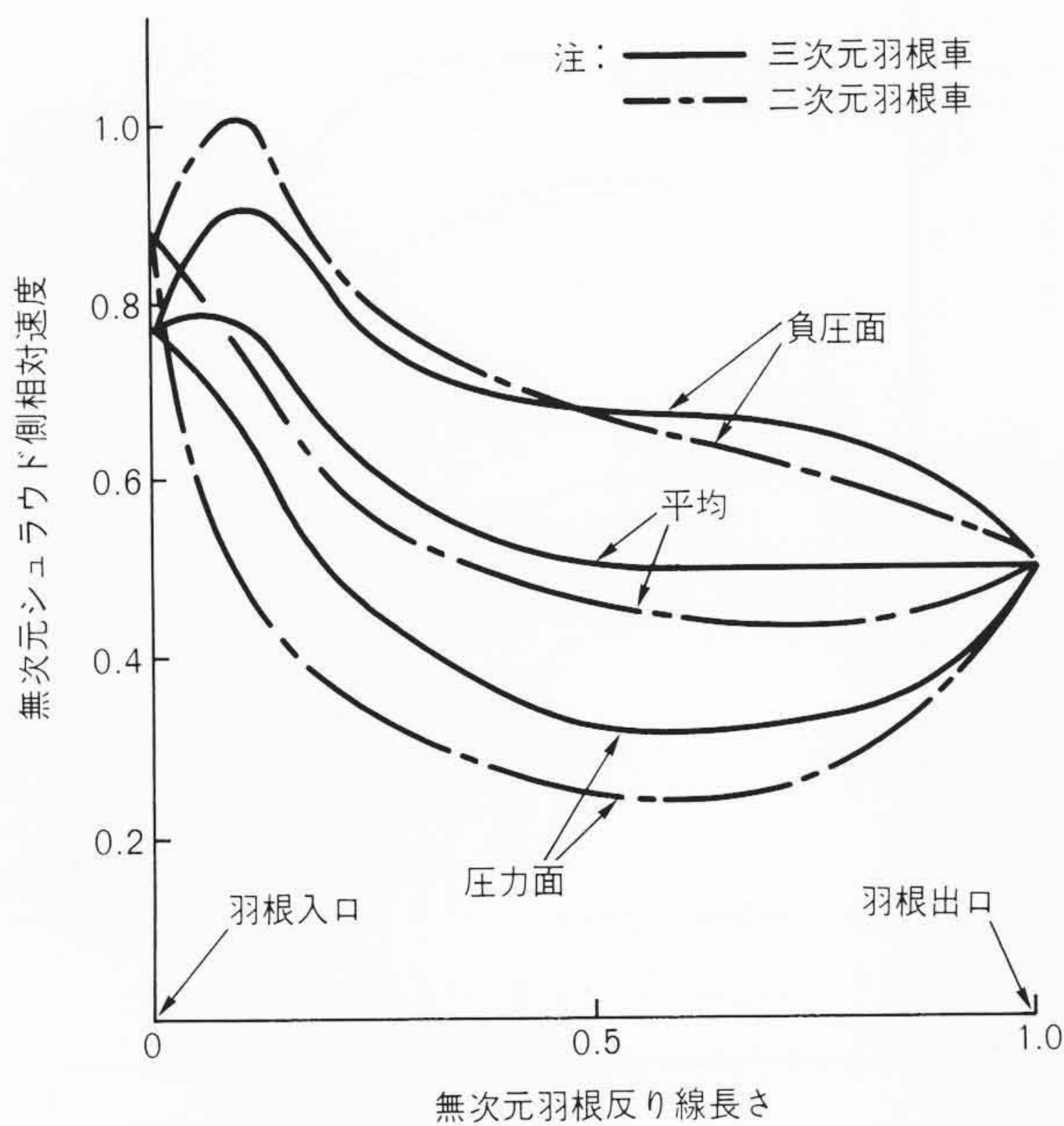
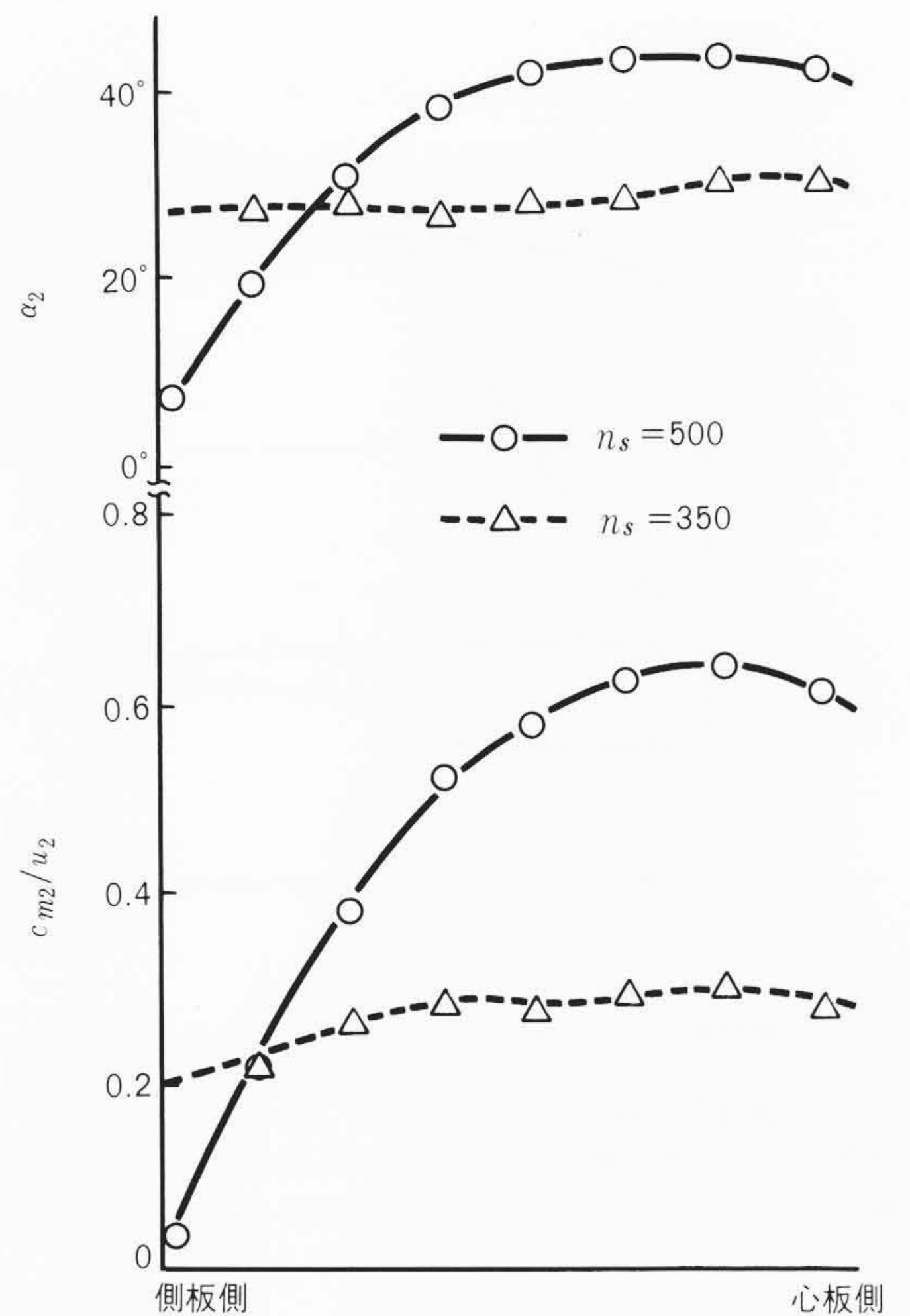
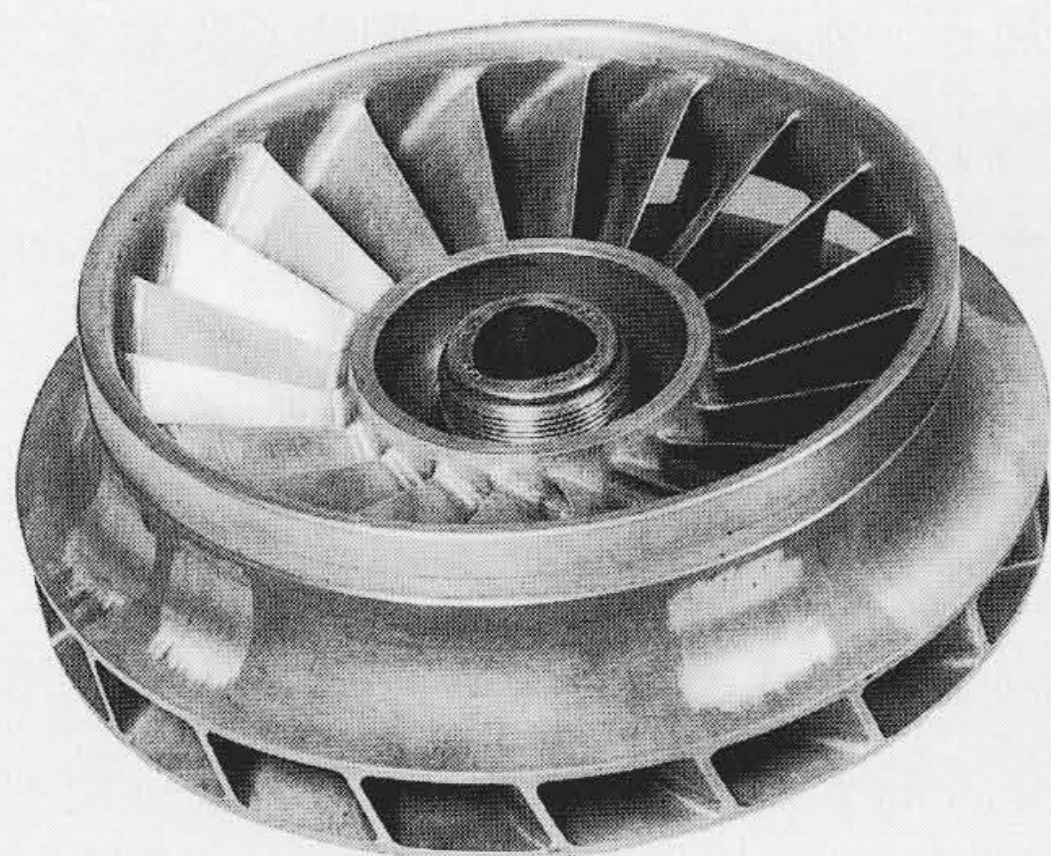


図2 羽根車内の相対速度分布の例 三次元羽根車では、二次元羽根車に比較して、滑らかな速度分布が得られている。

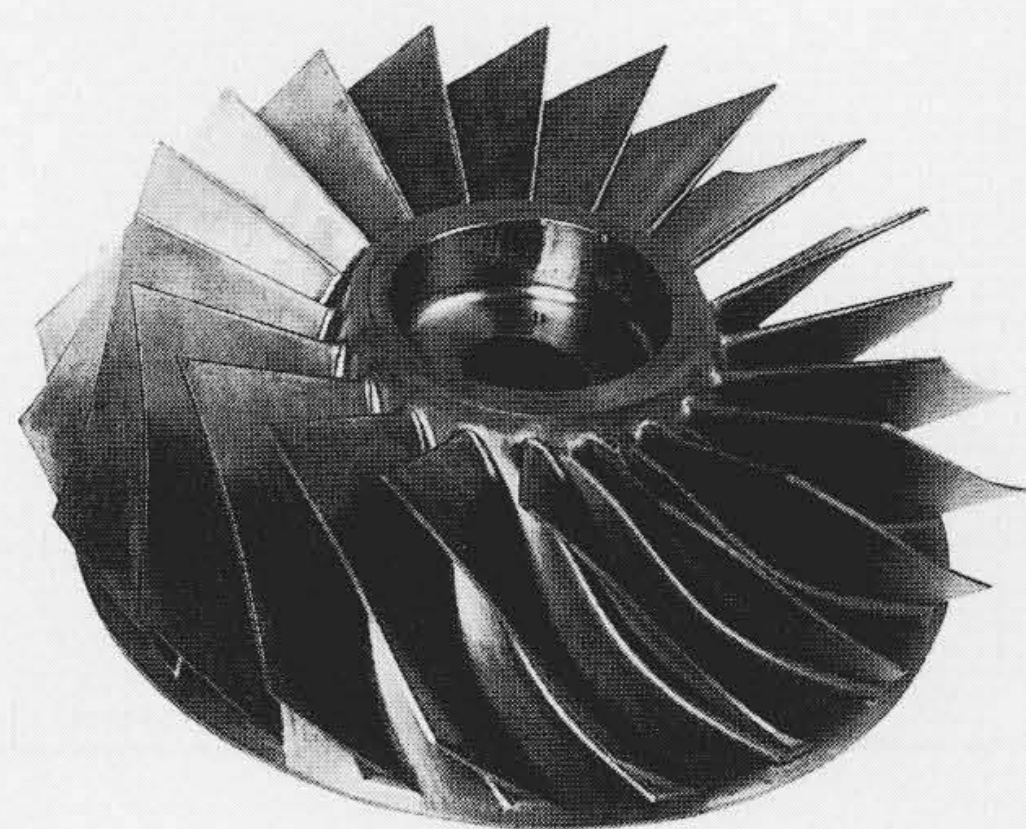


注：略語説明 α_2 (羽根車出口流れ角)
 S (シュラウド) c_{m2} (羽根車出口子午面速度)
 H (ハブ) u_2 (羽根車周速)

図4 比速度の異なる羽根車出口の速度分布例 比速度が大きくなると、羽根車出口の流れはハブ側(心板側)に偏り、軸方向にひずんだ流れとなる。



(a) $n_s = 500$ 遠心羽根車



(b) $n_s = 720$ 斜流羽根車

図3 三次元羽根車と高比速度斜流羽根車の外観 斜流羽根車の開発によって、同一羽根車外径比で吸込風量比で60%大風量を取り扱うことができる。

が、比速度が大きくなるにつれて羽根車の出口流れが心板側に偏り、軸方向にひずんだ流れとなることがわかる。

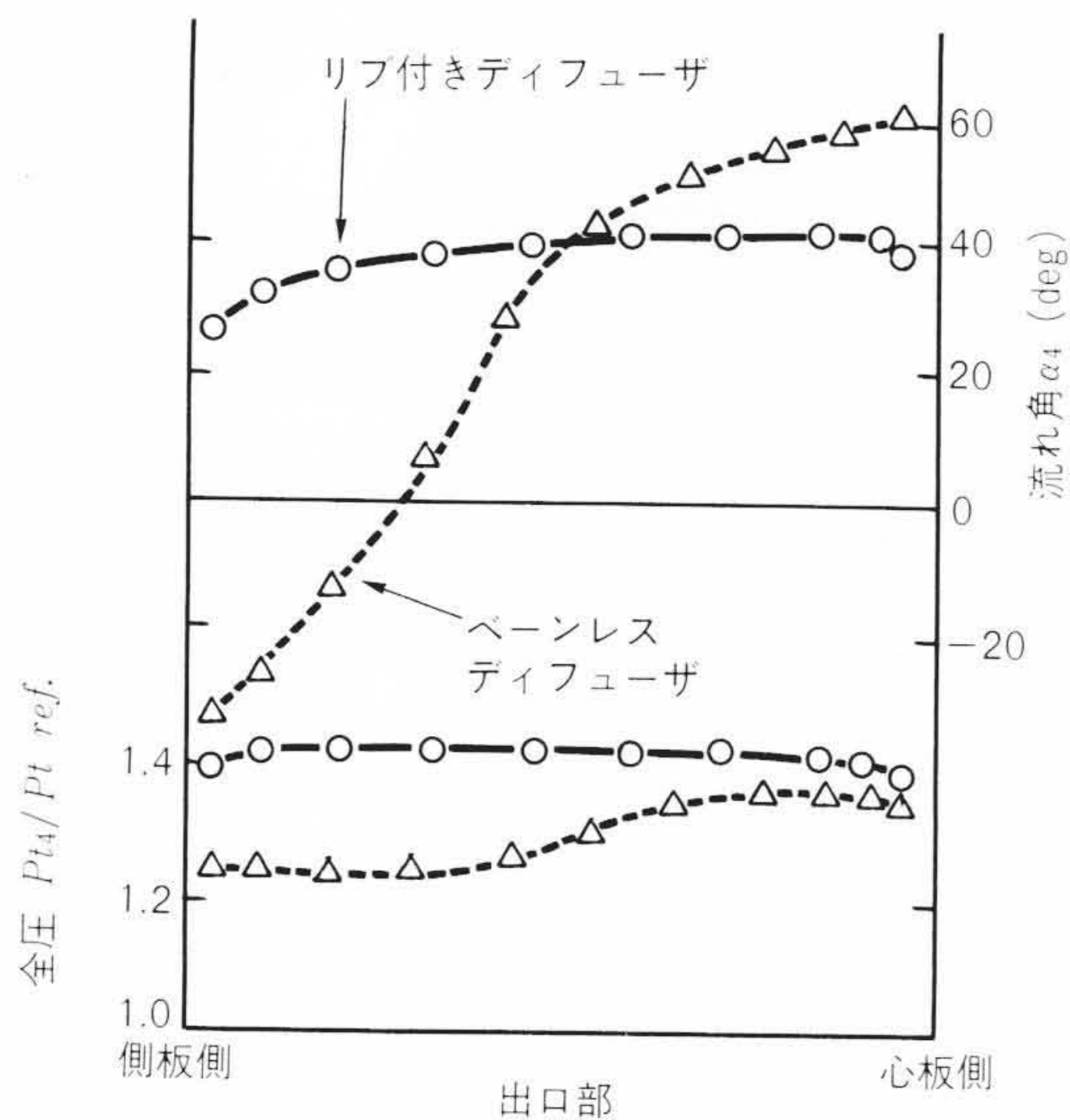
このような軸方向の流れのひずみは、ディフューザ内での二次流れなどを引き起こし効率低下の要因になる。

したがって、圧縮機の高効率化を達成するためには羽根車の高比速度化だけでなく、ディフューザ内の流れを矯正して一様化を図ることが合わせて必要である。

図5³⁾は比速度720の斜流羽根車について、ディフューザでの全圧と流れ角を示したものである。実線はディフューザ通路幅の $\frac{1}{2}$ の高さの案内羽根(リブ)をディフューザに設けた場合を、破線はベーンレスディフューザの場合を示す。

ベーンレスディフューザの場合、側板側の壁面近くでは流れ角が負の値を示していることから、逆流が生じていることが判断できる。これに対しリブ付きディフューザの場合は、流れは一様である。

このことを段性能で比較すると、その差は顕著である。図6³⁾は、この羽根車を用いてベーンレスとリブ付きデ



注：略語説明 α_4 (ディフューザ出口部流れ角)

図5 比速度720斜流羽根車のディフューザ内流れ ベーンレスディフューザの場合は、側板での減速が大きくなり、一部逆流が生じているが、リブ付きでは、流れが著しく改善されている。

ィフューザの段性能を比較したものであるが、段効率では20%もの違いがあることが判断できる。

この結果からも羽根車の高比速度化にはディフューザ側でのくふうも合わせて必要であることが理解できる。

2.3 高比速度遠心圧縮機

高比速度斜流羽根車を、多段圧縮機を適用したときの予想成果を、1,000 t/dアンモニアプラント用原料空気圧縮機の例で図7に示す。

従来は低圧段と高圧段の圧縮機間に増速機を介していたが、斜流羽根車の採用によって圧縮機低圧段を高圧段と同じ回転数とし、増速機を廃止することが可能となっ

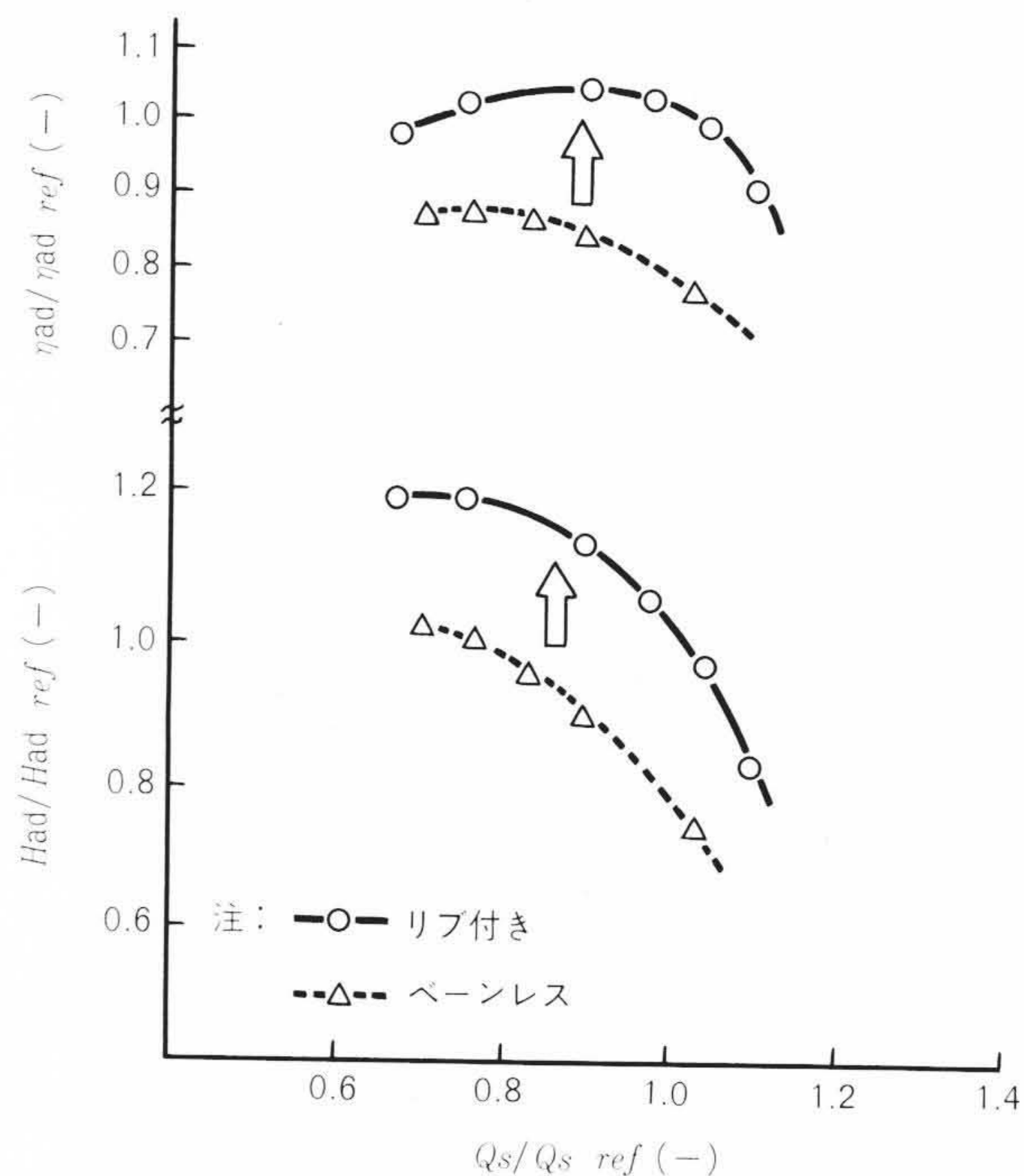


図6 比速度720斜流羽根車の段性能 リブ付きディフューザの採用により、段効率は20%以上改善される。

たことに加え、軸動力で5%、質量で約35%、据付け面積で約25%小形化が達成できる。また、エチレンプラント用分解ガス圧縮機の初段に、斜流羽根車を搭載したロータの外観を図8に示す。

3 圧縮機の周辺技術

従来の遠心圧縮機の軸受や軸封部には、潤滑やシールを目的として油を必要としていたが、まったく油を必要としない新技術が導入されつつあり、信頼性向上、省エネルギー、メンテナンスフリー化が期待できる。

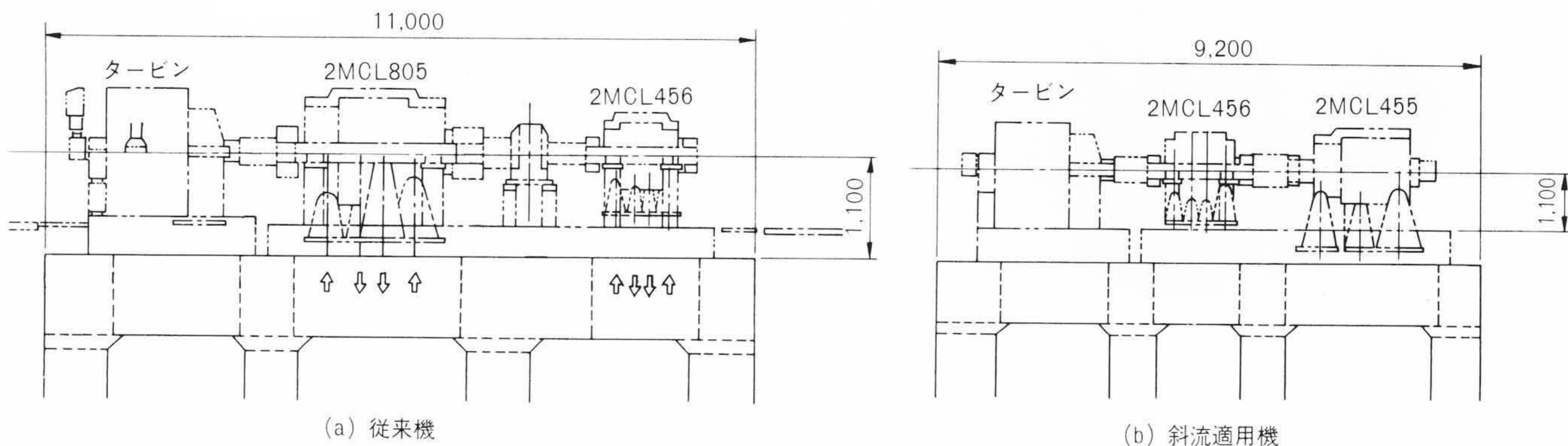


図7 モデル圧縮機設備の全体長さ比較 全体質量で約35%、据付け面積で約25%小形化が達成できる。

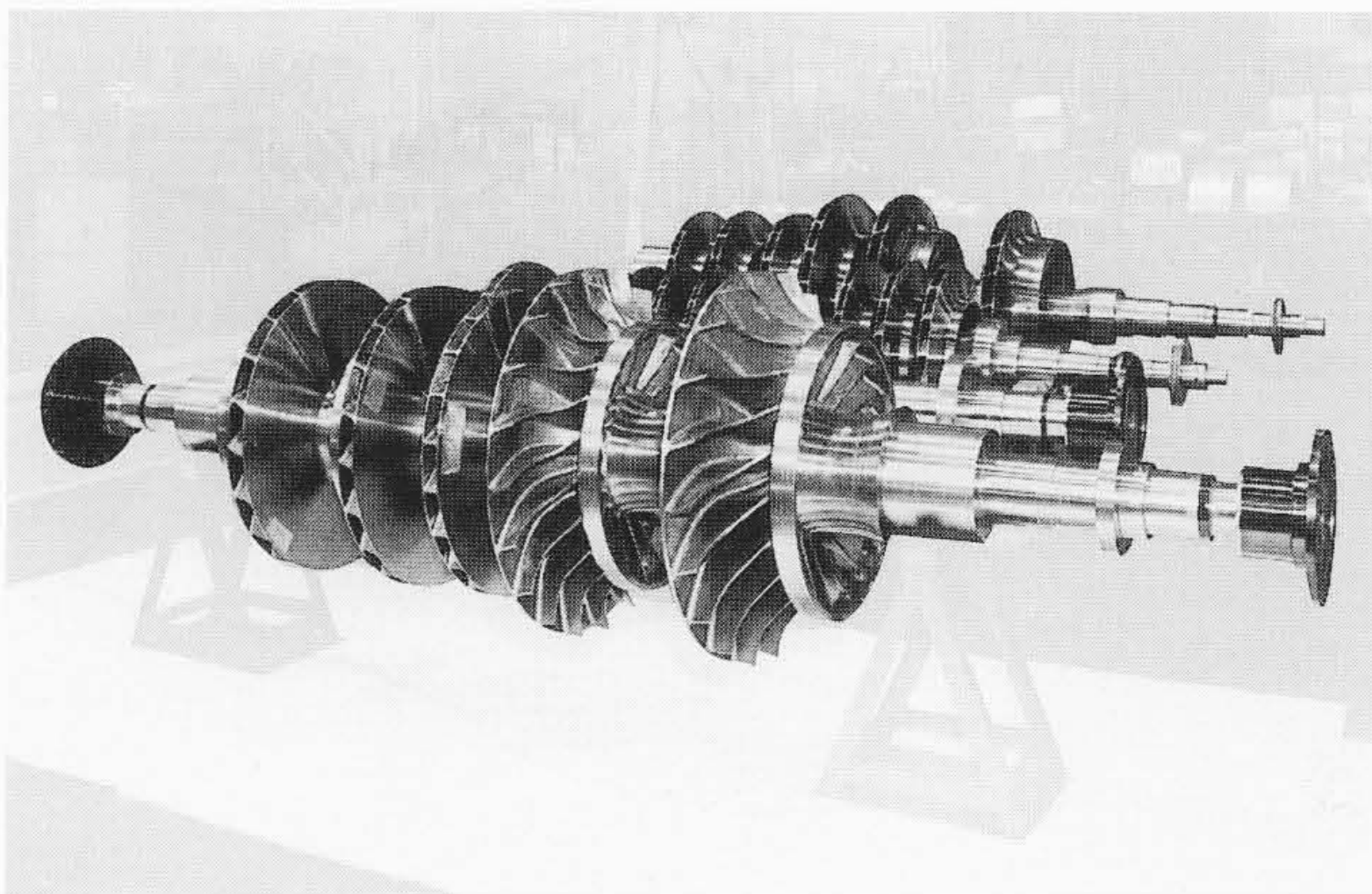


図8 斜流羽根車を搭載したエチレンプラント用分解ガス圧縮機ロータ 5段圧縮機の初段に斜流羽根車を搭載し、高効率化を図った。

3.1 磁気軸受

磁気軸受を用いた回転機械は、ロータ、磁気軸受および電子制御器から構成される。

磁気軸受はロータを常に軸受の中心に浮上支持するよう電磁石で磁気力をフィードバック制御する非接触軸受であるので、従来の滑り軸受や玉軸受などの受動形軸受とは異なり、その特性を電子制御で与えることができる能動形軸受⁴⁾である。日立製作所では、この磁気軸受の分野で豊富な運転実績を持つS2M社(フランス)から技術導入を行い、製品化を図った。

遠心圧縮機に磁気軸受を組み込んだ一例を図9に示す。ロータの両端にラジアル磁気軸受を配置し、その電磁石の力でロータの半径方向の位置を制御する。反駆動機側にはスラスト軸受を設け、ロータの軸方向位置を規定位置に保つ制御を行っている。

また、これらの磁気軸受近傍には、補助ベアリングと呼ばれる玉軸受が設けられている。この補助ベアリングは、インナーレースと軸との間に磁気軸受のエアギャップの約 $\frac{1}{2}$ のギャップを保持するように設計されており、運転中はロータと補助ベアリングは非接触の状態を維持している。何らかの異常で電磁力が喪失するという緊急時には、この補助ベアリングがロータを支持し、損傷することなく停止させる機能を果たしている。磁気軸受の軸受特性を従来形のティルティングパッド形油軸受と比較したものを図10に示す。磁気軸受の剛性は従来形に比べ約 $\frac{1}{10}$ に低下するが、従来形では二次の危険速度で運転回転数の上限が制限されるが、磁気軸受では三次危険速度以上での運転が実現できるため、より高速化・小形化

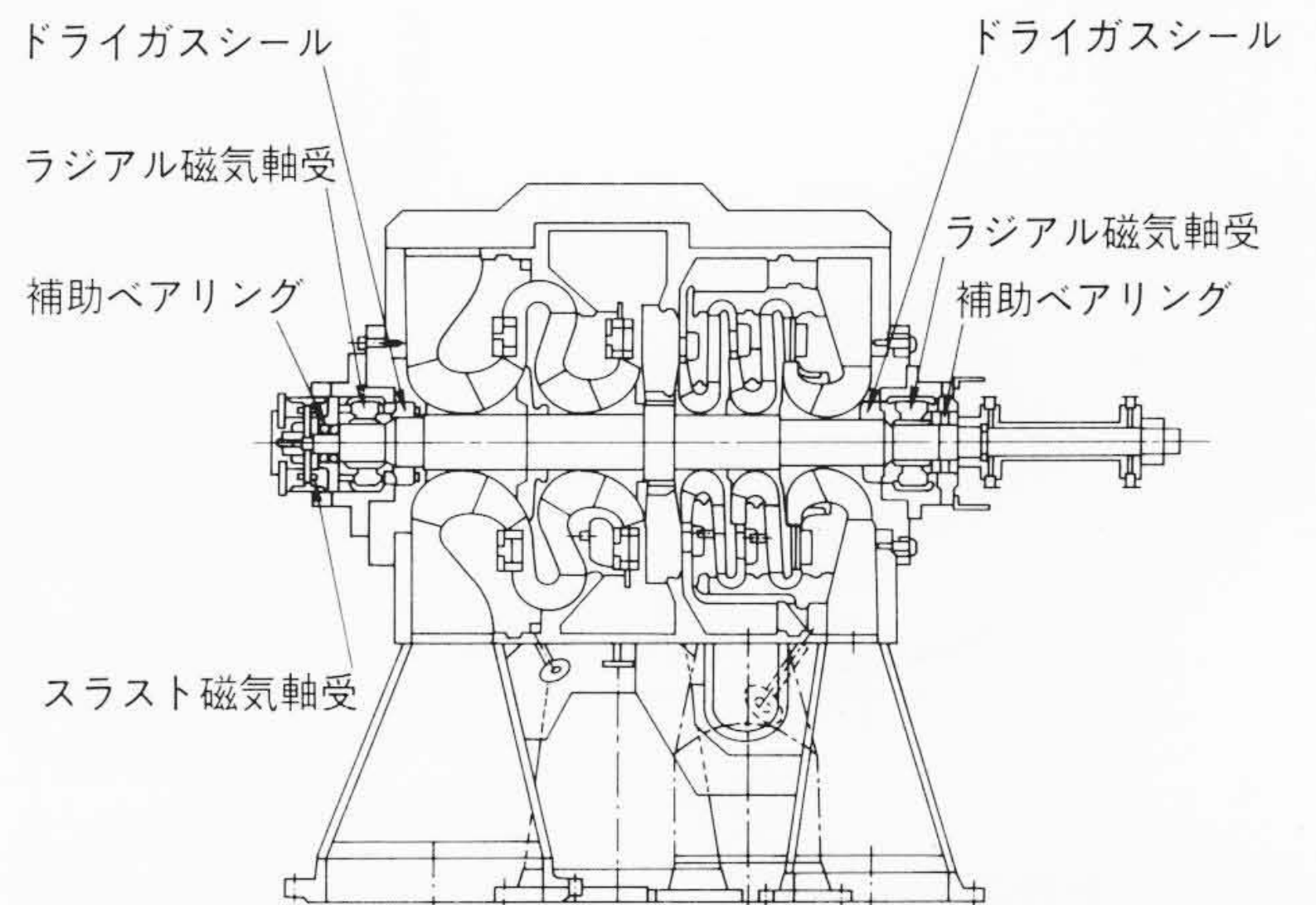


図9 磁気軸受搭載遠心圧縮機の例 軸受に磁気軸受を、軸封にドライガスシールを採用し、完全にオイルレス化が達成される。

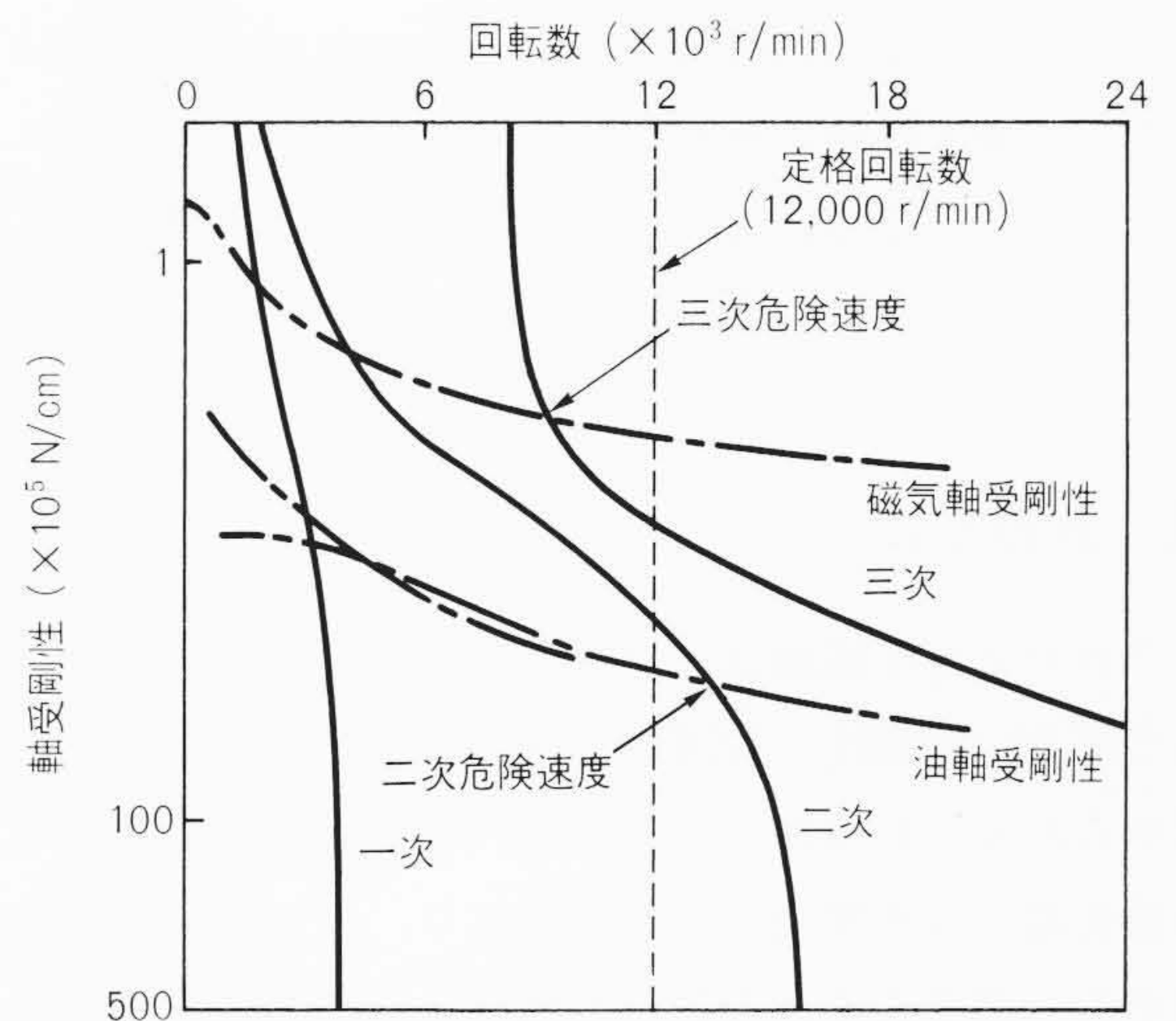


図10 危険速度線図(不減衰) この図はロータ重量5,600 N, 定格回転数12,000 r/min, 5段圧縮機の例である。

が達成できる。同図の軸系での運転時の軸振動振幅を図11に示す。

3.2 非接触ガスシール(ドライガスシール)

ドライガスシールはメカニカルシールと同様な構造を持ち、回転環のシール面に設けられたらせん状の溝が、シャフトの回転によってガスを外径側から内径側に導く。溝は図12に示すように途中で止まっているので、内側に導かれたガスはせき止められ、圧力が上昇する。この圧力によってシール面は非接触の状態になり、すきまは増大する。一方、すきまの増大によってせき止められたガスの圧力は下がるので、シール面は接近する。このように、ガスの圧力自身がシール面のすきまを調整する

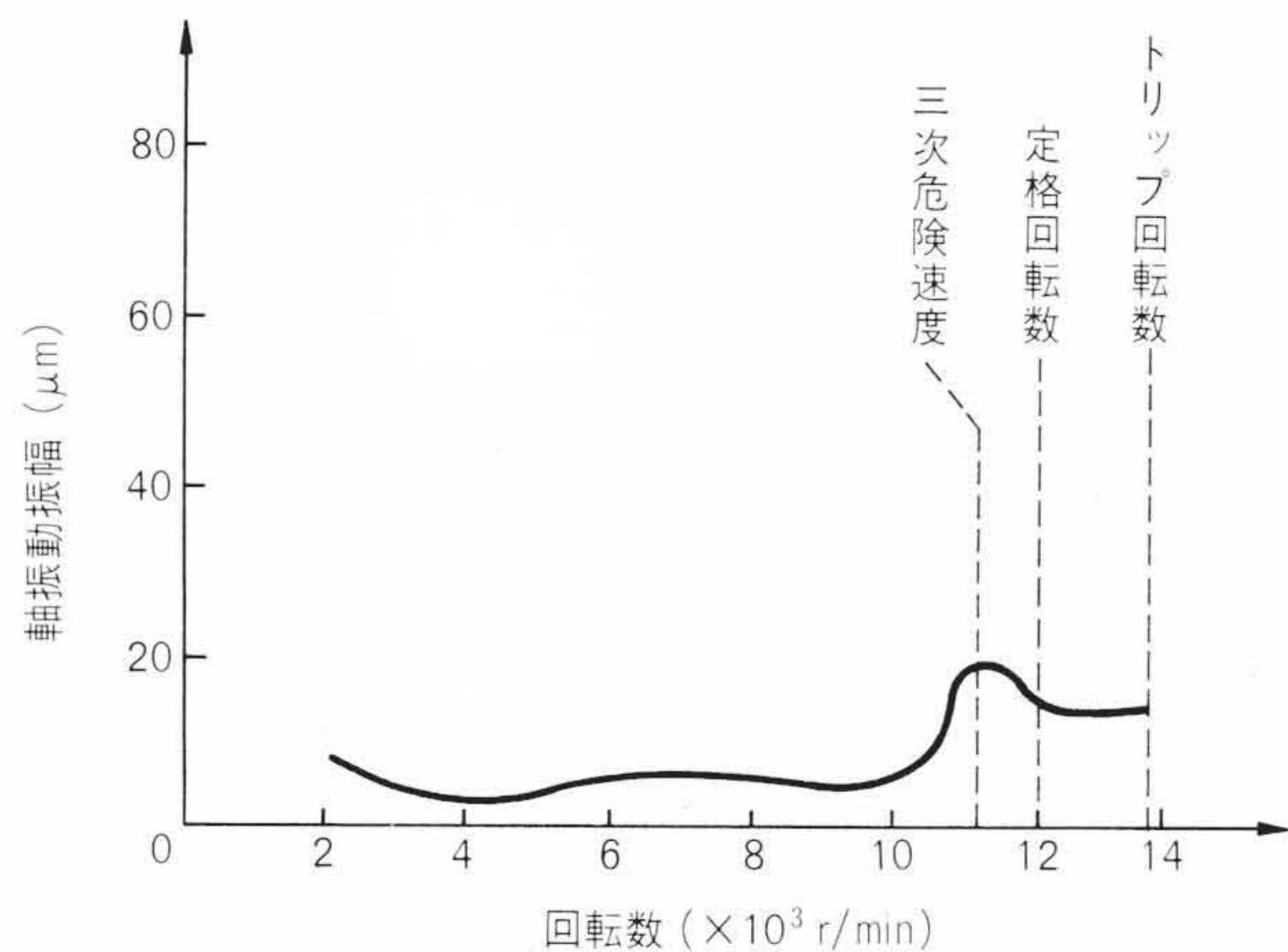


図11 運転時の軸振動振幅 三次危険速度通過時でも、軸振動は約20 μm (p-p)である。

ことになり、漏れ量を一定に制御することができる。ドライガスシールの特徴はこの漏れ量がきわめて少ないことで、従来圧縮機の軸封に必要とされていたオイルユニットが不要となる。先に述べた磁気軸受との併用によって、遠心圧縮機は完全に油を必要としないドライ化が可能となった。

4 おわりに

プロセス用圧縮機はプラント設備の中心を構成する機器であり、信頼性、経済性、保守性などに厳しい要求が課せられる回転機械である。これらの要求にこたえるため最先端の技術開発が行われており、ここで述べた技術はその一部である。今後とも開発を進めお客様のニーズにこたえていきたい。

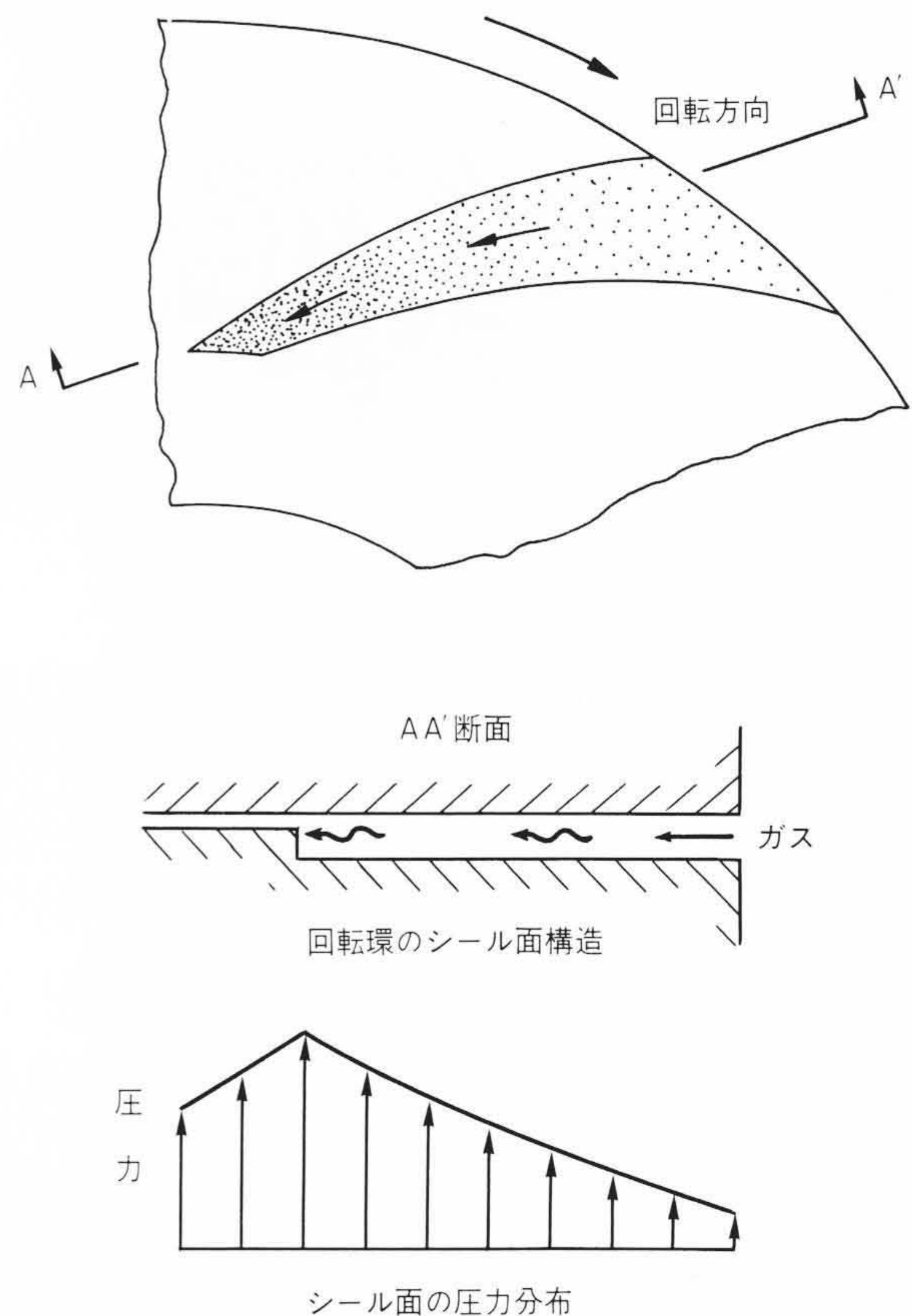


図12 ドライガスシールの回転環 外径側から導かれたガスは、内径側でせき止められて圧力が上昇する。

参考文献

- 1) Rodgers, C. : Specific Speed and Efficiency of Centrifugal Impellers, ASME Publication "Performance Prediction of Centrifugal Pumps and Compressors" (1980-3)
- 2) 吉永, 外 : 遠心圧縮機用ディフューザの性能に関する研究, 機械学会論文集, 50-460B2943 (昭59-12)
- 3) 三浦, 外 : 高比速度遠心圧縮機, ターボ機械, 19-6, 341 (平3-6)
- 4) 福島 : 遠心圧縮機への磁気軸受の適用, ターボ機械, 19-8, 475 (平3-8)