

水屋さんと風屋さん



大橋秀雄*

ポンプの関係者を水屋さん、送風機・圧縮機の関係者を風屋さんと呼ばせて頂くことにしよう。水屋さんと風屋さんは、会社がまったく別の場合もあれば、同じ会社でも部課がはっきり別かれていて、お互いの連携は思ったより少ないようである。ポンプにはポンプ独自の技術の流れと経験の積み重ねがあり、今日の姿まで発達してきている。送風機や圧縮機についても同じことで、互の技術の交流が少ないのもそれなりの必然性があることなのだろう。

ジェットエンジン屋が設計したポンプをみて、大変興味をひかれたことがあった。液体燃料ロケットに使われる燃料圧送ポンプは、軽量・小形化が極端に要求される結果、中には多段軸流ポンプが採用されているものもある。ところが、その多段軸流ポンプの流力設計の手法が、ジェットエンジン用多段軸流圧縮機のそれとほとんど同じものなのである。ディフュージョンファクタ、フローバタン、遷移段、アクチュエータディスク理論など、水屋さんには普通耳なれない設計用語がどんどんとび出してくる。このようにしてできあがったものは、単段の全揚程が2000~3000mに達する多段軸流ポンプで、ポンプ独自の技術の流れから考えると、異端児としか思えないものである。これなどは、ポンプと圧縮機分野における人的交流が成功をもたらした好例であろう。

私は、学会などの仕事を通じて、水屋さんとも風屋さんともおつき会いをする機会が多い。私自身はどちらの専門家でもなく、水屋さんの話も風屋さんの話もそれぞれ感心して聞き入るばかりであるが、両者の考

え方の違いに興味をもつことがときどきある。以下、そのような点について、思い当たることから列举してみよう。

□比速度□

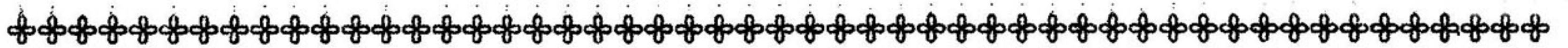
比速度の概念が一番身につけているのは、ポンプ、中でも遠心式や斜流式的设计者であろう。比速度一つでおよその形や、特性曲線、低流量特性、吸込性能までかなりの精度で見通しがつき、大変便利なパラメータである。エキスパートになるにしたがってその効用が大きく、永年の経験が比速度という一つのインデックスによって整理され、頭の中に蓄積されている感じがする。

風屋さん、特に圧縮機屋さんには、この概念が薄いようである。なぜそのような差が生ずるのかいろいろ考えてみたが、風屋の立場に立つと比速度について次のような疑問が生ずることに気付いた。比速度 $N_s = \frac{Q}{H^{3/4}}$ というが、体積流量 Q としてどこの値をとるべきなのか？ 入口か、出口か、あるいは平均値か？ 特に高圧力比の遠心羽根車では、入口と出口では体積流量が2倍以上違うこともある。またヘッド H についても、高圧力比のものでは、断熱ヘッドをとると、ポリトロプヘッドをとるとのでは無視できない違いを生ずる。このように、圧縮性気体を扱う羽根車に対して、比速度の定義すら曖昧である。

この点がいままで問題にされなかったことは、逆に風屋さん、特に圧縮機屋さんが比速度を重視していないことを無言に物語っている。

では、定義さえ明確にすれば風屋さんにも比速度が

* 東京大学 工学部 東京都文京区本郷 7-3-1



重用されるかという点、そうは思えない。むしろこれは二次的なもので、本質的な原因は別にあると思われる。さて比速度の効用は、これを二つに分けて考えると次のようになる。第一は、幾何学的に相似な機械では、対応する運転点、たとえば最高効率点で、比速度の値が一致することにある。この関係が成り立つためには、二つの前提が必要である。一つは、レイノルズ数の違いによる影響が無視できるほど小さいこと、二つは、圧縮性による体積流量の変化が無視できるほど小さいことである。ポンプの場合に比べて、送風機や圧縮機には圧縮性に対する制約が余分にかかるので、第一の効用が生きてくるのは、低圧の送風機に限られてくることになる。

比速度の第二の効用は、対応する運転点の比速度が一致する機械では、その幾何学的な形状が似かよったものになることである。この因果関係が成立するためには、羽根車を中心とする流れ部分の設計パラメータ、たとえば流量係数や羽根出口角などが、ほぼ一定の値をとることが要求される。一例として遠心ポンプの羽根車をとって考えると、流量係数や羽根出口角が、メーカーや設計者の違いにもかかわらず、驚くほど狭い範囲の中にかたまっていることがわかる。これは、ポンプの永年にわたる技術の流れの中で、効率やキャピテーション性能などに対する配慮から、設計パラメータがおのずと固定化してきた結果と思われるが、一方、ステバノフを始めとする優れた教科書がこれらの数値の固定化に拍車をかけたことも否めない。そのお蔭で、ポンプでは比速度の第二の効用が大いに生きてくるわけである。

これに反し送風機・圧縮機では、設計パラメータの範囲があまりにも広すぎ、比速度の第二の効用にはほとんどありつけない。たとえば遠心羽根車の出口角は、ポンプ並みのものから、径向き羽根、前向き羽根まで広く分布しており、比速度が同じでも、まったく違った羽根車の形になってしまう。風屋さんが比速度を重

用しない最大の原因は、結局はここにあると思われる。

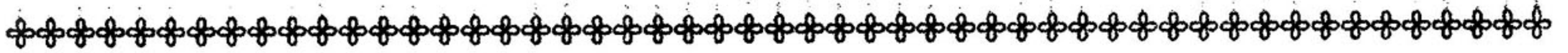
ポンプと送風機・圧縮機では、設計パラメータの選定にどうしてそのような違いが生ずるのか？これに立入ると、またまた一文を要するほど長くなるので省略するが、要は密度の違い、圧縮性の有無およびキャピテーションの有無という、流体の本性の違いに帰せられてしまう。

ポンプにおける設計パラメータの固定化は、単に比速度の活用のみならず、さまざまな利点を生みだしているが、その最たるものは標準化の進歩であろう。ポンプでは、小型うず巻ポンプ、小型多段式うず巻ポンプ、両吸込うず巻ポンプ等々、数種のポンプのJIS化が完了しているのに対し、風の分野では多翼送風機が唯一の実績である。この点における水屋さんの先進性は、大いに評価されるべきものと思う。

その反面もちろんある。最初にロケット用ポンプの例をひいたように、従来にない極限的な性能を要求される場合、設計パラメータの慣行にとらわれない圧縮機設計者の方が、かえってざん新な貢献をするという事態になるのである。

□斜 流□

昔は、斜流ポンプというのは遠心ポンプと軸流ポンプの間であると簡単に習ったものであるが、ポンプの工場を見学してみると、これが意外に多いので認識を新たにす。考えてみれば、斜めというのは一番一般的であり、遠心や軸流はそのスペシャルケースとして片づくのかも知れない。そこで大学の講義でも、斜流式の場合を一般的に取扱って、遠心や軸流は簡単にすませようかとも考えてみたが、いざ実行しようとすると、斜流式の取扱いは複雑、難解でとても判ってもらえそうにもない。そこで止むなく、斜流式を中間的と称して祭り上げてしまう昔ながらの教え方に止まらざるを得ないのである。



ポンプには斜流式が多いが、斜流式の送風機は皆無、圧縮機でもきわめて少数派で、探すのに苦労する。設計パラメータの多彩さではポンプをしのぐ空気機械が、斜流に関してのみなぜこうも例外的なのであろうか。

これは明らかに、キャビテーションの有無に由来している。必要 NPSH を H_{sv} 、吸込比速度を S とすると、 $S = n\sqrt{Q}/H_{sv}^{3/4}$ から $N_s = S(H_{sv}/H)^{3/4}$ となる。 S はほぼ一定値、 H_{sv} は吸込条件から一定の値以下に抑えられる。したがって、与えられた全揚程 H から計算される比速度が斜流の範囲に入るときは、自動的に斜流を採用しなければならない。回転速度を高めて N_s を軸流の範囲まで押し上げ、高速軸流ポンプによって軽量・小形化をはかることは、キャビテーションの制限から不可能である。

圧縮機では、キャビテーションによる回転速度の制限がない。したがって、高速側からは流路形状が単純な軸流式によって、低速側からは軸方向スペースが小さくてすむ遠心式によって挟み打ちに合い、斜流式の存在意義は完全に蚕食されてしまっている。斜流式には、多段化に適さないという欠点も無視できない。ポンプでは、斜流式の優れた低流量特性が評価されるが、もともとサージングの関係でそのような領域では使用されない圧縮機には無用の利点である。

このように、斜流についてはポンプの経験と技術の方が断然リードしている。しかし、斜流羽根車の内部流動に関する理論をたどってみると、Stanitz, Katsanis など風屋の活躍が目立っている。水屋さんには、昔からオイラーの法則できめられる入口、出口速度三角形からさらに羽根車内部に立ち入ってみるという風習が薄いので、この点では風屋に見習う余地が十分あると思う。

□羽根車強度□

ポンプでは、羽根車の遠心強度がネックとなって1段当たりの圧力上昇が制限されることは先ずあり得な

い。鋼合金の羽根車の遠心応力の限界は、外周速度が500m/s 付近にあり、10,000m を越すヘッドが簡単に得られる。チタニウム合金を使えば20,000m を越すヘッドも得られる。

ポンプにこのような大ヘッドが要求されることはほとんどないのに、実際には多段ポンプが多く使われていることは、ポンプの段当たりの圧力上昇が他の要因、主としてキャビテーションによって制約されることを示している。このため、ポンプの羽根車は遠心強度的に空気機械のそれより一般に楽な状態にあり、これがポンプの羽根および羽根車をほとんど鑄造製としている主要原因であろう。

空気機械では、圧縮性すなわちマッハ数の制限から周速度が抑えられてしまう場合もあるが、大部分の場合、周速度の応力的限界を高めることがそのまま段数の減少に直結するので、この点に関する関心がきわめて強い。ポンプについても、羽根車応力が問題となる場合は風屋さんの知恵を借りるところが多々あると思う。

羽根の曲げ応力でいうと、密度の大きいポンプの方がつらくなる。特に、軸流羽根のように片持式の場合が問題である。ポンプと送風機の軸流羽根車を見比べたとき、学生がよく発する疑問は、羽根数がどうしてあんなに違うかということである。いま、内外径、速度三角形、回転速度とも等しい水(w)と空気(a)の二つの軸流羽根を考えよう。両者の翼列は、節弦比のみ等しく、翼枚数 z および翼弦長 l は異なるものとする。両者の翼根に働く曲げモーメント M の比は、

$$M_w/M_a = (\rho_w/\rho_a)(z_a/z_w)$$

一方、羽根の根元に働く曲げ応力 σ は、 $\sigma = (\text{曲げモーメント})/(\text{断面係数}) \propto M/I^3$ 。したがって、両者の曲げ応力を等しくとる条件から、 $M_w/l_w^3 = M_a/l_a^3$ 。さらに、両者の節弦比が等しいためには、 $z_w l_w = z_a l_a$ 。以上のすべての式から、両者の翼枚数および翼弦長につき次の式が得られる。

