

アレキサンダー型油拡散ポンプの排気機構

道 家 忠 義

は し が き

最近高真空工業の急速な発展により、大型高性能の拡散ポンプの需要が増加し、それにともなう拡散ポンプのいろいろな研究が行われ、その排気機構および設計方針がかなり明らかになってきた。1946年の J. S. I. に掲載された P. Alexander の論文¹⁾もその意義あるものの一つである。

しかしその結論として作られた新型水銀ポンプに関してはその性能測定上の疑問もあり、余り設計方針も具体的にでない。そこで著者はその機構をより明確にしかつ設計方針を具体化するために、小型 Alexander 型油拡散ポンプを作りその性能を調べてみた。

排気速度と逆拡散

拡散ポンプの性能を比較するためには一般に排気速度とその逆拡散の二つの量を測定しなければならぬ。そこで Alexander 型油拡散ポンプの説明に入る前にこれ等がどのような因子に左右されるかについて考えてみよう。

排気速度は高真空側から流れ込んだ気体の流量を Q 、その時の高真空側の真空度を p 、到達真空度を p_0 とすれば

$$S = \frac{Q}{p - p_0} \quad (1)$$

で与えられる。また $Q=0$ のときに補助真空側に気体を流し込みその時の補助真空側の圧力を F とし、その時逆拡散によって高真空側が p^* になったとすると、逆拡散係数 b は次のように定義される。

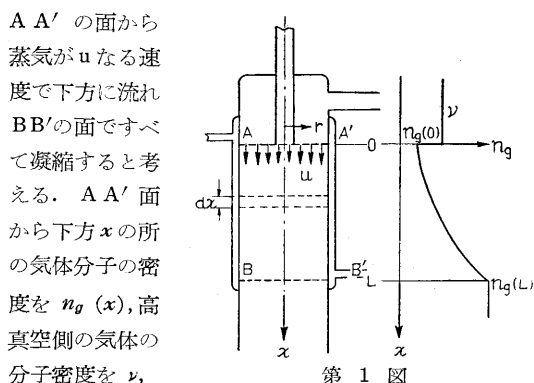
$$b = (p^* - p_0) / (F - F_0) \quad (2)$$

ここに F_0 は補助真空側の到達真空度である。もしこの逆拡散係数 b が測定され補助真空側の排気速度 S_F が判れば、次式によって逆拡散の影響を除いた排気速度 S_0 を求めることができる。

$$S_0 = \frac{S}{1 - b \frac{S}{S_F}} \quad (3)$$

逆拡散係数 b とその影響を除いた排気速度 S_0 は拡散ポンプの排気機構を研究する上に非常に重要な量である。すなわちこの S_0 は拡散ポンプのジェットからの油蒸気の流れの状態にのみ関係するものであると考えられる。したがって一つのジェットについてのみ言うならば、補助真空側の圧力が相当大きくなり（臨界圧力附近）油蒸気の流れの状態が本質的に変わってしまう限り高真

空側の真空度の如何にかかわらず S_0 は一定である筈である。しかしジェットの種類、壁の温度および形状などによって S_0 の効率は相当異なる。その主な原因は油蒸気の逆流と油蒸気の並進運動の速度の相違によると思われる。すなわち拡散ポンプを簡単化して第 1 図のように



排気孔の面積 F 、気体分子の平均速度を \bar{c} とするとそこに飛び込んでくる気体分子の数は

$$N = \frac{1}{4} F \bar{c} (\nu - n_g(0)) = \nu F s \quad (4)$$

である。ここに s は単位面積当りの排気速度を現わす。いま $A A'$ 面に飛び込んだ気体分子はすべて蒸気流と共に u なる速度で排除されたとすると、蒸気流の中の任意の断面の単位面積当りについては次の式が成り立つ筈である。

$$u n_g(x) - D \frac{d n_g(x)}{d x} = \nu s \quad (5)$$

ここに D は蒸気流の中の気体分子の拡散係数である。逆拡散のない場合を考えると左辺の第二項はなく(5)式は

$$u n_g(x) = \nu s$$

となり、これから $n_g(0) = \frac{\nu s}{u}$ が求まり、これを(4)式に

代入して単位面積当りの排気速度 s が求まる。

$$s = \frac{\bar{c}}{4} \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \frac{\bar{c}}{u}} \quad (6)$$

この排気速度 s は模型的に考えられた拡散ポンプでの逆拡散の影響を除いた排気速度とみることができ、したがってこれと同様 S_0 も油の蒸気流の並進速度に大いに依存する。また上の計算では油分子の逆流を考えなかったが、実際は油の蒸気流の並進速度より大きな相対速度を持つ蒸気分子は逆流し、逆ポンプ作用をなすため S_0

が減少すると考えられる。しかしこの逆ポンプ作用も並進速度を大きくすることによって減少せしめることができる。ここに述べた油蒸気の並進速度およびその逆流はジェット形状、取付け方および壁の冷却の状態等によってきまるものである。

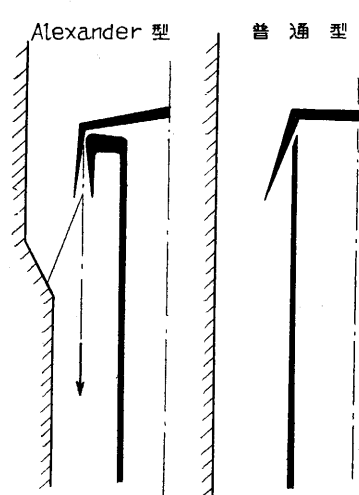
次に逆拡散係数 b の大小は何に起因しているかを考えてみよう。(5)式の右辺を 0 と置きその方程式を解くと

$$\frac{P(0)}{P(L)} = e^{-u/D \cdot L} \quad (7)$$

となる。ここに L は蒸気流の有効な長さであり、 $P(L)$ は補助真空度、 $P(0)$ は高真空側に逆拡散した気体の圧力であるから上式は逆拡散係数 b に等しい。今拡散係数 D は蒸気分子密度 n_0 に逆比例するので $D_0 = D \times n_0$ とすると u/D は un_0/D_0 となる。すなわち逆拡散係数 b は (密度) \times (蒸気の並進速度) に大いに依存することになる。実際上は u , n_0 , L はいずれも r の函数であり、一般には壁の附近で n_0 , L が小さくその部分の逆拡散は大きい。また n_0 を大きくして b を小さくしようとすると同時に高真空側への油蒸気の逆流も増加し性能を悪化せしめることも考えられる。

3 Alexander 型拡散ポンプ

Alexander はかれの種々の実験結果から高速蒸気流に重点を置き、さらに拡散ポンプの排気作用を効率よく行わせるための条件として、蒸気の流れの中にできる空気の密度の最小部と最大部 (第 1 図の AA', BB' のような部分) が排気方向に一直線上にあることであると考



第 2 図

えその結果

- 1) ジェットは排気方向に真直に向ける。
- 2) 1) を満足すると真直な壁では壁の附近で蒸気の密度が小さくなり、空気の密度の最大部が壁に沿ってできるため

上の条件が

満されなくなる。そこで第 2 図のように壁の適当な所を折り曲げて壁の附近の油の密度を増す。

〔3〕油の流れを乱さぬように外殻はもちろん内部のパイプの外側も完全に冷却する。

等のことが必要であるとした。そしてこのような条件が

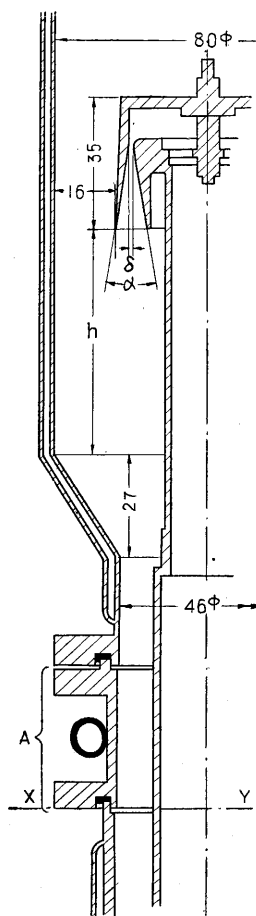
毀されぬ程度にできるだけ排気口の面積を広くすれば排気速度の大きい拡散ポンプが得られる筈であるとし、このような型式の水銀拡散ポンプを作り、普通の型のものと比較してみたところ、予想通りはるかにすぐれた性能を持っていることが判った。

ここでかれのいう排気作用の効率がよいための条件は換言すれば逆拡散をできるだけ減少せしめる条件である。さらにかれは排気速度は蒸気流が気体分子を排除する速度によってきまると考え、その蒸気流の速度を重視したことは意義がある。しかしその他に考察の所で述べるようにかれの設計方針は自然に蒸気の逆流も減少するようになっており、またジェットが内部のパイプ壁から離れているためその蒸気流が外側に拡がらずその結果排気速度の効率が上っていることも考えられる。

後に B. B. Dayton²⁾ によって指摘されたようにその測定法に疑問もあり、実際上の工作に困難な点もあり、設計方針に具体性がない。そこでその排気機構の研究とともに実用上の設計資料を得るため内部冷却壁のない Alexander 型油拡散ポンプを試作し、ジェットと壁との相対的位置を変えてその排気速度および逆拡散の変化を測定してみた。

4 実験装置

試作したポンプは 2 吋二本煙突型拡散ポンプを利用し、上向きジェットおよびボイラー (面積約 120cm²) の分溜用隔壁を取り去ってその高真空側に直径 80mmφ の Alexander 型の外殻を取りつけたもので、その主要寸法は第 3 図に示す通りである。またその外壁の傾斜は約 30° とした。図中 A 部にあるような種々の高さの円筒を挿入し、ジェットの位置を固定したまま外壁の高さを変えることによって傾斜壁とジェットの先端の距離 (図中の h) を変化させた。固定されたジェットの高さは X-Y 部からジェットの先端まで 125mm と 170mm とである。測定が行われた h はそのおのの高さに対して、



第 3 図 テスト・ポンプ

ジェット的位置

h

170 mm	117 mm, 65 mm
125 mm	72 mm, 59 mm, 46 mm,
	33 mm, 22 mm, 7 mm

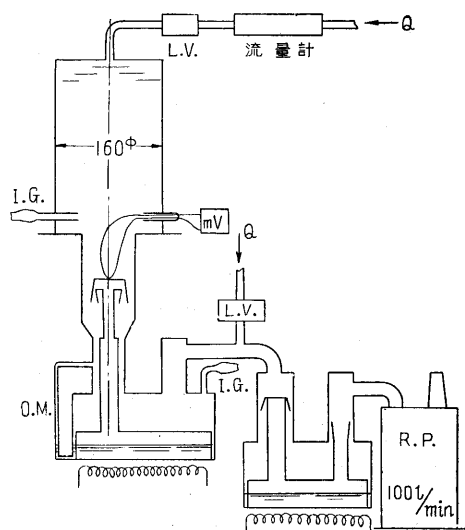
である。

テストは四種類のジェットについて行われたがここにはその三種類のジェットの特性のみを挙げる。その詳細は第3図および第1表に示す。

第 1 表

ジェットの種類	A ₁	A ₂	A ₃
α	18°	18°	18°
δ mm	1 mm	1.5 mm	2 mm
喉面積 F_0 mm ²	125.6	186	245
開口面積 F_1 mm ²	1004.8	1056	1102.1
F_1/F_0	8	5.66	4.5

測定は第4図に示す如く B. B. Dayton 氏の方法にしたがい流量計にはビュレット法を使用した。ボイラー圧は図に示すように油マンオメーターで直接読めるようにし

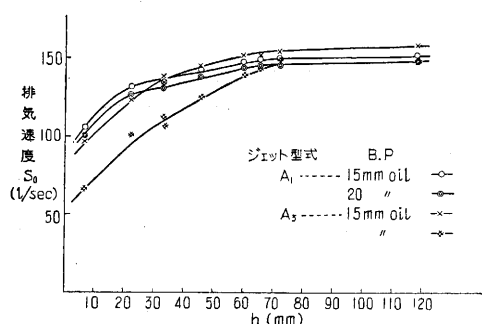


第 4 図 測定装置

である。またこのテスト・ポンプに直列に拡散ポンプを入れ中間真空を作り、そこにリーク・バルグをつけて電離真空計で逆拡散が測れるようにした。電離真空計にはすべて Fogel 型のものを使用した。回転ポンプは 100 l/min の島津製キネー型回転ポンプである。

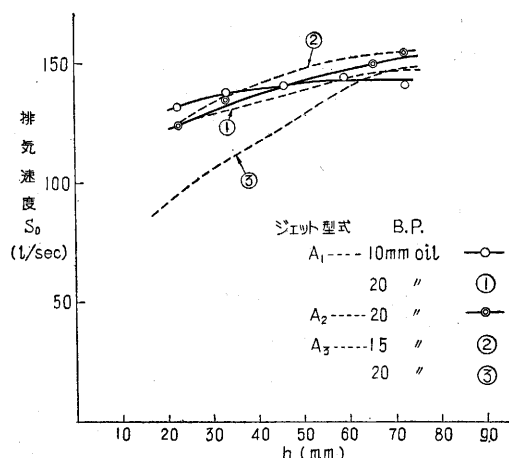
5 実験結果

A₁, A₃ のおのののジェットについてボイラー圧が 15 mm oil, 20 mm oil の場合の排気速度 S_0 の変化を第5図に示す。図から判るように最高排気速度は A₃ 型



第 5 図

ジェット (ボイラー圧 15 mm oil の場合) の 155 l/sec で H_0 係数にして約 40% 程度に達している。またいずれの場合も h が次第に減少していった場合 $h=60$ mm 前後で S_0 が低下し始め、更に $h=20$ mm 以下ではその減少率がさらに増加する。今 $h=20$ mm~70 mm の間の S_0 の変化を見るに A₁ 型ジェットのボイラー圧 15 mm oil, 20 mm oil いずれの場合もその減少率はほぼ同一であるが、A₃ 型ジェットになるとその減少率がさらに増加し、特にボイラー圧が 20 mm oil のときにはそれが甚しい。第6図はこれ等の変化にさらに A₁ 型、ボ



第 6 図

イラー圧 10mm

oil, A₂ 型, ボイ

ラー圧 20mm oil

の場合を加え比

較したものであ

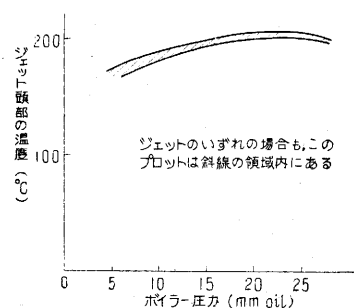
る。これ等の結

果と第7図*に

示すようにボイ

ラー圧に対する

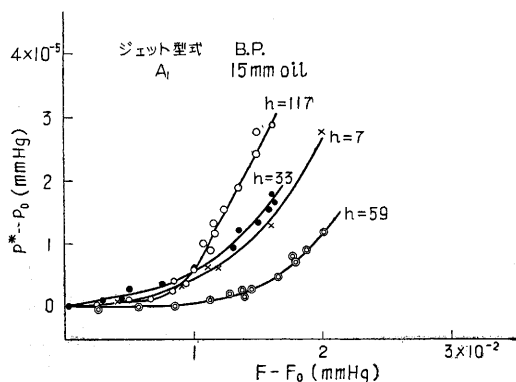
ジェット頭部の



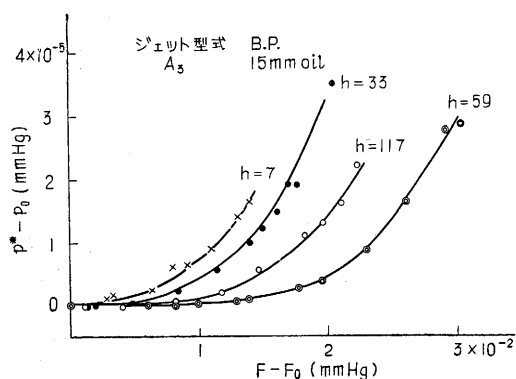
第 7 図

* この図のボイラー圧の高い所でジェット頭部の温度が下っている現象は何によるものかはきりしない。

温度の変化がボイラー圧 10~20 mm oil の間では 10% 程度しか変化していないことから、そのノズルの最小間隙の油蒸気の速度をいずれもほぼ一定なりとし、 S_0 の低下率はほぼ油蒸気の噴出量 ($\propto F_0 \times (B \cdot P.)$) に比例していると考えてよいであろう。また $h=20$ mm 以下での S_0 の変化は $h=70$ mm の一点しか測定されていないためはっきりしたことは言えないが、その急激な減少とその附近の幾何学的条件とを考えると油蒸気の流れの中に気体分子が effuse する有効面積の減少によるものと思われる。



第 8 図



第 9 図

逆拡散の特性については第 8 図、第 9 図に A_1 型ジェット及び A_3 型ジェットのボイラー圧 15 mm oil の場合の変化を示した。いずれも h を減少せしめるにしたがって初めは逆拡散が減少し、 $h=60$ mm 附近で最小となるがその後 h の減少とともに逆拡散が徐々に増し、 $h=33$ mm の附近で急激に増加するがそれ以下ではほとんど変化しないか、また変化したとしても僅かである。 A_1 型と A_3 型の相違は同一の h の縮小に対する逆拡散の減少の仕方は A_1 の方が大きい。これは開き率の大きい方が h の変化による冷却壁附近の油の密度変化の大きいことから当然かも知れぬ、また $h=33$ mm 附近の逆拡散の急激な悪化の仕方は A_1 より A_3 の方が多い、これは油蒸気の壁に衝突する量の多い方がより逆拡散を増加せしめていることを示すと考えられる。

6 考 察

排気速度 S_0 について 最高の H_0 -係数が約 40% にも達していることは測定の誤差を考慮しても小型拡散ポンプとしては相当に効率のよいことを示している。この主な原因は divergent nozzle を使用して油蒸気の並進速度を上げ、しかも排気方向に向けているためそれが有効に働いていること。また D. G. Avery and R. Witty³⁾ が指摘しているようにこのような設計はその油蒸気の逆流を減少するのに非常に有効であること、さらにジェットを内壁から離すことは内壁の高温のために油蒸気の流れが外側に拡がることを防ぐ点でよいのではないと思われること等である。また実験結果で示した $h=70 \sim 20$ mm の間の S_0 の減少は冷却壁面の油による絶縁膜のために油蒸気分子が反射し壁の附近の流れが乱れるためであろう。したがって油蒸気の噴出量の増加は熱絶縁膜の厚さの増加を示し、そのために油蒸気の流れの乱れが増加すると考えられる。

逆拡散の変化について 2 章で述べた如く逆拡散の多い所は外壁の附近である。したがって外壁の附近の油蒸気密度 n_v の増加は逆拡散を減少せしめるであろう。 $h=60$ mm 附近までを縮少して行くときの逆拡散の減少はこのためであろう。しかしそれ以下で徐々に逆拡散の増加するのは壁の附近の蒸気流の乱れの増加による油蒸気の並進速度 u の減少、および油蒸気流の有効な長さ L の減少が n_v の増加より激しいことを示していると考えられる。また $h=33$ mm 附近の逆拡散の急な変化は S_0 の変化には現われない所から壁に沿った部分の局部的変化によるものと思われる。

7 設計方針について

以上の結果から Alexander 型拡散ポンプは相当効率のよいものができる可能性があることが判った。そこで設計に必要な部分のみを取り上げて見ると

- 1) 下向きジェットを内側のパイプ壁からできるだけ遠ざけて取りつけること。
- 2) 逆拡散に対しても、排気速度に対しても h に関してある optimum があり、この実験に使用した油蒸気の密度の範囲および外壁の傾斜 (30°) のものでは、いずれもそれは $h=60$ mm 附近である。

しかし注意しなければならないことは排気口の有効面積がいくらか小さくなることと多段式の場合次段の排気速度が相当小さくなる可能性があることである。

以上実験結果と、それからいい得た点を二三口りまとめて報告した次第である。

終りにこの実験は 28 年度文部省助成金によるものであることを附記する。(1954・9・20)

文 献

- 1) P. Alexander; J. Sci. Instruments 23, 11 (1946)
- 2) B. B. Dayton; Ind. Eng. Chem. 40, 795 (1948)
- 3) D. G. Avery and R. Witty; Proc. Phys. Soc. 59, 1016 (1947)