

真空ポンプ

1 はじめに

真空ポンプは分析装置に多く用いられている。電子やイオンを用いた分析装置ではそれらの平均自由行程を長くする目的で真空が用いられ、表面分析では試料表面への分子の吸着を防ぐために 10^{-8} Pa 程度の超高真空が用いられる。測定試料の保管に真空デシケータを用いることもある。目的によって要求される圧力領域は異なるため、それに合わせて真空ポンプを選ぶ必要がある。また真空ポンプの使い方を理解して正しく使うことは分析結果の信頼性や長期にわたる安定した測定につながる。本稿では真空ポンプの使い方や使用上の注意について簡単に述べる。

2 真空ポンプの選び方と使い方

分析装置に多く用いられている真空ポンプは、ロータリーポンプ（油回転ポンプ）、ドライポンプ、ターボ分子ポンプ、イオンポンプ（スパッタイオンポンプ）、チタンゲッターポンプ、クライオポンプなどである。古い装置では油拡散ポンプ、新しい装置では非蒸発型ゲッター（NEG）ポンプなども使われている。通常は複数の真空ポンプを組み合わせることで目標の圧力まで排気することが多い。真空槽を目標の圧力まで排気して維持するためのポンプを主ポンプと呼び、主ポンプが動作可能な圧力まで排気するポンプを粗引きポンプと呼ぶ。また主ポンプの背圧を機能できる圧力以下に維持するためのポンプを補助ポンプと呼ぶ¹⁾。ターボ分子ポンプとロータリーポンプの組み合わせが用いられることが多く、その場合はターボ分子ポンプが主ポンプで、ロータリーポンプが粗引きポンプと補助ポンプの二つを兼ねている。図1に代表的な真空ポンプの使用圧力範囲を示す²⁾。

ガス放出がない理想的な真空槽では到達圧力は真空ポンプの圧縮比という性能で決まる。真空槽の圧力が下がり、それ以上排気できない状態での真空ポンプの吸気口の圧力 p_1 と排気口の圧力 p_0 の比 p_0/p_1 を最大圧縮比と呼ぶ。例としてターボ分子ポンプは 10^8 程度、ロータリーポンプは 10^6 程度であり、それらを直列に組み合わせるとロータリーポンプの排気口が大気圧（ 10^5 Pa）の時 $10^5 \text{ Pa} / (10^8 \times 10^6) = 10^{-9}$ Pa まで理想的には到達できることになる。

到達圧力に加えて真空ポンプには排気速度という性能がある。ガス放出がない理想的な真空槽では、圧力 p は初期圧力 p_0 から排気開始からの時間 t に対して $p = p_0 \exp(-t/\tau)$ という形で指数関数的に下がり、その時定数 τ は真空槽の体積 V と真空ポンプの排気速度 S を用

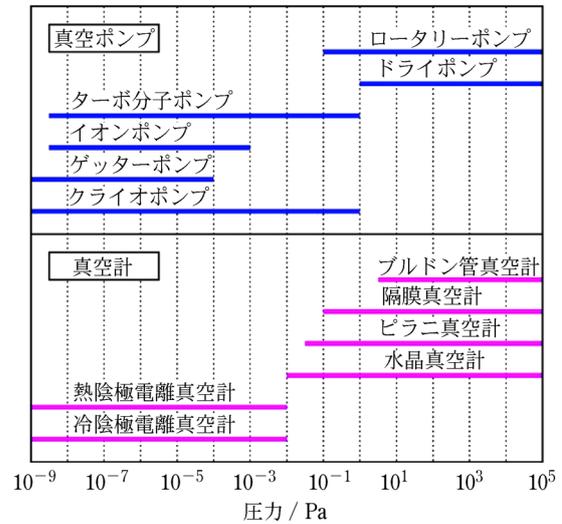


図1 代表的な真空ポンプと真空計の使用圧力領域

いて $\tau = V/S$ と表される。排気速度の大きい真空ポンプを用いると速く圧力が下がることになる。ただしターボ分子ポンプは軽い分子に対しては排気速度が小さく、イオンポンプは希ガスに対して排気速度が小さいなど排気する分子によって排気速度が異なることに注意する。

現実には 10^{-3} Pa 程度からは上記の式よりも圧力が下がりにくくなる。これは真空槽内の壁面に吸着した水が少しずつ脱離し、その脱離速度で圧力が決まるからである。また油分が存在しても同様の現象が起き、手の油分が付着するため真空槽や真空ポンプの内部を素手で触ることは避けるべきである。圧力を速く下げるためには真空槽全体を加熱して壁面に吸着した水分子の脱離を加速させて真空ポンプで排気しやすくするベーキングと呼ばれる作業を行う。通常は $150 \sim 200$ °C 程度で 24 時間程度ベーキングを行うと短時間で目標の圧力まで到達できる。ターボ分子ポンプは吸気口部分のベーキング温度に制限があるので注意する。また熱に弱い配線類は取り外すことが必要である。

真空ポンプの性能を十分に発揮するためには真空槽と真空ポンプをコンダクタンスの大きい配管でつなぐことが望ましい。コンダクタンスとは気体の流れやすさの指標であり、コンダクタンスの小さい配管でつなぐと排気速度が小さくなり、到達圧力も高くなる。断面が円形の直線配管の場合、圧力がおよそ 1 Pa 以下の分子流領域と呼ばれる圧力ではコンダクタンスは断面の半径の 3 乗に比例し、長さに反比例するため¹⁾、長さが短く内径が大きい配管でつなぐ方がよい。同様に主ポンプと補助ポンプをつなぐ配管のコンダクタンスにも注意が必要である。コンダクタンスが小さい場合、主ポンプの背圧が必要な値まで下がらず、動作しないことも起こり得る。

機械的な動作を伴うターボ分子ポンプやロータリーポンプは振動が分析装置に伝わり問題となることがある。その場合、測定時は機械的な動作のないイオンポンプやゲッターポンプで排気を行うとよい。ベローズを介して取り付けることで振動を緩和することもできる。またイオンポンプや冷陰極電離真空計などは磁石を用いているので磁場の影響が問題となる分析装置では注意する。

必要な圧力領域に合わせて真空ポンプを選ぶと同時に、その圧力領域に適した真空計を用意する必要もある。よく使われている真空計としてピラニ真空計、隔膜真空計、水晶真空計、熱陰極電離真空計、冷陰極電離真空計などが挙げられる。図1に代表的な真空計の使用圧力範囲を示す²⁾。真空計によっては分子種依存性があり、通常は窒素分子相当の圧力が表示されるため、主成分が窒素以外の場合には補正が必要となる場合がある。

3 真空ポンプの使用上の注意点

真空ポンプは使い方を誤るとトラブルが起きやすい。図2に起こりやすいトラブルの例を示す。ロータリーポンプ内部には油が満たされており、真空槽が真空の状態でもロータリーポンプを停止すると図2(a)のようにロータリーポンプ内部の油が引き込まれて真空槽内が油で汚染される。ターボ分子ポンプの補助ポンプとして使用している場合はターボ分子ポンプ内も汚染される。油は多層に吸着するためベキングで取り除くことは難しく、真空槽内の洗浄が必要となる。そのためロータリーポンプの吸気口にはバルブを設け、停止する場合はバルブを閉じてロータリーポンプの吸気口部を大気開放することが望ましい。停電でも同様の現象が起こるため、停電時に閉まる電磁バルブを取り付けるなどの対策を行った方がよい。

ターボ分子ポンプは高速で動翼が回転する構造をしており、高速回転中に異物が衝突すると動翼が破損する。図2(b)のように測定に用いる部品が落下する可能性のある場所にターボ分子ポンプを取り付けることは危険である。落下防止のメッシュが吸気口に取り付けられている場合が多いが、細かい部品などはメッシュの隙間を通過する危険性があるため、真空槽の下部に取り付ける場

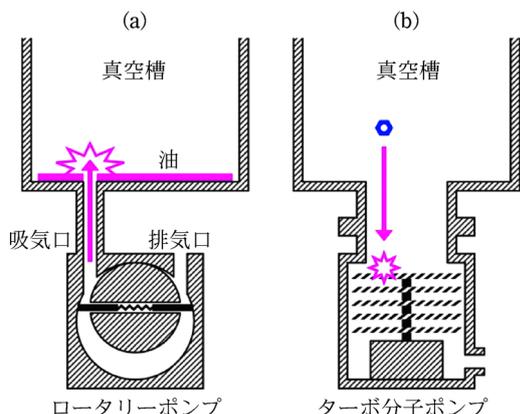


図2 真空ポンプのトラブル例

合はL型配管等で向きを変えて取り付けの方がよい。ターボ分子ポンプによって取り付けられる向きが決まっているものがあるので注意する。またイオンポンプも高電圧がかかっており、導電性の部品が落下するとショートして故障する可能性があるため、同様に設置の位置や向きに注意する。

真空ポンプは大気開放する際にも注意が必要となる。ターボ分子ポンプが動作中に大気圧のガスが流入すると動翼が変形して破損する危険があるので回転数をある程度落としてから大気開放する。真空計についてもフィラメントを利用している熱陰極電離真空計は動作中に大気圧のガスが流入するとフィラメントが酸化して切れるので注意する。大気開放する場合、電源を切ってフィラメントの温度が下がるまでしばらく待ってから開放するか、窒素ガスを真空槽に導入して大気開放する。窒素ガスを大気開放に用いる場合は真空槽内の圧力が大気圧より高くなると真空装置の窓や溶接ベローズを破損する恐れがあるので注意する。また酸欠の恐れもあるので十分な換気のもとで行う。

真空ポンプで排気した分子の処理も必要である。反応性の高い分子や有害な分子を排気する場合は、外部に放出しないよう定められた方法にしたがって回収・処理する必要がある。またロータリーポンプでは油が排気口から放出されるため、オイルミストトラップなどを取り付けて対策する。ロータリーポンプの油は使用に伴い減少・劣化するので使用前に確認して必要に応じて交換する。ターボ分子ポンプは磁気浮上タイプについてはメンテナンスが不要であるが、ベアリングを使用しているものは定期的なメンテナンスが必要である。また排気時の圧力の時間変化などを定期的に記録しておく、通常とは異なる圧力変化から真空ポンプの異常やリークを早期発見できる。

4 おわりに

本稿で省略した真空ポンプや真空計の個々の原理については文献1),2)で詳しく説明されている。また排気の理論や実際の排気に関する詳しい説明は文献1),3)にある。真空機器の保守や真空装置に潜む危険とその対策についてはそれぞれ文献4),5)で詳しく解説されているので参照していただきたい。本稿が安全な真空ポンプの使用と信頼性のある分析結果の取得につながれば幸いです。

文献

- 1) 湯山純平, 末次祐介: *J. Vac. Soc. Jpn.*, **56**, 210 (2013).
- 2) 株式会社アルバック: “新版真空ハンドブック”, (2002), (オーム社出版局).
- 3) 福谷克之: *応用物理*, **78**, 991 (2009).
- 4) 穂坂浩之: *表面と真空*, **61**, 496 (2018).
- 5) 後藤康仁: *J. Vac. Soc. Jpn.*, **59**, 184 (2016).

(東京電機大学 小倉正平)