ターボ分子ポンプ*

Turbo Molecular Pump

大田眞土**
Masato Ota

浦野智秋***
Chiaki URANO

Key words : turbo molecular pump, combined-type turbo molecular pump, magnetic bearing, rotor blade, touch down bearing, extreme high vacuum

1. はじめに

ターボ分子ポンプ（以下 TMP）は、1912 年ドイツの Gaede が考案したモレキュラドラッグポンプにその端を発している。1958 年、Becker¹⁾ は、タービン翼を使用し、分子流領域で特にその性能を発揮する TMP を考案した。このポンプは、中空円筒の中心に軸が設けられ、その軸に多数段のタービン翼列を有するロータが取り付けられ、ロータとロータの間にはロータと同じタービン翼のステータが設けられている。

このポンプの発表により、小型で大きな排気速度を有し、超高真空まで到達する機械式真空ポンプが実用化した。その後 30 年経って TMP は格段に改良されている。軸受方式は、油潤滑の転がり軸受からすべり軸受、完全非接触の磁気軸受と開発が進み、また近年、半導体製造装置に TMP が採用されるようになり、作動圧力領域の広い大流量型（複合型）TMP も開発されている。磁気軸受を応用した量産製品として、最初の成功例がこの TMP で、我々は既に 4 000 台以上を製造した。

本稿では、TMP の概論と課題となっているいくつかの項目について解説を行う。

2. TMP の排気原理

TMP の排気理論は、Kruger, Shapiro²⁾、沢田³⁾らによって説明されているのでその詳細は文献に譲るが、ここではその概略を述べる。なお、分子流領域下で運動するタービン翼は気体分子の平均自由行程が大きく、分子間の衝突が無視出来るので、空気力学的翼形状は余り問題にはならない。ここで、図 1 に示す形状の翼列が矢印の方向に回転している場合を考えると、この時の単段翼の最大圧縮比 $K_{\max}$ 及び最大排気速度効率 $W_{\max}$ は次式で表される。

$$K_{\max} = M_{12}/M_{21} \quad (1)$$

$$W_{\max} = M_{12} - M_{21} \quad (2)$$

ここで、 M_i は、領域 i から領域 j へ最終的に通り抜

図1 ターボ分子ポンプ単段の翼列形状

* 原稿受付 平成元年 8 月 22 日

** 正 会 員 セイコー精機(株) (習志野市屋敷 4-3-1)

*** セイコー精機(株)

図2 磁気軸受式ターボ分子ポンプ (STP-300)

ける確率(通過確率)を意味する。

通過確率 M_{12} 及び M_{21} は、図1に示す α, b, S 及び翼高さなどの形状パラメータと、翼周速、分子速度などにより決定される。ポンプ全体の排気特性を求めるためには、ロータ翼及びステータ翼の各段における通過確率を求め、これを多段に重ね合わせれば良い。

通過確率を求めるための手法としては、モンテカルロ法が一般的であり、複雑な翼形状に対しても比較的容易に通過確率を求めることが出来る。

3. TMP の構造

3.1 超高真空型 TMP

図2に磁気軸受式 TMP (STP-300) の外観、図3にその断面図を示す。ポンプは、ロータ翼①、ステータ翼②、高周波モータ⑧、磁気軸受、ハウジング等から構成されている。ロータ翼①とステータ翼②は、お互い角度が逆になるように作られていて、ロータ翼①とステータ翼②が交互に配置されている。ロータ翼①は、ステータ翼②の間を高周波モータ⑧によって周速 250~330 m/s で高速運動する。回転数はロータ翼①の外径によって異なり、20 000~90 000 rpm である。回転体の材料は、

比強度の高いアルミニウム合金 (JIS-A 2000 系) が使用されている。

磁気軸受は、3対の能動型磁気軸受と1対の受動型磁気軸受で構成されている(図3の例では3軸制御型)。半径方向センサ⑥と半径方向電磁石⑦で構成した2対の半径方向能動型磁気軸受と1対の受動型磁気軸受⑪で回転体を半径方向に支持し、軸方向センサ⑫と軸方向電磁石⑨で構成した1対の軸方向能動型磁気軸受で回転体を軸方向に支持している。この磁気軸受によって回転体は完全に機械的接触無しに支持されており、ポンプ内部に潤滑油を使用する必要がないため、完全ドライな TMP を実現している⁴⁾。また、磁気軸受の万一の故障に備えて固体潤滑剤の被膜を施した保護用ドライベアリング③、④が配置されているが、通常の運転ではロータと接触することは無い。なお、磁気軸受の詳細については、多くの文献が

図3 磁気軸受式 TMP の断面図 (三軸制御型)

出ているので、ここでは省略する。

ハウジング（外筒）は、ステンレス鋼で製作され、ICF, ISO, JIS 規格等のフランジが取り付けられている。近年、超高真空用としてアルミニウム合金を使用したフランジも製作されている。

TMP を動作させるためには、専用のパワーサプライ（高周波インバータ）が必要である。また、磁気軸受型には磁気軸受を制御するコントロールユニットが必要となる。加速時間は約 3~15 min 程度であり、インバータによって起動電流を一定に制御して加速させる。停止時には、内蔵ブレーキによって約 3~20 min 程度で停止させることが出来る。その他、各種の保護機能、リモート機能、インタロック等が付属している。

3.2 大流量型（複合型）TMP

近年、半導体製造装置に TMP がメカニカルブースタポンプに代わって採用されるケースが多くなってきたが、この原因のひとつとして作動圧力領域の広い大流量型 TMP の開発があげられる。通常の TMP は、吸気口側圧力が 10^{-1} Pa より高くなると排気速度が低下し、排気口側圧力が 10 Pa より高くなると圧縮比が大幅に低下してくる。これらの点を改良するため、タービン翼とねじ溝ポンプを組み合わせた大流量型 TMP が開発され、数千 SCCM ($1 \text{ SCCM} = 1.73 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) もの流量が TMP で得られることが可能になった⁵⁾。排気口側圧力で 10^3 Pa まで圧縮比が維持出来るのでルーツポンプの作動領域近くまで性能を維持し、スパッタリング装置、エッチング装置、CVD 装置等に応用され始めた。ロータ翼を除けば基本的に従来の TMP と同一構造であるが、反応生成物対策などの細かい点が改良されている。

4. TMP の特徴

TMP は、その特徴として一般的に、

- (1) 機械的に気体分子を外部に排出してしまうので、イオンポンプ・クライオポンプなどのためこみ式ポンプと異なり排気履歴が無い。
- (2) 油回転ポンプなどの補助ポンプで粗引きすることにより、大気からの排気が簡単に行える。
- (3) 熱運動速度の低い気体分子をより有効に排気し圧縮比も高い。すなわち、有機ガス分子などの分子量の大きい気体分子をより効率的に排気するため、オイルフリーの真空の生成に適している。

表 1 ターボ分子ポンプに適用される各種軸受方式の比較

項目	軸受 転がり軸受 方式	すべり軸受 方式	磁気軸受 方式
軸受寿命	2~3 年 △	半永久 ○	永 久 ◎
メンテナンス	油交換要 ×	不 要 ◎	不 要 ◎
オイル	多 量 ×	微量量 ○	不 要 ◎
高速回転	△	○	○
振動騒音	○	◎	◎
許容取付角	0~20° △	0~10° ×	自 由 ◎
寸法重量	ほ ぼ 同 等		
運 搬	○	△ (油を抜く)	○
価 格	○	○	△

などが上げられ、超高真空やオイルフリーな真空を要求される分野（核融合、加速器、電子顕微鏡、薄膜作成等）に広く利用されている。

また、TMP は採用されている軸受構造によって制約条件がある。表 1 に TMP で使用されている各種軸受方式での比較を示す⁶⁾。

5. 課 題

TMP の開発にともなう課題は多くあるが、構造にともなういくつかの課題について次に記述する。

5.1 ロータ翼加工方法

TMP の構成部品で、生産技術的、价格的な両面で一番重要な部品はロータ翼である。図 2 に示したようにロータ翼は数百枚の翼から構成されており、各メーカーによって製作方法が異なる。従来は、各段ごとに切削加工で製作し多段に接合させたもの、多段で片持ちはりのように加工し付け根で曲げ加工を行うもの等があったが、最近では一体（多段のまま）で翼加工するメーカーが増えた。これは、ロータ翼全体の剛性の向上、定常回転数の増加、信頼性の向上等をめざしたものであり、加工技術の進歩によるものが大きい。

現在では、主に放電加工が主流であるが、NC 加工機を使用して切削加工で一体製作するまでになっている。ロータ翼は、厚さ 0.7~3 mm、幅 3~10 mm、長さ 10~70 mm 程度で、10~50° の角度を持った片持ちはりが多段に積層されているため、加工上のノウハ

ウが多くあり、1台製作するのに20~50hかかっている。この加工時間の短縮と、新しい加工技術の確立が今後の課題である。

5.2 保護用ドライベアリング

これは磁気軸受型 TMP 固有の課題であるが、回転体保護用ドライベアリングの寿命向上の問題がある。保護用ドライベアリングとは、磁気軸受が万一制御不能になった場合、急に大気が突入した場合などに回転体を安全に停止させるために設置されているベアリングである。通常、転がり軸受を用い真空中であるため固体潤滑剤 (Ag, MoS₂, Pb 等) が使用されている。

このベアリングに要求される性能は、いわゆる“軸受”としての機能ではない。極端なことを言えば、回転時に騒音がしても回転精度が悪くても良いのである。万一のとき、回転体をダメージ無しに停止させ、再度起動したときに回転体が浮上、回転すれば良いのである。回転体は、20 000~90 000 rpm という超高速で回転しているため、仮にこのスピードで保護用ドライベアリングが回転すると $d_m \cdot N$ 値で 150 万以上の値になる。また、このベアリングは、停止状態から急激に高速回転を始め、回転体からランダムに衝撃を受けるため (通常、回転体が浮上するため片側 100~300 μm の軸受すきまがある)、一般のベアリングでは1回の使用 (TOUCH DOWN) でベアリングの保持器やボールが損傷し回転体を急停止させ再起動不能にしてしまう。我々は、独自のベアリング構造と特殊な固体潤滑剤の採用で耐久性を大幅に改善 (10 回以上の使用が可能) したが、決定的な解決策はまだ無い。

今後、磁気軸受は様々な分野で使用されることが多くなってくると思うが、この保護用ドライベアリングの耐久性向上の開発も重要な課題となっている。

5.3 極高真空対応と大気作動対応

5.3.1 極高真空対応 (Extreme High Vacuum)

最近の半導体素子製作における単原子層制御技術や表面科学の計測手法の高度化により極高真空技術の出現が期待されている。最近では、TSP (チタンサブリメーションポンプ)、液体 N₂ トラップ等を併用して、到達圧力 10^{-10} ~ 10^{-11} Pa が得られているが、TMP 単体で極高真空を得るためには、真空材料の高純度化、表面処理によるガス放出低減化、表面の清浄化技術の開発、翼形状の高圧縮率化等が必要である。最近、我々はタンデム型 TMP を開発し、TMP 単体で到達圧力 1×10^{-9} Pa、H₂ の圧縮比 10^8 以上を得ている。ただし、これ以上の性能を得るためには、上記

の技術開発と、特に TMP の場合、複雑な形状のロータ翼の表面加工技術の開発が必要である。

5.3.2 大気作動対応

先に述べたように、ねじ溝ポンプとの組合せによって排気口側圧力で 10^8 Pa まで TMP が使用出来るようになったが、大気圧までの吐出は現状の構造では無理である。これは、TMP の排気原理から決まり、主に分子流領域で使用されることを前提としているため、粘性流領域ではほとんど圧縮効率が得られないためである。ただし、最近では半導体装置で油回転ポンプの代わりにドライポンプが使用されるようになり、様々な機構のポンプが開発されている。その中には、軸流型のものもあり、新しい組合せ技術として従来のタービン翼、ねじ溝ポンプに再生型半径流ポンプ、遠心型ポンプ等との複合型が開発されている。今後、このような複合型の場合には、軽量・小型化、低振動・低騒音化が開発の課題であり、また、新しい排気原理の構造開発が必要である。

6. おわりに

TMP は、磁気軸受を採用したことによって、従来にまして使いやすい真空ポンプとなっている。ただし、ここで述べた課題以外にも多くの課題が残されており、今後、さらに高機能・高付加価値を持たせるためには、幅広い技術を結集する必要がある。真空技術は、今後多方面の分野で使用されることが多くなるため、より使いやすい完成された真空ポンプにするためにも、今後の技術開発を期待する。

参考文献

- 1) W. Becker: Vacuum-Technik, 7, (1958) 149.
- 2) C. H. Kruger & A. H. Shapiro: The Axial Flow Compressor in the Free Molecular Range (Rarefield Dynamics Gas Supplement), Academic Press, New York, N. Y., (1961) 117.
- 3) 沢田 雅ほか: 軸流分子ポンプの研究-第2報-, 動翼と静翼の組合せについて, 日本機械学会論文集, 36, 285 (1970) 781.
- 4) 成島勝也, 石丸 肇: 磁気ベアリング TMP の背圧依存性, KEK Report, 84-11.
- 5) 沢田 雅, 中村雅英: ねじみぞ粘性真空ポンプ, 日本機械学会論文集, B, 51, 470 (1985) 3381.
- 6) 佐々木 潔ほか: 新型ターボ分子ポンプ, 三菱電機技報, 62, 2 (1988).