大容量ターボ分子ポンプ技術*

白石成之**

Technology of Large-capacity Turbo-molecular Pump / Sigeyuki SIRAISI

Key words : turbo-molecular pump, active magnetic bearing, flexible installation, eddy current loss, rotation performance, large pumping-out performance, long length blade, miniaturization

1. はじめに

ターボ分子ポンプは、1917年ドイツのGaedeにより考案され、1958年W. Beckerによりほぼ現在の構造が提案された。以来30年余を経過し、最近の軸受技術、高速回転技術及び加工技術の向上と品質の向上などにより急速な進歩をとげ、今や高真空を必要とするあらゆる装置に利用されている。

一方、半導体製造装置、核融合装置、加速器及び表面分析装置等の先端技術ではクリーンな超高真空環境が必須条件となっており、その真空ポンプとしてクリーンで連続排気できるターボ分子ポンプの需要が一層高まっている。中でも、近年の半導体製造プロセスはより微細な加工技術に対応するため、低圧力領域での成膜・加工がなされる方向にあり、成膜・加工の速度と品質を向上させるには、清浄な原料ガスをより大量に真空容器に供給する必要があること及び稼働率向上等の観点から連続排気可能である必要があることなどから、溜め込み式のクライオポンプに代わる完全オイルフリーの大容量ターボ分子ポンプが望まれている。

ここでは、これらのニーズに対応して、大型の磁気浮上形ターボ分子ポンプ技術について紹介する。

2. 制御型磁気軸受の開発

回転機械で最も一般的に使用されている回転体支持機構は、油潤滑のボールベアリングで支持され、ゴムリングなどではねとダンピングを与える構造である。

この支持機構を用いたターボ分子ポンプは、ベアリングの寿命、油の劣化などによる定期的なメンテナンスが必要であると共に、真空容器へ潤滑油が拡散するという問題がある。

これらの問題を解決するため、制御型磁気軸受を用いたターボ分子ポンプの開発が進められ¹⁾²⁾、磁気軸受の一般産業機械への適用例としては最も代表的になっている。さて、磁気軸受は文字どおり磁気ので物体を空中に浮上させるものであり、非接触で無潤滑の軸受であるため、低振動、低騒音の超高速回転を得ると共にクリーンな環境を実現できる。

剛体を空間的に支持しようとする場合、並進の3自由度と回転の3自由度とを合わせた6自由度を制御する必要がある。回転体の場合は、回転軸周りの自由度を除く5自由度となるが、磁気軸受はこれらの支持力を永久磁石又は電磁石の磁力により実現する。中でも元来不安定である電磁石を制御によって安定化して使用するものを制御型もしくは能動型と称している。制御型の特徴は、負荷容量を大きくとれること、負荷変動に対して制御可能なこと、任意の姿勢で設置可能なことなどが挙げられる。特に全軸を制御型によって制御するものを5軸制御型と呼んでいる。

図1に5軸制御型の基本的なモデルを示す。軸受系は回転体を挟んで対向する4個のラジアル軸受用電磁石2組と1組のスラスト軸受用電磁石及びそれらを制御するために各軸に取り付けられた非接触の位置センサにより構成される。位置センサからの位置信号は、図2に示すように目標ギャップと突き合わされ、その偏差量から演算された制御電流によって差動的に電磁石が駆動され、系の剛性と減衰が補償されて回転体が

* 原稿受付 平成3年7月2日

** 三菱重工業(株)広島製作所 (広島市西区観音町4-6-22)

図1 制御型磁気軸受の基本モデル

中心位置に保持される。これが制御型磁気軸受の基本原理である。

一方、駆動力となる電磁石の吸引力は磁気回路の抵抗等から式(1)で表され、励磁電流の自乗に比例し、空隙長の自乗にはば比例する特性となる。

$$F = \frac{\mu_0 A (NI)^2}{\nu^2 (l/\mu_r + 2\delta)^2} \quad (1)$$

ここで、 F ：吸引力、 μ_0 ：真空の透磁率、 A ：磁極面積、 NI ：起磁力（コイル巻数×励磁電流）、 l ：磁路長、 μ_r ：磁極の比透磁率、 δ ：空隙長、 ν ：磁束漏れ係数。

この特性と μ_r の非線形性のため、電磁石の吸引力はそのままでは励磁電流の小さな領域で特性が悪くなる欠点が生じ、制御上好ましくない。その対策として、あらかじめバイアス電流を電磁石に印加しておく、吸引力特性を線形化して動作させる方法がとられる。

軸受のばね定数は、制御電流とバイアス電流により与えられるもので、制御電流によって生じる復元力と不安定化力で構成され、正のばね定数を得るには少なくとも復元力が不安定化力を上回る条件を満たす必要

図2 制御型磁気軸受の制御ブロック図

がある。このほかに、電磁石にはインダクタンスが含まれるため、過渡的な変位に対して励磁電流が遅れる現象、すなわち応答性が問題となる。負荷容量が大きいほどコイル巻数 N を増加させる必要があり、そのため電磁石の応答性が低下し、系の周波数特性が下がる。この応答性を改善し、系の周波数特性を良くすることが磁気軸受の適用を拡大していく上で重要な問題となる。このため、コイル電圧を励磁電流の変化に応じて制御する電流フィードバック方式や、コイルの並列化によるインダクタンスの低減など種々の工夫を行い、図3に示すような制御回路でのPI（微分・積分）制御及び位相補償と合わせ、数万rpmでの安定性を保っている。

なお、制御型磁気軸受の最大の難点は、本質的に不安定な系を制御により安定化させているため、制御系に大きく依存せざるを得ないことにある。このため電気的なノイズ耐力や回路の信頼性等に従来の軸受以上の十分な配慮が要求される。

3. 大型磁気浮上ターボ分子ポンプの 取付姿勢自在性の実現

制御型磁気軸受はターボ分子ポンプにとって、完全オイルフリーを実現する一つの理想的な支持機構であると言えるが、分子ポンプの使いやすさの面からは、取付姿勢を自在にできるというもう一つの大きな特徴を有している。

図3 軸受制御ブロック線図

図4 渦電流損の発生原理

しかしながら、回転体が大型になるほど磁気軸受の損失（渦電流損、ヒステリシス損）による回転体の発熱が大きくなり、取付姿勢自在性が実現し難くなるという課題がある³⁾。

一般に制御型磁気軸受の損失は、通常の機械式軸受と比べ極めて小さいが、真空中を非接触で回転するターボ分子ポンプでは損失の大きさが問題となる。すなわち周囲流体との熱伝導・熱伝達による冷却手段が存在しないため、回転体に熱の蓄積による温度上昇が生ずる。冷却手段は放射冷却であり、その冷却効果は一般に非常に小さいので放射冷却に見合った軸受損失にまで低減する必要がある。

電磁石の損失 W は K_e, K_h を定数として次式で示される。

$$W = \frac{K_e}{\rho} B_m^2 d^2 f^2 + K_h B_m^{1.6 \sim 2} f \quad (2)$$

但し、 ρ ：比抵抗、 B_m ：最大磁束密度、 d ：けい素鋼板厚さ、 f ：周波数。

右辺第1項は渦電流損、第2項はヒステリシス損と呼ばれる。図4に渦電流損の発生原理を示す。電磁石により作られる磁界の中を回転体が回転すると、フレミングの法則により渦電流が流れ、この電流により損失が発生する。

ターボ分子ポンプが横置に配置された場合、回転体の自重を支えるための磁束が付加され、そのために損失が増大する。大型機ほど、この傾向が顕著であり従来より大型のもので横置運転できるものがなかった。

ターボ分子ポンプを横置きに取り付けた場合、ラジアル電磁石はその位相により、図5に示す2つの配置をとらう。(a)に示す配置は、電磁石の吸引力が垂直方向を向く場合であり、(b)に示す配置は45°方向を向く配置である。熱的には(b)の方が厳しい。

図6に取付姿勢と軸受損失の関係の例を示す。この

(a) 垂直支持配置 (b) 45°支持配置

図5 横置取付けのラジアル電磁石の配置と支持力

図6 取付姿勢と軸受損失の関係（無次元表示）

軸受損失を低減するためには、軸受電磁石の設計に次のような改良検討が必要となる。

- (1) 磁束密度を低減し、磁束の飽和領域での使用を避ける。
- (2) 磁束の流れを円滑にする。
- (3) 空隙でのまれ磁束を少なくする。

また、取付姿勢自在性の実現には、損失低減だけではなく回転安定性も重要なポイントとなる。

回転安定性を考える場合、図5の(a)が厳しい。すなわち1個の電磁石で回転体の全重量を支える必要があるからである。従って、ターボ分子ポンプの横置運転を確認する場合、両方の条件での連続使用に耐えるかどうかを確認する必要がある。

4. 大排気速度化と小型軽量化の実現

ターボ分子ポンプの翼列を上部から見ると、動翼列はモデル的には図7に示す(a)のようになる。回転数 ω で回転する翼列は、(b)に示すように、速度 V で並進する翼列にモデル化することができる。ここで、(b)の2枚の動翼に囲まれた空間をセルと呼び、セルを囲む翼面を(b)に示すように X 面、 Y 面と呼ぶことにする。

気体分子は、熱平衡状態ではマクスウェル速度分布に従う速度分布を持つ。

図7 ターボ分子ポンプの動翼のモデル

いま、速度 V_s と $V_s + dV_s$ を持つ気体分子群に着目すると、その速度ベクトルの分布は等方的であり、二次元モデルで示すと図8(a)のようにあらゆる方向に等しい。動翼よりこれを見ると、図8(b)に示すように、翼の相対速度 V だけひずんだ速度ベクトルを持つように見える。

翼列の1つのセルに飛び込んで来る気体分子について考えると、吸気口側には、これらの分子のうち翼列より吸気口に垂直な速度成分を持つ気体分子のみが飛び込んで来るのであるから、その速度ベクトルの分布は概念的には図8(c)に示すようになる。逆に吐出し側については、図8(d)に示すようになる。

図8(c)と(d)とを比較すると、(c)では翼面XとYとに平行な速度ベクトルを持つ気体分子が多いため、セルの吸込み側から吐出し側へ気体分子は通り抜けやすいが、(d)では翼面Xが妨げとなり、セルの吐出し側から吸込み側への気体分子の逆流は妨げられやすいことが分かる。この「気体分子のセルの通り抜けやすさの差」(すなわち輸送確率の差)によって、吸込み側から吐出し側への気体分子の移送作用すなわちポンプ作用が発生する。

大排気速度のターボ分子ポンプでは、吸込み側に取り込む気体分子の数をできるだけ多くする必要がある。具体的には第一段動翼翼列(かき込み段の翼列)の開口面積(かき込み面積)をできるだけ大きくする必要がある。

また、回転速度を上げることによっても排気速度の向上が図れるが、回転速度と動翼径との強度面で兼ね合いおよび軸系とのマッチングが設計上重要なボイ

図8 分子運動論的観点から見たポンプ作用の原理

図9 制御磁気軸受形ターボ分子ポンプ FT-3000 W の外観

ントとなる。特に小型軽量化を図るには強度面の制約から、軸径をあまり小さくできないので、高さ方向の寸法を極小に押さえる必要がある。また、回転体の弾性モード固有振動数を定格回転数より高くすることにより、剛体モードの危険速度のみ通過させ、かつ定格回転数の $\pm 30\%$ 以内には固有振動数を配置しないような配慮をしなければならない。

また、大気突入耐力を向上させるため、回転体の剛性を上げることも重要である。

さらに低真空域の排気性能向上のため、動翼の低真空域にねじ翼を配置する広域形ターボ分子ポンプが一般的となっており、小型、軽量化に加えて性能向上に貢献している。

ちなみに、これらの技術要求を踏まえた大容量ターボ分子ポンプの一例として、当社の制御磁気軸受形ターボ分子ポンプ FT-3000 W の外観、各部寸法及び N_2 排気速度線図をそれぞれ図9～図11に示す。

取付姿勢自在の完全磁気浮上形ターボ分子ポンプとして、 N_2 排気速度 3000 l/s、 N_2 吸気限界圧 1 Torr (水冷の場合) の性能を有する小型軽量ターボ分子ポンプを実現している。

5. 今後の課題

完全磁気浮上型ターボ分子ポンプの性能を更に改良して作動圧力領域の拡大および、より大排気速度化の実現と共に、取扱い性、メンテナンス性を改善し、使いやすくすることも重要な課題の一つである。例えば

- (1) 停電時には、回転体を浮上させ安全に降速・停止させるためのバッテリーが不可欠であり、このバッテリーは、その寿命により1～2年ごとに交換する必要がある。バッテリーの代わりに回転体の回転エネルギーを再生し、この再生電力で回転

図10 制御磁気軸受形ターボ分子ポンプFT-3000 Wの各部寸法図

図11 制御磁気軸受形ターボ分子ポンプFT-3000 WのN₂排気速度線図

体自身を浮上制御させるシステムの大型機での実用化を図る。

- (2) 浮上制御するセンサの設定値および回転体の固有振動数が1台ごとに微妙に違うため、ターボ分子ポンプ本体とこれを駆動・浮上制御するパワーサプライは1対1の調整を要するが、これらに互換性を持たせること。

- (3) 制御方式の改良(アナログ制御からデジタル制御へ、最適制御則の適応等)によるパワーサプライの小型小容量化を図る。

等である。

また、半導体製造装置におけるターボ分子ポンプの使用条件が、さらに厳しくなると、次のような点を解決する必要が生じてくる。

(1) 耐熱性

超高真空を得るためおよび半導体製造装置における反応生成物の付着防止のためには真空容器自体のベーキングに加えて、ターボ分子ポンプも高温ベーキング可能とするニーズもあるが、回転体材料のみならず軸受、モータ等の制約により、実際のベーキング温度は100~120°Cに抑えられている。

(2) 耐食性

腐食性の強い処理ガスが使用されると回転体の腐食による強度低下が生じる。現状はアルミニウム合金に特殊な表面処理を施すことにより、耐食性を向上させているが十分ではなく、根本的には耐食性のある材料を使用する必要がある。

(3) 耐磁場性

磁場中で回転体を回転させると回転体に渦電流損による発熱を生じ不調をきたすことがある。

(4) 耐ノイズ性

制御型磁気軸受は制御系に依存するため、電気的なノイズ耐力を十分保有することが重要であるが、本質的安全性、信頼性の観点からはノイズに影響されない軸受系であることが望ましい。

これらの課題を解決するためには、回転体材料として高電気抵抗、耐熱性、耐食性を有する材料を用い、かつ電磁気的な軸受や駆動装置をもたないターボ分子ポンプが必要となる。

この観点からは、セラミックスの回転体と気体軸受で構成されるセラミックス真空ポンプが次世代の有望技術として期待される。

6. おわりに

以上、大容量ターボ分子ポンプ技術として、大型の磁気浮上型ターボ分子ポンプを主体にその現状技術と課題を述べたが、今後さらにターボ分子ポンプの使用条件が厳しくなる中で、性能向上と小型軽量化の追求が続けられる。また、ターボ分子ポンプは、ほぼ音速の回転速度をもつ高速回転体であることから、万一の破損に対しても十分な安全設計に一層の配慮が必要となろう。

文 献

- 1) 片山圭一ほか：能動型磁気軸受の開発、三菱重工技報、25, 3 (1988)。
- 2) 板井計介ほか：制御磁気軸受形広域用ターボ分子ポンプの開発、三菱重工技報、26, 5 (1989)。
- 3) 白石成之ほか：大型磁気浮上ターボ分子ポンプの取付方向自在性の実現、真空、23, 3 (1990)。