

大気圧ターボ分子ポンプの開発

川崎 裕之* 小神野 宏明**

Development of Atmospheric Pressure Type Turbomolecular Pump

by Hiroyuki KAWASAKI, & Hiroaki OGAMINO

A novel atmospheric pressure type turbomolecular pump has been developed for the microchip/IC manufacturing industry, as well as for SEM applications. This pump makes it unnecessary to use backup by auxiliary pumps, needed for creating an ultra-high vacuum environment by conventional turbomolecular pump operation. This new pump is fully oil-free, compact and featuring exceptionally high compression performance. Development was centered on the minimization of vane clearance by introducing thin ceramic multi-stage centrifugal vanes, as well as optimal dynamic and sensor-less magnetic bearings.

Keywords: Atmospheric pressure type TMP, Ceramics centrifugal vane, Dynamic bearing, Backup pump, Sensor less magnetic bearing, Thrust force, Ultra high vacuum, Destructive torque

1. はじめに

ターボ分子ポンプ（以下 TMP）は、安定的に超高真空が得られる高速・小型の機械式真空ポンプであり、半導体・液晶製造装置や表面検査装置などの様々な真空排気系を構成する超高真空ポンプとして使用されている。

しかしながら現状の TMP は、クライオポンプやゲッターポンプなど、他の超高真空ポンプと同様に、単独で大気圧まで圧縮はできない（大気圧から真空引きできない）。すなわち、TMP を用いた真空排気系には、TMP が作動可能となる真空領域まで圧力を下げる補助ポンプが必要である。また、TMP とこれら補助ポンプを接続する真空配管やバルブ、あるいは大気引きのためのバイパス配管なども必要となる。

TMP が半導体製造用として本格的に使用され始めたのは 1990 年代初頭からである。この頃から、TMP には所定流量のガスを排気しつつ真空容器内を低圧（必要真空度）に保つ能力が求められた。そのため、従来の分子流領域で効率的な排気作用を有するタービン翼に加え、中間流領域で効率的な排気作用を有する円筒ねじ溝を加えた広域型 TMP が開発され、広く使われるようになった。

その後は、円筒ねじ溝に代わる高圧縮翼が検討され、より作動圧力領域の広い（許容排気口圧力の高い）TMP の開発が行われてきた。許容排気口圧力が向上すれば、補助ポンプの小型化や真空配管系の小径化が可能となる。この TMP は、排気口圧力（背圧）を広域型の数倍まで高圧化しても排気性能を維持することができることから、高背圧型 TMP と呼ばれている。

このように、TMP は半導体・液晶製造プロセスに使用されてきたが、排気できるガス量が少ないために、用途も限定されている現状にある。

一方、検査装置用などガスを流さず、小容量容器を真空にするためだけの用途においても、補助ポンプが必要な状況は変わっていない。

したがって、次世代 TMP としては、次の二つの方向性が考えられる。

(1) ハイスルー putt 型（大流量化）

従来の TMP に対し、より多くのガスを連続排気でき、かつ低圧化できる TMP を、ハイスルー putt 型 TMP と称する。このポンプにより、LP_CVD などの大流量ガスを流すプロセス低圧化（プロセスウインドウの拡張）が図れ、また、新たな市場を作り出すことも可能となる。

この開発については別途報告することとする。

(2) 大気圧ターボ型（大気背圧化）

高背圧化を飛躍的に高め、単独で大気圧まで排気でき

* 精密・電子事業カンパニー 技術統括部 機器技術開発室
開発グループ

** 同 同

るようにする。それにより非常にシンプルな真空排気系を提供することが可能となる。

今回、当社で開発したターボ分子ポンプは、従来、最も広く使用されている広域型TMPの圧縮性能を約300倍向上させた新製品であり、補助ポンプがなくても超高真空から大気圧まで圧縮できる小型で、しかも完全オイルフリーの超高真空ポンプである。

2. 現状TMP

2-1 広域型TMP

図1に5軸制御型磁気軸受TMPの構造図を示す。ロータは、5軸制御型磁気軸受で非接触支持した回転軸に釣鐘状羽根車を締結し構成されている。羽根車の排気翼構成は、吸気口側（分子流領域）にタービン翼、排気口側（中間流領域）に円筒ねじ溝を使用している。これらの翼要素を組み合わせたTMPを一般的に複合型TMPもしくは広域型TMPと呼ぶ。吸気口側に配置されたタービン翼は、翼先端での周速度が300～400 m/sで回転し、吸気口圧力が約 10^{-2} Pa以下で最大の排気速度性能を示す。タービン翼の下流側には、気体の粘性作用によって気体を排気する円筒ねじ溝が配置されている。従来のTMPが大気圧まで圧縮できない理由は、ポンプ排気口側に配置された円筒ねじ溝圧縮性能の限界による。この円筒ねじ溝の許容排気口圧力は、300～400 Pa（大気圧の1/333～1/250）程度であり、大気圧には程遠い。

2-2 高背圧型TMP

従来の広域型に対し、円筒ねじ溝部の圧縮性能向上が図られたのが高背圧型TMPである。圧縮性能向上の手

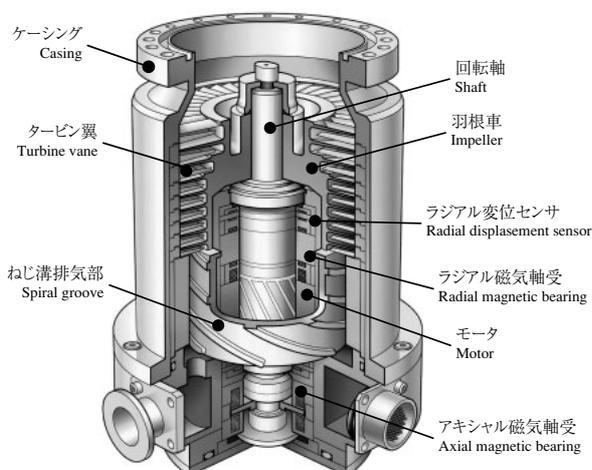


図1 従来の広域型TMP構造図
Fig. 1 Structure of conventional wide range type TMP

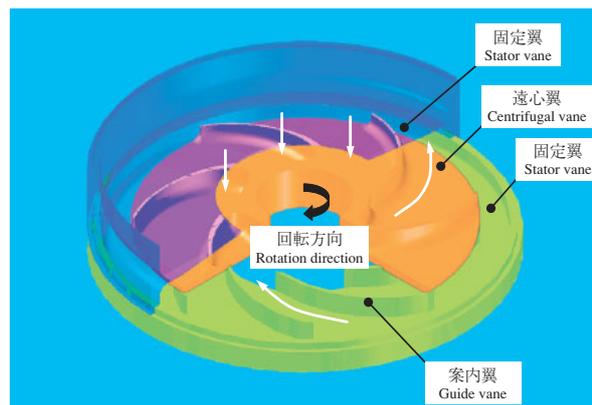


図2 遠心翼の構造
Fig. 2 Structure of centrifugal vane

法として円筒ねじ溝の代りに多段遠心翼を採用した。遠心翼は図2に示すように回転円板とその上の渦巻状翼からなる。この遠心翼を数段配備することにより、広域型円筒ねじ溝に比べ高い圧力までガスを圧縮排気することが可能となった。

この遠心翼部の許容排気口圧力は1000～2000 Pa（大気圧の1/100～1/50）程度である。

3. 大気圧ターボ分子ポンプの開発

3-1 開発コンセプト

超高真空から大気圧まで単独で圧縮可能な真空ポンプを「大気圧ターボ分子ポンプ」と称することとする。大気圧縮を可能にするためには、高背圧型TMPの50～100倍の許容背圧が必要であり従来技術の延長線上では到底達成不可能である。

我々が着目したのは、動圧軸受技術である。動圧軸受はより高速回転で、かつ回転側と固定側のクリアランスが微小となるほど反発力（保持能力）が上がる軸受である。これは軸受内側（高圧側）と外側（低圧側）との間の境界層によるシール性の向上を意味するもので、翼にとっての圧縮性の向上を示唆している。

したがって、高背圧型TMPの大気側に回転翼と固定翼を数段配置し、そのクリアランスを極小に維持したまま高速回転させることを基本コンセプトに置き、かつ小型化及び完全オイルフリーとした。しかも、大気圧縮に伴う軸方向荷重の増大及び発熱対策が必要となるので、具体的な開発コンセプトを以下とした。

(1) 翼クリアランスの極小化

大気側回転翼/固定翼に低熱膨張材を用い、翼部品を高い加工精度で成形し、かつ、高い精度で組み立てるこ

とで、翼クリアランスの極小化を図る。

(2) ロータの高速回転化, 小型化

翼の圧縮性能向上による翼段数削減と, ラジアル磁気軸受へのセンサレス磁気軸受の適用によって短軸化する。それらによって, ロータ固有値を向上させ, 高速回転化, 小型化を図る。

(3) 軸方向荷重対策: 極小翼クリアランスの維持

軸方向制御に, 磁気軸受に加え動圧軸受を配備し, 極小翼クリアランスの維持を図る。

(4) 発熱低減及び高熱伝導部材による放熱構造

3-2 基本構造

図3に大気圧TMPの構造図を示す。上段側に翼排気部を, 下段側に軸受部, モータ部を有するアクチュエータ部を直列配置した。翼排気部は, 吸気口側(分子流領域)にタービン翼, 中間段(中間流領域)にアルミニウム合金製遠心翼, 排気口側(粘性流領域)にセラミックス製遠心翼を配置した。これらの翼要素を軸方向多段に積み上げて回転軸に締結し, ロータを形成している。ロータを回転支持する軸受には, ラジアル方向に磁気軸受, アクシシャル方向に磁気軸受と動圧軸受の複合型軸受を採用し, 完全オイルフリーとした。また, 翼排気部とモータ部での大気圧縮による発熱を, 冷却水で放熱している。翼排気部とアクチュエータ部が軸方向に直列配置されているため, これらの部位の冷却は, 磁気軸受, モータが

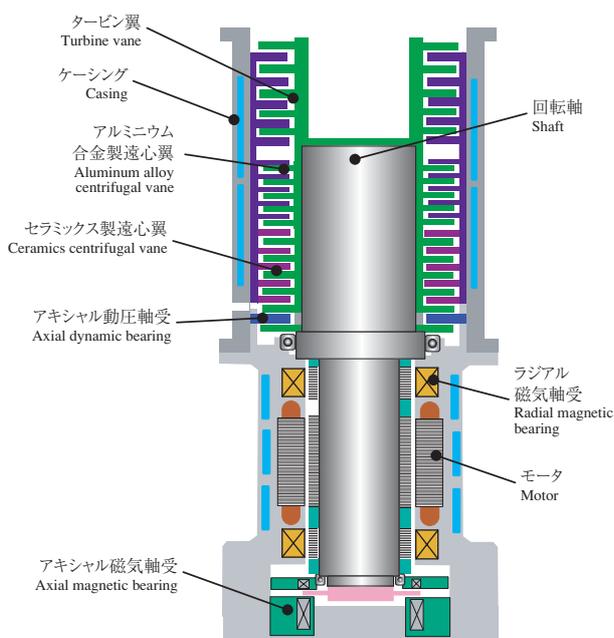


図3 大気圧ターボ分子ポンプ構造図
Fig. 3 Structure of atmospheric pressure type TMP

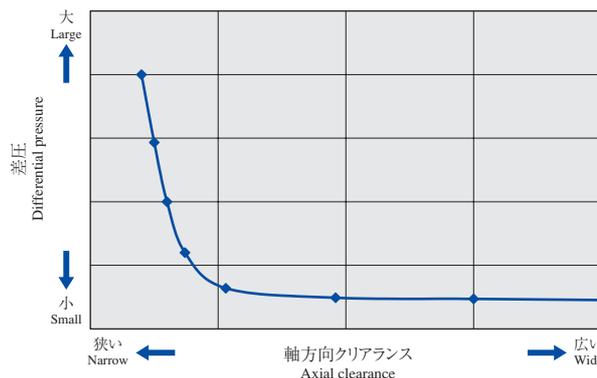


図4 セラミックス製遠心翼軸方向クリアランスと圧縮性能の関係
Fig. 4 Effect of axial clearance on compression performance

設置されたステータハウジング, 翼排気部をその内部に包囲締結するケーシングの外周部に冷却部位を一体形成することによって, 比較的容易に行うことができる。

以下に大気圧TMPの技術開発要素について詳説する。

3-3 セラミックス製遠心翼

従来の高背圧型TMPはタービン翼と遠心翼の多段配置によって, 超高真空から約1000~2000 Paまでの圧縮が可能である。この圧力から大気圧(1.013 × 10⁵ Pa)までの圧縮を行う翼要素に, セラミックス製遠心翼を採用した。排気原理は従来の高背圧型TMPで用いられているアルミニウム製遠心翼と同じであるが, 翼の形状(翼本数, 翼高さ, 翼角度), 及び回転翼と固定翼の軸方向クリアランスが異なる。特に圧力領域が大気圧領域に近づくにつれ, クリアランスからの逆流量が増大するため, クリアランスを極めて狭くしないと, 実用的な1段当りの圧縮性能を得ることができない。図4に, 軸方向クリアランスと1段当りの圧縮性能(差圧量)の関係を示す。軸方向クリアランスをある値より狭くした領域から, 圧縮性能の急激な上昇が見られた。そして翼本数, 翼高さ, 翼角度を最適化したセラミックス製遠心翼を数段配置することによって, 約1000 Paから大気圧までの圧縮を行うことが可能となった。

3-4 動圧軸受

セラミックス製遠心翼の軸方向クリアランスを極小化し高速回転させることによって, 大幅な圧縮性能向上が得られることが分かったものの, この極小クリアランスの遠心翼を多段に組み上げ, かつ安定に高速回転させることが実用上の課題である。これを解決するために, 軸方向軸受に, 磁気軸受と動圧軸受の複合型軸受を採用した。図5に動圧軸受の構造図を示す。また, 図6に動圧

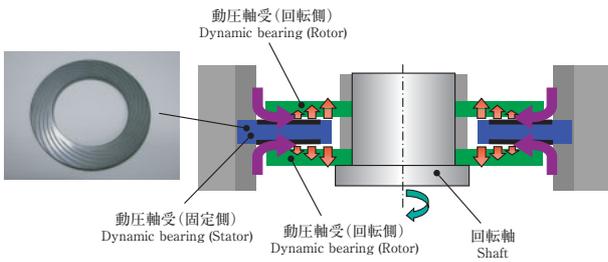


図5 動圧軸受部の構造
Fig. 5 Structure of dynamic bearing section

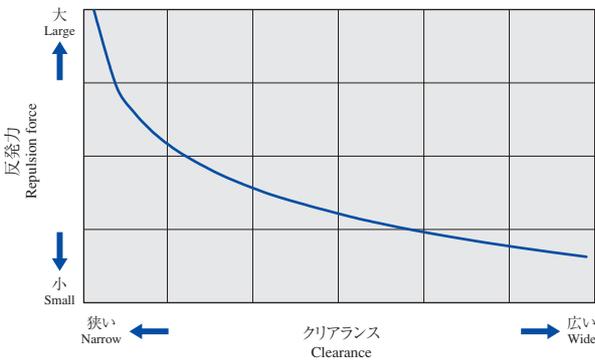


図6 クリアランスと反発力の関係
Fig. 6 Relationship between clearance and repulsion force

軸受のクリアランスと反発力の関係を示す。動圧軸受の反発力 F (N) と、軸方向クリアランス δ (m)、対向面積 S (m²)、回転周波数 ω (rad/s)、気体の粘性係数 μ (Pa·s) には以下の関係がある。

$$F \propto \frac{S^2 \cdot \mu \cdot \omega}{\delta^2}$$

対向面積 S 、回転周波数 ω 、気体の粘性係数 μ が一定とすると、反発力 F は軸方向クリアランス δ の2乗に反比例する。例えば、ロータが動圧軸受の一方の面に接近すると反発力が増しロータを押し戻す。そしてもう一方の面に接近すると、こちらの面の反発力が増しロータを押し戻すのである。この両面の反発作用により、ロータは上下のクリアランス内に保持されながら回転することができる。この上下のクリアランスを、セラミックス製遠心翼のクリアランスよりも小さく設定すれば、多段化されたセラミックス製遠心翼の極小クリアランス部での接触を発生させることなく、高速回転を実現することができる。

3-5 ロータダイナミクス設計

大気圧 TMP は排気部と磁気軸受、モータを直列に配置した構造であるため、極端なオーバーハングロータとなっている。このロータを磁気軸受及び動圧軸受による支持で安定して高速回転させるには、ロータの3次危険速度を高周波数化する必要がある。そこで、設計に際しては次の2点に留意した。

なお、磁気軸受を用いたロータの場合、一般に1次及び2次の危険速度は磁気軸受によって減衰が与えられ、安定して運転・通過できる。

(1) 排気部（オーバーハング部）の短軸化

中間流及び粘性流領域への遠心翼採用は、排気効率向上の観点だけでなく、排気部を短軸化する上でも有利な構造である。遠心翼は流路が径方向に形成されるため、流路長さを損なうことなく軸方向長さを短くできる。

(2) センサレス磁気軸受の採用

従来 TMP に用いられているラジアル磁気軸受は、ラジアル変位センサとラジアル電磁石を軸方向に並べて配置する構造であった。大気圧 TMP では、ラジアル電磁石に変位センサの機能を併せもたせたラジアルセンサレス磁気軸受を採用した。これによって、ラジアル変位センサの厚さ分だけのロータ軸長を短くでき、危険速度の高周波数化を図ることができた。

4. 排気性能

表1に今回開発した大気圧 TMP の仕様を示す。また、大気圧 TMP の性能測定結果の一例として、窒素ガスに対する排気速度カーブを図7に示す。なお、図7中には従来 TMP ではほぼ同一口径となる当社 60 L/s 広域型 TMP を比較対象として示した。従来 TMP の排気速度取得時

表1 仕様
Table 1 Specifications

| | |
|--|---|
| 最大排気速度 N ₂ Maximum pumping speed | 60 L/s |
| 到達圧力 Ultimated pressure | 1 × 10 ⁻⁵ Pa |
| 定格回転速度 Rated revolution | 80000 min ⁻¹ |
| 軸受方式 Bearing system | ラジアル方向：磁気軸受 Radial : Magnetic bearing アキシャル方向：磁気軸受 + 動圧軸受 Axial : Magnetic bearing + dynamic bearing |
| 冷却方式 Cooling system | 水冷 Water cooling |
| ポンプ寸法 Pump size | φ 102 × 290 mm |
| ポンプ質量 Pump weight | 11 kg |

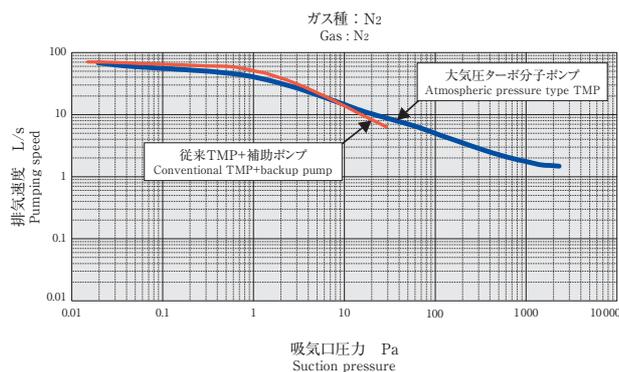


図7 排気速度カーブ
Fig. 7 Pumping speed curve

の補助ポンプは1000 L/minのルーツ型ドライ真空ポンプである。大気圧TMPは、従来TMPと補助ポンプで構成された排気系に対して、ほぼ同等の排気速度性能が得られた。

5. 安全性について

従来TMPの翼は、一体構造で製作されており、万一ロータが破壊した場合は、その翼のもつ回転エネルギーがすべて開放され、破壊トルクとしてポンプを固定している部位に伝達される。しかし大気圧TMPのロータはタービン翼、遠心翼の多段構造（分割構造）となっており、分割された各回転翼要素が瞬間的に同時に破壊する

表2 ロータ破壊時の発生トルクの比較

Table 2 Comparison in generated torque at rotor destruction

| | 大気圧ターボ分子ポンプ Atmospheric pressure type turbomolecular pump | 従来TMP Conventional TMP |
|---------------------------|--|---------------------------|
| 回転速度 Revolution | 80000 min ⁻¹ | 72000 min ⁻¹ |
| 発生トルク Generated torque | 130 N·m | 658 N·m |

ことはまず有り得ない。そのため、大気圧TMPは従来のTMPに比べ、ロータ破壊時に発生する破壊トルクを大幅に低減でき、計算では、従来TMPに比べ、約1/5程度にすることが可能である。表2に大気圧TMPと従来TMPで、最大排気速度がほぼ同一の当社60 L/s広域形TMPの破壊トルク計算値の比較を示す。

6. おわりに

新型真空ポンプとして、以下の特長を有するターボ分子ポンプを開発した。

- (1) 単独で超高真空から大気圧までの圧縮が可能である。
- (2) 排気速度性能が、従来TMPと補助ポンプを組み合わせた排気系と同等である。
- (3) 完全オイルフリーである。

今後は、これらの利点が生かせる用途での実用試験を重ね、製品化を図る予定である。