Direct Simulation Monte Carlo 法の ターボ分子ポンプへの適用*

筒井 慎吾^{*1}・二木 敬一^{*1}

The Application Example of Direct Simulation Monte Carlo Method to Turbo-molecular Pump

Shingo TSUTSUI^{*1} and Keiichi FUTAGI^{*1}

^{*1}Shimadzu Corporation, 1 Nishinokyo-Kuwabara-cho, Nakagyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto 604-8511, Japan

(Received October 30, 2014, Accepted April 15, 2015)

1. はじめに

1990年代の後半以降、半導体産業の発展とともに、ターボ分子ポンプは特に2000 L/s クラス以上のターボ分子ポンプにおいて、大排気速度化、大流量排気時の低圧化により、半導体ウェハの大口径化、微細化に貢献してきた。ターボ分子ポンプは、流れ場が分子流から遷移流の領域で作動し、近年は特に遷移流領域での排気性能向上の要求が高く、遷移流領域における排気性能解析の高精度化が求められている。流体解析手法としては、ナビエーストックス方程式¹⁾を利用することがあるが、これは主に粘性流領域を対象としたものであり、遷移流領域には適していない。また、分子流領域に対しては、沢田らの連立積分方程式法²⁾があるが、これは分子同士の衝突が無視できることが前提となっており、分子同士の衝突を考慮する必要がある遷移流領域にはやはり適していない。遷移流に適した流体解析手法として、分子同士の衝突を考慮した Direct Simulation Monte Carlo 法 (DSMC 法)³⁾があり、膨大な記憶容量と計算量から、計算時間が長くなるため、従来においては実際の設計には不向きであったが、計算機の発達により、実用段階となってきた。当社は、遷移流領域における排気効率の良いタービン翼の設計のために、DSMC 法を用いた排気シミュレーション技術確立した。

本稿では、DSMC 法をターボ分子ポンプの吸気口圧力解析に適用した事例および DSMC 法を用いて開発した島津製作所の最新のターボ分子ポンプを紹介する。

2. DSMC 法のターボ分子ポンプへの適用

2.1 DSMC 法

DSMC 法は、分子の衝突と移動を分離して扱うことができる数値解析法である。時間ステップ δt が平均自由時間より十分小さく、かつ、クラン条件（隣のセルを飛び越して2つ先のセルまで移動しないようにする制約条件）を満たす場合に、分子の衝突過程と移動過程を分けて扱うことができるという、分離の原理が成立する。分離の原理により、分子全体の挙動、すなわち流れ場の状態は図1に示すアルゴリズムで数値解析が可能となる。

ムで数値解析が可能となる。

2.2 解析対象

DSMC 法の解析対象は、磁気軸受形ターボ分子ポンプ TMP-3304形とした。ターボ分子ポンプの模式図を図2に、TMP-3304形のロータを図3に示す。近年のターボ分子ポンプは、図3に示すようなタービン翼を有するターボ分子ポンプ部と螺旋状の溝を有するモレキュラードラグポンプ

図1 DSMC 法の計算アルゴリズム。

図2 ターボ分子ポンプの模式図。

* 平成26年5月23日 日本真空学会2014年5月研究例会で発表

^{*1} 株式会社島津製作所 (〒604-8511 京都府京都市中京区西ノ京桑原町1)

部で構成される複合型ターボ分子ポンプが主流となっている。モレキュラードラグポンプは主に粘性流領域で作動し、ターボ分子ポンプは分子流から遷移流領域で作動するため、特にターボ分子ポンプ部の遷移流領域における吸気口圧力の解析精度の向上が課題である。よって、本稿における解析対象は、ターボ分子ポンプ部とした。

2.3 実測値と解析値の比較

本節では、Ar ガス流量と吸気口圧力の関係について、DSMC 法による解析値と実測値の比較を行う。

解析で考慮する気体の流れ、温度の模式図を図 4 に示す。温度はロータ翼温度、ステータ翼温度、吸気口側ガス温度、排気口側ガス温度である。ロータ翼およびステータ翼の温度について、高速で回転するロータ翼にガスが衝突したとき、摩擦熱が発生しロータ翼およびステータ翼の温度が上昇するものと考えられる。また、ロータ翼の温度は、一部は放射によりステータ翼に伝達され、一部は、ロータ翼とステータ翼の間に存在するガスの熱伝導によりロータ翼の温度がステータ翼に伝達される。ロータ翼およびステータ翼の温度は、ガス流量が多いほど高くなる。解析におけるロータ翼温度、ステータ翼温度は実際の運転状態に近い温度とし、吸気口側ガス温度、排気口側ガス温度は、ロータ翼温度とステータ翼温度の平均温度とした。また、具体的な温度条件を表 1 に示

図 3 TMP-3304形のロータ。

図 4 解析で考慮する気体の流れ、温度の模式図。

す。より正確には Ar ガスの流量が増加すればロータ翼およびステータ翼の温度も上昇していくと考えられるが、ここでは Ar 1000 sccm 以下ではロータ翼にかかるガス負荷が小さいため、ロータ翼温度およびステータ翼温度をそれぞれ一律 333 K、303 K とし、2000 sccm では実測温度に近いロータ翼およびステータ翼温度をそれぞれ 393 K、333 K と仮定した。Ar ガス流量は 100 sccm、500 sccm、1000 sccm、2000 sccm であるが、流れ場の状態はすべて遷移流領域である。

解析結果と実測値の比較を図 5、表 2 に示す。ターボ分子ポンプの排気口に接続される補助ポンプの排気速度は 7,000 L/min である。解析値の実測値に対する誤差は、Ar 100 sccm のとき -4 %、Ar 500 sccm のとき +3 %、Ar 1000 sccm のとき +7 %、Ar 2000 sccm のとき -4 % となっており、±10%の誤差に収まっていることが分かる。DSMC 法を用いることにより、遷移流領域においても、ターボ分子ポンプの設計ツールとして十分に使用できることが確認できた。なお、解析精度をさらに向上させるために、温度が解析

表 1 解析条件。

Argon gas throughput	Temperature			
	Rotor blade	Stator blade	inlet port side gas	foreline port side gas
sccm	K	K	K	K
100	333	303	318	318
500	333	303	318	318
1000	333	303	318	318
2000	393	333	363	363

図 5 実測値と解析値の比較。

表 2 実測値と解析値の比較。

Argon gas throughput	Measurement	Simulation	Error
sccm	Pa	Pa	%
100	6.71E-02	6.42E-02	-4%
500	3.44E-01	3.54E-01	3%
1000	7.26E-01	7.80E-01	7%
2000	1.86E+00	1.79E+00	-4%

誤差に与える影響を検討する必要がある。

3. ターボ分子ポンプ TMP-X3405形

近年では遷移流領域における排気性能向上に加えて、フットプリントの削減のために、よりコンパクトなターボ分子ポンプへの期待が高まっている。島津製作所では本体部に、電源部を一体化させたターボ分子ポンプ TMP-V3304形を発売している。この TMP-V3304形をさらにコンパクトなターボ分子ポンプとするために、DSMC 法を活用して、TMP-X3405シリーズを開発した。図 6 にターボ分子ポンプ TMP-X3405シリーズの外観を示す。

また、図 7 および表 3 に、TMP-3304形、TMP-V3304形、TMP-X3405形の外観図および仕様比較を示す。

TMP-3304形が従来のターボ分子ポンプで、電源部をポンプ本体部とは別に設置するため、ポンプ部と電源部を接続する制御ケーブルが必要であるが、この TMP-3304形のポンプ部に電源部を一体化させた TMP-V3304形は、ポンプ部と電源部を接続する制御ケーブルは不要である。

TMP-X3405形では、DSMC 法を活用し、タービン翼の翼長さや翼角度を最適化し、従来の TMP-3304形に対し、図 8 に示すように Ar 1000 sccm 以上のガス流量に対し

て吸気口圧力を低圧化し、例えば Ar 1800 sccm のとき15%の低圧化を実現しており、すなわち排気速度が向上した。これにより、成膜装置、エッチング装置に使用した時のプロセス領域が拡大できる。

また、TMP-X3405形シリーズは、温度調節機能も有しており、スパッタ装置市場への対応に加えて、半導体製造工程や液晶パネルの製造工程におけるエッチング装置で発生する反応生成物の堆積を軽減し、連続稼働時間を伸ばすことができる。

さらに TMP-V3304形のポンプ高さ462 mm に対し、TMP-X3405形は395 mm であり、67 mm もポンプ高さが小さくなっており、ターボ分子ポンプを搭載する装置のフット

表 3 主要な仕様.

TMP model		TMP-X3405	TMP-3304	TMP-V3304
Controller type		Integrated	Separated	Integrated
Inlet flange		VG300	VG300	VG300
Pumping speed	Nitrogen	3200 L/s	3200 L/s	3200 L/s
	Argon	3100 L/s	3100 L/s	3100 L/s
	Hydrogen	2150 L/s	2200 L/s	2200 L/s
Rotation speed		27,600 rpm	27,600 rpm	27,600 rpm
Pump temperature control		Available	Available	Not available
Height		395 mm	365 mm	462 mm

図 6 ターボ分子ポンプ TMP-X3405シリーズ.

図 8 排気特性比較.

図 7 外観図比較.

プリントの削減に貢献できる。

4. む す び

DSMC 法をターボ分子ポンプの吸気口圧力の解析に適用し、遷移流の領域において、 $\pm 10\%$ の精度で解析可能であることが確認できた。

島津製作所では、DSMC 法を用いることで従来のターボ分子ポンプと同等以上の排気速度を有し、高さ寸法を縮減した TMP-X3405を開発した。今後は、DSMC 法をターボ分子ポンプの製品開発に活かし、さらなる小型化、排気速度向上を図っていく予定である。

〔文 献〕

- 1) 登坂宣好：数値流体力学—基礎と応用(東京大学出版会，東京，1992)。
- 2) 谷口 修，鈴木 允，沢田 雅：日本機械学会論文集(第2部)，**34** (1968) 708。
- 3) 南部健一：数値流体力学—基礎と応用(東京大学出版会，東京，1992)。