108 レーザ光マイクロエンジン付近に誘起される気体分子流れ

都立大 太田正廣^{*}、日本IBM 笠原健治、都立大 坂本守義

Molecular Gas Flows around Laser Microengines

Masahiro OTA^{*}, Kenji KASAHARA^{**}, and Moriyoshi SAKAMOTO^{*}

Gas molecular motion around laser opto-microengines are numerically simulated by the Direct Simulation Monte Carlo method. The flow model for simulation is that four blades rotor of the engines is installed, without rotation, in a computational domain. The domain, a square cavity, is enclosed by solid surfaces with diffused reflection. The backward surface temperature of the rotor is lower than the forward surface temperature by 2 times. It is revealed that the maximum macroscopic velocity around the rotor is dependent on the blade thickness.

1. まえがき

近年、極限空間での作業や医療用など既存の技術では難しい極小の世界での仕事を果たすことを目的としたマイクロマシンの必要性がクローズアップされ、その研究開発が盛んになってきている。マイクロマシンの定義ははっきりと定まっていないが、一般にはその大きさが数mmから数百分の1mm程度の微小な機械と言うことができる。高温、高圧、真空、放射線、閉鎖空間などといった人間の入り込めない極限空間における作業環境においてマイクロマシンの真価が発揮されると期待されている。例えば、宇宙空間での作業の場合、軌道上にロケットで投入できる貨物重量には限界があるので、作業機械は小型にする必要がある。また、原子炉配管内やジェットエンジン内の点検などの狭くかつ危険な閉鎖空間の作業や医療分野におけるマイクロサージェリなどが考えられている¹⁾。

マイクロマシン開発において最も重要なポイントになっているのが、機械の微小化に伴う分子気体効果の顕在化と種々のエネルギーを機械運動に変換する動力源（エンジンあるいはアクチュエータ）の問題である。寸法（L）が非常に小さい世界では、慣性力などLの次元の大きな体積力よりもLの次元の小さい静電気力、表面張力、粘性力などが支配的である。そのため、ピストンやタービンなどの体積力を動作の基本原則とする従来の動力源は極小の世界では機能しにくい。したがって、従来とは異なった原理で駆動する新しい動力源が必要になる。機械や物質は分子や原子から構成されているのだから、動力源マイクロ化やマイクロマシン作動原理の究極は、微小機械の作動する空間が分子や原子の集団から構成されていることを考慮し分子や原子の物理的・化学的現象から発生することを利用すべきであろう²⁾。

^{*}Dept. of Mech. Eng., Tokyo Metropolitan University, 1-1, Minami-Oosawa, Hachioji, Tokyo 192-03, JAPAN.

^{**}, IBM JAPAN.

そこで、本研究では微小な機械の例として、マイクロマシンへのエネルギー伝送機構が注目される光マイクロエンジンを取り上げている。分子や原子の流れに特有な現象をここでは分子気体効果と名図ける。分子気体効果は2つの物理状態の場合、発生する。その第一の場合は気体分子の平均自由行程（ λ ：ある気体分子が他の分子と衝突してから、次に他の分子に衝突するまで自由に飛行できる平均的な距離）が物体の大きさ（ L ）などに比べて無視できない場合である。通常は気体圧力が低い場合で、宇宙環境や真空機械などにおいて発生する。このような分子気体力学の基礎パラメータは λ と L の比で定義れKnudsen数（以下、 Kn 数と略記する）である。 Kn 数が大きいと気体は分子集団から構成されていることを考慮しなくてはならず、 Kn 数が小さい（ $Kn < 0.01$ ）と気体を連続体と見なせる。第二の分子気体効果が発生する場合は、 Kn 数が 0.01 以上であるが圧力が比較的高く気体分子の平均自由行程の長さは短い、物体の大きさも小さい場合も考えられる。本研究では第二の分子気体効果の場合を議論する。

2. 光マイクロエンジン

光をエネルギー源とし、光エネルギーを固体表面の温度上昇に一旦変換させた後、分子気体効果を用いて機械的な回転エネルギーに変換させる光マイクロエンジンを、筆者らは提案している³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。光マイクロエンジンはラジオメータとその構造はほぼ同一でロータの駆動力は光によって得られるロータ翼表裏の温度差に起因する分子気体効果を用いるものである。

マイクロマシンへのエネルギー供給方法の確立を研究目標にした光マイクロエンジンは、数枚の平板翼からなる小型ロータを真空チャンバ内に設置し、チャンバ外部よりエネルギー源である光を照射する構造になっている。現在のところ、ロータ中央部のガラスキャップ状軸受け廻りにロータを固着させている。ロータサイズは現在までのところ1 mmが最小であるが、さらにマイクロ化を目指して開発が進んでいる。アルミニウム製ロータの片面にはカーボンブラックを塗布し反対側面は光反射率が高い。真空チャンバ内を減圧し、外部より白色光やレーザ光を照射するとロータが回転し初める。ロータ回転速度およびロータに働くトルクには、最適な気体圧力状態がある。圧力の最適値よりも高くても低くても回転速度およびトルクは減少する。また照射エネルギーパワーの上昇とともに回転速度およびトルクは増大する。最大静止トルクは $Kn = 0.2$ 付近で生じており、最大回転数は $Kn = 0.5$ 付近である⁶⁾。なぜ、静止トルクと回転数の最大値が発生する Kn 数が異なるのかは理解できていない。

光マイクロエンジンの駆動源としては二つの分子気体効果が考えられる。一つは古くから考えられている力で気体分子同士の空間衝突がほとんどない自由分子流に近い状態の時、発生するラジオメリック力である。もう一つは気体分子同士の衝突が気体分子と固体表面との衝突に比べて無視しえない状態のとき生じる熱流力である。両者とも分子気体環境におかれた表裏で温度の異なる固体表面に対して高温側が低温側方向に押す向きに働く力である。光エンジンの場合、光が照射されるとカーボンブラックによってロータ表裏の輻射エネルギーの吸収率に差による温度差が生じる。つまり、光は熱

源として用いられているのであり、光の放射圧力がロータを直接押しているのではない。光マイクロエンジンの駆動力が光の放射圧力によるものであるならば、回転方向はカーボンブラックが塗布されていない面が押される向きになるはずである。

3. 光マイクロエンジン付近に誘起される気体分子流れに関する数値シミュレーション

光マイクロエンジンはなぜ回転するのか、任意の Kn 数において光マイクロエンジン付近にどのような流動現象が生じているのか、どれくらいの回転トルクが発生しているのか、なぜ光エンジンには最適な Kn 数があるのかなどを明らかにするために、理論的には任意の Kn 数に適用可能な直接シミュレーションモンテカル法（以下、DSMC法と略記する）と呼ばれるコンピュータシミュレーション法により数値解析を行った。DSMC法は本質的に分子運動をコンピュータ上で追跡する方法で、気体分子同士の衝突の有無にかかわらず使用できる。計算空間を分割してできるセル

は、一辺の長さが気体の平均自由行程の程度であり、セル内では巨視的な物理量は一定であると仮定している。DSMC法の計算フローチャートを図1に示す。

本報告ではロータの翼厚さが与える巨視の流れへの影響を明らかにする。シミュレーションモデルでは、4枚のロータが静止状態で閉鎖空間に置かれている^{7) 8)}。モデルを図2に示す。一枚のロータの表（図2中のH部分）と裏（図2中のC部分）では表面温度が異なる。H部分が高くC部分が低い。厚みの影響に関する影響を明

Fig.1 Flow Chart of DSMC Method

Fig.2a
Flow Model
installed four Blades
without Thickness

Fig.2b
Flow Model
installed four Blades
with 40 % Thickness

ENCLOSING WALLS : 300[K]
(DIFFUSED OR SPECULAR REFLECTION)

Fig.3 Velocity Vector Diagram, $Kn=0.1$

らかにするための巨視的速度分布を図3に示す。C部分からH部分へ向かう巨視的な流れが生じており、さらに計算モデル場全体でさらに大きな回転流が発生している。運動量保存則から考慮すれば、気体にCからHへの巨視的な流れを発生させたのだから、ロータには反対にHからCへ向かう力が与えられ光マイクロエンジンが回転しているとも解釈される。重力場を考慮していないから明らかに自然対流ではない。誘起される巨視的速度の最大値を以下に示す；

	$Kn = 0.1$	$Kn = 1$
厚みなし	15 m/s	8 m/s
厚み比40%	12 m/s	6 m/s

厚みなしの場合、翼端で大きな温度差が生じている影響が現われている。

5. まとめ

本報告では、気体分子の集団移動を利用した光マイクロエンジン付近に誘起される流れに関する数値シミュレーション結果について報告した。翼端付近の固体壁面温度差の影響が現われている。

参考文献

- (1) 藤正厳, 中島尚正, 鎮西恒雄, 井街宏, マイクロマシン開発ノートブック, 秀潤社, 1991年, pp.17-27. (2) 日本機械学会・編, 原子・分子の流れ, 共立出版(株), 1996, pp.203. (3) Masahiro OTA, and Noriyuki KAWATA, Driving force estimation of Opto-Micro Engines worked by rarefied gas dynamics effects, Proc. of International Symposium on Micro-Machine and Human Science, Nagoya, pp.35-43, 1991. (4) Noriyuki KAWATA and Masahiro OTA, Numerical simulation of rarefied gas dynamics engine performance for a micro-machine, Proc. of International Symposium on Aerospace and Fluid Science, Sendai, pp.602-609, 1993. (5) 太田正廣, 笠原健治, 坂本守義, 光マイクロエンジンに関する研究, 日本機械学会論文集, 61-582, B, 1995年6月号. (6) Masahiro OTA and Kenji KASAHARA, Numerical Simulation of Rarefied Gas Flows Induced by Surface Temperature Gradients on Stationary Micro-engine Blades. Proc. of The First Asian CFD Conference, Hong Kong, January 1995, pp.1125-1130. (7) Masahiro OTA and Noriyuki KAWATA, Direct Simulation of Gas flows around Rarefied Gas Dynamics Engines for a Micro-machine, Rarefied Gas Dynamics, Oxford University Press, 1995, pp.722-728.