

異方性分子散乱特性による大気吸入イオンエンジンの圧縮性能向上

Improvement on Compression Performance of Air Breathing Ion Engine
By Anisotropic Molecular Scattering

○庄田 光佑・上瀧 優希・板谷 一輝・江崎 啓介・杉本 紘基・芦田 優作 (神戸大学) ・
小澤 宇志 (JAXA) ・山下 裕介 (東京大学) ・西山 和孝 (ISAS/JAXA) ・
横田 久美子・田川 雅人 (神戸大学)

○Kosuke Shoda・Yuki Jotaki・Kazuki Itatani・Keisuke Ezaki・Koki Sugimoto・Yusaku Ashida (Kobe University) ・
Takashi Ozawa (JAXA) ・Yusuke Yamashita (The University of Tokyo) ・Kazutaka Nishiyama (ISAS/JAXA) ・
Kumiko Yokota・Masahito Tagawa (Kobe University)

Abstract

The use of low-altitude satellites has expanded rapidly in recent years for Earth observation, navigation, and communications. Most satellites are generally operated at an altitude of around 600 km called LEO. There is a growing demand for higher resolution satellite data. It has been recognized that high-resolution observations are realized by orbiting lower altitudes called sub-LEO. However, the increased atmospheric drag due to the dense atmosphere limits long-term satellite operations in sub-LEO in the absence of propulsion systems. In this study, the effect of the microstructure surface on the passive compression performance of the intake system of an air-breathing ion engine (ABIE) system is proposed and analysed. The scattering distributions of the thermal Ar beam pulses at the microstructure surface were measured experimentally. The scattering process at the microstructure surface demonstrated anisotropic nature and rectification effect. The DSMC calculation at an altitude of 250 km was also performed using the simple scattering model, which is based on the experimental results of scattering distribution and recent ABIE design. The computational results indicate that the compression performance of the microstructure intake is higher than that of the diffusive flat intakes. Furthermore, the introduction of a collimator resulted in higher compression performance.

記号の説明

θ_i : 入射角 (deg.)

θ_d : 検出角 (deg.)

G : 圧縮比

n_{dis} : 放電室内大気数密度 (m^{-3})

n_{am} : 高層大気数密度 (m^{-3})

1. 緒言

人工衛星は期待される役割に合わせた軌道で運用されるが、とりわけ地表観測ミッションを担う地球観測衛星は低軌道 (Low Earth Orbit: LEO) 領域内の高度 600 km ~ 1,000 km で運用されることが一般的である。近年、地球観測衛星による衛星データの利用が加速されており、気象予測や防災・災害監視のみではなく GPS による地理情報や農林水産業への利用など、官民間問わず様々な分野で応用されている¹⁾。このことから、地球観測衛星での取得データの高精細化への要求が高まっており、従来の衛星運用高度よりも低い高度 300 km 以下の超低地球軌道 (sub-LEO) での衛星運用に注目が集まっている。sub-LEO 衛星には大きな可

能性が秘められており、欧州宇宙機関 (European Space Agency: ESA) によって 2009 年 3 月 17 日に打ち上げられた GOCE²⁾ (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) や JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) によって 2017 年 12 月 23 日に打ち上げられた超低高度技術試験機「つばめ³⁾ (SLATS: Super Low Altitude Test Satellite)」などの試験運用が行われており、運用実現に向けた研究が進められている。一方で、sub-LEO では従来高度と比較して衛星に加わる大気抵抗が大幅に増加するため推進器を用いて抵抗を補償する必要がある。上述した衛星ではどちらもイオンエンジンを用いて大気抵抗を補償している。イオンエンジンは推進剤を多量に噴出する化学推進に比べて高い比推力 (燃費) と推進剤利用効率 (推進剤が推力に寄与する割合) を誇る電気推進機であり、長期間の運用に適した推進機である⁴⁾。しかし、sub-LEO では定常的な運用が求められるため推進剤消費量が著しく、また飛行中の衛星に推進剤を補給することが困難であることから衛星運用寿命が推進剤の搭載量に依存してしまう。そこで、より長寿命な sub-LEO 衛星の実現のために、衛星に衝突してくる高層大気を取り込んで推進剤として利用するという構想に注

目が集まっている⁵⁾。

2003年にJAXAの西山⁶⁾により大気を捕集する流路であるインテークと ECR イオンエンジンからなる大気吸入イオンエンジン (Air Breathing Ion Engine: ABIE) が提案された。このモデルでは、インテークから軌道上の高層大気を取り込み、反射板を通してエンジン内部の放電室に大気を圧縮する。その後、放電室で大気分子をイオン化し静電加速して放出することで推進力を得る機構となっている。ABIEの実現のためには通常のイオンエンジンと同様に、静電加速部での性能改善やエンジン構造材の損耗・汚染なども重要な研究課題であるが、ABIE特有の研究課題として「放電室内の高数密度化」が挙げられる。高圧タンクに推進剤が搭載されている通常のイオンエンジンとは異なり、軌道上の高層大気を内部に取り込みプラズマ生成に適した放電室内数密度まで外部動力を用いることなく圧縮する必要がある。そのため、ABIEの成立にはより高効率な吸気システムが必要不可欠である。

本研究では大気を取り込むインテーク部の圧縮性能向上の方法として、表面に微細加工を施した表面の利用を考えた。インテーク部の設計で重要な点は、流入コンダクタンスを最大に、流出コンダクタンスを最小にすることである。微細加工表面を用いることで流入大気の反射方向に指向性を持ち分子トラップとして作用する可能性を考え、分子線散乱実験によってその散乱挙動について検証した。また、実験結果をもとにしてインテーク壁面に微細加工を施した際の ABIE 放電室圧縮率について DSMC 計算を行い、微細加工インテークの導入が圧縮性能に与える影響について検証した。

2. 分子線散乱実験

sub-LEO などの希薄流環境では、気体分子間の衝突ではなく気体と壁面との衝突が支配的となる⁷⁾。また、ABIE インテークでは外部動力を用いることなく大気を圧縮する必要がある。したがって、気体分子が壁面と衝突する際の反射方向に指向性を与え、高層大気の流入を最大に、内部からの逆流を最小とする表面を実現できれば放電室での圧縮性能を向上させることが可能だと考えられる。そこで、本研究では微細な加工を施した材料表面に注目し、分子線散乱実験を行うことで表面での散乱挙動を制御可能であるか検証した。

微細加工表面の SEM 画像と表面の概略図を図 1 に示す。サンプルの断面はのこぎり波状の加工が施されており、それぞれ 20° と 74° の傾斜角を持つ非対称なファセット面でおおわれている。実験では、図 1 の概略図において入射 Ar 分子が左側から右側へサンプル表面に流入する方向を順方向、右側から左側へサンプル表面に流入する方向を逆方向と定義して呼称する。微細加工サンプル表面はフロートガラス基板に樹脂で形状が転写されており、Au によってコーティングされている。よって、比較のために Au コート平面ミラーに対して同様の実験を行い微細加工による影響に

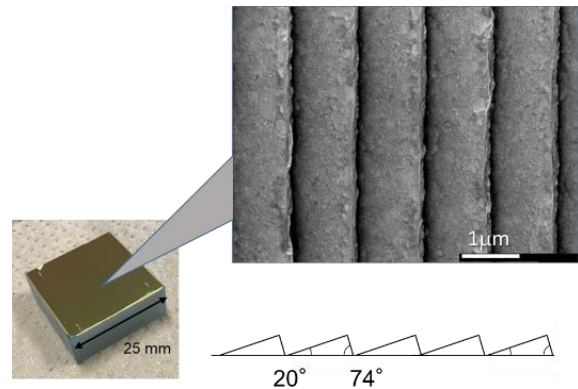


図 1 微細加工表面の SEM 画像と表面の概略。

表 1 サンプルの詳細な条件。

	Au-coated mirror	Microstructured surface
Surface coating	Au	Au
Substrate material	Cu	Float Glass
Facet angle (deg.)	-	20, 74
Cyclic period (mm ⁻¹)	-	830
Size and shape	25 mm in dia.	25 x 25 mm in square

ついて検証した。それぞれのサンプル条件について表 1 にまとめる。

実験装置の概略図を図 2 に示す。本実験装置は 3 つの真空チャンバーから構成されており、上流からソースチャンバー、リアクションチャンバー、TOF チャンバーと呼称する。ガス分子は図中右側の PSV からソースチャンバーへと流入される。PSV は供給されたガスを一定周波数の熱速度パルスとして導入することが可能である。ソースチャンバーに導入されたガス分子は、チャンバー間に設置された直径 3 mm のスキマーによって整流されたのちリアクションチャンバーに流入する。リアクションチャンバーの内部には、整流されたガス分子ビームライン上に 360° 回転可能なホルダによってサンプルが固定されており、分子線がサンプル表面に衝突し散乱する。散乱粒子はリアクションチャンバー内の検出アーム先端に設置した電離真空計によって計測される(図 3)。検出アームは装置外部から駆動することが可能であるため、アームを回転させることでサンプル表面からの散乱粒子を任意の角度で計測できる。これらの機構により、サンプルホルダおよび検出アームを回転させることでサンプルに対する分子線の入射角 θ_i および検出角 θ_d を任意に変更した際の散乱分子強度の計測が可能である。電離真空計により計測したイオン電流は高速ブリアンプによって電圧信号に変換され、デジタルストレージスコープにより記録される。実験の詳細な条件を表 2 に示す。すべての散乱実験は熱速度の Ar ビームパルスを流入気体とし、サンプル表面の温度は室温とした。

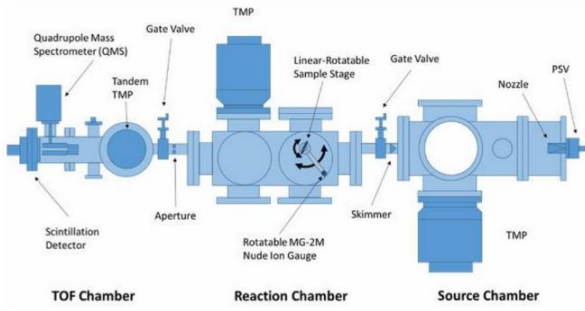


図2 実験装置の概略.

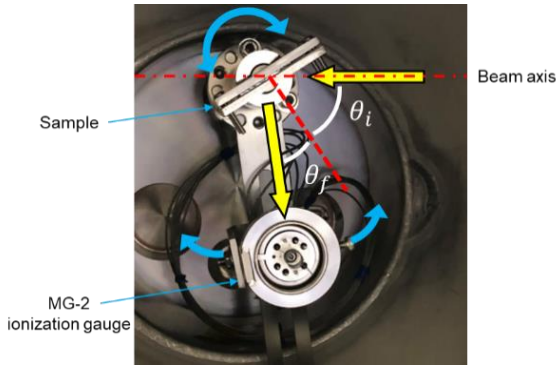


図3 サンプルステージとMG-2イオンゲージおよび入射角 θ_i と検出角 θ_f .

表2 分子線散乱実験の条件.

Incident species	Ar
PSV pressure (MPa)	1.0
Distance between PSV and sample (mm)	1250
Distance between sample and ionization gauge (mm)	70
Base pressure (Pa)	3E-7
Repetition rate (Hz)	3
Sample temperature	room temp.

3. 実験結果

図4にAuコート平面ミラーでのArビーム散乱強度分布を示す。入射角 θ は 0° 、 30° 、 60° として計測を行った。図の青い矢印は入射方向を示している。 30° と 60° では、それぞれ鏡面反射方向付近に散乱分子のピークを持ちピーク周りに葉っぱのような広がりを持つ葉状分布を示していることがわかる。一方で、 0° においては葉状散乱と拡散散乱が混在しているような分布を示している。これらの結果から、Au表面において入射粒子は葉状散乱を示すことが確認された。この葉状な散乱分布はほかの多くの研究においても確認されていることから⁸⁾、本実験の計測システムの妥当性を示せたと考えられる。

図5に微細加工表面でのArビーム散乱強度分布を示す。入射角 θ はAuコートミラーと同様の 0° 、 30° 、 60° で計測を行った。ここで、入射角は微細加工表面上のファセット面ではなくマクロな基板面を基準としている。図の青い矢印は入射方向を示しており、FNはファセット面の法線方向

向を示している。入射角が 0° である図5(a), (d)ではAuコートミラーで見られたような葉状散乱成分が見られず、拡散散乱に近い挙動を示している。一方で、入射角が順方向の 30° 、 60° (図5(b), (c))においては、はっきりとした葉状分布が見られる。特に図5(c)についてはファセット法線が -20° であることからファセット表面への入射角は 40° 、鏡面反射角は $+20^\circ$ と考えられ、表面の微細構造による鏡面方向とよく一致している。このことから、順方向の入射粒子に関しては、ファセット面に対しての鏡面反射方向にピークを持つ葉状散乱とすることができる。一方、逆方向入射である図5(e), (f)では顕著なピークはみられず拡散散乱に近い分布となっている。この原因として、隣接するファセットによる反射粒子への遮蔽効果が考えられる。一度ファセット面で反射した粒子が 74° のファセット面に衝突し、再度

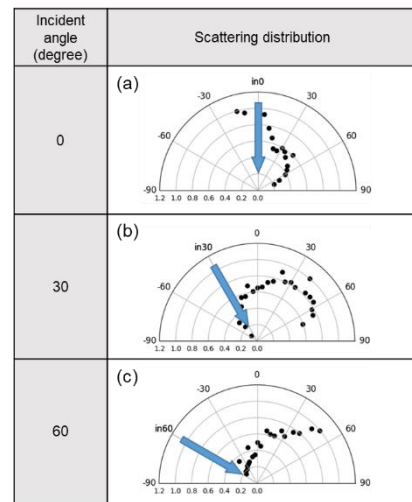


図4 Auコート平面ミラーでの散乱分布。(青矢印：Ar分子流入方向)

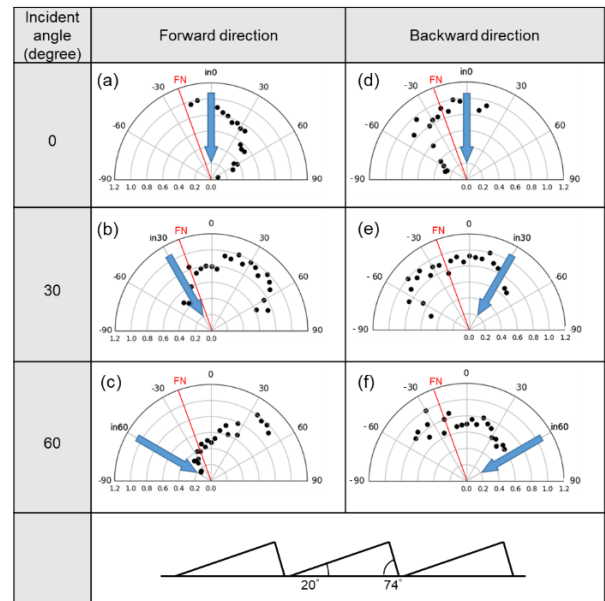


図5 微細加工表面での散乱分布。(青矢印：Ar分子流入方向, FN：ファセット面の法線方向)

反射することで全体としてピークを持たない散乱挙動になると考えられる。

以上から、表面の微細加工によって異方的な散乱挙動が生じ、順方向からの分子は鏡面反射が優勢で前方散乱が多くなり、逆方向からの分子は拡散反射が優勢なため、等方的に近い散乱挙動となることが示された。この特性によって、全体としては順方向に分子を通過させやすい異方性散乱特性が発現し、分子流領域での整流効果を実現できる可能性がある。

4. 微細加工表面を用いた ABIE インテーク

前項に示した分子線散乱実験により、サンプル表面に左右非対称な微細加工を施すことで散乱挙動が変化し、分子流領域での整流効果が期待できることを示した。この微細加工表面を ABIE インテーク部に適用した際の ABIE 圧縮性能への効果を評価するために、希薄流体の一般的な解析手法である DSMC 法 (Direct Simulation Monte Carlo)⁹⁾ を用いたシミュレーションを行った。

数値計算上で ABIE のインテーク壁面に微細加工表面を導入するためには壁面反射条件を定義する必要がある。本計算では、希薄流環境における数値解析の壁面反射条件として広く使用されている Maxwell モデルを応用した反射モデルを構築した。Maxwell モデルでは適応係数 γ (accommodation coefficient) を用いて、確率 γ で反射後の気体分子が壁面温度のボルツマン分布で散乱する拡散反射が生じ、確率 $1-\gamma$ で気体分子の持つ運動エネルギーが維持され入射角度と反射角度が等しくなる鏡面反射が生じる(図 6)。

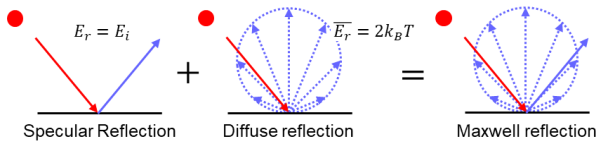


図 6 鏡面反射, 拡散反射, および Maxwell 反射モデル

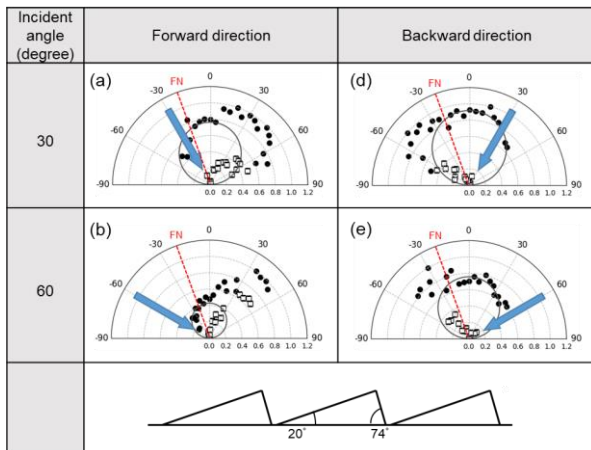


図 7 微細加工表面での散乱分布。

(灰色実線: 拡散流束成分, 中抜き四角: その他の流束成分)

表 3 各計測条件での適応係数

Incident angle (deg.)	accommodation coefficient : γ	
	Forward direction	Backward direction
30	0.753	0.865
60	0.640	0.877

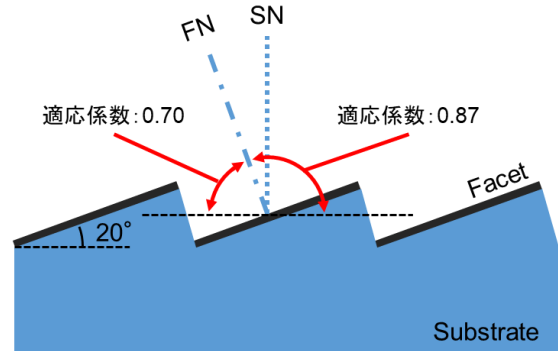


図 8 壁面反射モデルの概略

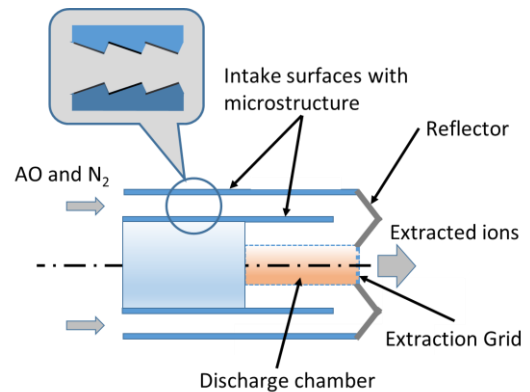


図 9 ABIE モデルと微細加工表面の適用範囲

ここでは Maxwell モデルを応用し、流入方向によって適応係数を与えることで微細加工表面での散乱挙動を表現した。図 7 に示すように、微細加工表面での実験結果から拡散流束とその他の流束成分に分離し、全流束に対する拡散流束の割合を適応係数 γ として使用した。各計測条件における適応係数 γ の計算結果を表 3 に示す。計算では順方向・逆方向それぞれの適応係数を平均化し、図 8 に示すようにファセット面法線方向 (FN) を境界として順方向からの入射分子は $\gamma=0.70$ 、逆方向では $\gamma=0.87$ の Maxwell モデルに従うとした。ここで、本モデルでは拡散流束に注目してモデルの構築を行ったため、拡散流束以外の成分についてはすべて鏡面反射とみなしている。

図 9 に本計算で対象とする JAXA の小澤によって提案された ABIE の形状モデルを示す。また、DSMC 計算に使用した条件を表 4 に示す。運用高度を 250 km とし、NRLMSISE-00 から得られる大気状態を計算条件として使用した。インテーク部以外の壁面に関しては、アルミニウムやステンレスのような一般的な工業材料の使用を想定し拡散反射を用いた。放電室およびグリッドシステムへの透

表4 シミュレーション条件

Altitude (km)	250
Number density (m ⁻³)	1.43×10 ¹⁵
Inflow velocity (m/s)	7754
Atmospheric temperature (K)	839.6
Wall temperature (K)	300.0
Gas-surface interaction (except intake surface)	Diffuse
Mass of molecular (kg)	3.26×10 ⁻²⁶
Transmittance	0.5 (discharge chamber) 0.2 (accel grid)
ABIE model	Double cylindrical type

表5 DSMC 計算による圧縮計算結果

Intake surface	Microstructured surface	Flat surface	
		Diffusive	Specular
Compression ratio: G	169.5	145.9	44.6

過率はそれぞれ0.5および0.2と仮定した。ABIE圧縮性能を評価する指標として、式(1)に示す圧縮比Gを用いた。圧縮比は放電室内大気数密度 n_{dis} と流入高層大気の数密度 n_{atm} の比で定義される。これらの条件のもとで、インテーク表面を図8で定義した反射挙動を示す微細加工表面とした場合、および拡散反射を示す通常の表面とした場合、また鏡面反射を示す表面材料とした場合の3つのケースで計算を行った。

$$G = \frac{n_{dis}}{n_{atm}} \quad (1)$$

計算結果を表5に示す。拡散反射インテークおよび鏡面反射インテークにおいてそれぞれの圧縮比は145.9および44.6となった。鏡面反射インテークで圧縮比が非常に小さくなった原因として、放電室内部からの粒子の逆流を防ぐことができないためであると考えられる。微細加工表面をインテーク壁面に適用することで圧縮比は169.5となり、通常の拡散反射インテークと比較して圧縮比が16%増加することが確認された。この結果は簡略化した反射モデルを用いたものであり、また微細加工表面の形状や材質が最適化されていない状態で得られたものである。したがって、ファセットの角度や格子間隔などの形状、表面材料、DSMCモデリング等を最適化することによってより効果的なインテーク表面条件が得られると考えられる。

5. 結言

ABIEのインテーク部受動圧縮性能を向上させるために、微細加工表面の導入を提案し表面での散乱特性について評価した。熱速度Arビームパルスを用いた分子線散乱実験を行い、順方向では等方的な拡散反射が少なく逆方向ではより多く生じることが確認された。以上から、微細加工表面全体としては順方向に分子を通過させやすい異方性散乱特性を明らかにし、分子流領域での整流効果を実現できる可能性を示した。また、DSMCシミュレーションを用いて微細加工インテークがABIE圧縮性能に与える効果につい

て検証を行った。Maxwellモデルを応用した反射モデルを構築してシミュレーションを行い、微細加工表面を用いることで圧縮性能の向上が確認された。放電室内部での圧縮比は通常のインテーク壁面と比較して16%増加するという結果となった。ファセットの角度や格子間隔などの形状、表面材料を最適化することで大気圧縮により効果的なインテーク表面を実現できると考えられる。

6. 謝辞

本研究の一部は科学研究者補助金・助成金#18K18912、#18H01624、#19K22017、19H02346の支援により行われたものである。

参考文献

- 1) 衛星利用推進サイト, JAXA 第一宇宙技術部門ホームページ: <https://www.sapc.jaxa.jp/>, (アクセス日: 2020.2.16)
- 2) GOCE home page: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/GOCE
- 3) Imamura, S., Utashima, M., Ozawa, T., Akiyama, K., Sasaki, M.: Current status of the on-going orbit transfer of super low altitude test satellite (SLATS). In: Proceedings of the 69th International Astronautical Congress, IAC-18-C1.8.1. Bremen, Germany, 2018
- 4) 竹ヶ原春樹: イオンエンジン(電気推進)の歴史とその将来, 航空と宇宙: 日本航空宇宙工業会会報, 788号, 2019, pp. 1-7
- 5) Zheng P., Wu J., Zhang Y, Wu B.: A Comprehensive Review of Atmosphere-Breathing Electric Propulsion Systems. International Journal of Aerospace Engineering, Vol. 2020, Article ID 8811847, 21 pages, 2020.
- 6) Nishiyama K.: Air breathing ion engine concept. In: Proceedings of the 54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law, Bremen, Germany, 2003, IAC-03-S.4.02, doi: 10.2514/6. IAC-03-S.4.02.
- 7) 日本機械学会: 原子・分子の流れ 希薄気体力学とその応用, 共立出版, 初版, 1996
- 8) 山西伸宏, 松本洋一郎, 青木功, 正島宏祐: 分子線による気体分子-固体表面間相互作用の解析: 第1報, 気体分子のIn-planeとout-of-planeにおける散乱挙動, 日本機械学会論文集B編, 65巻, 630号, 1999, pp. 437-443
- 9) Bird, G.A.: Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation Gas Flows. Oxford Science Publications, 1994