

大気吸い込み型電気推進機確立に向けたレーザーデトネーション風洞による極超音速流生成

東北大学大学院 工学研究科航空宇宙工学専攻*

高橋 聖幸

1. はじめに

近年、多衛星コンステレーションにより数百から数千機の小型人工衛星を協調同期させつつ宇宙ミッションが遂行されており、実際に SpaceX 社の Starlink システムなどによってネットワーク通信網が形成されてインフラとして地上へと供給されている。一方、このような多衛星ミッションが実現化されたことや、打ち上げシステムの低コスト化によりその他の小型衛星ミッションが容易になってきたことから、衛星の飛行軌道上に存在する宇宙ゴミ（スペースデブリ）の数が指数関数的に増加し、新しく軌道に投入する衛星の飛行を妨害することとなり、国際的に問題となっている。これらデブリに対してレーザーを照射してレーザーアブレーションを生じさせて落下させる、テザーを取り付けてローレンツ力を誘起して落下させる、ロボットアームを装備した衛星をデブリにランデブーさせ、物理的に取り除くなどのアプローチが検討されており、実際に日本でもレーザーやロボットアームを搭載した衛星の打ち上げが検討されている。この既存デブリを取り除くという計画とは別に、新規で衛星を打ち上げた際にはそもそもデブリにならないようなシステムとしておく、というアプローチも存在する。本研究は後者の「そもそもデブリにならない衛星システム」の確立を目指すものであり、そのために高度 100-300 km の地球超低軌道を積極的に利用する。

地球超低軌道は、軌道への打ち上げコストが安い、低解像度のカメラでも地球表面の高精度な観測が可能などのメリットがあり、世界的にも注目されている衛星飛行軌道である（図1）。中でも最も優れたメリットとして、運用終了後燃え尽きてスペースデブリにならないという点が挙げられる。地球超低軌道には、従来の高度 600 km 程度を飛行する低軌道よりもより低い軌道を飛行するために、希薄ながらも大気が存在している。この希薄大気により、おおよそ 0.1-10 mN 程度の空力抵抗を受けるため、衛星搭載のスラスタ使用をやめた途端に飛行高度が下がっていき燃え尽きてデブリになることを回避出来る。持続可能な宇宙開発を実現するための有望視されている軌道である一方で、衛星運用時は空力抵抗を補償するための推進力を確保し続けなければならないという課題がある。既存の衛星であれば、キセノンやクリプトンガスをタンクに充填してそれを電離させ、プラズマ流を推進後方へと排気することで推力を獲得する一方、既存の飛行軌道よりも大きな空力抵抗を受けるため、推進剤がすぐに枯渇してしまうという問題点がある。

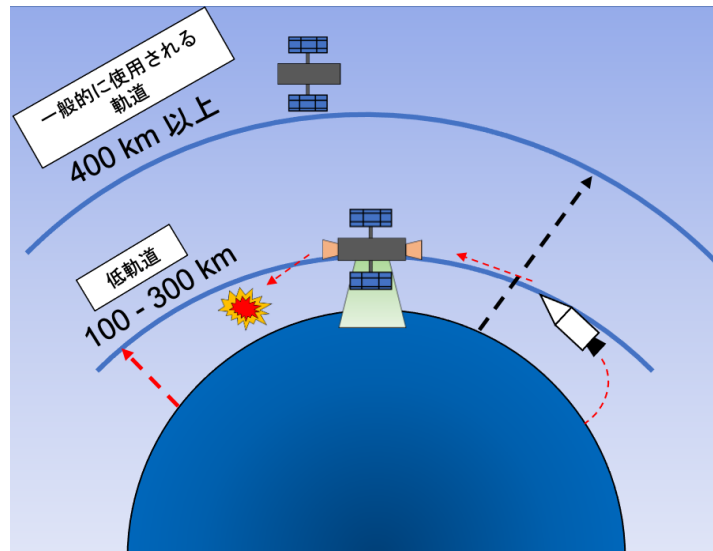


図1 地球超低軌道衛星による飛行．

そこで，地球超低軌道維持のために注目されているのが「大気吸込式電気推進機」である．当該システムでは燃料を搭載する代わりに，地球超低軌道に存在する希薄大気を空気取り込みインテークによって捕獲する．ラム圧縮過程を介して吸入空気を高密度化し，電気エネルギーを印加することでプラズマ化して高速排気し，推力を生成する．燃料を現地で調達出来る仕組みとなっているため，電極などに損耗が起こらない限りは半永久的な飛行が可能となる．インテークによる空気捕集効率，圧縮効率，およびその下流の放電・プラズマ排気ユニットによるプラズマ加熱・排気効率が全体性能を決定付けることとなり，世界各国で研究が行われている．世界の研究動向としては，既存の電気推進機の燃料を空気に置き換え，通常の電気推進の実験と同様に，マスフローコントローラーを使用して低速で空気を供給して放電させ，推進性能を計測するなどの実験が行われている．あるいはインテークに関しては，既存の電気推進機をインテークの前方に配置し，高速のプルーム流を作り出してインテークに当て，その捕集効率や圧縮性能を調べるといった研究が実施されている．然し乍らどの研究も，実際の地球超低軌道の飛行環境を模擬した地上実験が行われているとは言えず，課題が残る．

地球超低軌道環境を模擬する上では，テスト気流に (1) 圧力が極めて低い自由分子流であること，(2) 酸素が乖離しており，酸素原子が含まれていること，且つ電離していること (3) バルクの速さが 8 km/s と極めて高速であることの三点を満足させなければならない．例えばマスフローコントローラーを使用した実験では，空気流量を制限することで (1) は満たせる可能性があるものの，その他の (2) と (3) の条件が満たせず，地球超低軌道環境の模擬としては不十分である．また，電気推進機のプルームをテスト気流として使用する方式では，圧力制御が難しいこと，またプルームの電離度が低いために低速と高速のイオンが混ざってしまう，電離度の低さに起因して原子上酸素の密度を十分に高められないなどの難しさがあり，(1)-(3) 全てを満たすテスト気流の生成は難しいと言える．

上記とは別のアプローチとして、過去に田川らは「レーザーデトネーション風洞」を提案し、それによって高速気流を得ている[1]。レーザーデトネーション風洞は真空チャンバー上流に電磁弁を有しており、電磁弁を開くタイミングでレーザーを照射・集光し、レーザープラズマを介してテスト気流の加熱・加速を行うというものである。これによって原子状酸素を生成出来る上、被加熱気体の流量を制限することで軌道速度 8 km/s の酸素原子生成に成功している。一方、生成される原子状酸素密度は十分に高いとは言えず、低速と高速の粒子が混ざっており、テスト気流のバルク速さとしては 400 m/s であると推定され、環境模擬における (3) の条件を満たせていない。

そこで本研究では、レーザーデトネーション風洞に更なる改良を加え、原子状酸素を生成した上で、テスト気流のバルク速さをより高速化することを目指す。具体的には、レーザーデトネーション現象を膨張波管と組み合わせる新しいシステム「レーザーデトネーション膨張波管」を世界で初めて提案する。この新しいシステムの成立性を数値流体力学計算によって検証した上で、実験装置の開発を行う。

2. 研究の方法及び内容

2次元軸対称非粘性圧縮性オイラー方程式を、数値流体力学 (CFD) 計算コードを使用して解くことでレーザーデトネーション膨張波管の流れを再現した。チャンバー上流から大気圧領域、4.5 kPa の中圧領域、10 Pa の低圧領域に分割し、それぞれ隔膜を再現して配置した (図 2)。大気圧領域と中圧領域の間には超音速ノズルを配置し、第一隔膜の破膜時に圧力差でチャンバー内部に空気が流入する形となっている。通常のレーザーデトネーション風洞は高压と低圧領域のみで構成されるが、新たに第二隔膜を設けてより減圧されたチャンバー室を設けることで、テスト気流を追加加速出来る。レーザーパルスはノズルスロート部に照射することとし、エネルギーソース項を与えてレーザー照射による空気の加熱を模擬した。レーザーパルスは 5 J のエネルギーを持ち、ガウス関数型の空間分布で計算領域内に瞬間的に投入される設定とした。レーザー照射のタイミングは、レーザー照射によって駆動されるブラスト波フロントと、第一隔膜破膜によって生ずる始動衝撃波とが、同時に第二隔膜に辿り着くようなタイミングとした。

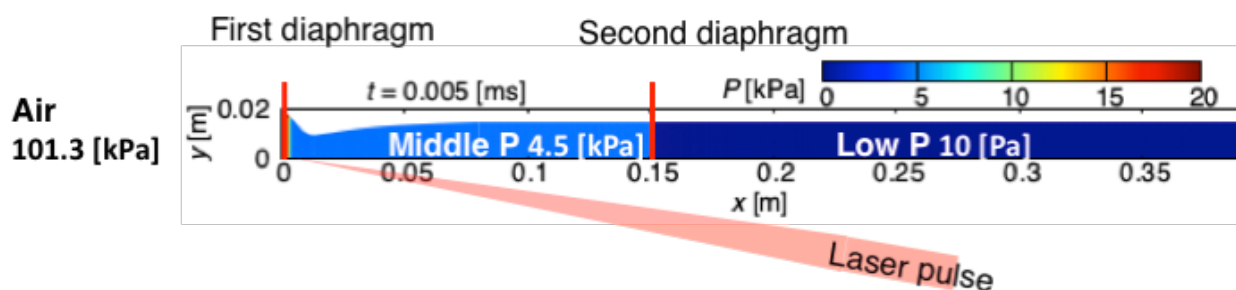


図 2 計算領域.

3. 結果

レーザーデトネーション膨張波管の内部流れを CFD 計算したところ、第二隔膜破膜後にバルク流速 $2,200\text{ m/s}$ を達成できることが示された。この時マッハ数はおよそ 7 である(図 3)。テスト気流の持続可能時間は 25 マイクロ秒と他の風洞装置と比較すると短いが、大気吸込式電気推進機内部における典型的なイオン加速時間スケールは 1 マイクロ秒程度であることから、推進機の基本的特性を調べる上では十分なテスト時間であると考えられる。以上より、レーザーデトネーションと膨張波管との組み合わせが、高速なテスト気流生成に有効であると世界で初めて示された。

また、現在はこのレーザーデトネーション膨張波管構築に向け、チャンバー装置構築を進めている。実際に $1\text{ m} \times \phi 0.5\text{ m}$ チャンバーとロータリーポンプ、及びターボ分子ポンプを組み合わせ高真空を作成することに成功した。圧力計測はピラニ真空系と電離真空系を組み合わせ実施した。ノズルは 3D プリンタを用いて製作し、減圧したチャンバーに第一隔膜を介して接続し、破膜することで超音速流を生成出来ることを確認した。今後は更なるテスト気流加速のために、第二隔膜やレーザー照射系の配備などを進める予定である。レーザー装置は研究室所有の 5 J CO₂ レーザーを用いる予定である。

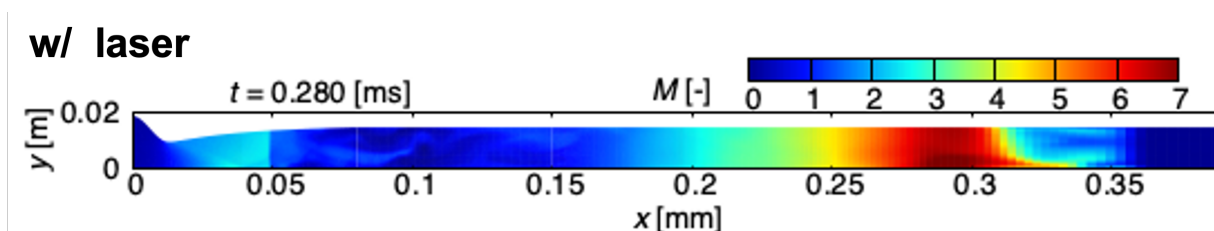


図 3 第二隔膜破膜後の気流マッハ数。

4. まとめ

本研究では地球超低軌道環境模擬風洞として、レーザーデトネーション風洞の低速なバルク流を追加速すべく、レーザーデトネーション膨張波管を世界で初めて提案した。CFD 計算を行ったところ、第二隔膜破膜後にバルク流速 $2,200\text{ m/s}$ 、気流マッハ数 7 の高速気流を生成することに成功した。今後は実際にチャンバー装置とレーザー装置の組み合わせ、レーザーデトネーション膨張波管の構築を行う。

謝辞

本研究は（公益財団法人）天野工業技術研究所、2023 年研究助成を受けて実施されました。

参考文献

- 1) M. Tagawa, R. Okura, W. Ide, S. Horimoto, K. Ezaki, A. Fujita, K. Shoda, and K. Yokota, “Laser-detonation Hyperthermal Beam Source Applicable to VLEO Environmental Simulations,” CEAS Space Journal, Vol. 14, pp. 757–765, 2021.