

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：52605

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04928

研究課題名（和文）有人宇宙構造物の省資源軌道運用に向けた二酸化炭素を用いるイオンエンジンの実現

研究課題名（英文）Realization of CO₂ Ion Engines for Resource-Saving Orbital Operation of Manned Space Structures

研究代表者

中野 正勝（Nakano, Masakatsu）

東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・教授

研究者番号：90315169

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：有人宇宙構造物の省資源軌道運用のために二酸化炭素を用いるイオンエンジンの研究を実施した。ミッション解析から有人宇宙システムの高度制御運用に比推力で約2000 sが必要と概算し、当該性能を持つイオンエンジンの実現性を評価した。小型イオン源でビーム引き出し実験を行い、二酸化炭素イオンエンジンのグローバルモデルを作成した。推進剤利用効率向上に限界があることから、イオンビーム加工によるグリッド製作も実施した。理論的な推定の他、スラストスタンドを用いて推力性能を評価した。今後の性能向上は必要であるが、入手性や貯蔵性を鑑み、有人宇宙構造物の制御に二酸化炭素を用いるイオンエンジンが適合可能との結論を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

イオンエンジンなどの電気推進において、キセノンの代替となる推進剤への切り替えは喫緊の課題である。キセノンなどの貴ガスと異なり、二酸化炭素のような分子性の推進剤をイオンエンジンに用いるには、分子性プラズマに関する新たな知見が要求されるとともに、耐久性能評価のために放電室・電極材料の表面物理に対する理解も必要である。宇宙開発には多額のコストがかかるとともにロケット打ち上げ等による環境負荷も懸念されている。人間や動植物からの排出物である二酸化炭素の有効活用は省資源での宇宙開発を実現し、宇宙開発におけるSDGsにも寄与するものであり社会的な意義が高い。

研究成果の概要（英文）：A study was conducted on an ion engine that utilizes carbon dioxide for the resource-saving orbital operation of a manned space structure. Based on mission analysis, it was estimated that a specific impulse of approximately 2000 s is required for precise control and operation of the manned space system, and the feasibility of the ion engine was evaluated. A global model of the carbon dioxide ion engine was created for the first time, and experiments were conducted on the performance of a small ion source, such as beam extraction. Grid fabrication through ion beam processing was also carried out due to the limitations in improving propellant utilization efficiency. The thrust was evaluated through theoretical estimation as well as measurements using a thrust stand. Based on these findings, although further performance improvements are necessary, it was concluded that an ion engine utilizing carbon dioxide is compatible with the control of manned space structures.

研究分野：宇宙推進工学

キーワード：イオンエンジン 二酸化炭素 有人宇宙構造物 省資源軌道運用 軌道保持

1. 研究開始当初の背景

イオンエンジンをはじめとした次世代宇宙推進である電気推進が宇宙機の高性能化に寄与することは、小惑星探査機「はやぶさ」で実証された。2015年にはボーイングが全電化衛星を実証し、人工衛星の軌道間輸送手段として化学推進から電気推進への移行が加速している。超低高度衛星技術試験機「つばめ」では、空気抵抗に打ち勝つために大量の推進剤が必要だった超低高度における高度維持をイオンエンジンにより実現した。

宇宙滞在が日常となる将来には、大気抵抗による高度低下を補う等、有人宇宙構造物の高度や位置を宇宙推進機によって保持する需要が多数発生することが予想される。イオンエンジンは、電気推進の中でも燃費の指標である比推力が高く、エネルギー変換効率も高いことから、軌道保持の用途に最も適している推進機である。

人間や動植物は二酸化炭素を呼吸で排出する。有人の国際宇宙ステーションでは酸素や水は回収して再利用するが、炭素は二酸化炭素の形で船外投棄している。炭素は食料として地球から補給されるため、船内で食料の生産が行われない限りリサイクルされない。宇宙滞在者一人当たりの二酸化炭素排出量は年間約 300 kg であり、滞在者全員では相応の量になることから、船外投棄される二酸化炭素をイオンエンジンの推進剤として利用できれば、地上からの高度保持用の推進剤の補給が不要となり、有人宇宙構造物の打ち上げ・維持管理において大きなメリットとなるというのが本研究の着眼点である(図1)。

現在主流のイオンエンジンはキセノンを推進剤とし、キセノンに対して最適化された設計となっている。二酸化炭素のような分子性ガスを用いたイオンエンジンの例として、水を用いたものが東京大学のグループで研究開発されている。また、ヨウ素を用いたイオンエンジンも開発されており軌道実証もされたが、ヨウ素には毒性があり安定性に欠けるなど問題が多い。水を推進剤として用いる場合の課題は、イオンとして噴射される割合(推進剤利用効率)が10%未満と低いことである。また、水分子の3割弱がOHやOに解離すると計算結果もあり、イオン化促進のために投入パワーを増やしても、水分子の解離にエネルギーが消費され、損失が増加する恐れがあるなど現象は複雑である。一方で、二酸化炭素の電離エネルギーは13.8 eVと水の12.6 eVと大きく変わらず、C=Oの結合エネルギーは804 kJ/molでO-Hの463 kJ/molよりも大きく解離しにくい。また、二酸化炭素は水より分子量が大きく、化学ロケットでは比推力を低下させる要因となるが、イオンエンジンではイオン加速電圧の設定によって比推力を補うことが可能であることから推力密度を上げてイオンエンジンをコンパクトにできる効果が期待できる。

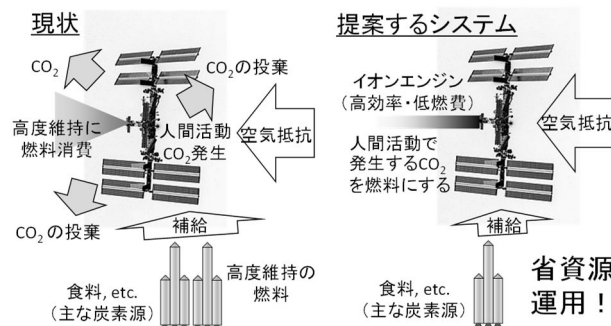


図1 有人宇宙構造物から投棄される二酸化炭素を活用したイオンエンジンによる軌道保持の省資源化

2. 研究の目的

有人宇宙構造物から投棄されている人間排出の二酸化炭素を用いたイオンエンジンを実現するための技術獲得を目指す。キセノンなどの既存の推進剤を用いた場合との違いを、イオン生成コストや推進剤利用効率などの電気推進工学の観点から明らかにする。また、イオン源に関して得られた実験データに、応募者が独自に開発したイオンビーム解析技術を適用し、効率良くイオンエンジンの性能を予測する方法を確立する。システム解析から、有人宇宙構造物の得るメリットを明らかとし、同時に推進機の作動最適化の指針を得る。

3. 研究の方法

イオン源、システム、性能評価・最適化の項目に分け、それぞれについて明らかにする。イオン源については、磁場回路設計等のわずかな差によって性能が大きく変化することがあるため、個々のイオンエンジンの性能向上を狙うのではなく、アルゴンや水等の推進剤を用いた場合の性能と比較することによって、二酸化炭素を推進剤とした場合の特性を取得することを主眼とした。

1) イオン源

イオン源で二酸化炭素プラズマを生成してイオンビームを引き出し、推進剤流量や吸収パワーを変化させた作動特性をイオン生成コストや推進剤利用効率の形で取得し、キセノンや水推進剤と比較して明らかにする。二酸化炭素のイオン化や解離の様子は、E×B プロー

ブと分光測定により取得する。二酸化炭素の解離による煤の付着や酸素による材料劣化を予測するため、分光測定等から生成の有無と生成条件を明らかにする。四重極質量分析計による残留ガス分析から、イオン源内部の二酸化炭素の解離状態の推定の助けとする。

2) システム

国際宇宙ステーション等の有人宇宙構造物の諸元から、余剰電力や二酸化炭素の投棄量を算出し、系統的に最適なイオンエンジンの諸元を明らかにする。有人宇宙構造物ならではの人間による故障パーツ交換による推進システムの寿命延長効果も考慮する。

3) 性能評価・最適化

1 で得られたイオン源データと 2 で得られたイオンエンジンの諸元から、イオンビーム解析コードを効率良く用いて実証用イオンエンジンを設計製作し、推力測定により性能を確認する。独自技術である電極形状の最適化により推進剤の漏れを最小化し更に性能を上げる。最適化による効果を有人宇宙構造物全体のコスト削減費の形で定量化する。

4. 研究成果

イオン源、システム、性能評価・最適化の項目に分けて研究を行った。

イオン源に関しては、小型マイクロ波放電式イオン源の製作を行い、初年度に二酸化炭素を推進剤としたプラズマ着火とイオンビームの引き出しに成功した。また、簡易的な性能評価のためにターゲット振り子式の推力測定装置を製作した。これらの実験装置により、イオン生成コスト、推進剤利用効率等の推進性能の取得が可能となった。

実験では二酸化炭素を推進剤とした場合と有人宇宙活動に必要な C, H, O から構成される物質である水、アダマンタンを推進剤として用いた場合との比較をした。イオン加速グリッドに対してはイオンビーム加工を施すことによって中性粒子の閉じ込めを最大限に上げるグリッドを製作して実験に使用した。

一連の実験結果から、二酸化炭素を用いた場合のイオンエンジンの推進剤利用効率はアダマンタンよりも一桁低く、水よりは高かった(図 2)。これは放電室内部の推進剤の閉じ込めが、分子量が高いものほどよいからである。ただし、二酸化炭素のプラズマ生成能力は想定よりも悪く、イオン生成コストは水よりも高い結果となった。

実験に並行してイオンエンジンの性能を推定するために二酸化炭素の反応式を組み込んだグローバルモデルを作成した。キセノンやクリプトン等の貴ガスやヨウ素や水に対するイオンエンジンのグローバルモデルは存在しているが、二酸化炭素をイオンエンジンに適用したモデルは初である。このモデルを用いることで、引き出しイオンの平均分子量など推進性能の把握が可能となる。また、逆電位アナライザによるイオン源内部のプラズマ電位計測にも着手することで、イオン源内部の診断手段ノウハウを新たに構築した。逆電位アナライザによる放電室内部プラズマ電位の計測からは、二酸化炭素プラズマの場合も分子量に関しては壁電位の関係で記述できることが判明した。次に、E×B プロープによるイオンビーム計測を実施し、二酸化炭素を用いた場合のイオン種の平均分子量を取得した(図 3)。これによりイオン源の性能から直ちにイオンエンジンの推進性能を予測可能となった。一方で、ビーム電流やイオンの平均分子量に関するグローバルモデルの予測は実測値と定量的な一致を得るまでに至っておらず改良の必要がある。なお、数値解析からも二酸化炭素のイオン生成コストは代表的な代替推進剤の水と比較して高く、性能向上のボトルネックとなっていることが明らかとなった。

システムとして必要なイオンエンジンの諸元の具体化も行った。人間 1 人当たりの呼気に含まれる二酸化炭素を推進剤とする場合、10 kW 級で比推力 2000 s 程度のイオンエンジ

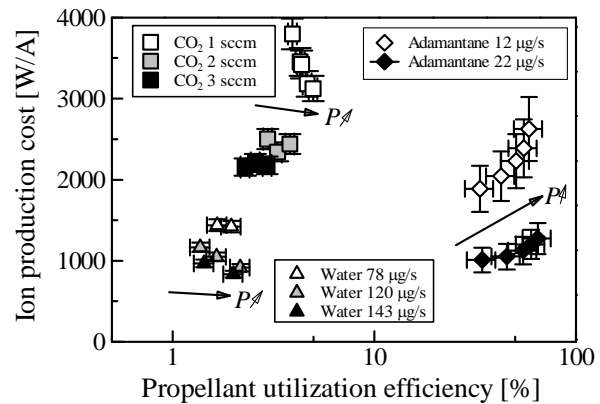


図 2 二酸化炭素を用いた際のイオン生成コストと推進剤利用効率の関係。水とアダマンタンとの比較を実施した。

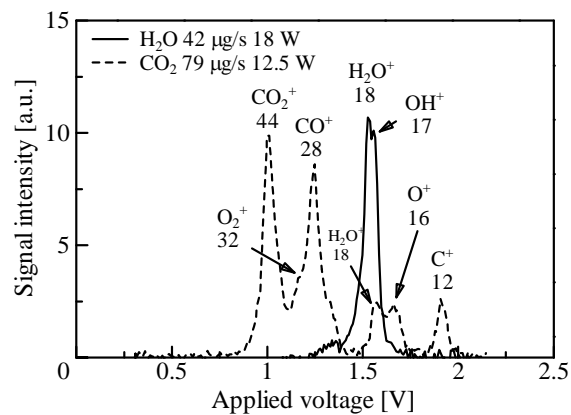


図 3 E×B プロープによる m/z 分布。二酸化炭素と水を推進剤とした際に引き出されるイオンの分布を示す。

ンが成立すれば国際宇宙ステーションクラスの宇宙構造物の高度補償が可能であるとの結果を得ている。

想定外の発見として、アダマンタンなどの炭化水素系推進剤使用によって発生した放電室やグリッドへの堆積物が二酸化炭素を推進剤として用いることで除去できることがある。アダマンタンは分子式が $C_{10}H_{16}$ で表される炭化水素である。分子量が大きく放電電圧も低いために推進剤利用効率が高く、イオン生成コストが低い理想的な推進剤である。一方で、炭化水素系物質であるためにプラズマ生成の際の解離等によって炭化水素系物質特有の残渣を生成し、長時間作動は難しい。

残渣が堆積した状態で二酸化炭素を用いて作動させることで残渣が消失することを見出し、残渣が堆積しない作動条件を明らかにした(図4)。これによりアダマンタンの高い性能と二酸化炭素を有用に組み合わせることができる。したがって、二酸化炭素単独で性能が十分に出ない場合でもアダマンタン等の高性能な炭化水素系物質との併用により性能向上が期待できる。

なお、杵淵らによる研究から、二酸化炭素はドライアイスとして保存することができ、三重点を使用することで、低圧の貯蔵(0.52 MPa)が可能となることが示された。三重点が維持されている間、タンク内の圧力と温度は一定に保たれるため、圧力調整器やその他の装置が不要となり、推進剤供給システムに関連する費用や複雑さが簡素化されるメリットがある。

これら一連の成果ならびに二酸化炭素利用の状況から、有人宇宙構造物の制御に二酸化炭素を用いるイオンエンジンは技術的に適合可能であり、その実現のための課題抽出や要素技術の獲得に十分に成功した。

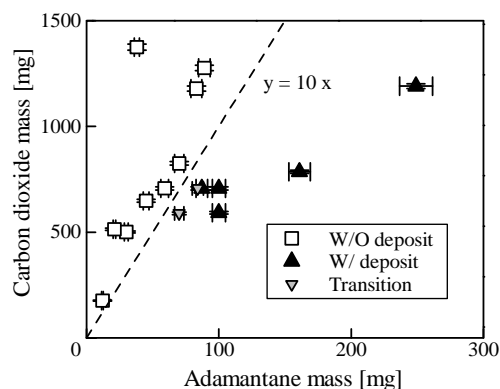


図4 二酸化炭素プラズマによるアダマンタン堆積物の除去条件(二酸化炭素との交互作用により堆積物の無い作動を実現できる)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 中野正勝	4. 巻 16
2. 論文標題 逆電位アナライザを用いた小型イオンエンジンの放電室プラズマ測定	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 東京都立産業技術高等専門学校 研究紀要	6. 最初と最後の頁 43-50
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Masakatsu Nakano and Akira Kakami	4. 巻 29
2. 論文標題 Global Model for Ion Thrusters Using Carbon Dioxide as Propellant	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma Application and Hybrid Functionally Materials	6. 最初と最後の頁 27-28
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masakatsu Nakano and Akira Kakami	4. 巻 13
2. 論文標題 Global Model for Ion Thrusters Using Carbon Dioxide as Propellant	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontier of Applied Plasma Technology	6. 最初と最後の頁 75-76
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 中野正勝, 山本直嗣, 大川恭志, 船木一幸
2. 発表標題 イオンエンジンの代替推進剤となる昇華性物質の探索
3. 学会等名 2021年度 宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中野正勝, 各務聡
2. 発表標題 二酸化炭素を推進剤とするイオンエンジンのグローバルモデル
3. 学会等名 宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masakatsu NAKANO and Shunsuke ENDO
2. 発表標題 Measurements of Plasma Potential Distributions in Small Ion Engine Discharge Chamber Using Retarding Potential Analyzer
3. 学会等名 IAPS Meeting 2023 / International Workshop '23 in Kobe (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中野 正勝, 白木 僚
2. 発表標題 代替推進剤としての昇華性推進剤の評価
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	各務 聡	東京都立大学・システムデザイン研究科・教授	
	(Kakami Akira)		
	(80415653)	(22604)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------