

グリーンプロペラントを用いた 1-3kW級直流アークジェットスラスタの開発研究

○田原 弘一 (大阪工大・工), 松本 和真 (大阪工大・工・学),
杉村 勇也 (大阪工大・工・学), 藤田 雄也 (大阪工大・工・院), 長田 泰一 (JAXA研究開発本部),
増田 井出夫 (JAXA研究開発本部), 野川 雄一郎(アーストラックコーポレーション)

1. 緒言

電気推進機であるアークジェット推進機は低重力空間で利用され, 主に人工衛星の軌道制御・姿勢制御を行う二次推進系, 軌道間輸送や惑星間輸送のための推進装置として利用されてきた¹. このとき使用された推進剤は一液, 二液推進系と推進剤を共有できるヒドラジン(N_2H_4)であるが, 発がん性物質であるため, 安全管理が難しくコストや時間の面で問題があった. (Fig.1-1)そのためヒドラジンの代替として低毒性推進剤を用いた化学推進システムの研究が世界で活発に進められている. 現在注目されているのがHAN系推進剤と呼ばれる推進剤である. Hydroxyl Ammonium Nitrate (HAN: NH_3OHNO_3)系推進剤はヒドラジンを超える燃焼性能を持ち, 低毒性であることから取り扱いも非常に安全であるため(Fig.1-2), 海外の研究機関などで注目され, 次世代衛星推進系の中心となっていくと考えられる. HAN系推進剤の特徴として密度がヒドラジン $1.008g/cm^3$ であるのに対しHAN系推進剤では $1.435g/cm^3$ と高く, 比推力もヒドラジンが $210s\sim 220s$ であるのに対しHAN系推進剤は $230s$ 以上である. すなわち比推力は 1.6 倍にもなる. さらに, 密度が高いことで推進剤のタンク容積も小型化することができる利点が生まれる. 凝固点もヒドラジンが $2^\circ C$ であるのに対しHAN系推進剤は $-35^\circ C$ と低いため液体として利用するためのヒーター電力も削減することができる. しかし, HAN系推進剤はその急激な燃焼性能から安定した燃焼が困難であるとされている.

また推進剤として水も注目されている. 水を推進剤として使用する意義は, HAN系推進剤のように化学推進機との燃料共有を目的とするものではなく, 宇宙ステーションにある水の再生利用システムを活用して, 排水を推進剤として再利用するというコスト削減の目的のためである. この水の再生利用システムであるが, 国際宇宙ステーション(International Space Station : ISS)には環境制御・生命維持システム(Environmental Control and Life Support System : ECLSS)の一部にある水再生システム(Water Recovery System : WRS)というクルーの生活廃水を再生し飲用水に精製することができる装置が搭載されている. (Fig.1-3)現在のISSでは従来からの姿勢制御用スラスタとして化学推進システムを採用しているが, 燃費の低さもあり常に補給が必要である. そのため, 姿勢制御にアークジェットスラスタを搭載した上で, WRSによって精製された再生水を推進剤として使用することが可能であり, 将来的には月面基地でレゴリスから水を抽出した際にも水を推進剤とする推進システムが使用できるなどその意義は大きいといえる.

本研究では独立行政法人宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace eXploration Agency : JAXA), アーストラックコーポレーションとの共同研究として, 低電力(1-3kW)直流アークジェットスラスタを用いてHAN系推進剤であるSHP163及び水の適合性の評価を目的とする.



Fig.1-1 ヒドラジン取り扱い時



Fig.1-2 HAN系推進剤取り扱い時

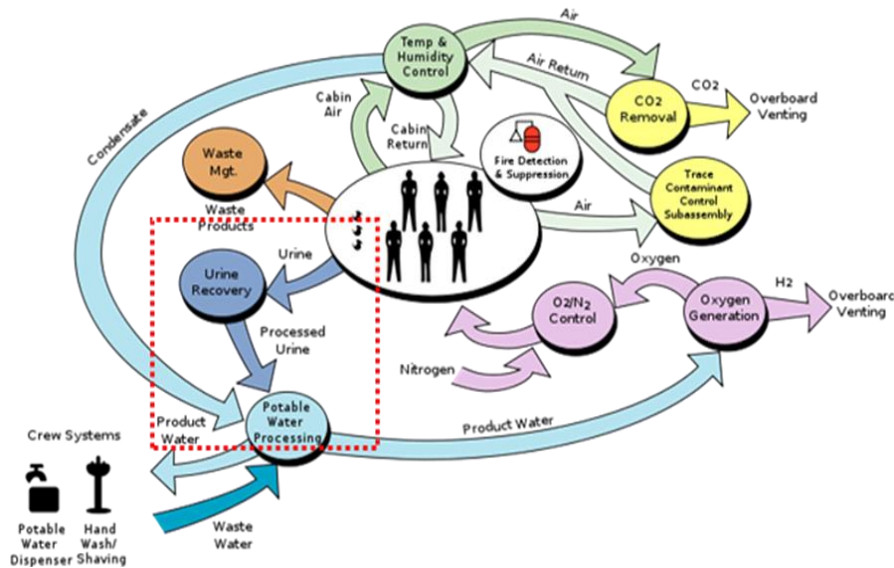


Fig.1-3 環境制御・生命維持システムと水再生システム

2. 新型低電力直流アークジェットスラスタ

低電力(1-3kW)直流アークジェットスラスタの断面図をFig.2-1, 本体写真をFig.2-2に示す. 腐食性のあるHAN系推進剤²を使用するため防腐蚀性に優れているSUS304をアノード・カソードホルダーに, ボディーには耐熱性の高い絶縁材であるポリカーボネートを使用した. さらに小型化にあたりコンストリクタ径を1.0mm, コンストリクタ長さは1.5mm, ノズル出口は直径21.5mmと設定した.¹

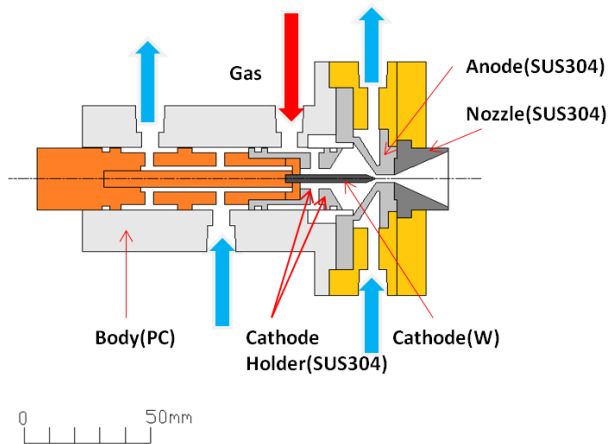


Fig.2-1 低電力直流アークジェットスラスタ断面図



Fig.2-2 スラスタ本体写真

3. 実験装置

本研究で用いた真空チャンバは内径1.2m, 長さ2mの円筒形で材質はステンレスである. 実験は真空チャンバ内で行う. 実験開始時の真空チャンバ内の圧力はロータリーポンプ(株式会社大阪真空機器製作所, 排気速度600m³/h)とメカニカルブースタ(大阪真空機器製作所, 排気速度6000m³/h)を併用して約1Pa程度まで下げられる.

スラスタスタンドには振り子式を採用し, 今回から真空中でも較正が行えるようにモータ内蔵式でチャンバの外部から遠隔操作可能なものに変更した.

さらに, 低電力化に伴い電源装置を高周波電源から1-3kW級のPWM電源に変更した. 電流値のみ可変行え, 電流値・電圧値メータが備え付けてあるため目視による数値の読み取りが可能である.

推進剤供給に関しては, 窒素・二酸化炭素・水素のガス系はマスフロコントローラにより流量調節を行ってスラスタ内部に投入される. 水はマイクロチューブポンプを介して流量調節を行う. マイクロチューブポンプは最大流量が180ml/hである.



Fig.3-1 真空チャンバ



Fig.3-2 真空排気ポンプ



Fig.3-3 PWM電源



Fig.3-4 マイクロチューブポンプ

4. 実験条件および結果

4.1 大電力アークジェットとの性能比較

まず、従来の大電力(5-10kW)直流アークジェットスラスタ^{3, 4, 5}と低電力直流アークジェットスラスタの性能比較を行った。推進剤には安定噴射が比較的可能である窒素のみを7.0SLM用いて実験を行った。推進力は低電力型では144.11mNであり、大電力型は205.6mN、比推力は低電力型では201.52s、大電力型は392.6s、推進効率は低電力型では11.96%、大電力型は11.4%となった。現状では大電力直流アークジェットスラスタの場合が、推進力・比推力ともに優れているが推進効率は低電力直流アークジェットスラスタの方が優れている結果となった。低電力型の方が推進効率において上昇した点については、ノズル開口比の上昇が原因の一つであると予想される。

4.2 SHP163分解ガスを用いた低電力アークジェットスラスタの性能特性

次にSHP163分解ガスを使用して実験を行った。この推進剤の成分および流量はSHP163の燃焼生成成分に対するモル分率により、 N_2 は1.6SLM、 CO_2 は1.6SLM、 H_2O は180ml/hと設定した⁶。比較対象にヒドラジン模擬ガス(N_2+2H_2 N_2 : 2.3SLM, H_2 : 4.6SLM)と窒素ガスのみを7.0SLM使用して其々の推進剤に対してのスラスタの性能特性を調べた。Fig.4-1にはSHP163分解ガス・ヒドラジン模擬ガス・窒素のみ其々の噴射の様子を示す。またSHP163推進剤と比較対象でのスラスタの性能パラメータはTable4-1.に示す。



Fig.4-1 SHP163分解ガス・ヒドラジン模擬ガス・窒素のみ其々の噴射

Table3-1. SHP163推進剤と比較対象でのスラストの性能パラメータ

	SHP163分解ガス	ヒドラジン模擬ガス	窒素
放電電流 A	17	17	17
放電電圧 V	80	78	70
投入電力 kW	1.36	1.33	1.19
推力 mN	289.51	210.01	263.90
純推力 mN	182.62	116.64	144.11
比推力 s	156.41	217.10	201.52
推進効率 %	10.30	9.364	11.96

4.3 水を用いた低電力アークジェットスラストの性能特性

最後に水を使用しての実験を行った。液体の水単体では着火が困難であったため、窒素を混ぜて安定噴射を行うことにした。窒素7.0SLMと水90ml/h、比較対象として窒素のみ7.0SLMを使用して実験を行って推進性能の比較を行った⁷。Fig.4-2には窒素のみ・窒素+水其々の噴射の様子を示す。また水と比較対象でのスラストの性能パラメータはTable4-2.に示す。

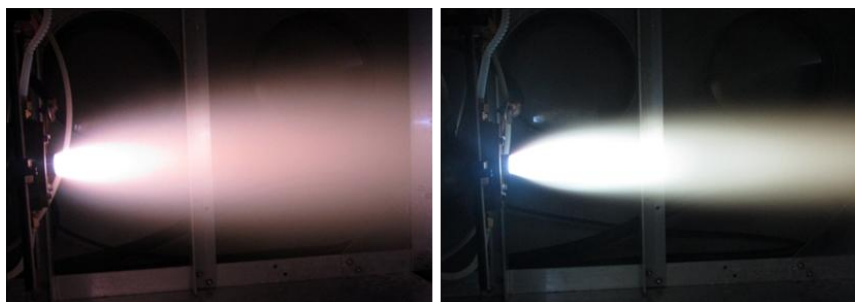


Fig.4-1 窒素のみ・窒素+水其々の噴射

Table4-2. 水と比較対象でのスラストの性能パラメータ

	窒素(7.0SLM)	窒素(7.0SLM)+水(90ml/h)
放電電流 A	21	21
放電電圧 V	60	80
投入電力 kW	1.26	1.68
推力 mN	275.6	411.2
純推力 mN	180.6	316.2
比推力 s	126.2	221.0
推進効率 %	8.874	7.517

4. 考察

今回SHP163分解ガスでの噴射は確認できたが、不安定作動が目立った。そのため比推力・推進効率の性能パラメータが落ち込んでしまい、また電離に必要な投入電力が上昇したのだと思われる。原因としては、水を常温で投入しているため陰極の加熱部を冷却してしまった点、炭素が含まれているためカソードに煤が付着した点、酸素によってカソードが酸化タングステンに組成変形が発生した可能性がある点が予想される。(Fig.4-1)

水に関しては窒素を混合しての噴射は確認されたものの、不安定作動が目立った。HAN系推進剤でも述べたことが挙げられる。また、噴射の際には窒素のみとは違いプレュームが青白く変化した。この変化に関しては水投入による温度降下が一つの要因であると推測する。さらに水の供給を止め、窒

素のみで噴射した時プルームの色は上流部では赤色，下流部では青色となっていた．おそらく水がまだ残っており噴射時に影響を及ぼしたものと考えられる．(Fig.4-2)またカソード損耗についてはHAN系推進剤とは異なる変化が見られた．先端は銀鍍金を施したようなものであり，根元部分では青緑色の粉末が付着していた．これに関しては今後カソード物性値を調べる必要があると思われる．

HAN系推進剤の今後の課題としてはSHP163そのものを用いた低電力直流アークジェットスラスタでの性能比較を行っていく必要がある．そのためにはガスジェネレータの開発が不可欠である．しかしながら，過去に製作したガスジェネレータでは触媒を介した化学反応によるガス化を行っていたのだが，触媒層の耐熱が困難であった点などが問題となった．そこで，耐熱性の触媒層の開発と化学反応によるガス化ではなくグロープラグでの直接加熱によってガス化を図る2パターンを考案した．

水に関しても今後ガス化による投入が不可欠であると考ええる．水ではセラミックグロープラグでなくメタルグロープラグを採用する予定である．なぜなら，セラミックグロープラグであれば先端が窒化ケイ素であるがゆえに水と反応してしまう恐れがあるためである．ガス化での水投入により水単体での噴射およびさらなる推進性能向上が期待される．

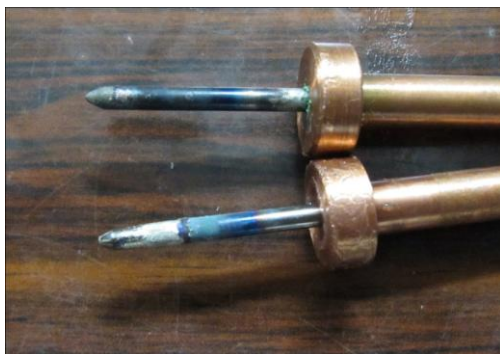


Fig.4-1 SHP163推進剤と水のカソード損耗

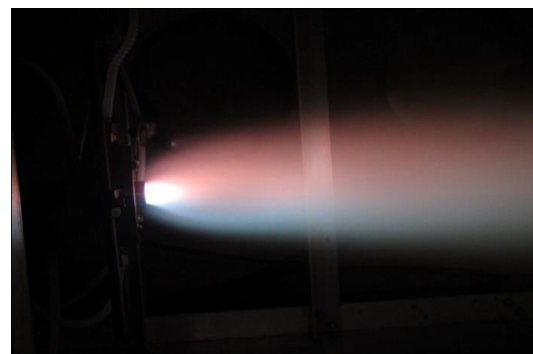


Fig.4-2 水投入中止後の窒素のみでの噴射

5. まとめ

5.1 低電力直流アークジェットスラスタ

本研究に限定して，低電力型は，大電力型よりも推力・比推力に関しては低い．しかしながら，推進効率に関しては低電力型の方が優れていることがわかった．推進効率が上昇した原因の一つは開口比を大電力型よりも上昇させたことであると予想する．低電力型の電極形状の最適化作，動条件の設定が今後重要である．

5.2 SHP163分解ガス適合性

SHP163分解ガスでは，比較対象である推進剤に比べ不安定作動が目立った．そのため推進パラメータが比較対象よりも落ち込んだ結果となった．原因としては水を常温液体の状態での投入したため，カソード部を冷却してしまった点，カソード部に煤が付いてしまった点，酸化タングステンに組成が変形してしまい融点が下がってしまった可能性がある点ではないかと予想する．

今後の課題としてはSHP163そのものをガス化して供給する必要があると考えている．これにより今回のように水を常温液体として投入するのではなく，ホットガスとしてスラスタ内に投入が可能であると考ええる．対策案としては，触媒を用いて化学反応熱によるガス化方法とセラミックグロープラグ⁷を用いて直接加熱によるガス化方法と2パターンを考案している．

5.3 水適合性

水に関しても，不安定作動が目立った．原因としてはSHP163同様，常温液体での水の投入であると予想する．噴射に関してはプルームの色が青白くなり，水の投入を中止した後に窒素のみで噴射を行ったがプルームが混合した挙動を示した．原因についてはカソードの温度が低下したことによりプルームが変化し，スラスタの中に水が溜まったためプルーム下流部では青白い色であったのだが上流部では窒素での赤いプルームになり混合したプルームがみられたと予想する．

対策案としては水のガス化が必須であると考えており，SHP163で使用予定であるセラミック製のも

のではなく金属製のグロープラグ⁸を用いて水単体と陰極にポラスカーボン⁹を用いての水単体での噴射を試みる。

参考文献

- 1) 栗本恭一, 荒川義博. 「電気推進ロケット入門」2003年5月, 東京大学出版本.
- 2) 三宅浩史, 藤田雄也, 田中宣行, 田原弘一, 長田泰一, 増田井出夫 「低毒性推薬 HAN を用いた直流アークジェットスラスタの推進性能」平成23年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2011-000, 2012年1月, JAXA 宇宙科学研究所(神奈川県相模原市).
- 3) Katsuya Fujita, Nobuyuki Tanaka, Hiroshi Miyake, Hirokazu Tahara, Taiichi Nagata and Ideo Masuda 「Performance Characteristics of DC Arcjet Thrusters Using Low Toxicity Propellant “HAN”」Asian Joint Conference on Propulsion and Power (AJSPP) 2012, AJCPP2012-004, 2012年3月, Grand New World Hotel (Xi'an, China).
- 4) 三宅浩史, 田中宣行, 藤田雄也, 岡町悠介, 田原弘一, 長田泰一, 増田井出夫 「HAN 系推進剤を用いた直流アークジェットスラスタの推進性能」日本機械学会関西支部 関西学生会 平成23年度学生員卒業研究発表講演会, 1502, 2012年3月, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市).
- 5) 松本和真, 杉村勇也, 藤田雄也, 田原弘一 「低毒性推進剤を用いた直流アークジェットスラスタの性能特性」電気学会 プラズマ研究会, PST-12-026, 2012年5月, 豊橋技術科学大学 ベンチャービジネスラボラトリー(愛知県豊橋市).
- 6) 藤田雄也, 松本和真, 杉村勇也, 田原弘一, 長田泰一, 増田井出夫 「低毒性推薬分解ガスを用いた低電力直流アークジェットスラスタの性能評価」第56回宇宙科学技術連合講演会, 3J02, 2012年11月, 別府国際コンベンションセンター(ビーコンプラザ)(大分県別府市).
- 7) セラミックグロープラグ http://www.ceramic.or.jp/museum/contents/pdf/2007_9_02.pdf 2012年12月アクセス
- 8) 日本特殊陶業 <http://www.ngkntk.co.jp/product/glowplugs/cera/nhtc.html> 2012年12月アクセス
- 9) (株)東海カーボン http://www.tokaicarbon.co.jp/products/fine_carbon/special/porous.html 2012年12月アクセス