

STEP-2012-032

ISSクルー再生水を推進剤としたDCアークジェットスラスタの開発

○ 野川雄一郎(アーストラック・コーポレーション), 田原弘一(大阪工業大学),
土田哲(アーストラック・コーポレーション)

CREW RECYCLING WATER DC ARCJET THRUSTER PROPULSION SYSTEM DEVELOPMENT

Yuichiro Nogawa (Earth-Track Corporation),
Hirokazu Tahara¹, and Akira Tsuchida²

Key Words: Electric propulsion, Arcjet, ISS, Waste Water

Abstract

Since 2011, Earth-Track Corporation and Osaka Institute of Technology have been studying for new advanced type of electric propulsion system what we call WEPS (Water Electric Propulsion System) by using “waste water” produced in a spacecraft because this new “reusable, ecological, green” propulsion system to resolve difficulty in perspective of re-fuel or cost saving is significantly important for the future manned space mission.

Our basic concept for this new advanced electric propulsion system is that modification with existing electric propulsion (DC Arc jet) system by changing its fuel. Regarding “water” as a propellant, we are planning to use the reclaimed waste water from Water Recovery System (WRS) in ISS Environmental Control and Life Support System (ECLSS) currently on orbit.

The first step of this study is to make a new DC Arc jet thruster with all related systems. Last year we found that our exiting mass flow controller could not produce enough water flow to ignite firing continuously, so we need to make thermal gas generator as a new flow product system to produce water gas flow.

Per the latest our roadmap for WEPS, we have a plan of developing a test payload and a small satellite using WEPS. These can be transferred to JEF (ISS/JEM Exposed Facility) from exposed pallet from Visiting Vehicle (HTV or Space-X DRAGON is possible candidate) by using ISS robotic arm. We also have been studying an orbital analysis for transition trajectory using a small satellite and its water tank volume estimation to go to the Moon.

1. 序論

アンモニア (NH_3) の代わりに”水”に変更する処置となる。

1.1 本研究の経緯

2011 年度よりアーストラック・コーポレーションと大阪工業大学は WEPS(Water Electric Propulsion System)という水を推進剤とする新たな電気推進システム開発に関する共同研究を継続中である。

水を推進剤とするメリットとしては、従来の毒性に強いヒドラジンなどに比べ格段に環境に配慮されたシステムになり得るという点、及び水を循環させた再利用システムの一環として機能させられるため、コスト削減に寄与できる点が挙げられる。さらに構造の単純化＝システム全体の軽量化を追求する上では水を電気分解して酸素と水素を生成し各々を推進剤推進システム、つまり化学推進よりは単純に水をそのまま使用した電気推進を採用したほうが利点が多い。

そして、電気推進スラスタのうち、DC アークジェットスラスタを採用し、軽量化・低電力化を図る。構造的には既存の DC アークジェットスラスタをベースにし推進剤を従来のヒドラジン (N_2H_4) や

1.2 現時点 (2012 年) での最新ロードマップ

現在我々は WEPS デザイン検討及び試験噴射を継続中である。現時点での共同研究進捗状況を考慮し、最新ロードマップを検討した (表 1)。

研究開始当初の目標である、小型衛星を月に到達させるという構想を最終目標として引き続き抱いているが、その前に宇宙空間での試験噴射を実施し重要なデータを得ることで最終目標に向けての衛星デザイン等へのフィードバックが可能となると考えている。

したがって計画は大きく 2 段階の設定とした。燃料タンクを含む WEPS 搭載モジュールとしての PM (Prop Module) を PM1/2 の 2 機製作し、WEPS 以外のサブシステム・ペイロード等を搭載した SM1 (Spacecraft Module) を 1 機製作する予定である。PM1 は FY2016 (HTV7 あるいは Space X Dragon が候補) に打ち上げてアークジェットスラスタ噴射実験 (@ ISS/JEM 船外実験プラットフォーム) を実施し、そ

	FY2011	FY2012	FY2013	FY2014	FY2015	FY2016	FY2017~
Milestone	Kick Off			PM1 Safety Review	PM2/SM1 Safety Review	PM1 Launch (Vehicle)	PM2/SM1 Launch (Space)
	Development/Design Phase						
Prop Module Development/ Test (continuous) HMT (parallel with Vector) -OoCv#2#2 PM2 (combined with SM at JEM)			PM1 M	PM2 M			
			1931 M				
Spacecraft Module Development -Objective -50kg class satellite bus				PM1 M			
				1931 M			
Orbit Injection to Lunar (transfer) Orbit Objective: Mission Analysis for spiral orbit with WPP(continuous firing)							
Spinnout Attraction Objective: selection for cooperative company							
Scout&/Product Development Objective: coordination with ISS WPP/JEM ALJCMRMG							
Verification On Orbit -Objective: Angel Firing completion on ISS or in Space (after departure from ISS)						PM1	PM2

	FY2011	FY2012	FY2013	FY2014	FY2015	FY2016	FY2017-
Milestone	Kick Off			PM1 Safety Review	PM2/SM1 Safety Review	PM1 Launch (on ISS)	PM2/SM1 Launch
Prop Module Development/Test (Argonne+R2 PM2) (Argonne with WPI/NIST) -Objective: R2 PM2 (combined with SM at JEM)	Development/Design Phase						
Spacecraft Module Development -Objective: ~50kg class satellite bus			1501.1.01 1501.1.01	1501.1.01			Departure from ISS
Orbit Injection to Lunar (transfer) Orbit Objective: Mission analysis for spiral orbit with WFFPS (continuous firing)				1501.1.01			
Sponsor Attraction -Objective: selection for cooperative company							
Scenario/Procedure Development -Objective: coordination with ISS WRS/JEM ALUM/RMG							
Verification On Orbit -Objective: Apogee Firing completion on ISS or in Space (after departure from ISS)						PM1	PM2/SM1

JAXA の無人宇宙船 HTV あるいは Space X 社の宇宙船 Dragon が有力である。これらは曝露ペイロード搭載機能を有している。HTV の例でいうと、曝露部パレットに衛星モジュール（小型衛星本体）をインストールした状態で HTV 補給キャリア非与圧部に曝露パレットを搭載する一方で HTV 補給キャリア与圧部に推進モジュールを保管する。HTV が ISS に結合した後、衛星モジュール含む曝露パレットはロボットアームで ISS 日本実験棟「きぼう」（Japanese Experiment Module : JEM）のうち船外実験プラットフォームに移設される。一方 ISS の与圧区画内に移動された推進モジュールには燃料タンクが搭載されており、ISS 内にて再生処理をした水を推進剤としてタンクに充填した後に JEM 内に装備されている曝露ペイロード用のエアロックから船外に搬出される（図.1 参照）。

HTV X Launch (H2B rocket)

Exposed Pallet w/ Spacecraft Module

After HTV is berthed, Exposed Pallet w/ Spacecraft Module is relocated

Prop Module with Water Tank (Empty)

Exposed Pallet (Type I) : Spacecraft Module is installed

Prop Module filled with Water by ISS WRS is stowed in Airlock

JAXA / OIT

2.1 ISS からの再生水供給シナリオ

[illegible]

2.2 DC アークジェット設計デザイン改良

大阪工業大学で開発された新型 DC アークジェットスラスタの断面図を図. 4、新型 DC アークジェットスラスタの写真を図. 5 に示す。新型 DC アークジェットは、ノズル形状でステンレス鋼 SUS304(18% Cr + 8% Ni) 陽極、純タングステン製陰極、陽極ノズル部は炭化ケイ素両電極を 2012 年度から採用したが水冷式アークジェットでは炭化ケイ素のような非金属部分の放熱が困難となりノズル部が高温で溶解する事象が発生したこと、及び低電圧モードでの噴射が見られたため SUS304 に変更した。陽極、純タングステン製陰極、陽極ノズル部の絶縁材はテフロン、ボロンナイトライドを使用している。陽極及びノズル部は従来の銅から変更した。アークジェットの主放電電源も当初使用していた直流定電流電源装置からより安定した動作を可能にする PWM 方式の電源装置を用いた。

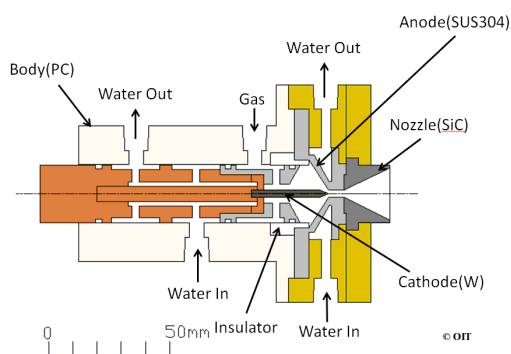


図. 4: 新型 DC アークジェット断面図
(最新の実験ではノズル部も SUS304 を使用)

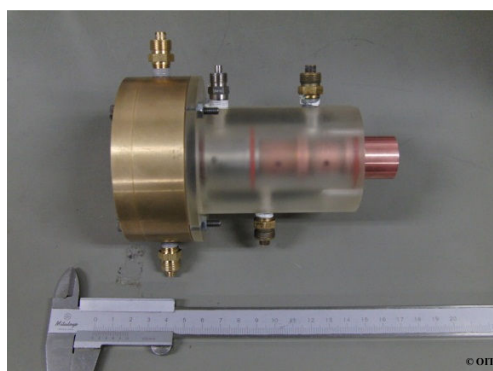


図. 5: 新型 DC アークジェット 写真

3. 最新噴射実験結果

3.1 実験設備

大阪工業大学では推進システムの実験設備としては国内屈指の規模を有しており、数多くの実験用

真空チャンバを保有している。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。真空チャンバの写真は図.6 参照。チャンバ内の圧力は約 1Pa 程度まで下げられる。推進剤については、水はマイクロチューブポンプ、ガスはマスフローコントローラーを用いて供給される仕組みになっている。実験設備構成図については図.7 参照。



図. 6: 真空チャンバ設備

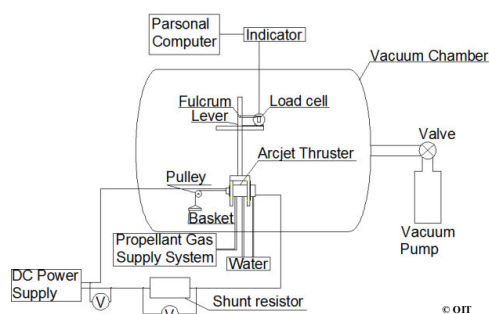


図. 7: 実験設備構成図

3.2 噴射実験 (1 回目)

噴射実験を実施するに当たっては 2011 年の研究開始当初に判明したマイクロチューブポンプによる水の流量が十分でないという件を改善する必要があるものの、2012 年度上期ではスラスタの開発に時間を要したため、依然としてその問題の解消策は検討中である。最新の噴射実験ではまず新型スラスタとしての性能確認のため、2011 年と同様の手法にてデータを取得した。つまり、水単体を推進剤とするのではなく安定した噴射が可能な N₂ ガスを併用してデータを取得した。

推進剤の流量の設定環境を表.1 に示す。N₂ ガスのみで流量 7.0SLM から始めて、N₂ ガスのみで流量 3.5 SLM に減少させた後、その 3.5 SLM 状態で水を流量 180ml/h で追加させた。それから N₂ ガスの供給量を再び 7.0SLM に増加させた。

今回の試験では水は純水と水道水両方でデータ取得したが、今後は純水のみとする方向のため掲載データは純粋使用時のみとする。純水の場合、流量 180ml/h の水のモル分率は、N₂ ガス 7.0 SLM の場合 0.053% (H₂O) / 99.947 % (N₂)、N₂ ガス 3.5 SLM の場合 0.107% (H₂O) / 99.894 % (N₂)となる。

表.1 推進剤流量条件

	H2O (Liquid)	N2(Gas)
流量	180[ml/h]	7.0/3.5 [SLM]

図. 8 にて取得した実験データのトレンドグラフを示す。また、表.2 にて実験結果サマリを示す。

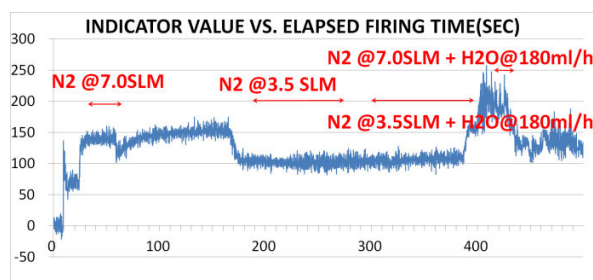


図.8: 噴射トレンドグラフ(H₂O + N₂ ガス)

表.2 実験結果サマリ

*全ての値について以下を意味する。 上段：N ₂ ガス 7.0SLM 下段：N ₂ ガス 7.0SLM	N2(Gas) +H2O(Liquid) H2O 0.023% @16.5 H2O 0.053% @7.0	N2(Gas)
推力 [mN]	133.0 105.4	93.0 101.7
入力電力 [kW]	0.9 0.8	0.8 0.7
比推力 [sec]	186.1 190.8	130.2 183.4
推進効率 [%]	13.5 8.0	7.4 8.4

全般的には典型的な DC アークジェットに比べると性能は落ちるものの（例えば比推力 Isp という典型的な DC アークジェットの Isp は通常～ 500 秒のオーダー）、本スラスタは既存スラスタに対して低電力化を図っており、一概には比較できない。

3.3 噴射実験（2 回目）

2 回目の実験では 1 回目と比較しノズルの設計変更と 1 回目の実験以降に故障した PWM 電源を交換

して噴射実験を実施した。推進剤の流量の設定環境を表.3 に示す。N₂ ガスのみで流量 7.0SLM から始めて、水を追加して流量を 30～90ml/h まで編かっせさせた。

今回の試験でも 1 回目同様純水のみ使用した。純水の場合、平均流量 60ml/h の水のモル分率は、N₂ ガス 7.0 SLM の場合 0.018% (H₂O) / 99.982 % (N₂)、となる。

表.3 推進剤流量条件

	H2O (Liquid)	N2(Gas)
流量	30-90[ml/h]	7.0 [SLM]

図. 9 にて取得した実験データのトレンドグラフを示す。また、表.4 にて実験結果サマリを示す。

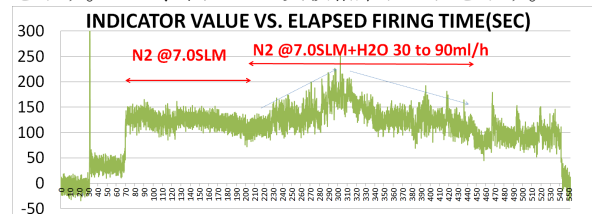


図.9: 噴射トレンドグラフ(H₂O + N₂ ガス)

表.4 実験結果サマリ

N2 ガス 7.0SLM でのみ実施	N2(Gas) +H2O(Liquid) H2O 0.018% @7.0 (平均 60ml/h)	N2(Gas)
推力 [mN]	155.5	124.8
入力電力 [kW]	1.68	1.26
比推力 [sec]	217.6	203.4
推進効率 [%]	9.9	11.5

1 回目と同様に、全般的には典型的な DC アークジェットに比べると性能は落ちるものが同レベルの推進性能であることを確認できた。それと同時に水の流量を変化させると推力もそれに応じて変化することも確認できた。H₂O を添加しても高周波放電により点火、及び十分な定常安定作動が可能と推測できる。今後はより多くのデータ取得を試み、その相関を確認していきたい。今後新規製作する予定のガスジェネレータにより H₂O 流量をより多くする条件を設定すれば水のみを推進剤としても一定のスラスタ性能を発揮できることが期待される。



図. 9: DC アークジェット噴射
(N_2 @7.0 SLM+ H_2O)

4. 今後の課題

WEPS に関する共同研究を進めていくうえでの現時点で識別している短期的・長期的の両側面での課題を以下に示す。

1. WEPS として水質の要求はどうか？
実験で使用している蒸留水と ISS 軌道上にある再生処理水の成分の差異によりスラスタ特性に差が見られるか確認する予定である。
2. ISS クルー再生水は上記水質要求を満たすのか？
ISS で再生処理される水にも様々な種類があり、中にはイオン化された水もある。どのタイプの再生水を使用するのが最適なのか検証する必要がある。
3. H_2O のみを推進剤とした場合どのように推進力を得るか？
今後ガスジェネレータを使用した高速流量の水（気体）によりスラスタ性能を向上させる予定である。
4. ISS から月へ向かう遷移軌道をどのように最適化するか？
詳細な軌道解析が必要であり、調査中である。
5. HTV または Dragon 宇宙船にて曝露ペイロード搭載計画を元に具体的な打ち上げタイミングを確定する。

1 から 3 については短期間での課題、4 から 5 については長期的な課題と言える。

5. まとめ

2011 年以降我々アーストラック・コーポレーションと大阪工業大学は水を推進剤とする新たな電気

推進システム“WEPS”について共同研究を進めている。

今までに実用に供したことがない水を燃料にする場合、今まで以上に低電力/連続噴射による腐食耐性を要求されるため、2011 年に使用したスラスタと異なるデザインのものを設計開発し、新たに実験を開始した。

噴射実験を実施するに当たっては 2011 年の研究開始当初に判明したマイクロチューブポンプによる水の流量が十分でないという件を改善する必要があるものの、2012 年度上期ではスラスタの開発に時間を要したため、依然としてその問題の解消策は検討中である。最新の噴射実験ではまず新型スラスタとしての性能確認のため、2011 年と同様の手法にてデータを取得した。つまり、水単体を推進剤とするのではなく安定した噴射が可能な N_2 ガスを併用してデータを取得した。結果として、流量を増やせばその分 H_2O は推進力を持ちうることを確認された。今後ガスジェネレータを使用した高速流量の水（気体）によりスラスタ性能を向上させる予定である。グランド的には陰極にポーラス素材又はグロープラグを使用したガスジェネレータ（現在性能評価中）を装備させ、ガス化した H_2O のみでの安定したスラスタ噴射実施を 2013 年初頭目標に進めていく。

参考文献

1. Jesse Bazley, “ISS Regenerative Life Support: Challenges and Success in the Quest for Long-Term Habitability in Space” 62nd IAC Flight Operations Virtual Forum, United Space Alliance, October 3, 2011
2. Carter, D.L., “Status of the Regenerative ECLSS Water Recovery System”, NASA, July 12, 2009
3. JMX-2010292, “JEM ペイロードアコモデーションハンドブック (JPAH) Vol.8”, JAXA, Mar 2011
4. “JEM 船外実験プラットフォーム利用ハンドブック”, JAXA, Sep 2010
5. Shinobu Doi, “JEM Extended Utilization for Exposed Experiments using JEM Airlock and Robotics”, JAXA, 15th Annual ISU International Symposium Strasbourg, France, Feb 16, 2011
6. 藤田雄也, 岡町悠介, 下城礼央, 中川和哉, 田原弘一 (大阪工業大学) 長田泰一, 増田井出夫 (宇宙航空研究開発機構) “低毒性 HAN を用いた直流アークジェットスラスタの性能特性”, 宇宙輸送シンポジウム, Jan 14, 2011

¹ Osaka Institute of Technology, Japan, tahara@med.oit.ac.jp

² Earth-Track Corporation, Japan, akira.tsuchida@earth-track.com