

## 水推進剤の運用を想定したアークジェットスラスタの 蒸気安定供給システムの研究・開発

### Research and development of steam stable supply system for arc jet thruster assuming operation of water propellant

○奥村 俊介・三村 岳史・奥田 和宜・服部 大輔  
田原 弘一・高田 恭子(大阪工業大学)・野川 雄一郎 (Splije)

○Shunsuke Okumura・Takefumi Mimura・Kazuyoshi Okuda・Disuke Hattori  
Hirokazu Tahara Kyoko Takada(Osaka Institute of Technology)・Yuichiro Nogawa (Splije)

#### Abstract (概要)

Hydrazine is highly toxic and is mainly used as the propellant of the arcjet thruster. In this research, we propose a propulsion system using water, which is non-toxic as a new propellant replacing hydrazine. In the previous study, water propellant was used for the arc jet thruster, but there was a problem with the vaporization system which is the propellant supply system, and it was not able to operate stably. In this presentation, we newly developed a steam stable supply system and report on its operation confirmation experiment.

#### 1. 序論

アークジェットスラスタは他の電気推進機より推力が高く構造がシンプルで、化学推進機との推進剤の併用ができる利点を持つ。その高い推力を生かし人工衛星の軌道制御や姿勢制御、緊急時の回避運動に使用され日本やアメリカでは実用されてきた。実用されているアークジェットスラスタの推進剤にはヒドラジン( $N_2H_4$ )という毒性の高い物質が使用されている。ヒドラジンは安全管理が非常に難しく、取り扱いには防護服を着用する等の多くの時間やコストがかかってしまう。また、ロケット打ち上げ失敗時や衛星がヒドラジン燃料を残したまま軌道を外れて地球に落下した場合、人体や環境に与える被害が甚大となる。ヒドラジンの取り扱いの様子を図1に示す。現在では低毒性推進剤を用いたアークジェットの開発が進められている。



図1 ヒドラジンの取り扱いの様子

我々の研究では、その推進剤の一つとして水に注目した。水は人体的影響がなく安定した物質であることから安全管理などにコストがかからない上、特殊な設備も必要ない。さらに、水の入手に関しては、地上ではもちろんのこと、宇宙では国際宇宙ステーション(International Space Station : ISS)の水再生システム(Water Recovery System : WRS)といったシステムがあるためISSでの推進剤の補給が可能である。加えて、将来的には月の堆積層(レゴリス)に含有されている酸素と水素から水を生成できる可能性がある。このように、水は宇宙空間で入手可能である点から、水を推進剤として使用する技術が確立されると更なる長期間のミッションに対応した推進システムを提案することができ、その意義は大きい。しかしながら、水は蒸発潜熱が2258kJ/kgと高く、電熱加速式のアークジェットスラスタにおいてエネルギー損失が大きくなってしまいう問題や、アークジェットの初期着火が困難である問題や、電極損耗が激しく、作動時間に限界がある問題が考えられる。

本研究では、水を液体から蒸気に変換し供給するための装置の開発及び動作確認を行った。加えて、水推進剤を使用しアークジェットスラスタで作動実験を行った。

## 2. 実験装置

### 2.1. 実験装置の全体構成

本実験で用いた実験装置の概略図を図2に示す。実験装置は真空チャンバ、真空排気装置、電源装置、推力測定装置、推進剤供給装置、水蒸気安定供給装置、アークジェットスラスタの7つで構成される。また、真空チャンバ内部の圧力はピラニ真空計を用いて測定している。

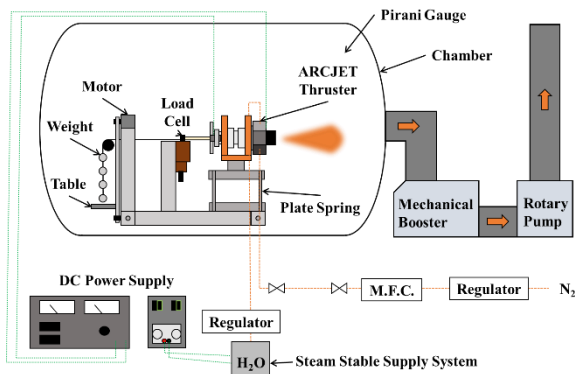


図2 実験装置概略図

### 2.2. 真空チャンバ・真空排気装置

真空チャンバはステンレス製であり内径が約1.2m、長さが約2mの円筒形である。内部の排気に使用されている真空排気装置はロータリーポンプであり、メカニカルブースターの2種類である。これらを併用して実験を行う。2種類の真空排気装置を併用したときの最高到達真空度は3Pa前後である。表1は真空排気装置の概要を記載する。

表1 真空排気装置概要

| Pump               | Exhaust Velocity, m <sup>3</sup> /h |
|--------------------|-------------------------------------|
| Rotary Pump        | 600                                 |
| Mechanical Booster | 6,000                               |

### 2.3. 推力測定装置

本研究で使用した推力測定装置の概略図を図3に示す。推力測定装置には板バネ式を採用し、測定方法としては、まずスラスタに推力が発生すると板バネがしなり、同軸上に取り付けられたロードセル（株式会社エー・アンド・デイ製 U2X1-0.5L-A）が押される。ロードセルに加わった荷重は電気信号として検出され、ケーブルで繋がれたデジタルインジケータ（株式会社エー・アンド・デイ製 AD-4532B）に表示される。デジタルインジケータはデータロガー（日置電機株式会社製 LR8402）と接続されており、データロギングが可能になっている。推力測定における較正は推進機後方の中心軸上に糸を取り付け、定滑車を介して錘を吊るし、荷重をかけることで擬似的に推力を再現して行う。1つあたり5.5gの錘を4個使用し、バスケットにより掬い上げ個数の変更を行うことで重量を変動させる。これと重力加速度との積が擬似推力となる。この際にインジケータの値をデータロギングし、得られた各質量での値を平

均化する。平均した値と錘の荷重の関係をグラフ化し、これを近似する。この近似式が較正式となり、実験で得られた値をこの式に代入することで推力を導く。

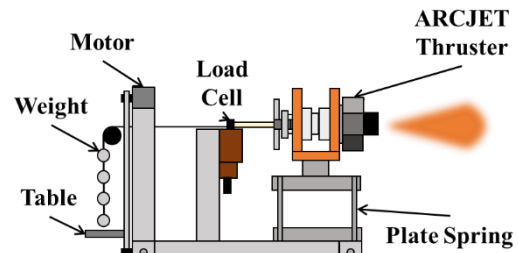


図3 推力測定装置の概略図

### 2.4. 推進剤供給系

推進剤供給系はマスフロコントローラ（KOFLOC社製、Model3600シリーズ）、レギュレータ、蒸気安定供給装置（Steam Stable Supply System）に大別される。窒素の推進剤供給にはマスフロコントローラを使用し、流量を一定にした後、スラスタへ供給を行っている。水推進剤供給に関しては、水蒸気安定供給装置で生成した水蒸気をレギュレータにより調圧しスラスタへ供給を行っている。

### 2.5. 新型水蒸気安定供給装置

本研究で使用した水は、液体供給を行うと真空チャンバ内で急激な減圧が起こるため、液体の水が沸騰し蒸発する。蒸発の際に周囲から蒸発潜熱を奪って水蒸気へと変化する。蒸発潜熱の分の熱量を奪われた液体の水は、蒸発潜熱の分、温度の低下が起きる。この温度低下により、水が凍結してしまう問題があった。そこで、先行研究では、水を液体ではなく蒸気にしたのちに供給する水蒸気安定供給装置を開発することで解決を図ったり、先行研究では加熱された流路へ水を供給するため、加熱壁面に触れた瞬間に即座に高温高压の蒸気となる。蒸気化した直後に下流側へと蒸気は流れていくが、上流側にも圧力がかかる。上流側は0.4 MPaで加圧され水が流れてくるが、蒸気化した直後の蒸気圧が加圧圧力を超えると流れが滞ってしまう。そのため、流量が一定にならず蒸気の生成が不安定になっていたと考えられる。また、水の表面張力は大きく、一度流れが止まると水の供給口で液滴が形成されてしまう。加熱壁面に触れるまで液滴が大きくなり限り蒸気化が起こらない。そのため、先行研究にて開発された水蒸気安定供給装置の課題点は以下の2点である。

- ・高温高压の蒸気圧による押し戻し問題
- ・水の表面張力による液滴形成問題

本研究では、この2点の課題を解決する目的でヒーターの変更と、新しい水蒸気安定供給装置の開発を行った。先行研究で使用していたグロープラグ（定格電力は50W）と呼ばれるヒーターに代わり面状発熱体（坂口伝熱株式会社、SAMICON 230 SR）を使用した。面状発熱体の消費電力は約400Wである。新型水蒸気安定供給装置を図4に示す。新型水蒸気安定供給装置は液体の水が入った加圧タンクを高温に熱して、蒸気を作り出す自然対流沸騰方式を用いており、面状

発熱体の上に断熱シートを模擬したシートで覆うことで外部への放熱を抑える仕組みになっている。

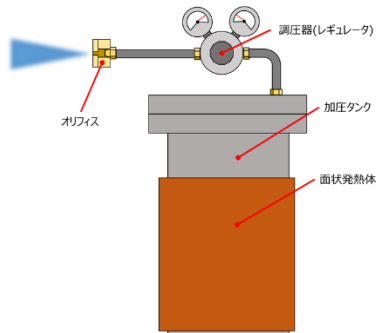


図4 蒸気安定供給システム

供給流量の調整には新型水蒸気安定供給装置に設けているレギュレータとオリフィスを用いる。蒸気化した水はオリフィスでチョーク流れになる。このときの推進剤の理論質量流量 $m_{th}$ はオリフィスの流量係数を $a$ 、オリフィスの断面積を $A_0$ 、新型水蒸気安定供給装置の水蒸気圧力を $P_0$ 、新型水蒸気安定供給装置の水蒸気温度を $T_0$ 、比熱比は $\gamma$ 、水蒸気の気体定数を $R$ とすると次式で表せる<sup>2)</sup>。

$$m_{th} = aA_0P_0 \left( \frac{\gamma}{RT_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (1)$$

加えて新型水蒸気安定供給装置の内部は飽和蒸気圧であるため、飽和蒸気圧は温度の関数となる。飽和蒸気圧の各種実験式は様々あるが、どれも影響のない程度の誤差であるため<sup>3)</sup>ここでは簡易的なTetensの式を利用する。(6.1)式にTetensの式を示す。

$$P_0 = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5T}{T+237.3}} \quad (2)$$

以上の(1)、(2)式より流量を算出する。

## 2.6. アノード輻射冷却式アークジェットスラスタ

アノード輻射冷却式アークジェットスラスタの本体写真と断面図を図5と図6、電極部の概略図を図7に示す。また、各種寸法を表2に記す。このアークジェットスラスタは全長146.7mm、最大直径は98mmである。材質の変更点は、アノード部には輻射率の高いカーボン、ボディ本体はコストが安く絶縁性の高いポリブチレンテレフタレート(PBT)である。また電極部形状は水冷式のものと同じ形状にしている。絶縁体を推進剤供給口周りに設けることにより蒸気安定供給システムを電氣的に独立させた。また、推進剤供給口から放電室までの距離を短くし、さらに推進剤供給口を蒸気化した水とその他の推進剤に分けている。



図5 アノード輻射冷却式アークジェットスラスタ本体写真

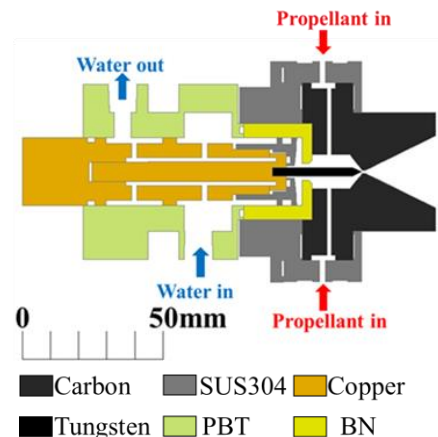


図6 アノード輻射冷却式アークジェットスラスタ断面図

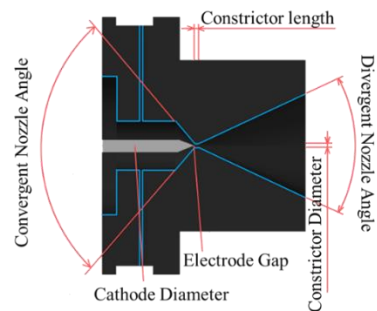


図7 アノード輻射冷却式アークジェットスラスタ電極部形状

表2 アノード輻射の電極部の各種寸法

| Parameter                     | Value |
|-------------------------------|-------|
| Cathode Diameter, mm          | 3.0   |
| Constrictor Length, mm        | 1.0   |
| Constrictor Diameter, mm      | 1.0   |
| Divergent Nozzle Angle, deg.  | 52    |
| Convergent Nozzle Angle, deg. | 102   |
| Electrode Gap, mm             | 0.0   |

### 3. 実験結果

#### 3.1. 新型水蒸気安定供給装置の蒸気化実験

開発した加圧タンク型を用いて蒸気の噴射実験を行った。レギュレータにて蒸気圧を調圧することが可能であるため、レギュレータ上流側圧力が目標の蒸気圧以上を達成している場合、任意の蒸気圧を供給できる。実験手順はまず、面状発熱体で加圧タンク内圧力が 0.8~1.0MPa になるまで加熱を行う。その後、レギュレータにて調圧しつつ噴射を行う。その際の噴射の様子を目視で確認を行った。加えて、オリフィスでチョークを起こすためには 0.2 MPa 以上必要<sup>4)</sup>なため、上流側圧力が調圧できているかも確認する。

実験の結果、蒸気圧 0.2MPa 以上を達成しておりチョークが起きていると判断できる。さらに、噴射の様子は非常に安定しており一定に供給できていると判断できる。噴射の様子を図 8 に示す。

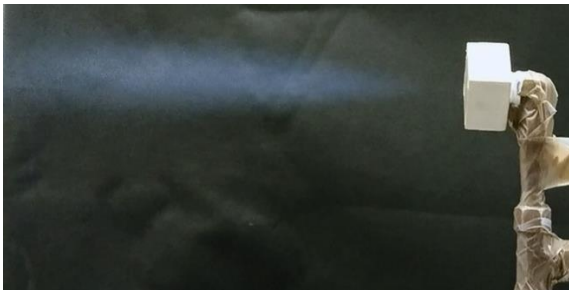


図 8 水噴射実験の様子

新型水蒸気安定供給装置は、先行研究のように加熱面へ液体の水を流さないため蒸気圧による押し戻しはなく、配管等に液体の水を供給しないため表面張力も働かないと考えられる。そのため、先行研究での不安定作動の原因と考えられた 2 点の問題をクリアしている。そのため、安定した作動ができたと考えられる。よって、安定した供給が求められるアークジェットスラスタへの推進剤供給装置に新規に開発した水蒸気安定供給装置は使用可能と判断できる。

#### 3.2. 新型水蒸気安定供給装置の流量算出について

先行研究での蒸気安定供給システムでは、流量は台はかりで算出していたが、新型水蒸気安定供給装置が大型であり、装置をすべて搭載すると台はかりでは流量の計測が困難である。加えて、今後の細かな実験を行うことも考えると台はかりにより流量を求めるのは精度と時間の観点からもメリットが無い。そのため、(1)式を用い水蒸気圧力と温度から流量を求める。(1)式での流量算出にはオリフィスの流量係数 $\alpha$ が必要であり、その算出のため実験を行う。

台はかりで計測を行うために、必要最低限の装置のみを組み付け、流量の計測を行う。実験で台はかりの重量変化より得た実測流量と(1)式で求めた計算流量から補正值を求める。この補正值が流量係数 $\alpha$ となる。流量算出に使用する数値を表 3 に示す。オリフィスの上流側水蒸気圧 $P_0$ は圧力計にて計測を行い、その圧力を用いて(2)式で水蒸気温度 $T_0$ を求め、計算流量を求める。

表 3 流量計算の定数

|  |       |
|--|-------|
| Orifice cross section, mm <sup>2</sup> | 0.385 |
| Gas constant, J/K                      | 480   |
| Heat capacity ratio                    | 13.3  |

台はかりの重量の時間変化から求めた実際の計測流量を、補正しない場合、つまり流量係数を 1 にした場合の計算流量で除した値が補正值となる。

結果、流量係数は約 0.93 で最も誤差が小さくなった。そのため流量係数を 0.93 とし、(1)式に用いることで流量算出することが可能となった。実測流量と計算流量( $\alpha = 0.93$ )のグラフを図 9 に示す。

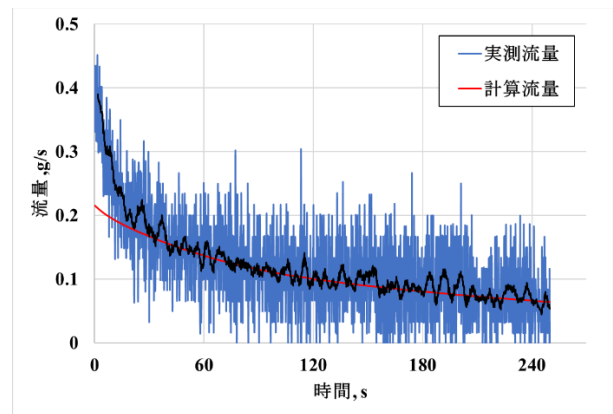


図 9 実測流量と計測流量

#### 3.3. 水を用いた生ガス噴射実験

先行研究において、グロープラグをヒーターに使用した水蒸気供給装置では、生成した蒸気の温度が不十分であり、スラスタでの生ガス作動時に温度の低いアノード部等と熱交換を行ってしまい液体に戻ってしてしまい、ノズル部を通る際に氷になってしまう問題が発生した。そのため、コンストリクタでの推進剤の凍結により作動できないという問題があった。新規に開発した蒸気安定供給装置において、コンストリクタでの推進剤凍結があるかを確認するために実験を行った。加えて、アークジェット作動時の供給流量が流せるかの確認も同時に行い、どの程度まで供給流量を増やせるのかの検証を行うため、供給開始後はレギュレータで調圧を行い、流量を増加させる。供給圧力と流量、投入電力の条件を表 4 に示す。

表 4 実験条件

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| Mass flow rate, mg/s  | 110 |
| Heater input power, W | 400 |
| Back pressure, Pa     | 6.0 |

結果、110mg/s の時は他の推進剤と同様に安定噴射であった。コンストリクタ部での凍結は確認されなかった。このことから、アークジェット作動時の流量では、コンストリクタでの凍結は確認されず、十分にアークジェットスラスタで使用できると考えられる。しかしながら、徐々に流量を上げていくと、140 mg/s 程度からプリュームが視認できるようにな



った。その理由については、ノズルでの断熱膨張時に水蒸気が相変化を起こすほど低温化し、液体や固体になったため視認できたと考えられる。140 mg/s 程度まではプリュームが視認できなかった。相変化が性能に与える影響は現在不明なため今後より詳細な調査が必要である。相変化時の噴射の様子を図 10 に示す。



図 10 生ガス噴射の様子

### 3.4. 水単体作動実験

新型水蒸気安定供給装置をアノード輻射冷却式アークジェットスラスタに用いて研究目的である水推進剤での噴射確認実験を行った。水推進剤のみの着火は困難なため、まず、窒素を用い初期着火を行った。安定作動を確認後、水推進剤を 110mg/s で供給する。水が投入されたことをアークジェット作動時のプリュームの様子から判断を行う。その後、窒素供給を止め、水単体作動を行った。実験条件を表 5 に記す。

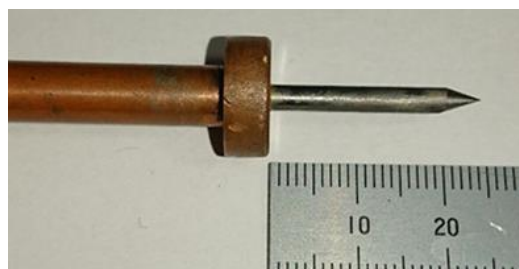
表 5 実験条件

| Propellant              | H <sub>2</sub> O | N <sub>2</sub> |
|-------------------------|------------------|----------------|
| Flow Rate, mg/s         | 110              | 135            |
| Heater input power, W   | 400              | -              |
| Arcjet input current, A | 17               |                |
| Back pressure, Pa       | 4.5              |                |

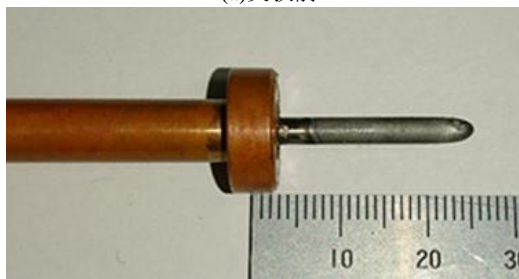
結果、水単体作動の作動に成功し、作動時間は 90 秒を達成した(先行研究の約 3 倍程度まで向上)。作動時の様子を図 11 に示す。作動の様子は比較的安定していたが、プリュームが上下に揺れて火花が飛び散る様子も確認できた。火花が飛び散る様子からカソードが損耗していると考えられる。プリュームは白、黄色の光を放っており、先行研究で確認された青白い色とは異なることが確認された。作動後のカソードは約 1.4 mm 短くなり、丸みを帯びた形状になっていることを確認した。図 12 に実験前と実験後のカソードの様子を示す。また表 6 に重量及び長さを示す。



図 11 水噴射実験の様子



(a)実験前



(b)実験後

図 12 実験前後のカソード形状

表 6 実験前後のカソードの重量及び長さ

|                       | Before | After |
|-----------------------|--------|-------|
| Weight of cathode, g  | 28.75  | 28.67 |
| Length of cathode, mm | 24.0   | 22.6  |

先行研究での問題であった水蒸気安定供給装置を改善したことで、水蒸気の一定供給が達成されており、90 秒の作動に成功したと考えられる。作動が停止した原因については、カソードが損耗し短くなったことで放電長が伸び、放電の維持が難しくなったことで作動が停止したと考えられる。また、水単体のプリュームについては先行研究で確認されたような青白い色ではなく白、黄色の光であった。先行研究では窒素の供給を切った直後も配管等に残っていた窒素が混じり、アークジェットが作動していた可能性が高い<sup>5,6)</sup>。そのため、今回の実験においてプリュームの色が異なっていたと考えられる。今回の実験において水単体に成功したことから水をアークジェットに用いることは可能であることが判明した。

## 4. 結論

### 4.1. 加圧タンク型4Sの蒸気化実験

開発した加圧タンク型を用いて蒸気の噴射実験を行った。実験の結果、蒸気圧 0.2MPa 以上を達成しておりチョークが起こっていると判断できる。さらに、噴射の様子は非常に安定しており一定に供給できていると判断できる。このことから、先行研究より問題であった蒸気の不安定供給の下記2点の原因を解決することができた。

- ・高温高圧の蒸気圧による押し戻し
- ・水の表面張力による液滴形成

### 4.2 新型水蒸気安定供給装置の流量算出について

流量を求めるために必要な、流量係数を求める実験を行った。流量係数は台はかりの重量の時間変化から求めた実際の計測流量を、補正しない場合、つまり流量係数を1にした場合の計算流量で除して求める。

実験の結果、流量係数は約 0.93 で最も誤差が小さくなった。そのため流量係数を 0.93 とし、(1)式に用いることで流量を時系列で算出することが可能となった。

### 4.3. 水を用いた生ガス噴射実験

開発した自然対流沸騰型を使用しスラスタでの噴射実験を行ったところ 110 mg/s では凍結もなく安定した噴射を確認することができた。しかしながら、供給流量が増加するに伴い相変化を確認することができたため、より詳細な調査が必要である。

### 4.4. 水単体作動実験

先行研究での問題であった水蒸気安定供給装置を改善したことで水蒸気の一定供給が達成されており、90 秒の作動に成功したと考えられる(先行研究の約 3 倍程度まで向上)。プラズマの色からも水単体作動となっていることを確認できた。作動後電極を確認すると、カソードが激しく損耗していることを確認した。今後、電極の損耗をおさえることでより長時間の作動ができると考えられる。今回の実験において水単体に成功したことから水推進剤をアークジェットスラスタに用いることは可能であることが判明した。

## 参考文献

- 1) 奥田 和宜, 三村岳史, 下垣内 勝也, 田原 弘一, 高田 恭子, 桃沢 愛, 野川雄一郎: 水を推進剤に用いた低電力 DC アークジェットスラスタの研究開発, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, 2E02, (2017)
- 2) 栗本恭一, 荒川義博.「電気推進ロケット入門」(2003), 東京大学出版本.
- 3) 菅原広史, 近藤純正, 「飽和水蒸気圧の計算誤差」, 水文・水資源学会誌, Vol. 7, No. 1, pp. 440-443, (1994).
- 4) 服部 大輔, 奥田 和宜, 三村 岳史, 奥村 俊介, 田原 弘一, 高田 恭子 (大阪工業大学), 野川 雄一郎 (Splije): アークジェットスラスタでの使用を目的とした水蒸気安定供

給システムの研究開発, 第 55 回中部・関西支部合同秋期大会, (2017)

- 5) 安岡康一, 前原常弘, 佐藤正之, 4. 水中プラズマによる化学(有機)プロセス, J. Plasma Fusion Res. Vol. 84, No. 10, pp. 679-684, (2008).
- 6) Abdollah Sarani, Anton Yu. Nikiforov, Christophe Leys1, “Atmospheric pressure plasma jet in Ar and Ar/H<sub>2</sub>O mixtures: Optical emission spectroscopy and temperature measurements”, Physics of Plasmas 17, 063504 ,(2010)