

アルミ - 水反応の衛星推進系への適用（室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター年次報告書2016）

著者	大堀 英雄，後藤 翔，今村 卓哉，菅原 友里恵，劉 思博，今井 良二，杉岡 正敏，東野 和幸
雑誌名	室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター年次報告書
巻	2016
ページ	18-23
発行年	2017-08
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009808

アルミ-水反応の衛星推進系への適用

- 大堀 英雄 (航空宇宙総合工学コース 博士前期2年)
 - 後藤 翔 (航空宇宙総合工学コース 博士前期2年)
 - 今村 卓哉 (航空宇宙総合工学コース 博士前期1年)
 - 菅原 友里恵 (航空宇宙システム工学コース 学部4年)
 - 劉 思博 (航空宇宙システム工学コース 学部4年)
 - 今井 良二 (航空宇宙システム工学ユニット 教授)
 - 杉岡 正敏 (航空宇宙機システム研究センター 名誉教授)
 - 東野 和幸 (航空宇宙機システム研究センター 特任教授)
-

1. 背景

現在、宇宙機推進システムの燃料として主にヒドラジンが使用されている。ヒドラジンは高比推力で着火性に優れる燃料であるが毒性を有するため、代替燃料を用いた推進システムの開発がすすめられている。航空宇宙機システム研究センターでは、アルミと水の反応から得られる水素を宇宙機推進システムに適用する研究をこれまでに実施してきた。本システムではアルミタンクから取り出したアルミと水タンクから取り出した水を反応器で混合して高圧水素製造反応を起こし、水素をスラスタに供給する構成としている。本システムでの反応物である水およびアルミ、反応生成物の水素および水酸化アルミはいずれも毒性を有さないため、次世代の推進系への適用が有望である。

昨年度までに、(1)水素製造循環における酸化アルミニウムの窒化の実証、(2)微小重力環境下における水タンク液体捕捉機構の考案、検証、(3)微小重力環境下における反応槽内部の流動挙動、気液分離機構の検証水タンクにおける液体捕捉機構の検討、を実施してきた。上記に引き続き本年度は、(1)水素製造循環における参加アルミニウム窒化条件の探索、(2)微小重力環境下における金属製水タンク液体捕捉機構の考案、および検証を実施した。本報では2016年度の研究成果についてまとめた。

2. 内容

2-1. Al/水系反応における水素製造循環に関する検討[1][2]

2-1-1 はじめに

現在、宇宙機推進システムの推進剤として主にヒドラジンが使用されているが、これは人体に極めて有害であるため、今後は代替可能な推進剤の一つとして水素の利用が求められている。しかし、従来の水素製造法(水蒸気改質法)ではCO₂の排出等の問題がある。そこで、本学では(1)式で表されるAlと水による水素製造法(Al/水反応)を宇宙機推進システムに応用する研究を行っている。



Al/水反応では、人体に無害で環境負荷の小さい物質を扱う。この反応を宇宙機推進システムに適用した場合のシステム重量の推算の結果、ヒドラジンを用いた場合より重量が大きくなるこ

とが判明した。これまでに、Al/水反応後の副生物である Al(OH)₃ を分解して Al に戻し、再び水素を製造する水素製造循環の構築を検討した。この水素製造循環により、Al と水の搭載量が最小限に抑えられ、推進系の軽量化が見込められる。Al(OH)₃ は加熱処理により分解して Al₂O₃ になるが、Al₂O₃ を直接 Al と O₂ に分解することは極めて困難である。そのため、宇宙機内で適用する際は(2)、(3)式に表すように、Al への分解が Al₂O₃ よりも比較的容易な窒化アルミニウム(AIN)に一旦変換してから分解する方が有利である。



まずは Al₂O₃ を炭素還元窒化反応による AIN 合成実験を行った。(2)式の反応に添加物(鉄粉(Fe)、コバルト粉末(Co)およびニッケル粉末(Ni))を用いて AIN 合成反応の転化率を示すとともに、Al/水系での水素製造循環システムの応用例も述べる。

2-1-2 実験方法

実験装置は 2015 年次報告書で示したものと同一とした。また表 1 に実験条件を示す。本実験では、プログラム管状電気炉および耐熱管を使用した。AIN 合成を行うために試薬粉末の酸化アルミニウム(Al₂O₃)、活性炭(AC)、Fe、Co および Ni を用いて、任意の質量割合で混合させた粉末混合物を試料とした。一方、Al₂O₃ は結晶構造の違いにより α 型(コランダム)および γ 型など同素体が存在することが知られている。Al/水系反応後の副生物である Al(OH)₃ は加熱処理により脱水されると、γ Al₂O₃ の結晶構造をとる。これはコランダムと比較すると化学反応性が良いことが知られているため、本実験では γ Al₂O₃ を AIN 合成反応の出発物質として選定した。実験試料は γ Al₂O₃(1.8g)と AC および添加物(Metal)の混合物(AC および添加物の組成 : AC/[X]wt%Metal(X=0,10,30,60), 3.6 g)を用いた。γ Al₂O₃ と AC/[X]wt%Metal の質量比は 1 : 2 であり、これらの混合物(合計 5.4 g)のうち、1.2 g を磁製ボートに載せ、耐熱管内に配置して窒素雰囲気内で加熱、反応させた。

表 1 実験条件

Sample conditions	γAl ₂ O ₃ + AC/0wt%Metal	
	γAl ₂ O ₃ + AC/10wt%Fe, γAl ₂ O ₃ + AC/30wt%Fe, γAl ₂ O ₃ + AC/60wt%Fe	
	γAl ₂ O ₃ + AC/10wt%Co, γAl ₂ O ₃ + AC/30wt%Co, γAl ₂ O ₃ + AC/60wt%Co	
	γAl ₂ O ₃ + AC/10wt%Ni, γAl ₂ O ₃ + AC/30wt%Ni, γAl ₂ O ₃ + AC/60wt%Ni	
Experiment temperature [°C]		1280
Experiment time [hr]		6
Sample mass [g]		1.2
Mass ratio [γAl ₂ O ₃ : AC/[X]wt%Metal]		1 : 2

2-1-3 XRD分析結果

図1にFe添加系におけるXRD分析結果を示す。図よりAINのピークを確認することができた。その他、Co添加系、Ni添加系実験後試料についても同分析を実施し、AINのピークを確認した。

AIN合成反応が最も進行する試料条件を把握するためにXRD分析結果からAIN(○)および α -Al₂O₃(▽)のピーク強度比を求めた。各試料条件における添加量とXRDピーク強度比の比較結果を図2に示す。図より、各種添加物を用いた試料条件において添加量とピーク強度比の関係には明確な傾向の違いを確認した。FeおよびCoを試料に添加するといずれの添加量でも添加物を用いない条件より高いピーク強度比が得られた。一方、Ni添加条件のピーク強度比は試料に添加物を用いない条件とほぼ変わらないか、むしろ下がる傾向があった。NiはFeやCoと似た反応促進効果を有する物質であるが、本実験ではFeおよびCo添加系とピーク強度比に大きな差が生じた。これは各種添加物には触媒効果を発揮するために適した温度帯が存在し、FeおよびCoではその温度が1280℃であるのではないかと推測する。一般的にFeはアンモニア合成法において窒素を活性化させる触媒として用いられる。そのため、本実験でもFeは窒素ガスを活性化させることでAIN合成反応の促進に寄与したと考えられる。

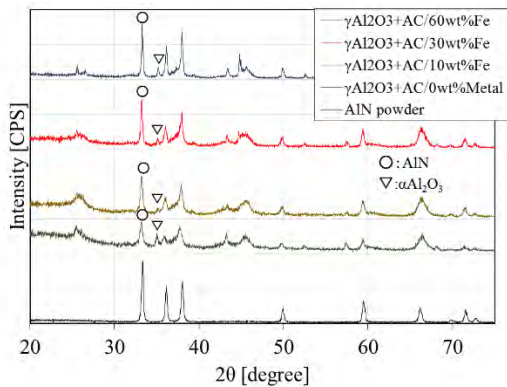


図1 XRD分析結果
Fe添加量 0,10,30,60wt%

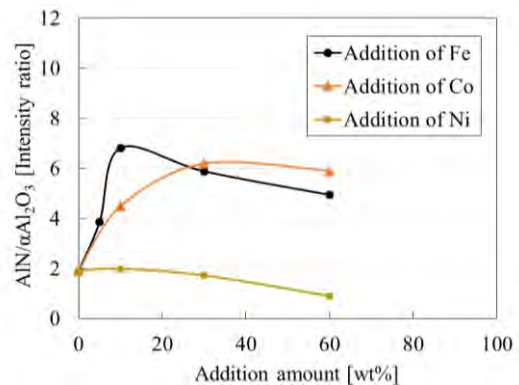


図2 添加物重量が反応特性におよぼす影響

次に、ピーク強度比が最も高かったAC/10wt%Fe条件におけるAIN転化率を検量線から評価した。図3にAINおよび α -Al₂O₃混合物中のAIN濃度ごとのXRDピーク強度比の関係を表した検量線を示す。図より、AC/10wt%Fe条件でのAIN転化率は約80%であった。そのため、本実験条件では γ -Al₂O₃の約80%をAINに変化可能であった。Al₂O₃の炭素還元窒化反応では、高熱伝導性を有する高性能な基板の原料となる高純度微細AIN粉末の獲得に向けて、反応促進剤および焼結助剤として主にCa化合物やY₂O₃などが選定される。一方、本実験では低温度条件でのAl₂O₃の不安定化を目指しているが、生成物の形態および焼結性向上など、AIN自体の特性にはこだわらない。そのため、高価な添加物を用いずとも高い転化率を示す条件の解明に取り組んだ。窒素ガスの活性化に着目し添加物を選定した結果、安価なFeおよびCo添加系により得られた転化率は他の研究[3]と比較しても高く、比較的低温度(1280℃)でも反応が促進されたことから、本法はコストおよび反応温度において従来の炭素還元窒化法よりも有利であった。

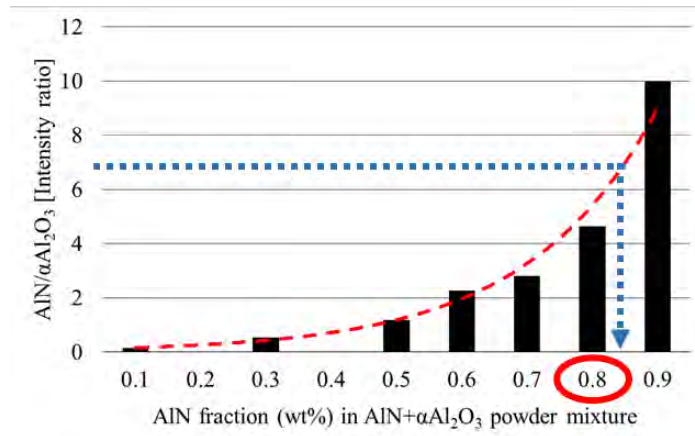


図3 AlNおよび α -Al₂O₃混合物中のAlN濃度ごとのXRDピーク強度比の関係を表した検量線

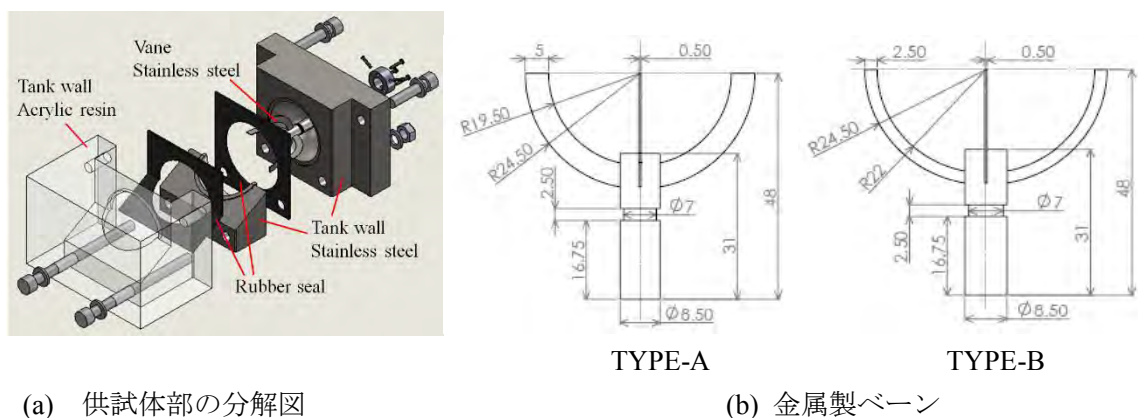
2-2. 水貯蔵タンクの液体捕捉機構[4]

2-2-1 はじめに

本章では、Al/水反応推進系の構成要素の一つである水タンクにおける、液体捕捉機構の研究開発結果について述べる。昨年度は親水性を有するシリカコーティングをアクリル樹脂製ベーン型表面張力タンクに施し、短時間微小重力実験により、微小重力下での液体捕捉機構の検証を実施した。本年度はこれに引き続き、より実機に近い金属製タンクに上記コーティングを施した際の液体捕捉機構の検証を、短時間微小重力環境において実施した。なお、短時間微小重力実験は株式会社植松電機が所有する微小重力実験塔「COSMOTORRE」を利用した。

2-2-2 実験装置

図4に本実験で用いた金属製タンクを示す。タンクはステンレス (SUS304) と透明アクリル樹脂製のブロックで構成され、透明アクリル樹脂を通してタンク内部を可視化した。ベーンの材質も SUS304 とし、金属タンク内面および金属ベーン表面にシリカコーティングを施した。



(a) 供試体部の分解図

(b) 金属製ベーン

図4 供試体部の構造およびベーン

図5に短時間微小重力実験用カプセルおよび実験機器の搭載状況を示す。供試体および各種計測機器、実験機器は木製の円盤状に配置させた。図のIで示す段には二つの試験体、ビデオカメラ

ラ、光源を搭載し、カプセルの上段に設置した。図のⅡで示す段には加速度センサー、データロガー、光源用のバッテリーを搭載した。バッテリーの重量が大きいので、カプセル搭載の重心位置を考慮し、本プレートはカプセルの最下段に搭載した。

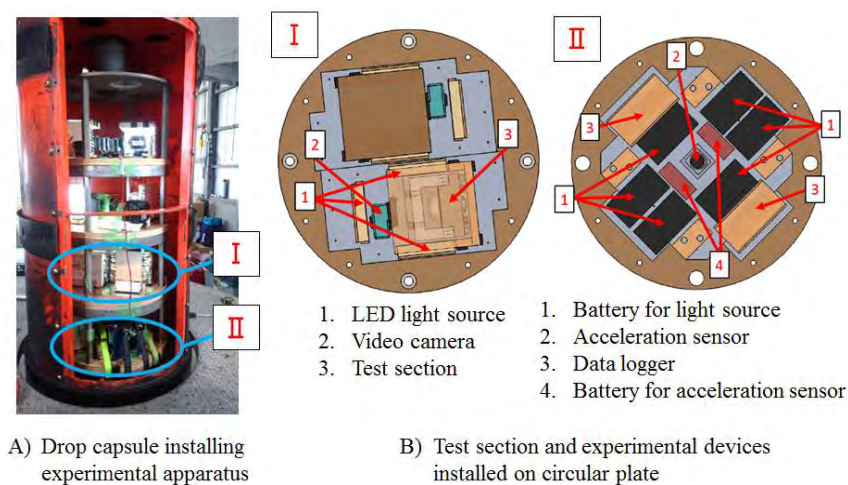


図5 短時間微小重力実験用カプセルおよび実験機器の搭載状況

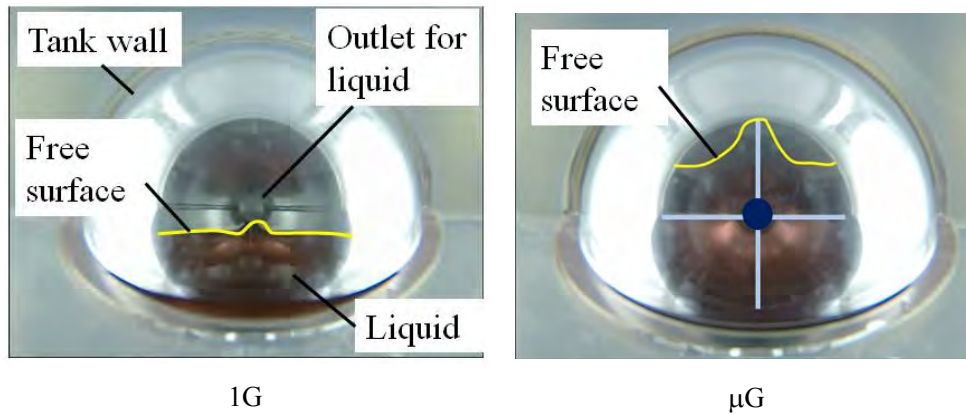
表2に実験条件を示す。実験ではベーン種類、液量等が液体捕捉機構におよぼす影響を調査した。

表2 実験条件

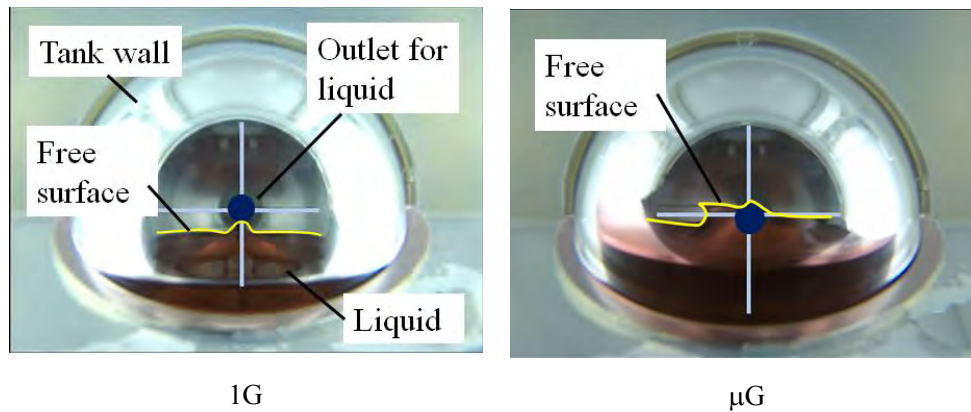
No	Vane type	Liquid substance	Coloring agent Red color	Coated surface		Liquid amount*
				Tank	Vane	
1	A	Water	✓	✓	✓	32%
2	B	Water	✓	✓	✓	32%
3	B	Water		✓	✓	32%
4	A	Water		✓	✓	16%

* Volume ratio of tank volume

図6にTYPE A およびTYPE B のベーンを内蔵した金属製タンク内の液体捕捉状況を示す。本実験条件では、視認性を向上させるため、試験液体を食紅で着色している。図より、TYPE A のベーンで自由界面がタンク内壁を上昇する様子が確認できる。一方TYPE B のベーンでは液面の移動量が僅かとなった。この理由として、TYPE B はベーンの高さが低く、液体捕捉機構が弱いこと、食紅が自由界面に吸着して表面張力を低減させていること、が考えられる。後者につき、より詳細に検証するため、食紅を用いない液体を用いた場合の液体捕捉機構を検証した結果、TYPE B ベーンでも液体捕捉が可能であることが示された。



(a) Vane type: A, Coated both on tank wall and vane surface (Exp. No. 1)



(b) Vane type: B, Coated both on tank wall and vane surface (Exp. No. 2)

図6 微小重力環境下の液体捕捉挙動（液体積比 32 %）

参考文献

- [1] 大堀英雄, 中田大将, 杉岡正敏, 今井良二, 東野和幸, AI/水反応における水素製造循環システムに関する研究, 日本航空宇宙学会北部支部創立 30 周年記念 2017 年講演会ならびに第 18 回再使用型宇宙推進系シンポジウム, 仙台 (東北大学) .
- [2] 大堀英雄, 中田大将, 杉岡正敏, 今井良二, 東野和幸 : AI/水系反応を利用した水素製造循環に関する研究(その 3), 第 17 回北海道エネルギー資源環境研究発表会要旨集, p.25-26, 2017.
- [3] André Luiz Molisani, et al., "Low temperature synthesis of AlN powder with multicomponent additive systems by carbothermal reduction - nitridation method", Materials Research Bulletin, 45, 733-738, 2010.
- [4] Ryoji Imai, Sho Goto, Takuya Imamura, Masayuki Saito, Masatoshi Sugioka, Kazuyuki Higashino, Basic research for liquid acquisition device and reactor in thrust system utilizing hydrogen production by aluminum and water reaction, AIAA-2017-4762, Propulsion and Energy Forum and Exposition 2017 July 10-12, Atlanta, USA.