

# 気液平衡推進系の開発

元岡範純(東大). 山本高行. 森治(JAXA). 中条俊大(東大). 石田大二郎. 山田啓介. 岸野義宏 (IHI エアロスペース)

## 概要

現在JAXAは小型宇宙機向けの推進系として気液平衡推進系を開発している. 気液平衡推進系とは推進薬(代替フロンガス)を液体状態で貯蔵し, 気化したガスのみをタンクから抽出しノズルから噴射する推進系である。本推進系は2010年に打ち上げられたソーラー電力セイル実証機IKAROS に搭載されその性能は実証されたが、更なる性能向上を目的として以下の開発に取り組んでいる。(1)落下塔を利用した微小重力環境下での気 液分離性能の評価と向上 (2)長秒時噴射を実現する気蓄器を搭載した新しい気液平衡推進系のシステム検討 (3)タンク内デバイスである発 泡金属の熱伝導性能の評価.

## 気液平衡推進系とは

<気液平衡推進系とは> 推進薬を液体状態でタンクに貯蔵し、気化したガスのみをコール ドガスジェットとしてノズルから噴射を行う推進系である。推進薬 には無寒、不燃性の代替フロンガスを使用している。+ボードを 掃除する際に使用されるダストプロワーと同じ原理。ダストブロワ の缶内はガスが液体状態で充填されているため長寿命である



- <本推進系の特徴(利点)> 推進薬が無毒、不燃性で、取扱いが容易→射場での充填作業が楽 ・ 代替コレガス、タンク圧は推薬の蒸気圧(1 [MPa (abs)] 程度) タンク内が推薬の蒸気圧で維持される
- ⇒ノウドが推集の蒸気圧で維持される→調圧弁なしに一定の推力を出力できる従来のコールドガス式と比較して、タンクが軽量でコンバクト
- 推薬を液体貯蔵するため、高密度充填が可能





図、推薬充填作業の様子 (写真: JAXA): 左図: 化学式推進系(あかつき)、右図: IKAROS気液平衡推進系

### <気液分離方法>

NAMAJR#JIAZ/ ・本推進系は微小重力環境下で気液を分離する必要がある。 なぜなら、液体状態の推進薬が ノズルから噴射されると、推力が不安定になると同時に、比推力の低下を招いてしまう。 そこで 本研究では以下の2種類の気液分離方式を開発している

わしのようなもの)に液体推薬を浸み込ませ、気孔間に張られる表面 が込まで、丸れ間に張られる表面 張力を利用して液体保持と気液分 離を行う方式、また発泡金属は推 薬噴射時に気化熱として奪われる 熱量を効率的にタンクシェルから 液体推薬に伝える役割も果たして



ペーン方式(表面張力タンク) ペーンとタンク内壁との距離をガス排出ポートに向けて単調に増加させることで、左下図のように曲率のはいよる駆動力がアレッグカス部)に作用する。これにより、アレッジ部を常にガス排出ポートへ追いやることができる一気液分離可能となる。





- ソーラー電力セイル実証超小型衛星(SSSAT) ・打ち上げ日時: 2006年9月(ひのでのサブベイロード) ・衛星質量: 6 [kg] ・推道業: イソブタン
- ・福東野豊: 6 kg ・福東野豊: 4ソプタン ・連用結果: 連用結果テレメトリ取得できず、ただし、展開動作は ・場合れたことはほぼ確実

- 小型ゾーラー電力セイル実証機(IKAROS)
  打ち上げ日時: 2010年5月(あかつきと同時打ち上げ)
  振霊機寛皇: 約310 [kg]
  情治: 1470-1344(代替プロン)
  4月71: 04 [kg] 61 (degC)
  世界で初めて正常に機能したことを確認した





図. 上段:SSSAT. 下段:IKAROS

## (1)微小重力実験による気液分離能力の評価

図. 実験装置全体写真

図 バブルポイント試験実験装置図(CAD図)

図. 液体推薬が流出している様子(40PPI)

表. 試験結果一覧: 本試験では3種類の気孔径につ

図 タンク回転時の 液体推力の様子

- <概要>・ ・試験期間:2012.10.30 ~11.2 ・試験期間:北海道赤平市、HASTIC所有の落下塔実験施設 ・目的:気液平衡推進タンクの液体保持能力と気液分離能力の評価

## <検証項目※>

- 下級・明日 / 宗治金属方式: (4)発治金属の方式: (4)発治金属の液体保持能力計測試験(パブルポイント計測試験) (8)不活性ガスで加圧された気液平衡ガス噴射の気液分離能力の計測試験 (C)発治金属の気孔径、材質の違いによる気液分離能力の評価
- ン方式:
- (D)アレッジ分裂曲線とアレッジ駆動曲線の妥当性の検証
- (C)ハンカ状パウメータイとアレッジ駆動速度との関係を確認する実験 (F)円間型タンク用大型ペーンの性能評価実験・噴射試験を含む) ※B.D.E.F.の試験結果についてはスペースの都合 から省略する

# <実験装置> 3段からなり、1回の落下で3種類の 実験が同時に実施できるように設計

- されている 下段:制御機器、バッテリ、データ
- ト段: 制御機器、ハツァリ、テータ ロガー、発泡金属の液体保持計測 試験機器(A) 中段: 発泡金属方式の噴射試験 装置 (B.C)、データロガー 上段: ベーン方式の噴射試験装置

## 主な計測機器 ハイスピードカメラ(120fps), 圧力センサ, 温度センサ

(A)発泡金属の液体保持能力確認試験

<要終の概要> 門簡形の通期なタンクに半月状の発泡 金属を搭載し、発泡金属に液体状態の推 薬を浸み込ませておく、実験が開始され るとモータによりタンクを回転させる。発 泡金属と共に回転する液体推薬には遠

心力が加わり、ある回転数以上になると 遠心力が発泡金属の液体保持能力を上 回り、 左図の赤矢印の方向に液体推薬が 国が、在国のが天日の方向に成体推案が 発泡金属から押し出される。本実験では、 発泡金属の液体保持能力を、液体推薬 が発泡金属から流出したときのヘッド圧を

ッド圧,R:タンク内半径,ρ:液体推薬の密度 ω:発泡金属から液体推薬が流出したときのモータ回転数

発泡金属の気孔径が小さいものほど保 持能力が高いことが確認できた。また, 地上でのバブルポイント圧(B.P)値と整合性

がとれている結果が得られた

用いて評価を行った。

## (C)発泡金属の気孔径、材質の違いによる気液分離能力の評価

### <宝輪の郷亜>

く 実験の (Magy) 右図にあるボリカーボネイト製のタンクに発 治金属と液体推薬を充填し、微小重カ下 で噴射を行い、3種類の発泡金属の気液 分離能力を評価する。



### <宝験結果>

今後の検討課題である







ガス装出ポート ペーン

気体部

内部構造(左上)

## (2) 長秒時噴射のための気液平衡推進系の検討

- <本システムの特徴> ・連続噴射時は気蓄器に貯蔵したガスを噴射するため、 気液分離性能は要 求されない
- ホロルス 相平衡維持のための莫大な加熱は不要、ミスト化防止のための加熱が必 要(相平衛維持と比較すると少量の加熱でよい)
- ⇒長秒時噴射が実現可能(連続噴射時間は気蓄器容積に依存する)

## <液化ガスのブローダウン>

(本化ガスのブローダウン> HeやPQなどの分子量の比較的軽いガスをブローダ ウンさせる場合は特に問題にならないが、分子量 の大きな液化ガスを断熱膨張させるとガス状態の 推業が凝縮し、ノズルからミスト噴射する可能性が ある。右図はブローダウン中のP-Tカーブを示して いる。理想の転所熱膨張では、断熱能振線(赤 繰)が常に触和蒸気圧曲線(青線)を上回っている。 それはガスが解除な五町単松を干刷している。 それはガスが解除する可能を干刷している。 これはガスが凝縮する可能性を示唆している。

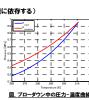
く ミスト化防止の加熱を宝施する時期:

<ミハドじ防止の加熱を実施する時期> ブローダウン中のミスト化を防ぐにはガスを加熱する必要がある。 加熱を実施する時期は大きく2通りある (1) ブローダウン中に加熱を行う 左回のようにブローダウン中に加熱を行うことで耐熱膨緩中の ガスのボルローブ指数を減少させる。必要な加熱量は断熱膨 振曲線が飽和蒸気圧曲線に一致するときのボルローブ指数を 振曲線が飽和蒸気圧曲線に一致するときのボルローブ指数を

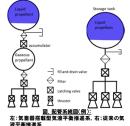
張曲線が艶和泰貝氏曲線に一致するときのポリトローブ指数で 求めることで計算できる (2)ブローダウン前に加熱を行う 噴射開始前に溶・ガスタンク間のバルブを閉めた後、ガスを加 熱する(石図の1→2の過程)、断熱曲線が艶和蒸気圧曲線 と交わる点(石図③)まで、ブローダウンを継続できる。

## <ミスト化防止の加熱量>

るスパーのエンルボニン 商星買量を100 kgと仮定して、連続噴射時のミスト化防止の ための加熱量を計算した結果、Inf/secの速度増分を連続噴 射で実現するためには2.2kJの総加熱量が必要、ただし、タン クシェルとガス間との熱交換は計算に考慮していない。







+ - transformation chang 図、ブローダウン中の圧力-温度曲線 左:ミスト化防止運用(1)、右:ミスト化防止運用(2)

	Amount of heat	Accumulator volume	Prop. mass	impulse	Selocity crement
	Q [kJ]	V [L]	m [kg]	P [Na]	V [m/s]
←図、ミスト化防止のための加熱	2.2	13	0.227	100	1
計算条件:衛星質量: 100 kg. 指	4.4	26	0.455	200	2
薬: HFC-125. ブローダウン比: 2	6.6	39	0.683	301	3
	8.8	52	0.911	402	4
$\rho 0 \rightarrow 0.5 * \rho 0$	11.0	65	1.140	503	5

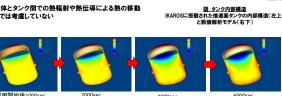
## (3) 噴射中のタンク内の温度勾配解析

○暦の日本ボンタンクトに流出する可能性のある温度勾配(0.3℃)を大きく上回るという解析結果が得られた。ただし、飛翔データとの定量的な整合性を確認するためには、液体推業がタンク壁面を伝ってガスポートから排出する力学的な運動を考慮した解析が必要である。

## <計算条件(熱の収支)>

- 熱量損失@気液界面
   Date:2010/6/30

- Date:2010/6/3U 総がルスカンナ:200 RCS連開時間:200×41 = 8200 s 総損失財量:180[kJ/kg]×200.4 [g]=36.1 [kJ] 単位時間当たりの損失財量: 36.1/8.2 = 4.40 [W] (=J/s)
- 熱供給 from ヒータ2010/6/30当日の実DUTYはテレメ受信時間間隔が大
- 2010/0/303日100美UIIIカンを支信時間间間間が きいため不確定ため、運用内容の近い2010/5/28の実 DUTYを使用する 実DUTY: 18.6% 単位時間当たりの供給熱量: 23.65 [W] \*18.6% = 4.40
- 、 ※衛星本体とタンク間での熱輻射や熱伝導による熱の移動 は本計算では考慮していない



図<u>計算結果(タンク温度勾配):</u> 気液界面とタンク底部で10℃程度の温度勾配がつく結果が得られた