

ドライアイス推進剤とした 電気推進システムの提案と供給実験

Electric Propulsion System with Dry Ice Propellant

○眞木 達朗（名大院）・杵淵 紀世志（名大）
張 科寅・渡邊 裕樹（宇宙航空研究開発機構）

○Tatsuro Maki (Nagoya University) ・ Kiyoshi Kinefuchi (Nagoya University)
Shinatora Cho ・ Hiroki Watanabe (JAXA)

Abstract

Dry ice was proposed as a propellant for electric propulsion spacecrafts. Dry ice could realize low-cost propulsion system in comparison with xenon propellant and could obtain in space, e.g., from Mars atmosphere and human exhalation. In this study, CO₂ gas supply experiment from dry ice using triple point storage and demonstration with a cold gas thruster and a Hall thruster were conducted. The triple point was maintained during CO₂ supply as long as the solid phase existed in the tank. During the triple point, constant tank pressure and flow rate were obtained. A numerical model to estimate the heat input to the tank and phase characteristic in the tank was developed. The simulation demonstrated a possibility of hundreds of days of storage and operation in orbit. A 1kW-class Hall thruster and a cold gas jet thruster were operated by triple point sublimation supply.

1. はじめに

宇宙開発の一層の発展に向け人工衛星の低コスト化が求められている。現在 Xe が静電加速型の電気推進の推進剤として多く用いられている。Xe は比重が高いことに加え、低い電離コスト、無毒等のメリットがある。しかし Xe は高価であることに加え、高圧で充てんする必要があるため、タンクが肉厚となり質量大となる。このため安価で低圧貯蔵可能な推進剤が求められている。そこで本研究ではドライアイス（固体 CO₂）を推進剤とした電気推進システムを提案する。表 1 にてドライアイスと Xe の特徴を比較した。ドライアイスを用いる理由として、比重は Xe と同等だが、価格が Xe に比べ圧倒的に安いこと、宇宙探査において火星大気から精製可能であること、有人探査において人間の呼気を推進剤として利用すること等が挙げられる。ドライアイスを資源と捉え、宇宙空間で排出することは地球環境保全、カーボンリサイクルに僅かながらも貢献できる可能性がある。さらにドライアイスを三重点で用いることにより、0.52MPa の低圧貯蔵が可能となり、三重点が維持されている間、タンク内の圧力、温度は一定に維持されるため、圧力レギュレータ等の装置が不要となり一層の簡素化、低コスト化が実現できる。

本研究では、世界初のドライアイスを推進剤とした三重点での定圧・定流量供給の実証とタンク内の熱流動状況の実験的確認、実験に基づき開発した解析モデルによる軌道上での貯蔵性能予測、およびコールドガスジェットとホールスラスターのドライアイス三重点供給による作動実証を行った。

表 1 推進剤の比較

推進剤	価格	圧力	比重
ドライアイス (三重点)	400 円/kg	0.52MPa	1.51
Xe (超臨界)	28 万円/kg	9.0MPa	1.56

2. 三重点について

三重点とは、その物質の気・液・固の三つの相が共存し、熱力学的平衡状態にある温度と圧力である。CO₂ の三重点は温度 -56.6°C、圧力 0.518MPa である。三重点近傍における相変化について図 1 を用いて説明する。まず、タンク内にドライアイスを入れ密閉する。周囲からの入熱により昇華が発生し、固気平衡線に沿って温度及び圧力が上昇する。三重点（図 1 の相図の点 O）に到達時、タンク内は固相と気相のみである。その後、入熱により固相は融解し、徐々に減少、液相が現れ始める。その際ドライアイスは三重点下にあるため、タンク内部温度と圧力は一定に維持される。これはタンクへの入熱と融解熱が平衡となるためである。三重点は固相がなくなり、液相と気相のみになった時点で終了する。

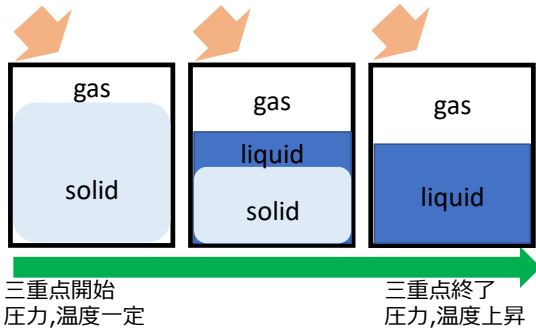
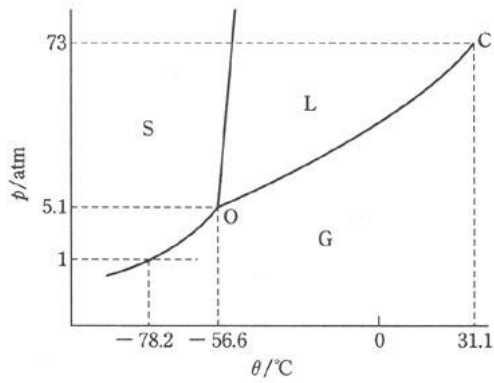


図1 CO₂の相図と三重点近傍におけるタンク内の相変化[1]

3. 実験装置

図2にドライアイス供給装置を示す。タンクにはユニコントロールズ製のTA100 蓋着脱方式フェールクランプ式タンク(容量2.5L, 材質SUS304)を用いた。タンク周囲には断熱材を施工した。断熱材としてはエアフレックス標準シート(厚さ25mm)を採用した。タンク内部圧力はデジタル圧力センサ(Panasonic DP-102ZA)にて、供給流量は気体流量計(SMC PF2M7)によって計測した。K型熱電対をタンク内(タンク中心, 上蓋から55mm位置)とタンク外側壁(上蓋から軸方向に15mm間隔おき)に設置し、タンク内外温度を計測した。タンクの質量変化は新光電子製の高精度電子天秤RJ-12Kを用い計測し、事前に放出流量とドライアイス消費量の校正を行った。

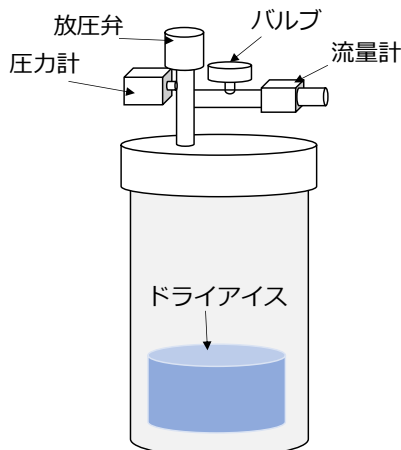


図2 ドライアイス供給装置

4. ドライアイス貯蔵・供給実験

ドライアイス貯蔵したタンクからの三重点定圧・定流量供給の実証実験と、タンク内の熱流動状況とタンクへの入熱量を把握しモデル化するための熱流動・入熱計測実験の2種の実験を実施した。いずれの実験も大気圧下にて行った。

4.1 三重点定圧・定流量供給実験

まず三重点による定圧・定流量供給の確認実験を行った。まずドライアイスタンク内に投入し、その後空気を排除するための数回の置換作業を経て、実験を開始した。実験中のタンク内圧力、タンク内温度の履歴を図3に示す。大気からタンクへの入熱があり、ドライアイスが昇華し圧力が上昇していく。実験開始から約2600秒を境に圧力が一定になることが確認された(この間、バルブ、放圧弁等は一切操作していない)。この点でドライアイスが三重点に到達したと考えられる。実験開始から約5200秒でバルブを解放した。この際、バルブの開度は一定に保持した。バルブ開によりCO₂流量が立ち上がっており、その後一定流量が維持されることが確認された。よってドライアイスの三重点下において、定圧・定流量供給が実証された。またタンク内の温度に関して、圧力が一定到達後から、概ね三重点温度まで下がり、ほぼ一定が維持されることが確認された。

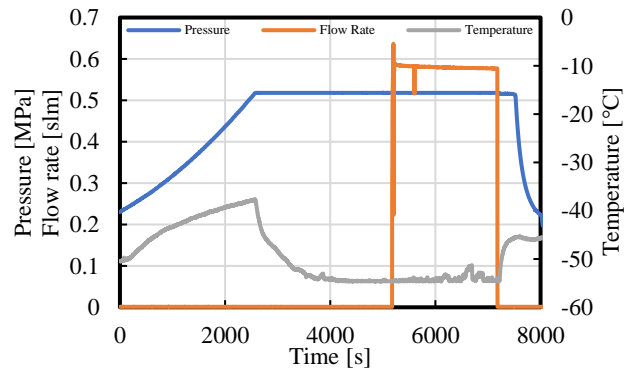


図3 圧力、タンク内温度、流量の履歴

4.2 熱流動・入熱計測実験

次に入熱量を計算するためにタンク外部側面の軸方向温度分布の測定実験を行った。この実験では、タンク外側面(断熱材内側)にタンク上蓋から15mm間隔で熱電対を設置し温度分布を測定した。実験結果を図4に示す。三重点には約1500秒前後で到達したことが圧力計および図4から確認された。その後、ドライアイスに近い熱電対のみ温度が低下している。これは三重点到達後のドライアイスの融解により流動性を持つ液相が生じ、壁面に接触することで壁面を冷却したためと考えられる。その後、実験開始から約1800秒で放圧弁を解放した。解放した際の温度変化は、タンク上蓋付近の方が大きく、ドライアイス近傍の方が小さい。これは、タンク下側に存在している温度の低い気体が放圧弁を解放することにより上部へ流動し、タンク上蓋付近が強制対流により冷却されたためと考えられる。

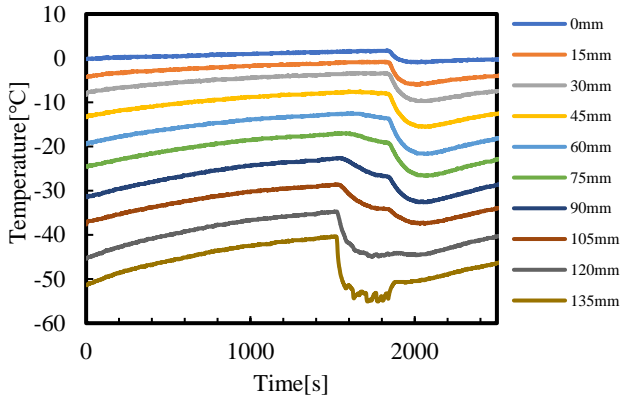


図4 タンク側面温度分布
(タンク上蓋から軸方向15mm間隔で計測)

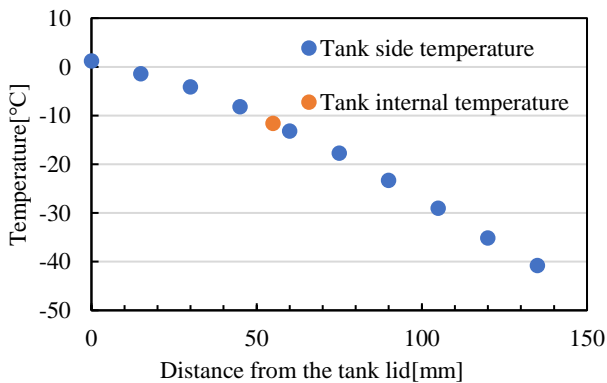


図5 1000秒におけるタンク外部側面温度とタンク内部の温度

図4の1000秒時点におけるタンク外部側面温度とタンク内部温度のタンク軸方向分布を図5に示す。図5から、タンク内部の温度はタンク外部側面の温度とほぼ等しく、半径方向の温度分布は無視できるものと考えられる。そこで、壁面の温度分布とタンク内気相部の温度分布が等しいと仮定し、気体の状態方程式を全微分することによって、三重点到達前の圧力上昇率から昇華量を算出し、これを入熱量に換算した。さらに、断熱材の熱伝導率等を用い、表1の条件の下でタンク内への入熱量の一次元理論予測を行った。タンク入熱量の実験値と理論値の比較を表2に示す。実験値が理論値をやや上回っているが、理論計算では配管系からの入熱、タンク蓋の熱容量等を考慮していないためと考えられる。

表2より理論計算が概ね妥当であることが確認できたことから、同等のモデルによりタンク断熱材としてMLI (Multi-Layer Insulation) [2]を採用し、周囲を真空環境とした場合の入熱量を見積もったところ、0.18Wとなった。この場合、タンク封じ切り状態では、タンク内のドライアイスがすべて消失し、液相、気相となるまでに約150日を要する結果となった。断熱のみであっても軌道上では一定の貯蔵性が確保可能であることが確認された。

表1 入熱量一次元理論計算条件

外部流体 (空気) 温度 $T_{\infty 1}$ [K]	293
タンク内 (CO ₂) 温度 $T_{\infty 2}$ [K]	195
タンク内径[m]	0.057
タンク外径[m]	0.077
断熱材熱伝導率[W/m·K]	0.032
タンク外熱伝達率[W/m ² ·K ²]	2.17
タンク内熱伝達率[W/m ² ·K ²]	0.099

表2 入熱量の理論値・実験値の比較

	理論値	実験値
入熱量	3.30W	4.27W

5. 軌道上貯蔵性能の予測

三重点下においてタンク内の相変化状況を把握するため、タンクへの入熱が \dot{Q} で、流量 \dot{m} の気体排出がある場合の三重点 (すなわち圧力、温度が一定) におけるタンク内部の相分率について式を導出した[3]。

$$\frac{dU}{dt} = u_{tr,v} \frac{dm_v}{dt} + u_{tr,l} \frac{dm_l}{dt} + u_{tr,s} \frac{dm_s}{dt} = \dot{Q} - \dot{m}h \quad (1)$$

$$\frac{1}{\rho_{tr,v}} \frac{dm_v}{dt} + \frac{1}{\rho_{tr,l}} \frac{dm_l}{dt} + \frac{1}{\rho_{tr,s}} \frac{dm_s}{dt} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{dm_v}{dt} + \frac{dm_l}{dt} + \frac{dm_s}{dt} = -\dot{m} \quad (3)$$

ここで U :内部エネルギー, u :比内部エネルギー, m :質量, h :放出ガスの比エンタルピー, ρ :密度である。添字 tr は三重点を, v, l, s はそれぞれ気相, 液相, 固相を表す。式(1)はエネルギー保存, 式(2)は体積保存, 式(3)は質量の保存式である。式(1)の右辺 $\dot{Q} - \dot{m}h$ は入熱量と排出エンタルピーの差であり、この値によって各相の時間変化特性が決定される。すなわち、 $\dot{Q} \gg \dot{m}h$ では入熱が支配的となり固相が減少し、液相と気相が増加する。 $\dot{Q} \ll \dot{m}h$ の場合は流量によるエンタルピーの流出が上回り、固相が増加する特性となる。

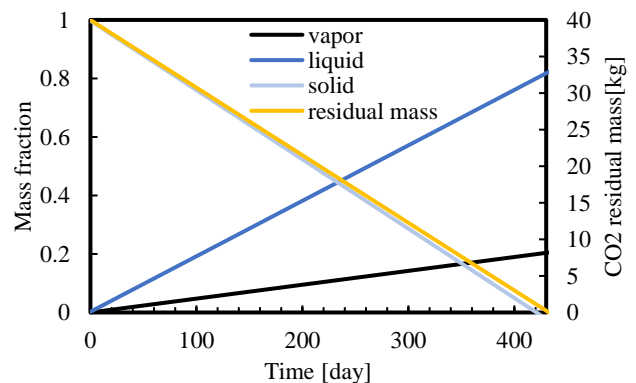


図6 タンク体積25L, 供給流量35sccmの場合の軌道上におけるタンク内部の相変化と推葉残量の予測

導出した式を用いてタンク内の各相の質量分率を予測した。ここでタンク容積は実際の宇宙機を想定し 25L とし、入熱は断熱材として MLI を想定し 0.67W とした。流量としては 1kW 級ホールスラスタに相当する 35sccm を供給すると仮定した。タンク内部の相変化をと残量の時間変化を図 6 に示す。このケースでは、入熱がエンタルピを上回っているため、固相が増加する結果となっている。しかし、スラスタへの流量供給によりタンクからエンタルピが持ち出される分、タンク封じ切りのケースの 150 日程度に対し、400 日以上運用が可能と概算された。また、このケースでは固相が無くなる（三重点が終了する）タイミングとほぼ同時に推薬が枯渇していることが確認される。

6. スラスタとの噛み合わせ実験

近年の電気推進宇宙機は、主推進としての電気推進に加え、レートダンブや姿勢制御のためにコールドガスジェットスラスタを搭載するケースが増えている。そこで本研究では、コールドガスジェットとホーススラスタを対象としてドライアイスからの三重点 CO₂ 流量供給とスラスタ作動実験を行った。

6.1 コールドガスジェットスラスタ

スロート径 0.5mm、膨張比 64 のコールドガススラスタへのドライアイスの三重点供給実験を行った。真空チャンバは直径 1.2m、平行部長さ 2.7m である。ドライポンプ（荏原製作所 AA70WN-H）で 10Pa まで粗引き後、ドライポンプを停止しクライオポンプ（Ulvac Cryogenics CRYO-U20）により減圧した。チャンバ内は常に 20mPa 以下に保たれた。推力は振り子式推力スタンドにより計測した。スラスタへの CO₂ の供給温度はほぼ室温であった。

図 7 に実験により得られた推力と推進剤流量の関係を示す。おおむね線形関係が得られている。すなわち、ノズルでの膨張に伴う CO₂ の固化、液化は発生していないものと考えられる。図 8 に比推力を示す。比推力は流量とともに上昇する傾向が得られた。低流量では境界層が厚くなり、実効的な膨張比が低下したためと考えられる。供給流量を大きくしていくと境界層厚さが薄くなり、より実際の膨張比に近づいたものと考えられる。

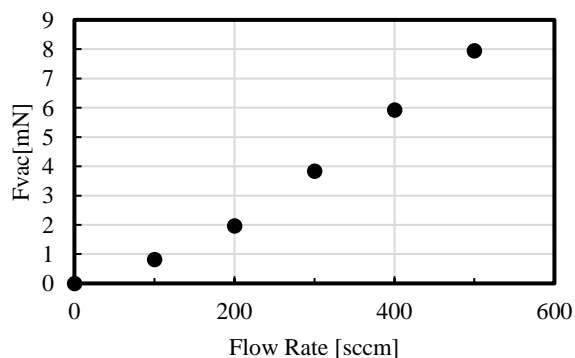


図 7 推進剤流量と推力の関係

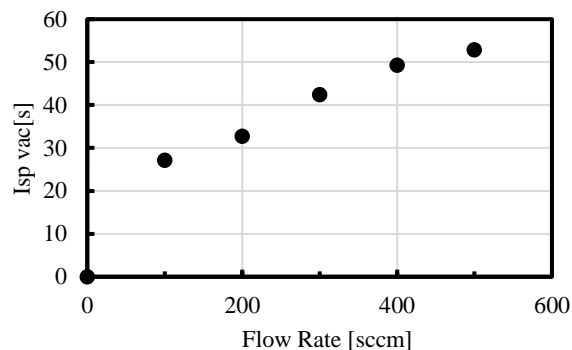


図 8 推進剤流量と比推力の関係

6.2 ホールスラスタ

1kW 級ホールスラスタヘドライアイスからの三重点供給を行い作動特性を調査した。カソードは Xe ホローカソードを用い、磁場コイルはアノードと直列接続となっている。放電電圧 200V、アノード流量 35sccm、キープ電流 3A にて実験を行った。真空チャンバは JAXA 宇宙研のスペースサイエンスチャンバを使用した。

真空チャンバ内でのホールスラスタの作動状況を図 9 に示す。放電電流とコイル電圧を図 11 に示す。放電電流が 20ms 周期で振動する結果になった。アノードコイル直列接続であるため、無磁場で放電電流が流れ始めるが、コイルインダクタンスにより磁場がすぐには立ち上がらず、突発的なスパイク状の電流波形となっている。磁場の立ち上がりと共に電流が制限されるが、イオン生成量が不足しており、放電を維持できず失火、その後無磁場となると再び突発電流発生を繰り返す結果となった。

試験後の点検では、炭素の堆積や過度のスパッタ等は認められなかった。したがって今回は生成されたプラズマとしては CO₂+ が主体となっているものと考えられる[4]。今後、イオン生成量と炭素や原子状酸素等によるスラスタへのダメージを踏まえたスラスタ設計を進めていく必要があると考えている。

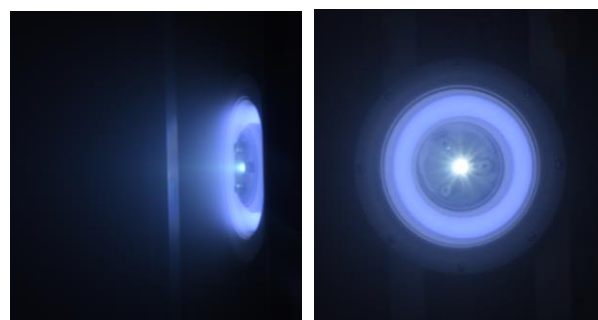


図 9 CO₂ によるホールスラスタの作動の様子

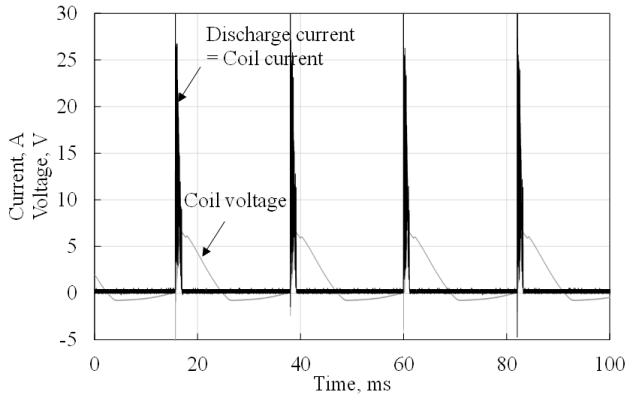


図 10 ホールスラスタ作動時の放電電流, コイル電圧

7. ま と め

電気推進宇宙機の推進剤としてドライアイスの採用と三重点を利用した供給方式を提案した. 実験によりドライアイスの三重点を利用した CO_2 ガスの定圧・定流量供給を実証した. 入熱と三相の相変化を予測可能な理論モデルを構築し, 軌道上では数百日に渡る貯蔵・供給が可能な見込みを得た.

ドライアイスからの三重点供給による CO_2 コールドガスジェットおよびホールスラスタの作動を確認した. ホールスラスタはパルス作動となっており, 今後安定作動に向けた実験を継続する. ミッション柔軟性の向上, 打上げ前の地上待機時を考慮し, タンク温度制御方式 (ヒータやペルチェ素子の利用) や, 微小重力下でのタンク内の三相の動的制御についても今後研究を進める計画である.

参 考 文 献

- [1] 北川能, 呉海帆, 塚越秀行, 朴聖煥, 三重点における相変化を利用した携帯圧源の開発, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 2005 年 11 月.
- [2] Takeshi Miyakita, Kazuya Kitamoto, Kiyoshi Kinofuchi, Masanori Saitoh, Tomoyuki Hirai and Hiroyuki Sugita, "Development of a new MLI for orbital cryogenic propulsion systems – thermal performance under one atmosphere to a vacuum," ICEC-ICMC, 2018.
- [3] Morten Hammer, "A method using a density-energy state function with a reference equation of state for fluid-dynamics simulation of vapor-liquid-solid carbon dioxide," Ind. Eng. Chem. Res. 2013, 52, 29, 9965–9978.
- [4] Cechan Tian and C. R. Vida, "Electron impact dissociative ionization of CO_2 : Measurements with a focusing time-of-flight mass spectrometer," Chem. Phys. 109, 1998.