

2023年8月7日

軌道間輸送システムを実現する推進薬マネジメント研究に関する提言

東京大学大学院工学系研究科 姫野 武洋

1. はじめに

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所における「宇宙輸送専門委員会」(徳留委員長(当時))および日本航空宇宙学会における『JSASS 宇宙ビジョン 2050』検討WGにおける議論のうち、軌道間輸送ネットワークに関する議論を紹介したうえで、その実現のための基盤技術として推進薬マネジメントの重要性について述べる。

2. 地球圏宇宙の経済活動

2.1 人類活動の拡大

21世紀の初頭段階では、大気圏外の人類活動は、国際宇宙ステーション(ISS)とその軌道に限られ、地球上から常時遠隔管理されつつ、特別に訓練された人々により営まれている。宇宙輸送技術と軌道上インフラ(物流・エネルギー・サービス)の低コスト化と高信頼化が進展することが見込まれる今世紀の後半には、人類の日常的活動領域が、月面を含む『地球圏宇宙』と呼ばれる領域に拡大し、多くの人々が自由意思に基づく経済活動を営むようになる。

地球圏宇宙での経済活動は、人工衛星や軌道上ロボットなどの無人飛行が先導し、地球上と異なる体験的価値(観光・冠婚葬祭など)を追求する乗客のための短時間有人飛行、続いて、地球周回軌道上の低重力環境を利用した長時間滞在(遊戯・療養(終末医療含む)など)へ、段階的に発展すると考えられる。更に、軌道上インフラが構築されるにつれて、民間企業による軌道上実験室の提供や、『太陽系空間』(深宇宙)開拓へ向けた中継基地も提供されるようになるであろう。

2.2 輸送システムと軌道上インフラ

地球圏宇宙での経済活動は、高信頼性かつ低コストの宇宙輸送システムと軌道上インフラ無くして存立しえない。有人と無人それぞれに対応した再使用宇宙往還機(RLV)から成る『打上輸送システム』に加え、図1に示すような、軌道間輸送機(OTV)と、軌道上での推進薬再補給拠点(Depot)や貨客中継港などから成る『軌道間輸送システム』が必須となる。また、経済活動拡大に伴うエネルギー需要増大を賄うためには、個々の活動拠点に発蓄電設備を備えた分散電源体系だけでなく、電力の空間伝送技術による集中電源体系を併用できることが望まれる。軌道上の集中電源ハブとしては、太陽光および太陽熱を利用した軌道上発電衛星群や、地球上から伝送される電力の軌道上中継衛星群が想定される。

更なる将来、軌道上発電衛星の能力増強は、軌道上から地球上へ電力供給に繋がり、軌道間輸送システムの能力増強は、隕石や小惑星の地球衝突を回避する手段に繋がる。軌道上宇宙港は、もちろん、火星や木星などの太陽系空間航行へ向けた前哨基地でもある。このように、地球圏宇宙を人類の日常的な活動領域に組み込み、平和的な開発利用を推進することは、人類の持続的生存と知の地平拡大に貢献する一里塚である。

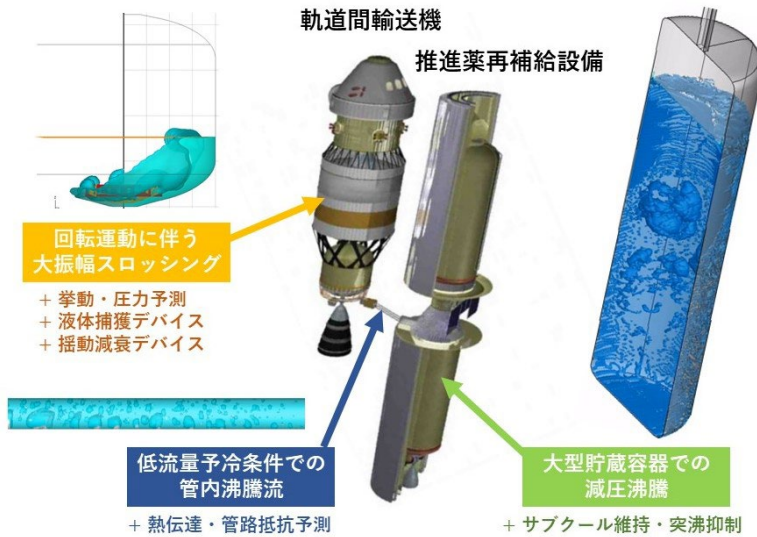


図1 軌道上推進薬再補給に関わる極低温推進薬管理課題 (機体CGは©ULA)

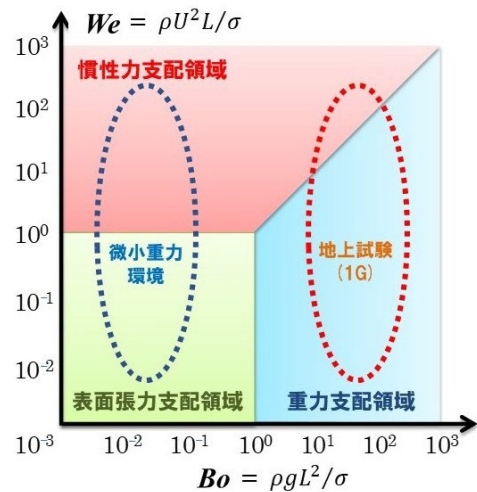


図2 流動を支配する力

3. 軌道上再補給拠点(Depot)と軌道間輸送機

3.1 近未来の宇宙開発競争

地球圏宇宙の開拓には、第一義的に、地球上と低軌道を繋ぐ打上輸送システムの低コスト化と高信頼性化が必須である。近年、米国を筆頭として民間事業者の参入により打上サービスの開発競争が加速しており、打上輸送システムは今世紀における宇宙開発競争の「主戦場」となっている。その先を見据えた領域が、軌道間輸送システムであり、2030年代の宇宙開発競争における「次の主戦場」と位置づけられる。

3.2 推進薬マネジメント

軌道間輸送船(OTV)と軌道上再補給設備(Depot)の実現に必要な鍵となる技術として、『ドッキング』技術と並んで『推進薬マネジメント』技術が挙げられる。推進薬マネジメントとは、地上とは異なる加速度環境で、極低温推進薬の熱流動を制御する技術を指す。

推力や姿勢変動を伴うロケット飛行中の非定常加速度環境や、比重差による液体駆動を期待できず、界面張力が相対的に卓越する低重力環境では、液体を、①望ましい位置に保持し(捕獲)、②思い通りに移し替え(搬送)、③その温度と圧力を制御すること(熱制御)が難しくなる(図2)。そのため、地上での暗黙の経験と試運転に基づいて設計された流体機器は、軌道上で想定した性能を発揮できないことが珍しくない。

これらの分野の技術課題を解決するためには、地上での実験的再現が難しい熱流動現象について知見の蓄積が必要だが、航空機や落下塔を用いて特殊加速度環境を得られる機会は限られている。このことが軌道上で運用される流体機械の開発段階における試行錯誤と試運転を難しくしており、勢い設計は保守的にならざるを得ず、宇宙開発利用を展開していく技術革新を阻んできた。

3.3 開発課題の具体例

推進薬マネジメントは、元来、液体ロケットや人工衛星にも共通する技術課題である。

現実的課題として、基幹ロケット(H3)の上段推進系において、図3に示す第1回燃焼停止に続く数時間に亘る慣性飛行(弾道飛行)中に、機体への太陽光入射を低減させるよう機体姿勢を変更する際、液体水素タンクにおいて大規模なスロッシング(液面揺動)が発生し、気液界面と固体壁近傍での熱伝達と凝縮が促進される結果、タンク圧力が大幅に低下することが懸念されている。また、基幹ロケット(高度化型 H2A)

では、第 2 段の慣性飛行を経た再着火に先立ち、燃焼残留熱や太陽光入射によって昇温した配管やターボポンプ軸系を、極低温推進薬を冷媒として沸騰潜熱によって再冷却(予冷)する際、事前の地上燃焼試験に比べて飛行中の流路圧損が小さく、多量の推進薬を消費してしまうなどの報告がある。いずれの事象も、相変化を伴う熱交換過程が地上重力環境と飛行中の加速度環境で異なることに起因しているが、現状では、予冷や加圧に消費されて推力に寄与しない無効推進薬を、余裕分として追加搭載した打上げが行われている。

将来的課題としても、再使用型打上ロケットが垂直着陸へ向けて帰還飛行を行う際や、軌道間輸送機が再補給拠点との連結へ向けた接近飛行を行う際に、従来のロケットや宇宙機に比べて急激かつ大きな姿勢変更が要求される局面があり、大振幅スロッシングに伴う推進薬の重心移動を適切に予測することは誘導航法上も重要である。また、再補給拠点の流体機器を設計するためには、補給に先立つ配管予冷時に、低重力かつ低流量条件となる管内沸騰流の圧損や熱伝達などの熱流動特性を定量的に予測できることが求められる。

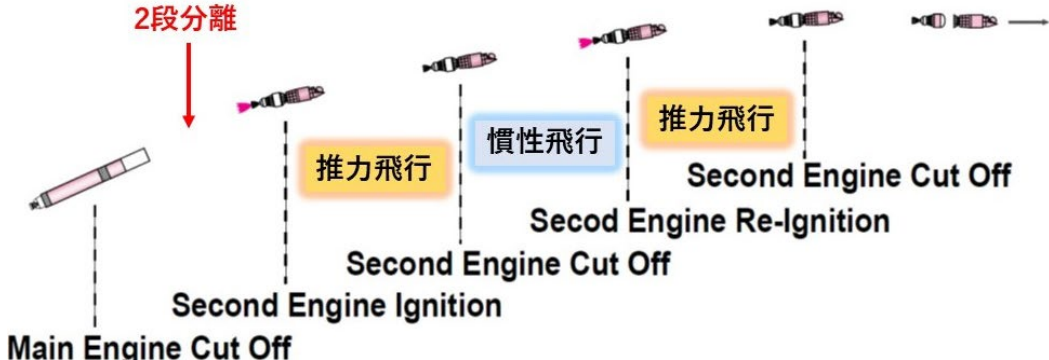


図 3 上段再着火と慣性飛行を伴う液体ロケット飛行の例

表 1 我が国における推進薬マネジメント技術実証の例

H-IIA 上段慣性飛行		
TF1 号機	液体水素タンク可視化(スロッシング、加圧ヘリウム噴射、スピニアップ)	
	20000 秒慣性飛行後の再々着火実験	
4,5,6 号機	1200~4300 秒慣性飛行中のデータ取得(入熱量、予冷特性、アイドルモード燃焼)	
8 号機	7000 秒慣性飛行後の再々着火実験、少量残推進薬	
再使用ロケット実験機		
RVT-9	横風突風時のスロッシング予測技術獲得(加振実験、CFD)	…図 4
RV-X	転回飛行時アンチ・スロッシュバツフル性能予測技術獲得(加振実験、CFD)	…図 6
CALLISTO	帰還飛行時のスロッシング予測技術獲得(落下塔実験、加振実験、CFD)	進行中
H-IIA 上段高度化		
S310-43	複雑形状流路内沸騰現象可視化(観測ロケット実験、CFD)	…図 7
29 号機	長秒時慣性飛行中のデータ取得(入熱量、トリクル予冷特性、タンク圧履歴、CFD)	
深宇宙探査		
MMX	火星衛星降着時のスロッシング予測技術獲得(落下塔実験、CFD)	

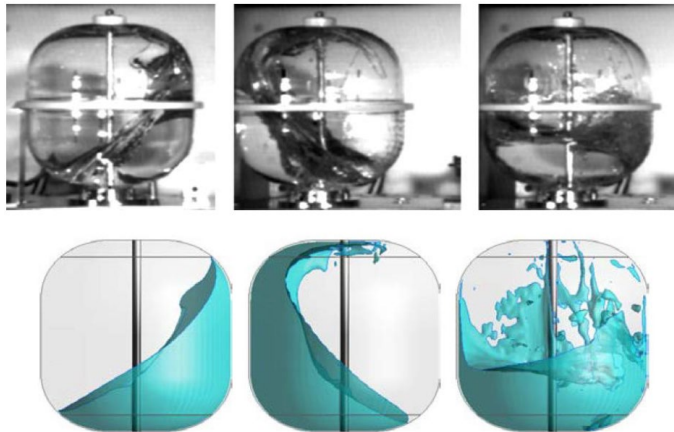
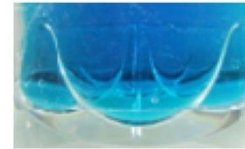
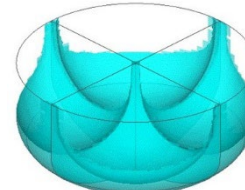


図4 再使用ロケット実験機のスロッシング
実験(上)と数値解析(下)



実験観察(例)



数値解析(例)

図5 表面張力による液体捕獲
実験(上)と数値解析(下)

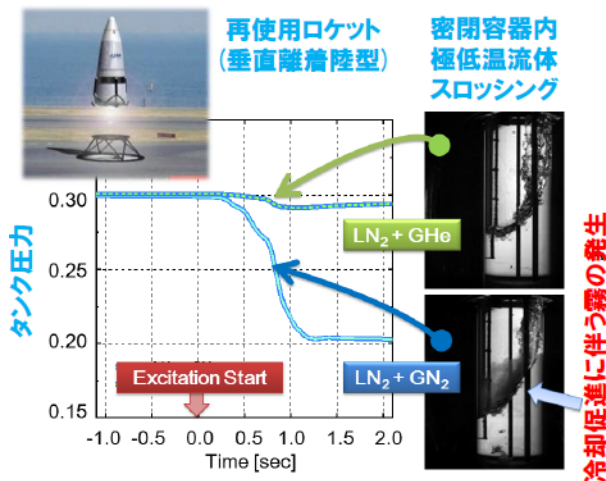


図6 スロッシングに伴うタンク圧力急降下

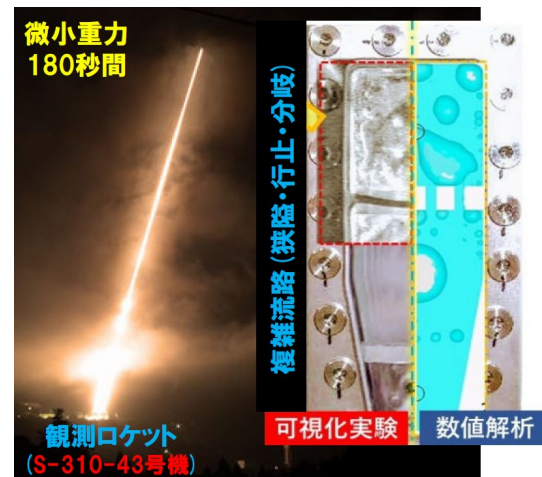


図7 観測ロケットによる予冷特性把握実験

3.4 国内外の技術成熟度

その重要性は、宇宙開発の草創期から認識され、1960年代には米国アポロ計画の中で網羅的で数多くの研究報告があり、国内でも H-I および H-II ロケットの開発時期(1980年代)に関連する報告が散見される。しかし、関連する設計クライテリアに対し理論式や実験式に基づく根拠が与えられるのは、容器や流路の形状、流動様式が単純な場合に限られており、実際の動的加速度環境における熱流動特性に関する知見の蓄積は十分でない。

また、気液二相流の数値シミュレーションが急速に発達した1990年代後半以降、関連する数値解析も数多く試みられているが、極低温流体管理の視点から、気液間の相変化および固体の内部伝熱との連成までを考慮した解析例は少なく、世界的に見ても、関連する熱流動特性の実験的整理も未だ工学的に有用な域に到達していない。

このような認識に立ち、米国と欧州では、軌道間輸送システムの実現へ向けた推進薬マネジメントの研究を加速する機運が高まりつつある。軌道間輸送システムは、①軌道上で長期間繰返し運用される点、②低重力・高真空(廃熱困難)などの極限的環境を地上で模擬できず、試行錯誤的な開発研究の機会が限定されている点など、技術的にも学術的にも未知の領域を残しており、困難ではあるが挑戦すべき課題が山

積している。

3.5 我が国における開発研究実績と課題

我が国においては、表1に示すように、JAXA(NAL/NASDA/ISAS)と大学、メーカーが協力し、落下塔や加振機を用いた地上実験、観測ロケットを用いた微小重力実験、基幹ロケットそれ自体を用いた軌道上試験など、推進薬マネジメントの技術成熟度を向上させる技術実証が継続的に実施されてきた。一連の成果として、多数回着火機能と長秒時運用(約6時間、静止軌道投入アシスト)が可能な極低温上段推進系(高度化型H2A)技術を獲得するに至っている。また、技術実証を通じて蓄積された知見と数値シミュレーション手法は、各種の再使用ロケット実験機の開発研究にも展開されている。このように、我が国は、部分的ではあるが、世界的にも優れた推進薬マネジメント技術を保有していると評価できる。

一方、我が国における課題として、推進薬マネジメントを打上輸送システムと軌道間輸送システムの共通基盤技術として位置づけ、機体設計や開発プロジェクトに先行し、恒常的かつ体系的に進める研究実施体制が構築できていない点を指摘したい。過去からの技術を継承して更に発展するためには、現象の理解に基づく実験的知見を数理モデルとして記述することで一般化し、数値シミュレーションの計算モデルとして集約し統合したうえで、「デジタルツインによる試運転」により、複雑現象の定量的予測に繋げるという方針を掲げることが重要である。また、それを実行するために産官学連携のコミュニティを形成し、若手研究者が活躍して成長できるプラットフォームとし、戦略的に人材育成を図るべきである。

4. 提言

以上のような認識を踏まえ、宇宙輸送技術戦略策定の議論に関連して、以下を申し述べる。

- (1) 推進薬マネジメントを、打上輸送システムの多機能化と高信頼化だけでなく、軌道間輸送システムの実現にも重要な共通基盤技術として位置づけるのが望ましい。
- (2) 推進薬マネジメントに関わる開発研究を、産官学連携で体系的に推進する体制を構築し、専門的な人材育成と併せて実行することが望ましい。

具体的に、以下の3点を挙げる。

〔実験設備〕

各機関が保有する落下塔、加振機、真空チャンバー等の大型共通試験設備を維持・拡充するとともに、各機関が連携して極低温試験を実施できる試験場の拡充することが望ましい。

※ JAXA 能代、JAXA 角田等を想定。

〔デジタル技術〕

数値シミュレーションを分析手法として使用するだけでなく、推進薬マネジメントの開発研究で得られた知見の統合先として改良を重ね、「デジタルツインによる試運転」を可能とすることを目指し、成果物を国内の研究機関と開発企業に対して共有するのが望ましい。

〔軌道上実証〕

基幹ロケットや観測ロケットを積極的に活用し、推進薬マネジメント開発研究の技術実証の機会を資金と共に創出して欲しい。

※ 飛行データの活用、副ペイロードを搭載した軌道上実験等を想定。

以上