

宇宙と地上と人をつなぐ社会実装拠点(2021)

高野敦*¹ 喜多村竜太*² 藤本滋*³ 高橋賢一*³ 高橋晶世*⁴ 正井卓馬*⁴ 植村寧夫*⁵ 堤健児*⁵ 國廣 愛彦*⁶

The social implementation base for connecting space, ground, and people

Atsushi TAKANO*¹ Ryuta KITAMURA*² Shigeru FUJIMOTO*³ Kenichi TAKAHASHI*³ Akiyo TAKAHASHI*⁴ Takuma MASAI*⁴

Shizuo UEMURA*⁵ Kenji TSUTSUMI*⁵ and Yoshihiko KUNIHIRO*⁶

1. 緒言

本プロジェクト研究は最終目標として宇宙連携拠点プラットフォーム構築を掲げ、研究および組織の構築を推進するものである。第一弾としてハイブリッドロケット研究を行う神奈川大学、電子機器・制御システム設計製造会社である(株)フルハートジャパン及び高度精密板金開発メーカーであるツツミ産業(株)を中核とした連携により、安全で低コストな宇宙輸送手段の確立・関連技術開発および産業的な視点を持った人材育成を目指すものである。この取り組みを通じて宇宙/民生分野ニーズ・シーズのマッチング機能・プロセス・体制を整え、プラットフォーム化を図る。その後、異なるテーマ・ニーズを持った研究機関・企業への参画呼びかけも行い、同プラットフォームの応用展開を図る。

2021年度(2021年10月~2022年9月)は「ハイブリッドロケットによる低コスト宇宙輸送手段の確立: #1 高度30kmへの到達」を通して各種デバイスの開発を行い、同時にそれら開発のかかわる人材の育成を進めた。

人材育成は、参画大学および企業で本業務に関連する研究を行う学生や技術者の相互交流を行うことで推進した。さらに、神奈川大学の「宇宙ロケット部」、日本大学で「ロケット研究会」としてすでに取り組んでいるように、研究室配属前の1~3年生でも意欲ある学生にも参加機会を与えて育成に取り組んだ。

2. チタン合金タンク開発^[1]

以前、著者らはアルミニウム合金パイプをCFRPで補強したものを

*¹ 教授 機械工学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

*² 特別助教 機械工学科

Assistant Professor, Dept. of Mechanical Engineering

*³ 客員教授 工学研究所

Visiting Professor, Research Institute for Engineering

*⁴ 客員研究員 工学研究所

Visiting Researcher, Research Institute for Engineering

*⁵ 特別研究員 工学研究所

Research Fellow, Research Institute for Engineering

*⁶ プロジェクト研究メンバー 工学研究所

Research Member, Research Institute for Engineering

胴体とし、アルミニウム合金製の外ねじ付き蓋をはめ込む形式で全長2m、直径150mm、容積34Lの酸化剤タンクの開発に2019年に成功し^[2]、打ち上げを実施した(これを2019タンクと呼ぶ)^[3]。これに続いてさらなる容積拡大及び軽量化を目標に、かつ燃焼試験設備に収納できる限界である全長2mを踏襲するため、直径を200mmに増大させることとした。圧力は亜酸化窒素の常温での蒸気圧が5~6MPa、臨界圧力が7.3MPaであることを考慮し制限圧力を6MPaとし、設計破壊圧力(=破壊試験圧力)は安全係数1.5を用いて9MPa、受入試験圧力は、降伏応力に対する安全係数1.25を用いて7.5MPaと設定した。またドーム部には半球形状を採用し、直胴部と同じ板厚を前提とし、材料として板厚1.2mmのTi-6Al-4V(6-4チタン合金)の焼鈍材を採用した。また貯蔵流体が酸素の場合、衝撃などによりチタン合金と反応して発火すると言われているが亜酸化窒素に対する反応性は文献が見当たらなかったため独自に試験を行い問題ないことを確認した^[4]。表1に設計結果の概要を、図1にタンク全体のCADを示す。表1に示すように軽量化指数 $pV/(mg)$ で2.2kmから4.9kmと大幅に改善された。

表1 設計結果概要

項目	2019 タンク ^[3]	チタン合金タンク
直径 D [mm]	150	200
板厚 t [mm]	3	1.2
内容積 V [L]	34.2	58.0
長さ L [mm]	1940	2015
質量 m [kg]	9.46	7.2
制限圧力 p [MPa]	6	6
軽量化指数 $pV/(mg)$ [km]	2.2	4.9

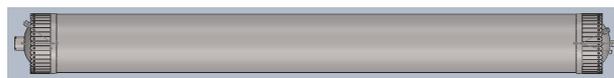


図1 タンク全体CAD

一方で溶接部の強度は溶接の技量や品質管理などにより低下することが予想された。そこで製造前にこれらの溶接時のフィルターの

有無，熱入力条件，目違い，溶接手直しを想定したケースについて試験片を作成し，引張試験で評価した。

タンクは両端の半球部，直胴部，耳金部および配管を締結するボス部分に分けて加工された。半球部，直胴部および耳金部は常温によるプレス加工を行った。通常，6-4 チタン合金のプレス加工は加熱しながら行われるが，ツツミ産業では常温にて割れなど生じさせることなくプレス加工するノウハウを有している。

溶接は NC ファイバレーザ溶接機を使用した。しかし継目は治具で固定しているものの 1.2mm という薄肉のため溶接時の熱変形で容易に面外に変形してしまうことに起因する溶接不具合が生じた。また半球部と直胴部は塑性加工の精度により目違いにより当初はアルゴン TiG による手溶接で対応したが，過大な入熱による脆化による強度低下が生じ，耐圧試験にて破裂するという事象に見舞われた(図 2)。この結果を反映し，プレス加工における精度の追込みと溶接時の治具及び溶接条件を見直し，フライトモデルは全周ファイバレーザ溶接で対応した。完成したタンク外観を図 3 に示す。また，加圧サイクル試験及び充填試験も完了させ，2022 年 10 月には打ち上げ実証を実施した。機体は回収できなかつたため飛行後のタンクの状況は確認できなかったが，飛行中のデータから判断する限り，タンクに起因する不具合は認められず，タンクの打ち上げ実証は成功した。



図 2 耐圧試験における破裂の様子



図 3 完成したタンク外観

3. テレメトリ・強制分離回路の打ち上げ試験評価⁶⁾

テレメトリ装置及び強制分離装置は 2021 年度以前に開発し，テレメトリ装置については(株)フルハートジャパンにより製品化されたものであるが，2021 年度の打ち上げでは混信が原因と思われる停

波が頻発した。原因を調査したところ，チャンネル周波数および距離が近接して複数の発信機が存在すると，混信を防ぐための停波機能が働くことが判明した。これを防ぐためには 10CH 以上，距離は 100mm 以上離すことが有効であることが判明した。しかし超小型ロケットであることから，従来のように GPS テレメトリを 2 台，大気圧テレメトリを 2 台，合計 4 台について相互の距離を 100mm 以上離して搭載することは至難の業であったため，GPS と大気圧テレメトリを統合し，4 台から 2 台へ減らすこととした。

この結果，2022 年 10 月に実施した打ち上げ試験では打ち上げ直前まで通信が停止することはなく，2021 年度よりも通信状況が改善した。2022 年度での飛行中においては，強制分離回路は飛行中に通信が途絶した。原因は新たに基板を追加したことにより横方向の加速度に対する強度が低下し，飛行中に横加速を受けて破損し，通信が途絶した可能性がある。またテレメトリ 2 台は着水後に通信が途絶したがこれは海水による電波の遮蔽によるものか，パラシュート未開傘による着水衝撃による破損と推定される。

4. 結言

本プロジェクト研究における第 1 段階である各種デバイスの開発を行った。チタン合金タンクは各種地上試験と打ち上げ試験を実施し，開発を完了した。

テレメトリ及び強制分離回路の混信問題を解決し，打ち上げ試験を行った。打ち上げ試験においても混信が解消されたが飛行中の振動によると思われる通信途絶が生じた。これは今後基板を統合するなどの対策を行うことで解消できる見込みである。

研究機関・企業との連携および人材育成の観点では，まだ成果は出ていないものの上述以外の企業・団体との連携が進行中である。

参考文献

- [1] 高野敦，五十嵐裕貴，喜多村竜太，正井卓馬，植村寧夫，蓮沼将太，政木清考，中山昇，堤健児，下川養雄，長谷川真人，Ti-6Al-4V 製ハイブリッドロケット用 58L 酸化剤タンクの開発，第 64 回構造強度に関する講演会，2A14，(2022)。
- [2] 三徳春季，西條紀之，齊藤慶紀，船見祐揮，喜多村竜太，高野敦，ハイブリッドロケット用酸化剤タンクの開発，令和元年度宇宙輸送シンポジウム，STCP-2019-038 (相模原，2020)。
- [3] 高野敦，我那覇七海，吉野啓太，欧正葆，杉本慶隆，崎山英努，檜山響太郎，福島優希，遊栗鈺，多田隼人，天沼響，岡村元太，渡邊舜也，中尾仁，喜多村竜太，正船見祐揮，高橋賢一，高橋晶世，國廣愛彦，三宅真，正井卓馬，植村寧夫，高度 15km を目指したハイブリッドロケットの打ち上げ結果，MoViC2021/SEC'21，A36，(オンライン，2021)。
- [4] 濱崎綾子，兼頼晴香，升啓太郎，熊田光樹，船見祐揮，喜多村竜太，高野敦，ハイブリッドロケットエンジンのための亜酸化窒素の反応調査，令和二年度宇宙輸送シンポジウム，STCP-2019-013(相模原，2021)。
- [5] 大槻龍一，服部建太，高野敦，喜多村竜太，國廣愛彦，三宅真，ハイブリッドロケットの無線通信の混信対策，令和四年度宇宙輸送シンポジウム，STCP-2022-008(相模原，2023)。