

# 展開エアロシェルを用いた観測ロケット実験データ回収モジュール RATS の開発及びフライト結果概要

○中尾達郎, 山田和彦, 羽森仁志, 永田靖典, 石丸貴博, 今井駿,  
前田佳穂, 前原健次, 羽生宏人 (JAXA)  
秋元雄希 (名古屋大学), 森みなみ, 満野真里絵 (東京理科大学),  
平田耕志郎 (東京農工大学), 高澤秀人 (北海道大学),  
鈴木宏二郎 (東大新領域)

Development of Reentry and Recovery Module with Deployable Aeroshell and Flight Demonstration using Sounding Rocket.

Tatsuro Nakao, Kazuhiko Yamada, Hitoshi Hamori, Yasunori Nagata, Takahiro Ishimaru, Shun Imai, Kaho Maeda, Kenji Maehara, Hideto Habu (JAXA),  
Yuki Akimoto (Nagoya University), Minami Mori, Marie Mitsuno (Tokyo University of Science), Koshiro Hirata (Tokyo University of Agriculture and Technology), Hideto Takasawa (Hokkaido University), Kojiro Suzuki (The University of Tokyo)

Key Words: Re-entry, Flexible structure, Inflatable Aeroshell, Iridium satellite Network, Recovery, Sounding Rocket

## Abstract

In sounding rocket experiments, there are demands for high resolution images and high sampling rate data collection that cannot be downlinked by telemetry. To meet these requirements, RATS (Re-entry and recovery module with deployable Aeroshell Technology for Sounding rocket experiments) was developed as recovery module for sounding rockets. RATS has a flare type thin membrane deployable aeroshell, which can enter the atmosphere with a low ballistic coefficient, decelerate by efficiently utilizing aerodynamic forces, and achieve a slow descent, soft landing, and floating at sea. The location data during the operation until recovery can be acquired via the Iridium satellite network. The sounding rocket S-520-31 with RATS was launched from Uchinoura Space Center at 5:30 a.m. on July 27, 2021. RATS was separated from the rocket 402 seconds after launch, and landed on the sea about 2,300 seconds later. It was recovered by helicopter about 100 minutes after splashdown.

## 1. はじめに

近年、観測ロケット実験において、テレメトリ通信では取得できないような大容量の実験データ、及び高価な実験装置の再利用のため、実験機部回収の要望は高まっている。海外の観測ロケットでは、実験機を陸上に着陸させることが可能な場合が多いため、基本は回収が前提として実験が計画される。一方国内では、国土の狭さから、実験機を海上に落下させるため、パラシュート等を用いた緩降下システムに加え、海上浮遊機能が必要になり、技術難易度が非常に高くなる。過去には、ISASのS-520型観測ロケットにて、計9回、回収実験が行われ、5回成功している。しかしながら、上述の技術難易度の高さ、それに伴う費用の高騰といった理由から、1998年のS-520-22号機を最後に回収実験は行われていない<sup>1)</sup>。

これらを背景として、観測ロケットS-520-31号機にて、メインPIであるデトネーションエンジン(DES)の大容量実験データの回収を目的として、展開型エアロシェルを用いた観測ロケット実験データ回収モジュールRATS(Reentry and recovery module with deployable Aeroshell Technology for Sounding rocket experiment)の実証試験を実施した。展開型エアロシェルを用いた大気突入システムは、2012年の観測ロケットS-310-41号機で技術実証されており<sup>2)3)</sup>、RATSはその機体システムを発展させた形で開発された。本システムの特徴は、ロケット搭載時にはコンパクトに収納することができるため、体積的な搭載制約を緩和可能であること。また、大気突入前にエアロシェルを展開させることで、軽量かつ大面積となり、弾道係数を大幅に低減できる。その結果、より高高度から効率良く減速することができ、機体の受ける空力

加熱を低減することが可能である。さらには、ガス注入により展開する方式のインフレータブル構造のため、着水後の海上浮遊のためのフローティング機能も担うことができる。S-520-31号機は2021年7月27日5時30分に内之浦宇宙空間観測所より打ち上げられた。本稿では、RATSのミッション概要とフライト結果の速報について述べる。

## 2. ミッション概要

### 2.1 ミッション目的

本実験における RATS ミッションの目的は、デトネーションエンジン (DES) の実証試験で取得した大量のフライトデータが書き込まれた USB メモリを回収し、RATS システムが、観測ロケット実験データ回収システムとして機能することの実証である。また、RATS システムを今後の観測ロケット実験のデータ回収オプション機器として、定常的に搭載可能なシステムとするべく、以下 3 点の技術を実証することが重要である。

- 1) S-520 ロケット環境下での展開型インフレータブルエアロシェルによる大気圏突入実証
- 2) インフレータブルエアロシェルによる緩降下、軟着水、海上浮遊実証
- 3) イリジウム衛星通信&GPS を使った地上局無しの位置特定と回収支援システムの実証

それに加えて、打ち上げ時の機械環境耐性、エアロシェルへのガス注入機構、カプセル分離射出機能、海上浮遊する RATS の回収方法を含めて、打ち上げから回収までの一連のシーケンスを実証する。

### 2.2 RATS フライトモデル

RATS システムは大気圏突入する突入部と、分離後ロケット側に残される残置機器部で構成される。

図 1 に RATS 突入部の概要図を示す。左図はエアロシェル収納状態、右図はエアロシェル展開状態であり、展開時は対辺の長さが 120 cm、開き角が 70 度の 12 角錐台状態となる。RATS の突入部は、電子機器等を搭載するカプセル本体部と、周囲に取り付けられる展開型エアロシェル部で構成されている。

RATS 用に開発されたエアロシェルは 1 つのインフレータブルリングで支持される薄膜フレア型エアロシェルである。インフレータブルリングは直径 10cm の円柱を 12 個結合させた正 12 角形のリング形状である。多層構造となっており、最内層はガス保持

のため、シリコンコーティングされたポリイミドフィルムと難燃性シリコンゴムシートで構成した気室となっており、その外側は、複数の ZYLON 織物で覆われている。リングを覆うリングカバーは、主には

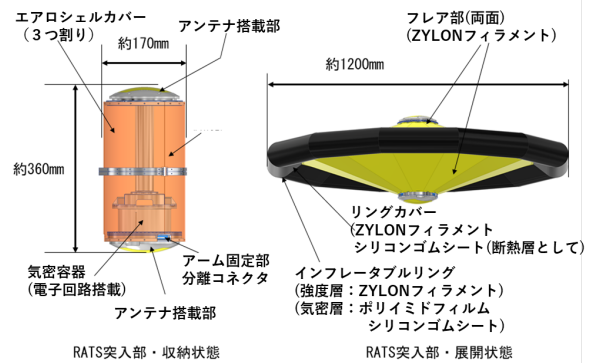


図 1 : RATS の突入機部の外観モデル (左 : エアロシェル収納状態, 右 : エアロシェル展開状態)

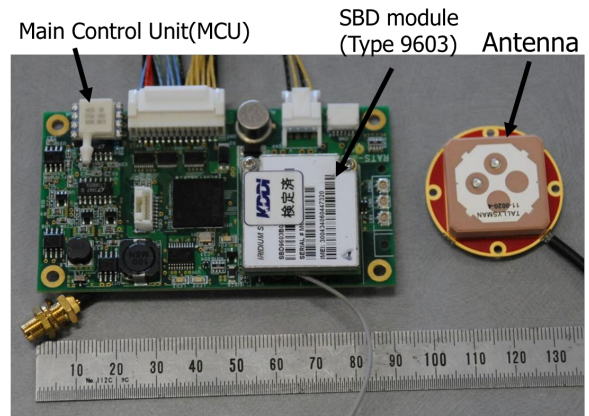


図 2 : RATS に搭載された MCU 基板とイリジウム通信, GPS 用アンテナ



図 3 : RATS のフライトモデル (左 : エアロシェル収納状態, 右 : エアロシェル展開状態)

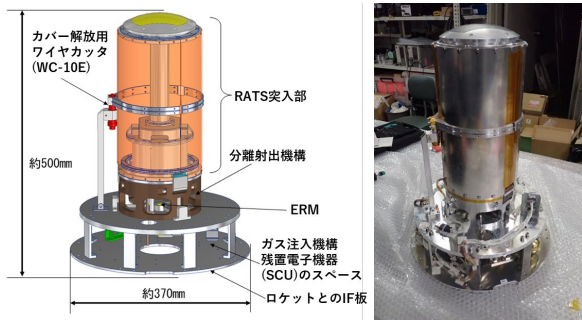


図4：ロケット搭載時のRATSシステム（左：外観モデル，右：外観写真）

2枚の ZYLON 織物でできている。また、2枚の ZYLON の間には、アブレーション効果による耐熱性・断熱性向上を期待し、難燃性シリコンゴムシートを挟んである。フレア部も ZYLON 織物でできている。カプセルが上下どちらの面から大気圏に突入しても空力加熱からカプセル本体部を守るように、両側に取り付けている。今回開発したエアロシェル部の総重量は 1.87 kg となっている。

カプセル本体部は直径 160 mm、高さ約 360 mm であり、気密容器と上下アンテナ部で構成されている。気密容器内部には、メイン制御回路 MCU(Main Control Unit)、駆動用電池、及び DES のデータを保存する USB メモリが搭載されている。MCU にはイリジウム SBD(Short Burst Data)モジュールと GPS 受信機 (Firefly) が実装されており、このボード 1 枚で自身の位置情報をイリジウム SBD 通信を介して送信することが可能となっている。サイズは 9 cm×5 cm、重量は 65g と非常にコンパクトな基板である。イリジウム、及び GPS 用のアンテナには防水処置が施されており、それぞれ上下 2 か所に配置されているため、カプセルがどちらから着水しても通信可能な設計としてある。図 2 に MCU 基板、アンテナの写真を示す。これらに加えて、突入時の姿勢状態を把握するための姿勢センサ、機体及びエアロシェル表面の温度を測定するための温度センサ、熱電対を搭載したフライトセンサ基板が気密容器外部に配置されている。着水後、捜索の目印となるシーマーカーは気密容器側面部に配置されている。打ち上げ時は、エアロシェルはカプセル本体部の細い円筒部に巻き付けられ、3 分割のエアロシェルカバーをワイヤで縛ることで収納されている。収納状態は直径 170 mm、高さ 360 mm の円柱状の形態となる。重量は、収納状態では 5.94 kg、展開状態では 4.80 kg となっている。

図 4 に残置機器部を突入部に結合した、ロケット搭載時の概要図を示す。残置機器部はインフレーターリングにガスを充填するためガス注入機構と、

エアロシェル展開後のカプセルを分離・射出させるための分離射出機構、及びそれらの制御回路 SCU(Sub system Control Unit)にて構成される。ガス注入機構は、CO<sub>2</sub> ガスカートリッジ、SMA (形状記憶合金) ボンボオープンナ、及び電磁弁が搭載されている。注入時、ガスは分離配管、及びカプセル本体部の逆止弁を通じて、インフレーターリングに充填される。分離射出機構は 3 つの固定アームにより突入部を把持しており、分離アクチュエータ ERM(Ejection Release Mechanism)を駆動させることにより、固定アームが開放され、突入部は分離・射出される。また、固定アームには突入部と残置機器部の通信のための分離コネクタが配置されている。SCU は、このコネクタを介して突入機部 MCU と通信し、必要な情報をテレメトリデータとしてロケット AVIO へ送信する機能も担っている。また、DES-AVIO とは残置機器部で USB Type-A コネクタにて接続される。DES の実験データも分離コネクタを介して気密容器内部の USB メモリに書き込まれる。

### 2.3 海上回収運用

RATS は着水後、CO<sub>2</sub> ガスが充填されたインフレーターリングの浮力で海上浮遊を実現する。しかしながら CO<sub>2</sub> は気密層の一部の材料として使用されているシリコンゴムを透過し易いため、インフレーターリングの内圧低下は速い。圧力が低下しカプセル部が沈んでしまうと、アンテナが浸水し通信不可能となる<sup>4)</sup>。RATS においては、約 13 時間程度で沈下する設計となっている。この時間制約により、回収作業は迅速に行う必要があるため、RATS の捜索及び回収にはヘリコプターを用いた。

RATS の着水予測場所は内之浦の南東方向 270km 程度とされるため、最も近い陸地である種子島の種子島宇宙センター内に回収本部とヘリポートを設置した。ヘリコプターは RATS の着水確認後に種子島宇宙センターより離陸し、イリジウム通信により送信されてくる位置情報を基に捜索、発見後、回収作業を実施する。回収完了後、種子島へ帰還する。

### 2.4 ミッションシーケンス

本号機の実験シーケンスを下記に纏める。また、概念図を図 5 に示す。

- 1) エアロシェルを収納し頭部を下向きにして分離射出機構に固定された状態で、ロケット先端のノーズコーン部分に搭載される。

- 2) RATS は電源 ON 状態で打ち上げられ、DES の実験終了まで待機状態となる。
- 3) ノーズコーン開頭後に搭載アンテナが暴露され、GPS による位置情報取得、イリジウム SBD 通信を開始する。
- 4) DES 実験中、取得されたデータは RATS 突入部の USB メモリに記録される。
- 5) DES 実験終了後、RATS の突入準備シーケンスを開始し、カバー開放、ガス注入、エアロシェル展開まで完了する。
- 6) 打ち上げ後 402 秒で RATS をロケットから分離する。
- 7) 低弾道係数で大気圏に再突入し、空力加熱、空力荷重に耐え、安定に降下する。
- 8) 終端速度まで減速し、緩降下する。
- 9) 軟着水前に搭載センサ類の電源を OFF する。
- 10) 終端速度 (約 8m/s) で軟着水し、インフレーター部の浮力で海上に浮遊する。
- 11) 着水後も継続して、RATS から位置情報が送信される。
- 12) RATS 突入部をヘリコプターにて回収する。

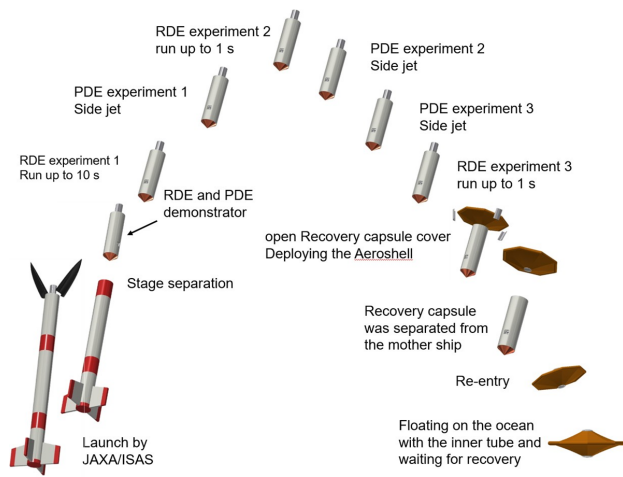


図 5 : S-520-31 号機 実験シーケンス概要

## 2.5 フライト迄の試験

RATS の FM 開発は、エアロシェル収納試験、真空下でのエアロシェル展開試験、温度試験、真空晒し試験、単体機械環境試験等<sup>5)</sup>の各種試験を実施し、2021 年 4 月に FM のベースが完成した。5 月には、ロケット機器との電気/機械 IF、及び頭胴部結合状態での機械環境耐性の確認を目的とした噛み合わせ試験を実施した。その後、2021 年 7 月内之浦でのフライトオペレーションに臨んだ。内之浦では打ち上げ前最後の動作確認が行われ、2021 年 7 月 27 日の打ち上げ当

日を迎えた。図 6 に RATS が搭載された観測ロケット S-520-31 号機の写真を示す。

海上回収システムの検証試験は 2020 年 12 月より計 4 回実施し、回収システムの習熟を図った。最後の回収試験はフライトオペレーション期間中に、回収本部のある種子島にて行われた。実際に、洋上に RATS-EM 品を投下し浮遊させ、送信される位置情報を基にヘリにて捜索、回収を試みた。本試験は、問題なく回収成功し、回収班も万全の状態で打ち上げを迎えた<sup>6)</sup>。



図 6 : RATS を搭載した観測ロケット S-520-31 号機

## 3. RATS フライト結果速報

### 3.1 フライト結果の概要

2021 年 7 月 27 日午前 5 時 30 分、RATS を搭載する観測ロケット S-520-31 号機は内之浦宇宙空間観測所より打ち上げられた。図 7 はその時の様子である。打ち上げ後、ロケットは問題なく上昇し RATS のエアロシェル展開・分離までのシーケンスが全て正常に実行された。分離後、RATS は大気圏突入の空力加熱に耐え緩降下し、打ち上げから約 2317 秒後に種子島から南東約 200 km の地点に軟着水した。その後、RATS は 1 時間半ほど洋上浮遊した後に、ヘリコプターにて無事回収された。搭載された海面着色剤も機能し、上空からの捜索に大きく役立った。図 8 は回収ヘリから撮影した発見時の RATS の様子である。海面上に見える緑色の線が海面着色剤である。イリジウム SBD 通信による位置情報送信についても、ノーズコーン開頭から、大気圏突入、軟着水し回収されるまで安定的に動作した。DES の実験データが保存されている USB メモリも無事回収でき、観測ロケット実験データ回収システムとして機能することを目

表 1：実験中イベントのタイムテーブル

X-time	イベント
X=0 (5:30)	ロケット打ち上げ
X=63sec	ノーズコーン開頭
X=97sec	GPS ロックオン
X=174sec	イリジウム SBD 通信開始
X=244sec	最高高度 250 km 到達
X=329sec	DES 実験終了
X=330sec	RATS タイマースタート
X=331sec	エアロシェルカバー開放
X=356sec	ガス注入開始
X=385sec	リング圧約 140 kPa 到達
X=402sec	RATS 分離 (高度 122 km)
X=430sec	最高速度到達 1.8 km/s(高度 75 km) に達した後、空気力により減速開始
X=2317sec	終端速度 8.4 m/s で軟着水
7:50 頃	回収完了

的とした RATS ミッションは成功裏に終わった。また、RATS 飛翔中の位置姿勢情報、機体、エアロシェル表面の温度履歴など、予定していたフライトデータは全て正常に取得できた。そのフライトデータから、展開型エアロシェルが大気圏突入時に減速装置として期待通りの性能を発揮したことが確認できた。ただし、高度 32 km 以下からは姿勢が不安定になる時間帯があったことが確認されている。表 1 に実験中のイベントのタイムテーブルをまとめる。



図 7：S-520-31 号機 打ち上げの様子



図 8：発見時の RATS の様子

### 3.1 エアロシェルの展開

本実験では、打ち上げから 331 秒後にロケット AVIO の信号によりエアロシェルカバーが開放された。その 25 秒後に、ガス注入機構が動作しガス注入が開始され、打ち上げから 402 秒後に RATS はロケットから分離射出された。図 9 に展開シーケンス中のインフレーターリングの内圧履歴を示す。リング圧は、展開前の収納時は残留圧により約 20 [kPa] が保たれており、カバー開放後はリング体積が増加するため、内圧は 1.4 [kPa] へ低下する。その後、ガス注入が開始されると、リング圧は上昇し、注入開始から約 30 秒後、設計通り約 140 [kPa] に到達した。これらの結果より、展開シーケンスは正常に実行されたことが確認された。

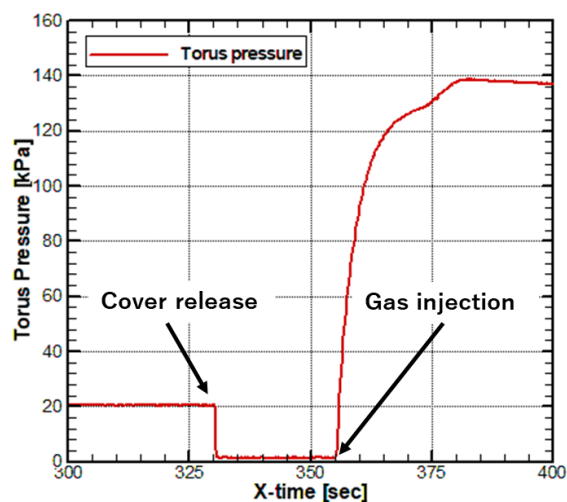


図 9：エアロシェル展開時のリング圧履歴

### 3.2 エアロシェル減速性能

図 10 に RATS に搭載された GPS の位置情報から得られた実際の再突入軌道と、事前シミュレーションによる予測軌道の比較を示す。縦軸に実験機の高度，横軸に位置データの差分により求められた速度を示す。フライト結果より，RATS は再突入後高度 75 km で最高速度 1.8 km/s に到達し，その後空気力による減速を開始し，高度 40 km に到達する頃には平衡速度に達した。分離から約 2316 秒の飛行を経て，約 8.4 m/s の速度で軟着水した。これらのフライト結果と事前シミュレーションの予測値はほぼ一致しており，S-520-型観測ロケットからの大気圏突入環境において，展開型エアロシェルは想定通りの性能を実証できたといえる。

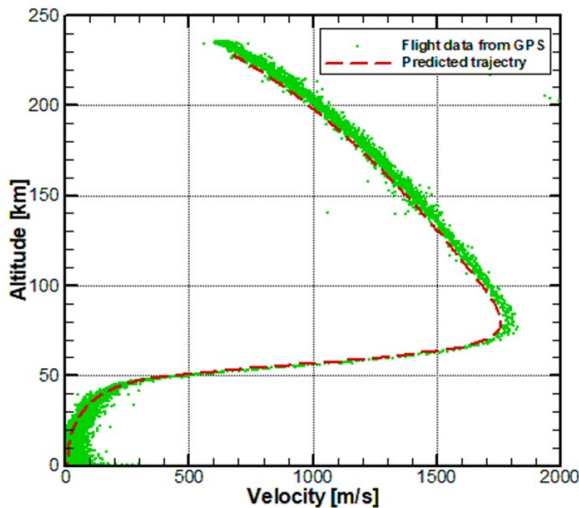


図 10：実験機の再突入軌道データと事前シミュレーションの予測軌道の比較

### 3.3 イリジウム SBD 通信による回収運用

RATS の回収運用は，イリジウム SBD 通信経由で送信される情報のみで実施された<sup>6)</sup>。RATS は，洋上浮遊中は 1 分間隔でイリジウム通信をトライするモードで運用された。結果として，洋上浮遊開始から回収完了までの 98 分間で 81 回の位置情報送信に成功し，頻度は 1 分強に 1 回と安定して動作した。これより，イリジウム SBD 通信は海上回収における位置特定システムとして十分に機能したといえる。図 11 にイリジウム通信によって得られた RATS の漂流軌跡を示す。図 12 に海上回収に成功した RATS と回収チームの様子を示す。

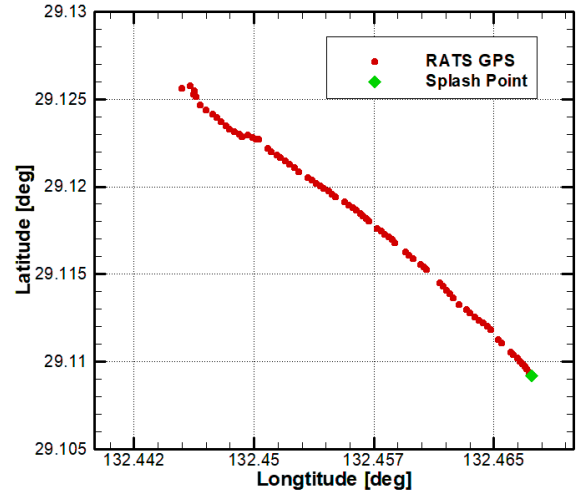


図 11：着水後の RATS の漂流軌跡



図 12：回収後の RATS 及び回収チームの様子

## 4. まとめ

RATS はデトネーションエンジン(DES)の大容量実験データの回収を目的として開発された。RATS を搭載した S-520-31 号機は 2021 年 7 月 27 日に打ち上げられた。実験シーケンスは全て正常に実行され，DES の実験データが記録された USB メモリの回収に成功した。これにより，RATS は観測ロケットデータ回収モジュールとして機能することを実証できた。

今後は，RATS を観測ロケットの定常的な回収オプション機器とすべく，設計のブラッシュアップは勿論，開発スケジュール・コストの低減手法の検討を進める。また，S-520-33 号機では大型エアロシェルを用いた大気突入実験 RATS-L<sup>7)</sup>が計画されており，本実験で得られた知見を活かして開発を進めていく。

## 参考文献

- 1) 山田和彦：“観測ロケット実験における回収システムの開発計画”， 観測ロケットシンポジウム 2018 講演集,2018
- 2) Yamada, K., Nagata, Y., Abe, T., Suzuki, K., Imamura, O., and Akita, D.: Suborbital Reentry Demonstration of Inflatable Flare-Type Thin-Membrane Aeroshell Using a Sounding Rocket, AIAA Journal of Spacecraft and Rockets, January, Vol. 52, No. 1(2015) : pp. 275-284
- 3) Yamada, K., Yasunori, N., Honma, N., Akita, D., Imamura, O., Abe T., Suzuki, K.: Reentry Demonstration of Deployable and Flexible Aeroshell for Atmospheric-Entry Vehicle Using Sounding Rockets, 65<sup>th</sup> International Astronautical Congress, 2012
- 4) 秋元雄希, 山田和彦, 笠原次郎：柔軟エアロシェルを用いた観測ロケット実験データ回収モジュールの開発, 2019 年度観測ロケットシンポジウム講演集, 2019
- 5) 羽森仁志, 中尾達郎, 河野太郎, 山田和彦：RATS 構造機構系の開発及び実証試験, 第 65 回宇宙科学技術連合講演会, 2021
- 6) 石丸貴博, 他：RATS の回収システムの開発と回収運用, 第 65 回宇宙科学技術連合講演会, 2021
- 7) 永田靖典 他, “展開型エアロシェルによる大気圏突入技術の飛行実証”, 2020 年度観測ロケットシンポジウム講演集, 2021