

大型柔軟エアロシェルによる大気突入回収システムの実証試験

JAXA/ISAS：山田和彦、安部隆士

東京大学新領域：鈴木宏二郎

日本大学：今村幸

東京工業大学：秋田大輔

岡山大学：永田靖典

北海道大学：高橋裕介

1. はじめに

次世代の大気圏突入システムとして、「展開型柔軟エアロシェル」が注目されている¹⁾。これは、大気圏突入前に、軽量で大型のエアロシェルを展開し、大気圏突入機の弾道係数を下げることで、効率よく空気力を利用し、大気圏突入に必要な減速を行うものである。我々は、「展開型柔軟エアロシェル」の中でも、特に、図1に示すようなインフレーターブルトラスで支持された薄膜フレア型エアロシェルに着目して研究開発を進めている。これは、カプセル型の鈍頭形状の周りに円錐形状の薄膜型のエアロシェルをとりつけ、それにかかる空気力を、ガスを充填したインフレーターブルトラスで圧縮力として支えるというものである。この形状は、重量のかさむインフレーターブル部を必要最小限にとどめていることにより、エアロシェルを軽量のまま大型化することが容易であることが特徴である。本システムが、図1に示すような地球再突入回収システムや惑星探査へ実用化された場合は、下記のような、これまでの大気圏突入システムにはない特徴や利点があるユニークシステムが実現すると考えている。

- * 収納効率が高いため、打ち上げ用のロケット内でのインテグレーションが容易になる。
- * 機体の低弾道係数化により、大気密度の薄い高高度で減速が可能になり空力加熱が低減される。
- * 機体の低弾道係数化により、終端速度が下がるため、軟着陸のための再減速が必要なくなる。
- * 海上に降りる場合は、インフレーターブル部がフロートの機能も兼ねることができる。
- * 軌道上の形態のまま、地表までたどりつくことができるためシステムがシンプルにできる。
- * カプセルを包み込むような形状であり、輸送する物資の形状に依存しない。

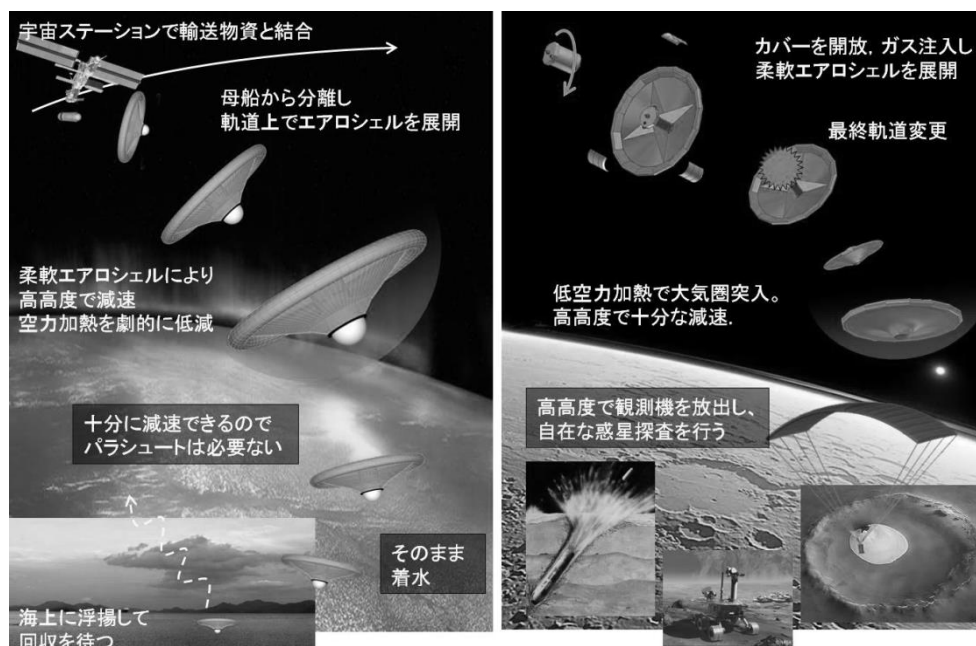


図1：展開型柔軟エアロシェルの応用例
(左：地球再突入回収システムへの応用、右：惑星探査システムへの応用)

2. 柔軟エアロシェル大気圏突入システムの開発計画と大気球実験の位置づけ

我々のグループでは、2000年頃から、薄膜フレア型の柔軟エアロシェルについての研究開発を進めてきており、大気球実験を含めた各種試験を経て、2012年8月に、それまでの活動の集大成として直径1.2mの展開型エアロシェルを有する小型の実験機を開発し、S-310-41号観測ロケットにより高度150kmからの大気圏突入実証試験に成功した²⁾。その成果を踏まえて、我々の研究開発の次のマイルストーンとして、地球低軌道上からの再突入実証試験を設定した。その実証試験(TITANS: Test flight of Inflatable Aeroshell for iNnovative atmospheric-entry System)の概念図を図3に示す。この実証試験では、近年、打ち上げの機会が多く得られるピギーバック衛星の機会を利用することを想定しており、システム全体の規模はサイズで50cm×50cm×50cm程度、総重量50kgとしている。実験システムは、軌道離脱までをサポートするサービスモジュール(SM, 重量35kg)と、直径2.5mの展開型柔軟エアロシェルを有するリエントリーモジュール(RM, 重量15kg)で構成されている。SMにより所定の位置にて、RMを地球低軌道から大気圏へ再突入させて、その間のデータを衛星通信経由で取得することを想定している。

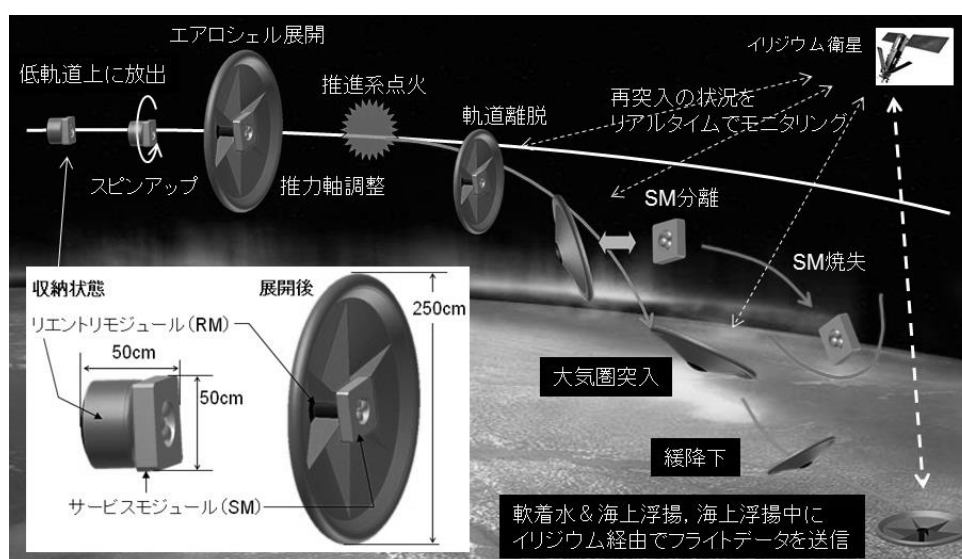


図2：柔軟エアロシェルの研究開発の次のマイルストーンとして設定した地球再突入実証試験(TITANS)の概念図

その実現にむけての技術的なハードルとして、エアロシェルの高性能化(大型化、軽量化、高耐熱化)、衛星通信経由でのデータの取得方法の確立(大気圏突入後の海上浮揚中にデータ送信)、軌道上で実験機をサポートするサービスモジュールの開発があげられる。図3に、この低軌道からの再突入実証試験(TITANS)までの活動計画をまとめた。TITANSを確実に成功させるためのステップとして、2つのフライト実証試験を計画しており、ここで提案する「大気球による大型柔軟エアロシェルによる大気突入回収システムの実証試験(B-MAAC)」は、その一つと位置づけている。B-MAACの目的は、TITANSの成功に必要な下記の3つの技術要素の実証である。

- 1) 直径2.5m(TITANS実スケール)の大型エアロシェルの真空、無重量環境で展開
- 2) フレア型の大型柔軟エアロシェルを有する低弾道飛行体の低速領域での安定飛行
- 3) 海上における実験機の浮揚、及び、そこからのデータ通信機能

この3つの項目は、いずれも、これまでの研究開発では実証されていない技術要素であり、また、地上試験のみではその実証が難しいものである。特に、2)の低速領域での安定飛行に関しては、観測ロケットS-310-41号機での飛行実験において、低速領域で不安定な姿勢運動が観察されたことをうけて、TITANSの実施に先駆けて、フルスケールモデルを用いて、自由飛行環境下で、必ず確認しておくべき事項だと考えている。

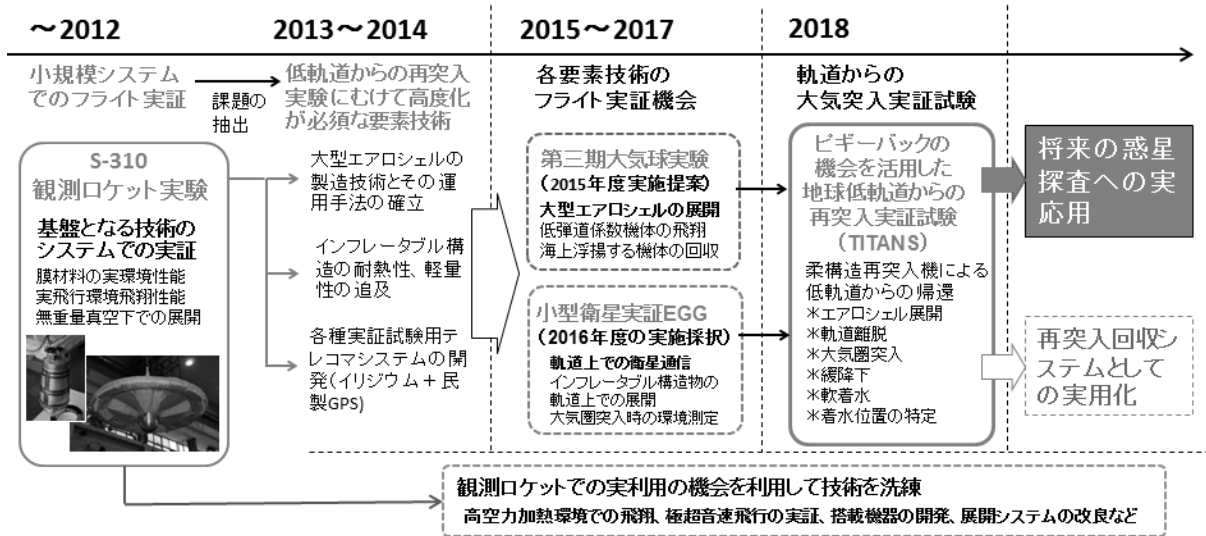


図3：地球低軌道からの再突入実証試験(TITANS)までの実証計画

3. 大気球による実証試験の概要

ここで提案する大気球試験 (B-MAAC) のシークエンスの概略を図4にまとめる。本試験で使用する実験機は、直径40cmのカプセル型の本体の周囲に直径2.5mのフレア型の展開柔軟エアロシエルを有し、総重量は15kg程度である。エアロシエルは、TITANSで使用するものと全く同じものを使用する予定で、実験機の重量もTITANSに併せている。本試験では、実験機のエアロシエルをコンパクトに収納した状態で、ゴンドラに搭載する。実験システムの全体重量は20~25kg程度と想定している。放球後、高度40km近くまで上昇した後に、実験機をスピニングアップし、ゴンドラから切り離す。切り離し直後の無重量真空状態で、エアロシエルカバーを開放し、インフレーター部にガスを注入し、エアロシエルを展開する。展開後、実験機は自由落下による飛行試験を行い、飛行中のデータの一部を地上局へ送信する。詳細なデータはカプセル内部に記録し、回収後にとりだす。実験機は、エアロシエルの減速効果で、終端速度10m/s以下で着水し、インフレーターリングの浮力で海上に浮揚する。海上浮揚後も実験機に搭載したイリジウム通信機により、その位置を特定できるため、その情報を基に実験機を回収する。

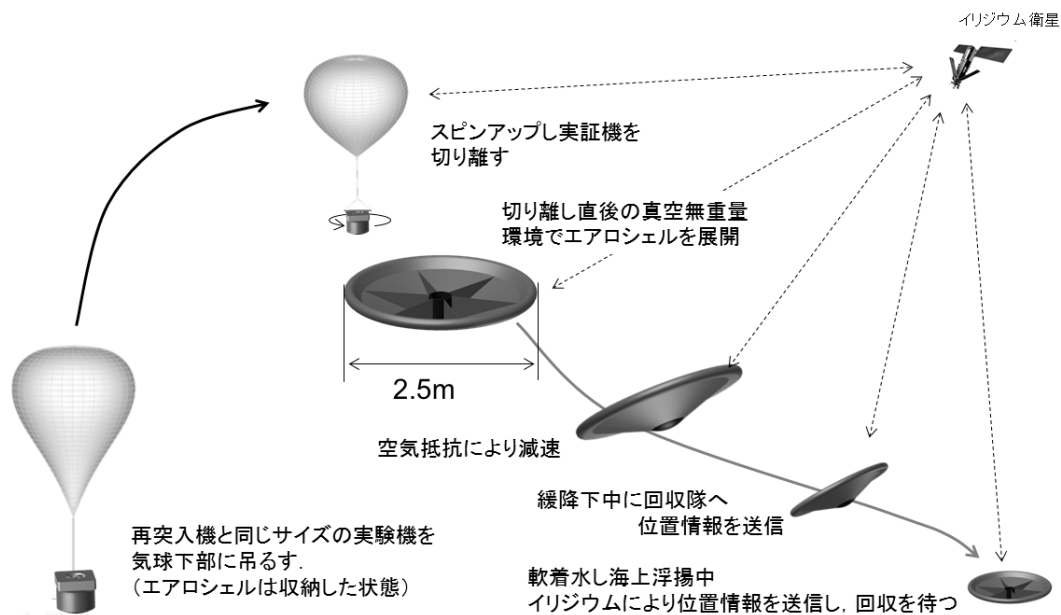


図4：B-MAACの実験シークエンスの概略図

4. 準備状況

本試験では、軌道からの再突入実証試験と同じサイズ、同じ材料のエアロシェルを用いて試験を実施することが大前提となっており、その開発が最も重要な項目である。軌道からの再突入試験に使用可能なエアロシェルに関しては、2012年度に実施した観測ロケット実験での実験機開発の経験を踏まえて、その高度化を進めている。エアロシェルの開発は、軽量性を維持したまま、エアロシェルの大型化と膜面材料高耐熱化が重要な開発要素である。エアロシェルの大型化に関しては、インフレーターブルフレームを12角形することで、形状精度を保ったまま大型化することに成功し、直径2.5mのエアロシェルの試作品を製作した。図5(左)は、その試作品の写真である。また、高耐熱化に関しては、気密層の材料をシリコンからポリイミドフィルムに変更することにより、使用温度を500°Cまで高め、さらにインフレーターブル部の前面にアルミナフェルトの断熱層を設けることにより、インフレーターブル部が大気圏突入時に経験する100kW/m²超の空力加熱に耐えることを確認している。図5(右)は、ICP加熱器で生成された高温プラズマ気流中に円柱状のインフレーターブル構造体を投入して耐熱性を評価したときの様子である。このようにTITANSで使用できる(低軌道からの大気圏突入環境に耐える)、柔軟エアロシェルの開発に目途がたったので、現在は、これらの設計をもとに実機同等のエアロシェルの製作を進めている。

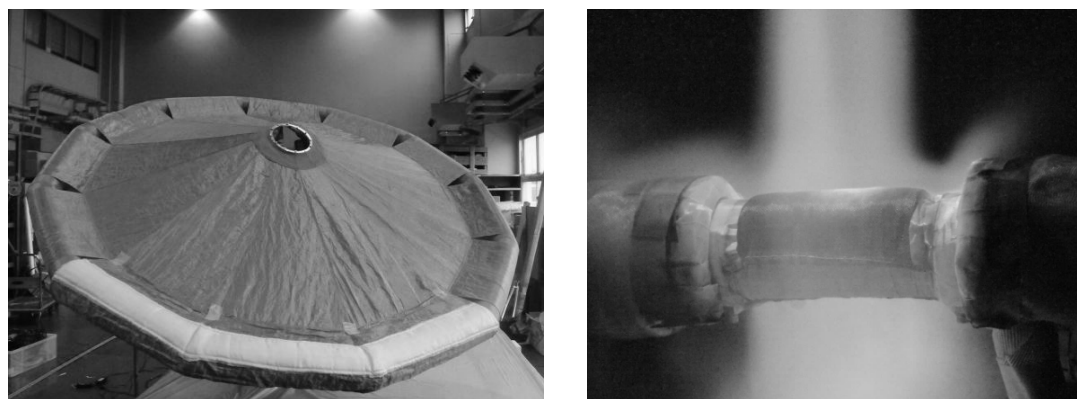


図5：(左) 直径2.5mのエアロシェルのプロトタイプ、(右) ICP加熱器で生成されたプラズマ気流に投入された円柱状のインフレーターブル構造模型

大型のエアロシェルの開発と並行して、センサ類、テレメトリなどのバス機器に加え、実験機の分離機構、エアロシェルの開放機構、ガス注入展開システムなど本試験に必要な機器類は、これまでの気球実験や観測ロケット実験で蓄積してきた知見を利用し、実験システムを構築していく。また、軌道からの実証試験のために、新規開発が必要な機器として、宇宙用のGPS、信頼性の高いSMAを利用したガス注入システムに関しても開発を進めている。

5. まとめ

次世代の大気圏突入システムとして期待されている展開型柔軟エアロシェルの研究開発は、実利用まであと一歩のところまで到達している。我々は、実利用にむけた最後のマイルストーンとして、低軌道からの大気圏再突入実証試験(TITNAS)を設定し、その準備を進めている。ここで提案した大気球による投下試験は、TITANSを成功させるために重要な要素技術の検証を目的としている。今年度の上半期の活動において地球低軌道から再突入可能なエアロシェルの開発に目途が立ったため、最速で平成27年度夏期に大気球実験を実施することを目指して準備を進めている。

参考文献

- 1) 山田和彦, 鈴木宏二郎, 安部隆士, 今村幸, 秋田大輔, 「展開型柔構造大気圏突入機 MAAC の開発と将来展望」, 日本航空宇宙学会誌, 第59巻, 第695号, 2011年, 12月
- 2) Kazuhiko Yamada, Yasunori Nagata, Takashi Abe, Kojiro Suzuki, Osamu Imamura, Daisuke Akita, “Suborbital Reentry Demonstration of Inflatable Flare-Type Thin-Membrane Aeroshell Using a Sounding Rocket”, AIAA Journal of Spacecraft and Rockets, Posted online on 27 Jun 2014.