

ISS より放出された EGG 衛星における柔軟構造飛翔体の展開実証

日大生産工 (院) ○松丸 和誉 東京農工大・(院) 森吉 大貴・金丸 拓樹
JAXA/ISAS 山田 和彦 東京大学 鈴木 宏二郎 日大生産工 今村 宰

1 はじめに

現在、惑星探査への関心が高まっている中で、サンプリングミッションや火星着陸探査ミッションなどが多く提案されている。これらのミッションに欠かさないのが大気圏突入システムである。その大気圏突入方法の代表的な例として、はやぶさカプセルやスペースシャトルなどが挙げられるが、MAAC (Membrane aeroshell for Atmospheric-entry Capsule)グループでは新しい大気圏突入システムとして展開型柔軟構造エアロシェルに着目し、研究開発を進めている¹⁾。この柔軟構造エアロセルの実用化に向け、地上試験、大気球からの投下試験²⁾、観測ロケットS-310-41号機による大気圏突入実証試験³⁾など実証試験まで研究をおこなってきた。次のステップとして地球低軌道上での実証試験を計画した。柔軟構造エアロセルを有する超小型衛星EGG (re-Entry satellite with Gossamer Aeroshell and GPS/Iridium)による実証試験が、2017年1月16日にISSより放出され2017年5月15日までの約4ヶ月間地球の周回軌道上での実証試験を実施した、多くの成果を得ることができた⁴⁾。本稿では、このフライト試験において、展開型エアロセルに関連する成果について紹介する。

2 超小型衛星EGGの概要

超小型衛星EGGは3U(11cm×11cm×34cm, 4kg)のサイズで設計され、エアロセルの収納時、展開時の設計モデルを図1、フライトモデルの外観を図2に示す。六角錐台形状のエアロセルが収納されており、軌道上で展開することが可能である。EGG衛星は、ISSから放出後、デプロイメントスイッチにより自動的に電源が入る。その後、エアロセルの収納状態から、側面の太陽電池パネルの展開、SMAボンベオープナーによる液化炭酸ガスボンベの開栓、インフレーターリングへの炭酸ガスの注入といった手順を踏み、エアロセルの展開実証を行う。その後、エアロセルの低弾道係数を利用し、エアロセルの働く空気力により徐々に高度を下げ、軌道崩壊によって大気圏へ突入する。最終的に空力加熱による影響によって高度約100kmで焼失する⁵⁾。EGG衛星の主な目的は、以下の3点である。

- (1) GPSおよびイリジウムの低軌道上での通信システムの実測
- (2) 低軌道上で柔軟エアロセルの展開実証
- (3) 軌道崩壊後のエアロセルによる減速装置としての機能実証

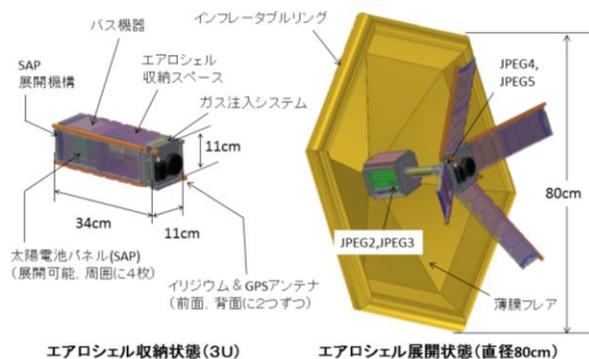


図1: EGG衛星エアロセルの設計モデル (左: 収納状態, 右: 展開状態)



図2: EGG衛星エアロセルのフライトモデル (左: 収納状態, 右: 展開状態)

2. 1 EGG衛星用エアロセル

EGG衛星のエアロセルはトラス外直径800mm、インフレーターリングのチューブ直径60mmの六角型サイズのエアロセルを使用している。図3にEGG衛星用エアロセルの外観およびインフレーター構造を示す。インフレーターリングは多層構造となっており、表1にインフレータブルの構成を示す。内層から順に気密層、保護層、強度層、エアロセルカバーの4層構造で構成され、気密層部に直線部にはユープレックス (ポリイミドフィルム)、コーナー部には難燃性シリコンゴムのハイブリッド構造を採用した。これにより、エアロセルの軽量化を実現できた。しかし、このハイブリッド構造の課題点として、地上試験や繰り返しの収納展開による劣化、製作時の影響などによる気密層のポリイミドフィルムの破損の可能性が示唆されていた。これに対して、厚さ12.5 μ mのポリイミドフィルムの表面に4 μ mのシリコンコーティングを両面に施すことで破損を防ぐ処置を行っている。

Deployable Evaluation of The Membrane Aeroshell for EGG (re-Entry satellite with Gossamer Aeroshell and GPS/Iridium)

Kazushige MATSUMARU, Takahiro MORIYOSHI, Hiroki KANEMARU,
Kazuhiko YAMADA, Kojiro SUZUKI and Osamu IMAMURA

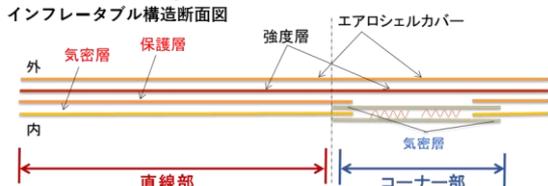
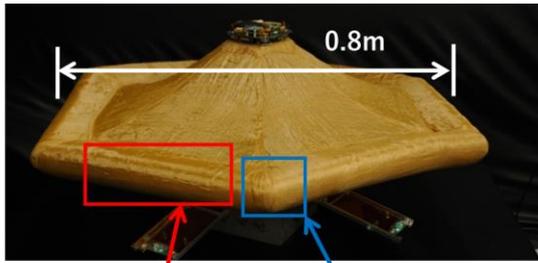


図3：インフレーターブルトーラスの各層構造

表1：インフレーターブル構造部の材料構成

	直線部	コーナー部
気密層	ユーピレックス (12.5 μ m) シリコン接着剤	難燃シリコンゴム (0.2mm) \times 2枚 ユーピレックス (7.5 μ m) シリコン接着剤
保護層	ZYLON フィラメント織物	なし
強度層	ZYLON フィラメント織物 \times 2枚	
シエルカバー	ZYLON フィラメント織物	

2.2 ガス注入システム

インフレーターブルリングにガス注入するためのシステムブロックを図4に示す。このシステムがEGG衛星内に搭載されており、低軌道へ放出後に形状記憶合金 (Shape memory alloy ; SMA) ポンペオープナーを加熱することにより、ポンペオープナーに搭載されている撃針でCO₂ガスボンベを開栓する。その後、CO₂ガスは電磁弁手前まで流れ、0.1秒単位で開閉が可能な電磁弁を用いて指定した時間で弁を開放することで、CO₂ガスを注入しエアロシエル展開を行うシステムである。展開後にはインフレーターブルリングから圧力計が接続されており、インフレーターブルリング内の圧力状況を測ることができる。

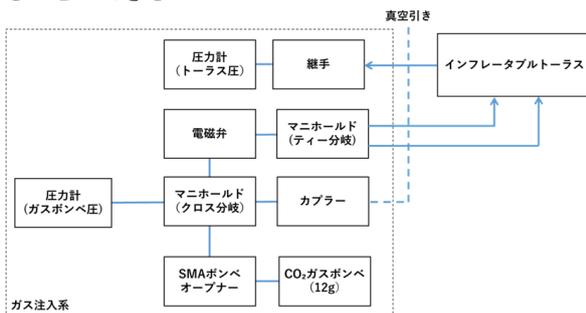


図4：ガス注入システムブロック

2.3 搭載JPEGカメラ

エアロシエルの展開実証は、本ミッションを遂行するにあたって重要な役割である。展開実証の確認の一つとしてEGG衛星にはJPEGカメラが搭載されている。JPEGカメラは6台搭載されており、そのうちバス機器部に搭載されている2台 (JPEGカメラ2, JPEGカメラ3) でエアロシエルを撮影することができる。

3 フライト結果

EGG衛星はISSより2017年1月16日にエアロシエル収納状態で低軌道上へ放出された。この状態で約1カ月の間、地球低軌道上を周回した。そして、同年の2月11日にエアロシエル展開の実施をした。その後、約3か月間飛行後の5月17日に大気圏へ突入し、高度約90kmにおいて焼失した。本節では、エアロシエルの展開実証・軌道崩壊などについての結果を紹介する。

4 エアロシエル展開実証

エアロシエルの展開実証は2月11日に実施した。エアロシエルの展開はインフレーターブルリングの内圧履歴、および搭載カメラによる静止画像による確認をおこなった。

4.1 インフレーターブルリングの内圧履歴

側面の太陽光パネルの展開後にエアロシエルの展開試験を実施した。ガス注入システムを用いてガス注入を0.1秒し、展開実証を実施した。図5に放出後のトーラス圧力・CO₂ガスボンベの圧力履歴を示す。これにより、放出後26日 (2月11日) にトーラス圧力が正常に約0kPaから上昇していることから、エアロシエル展開が行われたことが確認できる。また、展開実証時を含め軌道周回中で全8回実施し、ガスの供給をおこなった。しかし一方で、CO₂ガスボンベの圧力履歴より、インフレーターブルリングへのガス注入時以外にも、圧力が緩やかに減少していることからCO₂ガスボンベから電磁弁の間にガスのリーク源が存在することが考えられる。これによりトーラスへのガスの注入量も減少していると考えられる。

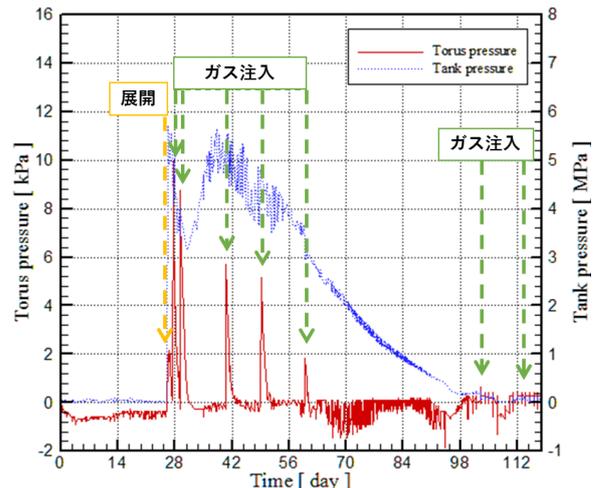


図5：放出後のトーラス圧力・ボンベ圧力履歴

4. 2 エアロシェル展開時の形状について

宇宙空間内にて撮影した画像から、エアロシェルが正常に展開したのか、またどのような状態になっているのか把握できる。図6の上段は地上試験での静止画、下段はフライト時の静止画である。JPEGカメラ2およびJPEGカメラ3で撮影した各静止画像より、フライト時においてエアロシェルが展開されたことが確認できる。しかし、地上試験における正常な展開時の画像とフライト時の画像を比較するとインフレータブルリングの位置が異なっている。画像による比較においてフライト時にはインフレータブルリングが振れた形状であったことからエアロシェル展開実証において、図7に示すような変形した状態で展開したと考えられる。

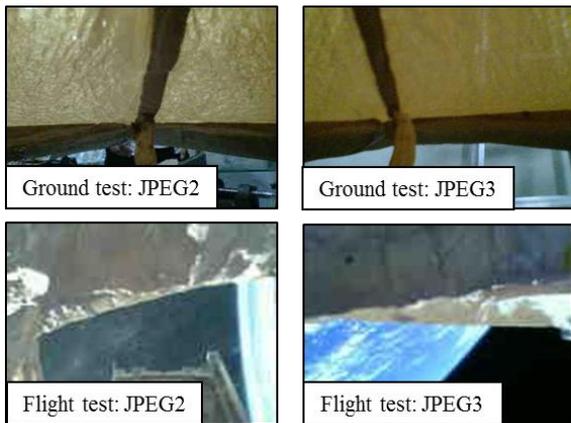


図6 JPEGカメラによる静止画像（左：JPEGカメラ2，右：JPEGカメラ3）



図7: 展開時に変形したと推定されるエアロシェル形状

5 インフレータブルのリークレート

エアロシェルのインフレータブルリングのリークレートを算出することで、インフレータブル部の気密保持機能の健全性を確認することができる。柔軟構造エアロシェルの構造上、コーナー部の気密に用いられている難燃性シリコンゴムはガス透過率が高く、内部はCO₂ガスであるため数時間単位でガスが抜けてしまう。そこで、フライト時のインフレータブルリングのリークレートを算出し、地上試験時のリークレートと比較し、エアロシェルの気密保持機能の健全性の確認を行った。フライトで得られた圧力履歴には日照日陰の温度の影響により不連続性がある。実際、エアロシェルのトラス部表面に接着した熱電対での測定結果より、飛行中のエアロシェルの温度はおおよそ-80℃から40℃まで変化していた。そこで、データ取得時のエアロシェル温度を用いて、基準温度を20℃とした圧力を算出することで補正を行った。図8は温度補正を行ったデー

タを指数関数で近似した結果である。また、近似曲線を用いることでガス注入時のインフレータブルリング圧力を算出した。この近似曲線からリークレートを算出した結果を表2にまとめる。これより、フライト時のリークレートはおおよそ4.5~8.0 [%/h]であり、地上試験時に実施した際のリークレート7.2~9.0 [%/h]⁶⁾と概ね近い値であることから宇宙空間内におけるエアロシェルの気密保持機能の健全性は確認できた。

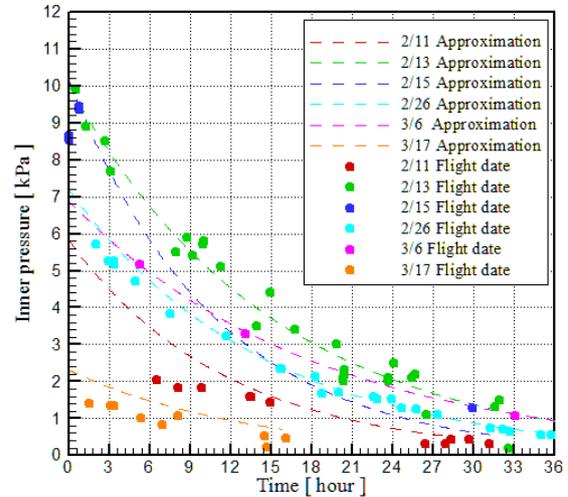


図8: 温度を考慮した際のリングの圧力履歴

表2 温度を考慮した際のリークレート

日時	リークレート[%/h]
2月11日	7.90
2月13日	8.21
2月15日	7.34
2月26日	6.61
3月6日	4.47
3月17日	7.05

6 軌道崩壊および大気圏突入実証

EGG衛星に搭載しているGPSおよび温度センサより、位置情報・温度情報を取得することができる。図9にISS放出後の日数とGPS高度の関係を示す。これにより、ISS放出直後では緩やかに高度が低下しているのに対し、エアロシェル展開後ではそれまで以上に高度の低下がみられ、軌道崩壊が確認できる。高度200km程度より急激な高度の低下から大気圏への突入も確認された。また、図10に示すようにエアロシェルのフレア、インフレータブル（直線部・コーナー部）に7箇所K型熱電対を配置しており、図11大気圏突入時におけるエアロシェルの最終受信より6時間前からの温度履歴を示す。これにより、大気圏突入までは日照・日陰の影響により-80℃から40℃程度の振れ幅があったが、大気圏突入後の高度200kmを下回ったあたりから空力加熱による温度上昇が確認された。そのため、高度履歴、温度履歴より正常に大気圏突入実証おこなわれたといえる。

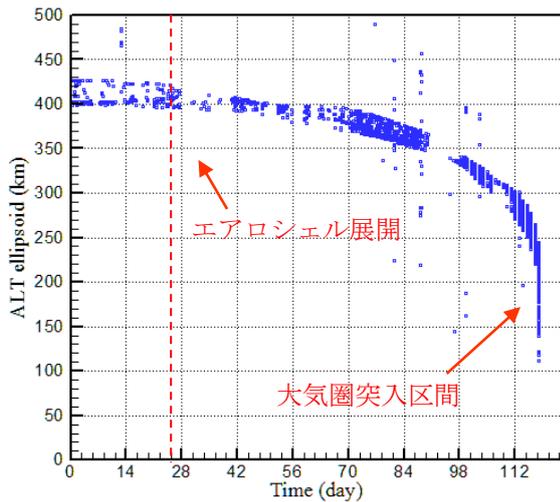


図9：ISS 放出後の EGG 衛星の高度履歴

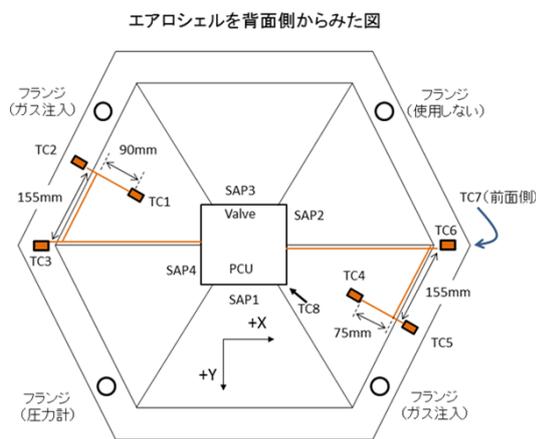


図10：エアロシェルに配置した K 型熱電対

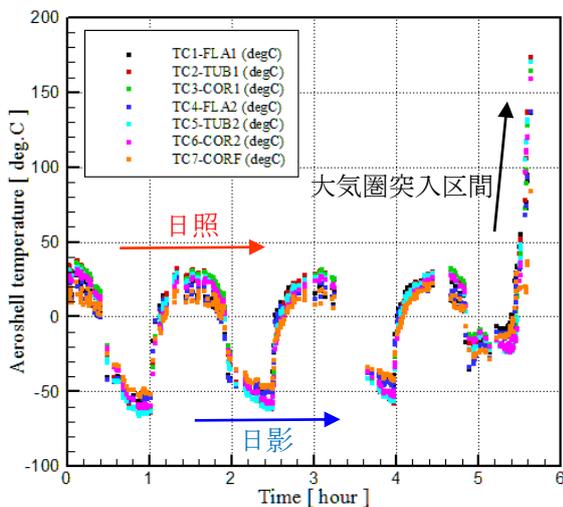


図11：大気圏投入前後におけるエアロシェルの各部位の温度履歴

7 まとめ

超小型衛星EGGによるISSからの放出機会を利用した実証試験では、エアロシェルの展開実証においてインフレータートラスの圧力履歴、JPEGカメラによる静止画像にて確認することができた。また、インフレータートラスの圧力履歴より地上試験とのリークレートの比較について差異が見られなかったため、柔軟構造エアロシェルの気密保持機能の健全性が確認できたといえる。高度履歴により、エアロシェルによる軌道崩壊、および大気圏突入時の空力加熱による温度上昇も確認することができた。しかし、本実証試験より、課題点も挙げられた。ガスボンベから電磁弁区間のCO₂ガスのリーク、またJPEGカメラによる画像比較からエアロシェルが変形した形状での展開であったことから、エアロシェルの展開方法には改善の余地がある。これらの知見を踏まえ、今後の機体の開発に反映させたい。

「参考文献」

- 1) 山田和彦, 他, 展開型柔軟構造エアロシェルの開発と展望, 日本航空宇宙学会誌, 第59巻, 第695号, 2011年, 12月
- 2) Yamada, K., Akita D., Sato, E., Suzuki, K., Narumi, T., and Abe, T.: Flare-Type Membrane Aeroshell Flight Test at Free Drop from a Balloon, J. Spacecraft and Rocket, Vol. 46, No. 3, 2009, pp. 606-614
- 3) Kazuhiko Yamada., Atmospheric-entry Flight Test of Deployable Membrane Aeroshell using S-310 Sounding Rocket”, 29th International Symposium on Space Technology and Science, paper ISTS, 2013-m-10
- 4) Kazuhiko, Y, Re-entry Nano-Satellite with Gossamer Aeroshell and GPS/Iridium deployed from ISS”, 31th International Symposium on Space Technology and Science, ISTS paper, 2017-f-5
- 5) 今村宰, 他: ISSから放出される小型衛星の再突入試験計画書(EGG)の開発進捗, 第59回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2015-4452
- 6) 松丸和誉, 他: 超小型衛星EGGの柔軟構造エアロシェルの開発, 第60回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2016-4267.