

柔軟構造による 再突入飛行体の研究開発

山田和彦(JAXA/ISAS)



講演内容

- ◆ 研究背景
柔軟エアロシエルを利用した展開型の再突入システム
- ◆ 研究を始めたきっかけ
- ◆ フライト試験を中心とした研究開発
- ◆ これまでの集大成としての観測ロケット実験
- ◆ 今後の計画
- ◆ まとめ
- ◆ 謝辞

再突入システムの新たな選択肢としての柔軟エアロシェル

従来型システム



アブレータや高温耐熱材料で2000°C以上になる高温環境に

耐える

パラシュートを展開し、減速して軟着陸(着水). 海上回収の場合は、さらにフロートを放出.



1960年代から採用されており、国内ではUSERS、「はやぶさ」でも採用

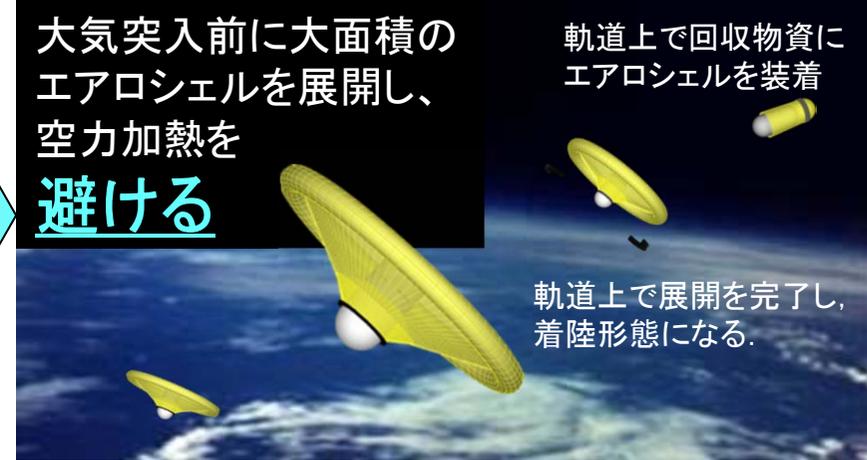
柔軟エアロシェルシステム

大気突入前に大面積のエアロシェルを展開し、空力加熱を

避ける

軌道上で回収物資にエアロシェルを装着

軌道上で展開を完了し、着陸形態になる.



低弾道係数を利用してそのまま緩降下 & 軟着陸(着水)可能. さらに、インフレータブル構造体の浮力により海上に浮揚できる

機体が高温環境にさらされないため、繊細精緻な耐熱材料が必要ない → 安全性向上, コスト減
再突入前にすでに着水形態になっており、飛行中にクリティカルな運用がない. → 信頼性向上
海上回収に必要なフロート機能を有している. → 日本国内での回収を実現
回収する物資の形状に依存しないシステムにできる可能性がある → 汎用性が高い

オリジナルな特徴が多くあり、再突入システムの新たなオプションとなる.

世界中で注目されてきた技術

柔軟構造体を利用した大気突入システムは
1960年代から、様々な形状のものが研究されてきた。

具体的なミッション計画やフライト試験は、1990年代から

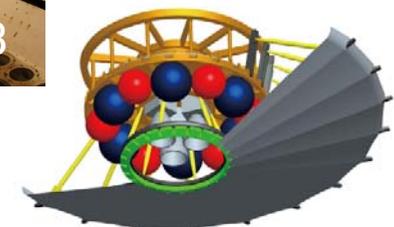
Russia:MARS-96's Penetrators→火星探査の突入機
ESA:IRDT→低軌道上からの大気突入試験, 3度の挑戦
FINLAND:METNET→火星ペネトレータへの応用

NASA:火星への大量輸送システムへの応用を目指して,
精力的に研究開発をすすめている。

IRVE:弾道ロケットを使った大気突入試験をシリーズで計画

- | | |
|----------|--------------|
| IRVE-I | ロケットからの分離に失敗 |
| IRVE-II | 2009/08実施 |
| IRVE-III | 2012/07実施 |
| IRVE-IV | 2015年実施計画 |

HEART-1, HEART-2, などの
さらなる将来計画もある。



ガス圧を利用しない
展開型エアロシェルを検討も

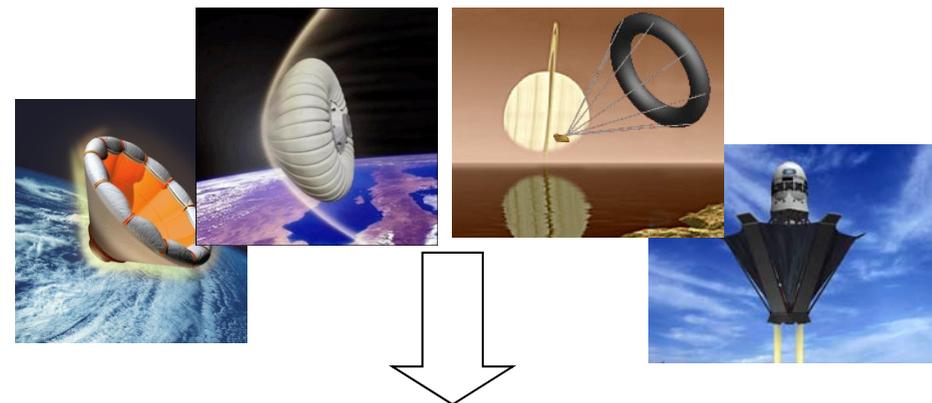
研究のきっかけは、15年前(2000年)

AIAAのAerospace Americaの記事



2000年, AIAAのAerospace America (July / 2000)で, ESAでインフレータブル構造を有する再突入機の大気圏突入実証試験が実施されるとの記事。

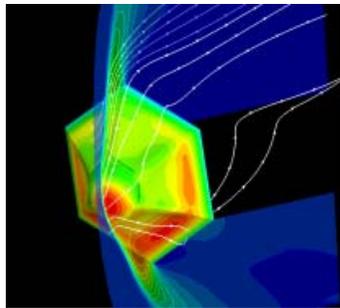
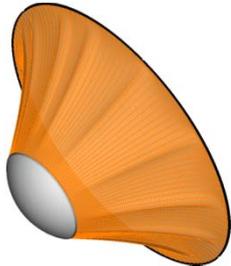
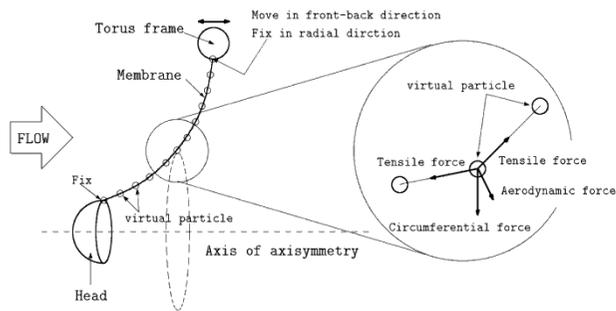
柔軟構造エアロシェルは, 1960年代に概念は提案され, さまざまな研究が行われており, そのメリットは示されているものの, 実ミッションに応用された例はないとのこと。



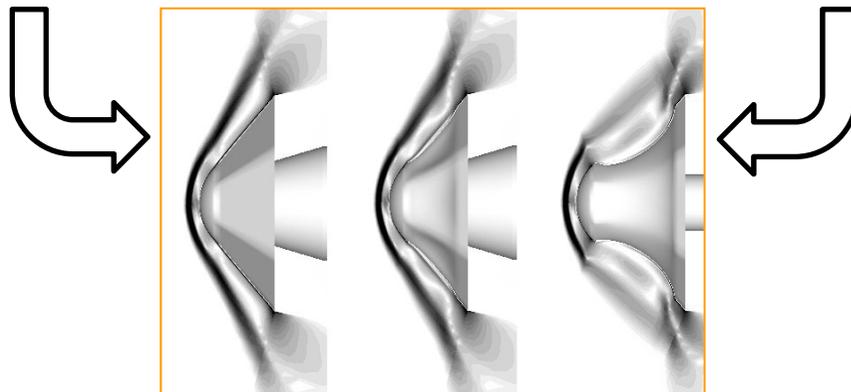
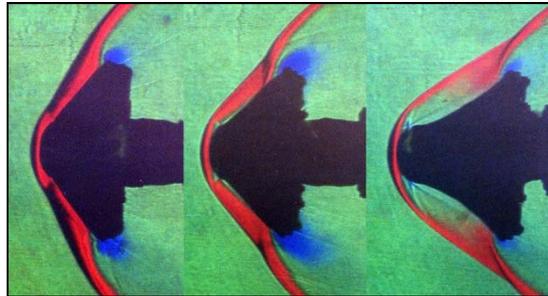
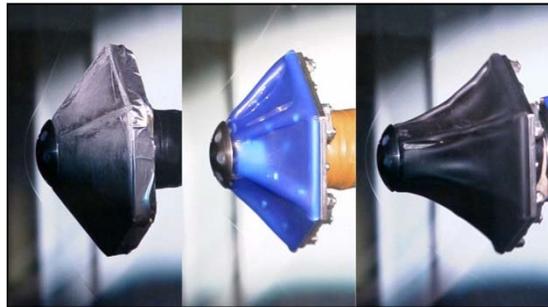
新しい再突入機, 惑星探査機の形として具現化できないか? ⇒修士論文のテーマに

研究開始のころ(修士課程～博士課程)

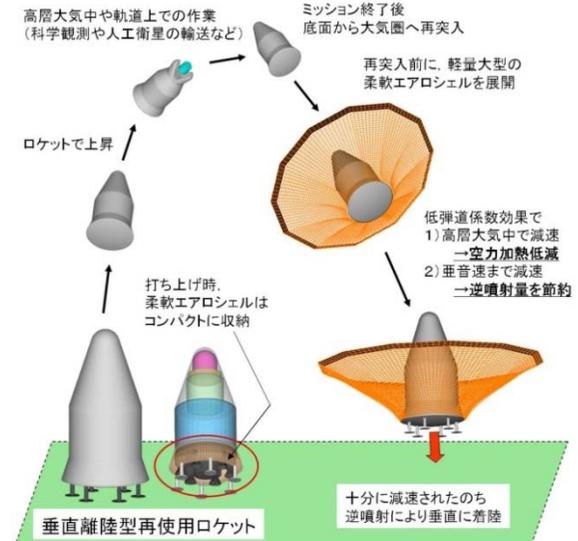
数値解析モデルの開発 (CFD+多粒子モデル)



柔軟シエルの基本特性を超音速風洞試験と数値解析で理解



宇宙輸送機への応用検討



大きな転機: フライト試験を提案

2002年12月の宇宙航行の力学シンポジウムの私の発表で、柔構造大気突入機の観測ロケットによるフライト試験を提案

平成14年度 宇宙航行の力学シンポジウム

観測ロケットを用いた実フライト試験

- 最高点到達 (200km)
- 水平方向速度 (1km/s)
- Payload重量 (40kg)

20cm

約1m

Payload 分離

自由落下

空力加熱により膜面展開

再突入

空力加熱測定
空力特性測定
膜面の展開方法の確立

平成14年12月3日(火)

平成14年度 宇宙航行の力学シンポジウム

観測ロケットを用いた実フライト試験

機体本体:
直径20cm程度のカプセル
前面のTPSは金属TPSを使用

膜面:
直径1m程度を想定
材料にはZYLON繊維を使用

フレーム:
形状記憶合金を利用
空力加熱で自動展開

膜面支持方法:
*形状記憶合金を細かく編みこんで形状を維持
*Tension Shell 構造を利用し、外枠を強固にする

その他、構造、測定機器
膜面、フレーム、TPS以外で30kg程度

形状記憶合金
多細梁&枠構造

Tension Shell & Compression Ring
構造

平成14年12月3日(火)

安部先生から「**まずは、気球を使った実験からはじめるべき**」とのアドバイスを頂き、宇宙研、気球グループの多大なるサポートを受けながら、東大、九大、宇宙研の学生が主体で**2003年8月**の実験実施をめざして準備をはじめた。

2003年に最初のチャレンジ

手作りで試行錯誤をしながら、実験機を実施に作っていく。

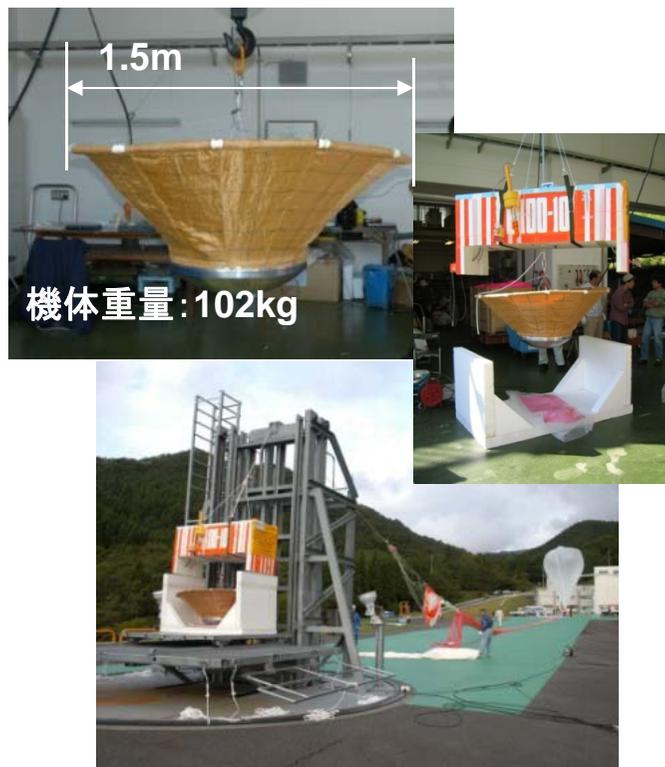


2003年8月@三陸大気球観測所にて実験実施。なんとか実験実施にこぎつけるものの...

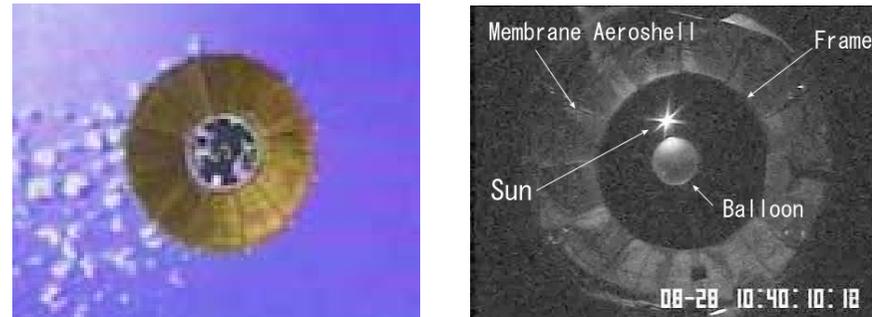
翌年、第1期気球実験(@三陸)に成功

2003年の気球実験は、うまくいかなかった(切り離しに失敗)ものの、
翌年、再挑戦して、亜音速～遷音速領域までの安定飛行実証に成功。

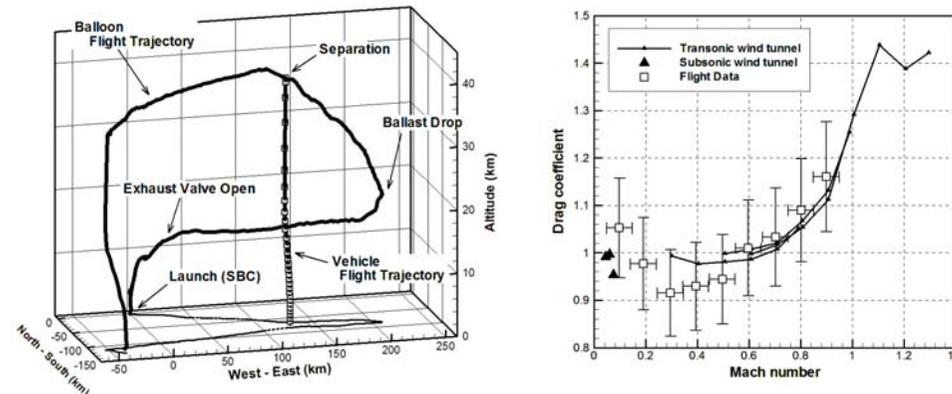
2004年気球実験の実験機



フライト中に取得した実験機の画像



降下軌道と実験機の抵抗係数(マッハ数との関係)の取得

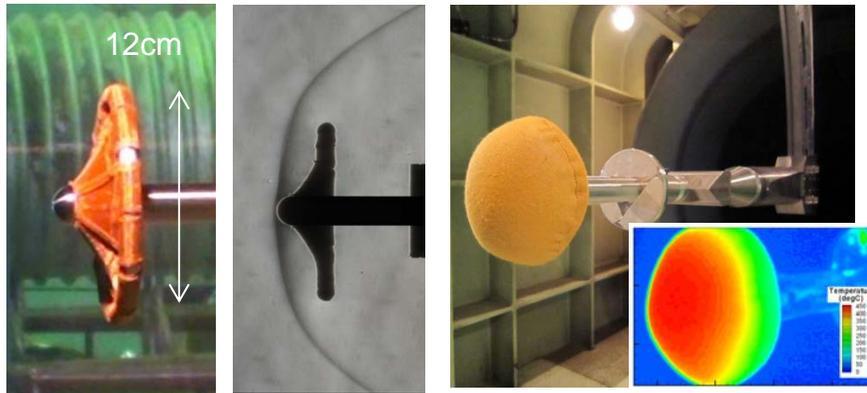


この実験が、この研究活動における大きな一歩でした。資金も、経験も、時間も全くなかったが、怖いものしらずの若さと、それを暖かく見守ってくれた先生方の度量のおかげで貴重なチャンスをもにすることができた。⇒次のステップは観測ロケット実験

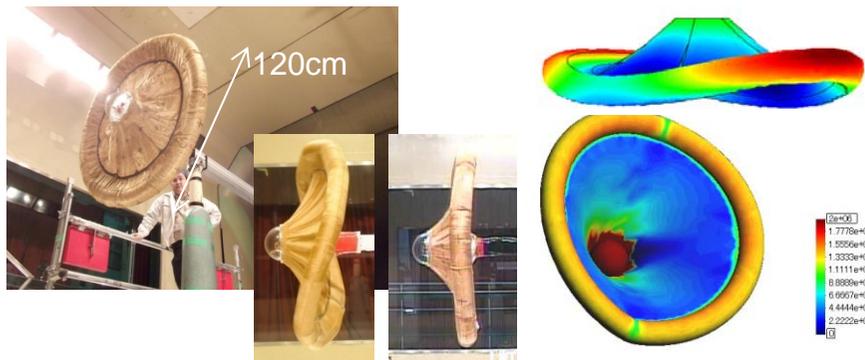
観測ロケット実験、実現のための必要な技術とその準備

* 実機開発にむけた要素技術の研究
(協力:JAXA/ARD 風洞技術センター)

極超音速気流中での空力特性 & 空力加熱環境の把握(極超音速風洞試験)

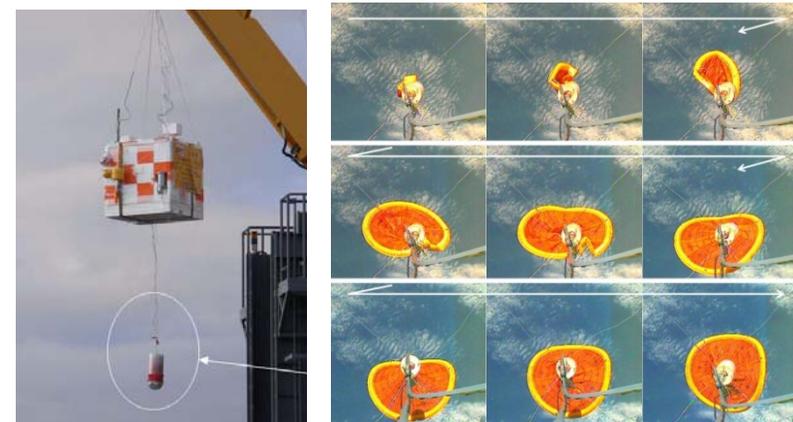
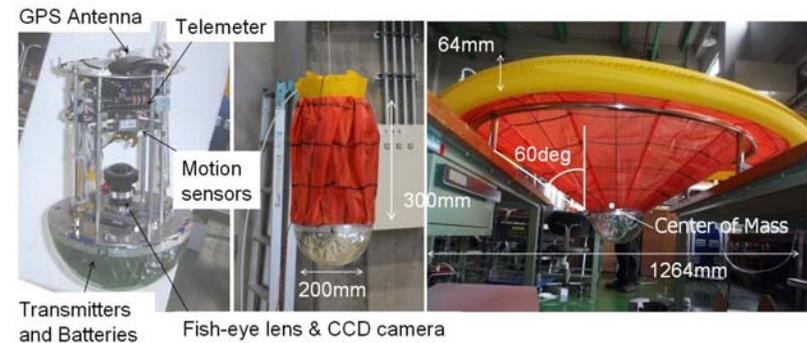


実スケールインフレーターブルトーラスの強度特性の理解(大型低速風洞試験 & 数値解析)



* 気球を利用したフライト試験による技術実証(協力:JAXA/ISAS 大気球実験室)

第二期気球実験(2009):インフレーターブル飛行体の特性の理解(大気球試験)



ガス圧で展開するエアロシェルを、上空で展開し、その後、自由飛行をさせ、飛行特性、構造強度を把握

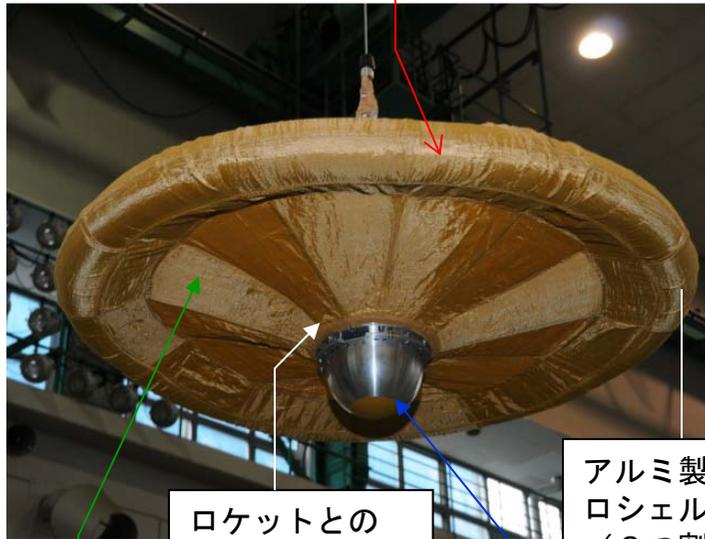
⇒これらの成果の集大成として観測ロケット実験を実施

観測ロケット実験用に開発した実験機

<インフレーターブローラス部>

材料：ZYLON紡績系織物，ZYLONフィラメント織物，シリコンゴムの3層構造

チューブ直径10cm，重量2.0kg（圧力配管部含む），外直径は120cm



ロケットとの結合用フランジ

アルミ製のエアロシェルカバー（3つ割）



ロケット先頭部に搭載

角柱部の回りに、エアロシェルを収納

<薄膜フレア部>

材料：ZYLONフィラメント織物

開き角70度の錐台形状

12枚の扇形の布を縫い合わせて製作
フレーム部の内側と結合

重量0.7kg（取り付け用部材を含む）

<カプセル本体>

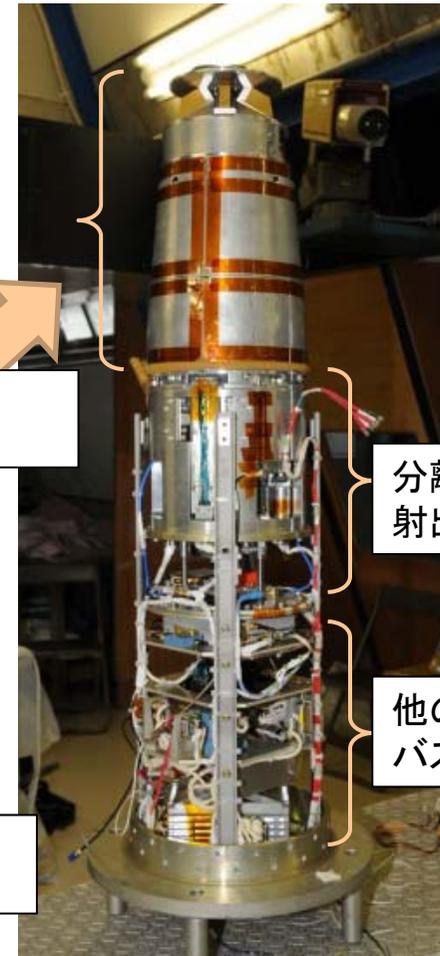
頭部形状は直径19cmの半球

胴体部は角柱殻構造，後頭部は円筒+円錐形状

内部に機器をすべて搭載（ガス注入系も含む）

直径20cm，高さ54cm，重量約13kg

ロケット搭載状態

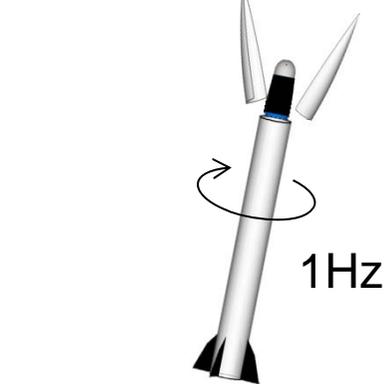


分離射出機構

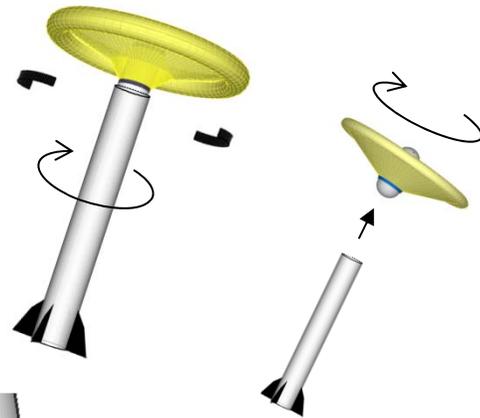
他のPIやバス機器

観測ロケット実験シーケンス

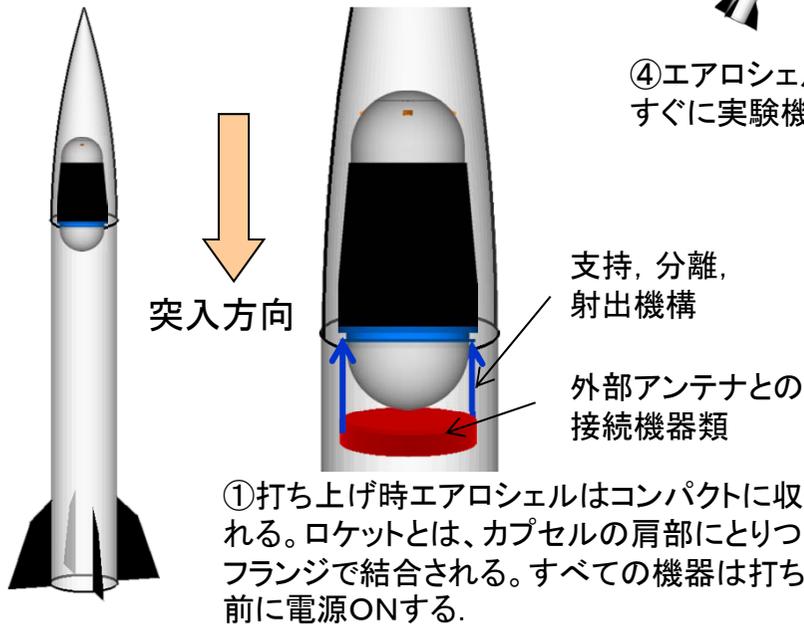
②ロケット燃烧終了後、ノーズコーン開頭、Kuアンテナ伸展。



③スピンレート1Hzでエアロシェルカバーを開放し、インフレーターブルトラスにガスを注入し、エアロシェルを展開する。

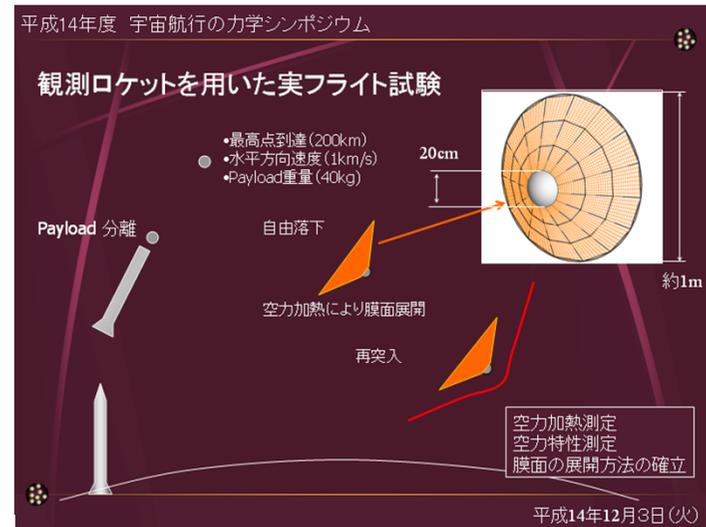


④エアロシェル展開後、すぐに実験機を射出



①打ち上げ時エアロシェルはコンパクトに収納される。ロケットとは、カプセルの肩部にとりつけたフランジで結合される。すべての機器は打ち上げ前に電源ONする。

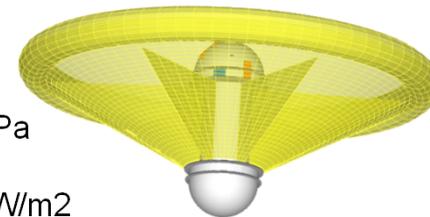
2002年時の提案資料



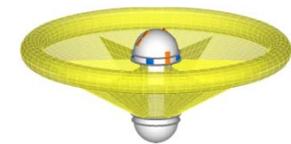
⑤動圧が大きくなるにつれて、空力安定により迎角0度に指向するとともに、空気をうけ、エアロシエルの形状が安定する。



⑥高度55km付近で
 最大動圧 0.65kPa
 最大マッハ数 4.45
 最大空力加熱 20.0kW/m²
 を経験する。



⑦最高到達後1015秒後に、終端速度16.8m/sで着水



観測ロケット実験結果(2012.8.7 実施)

実験シーケンス(フライト実績):

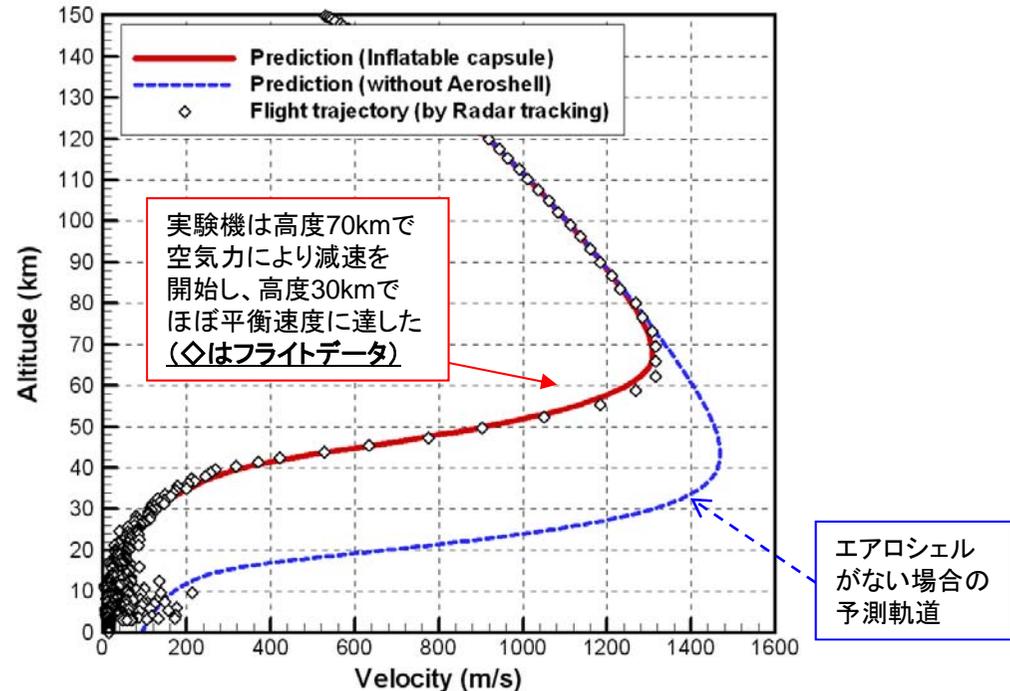
X=0	ロケット打ち上げ
X=60sec	ノーズコーン開頭
X=90sec	エアロシェルカバー開放
X=95sec	ガス注入
X=100sec	実験機分離 & 射出
X=190sec	頂点通過(最高高度:150km)
X=320sec	最高速度(1.32km/s)に達した後、 空気力により減速開始
X=400sec	平衡速度到達(高度30km)
X=1345sec	着水(終端速度約16m/s)

フライト中に取得した柔軟エアロシエルの映像



降下軌道(速度vs高度)(フライトと予測の比較)

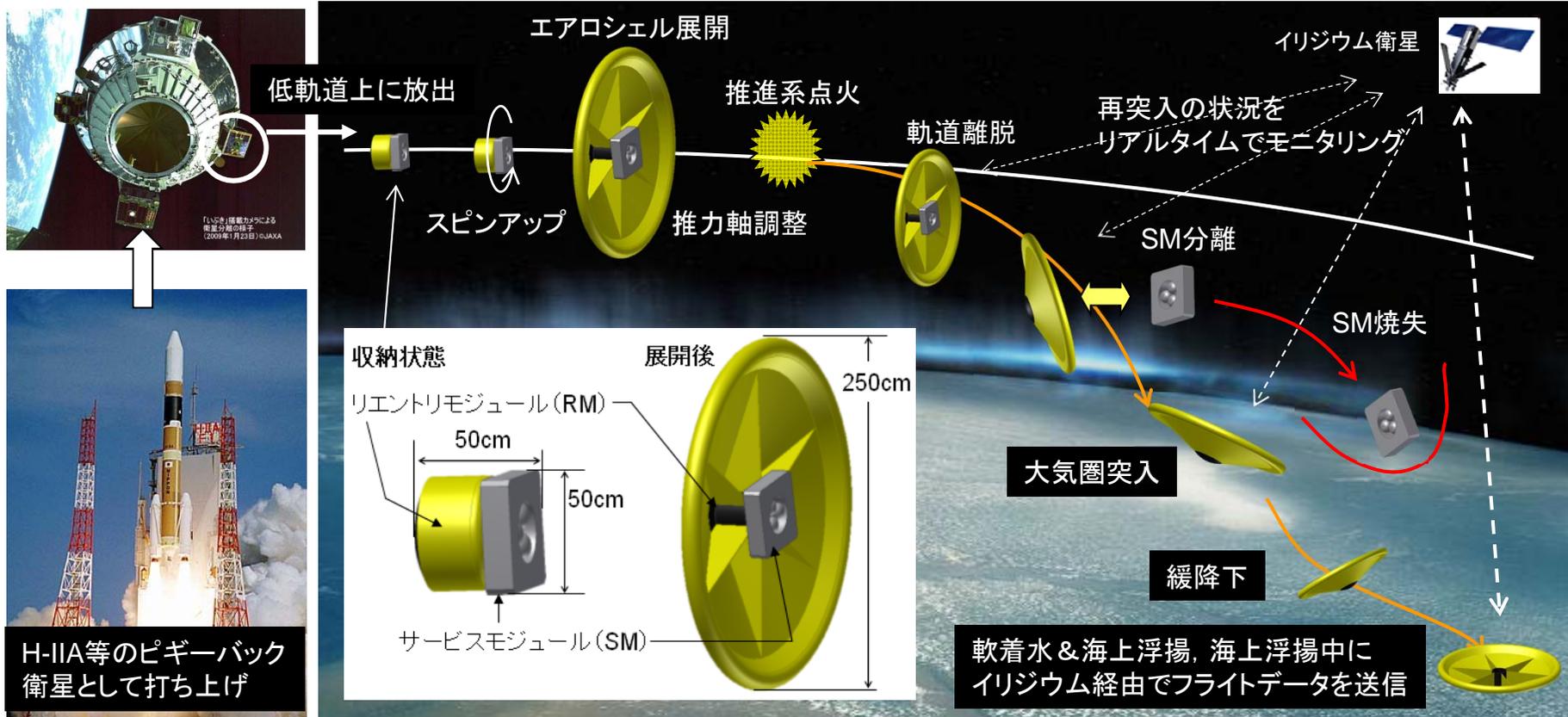
柔軟エアロシェルによって、より高高度で減速できている。



次なる目標は地球低軌道からの再突入実証

ピギーバック衛星の機会を利用した地球低軌道からの再突入実証試験 (**TITANS** (Test flight of Inflatable Aeroshell and iridium satellite Network for innovative re-entry and recovery System))を次の目標に設定。

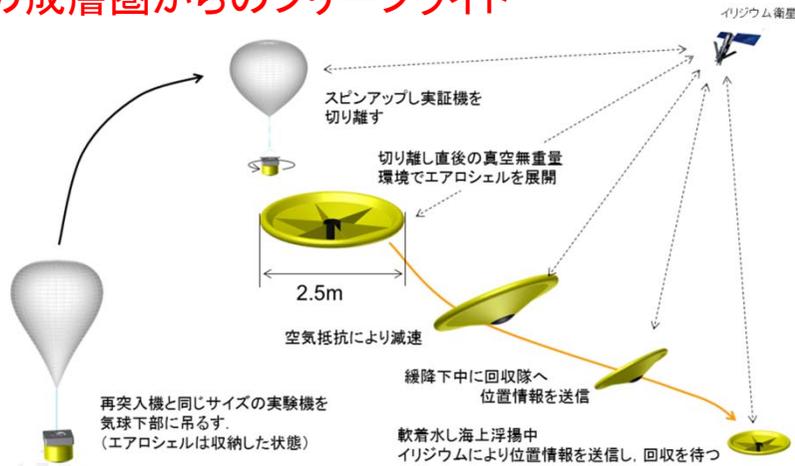
⇒2018年頃の実施を目指して準備を進めている。これが、大気圏突入システムとしての実応用への最終技術実証となる。



その準備としての事前フライト試験も計画中

第3期大気球実験：

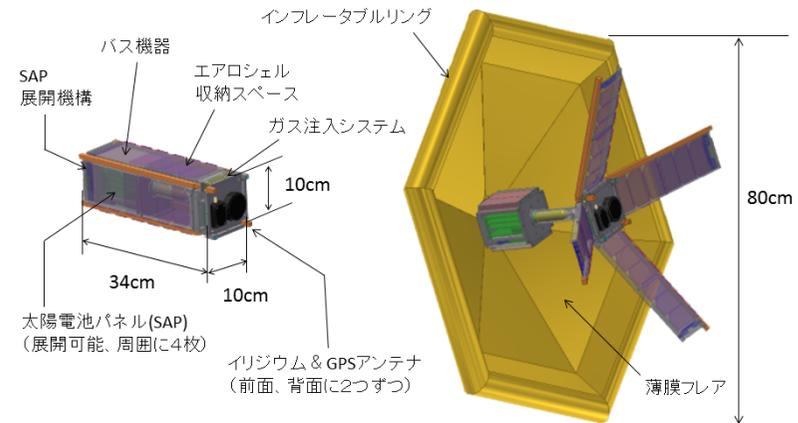
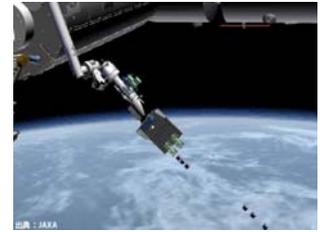
実スケール(~2.5m)の柔軟エアロシェルを有する飛翔体の展開、飛翔、回収実証
 ⇒実際のサイズ、製造方法のエアロシエルの成層圏からのフリーフライト



ISSからの放出衛星の機会を利用した実証ミッション

EGG(reEntry satellite with Gossamer aeroshell and Gps/Iridium)ミッション

⇒ついに柔軟エアロシェルが軌道上へ



エアロシェル収納状態(3U)

エアロシェル展開状態(直径80cm)



まとめ

まず、私が、この研究をここまで進めてこれたことに大変感謝しています。それは、このプロジェクトは、「いろいろなことに100回チャレンジして1つでも芽ができればよい」という先生方、指導者達の考え方から生まれてきたものです。

ただ、100回チャレンジするためには、繰り返しのスピードが必要で、それには、自分で技術をもっていなくては行けない。また、芽が出る可能性を高めるためには、それを見極めるセンスをもっていなければならないと感じています。

そして、これらは、自分で手を動かして実際に現場で、成功、失敗を経験しないと身につかないものであり、机の上や会議室で考えているだけでは、決して得られないことであるとも感じています。

勇気をもって1歩踏み出して、実際に手を動かして、何からを作り上げることが、たとえ、失敗したとしても、その経験が次のチャレンジにつながると思います。(次のチャレンジへの速度、成功への確立を上げることになるはずです。)

その中で生まれた柔軟エアロシエルの研究開発は、2012年度に実施した観測ロケット実験で、概念研究のレベルでは、一旦、集大成となったと思います。ただ、この技術を本当に使える技術にするには、これからが正念場だと認識しています。今後も、気を引き締めて、最終実証試験にむけて進んでいきます。

謝辞

「展開型柔軟エアロシェル(MAAC)」の研究開発活動が、観測ロケット実験まで進めることができ、さらにこのような賞をいただくような成果を上げることができたのは、多くの方々から支援と励ましを頂いてきたお陰だと思っています。

特に、JAXA宇宙工学委員会戦略的研究費より平成17年度(2005年度)より継続した支援をしていただいています。JAXA航空本部の風洞技術開発センターのスタッフの方々には、φ1.27m極超音速風洞、6.5m×5.5m低速風洞試験の実施時に貴重なご意見や支援をいただきました。また、JAXA宇宙科学研究所の大気球実験室や観測ロケット実験室からは飛行実験に関し、多岐にわたった多大なる援助を頂きました。飛行試験実施時には、三陸大気球観測所、大樹航空宇宙実験場、内之浦宇宙空間観測所のスタッフや地元の皆様に温かく迎えていただき、いろいろな形でのご支援、応援をいただきました。

ここに感謝の意を述べさせていただきます。ありがとうございました。



S-310-41号機の実験に射場で関わってくれた人々

謝辞

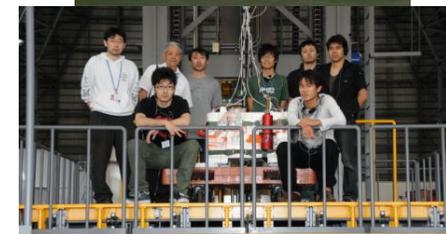
本研究活動の主力は、各研究室に所属する学生たちの若い力である。彼らの若い頭脳と手がなければ、到底この研究活動は成り立たなかったです。以下に参加してくれた学生メンバーの名前を記載し感謝の意を表します。

(観測ロケット実験以前に協力いただいた学生さんのリスト)

赤堀敬法 (東海大学)	秋田大輔 (東京大学)	安部大佑 (青山学院大学)
飯野 亨 (東京大学)	和泉有祐 (東京大学)	石田智樹 (東京大学)
大道勇哉 (東京大学)	加藤優佳 (静岡大学)	木内真史 (東京大学)
北村拓也 (東海大学)	衣本啓介 (東京大学)	木村祐介 (青山学院大学)
小山将史 (東京大学)	佐々木要 (東京大学)	貞光大樹 (東京大学)
佐藤英司 (東京大学)	菅沼邦彦 (東京大学)	園田拓也 (東海大学)
高谷岳志 (東京大学)	高間良樹 (東京大学)	田嶋良雄 (東海大学)
谷繁樹林 (東京大学)	堤 裕樹 (東海大学)	中澤英子 (東京大学)
永田靖典 (東京大学)	中村久美子 (東京大学)	中本浩樹 (東京大学)
鳴海智博 (九州大学)	能勢 温 (東海大学)	花田孔明 (東京大学)
濱崎勝俊 (東京大学)	日浦優吾 (東京大学)	古川宗孝 (東京大学)
本間直彦 (東京大学)	前原義明 (東京大学)	牧野 仁 (東海大学)
山下 礼 (東京大学)	湯田盛仁 (東京大学)	吉田昌史 (東京大学)
若月一彦 (東海大学)	渡邊保真 (東京大学)	

また、逆に、このような未熟な学生たちに、自由に研究活動をさせていただいた、鈴木先生、安部先生に対して、その勇気と忍耐力に対して敬意を表します。

各フライト試験に参加してくれた学生メンバーたち



謝辞

最後に、このプロジェクトのきっかけとなった最初の大気球実験の機会を与えていただき、また、その後、私を、大気球観測センターの一員として迎え入れてくれて、右も左もわからない私に、フライト試験が何たるかを一から厳しくも温かく指導していただき、育ててくれた故・山上隆正先生に、ささやかながら恩返しとして、本受賞を先生にささげたいと思います。

