

回収・再利用を目指した神奈川大学の ロケット開発



神奈川大学工学部機械工学科
教授 高野 敦

サマリ

- ✓ 神奈川大学高野研究室及び宇宙ロケット部は、ハイブリッドロケットの開発を行っている
- ✓ 2027年には高度100kmの宇宙到達を目標としている。
- ✓ 2021年度にはハイブリッドロケット国内高度記録10.1kmを樹立した。
- ✓ この記録は国内民間でも3位の記録である。
- ✓ 今回の打ち上げでは高度記録更新には69m及ばなかったが、機体のほぼすべての回収に成功。
- ✓ またマッハ1.5を記録。これも公表されている中ではハイブリッドロケット国内最速記録である。
- ✓ 回収した機体の一部の再利用・再打ち上げを目指している。

サマリ

- ✓ ロケット開発では、推進系に着目されがち
- ✓ 推進系のみならず、構造・分離機構・アビオニクス・空力・飛行経路解析・地上などの各サブシステムを統合したシステム設計・開発を行っている。
- ✓ 衛星は重電メーカー中心にシステム設計経験者が多い。
- ✓ 同時に、超小型衛星の発展により、超小型衛星のシステム設計の機会が増えている。
- ✓ 重電メーカーと超小型衛星ベンチャーの人材交流によりさらにシステム設計経験者が増えている。
- ✓ ロケットはモデルチェンジが少なく、システム設計の機会が少ない。
- ✓ 「教育」ではなく学生と一緒に「開発」に取り組むことにより、ロケットのシステム設計経験者を増やしたい。

3. ハイブリッドロケットとは

他のロケットとの違い

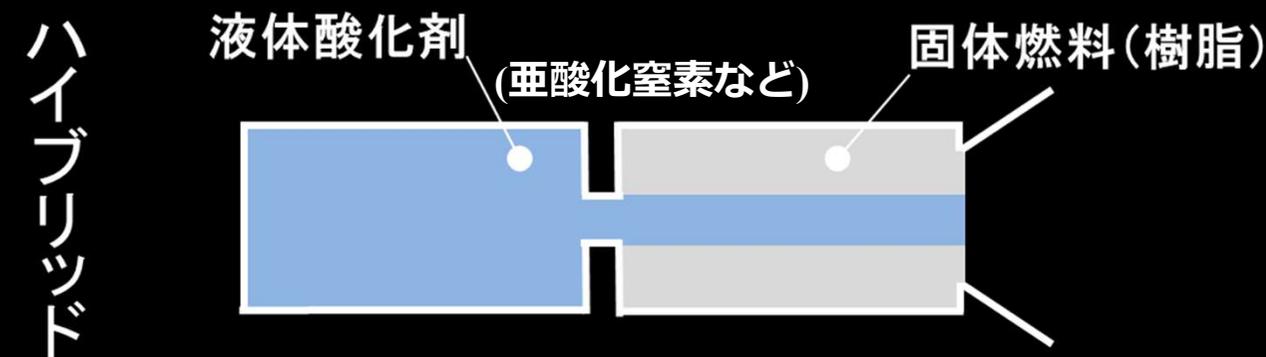
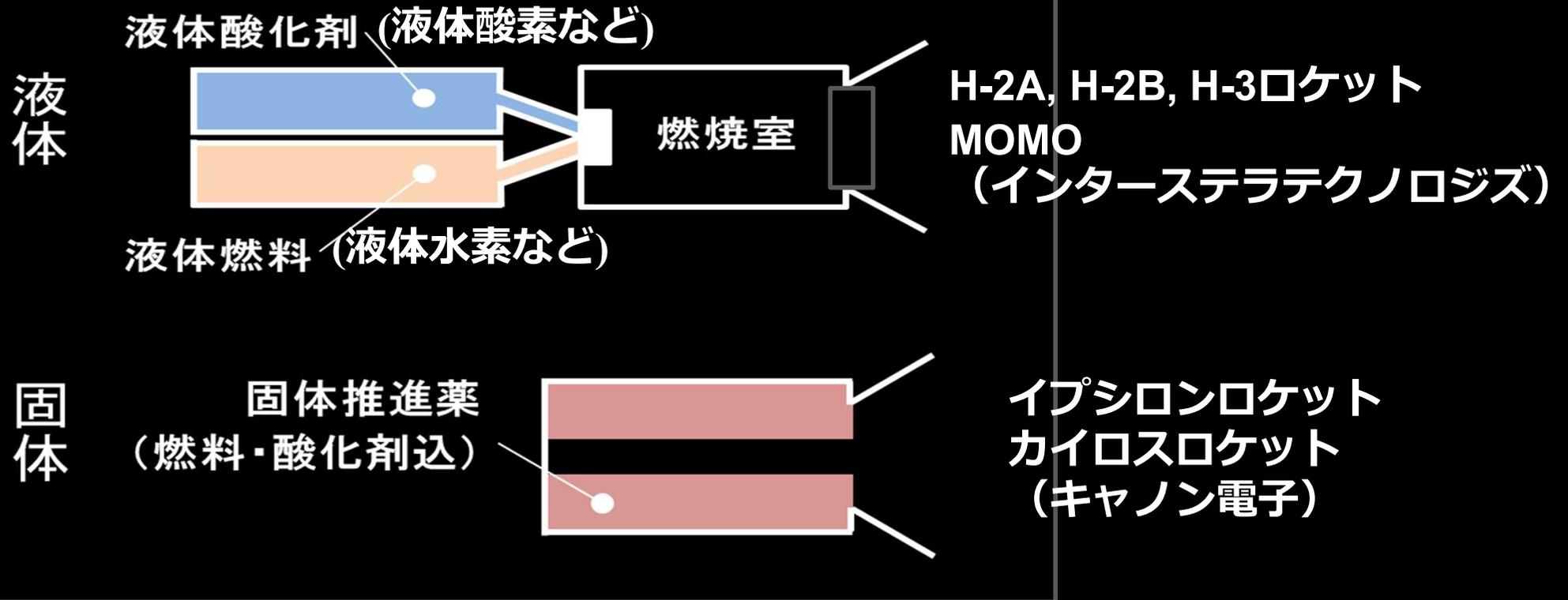


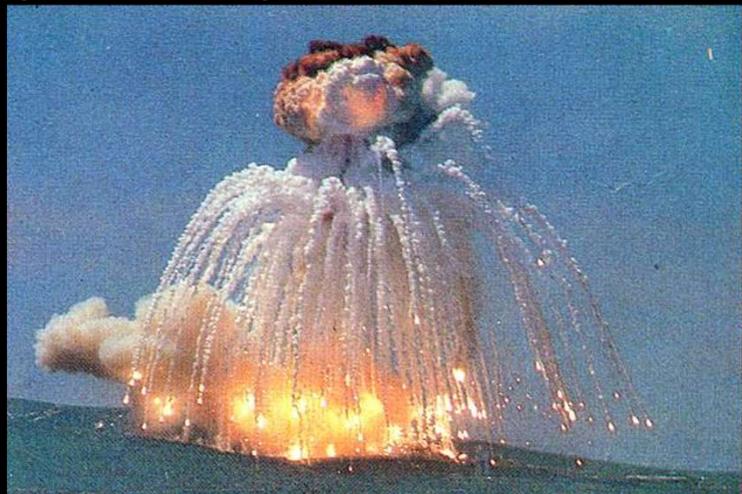
図 ロケット比較図

- ・爆発物不使用であり安全性に優れる
- ・運用コストの大幅削減
- ・推力特性の向上など技術的な課題

出典 2016年 軽量化ハイブリッドロケットエンジンの開発
佐藤・館山・米山

3. ハイブリッドロケットとは

固体ロケット爆発の例 (Titan IV)



↑ ↑
液体ロケット(LOX-ケロシン)爆発の例
(アンタレス)



ハイブリッドロケット事故の例 (スペースシップ2)

- 固体・液体ロケットでは爆発の際、上空及び地上でファイアボールが生じ、機体は粉々になる。
- ハイブリッドロケットでは、空中分解してもファイアボールは生じず、地上でロケット部分は残存している。
- 上記SS2の場合、ロケットのケースやタンクに爆発の痕跡はなく、パイロット1名は生還した。

ハイブリッドのTNT(爆薬)換算値:=0 → 非火薬

*JAXA嶋田先生より提供いただいた資料を一部改変

"Hazard Analysis of Commercial Space Transportation," U.S. Dept. of Transportation, Office of Commercial Space Transportation, 1995(rev) より

4. これまでの開発成果

機体概要

一部の機械加工部品、電子機器を除き、ロケットの設計、開発、試験、打上を神奈川大学の教職員・学生のみで実施

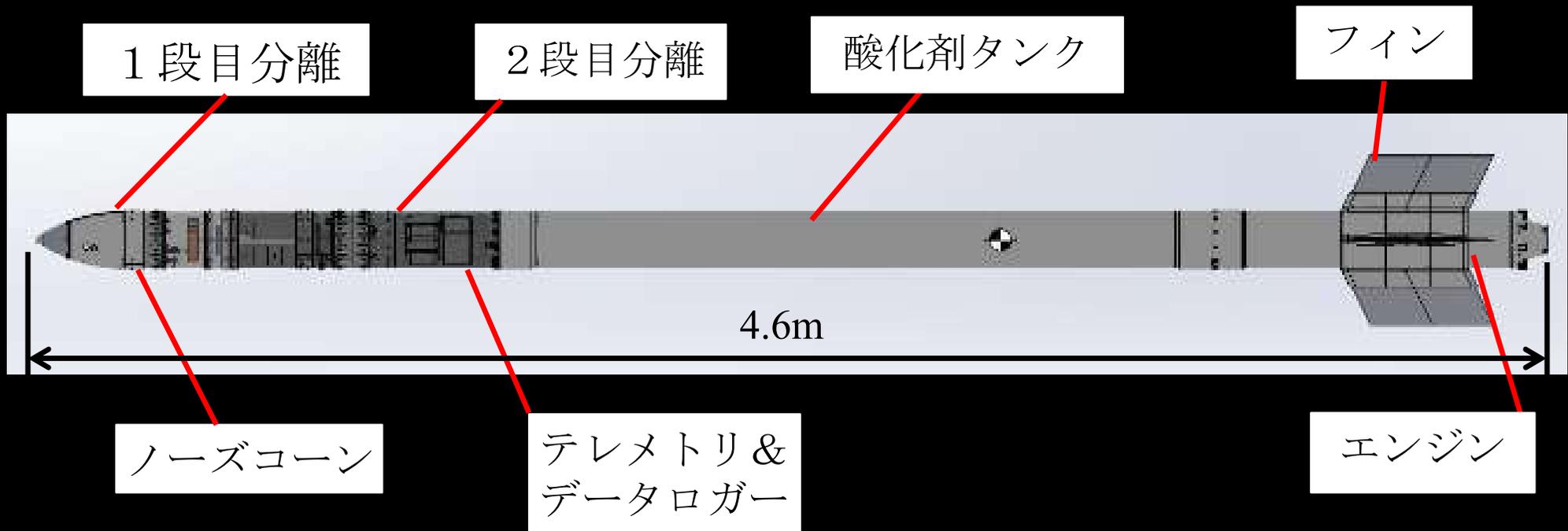


図 機体全体

5. 2024年打ち上げに向けての開発

エンジン概要

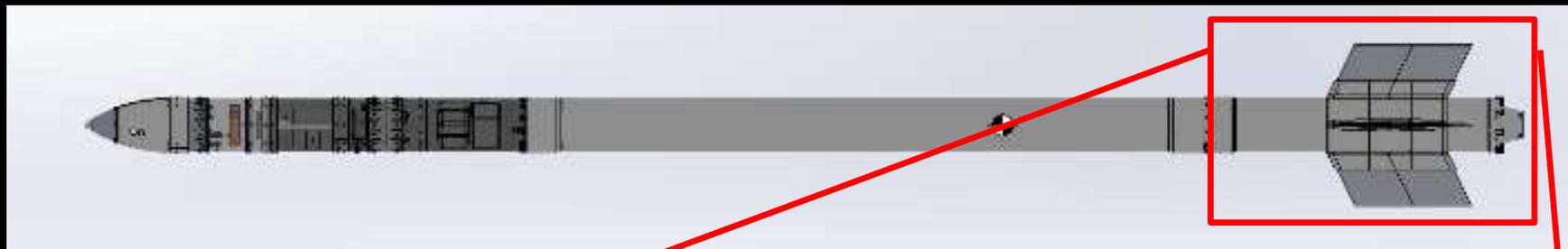


図 機体全体

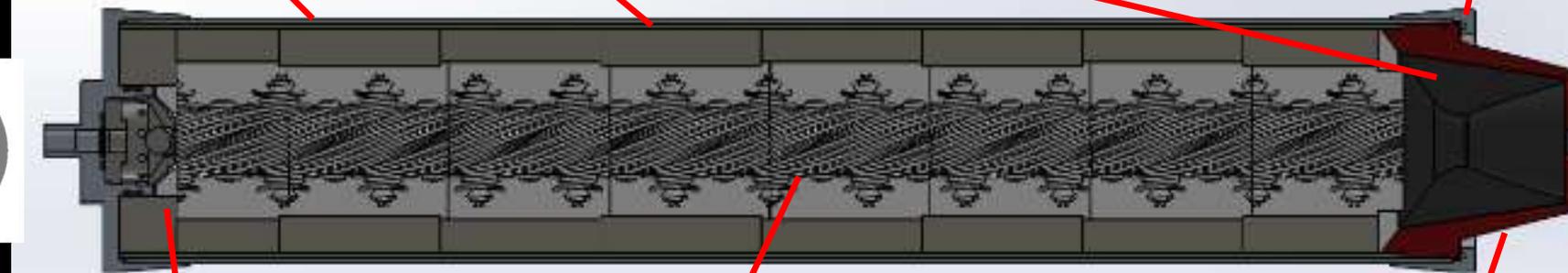
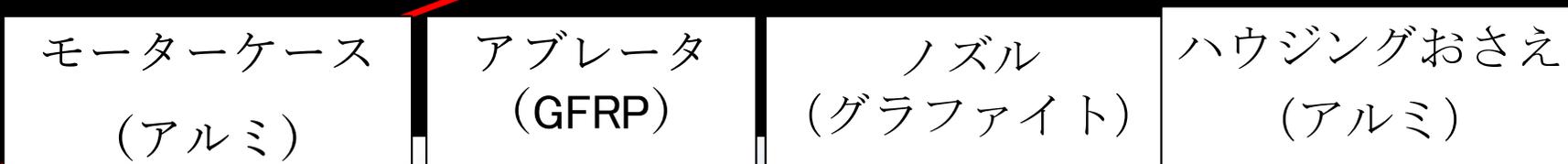


図 エンジン部拡大

5. 2024年打ち上げに向けての開発

燃焼試験結果(2024年5月25日, 6月15日, 7月6日, 7月7日)

	第1回	第2回	第3回	第4回	改4エンジン
燃焼時間 t [s]	24.62	26.03	24.53	23.38	25.6
最大推力 F_{10max} [kN]	7.28	7.2	8.19	8.29	7.40
トータルインパルス I_t [kNs]	93.6	95.4	95.6	94.8	96.5
比推力 I_{sp} [s]	167.6	170.9	171.2	173.4	172.2
設計値 $I_{tavg.}=95$ に対する差[%]	-1.5	0.41	0.63	-0.21	1.58

- 燃焼試験のトータルインパルスについて着目すると、設計値 ($I_{tavg.}=95\text{kNs}$) に対し、すべての実験で**約98%を達成**できた。
- 燃焼後のエンジン外壁を確認したところ、熱による変形や焼損が認められなかったため、グレインの接着の確立およびアブレータによって燃焼火炎の熱からモータケースを保護することができた。

すべての試験で**正常燃焼**を確認

2020改4エンジンと同等の
推進性能を得た

5. 2024年打ち上げに向けての開発

酸化剤タンク

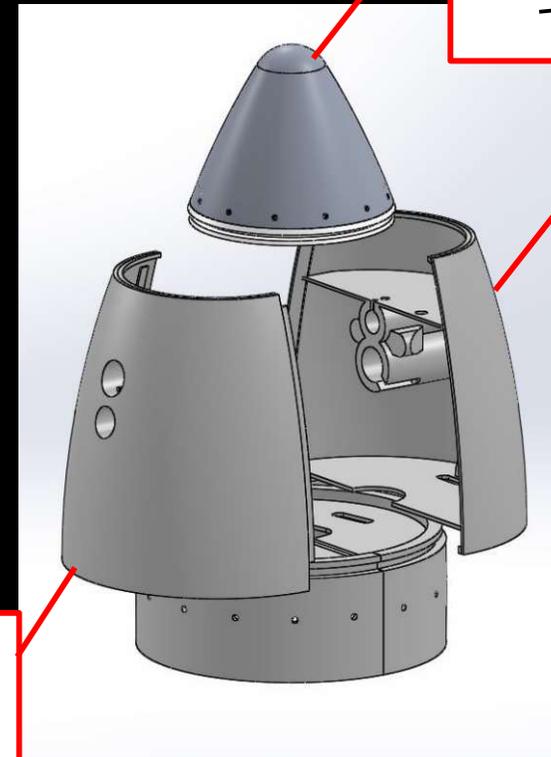
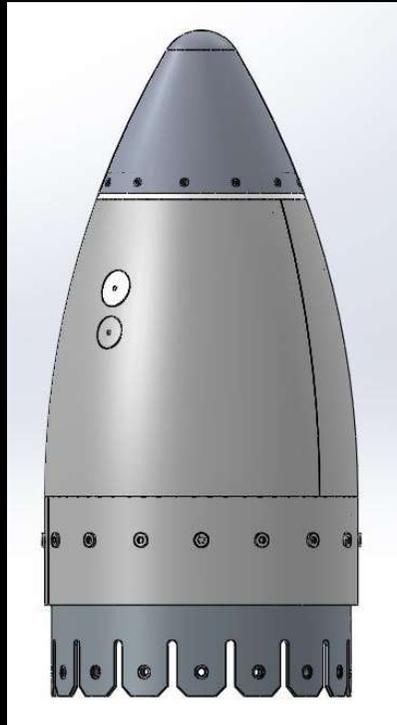
- ・ ツツミ産業株式会社殿と高強度チタン合金製タンクを共同開発中
- ・ ロケットのみならずスキューバや消防士向け、医療用酸素タンクなどを視野に入れている



完成したタンク（耳金溶接前）

5. 2024年打ち上げに向けての開発

一段目分離機構



ノーズコーン
キャップ

ノーズ
コーン

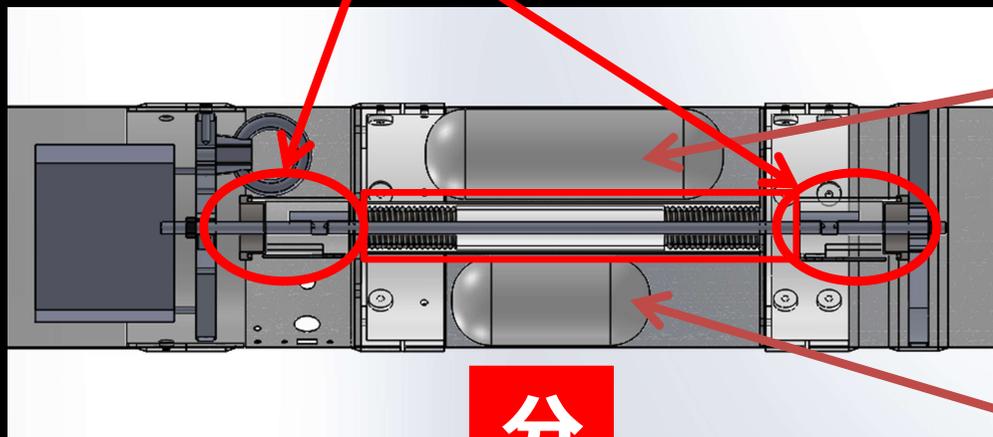
ノーズ
コーン

- フェアリング分離(ノーズコーンが3つに分離)
- ノーズコーンは三菱ケミカルの協力のもとポリカーボネート製作
- ノーズコーンキャップは三菱ケミカルの協力のもとCFRPで製作

5. 2024年打ち上げに向けての開発

二段目分離機構

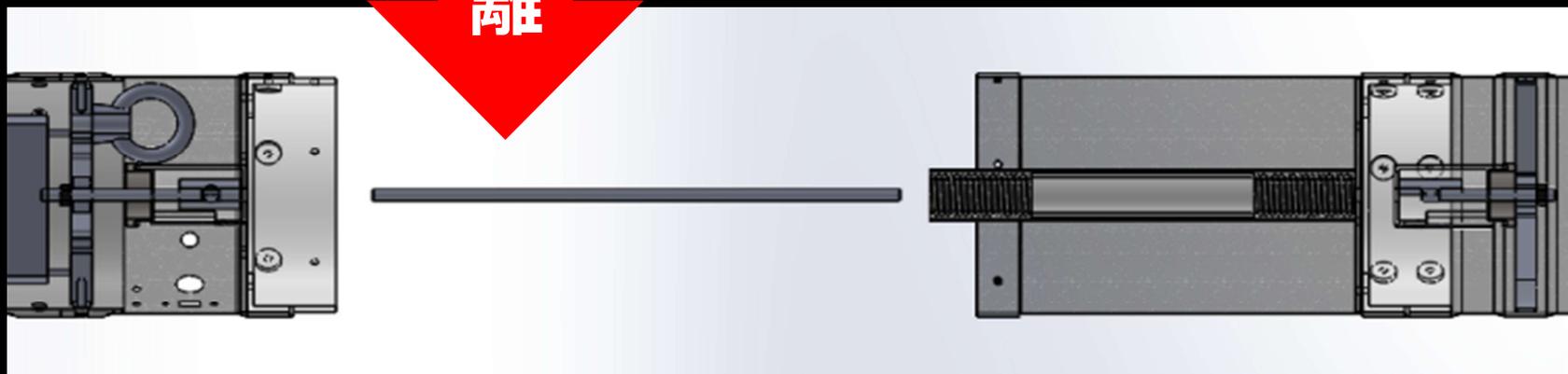
セパレーションナット



展開式フロート

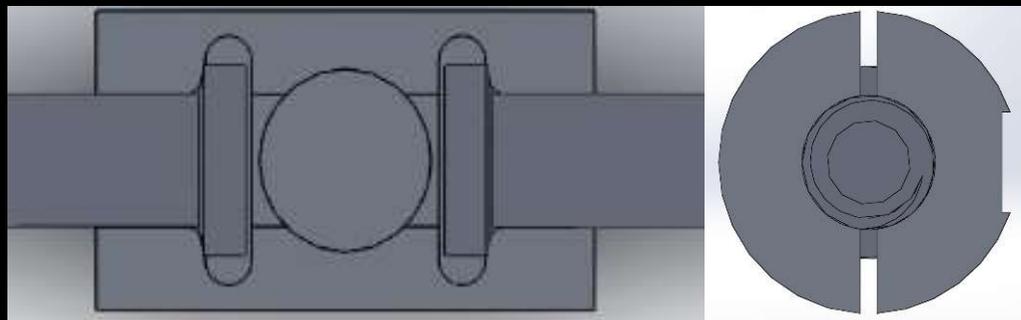
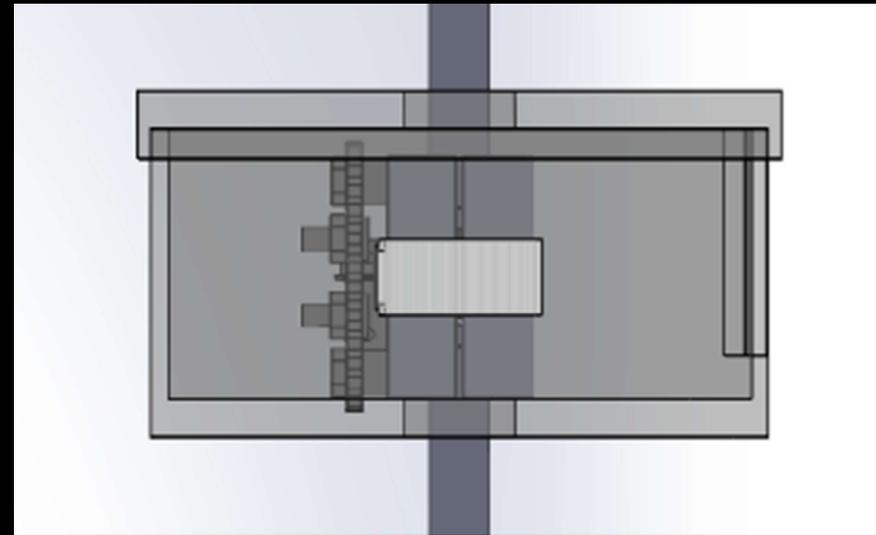
分離

パラシュート



5. 2024年打ち上げに向けての開発 分離機構

- 最大保持軸力10kNを達成
- 低分離衝撃

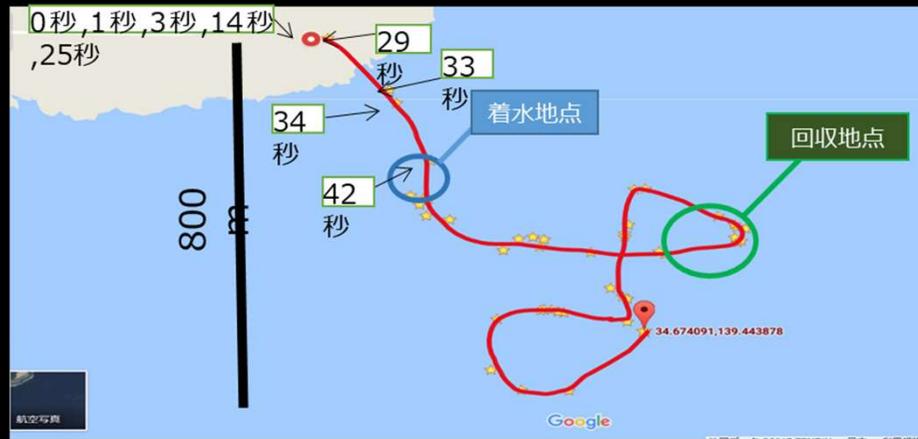


5. 2024年打ち上げに向けての開発 テレメトリ装置

- 打ち上げ時の高度、GPSデータなどを電波でダウンリンクする装置
- 計測制御を主軸とした制御機器の設計開発を行っている企業で下町ボブスレーにも深くかかわっているフルハートジャパン殿と共同開発済み。
- 2017、2018に打ち上げ実績のある装置（大学内作成）を製品化。

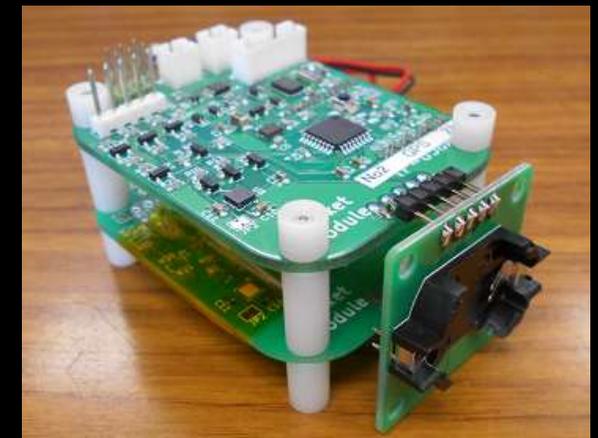


2017年度GPS



2017年度大気圧

実績のあるセンサや回路の組み合わせなどはそのまま

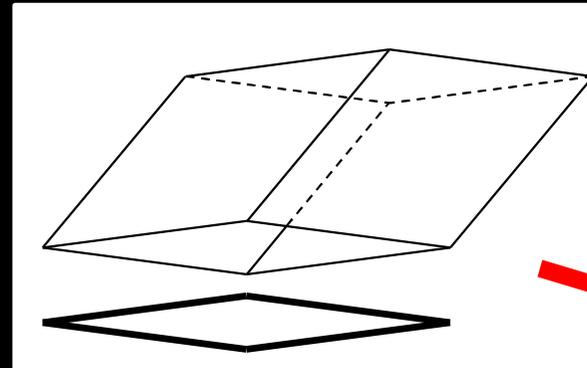


2019年度 テレメトリ装置

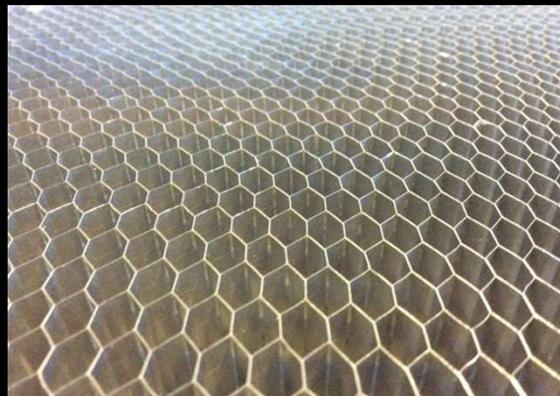
5. 2024年打ち上げに向けての開発

複合材料構造

ハニカムコアを有するCFRP表によるダイヤモンド翼を採用
フラッタ速度向上のため軽量・高剛性化



表皮 (CFRP製)



アルミニウムハニカムコア

切削

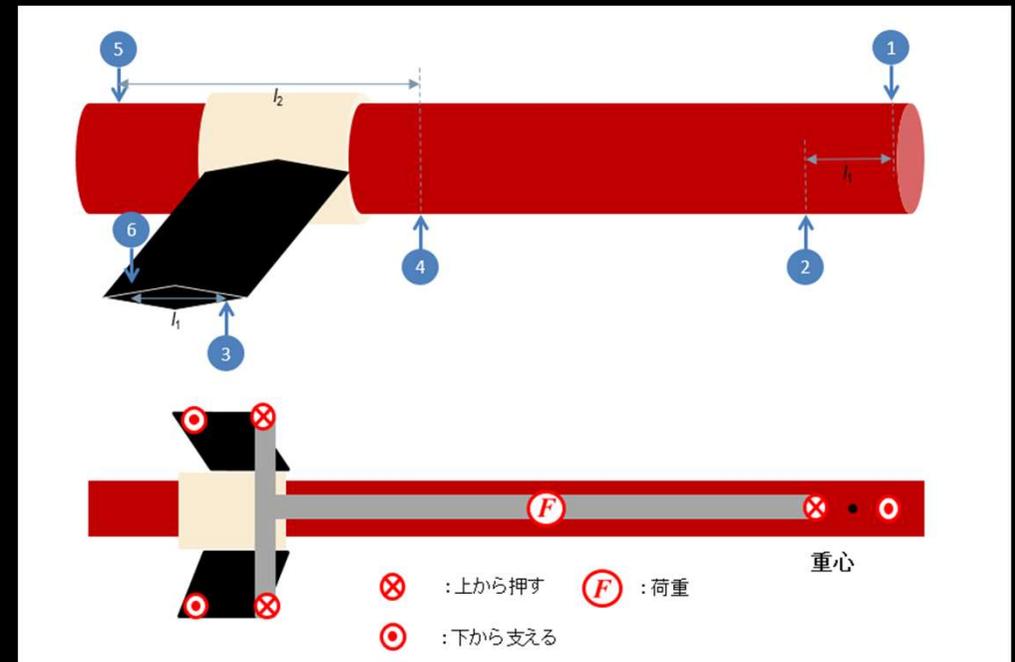


ハニカムコアフィン

5. 2024年打ち上げに向けての開発

複合材料構造

- 実機のフラッタ速度及びダイバージェンス速度を求めるためにフィンステー及び胴体を含めた剛性試験を行った
- フラッタ速度はフィンのねじり剛性が支配的と思われるが安全側の評価として機体の変形も含め測定



フィン周りの剛性試験（左：実物 右：簡易図）

5. 2024年打ち上げに向けての開発

ランチャー

2018年に開発したものを2019および2021年に改修

- 全長(ランチャー停止時) 17.9[m]
- 全高(仰角79°時) 12.6[m]
- 土台範囲 4.1×9.4[m]
- レール長さ 12.1[m]
- 重量 647.3[kg]
- 材質 アルミ ステンレス等
- 仰角可変 60度～89度



図 ランチャー全体

6. 打ち上げ試験

打ち上げ試験

- ・ 2024年12月14日AM6:50に打ち上げ
- ・ 最高高度は約10kmと計測
- ・ 最高速度は約マッハ1.5
- ・ 機体の大部分の回収にも成功



図 回収した機体



図 発射の様子（道浦直人氏提供）

5. 打ち上げ試験

打ち上げ試験

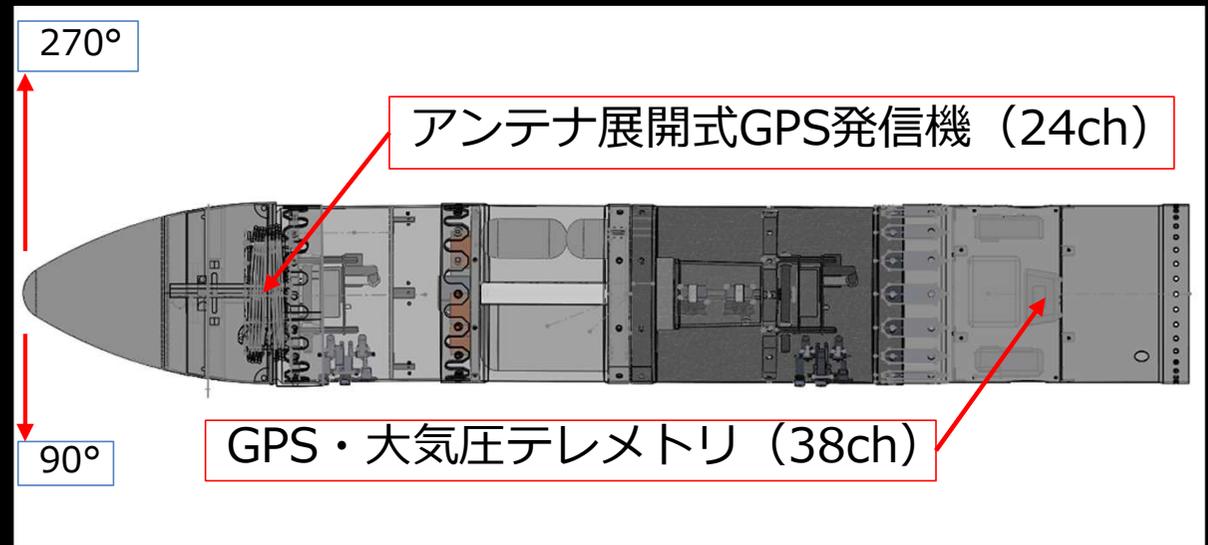
- ・ 2024年12月14日AM6:50に打ち上げ
- ・ 最高高度は約10kmと計測
- ・ 最高速度は約マッハ1.5
- ・ 機体の大部分の回収にも成功
⇒再利用の第一歩となった



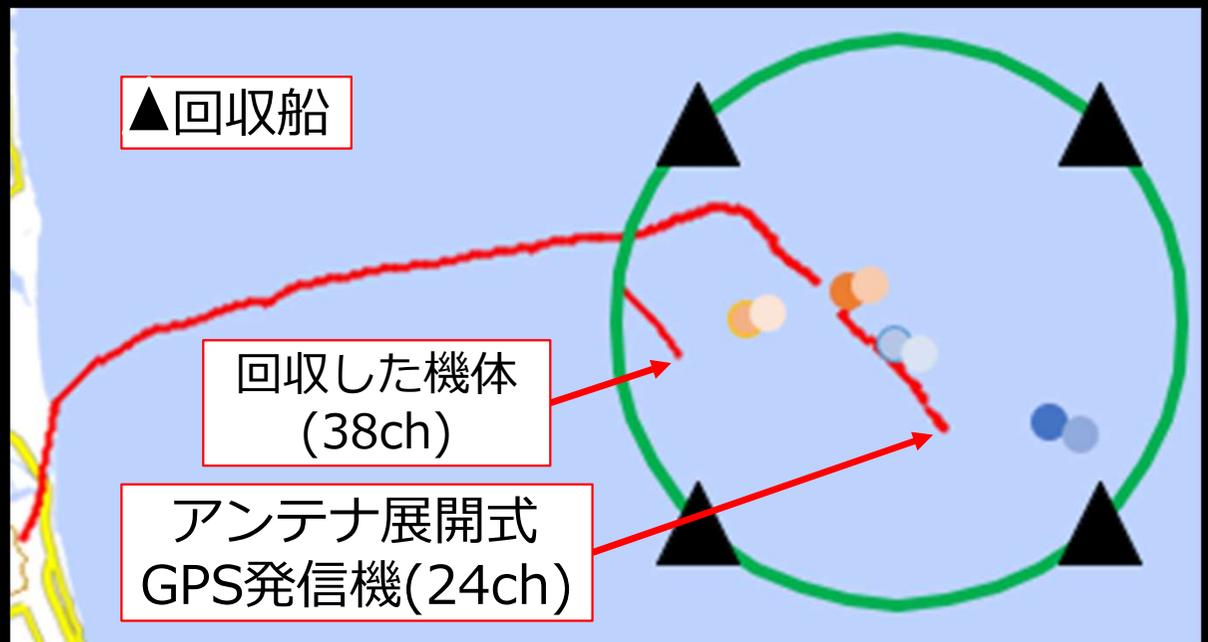
図 回収の様子

6. 打ち上げ試験

- 打ち上げ直前シミュレーションで算出した着水予測地点をプロットし、ロケットのGPSデータと比較した。
- その結果、最後にロストした位置が配置した回収船の内側にあるため警戒範囲内に着水できた。
- また、赤線の軌跡が途中で分かれていることからアンテナ展開式GPS発信機は機体から別れたと思われる。ノーズコーンとアンテナ展開式GPS発信機はショックコードがほどけてしまい見当たらなかった。



機体内のテレメトリ機器配置図



フライト軌道と打上直前シミュレーションの比較

7. 再利用に向けて

- 機体は回収できたモジュール及び回収できなかったモジュールがあった。
- ノーズコーン、ノーズキャップ、アンテナ展開式GPS発信機、エンジンは未回収だったがその他は回収することができた。
- このうち、ボス部が損傷したが外は無傷であったチタン合金タンクについて、修理、耐圧試験を完了、再打ち上げ予定。



機体回収の様子

修理・再利用



機体の回収結果



ご清聴ありがとうございました