

第 13 回伊豆大島共同打上実験報告書

東京工業大学 CREATE C-31J プロジェクト

東京工業大学 CREATE 1 年

C-31J PM 村上 勝也

2017 年 12 月 3 日

1. 実験概要

本実験は CREATE2017 年度新生が主導して行った実験である。将来的により高高度へのロケットの打ち上げを可能とする技術の開発を目指し、多段式ロケットの開発に係る技術の開発・実証、慣性誘導を行うのに必要なデータの取得・解析、及び既存の技術の継承を目的としたものである。

2. 機体概要

本機体の諸元を表 1 に示す。なお、重心位置はノーズ頂点からの距離を示している。

表 1 機体諸元

機体名	C-31J
全長	1735mm
機体外径	91mm
乾燥重量	3.365kg
乾燥時重心	1000mm
酸化剤充填時質量	3.791kg
酸化剤充填時重心	1026mm
予想到達高度	700m
機体色	1 段目ボディ：橙 2 段目ボディ：黒 フィン：白, 赤, 青, 緑 ノーズ：白

機体の外観を図1に示す。



図1 機体外観

2.1. 構造系

機体の各部品の概要を示す。

まず、図2に全体の、図3に2段目の部材位置を示す。

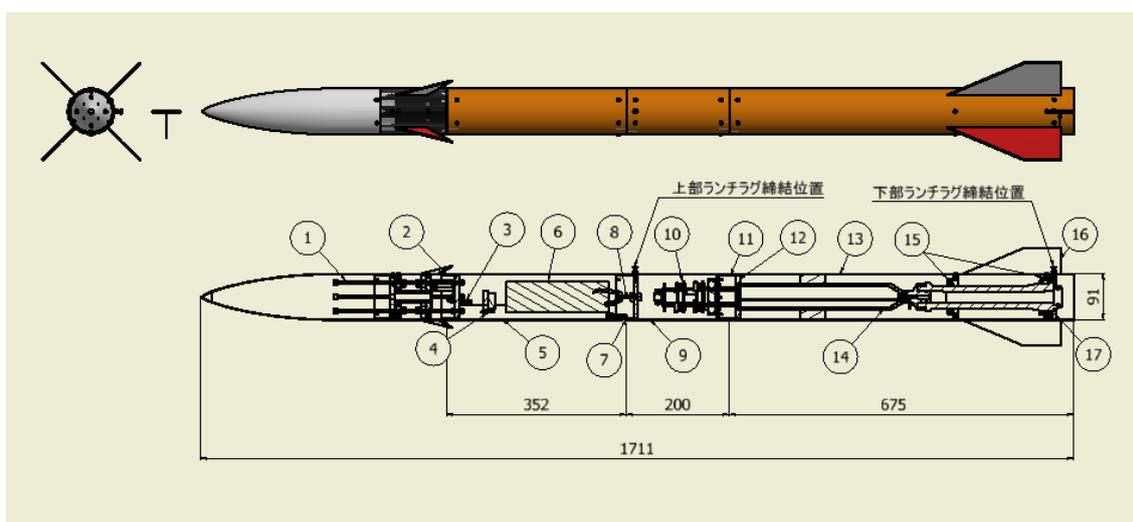


図2 機体寸法及び部材位置(全体)

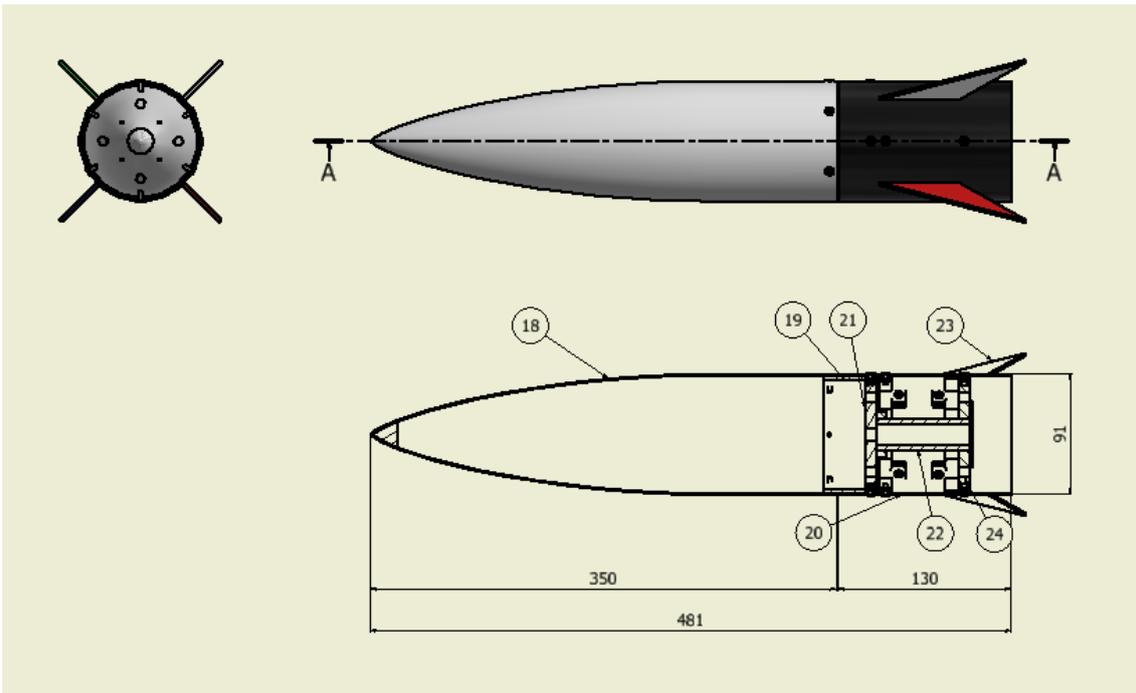


図3 機体寸法及び部材位置(2段目)

次に、図2,3に示した部品の詳細を表2に示す。

表2 各部品表

番号	名称	概要
1	半ネジ長ボルト	2段目の横揺れ防止及び射出用 KKT-HCSNNFXC6-250 59.1g スチール (SCM435 / SCM440) 製 4本 長さ 250mm
2	1段目最上部カプラー	218.5g(カプラー底板との合計値) アルミ製(A5052)
3	U字ボルト	2段目の縦揺れ防止用テグス PE ラインの締結用 UB4 11g 炭素鋼(SS440)製
4	バラ開放機構	69.0g ABS等を使用
5	リカバリーチューブ	70.5g CFRP 製 長さ 352mm
6	パラシュート	150g ナイロン製
7	電装カプラー	231.0g(カプラー底板との合計値) アルミ製(A5052)

8	アイボルト	パラシュート固定用 JIS B 1168 準拠 ステンレススチール SUS304 製
9	電装チューブ	77.0g GFRP 製 長さ 200mm
10	電装基板台	290g(電装含む) 厚さ 2 mm アクリル板、スペーサー (POM 製)等を使用
11	エンジンカプラー	203.5g(上部エンジン受けとの合計値) アルミ製(A5052)
12	1 段目上部エンジン受け	203.5g(エンジンカプラーとの合計値) アルミ製(A5052)
13	エンジンチューブ	131.0g CFRP 製 長さ 675mm
14	1 段目エンジン	充填前：1090g, 充填後：1516g, 燃焼後：1050g HyperTEK J-250
15	1 段目フィン	27g (1 枚当たり) CFRP・バルサ製の 4 枚
16	1 段目フィンブロック固具	14.5g ABS 製
17	1 段目下部エンジン受け	72.0g アルミ製(A5052)
18	ノーズ	101g CFRP 製 長さ 350mm
19	ノーズカプラー	100.0g アルミ製(A5052)
20	モデロケチューブ	26.5g CFRP 製 長さ 130mm
21	2 段目上部エンジン受け	63.0g アクリル製
22	2 段目エンジン	燃焼前：30g, 燃焼後：19g Estes C11-0
23	2 段目フィン	3.5 g (1 枚当たり) CFRP・バルサ製の 4 枚
24	2 段目下部エンジン受け	56.0g アクリル製

本機体は2段式に係る技術の実証機であり、2段目を固定・点火・分離する機構が備わっている。それらの機構について詳述する。

まず、2段目の固定に関して記述する。飛翔方向に垂直な方向については、図2及び表2に示した部品番号1の250mmの半ネジ長ボルト4本を2段目の上下エンジン受けに通し、ボルトを1段目に固定することで実現した。飛翔方向については、PEラインと呼ばれる釣り糸を2段目の上下エンジン受け及び1段目の最上部カプラー(部品番号2)に固定したU字ボルト(部品番号3)に通して結ぶことで実現した。

次に2段目の点火について記述する。2段目に搭載したエンジンはモデルロケットのブースターステージ(2段式の1段目のこと)に用いられるエンジンを使用しており、点火にはモデルロケット点火用のイグナイターを使用した。点火命令は1段目に搭載した電装基板から出るようになっている。点火条件等については2.2.節に詳述する。

最後に、2段目の分離について記述する。先述の通り、本機体の2段目を飛翔方向に固定しているのはPEラインのみである。2段目の分離は、2段目エンジンの燃焼によってこのPEラインを焼き切ることで、飛翔方向の拘束をなくし、2段目が1段目から分離する方式を取った。拘束がなくなった後は、前述の半ネジ長ボルトがガイドレールとなることで、2段目は前方に飛翔する。ただし、2段目が1段目から完全に分離すると、2段目に独立した減速落下機構を搭載しなければならないことや、2段目の挙動を正確にシミュレートすることが現状不可能であることから、本機体では2段目が1段目から完全に分離しない構造となっている。具体的には、前述の半ネジ長ボルトの頭部分に2段目の上部エンジン受けが引っかかり、それ以上2段目が飛翔するのを阻止する構造となっている。2段目は最大で約100mm前方に飛翔する構造になっている。

2.2.電装系

本機体に搭載した電装系の部品について記述する。本機体に搭載したセンサー類を表3,4に示す。本機体には電装基板を2枚搭載しており、以下では、その役割から、一方を開放基板、もう一方をGPS基板と呼称する。

表3 搭載センサー類(開放基板)

センサーの種類	型番	サンプリングレート	測定範囲
加速度	MPU-9250	10Hz	±16G
地磁気	MPU-9250	10Hz	±4800μT
ジャイロ	MPU-9250	10Hz	±250°/sec
気圧	LPS-25H	10Hz	800~1100hPa

表 4 搭載センサー類(GPS 基板)

センサーの種類	型番	サンプリングレート	測定範囲
加速度	MPU-9250	10Hz	±16G
地磁気	MPU-9250	10Hz	±4800 μ T
ジャイロ	MPU-9250	10Hz	±250° /sec
GPS	AE-GYSFDMAXB	1Hz	—
タッチ	ss-5gl13	10Hz	—

上記のセンサー類から Arduino のブートローダー書込済みの ATMEGA328P-PU を用いてデータを取得し、microSD カードに書込む仕様となっている。なお、microSD カードは 2 枚の基板の両方に搭載されている。

また、取得したデータを用いて同マイコンで各種シーケンスを実行する。具体的には、Z 方向 2G 以上の加速度を 2 秒間連続して検出した時の 2 秒前を離床時刻とし、その 14.2 秒後または機体が 2 秒間連続して下降した際にパラシュート開放指令を出す。また、高度が 571m を超えた時に 2 段目点火指令を出す。加速度については加速度センサーの、高度については気圧センサーの値を用いている。

図 4 に電装基板及びその固定台の外観を示す。なお、一番下の金属部品は図 2 及び表 2 に示した部品番号 11 のエンジンカップラーである。



図 4 電装基板及び基板台

基板台には厚さ 2mm のアクリル板 4 枚を使用しており、それらをエンジンカプラー底板の上に POM 製 M3 雄ネジ雌ネジスペーサーを用いて固定している。搭載されている部品は下から、電池、開放基板、GPS 基板、GPS である。本機体で用いた電池は、2 枚の基板への給電用の CR123A2 個と、イグナイターへの給電用の 9V 角電池 1 個である。

3. 打上結果

3.1. 打上状況

本機体の打上時の状況を表 5 に示す。

表 5 打上状況

打上日時	2017 年 11 月 12 日 9 時 00 分 00 秒 (JST)
打上地点	伊豆大島三原山裏砂漠(東京都大島町)
打上時風向風速	北向き 2.8m/s
ランチャ方位	90 度(磁東)
打上角度	80 度(水平=0 度)
最高到達高度	677m(シミュレーション値)
射点-落下点	距離：134.78m 方位：129.72 度(北=0 度)

なお、センサーデータがロストした(詳細は後述)ため、最高到達高度は実験後に射点と落下点の位置関係を基に計算したシミュレーション(HyperRocket を使用)による推定値である。

シミュレーション結果については、シミュレーションによるランチャクリア速度が 24.6m/s、打上動画(30fps)を解析した結果得られたランチャクリア速度が 27.4m/s であることから、概ね正確であるとした。

3.2. 回収状況

機体の回収状況を図5に示す。



図5 機体回収時の状況

機体全体としては、損傷は落下時の衝撃による塗装のはがれ、チューブの一部破損等のみであった。また、部品の脱落・紛失はフィン固定具をチューブに固定していたボルト2本の脱落のみであった。各部品の損傷状況について表6に示す。

表6 各部品の損傷状況

部品名	損傷状況	考えられる原因
ノーズ	下端から上部にかけての亀裂	落下時の衝撃
2段目上部エンジン受け	インサート挿入部の破損	落下時の衝撃
フェアリング	固定具付近に亀裂	飛行時及び開傘時の衝撃
リカバリーチューブ	カプラー固定用の穴の破損	落下時の衝撃
1段目エンジンチューブ	下端に亀裂	落下時の衝撃
1段目フィン(赤)	積層部の一部剥離	落下時の衝撃
各チューブ	塗装の一部剥離	落下時の衝撃
電池ボックス(CR-123A)	一部破損(端子を受ける部分)	開傘時の衝撃

ノーズの亀裂については、ノーズの作成方法で半分の部品を二つ合わせて成型する方法を取っていて、その接着面が落下時の強い衝撃ではがれたと考えられる。

電池ボックスの破損については、開傘衝撃が最も大きくかかる向きに配置されていたことと、破損した部分が極端に薄い仕様になっていたことが原因と考えられる。

特に損傷の大きな部品の状態を図6~9に示す。



図6 ノーズの損傷状況



図7 フェアリングの損傷状況

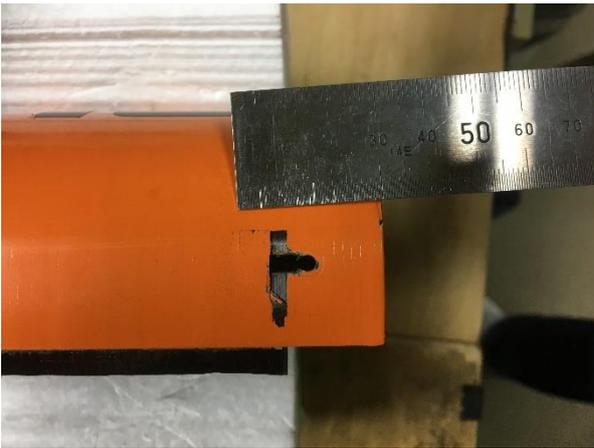


図8 リカバリーチューブの損傷状況



図9 1段目ボディーチューブの損傷状況

3.3. 結果

① 1日目の打上準備及び延期

予定通り機体の組み立てを午前9時から開始し、途中1段目エンジンが入らないというトラブルがあったものの、打上1時間前には本体の組立及び電源投入が終了した。打上予定時刻は11/11(土)12時丁度であったが、現地の風が強く(西向き 約5~7m/s)、このままでは打上が不可能なため、他団体との調整の結果、本来の予定時刻の1時間半後に打上時刻を変更し、12時15分頃に射点への機体の搬入を開始した。機体搬入後、ランチャ方位90度(磁東)・打上角87度で、ランチャを立ち上げた。1段目の点火装置が若干の不具合を生じていたが、時間内に修正できた。しかし、充填確認用のチューブが直前に抜けたため、13時30分での打上は中止し、ランチャから機体を下ろし、一旦本部に戻った。その後、他に打上を行える機体が無かったため、11日の最後のウインドウ(16時)に向けて15時過ぎにもう一度射点への機体搬入を行った。このときは、打上準備は順調に進行したが、風が強く風速制限を満たさなかったため、再び打上は中止となり、2日目に延期された。

② 2日目の打上準備

前日の協議の結果、2日目の最初のウインドウ(打上時刻9時00分)で打ち上げることとなった。朝6時に裏砂漠へ入り、機体の組立を開始した。組立は順調に進行し、打上1時間前には組立及び電源投入が終了した。その後、打上45分前の8時15分頃に機体搬入を開始した。打上準備は順調に進行した。このとき、風向が最も制限の厳しい北～北東であったため、改めて行ったシミュレーションに基づき、打上角を80度に変更してランチャを立ち上げた。

③ 打上

機体は、11/12(日)9時00分に1段目が正常に点火され、離床した。その後機体は正常に飛行し、約8.2秒後に2段目の燃焼を示す白煙の噴出が目視で確認された。さらに、打上約16秒後にフェアリングの開放とパラシュートの開傘が確認された。その後、打上約77秒後に3.1.節に示した地点に落下した。

2 段目の燃焼による白煙を図 10 に示す。



図 10 2 段目の燃焼による白煙(赤丸内の白い筋)

④ 回収

着地を確認後すぐに捜索班を出し、9 時 15 分頃に 3.1.節に示した地点で機体を発見した。落下状況を記録したのち、捜索班は機体を回収して次のウインドウ(9 時 30 分)までに本部へ戻った。

構造については、3.2.節に示した通り機体の損傷は軽微で、部品の脱落もほぼなく、完全回収に成功した。

電装については、搭載した 2 枚の基板の両方に給電していた電池を収めていた電池ボックスが破損し、電池からの給電が途絶えていたため、センサーのログは全く記録されていなかった。この理由については、プログラムの仕様上、打上から開傘 2 秒後までと開傘 2 秒後から落下までのログは別のファイルに書込むようになっていたが、そのどちらも全く記録されていなかったことから、開傘時の衝撃で電池ボックスが破損し、基板への給電が停止したため、最初のファイルが閉じられる前にプログラムが強制終了されてしまったためと考えられる。

⑤ 結果

2 段目の点火・燃焼・射出に関しては、電装によるログが全く取れていないためタッチセンサーのデータによる裏付けはできないが、飛行時、回収時及び機体検分時の状況証拠より全て正常に行われたと考えられる。点火・燃焼については、飛行時の目視による白煙の確認、回収時及び検分時のエンジン燃焼による臭い、1 段目最上部のカプラーに付着した煤等から明らかである。射出(2 段目が 1 段目から離床すること)については、回収時にリカバリーチューブに 2 段目燃焼による白い煤が多く付着していたこと、回収時に 2 段目チューブが 1 段目最上部カプラーから外れていたこと、2 回の燃焼試験の際の煤の付着状況(以下の図 11~14 参照)との一致不一致等から正常に行われたと推定される。

分離したことの判断の根拠とした燃焼試験の結果を図 11~16 に、打上実験直後の機体の状態を図 15, 16 に示す。なお、燃焼試験は2つの条件下で行った。一方は今回の打上で用いたのと同じ 250mm の半ネジ長ボルトを用いたもので、2段目は1段目に見立てた金属カップから本番と同様に点火・燃焼・離床する。他方は 140mm の半ネジ長ボルトを用いたもので、2段目はエンジン点火後も金属カップから全く離れない状態で燃焼する。前者では全体的に白い煤が付着していた(図 11, 12)が、後者では黒い煤が付着していた(図 13, 14)。打上実験直後の機体では白い煤が付着していた(図 15, 16)ため、離床したと判断できる。



図 11 燃焼試験結果 1-1(離床する)



図 12 燃焼試験結果 1-2(離床す



図 13 燃焼試験結果 2-1(離床しない)



図 14 燃焼試験結果 2-2(離床しない)



図 15 打上実験直後 1



図 16 打上実験直後 2

4. まとめ

4.1. サクセスクライテリアの達成状況

本実験のサクセスクライテリア及びその成否は、以下のようになった。

表7 サクセスクライテリア(構造系)

LEVEL	内容	判断基準	成否
MIN	リカバリー成功	飛行中の目視 回収後の機体検分	○
FULL	2段目の着火・燃焼及び分離	着火・燃焼： 回収後の機体検分(燃焼状態等)	○
		分離： タッチセンサーによる事後分析	△
ADV	2段目の安定飛行	－開発段階で断念－	×

表8 サクセスクライテリア(電装系)

LEVEL	内容	判断基準	成否
MIN	パラシュート開放機構の作動	飛行中の目視	○
FULL	1段目に搭載したセンサーデータの回収	microSDカードへのデータ書込みの成否	×
	2段目の正常着火	microSDカードに着火タイミングを記録	○
ADV	回収したデータの解析	加速度・角速度のデータによる機体位置と、GPSデータによる機体位置の比較	×
	2段目に電装基板を搭載	－開発段階で断念－	×

構造系に関しては、3.3.節⑤に記載した通り、リカバリー及び2段目の着火・燃焼は飛行中の目視及び機体検分により確実に成功したと判断できた。2段目の分離に関しては、完全な証拠はないが、状況証拠的に成功したと考えてよい(データは取れていないので△としてある)。

電装系に関しては、パラシュート開放機構の作動は飛行中の目視により確実に成功したと判断できた。2段目の着火に関しては、microSDカードのデータはロストしてしまったが、microSDカードへの記録という当初の判断基準は着火を目視で確認するのは困難だろうという推測から策定されたもので、着火のタイミングではなくあくまで着火の成否を確認するためのものであった。以上のことを踏まえ、結果的に目視で着火が確認されたことと、着火のタイミングについても打上後の映像解析により概ね予定通りで

あったことが確認されたことから、サクセスレベルは満たせたとして成功と判断した。この点については、判断基準がサクセスレベル達成判断の必要十分条件になっていなかったとして反省すべきである。その他については3.3.節④に記載した通り、データが記録されていなかったため失敗となった。

また、ADVに関しては、どちらも(電装系は一部)開発段階で実現不可能として断念していたため、失敗となっている。

4.2. 総括

全体を通して振り返れば、本実験は概ね成功だったといえる。

本実験の目的において、多段式に係る技術の開発及び実証については、2段目の固定・着火・燃焼・分離の全てを正常に行い、本実験において使われた技術の有効性を実証できた。慣性誘導に係るデータの取得・分析については、データを取得することができなかったが、破損した電池ボックスは過去の打上実験でも使用されていて、過去に破損した記録はなかったため予想しえなかったことであった。また、2段目の着火及びパラシュート開放まではプログラムは正常に動いていたので、データのロストを除けば概ね成功といえる。既存の技術の継承については、本機体の開発段階で、既存技術の継承と新技術の開発を両立し、それらを融合させて本機体を完成させることができた。

今後の展望として、まずは今回得られなかったデータを次回は確実に回収すること、次に今回得られた技術や知見を基に2段目の完全分離及び安定飛翔を成功させることを目標に、今回の成功・失敗と反省を活かしていきたいと考えている。

5. 謝辞

本打上実験の実施に際し、多大なご支援をいただいた NEWS COMPANY 様、株式会社ミスミ様、Aidemy 様、東京工業大学 OB の落合宏行様、大島町役場の皆様をはじめとする多くの方々に厚く御礼申し上げます。