

C2/FOX1 ハイブリッドロケット打上実験計画書

AstroX 株式会社/千葉工業大学

CTO/教授 和田 豊

1. 責任体制

実験責任者 和田 豊（博士（工学））

所属 AstroX 株式会社 技術最高責任者 / 千葉工業大学 教授

電話 050-3703-6042

E-mail yutaka_wada@astrox.jp

2. 実験目的

本実験では、南相馬市から小型観測ロケットの発射実験を実施する。本実験は、次の 3 つを目的としている①高度 10 km へ到達可能なロケットシステムの実証実験、②南相馬市から発射し安全な回収を行うまでの一連の打上技術の獲得、③高層大気サンプリングを目的とした疑似サンプラーの放出実験である。

- ① ロケットシステムの実証では、千葉工業大学が開発したハイブリッドロケット用燃料を搭載し、推力 10 kN、燃焼時間 20 秒を達成することで高度 10 km に到達し、上空で疑似サンプラー並びに回収装置を展開し、海上に着水させることを目標とする。
- ② 海上回収の技術では、ハイブリッドロケットの落下区域を事前に調整し、付近を航行する船舶への安全を確保する体制の確立と、ロケットの回収を行う技術の実証を海上で実証することが目標である。
- ③ 高層大気サンプリングでは、別実験である成層圏バルーンに搭載しているサンプラーを改良したものを搭載する。今回は実際に高度 10 km 付近にて本装置のダミー品を分離放出する技術の確立を目指す。

本実験は初の沖合海上回収となるため、確実に安全管理を行うため、ダミー高層大気サンプラーとロケット本体をワイヤーで連結し、一体で落下させることとした。

3. 日程

本実験日程を表 1 に示す。

表 1：実験日程

日程	予備日	作業内容	海上
11月7日（木）		打上準備（8:00 - 17:00） 南相馬市小高区井田川	
11月8日（金）		打上準備（8:00 - 17:00） 南相馬市小高区井田川	
11月9日（土）	11月16日（土） 11月23日（土） 11月30日（土）	打上実験（6:00-7:30） 南相馬市小高区井田川	6:00 - 8:30 警戒船/回収船

4. 実験概要

4.1 実験場所

- 組立作業場

概要 下太田作業場 (AstroX ロケット組み立て作業場)

〒975-0041 福島県南相馬市原町区下太田字川内迫 653 番地 12

- 打上射点

概要 福島ロボットテストフィールド通信塔 (小高) 横

〒979-2144 福島県南相馬市小高区井田川南新田 7 9 8

射点座標 37° 31' 41.09" N, 141° 1' 37.98" E

- 警戒/保安区域

海上警戒区域座標

・弾道落下範囲	右上	37° 37' 1.6" N, 141° 8' 25" E
	左上	37° 35' 50.4" N, 141° 5' 42.6" E
	左下	37° 30' 53.1" N, 141° 9' 8.3" E
	右下	37° 32' 4.2" N, 141° 11' 50.6" E
・減速落下範囲	右上	37° 34' 44.9" N, 141° 7' 27.9" E
	左上	37° 34' 5.1" N, 141° 5' 38" E
	左下	37° 31' 7.8" N, 141° 7' 19.2" E
	右下	37° 31' 47.5" N, 141° 9' 9" E

地上保安区域座標

左上	37° 31' 49.81" N, 141° 01' 09.25" E
右上	37° 32' 04.79" N, 141° 01' 45.38" E
右下	37° 31' 36.02" N, 141° 02' 04.19" E
左下	37° 31' 21.04" N, 141° 01' 28.06" E

図 1 に海上の警戒区域、図 2 に陸上の警戒区域と保安区域を示す。

図 1 : 海上の警戒区域

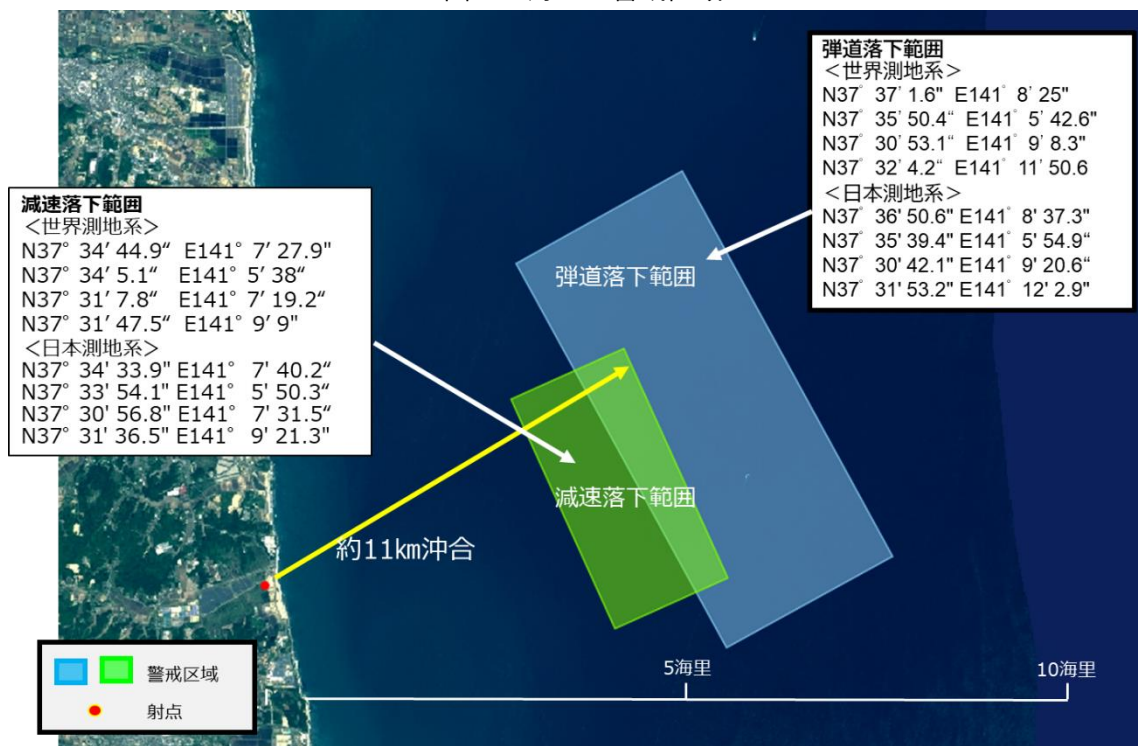
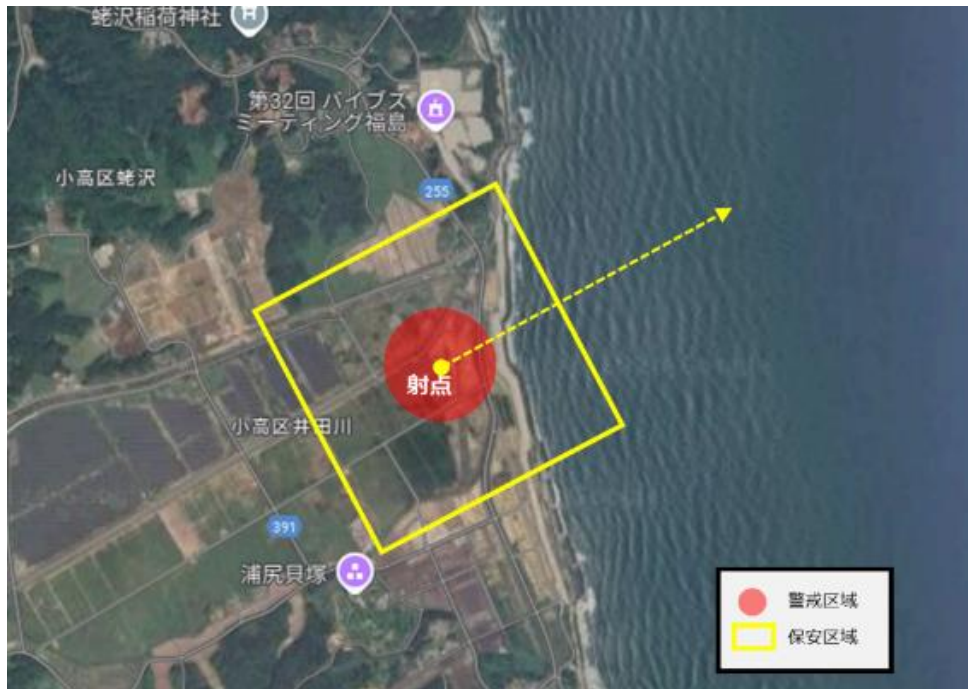


図 2：陸上の警戒区域と保安区域



4.2 打上実験実施時間帯

6:00 - 7:30 の間で、天候の良い時間帯に打上を実施する。

4.3 ロケット打上・回収方法

自作の地上支援装置を用いて、千葉工業大学の発射台(40 feet コンテナ)より打上を行う。図 3 に示す位置に発射台とロケットが格納された 40 feet コンテナ (図 4) を設置する。ロケットは点火後、頂点付近でパラシュートを開傘し、同時にフロート (参考：<http://www.metex.co.jp/shopdetail/000000001131/>) を機体の周囲に放出する。地上に着地後、フロート膨張機構が反応し、フロートが膨張する。その後、指向性のある特定周波数ビーコンを受信側のアンテナで受信し、ロケットの位置を特定し回収を行う。また、テレメトリが不備を起こし作動しなかった場合を想定し、人体及び環境に無害な海面着色剤 (参考：<http://www.koa-kako.co.jp/20gisouhin.html>) を機体内部に搭載する。図 5 に海上でのフロートと海面着色剤の展開イメージを示す。

図3：40foot コンテナ設置位置

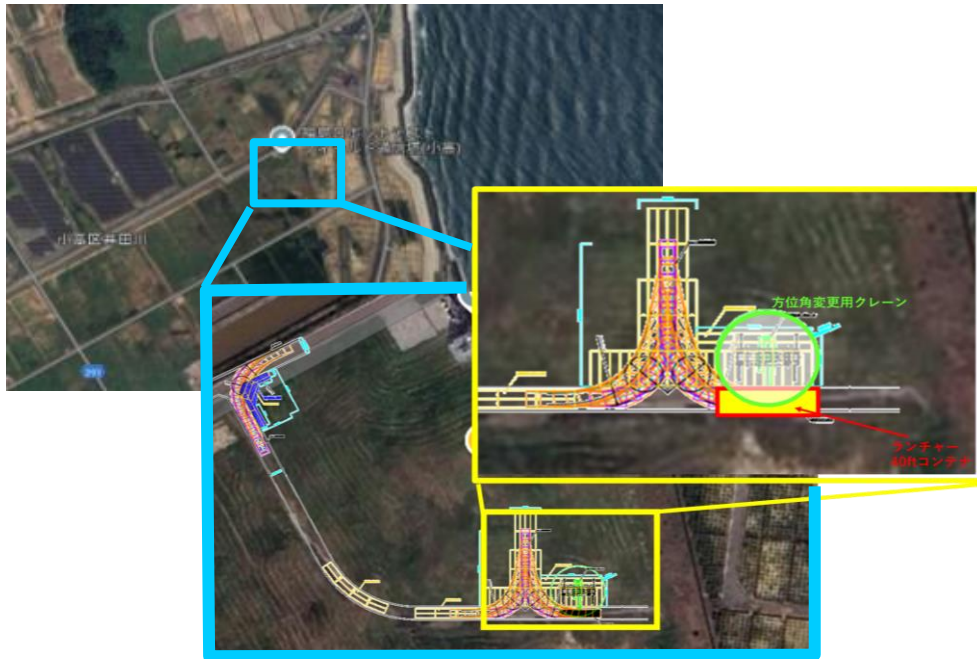


図4：40foot コンテナ

40foot コンテナサイズ：長さ:12.2 m，幅:2.4 m，高さ:2.6 m



図5：海上でのフロートと海面着色剤の展開イメージ



5. 機体

全長 6.5 m, 直径 334 mm, 乾燥重量 102.5 kg, ハイブリッドロケットモータには新規開発の低融点熱可塑性樹脂燃料, 亜酸化窒素(N_2O)を酸化剤としたものを用いる。機体は CFRP チューブをコンポーネントごとにアルミのプレートにボルト固定する。パラシュート及びフロートの放出には無火薬式の分離機構を用いる。搭載計器はテレメータ, 加速度計, 地磁気センサ, ジャイロセンサ, 気圧センサに加え気象観測装置, 衝撃環境用カメラである。火薬を使用しない。また, 機体は全機回収であり, 地上及び海上への投棄物はない。ロケットの姿勢安定は尾翼による空力安定であり, 事前のシミュレーションによって射角 $80^\circ \pm 10^\circ$ の範囲, 地上から高度 15 km 上空の風向風速の過去 5 年分の 1 月の平均風に分散を与えたシミュレーションを実施し, ロケットの落下位置が海上となることを確認して実施する。万が一, 打上軌道が警戒区域円外となる場合, 打上後にテレメトリによりメインバルブを遮断することで推力をカットすることで確実に警戒区域内に落下させる。図 6 に機体の 3D モデリング, 表 2 に機体の概要を示す。

図 6 : 3D モデリング

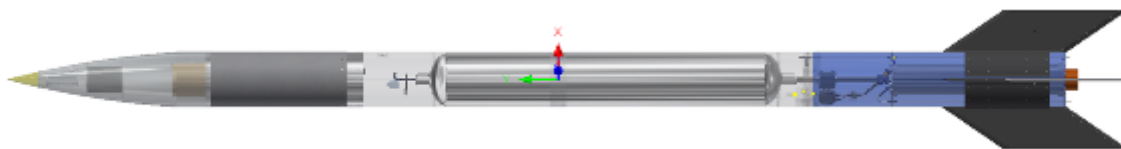


表 2 : ロケット概要(機体仕様変更の可能性あり)

名称	成層圏観測用小型ロケット C1-2 号機/FOX 試作機
型番	C1-2/FOX-0
全長[mm]	6520
直径[mm]	334
質量[kg]	102.5
モータ	10 kN 級ハイブリッドロケットモータ
到達高度[km]	10
回収方法	軌道頂点付近でサンプラー, パラシュート及びフロートの放出後着水。 着地と同時にフロートが膨張, 回収を行う。
搭載物	<ul style="list-style-type: none"> ・ハイブリッドロケットモータ ・無火薬式分離機構 ・パラシュート ・ガス展開フロート ・疑似高層大気サンプラー

6. 安全対策

6.1. 実験実施条件

ロケットの打上実験には多くの危険が存在する。そのため国が定める法を厳守し、安全に打上実験が行なえるように独自に自主規制を定め、その規制を守った上で打上実験を実施する。

- 射点から打上点火点までの距離：200m
- 陸上安全保安距離：500m とし、関係者以外の立ち入りを禁止する
- 海上安全保安距離：ロケット打上げ時には、海上警戒区域内（図 1 参照）への船舶の立ち入りを禁止する。
- 風速制限：8m/s 射場近傍地上の風速及び射場近傍上空 10m 地点（図 7）の風速を計測する

図 7：風速測定地点



- 発射仰角：70° ～80° の範囲とする(沖方向へ最低5° の発射角をつける)
- 立入制限半径：200 m，打上時は射点から半径 200 m 以内の立ち入りを禁ずる。（作業員含）
- 視界遮蔽距離に関する制限：以下の制限を満たしていなければ原則として打上を延期または中止する。ただし、この判断は現場責任者が行う。
 - 雨による視界遮蔽距離制限 降雨によって目視による 1 km 以内の観測が不可能であると判断される総合気象観測装置の単位時間あたりの降雨量が 11.3 mm/h 以上を観測した場合打上を中止する。視程距離 (V) と光波減衰量 (σ) の関係式は $\sigma=13/V$ [dB/km] で示され、10 分間降雨降雪量 (R) と光波減衰量 (σ) の関係は $\sigma=4.9R0.63$ [dB/km] で示されるので 1 km の視程を確保するためには、10 分間降雨降雪量が 4.7 mm/10 min である 必要があり、1 時間当たりの降雨降雪量に直すと約 28.2 mm/h である。また、10 分間平均の降雨降雪量は実際の 1 時間あたりの降雨降雪量の 2～2.5 倍となる 2)ので 28.2 mm/h の 4 割とすると 1 時間あたり 11.3 mm/h である。よって、11.3 mm/h を上限とする。
 - 濃霧による視界遮蔽距離制限 打上現場にて濃霧の発生を確認し、飛翔、落下時及び海上回収時にロケットを確認するための十分な視界の確保が困難であると判

断した場合は打上を延期または中止する。

- 煙による視界遮蔽距離制限 打上現場にて煙の発生を確認し、飛翔、落下時及び海上回収時にロケットを確認するための十分な視界の確保が困難であると判断した場合は打上を延期または中止する。
- 天候による制限：以下の警報、注意報が発令された場合は原則として打上を延期または中止する。ただしこの判断は現場責任者が行う。
 - 警報（暴風警報、暴風雪警報、大雨警報、大雪警報、波浪警報、高潮警報）
 - 注意報（強風注意報、風雪注意報、大雨注意報、大雪注意報、雷注意報、濃霧注意報、低温注意報、波浪注意報、高潮注意報） また、雷を観測した場合はシーケンスを中断し、直ちに高圧ガス関係の元栓を締め、配管を発射台から遠ざける。もし、日没までに雷雲が通過しない場合は打上実験を延期する。
- 地震による制限：発生時、発射台横転の危険性、地上燃焼支援装置周りにボンベがある場合、その場から避難する。地震発生後、ロケット、発射台及び地上燃焼支援装置に破損がないか確認する。
- 竜巻による制限：巻き込まれる危険性があるため、発生後直ちに避難する。
- 気温による制限：外気温が 0°C を大幅に下回る場合は、十分な発射台離脱速度での打上が出来ない恐れがあるため打上を延期または中止する。
- 消火隊：万が一ロケットが姿勢を崩し火炎を伴いながら地面に落下し、落下地点付近が炎上した場合に備え、射点付近及び着陸予定地までの経路付近に、小型消火器を持った消火隊を待機させ、直ちに消火活動が行なえるようにする。
- 保安要員：一般の人が立ち入り制限区域（安全保安距離内）に立ち入りらないように保安要員が監視を行う。
- 地元との協力：その他、南相馬市役所・消防署・警察署・地元漁協、から指導を仰ぎながら安全対策を行う。
- 緊急時連絡方法：現地本部に安全統括責任者を置き、緊急時には、南相馬市役所・消防署・警察署・その他関係機関に電話にて連絡を入れる。
- 事前説明：南相馬市役所・消防署・警察署・地元漁協へ実験計画書を提出する。
- 前日・当日の連絡：南相馬市役所・消防署・警察署・地元漁協に、打上 30 分前、及び打上完了後に電話で連絡を入れる。
- 回収・警戒船の出航条件：風速 12m/s 以下、波高 2m 以下とする。なお、乗船者は救命胴衣着用の上、回収作業を行う。
- 船が出港できない場合は打上を中止する。
- ロケットは完全回収を行うとともに、機体には持ち主の連絡先を記載する。
- 船には、トランシーバーを持ち地上と連絡が取りあえる者を乗船させる。
- 機体および疑似サンプラー落下予想地点付近に VHF 無線を搭載した警戒船を配置し、周囲を航行する商船に警戒情報を発信させる。
- 商船組合に対し事前に実験実施計画書を送付し注意喚起を行う。
- フェリー定期便および貨物船の運航時刻を避け実施する。
- 発射から着水まではロケットに搭載したテレメータシステムを用いてロケットの位置の特定を行う。

6.2. 打上中止条件

打上中止条件について以下に記載する。

- 総員退避後、安全保安距離内への第三者（レジャーボート、漁船等）の立ち入りが認められたとき。
- 風速制限値を超えたとき。
- 降雨量が 11.3 mm/h 以上を観測した場合（1km 以上の目視距離確保のため）
- 濃霧、煙などにより安全な目視距離（2km 以上の目視距離確保のため）が確保できないと現場責任者が判断したとき。
- 警報（暴風警報、暴風雪警報、大雨警報、大雪警報、波浪警報、高潮警報）注意報（強風注意報、風雪注意報、大雨注意報、大雪注意報、雷注意報、濃霧注意報、低温注意報、波浪注意報）が発令され、実験責任者が安全な実施が困難と判断したとき。
- 地震や竜巻が発生したとき。
- 点火時刻に外気温が 0°C 以下の低温になるとき。
- 回収・警戒船が出港できないとき。
- 海上の警戒区域に他の船舶が侵入したとき又は侵入する恐れがある場合

6.3 関係各所への事前連絡

下記に示す関係各所に本実験実施計画書配布による事前周知および打上前日の電話連絡による実験実施有無判断を通知する。

- 国土交通省東京航空局東京管制部
 平日 8:30-17:15（管制官事務室） 04-2992-1264
 上記以外の時間（北地域統括席） 04-2992-1318
- 仙台空港事務所航空管制官 022-383-1669（実験終了時のみ）
- 航空交通管理センター 092-608-8885（中止、延期、実験終了時）
- 東京空港事務所 050-3198-2865（延期・中止する場合）
- 総務省東北通信局 022-221-0654
- 海上保安庁福島海上保安部 0246-54-3450
- 福島県相双建設事務所 0244-26-1244
- 福島県相双農林事務所 0244-26-1184
- 福島県相馬港湾建設事務所 0244-26-7214
- 福島県相双地方振興局 0244-26-1144
- 南相馬市役所 0244-24-5264
- 南相馬警察署 0244-22-2191
- 相馬地方広域消防本部 0244-22-4165
- 南相馬消防署小高分署 0244-44-2212
- 南相馬市立総合病院 0244-22-3181
- 相馬双葉漁業協同組合 0244-38-8301
- 福島ロボットテストフィールド 0244-25-2474

6.4 実験当日の連絡体制

連絡体制を図8（陸上体制図），図9（海上体制図）に示す。

図8：陸上連絡体制図

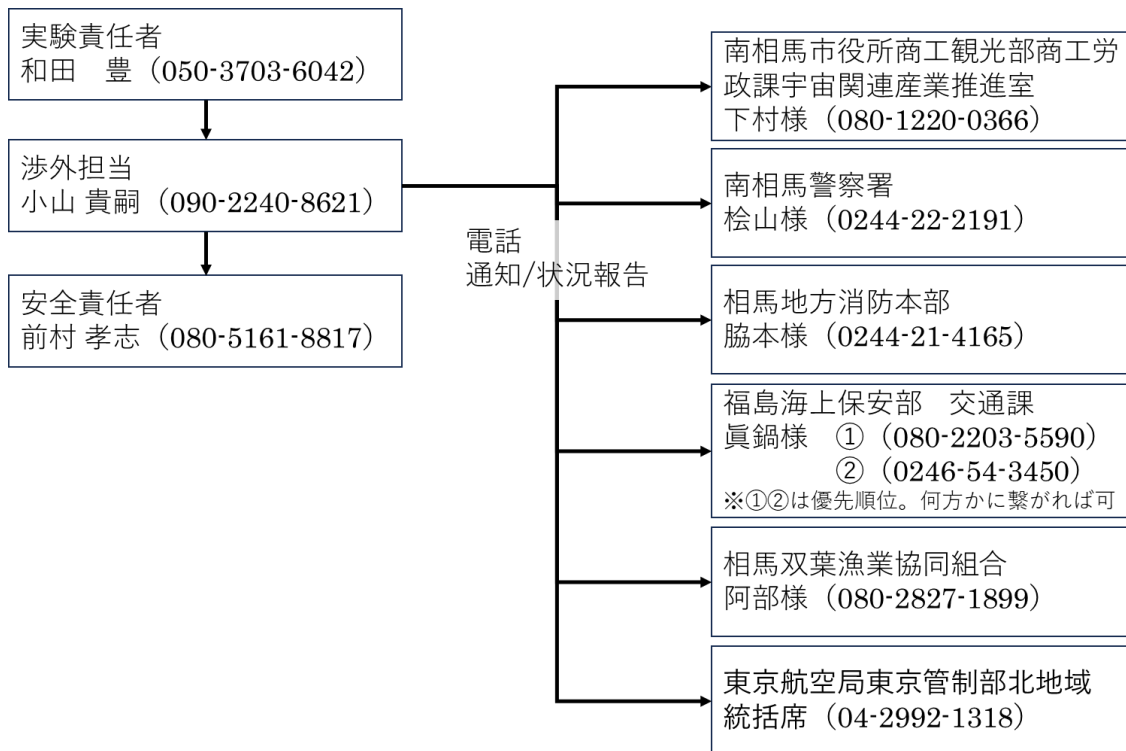
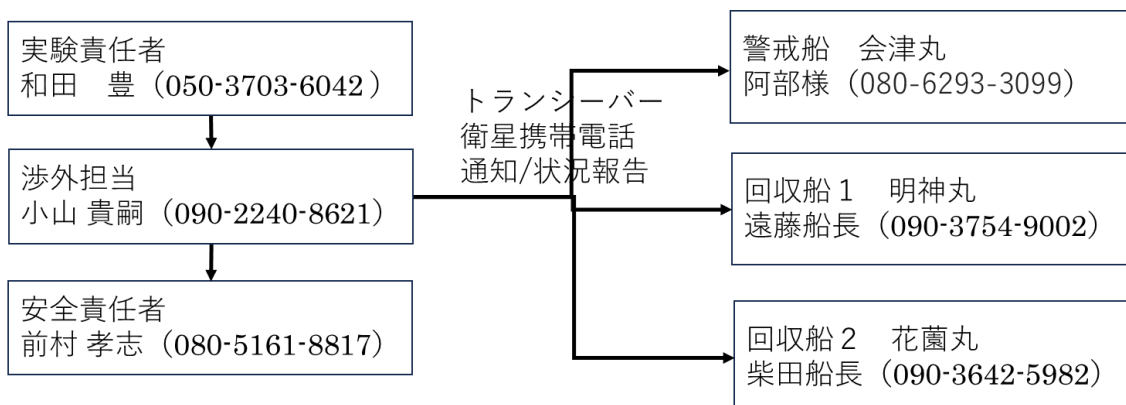


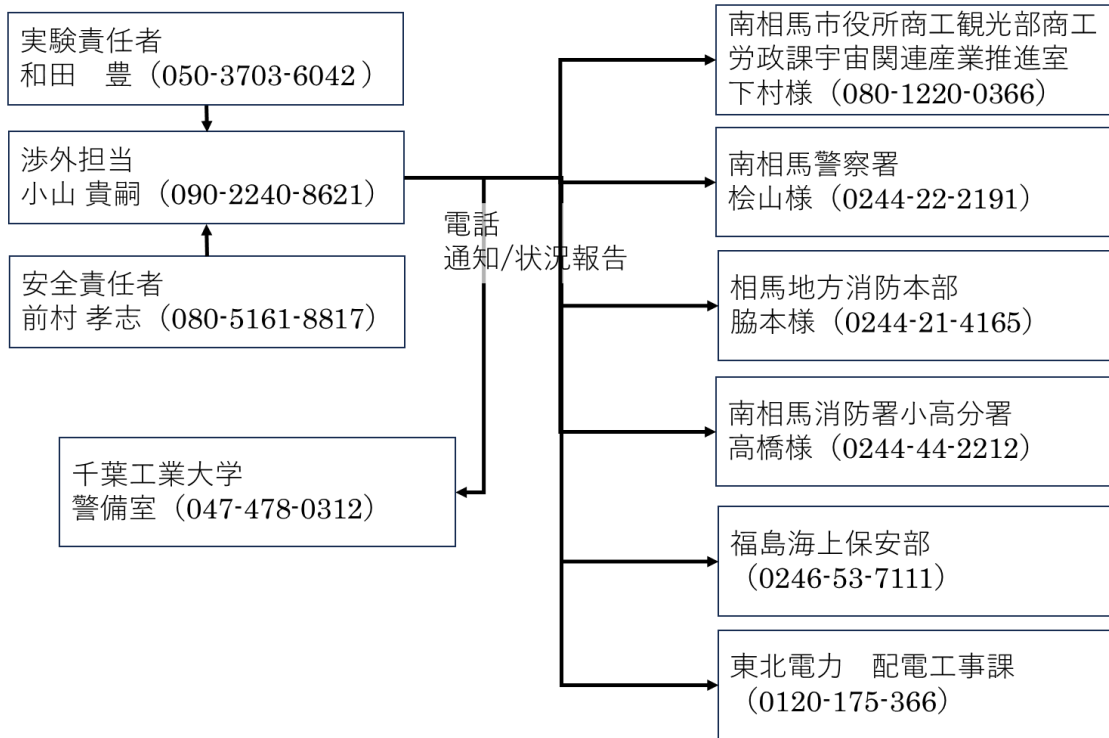
図9：海上連絡体制図



6.6 緊急時連絡体制

緊急時における連絡体制を図10に示す

図10：緊急時連絡体制



7 落下範囲

ロケットの落下範囲は航空宇宙技術研究所（旧 NAL）の「地上付近の横風の影響による小型ロケットの方位角変化」及び「地上付近の風の影響による小型ロケットの姿勢角変化」を参考にしたシミュレーションにより求めた。シミュレーションの条件を表 3 にその結果を表 4 に示す

表 3 シミュレーション条件

ランチャー仰角[度]	77
ランチャー方位角[度] (北を 0 度, 時計回りを正とする.)	70
風向・風速	気象庁第 3 次長期再解析 (JRA-3Q) を利用し, 2019 年~2023 年の 5 年間の 10 月~11 月における福島県沖の格子点 (37.5° N, 141.25° E) の上空風データを解析し, その平均風を上空風として利用
発射台滑走長 [m]	10

表 4 シミュレーション結果(理想プロファイル)

予想最大到達高度 [m]	8072.0
重心位置の発射台脱出速度 [m/s]	25.9
頂点到達時間 [s]	45.2
着水までの時間 (弾道) [s]	46.7
着水までの時間 (開傘) (ノミナルプロファイル)	290.9

表 5 にフライトシーケンスを示す。

表 5 フライトシーケンス表

X -60 min	酸化剤充填開始
X -1 min	酸化剤充填完了
X -30 s	燃焼器内酸素パージ
X -3 s	点火
X	メインバルブオープン
X + 0.97 s	ランチクリア
X + 17.57 s	MAX-Q (最大動圧点)
X + 46.7 s	最高到達点 分離信号
X + 94.8 s (弾道飛行時)	着水
X + 90.0 s (減速落下時)	着水

上空の風については、JRA-3Q の再解析値を用いて福島県沖の格子点 (37.5° N, 141.25° E) の 2019 年～2023 年の 5 年間における 10 月～11 月の平均風を取得した。取得した東西風、南北風の各平均風のグラフを図 1 1 に示す。

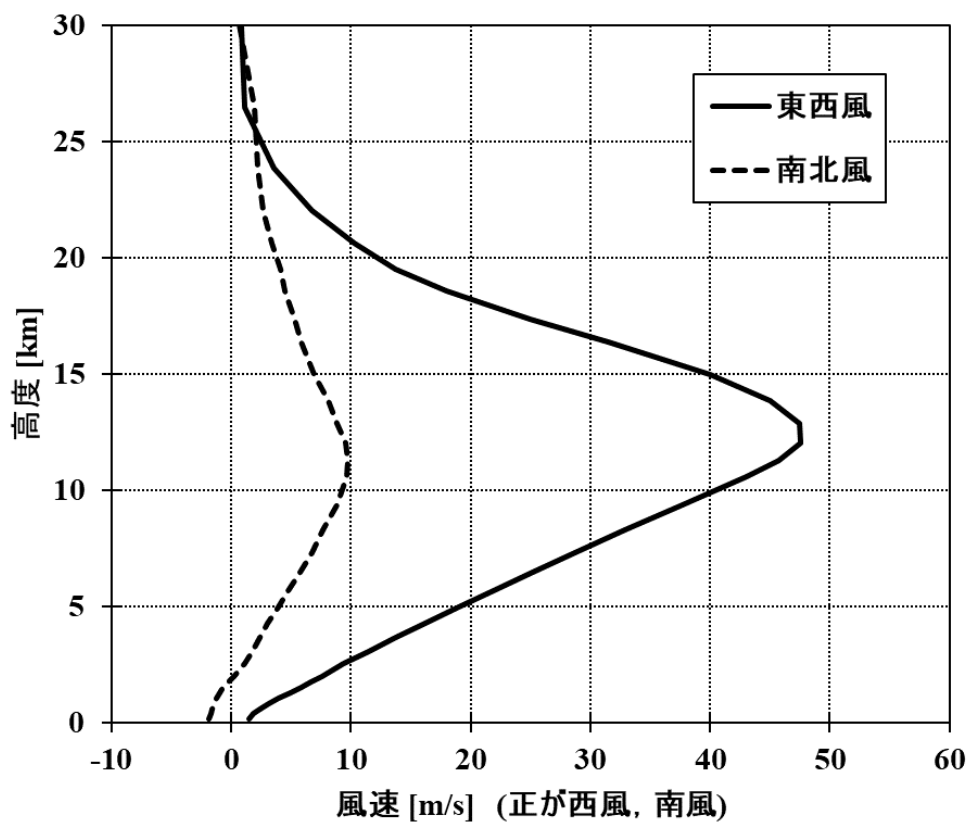


図 1 1 上空平均風 (JRA-3Q 福島県沖格子点, 直近 5 年間, 10-11 月平均風速)

実験時の落下範囲を図 1 2 に示す。図 1 2 の水色円は半径 10 km、橙色円が半径 20 km である。下矢印は発射点、各フラグは JRA-3Q 上空平均風による弾道落下位置並びに開傘着水点である。

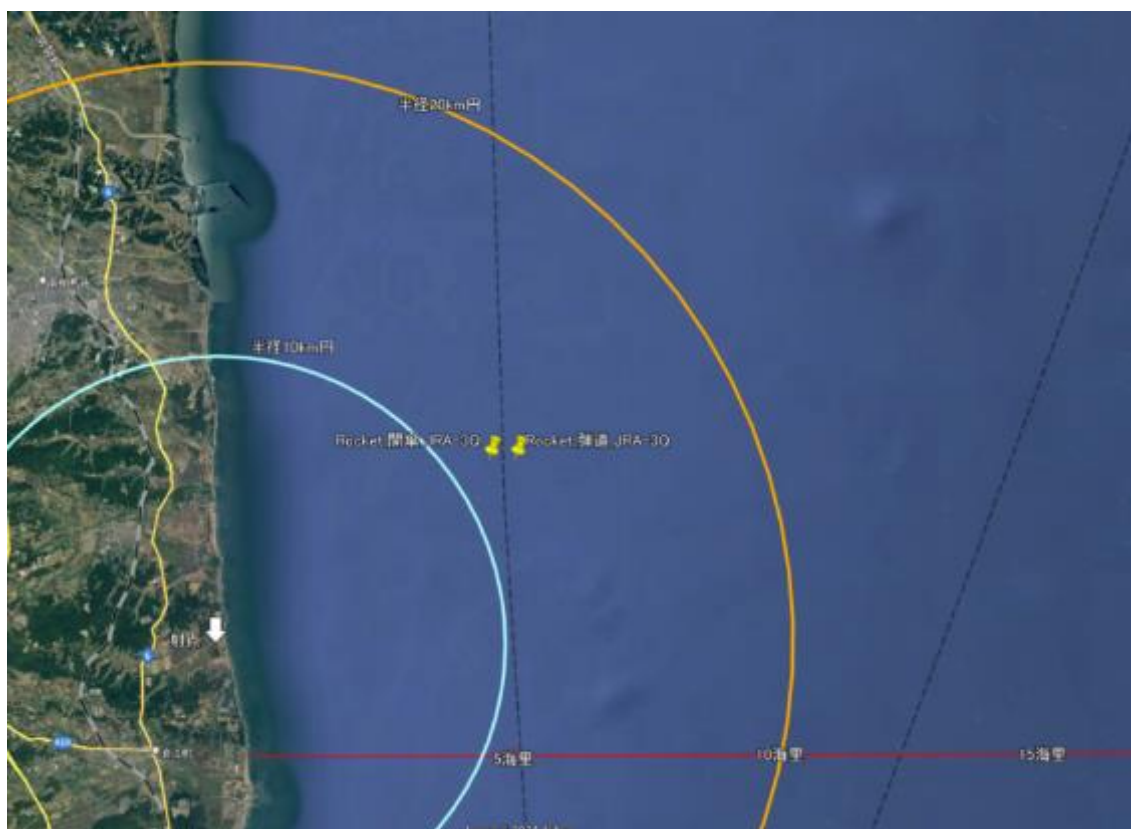


図 1 2 落下予想位置図 (JRA-3Q の平均風による推定)
 (福島県南相馬市小高区井田川付近から
 水色円：半径 10 km、橙円：半径 20 km を表す)

実際に打上げ直前の現地シミュレーションで使用する上空風データは気象庁数値予報モデルのうちメソ数値予報モデル GPV (MSM) を使用予定である。飛行分散の算出には上空風データの誤差を加味する必要があるため、2023 年 10 月 16 日～2023 年 10 月 31 日の期間における MSM の予報値と実際の風を用いたデータ解析を実施し、その平均値と実際の風の差をパラメータとして設定した。なお、MSM は福島県沖の格子点 (37.5° N, 141.0° E) にてデータを取得する。MSM の予報時間は最長 78 時間先 (2024 年 9 月現在) となっており、予報時間の経過における実績風との差分について比較を実施した。図 1 3 に過去 5 年間 (2019 年～2023 年) の 10 月の MSM における平均風速データを示す。また、図 1 4 に予報時間による予報風と実績の差分を示す。今回の飛行分散では、図 1 3 の東西風 U および南北風 V の 2 σ 間で各高度において、それぞれ一点をモンテカルロ法に基づき算出し、風速に対するパラメータとしている。加えて、図 1 4 の予報時間による実績との差分も考慮し、図 1 3 に加えて図 1 4 の値もパラメータとして使用することで現実的な数値に近い計算結果となると考えている。ここで、風向の変化であるが、東西風および南北風の強弱で評価を実施しているため、同じ風ファイルにおいても上昇中に常に同じ風向ではなく、高度に対して変化しているものである。

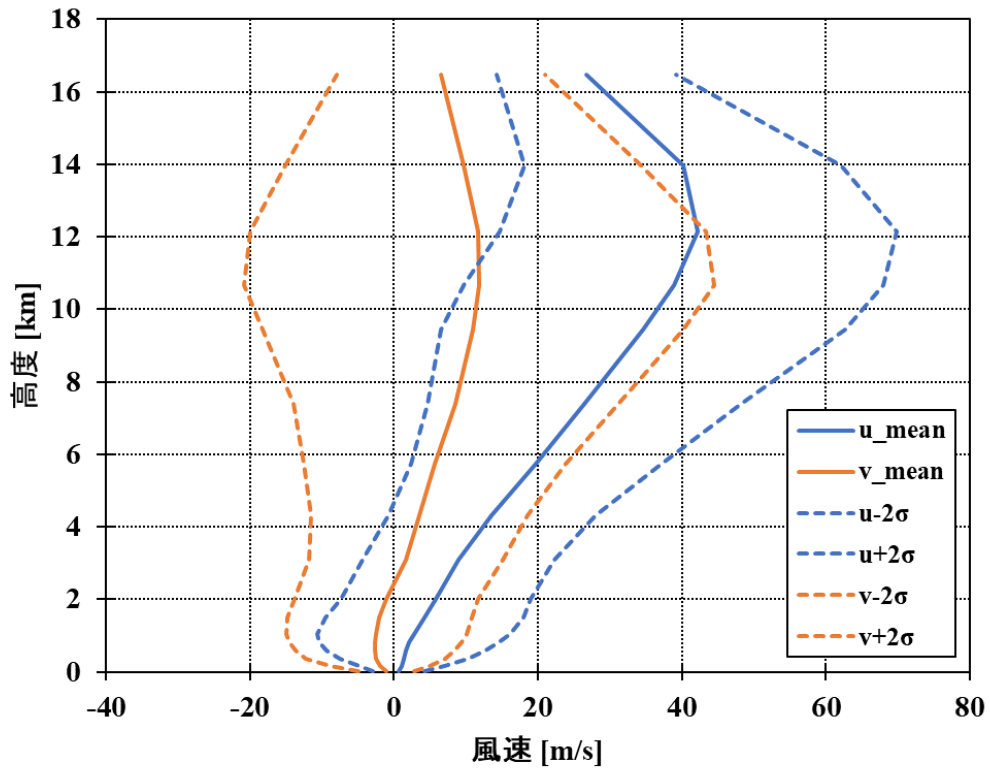
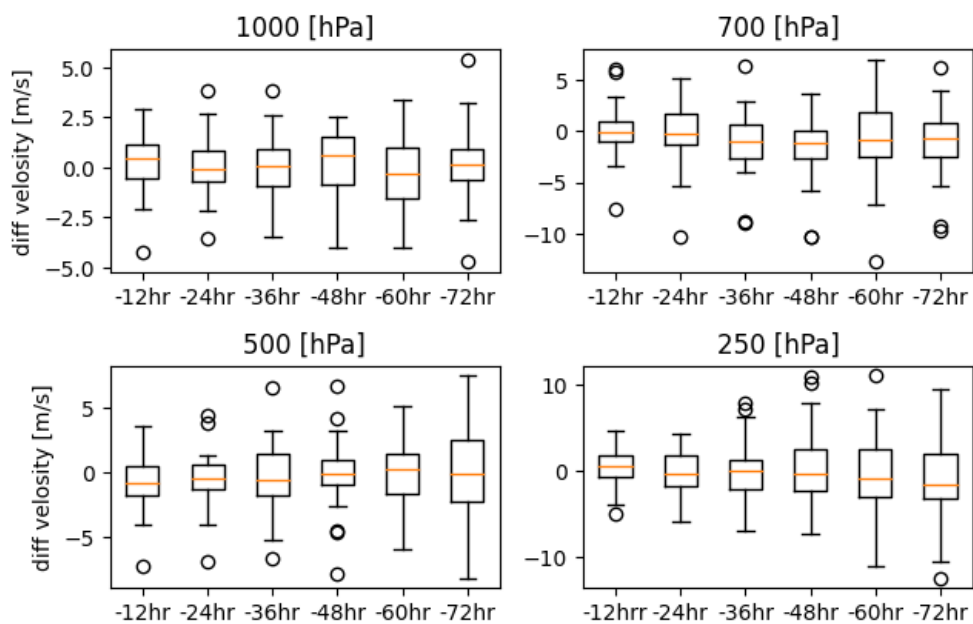


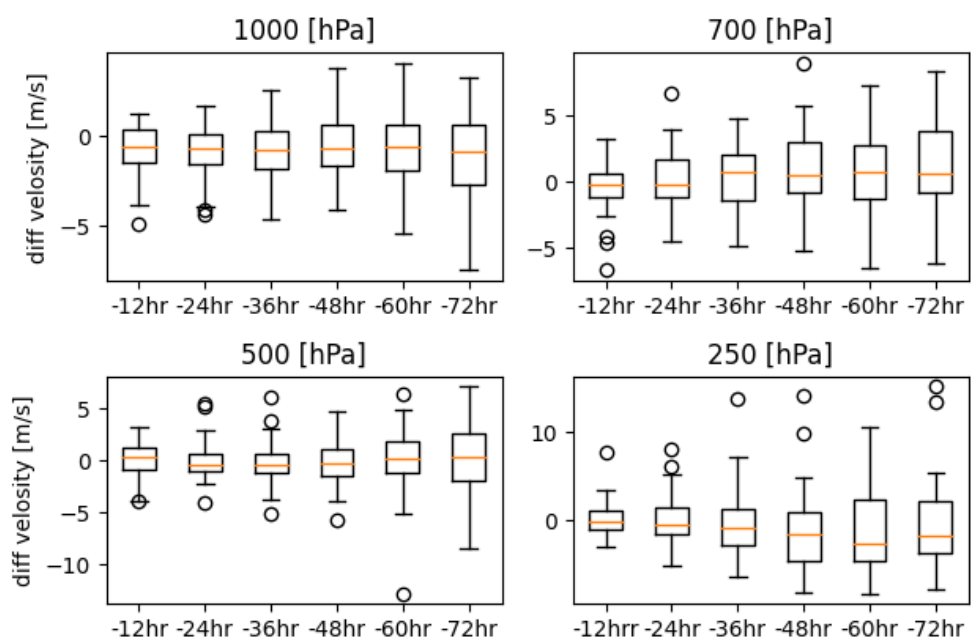
図 13 MSM の過去 5 年間の 10 月の東西風 u および南北風 v の平均値および $\pm 2\sigma$ 範囲
 (太線が平均値・破線に囲まれた領域を計算領域とする)

MSM-GPV Difference from final predicted value u-wind
target = 2023/10/16 - 2023/10/31 (UTC = 00 and 12)



(a) 東西風 u

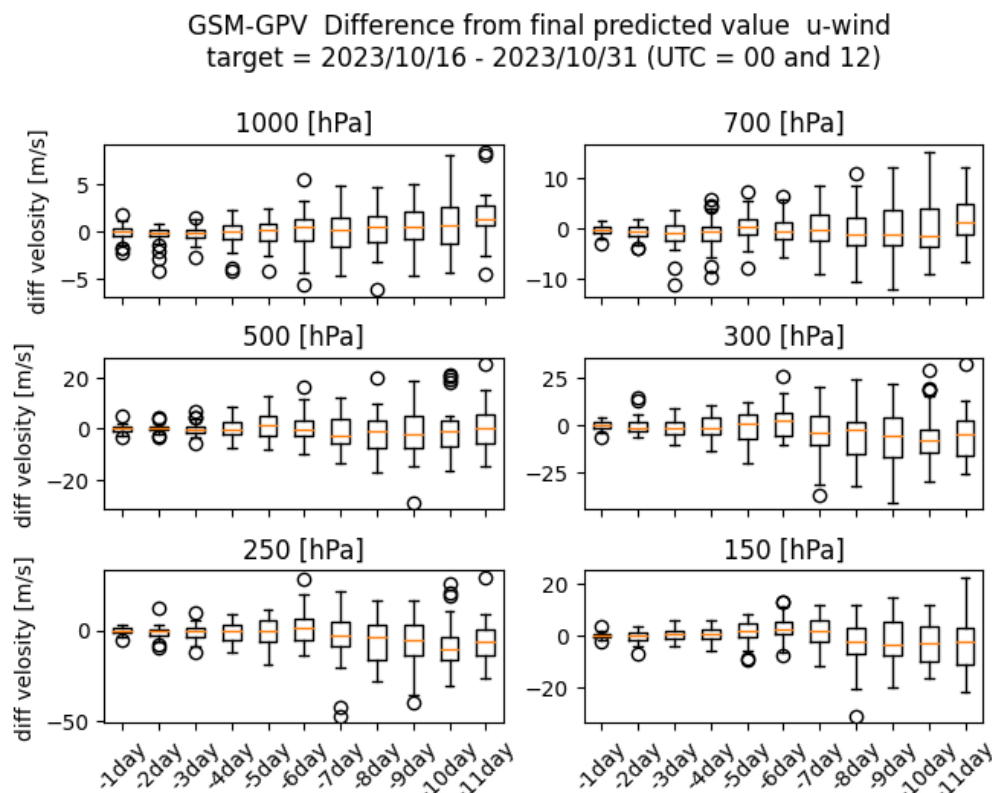
MSM-GPV Difference from final predicted value v-wind
target = 2023/10/16 - 2023/10/31 (UTC = 00 and 12)



(b) 南北風 v

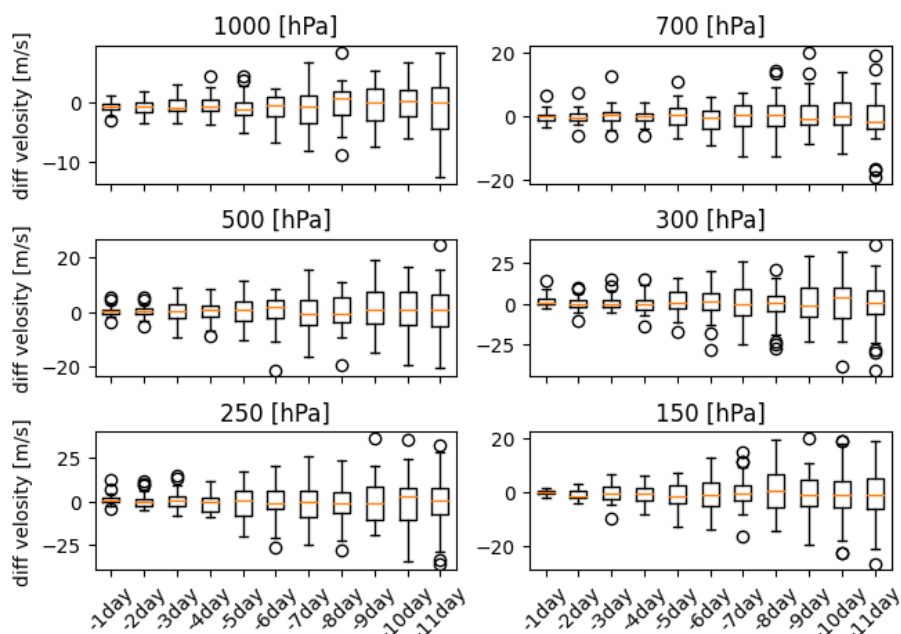
図 14 MSM の予報時間による実績風との誤差
(1000hPa=高度約 150 m, 700hPa=約 3 km, 500hPa=約 6 km, 250hPa=約 10 km)

MSM では予報時間が最長 78 時間であるのに対し、同じく気象庁数値予報モデルのうち全球数値予報モデル GPV (日本域) (以下、GSM という) では予報時間が最長 11 日先となっており、打上予定時刻の 1 週間前等の事前シミュレーションにおいては GSM の予報値を利用することとする。MSM と同様に 2023 年 10 月 16 日~2023 年 10 月 31 日の期間における GSM の予報時間の経過における実績風との差分について比較を実施した。図 15 に予報時間による予報風と実績の差分を示す。特に GSM においては、4~5 日先を境として 11 日先に向けて誤差範囲が拡大する傾向がみられる。このことから、打上予定時刻に近づくことにより落下分散の範囲が縮小傾向になると考えている。



(a) 東西風 u

GSM-GPV Difference from final predicted value v-wind
target = 2023/10/16 - 2023/10/31 (UTC = 00 and 12)



(b) 南北風 v

図 15 GSM の予報時間による実績風との誤差
(1000hPa=高度約 150 m, 700hPa=約 3 km, 500hPa=約 6 km,
300hPa=約 9 km, 250hPa=約 10 km, 150hPa=約 14 km)

風向風速の分散並びに発射角 ($77\text{deg} \pm 2\text{deg}$) の分散を与えモンテカルロ法により弾道落下および開傘落下位置について 1000 回計算した結果を図 16 に示す。いずれも計算結果のプロットより 3σ 範囲となり得る範囲について長方形の範囲として示している。

これらの範囲は全て福島県沖の太平洋海上に含まれており、陸域を含む落下範囲が存在しないことがわかる。最も陸側に落下すると予想される範囲は白色の GSM の 11 日前における弾道落下範囲であり、この落下範囲のうち海岸線に最短となる点について離岸距離は約 5 km である。ここで、本計算において 3σ 範囲を考慮しており、白色の範囲は GSM の予報時間による差分が 11 日先であり、誤差範囲が広い予報時間であることから、予報時間が打上時刻に近づくにつれて範囲も狭くなるため、今回の打上げにおいて陸上に落下するリスクは極めて低いと考えられる。

図 17 に打上時のフライトプロファイル例を示す。ロケットは頂点付近でパラシュートを開傘し、高度が下がるにつれて大気密度が増加することから空気抵抗が増え、最終的に着水直前での降下速度は約 30 m/s となる。仮に頭上に落下してくることが目視で確認できれば回収船及び警戒船が移動し回避することが十分に合う落下速度であり、打上から着水予定時間までの間は頭上への落下物体の有無に注意を払うこととする。

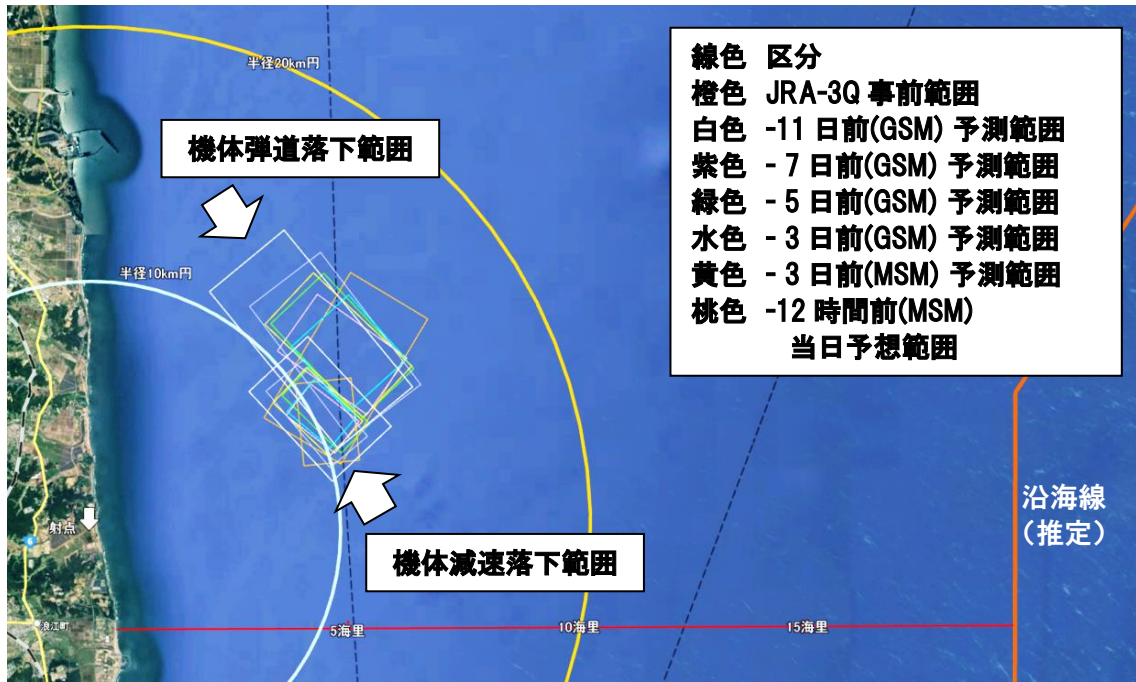


図 16 飛行分散 (試行回数 : 1000 回)

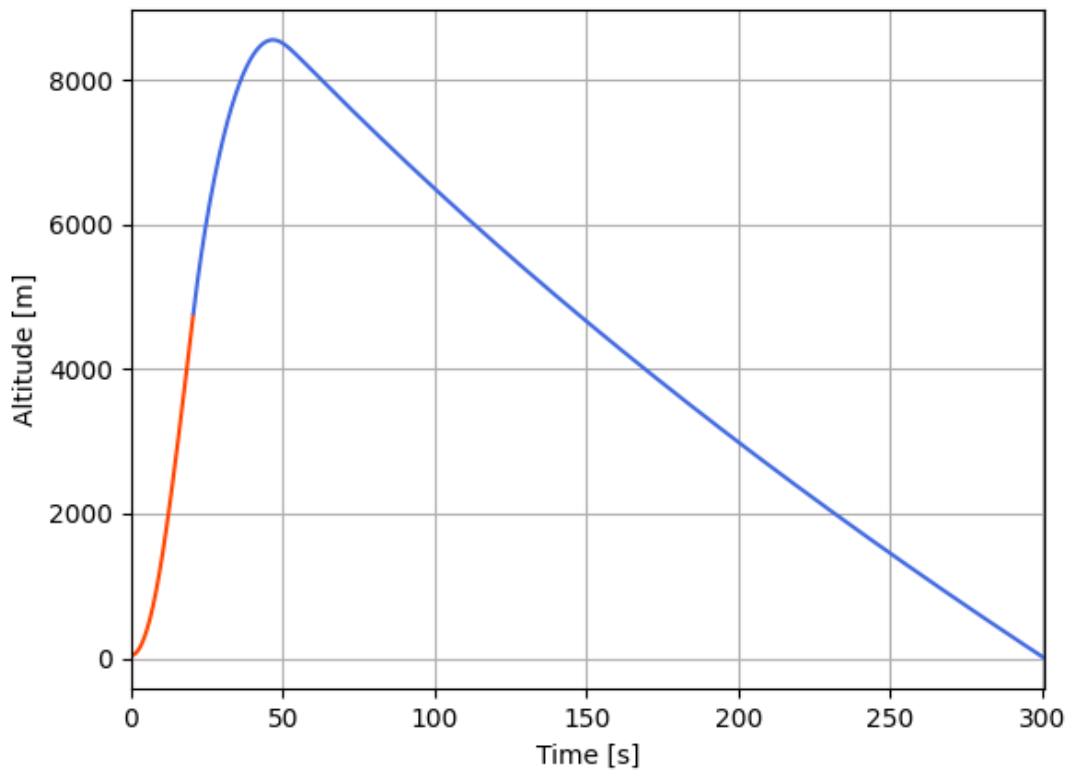


図 17 打上のフライトプロファイル例

8 実施場所広域図

当日の打上実施場所広域図を図18に示す。打上開始30分前から県道及び市道を通行止めとし浜街道（県道255号）に配置した警備員2名，井田川近傍配置した警備員4名により，車両及び歩行者の保安区域立ち入りを防止する。

図18：打上実施場所広域図

