

1 シミュレーション系

1.1 打ち上げ諸元

絶対ここじゃない

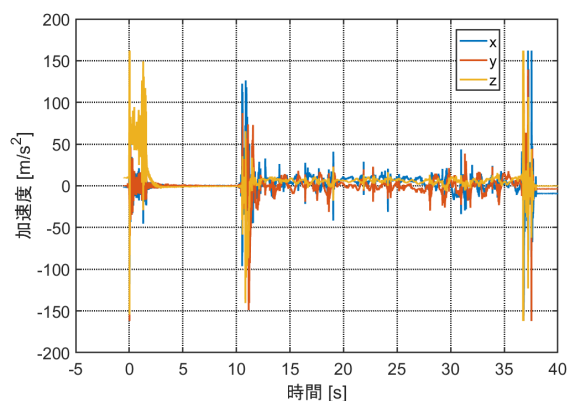
表 1.1: 打ち上げに関する諸元

名称	単位	値
日付		2022/11/13
日時		7:47
気象		
気温	°C	18.39
気圧	hPa	964.49
射点高度	m	430
射点緯度	deg	北緯 34.736139
射点経度	deg	東経 139.421333
磁気偏向	deg	7.53(西偏)
風向	deg	180
風速	m/s	3.0

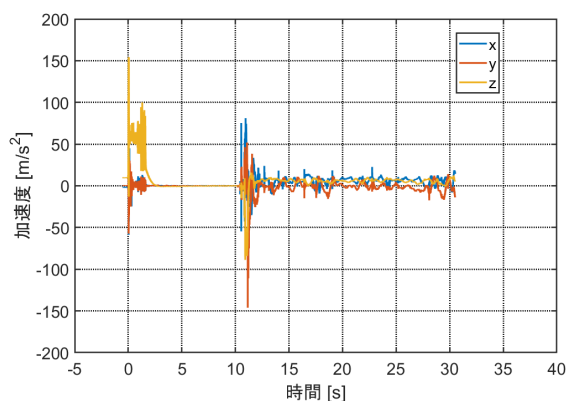
1.2 データ解析

1.2.1 位置・速度

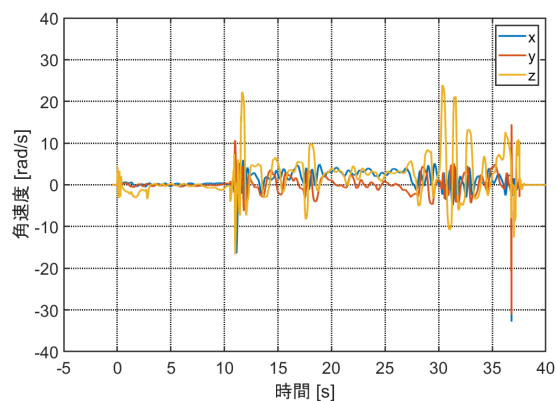
今回の打ち上げでは、開放基板及びミッション基板それぞれに搭載された 6 軸センサのロギング及びデータ取得に両者とも成功した。取得した加速度・角速度センサの値を図 1.1 に示す。ただしミッション基板のデータは離床検知後 30 秒までのものであり、着地前にロギングを終了している。座標軸に関して、各軸は図に示すとおりである。また、角速度センサについては離床前のデータの平均値を取り、全体から減算する事により 0 点補正を行っている。



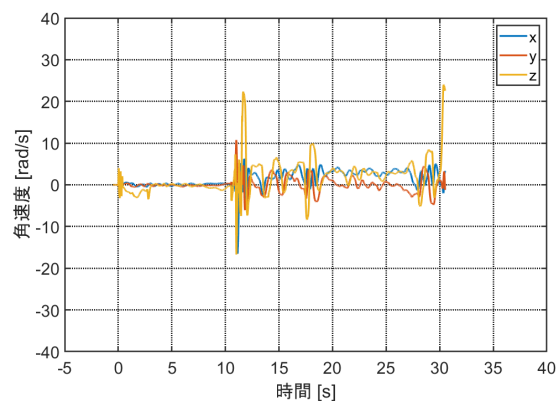
[1] 加速度データ（開放基板）



[2] 加速度データ（ミッション基板）



[3] 角速度データ（開放基板）



[4] 角速度データ（ミッション基板）

図 1.1: 加速度・角速度センサデータ

取得した加速度・角速度データをもとに積分を行い、対地速度及び飛行経路を算出した。開放基板及びミッション基板それぞれの対地速度を図 1.2 に、算出した飛行経路と実際の着地点を図 1.3 に示す。それぞれの値は射点を原点として磁束を基準とした ENU 座標系におけるものである。なお、パラシュート開傘以降の 6 軸センサの積分精度が悪くなることから、パラシュート開放以前は実線、以降は点線としてプロットしている。

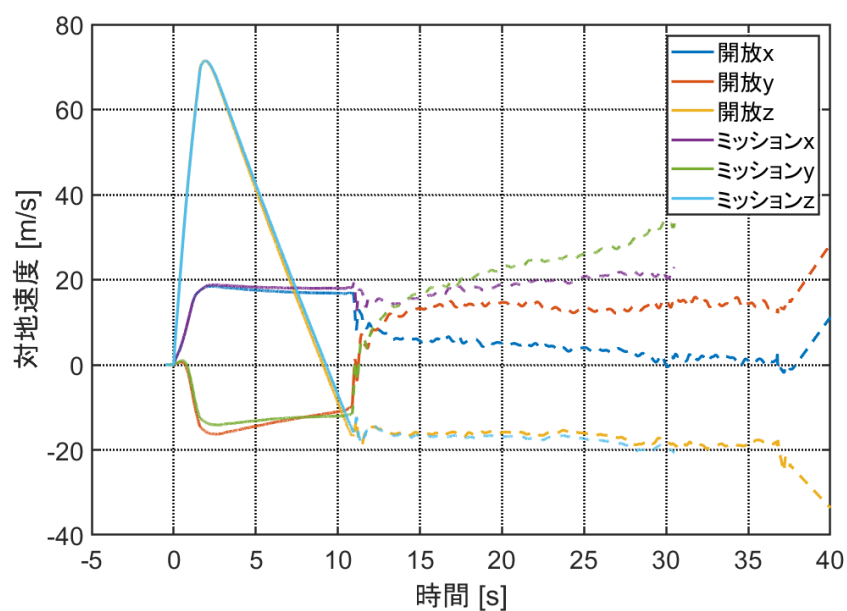
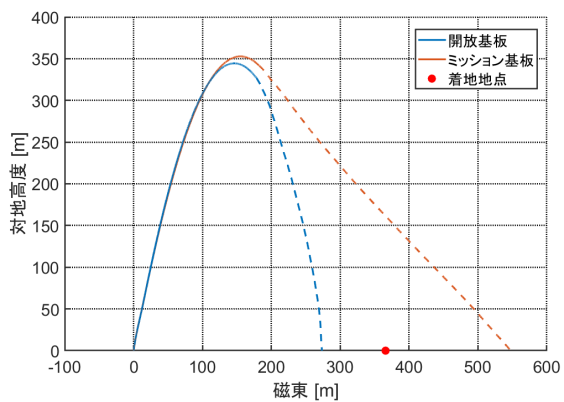
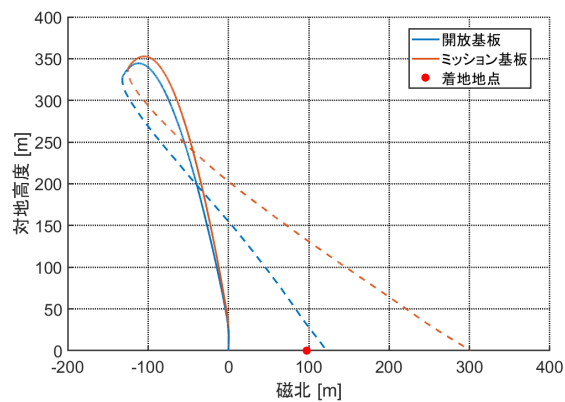


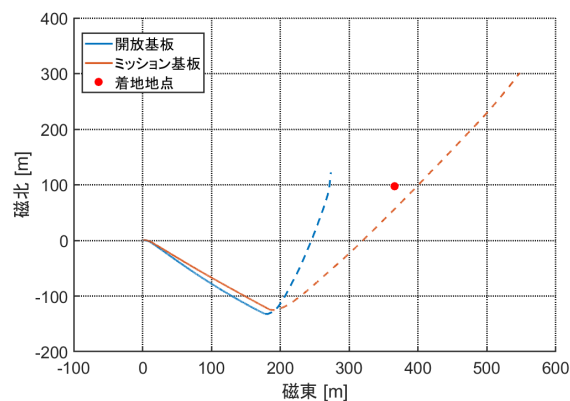
図 1.2: 対地速度



[1] 磁東－対地高度



[2] 磁北－対地高度



[3] 磁東－磁北

図 1.3: 飛行経路

表 1.2: 頂点座標

	x (m)	y (m)	z (m)
開放	146.2	-111.8	344.5
ミッション	155.1	-104.7	352.8

表 1.3: ランチクリア速度

	時刻 (s)	ランチクリア速度 (m/s)
開放	0.42	23.19
ミッション	0.42	22.69

ここで、取得した加速度を地上座標系における機体の重心での値への変換は式を、各変数については表に示す。

$$\mathbf{a}_e = C_{e/b} (\mathbf{a}_b - \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{X}_s) - \mathbf{g}_e \quad (1.1)$$

表 1.4: 式 (1.1) 諸元

名称	変数	単位	値
加速度ベクトル (取得値)	\mathbf{e}_b	m/s^2	-
加速度ベクトル (地上座標系)	\mathbf{e}_e	m/s^2	-
角速度 (機体座標系)	$\boldsymbol{\omega}$	rad/s	-
座標変換行列	$C_{e/b}$	-	-
センサ位置 (開放)	$C_{e/b}$	-	-
センサ位置 (ミッション)	\mathbf{X}_s	m	-
重力 (地上座標系)	\mathbf{g}_e	m/s^2	$(0, 0, -9.8066)$

図 1.2 と図 1.3 からわかるように、2つのデータは頂点到達までは、対気速度及び飛行経路ともに大方一致していることがわかる。頂点到達時の座標は表 1.2 に示しているように、その差は 14.0m である。独立した 2つのセンサから同様の経路を算出できたことから、頂点到達前に関しては実際の対地速度及び飛行経路に近いものが得られたと考えられる。

一方で頂点到達以降に関しては、2つの算出結果に大きな差が生じていることがわかる。これはパラシュート開傘時の運動がサンプリングレートより高い周波数の運動であることが原因と考えられる。すなわち、6 軸センサではパラシュート開傘後の運動を十分に追跡できなかったため、2つのセンサ間の差が拡大したと考えられる。

1.2.2 高度

離床時刻からの機体の高度は気圧センサのデータからも算出可能である。図 1.4 に気圧センサ及び 1.2.1 項で算出した高度の時間経過を、表にそれぞれの頂点到達時間及び最高到達高度を示す。

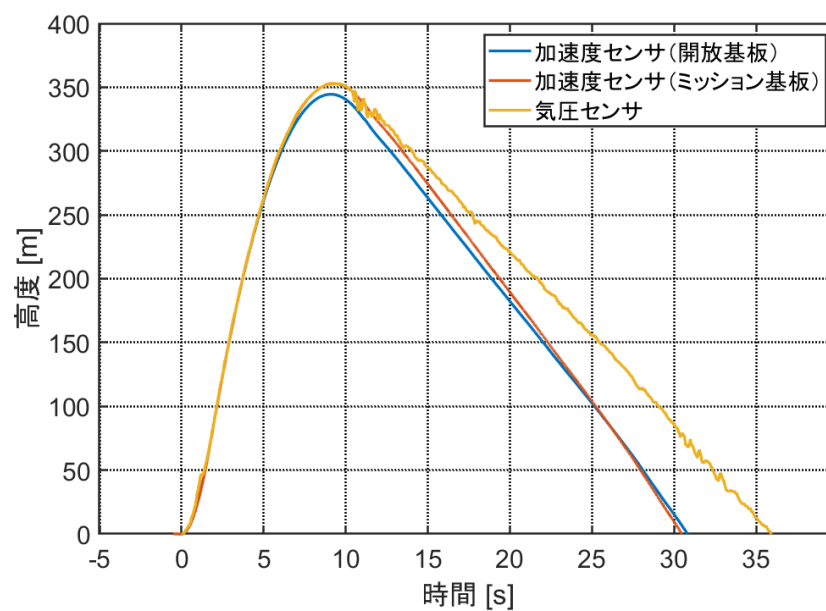


図 1.4: 高度の時間経過

表 1.5: 頂点到達時間及び最高到達高度

	頂点到達時間 (s)	高度 (m)
開放	9.08	344.5
ミッション	9.27	352.8
気圧センサ	9.48	353.0

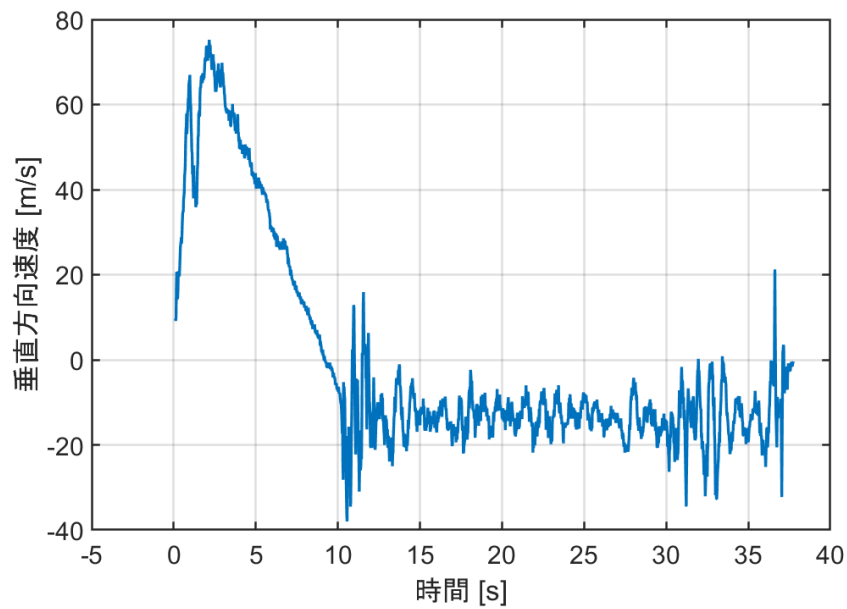


図 1.5: 気圧センサから算出した垂直方向速度

図 1.5 は気圧センサから取得した高度を微分したものである。ただし、変化を明瞭にするため 0.4 秒間、データ数にして 20 個のデータで移動平均を出したものをプロットしている。パラシュート開傘時刻が離床から 10.2 秒後であり、比較的降下速度が安定しているのが 12.5s 付近であることから、開傘から終端速度到達までに 2.5s ほどかかっていることがうかがえる。終端速度に関しては、15.0s から 30.0s の間に 274.3m 降下していることから、終端速度は 13.2m/s であることがわかった。表 1.6 に記載する諸元を用いて計算した結果、パラシュートの抗力係数は 1.27 であることがわかった。

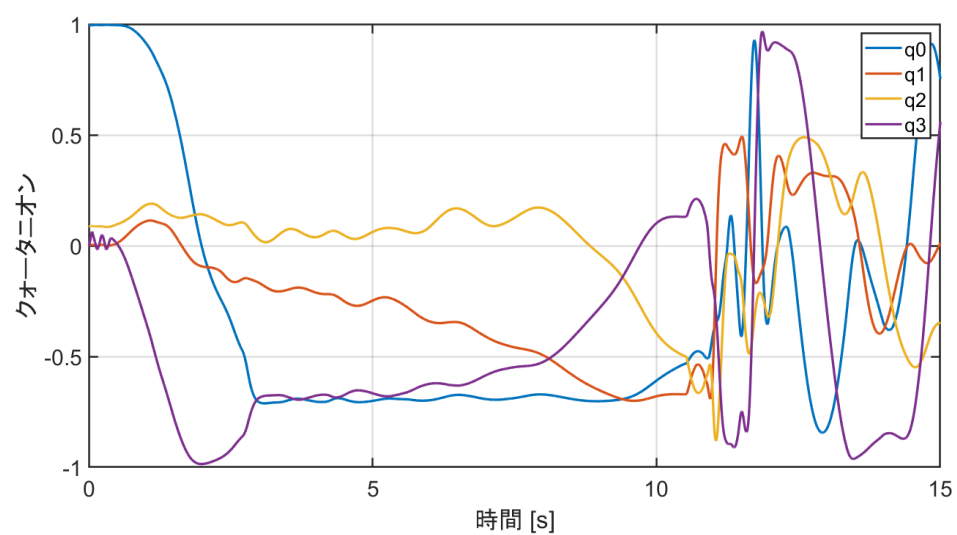
表 1.6: 抗力係数算出諸元

諸元名	単位	値
降下速度	m/s	13.71
燃焼終了後重量	kg	5.894
気体密度	kg/m ³	1.144
代表面積	m ²	0.422
抗力係数	–	1.27

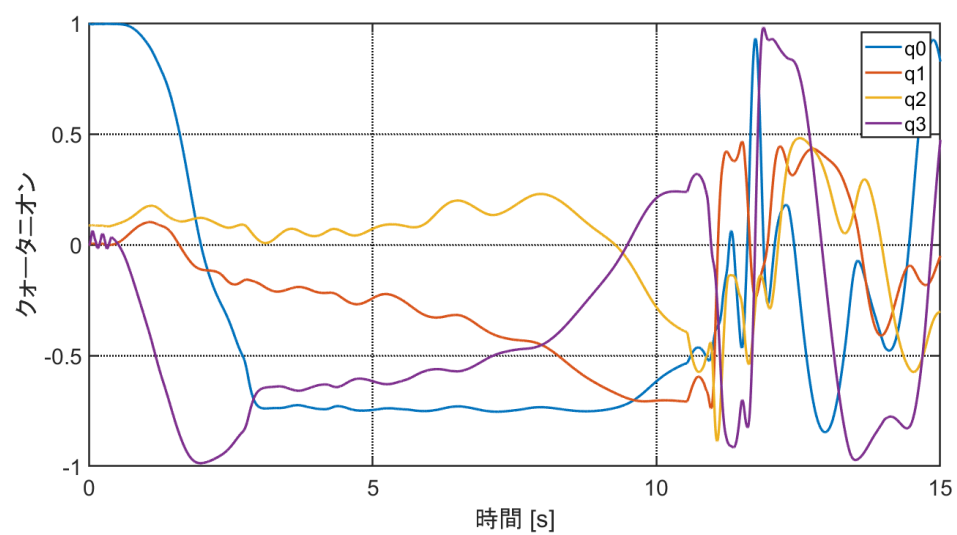
1.2.3 姿勢

取得した角速度データから、飛行中の機体の姿勢を表すクォータニオンを算出した。図 1.6 にそれぞれの基板のから算出した値を示す。またこれらクォータニオンを動翼の制御に使用した yxz オイラー角に変更したものを

図 1.7 に示す。



[1] 開放基板



[2] ミッション基板

図 1.6: 算出したクォータニオン

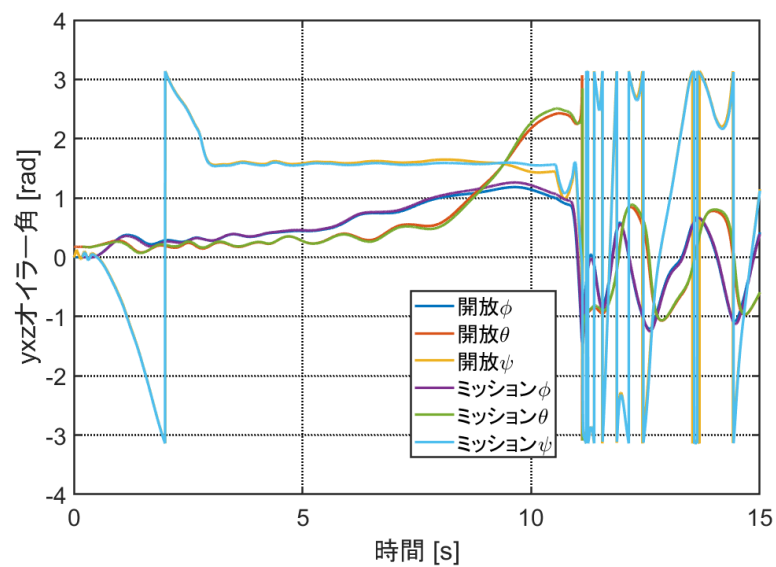


図 1.7: yxz オイラー角の比較



[1] 離床 5 秒後 (左: CG, 右: 機体カメラ)

[2] 離床 8 秒後 (左: CG, 右: 機体カメラ)

図 1.8: CG と機体カメラの映像の比較

図 1.7 に示した通り、それぞれの基板のセンサから算出した姿勢にほとんど差異は見られなかった。パラシュート開傘以前において、その差の最大値は ψ で 6.9deg であった。図 1.8 に示しているように、機体に搭載したカメラからの動画映像と、算出したクォーターニオンの値を用いて作成した CG 映像を比較しても、その差がほとんど見られないことが確認できた。

次に、取得した磁気センサの値の精度を評価する。磁気センサの零点補正を行うため、最小二乗法を用いて球面フィッティングを行った。補正した結果を図 1.9 に、ノルムの時間変化を図 1.10 に示す。

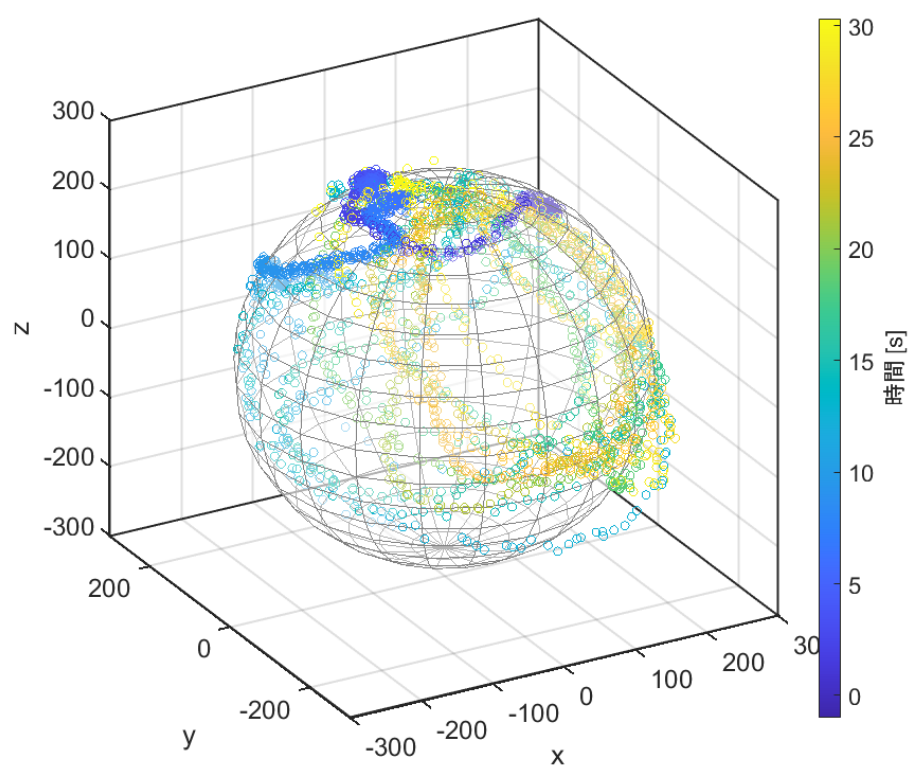


図 1.9: 零点補正後の磁気センサ

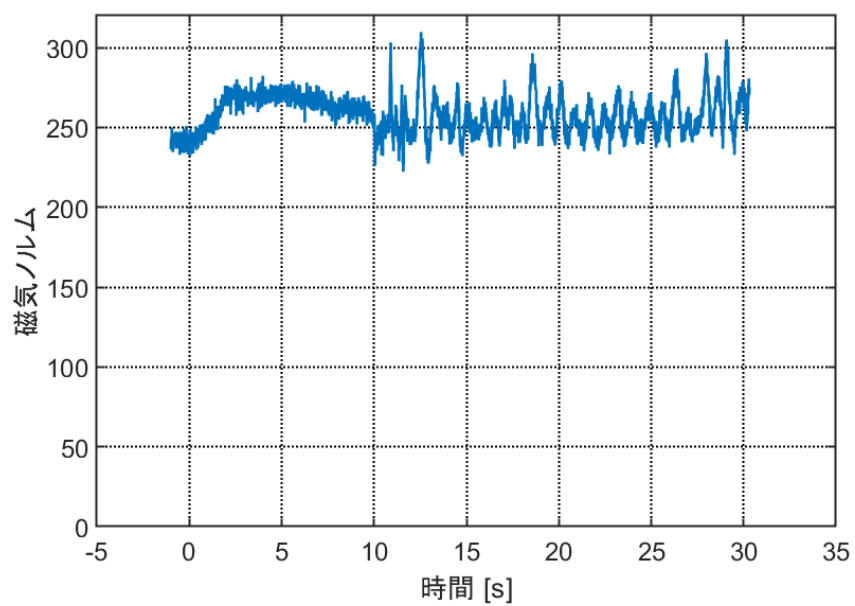


図 1.10: 零点補正後の磁気センサノルム

ここで算出したクォーターニオンを用いて磁気センサの値を地上座標系に変換したものを図 1.11 に示す。

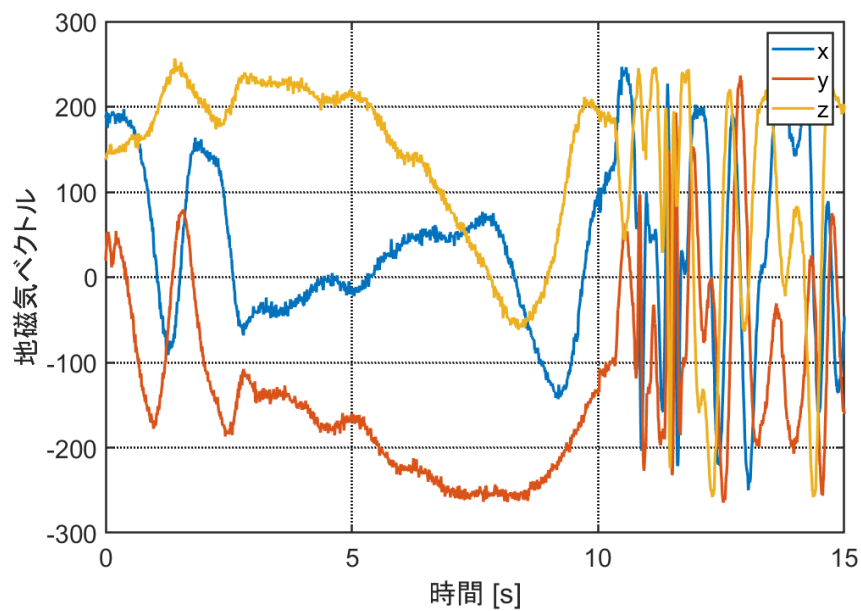


図 1.11: 磁気ベクトルの各成分（地上座標系）

本来は地磁気ベクトルが定ベクトルであるため、図 1.11 に示した各軸の値は一定になるはずである。算出したクォーターニオンは精度が確認されていることから、磁気センサの値に何らかの問題があることがわかる。ノルムの時間変化が小さくベクトルも球面上に存在しており、理想的なデータであったのにも関わらずこのような結果となった原因は現状不明である。

1.2.4 推力履歴

加速度データから打ち上げ時のエンジンの推力履歴を算出した。開放基板、ミッション基板から算出したものと、直近の 2022 年 7 月に実施された燃焼試験での値を図 1.12 に示す。また推力に関する各諸元を表 1.7 に、加速度データから推力の算出式を式 (1.2) に、各変数を表 1.8 に示す。

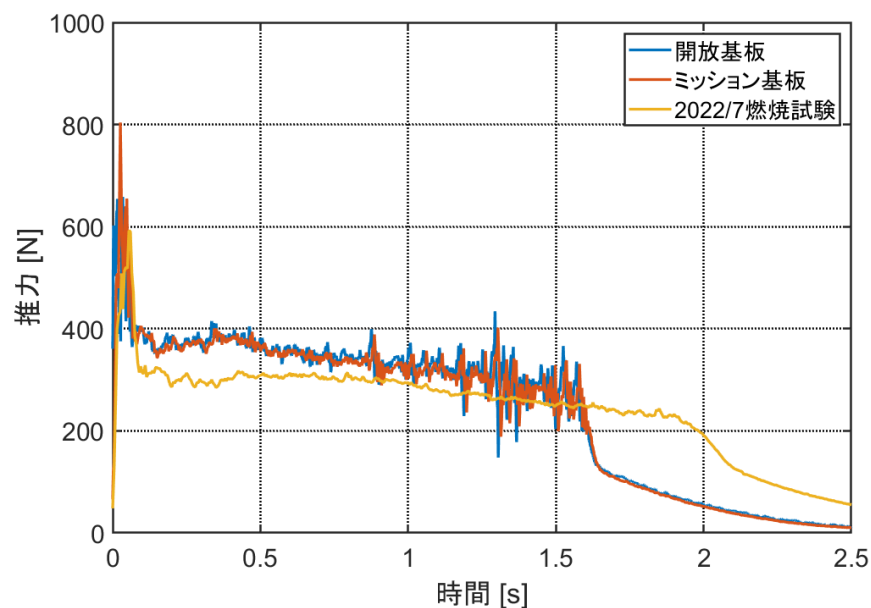


図 1.12: 推力履歴の比較

表 1.7: 燃焼諸元

名称	単位	開放	ミッション	7月燃焼試験
トータルインパルス	N s	596	581	628
平均推力	N	273	280	226
比推力	s	169	165	174
作動時間	s	2.18	2.08	2.79

$$T = a_z \left(M_0 + \frac{M_1 - M_0}{b_t} t \right) + \frac{1}{2} C_d \rho S V^2 \quad (1.2)$$

表 1.8: 式 (1.2) 諸元

名称	変数	単位
推力	T	N
z 軸加速度 (センサ)	a_{sz}	m/s ²
燃焼前質量	M_0	kg
燃焼後質量	M_1	kg
作動時間	b_t	s
時刻	t	s

図 1.12 の青線は打上実験時の開放基板から算出した推力を、赤線はミッション基板から算出した推力を、また黄線は 2022 年 7 月の燃焼実験時の推力をそれぞれ表している。

燃焼実験時と打ち上げ実験時の推力履歴を比較すると、打ち上げ実験時の方が作動時間が短く、またそれに伴ってトータルインパルスも小さくなっている。この原因としては、燃焼実験と打ち上げ実験で供給されている酸化剤の量が異なることが考えられる。燃焼実験では、タンク圧の計測を行っており、圧力センサ取り付け用の流路が存在している。打ち上げ実験時には、このような流路は存在しないため、この流路の分の酸化剤が供給されておらず、これが作動時間やトータルインパルスに影響を与えたと考えられる。

1.3 事後シミュレーション

打ち上げ実験後に、打ち上げ 10 分前に計測した風向風速データをもとにべき法則を用いて事後シミュレーションを行った。風向風速データを表 1.9 に、べき法則の各パラメータを表 1.10 に示す。

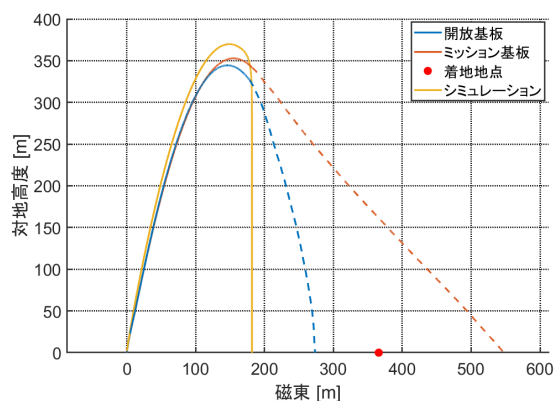
表 1.9: 風向風速

風向	磁南 (0deg)
風速	3.0m/s

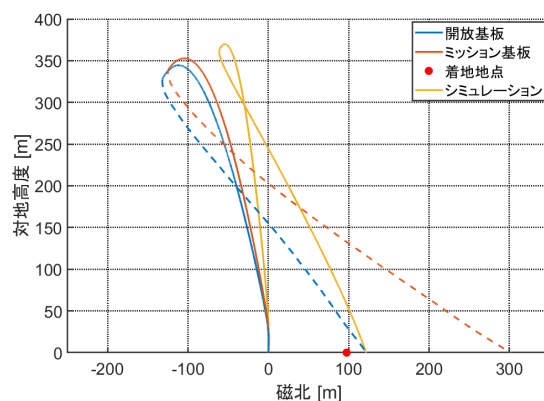
表 1.10: べき法則パラメータ

風向風速測定高度	2
風速分布係数	6

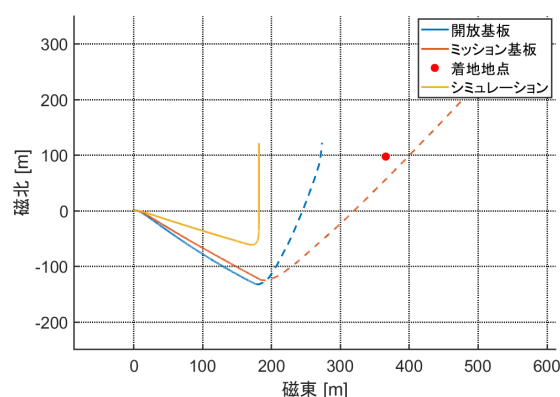
事後シミュレーションの結果、1.2.1 項にて推定した 2 つの飛行経路及び実際の着地地点を図 1.13 に示す。



[1] 磁東 - 対地高度



[2] 磁北 - 対地高度

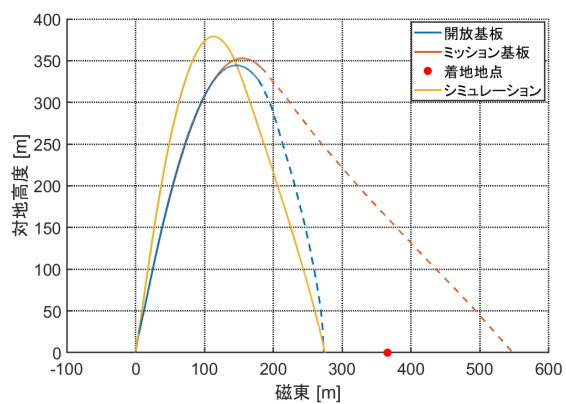


[3] 磁東 - 磁北

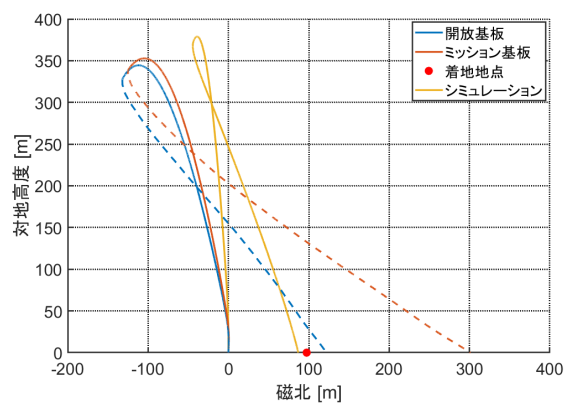
図 1.13: 飛行経路 (風向 180deg 風速 3.0m/s)

報告された風向風速条件ではシミュレーションによる落下地点は実際の落下地点から西に約 180m ずれていることが確認できる。また、最高高度は 1.2.2 項で示した値より 17m 高い結果となった。これはシミュレーションに使用した推力履歴が 7 月の燃焼試験でものもであり、1.2.4 項で示したように燃焼試験でのトータルインパルスが実際の値より上回っていた事が原因であると考えられる。

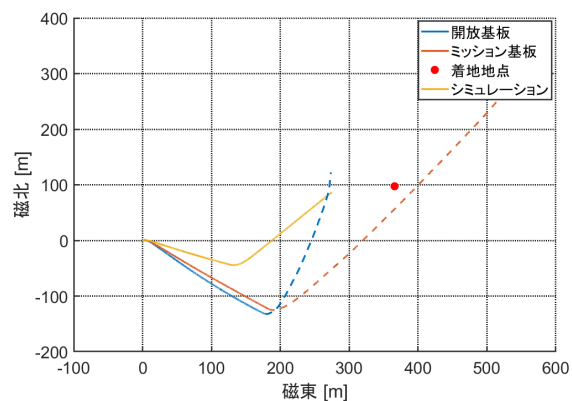
さらに、落下地点の差に関しては、風向の違いが大きく関係していると考えられる。打上げ直前の現地報告では風向が南であったが、推測された飛行経路の開傘地点と実際の落下地点を考慮すると、飛行時の風は南西であったと推測される。図 1.14 に南西の風でのシミュレーションの結果示す。



[1] 磁東 - 対地高度



[2] 磁北 - 対地高度



[3] 磁東 - 磁北

図 1.14: 飛行経路 (風向 225deg 風速 3.0m/s)

結果としては、南風の結果より南西の風でのシミュレーションのほうが落下地点に関しては近くなり、実際の落下地点から西に約 80m であった。

参考文献

- [1] 嶋田有三・佐々修一，飛行力学，森北出版株式会社 (2017)