

HISEP IN SAITAMA UNIVERSITY

ADVANCED COURSE RESEARCH REPORT IN 2022



Study on stratospheric high-energy phenomena using space balloons スペースバルーンを用いた成層圏の高エネルギー現象の解明研究

ANCO-project

(See the end matter for the full list of authors.)

ANCO-project (全著者リストは巻末資料をご覧ください。)

Abstract: We propose to utilize the stratosphere as a place for students' independent research. Then, we report on the measurement of ozone concentration and natural radiation intensity by a stratospheric balloon, which was carried out as the first step of the demonstration. The experiment was conducted with the aim of clarifying the relationship between them, but this time it was not possible to collect the data satisfactorily. However, by actually conducting experiments, we were able to obtain a lot of knowledge about balloon operations. It is expected that students will be able to conduct academic research in the stratosphere by making use of the experience gained this time in future experiments.

1 序論

成層圏 (stratosphere) は高度約 10 km から 50 km にわたって広がる領域であり、その中でも高度約 25 km を中心に広がるオゾン層は、私たちが紫外線から守る重要な存在として知られている。また、人間の活動によってオゾン層が破壊されたことはよく話題になるが、今後数十年でオゾン層が回復することも指摘されており [1], 研究者だけでなく、世界全体が引き続きオゾン層に注目していく必要がある。

私たちは最近の名古屋大学による研究 [2] で、1 日数回の頻度で生じる明滅オーロラと呼ばれる現象に伴って、地球の周りに存在する高エネルギー電子が成層圏までなだれ込むことでオゾン層が破壊されるということを知った。この研究では数 MeV のエネルギーを持つ電子に着目していたが、地球の周りには他にも高エネルギー現象が存在する。例えば、大気中の放射性同位体からは数 keV から MeV 領域の放射線が放出される。さらに、地球外からやってくる放射線である宇宙線 (cosmic rays, CR) のエネルギーは MeV 領域から超高エネルギーにわたる。これらの高エネルギー粒子は明滅オーロラに伴う電子のようにオゾン層を破壊しているのだろうか。その影響があるのだとしたら、それは紫外線と比較してどの程度だろうか。特に、大半の紫外線が吸収されてしまうであろうオゾン層の下層部 (高度 10 数 km) では紫外線以外の高エネルギー現象によるオゾン層への影響が支配的であることが予想される。

私たちはこの疑問に対して、成層圏気球を用いて環境測定を行なうことにより自分たちで回答を得ることを目

指す。気球は人工衛星・ロケットに次ぐ宇宙観測手段であり、それにもかかわらず運用コストは他の 2 つよりもはるかに安い。また科学的にも古くは Hess の宇宙線発見 [3] は気球実験であったし、最近でも気象庁のオゾンゾンデ観測 [4] で使われており、実は気球は手軽かつ頻繁に観測することができる手段である。もし学生が自身の力で観測気球を運用することができれば、成層圏が学生の自主研究の題材として開かれた存在になることが期待される。

このような動機のもとに、私たちは成層圏における学生の自主研究の第一歩として自然放射線強度とオゾン濃度の関係を調べた。放射線検出器およびオゾン検出器を気球に搭載し、1 時間程度の飛行の間に上空のオゾン濃度および放射線強度を同時測定することを目指した。実験は高知県土佐西南大規模公園で 9 月 24 日に行なわれ、観測機器を搭載した気球が放球された。結果としては、放射線検出器からのデータは回収できず、またオゾン検出器についても温度較正が不十分であったため取得できたデータの信頼性は不明である。しかし、今回の実験を通して気球実験を行なう一連の手続きや運用方法、現場で起こりうる諸トラブルなどを把握することができた。この経験をもとに、次回以降の実験ではより入念な準備の上着実に実験が遂行されることが期待される。今回の実験は学生の自主研究として成層圏を利用することの先駆けになったと期待したい。

本研究のプロジェクトを ANCO-project と称す。ANCO-project は埼玉大学宇宙工学サークルあかとき (以下、あかとき) と名古屋大学宇宙開発チーム NAFT (以下、NAFT) の 2 団体で構成された合同プロジェクトである。今回、2022 年 09 月 25 日に高知県の土佐西南

大規模公園で行われた「えひめ南予共同気球実験」に参加し、オゾンと放射線の関係について調査した。NAFTは「Nagoya-university Aerospace Flight Technology」の略称で名古屋大学と名古屋工業大学の学生で構成された大学生チームである。2012年に学生団体初のスペースバルーン打上げに成功した団体であり、Link space をモットーに活動している。ANCO-projectに参加したのはスペースバルーン班のみだが、他に5つの班も存在する。埼玉大学宇宙工学サークルあかときは埼玉大学・東京理科大学で構成されたサークルであり、2021年に小型シンチレーション式放射線検出器を開発し、CORE^{*1}が開発する「ひばり1」ロケットにて、高度約700mからその性能評価を行った。文部科学省主催第10回サイエンス・インカレにて関電工賞・石井浩介賞のダブル受賞し、人工衛星や探査機、飛翔体技術に関わる開発・研究を行っており、プロジェクト毎の活動をしている。また、理学的ミッションを積極的に取り入れている。今回打上げに参加したのはNAFTとあかとき合わせて16名である^{*2}。放射線検出器を開発し、スペースバルーンで成層圏まで飛ばし測定するため、それぞれの分野の経験を活かして協力し合い、実験を行う。

2 方法

本プロジェクトの製作の役割分担はパラシュートと放射線量測定をあかときが、構造とオゾン濃度測定をNAFTが担当した。製作中はスケジュールの都合上一度も会わず、完全リモートで行った。

次に搭載物の概要について説明する。それぞれの団体に先ほど示した放射線測定・オゾン濃度測定に加えて位置情報・高度データの基本情報取得を行った。位置情報については既製品であるGarmin衛星^{*3}も搭載した。機体の外観は図2.1に示すようになった。アクリルパイプ内に電装部品を搭載し、アルミ板で作った蓋にゴムを取り付け水密性を高めた。そしてカメラやセンサを蓋部分に取り付け、アクリルパイプの端にパラシュートを取り付けた。

次にバルーンからペイロードまでの全体の構造を図

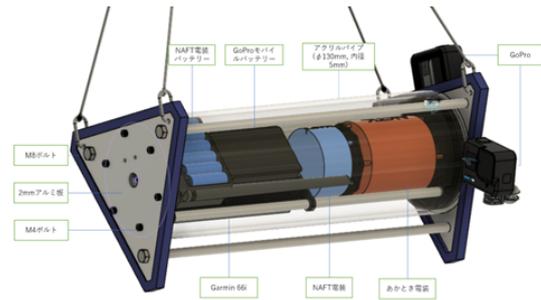


図 2.1

2.2 に示す。バルーンで上昇し、成層圏に到達すると内圧と外圧に大きな差が生まれ、バルーンが破裂し、それに伴ってパラシュートが展開され減速しながら落下する。

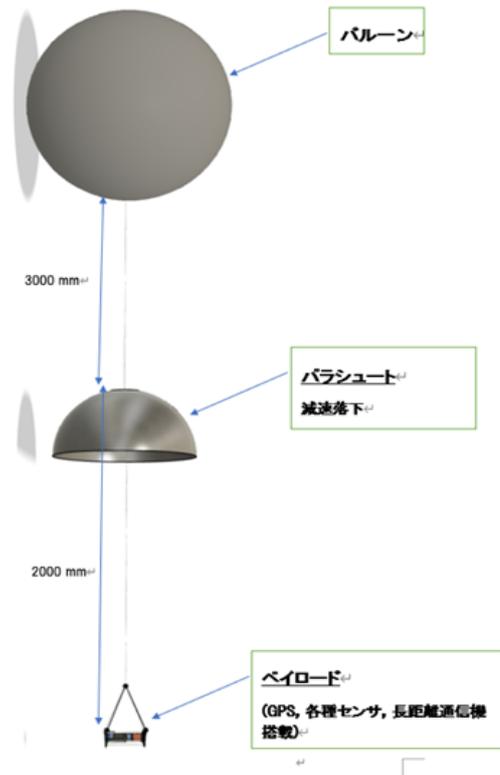


図 2.2

表 2.1 にヘリウム量と上昇速度、到達高度の関係を示す^{*4}。

表 2.2 に機体諸元を示す。ここには機体の区分、名称、重量を示す。

^{*1} CORE は Challengers of Rocket Engineering の略称。CORE は関東圏の大学生が集まり、ハイブリッドロケットや CanSat(缶サイズの模擬人工衛星)の製作・打上げを行っているサークルで、航空宇宙に興味があり、ロケットを自分の手で打ち上げたいという想いを持った学生が多く集まっている。また、CORE は東京都立大学、横浜国立大学、埼玉大学の公認サークルである。

^{*2} 本プロジェクトに携わった全開発者・研究者のリストは巻末をご覧ください。

^{*3} Garmin 衛星とは Garmin 社が製造する衛星通信技術を利用した製品である。例えば、inReach 衛星通信や MSC 10 マリンサテライトコンパスなどである。これらの製品は、世界中どこにいてもメッセージの送受信やルートのナビゲーション、位置情報の共有、緊急時に SOS を押してグローバル緊急対応センターに連絡することができる。

^{*4} 気球を除く全重 4098 g (ペイロード重量 3898 g + ロープ + パラシュート重量約 200 g) においてコスモブレン 1500 を使用した場合の上昇速度を示す。関係式 $v = \frac{kL^{1/2}}{(W+L)^{1/3}}$ を用いた。ただし、 v は上昇速度、 k は上昇速度係数、 L は浮力、 W は気球の重さである。

表 2.1: ヘリウム量と上昇速度, 到達高度の関係

上昇速度 (m/s)	ヘリウム量 (m ³)	到達高度 (m)
8.01	14.700	26.000 to 28.000
7.00	10.800	28.000 to 28.250
6.04	8.500	29,750

次に電装部品について説明する. あかとき側の電装は円柱状の構造であり, 上部分がセンサー・無線通信等, 真ん中部分がデータロガー, 下部分が放射線測定装置となっている. NAFT 側の電装は, オゾンセンサー, マイコンやその他のセンサー, 無線通信機器などで構成され, オゾンセンサーを機体の外部に取り付けることで, オゾン濃度を測定する. 表 2.3 にあかとき電装, 表 2.4 に NAFT 電装の搭載計器の詳細を示す.

図 2.3a あかとき電装と図 2.3b NAFT 電装のアルゴリズムをフローチャートに示す.

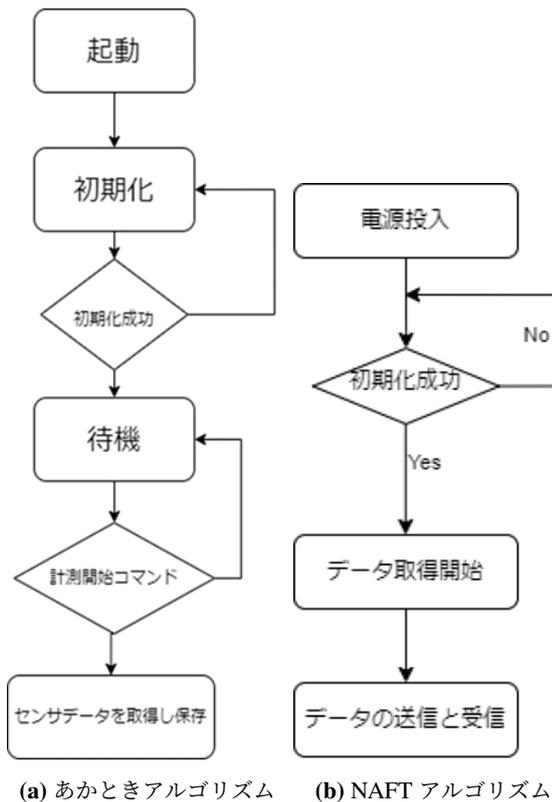


図 2.3

3 結果

3.1 あかとき

あかとき側の地上局で受信した座標および気圧データから算出した高度をプロットした画像を図 3.4 に示す.

通信機器のトラブルにより放球直後からダウンリンクが途絶した. 高度 12 to 16 km 付近でダウンリンクが再度取得できたが, それ以降では再び途絶した. そのため, 通信が途絶していた時間の位置座標は取得できていないため図 3.4 中では線形補間をしている. 図 3.4 中の黄色の点は, 取得できた位置座標を平面上にプロットしたものである.

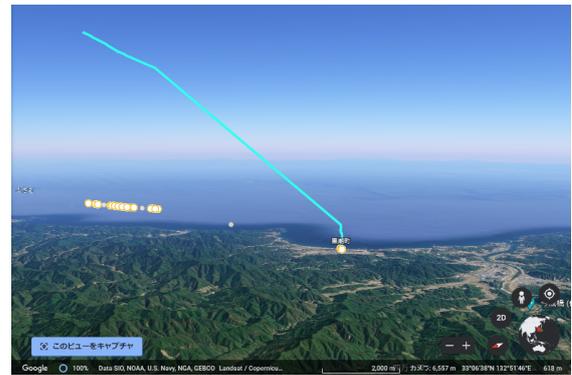


図 3.4

3.1.1 放射線量測定

本機体に搭載した放射線検出器で取得したデータは, 搭載した SD カードにのみに記録される仕様であったため本実験でデータを得ることはできなかった.

3.2 NAFT

3.2.1 位置情報

NAFT 側の地上局で受信した GPS の値をもとに Google Map にプロットしたものを以下の図 3.5 に示す. ただし使用した GPS の仕様上, 高度 10 km を超えた付近からデータの更新は停止した. 落下中に高度 7 km を下回った辺りで再度取得し始めていたが, 予想以上に落下が早く, その後のデータは取得できていない. これは落下最中にアンテナの取り外し作業を実施したことに起因する.

図 3.5 中の値 (緯度, 経度) について,

- ①: 打ち上げた場所
- ②: 上昇中に連続して取れた GPS の値
- ③: 落下中に GPS が再び取れ始めた際の値

を示している.

3.2.2 上昇・降下速度

さらに NAFT 側の以上局で受信した高度データならびに観測時刻を用いて上昇速度, 落下速度を導出する. その結果を図 3.6 に示す.

これにより, 上昇速度は 7.2 m/s, 落下速度は 59.1 m/s ということが分かった.

表 2.2: 機体諸元

区分	名称	重量 g
電装系	NAFT 電装	440
	AKTK 電装	460
	Garmin 66i	241
	SPOT GEN3	114
	ケーブル類	80
カメラ系	GoPro HERO9(マウント含む)	343
	GoPro HERO8(マウント含む)	175
	GoPro MAX	154
構造系	アクリルパイプ	895
	水密プレート (コネクタ側)	313
	水密プレート (非コネクタ側)	274
	内部フレーム	193
	電池ボックス (2 個)	193
	外部スペーサ	69
ペイロード重量合計		3898
パラシュート	パラシュート (ライン含む)	346
	バルーン	1500
全体重量合計		5744

表 2.3: あかとき電装諸元

名称	あかとき電装
重量	460 g
電源	3 セル LiPo, 11.1 V, 1300 mAh 型番: ET3S1300-35C メーカー: ETOP Power, 個数: 2 個
センサーその他 (種類)	GPS モジュール (ublox ZOE-M8Q) 気圧センサ (BMP280, BMP581) 6 軸センサ (MPU6050, ICM-30670) 放射線検出器 (自作) microSD
稼働時間	10 h
説明	放射線検出を行うあかとき側の電装

表 2.4: NAFT 電装諸元

名称	NAFT 電装
重量	500 g
マイコン	STM32L432KC
無線通信	LoRa, 920MHz, 1ch, ES920LR
電源	ニッケル水素電池, 1.2 V 190 mAh 個数: 6 本× 2
センサーその他 (種類)	GPS モジュール (GYSFDMAXB) 9 軸センサ (MPU9250) 気温センサ (MCP9700e) 気圧センサ (BMP280) オゾンセンサ (MIKROE-2767 MQ131) microSD
稼働時間	5 h
説明	オゾン測定をはじめとする データ取得用の NAFT 側の電装



図 3.5

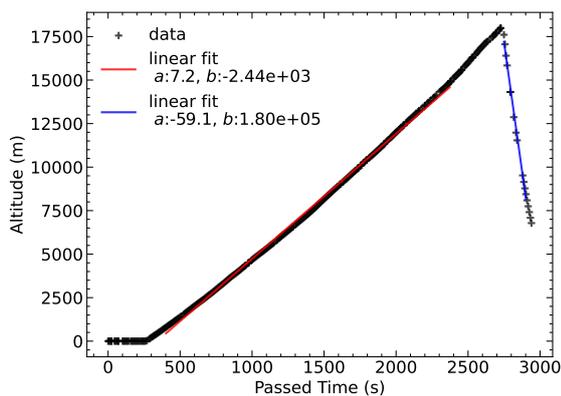


図 3.6

ているが、温度のデータをダウンリンクさせなかったため、温度校正ができていない。

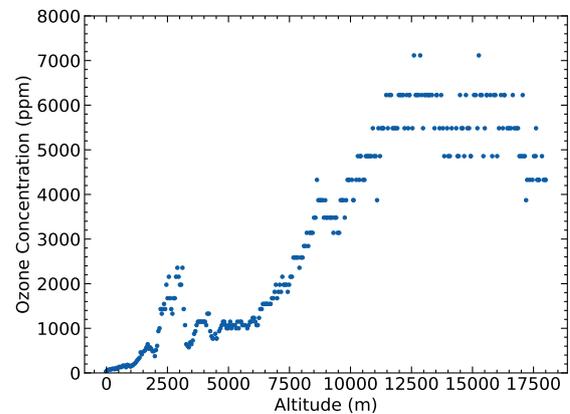


図 3.7

このデータによるとオゾン濃度と高度の相関係数は 0.645 である。そのためかなり相関関係があるといえる*5。

3.2.3 オゾン濃度

NAFT 側の地上局で受信したオゾンセンサーで取れた値は以下の図 3.7 のようになる。ただし、オゾンセンサーが温度によって大きく値が揺れることが確認でき

*5 相関係数の絶対値が 0.0 to 0.2 のとき「ほとんど相関関係がない」といい、0.2 to 0.4 のとき「やや相関関係がある」といい、0.4 to 0.7 のとき「かなり相関関係がある」といい、0.7 to 1.0 のとき「強い相関関係がある」と定義する。

4 考察

4.1 あかとき

あかとき電装の不具合の原因について考察する。あかとき電装の通信が途絶した原因は不明であるが、熱によるものではないかと推定される。本機体は図 3.4 に示すように、アクリルパイプを水密のために密閉する構造であった。そのため内部に熱がこもりやすく、また今回の機体では成層圏の低圧・低温環境および落下後の水密を重視するあまり、高度上昇までの直射日光による機体内の温度上昇を考慮できていなかったため直射日光により内部温度が非常に高くなってしまっていた可能性があると考えられる。打上げ当日は日差しが強く、機体全体を日傘により覆い直射日光を避けた運用を行っていたが、機体の外部で別のケースにより水密をしていた GoPro HERO8 が、打上げ直前に熱暴走してしまうという問題も発生していた。このことから、LoRa モジュールの熱保護機能が動作してデータのダウンリンクを行えなかったと考えられる。外気温が低くなる高度においてダウンリンクが一時的に再開されたタイミングがあったこともこの考察材料の一つである。

4.2 NAFT

4.2.1 位置情報

GPS の値が取得できなかったのは、地上局における通信が十分ではなかったこと、機体内のデータを得られなかったことが直接の原因だと考えられる。

4.2.2 上昇・降下速度

当日、上昇速度は 7.0 to 8.0 m/s になるように設定しており、その値と解析結果は大きく異なっていない。そのためデータ自体の信憑性は高いといえる。また落下速度が 59.1 m/s であったが、これは図 3.6 において約 7500 m までの高度しか取得できておらず、そのような上空では空気密度が小さいため落下速度は大きくなると考えられる。

4.2.3 オゾン濃度

オゾン濃度の測定結果について考察する。図 3.7 より高度 2000 to 3000 m でオゾン濃度が明らかに多くなっている。この理由として考えられることとして雲による影響、高度の較正による影響、外れ値が考えられる。まず雲として実際の天気から層積雲が見られた。これにより、他の部分とは異なった影響が表れてしまった可能性がある。次に結果 (3.2.3 節) に示したように、オゾンセンサは気温により較正する必要があったが、気温センサによるデータを受信していなかったため較正を行うことができなかった。これにより外れ値だと考えられる。

5 結論

本研究では、スペースバルーンを用いて成層圏におけるオゾン濃度および放射線強度の同時測定を目的として第 1 回えひめ南予共同気球実験に参加した。結果としてはデータを満足に得ることはできなかったが、実際に実験を行なうことによって気球運用についての多くの知見を得ることができた。さらに、今回の結果をふまえ、新たな機体には、

- 成層圏環境に耐えるかつ排熱の機能を持つ機体
- 通信機能をより拡充し、リアルタイムでのテレメトリを得られる機体
- 得られたデータに対して較正を行えるデータをすべて取得することのできる機体

が求められているとわかった。今回得られた経験を次回以降の実験に活かすことによって、学生主体でも成層圏における学術研究が可能になることが期待される。

6 謝辞

本プロジェクトは、名古屋大学学生後援会、埼玉大学学生後援会、愛南町商工会観光課商工観光係、愛媛県、HiSEP: ハイグレード理数教育プログラム、個人支援者 (以下敬称略. mwtnmik, _U_, Yuki Tommy, omoio, aioria_jpn, SusumuHara, moco_rocket, mobiletama, yuteshima, TOMOKI M, isk2006, Norihiko Tsuzuki, hir_matsui, sng11225, Tsuyoshi Kobu, baspoo, A_Kyoka, Sosuke_M, Shogo0000, msk310, TsuyoshiMiyazaki, takataka6530, Obaman22, ryos_phys, abekan, iszk2022, natanee, Kazuhiro_Iida, guestcc479e0bea54, Takuma Ishibashi, h0125, hokusai234, haru201503, Yuki Hama, tk_su0712, Takaki Sugimoto, kazu_0314, Keigo Sugimoto, ddd3h, oru_nekomimimincar, tk3_BunkaNet, 5tg, monkeymoney) の支援により実施されました。

えひめ南予共同気球実験実行委員会の皆様のご尽力により、打ち上げをさせて頂くことができました。心より感謝を申し上げます。

埼玉大学理工学研究科物質科学部門シニアプロフェッサー 井上直也 先生、同研究科人間支援・生産科学部門准教授 程島竜一 先生には、物品購入の支援や多くの御助言をして頂きました。この場を借りて感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] Organization), W. W. M. Scientific assessment of ozone depletion: 2018. *Global Ozone Research and Monitoring Project* (2018).
- [2] Miyoshi, Y. *et al.* Penetration of MeV electrons into the mesosphere accompanying pulsating aurorae. *Scientific reports* **11**, 1–9 (2021).
- [3] Hess, V. F. Observations in low level radiation during seven free balloon flights. *Phys. Zeit* **13**, 1084–1091 (1912).
- [4] 気象庁高層気象台. オゾンゾンデ観測 (2005). URL https://www.jma-net.go.jp/kousou/obs_second_div/sonde/sonde02.html.
- [5] 足立恭果 *et al.* オゾンと放射線の関わりを解き明かす— ANCO-project. In 大気球シンポジウム: 2022 年度 (宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 (JAXA)(ISAS), 2022).
- [6] 足立恭果 *et al.* ANCO-project 実績報告書 (2022).

ANCO-project,

ADACHI Kyoka^{1,9}, ISHIZAKI Taiki^{2,10}, SATO Masaki^{3,10}, SUDA Ryosuke^{3,10},
KIYOMOTO Takuto^{2,10}, NISHIHAMA Daisuke^{2,10}, MIYAZAKI Tsuyoshi^{2,10}, EBISAWA Yu^{4,10},
UI Ryosuke^{5,9}, IIDA Kazuhiro^{6,9}, KANEKO Takahiro^{6,9}, TOKUMITSU Kazuya^{6,9},
OBA Shogo^{6,9}, KATSUNO Taichi^{7,9}, YAMAMOTO Taiga^{6,9}, KAWASE Motoki^{8,9}

¹Department of Biological Science, School of Science, Nagoya University, Aichi, 464-8601, Japan

²Department of Physics, Faculty of Science, Saitama University, Saitama, 338-8570, Japan

³Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, Saitama, 338-8570, Japan

⁴Department of Mechanical Engineering and System Design, Faculty of Engineering, Saitama University, Saitama, 338-8570, Japan

⁵Department of Electrical Engineering, Electronics, and Information Engineering, School of Engineering, Nagoya University, Aichi, 464-8601, Japan

⁶Department of Mechanical and Aerospace Engineering, School of Engineering, Nagoya University, Aichi, 464-8601, Japan

⁷Department of Physical Science and Engineering, School of Engineering, Nagoya University, Aichi, 464-8601, Japan

⁸Department of Electrical and Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Aichi, 466-0061, Japan

⁹Nagoya-university Aerospace Flight Technology (NAFT), Nagoya University, Aichi, 464-8601, Japan

¹⁰Akatoki (AKTK), Saitama University, Saitama, 338-8570, Japan

