

大気圏観測のための気球搭載観測装置の開発：
LoRa通信実験と気球観測計画

笹岡由唯*1・上園波輝*1・上田真也*2・高田 拓*3

**Development of balloon-borne observation device for atmospheric observations:
LoRa communication test and the balloon observational plan**

Yui SASAOKA, Namiki UEZONO, Shinya UETA, and Taku TAKADA

Summary

We aim to develop an inexpensive, balloon-mounted observation device for atmospheric observation. We will propose a novel use of a sub-GHz band LoRa (Long Range) communication device to provide stable monitoring of orbital information during flight of a balloon. We conducted a long-distance communication experiment with the LoRa communication device on the ground, with a prospective range of up to 28 km, and demonstrated that it functions as a balloon-mounted communication device. We also examined, in detail, the observation plan for the balloon-mounted observation equipment incorporating the LoRa communication device, and confirmed that the observation plan, according to its purpose, is satisfactorily prepared.

1. はじめに

気象観測など利用されている気球を利用した観測では、ゴム気球にヘリウムを封入して放球することで、対流圏（～11km）を超えて、成層圏（11km～50km）に至る領域に、観測装置を飛行させることができる¹⁻³⁾。対流圏は、種々の気象現象が発生している領域であるが、雨雲などの発生は概ね6,000m以下の現象である。大気密度は高度とともに減少するが、高度20km程度の成層圏で地上の約10分の1程度の大気密度となる。地上から大気圏や天体などを観測する際に問題となるのは、雲や大気などによる可視光域を含む種々の波長域の吸収や遮断、大気のゆらぎなどによる撮像の精度の劣化である。一方で、大気の影響の全くない宇宙空間に観測装置を運ぶためには、ロケットで人工衛星を打ち上げる必要があり、莫大な費用がかかる。航空機は高度10km程度を定常的に航行しているが、近年は、テロなどへの対応のため、気軽に観測装置を持ち込んで観測をできる状況にならない。そのような中で、気球搭載の観測装置による利点はいくつかある。それは、高度30km程度までの対流圏・成層圏の直接観測を安価に実施することができること、天候に左右されずに、大気圏やその上空の天体などの撮像観測において、大気が薄い良い条件の下で実施できること、などである。

しかしながら、日本国内においては、人口密集地を避けた気球の着地が必要であることや、電波法による空中での通信の制限の問題のため、気球観測を容易に実施しづらくなっている。人口密集

*1 高知工業高等専門学校 電気情報工学科 5年生

*2 高知工業高等専門学校 教育研究支援センター 技術専門職員

*3 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 准教授

(E-mail: takada@ee.kochi-ct.ac.jp)

地を避けた着地のための試みとしては、パラフォイルを用いた自律航行などが計画されており、開発が進められている状況である^{4,6)}。無線通信については、電波法により、周波数や強度、利用エリアなどの細かい条件が決まっているが、特に上空での長距離通信ができる周波数帯で、誰もが利用しやすいものは少ない⁷⁾。

一方で、電子機器の小型軽量化、高性能化に伴って、モノのインターネットと呼ばれるIoT機器が普及してきた。IoT機器の通信には、低電力の上で、比較的長距離の通信が求められる。そのため、サブギガ帯などの特定小電力無線の無線システムであるLPWA (Low Power Wide Area) のLoRa (Long Range) やSIGFOXなどが利用されている。特定小電力無線は、電波の型式や周波数帯が決められており、空中線電力が小さいなどの制限がある代わりに、無線従事者資格や無線局登録の必要ない規格であり、利用者が使いやすい。LoRaは、LoRa Allianceが仕様化したオープンな通信規格であり、変調方式としてチャープ方式によるスペクトラム拡散変調を利用しているため、低電力による長距離通信を実現している。チャープ拡散では、送信時に搬送波のスペクトラムに対して、周波数を時間経過とともに連続的に変化させ、受信時に時間方向に拡散された信号を集めて変調する。そのため、特定の周波数信号による干渉や雑音の影響を軽減できる^{8,9)}。LoRa変調による通信では、一般に数kmから十数km程度の通信範囲が想定されており、30km程度までの長距離通信は十分可能とされている¹⁰⁾。最近では実際に防災目的などに利用され始めている¹¹⁾。しかし、長距離通信に関する報告例は少なく、通信状態の実態は不明な部分が多い。

本研究では、LoRa通信を用いた気球搭載観測装置の開発のため、LoRa通信による長距離通信実験を実施した。通信実験データを元に、LoRa通信を用いた気球観測計画について検討した。

2. 気球搭載観測装置について

2.1 気球搭載観測装置の構成

開発した気球観測装置では、観測装置を気球に搭載して成層圏まで上昇させた後、パラシュート降下させて海に着水させ、船で観測装置を回収することを想定している。気球搭載用の装置にはLoRa送信機を搭載し、LoRa受信機を搭載した地上受信用の装置を地上の複数の地点に設置する。図1に示すように、気球搭載用の装置は、オンボードコンピュータ、モバイルバッテリー、LoRa通信機(送信機)、GPSセンサモジュール、カメラ2台、温湿度・気圧センサモジュール、9軸センサモジュール、温度センサから構成される。地上受信用の装置は、オンボードコンピュータ、モバイルバッテリー、LoRa通信機(受信機)、GPSセンサモジュールから構成される。オンボードコンピュータにはRaspberry Pi Zero Wを使用した。GPSセンサモジュールより、飛行中および着水後の観測装置の位置情報(緯度、経度、高度)を取得し、温湿度・気圧センサモジュールより、高度推定に利用できる気圧を取得する。また、外気温の監視用として温度センサを装置外に、Webカメラは、雲などの監視用として天頂向きと側面の2方向に取り付ける。センサデータは1秒毎に、カメラ画像は30秒毎に取得し、SDカードにCSV形式で保存する。

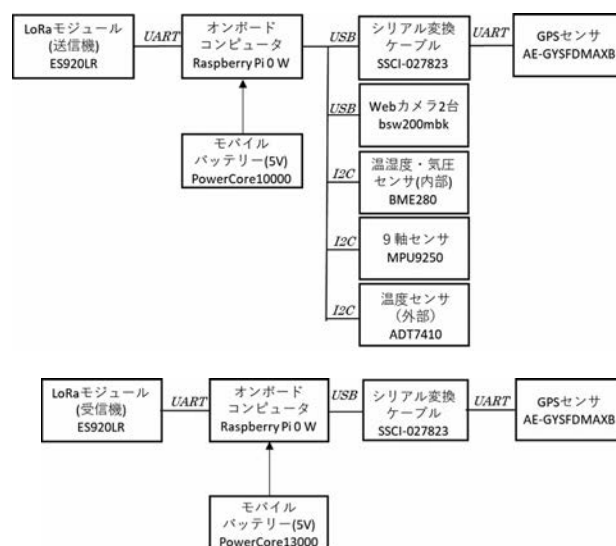


図1 観測装置の構成図：
(上) 気球搭載用、(下) 地上受信用

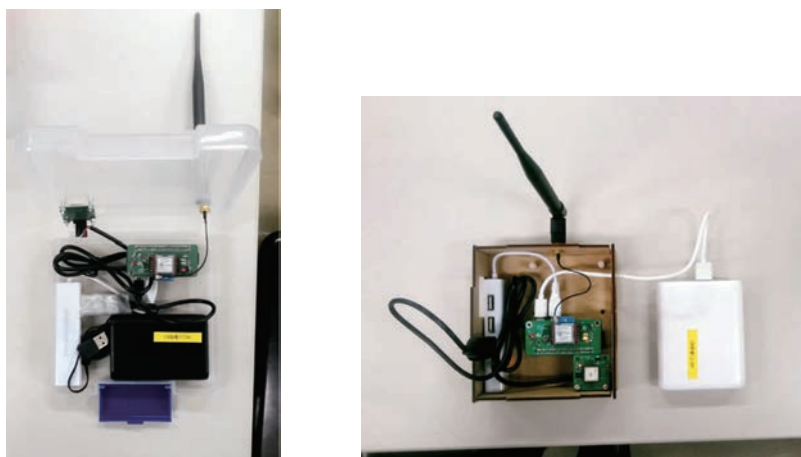


図2 LoRa通信機の外観：(左) 送信機、(右) 受信機

2.2 LoRa通信機について

データ通信には、920MHz帯のLoRaモジュールES920LRを用い、送信機と受信機の組み合わせとして利用する。図2に、開発した送信機と受信機の外観を示す。送信機は、3節での車載実験用に、小型のプラスチックケースに搭載したものである。

LoRa変調においては、信号の拡散具合を決める拡散率 (Spreading Factor, SF) と、帯域幅 (Band Width, BW) を選択できる。拡散率を上げるか、帯域幅を小さくするほど、雑音耐性が高くなり、通信距離が伸びるが、伝送速度が遅くなる。ただし、送信機、受信機ともに、同一の設定にしておく必要があり、基本的には実験の間中は一定の拡散率と帯域幅となる。また、受信強度RSSIは、受信した電波の強度を電力で示す指標であり、1 mWの電力を基準値とするデシベル (dB) で表した単位dBmを使用している。

表1に、ヘッダ情報を除く送信情報D= 50byteとしたときのデータ送信時間を示しており、本実験で使用した設定値を下線で示している。データ送信時間t [ms]は

$$t[\text{ms}] = (8 + 4.25) \left(\frac{2^{SF}}{BW} \right) + \left[8 + \max \left\{ \text{ceil} \left(\frac{8 \times (12 + D) - 4 SF + 28 + 16}{4 (SF - 2)}, 1 \right) (1 + 4), 0 \right\} \right] \left(\frac{2^{SF}}{BW} \right)$$

で表される。気球搭載観測装置では、取得データを5～10秒毎に送信することを考えており、データ送信時間は概ね2秒以内程度となることを想定している。

表1 送信情報50byte時のデータ送信時間¹²⁾

		拡散率 (SF)					
		7	8	9	10	11	12
帯域幅 (BW) [kHz]	62.5	308	534	903	1,642	2,957	5,587
	125	<u>154</u>	267	452	<u>821</u>	1,479	2,793
	250	77	133	226	411	739	1,397
	500	38	67	113	205	370	698

単位：ms

3. LoRa通信機による長距離通信実験

3.1 LoRa通信機による車載実験

LoRa通信機による通信距離や通信状態などを検討するために、地上での長距離通信実験を行った。実験では、気球に搭載予定の送信機を図3(左)に示すように車載し、高知県の土佐湾沿岸部(一部、自動車専用道路を含む)を走行させた。気球の飛行速度は高度や季節によっても異なる

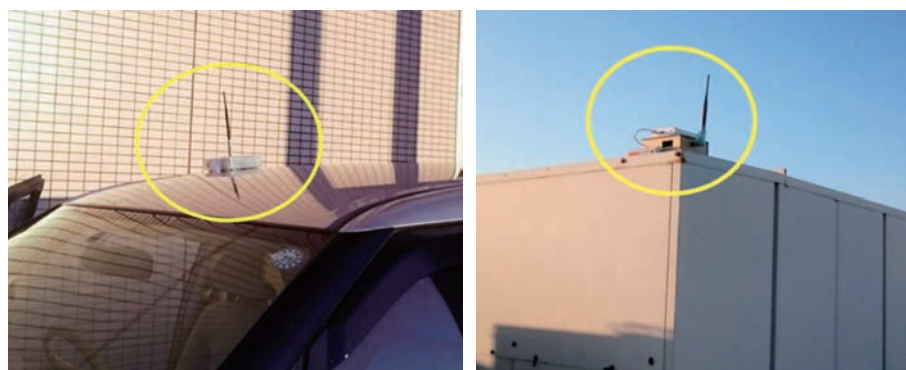


図3 LoRa通信機の設置状況：(左) 車載した送信機、(右) 校舎屋上に設置した受信機

が、通常20km/hから100km/h以上と考えられるため、気球搭載を想定した移動体通信の実験としては、妥当なものと考えている。送信機は、移動しながら取得したGPS位置情報などを、受信機へデータ送信する。受信機は、図3(右)に示すように、高知高専の校舎屋上の見通しの良い場所に設置した。LoRa通信機の設定に関しては、拡散率SFを10、帯域幅BWを125kHzとした。

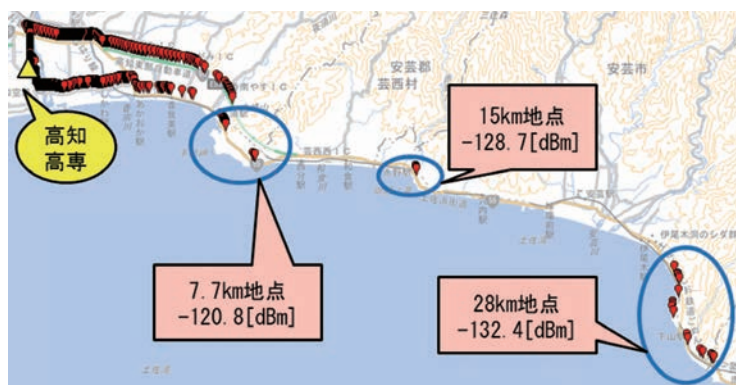


図4(上)に、2018年11月16日に実施したLoRa通信機を用いた車載実験の結果を示す。高知高専から7km地点までは、送信地点の局所的な状況によらず、概ね通信できていた。7km程度を超えて通信ができた地点は、7.7km、15km、26-28km地点であったが、いずれの地点も、海岸線近くで、見通しが非常に良い場所であり、最大通信距離は28kmであった。また、図4(下)に示すように、同程度の距離の位置であっても、周囲の障害物などの条件により、受信レベルは大きくばらつくことが分かった。使用しているLoRaモジュールの受信感度は、最小で-142dBm程度であるが、実際には-130dBmを大きく下回ると、不通となる通信が増加した。

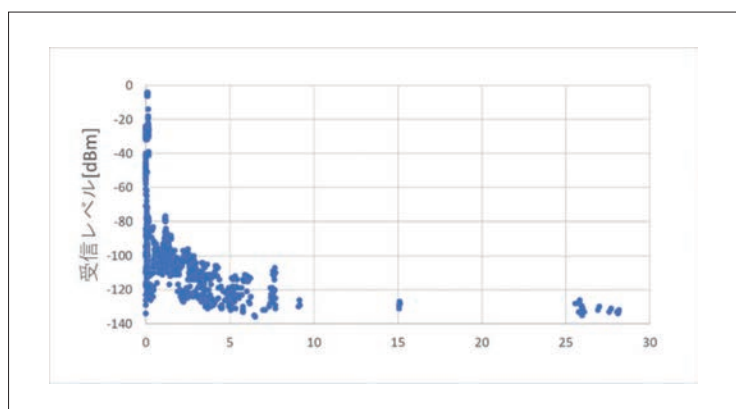


図4 車載実験(2018.11.16、SF=10)での(上) 通信位置と受信レベル(赤いマーカーは通信成功地点)、(下) 通信距離と受信レベルの関係

また、同じ仕様のLoRaモジュール(ES920LR)を搭載したLoRa通信機(LoRa Beacon/CL-MEAVE1)を用いた車載実験を2018年10月18日に実施しており、その結果を図5に示す。ただし、拡散率SFは7、帯域幅BWは125kHzとした。各位置における受信レベルの強度を色で示しており、不通の場合



図5 車載実験（2018.10.18、SF=7）での通信位置と受信レベル

は灰色の丸となっている。送信できた地点は、7 km程度より近い領域と、7.7km、26km程度の見通しの良い地点であった。図4と比較すると、15km地点や28km地点で通信が不通であり、拡散率が小さいことによる影響と考えられる。双方の実験において、通信成功時には、50byte程度の通信データは、完全に送信できているため、気球観測装置のためには、拡散係数10程度が良いと考えている。

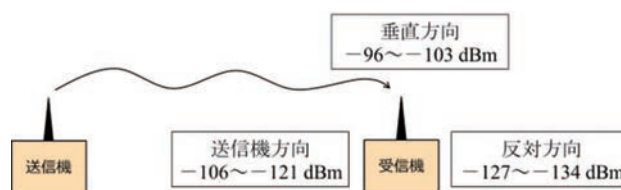


図6 受信機のアンテナの向きによる受信レベルの違い（4 km地点）

3.2 アンテナの指向性実験

車載実験とは異なる日程で、アンテナの向きによる受信レベルの状況を調べた。使用したアンテナの型式は、モノポールアンテナであり、アンテナの指向性は接地面より上側に半円を描くように広がっている。高知高専の校舎屋上に送信機を設置し、アンテナは鉛直上向きにした。一定距離の位置で、受信機のアンテナの向きを変化させて、受信レベルを測定した。図6に4 km地点での実験結果の概要を示すが、受信機のアンテナを変化させる向きは、送信機に対して垂直方向、送信機向き、送信機と反対向きの3パターンである。垂直方向の場合は-100dBm（最大で-90dBm）程度と非常に受信レベルが高かったが、送信機向きに倒した場合、10~20dBm程度下がり、送信機と反対向きに倒した場合、さらに10dBm程度下がり、受信レベルの下限に近付くことが分かった。また、図に示していないが、26km地点で同様の実験を実施した場合、アンテナの向きが垂直方向の場合のみ受信でき、アンテナの向きが送信機方向の場合は通信できなかった。気球搭載時は、アンテナの向きを制御することができず、風などの影響により、観測装置が揺れ、それに伴ってアンテナの向きが変化することが想定される。地上実験での受信レベルに比べて、若干小さくなることを考慮しておく必要がある。

4. 気球観測計画の検討

4.1 LoRa通信機による気球観測計画

今回の実験で、LoRa送信機から半径25km程度の見通し距離では、受信できることが確認できた。図7に気球観測装置の飛行予測、と地上に設置する予定の地上局（LoRa受信機）の通信圏（半径約25km）を示す。飛行予測には、ケンブリッジ大学の気球シミュレータを利用した¹³⁾。高知県四万十市の海岸で放球した場合の飛行経路を黒線で表しており、この場合の着水点は高知県の東沖の海上である。放球点から着水点までを網羅するように地上局（LoRa受信機）を設置した場合、4機程度の地上局で、気球飛行中の航路データを概ね受信できると考えている。実際には、気球は高度方向に25km程度未満の距離は離れているが、その代わりに、高高度ほど見通しの良い状態が確保されることになる。飛行中の航路情報が常時取得できる予定であり、船による観測装置の回収は十分可能であると考えている。ただし、気球の飛行経路予測は、季節などの条件で大きく変わるため、気球放球の1週間程度前の予測軌道を参考に、地上局の台数などを再検討する必要がある。



図7 気球の飛行予測と、地上局によるLoRa通信圏の例

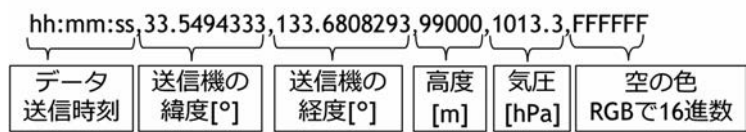


図8 送信する文字列の様式（51文字）

4.2 送信データの検討

LoRa変調による通信では、一度に送信できる容量は最大でも55byte程度であり、51文字の文字情報を送信することにした。図8に示すように、気球からの位置情報として重要なデータ値を選び出し、送信データの文字列の様式を決めた。送信データとしては、データ送信時の秒単位の時刻、GPSセンサから得られた位置情報（緯度、経度、高度）、気圧センサの気圧値、カメラから得られた代表的な空の色のデータである。緯度と経度に関しては、小数点

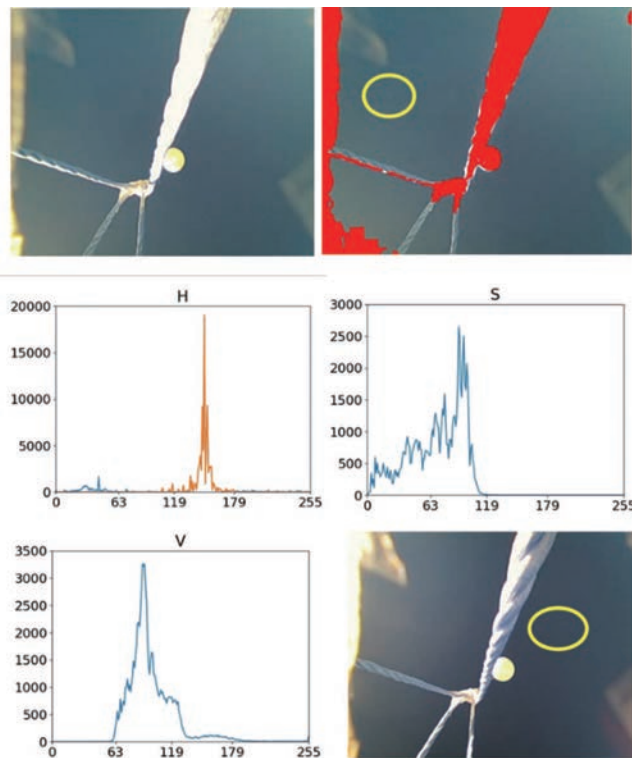


図9 代表的な空の色の抽出手法：（左上）2,000mでの空の画像、（右上）青系以外の色を差し引いた画像、（左中）空画像（2,000m）での色相の頻度分布（橙：青系色 青：青系以外の色）、（右中）空画像（2,000m）の青系色での彩度の頻度分布、（左下）空画像（2,000m）の青系色での明度の頻度分布、（右下）6,000mでの空の画像

以下7桁の値であれば、1 m以内の位置精度となり、高度に関しても1 m単位の値とした。なお、代表的な空の色に関しては、4.3で詳しく述べる。

4.3 雲上認識のための画像処理

気球観測において、特に曇りなどの際に、雲を抜けたかどうかを知ることは重要である。そのため、観測装置に搭載するカメラで撮像した画像から、代表的な空の色を抽出することにした。空の青さは、青色を基準として、明るさなどを変化させながら、連続的に変化しているように見える。そのため、画像の色情報を、HSV色空間の色相 (H)、彩度 (S)、明度 (V) に変換し、色に対応する色相の値に対して、基準とする青系の色の範囲で、彩度と明度の連続性を確認し、最頻値をその時の代表的な空の色とする。



図10 抽出した最頻値の空の色、(左) 2,000m: (H,S,V) = (139,89,115)、(右) 6,000m: (H,S,V) = (149,91,90)

図9で、代表的な空の色の抽出方法を具体的に説明する。図9 (左上) は、下村ら (2018) で得られた気球観測による、高度約2,000mでの天頂画像である³⁾。カメラは観測装置の上面に設置しており、カメラの視野内に装置を吊るす気球とロープが入る。図9 (左中) に、この画像での各ピクセルの色相の値の頻度分布を示す。256段階の色相値の場合、H=100~180が青系の色に相当する。この範囲で、Hの値は1つのピーク値をもつ連続した値となっており、概ね、空の色を認識できていると考えられる。天頂画像上で、色相の値が100~180以外のピクセル値を赤色にしたのが、図9 (右上) であるが、空以外の部分が概ね、取り除かれていることが分かる。色相H=100~180である各ピクセルに対して、彩度 (S) と明度 (V) の頻度分布を示したのが、図9 (右中、左下) である。彩度と明度の頻度分布で、各々2つのピークが見られるが、頻度が大きい方のH、S、Vの値を抽出することにした。得られた色は、図9 (左上) の黄色い丸で囲んだ色に相当する。この結果に関しては、画像上の代表的な空の色として妥当な範囲の色を抽出できていると考えている。同様に、高度約6,000mでの天頂画像 (図9、右下) に対して、同じ手法で抽出した代表的な空の色を黄色い丸で示す。高度約6,000mの画像に関しても、妥当な空の色を抽出できたと考えている。参考までに、図10に、今回抽出した2つの色を示す。比較すると、高度2,000mより、高度6,000mの空の色の方が濃い青になっており、実際の空の色が高度とともに黒に近づいていくことと合っている。H S Vの値の比較からは、高度が高いほど、色相の値が大きく (紺色に近づいており)、明度の値は小さく (暗く) なっていることが確認できる。

気球観測においては、天頂向きカメラで、空を常時撮像し、得られた画像の処理をオンボードコンピュータで行う予定である。代表的な空の色をモニターし続けることで、雲を抜けたかどうかの判断が可能となり、成層圏よりも高い場所での現象や天体の撮像を目的とする際に、撮像タイミングを判断できる。また、代表的な空の色のデータを地上に送信することで、準リアルタイムに、気球の状況を地上に伝えることができる。

4.4 気球計画の展望

今回開発した気球観測装置を用いた観測計画について考察する。気球観測で対象とする現象は様々であり、気球の到達すべき高度や飛行経路は、対象となる現象に合わせて調整する。通常、ゴム気球を使用した気象観測は、成層圏上部で、気球内部と外部との気圧差によりゴムが破裂する。この破裂は、気球と観測装置全体の重量、気球に封入するヘリウムの容積、ゴム気球自体の内容積などで決まる。ヘリウムの容積が小さいと浮力が小さく、最高高度に達するまでに、水平方向に流

されやすくなる。一方、ヘリウムの容積が大きいと、上昇速度は速いが、比較的低い高度で気球が破裂することになる。海上に着水した観測装置を回収することを考えると、水平方向に流される距離は短い方が良い。

そこで、図11に示すように、次の3つの観測パターンを考えている。1つは、高度25km程度以上の成層圏まで到達させるパターンである。この場合の利点は、最高高度に達することであるが、不利な点は着水点が遠くなり、観測装置の回収が難しくなる点である。2つ目は、大気密度が十分小さい高度15km程度に至った時点で、気球を切り離し、パラシュート降下させるパターンである。航空機でもなかなか飛行しない領域の観測ができる上に、1つ目のパターンに比べて、観測装置の回収がしやすくなる。3つ目は、対流圏の雲を完全に抜けた後に、高度7～10km程度で気球を切り離し、パラシュート降下させるパターンである。天候に関わらず、雲上での観測を実施できる上、着水点までの水平距離をかなり短くすることができ、観測装置を回収しやすい。今後、気球の切り離し機構を実装することで、今回開発したLoRa通信機を組み込んだ気球観測装置により、種々の観測対象に合わせた気球観測計画を実施できる体制が整うことになる。

5. まとめ

本研究では、大気圏観測のための安価な気球搭載観測装置の開発を目指しており、特に、気球飛行中の軌道情報を安定的に監視するために、920 MHz帯のLoRa通信機を新たに利用した。LoRa通信機による、地上での見通し28 km程度までの長距離通信実験を実施し、移動体である気球搭載通信機として機能することを実証した。実験では、変調方式に関わる拡散率の値による通信距離の違いや、アンテナの向きによる受信レベルの差異が見られることを確認できた。また、LoRaによる送信データ量は少ないため、適切な気球の位置情報を少ないデータ量で送られるように様式を検討した。また、気球が雲上へ出たことを確認するために、天頂カメラの画像処理により、代表的な空の色を抽出する手法を開発した。以上を踏まえて、LoRa通信機を組み込んだ気球搭載観測装置による観測計画について、3つのパターンについて検討し、目的に応じた観測計画を実施できる準備が整っていることを確認した。

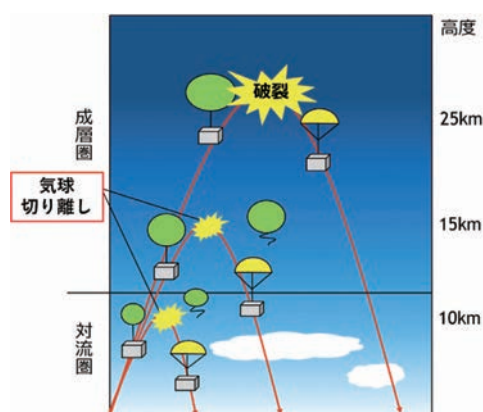


図11 気球計画のパターン例

謝 辞

国立研究開発法人情報通信研究機構の村田健史研究統括には、LoRa通信機を用いた実験に関して、有用なアドバイスを受けましたので、感謝いたします。本研究での機器開発に関して、一般財団法人WNI気象文化創造センターから助成を受けました。LoRa通信機に関して、国立研究開発法人情報通信研究機構の統合テストベッド (TB-0163) を利用しました。本研究はJSPS 科研費JP18H00542の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 横山佳紀、大国友篤、平尾千紗都、和歌山大学宇宙開発プロジェクト（WSP）による2012年度成層圏バルーンサット放球実験報告書、和歌山大学宇宙教育研究所紀要、2、55-68、2013
- 2) 島野侑加、大国友篤、横山佳紀、バルーンサット共同実験、和歌山大学宇宙教育研究所紀要、4、55-64、2015
- 3) 下村克樹、坪内麟太郎、山田磨耶、上田真也、高田拓、大気圏観測のための気球搭載観測装置の開発と放球実験結果：予測経路との比較とデータ通信に関する検討、高知工業高等専門学校学術紀要、63、63-72、2018
- 4) 河野紘基、枝本雅史、平塚丘将、山本真行、超小型気球をキャリアとする緩やかな着陸点誘導型ペイロードシステムの検討および開発、平成27年度大気球シンポジウム、isas15-sbs-025、2015
- 5) 平塚丘将、河野紘基、山本真行、超小型気球の回収に最適化された制御降下式ペイロードシステムの開発と飛行試験結果の評価、宇宙航空研究開発機構研究開発報告: 大気球研究報告、JAXA-RR-16-008、81-100、2017
- 6) 平塚丘将、河野紘基、山本真行、超小型気球のための準着陸誘導型ペイロードシステムの開発と検討、平成29年度大気球シンポジウム、isas17-sbs-019、2017
- 7) 小野文枝、三浦龍、小型無人航空機の無線通信技術の概要、IEICE Fundamentals Review、12(1)、7-11、2018
- 8) 石黒丈博、新たな920MHz帯電子タグシステム等の導入のための制度整備について、電子通信情報学会通信ソサイエティマガジン、12(1)、78-82、2018
- 9) 鈴木一哉、森本昌治、岩井孝法、IoT技術の最新動向、電子通信情報学会通信ソサイエティマガジン、45、12-20、2018
- 10) AmbientData Inc.、<https://ambidata.io/examples/lora/>（閲覧：2017年11月16日）
- 11) 秋山演亮、山口耕司、吉村元吾、菅原寛明、田中健貴、IoT機器（衛星）を利用した低コストな現地観測情報収集システムに関する実証試験、平成30年度砂防学会研究発表会概要集、V-094、2018
- 12) 株式会社EASEL、各種資料ダウンロードページ、<http://easel5.com/download/>（閲覧：2017年11月16日）
- 13) Cambridge University Spaceflight Landing Predictor、CUSF、<http://predict.habhub.org/>（閲覧：2017年11月16日）