

選考委員特別賞

佐々木嘉和賞

賞金 5 万円・アメリカ研修旅行

火山雷観測装置

「ボルカ」の制作と観測

鹿児島県立錦江湾高等学校

天文物理学部

桜島の降灰測定器（降灰君）の開発

鹿児島県立錦江湾高等学校 化学研究部
1年 神田 直人

2年 荒川 和樹・中村 美希・迫田 ひまわり・森 亮人

連絡責任者 教諭 河野裕一郎 : yuichi_chemistry@yahoo.co.jp

【住所】〒891-0133 鹿児島県鹿児島市平川町 4047 番地 Tel099-261-2121

1. 動機及び目的

2010年4月14日にアイスランド共和国エイヤフィヤトラヨークトル火山が爆発し、30ヶ国の空港が閉鎖し、1週間で航空機10万便が運休する事態になった¹⁾。また、鹿児島の活火山である桜島では、100年前に起こった大正噴火で噴煙が8000mまで到達し大きな被害があった²⁾。Fig.1のように現在も桜島は噴火を続け、平成25年度に観測点62ヶ所で約302g/m²の降灰量³⁾があった。その観測点の一つである鹿児島気象台では、Fig.2のようにステンレス製のトレーに24時間のうちに積もった灰の質量を測り、それを1m²あたりに換算し積もったものを降灰量としている。この方法では降灰量を測るには良い方法かもしれないが、空気中に浮遊している桜島の灰を測ることはできず、また、雨天時は火山灰を乾燥させてから質量を測るという原始的な方法である。そして、浮遊している火山灰量についての先行論文は少なく、実用化に至っていない⁴⁾。また、降灰君によって測定した火山灰の浮遊量を調べることにより、ヒトが吸う火山灰量についても考察する。

本研究は空気中に浮遊している桜島の灰をフィルター付きの吸引ポンプで集め、そのフィルターを自作の簡易反射型吸光度計で、降灰量測定機器（以降：降灰君）を目的とした。



Fig.1 錦江湾高校から見た桜島の噴火



Fig.2 降灰量の装置とステンレス製のトレー（鹿児島気象台）

2. 測定原理および降灰君の作製

2-1 測定原理

測定原理には、ランベルト・ベールの法則を用いた。実験装置の模式図を Fig.3 に示した。外部の光を遮断するために暗所ですべての実験は行った。

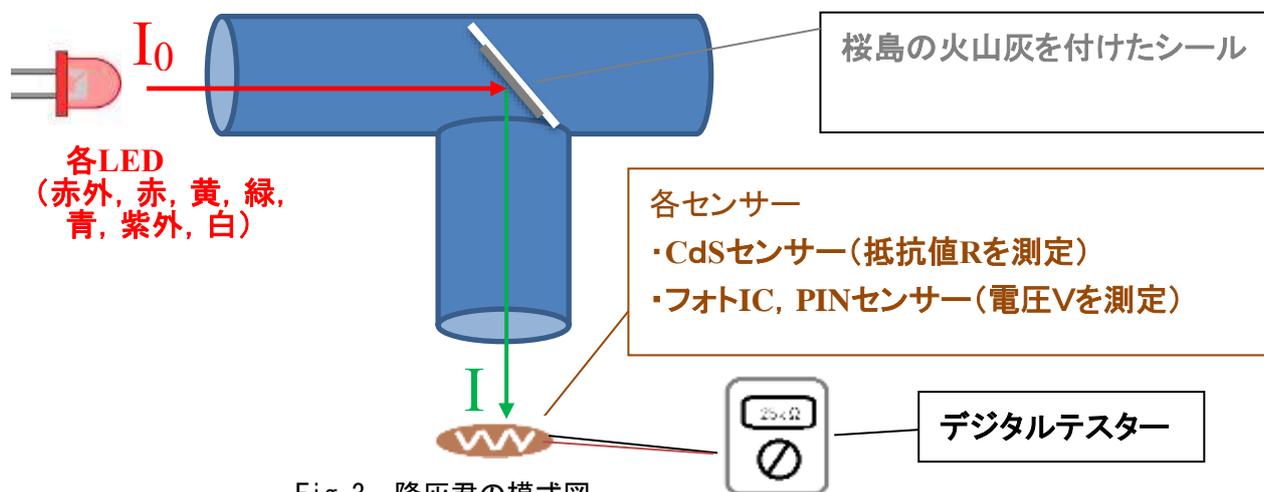


Fig.3 降灰君の模式図

光の強さ I_0 , I とすると,

$$I = I_0 \times 10^{-\varepsilon c l} \dots \dots \dots \textcircled{1} \quad \text{ここで } \varepsilon : \text{ 珉吸光係数、} c : \text{ 灰の質量、} l : \text{ 珉の長さ}$$

CdSの抵抗値 R は、光の強さ I のときに R , I_0 のときに R_0 とすると

$$R = R_0 I^{-\gamma} \dots \dots \dots \textcircled{2} \quad \text{ただし、} \gamma : \text{ CdSの係数 (1 ~ 0.5)}$$

②式より両辺対数を取り、整理すると

$$\log R = \log R_0^{-\gamma} (\log I_0 - \varepsilon c l)$$

さらに整理して $\log R = A + Bc \leftarrow$ 一次関数

以上より、CdSの抵抗値 R の対数は灰の質量 c に比例する。 $\log R \propto c$ という事がわかる。

2-2 降灰君の作製

参考文献^{5,6)}をもとに、加工がしやすく、製品の寸法など正確な水道管φ30mmPVC製およびジョイント管で本体を作った。フィルムケースに光源 5mmLED (赤外, 赤, 黄, 緑, 青, 紫外, 白), 入手可能な光センサー (硫化カドミウム (CdS) センサー, フォト IC センサー, PIN センサー) を試してみた。センサーからの各信号は、デジタルテスター Metex M-3860M で測定した。Fig. 4 に示す降灰君の1号機は、安定性や検量線の直線性が悪かった。2号機では、センサーのはんだ付けを行い、センサーとLED部分にスリットを付け、調節したが良い結果が得られなかった。そこで Fig. 5 にある3号機では光源部分とセンサー部分から光が入るため、キャップを付けたところ、安定性や検量線の直線性でよい結果が得られた。また、用いた電子部品は秋月電子より購入し、その型番・LED については最大波長、センサーについては最大感度波長を Table. 1 にまとめた。



Fig. 4 降灰君 (1号機)

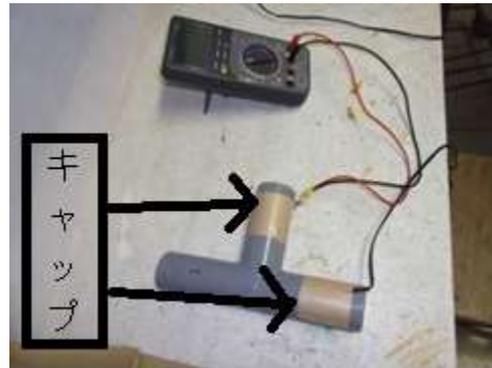


Fig. 5 降灰君 (3号機)

電子部品		製造会社	型番	最大波長 λ_{max}
5mmLED	赤外 LED	OptoSupply	OSI3CA5111A	850nm ($I_f=50mA$)
	赤 LED		OSHR5161A-QR	625nm ($I_f=20mA$)
	黄 LED		OSYL5111A-TU	590nm ($I_f=20mA$)
	緑 LED		OSPG5111A-34	525nm ($I_f=20mA$)
	青 LED		OSUB5111A-ST	470nm ($I_f=20mA$)
	紫外 LED		OSV5YL5111A	405nm ($I_f=20mA$)
	白 LED		Ospw5111A-Z3	混合色
センサー	CdS センサー	Macron International Group Ltd.	MI527	最大感度波長: 540nm
	フォト IC センサー	浜松ホトニクス株式会社	S9648-100	最大感度波長: 560nm
	PIN センサー		S2506-02	最大感度波長: 960nm

Table. 1 用いた各電子部品 (秋月電子より購入)⁷⁾

3. 結果と考察

3-1 レーザープリンターを用いた降灰君の検証

方法

ワードを用いて、RGB が (75. 75. 75) から (255. 255. 255) の 9 種類の白黒の濃淡の異なる紙をレーザープリンター Canon LBP8610 で印刷し、反射型吸光度計の各 LED の色、各センサーを変え実験した。

結果

RGB 値に対し、各センサで測定した抵抗値の対数 $\log R$ をプロットした。Fig. 6 はそのうち最も直線性が良かった CdS の場合を示す。結果として CdS センサーを使ったグラフの直線性が良く、青色 LED との組み合わせが最も直線性が良かった ($R^2=0.99$)。

考察

レーザープリンターのトナー（スチレン-アクリル製エステル共重合体 45-45%に酸化鉄 Fe_3O_4 40-50%や固形パラフィンや非晶質シリカを添加したもの⁸⁾）と火山灰は異なるが、LED と CdS センサーの有効性を確かめることができた。

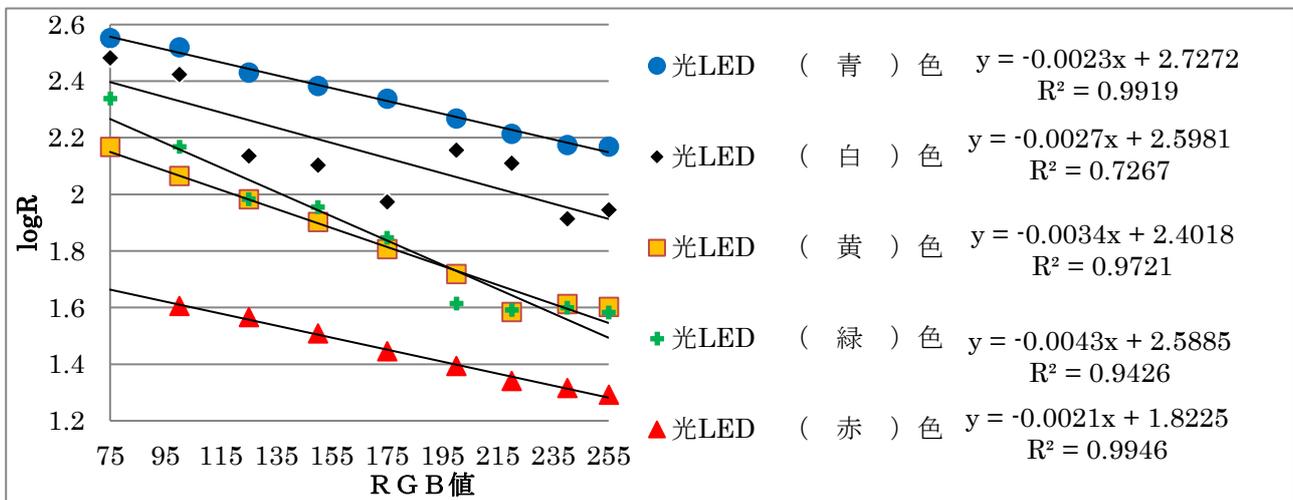


Fig. 6 各 LED における RGB 値と CdS の抵抗値の対数

3-2 降灰君を用いた火山灰量の測定

方法

火山灰の粒子径と CdS センサーの感度の関係を調べるために、ふるいにかけて火山灰をシールに付け、電子天秤 Shimadzu LIBROR AEL-200 で質量を測定し、降灰君の CdS センサーで抵抗値を測定する。その後、シールから火山灰を少しずつ取り除き、それを 7 回程度繰り返した。その結果を横軸に火山灰の質量 (g)、縦軸に抵抗値の対数 $\log R$ をプロットした。その一例を Fig. 7 に記した。

結果

各 LED における火山灰の質量と CdS センサーの抵抗値の対数の一次関数から求めた直線性を示す R^2 の値を Table. 2 にまとめた。粒子径が最も大きい 125~250 μm の火山灰では、赤色 LED (最大波長 $\lambda_{max}=625nm$) を用いた時が直線性が良く ($R^2=0.99$)、LED の λ_{max} が短くなるにつれ、直線性が悪くなった。粒子径が最も小さい 63 μm 以下の火山灰では、青色 LED の直線性が最もよかった ($R^2=0.71$)。また、ふるいをかけなかった火山灰では白色 LED が最も直線性が良かった ($R^2=0.99$)

考察

Table. 2 から火山灰の粒子が大きいほど長波長の光を散乱し、粒子が小さいほど短波長の光を散乱すると考えられる。。様々な粒子径の火山灰では様々な波長でピークをもつ白色 LED が有効という事

がわかった。よって、火山灰の質量測定には、白色 LED と CdS センサーの組み合わせを用いることにした。また、赤外 LED と紫外 LED に関しては、CdS センサーは硫化カドミウムを使用した光センサーで、光の強さに応じて電気抵抗が低下する抵抗器で人の目の特性に近い特性（緑色の光に対して高感度）を持っており⁹⁾、赤外 LED（ $\lambda_{max}=850\text{nm}$ ）と紫外 LED（405nm）付近に対しては、感度が悪いため、良い結果が得られなかったと考えられる。

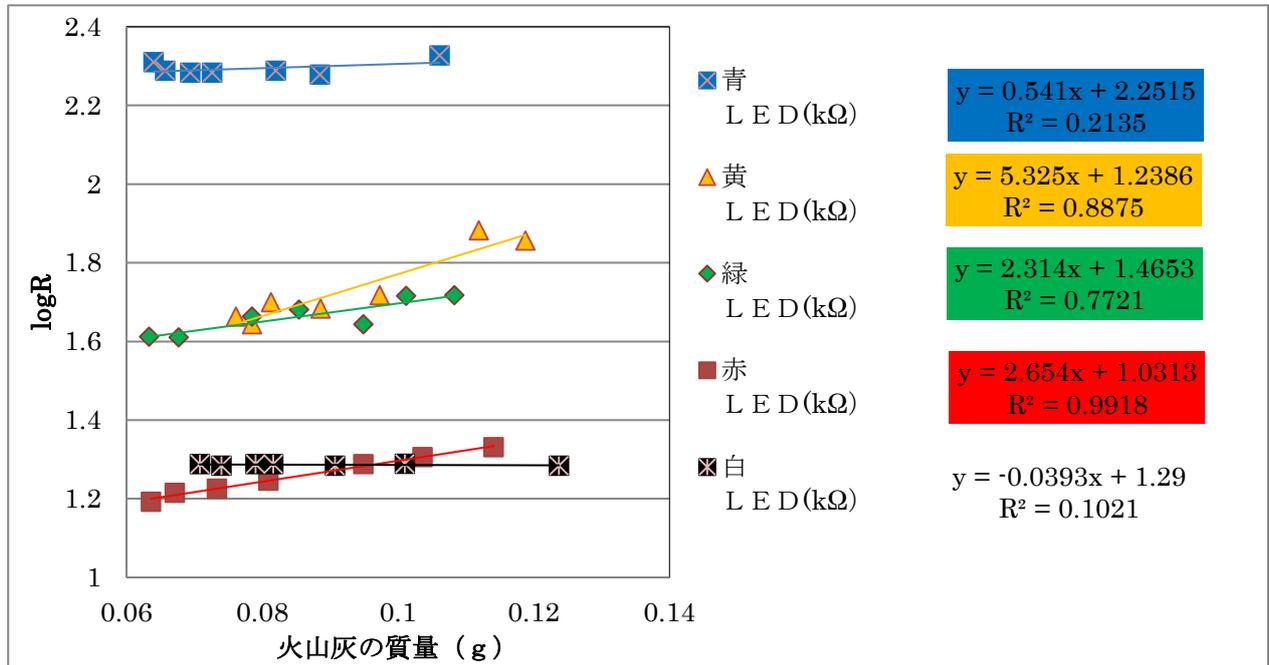


Fig. 7 各 LED における火山灰(125~250 μm)の質量と CdS の抵抗値の対数

光源 (LED)		赤外	赤	黄	緑	青	紫外	白
LED の最大波長 λ_{max} (カタログ値 ⁷⁾)		850nm	625nm	590nm	520nm	470nm	405nm	混合色
火山灰の 粒子径	125~250 μm	0.21	0.99	0.89	0.77	0.21	0.95	0.10
	63~125 μm	0.89	0.68	0.11	0.16	0.96	0.36	0.65
	~63 μm	0.20	0.31	0.15	0.45	0.71	0.08	0.60
	ふるいせず	0.92	0.81	0.59	0.36	0.78	0.42	0.99

Table. 2 R²のまとめ

3-3 火山灰中の鉱物の観察と同定

方法

火山灰の鉱物成分の観察と同定をするために、参考文献¹⁰⁾をもとに蒸発皿に入れ濁りが無くなるまで押し洗いした火山灰を超音波洗浄器 CS-55（ヴェルヴォクリア社製）にかけ、その後乾かし、実体顕微鏡 STZ-40TBITaN（shimadzu 社製）で観察した。その鉱物の写真及び組成について以下の Table. 3 にまとめた。

結果

粒子径が大きくなるにつれて無色鉱石（石英と長石の和）の割合が大きくなっている。逆に大きさが小さくなるにつれて有色鉱石（輝石と磁鉄鉱と火山灰ガラス）の割合が大きくなっている。

考察

一般に、石英が含まれると低波長で反射率が高いと言われている¹¹⁾。3-2の考察で述べたとおり、

粒子径が小さくなることにより低波長の光を反射した。さらに石英の含有量が大きくなるによる反射率の増大によって、63 μ mでは光源が青色LEDの方が直線性が良いという結果になったと考えられる。

粒子径		125~250 μ m	63~125 μ m	~63 μ m	ふるいせず	
実体顕微鏡 の写真						
組成 (%)	無色 鉱物	石英	21.6	38.6	39.2	33.3
		長石	3.6	0.3	0	0
		計	25.2	38.9	39.2	33.3
	有色 鉱物	輝石	26.4	30.4	25.0	38.1
		磁鉄鉱	47.5	29.6	35.7	28.5
		火山ガラス	0.9	1	0.1	0.1
		計	74.8	61.0	60.8	66.7

Table. 3 火山灰の写真と組成 (%)

3-4 降灰君の再現性及び検証

3-4-1 降灰君の再現性

方法

上記の3-2で良い結果が得られた白色LEDと火山灰の粒子径ふるいせず ($R^2=0.99$) について実験を8回繰り返した。

結果

エクセル 2007 を用いて検量線の傾き及び R^2 の AVE: 平均値, SD: 標準偏差, CV: 変動係数の結果を Table. 4 にまとめた。

考察

傾きに関しては CV の値がやや高いが、再現性で注目すべき R^2 値については CV 値が低いため、降灰君の再現性が実証された。

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	平均 AVE	標準偏 差 SD	変動係数 CV(%)
傾き	4.16	4.53	4.01	5.30	4.66	6.34	4.99	6.53	5.06	0.881	17.4
R^2	0.97	0.93	0.86	0.99	0.92	0.99	0.97	0.98	0.95	0.043	4.5

Table. 4 降灰君の再現性

3-4-2 降灰君の検証

方法

火山灰を付けたシールを Canon MP710 のスキャナー機能で 300dpi・カラー・TIFF 方式で読み込み、ImageJ (アメリカ国立衛生研究所 NIH で開発されたオープンソースでパブリックドメインの画像処理ソフトウェア) の Edit/Invert コマンドを使い色を反転したのち、Analyze/Set Measurements コマンドを使い、明度 V を求めた。

結果

ImageJ では明度Vは $V = (R + G + B) / 3$ として計算している¹²⁾。横軸にシールに付けた火山灰の質量、縦軸に明度V及び白色LEDにおけるCdSセンサーの抵抗値(k Ω)をとったグラフをFig. 8に記した。また、横軸に白色LEDにおけるCdSセンサーの抵抗値(k Ω)、縦軸に明度VをとったグラフをFig. 9に記した。

考察

Fig. 8に関して、抵抗値R及び明度Vの両方とも直線性が良かった。Fig. 9の抵抗値Rと明度Vを比較した結果、直線性もよく、正の相関性が見られ、簡易反射型吸光度計である降灰君がフィルターで集めた火山灰の空気中の質量測定に有効と考えられる。

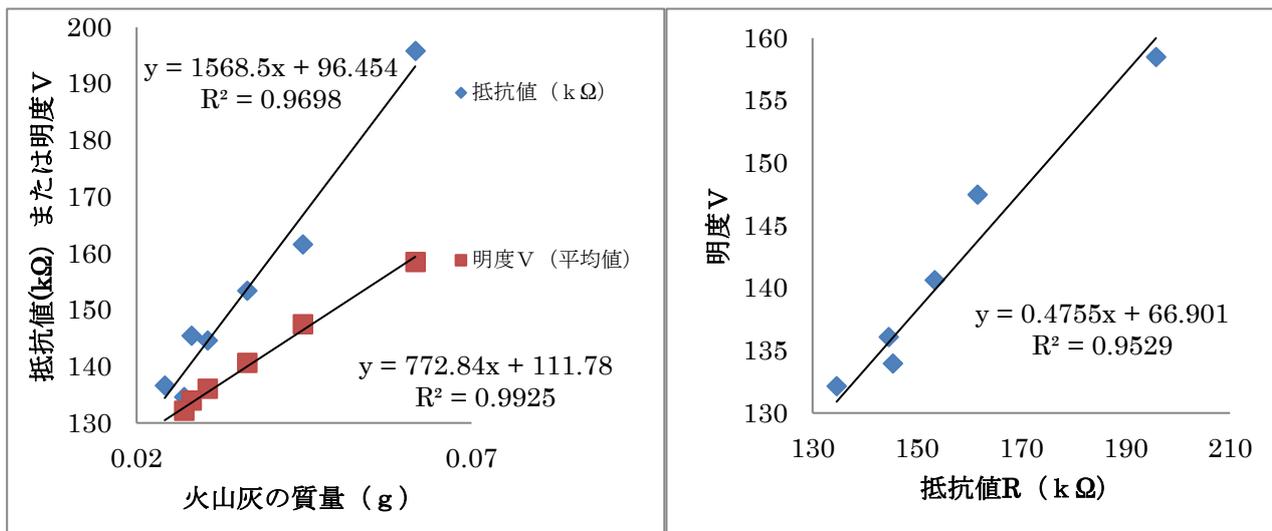


Fig. 8 火山灰の質量 (g) と抵抗値(k Ω) または明度V

Fig. 9 抵抗値 R(k Ω) と明度V

3-4-3 回折格子による検証

方法

Fig. 10 のようにデジタルカメラ Canon IXY80 と格子定数 $1.0 \times 10^{-6}m$ の回折格子フィルムを取り付けた降灰君を木の板に固定し、スリットを加えて実験を行った。しかし、5mm 白色LED では、2ルーメンと光の強さが弱く、反射光を回折格子フィルムで分光することができなかつたため、定電流方式のLEDドライバ(OptoSupply社製 OSMRQ16-W1213)を接続した200ルーメンの3Wパワー白色LED(OptoSupply社製 OSW4XME3C1S)を用いた。当初パワーLEDが発熱し、ポリ塩化ビニル製の降灰君の一部が溶けた。そのため、一元玉を4枚重ねた放熱板を作製しパワーLEDの下に設置した結果、無事に測定できた。デジカメは、マニュアルモード (ISO400, フラッシュ禁止, マクロ, 露出補正なし, 620万画素) で設定し撮影した。その撮影した画像をFig. 11に示した。JPEG方式で得られた画像は、ImageJのAnalyze/Plot Profileコマンドで数値化し、エクセルファイルとして処理をした結果をFig. 12にまとめた。また、赤色レーザー(650nm)、緑色レーザー(532nm)で2点校正した。火山灰を取り付けていないシールをベースラインとして、用いた。

結果

Fig. 11にあるように、各粒子径で450nm付近にピークを持つ、似たような波形のグラフになった。

考察

青色LEDの最大波長である470nm付近では粒子径63 μm の火山灰の明度Vが高く、それに比べ粒子径250nmでは低い値になった。粒子径63 μm は波長が低い青色の光を反射すると考えられ、「3-

2の降灰君を用いた火山灰量の測定」の結果を支持することになった。

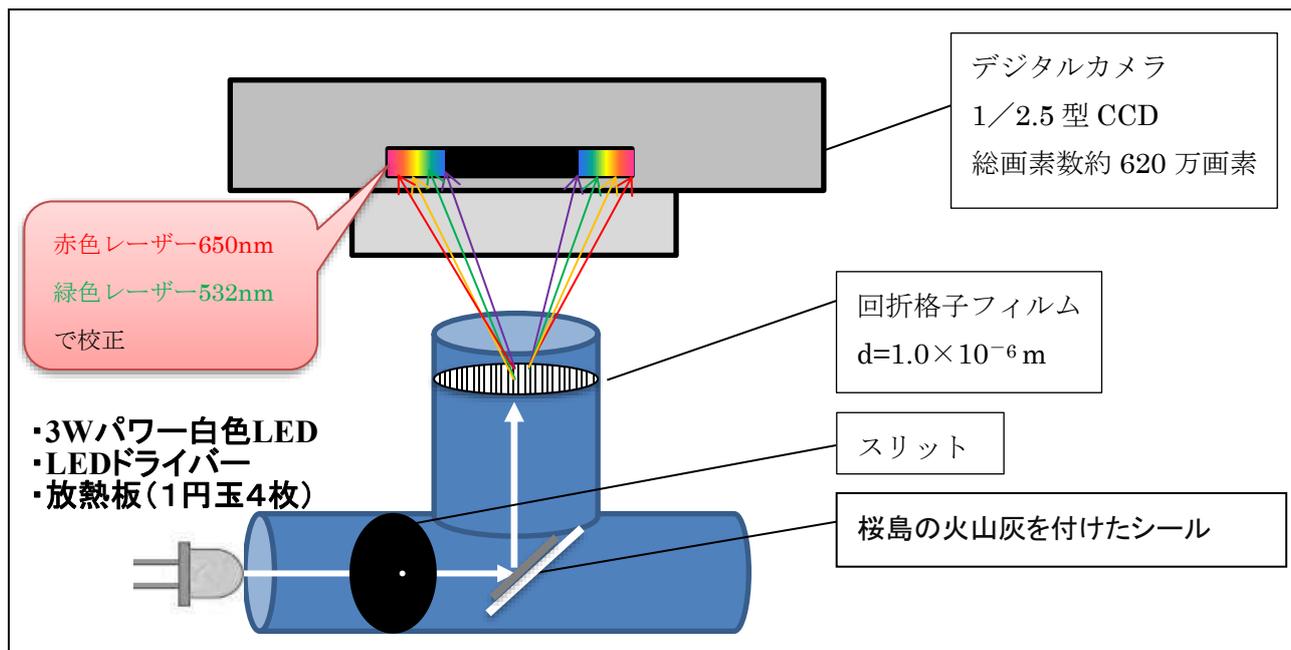


Fig. 10 回折格子フィルムによる自作分光装置図

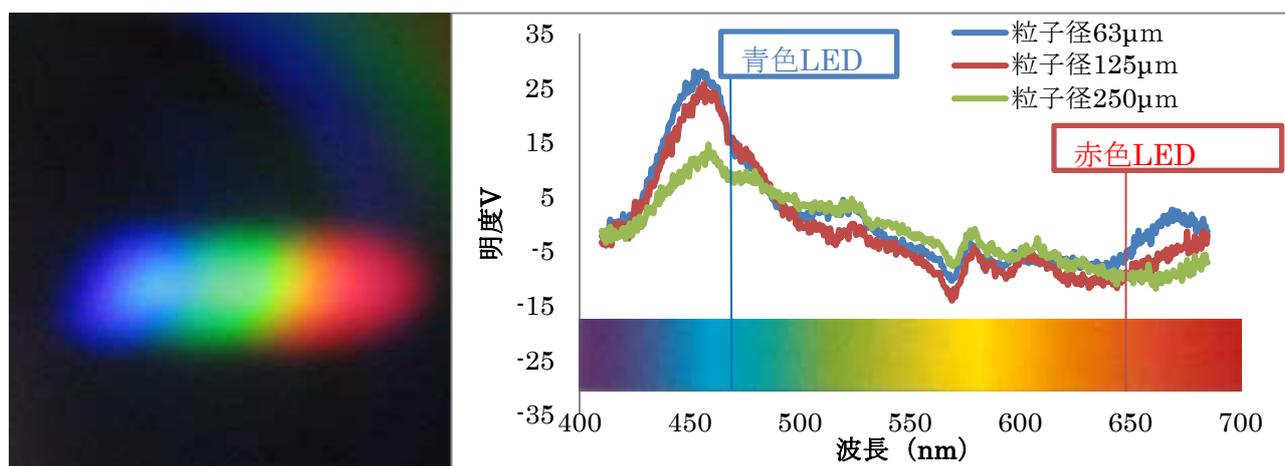


Fig. 11 反射光の分光画像

Fig. 12 火山灰の反射光のスペクトル

3-5 降灰量の測定

方法

吸引ポンプは水槽用のエアポンプ イーエア-2000SB(ジェックス株式会社製)を用いた。吸引ポンプは1分間に1.5Lの空気を吸引し、安価で長時間の吸引使用に耐えられるので都合が良いと考え、Fig. 13のようにプラスチックケースの中に密閉して、排気用のポンプを改良して吸引用ポンプとして用いた。

今回の研究では、降灰君の精度を確かめるために鹿児島気象台に吸引ポンプの設置を訪問時に依頼した。しかし、鹿児島気象台は、自衛隊鹿児島地方協力本部や第十管海上保安本部などの鹿児島県庁の第2地方合同庁舎であり、他の測定機器に影響を与える可能性があるため、吸引ポンプの設置ができなかった。そこで気象台が用いているステンレス製のトレーとほぼ同等品である赤川器物製作所製のステンレス浅型角バット 640x420x75mm (以降：降灰皿)を購入し、錦江湾高校の中庭で降灰量を測定し、降灰君での測定と比較を行った。その様子を Fig. 14 に示す。また、白色LEDとCdSセンサーの組み合わせによる降灰君3号機によって得られた検量線により降灰量を測定した。

結果

10月1日～10月7日まで降灰皿及び降灰君の降灰量を測定した結果を Fig. 15 に示す。降灰皿および降灰君の降灰量の関係を Fig. 16 に示す。

考察

Fig. 15 及び Fig. 16 にあるように、降灰皿と降灰君は正の相関性がある。降灰君が降灰量を正確に測れることが実験的に証明された。単位面積当たりの火山灰の質量を計算すると、降灰君で $34.8\text{g}/\text{m}^2$ 、降灰皿で $28.8\text{g}/\text{m}^2$ であった。

ヒトの呼吸量は $10\text{L}/\text{分}$ （体重 50kg の平均）と言われている¹³⁾ので、降灰君 ($1.5\text{L}/\text{分}$) から換算すると、錦江湾高校の野外では、1週間に約 0.033g の火山灰を吸引していることになる。よって、野外での労働時間8時間だとすると、1週間に約 0.011g 、1年だと 2.84g の火山灰を吸引していることになる。比較的降灰量が少ない錦江湾高校の中庭で、これだけの火山灰を吸引していることを考えると、鹿児島県民の健康被害についての更なる研究が望まれる。



Fig. 13 自作吸引ポンプ



Fig. 14 降灰量測定の様子

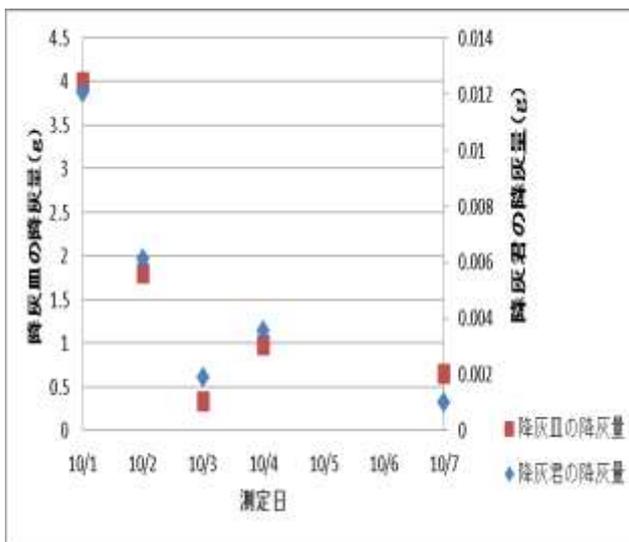


Fig. 15 降灰皿および降灰君の降灰量測定

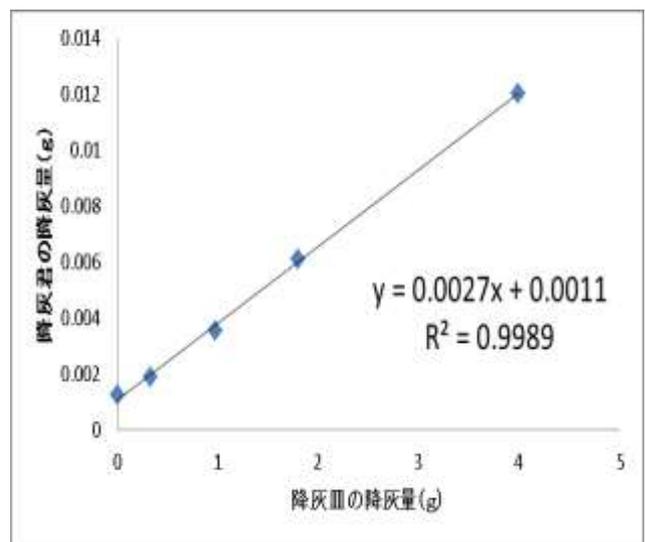


Fig. 16 降灰皿および降灰君の降灰量の関係

4. まとめ

降灰君でLEDの色を変えて実験したところ、火山灰粒子が小さいほど短波長の光を散乱すると分かった。また、火山灰粒子が小さいほど、反射率が高い石英が多く含まれている事も短波長の光を散乱の一因になったと考えられる。降灰君はデータの再現性も良く、スキャナーとImageJによって求めた明度V

と正の相関性が見られた。反射光を分光させたスペクトルにおいても、火山灰粒子が小さいほど短波長の光を反射することが分かった。そして、様々な粒子径の火山灰では様々な波長でピークをもつ白色 LED が有効だと分かった。

吸引装置を用いた降灰君で、桜島の降灰量をほぼ正確に測ることができた。鹿児島県民は比較的降灰量が少ない錦江湾高校の中庭でも、1年間に2.84gの火山灰を吸引していることが分かった。

また、降灰君は降灰皿と比べて、観測スペースを必要としない。また、降灰皿では雨天時には、火山灰を乾燥させてから質量を測らないといけないが、降灰君の場合には乾燥の手間が少ない。鹿児島県内に簡単に観測点を増やすことができると考えている。

5. 今後の研究について

- ①今回、計画書にあった二酸化硫黄の測定が上手くいかなかったため、現在二酸化硫黄の測定機器を開発中である。
- ②連続的なリアルタイム化を実現するために、ほこりセンサー（SHAPE 社製）を用いた降灰君を開発中である。
- ①・②については、開発中で測定結果がそろい次第、追って報告を行う。

6. 参考文献

1. 安田成夫 「アイスランドにおける火山噴火と航空関係の大混乱」 京都大学防災研究所年報 第 54 号
2. 桜島大正大噴火 100 周年事業実行員会「鹿児島の火山」 防災ガイド BOOK
3. 鹿児島県危機管理局危機管理防災課のホームページ
https://www.pref.kagoshima.jp/aj01/bosai/sonae/sakurajima/documents/74_20140116132847-1.pdf
4. 安田成夫 「Xバンド MP レーダーによる浮遊火山灰計測の試み」 京都大学防災研究所年報 第 55 号 B
5. 杉本良一・紺野昇 環境教育と情報活用 大学教育出版
6. 左巻健男・市川智史 環境調査マニュアル 東京書籍
7. 秋月電子 各製品データシート
8. キヤノン 製品安全データシート (MSDS 番号 : TC1334-0101)
9. MI5Series CdS Photoresistor Manual Macron International Group Ltd
10. 鹿児島県総合教育センター「火山と火山噴出に関する指導の工夫」理科第 270 号 平成 20 年 10 月
11. 日本板硝子テクノリサーチ株式会社のホームページ
<http://www.nsg-ntr.com/tech/e01.html>
12. ImageJ の解説ホームページ 「Drop of wisdom」
<http://www.hm6.aitai.ne.jp/~maxcat/imageJ/menus/analyze.html>
13. ダイキン工業株式会社のホームページ 「空気の学校」
http://www.daikin.co.jp/naze/html/d_1.html

謝辞

鹿児島大学理工学研究科 神長暁子助教 及び 錦江湾高等学校 樋之口仁教諭には、器具の借用とご指導いただきありがとうございました。鹿児島气象台につきましては、見学ありがとうございました

選考委員特別賞

衛星賞

賞金 5 万円、衛星オペレーション見学会

南国、高知の空の青さ
を測る！

高知工業専門学校

1. はじめに

私たちが普段見上げる南国、高知の空の青さはその時々により異なっている。空の青といっても、さまざまな青があるように感じる。空が青く見えるのは、太陽の光が空気中の物質に衝突し散乱するからである。物質の大きさが波長に比べて十分小さいレイリー散乱では、青色の光が最も散乱されやすく、その散乱された青い光が私たちの目に多く入るため、昼間の空は青く見える。一方、物質の大きさが波長と同程度か大きいときに起こる散乱をミー散乱という。雲や湯気が白く見えるのは、それらを構成する微細な氷晶または水滴の大きさが、可視光線の波長と同程度なため、可視光全体が等しく散乱されるためである。

散乱の効果は、散乱される距離によって異なり、高さ方向の大気の厚みは空の青さに関連すると考えられる。ヘリウムガスを入れた気球を放球することで、上空 30km 近くまで観測装置を揚げるができる。上空約 30km では、空は黒く光の散乱が十分されていないことが知られている。空が青く見える地上から連続して写真撮影をすることで、空の色と、散乱に関連する物理量が高さによってどう変化するかを調べることができる。これにより、空の色の違いを探ることができるだろう。そのために、気球搭載用の観測装置を開発し、係留気球実験と自由気球実験を行った。本報告書では、実験結果について考察し、今後の開発計画と試験運用について検討した。

2. 観測装置と観測について

2.1 ミッションの目的

本ミッションでは、気球搭載用の観測装置を開発し、空の青さの違いが何に起因するかを測定する。レイリー散乱に関連する物理量の1つは、大気密度であり、粒子種を仮定することで、気圧と温度から推定できる。ミー散乱に関連する物理量の候補としては、水蒸気やダストの密度があり、温度と湿度から水蒸気量を、ダストセンサーより塵の密度を推定できる。また、散乱する距離による散乱の効果の違いを検討するため、成層圏気球による測定を行う。気球の高度に関しては、①気圧と温度、②GPS の位置情報、③加速度と、地磁気、測定器の回転角度などの組み合わせから、各々推定することができる。

また、空の色の状態を測定するために、2台のカメラによる撮像を行う。1台のカメラは空の色の高さによる変化を測定し、もう1台のカメラは、空の色がどの波長の色から構成されているかを見るために、プリズムを用いた簡易な分光観測を行う。

2.2 気球シミュレータによる予測航路の計算

気球シミュレータはケンブリッジ大学の学生団体 CUSF (Cambridge University Space Flight) の Jon Sowman、Adam Greig、Daniel Richman によって作成されたものを使用した。放球予定の日時、気球の質量 (種類)、搭載重量に加えて、気球の破裂高度、上昇速度、ヘリウムの体積のいずれかを入力すると飛行経路の予測を行うことができる。

今回の自由気球の実験で実際に入力した値として、放球日時を 10 月 4 日 10:30、気球の質量 1000g、ヘリウムの体積 4000L を入力した。このとき、気球が破裂する高度は 30,054m、上昇速度は 6.12m/s となる。図 1 のシミュレーションは、当日 10 月 4 日 (木) 7:00 に行ったものである。飛行経路予測によると、放球直後、気球は西へと流され、すぐに東へと進路を変えている。その後、海へ出ると北東に向かって飛行し、土佐湾内に落下する。

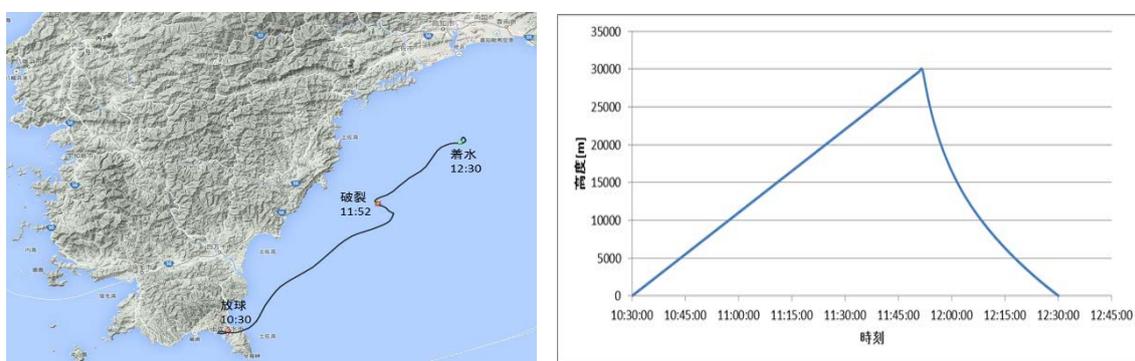


図 1. 2014 年 10 月 4 日 7:00 に行った 10 月 4 日 10:30 の (左) 飛行経路予測と (右) 日高度予測

2.3 気球搭載測定器の構成

気球搭載測定器としては、発泡スチロール製のキャリア内に、マイコンボード、センサー類、スマートフォン、GPS データロガーを配置した。マイコンボードには、Raspberry Pi B+ を採用し、各種センサーのデータを microSD カードに記録する。スマートフォンと GPS データロガーは、各々、電源を独立に維持しており、スマートフォンは docomo 3G 経由で位置情報の送信を行い、GPS データロガーは位置情報をロガー内に記録する。micro SD カードと GPS データロガーのデータは、海上に着水後にデータを回収する予定であった。気球搭載の測定器のブロック図を図 2 に、キャリアの写真を図 3、図 4 に示す。全体の外観としては、上からゴム気球、パラシュート、キャリア

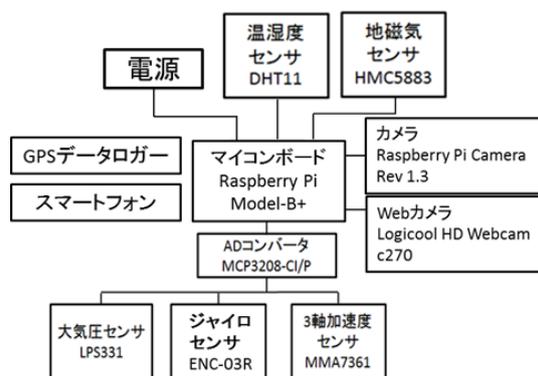


図 2. 観測装置のブロック図

の順に構成されており、実際の写真を図 5 に示す。



図 3. キャリア内



図 4. キャリア外観

2.4 簡易分光器について

物質の屈折率は光の波長によって異なるため、様々な波長を含んだ白色光をプリズムに通すと屈折により様々な色に分離される。波長の比較的長い赤はあまり曲げられず、波長の比較的短い青は大きく曲げられるため、スペクトルを得ることができる。これを利用して、今回の実験では撮像したい一部分だけを分光させるために、黒い紙でスリットを作りそれでプリズムを覆った。図 4 のキャリアの上部に設置している黒い物体がプリズムで、キャリア上部に開けた穴を通して、キャリア内部のカメラにより、分光観測が行われる。地上試験での観測例を図 6 に示す。



図 5. 気球の全体の外観

3. 実証実験

3.1 係留気球の実証実験と測定データの解析

2014 年 9 月 19 日に高知県香南市のヤ・シィパークから、2014 年 10 月 4 日に高知県土佐清水市の土佐清水総合公園から係留実験を行った。気球にはおよそ 4000L のヘリウムを封入し、約 400m のひもで係留した。センサ類は図 2 のものを使用した。スマートフォンは載せず、位置情報の取得は行わなかった。

1 回目のヤ・シィパークでの係留実験では、データが途中でしか取れていなかった。係留後にキャリア内で電源のコー



図 6. 分光させた光

ドとカメラのコードが絡んでいたことが確認されており、係留中にカメラのコードが抜けたために Raspberry Pi が再起動し、測定が中断したと考えられる。取得できた測定データを図 7 に示す。また、カメラで撮影した画像を図 8 に示す。係留実験では空の色の違いを確認することはできないが、明瞭な空の画像が取得できた。

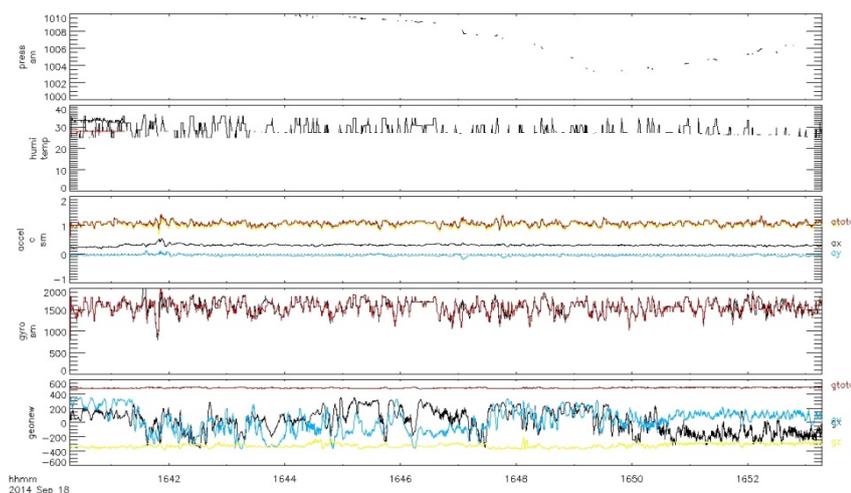


図 7. ヤ・シィパークでの観測データ



図 8. 気球からの撮影画像

2 回目の土佐清水総合公園での係留実験では、図 9 に示すデータが取得できた。1 つ目のグラフは気圧センサ、2 つ目のグラフは黒色が圧力センサの温度、赤色が温湿度センサの温度、青色が湿度を示している。3 つ目は加速度を、4 つ目がジャイロセンサを、5 つ目のグラフが地磁気センサから得られたデータを示している。1 つ目のグラフより気圧は、気球が上昇（放球）すると次第に気圧は減少し、下降（回収）する時には増加していることがわかる。2 つ目のグラフからは温度は、時間が経つに連れ次第に上昇している。その理由として、観測機器が徐々に熱を持っていったことが挙げられる。4 つ目のジャイロセンサのグラフでは、グラフが 0~2000 と増加と減少を繰り返すことで、キャリアが回転している様子がわかる。5 つ目のグラフで地磁気の 3 軸の大きさがほぼ一定の大きさを維持しているのは地球上の磁気の大きさが変わらないからで、xy 成分が変動しているのは、観測装置が回転し

ているからである。

3.2 自由気球の実証実験と飛行経路

2 回目の係留実験後に、自由気球の放球を行った。当日は台風が接近していたため気流が安定しなかった。そのため、ヘリウムは予定していた 4000L よりも

多く注入し、5500L 程度封

入した。スマートフォンからの位置情報によると、最終確認位置は、出航を予定していた港から、かなりの距離にあったため、キャリアの回収を諦めた。測定データを取得することができなかったが位置情報は得ることができたので、以下では、飛行経路等についての考察を行う。

位置情報を取得する方法として、スマートフォンのアプリの dokonan、Lookout、Android デバイスマネージャーを使用した。ただし、放球当日には、dokonan と Lookout は機能し、Android デバイスマネージャーは機能しなかったため Android デバイスマネージャーからは位置情報を取得することはできなかった。

放球は 11:35 に行った。dokonan は 15 分間隔で搭載スマホの位置をサーバに送信する。送信された位置情報は蓄積され、時刻順に番号を打って表示される。

Lookout は他のスマホや PC から検索を

かけたときに、リアルタイムで位置を検知し通知する。現在の位置情報が不明な場合、最後に確認された位置を表示する。

dokonan、Lookout の位置情報より推測した飛行経路を図 10 に示す。放球地点から 12:30～35 頃までは、dokonan による位置情報を順に結ぶことで推定した飛行経路である。12:40

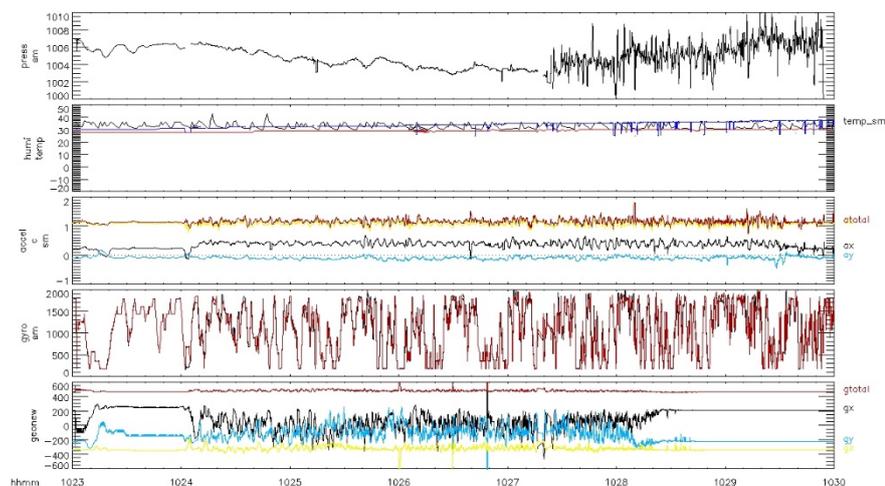


図 9. 土佐清水総合公園での観測データ

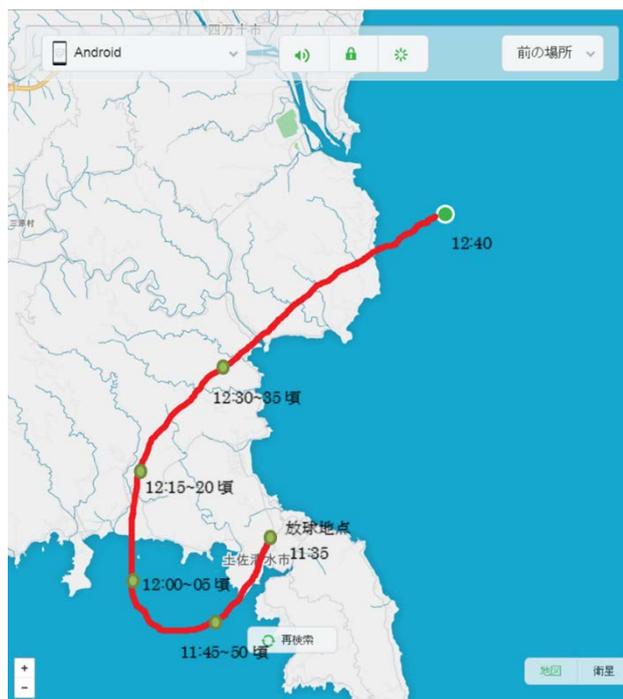


図 10. 推定飛行経路

の地点は Lookout から得られた位置情報であり、この位置は、この飛行経路の延長線上にあり矛盾はない。しかし、dokonan の最終地点 (12:35 頃) から Lookout の位置 (12:40) までの距離は、dokonan で 15 分間に進む距離よりかなり長い。そこで、それぞれの区間での気球の速度を概算し、検討してみた。表 1

表 1. 推定飛行速度

区間 (時間)	推定飛行速度
放球～① (10～15 分)	4.4～6.7m/s
①～② (15 分)	4.5m/s
②～③ (15 分)	4.5m/s
③～④ (15 分)	5.9m/s
④～Lookout (5～10 分)	17.3～34.5m/s

より、放球後しばらくの間は、推定飛行速度は数 m/s 程度であり、台風の接近していたことなどを考慮すると矛盾はない速度であるといえる。また、最後の区間では、飛行速度が速いが、高度が上昇し、成層圏の偏西風上にあると考えれば、20m/s 程度ならば十分にあり得る。

12:40 以降の位置情報に関しては、12:50 以降、dokonan、Lookout とともに、位置情報が得られなかった。このことから、12:40 から 12:50 の間に 3G エリア外に出たか、着水などして、スマホが通信不能になったと考えられる。速度の概算からおよその落下位置を予測すると、3G エリア内に収まっている可能性が高いため、データが取得できなかった理由はエリア外に出たことではなく、着水したからであると推察される。

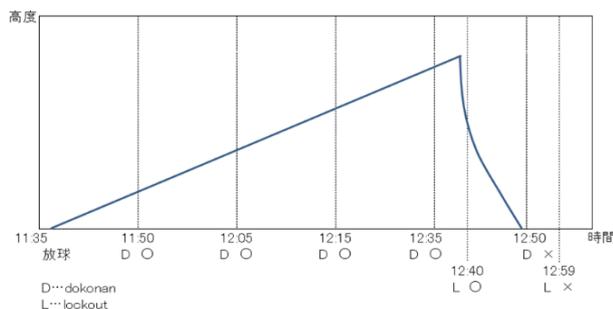


図 11. 各時刻における推定高度

飛行高度は、位置情報がすべて得られたことから 3G エリア内の高度以下で飛行を続けた可能性が高いといえる。3G エリア外の高度に到達していたとしても、dokonan の位置情報の送信間隔である 15 分以内という短時間である。また、ヘリウムを予定より多く注入していること、飛行時間が 1 時間を超えていることから 12:40 の時点では落下中の可能性が高い。推定したおおまかな飛行高度の変化を図 11 に示す。

推定飛行経路はシミュレータによる飛行経路と比べて、気球の進路の方角はあまりずれていないが、移動距離がかなり短くなっている。当日は、台風が接近しており地上付近でもかなり風が強く、気球の飛行が安定しないようだった。そのため、速く上昇するようにヘリウムを多く注入したことから、予定の 4000L から 5500L 近くになったと思われる。また、観測装置もシミュレータの値に比べて 100-200g 程度軽かったため、上昇速度が速くなり、シミュレータによる移動距離よりも、かなり短くなったと考えられる。

一方で、3G エリアに約 1 時間近く滞在していたことから、何らかの理由により気球が上昇できず、到達高度が極端に低かった可能性も考えられる。

4. まとめ

今回は、空の青さを観測することを目的とした気球搭載用の気象観測機器を OS 搭載型マイコンボード Raspberry Pi を用いて開発した。ヘリウムガスを入れた気球に観測器を搭載し、放球実験を行った。

係留気球の実証実験では 200~400m の高さまで気球を揚げて観測を行った。加速度、気圧、温度、湿度、地磁気、ジャイロ、カメラによる空の画像などのデータが正常に取得されていることを確認した。400m 程度の高度差では、空の色の違いは認められないが、自由気球でデータを回収できれば、目的を達成できることが見込まれた。

自由気球の実証試験では、観測機器を回収できなかつたため、データは取得することができなかった。ただし、搭載したスマートフォンにより、位置情報を取得することができ、実際の飛行経路を推定した。また、気球シミュレータによる予測経路との比較から、飛行距離が短かつた理由に関しても、いくつかの妥当な理由が考えられた。

5. 今後の展望

自由気球実験で、データ回収を確実にを行うため、以下のような検討が必要である。

- ・ OS 搭載型マイコンボードの強みを活かして、自動データ転送（サーバデータとのミラーリング）を行えるようにする。気球観測においては、携帯端末用のネットワーク回線を利用したデータ転送を想定している。さらにリアルタイムで取得データを表示するシステムの開発を行う。
- ・ 気球の浮力を精密に測定し、より正確な上昇速度を得ることで、シミュレーションによる予測経路の精度を上げる。
- ・ ダブルバルーン方式（気球を二重にする方法）を検討する。外側の気球が破裂して海へ落下した後も、内側の気球が浮き輪の代わりに果たし、取得したデータを確実に回収できるようになる。

今回の位置情報の推察から、携帯端末用のネットワーク回線を利用して、着水前に全データを回収できるようにするのが最も現実的である。

6. 参考文献

- ・ ”Cambridge University Spaceflight Landing Predictor” by Jon Sowman, Adam Greig and Daniel Richman for CUSF, <http://predict.habhub.org/>
- ・ 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、横山佳紀、大国友篤、平尾千紗都、横谷晟人、木戸佑輔、金森原太、増野宏一、三井遼太郎、上田卓弥、築山文香、儀間政哉、歌山大学宇宙教育研究所紀要 第2号