

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

服は内 II

-衣類内気象モニタリング-

サレジオ工業高等専門学校



服は内Ⅱ — 衣服内気候モニタリング —

水口 葵, 野田 祐基, 大庭 康平

指導教員 吉田 将司

サレジオ工業高等専門学校 機械電子工学科 情報通信工学研究室

1. 実施目的

夏場における健康被害でよく話題になるのは日焼け、熱中症、光化学スモッグである。これらの現象は目には見えず、すぐに被害が出るものが少ないため症状が悪化するまで身体の異変に気付くことがない。そのため毎年、夏場になるとこれらの健康被害が社会問題となっている。そこで我々は体調変化を知る手段として衣服内気候に着目した。衣服内気候とは、人体と衣服の微小な空間に生じる気候であり、衣服内の温湿度を測定することによって個々の体調変化を測定することが可能となる[1]。

昨年は屋内や屋外での活動において、衣服内温湿度の測定から体調の変化を可視化し、危険度を知らせる事で体調管理を行う事を目的とした装置を製作した。衣服内の温湿度を測定し、得られた温湿度が判定基準によって危険か正常かを判定し危険の場合は LED を点滅させる装置を製作し、性能を評価した。図 1 は昨年製作した装置を示す。左の機器で衣服内温湿度を測定し、右の装置で LED を点滅させた。

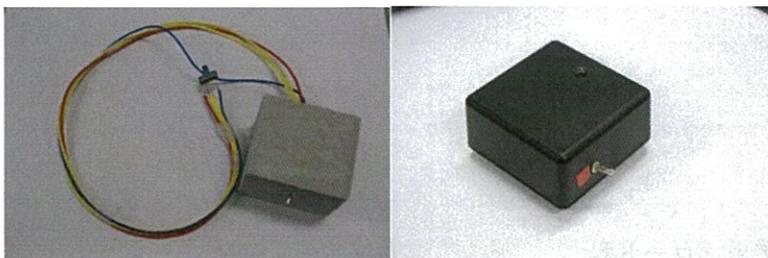


図 1 昨年の装置

この装置のメリットは衣服内の温湿度を測定し、危険の場合は測定者に警告を行うことができる。しかし、遠隔地にいる第 3 者が被験者の体調変化を知ることが出来ないことや、危険度の判定を「危険」「正常」で行っていたため、危険になる前に警告を行うことが出来なかった。

そこで本研究では、衣服内温湿度の測定から体調の変化を判定し、遠隔地にいる第 3 者が被験者の体調を確認できるシステムの構築を行う。また、被験者の体調が「危険」と判定される前に被験者に LED で警告ができるようにするために、判定基準を再設定する。

図 2 は申請時の機器のイメージを示す。また、図 3 は申請時の機器の使用例を示す。昨年と同様に、検出器は温湿度の測定を行い、測定結果を判定し表示器とアップロード器に

信号を送信する。表示器は信号を受け LED の点灯とモータのバイブレーションによって警告を行う。遠隔表示器は遠隔地にいる第 3 者がアップロード器を中継し画面に温度・湿度・危険度を表示することを想定していた。しかしアップロード器で WiFi を使い検出器から受けた信号をクラウドにアップすることが出来なかった。そのためアップロード器に検出器から受けた信号を表示した。図 4 は図 3 に示す機器の使用例の変更内容を示す。

検出器は図 3 と同様にベルトに引っ掛け、表示器は首から下げることで測定・警告を行う。アップロード器は被験者が持つ。

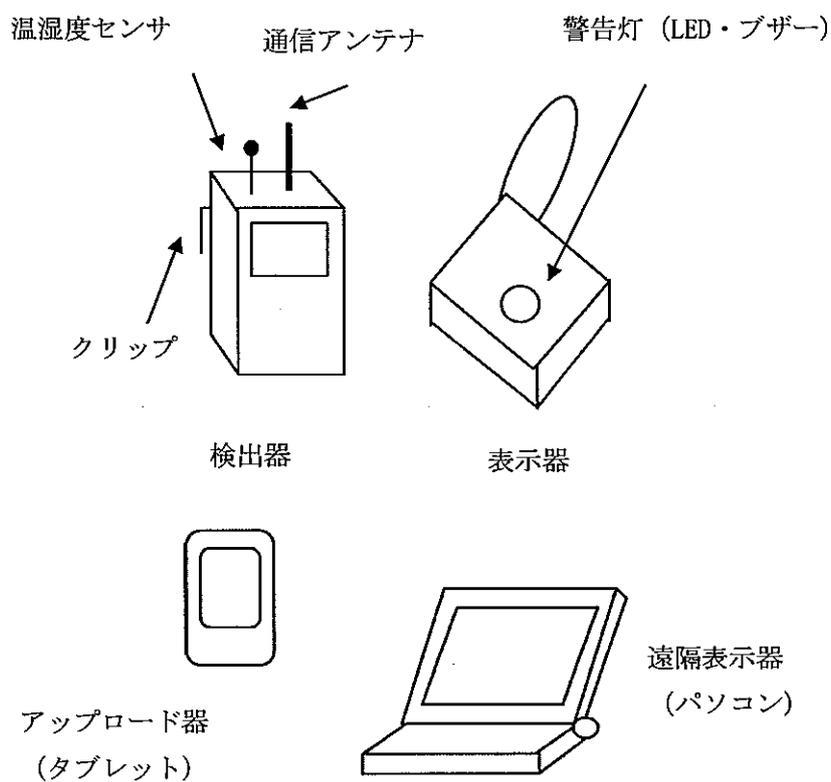


図 2 外観イメージ

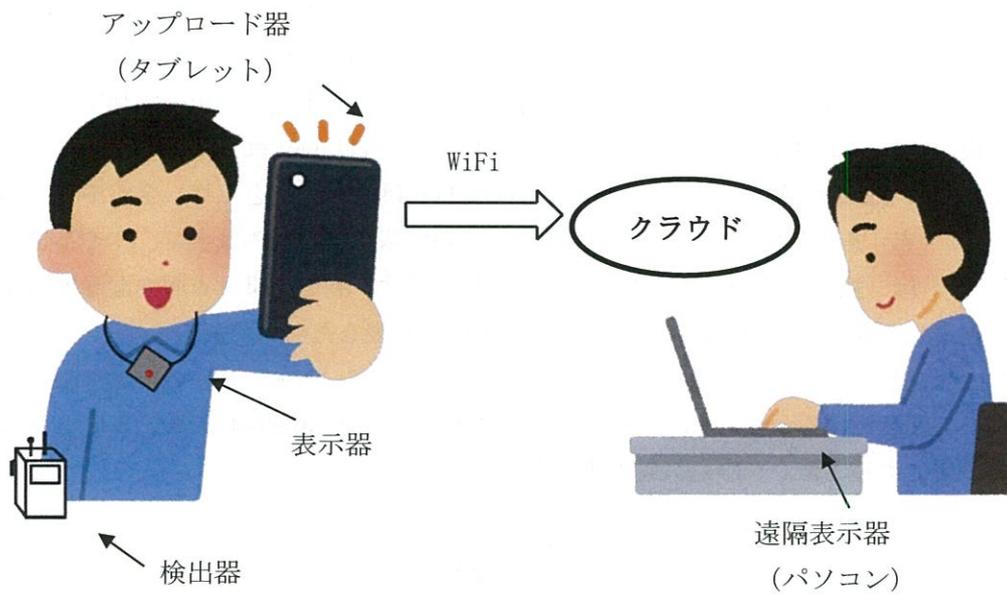


図3 機器の使用例



図4 機器の使用例 (変更後)

2. 測定原理

図5は測定方法のイメージを示す。図6は危険度の判定基準を示す。判定基準は衣服内温湿度の快適域を参考にし、設定した[2]。ただし、この図は不快指数と異なり定式化できない。本システムでは検出器のセンサを用いて衣服内温湿度を測定し、その測定値を表示器へ送信する。表示器は受けた測定値から危険度を図6の判定基準を用いて判定する。判定後、快適であればLEDが「青」を点灯、やや快適であればLEDは「水色」を点灯、やや不快であればLEDは「緑」を点灯、不快であればLEDは「黄色」を点灯、全く不快であればLEDは「赤」を点灯する。ただし本実験では、判定基準の領域外は全て、やや不快と判定されLEDは「緑」を点灯する。表1は判定結果を示す。判定結果は衣服内温湿度の測定値から判定した危険度と表示器が出力する結果の関係を表したものである。

図7はセンサの貼り付け方法を示す。センサは尾骶骨から10cmの背中中の位置に図7のようにテープで張り付ける。センサはテープでリング状のカバー(5mm厚)で覆い皮膚と衣服に触れない様にする事で衣服内気候の測定を行う。

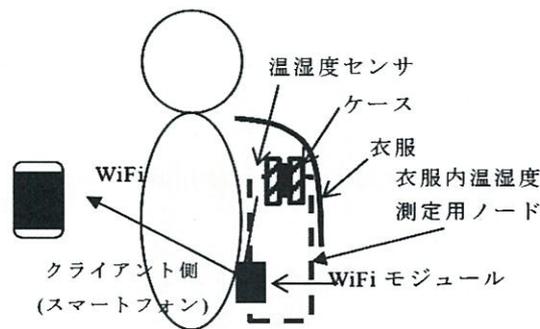


図5 イメージ

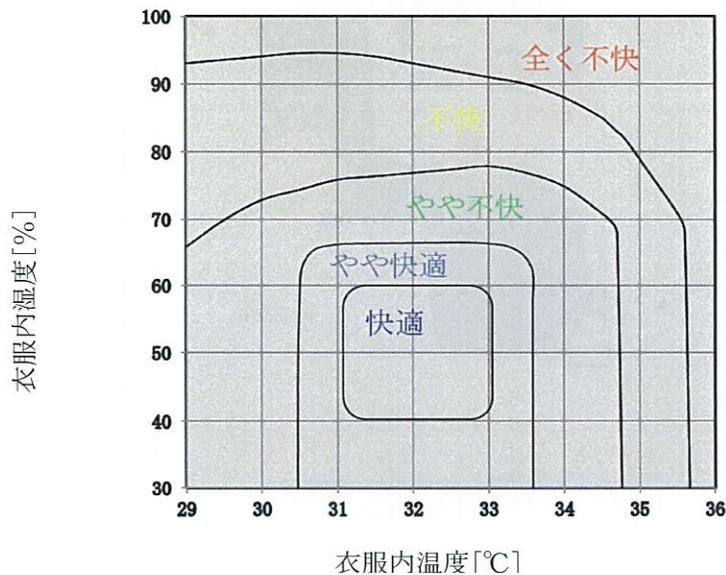


図6 判定基準

表 1 表示器の出力結果

判定	表示器の出力
全く不快	LED 赤色 点灯 バイブレレーション ON
不快	LED 黄色 点灯 バイブレレーション ON
やや不快	LED 緑 点灯 バイブレレーション OFF
やや快適	LED 水色 点灯 バイブレレーション OFF
快適	LED 青 点灯 バイブレレーション OFF

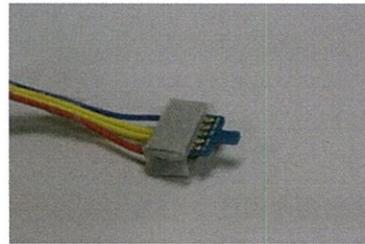


図 7 センサの貼り付け

3. システム構成

図 8 は製作した機器のシステム構成を示す。以下検出器・表示器・アップロード器の構成について説明する。

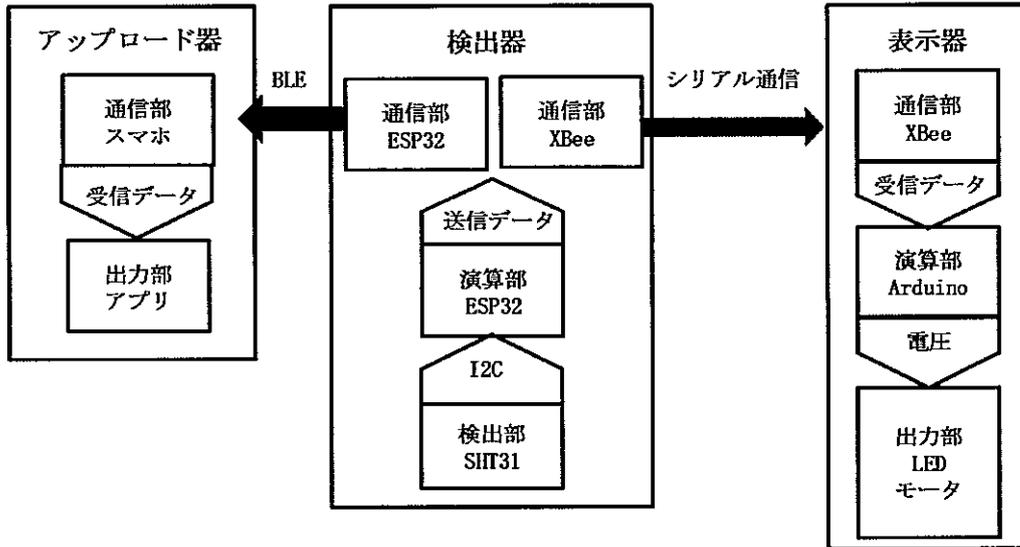


図 8 システムのブロック図

3-1 検出器の構成

検出器は検出部・演算部・通信部の機能からなる。図 9 は検出器の状態遷移図を示す。待機状態から衣服内温湿度の測定を開始し、その結果を表示器とアップロード器に送信する。

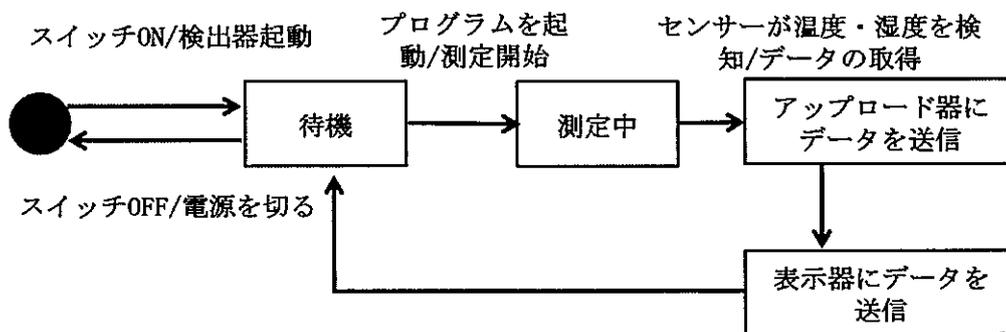


図 9 検出器の状態遷移

図 10 は検出器のフローチャートを示す。プログラムが起動したら測定を行い、測定値を表示器とアップロード器に送信する。

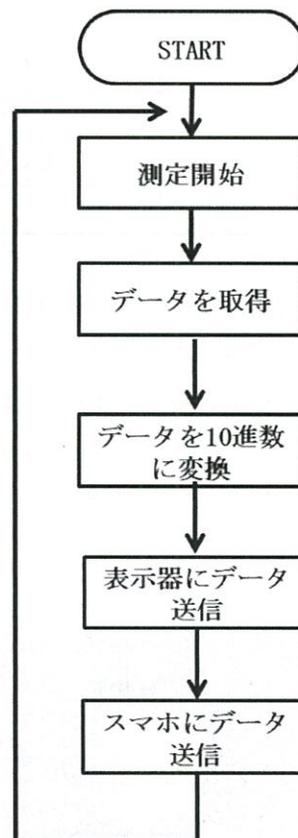


図 10 検出器のフローチャート

検出器の検出部には温湿度センサ SHT31 を使用した。図 11 は温湿度センサ SHT31 を示す。表 2 は SHT31 の主な仕様を示す[3]。気温の測定範囲が $-40[^\circ\text{C}] \sim 125[^\circ\text{C}]$ 、湿度は相対湿度で $0[\%] \sim 100[\%]$ であり I2C による出力である。

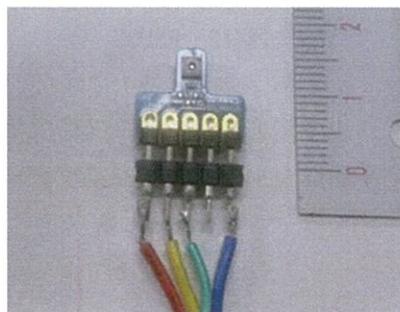


図 11 SHT31

表 2 SHT31 の仕様

内用	仕様
電源電圧	DC2.4~5.5[V]
通信方式	I2C
測定範囲と精度：温度	-40~+125[°C]、±0.2[°C]
測定範囲と精度：湿度	0~100[%]、±2[%]
取得データ bit 数	16bit (温度、湿度ともに)
消費電流 (測定中)	800[μ A]

演算部には ESP32 を使用した。図 12 は使用した ESP32 を示す。センサから I2C で取得した 2 進数 16bit の温湿度データを、10 進数のデータに演算を行う。

ESP32 は他にもアップロード器と通信を行う通信部に使用した。10 進数にした温湿度データを BLE (Bluetooth Low Energy) でアップロード器に送信を行う。ESP32 は Bluetooth 機能を搭載している。そのためアップロード器と ESP32 でペアリングをすることにより BLE 通信を可能とした。

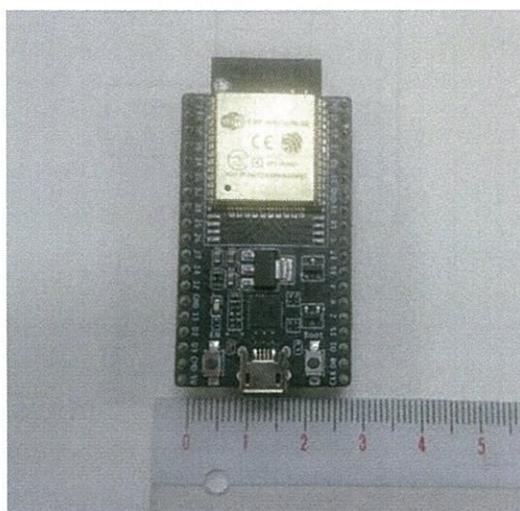


図 12 ESP32

図 13 は検出器の基板を示す。表示器と通信を行う通信部には XBee を使用した。表示器に使用している XBee とシリアル通信をすることで温湿度データを表示器に送信している。

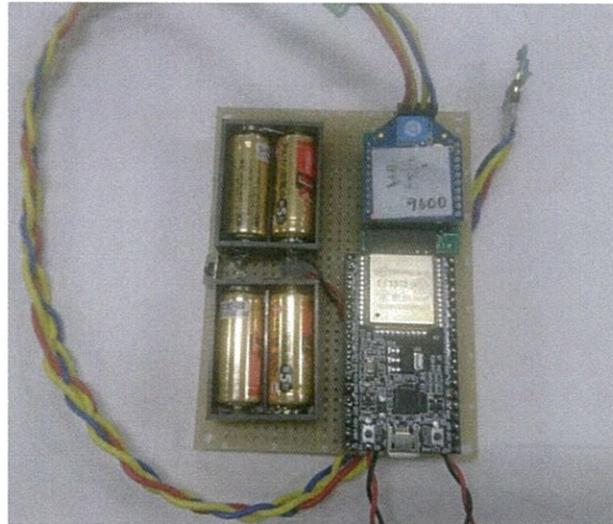


図 13 検出器の基板

3-2 表示器の構成

表示器は通信部・演算部・出力部からなるシステムを構築した。図 14 は表示器の状態遷移図を示す。待機状態から衣服内温湿度データを受信し、図 6 の判定基準に従い LED を点灯する。

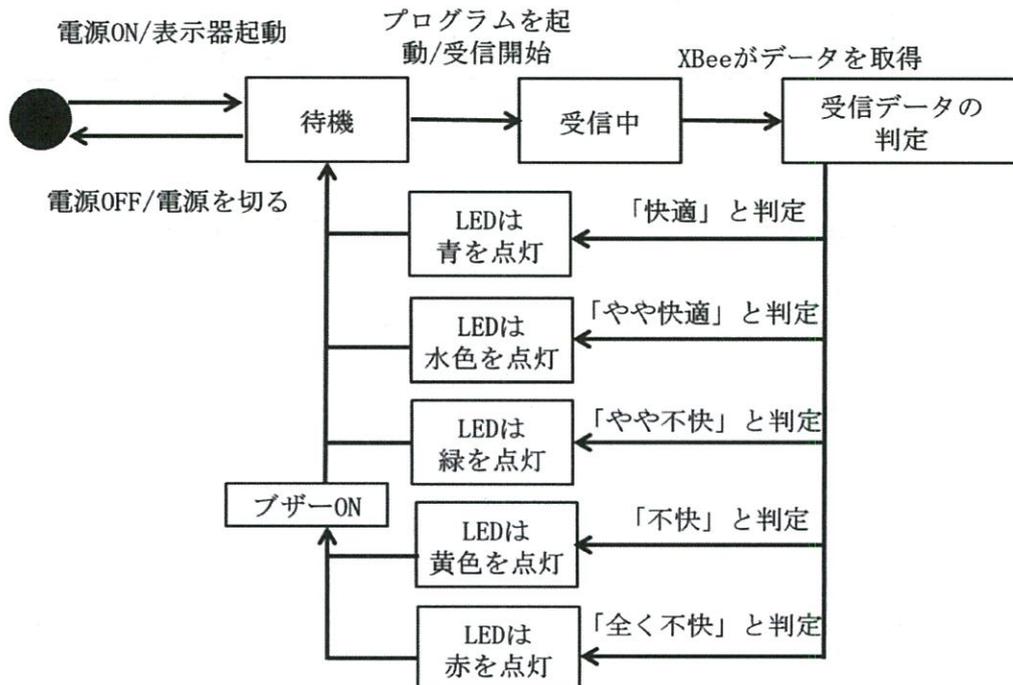


図 14 表示器の状態遷移

図 15 は表示器のフローチャートを示す。プログラムが起動したら受信を行い、判定基準に従い LED を点灯する。

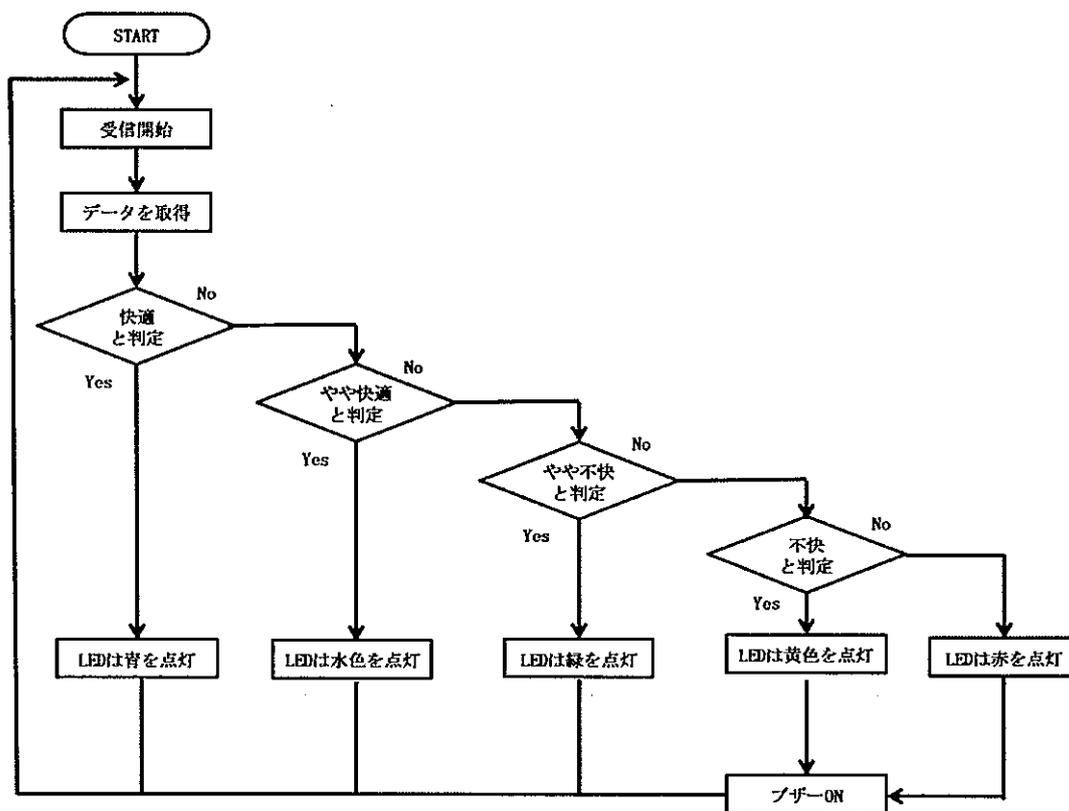


図 15 表示器のフローチャート

図 16 は表示器の基板を示す。検出器と通信を行う通信部には XBee を使用した。シリアル通信により、温湿度データを受信している。

演算部には Arduino NANO を使用した。図 6 の判定基準に従って危険度を判定し、快適であれば LED が「青」を点灯、やや快適であれば LED は「水色」を点灯、やや不快であれば LED は「緑」を点灯、不快であれば LED は「黄色」を点灯、全く不快であれば LED は「赤」を点灯させる。

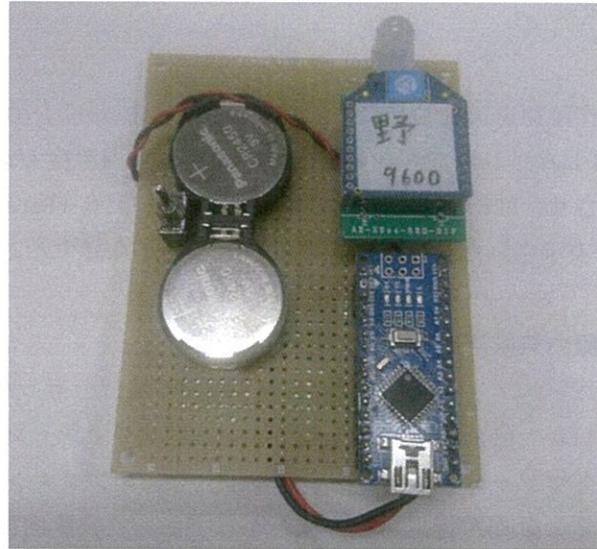


図 16 表示器の基板

3-3 アップロード器の構成

アップロード器にはスマートホンを用いる。検出器とペアリングをすることで BLE 通信を行いアップロード器は温湿度データを受信する。受信した温湿度を表示させる方法として、既存アプリである「Serial Terminal」(DEVMEI 社製)を使用した。図 17 は使用したアプリと実行画面を示す。アプリを実行すると右の図のように温湿度を表示する。このアプリはシリアル通信を行うデバイスとスマートホンを Bluetooth や USB で接続することでシリアル通信が可能になるアプリである。ただしデータの記録はできない。



図 17 使用したアプリ

4. 実験内容

4-1 動作確認

製作した機器の動作確認を実施した。本研究で製作した機器は表示器の判定基準に従い、対応した LED が点灯しなければならない。そこで検出器の温湿度センサに息を吹きかけることで温湿度を変化させ、BLE 通信で検出器から 5 秒間隔で PC (Tera Term) に温湿度の数値を表示する。PC に表示された数値に対応する色の LED が点灯することを確認した。

4-2 運動時の衣服内気候測定

被験者（学生）がランニングマシンで時速 6 [km] の走行を行った際の衣服内温湿度を計測し運動終了時の LED の色を確認する。運動はランニングマシンを用いた。図 18 は実験で用いたランニングマシンと実験の様子を示す。ランニングマシンを用いた目的は、時間に限らず常に一定の動作が行えると考えたからである。衣服内検出器のセンサを背中への位置にテープで固定し、5 分間の待機後、10 分間の走行、5 分間の休憩を行う合計 20 分の計測を行った。



図 18 走行の様子

5. 実験結果

5-1 動作確認

図 19 は LED の点灯を確認した写真を示す。動作確認は、センサに息を吹きかけて温湿度を変化させた。試験した結果、シリアルモニタの最下行に表示された温湿度に対応する LED が点灯することを確認できた。同時に LED が黄色・赤を点灯した際に振動モータが振動することを確認できた。

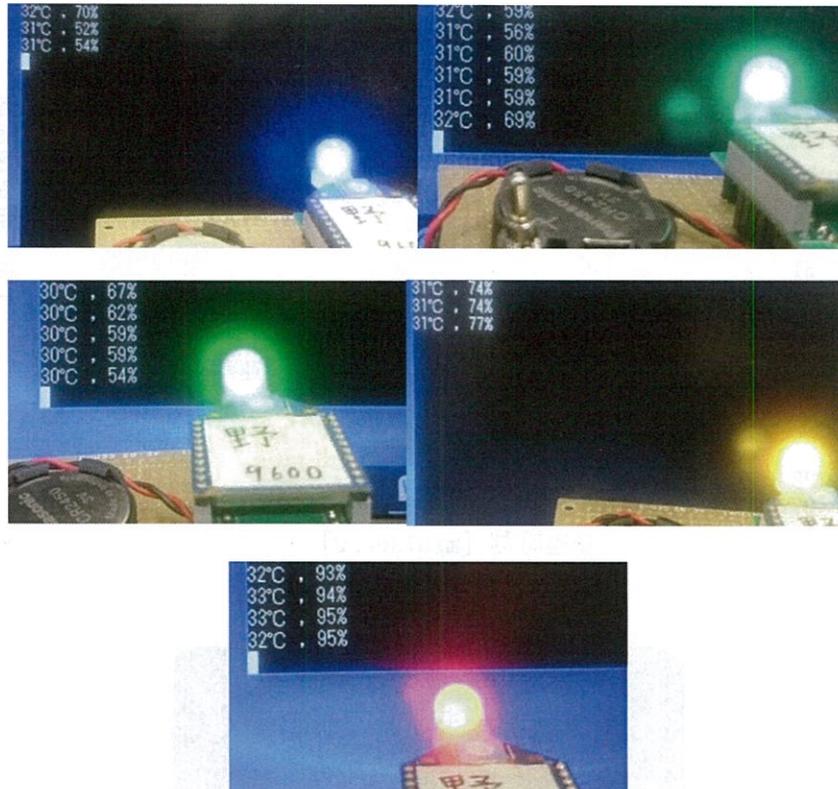


図 19 LED の点灯

5-2 運動時の衣服内気候測定

図 20 は運動を行った際の衣服内環境の変化を示す。時刻 7 分から 12 分は休憩、12 分から 22 分は運動、22 分から 27 分は休憩を行った。図 20 より運動開始 5 分後湿度が上昇し、運動中は最大値 90 [%] を記録した。湿度が上昇すると温度が 32 [°C] から 31.3 [°C] に低下した。運動をして掻いた汗が冷えて温度が低下したと考えられる。

運動終了後、温度・湿度ともに上昇した。温度は最大値 32.5 [°C]、湿度は 98 [%] まで上昇し、どちらも運動中よりも大きい値を記録した。

図 21 は運動前の LED の色を示す。LED は緑を点灯していた。図 20 より運動前の温度は 30.9 [°C] 湿度は 29.7 [%] と確認できた。この値は LED が緑を点灯する判定基準に満たしているため、表示器は正しく動作していることが分かる。

図 22 は運動後の LED の色を示す。LED は赤を点灯していた。図 20 より運動後の温度は 31.5 [°C] 湿度は 92.2 [%] と確認できた。この値は LED が赤を点灯する判定基準に満たしているため、表示器は正しく動作していることが分かる。

また運動終了後、モータは振動していたが、被験者はモータの振動に気づかなかった。

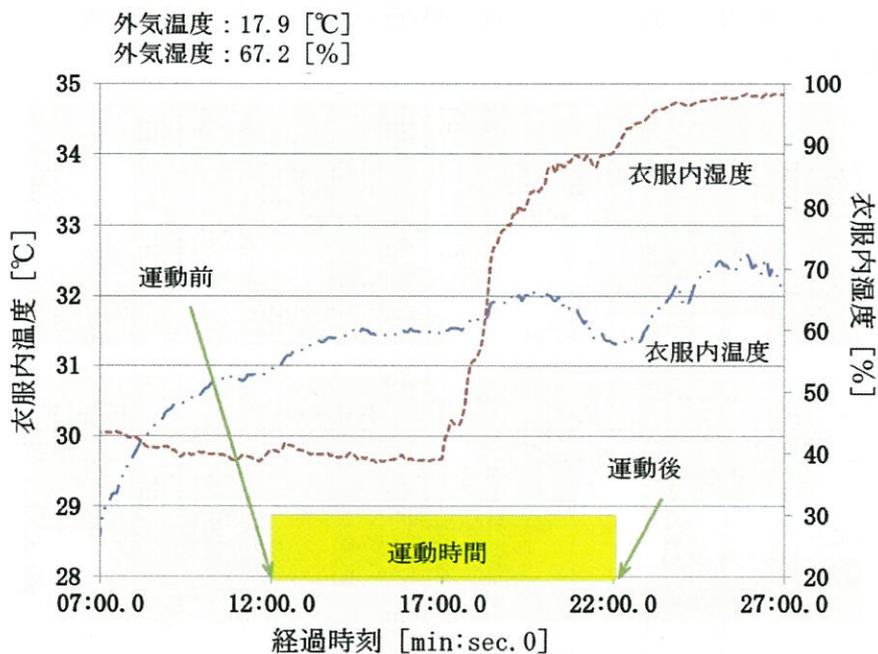


図 20 運動時の衣服内環境



図 21 運動前の LED 出力



図 22 運動後の LED の出力

6. まとめ

6-1 結論

本研究は、熱中症の防止をするため衣服内温湿度の測定から体調の変化を判定し、被験者に LED・モータによって警告を出す機器の製作を行った。まず検出器・表示器を製作した。次に機器を用いて動作確認・衣服内環境の計測を行った。

その結果、判定基準に対応した色が LED によって点灯することが確認でき、LED が黄色・赤を出力した際モータが振動することが確認できた。しかし運動中は被験者が動いているため、モータの振動に気づかなかった。

また運動を開始してから一定時間後に衣服内湿度が急上昇した。そのため運動中から運動後の熱中症を予防するには、運動開始時の衣服内温湿度よりも運動中の衣服内温湿度に着目すべきである。

6-2 今後の課題

遠隔表示器の開発を続け、PC の画面に温度・湿度・危険度を表示し、第 3 者が被験者の体調を確認できるようにする。

モータの振動によって被験者に警告するシステムをブザー等の音で警告するシステムに変更し検討を行う。

参考文献

- [1] 多井吉之介, 田多井恭子: “最新被服衛生学”, 光生館, p12, 1960.
- [2] 東洋紡株式会社: “三層構造のハイテク複合糸 衣服内気候”,
<http://www.toyobo.co.jp/seihin/ifukunai/ifuku4.htm>, (最終閲覧日: 2018/10/3).
- [3] “秋月電子通商”, <http://akizukidenshi.com/catalog/g/gK-12125/>,
(最終閲覧日: 2018/10/21).

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

離岸流観測警報システム

「R-alert」 第 2 報

長崎県立宇久高等学校



離岸流観測警報システム「R-alert」第2報

長崎県立宇久高等学校 1年 永松 柊人
 1年 永松 陸人
 1年 三ヶ崎裕也

1. はじめに

九州北西部にある長崎県の、さらに西方海上に位置する宇久島(図1)は、周囲をきれいな海に囲まれています(図2)。

人口は1998名(平成30年10月1日現在)、毎年減少し続けています。小中高は各1校ずつあり、児童・生徒数の合計は85名です。

日本の他のしま地区と同様に人口減少に悩む宇久島はしかし、夏休みの期間に入ると、島外から非常に多くの海水浴客が訪れ島中が活況を呈します。

そんな宇久島の海水浴場で、懸念されることは「離岸流」による被害です。

離岸流による事故は全国各地で発生しています。例えば、「●福岡県古賀市の海で親子ら4人が死亡した水難事故は、岸に打ち寄せた波が沖に戻る際に生まれる「離岸流」に巻き込まれたのが原因とみられる。●平成30年8月19日午後5時ごろ、茨城県鹿嶋市角折の海岸で発生した水難事故は、友人十数人と海水浴に来ていた少年(18)が行方不明になっており、ヘッドランド(人工の岬)周辺で泳いでいて「離岸流」に巻き込まれたものとみられている。●平成30年8月14日午前11時ごろ、茨城県銚田市の海岸で発生した水難事故は、貝を採っていた男性(61)が海に浮いているのが見つかり、病院に運ばれたものの死亡しています。事故現場はヘッドランド周辺で、「離岸流」が発生しやすい

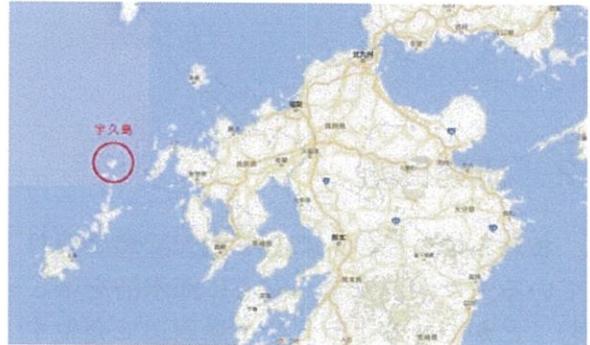


図1. 宇久島の位置



図2. 宇久島の海岸の風景 ドローン撮影

め、立ち入り禁止にしていされていた場所とのことでした。」などです。

このように、離岸流による被害は数多く報告されています。

私たちが住む宇久島でも事故は発生しています。

一昨年夏、島内最大の海水浴場である大浜海水浴場において、水難事故が発生した。泳いでいた地元の小学生が沖へ流されてしまい、意識不明となりドクターヘリで本土の病院に救急搬送された。幸いにも命に別状は無く、1ヶ月後には、元気に通学

できるように回復した。泳ぎに慣れている島の子どもでも、ふとしたはずみで、沖に流されてしまうことがあります。

沖へ流される原因の一つとして挙げられるのが、離岸流です。離岸流 (rip current) とは、海岸に打ち寄せた波が沖に戻ろうとする時に発生する強い流れのこと (第九管区海上保安本部海洋情報部HPより引用) です。

2. 研究目的

私たちは、島の人たちや観光で島を訪れている方々が、安全・安心に海水浴を楽しむことができるよう、宇久島周辺で発生する離岸流を多数観測し、発生条件を調べ、離岸流危険情報を提供できるように、本研究を行うこととしました。

3. 実験方法

GPSチップを搭載したプローブを実際に海に流すことで、離岸流を検出します。

「みちびき」に対応したGPSモジュールを実装した浮体式観測機に釣り糸をつけて波打ち際から流します (図3)。海上に観測機がでていると風の影響を受けますので、おもりを入れて浮力を調整し、海上に出ている部分を最小にして観測します (図4)。これによりカードに記録された緯度経度時刻データを解析することで、毎分の観測機の位置を把握することができ、離岸流の層流の流向流速を測定することが可能です。

実際に大浜海岸 (図5) でプローブを放流したところ、図6のように急速に沖へ移動する振る舞いを観測することができた。地形図に落とすと図7 (次ページ) のように離岸流が観測できました。



図3. 浮体式観測機

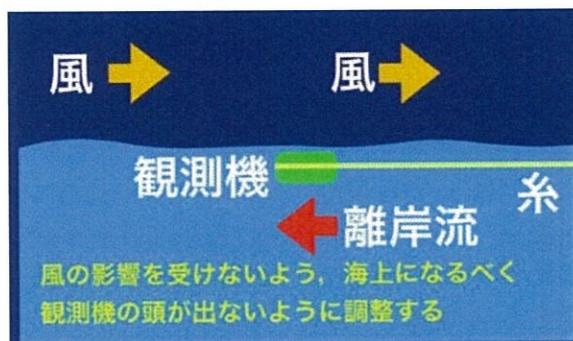


図4. 観測方法



図5. 大浜海岸

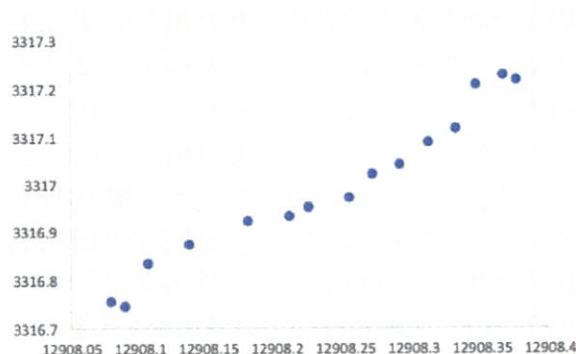


図6. プローブの動き



図7. 観測されたプローブの動きを地図に落としたもの

観測の利便性のため、釣り竿およびPEラインを準備し、プローブを放流する際の手間を低減しました(図8)。



図8. 観測機一式

4. 結果と考察

浮体式観測機を実際に流すことで、離岸流検出が容易となりました。

海上保安庁等で観測される場合の蛍光塗料などを放流する必要がなく、観測による環境負荷は随分軽減されたものと考えます。

浮体式観測機を放流する1回2時間程度の観測を夏から秋にかけて計7回行ったところ、そのうちの2回で離岸流と思しき2m/s程度の沖への流れを観測しました。また、非常に興味深いことに、昨年からの観測した

すべての離岸流の発生時間帯は上げ潮(干潮から満潮へ海面上昇している時間帯)でした。

5. まとめ

離岸流観測用の本観測機を制作することで、離岸流観測が低予算、低環境負荷の条件で実施可能となりました。

離岸流が頻度高く発生する時期は、上げ潮であることがわかりました。

今後は、地域の防災無線や観光協会を通じて宇久島を訪れる観光客や住民に注意を呼びかけ、宇久島における離岸流による水難事故の発生をゼロにしたい。

6. 謝辞

本研究は、一般財団法人 気象文化創造センターからの助成を受けて行いました。ここに記して感謝いたします。

代表理事特別賞

賞金 5 万円

浮遊粒子状物質 (SPM)

測定器の開発

鹿児島県立錦江湾高等学校

化学研究部



浮遊粒子状物質 (SPM) 測定器の開発

鹿児島県立錦江湾高等学校

化学研究部 2年 平望多瑠 久松佳奈 安留千加

1. はじめに

「浮遊粒子状物質」(Suspended Particulate Matter、SPM) とは、大気中に浮遊する粒子状物質であり、その粒径がおおむね $10 \mu\text{m}$ 以下と定義されている¹⁾。小さいため気管に入りやすく、特に粒径が $1 \mu\text{m}$ 以下の粒子は、気道や肺胞に沈着し、呼吸器疾患の原因となる²⁾。SPM は、代表的な大気汚染物質の一つとして、大気汚染防止法で規制・監視の対象であり、環境基準として「1時間値の1日平均値が 0.100 mg/m^3 以下であり、かつ、1時間値が 0.20 mg/m^3 以下であること」と定められている³⁾。

SPM の発生源は 2 種類あり、工場などから排出されるばいじんや粉塵、ディーゼル車の排出ガス中に含まれる黒煙など人為的発生源によるものと、飛散した土壌など自然発生源によるものがある⁴⁾。

2. 目的

大気中の SPM の測定には光散乱法・圧電天秤法・ベータ線吸収法などを用いた高価な機器が必要であるが、環境省が設置した大気汚染広域監視システム(そらまめ君)は鹿児島市でも 9 局(鹿児島市役所・谷山支所・有村・黒神・環境保健センター・鴨池・桜島支所・赤水・喜入)しか設置されていない⁵⁾。

そこで、安価で簡便な方法として、SPM をフィルター付きの吸引ポンプで捕集し、そのフィルターに付着した SPM の量を測定する簡易反射型吸光度計(以下: SPM 君)を製作し、家や学校の周囲の SPM を実測することを目的とした。

3. SPM 測定器 (SPM 君) の作成

3-1 捕集装置の作成

フィルター(ろ紙)をセットした吸引口から吸引ポンプで大気を吸引し、ろ紙上に SPM を捕集する装置を作成した (Fig. 1)。フィルターと吸引ポンプの間にガスマーターをつなぎ、吸引量を測定した。また、長時間測定のため、電源容量が大きい車用のバッテリーを用いた。ガスマーターは、本校の LP ガス取扱業者である上村ガス(株)より、使用期限が切れた

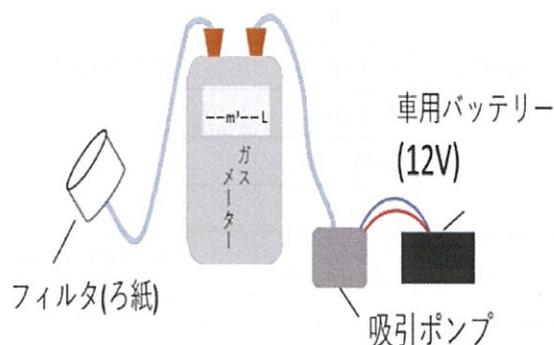


Fig. 1 SPM 捕集装置

ものを提供して頂いた。

3-2 簡易反射型吸光光度計の作成

SPM 濃度測定器 (SPM 君) の模式図を Fig. 2 に示した。加工がしやすい PVC 製水道管および T 型管で本体を作った。光源として LED (赤、黄、緑、青、紫外、赤外、白色など)、光センサーとして硫化カドミウム (CdS) をフィルムケースに取り付けて使用した。用いた LED および光センサーの詳細は、Table. 1 に示す。

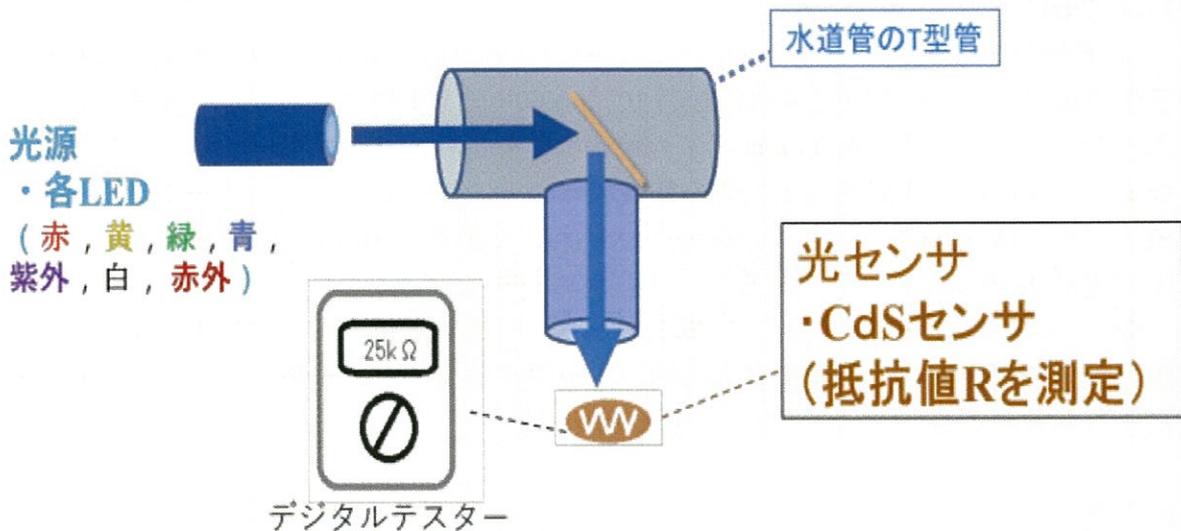


Fig. 2 SPM 濃度測定器 (SPM 君) の模式図

Table. 1 使用した LED および光センサー

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

4. SPM 測定器 (SPM 君) の方法・校正

4-1 モノクロレーザープリンターを用いた校正

SPM を捕集したろ紙は捕集量によって白色から灰色、黒色へと変化すると考えられるので、モノクロレーザープリンターで RGB=(0, 0, 0) から (250, 250, 250) まで RGB 値を変化させた円を印刷し、これを SPM 捕集後のろ紙の代わりとして校正を行った。各 LED を光源とし、RGB 値に対して抵抗値の比の対数 $\log(R/R_0)$ をプロットした (Fig. 3)。ただし、 R_0 は RGB=(250, 250, 250) の時の CdS センサーの抵抗値、 R は各 RGB 値での抵抗値である。各 LED で直線性を示す相関係数 $R^2=0.92$ 以上であった。

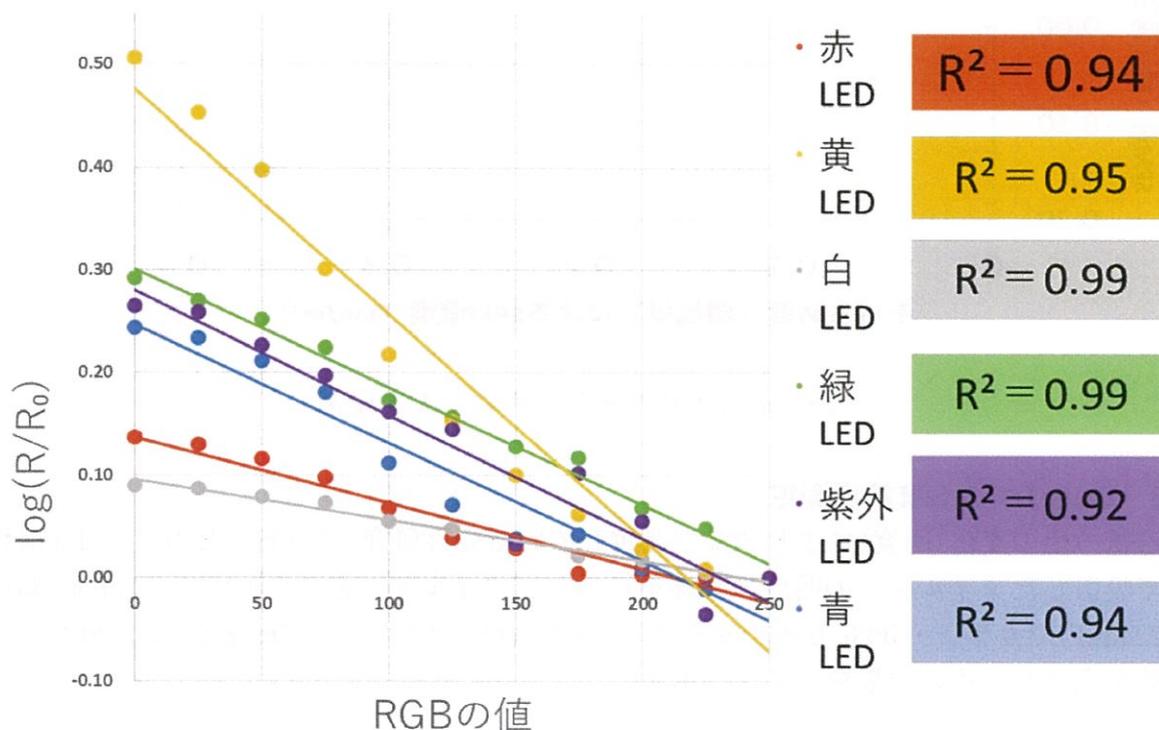


Fig. 3 各 RGB 値と $\log(R_0/R)$

4-2 そらまめ君での SPM 濃度測定

実際の SPM 濃度と比較するために、捕集装置を鹿児島市谷山・鴨池にある大気汚染物質広域監視システム (そらまめ君) の近くに設置した。設置については鹿児島市環境局環境部環境保全課の許可を得た。SPM 濃度のデータは、そらまめ君のホームページからダウンロードした。SPM 君で測定した CdS センサーの抵抗値 R と捕集前のろ紙での抵抗値 R_0 との比の対数 $\log(R/R_0)$ をそらまめ君による SPM 濃度に対してプロットした (Fig. 4)。青色 LED を光源とした場合に直線性が良かった ($R^2=0.80$)。よって、青色 LED が測定光源として適しており、SPM 君で SPM 濃度の測定が可能であるということが分かった。

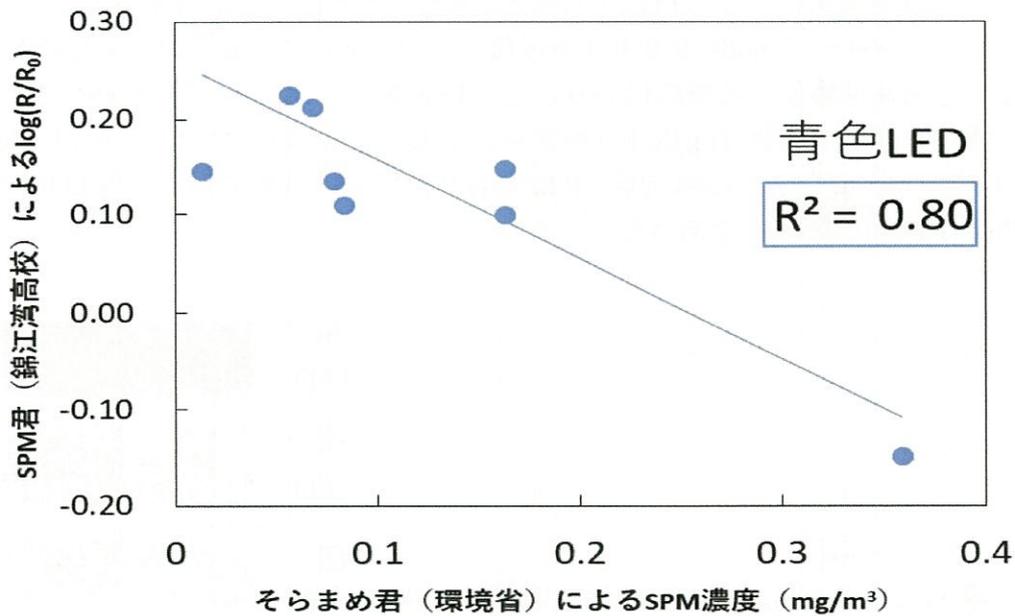


Fig. 4 SPM君のそらまめ君による校正

4-3 ImageJでのSPM濃度測定

ろ紙の色の変化(明度)によりSPMを測定している先行研究^{6,7)}があったので、SPM捕集装置で吸引したフィルターの明度の評価を行った。フィルターをスキャナー(Canon Satera MF224dw)でカラー・JPEG方式で読み込み、画像解析ソフトウェア(ImageJ)で、明度Vの平均値を求めた。その結果をFig. 5に示す。

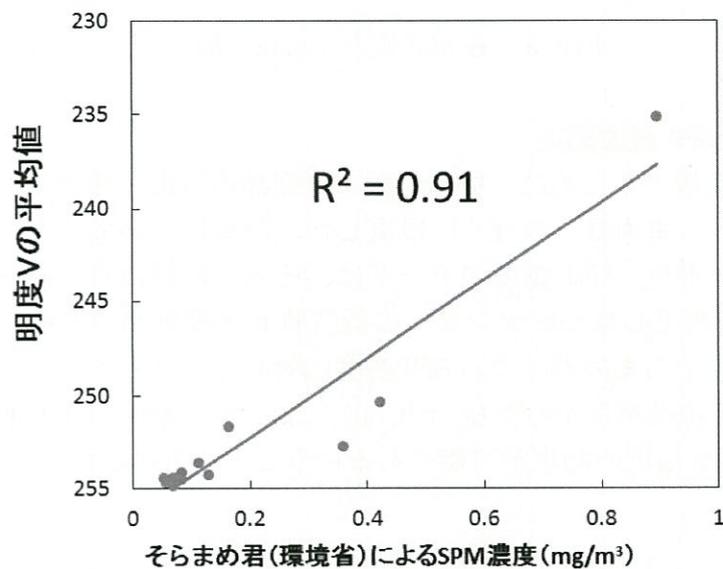


Fig. 5 ImageJとそらまめ君による校正

5. まとめ

- ・青色 LED で正確かつ安価に測定できる SPM 濃度測定器 (SPM 君) を作成し、環境省とほぼ同じ測定結果を得ることができた。
- ・また、ImageJ を用いたろ紙の明度測定でも SPM 濃度を正確に測れることがわかった。

6. 参考文献

- 1) 大気汚染防止法施行規則 第 18 条の 2
- 2) 横浜市環境創造局 「用語解説 : 浮遊粒子状物質 (SPM)」
<http://www.city.yokohama.lg.jp/kankyo/mamoru/kanshi/worda/spm.html>
- 3) 環境庁 昭和 48 年 5 月 8 日告示第 25 号
- 4) 独立行政法人 環境再生保全機構 「ばいじん、粉塵、浮遊粒子状物質 (SPM) とは？」
https://www.erca.go.jp/yobou/taiki/taisaku/01_02.html
- 5) 環境省大気汚染物質広域監視システム <http://soramame.taiki.go.jp/>
- 6) 齋藤由倫 「視覚による官能試験を利用した PM2.5 簡易測定法の検討」
全国環境研会誌 Vol. 41 No. 1 (2016)
- 7) 齋藤由倫 「科学的な環境教育を目指した大気環境に関する体験学習の試み」 環境教育 Vol. 24-3 (2015)

観客賞 賞金 5 万円

車のフロントガラスの

凍結予報サイトの開設

及び解氷スプレーの開発

鹿児島県立錦江湾高等学校

化学研究部



車のフロントガラスの解氷スプレースの開発 及び 凍結予報サイトの開設

鹿児島県立錦江湾高等学校 化学研究部
 研究者氏名 内村優希 黒瀬千晴 前田優梨
 指導者氏名 河野裕一郎

1 動機

北海道の札幌では最寒月平均気温が -7.0°C (Fig. 1) と、氷点下になることが多いため、霜が発生する頻度が多い。そのため、霜が発生する前に車のフロントガラスにカバーをかけたり、フロントガラスに撥水加工を施しておくなどの対策をすることに慣れていて、フロントガラスが凍ることは滅多にない。一方、私達が住む鹿児島の最寒月平均気温は 4.6°C (Fig. 2) と、氷点下になることが比較的少なく、霜が発生する頻度が少ないため、車の霜の対策をすること自体に慣れていない。

暖気運転で霜を融かすのは時間がかかるが、フロントガラスに霜を付着させたまま運転してしまうと、視界不良のため交通事故等の危険性が高まる。実際、霜を除去せずに車を運転して人身事故を起こしてしまったという事例も報告されている。解氷スプレーも市販されているが、解氷スプレーに含まれるエタノールが、車のワイパー等のゴム製品を傷めてしまうことがある。

また、現在の霜の発生予報は降水確率予報のような数値化がされていない。

そこで私たちは、即効性があり、ゴム製品を傷めない解氷スプレーを開発し、霜の発生を数値化して予報できるサイトを開設しようと考えた。

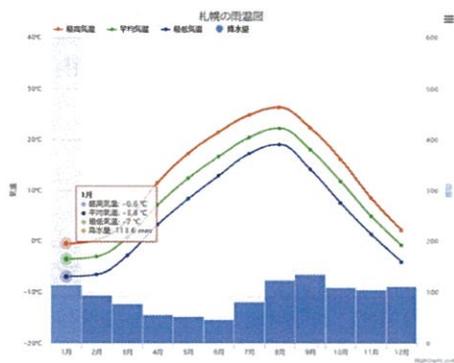


Fig. 1 札幌の最寒月平均気温

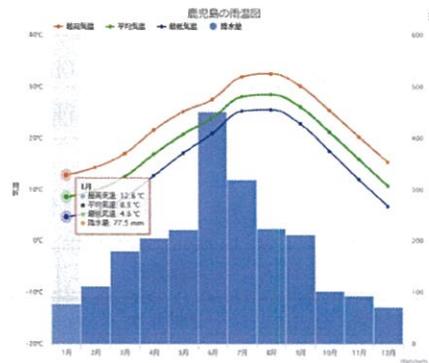


Fig. 2 鹿児島の最寒月平均気温

2 霜の発生原理

冬場の夜間になると放射冷却によって気温が低下し、外気温より車のフロントガラスの表面温度の方が低くなるため、フロントガラスに空気中の水蒸気が結露する。結露した後も外気温が下がり続けると、フロントガラスに結露していた水が凍ることによって、霜が発生する。

霜が発生しやすい条件としては、湿度が高いこと、晴れていて風がないこと、雲があま

りないことなどが挙げられる。

3 方法

市販の解氷スプレーにはアルコールが含まれており、アルコールの融点が水より低いという特徴を利用している。そのため、入手できた融点異なる 11 種類のアルコール (Table. 1) の解氷効果を検討しようと考えた。私たちは、各アルコールについて、解氷実験、希釈熱実験、ワイパーゴムの溶解実験の 3 つの実験を行った。

Table. 1 アルコールの一覧表

名称	英語表記	FW	示性式	融点(°C)
メタノール	Methanol	32.04	CH ₃ OH	-97.6
エタノール	Ethanol	46.07	C ₂ H ₅ OH	-114.1
1-プロパノール	1-Propanol	60.10	CH ₃ CH ₂ CH ₂ OH	-126.0
2-プロパノール	2-Propanol	60.10	CH ₃ CH(OH)CH ₃	-89.5
1-ブタノール	1-Butanol	74.12	CH ₃ (CH ₂) ₂ CH ₂ OH	-89.0
2-ブタノール	2-Butanol	74.12	CH ₃ CH ₂ CH(OH)CH ₃	-114.7
2-メチル-2-プロパノール	2-Methyl-2-Propanol	74.12	(CH ₃) ₃ COH	25.69
n-アミルアルコール	n-Amyl Alcohol	88.15	CH ₃ (CH ₂) ₄ CH ₂ OH	-78
イソアミルアルコール	Isoamyl Alcohol	88.15	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ CH ₂ OH	-117
2-ペンタノール	2-Pentanol	88.15	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH(OH)CH ₃	-73
1-オクタノール	1-Octanol	130.23	CH ₃ (CH ₂) ₆ CH ₂ OH	-15

しかし Table. 1 の一部のアルコールには、融点が水よりも高いものや、疎水性が高く水と混合すると分離してしまうもの、独特な臭いがあるものなど、スプレーとして利用するのに不向きなアルコールが含まれていたため、それらはいずれの実験にも使用しなかった。よって実際には、エタノール C₂H₅OH、メタノール CH₃OH、1-プロパノール CH₃CH₂CH₂OH、2-プロパノール CH₃CH(OH)CH₃ の 4 種類のアルコール (Table. 2) を使用した。

Table. 2 使用したアルコールの一覧表

名称	英語表記	FW	示性式	融点(°C)
メタノール	Methanol	32.04	CH ₃ OH	-97.6
エタノール	Ethanol	46.07	C ₂ H ₅ OH	-114.1
1-プロパノール	1-Propanol	60.10	CH ₃ CH ₂ CH ₂ OH	-126.0
2-プロパノール	2-Propanol	60.10	CH ₃ CH(OH)CH ₃	-89.5

(1) 解氷実験

まず、どのアルコールが最も早く氷を解かすのかを調べるために、解氷実験を行った。実験の最中の熱の出入りを防ぐため、発泡スチロールで自作した容器の中に 100ml ビーカーを入れた。そのビーカーの中に異なる濃度の各アルコール水溶液を 50ml 入れ、その中に市販の製氷皿で作成した約 10g の氷を入れてスターラーで攪拌しながら氷を解かした

(Fig. 3)。その間、氷を入れてから氷が完全に溶けるまでの時間を計測した。

一般に、アルコールの濃度は体積百分率で表されるが、本実験で使用する濃度は、次式で算出した。

$$\text{アルコール濃度 (\%)} = \frac{\text{アルコールの体積}}{\text{アルコールの体積} + \text{水の体積}} \times 100$$

本実験では、0%、20%、40%、60%、80%、100%の6種類の濃度について測定を行った。今回は、エタノール $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ のみ使用した。

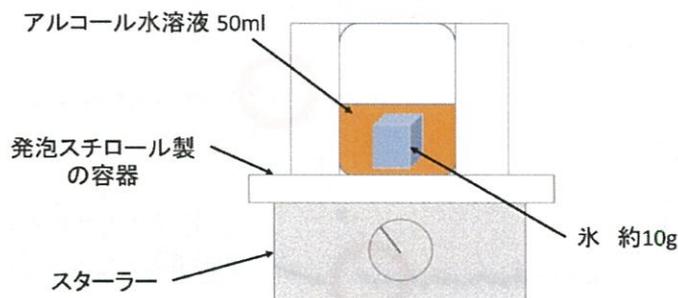


Fig. 3 解氷実験の実験装置

(2) 希釈熱実験

次に私達は、アルコールが氷を解かす要因として、希釈熱が関係しているのではないかと考え、各アルコールの希釈熱の熱量を算出するための実験を行った。

解氷実験と同様に、発泡スチロールで自作した容器に、50mlのアルコール水溶液を入れた100mlビーカーを入れる。保温容器の蓋に空けた穴から、スターラーで搅拌しながらホールピペットで蒸留水を10mlずつ滴下した。アルコール水溶液の温度変化を測定するため、ビーカーの中に温度センサを固定して温度センサをデータローガに接続し、データローガをPCに接続して実験を行った(Fig. 4)。

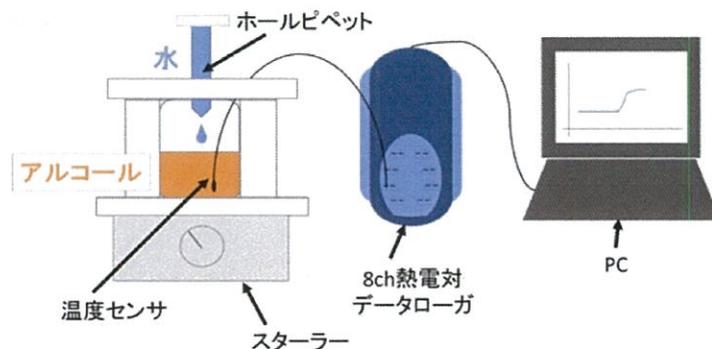


Fig. 4 希釈熱実験の実験装置

温度が上昇しきった時の温度 (Fig. 5 赤丸・上) と、水を加える前の温度 (Fig. 5 赤丸・下) の差から、

$$Q=mc \Delta T(Q=\text{熱量}[J], m=\text{質量}[g], c=\text{比熱}[J/(g \cdot K)], \Delta T=\text{上昇温度}[K])$$

の式に当てはめて、熱量を算出した。この時のアルコール濃度は 0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、100% の 11 種類について、それぞれ測定を行った。今回は、エタノール C_2H_5OH と 1-プロパノール $CH_3CH_2CH_2OH$ を使用した。

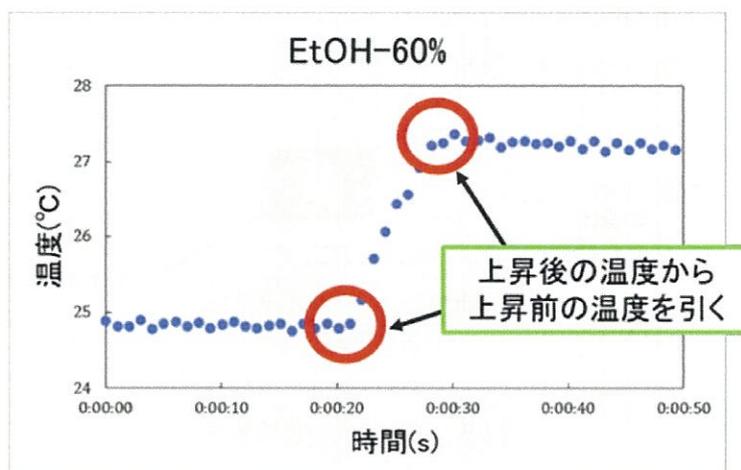


Fig. 5 60%エタノールの希釈熱による温度変化(例)

(3) ワイパーゴムの溶解実験

車のワイパーゴムを傷めにくいアルコールを確定するため、市販のワイパー (RPH 製 GRAPHITE GEAR U-30G) をサンプルとして用い、ワイパーゴムの溶解実験を行った。ワイパーゴムを 3cm の長さに切って、それぞれの質量を計測した後、各アルコール水溶液に浸し、30 分、1 時間、1 時間半、2 時間、24 時間、48 時間に取り出して、再度、質量を計測した。アルコール水溶液に浸す前の質量から、浸した後の質量を引いて、溶解したゴムの質量を算出した。今回は、エタノール C_2H_5OH (FW 46.07) と 1-プロパノール $CH_3CH_2CH_2OH$ (FW 60.10) を使用した。

3 結果・考察

(1) 解氷実験の結果

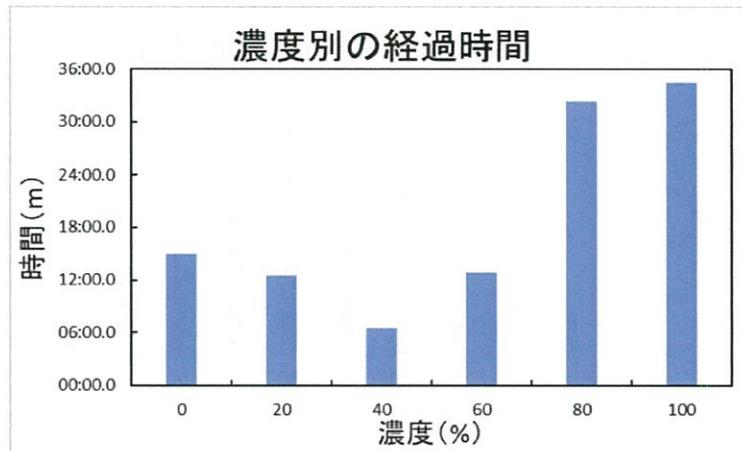


Fig.6 エタノールでの解氷実験の結果

Fig.6 に示したようにエタノール濃度 40%の場合に、最も早く氷が解けた。しかし、実験を1回しか行っておらず、エタノールでしか実験を行っていないため、これから実験の回数を重ねて再現性を検討し、また、他のアルコールを使用した実験も行っていきたい。

(2) 希釈熱実験の結果

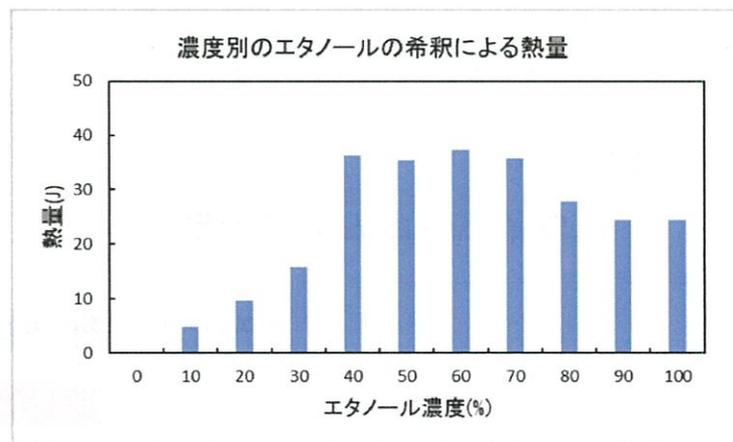


Fig.7 エタノールによる希釈熱

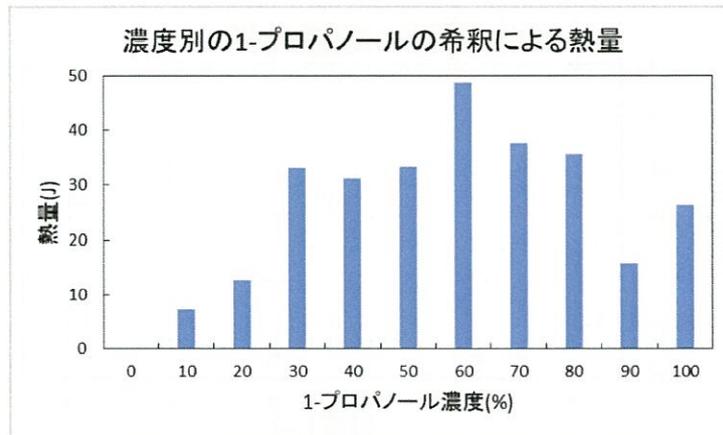


Fig. 8 1-プロパノールによる希釈熱

エタノールの実験結果を見ると、エタノール濃度 40%~70%において、発生した熱量が多いことが分かった。1-プロパノールの実験結果を見ると、1-プロパノール濃度 60%~70%において、熱量が多いことが分かった。しかし、1-プロパノール濃度 90%の場合は熱量が低くなるという結果が得られ、これは、今回は実験を1回しか行っていないために、データに誤差が生じていると思われる。これから実験の回数を重ねてデータの正確性を向上させていきたいと考えている。また、エタノールとプロパノール以外のアルコールを使用して、その中から最も発生する熱量の多いアルコールを確定していきたい。

(3) ワイパーゴムの溶解実験の結果

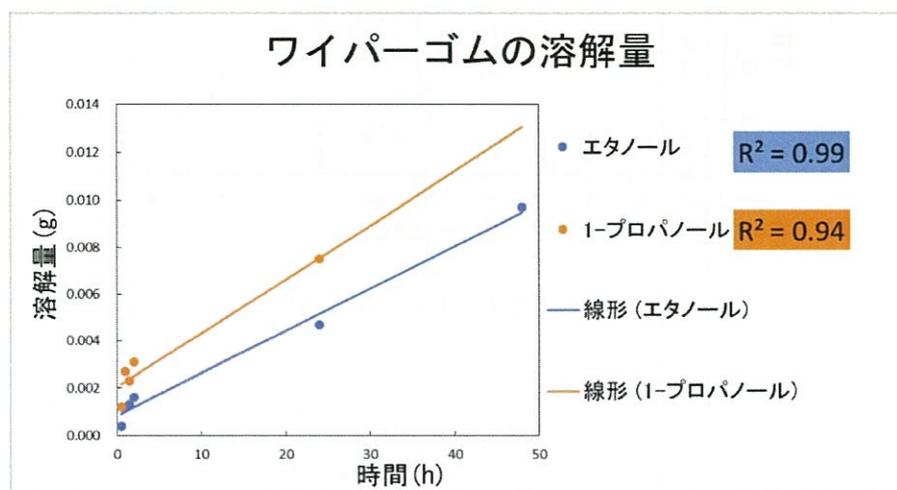


Fig. 9 ワイパーゴムの溶解実験の結果

エタノール、1-プロパノール共に、浸漬時間が長くなるにつれて溶解量も増加していることが分かった。また、エタノールよりも1-プロパノールの方がワイパーゴムを多く溶か

していることが分かった。この実験も、1回しか実験を行っていないため、より多くのデータを収集したいと考えている。

4 まとめ

解氷実験では、エタノール濃度 40%が最も解氷時間が短かった。希釈熱実験では、エタノール濃度 60%、1-プロパノール濃度 60%で発生する熱量が多かった。ワイパーゴムの溶解実験では、短時間ではそれほど違いが見られなかった。全体の実験を通して、実験の回数を増やし、他のアルコールについても検討することが今後の課題であると考えた。適当なアルコールの種類と濃度が確定できたら、人工的に霜を生成し、解氷する実験も行う予定である。また、並行して、予報サイトの開設もこれから行っていきたい。

5 参考文献

- 1) 『千葉市中央区南生実町』フロントガラスが凍結したまま、乗用車を運転して、78歳の女性をはねた男を逮捕！ 千葉日報オンライン 2017年01月17日
- 2) 寒冷地でフロントガラスの凍結を防ぐには？
JAF ニュース http://www.jaf.or.jp/profile/news/file/2014_45.htm

観客賞 賞金 5 万円

日射量・月謝量測定システム
「日進月歩くん」の開発
中央大学附属中学校・高等学校
地学研究部



日射量・月射量測定システム

「日進月歩くん」の開発

自動日周運動追尾システムを用いた

太陽光・月光発電

中央大学附属中学校・高等学校 地学研究部

石本貴昭・米村優輝・佐藤弘一・鈴木涼太

概要

一日中、自動で太陽と月を追尾しながら発電実験を行うことを目的とした、天体望遠鏡用赤道儀に太陽光パネルを搭載した装置「日進月歩くん」を開発した。本実験では「日進月歩くん」を用いて、人工的な月光（光量を月光程度に調節した LED 電球）を利用した模擬的な発電実験を行った。その結果、月光を用いた発電が可能であることが示唆された。また実験により、太陽光パネルに対して垂直に光が当たる時に最大効率の発電を行うことができる、本装置の自動日周運動追尾システムの有効性が確認された。

謝辞

今回の研究では、中央大学附属中学校・高等学校教諭の、平野誠先生（司書教諭／顧問）、窪田史先生（英語科教諭／顧問）、田島丈年先生（理科講師／委嘱指導者）、並びに伊藤早織先生（理科講師／委嘱指導者）にご指導を頂いた。ここに深謝の意を表す。また、今回の研究に協力して下さった地学研究部員 21 名に感謝の意を表す。

1. はじめに

東日本大震災による原子力発電所の事故を受けて、改めて再生可能エネルギーが注目されている。石炭火力や石油火力の火力発電では、発電燃料燃焼による 1 kWhあたりのライフサイクルCO₂排出量はそれぞれ 864 g-CO₂/kWh、695 g-CO₂/kWhであるが、太陽光発電や風力発電では一切放出されることはない¹⁾。近年、温室効果により加速する地球温暖化へ警鐘が鳴らされているが、温室効果は化石燃料の燃焼により生まれるCO₂の排出が主な原因である。一方、再生可能エネルギーによる発電は、排出されるCO₂や廃棄物等といった環境への負荷が極めて少ない。そのため現在、再生可能エネルギーが重要視されている。

再生可能エネルギーには、太陽光発電、水力発電、風力発電、並びに地熱発電等があるが、中でも太陽光発電は、一般家庭に広く普及している発電として注目されている。太陽光発電のメリットは、火力発電と比べて大幅に化石燃料を節約でき、さらに自然エネルギーである太陽光により太陽が出ている間は半永久的に発電することができる点である。しかし、太陽光発電のデメリットとしては、太陽の出ている夜間の発電ができないことが挙げられる。そこで、このデメリットを解消するために、月の光を利用した月光発電に着目した。さらに、太陽光発電と月光発電を組み合わせ、かつ部活動で用いている天体望遠鏡用赤道儀で太陽と月を自動追尾することで、昼間は太陽光、夜間は月光で一日中最大効率の発電を行うことができると考えた。本実験に取り組むにあたり先行研究を調査したが、月光を用いた発電は効率化が非常に難しいことから、ほとんど行われておらず実用化に至っていなかった。したがって、月光発電の効率化が実現され一般家庭に普及すれば、現在世界中で危惧されているエネルギー不足を解決する新たな発電として活躍すると確信している。

本稿では、天体望遠鏡用赤道儀による自動追尾式太陽光・月光発電の模擬実験について報告する。まず、ソーラーパネルと光の成す最も発電効率の良い角度を調べた。次に、夜空の明るさに対する発電量の変化を調べた。そして、月光発電による予測発電量を算出した。

¹⁾ 一般財団法人日本原子力文化財団「原子力・エネルギー図面集 2-1-9」 <<https://www.ene100.jp/zumen/2-1-9>>

2. 材料

- ・ 100 W 単結晶ソーラーパネル (ECO-WORTHY M100-1) 2 枚
- ・ 天体望遠鏡用赤道儀 (株式会社高橋製作所 EM-200) 2 台
- ・ 25 W 口金 e26 5000 K 昼白色 LED 電球 (Betorcy 社) 1 球
- ・ クリップライト E26 (株式会社ヤザワコーポレーション CLX605CH) 1 個
- ・ Sky Quality Meter (Unihedron 社) 1 台
- ・ ログ機能付きデジタルマルチメーター (三和電機計器株式会社 PC520M) 1 台
- ・ 抵抗器 (100 Ω \pm 5%) 1 本
- ・ 天体望遠鏡用三脚 (株式会社高橋製作所 M脚) 2 台
- ・ マッチプレート (株式会社高橋製作所) 2 枚
- ・ ワニ口クリップ 4 本
- ・ 厚紙 1 枚
- ・ 木板 (120.0 \times 22.0 \times 1.1 cm) 2 枚
- ・ 材木 (200.0 \times 3.0 \times 4.0 cm) 4 本
- ・ ユニクロ皿木ネジ (3.5 \times 25 mm、皿木ネジ) 28 本
- ・ ユニクロ皿木ネジ (コーススレッド w51) 16 本
- ・ ユニクロ皿頭小ネジ (6 \times 30 mm、皿頭小ネジ) 12 本
- ・ 六角ナット 12 個
- ・ ワッシャー 12 個

3. 材料

3-1. ソーラーパネルと赤道儀を繋ぐ木枠の組み立て方 (2 台製作)

- ① 2つの材木をそれぞれ 57.1 \times 3.0 \times 4.0 cm、124.0 \times 3.0 \times 4.0 cm となるようにのこぎりで切断した (図 1、図 2)。
- ② ①で作った 4 本の材木を用いてソーラーパネルを囲んだ。四隅に皿木ネジを 2 本ずつはめるために、電動ドリルで 2 つ穴を開け、皿木ネジで固定した。
- ③ 木板をのこぎりで 3 枚に切断した。60.0 \times 22.0 \times 1.1 cm の木板 (大) を 1 枚、30.0 \times 11.0 \times 1.1 cm の木板 (小) を 2 枚作った。
- ④ 木板 (大) と木枠を電動ドリルと皿木ネジで固定した (図 3)。同様に、木板 (小) も木枠に固定した。
- ⑤ マッチプレートの重心と木板 (大) の重心を合わせ、マッチプレートの四隅の穴に合うように、木板 (大) を電動ドリルと皿木ネジで固定した (図 4)。

3-2. 「日進月歩くん」の組み立て方 (2 台製作)

- ① 天体望遠鏡用三脚の脚を三角板で固定した。

- ② 赤道儀を天体望遠鏡用三脚に乗せ、2つを付属のボルトで固定した。
- ③ 鏡筒のバランスを取るための付属のおもり2個（5 kg/個）を赤道儀に取り付けた。
- ④ 付属の六角ネジでマッチプレート赤道儀に固定した。
- ⑤ マッチプレートの四隅の穴に合うように木枠を赤道儀に乗せ、木枠とマッチプレートを皿頭ネジ、六角ナット、ワッシャーで固定した。
- ⑥ 木枠にソーラーパネルをはめた（図5）。

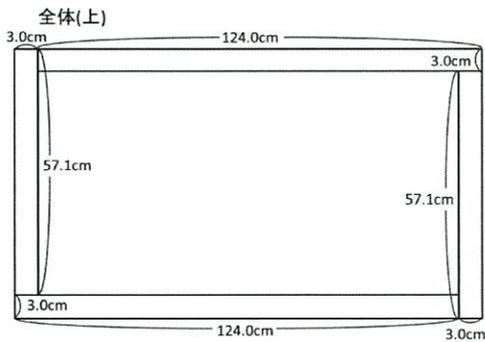


図1. 上から見た木枠



図3. 木枠に木板（大）を固定する様子

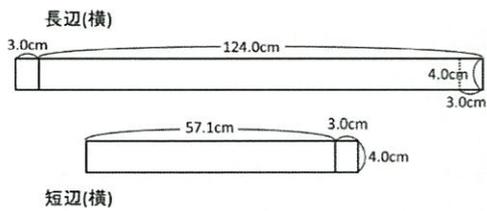


図2. 横から見た木枠

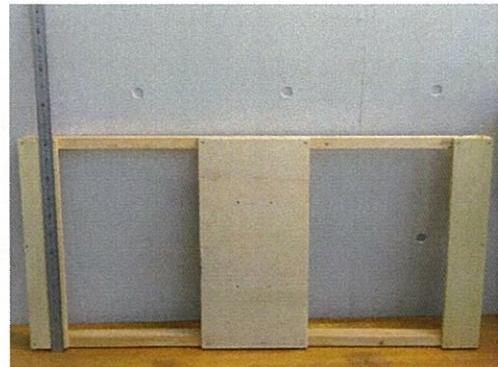


図4. 完成した木枠



図 5. 完成した「日進月歩くん」と筆者ら

4. 実験

4-1. 実験 I ソーラーパネルと光の成す角度の検証実験

1. 実験目的

天体望遠鏡用赤道儀で月を追いつつソーラーパネルで最大効率の発電を行うため、どの角度でソーラーパネルに光が当たるのが最も効率が良いのか検証した。具体的には、ソーラーパネルと光の成す角度を 90° 、 75° 、 60° 、 45° 、 30° 、 15° 、 0° と変えていき、それぞれの場合での電流および電圧量を比較した。

2. 実験方法

中央大学附属中学校・高等学校視聴覚ホール（図 6）で行った。

- ① 机 2 つを並べた上に椅子を 1 つ乗せ、視聴覚ホールの南側に置いた。
- ② LED 電球を付けたクリップライトを椅子にはさみ固定した（図 7）。
- ③ 光源からの光は机の間の通路を通るように設置し、光の延長線上にあたる壁にソーラーパネルを立て掛けた。机が並んでいる視聴覚ホールの中央部は、入り口から教壇まで下り階段（9 段 108.4 cm）になっているため、光はソーラーパネルを見下ろす状態にした。
- ④ 光の明るさを求めるため、Sky Quality Meter でソーラーパネル周辺の平方秒角あたりの等級（mag/arcsec²）を 5 回測定しその平均値を求めた。Sky Quality Meter によると満月で空が照らされている状態の等級は 17 mag/arcsec² だが、測定結果はそれよりも大きくなった。したがって、LED 電球の明るさを月光の 17 mag/arcsec² に合わせるため、減光を行う必要があることが分かった。
- ⑤ LED 電球からの光の減光をするために、厚紙をクリップライトの前側に養生テープで張り付けた。厚紙からクリップライトの端までの長さ（光が出ている部分）は 2.6 cm、光源の中心からクリップライトの端までの長さは、その半分なので 1.3 cm とした（図 9）。

- ⑥ 視聴覚ホール南側にある段（高さ 16.0 cm）の上に机（高さ 71.3 cm）、椅子（高さ 45.4 cm）、並びに光源（椅子とクリップライトの距離 2.0 cm、光源の中心からクリップライトまでの長さ 1.3 cm）を設置したため、ホールの最も低い所から光源までの高さは 244.4 cm となった。
- ⑦ ホールの最も低い所から 44.4 cm 上部の教壇にソーラーパネルを立て掛け、壁に立て掛けた時に光が垂直にソーラーパネルに当たる位置を決めた。
- ⑧ 光源の位置を点 L、ソーラーパネルを立て掛ける壁と教壇との接線の中で点 L に最も近い点を M、点 L から地面に下した垂線の足を点 N とした。この時 $\angle LNM$ は 90° となる（図 9）。
- ⑨ 視聴覚ホールの北側壁面から光源までの長さ MN は下記のようになった。
$$MN = 2500 - (80.0 + 109.2) = 2310.8 \text{ (単位: cm)}$$
また、光源からソーラーパネルの水平面までの長さ LN は下記のようになった。
$$LN = 244.4 - 44.4 = 200.0 \text{ (単位: cm)}$$
- ⑩ $\angle LMN$ を θ とすると、
$$\tan\theta = 0.08655011\dots$$
となる。
三角比の表より $\tan 5^\circ$ は 0.0874886... であるから、 θ を 5° とした。よって光源の俯角は 5° となった。
- ⑪ 光源の俯角が 5° となることから、光と地面の成す角度 $\angle LMN$ は 5° である。したがって、ソーラーパネルと光の成す角度を 90° に設定する時、地面とソーラーパネルの成す角度は 85° にしなければならない。ソーラーパネルと光の成す角度が 90° 、 75° 、 60° 、 45° 、 30° 、 15° 、 0° の時の、地面とソーラーパネルの成す角度を算出した（表 1）。
- ⑫ ソーラーパネルと光の成す角度を 90° 、 75° 、 60° 、 45° 、 30° 、 15° 、 0° とした時の電流および電圧量をデジタルマルチメーターで測定した。光と地面の成す角度 $\angle LMN$ を考慮し、ソーラーパネルの傾きの角度は、スマートフォンの分度器アプリで計測した（図 10、図 11）。
- ⑬ 直流電流の測定時は抵抗器とデジタルマルチメーターを直列つなぎ（図 12）、直流電圧の測定時は並列つなぎにした（図 13）。この時のそれぞれの単位は μA 、 mV であった。デジタルマルチメーター、抵抗器、ソーラーパネルは 4 本のワニ口クリップで繋いだ。抵抗器は $100 \Omega \pm 5\%$ のものを使った
- ⑭ 電流および電圧量は 1 分おきに 10 回ずつ測定し、その平均値を求めた。

表 1. 等級 17 mag/arcsec² におけるソーラーパネルと光の成す角度に対する地面とソーラーパネルの成す角度

ソーラーパネルと光の成す角度	地面とソーラーパネルの成す角度
90°	85°
75°	70°
60°	55°
45°	40°
30°	25°
15°	10°
0°	-5°*

* 地面とソーラーパネルの成す角度が -5°の時は、壁に立て掛けずに実験を行った(図11)。



図 6. 視聴覚ホール



図 8. 厚紙を貼った照明装置の様子



図 7. 椅子に取り付けた照明装置の様子

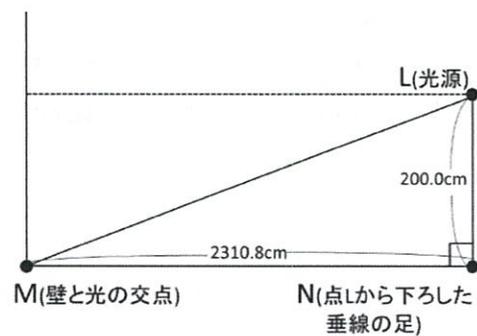




図 10. 角度を測定する様子



図 11. ソーラーパネルと光の成す角度が 0° の時の実験の様子

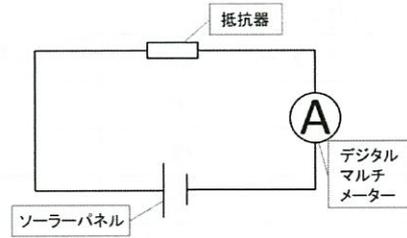


図 12. 電流測定での回路図

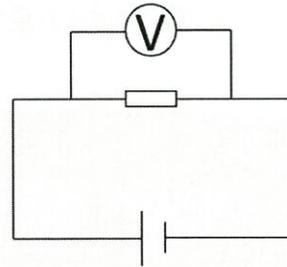


図 13. 電圧測定での回路図

4-2. 実験Ⅱ 明るさの変化における発電の検証実験

1. 実験目的

月は月齢によって明るさが変わるため、その変化を人工的に再現した。本実験では LED 電球の明るさを段階的に変えていき、このときの電流および電圧量を測定した。

2. 実験方法

ソーラーパネルと LED 電球の設置方法、電流および電圧量の測定方法は実験Ⅰと同様である。

- ① ソーラーパネルと光の成す角度は 90° とした。
- ② 月齢による明るさの変化を再現するため、Sky Quality Meter で測定した等級が 16、18、19 mag/arcsec² の時の電流および電圧量を測定した。17 mag/arcsec² の時の値は実験Ⅰですでに分かっていたため、実験Ⅱでは測定をしなかった。また、実験Ⅰと同様に、Sky Quality Meter でソーラーパネル周辺の平方秒角あ

たりの等級を5回測定しその平均値を求めた。

- ③ 最初に 16 mag/arcsec² での電流および電圧量を測定した。17 mag/arcsec² の時より明るい状態にするため、厚紙の位置を徐々に上げ、Sky Quality Meter で等級を測定しながら、16 mag/arcsec² に近づけていった。
- ④ 次に 18、19 mag/arcsec² での電流および電圧量を測定した。17 mag/arcsec² の時より暗い状態にするため、厚紙の位置を徐々に下げ、Sky Quality Meter で等級を測定しながら、18、19 mag/arcsec² に近づけていった。

4-3. 実験Ⅲ 月の明るさの測定実験

1. 実験目的

実験Ⅱでは、ソーラーパネルに当たる光の等級に対する電流および電圧量を求めた。そこで、実際の町の中での月明かりの等級を測定し、実験Ⅱで得られたデータからおおよその電流および電圧量を算出する。

2. 実験方法

2018年10月18日(木)19時30分頃、埼玉県所沢市にて Sky Quality Meter を用いて町明かりを含めた月明かりの等級を5回測定し、その平均値を求めた。

5. 結果

5-1. 実験Ⅰの結果

Sky Quality Meter で等級を測定すると、結果は 17.18、17.21、17.21、17.17、17.20 mag/arcsec² となり、平均値は 17.194 mag/arcsec² となった。これにより満月に近い 17 mag/arcsec² を再現することができた。

得られた電流・電圧量のデータを以下の表とグラフにまとめた(表2、図14)。

グラフからも分かるように、90°から15°ごとに角度が減少するにつれ、電流および電圧量ともに減少傾向が見られた。具体的には、電流は90°の時に0.300 μAと示されていたが、75°の時も0.300 μA、60°の時は0.270 μA、45°の時は0.300 μA、30°の時は0.150 μA、15°の時も0.150 μA、0°の時は0.070 μAとなった。電圧は90°の時に0.070 mVと示されていたが、75°の時は0.039 mV、60°の時は0.027 mV、45°の時は0.021 mV、30°の時は0.019 mV、15°の時は0.006 mV、0°の時は0.008 mVとなった(表2)。

また、近似式を求めるために、相関係数が最も1に近い近似式のグラフを求めた。これにより、電流の近似式のグラフは累乗近似、電圧の近似式のグラフは指数近似となった。

表2. ソーラーパネルと光の成す角度と電流および電圧量

ソーラーパネルと光の成す角度	電流 (μA)	電圧 (mV)
0°	0.070	0.008
15°	0.150	0.006
30°	0.150	0.019
45°	0.300	0.021
60°	0.270	0.027
75°	0.300	0.039
90°	0.300	0.070

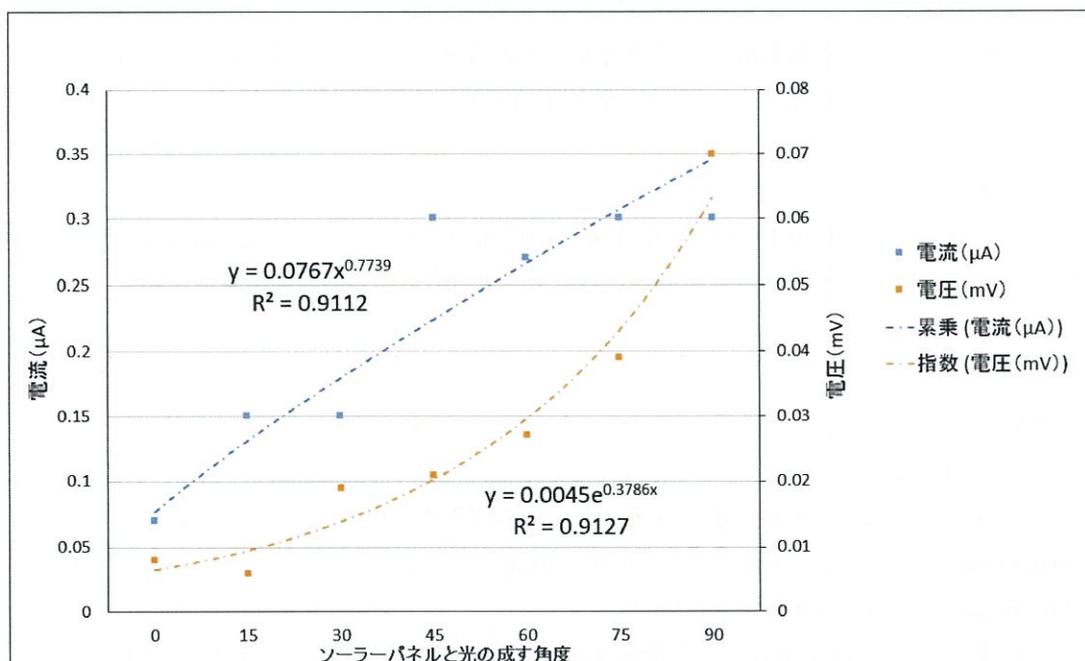


図 14. ソーラーパネルと光の成す角度と電流および電圧量の関係

5-2. 実験Ⅱの結果

得られたデータは、16.542 mag/arcsec²の時の電流が1.25 μA、電圧は0.125 mVで、18.190 mag/arcsec²の時の電流が0.250 μA、電圧は0.020 mV、19.182 mag/arcsec²の時の電流が0.080 μA、電圧は0 mVであった。また実験Ⅰより17.194 mag/arcsec²の時の電流が0.300 μA、電圧は0.070 mVであった(表3)。

等級 (mag/arcsec²) を照度 (lx) に換算するため、まず Unihedron 社のウェブサイト を参照し、得られた平方秒角あたりの等級 M (mag/arcsec²) から単位面積あたりの輝度 L (cd/m) を求めるには、

$$L = 108000 \times 10^{-0.4M}$$

の式を用いた²⁾。Mに16.542を代入すると、Lは0.026098993となった。

さらに単位面積あたりの輝度L (cd/m) から照度E (lx) を求めるには、

$$L = \frac{\rho}{\pi} \cdot E \Leftrightarrow E = \frac{L\pi}{\rho} \quad (\text{反射率 } \rho \cong \frac{8}{100})$$

の式を用いた³⁾。Lに0.026098993 (等級が16.542の時)を代入すると、Eは1.024905069となった。等級が17.194、18.190、19.182の時も同様にして照度を求めると、照度は0.562190679 (等級が17.194の時)、0.224638216 (等級が18.190の時)、0.090091463 (等級が19.182の時)となった。

得られた照度と電流および電圧量のデータを以下のグラフ (表3、図15) にまとめた。

また、データの予測をする近似式を求めるために、相関係数が最も1に近い近似式のグラフを求めた。これにより、電流の近似式のグラフは指数近似、電圧の近似式のグラフは線形近似となった。

表3. 得られた等級と照度、並びに電流および電圧量

ソーラーパネル周辺の平方秒角あたりの等級 (mag/arcsec ²)	照度 (lx)	電流 (μA)	電圧 (mV)
16.542	1.024905069	1.25	0.125
17.194	0.562190679	0.300	0.070
18.190	0.224638216	0.250	0.020
19.182	0.090091463	0.080	0

²⁾ Unihedron 「Convert visual mags/arcsecond² to cd/m²」 <<http://unihedron.com/projects/darksky/magconv.php>>

³⁾ CCS 株式会社 「光と色の話第一部第10回反射面における照度と輝度の関係」 <https://www.ccs-inc.co.jp/guide/column/light_color/vol10.html>

⁴⁾ 財団法人国立公園協会 「太陽光発電システム景観調査」 <http://www.env.go.jp/nature/mega_solar_na/conf/h2602/mat04_8.pdf>

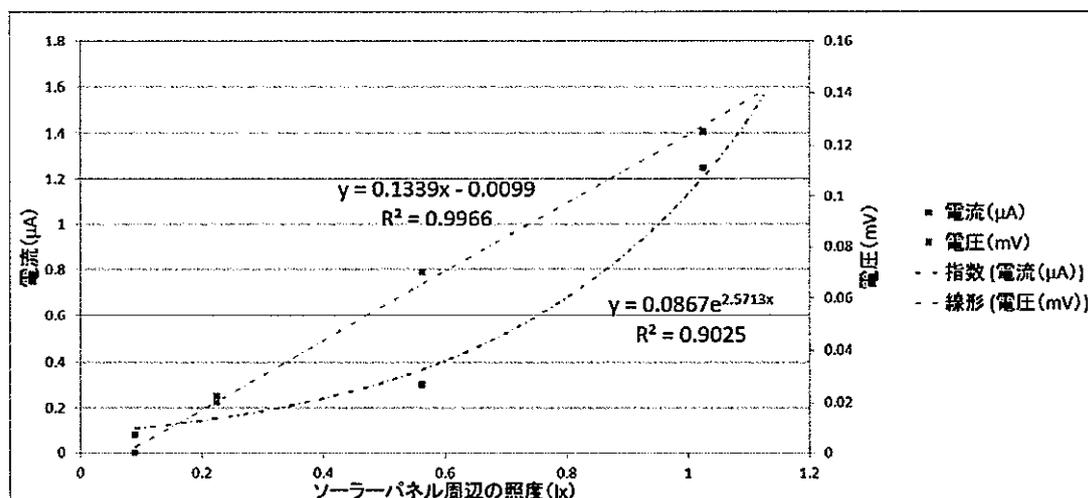


図 15. ソーラーパネル周辺の照度と電流および電圧量の関係

また、光がソーラーパネルに垂直に当たるときを基準にした電流および電圧量のパーセンテージを求めた (表 4)。電流および電圧量はいずれも急激な減少が見られた。

表 4. ソーラーパネルと光の成す角度に対する電流および電圧量、並びに 90°を基準としたその割合

角度	電流 (μA)	90°を基準とした割合	電圧 (mV)	90°を基準とした割合
90°	0.300	100 %	0.070	100 %
75°	0.300	100 %	0.039	56 %
60°	0.270	90 %	0.027	39 %
45°	0.300	100 %	0.021	30 %
30°	0.150	50 %	0.019	27 %
15°	0.150	50 %	0.006	9 %
0°	0.070	23 %	0.008	11 %

5-3. 実験Ⅲの結果

町明かりを含めた月明かりの等級は、15.93、15.93、15.92、15.91、15.92 mag/arcsec² となり、5つのデータの平均値は 15.922 mag/arcsec² となった。この日の月齢は 9.0、南中時刻は 18 時 56 分であった⁵⁾。

⁵⁾ 国立天文台天文情報センター「暦計算室」 <<https://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/>>

6. 考察

6-1. 実験Ⅰの考察

実験Ⅰの結果より、ソーラーパネルと光の成す角度が90°の時、すなわち光がソーラーパネルに垂直に当たる時が、最も良い発電効率が得られると分かった。これは、ソーラーパネルを天体望遠鏡用赤道儀に取り付けて、光がソーラーパネルに対して垂直に当たるように太陽・月を追尾することにより、最大の電流および電圧量が得られることを示しており、この方法が最も有効な手段であるということを証明するものである。

6-2. 実験Ⅱの考察

実験Ⅱの結果より、ソーラーパネル周辺の平方秒角あたりの等級が増加するにしたがって、電流および電圧量は減少していくことが明らかになった。すなわち、満月における発電量が最も高く、新月における発電量が最も低いことが分かった。またデータの近似式を用いることで、他の等級における電流および電圧量を予測することが可能になった。

6-3. 実験Ⅲの考察

実験Ⅲの結果より、月齢9.0のときの町明かりを含めた月明かりの等級は15.922 mag/arcsec²と分かった。実験Ⅱと同様に、これを輝度に換算しさらに照度に換算すると、照度は1.8141936445 lxと算出された。これを実験Ⅱで求めたソーラーパネル周辺の照度と電流および電圧量の関係式にそれぞれあてはめると、電流は9.203047902 μAとなり、電圧は0.233020529 mVと概算することができた。このとき電流は $9.203047902 \times 10^{-6}$ A、電圧は $2.33020529 \times 10^{-4}$ Vである。電力Wは電流Aと電圧Vの積で求まることから、電力は $2.144499091 \times 10^{-10}$ Wとなった。

また、環境省の平成24年度全国星空継続観察実験実施報告書より、2012年8月21日21時43分、同年1月11日19時22分の東京都三鷹市国立天文台の町明かりの等級は、それぞれ18.0、17.4 mag/arcsec²であった⁶⁾。実験Ⅲを行ったのは10月なので、その2つの平均値17.7 mag/arcsec²を町明かりの等級とする。これを、上で求めたのと同じように、照度を求め電流および電圧量を求めると、電流は $2.14758613 \times 10^{-7}$ A、電圧は 3.7335032×10^{-5} V、さらに電力 $8.018019689 \times 10^{-12}$ Wと概算することができた。

町明かりを含んだ月明かりの等級(15.922 mag/arcsec²)の時の電力量
 $2.144499091 \times 10^{-10}$ Wから、町明かりの等級(17.7 mag/arcsec²)の時の電力量
 $8.018019689 \times 10^{-12}$ Wを差し引いた値、すなわち電力 $2.064318894 \times 10^{-10}$ Wが月明かり

⁶⁾ 環境省 水・大気環境局大気生活環境室 (2013)『スターウォッチング・ネットワーク 平成24年度 冬期 全国星空継続観察の実施結果報告書』

⁷⁾ 環境省 水・大気環境局大気生活環境室 (2013)『スターウォッチング・ネットワーク 平成24年度 夏期 全国星空継続観察の実施結果報告書』

のみによって発電できる電力量である。したがって1分間で $2.064318894 \times 10^{-10}$ W の電気を生み出すことが判明した。ただし、これは月齢 9.0 の時の発電量である。満月の月齢 15.0 の時の発電量は、次のように求まる。

$$2.064318894 \times 10^{-10} \times \frac{15.0}{9.0} = 3.44053149 \times 10^{-10} (\text{W})$$

を得た。したがって、満月の時1分間で $3.44053149 \times 10^{-10}$ W の発電量を得られることが分かった。

2019年の春分・夏至・秋分・冬至の日における日の出と日の入りの時刻、並びに夜間の時間（太陽が出ていない時間とする）を調べた（表5）⁸⁾。また、これらの日が全て満月（月齢 15.0）かつ晴天で夜間一定の電力量を得られるものと仮定した時の電力量をまとめた（表5）。夜間の電力量は、1分間の電力量 $3.44053149 \times 10^{-10}$ W と夜間の時間から算出した。

表 5. 2019年の春分・夏至・秋分・冬至の日における日の出と日の入りの時刻、並びに夜間の時間に対する電力量（W）

月日	日の出時刻	日の入り時刻	夜間の時間	夜間電力（W）
3月21日（春分）	5時44分	17時53分	11時間51分	$2.446217889 \times 10^{-7}$
6月22日（夏至）	4時26分	19時00分	9時間26分	$1.947340823 \times 10^{-7}$
9月23日（秋分）	5時29分	17時38分	11時間51分	$2.446217889 \times 10^{-7}$
12月22日（冬至）	6時47分	16時32分	14時間15分	$2.941654424 \times 10^{-7}$

以上のことから、冬至の日が最も夜の時間が長いこと、夏至の日が最も夜の時間が短いことが分かった。

7. 結論

実験Ⅰ～Ⅲの結果は、月光による発電が可能であることを顕著に示している。実験Ⅰの結果からは、ソーラーパネルと光が垂直に当たる時が最も発電量を得られることが証明でき、天体望遠鏡用赤道儀による自動日周運動追尾式の太陽光・月光発電の実用性が確認できた。実験Ⅱの結果からは、満月から新月へ月齢が移り照度が減少していきながら電流および電圧量も減少していくことが確認できた。実験Ⅲの結果からは、2019年の春分・夏至・秋分・冬至の日における晴天かつ満月の日の夜間の発電量を、実験Ⅰ・Ⅱの結果を利用して求めた。また、実際に発電を行う際も、実験Ⅰ・Ⅱと同様に、得られたデータから近似式を求めることで発電量が予測できることが分かった。

しかし、月光発電による発電量は太陽光発電と比べて非常に低い。天体望遠鏡用赤道

⁸⁾国立天文台天文情報センター「暦計算室」 <<https://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/>>

儀を用いて、光がソーラーパネルと垂直に当たるようにする最大効率の発電を行ったとしても、現時点では再生可能エネルギーとして一般家庭で実用化できるほどの発電量を得ることは難しいと考えられる。

8. 今後の課題・改善点

今回の実験では、月光をLED電球で再現して擬似的な月光発電実験を行ったが、台風の影響などにより天候に恵まれず、正確な発電量の予測を行う上で必要な月の等級の実測値を十分に得られなかった。今後はより正確な発電量の予測を行うために、様々な月齢の月の等級を測定し、それぞれの場合での発電量の比較を行いたい。

また今回の実験では、実際の太陽と月による自動日周運動追尾システム「日進月歩くん」を用いた自動追尾発電を行うことができなかった。実験Ⅰ～Ⅲによって、夜間での月光発電の可能性と天体望遠鏡用赤道儀での自動追尾発電の有効性が確認された。次回はそれを発展させて、昼間は太陽光発電、夜間は月光発電を行う連続した自動追尾式太陽光・月光発電を行いたい。そして、この昼夜にまたがる連続での太陽光・月光発電から、1日の電流および電圧量の平均推移のグラフを作成したい。さらに、雲量、月齢、観測場所、町明かり、時間等の様々な条件を変えた場合での発電量の差異の検証や、1カ月間、1年間での太陽光・月光発電による正確な発電量の予測を行う方針である。

結論でも述べたように、月光発電は太陽光発電と比べて発電量が僅かしかない。したがって月光発電を実用化させるには、何等かの方法で発電量を増やさなければならない。例えば、月光をレンズで集光し、それをソーラーパネルに照射することで光を増幅したり、ソーラーパネルの周囲にたくさんの鏡を置き月光を反射してソーラーパネルに照射することで光を増したりする等の工夫が必要である。他にも、今回はソーラーパネル1枚で発電を行ったが、それを2枚、3枚と増やして発電を行ったり、上で述べたような発電量増加方法を幾つか組み合わせて発電を行ったりすることも有効である。

今後、発電実験を行う際は、発電量を増やす工夫を凝らした上で「日進月歩くん」をさらに進化させていきたい。

参考・引用文献

1. CCS株式会社「光と色の話第一部第10回反射面における照度と輝度の関係」<https://www.ccs-inc.co.jp/guide/column/light_color/vol10.html>
2. 本間琢也・牛山泉・梶川武信(2012)『「再生可能エネルギー」の基本—普及に向けて技術革新が続く次世代発電システムの現状と可能性』(イチバンやさしい理工系シリーズ20)ソフトバンク クリエイティブ株式会社
3. 石原顕光(2012)『トコトン優しい再生可能エネルギーの本』太田健一郎監修、日刊工

業新聞社

4. 一般財団法人日本原子力文化財団「原子力・エネルギー図面集 2-1-9」 <<https://www.ene100.jp/zumen/2-1-9>>
5. 環境省 水・大気環境局大気生活環境室 (2013)『スターウォッチング・ネットワーク 平成 24 年度 夏期 全国星空継続観察の実施結果報告書』
6. 環境省 水・大気環境局大気生活環境室 (2013)『スターウォッチング・ネットワーク 平成 24 年度 冬期 全国星空継続観察の実施結果報告書』
7. 国立天文台天文情報センター「暦計算室」 <<https://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/>>
8. 産業技術総合研究所太陽光発電工学研究センター編著 (2013)『トコトン優しい太陽電池の本 第2版』仁木栄・松原浩司監修、日刊工業新聞社
9. 佐藤勝昭 (2011)『「太陽電池」の基本—新エネルギーの切り札となる太陽光発電のしくみ』(イチバンやさしい理工系シリーズ 13) ソフトバンク クリエイティブ株式会社
10. Unihedron「Convert visual mags/arcsecond to cd/m」 <<http://unihedron.com/projects/darksky/magconv.php>>
11. 山崎耕造 (2010)『トコトン優しい太陽エネルギー発電の本』日刊工業新聞社
12. 財団法人国立公園協会「太陽光発電システム景観調査」 <http://www.env.go.jp/nature/mega_solar_na/conf/h2602/mat04_8.pdf>