

ひこうき雲の観測と実験

気象予報士 10028 号 伊藤優香

共同実験者 城戸研仁

1. はじめに

今日、上空を行き交う飛行機は1日約19万便あり、飛行機の排出ガスは二酸化炭素、水蒸気など、温室効果ガスが含まれており、地球温暖化や気候変動への影響を与えるとして注目されている。飛行機から排出されたガスによって後続に雲ができるものは飛行機雲と呼ばれ地上から目視で確認することができる。本研究では飛行機雲の生成や消滅過程を追究するとともに、理科実験の学びの手法について検討をする。

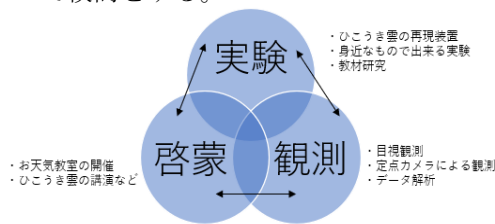


図1 計画プラン

2. 雲の生成実験

2.0 はじめに

海洋などの水が蒸発して水蒸気となって上昇し、水滴や氷晶となって浮かんでいるのが雲である。肉眼で雲が白く見えるのは雲粒が熱運動により不規則に動いているためである。これをブラウン運動という。

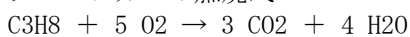
密閉容器に霧吹きで水を吹きかけ、蓋をすると内部の湿度は100%になるが、気体は白く見えない。これを過飽和といい、大気中に水蒸気が溢れている状態となっている。

アクリルパイプを真空ポンプを用いて真空状態にして冷凍庫と接続して冷やし、加湿器を稼働させたがアクリルパイプ内の気体は白くならなかった。^[11]

2.1 冷凍庫を用いた雲の生成実験

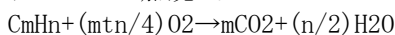
冷凍庫内(アイリスオーヤマ上開き冷凍庫 55 奥行 x 63.2 幅 x 85 高さ cm 冷媒: R600a)でガスバーナー(新富士バーナーパワートーチ RZ-832)の排気を冷却して変化を観察した。空気は白くならなかった。

プロパンガスの燃焼式



ガスバーナーの燃焼によって発生する水蒸気量は二酸化炭素とともに排出され、冷えて可視化できるほどの量ではないと考えられる。

ケロシンの燃焼式 C₉~C₁₅



飛行機は1秒あたり二酸化炭素を6000kg排出している。ケロシンの組成式を仮に

C₁₁H₂₄ とすると1秒あたり水蒸気を2600kg

排出している。

また、上空では気圧が下がるため露点温度が低下して雲が発生しやすい。

同冷凍庫内で高温スチームクリーナー

(Hapyvergo 高温蒸気洗浄機 1600W)を稼働させ、排気の変化を観察した。

空気は白く変化した。スチームクリーナーから排出された105℃の高温の蒸気が冷凍庫内の冷気に触れて急激に冷やされたため白く見えたためと考えられる。

次に、スチームクリーナーで冷凍庫内の湿度を上げた状態でガスバーナーを燃焼させた。

白色粒子がガスバーナーの燃焼熱により消えた。空気中の氷晶が溶かされたためと考える。

これは消滅飛行機雲と呼ばれる雲の内部を飛行機が通過する際に雲中の氷晶粒を力学、熱力学的に排除するために飛行機が通過した箇所の雲が消えて見える現象と類似しており、消滅飛行機雲の解説実験として行えるが、冷凍庫内に氷が氷結してしまうため冷凍室等での実験は望ましくないと考える。実験用冷凍庫を用いるか、冬季の屋外授業等で検討する。

2.2 ペットボトルを用いた雲の生成実験

炭酸キーパーを用いてペットボトル内を高圧にし、開封して一気に低圧にするとペットボトル内は白色となる。^[6]これは、ペットボトル内の空気塊が開封時にまわりの空気の温度の影響を受けずに体積が膨張し、ペットボトル内の空気塊の温度が一気に下がり、空気中の水蒸気が雲になる断熱膨張である。

2本のペットボトルに其々エタノールと熱湯を入れ、炭酸キーパーを用いてペットボトル内部を加圧し、常温と冷凍庫で開封して白色気体の消滅速度を比較した。

[結果]

常温20.5℃			
お湯	25秒	エタノール	60秒
冷凍庫			
お湯	30秒	エタノール	90秒

表1 ペットボトルを用いた雲生成結果

エタノールを入れたペットボトルを冷凍庫内で冷やしてから常温で開けると90秒だったが、冷凍庫内であけると60秒だった。常温でお湯を入れたときが一番早く消えた。お湯よりエタノールのほうが雲は長く残った。お湯よりエタノールのほうが揮発性が高く、空気中の水滴に衝突して凍結させる粒子として働いた。

消滅時間は気温差に依存することがわかった。

2.3 真空ポンプを用いた雲の生成実験

アクリルパイプを用いて真空ポンプで内部の空気を吸引すると真空状態を作ることができた。^[10]

真空状態でケロシン燃料等の燃焼実験を行うためには、飛行機のターボファンエンジンのように空気を取りこむ必要があり、アクリルパイプ内での再現性が厳しいため燃焼実験以外の方法で検討する。

フィルムケースに入浴剤（炭酸力のバブ）を1/3まで砕いて入れ、水を2/3まで入れた。蓋をしてアクリルパイプ（直径11cm厚み1cm長さ50cm）の中に置いた。真空ポンプを用いて、アクリルパイプ内を低圧

（250mmHg）にした。フィルムケース内が高圧になると中の水が突出した。

アクリルパイプ内に雲はできなかった。

フィルムケースの内部の圧力ではアクリルパイプ内の低圧部を体積膨張するに至らなかった。アクリルパイプの内部にさらに高圧の空気を流入する手段を検討する。

3. プラレールを用いた流体実験

プラレールとは、電池を用いて電車型可動玩具をレールの上を走行させる幼児用玩具である。等速で自動で可動できるという利点がある。

連結した軒樋（Panasonic アイアン丸 5.4m）の横に同延長のプラレール（TAKARA TOMY プラレール ES-10 近鉄名阪特急ひのとり）を並べ、可動機本体に染料をつけた絵筆を取り付けた。染料は食紅（ホームメイド食用色素青）を使用した。

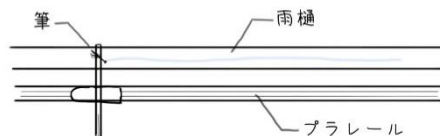


図2 プラレールを用いた流体実験

流れない水、流れのある水、洗濯のり（かねよ石鹼カネヨノール）を混ぜた水溶液を用いて流線形の比較を行った。流れは水道からホースを接続することによって水流を作った。また、絵筆を2本並べた状態で流れのない水で比較を行った。



図3 プラレールを用いた流体実験

流れのない状態を比較基準とし、絵筆からの2センチの染色幅を比較した。流れのない状態は約1cm、流れのある水は染料幅が広くなり約2cm、洗濯のりを混ぜた溶液は0.8cmと幅が狭くなった。

また、絵筆を2本並べた場合では、波状の間隔が狭くなった。このとき、絵筆は2.5cm離して並べた。

流れている粒子はBrown運動、層流場での速度のシヤー、乱流場での速度のシヤー、粒子沈降速度の差を持って衝突をする。絵筆の通過した後は乱流場となる。

レイノルズ数 $Re = \rho \cdot L \cdot U / \mu$

Re：レイノルズ数 L：代表長さ[m]

U：代表速度[m/s] ρ ：流体密度 [kg/m³]

μ ：粘性係数[Pa·s]

水道水の温度15℃における水の流体密度

998.2kg/m³、長さ4m、速度0.4m/s、

$Re = 998.2 \cdot 4 \cdot 0.4 / \mu = 1597.1 / \mu$

流れのない水、流れのある水、洗濯のりによる粘性の違いによる流体の乱れの違いが可視化できた。

今後、形態に修正を行い、ベントで行っていくこととする。

3. ひこうき雲の観測

3.1 目視観測

日常生活上において目視により観察できたひこうき雲を写真撮影し、同時刻に上空を飛行していた対応する飛行機のデータ（スマートフォンアプリ：フライトレーダー24）を記録した。観測日時、観測場所、飛行場所については別途付録として添付した。また、観測の際に同じ航路の機体があり機体の特定が困難な場合は記録として採用しないこととした。

3.1.1 結果 1

1. 2019年4月～2024年6月末の観測数

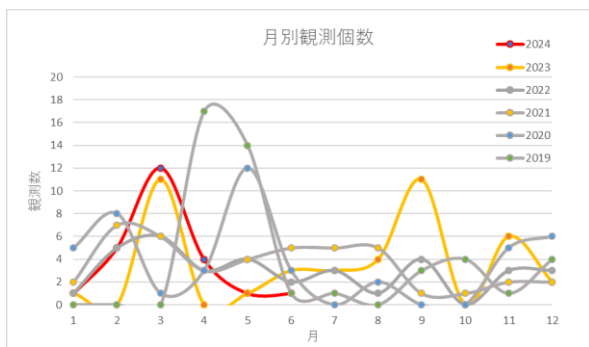


図4 ひこうき雲の観測数の比較

2019年は4月より観測を開始したため1～3月はデータなしとした。2023年7月～2024年6月において、9月と3月の観測数のピークがあり、11月が次いで多く観測できた。5月～8月の観測数は相対的に少なかった。

2022年度以前に比べて、9月の観測数が最も多かった。特に観測が多かった9月10～13日では西日本～北日本の各地で上空の寒気や湿った空気の影響で大気の状態が不安定となり、所々で激しい雨や雷雨であった。茨城上空に湿った空気の流入があったと考えられる。(図5)

秋は春に比べて上空のチリやホコリの量が少ないが、低気圧の通過に伴い高層に水蒸気量の流入が多く、秋雨前線北側でひこうき雲が多く観測できた。

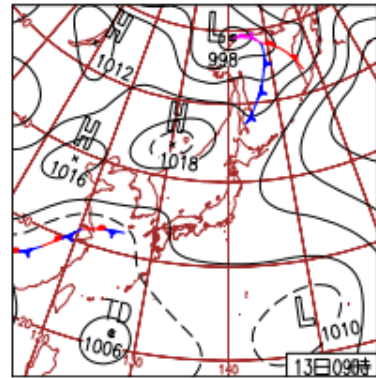


図5 2023年9月13日地上天気図

これまでの年間比較において3～5月の春が一番多くひこうき雲が観測できた。

ひこうき雲の出現する高層では雲は氷晶核が水滴や水蒸気を凍結、昇華させ氷晶が生成することで発生する。氷晶核は主に大気中に舞い上がった土壌粒子中の粘土鉱物からなる。^[8]

春は上空のチリやホコリの量が多く、氷晶核の量が多く、低気圧と高気圧が交互に通過する際、低気圧前面でひこうき雲が多く現れやすいため3～5月のひこうき雲の観測数は多かった。

高気圧に覆われると下降流が発生し、逆転層が生じる。逆転層が大気に蓋をして地上の塵や埃が滞留し上層の塵や埃も多くなった。2024年3月11日は4本のひこうき雲が観測できた。11日は高気圧に覆われ晴れたが、12日は前線を伴った低気圧が東進し関東では大荒れとなった。

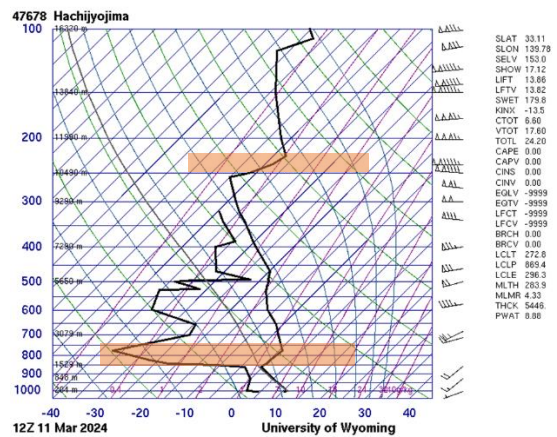


図6 2024年3月11日エマグラム

ひこうき雲の長さについて、上空に掌を伸ばした状態で指1本分(約1cm)をランク1、指2本分(約3cm)をランク2、指3本分(約4cm)をランク3、指4本分(約5cm)をランク4、掌一つ分(約10cm)をランク5、掌2つ分(約20cm)をランクS、それ以上をランクSSとした。

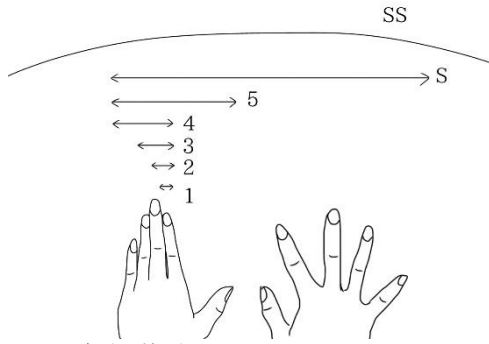


図7 観測基準

観測位置と飛行場所との距離によって観測レベルと実際の出現延長に以下のような相違が生じる。



図8 遠近法の計算

遠近法の計算 $y = wrd / ((w+x) * x) = 2 / ((1+x) * x)$

1km	5km	10km	20km	50km	100km	200km
1	1/15	1/55	1/210	1/1275	1/5050	1/31375

表2 観測距離に応じた出現延長

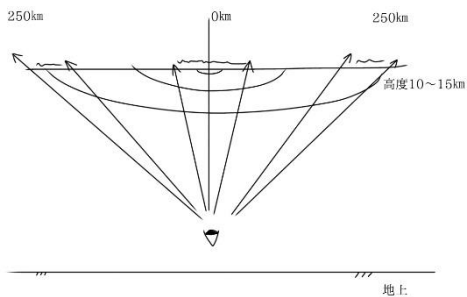


図9 観測距離と出現延長

各々の観測距離に応じて下記の重みづけを行った上で比較を行った。

距離/観測ランク	ランク変換						
	SS	S	5	4	3	2	1
5km	SS	S	5	4	3	2	1
10km		SS	S	5	4	3	2
20km			SS	S	5	4	3
50km				SS	S	5	4
100km						SS	S
200km							SS

表3 観測距離による重みづけ

写真から機体と比較した概算でひこうき雲の延長はランク1は約500~1,000m、ランク2は約1,000~3,000m、ランク3は約3,000~4,000m、ランク4は約4,000~5,000m、ランク5は約5,000~12,000m、ランクSは約12,000~24,000m、ランクSSは約24,000m以上とした。

2023年度の観測ランクと距離の関係は下記の結果となった。

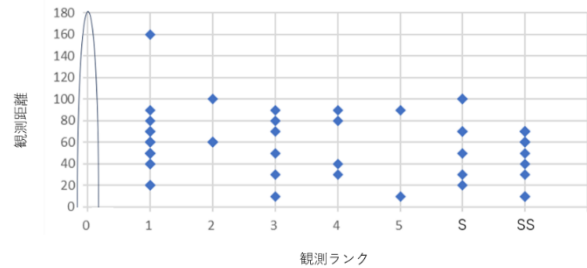


表4 観測ランクと観測距離の関係(23)

SSランクで肉眼で長く観測できる範囲は観測地点からおおよそ70kmまでであり、100kmより遠くを飛行する場合は1として観測された。

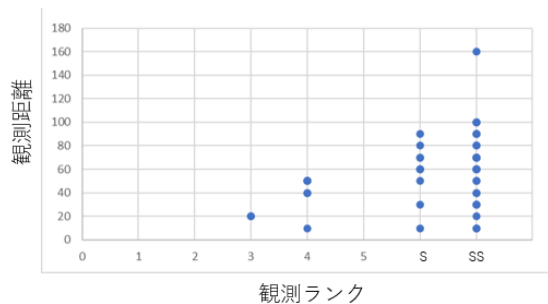


表5 観測距離に応じたランク変換(23)

観測された多くのものが12,000km以上のひこうき雲である結果になった。写真による機体との比較との誤差が生じてしまうため、重み付けによるランク変換についてさらなる検証が必要である。

3.1.2 結果2

ひこうき雲の目視観測できた時刻に出現していた雲と雲量を記録した。

雲の分類については「最新の国際基準で見分ける雲の図鑑」を参考に十種雲形別に分類した。^[1]

雲量は「プロが教える気象・天気図のすべてがわかる本」の雲量と天気判断を参考とした。^[2]

	巻雲	巻積雲	巻層雲	積乱雲	積雲	層積雲	高積雲
出現数	16	10	28	1	10	4	5
平均雲量	2.75	1.6	6.678571		3	1.2	1.5

表5 ひこうき雲出現時の雲形別雲量

観測できた78本のうち、他の雲がなかった観測は4回だった。ひこうき雲が現れるのは95%の確率で他にも雲が出現していた。

十種雲形別の分類だと、巻層雲が出現している際にひこうき雲も多く出現することがわかった。巻層雲の次に巻雲、巻積雲と高層の雲が同時に出現していた。巻層雲は平均雲量が6.7と多いのに対し、他の雲は雲量が3以下と少なかった。

巻層雲以外の雲が多い場合は、雲の中に消えてしまったため、ひこうき雲が確認できなくなってしまった。巻層雲が多い場合、ベール状のためひこうき雲は紛れずに存在し続けることができた。

上層雲が出ているときの上空は-25℃である。氷晶核の有効な数は-20℃で 10^3 個 m^{-3} と多い。^[8] 上層雲が出現していると雲生成に必要な氷晶核が多いため飛行機の通過の際にひこうき雲が出現した。

今後は観測を継続し、雲量による観測だけでなく、雲の状態による分類でも評価していきたい。

目視観測できたひこうき雲の78本の消え方の分類を行った。1分以内にひこうき雲が消えたものを消滅型、1分以上残ったものを残留型とした。消滅型は65本、残留型は13本だった。出現するひこうき雲の約83%は1分と残らずに消えていた。

消滅型と残留型の月毎のひこうき雲の観測数を比較した。(図10) 総数に対して1月と2月は残りやすかった。5月と6月に観測できた本数は少なく、どちらも消滅型だった。

残留/消滅型の年間比較

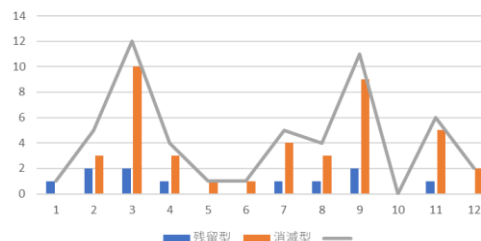


図10 ひこうき雲の観測数の比較

残留型13本のうち6本は17時台に観測した。観測できたのは日没時刻の81分前~10分前だった。今回、日没後に観測できたものはなかった。

太陽の傾きとともに地上気温が低下し赤外放射量も減少する。日没前に上層の水蒸気量が増え、ひこうき雲が多く見られるが、ひこうき雲が夕方によく見られるのは日没までで、日没後は巻層雲や層積雲など全雲量が増えるか、全く雲がなくなり全雲量が0になりひこうき雲は見られなくなる。

夜間にひこうき雲が出現することもあるが、暗いため確認しづらく、今までの観測本数は少ない。また、カメラによる観測でも撮影が難しいため、夜間のひこうき雲の観測は今後の課題である。

今回、ウィンドプロファイラのデータでの確認ができなかったが今後、データを保存し討を行っていく。

3.2 観測カメラによる常時固定観測

茨城県常総市に固定カメラを設置し、インターネットによって遠隔で動画を確認し、ひこうき雲の常時カメラ観測を行った。

- 2023年11月 iPhone8を設置した。youtubeに接続し、遠隔で観測を行った。24時間以上の継続した撮影ができなかった。
- 2023年12月 PANOX V2 全天球360度カメラを設置した。Youtubeで遠隔で画面を確認でき、画面を指で動かすことによって360度全球を見ることができた。しかし、アップデートに伴い、2日以上連続稼働ができなくなった。
- 2023年12月 ICAMI 防犯カメラを南北方向に1台ずつ設置し(計2台)、インターネットにより自宅のパソコンでHiP2P Clientまたはスマートフォン上でCamHiproを用いて録画データを毎日確認した。回線が途切れることなく観測が継続して行えた。

3.2.1 結果

1. 2023年12月～2024年6月末の観測数

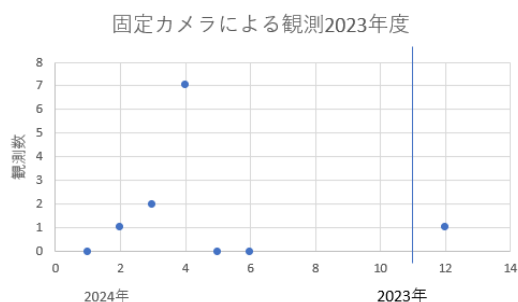


図11 固定カメラによる観測数

1月、5月、6月は固定カメラによるひこうき雲は観測できなかった。12月、2月は1本のみ、4月は7本の観測ができた。

確認できた11本のうち、8本は発生後すぐに大気中に消滅、もしくは、他の雲に合流して見えなくなった。カメラ観測によるひこうき雲の消滅率は73%と、目視観測(83%)に比べて低くなった。カメラ観測では消滅型が見えにくく見逃している可能性がある。

確認できた11本のうち、3本は時間とともに幅が広がり巻積雲となりカメラで消滅過程を確認できた。カメラに映っていた時間は其々6分、30分、13分だった。

30分以上消えないものは画面から外れて追跡ができなかった。カメラの数を増やすか、撮影画面が広いものに変えるなど今後検討する。

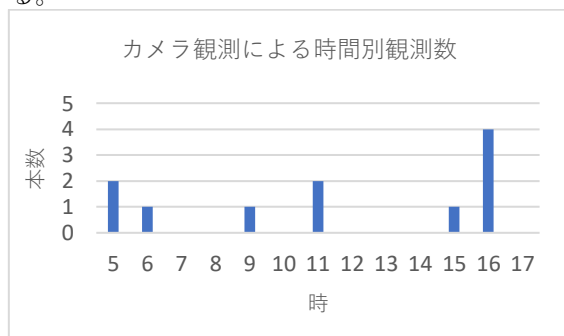


図12 カメラ観測によるひこうき雲の時間別本数(2023年度)

カメラでひこうき雲を観測できた時間別本数を比較した。(図12) 観測できた時間は5時、6時、9時、11時、15時、16時であった。16時が一番多く、その他の時間では1～2本と少なかった。太陽が高い12～14時では観測できなかった。

朝と夕方の太陽高度が低い時間に出現しやすく、南中時には出現が抑えられていると推測される。今回は観測数が少ないため、比較を行うためにはさらなる観測数が必要である。目視観測では観測時刻の偏りがあり、比較が行えてこなかったため、今後もカメラ観測を継続し、引き続き観測時刻の比較を行っていくこととする。

3.3 自動観測ツールによる常時固定観測

茨城県常総市に設置した固定カメラの動画を元に、ひこうき雲の自動観測ツールを作成した。10～20ピクセルの幅を10秒毎に撮影し、ひこうき雲を検出した場合に画像を保存し、日時を記録した。画像は1280×960に縮小してから検出とした。検出画像と観測画面の撮影保存を自動に行うものとした。

AI判定で95%以上であれば検出したと判定することとした。

2024年6月に稼働させたがひこうき雲は固定カメラで撮影できず、自動検出することができなかった。

3.3.1 結果



図13 自動観測ツール稼働結果

録画していたひこうき雲の動画データを対象に検出することができた。残留型、消滅型ともに検出できた。現在、録画データを手作業により個々に調べる方法をしているため、今後はこの自動観測ツールを使用することで正確性、時間の短縮になるよう活用していくこととする。

固定カメラによる観測ではひこうき雲のほか、ハロや雷なども観測できている。ひこうき雲だけでなく幅広い分野の研究活用を探っていく。

4. 発表やイベント登壇

こども時代の体験は一時的な楽しみだけでなく、その後の人生の豊かさに大きな影響を与えるため^[4]、こども達に向けてのお天気教室や実験教室は重要であり、成人の会話においても天気の話は雑談に使用されることが多く、雑談が問題解決型議論に与える影響について調査した研究では雑談を多く行なっているグループは発話も多い傾向があることがわかっている。^[12] また、新しい経験や体験をすると脳が活性化され、シナプスの通りが良くなれば伝達物質の放出量が増え、数が増えれば接点が増える分、情報をたくさん伝えられる・受け取れるという効果がみられる。^[13] こどもから大人まで新しい知識を得ることや体験をすることは良い効果をもたらすことから年齢問わずひこうき雲や天気に関する普及啓蒙活動を行う。

・2023年8月

龍ヶ崎市立中央図書館(親子約50名)

・2024年3月

守谷市北守谷児童センター(小学生約50名)

・2024年5月

つくばパン祭り出展(親子約40名)

・2024年6月

島根県お天気の出張授業(親子:約20名)

島根県ではこのような出張授業は初めてのことで大変お喜びいただけた。



図14 お天気教室開催の様子

5. おわりに

第13回気象文化大賞を受賞し、助成いただいたことにより多くの方にひこうき雲や空の話をお届けことができ、とても嬉しく思います。継続していることで問い合わせも増えてきて、今後もさらに多くの方に届けていけるよう精力的に活動を行ってまいります。長きにわたり、多大なるご支援に心より感謝致します。

6. 参考文献

- [1] 最新の国際基準で見分ける雲の図鑑
- [2] プロが教える気象・天気図のすべてがわかる本(ナツメ社)
- [3] 図解雑学よくわかる気象のしくみ
- [4] 文部科学省:令和2年度青少年の体験活動に関する調査研究結果報告
- [5] [山形 1996] 山形定:実験室スケールでの雲の生成とそのキャラクターゼーション,1996
- [6] 防衛省 雲の作り方
<https://www.mod.go.jp/asdf/awsg/aboutawsg/column/images/column014.pdf>
- [7] 雲の発生と天気図(姫路気象株式会社)
- [8] 一般気象学
- [9] よくわかる高層気象の知識(2訂版)一 JMH 図から読み解く
- [10] [伊藤 2022] 伊藤優香:ひこうき雲の生成と消滅に関する実験,2022
- [11] [伊藤 2023] 伊藤優香:ひこうき雲の観測と実験,2023
- [12] [奥原 2017] 奥原 俊,伊藤 孝行:雑談が問題解決型議論に与える影響とそ議論効果に関する研究,2017
- [13] LINK@TOYO 今こそ身につけたい“教養”、大人のためのWEBマガジン 東洋大学生命科学部 児島伸彦教授
- [14]ENEOS 石油便覧
<https://www.eneos.co.jp/binran/part02/chapter01/section03.html>
- [15] 気象庁過去の気象観測データ(高層)
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/upper/index.php>
- [16] 気象庁 日々の天気図
<https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/index.html>
- [17] 日本気象協会 過去の天気
<https://tenki.jp/past/>
- [18] 遠近法の計算
<http://andoh.la.coocan.jp/enkinho/calc.html>
- [19] 圃場管理のための気の話
<https://hesodim.or.jp/toritani/859>