

赤外線サーモグラフィーによる雲の高度と層構造の観測

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 岐阜大学教育学部・教育学研究科 公開日: 2025-04-28 キーワード (Ja): 雲, 上空温度, 雲底高度, サーモグラフィー, 中学校理科 キーワード (En): 作成者: 小野木, 大翔, 藤井, 亮我, 森本, 真紀 メールアドレス: 所属: 岐阜大学, 岐阜大学, 岐阜大学
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12099/0002001003

赤外線サーモグラフィーによる雲の高度と層構造の観測

Thermal imaging for cloud base height and cloud layer structure

小野木大翔, 藤井亮我, 森本真紀

ONOGI Hiroto, FUJII Ryoga, MORIMOTO Maki

[キーワード Keyword] 雲, 上空温度, 雲底高度, サーモグラフィー, 中学校理科
[所属 Institution] 岐阜大学教育学部 (Faculty of Education, Gifu University)

[要 旨 Abstract] 小・中学校理科の地学領域の「地球の大気と水の循環」分野では, 身近な気象の観察, 実験などを通して, 天気の変化や日本の天気の特徴を学習する。簡便な雲底高度推定法として提唱されている上空の放射温度観測について, 測定範囲の平均値を求める放射温度計観測では少ない雲量での高度の推定が難しく, 様々な高度の雲が同時に存在する場合にはその分離が困難であった。本研究では, 赤外線サーモグラフィーの熱画像による上空温度の分布から, 様々な雲量での雲の面的・層構造の解析をおこなった。低気圧の通過や冬型の気圧配置時の雲形と放射雲底高度の時間変化を観測し, 雲の形状や量に関わらず放射雲底高度が求められることを示した。

1. はじめに

小中学校の理科（地学分野）における雲の学習では, 水蒸気の凝結から学ぶ雲の発生, 空の観察から学ぶ雲の量や動きと天気の変化との関係, の順に進んで行く。空の観察では目視で雲量や雲形を調べる。この観察は機器が不要で簡単におこなうことができるが, それに続く天気図や衛星画像, 気象データを用いた天気の変化の学習内容の間にはやや隔たりがあり, この乖離を埋める観測や教材によって, 雲の学習内容の理解がより進むと考えられる。

雲の種類は, 世界気象機関によって高度や形状で10種類に分類されており, 目視によって雲量や形状を観測し, 高度は対流圏をおおよそ3層に分割した下層（高度約2000 m以下）, 中層（約2000~7000 m）, 上層（約5000 m以上）に, 観察した雲を分類する。地上から上空の雲の高さを判断するための比較対象やスケールが上空にはなく, おおよそその高度を目視で判断するのは難しい。機器を用いた雲高度の測定には, レーザー光を用いるシーロメーター（雲高測定器）のような専用の装置やラジオゾンデ観測による高層気象データからの推定法が用いられてきた。一方, 工業や建築などの分野や非接触での体温計測の目的で利用され比較的安価で入手可能な放射温度計を用いて, 簡易に雲の高度を測定する方法が提唱されている。鈴木(2015)は, 一般的な放射温度計の感度域が中間赤外線にあることを利用し, 地球惑星科学における様々な活用を図り, その一つとして上空温度を測定した。赤外線を放出しているのは大気分子（窒素, 酸素, 水蒸気）であり, 雲があると赤外線量は非常に大きくなり, 光学的に十分厚い雲であれば測定した温度が雲底温度に等しくなると考えた。地上気温との差から乾燥断熱減率（1 °C / 100 m）を用いて雲底高度推定の可能性を提示した。

加藤・森本(2021)や藤井(2024)では, 空港設置のシーロメーターと同地点同時刻での放射温度計による上空温度観測を行い, シーロメーター高度と放射雲底高度を比較した。雲量8以上の曇天時に相関が高いことから, 放射温度計を用いての雲底高度の推定が可能であること, また, その関係性は大気中の水蒸気量の影響を受けて季節変化することが示された。神山ほか(2022)と下薮ほか(2023)では, 上空温度が示すものについて雲量別（0~2, 3~7, 8~10）に考察し, 毎日の上空温度観測から名古屋市と岐阜市の放射雲底高度の季節変化を推定した。

放射温度計での雲観測の問題点は, ある範囲の放射温度の平均値が示されるが測定範囲が不明であり, どの雲のどの部分を観測したか正確ではない点である。雲量が多く全体がほぼ同じ高度の場合は高度の推定が容易であるが, 様々な高度の雲が同時に存在する場合にはその分離が困難である。また, 雲量が少ない場合

は、背景の青空と雲を分離してそれぞれの放射温度を求めることが困難である。よって、本研究では赤外線サーモグラフィーの熱画像による上空温度の分布から、雲の面的・層構造の解析に取り組み、低気圧の通過や冬の気圧配置時の雲形と放射雲底高度の時間変化を観測をした。

2. 研究方法

2.1. サーモグラフィー

サーモグラフィーとは、対象物から出ている赤外線放射エネルギーを検出し、その温度分布を画像として可視化することができる装置である（日本赤外線サーモグラフィ協会ウェブサイト）。赤外放射エネルギーを二次元検出器により電気信号に変換しているため、夜間でも雲底の放射温度を撮影して画像で示すことができる。サーモグラフィーによる上空の撮影によって温度の面的分布が得られることから、雲の分布と高度の空間解析が可能となると考えた。

用いたサーモグラフィーは日本アビオニクス社のInfRecサーモギアG100であり（図1）、測定温度範囲は $-40 \sim +500^{\circ}\text{C}$ （分解能 0.08°C ）、測定精度は $0 \sim 40^{\circ}\text{C}$ では $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、 0°C 未満では $\pm 3^{\circ}\text{C}$ である。視野角は水平 32° × 垂直 24° であり、100mの撮影距離での水平視野は約57m、垂直視野は約43mである。1枚の赤外画像は横320×縦240ピクセルの温度データで構成される。

サーモグラフィーで撮影した地上の建物と上空の画像と温度分布を図2に示す。可視画像と赤外画像を比べると、地上の建物や木々、雲、雲のない上空の青空の放射温度の差が明確であり、図2cのヒストグラムでも



図1 赤外線サーモグラフィー（日本アビオニクス InfRec Thermo GEAR G100）

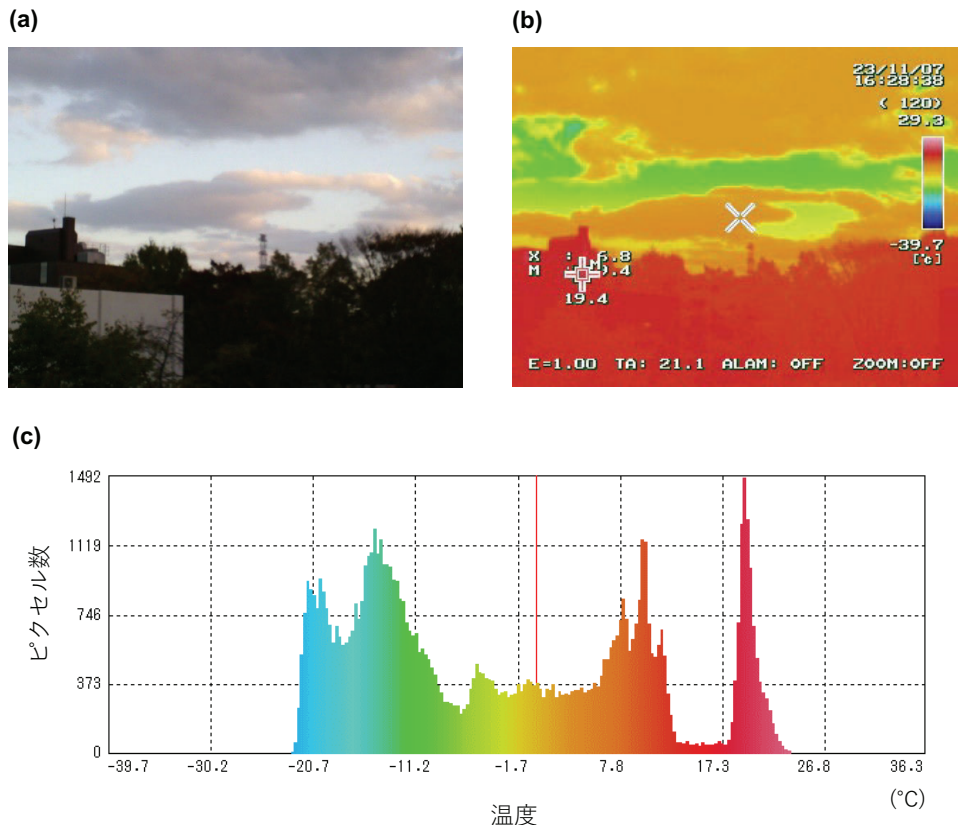


図2 2023年11月7日に撮影したサーモグラフィー画像と温度分布
(a) 可視画像, (b) 赤外画像, (c) 温度分布

それぞれ+20℃以上、-10~+15℃、-10℃以下に温度のピークを持つ分布が確認できる。よって、可視と赤外画像での雲分布とその形状確認、さらに温度分布を元に、0.1℃ごとのピクセル数の分布における雲分布のピーク温度を、その雲の層の雲底温度とした。

2.2. 雲底高度の推定

観測した上空温度からの放射雲底高度推定には、加藤・森本(2021)と同様に、乾燥断熱減率（1℃/100m）に基づいて、放射温度計で測定した上空温度と地上気温の差から計算する方法を用いた（式1）。

$$H = 100 (T - T_{\text{sky}}) \quad (1)$$

（H：推定放射雲底高度、T：地上気温、T_{sky}：上空温度）

下園ほか(2023)と藤井(2024)は、名古屋空港（愛知県豊山町）での放射温度計による観測に基づき、乾燥断熱減率による推定放射雲底高度と空港設置シーロメーター雲底高度の関係（回帰式）を季節別に求めた（表1）。気温変化の特徴に基づく季節は春、梅雨、夏、秋、冬の5区分である。乾燥断熱減率で求めた高度に観測した日の季節の回帰式を適用して、放射雲底高度を推定した。

表1：乾燥断熱減率による推定放射雲底高度と空港設置シーロメーター雲底高度の回帰式の傾き（藤井, 2024）

春	梅雨	夏	秋	冬
1.61	2.17	2.34	1.68	1.20

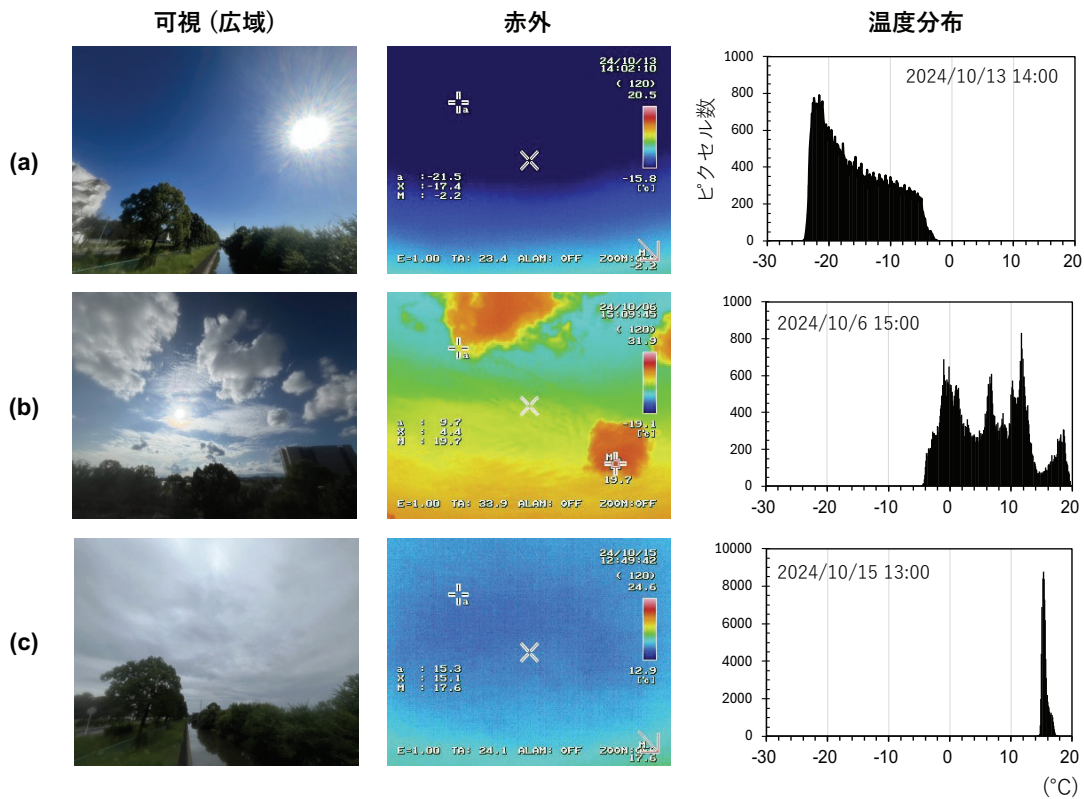


図3 (a) 雲量0, (b) 雲量4, (c) 雲量10の時の上空写真（可視画像）、赤外画像、赤外画像の温度分布（赤外画像の温度スケールはそれぞれ異なる）

3. サーモグラフィーによる雲の高度と層構造の観測

3.1. 雲量の違いによる上空温度分布と放射雲底高度

雲量の多少による上空温度分布の違いを図3に示す。すべて2024年10月の日中の撮影であり、雲量0、4、10で上空温度分布が大きく異なっていた。雲量0（図3a）では、雲のない青空の温度分布は-20℃以下が多いが、低い高度では0℃近くまで分布していた。一方、雲量10（図3c）の可視画像では目視で高度が低く見えた雲が一面に分布し、15~17℃に温度が集中していた。雲量4（図3b）の日は目視の形状確認で積雲、高積雲、巻雲が観測された。温度分布では大きく4つのピークが見られたが、赤外画像から0℃以下は雲ではない青空の部分であることが確認され6.6℃、11.9℃、17.9℃が雲底温度のピークであると推定した。確認できた雲底温度から放射雲底高度を計算すると、雲量10の10月15日13時には1380mの1層、雲量4の10月6日15時には1800m、2810m、3700mの3層の雲が存在していたことが示された。

3.2. 低気圧通過に伴う雲形と雲底高度変化（図4）

2024年10月21日~23日にかけて前線を伴う温帯低気圧の中心が日本海を通過し、雲形と上空温度を岐阜大学（岐阜市）において観測した。連続して雨が降っていた時間を除き、20分~1時間おきに計22回観測した。上空温度観測地点である岐阜大学の南南東約7kmに位置する岐阜気象台において、22日の21時~23日の20時にかけて降水が観測されたが、1時間降水量が0.5mm以下の時間帯がほとんどであり、降水の比較的多い時間の1時間降水量は、23日の7時に4.5mm、8時に1.0mm、12時に1.5mmであった。

可視画像と雲量変化より、21日の23時には雲量0であったが、22日の朝にかけて雲が増加し8時には巻層雲が見られた。雲量の少ないこの時間帯の上空温度は雲底温度も含めて-10℃以下の低温に分布し、推定放射雲底高度は4000~8000mであった。22日の日中の13~18時は高層雲が分布する雲量10が続き、雲底高度は1800~2560mと高度変化が少ない時間帯であった。その後、雨が降り始め、23日の8~15時には高度1000m以下の乱層雲が観測された。ただし、降水時に観測される上空温度には落下する雨粒の放射温度が含まれるため、実際の雲底高度よりも低く計算されると考えられる。23日の16時以降は雲量が10から減少していき、乱層雲以外に積雲と高積雲が観測された。2000m以下の雲の層が多くを占める一方、少ない雲量だが高積雲は3300~4600mの高度であった。

以上の雲形、雲量、雲底高度の変化は図4dの天気図に見られる前線を伴う低気圧の移動と関連している。21日夜から22日夕方にかけての雲の増加と高度の低下は温暖前線の接近を示し、乱層雲の発生により降雨が観測された。その後の23日午後から夜にかけての寒冷前線の通過では多量の雨は降らなかったが、雲形と高度の異なる2~3層の雲が観測され、短時間で雲量が急激に減少した。

3.3. 冬型の気圧配置時の岐阜市における雲底高度（図5）

冬型の気圧配置となった2024年12月12日に、12~16時の1時間おきに雲形と上空温度を岐阜大学（岐阜市）において観測した。雲量は0~5で変化し、雲形はすべて積雲であった。また、この時間帯の岐阜気象台における風向は北北西~北西であり、風速は4.5~8.0 m/sとやや強い風であった。冬季は雲のない青空部分の放射温度が低くサーモグラフィーの観測下限の-50℃より低下し、下限以下の温度は全て-50℃と記録される。よって、雲量が少ない時の温度分布では-50℃に大きなピークが現れる（図5b）。なお、2.1では機器の測定温度範囲は-40℃以上と記したが、この温度はメーカーが精度保証する下限であり、機器には-50℃まで記録される。15時10分は雲量が1と少なく青空と雲の放射温度のピーク分離が困難であったため、雲量2以上の時間帯の放射雲底高度を計算した。2630~3110mの高度が得られ、高度変化が少なくいずれの時間も雲層は1つであった。

一般に冬型の気圧配置下の日本列島では、日本海側やその山側で雪、太平洋側では乾燥した晴れの天気分布となる。相対的に暖かい日本海から蒸発する水蒸気によって海上で発生した積雲や積乱雲が雪をもたらす。岐阜市は濃尾平野の北端に位置するが、太平洋側の特徴とは異なり、冬季には晴れ・曇りが交互に現れる天候となり、時折、少量の雨や雪が降る。

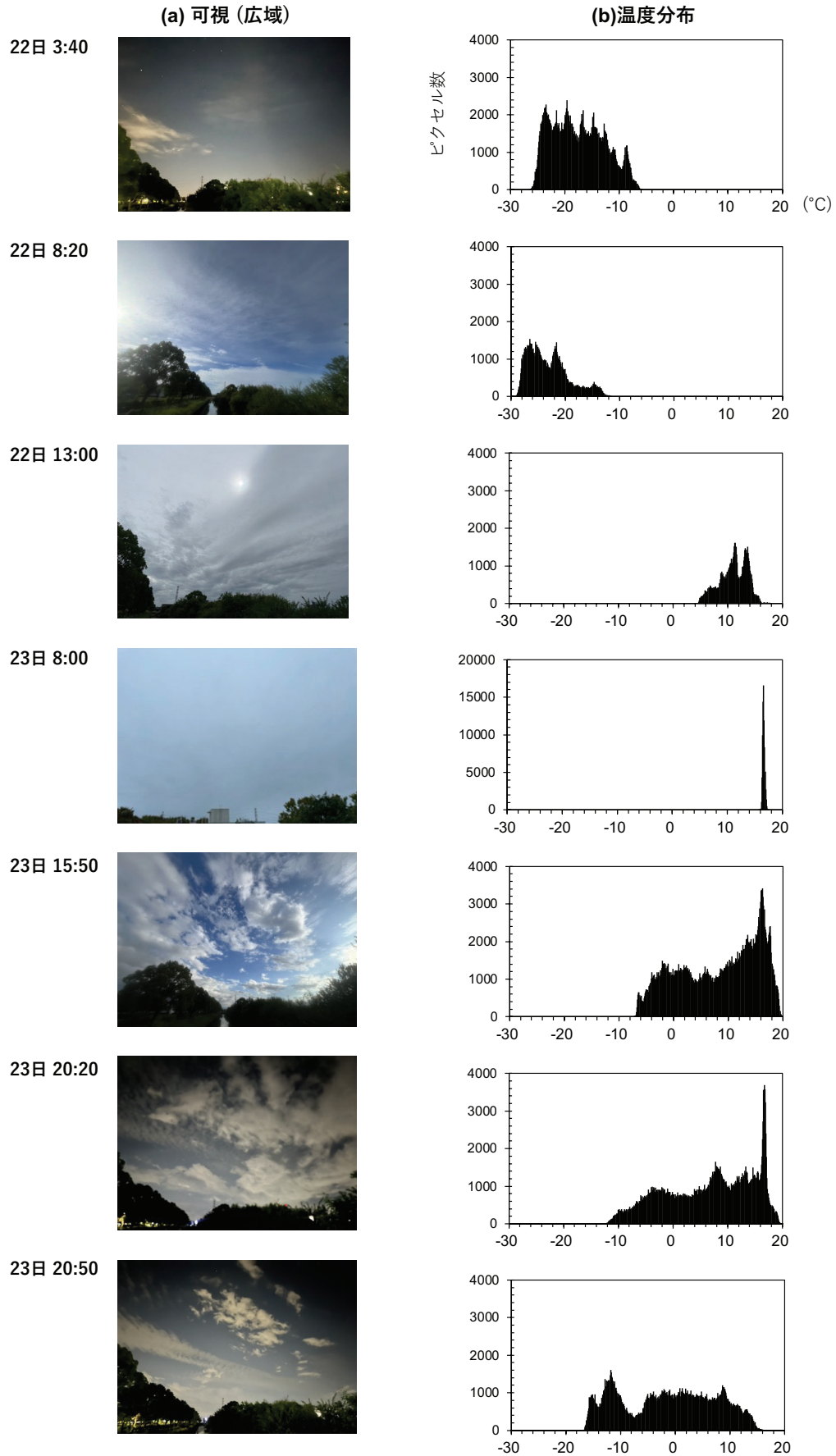
今回観測した高度3000m以下の積雲は、福井県や滋賀県から北北西~北西の風により流れてきたと考えら

れる。関東平野などの太平洋側の地域と比べて岐阜市周辺は日本海からの距離が近く、また、岐阜市から見て北～北西に位置する県境の山地の多くは標高1500m以下である。そのため、日本海側で発生した積雲が全て消滅することなく、北寄りの風に流されて岐阜市まで到達し、曇りや雨・雪を時折もたらしめていることが、雲形と雲底高度の観測から確認することができた。

本研究では、サーモグラフィーの熱画像による上空温度の分布を用いた雲の面的・層構造の解析に取り組み、少ない雲量では高度の推定が難しかった放射温度計の問題点を解決して、雲の形状や量に関わらず放射雲底高度が求められることを示した。大型の観測装置と比べて安価で簡易に測定可能であり、観測した雲形・雲量と推定した雲底高度を用いることによって、低気圧や冬型などの気象現象と関連づけた気象の学習に役立つと考える。

<参考文献>

- 加藤 靖葉・森本 真紀（2021）放射温度計観測による空の温度と雲底高度の関係. 岐阜大学教育学部研究報告（自然科学）, 45, 41-47.
- 神山 千鶴・加藤 靖葉・小寺 美友紀・森本 真紀（2022）放射温度計観測による空の温度と季節変化. 岐阜大学教育学部研究報告（自然科学）, 46, 71-77.
- 下園 玲治・神山 千鶴・加藤 靖葉・森本 真紀（2023）放射温度計観測による上空温度と雲底高度の関係の季節変化. 岐阜大学教育学部研究報告（自然科学）, 47, 47-53.
- 鈴木 文二（2015）放射温度計を活用した地球惑星科学教育. 2015年度東レ科学振興会理科教育賞(https://www.toray-sf.or.jp/awards/education/pdf/h27_03.pdf).
- 日本赤外線サーモグラフィ協会, 赤外線サーモグラフィとは, <http://www.thermography.or.jp/about/index.html>（最終閲覧2025年1月12日）.
- 藤井 亮我（2024）放射温度を用いた雲の高度分布の解析. 岐阜大学教育学部卒業論文, 66p.



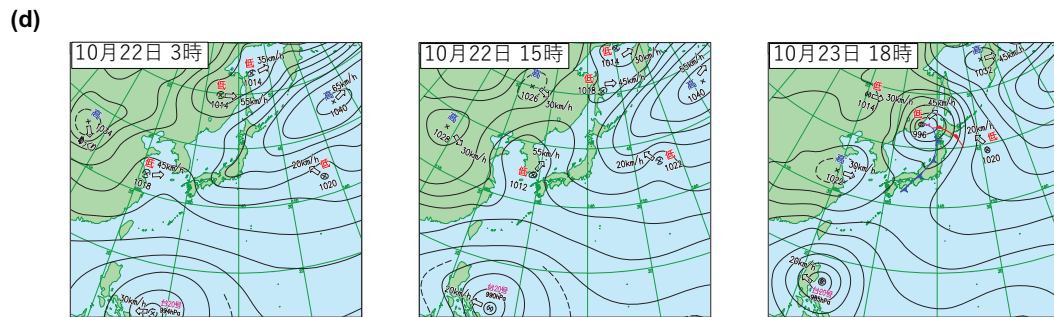
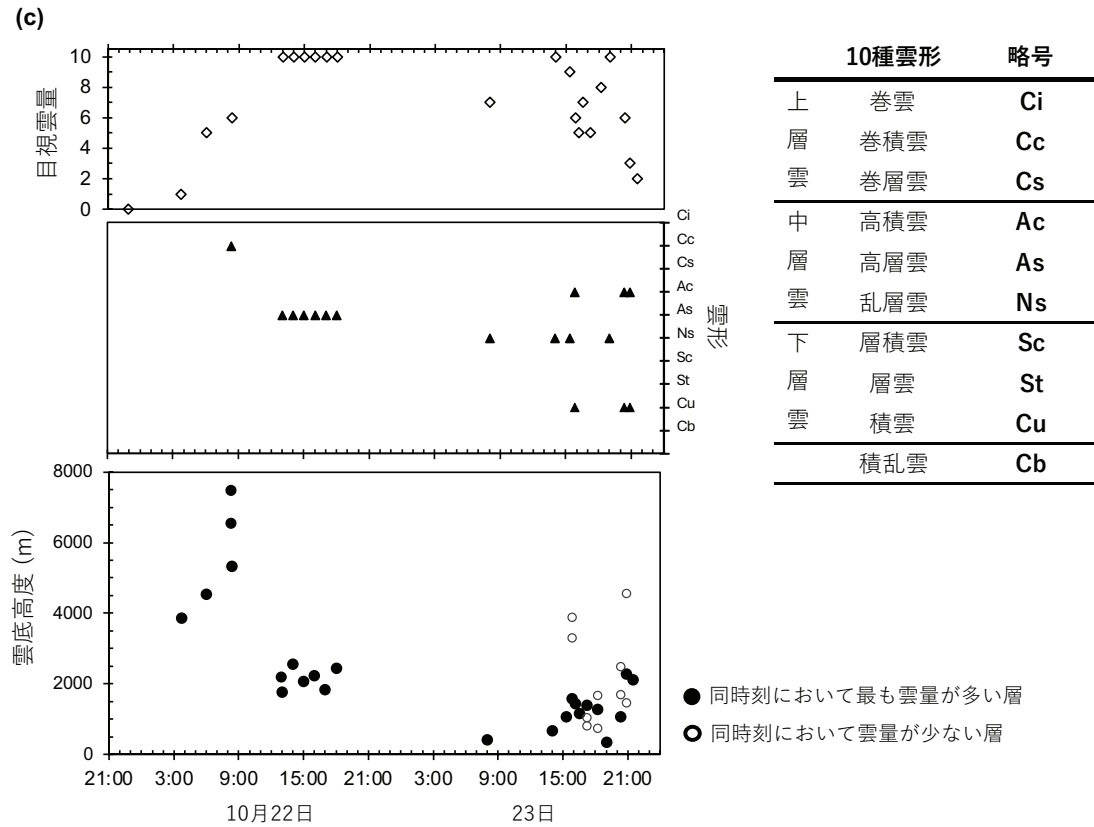


図4 岐阜市における2024年10月21日夜から10月23日夜までの

- (a) 上空写真（可視画像）
- (b) 赤外画像の温度分布
- (c) 目視雲量，目視雲形，推定雲底高度の時間変化
- (d) 天気図（気象庁）

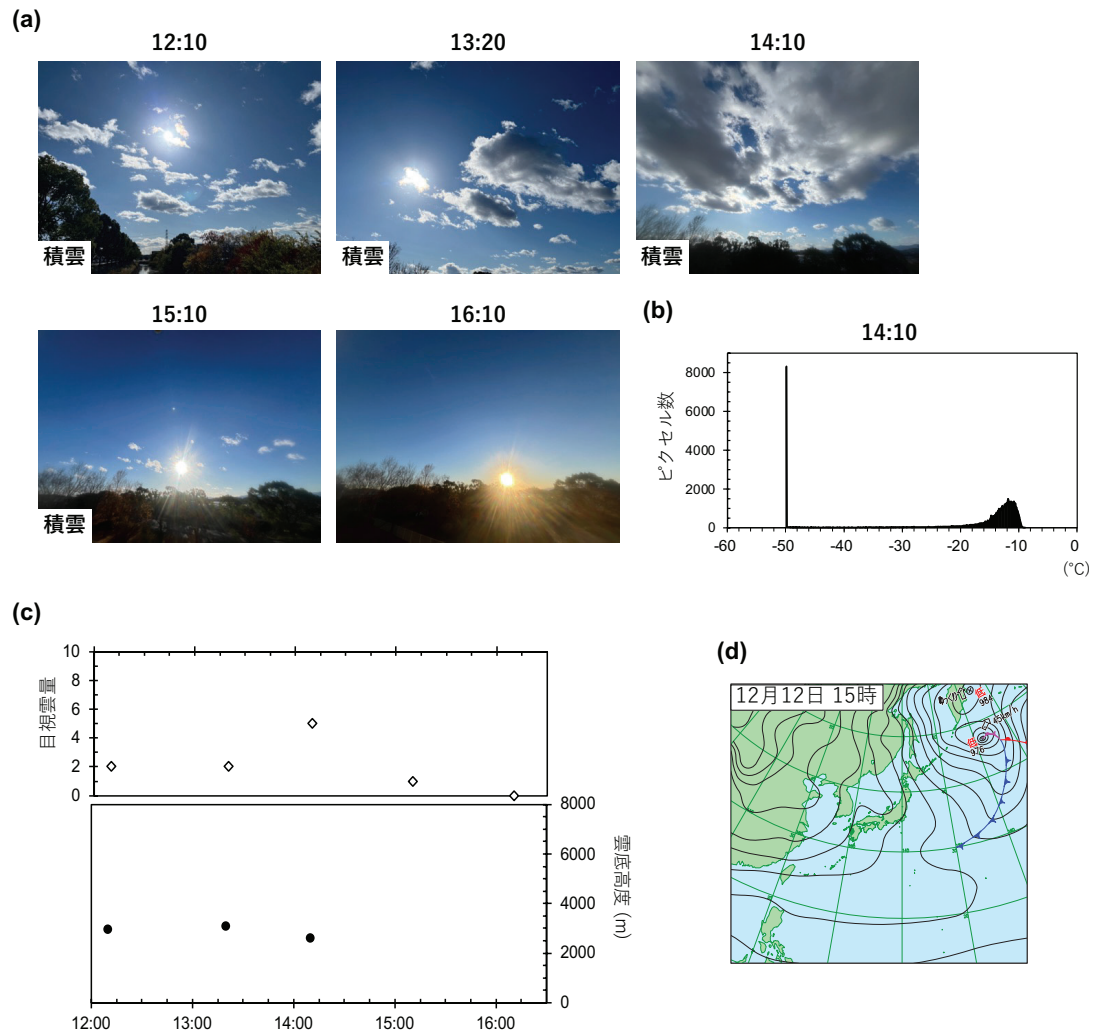


図5 岐阜市における2024年12月12日の
 (a) 上空写真（可視画像）
 (b) 14時10分の赤外画像の温度分布
 (c) 目視雲量と推定雲底高度の時間変化
 (d) 15時の天気図（気象庁）

