

放射温度計観測による空の温度と季節変化

Measuring the temperature of the sky with an infrared thermometer and its seasonal variations

神山千鶴, 加藤靖葉, 小寺美友紀, 森本真紀

Koyama Chizuru, Kato Yasuha, Kodera Miyuki, Morimoto Maki

[キーワード] 雲, 上空温度, 雲底高度, 放射温度計, 雲量

[所属 Institution] 岐阜大学教育学部 (Faculty of Education, Gifu University)

[要 旨] 本研究では、簡便な雲底高度推定法として提案されている放射温度計による上空温度観測を行い、2021年の岐阜市上空温度の季節変化を調べた。上空温度は大きな季節変動をすることに加え、雲量の違いによっても示すことが異なる。雲量8~10の曇天時には低層~中層の層状の雲が広がり、上空温度からおよその雲底高度が推定できることを示した。雲量0~2の晴天時での上空温度は曇天時よりも低温で明瞭な季節変化を示しており、大気中の水蒸気量変化の影響を受けていた。雲量3~7では放射温度計の測定範囲には雲と背景の空が混在しているため、雲底高度の推定を行うための補正法を検討した。

1. はじめに

小中学校の理科（地学分野）において気象は重要な分野の一つであり、平成29年の学習指導要領解説理科編では、身近な気象の観察、実験などを行い、その観測記録や資料を基に、気象要素と天気の変化の關係に着目しながら、天気の変化や日本の天気の特徴を、大気中の水の状態変化や大気の動きと関連付けて理解させることが主なねらいであるとされている。内容の一つとして雲の発生、雲の量や動きと天気の変化との關係について学習する。学校での観測実習を行いやすい気温や雨と異なり、雲は定量的に観測することが難しい。

雲の形は様々であるが、世界気象機関により目視の形状とおよその高度から大きく10種類（「巻雲」「巻積雲」「巻層雲」「高積雲」「高層雲」「乱層雲」「積雲」「積乱雲」「層雲」「層積雲」）に分類されている。高度からは、低層雲（高度2000 m以下）、中層雲（2000~7000 m）、高層雲（5000 m以上）と大きく3つに分類されているが、地上から上空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、低層と中層、中層と高層の違いを目視で判断するのは難しい。雲の高度を測定する方法としてシーロメーター（雲高測定器）やパイロットバルーン法（藤井・馬場, 2010）、エマグラムなどが挙げられるが、これらは大型で高価な機器であったり、連続観測が難しいものや、任意の方向の観測が難しいことが指摘されている（加藤・森本（2021））。そこで簡便で安価な雲底高度推定法の一案として、放射温度計による上空温度観測の試みが行われてきた。

鈴木(2015)は、一般的な放射温度計の感度域が中間赤外線あることを利用し、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。高濱(2018)では、層積雲の高度を知るために4つの方法（放射温度計による乾燥断熱減率法、地上気温と露点温度を用いる方法、エマグラム、シーロメーター）を比較したが、方法ごとの観測地点の距離が離れていることや観測回数が少ないことから、それぞれの推定雲底高度には差が見られた。

小寺(2020)では、愛知県尾張旭市において2019年の1年間の上空温度を放射温度計で毎日測定し、中部国際空港（愛知県常滑市）のシーロメーターデータと比較した。大気中の水蒸気量が少ない秋~春に雲底高度が推定できる可能性を示したが、観測地点間の距離が約50kmと離れているため、同じ気象状況下の雲を観測できているか不明であった。加藤(2021)と加藤・森本(2021)では、シーロメーターが設置されている愛知県

営名古屋空港（愛知県西春日井郡豊山町）において放射温度計による上空温度観測を行い、同じ地点における雲底高度の比較検証を行なった。雲量8以上の曇りの天候で、乾燥断熱減率を用いる方法によって雲底高度が推定可能であることを示した。

本研究では小寺(2020)、加藤(2021)、加藤・森本(2021)の結果を基に、上空温度の示すものについて雲量別に考察し、2021年の1年間の岐阜市の上空温度と雲量の観測から、雲底高度の季節変化を推定することを目的とした。

2. 研究方法と観測地点（図1）

2021年1月1日から12月31日までの1年間の毎日1回、岐阜大学近隣の岐阜市折立において、放射温度計による上空温度測定と同時に全天雲量の目視観測を行なった。上空温度は真上（天頂）に放射温度計を向けて測定し、これを連続して5回行い、その平均値を用いた。上空温度観測と同時に地上気温と相対湿度は、岐阜地方気象台（岐阜市加納二之丸）のデータを用いた。

用いた放射温度計はカスタム社のIR-310WPであり（図2）、測定温度範囲は $-60\sim+550\text{ }^{\circ}\text{C}$ （分解能 0.1°C ）、測定精度は $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ または $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ のどちらか大きい方、測定範囲は60cmの距離で $\phi 5\text{ cm}$ （すなわち上空に向けて高度6000mの距離で $\phi 500\text{ m}$ ）である。

一般に空港では航空気象観測が行われており、地上気温・露点温度・風向風速・雲量・天候・シーロメーターによる雲底高度などの観測データがMETAR（航空気象定時観測気象報）として公開されている。本研究では、岐阜大学から14kmの距離に位置する航空自衛隊岐阜基地（岐阜県各務原市）と、28kmの距離に位置する名古屋空港の観測データを用いた。放射温度計観測と同時にデータを入力し、比較解析に用いた。METARで公開される雲底高度は地上から3層目までの雲についてであり、また、高度は連続的な値ではなく1000フィート以下の高度では100フィート（30.5m）毎、1000～5000フィートの高度では500フィート（152.4m）毎、5000フィート以上の高度では1000フィート（304.8 m）毎の値で発表されている。



図1：観測地点（地理院地図に加筆）



図2：放射温度計
(CUSTOM IR-310WP)

3. 観測結果

2021年の1年間の岐阜市における上空温度などの観測結果を図3に示す。図3(a)より、地上気温は最寒期の1月におよそ 0°C 、最暖期の8月に 40°C 近くに達し、1年に約 40°C の季節変化を示したが、1ヶ月単位で見ると1ヶ月間の変化は大きくても 10°C 程度であった。一方、上空温度は、1月と11月下旬～12月に -60°C 以下（放射温度計の測定下限値未満）の最低値となり、8月には 25°C 近くに達した。また、同じ季節内での日毎の変化が大きく、例えば1月では1ヶ月の間に 60°C の変化幅を示した。図3(b)と(c)からは、雲量と相対湿度では地上気温や上空温度のような1年を通じた明瞭な季節変化はなく、天候に応じた日毎の変化が大きいことが読み取れる。梅雨期である6月から7月上旬や、8月から9月にかけては、雲量10の日が多く、一方で雲量0の日が少ない。この時期には相対湿度も前後の時期より高くなっていった。また、3月中旬から4月は雲量と湿度がともに2、3日おきに増加・減少を繰り返しており、移動性高気圧と低気圧の通過による天候変化であると考えられる。

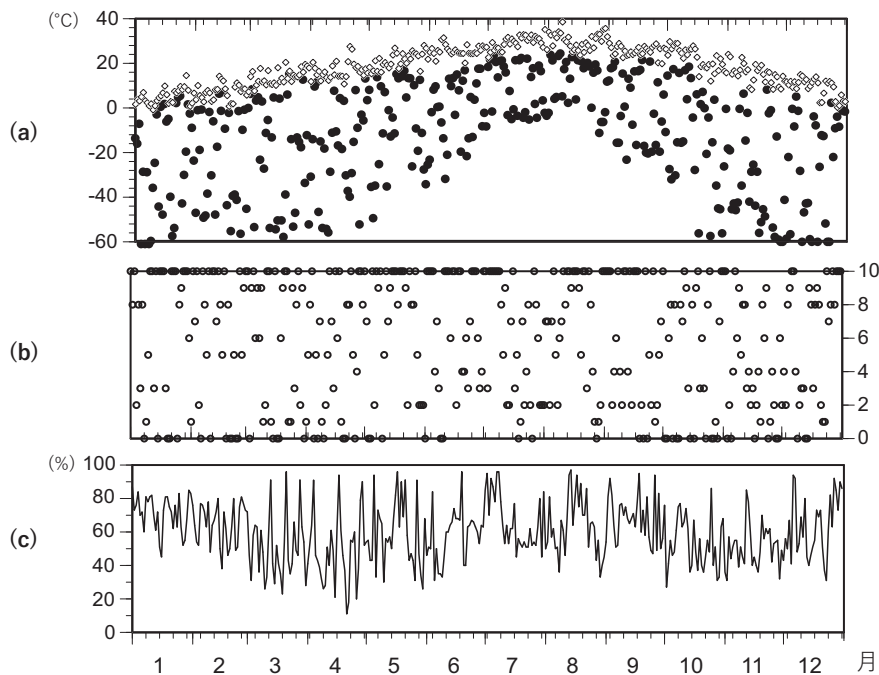


図3：2021年1月1日～12月31日の岐阜市の(a)上空温度(●)と地上気温(◇)，(b)目視雲量，(c)相対湿度

4. 考察

4.1 雲底高度の推定

観測結果からの雲底高度推定には加藤・森本(2021)と同様に、乾燥断熱減率(1 °C/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：推定雲底高度、T：地上気温、 T_{sky} ：上空温度)

図4に1年間の岐阜市上空の推定雲底高度と、シーロメーター観測(各務原市)の雲底高度を示す。乾燥断熱減率法の推定雲底高度は、1年を通じて0～8000mの範囲で変化しているが、日毎の変化が大きく、また、同じ時期での最高高度は、夏季に低く(4000m以下)冬季に高くなっていった。シーロメーター雲底高度でも1年を通じて0～8000mの範囲で変化しているが、最高高度が夏季に低くなる傾向はなく1年を通じて一定であった。また、1層目の高度が1年中およそ1000m以下を示したが、これは加藤・森本(2021)でも示したように、目視雲量が0の日も含めどのような天候の日でも1層目の雲量が2であることが多く、高度も一定であることから、低い高度の水蒸気やエアロゾルなどを反映している可能性も考えられる。本稿での次節以降の考察では1層目を除いて2層目と3層目について比較検討を行う。

図4において推定雲底高度とシーロメーター高度の変化が異なっている理由として、雲の有無にかかわらず、雲量が0～10の全ての天候の日について一律に高度を推定していることが挙げられる。雲量10の日は上空に向けた放射温度計は雲底の温度を測定しているが、雲量0の快晴日では上空温度は雲を測定しておらず、上空そのものの温度(ある高度に浮かぶ何らかの物質からの放射温度)を測定していると考えられる。

よって次節以降では、上空温度が示すものについて雲量別に考察をおこなう。気象庁では雲量0～1を「快晴」、雲量2～8を「晴」、雲量9～10を「曇」としているが、「晴」とする雲量の段階が多いため、本研究では「快晴」と「曇」の雲量の幅を広げて、雲量0～2、3～7、8～10の3グループに分けて考察する。

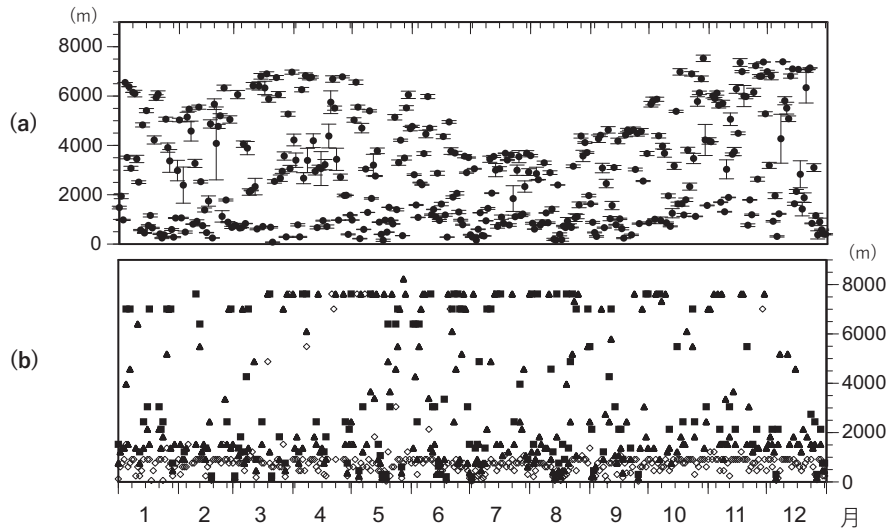


図4：2021年1月1日～12月31日の岐阜市の(a)乾燥断熱減率法による推定雲底高度と(b)各務原市（岐阜基地）のシーロメーター観測による雲底高度（1層目(◇)、2層目(▲)、3層目(■)）

4.2 雲量8～10（曇もしくは雨）

雲量8～10はほぼ全天を雲が覆っている状態であり、目視観測では低層～中層の高度が低い層状の雲が多く見られた。放射温度計の観測も測定範囲全体が雲に向いており、雲からの放射を多く含むと考えられる。加藤・森本（2021）と加藤（2021）による名古屋空港におけるシーロメーターと放射温度計観測の直接比較でも、雲量8～10のデータについて、推定雲底高度がシーロメーターの雲底高度と正相関を示していた。この結果に、航空自衛隊岐阜基地（岐阜県各務原市）の近隣で2021年10月～12月に行った6回の放射温度計観測

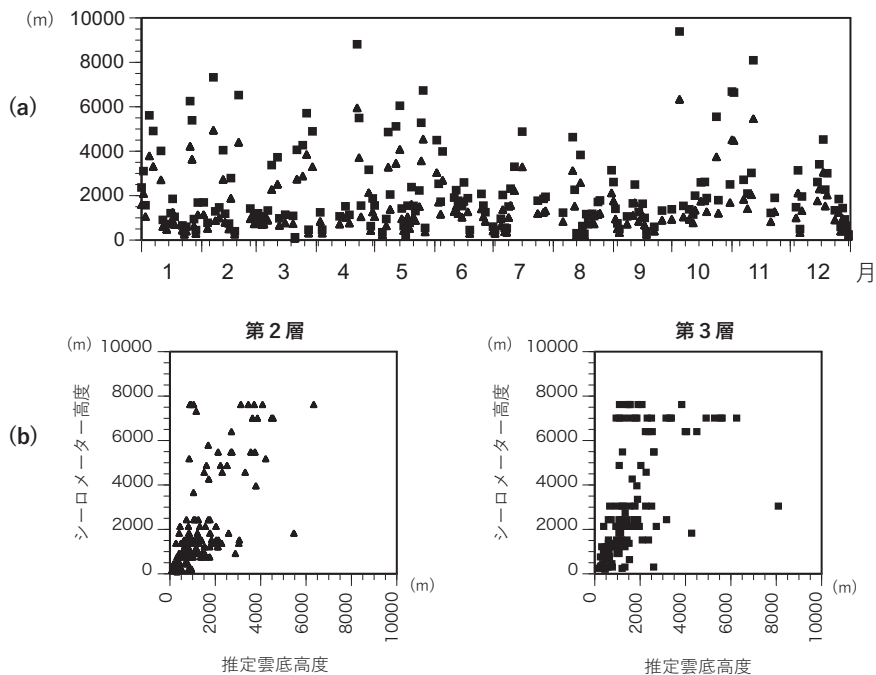


図5：2021年の雲量8以上の日の岐阜市の推定雲底高度 (a)季節変化（2層目(▲)、3層目(■)）、(b)シーロメーター雲底高度との比較

とシーロメーター高度を比較した結果のうち、雲量8～10のデータを加えて、以下の関係式が得られた（式2, 式3）。

$$2 \text{ 層目 } y_2 = 1.0799 x \quad (r^2 = 0.77) \quad (2)$$

$$3 \text{ 層目 } y_3 = 1.5994 x \quad (r^2 = 0.81) \quad (3)$$

(x : 放射温度計による推定雲底高度, y_2 : シーロメーターの2層目雲底高度,
 y_3 : シーロメーターの3層目雲底高度)

4.1で示した乾燥断熱減率法による推定雲底高度を上式の式に代入して、雲量8～10の日の2層目と3層目の雲底高度を計算した（図5(a)）。1年を通じて2層・3層ともに2000m以下の雲底高度の日が多い。また、2月、4月、10～11月に6000m以上の高い高度の日が比較的多かった。上空温度の観測地点（岐阜市折立）と岐阜基地（各務原市）は約14km離れているが、2層・3層目の推定雲底高度とシーロメーター高度を比較すると高い相関を示した（図5(b)）。このことから雲量が多い日の雲は、同程度の高度で広範囲に広がっていると言える。

4.3 雲量0～2（快晴・晴）

雲量0～2のほとんど雲がない天候で測定した上空温度が、どの程度の高さの上空温度を示しているかを調べるため、気象庁による高層気象観測データ（ラジオゾンデ観測）との比較を行った。岐阜市から最も近い観測点である和歌山県潮岬のデータを用い、100～1000hPaの高度の気温と放射温度計による上空温度を比較した（図6(a)）。1000hPaの高度では1年を通じてほとんど0°C以上であり、100hPaでは-60°C以下となっていた。放射温度計の上空温度は、1, 2月や11, 12月では100～200hPaぐらいの温度と同等であるが、7～8月には600hPaの温度に近くっており、明瞭な季節変化を示していた。

高層気象観測の気圧（hPa）を高度に変換すると、放射温度計の上空温度が示している高度になる（図6

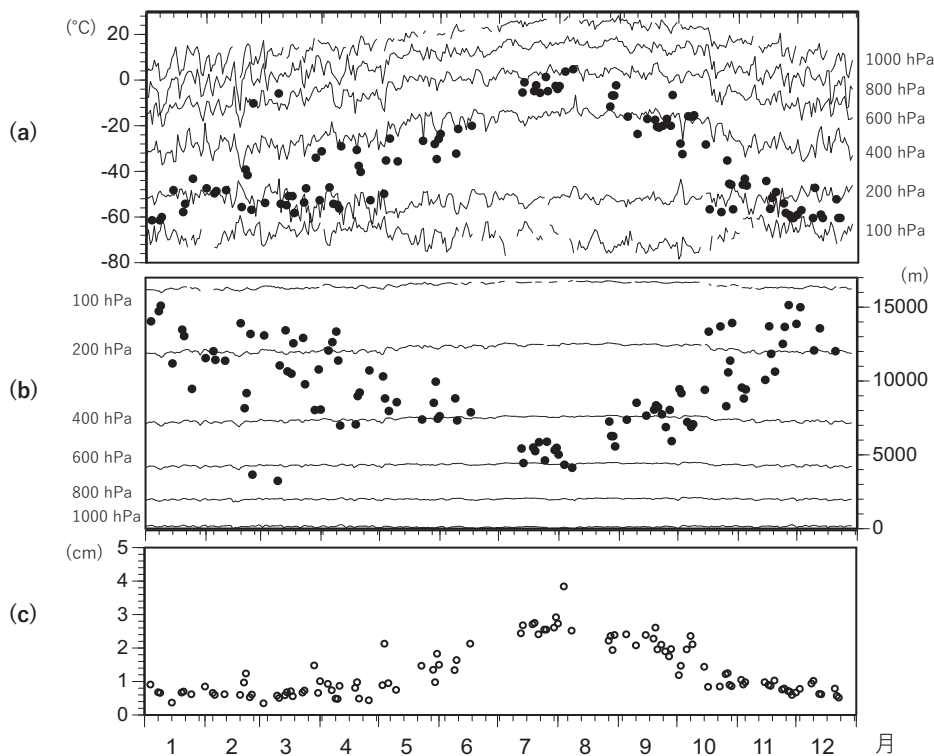


図6：2021年の雲量0～2の日の(a)岐阜市の上空温度（●）と潮岬（和歌山県）の高層気象観測の上空温度（実線）、(b)潮岬の高層気象観測による気圧高度と岐阜市の上空温度が示す高度（●）、(c)岐阜市の地上露点温度から推定した大気中の有効水蒸気全量

(b))。この高度も明瞭な季節変化を示しており、冬季にはおよそ15,000mと高く、春から夏にかけて徐々に低下し、7月にはおよそ5000mを示しており、秋から冬にかけて上昇していた。放射温度計が測定する上空温度が示す高度が季節によって異なる原因として、暖候期、特に梅雨や夏季には空気中に含まれる水蒸気量が他の季節に比べて多いため、水蒸気からの赤外放射が測定温度に影響している可能性が考えられる。

そこで、雲量0~2の日について、大気中に含まれる水蒸気量の季節変化を推定した(図6(c))。近藤(1994)による地上の露点温度を用いた簡易な関係式を用いて有効水蒸気全量を計算した。大気中の全水蒸気量の指標として用いられる有効水蒸気全量や可降水量は、単位面積あたりの気柱内に含まれる水蒸気量である。2021年の岐阜市における有効水蒸気全量は、5月上旬から8月上旬にかけて増加し、8月以降徐々に低下していた。この結果は糟谷・川村(2012)によるGPS測量を用いる方法から求めた名古屋における結果と同様の季節変化を示していた。この結果から、快晴時に放射温度計が測定している上空温度は、大気中の水蒸気量の季節変化の影響を受けていることが明らかになった。

4.4 雲量3~7 (晴れ (一部に雲))

雲量3~7では天空全体のおよそ半分に雲が分布しているため、放射温度計で測定する上空温度には、雲底からの放射とそれ以外の上空からの放射が混ざっていることになる。よって、雲の放射温度を求めるためには、上空からの放射温度を除く必要がある。また、雲量3~7の日における乾燥断熱減率法で求めた雲底高度は(図7(a))、700~6000mの間に分布しており、7、8月に低い傾向はあるが、雲量8~10と比べると2000m以下の低層雲の日は少ない。そのため、雲量8~10と比べると地上から雲底までの距離が長い場合が多いため、季節によっては地上と雲底間に存在する水蒸気量が多く、上空温度に水蒸気からの放射も含まれるため、その影響を除去する必要がある。そこで、雲量3~7の日の上空温度に対して「雲量補正」と「水蒸気量の季節変化補正」を行なった。

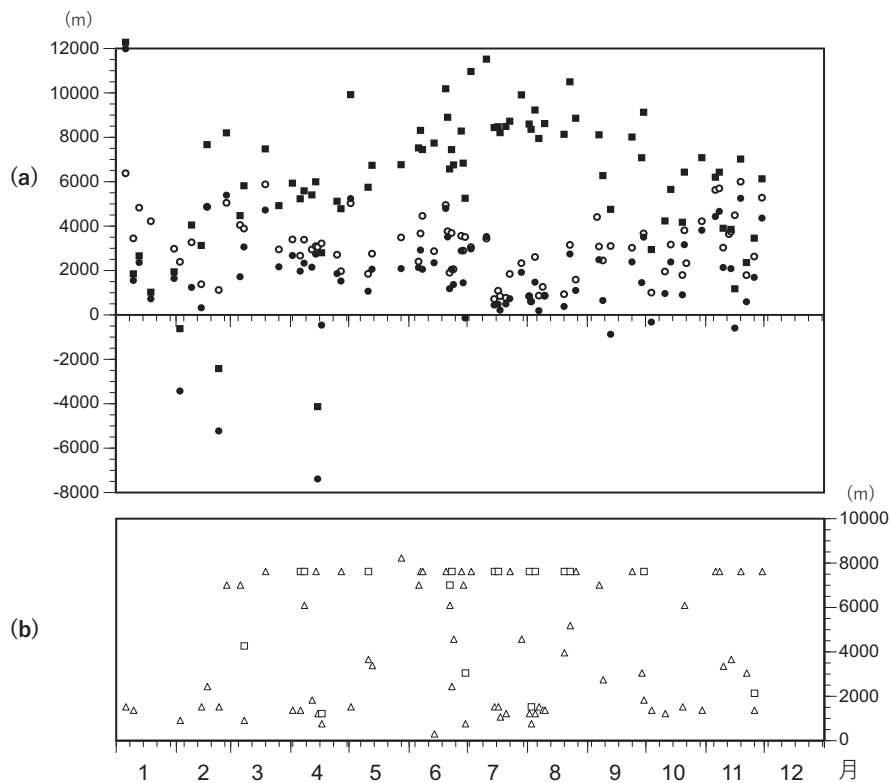


図7：2021年の雲量3~7の日の(a)乾燥断熱減率法による岐阜市の推定雲底高度(補正前(○)、雲量補正後(●)、雲量補正と季節補正後(■))、(b)シーロメーター観測による雲底高度(2層目(△)、3層目(□))

「雲量補正」では、観測した上空温度から雲以外の部分の温度を除去した。観測している目視雲量は全天の面積に対する雲量だが、放射温度計で測定する天頂の一部分に存在する雲量とは異なることがある。そこで、観測時に撮影している天頂の写真の範囲の雲量をこの補正計算に用いた。雲以外の部分（青空）の温度は、雲量0～2の上空温度を月ごとに平均した値を用いた。

「水蒸気量の季節変化補正」は、水蒸気からの放射の見積もりが困難なため、雲量0～2の岐阜市の上空温度が示す高度の季節変化（図6(b))を用いた。上空温度が示す高度を月ごとに平均し、最も高い月（12月）との高度差を月ごとに求め、その値を雲量3～7の高度に加算した。

乾燥断熱減率法の推定雲底高度（未補正）、それを雲量補正した高度、さらに水蒸気量の季節変化補正した高度を図7(a)に示す。雲量補正では雲がない上空の低温部の温度を差し引くことから、補正後に高度が低下する。そのため、補正によって負の値になってしまう日が8日あった。季節補正を行うと、多量の水蒸気が存在する夏季ほど加算する高度が大きいことから、補正後の高度が6～8月に10,000mを超える日が数日あった。シーロメーターの雲底高度（図7(b))と比較すると、2～5月や9～11月では、シーロメーター高度の5000m以上の日について、雲量補正と季節補正後の高度が未補正高度よりもより近い値となっていた。

しかしながら、夏季ではシーロメーターよりも高い高度の日が多く、補正量が多かった可能性がある。これまでの研究では10～12月のみの観測であったが、シーロメーターと放射温度計の直接比較による関係式を季節ごと・月ごとに調べることで、季節変化の補正が行える可能性がある。また、シーロメーターが示す高度は1年を通じて最大値が7600mと揃っており、機器自体の観測高度の限界である可能性も考えられる。

放射温度計を用いた上空温度観測は非常に簡便で短時間に測定ができることから、観察した雲の種類・雲量と上空温度から推定した雲底高度を組み合わせることにより、前線や台風の通過前から後にかけての雲と天気の変化など、学校教育での気象の学習に役立てることができる。と考える。

<謝辞>

神山真一氏、理科教育講座地学専攻4年生の益木悠馬氏、昨年度4年生の池口遼人氏と菊井重和氏には各務原市（岐阜基地周辺）と名古屋空港における観測にご協力をいただきました。また、理科教育講座地学専攻の勝田長貴准教授と香川雅子講師にはこの研究を進めるにあたり、専攻のゼミなどで様々なご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

<参考文献>

- 糟谷 司・川村 隆一（2012）日本におけるGPS可降水量の季節変化の特徴. 天気, 59 (10), 917-925.
- 加藤 靖葉（2021）岐阜市の雲と降水の季節変化. 岐阜大学教育学部卒業論文, 74p.
- 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.
- 小寺 美友紀（2020）放射温度計を用いた雲底高度測定と季節変化. 岐阜大学教育学部卒業論文, 63p.
- 近藤 純正・徐 健青（1996）可降水量を地上の露点温度から推定する実験式. 水文・水資源学会誌, 9 (5), 463-467.
- 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).
- 高濱 大介（2018）複数の方法で得た層積雲の雲底高度. 千葉県立船橋高校スーパーサイエンスハイスクール 2018 年理科教科課題研究 (https://www.chiba-c.ed.jp/funako/ftp_kousin/ssh/research/2018/2018_22g1.pdf).
- 藤井 健・馬場 賢治（2010）京都産業大学付近の上空における風の特性：パイバル観測学生実習の方法と成果. 京都産業大学論集, 自然科学系列, 39, 95-111.

