

放射温度計観測による空の温度と雲底高度の関係

加藤靖葉・森本真紀
岐阜大学教育学部

Measuring the temperature of the sky with an infrared thermometer and its relation to cloud base height

Yasuha Kato and Maki Morimoto
Faculty of Education, Gifu University

要約

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について、既存の雲底高度観測装置との比較検証を行なった。地上気温と比べて上空温度は大きな変化を示し、さらに、雲量が8以上の曇りの天候で、高度5000～6000 mまでのおよその雲底高度が、乾燥断熱減率を用いる方法によって推定可能であることが示された。

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、雲は高度などを定量的に観測することが難しい。雲の高度は、目視による雲の10種類の形の分類とおよその高さから、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。

雲の高度を測定する方法としてシーロメーターやパイロットバルーン法、エマグラムなどが挙げられる。シーロメーター（図1）は地上から空に向かって短波長の強力なレーザー光を照射し、雲や降水、その他の障害物があると光の反射（後方散乱）が起こり、機器に戻ってきた時間から計算して雲底高度を測定することができる（VAISALA社ホームページ、気象庁ホームページより）。雲高は航空気象観測に重要な情報であるため各地の空港に設置されている。気象研究用にも用いられるが大型で高価な機器である。

比較的簡便な方法としてパイロットバルーン法が大学の実習等で用いられている（香川、私信）。ヘリウムガスを充填した風船を飛ばさせ、角度を測定するセオドライトで方位角と高度角を測定し、風船の到達距離を測定するものである。本来は上空風の観測が目的だが（藤井・馬場、2010）、風船が雲に入っていく時の到達距離から、その雲の雲底高度が求められることができるとされる。風向と風速に任せる方法のため雲量が少ない場合の観測は難しく、また任意の雲を測定することはできない。また高度が高くなると上空のバルーンの位置の確認が難しくなる。

間接的な雲の高度推定法として、ラジオゾンデによる高層気象データを用いたエマグラム（ある地点の上空の気圧と気温および露点温度の關係を示した図）がある。ラジオゾンデは気象要素を観測してデータ送信する測器であり、ゴム気球に吊

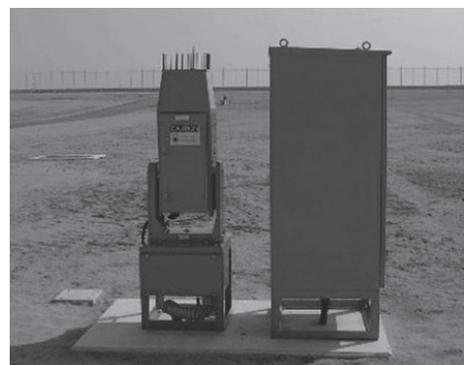


図1：シーロメーター（雲高測定器）
（気象庁ホームページ）

るして飛揚させ地上から高度約 30km までの大気の状態を観測する（気象庁ホームページより）。エマグラムにプロットされた気温曲線と露点温度曲線が近くなっている高度で雲が発生していると推定することができ、多層の雲の高度を知ることができる（横川, 2015）。気象庁では潮岬など全国 16 カ所の気象官署で毎日 2 回観測を行なっている。個人でもラジオゾンデ測定は可能だが、毎日の変化や時間変化を調べるために何度も行うには高価である。

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、その一つとして天頂方向に向け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 ($1\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$) を用いて雲底高度推定ができるとした。

Riordan *et al.* (2005) は、自作の全天雲観測計を用いて、波長 $10\text{ }\mu\text{m}$ の赤外放射温度（雲底温度）を計測し、シーロメーター、ラジオゾンデなどと比較した。高度が低い雲は黒体としてふるまうが、高い雲は水蒸気量の影響が大きくなってしまいうため考慮する必要があることが示された。

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、4 つの方法で求めた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。快晴時の上空温度の季節変動を示し、さらに上空温度からの推定雲底高度とシーロメーターの高度との比較から、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。しかし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。

そこで本研究では、航空気象観測データが公表されているシーロメーター設置地点（空港）において放射温度計によって上空温度を観測し、推定雲底高度を比較検証することを目的とした。雲量が異なる（曇り、晴れ、快晴）状況での観測を行い、また 1 日の時間変化も観測した。

2. 研究方法

観測は 2020 年 10 月 4 日、10 月 16 日、11 月 18 日、12 月 14 日の日中に 1 時間おき（毎時 0 分）に行った。観測地点は愛知県営名古屋空港（愛知県西春日井郡豊山町）である。空港ターミナルビルの 3 階屋上展望デッキにおいて、真上に放射温度計を向けて上空温度を測定した。測定は連続して 5 回行い、その平均値を用いた。また、同時刻の全天雲量の目視観測を行った。10 月 4 日の上空温度観測のみ岐阜大学（岐阜市柳戸）で行った。観測地点を図 2 に示す。

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



図 2：観測地点（地理院地図）



図 3：放射温度計
(CUSTOM IR-310WP)

名古屋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。放射温度計観測と同時刻のデータを入力し、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 500 フィート(152.4m)もしくは 1000 フィート(304.8 m)毎の値で発表されている。

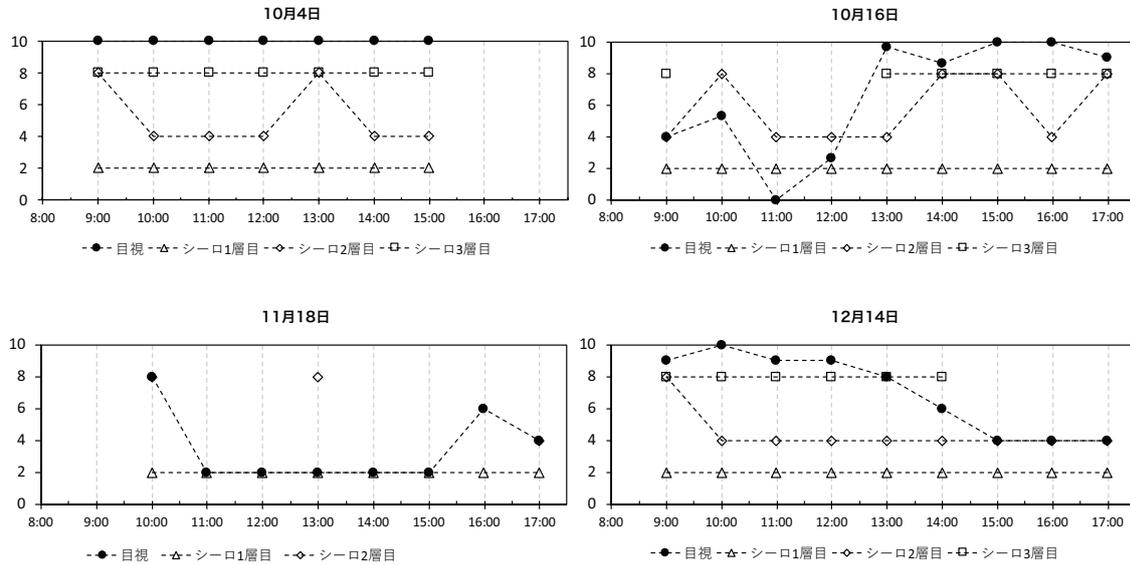


図 4：名古屋空港における雲量の時間変化：目視観測とシーロメーター観測の比較。

10月4日の目視観測のみ岐阜大学（岐阜市柳戸）でおこなった。

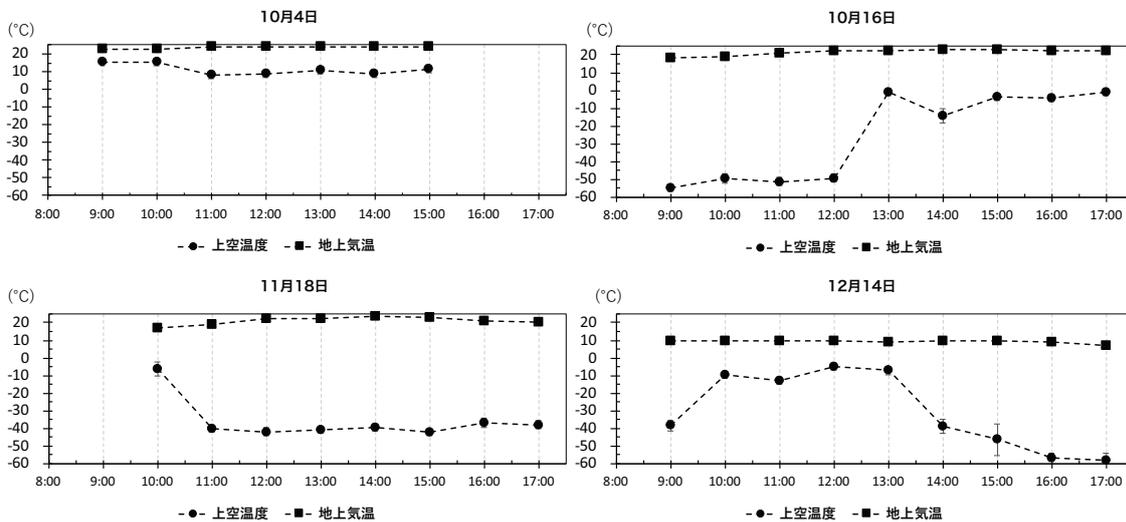


図 5：名古屋空港における上空温度と地上気温の時間変化。

上空温度は放射温度計による観測であり、地上気温は METAR データを用いた。10月4日の上空気温のみ岐阜大学（岐阜市柳戸）における観測である。上空温度の誤差範囲は5回測定した放射温度計測定値の標準偏差（1σ）である。

3. 結果

4回の観測日の雲量（目視とシーロメーター）と上空温度、地上気温の時間変化を図4、5に示す。4回の観測日は異なる天気状況であった。10月4日は終日曇り（低い雲が広がる）で目視雲量は全て10で

あった。10月16日は午前中は晴れで午後から雲が広がった。目視雲量は0~10まで大きく変化した。11月18日は10時と16時以降で雲が多かった（目視雲量4~8）が、それ以外の日中は晴天であり（目視雲量2）、最高気温が24℃まで上がった。12月14日は早朝に小雨が降り、午前中は雲が多く（目視雲量8~10、14時以降雲が少なくなり晴天となった（目視雲量4）。

シーロメーター観測の3層の雲は（図4）、1層目が一番低い高度で、3層目が一番高い高度の雲である。目視雲量と比較すると、3層のうち一番多い雲量と目視雲量が同様の時間変化をしていた。シーロメーターの1層目は4回の観測日において全て雲量2であった。

図5より、4回の観測日の日中の地上気温変化幅は1.6~6.6℃であった（22.4~24.2℃、18~23℃、17.2~23.8℃、7~10℃）。一方、上空温度は回ごとに大きく異なり、曇っていた10月4日は10℃前後と高く、10月16日の午前や12月14日午後など晴れていた時間は-40~-60℃と低い温度であった。さらに1日の変化幅も天候の違いで異なり、10月4日では6.9℃であり、10月16日では53.8℃であった。

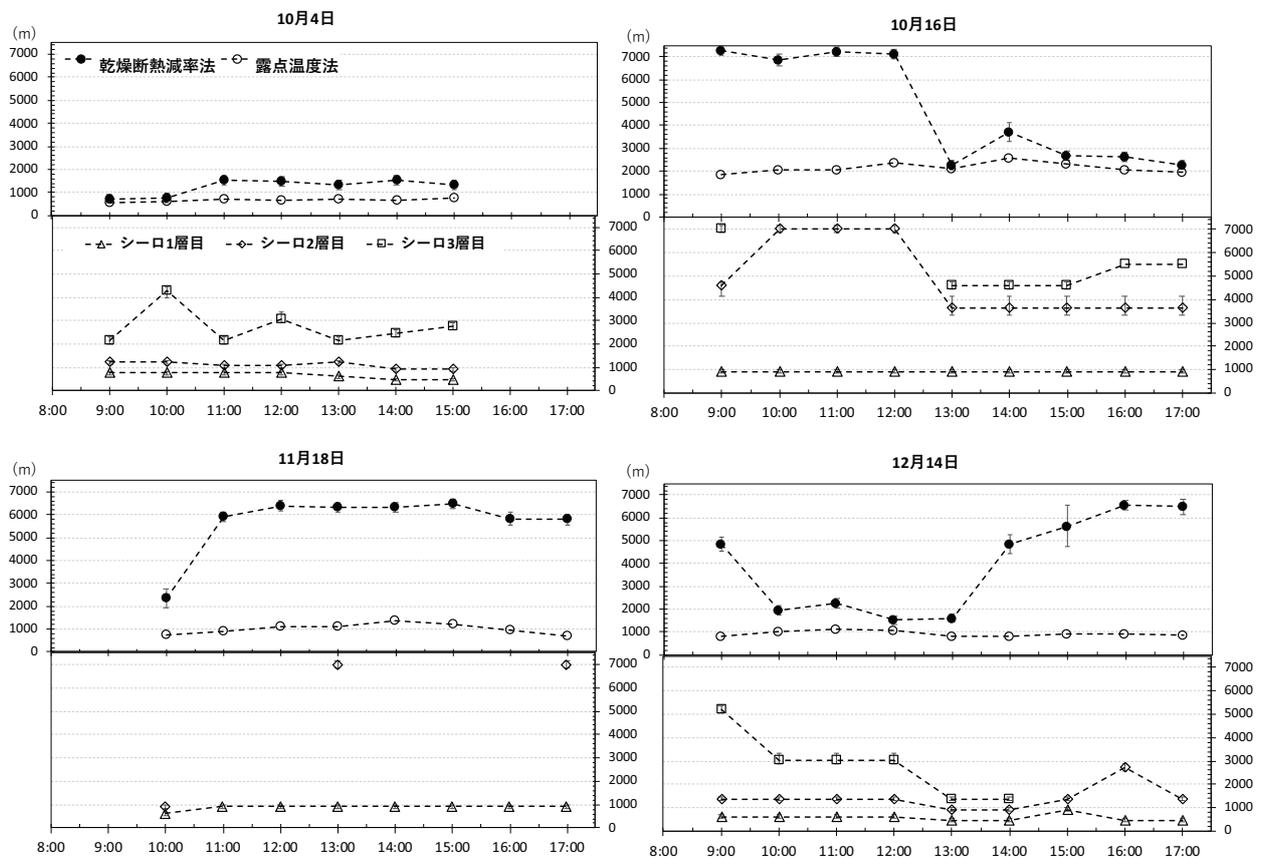


図6：名古屋空港における推定雲底高度の時間変化。

各観測日の上の図は上空温度と地上気象データから計算した推定雲底高度（乾燥断熱減率法と露点温度法）であり、下の図は空港設置のシーロメーター観測による雲底高度である。乾燥断熱減率法の誤差範囲は5回測定した放射温度計の測定値の標準偏差（1σ）を推定高度の誤差に変換したものであり、シーロメーター高度の誤差範囲は公表値の間隔を示している。

4. 考察

(1) 雲底高度の推定

観測結果からの雲底高度推定に以下の2つの方法を用いた。1つ目は乾燥断熱減率（1℃/100m）を用いて、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である（式1）。2つ目は地上の気温と露点温度の差を元に持ち上げ凝結高度を求める方法である（式2）。

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

H：推定雲底高度、T：地上気温、 T_{sky} ：上空温度

$$H = 125 (T - T_{\text{Dew point}}) \quad (2)$$

H：推定雲底高度、T：地上気温、 $T_{\text{Dew point}}$ ：地上露点温度

図6に4回の観測日の推定雲底高度とシーロメーター観測の雲底高度の時間変化を示す。乾燥断熱減率法は4回の観測日で高度の差や時間変化が見られた。例えば、10月4日は700~1500mと低い高度で変化が少なく、10月16日は午前は7300mと高く、午後は2300mまで低下した。露点温度法では4回の観測全てで乾燥断熱減率よりも雲底高度が低くまた1日の高度変化も少なかった。最も高度が低かった10月16日で530~760m、最も高い10月16日では1860~2560mであった。

シーロメーター観測による3層の雲底高度と比較すると、1層目は常に低高度で460~910mの範囲であり、露点温度法の高度と近い。2層目と3層目の高度は10月6日と10月16日、さらに12月14日の午前中の乾燥断熱減率の高度と近い値を示している。11月18日は晴れで雲量が少なかったため、3層目の雲が観測されなかったが、2層目で観測された10時、13時、17時の高度は乾燥断熱減率の高度変化と同様であった。

(2) 露点温度法の推定雲底高度

(1)で推定した露点温度法の推定雲底高度は、乾燥断熱減率法と比較して高度が低く変化が小さい。また、どの雲量でも低い高度となった。シーロメーター観測での1層目の高度が雲量に関わらず常に1000m以下の低高度であることと関係があるかを調べるため散布図を作成したが

(図7)、露点温度法での高度が1300m以上でもシーロメーターでは910mであり、両者に相関は見られなかった。

露点温度法は地上の気温と湿度から計算した露点温度を用いて、一定の温度降下率での凝結を仮定した理論上の水蒸気凝結高度を示しているが、実際の上空の気温と湿度の変化は一定ではないことが原因かもしれない。目視雲量が0の場合でもシーロメーター1層目の雲量が常に2であり低高度に雲が存在すると観測されていることと合わせて、今後の検討が必要である。以上より、上空の広範囲に広がる雲の雲底高度とその変化の推定には乾燥断熱減率法の方が適していると考え、次節では雲底高度が推定可能な条件を検討する。

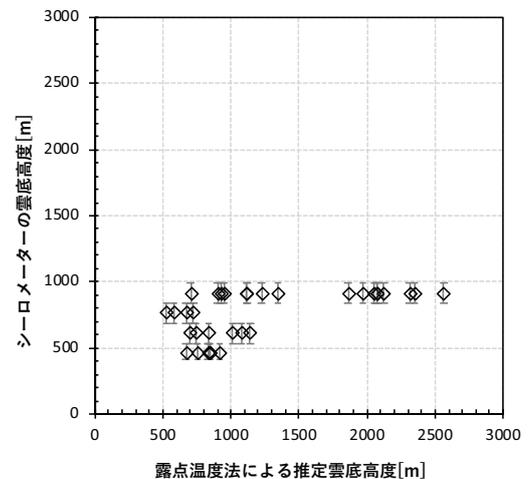


図7：地上気象観測データによる露点温度法の推定雲底高度とシーロメーター第1層雲底高度の比較。

(3) 乾燥断熱減率法とシーロメーターの雲底高度比較

全ての観測日の放射温度計の上空温度観測による乾燥断熱減率法を用いた推定雲底高度と、シーロメーター観測の3層の雲底高度を比較した(図8左)。横軸の誤差範囲は5回測定した放射温度計の測定値の標準偏差(1 σ)を推定高度の誤差に変換し、縦軸の誤差範囲はシーロメーターの公表値の間隔を示してい

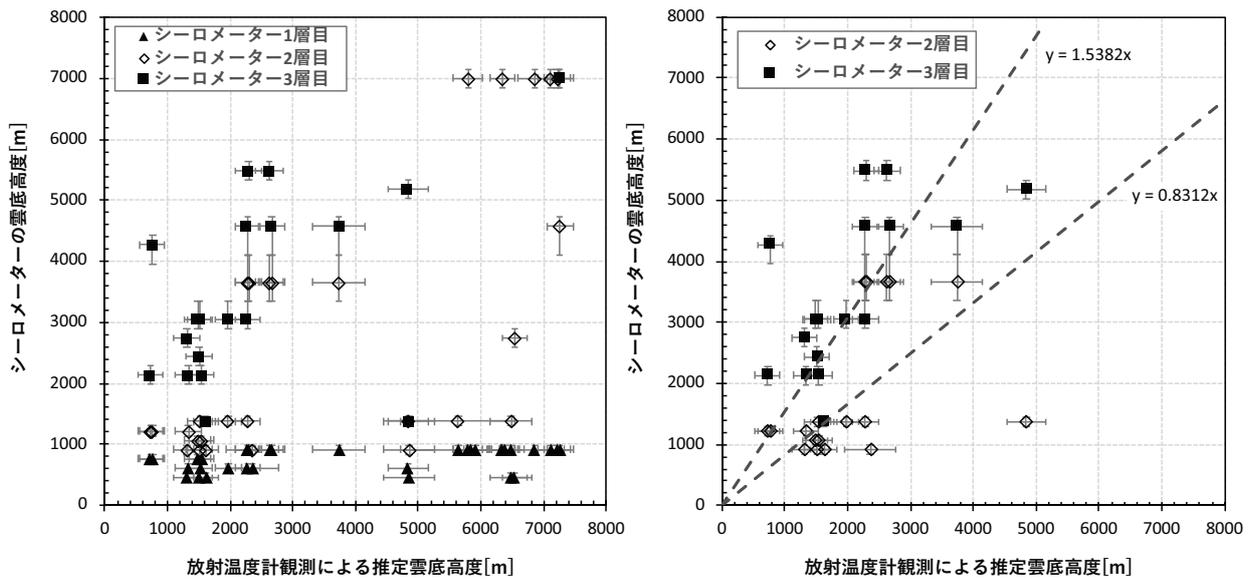


図8：放射温度計の上空温度観測による推定雲底高度（乾燥断熱減率法）とシーロメーター雲底高度の比較

左図：4回の観測の全データを示す。推定雲底高度をシーロメーターの第1層～第3層の3種類の高度と比較した。

右図：4回の観測期間のうち雲量8以上のデータを示す（シーロメーターの第1層を除く）。

る。散布図のデータ分布は大きく2つの範囲に分けられ、1つ目は原点から右上がりの正の相関を示す分布であり、乾燥断熱減率法での推定高度が高くなるとシーロメーターの高度も上がり、2層目と3層目のデータで構成される。2つ目はシーロメーター雲底高度が1000 m以下の分布であり、多くは1層目のデータで構成されるが2層目も含み、乾燥断熱減率法の推定雲底高度は1000 m以下から7000 m以上と幅広い。この2つ目のグループに含まれるシーロメーター2層目の高度は、12月14日の午後などの雲量が少ない時のデータである。すなわち放射温度計の観測範囲に雲が少なく、雲がない部分の上空からの放射も同時に測定するため、 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ や $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ という非常に低い温度となり、上空温度から求めた推定高度が実際の雲高よりも大幅に高くなったと考えられる。快晴時の上空温度の季節変化は小寺(2020)により観測され、用いた放射温度計の温度下限が $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ であったためそれ以下の温度は計測できていないが、秋から冬は $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ を下回る温度であることが示されている。

雲以外の部分の放射の影響を除くため雲量8以上のデータについて、さらに乾燥断熱減率法高度とは関係が弱い1層目を除いたデータについて、乾燥断熱減率法とシーロメーターの雲底高度を比較した（図8右）。右上がりの正の相関を示す分布であり、シーロメーターの2層目と3層目で異なる分布となっている。原点を通る回帰直線の傾きは2層目データで0.83、3層目データで1.54である。

雲量は0～1が快晴、2～8が晴れ、9～10が曇り（降水がある場合は雨や雪）である。よって曇りとされる天候下では、乾燥断熱減率法で求めた雲底高度は2層目と3層目の中間の値を示しており、また回帰直線の傾きを用いることにより2層目と3層目のおよその雲底高度が推定できると言えるだろう。

本研究の観測時期は10月中旬から12月であったため層状の雲が多く、対流性の雲の観測はできなかったことから、対流性の雲の観測が今後の課題の一つである。しかしながら、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で観測ができることから、観測温度から推定した雲底高度と観察した雲の種類を組み合わせることにより、前線通過時の雲と天気の変化など小中学校での気象の学習に役立てることができると考える。

<謝辞>

理科教育講座地学専攻4年生の池口遼人氏と菊井重和氏には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>

- 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.
- 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 理数科課題研究 (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.
- 横川 淳 (2015) “第3章 雲と雨”. 身に付く気象の原理. 技術評論社, 120-161.
- D. Riordan, R. Clay, A. Maghrabi, B. Dawson, R. Pace, and N. Wild (2005) Cloud base temperature measurements using a simple longwave infrared cloud detection system, *Journal of Geophysical Research*, **110**, D03207.

