

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

Seasonal variation in the correlation between cloud base height and sky
temperature measured by infrared thermometer

下園玲治, 神山千鶴, 加藤靖葉, 森本真紀

SHIMOZONO Reiji, KOYAMA Chizuru, KATO Yasuha, MORIMOTO Maki

[キーワード Keyword] 雲, 上空温度, 雲底高度, 放射温度計, 雲量, 季節変化

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

[要旨 Abstract] 本研究では, 雲底高度と上空温度の関係の季節変化を調べ, その季節性を元に2022年の1年間の名古屋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した。中部国際空港において毎月1回の上空温度観測をおこない, 空港設置のシーロメーター観測の雲底高度との比較をおこなった。放射温度計を用いた乾燥断熱減率法の雲底高度補正のための関係式を作成したが, 季節別では夏季の関係性が他の季節と大きく異なっており, その原因は高湿度による上空の水蒸気量の増加と推定された。季節別の関係性を用いて, 2022年の雲量8~10の曇天日の名古屋市の雲底高度の季節変化を求め, 名古屋空港観測の雲底高度の変化と同様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)での分野の一つである気象の内容の一つとして, 雲の発生, 雲の量や動きと天気の変化との関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。目視によって雲量・形状が観測されてきたが, 高度は低層雲(高度2000 m以下), 中層雲(2000~7000 m), 高層雲(5000 m以上)と大きく3つに分類されており, 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であることを利用し, 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(2021)と加藤・森本(2021)では, シーロメーターが設



図1: 観測地点(地理院地図に加筆)

置されている愛知県営名古屋空港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。神山ほか(2022)と神山(2022)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、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した。これらの先行研究では、シーロメーターが設置されている空港において、放射温度計測定の上空温度とシーロメーター雲底高度の比較をおこない、その関係性を調べたが、観測時期が10, 11, 12月の3ヶ月のみの秋〜冬に偏っており、気象状況が大きく異なる他の季節については観測されなかった。

そこで本研究では、雲底高度と上空温度の関係の季節変化を調べ、その季節性を元に2022年の1年間の名古屋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)

乾燥断熱減率法とシーロメーター観測の雲底高度の関係の季節変化を調べる観測はおよそ1ヶ月に1回の計11回(2022年1月29日、3月9日、4月6日、4月25日、5月26日、7月19日、8月25日、9月17日、11月14日、11月22日、12月5日)おこなった。観測地点は岐阜市から約70km南、名古屋市からは約35km南に位置する中部国際空港(愛知県常滑市)である(図1)。観測地点到着後に快晴になった観測日もあったが、雲量0~2の快晴では雲底高度が測定できないため、できるだけ雲が多くかつ雨が降っていない日を選んで観測した。空港ターミナルビルの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。観測の間隔は、中部国際空港の航空気象観測データ発表の間隔に揃えた毎時0分と30分である。

また、1年間の雲底高度の変化を調べるために、2021年は岐阜大学近隣の地点であったが、2022年は岐阜大学と中部国際空港の中間付近であり、愛知県営名古屋空港から約10km南西の名古屋市中川区において、1月1日から12月31日までの1年間の毎日1回、放射温度計による上空温度測定と同時刻の全天雲量の目視観測を行なった。上空温度観測と同時刻の地上気温と相対湿度は、名古屋地方気象台(名古屋千種区日和町)のデータを用いた。観測地点を図1に示す。

用いた放射温度計は加藤・森本(2021)、神山ほか(2022)と同じカスタム社のIR-310WPであり、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 $\pm 2\%$ rdg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。

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($1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$)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)

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、中部国際空港(30分間隔でデータ公開)と名古屋空港(1時間間隔でデータ公開)の観測データを用いた。放射温度計観測と同時刻のデータを入手し、比較解析に用いた。METARで公開される雲底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(304.8m)毎の段階的な値で発表されている。また発表されるのは地上から3層目までの雲についてであり、4層より上の高度についての情報は無い。また最高高度は30,000フィート(9140m)までの発表となっている。

神山(2022)によると岐阜基地(岐阜各務原空港)の1層目の雲は2021年の1年間に358日とほぼ毎日観測されており、雲量2での記録が多くを占め、さらにおよそ3分の1は1000m付近の高度であった。目視では快晴であった日の多くでも、シーロメーターでは雲量2の1層目の雲が観測されており、放射温度計による乾燥断熱減率法の推定雲底高度とシーロメーター観測1層目の雲の関係が低いことが指摘された。そのため、本

研究では、空港観測のシーロメーター雲底高度の2層目と3層目のデータについてのみ扱うこととした。

3. 観測結果

3.1. 空港観測の日変化

中部国際空港における2022年の11回の観測のうち、3月9日と7月19日の結果を図2に示す。両日ともに日中は曇天であり目視雲量は10が続き、シーロメーター雲量は2層目は4が多く、3層目は8であった(図2(a))。同様の雲量であったが、3月の気温はおよそ10°Cで上空温度は-10~-20°Cを記録し、夏季の7月では気温は25°Cを超え、上空温度もおよそ20度と高温を示した(図2(b))。乾燥断熱減率で求めた雲底高度とシーロメーター観測の高度を比較すると(図2(c))、3月の推定高度は3000~2000mで変化しており、それより高い4000~2000mの変化をシーロメーターは示したが、変化の傾向は似ている。7月では推定高度は1000m以下と低い高度で推移し、その高度にシーロメーター2層目は近く、3層目は1000~3000mと高い高度であった。

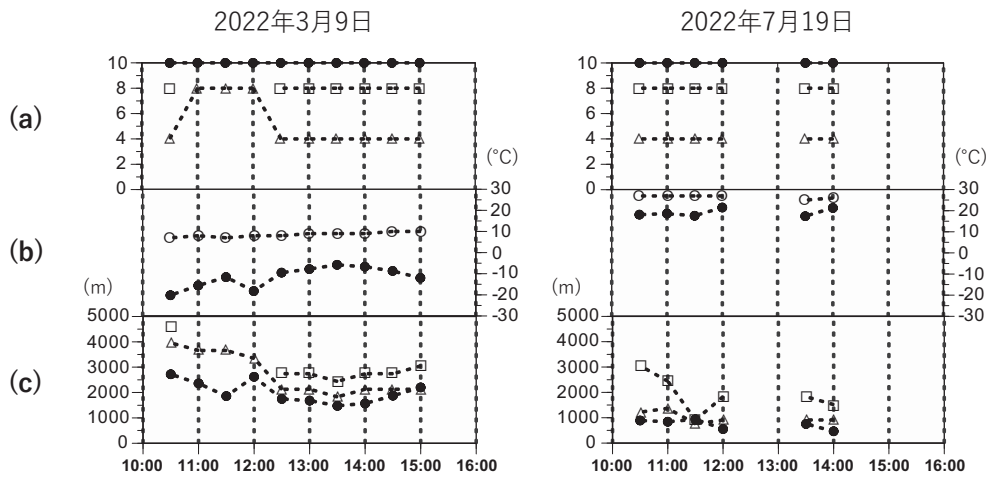


図2：2022年3月9日と7月19日の中部国際空港における(a)雲量、(b)上空温度と地上気温、(c)雲底高度の時間変化。

(a) 雲量は、目視観測(●)、シーロメーター観測2層目(△)、3層目(□)。

(b) 上空温度(●)と地上気温(○)。

(c) 雲底高度は、上空温度と地上気象データから乾燥断熱減率法で求めた推定雲底高度(●)とシーロメーター観測2層目(△)、3層目(□)。

3.2. 2022年の名古屋市の上空温度の季節変化

2022年の1年間の名古屋市における上空温度などの気象観測結果を図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35°Cを超える季節変化を示したが、1ヶ月単位で見ると1ヶ月の間の変化は大きくても10°C程度であり、2021年の岐阜市の結果(神山ほか(2022))と同様であった。

一方、上空温度は、1月~3月と10月中旬~12月に-60°C以下(使用した放射温度計の測定下限値未満)の最低値を示す日が多く見られた。この-60°C以下の観測日数は2021年の岐阜市よりも日数が多く、長期間であった。5~9月では-60°C以下まで低下することなく、8月では低くても-20°C、高温の日には25°C近くに達した。

図3(b)の雲量では、2021年の岐阜市と同様に上空温度のような明瞭の季節変化はないが、2021年と比較すると雲量0の日が多く見られたことから、上空温度の低い日数が多かったことの原因の一つと考えられる。

図3(c)の相対湿度も2021年と同様に天候に応じた日毎の変化が大きいが、6~9月の夏季には1か月の最低湿度が高く、10月以降の秋・冬季では湿度の低下が見られた。

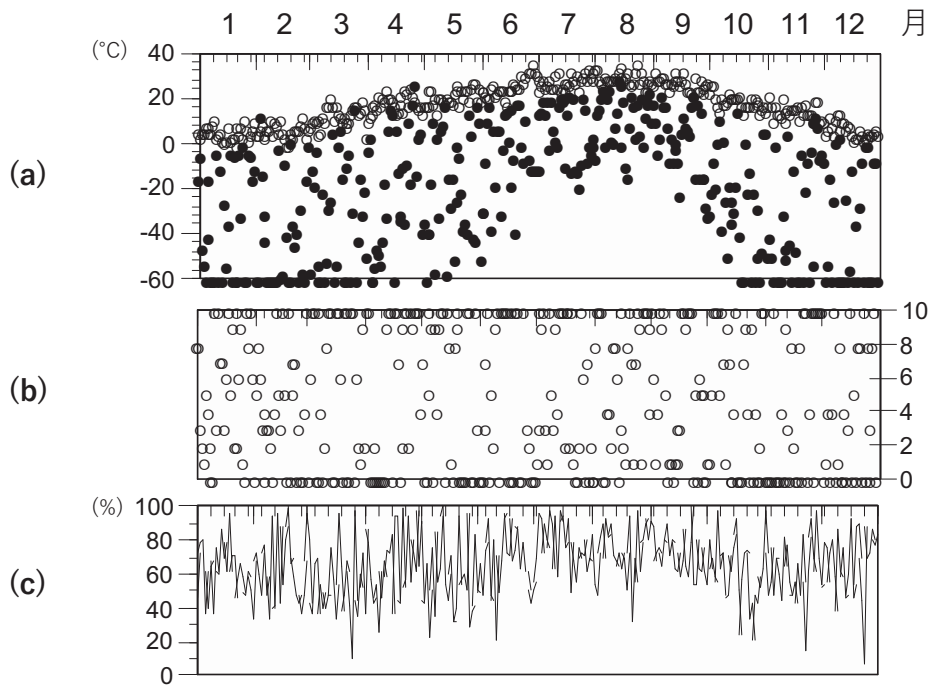


図3：2022年1月1日～12月31日の名古屋市の(a)上空温度(●)と地上気温(○)，(b)目視雲量，(c)相対湿度。

4. 考察

4.1. 乾燥断熱減率法とシーロメーターの雲底高度比較

2022年の空港における11回の観測のうち、上空の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、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2層目、3層目の雲底高度を比較した(図4左)。加藤・森本(2021)や神山(2022)と同様の高い正の相関を示す分布となっているが、これをさらに季節ごとに分けて解析するにはデータ数が少ないため、加藤・森本(2021)の2020年10~12月の名古屋空港での観測と神山(2021)の2021年10~12月の岐阜各務原空港での観

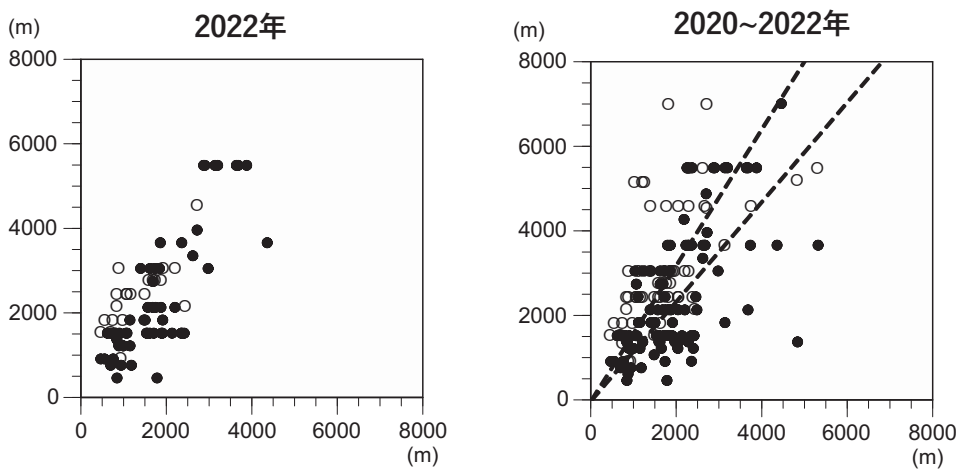


図4：空港における放射温度計の上空温度観測による推定雲底高度(乾燥断熱減率法)とシーロメーター雲底高度の比較。

雲量8以上のデータを示し、シーロメーター雲底高度の2層目(●)と3層目(○)との比較である。

測データを加えた散布図を図4右に示す。2022年のみのデータと比べるとややデータのばらつきが見られるが、以下の関係式が得られ、相関も高い値を示した（式2、式3）。4.2ではこの関係を季節ごとに検討する。

$$2 \text{ 層目 } y_2 = 1.178 x \quad (r^2 = 0.83) \quad (2)$$

$$3 \text{ 層目 } y_3 = 1.608 x \quad (r^2 = 0.83) \quad (3)$$

(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)

4.2. 季節別の乾燥断熱減率法とシーロメーターの雲底高度の関係

2020年10~12月, 2021年10~12月, 2022年1~12月の空港における観測結果を用いて, 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, シーロメーター雲底高度の関係を季節ごとに分けて調べた(図5)。12ヶ月のうち1・2・4・6月の観測データはないため, 春(3・5月), 夏(7・8月), 秋(9・10・11月), 冬(12月)のデータを用いている。図5で季節ごとにデータのばらつきが異なるのは, 季節ごとの気象状況の影響も考えられるが, 秋と冬は観測回数が多いことが原因ではないかと考えられる。乾燥断熱減率法推定雲底高度とシーロメーター雲底高度の関係式(回帰式)の傾きを季節ごとに求めると以下となる。

	春	夏	秋	冬
2層目傾き	1.346	0.861	1.287	0.992
3層目傾き	1.602	2.039	1.543	1.608

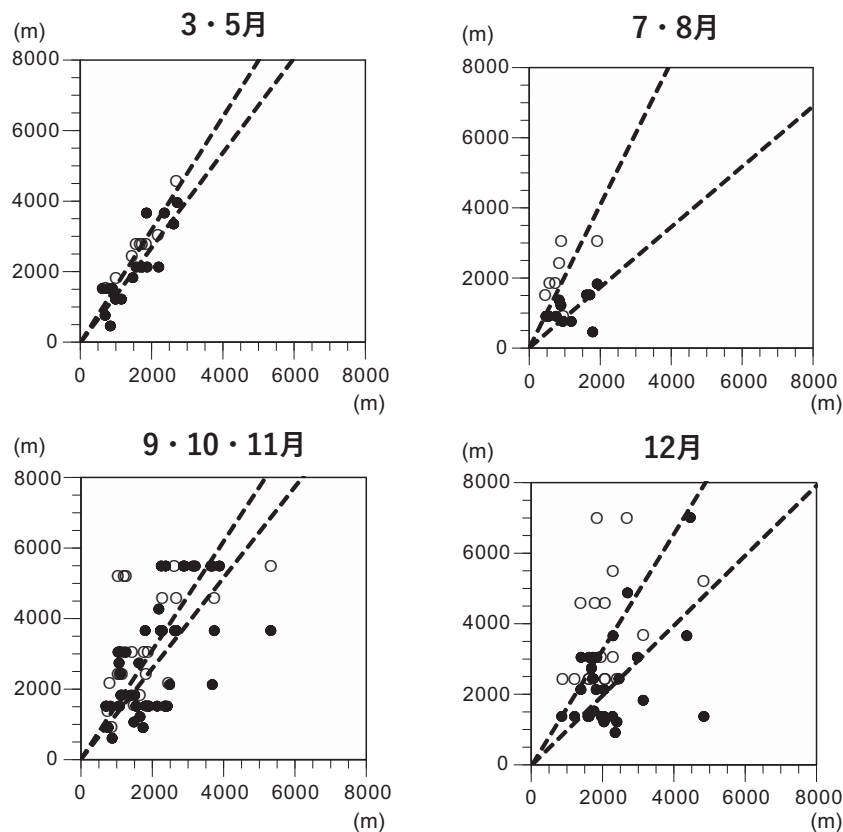


図5: 放射温度計の上空温度観測による推定雲底高度とシーロメーター雲底高度の季節別の比較。
雲量8以上のデータを示し, シーロメーター雲底高度の2層目(●)と3層目(○)との比較である。

2層目の関係式の傾きは、春と秋が約1.3と近く、夏が0.86と小さい。4.1で示した3年間全体の値と近いのは秋である。3層目との関係の傾きでは、夏が2以上と大きい、春・秋・冬は3年間全体と近い1.5~1.6となった。

夏の3層目の傾きが大きいのは、3.2で示したように夏の上空温度が他の季節と比べて高いことが原因ではないかと考える。神山ほか(2022)では、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示された。よって雲量0~2の快晴時に放射温度計が測定している上空温度だけでなく、雲量が多い場合でも水蒸気が多い時期には、高い上空温度が観測されることにより、シーロメーター雲底高度と比較すると放射温度計による推定雲底高度が低くなることから、関係式の傾きが大きくなる。しかしながら、夏の2層目の傾きは他の季節より低くなっており、その原因は未だ不明である。夏の観測回数は2022年の2回しかなく、どちらも観測時間前後に雨が降り、雲底高度が非常に低い天候状況であったため、今後の課題として夏の観測回数を増やすことが挙げられる。

4.3. 2022年の名古屋市上空の雲底高度の推定 (図6)

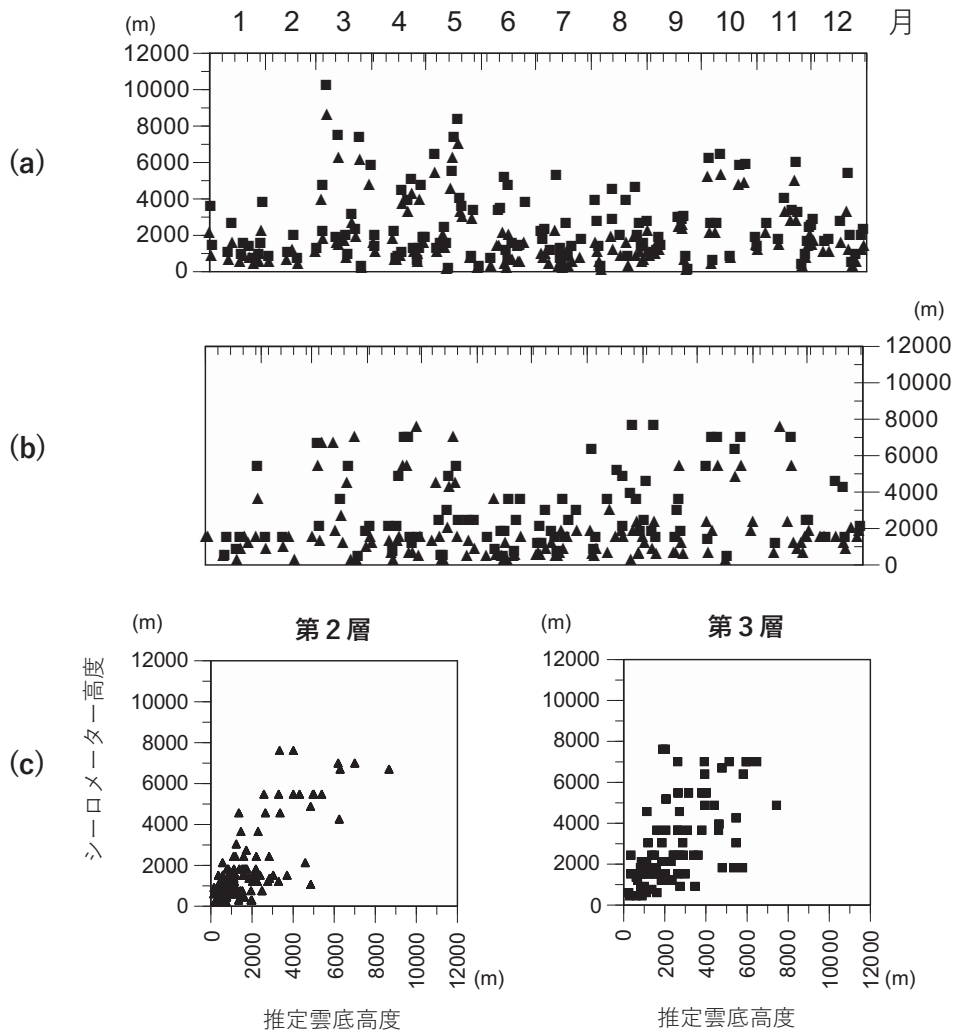


図6：2022年の雲量8以上の日の名古屋市の推定雲底高度（2層目(▲)、3層目(■)）。
 (a)季節変化、(b)シーロメーター雲底高度（名古屋空港）、(c)名古屋空港シーロメーター雲底高度との比較

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

2022年の毎日の上空温度観測結果から乾燥断熱減率で求めた雲底高度に、4.2で求めた季節別(春(3~5月), 夏(6~8月), 秋(9~11月), 冬(12, 1, 2月))のシーロメーター雲底高度との関係性を適用して、名古屋市の上空の雲底高度を推定した。求めたのは雲量8~10の日の2層目と3層目の雲底高度である(図6(a))。同じ日時の名古屋空港のシーロメーターの2層目と3層目の雲底高度(図6(b))と上空温度から求めた雲底高度と名古屋空港シーロメーター雲底高度の関係を図6(c)に示す。

3~5月や10, 11月に2層目・3層目ともに4000m以上の中層雲以上の高い高度が復元され、10km北東に位置する名古屋空港でも比較的似た高度が観測された。1, 2月や6, 7月は他の月と比べると低い高度(4000m以下)が多く、名古屋空港でも同様であった。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(図6(c))、放射温度計観測の上空温度から実際の雲底高度をおよそ復元できていると言える。また、この図は雲量8以上の日のデータを用いており、雲量が多い日の雲は、同程度の高度で10km以上の範囲に広がっているとも言える。

放射温度計による推定雲底高度とシーロメーター観測高度を詳細に比較すると、放射温度計の方が春の推定高度がやや高い特徴が見られた。4.2での季節別の関係性確認では、時期によって観測データ数が大きく異なることから、今後のさらなる観測と検証が必要である。また、本研究では雲量8~10のほぼ雲で覆われた曇天の状況についてのみ検証したため、雲量が少ない状況での推定法についてさらに検討する必要がある。しかしながら、大規模な装置を用いる必要がなく、どこでも簡便に短時間で測定可能で、すぐに雲底高度に換算できるこの方法は、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>

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>

- 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.
- 神山 千鶴 (2022) 放射温度計測定による岐阜市の雲底高度の季節変化と短期的な変化. 岐阜大学教育学部卒業論文, 65p.
- 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.
- 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).
- 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.

