

赤外線放射温度計を用いた月の観測

埼玉県立春日部女子高等学校

(教諭) 鈴木 文二

(地球科学部) 福原 育代, 室井 千堯, 三枝 千春, 小船 有美,
高松 由佳, 榎本 仁美, 郡司 歩直美, 長谷川 千桂, 大岡 莉央,
高橋 真生, 牧田 里美, 山出 果歩, 黒沢 奈央, 染谷 玲希,
綱島 芙美, 川端 ひ芳子, 田口 志保野, 赤坂 有紀, 梅津 美希,
大倉 彩咲, 平井 彩恵

1 はじめに

手にとって見る, 調べる, 測定することが不可能な対象をとり扱うのが天文学である。古くから, 測定・観測機器は肉眼のみであったが, 19 世紀半ばにタゲレオタイプの写真が発明され, より深い(遠い)宇宙の観測が可能になった。そして, 次の革命的な発明である CCD によって, 銀河系の外側に広がる宇宙の扉を開けることができるようになった。同時に, 可視光線だけでなく, X 線, 紫外線, 赤外線, 電波という様々な電磁波を測定できる機器が登場した。多波長でとらえた天体の姿は驚きに満ちており, 天文学を発見の時代へと導いた。一方で, そのような先端科学の躍動感あふれる進歩に対して, 初等教育現場の天文学は, 太陽の動き, 星座の星ばし, 月の満ち欠けなど, 近代の位置天文学から抜け出しきれていない。また, 身の回り主義的な実験・観察を主体とする理科教育も, 遠い天体を測定することを阻んでいるかのように思える。

本稿は, 比較的容易に入手できる「赤外線放射温度計」を用いて, 月面温度を測定する試みの紹介である。この取り組みは, 筆者の勤務する学校の地球科学部の活動として行われた。研究の発端は, 気象の授業において雲底温度を測定する実習であった。水蒸気を含んだ空気塊が上昇すると断熱膨張して温度が低下し, 露点温度を下回ると雲が発生する。その高度は数百 m から数千 m であり, 直接測定できない高さである。ところが, 非接触型温度計と呼ばれる放射温度計は, 物体から放射される赤外線を測定して温度を算出する。雲から赤外線放射で雲底温度が測定できれば, 地表温度との差から乾燥断熱変化を使って高度を求めることができる。その雲の観測の合間に, 下弦の月に温度計を向けたところ, わずかな温度上昇が認められた(図 1)。背景大気に対して約 0.5 °C であったが, 日周運動によって月が温度計視野を横

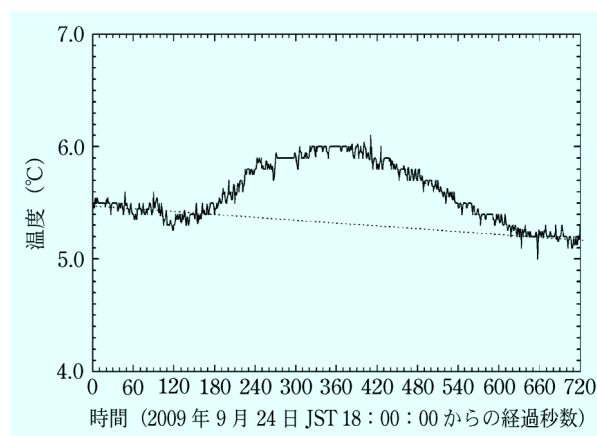


図 1 初めて検知した月からの赤外線

切ると考えられる時間内で, 温度上昇が認められたため, 月からの赤外線を検知したと考えた。

2 大気の窓

厚い大気に覆われている地球は, 電磁波の様々な波長が大気中の分子によって吸収・散乱されるため, 特定の波長域でしか天体からの信号を受け取ることができない(図 2)¹⁾。この波長域のことを「大気の窓」と呼び, 可視光線, 赤外線, 電波などの天体観測は, その窓に合わせて行われている。可視光の窓は大きく開いているため, 晴れていれば, 太陽, 月, 惑星, 恒星を観測することができる。ただし, 昼間の空は大気分子の散乱で明るい(青空), 恒星などを見ることはできない。一方で, 赤外線および電波の波長域においては, 太陽光の散乱の影響は少なく, 水蒸気の影響のない波長帯を選ぶことによって, 昼夜を通しての観測が可能である。

天体からの電磁波の放射は, 太陽を含め黒体放射と考えてよい。惑星, 衛星などは, 自ら光り輝いてはいないが, 太陽光を受けて熱せられ, その温度に見合った電磁波を放出し平衡状態を保っている(放射平衡)。地球の平衡温度は -18°C (255 K) であるが, 現在の地球平

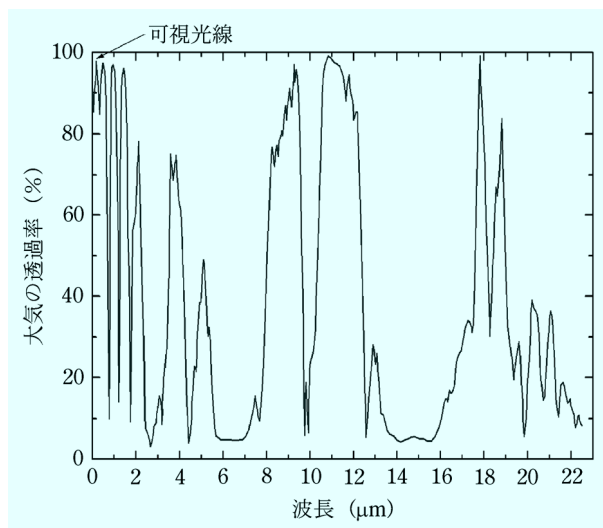


図2 地表からの電磁波で観測可能な「大気窓」
(Estes and Senger¹⁾ を元に作成)

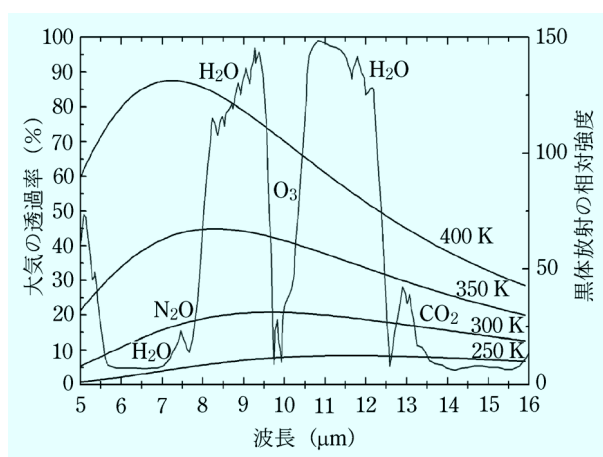


図3 中間赤外領域における大気窓と黒体放射
(大気透過率は Estes and Senger¹⁾ を元に作成)

均気温が 15 °C (288 K) であるのは、水蒸気などの温室効果によるものである。惑星の表面温度が数百 K の場合の黒体放射は、波長が数 μm から 10 μm 程度の中間赤外線の波長でピークを持っている。この波長域で大気窓は開いており (図 3)¹⁾、地表からの観測が可能である。ただし、少なからぬ水蒸気とオゾンによる吸収があり、10 μm より長い波長では二酸化炭素による吸収が顕著になっている。この二酸化炭素による吸収こそが、現代的な問題となっている温室効果の波長域である。

月の平衡温度は、約 1 °C (274 K) であるため、この中間赤外線領域での観測が可能である。夜昼の温度は -100 °C (173 K) から 130 °C (403 K) と激しく変化するが、この波長域に収まる範囲で赤外線を放射している²⁾。また、太陽光に含まれる中間赤外線に対する月表面のアルベド (反射率) は、0.01 以下であることが知られており³⁾、月からの赤外線は黒体放射 (熱的赤外線) とみなすことができる。

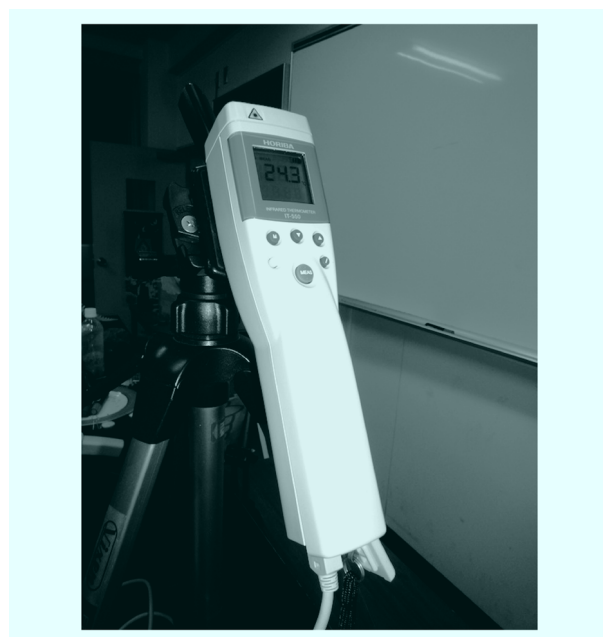


図4 使用した放射温度計

温度という概念は直感的に理解できる物理量の一つであり、可視光線以外で天体をとらえるという現代的な醍醐味がある。黒体放射の式も高校の学習事項である。中間赤外線領域の大気吸収は、いま注目されている温室効果に関連している。惑星環境を考える上で、熱平衡という考え方は重要であり、新しい学習指導要領では前面に出ている。すべてにおいて、従来の天体観測という枠を越えた新しいアプローチになりうると考えられた。さらに決定的なことは、放射温度計の数万円という価格である。産業用途が拡大してきたため、特別な予算を組まなくても、手の届くレベルになってきたのである。

3 測定機器の検定

今回の研究で使用した放射温度計は、堀場製作所の IT-550L である (図 4)。公表されている仕様は以下のとおりである。

測定可能温度範囲：-50 °C ~ 500 °C

温度表示分解能：0.1 °C

測定視野：約 2°

波長感度域：8 ~ 16 μm

サンプリング間隔は最少で 1 秒、インターフェイスは RS-232C であるが USB 変換アダプタを介して、パソコンに簡単に繋げられる。付属ソフトウェアを使ってエクセル形式でデータを取り込んで保存ができる。

月からの信号は、背景大気に対して差が小さいと見込まれるため、機器の精度の検証を行った。水槽に汲みおいた水の温度を連続測定した結果を図 5 に示す。仕様どおりに 0.1 °C の精度が出ていることを確認した。天体観測に用いられる赤外線観測機器は、機器の温度雑音

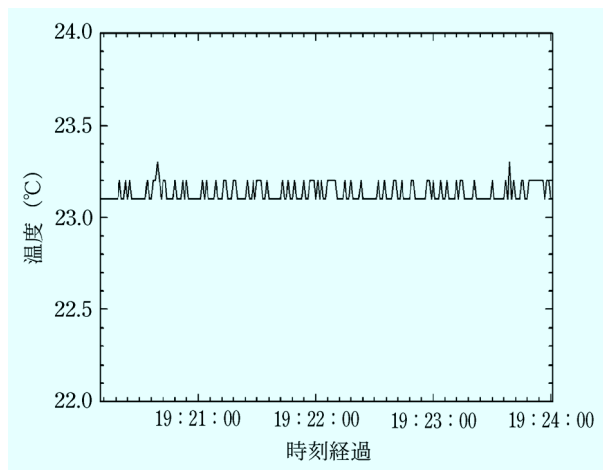


図5 放射温度計の安定性

を減らすため、液体窒素などで冷却するのが通例であるが、もちろんハンディタイプの温度計には装備されていない。放射温度計は、機器温度の変化を内部センサーで感知し、フィードバック回路で逐次補正している。強い赤外線が入ると過補正となり、安定するまでに数秒間かかるようであるが、観測には問題ないと考えた。

次に波長特性と測定視野の問題がある。前者は検定する装置・設備がないため、仕様を信頼するしかない。8～16 μmの大気分子の吸収は、主に水蒸気、オゾン、二酸化炭素であるが、変動量の大きなものは水蒸気である。通年の観測を整理してみると、夏場と冬場ではかなりの差異が認められた。良質のデータが取得できたのは、安定した好天の続く乾燥した冬場であった。後者については実験で検証した。仕様に書かれている温度計の視野2°に対して、月の視直径は約0.5°である。視野内での感度分布、正確な視野直径を求めることは、非常に重要である。熱源として暖房用ハロゲンヒーターを用い実験を行った。ヒーターは直径35 cmであったので、校舎内の直線廊下の遠方40 m先に置くと、月の視直径と同程度になる。台車に乗せたヒーターを5秒ごとに、10 cmずつ移動させて温度測定を行った（図6）。一次元の測光機器の感度分布は、多くの場合は中心の感度が高いガウス分布となるが、温度計も同じであることが判明した（図7）。また、移動させた距離から、視野直径は仕様にほぼ等しい約2°であることも確認された。視野直径については、背景温度と一致する境界で定めるよりも、感度の半値幅で定義すべきだが、それほど違いはなかった。実際の観測では視野直径は定数となるため、絶対値を厳密に求めるのでなければ、仕様どおりの値を使っても問題はない。なお、温度計メーカーである堀場製作所に確認したところ、1 mの距離で焦点を結ぶレンズ設計であるとの返答があった。無限遠にある月の場合に、どのような視野になるかは不明だそうだが、レンズ設置の位置から逆算すると2°という値は妥当のようである。

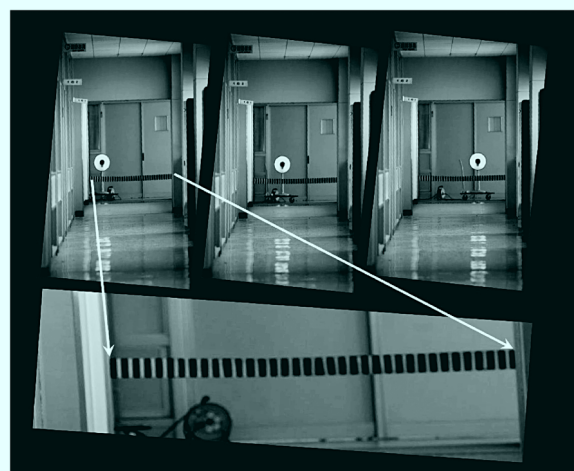


図6 放射温度計の感度特性の実験概要（白黒模様が10 cmごとの移動ガイドとなっている）

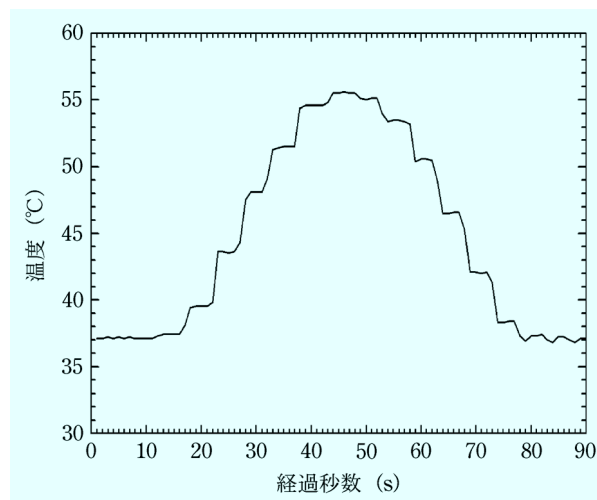


図7 放射温度計の感度分布

ある。

4 解析方法

工場における製品管理、油調理の油温確認などの一般的な用途に使用するため、放射温度計からの出力は、セルシウス温度（°C）である。黒体放射とみなせる物体からの赤外線放射量の強弱を比較するためには、セルシウス温度 t を絶対温度 T （K）に換算し、ステファン・ボルツマンの式を用いてフラックス E （W m⁻²）を求める。

$$T = t + 273.15$$

$$E = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ (W m}^{-2} \text{ K}^{-4}\text{)}$$

……………ステファン・ボルツマン定数

しかし、図7で測定されたヒーターの温度は、そのものからの赤外線だけでなく、背景の室内温度37°Cから放出される赤外線 E_s も含んでいる値である。した

がって、ヒーターのみの赤外線量 E_o は、

$$E_o = E - E_s$$

次に、放射温度計の感度分布は平坦でないため、視野中央で測定した値を採用する。さらに、温度計視野の直径は 2° であるが、測定対象であるヒーターの視直径は 0.5° であるため、面積比率から赤外線強度は $1/16$ になっていることを考慮する。実際の月は楕円軌道であり、視直径 d が変化するため、真の赤外線の放射量 E_p は、

$$E_p = E_o \times (2/d)^2$$

以上の手順で、ヒーターのみの赤外線量を求め、再びステファン・ボルツマンの式を適用し、40 m 離れたヒーターの温度を求めたところ 169°C であった。ヒーターを至近距離で直接測定した温度は 173°C であり、十分な精度で測定がなされ、計算手法も正しいことがわかった。

5 観 測

観測装置の概要は図8のとおりである。望遠レンズ付きデジタルカメラを、放射温度計と平行になるように調整し、導入のためのファインダーとして使用する。日周運動によって、月が温度計の視野中心を通過するようにセットする。月の通過時間は6分ほどであるが、前後の大気温度を測定する必要があるため、10分ほどの測定時間とする。

実際の観測例を図9に示す。ほぼ満月に近い月を観測したため S/N が非常に良い例である。月が赤外線放射温度計の中心を通過していない4例、ほぼ中心を通った3例の観測が入っている。しだいに背景大気温度が下がってきていることもわかると思う。解析は視野中心を通過したデータを用い、大気温度の変化を一次式で近似して差し引く。また、観測時の視直径を用いて面積比の補正を行う。この日の赤外線強度は 1308 W m^{-2} で、月面温度は 117°C (390 K) と求められた。月の昼側の温度は太陽直下点において 130°C 程度であり、放射温度計の観測は月面平均温度を求めていることから、測定値は整合性あるものと考えられる。

観測は、三日月、上弦の月、満月、下弦の月など、輝面比（昼の部分の割合）の異なる月を追い続けて行われた。結果を表1に示す。位相角とは、地球から観測時の太陽と月の角度である。新月は 0° 、上弦の月は 90° 、満月は 180° 、下弦の月は 270° と表される。可視光での月の明るさは等級で表されることが多い。そのため、赤外線強度 E_p のとき、次の式を使って赤外線等級 mag とした。

$$\text{mag} = -2.5 \cdot \log(E_p)$$



図8 観測装置の概要

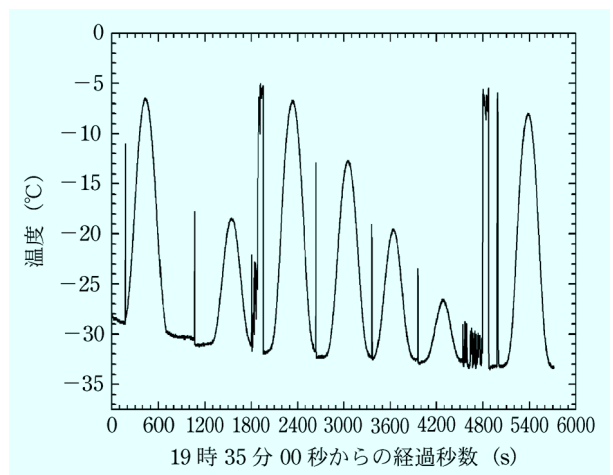


図9 月面温度の観測例（2009年12月1日）

表1において、12回の観測のうち5回の観測を精度が悪いとした。特に、2010年9月14、17日の観測は、同程度の位相角の観測にくらべて約1 mag 暗い。これは、 $10 \mu\text{m}$ よりも長い波長で吸収帯を持つ水蒸気の影響であると考えられる。それでは、条件のよい際の観測は、どのくらいの精度だったろうか。絶対値ではなく、同一日に複数回測定を行った際の結果で議論をしてみる。2009年12月25日の10回の観測の平均二乗誤差は、温度で 3.9°C 、等級では 0.06 mag であった。写真測光の精度は 0.1 mag 、CCD では 0.01 mag 程度であるので、温度計という簡易的な測光装置としては、かなりよい精度であると言える。

6 砂団子モデルによる実験

遠く離れた月の温度測定だけでなく、モデル実験も試

表 1 観測結果

観測日	位相角 (°)	視直径 (°)	視直径 補正量	赤外線強度 (W m^{-2})		月面平均温度		赤外線等級 mag	月の高度 (°)	データの 精度
				観測値	補正值	(K)	(°C)			
2009 年 9 月 24 日	67.6	30.3	15.68	3.26	51.13	173.3	-99.9	-4.27	21.36	×
12 月 1 日	163.9	31.9	14.15	92.40	1307.53	389.7	116.5	-7.79	55.88	◎
12 月 2 日	176.3	32.7	13.47	27.86	375.19	285.2	12.1	-6.44	24.47	×
12 月 8 日	258.1	32.4	13.72	28.10	385.46	287.1	14.0	-6.46	19.68	◎
12 月 21 日	50.8	29.8	16.22	4.00	64.86	183.9	-89.2	-4.53	35.44	○
12 月 22 日	61.7	29.8	16.22	7.00	113.51	211.5	-61.6	-5.14	36.61	○
12 月 25 日	94.9	30.8	15.18	25.14	381.62	286.4	13.3	-6.45	45.83	◎
2010 年 7 月 21 日	124.1	30.9	15.08	6.88	103.76	206.8	-66.3	-5.04	22.17	×
9 月 14 日	77.5	31.4	14.61	4.63	67.62	185.8	-87.3	-4.58	28.91	○
9 月 17 日	112.2	30.2	15.79	12.28	193.89	241.8	-31.3	-5.72	27.32	○
9 月 21 日	155.3	29.7	16.32	27.90	455.46	299.4	26.2	-6.65	41.71	×
9 月 22 日	165.6	29.1	17.00	16.57	281.77	265.5	-7.6	-6.12	24.77	×

みた。温度計の感度測定実験に用いたヒーターで、月の模型を暖める実験である。模型の素材候補として、岩石と砂（校庭の砂）の温度変化の違いを調べてみた。表面温度は放射温度計、裏面はデジタル温度計（1℃精度）を差し込んで変化を調べた。当たり前のことだが、岩石は色の濃い黒いものほど熱吸収が大きい。ところが、砂はどの岩石よりも温度変化が大きく、砂は表面に熱がたまりやすいことがわかった。砂粒同士の接触面が狭いため、熱が伝導しにくいためである。これは、焼けつくような砂浜の砂を掘り起こすと、下の方は意外と冷たいことからでも知られている。

月を含めて多くの天体表面は、「レゴリス」と呼ばれる大小の石片（砂と言ってもよい）で覆われている。そこで、砂で月模型を作ることにした。砂を固めて作る芸術作品（砂像）があり、それに使われている接着剤は「木工用ボンド：水＝1：1」である。しかし、天体表面は接着剤ではなく、重力によって砂が引き留められている。そこで、「さらさら状態の砂」と「接着剤で固めた砂」の熱特性を測ってみたところ、特に大きな問題は見られなかった。

月模型の製作手順は次のとおりである（図 10）。

- ① 砂と調合した接着剤をペースト状になるまで混ぜる。
- ② 内径 21 cm の半球型発泡スチロールの内側にラップを敷く。
- ③ ラップの上に、厚さが 1.5 cm になるように砂を押しつける。
- ④ 外径 18 cm の半球型発泡スチロールを砂に押し入れる。
- ⑤ 全体をひっくり返し、ラップをとり一昼夜ほど乾燥させる。
- ⑥ 乾燥した半球二つを接着し、凹凸をやすりで削る。



図10 砂団子型月模型の制作

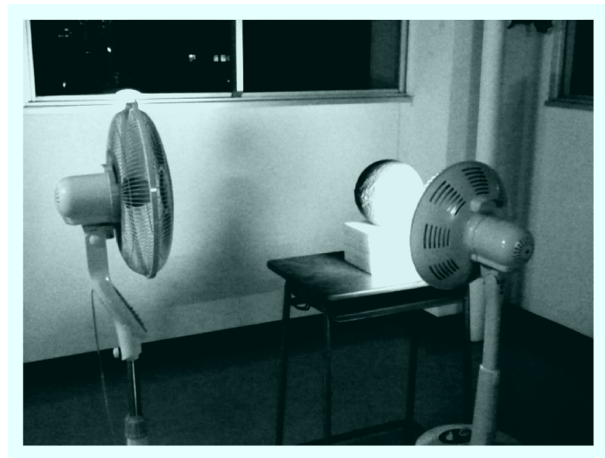


図11 砂団子による実験

砂団子型月模型を芯まで砂で作らなかったのは、乾燥途中で自重変形・崩壊することを恐れたからである。ま

表 2 位相角による赤外線強度の実験

位相角 (°)	30	60	90	120	150	180
赤外線強度 (W m^{-2})	0	1.2	5.3	11.6	20.9	27.2

た、基礎実験で接着剤は表面で固まり、内部には水がたまりやすいことがわかったからである。

実験にあたって、さらに次のような工夫をした。宇宙空間に浮かぶ、大気のない月は急激に冷えるはずである。室内実験では、岩石や砂の表面に接する空気が暖まり、冷却に時間がかかる。そこで、扇風機の風を模型にあて、空気が循環しやすくした (図 11)。ヒーターの角度を変え (位相角を変化させ)、砂団子から放出される赤外線強度を放射温度計で測定した (表 2)。

7 結果と考察

実際の月と実験で使用した模型とは、大きさや、熱源の温度の違いから、絶対値に差が生じるのは当たり前である。ここで注目すべき点は満月と半月の赤外線強度の比である。観測では、満月前で 1308 W m^{-2} 、半月が 382 W m^{-2} で、約 3.4 倍である。実験では、表 2 に示すように満月が 27.2 W m^{-2} 、半月が 5.3 W m^{-2} 、こちらは約 5.1 倍となった。ちなみに、可視光線の比率は約 21 倍と大きな値である。ここで、赤外観測、モデル実験、可視光線の強度を等級で表し、可視光線の等級にスケールを合わせたものが図 12 である。観測結果と実験は、非常によく一致している。砂団子型月模型は、完成度の高い月の赤外線放射モデルであると言える。可視光線の等級変化と赤外線での観測・実験の変化を比較すると、位相角依存性は赤外線のほうが緩やかである。このことは、月には大気や水はないが、ある程度の熱は表面から一定の深さまで伝わり、徐々に赤外線を放射して冷えてゆくことを示している。ちなみに、太陽定数は約 1370 W m^{-2} である。満月に近い 2009 年 12 月 1 日の観測から求めた赤外線強度は、 1308 W m^{-2} であった。この二つから、単純に月のアルベドを求めると、約 0.05 となる。可視光のアルベドは、0.07 であり⁴⁾、熱収支の基本的なデータを観測できていると思われる。

8 おわりに

手に持てる装置を使った観測としては、おそらく世界初の観測、解析方法を確立した。また、砂団子型月模型を製作し、その実験にも成功を収めた。月の赤外線観測は昼夜を問わないことから、女子高校生のテーマとしては都合がよい。固定された架台、天体ドームがないため、運搬とセッティングに手間がかかり、観測回数を増やすことはなかなか難しい。しかし、この研究論文⁵⁾を完成させた後、さらに観測・実験は進化が続いている。背景大気の変動をリアルタイムで測定するため、同じ機

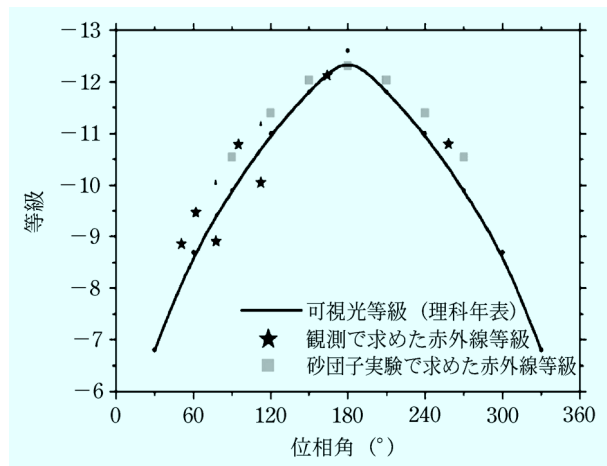


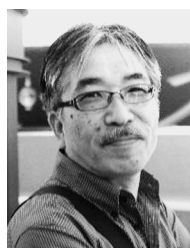
図12 月の赤外線等級、可視光等級、およびモデル実験の結果

種の温度計を並べて使い、2チャンネルで温度を測定できるようにした。これによって、2011年12月の月食時の温度変化を見事にとらえることができた⁶⁾。また、位相角をより細かな角度で測定をするとともに、砂団子を自転させる装置を工夫した。さらに、解析方法については、水蒸気による吸収量の補正も考案した。これは、高層気象のデータから、上空の絶対水蒸気量を推定して独自の吸収係数を求めるというものである。

本稿で紹介した試みは、筆者によって国際学会で報告がなされ、予算が限られる発展途上国においては、大学教育にも活用できるとして脚光を浴びた⁷⁾。新しい挑戦は、大きな一歩を踏み出したと思う。生徒とともに、太陽系の謎の解明に迫れる研究に高めていきたいと考えている。

文 献

- 1) J. E. Estes, L. W. Senger (ed) : "Remote Sensing Techniques for Environmental Analysis", (Hamilton Publ.), (1974).
- 2) 松井孝典編：岩波地球惑星科学講座「比較惑星学」, (1997), (岩波書店).
- 3) 関口朋彦ほか, 「はやぶさミッション目的小惑星 Itokawa の中間赤外線観測：サイズと表層特性」, 日本天文学会春季年会, 2006.
- 4) 国立天文台編：「理科年表」, (2010), (丸善).
- 5) 第10回全国高校生理科・科学論文大賞 受賞作品集, 「未来の科学者との対話X」, 日刊工業新聞社, 2012.
- 6) 春日部女子高校・地球科学部, 「月面温度変化」, 日本天文学会ジュニアセッション, 2012.
- 7) B. Suzuki : "The measurement of the Luna's thermal infrared rays", 11th Asian-Pacific Regional IAU Meeting, 2011.



鈴木文二 (Bunji Suzuki)

埼玉県春日部女子高等学校 (〒344-8521 埼玉県春日部市粕壁東 6-1-1)。東京学芸大学卒。《現在の研究テーマ》太陽系天体の分光、偏光観測。《主な著書》「カラー版 天文学入門」(岩波ジュニア新書)。

E-mail : suzukibn@da2.so-net.ne.jp