

第2週： 熱・放射環境の測定

1. はじめに

本実験では、気象観測機器を用いた熱・放射環境の観測を実施する。測定項目は、乾球気温、湿球温度、黒球温度、長波放射、短波放射である。短波放射や長波放射による熱収支の解析を通して、地表面付近での熱・放射環境に関する理解を深める。日なたと日かげの違いにも注目する。また、熱中症予防の観点から近年用いられている湿球黒球温度（WBGT）の評価を行ない、生気象学や教育現場における安全という観点から熱環境について学ぶことも目的とする。

2. 放射環境の測定の基礎

（1）短波放射

天空の開けている場所で日射計を真上に向けて、下向き短波放射 $S^\downarrow$ を測定する。同様に、日射計を真下に向けて、上向き短波放射 $S^\uparrow$ を測定する。また、日射計を太陽に向け、散乱光を避けるための遮光用筒をつけて、直達光 S_D を測定する。下向き散乱光 $S_s^\downarrow$ を、関係式

$$S^\downarrow = S_s^\downarrow + S_D \cos \theta$$

を用いて求める。 θ は太陽の天頂角である。気象庁では、下向き短波放射 $S^\downarrow$ を全天日射量、直達光 S_D を直達日射量、下向き散乱光 $S_s^\downarrow$ を散乱日射量、上向き短波放射 $S^\uparrow$ を反射日射量とよんでいる。全天日射量と散乱日射量は水平面で定義するが、直達日射量は太陽からの直達光に垂直な面で定義する点に注意する。

- ☞ 中学校の理科第2分野では、太陽の南中高度を定量的に取り扱う。南中高度や昼間の時間と、気温との間の関係にも言及する。また、太陽の光の入射角によって受ける熱の大きさが異なることを定性的に扱う。
- ☞ 高等学校の地学では、簡単な日射計を用いて、太陽放射の定量的な測定を行なうことがある。

大気上端で入射太陽光に垂直な面が受ける、単位面積あたりの放射エネルギーを太陽定数という。太陽定数は、およそ $1.37 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ である。地上で測定される日射量は、大気による吸収や反射により、晴天時であっても通常は太陽定数よりも小さくなる。

（2）長波放射

放射温度計を用いて、簡易的な方法で、上向き、下向き長波放射を推定する。あらかじめ、放射温度計の射出率 ε を $\varepsilon = 1$ に設定しておく。

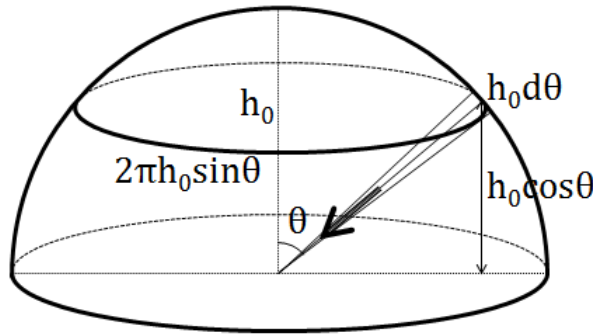
放射温度計を真下に向けて、上向き長波放射 $L^\uparrow$ を測定する。放射計が示した温度 $T_{rad}^\uparrow$ を用いて、関係式

$$L^\uparrow = \sigma T_{rad}^{\uparrow 4}$$

によって推定する。 σ はステファン・ボルツマン係数である。黒体放射が温度の4乗に比例するという関係をステファン・ボルツマンの法則という。

- ☞ 高等学校の地学では、天文学の分野でステファン・ボルツマンの法則を取り上げる。

地球大気は、赤外線で見ると灰色である。そこで、大気中を赤外線が透過できる代表的な距離のスケールを求め、その距離だけ離れた場所における気温に対応した長波放射を受けていると考える。天頂角が小さい天頂付近を見ている場合、視線が真上に近い方向を向いているので、比較的高い高度からの長波放射を受けることができる。しかし、天頂角を大きくして地平線付近に視線を向けると、より低い高度からの長波放射を受けることになる。したがって、下向き長波放射 $L^\downarrow$ を推定するときには、真上方向の放射温度を測るのではなく、代表的な高度からの長波放射を測定しているとみなせるような天頂角で測定する必要がある。



長波放射が大気中を透過できる距離のスケールを h_0 とする。真上を見た場合、代表的には、高度 h_0 における気温に対応した長波放射が観測される。しかし、視線の天頂角 θ が大きくなるにしたがって、 h_0 より低い高度 $h = h_0 \cos \theta$ における気温に対応した長波放射が観測されるようになる。そこで、天頂角 θ を $\theta = 0$ から $\pi/2$ まで変化させて積分し、高度 h の平均値 $\bar{h}$ を計算する。いま、天頂角 θ の方向を見ているとする。半径 h_0 の半球の表面積のうち、天頂角の微小変化 $d\theta$ に対応する表面積 dS は、

$$dS = 2\pi h_0^2 \sin \theta d\theta$$

である。長波フラックスの方向は真下ではなく斜めになっている。フラックスのうち、真下を向いている正味の成分を求めるために、 $\cos \theta$ をかける。

$$\cos \theta dS = 2\pi h_0^2 \sin \theta \cos \theta d\theta$$

一方、観測される長波放射に対応する代表的な高度は、

$$h = h_0 \cos \theta$$

と表せる。高度 h の平均値を求めるためには、 $\cos \theta dS$ で重みをかけながら h を積分すればよいので、

$$\bar{h} = \frac{\int_{\theta=0}^{\theta=\pi/2} (h_0 \cos \theta) \cos \theta dS}{\int_{\theta=0}^{\theta=\pi/2} \cos \theta dS} = \frac{\int_0^{\pi/2} (h_0 \cos \theta) (2\pi h_0^2 \sin \theta \cos \theta) d\theta}{\int_0^{\pi/2} 2\pi h_0^2 \sin \theta \cos \theta d\theta} = \frac{\frac{2}{3} \pi h_0^3}{\pi h_0^2} = \frac{2}{3} h_0$$

となる。このような $\bar{h}$ に対応する天頂角 θ の値 $\bar{\theta}$ は、

$$\bar{h} = h_0 \cos \bar{\theta} = \frac{2}{3} h_0$$

で求められるので、

$$\bar{\theta} = \cos^{-1} \frac{2}{3} \approx 48^\circ$$

したがって、下向き長波放射 $L^\downarrow$ を推定するときには、放射温度計を天頂角 48° （高度 42° ）の方向に向けて、温度を測定する。このようにして得られた温度 $T_{rad}^\downarrow$ から、上向き長波放射の場合と同様にして、下向き長波放射 $L^\downarrow$ を算出する。

☞ 地球大気が赤外線に対して不透明であることが温室効果や地球温暖化を考えるうえで、本質的に重要である。地球大気が赤外線に対して不透明であることは、高校の地学で言及している。また、中学校の理科第2分野や高等学校の地学で、地球温暖化を取り上げている。

以上のような放射温度計を用いた長波放射の推定は、簡易的な方法である。大気の赤外線の透過率は実は波長帯によって大きく異なっている。透過率の低い波長帯では大気の透明度が低いので、主に低い高度の大気からの放射を受ける。そのような波長帯に感度のある放射温度計の示度は高くなる。逆に透過率の高い波長帯に感度のある放射温度計では示度は低くなる。放射温度計の本来の目的は、長波放射の測定ではなく、物体の温度を遠隔的に測定することである。したがって、放射温度計は透過率の高い波長帯に感度を持つように設計されていることも多い。機種によるが、以上の方法で推定した長波放射量は、実際の値よりもかなり小さくなる点に注意する。

（３）地表面温度

測定対象の物体が完全に黒体であって、射出率 ε が $\varepsilon = 1$ であるとする。物体の表面温度を T とすると、物体の表面からの放射フラックス F は

$$F = \sigma T^4$$

である。このとき、 T は、

$$T = \sqrt[4]{\frac{F}{\sigma}}$$

で求められる。

多くの物体では、赤外域における射出率は1に近いが、厳密には1より小さい。このため、物体の射出率に応じた補正をしないと、放射温度計によって物体の表面温度を正しく求めることができない。射出率が1より小さい場合には、実際の表面温度 T_{true} に対して、物体の表面からの長波放射フラックス F は、

$$F = \varepsilon \sigma T_{true}^4 + (1 - \varepsilon) F_{env}$$

となる。右辺第1項は物体からの熱放射、第2項は外部から受けた長波放射の反射を表している。右辺第2項の F_{env} は、外部から物体の表面に到達してくる長波放射であり、野外での地表面温度の測定においては、長波放射の推定で求めた下向き長波放射 $L^\downarrow$ に相当する。物体の表面に到達してくる長波放射 F_{env} に相当する黒体放射温度を T_{env} とすると、

$$F_{env} = \sigma T_{env}^4$$

である。このとき、 T_{true} は、

$$T_{true} = \sqrt[4]{\frac{F - (1 - \varepsilon)F_{env}}{\varepsilon\sigma}}$$

あるいは、

$$\varepsilon T_{true}^4 = T^4 - (1 - \varepsilon)T_{env}^4$$

と書くことができる。ここで、 T は、放射フラックス F の値にステファン・ボルツマンの法則を適用して得られる温度である。射出率が 1 より小さい物体の表面温度を正しく求めるためには、 F だけではなく T_{env} を明らかにしなければならない。通常の放射温度計では、本体に内蔵されている温度センサーによって測定した温度を T_{env} とみなしている場合が多い。屋内での利用であれば、この方法で大きな問題は生じないことが多い。しかし、野外においては、放射温度計を用いて、下向き長波放射 $L^{\downarrow}$ に対応する T_{env} を実測しておく必要がある。

放射温度計の赤外線センサーの波長範囲は機種によって異なる。一般に、波長範囲によっては、物体と放射温度の間の空気に含まれる水蒸気や二酸化炭素などによる吸収、射出の影響がある。しかし、距離が数m以内なら影響は小さいので無視してよい。

一般に、ステファン・ボルツマンの法則にみられるように、熱放射の全波長にわたる積分値は絶対温度の 4 乗に比例する。したがって、放射温度計のセンサーの波長範囲が十分に広い場合には、以上のような計算を適用できる。しかし、積分する波長範囲が有限である場合には 4 乗に比例するとは限らない。通常の放射温度計は、たとえば、 $9 \sim 12 \mu m$ のような、熱放射のスペクトルのピークに近い波長帯に限定して測定している。このような場合、熱放射の積分値は、近似的に温度の 5 乗に比例するので、 T_{true} は

$$\varepsilon T_{true}^5 = T^5 - (1 - \varepsilon)T_{env}^5 \quad ①$$

で求められる。

(4) 黒球温度

黒球温度とは、熱放射をよく吸収する黒球の温度である。短波放射や長波放射の影響を考慮に入れた熱環境の指標である。具体的には、球殻の肉厚ができるだけ薄くて中空になっている、つや消し黒色球の中心に位置する温度計の示す温度である。たとえば、日射が当たっているような環境では、黒球温度は気温よりもかなり高くなる。黒球温度は体感温度の指標の一部として使われる。また、変温動物である昆虫の体温の近似値として使われることもある。

ここで、黒球温度を定量的に推定してみる。地上に設置されている半径 r の黒球の熱収支を考える。黒球の射出率は 1 であり、したがって、長波放射の反射率はゼロ、また、短波放射の反射率もゼロであると仮定する。実際の黒球の表面においては、表面熱伝導によって大気と直接に熱が交換されている。しかし、ここでは、表面熱伝導の効果を無視し、放射過程のみを考慮する。つまり、黒球が受ける短波放射と長波放射のみから、黒球温度の値を推定する。以下では、放射過程のみによって評価した仮想的な黒球の表面温度を T_g^* とする。黒球の表面上では T_g^* は一様であると仮定すると、半径 r の黒球の表面から放射される長波放射は、

$$4\pi r^2 \sigma T_g^{*4}$$

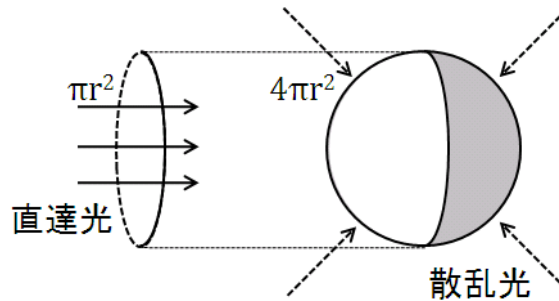
である。一方で、黒球の表面に入射してくる短波放射は、直達光と散乱光の和を考えて、

$$\pi r^2 S_D + 4\pi r^2 \frac{S_s^\downarrow + S^\uparrow}{2}$$

であり、長波放射は、

$$4\pi r^2 \frac{L^\downarrow + L^\uparrow}{2}$$

である。



したがって、黒球が受ける単位表面積あたりの短波放射 S_{tot} は、

$$S_{tot} = \frac{S_D}{4} + \frac{S_s^\downarrow + S^\uparrow}{2}$$

長波放射 L_{tot} は、

$$L_{tot} = \frac{L^\downarrow + L^\uparrow}{2}$$

となる。定常状態においては、黒球表面から放射される長波放射と、黒球表面に入射してくる放射は等しいから、

$$\sigma T_g^{*4} = S_{tot} + L_{tot} = \frac{S_D}{4} + \frac{S_s^\downarrow + S^\uparrow}{2} + \frac{L^\downarrow + L^\uparrow}{2}$$

が成り立つ。したがって、 T_g^* は

$$T_g^* = \sqrt[4]{\frac{S_{tot} + L_{tot}}{\sigma}}$$

で求めることができる。実際に黒球温度計によって測定される黒球温度には、表面熱伝導の効果が加味される。表面熱伝導は、黒球温度の値を、ここで得られた推定値よりも乾球温度に近づける効果を持つはずである。

☞ 小学校の理科では、アルコール温度計を用いて、日なたと日かげでの地表面の温度の違いを測定する。

(5) WBGTの算出

湿球黒球温度 (WBGT) は、乾球気温、湿球温度、黒球温度を組み合わせた熱環境の指標であり、熱中症の危険性の評価のためにしばしば用いられる。天気予報の熱中症予防情報もWBGTの値に基づいている。WBGTは以下のように定義される。

屋外： $WBGT = 0.7 \times \text{湿球温度} + 0.2 \times \text{黒球温度} + 0.1 \times \text{乾球温度}$

屋内： $WBGT = 0.7 \times \text{湿球温度} + 0.3 \times \text{黒球温度}$

なお、厚生労働省の通達においては、屋外で直射日光が当たっていない場合には、屋内の式を用いることとされている。また、湿球温度は、通風乾湿計のような強制通風ではなく、自然通風で測定することになっている。さらに、黒球の大きさは直径 150mm と定められている。

ただし、この実験においては、日なたと日かげの比較を行ないやすくするため、直射日光が当たっていない場合であっても、屋外の式を用いることにする（乾球温度と黒球温度との差が小さい場合には影響は大きくない）。また、湿球温度の値は、通風乾湿計による値をそのまま用いる（弱風時には、自然通風の場合のほうが高めの値が出やすい）。この実験で用いている黒球の直径は 75mm であり、150mm より小さいが、黒球温度の値もそのまま用いる。

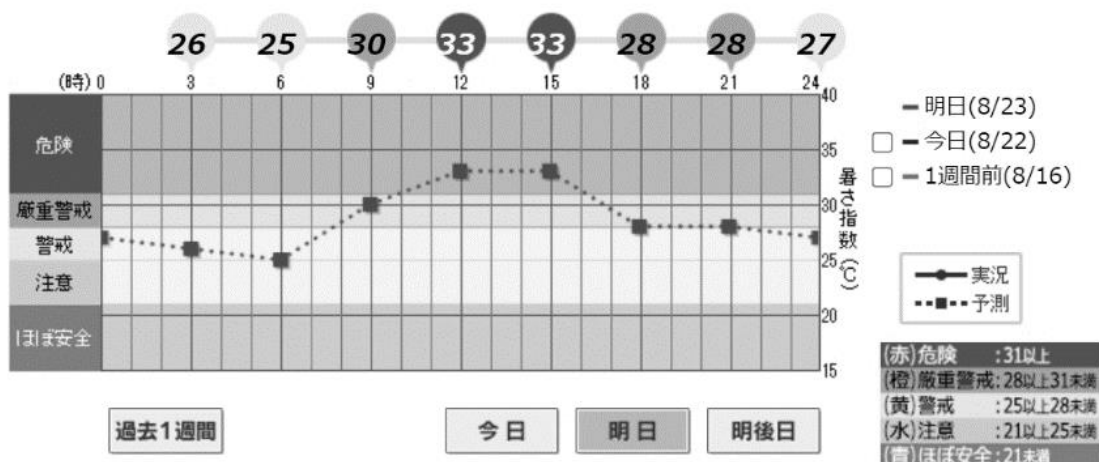
日本体育協会では、熱中症予防のため、WBGT の値に応じて、次のような指針を掲げている。

表 1: 熱中症予防のための運動指針

WBGT (°C)		
31 以上	運動は原則中止	皮膚温度より気温のほうが高くなり、体から熱を逃がすことができない。特別の場合以外は運動を中止する。
28～31	厳重警戒	熱中症の危険が高いため、激しい運動や持久走などは避ける。体力の低いもの、暑さに慣れていないものは運動中止。運動する場合は積極的に休息をとり、水分補給を行う。
25～28	警戒	熱中症の危険が増すため、積極的に休息をとり、水分を補給する。激しい運動では 30 分おきくらいに休息をとる。
21～25	注意	熱中症による死亡事故が発生する可能性がある。熱中症の兆候に注意しながら、運動の合間に積極的に水分を補給する。
21 以下	ほぼ安全	通常は熱中症の危険は少ないが、水分の補給が必要。市民マラソンなどではこの条件でも熱中症が発生するので注意する。

（日本体育協会のウェブサイトより）

天気予報の熱中症予防情報での熱中症の危険度も、この階級分けに従っていることが多いようである。WBGT の単位は℃であるが、気温とは異なるので、数値を扱うときには注意する。通常、WBGT の値は気温の値よりも小さい。体育の授業や部活動など教育現場での熱中症による事故は、WBGT が 28℃以上の条件で発生することが多い。



[http:// www.wbgt.env.go.jp/](http://www.wbgt.env.go.jp/)

熱中症予防情報の例（環境省による）

3. 用意するもの

アスマン通風乾湿計（本体、三脚、ゼンマイ用ネジ、スポイト、ケース）、メジャー、放射温度計、日射計、黒球温度計、三脚（黒球温度計用）、遮光用の厚紙

（以上は班に1個ずつ）

時計（秒針のある腕時計など、時刻を正確に合わせておく）、

筆記用具（ペン、鉛筆、消しゴム、下敷き）、

ノートパソコンまたは関数電卓（ n 乗根や三角関数を計算できるもの）、記録用紙

※時計、筆記用具、ノートパソコンまたは関数電卓は各自持参してください。

4. 観測の準備

記録用紙には、班、学生番号、氏名、共同実験者名（全員、姓のみで可）を正しく記入しなさい。

観測を始める前に、現在の日なたと日かげの気温（℃）、黒球温度（℃）を予想して、あらかじめ記入しておきなさい（有効数字は1の位まで）。実験室の温度計の値を参考にしてよい。なお、予想が当たったかどうかは成績評価とは関係ない。

測器を受け取ったら、アスマン通風乾湿計、放射温度計、日射計、黒球温度計の製造番号を確認し、記録用紙に記入する。観測の際には必ず番号を確認し、途中で入れ替わらないように注意する。

5. 観測

本実験では、日なたと日かげで、乾球温度、湿球温度、黒球温度、長波放射、短波放射を測定する。観測機器は各班に1台であるが、測定値は必ず自分自身で読むこと。測定値は鉛筆ではなくペンで記録することが望ましい。

観測場所に着いたら、場所、緯度、経度（緯度、経度とも単位は度と分、有効数字は1分まで）、標高（単位はm、有効数字は小数点第1位まで）、測定日（年は西暦）、時刻（日本標準時、24時制）を必ず記録する。時刻に関しては、日なたでの日射計による測定を行った時刻を分単位で正確に記入する（日射計の測定を行なったときに忘れずに記入する）。また、太陽の赤緯（単位は度と分、有効数字は1分まで）と均時差の値（単位は分、有効数字は0.1分まで）を指示に従って記入すること。

一般に地上で通常の気象観測を行なう場合、地面が芝などの草で覆われていて、また、周囲が開けていて日射や風を遮るものがない場所を選ぶとよい。

- ☞ 中学校理科第2分野では、学校内のさまざまな場所で気象観測を行なって結果を比較する。この場合、観測場所によっては、上記の条件を満たさないこともある。しかし、標準的な気象観測の条件は上記の通りであるということを教えておくことが望まれる。

測器を用いた測定をする前に、天気と雲量、雲の種類を記録する。雲量は雲が全くない場合は0、完全に雲に覆われている場合は10とする（整数値）。降水などの現象がない場合、雲量0～1は快晴、2～8は晴れ、9～10はくもりである。雲の種類は、下の表に示した十種雲形に従って、観測された雲を多いものから順にすべて記号で記録する。雲がない場合は「なし」と記入する。他に気がついた点があれば書き留めておく。

表 2: 十種雲形

	雲形	俗称	英語名	記号
上層雲	巻雲	すじ雲	cirrus	Ci
	巻積雲	うろこ雲	cirrocumulus	Cc
	巻層雲	うす雲	cirrostratus	Cs
中層雲	高積雲	ひつじ雲	altocumulus	Ac
	高層雲	おぼろ雲	altostratus	As
	乱層雲	あま雲	nimbostratus	Ns
下層雲	層雲	きり雲	stratus	St
	層積雲	うね雲	stratocumulus	Sc
下層から 上層の雲	積雲	わた雲	cumulus	Cu
	積乱雲	かみなり雲	cumulonimbus	Cb

- ☞ 小学校の理科では、雲の量が0～8のときは晴れ、9～10のときはくもりとしている。
- ☞ 中学校理科第2分野や小学校の理科で、十種雲形を取り扱う。

まず、日なたにおいて、次のような計測を行なう。黒球温度計、日射計、放射温度計は、電子機器であり、炎天下に長時間放置してはいけない。

- **アスマン通風乾湿計**：三脚につるして使用する。気象庁では、気温は地上1.5mで計測することになっているが、今回は携帯式の三脚を用いるので、これよりも低くなる。本実験で使用する乾湿計には日よけがついているので、短時間の観測であれば直射日光に当てても問題ない。通風口の地面（基準面）からの高さ（単位はm、有効数字は小数点第1位まで）をメジャーで測定し記録しておく。

2本の温度計のうち右側は乾球温度計（普通の温度計）で、左側は湿球温度計である。湿球温度計の球部はガーゼで覆われている。金属筒をはずし、スポイトを使ってガーゼを十分

に湿らせる。ガーゼには手を触れないこと。気温が同じであっても、空気が乾燥している場合のほうが湿球温度は低くなる。ゼンマイを巻いて5分間以上通風し、示度が安定していることを確かめてから測定値を読む。手で触ったり、息がかかったりしないように注意する。乾球温度と湿球温度（単位は℃、有効数字は小数点第1位まで）を記録する。正確に読むためには、目線が温度計に対し直角になるようにする。示度の変化の影響を防ぐため、小数点第1位を先に読み、次に、1の位、10の位を読むとよい。

- ☞ 中学校理科第2分野で通風式ではない乾湿計を取り扱う。原理は同じである。小学校の理科では（乾球）温度のみを測定する。
- ☞ 小学校の理科では児童の身長を考慮して、高さ1.2mで計測することがある。

- **黒球温度計**：手に持ち乾湿計と同程度の高さで測定する。球部の地面（基準面）からの高さ（単位は℃、有効数字は小数点第1位まで）をメジャーで測定し記録しておく。体温などの影響を避けるため、手を伸ばして、できるだけ体から離して測定する。5分間以上経過し、示度が安定していることを確かめてから測定値を読む。球部を手で触ったり、息がかかったりしないように注意する。「MODE」ボタンを押すと表示が切り替わる。「TG」と表示されたときに黒球温度が表示されている。黒球温度（TG）（単位は℃、有効数字は小数点第1位まで）を記録する。この実験で用いる黒球温度計は気温、湿度も測定し、WBGTを自動で算出するが、それらは記録しなくてよい。
- **日射計**：日なたであって、太陽の方角以外も十分に開けている場所で測定する。センサーのキャップをはずして日射計の電源を入れる。単位が「 W/m^2 」になっていない場合は、「 W/m^2 」ボタンを押して切り替える。最小桁が1の位ではなく小数点第1位になっている場合は、「R」ボタンを押して切り替える。この測定を行なった時刻を観測時刻として記録用紙に記入すること。
 - ① はじめに、地面の上で日射計を真上に向けて、下向き散乱光の強度を測定する。遮光用の厚紙を用いて、直射日光がセンサーに当たらないようにする。直射日光以外の散乱光を遮らないように注意する。示度が安定しない場合もあるが、平均的な値を読み取ること。下向き散乱光の放射強度を記録する（単位は W/m^2 、有効数字は1の位まで）。
 - ② 次に、日射計を太陽に向け、散乱光を避けるために遮光用の筒をつけて、直達光を測定する。日射計のセンサーと遮光用の筒を正確に太陽の方向に向ける。センサーに筒の影が映らず、直射日光が確実に当たっていることを確かめたうえで、測定すること。下向き散乱光の場合と同様にして、直達光の放射強度を記録する（単位は W/m^2 、有効数字は1の位まで）。
 - ③ さらに、日の当たっている地面の上で、日射計を手に持ち、センサーを真下に向けて、上向き短波放射を測定する。これは地面で反射された光の計測である。地面ができるだけ一様な条件になっている場所を選ぶ。測定者の影響をできるだけ小さくするように工夫するとよい。下向き散乱光、直達光の場合と同様にして、地表面からの放射強度を記録する（単位は W/m^2 、有効数字は1の位まで）。
- **放射温度計**：日射計と同様に、日なたであって、太陽の方角以外も十分に開けている場所で測定する。今回使用する日射計には電源スイッチはなく、側面の「SCAN」ボタンを押すと測定される。一定時間経過すると自動的に電源が切れる。測定時に、センサーの向いている方向を示すためにレーザー光が発射されるので、目に入れないように注意すること。測定の前に、正面の「Mode」ボタンを押して、**放射温度計の射出率の設定が1.00になっていることを必ず確かめること**。この実験で用いる放射温度計の視野は、距離1に対して、直径1／

6 程度である。計測時にはセンサーの視野内に太陽が入らないように注意する。

- ① はじめに、放射温度計を手を持ち、天頂角 48° （高度 42° ）の方向に向けて、下向き長波放射を測定する。どの方向でもよいが、障害物がなく、直射日光を避けることができ、かつ、雲の状態などの点で可能な範囲で代表性が高いと思われる方向を選ぶとよい。ボタンを押すと測定が行なわれる。天空の放射温度を記録する（単位は $^\circ\text{C}$ 、有効数字は小数点第1位まで）。
- ② 次に、日の当たっている地面の上で放射温度計を手を持ち、センサーを真下に向けて、上向き長波放射を測定する。下向き長波放射の場合と同様にして、地表面の放射温度を記録する（単位は $^\circ\text{C}$ 、有効数字は小数点第1位まで）。

日かげについても同様の計測を行なう。日なたでの測定を行なった場所からあまり離れていなくて、地表面の条件が似ている場所を選ぶこと。日射計による測定においては、②は行なわなくてよく、①で遮光は必要ない。放射温度計による測定は、②のみ行なう。

6. 観測データの解析

ここでは、観測した結果に基づいて、短波放射や長波放射による熱収支を解析し、地表面付近での熱環境に関して検討する。また、日なたと日かげの熱環境の違いについても考察する。

以下の課題（1）～（10）を行ないなさい。以下、計算問題においては、結果だけでなく計算過程も記すこと。数値を答える場合は、有効数字に関する指示に従うこと。この実験においては、解答した数値を以降の計算で用いる場合には、解答欄に記入した有効数字のまま使用してよい（有効数字を1桁多くとる必要はない）。

【太陽の位置の計算】

（→2（1）を参照）

（1）経度、均時差から観測時刻における太陽の時角（南中が 0° 、西に向かって正）（単位は度、有効数字は0.1度まで）を計算しなさい。さらに、太陽の赤緯と時角から、太陽の天頂角（天頂が 0° 、水平が 90° ）（単位は度、有効数字は0.1度まで）を計算しなさい。

緯度 ϕ 、赤緯 δ 、時角 H と天頂角 θ の間には次のような関係が成り立つ。

$$\cos \theta = \cos \phi \cos \delta \cos H + \sin \phi \sin \delta$$

均時差とは、地球の軌道が楕円であることと地軸の傾きによって生じる、視太陽と平均太陽との間の赤経の差である。正の値は視太陽の時角のほうが大きい（天球上でより西に位置している）ことを意味する。たとえば、均時差が10.0分であれば、標準子午線上の観測点では11時50.0分に太陽が南中する。計算にあたっては、赤緯1分は $1/60$ 度であるが、均時差は角度ではなく時間で表している（1分は角度でいうと $15/60$ 度に相当する）ことに注意すること。

以下の課題は、日なたと日かげの両方について、行なうこと。ただし、（4）は日かげでは直達光がないとみなすので不要である。また、（6）の下向き長波放射は、日なたと日かげで共通の値を用いる（日かげにおいても、日なたの場合と等しいと仮定する）。

【湿度の算出】

（2）乾球温度、湿球温度から、乾球温度と湿球温度の差（単位： $^\circ\text{C}$ 、有効数字：小数点第1位まで）と相対湿度（単位：%、有効数字：1の位まで）を算出しなさい。相対湿度を算出すると

きには湿度換算表（第1週の資料2）を用いなさい。換算表は1℃単位であるから必要に応じ補間して用いること。

【地表面温度の算出】

（→2（3）を参照）

（3）放射温度と下向き長波放射の値から地表面温度を算出なさい。計算には①式を用いなさい。地表面の射出率は0.95とする（単位は℃、有効数字は小数点第1位まで）。なお、0℃は273.15Kである。

【短波放射の計算】

（4）下向き短波放射を計算なさい（単位は W/m^2 、有効数字は1の位まで）。地面が受ける直達光と下向き散乱光の和が、ここで求めようとしている、天空からの下向き短波放射である点に注意すること。地面が受ける直達光を計算するときには太陽の天頂角を考慮する必要がある。

（5）下向き短波放射と上向き短波放射の値から、地表面のアルベドを計算なさい（有効数字：小数点第3位まで）。地表面は、直達光と下向き散乱光の区別なく、反射光を等方的に放射していると仮定しなさい。

【長波放射の計算】

（→2（2）を参照）

（6）天空の放射温度の値にステファン・ボルツマンの法則を適用して、下向き長波放射を計算しなさい（単位は W/m^2 、有効数字は1の位まで）。ステファン・ボルツマン係数は $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ とする。

（7）同様に、上向き長波放射を計算しなさい（単位は W/m^2 、有効数字は1の位まで）。

【黒球の熱収支の計算】

（→2（4）を参照）

（8）黒球が単位表面積あたりに受ける短波放射を計算しなさい（単位は W/m^2 、有効数字は1の位まで）。黒球表面の反射率はゼロであると仮定する。

（9）黒球が単位表面積あたりに受ける長波放射を計算しなさい（単位は W/m^2 、有効数字は1の位まで）。黒球表面の射出率は1であって、したがって反射率はゼロであると仮定する。

（10）表面熱伝導の効果を無視し、放射過程のみを考慮して、黒球の放射平衡温度を計算しなさい。つまり、黒球が受ける短波放射と長波放射の和と、黒球が放射する黒体放射が等しくなったときの（仮想的な）黒球温度を推定しなさい（単位は℃、有効数字は小数点第1位まで）。

【WBGTの算出】

（→2（5）を参照）

（11）湿球黒球温度（WBGT）を算出しなさい（単位は℃、有効数字は小数点第1位まで）。黒球温度に関しては、黒球温度計で計測した値を用いなさい。この実験に限っては、日かげにおいても、日なたの場合と同様に、屋外用の計算式を用いること。

7. 考察

（1）日なたにおいて、黒球温度計で実際に計測した黒球温度の値と、表面熱伝導の効果を無視し、放射過程のみを考慮して推定した黒球温度との間にはどのような違いがあるか、あるいはないか。また、その原因を考察しなさい。

(2) 一般に、日なたと日かげでは気温差が生じると予想される。また、黒球温度差も生じるであろう。今回の計測において、気温差と黒球温度差にはどのような違いがあるか、あるいはないか。また、その原因を考察しなさい。

(3) 一般に、日なたと日かげでは体感温度には大きな違いがある。このような違いが生じる原因を、今回の計測の結果に基づいて考察しなさい。

(4) 今回の計測において、日なたと日かげのWBGTの違いは、おもに、湿球温度、黒球温度、乾球温度のうちのどの要素の違いによって生じているか、考察しなさい。

(5) WBGTは暑熱環境の評価にしばしば用いられている。人間にとっての暑熱環境にはさまざまな要素が関連すると考えられるが、それらの中で、WBGTによっては評価されない要素があるとすれば何か。具体的に指摘し、その要素が暑熱環境に与える影響を論じなさい。体調など、人間の側の医学的な要素や心理学的な要素は除外する。

記録用紙は、学生番号と氏名の記入を確認のうえ、次回の実験の開始時まで提出してください。