

気象・水文観測実習

(2) 屋上緑化による熱環境への影響評価 ～データ解析～

担当：植山・中桐

実習場所： B11-118 情報処理演習室

1. 実習の目的

屋上緑化が熱・放射環境に及ぼす影響について、野外観測データの解析を通じて学習する。基本的なデータ解析の手順や表計算ソフトの使用方法を学ぶ。

2. データ解析

地表面における放射収支は、短波放射量(S)と長波放射量(L)の収支として以下のように表される。

$$\begin{aligned} Rn &= S \downarrow - S \uparrow + L \downarrow - L \uparrow \\ &\cong H + IE + G \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 Rn は純放射量、 \downarrow は下向き、 \uparrow は上向きを表す。また、 H は顕熱フラックス、 IE は潜熱フラックス、 G は地中熱流量を表す。観測より、 Rn は純放射計で、 G は地中熱流板で直接計測されている。

2. 1. フラックスの評価

【作業1】 潜熱フラックスの計算

観測された土壌体積含水率 (vwc) の減少量が蒸発散による水分量の変化であると仮定すると、緑化基盤における蒸発散量は以下のように表すことができる。

$$E_{30} = (vwc_{\text{previous}} - vwc_{\text{current}}) \times D_{\text{soil}} \quad (2)$$

ここで D_{soil} は、緑化基盤土壌の厚さ (150 mm) を表す。また、下付き文字の current と previous は、それぞれ当該ランとひとつ前のランを表す。今回の観測ではラン間隔を 30 分としたため、式(2)で計算される E は、30 分間における蒸発散量 (E_{30} ; $\text{mm } 30\text{-minute}^{-1}$) である。これを以下の式を用いて、1 秒間における蒸発速度 (E ; $\text{mm } \text{s}^{-1}$) に変換する。

$$E = E_{30}/(30 \times 60) \quad (3)$$

ここで、 1 m^2 の面積に 1 mm の水を満たした場合の水の体積は 0.001 m^3 となり、この重さは 1 kg となる。すなわち、蒸発散速度の単位 (mm s^{-1}) は、($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) と等価となる。

潜熱とは水の相変化に用いられるエネルギーのことである。液体から気体へ水が相変化するためには、蒸発のためのエネルギーが必要であり、これが潜熱である。逆に、気体から液体に相変化する場合は、蒸発の際に使われたエネルギーが解放される。ここで 1 kg の水が水蒸気へと蒸発するには l ($2.50 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$) の気化潜熱が必要である。式(3)で算出した蒸発散を生じさせるために必要な潜熱エネルギーは、蒸発散速度 ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) に水の気化潜熱をかけて以下のように表わされる。

$$IE = l \times E \quad (4)$$

ここで仕事率の単位である J s^{-1} は W なので、潜熱フラックスの単位は W m^{-2} となる。式(2)による蒸発散量の評価は、対象とする時間に降雨がないことを前提としている。そのため、式(2)の適用は当該ランとひとつ前のランで雨が降っていない場合のみとする。緑化基盤のない屋上面は、降雨時を除いて水がないため、屋上面における潜熱フラックスは無視できるものとする。

【作業2】熱収支式を用いた顕熱フラックスの計算

計測された純放射量、地中熱流量と推定された潜熱フラックスを式(1)に代入して、顕熱フラックスを推定する。

図2は、各エネルギーフラックスの平均的な日変化である。緑化面の潜熱フラックスには、降雨中と降雨直後の蒸発量が込みされていないことに注意する必要がある。

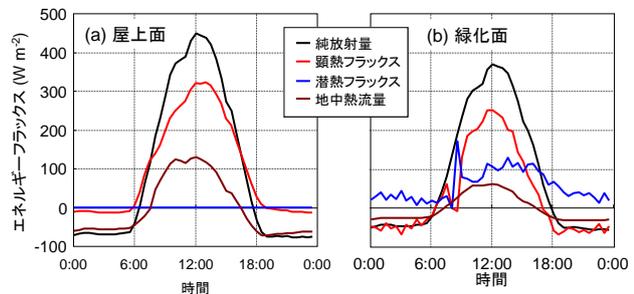


図2. 屋上面と緑化面における平均的なエネルギーフラックスの日変化

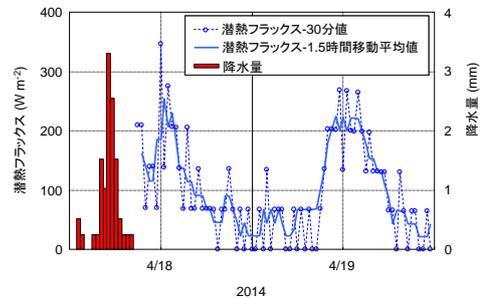


図1. 緑化プロットにおける潜熱フラックスと降水量の時間変化

2. 2. 放射収支の評価

前節では、純放射量として受け取ったエネルギーがどのように使われたか、即ち、顕熱フラックス、潜熱フラックス、地中熱流量にどのように分配されたかを評価した。本節では、屋上面と緑化面における純放射量の違いが放射収支の観点からどのように異なっているかを評価する。純放射量に影響を与える要素は、短波放射量と長波放射量の収支である。

【作業3】 アルベドの計算と短波収支

式(1)で定義される放射収支は、地表面の反射率（アルベド; $ref = S \uparrow / S \downarrow$ ）を用いて以下のように書き換えることができる。

$$Rn = S \downarrow - S \uparrow + L \downarrow - L \uparrow \quad (5)$$

$$= (1 - ref) S \downarrow + L \downarrow - L \uparrow$$

観測された $S \downarrow$ と $S \uparrow$ を用いてアルベドを計算せよ。短波放射量の比として表されるアルベドは、 $S \downarrow$ が 0 W m^{-2} に近い時に分母が小さくなることで無限大に大きく発散してしまう。本来、日射計に誤差がなければ日射量が小さくても比を計算で求めることができるはずである。しかし、実際は測定誤差により 0 W m^{-2} に近い条件でのアルベドを計算で求めることができない。そこで、本実習では $S \downarrow$ か $S \uparrow$ が 5 W m^{-2} を下回る条件ではアルベドの計算をしないようにする。

式(5)で示される通り、純放射量は正味の短波放射収支 ($S \downarrow - S \uparrow$) と正味の長波放射収支 ($L \downarrow - L \uparrow$) の和によって決まる。 $S \downarrow$ が同一の条件下においては、アルベドが正味短波放射収支の決定要因となる。屋上面と緑化面のそれぞれについて、正味短波放射収支 ($S \downarrow - S \uparrow$) を計算せよ。

【作業4】 正味長波放射量の計算

次に、正味長波放射収支 ($L \downarrow - L \uparrow$) を評価する。今回の実験では、プロットが隣り合っているため $L \downarrow$ は同じとみなすことができ、緑化面と屋上面の正味長波放射収支の差は、両プロットにおける $L \uparrow$ の差によって評価することができる。ある表面温度 (T_{surf} ; 単位は絶対温度) の物体から射出される長波放射量 (L) は、ステファン・ボルツマン (Stefan-Boltzmann) の法則を用いて以下のように計算できる。

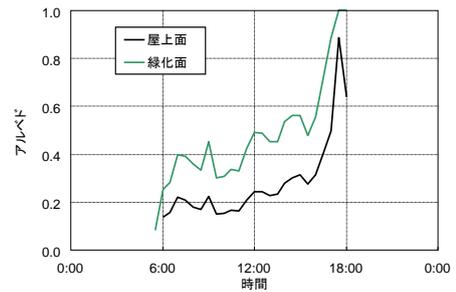


図 3. 屋上面と緑化面における平均的なアルベドの日変化

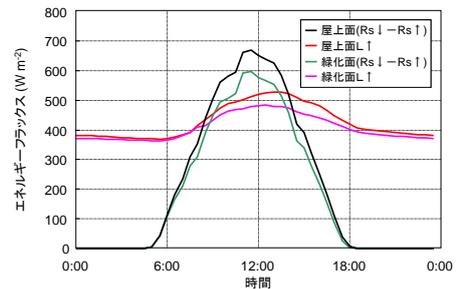


図 4. 屋上面と緑化面における平均的な正味短波放射量と上向き長波放射量の日変化

$$L = \varepsilon \sigma T_{\text{surf}}^4 \quad (6)$$

ここで、 σ はステファン・ボルツマン定数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)、 ε は射出率を表す。式(6)を用いて、屋上面と緑化面からの $L \uparrow$ を計算せよ。ここで、屋上面からの ε は事前調査に基づき 0.96 とし、緑化面からの ε は文献値 (近藤、2000) に基づき草地の 0.98 を用いる。

【作業 5】緑化効果の評価

屋上面を緑化した場合のエネルギー収支、放射収支や環境条件に与える影響 (E_f) を以下のように定義する。

$$E_f = E_{\text{green}} - E_{\text{roof}} \quad (7)$$

ここで、 E_{green} は緑化面で観測された項目、 E_{roof} は屋上面で観測された項目を表す。ここで、効果の評価項目を、純放射量、顕熱フラックス、潜熱フラックス、地中熱流量、正味短波放射量、正味長波放射量、アルベド、地表面温度とする。それぞれの効果について、「1 日のみでの効果」の他に、「日中のみでの効果」、「夜間のみでの効果」についても評価する。ここで、日中とは下向きの短波放射量が 5 W m^{-2} 以上の時間とし、それ以外の時間帯を夜間とする。

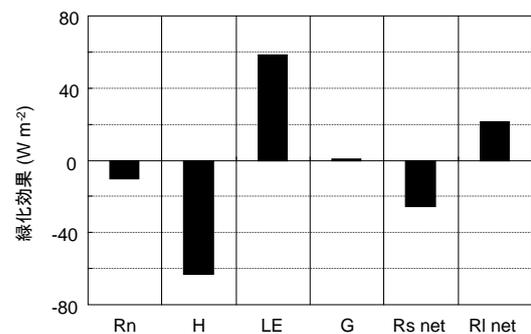


図 5. 屋上緑化に伴う熱収支・放射収支の変化量 (2014 年 4 月 18 日～5 月 3 日)。緑化効果は、緑化面における観測値から屋上面の観測値を差し引いて計算された。

3. レポート

レポートは、以下のように章立てして記載すること。

1. **序論**：実験の目的について書く。ここで、目的を単に「学習のため」と書くのではなく、自らが実験を主体的に行う際の動機、すなわち「この実験を行うことでどのような新しい科学的な知見が得られるか」という観点から自分で考えて記述すること。序論で実験に対する作業仮説を立てておけば、結果を考察する上での助けとなる。
2. **原理**：熱収支と放射収支の原理について簡潔に述べ、その原理を今回の実習にどのように用いたかを記述する。
3. **手法**：測定機器をどのように取り付けたかなどを、そのレポートを見れば他者でも同様の実験を追試できる程度に記述する。機器の取り付け高度などの情報も記載しておくことが望ましい。
4. **結果および考察**：作業1～5によって得られた結果を必要に応じて図示し、科学的な解釈を記述する。「結果」については、得られた結果を客観的に記述（数値や統計値を示して定量的な説明を心掛けること）し、その後、自らの解釈を「考察」として書くこと。図表は Excel で出力されたままの図を使用するのではなく、綺麗に体裁を整えて掲載すること（4章参照；前年度の生物学実験のテキストもあわせて参照すること）。作業5の結果と考察に関しては必ず言及し、放射収支と熱収支の観点から屋上緑化の効果を議論すること。放射収支と熱収支の間に矛盾がある場合は、その原因を考察すること。
5. **結論**：今回の実験の結果から得られた結論を簡潔に記述する。また、今後と同様の実験を行う際にどのような点を改善すべきかについても記述する。今回の結果からどのような都市緑化計画を立てると良いかの提言も含めること。
6. **引用・参考文献**：レポートを作成するにあたり引用した文献や参考にした文献があれば、必ずそのリストを記述すること。

レポートは、A4用紙4枚以内に簡潔にまとめること。上記の5章(+引用・参考文献)に加えて、実験の感想などについても記述してもよい。ただし、感想は結論の節の中には含めないこと。

レポートの提出期限は、本日から2週間後の2018年5月31日の午後6時とする。レポートの提出は授業支援システムから、PDFファイルで提出すること。

観測データ及び、資料については、下記の生態気象学研究グループのウェブサイト上にアップロードされている。

<http://atmenv.envi.osakafu-u.ac.jp/>

4. 図表作成上の注意

図表は、以下の注意を守って丁寧に作成すること。以下のことが守られていない図表が掲載されている場合は減点の対象となる。

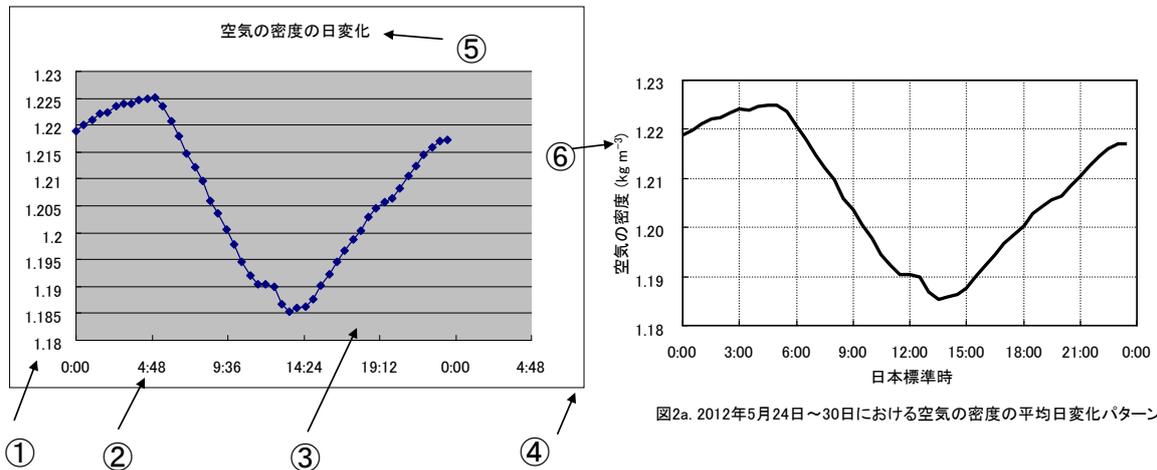


図6 悪い図（左）と良い図（右）の例

- ① 軸目盛の有効桁数を統一する。Y軸の目盛が何を表すのかを記載する。また、当該の物理量に単位がある場合は、括弧書きで単位を必ず記載する。
- ② X軸の目盛が何を表すのかを記載する。Excelで自動生成される目盛刻みを利用しない。例えば、左図のように4:48分刻みで示されると理解しづらい。この場合は、0:00～翌日の0:00の期間について示すのみでよい。
- ③ グラフの背景は特別な理由が無ければ白色とする。
- ④ 図の外枠線は表示させない。
- ⑤ 図のタイトルは、「その図表をどういう観点でみれば良いか」が読者にわかる具体的な表現（右図参照）とし、図の場合は図の下に、表の場合は表の上に、それぞれ通し番号をつけて記載する。
- ⑥ 下付文字、上付文字に注意して記載する。

その他、複数のデータを同一グラフ内に示す場合は、各線（或いは点）が何を表すのかをレジェンドで示す。また、白黒で表記するときは、白黒でも理解できるように、色の濃淡や太さ、大きさ、形を変え、白黒でも判別が可能ないように工夫する。図中では、特別な理由が無ければゴシック調のフォントが使用されることが好ましい。

引用文献

近藤純正 (2000), 地表面に近い大気の科学 理解と応用. 東京大学出版会, 東京, 324pp.