気象・水文観測実習

（１）屋上緑化による熱環境への影響評価　～微気象観測～

担当：植山・中桐
実習場所：生命環境科学域 B11 棟屋上

１．実習の目的

屋上緑化が熱環境に及ぼす影響について、野外観測を通じて明らかにする。野外における微気象観測の基礎技術を習得し、観測において注意すべき点を学ぶ。

２．原理

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

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

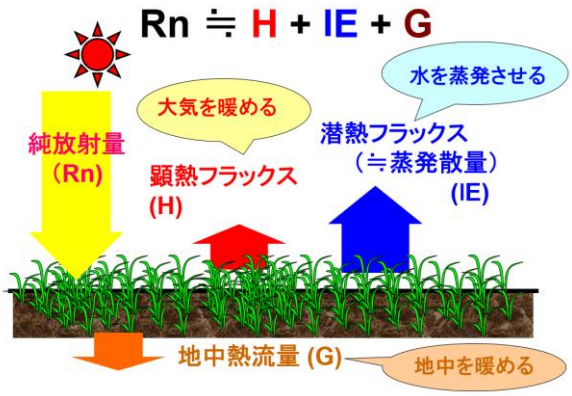

図 1. 地表面熱収支の概念

ここで、Rn は純放射量、ref は地表面の反射率（アルベド）、↓は下向き、↑は上向きを表す。また、H は顕熱フラックス、lE は潜熱フラックス、G は地中熱流量を表す。なお、“フラックス”とは，単位時間単位面積あたりに流れる物質またはエネルギーの量のことをいう。

ここで式(1)が満たされる環境下、すなわち、その他の熱の出入りを考えなくても良い場合には、純放射量 Rn と地中熱流量 G（地中を暖めるのに利用されるエネルギー）に加え、顕熱フラックス H（大気を暖めるのに利用されるエネルギー）か潜熱フラックス lE（水の蒸発に利用されるエネルギー）のいずれか一方を測定すれば、残るもう一つの項をこの式から推定することが出来る。このようにして顕熱フラックス H 或いは潜熱フラックス lE を推定する方法は**熱収支法**とよばれる。

３．実習方法

生命環境科学域 B11 棟屋上の一画には、緑化プロットが設置されている。この実習では、水やりされていない緑化された屋上面（無潅水緑化面）、水やりされている緑化された屋上面（潅水緑化面）、と緑化されていない屋上面（非緑化面）の 3 箇所に観測機器を設置して純放射量 *Rn*、地中熱流量 *G*、潜熱フラックス *lE* の測定を行い、熱収支法を用いて顕熱フラックス *H* を推定する。緑化面と非緑化面、潅水と無潅水の緑化面で得られた各熱収支成分を比較することにより、緑化や潅水が熱環境に及ぼす影響を評価する。

純放射量 *Rn* 及び地中熱流量 *G* は、それぞれ純放射計、地中熱流板を用いて測定する。潜熱フラックス *lE* については、土壌水分計を用いて土壌水分減少法により計測する。 なお、非緑化面においては、潜熱フラックスは生じないものとする。

４．計測の概要

グループ A は、B11 棟屋根面で観測を行う。屋根から 55 cm の高度に純放射計 (NR Lite, Kipp & Zonen, USA)を取り付ける。また、同高度に短波放射計 (ML-01-5, EKO, Japan)を下向きに取り付け、屋根面からの反射による上向き短波放射量を日射計（ML-01-5, EKO, Japan）で計測する。屋根面に地中熱流板 (HFP01, Hukseflux, Netherlands)を取り付けることで、屋根表面から建屋に伝導する熱量を計測する。日射量、純放射量の計測は、観測マストや測器の影にならないように留意し、南側に突き出して設置する。通風筒に入れた温湿度センサー（HMP6-L, Campbell Scientific Inc., USA）を屋根から 70 cm の高度に設置し、気温と相対湿度を計測する。これらの機器は、単管パイプからなる観測用マストを屋上に取り付けて、その観測マストに設置する。観測用マストには、雨量計 (TE525-L25, Campbell Scientific Inc., USA)を設置し、降水量を計測する。屋根面に熱電対温度計を張り付けて設置することで、屋上の表面温度を測定する。これらの環境データは、1 秒ごとにデータロガー (CR1000, Campbell Scientific Inc., USA)を用いて計測され、30 分平均値が記録される。

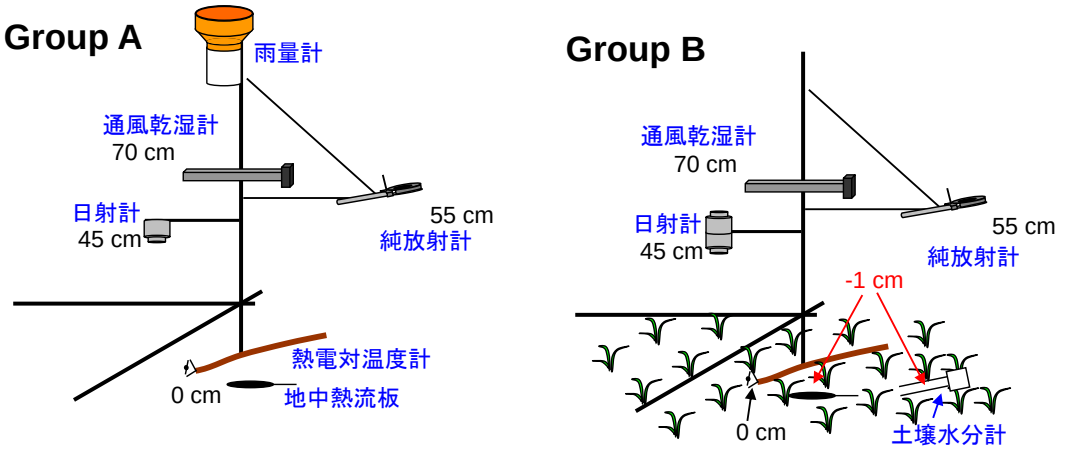

図 2. 測定機器の取り付けについての模式図

グループ B は、水管理がなされていない屋上緑化区で観測を行う。グループ B の観測では、グループ A と同モデルの機器で同じ測定高度で観測を実施するため、計測に差異があるもののみ記載する。グループ B では、下向きの短波放射量、つまり日射量を日射計（ML-01-5, EKO, Japan）で計測する。地中熱流板 (HFP01, Hukseflux, Netherlands)は緑化面中の地下 1 cm に取り付ける。緑化プロットの土壌含水率を計測するために、体積含水率計 (CS616, Campbell Scientric Inc., USA)を緑化プロットに設置する。本実習では、土壌水分量の減少速度から、緑化プロットの蒸発散速度、つまり潜熱フラックスを見積もる。雨量はグループ A によって観測されるものと同様とみなすことができるため、グループ B では観測を実施しない。

グループ C は、水管理がされる屋上緑化区で観測を行う。グループ C の観測では、グループ B と同モデルの機器で同じ測定高度で観測を実施するが、気温、湿度についてはグループ A、B による観測値と大きく変わらないと予想されるため、観測しない。

５．測器と測定に関する補足（生態環境計測学の講義資料より一部抜粋）

気温計測に用いたセンサー：電気抵抗温度計

電気抵抗温度計は、温度が上昇すると抵抗値が増す金属を用いた抵抗温度計（白金抵抗温度計など）と、逆に抵抗値が減る半導体を用いた抵抗温度計（サーミスタ温度計）がある。測温部の温度に対する抵抗値には個体差があるため、あらかじめ抵抗値と温度の対応を正確に調べておく必要がある。今回は、サーミスタ温度計を用いて気温を観測する。

図 3. 通風乾湿計

気温を計測する際は、測温部が直射日光や雨・雪にさらされると正しく気温が測定できないため、測温部をシェルター内に取り付ける必要がある。シェルターによる輻射熱の影響を低減するためシェルターを 2 重とし、外側のシェルターには高反射率の素材を利用する。また、外気と同じ状態の新鮮な空気を常に測温部に当てるために、電動ファン等でシェルター内を通気する必要がある。

表面温度の計測に用いたセンサー：銅・コンスタンタン熱電対温度計

熱電対温度計は、異金属接合部の熱起電力、すなわちゼーベック効果を用いて温度を計測する。熱電対を用いる計測では、図 4 のような回路を用いて測温部の温度(T1)を計測する。熱電対では、T1 と T0 の温度差を計測するため、T1 の温度の絶対値を知るためには、電気抵抗温度計等で T0 の温度を計測しておく必要がある。熱電対で出力される電圧は温度差 1℃あたり約 40 μV 程度と非常に微弱である。そのため、周囲からの電波や電源からのノイズによって不要な電流が誘導され正しく計測できない場合がある。特に熱電対を長く取り回して使用する際など、長い配線自体がアンテナとなりノイズを拾うことがあるた

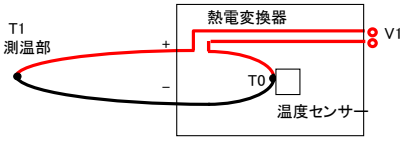

図 4. 熱電対温度計の回路

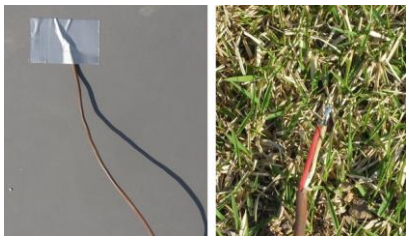

図 5. 屋上面と緑化面に設置された熱電対温度計

め注意が必要である。

降水量の計測に用いた測器：転倒ます型雨量計

転倒マス式雨量計は 2 つの転倒マスからなり、片側のマスに水（気象庁の観測では降水量 0.5 mm に相当する水量）が貯まると転倒し、その転倒回数から雨量を計測する。0.5 mm に満たない降水量や 0.5 mm の整数倍にならずに端数としてマスに残った水は、蒸発損失となり降水量の過小評価の原因となる。また、降水の一部が受水器に付着し、そのまま蒸発する可能性もある。強風の場合は、受水器の周りの気流が乱れることで降水の一部を取り逃すことも知られており（捕捉率の低下）、設置場所を工夫したり、風除けを設置したりする必要がある場合がある。

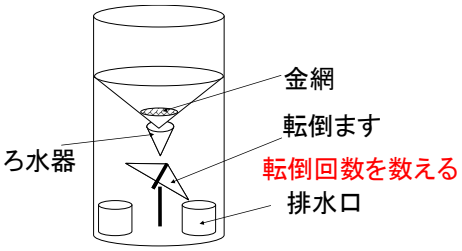

図 6. 転倒ます型雨量計

短波放射量の計測に用いた測器：光電式センサー

短波放射計は、熱式と光電式の 2 つのタイプがある。実験で用いる光電式のセンサーは、フォトダイオードと呼ばれる受光エネルギーに応じて電流を出力する光半導体素子である。光電式センサーは、熱式のセンサーに比べて安価で応答速度が速い反面、短波放射の波長特性に仮定をおいた計測を行うため、正確に計測できない場合もある。

図 7. 下向きに設置された日射計

地中熱流量と純放射量の計測に用いた測器

今回用いた純放射計と地中熱流板は、上下の受熱板の温度差を熱電堆で計測し、既知の熱輸送係数と計測された受熱板上下の温度差からエネルギー輸送量、つまり純放射量と地中熱流量を見積もる測器である。

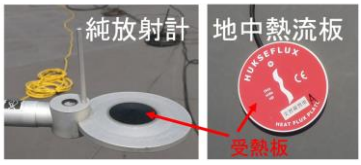

図 8. 純放射計と地中熱流板

純放射量や日射量などの、下向きの放射を計測する際は、機器が取り付け用のマスト等の影にならないように工夫して取り付けること。通常、影の影響を最小限にするために、これらの放射センサーは、南向けに取り付ける。

土壌含水率の計測に用いた測器：時間領域反射測定
(Time Domain Reflectometer; TDR)法

TDR 法では土壌に金属ロッドを埋設し、金属ロッドにマイクロ波を流した時に先端までマイクロ波が到達するのに要した時間を計測する。この到達速度が、土壌の比誘電率と関係し、土壌の比誘電率が土壌含水率と関係することから、土壌水分量が計測できる。

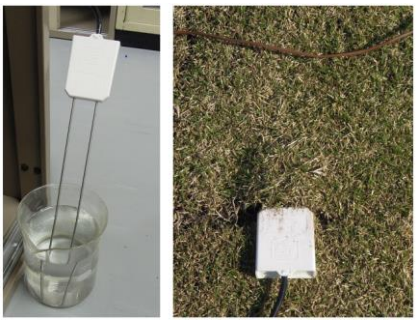

図 9. TDR センサーと緑化プロットに設置された TDR センサー

７．使用機材

A グループ：屋上面観測用

*純放射計 (NR Lite, Kipp & Zonen, USA)
*地中熱流板 (HFP01, Hukseflux, Netherlands)　　* 紙
*短波放射計 (ML-01-5, EKO, Japan)
*通風乾湿計　(HMP6-L, Campbell Scientific Inc., USA)　　*熱電対温度計
*雨量計　(TE525-L25, Campbell Scientific Inc., USA)
*データロガー (CR1000, Campbell Scientific Inc., USA)
*鉄製ポール (3 本)
*直行クランプ (4 個)
*ケーブル類　　*防水ボックス　　*メジャー　　* ダクトテープ
*工具　（モンキーレンチ・ドライバー・水準器　等）
*ノートパソコン　（A、B、C 班で共用とする。）

B グループ：無潅水緑化面観測

*純放射計 (NR Lite, Kipp & Zonen,, USA)
*地中熱流板 (HFP01, Hukseflux, Netherlands)
*短波放射計 (ML-01-5, EKO, Japan) (2 個)
*体積含水率計 (CS616, Campbell Scientric Inc., USA)
*通風乾湿計　(自作)　　*熱電対温度計
*データロガー (CR1000, Campbell Scientific Inc., USA)
*鉄製ポール (3 本)
*クランプ (4 個)
*ケーブル類　　*防水ボックス　　*メジャー
*工具　（モンキーレンチ・ドライバー・水準器　等）
* ノートパソコン　（A、B、C 班で共用とする。）

C グループ：潅水緑化面観測

*純放射計 (NR Lite, Kipp & Zonen, USA)

*地中熱流板 (HFP01, Hukseflux, Netherlands)

*短波放射計 (ML-01-5, EKO, Japan) (1 個)

*体積含水率計 (CS616, Campbell Scientric Inc., USA)

*熱電対温度計

*データロガー (CR1000, Campbell Scientific Inc., USA)

*鉄製ポール (3 本)

*クランプ (4 個)

*ケーブル類　　*防水ボックス　　*メジャー

*工具　（モンキーレンチ・ドライバー・水準器　等）

* ノートパソコン　（A、B、C 班で共用とする。）

８．手順

1. 観測機器を屋上に運ぶ。

2. 測器の取り付け（当日、現地にて詳細な説明を別途行う）

*観測マストを組み立てる。

*観測機器を取り付ける。

*雨量計を観測マストの最高位置に取り付ける（内部の水準器で水平をとる）。（A 班のみ）

*地上 55 cm の高度に、純放射計を取り付ける。

C 班は、潅水緑化区の植生高が高いため、適宜、測定高度を高くする。

*地上 55 cm の高度に、日射計を水準器で水平を出して上下にそれぞれ取り付ける。

日射量の計測は両班で共有するため、A 班、C 班は反射計測用の日射計のみ取り付ける。

C 班は、潅水緑化区の植生高が高いため、適宜、測定高度を高くする。

*地中熱流板を取り付ける。

→赤色面を上にして取り付ける。

A 班は、ダクトテープで貼り付ける。

直接にテープで熱流板を貼り付けると、**熱流板がねちょねちょになるので、間に紙を挟む**。

B 班、C 班は、地中 1 cm のところに**水平に**埋設する。

*地上 70 cm の高度に、通風乾湿計を取り付ける。（A 班、B 班のみ）

通風乾湿計のファンは、水がケーブルを伝ってファンに入り込まない向きに取り付ける。

*データロガーに観測機器からの信号線を配線する。

誤って配線をすると機器が故障する場合があるので、慎重に行うこと。

*データロガーとパソコンとを接続して、測器が正しく動作しているかを確認する。

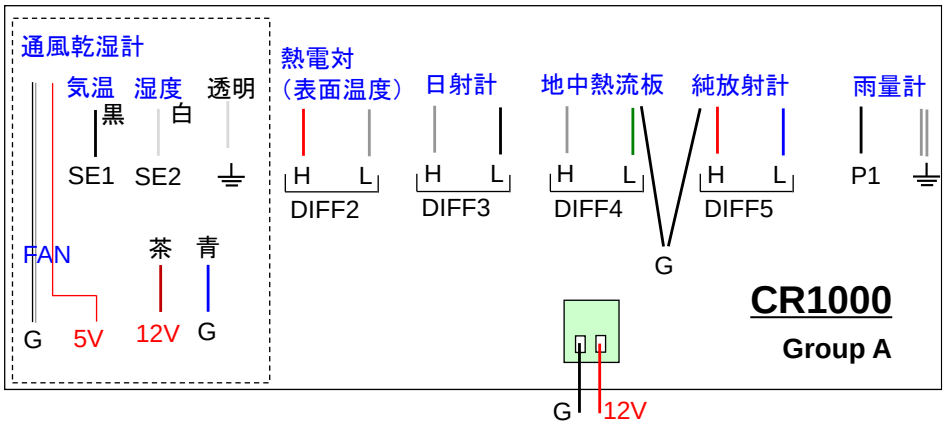

図 10. グループ A のロガー配線図

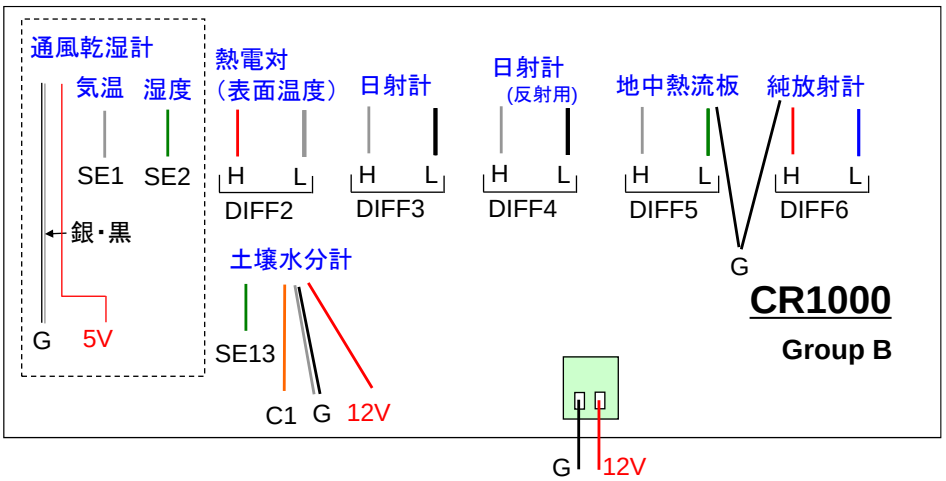

図 11. グループ B のロガー配線図

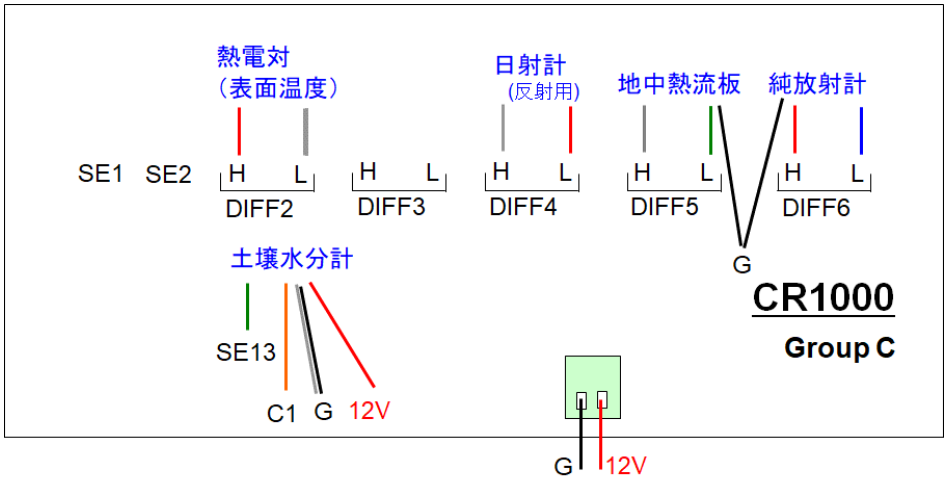

図 12. グループ C のロガー配線図

９．データ整理と考察

後日に実施されるデータ解析演習にて、各測定データの整理および集計を行い、各自で“緑化、潅水が熱環境に及ぼす影響”について考察する。

１０．レポート

データ解析演習に関する授業の後、1 つのレポートを作成し提出すること。レポート作成に向けて、野外で作業を行っている間に、どのような手順で測定機器の調整、設置を行なったのか、また作業をする中で気付いた点、疑問点、感想などを**メモしておくこと**。**取り付け時の植物の状況を記録するために、写真を撮っておくとレポート作成の考察時に役に立つ**。

１１．参考資料

次回の実習までに下記の文献のうち、いくつかを読んでおくことが望ましい。

1. ヒートアイランド対策　都市平熱化計画の考え方・進め方
   空気調和・衛生工学会編集, 2009 年
2. 都市の気候変動と異常気象　猛暑と大雨をめぐって
   藤部文昭
3. 建築熱環境
   坂本雄三
4. ヒートアイランドの対策と技術
   森山正和編集
5. 気象ブックス 037 都市を冷やすフラクタル日除け
   酒井敏
6. 気象ブックス 029 ヒートアイランドと都市緑化
   山口隆子
7. 内陸都市はなぜ暑いか　日本一高温の熊谷から
   福岡義隆・中川清隆　編集
8. 知っておきたい都市緑化の Q&A
   財団法人　都市緑化機構　特殊緑化共同研究会　編著