

# 植物の熱環境緩和機能の評価

大阪府立大学 渋谷俊夫

## 1. 実習の目的

植物には熱環境を緩和する効果がある。熱環境を緩和するということはどういうことだろうか。そのときの熱とは何を指すのだろうか。その仕組みを理解するには、植物とその周辺でどのように熱のやりとりが行われているかを考える必要がある。ある系（システム）に加えられた熱がどのような形でどこへ伝えられたかを示すものを熱収支といい、熱収支を明らかにすることはその系における熱環境を理解する大きな手助けになる。この実習では、ある通気システムに植物を入れて、微気象計測を通してシステム内での熱のやりとりを計測することで、植物の蒸散による熱環境緩和効果を評価する。

## 2. どのように植物は熱環境を緩和するのか

ある系に同じ量の熱が加えられても、それがものを暖めるために使われるか物質の状態を変化させるために使われるかによってその系の温度変化の仕方は異なる。これは植物による熱環境緩和効果を理解する上でもっとも重要な点である。物質の状態変化なしに温度変化のために使われる熱を顕熱といい、温度変化なしに物質の状態変化に使われる熱を潜熱という。例えば、ここに乾いた布と水で湿った布があり、それぞれに同じ量の熱が加えられたとする（図1）。乾いた布では布に吸収された熱は全て布を暖めるために使われ、やがてその熱は周辺の空気を暖めるために使われる。一方、湿った布では、布に吸収された熱の多くは水が蒸発するときの状態変化に使われ、残りの熱は布を暖めるために使われる。したがって、同じ量の熱が加えられても、湿った布では蒸発に使われる熱の分だけ布や周辺空気の温度上昇が緩和される。このことは蒸散活動を行う植物の葉においても同じであり、真夏の強い日射を受けても植物の葉がそれほど熱くならないのは、太陽の放射から葉が吸収した熱の多くが蒸散活動にともなう水の状態変化に使われるためである。

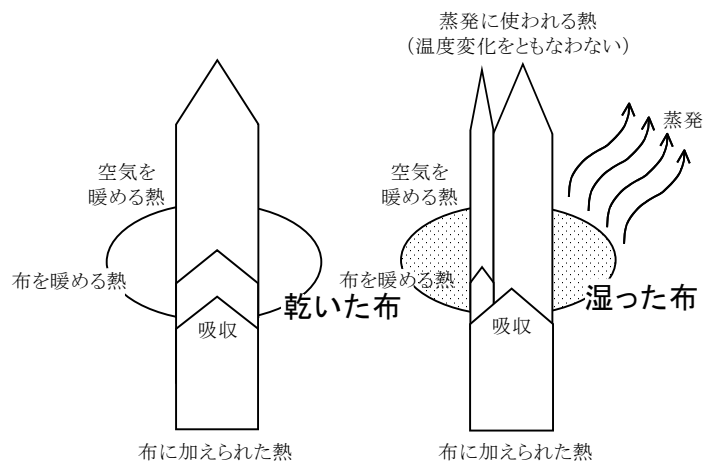
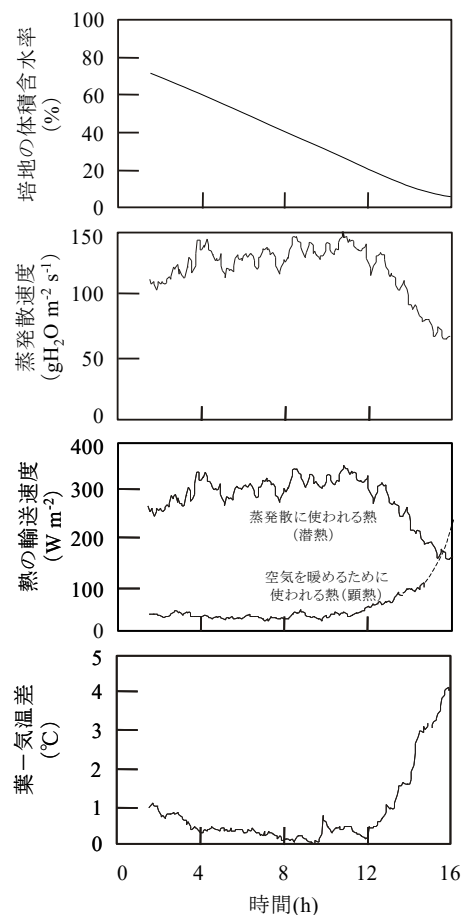


図1 乾いた布と湿った布での熱のやりとり  
矢印の太さは熱の流れる量を概念的に図示したものであるが、実際には布の材質や湿り具合、周辺空気の流れ方などによってその割合は異なる。（「農学から地域環境を考える」より）

図2は培地の含水率を低下させたときの植物個体群における蒸発散（植物からの蒸散と培地からの蒸発をあわせたもの）速度、顕熱および潜熱の輸送速度および葉-気温差の変動を測定したものである。培地の含水率が適正範囲内で植物の蒸散が活発なときは、植物個体群上への放射によって植物個体群に輸送された熱の多くが蒸発散のために使われ、その結果として葉温は気温より0.5℃から1℃高い程度に保たれる。しかし、培地の含水率が低下すると植物が水分ストレスを受けて蒸発散速度は大きく低下する。すると、蒸発散に使われる熱の割合が減少するので、葉を暖めるために使われる熱の割合が増大して、その結果として葉温は急上昇し、その熱は周辺大気へ輸送される。このように植物の蒸散活動は放射による熱負荷を緩和し、植物体温を調節する役割を持っている。

図2 培地の含水率の低下にもとなう植物個体群の蒸発散速度、熱の輸送速度および葉-気温差 の変動



### 3. 通気システム内での熱のやりとりを考える

植物においてこのような熱のやりとりを把握するには、熱輸送を定量的に調べる必要がある。そこで、この実習では熱輸送をより単純するために、図3のように、通気口のある容器内に地表面（植被面）を設け、この通気システム内における熱のやりとりを考えることにする。

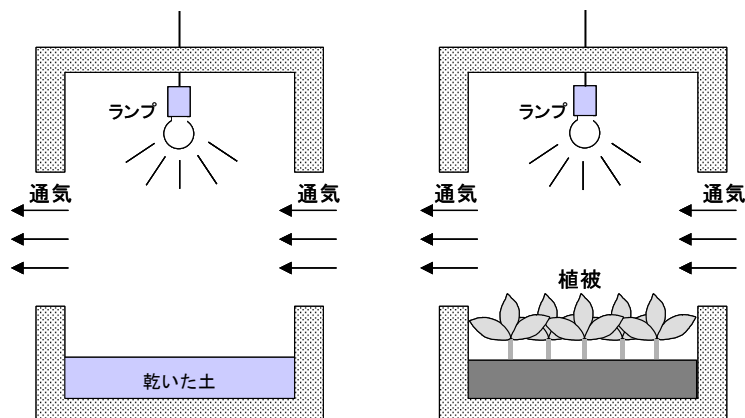


図3 通気システムの概略図

### 地表面（植被面）上でのエネルギーの流れ

図4に通気システム内における熱のやりとりを模式的に示す。通気システム内のランプを点灯させる。すると、ランプに投入されたエネルギー（①）の一部は、ランプから地表面（植被面）への放射に使われ、残りはランプを暖め、ひいてはランプ周辺の空気を暖めるために使われる。厳密に考えれば、ランプからの放射は壁面にも照射され、またランプは壁面や地表面（植被面）からの放射を受けているが、ここでは単純にランプから放出された熱は全て地表面（植被面）へ吸収されたと考えることにする。

ランプから放出されたエネルギーは、地表面（植被面）によって吸収される。次にこの吸収されたエネルギーがどのようにやりとりされるかを考えよう。乾いた地表面では、地表面によって吸収された放射エネルギーはすべて地表面を暖めるために使われる。そのエネルギーは、地表面上の空気を暖めるために使われ（③）、一部は地中を暖めるために使われる（ここでは地中の温度が変化しなくなったと仮定してゼロとする）。他方、植被面では、植被面によって吸収されたエネルギーの一部が植被面からの蒸発散のために使われ（④）、残りが植被面を暖めるために使われる。植被面が暖められるために使われたエネルギーは、植被面上の空気を暖めるために使われ（③）、一部は植被内を暖めるために使われる（ここでは植被の温度が変化しなくなったと仮定してゼロとする）。

これらの関係を式で表すと下記のようなになる。

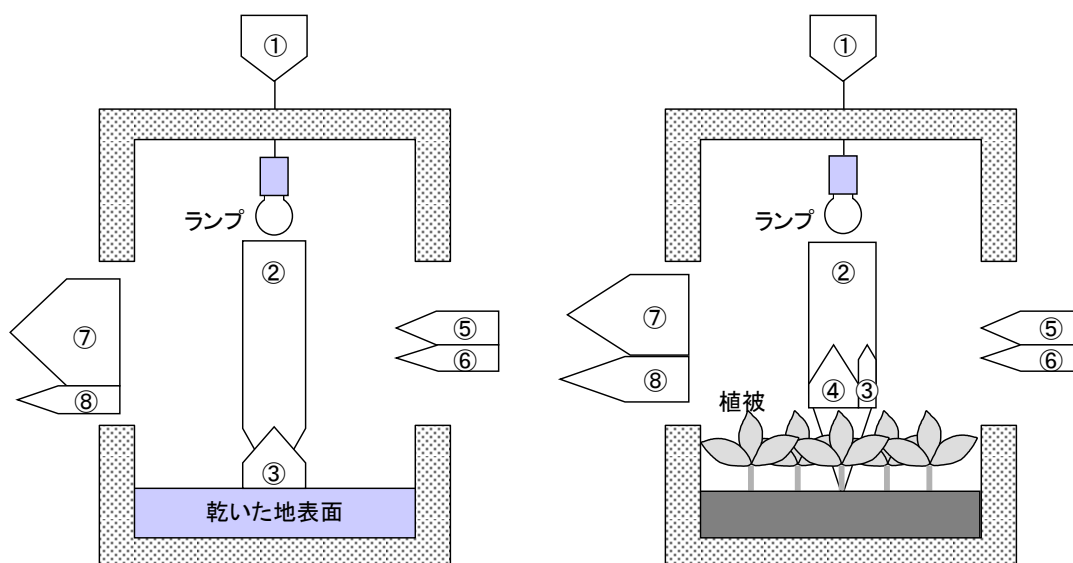
$$\text{ランプから地表面に放出されたエネルギー量 (②)} = \text{③}$$

$$\text{ランプから植被面に放出されたエネルギー量 (②)} = \text{③} + \text{④}$$

このようなエネルギーのやりとりを表した式を熱収支式という。熱収支式を組み立てることは、系内の熱の流れを理解する上でとても重要である。

### 通気した空気のエネルギー収支

上記の過程から通気システム内に放出されたエネルギーによって、流入した空気のエネルギー量は増大し、システム外へ流出する。すなわち、システム内に流入した空気は、ランプから投入されたエネルギー量分を受け取ってシステム外へ流出する。このとき、乾いた地表面と植被面とでは、エネルギーの増大の仕方がことなる。乾いた地表面では、通気システム内に投入されたエネルギーのすべてがものを暖めるための熱（顕熱）として使われるのに対して、植被面ではその一部が植被面からの蒸発散に使われ、そのエネルギーは物質の状態変化に使われる熱（潜熱）の分だけ、水蒸気を持つエネルギーとして空気中に蓄えられるからである。



- ①: ランプに投入される電気エネルギー
- ②: ランプから地表面(植被面)に放出される熱量
- ③: 地表面(植被面)が空気を暖めるのに使われる熱量
- ④: 植被面からの蒸発散に使われる熱量(=空気中に放出される水蒸気の熱量)
- ⑤: 通気によって容器に入ってくる顕熱
- ⑥: 通気によって容器に入ってくる水蒸気が持つ熱量
- ⑦: 通気によって容器から出て行く顕熱(⑤+③)
- ⑧: 通気によって容器から出て行く水蒸気が持つ熱量(⑥+④)

図4 通気システム内における熱のやりとりの模式図

注1: 矢印の太さはエネルギー量を相対的に示すが、その割合はランプの種類、土質、植被の状態、空気流動の状態などによって異なる。

注2: 地中(植被内)の温度が変化しなくなった(定常になった)場合を想定しているので、地中(植被内)へ伝わる熱量はゼロとした。

### エネルギーの使い方を捉える

通気システム内に投入されたエネルギーの使い方をそれぞれ定量的に評価してみよう。

#### ①: 通気システム内に投入された電気エネルギー

便宜的に照明ランプのワット数で考える。100 W のランプなら  $100 \text{ J s}^{-1}$ 、すなわち1秒間に約 100 J のエネルギーが通気システム内に投入される。ランプに記載されているワット数と実際のエネルギー消費量は一致しない場合があるので、正確には電力計を使うとよい。

#### ②: ランプから地表面(植被面)に放出された熱量

便宜上、ランプから放出されたエネルギーは全て地表面(植被面)に吸収されると考えるが、実際にはランプからの放射は壁面にも吸収され、またランプ自身がまわりの空気を暖めるので、地表面(植被面)に到達する熱量はランプに投入された電気エネルギーよりも少ない。

### ③：通気空気を暖めるために使われた熱量（顕熱）

時間あたりに通気システム内で空気を暖めるためにエネルギーが使われたかは、通気前後における顕熱の流入出速度の差（すなわち⑦－⑤）から求めることができる。顕熱（0°Cを基準とした場合）の流入出速度（J s<sup>-1</sup>）は、気温（°C）、空気の比熱（約1 kJ kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>）、通気流量（kg s<sup>-1</sup>）の積で表すことができる（式1・2）。通気システム内での空気を暖めるために使われた熱量（③）は、式3のように表される。乾いた地面では、通気システム内に投入されたエネルギー量（①，J s<sup>-1</sup>）はすべて通気空気を暖めるための熱量に使われる。すなわち①＝③となる。

$$\begin{aligned} \text{【顕熱の流入速度⑤】} &= \text{【流入空気の気温】} \times \text{【空気の比熱】} \times \text{【通気流量】} && \text{式1} \\ (\text{kJ s}^{-1}) & && (\text{°C}) \quad (\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}) \quad (\text{kg s}^{-1}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{【顕熱の流出速度⑦】} &= \text{【流出空気の気温】} \times \text{【空気の比熱】} \times \text{【通気流量】} && \text{式2} \\ (\text{kJ s}^{-1}) & && (\text{°C}) \quad (\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}) \quad (\text{kg s}^{-1}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{【空気を暖めるために使われた熱量③】} &= \text{【顕熱の流出速度⑦】} - \text{【顕熱の流入速度⑤】} && \text{式3} \\ (\text{kJ s}^{-1}) & && (\text{kJ s}^{-1}) \quad (\text{kJ s}^{-1}) \\ &= (\text{【流入空気の気温】} - \text{【流出空気の気温】}) \times \text{【空気の比熱】} \times \text{【通気流量】} \\ & && (\text{°C}) \quad (\text{°C}) \quad (\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}) \quad (\text{kg s}^{-1}) \end{aligned}$$

### ④：植被面からの蒸発散に使われた熱量（潜熱）

水の蒸発潜熱は約2.5 kJ g<sup>-1</sup>である。これは水1 gを蒸発させるのに2.5 kJの熱量が必要であることを示す。これに植被面からの蒸発散量をかけることによって、どれくらいの熱量が蒸発散に使われたかを評価することができる。植被面からの蒸発散量は、通気前後における通気空気の\*比湿（kgH<sub>2</sub>O kg<sup>-1</sup>）と通気流量（kg s<sup>-1</sup>）から求めることができる（式4～7）。

$$\begin{aligned} \text{【水蒸気の流入速度】} &= \text{【流入空気の比湿】} \times \text{【通気流量】} && \text{式4} \\ (\text{kgH}_2\text{O s}^{-1}) & && (\text{kgH}_2\text{O kg}^{-1}) \quad (\text{kg s}^{-1}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{【水蒸気の流出速度】} &= \text{【流出空気の比湿】} \times \text{【通気流量】} && \text{式5} \\ (\text{kgH}_2\text{O s}^{-1}) & && (\text{kgH}_2\text{O kg}^{-1}) \quad (\text{kg s}^{-1}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{【蒸発散速度】} &= \text{【水蒸気の流出速度】} - \text{【水蒸気の流入速度】} && \text{式6} \\ (\text{kgH}_2\text{O s}^{-1}) & && (\text{kgH}_2\text{O s}^{-1}) \quad (\text{kgH}_2\text{O s}^{-1}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{【蒸発散に使われた熱量】} &= \text{【蒸発散速度】} \times \text{【蒸発潜熱】} && \text{式7} \\ (\text{kJ s}^{-1}) & && (\text{kgH}_2\text{O s}^{-1}) \quad (\text{kJ kg}^{-1}) \\ &= (\text{【水蒸気の流出速度】} - \text{【水蒸気の流入速度】}) \times \text{【蒸発潜熱】} \\ & && (\text{kgH}_2\text{O s}^{-1}) \quad (\text{kgH}_2\text{O s}^{-1}) \quad (\text{kJ kg}^{-1}) \\ &= (\text{【通気後の比湿】} - \text{【通気前の比湿】}) \times \text{【通気流量】} \times \text{【蒸発潜熱】} \\ & && (\text{kgH}_2\text{O kg}^{-1}) \quad (\text{kgH}_2\text{O kg}^{-1}) \quad (\text{kg s}^{-1}) \quad (\text{kJ kg}^{-1}) \end{aligned}$$

\*\* 空気 1 kg あたりに含まれる水蒸気の質量. 実験で用いる温湿度センサは気温と相対湿度を出力する. これらの値から下式を用いて比湿を求めることができる.

$$e_s = 6.1078 \cdot \exp\left(\frac{17.27 \cdot T}{T + 237.3}\right) \quad RH = \frac{e}{e_s} \times 100 \quad q = \frac{0.622 \cdot e}{P - 0.378 \cdot e}$$

$T$ : 温度 (°C),  $e_s$ : 飽和水蒸気圧 (hPa),  $e$ : 水蒸気圧 (hPa),  
 $RH$ : 相対湿度 (%),  $P$ : 大気圧 (hPa),  $q$ : 比湿 (kgH<sub>2</sub>O kg<sup>-1</sup>)  
 $\exp(x) = e^x$ ,  $e$  = 自然対数の底

### ③+④: 通気前後で増大した全熱量

空気中に含まれる顕熱と水蒸気を持つ熱量の合計をエンタルピ (全熱量) という. 同じだけエンタルピが増大しても, その中での顕熱と潜熱の割合によって気温上昇は異なる. エンタルピの増大量は, すなわち (⑦-⑤) + (⑧-⑥) であり, 通気システム内の熱量が変化しない状態 (気温と湿度が変化しない状態) であれば, ランプに投入される電気エネルギー (①) と等しくなる. 厳密には水蒸気に含まれる顕熱も増大するが, その割合はわずかである.

### 顕熱と潜熱の比率

通気空気を暖めるために使われた熱量 (③) と植被面からの蒸発散に使われた熱量 (④) の比はボーエン比 (Bowen ratio) といい, そのシステムの熱環境緩和効果を評価する上で重要なパラメータである. 式3および式7から, その値を求めることができる. ボーエン比を用いることで, 通気システムに投入されたエネルギー (①=③+④) から, 顕熱の増大分 (③) および水蒸気持つ熱量の増大分 (④) の絶対値を求めることができる.

## 4. 実験方法

### 計測装置

発泡スチロール製の箱とファンを用いて, 図4と同様な通気システムを作製する. 発泡スチロール製の箱に2つ通気口を設け, 一方からファンで空気を引き, 通気を行う. 内側をアルミフィルムで被覆する. 通気システム内外に温湿度センサを設置して, 気温および相対湿度を計測する. 通気システム内の空気はファンで攪拌する.

### 作業手順

- 乾燥した砂の入った容器を通気システム床面に設置する.
- 通気システムにフタをして, 通気用, 攪拌用のファンを回す.
- ランプを照射し, 通気システム内の気温および相対湿度が一定になるまで, 1 分間隔で気温, 相対湿度を記録する.
- 通気システムを開放し, システム中の温度を十分に下げる.

- ・ 植物の入った容器を通気システム床面に設置する.
- ・ 通気システムにフタをして, 通気用, 攪拌用のファンを回す.
- ・ ランプを付け, 通気システム内の気温および相対湿度が一定になるまで, 1 分間隔で気温, 相対湿度を記録する.

### 算定項目

測定結果から下記の項目を求める. 通気システム内は十分攪拌されているため, システム内空気と流出空気はほぼ同じと仮定する.

- ・ 通気空気を暖めるために使われた熱量と植被面からの蒸発散に使われた熱量の比率
- ・ 通気空気を暖めるために使われた熱量
- ・ 植被面からの蒸発散に使われた熱量
- ・ 植被面からの蒸発散速度 ( $\text{g s}^{-1}$ )

## 5. レポート

計測原理・計測方法, 算定方法を分かりやすく正確に記述すること. 材料や測器なども詳細に記載すること. このテキストに書いてある内容を写すだけでは不十分である. 測定装置を図で示し, 図中にスケールを入れること. 結果は図や表にまとめ, そこから読みとれることを文章で説明すること. 図や表は何を伝えたいのかをよく考えて作成すること. 単位は正確に記述すること. 下記の内容について算定・考察すること. 他の項目について考察しても構わない.

### 気温および比湿の時間変化について

乾燥した砂, 植物を入れたときの通気システム内の気温および比湿の時間変化をグラフ化して, その傾向を述べよ. また, そのようになった理由について考察せよ.

### 通気システムの熱収支について

それぞれの算定項目から, 図4の②, ③, ④の各項目を, 乾燥した砂, 植物を入れたときについてそれぞれ図示せよ. 矢印の太さを熱量の大きさと対応させ, 数値を記入すること.

### 植物の熱環境緩和効果の評価方法について

植物と環境との関係を調べる上で, 閉じたシステムで考えることで物事をわかりやすくすることができる. その一方で, 閉じてしまうことでわかりにくくなってしまうこともある. 今回の実験結果は, 実際の緑地における植物の熱環境緩和効果を考える上でどのあたりが重要で, またどのあたりが現実とかけ離れているか, その理由を含めて述べよ. 緑地において, 植物による熱環境緩和効果を定量的に把握する方法について, 参考図書などを調べ, 理解できた範囲でわかりやすく記述せよ.

## 6. 参考図書

- ・ 「新版生物環境調節ハンドブック」, 生物環境調節学会編, 養賢堂, 1995 年
- ・ 「新訂農業気象の測器と測定法」, 日本農業気象学会編, 農業技術協会, 1997 年
- ・ 「農業環境実験法」, 渡部一郎編, サイエンスハウス, 1987 年
- ・ 「徹底マスター空気線図の読み方・使い方」, 空気調和・衛生工学編, オーム社, 1998 年
- ・ 「100 万人の空気調和」, 小原淳平編, オーム社, 1975 年
- ・ 「都市緑化における微気象の設計」, 新田伸三ら著, 鹿島出版会, 1981 年
- ・ 「農学・生態学のための気象環境学」, 文字信貴ら編, 丸善, 1997 年
- ・ 「農学から地域環境を考える」, 地域環境を考える会編, 大阪公立大学共同出版会, 2003 年