

# 閉鎖系における環境制御とエネルギー収支

渋谷俊夫

## 1. 実習の目的

温室やファイトトロンなどの閉鎖系システムの環境制御を適切に行うためには、系内外のエネルギー収支の定量的な解析が不可欠である。この実習は、閉鎖環境をモニタリング・制御するために必要な空気調和の基礎を湿り空気線図を用いて学習するとともに、閉鎖系におけるエネルギー収支の考え方をモデル的な実験を通して理解することを目的とする。本実習で学習する概念は、植物環境のみならず、私たち人間の生活環境を快適にするためにも重要な内容である。

## 2. 閉鎖系での環境制御

閉鎖系とは、内外での物質やエネルギーのやりとりが制限されたシステムを意味する。例えば、私たちが日常生活する居住空間もひとつの閉鎖系と考えることができよう。系内外での物質やエネルギーのやりとりを制限することで、系内に外部と異なる環境をつくり出すことができる。居住環境では人間の周りを建物で覆うことで、日照や風雨などをしのぎ、屋外よりもより快適な環境をつくることことができる。植物の育成では、植物の周りをガラスや透明フィルムで覆うことで熱のやりとりを制限し、植物の生育に好適な環境をつくることことができる。しかしながら、このような構造物による受動的な環境制御には限界があるので、閉鎖空間の環境をより好適に保つには、空気調和と呼ばれる能動的な手法が必要になる。

空気調和とは、人間の快適性を保つことを主な目的として、空気の温度、湿度、気流などを制御することである。具体的には、ヒータで系内に熱を入れたり、クーラーで系外に熱を出したり、除湿器で系外に水蒸気を出したり、加湿器で系内に水蒸気を入れたりすることである。空気調和によってほぼ完全な温度・湿度の制御ができるようになったのは、冷凍機によって系外に熱や水蒸気を出すことのできる技術が 20 世紀初頭に発明されてからである。空気調和によって人工的に気象条件をつくることのできる植物育成施設はファイトトロン（人工気象器）と呼ばれ、それを用いることでさまざまな植物の環境応答に関する知見が得られるようになった。現在でも、太陽光を利用したものから人工光を利用したものまで様々なタイプのファイトトロンが存在するが、それらの環境制御では居住空間と比べていくつか気をつけなければならない点がある。それは、植物は光を必要とするので、それにとともに大量の熱が系内に入ってくることで、植物は常に大量の水を必要とするので、それにとともに大量の水蒸気が系内に入ってくることである。ファイトトロン内の温度・湿度を適正に保つためには、この系内に入ってきた熱および水蒸気を取り除く必要があるため、一般的な居住空間に比べて多大なエネルギーを必要とする。

居住空間、植物生育環境の制御では、気をつける点は異なるものの、それに必要な基本的な考え方は同じである。本実習では、湿り空気線図を用いて、閉鎖系での温度、湿度の制御、それに必要なエネルギーについて考えていきたい。

### 3. 温湿度環境を把握する

空気には、常温で1~3%程度の質量の水蒸気が含まれている。水蒸気を含んだ空気を湿り空気、水蒸気を含まない空気を乾き空気という。湿度は、空気中に含まれる水蒸気量の程度であり、その表し方はいくつかある。施設園芸でよく取り扱われる湿度の表記方法、定義およびその計算式を表1に示す。用語が専門分野によって異なる項目もあるが、ここでは主に、空気調和工学で用いられる用語を用いて説明する。

表1 湿度の表し方と計算式

用語	単位	定義および計算式
飽和水蒸気分圧 ( $e_s$ )	kPa	ある温度の空気が最大限水蒸気を含んだときの水蒸気分圧。 いくつかある近似式のうち、以下の Murray の式が比較的簡易で、常温の範囲で精度がよいためによく用いられる。 $e_s = 0.6 \cdot 1078 \cdot \exp\{17.269 \cdot t / (t + 237.3)\}$ <sup>注1</sup> $t$ は温度 (°C) である。
水蒸気分圧 ( $e$ )	kPa	大気圧のうち水蒸気が占める分圧。 乾球温度 ( $t$ ) および湿球温度 ( $t_w$ ) から求めることができる。 $e = e_{ws} - 0.000662 \cdot P (t - t_w)$ $e_{ws}$ は湿球での飽和水蒸気分圧 (kPa)、 $P$ は大気圧 (kPa) である。
飽差 ( $e_d$ )	kPa	湿り空気の飽差水蒸気分圧と水蒸気分圧との差。 $e_d = e_s - e$
絶対湿度 ( $x$ )	kg kg <sup>-1</sup>	乾き空気 1 kg あたりを基準としたときの、湿り空気に含まれる水蒸気の質量。 $x = 0.622 \cdot e / (P - e)$ <sup>注1</sup>
水蒸気密度 ( $y$ )	g/m <sup>3</sup>	湿り空気 1 m <sup>3</sup> あたりに含まれる水蒸気の質量。 $y = 804 \cdot e / \{P (1 + 0.00366 t)\}$
相対湿度 (RH)	%	湿り空気の飽和水蒸気分圧に対する水蒸気分圧の百分率。 $RH = e_s / e_{ws}$
露点温度 ( $t_{dp}$ )	°C	湿り空気の温度を低下させたときに凝結が始まる温度。 $t_{dp} = -237.3 \cdot \ln(e/6.1078) / \{\ln(e/6.1078) - 17.2693882\}$ <sup>注2</sup>
比容積 ( $v$ )	m <sup>3</sup> /kg <sup>-1</sup>	乾き空気 1 kg あたりを基準としたときの、湿り空気の容積。 $v = 0.004555 (x + 0.622) t$
比エンタルピ ( $h$ )	kJ/kg <sup>-1</sup>	0°Cの乾き空気を基準としたときの、湿り空気を持つ相対的な熱量。 $h = c_{pa} \cdot t + x (r_0 + c_{pv})$ $c_{pa}$ は乾き空気の定圧比熱 = 1.006 kJ kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> 、 $r_0$ は0°Cにおける水の蒸発潜熱 = 2501 kJ kg <sup>-1</sup> 、 $c_{pv}$ は水蒸気の定圧比熱 = 1.805 kJ kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> <sup>注3</sup> 。

<sup>注1</sup>氷上の場合には式中の定数が異なる。<sup>注2</sup>kg'は乾き空気の質量を表す。<sup>注3</sup> $c_{pv}$ は空気調和・衛生工学会便覧の値を用いた。

## 4. 湿り空気線図を描く

### 気温、飽和水蒸気圧、相対湿度の関係

はじめに図1のように気温と飽和水蒸気圧との関係をグラフ化する。これは空気の温度が上昇すると、それにもなって空気の含むことができる水蒸気量が指数関数的に増大することを示している。この飽和曲線が湿り空気線図のベースとなる。温度と飽和水蒸気圧との関係は下式のとおりである。

$$e_s = 6.1078 \cdot \exp\left(\frac{17.27 \cdot T}{T + 237.3}\right)$$

$T$ : 温度 (°C),  $e_s$ : 飽和水蒸気圧 (hPa)

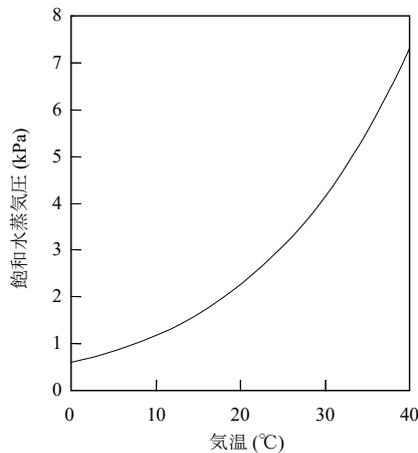


図1 気温と飽和水蒸気分圧の関係

次にこの飽和曲線に相対湿度の曲線を入れる。図2のように飽和曲線を100%として、等間隔で区切っていく。このようにすると、ある気温での飽和水蒸気圧に対して、何パーセント水蒸気を含んでいると(すなわちある気温で相対湿度が何パーセント)、水蒸気分圧が何kPaなのかを示すことができる。これは気温、相対湿度および水蒸気分圧の関係を1つのグラフに示したものであり、これら3項目のうち2項目が分かれば、残りの1項目を求めることができる。例えば、このグラフを使えば、気温30°Cで相対湿度50%のときの水蒸気分圧が約2kPaであることを求めることができる。逆に水蒸気分圧と気温が分かれば、相対湿度を求めることもできる。縦軸を絶対湿度にすると図3のようになる。相対湿度および絶対湿度の算定式は下式のとおりである。

$$RH = \frac{e}{e_s} \times 100 \quad x = \frac{0.622 \cdot e}{(P - e)}$$

$T$ : 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),  $x$ : 絶対湿度 ( $\text{kg kg}^{-1}$ )

これで湿り空気線図の骨格は完成である。グラフ上の湿り空気の状態を示す点(状態点と呼ばれる)

を求めるができれば、湿り空気に関するさまざまな項目を算定することができる。

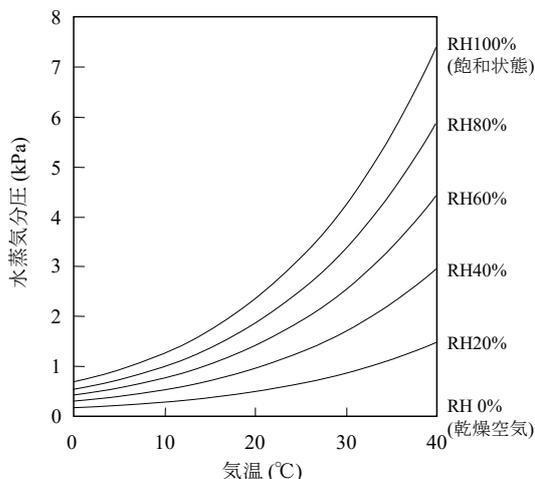


図2 気温、水蒸気分圧、相対湿度の関係

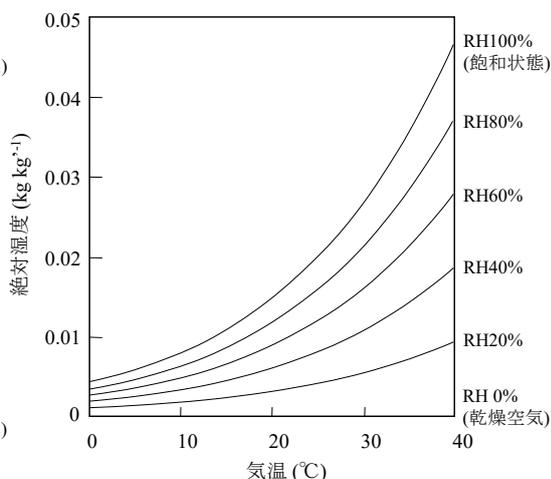


図3 気温、相対湿度、絶対湿度の関係

### 比エンタルピを求める

気温と絶対湿度から、0°Cの乾き空気を基準としたその空気が持つ熱量（比エンタルピ）を算定する。気温に空気の比熱（約  $1006 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ）をかけることによって、横軸を乾き空気の比エンタルピに変換する（図4）。また、絶対湿度（ $\text{kg kg}^{-1}$ ）に水の蒸発潜熱（ $2.501 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ ）をかけることによって、縦軸を水蒸気の比エンタルピ（ $\text{J kg}^{-1}$ ）に変換する（図5）。厳密には水蒸気の比熱も考慮する必要があるが、ここでは無視して考える。これら乾き空気の比エンタルピ（x軸）と水蒸気の比エンタルピ（y軸）の和が等しくなる等値線を引く。このグラフでは右下がりの直線になる。グラフの左上にその和の目盛り線を付ける。そうすると、湿り空気線図上の任意の点からその空気の持つ乾き空気の比エンタルピと水蒸気の比エンタルピの和、すなわち湿り空気の比エンタルピを求めることができる。この比エンタルピを求めることで、ある状態の空気を別の状態にするのにどれくらいのエネルギーを加えればよいのか、または除かなければならないのかを簡単に求めることができる。

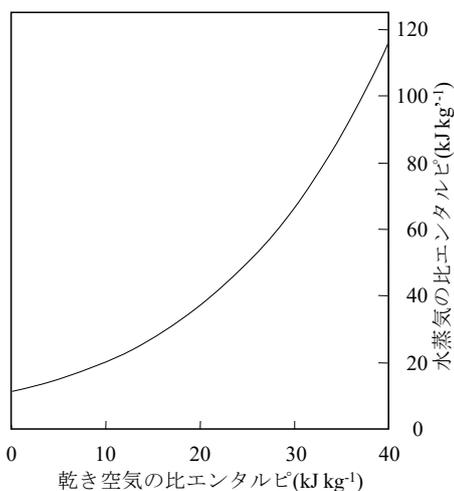


図4 気温、絶対湿度をそれぞれ乾き空気、水蒸気の

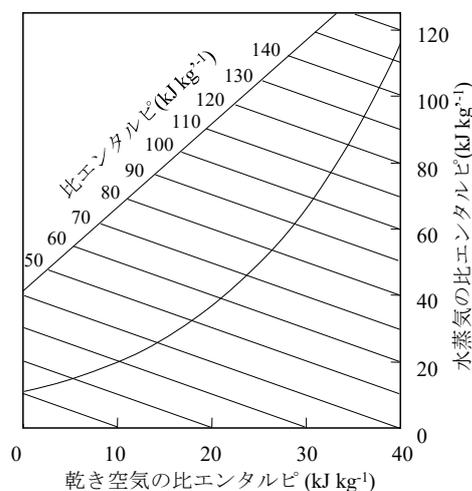


図5 各エンタルピの和の目盛り線をつくる

比エンタルピに換算する

### 乾球温度、湿球温度

次に乾球温度と湿球温度を記入する。湿球温度とは、温度計の感部をガーゼ等で湿らせたときの温度である。湿球表面では水の蒸発によって潜熱交換が起こり、その結果温度が周辺気温よりも低くなる。そのときの熱交換の模式図を図6に示す。湿球表面では水蒸気持つエンタルピが放出され、それと同じだけの顕熱が流入する。顕熱が周辺空気から湿球の方向に輸送されていることは、顕熱がより温度の低い湿球へ向かって輸送されていることを意味する。湿球周辺の気流速度を  $5\text{m s}^{-1}$  以上にしたときの湿球温度は断熱飽和温度に等しいとされる。断熱飽和温度とは図7のように断熱した空間で水を噴霧し、蒸発させて飽和状態にしたときの温度のことで、これはすなわち空気中の顕熱を可能な限り水蒸気のエンタルピに交換することで最大限下げることのできる温度である。ある状態の空気を断熱飽和温度にすることは、比エンタルピを変えずに空気を水蒸気で飽和状態にすることであり、湿り空気線図上では比エンタルピの等値線に沿って飽和線に向かっていくことになる。

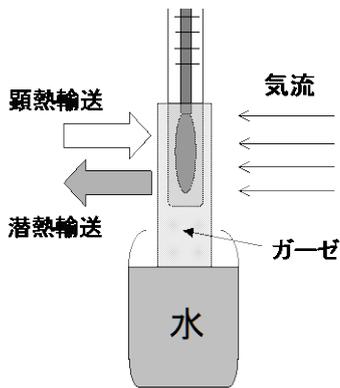


図6 湿球における熱交換の模式図

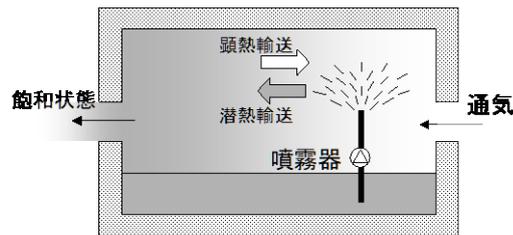


図7 断熱状態で水蒸気を噴霧して飽和させたときの熱交換

すなわち、ある状態の空気から比エンタルピの等値線と平行に直線を引き、飽和曲線にぶつかったときの乾球温度の値が湿球温度である。湿球温度の目盛りを飽和曲線上に付けると図8のようになる。これによって、アスマン通風乾湿計などで測定した乾球温度と湿球温度から、湿り空気の状態点を求めることができ、その状態点から湿り空気に関するさまざまな項目を求めることができる(図9)。

なお、実用場面で用いられている湿り空気線図ではエンタルピと湿球温度の等値線が完全に平行になっていない。これは水が蒸発するときに、その水自体が持っている顕熱が空気中に放出されるためである。すなわち図8の断熱容器内では、顕熱と水蒸気のエンタルピが入れかわっているだけで、入り口と出口での空気の熱量は変わらないように見えるが、実際には噴霧された水が持っていた顕熱分だけ多く熱量を持って出て行くのである。よって正確な湿り空気線図では、湿球温度の等値線は比エンタルピ線よりもやや傾きが大きくなる(この図ではより右下への傾く)。

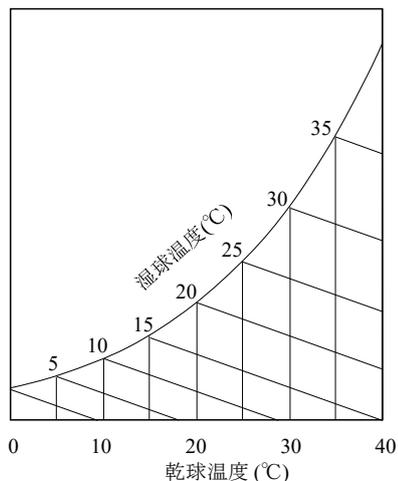


図8 比エンタルピと並行に湿球温度線を引く

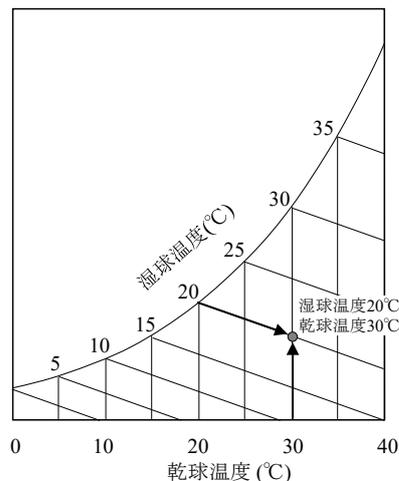


図9 乾球温度と湿球温度から状態点を求める

### 湿り空気線図の完成

以上の項目をすべて示した湿り空気線図を図10に示す。この図を用いれば乾球温度、湿球温度、水蒸気分圧、絶対湿度、相対湿度、露点温度のうちの2項目が分かっていたら、湿り空気の状態点を求めることができ、残りのすべての項目を簡単に求めることができる。実用現場で用いる湿り空気線図にはこれ以外にも比容積(乾き空気の単位質量あたりの容積)、顕熱比などが加わる。湿り空気線図は大気圧によって異なるので注意が必要である。これは大気圧によって気温と飽和水蒸気圧との関係や空気の比熱などが異なるためである。このテキストでは、大気圧を1013 hPaとして作成した。

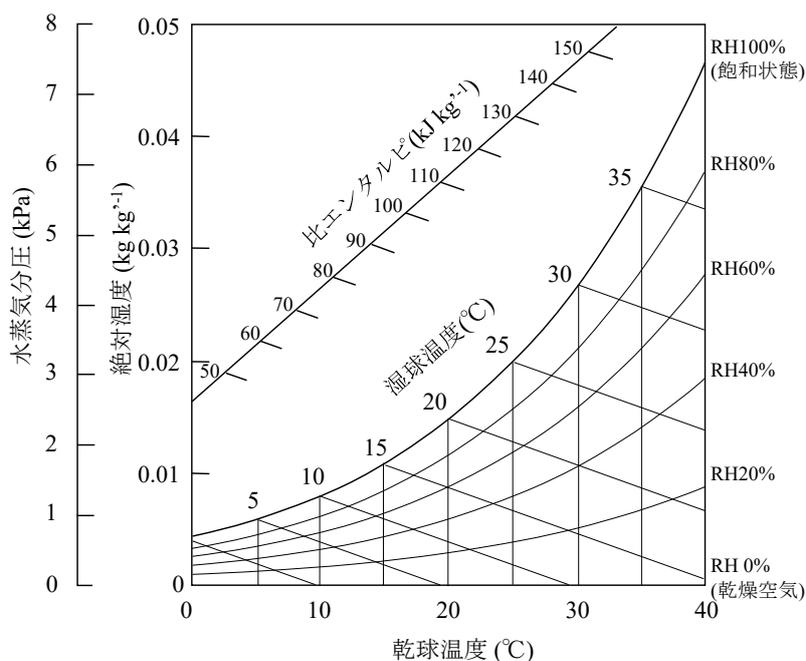


図10 湿り空気線図

## 湿り空気線図での方向の意味

湿り空気線図を用いる利点は、湿り空気の各項目を簡単に求めることだけでなく、その空気の状態が変化しているとき、その湿り空気の状態がどのような方向に向かっているのかを視覚的に捉えることができることにある（図 11）。例えば、気温 20℃・相対湿度 60%から、気温 30℃・相対湿度 70%に変化したとき（図 12）、湿り空気線図上の状態点は図 13 の A から B の方向に向かう。これは加温して、さらに加湿している方向である。このとき、比エンタルピーの目盛りに注目すると、エンタルピーが約 36 kJ kg<sup>-1</sup> 増えていることが分かる（図 12 の c）。つまりこれは状態点が変わるときに、空気 1kg あたりの熱量が 35 kJ 増えたことを意味する。この熱量は、乾き空気のエンタルピーと水蒸気のエンタルピーを合わせたものである。このうち乾き空気のエンタルピーの増加分が占める部分は、気温が上昇したことによるエンタルピーの増加分、すなわち状態点を水平方向に動かしたときのエンタルピーの増加分（図 12 の a）であり、これは約 12 kJ kg<sup>-1</sup> である。また、水蒸気のエンタルピーの増加分が占める部分は、絶対湿度が増加したことによるエンタルピーの増加分、すなわち状態点を垂直方向に動かしたときのエンタルピーの増加分であり（図 12 の b）、これは約 24 kJ kg<sup>-1</sup> である。このように湿り空気線図上の状態点が動く方向をみることによって、その湿り空気のエネルギーがどのように変化しているかがわかり、逆に、その湿り空気を任意の状態にしようとしたときに、どのように空気の持つ熱量を制御すればよいかのわかるのである。

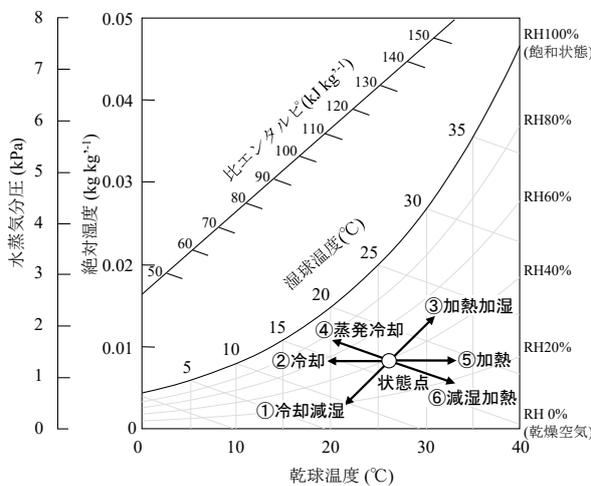


図 11 加温、冷却、加湿、除湿を行ったときの湿り空気線図上の向き

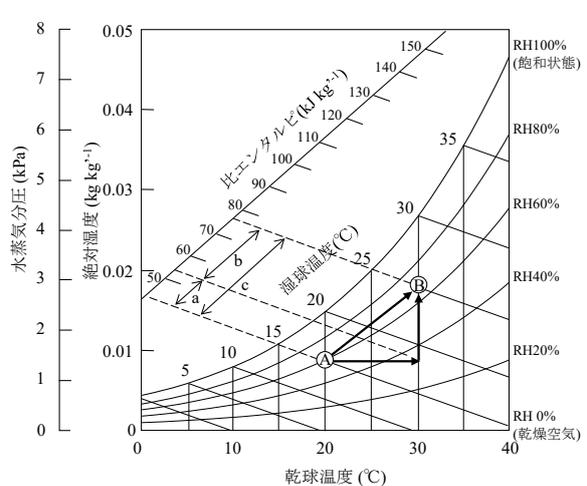


図 12 湿り空気線図を用いてエネルギーの変化量を求める

## 飽差を求める

水蒸気の輸送は水蒸気分圧の高い方から低い方へ行われ、その速度は水蒸気分圧の差に比例する。蒸発面が水で飽和していると仮定すると、蒸発速度は水蒸気分圧と水温における飽和水蒸気分圧との差に比例する。ある湿り空気の飽和水蒸気圧とその空気の水蒸気分圧との差を飽差という。気温と水

温がほぼ等しいと仮定すれば、水の蒸発速度は飽差に比例する。蒸発散に関することで湿度を扱うときには、この飽差で考えることが極めて重要である。先ほどの状態点 A と B において、飽差を比較すると、状態点 A の飽差は約 0.9 kPa、状態点 B の飽差は約 1.3 kPa である (図 13)。すなわち相対湿度 70% の状態点 B の方が、相対湿度 60% の状態点 A よりも約 1.4 倍蒸発しやすいことになる。湿り空気線図をみてわかるとおり、同じ相対湿度でも飽差は気温によって大きく異なる。したがって、気温を無視して相対湿度のみで比較することはまったく意味がない。

### 露点温度を求める

水蒸気分圧を変化させずに湿り空気の温度を下げていくと、ある温度で水の凝結がはじまる。これはその空気の飽和水蒸気分圧が水蒸気分圧よりも低下すると、空気中に含むことのできなくなった水蒸気が水として出てくるためである。この凝結のはじまる温度を露点温度という。例えば、乾球温度 30℃、湿球温度 15℃の空気を冷却していく、すなわち湿り空気線図上で左水平方向に状態点を移動させると、約 15℃で飽和曲線にぶつかる (図 14)。このときの乾球温度が露点温度である。この空気をさらに冷却すると、状態点は飽和曲線をなぞって左下へ移動する。このときの絶対湿度の低下は凝結によって水が出たことによる。5℃まで低下させたとき、絶対湿度は約 0.005 kg kg<sup>-1</sup> 低下する。これは凝結によって空気中 1 kg 中から水 5g が出てきたことを示す。

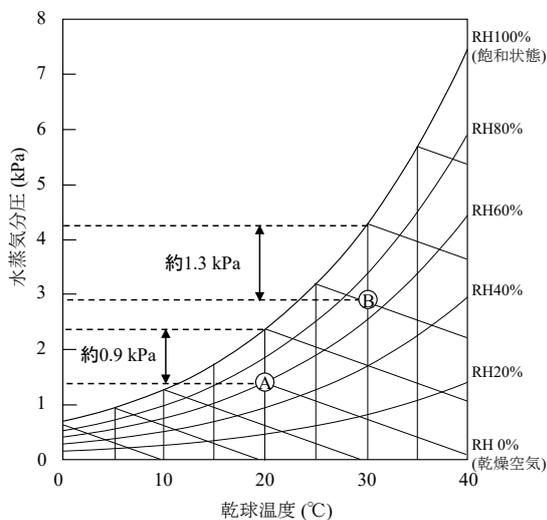


図 13 飽差の求め方

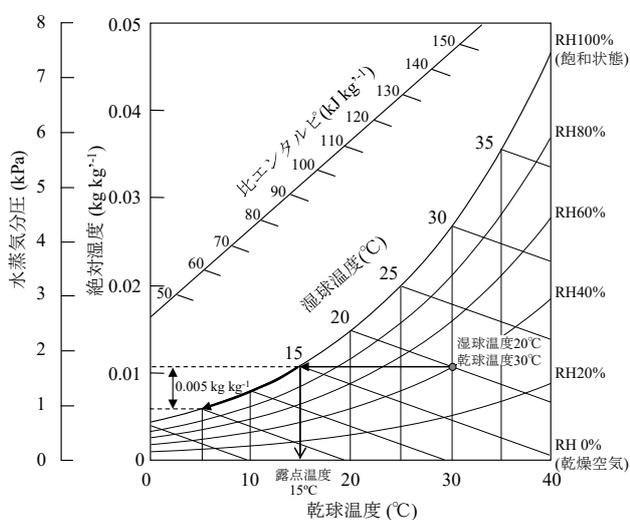


図 14 露点温度の求め方

## 5. 実習内容

熱源と植物が入った通気システムをつくり，その熱環境を湿り空気線図を用いて計測・解析する．

### 計測装置

発泡スチロール製の箱とファンを用いて，図 19 のよう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．

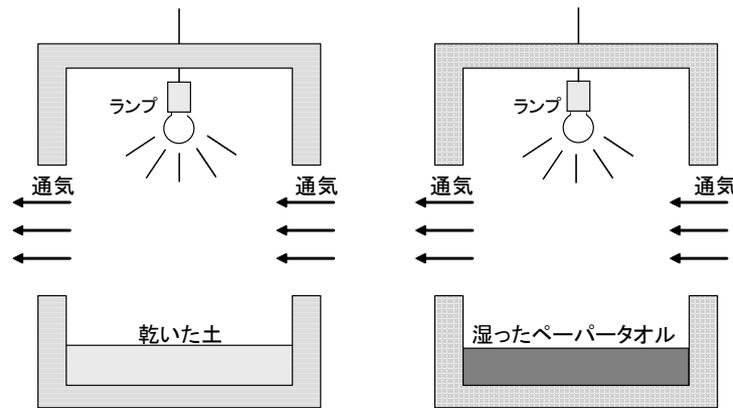


図 19 通気システムの概略図

### 作業手順

- ・ 乾いた土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待つ．
- ・ 通気システムの流入，流出口の気温および相対湿度を記録する．
- ・ 湿ったペーパータオル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

測定結果から湿り空気線図を用いて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ペーパータオルからの蒸発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 ( $\text{J s}^{-1}$ )
- ・ ペーパータオルからの蒸発に使われた熱量 ( $\text{J s}^{-1}$ )

## 7. レポート

目的, 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.

### 湿り空気線図の作図

「4. 湿り空気線図を描く」にもとづいて, 湿り空気線図をグラフ用紙に作図せよ. 乾球温度の範囲は $-5^{\circ}\text{C}$ ~ $50^{\circ}\text{C}$ とする. 乾球温度, 湿球温度は $1^{\circ}\text{C}$ 間隔, 水蒸気分圧は $0.5\text{ kPa}$ 間隔, 絶対湿度は $0.002\text{ kg kg}^{-1}$ 間隔, 比エンタルピは $5\text{ kJ kg}^{-1}$ 間隔, 相対湿度は $10\%$ 間隔とする. 見やすくできれば, さらに細かく目盛りをつけてもよい. エンタルピと湿球温度の等値線は便宜上並行として構わない. また, 温度による空気密度の変化は便宜上無視する. 各項目を正しく求めることができるなら線図のスタイルは問わない.

### 湿り空気の状態点の経時変化

作成した湿り空気線図に, 実験での通気システム内外における湿り空気の状態点をプロットせよ. 乾いた土と湿ったペーパータオルとでの状態点の違いを具体的に述べ, なぜそのようになったのかを説明せよ.

### 熱輸送の算定結果について

通気システムにおける熱輸送を模式図で示せ. 熱の輸送を矢印で表現し, 矢印の太さを熱量の大きさと対応させること. 乾いた土と湿ったペーパータオルとでの熱輸送の違いを具体的に述べ, なぜそのようになったのかを説明せよ. また, 投入熱量は植物を入れたときと入れないときで同じにもかかわらず, 植物を入れた方がエンタルピの増加が大きいことがある. その理由を説明せよ.

### レポートの書式

A4用紙2枚以内(湿り空気線図は別とする). 1頁あたりの文字数: 45字×45行程度. 図表は全体の半分以下に抑えること. 表紙は必要ない. 作成した湿り空気線図を添付すること.

## 8. 参考図書

- ・ 「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, 2,800円
- ・ 「100万人の空気調和」, 小原淳平編, オーム社, 1975年, 3,800円
- ・ 「続100万人の空気調和」, 小原淳平編, オーム社, 1976年, 3,800円
- ・ 「空気調和ハンドブック」, 井上宇市編, 丸善, 1996年, 4,200円
- ・ 「建築環境学2」, 木村建一編著, 丸善, 1993年, 4,500円
- ・ 「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, 3,600円
- ・ 「室内の環境を測る」, 村松學編, オーム社, 2005年, 3,000円
- ・ 「建築環境設備学新訂版」, 紀谷文樹編, 彰国社, 2003年, 3,400円
- ・ 「暖房と冷房」, 空気調和・衛生工学会編, オーム社, 1999年, 2,800円
- ・ 「屋上・壁面緑化技術のてびき」, 都市緑化技術開発機構, 大蔵省印刷局, 2000年, 1,500円
- ・ 「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, 4,300円
- ・ 「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, 13,000円
- ・ 「農業環境実験法」, 渡部一郎編, サイエンスハウス, 1987年, 3,600円
- ・ 「湿度計測・センサのマニュアル」, 湿度計測・センサ研究会編著, 学献社, 1989年, 3,600円
- ・ 「農学・生態学のための気象環境学」, 文字信貴ら編, 丸善, 1997年, 3,570円
- ・ 「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, 2,000円