

講座

蒸 発 散 (その1)

—地球上における水の役割と蒸発散—

三 野 徹* 丸 山 利 輔**

講座「蒸発散」を始めるに当って

蒸発散は、地球上における水循環の駆動力であり、太陽エネルギーを動力源としたポンプの役割を担っている。蒸発散は、地球上の水循環に対してこのように重要な役割を果たしているにもかかわらず、研究対象として実用的にはともかく、科学的に農業土木の分野では大きな関心が払われてきたとはいえない。

しかし、蒸発散現象は科学的には水の相変化を通じて、多大の熱エネルギーを吸収、または放出する現象であり、大気、植物、土壌を通じての水の相変化を伴う流れであり、それを通じて植物生長のための養分のキャリアーでもある。また、水の循環を通じて、地球環境の形成に主体的な役割を担っている現象でもある。さらに、灌漑計画における用水量問題や、水資源計画における損失雨量にも直接結びつく工学的課題でもある。したがって、汲めども尽きぬ知的内容を持ち、実際的にも重要な研究対象である。

本講座では、このような考え方に立ち、蒸発散現象を太陽エネルギーの配分過程ととらえ、蒸発散が地球の環境形成にどのような役割を果たしているかを概説した後、蒸発散の機構、蒸発散と植物ストレス、測定などの基礎的な知識を解説し、次に、林地、耕地、および地目の混在した広い地域にわたる蒸発散現象とその推定法に触れ、最後に灌漑計画と水資源計画に対する蒸発散問題に論及する予定である。

以下、その標題と執筆予定者を列記すると以下のとおりである。

標 題

執筆者

- | | | | |
|--------------------|-----------|-----------------|----------------|
| 1. 地球上における水の役割と蒸発散 | 三野 徹・丸山利輔 | 5. 林地の蒸発散 | 福畠義宏 |
| 2. 蒸発散の機構 | 三浦健志 | 6. 耕地の蒸発散 | 高瀬恵次・佐藤晃一 |
| 3. 蒸散と植物体のストレス | 及川武久 | 7. 広域の蒸発散 | 大槻恭一・三浦健志・高瀬恵次 |
| 4. 蒸発散量の測定法 | 矢野友久 | 8. 蒸発散量の推定法 | 大槻恭一 |
| | | 9. 灌漑・水資源計画と蒸発散 | 丸山利輔・三野 徹 |

I. はじめに

水は地球上の環境形成に重要な役割を果たしているとともに、地球上の生物の生命活動を維持してゆく上で、最も基本的な物質であることは改めて強調するまでもない。しかしながら、水が果たしている役割や環境形成の

機能、生命現象に係わる仕組みなどは、必ずしも十分に解明されているとはいえない。とはいえ、最近の科学の進歩には著しいものがあり、かなりの程度まで解明が進みつつある。

以下では、地球上で水が果たしている役割を、太陽エネルギーの配分と水の循環という視点から検討を加えるものである。とりわけ、水の循環を駆動しているメカニズムのもっとも重要な部分である蒸発散を中心に、水という物質の持つ特異な性質の関わりとその仕組みをみてゆきたい。そして農業土木、とりわけ灌漑排水が、このよ

* 岡山大学農学部 (みつの とおる)

** 京都大学農学部 (まるやま としすけ)

キーワード

蒸発, 蒸散, 水蒸気圧, 化学ポテンシャル, 潜熱エネルギー, 放射エネルギー, 水循環, エントロピー, 水収支

うな水循環の制御を通じて、地球上の環境や生命活動の場の改良に大きく係わっていることを述べてみたい。

もとより、広範囲でしかも現代科学の最先端の研究内容も含まれており、筆者の力では理解の及ばない部分もかなり多い。本講座はそのような現代科学の成果を忠実に紹介しようとするものではなく、農業土木と現代科学の係わり的一端を述べようとしていることをご理解いただき、紙面の都合による説明不足などについてはお許しを願いたい。

II. 水の分子構造と蒸発現象

1. 水分子の構造とその特異な物性

水は、地球上に存在する物質の中でも特異な性質を持っていることはよく知られている。たとえば、周期律表で酸素と同列にある各元素の水素化合物について、沸点と融点を整理すると表-1 のようになり、他の分子に比較して水分子は異常ともいえるくらい高い沸点と融点を持つ。また、これに対応して、相の変化には他の分子に比較してきわめて大きな蒸発潜熱や融解熱が必要である。さらに、物質をよく溶解するとともに、イオンともきわめてよく水和する、あるいは誘電定数が非常に大きいことなど、水分子は特異な性質を持っている。これらの特性が地球上の環境を形成したり、生命を維持するための代謝活動を行う上で、重要な役割を果たしている。しかも、何にもまして、地球上にきわめて多量に存在することが重要な特徴といえよう。

これらの特性は、主として水分子の持つ2つの特徴から派生することが明らかにされてきている。すなわち、水分子は水素原子2つと酸素原子1つから構成されているが、酸素原子の電気陰性度が高いことによって、電子の軌道が酸素原子側へずれ込み、また分子自身も非対称の構造となる。水素原子と酸素原子の中心を結ぶ角度は、図-1 に示すように約 104.5° となり、水分子全体では電氣的に中性であるにもかかわらず、正電荷と負電荷の重

表-1 酸素と同周期にある水素化合物の
融点と沸点の比較

水素化合物	分子量	融点 $^\circ\text{C}$	沸点 $^\circ\text{C}$
H_2Te	129.6	-51	-4
H_2Se	81.0	-64	-42
H_2S	34.1	-82	-62
H_2O	18.0	0	100

表-2 各種溶媒の誘電定数 (20°C)

溶媒	分子量	誘電定数
水	80	アセトン 21.4
メタノール	33	ベンゼン 2.3
エタノール	24	ヘキサン 1.9

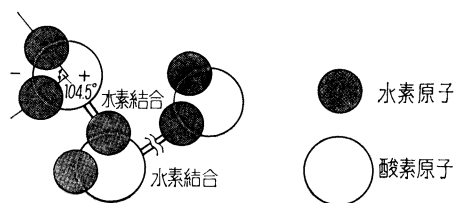


図-1 水の分子構造の模式図

心がずれる。その結果、双極子モーメントが発生し、表-2 に示すように他の溶媒に比較してもずばぬけて高い誘電定数を持つことになる*。イオン結合をしている分子について、イオンを引き離そうとすると、きわめて大きなエネルギーが必要であるのに対して、水中ではいとも簡単に引き離すことができること、すなわち、物がよく溶けるという性質はこのことから生じる。

さらにこのような分子構造から水分子を構成している水素原子と別の水分子の酸素原子との間に、図-1 に示すような水素結合と呼ばれる特別の結合力が発生する。この結合エネルギーは約 $6\sim7\text{ kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$ 程度であって、通常にみられる数 10 kcal/mol 以上の化学結合よりは小さいが、ファン・デル・ワールス (van der Waals) 力などの物理結合に比較するとかなり大きい値である**。このことが、水分子が他の物質に比してあいまいな振舞いをする原因となっている。

たとえば、固体の水分子である氷は、互いに隣接した分子同士が水素結合で結晶を作っている。したがって、氷を融解するためにはその結合をときほぐさねばならず、物理結合によって結晶を作っている物質に比べて大きなエネルギーを必要とし、融点もきわめて高くなる。しかし、融解熱を測定してみると、水素結合をすべてほぐすために必要なエネルギーよりも小さい。そのために液状の水にはかなり水素結合が残っており、図-2 に示すよう

* 双極子モーメントと誘電定数：真空中に置かれた2つの荷電粒子は、互いに異符号の電荷の間では静電的な引力を、同符号では反発力を及ぼす。この力は、クーロンの法則によって各々の荷電量の積に比例し、距離に反比例する。全体では電氣的に中性であるが、正と負の重心がずれた双極子モーメントを持つ物質が充填された中に荷電粒子が置かれた場合には、双極子の中の異符号の電荷部分には吸引力が、同符号に対しては反発力が働くために、双極子は荷電粒子の方向を向いて並ぶ(配向する)。この配向によって荷電粒子の電荷の一部は中和され、荷電粒子間に働く静電力は見かけ上で小さくなる。また、双極子の配向の形で電気エネルギーが充填物質の中に蓄積されることになる。双極子の配向の程度は誘電定数で表される。双極子モーメントは物質の分子や原子の構造によって決まる特定の値をとる。

水分子は電子軌道理論からも顕著な双極子モーメントが発生する物質として知られている。そのために上述したような機構で、水の中では荷電粒子間に働く静電力は弱められる。静電力によって結合しているイオン結合物質は、水中では結合力が弱められて容易に解離する。水が物質を良く溶解するのはこのような性質によるためである。

** ファン・デル・ワールス力：比較的に弱い力であるが、粒子間に普遍的に働く量子力学的な力である。酸素や窒素、水素やアルゴンなどの気体が低温で固体となるのは、分子や原子がこの力によって互いに結び付けられるためである。この力は距離の6乗に反比例するために、クーロン力に比べると粒子の比較的近傍で消失する。ミクロな分子レベルの世界で分子や原子を結合する力として重要な役割を果たす。

な水素結合で結ばれた高分子状態と単分子状態の水分子が混在していると考えられている。このモデルによって、液状の水の比熱が大きいこと、4°C で密度が最大になることなどの水分子の異常性の説明がつけられる。つまり、残っている水素結合をほぐすために、温度上昇とともに熱エネルギーを吸収して比熱が大きくなり、またその結果、単分子状態の水分子が増加して、4°C で最密充填状態となるというのである。

気化する際の蒸発潜熱が大きく、しかも沸点が高いのも、また、この水素結合に由来する。このような理由によって、水分子は地球上の常温・常圧の付近で3つの相に容易に変化することになり、これが後述するように地球上での太陽エネルギー配分に重要な役割を演じることになる。とくに、表-3に示すように、大きな蒸発潜熱と融解潜熱を必要とするために、相変化に伴いきわめて大きいエントロピー変化が生じることになる。

2. 相変化と化学ポテンシャル

水は相変化とともに大きなエネルギーを吸収したり、あるいは吐き出す。さらに、いろいろな物質と結合したり、あるいは水自身が液体や気体となって流動、拡散する。高いところにある水が低いところへ向かって流れるのと同じように、自然界ではポテンシャルエネルギーが高い状態から低い状態へ移ろうとする。その傾向の強さはポテンシャルエネルギーの比較によって定量化して取扱える。上述したように、水が高い位置から低い位置へ向かって流れるのは、大気圧の下で、重力ポテンシャルの高い方から低い方へ向かう現象といえる。一方、管路では圧力ポテンシャルを封じ込めるので、圧力ポテンシャルと重力ポテンシャルの合計した水理ポテンシャルの高い方から低い方へ向かって水が移動する。同様に物質と結合したり、あるいは相が変化したりする現象もやはり

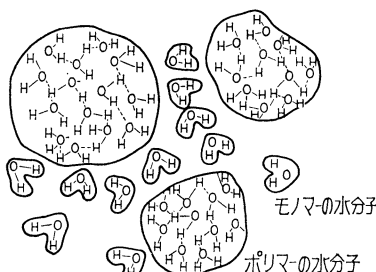


図-2 液状水の構造模式

表-3 水のエンタルピー (cal・K⁻¹・mol⁻¹)

状 態		固 体	液 体	気 体
温 度 (K)	0	250	273	273
比エンタルピー	0	9.0	15.1	45.1

ポテンシャルの高い方から低い方へ向かう水の移動現象とみなすことができる。すなわち、水分子は化学ポテンシャルという形のポテンシャルエネルギーを持っており、相変化や化学反応はその値が高い方から低い方へ向かう水分子の移動現象と考えられるのである。

以上からわかるように、化学ポテンシャルと重力ポテンシャルの合計値を全ポテンシャルと考えれば、液状の水の移動のみならず、溶解物質を含む水、土壤に吸着された水、植物細胞の中の水、さらに大気中の水蒸気など、相の変化を伴ったり、相の異なった水の移動など、いずれも一つの連続した水の流れとして扱うことができる。これらは統一した化学ポテンシャルという尺度を用いることによって、取扱いが可能となる。

3. 飽和水蒸気圧～温度曲線^{*)}

密閉した容器の中で液状水を蒸発させる際に、これ以上蒸発しなくなった時点の水蒸気圧が飽和水蒸気圧である。上述の化学ポテンシャルの見方からすれば、気体状態の水分子の化学ポテンシャルと液状水の化学ポテンシャルが等しくなった点とみることができる。この点は気～液共存点と呼ばれ、熱力学の基礎式の一つである有名なクラウジウス・クラペイロン(Clausius-Clapeyron)の式を適用すれば、次のような近似式が導ける*。この近似は水蒸気の比体積が液状の水の比体積に比較して無視できるとしているが、これは十分な精度でもって成立する。

$$\Delta = dp_0/dT = L/(R \cdot T^2) = \Delta S/(R \cdot T) \dots\dots\dots (1)$$

あるいは上式を積分し、積分定数をCとすると、

$$\log_e(p_0) = C - (L/R) \cdot T \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 Δ は飽和水蒸気圧温度曲線の勾配で、温度変化(dT)に対する飽和水蒸気圧の変化量(dp_0)を表す。 p_0 は飽和水蒸気圧、 T は絶対温度、 R は気体定数、 L は蒸発潜熱、 ΔS は液体と気体の水のエンタルピー差である。図-3にこの式から計算される飽和水蒸気圧と温度の関係を示す。水蒸気圧の温度に対する変化量は、水蒸気を含め理想気体では約0.4%程度(1/273)であるのに対して、液状水

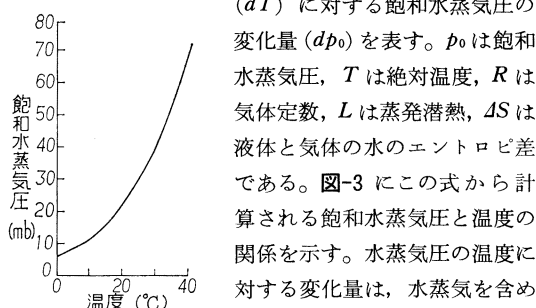


図-3 飽和水蒸気圧～温度曲線

* クラウジウス・クラペイロンの式：与えられた温度と圧力の下で気体と液体の水分子が共存している場合に、両相の化学ポテンシャルは等しくなければならない。この平衡系の温度が変化した場合に、相平衡を保つためには、新しい平衡状態でも両相の化学ポテンシャルは等しいことが必要である。そのためには温度変化に対応した圧力変化が生じなければならない。液体の水と気体の水(水蒸気)の比体積、比エンタルピーの差を考慮した上で、新たな平衡状態で両相の化学ポテンシャルが等しくなるという条件から導かれた式がクラウジウス・クラペイロンの式である。液体の水と平衡状態にある水蒸気の圧力(飽和水蒸気圧)と温度の関係を与える。

との共存状態では 1°C につき約6.5%と、きわめて大きくなる。

蒸発面に熱エネルギーが与えられるとき、蒸発に配分される熱エネルギーと、空気を暖めるのに使われるエネルギーの配分比率はこの値によって大きく影響される。水は蒸発潜熱が大きいために、この式 dp_0/dT の右辺の分子が分母に比較して著しく大きい。その結果、温度の上昇に伴い水蒸気圧が大きく上昇して、エネルギーの大半は蒸発潜熱へ配分されることになる。水が熱エネルギーの吸収体として、地表面近傍の環境形成に対してきわめて重要な役割を果たすのは、この関係が発起点である。つまり、水の持つ潜熱エネルギーが大きく、蒸発過程においてエントロピーが大きく変化するという、水の持つ特異な性質によるといえる。

4. pF と水蒸気圧²⁾

pF は、化学ポテンシャルを表す実用尺度であり、土壌物理学では土壌中の水のエネルギー状態の評価指標としてよく利用されている。定義によれば、pF が大きいことは、対象としている水の化学ポテンシャルが標準状態（1気圧、 15°C の純水）の水のそれより小さいことを表す。この pF の導入によって、地表水、土壌水、植物体内の水、大気中の水蒸気を含む一つの連続系として、水の移動を把握することができる。この考え方は SPAC* と呼ばれるモデルへと発展した。

理論によれば、pF は、温度が一定の水蒸気圧について、次のように相対水蒸気圧 p/p_0 の関数として表される。

$$\begin{aligned} pF &= \log \{ 2.3 \cdot R \cdot T / (M \cdot g) \cdot \log (p/p_0) \} \\ &= 6.5 + \log \{ \log (p_0/p) \} \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここで、 M は水の分子量、 g は重力加速度、他は(1)式と同じである。この式に基づいて計算した相対水蒸気圧と pF との関係を図-4 に示す。

わが国の気候条件下では、相対水蒸気圧は平均すると約80%程度であるから、大気中の水の pF は約5.5である。それに対して土壌中の水分は、重力水を除いて pF 1.8程度、植物が吸収できなくなるぐらい乾燥して、pF 4.2程度といわれている。したがって、植物体あるいは土壌表面を通して、絶えず土壌から大気へ向かう水分子の移動が生じる。これが蒸発散である。この際に多量のエネ

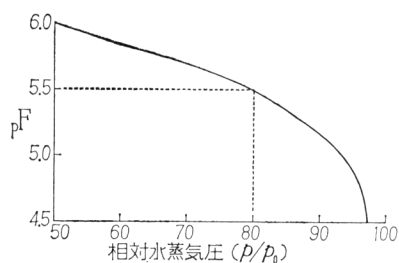


図-4 相対水蒸気圧と pF との関係

ルギが必要となる。

III. 地球の放射エネルギー交換と蒸発³⁾

1. 地球の放射エネルギー交換

ステファン・ボルツマンの法則によれば、絶対温度が 0 K 以上の温度を持つあらゆる物質は、電磁波エネルギーを放射している**。その放射エネルギーの強度は絶対温度の 4 乗に比例する。太陽の温度は 5,700 K と推定され、地球はこの太陽からの放射エネルギーを多量に受取っている。地球の大気圏外へ到達した太陽からのエネルギーを、単位時間、単位面積当りの強度に換算した値が太陽定数であり、 $1.95 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ の値である。この値は太陽に向かって直角の面が受けるエネルギーであり、図-5 からわかるように地球表面積の平均値に換算すると、その $1/4$, $0.49 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ となる。これを 100 とするとき、そのうちの約 37% は反射され、残りの 63% の $0.31 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ の放射エネルギーが地球によって吸収される。地球はこのようなエネルギーを太陽から受取る一方で、地球自身もエネルギーを放射しているが、これは図-5 に示すように、宇宙へ向けて地球の全表面から放射される。太陽から受取るエネルギーと地球自身が放射するエネ

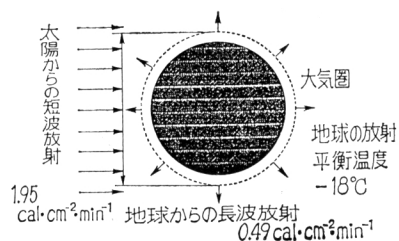


図-5 地球の放射エネルギー収支の概要

* SPAC: 英語のつづり Soil Plant Atmosphere Continuum の頭文字をとったもので、土、植物、大気をつなぐ一つの水の流の連続系として捉える理論体系を指す。従来、土中の水は土壌物理学、植物中では植物生理学、大気中の水は気象学と、それぞれ個別の分野で主として研究が続けられてきた。それらを組合せて一つの総合システムとして捉え、水の流れる経路という観点から統一しようとする試みが 1960 年代から主に米国において発展した。植物生産や蒸散機構、灌漑の基礎理論などの分野に大きな成果をもたらした。なお、本講座では(その 3)において詳述される予定である。

** ステファン・ボルツマンの法則: 絶対温度が零度以上のあらゆる物体は電磁波エネルギーを放射する。全ての電磁波エネルギーを吸収する物体を黒体という。黒体とはまた与えられた温度の下で最も効率よく電磁波エネルギーを放射する。単位面積当り黒体が放射する総電磁波エネルギーは、絶対温度の 4 乗に比例する。この法則をステファン・ボルツマンの法則という。この法則を含め放射理論はプランクによって今世紀初頭に完成され、今日の量子力学の基礎となった。暗れた夜の明け方に見られる放射冷却は、地表面がステファン・ボルツマンの法則にしたがって電磁波エネルギー(赤外線)の形でエネルギーを失う結果生じる温度の低下現象である。

ルギが平衡する温度をステンファン・ボルツマンの法則から計算すると、 -18°C という値が得られる。これは放射平衡から求めた地球の平衡温度であり、実際の地球の平均温度よりかなり低い値が計算される。

2. 地表面における熱平衡

図-6 に示すように地球の大気圏外へ到着した太陽光は、大気を通過する途中で約53%, $0.26 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ のエネルギーを大気の吸収や反射によって失う。地表へ到達し吸収されるのは、そのうちの47%, $0.23 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ と見積られている。

大気自身も吸収したエネルギーによって温まり、放射エネルギーを放出する。地表面はこの大気の放出するエネルギーから $0.47 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ を受取る。これは、いわゆる大気の温室効果といわれるものであり、太陽から直接地表面が受取るエネルギーの約2倍に相当する値であることは注目すべきであろう。

地表面はこのようにして長波と短波放射の合計 $0.70 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ を放射エネルギーの形で受取ることになる。このエネルギーをすべて放射エネルギーの形で放出するとすれば、平衡温度は約 31°C とならなければならない。しかし、実際はこれより低く、平均温度は約 15°C であり、別の放熱機構が存在していることがわかる。

この別の放熱機構は空気の大気対流と水の蒸発である。地表面の平均温度 15°C による放射エネルギーは $0.55 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ であり、それを入射量から差引いた $0.15 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ が空気と水蒸気によって対流圏の上部まで輸送され、そこで放射エネルギーとなってはるか宇宙へ向かって放出される。宇宙空間ではおもに放射エネルギーの形のみで輸送されるのである。

対流圏の上部約5 km のところで水蒸気は凝固、あるいは凝結してエネルギーを放出する。それはさらに放射エネルギーとなって地球から放出されるが、大気が5 km 上空まで断熱膨脹すると考えると、 -23°C 程度にまで冷却

される。大気による温室効果、空気の大気対流と水蒸気による潜熱エネルギーの形の大気の冷却機構によって、地球表面の複雑な温度分布と熱エネルギー配分が行われる。そのようなエネルギー配分の過程で、水分子が、液体、気体、固体の三つの相に変化することがきわめて重要な意味をもっている。

3. 水循環と水蒸気

地表が吸収した太陽エネルギーの約50%に当たる $0.12 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ が、これは地球に到達した太陽エネルギーの約24%に相当するが、図-8 に示すように、水蒸気の蒸発エネルギーとなって上空へ輸送されると推定されている。 $0.12 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ のエネルギーは1年間に換算すると $0.12 \times 1,440 \times 365 = 63,072 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}$ となるが、水の気化潜熱約 $600 \text{ cal}\cdot\text{g}^{-1}$ と密度 $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ を用いて水蒸気量に換算すると、一年間で1,000 mm 強となる。地球全体でこの量に相当する蒸発が生じ、はるか上空で凝縮して、降雨となって再び地球表面へかえってきていることになる。すなわち、地球上では一年間に約1,000 mm に相当する水が絶えず循環している。大気中に存在する全水蒸気量は、水深に換算すると25 mm といわれている。したがって、 $1,000 \text{ mm} \div 25 \text{ mm} = 40$ 、つまり一年間に大気の水蒸気は40回入れ替わっている、あるいは平均的に大気中に水分子が存在している期間で見ると約9日程度となり、きわめてダイナミックな水の循環がこの地球上に起こっていることがわかる。

IV. 植物生産と蒸散

1. 光合成と蒸散

光合成の仕組みは、いまだ完全に解明されてはいないが、かなりの程度まで明らかになっている。水と炭酸ガスを材料として、太陽光のエネルギーを利用して炭水化物を生成する仕組みは、壮大な化学工場のように、それが一枚の葉の中に収まっている状況には感嘆せざるをえない。その生成過程において葉緑体とアデノシン3 磷酸(ATP)が極めて重要な役割を演じており、この反応の最も効率の高い温度条件は常温付近である。この課題についてこれ以上深入りはしないことにしよう。

高等植物の光合成により固定されるエネルギー効率はせいぜい0.5% 以下であり、地球全体でも0.03%程度といわれている。残りの99%以上の太陽エネルギーは、蒸散や対流、そして赤外放射などで消費され、きわめて効率が低い。試算によれば、光合成の原料として使用される水の約300倍以上にものぼる水が、光合成の反応条件を整えるために必要であるといわれている。

地表にまんべんなく降り注ぐ、濃度の薄い太陽のエネ

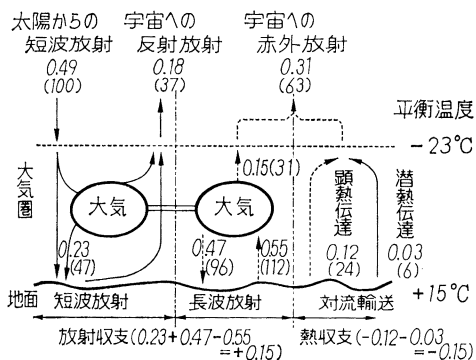


図-6 地球および地表面におけるエネルギー収支の状況

ルギをもとに、きわめて巧妙にエネルギーレベルを高めていく、すなわちエントロピを濃縮してゆく光合成の仕組みは、人間の作る化学工場をはるかにしのぐものである。反応が複雑であればあるほどその反応の過程で多量のエントロピの発生することは、熱力学の基本原則の一つである。この複雑な光合成の反応過程で多量のエントロピが発生するであろうことを想像することはそれほど無理ではない。植物はこの過程で生成したエントロピを、水を使って最終的には蒸散という形で環境へ放出するのである⁹⁾。多量の水を消費することは、濃度の薄い太陽エネルギーから、良質の化学エネルギーを濃縮・生成することと表裏一体の関係にある。

2. 気孔の開閉と植物生産

すでに述べたように、土中水は大気中の水蒸気と比較して極めて大きな化学ポテンシャルを有する。したがって、水は土壤から大気へ向かって移動しようとする傾向を持っている。この間に植物が介在すると、水は植物体を通過して大気へ向かって移動する。この経路はすでに述べたように SPAC と呼ばれているが、光合成の原料に使われる水とは比較にならないほど多量の水が植物体を通過する。この通過流量は蒸散量に等しい。植物はこの水の流れを利用して、肥料成分の吸収や放熱など、環境との間で物質やエネルギーの交換を行う。

蒸散による水蒸気の排出や、光合成の材料である炭酸ガスの取込み、酸素の排出、呼吸作用などは、主として葉面に分布する気孔を通して行われる。気孔は孔辺細胞によって開閉が制御される。植物体の細胞の膨圧が低下すると気孔は閉じる。とくに土壤水の pF が大きくなり、大気中の水蒸気圧が低下した状態、すなわち乾燥状態では、植物の吸水力が低下し、蒸散が大きくなって、植物体の細胞の膨圧が低下し、気孔が閉じて蒸散は停止する。植物体はこのような機構によって自己の水分の保全を図ろうとする。生体の環境変化に対する一種の防御反応である。

気孔が閉じることは、同時に光合成の原料である炭酸ガスの取込みが停止することを意味する。太陽エネルギーがいくらあっても、このような状態では光合成は進行しない。また、気孔の閉鎖によって呼吸作用も低下するために、植物の活性が著しく低下することになる。土壤の乾燥と大気の水蒸気圧の低下は、このように植物体に大きな水分ストレスを与え、植物の活性を低下させて、植物の生産力を落とすことになる。

このような状況において、灌漑により土壤水分を補給し、土壤の水分ポテンシャルを高めると、気孔が開き、極めて大きな植物生産力を引き出すことが可能になる。

3. 植物群落におけるエネルギー変換と移流¹⁰⁾

放射交換の結果、地表近傍で発生した水蒸気と暖まった空気塊は、主として風によって引き起こされる大気の乱れにより、上空へと拡散輸送される。風速が大きいとこの輸送力は大きくなり、風速が小さいとその逆となる。地表面近傍における風速分布には対数分布法則の成立することが知られている。これによると地表近傍では風速が極めて小さいために、拡散抵抗は著しく大きい。上空にいくに従って風速が大きくなって、拡散抵抗は小さくなる。また、この風速分布は地表面の粗さとも関係し、粗度長によって地表面の粗さが評価される。

図-7 に示すように、草丈の高い群落上では粗度長は約 10 cm となり、水面や短い植物群落と比較して極めて大きく、また風速が見かけ上でゼロとなる地面修正高も地表よりかなり高い位置に存在する。したがって、植被直上では風速はかなり大きく、拡散抵抗が小さい。しかし、植被の内部に入ると風速は急速に低下し、拡散抵抗も大きくなる。

太陽光は比較的植被の内部まで侵入し、そこで放射交換する。そのために比較的植被の内部へ入ったところで顕熱エネルギーが発生する。一方、植物体内を通過して葉面まで輸送される際の抵抗が、植被内部の空気中を通過する場合の抵抗に比して極めて小さいために、水蒸気はほとんど植物体を通過して植被直上まで運ばれる。つまり、潜熱の形のエネルギーの湧き出し点は、植被直上となり、それに対して顕熱エネルギーの湧き出し点は植被の内部深くに存在することになる。したがって、大気へのエネルギーの拡散は、背丈の高い植被上では潜熱の形態の方が顕熱の形態に比較して容易となるとともに、顕熱と潜熱の両形態のエネルギー輸送そのものも、背丈の低い植被あるいは水面に比べて、著しく容易となる。

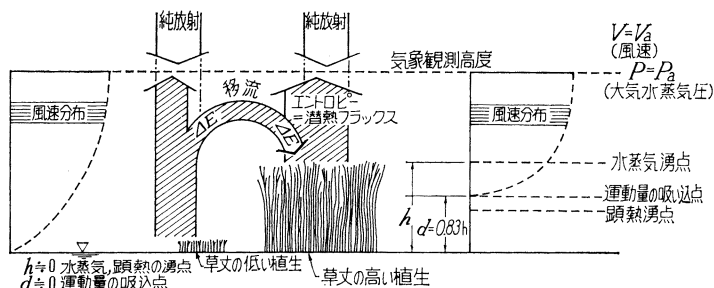


図-7 草丈の異なる植被面あるいは水面からのエンタルピー輸送状況と顕熱、潜熱、運動量の湧点、吸点の概要図

このようにして草丈の高い植生は、顕熱と潜熱を合わせた全熱エネルギー(エンタルピー)の拡散抵抗が小さく、しかも、主として潜熱の形態に選択的に配分する特性を持っている。このような2つの機能が総合されて、草丈の高い群落上ではきわめて大きな水蒸気輸送量、すなわち、蒸散が生じることになる。このような群落からの蒸発散量は、しばしば水面からの蒸発量の2倍以上にもなることがあり、その群落が獲得した放射エネルギーをはるかに越えることもある。

植物は、長い進化の過程を経て、周辺へ到達した太陽エネルギーを集め、自らの上に降り注ぐ太陽エネルギーに対応する以上の蒸散量を確保するような形質を獲得したとみることができよう。高収獲品種の水稻の蒸散比は、在来品種に比べてきわめて大きな値を示すことが、すでに確認されている⁷⁾。

4. 塩類集積と蒸発散⁸⁾

水は地表面で放射エネルギーを吸収して蒸発し、はるか上空で潜熱エネルギーを放出して再び液状水に帰り、地上へ降雨となって落下してくる。このようなサイクルを絶えず繰返しており、それによって地表面のエネルギーを対流圏の上端へ運んでいる。この循環はすでに述べたように年間に40回、9日に一回の割合で行われている。一方、水は蒸発する際に大きなエントロピーを吸収する。図-8に示すように、そのエントロピーははるか上空で宇宙に放出され、再生されたエントロピーの低い水となって地表に再び帰ってくる。蒸発はこのように水の再生に大きな役割を果たす。地球上における生物生産の限界値は、地球上での水循環によって再生されるエントロピーの再生量に規定されることになる。

水は循環の過程でさまざまな物質を溶解する。地球上で最も溶解しやすい物質は、ナトリウムと塩素イオンである。これらの溶解物質は水の蒸発過程で取残される。つまり、蒸発点に集積することになる。海水の塩分濃度が高いのは、長い年月をかけて蒸発により塩分が濃縮さ

れたためであり、死海などの塩水湖も同様のメカニズムで塩分が濃縮されたものである。

一方、陸上では、土壌面からの蒸発によって土壌中に塩類が集積する。灌漑は蒸発散によって消費される水の供給を目的とする。灌漑水には少量ではあるが塩類を溶解している。したがって、灌漑を行って蒸発散が増加すれば必ず農耕地には塩類集積が生じる。わが国のような湿潤地帯で塩類集積がみられないのは、降雨量が蒸発散量をはるかに上回り、集積した塩類が排水中にとけ込んで、最終的には海へ排除されるためである。しかし、乾燥地帯ではそのような排除メカニズムが働かないから、灌漑を行うと必ず塩類集積が生じる。したがって、乾燥地帯の灌漑計画では、塩類を排除するための排水システムを設けるとともに、集積した塩類を輸送するために用水を準備しておく必要がある。

このように作物の生育環境そのものが、蒸発散によって悪化していくことがある。水は、集積した塩類の除去をはじめ、地下の環境を制御する上で重要な働きをする。これは、水が物質をよく溶かし、自らのエントロピーを大きくする、いわゆる『雑巾』の役目をするからである。しかし、エントロピーの最終的な行き先を追えば、それは水によって対流圏の上端に運ばれ、はるか宇宙へ捨て去られることになる。水は地球上のエントロピーの掃除屋であり、太陽のエネルギーに駆動された水循環がその掃除を行っているといえよう⁹⁾。

V. 蒸発散によるエネルギー収支の調整と地球の環境形成

1. 熱収支分布¹⁰⁾

すでに地球全体としての放射収支は平衡していることをみてきたが、太陽からくる入射エネルギーの単位面積強度についてみると、低緯度地帯と高緯度地帯とは大きな差が生じていることがわかる。地球の放射するエネルギーは、単位面積についてはほぼ一定とみなせる。たとえば、大気の上端における太陽放射量と上向き赤外放射量の緯度分布は図-9に示すとおりである。地球全体としては放射エネルギーはバランスしているとはいえ、低緯度地帯では収入超過、高緯度地帯では支出超過となる。

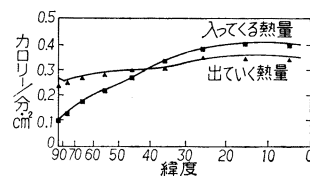


図-9 大気上端における上下方向の放射エネルギーの分布状況¹⁰⁾

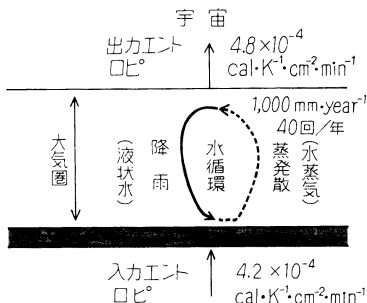
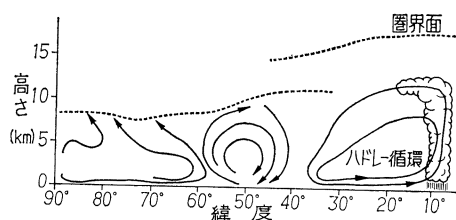
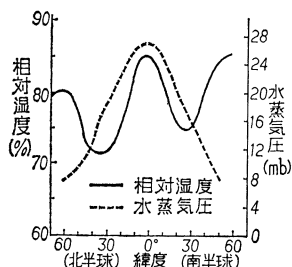
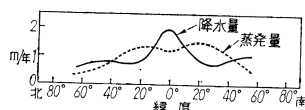


図-8 水循環によるエントロピー輸送

図-10 対流圏の南北鉛直断面内の循環¹⁰⁾図-11 相対湿度および水蒸気圧の分布¹¹⁾ (ホールヴィツラ)図-12 降水量と蒸発量の緯度分布¹¹⁾ (ブディコ)

は大気の流れによる調整である。低緯度部から高緯度部へエネルギーを運ぶ特有の風系が形成され、顕熱や潜熱エネルギーの輸送の形で収支調整が生じる。このような現象は、地球の自転や、陸地の分布などのさまざまな地表面の性質と深く関連しており、きわめて複雑となる。

大気の流れによる調整を考える上で、一般的に図-10に示すような三つの風の循環系の存在が確認されている。この図からわかるように、とくに緯度が 30° 付近に顕著な下降気流が発生し、高気圧帯が形成される。これは中緯度高気圧帯として知られており、ここはとくに雲の少ない地帯であることが、衛星写真によっても確認されている。

3. 大気中の水蒸気分布¹¹⁾

大気中の水蒸気の含有状況には二つの表示方法がある。一つは一定体積中の水蒸気の総量を表すもので、絶対湿度、あるいは水蒸気圧によって表示される。もう一つは、大気が含ま得る最大の水蒸気量に対する相対的な割合による表示である。これは相対湿度と呼ばれ、飽和水蒸気圧に対するその大気中の水蒸気圧の比率として表示される。後者は、すでに示した(3)式から、そのまま pF に等価変換されることがわかる。

緯度別に大気の平均湿度の分布状況を整理すると、図-11 のようになる。絶対湿度は、蒸発散量に応じて高

地球上にこれを調整する現象が生じ、それによって地球の気候が形成される。

2. 大気循環¹⁰⁾

高緯度部と低緯度部との間のエネルギー調整は、主として二つの機構で行われる。一つは海流であり、低緯度部で暖められた海水は高緯度部へ移動して冷却され、緯度間のエネルギー調整を行う。もう一つ

緯度に行くほど低下するのに対して、相対湿度は途中で極小値をとるという特徴がみられる。これは高緯度部に行くほど気温が低下し、相対湿度の分母である飽和水蒸気圧が小さくなるためである。相対水蒸気圧が極小となる地帯は、緯度が 30° 付近を中心として帯状に地球を取巻いて乾燥地帯を形成している。その両側は、相対湿度が高く水蒸気が凝縮しやすいために、降雨が降りやすい湿潤地帯を形成することになる。

4. 地球上の水収支分布¹¹⁾

以上で示した風系と水蒸気分布に対応して、地球上での降雨量分布と蒸発散量の分布が形成される。この分布の状況は図-12に示すようになり、緯度とともに陸上と海上とで大きく異なっている。さらに詳細には地形の影響を受けて、きわめて複雑な分布を形成している。今後の農業開発や水資源の開発は、いやがおうにもこのような地球規模の環境の枠組みを意識せざるを得ない。

VI. おわりに

われわれの住む地球の環境は、以上で述べてきたような機構の下で形成され、その形成過程で水は決定的な役割を果たしている。このような水を資源として開発し、水収支を調整し、新しい農地を拓いて水を供給する、そして最大限の植物生産力を引き出すことを目標とする農業土木は、このような自然の仕組みと深く関わっているのである。したがって、農業土木は人類の将来にとってきわめて重要な役割と責任を持つことになる。

なお、蒸発散、光合成、あるいは地球環境科学などに関連して、多数のすぐれた教養・啓蒙書が出版されている。とくに本文では、意識して一般的な著書の引用に努めた。興味ある方は参考書としてそれらの一読を薦めたい。

引用文献

- 1) 気象ハンドブック編集委員会編：気象ハンドブック，pp. 337～339，朝倉書店（1979）
- 2) 石田他：pF の原理と応用（4. pF の測定とその原理），土と基礎，35(1)，pp. 61～66（1987）
- 3) たとえば，植田 敦：資源物理学入門，pp. 159～165，日本放送出版協会（1982）
- 4) 植田 敦，室田 武：水・生物・人間とエントロピー，別冊経済セミナー，エントロピー読本 II，pp. 44～51（1985）
- 5) たとえば，D. Hillel(高見，内島共訳)：土壌物理学概論，pp. 199～209，養賢堂（1984）
- 6) 丸山他：灌漑排水（下），pp. 23～29，養賢堂（1988）
- 7) 桜谷哲夫，堀江 武：作物の蒸発散に関する研究（1），農業気象，44(1)，pp. 45～55（1985）
- 8) 前出 6)，pp. 133～137
- 9) 前出 3)，pp. 163～164
- 10) 小倉義光：大気科学，pp. 115～123，日本放送出版協会（1968）
- 11) 北野 康：水の科学，pp. 35～49，日本放送出版協会（1969）

参考文献

- 植田 敦：資源物理学入門，pp. 159～165，日本放送出版協会（1982）
 小倉義光：大気科学，pp. 115～123，日本放送出版協会（1968）
 北野 康：水の科学，pp. 35～49，日本放送出版協会（1969）

[1989. 1. 18. 受稿]