

物理の普遍性と現象の多様性

塩沢 昌¹

物理現象を支配する法則と物質の物理特性には普遍性がある。力の釣り合い（作用と反作用）や質量・エネルギー保存則などの物理法則は地球上の、いや宇宙のどこでも同様に成立するし、水や空気の粘性・密度・表面張力・熱伝導率など物質の特性は、宇宙のどこでも同様である。そして、全ての物理現象は、物理法則と物質の物理特性によって説明され、人が理解できるかどうかは別にして、説明できない不思議な現象は存在しない。土の中の物理現象も全く同様である。土壤中でしか成立しない物理法則や物質特性は存在しない。ダルシー式や溶質拡散などの特有の基本式は、水の粘性や分子の熱運動など、より基本的な物質特性からその根拠が説明されるが、そういう本質的なことは普通のテキストにはほとんど書かれていないので、自分でよく考えて納得することが大切である。

環境科学としての土壌物理学における重要な現象で、支配メカニズムを理解するのが難しいのは、蒸発（植物の蒸散を含む）だと思う。身の周りで生じているありふれた現象であるが、蒸発速度 E （蒸発表面における水蒸気フラックス）がどのように決まるかを理解するのは容易ではない。蒸発速度は二つの物理法則に支配される。一つは、大気境界層における熱物質輸送が上下の空気の混合によって生じるというメカニズムで、大気の混合速度を示す交換係数 K_h を比例定数として、蒸発表面と上空との水蒸気濃度差 $(\rho_s - \rho_a)$ に比例して水蒸気が、温度差 $(T_s - T_a)$ に比例して顕熱が輸送されるという輸送式で表される。これは乱流拡散の結果として誘導される。もう一つの支配法則は、蒸発表面において熱収支式が満たされなければならないという制約条件である。すなわち、液状水が水蒸気に相変化するには 2450 J g^{-1} もの大きな潜熱が必要で、蒸発で消費される潜熱に等しい熱が別途、供給されなければならない、ということである。ここで決定的に重要なのが、大気の飽和水蒸気濃度 ρ^* が温度 T の関数（下に凸の増加関数）であるという水蒸気特性である。この特性曲線 $\rho^*(T)$ を介して、①水蒸気輸送式、②顕熱輸送式、③熱収支式が同時に満たされるように表面温度 T_s （未知数）が自動調整され、 E が決まる。 $\rho^*(T_s)$ を線形近似して、上記3式の連立一次式を E について解いたのが、ペンマン・モンティース式である。

著者は、学生に蒸発のメカニズムを理解させるために、以下の問題を考えさせることにしている。問題1：「相対湿度100%の室内にある水面から蒸発が生じるか」、問題2：「野外の蒸発は風が強いほど大きくなるか」。問題2は簡単ではなく、これを説明できれば蒸発のメカニズムの理解は十分と言える。大気中の水蒸気輸送式だけを見れば、風が強いほど K_h が大きくなるので蒸発は大きくなると思ってしまう。この問題を正しく理解するのに大切なことは、蒸発が継続するには熱源が必要だということである。野外環境における蒸発の熱源は二つある。一つは、表面温度が気温より低下する場合に空気との温度差によって大気から与えられる顕熱であり、空気の相対湿度が100%より低下しているために生じる。蒸発のもう一つの、そしてより重要な熱源は、太陽を熱源とする正味放射（純放射）である。

前者では、顕熱の供給が K_h に比例するので、 E も K_h に比例する。一方、大気の湿度が飽和で純放射のみによる蒸発を考えると、表面温度 T_s は気温 T_a よりも上昇し、顕熱も潜熱も表面から大気に向かう方向になり、純放射が顕熱と潜熱に配分される形で熱収支が成立する。 K_h が大きくなると、 T_s が低下して $\rho^*(T_s)$ も低下するが、顕熱と潜熱の配分割合は変わらず、 E も顕熱も K_h の影響を受けない。ペンマン・モンティース式は、純放射による E （第1項）と大気の相対湿度低下による E （第2項）からなり、第2項は風速が大きいほど大きい K_h に比例するが、第1項は純放射と気温だけで決まり、 K_h を含まないため風速に依存しないのである。

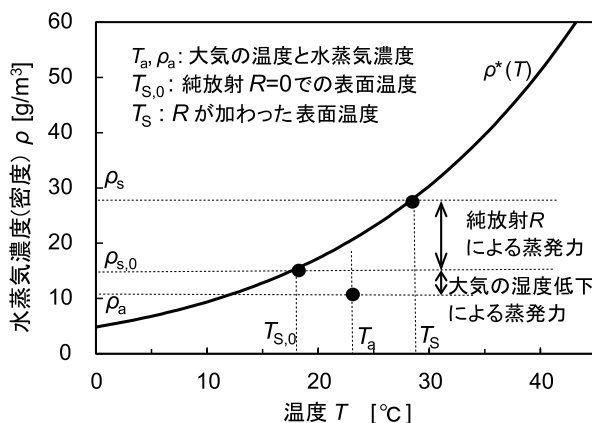


Fig. 1 $\rho^*(T)$ と蒸発の駆動力。

¹ 東京大学大学院 農学生命科学研究科

以上により、濡れた表面からの E (ポテンシャル蒸発) を決める気象要因は、第一に日射量、第二に気温であり、風速は、とくに相対湿度が高い湿潤地域の場合、重要ではない。

では、ポテンシャル蒸発の E はどの程度の値であろうか。これは地球の熱収支と大気循環から平均値を概算できる。太陽からの放射の一部が地表に到達して地表を加熱して温度を上昇させ、純放射が顕熱と潜熱に配分され対流によって大気上空に運搬され、大気上空から長波放射として宇宙空間に放出されて、地球の熱収支が保たれる。大気圏外の太陽に垂直面の日射量 (太陽定数) は 1366 W m^{-2} である。これを一日に積算し、球の表面積と断面積との比 (=4) で割って地球表面平均とし、蒸発潜熱で割って蒸発水深に換算すると 12 mm d^{-1} である。このうち短波放射として地表に達して熱になるのは 50% で、地表の長波放射収支の結果として 20% は長波放射で上空に向い、純放射は大気圏外日射の 30% とされている。地球の平均気温 15°C での潜熱と顕熱への配分割合はペンマン・モンティース式よりおよそ 2:1 なので、 E の地球平均は約 2.5 mm d^{-1} と算定できる。

次に、土壌表面の乾燥が進んだ場合の蒸発低下現象を考えよう。土壌表面の乾燥状態は土壌水移動の結果として決まるが、表面の水ポテンシャル ψ_w の低下が相対湿度 h_r を低下させ、表面と大気との湿度差で決まる蒸発を低下させる。これを支配する重要な特性が水蒸気の水ポテンシャル ψ_w と相対湿度 h_r との関係である。 $h_r(\psi_w)$ は指数関数であるが、 h_r と $\log(-\psi_w)$ との関係グラフを描けば、乾燥による蒸発低下がわかる。すなわち、 ψ_w が永久シオレ点の pF 4.2 に低下しても $h_r = 0.99$ でほぼ飽和であり蒸発はほとんど低下せず、pF 5.2 で $h_r = 0.9$ 、pF 6.0 で $h_r = 0.5$ 、pF 7.0 で $h_r = 0.00$ なので、例えば大気の相対湿度が $h_r = 0.5$ の場合、土壌表面の水分状態が pF 5.0 ~ pF 6.0 において乾燥による蒸発速度の著しい低下があり、日射による加熱がなければ pF 6.0 で蒸発が停止することがわかる。このように $h_r(\psi_w)$ により、一般に乾燥が進むのに蒸発速度が低下しない恒率蒸発段階と蒸発速度が低下する減率段階が存在するという重要な現象を説明できる。 $h_r(\psi_w)$ は、土壌物理学で最も重要な式と言ってよいが、この関係式は、水ポテンシャルの原理的な定義「等温等空気圧下で、容器内の純水を基準状態としてその微量を測定状態に移すための可逆的な仕事を移した水の単位量当たりで示したもの」に基づいて説明できる。熱力学の基本式ではあるが、これも熱力学の教科書に納得できる十分な説明がないように思うところで難しく、自分で考えて納得することが大切である。

土壌水のポテンシャルエネルギーには、基準状態と測定状態 (定義する状態) のとり方によってマトリックポテンシャル (ψ_m : 土の中の土壌溶液と平衡する土の外の土壌溶液が示す圧力)、浸透ポテンシャル (ψ_o)、水ポテンシャル ($\psi_w = \psi_m + \psi_o$) の三つの主要なポテンシャルエネルギーが定義され、それぞれ水移動における役割が異なるのであるが、何れも、基準状態と測定状態との間で微量の水を移す「可逆的な仕事」によって定義される。この原理的な定義の背景には熱力学第 2 法則にある。すなわち、所定の外的条件下 (等温等空気圧) で系の状態変化から引き出せる「仕事」(自由エネルギー) は、系内の可逆的な (言い換えると準平衡状態の) 物質移動に対しては保存されるが、現実の物質移動は非可逆過程であり、熱になって散逸する分、低下するためである。熱力学はエネルギーがやりとりされる二つの基本形態である「熱と仕事」の関係についての科学であるが、ここには二つの基本法則しかない。著者の流儀で簡単にいえば、熱力学第 1 法則は仕事と熱がエネルギーとして等価であることを主張し、第 2 法則は仕事と熱が等価ではないことを主張するものである。この法則が必要条件として多様な現象を制約している。熱力学法則は重要ではあるが、必要条件を与えるにすぎず、多様な個別の物理現象が熱力学だけで決まるのではない、という理解は大切だと思う。

水ポテンシャルについて一つ指摘しておきたい。「水移動は水ポテンシャルの高い方から低い方に生じる」という「法則」は物理学には存在しない、誤解である。土壌中の液状水は力 (圧力勾配と重力) によって移動し、水蒸気は濃度の低い方に拡散する。土壌中に塩濃度差があれば液状水は水ポテンシャルが高い方にも移動するし、温度の違いがあれば水蒸気は水ポテンシャルの低い方から高い方向にも (すなわち、高温側から低温側に) 拡散する。境界条件の変動に対して系内の水ポテンシャルが均一な平衡状態になろうとするが、これは個々の具体的な制約条件下で、溶質の拡散、熱移動、水移動など多様な熱物質移動によって生じる。すなわち、土壌内の温度差は熱移動 (主に熱伝導と潜熱輸送) を、土壌水中の溶質濃度差は溶質拡散を、水蒸気濃度差は水蒸気拡散を、水の圧力 (マトリックポテンシャル) 差と重力は液状水の移動をもたらす、根の半透膜を介しては植物と土壌水との水ポテンシャル差による根の吸水が生じる。この多様な熱物質移動の結果として、温度が均一で、土壌水中の水理ポテンシャルおよび溶質濃度が均一で、「土壌-植物」系を含めて水ポテンシャルも均一な平衡状態に向かおうとするのである。

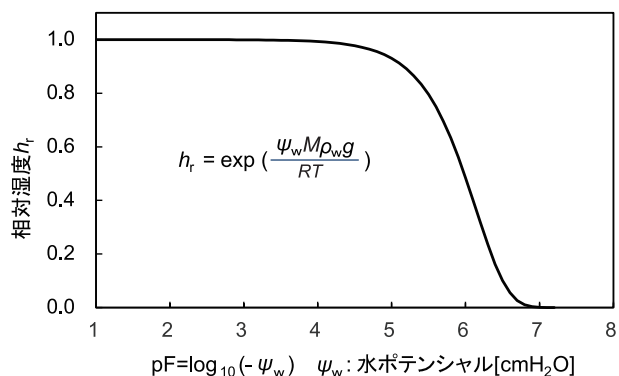


Fig. 2 相対湿度と水ポテンシャルとの関係。

土壌物理学, 土質力学, 水理学, 気象学などの学問分類は人の都合で勝手に分けたにすぎず, 研究対象の自然に区分があるわけではない. 客観的に実在するのは, 全てが互いに関連する, 物質の諸現象が構成する唯一の自然界であり, そこでの物理法則と物質特性は普遍的で, 「学問分野による違い」はあり得ない. 自然や社会を理解するには, 個々の知識を関連づけて全体を構成することが必要である. 百科事典のような知識がいくらあっても, 関連のないバラバラなものであれば死んだ知識でほとんど役立たない. 人が「分かった」と納得するのは, 新たな認識がそれまでの自分の知識と関連がついて全体の体系の中に位置づけられることである. 物理現象のメカニズムを理解するには, 具体的な問題をいろいろな側面から自分の頭で考え抜くことが不可欠で, それはこの上なく楽しいことである.