

飽和空気中への水の蒸発

高見晋一

(近畿大学農学研究科環境管理学専攻)

1. はじめに

冬の風呂場で、もうもうと湯気が立ちこめていることがある。風呂の湯から飽和空気中へ蒸発が生じているからだ。多くの人が身近に経験する現象の一つである。その理屈も、蒸発の基本に立ち返れば、容易に理解できる(高見, 1996;1997)。しかし、それにもかかわらず、いまだに「空気が飽和していると、蒸発は生じない」と思っている人が多い。学生や一般の人のもとより、関係分野の研究者の中にも誤解している人がみうけられる。そこで、本稿では、飽和空気中への蒸発に焦点をおいて、もう一度、蒸発という現象を基本から考え直してみよう。なお、ここでは、蒸発を「水面(あるいは水で飽和した面)から液体水が気化し、その気化した水蒸気が水面の境界層を通じて、その上部の空気層へ移動する現象」と定義する。

2. 定性的考察

一般に、蒸発面が受け取る放射エネルギー(吸収日射量+周辺空気層からの赤外放射量)を Rt (W/m^2 、以下熱フラックスの単位はこれと同じ)、蒸発面からの熱放射束密度を L 、周辺大気との間の顕熱交換量(厳密には顕熱束密度)を F 、蒸発面からその周辺への伝導熱流束密度を G 、蒸発速度(厳密には蒸発束密度)を E ($g/(m^2/s)$) とすれば、次の収支が成立する。

$$\lambda E = (Rt - G) - (L + F) \quad (1)$$

ただし、ここで λ は蒸発の潜熱である。さらに、蒸発面の水蒸気濃度を H (g/m^3)、大気の水蒸気濃度を Ha (g/m^3) とすれば、水蒸気は次の関係式(輸送式)にしたがって輸送される。

$$E = D(H - Ha) \quad (2)$$

ただし、ここで、比例係数 D (m/s) は、蒸発面とそれに接する空気層のある代表点との間の輸送係数で、この場合、水蒸気の“運ばれやすさ”を表す量である。

一方、蒸発が生じるには、水の存在を前提とした上で、さらに次の条件が必要である(たとえば、Rose 1966)。蒸発面へ気化のためのエネルギーが供給されること(条件①)、周辺空気より蒸発面の水蒸気濃度(水蒸気圧)が高いこと(条件②)の2つである。このうち、条件①が成立するということは、熱収支式(1)から、次式が成立することに等しい。

$$(Rt - G) > (L + F) \quad (3)$$

また、条件②が成立するということは、輸送式(2)から、次の関係が成立することに等しい。

$$H > Ha \quad (4)$$

さらに、ここで、蒸発面には水が存在するという前提を考慮すれば、蒸発面としては水面あるいは水で飽和された面を対象としていることになるので、 H は蒸発面の温度 T ($^{\circ}C$) における $H_s(T)$ 飽和水蒸気濃度 (g/m^3) に等しい。すなわち

$$H = H_s(T) \quad (5)$$

となるので、式(2)、(4)はそれぞれつぎのように書き換えられる。

$$E = D(H_s(T) - Ha) \quad (6)$$

$$H_s(T) > Ha \quad (7)$$

以上を要するに、水面或は水で飽和した面からは、式(3)(蒸発条件①)の前提のもとで、式(7)の関係(条件②)が成り立ちさえすれば、蒸発が継続することになる。

蒸発面上の空気層の温度を Ta ($^{\circ}C$) とすれば、この層の飽和水蒸気濃度は $H_s(Ta)$ と表すことができる。それゆえ、水面境界層上の空気層が飽和していても

$$H_s(T) > H_s(Ta) \quad (8)$$

が成り立つ限り、蒸発は継続することが分る。いいかえれば、飽和水蒸気濃度は周知のように温度に伴って指数関数的に増大するから、 T が Ta より高ければ、蒸発が継続する。では、表面温度 T が気温 Ta より高くなるのはどのような条件下だろうか。ここで再び、蒸発条件②を考えなければ

ばならない。風呂やなべを暖める場合は簡単だ。蒸発面の温度は、電気や燃料の熱で、たやすく浴室や鍋の中の空気温度より高めることができる。式(3)でいえば、蒸発面には Rt に加えて $-G$ (G は蒸発面から失われる場合を正としているので)として、薪やコンロから多量の燃焼熱が加えられるため、 $Rt-G$ が、面から失われる熱 ($L + F$) を容易に上回るからだ。自然条件下の蒸発も同様である。

3. 定量的考察

以上のように、熱収支と水蒸気の輸送を同時に考慮すれば、飽和大気中にも蒸発が生じることを、ある程度、理論的に説明することができる。しかし、表面温度 T が気温 Ta より高くなる条件については、感覚的な説明にならざるを得なかった。もっときちんとした説明にするには、蒸発だけでなく顕熱や熱放射も含めた蒸発面の熱のやり取りと、その相互関係をあらわす熱収支式とを連立させた式を用いなければならない。そこで、そのような組み合わせの結果得られる関係式(組み合わせ法)を使って、考察をすすめよう。途中(高見, 1996;1997 参照)は省略して、最終的に得られる、蒸発速度と表面温度についての近似解析解を記すと次のようになる。ただし、 $ra = 1/D$, $da = Hs(Ta) - Ha$ は飽差, Cv は空気の容積熱容量である。

$$\lambda E = \frac{\{\varepsilon(Rn - G) + \lambda(da/ra)\}}{\varepsilon + 1} \quad (9)$$

$$T = Ta - \frac{(\lambda \cdot da - ra \cdot (Rn - G))}{Cv(\varepsilon + 1)} \quad (10)$$

これらの式から、飽和空気では $da = 0$ であるから、 E と T はそれぞれ下記のようにあたえられる。ここで $\varepsilon/(\varepsilon + 1) \approx 0.75$ なので、「面」が正味受けとる熱 ($Rn-G$) の約 75% に相当する蒸発が生じることになる。このように、大気が水蒸気で飽和していても、その大気へは蒸発が起こる。それは、式(12)から分かるように、 $Rn-G$ が正すなわち面が熱を正味受け取っているなら、 $T > Ta$ となるため、面の水蒸気濃度が大気のそれを上回るからだ。

$$\lambda E = \frac{\varepsilon(Rn - G)}{\varepsilon + 1} \quad (11)$$

$$T = Ta + \frac{ra \cdot (Rn - G)}{Cv(\varepsilon + 1)} \quad (12)$$

4. むすび

飽和空気中へは蒸発は生じないという誤解はどうして生じるのだろうか。おそらく、水蒸気をそれ以上は含めないだけ含んでいるので、そこへ水蒸気が入ってくることはあ

りえないと考えるからだろう。しかし、実は入ってくるのだ。濃度差が存在する以上、移動先の空気層が飽和しているといまいと、否応無しに水蒸気分子の正味の移動が生じる。これが厳然たる自然界の法則である。そして、移動して来た水蒸気分子は、既存の水蒸気分子と混合し、飽和(しばしば、過飽和)以上の分は、液体として「気体系」としての空気層の“外”に押し出される。私達が、湯気や霧として、目でみることができるのは、このように押し出された水蒸気が凝結したものに他ならない。いいかえれば、蒸発の過程でいったんは水蒸気として見失った水を、再び霧、湯気、雲といった水滴としてみることができるのはそのためである。冒頭で述べた風呂場の湯気だけでなく、蒸気霧や前線霧といった現象も基本的には(実際は、凝結核の存在や移流、混合の影響で必ずしも単純ではないが)同じ原理に基づく(たとえば、和達, 1993)。

飽和空気中への蒸発という現象は、輸送現象の本質を改めて考えさせてくれる。この現象が、飽和土壌への液体水の移動と相似とみなせるからだ。たとえ、土壌が水で飽和していても、そのポテンシャルエネルギーが水源のそれよりも低ければ、その間、水源からは絶えずこの土壌まで水が輸送される。そして、既存の水と混合しながら、この土壌が含みきれない分は、その外に流出や浸透として“こぼれ出る”。このような質量流れの場合と同様、拡散現象の一つである蒸発においても、2点間に濃度差がある限り、そして輸送経路が閉じていない限り、そこには必ず流れが継続する。

いまは昔、Van Bavel 教授の講義を受けるまでは、私も空気が飽和すれば、それ以上、蒸発は生じないと思っていた。それまでも蒸発について学び、観測等も行っていたが、蒸発の本質をほとんど理解していなかったのだ。先生は、具体例として川霧をあげながら、式(11)を導くことよって、この現象の理論的背景を明解に説明してくれた。それ以来、折に触れて、私は蒸発という現象からさまざまなことを学んできた(たとえば、高見, 1998)。蒸発は、私の愛する自然の教材の一つである。

引用文献

- Rose, C. W. 1966: Agricultural Physics. Pergamon Press, Oxford, 226pp.
 高見晋一 1998: 限定要因の法則からみた蒸発. 水文・水資源学会誌, **11**, 67-69.
 高見晋一 2006: 蒸発の基本的概念とそれに基づく蒸発量の推定法. (1) 生物と気象, **5**, 123-129.
 高見晋一 2007: 蒸発の基本的概念とそれに基づく蒸発量の推定法. (2) 生物と気象, **6**, 87-92.
 和達清夫(監修) 1993: 気象の事典, 東京堂出版.