微小水滴の蒸発速度について*

山本 義一** 三浦 晃***

§1 緒言

従来気象学では水面上その温度で飽和しているとして蒸発や乾湿計の理論⁽¹⁾を取扱つてきたが厳密に云えば水面上は不飽和の状態にあることが Frössling⁽¹⁾ によつて指摘され、最近辻幹男氏⁽²⁾ は水面上が不飽和であるとして水滴の蒸発の速度を與える理論式を導いた。それによると水滴が大きい場合は従來の理論、例えば、萩原氏⁽³⁾ の公式と一致するが、水滴が小さくなると萩原氏の公式よりも蒸発速度が遅くなり、例えば半径 5μ の水滴では萩原公式の約 $\frac{1}{2}$ 、半径 1μ では萩原公式の 0.18 倍の蒸発速度となる。辻氏の理論は單に蒸発の問題としてのみでなく、雲滴、霧滴の生成、消滅の機構を論ずる上にも興味が深いが、これまでの水滴蒸発の實驗、例えば眞島-研野⁽⁴⁾、高橋⁽⁵⁾、Frössling⁽¹⁾ の實驗は總て大きな水滴について行われているので、辻の公式の正否を判定することが出来ない。それで我々は半径 2.5μ 以下の微小水滴について蒸発速度の測定を行つた結果、辻の公式にほぼ一致する結果を得たのでここで報告しよう

静止水滴の蒸発速度を與える式としては萩原氏により

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{4\pi DM}{RT} (P_0 - P_\infty) a \quad (1)$$

で與えられている

ここに m ; 水滴の全質量, a ; 水滴の半径, $-\frac{dm}{dt}$; 水滴の蒸発速度, D ; 水蒸氣の擴散係數, M ; 水蒸氣の分子量, R ; 普選氣體常數, P_0 ; 水滴表面に於ける水蒸氣圧, P_∞ ; 水滴より充分離れた場所の水蒸氣圧である

最近辻氏は水の凝縮係数が極めて小さいと云う Alty⁽⁶⁾ の實驗結果に基き静止水滴の表面が不飽和の状態にあると云う假定のもとに微小水滴の蒸発速度を與える式として

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{4\pi DM}{RT(1 + \frac{P}{Ka})} (P_s - P_\infty) a \quad (2)$$

を提出した

ここに $K = \frac{\beta}{1 - \frac{4}{3}\beta} \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}}$, β ; 水の凝縮係數, P_s ; 水の飽和蒸氣圧である、

今水滴は球形であるとして $m = \frac{4}{3}\pi a^3$ と置き半径 a_1 なる水滴が蒸発して半径 a_2 になる迄に要する時間を t_2 とすれば

(1)より

* G. Yamamoto and A. Miura: On the Rate of Evaporation of Small Water Drops. Drops.

** , *** 東北大学理学部地球物理学教室

$$t_{12} = \int_{a_1}^{a_2} \frac{RTada}{DM(P_0 - P_\infty)} = \frac{RT}{2DM(P_0 - P_\infty)} (a_1^2 - a_2^2) \quad (3)$$

(2)より

$$t_{12} = \int_{a_1}^{a_2} \frac{RTa}{DM(P_0 - P_\infty)} \left(1 + \frac{D}{Ka}\right) da = \frac{RT}{2DM(P_0 - P_\infty)} (a_1^2 - a_2^2) + \frac{RT}{KM(P_0 - P_\infty)} (a_1 - a_2) \quad (4)$$

(3) (4)を比較すると a の一次の項が有るか無いかの差異である。半径 a が大きければ a^2 の項によるが半径 a が小さくなつた時には a の項の有無により(3)式と(4)式との差は大きくなる

§ 2 実験法と測定結果

蒸発による水滴の変化を測定する爲に初め脱脂した動物の毛を使用した。脱脂した毛に水滴を附着させると水滴は蒸発するにつれ球形では無く紡錘形になり取扱いが非常に困難となる。更に動物の毛は尖端でも $3 \sim 5 \mu$ の太さが有るので 10μ 以下の測定は不可能であつた。そこで我々は太さ $1 \sim 2 \mu$ 位の細い水晶線を使用した。水晶線を鉛直に下げその尖に水滴を附着させた。こうすれば水晶線に直角などの方向から見ても水滴は同じ大きさに見えるので取る一方向から測定しても水滴の太さが正確に求められる。又我々の測定範囲では水晶線に附着した水滴は球形で蒸発による水滴の形状の変化はみとめられなかつた。依つて水滴は球として考えてよい事がわかつた。第1圖は測定装置の大略である。光源としては熱線を去つた光を使用した。気温、湿度の変化、氣流の影響を少なくする爲に測定は暗室で行つた。水滴の直径は顯微鏡の接眼Micrometerにより 1μ 迄目測した。時間はStopwatchで0.5 Sec.迄測定した。

第1表は測定結果である。第2圖は縦軸に水滴の半径の自乗を取り横軸に時間を取つたものである。暗室の温度、湿度はアスマン通風乾濕計で測定した。その結果は第1表の下に示した第2圖から明らかなる如く半径 10μ 以下では直線ではなく曲線である故に之等の曲線の實驗式は $t = At^2 + Bt$ なる形で表す事が出来る。但しこの場合 t としては第2圖に於て夫々の曲線につき水滴が蒸発して消滅してしまつた時刻を原点にとり、 t 軸の方向は左方へ正にとる。第1表の測定値を用いて A, B を計算すると第2表の如くなる。

次に(4)式で $R = 8.31 \times 10^7 \text{ erg/K}^\circ, M = 18.0$ を代入し、

圧力 P を mmHg 、半径 a を μ で表すと、

$$t_{12} = 1.74 \times 10^{-5} \frac{T}{D(P_0 - P_\infty)} (a_1^2 - a_2^2) + 4.04 \times 10^{-4} \frac{\sqrt{T}}{\alpha(P_0 - P_\infty)} (a_1 - a_2), \text{ 但し } \alpha = \frac{\beta}{1 - \frac{\beta}{2}} \quad (7)$$

T はアスマン通風乾濕計の濕球温度を使用し、 D はMontgomeryによる値(第3表)を使用して夫々の實驗式の a^2 の係数と比較する事により $P_0 - P_\infty$ の値を求め、之を第2表第3行に示した

又この $P_0 - P_\infty$ の値を用いて α を求め之を第4行に示した。その平均は $\alpha = 0.023$ となつた。第5行はアスマン吸氣乾濕計で觀測した $P_0 - P_\infty$ の値である。なお第5行の $P_0 - P_\infty$ を使用した時の α の値を計算し第6行に示したその平均は $\alpha = 0.018$ となつた。

第 1 圖

測定装置

第 2 圖

§ 3 結論

以上簡単に現在运行つた實驗につき述べたが我々の測定範囲では半径の一次の項を含めた辻氏の理論式とほぼ一致する結果を得た。即ち水滴の表面は飽和せず不飽和であると考えの方が妥當であると思われる。水滴の蒸発

速度が辻氏の式によるものとして水の凝縮係数を求めると 0.023 となつた。現在迄水の凝縮係数については Alty⁽⁶⁾, 中尾・荒原⁽⁸⁾, 吉田・中山⁽⁹⁾, Schmidt⁽¹⁰⁾, Rideal⁽¹¹⁾ 等による測定値があるがそれ等は皆値がまちまちである。その何れが正しいかについては未だはつきりした結論を下すことは出来ないが、今 Alty の値と我々の値とを比較すると第 4 表の如くなりほぼ一致する

第 1 表

半径 (μ)	時間 (sec)					
	I	II	III	IV	V	VI
25.0		0.0				
22.5	0.0	6.0				
20.0	4.0	10.5	0.0			
17.5	7.0	15.0	4.0			
15.0	9.5	19.0	8.0	0.0	0.0	3.0
12.5	12.5	22.5	11.0	2.5	3.0	6.0
10.0	13.5	25.5	14.5	5.0	5.0	9.0
7.5	15.5	28.0	17.5	7.0	8.0	12.0
5.0	17.0	30.5	21.0	9.0	9.5	15.0
2.5	18.5	33.0	22.5	10.5	11.5	17.0
0	20.0	35.0	23.0	11.5	12.0	17.5
乾球	5.8°C	5.8°C	6.2°C	5.6°C	5.6°C	6.0°C
濕球	3.0°C	3.8°C	4.6°C	3.7°C	3.6°C	4.3°C

第 3 表

温度(°C)	擴散係数(cm ² sec ⁻¹)
-20	0.197
-10	0.211
0	0.226
10	0.241
20	0.257
30	0.273

第 2 表

実験番号	I	II	III	IV	V	VI	
A	0.019	0.029	0.035	0.034	0.030	0.033	
B	0.44	0.66	0.47	0.32	0.35	0.44	
$P_s - P_{\infty}$	1.09	0.71	0.59	0.61	0.69	0.62	平均
α	0.014	0.014	0.024	0.034	0.028	0.025	0.023
実験(1)より $P_s - P_{\infty}$	1.23	0.90	0.75	0.85	0.89	0.78	平均
α	0.012	0.011	0.019	0.025	0.022	0.020	0.018

第 4 表

我々の測定値	0.023 (3°C 5°C)		
Alty の測定値	0.036 (0°C)	0.027 (4°C)	0.016 (5.9°C)

第 2 表に於て實驗式から得た $P_g - P_{\infty}$ と實測から求めた $P_g - P_{\infty}$ が一致しなく約 0.2 mmHg の差が有るのは水滴の近傍と室の蒸氣圧とが同一で無く水滴の近くでは蒸発により蒸氣圧が少し大きくなつていていると考える事によりうなづかれる

最後に第 2 表を使用して蒸発速度 $\frac{dm}{dt}$ を計算すると下表の如くなる。

半 径 (μ)	50	40	30	20	10
$\frac{dm}{dt}$ (μ^3/sec)	9.0×10^3	6.6×10^3	4.8×10^3	2.9×10^3	1.2×10^3

この研究費の一部分は文部省科学研究費によるものであり、又中央氣象台氣象研究所の寺田一彦博士及び辻幹男氏には種々御助力を仰いだ、こゝに厚く感謝する

文 献

- (1) Frössling : Gerl. Beit. z. Gophys., 52 (1938) 170
- (2) 辻幹男 : 氣象集誌, 第 2 輯, 26 (1948) 特別號 40
- (3) 萩原断二 : 氣象集誌, 第 2 輯, 22 (1944) 134
- (4) 眞島正市, 研野作一 : 理化学研究所彙報 9 (1930) 389
- (5) 高橋喜彦 : 氣象集誌, 第 2 輯, 13 (1935) 302, 應用物理, 4 (1935) 270
- (6) Alty : Proc. Roy. Soc., (A) 145 (1935) 104
- (7) Montgomery : Jour. Meteo., 4 (1947) 193
- (8) 中尾一寛原 : 現代膠質学の展望
- (9) 吉田一中山 : 低温科学, 2
- (10) Schmidt : "Techn. Mech. Thermodynamik", I (1930) 2
- (11) Rideal : J. Phys. Chem., 29 (1925) 1585

(昭和 24 年 5 月 13 日受理)