霧滴の蒸発に関する実験*

(蒸発の研究 VI)

萩原 晁 二**

§1 緒言

霧滴の蒸発に就いてはその測定が極めて困難である爲に最近に至る迄殆ど実験的な研究が行はれてゐない。著者⁽¹⁾は先に理論的研究によつて霧滴の蒸発公式を求めた。今回は此の公式の当否を判定する目的で一つの実験を試みたのでその結果に就いて述べてみようと思ふ。一昨年北大の吉田教授⁽²⁾は室内に侵入する霧の消散を測定して著者の公式と比較されてゐるがその結果に就いては後に述べる事にする

霧滴の蒸発速度を測定するには落下してゐる霧滴を捉へてその大きさの変化を測定するのが一番都合良いので最初此の方法によつて実験を行はうとしたが次に述べる様な事情の爲に之を断念せざるを得なかつた。即ち Kneusel⁽³⁾が自然落下法によつて霧滴の大きさを測る目的で造つた装置の一部を改良して顕微鏡とランプとを同一の高さの儘で上下出来る様にし、自然に落下する霧滴の落下速度が蒸発によつて変化する割合を知らうとしたのである。然しながら実際に此の装置で実験を行つてみると大きい霧滴ではその落下速度が余り大き過ぎて追跡は困難であつた。又小さい霧滴を捉へる爲には高倍率の顕微鏡を必要とするが此の様な顕微鏡の視野は深度が浅い爲に顕微鏡やランプを上下させる装置の僅かなガタによつて之を見逃してしまふ事が多い爲に実験は非常に困難であつた。此の外霧滴を見る爲には相当の明るさのランプを必要とし之が放出する熱の影響が無視出来ない事などの爲に遂に此の方法を断念せざるを得なかつたのである

我々が今度用いた方法は次に述べる様に間接的な方法である。蒸発公式によると半径 a_1 の霧滴が H の高さを落下した後にその大きさが a_2 になるものとすれば

$$H = \frac{g}{18k\mu(C_0 - C_\infty)} \left\{ a_1^4 \left(1 - \frac{4}{7} \alpha_1 a_1 \right) - a_2^4 \left(1 - \frac{4}{7} \alpha_2 a_2 \right) \right\} \quad (1)$$

で與へられる。又此の落下に要した時間は

$$T = \frac{1}{2k(C_0 - C_\infty)} \left\{ a_1^2 \left(1 - \frac{2}{5} \alpha_1 a_1 \right) - a_2^2 \left(1 - \frac{2}{5} \alpha_2 a_2 \right) \right\} \quad (2)$$

である。ここに k = 水蒸氣の擴散係数; μ = 空氣の粘性係数; g = 重力の加速度; C_0, C_∞ = 霧滴の表面及び空氣中の水蒸氣密度; $\alpha_1 = \frac{\mu_1}{2k}$; $\mu_1 = a_1$ の落下速度 $= \frac{2g}{9\mu} a_1^2$ である。今之等二つの式

* S. Ogiwara: Experimental Studies on the Evaporation of Fog Particles (Studies on Evaporation Part VI)

** 東北大學理學部地球物理學教室。

(1) 萩原晁二: 蒸発の研究 II III 氣象集誌 (昭和19年)

(2) 吉田順五: 霧粒の蒸発に関する一測定、霧の研究 (學研第151班霧班昭和20年)

(3) St. Kneusel: Met. ZS. 52. (1935)

から a_1 を消去すれば a_2 T ・ H の間の関係が得られる 我々は之等三つのものを測定して蒸発公式の当否を判定しようとしたのである

§2 実験の方法

実験は極めて簡単であつて長さ61.4cm・直径2cmのガラス管の中を上方から霧吹きによつて作られた霧滴を落下させ管の下端には Mobil 油を塗つた deck glass を置いて霧滴を捕捉する様にした。最初管の上端には蓋をし、下端には deck glass を置いて霧を作り適当な時刻に蓋を取る それから T 秒後に下の deck glass を取り出してその上に捉へられた霧滴の大きさを顕微鏡で測定するのである

今時刻の測り初めに丁度管の上端にあつた霧滴が丁度 T 秒後に deck glass の上に落下したものとす。此の霧滴よりも小さい霧滴は時刻の測り初めには管の上端又はそれより上にあつたのであるから T 秒後には未だ deck glass には到達してゐない筈である。それ故蒸発公式が正しいとすれば捉へられた霧滴の大きさは(1)・(2)式から計算した霧滴の大きさ a_2 に等しいが又はそれよりも大きい筈である。即ち一つの実験で捉へられた霧滴の中最も小さいものを a'_2 とすれば $a'_2 \geq a_2$ である。然しながら時間 T を色々に変へて多くの実験を繰返へすならば a_1 の大きさの霧滴が時刻の測り初めに丁度管の上端に来る場合もあり得るであらう。従つて多くの実験を行つて計算値 a_2 と最小実測値 a'_2 との関係を図示すれば第1図の●印で示された点の様になり a'_2 の最小値は a_2 に充分近いものとなるであらう 若しこの様な結果が得られれば蒸発公式は正しいものと考えられる事が出来る 又若し誤であるならば例へば×印又は○印で示された様な分布を示すであらう

我々の用いた方法は以上の通りであるが我々の目的は同一の a_2 に対応する多くの a'_2 の値の中で最も小さいものが a_2 である事を示せば良いのであるから時刻の測り初め即ち蓋を取る時に管の上端にあつた霧滴が丁度 T 秒後に deck glass の上に落下する事が望ましい。此の爲には霧吹きで作る霧滴の大きさと測定時間 T とを適当に調節する事が必要である。霧滴の落下後長時間を経て deck glass を取り出せば必ず $a'_2 \gg a_2$ であるから利用價值が無い事になる 此の爲に deck glass の直ぐ上に別の deck glass を置き下の glass と入れ代りに之と管の下に入れ下のものを取去つた後にも尚霧滴が管の中を落下してゐるかどうかを調べた。若し上のものにも霧滴が捕捉されてゐるならば下の glass に捕捉された霧滴は落下後余り時間を経過してゐないであらうと云ふ想像がつく それ故両方の glass に霧滴が捕捉される様に時間 T を調節した。

§3 実験の結果

実験は12月16日から19日迄の間に100回行つた。気温は5度乃至9度、湿度は60乃至80%であつた。測定の結果 deck glass 上に霧滴の認められなかつたもの、最小霧滴の大きさが 4.0μ 以上であつたもの及び油の上で霧滴が蒸発してゐるもの等を除外すると使用出来る材料は70であつた。半径 4.0μ 以上のものにはその運動に対する Stokes の法則が適用されないので除外したのである 通常1回の測定につき霧滴は2, 30個認める事が出来た

実験の結果を表はすに第1図の様に実測した霧滴の大きいさと計算から求めた大きいさとの関係を用ひないで(1)、(2)式に高さ h と実測した霧滴の大きいさとを入れて計算した時間 T と実測した時間 T' との関係を示す事にした。之は実験の誤差を見積る際に便利な爲である。尙此の計算には常数の値として $k=0.237$, $\mu=175 \times 10^{-6}$ (700の値)を用ひた

縦軸に $T'-T$, 横軸に測定した霧滴の半径 a_2 を取つて実験の結果を図示すると第2図の様になる。又実験結果の例を第1表に示した。 $T'-T$ の余り大きいものは利用価値が少いので第2図には+20秒以上のもの(17回)を

第1図

第2図

第1表

12月16日

番号	観測時刻	気温	湿度	$(C_0 - C_\infty) \times 10^5$	a_2	T' (測定)	T (計算)	a_1	$\frac{H}{\mu a_2}$	
1	10h22m	5.5	68	1.23	50<	6.3				
2	28	5.7	70	1.18	26	6.0	6.0	33	7.2	
3	33	5.7	71	1.19	25	6.1	6.1	32	7.8	
4	40	5.9	68	1.25	27	5.4	5.4	33	6.7	
5	45	5.9	68	1.25	25	5.6	6.1	32	7.8	
6	53	5.9	68	1.25	31	5.8	4.1	35	5.2	
7	11h10m	6.1	68	1.27	27	5.3	5.3	33	6.7	
8	16	6.1	68	1.27		5.8				
9	18	6.1	68	1.27	36	7.2	3.4	40	3.8	
10	25	6.1	68	1.27						

a_1 は a_2 の霧滴が T 秒を要して deck glass に達したものと同定した場合の管の上端における大きいさ (計算)

a_2 は実測値

省略した 第2図の各点は気温及び湿度には無関係に一樣に分布してゐる。霧吹きで作られる霧滴は半径25~40 μ のものが大部分で測定された霧滴の大きいさは25~35 μ のものが多かつた。それ故余り小さい霧滴に就いては充分の測定値が得られなかつた。第2図によれば霧滴のすべての大きいさに対して $T'-T$ の最小値は0に殆ど等しいので蒸発公式は大体に於て正しいものと考えられる事が出来るが尙その結果に対しては多くの考察を必要とする。

§4 実験の誤差及び結果に対する論議

次に実験の際起り得る誤差の原因及びその大きいさに就いて考へてみよう

(1) 硝子管内の氣流の影響

半径20 μ の霧滴の落下速度は5 cm/sec程度であるから硝子管中に僅かな空氣の流れがあつてもその影響は無視出来ない程度のもとなる。此の影響を避ける爲に室内の空氣の動搖や部分的の過熱によつて生ずる氣流等を極力なくす様努めた。煙草の煙によつて管の上下端附近を調べた結果では此の影響は全く認められなかつた。

(2) 時間の測定の誤差

時間は Stop Watch で測定したが余り急激にガラス管の蓋を取る事は好ましくない事などの爲に時間 T の測定には多少の誤差を伴ふものと考へねばならない。この誤差は大体 0.2 秒位のものと思はれる。

(3) 霧滴の大いさの測定に伴ふ誤差

顕微鏡の倍率は 275 倍であつたから micrometer の $\frac{1}{2} \text{ mm}$ を測定し得るものとしてその誤差は 1μ (直径 2μ) 程度である。半径に 1μ の誤差がある場合に之から計算した時間 T に生ずる誤差は次の様にして求められる。(2) 式から

$$\frac{dT}{d\alpha_2} = \frac{1}{k(C_0 - C_\infty)} (\alpha_1 \frac{d\alpha_1}{d\alpha_2} - \alpha_2)$$

$$\text{又(1)式から } \alpha_1^3 \frac{d\alpha_1}{d\alpha_2} - \alpha_2^3 = 0$$

之等の式では α_1 を 1 に比べて小さいとして省略した。之より

$$\frac{dT}{d\alpha_2} = \frac{\alpha_2}{k(C_0 - C_\infty)} \left(\frac{\alpha_2^2}{\alpha_1^3} - 1 \right)$$

今此の式から実験中の気温、湿度に相当する $C_0 - C_\infty = 10 \sim 1.6 \times 10^{-6}$ の値に対する T の誤差を計算すると次の様になる

$C_0 - C_\infty$	1.0	1.2	1.4	1.6×10^{-6}
α				
20 μ	-0.43	-0.39	-0.35	-0.31 sec
30 μ	-0.27	-0.25	-0.23	-0.22 sec

誤差の負号は霧滴を大きく見誤つた場合には時間 T を小さく見積り過ぎた事を意味する。

(4) 油の上の霧滴の蒸発

霧滴の自然落下速度は小さいので気温が低くて油の粘性が大きい時には霧滴は油の中に全部入る事なくその一部から蒸発する。若し蒸発してあるものを知らずに測つたとすれば計算から得られた時間 T は実際よりも大きく出る事になる。(上の表より) 即ち第 2 図で T が小さくなり又は負の値となる 実際の場合顕微鏡の視野は深度が極めて浅い爲に油の中に全部入らない様な霧滴は識別が比較的容易であり又室内の湿度が可成り低かつた爲に蒸発してあるものはその状況を認める事が出来た。従つて蒸発しつつある霧滴の認められた様な場合にはその材料を用ひない様にした。

(5) 最小霧滴を見落した場合

顕微鏡の視野が狭い爲に短時間に全部の霧滴を見る事は困難であつた。此の爲に最小の霧滴を見落した場合もあつたらうと思はれる。此の様な時は霧滴を大きく見誤つてゐる場合に相当するので $T' - T$ は大きくなる 然しながら之は実験の誤差とは別物である。何となれば見落した小霧滴が此の場合霧吹きによつて作られなかつたものと考えても同じ結果になるからである

(6) 硝子管内の気温及び湿度の変化

気温及び湿度は硝子管の近くで Assmann 通風乾濕計を用ひて測定したので管の中の気温や湿度が外部と同一になつてゐる事が必要である 此の爲には実験の行はれてゐない時には上下の蓋を取り去つて良く通風が行はれる様にした 又霧滴が管の中で蒸発する爲に起る気温や湿度の変化は計算の結果余り小さくて問題にならない程度であつた

(7) 霧滴の温度

霧滴の温度 T_0 は既に理論的な計算に依つて求められてゐるが⁽¹⁾之を実験的に確かめる事は極めて困難である。計算の結果によれば之は湿球温度に殆ど等しいので我々は T_0 として之を用ひた。唯霧吹きを用ひた爲に最初霧滴の温度は室内の湿球温度よりも相当高かつたのではないかと考へられる。今此の影響を調べる爲に霧滴の温度 T_0 が時間と共に変化するものとする。と蒸発の研究 V に於ける雨滴の場合と同様の考へによつて $\frac{4}{3}\pi r^3 \frac{dT_0}{dt} + 4\pi r k a (C_0 - C_\infty)(1 + \alpha a) + 4\pi r \lambda a (T_0 - T_\infty)(1 + \alpha a) = 0$ と云ふ式が成立つ。但し l = 水の氣化熱、 λ = 空氣の熱傳導度、 $\alpha' = \frac{C_p \rho \mu}{2\lambda}$ 、 C_p = 空氣の定圧比熱、 ρ = 空氣の密度である。霧滴が輻射で失ふ熱量は計算の結果極めて小さいので省略した

最初霧滴の温度が空氣の湿球温度よりも高いとし之が湿球温度より 0.1° だけ高い温度になる迄に要する時間を計算してみよう a の変化は小さいものとして氣温 70° 、湿度 70% の場合に $a = 30\mu$ の霧滴に就いて近似計算を行ふと次の様になる

最初の霧滴の温度 と湿球温度との差	所要時間	この間に落下する距離
5°	約 $\frac{1}{5}$ 秒	約 2 厘
10°	約 $\frac{1}{4.5}$ 秒	約 2.5 厘
20°	約 $\frac{1}{4}$ 秒	約 3 厘

尙此の所要時間は霧滴の半径の自乗に比例するので小霧滴ではもつと短時間になる。従つてこの影響は全く考へる必要のない事が分つた。

以上種々の誤差を考慮に入れても実験の結果は理論式と矛盾しない様に思はれるが尙念の爲に蒸発公式の係数を少しく変へた場合に第 2 図の結果がどの様になるものかを調べてみよう

蒸発公式

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) = -4\pi r k a (C_0 - C_\infty)(1 + \alpha a) \quad \text{----- (3)}$$

に於て蒸発速度が $C_0 - C_\infty$ に比例する事は容器に入れた液体の蒸発、大きい液滴の蒸発の場合に就いて実験並びに理論的に確かめられてゐるので霧滴の場合もその通りであると考え。又蒸発速度が半径に比例する事は霧滴が静止してゐる場合に就いては確かめられてをり⁽²⁾此の形を任意に変へてその係数を求める事は今度の実験からは不可能であるので矢張り半径に比例するものと仮定しよう。(3)式の右辺の係数 $4\pi r k$ の値を変へた場合に時間 T がどれ程変化するかを計算してみると霧滴の大きさによつて多少異なるが係数の 10% の変化に対して T の変化は 0.2 秒以下である事が分つた。それ故実験の結果及び誤差の大きさを考慮して蒸発公式の係数に誤があるとしても大凡 10% 以下であると云ふ事が分る

次に初めにも述べた吉田教授の実験結果に就いて一言しよう。此の実験によると $18^\circ 0.80\%$ の空氣中で直径 35μ の霧滴は 4 秒で消滅する。我々の計算によると之は 4.2 秒であつて之と良く一致する。吉田教授は計算の結果を 2 秒とされてゐるが之は霧滴の温度に就いての研究(第 5 報)が未発表であつた爲氣温に等しいとした爲である

(1) 萩原晴二：蒸発の研究 V，氣象集誌に掲載の答

(2) 萩原晴二，中西定一，鹽原正宏：霧滴の蒸発、及び霧滴と視程との關係に就いて 氣象集誌掲載の答。

§5 結語

我々は霧滴の蒸発速度を直接測定して実験式を求め之と理論式とを比較する事の出来なかつた事を非常に遺憾とするが今度の実験結果の外次の二つの事実よりしても先に得られた蒸発公式が正しいものと認めて良いであらうと思ふ。

(1) 大きい水滴の蒸発に就いて Frössling⁽¹⁾ が求めた実験式と霧滴の蒸発公式とがその境界で連続的に結び付けられる事(蒸発の研究IV)。

(2) 吉田教授の実験結果が理論と一致する事。

終りに臨み此の実験の研究費に特別の御配慮を賜はつた北大中谷宇吉郎先生、常に御指導と御激励を賜はる中央气象台長藤原先生及び地球物理学教室加藤愛雄先生に厚く御礼申上げる次第である。尚此の実験には地球物理学教室研究補助菅野常吉君の有益なる援助を受けた。厚く感謝の意を表したい。

対流雲中の気温並びに雲滴の生長に就いて*

(降水機巧の研究 I)

藤原 晰 二**

§1 緒言

大氣中に起る凝結現象には凝結核が重要な役割を果している事は疑ふ余地はないが未だその性質大いさ 数等が充分に分つてゐない爲に之を實際の大氣中に起る凝結現象と結び付けた研究は余り行はれてゐない様である。高橋喜彦氏⁽¹⁾ は空氣の体積が一定の場合に凝結によつて生ずる霧滴の最初の大いさを求め $0.5 \sim 15 \mu$ の程度であると云ふ結果を得てゐる。著者は上昇氣流によつて出来る雲滴がどの様に生長してゆくか又雲の中の溫度はどの様に変化するかに就いて研究した。

§2 準静力学的変化の場合

今半径 r の凝結核を n 個含む $16r$ の空氣塊が対流等の原因によつて断熱的に上昇する場合を考へる。此の凝結核を不溶性のものとすればその上の飽和水蒸氣張力 E_d は

$$E_d' = E_d e^{\frac{2\alpha M}{R T_d}} \quad \text{-----} \quad (1)$$

によつて與へられる。こゝに α は水の表面張力、 M は水の分子量、 R は氣體常数、 T_d は凝結核の溫度、 E_d は T_d に於ける平面上の飽和水蒸氣張力である。凝結が初まつてからは T_d, E_d は夫

(1) V. Frössling: Über die Verdunstung fallender Tropfen, Beitr. 2. Geophys. 52 (1938).

* S. Ogiwara: On the Temperature of the Air and the Growth of Cloud Particles in Convective Clouds (Studies on the Formation of cloud and Rain, Part I)

** 東北大學理學部地球物理學係室

(1) 高橋喜彦: 霧滴の最初の大いさ 氣象集誌 21, 355-364 (昭和18年)