



Title	霧粒の大きさ及び数の測定法について
Author(s)	小口, 八郎
Citation	低温科学, 2, 105-118
Issue Date	1949-10-20
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17406
Type	departmental bulletin paper
File Information	2_p105-118.pdf



霧粒の大きさ及び数の測定法について*

大学院特別研究生 小口八郎**

緒言

霧粒測定法の歴史的概観

霧粒或ひは雲粒の大きさの測定には従来色々な方法が試みられて来た。それ等の測定法を大別すれば次の如くなる。即ち、I. 直接法、II. 間接法である。

I の直接法は霧粒を適当な方法で捕捉して、その大きさを直接顕微鏡下で観測する方法である。その測定には單なる鏡檢の場合と寫眞測定の場合とがある。Assmann⁽¹⁾ が水に不溶性の油膜上に霧粒を捕捉して測定したのが此の方法の初期の研究であつて、この Assmann の方法が其の後色々改良されて澤山の人々によつて繼承されたのである。H. Köhler⁽²⁾ は白金線に雲粒を着けて顕微鏡下でその直径を測定したことがある。V. Hagemann⁽³⁾ は Assmann の油膜法に依る霧粒測定法に嚴密な檢討を加へ、同時に粒の大きさばかりでなく数の測定法をも研究して、この種の測定法の基準を定めた。その後 Neumann⁽⁴⁾ は Hagemann の測定法に倣つて、北海の海霧について測定を行つた。

II の間接法は、更に次の三種に分けられる。即ち、i) 自由落下法、ii) 光環法及び iii) 其の他の方法の三種である。i) の自由落下法は、霧粒を自由落下せしめて、その落下速度を測定し、Stokes の式より霧粒の直径を算出する方法である。この方法も二三の人々によつて行はれて居る。例へば St. Kneusel⁽⁵⁾ はこの方法で各種の霧及び雲粒に就いてその粒を測定し、又近年福田⁽⁶⁾ 氏は筑波山に於ける觀測で霧粒の大きさが或群分布をなす事を提唱してゐる。筆者等は顯微鏡の視野内で自由落下速度を測定する装置を作り、天然の霧に就いて測定した。ii) の光環法は霧中の光源に依つて生ずる光環の大きさ、即ち視角が霧粒の大きさに比例する事を利用し、光環の視

* 北海道大學低溫科學研究所業績 第 32 號。

** 北大理學部物理學教室。指導教授、北大教授 中谷宇吉郎。

- (1) Assmann: Met. Zeit., 1885, S. 41.
- (2) H. Köhler: Met. Zeit., 1921, S. 351.
- (3) V. Hagemann: Gerl. Beitr. Geophys., 46 (1936), S. 261.
- (4) Neumann: Gerl. Beitr. Geophys., 56 (1940), S. 49.
- (5) St. Kneusel: Met. Zeit., 1935, S. 64.
- (6) 福田: 中央氣象臺彙報, 20 (昭和 17 年), 185 頁。
- (7) 吉田順五, 小口八郎: 低溫科學, 第 2 輯, 69 頁參照。
- (8) Pernter-Exner: Meteorologische Optik. Wien u. Leipzig, 1922.
- (9) Mecke: Ann. d. Physik., 61 (1920), S. 471; 62 (1920), S. 623.

角測定から霧粒の平均半径を算出する方法である。この方法は、Pernter 及び Exner, Mecke,⁽⁸⁾⁽⁹⁾
Wagner, K. Köhler⁽¹⁾ 等に依り精密な研究がなされ、その測定法は殆んど完成の域に達した。
iii) のその他の方法中には、流線法⁽¹⁾, Trabert の式に依り視程と霧水量とより求むる法⁽⁴⁾, Fin-
deisen の方法及び H. Köhler の樹氷秤量に依る方法等⁽⁵⁾⁽⁶⁾がある。これ等はそれぞれ特殊の目的の
爲に考案されたものである。

諸方法の吟味

上述の如く霧粒の測定法には多種多様の方法があるが、いづれも一長一短の特徴がある。それ
で上述の諸方法を検討してみる。光環法は自然の状態その儘で測定し得るので、測定操作に依る
誤差は殆んどない。しかしこの方法では單に霧粒の平均の大きさのみを知り得るに過ぎないので
粒径の分布曲線の形は分らない。又數の測定も不可能である。例へば霧が消散過程にある場合に
は、粒径の分布曲線も數も共に急激に變化して居るのであるが、さういふ場合の霧の性質の測定
には殆んど役に立たない。

次に理論的にみて尤も安全なのは自由落下法⁽⁷⁾であるが、筆者等の經驗よりすれば、この方法に
は實施上次の如き難點がある。即ち、落下速度の測定に暗視野照明法を用ひる必要があるが、そ
の光源の熱的影響を完全に除去する事がかなり困難である。特に小粒子の場合には光源を強くす
る必要があるのでこの困難が増す。これ等の外に自由落下をさせる静止空氣室を作る事が容易で
はなく、又その静止空氣室の中に霧粒を相當數導入する事も著しく困難である。この難點も亦小
粒子の場合に著しく現はれ、結局霧粒が小さい場合には、この自由落下法は適用出來ないと言つ
てよい。

油膜捕捉に依る測定法中粒径測定について先づ考へてみるに、その誤差の生ずべき點が二三あ
る。先づ油膜中で霧粒が球形から變形するおそれがあり、又不適性油を用ひると油膜中で粒子が
變化する心配もある。又寫眞測定をする場合には技術的な誤差も入るおそれがある。球形からの
變形については既に研究があり、⁽⁸⁾適當な油の中では水滴は完全に球形を保つ事が明かになつて居
る。次の難點に對しては適性油を撰擇すればよいので、その點に就いては本文で詳述する。又寫
眞測定による誤差も注意する事に依つて除き得る事も後述の如くである。次に數の測定について

- (1) Wagner: Siss-Ber. Wien. Dez., 1908.
- (2) K. Köhler: Met. Zeit., 1921, S. 351.
- (3) Albrecht: Handb. meteor. Instr. Kleinschmidt, 1935 参照.
- (4) Albrecht: 同上.
- (5) Findeisen: Gerl-Beitr. Geophys., 35 (1932), S. 295.
- (6) H. Köhler: 前出.
- (7) 吉田, 小口: 前出.
- (8) F. Häusser u. Strobel: Zeitschr. Techn. Phys., 5 (1922), S. 151.

(1) は、Hagemann の詳細な研究に依る吸入法に依つて霧粒をかなりの程度まで完全に捕捉出来るので、この吸入法を用ひると誤差を少くすることが出来る。以上に挙げた諸注意を心得て居れば油膜方法は至極簡便な方法で、又連続測定にも適する。短時間に大きさと数との同時測定を可能とする方法は他にないので、筆者はこの油膜法を採用する事にした。その実施上更に考慮すべき點は捕捉方法を一層改良すること、適性油の吟味を嚴にすること、其の他操作全般に互つて萬遍なく綿密なる注意を拂ふことである。本論文の要旨はこの點にあるのであつて、新たに測定器具を設計製作し、これについて測定法の基準を定めることを期した。

§ 1. 霧粒測定装置並に測定法

本研究で採用した油膜法で先づ問題となるのは油に依る霧粒捕捉の方法である。この捕捉法として従来行はれて來たのは次の三種である。第一に、油を塗布せる硝子板を顯微鏡下に置き、顯微鏡視野内に落ち込む霧粒を測定するのが一番簡単な方法である。然しこの方法では小粒子の捕捉が出来ず、且つ蒸發のおそれがあるので採用しないことにした。次に油を塗布した硝子板を風向に直角に露出し、自然風で捕捉する方法がある。これを露出法と名付けることにする。第三に Hagemann⁽²⁾ に従ひ、大氣中より一定容積の霧を含む空気を吸入して捕捉する方法がある。これを吸入法とする。この露出法と吸入法とが従来主として行はれて來た方法で、後に述べる如くこの兩方法を各々獨立に用ひるとそれぞれ損失がある。それで本測定に於てはこの兩者の方法を併用し、各々の優れた點を採用するに努めた。その結果吸入法に重きを置きその不利な點を露出法で補ふのが一番よい方法であることを知つた。

露出法では大きさ 20 mm 角の顯微鏡の蓋硝子板に油を塗り、風向に直角に露出し、同時に風速並に露出時間を測定することにした。適當時間露出して、霧粒を捕捉した後直ちに顯微鏡寫眞を撮るのである。露出法に依る霧粒寫眞より、霧粒の密度個数を算出するには次の如くする。即ち大氣 1 cm³ 中に存在する霧粒個数を n とすれば、

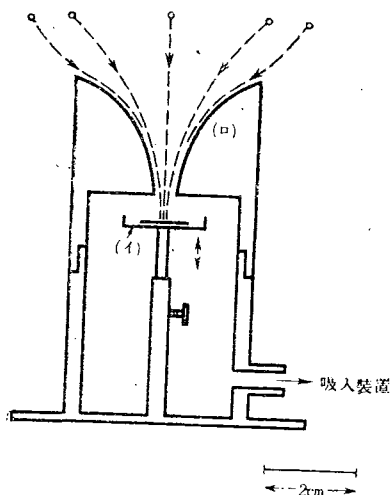
$$n = \frac{N}{StV}$$

となる。但し、 N は寫眞中の粒子總數、 S は捕捉面積、 t は露出時間で V は風速である。この式は S 面に直角な大氣柱内の霧粒が全部 S 面に捕捉される事を假定して居るのであるが、實際は流線に沿つて多數の霧粒が逃げるので、之から出した霧粒の數 n は實際の値よりかなり小さくなる筈である。その點に就いては § 2. で詳しく述べる。

(1) Hagemann: 前出.

(2) Hagemann: 前出.

吸入法に用ひる吸入装置は、Hagemann⁽¹⁾の装置と原理は同じもので、新たに二種の吸入器を試作した。その一種は第1圖に示す如き形をして居る。之をA型とする。別種のもは、第1圖に示したものとほぼ同形であるが、たゞ吸入口の大き及び流線形を少し變へたものである。之をB型とする。吸入口の流線の開いた方を外口、閉じた方を内口とすれば、A型は外口径4cm



第 1 圖

で内口径0.5cmである。これに對して、B型は外口径2cmで内口径0.4cmである。従つてB型はA型に比して外口径の内口径に對する比が大であり、内外口を接続する吸入口壁の流線形の曲率はB型の方がA型のものより小さい。A型及びB型に就き自然霧でその捕捉能力を検討した所に依れば、A型は霧粒大なる場合も小なる場合も共に適し、B型は霧粒小なる場合にのみ適する傾向がある事がわかつた。然しA型では吸入内口が大きいので、従つて霧粒捕捉面積も大となり、數測定の場合の如く霧粒全部を寫眞に撮る必要がある場合には、餘程の低倍率で撮らねばならない。一方可成りの低倍率で撮ると小粒子が消失するおそれがあるので、結局A型は霧粒の大きい場合に適する。それで、霧の性質及び

測定目的に依り、A型、B型それぞれの適性に應じて使用した。

吸入法は次の如くする。即ち第1圖に示す如く、20mm角の顯微鏡蓋硝子板に油を塗布し、之を上下に移動し得る臺(イ)上に置き、吸入口(口)から霧を含んだ大氣を吸ひ込んで、霧粒を油膜上に衝突させるのである。吸入口は多くの場合風向に向けて使用する。吸入の装置には50ccの注射器の硝子部分を用ひ、手で適當な速度で引いた。吸入容積は20乃至60ccで、吸入速度は風速及び霧粒の大きさに依つて適當な速度を撰んだ。この吸入速度は速きに過ぎても遅きに失しても不可である。この點については後節で述べる。數が必要でなく粒徑の分布曲線だけが必要な場合には口で吸ふのが一番簡單で調節が自由にきく爲結果も良好である。第1圖の吸入装置A型の寫眞を寫眞1に示す。

吸入法に依る霧粒數の測定は次の如くする。即ち、一定容積中の霧粒全部或ひは大部分が蓋硝子上の中央部分に捕捉されるので、その全體を視野の廣い低倍率の顯微鏡で寫眞に撮り、それを引伸ばして霧粒の總數を算へる。寫眞4がこの密度個數測定用寫眞の一例である。

大きさの測定は數の測定と同時に進行する必要があるもので、この低倍率の寫眞撮影後直に同一資料

(1) Hagemann: 前出。

の各部分に付高倍率で適當枚數撮影する。その寫眞を更に引伸し、實物の 500 倍にして、その上で四捨五入して 1 mm の精度で粒子の直径を測定する。そして粒径の頻度分布曲線を作るのである。寫眞 4 の一部を大きさ測定用として高倍率で撮影した寫眞を寫眞 5 に示す。この程度の鮮明度に撮れれば寫眞測定 of 誤差は極めて小さくなる。

露出法並に吸入法ともに顯微鏡寫眞は全部ライカカメラで撮つた。少し馴れれば短時間内に多數の寫眞を撮影し得るやうになり、數及び大きさの同時測定に必要な枚數、即ち 5 枚乃至 10 枚の寫眞が 30 秒乃至 100 秒以内に撮れるやうになる。

§ 2. 露出法及び吸入法による霧粒捕捉様式の比較

露出法と吸入法との差は霧粒捕捉の問題にかゝつて居る。兩者の霧粒捕捉能力の差は風速、霧粒の大きさ、密度個數等に依り變化するので、その點を検討して置く必要がある。露出法の捕捉能力は硝子板の大きさにも依るので、幅の狭い硝子板を使ふと能率はよくなる。その例は菅谷氏⁽¹⁾の高山に於ける霧粒觀測の際に注意されて居る通りである。しかし本研究では便宜上前後を通じて 20 mm 角の一定の硝子板を用ひた。

實驗室内で人工霧について研究した結果によれば、豫期の通り大粒のものがよく捕捉され、小粒の霧は逃げ易いことが確められた。又風速にも關係があり、風速が弱く 0.2 乃至 1.0 m/sec 程度の場合は、小粒は勿論直径 50 乃至 100 μ 程度の大粒子のものも、露出法では著しく霧粒が逸散し、捕捉方法としてはこの方法は不適當である事が知られた。物體に依る霧粒捕捉の問題は着水の問題に關連して、理論的には既に十分に研究されて居る。本實驗の結果も定性的には従來の知識と大體一致して居る。硝子板を廻つて風が流れる場合に霧粒の一部が流線にのつて逸散する状態を暗視野照明法に依り撮影したのが寫眞 2 である。

吸入法は露出法に比して良好なる結果を示した。第 1 圖の装置を用ひて硝子板の上に捕捉した全霧粒の分布状態をみると、比較的大粒のものが中心部分にあり、小粒子が周邊に並んで略一様に一定直径の圓内に霧粒が捕捉され、その外には霧粒の殆んどない油の面が見られる。即ち、吸入口を通つた霧粒は殆んど全部捕捉されると見て差支へない。問題は吸入口に入る前に一部の粒子が逃げる點であつて、その點については次節で述べる。

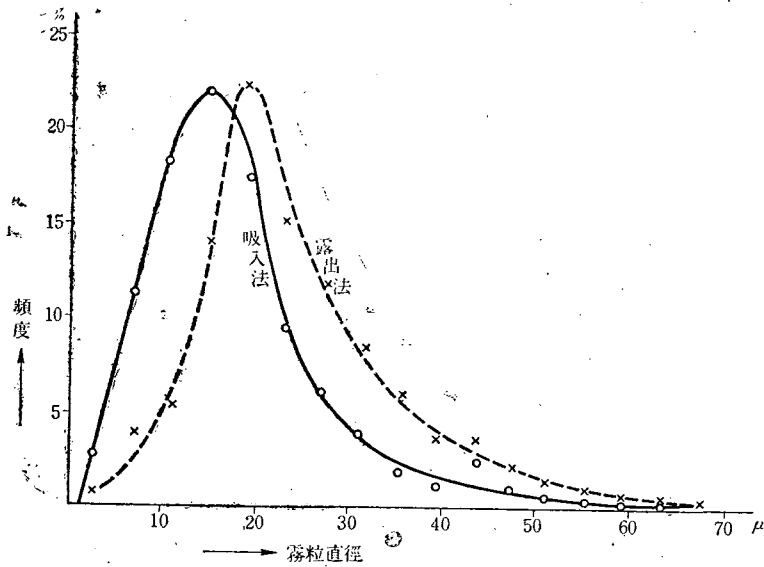
霧粒の大きさに依る捕捉率の差は數のみならず、粒の大きさの頻度分布曲線の形にも影響する。天然霧について實際に兩方法で同時に測定した場合を比較した一例は第 2 圖に示すやうな結

(1) 菅谷重二：低温科學，第 2 輯参照。

(2) Albrecht: Phys. Zeitschr., 32 (1931), S. 48.

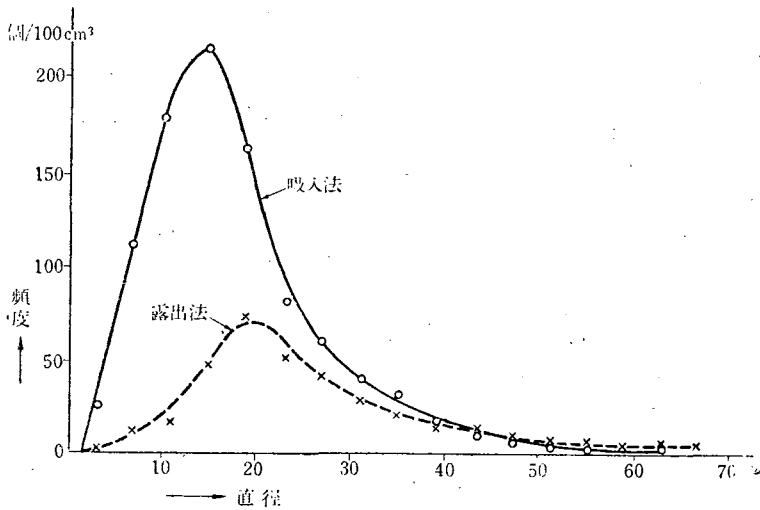
今井一郎：中央氣象彙報，第 20 冊 (昭和 17 年)，67 頁。

果となつた。即ち同じ霧について分布曲線の形が異なるばかりでなく、最大頻度の粒徑が異つて居



第 2 圖

る。これは重大な問題である。今二方法の捕捉能力の比較をする爲に、雙方共 100 cm³ 中に含まれるべき密度實數に換算してその頻度分布曲線を作つてみると、第 3 圖のやうになる。露出法の實數は前出 $n = \frac{N}{S \cdot V}$ に依つて計算した。この例に見られる如く風速 4.0 m/sec, 霧粒直径の最大



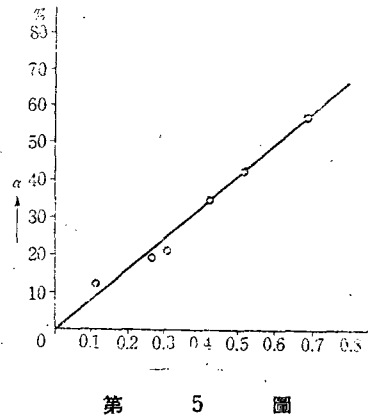
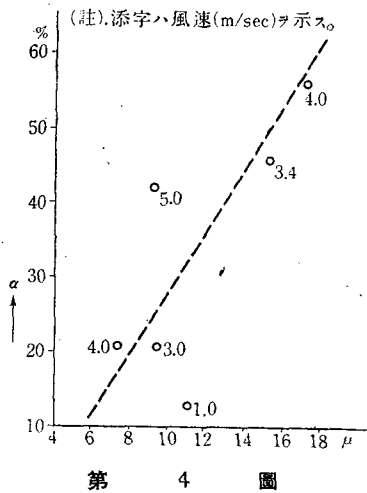
第 3 圖

頻度 10 乃至 25 μ 程度の場合には、霧出法の捕捉率は吸入法の約 30% になる。第 2 圖及び第 3

圖から、露出法では小粒子は殆んど捕捉されず、大きい霧粒がよく捕捉されて居ることが分る。露出法及び吸入法に依る相對的捕捉率比較の目安として、

$$\frac{\text{(露出法に依る捕捉總數)}}{\text{(吸入法に依る捕捉總數)}} = \alpha$$

を算出してみた。αは勿論粒子の大きさ及び風速に依る事は既述の如くであるが、風速を無視して單にαと最大頻度粒子半径との關係をみてみたのが第4圖である。なほ第4圖には各測定時の風速を各測定の際に記しておいた。第4圖で分る通り風速が小であると大粒子の場合でも露出法に依る捕捉率が悪いことは前述の實驗の場合と同様である。次にαと風速Vと粒子半径rとの積即ちV・rとの關係をみてみると第5圖に示す如くなる。即ち、αは大體V・rに正比例して居る。そしてV及びrをC.G.S.單位で表した場合、V・rが0.7位の時αは約60%である。



實際の自然霧の場合、霧粒の最多頻度半径は通例 15 μ 以下であるから、風速 10 m/sec 以下では露出法のみによつて霧粒を捕捉することは不充分である。以上の結果よりして、露出法は大粒捕捉に適し吸入法は小粒捕捉に適して居る事が明かになつた。故に廣範圍に亘つて大小の粒が混合して居る霧の測定には二者を併用する必要がある。實際には第3圖に示す如く、吸入法及び露出法に依る粒径の頻度分布曲線を作り、直径 40 μ 位迄の小粒子の部分を吸入法に依る曲線で作り、それ以上の大粒子の部分は露出法で補足するのが一番よいと言ふ結論に達した。

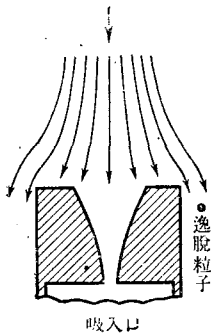
§ 3. 吸入法の誤差及び操作上の注意

吸入法及び露出法の捕捉率の比較から、前述の如く霧粒が小さい場合又は風速が弱い場合には吸入法が優れて居ることを知つた。然し吸入法にも難點があるので、その點を檢討する必要がある

i) 霧粒の逸脱並に吸入口壁との衝突

吸入口を完全に風向に向けて吸入する場合は問題はないが、一般には風向と完全に一致しないので、吸入の際に一部の霧粒を取逃がす心配がある。この點を確める爲に暗視野照明法により噴霧器で作った霧粒の流れの状態を顕微鏡寫眞に撮つて調べてみた。寫眞3はその一例で、この場合はかなり悪い條件、即ち、風向に對して吸入器の方向が約 60° も傾いて居る場合である。この場合でも霧粒の流れは大部分吸入器に吸ひ込まれて居る。この霧粒の逸脱量は勿論霧粒の大きい程多く、吸入法に依る大粒捕捉の減少の一原因となつて居る。しかし直径 40μ 乃至 50μ 以下の普通の霧粒に對してはこの影響はさ程恐れる必要はない。

以上は風速の比較的小さい場合についての検討であるが、風速がかなり大きい場合の霧粒の逸脱も調べておく必要がある。人工霧を風洞に通して調べてみた所によると、流速が吸入器の外口の吸入流速よりも大きい時には第6圖に示すやうな流線となり、霧粒の一部が逸脱する。大きい



第 6 圖

粒子は運動エネルギーが大きいので、流線が少々變つてもそのまま吸入口に突入してくるが、小さい粒子では流線に乗つて逃げ易い。従つてこのやうな逸脱は粒子が小さい時には殊に注意しなければならない。この逸脱を防ぐには外口の吸入流速を外氣の風速より大きくすればよい。それで實際に天然霧を測定する場合、風速 10 m/sec 以上で霧粒直径 15μ 程度以下の場合にはB型の吸入器を用ひて出来るだけ吸入外口の流速を増すやうにした。然し、後で述べるやうな種々の難點があるので、吸入流速を無制限に大きくすることは出来ない。従つて風速が大體 10 m/sec 以上で霧粒直径 15μ 程度以下の場合には風速を適當に減速して

吸入した方がよい。

次に霧粒が吸入管内で流線からそれて口壁に衝突して附着すれば、油膜上にはその分だけ霧粒が不足することになる。この誤差は粒子が大きい程大きいことは豫想される。これも吸入法は大粒の霧粒に對しては捕捉率が低下する一つの原因である。Hagemann⁽¹⁾の計算例では、吸入口の流速が 15 m/sec の時、半径 20 乃至 30μ の霧粒は約 6 乃至 14% が口壁に附着すると言ふ結果になつて居る。なほ口壁附着量は吸入口の形に依つて異なる事は勿論で、筆者の使用したB型はHagemannの吸入口と略々同型である。故に粒子の大きい場合には、吸入法の外に露出法をも併用して頻度分布を求める事が肝要である。

密度個數の測定に於ては、通例大粒子の密度が著しく少ない爲吸入法だけでも密度個數は殆んど變らない。但し粒徑と密度個數から霧水量を算出する場合には、直径 100μ の粒一個の質量

(1) Hagemann: 前出.

が 10μ の粒が 1000 個集つたのに相當する故、十分注意して大粒子を逃がさぬやうにする必要がある。

ii) 吸入に伴ふ膨脹に依る新しい凝結

この誤差に就いても Hagemann の考案⁽¹⁾がある。外氣温が 10°C で相對濕度が 100% の場合について計算してみると、外氣壓を $760 \text{ mm}\cdot\text{Hg}$ とし、吸入口流速を 15 m/sec 、吸入口外では 0 m/sec とすれば、吸入に依る減壓は約 $1 \text{ mm}\cdot\text{Hg}$ となり、溫度降下は約 0.05°C となる。之に依り新たに凝結すべき水滴は約 0.03 gr/m^3 となる。故に實際の霧粒が 0.3 gr/m^3 程度の霧水量を有する場合には、約 10% の新しい凝結水滴が生ずる事になる。然し吸入される空氣は吸入口壁で摩擦熱を得るから、この計算通りの溫度降下は生じない。又霧中でも多くの場合相對濕度 100% 以下のことが多いから、このやうな時にはこの種の誤差は殆んど無視して差支へない。實例に徴してみると、通風乾濕球計で相對濕度 100% の時、吸入流速をこの計算例の約 2 倍位にしてみても、新に小粒子が凝結發生した痕跡は見當らなかつた。それで吸入口流速 30 m/sec 位迄はこの種の誤差は左程心配する必要はないであらう。

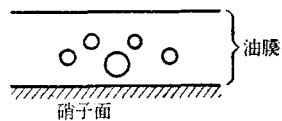
iii) 強吸入に依る粒子間の衝突並に結合

強吸入の場合に生ずべき誤差の中最も注意すべきものは、粒子が相互に衝突して結合する點である。即ち、吸入口の流速が著しく大きくなる場合には、霧粒は油膜の中で相互に衝突して結合し、著しくその大きさを増す。この現象は顯微鏡下に明かに觀取される。強吸入の一例を寫眞 6 に示す。この場合同時に適當な吸入速度で捕捉した例は寫眞 7 の如くになつた。この兩寫眞を比較してみると吸入速度の調整が如何に大切であるかが分る。この誤差を避けるには、或程度以上の強吸入を行はないうやうに注意しなければならない。又この結合現象は油膜内の粒の状態から明瞭に認知出来るので、このやうな資料は寫眞に撮らず、別に新しく捕捉して撮影することにすればよい。

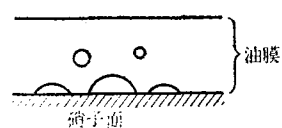
iv) 強吸入による大きい粒子の硝子面附着

この誤差は大きい粒子に著しい。即ち、大きい速度で油膜内に入つて來た大きい粒子は、油膜を突き抜けて底部に達し硝子面上に附着する。すると最早球形を保つことが出來ず、第 7 圖(b)に示すやうに、硝子面上に擴がつて扁平な形となる。このやうに變形した霧粒は、その形からも亦寫眞のコントラストからも明瞭に他のものと區別することが出来る。寫眞 8 にその一例を示した。

(a) 油中ニ懸垂セル状態



(b) 硝子面ニ附着セル状態



第 7 圖

(1) Hagemann: 前出.

圖中矢印の粒子がそれである。なほ丸矢印は球の形の粒子である。この誤差を避けるには、油の粘性と油膜の厚さを加減し、且つ吸入速度を適當に減速調整すればよい。又あまり底部に附着した粒子が多い場合には寫眞撮影を中止して、別に測定し直すやうに心掛ければよい。

v) 油膜表面に露出せる粒子の蒸發

吸入速度が小さすぎる時は、粒子が油の中に没入し切れなくて一部外氣に露出する。その時は光源のわづかな熱によつても迅速な蒸發が起こる。この現象は粒子が小さい場合に著しい。故に小さい粒子に對しては、油の粘性の加減を慎重にする必要がある。

iv) 風向についての注意

自然層の測定に於ては多少の風があるのは必然である。吸入口が風向に向いてゐる場合と、さうでない場合とでは前述の如く霧粒捕捉率に差が出て来る。種々の風速の場合について調べた結果、風速が 0 乃至 5 m/sec 程度では吸入流速を適當に調節すると、風向に依る霧粒捕捉率の變化は大した事はない。風速 10 m/sec 以上になると、風向と風向に直角の場合とでは後者は前者の約 50 乃至 80% に落ちる。風速 20 m/sec 程度になると後者は前者の約 30% にしか達しない。即ち、風速の大きい場合には必ず風向に向けて吸入する必要がある。これは前に述べた色々な誤差を防止する爲に吸入速度を餘り大きくする事が出来ないからである。一般に風が強い時の測定は風向に向けて吸入しても、なほ霧粒逸脱のおそれがあり、適當に風速を減速して捕捉する方がよい。又強風の場合は露出法に依る捕捉率がよくなるから、露出法を併用して吸入法の誤差を補ふ方がよい。

以上述べた色々な誤差は或程度まではこれを避けることが出来ない。然し全然異なる測定法に依る結果、即ち全含水量⁽¹⁾及び霧水量⁽²⁾の測定を同時に行つた結果と對照したところ、以上の霧粒の測定法はかなりの程度まで信頼し得るものである事を確めた。

§ 4. 油 の 吟 味

霧粒を捕捉する上に油の吟味が大切である事は前節で所々觸れて來たが、之を一括すれば、霧粒捕捉油の具有すべき特性は、i) 水に不溶なること、ii) 適度の粘稠度を有すること、iii) 不純物、主して氣泡を含まぬこと、iv) 水と同一若くはやゝ少い比重を有すること等である。一般に水に不溶であると考へられて居る油でも、實際に霧粒を懸濁させた場合、短時間に霧粒が縮小又

* 油の粘性を加減するには、Zähderöl ならば白色ワゼリン又は流動パラフィンを混入すればよい。一般に氣温 20°C 以下では Zähderöl は粘性を増す必要はなくむしろ減ずる必要のある場合が多い。従つて流動パラフィンの如き稀釋液を用意しておけばよい。

(1) 全含水量の測定から霧水量を算出する方法については花島助教授の論文参照。低温科學，第 2 輯所載。

(2) 福富，楠，田畑：網目に依る霧水量の測定法について，低温科學，第 2 輯参照。

は消失するやうな油もある。従つて使用に當つては豫め検査して置く必要がある。本測定に於ては、入手し得た二、三の油について適性検査を行つた結果、常温に於ては獨逸の Merck 會社製の Zähleröl が最も良好な成績を示した⁽¹⁾。依つて本測定に於ては専らこの油を使用した。Merck 會社の Zähleröl が入手出来ない場合は、良質ヒマシ油又は流動パラフィンと白色ワゼリンの混合油を使用してもよい⁽²⁾。三宅博士の使用した Ceder oil と白色ワゼリンの混合油も又良好なる由である。

硝子板に油を塗る場合注意すべき點は、油膜面が平滑になるやうに塗布することである。もし油の面が凹凸であると、寫眞の像に不明瞭な個所が生ずる。油膜の厚さは霧粒の大きさに較べて十分厚くする必要がある。本測定に於ては、粒子の大きさ等に依り約 0.1 mm~0.5 mm の厚さに塗布した。油膜の厚さが餘り厚いと油が流動し易く、従つて捕捉した霧粒が油に集つて移動し、寫眞撮影に不便であるから、油膜は出来る限り薄く塗布する方がよい。又霧粒捕捉後の油膜の温度は、外気温にほぼ等しいことが望ましい。外気温に等しい油膜を霧粒を捕捉した後外気温よりも高い場所に持つて來ると、油の面に新しい微粒子が凝結する危険がある。この現象は冬期の霧粒を測定する場合に、しばしば経験することであるから注意を要する。

§ 5. 寫眞測定に關する注意

吸入上の誤差を除き、且つ油の吟味をよくしても、寫眞測定を行ふ爲、それによる誤差をも考慮して置かなければならない。

i) 大きさの測定

大きさを測定するには § 1. で述べた如く、顯微鏡寫眞フィルムを長さで 500 倍に擴大し、右の粒子についてその直徑を四捨五入して 1 mm の精度で測定する。従つて粒子の直徑が 2μ 以下になると測定し得ない。又粒子が全て同一平面上にある場合は少く、多くは粒子の大きさに依り、油膜中の異なる深さの層中に懸垂する。それで、焦點の合はない粒子もあり、それ等の粒子に就いては 1 mm の精度は期し難い。

霧粒全部を油膜中の或る深さの同一平面上に捕捉することはなかなか困難である。粒子の大きさが均等の場合には、吸入速度を適當に調節して、ほぼ同一平面内に捕捉することが出来る。粒子が不均等な場合には、大粒子は油膜の中に深く入り易く、その爲焦點の合はない粒子が雜つて來るのは止むを得ない。露出法で捕捉した場合にはこの現象が殊に著しい。寫眞 9 に大小の霧粒

* 市販のヒマシ油はあまり良好でない。

(1) Neumann (前出) の測定の際も Zähleröl が良好な結果を示した。

(2) 三宅博士との談話による。

が雑つて居る自然霧を露出法で捕捉した例を掲げた。なほ油の中の粒子に焦點が合はない場合には、二重環を生じ測定上の誤差を招き易い。この二重環は油と水の光の屈折率の相違に依つて生ずるものと思はれる。従つて油の種類に依り二重環は異つて來るものと思はれる。この二重環の生じた例を寫眞9中の矢印で示した。

ii) 數 の 測 定

數の測定には寫眞の技術による難點が澤山ある。第一の難點は、視野を廣くする爲に低倍率で顯微鏡寫眞をとり、その寫眞で測定する爲、光源の強さと光の露出時間とを適當に撰ばぬと、微小な粒子が寫らないことである。この點を明かにする爲に油膜のほと同一個所について、大きさ測定用の高倍率で寫眞をとり、數測定用の低倍率寫眞と兩方の數を同一面積について比較してみた。粒径最大頻度が 5μ 以下の小さい粒子では、低倍率の寫眞は高倍率の寫眞に較べて約 20 乃至 50% 程數の減少を示した。故に直径 10μ 以下の粒子を多數混入して居る霧の場合には、高倍率で數の補正をする必要がある。大粒の場合は低倍率に依る誤差は殆んどない。

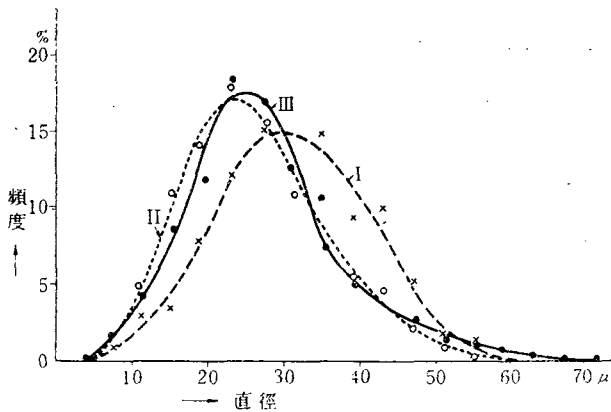
第二には捕捉した粒子が全部顯微鏡の視野の中に入り切らないことがしばしばあり、その場合には補正に依る追加が必要となつて來る。一般に吸入法によれば、油膜上に捕捉された霧粒はほぼ圓形の範圍内に撒布される。故に逸脱した部分を圓形の一部と見做して補正をすればよい。本装置では多くの場合、逸脱部分の數は全體の約 10% 以下であつた。

第三に數の測定は個數が少い場合、例へば 1000 個程度迄は個々の數を算へその總數を求めればよい。然し、個數が非常に多い場合、例へば一つの圓内に 3000~10000 個程度も寫つて居る場合には、それを一々數へるのは甚しい勞力を伴ふし、又數へる上の誤差も大きくなる。その場合は、粒子の撒布密度が略一様である時は、數個所に於て單位面積についての數を數へ、その平均の値から全數を推算した。この方法もかなり精確であつて、一口の個數を數へた値と比較してもその誤差は常に 10% 位であつた。

以上の種々の原因に基く誤差をなるべく少くするには、それぞれの吟味を怠らないことである。殊に小粒子の場合には特に注意して出来るだけ誤差を少くするやうに心掛けなければならぬ。

§. 6. 頻度分布曲線を作るに必要な測定數

頻度分布曲線を作る場合、測定粒子が僅少に過ぎると甚しい偏倚があるのを免れない。元來頻度分布曲線は、測定數が大きい程理想的であるが、實際の測定では無制限に粒子を測定することは出来ない。そこで大略何個位の粒子を測定すれば十分であるかを知つて置く必要がある。實際の自然霧について、同時に測定した一例を第 8 圖に示した。圖中 I は總數 130 個で作つた頻度分



第 8 圖

布曲線で、II は 380 個、III は 990 個で作つたものである。II と III とが略一致して居るので、普通の場合は大體 300 個程度の霧粒を測定すれば、それで描いた分布曲線は大體信用してよいと思はれる。尤も山霧の場合のやうに均等な霧粒の時は 50~100 個位でも充分である。

§ 7. 頻度と線の作り方

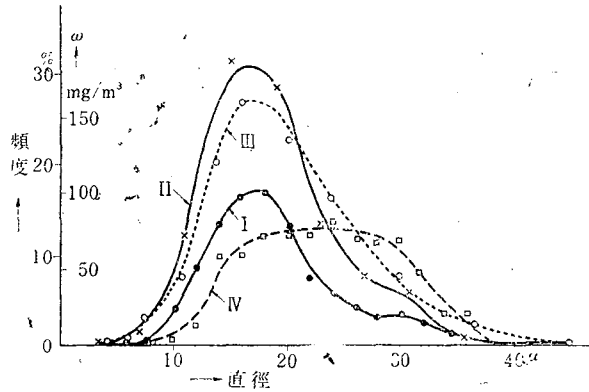
従來の頻度曲線は、粒子直径又は半径についてその儘行つたものが多い。この場合測定値を取る範囲に分割して、その區分内にある数を統計して居る。確率論⁽¹⁾に依れば、統計をとる際の區分法は、頻度曲線の形がほぼ Gauss 曲線に近い場合は、測定値の最大及び最小値をそれぞれ m_{\max} 及び m_{\min} とすると、分割區間が $(m_{\max} - m_{\min})/20$ にほど近き値になる如く分割すると誤差が少くなる。本測定では 2μ 毎の測定であるが、奇數及び偶數に依る讀みの誤差を避ける爲、相隣る奇數値と偶數値とを合せてその値を以つてこの區分間に存在する霧粒の數とした。従つて分割區間は 4μ である。この方法、即ち従來行はれて居る方法は分割區間を一定とした分割法である。最近高橋喜彦氏⁽²⁾は粒徑に無關係な一定の分割區分を採る代りに、物理的分割法とも稱すべき區分法を提唱して居る。この方法は、粒徑の測定誤差 $\pm 10\%$ を許す範圍を分割區分として、その中に含まれる霧粒の頻度分布を作るのである。この分割法に依れば測定⁽²⁾の誤差を大小の粒に平等に負荷することが出来る。これによると各分割群の霧粒は、夫々一定誤差範圍内の物理的性質例へば落下速度を有つ如く分類することが出来る。

以上は大きさについての頻度曲線であるが、霧粒の頻度分布は單に直径の分布だけに止まらず、霧粒面積頻度分布、質量頻度分布等もそれぞれの目的に従つて必要である。霧の濃度を論ず

(1) 末綱恕一：確率論，岩波全書，昭和 18 年刊，140 頁。

(2) 高橋喜彦氏の談話に依る。なほ氏のこの分割法は近々發表の由である。

る場合には、霧水量の粒径に依る分布曲線も霧中視程の問題と関連して必要である。第9圖にこれ等種々の頻度分布曲線を同一測定資料について示した。同圖中 I は 2μ おきの分割に依る大きさの頻度分布、II は 4μ 間隔の分割に依る頻度分布で、III は高橋分割法に依る頻度分布である。IV は霧水量の粒径に対する頻度分布曲線である。IV をみると、直径 15μ から 30μ 間の霧粒がいつも霧水量を平等に受け持つて居ることが分る。



第 9 圖

結 言

以上の研究に於ては、自然の霧粒の大きさ及び数の測定法として油膜法を採用し、油膜による霧粒測定法の基準を定めることを期した。これが爲、油膜法に依る測定誤差の範圍を確定し、これを除く方法を検討した。油膜法に依つて霧粒を測定する場合には、

- (i) 霧粒の捕捉率を高めるやうにすること、
- (ii) 油をよく吟味して使用すること、
- (iii) 寫眞の技術上生ずる誤差に留意すること、
- (iv) 頻度分布曲線に考慮を拂ふこと、

等の注意が必要であるので、天然霧及び人工霧について實測し且つ之につき考察した。

本研究は大學院特別研究生として、中谷宇吉郎教授指導の下に行はれた霧の物理的研究の一部である。本研究を直接御指導された中谷教授並に有益な御助言を賜つた低研の吉田教授に深く感謝する次第である。なほ本研究の資料整理を援助された伏見たか子、小林ひな子、山中和子、金垣節子、大西和枝及び渡邊玲子の諸嬢にも深く感謝する。

又本研究は文部省學術研究會議霧研究班の仕事の一部として行つたものである。

低 温 科 学 第 二 輯 (第 一 刷) 正 誤 表

(頁)	(行)	(誤)	(正)	(頁)	(行)	(誤)	(正)
目次	20	福島	福富	90	13	写真 12	写真No.30
3	12	α	αd	94	28	" 7	" No.25
6	第6圖	5 cm	0.5 cm	99	16	示すと	みると
"	20	$\frac{3}{\text{kg/cm}}$	$\frac{3}{\text{kg/cm}^2}$	"	"	写真No.1の如く	トル
24	22	相対温度	相対湿度	"	22,23	写真1に見られる	トル
26	第1表の5	<105	>105	100	2	写真と同様に	トル
27	4	写真 2	写真No.2	101	27,28	写真No.2に示す様に	トル
"	10	" 1	" No.1	101,102	30,1	写真に示す如く	トル
"	14	" 3	" No.3	102	13	第1表及び写真No.2を	第1表を
"	19	F	下	108	26	写真 1	写真No.31
"	30	写真 4,5	写真No.4,5	"	29	" 4	" No.34
28	4	T_c	T_a	"	29	" 4	" No.34
"	5	T_c	T_a	109	3	" 4	" No.34
"	23	写真 6,7,8	写真No.6,7,8	"	"	" 5	" No.35
"	29	" 8	" No.8	"	"	" 2	" No.32
29	2	" 9,10,11	" No.9,10,11	112	3	" 3	" No.33
34	10	鐵線があるが	鐵線であるが	113	17	" 6	" No.36
59	第13圖	---細土含有量	---細土含有量	"	18	" 7	" No.37
"	"	-x-粘土含有量	-x-粘土含有量	"	29	" 8	" No.38
70	24	b c	b : c	115	27	" 9	" No.39
71	3	写真No.1	写真No.12	116	4	" 9	" No.39
"	3	" No.2	" No.22,13	120	13	$1.0 \times 10^{-7} V$	$1.0 \times 10^{-2} V$
"	16	" No.1	" No.21,12	121	7	30cm	130cm
74	6	第2圖(A)	" No.14	128	14	3m	4.8m
"	"	" (B)	" No.15	136	第1表の1	左右對線	左右對稱
"	"	" (C)	" No.16	142	1	打點式によつて	自記的に
"	8	写真 (A)	" No.14	159	6	Ag	Aq
"	10	写真 (B)	" No.15	164	25	$\Delta t'g > t_w$	$\Delta t'g > \Delta t_w$
"	18	" (C)	" No.16	166	27	0.001N	0.001/N
"	20	" (A)	" No.14	171	3	9桁	6桁
75	9	第4圖(D)及(E)	" No.17, No.18	"	16	$\frac{T_l}{T_a} Vt$	$\frac{T_l}{T_l} Vt$
"	11	写真 (D)	" No.17	172	2	$R-I = \frac{e}{e_{sat}} 100$	$RH = \frac{e}{e_{sat}} 100$
"	12	" (E)	" No.18	"	22	a), b)	写真No.40, No.41
77	脚註3	Seron	Screen	174	第3表	相対温度	相対湿度
80	11	$\int_0^{\infty} \varphi(r) d^2(r) pr$	$\int_0^{\infty} \varphi(r) p^2(r) dr$	180	6	$B_{nap} s$	B_{napus}
88	10	写真 1	写真No.19	181	2	<i>Fapnanobras-sica</i>	<i>Raphanobras-sica</i>
"	20	" 2	" No.20	182	4	<i>Horde m</i>	<i>Hordecum</i>
89	1	" 3	" No.21	183	13	<i>nap s</i>	<i>napus</i>
"	3	" 4	" No.22	244	19	單位生殖	單爲生殖
"	12	" 5	" No.23	248	15,16	温度氏はでも	湿度でも
"	"	" 6	" No.24	"	16	尙松島	尙松島氏は
"	14	" 4	" No.22	252	13	Schwarkinowa	Schkwarnikow
"	22	" 7	" No.25	257	6	写真1-5	写真No.56の1-5
"	27	" 8	" No.26	259	8	写真4-5	写真No.56の4-5
"	28	" 9	" No.27	260	6	" 6	" No.56の6
90	3	" 12	" No.30				
"	10	" 8	" No.26				
"	11	" 11	" No.29				
"	12	" 9	" No.27				