



| | |
|------------------|---|
| Title | 超電子顕微鏡による霧核の研究 |
| Author(s) | 黒岩, 大助; KUROIWA, Daisuke; 只野, 文哉 他 |
| Citation | 低温科学, 7, 51-66 |
| Issue Date | 1951-09-05 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/17500 |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | 7_p51-66.pdf |



超電子顕微鏡による霧核の研究* (豫報)

黒岩大助 只野文哉

(低温科学研究所 応用物理部門) (日立中央研究所)

(昭和21年1月受理)

I. 緒 論

大気が何等かの過程によつて露点温度以下に冷えると、水蒸気は過飽和となり、凝結核を中心として凝結し、小さな水滴となつて空気中に懸垂する。これが雲や霧である。雲や霧の凝結核に関しては古くから多くの研究があつて、細塵、煤煙、イオン等いろいろな説が提出されているが、なかでも海水の飛沫などからできた微細な海鹽粒子であるという考えが廣く信ぜられている。しかしこれらの研究は、いわば間接的ないしは統計的方法によつてなされたもので、未だかつて實際の霧核の形や大きさを示したものはみられない。この研究は高分解能の超電子顕微鏡をつかつて、直接に霧核の實體を檢鏡しようと試みたものである。

II. 霧核研究の歴史⁽¹⁾⁽²⁾

先ず順序として、なぜ海鹽核の考えが廣く信ぜられるにいたつたかを簡単に述べてみよう。水蒸気が凝結するとき、空気中に浮かんでいる細塵を心核とすることは、古く Coulier や Mascart (1875) によつて見出されたが、特に 1880 年に、Aitken⁽³⁾ は有名な計塵器を用いて實驗的に證明した。Aitken の計塵器は水蒸気を含んだ一定量の空気を、ピストンで急に斷熱膨脹をさせて冷却すると、空気中に含まれていた細塵を心核として水蒸気が凝結し、水滴となつて沈降するのを顕微鏡で計測するのである。清浄にしていない普通の空気を斷熱膨脹させると、必ず水蒸気の凝結がみられたが、かたくつめた脱脂綿等で注意して濾過した空気を膨脹させても、ほとんど水蒸気の凝結はおこらなかつたばかりでなく、その中に細塵を投入したのについて再び凝結がおこることが確かめられた。そして計測される核の数は、計塵器を膨脹させる割合、すなわち過飽和度に應じて大きく變ることが知られたが、凝結核となる細塵の形や大きさはもちろん、細塵の存在によつてなぜ水蒸気が凝結するのか、くわしいことはわからなかつた。

1870 年、Lord Kelvin は、曲面をなしている水面と平衡にある水の蒸気壓は、水平面と平

* 北海道大學低温科学研究所業績 第 121 號。

衡にある蒸気圧よりも、表面張力のために大きくなることを示した。すなわち、平衡状態にある水平面の上に、小さな水滴をもつてきて懸垂させると、水滴と平衡にある蒸気圧は、水平面のそれよりも高いから、水滴は蒸發して水平面に凝結する。それゆゑ水滴の蒸發を防ぐためには、まわりの蒸気圧は過飽和になつていなければならない。過飽和の度合は水滴の大きさによつて違ふ。第1表にいろいろな大きさの水滴を蒸發させないために必要な過飽和度を相對濕度で示す。

第 1 表

| 水 滴 直 徑 | 10 ⁻⁶ | 10 ⁻⁵ | 10 ⁻⁴ | 10 ⁻³ | 10 ⁻² × cm |
|---------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------|
| 相 對 濕 度 | 126 | 102.4 | 100.23 | 100.02 | 100.002 % |

この表から、直徑が 10⁻⁴ cm 以上の水滴の過飽和度は小さいが、水滴がこれ以下に小さくなると急激に大きくなるこ

とがわかる。もし飽和した空氣中に核がなくして温度が下つたとすると、凝結は水蒸氣分子の結合によつてのみおこることになる。水蒸氣分子の大きさは 4×10⁻⁸ cm くらいであるから、かりに直徑が 10⁻⁶ cm という小さな水滴をつくるとしても、約 15,000 個の水蒸氣分子がチャンスで同時に結合しなければならない。もしできたとしても、その蒸發を防ぐためには 26 % も過飽和になつていなければならない。ところで、もし凝結のしんとなる核があつて、その大きさが 10⁻⁴ cm あれば近似的に初めから 10⁻⁴ cm の大きさの水滴があつたとみなしてよいから、その上に凝結が起るには、わずか 0.23 % の過飽和で足りるのである。それ故、自然に雲や霧ができるのは、過飽和になつて、水蒸氣分子がくつきあつてできるのではなく、始めから大氣中に細塵のような適当な大きさの核があつて、その上に凝結がおこると考える方が自然である。

水蒸氣が凝結するには細塵の外に、電荷が大きな影響をもつていることを 1887 年に Helmholtz が發見したが、更に、1897 年に C. T. R. Wilson が、細塵をすつかり除去した空氣でもこれを充分濕らせておいて、斷熱膨脹させるときに、外から X 線で照射したり、内部にラジウムを入れてイオンをつくつてやると、イオンを心核として霧ができることを見出した。これが有名な Wilson の霧函である。イオンの存在によつて水蒸氣の凝結がおこるのは、帯電することによつて水滴の飽和蒸気圧が低くなるからである。Wilson の實驗は細塵以外の、たとえばイオンのような帯電粒子でも、霧の凝結核になり得ることを示したものであつた。しかしながら、實驗の結果は、イオンが凝結の心核となるためには、陰イオンでは 400 %、陽イオンでは 600 % も過飽和になつていなければならないことを示した。自然の大空氣中では、このような大きな過飽和は見られないから、このような小イオン（直徑が 10⁻⁷ cm 程度の帯電分子の集團と考えられている）が天然の霧や雲の凝結核になることは、まずないであろう。その後、1905 年に P. Langevin が大都市のような細塵の多い空氣中には、非常に質量の大きいイオンが存在していて、このような大イオン（直徑が 10⁻⁶ cm ~ 10⁻⁵ cm）は凝結核になり得ることを示した。

1913 年になつて、A. Wigand は、計塵器で通常の空氣中で核の数を測定しておき、次には殊更に細塵、炭穀粉、衣料品の纖維等でほこりをたたせておいて核の数を測つて、兩方を比較

してみたが、豫期に反して核の数はほとんど増加していないことを見出した。Boylan (1926) も同様な結果を得た。このことから、凝結核となり得るものは、どのような種類の細塵でもよいのではなくて、吸湿性の強い核だけであることが結論され、これが長く信ぜられるようになった。しかるに一方、Jünge が 1936 年に、炭穀のあく、みがき粉、粘土粒子、繊維の屑等の非吸湿性物質や、殊に小さい油滴でさえも凝結核になりうることを示した。彼は凝結をおこす力は物質には無関係であると主張したが、Jünge が実験した非吸湿性粒子でも、その表面がごくうすい水膜で覆われていなかつたかどうか疑問であると、G. C. Simpson は批評している。第 2 表は Jünge が與えたもので、吸湿性粒子と非吸湿性粒子の上に凝結がおこるために必要な過飽和度を示す。

第 2 表

| | | | | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------|
| 吸湿性粒子直径 | 16 | 8 | 5 | 3.4 | 2.2 | 1.3 | 0.8 | $\times 10^{-6}$ cm |
| 非吸湿性粒子直径 | 46 | 23 | 12 | 8 | 5 | 2.4 | 1.3 | $\times 10^{-6}$ cm |
| 相 對 濕 度 | 100.5 | 101.0 | 102.0 | 103.0 | 105.0 | 110.0 | 120.0 | % |

ところで、大氣中で自然におこる過飽和は、最大 0.5% であるといわれている。第 2 表から自然にできる霧の核は、もし非吸湿性物質ならば 4.6×10^{-5} cm, 吸湿性物質ならば 1.6×10^{-5} cm 以上の大きさを持つていなければならないことがわかる。それならば、霧粒をスライドグラスに受けて乾燥させて、顕微鏡で調べれば、核を發見することが可能なはずである。しかし、これらの試みからは、満足な結果は何も得られなかつたのである。

1921 年に H. Köhler⁽⁴⁾⁽⁵⁾ は、冬季山岳にできる樹氷をとかして化学分析を行つたところ、とかした樹氷 1 立の中には 6.44 mg の鹽分を含んでいることを見出した。樹氷は過冷却した霧や雲の粒が地物に衝突して、つぎつぎに凍りついたものである。それで霧粒の大きさを測定しておけば、1 個の霧粒に含まれている鹽の量が計算できる。霧粒の平均直径は 17.7×10^{-4} cm であつたから、霧粒 1 個に含まれている鹽分量は平均 1.8×10^{-14} g になる。そこで Köhler は、凝結核となるものは、海水の飛沫の蒸發によつてつくられる微細な海鹽粒子であろうと考え、世界各地の雨水の分析にも海鹽の組成がでることを示して、有名な海鹽説を提唱した。海は地球表面積の 70% を占めているから、海水のしぶきの蒸發によつて、間斷なく細かい海鹽粒子が空氣中に供給せられ、そしてこれらは風によつて世界各地に運ばれていると考えられるから、吸湿性の強い海鹽粒子が容易に凝結核になり得ることは想像にかたくない。

1939 年に Wright⁽⁶⁾⁽⁷⁾ は、視程であらわした大氣の透明度が、相對濕度が 70% 以上になると濕度の増加と共に減少するが、それ以下では、濕度の減少とほとんど関係がないことを觀測した。彼は空氣中には凝結核となるべき吸湿性のつよい粒子が浮かんでいて、濕度が 70% 以上になると水蒸氣を吸つて直径が大きくなり、視程が減少するが、70% 以下では、核は乾燥して固體の結

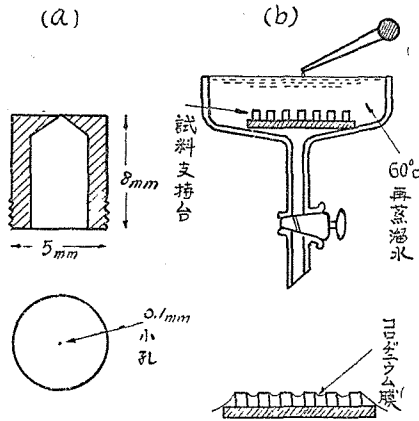
晶になるから視程とは関係がなくなると考えた。そしてそのような核は海鹽の粒子であつて、その大きさは 11×10^{-14} g であると計算した。實際に、乾燥させた海鹽の結晶は、Owens の實驗によれば、常溫で濕度が 70 % になると潮解を始めるのである。Wright の計算した核の大きさは、Köhler の値に比べて少し大きい Order はあつている。これらは、海鹽説に對してつよい支持を與えたのである。S. Pettersen⁽⁸⁾ も、アメリカのある地方の海霧は、霧水 1 立中に約 100 mg の鹽分を含んでいる、そして霧粒の平均直徑は 40 μ くらいであるから、これを乾燥させた核の大きさは 1~2 μ になる、このように大きな核をもっているから、相對濕度が 99~98 % ぐらゐの未飽和の状態でも、霧粒が存在しうるのである、といつている。しかしながら、空氣中に存在する吸濕性物質は、なにも海鹽粒子とは限らない。たとえば火山の噴出物、工場廢氣等の中には、吸濕性のつよい瓦斯などが含まれていて、これらもまた凝結核となりうるものが、3 の人々によつて提唱されている。

以上は今日、海鹽説が信ぜられるようになった概要であるが、計塵器にしても化學分析にしても、また視程觀測にしても、いずれも間接的、統計的方法であつて、直接霧核自身に觸れた研究ではない。もし海鹽説が正しくて、霧核が Köhler のいふように 1.8×10^{-14} g 程度 of 海鹽粒子であるならば、1 個の霧粒を乾燥させたとき、もし海鹽が立方狀の結晶になつたとすれば、その 1 邊の長さは約 2.1×10^{-5} cm になるはずである。これは最も優秀な光學顯微鏡の分解能の極限に近いから、光學顯微鏡では到底檢出することがむずかしい。しかしながら、分解能が光學顯微鏡よりも約 100 倍も大きい電子顯微鏡をつかえば霧核の實體を直接檢鏡しうる可能性がある。筆者は 1944 年 6 月~7 月、北海道の根室において、又 9 月~10 月、おなじく北海道のニセコアヌプリ山頂で、コロジウム膜に霧粒をつけ乾燥し、これを東京の日立中央研究所にはこんで、電子顯微鏡をつかつてコロジウム膜の上に残された霧核の寫眞をとつた。以下にその概要を述べる。

III 試料の製作法

電子顯微鏡は、光の代りに電子線を使用するのであるから、檢鏡試料の製作法も光學顯微鏡の場合とは多少異なる。第 1 圖 (a) は試料支持臺を示す。これは直徑 5 mm、高さ 8 mm の眞鍮製のもので、中央には電子を通すための直徑約 0.1 mm ぐらゐの小さい孔があけてある。この小孔にコロジウムの薄膜を貼りつけて、これに霧粒を支持させるのである。コロジウムの膜は、電子の通過に對してほとんど抵抗にならないぐらゐ薄く貼りつけなければならない。同圖 (b) はこの膜付けの操作を示す。試料支持臺は豫め充分洗滌したのち、ピフネル漏斗の底に適當な間隔を置いて竝べ、60°C の再蒸溜水を満たす。そしてスポイトでコロジウムの醋酸アミル溶液を 1 滴、靜かに水面に落す。液は擴がつて、やがて醋酸アミルが蒸發するとコロジウムの薄膜が出來上るので、靜かに漏斗の栓を開いて水を抜き、膜面を次第に下げてやれば、膜は圖のように支持臺の表面に貼付き、小孔に膜がはられる。そこで針の先に醋酸アミルの少量をつけ

第 1 圖



て不要な膜を切りとり、デシケーターに入れて乾燥させるのである。そして検鏡しようとする霧粒はこの小孔の上に附着させるのである。筆者等は霧核の試料は次のような方法によつて製作した。すなわち、第1には、細かい目の金網を霧の流れにおき、これに衝突した霧粒を集めて霧水としたものと、小型のコットレル装置により採集した霧水とをコロジウム膜につけたもの。第2には、比較のため、霧のない晴天の日に試料支持臺を長時間空気にさらして、大気中の浮遊物を沈着させたもの。第3には、霧の中に支持臺を短時間さらして直接に霧粒をつけ、これを乾燥させたもので、これは光學顕微鏡で霧粒の附着した位置及び蒸發過程を寫眞にとつておき、電子顕微鏡で検鏡するとき、これと對照しながら、最初霧粒が附着していたあとをさがして寫眞をとつた。

IV 觀測結果

i) 霧水の沈澱

第1圖版の Fig. 1 及び Fig. 2 は、北海道斜里岳(高さ1,646 m)で金網によつて採集した霧水、及び Fig. 3 は、根室町種馬所においてコットレル法によつて採集した霧水の沈澱物の電子顕微鏡寫眞である。試料は、霧水を靜置させておいて沈澱物を取り、再蒸溜水で適當にうすめ、白金耳ですくつてその1滴を支持臺の小孔の上に乗せて乾燥させたものである。Fig. 1で最も特徴のあるのは、大きさが最大 10^{-5} cm ぐらゐの微粒子の集團である。同じような微粒子が Fig. 2, Fig. 3にも見出される。そして寫眞の黒いつながつた部分は、これら微粒子が互に密集してくつきあつたものと思われる。このような微粒子が、化學的に如何なる性質のものであるかわからないが、霧水は金網やコットレル法によつて採集されたものであるから、霧水のなかには、空氣中に浮遊しているいろいろな微粒子や夾雜物が混入しているはずである。それ故、これらの微粒子は霧粒の中に含まれていた凝結核だけであるとはいわれぬ。もしこのような大きさの凝結核となるためには、第1表より明らかなごとく、大氣は數%の大なる過飽和を必要とするからである。海霧は太平洋上で冷氣塊と溫氣塊との混合によつて發生するとすると、それほど大きな過飽和はおこり得ない。それ故、これらの粒子は、いわゆる大氣膠質と稱されている浮遊微粒子であるか、または霧水の乾燥につれて、とけこんでいた溶質が微粒子状に新しく析出したものかもしれない。Fig. 2の中央の不規則な斑點狀の圖形は、このような微粒子の集團ではなくて、何か微生物の分泌物が又はタールのようにも思えるが、くわしいことはわからない。電子顕微鏡内部の眞空度は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ mmHg に保たれているから、これらの

物質の蒸気壓は、いずれもこの値よりは、はるかに低いものである。印刷の関係でここには掲載し得ないが、沈澱物の寫眞はこの他にも數枚撮つた。そのなかには岩石の細粉や風化物、粘土粒子と思われるもの、細菌、煤煙狀物質等が発見されたが、ここにかかげたような微粒子のまぎつているものが多かつた。

ii) 氣球觀測

北海道の根室町附近に發現する霧は、遠く太平洋上で發生した海霧が、數10米から數100米の厚さをなして陸地に移流してくるものである。筆者は霧がかかつて來たとき氣球に搭乗して、地上50m~100m毎に霧の試料をとつた。すなわち適當な高度で氣球の上昇を止め、支持臺をピンセットではさんで風上にむけ、約2~3秒くらい曝して霧粒をつけ、直ちにデシケーターのなかで乾燥させた。第1圖版の Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6は、それらの中から地上50m, 100m, 500mの各高度で採集した霧核の電子顯微鏡寫眞を示す。Fig. 4は、何か無定形の吸濕性のつよい物質のように思われる。像が鮮明でないのは、焦點があつていないためではなく、初めから寫眞のように境界のはつきりしないものであつた。Fig. 5は、dendriteな構造をもつ結晶のように思われる。多分霧粒のなかにとけこんでいた物質が、水の蒸發につれてこのような形に析出してきたものであろう。まわりにうすい沈積物がみとめられる。しかし、はつきりした根據があるわけではないが、Fig. 5は何か微生物のようにも思われる。このような微生物は空氣中の浮遊物としては、かなり注目すべきものであるが、⁽⁹⁾まだ霧の凝結核としての作用についてはあまり知られていない。しかし霧の凝結核となりうる可能性は充分あるであらう。Fig. 6は細塵の一種で、氣球觀測で得た數10個の試料のうち、もつともしばしば顯微鏡の視野にあらわれたものであつた。形状から想像すると、岩石の細粉か粘土の微粒子のように思われる。以上の試料は氣球のせまいゴンドラのなかで採取されたのであるから、霧粒が支持臺の孔のどの位置に附著したか、その寫眞をとることができなかつた。従つて嚴密にはこれらのものは、霧粒のなかに含まれていたものであるとはいひ難いが、試料支持臺を霧中にさらしている時間が短かいので、微小な固體粒子は支持臺に衝突しても附著することは少いと考えられるから、大體において霧粒の中から發見されたものとみてよいであらう。しかし、これらの試料のなかには豫期したように立方狀をした海鹽の結晶と認められるものは、ひとつも發見できなかつた。

iii) 海鹽の結晶

根室種馬所において、霧のない晴天の日に、試料支持臺を海から吹いてくる微風の中に數分間さらして、空氣中の浮遊物の試料をつくつた。霧粒のあるときは、2~3秒間試料支持臺をさらただけで充分であつたが、細塵のような浮遊物の試料をつくるのであるから、比較的長時間さらしてみた。寫眞は全部で30枚ばかり撮つたが、その中で最も興味あるものを第1圖版 Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9に示す。そのうち、Fig. 7は蒸気壓の低い、何かタール狀のものであつて、Fig. 2に示した種類のものと考えられる。ところで問題は、Fig. 8, Fig. 9に示したような樹枝狀の結晶である。採集條件から考えてみるに、これは海水の小さな飛沫からできた海鹽の

結晶とみるのが一番自然な解釋である。根室種馬所は海岸から約6 Km くらい入った高臺の上にあつて、採取したときは5~6 m/sの風が海から陸地に向つて吹いていた。それ故、これらは海からとんで來た海水飛沫によるものと考えられる。海鹽がこの種の樹枝狀結晶に析出することがあるか否かを調べるために、實際に海水の1滴をガラス板にのせ、靜かに蒸發させてみたところ第2圖(a)のような立

方狀の結晶が得られた。これならば食鹽の結晶と似た形で、當然豫期されるところである。ところが、海水の滴を電熱器の上で加熱しながら急速に蒸發させてみたところ、同圖(b)の如き樹枝狀結晶となつた。

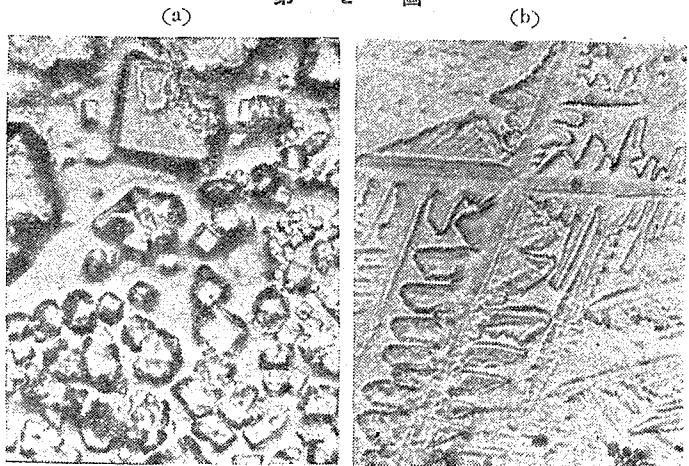
この實驗から判斷すれば、恐らく電子顕微鏡に入れたとき

内部の高真空のために、急速に蒸發して Fig. 8, Fig. 9 のような結晶になつたものと考えられる。このような蒸發速度の大小による結晶形の變形は、他の物質においてもしばしばみられるものである。Fig. 8 と Fig. 9 とを比較して直ぐ氣のつく特徴は、Fig. 8 の結晶は白く透明であるが、Fig. 9 の結晶は黒く不透明な點である。これは Fig. 8 の結晶は薄く、Fig. 9 の結晶は厚いためでありといちおう考えることができる。しかし、Fig. 8 の透明な結晶はコロジオンの膜の上につており、結晶はある厚さを持つてゐるのにかかわらず、結晶ののつていない他の部分と比較して、ずつと白くみえ、電子線に對する透明度が大きいように見える。それ故、結晶の厚さだけでは説明がつかないように思われる。

iv) ニセコアンヌプリ山頂における觀測

9月下旬、北海道虻田郡ニセコアンヌプリの山頂觀測所(高さ1,300 m)で山霧の調査研究が行われた。第1圖版 Fig. 10~Fig. 15 は、その際得られた山霧の核の電子顕微鏡寫眞の一部を示す。試料は支持臺をピンセットではさみ、風上に向けて霧の中に數秒間曝して霧粒をつけ、直ちに光學顯微鏡で寫眞をとつた。Fig. 10 は霧粒が試料支持臺のコロジウム膜上に附着した状態を光學顯微鏡で撮影したものである。霧粒は迅速に蒸發してゆくの、ライカ寫眞機で順々に手早くその蒸發過程を撮つたものが Fig. 11, Fig. 12 である。Fig. 12 の光學顯微鏡寫眞を撮つたのち、その試料をデッケーター内に保存し、後に電子顕微鏡で調べてみると、第2圖版の Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15 のような核の寫眞が得られた。すなわち、Fig. 10~Fig. 12 の光學顯微鏡寫眞と對照しながら、電子顕微鏡の微動裝置を調節して、寫眞の a, b, c の霧粒が附着していたあとをさがしてみると、Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15 の核が残存していた。ところが、d, e

第 2 圖



の霧粒のあつた位置には核らしいものは何も見出されなかつたのである。このことから想像すると、d, e の霧粒の核は固體粒子ではなくて、大イオンか又は揮發性のつよい液滴か瓦斯分子のようなもので、蒸氣壓が電子顯微鏡の真空度より高かつたために蒸發してしまつたものと考えることができる。

Fig. 16~Fig. 21 も同様な觀測例で、Fig. 16~Fig. 18 は霧粒の附著した位置、及びその蒸發過程を示す光學顯微鏡寫眞で、Fig. 19~Fig. 21 は霧粒 a, b, c の蒸發した残滓を電子顯微鏡で撮影したものである。なおこのほか、9月26日に煙霧の寫眞もとつた。その日は風のないおだやかな日で、見渡すかぎり紫色の煙霧がニセコの中腹をとりまいていた。そこで、支持臺を外に出し30分間ぐらい煙霧のなかに放置しておいた。この電子顯微鏡寫眞には Fig. 14, Fig. 15 に似た形のものが發見された。

このようにして、やや満足すべき霧核の實體を見るのが可能となつたが、勿論、これらの寫眞から核がどのような物質で出來ているかを判斷することは困難である。筆者は、このように霧粒を蒸發させたとき、残つた残滓がただ1個の場合には、それを核と看做したのであるが、なかには2箇以上存在するものもあつた。例えば Fig. 20 の如き例である。そういう場合、そのなかで大きいものを霧核と判斷するか、2個以上の霧粒がくつつきあつたものとするか、霧粒の蒸發によつて溶けていた溶質が數個に分かれて析出したものとみるか、なお多くの研究事項が今後に残されている。何分、試料の數が少なかつたので、霧粒の大きさと核の大きさととの關係についても、くわしく調べることができなかつた。

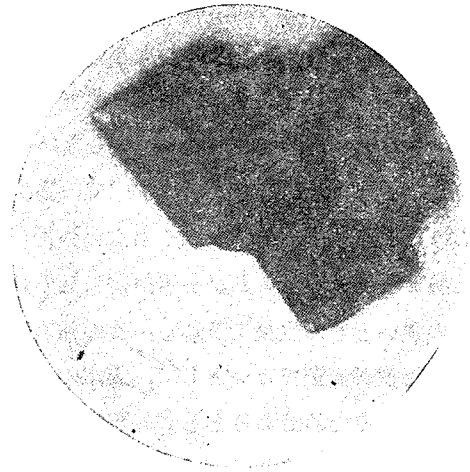
V 觀測結果の考察

今回の觀測からみるに、霧粒の蒸發したあとに、豫期したような立方狀又は樹枝狀のように明瞭な海鹽の結晶とみとめられるものは一つも發見されなかつた。その點は、根室附近の霧では霧水中に平均20 mg/l 程度の鹽分が常に含まれていることと矛盾するように見える。根室附近の霧粒の平均直徑は大體30 μ くらいであるから、霧粒1個に含まれる鹽分は平均して 8.6×10^{-14} g となる。もし、これを乾燥させたとき、ふくまれている海鹽が1個の立方狀結晶に析出するとすれば、その1邊の長さは約 5.1×10^{-5} cm となる。それ故、電子顯微鏡で10,000 倍に擴大すれば5.1 mm となり、充分視野のなかで檢出可能なはずである。圖版 No. 22 は實驗室で蒸溜水に食鹽を溶かして濃度が50 mg/l の水溶液とし、その1滴を支持臺にのせ乾燥させてから、電子顯微鏡で撮影したものである。液滴の量が多かつたためか食鹽の結晶は、寫眞のように分散して析出したが、その大きさは 5×10^{-5} cm 前後であつて、しかも明瞭に立方狀をしているのが認められる。次にこの溶液を噴霧器で吹いて人工霧をつくり、これを試料支持臺で受けて乾燥させたものを電子顯微鏡で撮影したものが第3圖である。このときの霧粒は自然にできる霧粒よりもずつと大きくて、直徑が100 μ ぐらいあつた。しかし食鹽は寫眞のようにやや不規則な形であるが、1個の結晶となつて析出している。それ故もし霧核が海鹽であるならば、このよ

うに明瞭な立方状の結晶か、さもなければ Fig. 8 Fig. 9 のような樹枝状の結晶として検出されることが豫期される。ところが、そういうものが観測されなかつたのである。この理由は、検鏡した試料の数が少ないということもあるが、次のようなことも考えられる。すなわち、筆者は、霧粒を乾燥させれば含まれている海鹽は必ず1個の立方状、又は樹枝状の結晶として析出されるであろうと期待した。しかし実際には、海鹽は食鹽だけでなく、少量ではあるが溶解度を異にするいろいろな鹽類を含んでいる。それ故、霧粒を蒸發させるときの條件によつては、必ずしも1個の明瞭な結晶にならないで不規則な形になつたり、又は細かく分散して析出するかもしれないわけである。そして今一つの理由は、霧の凝結核は海鹽でなくて、細塵や大イオン又は吸濕性のつよい工場廢氣のようなものであるか、或は三宅氏⁽¹¹⁾が提唱しているように、海水飛沫が空中を浮遊している間に蒸發して結晶分離を行い、その一つ一つの成分が凝結核になるという考えである。もし霧核が海鹽そのものではなくて、硫酸鹽や細塵や、イオン、瓦斯分子のようなものであれば、電子顕微鏡にかけても、上にのべたような結晶形は示さないであろう。しかしながら化學分析の結果は、根室附近では霧水1立中に20~30 mg、ニセコ山頂でも10 mg ぐらいの鹽分が常に發見されるのである。

霧核が海鹽でなくて、しかも霧水中に鹽分が出てくる場合として、次のようなことが考えられる。すなわち、霧粒と同程度の大きさを持つた海水の飛沫が大氣中に存在し、鹽分を含まぬ霧粒と混つている場合には、霧水としては鹽分を含んでいてもよいことになる。ことに、海から陸地に向つて移流してくる海霧のなかには、霧粒と同じくらいの大きさの海水飛沫が雜つていると考える方が自然である。そういう海水の飛沫らしいものが、今回の観測中ただ1例ではあつたが、ニセコアンヌプリ山頂(1,300 m)で山霧のなかに雜つて観測されたのである。第2圖版 Fig. 23, Fig. 24 はその光學顯微鏡寫眞を示す。Fig. 23 は現場で試料支持臺の小孔に附着した直後を撮影したもの、Fig. 24 は Fig. 23 の撮影後、試料をデシケーターの中に2~3日放置したのちに撮影したものである。今までの霧粒は、皆撮影中にどんどん蒸發してゆくの、この霧粒だけはほとんど蒸發しないので、デシケーターの中に藏つておいたのである。その後、水滴の半徑が約 $\frac{1}{2}$ になつて、寫眞のような立方状の結晶が1個析出して來たのである。海水は1立中に35 gの鹽を含んでいる。そして容積で約 $\frac{1}{10}$ に濃縮すれば食鹽は飽和して析出し始める。水滴の半徑が $\frac{1}{2}$ に減じたことは、體積が $\frac{1}{8}$ に減つたことになる。それ故、Fig. 24 の立方状の結晶は海鹽であつて、この微滴は海水飛沫であろうと判断した。この粒を採取した

第 3 圖



ときの風速は 15 m/s くらいであつた。

このような海水の飛沫は、波頭が風で吹きちぎれたり、泡沫が破裂したりしてできると想像されるが、そのうち、直径の大きいものは直ぐ落下するが、霧粒と同程度の大きさのものは、風につれて相当遠くまで運ばれるはずである。⁽¹²⁾ 海上で発生した霧が陸地に移流してくるときには、このような海水の飛沫も蒸発しないで雑つて存在する。それ故、金網やガーゼ等で捕集した霧水を分析したときには、すべての霧核が海鹽でなくても、かなり多くの鹽分が検出されるわけである。それ故、霧水や雨水の分析だけによつて霧核が海鹽であると考えるのは、かなり危険である。同じことが冬季山岳に見られる樹水の分析についてもいわれる。樹水は、大い風強いときに生長するから、この種の飛沫が混入した影響を無視することはできないであろう。霧核が海鹽でないとして、霧水の分析に出てくる鹽分は、すべてこのような海水の飛沫が雑つているためであるとして、霧粒及び飛沫の直径を 30μ とすれば、霧水に 20 mg/l の鹽分を含む海霧では、無鹽霧粒 1,700 個につき 1 個の割合で海水の飛沫が混入しておればよいことになる。それ故、試料支持壺を短時間霧のなかにさらしたくらいでは、海水の飛沫が採取される確率は非常に少いわけである。このような飛沫は、霧の有無にかかわらず風さえ強ければ飛んでいるはずであるから、霧水中の鹽素濃度が霧の濃い場合には小さく、霧のうすいときは大きく出たり、また地面から或る高さ以上になると減少したりすること、⁽¹³⁾ 雨水中の鹽分が海岸地方で多く、内陸に入るに従つて少いこと、高田地方の雪水の分析に海水の組成が出ること⁽¹⁴⁾等は、海水飛沫の混入ということからだけでも説明される。しかし、最近の霧水の化學分析の結果によれば、所によつては海水の組成を必ずしも示していないものが多い。それはこれまでにもたびたび述べたように、霧水や雨水には必ず空氣中に浮遊しているいろいろな夾雜物を含んでいる。それ故、分析の結果が海水そのままの組成と異なることは、むしろ自然である。ことに、Findseisen によれば、昇華核と凝結核とは別種のもものとされている故、雨水の分析の場合は更に事情が複雑になるわけである。

⁽¹⁵⁾ G. C. Simpson は、次のような考えから海鹽説に反對している。すなわち、全世界に 1 年間に降る雨の量は、平均約 100 cm に達する。そしてこの雨がどれだけの数の雲粒によつてつくられたかを計算してみる。假に雲粒の大きさを Köhler が測定したように直径 17.7×10^{-4} cm とすると、雨水 1 c.c. 中には 3.5×10^8 個の雲粒を含むことがわかる。それで 1 年間に平均して地球表面の單位面積に降つてくる雲粒の数は 3.5×10^{10} 個で、1 年は 3.2×10^7 秒であるから約 1,000 個の雲粒が 1 秒間に降つてくる。各々の雲粒には核が含まれているから、雨は結局地球表面の單位面積に毎秒 1,000 個の核を運んでくることになる。そうすれば、逆に地球表面からは、それと同数の核が大氣中に供給されていなければならぬ。このような核が、Köhler が提唱したような海鹽粒子であるならば、核は主に海の表面からのみつくられるであろう。しかし、海の表面積は地球表面積の $\frac{1}{3}$ を占めているから、これだけの核をまかなうためには、海の表面の單位面積から單位時間につくられる海鹽粒子の数は 1,250 個とならなければならぬ

い. . . ところで、海鹽粒子は海水の飛沫が空気中で乾燥してできたものである。そして海水の飛沫は波打際とか、風の強い荒れている海面でつくられるものであつて、油を流したような静かな海面からは、飛沫はあまりつくられないであらう。それで飛沫が空気中にさかんにとび出している海面や、海岸線の面積を少し大きく見積りすぎるが全海面の $\frac{1}{10}$ と假定しよう。そうすれば、毎秒荒れている海の単位面積からつくられる飛沫の数は 12,500 個となる。この飛沫 1 個に含まれている海鹽の質量は、Köhler によれば 1.8×10^{-14} g であるから、もとの飛沫の大きさは直徑 1.07×10^{-4} cm になる。この大きさは分裂によつてできる水滴の大きさの下限に近い。實際、霧吹きで霧をつくつても、この程度の大きさのものは少くて、大ていのはこれよりもずつと大きいのが普通である。それ故、荒れている海面でつくられる大小の飛沫のうちで、この大きさのものは全體の $\frac{1}{4}$ で、他は全部落下するものとする。 $\frac{1}{4}$ という數字は、別に確かな根據があるわけではないが、決して過小評價ではない。そうすれば、12,500 個の核をつくるには、少くとも 50,000 個の飛沫がつくらなければならないことになる。すなわち、荒れている海面の単位面積から、毎秒 50,000 個の海水飛沫が、しかも連続的につくられるということは、到底あり得ないというのが Simpson の反對要旨である。

雲や霧粒の凝結核は海鹽粒子でないとし、雨水中に含まれる鹽分は雲粒と同じ大きさの海水の飛沫が混入しているためであるとして、同じような計算をしてみよう。1 年間に地球の単位面積に降つてくる雲粒の数は、上にのべたごとく 3.5×10^{10} 個で、雲粒の平均直徑を 17.7×10^{-4} cm この核が 1.8×10^{-14} g の海鹽であるとすれば、1 年間に地球表面の単位面積に降つてくる鹽分量は 0.64 mg になる。この鹽分は核によつてもたらされるものではなくて、海鹽粒子を核としない雲粒の中に、雲粒と同じ大きさの平均直徑 17.7×10^{-4} cm の海水飛沫が雜つているために出てくるものとすれば、1 年間に降る雨の中には 6.4×10^6 個の海水飛沫が混つていることになる。すなわち、地球表面の単位面積に、1 年間に 6.4×10^6 個の海水飛沫が降つてくるわけになる。そして海の全表面積の $\frac{1}{10}$ の面積でこれらの飛沫がつくられ、そのうち $\frac{1}{4}$ だけがこの大きさのもので、他は全部落下するものとするれば、同様な計算によつて、毎秒荒れている海面の単位面積でつくられる飛沫の数は約 10 個となる。Simpson のいうように、毎秒 50,000 個というのは確かに多すぎるが、10 個ぐらいならばあり得るであらう。このような割合で海からとび出した海水飛沫は、濕度が 70 % 以下の非常に乾燥した大氣中では、三宅氏が提唱しているように、結晶分離をおこしてバラバラになるかもしれないが、通常雲が存在するような大氣中では、海水のままで浮遊していると考えられる。これが雨や雲に雜つて降つてくるわけである。

VI 要 約

霧の凝結核は、古くから多くの研究によつて、大氣中に浮遊している微粒子のなかでも吸濕性にとむもの、たとえば海水飛沫からつくられる海鹽粒子であらうということが、海鹽説として廣く信ぜられてきた。核に関する研究は、主に水蒸氣の擴散理論による核の大きさの推定と

か、又は計塵器とか、雨水、霧水の化学分析などによる間接的方法によつて、直接霧核自体にふれたものではなかつた。この研究は、高分解能をもつ電子顕微鏡をつかつて、直接天然の霧核の實體の寫眞をとることを始めて試みたものである。試料は霧水の沈澱物、霧のないときの大気浮遊物、霧粒個々の蒸發残滓等について調べた。その結果の代表的なものを圖版に示した。霧粒を蒸發させた残滓のなかには、一見して海鹽結晶と判定できるものは少く、煤煙、土壤物質のごときものが發見された。試料の数が少いので、的確なことはいえないが、従來考えられていたように、海鹽粒子が主な霧の凝結核であるということはないであろう。従つて、霧水、雨水中に出てくる鹽分は、凝結核によるものではなく、少數の海水飛沫が無鹽霧粒中に雜つているためであるとしても説明がつく。そういう海水の飛沫を、1例であつたが、ニセコアンヌプリ (1,300 m) の山頂で山霧のなかに發見したのである。

Simpson は、霧核が海鹽粒子であるならば、その核をつくるためには、海の表面の 1 cm^2 から毎秒 $5 \cdot 10^4$ 個の海水飛沫が連続的に大氣中に供給されていなければならないとして海鹽核に反對した。しかし、これは別に實驗的な裏付けがあつたわけではない。假に、著者の考えをすすめ、霧水中の鹽分は、霧粒と同程度の海水飛沫が無鹽霧粒中に混入しているためにでるとすれば、そのような海水飛沫は、海面 1 cm^2 から平均毎秒 10 個つくられればよいことになる。 $5 \cdot 10^4$ 個は多過ぎるが、10 個くらいならばありうるであろう。

以上の結果から、著者は直ちに海鹽説を全面的に否定するものではない。各地域の霧の、より多くの試料について、統計的な分類研究がなされなければ的確なことはいえないからである。

この研究は 1944 年 6 月～7 月、北海道根室において、同年 9 月下旬ニセコアンヌプリ山頂觀測所において、中谷教授、吉田教授の指導をえてなされたものである。同一内容の報告は、戦時研究報告 6～2 “千島及び北海道の霧の研究” に發表したが、再びここに再録した。この研究に多大の助力をおしまれなかつた日立中央研究所の方々及び四方幸子氏に對し厚く感謝する。

文 獻

- (1) 岡田武松 理論氣象學 (上) P 175 岩波書店
- (2) Simpson, G. C. 1941 On the formation of cloud and rain drop. Quart. J. r. meteor. Soc., **67**, No. 290, 99.
- (3) Aitken, 1923 Collected Scientific Papers. Cambridge Univ. Press.
- (4) Köhler, H. 1921 Ueber die Tröpfchen gröfzen der Wolken und die Kondensation. Met. Zeit., **38**, 359.
- (5) Köhler, H. 1936 The nucleus in and the growth of hygroscopic droplets. Trans. Faraday. Soc., **32.2**, 1152.
- (6) Wright, H. L. 1939 Atomospheric opacity: a study of visibility observations in British Isles. Quart. J. r. Meteor. Soc. **65**, No. 281, 411.
- (7) Wright, H. L. 1940 Atomospheric opacity at Valentia. Quart. J. r. Meteor. Soc., **66**, No. 283, 66.
- (8) Pettersen, S. 1941 Recent fog investigations. Journ. of Aero. Sci., **8**, Junu., No. 3.
- (9) Coste, J. II. 1936 The nature of the dispersoids in country and town air. Trans. of Faraday

- Soc., **32,2**, 1162.
- (10) Tutton, The natural history of ice and snow. Kegan Paul. London. 32.
- (11) 三宅泰雄 1939 雨水の化学 気象集誌 II 輯, **17**, 20.
- (12) Wright, H. L. 1940 Sea-salt nuclei. Quart. J. r. Meteor. Soc., **66**, No. 283, 3.
- (13) 福富孝治 1944 ガーゼ法による霧水電鏡に霧中の大粒子鹽素量の測定結果 千島及び北海道の霧の研究 53.
- (14) 松居秀夫 1944 凝結核及び昇華核の化学的研究, 気象集誌 XI 輯, **22**, 2.
- (15) Simpson, G. C. 1941 Sea-salt and condensation nuclei. Quart. J. r. Meteor. Soc. **67**, 290.

圖 版 説 明

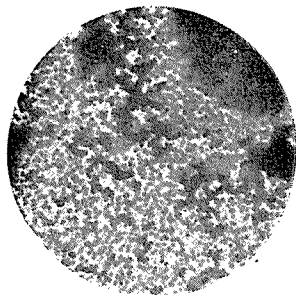
第 1 圖 版

- Fig. 1 霧水沈澱 (斜甲嶽) 金網法により捕集せるもの 電顯×10000
- Fig. 2 霧水沈澱 (斜甲嶽) 金網法により捕集せるもの 電顯×5000
- Fig. 3 霧水沈澱 (根室種馬所) コットレル法により捕集せるもの 電顯×5000
- Fig. 4 氣球により地上 50 m にて採取せる霧粒の残滓 電顯×5000
- Fig. 5 氣球により地上 100 m にて採取せる霧粒中に見出されたもので、微生物のように思はれる 電顯×10000
- Fig. 6 氣球により地上 500 m にて採取せる霧水の残滓 電顯×5000
- Fig. 7 根室種馬所にて晴天の日に試料支持臺を長時間放置して採取せるもの、タール状の物質か? 電顯×5000
- Fig. 8 同上、海鹽の結晶 電顯×5000. 結晶が透写である點に注意
- Fig. 9 同上、海鹽の結晶 電顯×5000 結晶が不透明である點に注意
- Fig. 10 コロヂオン膜上に附着せる霧粒 (ニセコ觀測所) 光顯×600
- Fig. 11 同上、蒸發過程、大部分の霧粒は蒸發した 光顯×600
- Fig. 12 同上、蒸發過程 光顯×600

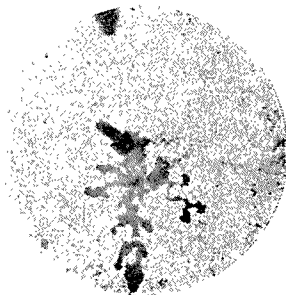
第 2 圖 版

- Fig. 13 Fig. 10 の霧粒 a の核 電顯×5000
- Fig. 14 同上、霧粒 b の核 電顯×10000
- Fig. 15 同上、霧粒 c の核 電顯×10000
- Fig. 16 コロヂオン膜上に附着せる霧粒 (ニセコ觀測所) 電顯×600
- Fig. 17 同上、蒸發過程 光顯×600
- Fig. 18 同上、蒸發過程 光顯×600
- Fig. 19 同上、霧粒 a の核 電顯×5000
- Fig. 20 同上、霧粒 b の核 電顯×5000
- Fig. 21 同上、霧粒 c の核 電顯×5000
- Fig. 22 純粹の食鹽の微結晶 電顯×5000
- Fig. 23 ニセコ山頂にて山霧の中より發見せる海水飛沫 光顯×600
- Fig. 24 同上、デシケーターに保存した後撮影せるもの、鹽の結晶が見える 光顯×600

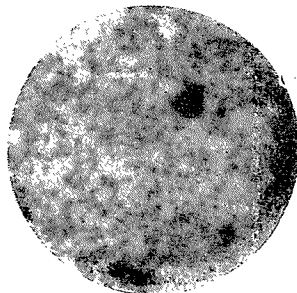
1.



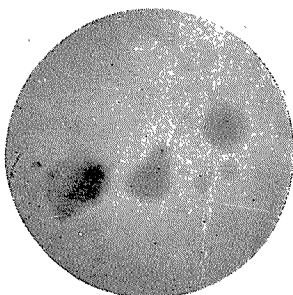
2.



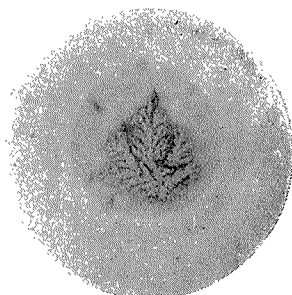
3.



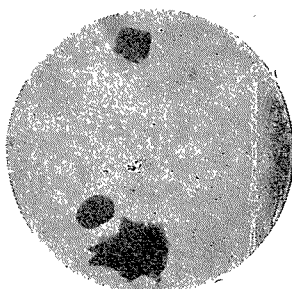
4.



5.



6.



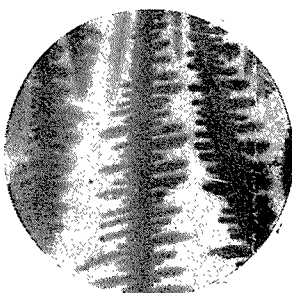
7.



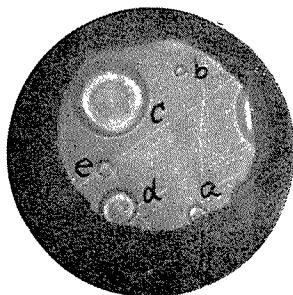
8.



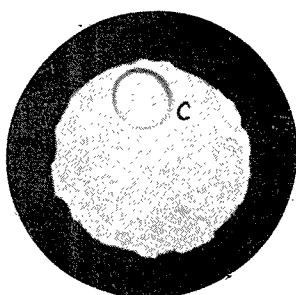
9.



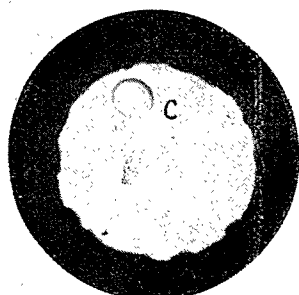
10.



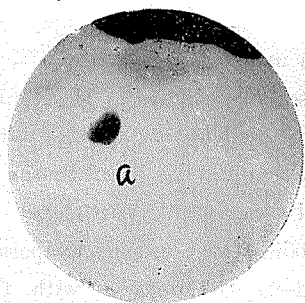
11.



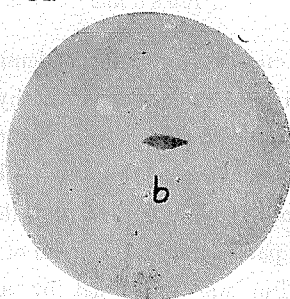
12.



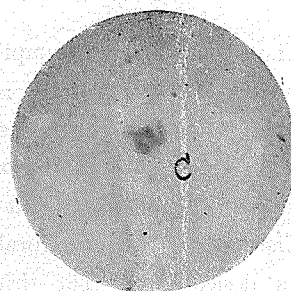
13.



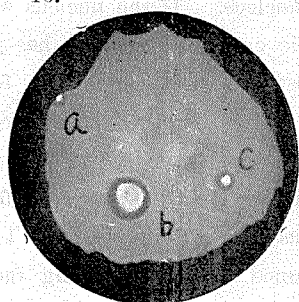
14.



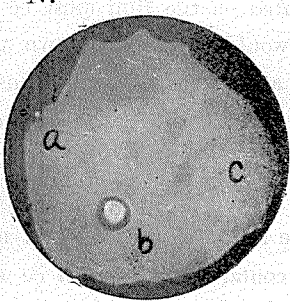
15.



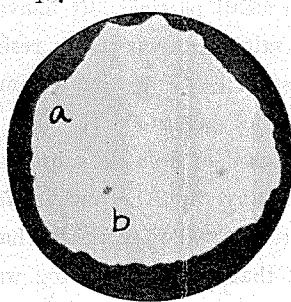
16.



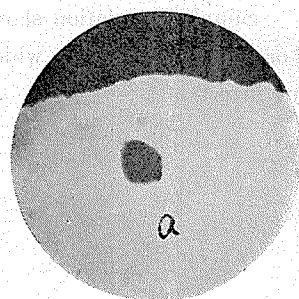
17.



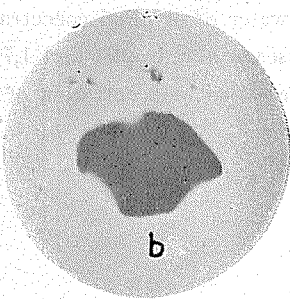
18.



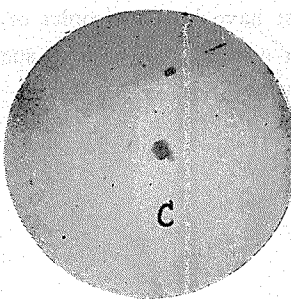
19.



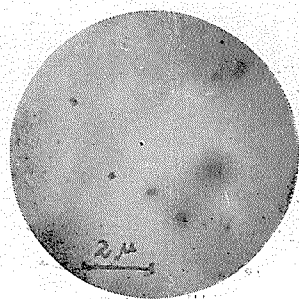
20.



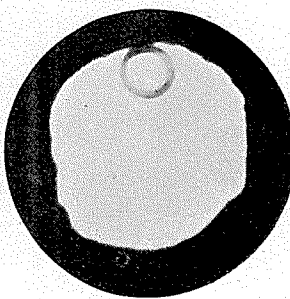
21.



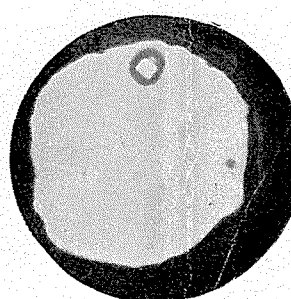
22.



23.



24.



Résumé

There are various assumptions on the nature of condensation nuclei of fog particles. It is widely believed that the nuclei are small particles of hygroscopic substance. H. Köhler assumed that they were sea salt particles which were formed by evaporation of sea water droplets splitted by wind from the surface of the sea. His assumption is based in the fact about 10 mg of sea salt is contained in a litre of collected water of fog particles.

The authors caught natural fog particles on a thin film of collodium, and let them evaporate in a desiccator. The dried film was examined by an electron-microscope with the magnification of about 10,000. A small particle of about 0.5-1 micron was usually found left somewhere on that part of the collodium film which had been covered by fog particle. The small particle left unevaporated on the film must be the nucleus. If the nucleus was sea salt, the evaporation residue would have been shown a cubic crystal. But it has no crystalline form but resembles a fragment of amorphous substance. Some of the fog particles caught on the film left no residual. In these cases the nuclei would have been composed of volatile substance.

At any rate, the authors found no cubic sea salt crystal as the evaporation residue of fog particles, and they think that the assumption of sea salt nucleus must be abandoned. The fact that the collected fog water contains sea salt can be explained by the following fact. Among numerous fog particles caught on the collodium film, the authors found a particle which turned to a comparatively large cubic crystal of 2.5 microns as it evaporated in the desiccator. This cubic crystal must be sea salt, and the fog particle which left this crystal must have been a droplet of sea water of original concentration. Simple calculation shows that a mixture of one of such a sea water droplet and 1,700 of ordinary fog particles which contain no sea salt produces water of salt concentration of 10 mg/litre.