

# 浮ゆうする氷晶の可視光に対する散乱断面積\*

森 田 恭 弘\*\*

## 要 旨

良質ガラスのドーム型低温槽内に  $10\mu$  前後の氷晶の雲をつくり、ジルコン光源の平行光を水平に照射して水平面内の散乱光を光電子倍增管で測定し、同時に氷晶のレプリカをとった。  $2\pi r/\lambda=80\sim 100$  程度であり、回折干渉による散乱と屈折反射による幾何光学的散乱が重なって気象学上重要な領域であると考えられる。

Mie 散乱の特徴と22度、46度、反太陽度のハローが現れ、角板結晶と角柱結晶とで各ハローの強さ、前方と側方との散乱強度が異なることが見出され、角柱のスケルトン構造が差異の一因となっていることがわかった。角板と角柱について氷晶1個当りの有効散乱係数を散乱角別に定めた。偏光度についてはハローの散乱角で大体において測定面に垂直が強く、角板では全体的に垂直、角柱では平行が卓越し、角板角柱混合雲では0となる散乱角が多かった。比較のために水滴で同じ実験を行い、Mie 散乱(コロナを含む)と虹の効果が強くとれた。偏光度は虹の出る角度では大体において垂直が卓越していた。水滴についても一個当りの有効散乱係数を散乱角別に定めた。

## 1. 序 論

### 1.1 歴史的背景

大気中に見られる光学現象はさまざまであるが、主として光の回折干渉にもとづく散乱現象と屈折反射による幾何光学的現象に大別することができる。散乱現象としては Rayleigh 散乱と Mie 散乱にもとづくものがある。前者は空の光の理論として有名であり、Chapman and Hammad (1939), Sekihara (1950) が取扱った直接積分による2次散乱までの理論、Chandrasekhar (1950) の発見した散乱大気中の放射平衡論をはじめとして、現在までに著しい発展をみておりとくに最近では Rayleigh 大気中の諸問題—オゾンの垂直分布、放射平衡、光化学的平衡—等についての研究がオゾンの吸収、多重散乱を考慮して Sekera and Dave (1962), Walton (1955), Dave (1964) (1965) によって、また地面の反射を取入れた計算が Dave and Furukawa (1964) によって、更に偏光度についてのオゾンの吸収の効果に関して Herman and Yeager (1965) の研究がある。一方 Mie 理論は上述の問題に関してエエロゾルの効果について、また視程、霧、雲の光の透過についての研究に応

用されている。Mie 理論は入射光の波長と同程度の大きさを有する屈折率の定まっている光学的に等方である球に対する散乱の場を2つのグループよりなる球面波より定めるものであって、この Mie の解は粒子の径、散乱角、入射光の波長の複雑な関数であり、現在までに大気中の諸問題に応用するための基礎的研究として Sinclair (1947), Sinclair and La Mer (1948), Houghton and Chalker (1948), Gumprecht et al. (1952), Goldberg (1953) 等が実験的、理論的研究を行なっている。また大気中の光の透過に関して Middleton (1957) が詳細なる研究を行ない微水滴による散乱の効果についてのべている。更に薄明の強度、Haze layer の問題について Hulburt (1938) (1941) (1943) (1947) (1953) の研究を初めとして、上層大気のエエロゾル、とくに夜光雲、真珠母雲を構成する粒子に関しての光学的性質およびその観測方法について Volz (1965), Volz and Goody (1962), Newkirk and Eddy (1964) が詳細なる研究を行なっており、とくに氷粒子の効果についてマイクロ波の領域で oblate ice spheroids の後方散乱強度の測定が Atlas (1963) によって、赤外領域では氷粒子の一次散乱体および吸収体としての影響を Zdunkowski et al. (1965) が考察している。この点について Yamamoto (1967) は雲の内部の放射伝達について、可視、赤外の全領域にわたり氷晶雲、水滴雲の双方についての評価が

\* Scattering Cross-Section of Freely Suspended Ice Crystals for Visible Light

\*\* Y. Morita 名古屋大学空電研究所  
—1973年1月19日受理—

早くなされねばならないとのべている。

回折現象としては光環が有名である。これは無数の小円板による光の回折現象として説明され、Airy, Scherzer, Exner が計算を行ない、とくに1877年に Exner はコロナを生ずる粒子の大きさとその強度が極小を呈する順位の関係を表わす式を与えた、(Humphreys, 1940)。これについて Simpson (1912) は  $1-10 \mu$  の微水滴について考察を行っており、Naik (1954) は微水滴の径の測定を Mie 理論と比較し、Naik and Joshi (1955) が反コロナ (anticorona) についての実験的研究を行なっている。

屈折および反射の現象としては、水滴の場合には虹が、氷晶の場合にはハローが有名である。虹については1637年に Descartes が幾何光学によって理論をたて虹の概要を説明し、Airy (1836) は波動光学によってこれを大成し、1897年に Pernter が更に改良を行ない (Pernter and Exner, 1922) その後 Aichi and Tanakadate (1904) がこれを完成させた。一方ハローには内暈、外暈、幻日環、幻日、内暈切弧、反対幻日、天頂弧、ローウィツの弧、パーリーの弧、太陽柱がありいずれも氷晶による光の屈折現象として説明され、Wegner (1925), Pernter and Exner (1922) が計算を行なっている。最近では Liljequist (1949—52) が南極の Mandheim で上記の種々のハローの出現頻度、ハローを生ずる氷晶雲、氷晶の形等についての詳細なる観測を行っている。Huffman and Thursby (1969) は低温室内で氷晶による光の散乱を実測したが、相対的な散乱強度分布をえたにとどまり、散乱断面積あるいは有効散乱係数の絶対値をえるにいたっていない。

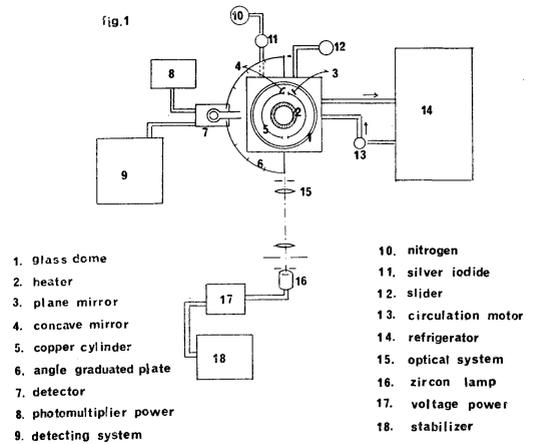
## 1・2 本研究の目的

大気に見られる光学現象、とりわけ水滴氷晶によって生ずるコロナ、虹、ハローについてその成因、光学的性質について考察することは、水滴、氷晶によって構成されている雲の生成条件、雲中の水滴、氷晶の分布状態を間接的に知る手がかりとなるものであって気象学上重要である。しかるに大気中に浮ゆうしている氷晶中、ハローを生ずべきものは多数ありその形状については計算によって推定されているが、実際の雲においては、さまざまな氷晶が浮ゆうしていると考えられ、何種類かの氷晶が混合している雲より生ずるハローについて論じたものはない。またハローを生ずる氷晶について氷晶は如何なる姿勢をとって落下するか、これを確かめたものは未だなくその落下の状態については確実な事実がつかまれている。またハローの計算は幾何光学によって行な

われており、これにより決定されるのは光線の方向であって、そのときの光の強度については知ることができない。ここで取扱う氷晶および水滴はその大きさから考えて Mie 散乱と幾何光学との境界点にあり、とくに氷晶の場合には、その形状より、散乱の問題として取扱う場合には理論的には非常に困難である。よって実験的にこれを考察することが重要であると思われる。そこで著者は以上の点に着目し低温槽内に角板および角柱よりなる氷晶雲および水滴雲を形成し、その光学的性質につき実験的研究を行ない、氷晶の形ごとに有効散乱係数の値を求めた。

## 2. 実験

装置の平面図をブロックダイアグラムにて第1図に示す。装置は低温槽、氷晶試料採集器、温度測定、検出系、氷晶核輸送部、光学系よりなる。

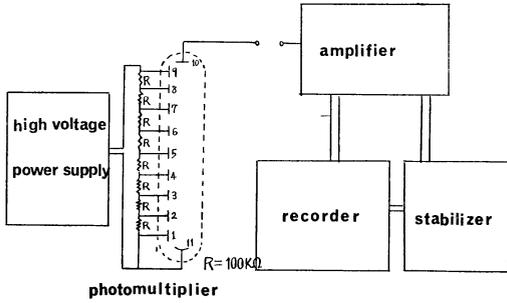


第1図 実験装置

1) 低温槽 低温槽は2重ガラス鐘にておわれ、断熱の効果および光学測定に便利なようにしてある。低温槽下部には氷晶試料採集器が組込まれている。冷却はエチレングリコールをドライアイスにて冷却したものを槽内に循環させて行ない、氷晶核は測定のはじめに AgI を  $N_2$  ガスと共に槽内に送りこみ、約  $-8^\circ C$ 、 $-10^\circ C$ 、にて氷晶雲を形成した。温度は Cu-Co 熱電対 2本を用い光路の上下 2点を測定した。

2) 光学系 光源は白色光、高輝度の点光源であるジルコンランプを用い、レンズ系にて  $4.0 \text{ mm}$  の径の平行光束を作り水平に氷晶雲に照射した。

3) 検出系 検知器は光電子増倍管 HTV 931 A を使用し、水平面内で散乱角  $0^\circ-180^\circ$  回転できるようにし

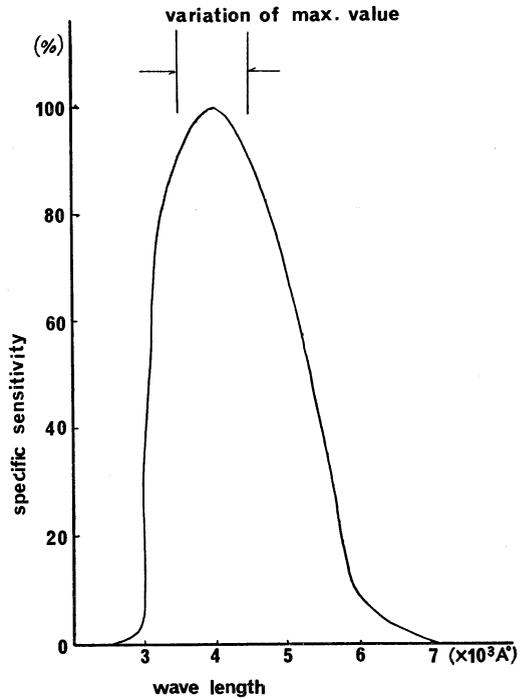


第2図 検出部回路ダイアグラム

である。測定は入射光の影響をさけるために  $17.5^\circ$ — $150^\circ$  の間について  $5^\circ$  毎に約 15 秒間行なった。第2図に検出系の回路構成を示す。検知器 HTV 931 A に一定の電圧を供給する直流高圧電源、散乱光による光電流を安定して増幅するための交流増幅器および増幅された電流を自記するための記録計、増幅器および記録計に供給する電圧を一定にする安定化電源よりなる。第3図に HTV 931 A の分光感度曲線を示す。光電面は Sb—Cs 面であって可視の領域を測定するのに有効である。

4) 氷晶試料採集器 測定の対象となった氷晶雲を構成する氷晶の形、個数の空間密度を知り、得られた散乱強度と対応させるために連続して4枚のレプリカのとれる採集器を作成した。このとき得られた氷晶の個数のフラックスの例を第4、5図に示す。測定の対象となった氷晶の平均の大きさは角板結晶では  $\bar{a}=13.4\mu$ ,  $\bar{c}=3.6\mu$  角柱結晶では  $\bar{a}=9.0\mu$ ,  $\bar{c}=13.0\mu$  水滴の平均半径は  $r=1.1\mu$  であった。

5) Stray light 以上の測定で問題となったのは槽内

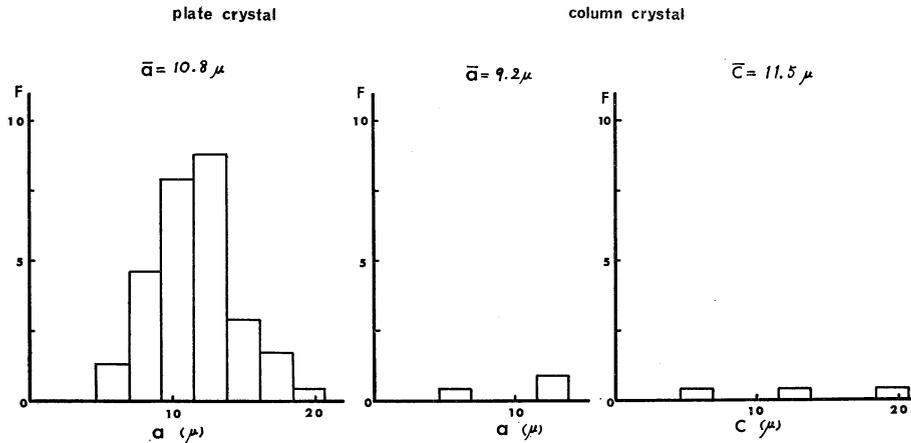


第3図 検知器の波長感度

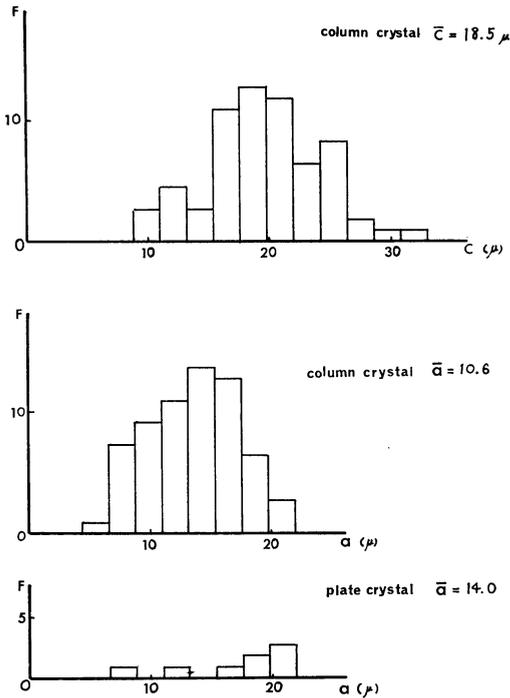
の壁面およびガラス面での反射光によって測定が妨害されることである。これを防ぐために槽内に凹面鏡および平面鏡を取付け、直達入射光を側方へ外し、反射の影響を出来るだけ少くして測定を行なった。

### 3. 結果及び討論

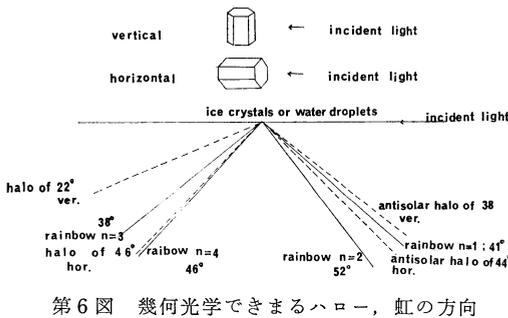
#### 3.1 散乱体としての氷晶および水滴



第4図 氷晶の粒度分布



第5図

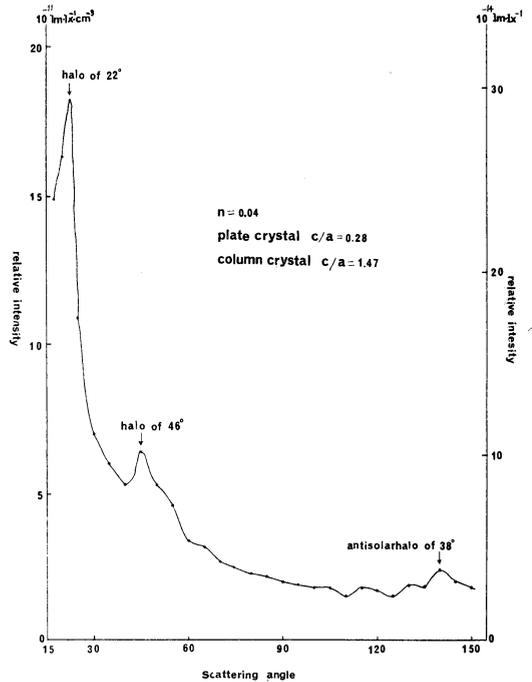


第6図 幾何光学できまるハロー、虹の方向

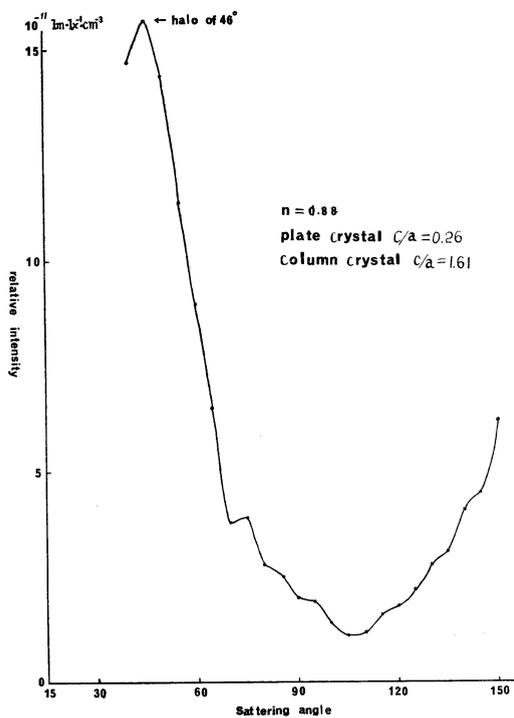
氷晶又は水滴の示す散乱特性のうち幾何光学的観点からこの実験で生じるはずであるハローおよび虹の方向を第6図に示す。氷晶が散乱体である場合には、氷晶（角板又は角柱結晶）がC軸を垂直にして浮遊しているときには  $\theta=22^\circ$  の方向に  $22^\circ$  ハローが  $\theta=142^\circ$  には  $38^\circ$  反太陽ハローが、C軸を水平にして浮遊している場合には  $\theta=46^\circ$  の方向に  $46^\circ$  ハローが、 $\theta=136^\circ$  には  $44^\circ$  反太陽ハローが光学的プリズムとしての最小偏角の計算から現れることになる。一方水滴の場合には半径  $30\mu$  以下の水滴では霧虹（白虹）が生ずることが知られており、虹の生ずる方向は最小偏角の計算から定ま

る。Descartes の虹の理論では第一、第二、第三、第四虹はそれぞれ  $\theta=139^\circ, 128^\circ, 38^\circ, 46^\circ$  の方向に現われる。

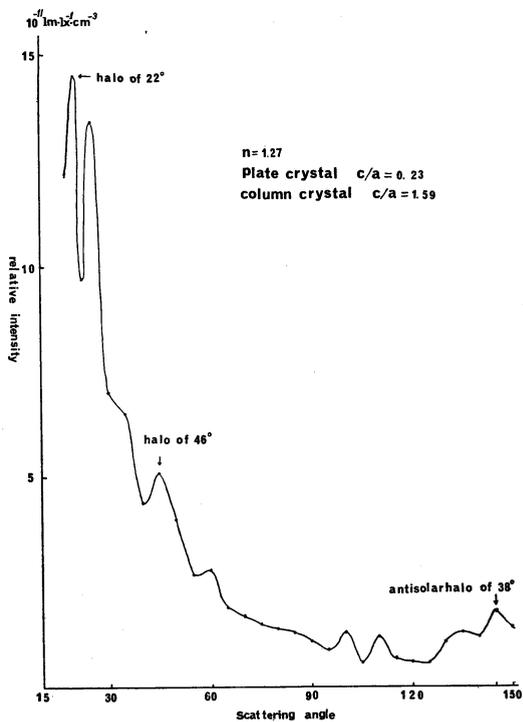
回折干渉の立場からはコロナを含む Mie 散乱による効果が重要である。氷晶については1963年に Towemy が赤外領域で氷晶を球とみなして Mie の散乱断面積を計算した他は、Mie の領域での研究は皆無に近い状態である (Zdunkouski et al., 1965)。この実験では角板、角柱結晶をそれぞれ外接する球とみなしたときには全ての試料の平均で半径は角板が  $r=6.7\mu$  角柱が  $7.9\mu$  である。入射光の有効波長  $\lambda_e=0.4\mu$  とすると Mie パラメーター  $\alpha=2\pi r/\lambda_e$  は角板では105角柱では124となり幾何光学と回折干渉との重複した領域であり、双方の効果を考慮した取扱が行われなければならない理論的取扱いは非常に困難であると考えられる。コロナについては Simpson (1912) がコロナを生ずる粒子の大きさと中心から第一第二の赤輪に至る角度  $\theta$  との関係について、 $r=1-10\mu$  の粒子について計算した。これによると、ここで取扱った氷晶の場合には第一の赤輪について  $\theta=2^\circ-3^\circ$ 、第2の赤輪については  $\theta=5^\circ-7^\circ$  となり、この実験での測定角度範囲外となる。一方水滴については  $r=1.1\mu$  とすると  $\alpha=17$  となり、幾何光学的効果より



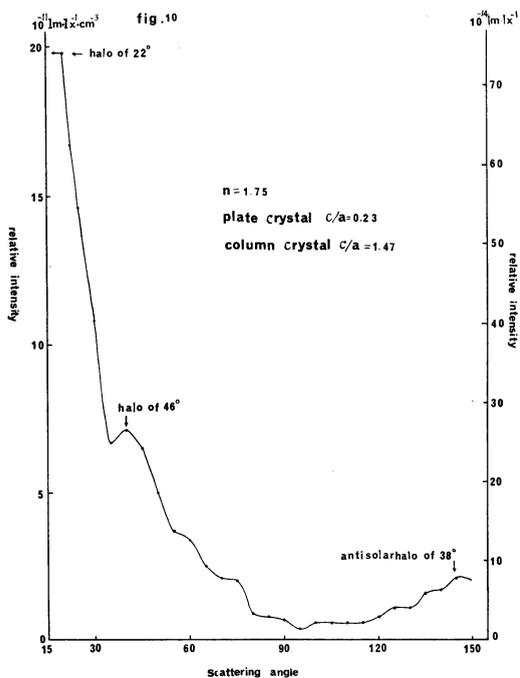
第7図 7~11 散乱断面積の角度分布



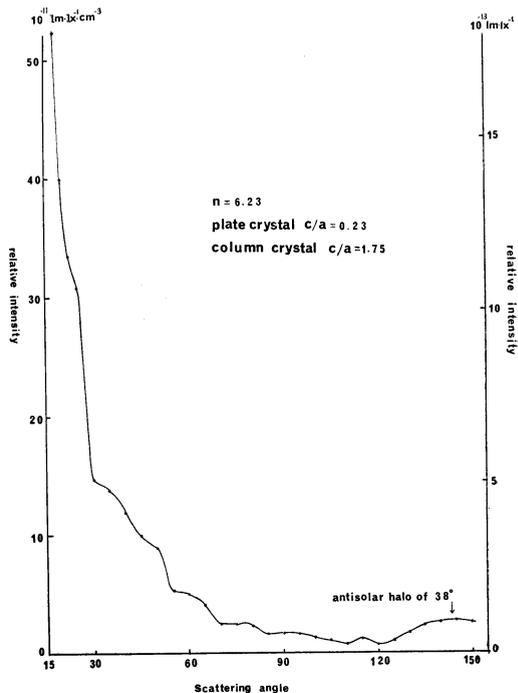
第8図



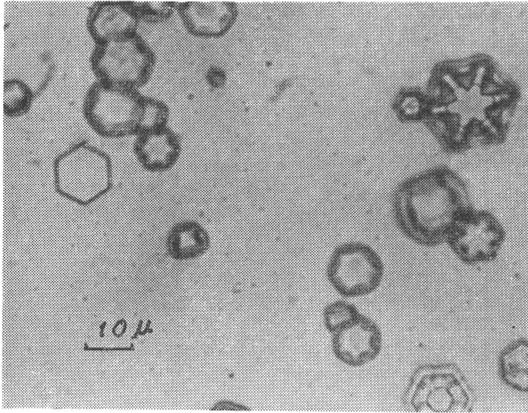
第9図



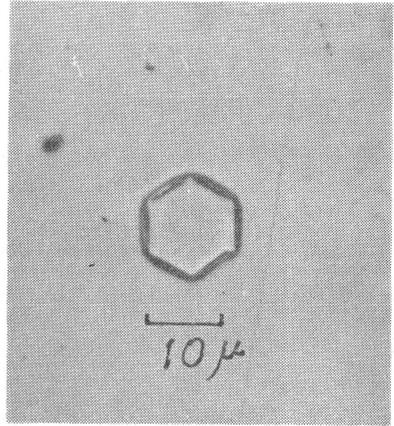
第10図



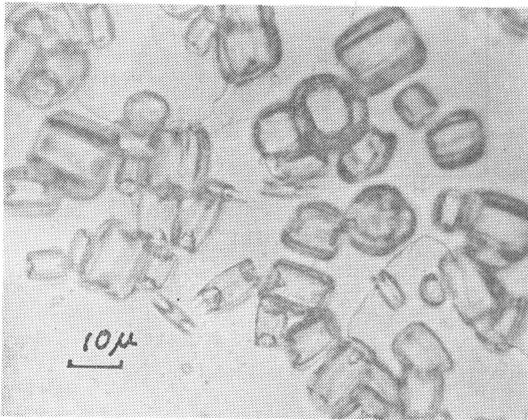
第11図



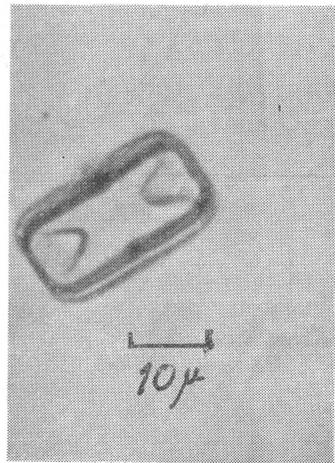
第12図 12~15氷晶のレプリカ写真



第14図



第13図



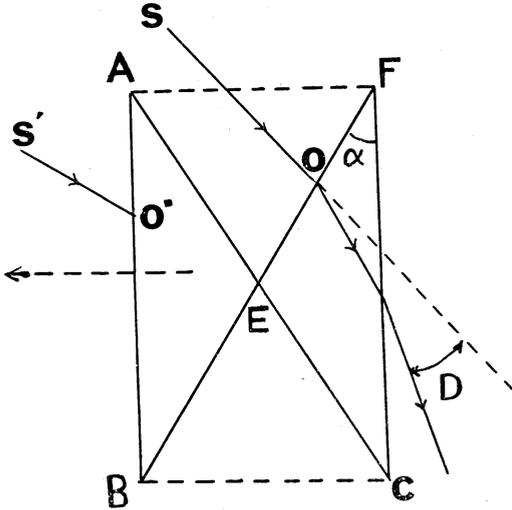
第15図

も回折干渉による効果が大であることがわかる。コロナを生ずる角度については第一の赤輪については  $\theta=24^\circ$  である。

### 3.2 氷晶の散乱特性

得られた測定値106例を整理して代表的な散乱特性の例を第7, 8, 9, 10, 11図に示す。このときの氷晶のレプリカの写真を第12, 13, 14, 15図に示してある。縦軸は散乱強度、横軸は散乱角である。左の縦軸は氷晶雲  $1\text{ cm}^3$  についての散乱強度であり(単位  $10^{-11}\text{ lm. lx}^{-1}\text{ cm}^{-3}$ )右の軸は氷晶1個についての散乱強度(単位  $10^{-13}$  又は  $10^{-14}\text{ lm. lx}^{-1}$ )である。これらはそれぞれ入射光強度で除した値にて示されている。入射光強度は  $776\text{ lx}$  でガラスの吸収等を考慮した値である。図中の  $n$  は氷晶雲中の角板、角柱結晶の個数の空間密度の比である。 $n=0.04$  の第7図は氷晶雲がほとんど角板結晶よりなる

場合である。グラフは全体として前方が強く、側方が弱い散乱特性を示すと共に  $22.5^\circ-27.5^\circ$ ,  $42.5^\circ-47.5^\circ$ ,  $142.5^\circ-147.5^\circ$  付近にそれぞれ極大が生じている。前の考察からこれらはそれぞれ  $22^\circ$ ,  $46^\circ$  ハロー、 $38^\circ$  反太陽ハローであると考えられる。第8図,  $n=0.88$  の場合、すなわち氷晶雲中に角板と角柱が混合しておりしかも比較的角板結晶が多いときには  $45^\circ$  付近の極大が著しく、すなわち  $46^\circ$  ハローが生じている。第9図,  $n=1.27$  の場合、比較的角柱結晶が多い場合には  $22^\circ$ ,  $46^\circ$  ハロー、 $38^\circ$  反太陽ハローがそれぞれ顕著に現われている。更に角柱結晶がふえて角板結晶の2倍近くになると第10図  $n=1.75$  の場合には  $22^\circ$  ハローはさほど顕著ではない。この傾向は更に角柱結晶がふえてくるにつれて第11図,  $n=6.23$  の場合に著しくなり、 $22^\circ$ ,  $46^\circ$  ハローは全くみ

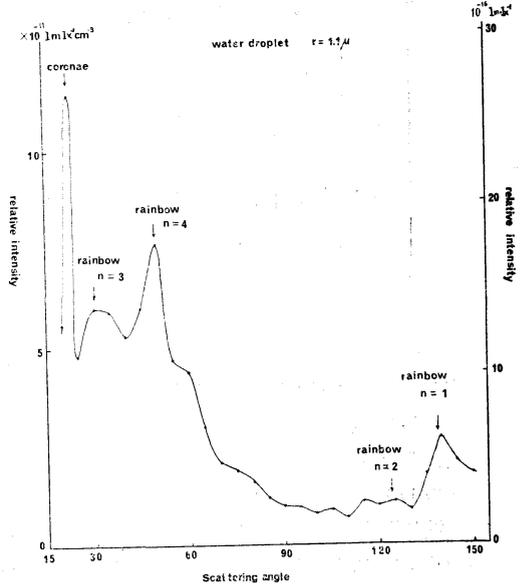


第16図 骸晶のプリズム

られなくなる。以上のことから考察すると

1. 角板を主とする氷晶雲の場合に $25^\circ$ 付近に極大値が現われたのはハローであり、 $45^\circ$ 付近の極大は $46^\circ$ ハローであり、 $145^\circ$ 付近の極大は $38^\circ$ 反太陽ハローであると考えられる。従って角板結晶は底面を下方(C軸を垂直)にとって浮ゆうしており、又 $46^\circ$ ハローが生じていることから側面を下方にとって(C軸を水平)幾分か傾斜して浮ゆうしている氷晶も存在していることがわかる。

2. 角柱を主とする氷晶雲では $22^\circ$ 、 $46^\circ$ ハローが表われず、わずかに $38^\circ$ 反太陽ハローがあらわれている。これはこの実験の重要な結果の一つと考えられる。今骸晶構造のない角柱が側面を下方にとって浮ゆうしていると考えると $22^\circ$ ハローは測定する面上に存在しないが、 $46^\circ$ ハロー、 $44^\circ$ 反太陽ハローは現れなければならない。しかるにここで対象とした角柱は第15図に示すように骸晶構造を有しており、光学的プリズムとして $90^\circ$ の稜角がないものが多いと考えられる。その結果 $46^\circ$ ハロー、 $44^\circ$ 反太陽ハローはほぼ消失したものと考えてよい。今、角柱結晶が第16図のような構造をしていると考え、側面を下方にとって水平に浮ゆうしているとするれば、 $\triangle FEC$ を頂角 $\alpha$ なる光学的プリズムとしたときにハローを生ずると考えられる入射光の向きはSO、S'O'だけである。しかるにS'O'はこの実験では太陽柱を生ずる方向となり、この実験での測定面上に存在しない。SOについては角柱の平均の大きさは $AB=13.0\mu$ 、 $AF=9.0\mu$ とすると $\alpha=35^\circ$ となりこのときの最小偏角は氷晶の屈折率 $n=1.31$ とすると $D=11^\circ$ となる。従って



第17図 水滴の散乱断面積の角度分布

角柱の場合には $110^\circ$ 付近にハローを生ずるはずである。しかしこの実験では測定範囲外でありしかも実際の角柱は更に複雑な構造を有しているので、骸晶構造をもっている角柱より生じるハローについては簡単に論ずることはできないが、この実験で角柱の場合に前方散乱強度が著しく強くなっていることはこのような効果が充分ありうることを示していると考えられる。以上の特性で全体として前方がつよく側方が弱く、後方へゆくに従ってつよくなっているのは回折干渉による効果であると考えられる。

3. 水滴の散乱特性を第17図に示す。特性はいくつもの極大、極小を有するMie散乱の特徴を示している。前の考察から明らかに、これらの極大はコロナ、虹の効果を含んでいることがわかる。とくに $\theta=25^\circ$ 付近のコロナの強度が大きく、 $\theta=45^\circ$ 付近の第4虹が $\theta=140^\circ$ 付近に生じた第1虹よりも強度がつよいことは注目される。これは明らかに回折干渉による効果であることがわかる。

### 3.3 氷晶の落下速度の決定

第7, 10, 11図に氷晶1個あたりの散乱強度(散乱断面積)の角度分布が示されたがこれはこの実験により初めて求められたものである。このとき氷晶の個数の空間密度を決定する必要がある、そのためには氷晶の落下速度を定めることが必要である。しかるにこれについては現在までのところ決定的な方法はない。ここでは骸晶構

第1表 落下速度と空間濃度

	$\bar{a}(\mu)$	$\bar{c}(\mu)$	$\bar{v} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$	$N \text{ cm}^{-3}$
plate	13.4	3.6	$v_1=2.21 \times 10^{-1}$ $v_2=0.76 \times 10^{-1}$	345 158
column	9.0	13.0	$1.61 \times 10^{-1}$	398
water droplet	$r=1.1$		$0.165 \times 10^{-1}$	$3.58 \times 10^4$

第2表 有効散乱係数の角度分布

$\theta$	$n=0.04$	$n=6.23$	water droplet
17.5	$1.96 \times 10^{-3}$	$5.10 \times 10^{-3}$	—
20	2.14	3.82	$3.39 \times 10^{-4}$
22.5	2.39	3.19	6.86
25	1.43	2.97	2.83
30	$9.11 \times 10^{-4}$	1.41	3.65
35	7.82	1.32	3.56
40	6.94	1.14	3.16
45	8.43	$9.65 \times 10^{-4}$	3.58
50	6.94	8.25	4.56
55	6.12	5.02	2.87
60	4.04	4.75	2.66
65	4.24	3.95	1.81
70	3.50	2.41	1.26
75	3.28	2.33	1.12
80	3.06	2.17	$9.92 \times 10^{-5}$
85	2.90	1.62	7.13
90	2.61	1.67	6.16
95	2.54	1.52	5.82
100	2.31	1.25	5.05
105	2.31	1.06	5.46
110	1.94	$8.12 \times 10^{-5}$	4.35
115	2.31	$1.14 \times 10^{-4}$	6.95
120	2.24	$6.31 \times 10^{-5}$	6.36
125	2.01	$1.08 \times 10^{-4}$	6.77
130	1.86	1.65	5.23
135	2.38	2.06	$1.05 \times 10^{-4}$
140	3.21	2.54	1.61
145	2.69	2.66	1.27
150	2.38	2.51	1.08
av.	$6.08 \times 10^{-4}$	$8.63 \times 10^{-4}$	$1.84 \times 10^{-4}$

造を有している水晶と有していない水晶とに分類して質量を決定し、これに働く抗力  $F$  を定め落下速度を決定した。すなわち角板結晶については外接する円板として、骸晶構造を有している角板結晶については有していない角板の1/3として質量を求めた。角柱結晶についてはすべて骸晶構造を有していると考え、質量は Higuchi (1954) の実験式によった。抗力  $F$  は角板は円板に外接する球に働く力として、角柱は円柱に外接する球に働く力としてそれぞれ求めた。抗力は水晶の落下姿勢を仮定することにより変わってくる。粘性流体中を運動する物体に働く力は Lamb (1945) によると、 $F=6\pi R\eta v$  の形であり、とくに、(1) 円板が底面を下方にして運動するときには  $R=0.43a$  (2) 側面を下方にしている場合には  $R=2.28a$  (3) 外接する球が運動する場合には  $R=0.50a$  である。ここで  $a$  は円板の直径である。以上の場合にいずれも大きい差はみられないが、ここでは落下姿勢を限定してしまうのは好ましいことではないと思われるので (3) の場合を任意の姿勢をとらうるものとして採用した。このようにして求めた落下速度は  $a$  軸、 $c$  軸を  $\mu$  で表わし、落下速度  $\text{cm s}^{-1}$  とすると角板結晶のうち骸晶構造のないものについては  $v_1=4.68 \times 10^{-3} ac$  あるものについては  $v_2=1.56 \times 10^{-3} ac$  角柱結晶については  $v_3=2.60 \times 10^{-3} ac^2/\sqrt{a^2+c^2}$  であった。ここでは粘性率  $\eta=1.60 \times 10^{-4} \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、水の密度  $\rho=0.916 \text{ g cm}^{-3}$  重力の加速度  $g=980 \text{ cm s}^{-2}$  とした。水滴については Stokes の法則を用いて落下速度を求めた。以上のようにして求めた落下速度、これより計算した個数の空間密度をすべての試料の平均として求めた値を第1表にて示す。

3.4 水晶の有効散乱係数および偏光度

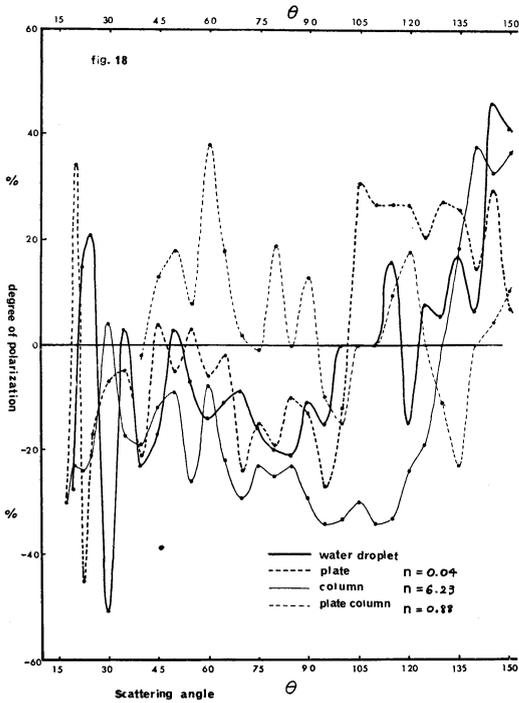
1) 有効散乱係数

前節の結果にもとづいて、角板結晶、角柱結晶、水滴の有効散乱係数を求めた。有効散乱係数=散乱断面積/幾何学的断面積である。幾何学的断面積  $S$  は水晶の外

接する球の  $\pi r^2$  として求めた。このとき用いた  $a, c$  軸の値は全試料の平均でなく、 $n=0.04, n=6.23$  のときの試料の平均をそれぞれ採用した。すなわち角板結晶では  $r=6.2\mu, S=1.21 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 、角柱結晶では  $r=10.7\mu, S=3.56 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 、水滴は  $r=1.1\mu, S=3.80 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  である。第2表に有効散乱係数の角度分布および平均値を示す。

2) 偏光度

測定面に平行な偏光成分  $I_{11}$  と垂直な成分  $I_1$  を同時に測定した。 $I_{11}, I_1$  の散乱強度の角度分布は偏光しない場合と大略同様の傾向を示した。ここではこれより求め



第18図 偏光度の角度分布

た偏光度  $P$  の角度分布を第18図に示す。  $P = (I_1 - I_{11}) / (I_1 + I_{11}) \times 100$  として%で示してある。横軸は散乱角  $\theta$  である。図には角板結晶の場合  $n = 0.04$ 、角柱結晶の場合  $n = 6.23$ 、角板角柱混合している場合  $n = 0.88$  の場合および水滴について示してある。これによると氷晶の場合には大体において  $22^\circ$ 、 $46^\circ$  ハロー、 $38^\circ$ 、 $44^\circ$  反太陽ハローの生ずる付近で  $I_1$  の成分が卓越していた。とくに角板結晶が主であるときには全体として  $I_{11}$  の成分が卓越しており、角柱結晶が主であるときにはやはり  $I_{11}$  成分が卓越していた。角板角柱が混合しているときには、比較的角板が多いときには  $I_{11}$  の偏光成分が卓越しており、比較的角柱の多いときには  $I_1$  の成分が卓越していた。また全体として偏光してない角度が多かった。水滴の場合には  $I_1$ 、 $I_{11}$  成分が交互にあらわれるが、大体において  $I_1$  成分が卓越しておりとくに虹の出る角度では  $I_1$  成分が卓越していた。

4. 結論

以上の実験および考察から次のことがわかった。

- 1) 角板型氷晶と角柱型氷晶について実験的に光の散乱断面積および有効散乱係数を求めることができた。
- 2) 氷晶の形とハローの現われる角度との関係について

従来幾何光学的仮説をはじめて室内実験で確認した。

3) 角柱結晶の骸晶構造が散乱の仕方(ハローを含む)に影響していることを見いだした。

4) 本研究は雲の中で氷晶が形成されてまもない初期状態を光学的に測定するための基礎実験となるものである。

5. 謝辞

この論文を発表するにあたり有益なる討論をしていた名古屋大学理学部の磯野謙治教授、武田喬男助教授、気象大学の駒林誠教授、気象研究所の田中豊顕氏、東京理科大学の権田武彦講師に感謝いたします。また氷晶の習性および落下速度の決定に際して有益なる助言をいただいた名古屋大学理学部の樋口敬二教授に感謝いたします。更に光電測定に関して千野製作所山口益男氏に助言をいただいたことを附記します。尚、本研究は名古屋大学大学院理学研究科地球科学第Ⅱ類修士課程で名古屋大学理学部水質科学研究施設において、磯野謙治教授を指導教官として、駒林誠助教授(当時)を主任指導として、昭和40年および41年度におこなわれたものである。

文献

- 1) Aichi K. and Tanakadate, S., (1904): Theory of the rainbow date a circular source of light. *Phil. Mag.* **8**, 589-610.
- 2) Airy G. B., (1836): On the intensity of light in the neighbourhood of a caustic. *Trans. Camb. Phil. Soc.* **6**, 141-403.
- 3) Atlas, D. (1963): Back-scatter by oblate ice spheroids. *J. Atmos. Sci.* **20**, 48-61.
- 4) Chandrasekhar S., (1950): *Radiative transfer*. Dover Publications Inc. p. 393.
- 5) Chapman S. and Hammad, A., (1939): The primary scattering and secondary scattering of sunlight in a plane-stratified atmosphere of uniform composition. *Phil. Mag.* **28**, 99-110.
- 6) Dave, J. V. (1964): Meaning of successive iteration of the auxiliary equation in the theory of radiative transfer. *Astrophys. J.* **140**, 1292-1303.
- 7) —, (1965): Multiple scattering in a non-homogeneous Rayleigh atmosphere. *J. Atmos. Sci.* **22**, 273-279.
- 8) —, and Furukawa P. (1964): The effect of Lambert-type ground reflection on umkehr measurement. *J. Atmos. Sci.* **21**, 161-167.

- 9) Goldberg, B. (1953): New computation of the Mie-scattering function for spherical particles. *J. Opt. Soc. Amer.* **43**, 1221.
- 10) Gumprecht R. O. Sung N. Chin J. H. and Sliepcevich C. M. (1952): Angular distribution of light scattered by large droplets of water. *J. Opt. Soc. Amer.* **42**, 226-231.
- 11) Herman B. M. and Browing S. R. (1965): A numerical solution to the equation of radiative transfer. *J. Atmos. Sci.* **22**, 559-566.
- 12) —, and Yarger D. N. (1965): The effect of absorption on a Rayleigh atmosphere. *J. Atmos. Sci.* **22**, 644-651.
- 13) Higuchi K. (1954): A method for observation of falling snow particles. *J. Meteor. Soc. of Japan*, **32**, 19-23.
- 14) Houghton H. G. and Chalker W. R. (1949): The scattering cross section of water drops in air for visible light. *J. Opt. Soc. Amer.* **39**, 955-957.
- 15) Huffman, P. J. and W. R. Thursby, (1969): Light scattering by ice crystals. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 1073-1077.
- 16) Hulburt E. O. (1938): The brightness of the twilight sky and the density and temperature of the atmosphere. *J. Opt. Soc. Amer.* **28**, 227-236.
- 17) —, (1941): Optics of atmospheric haze. *J. Opt. Soc. Amer.* **31**, 467-476.
- 18) —, (1941): Angular distribution of light scattered in liquids. *J. Opt. Soc. Amer.* **31**, 554-558.
- 19) Hulburt E. O. (1943) Propagation of radiation in a scattering and absorbing medium. *J. Opt. Soc. Amer.* **33**, 42-45.
- 20) —, (1947): Brightness and polarization of daylight sky at various altitudes above sea level. *J. Opt. Soc. Amer.* **37**, 78-92.
- 21) —, (1953): Explanation of the brightness and color of the sky particularly the twilight sky. *J. Opt. Soc. Amer.* **43**, 113-118.
- 22) Humphreys W. J. (1940): Physics of the air. McGraw-Hill book Co. New York. Chapter 6. 547-556.
- 23) Lamb. H. A. (1932): Hydrodynamics. 6th ed. Cambridge Univ. Press. p. 734.
- 24) Liljequist, G. M. (1949-52): A halo phenomena and ice crystals Norwegian British Swedish antarctic expedition. Scientific results. **11**, 1-84.
- 25) Middleton, W. E. K. (1957): Vision through the atmosphere. *Handbuch der Physik.* **48**, 254-287.
- 26) Naik Y. G., (1954): Correlation between optical and dynamic methods of measuring size of water drops in a cloud. *J. Colloid Sci.* **9**, 393-399.
- 27) —, and Joshi R. M. (1955): Anti-coronas or brocken bows. *J. Opt. Soc. Amer.* **45**, 733-736.
- 28) Newkirk, G. and J. A. Eddy (1964): Light scattering by particles in the upper atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **21**, 35-60.
- 29) Pernter J. M. and Exner F. M. (1922): *Meteorologische optik.* Wien and Leipzig. p. 560.
- 30) Sekera Z. and Dave J. V. (1961): Diffuse transmission of solar ultraviolet radiation in the presence of ozone. *Astrophys. J.* **133**, 210-227.
- 31) Sekihara, K. and Kawamura K. (1950): Studies of distribution of ultraviolet sky radiation I. *Geophys. Mag.* **22**, 21-28.
- 32) Simpson, G. C. (1912): Coronae and iridescent cloud. *Quart. J. R. Met. Soc.* **38**, 291-302.
- 33) Sinclair, D., (1947): Light scattering by spherical particles. *J. Opt. Soc. Amer.* **37**, 475-480.
- 34) —, and LaMer V.K. (1949): Light scattering as a measure of particle size in aerosols. *Chem. Rev.* **44**, 245-267.
- 35) Volz, F. E. (1965): Atmospheric haze layers and brightness of the horizon. *Tellus.* **17**, 166-176.
- 36) —, and Goody, R. M. (1962): The intensity of the twilight and upper atmospheric dust. *J. Atmos. Sci.* **19**, 385-406.
- 37) Walton, G. F. (1955): Atmospheric scattering and absorption of ultraviolet sunlight. *Phil. Mag.* **46**, 281-292.
- 38) Wegner A. (1925): *Aus den Archiv d. Deutschen. Seewarte u. d. Marine Observatoriums.* **43**, Der Nebensonnenhalo 6-9. Zahlenwete 12-14. Der Zirkumzenitalbogen 15-18. Hamburg.
- 39) Yamamoto, G. (1967): Atmospheric radiation. *Science.* **37**, 140-144. Iwanami in Japanese.
- 40) Zdunkowski W. Henderson D. and Hales J. V. (1965): The influence of haze on infrared radiation measurements detected by space vehicles. *Tellus.* **17**, 147-165.