

人工霧による放射抑制機構に関する研究 (第1報)

関原 彊・村井潔三・嘉納宗靖

気象庁気象研究所

Studies on the Mechanism of Decrease of Effective Radiation
by an Artificial Fog (Report 1)

By

K. SEKIHARA, K. MURAI and M. KANO

Meteorological Research Institute, Tokyo

Summary

Main effort was made for trial manufacture of a near infrared spectropyrheliometer, and by participating in the open-air experiments on artificial fog of National Institute of Agricultural Sciences, observations of fog and radiation were carried out and the data were analyzed.

Main parts of the near infrared spectropyrheliometer are two co-axial prisms of quartz glass, and this instrument is useful for experimental study of the radiative transfer in fog and of the absorption phenomena by water vapor.

Results of radiation measurements in artificial fog have shown that the degree of radiation decrease in fog layer is approximately 11 - 33%, that the size of fog particles has a peak of its distribution at about 10μ (radius) on an average, that the water content is about $0.4 - 1.3 \text{ g/m}^3$, and that each of these values is fairly greatly fluctuating.

1. 序 論

よく晴れた夜は地表面付近の冷却が激しく、これに反し全天雲におおわれた時または濃い霧のかかった際には夜間冷却が小さいことはよく知られている。これは雲または霧が地表面から射出された長波長(赤外)放射を吸収し、この吸収した放射エネルギーの大部分を再び地表面へ向けて放射するためである。雲や霧は長波長放射を非常によく吸収するので、長波長放射の伝達の問題では従来雲を黒体として扱ってきた。雲や霧がこのように長波長放射をよく吸収する性質を利用して、人工霧をつくり、それによって夜間放射による冷却を

やわらげ、霜の害を防ごうとする試みは昔からなされてきたが、蒸発抑制剤を使用しての不乾性微水滴を大量発生させて防霜防冷に使おうとする方法が、三原氏等(1966)によつて開拓されてきた。この場合、三原氏等が述べているとおりまず安定した(蒸発速度が非常に遅い)霧粒を多量にかつ廉価に得ることが問題であり、これについては資源技術試験所で研究が進められている。第二はこれらの霧の放射の性質を研究することである。雲がかなり厚い場合には前記のように長波長放射に対して、雲は黒体として扱えるが、そうでない場合には黒体として扱えず、問題は非常に複雑とな

る。霧や雲は夜間においては地面からの長波長放射をさえぎり、地表面の冷却をやわらげるが、昼間においては太陽からの短波長放射(日射)をさえぎり、地表付近の温度上昇を妨げ、いわゆる冷害の問題に深く関係する。このように霧や雲は大気中での放射伝達に重要な役割を演ずるが、問題が取扱にくいため、霧や雲の中での放射伝達の研究は遅れている。

そこでまず霧粒の粒度分布、霧の含水量および霧の層の厚さが放射伝達におよぼす影響を実験的、理論的に研究し、その成果を基礎にして、実際の防霜、冷害の対策を考えることが肝要である。この予備報告では、1966年12月に行なわれた野外観測の測定結果と試作した近赤外分光日射計の特徴ならびに次年度の研究計画を述べる。

2. 野外観測

1966年12月6日の晩から翌7日の早朝にかけて、国立競技場において、農技研の三原氏等とともに人工霧による夜間放射のしやへい効果についての共同観測を行なった。当方の行なった測定は長波長放射、人工霧の粒度分布およびその含水量等である。

長波長放射の測定は霧発生機から約20ないし30m離れたところでFunk型の放射計を用いてなされた。

霧粒の粒度分布は放射の観測点付近および、霧発生機の近く(5~10m以内)で主として行なった。測定方法は次のとおりである。長さ約6cm、幅約2cmのガラスの小片の表面にMgOをくん煙して吹きつけ(smoke)したものを多数準備し、これを霧におおわれている場所の地表面に一定時間(当夜は霧の濃度に応じ15秒ないし30秒)放置する。そうするとガラスの小片上に霧粒が落下し、その上にこん跡を残す。このこん跡を顕微鏡写真にとり、その大きさを測定していくつかの大きさの範囲に分け、その範囲内のこん跡の数を求める。これはガラス小片上に落下した霧粒の粒度分布を与えるものであるが、これから実際の空間における粒度分布を求めるには次のようにする。今、 i 番目の大きさの区間にある霧粒の半径を r_i 、落下速度を v_i 、また空間密度を N_i とし、時間 t の間に面積が A なるガラス小片の上に落下した i 番目の霧粒の数を S_i とすると、 $N_i = S_i / Av_i t$ で与えられる。

霧の含水量 w (霧の中の単位体積中に含まれる

水の量)は独立に測定されたが、上記の粒度分布の測定値より、式 $w = \sum_i \frac{4}{3} \pi r_i^3 N_i \rho$ を用いても求められる。ここで ρ は水の密度を示すが、 $\rho = 1$ として扱った。

3. 測定結果および考察

前記の夜間の間に数回にわたって霧が作られ、観測場所へ流出されたが、風の影響でうまく霧が測定点付近をおおわなかったり、また拡散によって霧が途中で消えて十分な濃度が得られなかったりしたが、そのうちで午前2時50分ごろより3時30分ごろまでの実験では霧が定常的に測定点をおおい、比較的よい測定値が得られた。その時の長波長放射の測定結果を図-1a, 1bに、また同時刻に放射の観測点付近で観測された霧粒の顕微鏡写真の一部を図-2a, 2bに、またこのような写真から得られたいくつかの霧粒の粒度分布を図-3a~3fに示す。

図-1a, 1bからわかるように、夜間放射は人工霧におおわれる直前の値に比べて霧におおわれた場合には平均およそ22%減少し、その値は最大約33%より最少11%の間を変動している。この夜間放射の変動は霧の状態の変動によるもので、図-3a~3fからわかるように霧粒の半径は10 μ 前後のものが一番多いが、かなり変動を示しており、含水量もそれに伴ってかなり変動し、約0.4 g/m³より1.7 g/m³にまたがっていることがわかる。これは自然の霧や雲で観測される含水量の大きさと大体同じ程度であり、三原氏等の前述の報告で推定(実測値ではない)された値、2~3 g/m³よりは小さいが、大きさの程度は同じである。霧の層の厚さの測定はなされなかったが、今回の霧の層の厚さは大体5~10m程度であったと思われる。今、かりに層の厚さの平均値として7mをとり、また霧の含水量のそれを1 g/m³とすると底面積1m²の気柱の霧水量は7 g/m²となる。ところが三原氏等の報告の図-5の霧水量と長波長放射の透過率との関係を示す曲線によると、7 g/m²の霧水量に対する透過率は非常に小さく約0.23であるが、今回の測定では霧の透過率は平均およそ0.78であった。0.23に比べてかなり大きい。これは多分三原氏の計算が霧粒の大きさを考慮せずに含水量を等価的な水の膜に置き換えていることに起因するものと思われる。霧水量を水の膜に置き換えた場合と、実際の霧粒の大きさを考慮し

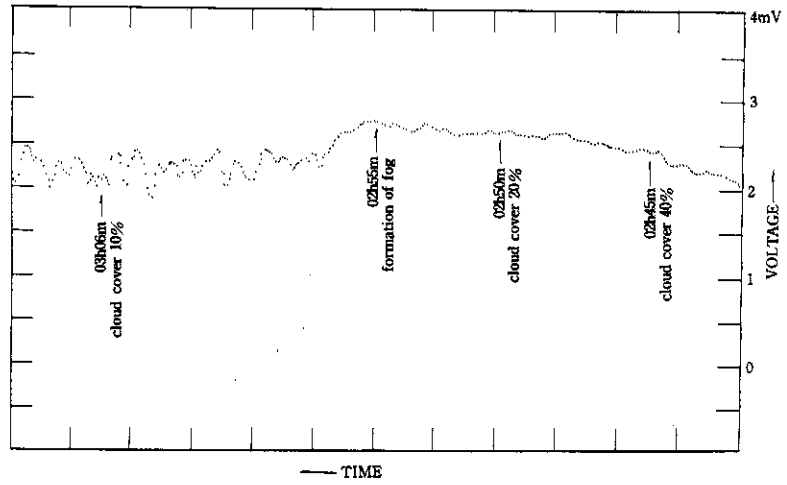


Fig. 1a. Record of net flux at surface.

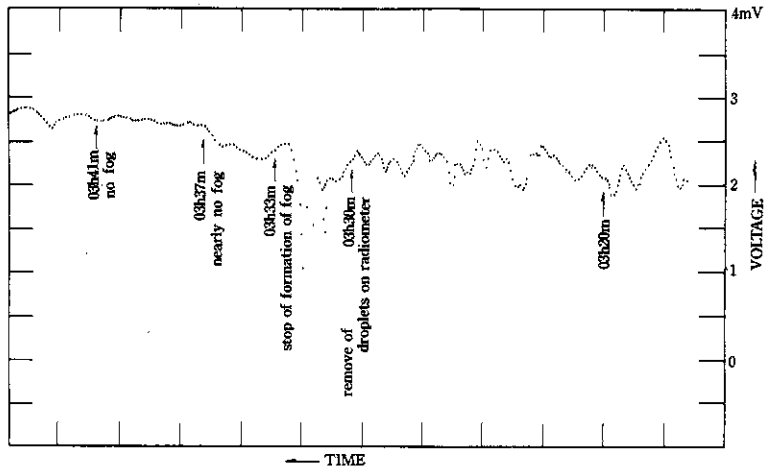


Fig. 1b. The same as Fig. 1a.

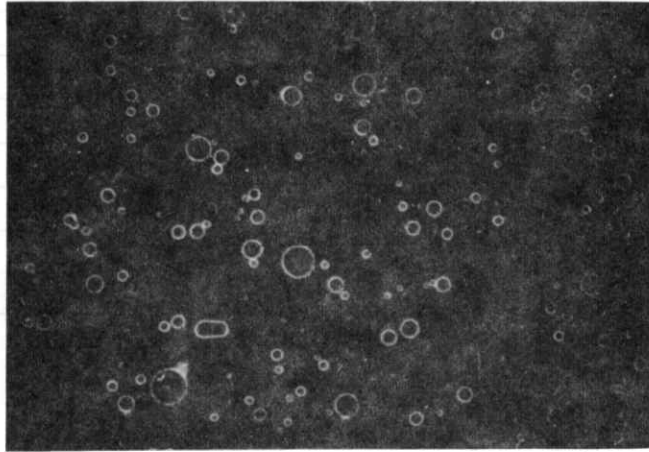


Fig. 2a. Microscopic picture of artificial fog particles.

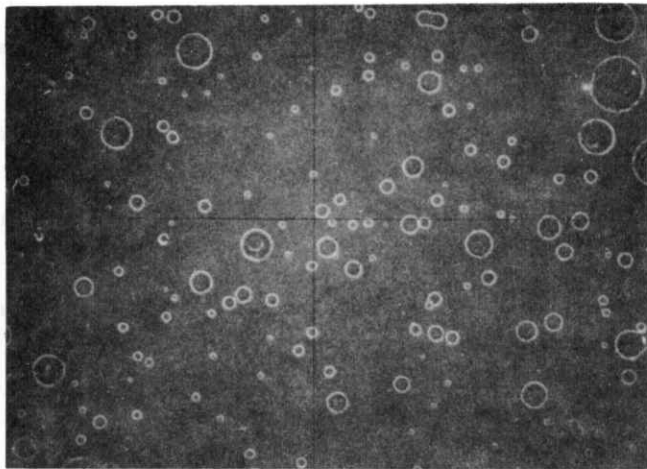


Fig. 2b. The same as Fig. 2a.

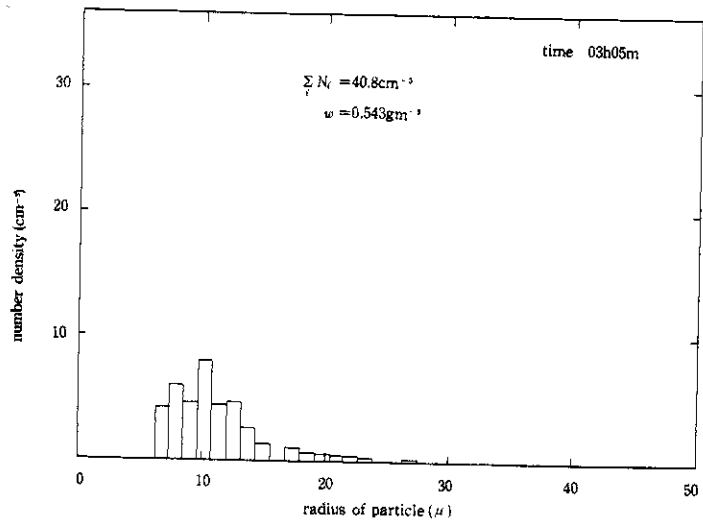


Fig. 3a. Size distribution of artificial fog particles near observation point of net flux.

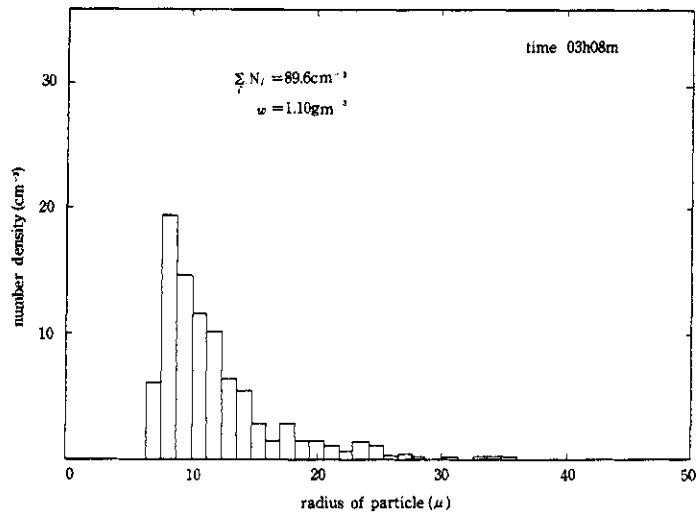


Fig. 3b. The same as Fig. 3a.

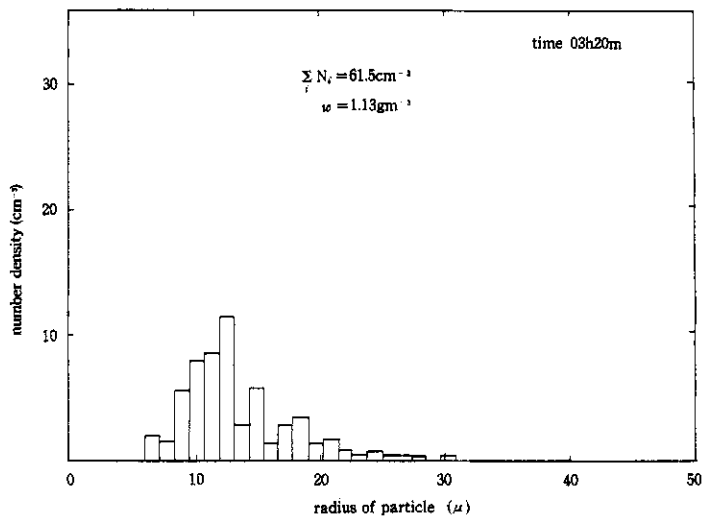


Fig. 3c. The same as Fig. 3a.

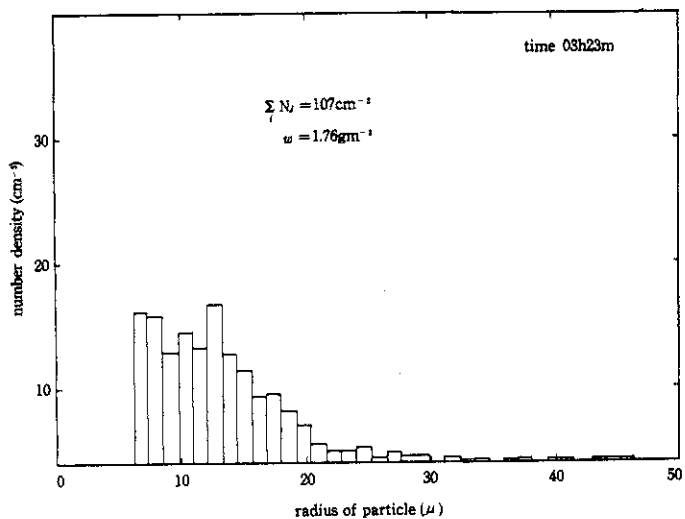


Fig. 3d. The same as Fig. 3a.

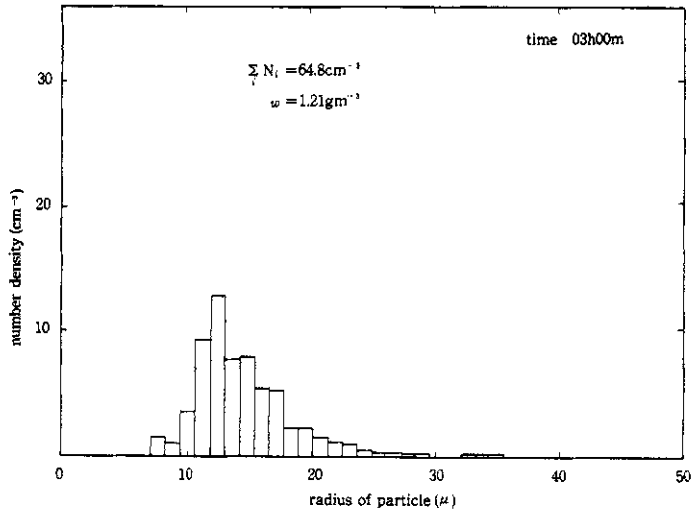


Fig. 3e. The same as Fig. 3a except near point of fog generator.

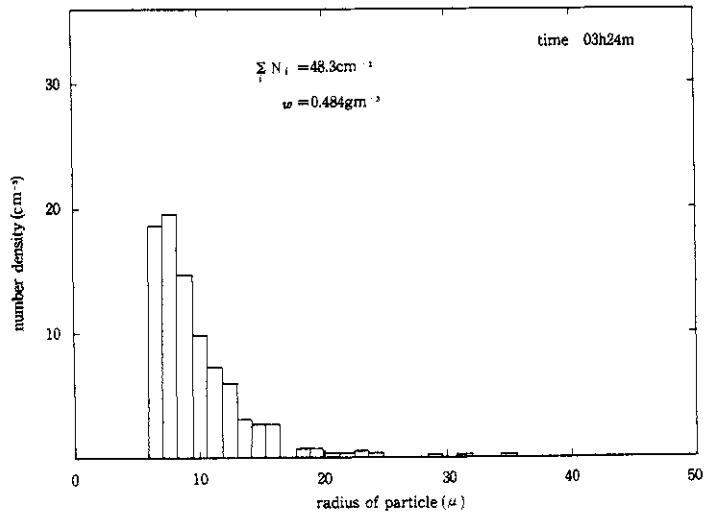


Fig. 3f. The same as Fig. 3e.

た場合とでは同じ水の量でも吸収にかなりの差がある。すなわち霧粒の粒度分布によってかなり差があることが知られているが、今回の野外観測では人工霧の粒度分布とそれの夜間放射に対するしやへい作用あるいは霧の透過率との関係を見いだすことはできなかった。このためには人工霧のみならず、自然のより安定した霧の場合に放射を測定し、同時に霧の粒度分布、含水量および霧の層の厚さを測定し、放射(短波長および長波長)の透過率とこれらの霧の特性を示すパラメーターとの関係を研究する一方、理論的に霧や雲の中での放射伝達の機構を解明し、その基礎に立って、冷害防止、防霜法の研究を進める必要がある。そして放射伝達機構の解明のためには、従来ほとんど資料のなかった波長別測定結果を積み上げるものが一つの重要な鍵となるのである。

4. 近赤外分光放射計の試作

0.3 μ ~ 4.0 μ の間で光源(太陽あるいは人工光源)の直射光および任意の方向からの散乱光を測定しうるように設計した。直射光のみを集光するため、また、光源の方向から1° づれた方向からの散乱光が測定できるように開口角のきわめて小

さい集光用望遠鏡を設計した。

波長の純度をよくするために分光器は infra-sil. プリズムを2個用いた複式分光器とし、2個のプリズムは同一の軸に固定され、2個のプリズムの回転角のずれによって生ずる波長の誤差を極力小さくしてある。

光源の直射光と散乱光の強度比は、自然光の場合には最大 10^5 に達するので、これを同一の装置で測定するためには装置の感度調節が問題点となる。そのために次のような方法を用いる。

1) 電氣的調節

受光用の光電子増倍管に供給する電圧を約300 V から 750 V の間で段階的に10段階に分け、入射光の強度に応じて切り換える。

各段階における電圧が安定に得られるように回路には充分の考慮が払われている。この方法で調節しうる感度の範囲は $1 \sim 10^3$ である。

PbSで受光する場合には増幅度を変化させる。

2) 光学的調節

分光器に入射する光量を調節するために次の方法を用いる。(I)望遠鏡の先端における絞りの調節 (II)入射スリットの長さおよび幅の調節 (III)グレーフィルターの濃度の調節の3種である。それぞれの調節によって調節しうる範囲は、(I) $1 \sim 10^1$, (II) $1 \sim 5 \times 10^2$, (III) $1 \sim 3 \times 10^1$ の程度である。

実験の測定に際しては、波長0.3 μ ~ 4.0 μ の間の走査(scanning) は約5分でその途中で電氣的調節を瞬間的に行ない、波長による変動の範囲を調節し、光学的調節は走査の途中では一切行なわない。

装置の構成図を図-4に示す。

集光用望遠鏡および光源自動追尾装置

集光用望遠鏡は図-4のTで示される。望遠鏡の開口角は約50' になるように設計され、望遠鏡内の迷光を吸収するための暗箱を側部に付してある。

光源自動追尾装置 (sun-follower) (F)は、望遠鏡の側面に取付けられ、Fは常に光源の方向を追随し、TとFは互に平行あるいは任意の角度に保たれ、直射光あるいは散乱光を集光する。光源自動追尾装置は簡単な望遠鏡であって、平行に並べた2枚の光電管(photo cell)上に光源の像を結ばせ各々の出力の差によってモーターを駆動させて常に光源の方向を保つようにしたサーボ系(servo system)である。望遠鏡の回転は

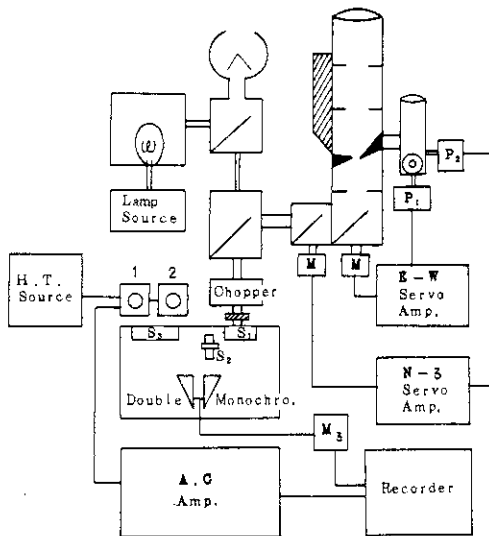


Fig. 4. Block diagram of the infrared spectropheliometer.

水平面内の成分と鉛直面内の成分とに分けられその各々が独立してサーボ系によって駆動される。

分光器

分光器は、infrasil プリズム2個を用いた複式分光器である。前述のように、2個のプリズムを同一の軸に固定して回転し波長を選定しているので、2個のプリズムをスプリング等によって結合した場合に比してはるかに波長の精度が良い。

スリットの幅および長さは、可変であるが不連続である。すなわち、あらかじめ種々の幅および長さを持ったスリットを多数用意しておき、入射光に適したものをそり入して測定する。これは、連続可変のスリットの場合には同一のスリット幅の再現性が悪いために生ずる測定の誤差を避ける目的である。

中間スリットは、幅および長さは適当な値に固定して測定を行なう。射出スリットの幅および長さも固定され、検出器の受光部分の移動による誤差を避ける。射出スリットは極力大きく保ち、受光面積をできる限り広く取りうるようにする。

入射光の強度の大きい場合には入射スリットの直前にグレーフィルターをそり入し減光する。濃度の異なるフィルターをいくつか準備しておき適当なものを選んで用いる。

スリット幅および長さ、グレーフィルターの濃度、絞りの量の調節による装置の感度の変化は、自然光を光源として検定を行ない、測定された値はすべて同一の条件のものに統一される。

検出器および電源

検出器としては、紫外、可視域 ($0.3\mu\sim 0.8\mu$) に対しては光電子増倍管 (9526-B) を用い、 $0.6\mu\sim 4.0\mu$ の間は PbS セルを用いる。検出器の発する雑音を少なくするために検出器を冷却する。検出器の交換は射出スリットの前の反射鏡の回転によって行なう。

増倍管への供給電圧の変動は、0.2% をこえないように回路の安定化を計ってある。

増幅器および記録計

光電流を安定に測定するために、入射スリットの直前でセクターを回転させ、入射光束を交流化して測定する。

変換の周波数は約 400% である。

変換周波数に同調した増幅器によって光電流を増幅し、最大出力 10 mV として記録する。

標準光源および波長検定

測定値の基準として標準光源を用意し、測定値はすべてこの標準光源の強度に対する比で表わされる。光源としては、タングステン電球を用い、直射光の測定の直前に標準光源の強度を測定しておき、装置の感度の変動による誤差を取除く。

1回の走査の速さは、 $0.3\mu\sim 4\mu$ の間について約5分である。短波長側から走査を開始し、適当な波長を選んで測定しうるようにプリズムの回転をカムによって調節する。測定値は連続的に記録も可能であるが、あらかじめ測定すべき波長の値を指定し (ほぼ 500Å 間隔)、その波長の値のみを記録する方法を用いる。

波長の検定のために水銀灯を用い常時波長の検定を行ない、さらに、簡単なグレーティング分光器を用い、長波長側の光源として用いる。後者は必要に応じて実験室内で精密に検定することを目的としている。

測定誤差

測定器のもつ誤差の最大のもはスリット幅の再現性の不良から生ずるものと思われ、スリット幅を連続可変にする場合には避けられないので、これを不連続可変とした。すなわち、種々の大きさのスリット板を多数備え、これを交換することにより入射光量を調節する方法を採った。この場合に問題となるのは、スリット板を取付ける位置の再現性であるが、前者よりは精度の向上が予想される。

減光のためにそり入するグレーフィルター (あるいは水晶の半透明拡散板) は、透過率が波長により異なる点が問題点であって、波長別に正確な値を求めることが重要な点である。

望遠鏡の先端で調節する絞りの係数は、わずかに波長による変化が認められるが、極度に光量を絞らない場合には誤差はきわめて小さい。

電気的原因、すなわち、検出器に供給される高圧の変動による誤差は、電圧値が高いほど効いてくるわけであるが、この測定に用いている値は最高 750 V であって著しい誤差の原因とはならない。

PbS セルで受光する場合には、冷却によって雑音は少なくしうるが、増幅度を高くした場合に除き切れず暗電流が残る。これが時間的に変動するために誤差を生ずる。毎回の測定の直後に暗電流を記録して補正するが、これによる誤差は他に比べて大きいものと推定される。

測定の順序と測定値の整理

a) 自然光測定

太陽を光源として行なり場合には、太陽の直射光と太陽の中心から $1^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 方向の天空光の角度分布を測定する。

まず最初に標準光源について $0.35\mu\sim 4.0\mu$ の強度を測定し、引き続き直射光を測定し、さらに $1^{\circ}, 2^{\circ}, 3^{\circ}, 5^{\circ}, 7^{\circ}, 10^{\circ}$ および 15° の天空光を測定し、空の状態を知る目的で天頂の波長分布も測定しておく。

測定された値は、前述のように標準光源に対する比 $\tau(\lambda)$ として表わされる。

$$\tau(\lambda) = i(\lambda)/i_e(\lambda)$$

$i(\lambda)$ は、直射光あるいは天空光に対応する受光器の光電流であり、 $i_e(\lambda)$ は標準電球のそれである。

以上の一連の測定を、太陽高度 15° 付近の時刻から南中高度の時刻までの間にできる限り数多く繰返し行なっておく。直射光の強度は、

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-\tau(\lambda)\cdot m}$$

$I(\lambda)$: 地上に達する直射光の強度

$I_0(\lambda)$: 大気外における直射光の強度

$\tau(\lambda)$: 大気の光学的厚さ

$m (= \sec Z)$: 大気路程, Z : 太陽天頂角と表わされる。書きかえると

$$\log I_0(\lambda) - \log I(\lambda) = \tau(\lambda)\cdot m$$

となり、 $\log I(\lambda)$ は m に対し直線関係となる。そこで、横軸に m 、縦軸に $\log I(\lambda)$ 、すなわち、測定値としては $\log \tau(\lambda)$ をとり、測定時刻に対応する m に対して測定された $\log \tau(\lambda)$ をプロットすれば、その直線の傾きによって $\tau(\lambda)$ が得られる。また、補外法によって $m=0$ における $\tau(\lambda)$ を求めれば大気外の直射光に対応する値が得られる(Bouguer-Langleyの方法)。このようにして求めた $\tau(\lambda)$ の波長分布からエアロゾルの粒径分布が推定される。

太陽の周辺光の強度は、エアロゾル粒子によって散乱された一次散光の強度を表わすものと見な

しうるので波長別の角度分布を知ることによってエアロゾルの粒度分布の知識が得られる。

雲の場合の測定は、まず第一に雲が非常にうすく、直射光の測定が可能な場合に限られる。また、雲の層の厚さはきわめて変化が著しく、安定な測定が得られない点が問題である。

b) 人工光源による測定

霧の層の中での測定は、自然光を光源として用いることができないので、適当な人工光源を用いる。測定の種類は自然光の場合と同様に直射光と散乱光であるが、方法はかなり違ってくる。この場合には、霧粒による散乱光を散乱角 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ の間で測定し、波長別の角度分布を求めることが基本となる。その形から霧の粒径分布の推定がある程度可能であると考えられる。

以上、短波長域の測定は、エアロゾルあるいは霧粒の粒径分布と放射との関係がおもな問題である。一方、夜間の冷却に最も有効な領域は 10μ を中心とする長波長域であって、短波長域は直接有効な成分ではないのであるが、長波長放射に及ぼす霧の効果の中に霧粒の大きさが要素として介入してくる場合には上述のような霧の粒径分布の推定が必要になるものと考えられる。

また、長波長成分の測定には分光測定はかなり難点を持っており、黒体を受感部とする全波長域の測定器を用いるのが容易である。その場合には、短波長域の成分を求める方法として上の測定が有効になってくる。

5. あとがき

この報告の1~3は主として嘉納が担当し、4については主として村井が担当して執筆した。また共同観測には気象研究所高層物理研究部第二研究室員、鈴木正、小川芳雄、同物理気象研究部、佐粧純男、徳植宏が参加している。

なお、次年度においては3で指摘したごとく自然および人工霧中の放射伝達の実験的・理論的研究を行なうと共に、試作された近赤外分光日射計を使用して波長別の放射測定を行なう予定である。