

# 飛行機利用の雲粒測定器\*

市村市太郎\*\*

鎌田和夫\*\*\*

## 要旨

積雲など自然の雲の雲粒を採取する場合飛行機を利用することが多い。したがって、そのための測定器もいろいろ開発されている。しかし、これらの多くは断続的の採取器であって、雲の粒径分布等微視的構造を知る上で必ずしも充分とは言えない。そこで筆者らは、雲粒の連続測定器を開発し、1974年と75年に実施された AMTEX において、この測定器による研究観測を行なった。

## 1. まえがき

自然大気中における雲中の雲粒の大きさとその分布を測定するための研究は、雲の生成発達と降水機構を知る上で重要である。この種の研究は一般的に飛行機を使って観測する。わが国でも、1962年～1967年まで行なわれた「人工降雨に関する試験研究」を経験して、飛行機利用の測定器が開発されるようになった。

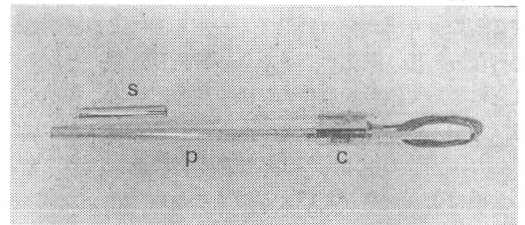
その中で、雲などに関する個々の物理的諸条件ならびにその変化過程を解明する基礎研究の一つとして、今井ら(1967)による雲粒測定器が開発された。採取した雲粒の記録は、顕微鏡を使い低倍率(100～200倍)で容易に見分けられる大きさであるが、その数は僅か $1\text{ cm}^3$ 中に数十から数千も含まれているため、個々の粒子を分離して採取することは簡単でない。

測定は、光学的に測る間接的な方法と、ある種の感部を利用する直接的な方法とがあるが、現在では直接採取の方が信頼性がある。その代表的なものとして酸化マグネシウムを感部に利用する方法がある。この方法による飛行機用雲粒測定器としては、Frith (1951), Squires・Gillespie (1952), Claque (1965), および今井ら(1967)などの研究がある。これらはいずれも携帯用で、飛行機の小窓を利用して容易に測定できるなど簡易な測定器として秀れている。しかし、雲の中の複雑な変化に対する雲粒濃度の知見を得るためには、間欠的な測定から連続的な測定の必要が求められていた。その点を考

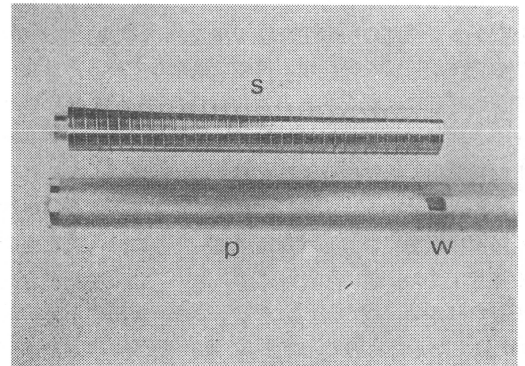
慮して、筆者らは酸化マグネシウム法による飛行機用連続雲粒測定器を開発した。その性能と機構について述べる。なお、「東支那海における気団変質の研究」において海洋性積雲の雲粒測定に使用した。

## 2. 雲粒測定器の構造と動作

筆者らが開発した測定器の外観とその構造を第1図と第2図に示した。それらの図からわかるように、携帯用で簡単な構造である。感部回転を円滑にするためその駆動



(A)



(B)

第1図 飛行機用雲粒測定器。(A)電源を除く全装置、(B)感部およびスリットの拡大写真。

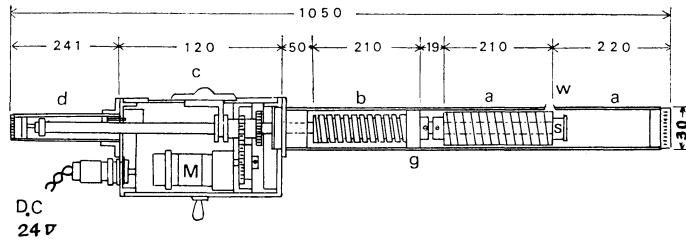
\* An Airborne Cloud-droplet Sampler.

\*\* I. Ichimura, 気象研究所.

\*\*\* K. Kamata, 気象測定器工場.

—1978年9月11日 受領—

—1979年3月5日 受理—



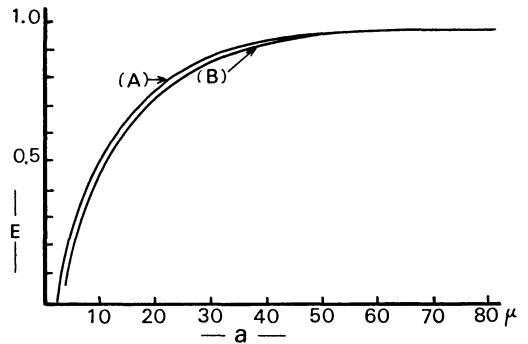
第2図 測定器の構造断面図。a: 感部取付部, b: 感部制御, c: 測定器駆動制御部, d: 取手。スケールの単位は mm。

を小型直流モーターで行ない、標準電圧として 24 V.D.C を用いる。電源部を除いた測定器の重量は約 5 kg で、特に機内に架台を設けなくても観測者の手で携帯しながら測定できる。測定は、第1図Pに相当する円管の部分の機外に突き出して行なう。その際、風圧による同管の変形を避けるため、強度十分な外径 30 mm、内径 28 mm のステンレス円管を使用している。円管の先端から 220 mm の位置に幅 2 mm、長さ 5 mm のスリットを設け、そこから入る雲粒を感部によって捕捉する。

感部の構造は直径 27.2 mm、長さ 210 mm の真鍮円筒で、表面を研磨したうえクロームメッキを施してある。捕捉した雲粒に対する撥水性を持たせるため、1%~2%のコロジオンの酢酸アミール溶液による表面処理を行なった後、酸化マグネシウム被膜を施す。そうすることによって雲粒採取後の痕跡を明瞭にすることができる(丸山, 1954)。

また、円管の中で回転する感部の被膜面を円管内壁との接触により破傷しないようにするため、第1図(B)に示した螺線を施した、6mmφの真鍮線を0.3mmだけ表面から出るようにして、5mmのピッチで巻いてある。したがって感部の回転半径は0.3mmだけ長くなるが、この空隙が被膜を保護する役割を果たしている。また、細線は感部に回転を与える「角ねじ」(第2図b)のピッチと同期するように巻かれているので、それがスリット面に露出し雲粒採取領域を犯すことはない。

この雲粒測定器は、飛行機プロペラ後流、機体の気流に及ぼす影響を考慮して使用する。それには、副操縦席の横窓、または胴体のほぼ真中にあいている写真測量孔などを利用し、測定器のスリットの位置を機体から約30cm以上離れた状態で動作する。毎回感部は貫通毎に交換し、それを実験室に持ち帰り光学顕微鏡を用いて検出する。



第3図 測定器の「よどみ点」における雲粒捕捉率。飛行高度 800 mb、気温 0°C、測定器円管の半径 1.5 cm として、(A) 機速 75 m/sec、(B) 機速 62 m/sec についての計算値。

### 3. 測定器の性能と雲粒の検出

#### 3.1. 測定器の雲粒捕捉率

この測定器による雲粒採取の原理は、直径 30cm の円柱を大気中に露出し、その表面にて相対的に速い速度の雲粒を捕捉することと同じである。この場合円柱の粒子捕捉率は、Langmuir・Blodgett (1946) によると、流れ方向に対して  $\theta=0^\circ$ 、すなわち「よどみ点」で最もよく、それよりずれるに従って悪くなる。測定器では幅 2mm のスリットを通して捕捉するが、この場合  $\theta=3.5^\circ$  で「よどみ点」の捕捉率に近い。実際の観測は 800 mb 前後の高度で実施する場合が多く、機速も 62 m/sec~75 m/sec の範囲である。それらの条件下のかつ気温 0°C における測定器の粒径別捕捉率の計算値を、第3図に示した。

この図から直径約 50 μm 以上の雲粒については機速の差を考慮する必要はないが、各種の雲の雲粒濃度のモードは約 10 μm~40 μm (直径) に現われるので、50 μm 以下では機速の差による捕捉率の違いを無視することは

できない。

また、この測定器では、スリット面から感部表面まで 1.4 mm の空隙があるため、感部の最小捕捉雲粒半径は円管表面で捕捉されるそれより若干大きくなる。その臨界雲粒半径は、

$$\lambda = \left(\frac{2}{9}\right) r_c^2 \cdot \frac{U}{\eta}$$

から求まる。

ここで、 $\lambda$ : 空隙幅、 $r_c$ : 臨界捕捉雲粒半径、 $U$ : 雲粒の捕捉前の速度、 $\eta$ : 空気の粘性係数で、 $U=70$  m/sec、 $\lambda=1.4$  mm とすると、 $r_c=3.92$   $\mu\text{m}$  になる。すなわち、この測定器では直径約 8  $\mu\text{m}$  以下の大きさの雲粒は捕捉されないことを示す。ただ、測定中感部は一定の回転角速度で回転しているから、回転していない場合の「よどみ点」で若干の流速を考慮すると、計算値よりも小さい雲粒を捕捉していると思われる。

なお、測定器はスリットを開放にして測定するため、自然の雲粒以外の微水滴を採取する恐れもあるが、その立証は困難である。観測中の観察から言えることは、濃密と思われる雲を貫通しているとき機外に突き出した測定器同管の「よどみ点」上に、水膜を形成することがある。それはやがてはく離するが、その際生成されるであろう微水滴が、何かの原因でスリット口より飛び入ることも考えられる。少なくとも、瞬間露出式測定器を併用した同時観測を行なって、その評価を行なう必要はあると考える。

### 3.2. 測定器感部の露出時間

採取した雲粒記録を読み取り易くするためには、酸化マグネシウムベース上で重複しない痕跡を得ることである。雲粒濃度は、雲の種類または同じ雲でもその採取場所によってまちまちであり、そのつど適切な露出時間で測定しないと鮮明な記録が得られない。積雲系の雲について、今井 (1967) の瞬間露出式測定器を用いた実験の結果によると、機速 60 m/sec~70 m/sec のもとで 1/50 秒~1/100 秒の範囲内の露出で十分鮮明に採取することを示した。

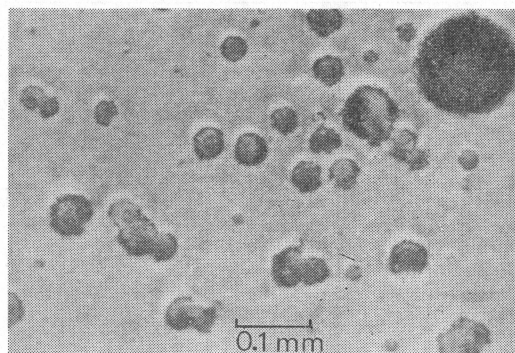
筆者らの測定器の露出時間 ( $T$ ) は、スリット幅 (2 mm) 固定だから、感部の回転角速度 ( $\omega$ ) だけから定まりその実験式は、

$$T = 8.37/\omega \text{ (秒)}$$

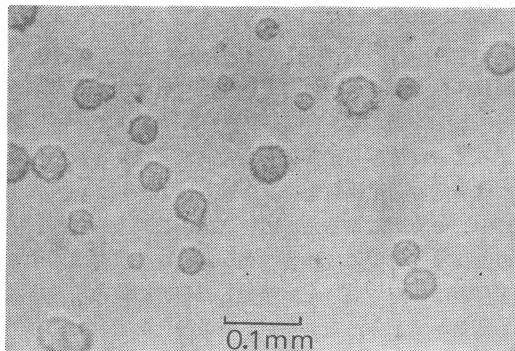
である。 $\omega$  は直流モーターの回転数で制御し、電圧 24 V.D.C の場合 1 および 2 のギヤーで 360°/sec と 720°/sec の値になるよう設計した。これは露出時間にして約

1/50 秒~1/100 秒になる。したがって、この測定器では供給電圧を調整して、さらに適切な露出を選ぶこともできる。

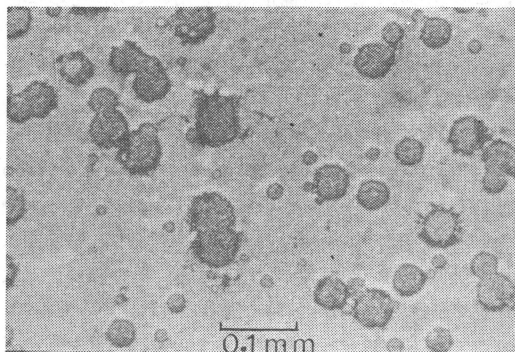
### 3.3. 酸化マグネシウム被膜の補正係数



(A)



(B)



(C)

第4図 積雲の貫通で得た雲粒の検出例。写真は、連続採取されている記録から 1/6 秒間隔で抽出したプリントで、これから求まる雲水量は、A=2.45 g/m<sup>3</sup>、B=0.71 g/m<sup>3</sup>、C=2.51 g/m<sup>3</sup>。

第1表 雲粒較正係数の実験とその適用例。

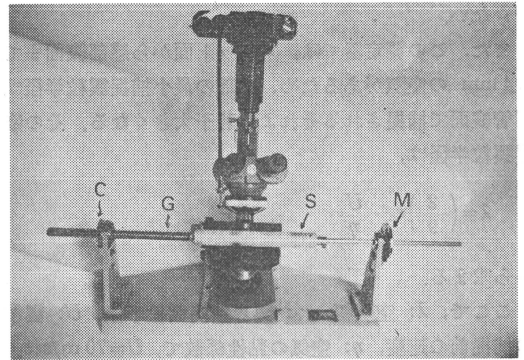
研究者	較正值	目的	方法(実験)
May (1950)	0.848 } 0.738	測定器比較 テスト	微水滴発生装置の開 発と、それを使った 実験
Frith (1951)	0.85	測定器テス ト	May の値を使う
Squire・ Gillespie (1952)	0.85	測定器テス ト	May の値を使う
丸山 (1954)	0.788	北陸降雪機 構の観測	自然落下による実験
Durbin (1959)	0.71	測定器テス ト	プロアを使った実験
Durbin (1958)	0.85	St-Cu の観 測	May の値を使う
今井 (1967)	0.71	人工降雨実 験	Durbin の値を使う

雲粒は採取されると被膜上に円形の痕跡を残す(第4図)。その直径は採取前の実雲粒の直径より大きい。したがって、痕跡から実雲粒の大きさ(直径)を求めるためには一定の補正係数を掛けなければならない。丸山(1954)の実験によると、雲粒直径と被膜上の痕跡直径との関係は、雲粒の大きさにかかわらず痕跡に対する補正係数は一定であった。類似した研究他の研究者による結果を第1表に示したが、その値は0.71~0.85の範囲である。この範囲内の差は実験方法の違いによるもので、このうちのいかなる補正係数を用いても、そのことの議論は少ない。むしろ、測定の実験(サンプリングボリュームが小さいため)さによる代表性の方が議論となるであろう。

#### 3.4. 測定した雲粒の検出

測定器の雲粒採取は機速 70 m/sec, ギヤーセット(1)で観測した場合、14 cm<sup>3</sup> 毎のサンプリングボリュームで行なわれる。測定に使用した感部は持ち帰り、第5図に示した装置を用い顕微鏡にて検出する。その際の倍率は100倍で充分だが、数や痕跡の読み取りは、いったん 35 mm フィルムに撮ってから行なっている。感部を支えている軸が測定器の機構と同じ回転ピッチになっているため、感部に対する撮影ピッチを測定と同じ条件に保ちながら撮ることができる。それは、連続的に撮る場合でも間欠的に撮る場合でも同様である。

第4図は、1975年10月23日、測定器テストの目的で北関



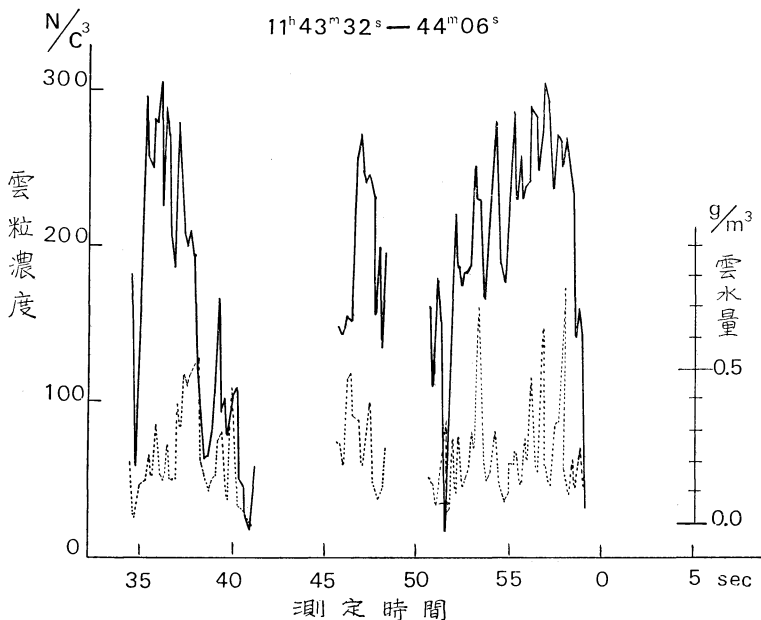
第5図 測定した雲粒の検出装置。M: 感部回転取手, S: 感部, G: 感部連続角ねじ, C: 感部固定および水平移動取手。

東上空に発生していた積雲を貫通して得た雲粒の記録例である。このときの飛行速度は 65 m/sec で約15秒間で貫通したから、約 1000 m 弱の拡がりをもった積雲であった。第4図の A, B, C は第5図の装置で感部を60度の回転角にセットして撮影していったものの一部で、これは雲の中でそれぞれ 10.8 m 毎にサンプリングした記録を示している。このようなプリントの連続を撮ると、感部1個で少なくとも 6,500 枚以上になるが、仮りに60度回転角で撮影したとしても、酸化マグネシウム法で Warner (1969) が Claque (1965) の測定器2台を交互に用いて得られた、雲中 100 m 毎の資料に比べ、より詳しい情報を提供することになる。第6図は、1975年2月 AMTEX において観測した海洋性積雲中の雲粒濃度の変化を示したもので、この変化は雲中におけるある種の乱に依存していると思われるが、その物理的な説明はこれからの研究課題である。

#### 4. まとめ

この測定器の開発のねらいは、対流性雲を対称に、飛行機で少なくとも一貫通分を連続的に測定することを念頭に置いて設計した。感部1個の測定時間は、ギヤーセット(1)で僅か34秒間であるが、70 m/sec の機速を持つ飛行機なら約 2,400 m 分の連続測定を可能にする。もしも、層積雲、層雲など拡く分布しているような雲を貫通して測定する場合は、測定器を2台準備して交互に使用すれば、より長い時間にもわたる連続測定を可能にする。

ただ、この測定器を用いて飛行機観測を実施する場合、機体の影響の全くない条件の位置で測定しなければならないが、それには観測専用機の保有を必要とするだろう。



第6図 積雲中の雲粒濃度. 1975年2月24日, 貫通レベル 4,500 ft, 雲低 4,000 ft, 雲頂 4,900 ft. 三つの小積雲を貫通した. 実線は雲粒濃度. 点線は雲粒より計算した雲水量を示す.

「雲中に雨滴が存在した場合の測定器に与える影響など, まだ不明の点も残されているが, この測定器の開発について議論し, 指導して下さった藤原美幸博士に感謝する.

文献

May, K.R., 1950: J. Sci. Instr., 27, 128-130.  
 Frith, R., 1951: Q.J.R. Met. Soc., 77, 441-444.

Squires, P. and C.E., Gillespie, 1952: Q.J.R. Met. Soc., 78, 387-393.  
 丸山, 浜, 1954: J. Met. Soc. Japan., 32, 49-56.  
 Durbin, W.G., 1958: Weather, 13, 143-151.  
 Durbin, W.G., 1959: Tellus, 11, 203-215.  
 Claque, L.F., 1965: J. Appl. Met., 4, 549-551.  
 今井他, 1967: 人工降雨総合報告書, 日本人工降雨協会, 20-25.  
 Warner, J., 1969: J. Atmos. Sci., 26, 1049-1059.  
 市村, 藤原, 1978: 気象庁技術報告, 93, 189-200.