

雲粒子ゾンデの開発*

水野 量・松尾 敬世・村上 正隆・山田 芳則**

1. はじめに

雲は、大気の大きな特徴である。気象衛星から地球をながめると、いろいろな形をした雲がまず目に入る。熱帯地方の白い塊状の雲や台風の雲、中緯度地方の幅広い帯状の雲、さらに細長い線状の雲などが、印象的である。このように大気中にはさまざまな擾乱があり、そこに雲が発生している。雲は、降水の形成を通して水循環に大きな役割を担っているだけでなく、地球の放射収支にも深くかかわっている。

雲は大気表情であり、雲を観測することにより大気の状態を知ることができる。気象衛星からは雲の上面を見ることができ、地上からは主に雲の下面を観測できる。しかし、大気は3次元的に広がっているので、雲の外観だけでなく雲の内部の観測も必要である。雲を立体的に詳しく観測することで、大気の実態が分かる。

ここで紹介する雲粒子ゾンデ (Hydrometeor Video Sonde: HYVIS) は、大気中のすべての種類の水粒子を直接的に観測するものである。1990年10月現在の雲粒子ゾンデは、2台の倍率の異なる TV カメラを搭載した特殊ゾンデである。これによって $\sim 5 \mu\text{m}$ の雲粒・氷晶から数 mm の雨滴・雪片までの雲粒子・降水粒子の映像を、電波で地上に送ることができる。この雲粒子ゾンデと同時にレーゾンデを飛揚することで、雲粒子・降水粒子の個数、粒径、相と気象要素の微細な鉛直分布を知ることができる。雲粒子ゾンデは、航空機と同様に雲を直接観測することから、降水機構を調べる上で強力な観測手段である。また最近では、霧や雷の観測にも使われようとしている。

本稿では、雲粒子ゾンデの開発の経緯と概要、雲粒子ゾンデを用いた観測例を紹介し、多方面での活用の参考にした。

2. 開発の経緯

雲粒子ゾンデは、昭和59年度～61年度に実施された気象庁特別研究「雲及び放射の総合観測手法の研究」の中で、雲粒子ゾンデシステムの一つとして雲粒子ゾンデ受信システムと共に開発された。この特別研究の目的は、「異常天候・気候変動に大きな役割を果している雲の微物理特性及び放射特性を解明するための測定システム及び観測手法を開発すること」であった。この研究の中で、雲粒子ゾンデシステムに加えて、航空機搭載雲粒子測定システム、航空機搭載雲内エーロゾル測定システム、航空機搭載観測用分光日射測定システムが同時に開発されている。

最初に開発された雲粒子ゾンデは、1台の TV カメラを搭載し、文字どおり主に雲粒子の映像を地上に伝送するゾンデであった。開発の中では、数多くの室内および野外実験によって改良を重ねられ、直径 $7 \mu\text{m}$ の小さな雲粒に対する捕捉率が 0.1 程度にまで改善されている。初期の雲粒子ゾンデの開発については、Murakami *et al.* (1987)、気象研究所 (1987) で述べられている。

次に、現在のタイプの雲粒子ゾンデが開発された (Murakami and Matsuo, 1988 a, b; Murakami and Matsuo, 1990)。初期の雲粒子ゾンデから、雲粒子と降水粒子の両方を観測するため TV カメラを2台にし、また粒子捕捉用のフィルムを 16 mm から 35 mm に幅を広くするという改良をしたものである。以下に示す雲粒子ゾンデの概要は、この現在のタイプのものである。

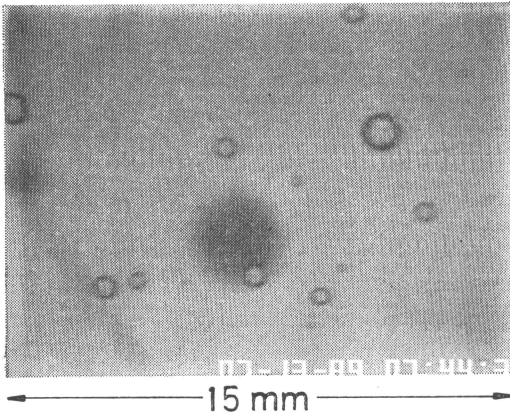
3. 概要

雲粒子ゾンデの外観を、第1図に示す。雲粒子ゾンデは $225 \text{ mm} \times 152 \text{ mm} \times 410 \text{ mm}$ の大きさで、約 1.4 kg の重量である。大きさはレーゾンデ (RS2-80 型) より少し大きく、重量は約 2.5 倍となっている。

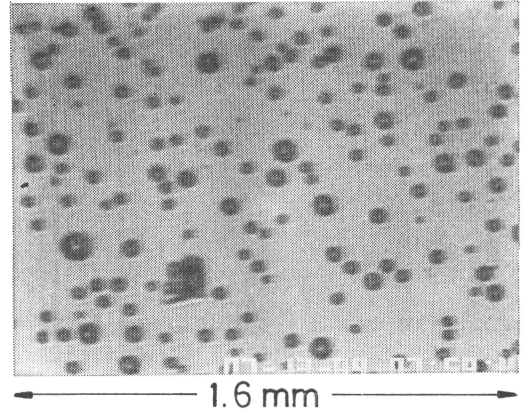
雲粒子ゾンデの動作原理は、第2図の通りである。雲粒子ゾンデが気球に吊り下げられて上昇するとき、大気中の雲粒子・降水粒子が粒子捕捉用の透明なフィルムに

* Development of Hydrometeor Video Sonde

** Mizuno, H., T. Matsuo, M. Murakami and Y. Yamada. 気象研究所物理気象研究部.



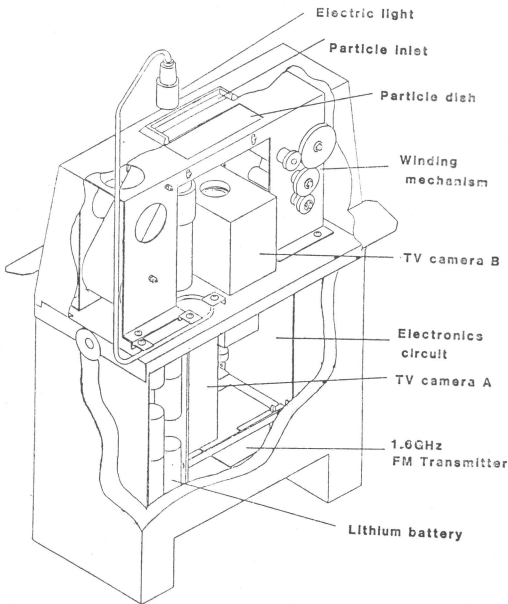
(a) 接写側映像



(b) 顕微鏡側映像

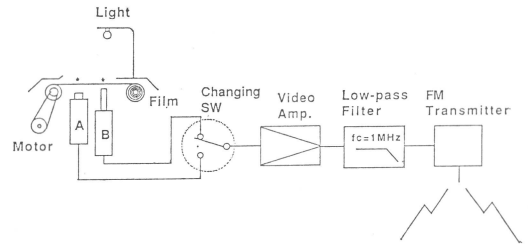
写真1 雲粒子ゾンデの映像の例

1989年7月13日7時49, 59分, つくば市上空で観測された。



第1図 雲粒子ゾンデの外観 (村上ほか, 1988)

捕捉される。このように雲粒子ゾンデは, Magono and Tazawa (1966) の回収方式だった雪ゾンデ (Snow Crystal Sonde) の動作原理を応用したものである。粒子捕捉用のフィルムは, 約4秒間モーターが駆動して巻き取られ, その後約6秒間静止する。このような駆動・静止の約10秒間隔のサイクルを繰り返して, 新しいフィルム面に捕捉された粒子が次々と2台のTVカメラで



第2図 雲粒子ゾンデの動作原理 (村上ほか, 1988)

撮影されている。

TVカメラの一つは接写用TVカメラ(カメラB)で, 主に $0.2\text{ mm}\sim 18\text{ mm}$ の粒子を画像信号に変換する低倍率用TVカメラである。もう一つは顕微鏡用TVカメラ(カメラA)で, 主に $5\text{ }\mu\text{ m}\sim 1,000\text{ }\mu\text{ m}$ の粒子を画像信号に変換する高倍率用TVカメラである。なお, 接写用TVカメラにはオートアイリス(自動絞り)レンズが装備されており, また顕微鏡用TVカメラには照明用の電球がカメラの上方約 10 cm にある。この2台のカメラからの画像信号は, フィルムの駆動・静止サイクルの間に交互に切り換えられて地上に伝送される。地上で受信された画像は, ビデオテープに収録されて解析に用いられる。写真1に, 接写側映像と顕微鏡側映像の例を示す。

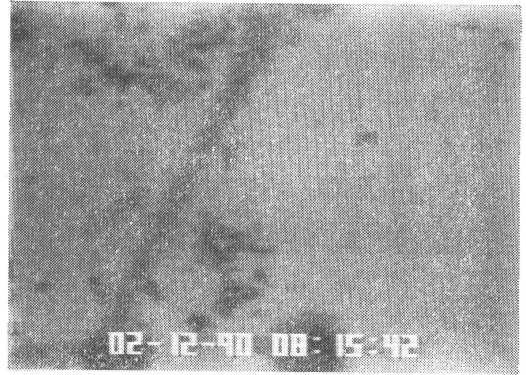
雲粒子ゾンデの主な性能は, 第1表の通りである。雲粒子ゾンデは, 第1表のような電波を使うため, 無線局

第1表 雲粒子ゾンデの主要性能

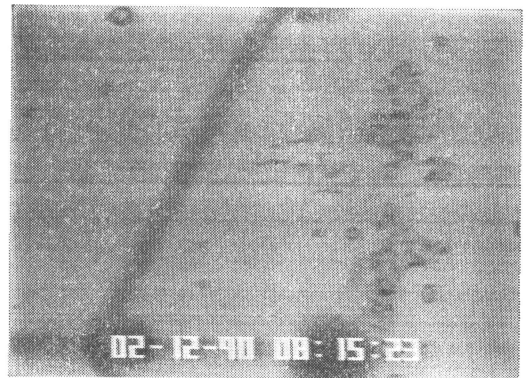
倍率*	約10倍(接写側)と約180倍 (顕微鏡側)
モーター駆動間隔	約10秒
モーター駆動時間	約4秒
顕微鏡側映像時間	約4秒
接写側映像時間	約6秒
搬送周波数	1,687 MHz ± 4 MHz
送信出力	0.5 W
動作時間	約60分

* 倍率は、受信系で12インチモニタを使用したときの
ものである。

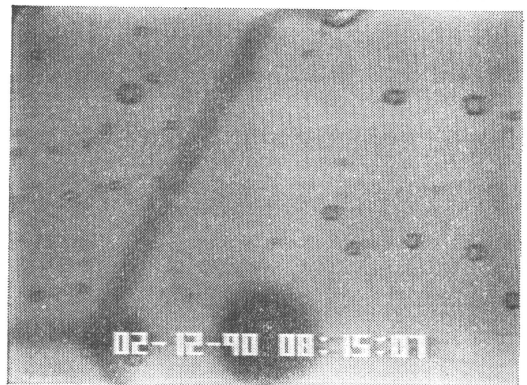
資料：雲粒子ゾンデ (WUA-04) 取扱説明書 (明星
電気株式会社, 1987)。



(a) 融解層の上



(b) 融解層の中



(c) 融解層の下

写真2 融解層付近の降水粒子

1990年2月12日8時15分、山形県酒田市飛鳥の上空
で観測された。

の免許を郵政大臣から得なければならない。気象研究所
では昭和59年に実験局としての無線局の免許を得て以
来、2年毎に再免許の更新をして雲粒子ゾンデによる観
測を行ってきた。また、雲粒子ゾンデは、観測終了
後に回収することがほとんどできないため、毎回観測前
に無線局(雲粒子ゾンデ)の設備変更(増設)申請をし
て検査を受けている。なお、1990年10月現在雲粒子ゾ
ンデは、明星電気株式会社で作られており、数十万円で購
入することができる。

4. 観測例

気象研究所ではこれまで、いくつかの雲について雲粒
子ゾンデによる観測を行ってきた。ここでは雲粒子ゾ
ンデ観測の例として、融解層、対流性降雪雲、巻層雲の特
徴的な粒子の画像を示す。

4.1 融解層

写真2に、融解層付近の降水粒子の映像の一例を示
す。融解層の上では降水粒子は雪片であり、融解層の下
では雨滴となっている。また、融解層の中では、雪片と
みぞれ、雨滴が見られる。

このように鉛直方向に降水粒子が大きく変化している
場合でも、雲粒子ゾンデは非常に細かな鉛直分解能で観
測することができる。例えば、5 m/s でゾンデが上昇し
ているとき、約20 cm 毎の映像が得られる。

4.2 対流性降雪雲

第3図は、北陸地方の富山市付近で観測された対流性
降雪雲の雲粒子画像である。この雲粒子画像の鉛直分布
から、雲内の所々に過冷却水滴が存在すること、上部で
は $\sim 100 \mu\text{m}$ 以下の小さな氷晶が多いこと、また雲の中

18 mm

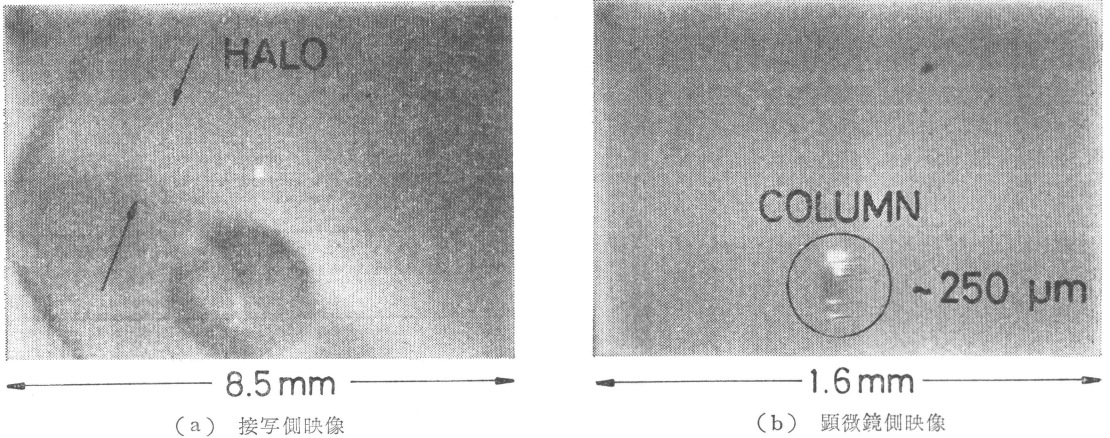
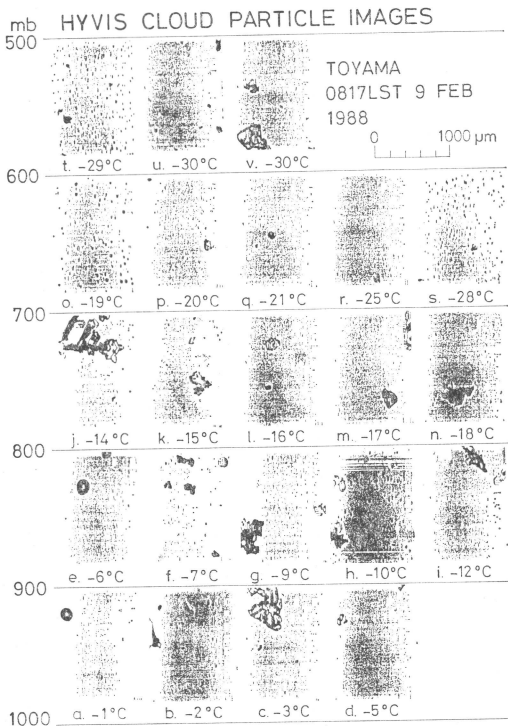


写真3 巻層雲の映像

1989年6月22日11時5分, つくば市上空で観測された。



第3図 対流性降雪雲内の顕微鏡側映像

1988年2月9日8時17分富山市付近で観測された。(Mizuno and Murakami, 1989).

下部では $\sim 100 \mu\text{m}$ 以上の大きな結晶がある(特に, 第3図jの樹枝状結晶は $\sim 1,000 \mu\text{m}$ 以上もある)ことを

指摘できる。

このように雲粒子ゾンデは, 小さな結晶から大きなものまで雲粒子の形状, 粒径分布の鉛直分布を直接観測できる。

4.3 巻層雲

写真3は, 巻層雲の観測で得られた接写側映像と顕微鏡側映像である。写真3の接写側映像には, 太陽の周りのハローが写っている。また, このときの顕微鏡側映像には, 角柱状の氷晶がある。ハローが角柱状の氷晶と対応していることが, 雲粒子ゾンデ観測でよく分かる。

このように雲粒子ゾンデの接写側映像には, 降水粒子以外に空の様子や気球の姿が写っている。気球が対流圏を通りすぎて成層圏に入ったときの澄み切った空, 接写側画面一杯に膨らんだゴム気球, やがてそれが破裂する場面, さらにパラシュートが開いてゆっくりと落下してくる様を見ることができる。これら一連の場面を見てみると, あたかも自分自身で気球に乗って大気中を上下しているような錯覚に陥る。雲粒子ゾンデ観測によって, 雲が身近に感じられるようになった。

6. おわりに

いろいろな雲を観測する方法として, 間接観測と直接観測がある。雲の直接観測の手段として, 航空機とゾンデがある。航空機観測は雲の水平分布を観測できるという特徴があり, ゾンデ観測は雲の鉛直分布を詳しく見ることができる。特に, 雲粒子ゾンデは, 雲粒子の個数・粒径・相の鉛直分布を観測することを目的として開発さ

れた。これを用いて、これまで種々の雲の鉛直構造を明らかにしてきた。

しかし、現在の雲粒子ゾンデにも不十分な点がある。例えば、巻層雲などを観測するとき強い太陽光線が TV カメラの視野に入って鮮明な映像が得られない場合があり、また接写用 TV カメラに照明がないため夜間の観測ができないことである。この点については、粒子捕捉・照明部分に改良を加え、テスト観測を行っている。また、雪雲の氷晶の初期生成過程を調べるためには、さらに高倍率の顕微鏡用 TV カメラが必要となり、カメラの高倍率化を図っている。今後観測対象が広がるにつれ、いろいろな問題が生じることが予想され、雲粒子ゾンデの改良を進めていくことが大切であると考えられる。

本稿によって、雲粒子ゾンデが雲、霧、雷などの観測、その他の用途で活用されれば幸いである。

謝 辞

雲粒子ゾンデの開発初期から現在まで、一貫して雲粒子ゾンデの開発・製造をしてきた明星電気株式会社、降雪雲観測で御協力頂いた建設省土木研究所と日本気象協会、無線局の申請等の指導をして頂く気象庁観測部高層課、ゾンデ観測に関して施設利用と放球作業の指導をして頂く高層気象台、その他関係者の方々に厚く感謝する。

写真2の観測資料は、平成元年度に実施された科学技術振興調整費「降積雪対策技術の高度化に関する研究」で得られたものである。また、第3図の観測資料は、昭和63年度に実施された気象研究所と土木研究所との「降雪雲の構成粒子の把握に関する協同業務」で得られたものである。

文 献

- 気象研究所, 1987: 雲及び放射の総合観測手法の研究(終了). 昭和61年度研究報告書, 16-23.
- 明星電気株式会社, 1983: RS2-80 MA 型 レーザーゾンデ取扱説明書, 18 pp.
- , 1987: 雲粒子ゾンデ (WUA-04) 取扱説明書, 16 pp.
- Magono, C. and S. Tazawa, 1966: Design of "Snow Crystal Sondes". *J. Atmos. Sci.*, 23, 618-625.
- Mizuno, H. and M. Murakami, 1989: Microstructure of winter monsoon snow clouds over the Sea of Japan observed with HYVIS. *WMO/TD-No. 269*, 69-72.
- Murakami, M., T. Matsuo, T. Nakayama and T. Tanaka, 1987: Development of Cloud Particle Video Sonde. *J. Meteor. Soc. Japan*, 65, 803-809.
- , and T. Matsuo, 1988 a: Development of Hydrometeor Video Sonde. Preprints 10th International Cloud Physics Conference, Bad Homburg, FRG, 1988, 144-147.
- and ———, 1988 b: Microphysical structures of Japanese warm-frontal clouds observed with a new type sonde (HYVIS). Preprints 10th International Cloud Physics Conference, Bad Homburg, FRG, 1988, 521-524.
- 村上正隆・松尾敬世・水野 量・山田芳則, 1988: HYVIS によって観測された温暖前線雲の微物理構造. 昭和63年度研究発表会誌, 気象研究所, 249-264.
- Murakami, M. and Matsuo, 1990: Development of Hydrometeor Video Sonde (HYVIS.). *J. Atmos. Ocean. Tech.* 7, 613-620.