

研究

ビデオゾンデによる雲粒子の直接観測システム

森川 公夫^{*,**}・野村 彰夫^{**}・斉藤 保典^{**}・鹿野 哲生^{**}
村上 正隆^{***}・松尾 敬世^{***}

* 明星電気(株) 〒302-01 茨城県北相馬郡守谷町守谷甲 249-1

** 信州大学工学部 〒380 長野市若里 500

*** 気象研究所物理気象研究部 〒305 つくば市長峰 1-1

(1993年10月26日受付, 1993年11月26日受理)

A Direct Measurement System of Cloud Particles by Using Video Sonde

Kimio MORIKAWA,^{*,**} Akio NOMURA,^{**} Yasunori SAITO,^{**} Tetsuo KANO,^{**}
Masataka MURAKAMI^{***} and Takayo MATSUO^{***}

* Meisei Electric Co., Ltd., 249-1, Moriya-ko, Moriya-cho, Kitasouma-gun, Ibaraki 302-01

** Faculty of Engineering, Shinshu University, 500, Wakasato, Nagano 380

*** Meteorological Research Institute, 1-1, Nagamine, Tsukuba 305

(Received October 26, 1993; Accepted November 26, 1993)

A video sonde system loaded under a balloon has been developed for direct measurement of atmospheric clouds, which consists of a catching mechanism of cloud particles, two video cameras (low and high magnification) and an image signal transmitting system. We discuss the fundamental characteristics of the system on the bases of experiments, i. e., the variation of carrier to noise ratio (CNR) with slant range, the dependence of image quality on the bandwidth of the video signal, and the distortion of cloud particles deposited on a film coating material due to gravitation. By showing some examples of image data obtained by field observations, it is indicated that this system is a powerful tool for the research of microphysical structure of clouds.

1. はじめに

雲は我々にとって日々の天候に密接に関連し、気象衛星、レーダーあるいは目視観測等によって定常的に観測され、天気予報等に役立てられている。

一方、雲にはもう一つ地球大気環境にとって重要な役割を持っている。それは今問題となっている地球温暖化と密接に関連した大気エネルギー過程への影響として(1)潜熱を凝結時に放出させ、水分を降水時に大気から取り除く水循環への影響と(2)太陽放射や地球放射の散乱、吸収および放出等による放射収支への影響等がある。

これらの問題を解明するためには、雲をマイクロにとらえる、すなわち雲粒子の粒径分布、数密度およびこれらの高度分布、さらに液相か固相かという状態等を定量的に知る必要がある。

雲の構造をマイクロにとらえる遠隔計測技術の開発は1950年代以降始められ、電波レーダー¹⁻³⁾、レーザーレーダー⁴⁾や、マイクロ波放射計⁵⁾を利用した観測が行われた。これらの遠隔計測では広い空間のマクロな構造がリアルタイムで得られる反面、雲粒子のマイクロな構造を全体的にとらえることが困難であった。

そこで雲のマイクロな構造をとらえるために、1980年以降 in-situ 観測(直接観測)が始められ、J-T hot wire device, FSSP, および 2-D optical array probe

* 信州大学大学院工学系研究科(社会人)博士(後期)課程

等を飛行機に搭載して雲の直接観測が行われた⁶⁻⁹⁾。これらの観測システムは自動的に行われる便利なものであるが、雲粒子の微細構造の分解能に劣るという欠点があると同時に、鉛直方向のデータは得にくい点と安全性との関係から空間のおよび時間的に観測が制限されるという問題が残る。

これらの問題を克服するため、筆者らは小型ビデオカメラを搭載し、フィルム面に捕捉した雲粒子を画像としてとらえ、地上にビデオ信号を転送する cloud particle video sonde (CPVS) の開発を行い、通常の高層気象観測ゾンデ (rawin sonde) と同時観測を行ってきた。この結果、 $7\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ サイズの雲粒子の粒径分布と相状態が画像データから得られることを明らかにした¹⁰⁾。我々はさらにこのシステムを発展させ、2台のビデオカメラを搭載して、高倍率画像と広角画像を交互に地上に伝送して、雲粒子のみならず雨滴も観測可能な hydro-meteor video sonde (HYVIS) の開発を行った。フィールドテストの結果から $7\mu\text{m}\sim 18\text{mm}$ の広い範囲の雲および雨粒子の観測が可能であることを明らかにした¹¹⁾。

本論文では開発を行った HYVIS の基本的な特性について検討を行った結果を述べ、フィールドテストで取得したデータを示し、総合的なシステムの評価を行う。

2. 雲観測に要求されるシステムの性能

本システムで重要な性能は雲粒子の画像データの取得性能である。地表から対流圏上部 12 km 付近までの高度範囲を対象にした場合、大気中の粒子は $5\mu\text{m}$ から数 mm の雲粒子、降水粒子を含んでいる。これらの粒子を捕捉し、粒子画像をリアルタイムで電波により伝送し、画像から粒径・個数・相を明らかにするためには、 $5\mu\text{m}$ 付近から数 mm までをカバーする広い粒子撮像性能が必要である。対流圏上部 12 km 付近の気温は $-50\sim -60^\circ\text{C}$ にも及ぶことが知られており、地上からバルーンにより上昇しながら観測する本システムでは常温から

-60°C までの温度範囲で作動する性能が要求される。1回の観測時間を従来の気象ゾンデと同様に約 5 m/s の上昇速度と仮定すれば、少なくとも 40 分以上の観測時間を考慮しなければならない。一方、気象要素観測は気象ゾンデによれば上昇中 4 秒ごとにデータが伝送され、これは高度分解能として約 20 m であるが、これらのデータとの関係から 20 m 以下の高度分解能が要求される。また本ビデオゾンデは使い捨てを考慮して低コスト化を図る必要もある。

データ伝送方式は気象ゾンデデータと画像データをまとめて伝送することも考えられるが単独観測と観測の簡便さを考慮すると、ビデオゾンデデータを独立に伝送する方式が望ましい。この場合、気象ゾンデ用受信機の流用が可能な気象援助用周波数帯の 1660~1700 MHz が妥当である。送信電力については気象ゾンデと同等の 0.6 W 程度とし、既存の気象ゾンデと干渉を起こさず、同時に観測が可能になることが必要である。また地上の受信装置は、既に気象ゾンデ用として観測に使用している装置を改良して画像復調機能を付加し、画像データが特別の処理を経ることなくリアルタイムで直接観測および記録ができるものとし、別途画像の量子化を行えばデジタル的な画像処理も可能である。

3. 観測の原理とシステムの構成

開発した HYVIS の構成および外観を Fig. 1, Fig. 2 に示す。HYVIS では上部の捕捉窓を通してフィルム面上に衝突する粒子を捕捉する。捕捉された粒子はフィルム下に設置された倍率の異なる 2 台の白黒テレビカメラによりそれぞれ 4 秒間撮影され、その後タイマーの制御によるモータ機構により 2 秒間で新しいフィルム面が引き出される。以上の動作を順次繰り返しながら大気鉛直方向の観測が行われる。ここで A は光学系 7 倍のレンズを付けた高倍率カメラで、 $7\sim 1000\mu\text{m}$ の粒子を撮影するのに使用され、B は 1 倍の接写カメラで、 $0.2\sim$

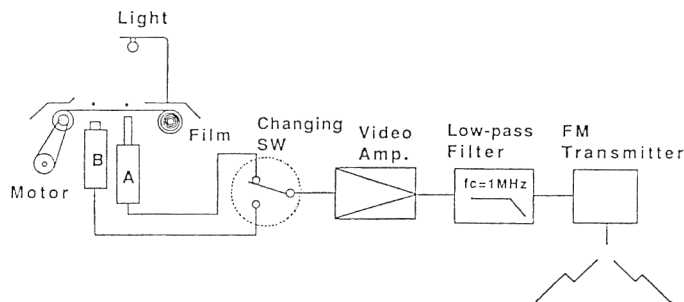


Fig. 1 Schematic diagram of the HYVIS.

18 mm の大きな粒子の観測に使用される。一方、粒子捕捉用のフィルムは 35 mm 透明フィルムを撥水材により処理したものを使用し、捕捉機構内に約 1 時間の観測に必要な約 20 m 分が格納されている。ビデオ信号は、伝送に必要なレベルまで増幅した後、フィルタにより 1 MHz までの低減スペクトラム範囲に制限し、送信電波の帯域を制限している。これは気象ゾンデの送信電波との干渉を避けるためと帯域制限により信号対雑音比を向上し、画質を確保するための処置である。以上の帯域制限の後、ビデオ信号はマイクロ波送信器で FM 変調

されダイポールアンテナから送信される。HYVIS の電源は小型で低温特性に優れたリチウム電池（松下電池製）を使用している。粒子捕捉部は厚さ 0.5 mm のアルミカバーを採用し、ケースは発泡スチロール製とし、保温と軽量化を図っている。

電波の周波数は気象ゾンデと同一の気象援助用周波数帯とし、気象ゾンデとの干渉を避けるため HYVIS の搬送波周波数は気象ゾンデから 14 MHz 離れた 1687 MHz とし、かつ両ゾンデの距離を 20 cm 以上離して同時観測を行った。Fig. 3 に地上受信機部を示す。従来から気象ゾンデに使用されている設備に画像復調用の広帯域 FM 復調機能を付加し、気象ゾンデと HYVIS の両方の受信を可能としている。受信アンテナにはパラボラアンテナを使用し、固定受信局では直径 2 m、移動観測には小型の直径 1 m のアンテナを使用する。受信され

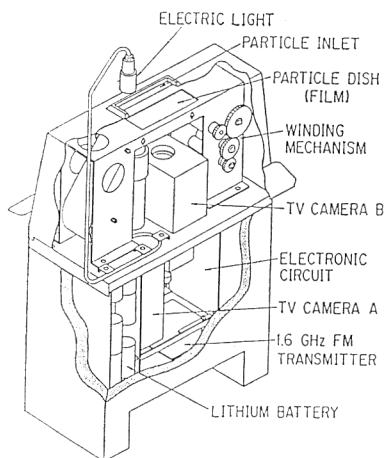


Fig. 2 Cutout view of the HYVIS.

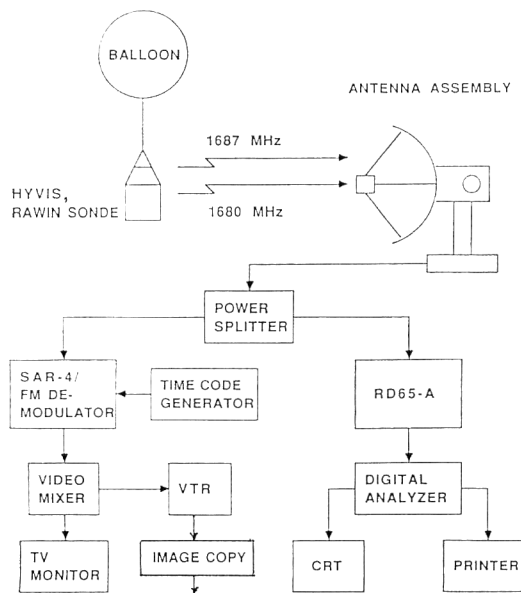


Fig. 3 Schematic diagram of the HYVIS system.

Table 1 Specifications of the HYVIS system.

NO	Item	Specifications
1	Video sonde	HYVIS
1.1	Weight	1.4 kg
1.2	Dimensions	225 mm (W), 152 mm (L), 410 mm (H)
1.3	Total observation time	50 min approximately
1.4	Object of particle size	(1) 7-1000 μm (2) 0.2-18 mm
1.5	Video picture	Black and white, Two-channel, NTSC
1.6	Numbers of camera	2
1.7	Maximum frequency of video signal	1 MHz (-3 dB)
1.8	Carrier frequency	A frequency from within 1660-1700 MHz
1.9	Transmission power	0.6 W nominal
1.10	Transmitter type	Self-oscillated by one-transistor
1.11	Modulation type	FM
1.12	Antenna type	Dipole antenna
1.13	Battery type	Lithium battery
2	Receiver	L-band receiver
2.1	Tracking antenna	Conical scanning
2.2	Receive frequency	1660-1700 MHz
2.3	Antenna type	Parabolic dish
2.4	Antenna gain	Dia. 1 m, 18 dB
2.5	Receive bandwidth	2.5 MHz
2.6	Total noise level	-102 dBm
2.7	Demodulator type	Wide-band FM demodulator
2.8	Video output	1 V. p-p
2.9	Power supply	AC 100V. 10A

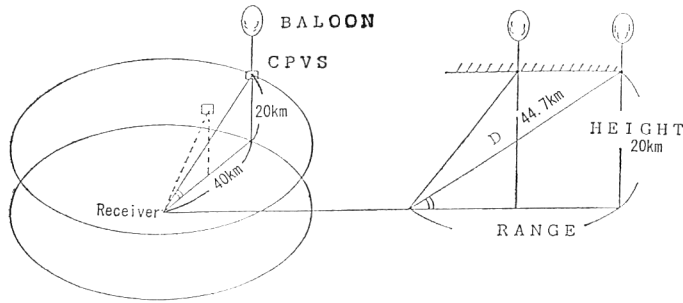


Fig. 4 Outline of the planning area.

た画像データはモニター上にリアルタイムで直接表示され、同時に、VTR に収録される。画像は NTSC 方式で1秒間に 30 枚が伝送され、5 m/s の上昇速度では高度分解能として約 17 cm ほどの粒子画像が得られることになる。以上述べたシステムの性能を Table 1 に示す。

4. システムの性能の評価と検討

4.1 電波伝搬特性と画質

本システムは対流圏上部までの高度範囲を対象としている。水平方向の平均風速を 15 m/s としたとき 40 分間の観測で HYVIS は水平方向に 36 km 流されるので、Fig. 4 で示される高度 20 km、観測半径 40 km の円筒状の観測対象域が描かれる。この場合、電波伝搬におけるスラントレンジの最大は 44.7 km となる。以下では、この範囲における CNR (carrier to noise ratio) を算出し画像データとの評価を行う。

HYVIS と地上局との通信は、見通し距離内通信とみなすことができ、地上局の受信電力 W_r は式(1)に示す自由空間電波伝搬式を用いて計算される。

$$W_r = G_t + G_r + P_t - (L_t + L_r) - L_a \quad (\text{dBm}) \quad (1)$$

W_r : 地上における電波受信電力 (dBm)

G_t : 送信アンテナ利得 (dB)

G_r : 受信アンテナ利得 (dB)

P_t : 送信電力 (dBm)

L_t : 送信給電損失 (dB)

L_r : 受信給電損失 (dB)

L_a : 自由空間損失であり、式(2)で示される。(dB)

$$L_a = 20 \log(4\pi D/\lambda) \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

ただし、 D : 電波伝搬距離 (スラントレンジ) (m)

λ : 電波の波長 (m)

計算結果を Fig. 5 に示す。縦軸は受信電力、横軸は HYVIS までのスラントレンジを示している。曲線 A,

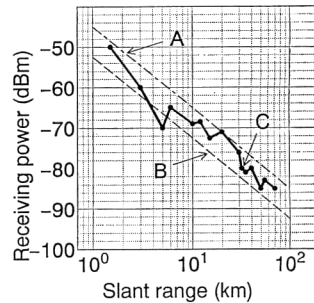


Fig. 5 Profiles of calculated and observed receiving power. -----; Calculated curve using Dia. 1 m antenna, - · - · -; Calculated curve using Dia. 2 m antenna, —; Observed curve in the field.

Table 2 Parameters for calculation.

$G_t + L_t$	0 dB
G_r	26 dB (parabolic antenna DIA. 2 m)
G_r	18 dB (parabolic antenna DIA. 1 m)
L_r	-1.2 dB (cable loss 1 m)
P_t	27.8 dBm (0.6 W)

曲線 B は直径 2 m、1 m のパラボラアンテナを想定した計算結果である。計算に用いたパラメータを Table 2 に示す。本計算により観測対象域における最大スラントレンジの 44.7 km における受信電力は直径 2 m のパラボラアンテナの場合 $W_r = -78.5$ dBm、直径 1 m のパラボラアンテナの場合 $W_r = -86$ dBm となる。

電波伝搬のフィールドテストは宇宙科学研究所三陸大気球観測所において、大気球に搭載している伝送システムを使用し、受信アンテナは直径 2 m のパラボラアンテナを使用した。曲線 C はフィールドテストで得たスラントレンジに対する受信電力の実測値を示す。同図より実測値と計算値は概ね一致し、先に描いた観測対象域内の最大スラントレンジ 44.7 km において受信電力は約

-83 dBm となった. 以上のことから, 観測対象域に対しては自由空間における電波伝搬式が使用でき, 受信機の雑音レベル-102 dBm から観測計画に対しては CNR が 19 dB 以上確保できることが確認された. 受信画像の画質は CNR により変化する. そこで「CNR と画質の関係」について実験を行い, 実験結果を Fig. 6 に示す. この結果を評価すると 15 dB 以上の CNR で良好な画質が得られることが確認された.

4.2 画像の鮮鋭さと粒径測定限界

前述までに本システムが良好な画像データを提供できることを明らかにした. 得られた画像データは電波の有効利用にもとづき電波の広がりをも最小限に抑えるため, 搬送波へ変調をかける前にビデオ信号のスペクトラムを制限する高域除去フィルター(低域通過型フィルター)を通してている. このフィルターは画像の高域成分を低下させるので粒子画像のエッジの鮮鋭さが失われる. 本システムは NTSC 方式の TV カメラを使用しているので垂直方向の有効走査線数は約 450 本である. 高倍率カメラ側はその倍率から垂直方向の観測スケール 1200

μm を 450 本の走査線で表現するので約 $3 \mu\text{m}$ の分解能となり, 低倍率カメラは 13.5 mm を 450 本の走査線で表現するので約 $30 \mu\text{m}$ の分解能である.

水平方向の分解能は画像信号の周波数特性により変化する. フィルターのカットオフ周波数(遮断周波数)に依存する. そこで本システムの水平方向の分解能を明らかにするため, カットオフ周波数と分解能の関係について実験を行った. 実験はフィルターをかけた粒子画像の信号を A/D 変換して取り込み, 画像信号のデジタル的量子化を行い, 粒子画像のエッジの立ち上がり立ち下がり部分の微分カーブの半値幅を求め, 画像としての判別の限界と考え分解能とした. 量子化の 1 ピクセルは高倍率カメラ側では水平方向のフルスケールである $1605 \mu\text{m}$ を 256 ピクセルで表して $6.4 \mu\text{m}$ となり, 低倍率カメラ側はフルスケールである 18 mm を 256 ピクセルで表して $70 \mu\text{m}$ である. フィルターのカットオフ周波数を変化させ分解能を求めた実験結果を Fig. 7(a), (b) に示す. (a) は高倍率カメラ, (b) は接写カメラの分解能を示す. 縦軸はエッジ部分の一次微分の半値幅を観測

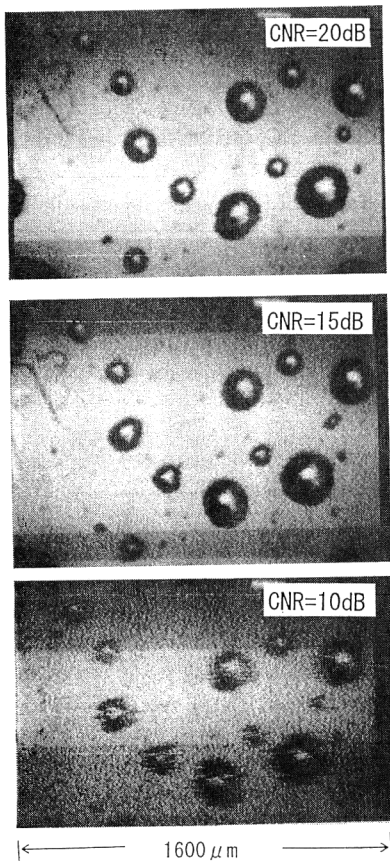


Fig. 6 Video images for CNR.

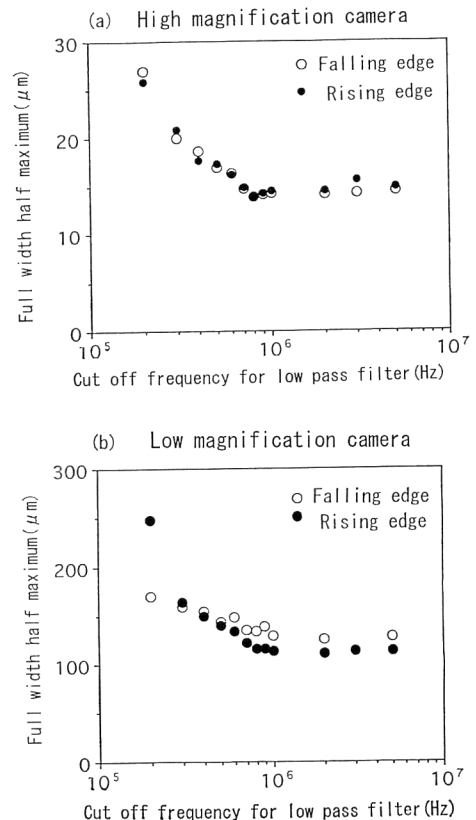


Fig. 7 The resolution for the cut off frequency of low-pass filter.

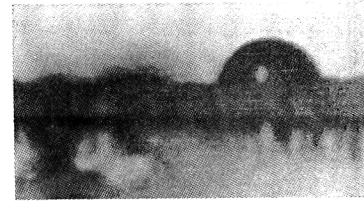
スケールに換算して示し、横軸は低域通過型フィルターのカットオフ周波数を示す。

Fig. 7の結果から高倍率カメラ側の水平方向の分解能はカットオフ周波数を 800 kHz 以上にすれば、14~15 μm で一定となりこれが限界であることを示し、接写カメラ側では 110~120 μm が限界であることを示している。本システムでは画像信号の帯域圧縮として 1 MHz のカットオフ周波数を採用しており、画像信号を量子化しての粒子測定を行う場合の水平方向の分解能は上記値となり垂直方向の分解能はさらに小さい。ただしモニター上の直接画像をアナログ的に、連続して見る場合は 7 μm までは観測ができる。

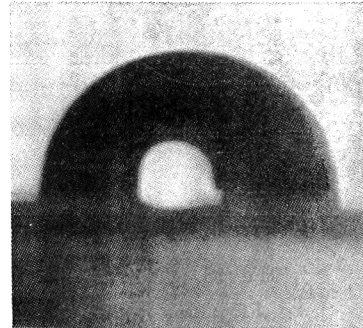
4.3 雲粒子の歪の補正

フィールド観測において捕捉用フィルムに捕捉された水滴は重力により扁平となり、球形を仮定したときの径より大きく観測される。画像データから雲粒子の粒径分布を定量的に調べるにはこの歪みの補正が必要となる。この歪みの程度を調べるために、捕捉フィルム上に付着した粒子の横からの画像を撮影した。この画像から体積を求め、同体積を有する球体を浮遊粒子とみなし、測定径と浮遊径との間の補正值（扁平補正係数）を求めた実験結果について述べる。実験に使用した捕捉用フィルムは Table 3 に示す 5 種類である。その内訳は常温撥水材 (KC 88, 信越化学工業(株), シリコン分 10%) を濃度 0.5%, 1%, 2% にうすめフィルムにコーティングした 3 種類と、シリコンオイル (KE 103, 信越化学工業(株)) を塗布したもの、フィルムをコーティングしていないもの (未処理) である。

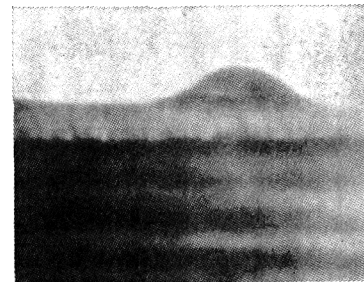
フィルムに付着した粒子の側方粒子写真の例を Fig. 8 に示し、上記各フィルムについて測定した結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9 の横軸はフィルム上の粒径を示し、縦軸は球形を仮定したときの補正粒径である。この図で傾きが小さいほど重力による歪が大きいことを示す。なお、フィルム B~D はほぼ同じ結果となり、代表



No coating



Water-repellent coating



Silicon oil coating

Fig. 8 The side images of particle on the film.

Table 3 Film condition.

Film	Condition
A	No-coating film
B	Water-repellent coating-film concentration of 0.5%
C	Water-repellent coating-film concentration of 1%
D	Water-repellent coating-film concentration of 2%
E	Coating-film by silicon oil

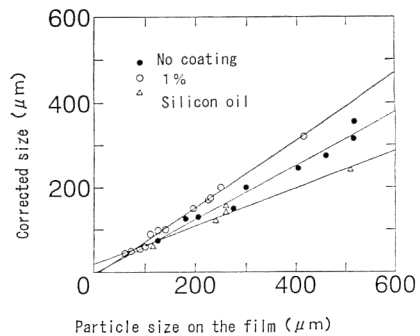


Fig. 9 The correction-curve of particle size.

値としてフィルムCの実験結果を図に示している。また直線は最小二乗法により求めた最尤直線であり、次式(3)~(5)で示される。

$$\text{未処理フィルム } y = 6.7 + 0.63x \quad (\mu\text{m}) \quad (3)$$

$$\text{濃度 1\% } y = -7.5 + 0.79x \quad (\mu\text{m}) \quad (4)$$

$$\text{シリコンオイル } y = 28 + 0.43x \quad (\mu\text{m}) \quad (5)$$

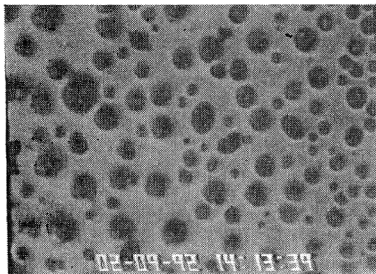
ここで x はフィルム上での粒径, y は補正後の粒径である。また y の誤差はフィルムAの場合 $\pm 14 \mu\text{m}$, フィルムCの場合 $\pm 2.9 \mu\text{m}$, シリコンオイルEの場合 $\pm 11 \mu\text{m}$ である。この誤差を考慮するとシリコンオイルの場合を除き, x と y は, ほぼ比例関係にある。以上の結果から濃度 0.5~2% の常温撥水材でコーティングしたフィルムを使用した場合には偏平補正係数はほぼ一定 (0.79) となった。

5. フィールドにおける雲粒子観測

以上述べてきた HYVIS によるフィールド観測の画像データ例を示す。Fig. 10(a), (b) は 1992 年 2 月 9 日山形県酒田市, 飛島における観測データのサンプルである。(a) は帯状の降雪雲の高度 0.9 km, 気温 -6.3°C における高倍率カメラ (カメラA) で捕らえた $485 \mu\text{m} \times 743 \mu\text{m}$ の氷晶画像であり, (b) は高度 2.7

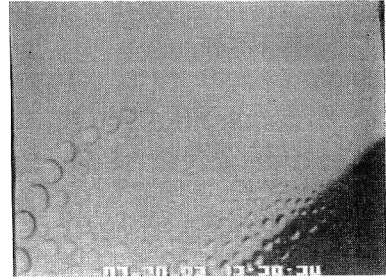


(a) Ice crystal



(b) Cloud particles

Fig. 10 The samples of data in the field-test.



(a) Rain droplets



(b) Ice crystal

Fig. 11 The samples of data in the field-test.

km, 気温 -18°C における $97 \sim 145 \mu\text{m}$ の雲粒子画像である。Fig. 11(a), (b) は 1993 年 7 月 20 日, 茨城県つくば市での観測データを示す。(a) は高度 0.6 km, 気温 15.7°C で接写カメラ (カメラB) が捕らえた $0.15 \sim 10 \text{ mm}$ の雨滴画像である。(b) は高度 10.4 km, 気温 -36°C の絹雲内で高倍率カメラが捕らえた結晶で, 写真左下は $226 \mu\text{m} \times 65 \mu\text{m}$ の角柱型氷晶であり, 右上は $97 \mu\text{m} \times 48 \mu\text{m}$ の砲弾型結晶である。いずれも良好な粒子画像が得られた。

6. まとめ

雲のミクロな構造を粒子画像を用いリアルタイムでとらえる観測システムの開発を行ってきた。本稿ではその基本的な性能の評価と検討を行った結果を報告した。

結論として次のことを明らかにした。

1. 観測対象域 (半径 40 km, 高度 20 km 以内) における最大スラントレンジ 44.7 km で, 既存の気象ゾンデと同じ送信電力 0.6 W にて CNR は 19 dB が確保でき良好な雲粒子画像を得ることができる。

2. 粒子画像の分解能はモニター上での直接画像では $7 \mu\text{m}$ までの判別ができる¹¹⁾ が, 画像を量子化して処理

を行う粒径測定ではピクセル化を行い不連続となるため、粒径の測定は高倍率カメラ側では 14~15 μm が限界となりそれより大きいものの測定が可能であり、接写カメラ側では 110~120 μm が限界となりそれより大きいものの測定が可能である。

3. 捕捉フィルムに撥水材として KC 88, 信越化学工業(株)を濃度 0.5~2%でコーティングした場合、粒子画像の重力による歪補正係数は 0.79 であることが明らかになった。

4. フィールド観測では雲粒子のみならず氷晶, 雨滴も良好に観測できるシステムであることを示した。

以上により本システムは雲の微物理構造の研究に有効な観測データを得る手段であり、大気の直接観測とリアルタイム性という特性を生かして、リモートセンシングが困難なエアロゾルや酸性雨等の観測への応用が期待される。

最後に、本研究を遂行するにあたり、ご協力いただいた文部省宇宙科学研究所の山上隆正助教授ならびに信州大学工学部情報工学科三井正樹君に感謝いたします。

文 献

- 1) D. Atlas: "The estimation of cloud parameters by radar," *J. Meteor.*, **11** (1953) 309-317.
- 2) J.Q. Brantley and D.A. Barczys: "Some weather observations with continuous wave Doppler radar," *Proc. 6th Wea. Radar Conf., Boston* (1957), pp. 297-306.
- 3) S.R. Pal and A.I. Carswell: "The polarization characteristics of lidar scattering from snow and ice crystals in the atmosphere," *J. Appl. Meteor.*, **16** (1977) 70-80.
- 4) T.A. Seliga and V.N. Bringi: "Potential use of radar reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation," *J. Appl. Meteor.*, **15** (1976) 69-76.
- 5) D.C. Hogg, F.O. Guiraud, J.B. Snider, M.T. Decker and E.R. Westwater: "A steerable dual-channel microwave radiometer for measurements of water vapor and liquid in the troposphere," *J. Climate Appl. Meteor.*, **22** (1983) 789-806.
- 6) A.J. Heymsfield and D.J. Musil: "Case study of a hailstorm in Colorado. Part II; Particle growth processes at mid-levels deduced from in-situ measurements," *J. Atmos. Sci.*, **39** (1982) 2847-2866.
- 7) R.E. Stewart, J.D. Marwitz and J.C. Pace: "Characteristics through the melting layer of stratiform clouds," *J. Atmos. Sci.*, **41** (1984) 3227-3237.
- 8) G.L. Gordon and J.D. Marwitz: "Hydrometer evolution in rainbands over the California Valley," *J. Atmos. Sci.*, **43** (1986) 1087-1100.
- 9) R.A. Black and J. Hallett: "Observation of distribution of ice in hurricanes," *J. Atmos. Sci.*, **43** (1986) 802-822.
- 10) M. Murakami, T. Matsuo, T. Nakayama and T. Tanaka: "Development of cloud particle video sonde," *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **65** (1987) 803-809.
- 11) M. Murakami, Y. Yamada, T. Matsuo and K. Morikawa: "Microphysical structures of wave-frontal clouds: the 20 June 1987 case study," *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **70** (1992) 877-894.