



Title	粒径別雲水量測定ゾンデの試作（序報）
Author(s)	橋本, 雅之; HASHIMOTO, Masayuki; 中島, 映至 他
Citation	低温科学. 物理篇, 44, 103-117
Issue Date	1986-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18522
Type	departmental bulletin paper
File Information	44_p103-117.pdf



Masayuki HASHIMOTO, Teruyuki NAKAJIMA, Tadashi KIMURA, Toshiji SHIBATA, Tatsuo ENDOH and Gorow WAKAHAMA 1985 Trial Manufacturing of a Sonde Measuring Liquid Water Contents for Classified Droplet Sizes (Preliminary Report). *Low Temperature Science, Ser. A, 44*. (With English Summary P. 116)

粒径別雲水量測定ゾンデの試作 (序報)*

橋本 雅之**

(北海道大学大学院 理学研究科)

中島 映至

(東北大学 理学部)

木村 忠志

(国立防災科学技術センター雪害実験研究所)

柴田 利二

(明星電気株式会社)

遠藤辰雄・若浜五郎

(低温科学研究所)

(昭和60年11月受理)

I. 緒 言

雨や雪をもたらす雲は大小さまざまな大きさの雲粒からできている。このような雲の内部の雲水量の分布を測定することは降雨、降雪機構の解明や、雲が太陽放射・地球放射に与える影響を知る上で極めて重要である。近年、気候変動が世界の関心事となり、その原因の究明が強くいわれている。わが国も1986年から「世界気候研究計画」(WCRP)に参加し、「雲と放射」の解明を重点事項にとり上げることになっているが、その成否は粒径別の雲水量の測定の可否にあるとさえいわれている。

しかるに従来わが国ではこの種の観測はほとんどなされた例がない。雲内部の雲水量を粒径別に精度よく、しかも安価に測定する方法がなかったからである。そこでわれわれは、ゾンデ観測技術を雲水量の観測に拡張し、雲内部の粒径別雲水量の鉛直分布を正確に測定するためのゾンデ用測器を開発し、その実用化を図る目的で本研究を行った。

試作した粒径別雲水量測定ゾンデの方式は、吸引によるカスケードインパクターである。この方式ではインパクターの段数に制限があるため、得られる粒径分布は粗いが、最終段までの全積算値は、ほぼ完全に雲粒を捕捉した値になると期待される。また吸引式であるためサンプリングの捕捉率は1とみなすことができる。このカスケードインパクターの各ステージにとらえられる雲粒はガラスウールに浸透し、それ全体をはさむ電極によって誘電率として測定

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2781号

** 現在 秋田県立湯沢北高等学校

され電気信号に変換される。これをテレメタリングして最終的には水分量の値として得るものである。

また粒径分布として何段まで、さらにどのような粒径範囲でとらえるのが、放射特性と関連づける上で必要であるかを調べるためいくつかの数値実験を行った。その結果粒径を0.1~2, 2~5, 5~10, 10~40 μm 程度に分割すれば得られる測定値から雲層の平均的な反射率、透過率および射出率を精度良く再構成できることがわかった。したがってステージ数を4段にして雲粒をとらえることにし、ゾンデ用の小型軽量のカスケードインパクターを試作し、さらに気球観測のためのシステムを組み立てるに至ったので以下にその詳細を報告する。

II. 放射特性に効く粒径分布の数値実験

数値実験に用いた粒径分布は、Welch 等 (1980)¹⁾ が使用した6つのモデルで第1表にまとめたとおりである。分布は Modified gamma 関数で表現されていて各パラメーターは次の様に定義される：

$$\frac{dN}{dr} = n(r) = ar^\alpha \exp \left\{ -\frac{\alpha}{\gamma} \left(\frac{r}{r_c} \right)^\gamma \right\}.$$

ここで、 r は粒子半径 (μm) で N は r に関する雲粒の累積数密度である。 $n(r)$ を粒径分布または数スペクトルとよぶ。

雲水量測定ゾンデによって計測されるのはあらかじめ設定された粒径区分 (r_i, r_{i+1}), $i=1, \dots, N$ 間で積分された体積である：

$$V_i = \int_{\ln r_i}^{\ln r_{i+1}} V(\ln r) d \ln r, \quad i=1, \dots, N.$$

第1図に示した様に r_1 と r_{N+1} は現実で考えられる最小粒径と最大粒径をとり、間に存在する r_2, \dots, r_N の値、および分割数 N を変化させることによって、いろいろな粒径階級をもつ雲水量測定ゾンデの測定特性をシミュレートすることにする。

本研究では、 $r_1=0.1 \mu\text{m}$, $r_{N+1}=40 \mu\text{m}$ とし、 r_2 から r_N の間を粒径の対数で $(N-2)$ 個の等

第1表 雲型ごとの粒径分布のモデル modified gamma 関数のパラメーター a, α, γ, r_c と雲水量 W_c を示す

Type	a ($/\text{cm}^3 \mu\text{m}$)	α	γ	r_c (μm)	W_c (g/m^3)
Stratocumulus					
1 base	0.2823	5	1.19	5.33	0.141
2 top	0.1978	2	2.46	10.19	0.796
Stratus					
3 base	0.9792	5	1.05	4.70	0.114
4 top	0.3818	3	1.30	6.75	0.379
Nimbostratus					
5 base	0.8061	5	1.24	6.41	0.235
6 top	1.0969	1	2.41	9.67	1.034

区間に分割した(第1図)。以下 r_2 を r_{\min} , r_N を r_{\max} と書く。雲層の放射特性は、平行入射光線が距離 1 km 走った時の減衰率を $\exp(-C_{\text{ext}})$ と表わした時の消散係数 C_{ext} , 減衰した光のうちで、吸収されずに、散乱角 θ 方向へ散乱される確率 (single scattering albedo) ω_0 , および確率密度関数 $\omega_0 P(\theta)$ { $P(\theta)$ を散乱関数とよぶ } によって決められる。 C_{ext} , ω_0 , $P(\theta)$ を観測データ $\{V_i, i=1, \dots, N\}$ から計算するためには、まず元の体積スペクトル $V(\ln r)$:

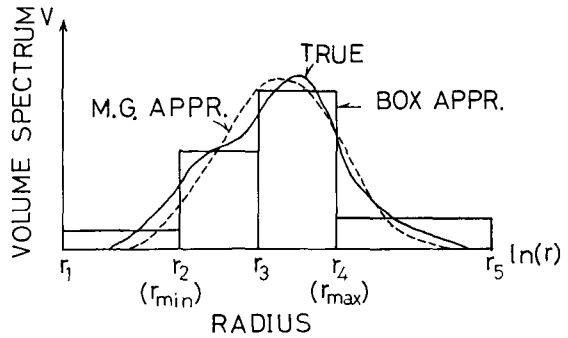
$$V(\ln r) = \frac{dV}{d \ln r} = \frac{4\pi r^4}{3} n(r)$$

を再構成する必要がある。そのために2つの方法を採用した。1つは、観測データを最小二乗法的に最良に説明できる Modified Gamma 関数を推定する方法である。しかし、この方法は、大きな誤差を伴うデータや、ピークが複数個あるデータに対しては、不安定になりやすいので他に最も簡単な近似として区間 (r_i, r_{i+1}) に対しては、 $V_i / \ln(r_{i+1}/r_i)$ なる一定値をもつ箱型関数を再構成値とする方法も用いた。

体積スペクトルと波長および気塊の複素屈折率が与えられれば、Mie 散乱理論によって気塊の消散係数 C_{ext} , single scattering albedo ω_0 , および散乱関数 $P(\theta)$ が計算される。第2表は、この様にして観測データから再構成された消散係数の相対誤差を波長 $1 \mu\text{m}$ に対して示したものである。気塊の複素屈折率は、波長や水蒸気量によっても大きく変化するため、虚数部を $-\text{Im}(\bar{m}) = 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 2 \times 10^{-3}, 3 \times 10^{-3}$ と仮定し、粒径分布の6個のモデルと合わせて計36通りの場合の二乗平均誤差を示してある。複素屈折率の実部は $\text{Re}(\bar{m}) = 1.33$ に固定して考えた。表より、モデルの粒径分布が Modified gamma 分布であるため、Modified gamma 関数によって粒径分布を推定の方が、精度がよく、たとえ分割数 N が3であっても消散係数の推定誤差はほぼ10%以下にとどまっている。一方、箱型の関数近似では、 $N=3$ の場合、誤差は数10%になることがわかる。分割数が $N=4$ になるとどちらの近似でも誤差は場合によって1ケタ程度改善される。さらに分割数がふえるに従って、 r_{\max} の値が大きいく、 r_{\min} の値が小さい場合の誤差が大幅に改善されることがわかる。

したがって分割数を大きくできる場合には、分割される粒径域 (r_{\min}, r_{\max}) を大きく取る方がよいことがわかる。一方、 N が4程度に制限される場合には、 r_{\min} と r_{\max} の値を吟味する必要がある。第2表の場合には、 $N \geq 4$, $r_{\min} \sim 2 \mu\text{m}$, $r_{\max} \sim 10 \mu\text{m}$ 程度に設定すべきことがわかる。

第3表は箱型近似で $N=4$ に限った時の C_{ext} , $1-\omega_0$, $1-g$ および f^* の相対誤差である。ここで Asymmetry factor g と f^* はそれぞれ次のように定義される:



第1図 体積スペクトルの再構成

真値 (true) が与えられた時、測定値を最良近似する modified gamma 関数を用いる方法 (M. G. appr.) と区間内が一様である箱型関数を用いる方法 (box appr.)。 $N=4$ の例で区間 (r_2, r_3) と (r_3, r_4) は等間隔である

第2表 消散係数 C_{ext} の再構成相対誤差 (1/1000 単位)。 $r_{min}(=r_2)$ を 1, 2, 3, 5 および $7 \mu\text{m}$, $r_{max}(=r_N)$ を 10, 20, および $30 \mu\text{m}$, r_1 から r_{N+1} の間の分割数 N を 3, 4, 5 および 10 とそれぞれ与えた時の値。左側は modified gamma 関数 (G), 右側は箱型関数 (U) によって体積スペクトルを再現した場合。波長 (WL) は $1 \mu\text{m}$

WL=1.0 N=3 G C_{ext}						WL=1.0 N=3 U C_{ext}					
$R_{min} \backslash R_{max}$	1	2	3	5	7	$R_{min} \backslash R_{max}$	1	2	3	5	7
10	76	75	54	36	38	10	1297	403	144	220	940
20	116	138	103	32	19	20	2940	1127	598	327	961
30	310	148	141	53	17	30	3045	1151	609	286	902

WL=1.0 N=4 G C_{ext}						WL=1.0 N=4 U C_{ext}					
$R_{min} \backslash R_{max}$	1	2	3	5	7	$R_{min} \backslash R_{max}$	1	2	3	5	7
10	54	36	36	36	38	10	135	52	67	202	939
20	70	32	31	21	10	20	327	160	94	254	997
30	49	45	18	13	20	30	233	172	136	263	989

WL=1.0 N=5 G C_{ext}						WL=1.0 N=5 U C_{ext}					
$R_{min} \backslash R_{max}$	1	2	3	5	7	$R_{min} \backslash R_{max}$	1	2	3	5	7
10	36	36	36	35	36	10	54	71	87	201	938
20	16	23	10	14	15	20	123	74	39	244	1000
30	24	13	19	11	18	30	140	71	57	248	999

WL=1.0 N=10 G C_{ext}						WL=1.0 N=10 U C_{ext}					
$R_{min} \backslash R_{max}$	1	2	3	5	7	$R_{min} \backslash R_{max}$	1	2	3	5	7
10	35	35	35	35	36	10	102	106	101	199	938
20	15	15	12	13	13	20	9	8	13	236	1002
30	12	12	12	13	13	30	21	8	20	240	1003

$$g = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 P(x) x dx,$$

$$f^* = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 P(x) P_2(x) dx,$$

(P_2 は 2 次 Legendre 多項式)。

第3表には波長が $1 \mu\text{m}$ の場合と同時に $10 \mu\text{m}$ での結果も示した。この場合赤外部での水の複素屈折率を想定して虚数部を $-Im(\bar{m})=0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5$ にとった。実数部は 1.33 とした。第3表より, $r_{min} \sim 2 \mu\text{m}$, $r_{max} \sim 10 \mu\text{m}$ を選べば, C_{ext} については 5~10%, $1-\omega_0$ については 3~5%, $1-g$ については 1~2%, f^* については 1~4% 程度の推定誤差にとどまることがわかる。一般に C_{ext} と $1-\omega_0$, $1-g$ と f^* はそれぞれ同程度の変化率を示し, 前者のグルー

第3表 C_{ext} , $1-\omega_0$, $1-g$, および f^* の箱型近似による推定誤差 (1/1000 単位)。左側が波長 $1 \mu\text{m}$, 右側が $10 \mu\text{m}$ の場合。
 $N=4$ 。他は第2表と同じ

WL=1.0 N=4 U C_{ext}

$R_{min} \backslash R_{max}$	1	2	3	5	7
10	135	52	67	202	939
20	327	160	94	254	997
30	233	172	136	263	989

WL=10.0 N=4 U C_{ext}

$R_{min} \backslash R_{max}$	1	2	3	5	7
10	104	94	104	126	192
20	280	182	117	59	125
30	271	170	99	46	133

WL=1.0 N=4 U $1-\omega_0$

$R_{min} \backslash R_{max}$	1	2	3	5	7
10	114	56	56	176	425
20	205	125	80	198	434
30	177	146	114	203	435

WL=10.0 N=4 U $1-\omega_0$

$R_{min} \backslash R_{max}$	1	2	3	5	7
10	60	33	30	52	182
20	101	104	84	52	158
30	134	134	75	42	168

WL=1.0 N=4 U $1-G$

$R_{min} \backslash R_{max}$	1	2	3	5	7
10	23	12	9	58	129
20	27	28	18	57	124
30	38	46	24	57	125

WL=10.0 N=4 U $1-G$

$R_{min} \backslash R_{max}$	1	2	3	5	7
10	58	23	14	8	41
20	39	40	37	11	36
30	35	83	60	14	37

WL=1.0 N=4 U f^*

$R_{min} \backslash R_{max}$	1	2	3	5	7
10	19	9	9	72	159
20	24	17	16	70	152
30	35	28	22	70	153

WL=10.0 N=4 U f^*

$R_{min} \backslash R_{max}$	1	2	3	5	7
10	88	35	20	9	25
20	62	45	54	13	19
30	36	96	89	22	20

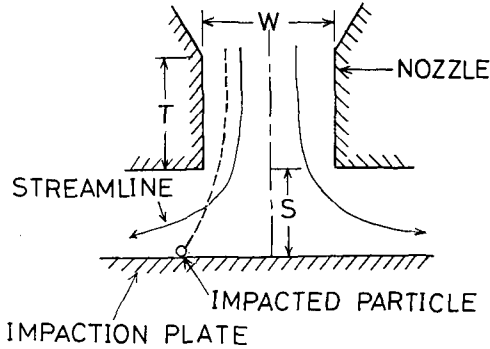
プの方が値が大きい。したがって、 C_{ext} に含まれる誤差を目安に精度を議論すれば、他のパラメーターの影響についても把握することができる。このことはまた、雲層の光学定数の中で光学の厚さを正確に知る必要があることを示している。いずれにしてもこれらの値は雲層の反射率、透過率および射出のいずれをも 10% 以下の相対誤差で決定できることを示している。

III. ソンデ用カスケードインパクトの製作と試験

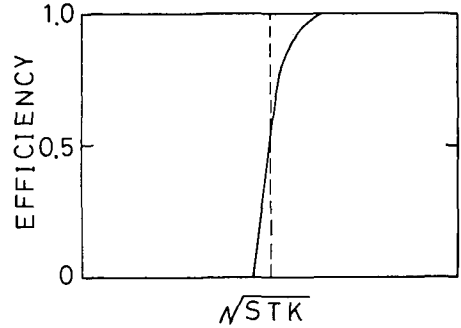
インパクトは第2図に示したような原理となっている。ノズルから噴出した粒子がインパクションプレートに衝突するかどうかは、次式で表わされるストークス数 STK に大きく依存する²⁾：

$$STK = \frac{\rho_p C V_0 D_p^2 / 18 \mu}{W/2} \quad (1)$$

ここで、 ρ_p は粒子の密度、 C は Cunningham slip correction factor、 V_0 はノズル内の平均流



第2図 インパクトターのステージの部分の模式図



第3図 ストーク数と、粒子がインパクトションプレートに衝突する効率との関係

速, D_p は粒子の直径, μ は流体の粘性係数, W はノズルの幅である。

ストークス数と粒子がインパクトションプレートに衝突する効率との関係を表わした典型的な効率曲線を第3図に示す。ストークス数が一定値より大きくなると効率が急激に増大するように、インパクトターを作成しなければならない。効率曲線の勾配, 形状は, レイノルズ数 Re , ノズルの先端からプレートまでの距離 s , ノズルの長さ T , ノズルの幅 W に依存する。Marple 等 (1974)³⁾ は s/W の値は噴出口の形が円形の場合で1以上, 矩形で1.5以上, $T/W \geq 1$, $Re \geq 500$ であることが望ましいとしているので, これに従った。

次に噴出口が矩形の場合について, ノズルの幅 W の算出方法を述べる。空気の流量を Q , 噴出口の長さを L とすると, ノズル内の平均流速 V_0 は,

$$V_0 = \frac{Q}{LW} \quad (2)$$

となる。

インパクトションプレートに粒子が衝突する効率が50%となるストークス数を STK_{50} , そのときの粒子の直径を D_{50} とすると, (1)式と(2)式より,

$$W = \sqrt{\frac{\rho_f Q C D_{50}^2}{9 \mu L STK_{50}}} \quad (3)$$

となる。

本研究で製作したカスケードインパクトターのステージ数は4段で, 1段目で採取する粒子の D_{50} の値を $12 \mu\text{m}$, 2段目で $5 \mu\text{m}$, 3段目で $2 \mu\text{m}$ とした。4段目はノズルによる方法とはらず, 粒子の通過部に濾紙をおき, それに吸収させることにした。

Marple 等 (1974)³⁾ によれば, $s/W=1.5$, $T/W=1$ のとき, $STK_{50}=0.7$ である。また空気の粘性係数は 20°C で $\mu=1.81 \times 10^{-4}$ poise であり, 測定しようとする粒子は雲粒であるから $\rho_p=1 \text{ g/cm}^3$ である。Cunningham slip correction factor C は

$$C = 1 + \frac{0.163}{D_p P_2} + \frac{0.0549}{D_p P_2} \exp(-6.66 D_p P_2) \quad (4)$$

と表わされる⁴⁾。ここで D_p の単位は μm , P_2 (単位は気圧) はインパクトションプレート前面での

静水圧で

$$P_2 = P_1 - \frac{1}{2} \rho V_0^2 = P_1 - \frac{1}{2} \rho \left(\frac{Q}{LW} \right)^2 \quad (5)$$

と表わされる。 P_1 はインパクター入口での静水圧、 ρ は流体の密度である。

(4)式より D_P が数 μm 以上の場合 $c=1$ であるので、 $Q=5 \ell/\text{min}$ 、 $L=0.5 \text{ cm}$ とすると、

$$\sqrt{c} D_{50} = 2 \mu\text{m} \text{ のとき } W \doteq 0.08 \text{ cm}$$

$$\sqrt{c} D_{50} = 5 \mu\text{m} \text{ のとき } W \doteq 0.2 \text{ cm}$$

$\sqrt{c} D_{50} = 12 \mu\text{m}$ のとき $W \doteq 0.5 \text{ cm}$ となる。しかしこのカスケードインパクターはゾンデにとりつけるのであるから、 W の値を正確に求めるためには、上空の気圧、温度を用いて計算しなければならない。そこで、地上が1気圧、 20°C 、 $\mu = 1.81 \times 10^{-4} \text{ poise}$ 、ゾンデが0.5気圧、 -30°C の上空まで上昇すると仮定すると $\mu = 1.56 \times 10^{-4} \text{ poise}$ となる。地上と上空との二通りに分けて $D_{50} = 2, 5, 12 \mu\text{m}$

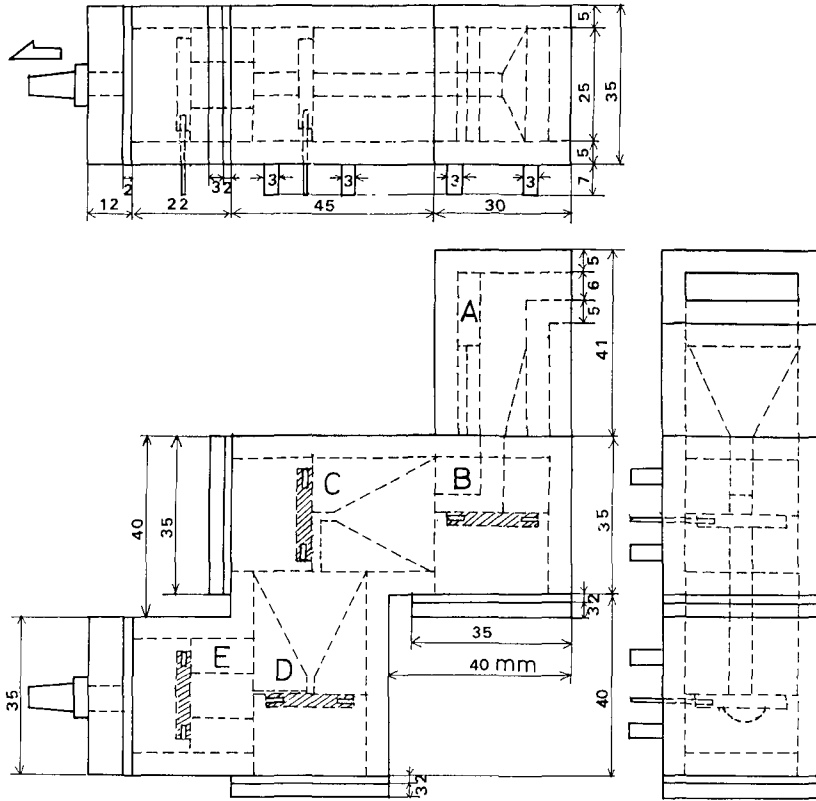
第4表 気圧が1013 mb, 気温が 20°C の場合と506.5 mb, -30°C の場合のノズルの幅 W の値

D_{50}	1013 mb 20°C	506.5 mb -30°C
2 μm	0.79 mm	0.89 mm
5 μm	1.94 mm	2.13 mm
12 μm	4.61 mm	5.01 mm

μm に応じたノズルの幅 W を(3), (4), (5)式を用いて計算した結果を第4表に示す。この表を参考にして、1段目のノズル幅を5 mm、2段目を2.1 mm、3段目を0.8 mmとした。

以上の結果をもとにして製作したカスケードインパクターを第5図に示す。50 μm 以上の粒子は測定にかからないように吸入口の大きさは2.5 cm \times 0.6 cmとし、吸入部付近につけた濾紙にすいとられるようにした。3段目のインパクターの後にも濾紙を設け、すべてのインパクターを通過した小さな粒子をとらえるようにした。インパクターの材質は塩化ビニールで、表面には静電気防止用に導電塗料を塗った。

このカスケードインパクターの試作機を作成し、各ステージで採取される粒径分布を調べるため、超音波加湿機によって作成された粒子の粒径を測定した。超音波加湿機の噴霧口を直径約60 cm、長さ約5 mの鉛直につるしたビニールチューブにつなぎ、チューブ内を落下した粒子を測定した。粒子の吸入には流量6.5 ℓ/min のポンプを使用した。粒径の測定には、濾紙をはさんだ電極の代わりにウォーターブルーをぬったカバーガラスを用いた。第5図に各ステージで得られた粒子の粒径分布を示す。1段目のステージで得られた粒子の平均直径は14 μm 、2段目で6 μm 、3段目で3 μm であった。平均直径としては期待した粒径が各ステージで捕捉された。しかし、粒径分布は1段目で8~25 μm 、2段目で3.5~11 μm 、3段目で1.5~6.5 μm 、となり、1段と2段の間では8~11 μm 、2段と3段の間では3.5~6.5 μm の範囲で粒径分布が重なっている。今後はこの重なりを減少させるようにインパクターを改良しなければならない。

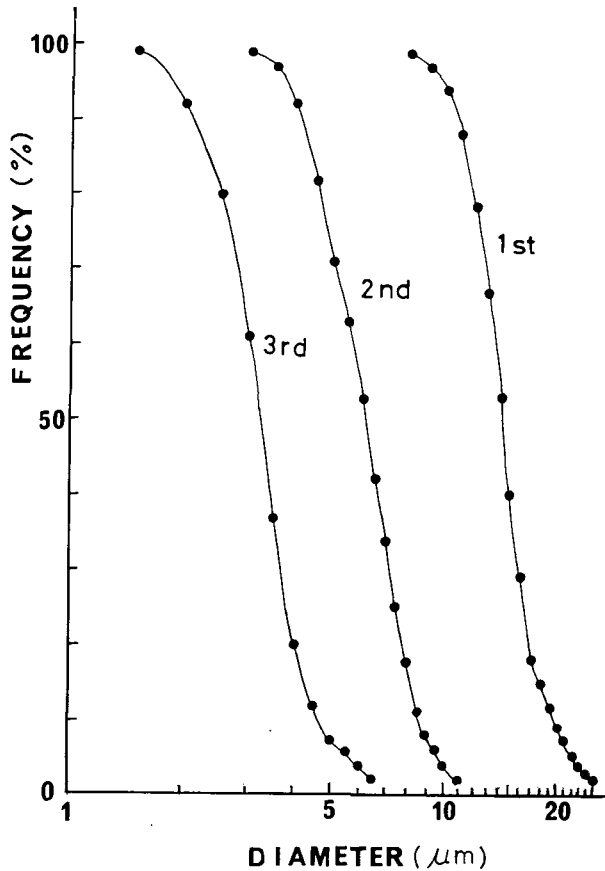


第4図 カスケードインパクト Aは $50\mu\text{m}$ 以上の粒径の雲粒を吸収するための濾紙。B, C, Dはそれぞれ第1, 2, 3段目のインパクトでノズルの噴出口の大きさはそれぞれ $5\times 5\text{mm}$, $5\times 2.1\text{mm}$, $5\times 0.8\text{mm}$ である。Eは最終段のバックアップフィルター。斜線部は水分を測定するための濾紙と電極

IV. 電気水分計と発信器の開発

カスケードインパクトの各ステージ上に捕捉される水分を積算値として検知し、これを地上に電気信号で送るために、これまで積雪の含水量の測定⁵⁾などでも用いられてきた誘電率方式による水分計を採用した。この方式の利点は採集された水に多少の電解質など不純物が入っていても、電気伝導率で水分を計る場合の様な誤差を生じにくいところにある。測定電界の周波数は 2.1MHz としたが、 100KHz 以上の高周波電場内では水の誘電率が水の約23倍になり、液相の水量が測定できる。

この水分計の原型は紙水分計等の用途に開発されたIB回路⁶⁾と称するものであるが、これをゾンデ用として小型化した電気回路を第6図に示す。図の上段は 2.1MHz の水晶制御発振器で、これは頭初 4.2MHz を予定したが、後述するIB回路の同調コイルに用いたポット型コアの高周波特性から、周波数を $1/2$ に減じた。発振波形は矩形波であるが、入・出力回路にインダクターを持ったバッファーを通して、正弦波を得た。中段はIB回路で、容量結合したまったく同一の複同調回路2組に 2.1MHz の高周波電流を供給し、図中の同調コンデンサー

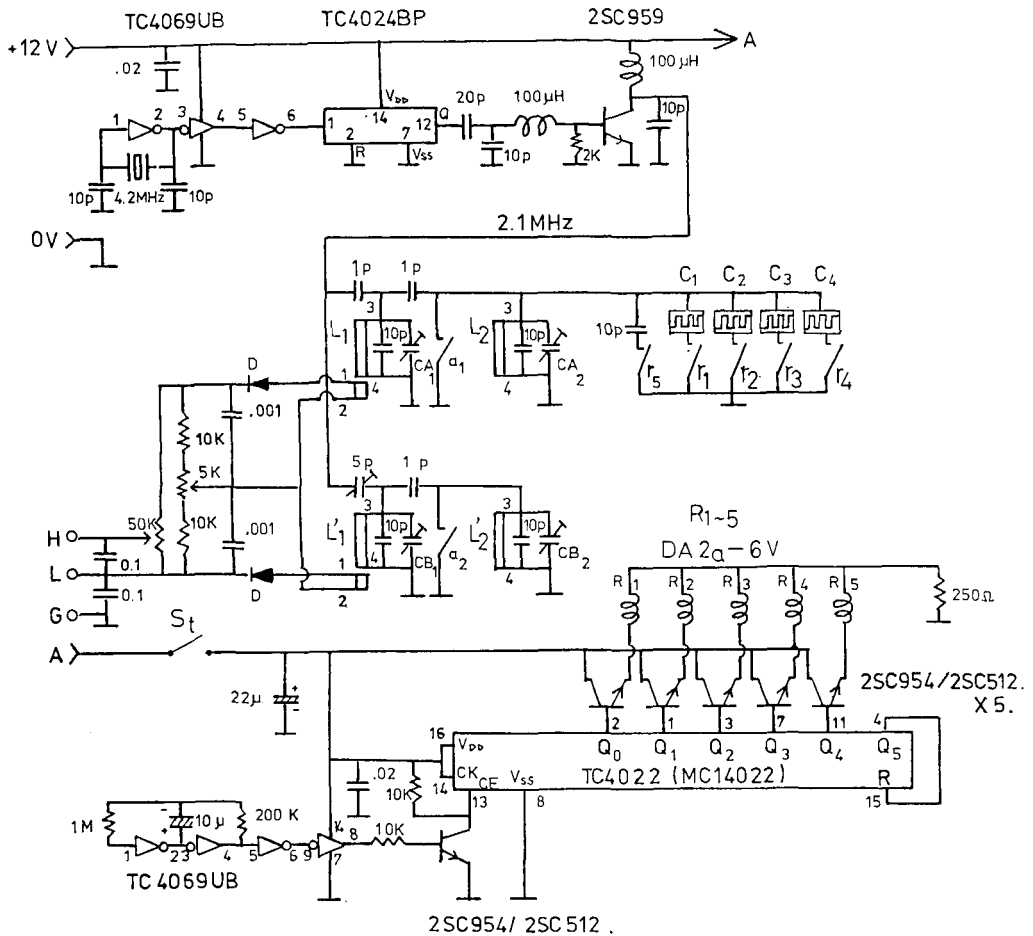


第5図 各ステージで捕捉された粒子の粒径分布。右側の曲線から第1段目、2段目、3段目での分布を示す

CA₂に並列接続する測定回路の静電容量によって生ずる不平衡成分を、L₁およびL₂に電磁結合した整流回路によって、直流電圧としてとり出す。この回路は、直線性が良好で、4つの同調回路をコンパクトに接近させて組み立てることにより、温度の影響をほぼ通りのぞくことができる。またCA₂およびCB₂を同調点よりわずかにずらせて、同調曲線のスロープの変曲点付近に設定し、ここからのズレを検出することによって、測定試料によるQの低下の影響を減少させることができる。

4つの同調回路は、本装置ではポット型コアを用いて小型・軽量化をはかった。CA₂には基準用の10 pFコンデンサーと、後述するように、電極に濾紙を固定して、カスケードインパクターの4つのステージのそれぞれにとりつけた測定ユニットC₁₋₄が、接点r₁₋₅によって順次並列に接続される。r₁₋₅の開閉は、くり返し周期4秒のアステープルマルチバイブレータ(AMV)とリングカウンタによってリードリレーR₁₋₅を順次作動させることで行なった。このAMVは、図中の10 μFのコンデンサーが特に重要で高品質のものを使用する必要があるが、本装置では小型化のため固体タンタルコンデンサーを選択して使用した。

濾紙の水分を検出する電極の構造を第7図に示す。図の上段はガラスエポキシ板上にブリ



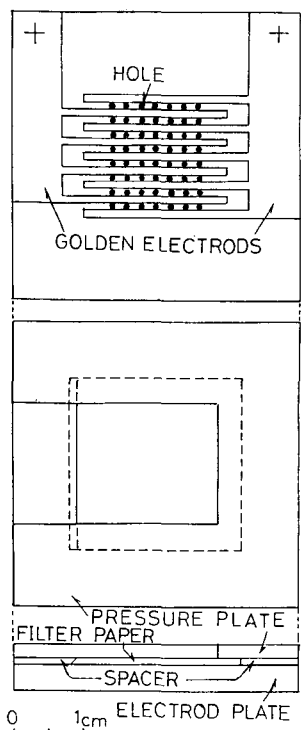
第6図 電気水分計の電気回路

ントしたクシ型電極で、これには金メッキをほどこして接触条件を安定化した。この電極の上に濾紙を重ねて固定した。図の黒丸は貫通孔を示す。貫通孔のあるのは第4段目の電極で他の第1~3段の電極にはこの孔はない。

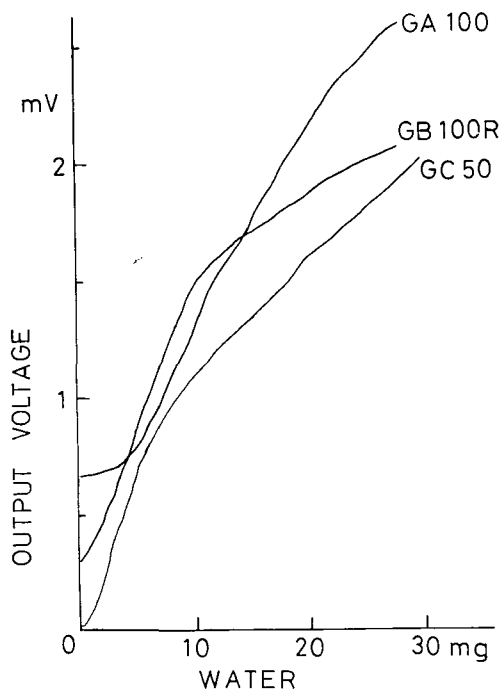
図の中・下段はこの電極に濾紙を固定して測定ユニットとした状態で、雲粒はインパクターにより濾紙面に垂直に衝突する。そして捕捉されない雲粒は直角に曲って通過する。

使用する濾紙について種々のタイプを試験したが、セルロースのものは再現性、および吸水後測定値が安定するまでの時定数に問題があった。一方、グラスファイバーのものは比較的良好な結果が得られ、とくに時定数は0.5秒程度になった。これはガラスの親水性が効いていると考えられる。

第8図は東洋濾紙のグラスファイバー濾紙GA 100, GB 100 R, GC 50について試験した結果である。水量が3 mg 以下では感度が低く、この部分は呼び水を入れなければならないが、水量5 mg 以上での直線性が良好で、かつ勾配が最も大きいことからGA 100を選定した。なおこの比較試験では35 mm 角のくし状電極を使用した。電極の幅と間隔は第7図と同じであ



第7図 濾紙に吸収された水分を検出する電極の構造



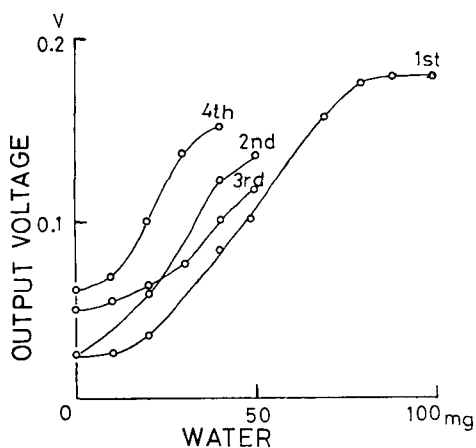
第8図 グラスファイバー濾紙 (GA 100, GB 100R, GC 50) に与えた水量と水分計の出力との関係

る。また回路の出力電圧の最大値を、使用した記録装置の感度にあわせた。

飛揚試験1号機に設定した濾紙と電極についての検定曲線の例が第9図である。この場合は、第1および第4段目に10 mgの水を事前に与えて使用した。なお、1号機の水分計の出力電圧の最大値は、使用するラジオゾンデの信号入力条件にあわせて0.2 Vに設定した。

ラジオゾンデの発信器は、低周波発振部と搬送波発振部からなる。今回の雲水量測定ゾンデを製作するにあたり、新たに開発した低周波発振部は、雲水量センサー部からの出力電圧の変化を低周波の変化 (150 Hz~1200 Hz) に変換し、搬送波にAM変調をかけて地上に送信するものである。搬送波発振器は、従来ラジオゾンデに使用しているものを用い、搬送波は、1687 MHzを使用した。

低周波発振部は、第10図に示すように、オペアンプを利用した積分器とCMOS-ICを利用したモノステーブルマルチバイブレータ (M.M.V.) を用いたV-F変換器である。入力

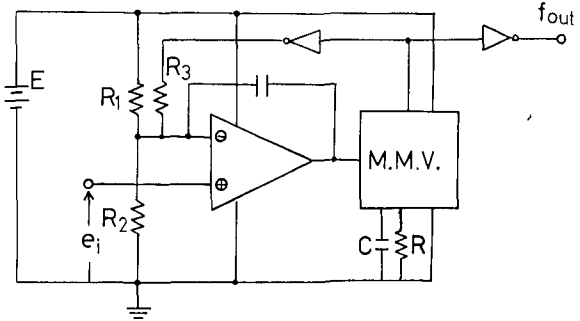


第9図 各インパクターに設置した濾紙と電極についての検定曲線

電圧 e_1 と発振周波数 f との関係は、

$$f = \frac{R_3}{Et} \left\{ \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) e_1 - \frac{E}{R_1} \right\} \quad (6)$$

と表わされる。 E は電源電圧、 t は M.M.V. のパルス幅、 R_1, R_2, R_3 は抵抗である。(6)式にみるように、 e_1 と f は直線関係となる。コンデンサー C と抵抗に温度特性のよいものを選択し、電源電圧をツェナーダイオードによる



第 10 図 低周波発振部の電気回路

定電圧回路により安定化すると、周囲温度が -40°C から $+40^{\circ}\text{C}$ まで変化しても、周波数と入力電圧の直線関係が保持でき、ラジオゾンデとして十分な性能が得られる。

V. 粒径別雲水量ゾンデの仕様

天然の現象の方から要求される物理量として検出可能な仕様を検討したが、これは現時点で入手可能な部品、材料の性能によって制約される。したがってここに示す仕様は、今後諸条件の進展にしたがってその都度改良されるべきものである。

層雲の含水量は、次の推定値によって見積った。雲水量 \bar{W}_c は $0.2 \sim 2 \text{ g/m}^3$ 、雲の厚さ H は $500 \sim 5,000 \text{ m}$ とし、ポンプの流量 Q とゾンデの上昇速度 v はそれぞれ 5 l/min 、 5 m/sec と固定すると、ゾンデが採取する全雲水量 M は

$$M = \bar{W}_c \cdot Q \cdot H / v$$

により、

$$1.5 \text{ mg} < M < 160 \text{ mg}$$

におさまることになる。

最小感度は、最小値の $1/10$ を要求すれば 0.15 mg となり、現在のところ検出が難しい。雲水量 1.0 g/m^3 、雲厚 $2,500 \text{ m}$ のていどが標準と推定されるので、そのときは全雲水量は 40 mg となり測定に十分な量である。

ポンプの性能には効率と重量の関係で制約があり、 5 l/min とした。

以上のことから現状では次の仕様となった。

i) 雲粒捕捉部

形式 (1) カスケードインパクター段数 3

(2) バックアップフィルター段数 1

捕捉雲粒の直径 (期待値)

(1) 第 1 段 $10 \sim 25 \mu\text{m}$

第 2 段 $5 \sim 10 \mu\text{m}$

第 3 段 $2 \sim 5 \mu\text{m}$

(2) 第4段 2 μm 以下

各段にグラスファイバー濾紙つき金メッキ電極がある。

ii) 吸引ポンプ流量 5 ℓ/min

電源 6 V (アルカリ単三4本)

iii) 水分検出部

誘電率測定形式

感度 1 mg

最大測定量 100 mg

出力 DC 0~0.2 V

電源 DC 12 V (アルカリ単三8本)

iv) 信号変換および発振部

V-F 変換器

0~0.3 V を 130~1200 Hz に変換

搬送波 1687 MHz

出力 0.4 W

v) 重 量

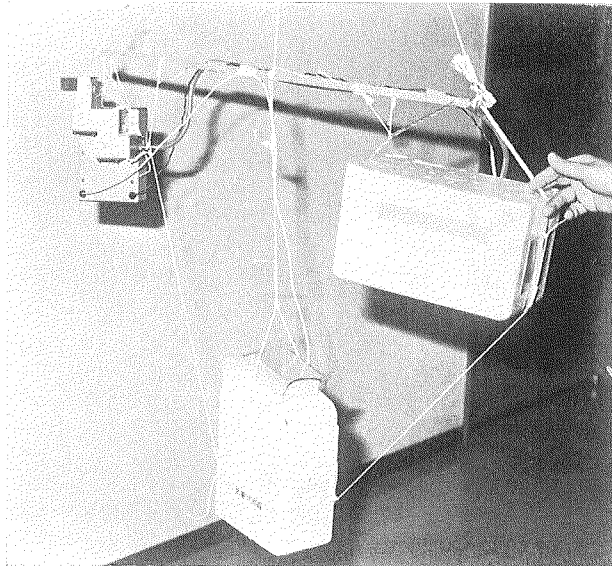
インパクター、電気水分計 650 g

ポンプ、電源 800 g

発振部 500 g

計 1950 g

飛揚の際には第11図のようなとりつけ方で、カスケードインパクターと電気水分計を組



第11図 左側よりカスケードインパクター、発振器、ポンプと電源電池の入ったボックス

み、電源の電池類とポンプを一体とし、またやや下方に発振部をそれぞれ独立につりさげた。

VI. あとがき

気球によるカスケードインパクト方式は雲水量の鉛直方向の積算値について精度のよい測定ができると期待されるので、放射特性などと関係づけるときには有効である。

今回の試作を通して今後試行すべきことがらが次の様に考えられた。

1) 同一粒径の粒子でも、インパクトのステージに捕捉される粒子と、捕捉されずに次段のステージで捕捉される粒子があるため、測定された粒径分布が重複している。今後この分布の重複をできるだけ小さくさせるようにインパクトを改良する必要がある。

2) 第4段は吸引の抵抗にならない構造に改良する必要がある。

3) 各ステージの水量—電圧特性をより均一化し、かつ検定作業を簡易化するために、グラスビーズパック固型フィルターに電極を蒸着する形式を検討する必要がある。この方が製作および取扱いの面で容易になると考えられる。

4) 第3, 4段目は捕捉水量が少ないので水晶振動子を用いるのも一策と考えられる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり多くの助言と協力をいただいた国立極地研究所の山内恭博士、川口貞男博士、ゾンデに必要な精度の決定について多くの助言をいただいた本研究所の藤吉康志博士、ならびに貴重な資料を提供して下さった気象庁気象研究所の伊藤朋之博士、松尾敬世博士、村上正隆博士に深謝の意を表す。

この研究は昭和58, 59年度文部省科学研究費補助金試験研究(課題番号58840016 研究代表者若浜五郎)によってなされた。

文 献

- 1) Welch, R. M., Cox, S. K. and Davis, J. M. 1980 Solar Radiation and Clouds, Meteorological Monographs 29, Amer. Meteor. Soc. 96 pp.
- 2) Fuchs, N. A., 1964 The Mechanics of Aerosols, Pergamon Press, New York, 154 p.
- 3) Marple, V. A. and Liu, B. Y. H. 1974 Characteristics of Laminar Jet Impactors, *J. Envir. Sci. Tech.*, **8**, 648-654.
- 4) Wahi, B. N. and Liu, B. Y. H. 1971 The Mobility of Polystyrene Latex Particles in the Transition and the Free Molecular Regimes, *J. Colloid Interface Sci.*, **37**, 374-381.
- 5) 木村忠志 1969 積雪含水率計の小史, 雪氷, **31**, 104-107.
- 6) 一条文二郎 1960 IB回路法 電気式水分計, 日刊工業新聞社, 東京, 270-298.

Summary

Measuring liquid water contents for varying droplet sizes is important to understand the effect of clouds on solar and earth radiation. We manufactured a sonde measuring the vertical distribution of liquid water content for the classified droplet sizes.

The formula of the sonde manufactured as a trial is a cascade impactor in which an

aerosol sample is drawn through a series of successively smaller orifices with a collection surface placed perpendicular to the direction of flow. The merit of the cascade impactor is that the total amount of liquid water on the all collection surface is the value of almost all cloud droplets captured by absorption.

Numerical experiments were made to investigate how many stages of the impactor and the size range of the captured droplets are needed to estimate the characteristics of cloud radiation. As shown in Tables 2 and 3, the results indicate that the accuracy better than 10% can be obtained for reflectivity, transmissivity coefficient and emissivity when the stage number is four with the minimum and maximum droplet radii of $2\ \mu\text{m}$ and $10\ \mu\text{m}$, respectively. Therefore, we manufactured a light and small cascade impactor with four stages shown in Fig. 4. The size distribution measured by this cascade impactor is shown in Fig. 5. The diameter of droplets was $8\sim 25\ \mu\text{m}$ at the first stage, $3.5\sim 11\ \mu\text{m}$ at the second stage, $1.5\sim 6.5\ \mu\text{m}$ at the third stage. The final stage collects all the smaller droplets which escape from the three stages of the impactor.

A moisture meter using a method of measuring dielectric constants was adopted to detect liquid water contents at each stage. The electronic circuit and the structure of the electrode are shown in Figs. 6 and 7. The droplets impacted at the stages permeate the filter paper which is fixed on the electrode. The moisture is measured as a dielectric constant by the electrode and transformed into electric signals, which are sent out to the ground.