

濾紙法による雨滴分布の測定

福 士 清 造*

The Size Distribution of Raindrops by Filter Paper Method.

by *Seizo FUKUSHI*

Experimental data relating to drop-size distribution in rain are examined by means of the filter paper method. Measurement by Toyo's filter paper No.1 or No.3 with 18.5 cm diameter have led fraction of total volume reaching ground and fraction of total volume in air comprised by drops. The filter paper exposed from three to fifteen seconds in rain. It is shown that the drop-size distribution in air is in accordance with the Best's equation and measuring curves of drop-size distribution reaching ground is approximately agreement with Laws and Parson's distribution.

1. ま え が き

降雨中に占める雨滴の空間含水量，空間粒度分布および着地粒度分布等については，国外ではこれまでいくつか報告がなされている¹⁾²⁾。しかし国内では雨滴の測定法に関するもの³⁾や雨滴の測定装置に関する報告はあるが雨滴の粒度分布や着地百分率分布に関する報告には，降雨量に対する具体的な数量が示されてなく，レーダーによる雨滴の反射係数として概略値を述べたものはかなり見られる。従って我が国では雨滴の粒度分布等については Laws and Parsons の測定値が引用されてきた。

本論文は濾紙法を用いて行った雨滴の測定の方法を述べ，測定した濾紙の雨滴の痕跡から雨滴の分布形および分布の関係式を導出し，既に報告されている雨滴の分布式や分布形との比較を行った。その結果は雨滴の空間粒度分布の式において Best が定数と定義している n が指数関数で表わされることおよび雨滴の着地百分率分布形は Laws and Parsons の測定した分布形とほぼ等しい形が得られた。

2. 測 定 法

雨滴の粒度分布を測定する方法は次に述べる理由から濾紙法を採用した。つまり特別な装置とか器具がいらないこと，測定が簡単であること，測定後の痕跡を調べるのが比較的容易であること，および測定精度も悪くないこと等から選ばれた。測定に使用した濾紙

* 理工学部電気工学科講師 電波工学

は東洋濾紙製 No.1 および No.3 (主として No.3) の直径 18.5cm 円形濾紙であり、この濾紙にメチルブルーの粉末をガソリンで溶いてしみ込ませ乾燥させたものを用意した。雨滴の測定に先だって大きさの分った雨滴模型である水球を作り、高さ約15mの所から落下させて濾紙に受け、その着色した痕跡の大きさを測定して、濾紙の痕跡と水球の直径との関係を調べて較正曲線を作った。その結果をグラフにしたのが図1である。

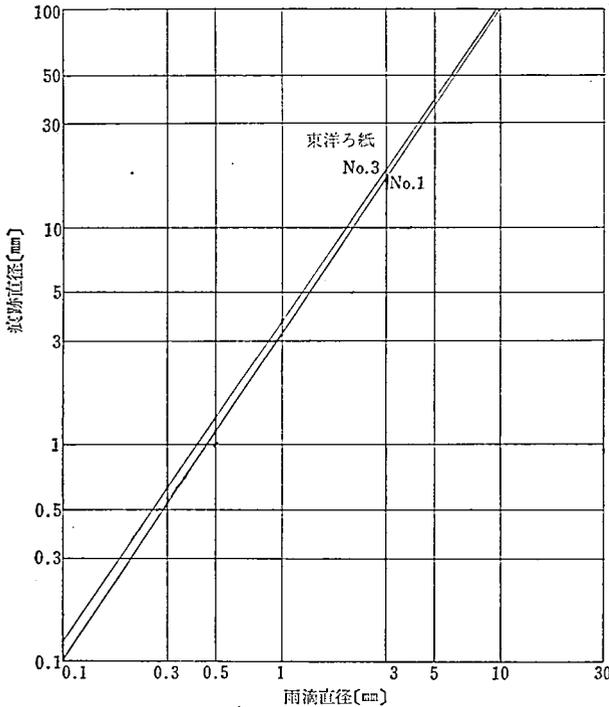


図1 雨滴直径と痕跡直径との関係

雨滴の測定にあたって、濾紙は台紙の上に貼り、その上に覆いの紙を乗せておき、測定と同時に上の紙を取り雨滴を受ける。所定の時間が来たらまた紙で上から濾紙を覆うようにする。雨滴を受けるための露出時間は降雨強度に応じて変え3秒から15秒までの時間を秒時計で計る。従って一人が濾紙を持ち、他の一人が秒時計を見て合図をする。露出時間の設定は、露出時間を長くすると雨滴の痕跡が重なってしまう恐れがあること、および降雨の状態が変化することも考えられるので、あらかじめ雨滴が重ならない程度の時間を決めておく、すなわち降雨の少ないとき(約0~3mm/hr)は15秒、中位いとき(約3~6mm/hr)

は5秒、それ以上のときは3秒という具合にして求めた。

濾紙の大きさを直径18.5cmの円形紙にしたのは、受水面積が大きい方が雨滴の分布の確率誤差が小さくなると思われたからである。

すなわち普通の雨量計の場合の測定誤差 E_c は

$$E_c = \frac{k}{D} \sqrt{\frac{m}{t}} \dots\dots\dots(1)$$

で表わされるとされている。ここで k , m は係数, D は受水面積, t は単位時間。雨量計の受水面積が直径20cmの円形の時誤差は ± 0.2 mm と報告されている⁴⁾。しかし濾紙の場合は雨量計と同等に論じられない、式(1)から推定して濾紙の面積が大きい程誤差が少ないとすれば、大きい濾紙の方が良いことになる。しかし濾紙の面積が大きくなると雨滴の痕跡数が膨大になり、雨滴を集計するのに相当骨が折れるので18.5cm円形濾紙を選んだ。

濾紙の痕跡の大きさを調べるにはプラスチックの薄い板の上に雨滴の直径が表2に区分したように大きさに応じて順々に線を引き、これを物差しにして読み取るようにした。測定する雨滴の痕跡は円形だけでなく、楕円形、星形および二個または三個と痕跡が重なったものが出る。これらの痕跡を調べるには楕円形のものには長径と短径の平均値を、星形のものには突出した部分を除いて直径を読み取る。二個または三個と重なったものは重なって

ない部分の形状から推定して円形を求めて直径を読み取るようにした。このほかに降雨強度が15mm/hr以上のものは痕跡が幾重にも重なり合って判別出来ないものもあるので除外してある。また風の強い日は痕跡が飛び散り易いので測定は行わなかった。

雨滴の粒度分布は降雨の状態により変化する。つまり雨が降り始めの頃は比較的粒径の大きな雨滴が多く、雨の降り終りの頃には粒径の小さな雨滴が多く分布することは周知のことである⁵⁾。従って雨滴の測定する時刻は出来るだけランダムに行うようにした。

3. 測定結果

雨滴を測定した期間は昭和46年9月より昭和49年3月までである。測定場所は東京都日野市郊外の外摩丘陵にある明星大学の構内である。測定した濾紙は東洋製濾紙 No.1 および No.3 (主として No.3) を併せて230枚である。

濾紙の痕跡は雨滴の直径にして0~0.25, 0.25~0.50mmのように0.25mm間隔にして分類した。この分類からもとめた落下雨滴の粒数の1m²/secあたりの粒数(n_i)を求め、各雨滴の体積(V_i)を乗じて降雨強度(R)を出し、更に雨滴の落下速度(v_i) (Kinzerの値⁶⁾を用い、一部は内挿法にて求めた)で粒数を割り、空間含水量(W)を求めると

$$W = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{n_i}{v_i} V_i \quad [\text{mm}^3/\text{m}^3/\text{sec}] \quad \dots\dots(2)$$

のようになる。降雨強度(R) [mm³/m²/sec] に対する空間含水量(W) をグラフにしたの

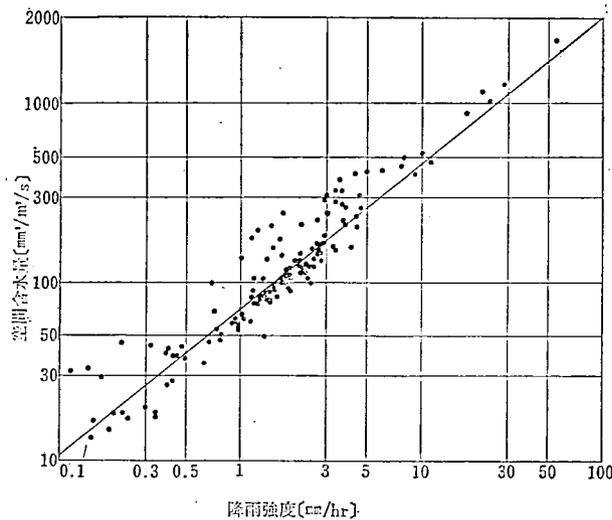


図-2 降雨強度に対する空間含水量

が図2である。この図2から降雨強度(R)に対する空間1m²/secあたりの含水量(W)を関係づけてみると、次のような近似式が成り立つ

$$W = CR^B \quad [\text{mm}^3/\text{m}^3/\text{sec}] \quad \dots\dots(3)$$

ここで降雨強度(R)をmm/hrで表わすと、グラフの直線から求めたCは71, Bは0.864になる。濾紙から求めたすべての雨滴の着地百分率分布を、表1に示した範囲の降雨強度別に区分して、着地百分率分布の平均をとり、この値を降雨強度別の平均値として用いた。平均降雨強度は Laws and Parsons のデータと比較するために都合が良いように選んだ。

表1 降雨強度の分類

降雨強度範囲 [mm/hr]	平均降雨強度 [mm/hr]
0—0.5	0.25
0.5—1.0	0.75
1.0—1.5	1.25
1.5—2.0	1.75
2.0—3.0	2.50
3.0—7.0	5.00
7.0—10.0	8.50
10.0—15.0	12.50

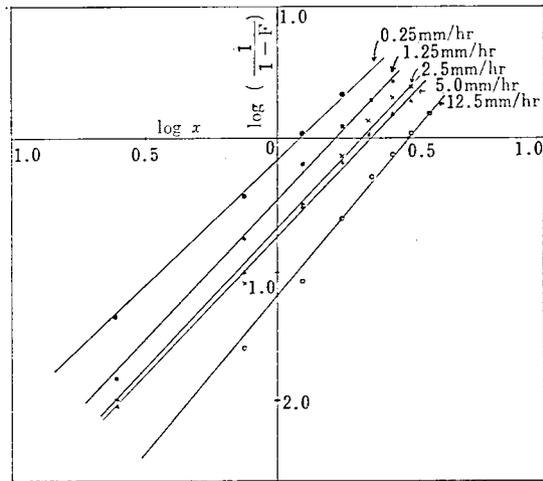


図-3 雨滴直径xに対する $\log \log \left(\frac{1}{1-F} \right)$

雨滴の痕跡粒数の $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ に相当する着地百分率分布を求めて、雨滴直径が x よりも小さい雨滴の体積の百分率を F とし、 F を次の式のような関係に仮定すると

$$1-F = \exp\left[-\left(\frac{x}{a}\right)^n\right] \quad \dots\dots(4)$$

$$n = AR^P \quad \dots\dots(5)$$

ここで A, P は係数である。測定データから $\log \log(1/1-F)$ に対する $\log x$ の関係を図3のようにグラフに描くと、降雨強度別の直線が得られる。そこで更に

$$\log \log\left(\frac{1}{1-F}\right) = n \log x - n \log a + 0.36 = nX + E \quad \dots\dots(6)$$

次に $nX + E$ を降雨強度の項を含めた指数関数として表わすと、つまり

$$\alpha X + E = \alpha \cdot R^\beta \cdot x + \xi \cdot R^\gamma \quad \dots\dots(7)$$

とすれば、 α は2.066、 β は0.0522、 ξ は1.190、 γ は0.189のように求まる。更に式(4)(5)から

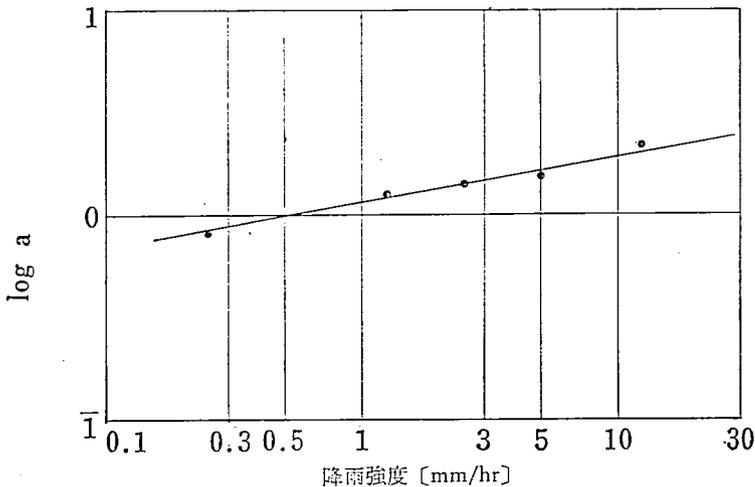


図-4 降雨強度に対する $\log a$

表 2

降雨強度 [mm/hr]	空間含水量 [mm ³ /m ³ /sec]				空間粒数 [drop/m ³ /sec]			
	0.25	1.25	2.5	12.5	0.25	1.25	2.5	12.5
0—0.25	2.392	2.745	3.720	6.545	2392	2745	3720	6545
0.25—0.50	5.428	8.568	11.940	7.480	196.6	310.4	432.6	271.6
0.50—0.75	5.816	13.064	18.780	25.685	45.51	102.2	146.9	200.9
0.75—1.00	4.512	15.028	22.860	36.410	12.86	42.85	65.18	103.8
1.00—1.25	2.727	14.339	25.050	48.730	3.659	19.23	33.60	65.37
1.25—1.50	1.334	11.764	19.605	55.825	0.9802	8.644	14.40	41.02
1.50—1.75	0.5405	8.474	17.175	61.050	0.2405	3.772	7.645	27.17
1.75—2.00	0.1817	5.372	12.495	61.325	0.0526	1.556	3.620	17.76
2.00—2.25	0.0529	3.034	8.265	57.365	0.0105	0.6040	1.645	11.41
2.25—2.50	0.0108	1.521	4.980	50.710	0.00154	0.2169	0.7100	7.230
2.50—2.75	0.0025	0.6800	2.730	41.855	0.00026	0.0718	.02882	4.419
2.75—3.00		0.2720	1.365	32.505		0.0218	0.1097	2.612
3.00—3.25		0.0935	0.6300	23.760		0.0058	0.0394	1.487
3.25—3.50		0.0340	0.2550	16.390		0.0016	0.0126	0.8143
3.50—3.75		0.0085	0.1050	10.560		0.0003	0.0042	0.4234
3.75—4.00			0.4500	6.435			0.0014	0.2112
4.00—4.25				3.685				0.1002
4.25—4.50				1.925				0.0439
4.50—4.75				0.9900				0.0191
4.75—5.00				0.4400				0.0072
5.00—5.25				0.3300				0.0046

$$\log a = \log A + P \log R \quad \dots\dots(8)$$

$$= \frac{-E + 0.36}{n} \quad \dots\dots(9)$$

のようになり、 $\log a$ に対する降雨強度 R の関係をプロットしてみると図 4 となる。この図 4 より係数 A および P を求めると A は 1.114、 P は 0.228 となること分かる。上記の式から求めた n 、 a および w を用いて、雨滴の空間百分率分布を計算した結果が表 2 である。また降雨強度が 2.5mm/hr の場合に雨滴直径に対する空間粒度分布の関係を筆者の値と Laws and Parsons および Best の値とを比較したものを図 5 に示してある。雨滴の痕跡から求めた降雨強度に対する着地百分率分布を Laws and Parsons の測定値と比較するために表わしたのが図 6 (a)(b)(c)(d) である。

4. 検 討

降雨強度に対する雨滴の空間含水量は Laws and Parsons や Best の数値に比べてみると、式(3)において Laws and Parsons は C は 72、 B は 0.867 となっている。また Best は 6 例の平均を取って C は 67、 B は 0.846 になることを報告している。したがって筆者の C は 71、 B は 0.846 であるから三者とも大体一致していることがわかる。式(4)の n は Best

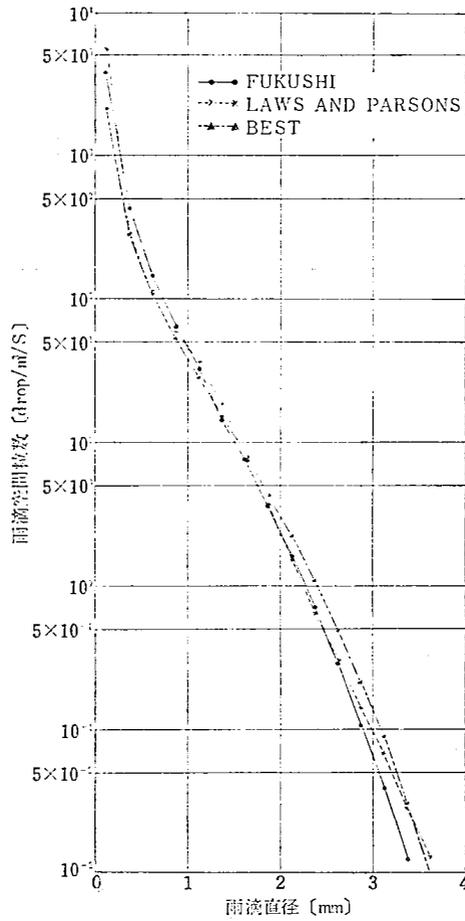


図-5 2.5mm/hr 雨滴の空間粒度分布曲線

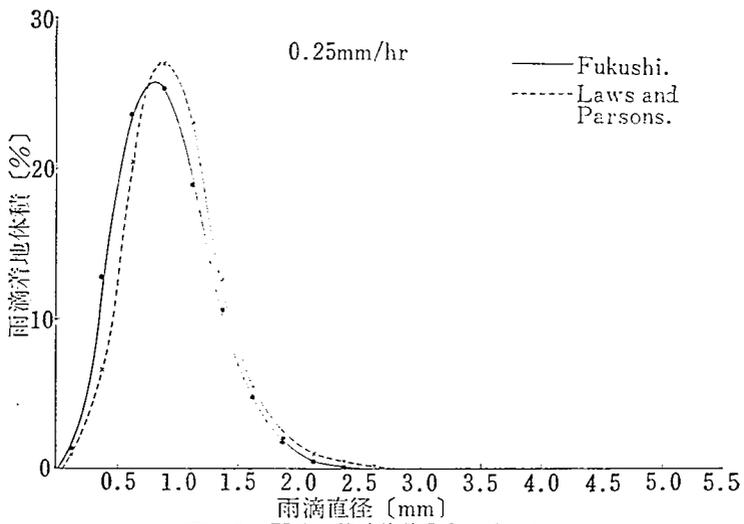
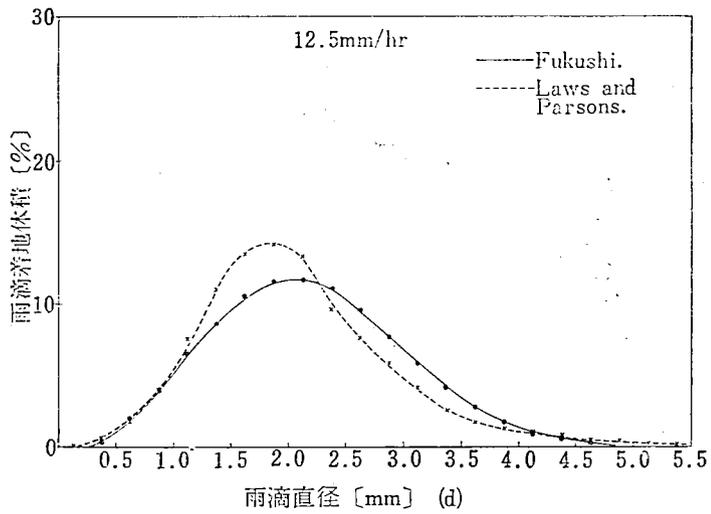
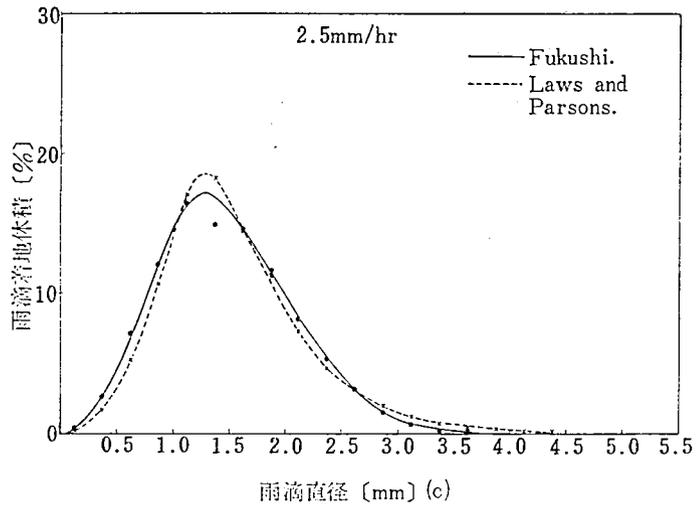
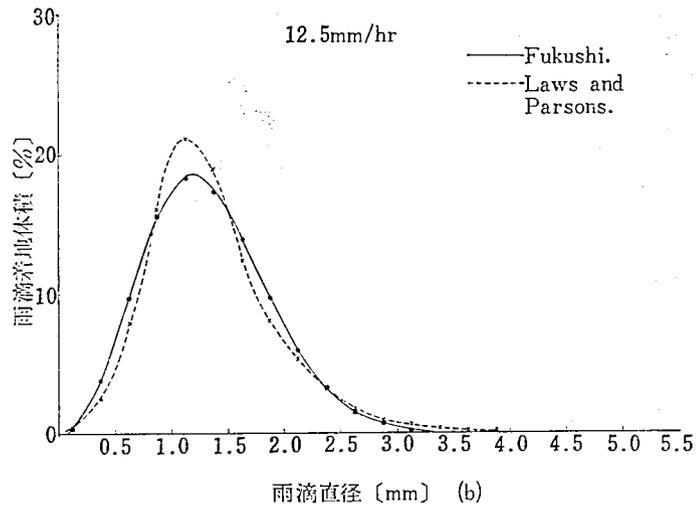


図-6 雨滴の着地体積分布曲線 (a)



によると降雨強度に関係のない数(平均値として2.25を与えている)と定義している。しかし筆者の測定データーを用いて $\log \log(1/1-F)$ 対 $\log x$ の関係を求めると、図3のように降雨強度がパラメーターである直線で表わされることが分る。すなわち $n = \alpha \cdot R^\beta$ のように降雨強度の項を含めた指数関数で表わした方が測定値を良く説明できる。図4からは降雨強度が 5.0mm/hr ではプロットした点が直線からずれていること、および 12.5mm/hr ではその n の値すなわち直線の傾斜が他の値よりも大きくなっていることが分る。これらは雨滴の測定データーが他のものよりも少なかったために偏りが出来たものと思われる。表2からは雨滴の空間粒度分布は各降雨強度とも、粒径の小さいもの、つまり小さい雨滴程その数が常に多いということがいえる。このことは Best も報告している。しかし Laws and Parsons の測定結果をみると 25mm/hr 以上では雨滴直径が 0~0.25mm の分布は零になっている。これは 0.1%以下の数値を省略しているのか疑問がある。図5の雨滴の空間粒度分布の比較において筆者の値、Laws and Parsons および Best の値はいずれも一致しないことが分る。しかし雨滴の小さい方と大きい方で差があるが全体的には大した違いはないといえる。またこの図からは雨滴の空間粒度分布は片対数グラフに描いた場合に曲線で表わされるので、分布関数を対数直線で表わすのは無理であることがわかる。次に雨滴の着地百分率分布に関しては筆者の測定した値と Laws and Parsons の値とを比較した図一6の結果は(d)の 12.5mm/hr での分布はかなり違いがある。これは筆者の測定したデーターが他の降雨強度に比べて少ないせいもある。その他の分布形については大体同じと見てよい。

5. む す び

濾紙法を用いて測定した雨滴の痕跡から求めた空間含水量、空間粒度分布および着地百分率分布等は Laws and Parsons や Best の測定したものとほぼ同じ結果が得られた。雨滴の空間粒度分布は降雨強度に関係なく雨滴の直径の小さいもの程数が多いといえる。また空間粒度分布は Best の式(3)において n を降雨強度の項を含む指数関数で表わした方が分布を良く表わすことができる。したがって空間粒度分布を対数直線で近似することは無理がある。

6. 謝 辞

最後に本研究を行う機会を与えて下さった本学木名瀬教授、常に御指導を賜わる明大築地教授およびいつも激励し助言を与えて下さる東海大森屋助教授に感謝の意を表します。またデーター整理などに関しては卒研究生真鳥幸雄君その他の学生諸君の協力を得たことを付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) J.O.Laws, D.A.Parsons. "The relation of raindrop-size to intensity." Trans, American Geophysical Union. VOL.24, p.452, 1943.
- 2) A.C.Best. "The size distribution of raindrops." Quarterly Journal Royal Meteorology Society, VOL.76, p.16, 1950.
- 3) 高橋喜彦, "細雨の雨滴の測定について." 気象集誌, VOL.21, p.111, 1943.
- 4) 矢島幸雄, "雨量計の口径の大きさについて." 気象集誌, VOL.31, p.35, 1953.
- 5) 藤原美幸, "レーダー気象のための雲物理学." 気象研究ノート, VOL.90, p.228, 1957.
- 6) R.Gunn, G.D.Kinzer. "The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air."

- Journal of Meteorology, VOL. 6, p. 243,
7) J. S. Marshall, W. Mck. Palmer. "The distribution of raindrops with size." Journal American
Meteorology Society. VOL. 5, p. 165, 1948.

(昭和50年1月9日受理)