

降下ばいじん量と降水量の間の関係について

佐野 悞*・太田 洋*・市川 俊子**・坪井 勇**

Relation between the Dust-fall and the Rain-water Quantity Both Measured by a Deposit-gauge Assembly

Isamu SANÔ, Hiroshi OHTA,
Toshiko ICHIKAWA and Isamu TSUBOI

Based on the data acquired from dust-fall measurement during the period April 1982—March 1983, we have considered the relation between the dust-fall (M , $t/km^2 \cdot mo$) and the rain-water caught simultaneously (V , lit/mo); although the data utilized are only part of those that have been collected in the last 10 years or more and subsequent measurement are in progress, we believe our study to be interesting enough to report now.

The findings are: (1) A plot of M/V against V is of hyperbolic shape, whereas that of M/V against $1/V$ gives a straight line the slope of which is approximately equal to the annual average of M . (2) If we take M as ordinate and V as abscissa, we obtain a nearly linear relation which might be expressed by an equation $M = m + \alpha V - \beta V^2$, where m is a constant independent of rain, while α and β are constants relating to the collection efficiency of a rain-drop for a dust-particle. (3) Using the values of α and β determined by the method of least squares, the efficiency as averaged over the dust-fall measurement period has been estimated to be of the order of magnitude 10^{-2} or so under some such meteorological conditions as rain-fall intensity 0.1 to 1.0 mm/hr and rain-drop diameter 0.5—1.0 mm.

はじめに

大気汚染の状況を調査する方法の一つとして降下ばいじん計によるばいじん量の測定があるが、この方法は世界的に流布し、我が国でも全国的に利用されている。春日井市でも多年この方法で調査を実施、その成績を公害防止対策の資料としているが、今回、我々は春日井市内設置の降下ばいじん計による降下ばいじん量と降水量の測定値の間の関係について考察し、若干の興味ある結果を得たのでここに報告する。

調査成績

表1に春日井市内各調査地点(No.1～No.16)における降下ばいじん総量^{*1}(M , $t/km^2 \cdot 月$)と降水量(V , $l/月$)の測定値を示した。地点No.1及び2でばいじん量が多いのは工場に近いためであろうと見られ、No.15で少いのは市内ではあるが、閑静で緑の多い住居地区にあるた

めと思われる。No.13でばいじん量が多いが、交通量の多い交差点に近いことが原因であろう。No.12のばいじん量が多い理由は明らかでない。

降水量が増大するにつれ、ばいじん計内のばいじん濃度は減少するであろうと思われるので縦軸及び横軸にそれぞれ $\frac{M}{V}$ 及び V を目盛って表1をグラフ化すると図1の如くなる。紙面の関係上、若干の場合を例示するに止めたが、他の場合でも双曲線的傾向が見られるのでこれを手掛りにして以下の通り考察を行った。

考察(Ⅰ)——ばいじん量と降水量の測定値の間の関係(1)

図1を、横軸に $1/V$ を選んで描き改めると図2の如くなるが、この場合、調査16地点を通じ、相関係数0.8以上(危険率1%以下)であることが認められたので帰帰式

* 環境工学研究所

** 春日井市環境分析センター

*1 溶解及び不溶解両成分の合計値。なお、ばいじん計の形状、寸法及び使用法さらにばいじん量や降水量の測定法などはすべて規格・法定通りにつき、記述を省略。

表1 調査成績(昭57年度)

M: 降下ばいじん量 (t/km²・月) V: 降水量 (l/月)

調査地点	年月	57/4	5	6	7	8	9	10	11	12	58/1	2	3	平均 (M)
		1	M	7.1	3.4	3.4	5.6	—	—	2.6	4.3	3.7	3.9	5.5
	V	8.7	3.7	8.1	16.2	—	—	2.8	6.0	1.6	1.7	2.1	9.2	6.0 ₁
2	M	4.4	3.8	3.6	5.4	—	—	2.2	3.2	2.8	2.5	4.0	3.4	3.5 ₃
	V	8.6	3.3	7.5	18.7	—	—	3.2	6.0	1.4	2.0	2.2	8.3	6.1 ₂
3	M	4.4	2.8	2.4	4.1	—	4.3	1.4	2.8	2.8	1.9	3.0	3.0	2.9 ₉
	V	8.8	3.8	7.7	15.4	—	23.3	2.9	6.0	1.3	1.8	2.1	8.7	7.4 ₄
4	M	3.3	3.6	—	4.0	4.0	3.3	1.3	2.1	2.2	2.7	4.0	2.5	3.0 ₀
	V	8.5	3.4	—	13.3	23.6	23.5	2.5	6.6	1.4	2.0	2.0	7.9	8.6 ₁
5	M	3.5	3.0	2.5	3.6	4.1	—	1.5	2.3	1.5	2.4	4.5	2.5	2.8 ₅
	V	8.7	3.8	8.0	14.0	23.1	—	2.9	6.4	1.3	1.9	2.2	8.9	7.3 ₈
6	M	3.2	3.1	3.9	3.8	—	—	1.3	2.1	1.4	1.1	2.1	2.4	2.4 ₄
	V	9.4	4.5	8.9	14.2	—	—	3.6	7.1	2.4	2.7	3.0	9.8	6.5 ₆
7	M	3.5	3.2	3.3	4.0	—	3.8	1.9	2.5	1.8	1.6	2.9	3.0	2.8 ₆
	V	9.5	4.4	8.8	15.1	—	23.8	3.1	6.5	1.6	1.8	2.2	9.0	8.7 ₁
8	M	4.0	4.5	3.3	4.1	—	3.6	1.8	2.5	1.8	1.5	2.7	3.2	3.0 ₀
	V	9.2	4.2	9.2	12.9	—	19.6	3.4	6.9	1.8	2.0	2.3	9.8	7.3 ₉
9	M	3.1	3.4	3.3	4.0	—	3.5	1.6	2.1	1.6	1.3	2.2	2.6	2.6 ₁
	V	9.2	4.7	9.4	14.0	—	22.5	3.5	7.1	1.4	2.1	2.4	9.2	7.7 ₇
10	M	3.2	3.1	3.4	4.2	—	2.5	1.5	1.9	1.3	1.5	2.8	2.8	2.5 ₆
	V	8.1	3.5	9.2	12.0	—	16.8	3.1	7.0	1.0	1.5	2.1	9.5	6.7 ₁
11	M	3.6	3.4	2.9	—	2.7	3.2	1.4	1.9	1.5	1.1	2.1	3.3	2.4 ₆
	V	9.6	3.6	7.5	—	17.5	20.3	2.4	6.6	0.8	1.6	1.9	8.2	7.2 ₇
12	M	2.9	3.4	4.2	3.3	5.2	4.1	1.8	1.8	2.5	3.5	—	2.5	3.2 ₀
	V	8.0	6.1	10.4	14.9	20.8	21.3	3.2	8.0	2.0	2.3	—	9.3	9.6 ₆
13	M	5.5	3.8	3.6	4.5	2.8	3.5	2.3	3.0	—	2.8	4.6	5.0	3.7 ₆
	V	11.1	4.7	9.2	14.7	19.5	21.2	3.3	3.0	—	1.8	1.9	8.3	8.9 ₇
14	M	4.0	2.6	2.6	3.0	4.4	3.0	1.6	1.9	1.6	1.7	1.9	2.8	2.5 ₉
	V	11.0	4.8	8.6	13.7	20.5	18.8	3.3	7.4	1.8	2.0	2.2	8.4	8.5 ₄
15	M	2.5	2.2	1.9	1.9	—	2.0	—	—	1.3	1.3	2.5	3.3	2.1 ₀
	V	11.3	5.1	7.7	13.2	—	21.1	—	—	2.3	2.2	2.4	8.5	8.2 ₀
16	M	3.4	3.9	3.6	3.4	—	3.4	1.8	2.7	2.0	1.5	2.8	2.8	2.8 ₄
	V	7.8	3.0	7.2	14.0	—	22.5	2.7	6.3	1.0	2.0	2.2	8.6	7.0 ₃

$$\frac{M}{V} = k \frac{1}{V} + \Delta \quad (1)$$

の勾配 (k, t/km²・月) 及び切片 (Δ, t/km²・月) を求めたところ、結果は表2の通りになった。表2には、な

お、各地点の年間平均のばいじん総量 (\bar{M})*²が示してあるが、式から察せられる如く勾配 (k) と年間平均ばいじん量 (\bar{M}) とはほぼ一致している*³。

*2 表1参照

*3 k は次式 $k = \frac{(\sum M_i V_i)(\sum V_i) - (\sum M_i)(\sum V_i^2)}{(\sum V_i)^2 - n \cdot (\sum V_i^2)}$ によって与えられるので一般に $k < \bar{M}$ の関係にある

(n: 年間調査月数, 欠測がない場合12)。

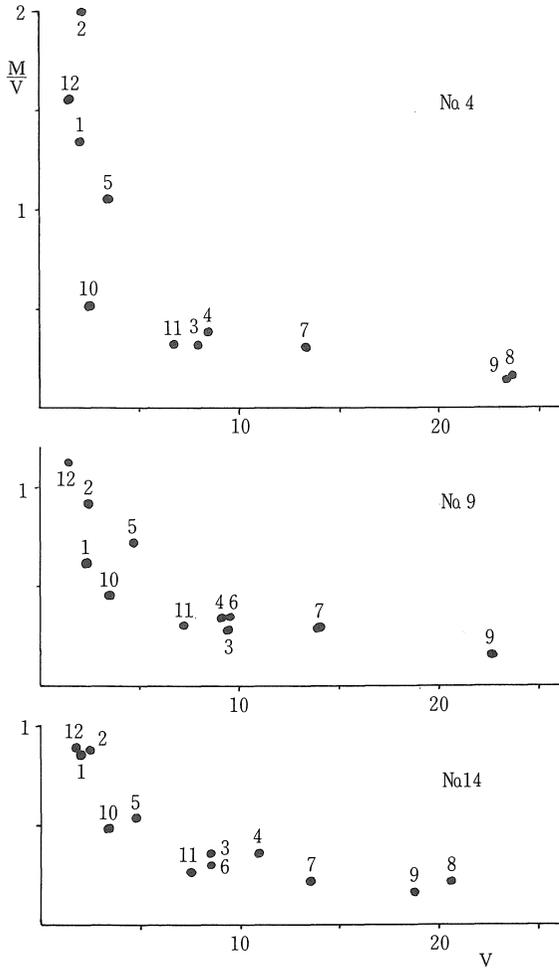


図1 ばいじん濃度 ($\frac{M}{V}$, $t/km^2 \cdot l$) と降水量 (V , $l/月$) の間の関係 (点につけた数字は月を示す)

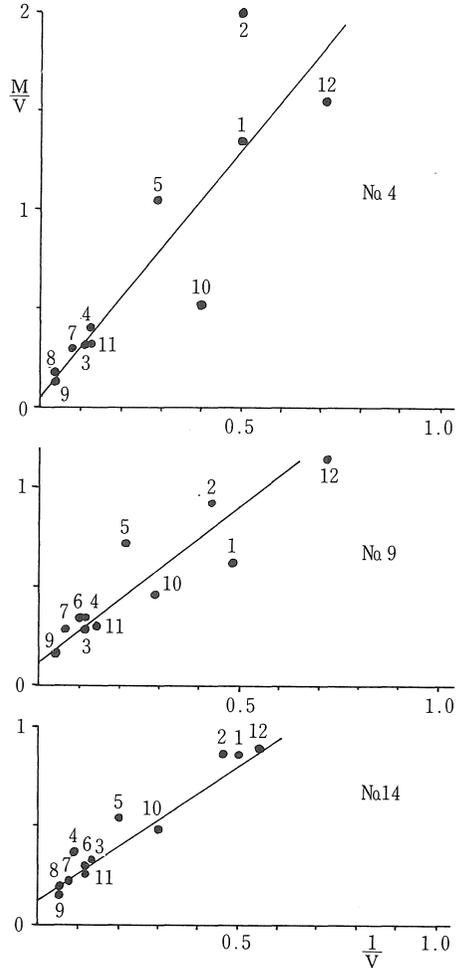


図2 回帰式 $\frac{M}{V} = k \frac{1}{V} + \Delta$ の図示 (表2 参照)

考察 (II) —— ばいじん量と降水量の測定値の間の関係(2)

表1のばいじん量と降水量の測定値の間の関係を、縦軸にばいじん量 (M)、横軸に降水量 (V) を採って地点別にグラフ化すると図3の通りになる。図3には、図1及び2と同じ地点の場合を示したが、他の地点についても放物線関係の存在することが見られるので、これらに対し、式(2)

$$M = m + \alpha V - \beta V^2 \quad (2)$$

を適用し、最小2乗法で m 、 α 及び β を計算した。結果は表3の如くである。

m はばいじん量 (M) の中の、降水量 (V) に関係のない部分を表わし、従って降雨に関係なくばいじん計内に降下したばいじん量に他ならないが、表3によると、

表1と同様に地点No.1, 2及び13で多く、No.15で少いことなどが認められる。No.6で際立って少いが、これについては原因不明である。

以上を要するに、春日井市全域を通じ降下ばいじん総量と降水量の測定値の間に式(1)或は詳しくは式(2)の関係が成立し、式中の m 及び $2\beta/\alpha$ の数値は表3の平均値の通りと考えてよいであろうと思われるので、以下では、この観点に沿って考察が進めてある。

考察 (III) —— 降雨によるばいじんの洗い落とし式(2)の誘導

降雨によってばいじんは洗い落とされるが、その速度に対して次式¹⁾

$$-\frac{dn}{dt} = pn$$

表2 実測値からの年間平均ばいじん量(\bar{M})並びに
 回帰式 $\frac{M}{V} = k\frac{1}{V} + \Delta$ の勾配(k)と切片(Δ)

調査地点	M	k	Δ
1	4.4	3.6	0.14
2	3.5	2.7	0.14
3	3.0	2.2	0.10
4	3.0	2.6	0.05
5	2.9	2.3	0.08
6	2.4	1.1	0.20
7	2.9	2.1	0.09
8	3.0	2.2	0.11
9	2.6	1.8	0.11
10	2.6	1.9	0.10
11	2.5	1.9	0.08
12	3.2	2.2	0.11
13	3.8	3.6	0.02
14	2.6	1.6	0.12
15	2.1	1.9	0.02
16	2.8	2.4	0.06
平均	2.9 ₆	2.2 ₆	0.09 ₆

n : 空気中のばいじん粒子の濃度 (個/cm³)

t : 経過時間 (sec)

p : 洗い落とし係数 (1/sec)

が提出され、係数Pは下の如く与えられている*4。

$$p = \pi R^2 \varepsilon v N \tag{3}$$

R : 雨滴の半径 (cm)

ε : 雨滴対ばいじん粒子間の衝突効率

v : 雨滴の落下速度 (cm/sec)

N : 雨滴の濃度 (個/cm³)

従って経過時間 t におけるばいじん粒子の濃度 (n) は次式

$$\frac{n}{n_0} = e^{-pt}$$

n₀ : ばいじん粒子の初濃度 (個/cm³)

によって表わされるが、これをさらに書き換えて

$$\frac{\omega}{\omega_0} = e^{-pt} \tag{4}$$

ω_0 : ばいじんの初濃度 (g/cm³)

とすることもできる。表4に衝突効率(ε)の、I. Langmuir—B. J. Mason による計算値²⁾を掲げた。表4によると、直径4 μ m以下のばいじん粒子は雨滴によって洗い落とされる可能性が小さく、しかも雨滴は、實際上、直径1 mm以下の場合が普通であるから直径4 μ m以下

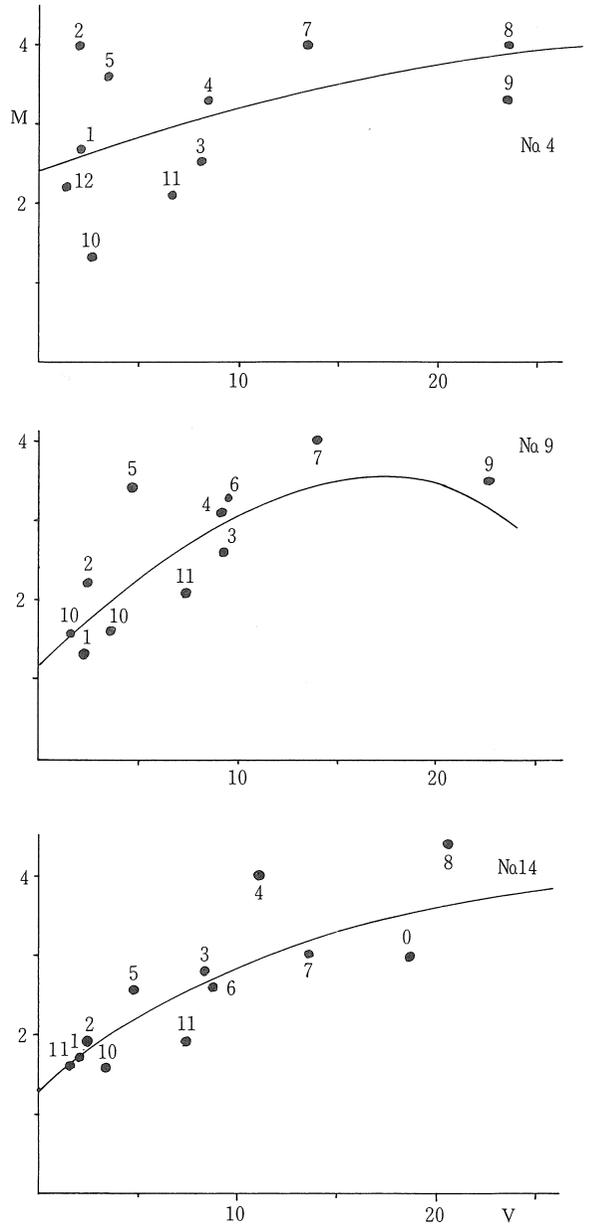


図3 ばいじん量 (M, t/km²・月)と降水量 (V, l/月) の間の関係 (曲線は表3の式 $M = m + \alpha V - \beta V^2$ を示す)

のばいじん粒子は雨滴によって殆んど洗い落とされることがないであろうと思われる。なお、水滴(直径1.0mm)と塩化アンモニウム煙粒子の間の衝突について実験し、煙粒子が直径0.7及び1.3 μ mの場合、衝突効率がそれぞれ0.03及び0.05と得られたとか水滴の代わりにアセトン滴(直径0.8mm)の場合には衝突効率0.00₅であったとか

* 4 雨滴にもばいじん粒子にも粒度分布があるけれどもこれを無視、それぞれ、均一と想定。

表3 $M = m + \alpha V - \beta V^2$ 中の m , α 及び β (計算値)

調査地点	m ($t/km^2 \cdot 月$)	α ($t/km^2 \cdot 月 \cdot l$)	β ($t/km^2 \cdot 月 \cdot l^2$)	$2\beta/\alpha \times 10^2$
1	3.4	0.20	0.003	3.0
2	2.8	0.10	(-0.002)	(-)
3	2.0	0.18	0.003	3.3
4	2.4	0.09	0.001	2.2
5	2.4	0.06	(-0.001)	(-)
6	0.6	0.39	0.012	6.2
7	1.6	0.25	0.007	5.6
8	1.5	0.34	0.012	7.1
9	1.2	0.26	0.007	5.4
10	1.2	0.37	0.016	8.6
11	1.2	0.33	0.012	7.3
12	2.6	0.00	(-0.004)	(-)
13	2.4	0.39	0.017	8.7
14	1.3	0.20	0.004	4.0
15	1.4	0.19	0.008	8.4
16	2.0	0.19	0.006	6.3
平均	1.8 ₇	0.19 ₆	0.008 ₃	5.8 ₅

表4 雨滴対ばいじん粒子間の衝突効率 (ϵ)

雨滴の直径 (μm)	ばいじん粒子* の直径 (μm)				
	4	6	8	12	16
200	0	0.001	0.183	0.510	0.698
300	0	0.014	0.276	0.572	0.730
400	0	0.10	0.358	0.615	0.756
600	0	0.225	0.435	0.675	0.800
800	0.04	0.315	0.495	0.710	0.820
1200	0.12	0.375	0.545	0.740	0.852
2000	0.14	0.355	0.525	0.730	0.836

*密度: $1 g/cm^3$

表5 降雨強度と強度定数

降雨強度 (mm/hr)	r (cm/sec)
1	$\frac{1}{3.6} \times 10^{-4}$
0.5	$\frac{5}{3.6} \times 10^{-5}$
0.2	$\frac{2}{3.6} \times 10^{-5}$

$$Q = \frac{V \times 10^4}{a}$$

a : 降下ばいじん計の漏斗の断面積 (cm^2) で、
実際上、 $706cm^2$

にあるので $V=7.6 l/月^*$ と置くことにより $7.6 \times 10^4 / 706 \times 30 \times 24 = 0.15mm/hr$ と推測されるが、他方、市消防署によると、57年度年間降雨量は $1548.0mm$ ($n = 12^{*3}$) と報告されているのでこれから計算すると平均降雨強度が $1548.0 / 12 \times 30 \times 24 = 0.18mm/hr$ と勘定でき、殆ど一致する*。

式(4)と式(5)から式(6)

$$\frac{\omega}{\omega_0} = e^{-p \frac{Q}{r}} \tag{6}$$

が得られるが、これに降雨量 (Q , $cm/月$) と降水量 (V ,

の結果が報告³⁾されている。

一方、降雨量 (Q , mm) は、降雨強度 (mm/hr) 一定の場合、降雨時間 (t , hr) に比例するので次の関係

$$Q = rt \tag{5}$$

が存在する。式中 r は強度定数で、その数値は例えば表5の通りである。

因みに春日井市内の年間平均降雨強度は月間の降雨量 (Q , $mm/月$) と降下ばいじん計の降水量 (V , $l/月$) の間の関係

* 5 表1の調査16地点の平均値

* 6 両者の差額が蒸発量であろうかと思われるが、以下、これを無視。

表6 雨滴の個数濃度(空気1m³中)*

降雨強度(mm/hr)	0.1	0.7	5.6
雨滴直径(mm) 2	2×10^{-4}	1×10^{-1}	3
1	5	30	105
0.5	30	30	105

* 気象の事典⁴⁾中のグラフ(片対数)からの筆者の読み取り値

表7 雨滴の落下速度⁵⁾

雨滴直径(mm)	落下速度(cm/sec)
2	596
1	390
0.5	208

l/月)の間の関係 $Q = V \times 10^3/a$ を代入すると

$$\frac{\omega}{\omega_0} = e^{-PV}, \quad P = \frac{10^3}{ra} \cdot p \quad (7)$$

となる。従って降雨による洗い落とし率は

$$\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = 1 - \frac{\omega}{\omega_0} = 1 - e^{-PV}$$

によって与えられ、洗い落とされるばいじん量は $K \cdot (1 - e^{-PV})$ と表されるので(K : 空気中の浮遊ばいじん量), 降下ばいじん総量(M)を次の如く書き下すことができる。

$$M = m + K(1 - e^{-PV}) \quad (8)$$

式(8)の右辺第2項を展開すると

$$M = m + K \left\{ PV - \frac{1}{2}(PV)^2 \right\} \quad (9)$$

となるが、式(9)は式(2)に他ならないのでこれらの式を比べると次の関係 $KP = \alpha, \frac{1}{2}KP^2 = \beta$, 従って式(10)

$$P = \frac{2\beta}{\alpha} = \frac{10^3}{ra} \cdot p \quad (10)$$

が得られる。

考察(IV) — 衝突効率(ϵ)の算出と式(9)の妥当性の検討

式(10)と式(3)から衝突効率(ϵ)の式(11)が導かれる。

$$\epsilon = \frac{2\beta}{\alpha} \cdot ra \times 10^{-3} / \pi R^2 v N \quad (11)$$

表8 衝突効率(ϵ)の計算値

降雨強度(mm/hr)	衝突効率(ϵ)	強度定数(r)	雨滴濃度(個/m ³)
1	1.07×10^{-2}	$\frac{1}{3.6} \times 10^{-4}$	35
0.5	0.94×10^{-2}	$\frac{5}{3.6} \times 10^{-5}$	20
0.2	0.75×10^{-2}	$\frac{2}{3.6} \times 10^{-5}$	10
	1.87×10^{-2} *		30
0.1	0.75×10^{-2}	$\frac{1}{3.6} \times 10^{-5}$	5

* 雨滴直径 0.5mm

式中の $2\beta/\alpha$ は表3から $5.85 \times 10^{-2} (10^{-3} \cdot \text{cm}^{-3})^{*7}$ と見出され、 r は表5に示した通りであるし、また a は実際上 $706 (\text{cm}^2)$ と測定されている。一方、雨滴の濃度(N , 個/ cm^3)は表6の如くに見積ることができ、落下速度(v , cm/sec)は表7によって与えられるのでこれらを代入して式(11)から ϵ を計算すると表8の通りになる。ただし、雨滴は、実際上、直径1mm程度のことが多いので $R = 0.5\text{mm}$ と置いてある。

表8によると、降雨強度1~0.1mm/hrで雨滴直径1~0.5mmの場合、衝突効率は0.01~0.02と算出され、表4のばいじん粒子が直径5~10 μm の場合に比べると、10分の1~数10分の1程度の大きさになっているが、これは57年度平均値と看做されるもので、現実の衝突効率はこの上下に或は高く或は低く散在するであろうと考えられる*⁸。一方、表4の衝突効率は、元来、雨滴対雨滴の場合について計算されたもので、この場合には付着率は1と設定してよいであろうが、一方がばいじん粒子の場合には、付着率は1より低く、特にばいじん粒子がタール性のものである場合にはことさらそうであろうと思われる。これらの事情を考えると表8の計算値が表4のそれより低目に出て当然であろうかと思われ、従って、式(9)には妥当性があるように考えられる。

* 7 地点13個の平均

* 8 表8は1ヶ月間を毎日降雨があるものとして計算した結果であるが、晴天・雨天の交じりを想定しても結果には殆ど狂いが現われない。例えば1ヶ月当り雨天の日を10日とすると平均降雨強度は $7.6 \times 10^4 / 706 \times 10 \times 24 = 0.45 \text{mm/hr}$ で、雨滴直径を1mmとすると衝突効率が 0.84×10^{-2} と算出される。

考察 (V) — 降雨によって洗い落とされる, 空気中の浮遊ばいじん量 (K) の推定

式(8)或は(9)の浮遊ばいじん量 (K, t/km²・月) は雨滴に捕収されて洗い落とされるものである。直径10μm以上のばいじん粒子*9は重力によって落下し, その量が式(2)中のmに他ならないが, 一方, 直径4 μm以下の粒子は殆んど雨滴に捕収されることがないので(表4), 直径がこれらの間の10~4 μm程度の粒子の浮遊量が即ちK値該当分であろうと思われる。

式(8)を書き換えると

$$K = \frac{M-m}{1-e^{-PV}}$$

となるので, $M-m = 2.9_4 - 1.8_7 = 1.0_7$ (表2, 3)及び $P = 2\beta/\alpha = 5.8_5 \times 10^{-2}$, $V = 7.6_0 \times 10^9$ などと置いて計算すると, 降雨強度0.1~1 mm/hr及び雨滴直径1~0.5 mmの場合に対し, $K = 3.0$ (t/km²・月) が得られる。

まとめ

降下ばいじん計で測定された降下ばいじん総量 (M, t/km²・月) と降水量 (V, l/月) の測定値の関係を検討して次の結果を得た。

1) 両者の間に式(1)の直線関係が成立し, 勾配は年間平均降下ばいじん量にほぼ等しい。

2) 尤も, 詳しくは, 次式

$$M = m + \alpha V - \beta V^2$$

が成立する。m, α 及び β の物理的意味を追究し, mは重力によって落下する程度の粗大粒子(直径10μm以上)のばいじん量を表わし, α 及び β は雨滴とばいじん粒子間の衝突効率に關係する係数であることを示した。

α 及び β の測定値から衝突効率の大きさを計算すると, 10⁻²見当の値が得られるが(表8), これは雨滴とばいじん粒子間の衝突効率であることから妥当なものではなからうかと考えられる。

3) なお, 降雨によって洗い落される, 空気中浮遊のばいじん量(粒子直径10~4 μm程度)を計算したところ, 3.0 t/km²・月が得られた。

引用文献

- 1) H. L. Green, W. R. Lane: Particulate Cloud—Dusts, Smokes and Mists, Spon Ltd (London), 1964, Chap. 8 (Part I)
- 2) H. L. Green, W. R. Lane: ibid, Chap. 6 (Part I)
- 3) 藤谷 義保: 日化, 77 (昭31), No. 6, 916
- 4) 和達 清夫監修: 気象の事典(東京堂, 昭49), P. 8
- 5) 山本 義一: 気象学概論(朝倉, 昭49), 第5章

(受理 昭和60年1月30日)

* 9 直径10μm以下の粒子は落下速度が小さく空気中に長い間浮遊し, 呼吸器に吸入されて健康に影響するなどのことから, 直径10μm以下の粒子を浮遊粒子状物質と呼び, 次の如く環境基準が定められている: 1時間値0.20mg/m³以下, 1日平均値0.10mg/m³以下。

* 10 表1, 表3及び*5参照