

降下ばいじん量と降水量の間の関係について (第2報)

太田 洋*・佐野 慄**・市川 俊子***
坪井 勇***・桃井 和好****

Relation between the Dust-fall and Rain-water Quantity Both Measured by a Deposit-gauge Assembly (2)

Hiroshi OHTA, Isamu SANŌ, Toshiko ICHIKAWA,
Isamu TSUBOI and Kazuyoshi MOMOI

This report deals with the data obtained from the dust-fall monitoring net-work using deposit-gauges during the period April 1983—March 1984; those for the period April 1982—March 1983 have been published in the foregoing report.

For the second period, another area was also studied in addition to the one for the first period; the former is situated along Mikawa bay, while the latter is located inland by some 60 km northwards. This selection of areas might be regarded so suggestive that the data obtainable from them could be expected to provide useful information.

The findings are as follows: For dust (M , $t/km^2 \cdot mo$) and rain (V , L/mo) both gathered by the deposit-gauge at a site, (1) a formula $M/V = k \cdot L/V + \Delta$ is approximately applicable, the slope k being much the same as the annual average of dust-fall at the site. (2) More exactly, a nearly linear relation $M = m + \alpha V - \beta V^2$ holds, where m is a constant independent of rain-fall and α as well as β constants affecting the collection efficiency of a rain-drop for a dust-particle. (3) The collection efficiencies calculated under such meteorological conditions as rain-fall intensity 0.1—1.0 mm/h and rain-drop diameter 0.5—1.0 mm are all of the order of magnitude 10^{-2} or the like, those for the inland area remaining practically constant throughout the two periods and, as compared to these, those for the coastal area being about two times larger. (4) Further, the amounts of dust to be scavenged by rain are estimated at 2.8 and 2.3 $t/km^2 \cdot mo$ for the inland and coastal areas respectively.

Additionally, mention was made of two reports measuring collection efficiency, one of them being concerned with a laboratory experiment using snow crystals for a polystyrene aerosol and the other being related to a field survey monitoring the amount of dust in air after rain-fall; their results are found to be in good agreement with those obtained by us.

はじめに

筆者らは前報において春日井市(愛知県)内16地点に設置の、降下ばいじん計によるばいじん量と降水量^{*1}の調査成績(1982.4~1983.3)を考察して両者の間の関係を数式的に表現し、これを足場として降雨によるばいじんの洗い落としに論及、吟味して雨滴対ばいじん粒子間の衝突効率(捕収効率)を 10^{-2} 程度と算定した。本報はこれらの結果の確認と知見の拡充を目的とし、その後の

調査成績(1983.4~1984.3)の他に三河湾沿岸地域を対象に取り入れ、これらに対して前報と同様の手法を適用した結果を記述したものである。

調査成績

表1に春日井市内(A, No.1~16)と三河湾沿岸地域(B, No.1~9)の、降下ばいじん量(M , $t/km^2 \cdot 月$)と降水量(V , $L/月$)の測定値を示した。

表1-Aに於ては前報と同様な傾向が見られ、工場に近い地点No.1および2ではばいじん量が多く、住居地区にあるNo.15で少ないが、交通量の多い交差点のNo.13

*環境工学研究所

**名古屋大学(名誉教授)

***春日井市環境分析センター

****日本気象協会東海本部

*1 正しくは、降下ばいじん計内貯水量

表1-A 調査結果 (昭和58年度 春日井市内)

M: 降下ばいじん量 (t/km²・月) V: 降水量L/月)

調査地点	年月	58										59			平均
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3		
1	M	5.4	3.0	5.4	4.9	3.2	2.7	3.6	4.6	3.1	2.9	7.5	9.2	4.6	
	V	11.0	7.7	17.3	28.0	11.3	3.4	23.8	2.3	0.8	0.8	5.5	4.5	9.7	
2	M	4.0	2.8	4.3	5.6	2.3	2.0	3.6	3.6	2.0	1.6	4.2	5.3	3.4	
	V	9.9	6.1	14.8	24.0	7.4	3.0	22.4	2.1	0.7	0.7	4.8	4.1	8.3	
3	M	4.0	2.8	3.4	4.9	2.4	1.8	1.9	2.3	1.4	1.5	3.4	4.1	2.8	
	V	10.5	6.6	15.4	26.6	8.3	3.5	22.5	2.0	0.7	0.7	5.0	4.1	8.8	
4	M	3.0	2.9	3.4	5.5	2.6	1.9	1.8	2.0	1.2	1.1	2.7	3.3	2.6	
	V	9.7	5.9	14.2	29.2	6.4	2.8	21.1	1.9	0.7	0.7	5.0	6.0	8.6	
5	M	2.9	3.2	3.0	6.1	2.7	1.5	1.3	1.8	1.0	0.9	2.7	3.4	2.5	
	V	10.6	6.1	17.8	32.4	8.2	3.9	21.8	2.4	0.7	0.7	5.1	4.3	9.5	
6	M	3.2	2.2	3.7	6.3	1.8	1.8	1.7	1.9	1.3	1.3	3.5	3.7	2.7	
	V	12.1	8.0	19.0	32.3	10.8	4.0	22.7	2.9	0.8	0.9	5.4	4.8	10.3	
7	M	3.5	3.6	4.7	6.7	3.4	2.7	2.2	2.7	1.5	1.7	3.5	4.4	3.4	
	V	10.9	6.0	17.8	32.3	7.9	3.8	21.6	1.9	0.7	0.6	5.3	4.8	9.5	
8	M	3.6	3.7	5.1	5.2	2.8	2.6	2.3	3.1	2.0	1.5	3.3	4.0	3.3	
	V	11.0	5.5	18.2	22.5	7.5	3.4	19.1	2.1	0.8	0.8	5.3	4.9	8.4	
9	M	3.3	2.9	3.4	5.1	2.9	2.3	1.5	2.1	1.1	1.1	3.2	3.8	2.7	
	V	10.8	5.7	15.8	27.0	8.1	5.9	20.9	2.7	0.8	0.8	5.1	4.5	9.0	
10	M	2.8	3.1	4.1	4.2	2.2	1.7	2.0	2.2	1.5	1.1	2.6	3.9	2.6	
	V	11.0	5.4	17.0	21.6	6.9	3.1	18.4	2.0	0.7	0.6	4.9	6.2	8.2	
11	M	2.9	2.9	3.2	4.5	2.6	2.1	2.3	1.4	0.8	1.2	2.9	3.3	2.5	
	V	10.2	4.9	13.6	20.1	9.5	3.7	18.9	2.2	0.7	0.5	4.4	4.0	7.7	
12	M	3.1	3.4	5.0	4.5	2.7	1.9	1.9	2.4	1.3	1.1	2.3	3.3	2.7	
	V	10.7	6.7	17.7	21.1	8.0	3.8	18.4	2.0	0.7	0.7	5.1	4.7	8.3	
13	M	4.1	4.5	5.8	—	4.4	2.4	4.2	3.2	2.1	3.0	4.6	4.9	3.9	
	V	10.6	6.9	17.2	—	12.9	3.1	20.3	1.6	0.7	0.5	5.4	4.1	7.6	
14	M	3.0	3.5	4.0	4.2	3.2	1.6	3.8	1.8	1.2	1.2	2.4	5.0	2.9	
	V	10.9	7.3	16.9	20.2	13.8	3.3	23.0	2.1	0.7	0.6	4.9	4.0	9.0	
15	M	2.4	1.9	2.8	2.6	1.4	1.5	1.1	1.6	0.9	0.7	2.2	2.6	1.8	
	V	11.1	78.8	14.0	17.5	10.9	4.7	21.3	2.3	0.8	0.6	4.5	3.9	8.3	
16	M	3.3	3.1	4.8	6.3	2.7	2.5	2.2	3.3	1.9	1.4	2.9	3.9	3.2	
	V	10.1	5.5	13.6	30.5	6.9	3.5	21.2	1.9	0.7	0.6	5.0	4.1	8.6	

では、矢張り、ばいじん量が多い。

一方、表1-BでもAと同様にばいじん量の増減は降水量の消長と概して並行しているが、地点C、F及びGについては他の地点に比べてばいじん量が高く而かも年間を通じて寧ろ定常的に経過し季節による変動が余り見られない。恐らくこれらの地点の周辺に発生源が点在す

るためであろうかと思われるが、詳細は明らかでない。

A (16地点) のばいじん量年間平均値(\bar{M})は2.9。(t/km²・月)であり、B (9地点) の年間平均値(\bar{M})は2.7。(t/km²・月)である(表2-A, B)。

表1-A, Bより、M/Vを縦軸に、Vを横軸に目盛ってグラフを描くと、図1-A, Bの如くに双曲線的傾向

表1-B 調査結果（昭58年度 三河湾沿岸地域）

M：降下ばいじん量 (t/km²・月) V：降水量 (L/月)

年月 調査地点	58										59			平均
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3		
A	M	4.0	2.3	3.5	1.6	2.1	2.1	2.3	1.3	1.0	1.2	—	—	2.1
	V	9.69	3.18	10.61	7.46	7.75	13.48	7.23	1.29	0.58	1.16	—	—	6.2
B	M	6.7	2.6	3.6	2.8	2.8	3.2	2.3	2.0	1.4	1.5	2.7	3.9	3.0
	V	10.91	4.13	10.68	11.01	9.08	14.39	8.68	1.47	0.63	1.71	5.62	7.59	7.2
C	M	3.7	3.3	4.4	2.23	3.1	3.2	4.0	4.1	2.4	2.2	3.2	5.4	3.4
	V	12.86	4.74	13.84	10.96	11.89	17.20	9.66	1.08	0.67	1.14	4.63	6.85	8.0
D	M	3.5	2.7	3.0	2.8	—	2.0	1.8	1.4	1.0	1.2	2.1	3.1	2.2
	V	10.78	5.48	16.56	6.82	—	12.02	7.69	2.44	0.66	2.24	4.98	7.42	7.0
E	M	3.2	2.4	2.6	1.9	2.8	3.4	1.8	1.0	0.9	1.1	2.5	3.4	2.3
	V	11.67	4.42	15.75	8.07	12.76	21.93	8.84	1.57	0.56	1.91	5.35	7.46	8.4
F	M	4.4	2.9	3.1	3.1	2.7	3.4	3.3	3.2	2.3	—	3.6	4.6	3.3
	V	10.08	3.94	14.38	9.98	10.19	14.42	7.97	1.27	0.68	—	4.80	7.11	7.7
G	M	4.6	3.7	3.6	2.2	3.5	3.3	2.7	—	2.5	2.1	3.0	4.2	3.2
	V	9.84	3.74	11.80	6.25	13.41	13.68	6.35	—	0.55	1.82	4.66	7.17	7.2
H	M	3.3	2.4	3.1	2.1	2.1	2.9	2.1	2.3	1.5	1.3	3.7	3.5	2.5
	V	9.49	2.78	10.89	7.83	7.74	13.78	5.77	0.76	0.52	0.73	3.90	3.76	5.7
I	M	3.1	2.7	3.2	3.2	3.0	4.0	2.6	2.7	1.2	1.3	2.7	4.0	2.7
	V	9.64	3.49	11.89	8.97	8.62	13.97	6.86	11.10	0.60	1.06	4.27	4.66	6.3

表2-A 調査地点別の年間平均ばいじん量(\bar{M})並びに直線 $M/V = k \cdot 1/V + \Delta$ の勾配(k) と切片(Δ)

調査地点	\bar{M}	k	Δ
1	4.6	4.6	0.01
2	3.4	2.7	0.09
3	2.8	2.2	0.07
4	2.6	1.8	0.10
5	2.5	1.6	0.10
6	2.7	1.7	0.10
7	3.4	2.4	0.10
8	3.3	2.5	0.10
9	2.7	2.0	0.08
10	2.6	1.9	0.09
11	2.5	1.7	0.10
12	2.7	1.8	0.11
13	3.9	3.1	0.11
14	2.9	2.0	0.11
15	1.8	1.7	0.02
16	3.2	2.3	0.10
平均	2.9 ₈	2.2 ₄	0.08 ₇

表2-B 調査地点別の年間平均ばいじん量(\bar{M})並びに直線 $M/V = k \cdot 1/V + \Delta$ の勾配(k) と切片(Δ)

調査地点	\bar{M}	k	Δ
A	2.1	1.2	0.15
B	3.0	1.6	0.19
C	3.4	3.2	0.03
D	2.2	1.4	0.12
E	2.3	1.4	0.11
F	3.3	3.1	0.04
G	3.2	2.6	0.09
H	2.5	2.1	0.08
I	2.7	1.9	0.13
平均	2.7 ₄	2.0 ₆	0.10 ₄

が認められる*2。

*2 紙面の都合上、若干の場合を例示するに止めたが、表1-Aに関しては前報と重複しない地点が選んである。

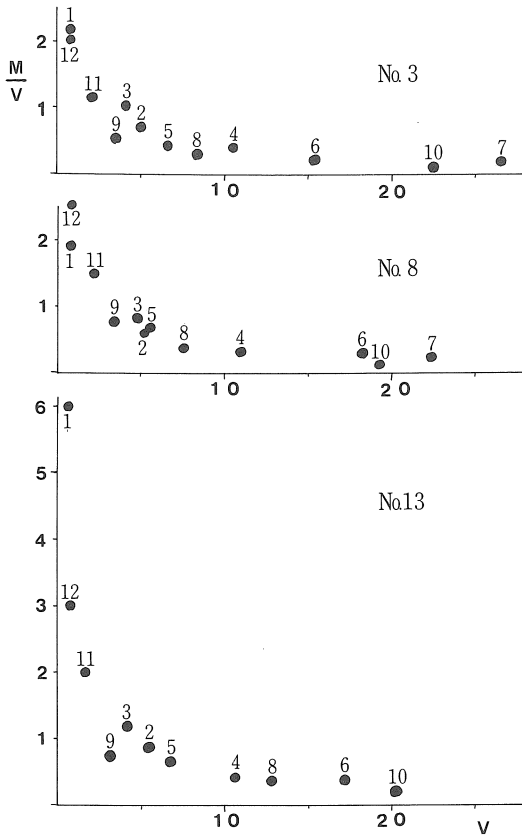


図1-A ばいじん濃度 ($\frac{M}{V}$, t/km²・L) と降水量 (V, L/月) の間の関係 (点につけた数字は月を示す)

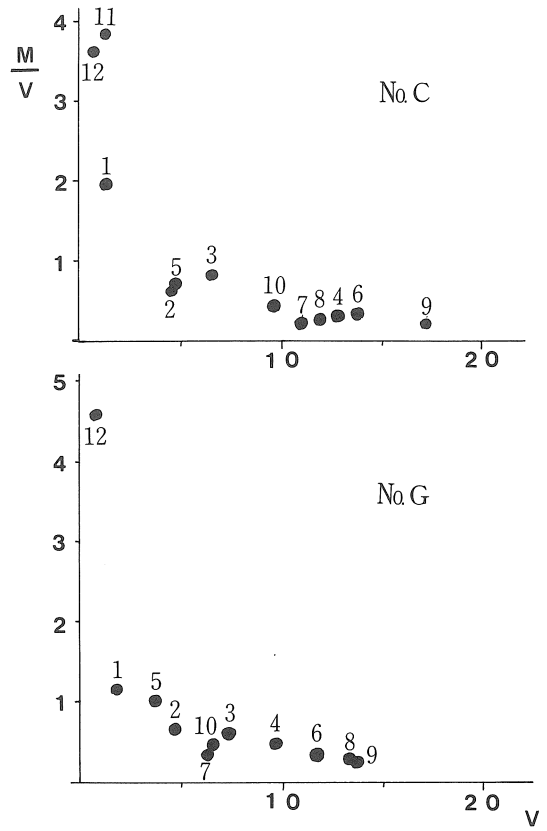


図1-B ばいじん濃度 ($\frac{M}{V}$, t/km²・L) と降水量 (V, L/月) の間の関係 (点につけた数字は月を示す)

考察^{*3}

考察 (I) —— ばいじん量と貯水量の測定値の間の関係 (1)

図1-A, Bを, 横軸に $1/V$ を目盛って描き改めると, 図2-A, Bの通り, 両者共に, 直線関係

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

の成立することが見られる。勾配 (k, t/km²・月) と切片 (Δ , t/km²・月) は表2-A, Bのようになり^{*4}, kの平均値はAでは2.24, Bでは2.06である。表2-A, Bに各地点毎の年間平均ばいじん量 (\bar{M}) を記したが, 式から察せられる如く, これらは勾配 (k) とほぼ一致している。

考察 (II) —— ばいじん量と降水量の測定値の間の関係 (2)

表1-A, Bを, 縦軸にばいじん量 (M), 横軸に降水量 (V) を選んでグラフを描くと放物線の関係の存在することが察せられるので (図3-A, B), これに対し, 次式

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

$$m > 0, \alpha > 0, \beta > 0$$

を想定し, 係数 m, α 及び β も算出^{*4}して表3-A, Bを得た。

考察 (III) —— 衝突効率^{*5} (ϵ) 算定

衝突効率 (ϵ) は次式によって表わされる¹⁾。

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

ただし

* 3 詳細は前報参照のこと

* 4 最小2乗法により算出

* 5 捕収効率とも

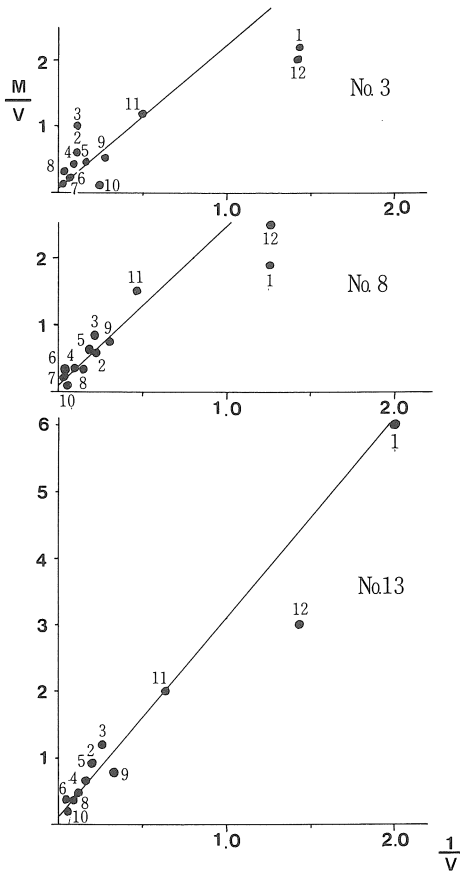


図2-A 回帰式 $\frac{M}{V} = k \frac{1}{V} + \Delta$ の図示 (表2-A参照)

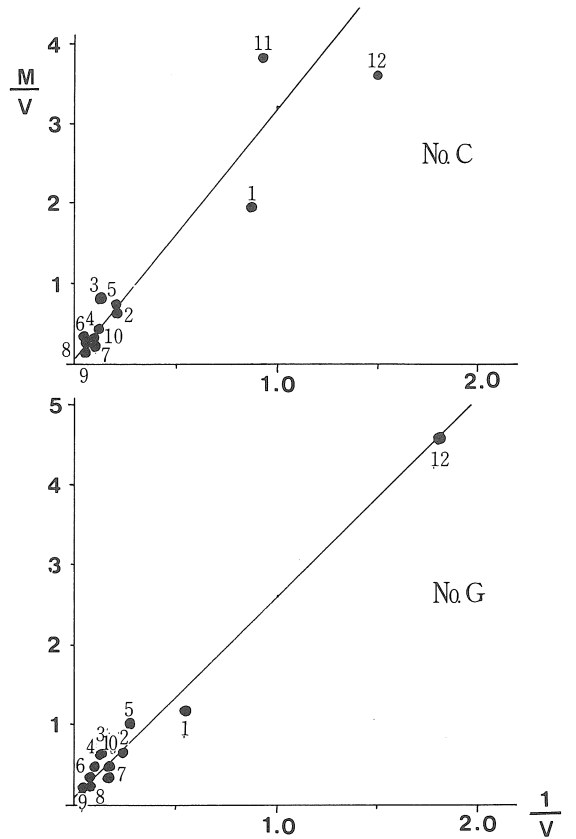


図2-B 回帰式 $\frac{M}{V} = k \frac{1}{V} + \Delta$ の図示 (表2-B参照)

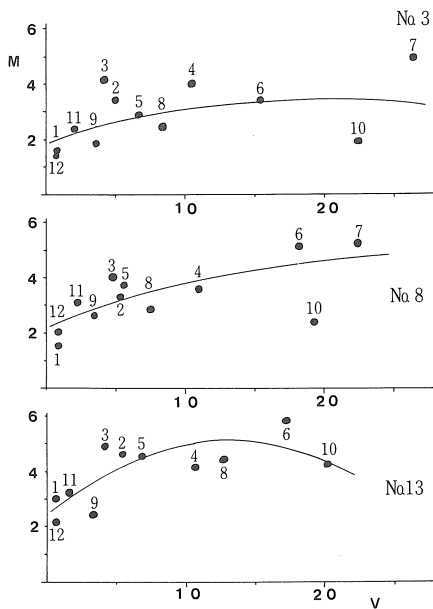


図3-A ばいじん量 (M, t/km²・月) と降水量 (V, L/月) の間の関係 (曲線は表3-Aの式 $M = m + \alpha V - \beta V^2$ を示す)

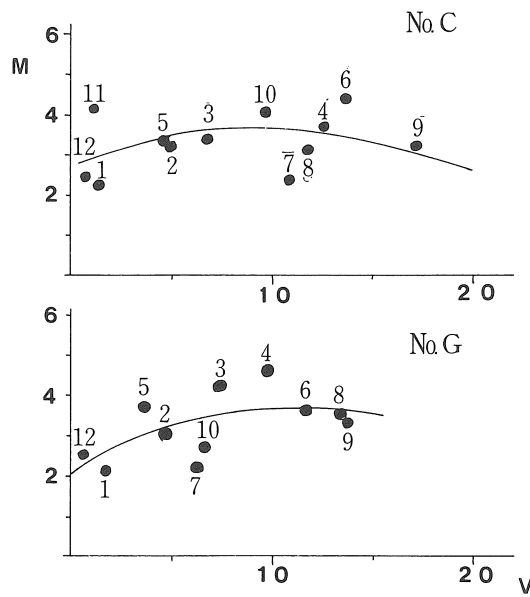


図3-B ばいじん量 (M, t/km²・月) と降水量 (V, L/月) の間の関係 (曲線は表3-Bの式 $M = m + \alpha V - \beta V^2$ を示す)

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

調査地点	m	α	β	$2\beta/\alpha \times 10^2$
1	4.1	0.15	0.005	6.7
2	2.5	0.16	0.003	3.8
3	1.9	0.16	0.004	5.0
4	1.8	0.10	0.000 ₁	0.2
5	1.9	0.01	(-0.003)	-
6	2.1	(-0.01)	(-0.004)	-
7	2.5	0.07	(-0.001)	-
8	2.2	0.20	0.004	4.0
9	1.8	0.13	0.002	3.1
10	1.5	0.24	0.007	5.8
11	1.2	0.28	0.009	6.4
12	1.4	0.27	0.007	5.2
13	2.4	0.40	0.015	7.5
14	1.4	0.30	0.009	6.0
15	0.8	0.28	0.012	8.6
16	2.5	0.06	(-0.001)	-
平均	2.0 ₀	0.18 ₇	0.006 ₄	5.1 ₉

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

調査地点	m	α	β	$2\beta/\alpha \times 10^2$
A	0.8	0.37	0.017	9.2
B	1.1	0.43	0.017	7.9
C	2.7	0.22	0.012	10.9
D	0.7	0.35	0.014	8.0
E	0.9	0.25	0.007	5.6
F	2.5	0.27	0.016	11.9
G	2.1	0.29	0.013	9.0
H	1.8	0.22	0.011	10.0
I	1.8	0.21	0.006	5.7
平均	1.6 ₀	0.29 ₀	0.012 ₀	8.6 ₉

R : 雨滴の半径 (cm)

v : 雨滴の落下速度 (cm/sec)*6

N : 雨滴の濃度 (個/cm³)

r : 降雨の強度定数 (mm/h)*7

a : 降下ばいじん計の漏斗の断面積 (cm²) で、
実際上、706cm²

又、 $2\beta/\alpha$ は、A では $5.1_9 \times 10^{-2}$ ($10^{-3} \cdot \text{cm}^{-3}$), B では $8.6_9 \times 10^{-2}$ ($10^{-3} \cdot \text{cm}^{-3}$) である (表3-A, B)。ε の計算結果は表4-A, B に示した通りで (雨滴直径 1 mm), 表には、尚、計算に使用した r 及び N の値が掲げてある。衝突効率、表の如く A に比べて B の方が 2 倍近く大きい、両者共、前報と同様に 10^{-2} 程度のものであることが知られる。因みに、降水によるばいじんの捕取に関する、最近の研究として次のものがある——

天然の雪粒 (雪晶) をポリスチレン粒子のエロゾル

表4-A 衝突効率 (ε) の計算値

降雨強度 (mm/h)	衝突効率 (ε)	備考	
		強度定数 (r)	雨滴濃度 (N)
1	$0.9_5 \times 10^{-2}$	$1/3.6 \times 10^{-4}$	35
0.5	$0.8_3 \times 10^{-2}$	$5/3.6 \times 10^{-5}$	20
0.2	$0.6_7 \times 10^{-2}$	$2/3.6 \times 10^{-5}$	10
	$1.6_6 \times 10^{-2} *$		30
0.1	$0.6_7 \times 10^{-2}$	$1/3.6 \times 10^{-5}$	5

* 雨滴直径 0.5mm

表4-B 衝突効率 (ε) の計算値

降雨強度 (mm/h)	衝突効率 (ε)	備考	
		強度定数 (r)	雨滴濃度 (N)
1	$1.5_9 \times 10^{-2}$	$1/3.6 \times 10^{-4}$	35
0.5	$1.3_9 \times 10^{-2}$	$5/3.6 \times 10^{-5}$	20
0.2	$1.1_1 \times 10^{-2}$	$2/3.6 \times 10^{-5}$	10
	$2.7_8 \times 10^{-2} *$		30
0.1	$1.1_1 \times 10^{-2}$	$1/3.6 \times 10^{-5}$	5

* 雨滴直径 0.5mm

* 6 $2R = 1 \text{ mm}$ のとき 390(cm/sec), $2R = 0.5 \text{ mm}$ のとき 208(cm/sec)。これについては、山本義一：気象学概論 (朝倉, 昭49), 第5章を参照のこと

* 7 因みに、年間平均降雨強度は次式 $\frac{V \times 10^4}{a} \times \frac{1}{30 \times 24}$ (mm/h) によって計算できるので、例えばAの場合には、V に対して16地点の平均8.7L/月を代入すると ($a = 706 \text{ cm}^2$), 0.17mm/h が得られる。同様にしてBの場合には $V = 7.0_7$ (9 地点平均) を代入して0.14mm/h が得られる。詳しくは前報参照のこと

中に落下させて実験的に捕収効率を測定すると^{*8}、ポリスチレン粒子が直径1及び6 μm の場合、それぞれ、 10^{-3} 及び 10^{-2} 程度であることが観察され、捕収はさきざり作用が原因であろうと推定されている²⁾。

これに対し、雨滴による捕収については、1978年9月29日の深夜から翌30日の早朝にかけて関東南部一円、特に東京首都圏に、前線性の降雨があったが、降雨強度の変動が小さく(1~5 mm/h)、一方、風速は弱く(0~2 m/s)、風向も殆ど一定(N)で汚染の移流を一応無視することができ、更に深夜から早朝のため汚染発生も小さいなどと考えられるのでこの間のばいじん濃度(浮遊粉じん濃度)の測定成績を収集し、熱成層が中立であるとか、その他2、3の仮定を置いて解析を行い、降雨強度0.1mm/h、雨滴0.2mm及びばいじん直径5 μm 程度の場合、捕収率が0.05前後(附着率1)と見積られている³⁾——

これらの結果は前報¹⁾及び本報と類似の結果であり、興味深く思われる。

考察(IV)——降雨によって洗い落とされるべき、空气中の浮遊ばいじん量(K)の算定

降雨によって洗い落とされる降下ばいじん量^{*9}は式(2)中のM-mで与えられるが、これについては下の関係が存在する。

$$M-m = K(1 - e^{-Pv}) \quad (4)$$

ただし、 $P = \frac{2\beta}{\alpha}$

この式からKを求めると、AではM-m=0.9₈(表2-A及び表3-A)、 $\frac{2\beta}{\alpha} = 5.1_9 \times 10^{-2}$ 、V=8.7₄ L/月であるから2.6₉ (t/km²・月)、一方、BではM-m=1.1₄(表2-B及び表3-B)、 $\frac{2\beta}{\alpha} = 8.6_9 \times 10^{-2}$ 、V=7.0₇ L/月であるから2.4₈ (t/km²・月)が得られる。

まとめ

前報に引き続き昭和58年4月から59年3月までの、降下ばいじん計による調査成績の中からばいじん量(M、

t/km²・月と降水量(V, L/月)を取り出し、前報と同様の手法で両者間の関係を吟味した。ただし、本報では春日井市内の他、三河湾沿岸地域の調査成績も対象に加えてある。

結果は下の如くであった。

- 1) MとVの両者間に本文中の式(1)が成立し、その勾配(k)は調査地点毎の年間平均ばいじん量にはほぼ等しい。
- 2) 更に両者間に式(2)が成立する。式中のmは重力によって落下する程度の粗大粒子(直径10 μm 以上)の降水量を表わし、 α 及び β は雨滴とばいじん粒子間の衝突効率(捕収効率)に関連する定数である。
 α 及び β の測定値を用いて式(3)から衝突効率を計算すると、春日井市内及び三河湾沿岸地域共に前報と同じ 10^{-2} 前後の値が得られるが、数値的には後者の方が約2倍大きい。これと同じレベルの値が雪晶とポリスチレンエーロゾル粒子の間の衝突に関する室内実験により、又降雨による空气中粉じん濃度の減少を追跡した野外調査に於て、それぞれ、得られている。
- 3) 尚、降雨によって洗い落とされる、浮遊ばいじん(粒子直径5~10 μm 程度)の量を式(4)によって算定し、春日井市内及び三河湾沿岸地域それぞれ2.7及び2.5t/km²・月であることを知った。

引用文献

- 1) 市川 俊子, 坪井 勇, 市川 治彦, 佐野 悞: 第15回中部化学関係学協会支部連合秋季大会講演要旨(59, 10月); 環境分析センター報告(昭60, 3月), 春日井市経済環境部: 佐野 悞, 太田 洋, 市川 俊子, 坪井 勇: 愛工大研報, No.20(昭60, 3月), 101
- 2) 村上 正隆, 菊地 勝弘, 孫野 長治: J. Meteorol. Soc. Japan, 63(1985), No.1 (Feb), 119
- 3) 藤田 慎一, 千秋 鋭夫: 大気汚染学会誌, 15(1980), No.9 (Oct), 367

(受理 昭和61年1月25日)

* 8 雪晶: 降雪中に採取して使用。大きさ1~5 mm(円相当直径)の間で、大小種々 ポリスチレン粒子: 球形且つ疎水性。直径0.1~6 μm の間の色々な大きさの9種類を、それぞれ、単分散エーロゾルに調製して使用

* 9 粒子直径4~10 μm 程度