

降下ばいじん量と降水量の間の関係について (第3報)

太田 洋*・佐野 惲**・市川俊子***・坪井 勇***

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

Hiroshi OHTA, Isamu SANO, Toshiko ICHIKAWA
and Isamu TSUBOI

This paper treats the data of dust-fall and rain-water caught simultaneously by deposit-gauges in Kasugai and Ohtake cities during the fiscal year 1984; the data of Kasugai city and the coastal area of Mikawa bay for the fiscal years 1982 and 1983 have been reported in two foregoing papers, and after these, we have likewise examined the present data.

The results obtained are: (1) There holds an annual formula $M/V = k \cdot 1/V + \Delta$ between M (dust-fall, $t/km^2 \cdot mo$) and V (rain-water, L/mo) at a monitoring site, k and Δ being constants. (2) Expressing more fully, an almost linear relation $M = m + \alpha V - \beta V^2$ applies, where m represents a constant independent of rain and α as well as β constants relating to the dust-particle collection efficiency of a rain-drop. (3) The efficiencies estimated under such meteorological conditions as rain-fall intensity $0.1 \sim 1.0$ mm/h and rain-drop diameter $0.5 \sim 1.0$ mm are of the order of 10^{-2} , this finding being just the same as that already reported. (4) The amount of suspending dust, a portion of which might be scavenged by rain is, by calculation, 3.3 and 3.7 $t/km^2 \cdot mo$ for Kasugai and Otake respectively.

はじめに

前2報^{1,2)}に引き続き、降下ばいじん計によるばいじん総量と降水量の各測定値の間の関係を考察し、これらの報告中の関係式が今回も成立することを確かめた後、更に雨滴とばいじん粒子間の捕収効率(付着率)を算定して前2報と同じ 10^{-2} 程度であることを示した。資料は愛知県春日井市の測定値(昭和59年度)の他、広島県大竹市の測定値(昭和59年度)³⁾である。以下にこれらの概要^{*1}を報告する。

調査成績

表1-A及びBに、それぞれ春日井市及び大竹市に於ける降下ばいじん量(M , $t/km^2 \cdot 月$)と降水量(V , $L/月$)^{*2}の各測定値(昭和59年度)を掲げた^{*3}。

春日井市のばいじん量測定値(表1-A)の中、地点No.10及び11でばいじん量が、それぞれ、年間平均3.8及び2.9 t と多いのはO製紙工場に近いためと考えられる

が、更にこれらの2地点は冬季工場の風下に又夏季風上になることが多いのでこの影響が現われているようである。No.4で少な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。因みに、No.3は前2報では交通量の多い交差点に近く、ばいじん量は多く測定されていたが、今回、設置場所を交差点近くから移動したのでばいじん量が少なく測定されている。一方、大竹市については、測定地点12箇所、ばいじん量(年間平均)は4.0(最高)~1.6(最低)の間にあることが見られる。尚、降水量^{*2}は春日井市関係7.0~5.6 L 、大竹市関係10.3~7.4の範囲内にある。

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、前2報と同様に図1-A, Bの通りで、双曲線的傾向の存在することが察せられる^{*4}。

考察(I) ばいじん量と降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の如くで、直線関係

$$M/V = k \cdot 1/V + \Delta \quad (1)$$

* 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

表1-A 調査結果(昭59年度 春日井市)

M: 降下ばいじん量 (t/km²・月) V: 降水量L/月

年月 調査地点		59	5	6	7	8	9	10	11	12	60			平均 \bar{M} \bar{V}
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	
1	M	3.9	3.8	2.5	2.7	1.9	1.9	2.7	3.0	2.1	2.2	2.9	4.2	2.8
	V	8.1	6.7	12.4	17.1	3.0	4.2	1.9	4.0	2.3	1.1	7.0	11.4	6.6
2	M	2.8	2.5	2.8	1.9	2.6	1.1	1.6	1.9	1.5	1.1	1.8	3.1	2.1
	V	8.3	6.2	14.5	16.2	4.8	3.8	2.0	4.0	2.4	0.6	7.3	11.3	6.8
3	M	2.7	2.5	2.6	2.0	2.1	1.1	1.5	1.8	1.3	0.9	1.8	3.3	2.0
	V	7.7	5.6	12.0	16.8	2.8	4.3	2.1	4.0	2.5	0.3	6.9	10.8	6.3
4	M	2.8	2.3	2.1	1.9	2.6	1.1	1.6	1.5	1.0	0.9	1.8	3.1	1.9
	V	9.3	6.0	12.8	17.5	7.7	4.2	2.3	3.9	2.2	0.6	6.8	10.7	7.0
5	M	3.1	3.1	2.5	2.2	1.8	1.2	1.9	2.0	1.6	1.4	2.0	3.7	2.2
	V	7.9	5.4	8.2	17.7	2.8	4.3	2.3	3.8	2.5	0.3	7.1	10.8	6.1
6	M	3.8	4.0	3.8	2.5	1.8	1.8	2.3	2.4	1.5	1.3	2.1	4.0	2.6
	V	10.6	6.0	10.0	15.0	1.2	4.9	2.3	4.2	2.5	0.5	7.5	11.3	6.3
7	M	3.3	3.3	3.2	2.7	2.4	1.7	2.1	2.2	1.6	1.3	2.3	3.5	2.5
	V	8.8	5.3	8.4	14.8	1.5	5.1	2.3	4.1	2.3	0.3	7.4	11.0	6.2
9	M	—	2.7	2.7	2.6	2.1	2.1	1.9	1.9	1.6	1.3	2.4	3.3	2.2
	V	—	4.9	8.0	15.5	1.5	4.6	2.4	3.8	2.4	0.4	7.6	11.0	5.6
10	M	6.1	3.7	2.6	2.7	1.8	2.1	2.6	3.9	4.0	3.0	5.9	7.5	3.8
	V	11.4	6.2	8.5	18.5	1.6	5.3	2.8	4.0	2.6	0.6	7.7	11.0	6.7
11	M	3.9	3.5	2.7	3.3	1.7	1.8	2.4	2.7	2.5	1.9	3.5	5.4	2.9
	V	10.1	5.4	7.7	16.2	1.6	4.7	2.3	3.8	2.5	0.5	7.2	10.9	6.1
12	M	4.0	4.3	3.5	3.3	2.8	2.0	2.8	2.5	2.1	1.7	2.5	3.9	3.0
	V	10.6	5.8	8.0	17.1	1.4	5.2	2.4	3.8	2.3	0.5	7.5	10.7	6.3

総平均 \bar{M} 2.5s
 \bar{V} 6.37

が成立し、その勾配 (k, t/km²・月) と切片 (Δ, t/km²・月) は表2-A, Bの通りになる*5。

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のばいじん量の降水量の測定値の間の関係を、縦軸ばいじん量 (M), 横軸降水量 (V) として図を描くと放物線の関係が見られるので (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 を算出*5して表3-A, Bを得た。

考察(III) 衝突効率*6 (ε) の算定

衝突効率 (ε) は次式によって表わされる^{11,2)}。

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

R: 雨滴の半径 (cm)

* 1 詳しくは、環境分析センター報告(春日井市, 昭和60. 3月)を参照のこと

* 2 正しくは、ばいじん計内降水量

* 3 春日井市の分については昭和59年度から調査地点が、その変更或は廃止に伴い、16個から11個所に減少したが、この中の7個は従来と同じ地点である。

* 4 紙面の都合上、若干の場合を例示

* 5 最小二乗法により算出(前報参照)。尚 k の値は年間平均ばいじん量 (\bar{M}) とほぼ同じ値であるが、後述の m と一般に次の関係 $\bar{M} > k > m$ にある。

* 6 捕収効率とも

表1-B 調査結果（昭59年度 大竹市）

M：降下ばいじん量 (t/km²・月) V：降水量 (L/月)

調査地点	年月	59	5	6	7	8	9	10	11	12	60	2	3	平均
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	\bar{M}
2	M	3.5	2.1	3.2	2.1	4.0	3.0	1.2	1.5	1.4	1.0	1.6	3.4	2.3
	V	15.1	6.0	21.1	8.9	6.1	11.2	4.2	3.4	5.1	0	10.6	13.2	8.8
7	M	5.5	5.0	5.0	4.5	4.8	5.4	2.3	2.2	2.1	2.0	3.3	6.2	4.0
	V	15.1	6.0	21.1	8.9	6.2	10.8	5.1	3.6	5.5	0	9.8	13.4	8.8
10	M	3.9	2.3	3.0	2.5	4.0	2.7	1.7	1.9	1.6	1.2	1.9	3.9	2.6
	V	15.2	6.0	20.5	8.7	4.9	9.9	3.4	3.3	5.4	0	9.4	12.7	8.4
11	M	3.2	2.8	2.6	2.1	3.9	2.9	2.2	2.1	2.0	1.3	2.3	4.2	2.2
	V	14.7	5.5	21.1	8.9	5.1	10.0	3.9	3.4	5.2	0	9.3	13.2	8.6
12	M	2.7	2.1	2.5	4.1	2.6	2.5	1.1	1.3	1.4	0.8	1.7	3.5	3.0
	V	15.1	5.6	21.7	7.6	6.2	9.5	5.0	3.2	5.8	0	9.5	13.9	7.4
14	M	3.6	2.3	3.9	2.9	4.1	4.0	2.0	2.1	2.3	1.3	3.2	4.4	2.8
	V	13.6	4.7	19.7	6.6	4.4	8.0	3.9	2.8	4.8	0	8.4	12.1	8.4
15	M	4.0	2.4	3.4	2.4	3.5	3.3	1.8	1.8	2.1	1.3	2.8	4.3	2.6
	V	14.5	6.3	21.1	8.8	5.0	9.8	4.4	3.4	5.1	0	9.2	12.6	8.2
16	M	2.8	1.9	2.7	2.1	3.8	3.2	1.9	2.1	2.1	1.0	2.5	4.7	2.2
	V	14.5	6.1	20.8	7.8	5.1	9.5	3.7	3.2	5.0	0	9.3	13.1	8.7
18	M	3.0	1.8	2.8	2.1	2.9	2.7	1.1	1.7	1.6	1.0	2.1	4.1	2.2
	V	15.2	5.5	21.4	8.4	5.6	9.6	4.9	3.2	5.5	0	9.8	15.4	8.7
19	M	3.6	2.9	3.2	1.8	3.9	2.8	1.6	1.8	1.6	1.2	2.2	4.4	2.6
	V	15.3	6.0	21.7	8.4	5.1	9.8	4.3	3.3	5.5	0	9.9	13.7	8.6
20	M	3.4	2.2	2.4	1.8	3.4	2.3	1.5	1.5	1.6	2.7	2.8	3.3	2.4
	V	15.9	6.5	23.9	8.3	6.5	11.2	4.5	3.7	6.1	0.1	10.9	13.7	9.3
23	M	2.3	1.9	1.6	1.3	2.2	1.5	1.1	1.0	1.3	1.3	1.4	2.2	1.6
	V	14.1	6.5	25.1	9.1	9.4	12.0	6.7	4.7	6.2	0.7	11.6	17.7	10.3

総平均 \bar{M} 2.58
 \bar{V} 8.65

v：雨滴の落下速度 (cm/sec)*7

N：雨滴の濃度 (個/cm³)

r：降雨の強度定数 (mm/h)**8

a：降下ばいじん計の漏斗の面積 (cm²) で、実際上、706cm²

又、 $2\beta/\alpha$ は、Aの場合 $8.8_3 \times 10^{-2}$ ($10^{-3} \cdot \text{cm}^{-3}$)、Bの場合 $5.9_3 \times 10^{-2}$ ($10^{-3} \cdot \text{cm}^{-3}$)である(表3-A, B)。衝突効率を雨滴直径1mmの場合について計算すると結果は表4-A, Bに示した如くで、前2報で同様に 10^{-2} 程度

のものである。

考察(IV) 降雨によって洗い落とされるべき、空気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)の中の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¹⁾。

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

$$P = 2\beta/\alpha$$

これに対し、例えばAでは $M - m = 1.4_3$ (表2-A及び表

*7 2Rが1mmのとき390 (cm/sec)、2Rが0.5mmのとき280 (cm/sec) などである。これについては、例えば山本義一：気象学概論(朝倉, 昭49), 第5章を参照のこと

*8 因みに、年間平均降雨強度は次式 $V \times 10^4 / a \times 1/30 \times 24$ (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11地点の平均6.3₇ L/月(\bar{V})を代入すると(a=706cm²)、0.13mm/hと得られる。Bの場合には8.6₅ L/月を代入して0.17mm/h。詳しくは前報参照のこと

*9 粒子直径10~14 μ m程度

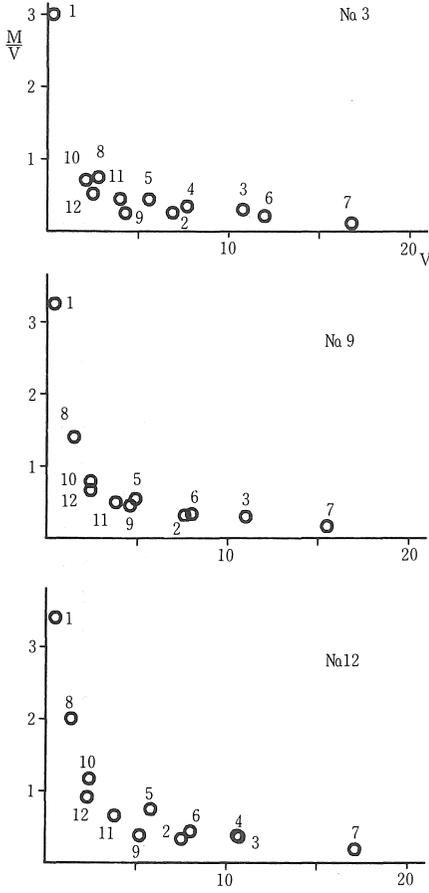


図1-A ばいじん濃度 (M/V, t/km²・L) と降水量 (V, L/月) の間の関係 (点につけた数字は月を示す)

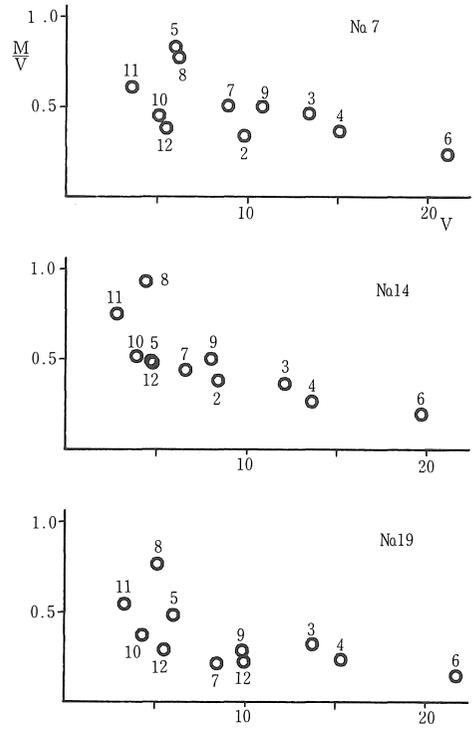


図1-B ばいじん濃度 (M/V, t/km²・L) と降水量 (V, L/月) の間の関係 (点につけた数字は月を示す)

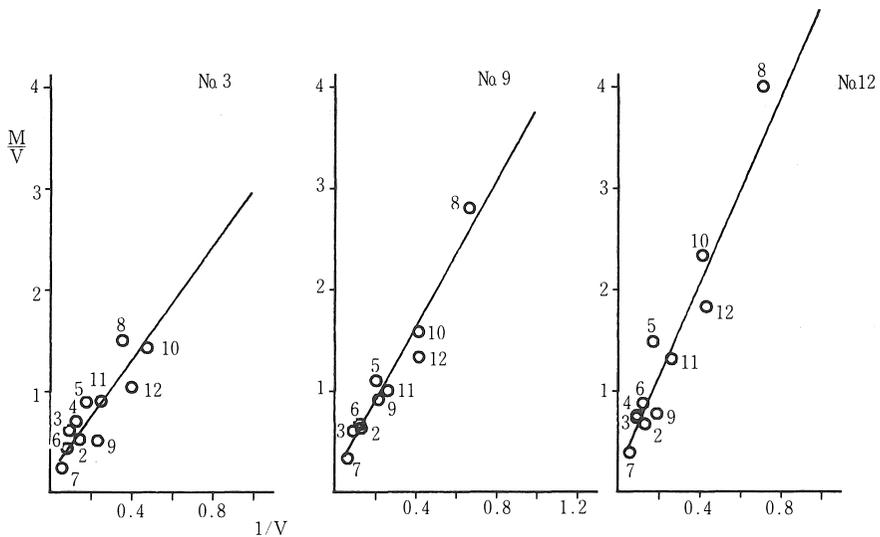


図2-A 回帰式 $M/V = K \cdot 1/V + \Delta$ の図示 (表2-A 参照)

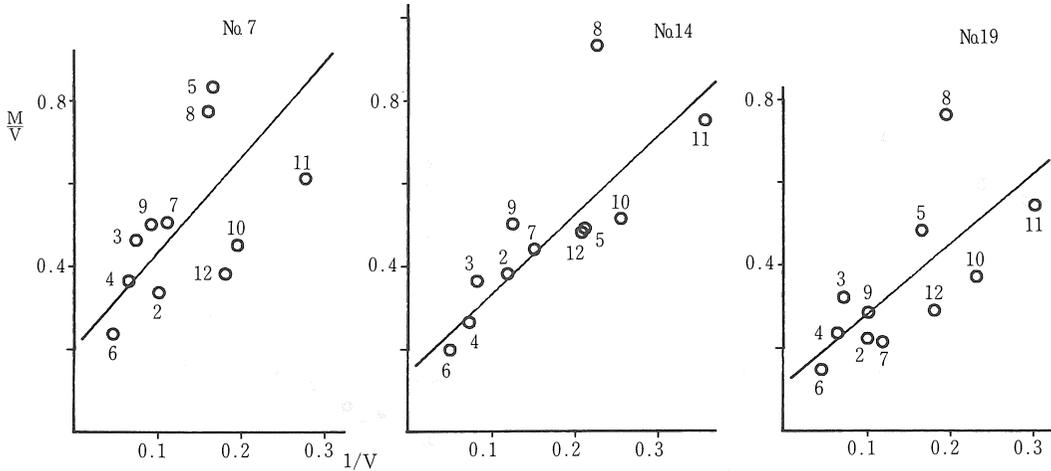


図2-B 回帰式 $M/V = K \cdot 1/V + \Delta$ の図示 (表2-B参照)

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) (春日井市)

調査地点	\bar{M}	k	Δ
1	2.8	2.4	0.07
2	2.1	1.5	0.08
3	2.0	1.4	0.09
4	1.9	1.3	0.09
5	2.2	1.7	0.08
6	2.6	1.7	0.15
7	2.5	1.9	0.09
9	2.2	1.8	0.09
10	3.8	3.0	0.12
11	2.9	2.0	0.16
12	3.0	2.3	0.10
平均	$2.55(\bar{\bar{M}})$	1.9 ₁	0.09 ₃

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) (大竹市)

調査地点	\bar{M}	k	Δ
2	2.3	1.3	0.11
7	4.0	2.3	0.20
10	2.6	1.7	0.10
11	2.6	2.1	0.06
12	2.2	1.4	0.09
14	3.0	1.9	0.14
15	2.8	1.7	0.12
16	2.6	1.8	0.09
18	2.2	1.3	0.11
19	2.6	1.7	0.11
20	2.4	2.0	0.04
23	1.6	1.3	0.03
平均	$2.58(\bar{\bar{M}})$	1.7 ₂	0.10 ₀

3-A), $2\beta/\alpha = 8.8_3 \times 10^{-2}$ (表3-A), $V = 6.37L/月$ (表1-A)であるからこれらを代入すると $K = 3.3_2 (t/km^2 \cdot 月)$ が得られる。同様にしてBでは $M - m = 1.5_0$ (表2-B及び表3-B), $2\beta/\alpha = 5.9_3 \times 10^{-2}$ (表3-B), $V = 8.6_5$ (表1-B)であるから $K = 3.7_3$ となる。

まとめ

前2報に引き続き春日井市内11個所に配置の降下ばいじん計による、昭和59年度の降下ばいじん総量及び降水量の測定成績について両者間の関係を考察し、又これと並行して大竹市(12個所)の測定値についても同様に吟味した。結果は以下の通りである。

1) 降下ばいじん量($M, t/km^2 \cdot 月$)と降水量($V, L/月$)間に次の関係

$$M/V = k \cdot 1/V + \Delta \quad (1)$$

(k, Δ : 定数)

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

(m, α, β : 定数)

が成立する。

2) 式(2)中の α, β の最小二乗法算定値から式(3)によって雨滴とばいじん粒子の間の衝突(捕収)効率を勘定し、 10^{-2} 程度であることを示した。

これらの結果は両市に共通し、又前2報とも一致している。

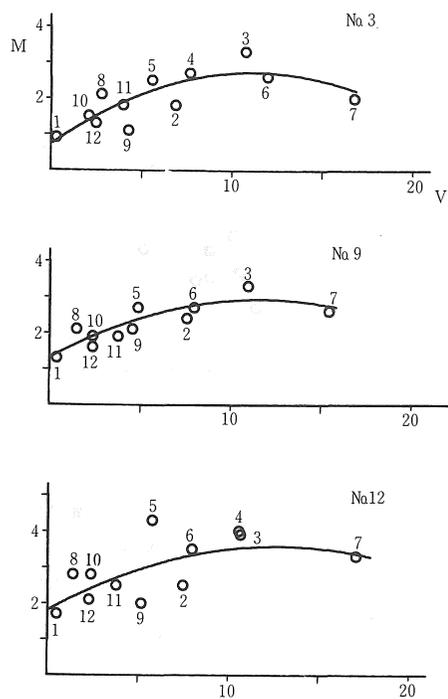


図 3 - A ばいじん量 (M, t/km²・月) と降水量 (V, L/月) の間の関係 (曲線は表 3 - A の式 $M = m + \alpha V - \beta V^2$ を示す)

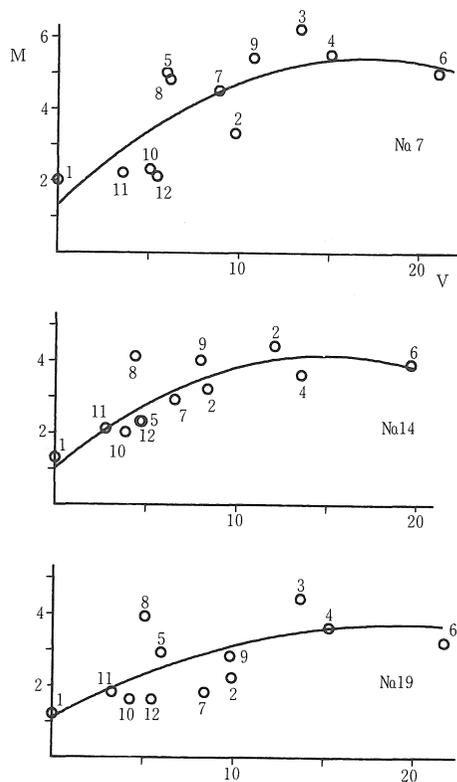


図 3 - B ばいじん量 (M, t/km²・月) と降水量 (V, L/月) の間の関係 (曲線は表 3 - B の式 $M = m + \alpha V - \beta V^2$ を示す)

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

(春日井市)

調査地点	m	α	β	$2\beta/\alpha \times 10^2$
1	1.5	0.38	0.018	9.5
2	0.7	0.37	0.017	9.2
3	0.7	0.36	0.016	8.9
4	0.4	0.38	0.017	8.9
5	1.0	0.35	0.015	8.6
6	0.9	0.49	0.024	9.8
7	1.3	0.31	0.013	8.4
9	1.3	0.28	0.012	8.6
10	1.4	0.68	0.031	9.1
11	1.3	0.44	0.018	8.2
12	1.8	0.28	0.011	7.9
平均	1.1 ₂	0.39 ₃	0.017 ₄	8.8 ₃

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

調査地点	m	α	β	$2\beta/\alpha \times 10^2$
2	0.9	0.23	0.005	4.3
7	1.3	0.48	0.014	5.8
10	1.2	0.25	0.007	5.6
11	1.4	0.25	0.009	7.2
12	0.5	0.33	0.011	6.7
14	1.0	0.42	0.014	6.7
15	1.1	0.31	0.009	5.8
16	1.0	0.33	0.012	7.3
18	0.8	0.24	0.006	5.0
19	1.1	0.27	0.007	5.2
20	1.8	0.10	0.003	6.0
23	0.9	0.11	0.003	5.5
平均	1.0 ₃	0.27 ₇	0.008 ₃	5.9 ₃

表4-A 衝突効率 (ϵ) の計算値 (春日井市)

降雨強度 (mm/h)	衝突効率 (ϵ)	強度定数 (r)	雨滴濃度 (個/m ³)
1	$1.6_2 \times 10^{-2}$	$1/3.6 \times 10^{-4}$	35
0.5	$1.4_1 \times 10^{-2}$	$5/3.6 \times 10^{-5}$	20
0.2	$1.1_3 \times 10^{-2}$ $2.8_3 \times 10^{-2} *$	$2/3.6 \times 10^{-5}$	10
0.1	$1.1_3 \times 10^{-2}$	$1/3.6 \times 10^{-5}$	5

* 雨滴直径 0.5mm

表4-B 衝突効率 (ϵ) の計算値 (大竹市)

降雨強度 (mm/h)	衝突効率 (ϵ)	強度定数 (r)	雨滴濃度 (個/m ³)
1	$1.0_9 \times 10^{-2}$	$1/3.6 \times 10^{-4}$	35
0.5	$0.9_5 \times 10^{-2}$	$5/3.6 \times 10^{-5}$	20
0.2	$0.7_6 \times 10^{-2}$ $1.9_0 \times 10^{-2} *$	$2/3.6 \times 10^{-5}$	10
0.1	$0.7_6 \times 10^{-2}$	$11/3.6 \times 10^{-5}$	5

* 雨滴直径 0.5mm

尚、降雨によってその一部が洗い落される筈の、空气中浮遊ばいじん量（粒子直径10~4 μ m）を計算し、春日井及び大竹両市に対し、それぞれ、3.3及び3.7t/km²・月を得た。

引用文献

- 1) 佐野 悞, 太田 洋, 市川俊子, 坪井 勇: 愛工大研報, No.20 (1985), 101
- 2) 太田 洋, 佐野 悞, 市川俊子, 坪井 勇, 桃井和好: 愛工大研報, No.21 (1986), 83
- 3) 公害の現状と対策, No.19, 大竹市 (1985.10)

(受理 昭和62年1月25日)