

関東地方における梅雨期の降水の性状*

—NO₃⁻ と SO₄²⁻ について—

清水源治**高橋照美**蛭田真史**友部正志**
久保昌幸**関口恭一**高野利一**押尾敏夫**
小山功**三村春雄**福崎紀夫**鹿野正明**
久米一成**鶴田治雄**

1. はじめに

関東知事会（関東地方公害対策推進本部）では、1981年から梅雨期（6月中下旬）の12日間を選んで降水調査などを行ってきた。調査は84年以降ほぼ同じ形式で継続されるようになり¹⁾、86年には福島県を加えた1都11県1市（福島、茨城、栃木、群馬、埼玉、千葉、東京、神奈川、新潟、山梨、長野、静岡、横浜）が参画する広域調査となった。ここでは主に降水中のNO₃⁻とSO₄²⁻の測定結果を用いて、各年や各地点の特徴などを明らかにしようとした。

2. これまでの調査結果¹⁾

2・1 調査方法の概略

気象：雲向などを観測すると共に、各気象台の日報簿やアメダス、富士山レーダーのデータを収集した。

降水：初期降水、一降水および大気降下物を捕集し、pHなど10項目を常法²⁾により測定した。初期降水は1mm毎に3mm目まで捕集し、一降水は非降水時間3時間を区切りとした。降水量には降雨計の値または捕集量を捕集面積で除した値を用いた。なお調査地点は各自治体で任意に選んだ。

2・2 調査結果の概略

これまでの調査から、概ね次の点が明らかになっ

た¹⁾。

1) 関東平野の地点（以下平野部）では、平野から分水嶺を超えた地点（以下周辺部）に比べて降水成分の濃度が高く、pHの低い降水が観察されることが多かった。

2) pHは、北東からの冷たい気流が入り込む場合に平野南部で、南からの暖かい湿った空気が流れ込む場合には平野北部で、低くなることが多かった。

3) pHの変動によく対応した成分は、NH₄⁺、Ca₂₊、SO₄²⁻、NO₃⁻であり、pHの低い降水ではSO₄²⁻、NO₃⁻の濃度が高かった。

4) 降水に占める海塩由来分はSO₄²⁻の場合、初期降水の1mm目で大きかったが、10%を超える事例は少なかった。

5) NO_x、SO₂の二次生成物質であるNO₃⁻、SO₄²⁻に着目した場合、NO₃⁻/SO₄²⁻の値が大きくなるほどpHは低くなる例が多かった。なおこの値が1を超えることは少なかった。

6) 1mmごとの捕集では、各成分とも1mm目の濃度が高かったが、東京湾岸の地点では2mm目以降のpHが低くなる事例がよくみられた。

* Studies on Acid Rain of Kanto Area in Rainy Seasons (1984～89)

** G. SHIMIZU (山梨県衛生公害研究所), T. TAKAHASHI (山梨県衛生公害研究所)
M. HIRUTA (郡山公害対策センター), M. TOMOBE (茨城県公害技術センター)
M. KUBO (栃木県公害研究所), K. SEKIGUCHI (群馬県衛生公害研究所)
T. TAKANO (埼玉県公害センター), T. OSHIO (千葉県公害研究所)
I. KOYAMA (東京都環境科学研究所), H. MIMURA (神奈川県公害センター)
N. FUKUZAKI (新潟県衛生公害研究所), M. SHIKANO (長野県衛生公害研究所)
I. KUME (静岡県衛生環境センター), H. TSURUTA (横浜市公害研究所)

(関東地方公害対策推進本部大気汚染部会湿性大気汚染調査グループ)

Department of Air Pollution, Environmental Protection Measures Promotion Headquarters, Kanto District Governors Association

表1 関東平野の測定機関所在地における降水の性状と6月の大気汚染質濃度(平均値)

降水:1984-89年度, 大気汚染質:1984-88年度(1都6県1市), mm:降水量

年	平野部8地点									周辺部5地点**								
	mm	pH	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO _x	SO ₂	O _x	mm	pH	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO _x	SO ₂	O _x
84	168	4.6	1.8	1.0	300	170	33	7	35	111	4.5	1.7	1.0	190	110	15	5	44
85	195	4.5	1.6	1.0	310	200	37	7	42	172	5.0	0.9	0.4	160	70	15	6	46
86	70	4.2	4.0	2.7	280	190	29	7	40	73	4.7	1.4	0.9	110	60	14	5	46
87	57	4.8	1.7	1.0	100	50	34	7	51	26	4.8	1.3	1.0	30	30	13	5	54
*88	131	4.5	2.4	1.5	320	190	34	7	43	89	4.6	1.4	0.9	120	80	15	6	45
89	151	4.4	1.5	1.4	360	210	—	—	—	105	4.9	1.5	0.9	150	80	—	—	—

平均値:各地点の算術平均値,ただし降水濃度は降水量で重みづけした濃度
 NO_x,SO₂:「月平均値」の平均値,O_x:「昼間の日最高値の月平均値」の平均値
 単位 降水濃度 mg/l, 降水量 mg/m²/12d, 大気汚染質ppb,*千代田降水欠測,**降水は郡山を除く

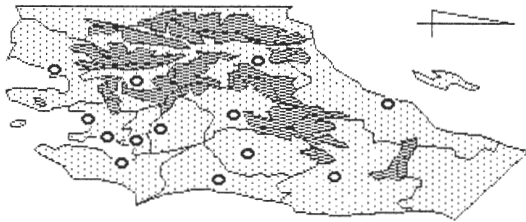


図1 各調査地点の位置

3. 各年の降水の特徴

公害センター等の所在地13地点(図1)を平野部と周辺部とに区別し,各年の降水の濃度と降水量,大気汚染質濃度の平均値を求めた(表1)。ここで,平野部と周辺部との区分は次のとおりとし,大気汚染質の濃度には()の測定局の6月の平均値³⁾を用いた。降水量と大気汚染質濃度には算術平均値を用いたが,降水成分の濃度には濃度と降水量から求めた降水量の合計を降水量の合計で除した値(降水量で重みづけした平均値)を用いた。

平野部:水戸(水戸石川局),宇都宮(雀宮中学校局),前橋(保健所局),浦和(公害センター局),市原(岩崎西局),千代田(都庁前局),横浜(磯子総合庁舎局),平塚(市役所局)
 周辺部:郡山(朝日局),新潟(立仏局),長野(衛生公害研究所局),甲府(衛公研局),静岡(中央測定局)

各年のうち,降水量が少なかった87年は移動性高気圧に覆われた期間が長く,平野部,周辺部とも降水成分の濃度は低く降水量も少なかった。86年も同様に降水は少なかったが,平野部では北東気流が入り込むなど梅雨期に特有な気象がみられた。その結果,濃度は

特に高くなり降水量は降水量の多い年とほぼ同量になった。梅雨型の天候が少なかった87年を除いた平野部の降水量(mg/m²/12d)は,NO₃⁻190±20,SO₄²⁻320±40など概ね一定(概ね±10%以内)とみなせる範囲にあった。大気汚染質についてもその平均値(ppb)はNO_x33±4,SO₄²⁻7±0とほぼ一定であった。

周辺部でも同様に,NO_x,SO₂濃度は一定とみなせる範囲にあったが,その濃度は平野部に較べて,NO_xは約1/2,SO₂は1~2ppb低かった。降水量は少なく,NO₃⁻やSO₄²⁻の濃度は低かった。また,降水量はSO₄²⁻150±40,NO₃⁻80±30と各年の変動が大きく,降水量の多い年ほど降水量は増加する傾向にあった。O_x濃度は平野部より高かった。

なお,84~88年の大気汚染質濃度と降水成分を比較したところ,イオウ酸化物では(SO₄²⁻濃度/SO₂濃度)が平野部,周辺部ともほぼ同じ値(約0.3)をとり,見掛け上大気汚染質濃度は降水濃度に反映していた。また,窒素酸化物では(NO₃⁻降水量/NO_x濃度)が同様にほぼ同じ値(4~5)となり,大気汚染質濃度は降水量に反映する傾向がみられた。

4. 各地点の降水の性状

期間中の降水量は静岡や平塚など南部の地点が多く,郡山,新潟,長野では少なかった。雷雨の影響があった宇都宮は降水量が多かった。各地点の降水の濃度と降水量,大気汚染質濃度の平均値を表2に示したが,各々次のような特徴があった。

1) 平野南部

千代田:NO_x,SO₂濃度は高かったが,O_x濃度は低く,SO₄²⁻濃度が高かった。pHは最も高かった。

横浜:NO_x,SO₂濃度が千代田に次いで高く,SO₄²⁻

表2 各地における降水濃度と大気汚染濃度(平均値)

降水:1986-89年度,大気汚染質:1984-88,()内:初期1mm降水

地点	降水量		EC μS/cm	NO ₃ ⁻		SO ₄ ²⁻		Cl ⁻ mg/m ²	NO _x	SO ₂	O _x
	mm	pH		mg/m ²	mg/l	mg/m ²	mg/l				
郡山	51	4.44 (4.44)	14	50	1.0 (3.9)	100	2.0 (6.1)	30	13	5	47
水戸	95	4.23 (3.95)	28	90	1.0 (5.3)	260	2.7 (7.6)	100	10	5	47
宇都宮	160	4.41 (4.10)	24	310	2.0 (7.0)	350	2.2 (6.6)	100	13	5	55
前橋	92	4.39 (4.17)	33	250	2.8 (7.8)	330	3.6 (9.4)	100	28	7	47
浦和	82	4.36 (3.95)	28	120	1.8 (7.8)	210	2.5 (9.1)	90	27	7	60
市原	84	4.72 (4.72)	15	100	1.2 (4.8)	250	3.0 (7.0)	90	19	6	34
*千代田	70	4.90 (5.02)	19	90	1.3 (7.0)	200	2.9 (6.7)	80	88	10	18
横浜	105	4.41 (4.08)	26	130	1.3 (6.1)	270	2.5 (6.1)	100	42	10	43
平塚	114	4.31 (3.92)	23	130	1.2 (5.6)	220	1.9 (7.4)	80	35	6	32
静岡	137	4.75 (3.94)	15	110	0.9 (5.9)	220	1.6 (6.5)	120	24	6	51
甲府	73	4.63 (4.44)	15	80	1.0 (3.4)	100	1.5 (3.9)	30	14	5	44
長野	38	4.69 (4.64)	14	40	1.1 (2.8)	50	1.2 (2.9)	20	11	7	52
新潟	46	4.75 (4.31)	11	30	0.6 (2.5)	50	1.1 (3.6)	30	11	5	42

平均値:各年の算術平均値,ただし降水濃度は降水量で重みづけした濃度

NO_x, SO₂:「月平均値」の平均値, O_x:「昼間の日最高値の月平均値」の平均値 *88年 降水欠測

の降下量が多かった。

市原:降水の EC は小さかったが, SO₄²⁻ 濃度は高かった。

平塚:初期降水の pH が 4 未満であり, 平野南部では横浜とともに NO₃⁻ の降下量が多かった。

浦和:Ox 濃度が最も高く, 初期降水の NO₃⁻, SO₄²⁻ 濃度が高かった。初期降水の pH は 4 未満であった。

2) 平野北部

前橋:NOx 濃度がやや高かった。NO₃⁻, SO₄²⁻ 濃度が特に高く降下量も多かった。

宇都宮:NOx, SO₂ 濃度は低かったが, 降水量が多く, NO₃⁻, SO₄²⁻ の降下量は特に多かった。

水戸:初期降水の pH が 4 未満であった。NO₃⁻ の降下量に較べて SO₄²⁻ の降下量が多かった。

3) 周辺部

静岡:性状は平塚によく似ていた。初期降水の pH が 4 未満であった。

甲府:濃度, 降下量とも静岡と長野の中間値であった。

長野:降水量が少なかった。降下量は新潟とともに特に少なかった。

新潟:EC が小さく, NO₃⁻ の濃度が低かった。

郡山:隣接する新潟に較べて, SO₄²⁻ の濃度が高く降下量も多かった。

なお, 大気汚染質の濃度は千代田から離れるにつれて低くなった。NOx 濃度は平野南部で高く, 平野北部では低かったが, 降水の NO₃⁻ 濃度は逆に南岸の静岡

から宇都宮, 前橋まで次第に増加する傾向がみられた。(図2, 3)。

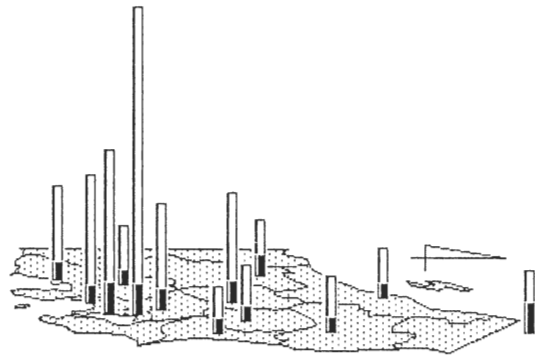


図2 6月の大気汚染質濃度 (黒:SO₂, 白:NO_x, 標準柱:各10ppb, 84-88年)

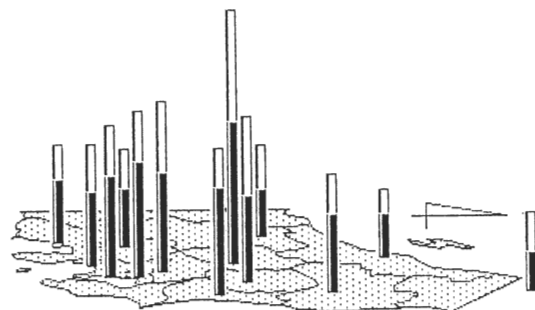


図3 調査期間中の降水濃度 (黒:SO₄²⁻, 白:NO₃⁻, 標準柱:各1mg/l, 86-89年)

また平野部の降下量 (mg/m²/12 d) は、SO₄²⁻ 280 ± 70, NO₃⁻ 200 ± 110, Cl⁻ 90 ± 10 の範囲にあった。その偏りは、Cl⁻ < SO₄²⁻ < NO₃⁻ の順序で大きくなり、NO₃⁻ の降下量は地点間の差が大きかった。SO₄²⁻, NO₃⁻ の降下量は宇都宮と前橋で多い傾向にあり、大気降下物でも同様であった。

5. 気象事例と降水の汚染度

梅雨期は前線の活動に伴う降水が多かったが、雷雨のように前線とは無関係な降水もあった。そこで降水をもたらす気象条件をいくつかの型に大別し、84年以降の調査で事例数の多かった5つの型を次に示した。事例数では南から暖湿流が流入した例が最も多かった。また関東南岸に前線が接近して小雨や霧雨となる場合は汚染度が特に高くなること (NO₃⁻ や SO₄²⁻ の濃度が著しく高くなり pH も低いこと) があり、注意が必要であった。これらの気象事例は初期 1 mm 降水にその影響が現われやすかった (表 3)。

1) 南から暖湿流: 前線上に発生する低気圧などの影響で前線の活動が活発になり、上空に暖かい湿った空気が大量に流れ込む。雨域が広く、降水量も多い。平野北部で汚染度が高くなる。調査期間の後半に多かった (図 4)。

2) 北東気流が流入: オホーツク海の高気圧が優勢となって平野に冷たい空気が入り込む。降水量はやや少なめで、平野南部で汚染度が高くなる。調査期間の初めに多かった (図 5)。

3) 前線が南岸に接近: 気温逆転層の位置が低いた

め大気汚染質は拡散しにくい。霧雨や小雨となった地点では降水の落下速度が遅いため汚染度が著しく高くなる。事例数は少なかった。

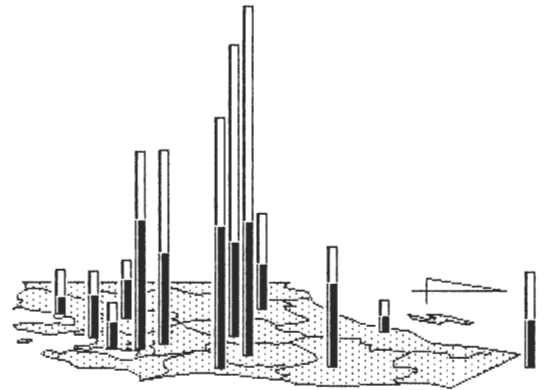


図 4 南から暖湿流が流入した88年6月29日の事例 (初期1mm降水, 黒: SO₄²⁻, 白: NO₃⁻, 標準柱: 各5mg/l)

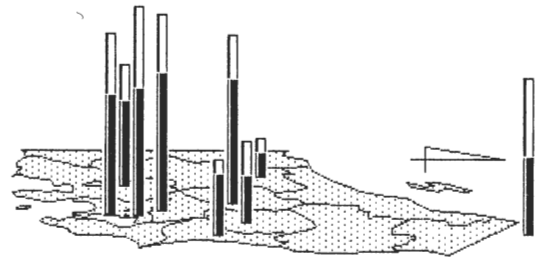


図 5 平野に北東気流が流入した85年6月17日の事例 (初期1mm降水, 黒: SO₄²⁻, 白: NO₃⁻, 標準柱: 各5mg/l)

表 3 気象事例と初期 1 mm 降水の濃度

(): -降水, mm : 降水量, 単位: μS/cm, mg/l

地 点	mm	pH	EC	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	mm	pH	EC	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
	北東気流が流入 (1985年6月17日)					南から暖湿流 (1988年6月29日)				
水 戸	54	5.40(4.98)	26(7)	3.9	0.9	33	3.54(4.15)	170(46)	15.0	11.4
宇都宮	38	4.70(5.34)	31(5)	3.0	2.2	38	3.53(4.39)	184(33)	14.1	23.0
浦 和	94	4.14(4.89)	74(9)	8.9	3.7	41	3.56(4.55)	144(17)	9.6	10.8
横 浜	28	4.26(4.84)	67(13)	7.7	3.9	44	3.91(4.40)	62(23)	1.9	2.7
平 塚	107	—(4.47)	—(16)	—	—	36	4.10(4.45)	55(20)	2.4	4.6
甲 府	17	4.51(4.68)	65(16)	5.5	2.3	25	4.37(4.50)	30(18)	1.9	4.3
新 潟	<1	5.76(5.76)	14(14)	1.6	1.1	22	4.62(4.77)	19(11)	1.6	1.6
	前線が接近 (1985年6月21日)					日本海を低気圧 (1989年6月27日)				
水 戸	6	3.72(3.98)	102(54)	14.6	7.7	33	3.72(3.99)	104(33)	14.7	8.7
宇都宮	18	3.54(4.09)	108(22)	8.0	9.7	66	3.62(4.05)	111(36)	10.5	7.9
浦 和	8	3.15(3.80)	385(91)	19.8	30.5	37	3.87(4.15)	118(44)	11.3	13.7
横 浜	12	3.96(4.54)	63(21)	7.0	3.6	58	4.34(4.23)	31(28)	2.3	2.6
平 塚	36	3.36(3.88)	271(72)	16.9	28.7	73	3.92(4.28)	67(27)	5.1	5.2
甲 府	11	4.91(5.18)	39(10)	4.9	2.5	35	4.11(4.64)	35(12)	2.8	3.9
新 潟	19	3.82(4.35)	97(24)	9.4	8.8	10	4.03(4.31)	53(10)	6.8	3.6

4) 雷雲が発生：上空に寒気が入り込んだり日射により地表が熱せられた場合、雷雲が発達して局地的に強い雨となる。雨域は狭い。汚染質を効率よく雲内に取り込むため汚染度が高い。

5) 低気圧が通過：南海上を通過する場合は、全体に降水の汚染度は低い。ただし日本海沿岸を通過する場合には平野北部で汚染度が高くなることがあった。

このように梅雨期の降水は、気象条件によって汚染度の高い地域が様々に変化した。これまでの調査では、降水量の多い「南から暖湿流」型の気象事例が多かったことが平野北部の NO_3^- や SO_4^{2-} 濃度とその降水量の平均値を高くしていたが、他の時期についても、これらの関係を把握することが必要であろう。また今後は、汚染度の高い地域と汚染質の大発生源地域である首都圏との関係を明らかにしていくことが課題であり、さらに酸性雨の生成機構の中で気象要因が果たす役割を検討していきたい。

6. おわりに

前線が南海上に停滞し広範囲で降水が観測される梅

雨期（6月中下旬）を選び、関東平野とその隣接地域で降水調査を行ってきた。降水中の NO_3^- と SO_4^{2-} の濃度は平野北部で高く、その降水量も多かった。しかし各地点ともこの期間の降水量は年間降水量の1/10以下と考えられ、この調査結果が各地点の降水の性状を代表するとは考えにくかった。関東平野やその隣接地域における降水の性状を十分に把握し、年間降水量などを求めていくためには、梅雨期以外の調査が必要であった。

末筆になったが、調査にご協力いただいた環境庁、各自治体および気象情報の収集に快く応じてくれた気象庁、気象台の各位にお礼を申し上げる。

—引用文献—

- 1) 関東地方公害対策推進本部大気汚染部会：湿性大気汚染共同調査報告書，1981～1989。
- 2) 環境庁大気保全局大気規制課：酸性成分分析調査実施細則，1988。
- 3) 環境庁大気保全局大気規制課：一般環境大気測定局測定結果報告，1984～1988。