

1993年暖候期における佐倉およびその周辺の酸性雨について

——環境教育の一環として——

中 村 圭 三

1. まえがき

前報（中村、1993）では、本学周辺の環境を題材とした教育システムについて検討した。ここでは、ヒートアイランド、高速道路の騒音、林地の役割、酸性雨、河川・湖沼の水質、ゴミ問題、焼却場周辺の環境問題、生物季節、杉花粉などの環境項目ごとに、授業の題材として取り扱う場合の時間別（授業時間内・外）、地域別

（キャンパス内、その周辺および通学圏、図1）の適性評価がなされた。その結果、酸性雨に関しては、授業時間内のみで取り扱う場合でも、基礎的な調査・観測・解析方法等を修得させ、その実態について一応の理解を深めさせることが可能であることが、明らかになった。また、さらに授業以外の時間も活用して調査・観測を実施すれば、正しい調査・観測・解析方法等を修得し、その実態の十分な理解が可能となる。

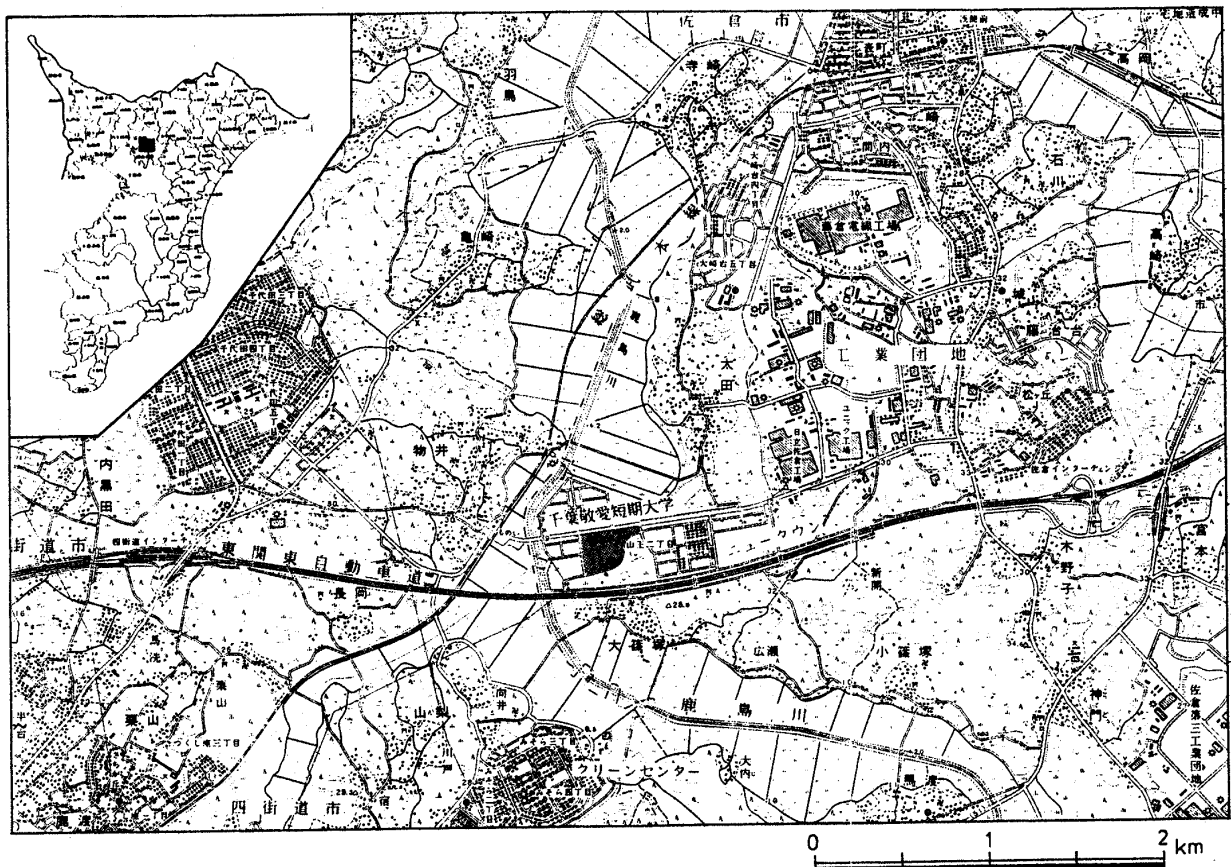


図1 観測地域

そこで、1993年度には、授業時間内・外の時間を活用し、キャンパス内、および学生の通学圏内における酸性雨の時間的、空間的分布の把握に取り組んだ。1993年の梅雨は、8月になっても継続し、ほとんど盛夏が見られないまま秋霖に移行して、戦後一番の冷夏に見回れた。ここでは、この冷夏を中心とする4月から9月までの暖候期における観測結果について報告する。

2. 教育研究方法

著者の担当する「演習Ⅰ」(1年生)、「演習Ⅱ」(2年生)においては、酸性雨問題をテーマとし、その成因・実態・影響・対策等について講義する一方、酸性雨に関する調査・観測・解析等についても並行して実施した。

本学内における酸性雨の調査・観測に当たっては、酸性雨を採水するために、ガラスロート(直径10.5cm)を差し込んだポリビン(500ml)を、本学環境情報研究所付属観測露場内の地上1.5m高度に設置し、1993年4月から5月上旬までの期間には、「演習Ⅱ」の受講生が、その後は「演習Ⅰ」の受講生が、交替で毎日昼休みに交換した。

また、本学学生の通学圏内における酸性雨分布に関する調査・観測に当たっては、「演習Ⅰ」、「演習Ⅱ」および「地球環境論」、「世界の地理」における学習の一環として実施した。この場合、学生は、よく洗浄したガラスコップを用いて指定した期間に自宅付近で酸性雨を採水し、配布した30mlポリビンに入れて冷蔵庫に保管しておき、次の授業時に回収した。これらの試料のpH、EC(電気伝導度)測定については、「地球環

境論」、「世界の地理」の授業時にも実施したが、おもに「演習Ⅰ」、「演習Ⅱ」の学生が東亜電波製ガラス電極型pHメーター(HM-30V)および電気伝導度計(CM-11P)で測定した。また、その成分については、島津製作所製イオンクロマトグラフ(LC-10A)によって、陽イオン(Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})および陰イオン(F^- , Cl^- , NO_2^- , Br^- , NO_3^- , SO_4^{2-})の11成分について分析した。

3. 酸性雨の観測結果

3.1 本学における観測結果

3.1.1 結果の概要

4月から9月までの期間に、34回の酸性雨観測を実施した。全期間および各月の観測結果を概観するために、pH、EC、各成分および降水に関する平均値、標準偏差、最大値、最小値等を表1にまとめた。

次に、これらの結果について詳しく述べることにする。

3.1.1.1 降水量

4月から9月までの6カ月間における、酸性雨観測時の降水量を図2に示す。なお、ここでは、前後4時間以上の無降水期間によって区切られた降水を、一降水と定義した。図2によると、4月、5月には、それぞれ平均値が9.8mm、9.3mmで、最大値でも19mmであったが、6月に入ると平均値23.0mm、最大値49mmと急激に増大した。7月には、最高125mmに達したが、平均値は27.0mmで6月よりもやや多い程度であった。

表1 1993年暖候期の佐倉における——降水の成分濃度および降水状況

| 期 間 | 統 計 | pH | EC | H ⁺ | Na ⁺ | NH ₄ ⁺ | Ca ²⁺ | nssCa ²⁺ | Mg ²⁺ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | nssSO ₄ ²⁻ | 降水量 (mm) | 降雨時間 (h) | 降水強度 (mm/h) |
|-----|------|------|--------|----------------|-----------------|------------------------------|------------------|---------------------|------------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------|-------------|----------------|
| 全期間 | 平均値 | 5.05 | 64.44 | 26.00 | 1.34 | 0.93 | 0.82 | 0.77 | 0.23 | 5.40 | 2.47 | 3.05 | 2.74 | 14.8 | 8.8 | 3.9 |
| | 標準偏差 | 0.72 | 5.41 | 40.50 | 1.75 | 0.54 | 0.73 | 0.68 | 0.25 | 6.32 | 2.18 | 2.36 | 2.09 | 503 | 238 | 4.9 |
| | 最大値 | 6.93 | 213.00 | 208.90 | 10.05 | 2.35 | 3.20 | 2.82 | 1.21 | 24.82 | 6.86 | 10.22 | 7.70 | 125 | 42 | 19 |
| | 最小値 | 3.68 | 5.50 | 0.10 | 0.08 | 0.28 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0 | 1 | 0 |
| 4 月 | 平 均 | 4.58 | 63.70 | 28.40 | 0.31 | 0.73 | 1.09 | 1.08 | 0.14 | 5.70 | 3.43 | 2.84 | 2.81 | 9.8 | 9.3 | 3.8 |
| | 標準偏差 | 0.17 | 0.83 | 10.60 | 0.30 | 0.14 | 0.56 | 0.57 | 0.11 | 6.81 | 2.41 | 1.79 | 1.78 | 39 | 37 | 3.6 |
| | 最 高 | 4.77 | 64.60 | 39.80 | 0.82 | 0.97 | 1.84 | 1.83 | 0.29 | 17.48 | 6.79 | 4.97 | 4.92 | 17 | 24 | 10 |
| | 最 低 | 4.40 | 62.60 | 17.00 | 0.08 | 0.59 | 0.25 | 0.22 | 0.0 | 1.33 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2 | 2 | 1 |
| 5 月 | 平 均 | 4.66 | 34.24 | 33.10 | 0.62 | 0.79 | 0.71 | 0.68 | 0.20 | 1.75 | 2.30 | 3.00 | 2.84 | 9.3 | 5.5 | 2.3 |
| | 標準偏差 | 0.40 | 15.43 | 29.20 | 0.47 | 0.28 | 0.35 | 0.36 | 0.16 | 1.39 | 2.80 | 2.17 | 2.20 | 37 | 22 | 1.3 |
| | 最 高 | 5.15 | 48.90 | 81.30 | 1.36 | 1.24 | 1.26 | 1.25 | 0.44 | 3.87 | 6.86 | 6.67 | 6.60 | 19 | 13 | 4 |
| | 最 低 | 4.09 | 12.92 | 7.10 | 0.14 | 0.53 | 0.37 | 0.34 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.35 | 1.18 | 1 | 1 | 1 |
| 6 月 | 平 均 | 5.78 | 80.60 | 8.00 | 0.79 | 0.88 | 0.41 | 0.38 | 0.39 | 1.34 | 2.02 | 2.24 | 2.07 | 23.0 | 17.8 | 5.3 |
| | 標準偏差 | 0.87 | 63.07 | 11.70 | 0.52 | 0.53 | 0.21 | 0.20 | 0.48 | 0.94 | 1.40 | 1.96 | 1.99 | 92 | 71 | 4.1 |
| | 最 高 | 6.93 | 161.00 | 28.20 | 1.46 | 1.77 | 0.75 | 0.70 | 1.21 | 2.48 | 3.91 | 5.39 | 5.34 | 49 | 42 | 12 |
| | 最 低 | 4.55 | 15.49 | 0.10 | 0.18 | 0.40 | 0.18 | 0.17 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2 | 4 | 1 |
| 7 月 | 平 均 | 5.45 | 100.66 | 7.00 | 0.91 | 0.66 | 0.31 | 0.28 | 0.11 | 7.44 | 0.97 | 1.30 | 1.15 | 27.0 | 7.1 | 6.6 |
| | 標準偏差 | 0.48 | 66.98 | 8.20 | 0.66 | 0.31 | 0.19 | 0.17 | 0.09 | 9.16 | 1.28 | 1.48 | 1.35 | 216 | 57 | 6.2 |
| | 最 高 | 6.17 | 213.00 | 25.70 | 2.59 | 1.15 | 0.46 | 0.43 | 0.24 | 24.82 | 3.11 | 4.18 | 3.94 | 125 | 23 | 19 |
| | 最 低 | 4.59 | 11.81 | 0.70 | 0.31 | 0.28 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.89 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1 | 1 | 1 |
| 8 月 | 平 均 | 4.84 | 49.43 | 46.80 | 1.21 | 0.83 | 0.65 | 0.61 | 0.17 | 5.77 | 2.54 | 3.90 | 3.59 | 10.1 | 2.8 | 3.3 |
| | 標準偏差 | 0.77 | 34.35 | 65.80 | 0.73 | 0.36 | 0.49 | 0.46 | 0.14 | 5.48 | 2.12 | 1.81 | 1.67 | 81 | 14 | 5.6 |
| | 最 高 | 6.18 | 98.20 | 208.90 | 2.85 | 1.57 | 1.59 | 1.48 | 0.45 | 17.75 | 5.41 | 6.49 | 5.87 | 64 | 8 | 18 |
| | 最 低 | 3.68 | 5.50 | 0.70 | 0.41 | 0.43 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.84 | 0.0 | 1.92 | 1.72 | 0 | 1 | 0 |
| 9 月 | 平 均 | 4.88 | 40.85 | 29.40 | 3.63 | 1.68 | 1.87 | 1.73 | 0.44 | 7.14 | 4.13 | 4.97 | 4.06 | 6.3 | 18.5 | 1.2 |
| | 標準偏差 | 0.57 | 23.10 | 37.20 | 2.98 | 0.62 | 0.82 | 0.73 | 0.19 | 3.61 | 1.32 | 2.67 | 2.06 | 38 | 37 | 1.3 |
| | 最 高 | 5.75 | 89.80 | 109.60 | 10.05 | 2.35 | 3.20 | 2.82 | 0.77 | 11.99 | 6.15 | 10.22 | 7.70 | 32 | 33 | 3 |
| | 最 低 | 3.96 | 23.10 | 1.80 | 1.51 | 0.72 | 0.93 | 0.88 | 0.24 | 1.16 | 2.09 | 2.26 | 1.88 | 0 | 4 | 0 |

単位: EC($\mu\text{S}/\text{cm}$)、H⁺($\mu\text{eq}/\ell$)、各成分(mg/ ℓ)

太字: 合計値

降水強度は、最大一時間降水量で示す

8 月には、64mmを除くと、他は全て 6 mm以下で、平均すると10.1mmであった。9 月に入ると 1 mm未満のことが多くなり、平均値も3.8mmと 6 カ月間で最低であった。

3.1.1.2 pH

降水は、落下中に大気中の CO_2 を吸収し、平衡状態に達すると pH5.6 程度を呈するようになる。そのため、一般的には、pH5.6 以下の降水を酸性雨と称する。図 3 は、本学で 1993 年 4 月 1 日から同年 9 月末日までの期間に観測した一降水中の pH 値の時間的推移を示したものである。

この図によると、34 サンプル中 26 例 (76.5%) が酸性雨であり、pH4 以下も 2 例ある。4 月、5 月の降水は全てが酸性雨であった。特に、4 月の降水は pH4.40-4.77 の範囲にあり、標準偏差は、0.17 であった。6 月以降 pH の変動は大きくなり、pH6 以上の値が、6 月から 8 月にかけては毎月出現する一方で、pH4 未満の値も、8 月と 9 月に出現した。そのため標準偏差は急増し、6 月には 0.87、8 月には 0.77 に達した。

次に、pH 値の頻度分布について調べるために、図 4 を作成した。この図では、pH 値は 0.5

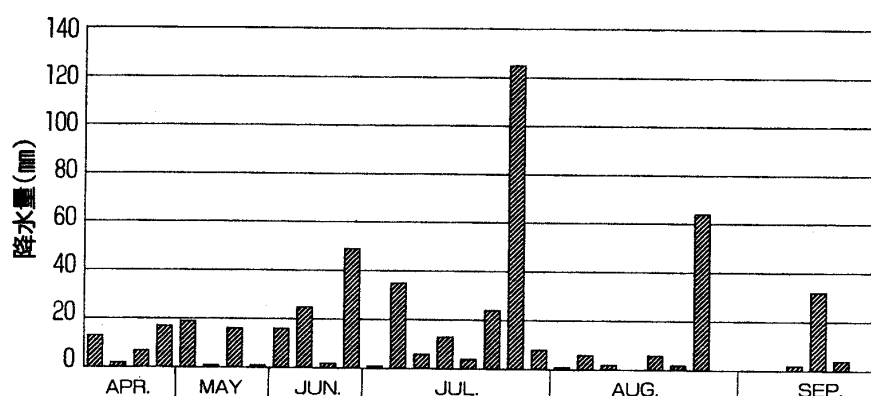


図 2 酸性雨観測時における降水量の時間的推移 1993 年 4 月 - 9 月

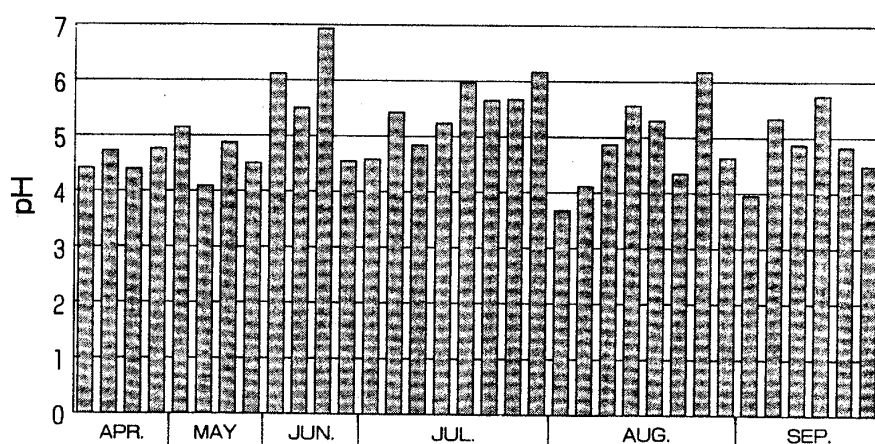


図 3 pH の時間的推移 1993 年 4 月 - 9 月

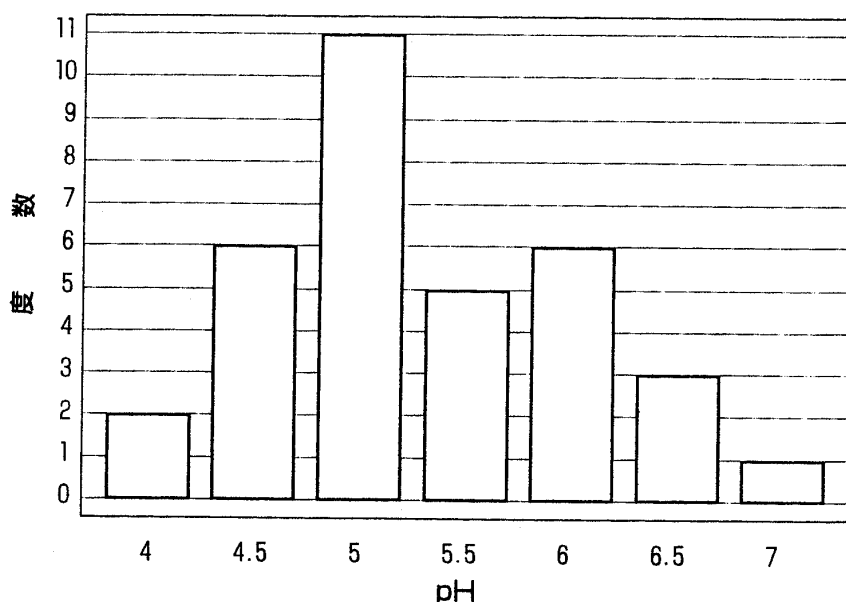


図 4 pH の頻度分布

づつ変化している。最も出現頻度数が高いのは、pH4.5-5.0 で 34 例中 11 例 (32.4%) あり、平均

値はpH5.05である。また、pH値5.5以下は24例あつて76.6%を占め、pH値4.0以下も2例(5.9%)存在する。さらに、pH値と降水量との関

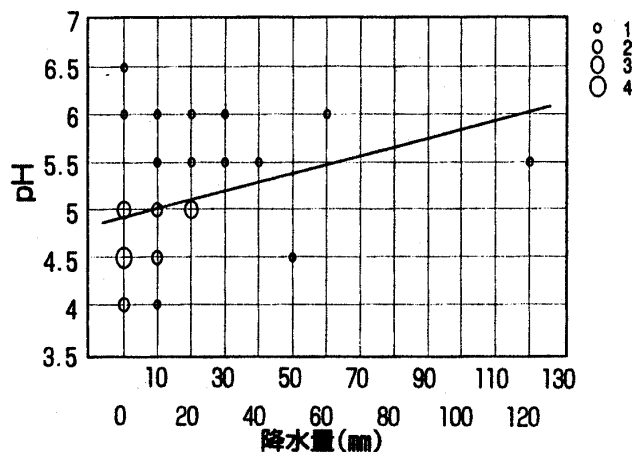


図5 pHと降水量との関係

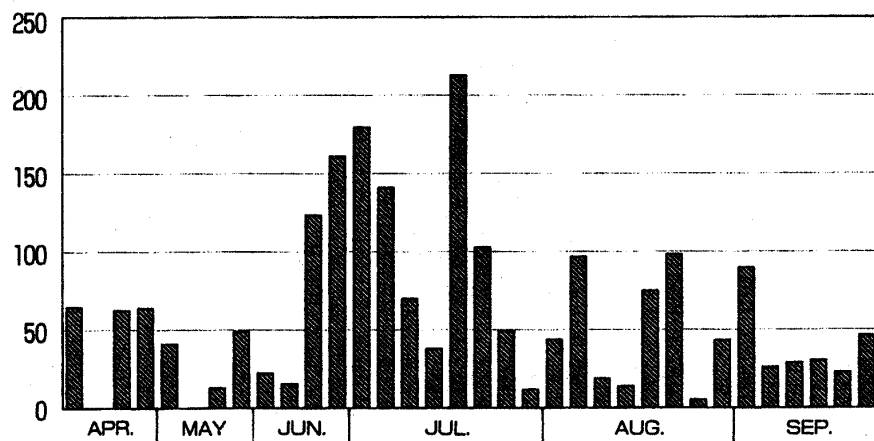


図6 ECの時間的推移 単位: $\mu\text{s}/\text{cm}$ 1993年4月-9月

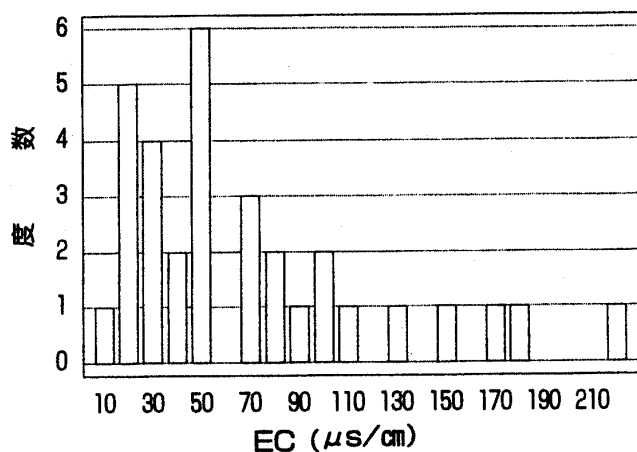


図7 ECの頻度分布

係を示す図5によると、両者の間には正の相関があることがわかる。

3.1.1.3 EC

次に、同期間におけるECの時間的推移を知るために、図6を作成した。この図によると、4月、5月のECの平均値はそれぞれ $63.70 \mu\text{s}/\text{cm}$ 、 $34.24 \mu\text{s}/\text{cm}$ 、標準偏差も $0.83 \mu\text{s}/\text{cm}$ 、 $15.43 \mu\text{s}/\text{cm}$ とpHと同様に、比較的安定した小さな値を示している。ところが6月の梅雨入りと同時にその値は急増し、6月、7月には $100 \mu\text{s}/\text{cm}$ を超えることが多くなった。それに伴い6月、7月の平均値はそれぞれ $80.60 \mu\text{s}/\text{cm}$ 、 $100.$

$66 \mu\text{s}/\text{cm}$ と大きくなり、その標準偏差はそれぞれ $63.07 \mu\text{s}/\text{cm}$ 、 $66.98 \mu\text{s}/\text{cm}$ であった。その後値は小さくなり、8月には $100 \mu\text{s}/\text{cm}$ 以下、9月にはほとんどが $50 \mu\text{s}/\text{cm}$ 以下となった。

次に、EC $10 \mu\text{s}/\text{cm}$ ごとの頻度分布を知るために図7を作成した。50 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 以下の度数は18で、全体の56.35%に当たる。度数は

EC値の増加とともに減少し、 $100 \mu\text{s}/\text{cm}$ 以上は18.8%に過ぎない。

3.1.2 成分分析結果

降水の成分については、陽イオン(Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) および陰イオン(F^- , Cl^- , NO_2^- , Br^- , NO_3^- , SO_4^{2-})をイオンクロマトグラフで分析した。また、これらの成分中、 Na^+ については、100%海洋由来

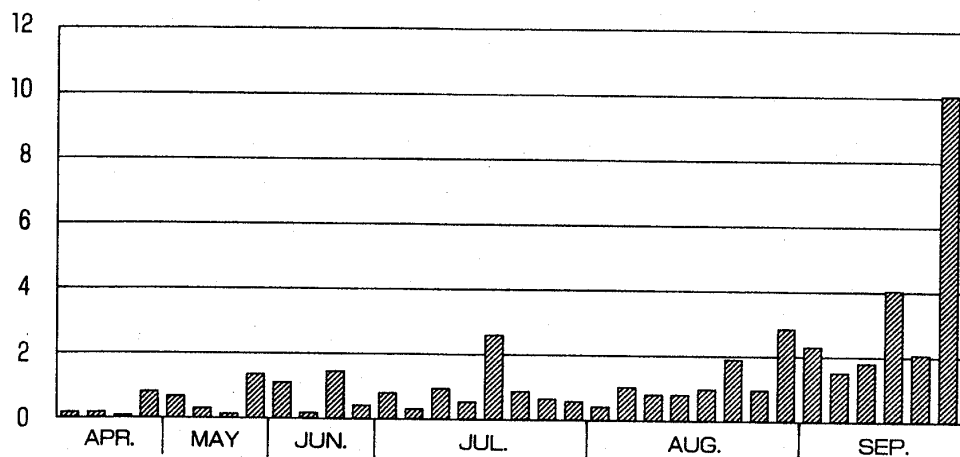


図8 Na⁺濃度の時間的推移 単位: mg/ℓ 1993年4月-9月

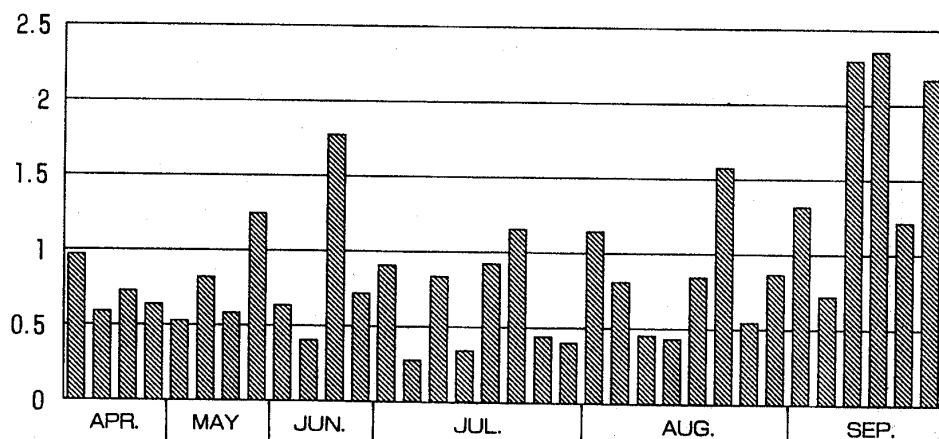


図9 NH₄⁺濃度の時間的推移 単位: mg/ℓ 1993年4月-9月

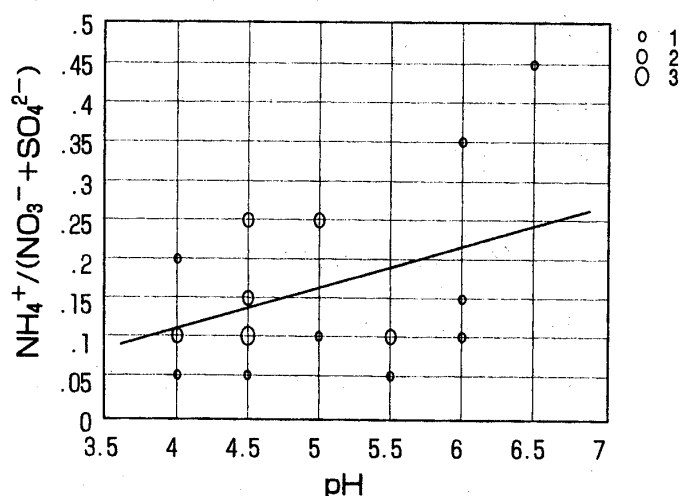


図10 NH₄⁺/(NO₃⁻+SO₄²⁻) 濃度比とpHとの関係

であると仮定し、非海洋由来 (non sea salt) の成分 nss Ca^{2+} , nss SO_4^{2-} についても算出した。

3.1.2.1 Na⁺濃度

1993年4月から9月までに観測した、一降水中のNa⁺濃度の時間的推移を、図8に示す。Na⁺は、その大部分が海洋由来であると考えられている。その濃度は、図8に示すように、4月の平均値0.31mg/ℓから9月の平均値3.63mg/ℓまで増加傾向にある。特に、9月の平均値が、8月の平均値 (1.21mg/ℓ) の3倍であることは注目に値する。

3.1.2.2 NH₄⁺濃度

観測期間中の最高値は9月に観測された2.35mg/ℓであった。(図9)。NH₄⁺は、後述のCa²⁺と同様、降水の酸性化を緩和する性質がある。図10は、NH₄⁺/(NO₃⁻+SO₄²⁻)濃度比とpHとの関係を示したもので、この比が大きくなると、pH値が増大することがわかる。

3.1.2.3 Ca^{2+} 濃度・nss Ca^{2+} 濃度

Ca^{2+} の時間的推移は、全体的にみると、7月に極小を持つ谷型を示す(図11)。6月、7月の平均値がそれぞれ0.41mg/ℓ、0.31mg/ℓであるのに対し、4月、9月の平均値はそれぞれ1.09mg/ℓ、1.87mg/ℓと高い値を示している。特に9月には、最高値3.20mg/ℓが出現した。また、これ

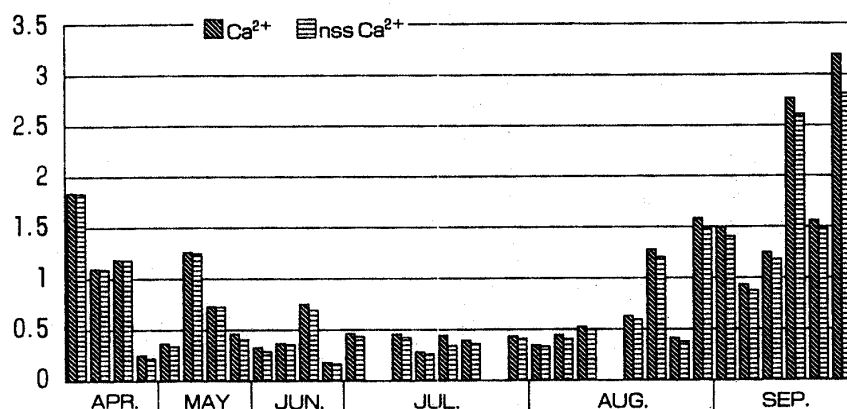


図11 Ca^{2+} 濃度とnss Ca^{2+} 濃度の時間的推移

単位：mg/ℓ 1993年4月－9月

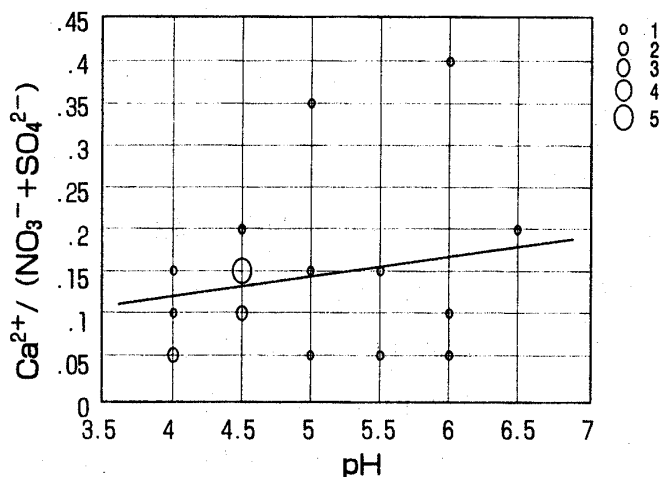


図12 $\text{Ca}^{2+} / (\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 濃度比とpHとの関係

らの大部分は、非海洋由来であった。図12は、 $\text{Ca}^{2+} / (\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 濃度比とpHとの関係、また、図13は、 $(\text{NH}_4^+ + \text{Ca}^{2+}) / (\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 濃度比とpHとの関係を示したもので、前述の NH_4^+ と同様に、 Ca^{2+} が降水の酸性化を緩和していることが理解される。

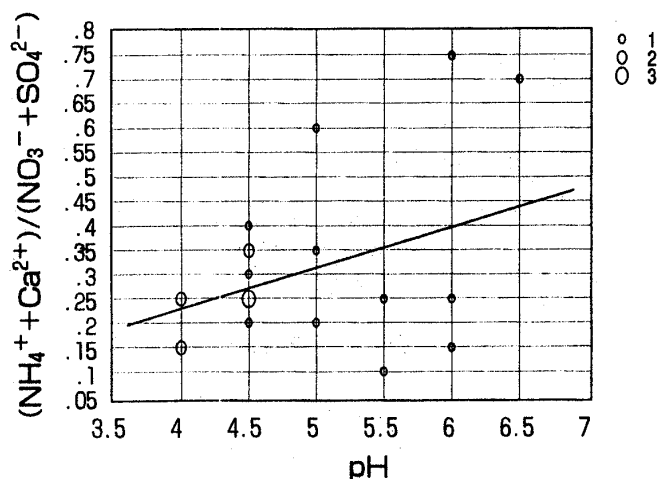


図13 $(\text{NH}_4^+ + \text{Ca}^{2+}) / (\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 濃度比とpHとの関係

3.1.2.4 Mg^{2+} 濃度

降水中に含まれる量は、6月に1.21mg/ℓが

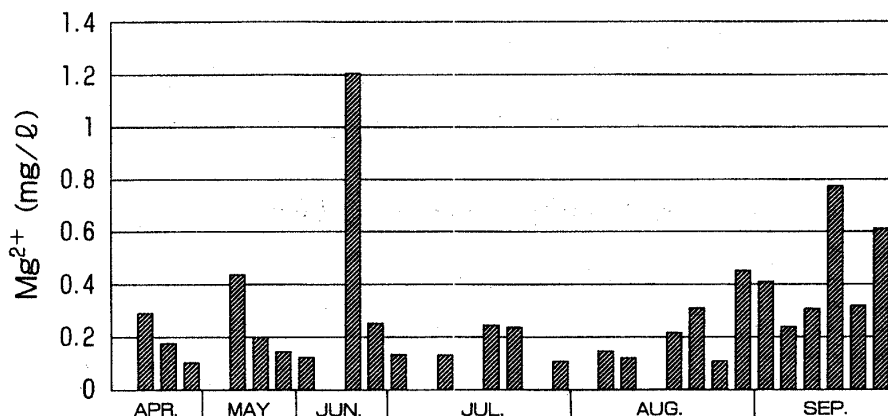


図14 Mg^{2+} 濃度の時間的推移 単位：mg/ℓ 1993年4月－9月

出現したのを除くと、他はすべて0.8mg/ℓ未満であった(図14)。また、平均値では、他の成分と同様9月が最高で0.44mg/ℓであった。

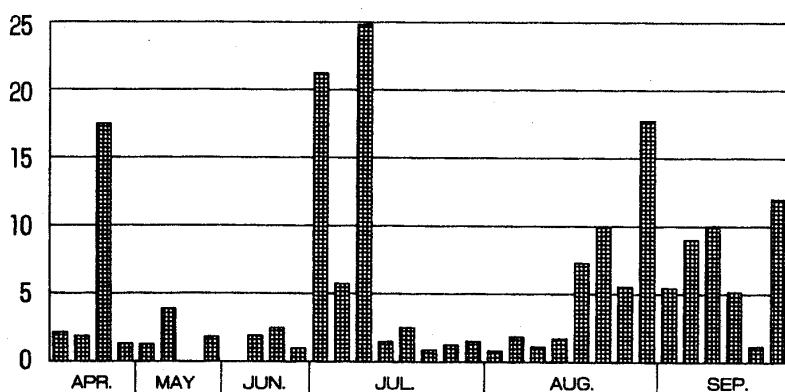


図15 Cl^- 濃度の時間的推移 単位: mg/ℓ
1993年4月-9月

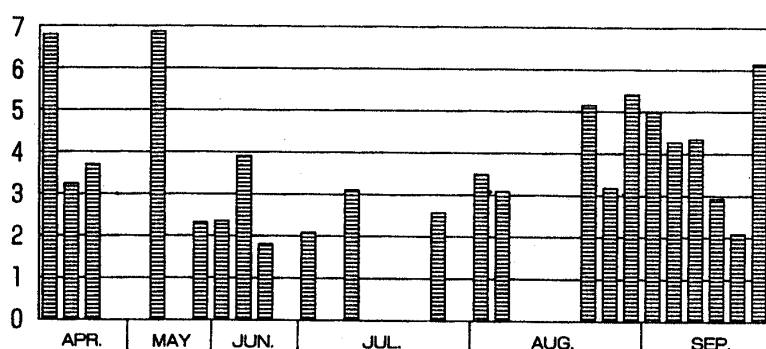


図16 NO_3^- 濃度の時間的推移 単位: mg/ℓ
1993年4月-9月

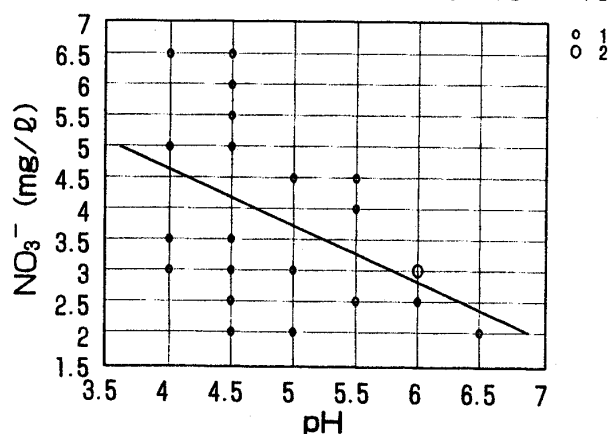


図17 NO_3^- 濃度とpHとの関係

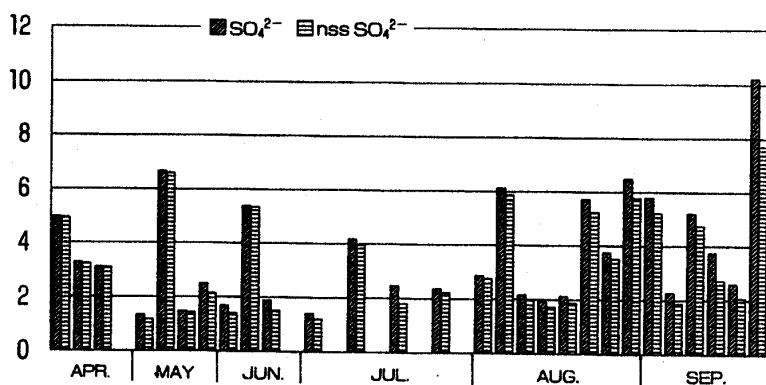


図18 SO_4^{2-} 濃度と nss SO_4^{2-} 濃度の時間的推移
単位: mg/ℓ 1993年4月-9月

3.1.2.5 Cl^- 濃度

Cl^- は4月に一度 $17.48\text{mg}/\ell$ が出現したものの、それを除くと4月から6月までは数 mg/ℓ にとどまった(図15)。ところが7月に入ると急に大きな値が出現し始め、最高値は $24.82\text{mg}/\ell$ に達した。この値は、4月から9月までの期間中の最高値でもあった。その後、7月中旬から再び数 mg/ℓ の値にもどるが、8月中旬以降 $10\text{mg}/\ell$ 台の値が4回出現した。

3.1.2.6 NO_3^- 濃度

図16によると、 NO_3^- 濃度の時間的推移は、梅雨期の7月に極小値を持つ分布型を示す。 NO_3^- は、 SO_4^{2-} とともに降水の酸性化に寄与する主なイオンと考えられる。 NO_3^- とpH値との間には、図17に示すように負の相関が見られ、 NO_3^- が高濃度の時にpH値が低くなっている。

3.1.2.7 $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{nss}$

SO_4^{2-} 濃度

4月から9月までの観測期間全体を通して見ると、 NO_3^- と同様に7月に極小値を持つ分布型を示す(図18)。そこで両者の関係を知るために、図19を作成した。

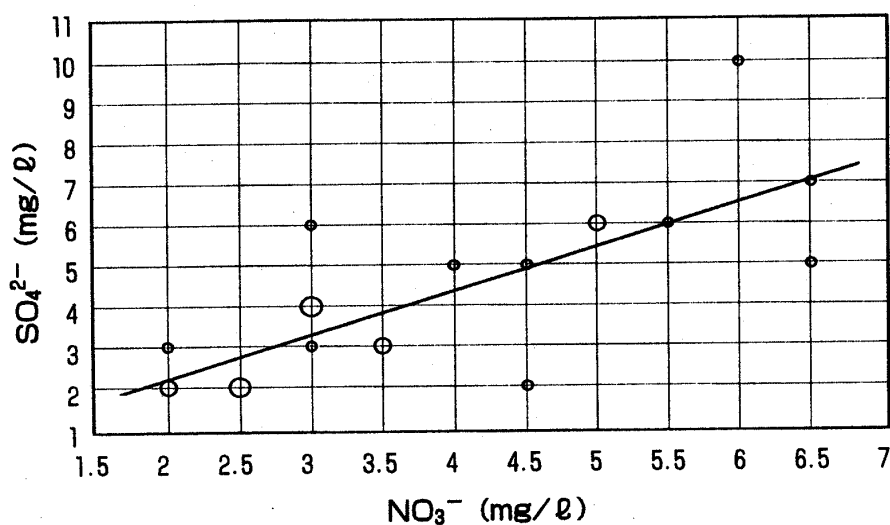


図19 NO₃⁻濃度とSO₄²⁻濃度との関係

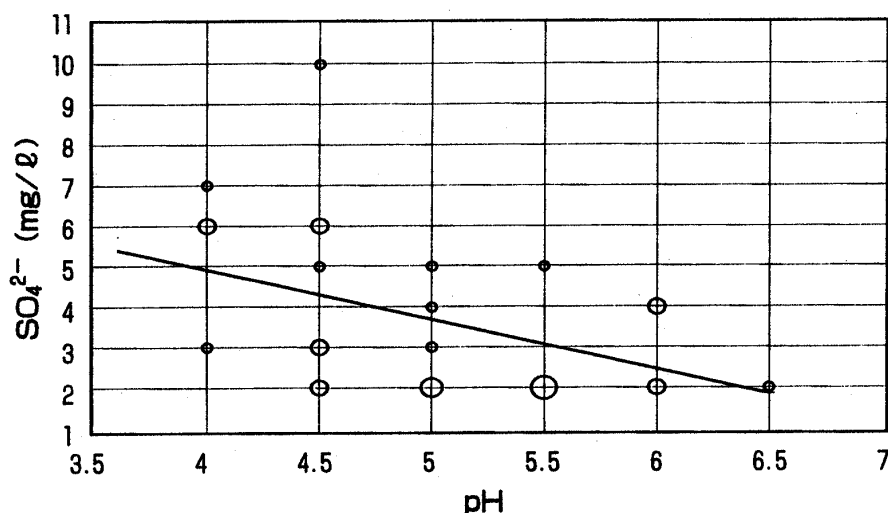


図20 SO₄²⁻濃度とpHとの関係

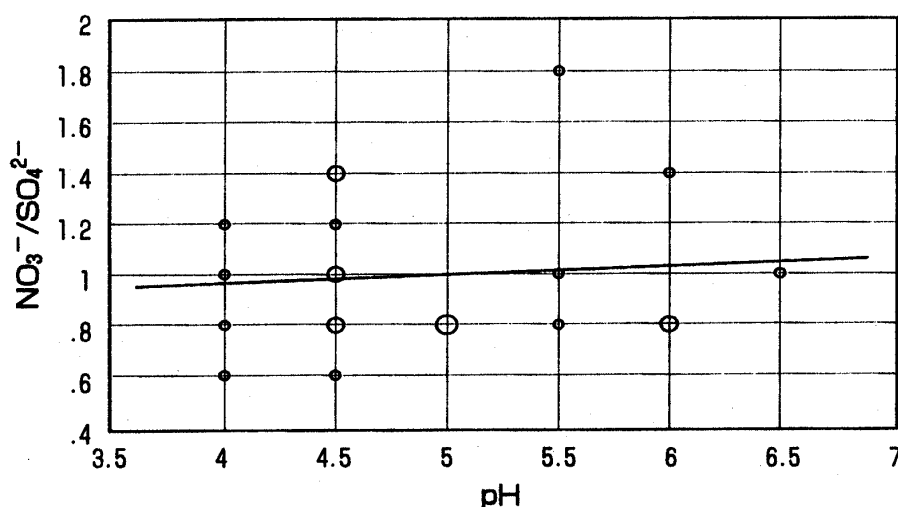


図21 NO₃⁻/SO₄²⁻濃度比とpHとの関係

この図によると、NO₃⁻とSO₄²⁻は正の相関（相関係数0.85）を示し、

$$SO_4^{2-} = 0.918NO_3^- + 0.786$$

の一次式で表される。

SO₄²⁻とpHとの関係は、図20に示すようにNO₃⁻と同様の負の相関を示す。そこで、

NO₃⁻とSO₄²⁻とのどちらが佐倉における降水の酸性化に寄与しているかを知るために、pH値と、NO₃⁻/SO₄²⁻濃度比（以後NS比という）との関係を示す図21を作成した。

この図によると、降水の低pH値化にはNO₃⁻よりもSO₄²⁻の方がより大きく寄与していることがわかる。この傾向は、千葉県による酸性雨調査結果（千葉県、1993）にも認められ、佐倉の酸性雨には、京葉工業地帯方面から移送される酸性降下物の寄与が大きいことを示すものと考ええる。さらに、NO₃⁻、SO₄²⁻お

よびpHとの関係を知るために、図22を作成した。それによると、 NO_3^- および SO_4^{2-} の値の増加とともに、pH値が減少し、酸性が強まることがわかる。これらの関係は、次式で示され

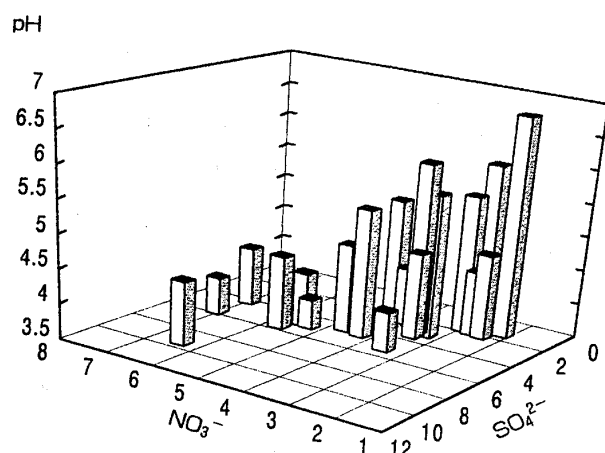


図22 NO_3^- 濃度、 SO_4^{2-} 濃度およびpHとの関係

る。

$$\text{pH} = -0.106\text{NO}_3^- - 0.048\text{SO}_4^{2-} + 5.468 \quad R^2 = 0.208$$

ところで、 SO_4^{2-} に対する nssSO_4^{2-} の割合について見ると、4月にはほとんど nssSO_4^{2-} であったが、5月以降その割合は次第に減少していることがわかる。

3.1.2.8 イオン濃度組成

以上、各イオン濃度に見られる諸特徴について記してきたが、これらの全体像を知るために、主な陽イオン (Na^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) および陰イオン (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) の濃度組成 (mg/ℓ) を図23に示した。この図によると、8月下旬から9月にかけて、高濃度になる頻度が高い傾向が認められる。

その主な原因としては、他の月に比べて降水量が少なかったことが上げられる。

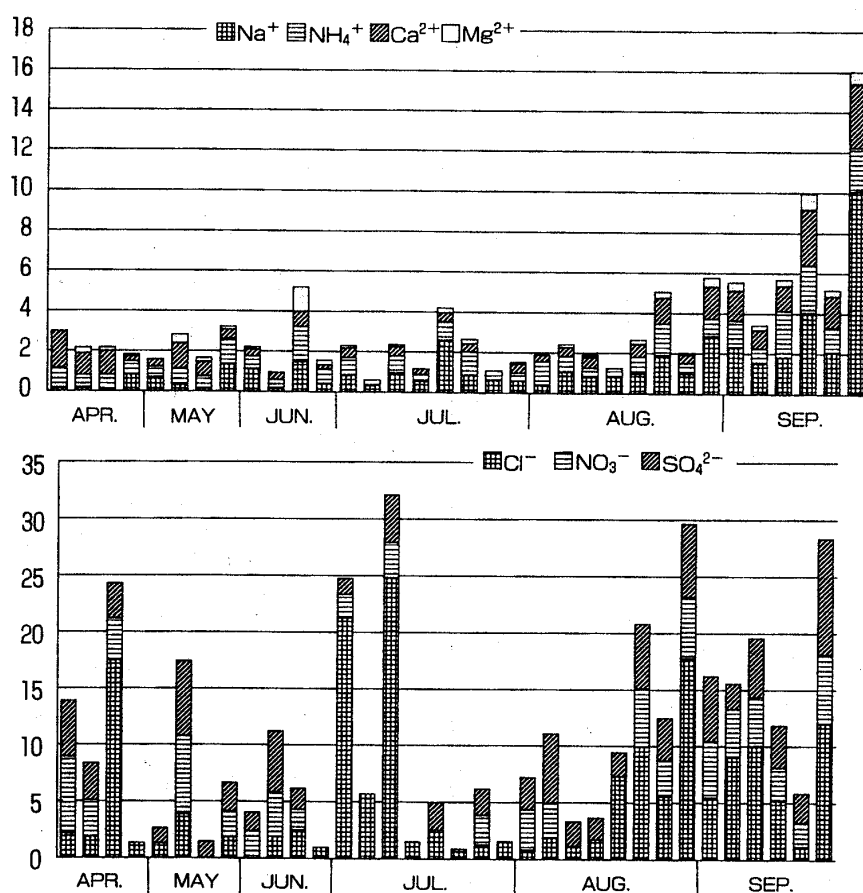


図23 イオン濃度組成図 上：陽イオン 下：陰イオン
単位： mg/ℓ

3.2 気象条件との関係

酸性雨と気象条件との関係については、これまでに古明地ほか (1980)、小山ほか (1982, 1985)、佐藤 (1991) などによる研究により、気圧配置型、降水特性などとの関係が明らかになりつつある。ここでは、佐倉における暖候期の酸性雨について、気象的な特性について見ていきたい。まず、1993年4月1日から9月30日までの6カ月間に酸性雨を観測した日の気圧配置型を、次のように分類した。

| | |
|----------------|-----|
| A. 寒冷前線通過型 | 2 例 |
| B. 南岸前線停滞型 | 11例 |
| C. 南沖前線停滞型 | 4 例 |
| D. 南岸前線上低気圧通過型 | 4 例 |
| E. 低気圧北側通過型 | 2 例 |
| F. 低気圧南岸通過型 | 3 例 |
| G. 台 風 型 | 3 例 |
| H. そ の 他 | 7 例 |

この分類に従い、気圧配置型ごとのpH、EC、 H^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 $nss\ Ca^{2+}$ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 $nss\ SO_4^{2-}$ 、降水量、降水時間、降水強度などの平均値、標準偏差、最大値、最小値を表2に示す。次に、この表に基づき、気圧配置型ごとの酸性雨の特徴について見ていくことにする。

A. 寒冷前線通過型

サンプル数が少なく詳しいことはわからないが、pHの平均値は4.83であった。 NO_3^- に関しては、全期間を通じて2番目に高い値(6.79 mg/l)が出現した。

B. 南岸前線停滞型

NEの風が卓越する。平均降水量13.2mm、平均降水強度は、4.0mm/hであった。またpH、ECの平均値は、それぞれ、4.85、57.76であった。 SO_4^{2-} の平均値は3.58mg/lで、南沖前線停滞型に次いで2番目に大きな値を示している。また、 Cl^- の平均値も、6.19mg/lで、同じく2番目に大きな値になっている。

C. 南沖前線停滞型

この型の場合佐倉では、Nの風向が卓越する。海洋由来の Na^+ の平均値は3.75mg/lと、全気圧配置型の中で最高値を示している。このことから、この Na^+ はN寄りの気流によって運ばれてきたものと推定される。また、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} の平均値もそれぞれ1.34mg/l、1.54mg/l、3.71mg/l、4.39mg/lと全気圧配置型中最も大きな値を示している。

D. 南岸前線上低気圧通過型

この気圧配置型においては、4例中全てが酸性雨であった。全観測期間中のpHの最低値3.68はこの型に出現し、その時のECは、43.80 $\mu s/cm$ であった。また、それに対応し、ECの平均値は最も高い120.28 $\mu s/cm$ を示した。 Ca^{2+} の平均値が0.36mg/lと2番目に低い値であったことに比して、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} の値がそれぞれ2.17mg/l、2.60mg/lと高かったために、低pH値が出現した。

E. 低気圧北側通過型

佐倉の北側を低気圧が通過したのは、2例のみであった。S寄りの風が卓越し、pHの平均値は6.53と最も高い値を記録した。また、 Mg^{2+} の平均値は0.66mg/lで、全気圧配置型の中で最も高い値であった。

F. 低気圧南岸通過型

すべての降水が酸性雨であった。 NO_3^- 、 SO_4^{2-} の平均値はそれぞれ2.32mg/l、2.57mg/lであり、pHの平均値は、2番目に小

表 2 気象型別に見た1993年暖候期の佐倉における——降水の成分濃度および降水状況

| 気圧配置型 | 統計 | pH | EC | H ⁺ | Na ⁺ | NH ₄ ⁺ | Ca ²⁺ | nssCa ²⁺ | Mg ²⁺ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | nssSO ₄ ²⁻ | 降水量 (mm) | 降雨時間 (h) | 降水強度 (mm/h) |
|---------------|------|------|--------|----------------|-----------------|------------------------------|------------------|---------------------|------------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------|-------------|----------------|
| 寒 冷 前 線 過 通 | 平均値 | 4.83 | 51.25 | 21.90 | 0.35 | 0.66 | 1.05 | 1.05 | 0.0 | 1.82 | 3.40 | 2.48 | 2.46 | 13.0 | 2.5 | 9.5 |
| | 標準偏差 | 0.41 | 13.35 | 16.10 | 0.18 | 0.31 | 0.78 | 0.78 | 0.0 | 0.33 | 3.40 | 2.48 | 2.46 | 26 | 5 | 0.5 |
| | 最大値 | 5.24 | 64.60 | 38.00 | 0.53 | 0.97 | 1.84 | 1.83 | 0.0 | 2.14 | 6.79 | 4.97 | 4.92 | 13 | 3 | 10 |
| | 最小値 | 4.42 | 37.90 | 5.80 | 0.17 | 0.34 | 0.28 | 0.26 | 0.0 | 1.49 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 13 | 2 | 9 |
| 南 岸 前 線 停 滯 | 平均 | 4.85 | 57.76 | 29.50 | 1.20 | 0.93 | 0.86 | 0.81 | 0.24 | 6.19 | 2.72 | 3.58 | 3.31 | 13.2 | 6.1 | 4.0 |
| | 標準偏差 | 0.60 | 41.46 | 33.60 | 0.85 | 0.56 | 0.51 | 0.49 | 0.15 | 4.84 | 2.62 | 2.42 | 2.25 | 145 | 43 | 5.6 |
| | 最高 | 6.18 | 140.90 | 109.60 | 2.85 | 2.30 | 1.59 | 1.48 | 0.45 | 17.75 | 6.86 | 6.67 | 6.60 | 64 | 24 | 18 |
| | 最低 | 3.96 | 5.50 | 0.70 | 0.14 | 0.28 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0 | 1 | 0 |
| 南 沖 前 線 停 滯 | 平均 | 4.80 | 36.15 | 20.60 | 3.75 | 1.34 | 1.54 | 1.40 | 0.33 | 6.00 | 3.71 | 4.39 | 3.45 | 1.3 | 2.5 | 0.5 |
| | 標準偏差 | 0.35 | 11.59 | 11.60 | 3.65 | 0.52 | 1.03 | 0.90 | 0.17 | 4.63 | 1.64 | 3.37 | 2.45 | 5 | 5 | 0.5 |
| | 最高 | 5.35 | 48.90 | 32.40 | 10.05 | 2.17 | 3.20 | 2.82 | 0.61 | 11.99 | 6.15 | 10.22 | 7.70 | 4 | 4 | 1 |
| | 最低 | 4.49 | 23.10 | 4.50 | 1.36 | 0.72 | 0.46 | 0.41 | 0.14 | 1.16 | 2.09 | 2.26 | 1.88 | 0 | 1 | 0 |
| 南 岸 前 線 上 低 通 | 平均 | 4.24 | 120.28 | 84.70 | 0.66 | 0.89 | 0.36 | 0.34 | 0.13 | 6.23 | 2.17 | 2.60 | 2.46 | 14.3 | 13.0 | 4.3 |
| | 標準偏差 | 0.37 | 53.85 | 74.50 | 0.26 | 0.16 | 0.11 | 0.10 | 0.09 | 8.67 | 1.35 | 2.27 | 2.20 | 57 | 52 | 4.6 |
| | 最高 | 4.59 | 179.70 | 208.90 | 1.02 | 1.14 | 0.46 | 0.43 | 0.25 | 21.24 | 3.50 | 6.12 | 5.87 | 49 | 42 | 12 |
| | 最低 | 3.68 | 43.80 | 25.70 | 0.41 | 0.72 | 0.18 | 0.17 | 0.0 | 0.84 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1 | 1 | 1 |
| 低 気 圧 北 側 通 過 | 平均 | 6.53 | 72.95 | 0.40 | 1.29 | 1.20 | 0.54 | 0.49 | 0.66 | 1.24 | 2.08 | 1.78 | 1.46 | 9.0 | 7.5 | 2.0 |
| | 標準偏差 | 0.40 | 50.45 | 0.30 | 0.17 | 0.57 | 0.21 | 0.20 | 0.54 | 1.24 | 0.28 | 0.10 | 0.05 | 18 | 15 | 1.0 |
| | 最高 | 6.93 | 123.40 | 0.80 | 1.46 | 1.77 | 0.75 | 0.70 | 1.21 | 2.48 | 2.36 | 1.88 | 1.51 | 16 | 11 | 3 |
| | 最低 | 6.12 | 22.50 | 0.10 | 1.12 | 0.64 | 0.33 | 0.29 | 0.12 | 0.0 | 1.81 | 1.69 | 1.40 | 2 | 4 | 1 |
| 低 気 圧 南 岸 通 過 | 平均 | 4.76 | 51.75 | 21.80 | 0.31 | 0.62 | 0.88 | 0.87 | 0.16 | 6.87 | 2.32 | 2.57 | 2.50 | 9.3 | 8.0 | 2.0 |
| | 標準偏差 | 0.31 | 10.85 | 13.60 | 0.26 | 0.08 | 0.37 | 0.38 | 0.12 | 7.50 | 1.65 | 0.87 | 0.93 | 28 | 24 | 0.8 |
| | 最高 | 5.15 | 62.60 | 39.80 | 0.68 | 0.73 | 1.18 | 1.18 | 0.29 | 17.48 | 3.70 | 3.27 | 3.23 | 19 | 13 | 3 |
| | 最低 | 4.40 | 40.90 | 7.10 | 0.08 | 0.53 | 0.37 | 0.34 | 0.0 | 1.29 | 0.0 | 1.35 | 1.18 | 2 | 2 | 1 |
| 台 風 | 平均 | 5.80 | 42.81 | 1.90 | 0.75 | 0.66 | 0.28 | 0.26 | 0.11 | 1.38 | 0.0 | 0.64 | 0.57 | 10.7 | 7.5 | 3.0 |
| | 標準偏差 | 0.27 | 42.29 | 0.90 | 0.12 | 0.35 | 0.20 | 0.18 | 0.10 | 0.36 | 0.0 | 0.91 | 0.81 | 32 | 15 | 2.2 |
| | 最高 | 6.17 | 102.60 | 2.70 | 0.87 | 1.15 | 0.44 | 0.41 | 0.24 | 1.73 | 0.0 | 1.92 | 1.72 | 24 | 9 | 6 |
| | 最低 | 5.57 | 11.81 | 0.70 | 0.58 | 0.40 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.89 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0 | 6 | 1 |
| そ の 他 | 平均 | 5.55 | 75.70 | 4.50 | 1.68 | 0.99 | 0.81 | 0.75 | 0.23 | 7.13 | 2.51 | 3.63 | 3.21 | 38.4 | 15.8 | 6.0 |
| | 標準偏差 | 0.38 | 71.04 | 5.00 | 1.43 | 0.71 | 0.99 | 0.94 | 0.29 | 8.94 | 1.33 | 1.13 | 1.29 | 192 | 79 | 6.6 |
| | 最高 | 5.97 | 213.00 | 14.50 | 4.04 | 2.35 | 2.77 | 2.61 | 0.77 | 24.82 | 3.91 | 5.39 | 5.34 | 125 | 33 | 19 |
| | 最低 | 4.84 | 15.49 | 1.10 | 0.18 | 0.40 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.26 | 0.0 | 2.37 | 1.80 | 4 | 2 | 1 |

単位: EC(μs/cm)、H⁺(μeq/ℓ)、各成分(mg/ℓ) 太字: 合計値

降水強度は、最大一時間降水量で示す

さい4.76であった。

G. 台風型

3例あるが、いずれも酸性雨とは認めがたく、pHの平均値は5.80であった。また、EC値は最高 $102.6 \mu\text{s/cm}$ で、平均値は $42.81 \mu\text{s/cm}$ であった。海洋由来の Na^+ は、 1 mg/l を超えるものはなく、平均すると、 0.75 mg/l と比較的小さい値にとどまった。

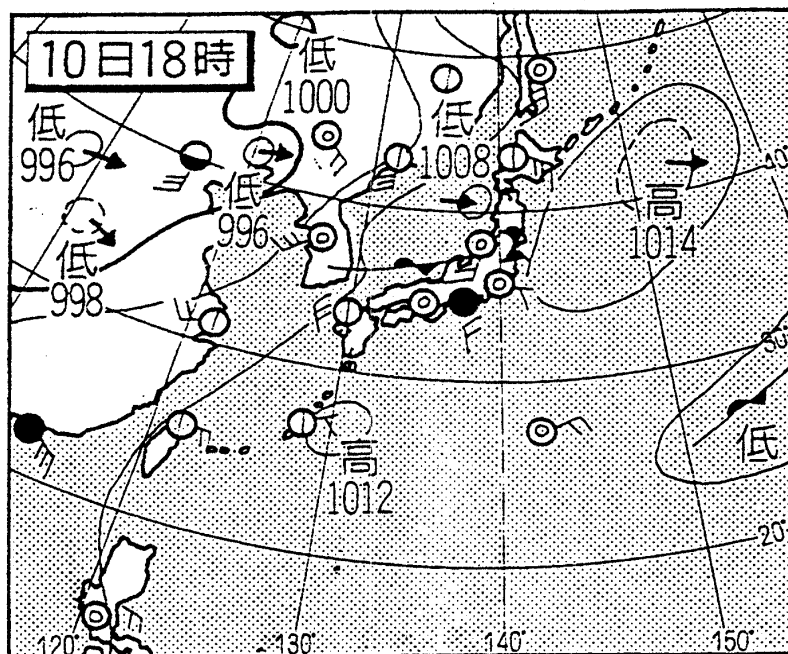


図24 1993年7月10日18時の天気図

H. その他

上記の分類以外には、南沖低気圧通過型、南沖前線上低気圧通過型、北側前線通過または寒冷前線通過と台風の混合型などがあり、これらのpHの平均値は、5.55であった。

3.3 千葉県北部（通学圏内）における酸性雨分布

本学学生の環境教育の一環として、通学圏内における酸性雨調査を1993年度に数回実施した。本学学生の通学圏は千葉県北部を中心に、同県南部、東京・埼玉東部および茨城県南部地域におよぶ。ここでは1993年7月10日8時から翌11日8時までの1日間に実施した観測結果について報告する。

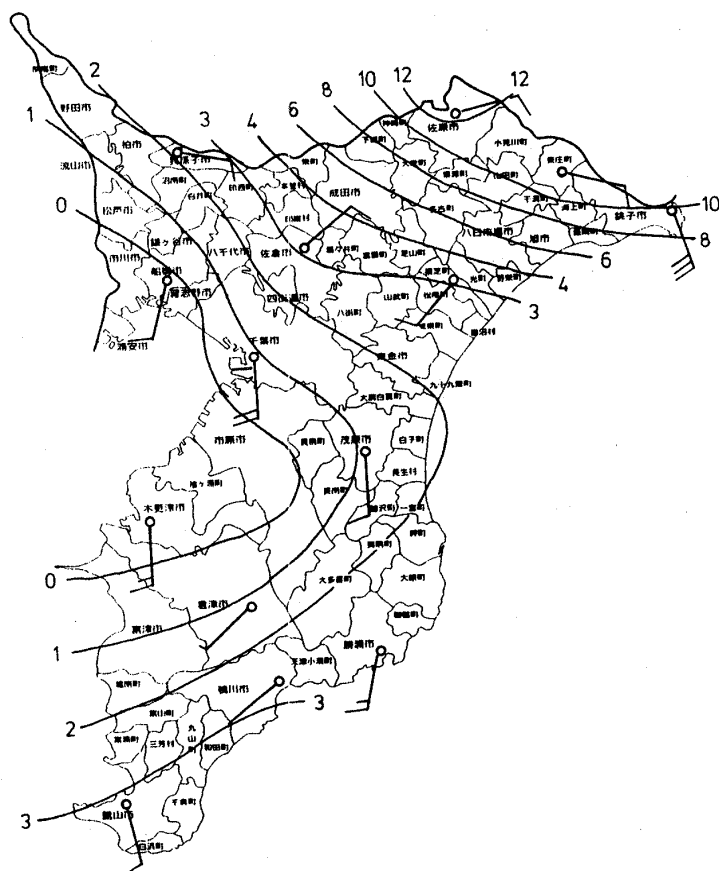


図25 千葉県の降水量分布 (mm)

1993年7月10日8時—11日8時

短い矢羽：0.5 m/s 長い矢羽：1 m/s

3.3.1 気象状況

1993年7月10日18時には、北海道の東方沖に中心示度1014hPaの小さな高気圧が、また、日本海東部には、中心示度1008hPaの低気圧が位置していた（図24）。この低気圧から、東西方向に停滞前線が延び、その東端は関東北部にかかっていた。10日は、ほぼこの状況で推移し、千葉県全域で降雨となった。11日には、北海道東方海上の高気圧がやや南下した。それに伴い、前線も中部地方まで南下したため、千葉県付近の降雨は終わった。この間（7月10日8時から11日8時まで）の降水量分布を図25に示す。この図によると、1mmの線が流山、千葉、茂原、富津を通り、この線の東京湾側では1mm未満と非常に少なくなっている。一方北東部に向かって降水量は増加し、佐原付近では12mmに達している。

3.3.2 pH分布

pHの測定結果を図26に示す。この図によると、pH5.6以下の酸性雨域は、富里、八街から千葉市東部にかけての南北に細長い地域に分布する。一方、pH6以上の地域は、西部と太平洋側の地域に分布し、中でも千葉市西部から船橋にかけての地域では、pH7以上の値が出現している。

3.3.3 EC分布

100 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 以上の値は、主に北西部を中心とする地域に分布するが、四街道から光にいたる地域にも現れている（図27）。前者では、沼南から成田、船橋にいたる地域に150 $\mu\text{s}/\text{cm}$

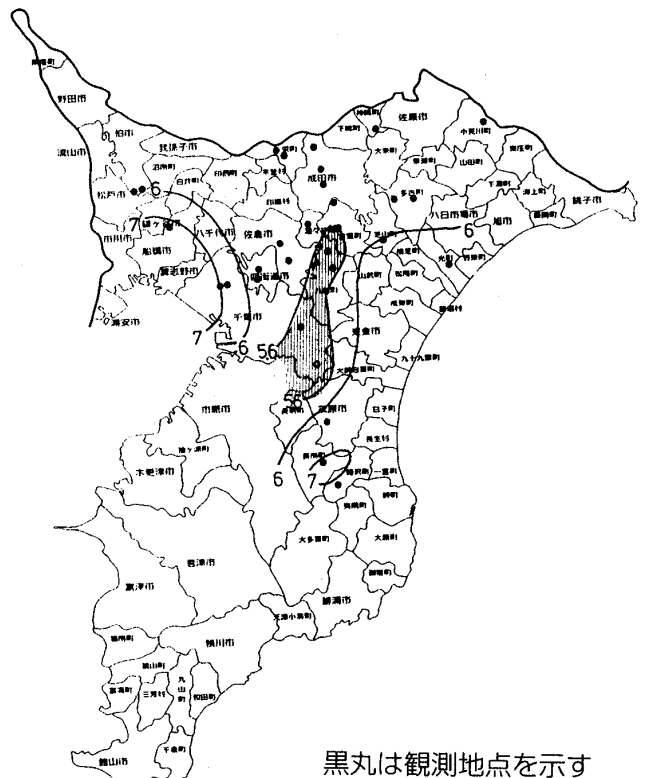


図26 pH分布 1993年7月10日8時～11日8時
アミを付した部分はpH5.6以下を示す

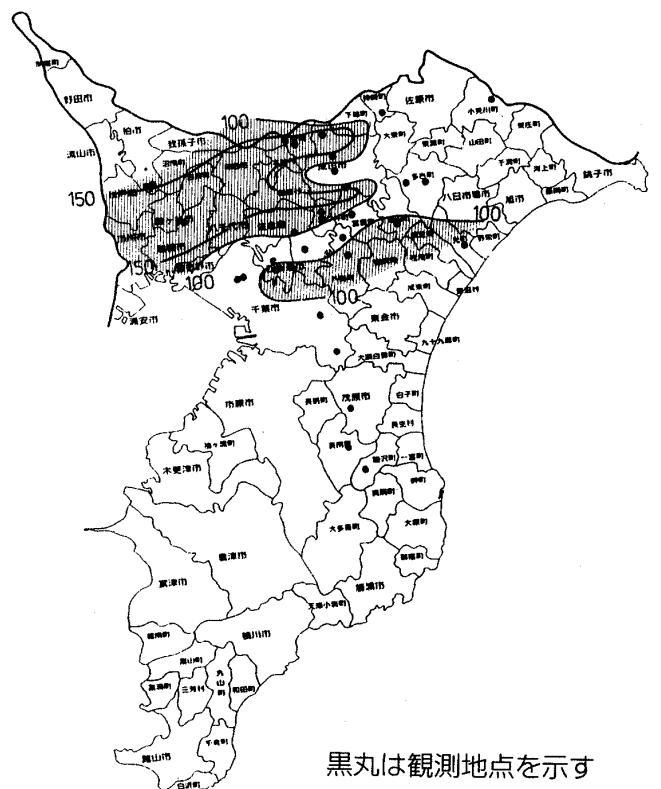


図27 EC分布 1993年7月10日8時～11日8時
アミを付した部分はEC100 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 以上を示す

以上、さらに船橋、酒々井では、 $200 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以上の値が散見される。この分布図と、pH分布図とを比較すると、あまり良い対応は見られない。

3.3.4 Na^+ 濃度分布

図28において、 $\text{Na}^+ 5\text{mg}/\ell$ 以上の値は、九十九里海岸沿いを中心とした地域および船橋付近を中心とした東京湾北部地域に分布する。このことから、 Na^+ のほとんどは、海洋由来であると推定される。

3.3.5 NH_4^+ 濃度分布

$3\text{mg}/\ell$ 以上の値は、千葉から北東方向に成田付近までの地域、および茂原付近に分布する(図29)。特に前者においては、佐倉と成田の中間付近に $5\text{mg}/\ell$ を超える値が分布し、最高値は $9.7\text{mg}/\ell$ に達する。

3.3.6 Ca^{2+} & nss Ca^{2+} 濃度分布

$5\text{mg}/\ell$ 以上の地域は、東京湾北部地域と九十九里沿岸地域に二分されている(図30a、30b)。 Ca^{2+} 濃度と nss Ca^{2+} 濃度の分布型およびその値はほぼ一致し、ほとんどが非海洋由来であることがわかる。

3.3.7 Mg^{2+} 濃度分布

$1\text{mg}/\ell$ 以上の値は、東京湾の北部沿岸地域に広く分布するとともに、芝山を中心とする地域にも分布する(図31)。前者においては、 $4\text{mg}/\ell$ を超える値が認められる。また、後者においては、分布範囲は狭いが、 Mg^{2+} の最高値 $6.51\text{mg}/\ell$ が出現している。

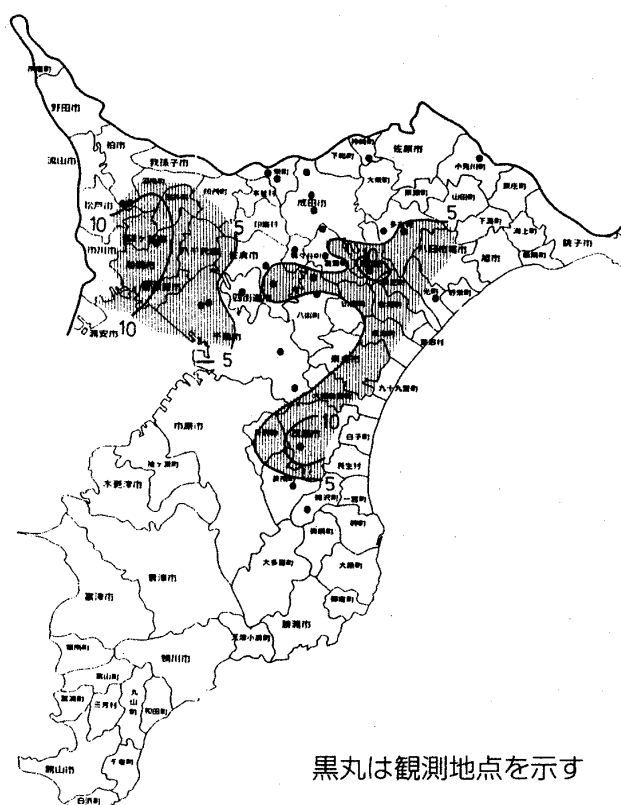


図28 Na^+ 濃度分布
1993年7月10日8時-11日8時
アミを付した部分は $5\text{mg}/\ell$ 以上を示す

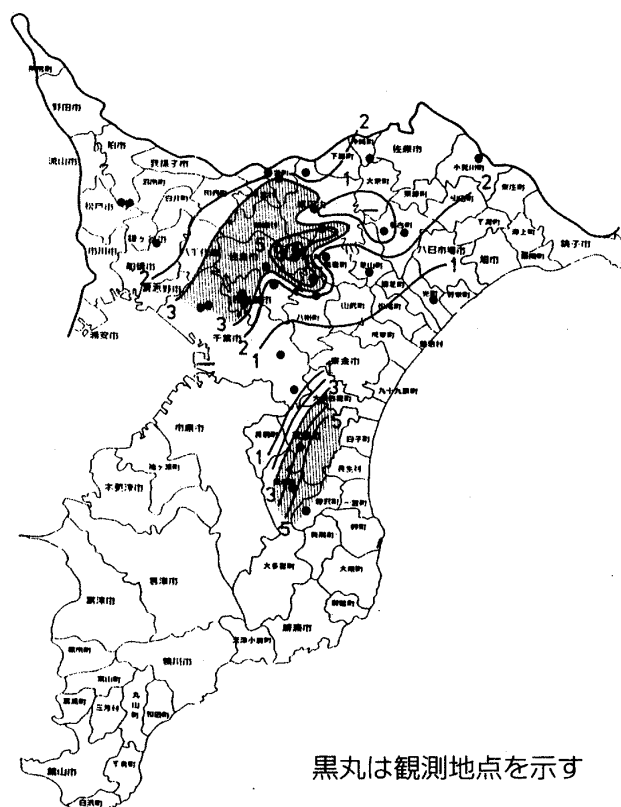
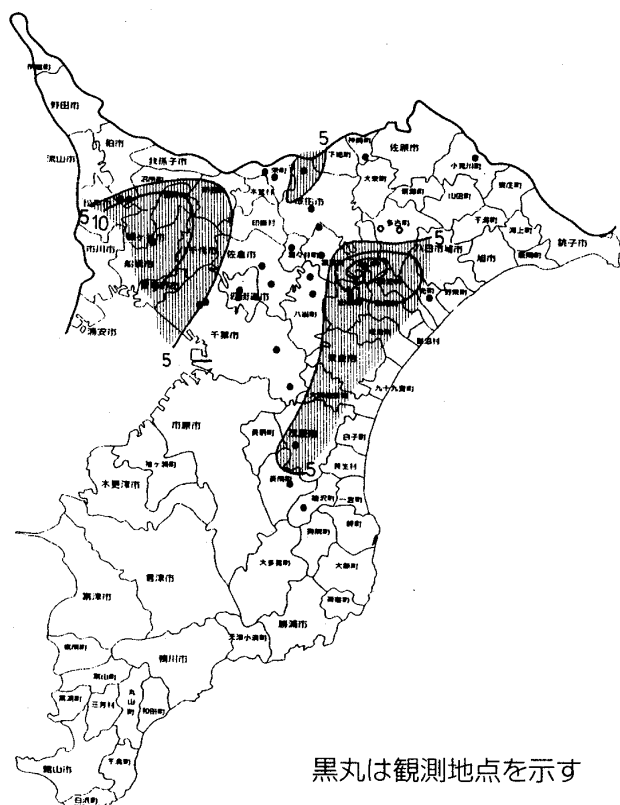
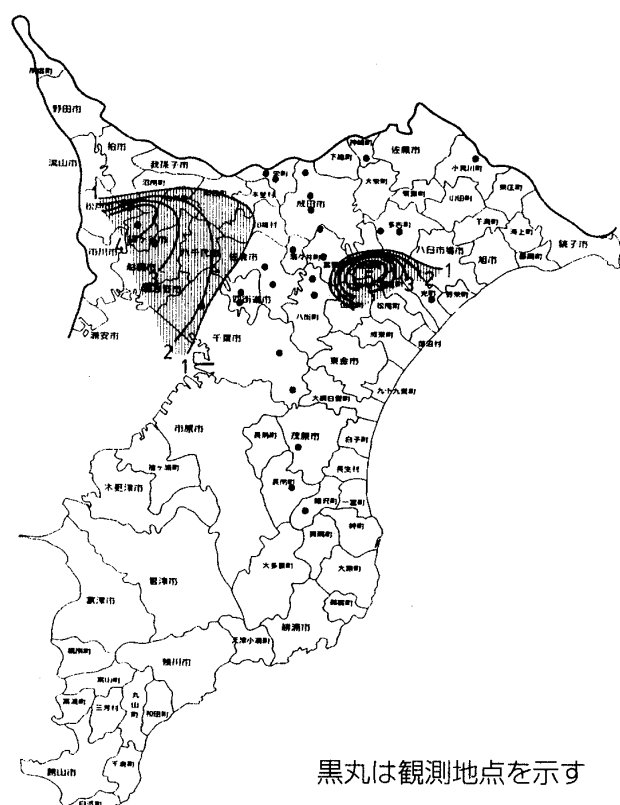


図29 NH_4^+ 濃度分布
1993年7月10日8時-11日8時
アミを付した部分は $3\text{mg}/\ell$ 以上を示す



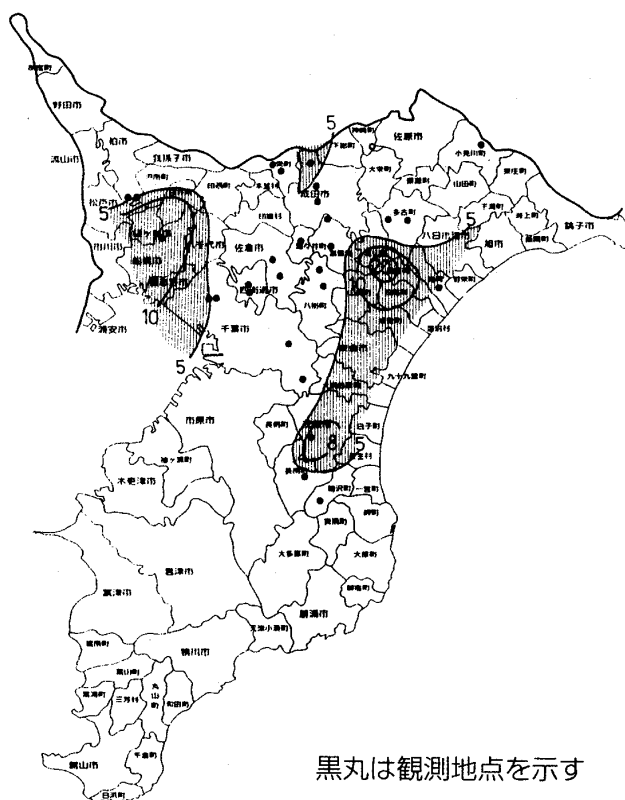
黒丸は観測地点を示す

図30a Ca^{2+} 濃度分布
1993年7月10日8時-11日8時
アミを付した部分は5 mg/ℓ以上を示す



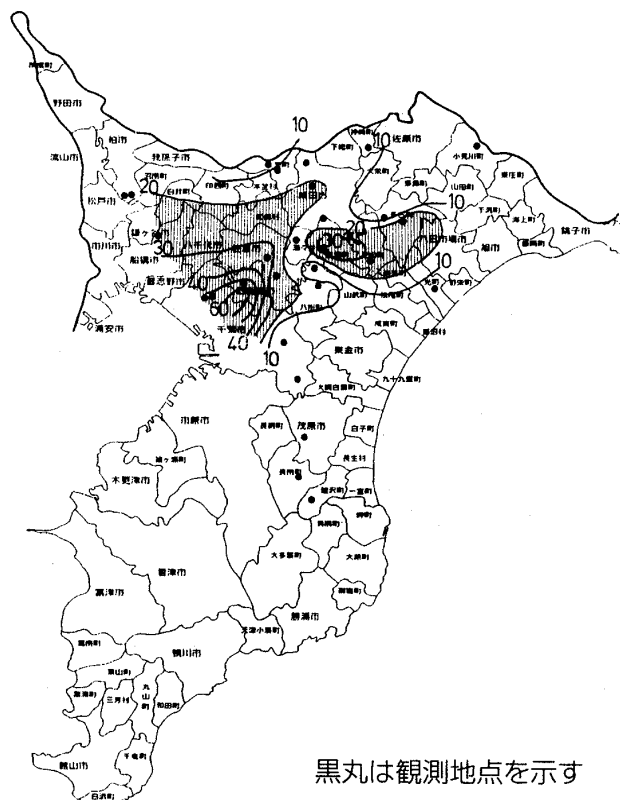
黒丸は観測地点を示す

図31 Mg^{2+} 濃度分布
1993年7月10日8時-11日8時
アミを付した部分は1 mg/ℓ以上を示す



黒丸は観測地点を示す

図30b nss Ca^{2+} 濃度分布
1993年7月10日8時-11日8時
アミを付した部分は5 mg/ℓ以上を示す



黒丸は観測地点を示す

図32 Cl^- 濃度分布
1993年7月10日8時-11日8時
アミを付した部分は20mg/ℓ以上を示す

3.3.8 Cl^- 濃度分布

四街道市南部に最高値64.5mg/l が出現し、ここから千葉市北部にかけての地域が最も高濃度な地域になっている（図32）。ここを中心に、20mg/l 以上の高濃度地域は、主に北側方向に広がっている。一方、富里（31.3mg/l）を中心に芝山、多古にいたる地域に20mg/l 以上の値が広がっている。

3.3.9 NO_3^- 濃度分布

図33によると、芝山付近では、46.42mg/l が観測された。その他の地域はすべて10mg/l 以下であり、この値がいかに高い値であるかが理解できる。この地域は、成田国際空港滑走路の南東方向の延長線上にあり、ジェット機による排気ガスの影響を多分に受けているものと予想される。

3.3.10 $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{nssSO}_4^{2-}$ 濃度分布

SO_4^{2-} 濃度分布は、九十九里側で低く 5 mg/l 以下である（図34 a）。一方、その西側では、西方に向かって値は増大し、佐倉付近で 10mg/l、さらに鎌ヶ谷付近で 20mg/l に達している。また、 nssSO_4^{2-} 濃度は、 SO_4^{2-} 濃度に比べて10%程度の減少はあるものの、ほぼ同様の分布型を示す（図34 b）。このことから、東京湾沿岸の京葉工業地帯方面で発生した硫黄酸化物が、北東方向に移動して行ったものと判断される。

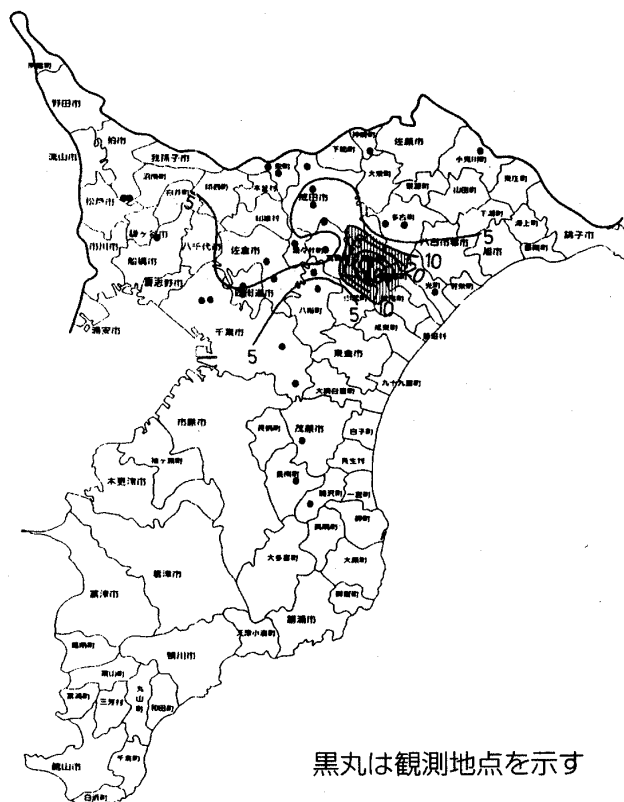


図33 NO_3^- 濃度分布
1993年7月10日8時～11日8時
アミを付した部分は10mg/l 以上を示す

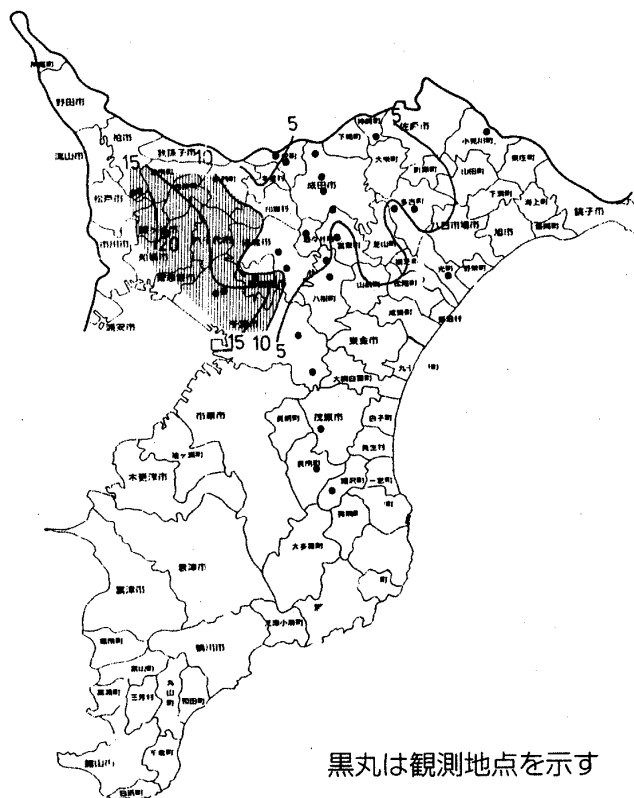


図34a SO_4^{2-} 濃度分布
1993年7月10日8時～11日8時
アミを付した部分は10mg/l 以上を示す

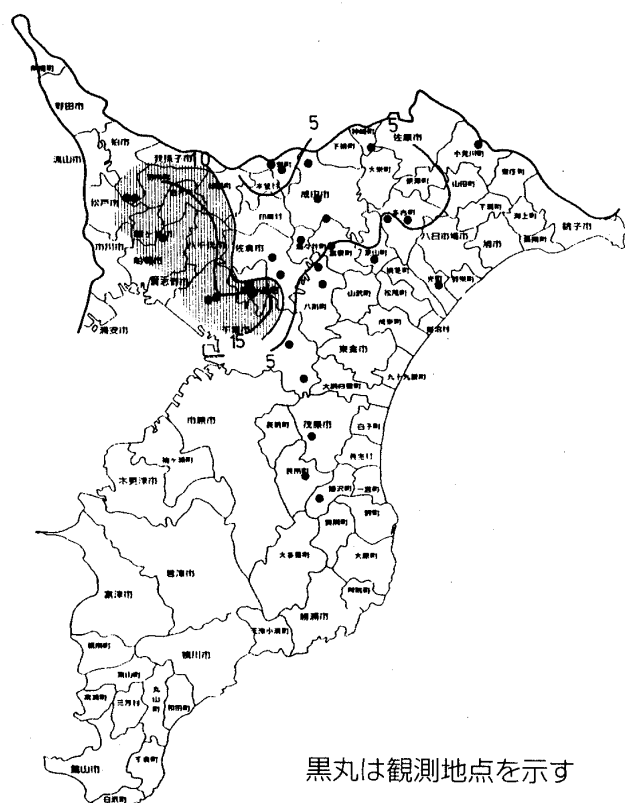


図34b nss SO_4^{2-} 濃度分布
1993年7月10日8時～11日8時
アミを付した部分は10mg/ℓ以上を示す

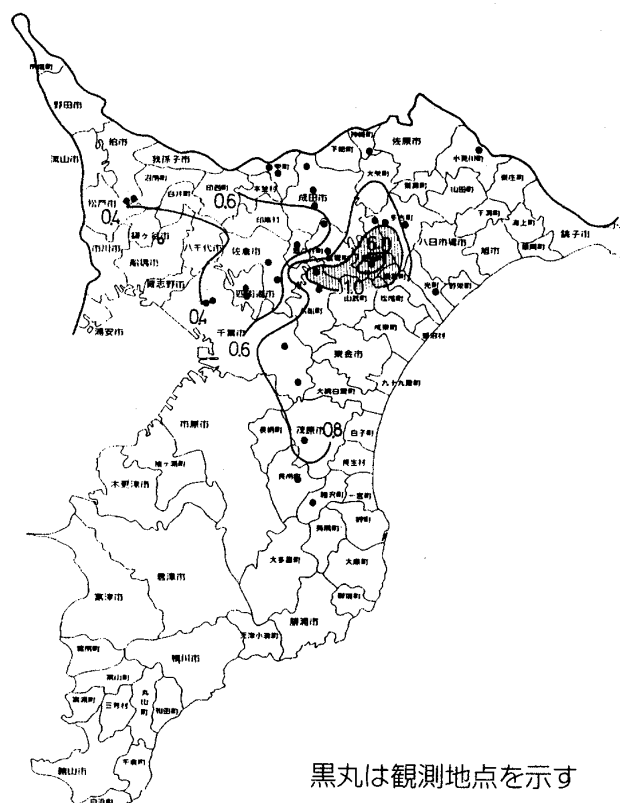


図35 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 濃度比分布
1993年7月10日8時～11日8時
アミを付した部分は1.0以上を示す

3.3.11 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 濃度比分布

3.3.9、3.3.10から、 NO_3^- および SO_4^{2-} ・ nssSO_4^{2-} の分布傾向が明らかになったが、さらに地域的特徴を明確にするために、 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 濃度比の分布図（図35）を作成した。一般的には、pHの低下には NO_3^- 濃度の寄与が大きいものと考えられる（高野ほか1991）。この図によると、 NO_3^- の割合が比較的小さいNS比0.6以下の地域が佐倉・四街道以西の東京湾沿岸北部地域に広がる。一方、NS比の割合が比較的大きい0.8以上の地域はその東方に広がり、八街、芝山、多古にかけての地域では1.0を超える。特にその中心に当たる芝山では、6.25の値が認められ、 NO_3^- 濃度の異常な高さが改め

て指摘される。

3.3.12 考察

これらの各成分の分布状況から、その発生源、および移動状況のある程度把握することが出来た。各成分の濃度や降水現象の総合された結果として、pHやECの値は決まる。今回の観測でpH5.6以下の地域は、 NO_3^- や SO_4^{2-} の濃度が（5 mg/ℓ）程度で、 Ca^{2+} の濃度が5 mg/ℓ弱、降水量4 mm以下の地域に位置している。また、船橋・習志野を中心とするpH7以上の地域は、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} などの濃度が比較的高く、降水量1 mm以下の地域に位置している。さらに、成田国際空港の南東側に位置する芝山では、 nss Ca^{2+} （21.11mg/ℓ）、 NO_3^- （46.42mg/ℓ）な

どの観測値およびNS比が異常に高かったことから、この地域の降水には、同空港の影響が多分に反映されているものとする。なお、その詳細については、今後の課題としたい。

4. まとめ

1993年度には、環境教育の一環として、授業時間内・外の時間を活用し、キャンパス内、および学生の通学圏内における酸性雨の時間的、空間的分布の把握に取り組んだ。その結果、1993年の暖候期における佐倉およびその周辺の酸性雨について、次の知見が得られた。

- 1) 1993年4月から9月までの期間に観測した降水の76.5%が酸性雨で、この間のpHの平均値は、5.05であった。4月と5月の降水は全て酸性雨で、pH値も安定していたが、6月以降pH値の変動幅が増大した。
- 2) EC値も、pH値同様4月、5月には、比較的安定した値(平均値63.70 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、34.24 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、標準偏差0.83 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、15.43 $\mu\text{S}/\text{cm}$)を示していたが、6月、7月には、平均値80.60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、100.66 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上、標準偏差63.07 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、66.98 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と、変動が大きくなった。
- 3) NO_3^- および SO_4^{2-} が増加すると、pH値は減少し、酸性が強まる。
- 4) 佐倉の低pH化には、 NO_3^- よりも SO_4^{2-} のほうがより大きく寄与している。
- 5) 8月中旬から9月にかけて見られる各イオンの高濃度化は、主に降水量の減少によ

るものと考えられる。

- 6) 日本列島の南岸に停滞した前線上を低気圧が通過した場合(4例)には、全てが酸性雨となり、最も低いpH値3.68は、この型に出現した。
- 7) 台風時(3例)には、いずれも酸性雨とは認められず、 Na^+ は、全て1 mg/l以下で、平均0.75 mg/lと比較的小さい値にとどまった。
- 8) 1993年7月10日8時から11日8時までの1日間に、本学学生の通学圏内における酸性雨分布について調査した。その結果によると、pH5.6以下の酸性雨は、富里、八街から千葉市東部にかけての南北に細長い地域に分布した。pH6以上の値は、北西部と太平洋側の地域に分布するが、これは、 Na^+ の分布とよく対応している。
- 9) 西側の京葉工業地帯に近い地域では、 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 濃度比(NS比)が低いが、東部地域ではNS比が増加する。特に成田国際空港付近におけるNS比は6.25に達し、同空港の酸性雨に対する少なからぬ影響が示唆された。

これらの知見、および提起された問題点を基に、次年度以降の酸性雨を題材とした環境教育のあり方について、検討を重ねていきたいと考えている。

参考文献

- 古明地哲人・小山 功・渡辺のぶ子・石黒辰吉
(1980)：連続降雨の雨水成分濃度と気象との関係について、東京都公害研究所年報

1980. 69-76.
- 小山 功・古明地哲人・石黒辰吉 (1982) : 降水の連続酸性現象と(高層)気象. 東京都公害研究所年報1982. 70-80.
- 小山 功・古明地哲人 (1985) : 降水の低pH化とその気象条件. 東京都公害研究所年報1985. 90-100.
- 佐藤 力夫 (1991) : 仙台における酸性雨の気象特性. 東北技術だより. Vol. 8, No. 5, 306-317.
- 高野 利一・竹井 利勝・町田 茂・松本 利恵・水上 和子 (1991) : 埼玉県における梅雨期の降水成分の性状. 埼玉県公害センター研究報告. (18), 9-17.
- 千葉県環境部 (1993) : 大気環境調査報告書 (平成4年度).
- 中村 圭三 (1993) : 大学周辺の環境を題材とした教育システムの検討. 環境情報研究. No 1, 1-13.

ABSTRACT

Acid Rain in and around Sakura-City, Chiba Prefecture during the Warm Season, 1993

A result of the Environmental Education in CKJC

Keizo NAKAMURA

In our college, Chiba Keiai Junior College(CKJC), the observations of the acid rain have been conducted as a part of environmental education program since April, 1993. The results of the observation in and around Sakura-City from April to September, 1993, are summarized as follows:

1. The average pH value of the sample of the precipitation which are collected with every rainfall in the period is 5.06, and 77% of the precipitations is occupied by acid rain.
2. All precipitations in April and May can be recognized to be acid rain. The pH values of these are stable, whereas after June the values show violent variation.
3. When the low pressure passes through stationary front which is on the south coast of Japan Island, all of the precipitations become acid rain, and then, the lowest pH value of the precipitations in all the observations, i.e., 3.68, is observed.
4. Near Narita International Airport, extremely high values of $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ concentration ratio (NS ratio) in rain are observed.