

# 連続降雨中の $Zn^{2+} \cdot Ca^{2+} \cdot Mg^{2+} \cdot K^+ \cdot Na^+$ 濃度の変動とその原因について\*

竹内 丑雄\*\*

## 要旨

連続降雨中の  $Zn^{2+} \cdot Ca^{2+} \cdot Mg^{2+} \cdot K^+ \cdot Na^+$  濃度は、つねに変動している。この変動をきたす主な原因として、降水時の上空に流入する気塊と、雨量強度とが考えられる。南方（海洋上）から気塊が流入した場合は、 $Na^+ \cdot K^+$  の濃度が高くその降水量は多くなり、北方（陸地上空）よりの気塊が流入したときは、 $Ca^{2+} \cdot Mg^{2+}$  濃度が高くなり、その降水量が多くなる。また雨量強度が大きくなると濃度はひくく、雨量強度が小さくなると濃度が高くなる傾向がある。

## 1. まえがき

降りつづく雨の中の化学物質濃度は、つねに変動している。三宅・杉浦（1952）は、台風が通過した際の降雨中の化学成分濃度の変化をみているが、これは一つの場合であり台風による降雨においても、さまざまな変動をしている。

著者（1972）は、さきに連続降雨中の化学物質濃度の変動は、降雨時の上空に流入する気塊によるものであることを示した。が、本稿において、降水中の  $Zn^{2+} \cdot Ca^{2+} \cdot Mg^{2+} \cdot K^+ \cdot Na^+$  濃度の変動の要因は、降水時の上空に流入する気塊の流跡線と、雨量強度によるものであることを明らかにし、さらに化学物質の降水量について考察を加える。

## 2. 採水と化学物質濃度の測定

### 2.1 採水場所と採水方法

東京都武蔵野市吉祥寺 成蹊小学校露場

採水はたて 40 cm, よこ 27 cm, 深さ 5 cm の琺瑯製のバットをビニールで覆ったものを、高さ 65 cm の台上において行なう。

### 2.2 測定方法、原子吸光分光分析

## 3. $Zn^{2+} \cdot Ca^{2+} \cdot Mg^{2+} \cdot K^+ \cdot Na^+$ 濃度の変動

### 3.1 10月29～30日（1971）と2月4～5日（1972）の降雨

第1表 (単位 ppm)

| 採水<br>順序 | 化学成分   |       | $Zn^{2+}$ | $Ca^{2+}$ | $Mg^{2+}$ | $K^+$ | $Na^+$ |
|----------|--------|-------|-----------|-----------|-----------|-------|--------|
|          | 採水時刻   |       |           |           |           |       |        |
|          | 29日    | 30日   |           |           |           |       |        |
| 1        | 16:55~ | 9:10  | 0.027     | 0.221     | 0.054     | 0.03  | 0.23   |
| 2        | 9:10~  | 9:40  | 0.020     | 0.069     | 0.012     | 0.01  | 0.05   |
| 3        | 9:40~  | 10:10 | 0.020     | 0.069     | 0.008     | 0.01  | 0.05   |
| 4        | 10:10~ | 10:40 | 0.020     | 0.069     | 0.006     | 0.03  | 0.06   |
| 5        | 10:40~ | 11:10 | 0.010     | 0.088     | 0.006     | 0.03  | 0.06   |
| 6        | 11:10~ | 11:40 | 0.010     | 0.077     | 0.015     | 0.03  | 0.05   |
| 7        | 11:40~ | 12:10 | 0.019     | 0.051     | 0.013     | 0.01  | 0.02   |
| 8        | 12:10~ | 12:40 | 0.020     | 0.052     | 0.014     | 0.01  | 0.02   |
| 9        | 12:40~ | 13:10 | 0.024     | 0.052     | 0.021     | 0.03  | 0.02   |
| 10       | 13:10~ | 13:24 | 0.010     | 0.019     | 0.015     | 0.03  | 0.02   |
| 11       | 13:24~ | 15:20 | 0.020     | 0.077     | 0.008     | 0.01  | 0.03   |
| 12       | 15:20~ | 16:10 | 0.006     | 0.008     | 0.001     | 0.01  | 0.01   |
| 13       | 16:10~ | 17:32 | 0.005     | 0.017     | 0.001     | 0.01  | 0.01   |
| 14       | 17:32~ | 18:55 | 0.006     | 0.058     | 0.005     | 0.01  | 0.02   |
| 15       | 18:55~ | 20:10 | 0.002     | 0.017     | 0.002     | 0.01  | 0.03   |
| 16       | 20:10~ | 21:34 | 0.001     | 0.009     | 0.001     | 0.01  | 0.01   |

第1表に10月29～30日、第2表に2月4～5日の降水中の濃度をしめす。

第1, 2表の  $Zn^{2+}$  をのぞく他の成分の濃度と、金森（1962）が測定したわが国における降水の平均濃度とを比較すると、第3表の如くである。

なお  $Zn^{2+}$  については、森田（1955）の測定がある。つぎの第4表は森田の測定によるものと、吉祥寺における降水中の  $Zn^{2+}$  濃度をしめしたものである。

\* Time Variation of Concentrations of  $Zn^{2+} \cdot Ca^{2+} \cdot Mg^{2+} \cdot K^+$  and  $Na^+$  in the Continuous Rainfall and Its Causes.

\*\* U. Takeuchi 成蹊小学校

—1972年12月8日受理—

第2表 (単位 ppm)

| 採水<br>順序 | 化学成分        |    | Zn <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> |
|----------|-------------|----|------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|
|          | 採水時刻        |    |                  |                  |                  |                |                 |
| 1        | 8:05~10:25  |    | 0.076            | 1.020            | 0.370            | 0.16           | 2.10            |
| 2        | 10:25~11:25 |    | 0.040            | 1.069            | 0.096            | 0.07           | 0.52            |
| 3        | 11:25~12:50 |    | 0.024            | 0.468            | 0.054            | 0.05           | 0.28            |
| 4        | 12:50~14:15 |    | 0.027            | 0.431            | 0.038            | 0.07           | 0.37            |
| 5        | 14:15~15:05 |    | 0.030            | 0.382            | 0.039            | 0.05           | 0.19            |
| 6        | 15:05~16:00 |    | 0.023            | 0.258            | 0.028            | 0.05           | 0.13            |
| 7        | 16:00:16:28 |    | 0.031            | 0.361            | 0.037            | 0.06           | 0.22            |
| 8        | 16:30~17:35 |    | 0.058            | 1.477            | 0.142            | 0.16           | 0.84            |
| 9        | 17:35~18:40 |    | 0.052            | 0.821            | 0.078            | 0.06           | 0.39            |
| 10       | 18:40~19:50 |    | 0.036            | 0.830            | 0.078            | 0.06           | 0.22            |
| 11       | 19:50~20:55 |    | 0.020            | 0.559            | 0.042            | 0.07           | 0.31            |
| 12       | 20:55~21:50 |    | 0.030            | 0.288            | 0.048            | 0.07           | 0.32            |
| 13       | 21:50~22:50 |    | 0.036            | 0.400            | 0.061            | 0.11           | 0.38            |
| 14       | 22:50~0:35  | 5日 | 0.023            | 0.327            | 0.028            | 0.10           | 0.20            |
| 15       | 0:35~2:40   |    | 0.031            | 0.821            | 0.105            | 0.12           | 0.34            |
| 16       | 2:40~3:00   |    | 0.044            | 0.701            | 0.080            | 0.06           | 0.34            |

第3表 (単位 ppm)

| 化学成分                 |                      | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> |
|----------------------|----------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|
| 全国平均<br>(1958年金森による) |                      | 0.97             | 0.39             | 0.26           | 1.10            |
| 吉祥寺平均<br>(竹内による)     | 10月29~30日<br>(1971年) | 0.06             | 0.01             | 0.02           | 0.04            |
|                      | 2月4~5日<br>(1972年)    | 0.64             | 0.08             | 0.08           | 0.44            |

第4表 (単位 ppb)

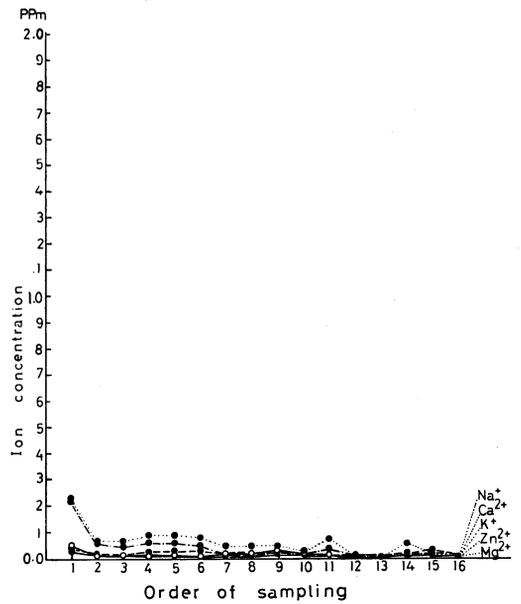
|                 |                     | 濃度範囲                    | 平均         |
|-----------------|---------------------|-------------------------|------------|
| 名古屋(1955年森田による) |                     | 雨 2.5~5.5<br>雪 3.5~12.0 | 3.6<br>6.5 |
| 吉祥寺<br>(竹内による)  | 10月29~30日<br>(1971) | 1.0~27.0                | 14.1       |
|                 | 2月4~5日<br>(1972)    | 20.0~76.0               | 36.0       |

以上 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> については、吉祥寺の降雨は、どれも名古屋の降雨より濃度はひくくなっている。が、Zn<sup>2+</sup> 濃度の範囲は、吉祥寺の降雨が名古屋の降雨より広く、平均値は高くなっている。

Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> の発生源が、主として陸や海洋であり、Zn<sup>2+</sup> は HAMMOND (1971) や BERTINE (1971) のいう如く亜鉛プロセス、化石燃料の燃焼によるものとすれば、金森・森田の測定から10数年経過した今日の工業の隆盛と、化石燃料の消費とを考えあわせると、Zn<sup>2+</sup>

Time variation of ion concentration

Oct. 29-30 1971



第1図 イオン濃度の時間的变化  
10月29—30日 1971年

濃度の増加は当然の帰結である。なお矢野 (1972) は、大気中のエアロゾルの測定において、Zn<sup>2+</sup> が他の成分に比し、いちぢるしく多いことを指摘している。

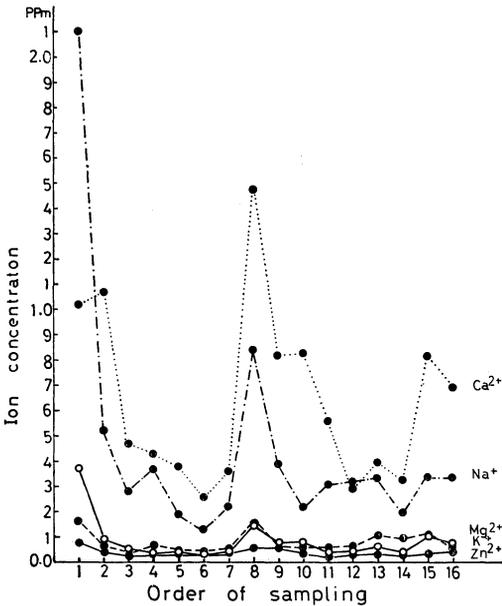
3.2 二つの降雨の特徴

何れの降雨についても、Zn<sup>2+</sup> 濃度をのぞき、他の成分の平均濃度は、全国平均よりひくい、時間の経過にともなう各成分濃度の変動は異なっている。その変動の状態を图示したものが第1図および第2図である。

これら濃度変動を、降水時の上空に流入した気塊の流跡線によってみると、第1図は降りはじめに海洋上からの気塊が、高度 1,500 m は SE, 3,000 m では SW から流入している。そしてのちには、何れの高度も本土上空を東進してきた気塊が変わっている。

第2図は台湾東方海上に発生した低気圧が東進し、降雨をもたらしたものである。降りはじめに海洋上の気塊が高度 1,500 m において SW から流入している。またなかごろ (採水順序 6, 7, 8) には高度 1,500 m S, 3,000 m SW から海洋上の気塊が流入している。一般的に陸地上空を通過した気塊よりも、海洋上および工業地上空を通過した気塊が流入したときに、降水中の成分濃度が高くなっている。

Time variation of ion concentration  
Feb. 4-5 1972



第2図 イオン濃度の時間的变化  
2月4—5日 1972年

4. 降水中の  $Zn^{2+} \cdot Ca^{2+} \cdot Mg^{2+} \cdot K^+ \cdot Na^+$  濃度  
と降水時上空の気塊の流跡線との関係

4.1 イオン濃度の変動と流跡線

1971年8月30~31日の降雨は、台風の通過による降雨である。この降雨の降りはじめから終わりまで、順次採水したものの測定結果をつぎの第5表に示す。

$Ca^{2+} \cdot Mg^{2+} \cdot K^+ \cdot Na^+$  のいずれも全国の平均よりひくい、 $Zn^{2+}$  は森田の測定よりはるかに高くなっている。

つぎの第3図は、これ等各成分濃度の時間的変化をあらわしたものである。

図に明らかなように、採水6、7を境にして、前半は  $Na^+ \cdot K^+$  の濃度が高く、後半は  $Ca^{2+} \cdot Mg^{2+}$  の濃度が高くなっている。いまこれら濃度の変動を、地上および上空の風向から推定した気塊の流跡線との関係において考察を加える。

第6表は、降水時の地上および上空の風向を示したものである。

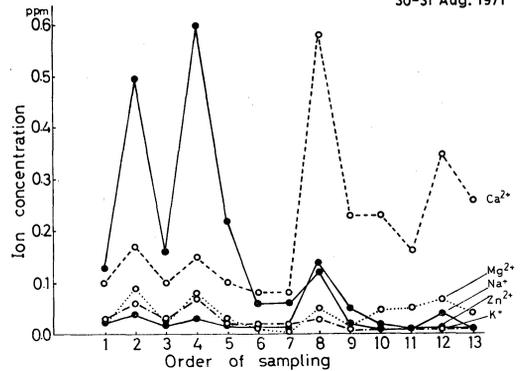
採水順序5（採水時刻15時前後）のときまでは、地上および上空は概して南方よりの風が吹き、太平洋上を大きく旋回した気塊が流入している。

1973年2月

第5表 (単位 ppm)

| 採水順序 | 化学成分   |       | $Zn^{2+}$ | $Ca^{2+}$ | $Mg^{2+}$ | $K^+$ | $Na^+$ |
|------|--------|-------|-----------|-----------|-----------|-------|--------|
|      | 採水時刻   |       |           |           |           |       |        |
|      | 30日    | 31日   |           |           |           |       |        |
| 1    | 17:10~ | 9:25  | 0.018     | 0.101     | 0.019     | 0.03  | 0.13   |
| 2    | 9:25~  | 10:30 | 0.041     | 0.172     | 0.085     | 0.06  | 0.50   |
| 3    | 10:30~ | 12:10 | 0.022     | 0.101     | 0.023     | 0.03  | 0.16   |
| 4    | 12:10~ | 14:15 | 0.029     | 0.148     | 0.080     | 0.07  | 0.60   |
| 5    | 14:15~ | 15:15 | 0.019     | 0.099     | 0.034     | 0.02  | 0.22   |
| 6    | 15:15~ | 15:57 | 0.018     | 0.079     | 0.014     | 0.02  | 0.06   |
| 7    | 15:57~ | 16:30 | 0.018     | 0.077     | 0.004     | 0.02  | 0.06   |
| 8    | 16:30~ | 19:15 | 0.140     | 0.580     | 0.052     | 0.03  | 0.12   |
| 9    | 19:15~ | 20:03 | 0.049     | 0.231     | 0.018     | 0.01  | 0.02   |
| 10   | 20:03~ | 20:50 | 0.022     | 0.228     | 0.047     | 0.01  | 0.01   |
| 11   | 20:50~ | 21:55 | 0.008     | 0.157     | 0.055     | 0.01  | 0.01   |
| 12   | 21:55~ | 22:50 | 0.008     | 0.348     | 0.067     | 0.01  | 0.04   |
| 13   | 22:50~ | 23:40 | 0.007     | 0.261     | 0.044     | 0.01  | 0.01   |
| 平均   |        |       | 0.031     | 0.199     | 0.042     | 0.03  | 0.15   |

Time variation of ion concentration  
30-31 Aug. 1971



第3図 イオン濃度の時間的变化  
8月30—31日 1971年

採水順序にして6を過ぎる頃から風向は地上および上空とも北方よりに変わり、気塊が日本海上から本州中部を通り、吹きこんでいる。

以上を気塊の流跡線によってみると、前者は太平洋上からであり、後者は日本海から本州中部を通ったものである。このことから降水中のイオン濃度をみると、流跡線が南方よりの場合は、 $Na^+ \cdot K^+$  の濃度が高く、北方よりのときに  $Ca^{2+} \cdot Mg^{2+}$  の濃度が高くなっている。

4.2 イオン濃度比と流跡線

つぎの第4図は、 $Na^+$  を基にした各成分比の時間的変化を表わしたものである。

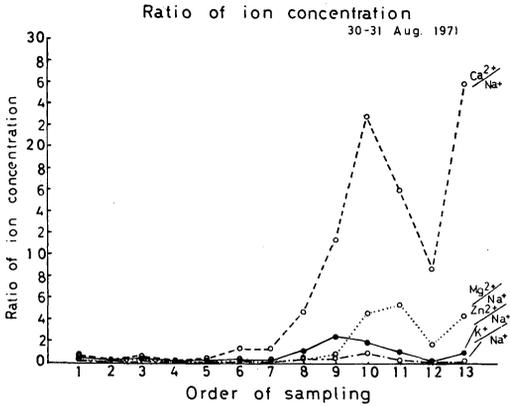
第 6 表

| 採水順序  | 地上及び等圧面高度 |     | 地 上  | 850 mb | 800 mb | 700 mb | 600 mb | 500 mb | 400 mb |
|-------|-----------|-----|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|       | 時刻        |     |      |        |        |        |        |        |        |
| ふりはじめ | 30日       | 17時 | S SW |        |        |        |        |        |        |
|       |           | 19  | S SE |        |        |        |        |        |        |
|       | 21        |     | S E  | S E    | S      | S      | S      | —      | W      |
|       |           |     | E    |        |        |        |        |        |        |
| 1     | 31日       | 1   | E SE |        |        |        |        |        |        |
|       |           | 3   | E SE | S E    | S E    | SW     | SW     | SW     | SW     |
|       |           | 5   | S E  |        |        |        |        |        |        |
|       |           | 7   | E    |        |        |        |        |        |        |
| 2     | 9         |     | S SE | S      | S      | S      | S      | —      | SW     |
|       |           |     | S E  |        |        |        |        |        |        |
| 3     | 11        |     | S E  |        |        |        |        |        |        |
|       |           |     | S SW |        |        |        |        |        |        |
| 4     | 13        |     | S SW |        |        |        |        |        |        |
|       |           |     | S SW |        |        |        |        |        |        |
| 5     | 15        |     | N    | W      | NW     | NW     | NW     | NW     | NW     |
|       |           |     | N    |        |        |        |        |        |        |
| 6     | 17        |     | NNW  |        |        |        |        |        |        |
|       |           |     | NNW  |        |        |        |        |        |        |
| 7     | 19        |     | WNW  |        |        |        |        |        |        |
|       |           |     | WNW  |        |        |        |        |        |        |
| 8     | 21        |     | N    | N      | N      | N      | NW     | —      | W      |
|       |           |     | N    |        |        |        |        |        |        |
| 9     | 23        |     | N    |        |        |        |        |        |        |
|       |           |     | N    |        |        |        |        |        |        |
| 10    | 1日        | 1   | NNW  |        |        |        |        |        |        |
|       |           | 3   | NNW  | NE     | NE     | NE     | NW     | NW     | NW     |
| 11    | 雨やむ       |     | NNW  |        |        |        |        |        |        |
|       |           |     | NNW  |        |        |        |        |        |        |

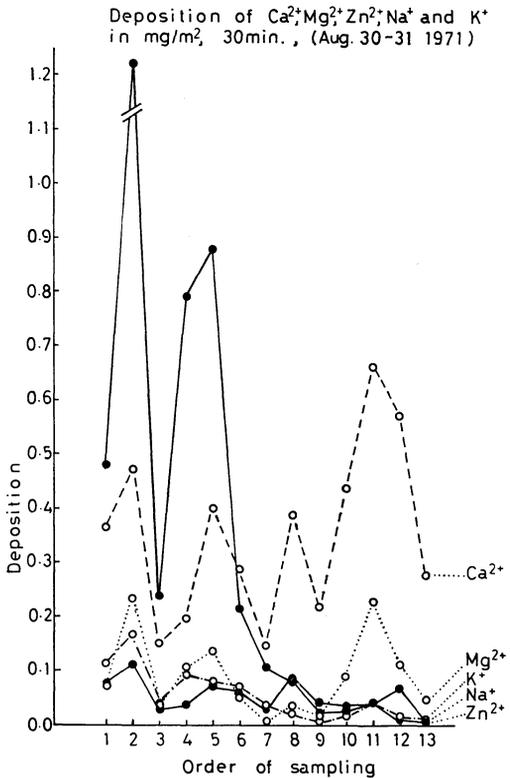
第 7 表

(単位 ppm)

| 採水順序 | 化学成分        |            | Zn <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | 雨量/30分 |
|------|-------------|------------|------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|--------|
|      | 採水時刻        |            |                  |                  |                  |                |                 |        |
| 1    | 28日         | 29日        |                  |                  |                  |                |                 |        |
|      |             | 20:25~8:07 | 0.13             | 0.75             | 0.08             | 0.10           | 0.67            | 0.98   |
| 2    | 8:07~8:50   |            | 0.08             | 0.45             | 0.07             | 0.20           | 0.57            | 0.70   |
| 3    | 8:50~9:25   |            | 0.07             | 0.20             | 0.02             | 0.05           | 0.25            | 1.74   |
| 4    | 9:25~10:00  |            | 0.25             | 0.20             | 0.03             | 0.05           | 0.35            | 1.29   |
| 5    | 10:00~10:40 |            | 0.14             | 0.25             | 0.06             | 0.05           | 0.46            | 1.13   |
| 6    | 10:40~11:40 |            | 0.18             | 0.20             | 0.03             | 0.05           | 0.25            | 1.00   |
| 7    | 11:40~12:35 |            | 0.08             | 0.15             | 0.01             | 0.01           | 0.10            | 1.64   |
| 8    | 12:35~13:35 |            | 0.03             | 0.15             | 0.01             | 0.01           | 0.07            | 1.75   |
| 9    | 13:35~14:35 |            | 0.02             | 0.25             | 0.01             | 0.01           | 0.04            | 2.75   |
| 10   | 14:35~16:50 |            | 0.06             | 0.15             | 0.01             | 0.01           | 0.04            | 2.00   |
| 11   | 16:50~21:30 |            | 0.06             | 0.20             | 0.01             | 0.01           | 0.21            | 1.20   |



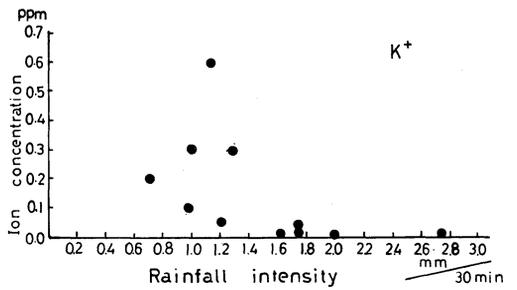
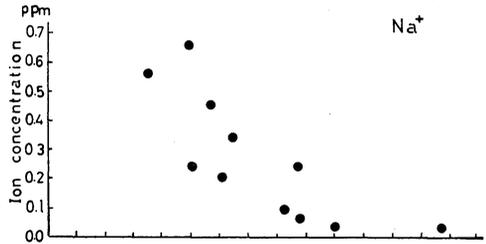
第4図 イオン濃度比  
8月30—31日 1971年



第5図  $Ca^{2+}$ ・ $Mg^{2+}$ ・ $Zn^{2+}$ ・ $Na^+$ ・ $K^+$  イオンの降下量  $mg/m^2$ , 30 min  
8月30—31日 1971年

採水順序6—13までの各イオン濃度比は、1—5までにくらべ全般的に大きく、ことに  $Ca^{2+}/Na^+$ 、 $Mg^{2+}/Na^+$  は、いちぢるしく大きくなっている。

Relationship between ion concentration and rainfall intensity  
Apr. 28-29 1971



第6図 イオン濃度と雨量濃度との関係  
 $Na^+$  と  $K^+$  について  
4月28—29日 1971年

#### 4.3 化学物質の降下量

化学物質の濃度と降水量の積が、その物質の降下量である。つぎの第5図は、 $Zn^{2+}$ ・ $Ca^{2+}$ ・ $Mg^{2+}$ ・ $K^+$ ・ $Na^+$  の降下量の時間的変化を示めたものである。

$K^+$ ・ $Na^+$  の降下量は、気塊が南方より流入した場合に多く、北方より流入した場合はすくない。 $Ca^{2+}$ ・ $Mg^{2+}$  については、南方よりの気塊にすくなく、北方よりの気塊に多くなっている。これ等のことから、 $K^+$ ・ $Na^+$  の源は主として海洋に、 $Ca^{2+}$ ・ $Mg^{2+}$  は陸地からであることが推定される。

#### 5. イオン濃度と雨量強度

4月28—29日(1971)の降雨は、降水中の化学物質濃度があまり変化していない。いまこの降雨中の  $Zn^{2+}$ ・ $Ca^{2+}$ ・ $Mg^{2+}$ ・ $K^+$ ・ $Na^+$  濃度と、雨量強度との関係を考察する。

第7表は、各イオン濃度と雨量強度とを表わしたものである。

つぎにこれらのうち、 $K^+$ 、 $Na^+$  濃度と雨量強度との関係を見ると、第6図の如くである。

$K^+$ 、 $Na^+$  濃度は雨量強度が大きいきにひくくな

り、雨量強度が小さい場合に高くなっている。このような関係は、 $Zn^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  についても同一である。この関係の成立は、降水時の上空に流入する気塊にふくまれている化学物質を、雨滴が捕捉してくることによるものと考えられる。

#### 6. むすび

降水中の  $Zn^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Na^+$  濃度のうち、 $Zn^{2+}$  濃度は他の成分にくらべ、いちぢるしく高くなっている。

また各イオン濃度変動の要因は、降水時の上空に流入する気塊の流跡線と雨量強度によるものである。

本研究を行なうにあたりご教示いただいた三宅泰雄先生、気象研究所地球化学研究部の方々、中沢全一氏に心から感謝の意を表する。

研究の一部は日本気象学会奨励金によったものである。

#### 文 献

- 1) Bertine, K. K. and Goldberc, E. D. 1971: Fossil fuel combustion and the major sedimentary cycle. *Science*, **173**, 233-235.
- 2) Hammomd, W. F. 1971: 大気汚染物質の発生源, 燃料協会訳, 横川書房.
- 3) 金森暢子, 1962: 学位論文 名古屋大学に提出.
- 4) 三宅泰雄, 杉浦吉雄, 1952: 台風に伴う雨水に溶在する化学成分の異常について, *海と空*, **29**, 1-5.
- 5) Morita Yoshimi, 1955: Distribution of copper and Zinc in various phases of the earth materials. *J. Earth Sci., Nagoya Univ.*, **3**, 33-57.
- 6) 竹内丑雄, 1972: 降水中の化学物質濃度の変動について, *地球化学*, **5**, 1-12.
- 7) 矢野 直, 前橋紀恵子, 1972: 汚染地域の大气エアロゾル粒子組成と発生源, 日本気象学会秋季大会講演予稿集, p. 84.