

## 原著論文

## レインゴーランド法による生態システム園の酸性雨測定Ⅴ -森林内の降雨の特徴-

山下栄次<sup>1</sup>・小林 賢<sup>2</sup>・矢部智恒<sup>3</sup>・満崎 純<sup>4</sup>・月森新一朗<sup>5</sup>  
平田圭佑<sup>6</sup>・松尾太郎<sup>7</sup>・正木智美<sup>7</sup>

Measurement of acid rain in the Botanical Garden with Raingoround Method  
- Characteristic of the precipitation in the forest -

Eiji YAMASHIYA<sup>1</sup>, Ken KOBAYASHI<sup>2</sup>, Tomotune YABE<sup>3</sup>, Jun MITUZAKI<sup>4</sup>,  
Sinitirou TUKIMORI<sup>5</sup>, Keisuke HIRATA<sup>6</sup>, Taro MATSUO<sup>7</sup> and Tomomi MASAKI<sup>7</sup>

### I. はじめに

加計学園自然植物園は、技術科学研究所と共同研究として、岡山理科大学生態システム園を選び、2000年から継続して降雨を採取し、湿性降下物質のモニタリングを行なっている。2000年から2007年までの降雨採取方法は、レインゴーランドⅡで、降水採取場所は、生態システム園内で周りに樹木が少ない森林内空地、生態システム園内で「森林内」と考えられる場所、森林と比較するために設定した「岡山理科大学10号館屋上」の3測点である。

2000年5月から2006年11月までのモニタリング結果は、既報(小林ほか, 2003, 2004, 2007), 小林(2004, 2008), 満崎ほか(2008)で報告している。

今回は、2000年から2007年の間にレインゴーランドⅡで採取され、分析を行った全ての測定値を用いて、森林内の降雨量、森林内のpHとEC、森林内降水のAnionとCation濃度について、累積出現頻度、ヒストグラム、中央値を用いて解析し、森林内降水と森林外(森林空地、10学舎屋上)と比較し森林内降水の特徴について考察した。

### II. 方法

#### 1. 測定場所

レインゴーランド法の測定場所は、岡山理科大学生態システム園内に2箇所、岡山理科大学構内に1箇所の計3箇所である。

図1に、測定場所の位置関係の概念図を示した。

測定場所番号Sta. 1は生態システム園内で周りに樹木が少ない森林内の「空き地」(以下「空地」と記



図1. 測定場所の位置概念図. Sta. 1は森林内の「空き地」, Sta. 2は森林内, Sta. 3は岡山理科大学10号館「屋上」.

1. 岡山理科大学技術科学研究所
2. 岡山理科大学大学院理学研究科, (現)神戸大学大学院
3. 岡山理科大学工学部応用化学科, (現)京都大学大学院
4. 岡山理科大学工学部応用化学科, (現)株式会社アイ・アイ・シー
5. 岡山理科大学工学部応用化学科, (現)岡山理科大学大学院
6. 岡山理科大学理学部基礎理学科, (現)徳島県警
7. 加計学園自然植物園

す), Sta. 2は生態システム園内で「森林内」と考えられる場所(以下「森林内」と記す), Sta. 3は岡山理科大学10号館「屋上」で森林と比較するために設定した場所(以下「屋上」と記す)である。

測定個所の詳細は、既報(小林ほか, 2003, 2004, 2007)に示した。

## 2. 降雨採取方法, 試料保存方法, 試料採取期間及び採取数, 分析項目及び分析機器

### 2-1. 降雨採取方法

堀場製作所製, レインゴーランドII(以下RGと記す)を用いた。RG法は, 1降雨の初期降雨7mmを1mm毎に分割採取でき, 降水量が8mmを超えると8mm以降の降水をまとめて水受けボトルに溜める構造になっている。そのため, RG法は, 初期降雨7mmまでの試料を分析すると降雨7mmまでの詳細な降雨中のpHやEC, イオン濃度の挙動を測定できる。しかし, 8mm以降の降水の挙動は把握できない採取方法である。

RG法は, 取扱が簡単で降水の採取に電源を必要としない。また, 専用の自動フタ開け装置を付けることで, 乾性降下物の影響の少ない降水を採取できる装置である。RG法に関する詳細は既報(小林ほか, 2003)に示した。

### 2-2. 試料保存方法

RG法のボトルに溜まった降雨試料は, 1雨毎に洗浄した10ml容ポリエチレン製容器(AS COPORATION製, PS Screw Bottle SS-10)に移し変え, 分析するまで冷蔵保存した。

### 2-3. 試料採取期間及び採取数

pH・EC測定用試料の採取期間は, 2000年5月27日から2006年11月25日の約7年間で, イオン分析用試料の採取期間は, 2004年2月22日から2006年2月14日の2年間である。

表1に, 岡山の降雨状況を示す例として「屋上」における年別・月別降雨採取回数を示した。

採取した回数は, 2000年5月~2006年11月までの

約7年間で述べ285回であった。年間降水採取回数は, 2001年から2005年の間で, 最大が2003年の56回で, 最小が2005年の31回で, 平均45回であった。

月別降水採取回数は, 2000年から2006年の間で, 最大が2003年7月の8回で2004年の1月が0回であった。2000年から2006年での月別降水採取回数の延数は, 最大が7月の35回で, 8月, 12月が16回, 15回と少なかった。

表2に分析項目別測定場所毎ボトル毎降雨試料試料数を示した。

pHとECの総試料数は, 5047個で, 空気が1863個, 森林内が1604個, Sta. 3が1580個である。陰イオン総試料数は, 1085個で, 空気が479個, 森林内

表1. Sta. 3(岡山理科大学10号館「屋上」)における年別・月別降雨採取回数。

Year	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	月別採水回数
Month								
1		6	4	4	0	4	2	20
2		5	0	7	4	4	1	21
3		3	5	6	5	4	6	29
4		1	5	6	6	3	3	24
5	2	4	5	5	6	3	4	29
6	5	5	5	4	4	2	4	29
7	5	5	5	8	4	5	3	35
8	1	3	2	2	5	1	2	16
9	2	3	4	4	4	2	4	23
10	5	4	2	2	4	1	2	20
11	3	3	3	5	3	2	5	24
12	2	2	5	3	3	0		15
年別回数	25	44	45	56	48	31	36	285

表2. 分析項目別測定場所毎ボトル毎降雨試料試料数。pH・ECはpH・ECを分析した試料数を, Anion(陰イオン)は,  $H_2PO_4^-$ ,  $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $Br^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ を分析した試料数を, Cation(陽イオン)は $Li^+$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ を分析した試料数を示す。

Sta.	Bottle No.	pH・EC	Anion	Cation
<b>Total</b>		<b>5047</b>	<b>1085</b>	<b>1068</b>
<b>Sta.1total</b>		<b>1863</b>	<b>479</b>	<b>479</b>
<b>Sta.2total</b>		<b>1604</b>	<b>399</b>	<b>399</b>
<b>Sta.3total</b>		<b>1580</b>	<b>207</b>	<b>190</b>
Sta.1	1	284	79	79
Sta.1	2	268	73	73
Sta.1	3	250	68	68
Sta.1	4	234	62	62
Sta.1	5	227	60	60
Sta.1	6	211	53	53
Sta.1	7	201	49	49
Sta.1	8	188	35	35
Sta.2	1	267	72	72
Sta.2	2	245	63	63
Sta.2	3	227	57	57
Sta.2	4	210	54	54
Sta.2	5	181	45	45
Sta.2	6	175	41	41
Sta.2	7	158	35	35
Sta.2	8	141	32	32
Sta.3	1	235	31	28
Sta.3	2	220	27	24
Sta.3	3	208	25	23
Sta.3	4	197	23	22
Sta.3	5	191	27	24
Sta.3	6	185	25	24
Sta.3	7	175	26	24
Sta.3	8	169	23	21

が399個, Sta. 3が207個である。陽イオン総試料数は, 1068個で, 空地が479個, 森林内が399個, Sta. 3が190個である。

### 2-4. 分析項目及び分析機器

pH・ECの分析機器は, 2000年5月から2004年11月までは堀場製作所製Twin pH分析器 B-212とTwin Cond導電率分析器 B-173を用いた。それ以後は, 堀場製作所製pH/cond meter D-54, pH glass electrode 9669-10D, EC glass electrode 3574-10Cを用いて測定した。ECの単位は $\mu\text{S}/\text{cm}$ である。

Anion(陰イオン,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ )とCation(陽イオン,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ )は, 島津製作所製パーソナルアナライザ PIA-1000を用いて分析した。Anionの分析条件は, 分離カラムはSHIMADZU Shim-pack IC-A3(S), 移動相は8mM p-ヒドロキシ安息香酸/3.2mM Bis-Tris, 移動相流量は0.15ml/min, 温度は35°C, 注入量は10 $\mu\text{l}$ である。Cationの分析条件は, 分離カラムはSHIMADZU Shim-pack IC-C3(S), 移動相は2.5mM シュウ酸, 移動相流量は0.3ml/min, 温度は45°C, 注入量は10 $\mu\text{l}$ である(岡田ほか, 2002; 厚生省生活衛生局水道環境部, 1993; 武藤・及川, 1983; 矢部, 2004)。

また, イオンの定性及び定量に液は, Anionには $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ の濃度が記されている関東化学株式会社製陰イオン混合標準液IVを, Cationには $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ の濃度が記されている関東化学株式会社製陽イオン混合標準液IIを希釈して用いた。

Anion(陰イオン)とCation(陽イオン)の定量下限は0.04mg/lとし, それ未満は不検出と考察し0.0mg/lと表示した。

## III. 結果及び考察

### 1. 森林内の降雨量の特徴

表3に測定場所別降雨量の集計を示した。この表の回数の値は, 表2の各測定場所のpH・ECのBottle毎の試料数から1mm毎の降雨回数を求めものである。例えば, Sta. 1(空地)における1mmの降雨は,

16回あり, 比の値は, 空地における1mmの総降雨回数284回の内5.6%であったことを示している。

1mmの降雨採取回数の比は, 空地は5.6%, 森林内は8.2%, Sta. 3は6.4%で, 森林内>屋上>空地であった。4mmの比は, 空地が2.5%, 森林内が10.9%, 屋上が2.6%で, 森林内>屋上=空地であった。8mm以上の降雨採取回数の比は, 空地が66.2%, 森林内が52.8%, 屋上が71.9%で, 屋上>空地>森林内であった。

空地と屋上の降雨採取回数の比の値は, 1mmから8mmまで良く似ていた。空地と屋上との水平距離は約1.5kmあり, 空地と屋上との間に標高130mの半田山がある。空地と屋上の1mmから8mmまで良く似ていたことから, これら地理的条件に影響されず, 空地と屋上の雨の降り方に差が無く, 同じ雨雲から降った雨を採取していると考察できた。

空地と森林内の水平距離は約50mである。50mの距離の影響で空地と森林内の1mm, 4mm, 8mm以上降雨採取回数の比の違いがでるとは考え難く, 森林内では下記の現象が起きていると考察できた。

森林内においては, 降雨の一部が樹木葉により降雨が保留されたり, 樹木葉・枝・幹により妨げられRGまで到達しない現象が常に起きている。降雨が降り続けると, 樹木葉表面により保留されていた水滴が一気に樹木葉により離れRGへ落下する現象が起きる。そのため, 4mmの比が他の測定場所より大きくなり, 落下直後に保留が復活し, 5mmの比が他の測定場所より小さくなったと考察できる。6, 7mmの降雨採取回数の比が測定場所より多いのは, 森林外で8mm以上である降雨が, 森林内においては樹木葉・枝・幹により妨げられRGに到達しないため, 森林内の6, 7mmの比が大きくなったと考察できる。従

表3. 測定場所別降雨量集計。回数の値は, Sta. 1における1mmの降雨が16回あったことを示し, 比の値は, Sta. 1における1mmの降雨が284回の降雨で5.6%あったことを示す。

降雨量 mm	回 数 (回)			比 (%)		
	Sta.1	Sta.2	Sta.3	Sta.1	Sta.2	Sta.3
1	16	22	15	5.6	8.2	6.4
2	18	18	12	6.3	6.7	5.1
3	18	17	11	5.6	6.4	4.7
4	7	29	6	2.5	10.9	2.6
5	16	6	6	5.6	2.2	2.6
6	10	17	10	3.5	6.4	4.3
7	13	17	6	4.6	6.4	2.6
8	188	141	169	66.2	52.8	71.9
総計	284	267	235	100.0	100.0	100.0

って、森林内の8mm以上の降雨比は、相対的に森林外(空地, 屋上)に比べ少なくなったと考察できた。樹木葉・枝・幹により妨げられRGに到達しない水は樹幹流として樹木の根周辺で地下に浸透していると考えられる。

森林内の降雨量の特徴は、森林外(空地, 屋上)に比べ、8mm以上の降雨採取回数の比が、10から20%少ない。また、4mmの比が森林外(空地, 屋上)に比べ大きい。

森林空地や屋上において8mm以上の降雨採取回数の比が71.9%であることから、RG法による初期降雨を採取する観測では、8mm以上の降水中の成分を無視していることとなるので、今後採取方も含め、長期影響調査に検討を加える必要があると考察した(玉置・平木, 1993)。

## 2. 森林内降水のpHとEC濃度分布の特徴

2000年5月～2006年11月までの約7年間で、pHとECの測定回数は、5047個で、空地が1863個、森林内が1604個、屋上が1580個である。

図2にSta. 1(空地), Sta. 2(森林内), Sta. 3(屋上)におけるpHの2000年5月～2006年11月間の累積出現頻度図を示した。

3測定場所のpH値は4.0から7.5に分布していた。3測定場所のpHのヒストグラムは一山であり、正規型の分布を示していた。全てのpH区分で、pH値は、森林内>空地>屋上を示していた。森林内は、空地と屋上に比べ中性になっていた。また、森林空地は屋上に比べ中性になっていた。

森林内pHの特徴は、森林外(森林空, 屋上)に比較して中性になることである。

図3にSta. 1(空地), Sta. 2(森林内), Sta. 3(屋上)におけるECの累積出現頻度図を示した。

3測定場所のECのヒストグラムは一山であり、対数正規型の分布を示していた。ECは、5μS/cmから100μS/cmに森林内は93.6%、空地は97.4%、屋上95.4%分布していた。全てのEC濃度の区分で、EC値は、屋上>空地>森林内を示していた。森林内は、空地と屋上に比べ値が小さかった。空地と

屋上の比較では、5μS/cmから45μS/cmでは、ほぼ同じ値を示し、45μS/cmから95μS/cmでは、屋上>空地であった。

森林内ECの特徴は、森林空地や屋上に比較して値が小さい。森林空地においても、屋上に比較して値が小さい。

## 3. 森林内降水のAnion濃度分布の特徴

Anion(陰イオン)の $H_2PO_4^-$ ,  $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $Br^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ の濃度区分別出現頻度%を図4, 5, 6, 7, 8, 9, 10に示した。

$H_2PO_4^-$ は空地, 森林内, 屋上共に0.2mg/l未満の出現頻度が97%を占めていた。各測定場所の $H_2PO_4^-$ は、0.2mg/lから1.1mg/lはほとんど検出されなかった。1.2mg/l以上の測定値が出現頻度3%程度見られたが、次の級は、採取時における鳥の糞, 昆虫等の混入や保存時における汚染によるものと考察できる。

Fは0.2mg/l未満が、空地で91.4%、森林内が

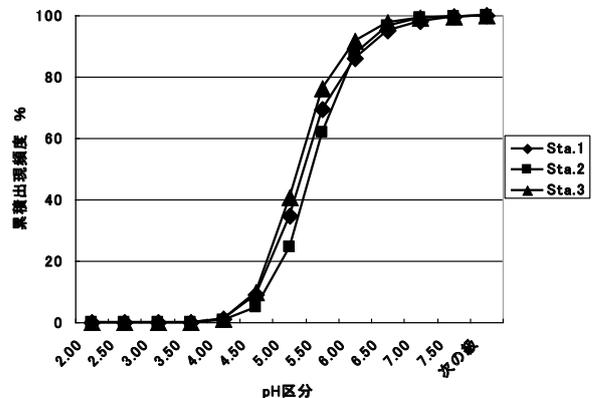


図2. Sta. 1, 2, 3におけるpHの累積出現頻度(%)。

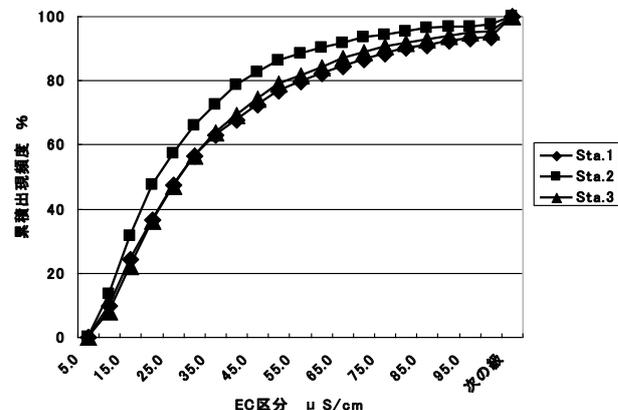


図3. Sta. 1, 2, 3におけるECの累積出現頻度(%)。

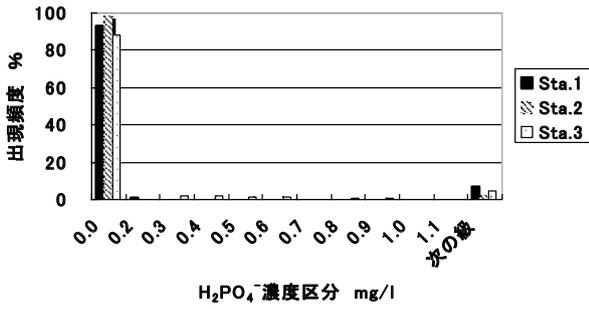


図4. Sta.1, 2, 3におけるH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>の出現頻度(%)

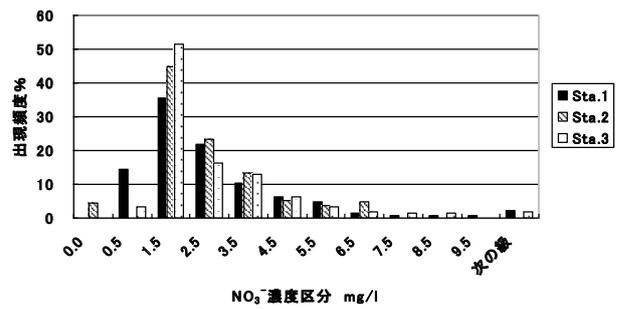


図9. Sta.1, 2, 3におけるNO<sub>3</sub><sup>-</sup>の出現頻度(%)

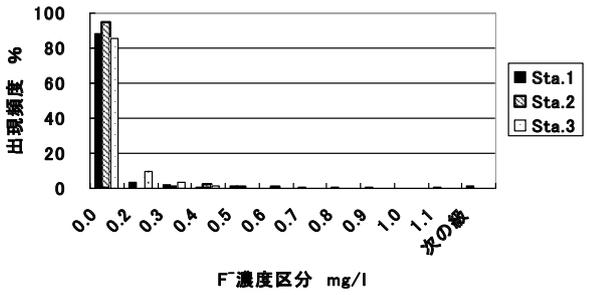


図5. Sta.1, 2, 3におけるF<sup>-</sup>の出現頻度(%)

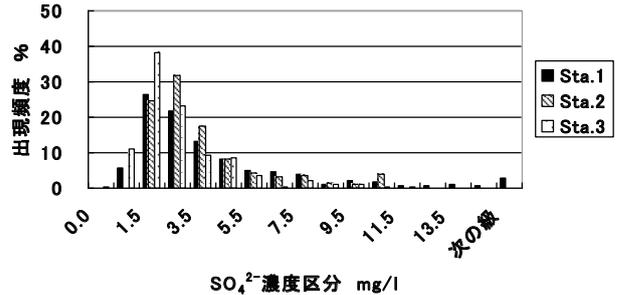


図10. Sta.1, 2, 3におけるSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の出現頻度(%)

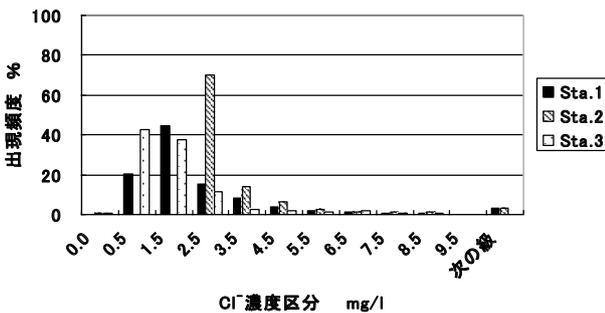


図6. Sta.1, 2, 3におけるCl<sup>-</sup>の出現頻度(%)

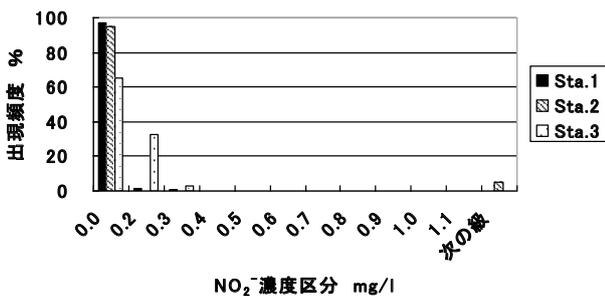


図7. Sta.1, 2, 3におけるNO<sub>2</sub><sup>-</sup>の出現頻度(%)

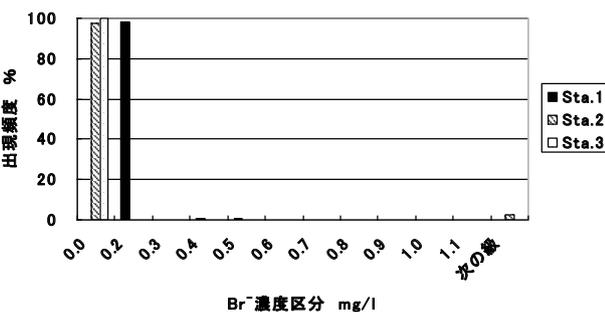


図8. Sta.1, 2, 3におけるBr<sup>-</sup>の出現頻度(%)

94.7%, 屋上の出現頻度が95.1%であった。0.2mg/lから1.1mg/lは、空地と森林内で検出される例はあるが、屋上では全く検出されていない。次の級は、汚染によるものと考察できる。

Cl<sup>-</sup>の3測定場所のヒストグラムは一山であり対数正規型の分布を示した。1.5mg/l以下の出現頻度は、空地で66%, 森林内が0.5%, 屋上が80.4%であった。森林内は、2.5mg/lから4.5mg/lの出現頻度が空地、屋上に比べ際立って多かった。森林内の樹木葉表面に乾性沈着したCl<sup>-</sup>がRGに採取されたためと考察できた。次の級は、汚染によるものと考察できる。森林内Cl<sup>-</sup>濃度の特徴は、森林空地や屋上に比較して多いことであった。

NO<sub>2</sub><sup>-</sup>は0.2mg/l以下の出現頻度が空地で98.5%, 森林内で94.7%, 屋上で97.5%であった。0.2mg/lから1.1mg/lは、空地で6回、屋上で5回検出されたが、森林内では全く検出されていない。しかし、森林内において次の級を21回検出した。現在のところ、その原因は明らかでない。

Br<sup>-</sup>は0.2mg/l以下の出現頻度が空地で98.3%, 森林内で97.7%, 屋上で100%であった。空地において次の級が8回検出されたが、森林内、屋上では全く検出されていない。現在のところ、その原因は明

らかでない。

降水のpHを決定する主要イオンである $\text{NO}_3^-$ の3測定場所のヒストグラムは、一山であり対数正規型の分布を示した。1.5mg/lでの出現頻度は、空地で35.3%、森林内で44.9%、屋上で51.6%であった。2.5mg/lまでの累積出現頻度%は、空地で72.2%、森林内で75.7%、屋上で71.2%であった。森林内 $\text{NO}_3^-$ 濃度分布の特徴は、森林空地や屋上に比較して、3.5mg/lと6.5mg/lにおいて多いことであった。なぜ、森林内 $\text{NO}_3^-$ 濃度が離れた濃度で多く検出されたかは明らかではない。

降水のpHを決定する主要イオンである $\text{SO}_4^{2-}$ の3測定場所のヒストグラムは、一山であり、 $\text{NO}_3^-$ に比較してなだらかな対数正規型の分布を示していた。出現頻度が最も高い濃度は、空地と屋上が1.5mg/lで、森林内が2.5mg/lであった。

森林内 $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度の特徴は、森林空地や屋上に比較して高値であることであった。また、森林空地も屋上に比較して、高値であった。森林内や森林空地が森林外に比較して高値である理由は明らかではない。

Anion濃度分布の特徴は、 $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{Br}^-$ の4 Anionについては0.2mg/l以下の出現頻度が多く、森林内、空地、屋上を比較検討できなかった。 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ は森林内において、空地、屋上に比較して高濃度で分布していたことであった。ヒストグラムの型は、 $\text{Cl}^-$ が正規型で、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ は対数正規型であった。

#### 4. 森林内降水のCation濃度の特徴

陽イオン(Cation)の $\text{Li}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ の濃度区別出現頻度%を図11, 12, 13, 14, 15, 16, に示した。

$\text{Li}^+$ は0.2mg/l以下の出現頻度が空地で84.3%、森林内で99.5%、屋上で100%であった。各測定場所の $\text{Li}^+$ の0.3mg/lから1.1mg/lの出現頻度は、空地で65回あるが、森林内で99.5%と屋上は検出されなかった。なぜ、空地にのみ検出されるのか原因は明らかではない。

$\text{Na}^+$ の3測定場所のヒストグラムは一山であり対数正規型の分布を示した。1.5mg/lにおける出現頻度が空地で36.5%、森林内で31.8%、屋上で32%であった。2.5mg/lまでの累積出現頻度%は、空地で84.1%、森林内で89.2%、屋上で95.4%であった。2.5mg/lから4.5mg/lの出現頻度は、空地と森林内が屋上に比べ大きかった。空地と森林内の樹木葉表面に乾性沈着した $\text{Na}^+$ が測定されたためと考察できた。

$\text{NH}_4^+$ の3測定場所のヒストグラムは一山であり対数正規型の分布を示した。2.5mg/lまでの累積出現頻度%は、空地で81.6%、森林内で90.7%、屋上で95.4%であった。2.5mg/lから9.5mg/lの出現頻度は、空地、森林内が屋上に比較して多かった。

$\text{K}^+$ の3測定場所のヒストグラムは一山であり対数正規型の分布を示した。1.5mg/lまでの累積出現頻度%は、空地で91.0%、森林内で87.2%、屋上で99.5%であった。2.5mg/lから9.5mg/lの出現頻度は、 $\text{NH}_4^+$ と同じく空地、森林内が屋上に比較して多かった。

$\text{Mg}^{2+}$ の3測定場所のヒストグラムは一山であり対数正規型の分布を示した。0.4mg/lまでの累積出現頻度%は、空地で71.6%、森林内で86.5%、屋上で82.6%であった。2.5mg/lから9.5mg/lの出現頻度は、 $\text{NH}_4^+$ と同じく空地、森林内が屋上に比較して多かった。

$\text{Ca}^{2+}$ の3測定場所のヒストグラムは一山であり正規型の分布を示した。2.5mg/lまでの累積出現頻度%は、空地で88.5%、森林内で89.7%、屋上で99.5%であった。0.5mg/lから9.5mg/lの出現頻度は、 $\text{NH}_4^+$ と同じく空地、森林内が屋上に比較して多かった。

Cation濃度分布の特徴は、 $\text{Li}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ のCationについては0.2mg/l以下の出現頻度が多く、森林内、空地、屋上を比較検討できなかった。 $\text{Na}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$ は森林内と空地が、屋上に比較して高濃度で分布していた。ヒストグラムの型は、 $\text{Ca}^{2+}$ が正規型で、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$ は対数正規型であった。

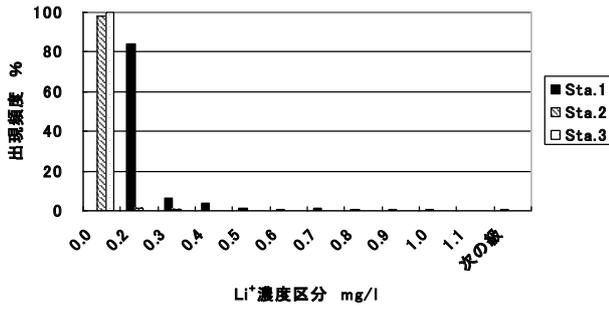


図11. Sta.1, 2, 3におけるLi<sup>+</sup>の出現頻度(%)

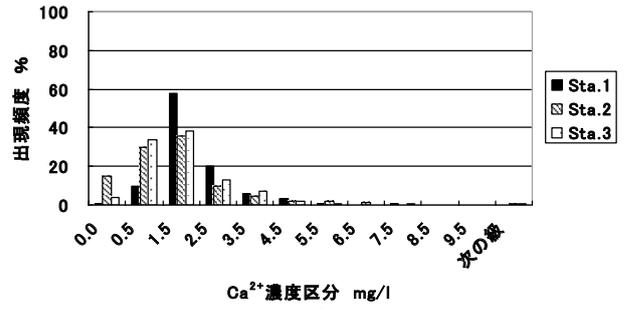


図16. Sta.1, 2, 3におけるCa<sup>2+</sup>の出現頻度(%)

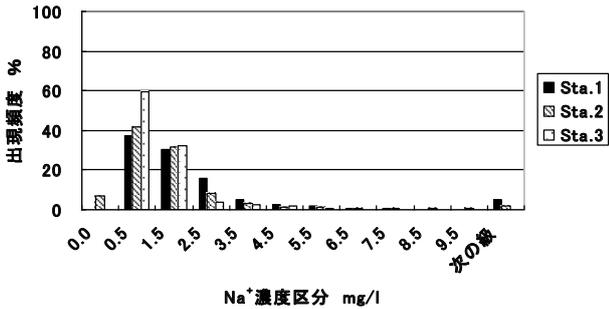


図12. Sta.1, 2, 3におけるNa<sup>+</sup>の出現頻度(%)

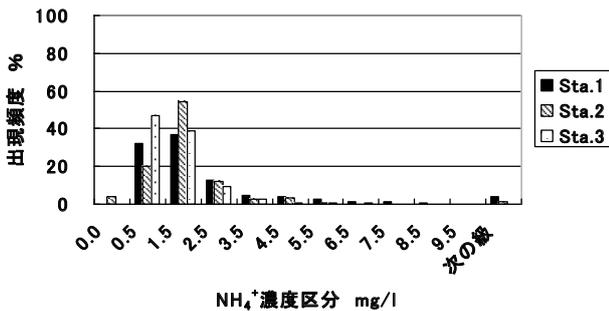


図13. Sta.1, 2, 3におけるNH<sub>4</sub><sup>+</sup>の出現頻度(%)

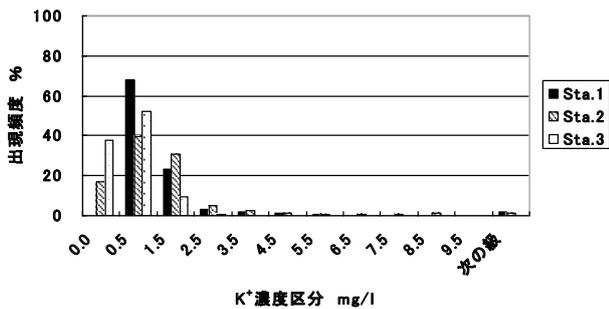


図14. Sta.1, 2, 3におけるK<sup>+</sup>の出現頻度(%)

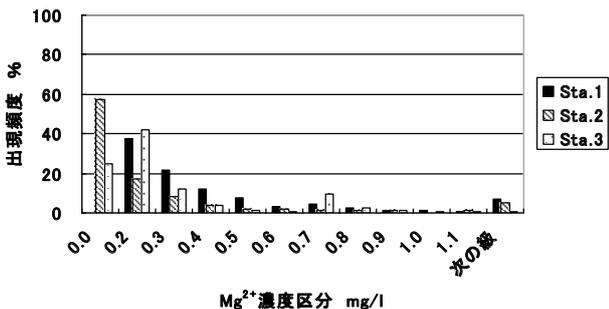


図15. Sta.1, 2, 3におけるMg<sup>2+</sup>の出現頻度(%)

表4. 測定場所別分析項目毎の中央値と平均値. Sta.1は森林空地, Sta.2は森林内, Sta.3は岡山理科大学10号館屋上である. aはpH・EC, bはAnion, cはCationの集計を示す. Sta.1 med.はSta.1における中央値を, Sta.1 ave.はSta.1における算術平均値を示す. Nは, 分析試料数を示す.

(a)

(単位: EC $\mu S \cdot cm$ )			
Sta.	N	pH	EC
Sta.1 med.	1863	4.6	24.0
Sta.2 med.	1604	4.8	19.0
Sta.3 med.	1580	4.6	24.0
Sta.1 ave.	1863	4.7	40.7
Sta.2 ave.	1604	4.8	27.8
Sta.3 ave.	1580	4.6	35.1

(b)

(単位: mg/l)								
Sta.	N	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Sta.1 med.	479	0.0	0.0	0.9	0.0	0.1	1.4	2.2
Sta.2 med.	399	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	1.5	2.1
Sta.3 med.	207	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	1.3	1.5
Sta.1 ave.	479	0.7	0.1	2.0	0.0	0.1	2.2	3.7
Sta.2 ave.	399	0.1	0.0	2.9	0.1	0.0	2.1	3.2
Sta.3 ave.	207	0.2	0.0	1.0	0.0	0.0	2.1	2.1

(c)

(単位: mg/l)							
Sta.	N	Li <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
Sta.1 med.	479	0.0	0.7	0.8	0.3	0.2	1.0
Sta.2 med.	399	0.0	0.5	0.7	0.4	0.0	0.5
Sta.3 med.	190	0.0	0.3	0.5	0.1	0.1	0.6
Sta.1 ave.	479	0.1	2.8	2.2	1.2	0.4	1.4
Sta.2 ave.	399	0.0	1.4	1.5	1.5	0.3	1.0
Sta.3 ave.	190	0.0	0.6	0.8	0.2	0.2	1.1

## 5. 森林内降水の化学的特徴

化学的特徴を示す代表値として算術平均値が汎用されるが, 前述したように測定値の累積出現頻度のヒストグラムは, pHとCaは正規型を示すが, その他の項目は対数正規型を示すことが多い. 今回は, 森林内降水の特徴を示す代表値として中央値と算術平均値を用いて, 森林内降水の化学的特徴を考察した.

表4に測定場所別分析項目毎の中央値と平均値を示した.

森林内のpHの特徴は中央値で4.8であり, 空地の4.6, 屋上の4.6に比べ0.2中性であった. 算術平均値においても森林内のpHは, 空地の4.6, 屋上の4.6に比べ0.2中性であった. 中央値と平均値は0.1の範囲で一致していた.

森林内のECの特徴は中央値で $19.0 \mu\text{S}/\text{cm}$ であり、空地の $24.0 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、屋上の $24.0 \mu\text{S}/\text{cm}$ に比べ $5 \mu\text{S}/\text{cm}$ 小さかった。算術平均値においても森林内のECは、空地、屋上に比べ小さかった。

Anionにおいて、森林内の $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{Br}^-$ は、中央値で、空地、屋上と同じく $0.0\text{mg}/\text{l}$ を示したので、測定場所間の比較できないので考察から除いた。

森林内 $\text{Cl}^-$ の特徴は中央値で $2.0\text{mg}/\text{l}$ であり、空地の $0.9\text{mg}/\text{l}$ 、屋上の $0.5\text{mg}/\text{l}$ に比べ、 $1.1\text{mg}/\text{l}$ 、 $1.5\text{mg}/\text{l}$ 大きかった。算術平均値においても、測定場所間の大小関係は変わらなかった。

森林内の $\text{NO}_3^-$ の特徴は中央値で $1.5\text{mg}/\text{l}$ であり、空地の $1.4\text{mg}/\text{l}$ 、屋上の $1.3\text{mg}/\text{l}$ に比べ、 $0.1\text{mg}/\text{l}$ 、 $0.2\text{mg}/\text{l}$ 大きかった。算術平均値においても、測定場所間の大小関係は変わらなかった。

森林内の $\text{SO}_4^{2-}$ の特徴は中央値で $2.1\text{mg}/\text{l}$ であり、空地の $2.2\text{mg}/\text{l}$ に比べ $0.1\text{mg}/\text{l}$ 小さく、屋上の $0.6\text{mg}/\text{l}$ に比べ $0.2\text{mg}/\text{l}$ 大きかった。算術平均値においても、森林内の $\text{SO}_4^{2-}$ は、空地に比べ小さく、屋上に比べ大きかった。

次いで、Cationにおいて、森林内 $\text{Li}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ は中央値で $0.0\text{mg}/\text{l}$ を示したので測定場所間の比較ができないので考察から除いた。

森林内の $\text{Na}^+$ の特徴は中央値で $0.7\text{mg}/\text{l}$ であり、空地の $0.7\text{mg}/\text{l}$ 比べ $0.2\text{mg}/\text{l}$ 小さく、屋上の $0.3\text{mg}/\text{l}$ に比べ $0.2\text{mg}/\text{l}$ 大きかった。算術平均値においても、森林内の $\text{Na}^+$ は、空地に比べ小さく、屋上に比べ大きかった。 $\text{Na}^+$ の測定場所間の大小関係は $\text{SO}_4^{2-}$ と同じであった。

森林内の $\text{NH}_4^+$ の特徴は中央値で $0.7\text{mg}/\text{l}$ であり、空地の $0.8\text{mg}/\text{l}$ 比べ $0.1\text{mg}/\text{l}$ 小さく、屋上の $0.5\text{mg}/\text{l}$ に比べ $0.2\text{mg}/\text{l}$ 大きかった。算術平均値においても、森林内の $\text{NH}_4^+$ は、空地に比べ小さく、屋上に比べ大きかった。この測定場所間の大小関係は $\text{SO}_4^{2-}$ と同じであった。

森林内の $\text{K}^+$ の特徴は、中央値では、 $0.4\text{mg}/\text{l}$ で、空地の $0.4\text{mg}/\text{l}$ 、屋上の $0.1\text{mg}/\text{l}$ に比べ、 $0.1\text{mg}/\text{l}$ 、 $0.3\text{mg}/\text{l}$ 大きかった。算術平均値においても、森林

内の $\text{SO}_4^{2-}$ は、空地、屋上に比べ大きかった。この測定場所間の大小関係は $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ と同じであった。

森林内の $\text{Ca}^{2+}$ の特徴は中央値では $0.5\text{mg}/\text{l}$ で、空地の $1.0\text{mg}/\text{l}$ 、屋上の $0.6\text{mg}/\text{l}$ に比べ小さかった。算術平均値でも測定場所間の関係は同じであった。

#### IV. まとめ

森林で採取された降雨の特徴を2000年5月から2007年11月の間の、pHとECの総試料数5047個、陰イオン総試料数1085個、陽イオン総試料数1068個のデータを用いて、森林内の降雨量、森林内のpHとEC、森林内降水のAnionとCation濃度について、累積出現頻度、ヒストグラム、中央値を用いて解析し、森林内降水と森林外(森林空地、屋上)と比較し森林内降水の特徴について考察した。

森林内の降雨量は、森林外(空地、屋上)に比べ、 $8\text{mm}$ 以上の降雨採取回数の比が、10から20%少なかった。

森林内のpHの中央値は4.8で、森林外(空地、屋上)に比べ、中央値で0.2中性であった。森林内のECの中央値は $19.0 \mu\text{S}/\text{cm}$ で、森林外(空地、屋上)に比べ、中央値で $5 \mu\text{S}/\text{cm}$ 小さかった。

森林内の $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{Br}^-$ 、 $\text{Li}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ の中央値は、 $0.0\text{mg}/\text{l}$ となり環境評価ができなかった。森林外(空地、屋上)においても、この5つのイオンの中央値は、 $0.0\text{mg}/\text{l}$ であった。森林内が中央値で空地、屋上に比べ多かったイオンは、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{K}^+$ であった。森林内が中央値で空地より少なく、屋上に比べ多かったイオンは、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ であった。森林内が中央値で空地、屋上に比べ少なかったイオンは、 $\text{Ca}^{2+}$ であった。

#### 引用文献

岡田哲男・山本 敦・井上嘉則(2002). 研究者・技術者のための手引書 クロマトグラフィーによるイオン性化学種の分離分析, エヌ・ティー・エス株式会社:137-141, 144-148.

厚生省生活衛生局水道環境部(1993). 上水試験方

- 法, 日本水道協会:35-40.
- 小林 賢・松尾太郎・山下栄次(2003). レインゴーランド法による生態システム園の酸性雨測定-2000年5月~2002年12月-, 岡山理科大学自然植物園研究報告 8:32-39.
- 小林 賢・矢部智恒・松尾太郎・山下栄次(2004). レインゴーランド法による生態システム園の酸性雨測定II-2000年5月~2004年5月-, *Naturalistae* 9:55-62.
- 小林 賢・満崎 純・松尾太郎・正木智美・山下栄次(2007). レインゴーランド法による生態システム園の酸性雨測定III-2000年5月~2006年7月-, *Naturalistae* 11:95-103.
- 小林 賢(2004). 西部太平洋赤道海域及び岡山理科大学生態システム園における降水の化学成分に関する研究, 岡山理科大学技術科学研究所卒業論文集2004年版:14-35.
- 小林 賢(2008). 大気中酸性物質の湿性及び乾性沈着に関する研究, 第4章 岡山市街地における定量分割採取による降水の化学成分特性, 神戸大学大学院自然科学研究科博士論文:21-38.
- 酸性雨調査法研究会(1993). 酸性雨調査法, 株式会社 ぎょうせい:211-220.
- 玉置元則・平木隆年(1993). 雨水採取法と成分濃度との関係(一雨全体と分取との比較), 兵庫県公害研究所報告 17:62-63.
- 満崎 純・小林 賢・矢部智恒・松尾太郎・正木智美・山下栄次(2008). レインゴーランド法による生態システム園の酸性雨測定IV-2000年5月~2006年11月-, *Naturalistae* 12:9-19.
- 武藤義一・及川紀久雄(1983). イオンクロマトグラフィ, 講談社:9-77.
- 矢部智恒(2004). レインゴーランド法を用いた降雨中の無機イオン組成に関する研究-岡山理科大学生態システム園及び大学構内-, 岡山理科大学技術科学研究所卒業論文集2004年版:4-14.

(2009年1月19日受理)