

原著論文

## 岡山におけるろ過式採取法による降水の観測(VI) -2010年～2013年のイオン降下量-

山下栄次<sup>1</sup>・藤井 彩<sup>2</sup>・和田真平<sup>2</sup>・江国真幸<sup>3</sup>・松尾太郎<sup>4</sup>・正木智美<sup>4</sup>

Measurement of the precipitation by the filtration type sampling method in Okayama City (VI)  
-Amount of ion fall from 2010 to 2013-

Eiji YAMASHITA<sup>1</sup>, Aya FUJII<sup>2</sup>, Shinpei WADA<sup>2</sup>, Masaki EKUNI<sup>3</sup>, Taro MATSUO<sup>4</sup>, and Tomomi MASAKI<sup>4</sup>

### I. はじめに

岡山理科大学技術科学研究所山下研究室と自然植物園は、岡山理科大学生態システム園(2か所)及び岡山理科大学構内の3測点で、降雨成分の実態を把握することと、森林による大気洗浄効果を判定する目的で、降水のモニタリングを行っている。2000年5月から観測を始め、現在(2013年11月)も継続して行っている。

2000年5月から2006年11月までは、レインゴーランドIIを用い、1雨毎の降り始めから8mmまでの初期降雨の短期変動を採取し測定した。レインゴーランドIIの詳細と観測結果は、小林他(2003, 2004, 2007), 満崎他(2008), 山下他(2009)で報告した。

2006年3月からは、降水採取方法をろ過式採取法へと変更し、降水の長期変化を明らかにすることを目的とした観測を行っている。ろ過式採取法の詳細と観測結果については、渡邊他(2009a, 2009b), 山下他(2011, 2013), 江国他(2012)で報告した。

今回は、2010年9月から2013年5月まで、モニタリング場所を、岡山理科大学生態システム園(2か所)、岡山理科大学構内に加え、岡山市内、瀬戸内市の計5測点とし、より広域な降下物の実態を把握



図1. 降水採取場所。

することを目的として、降雨中のイオン降下量の季節変化について観測を行い、その要因について考察したので、報告する。

### II. 方法

#### 1. 採取場所・採取期間・採取頻度・検体数

図1に降水採取場所を示した。採取場所は岡山理科大学生態システム園内に2か所(Sta. 1, Sta. 2), 岡山理科大学10学舎屋上に1か所(Sta. 3), 岡山理科大学技術科学研究所関別館前庭に1か所(Sta. 4), 岡山大学理学部附属牛窓臨海実験所前庭に1か所

1. 岡山理科大学技術科学研究所  
2. 岡山理科大学総合情報学部生物地球システム学科  
3. 岡山理科大学院総合情報研究科生物地球システム専攻  
4. 加計学園(岡山理科大学)自然植物園

(Sta. 5)の計5か所である。

Sta. 1は岡山理科大学生態システム園森林内で周囲に樹木が少なく上空が開けている場所である。Sta. 2は同じ森林内だが周囲に約10m以上の樹木が生い茂っており、上空も樹木で覆われている。Sta. 3は岡山理科大学10学舎屋上で、南には岡山市街地が広がり、上空が開けている場所である。Sta. 4は岡山理科大学技術科学研究所関別館前庭で、周囲に住宅地があり上空は開けている場所である。Sta. 5は岡山大学理学部附属牛窓臨海実験所前庭の波打ちから約50mの場所にあり、海岸の近くにあり、上空は開けている場所である。

採取期間は、2010年9月27日から2013年5月9日までである。採取頻度は原則2週間毎である。検体数は、Sta. 1・Sta. 2・Sta. 3・Sta. 4・Sta. 5共に67検体であった。降水量が0 mmであったのは、Sta. 1・2・3・4・5で各々4、4、4、4、5検体であった。

## 2. 測定項目・分析機器

測定項目は、採水採取量(ml)、降水量(mm)、水素イオン濃度指数(pH)、電気伝導度(EC, mS/m)、陽イオン(Cation,  $\mu\text{mol/l}$ )、陰イオン(Anion,  $\mu\text{mol/l}$ )である。

降水の採取装置は、ADVANTEC社製、酸性雨採取装置ACDR-047型を使用した。この装置は、湿性降下物と乾性降下物を合わせた総降下物の採取を目的としたものである。本装置は、降水の採取に電源を必要としない。

pHとEC( $\mu\text{S/cm}$ )の測定には、堀場製作所製pH/cond meter F-54を用いた。

イオン分析には、島津製作所社製パーソナルイオンアナライザPIA-1000で、CationとAnionそれぞれ1台ずつ用いた。

測定したCationは、 $\text{Li}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、Anionは、 $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{Br}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ である。しかし、 $\text{Li}^+$ 、 $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{Br}^-$ は、全ての試料で定量下限以下であったので、定量し解析したCationは、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ で、Anion

表1. 各Sta.における降水量の月変化。Total：月総降雨量。

月	雨量(mm)				
	Sta.1 Total	Sta.2 Total	Sta.3 Total	Sta.4 Total	Sta.5 Total
1	42	34	42	28	31
2	74	57	78	70	84
3	56	42	53	49	46
4	70	48	59	74	69
5	144	74	154	148	152
6	176	113	186	196	195
7	184	109	183	171	158
8	160	68	138	163	253
9	190	119	187	145	187
10	58	43	52	56	63
11	57	41	54	56	52
12	57	43	43	50	51
年降雨	1268	791	1229	1206	1341

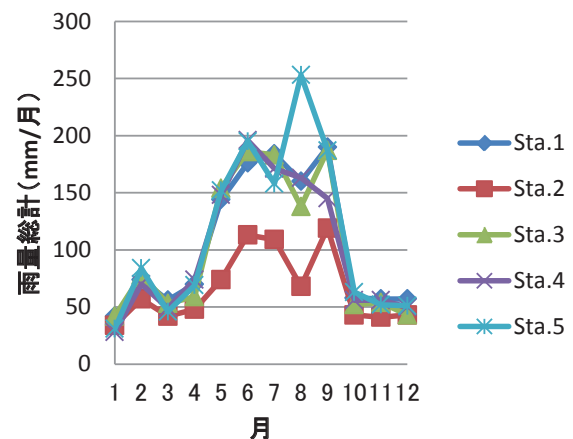


図2. 各Sta.における降水量の月変化。測定期間：2010年9月27日～2013年5月9日。

は、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ の計8イオンである。イオンの定性及び定量方法、分析カラム、標準溶液の成分濃度、繰り返し精度実験、並行観測結果は、既報の渡邊他(2009a)に記した通りである。

## 3. データ処理方法

pH、EC( $\mu\text{S/cm}$ )、Cation、Anionの月平均値は、2週間毎に得られたデータを月毎に降水量を考慮した加重平均して算出した。ただし、pHの平均値は、各々のpH値を $[\text{H}^+]$ に変換した後に、 $[\text{H}^+]$ から $[\text{Hn}^+]$ までの合計を求め、試料数で除した値( $[\text{H}^+]_{\text{mean}}$ )を求めた後、pH値に戻す方法で求めた。

非海洋由来成分(non sea salt : nss)の計算方法は、酸性雨調査法研究会(1993)を参考にした。 $\text{nss-Ca}^{2+}$ と $\text{nss-SO}_4^{2-}$ は、以下の式より求めた。単位は $\mu\text{mol/l}$ である。

表 2. 各Sta. におけるNa<sup>+</sup>降下量の月変化. ave.は平均値, sdは標準偏差.

月	Na <sup>+</sup> 降下量 (m-mol/m <sup>2</sup> /月)									
	Sta.1		Sta.2		Sta.3		Sta.4		Sta.5	
	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd
1	29	2	58	29	34	5	27	10	35	4
2	35	18	50	25	53	19	31	6	44	14
3	50	23	70	24	65	36	52	41	79	54
4	47	10	66	20	55	5	72	19	214	102
5	27	5	27	7	35	15	27	2	69	5
6	35	13	46	12	42	7	62	37	132	66
7	48	20	39	3	48	5	54	8	825	717
8	33	1	31	5	38	8	44	3	1386	1202
9	41	13	54	22	47	12	46	10	502	508
10	46	14	48	17	37	16	67	32	100	14
11	32	11	51	11	41	12	50	17	94	53
12	43	26	85	56	43	26	49	32	64	37

$$\text{nss-Ca}^{2+} (\mu\text{mol/l}) = [\text{Ca}^{2+}] - 0.038 \times [\text{Na}^+]$$

$$\text{nss-SO}_4^{2-} (\mu\text{mol/l}) = [\text{SO}_4^{2-}] - 0.251 \times [\text{Na}^+]$$

ただし,  $[\text{Na}^+]$ : Na<sup>+</sup>測定値 (μmol/l),  $[\text{Ca}^{2+}]$ : Ca<sup>2+</sup>測定値 (μmol/l),  $[\text{SO}_4^{2-}]$ : SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>測定値 (μmol/l) である.

イオン降下量は, イオン濃度に降水量を乗じて求めた. 降下量の単位はm-mmol/m<sup>2</sup>/月である.

試料32ヶ月分データを1~12月までの月変化に換算し評価した.

pHの平均値算出方法やイオンクロマトグラフ法による測定値のデータ処理方法の詳細は, 既報, 江國他(2012)に記した通りである.

### III. 結果及び考察

#### 1. 降水量の季節変化

表1と図2に各Sta. における降水量の月変化を示した. 降水量はすべてのSta. で夏季(5月から9月)に高く, 10月から1月まで低い季節変化を示した. Sta. 1・3共に, 9月に最大値を示し, 1月に最小値を示した. Sta. 2は9月に最大値を示し, 1月に最小値を示した. Sta. 4は6月に最大値を示し, 1月に最小値を示した. Sta. 5は8月に最大値を示し, Sta. 1・2・3・4と同様に1月に最小値を示した.

Sta. 2はSta. 1・3・4・5より降水量が少なかった. 森林内で植物の枝葉に遮られているSta. 2の降水量と上空が開けているSta. 3の降水量を比較するために, Sta. 2とSta. 3を検討した. Sta. 2の降水量はSta. 3の降水量と比較して, 葉の茂る5月から9月の平均値は56% (Sta. 2 = 483mm, Sta. 3 = 851mm) で, その他の月の平均値は82% (Sta.

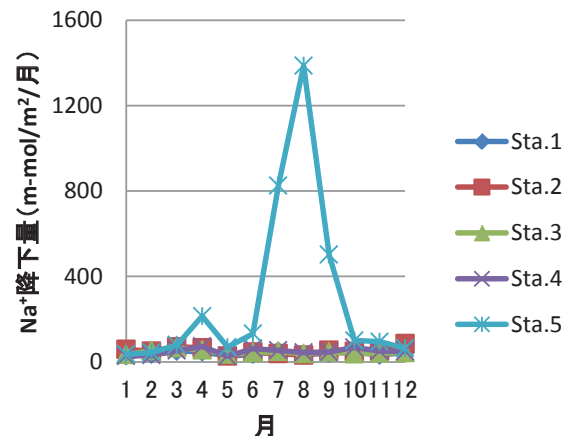


図 3. 各Sta. におけるNa<sup>+</sup>降下量季節変化. 測定期間: 2010年9月27日~2013年5月9日.

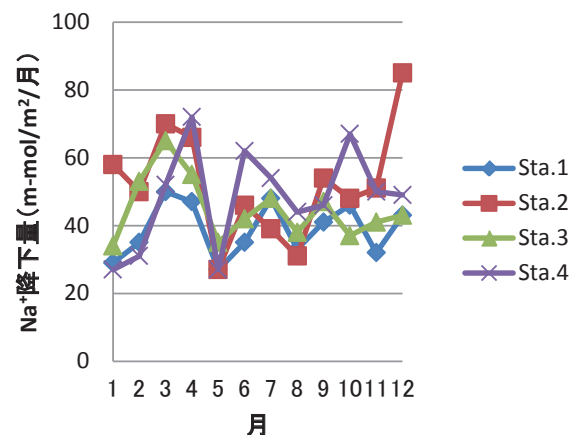
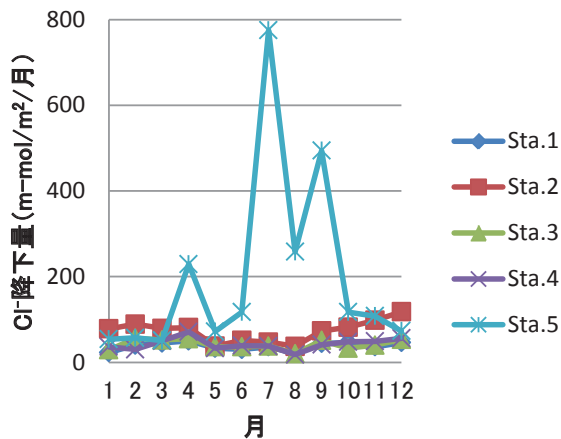
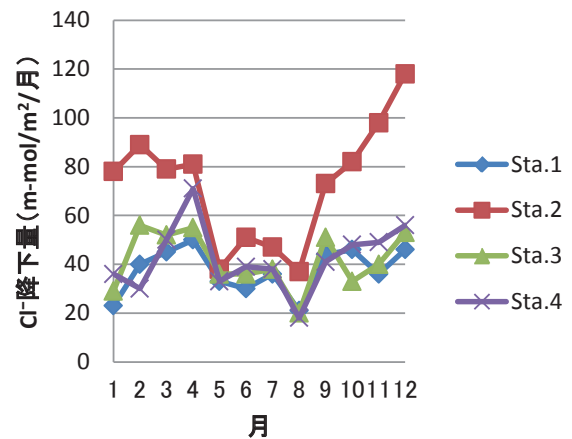


図 4. Sta. 5 を除く各Sta. におけるNa<sup>+</sup>降下量季節変化. 測定期間: 2010年9月27日~2013年5月9日.

2 = 308mm, Sta. 3 = 381mm) で, 年間の平均値は64% (Sta. 2 = 791mm, Sta. 3 = 1229mm) であった. Sta. 2の降水量が少ない原因は, Sta. 2が森林内にあり, 植物の枝葉に遮られて降水が採取タンクに入りにくかったと考える. また, Sta. 5がSta. 1・2・3・4より8月に降水量が多いのは台風により, 海水しぶきが採取されたためだと考えられた.

表 3. 各Sta. におけるCl<sup>-</sup>降下量の月変化. ave.は平均値, sdは標準偏差.

月	Cl <sup>-</sup> 降下量(m-mol/m <sup>2</sup> /月)									
	Sta.1		Sta.2		Sta.3		Sta.4		Sta.5	
	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd
1	23	3.3	78	16.9	29	0.1	36	13.8	54	5.7
2	40	27.1	89	66.5	56	30.9	30	6.1	57	14.1
3	45	13.8	79	17.9	52	18.6	50	36.1	51	13.9
4	50	6.4	81	10.6	55	4.8	71	19.5	229	96.5
5	33	13.8	38	4.9	36	16.1	33	9.5	72	20.7
6	30	11.9	51	5.6	36	7.8	39	6	117	33.4
7	36	5.7	47	1.8	38	4.7	38	7.5	775	715.9
8	21	1.2	37	0.8	20	0.1	18	4.1	258	84.2
9	44	29.5	73	34.8	51	29	41	10	494	480.1
10	46	10.5	82	29.7	33	12.2	48	9.9	117	11
11	36	17.6	98	33.4	40	16.5	49	21.8	108	68.8
12	46	31.4	118	86.4	53	19.1	56	36.3	73	42.3

図 5. 各Sta. におけるCl<sup>-</sup>降下量季節変化. 測定期間: 2010年9月27日~2013年5月9日.図 6. Sta. 5 を除く各Sta. におけるCl<sup>-</sup>降下量季節変化. 測定期間: 2010年9月27日~2013年5月9日.

なお, Sta. 5 の降水量や波しぶき混入による増加が考えられNa<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup>降下量等に影響があった台風は5回あった. 2011年7月20日徳島県に上陸した台風6号, 2011年9月3日岡山県に上陸した台風12号, 2011年9月20-21日四国沖を通過した台風15号, 2012年6月19日四国沖を通過した台風4号, 2012年9月30日四国沖を通過した台風17号である.

## 2. Na<sup>+</sup>とCl<sup>-</sup>降下量の季節変化

Na<sup>+</sup>とCl<sup>-</sup>は, Sta. 5 (牛窓)の値が7月から9月に特異的に高い項目であった.

表2と図3に各Sta. におけるNa<sup>+</sup>降下量の月変化を示した. Na<sup>+</sup>降下量はSta. 1・2・3・4は特定の月が高いという季節変化は見られなかった. Sta. 5が8月に高い一山型の季節変化を示した. Sta. 5は8月に高い値の最大値を示し, 1月に最小値を示した. Sta. 5の8月の最高値は1386m-mol/m<sup>2</sup>/

月で, Sta. 3の8月の38m-mol/m<sup>2</sup>/月に比べ36倍であった. Sta. 5の1月の最小値は35m-mol/m<sup>2</sup>/月で, Sta. 3の1月の34m-mol/m<sup>2</sup>/月に比べほぼ同じ値を示した. Sta. 5の値が高いのは採取場所が浪打ちから50mと近い位置にあるため波しぶきの混入の影響と考えられる.

図4にSta. 5 (牛窓)を除いた各Sta. におけるNa<sup>+</sup>降下量の月変化を示した.

Sta. 1・3は3月に, Sta. 4は4月に最大値を示し, Sta. 1は5月に, Sta. 3は1月に, Sta. 4は1月と5月に最小値を示した. Sta. 2は, 12月に最大値を示し, 8月に最小値を示した. Sta. 2の最大値はSta. 1・3・4より値は高かった. そして全てのSta. をみるとSta. 1はSta. 2・3・4より値が低かった.

表3と図5に各Sta. におけるCl<sup>-</sup>降下量の月変化を示した. 図5をみるとSta. 5は4月, 7月, 9月に値が高く, その他の月の値は低いという季節変化を示した. Sta. 5を除くSta. は値が近接した季節変化

表 4. 各Sta. における $K^+$ 降下量の月変化. ave.は平均値, sdは標準偏差.

月	$K^+$ 降下量( $m\text{-mol}/m^2/\text{月}$ )									
	Sta.1		Sta.2		Sta.3		Sta.4		Sta.5	
	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd
1	8	3	15	11	7	4	5	4	18	18
2	6	3	20	11	18	12	8	4	12	2
3	7	1	20	2	9	1	5	2	21	12
4	17	6	113	49	16	7	16	9	22	3
5	18	8	102	21	25	11	14	9	62	45
6	22	0	185	53	34	16	20	4	18	2
7	23	1	93	11	19	1	16	2	35	31
8	20	7	70	30	13	8	13	8	44	35
9	19	10	92	39	20	5	10	6	24	11
10	14	1	79	25	6	2	20	10	28	27
11	7	0	79	30	7	1	14	13	8	1
12	14	10	39	18	10	10	25	19	49	64

を示した. Sta. 5は7月に最大値を示し, 3月に最小値を示した. Sta. 5の7月の最高値は $775m\text{-mol}/m^2/\text{月}$ で, Sta. 3の8月の $20m\text{-mol}/m^2/\text{月}$ に比べ39倍であった. Sta. 5の3月の最小値は $51m\text{-mol}/m^2/\text{月}$ で, Sta. 3の3月の $52m\text{-mol}/m^2/\text{月}$ に比べほぼ同じ値を示した. Sta. 5の値が高いのは,  $Na^+$ と同じく採取場所が浪打ちから50mと近い位置にあるため波しぶきの混入の影響と考えられる.

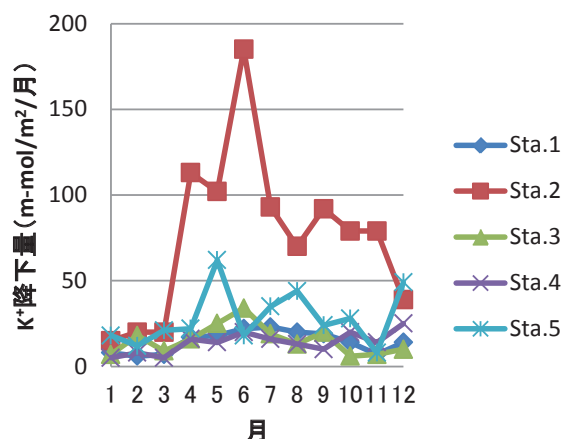
図6にSta. 5を除く各Sta. における $Cl^-$ 降下量の月変化を示した.

Sta. 2を除くSta. は似た位相の季節変化を示した. すべてのSta. は5月から9月にかけてほかの月に比べ値が低い季節変化を示した. Sta. 1・4は4月にSta. 3は2月に最大値を示し, 8月に最小値を示した. Sta. 2は12月に最大値を示し, 8月に最小値を示した. またSta. 2の $Cl^-$ 降下量は, 全ての月でSta. 1・3・4よりも値が高かった. Sta. 2はSta. 1, 3, 4に比べ1, 2, 3, 10, 11, 12月が高い季節変化を示した.

### 3. $K^+$ と $Mg^{2+}$ 降下量の季節変化

Sta. 2での値が高い,  $K^+$ と $Mg^{2+}$ 降下量の季節変化について考察した.

表4と図7に各Sta. における $K^+$ 降下量の月変化を示した.  $K^+$ 降下量はSta. 2が4月から11月にかけて値が高い一山型の季節変化を示した. またSta. 1・3・4は似た位相の季節変化を示した. Sta. 1は6月が高く, 2月が低かった. Sta. 2は6月が高く, 1月が低かった. Sta. 3は6月が高く, 10月が低かった. Sta. 4は12月が高く, 1月と3月が低かつ

図 7. 各Sta. における $K^+$  降下量季節変化. 測定期間: 2010年9月27日~2013年5月9日

た. Sta. 5は5月が高く, 11月が低かった.  $K^+$ は植物由来成分のイオンなので(村野 1993), Sta. 2が森林内にあり降水が枝葉に触れてから採取されたため影響が出たと考える. Sta. 2の $K^+$ 降下量が4, 5, 6月で他のSta. と比較すると5倍以上の値の差が見られた.

表5と図8に各Sta. における $Mg^{2+}$ 降下量の月変化を示した.  $Mg^{2+}$ 降下量はSta. 5が8月に他の月に比べ高い一山型の季節変化を示し, Sta. 2は4, 8, 10月が他の月に比べ高い季節変化を示した.

Sta. 5は8月に最大値を示し, 6月に最小値を示した. Sta. 5の8月の値はSta. 2に比べ7倍であった. この原因は海水由来の影響と考察できる.

図9に各Sta. における $nss\text{-}Mg^{2+}$ 降下量の月変化を示した.

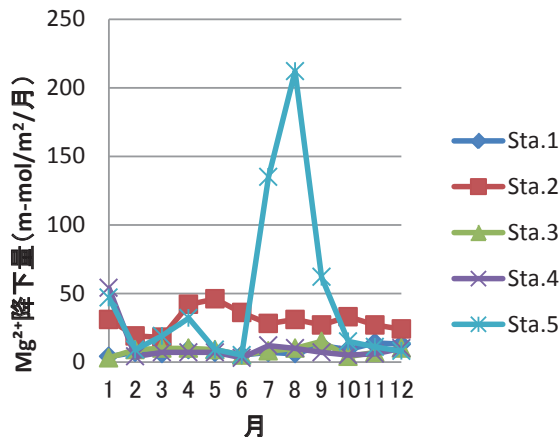
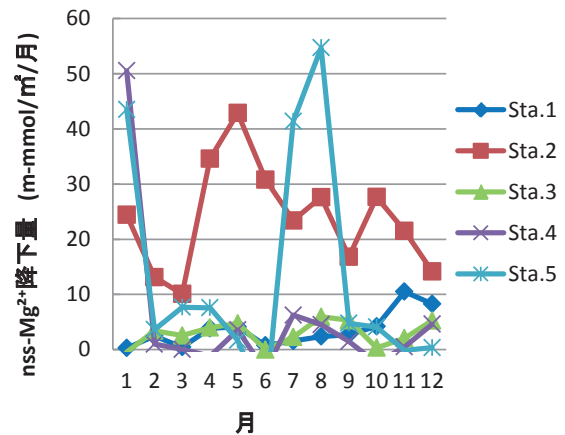
Sta. 2の $nss\text{-}Mg^{2+}$ 降下量は5月, 8月, 10月に値が高い季節変化を示した.

Sta. 1は11月にSta. 3は9月にSta. 4は7月に最大値を示し, Sta. 1は3月にSta. 3・4は6月に最小



表5. 各Sta. における $Mg^{2+}$ 降下量の月変化. ave.は平均値, sdは標準偏差.

月	Mg <sup>2+</sup> 降下量(m-mol/m <sup>2</sup> /月)									
	Sta.1		Sta.2		Sta.3		Sta.4		Sta.5	
	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd
1	4	4	31	22	3	3	54	69	47	63
2	7	5	19	13	9	4	4	4	9	7
3	6	3	18	1	10	3	7	2	19	11
4	9	7	42	8	10	7	7	5	32	16
5	7	2	46	4	9	3	7	3	9	1
6	5	5	36	18	5	5	3	3	5	5
7	7	6	28	6	8	5	12	10	135	133
8	6	6	31	15	10	9	10	10	212	210
9	12	10	27	15	15	11	7	7	62	66
10	9	7	33	13	4	3	5	4	15	9
11	14	7	27	11	7	5	6	4	11	2
12	13	11	24	15	10	7	10	6	8	4

図8. 各Sta.における $Mg^{2+}$ 降下量季節変化. 測定期間: 2010年9月27日~2013年5月9日.図9. 各Sta.におけるnss- $Mg^{2+}$ 降下量季節変化. 測定期間: 2010年9月27日~2013年5月9日.

値を示した. Sta. 2は5月に最大値を示し, 3月に最小値を示した. Sta. 5の8月の最大値は, Sta. 2の2倍程度となった. しかし, 8月に高値となる原因は明らかにできなかった. Sta. 2は1月を除き, 常にSta. 1・3・4より値が高く $K^+$ 降下量と同様に夏季が高い一山型の季節変化を示した. この原因は $K^+$ と同様に $Mg^{2+}$ も植物由来成分のイオンのため影響が出たと考えられる.

#### 4. $Ca^{2+}$ とnss- $Ca^{2+}$ 降下量の季節変化

陸上由来の $Ca^{2+}$ (nss- $Ca^{2+}$ 降下量)と海塩由来の $Ca^{2+}$ (ss- $Ca^{2+}$ 降下量)を分離して評価するため $Na^+$ からnss- $Ca^{2+}$ 降下量を算出し, 各Sta. を評価した.

表6と図10に各Sta. における $Ca^{2+}$ 降下量(陸上由来の $Ca^{2+}$ と海塩由来の $Ca^{2+}$ の合計量)の月変化を示した. Sta. 1・3・4・5の $Ca^{2+}$ 降下量は, 4, 8, 12月が高い似た位相の季節変化を示し, Sta. 2は4月から9月が他の月より高い季節変化を示した. Sta. 1・3は共に4月に, Sta. 4は5月に最大値を示

し, 1月に最小値を示した. Sta. 2は7月に最大値を示し, 1月に最小値を示した. Sta. 5は他のSta. とは異なり8月に最大値を示し, 1月に最小値を示した. 8月の最大値には海塩由来の $Ca^{2+}$ (ss- $Ca^{2+}$ 降下量)によると予測された. Sta. 2はSta. 3の2月を除き, Sta. 1・3・4・5よりも $Ca^{2+}$ の値が高かった.

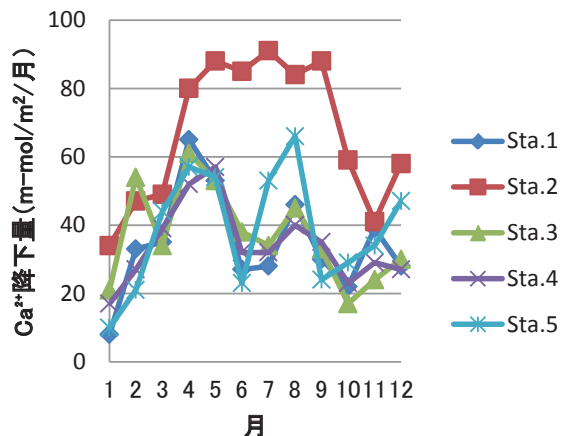
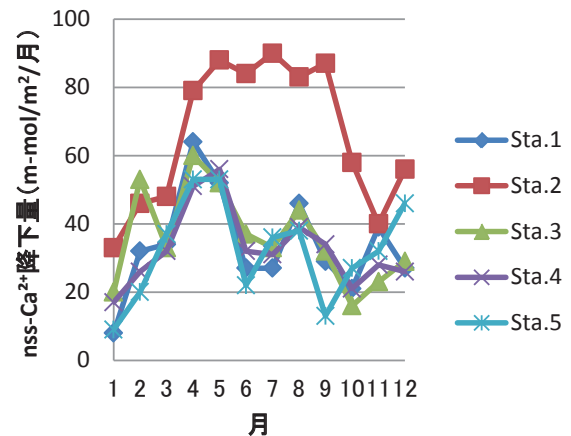
表7と図11に各Sta. におけるnss- $Ca^{2+}$ 降下量の月変化を示した. nss- $Ca^{2+}$ 降下量はSta. 1・3・4・5が,  $Ca^{2+}$ と似た位相の季節変化を示し, Sta. 2は4月から9月に値が高い季節変化を示した. Sta. 1・3は4月に, Sta. 4は5月に最大値を示し, 1月に最小値を示した. Sta. 2は7月に最大値に示し, 1月に最小値を示した. Sta. 1・2・3・4・5のnss- $Ca^{2+}$ 降下量の値は,  $Ca^{2+}$ 降下量の値とほぼ同じであった. しかし, Sta. 5は4月と5月に最大値を示し, 1月に最小値を示した. そして, 図10のSta. 5の8月と図11のSta. 5の8月を比較すると8月のnss- $Ca^{2+}$ 降下量の値が低下した. このことは, Sta. 5の8月が海水由来の影響があったと考えられた. Sta. 2は

表 6. 各Sta. における $\text{Ca}^{2+}$  降下量の月変化. ave. は平均値, sd は標準偏差.

月	$\text{Ca}^{2+}$ 降下量 ( $\text{m-mol/m}^2/\text{月}$ )									
	Sta.1		Sta.2		Sta.3		Sta.4		Sta.5	
	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd
1	8	4	34	26	21	9	17	16	10	8
2	33	28	47	37	54	35	27	13	21	6
3	35	10	49	20	34	17	39	15	44	8
4	65	24	80	24	61	24	52	40	57	3
5	53	17	88	38	53	12	57	14	54	12
6	27	27	85	58	38	38	32	32	23	23
7	28	12	91	15	34	13	32	16	53	34
8	46	29	84	47	45	24	40	13	66	66
9	30	20	88	41	33	3	35	22	24	6
10	22	7	59	13	17	6	23	6	29	17
11	39	25	41	27	24	5	29	10	34	12
12	28	17	58	38	30	16	27	14	47	29

表 7. 各Sta. における $\text{nss-Ca}^{2+}$  降下量の月変化. ave. は平均値, sd は標準偏差.

月	$\text{nss-Ca}^{2+}$ 降下量 ( $\text{m-mol/m}^2/\text{月}$ )									
	Sta.1		Sta.2		Sta.3		Sta.4		Sta.5	
	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd
1	8	4	33	25	20	9	17	15	9	8
2	32	28	46	36	53	34	26	13	20	7
3	34	9	48	19	33	16	32	22	37	4
4	64	24	79	24	60	24	51	40	53	5
5	52	17	88	38	52	12	56	14	53	12
6	27	27	84	58	37	37	32	32	22	22
7	27	12	90	15	33	13	31	15	36	17
8	46	29	83	47	44	24	39	13	38	38
9	29	20	87	40	32	3	34	22	13	9
10	21	8	58	13	16	6	21	7	27	18
11	39	24	40	27	23	6	28	10	32	13
12	27	16	56	37	29	16	26	13	46	28

図10. 各Sta. における $\text{Ca}^{2+}$  降下量季節変化. 測定期間: 2010年9月27日~2013年5月9日.図11. 各Sta. における $\text{nss-Ca}^{2+}$  降下量季節変化. 測定期間: 2010年9月27日~2013年5月9日.

Sta. 5 の 2 月を除き, Sta. 1・3・4・5 よりも年を通じて $\text{nss-Ca}^{2+}$  降下量の値が高かった.

## 5. $\text{SO}_4^{2-}$ と $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 降下量の季節変化

陸上由来の $\text{SO}_4^{2-}$  ( $\text{nss-SO}_4^{2-}$  降下量) と海塩由来の $\text{SO}_4^{2-}$  ( $\text{ss-SO}_4^{2-}$  降下量) を分離して評価するため $\text{Na}^+$  から $\text{nss-SO}_4^{2-}$  降下量を算出し, 各Sta. を評価した.

表 8 と図12に各Sta. における $\text{SO}_4^{2-}$  降下量の月変化を示した.  $\text{SO}_4^{2-}$  降下量は, Sta. 1・2・3・4 は 4 月から 9 月の夏季に高い季節変化を示し, Sta. 5 が

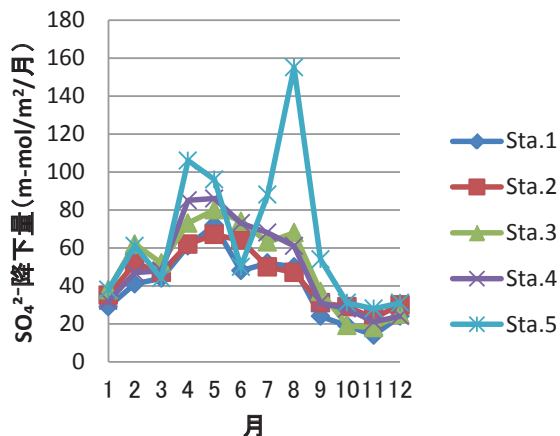
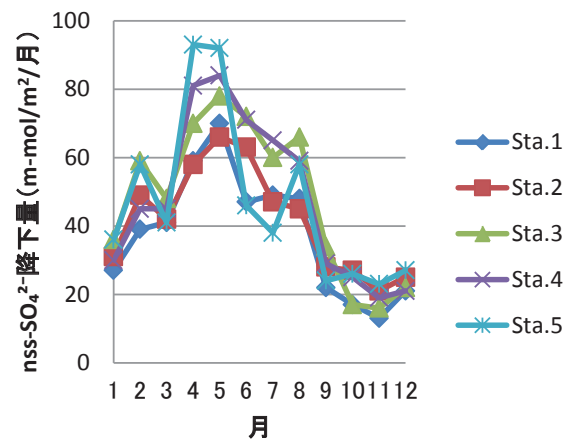
4 月と 8 月に値が高い季節変化を示した. Sta. 1・2・3・4 は 5 月に最大値を示し, 11 月に最小値を示した. Sta. 5 は 8 月に最大値を示し, 11 月に最小値を示した. Sta. 5 の 8 月の最大値は, 海塩由来の $\text{SO}_4^{2-}$  ( $\text{ss-SO}_4^{2-}$  降下量) によると推察できた. 冬季 (10月, 11月, 12月, 1月, 2月) を除く Sta. 3・4 は Sta. 1・2 より値が高かった. その原因は, Sta. 3・4 は住宅地に接しているか住宅地内であり, 一方で Sta. 1・2 は周囲 1 km が森林であるため, 都市に近い Sta. 3・4 が人為的な汚染を受けていると

表8. 各Sta. における $\text{SO}_4^{2-}$ 降下量の月変化. ave.は平均値, sdは標準偏差.

月	$\text{SO}_4^{2-}$ 降下量( $\text{m-mol/m}^2/\text{月}$ )									
	Sta.1		Sta.2		Sta.3		Sta.4		Sta.5	
	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd
1	29	3	35	11	38	10	32	5	38	9
2	41	4	52	22	62	11	47	14	61	21
3	44	12	47	2	52	12	48	14	44	10
4	61	25	62	16	73	25	85	29	106	25
5	72	19	67	13	80	6	86	21	96	38
6	48	39	64	41	74	45	73	39	50	30
7	52	12	50	3	63	2	68	8	88	45
8	50	12	47	15	68	21	61	9	155	108
9	24	23	31	24	37	35	31	8	54	28
10	19	7	29	14	19	12	28	16	31	13
11	14	4	23	11	18	7	21	8	28	5
12	24	15	30	21	25	14	24	15	31	17

表9. 各Sta. における $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 降下量の月変化. ave.は平均値, sdは標準偏差.

月	$\text{nss-SO}_4^{2-}$ 降下量( $\text{m-mol/m}^2/\text{月}$ )									
	Sta.1		Sta.2		Sta.3		Sta.4		Sta.5	
	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd
1	27	3	31	9	36	9	30	6	36	9
2	39	3	49	21	59	11	45	14	58	21
3	41	10	42	2	48	11	45	12	41	9
4	59	25	58	17	70	25	81	29	93	25
5	70	19	66	13	78	6	84	21	92	38
6	47	39	63	41	72	45	71	40	46	30
7	49	11	47	3	60	2	65	8	38	2
8	48	12	45	14	66	21	59	9	58	50
9	22	22	28	23	34	34	29	8	24	12
10	17	7	27	13	17	12	25	15	26	12
11	13	4	21	10	16	6	19	7	23	3
12	21	14	25	18	22	12	21	13	27	15

図12. 各Sta. における $\text{SO}_4^{2-}$ 降下量季節変化. 測定期間: 2010年9月27日~2013年5月9日.図13. 各Sta. における $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 降下量季節変化. 測定期間: 2010年9月27日~2013年5月9日.

考えられる.

表9と図13に各Sta. における $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 降下量の月変化を示した.  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 降下量はすべてのSta. で5月が高い季節変化を示した. Sta. 1・2・3・4は5月に最大値を示し, 11月に最小値を示した. Sta. 1・2・3・4は,  $\text{SO}_4^{2-}$ 降下量と $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 降下量の値がほぼ等しく, 海塩由来の $\text{SO}_4^{2-}$ 降下量は少なかった. Sta. 5は4月に最大値を示し, 11月に最小値を示した. Sta. 2はSta. 3・4より値が低かった. 図12のSta. 5の8月と図13のSta. 5の8月を比較する

と8月の $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 降下量の値が低下したのは海水由来の影響があったと考えられる.

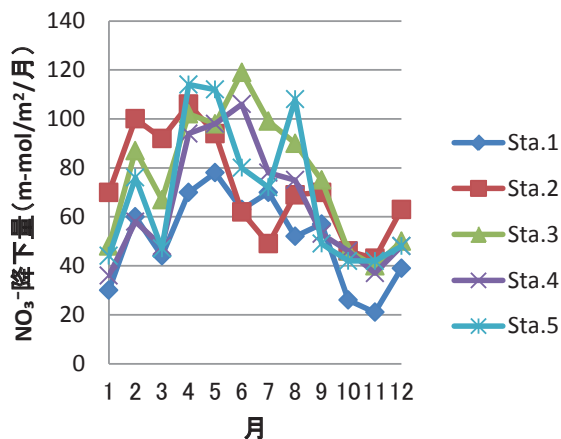
## 6. $\text{NO}_3^-$ 降下量の季節変化

表10と図14に各Sta. における $\text{NO}_3^-$ 降下量の月変化を示した.  $\text{NO}_3^-$ 降下量はすべてのSta. で10, 11月が低い季節変化を示した. Sta. 1は5月に最大値を示し, 11月に最小値を示した. Sta. 3は6月にSta. 4は1月に最大値を示し, 11月に最小値を示した. Sta. 5は4月に最大値を示し, 10月と11月に最小値を示



表10. 各Sta. における $\text{NO}_3^-$ 降下量の月変化. ave.は平均値, sdは標準偏差.

月	$\text{NO}_3^-$ 降下量( $\text{m-mol/m}^2/\text{月}$ )									
	Sta.1		Sta.2		Sta.3		Sta.4		Sta.5	
	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd	ave.	sd
1	30	5	70	29	48	11	36	3	44	11
2	60	16	100	50	87	6	58	19	76	26
3	44	6	92	10	67	14	48	11	47	3
4	70	13	106	13	102	7	94	12	114	28
5	78	2	94	7	98	9	98	3	112	14
6	63	34	62	32	119	11	106	14	80	13
7	70	23	49	15	99	41	78	21	72	4
8	52	52	69	27	90	41	75	14	108	55
9	57	47	70	39	75	45	53	10	49	24
10	26	10	46	26	46	22	46	13	42	17
11	21	12	43	19	40	6	37	14	42	11
12	39	26	63	42	50	33	48	33	48	33

図14. 各Sta. における $\text{NO}_3^-$ 降下量季節変化. 測定期間: 2010年9月27日~2013年5月9日.

した. 住宅地に接しているか住宅地内であるSta. 3・4の値が, 周囲1 kmが森林であるSta. 1・2より高いのは,  $\text{SO}_4^{2-}$ 降下量と同じく, 原因は都市型汚染の影響と考えられる. Sta. 1は1, 3, 4, 5, 8, 10, 11, 12月に, 5測定場所のうちで最小値を示した.

#### IV. まとめ

2010年9月27日~2013年5月9日までの3年間, ろ過式採取装置をSta. 1, 2, 3, 4, 5の5地点に設置し, 2週間毎降水を採取した. 項目毎の季節変化の特徴は次の通りであった.

(1)降水量はすべてのSta. で夏季(5月から9月)に高く, 10月から1月まで低い季節変化を示した. Sta. 5で夏季に降水量が多いのは台風により, 海水しぶきが採取されたためだと考えられた.

(2) $\text{Na}^+$ 降下量はSta. 1・2・3・4は特定の月が高いという季節変化は見られなかった. Sta. 5が

8月に高い一山型の季節変化を示した. また $\text{Cl}^-$ 降下量はすべてのSta. が5月から9月にかけてほかの月に比べ値が低い季節変化を示した.

(3) $\text{K}^+$ 降下量と $\text{Mg}^{2+}$ 降下量は, 夏季が高い一山型の季節変化を示した. この原因は $\text{K}^+$ と $\text{Mg}^{2+}$ が植物由来成分のイオンのため影響が出たと考えられる.

(4) $\text{Ca}^{2+}$ 降下量はSta. 1・3・4・5の4, 8, 12月が高い位相の季節変化を示し, Sta. 2は4月から9月が他の月より高い季節変化を示した.  $\text{nss-Ca}^{2+}$ 降下量はSta. 1・3・4・5が,  $\text{Ca}^{2+}$ と似た位相の季節変化を示し, Sta. 2は4月から9月に値が高い季節変化を示した. Sta. 5の8月の高値は海水の影響があったと考えられた.

(5) $\text{SO}_4^{2-}$ 降下量は, Sta. 1・2・3・4の4月から9月の夏季に高い季節変化を示し, Sta. 5が4月と8月に値が高い季節変化を示した.  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 降下量はすべてのSta. で5月が高い季節変化を示した. Sta. 5の8月の高値は海水の影響があったと考えられた. 冬季を除くSta. 3・4はSta. 1・2より値が高かった. その原因は, Sta. 3・4は住宅地に接しているか住宅地内であり, 一方でSta. 1・2は周囲1 kmが森林であるため, 都市に近いSta. 3・4が人為的な汚染を受けていると考えられる.

(6) $\text{NO}_3^-$ 降下量は住宅地に接しているか住宅地内であるSta. 3・4の値が, 周囲1 kmが森林であるSta. 1・2より高いのは,  $\text{SO}_4^{2-}$ 降下量と同じく, 原因は都市型汚染の影響と考えられる.

#### 謝辞

本研究のデータを提供しご協力いただいた岡山大学理学部附属牛窓臨海実験所の午堂和一郎氏, 岡山

理科大学技術科学研究所山下研究室の卒業生の渡邊恵三氏、有元拓也氏に深謝いたします。

## 引用文献

- 江國真幸・渡邊恵三・山下栄次・松尾太郎・正木智美(2012). 岡山におけるろ過式採取法による降水の観測(IV)-2006年7月～2011年6月-. 岡山理科大学自然植物園. *Naturalistae* 16: 5-18.
- 小林 賢・松尾太郎・正木智美・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 第8号. pp31-45.
- 小林 賢・矢部智恒・松尾太郎・正木智美・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-. 岡山理科大学自然植物園. *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-. 岡山理科大学自然植物園. *Naturalistae* 11: 95-103.
- 満崎 純・小林 賢・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-. 岡山理科大学自然植物園. *Naturalistae* 12: 9-19.
- 村野健太郎(1993). ポピュラーサイエンス酸性雨と酸性霧. pp41-43. 裳華房, 東京.
- 酸性雨調査法研究会編(1993). 酸性雨調査法. 株式会社ぎょうせい. pp64-77, 267-268, 280.
- 渡邊恵三・山下栄次・松尾太郎・正木智美(2009a). 岡山市におけるろ過式採取法による降水の観測-ろ過式採取法の並行測定-. 岡山理科大学自然植物園. *Naturalistae* 13: 37-44.
- 渡邊恵三・山下栄次・松尾太郎・正木智美(2009b). 岡山市におけるろ過式採取法による降水の観測(II)-2006年9月～2008年8月-. 岡山理科大学自然植物園. *Naturalistae* 14: 23-29.
- 山下栄次・小林 賢・矢部智恒・満崎 純・月森新一郎・平田圭祐・松尾太郎・正木智美(2009). 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-森林内降雨の特徴-. 岡山理科大学自然植物園. *Naturalistae* 13: 27-35.
- 山下栄次・江國真幸・渡邊恵三・松尾太郎・正木智美(2011). 岡山におけるろ過式採取法による降水の観測(III)-2007年1月～2009年12月-. 岡山理科大学自然植物園. *Naturalistae* 15: 65-77.
- 山下栄次・江國真幸・松尾太郎・正木智美(2013). 岡山におけるろ過式採取法による降水の観測(V)-2007年～2011年の年平均値の考察-. 岡山理科大学自然植物園. *Naturalistae* 17: 23-40.

(2014年1月8日受理)