

原著論文

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-

山下栄次¹・江國真幸²・松尾太郎³・正木智美³

Measurement of precipitation by the filtration type sampling method
in Okayama City (V): annual values from 2007 to 2011

Eiji YAMASHITA¹, Masaki EKUNI², Taro MATSUO³, and Tomomi MASAKI³

I. はじめに

岡山理科大学が実施している降水の観測は、岡山理科大学生態システム園で2測点と岡山理科大学構内の1測点で、2000年5月から観測を始め、現在(2012年6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観測した。レインゴランド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), 渡邊他(2009b), 山下他(2011), 江國等(2012)で報告した。

今回は、2007年1月から2011年12月の5年間、2週間毎に採取した降水量、pH(水素イオン濃度指数)、EC(電気伝導度)、イオン濃度の各年の平均値と5年間平均値を用いて、下記の点を考察した。

- 1) 2007~2011年降水量の特徴、pHとEC年平均値の特徴
- 2) イオン濃度の経年変化の特徴
- 3) 陽・陰イオン年平均値と年降水量との関係
- 4) 森林による大気中の陽イオンと陰イオンの付

着量の試算

II. 方法

1. 降雨採取装置

研究に使用した採取装置は、ADVANTEC社製、酸性雨採取装置ACDR-047型(以下ろ過式と記す.)で、酸性雨調査法研究会(1993)に記載されている採取装置である。ろ紙は、ADVANTEC社製メンブレンフィルターA080A047A 孔径0.80μmを使用した。本装置は、湿性沈着物と乾性沈着物を採取することを目的としたものである。

本採取装置(ACDR-047型)は、渡邊他(2009a, 2009b)の3台の並行測定から、器差の少ない降水採取装置である事が明らかである。

2. 採取場所、採取期間、採取頻度、検体数

採取場所は、岡山理科大学生態システム園内に2箇所(以下森林空地、森林内と記す.)、岡山理科大学構内に1箇所(岡山市北区理大町1-1, 以下10学舎屋上と記す.)である。

図1に、採取場所の概念図を示した。森林空地、森林内、10学舎屋上についての詳細は、既報(江國他 2011)と本論文のIII. 1. 2007~2011年降水量の特徴の部に記した。

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研究科生物地球システム専攻, (現)足立石灰工業株式会社生産部

3. 加計学園(岡山理科大学)自然植物園

採取期間は、2006年12月28日～2012年1月5日で、採取頻度は、原則2週間である。

降水試料数は、122個であった。降水量が0mmの時は、森林空地、森林内、10学舎屋上、各8個であった。

3. 測定項目と測定機器・方法

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

降水量(mm)は、降水の採取量(ml)をメスシリンダーで計量した値を、採取装置の開口面積で除して算出した。

pHとECの測定は、2007年8月以前は、堀場製作所製、pH/cond meter D-54、pH glass electrode 9669-10Dを使用し、2007年8月以後は、pH glass electrode 9611-10D、EC glass electrode 3574-10Cを使用した。pHとECの測定は、室温で測定した。

陽イオンと陰イオンの分析は、イオンクロマトグラフ法を用いた。使用した分析器は、パーソナルイオンアナライザーPIA-1000で、陽イオンと陰イオン、それぞれ1台ずつ用いた。測定した陽イオンは、 Li^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、陰イオンは、 $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ 、 F^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 Br^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} である。しかし、 Li^+ 、 $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ 、 F^- 、 Br^- は、定量下限以下であったので、定量し解析した陽イオンは、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} で、陰イオンは、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} の計7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、繰り返し精度実験結果は、既報の渡邊ほか(2009a)に記した通りである。

4. データ処理方法

pH、EC、イオン濃度の年平均値は、1月～12月分の月平均値のデータを降水量加重平均して算出した。pH、EC、イオン濃度の5年間平均値は、5年間の年平均値を算術平均して算出した。なお、pH、EC、イオン濃度の月平均値は、2週間毎に得られたデータを月毎に降水量加重平均して算



図1. 採取場所の概念図。

出した。

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。

月降水量(mm)は、2週間毎に得られたデータの合計で、年降水量(mm)は、1月から12月の積算値である。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. 2007～2011年降水量の特徴

測定場所の特徴を明らかにするために、アメダス岡山とアメダス日応寺の降水データ(気象庁ホームページ, 2012年閲覧)を参考とした。

測定場所は、岡山理科大学が測定した森林空地、森林内、10学舎屋上の3箇所と、気象台が測定したアメダス岡山とアメダス日応寺2箇所である。

10学舎屋上は、岡山市北区理大町の岡山理科大学構内にあり、標高は75mである。約500m南から岡山市街地が開け、北は200mから500mの森林が連なっている。以下、他の測定場所の位置を10学舎屋上からの方向と距離で示す。森林空地と森林内は、10学舎屋上の北1.7Kmにある岡山理科大学生態システム園内で、標高は112mと136mであり、両者は65m離れ

ている。森林空地、森林内、10学舎屋上3測定場所の位置図、生態システム園内図、岡山理科大学構内図、降雨採取装置の周囲、3測定場所の上空の様子等の詳細は、既報、江國他(2011)に記した。

アメダス岡山は、岡山市北区桑田町の岡山地方気象台にあり、標高は3mである。10学舎屋上から南南西4.2Kmで、北緯34.66度、東経133.92度である。アメダス日応寺は、岡山市北区日応寺の岡山空港出張所にあり、標高は239mである。10学舎屋上から北西9.4Kmで、北緯34.76度、東経133.85度である。

図1に、森林空地、森林内、10学舎屋上3測定場所の位置図を示した。

表1に、2007～2011年の年降水量と集計値を示した。集計値は、最大値、最小値、範囲(最大値-最小値)、算術平均、標準偏差、変動係数%(CV%)である。単位はmmである。

2007～2011年5年間平均降水量は、森林空地、森林内、10学舎屋上、アメダス岡山、アメダス日応寺では、1178.9mm、844.1mm、1119.9mm、1086.2mm、1173.0mmであった。

5年間平均降水量は、多い順に、森林空地≧アメダス日応寺≧10学舎屋上>アメダス岡山>森林内であった。10学舎屋上は、南が平野ではあるが、距離的に近いアメダス岡山より、山間のアメダス日応寺の値に近かった。

山間であるアメダス日応寺の5年間平均降水量は、平野にあるアメダス岡山に比べ、86.8mm多く、岡山においては、南部の平野より北部山間部の方が降水量は多いという岡山地方気象台の報告(岡山地方気象台 1999)と一致していた。

森林内の5年間平均降水量は、上空には樹木があり、雨が捕捉されている林内雨となるため、アメダス岡山に比べ、242.1mm低値であった。

5測定場所の年降水量のCV%は、それぞれ、18%、17%、21%、23%、17%で、CV%は多い順に、アメダス岡山>10学舎屋上>森林空地>森林内≧アメダス日応寺であった。山間や森林内のCV%に比べ平野のアメダス岡山のCV%が高値である理由は明らかでない。

表1. 年降水量と集計値. 測定期間: 2007～2011年. 岡山理科大測定場所は、森林空地、森林内、10学舎屋上. 岡山地方気象台測定場所は、アメダス岡山、アメダス日応寺.

年	降水量 mm/year				
	岡山理科大測定			アメダス	
	森林空地	森林内	10学舎	岡山	日応寺
2007	828.4	614.3	748.0	773.0	960.0
2008	1174.7	859.1	1156.9	951.5	1014.0
2009	1191.6	968.2	1104.9	1074.0	1168.5
2010	1298.3	940.6	1210.6	1216.0	1287.0
2011	1401.6	838.5	1378.8	1416.5	1435.5
最大値	1401.6	968.2	1378.8	1416.5	1435.5
最小値	828.4	614.3	748.0	773.0	960.0
範囲	573.2	353.9	630.8	643.5	475.5
平均	1178.9	844.1	1119.9	1086.2	1173.0
標準偏差	216.1	139.4	231.9	246.1	195.3
CV %	18	17	21	23	17

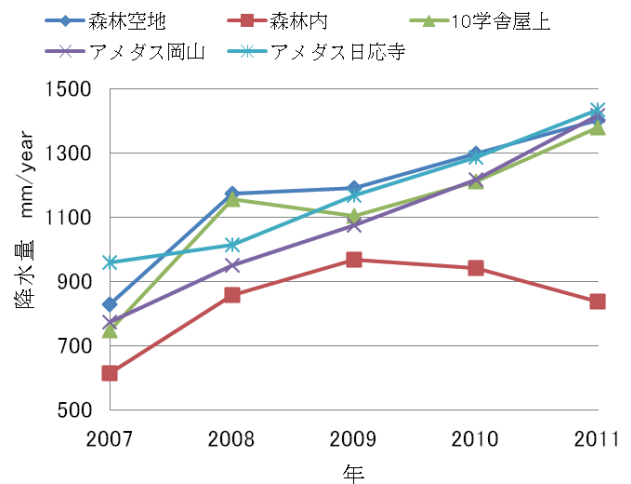


図2. 2007～2011年の年降水量の測定場所毎経年変化. 理科大測定場所: 森林空地, 森林内, 10学舎屋上. アメダス測定場所: 岡山, 日応寺.

図2に、2007～2011年の年降水量の測定場所毎経年変化を示した。

森林内を除く4測定場所において、年降水量は、2007年から2010年まで増加し続けていた。しかし、林内雨である森林内の年降水量は、2009年を最高値となる一山型であり、他の4測定場所と異なる経年変化を示した。また、2007年から2010年の間の森林内の年降水量は、4測定場所より少なかった。このことから、森林内(林内雨)降水量は森林空地(林外雨)と比べ少ないが、雨の降り方により、その減少率は異なると考えられた。

森林空地、10学舎屋上、アメダス岡山、アメダス日応寺の4測定場所において、2007～2011年の間の年降水量が連続して増加し続けたことについて、このような現象がどの程度の頻度で見られるのか検討するために、岡山気象台における長期の年降水量の経年変化と比較検討した。気象庁ホームペー

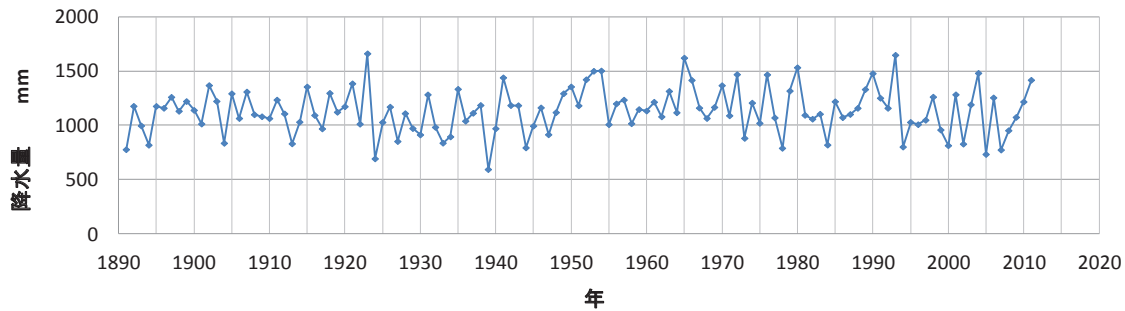


図3. 1891～2011年の岡山気象台における年降水量の経年変化.

ジ : <http://www.data.jma.gp.jp/obd/stats/etrm/index.php>,
気象統計情報, 過去の気象データ検索, 日ごとの値
(2012.07.01閲覧).

図3に1891～2011年の岡山気象台における年降水量の経年変化を示した.

121年間の年降水量には周期性は見られない. 年降水量の推移は, 「のこぎり状」の位相を示していた.

121年間の年降水量の集計値は, 最大が1923年の1660.1mm, 最小が1939年の593.2mmで, 最大値と最小値の差は1066.9mmであった, 平均値は1133.2mmで, 標準偏差は209.7mm, CV%は19%であった.

また, 前年に比べて降水増加量が最も多かったのは, 1923年の648.8mm増加であった. 前年に比べて降水減少量が最も多かったのは, 1924年の968.3mmであった. 1923年と1924年は前年の降水量との比較で特徴的な年であった.

しかし, 2007年の年降雨773.0mmと2011年の年降雨量1416.5mmは, 121年間の最大値や最小値に近い値を示しており, その期間の増加量643.5mmは, 1923年の増加量とほぼ等しい値であった. 2007～2011年は, 毎年の増加量は少ないが, 5年間程度年降雨量が増加し続けており, 特徴的であった. このような例は121年間で3例見られた. 1947～1954年(1951年だけ低い値であったが増加傾向は連続していた.)に588.2mm増加し, 1986～1990年に405.5mm増加し, 2007～2011年に643.5mm増加していた.

表2に, 2007～2011年のアメダス岡山の年降水量の特徴を明らかにするために, 121年間(1891～2011年)と30年間(1982～2011年)での2007～2011年各年の降水量, 順位とその集計値(最大値, 最小値, 範囲, 算術平均, 標準偏差, CV%)を示した.

表2. 2007～2011年での岡山アメダス降雨量の特徴. 測定期間:
岡山1は1891～2011年の121年間, 岡山2は1982～2011年の30年間, 岡山3は2007～2011年の5年間.

西暦年	単位: mm/year				
	岡山1	121年間順位	岡山2	30年間順位	岡山3
2007	773.0	118	773.0	29	773.0
2008	951.5	101	951.5	24	951.5
2009	1074.0	76	1074.0	17	1074.0
2010	1216.0	39	1216.0	11	1216.0
2011	1416.5	13	1416.5	4	1416.5
N	121		30		5
最大値	1660.1		1646.5		1416.5
最小値	593.2		732.5		773.0
範囲	1066.9		914.0		643.5
平均	1133.2		1116.7		1086.2
標準偏差	209.7		224.2		246.1
CV%	19		20		23

121年間の年降水量の集計値は, 最大値が1923年の1660.1mm, 最小値が1939年の593.2mmで, 範囲(最大値と最小値の差)は1066.9mmであった, 平均値は1133.2mmで, 標準偏差は209.7mm, 変動係数(CV)は19%であった.

順位は, 例えば, 2011年の年降雨量は, 121年間の間で13番目に多い降雨量であり, 30年間の間では, 4番目に多い降雨量の年であったことを示している.

2007～2011年の降水量の順位を, 121年間や30年間で概観すると, 2007～2011年は, 最高値付近から最低値付近まで5年間連続して順位が順序良く並んでいた. また, 2007～2011年の増加量は, 1947～1954年と1986～1990年に比べ大きかった. 2007～2011年の降水量の推移は, 岡山気象台における降雨量測定始まって以来の特異な現象であったことが明らかとなった.

従って, 森林空地, 森林内, 10学舎屋上の降雨成分の変化も降水量の影響を受け, 他の期間に比べ変化が大きい期間であることが予測された. そこで, 以後, 年降水量と年平均降雨成分濃度との関係を中心に解析を進めた.

表3. pHの年平均値と集計値. 測定期間: 2007~2011年. 岡山理科大学測定場所: 森林空地, 森林内, 10学舎屋上.

年	pH		
	森林空地	森林内	10学舎屋上
2007	4.70	4.90	4.64
2008	5.38	5.38	5.18
2009	5.89	5.86	5.48
2010	5.82	5.96	5.84
2011	6.17	6.23	5.92
最大値	6.17	6.23	5.92
最小値	4.70	4.90	4.64
範囲	1.47	1.34	1.28
平均	5.59	5.66	5.41
標準偏差	0.57	0.53	0.52
CV %	10	9	10

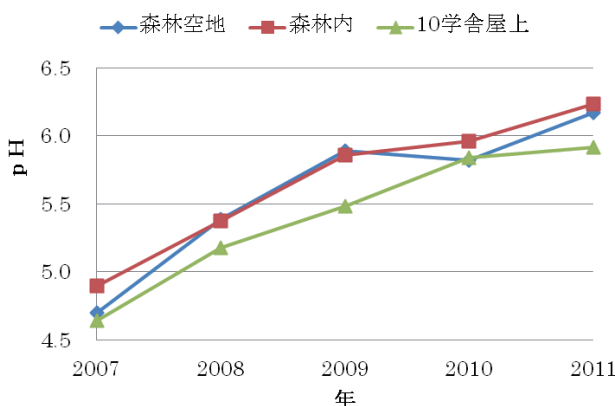


図4. pH年平均値の測定場所毎経年変化. 測定期間: 2007~2011年. 測定場所: 森林空地, 森林内, 10学舎屋上.

2. pH年平均値の特徴

表3に, 岡山理科大学が測定した2007~2011年の間のpH年平均値と集計値を, 図4にpH年平均値の測定場所毎経年変化(岡山理科大学測定)を示した.

集計値は, 最大値, 最小値, 範囲(最大値-最小値), 算術平均, 標準偏差, 変動係数%(CV%)である.

測定場所は, 岡山理科大学の測定場所の森林空地, 森林内, 10学舎屋上の3箇所である.

最大値は, 3測定場所とも2011年で, 最小値は, 3測定場所とも2007年であった. 範囲は, 森林空地, 森林内, 10学舎屋上で, 1.47, 1.33, 1.28であった.

pHの5年平均値は, 森林空地, 森林内, 10学舎屋上で, 5.59, 5.66, 5.41であった, pHの5年平均値は, 中性に近い順に, 森林内>森林空地>10学舎屋上であった. 森林空地, 森林内, 10学舎屋上の2007

表4. 他都市のpHの年度平均値と集計値. 測定期間: 2007~2011年. 測定場所: 岡山市は大気汚染測定南輝局, 笠岡市は井笠地域事務所, 福山市は福山市保健センター.

年度	pH		
	岡山市 南輝測定局	笠岡市 井笠地域事務所	福山市 福山市保健センター
2007	4.8	5.0	4.9
2008	4.9	5.5	5.2
2009	4.8	5.6	5.0
2010	4.9	5.7	5.3
2011			6.0
最大値	4.9	5.7	6.0
最小値	4.8	5.0	4.9
範囲	0.1	0.7	1.1
平均	4.9	5.5	5.3
標準偏差	0.06	0.27	0.39
CV %	1	5	7

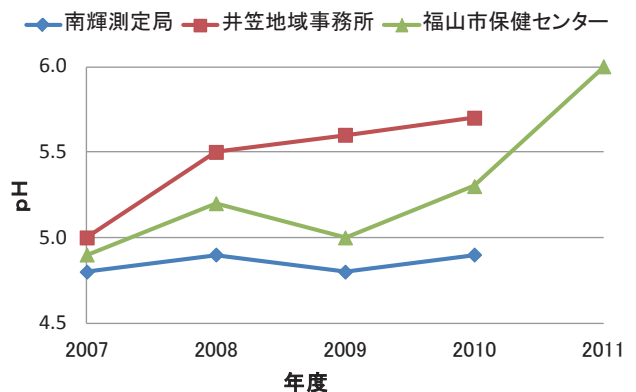


図5. 他都市のpH年度平均値の測定場所毎経年変化. 2007~2011年は, 福山市保健センター(福山市). 2007~2010年は, 大気汚染測定南輝測定局(岡山市)と井笠地域事務所(笠岡市).

~2011年のCV(%)は, それぞれ, 10%, 9%, 10%で, 森林空地=10学舎屋上>森林内であった.

2007年から2011年にかけての, 森林空地, 森林内, 10学舎屋上におけるpH年平均値は, 毎年約0.3直線的に増加し, 5年間で約1.5増加していた. 10学舎屋上のpH年平均値は, 森林空地や森林内のpH年平均値よりも0.18, 0.25酸性であるが, 毎年pH0.3値が増加することは, 測定場所の間の差よりも大きく, この上昇は大変特異な現象で, 原因を明らかにすることは重要である.

表4に, 森林空地, 森林内, 10学舎屋上と比較するために, 他都市の2007年から2011年にかけての, pH年度平均値と集計値を, 図5に, 他都市のpH年度平均値の測定場所毎経年変化を示した.

岡山理科大学が集計したpHのデータの解析期間は, 1月から12月までの年平均値あり, 有効桁数は

小数点以下二桁である。一方、他都市の公表されたpHのデータの解析期間は、4月から翌年の3月までの年度平均値あり、有効桁数は小数点以下一桁であるが、年推移を比較検討することはできると考察し採用した。他都市の測定場所は、岡山市の南輝測定局で所在地は岡山市南区南輝3丁目6-9である。笠岡市は井笠地域事務所で所在地は笠岡市六番町2-5である。福山市は福山市保健センターで所在地は福山市三吉町南2-11-22である。測定機関は、南輝測定局が岡山市、井笠地域事務所が岡山県、福山市保健センターが広島県である。南輝測定局のデータは、岡山市環境白書(2012)、井笠地域事務所のデータは、福山市ホームページ(2012)、福山市保健センターのデータは、広島県環境保全課ホームページ(2012)より入手した。ただし、南輝測定局は2011年から測定中止された。また、井笠地域事務所の2011年度のデータは公表されていなかった。

集計値は、最大値、最小値、範囲(最大値-最小値)、算術平均、標準偏差、変動係数%(CV%)である。

南輝測定局におけるpHの年度平均値は、4.8と4.9の間を上下しており、2007年度～2010年度の間には、森林空地、森林内、10学舎屋上のような経年的な傾向は見られなかった。

井笠地域事務所は、最大値は2010年度平均値で、5.7、最小値は2007年度平均値で5.0であった。そして、2007年度から2010年度の間、pHは、0.7上昇していた。この値の推移は、森林空地、森林内、10学舎屋上のpHの推移と良く似ていた。

福山市保健センターは、最大値は2011年度平均値で6.0、最小値は2007年度平均値で4.9であった。そして、2007年度から2011年度の間、pHは、1.1上昇していた。ただし、2009年度に5.0と前年に比べ酸性となっていた。しかし、5年間の推移の傾向は、岡山理科大の測定例と良く似て上昇していた。

平均値で、南輝測定局、井笠地域事務所、福山市保健センターが、森林空地、森林内、10学舎屋上に比べ酸性であった。また、森林空地、森林内、10学舎屋上のCV%が、9%から10%であるのに比べ、

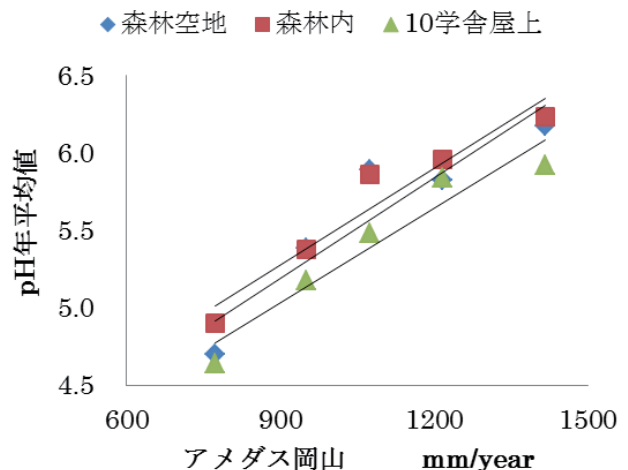


図6. アメダス岡山の年降水量とpH年平均値の関係。yはpH, xはアメダス岡山の年降水量(mm/year)。

森林空地の回帰式 : $y=0.0022x+3.24$, $R=0.929$

森林内の回帰式 : $y=0.0021x+3.41$, $R=0.966$

10学舎屋上の回帰式 : $y=0.0020x+3.20$, $R=0.962$

1%から3%と低かった。

以上から、2007年度から2010年度の間pHの推移は、森林空地、森林内、10学舎屋上、井笠地域事務所のように、毎年pHが上昇した測定場所とそうでない測定場所があることが明らかとなった。

森林空地、森林内、10学舎屋上においては、前節の年降水量の変化とpHの年平均値の変化の経年的な位相が似ていることから、年降水量とpH年平均値の相関関係について検討した。

図6に、アメダス岡山年降水量と森林空地、森林内、10学舎屋上のpH年平均値の相関図を示した。なお、年降水量の代表として、アメダス岡山を用いた。

森林空地における降水量とpHの年平均値の回帰式は、 $y=0.0022x+3.24$ (yはpH, xはアメダス岡山の年降水量), R (相関係数)は0.929であった。森林内での回帰式と相関係数は、 $y=0.0021x+3.41$, R は0.966であった。10学舎屋上での回帰式と相関係数は、 $y=0.0020x+3.20$, R は0.962であった。

アメダス岡山年降水量と森林空地、森林内、10学舎屋上の回帰式の傾きは、0.0020～0.0022と良く似た値であり、3箇所の増加に降雨量が同じ程度関与していることを示唆していた。また、相関係数は、0.929～0.966と高い値を示し、3箇所のpHの

表5. ECの年平均値と集計値. 測定期間: 2007~2011年, 岡山理科大測定場所: 森林空地, 森林内, 10学舎屋上.

年	EC mS/m		
	森林空地	森林内	10学舎屋上
2007	2.70	2.86	2.50
2008	1.89	2.55	1.59
2009	1.58	2.08	1.60
2010	1.49	1.85	1.27
2011	1.04	1.68	1.27
最大値	2.70	2.86	2.50
最小値	1.04	1.68	1.27
範囲	1.66	1.18	1.23
平均	1.74	2.20	1.64
標準偏差	0.62	0.49	0.51
CV %	36	22	31

年平均値とアメダス岡山年降雨量の間に高い相関関係があることを示していた.

3. EC年平均値の特徴

表5に, ECの年平均値と集計値を示した. 集計値は, 最大値, 最小値, 範囲(最大値-最小値), 算術平均, 標準偏差, 変動係数%(CV%)である.

測定場所は, 岡山理科大学の測定場所の森林空地, 森林内, 10学舎屋上の3箇所である.

森林空地, 森林内, 10学舎屋上の2007~2011年のECの5年平均値は, それぞれ, 1.74, 2.20, 1.64mS/mで大きい順に, 森林内>森林空地>10学舎屋上であった.

森林内(林内雨)と森林空地(林外雨), 10学舎屋上(林外雨)の差は, 0.46, 0.56mS/mで, 林内雨が林外雨よりECが高いことが明らかであった. 林外雨である森林空地と10学舎屋上の差は, 0.10mS/mであり, これが地域差であると考えられる.

EC5年平均値では, 森林内(林内雨)と森林空地(林外雨)の差は, 森林空地と10学舎屋上の差が示す地域差より大きかった.

森林空地, 森林内, 10学舎屋上の2007~2011年のCV%は, それぞれ, 36, 22, 31%で, 森林空地>10

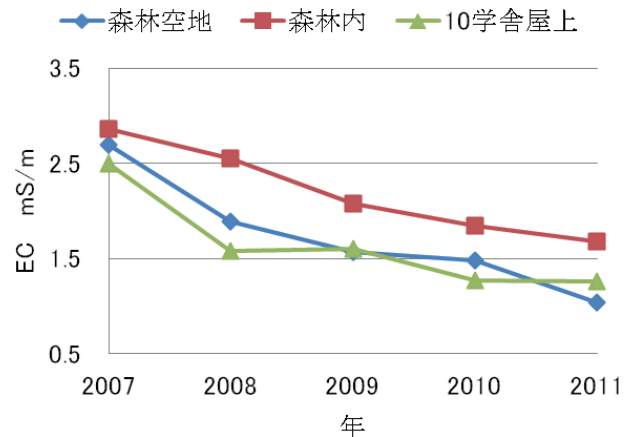


図7. EC年平均値の測定場所毎経年変化. 測定期間: 2007~2011年. 測定場所: 森林空地, 森林内, 10学舎屋上.

学舎屋上>森林内であった. 林内雨の年平均の変動は, 林外雨よりも大きかった. 林外雨である森林空地と10学舎屋上の年平均の変動は, 森林空地と10学舎屋上のCV%近い値であったことから, ほぼ同じであると考えられた.

図7にEC年平均値の測定場所毎経年変化を示した.

2007~2011年の間, EC年平均値は, 大きい順に, 森林内>森林空地>10学舎屋上であった. 森林内のECが他の測定場所よりも高いのは, 林内雨である森林内では, 上空の樹木に雨が触れた際, 樹木に沈着していた乾生沈着物や植物由来の成分が雨に溶け込み, 採取されるからであると考えられる.

2007~2011年の間では, 3測定場所で, EC年平均値は減少し, 5年間で各々, 1.66, 1.18, 1.23mS/m減少した. 減少量は, 森林空地, 森林内, 10学舎屋上の地域差(0.10mS/m)よりも大きく, 原因を明らかにすることは重要である.

森林空地, 森林内, 10学舎屋上においては, 前節の年降雨量の変化とECの年平均値の変化の経年的な位相が似ていることから, 年降雨量とECの年平均値の相関関係から検討した.

図8に, アメダス岡山年降水量とECの年平均値の相関図を示した. なお, 年降水量の代表としてアメダス岡山を用いた.

森林空地における降水量とECの年平均値の回帰式は, $y = -0.0024x + 4.35$ (y はEC, x はアメダス岡山

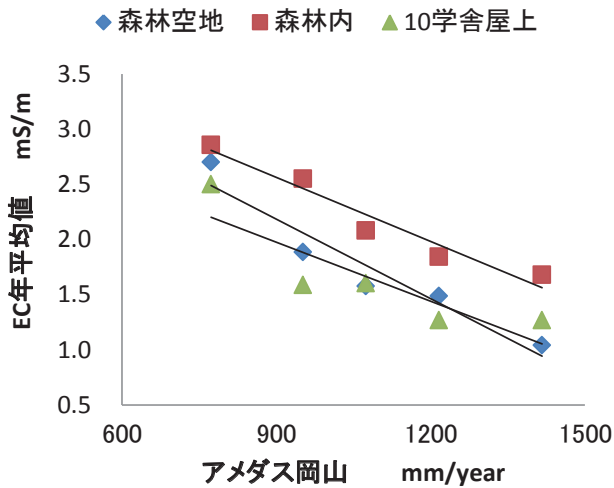


図 8. アメダス岡山の年降水量とEC年平均値の関係。yはEC(mS/m)。xはアメダス岡山の年降雨量(mm/year)。
 森林空地の回帰式 : $y = -0.0024x + 4.35$, $R = 0.958$
 森林内の回帰式 : $y = -0.0019x + 4.31$, $R = 0.970$
 10学舎屋上の回帰式 : $y = -0.0018x + 3.58$, $R = 0.871$

の年降雨量), R(相関係数)は0.958であった。森林内での回帰式と相関係数は, $y = -0.0019x + 4.31$, Rは0.970であった。10学舎屋上での回帰式と相関係数は, $y = -0.0018x + 3.58$, Rは0.871であった。

アメダス岡山の年降水量と森林空地, 森林内, 10学舎屋上のEC年平均値の回帰式の傾きは, $-0.0024 \sim -0.0018$ と良く似た値であり, 3箇所の減少に降雨量が同じ程度関与していることを示唆していた。相関係数も, 0.871~0.970と高い値を示し, 3箇所のECの年平均値とアメダス岡山年降雨量の高い相関関係があることを示していた。

4. イオン濃度の年変化の特徴

(1)陽イオンの年平均値の経年変化とその集計値

表6に, Na^+ , NH_4^+ , K^+ の年平均値と集計値を, 表7に Mg^{2+} , Ca^{2+} , nss-Ca^{2+} の年平均値と集計値(最大値, 最小値, 範囲, 算術平均, 標準偏差(CV%))を示した。単位は $\mu\text{mol}/\ell$ である。

森林空地, 森林内, 10学舎屋上における, Na^+ の5年平均値は, 14.6, 26.0, 16.0 $\mu\text{mol}/\ell$ であった。 NH_4^+ の5年平均値は, 18.0, 22.5, 18.9 $\mu\text{mol}/\ell$ であった。 K^+ の5年平均値は, 6.5, 36.4, 6.3 $\mu\text{mol}/\ell$ であった。 Mg^{2+} 5年平均値は, 3.7, 14.7, 4.2 $\mu\text{mol}/\ell$ であった。 Ca^{2+} 5年平均値は, 14.3,

表 6. Na^+ , NH_4^+ , K^+ の年平均値と集計値。測定期間: 2007~2011年。岡山理科大測定場所: 森林空地, 森林内, 10学舎屋上。

年	Na^+ $\mu\text{mol}/\ell$			NH_4^+ $\mu\text{mol}/\ell$			K^+ $\mu\text{mol}/\ell$		
	森林空地	森林内	10学舎	森林空地	森林内	10学舎	森林空地	森林内	10学舎
2007	17.2	32.6	20.7	24.5	30.2	28.5	5.5	41.2	5.2
2008	18.2	33.1	19.8	13.7	21.9	17.4	9.7	41.7	8.5
2009	17.8	23.9	16.2	26.7	28.0	20.4	7.5	36.1	6.2
2010	12.9	24.4	13.6	12.8	16.2	14.1	5.8	32.1	7.0
2011	7.0	16.2	9.9	12.5	16.2	13.9	4.1	31.0	4.5
最大値	18.2	33.1	20.7	26.7	30.2	28.5	9.7	41.7	8.5
最小値	7.0	16.2	9.9	12.5	16.2	13.9	4.1	31.0	4.5
範囲	11.2	16.9	10.8	14.2	14.0	14.6	5.6	10.7	4.0
平均	14.6	26.0	16.0	18.0	22.5	18.9	6.5	36.4	6.3
標準偏差	4.8	7.0	4.5	7.0	6.5	6.0	2.1	5.0	1.6
CV %	33	27	28	39	29	32	33	14	25

表 7. Mg^{2+} , Ca^{2+} , nss-Ca^{2+} の年平均値と集計値。測定期間: 2007~2011年。岡山理科大測定場所: 森林空地, 森林内, 10学舎屋上。

年	Mg^{2+} $\mu\text{mol}/\ell$			Ca^{2+} $\mu\text{mol}/\ell$			nss-Ca^{2+} $\mu\text{mol}/\ell$		
	森林空地	森林内	10学舎	森林空地	森林内	10学舎	森林空地	森林内	10学舎
2007	4.0	20.7	3.7	17.2	52.0	21.4	16.2	51.3	21.0
2008	3.0	16.1	4.8	14.7	42.4	16.3	14.3	41.6	16.1
2009	4.3	10.8	4.9	13.5	32.7	15.0	13.1	32.2	14.7
2010	4.6	12.0	4.6	14.9	36.6	14.6	14.6	36.1	14.3
2011	2.6	13.9	2.8	11.3	34.6	13.0	11.1	34.3	12.8
最大値	4.6	20.7	4.9	17.2	52.0	21.4	16.2	51.3	21.0
最小値	2.6	10.8	2.8	11.3	32.7	13.0	11.1	32.2	12.8
範囲	2.0	9.9	2.1	5.9	19.3	8.4	5.1	19.1	8.2
平均	3.7	14.7	4.2	14.3	39.7	16.1	13.9	39.1	15.8
標準偏差	0.9	3.9	0.9	2.2	7.8	3.2	1.9	7.7	3.1
CV %	23	27	22	15	20	20	14	20	20

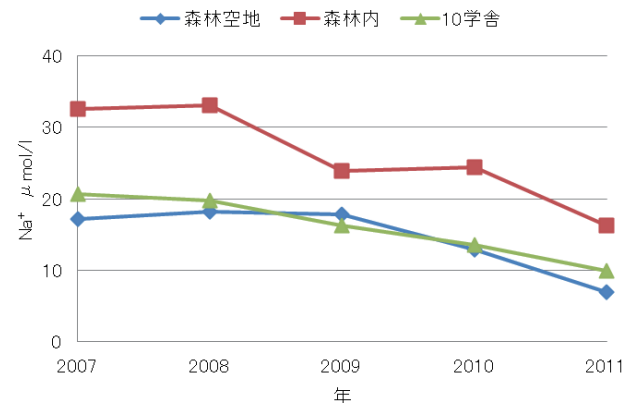


図 9. Na^+ 年平均値の測定場所毎経年変化。測定期間: 2007~2011年。測定場所: 森林空地, 森林内, 10学舎屋上。

39.7, 16.1 $\mu\text{mol}/\ell$ であった。 nss-Ca^{2+} 5年平均値は, 13.9, 39.1, 15.8 $\mu\text{mol}/\ell$ であった。

Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , nss-Ca^{2+} の5年平均値の最大値, 最小値, 範囲, 平均値, 標準偏差は, 大きい順に, 森林内>森林空地=10学舎屋上であった。しかし, NH_4^+ の範囲と標準偏差の測定場所による大小関係は, Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , nss-Ca^{2+} と異なっていた。林内雨である森林内は, 林外雨である森林空

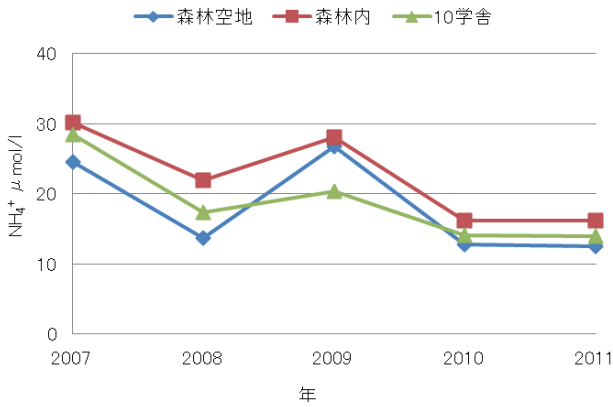


図10. NH_4^+ 年平均値の測定場所毎経年変化. 測定期間: 2007~2011年. 測定場所: 森林空地, 森林内, 10学舎屋上.

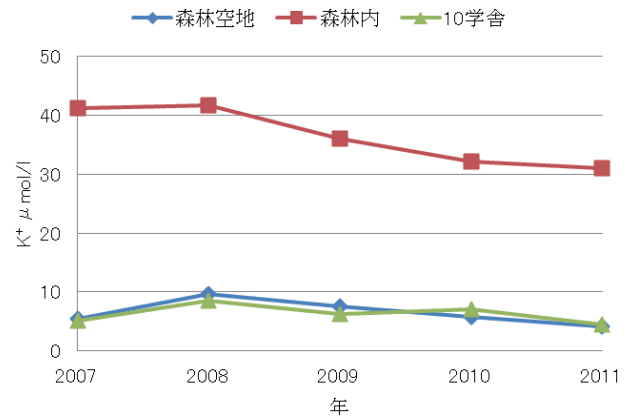


図11. K^+ 年平均値の測定場所毎経年変化. 測定期間: 2007~2011年. 測定場所: 森林空地, 森林内, 10学舎屋上.

地や10学舎屋上に比べ、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 nss-Ca^{2+} が高いことが明らかであった。

図9に Na^+ 年平均値の測定場所毎経年変化を示した。

2007~2011年の間、 Na^+ 年平均値は、森林空地、森林内、10学舎屋上で、5年間連続して直線的に経年的に減少していた。2007~2011年の間に減少した値は、森林空地、森林内、10学舎屋上で、11.2、16.9、10.8 $\mu\text{mol/l}$ であった。森林空地、森林内、10学舎屋上の2011年の値は2007年の、41%、50%、48%であった。減少率は林内雨と林外雨に差は無く、同じ原因で減少したことを示唆している。森林空地と10学舎屋上の年平均値と経年変化の位相は、良く似ていた。

図10に NH_4^+ 年平均値の測定場所毎経年変化を示した。

NH_4^+ 年平均値は、森林内、森林空地、10学舎屋上で、2007~2011年の間で減少していた。しかし、2009年は、2008年と2010年に比べ高い値を示していたがその理由は明かではない。

2007と2011年の差は、森林内、森林空地、10学舎屋上で14.2、14.0、14.6 $\mu\text{mol/l}$ であった。2011年の値は2007年に比べ森林内、森林空地、10学舎屋上で、55%、51%、49%まで減少していた。減少率は林内雨と林外雨に差は無く、同じ原因で減少したことを示唆している。 NH_4^+ 年平均値は Na^+ 年平均値とは異なり、林内雨と林外雨に差は少なく、3箇所

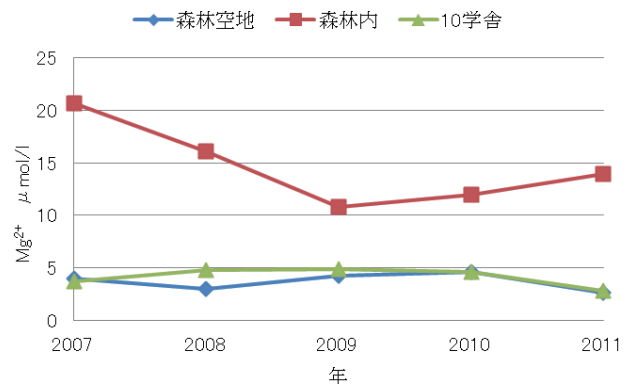


図12. Mg^{2+} 年平均値の測定場所毎経年変化. 測定期間: 2007~2011年. 測定場所: 森林空地, 森林内, 10学舎屋上.

の年平均値と経年変化の位相は、良く似ていた。

図11に K^+ 年平均値の測定場所毎経年変化を示した。

K^+ 年平均値は、3測定場所とも、2008年に2007年より濃度が高くなっているが、理由は明らかではない。しかし、2008~2011年の間、森林内、森林空地、10学舎屋上で4年間連続して直線的に経年的に減少していた。4年の減少量は、森林内、森林空地、10学舎屋上で10.7、5.6、4.0 $\mu\text{mol/l}$ で、森林内(林内雨)の減少量は、森林空地(林外雨)や10学舎屋上(林外雨)の約2倍であった。 K^+ 5年平均値と比較すると森林内(林内雨)は、森林空地(林外雨)や10学舎屋上(林外雨)の5.6倍、5.8倍高い値であった。

大気中の K^+ が森林の葉枝に選択的に捕集されるとは考え難いので、 K^+ が森林の葉枝からの溶出成分と考察された。森林空地と10学舎屋上の経年的な濃度も、推移も良く似ており、4年の減少量も森林内と

表8. ss-Ca²⁺存在比の変化.

年	ss-Ca ²⁺ 存在比 %		
	森林空地	森林内	10学舎
2007	5.6	1.3	1.9
2008	2.4	1.8	1.2
2009	2.7	1.4	2.1
2010	2.0	1.4	1.9
2011	1.4	0.9	1.4
最大値	5.6	1.8	2.1
最小値	1.4	0.9	1.2
範囲	4.3	0.9	1.0
平均	2.8	1.4	1.7
標準偏差	1.5	0.3	0.4
CV %	52	21	21

比べ少なかった。

図12にMg²⁺年平均値の測定場所毎経年変化を示した。

森林空地は、2010年を山とした一型、森林内は、2009年を谷とした一型、10学舎屋上は、2008年から2010年を山とした一型の推移をしていた。2007年と2011年の最大値と最小値の差(範囲)差は、森林内、森林空地、10学舎屋上において9.9, 2.0, 2.1 $\mu\text{mol}/\text{l}$ で、森林内の減少量は、森林空地や10学舎屋上の約5倍であった。そして、5年平均値と比較すると林内雨の森林内は、林外雨の森林空地や10学舎屋上の4.0倍, 3.5倍高い値であった。

森林内のMg²⁺年平均値が、森林空地と10学舎屋上比べ約4倍も高いこと、経年的な変化が森林内で大きく、森林空地と10学舎屋上で少ないことから、K⁺と同じ様に、Mg²⁺は森林の葉枝からの溶出成分と考察された。

表8に海塩粒子由来のCa²⁺(ss-Ca²⁺)の存在比(%)の経年変化を示した。

本論文でCa²⁺と記しているのは、海塩粒子由来(ss-Ca²⁺と記す.)と陸上由来(nss-Ca²⁺と記す.)の合計量(単にCa²⁺と記す.)である。降雨水の科学を環境問題として研究する場合、ss-Ca²⁺は自然現象であるから、人為的な対処の対象とならない。人がコントロールできる可能性のあるのはnss-Ca²⁺であるので、ss-Ca²⁺とnss-Ca²⁺の存在比を明らかにしておくことは重要である。

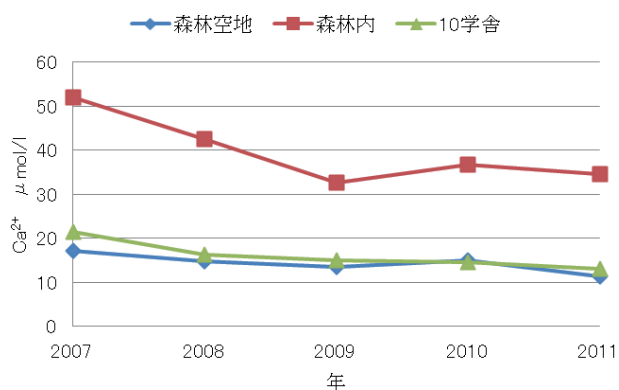


図13. Ca²⁺年平均値の測定場所毎経年変化. 測定期間: 2007~2011年. 測定場所: 森林空地, 森林内, 10学舎屋上.

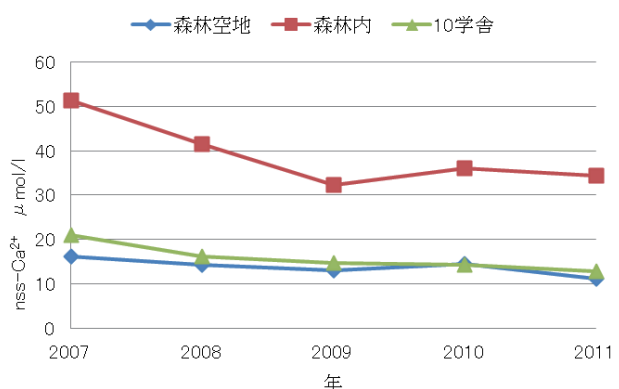


図14. nss-Ca²⁺年平均値の測定場所毎経年変化. 測定期間: 2007~2011年. 測定場所: 森林空地, 森林内, 10学舎屋上.

2007~2011年の間で、ss-Ca²⁺の存在比(%)は、森林空地で1.4%~5.6%、森林内で、0.9%~1.8%、10学舎屋上で、1.2%~2.1%であった。

2007年の森林空地における5.6%の高値の理由は明らかでない。2007年を除いた森林空地、森林内と10学舎屋上の4年間平均値は、2.1%, 1.4%, 1.7%であった。森林空地、森林内と10学舎屋上のss-Ca²⁺の存在比は、おおむね1~2%と少なく、Ca²⁺の98~99%が、nss-Ca²⁺であることが明らかになった。

また、林内雨(森林内)のss-Ca²⁺の存在比が林外雨(森林空地と10学舎屋上)に比べ値小さい理由は明らかに出来なかった。

図13に、Ca²⁺年平均値の測定場所毎経年変化を、図14に、nss-Ca²⁺年平均値の測定場所毎経年変化を示した。

Ca²⁺は、ss-Ca²⁺とnss-Ca²⁺の合計量である。表8より、ss-Ca²⁺は、森林空地、森林内、10学舎屋上

表9. Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , nss-SO_4^{2-} 年平均値と集計値. 測定期間: 2007~2011年. 岡山理科大測定場所: 森林空地, 森林内, 10学舎屋上.

年	$\text{Cl}^- \mu\text{mol/l}$			$\text{NO}_3^- \mu\text{mol/l}$			$\text{SO}_4^{2-} \mu\text{mol/l}$			$\text{nss-SO}_4^{2-} \mu\text{mol/l}$		
	森林空地	森林内	10学舎	森林空地	森林内	10学舎	森林空地	森林内	10学舎	森林空地	森林内	10学舎
2007	21.9	59.1	25.9	35.6	61.2	44.5	38.0	52.5	44.7	36.6	50.6	43.5
2008	22.5	54.9	21.9	25.2	60.6	31.3	32.7	46.5	35.4	31.7	44.5	32.8
2009	22.2	34.9	21.1	23.1	39.5	29.0	19.7	27.1	22.8	18.6	25.7	21.9
2010	17.6	38.6	17.6	18.7	31.5	22.9	13.3	21.8	16.2	12.5	20.4	15.4
2011	8.4	27.0	9.3	13.9	31.6	19.2	10.0	21.1	14.0	9.6	20.1	13.4
最大値	22.5	59.1	25.9	35.6	61.2	44.5	38.0	52.5	44.7	36.6	50.6	43.5
最小値	8.4	27.0	9.3	13.9	31.5	19.2	10.0	21.1	14.0	9.6	20.1	13.4
範囲	14.1	32.1	16.6	21.7	29.7	25.3	28.0	31.4	30.7	27.0	30.5	30.1
平均	18.5	42.9	19.2	23.3	44.9	29.4	22.7	33.8	26.6	21.8	32.3	25.4
標準偏差	6.0	13.6	6.3	8.1	15.0	9.7	12.2	14.7	13.1	11.9	14.3	12.6
CV%	32	32	33	35	33	33	54	43	49	54	44	50

で, Ca^{2+} 中の1~2%程度で, Ca^{2+} の大部分は nss-Ca^{2+} であった. 図13と図14は, ほぼ同じ図となった. そこで, Ca^{2+} と nss-Ca^{2+} の年平均値変化の値や経年変化は同一と考え, nss-Ca^{2+} 即ち陸上由来(人的由来)の経年変化について考察した.

nss-Ca^{2+} 年平均値は2007~2011年の間で, 2009年の森林内を除き, 概観的に見れば, 森林空地, 森林内, 10学舎屋上で減少していた. 2007~2011年の間に減少した値は, 森林空地, 森林内, 10学舎屋上において5.1, 19.1, 8.2 $\mu\text{mol/l}$ で, 森林内の減少量は, 森林空地や10学舎屋上の減少量の2.3~3.7倍であった. 林内雨の森林内の減少量は林外雨の森林空地や10学舎屋上に比べ大きい. 2011年の年平均値は2007年の年平均値の, 69%, 67%, 61%であり, 5年間の減少率は大きい. 森林空地と10学舎屋上の経年的な平均値と経年変化は, 良く似ていた. 森林内の5年間平均値は, 森林空地と10学舎屋上の2.5~2.8倍高かった.

(2)陰イオンの年平均値の経年変化とその集計値

表9に Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , nss-SO_4^{2-} の年平均値と集計値(最大値, 最小値, 範囲, 算術平均, 標準偏差, CV%)を示した. 単位は $\mu\text{mol/l}$ である.

森林空地, 森林内, 10学舎屋上における, Cl^- の5年平均値は, 18.5, 42.9, 19.2 $\mu\text{mol/l}$ であった. NO_3^- の5年平均値は, 23.3, 44.9, 29.4 $\mu\text{mol/l}$ であった. SO_4^{2-} の5年平均値は, 22.7, 33.8, 26.6 $\mu\text{mol/l}$ であった. nss-SO_4^{2-} の5年平均値

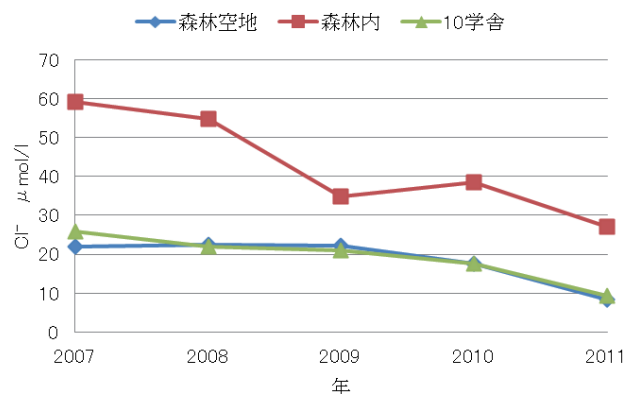


図15. Cl^- 年平均値の測定場所毎経年変化. 測定期間: 2007~2011年. 測定場所: 森林空地, 森林内, 10学舎屋上.

は, 21.8, 32.3, 25.4 $\mu\text{mol/l}$ であった. 陰イオンの5年平均値は, 陽イオンの5年平均値と同じく, 森林内(林内雨)の値が, 森林空地(林外雨)や10学舎屋上(林外雨)に比べ高い値であった.

Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , nss-SO_4^{2-} の最大値, 最小値, 範囲, 平均値, 標準偏差は, 森林内(林内雨)は森林空地(林外雨)や10学舎屋上(林外雨)に比べ高い値であった.

しかし, 森林内(林内雨)のCV%は, SO_4^{2-} , nss-SO_4^{2-} で森林空地(林外雨)や10学舎屋上(林外雨)に比べ低い値であった. また, 森林内(林内雨)の Cl^- と NO_3^- のCV%は, 森林空地(林外雨)や10学舎屋上(林外雨)と比べ1~2%の差でありほぼ同じ値であった. このことは, 林内雨(森林内)が森林によって受ける Cl^- と NO_3^- の濃度の上昇と SO_4^{2-} , nss-SO_4^{2-} の濃度の上昇のメカニズムが異なることを示唆していると考察できた.

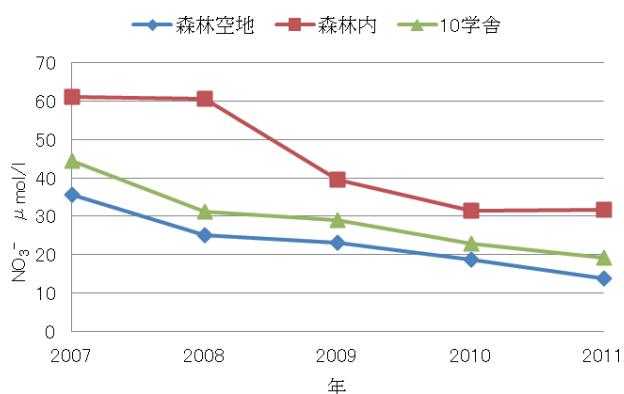


図16. NO₃⁻年平均値の測定場所毎経年変化. 測定期間：2007～2011年. 測定場所：森林空地，森林内，10学舎屋上.

表10. ss-SO₄²⁻存在比 % の変化. 測定期間：2007～2011年. 岡山理科大測定場所：森林空地，森林内，10学舎屋上.

年	ss-SO ₄ ²⁻ 存在比 %		
	森林空地	森林内	10学舎屋上
2007	3.8	3.7	2.7
2008	3.2	4.4	7.3
2009	5.4	5.2	4.1
2010	5.7	6.6	5.1
2011	3.8	4.5	4.1
最大値	5.7	6.6	7.3
最小値	3.2	3.7	2.7
範囲	2.5	2.9	4.5
平均	4.4	4.9	4.7
標準偏差	1.0	1.0	1.5
CV %	22	20	32

図15にCl⁻年平均値の測定場所毎経年変化を示した.

森林内の2007～2011年の間のCl⁻年平均値は，2009年を除き，5年間経年的にほぼ直線的に減少していた.

森林空地と10学舎屋上のCl⁻年平均値は，2007～2009年は値の変動は森林内に比べ少なく，2009～2010年は，森林内と同程度減少していた. 2007～2011年の間に減少した量は，森林空地，森林内，10学舎屋上で13.5，32.1，16.6μmol/lであった.

2011年のCl⁻年平均値は2007年に比べ，37%，46%，35%まで減少していた. 森林内(林内雨)の減少率は，森林空地(林外雨)や10学舎屋上(林外雨)に比べ大きかった. Cl⁻とNa⁺の各年の平均値の推移が大

変良く似ていることから，Cl⁻とNa⁺は海塩粒子由来のイオンであると考察できた. 森林内(林内雨)の5年平均値は，森林空地(林外雨)や10学舎屋上(林外雨)に比べ，2.2～2.3倍であった.

図16にNO₃⁻年平均値の測定場所毎経年変化を示した.

酸性雨の主要成因であるNO₃⁻の挙動は，酸性雨研究では重要なイオンである.

2007～2011年の間にNO₃⁻年平均値は，森林空地，森林内，10学舎屋上でほぼ直線的に経年的に減少していた. 2007～2011年の間に減少した量は，森林空地，森林内，10学舎屋上で21.7，29.7，25.3μmol/lで，林内雨も林外雨も減少量に差は少なかった. 2011年のNO₃⁻年平均値は2007年に比べ，森林空地，森林内，10学舎屋上で39%，52%，43%まで減少しており，森林内(林内雨)減少率は，森林空地(林外雨)や10学舎屋上(林外雨)に比べ大きかった.

NO₃⁻5年平均値の大小関係は，森林内>10学舎屋上>森林空地で，林内雨が林外雨に比べ大きかった.

森林空地の年平均値と10学舎屋上の年平均値の推移は，良く似ていた. 2009～2011年では，森林内が他の測定場所の値に近づいているが，理由は明らかではない.

表10に海塩粒子由来のSO₄²⁻(ss-SO₄²⁻)の存在比(%)の経年変化を示した.

SO₄²⁻は，Ca²⁺同じように海塩粒子由来(ss-SO₄²⁻と記す.)と陸上由来(nss-SO₄²⁻と記す.)がある. 本論文でSO₄²⁻と記しているのは，海塩粒子由来と陸上由来の総量(単にSO₄²⁻と記す.)を示している. 降雨水の科学を環境問題として研究する場合，海塩の影響は自然現象であるから，人為的な対処の対象とならない. 人がコントロールできる可能性のあるのはnss-SO₄²⁻であるので，nss-SO₄²⁻値は重要である.

2007～2011年の間でのss-SO₄²⁻の存在比(%)は，森林空地は，3.2%～5.7%，森林内は，3.7%～6.6%，10学舎屋上は，2008年が他の年に比べ大きい原因は明らかではないが，2.7%～7.3%であった.

存在比の5年間平均値は，4.4%，4.9%，4.7%

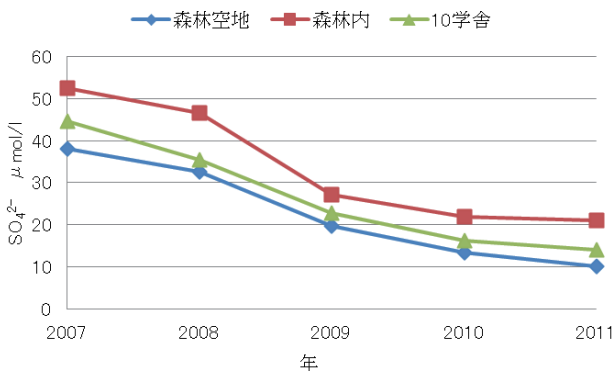


図17. ss-SO₄²⁻年平均値の測定場所毎経年変化. 測定期間: 2007~2011年. 測定場所: 森林空, 森林内, 10学舎屋上.

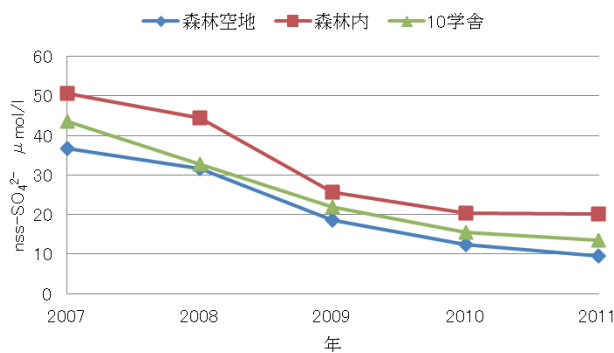


図18. nss-SO₄²⁻年平均値の測定場所毎経年変化. 測定期間: 2007~2011年. 測定場所: 森林空地, 森林内, 10学舎屋上.

で, Ca²⁺の海塩粒子由来の存在比より大きい.

2007~2011年の間で, 3測定場所で, ss-SO₄²⁻の存在比は, 5年平均値で概ね5%前後であり, 残りの95%は陸上由来(即ち人為的由来であることが明らかになった).

図17に, SO₄²⁻年平均値の測定場所毎経年変化を示し, 図18に, nss-SO₄²⁻年平均値の測定場所毎経年変化を示した.

SO₄²⁻は, ss-SO₄²⁻とnss-SO₄²⁻の合計量である. 表10より, ss-SO₄²⁻は, 3測定場所で, SO₄²⁻の約5%程度で, SO₄²⁻の95%は陸上由来(nss-SO₄²⁻, 人的由来)であった. そこで, SO₄²⁻とnss-SO₄²⁻の年平均値変化の値や推移はほぼ同一と考え, nss-SO₄²⁻の変化について考察した.

2007~2011年の間では, 概観的に見れば, 森林空地, 森林内, 10学舎屋上で直線的に経年的減少していた. 2007~2011年の間に減少した値は, 森林空地, 森林内, 10学舎屋上において27.0, 30.5, 30.1μmol/lで, 森林内(林内雨)減少率は, 森林空

表11. 陽イオンと陰イオン年平均値と年降水量との関係. 測定期間: 2007~2011年. 岡山理科大測定場所: 森林空地, 森林内, 10学舎屋上. 回帰式: yはイオンの年平均値(μmol/l). xはアメダス岡山の年間降雨量(mm).

イオン名	測定場所	回帰式	相関係数(R)
Na ⁺	森林空地	y = -0.0167x + 32.75	0.868
	森林内	y = -0.0266x + 54.95	0.932
	10学舎屋上	y = -0.0177x + 35.28	0.983
NH ₄ ⁺	森林空地	y = -0.0167x + 36.21	0.592
	森林内	y = -0.0218x + 46.17	0.827
	10学舎屋上	y = -0.0212x + 41.85	0.862
陽イオン K ⁺	森林空地	y = -0.0042x + 11.12	0.482
	森林内	y = -0.0188x + 56.85	0.931
	10学舎屋上	y = -0.0020x + 8.40	0.312
Mg ²⁺	森林空地	y = -0.0011x + 4.87	0.302
	森林内	y = -0.0109x + 26.57	0.687
	10学舎屋上	y = -0.0015x + 5.74	0.395
nss-Ca ²⁺	森林空地	y = -0.0066x + 21.06	0.859
	森林内	y = -0.0250x + 66.29	0.803
	10学舎屋上	y = -0.0117x + 28.47	0.917
Cl ⁻	森林空地	y = -0.0211x + 41.43	0.865
	森林内	y = -0.0512x + 98.47	0.925
	10学舎屋上	y = -0.0247x + 45.95	0.969
陰イオン NO ₃ ⁻	森林空地	y = -0.0322x + 58.31	0.975
	森林内	y = -0.0549x + 104.48	0.901
	10学舎屋上	y = -0.0378x + 70.48	0.960
nss-SO ₄ ²⁻	森林空地	y = -0.046x + 71.73	0.957
	森林内	y = -0.053x + 89.80	0.914
	10学舎屋上	y = -0.049x + 78.62	0.955

地(林外雨)や10学舎屋上(林外雨)とほぼ同じ値であった. 2011年の値は2007年の, 26%, 40%, 30%であり, 5年間の減少は, 他の陽イオンと同様に大きかった. 林内雨の森林内のnss-SO₄²⁻5年間平均値は, 林外雨の森林空地や10学舎屋上の1.3~1.5倍高かった.

5. 陽・陰イオン年平均値と年降水量との関係

表11に, 陽イオン(Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, nss-Ca²⁺)と陰イオン(Cl⁻, NO₃⁻, nss-SO₄²⁻)の年平均値と年降水量との関係を測定場所別に示した. なお, 年降水量の代表としてアメダス岡山を用いた.

Na⁺の相関係数は, 3測定場所で, 0.868~0.983であり, 陽イオンと陰イオン年平均値は, 年降水量との関係が高い. 回帰式(yはイオンの年平均値, μmol/l: xはアメダス岡山の年間降雨量mm)の傾きは, 森林内が森林空地や10学舎屋上に比べ大きく, 降雨量による濃度の影響を多く受けていると考察できた. また, 回帰式のy切片は, 森林内が森林空地や10学舎屋上に比べ大きく, 森林内の平均値が高いことを示していた. これは, 大気中のNa⁺が, 森林の葉や枝に付着し, 雨と接触して落下したことによると考えられる.

NH_4^+ の相関係数は、森林空地が0.592、森林内が0.827、10学舎屋上が0.862で、森林空地が他の測定場所に比べて年降水量との関係が低かった。森林空地だけが、年降水量との関係が低い理由は、明らかに出来なかった。

回帰式の傾きは、森林内と10学舎屋上が森林空地に比べ大きく、森林内と10学舎屋上は森林空地に比べ降雨量による濃度の影響を多く受けていると考察できた。また、回帰式のy切片は、森林内、森林空地、10学舎屋上が、36.21、46.17、41.85と Na^+ に比べ差は小さく、年平均値に差が少ないことを示していた。

K^+ の相関係数は、森林空地が0.482、森林内が0.831、10学舎屋上が0.312であった。森林内の年降水量との関係は、森林空地と10学舎屋上に比べ高かった。これは、 K^+ が、植物の葉や枝等樹木由来のイオンであり、降雨が葉や枝等と触れて落下した時にだけ林内雨中存在するため、年降水量との関係が高くなったと考察できた。 K^+ は、大気中の存在量が大変少ないので、林外雨である森林空地や10学舎屋上では、年降水量との関係が少ないと考察できた。

回帰式の傾きは、森林内で森林空地や10学舎屋上に比べ大きかった。森林内は降雨量による濃度の影響が有るようであるが、森林空地や10学舎屋上は降雨量による濃度の影響ほぼ無いと考察できた。また、回帰式のy切片は、森林空地、森林内、10学舎屋上が、11.12、56.85、8.40であった。森林内が森林空地や10学舎屋上に比べ大変大きく、 K^+ が植物の葉や枝等樹木由来のイオンであることを示していると考察できた。

Mg^{2+} の相関係数は、森林空地が、0.302、森林内が、0.687、10学舎屋上が、0.395であった。 K^+ と同じく、森林内だけが、年降水量との関係が高く、森林空地と10学舎屋上は関係が低かった。 K^+ と同じく、 Mg^{2+} が、植物の葉や枝等樹木由来のイオンであるのよると考えられ、年降水量との関係も K^+ と同じ現象であると考察できた。

K^+ と同じく、回帰式の傾きは、森林内は森林空地や10学舎屋上に比べ大きかった。森林内は降雨量に

よる濃度の影響が有るようであるが、森林空地や10学舎屋上は降雨量による濃度の影響ほぼ無いと考察できた。また、回帰式のy切片は、森林空地、森林内、10学舎屋上が、4.87、26.57、5.74で、森林内が森林空地や10学舎屋上に比べ大変大きく、 Mg^{2+} が植物の葉や枝等樹木由来のイオンであることを示していると考察できた。

nss-Ca^{2+} の相関係数は、森林空地、森林内、10学舎屋上で、0.803~0.917であり、年平均値は年降水量との関係が高い。回帰式の傾きは、森林内が森林空地や10学舎屋上に比べ大きく、降雨量による濃度の影響を多く受けていると考察できた。また、回帰式のy切片は、森林内が森林空地や10学舎屋上に比べ大きく、森林内の平均値が高いことを示していた。

3測定場所共に年平均値は年降水量との関係が高い現象は、 Na^+ とよく似ていた。

Cl^- の相関係数は、森林空地、森林内、10学舎屋上で、0.865~0.969であり、年平均値は、年降水量との関係が高い。回帰式の傾きは、森林内が森林空地や10学舎屋上に比べ大きく、降雨量による濃度の影響を多く受けていると考察できた。また、回帰式のy切片は、森林内が森林空地や10学舎屋上に比べ大きく、森林内の平均値が高いことを示していた。

3測定場所共に年平均値は年降水量との関係が高い現象は、 Na^+ 、 nss-Ca^{2+} によく似ていた。

NO_3^- の相関係数は、森林空地、森林内、10学舎屋上で、0.901~0.975であり、年平均値は、年降水量との関係が高い。回帰式の傾きは、森林内が森林空地や10学舎屋上に比べ大きく、降雨量による濃度の影響を多く受けていると考察できた。また、回帰式のy切片は、森林内が森林空地や10学舎屋上に比べ大きく、森林内の平均値が高いことを示していた。

3測定場所共に年平均値は年降水量との関係が高い現象は、 Na^+ 、 nss-Ca^{2+} 、 Cl^- とよく似ていた。

nss-SO_4^{2-} の相関係数は、森林空地、森林内、10学舎屋上で、0.914~0.957であり、年平均値は、年降水量との関係が高い。回帰式の傾きは、森林内が森林空地や10学舎屋上に比べ大きく、降雨量による濃度の影響を多く受けていると考察できた。また、

表12. 森林による大気中陽イオンと陰イオンの付着量の試算. 測定期間: 2007~2011年. 測定場所: 森林空地, 森林内. (a): 森林内の値から森林空地の値を引いた値. 単位 $\mu\text{mol}/\ell$. (b): (a)を森林空地の値で除した値 $\times 100$ (付着率). 単位: %.

年	降水量 mm	pH	EC mS/m	森林内-森林空地 $\mu\text{mol}/\ell$							
				Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
2007	-214.1	0.20	0.16	15.5	5.7	35.7	16.8	34.8	37.2	25.6	14.5
2008	-315.6	-0.01	0.67	14.9	8.2	32.0	13.1	27.7	32.3	35.4	13.8
2009	-223.4	-0.03	0.51	6.1	1.3	28.6	6.5	19.2	12.7	16.4	7.4
2010	-357.7	0.14	0.36	11.4	3.4	26.3	7.4	21.7	21.1	12.8	8.5
2011	-563.1	0.06	0.64	9.2	3.7	26.9	11.4	23.3	18.6	17.7	11.1
最大値	-214.1	0.20	0.67	15.5	8.2	35.7	16.8	34.8	37.2	35.4	14.5
最小値	-563.1	-0.03	0.16	6.1	1.3	26.3	6.5	19.2	12.7	12.8	7.4
範囲	348.9	0.23	0.51	9.3	6.9	9.4	10.3	15.6	24.5	22.6	7.1
平均	-334.8		0.47	11.4	4.4	29.9	11.0	25.3	24.4	21.6	11.1
標準偏差	190.1		0.46	5.4	2.3	12.3	4.4	11.9	12.7	11.4	5.1
CV %	57		100	47	51	41	40	47	52	53	46

年	降水量	EC	(森林内-森林空地) / 森林空地 $\times 100$ %							
			Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
2007	-26	6	90	23	647	422	202	170	72	38
2008	-27	35	81	59	329	435	188	143	141	42
2009	-19	32	34	5	381	150	142	57	71	38
2010	-28	24	88	27	450	161	146	120	68	64
2011	-40	62	130	30	660	445	206	221	128	111
最大値	-19	62	130	59	660	445	206	221	141	111
最小値	-40	6	34	5	329	150	142	57	68	38
範囲	21	56	96	55	331	295	64	164	72	73
平均	-28	32	85	29	493	323	177	142	96	59
標準偏差	8	20	34	20	152	153	31	61	35	31
CV %	28	64	40	69	31	47	17	43	37	53

回帰式のy切片は, 森林内が森林空地や10学舎屋上に比べ大きく, 森林内の平均値が高いことを示していた.

6. 森林による大気中の陽イオンと陰イオン付着量の試算

表12に森林による大気中陽イオンと陰イオンの付着量の試算を示した.

表12(a)は, 森林内の値を林内雨, 森林空地の値を林外雨とみなし, 森林内の値から森林空地の値を引いた値を示した. そして, 林内雨の濃度の増加量が付着量(mm, $\mu\text{mol}/\ell$)であると考察して示した. また, 表12(b)は, 表12(a)の値を森林空地の値で割りパーセントで示した. この値は, 付着量と林外雨(森林の影響のない値)との比率を示している. 5か年の平均付着率は, 各年の付着率の5年平均値で示した.

表12(a), 表12(b)より, 2007年~2011年の年降水量は, 森林内が森林空地に比べ, 214.1~563.1mm少なく, 年降水量は平均334.8mm少なかった. 表1より, 森林空地の5年間平均降水量は1178.9mmであっ

たので, 2007~2011年の年降水付着率は, 18~48%で, 5年間平均付着率は, 28%であった.

pH値の年平均値の森林内と森林空地の差は, -0.03~0.20であった. 森林内が森林空地より中性になった年は, 2007年, 2010年, 2011年で, pH値が増加した値は0.06~0.20であった. 森林内が森林空地より酸性になった年は, 2008年, 2009年, pH値が減少した値は0.01~0.03であった. 増加した値と減少した値を比較すると, 増加した値が大きかった. 従って, 森林内が森林空地より中性になると考察できた.

2007年~2011年のEC年平均値は, 森林内が森林空地に比べ, 0.16~0.67mS/m高値で, ECは平均0.47mS/m高値であった. 表5より, 森林空地のEC5年間平均は1.74mS/mであったので, 2007~2011年のEC年増加率は, 6~62%で, 5年間平均付着率は32%であった.

2007年~2011年のNa⁺年平均値は, 森林内が森林空地に比べ, 6.1~15.5 $\mu\text{mol}/\ell$ 高値であった. 表6より, 森林空地のNa⁺5年間平均は14.6 $\mu\text{mol}/\ell$ であったので, 2007年~2011年のNa⁺年付着率は34~130

%で、5年間平均付着率は85%であった。

2007～2011年の NH_4^+ 年平均値は、森林内が森林空地に比べ、1.3～8.2 $\mu\text{mol}/\ell$ 高値であった。表6より、森林空地の NH_4^+ 5年間平均は18.0 $\mu\text{mol}/\ell$ であったので、2007～2011年の NH_4^+ 年付着率は5～59%で、5年間平均付着率は29%であった。

森林内の NH_4^+ 増加量と付着率は、 Na^+ に比べ少なく、挙動が Na^+ と異なることを示唆している。この現象は、 NH_4^+ の増加が森林による大気中 NH_4^+ の付着だけによるのではないことを示唆しているが、原因は明らかではない。

2007～2011年の K^+ 年平均値は、森林内が森林空地に比べ、26.3～35.7 $\mu\text{mol}/\ell$ 高値であった。表6より、森林空地の K^+ 5年間平均は6.5 $\mu\text{mol}/\ell$ であったので、2007～2011年の K^+ 年付着率は329～660%で、5年間平均付着率は493%であった。

森林内の K^+ 年平均値は、森林空地に比べ5倍以上の値であった。森林内の K^+ 増加量と付着率は、 Na^+ に比べ大変大きく、挙動が Na^+ と異なることを示唆している。この現象は、 K^+ の増加が森林による大気中 K^+ の付着によるのではないことを示唆している。

2007～2011年の Mg^{2+} 年平均値は、森林内が森林空地に比べ、6.5～16.8 $\mu\text{mol}/\ell$ 高値であった。表6より、森林空地の Mg^{2+} 5年間平均は3.7 $\mu\text{mol}/\ell$ であったので、2007～2011年の Mg^{2+} 年付着率は150～445%で、5年間平均付着率は323%であった。

森林内の Mg^{2+} 年平均値は、森林空地に比べ3倍以上の値であった。森林内の Mg^{2+} 増加量と付着率は、 Na^+ に比べ大変大きく、挙動が Na^+ と異なることを示唆している。

森林内の Mg^{2+} と K^+ の5年平均値が、森林空地に比べ3倍から5倍高値であること、 Mg^{2+} と K^+ の5年間平均付着率が323%と493%であることから、両者は樹木由来のイオンであると示唆された。

2007～2011年の Ca^{2+} 年平均値は、森林内が森林空地に比べ、19.2～34.8 $\mu\text{mol}/\ell$ 高値であった。表6より、森林空地の Ca^{2+} 5年間平均は14.3 $\mu\text{mol}/\ell$ であったので、2007～2011年の Ca^{2+} 年付着率は142～206%で、5年間平均付着率は177%であった。

Ca^{2+} 付着量と付着率は、 Na^+ 付着量と付着率に近い値であった。

2007～2011年の Cl^- 年平均値は、森林内が森林空地に比べ、12.7～37.2 $\mu\text{mol}/\ell$ 高値であった。表6より、森林空地の Cl^- 5年間平均は18.5 $\mu\text{mol}/\ell$ であったので、2007～2011年の Cl^- 年付着率は57～221%で、5年間平均付着率は142%であった。 Cl^- 付着量と付着率は、 Na^+ 付着量と付着率に近い値であった。

2007～2011年の NO_3^- 年平均値は、森林内が森林空地に比べ、12.8～35.4 $\mu\text{mol}/\ell$ 高値であった。表6より、森林空地の NO_3^- 5年間平均は23.3 $\mu\text{mol}/\ell$ であったので、2007～2011年の NO_3^- 年付着率は68～141%で、5年間平均付着率は142%であった。 NO_3^- 付着量と付着率は、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 付着量と付着率に近い値であった。

2007～2011年の SO_4^{2-} 年平均値は、森林内が森林空地に比べ、7.4～14.5 $\mu\text{mol}/\ell$ 高値であった。表6より、森林空地の SO_4^{2-} 5年間平均は22.7 $\mu\text{mol}/\ell$ であったので、2007～2011年の SO_4^{2-} 年付着率は38～111%で、5年間平均付着率は59%であった。 SO_4^{2-} 付着量と付着率は、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 付着量と付着率に近い値であった。

表12(b)の付着率を5年間平均値でまとめると以下のとおりであった。

林内雨の降水量は林外雨に比べ28%減少していた。林内雨のECは32%増加しており、可溶性イオンが、林外雨に比べ増加していることを示唆していた。付着率の高い順にイオンを並べると、 K^+ (493%)> Mg^{2+} (323%)> Ca^{2+} (177%)> Cl^- (142%)> NO_3^- (96%)> Na^+ (85%)> SO_4^{2-} (59%)> NH_4^+ (29%)であった。付着率の違いが各々のイオンの発生や拡散メカニズムの違いを示していると考察できた。

K^+ と Mg^{2+} は、大気中(林外雨)に10 $\mu\text{mol}/\ell$ 以下と少なく(表6, 7)、付着率が突出し高いことから、大気中の K^+ と Mg^{2+} が森林の葉や枝への付着により高値を示したのではなく、植物の生体から溶出した成分であると考察できた(村野 1993)。 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} は、森林の葉や枝からの由来イオンと考えにくいことから、大気の付着により高値を示した

と考察出来た(村野 1993).

NH_4^+ については上記のイオンとは異なったメカニズムで挙動しているように考察された.

7. まとめ

岡山理科大学生態システム園で、森林空地と森林内の2測点、岡山理科大学構内で、10学舎屋上の1測点で、2007年1月から2011年12月の5年間2週間毎に採取した降水量、pH、EC、イオン濃度の各年の平均値と5年間平均値を用いて、岡山の降水量とその成分の関係について考察した.

1)2007~2011年の年降水量変化の特徴は、岡山地方気象台における121年間観測で、この期間は降水量変化が大きく、かつ、経年的に増加し続け、岡山地方気象台における降雨量測定始まって以来の特異な経年変化をしたことであった.

2)森林空地、森林内、10学舎屋上における、2007~2011年のpH年平均値の特徴は、経年的に値が増加し続けたことであった.

3)EC、陽イオン、陰イオンの濃度の年平均値の特徴を概観すると、経年的に値が減少し続けたことであった.

4)pH、EC、陽イオン、陰イオンの濃度の年平均値は、アメダス岡山の年降雨量との間に高い相関関係が認められた.

5)森林空地と森林内の値を用いて、森林による大気中の陽・陰イオンの付着量の試算を試みた. Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} は大気中から森林の葉や枝への付着により林内雨の濃度が増加していると考えられた. K^+ と Mg^{2+} は、元来大気中からは少なく、植物由来の成分であり、降雨により林内雨の濃度が増加していると考えられた. NH_4^+ が林内雨の濃度が高い原因は明らかにできなかった.

謝辞

本研究に、ご協力いただいた歴代の技術科学研究所山下研究室の皆さんに深謝します.

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-. *Naturalistae* 16: 5-18
- 福山市. ホームページ: 福山の環境. 酸性雨. 担当: 環境保全課(掲載日: 2011年3月11日). (2012.07.01閲覧).
- 広島県環境保全課ホームページ: ecoひろしま~環境情報サイト~. 酸性雨の状況について. (2012.12.10閲覧).
- 環境省(2009). 酸性雨長期モニタリング報告書(平成15~19年度). 環境省. pp15. 18.
- 気象庁ホームページ: <http://www.data.jma.gp.jp/obd/stats/etrn/index.php>. 気象統計情報. 過去の気象データ検索. 日ごとの値. (2012.07.01閲覧).
- 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-. *Naturalistae* 9. pp55-62.
- 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. pp95-103.
- 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-. *Naturalistae* 12. pp9-19.
- 村野健太郎(1993). ポピュラーサイエンス 酸性雨と酸性霧. 裳華房. pp41-43.
- 岡山県(2012). 平成23年版岡山県環境白書. pp109.

- 岡山市(2012). 平成23年版岡山市環境白書. pp30. 23-29.
- 岡山地方気象台(1999). 岡山県気象年報平成11年. 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-. *Naturalistae* 13: 27-35.
- 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-. *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-. *Naturalistae* 14: 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-. *Naturalistae* 15: 65-77.

(2012年12月27日受理)