

論文 (Original Article)

東北地方内陸部森林地帯における降水中の溶存成分濃度の季節変化 および溶存成分負荷量

相澤州平^{1)*}・岡本 透¹⁾・池田重人²⁾

Seasonal changes in the concentrations and depositions of dissolved substances in precipitation observed in a forest region located in an inland Tohoku district

AIZAWA Shuhei^{1)*}, OKAMOTO Toru¹⁾ and IKEDA Shigeto²⁾

Abstract

We observed seasonal changes in the concentrations of dissolved substances in precipitation at an open area in a forest region in an inland Tohoku district. The amount of deposition brought by precipitation except NO_3 was smaller to national averages. The amount of Na and Cl was small in particular. We consider that the experimental site is located in a clean area, however the concentration of NH_4 and NO_3 was higher than other clean areas. The concentration of Na and Cl originating in sea-salt carried by strong seasonal winds was high from December to January, while the concentration of nss-Ca was high from March to April. It appears that the high concentration of nss-Ca was caused by eolian dust (Kosa) from mainland China. These findings indicate that substances carried from the Sea of Japan or mainland China had reached the experimental site. Concentrations of nss- SO_4 and NO_3 were also high during the same period for the nss-Ca. This suggests that the acidic loads such as SO_4 and NO_3 were long-range loads that had been transported from mainland China and had extended to the experimental site in the inland Tohoku district.

Key words : acid rain, precipitation, deposition, Tohoku district, seasonal wind, nss- SO_4 , nss-Ca

要 旨

東北地方内陸部の森林地域に位置する開空地において降水を通年採取し、溶存成分濃度を測定した。試験地における降水による物質負荷量は、海塩に由来するNaおよびClの負荷量が全国平均より非常に小さく、NaおよびCl以外の溶存成分の負荷量も全国平均より小さいものが多かったが、 NO_3 の負荷量は全国平均と同等であった。試験地は清浄地域に位置すると考えられるが、 NH_4 および NO_3 の負荷量に関しては他の清浄地域より大きな値であった。試験地における降水中の溶存成分濃度は、12～1月には北西季節風の影響による海塩由来のNaおよびCl濃度の上昇が認められ、3～4月には黄砂の影響と見られるnss-Ca濃度の上昇が認められた。これらは、日本海や中国大陸等の遠隔地から輸送される物質が試験地に到達していることを示している。降水中のnss- SO_4 、 NO_3 濃度がこれらの物質と同時期に上昇する傾向

原稿受付：平成15年2月4日 Received Feb. 4, 2003 原稿受理：平成15年7月17日 Accepted July. 17, 2003

* 森林総合研究所立地環境研究領域 〒305-8687 つくば市松の里 1

Department of Forest Site Environment, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan; e-mail : aizawa@ffpri.affrc.go.jp

1) 森林総合研究所立地環境研究領域 Department of Forest Site Environment, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) 森林総合研究所東北支所 Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

がみられ、海塩や黄砂と同様に遠隔地から輸送される酸性物質の負荷が内陸に位置する試験地に及んでいる可能性が示唆された。

キーワード：酸性雨、降水、降下物、東北地方、季節風、 nss-SO_4 、 nss-Ca

1 はじめに

欧米において酸性降下物が森林衰退を招くおそれのことが報告されて以来 (Abrahamsenら, 1977, Oden, 1976, Tammら, 1977, Whittakerら, 1974)、日本においても酸性降下物による様々な被害が懸念されている (竹内, 1995, 金野, 1986, 玉置ら, 1991)。酸性降下物による被害を予測するために、環境庁をはじめとして多くの機関によって全国で降水の酸性度と溶存成分組成についての長期モニタリングが行われてきた (玉置ら, 1991, 原, 1997, 竹内, 1995, 藤田, 1995)。その結果、日本においても欧米並みに降水が酸性化していることが明らかにされている (竹内, 1995, 金野, 1986)。しかしこれらのモニタリング調査地点は都市やその周辺地域が多く、森林域における調査地点は少ないため、酸性降下物による森林への影響を全国的に予測するのに十分なデータが得られているとはいえない。森林総合研究所では1990年から特定研究「酸性雨等モニタリングセンターステーション構築」を開始し、全国の森林域における降水の酸性度と溶存成分濃度のモニタリングを実施してきた。本稿では東北地方内陸部における降水による森林域への物質負荷の実態を明らかにするため、森林総合研究所東北支所が担当した森林環境モニタリングの結果から、北上山地のカラマツ人工林における降水の観測ならびに降水中に含まれる溶存成分の計測結果について報告する。また、環境庁等の調査により日本海側では冬季に大陸由来とみられる非海塩性の SO_4 濃度が上昇することが明らかにされているので (飯田ら, 1995, 竹内, 1995)、東北地方内陸部の森林地帯におけるその影響について検証する。

2 試験地と方法

盛岡市の北東、北上山地西部の姫神山東方に位置する1965年植栽のカラマツ人工林内の開空地 (北緯39度50分、東経141度16分、標高780m) において降水を採取した (Fig. 1)。試験地は盛岡の市街地から約20km離れた山地に位置し、周囲には人家、工場、交通量の多い道路は存在せず、国道4号線からは姫神山をはさんで約8km、国道455号線からは約6km、最も近い砂子沢集落からは約3kmの距離があった。周囲の土地利用形態は、森林の中に夏期に放牧が行われる牧草地が散在し、試験地から最も近い牧草地までは約400m (積雪期の採取場所からは約100m) の距離があった。

無降雪期は口径30cmまたは21cmのロートにより常時開放式で原則として1降雨毎に採取し、降雪期は口径48cmのポリ容器およびポリ袋を用いて原則として1降雪

毎に採取した。採取した試料は、採取量を測定した後、一部を用いてEC、pHを測定し、残りの一部を濾紙 (No. 5A) で濾過して4℃で保存し、溶存イオン濃度を分析した。雪の場合は室温で融解した後分析した。pHはガラス電極法により、ECはEC計により測定した。Na、K、Ca、Mg濃度は原子吸光法により、 NH_4 、Cl、 NO_3 、 PO_4 、 SO_4 濃度はイオンクロマト法により測定した。観測は1994年に開始し、現在も継続中であるが、本稿では1995年から2001年までの結果をもとに解析をおこなった。Caおよび SO_4 は海水中に高濃度に含まれるイオンであるため、降水中のCaおよび SO_4 は海塩性の成分と非海塩性の成分に分けて解析した。降水成分組成に関する既往の報告 (原, 1997, 飯田ら, 1995) と同様に、降水中のNaは海塩由来であり、降水に混入した海塩のイオン濃度比は海水のものと同等であると仮定し、降水中のNa濃度を基準に海水のイオン濃度比 (半谷ら, 1995) を用いて海塩性Caおよび海塩性 SO_4 濃度を計算し、測定値と海塩性成分の差を非海塩性Ca (nss-Ca) および非海塩性 SO_4 (nss-SO_4) 濃度とした。

降水の溶存成分の分析結果については、リン酸イオンまたは高濃度のアンモニウムイオンが検出された場合は、鳥の糞や昆虫の混入などのコンタミネーションがあったと考えられるため棄却した。また、原則として、イオンバランスが50%以上ずれていた場合も棄却した。

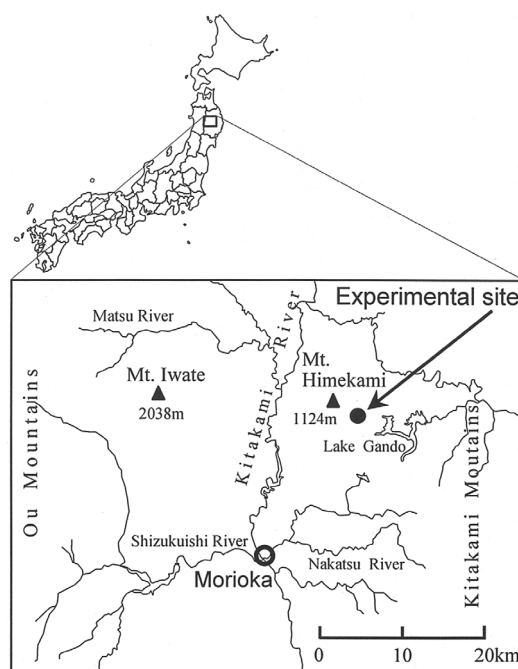


Fig. 1. 試験地の位置
Location of the experimental site

3 結果

1) 観測期間の降水量・pH・EC・溶存成分濃度の平均値と年間負荷量

Table 1に1995年から2001年までの各年の年降水量および降水のpH、EC、降水中の溶存イオン濃度を示した。溶存イオン濃度は採取時の降水量により加重平均して求めた。また、観測期間の加重平均値を最下欄に示した。Table 2に降水による各年の年間イオン負荷量と観測期間の平均値を示した。

観測期間における年降水量は、1246～2050mmの範囲で変動し、平均は1685mmであった。

降水のpHは4.5～5.0を示し、観測期間の加重平均で4.7であった。ECは0.9～1.5mSm⁻¹を示し、観測期間の加重

平均で1.2mSm⁻¹であった。

降水中の濃度が高い溶存成分の種類とその平均濃度は、カチオンではNaが21.1 μmol_cL⁻¹、NH₄⁺が13.6 μmol_cL⁻¹、Caが8.4 μmol_cL⁻¹ (nss-Caは7.5 μmol_cL⁻¹) であり、アニオンではClが24.9 μmol_cL⁻¹、SO₄²⁻が23.3 μmol_cL⁻¹ (nss-SO₄²⁻は20.7 μmol_cL⁻¹)、NO₃⁻が12.4 μmol_cL⁻¹であった。

降水による負荷量が大きな溶存成分の種類とその平均年間負荷量は、カチオンではNaが36.0mmol_cm⁻²、NH₄⁺が22.7mmol_cm⁻²、Caが14.2mmol_cm⁻² (nss-Caは12.7mmol_cm⁻²) であり、アニオンではClが42.0mmol_cm⁻²、SO₄²⁻が39.2mmol_cm⁻² (nss-SO₄²⁻は34.9mmol_cm⁻²)、NO₃⁻が20.9mmol_cm⁻²であった。

Table 1. 試験地における年降水量および降水のpH・EC・溶存イオン濃度の平均値
Annual precipitation and mean annual pH, EC and concentrations of dissolved ions in precipitation at the experimental site

Year	Annual precipitation mm year ⁻¹	pH	EC mSm ⁻¹	Concentration of dissolved ions μmol _c L ⁻¹										
				H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	nss-Ca ²⁺	nss-SO ₄ ²⁻
1995	1773.3	4.47	1.50	32.0	28.9	-	4.2	10.5	6.2	29.3	13.6	27.2	9.3	23.7
1996	1246.1	4.46	1.41	35.1	29.2	16.4	5.9	11.0	6.8	34.1	15.4	28.4	9.7	24.9
1997	1690.2	4.74	0.96	18.3	18.9	15.9	4.8	7.3	3.9	29.9	12.8	14.0	6.5	11.7
1998	2050.4	4.70	1.00	19.5	18.7	9.1	4.4	4.8	7.2	20.9	10.0	18.9	3.9	16.7
1999	1607.4	5.01	0.93	10.8	18.4	10.9	2.8	5.9	5.8	21.9	10.1	17.7	5.1	15.5
2000	1901.7	4.75	1.16	17.4	15.7	14.8	2.9	7.7	3.8	18.5	12.7	26.9	7.0	25.0
2001	1524.8	4.67	1.46	17.8	22.6	16.1	2.4	13.8	6.1	23.5	13.5	31.9	12.8	29.2
The weighted average by annual precipitation				21.1	21.4	13.6	3.9	8.4	5.7	24.9	12.4	23.3	7.5	20.7

ただしNH₄⁺のデータは1995年4月以前欠損のため、1995年の年平均値は計算せず、降水量による加重平均値には1996年以降を使用
NH₄⁺ in 1995 was not calculated because of the lack of data.

The weighted average for NH₄⁺ was estimated from the data from 1996 on.

Table 2. 試験地における降水によるイオンの年間負荷量
Annual deposition by precipitation at the experimental site

Year	Annual deposition of dissolved ions mmol _c m ⁻²										
	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	nss-Ca ²⁺	nss-SO ₄ ²⁻
1995	56.8	51.3	-	7.5	18.7	11.0	52.0	24.1	48.2	16.4	42.0
1996	43.7	36.3	20.5	7.3	13.7	8.5	42.5	19.1	35.4	12.1	31.0
1997	30.9	32.0	26.8	8.2	12.4	6.5	50.6	21.7	23.6	11.0	19.8
1998	40.0	38.4	18.6	9.1	9.8	14.7	42.9	20.5	38.8	8.1	34.2
1999	17.4	29.6	17.6	4.5	9.4	9.4	35.3	16.2	28.5	8.1	24.9
2000	33.1	29.9	28.1	5.5	14.7	7.3	35.2	24.2	51.1	13.4	47.5
2001	27.1	34.5	24.6	3.7	21.1	9.3	35.8	20.6	48.7	19.6	44.5
Average	35.6	36.0	22.7	6.5	14.2	9.5	42.0	20.9	39.2	12.7	34.9

ただしNH₄⁺のデータは1995年4月以前欠損のため、1995年の年間負荷量は計算せず、平均値には1996年以降を使用
NH₄⁺ in 1995 was not calculated because of the lack of data.

The average for NH₄⁺ was estimated from the data from 1996 on.

2) 降水量・pH・ECの季節変化

1995～2001年における各月の降水量、pH、ECの単純平均値の変化をFig. 2に示した。また、観測した7年間に於ける各月のpH、ECの単純平均値をFig. 3に示した。

月毎の降水量は約30～480mmの範囲で、夏季に多く冬季に少ない傾向がみられた。12月～3月の降水はほとんどが雪であり、各年の積雪の最大値は60～120cmであった。観測期間における月降水量の平均値は、9月が最大で約227mm、2月が最小で約80mmであった。月毎の降水のpHは4.2～5.4であった。観測期間の月平均pHは、12～2月が4.5と低く、他の月は4.6～4.9を示した。月毎の降水のECは0.3～3.3mSm⁻¹（降水量による加重平均値で0.3～2.6mSm⁻¹）の値を示した。ECは5～9月が0.8～1.0mSm⁻¹（降水量による加重平均値で0.7～0.9mSm⁻¹）と低く、10～4月が1.3～1.9mSm⁻¹（降水量による加重平均値で1.2～1.7mSm⁻¹）と高かった。降水量が大きい月ほどpHが高くECが低い傾向がみられた。

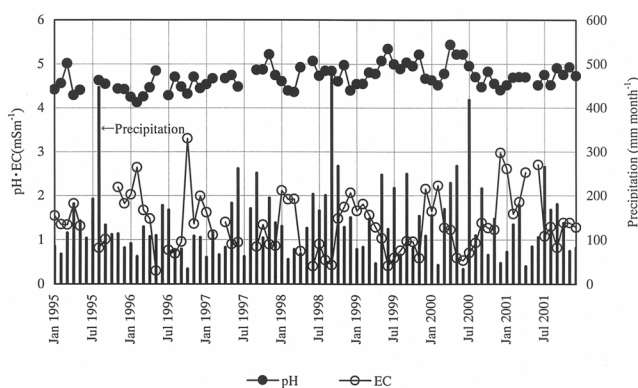


Fig.2. 月毎の降水量と降水のpH・ECの平均値
Monthly precipitation and mean monthly pH and EC of precipitation

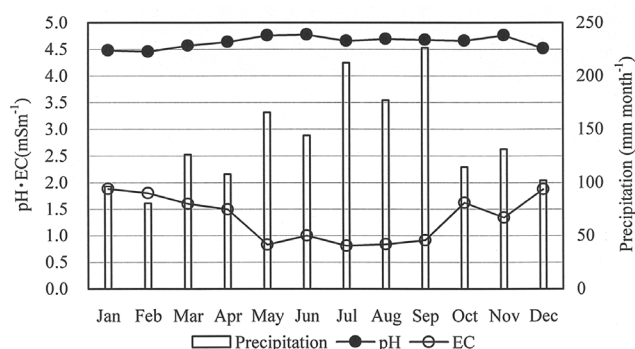


Fig.3. 降水量・pH・ECの観測期間における月平均値
Mean monthly precipitation and mean monthly pH and EC of precipitation for the observation period

3) 溶存イオン濃度の季節変化

降水中の溶存イオン濃度の月単純平均値の変化をFig. 4～6に示した。また、観測した7年間に於ける月単純平均値をFig. 7～8に示し、各イオンのアニオンまたはカチオン全体に占める割合をFig. 9～10に示した。

Naは10～4月に濃度が高い傾向がみられ、特に濃度が高い12～1月には観測期間における月平均値で49～59 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ （降水量による加重平均値で45～50 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ ）であった。一方、5～9月には濃度が低い傾向がみられ、観測期間における月平均値では7月に4 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ （降水量による加重平均値で3 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ ）と低い値を示した。他のイオンに較べて濃度の季節変化が大きく、降水中の全カチオンに対して占める比率は、1月は約50%、7月は約8%であった。

Caは10～4月に濃度が高く、観測期間における月平均値では4月に21 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ （降水量による加重平均値で3月に22 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ ）を示した。これに対し、6～9月は濃度が非常に低く、観測期間における月平均値で1～4 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ であった。なお、降水中のCaのうち非海塩性Caが占める比率は、90%を越える月が多く、最も高い5月で96%であったが、12～1月および8～9月は若干低く、76～84%であった。

NH_4 は2～4月に濃度が高い傾向がみられた。観測期間における月平均値では4月に31 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ （降水量による加重平均値で28 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ ）と高い値を示し、11月に5 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ と低い値を示した。NaやCaと比較して夏季の濃度低下が小さいため、5～7月には降水中の全カチオンのなかで相対的に高い濃度を示した。

MgはCaと類似した濃度変化の傾向を示した。観測期間における月平均値では10～4月は10～14 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ （降水量による加重平均値で10 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ 前後）と濃度が高く、最高の11月および1月には14および12 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ （降水量による加重平均値で12 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ ）を示したが、5～9月は1～3 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ （降水量による加重平均値で1～2 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ ）と非常に低い値を示した。

Kは観測期間における月平均値では概ね2～4 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ と低い値を示したが、10～11月は10～23 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ （降水量による加重平均値で10～13 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ ）と高い値を示した。

ClはNaとほぼ同様に濃度の季節変動が大きかった。観測期間における月平均値で1月には66 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ （降水量による加重平均値で56 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ ）と濃度が高く、これに対し、7月には5 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ と濃度が非常に低かった。

SO_4 はClと同様に10月以降濃度が高い傾向がみられたが、高濃度を示す時期はClとは異なり、12～1月に集中せず4月頃まで濃度が高い傾向がみられた。観測期間における月平均値では、3～4月に39～40 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ （降水量による加重平均値で35～36 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ ）を示した。一方、5～9月は濃度が低く、観測期間における月平均値で14～20 $\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ （降水量による加重平均値で13～18

$\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 前後の値を示した。Clと比較して濃度変化が小さいため、Cl濃度が非常に低くなる5~8月は全アニオン中の SO_4 の比率が40~57%に達した。なお、降水中の SO_4 の中で非海塩性 SO_4 が占める比率は多くの月で90%前後以上で、5月には96%であったが、8月および12~2月にはやや低く、76~83%であった。

NO_3 は12月~4月に濃度が高く、観測期間における月平均値で $18\sim 23\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (降水量による加重平均値で $15\sim 20\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 前後) の値を示し、5~11月は濃度が低く、観測期間における月平均値で $8\sim 12\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (降水量による加重平均値で $6\sim 13\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 前後の値を示した。変化の傾向は SO_4 と類似していたが、濃度は SO_4 の約2分の1程度の月が多かった。

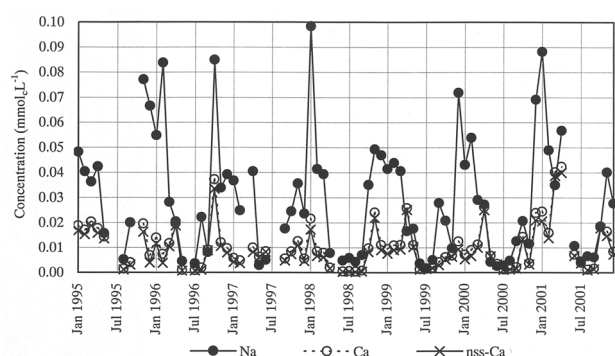


Fig.4. 月毎の降水中の溶存イオン濃度の平均値 (Na, Ca, nss-Ca)
Mean monthly concentrations of dissolved ions in precipitation (Na, Ca, nss-Ca)

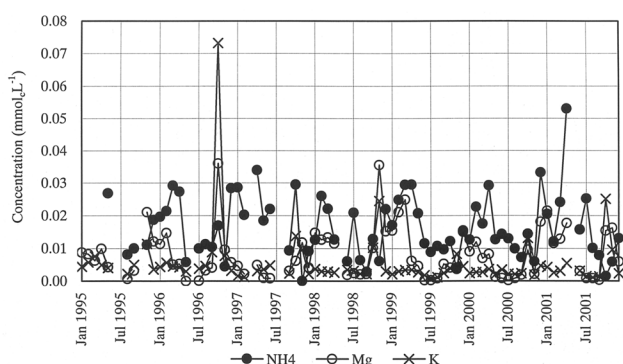


Fig.5. 月毎の降水中の溶存イオン濃度の平均値 (NH_4 , Mg, K)
Mean monthly concentrations of dissolved ions in precipitation (NH_4 , Mg, K)

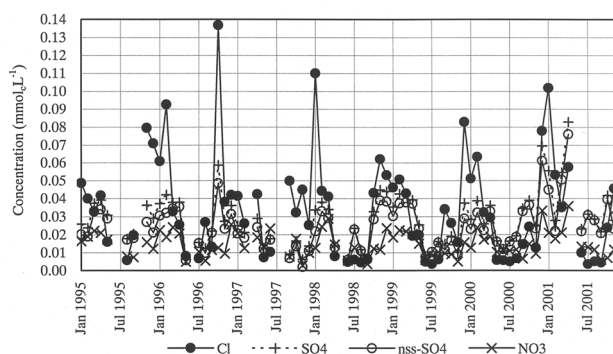


Fig.6. 月毎の降水中の溶存イオン濃度の平均値 (Cl, SO_4 , nss- SO_4 , NO_3)
Mean monthly concentrations of dissolved ions in precipitation (Cl, SO_4 , nss- SO_4 , NO_3)

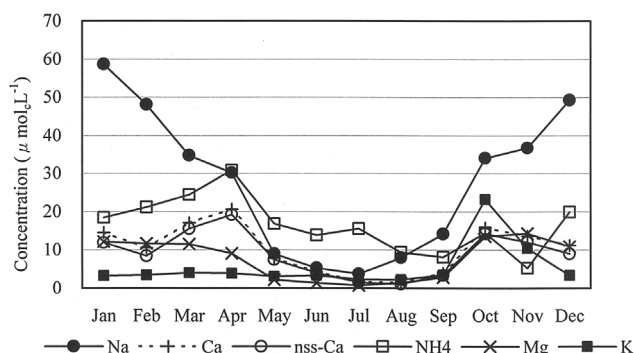


Fig.7. 溶存カチオン濃度の観測期間における月平均値
Mean monthly concentrations of dissolved cations in precipitation for the observation period

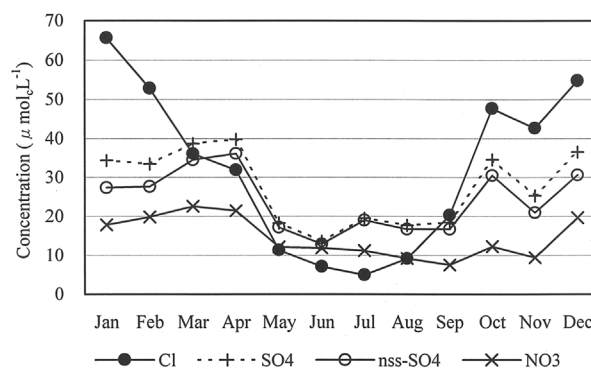


Fig.8. 溶存アニオン濃度の観測期間における月平均値
Mean monthly concentrations of dissolved anions in precipitation for the observation period

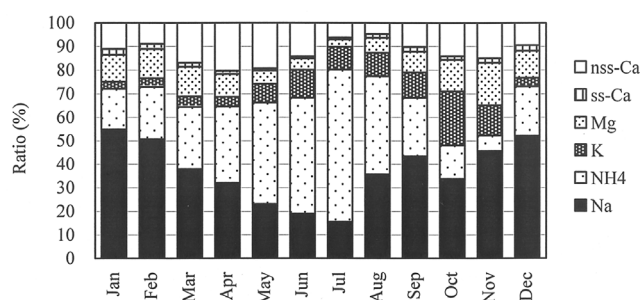


Fig.9. 溶存カチオン濃度の月平均値が全カチオンに占める割合
Ratio of each cation to sum of cations

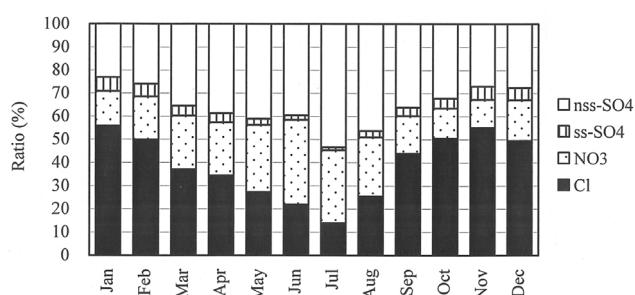


Fig.10. 溶存アニオン濃度の月平均値が全アニオンに占める割合
Ratio of each anion to sum of anions

4 考察

1) 他の地域と比較した濃度および負荷量の特徴

試験地における降水の溶存成分濃度およびその年間負荷量を、既往の全国規模の調査結果と比較すると、環境庁の酸性雨対策第一次調査（1986年4月～1988年3月）における全国平均値（玉置ら，1991）と比較してKおよびNO₃を除いて0.2～0.6倍という低い値を示した。KおよびNO₃は0.8倍と、やや低いながらほぼ同等の値を示した。環境庁の酸性雨対策第二次調査（1989年4月～1993年3月）における全国平均値（原，1997）との比較でも同様の傾向を示した。nss-SO₄、NO₃、NH₄、nss-Caの濃度および年間負荷量を電力中央研究所の全国調査（1987年10月～1990年9月）における全国平均値（原，1997）と比較した結果も、NO₃が同等、それ以外が0.7倍という上記と同様の傾向を示した。環境庁および電力中央研究所の全国調査では、観測点は主に都市近郊とその周辺地域に設置されている。当試験地は都市や工場、道路等から離れた森林地域に設置されているため、環境庁等の全国調査と比較してこれらの汚染源の影響を受けにくく、溶存成分濃度が低い値を示すと考えられる。

なお、NaおよびClの濃度および年間負荷量は、環境庁の第一次調査の全国平均値と比較して0.2倍、第二次調査の全国平均値と比較して0.4倍と、他の溶存成分に比べて特に低い値を示した。また、NaおよびClがそれぞれ降水中の全カチオンおよび全アニオンに占める割合

は、環境庁の第二次調査の全国平均値では約60%（原，1997）であるが、当試験地では観測期間の加重平均値でそれぞれ約30%および約40%であり、全国平均値より明瞭に小さかった。当試験地におけるNaとClの濃度比（[Cl]/[Na⁺]）は観測期間の加重平均値で1.17であり、海水の1.17（半谷ら，1995）と等しい。このことから、降水中のNaおよびClは主に海水起源であると考えられる。降水の溶存成分の年平均値および年間負荷量に関しては、環境庁等の全国調査と比較して当試験地では海塩の影響が小さいといえる。

環境庁および電力中央研究所の全国調査の平均値と比較した場合、当試験地は内陸部の森林地域に位置するため、降水中のnss-SO₄、NH₄、nss-Caといった汚染物質の濃度が低いこと、および、海水起源のNaおよびCl濃度が非常に低いことが特徴であるといえる。一方で、NO₃濃度に関しては全国平均値とほぼ同等のレベルであった。

電力中央研究所の全国調査は降水量にもとづいて分類した気候区を代表するように観測点を設置している（藤田，1994）。その気候区のなかで、当試験地が属する気候区を代表する平野部の観測点である宮城県高清水（当試験地の南約140km）における平均値（藤田，1994）と比較すると、当試験地の降水のnss-SO₄濃度は0.8倍であり、ほぼ同等のレベルと考えられる。降水中のnss-SO₄、NO₃、NH₄、nss-Caの濃度を、当試験地の南東約90kmの太平洋岸に位置する岩手県綾里における1994年の平均値（石川ら，1998）と比較すると、nss-Caは0.7倍と低く、nss-SO₄とNO₃はほぼ同等で、NH₄は2.3倍の高い値を示した。また、同様に当試験地の西約40kmの奥羽山脈に位置する岩手県八幡平における1994年の平均値（石川ら，1998）と比較すると、いずれもほぼ同等の値であった。当試験地における降水の溶存成分濃度は、NH₄は近接する地域での観測値よりやや高く、それ以外はほぼ同等であると考えられる。

玉置ら（1991）は環境庁の酸性雨対策第一次調査で降水中の溶存成分濃度が低い観測地点のデータをもとに、日本の清浄地域での降水の年平均値を推定した。これを本報で用いている単位で表記すると、概ねpH：5.0以下、EC：1.0～1.5mSm⁻¹、Na：13～17μmol_cL⁻¹、NH₄：6～8μmol_cL⁻¹、K：1μmol_cL⁻¹前後、Ca：5～8μmol_cL⁻¹、Mg：2～4μmol_cL⁻¹、Cl：15～25μmol_cL⁻¹、NO₃：5～7μmol_cL⁻¹、SO₄：20～30μmol_cL⁻¹に相当する。これと比較すると、当試験地の平均値はNH₄、KおよびNO₃が第一次調査で清浄地域とされた地点の値より大きく、その他の成分はほぼこの範囲に入る。

森林地域を対象とした既往の観測例で、清浄地域として扱われているデータと比較すると、富山県有峰の1987年～1989年の5～10月の降水の平均値（安田，1993）に対して、当試験地の観測期間における5～10月の降水の平均値は、NH₄が2.8倍と高く他の成分は同等以下であった。奈良県大台ヶ原における1984年11月の降水の平

均値（松本ら，1986）に対して、当試験地の観測期間における11月の降水の平均値は、 SO_4 が0.7倍と低く、他は同等以上の値を示した。滋賀県竜王における1986年6月～1990年6月の平均値および滋賀県桐生における1990年9月～1991年8月の平均値（徳地ら，1992）に対して、当試験地の平均値は NO_3 が同等でそれ以外は低い値であったが、竜王に対しては NH_4 が6.3倍と高い値を示した。

以上のことから、当試験地は全国的にみれば清浄地域であるといえるが、降水中の NO_3 の濃度は全国平均値と同等であり、 NH_4 の濃度は近接地域や他の清浄地域に比較して高いことが特徴であるといえる。

2) 冬季におけるNa、Cl濃度の上昇

冬季には濃度が上昇する成分が多く、中でもNaとClについては、12～1月に明瞭な濃度のピークがみられた。先に述べたように、試験地における降水中のNaおよびClは主に海水起源であると考えられること、また、12～1月は北西季節風が強い時期であることから、この時期のNaおよびClの濃度上昇は北西季節風によって日本海からの海塩が運ばれた結果であると考えられる。

12～1月の降水中のNaおよびCl濃度は、日本海沿岸地域（原，1997、安田，1993、飯田ら，1995）と比較すると絶対値は低いが、12～1月の月平均値を当試験地における年平均値と比較すると2倍以上、7月の月平均値と比較すると10倍以上であった。降水中の海塩由来のNaおよびClの濃度自体は低いレベルではあるが、12～1月の濃度上昇は顕著であることから、冬季の北西季節風による日本海起源の海塩が、当試験地における降水の溶存成分濃度の季節変化におよぼす影響は大きいと考えられる。

3) 3月から4月における非海塩性Ca濃度の上昇

nss-CaもNa、Clと同様に10月以降濃度が上昇する傾向が認められるが、濃度が最大値を示すのはNaおよびClよりやや遅れ、3～4月に濃度が高い傾向がある。この時期は試料中に黄砂の混入がみられることが多い。黄砂はCaの含有率が大きく（田中ら，1989、田中ら，1990）、また、3～5月には西日本を中心に大気粉塵の組成に黄砂の与える影響が大きいことが報告されている（田中ら，1989、田中ら，1990）。これらのことは、本試験地における3～4月の降水中のnss-Ca濃度の上昇は黄砂の影響であることを示唆している。

4) 大陸からの非海塩性 SO_4 および NO_3 の影響

試験地は12～1月を中心とする冬季には日本海からの海塩の影響を受けており、3～4月には黄砂の影響が認められたことから、これらの季節には北西季節風等の強い西風により日本海あるいは中国大陆起源の物質が到達していると考えられる。晩秋から春先にかけて降水中の濃度が高いnss- SO_4 および NO_3 の供給源としては、風上に位置する日本海沿岸の都市や工業地域も考えられるため、本研究で得られたデータからはこれらの酸性物質が中国大陆起源であるとは断定できない。しかし、日本海

沿岸地域で冬季に大陸起源の SO_2 およびnss- SO_4 の負荷が増大すること（市川，1998、原，1997、竹内，1995、藤田，1995）、また、近年黄砂の酸性物質中和能が低下し、黄砂とともに輸送される中国大陆および朝鮮半島起源のnss- SO_4 および NO_3 等の酸性物質が日本の降水の酸性化に寄与しているとする指摘（井上ら，1994）があること、さらに、試験地に近い盛岡市において、11～4月にみられるエアロゾル中のフッ素濃度の上昇が、中国大陆から輸送されるレス質風成塵および石炭煤塵を含む広域風成塵の影響であるとする報告（井上ら，1995）があることを考慮すると、冬季および黄砂期には中国大陆方面を起源とする酸性物質が当試験地に到達している可能性が高いと考えられる。

5 まとめ

東北地方の内陸部に位置するカラマツ人工林内の開空地において降水を通年採取し、溶存成分濃度を測定した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 試験地における降水の溶存成分濃度および負荷量は、海塩に由来するNaおよびClが全国平均より非常に小さいことが特徴であった。nss- SO_4 の濃度および負荷量も全国平均より小さかった。試験地は全国的にみると清浄地域と位置づけられるが、 NO_3 の濃度および負荷量は全国平均並みであった。ほかの清浄地のデータと比較すると、 NH_4 の濃度および負荷量が大きかった。
- (2) 降水中の濃度の季節変化では、12～1月には北西季節風の影響による海塩由来のNaおよびCl濃度の上昇が認められ、3～4月には黄砂の影響とみられるnss-Ca濃度の上昇が認められた。また、降水中のnss- SO_4 、 NO_3 濃度がこれらと同時期に上昇していた。試験地は内陸に位置するが、日本海や中国大陆等の遠隔地から輸送される物質が到達していた。降水中のnss- SO_4 、 NO_3 濃度がこれらと同時期に上昇していたことは、遠隔地から輸送される酸性物質の負荷が内陸に及んでいることを示唆している。

引用文献

- Abrahamsen, G., Horntvedt, R. and Tveite, B. (1977) Impacts of acid precipitation on coniferous forest ecosystems, *Water, Air, Soil Pollut.*, 8, 57-73.
- 藤田慎一（1995）電力中央研究所における酸性雨の調査研究，*環境研究*，99，155-160.
- 藤田慎一・高橋 章・西宮 昌（1994）わが国における酸性雨の実態－降水の観測網の構築－，*環境科学会誌*，7，107-120.
- 半谷高久・小倉紀雄（1995）*水質調査法* 第3版，丸善，335p.
- 原 宏（1997）日本の降水の化学，*日化誌*，1997，733-748.
- 市川陽一（1998）北東アジアにおける酸性物質の長距

- 離輸送, 水利科学, 242, 51-67.
- 飯田俊彰・上木勝司・塚原初男・上木厚子 (1995) 東北地方日本海沿岸地域における湿性酸性降水物の特性, 農土論集, 175, 47-56.
- 井上克弘・張一飛・成瀬敏郎 (1994) 東アジア中緯度域における雨水の水質に及ぼす広域風成塵の影響, 土肥誌, 65, 619-628.
- 井上克弘・張一飛・板井一好・角田文男・趙静 (1995) エアロゾル中のフッ素濃度に及ぼすアジア大陸起源広域風成塵の影響, 土肥誌, 66, 223-232.
- 井上敏雄 (1983) 酸性雨による森林被害－ヨーロッパ・北アメリカにおける現状と今後の課題－, 林業技術, 496, 27-30.
- 石川百合子・大野卓也・大山準一・小川完・原宏 (1998) 綾里における1976～1994年の降水の酸性化, 天気, 45 (5), 13-22.
- 金野隆光 (1986) 酸性雨－農業生態系への影響, 化学と生物, 24, 591-599.
- 松本光弘・西川喜孝・西川雅高・溝口次夫 (1986) 山岳地域である大台ヶ原における雨水成分濃度, 大気汚染学会誌, 21, 165-172.
- Oden, S. (1976) The acidity problem - an outline of concepts, Water, Air, Soil Pollut., 6, 137-166.
- Tamm, C.O. and Cowling, E. B. (1977) Acid precipitation and forest vegetation, Water, Air, Soil Pollut., 7, 503-511.
- 竹内 正 (1995) 環境庁による酸性雨問題への取組, 環境研究, 99, 141-148.
- 玉置元則・小山 功 (1991) 地上から見た日本の酸性雨－酸性雨調査・研究で得られた成果と今後の課題－, 大気汚染学会誌, 26, 1-22.
- 玉置元則・加藤拓紀・関口恭一・北村守次・田口圭介・大原真由美・森 淳子・若松伸司・村野健太郎・大喜多敏一・山中芳夫・原 宏 (1991) 日本の酸性雨の化学, 日化誌, 1991, 667-674.
- 田中 茂・岡森克高・橋本芳一・大歳恒彦 (1990) 大気粉じん中のRbとSrの測定による黄砂現象の我が国エアロゾルにおよぼす影響の推定, 日化誌, 1990, 692-698.
- 田中 茂・尾上 勉・橋本芳一・大歳恒彦 (1989) 国設大気観測網 (NASN) の10年間の測定結果に基づく黄砂現象によるアジア大陸からの土壌粒子の我が国環境大気に及ぼす影響, 大気汚染学会誌, 24, 119-129.
- 徳地直子・岩坪五郎 (1992) 酸性雨と森林生態系の物質循環, 森林立地, 34, 14-19.
- Whittaker, R. H., Bormann, F. H., Likens, G. E. and Siccama, T. G. (1974) The Hubbard Brook ecosystem study: Forest biomass and production, Ecol. Monogr., 44, 233-252.
- 安田 洋 (1993) 酸性雨1 どんな雨が降っているのか－酸性雨の現状と地域性－, 土肥誌, 64, 448-455.