

酒田市における酸性雨の現状と森林

大歳恒彦、山崎 茜、呉 尚浩

1. はじめに

酸性雨は化石燃料（石炭や石油）の燃焼などにより生じる硫黄酸化物（ SO_x ）や窒素酸化物（ NO_x ）などが、大気中で反応して酸性の化合物（硫酸や硝酸）となり、地上へ降下するpHの低い雨のことをいう。実際には、雨の他に霧や雪など（湿性沈着）およびガスやエアロゾルとして沈着するもの（乾性沈着）が総体として環境への影響を与えることから、全てをあわせて酸性沈着と呼んでいる。

従来、酸性雨は欧米などの先進国における局地的な問題と考えられてきた。しかし、最近の酸性雨の問題は昔の様子とは異なり、影響がより広域化している。工場や火力発電所の煙突が高くなると汚染物質が大気の高層にまで広がるようになり、被害が大気の大循環とともに拡大していったからである。酸性雨による影響は広範囲にわたり、汚染物質の発生源から数千キロ離れたところで観測される例もある。

近年、中国、東南アジアなど開発途上国における工業化の進展により、大気汚染物質の排出量は増加しており、広域的な酸性雨の被害が大きな問題となってきた¹⁾。極東に位置する我が国には黄砂をはじめとし偏西風によって大陸からさまざまな物質が飛来してきている。硫黄酸化物（ SO_x ）や窒素酸化物（ NO_x ）なども例外ではない。

現在のところ、日本では明らかに酸性雨による被害と断定された報告はないが、環境省による「酸性雨対策調査」の結果によると、pH 4 台の酸性雨が全国的に観察されており、今後様々な影響が現れることが懸念されている²⁾。

本報告では、酒田市の本学キャンパスにおいて2003年から継続的に行ってきた降水の調査結果と、2004年および2006年の春季から秋季にかけて周辺の針葉樹（クロマツ）林および広葉樹（ケヤキ、オヒョウ）林の中で採取した林内雨

の調査結果とを比較し、酸性雨の現状と森林との関連について考察した。

2. 調査方法

2.1 調査場所および期間

通常の降水については、大学酒田キャンパス校舎2階屋上（地上約7 m）において2003年1月から2006年12月までの4年間にわたって試料の採取を行った（写真1）。

林内雨については、2004年春季から秋季にかけて大学周辺のクロマツ林内2ヶ所において同様に試料の採取を行った（写真2）。また、2006年春季から秋季にかけては、大学内および大学に隣接する酒田市飯森山公園の広葉樹（ケヤキ、オヒョウ）林内において同様に試料の採取を行った（写真3）。

2.2 測定方法

降水（雪を含む）時のみにポリブレン製容器を用いて試料を集める「イベントサンプリング」法により試料を採取した。

集めた降水の測定項目として、pH、EC（電気伝導率）及び陰イオン成分について調べた。

- ① pH測定：ガラス電極法（東亜ディーケーケー製EC/pHメータWM-22EP）
- ② EC（電気伝導率）：電気伝導率計による方法（東亜ディーケーケー製



写真1 通常の降水の採取
（大学校舎2階屋上、2003年1月～2006年12月）

EC/pHメータWM-22EP)

- ③ イオン成分測定：陰イオン（塩化物イオン Cl^- 、硝酸イオン NO_3^- 、硫酸イオン SO_4^{2-} ）について、イオンクロマトグラフ（ダイオネックス製DX-120）を用いて定量した。



写真 2 林内雨の採取
（クロマツ林、2004年春季～秋季）



写真 3 林内雨の採取
（広葉樹、2006年春季～秋季）

3. 調査結果

3.1 降水の長期傾向（2003年から2006年）

酒田キャンパスの大学屋上において、4年間にわたって採取してきた降水の特性を表1にまとめた。毎年45～60試料程度の降水を採取し、pH、イオン成分などの測定は試料ごとに実施した。月平均および年平均は、降水量によって補正した加重平均値を求めた。また、降水量については酒田測候所の気象データ³⁾を掲載した。

降水の酸性度をあらわすpHの年平均値は2003年、2004年がpH4.5であり、2005年、2006年がpH4.3であり、ここ数年にわたって降水の酸性化がわずかではあるが、進行している様子がうかがえる。また、イオン成分のなかでは硝酸イオン（ NO_3^- ）、硫酸イオン（ SO_4^{2-} ）の濃度が増加していることから、酸性化の原因のひとつとしてはこれらイオン成分の増加が考えられる。酒田市における降水量は毎年2000mm前後であり、2004年、2005年は降水量が多少多めであった。

表 1 降水成分の年平均値の推移

	降水量*	pH	電気伝導率 (EC) (mS/m)	塩化物イオン (Cl ⁻) (mg/l)	硝酸イオン (NO ₃ ⁻) (mg/l)	硫酸イオン (SO ₄ ²⁻) (mg/l)
2003年	2012mm	4.5	-	5.0	1.1	2.0
2004年	2217mm	4.5	-	17.8	1.2	4.0
2005年	2244mm	4.3	6.9	18.3	1.7	5.2
2006年	1915mm	4.3	6.4	10.8	1.6	4.0

注) *酒田測候所データ

月別のpH平均値を図 1 に示した。月別の変動が大きいのが、全体的に見ると春季から秋季にかけてpHが高く、冬季にpHが低くなっているのではないかと考えられる。

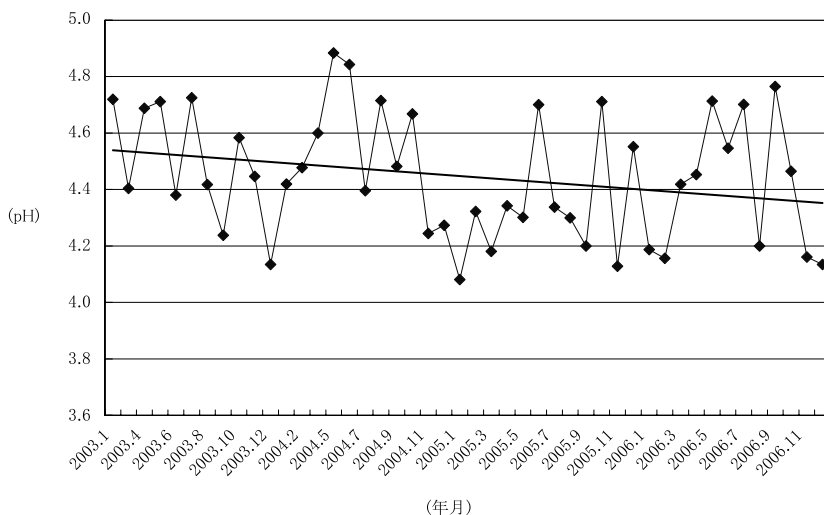


図 1 降水とpH月平均値の推移 (2003年 1 月～2006年12月)

3.2 林内雨と通常降雨の比較

表 2 および図 2 , 3 には2004年と2006年に実施した林内雨の調査結果と、同時期に採取した通常の降雨 (大学屋上) との比較を示した。各年ともにそれぞれ

れ並行して採取した 1 3 降雨を試料として採用した。また、平均値は前述したように、降水量による加重平均によって求めた。その結果、降水のpHは通常の降水（2004年、2006年いずれもpH4.5）と比較してクロマツ林ではpH5.3およびpH5.5、広葉樹林ではpH5.3というように、酸性化の緩和がみられる。

表2 林内雨と通常の降雨とのpH・イオン成分など平均値の比較

期間・樹種	採取地点	pH	電気伝導率 (EC) (mS/m)	塩化物イオン (Cl ⁻) (mg/l)	硝酸イオン (NO ₃ ⁻) (mg/l)	硫酸イオン (SO ₄ ²⁻) (mg/l)
2004年 (6～10月) クロマツ林	屋上*	4.5	-	1.4	1.0	1.4
	林内1**	5.5	-	6.2	1.4	2.3
	林内2**	5.3	-	12.6	1.6	2.9
2006年 (6～10月) 広葉樹	屋上*	4.5	3.6	2.4	1.1	1.8
	学内林**	5.3	3.4	3.4	0.9	2.9
	飯森山**	5.3	3.8	3.8	2.3	3.9

注) *通常の降水、**林内雨

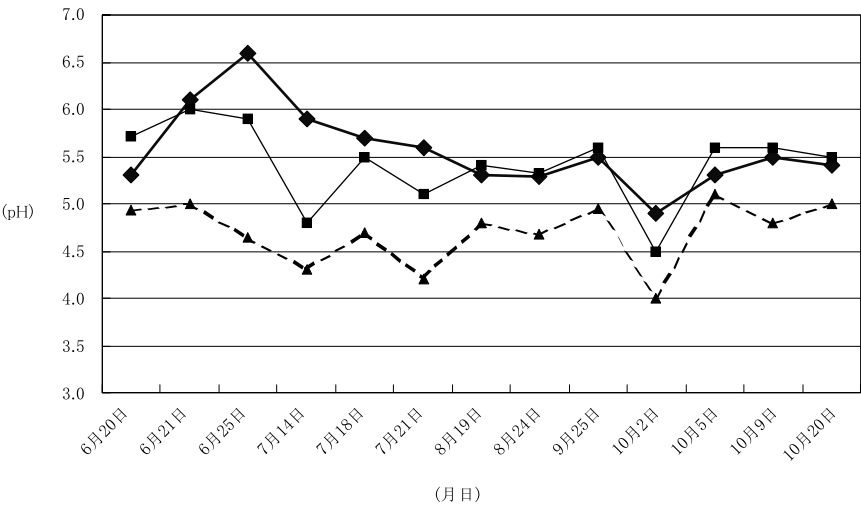


図2 通常の降水と林内雨とのpHの比較（2004年、クロマツ林）
（点線：屋上で採取した降水、実線：林内雨）

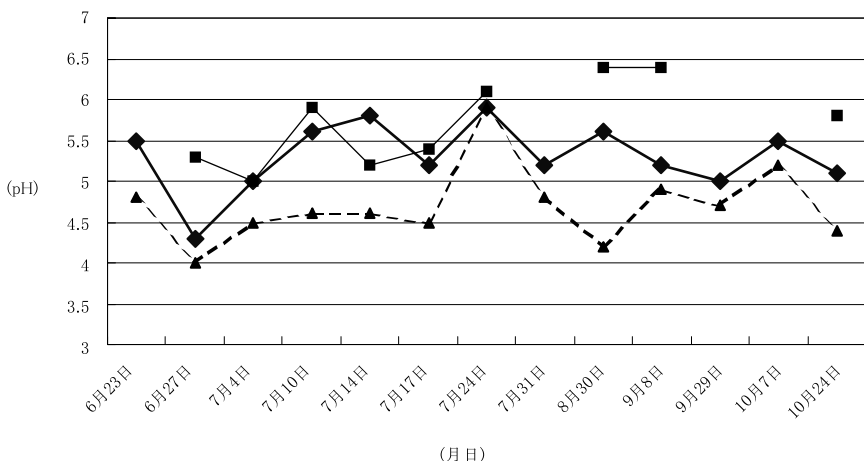


図3 通常の降水と林内雨とのpHの比較（2006年、広葉樹）
（点線：屋上で採取した降水、実線：林内雨）

4. 考 察

4.1 降水の長期傾向

前述の環境省による「酸性雨対策調査（第4次、1998～2000年）」²⁾によれば、全国の降水のpH平均値は1998年、1999年、2000年がそれぞれpH4.9、pH4.85、pH4.7であった。また、酒田市（大学）における2002年の降水の測定結果⁴⁾でも平均値はpH4.8であった。一方、本報告の2003年～2006年の降水の調査結果は、2003年と2004年がそれぞれpH4.5、2005年と2006年がpH4.3であり、過去のデータと比較して、わずかではあるが明らかに降水の酸性化が進んでいることを示している。これは、最近の山形県調査⁵⁾の結果とも同じ傾向である。山形県の酸性雨調査によれば、第1次調査（1995～1998年度）と比較して第2次調査（2002～2005年度）では県内8地点の内6地点で降水の酸性化が報告されている。特にpH値が低いのは遊佐町（pH4.5）、旧朝日村（pH4.5）などの酒田市と同様に庄内地域の測定地点である。また、鶴岡市における酸性雨の継続観測結果⁶⁾からも、1998年がpH4.72であったが、2003年にはpH4.50であり、降水の酸性化がうかがわれる。

降水の酸性化の原因物質として、硫酸イオンや硝酸イオンなどの増加があげられる。環境省が長期間にわたって行なってきた酸性雨対策調査のまとめが2005年に行なわれ、その中で岐阜県伊自良湖の集水域において、我が国ではじめて酸性沈着が土壌経由で河川水に影響を与えていたと確認された⁷⁾。伊自良湖における全沈着量（湿性と乾性の和）は、 SO_4^{2-} (1.14keq/ha/y) NO_3^- (0.63keq/ha/y)であり、中京工業地帯や名古屋都市圏からの酸性化物質の移流によるものと考えられる。本報告では、湿性沈着（降水）の評価のみを行なっているが、4年間のデータを平均すると SO_4^{2-} (1.66keq/ha/y) NO_3^- (0.46keq/ha/y)が得られる。硝酸イオンについては伊自良湖よりも低いが、硫酸イオンについては高めの値となっている。酒田において硫酸イオン濃度が高い原因のひとつは海塩に含まれるものであり、直ちに深刻な影響があらわれるものではないが、今後の濃度の推移に注目する必要がある。

各成分が降水の酸性化にどのように関与しているかを検討するために、pH、塩化物イオン(Cl^-)、硫酸イオン(SO_4^{2-})および硝酸イオン(NO_3^-)のそれぞれの成分の相関係数を調べ、表3に相関行列として示した。成分間で最も相関係数が大きい(0.90)のは、塩化物イオンと硫酸イオンであり、これは塩化物イオンが海水を代表する成分であり、また硫酸イオンも海水中に含まれるためであり、酒田のように海塩の影響を受けやすい沿岸部の調査地点では典型的な挙動である。一方、海水中にはほとんど含まれない硝酸イオンと硫酸イオンの相関係数も高く(0.74)、これは海洋起源以外からの硫酸・硝酸成分の影響を示唆するものと考えられる。pHの値とこれらの陰イオン成分はいずれも負の相関があり、単一成分ではないが、これらの複数の成分濃度が上昇することによって、降水の酸性化が進んでいると考えられる。

表3 降水中の各成分濃度の相関係数(2003-2006年)

	pH	塩化物イオン (Cl^-)	硝酸イオン (NO_3^-)	硫酸イオン (SO_4^{2-})
pH	1.00	—	—	—
塩化物イオン(Cl^-)	-0.33	1.00	—	—
硝酸イオン(NO_3^-)	-0.44	0.46	1.00	—
硫酸イオン(SO_4^{2-})	-0.49	0.90	0.74	1.00

4.2 林内雨と森林

林内雨は林内を通過した降水であり、植物の枝葉についた乾性および湿性の降水物や植物から溶脱される各種イオンが洗い流されるため、一般に各種イオンの降下量が増加することが指摘されている⁸⁾。表2の結果からも、屋上で採取した降水と比較して、林内雨のイオン成分濃度は高く、硝酸イオンおよび硫酸イオンでは1～2倍程度であるが、塩化物イオンは1～9倍であった。特に針葉樹（クロマツ）の林内雨では4～9倍の高い塩化物濃度が観察された。また、pH値の比較では、林内雨は0.8～1.0も高い値となり、 $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$ の定義から水素イオン濃度が6～10倍程度低くなって、中性化がおこっていることがわかる。

本調査では陰イオンのみで、陽イオンの分析は行っていないが、他の調査ではカルシウムイオン(Ca^{2+})やマグネシウムイオン(Mg^{2+})などの陽イオンが枝葉表面沈着物を洗い流したものと溶脱成分を合わせて林内雨に含まれることが知られている⁹⁾。このことから、森林の枝葉を通り過ぎる間に、これらの陽イオンが酸性雨に中性化の効果を及ぼしていることが推測される。一般的に、森林には水源涵養をはじめとする多くの公益的な役割があるとされているが、人為的な活動などによって発生する硫酸イオンや硝酸イオンなどの酸性沈着物を中性化して、森林がない時と比較して酸性雨による影響を森林が緩和していることがわかった。

針葉樹と広葉樹の比較については、硝酸イオン・硫酸イオン濃度および降雨の中性化の点では両者はほぼ同様の結果が得られているが、塩化物イオンについてだけは、針葉樹（クロマツ）の方が数倍高い濃度となっている。この原因としては、針葉樹（クロマツ）の枝葉の形状が広葉樹と比較して海塩を捕捉しやすいものであるなどの推測はできるが、今回の結果だけでの断定的な結論は難しい。今後、データを積み重ねながら検討を続けていきたい。

4.3 今後の課題

現在のところは、酸性雨が直接の原因と考えられる森林の枯損などは酒田周辺においても報告されていない。また、森林の酸性雨の緩和作用が本報告でも明らかになってきたが、今後、酸性雨が降り続いた場合の対策としてはどのよ

うなことが考えられるのだろうか。酸性沈着に対する影響は、樹種、土壌種および母岩の性質などによって異なり、一般的に日本の土壌は、ヨーロッパなどと比べて酸性沈着物への緩衝能力が高いといわれている。しかしながら、樹木の枯損の原因としてあげられるマツノザイセンチュウなどの遠因として酸性雨の影響が疑われていることも事実である。そのような現象に対して、粉炭や木酢液などの土壌改良剤を用いて樹木や農作物が健全に育つという報告もある¹⁰⁾。

また、硫酸イオンや硝酸イオンなどの酸性雨の原因物質の発生源については、硝酸イオンは自動車など国内に原因があると考えられるが⁶⁾、特に冬季の硫酸イオン濃度については、イオウの同位体比の測定結果から、大陸北部からの影響も示唆されている¹¹⁾。

以上のことから、今後も酸性雨の継続的な観察を続けるとともに、森林の枯損状況や土壌の酸性化に関する調査および発生源に関する考察なども必要であると考えられる。

5. ま と め

酒田市の大学キャンパス周辺において、2003年から調査を行ってきた降水の現状は、従来の調査結果と比較して2003年と2004年がpH4.5、2005年と2006年がpH4.3となり、僅かではあるが酸性化が進んでいることが明らかとなった。その原因としては、降水中の硫酸イオンや硝酸イオンなどの濃度が高くなったことがあげられる。

針葉樹と広葉樹の林内雨は、いずれも含まれるイオン成分濃度が通常の降雨よりも高くなるとともに、同時に降った通常の降水がpH4.5程度であっても、林内雨ではpH5.3～pH5.5というようになっており、森林によって酸性雨が緩和され、中性化される効果があらわれていた。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、ご協力いただいた関係者の皆さまに心より感謝申し上げます。また、(財)日本環境衛生センター酸性雨研究センター佐瀬裕之博士には林内雨の採取方法についてご教示いただいた。ここに合わせて感謝申し上げます。

引用資料

- 1) 大歳恒彦、中国四川省における酸性雨について、東北公益文科大学総合研究論集第4号、57-68 (2002)。
- 2) Acid Deposition in Japan- Major Results of the Forth Phase of the National Acid Deposition Survey, Ministry of the Environment (2003)。
- 3) 気象庁ホームページ(<http://www.data.kishou.go.jp/>) 酒田測候所のデータ。
- 4) 大歳恒彦、庄内地域における大気中浮遊粒子及び降水の現況 東北公益文科大学における2002年調査結果、東北公益文科大学総合研究論集第5号、15-23 (2003)。
- 5) 酸性雨対策総合モニタリング調査取りまとめ報告書(平成19年3月)、山形県(2007)。
- 6) 鶴岡市における酸性雨の現状、小谷卓、環境保全、No.8、21-26、山形大学環境保全センター(2006)。
- 7) 袴田共之、中原治、伊自良湖集水域の20年間の調査からみえてくること、日本化学会酸性雨問題研究会、第26回酸性雨問題研究会シンポジウム要旨集、1-6 (2006)。
- 8) 海藤亜紀子、渡邊明、林外・林内雨の化学組成とその変動、第10回大気環境学会北海道東北支部学術集会講演要旨集、20-21 (2003)。
- 9) 高世東 他、中国重慶における森林の林内雨に対する酸性沈着の影響、大気環境学会誌、34、53-64 (1999)。
- 10) 及川紀久雄、石原茂久、究極の「炭」健康法、マキノ出版(2005)。
- 11) 柳澤文孝、酸性雨の発生源を求める、環境保全、No.8、6-8、山形大学環境保全センター(2006)。