東北公益文科大学
総合研究論集
17

カナダ清浄地域における大気環境（1）

― 降水の科学的性状について ―

大　歳　恒　彦
小　林　丈　一

東北公益文科大学
Tohoku University of Community Service and Science

研究ノート

カナダ清浄地域における大気環境（１）
― 降水の化学的性状について ―

Atmospheric environment of Canadian remote areas（1）: chemical characteristics of precipitation

大歳 恒彦、小林 丈一
Tsunehiko Otoshi and Joichi Kobayashi

１．はじめに

地球規模における水資源の循環のなかで、降水は自然への恵みをもたらすとともに、特に先進国においては1960 ～ 70年代にかけて、化石燃料の使用にともなう酸性雨による森林への被害などが顕在化してきた。日本では、酸性雨の被害は明らかにはなっていないものの、樹木などへの影響が疑われる事例がいくつか報告されている。現在の日本では人口密度が高く、工業やその他の人為的活動が盛んなことを反映し､酸性雨の定義とされる「ｐH5.6以下」の降雨がほとんどの地域で観察されており、地球規模における「酸性雨とは無縁な清浄な降水」とはどのようなものかについては興味がつきない。ここでは、2005年の春季にカナダ北極圏において、清浄地域の大気環境の調査をする機会があり、興味ある結果を得たので、その成果のひとつとして極地において観測した清浄な降水の化学的性状について報告する。またこの結果を他地域の降水とも比較検討して樹木などの自然環境と降水の化学的な性状の関係について考察する。

２．調査地域と方法

2.1 調査時期

2005年３月６日から４月１日まで（現地調査）

2.2 調査地域

北極海に面したカナダ ヌナブット（Nunavut）準州のつぎの地点で降水のサンプリングを行った。

- ワードハント島（Ward Hunt、北緯83度、西経74度）：本調査における調査地点の最北端。ワードハントには北極で最も大きい氷棚があることで知られている。
- ヨーレカ（Eureka、北緯80度、西経85度）：エルスメア（Ellestmere）島の中部に位置する。世界最北の気象観測施設のひとつがあるが、地域住民の集落はない。
- レゾリュート（Resolute、北緯74度、西経94度）：コーンワリス（Cornwallis）島にあるカナダにおける地域住民（イヌイット）の北限集落のひとつ。2006年の調査[1)]では人口229名といわれている。年平均気温は－16.4℃、3月の平均最高気温－27.2℃、同平均最低気温－34.2℃[2)]。



写真１　レゾリュート全景



写真２　レゾリュートのサンプリング地点付近



写真３　サンプリング用の容器

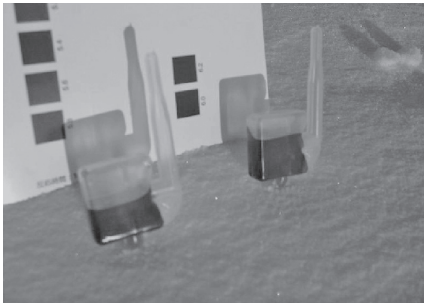


写真４　簡易法によるｐＨ測定

2.3　調査方法

降雪時のみにポリプロピレン製容器（写真３）を用いて試料を集める「イベントサンプリング」法によって試料を採取した。ただし、ワードハンド島およびヨーレカにおいては、地表に降り積もった降雪の表面を取り除いた後、同じポリプロピレン製容器を用いて注意して試料を採取した。

集めた降雪（降水）は、室温で溶解後、試料の一部を用いてｐＨの簡易測定（柴田科学製シンプルパック）を行なった（写真４）。また、残りの試料については、洗浄したポリビンに入れて冷蔵庫に保存した後、日本に持ち帰り、実験室において、ｐＨ、EC（電気伝導率）および陰イオン成分について調べた。

- ｐＨ、EC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）
- 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^{--}）について、イオンクロマトグラフ（ダイオネクス製DX-120）を用いて定量した。

３．調査結果

カナダ北極圏の降水試料の測定結果を表1に示す。ワードハント島およびヨーレカでは、地表の降雪それぞれ１試料、レゾリュートでは調査期間中の降雪を採取した３試料について測定した結果である。酸性度を示すｐＨについては、目安とされるｐＨ5.6の試料が２試料あったものの、それを超えて酸性度の高い試料はなく、いずれの試料も人為的な要因などで酸性化しているとはいえないものであった。溶存するイオン成分の総量の目安となるEC（電気伝導率）も全体の試料で低く、ワードハント島の1.4ｍS/mを除き、いずれの試料もECは1.0ｍS/ｍ以下であり、総イオン量が少ないことがわかった。個別の陰イオン成分をみると、化石燃料の燃焼などから発生し、酸性雨の主な原因物質となる硫酸イオン（SO_4^{--}）、硝酸イオン（NO_3^-）の濃度がいずれも1.0mg/l以下の低い濃度となっていた。一方、海塩が主な発生源となる塩化物イオン（Cl^-）については、他の成分と比べて比較的高い濃度の試料が多く、ほとんどの試料で1.0mg/l以上となっていた。

以上の結果を総合的にみると、本調査によるカナダの降水試料のｐＨからは酸性雨といえるものはなく、イオン成分についても人為的な発生源からのものは概して濃度は低いが、一部に海洋からの影響がみられることがわかった。

表１　本調査による降水試料の測定結果

測定地点	サンプリング月 日	ｐ Ｈ	EC (mS/m)	SO_4^{--} (mg/l)	NO_3^- (mg/l)	Cl^- (mg/l)	備考
ワードハント島	３月６日	6.0	1.4	0.80	0.14	4.4	１試料
ヨーレカ	３月６日	5.6	0.75	0.48	0.10	1.8	１試料
レゾリュート	３月９日～４月１日	5.6～6.2	0.26～0.74	<0.1～0.62	0.11～0.26	0.6～7.4	３試料

４．考　察

4.1 酸性雨の原因物質と評価

大気中には様々な物質が存在するが、降水に取り込まれてその酸性化に関与する主な物質は、人為活動に由来する二酸化硫黄と窒素酸化物、火山活動由来の硫黄酸化物、森林火災由来の窒素酸化物、海洋の硫酸還元に由来する硫黄化合物などであり、一方で黄砂粒子などに含まれる塩基性カルシウム粒子や農業活動などに由来するアンモニアガスなどは酸性化した降水を中和する役割を果たす。

酸性雨に関連した大気中に存在する種々の化合物の反応として最も重要なものは、二酸化硫黄（SO_2）と窒素酸化物（主にNO_2）の気相および液相反応である。これらの反応の概要は以下のようである[3)]。

- 気相反応：

$$\underline{SO_2} + OH + M \rightarrow HOSO_2 \quad (1)$$

$$HOSO_2 + O_2 \rightarrow SO_3 + HO_2 \quad (2)$$

$$SO_3 + H_2O \rightarrow \underline{H_2SO_4} \quad (3)$$

$$HO_2 + NO \rightarrow OH + NO_2 \quad (4)$$

（気相反応ではOHラジカルが重要な役割を演じる。(4) でOHが再生して連鎖反応によりSO_2の酸化が進行する。）

$$\underline{NO_2} + OH \rightarrow \underline{HNO_3} \quad (5)$$

$$NO_2 + O_3 \rightarrow NO_3 + O_2 \quad (6)$$

$$NO_2 + NO_3 \Leftrightarrow N_2O_5 \quad (7)$$

$$N_2O_5 + H_2O \rightarrow 2\underline{HNO_3} \quad (8)$$

- 液相反応：

$$\underline{SO_2} + H_2O \rightarrow SO_2 \cdot H_2O \rightarrow HSO_3^- + H^+ \rightarrow SO_3^{--} + 2H^+ \quad (9)$$

$$HSO_3^- + H_2O_2 \rightarrow \underline{SO_4^{--}} + H^+ + H_2O \quad (10)$$

$$SO_3^{--} + O_3 \rightarrow \underline{SO_4^{--}} + O_2 \quad (11)$$

（液相反応では硫酸だけが生成する。SO_2は大気から液相へ溶解したH_2O_2とO_3によって効率よく酸化される。）

酸性雨の原因は、一般的には人為的な活動により発生した汚染物質による酸性化した降水をイメージさせることが多い。降水の酸性度の度合いとして、現状で380ppm程度の濃度である大気中の二酸化炭素（CO_2）が純水と平衡関係にある場合のｐH5.6が目安とされている。しかしながら、実際の降水のｐHは、試料に含まれる硫酸イオンや硝酸イオンなど、酸性化に寄与する陰イオンと、反対にその中性化に寄与するカルシウムイオンなどの陽イオンとの割合によって変わる数値である。従って、単に降水試料のｐHの値だけをもって酸性雨の程度をあらわすというのは、酸性雨の生態系への影響などを考える時には不十分であるといえる。酸性雨の評価はｐHのみではなく、その降水に含まれるイオン成分濃度などを含めた評価が必要となる。

4.2 他の調査結果との比較

ヨーロッパや北米における酸性雨被害を受けて、各国では酸性雨の実態を捉えるために、恒常的なモニタリングネットワークが稼動している。ヨーロッパ、アメリカ、カナダおよび東アジアにそれぞれのネットワークがあるが、ここでは日本を含む東アジアと、カナダの既存のネットワークのデータを引用して、本調査の結果との比較を行う。

東アジア酸性雨モニタリングネットワーク（Acid Deposition Monitoring

Network in East Asia, EANET）[4]は日本、中国、韓国、ロシアなど12カ国が参加し、47ヶ所の測定局で酸性雨の測定を行っている（2005年当時）。このうち、最も北に位置する測定局はロシアのシベリア地方内陸部にあるモンディ（北緯51度、東経101度、標高約2,000ｍ）である。また、日本の最北測定局は、北海道の利尻島（北緯45度、東経141度、標高約40ｍ）である。日本の清浄な測定局の例として、長野県の八方尾根（北緯37度、東経137度、標高約1,900ｍ）のデータも引用した。EANETには、清浄地域（remote)、田園地域（rural)、都市地域（urban）の3種類の測定局分類があるが、モンディ、利尻島、八方尾根ともに清浄地域（remote）に分類される属性を持っている測定局である。利尻島以外のモンディと八方尾根は海洋からの影響を受けにくい山岳地帯にある。

カナダ大気・降水モニタリングネットワーク（The Canadian Air and Precipitation Monitoring Network、CAPMoN）[5]は、すべての測定局が周辺の大気汚染発生源の影響を受けずにすむような非都市地域（non-urban）にあり、また各測定局は、その周辺地域の環境条件を代表するような地点に配置され、カナダ全土で28ヶ所（及び米国1ヶ所）の測定局で構成されている。本調査のような高緯度地帯には配置されていないが、最も緯度の高い測定局であるSnare Rapids（北緯63度、西経116度、標高約240ｍ）及びLG4（北緯53度、西経73度、標高約300ｍ）のデータを引用した。これらカナダの測定局の特徴は海洋から離れた内陸部にあることである。

ｐＨを比較すると、本調査の結果がｐＨ5.6～ｐＨ6.2であるのに対して、カナダ及びロシアがほとんど同じ程度で、一方、日本の測定局だけがいずれもｐＨ4.7と低いｐＨ値であることがわかる。ECの値は本調査の0.26～1.4mS/mという値はロシアや八方尾根と同程度であるが、海洋の影響を受けやすい利尻島ではこれより高い3.8mS/mとなっていた。各陰イオン成分では、本調査の硝酸イオン濃度の0.10～0.26mg/lはカナダ及びロシアのデータに匹敵する低濃度であるが、日本の測定局ではこの数倍の濃度がみられている。硫酸イオン濃度はカナダの値が最も低く、ついで本調査とロシアのデータが同程度、日本のデータは最も高くなっている。塩化物イオン濃度もカナダの値が最も低く、ついでロシア、八方尾根であり、海洋の影響を受けやすい本調査と利

尻島の値が高くなっている。本調査の結果をｐＨ、ECや陰イオン成分など総合的にみると、一部の海洋からの影響を除いて各国の非汚染地域の測定値と同程度であることがわかる。

表２　他の調査による降水試料の測定結果

測定地点	サンプリング月 日	ｐ Ｈ	EC (mS/m)	SO_4^{--} (mg/l)	NO_3^- (mg/l)	Cl^- (mg/l)	備考 (降水量)
利尻島	３月平均値	4.7	3.8	2.7	0.6	5.8	EANET* (33mm)
八方尾根	３月平均値	4.7	1.3	1.7	1.4	0.7	EANET* (163mm)
ロシア清浄データ（モンディ）	４月 ** 平均値	5.6	0.6	0.6	0.2	0.5	EANET* (30mm)
カナダ清浄データ１（LG4）	３月平均値	5.3	-	0.12	0.19	0.05	CAPMoN*** (21mm)
カナダ清浄データ２（Snare Rapids）	３月平均値	5.2	-	0.14	0.13	0.06	CAPMoN*** (17mm)

注）EANET*：東アジア酸性雨モニタリングネットワーク。**3月が測定中止のため、4月のデータを引用。CAPMoN***：カナダ大気・降水モニタリングネットワーク。

4.3 酸性雨の樹木などへの影響について

レゾリュートの年間平均降水量は150mmと少なく、３月の平均降水量も6.5mmとなっている[2)]。３月中に前述のカナダの測定局に実際に降った降水も20mm程度と少なかった[5)]。降水量が少ないのはロシアのモンディーも同様で、年間降水量は286mmとなっている[4)]。これと日本の八方尾根（年間降水量2,996mm）や利尻島（同961mm）と比較すると、カナダ北極圏や大陸内陸部における降水量の少なさと、海洋に囲まれた島国である日本の降水量の多さが際だってくる。日本では地域によって差はあるが、年間降水量は1,000mmから2,000mmというのが普通であり、森林の保全のためにはめぐみの雨ということができる。しかしながら、降水の性状が酸性成分を含む酸性雨であれば、森林への悪影響も懸念される。ヨーロッパや北米で酸性雨による被害が顕在化した時期における主な原因は降水中に含まれる硫黄酸化物であったと懸念されている。図１に示すとおり､本調査で得られたカナダ北極圏（ワードハント島）の降水はロシア（モンディ）などと同程度の硫酸イオン濃度であり、日本（八

方尾根）よりもこの成分の濃度が低い清浄な降水といえる。ただし、カナダ北極圏では海洋が近いために、その影響を受けて塩化物イオン濃度は比較的高くなっている。一方、中国（西安）の例では硫酸イオン濃度が高くなっていることがわかり、この成分が高濃度であることによる森林生態系への影響が懸念されるところである。また、日本の酒田の例をみると、硫酸イオンも清浄地域よりは高くなっているが、それよりも塩化物イオン濃度が非常に高くなっていることがわかり、酒田のように日本海側に面した地域では海塩による森林生態系への影響を考慮する必要があることをあらためて確認することができた。

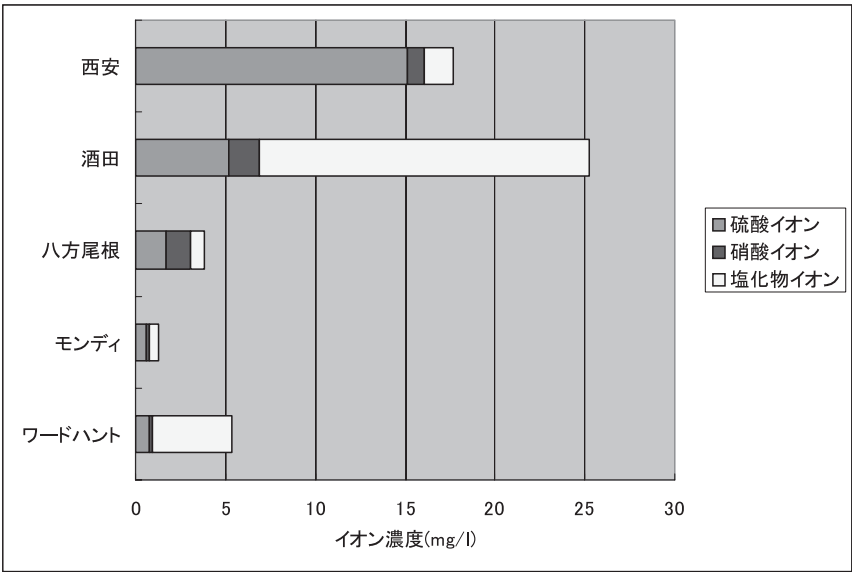


図１　各地域の降水に含まれる陰イオン成分の比較

注）西安はEANETにおけるremote測定局３月データ、酒田は東北公益文科大学の2005年平均値、他の測定局データは表１、表２から引用）

ま と め

2005年春季にカナダ北極圏における降水試料をサンプリングして測定した結果、つぎの結果が得られた。今後、このような清浄地域の結果を私たちの生活環境を見直す際のひとつのめやすとしていくことができると考えられる。

- 降水の酸性度はｐH5.6からｐH6.2の範囲であった。
- 人為的な発生源からの成分とされる硫酸イオン、硝酸イオン濃度は他の清浄地域のものと同程度の清浄なものであった。
- 北極海に近いという地理的な条件を反映して塩化物イオンは比較的高い濃度となっていた。

謝　　辞

本調査は、「地球縦周り一周の旅-第2弾カナダ北極圏の旅」の一環としておこなわれた。この壮大な冒険旅行の主催者である大場満郎氏ならびにご苦労を共にされた関係者の方々に心より感謝を申し上げる。

（本文中写真についての著作権は「地球縦周り一週の旅-第2弾カナダ北極圏の旅」事務局にある。）

引用資料

1）2006 Community Profiles, Statistics Canada,
（http://www12.statcan.ca/census-recensement/2006/dp-pd/prof/92-591/index.cfm?Lang=E）.
2）Environment Canada – Canadian climate Normals 1971-2000.
（http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/Welcome_e.html）.
3）大泉　毅、入門講座 大気沈着－第2講 湿性沈着－、大気環境学会誌、A17 ～ A23、第44巻、第5号（2009）.

4）Data Report on the Acid Deposition in the East Asian Region 2005, Network Center for EANET（2006）.
5）CAPMoN Data（http://www.msc.ec.gc.ca/capmon/index_e.cfm）.