

農耕地に囲まれた市街域とそれに隣接した森林域における大気沈着量の比較：北海道足寄町における事例

智和, 正明
九州大学大学院農学研究院環境農学部門森林環境科学講座

村田, 秀介
九州大学農学部附属演習林

中村, 琢磨
九州大学農学部附属演習林

<https://doi.org/10.15017/1913980>

出版情報：九州大学農学部演習林報告. 99, pp. 32-35, 2018-03. 九州大学農学部附属演習林
バージョン：
権利関係：

農耕地に囲まれた市街域とそれに隣接した森林域における大気沈着量の比較 —北海道足寄町における事例—

智和 正明^{*1}, 村田 秀介², 中村 琢磨²

観測地点の立地条件による大気沈着量の違いを評価するために、北海道足寄町内の市街域とその付近に位置する九州大学北海道演習林内の森林域でバルク降水を2016年5月から12月にかけて月2回ごとに採取し、降水量、イオン成分(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, H⁺, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺)濃度、沈着量を比較した。観測期間中の総降水量は森林域で1,236mm、市街域で1,121mmとなり、森林域で10%程度多かったが、過去9年間の年間降水量では必ずしも森林域で多くはなかった。バルク降水のイオン成分濃度は森林域でK⁺とMg²⁺が市街域よりもそれぞれ10%、20%程度高かったが、それ以外のイオン成分濃度は同程度だった。総降水量とイオン成分濃度を乗じて計算した総沈着量は、総降水量が森林域で10%程度多いために森林域で増加した。このことから、市街域の規模が小さい場合、主に人為起源と考えられているバルク降水中のNO₃⁻やSO₄²⁻の濃度に立地条件が与える影響は小さい。そのため、沈着量は観測地点における降水量によって違いが生じ得る可能性が考えられた。

キーワード：バルク沈着、立地条件、成分起源、レインアウト、長期モニタリング

To evaluate the effect of observation location on atmospheric deposition, bulk precipitation was collected twice a month at two places in Ashoro town: a city area and a nearby-forested area situated in Ashoro Research Forest, Kyushu University Forest. Amount and ion concentrations (Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, H⁺, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺) of bulk precipitation were determined during the period from May to December 2016. Total precipitation volume during the observation period at the nearby-forested area (1,236 mm) was higher than at the city area (1,121 mm). However, annual precipitation volume at the nearby-forested area was not always higher than at the city area over the past 10 years. Concentrations in bulk precipitation were almost the same for ions between the two sites except for K⁺ and Mg²⁺ that was 10% and 20% higher at the nearby-forested area, respectively. Total depositions of ions calculated from total precipitation volume and concentrations were higher at the nearby-forested area, corresponding to higher precipitation amount. In conclusion, the concentrations of anthropogenic-derived ions including NO₃⁻ and SO₄²⁻ in bulk precipitation are not affected by the observation location in a small city, while the depositions can be affected by precipitation amount at the observation location.

Keywords: bulk precipitation, observation location, sources of components, rainout, long-term monitoring

1. はじめに

近年、人間活動の影響で窒素酸化物や硫黄酸化物による大気汚染が全球レベルで進んでいる (Schlesinger and Bernhardt 2013)。特にアジアは欧米と比べてこれらの物質の排出量が急速に増加しているため (Akimoto 2003; Ohara *et al* 2007)、東アジアからの大気汚染物質の長距離輸送が顕在化しており (兼保ら 2010; Chiwa *et al* 2010)、森林生態系への悪影響が懸念されている (Aber *et al* 1989; Vitousek *et al* 1997)。このため、国内では酸性雨を中心とした大気沈着に関する広域的かつ長期的な調査が環境省や全国環境研協議会によって行われている (環境省 2002; 全国環境研協議会 2003)。さらに周辺各国における酸性雨の現状や越境汚染等を調査するために、東アジア酸性雨モニタリングネットワーク (EANET) が稼働している (原 2004)。

このように、大気沈着に関しては国内外の多地点で長期的観測が既に行われており、広域的な解析が行なわれている。しかしこのような広域的な解析は、大気沈着の観測地

点はその地域の代表値であるという前提で行われている。モニタリングは市街域で行なわれていることが多いものの、森林域でモニタリングされることもあり、立地条件が異なる場合がある。市街域では、市街地内での人為起源の放出が降水中の成分、特に硝酸イオン (NO₃⁻)、硫酸イオン (SO₄²⁻)、アンモニウムイオン (NH₄⁺) の沈着に影響を与える可能性がある。一方、森林域では、土壌や植物破片の飛来がマグネシウムイオン (Mg²⁺)、カルシウムイオン (Ca²⁺)、カリウムイオン (K⁺) の沈着に影響を与える可能性がある。したがって、大気沈着の解析においては、観測地点による立地条件 (市街地、森林域、農地など) を考慮する必要がある。しかし、そのような立地条件の違いが沈着量に与える影響を解析した研究事例はみあたらない。

さらに、大気沈着量の数十年にわたる長期モニタリングを行う場合は、観測地点の変更が行われることもある。観測地点間の距離に応じた降水量の分散の拡大 (葛葉ら 2001, 2002) や微地形 (Fowler *et al* 1989) は大気沈着量に影響を与える可能性があるため、そのような観測場所の変

Chiwa M., Murata S., Nakamura T.: A comparison of atmospheric deposition at a city area surrounded by agricultural areas and a nearby-forested area—a case study at the town of Ashoro

* 責任著者 (Corresponding author): E-mail: mchiwa@forest.kyushu-u.ac.jp 〒 089-3705 北海道足寄郡足寄町北5条1-85

¹ 九州大学大学院農学研究院環境農学部門森林環境科学講座

Division of Forest Environmental Sciences, Department of Agro-environmental Sciences, Faculty of Agriculture, Kyushu University

² 九州大学農学部附属演習林北海道演習林

Ashoro Research Forest, Faculty of Agriculture, Kyushu University

更による沈着量の違いを検討することは長期変動を解析する上でも重要になる。

本研究調査地である足寄町を含む十勝地方は農業活動、特に畜産活動が活発である。畜産活動が盛んな地域では、アンモニアガスの大気中への放出が増加するために、アンモニウムイオンの沈着量が増加することが報告されている(新藤ら, 2005; 横山, 2014)。アンモニアガスは発生源から数 km で沈着するため(野口・山口, 2009)、農耕地周辺の沈着量の算出は、その発生源の距離によってアンモニウムイオンの沈着量が異なる可能性がある。

そこで本研究は、北海道足寄郡足寄町を事例として取り上げ、足寄町内の農耕地に囲まれた市街域とその付近の森林域においてバルク降水を採取し、降水量、主要イオン成分濃度、沈着量を計測し、比較を行った。

2. 方法

2.1 調査地

観測は北海道道東部に位置する足寄郡足寄町で行った。足寄町の面積は約 1,408km² であり、人口は、2015 年 3 月末において 7,024 人(戸数 3543 戸)である(足寄町, 2015)。農林業が基幹産業であり、森林面積率は 77% である。市街地近傍の森林は農耕地で囲まれている(図 1)。市街域として、足寄町内の市街地に位置する九州大学農学部附属演習林北海道演習林(以下北海道演習林)事務所構内(43° 15'N, 143° 33'E; 標高約 100m)の水質観測用の事務所タワー上(高さ約 6m)で、森林域として市街域に隣接する北海道演習林の拓北流域(43° 20'N, 143° 31'E; 標高約 370m)の拓北タワー上(高さ約 15m)でバルク降水の採取(ロード常時開放型雨水採取)を行った。バルク降水を採取した事務所構内から森林域の拓北タワーまでの直線距離は約 10km である。

足寄町の過去 30 年間(1986 年～2016 年)の年間降水量は平均 849mm, 最小 606mm(2007 年), 最大 1168mm(2016 年)である。森林域においては拓北タワーにおいて転倒マス雨量計を用いて降水量の観測を行った。なお、観測値の立地・形状や風速等の気象条件によって降水量の捕捉損失が生じることが知られているが(山口ら, 2013)、本研究では捕捉損失の補正については行っていない。バルク降水を採取した事務所構内の付近には、国道 242 号線が南北に走っており、自動車交通量は 2010(平成 22)年度において 8,646 台/日である(北海道開発局 2015)。

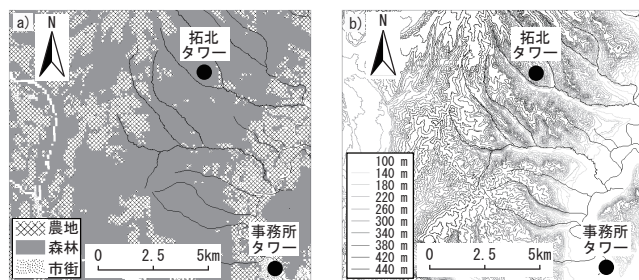


図 1 観測地点(拓北タワー, 事務所タワー) a), b) はそれぞれ土地利用図, 標高を示す。黒丸は観測地点を示す。

森林域の拓北流域の植生は、ミズナラ、ヤチダモ、ハルニレ、エゾイタヤが優占する落葉広葉樹林の天然生林である。本流域は、凝灰岩と頁岩の層の上に厚く(数十メートル)火山灰が堆積しており、表層土壌は主に適潤性黒色土壌である。

2.2 試料の採取と分析

バルク降水の採取には、加工した漬物タル(50 L 容量, 直径 50cm 高さ 40cm)を用いた。上部フタの中心部に穴を開け、洗浄済みのポリエチレン製のロート(直径 24cm)を取り付け、漬物タル内部に未開封のビニル袋を入れてバルク降水を採取した。さらに、6 月下旬から 10 月上旬にかけては羽アリのバルク降水への混入を防ぐために、洗浄済みのピンポン玉をロート口に取り付けた。また、11 月—12 月にかけては降雪を採取するために、ロートを取り付けず、上部フタの中心部に穴(直径 21cm)を開けてバルク降水を採取した。本バルク降水採取器の設置と回収は月 2 回の頻度で行った。バルク降水の回収は 2016 年 5 月から 2017 年 12 月まで行った。

採取した試料は事務所にすぐに持ち帰り、重量を計測後、100mL のポリエチレン瓶に共洗いをして移した。試料は原則として採取日に九州大学福岡演習林(福岡県糟屋郡篠栗町)に冷蔵輸送し、試料到着後、試料のろ過及び pH の計測を行った。pH の計測にはガラス電極(F-21, Horiba, Japan)を用いた。試料のろ過には蒸留水で前洗浄されたガラス繊維フィルター(GC-50, Avdantec, Japan)を用いて行い、陰イオン(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻), 陽イオン(Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺)を測定した。陰イオン・陽イオン成分の分析にはイオンクロマトグラフ(DX-120, Dionex, Osaka, Japan)を用いた。イオンクロマトグラフの分析条件については智和ら(2007)を参照されたい。ろ過試料は分析を行うまで冷蔵保存した。

3. 結果と考察

3.1 降水量

観測期間中の総降水量は森林域で 1,236mm, 市街域で 1,121mm となり、森林域で 10% 程度多かった(表 1)。しかし、森林域でのバルク降水の採水地点における転倒マ

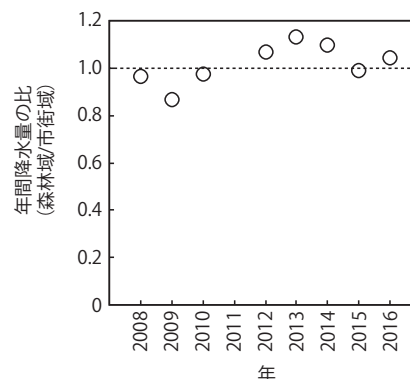


図 2 森林域(拓北タワー)と市街域(足寄町アメダス)における年間降水量の比の経年変化

表1 森林域（拓北タワー）と市街域（事務所タワー）におけるバルク降水の降水量（mm）、pH および主要イオン成分の降水量加重平均濃度（ $\mu\text{mol L}^{-1}$ ）

場所	降水量	pH	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
森林域 (n=14) (拓北タワー)	1,236	5.17	6.76	10.2	9.1	7.0	21.5	6.05	3.26	1.41	2.28
市街域 (n=14) (事務所タワー)	1,121	5.16	6.91	10.2	8.7	6.8	22.0	6.48	2.95	1.15	2.25
森林域 / 市街域	1.10	1.00	0.98	1.01	1.05	1.03	0.98	0.93	1.11	1.23	1.02

表2 森林域（拓北タワー）と市街域（事務所タワー）におけるバルク降水の沈着量（ mmol m^{-2} ）

場所	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
森林域 (n=14) (拓北タワー)	8.36	12.7	11.3	8.66	26.6	7.48	4.03	1.74	2.82
市街域 (n=14) (事務所タワー)	7.74	11.4	9.8	7.69	24.6	7.26	3.30	1.29	2.52
森林域 / 市街域	1.08	1.11	1.16	1.14	1.08	1.03	1.22	1.36	1.12

ス雨量計による降水量と北海道演習林事務所から直線距離で約 850m 離れたアメダス足寄町観測所（43° 15'N, 143° 33'E；標高 90m）における降水量を過去 9 年間（2008 年～2016 年，2011 年はデータ欠損のため除く）で比較すると，森林域では平均 879mm，足寄町市街域で平均 867mm となり，ほぼ同程度だった。なお，アメダスの観測地点と演習林事務所との距離は 850m しか離れていないため，本研究では両者の年間降水量は等しい（年間降水量の比が 1）と仮定している。また，2008 年から 2016 年における市街域に対する森林域の降水量の比（森林域 / 市街域）は必ずしも常に 1 以上ではなかった（図 2）。このことから，長期的には必ずしも森林域で降水量が市街域より多いわけではなかった。森林域の降水量が足寄町市街域の年間降水量よりも少なかった年（2009 年）と多かった年（2013 年）の変動要因を解析すると，2009 年は冬季（1 - 3 月，12 月）における降水量が森林域で少なく，2013 年は夏季（8 月）において森林域で多かった。

澤野ら（2005）は日本全域における市街域での年間降水量が 1575mm に対して，森林域での年間降水量は 1,901mm となり，20% 程度森林域で高く，土地利用の重要性を指摘している。一般的に降水量は標高とともに増加するため，高標高地域に位置している森林域の降水量は市街域よりも高くなる（澤野ら，2005）。本研究における市街域と森林域の標高差は約 300m 程度と小さいことから，降水量に大きな違いは生じなかったと考えられる。

3.2 成分濃度

主要イオン成分の降水量加重平均濃度の解析を行った結果，森林域における K⁺ と Mg²⁺ 濃度が市街域よりもそれぞれ 10%，20% 程度高かったが，それ以外の成分は同程度あるいは若干市街域で高い値であった（表 1）。バルク降水中の K⁺，Mg²⁺ 濃度が森林域で高い値を示したのは，これらの成分に土壌や植物由来の起源が一部に含まれるためと考えられる。

市街域と約 3 km 程度離れた森林域のバルク降水濃度を

解析した広島県廿日市市における研究事例では，市街域において NO₃⁻，SO₄²⁻ 濃度がそれぞれ 30%，25% 程度高い傾向を示した（Chiwa *et al* 2003）。その原因として，降雨中に大気中の物質が雨滴中に取り込まれるレインアウト（Schlesinger and Bernhardt 2013）が考えられる。本研究で市街域とその付近の森林域でこれらの濃度に違いがみられなかったのは，市街域の規模が小さいために人為起源の汚染物質の排出量が比較的小さく，市街域でのレインアウトの効果が小さかった可能性が考えられる。

主に土壌由来成分と考えられる Ca²⁺ のバルク降水濃度は森林域で必ずしも高くならなかった（表 1）。この原因は，市街域である事務所構内から南東方向に約 200m の場所にコンクリート工場（面積 約 1 ha）があり，Ca²⁺ が一部飛来したために，市街域のバルク降水中の Ca²⁺ を若干高めている可能性が考えられる。Ca²⁺ 濃度を高めるその他の原因として凍結防止剤からの Ca²⁺ の沈着が考えられるが，本研究の採取期間は 5 月 - 12 月であり，凍結防止剤の使用期間が限られている。今後，季節変化による違いを解析することが必要である。

3.3 沈着量

降水量と降水量加重平均濃度を乗じた主要イオン成分の沈着量を表 2 に示す。降水量が森林域で 10% 程度高いために，その割合に応じて沈着量も増加した。Mg²⁺，K⁺ は森林域で濃度が高かったために，降水量を乗じることで沈着量ではさらにその差が大きくなり，森林域での Mg²⁺，K⁺ 沈着量がそれぞれ 35%，20% 程度高い値を示した（表 2）。本研究サイトにおける窒素沈着量（NO₃⁻ + NH₄⁺）は 2016 年 5 月～12 月の期間において森林域と市街域でそれぞれ 18.8，17.1 mmol m^{-2} となり，これらの値を札幌（49.6 $\text{mmol m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ ）や利尻（31.0 $\text{mmol m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ ）の湿性沈着量（野口・山口，2010）と比較すると，本研究では採取期間が短いことを考慮しても，比較的低い値であった。

本研究の結果から，市街域の規模が小さい場合，観測地点による立地条件の違い（市街域や森林域）がバルク降

水濃度に与える影響は主に人為起源と考えられる NO_3^- や SO_4^{2-} に関しては小さかった。本観測期間中における森林域と市街域との総降水量の違いは 10% 程度であり過去 10 年間の観測データの中では大きい値であった。このために沈着量が 10% 程度森林域で多かった。したがって、市街域の規模が小さい場合、森林域と市街域のバルク降水の沈着量に影響を与える要因として森林域と市街域の降水量の違いが重要であると考えられた。

謝辞

本研究の執筆にあたり、地図の作成補助をしていただいた篠塚賢一氏に御礼申し上げます。本研究の一部は、九州大学 3 演習林共通課題プロジェクト（水質モニタリング）および文部科学省科学研究費補助金 17H03833（代表：智和正明）の助成を受けて行われた。

引用文献

- Aber JD, Nadelhoffer KJ, Steudler P, and Melillo JM (1989) Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *Bioscience* 39: 378-386
- Akimoto, H (2003) Global air quality and pollution. *Science* 302: 1716-1719
- 足寄町 (2015) 町勢要覧. 足寄町.
- Chiwa M (2010) Characteristics of atmospheric nitrogen and sulfur containing compounds in an inland suburban-forested site in northern Kyushu, western Japan. *Atmos Res* 96: 531-543
- Chiwa M, Kim DH, Sakugawa H (2003) Rainfall, stemflow, and throughfall chemistry at urban- and mountain-facing sites at Mt. Gokurakuji, Hiroshima, western Japan. *Water Air Soil Pollut* 146: 93-109
- 智和正明・井手淳一郎・扇大輔・田代直明・古賀信也・柴田英昭・佐藤冬樹・大槻恭一 (2007) 北海道演習林及び福岡演習林における降水、渓流水中の化学成分の特徴. *九大演報* 88: 33-43
- Fowler D, Cape JN, Unsworth MH, Mayer H, Crowther JM, Jarvis PG, Gardiner B, Shuttleworth WJ (1989) Deposition of atmospheric pollutants on forests. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 324: 247-265
- 原 宏 (2004) 東アジア酸性雨モニタリングネットワーク. *大気環境学会* 40: A 1-A15
- 北海道開発局 (2015) 一般国道 241 号・242 号足寄道路事後評価結果準備書説明資料
- 兼保直樹・高見昭憲・佐藤 圭・畠山史郎・林 政彦・原圭一郎, Chang Lim-Serok, Ahn Joon-Young (2010) 九州北部における春季の高濃度 PM2.5 と長距離輸送. *大気環境学会誌* 45: 227-234
- 環境省 (2002) 第 4 次酸性雨対策調査取りまとめ. 62. pp
- 葛葉泰久・友杉邦雄・岸井徳雄 (2001) 降水量データの代表性. *水文水資源学会誌* 14: 461-471
- 葛葉泰久・友杉邦雄・岸井徳雄 (2002) 降水量の空間相関構造. *水文水資源学会誌* 46: 127-132
- 野口泉・山口高志 (2010) 大気からの窒素成分沈着. *地球環境* 15: 111-120
- Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, Horii N, Yamaji K, Yan X, Hayasaka T (2007) An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020. *Atmos Chem Phys* 7: 4419-4444
- 澤野真治・小松光・鈴木雅一 (2005) 森林における年降水量の農地・都市域との違い—日本全域を対象として—. *水文・水資源学会誌* 18: 435-440
- Schlesinger and Bernhardt (2013) *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change (Third Edition)*. Elsevier
- Vitousek PM, Aber JD, Howarth RW, Likens GE, Matson PA, Schindler DW, Schlesinger WH, Tilman DG (1997) Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences. *Ecol Appl* 7: 737-750
- 山口弘誠・中北英一・野中理伸 (2013) 9m2 巨大雨量計の開発による地上雨量計の捕捉率の評価. *土木学会論文集 B 1 (水工学)* 69: I_307-I_312
- 全国環境研協議会 (2003) 第 3 次酸性雨全国調査報告書 (平成 11 ~ 13 年度まとめ). *全国環境研会誌* 28: 126-185

(2017 年 9 月 24 日受付：2018 年 1 月 31 日受理)