

スギ林における海洋起源成分の沈着量の推定

金子真司 (森林総研)

要旨：京都市のスギ林における降雨、林内雨、渓流水の7年間のモニタリングデータを用いて、森林生態系への海塩の湿性・乾性沈着量およびその影響について調べた。降雨ではナトリウムイオン(Na^+)と塩化物イオン(Cl^-)の濃度に相関関係が認められ、 Cl^-/Na^+ 比は降雨では海水の比率とほぼ同じであった。林内雨では Na^+ と Cl^- の濃度は降雨に比べて高く、両者に相関関係が認められたものの Cl^-/Na^+ 比は1.823と Na^+ が Cl^- に対して相対的に少なかった。物質収支から Cl^- の湿性沈着量、乾性沈着量はそれぞれ $34.3\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ 、 $56.9\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ と推定された。林内雨で Na^+ が少ない理由として降雨が樹冠を通過する際に樹体中の成分とイオン交換が生じているためと推察した。

キーワード：降雨、海塩粒子、湿性沈着、乾性沈着

I. はじめに

島嶼であるわが国では降雨中の成分の約半分は海水起源である(2)。このため、わが国の河川は世界の河川に比べて溶存成分における Na^+ と Cl^- の割合が高く(6)、渓流水中の Cl^- 濃度は大陸内陸部に比べて高いことが、東アジアの森林流出水の水質調査においても明らかにされている(12)。降雨中の化学成分は海塩粒子を主体とするエアロゾルに由来し(19)、降雨の塩化物イオン(Cl^-)はそのほとんどが海水起源である(19)。降雨中のナトリウムイオン(Na^+)も Na^+/Cl^- からほとんどは海水起源と推定されている(5, 15, 19)。森林は海洋からの風送塩(海塩粒子)を捕捉する機能をもつことが知られている。菅原・半屋は三重県菅島における流水中の Cl^- 濃度が、裸地区に比べて樹木の繁茂する地区において著しく高いことから、樹木が風送塩を大量に捕集する事実を示した(16, 17, 18)。また仲川らは林冠が閉鎖した流域から流出する渓流水は林冠の閉鎖が不十分な流域に比べて渓流水中の Cl^- 濃度が高いことを明らかにした(13)。以上、わが国の降雨は海洋の影響を強く受け、森林へ流入する Na^+ や Cl^- はそのほとんどが海洋由来であり、風によって運ばれる海塩粒子の捕集に森林が大きな役割を果たしている。

陸上生態系および淡水生態系において循環する塩化物イオン(Cl^-)の大半は海水起源であり、岩石からの風化によって供給される Cl^- はごくわずかである(1)。そこで流域における Cl^- 収支から Cl^- の湿性や乾性の沈着

量が推定可能と考えられる。降雨が樹冠を通過する際に、樹体に付着した乾性沈着物の洗脱、降雨中の窒素化合物などの成分の葉面吸収、さらには樹体中成分の溶脱が起こる(7, 8, 10)。 Cl^- は植物の必須栄養素であるが、森林生態系において不足することはなく流入や流出に比べ系内での変化量は小さい特徴をもつ(9)。そこで、酸性雨モニタリングのデータに基づき、森林への海洋起源物質の沈着量を明らかにし、その影響について検討した。

II. 方法

京都府京都市安祥寺山国有林(135° 49' E, N35° 0' , 標高150m)において1995-2002年の期間に観測した降雨、林内雨、渓流水質データである。林内雨は45年生(1995年当時)のスギ林で観測されたものである。試験地や試料の採取方法の詳細は(14)に記載されている。これらデータは森林総合研究所の研究プロジェクトとして観測してきたもので、現在は森林総合研究所ホームページ上でデータが公開されている(4)。データベースでは濃度は1リットルあたり質量($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)で示されているが、本研究ではイオンバランスを比較するため各成分濃度は当量濃度($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)に変換した。降雨、林内雨による年成分流入量は、すべてのデータを用いて年加重平均値を計算し、この値に年降水量あるいは年林内雨量を乗じて求めた。溪流への年成分流出量は年流出水量に渓流水の年成分単純平均値を乗じて求め

た。年流出水量は、服部(1992)の記述(3)を参考に観測地の年蒸散量を750mmと仮定し、現地で降雨の測定値からこの値を差し引き求めた。

III. 結果

降雨中のNa⁺とCl⁻はR²が0.9145の高い相関が認められた。両者の近似線の傾きはCl⁻/Na⁺=1.24であり、海水中の比率(1.17)とほぼ等しかった(図-1)。林内雨のNa⁺とCl⁻の場合もR²=0.9035の高い相関が認められたが、近似線の傾きはCl⁻/Na⁺=1.823であ

り、降雨に比べてCl⁻の割合が相対的に高かった(図-2)。降雨中の各成分の年加重平均濃度を林内雨のそれを比較すると、プロトン(H⁺)以外の成分は林内雨で濃度が高かった。フラックスに関しても林内雨量は降雨量よりも少ないため、年流入量では降雨に対する林内雨の比率はやや低かった(表-1)。溪流へのフラックスはH⁺とNH₄⁺以外の成分は降雨よりも大きく、林内雨に比べるとNa⁺、Mg²⁺、Ca²⁺がそれぞれ4.7、3.2、2.8倍と大きく、SO₄²⁻は1.7倍であり、Cl⁻、NO₃⁻は1.2、1.0倍とほぼ等しかった。

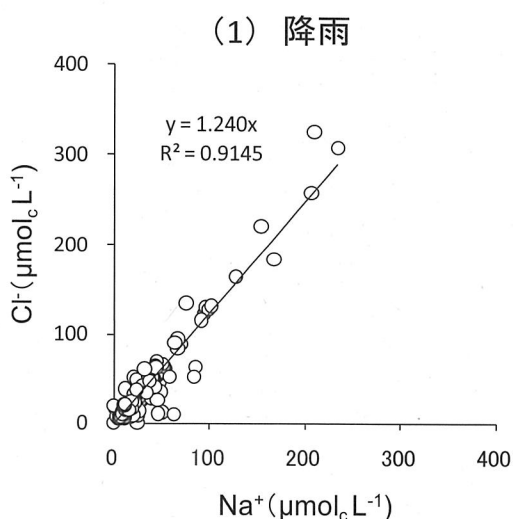


図-1. 安祥寺山国有林スギ林における降雨のNa⁺濃度とCl⁻濃度の関係(破線は海水の濃度比:Cl⁻/Na⁺=1.17)。

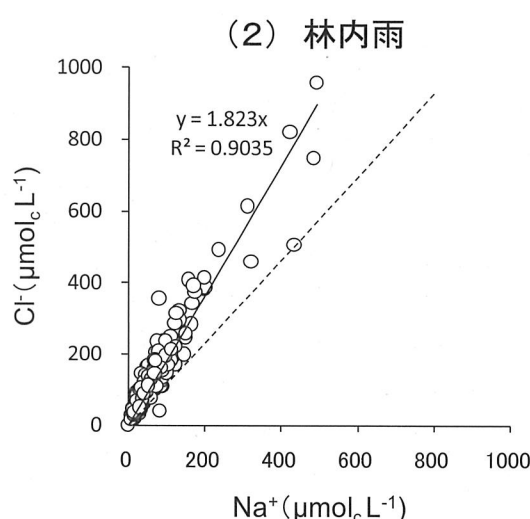


図-2. 安祥寺山国有林スギ林における林内雨のNa⁺濃度とCl⁻濃度の関係(破線は海水の濃度比:Cl⁻/Na⁺=1.17)。

表-1 安祥寺山国有林スギ林における降雨、林内雨、溪流の各成分のフラックス(平均±標準偏差:単位mmol_c m² yr⁻¹)

Type	H ⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Rain	26.8±7.8	32.8±8.1	8.2±3.2	19.5±7.9	32.9±12.6	11.4±4.4	34.3±5.5	21.6±7.1	49.8±8.7
Throughfall	11.6±6.0	40.7±5.8	49.8±11.6	26.6±7.3	81.7±9.0	33.1±3.7	77.8±13.3	52.6±11.1	66.2±11.7
Streamwater	0.0±0.0	192.2±47.7	18.5±5.0	3.4±1.4	231.7±51.0	107.0±25.5	91.2±27.4	51.5±12.1	109.8±26.4

IV. 考察

降雨のNa⁺とCl⁻の濃度比は海水に近いことはこれまでに多く報告されており(5, 15, 19), 今回も降雨中のNa⁺、Cl⁻濃度の関係は両者の近似線の傾きが

Cl⁻/Na⁺=1.24と海水中の比率(1.17)(11)にほぼ等しかった(図-1)。一般に降雨中のCl⁻はそのほとんどが海水起源と考えられている(19)。安祥寺山国有林の降雨のNa⁺とCl⁻はほとんどが海水起源とみてよいである

う。林内雨中の Na^+ と Cl^- 濃度は降雨に比べて高く、フラックスでも林内雨の方が大きいことは、降雨が樹冠を通過する際に Na^+ と Cl^- が増加することを示している(表-1)。樹木の Cl^- 含有量や樹体からの Cl^- 溶脱に関する情報は少ないが、 Cl^- は森林生態系において不足することはなく流入や流出に比べ系内での変化量は小さく(9)、一般に樹冠からの溶出はないと考えられている(8)。わが国の陸上植物の葉を対象に中性子放射化分析によって調べた元素濃度データ集(20)には Cl^- の分析値が掲載されている。その中からスギ葉の分析結果を選び、主要成分の平均濃度を計算したところ、 Cl^- 濃度($62 \mu\text{mol}_c \text{g}^{-1}$)は Na^+ 濃度($10 \mu\text{mol}_c \text{g}^{-1}$)に比べて高かった。降雨が樹冠を通過する際の成分濃度の上昇は、樹体に付着した乾性沈着成分の洗脱や樹体からの溶脱によって生じることが報告されているので(7)。林内雨の Cl^- 濃度はスギ葉からの溶脱によって生じている可能性もある。樹体から溶脱する成分は樹木が生長の過程で樹体中に吸収したものであるため、樹体からの溶脱が多い成分は内部循環の割合が高い成分であり、林内雨のフラックスが大きい特徴がある。実際に内部循環の割合が高い K^+ では林内雨のフラックス($49.8 \text{mmol}_c \text{m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)が、溪流のフラックス($18.5 \text{mmol}_c \text{m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)に比べて大きい(表-1)。それに対して Cl^- は林内雨のフラックスが溪流のフラックスよりやや少なく、樹体から Cl^- の溶脱がわずかであることを意味している。そこで Cl^- の溶脱を0とみなし、降雨のフラックスを湿性沈着量、林内雨と降雨のフラックスの差を乾性沈着量とすると、表-1から Cl^- の湿性沈着量、乾性沈着量はそれぞれ 34.3 、 $43.4 \text{mmol}_c \text{m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ と計算される。林内雨のフラックス($77.8 \text{mmol}_c \text{m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)は、溪流のフラックス($91.2 \text{mmol}_c \text{m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)よりやや少ない。林床から渓流水として流出までの経路において Cl^- の増減が無いと仮定すると、この不足分は樹幹流によって樹体から洗脱される Cl^- 乾性沈着物であると推定される。そこで溪流と降雨の Cl^- のフラックスの差($56.9 \text{mmol}_c \text{m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)を Cl^- 乾性沈着量と考えると、乾性沈着は湿性沈着の約2倍となる。多賀・那須もわが国の河川中の成分濃度を計算する際に、降下物(乾性沈着)が降水(湿性沈着)の2倍と仮定しており(19)、今回の結果は概ね妥当と判断される。

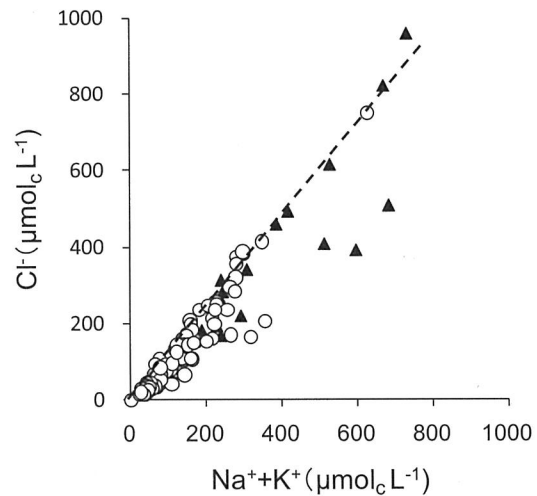


図-3 林内雨中の Na^+ と K^+ の合計濃度と Cl^- 濃度の関係 (▲ $\text{TF} < 10\text{mm}$, ○ $\text{TF} \geq 10\text{mm}$, 破線は 海水の濃度比: $\text{Cl}^- / \text{Na}^+ = 1.17$).

陸上生態系および淡水生態系において循環する塩化物イオン(Cl^-)の大半は海水起源と考えられている(1)。わが国の河川中の Cl^- の起源についても、大気から運ばれる Cl^- は湿性・乾性とも海水起源と考えられる(6)。そこで安祥寺山国有林の Cl^- の湿性と乾性沈着物も海水起源であるなら、林内雨の $\text{Cl}^- / \text{Na}^+$ は海水の比率に近くなるはずである。しかし林内雨の $\text{Cl}^- / \text{Na}^+$ は1.823と海水に比べて Cl^- の割合が高かった(図-2)。そこで降雨が樹冠を通過する際に何らかの理由で Na^+ が減少したと考えられる。 Na^+ は Cl^- と対になっているので、 Na^+ の減少は他の陽イオンの増加によって補われている。そのことから降雨が樹冠を通過する際に、 Na^+ と樹体中の成分との間でイオン交換が起こると推定した。降雨に比べて林内雨では K^+ 濃度が高い上、 K^+ は Na^+ と同じ1価の陽イオンであるので、 Na^+ は樹体中の K^+ とイオン交換すると推察した。イオン交換では等量のイオンが入れ替わるので Na^+ と K^+ の含量は初めの Na^+ 量と等しい。そこで林内雨中の Na^+ と K^+ の合計の濃度と Cl^- 濃度を比較したところ、両者に $R^2 = 0.987$ の高い相関関係が認められた(図-3)。林内雨量が10mm以上の場合に限れば Na^+ と K^+ の合計の濃度と Cl^- 濃度は海水中の $\text{Cl}^- / \text{Na}^+$ 比に近かった。この結果は Na^+ と K^+ のイオン交換が起きているという仮定と矛盾しない。樹冠におけるイオン交換がどのように生じるかは明らかでないが、

安祥寺山国有林のスギ林では枯れた枝葉がすぐに落葉せず樹体に長い間付いていることが観測されているので、この枯れた枝葉がイオン交換の主体になっている可能性が高い。

V. おわりに

今回の研究から森林が海洋由来成分に関し湿性の約2倍の乾性沈着が負荷されていると推定された。また樹冠において降雨成分と樹体との間でイオン交換が起きていることが示唆された。イオン交換のメカニズムは不明な点が多いので、さらに検討する必要がある。

引用文献

- (1) GRAEDEL, T.E. and KEENE, W.C. (1996) The budget and cycle of Earth's natural chlorine. *Pure Appl. Chem.* **68**:1689-1697.
- (2) HARA, H., KITAMURA, M., MORI, A., NOGUCHI, I., OHIZUMU, T., SETO, S., KAKEUCHI, T. and DEGUCHI, T. (1995) Precipitation chemistry in Japan 1989-1993. *Water Air Soil Pollut.* **85**:2307-2312.
- (3) 服部重昭 (1992) 林況と蒸発散量の関係。(森林水文学. 塚本良則編, 319pp. 文永堂出版, 東京). 96-102pp.
- (4) 稲垣昌宏・池田重人・金子真司・高橋正通 (2008) 森林降水溪流水質データベース (FASC-DB) の構築. *森林科学* **54**:53-55
- (5) 岩坪五郎・仲川康則 (1999) 水系における水・物質循環系の変化。(水・物質循環系の変化. 和田英太郎・安成哲三編, 348pp., 岩波書店, 東京). 197-228pp.
- (6) 小林純 (1961) 日本の河川の平均水質とその特徴に関する研究. *農学研究* **48**:63-106.
- (7) LOVETT, G.M. (1992) Atmospheric deposition and canopy interactions of nitrogen p.152-166 In *Atmospheric deposition and forest nutrient cycling.* (eds. Johnson DW and Lindberg SE) 707 pp., Springer-Verlag, New York.
- (8) LOVETT, G.M. and HUBBELL, J.G (1991) Effects of ozone and acid moist on foliar leaching from eastern white pine and sugar maple. *Can. J. For. Res.* **21**:794-802
- (9) LOVETT, G.M., LIKENS, G.E., BUSO, D.C., DRISCOLL, C.T. and BAILEY, S.W. (2005) The biogeochemistry of chlorine at Hubbard Brook, New Hampshire, USA. *Biogeochemistry* **72**:191-232.
- (10) LOVETT, G.M., LINDBERG, S.E., RICHTER, D.D. and JOHNSON, D.W. (1995) The effect of acidic deposition on cation leaching from three deciduous forest canopy. *Can. J. For. Res.* **15**:1055-1060.
- (11) 文部省国立天文台編 (2000) 理科年表 CD-ROM 2000, 丸善株式会社, 東京.
- (12) NAKAGAWA, Y. and IWATSUBO, G. (1999) Extensive study on forest runoff water chemistry over East Asia. *J. For. Res.* **4**:115-123.
- (13) 仲川泰則・徳地直子・西村和雄・岩坪五郎 (1995) 森林流出水の水質特性に関する広域比較. 京大演習林報告 **67**:45-501.
- (14) 金子真司・荒木誠・古澤仁美・後藤義明・服部重昭・平野恭弘・井鷲裕司・伊東宏樹・加茂皓一・清野嘉之・小林忠一・小南裕志・深山貴文・南部桂・西本哲昭・竹内郁雄・玉井幸治・千葉幸弘・鳥居厚志・吉岡二郎 (2004) 酸性雨等の森林生態系への影響モニタリングー関西スギ林における酸性降下物一. *森林総研報告* **3**:277-296.
- (15) 金子真司・松浦陽次郎 (1992) 沿岸地域における雨水中のイオン濃度と沿岸線からの距離の関係. *日林論* **103**:245-247.
- (16) 菅原健・半谷高久 (1948) 菅島の地球化学的研究. 第1報. *日本化学雑誌* **69**:169-170.
- (17) 菅原健・半谷高久 (1950) 菅島の地球化学的研究. 第2報. *日本化学雑誌* **71**:52-54.
- (18) 菅原健・半谷高久 (1950) 菅島の地球化学的研究. 第3報. *日本化学雑誌* **71**:20-125.
- (19) 多賀光彦・那須淑子 (1998) 地球の化学と環境 (第2版), 219pp., 三共出版, 東京.
- (20) 高田実弥・高松武二郎・佐竹研一・佐瀬裕之 (編) (1994) 陸上植物葉の元素濃度—中性子放射化分析データ集 I —. 国立環境研究所, 260pp., つくば.