

森林内外での浮遊粉塵の挙動

片山 幸士・山下 洋*・石丸 優**・青木 敦***

Behavior of Airborne Dust upper and beneath a Canopy

Yukio KATAYAMA, Hiroshi YAMASHITA, Yutaka ISHIMARU and Atsushi AOKI

要 旨

降水に比べて、樹冠通過雨や樹幹流の物質濃度が高くなることの原因の1つは、樹冠部や樹幹表面に付着した粉塵の洗いだしである。そこで滋賀県大津市の東南部にある桐生調査地の森林の内外で浮遊粉塵を採取し、その挙動について検討した。

林外での浮遊粉塵濃度は、春先から夏にかけて高くなり、この期間は中国からの黄砂の強い影響を受けていた。林外と林内の大気中の浮遊粉塵濃度は、林外で常に高く、林外、林内でほぼ平行に変動していた。林外と林内での濃度変化から、多いときには約70%が、平均して林外の約30%の浮遊粉塵が樹冠部で捕集されていることが判明した。樹冠部で浮遊粉塵はその粒径に関係なくほぼ一様に捕集されていた。また、林内の大気中の元素濃度は林外より低かった。したがって、浮遊粉塵量についても、また、それに含まれる元素についても、林内の大気中では林外より減少しており、樹冠部や樹幹表面で捕集されていることが判明した。

1. は じ め に

降水に含まれる物質濃度に比べて、森林内の樹冠通過雨や樹幹流での濃度が高くなることはよく知られている。この原因としては、樹体表面での濃縮、樹体からの溶脱、および樹体に捕集された大気浮遊粉塵の洗いだしが考えられる。このうち浮遊粉塵は降水とともに森林へ物質を流入する媒体の1つである。浮遊粉塵は降水時には雨とともに森林へ降下し、また降水のない場合にもその一部は dry fallout として森林に流入し、その大部分は樹体に捕集される。したがって、森林生態系での物質循環を考える際、浮遊粉塵の役割は大きい。

ところで、森林での浮遊粉塵に関する研究は、その挙動が非常に複雑なため遅れているのが現状である。これまでに行われた測定方法としては、風洞を用いたもの¹⁾、胞子や花粉を飛ばして浮遊粉塵の挙動を推定する方法^{2,3)}、あるいは樹冠の近くにペトリ皿等においてその沈着量から葉の捕集量を求める方法⁴⁾などがある。しかし、いずれも森林における実測値としての十分な評価はできていない。森林の内外の降下物量から、森林への物質移入を調べることは行われてきたが、

*現在大阪府立島上高等学校 (at present Osaka Prefectural Shimakami High School)

**京都府立大学農学部 (Kyoto Prefectural University, Faculty of Agriculture)

***京都府立大学生生活科学部 (Kyoto Prefectural University, Faculty of Living Science)

林内での降下量の増加が、樹体からの溶脱によるものか、あるいは捕集された浮遊粉塵の洗いだしが関与しているのかは明確になっていない^{5,6,7)}。この点については吉田⁸⁾が解決の方向を提示している。

本稿では、森林の内外で浮遊粉塵を採取し、内外での大気中の浮遊粉塵濃度、元素濃度、捕集される際の粒径の選択性などを調べ、樹冠部による遮断効果について検討した。

2. 実 験

2. 1 調査地と試料

1978年5月から1980年9月までの2年4カ月間、浮遊粉塵の採取を滋賀県大津市の東南部にある桐生調査地⁹⁾で行った。林外での浮遊粉塵の採取は以下の通りである。調査地内に鉄塔を設け、樹冠層の1.5m上方にローボリュームエアーサンプラーのホルダーを取り付け、ビニールホースを通し、昼夜連続してポンプで吸引、通過した空気量をガスメータで測定した。なお、エアーサンプラーには直接雨があたらないように覆いを施した。林外と同様の装置を林床から1.5mのところに設置して林内の浮遊粉塵を採取した。フィルターにはミリポアろ紙（直径47mm、孔径0.8 μm ）を用い、2～4週間毎に取り替えた。浮遊粉塵量は取り替え前後のミリポアろ紙の重量変化から求めた。平均吸引速度は林外で10.8 ℓ/min 、林内で12.7 ℓ/min であった。

2. 2 微量元素の定量

浮遊粉塵を採取したミリポアろ紙を直径16mmにくり抜き、微量元素分析用試料に供した。試料に、京都大学原子炉実験所または立教大学原子力研究所の原子炉で熱中性子を照射し、冷却後、 γ 線スペクトロメトリイを行って微量元素を定量した^{10,11)}。

3. 結果と考察

3. 1 林外・林内大気中の浮遊粉塵濃度

林外と林内での大気中の浮遊粉塵濃度を、降水量とともにFig. 1に示す。林外の大気中の浮遊粉塵濃度は測定期間中、13.2～69.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ の範囲にあり、林内では10.7～49.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。大気中の浮遊粉塵濃度に影響を与える要因としては、測定点の立地条件、黄砂などを伴う季節風の有無、一時的な土壌粒子の舞い上がり等が考えられる。例えば、都市部および重工業地帯での大気中の浮遊粉塵濃度は、Mamuro¹²⁾、青木^{13,14)}によると55～91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ である。これに比べると、桐生調査地の林外での測定値は各年とも5月前後を除くと50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下であった。桐生調査地が、重工業地帯や人口密集地域から離れた都市近郊の農村地帯に隣接した山地にあることを考えれば、測定された値は妥当なものといえる。今回の測定期間を通じて毎年5月頃の測定値が、51.3、69.1および63.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と高いのは中国からの黄砂の影響を受けた結果である。この時期には、京都市においても浮遊粉塵が増えていることは肉眼によっても確認できた。さらに、田中¹⁵⁾によると、黄砂現象時の春、長崎、岡山、新潟、横浜などで、大気中の浮遊粉塵濃度が100～200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ にもなっていたと報告している。

浮遊粉塵濃度は林外と林内でほぼ平行に変動している。すなわち、林外濃度が大きくなれば林内でも増大し、林外で小さくなれば林内濃度も減少している。また、濃度の大小にかかわらず、林外の浮遊粉塵濃度は林内に比べて常に高い。林外と林内の濃度比を採取期間毎に求めると、0.32～0.97の範囲にあり、平均値は0.72である。したがって、平均して約30%、多いときには約

70%の浮遊粉塵が樹冠部を通過することによって枝葉や樹幹表面に捕集されていたことになる。樹冠部での浮遊粉塵の捕集は、常緑、落葉、針葉、広葉などの樹木の種類や葉面積によって影響を受けるであろう。しかし、森林の存在が浮遊粉塵の遮断を効果的に行っていることは明らかである。また、先述した樹冠通過雨や樹幹流中での物質濃度が降水より大きくなることは、樹体からの溶脱に加えて、これらの捕集された浮遊粉塵の洗い落としにあることが確認された。とくに、1979年、1980年のいずれも3月から7月にかけて浮遊粉塵濃度が高くなっていたことは、同じ桐生試験地で調査した、黄砂とともに飛来すると考えられるBHCの降下量が、寒冷期である11月から3月に比べると5倍以上になっていたこととよく対応している⁹⁾。

大気中の浮遊粉塵濃度はその発生源や気象条件の影響を受ける。Fig. 1に示した降水量と浮遊粉塵濃度の間には、ある程度の関連が認められる。すなわち、浮遊粉塵採取期間中の降水量が前の期間より大きくなれば粉塵濃度は減少し、降水量が小さくなれば逆に濃度は増大している。このことは降水によるwash outの結果である。しかし、1978年8月、1979年3月、および1980年2月などに認められるように、降水量と浮遊粉塵濃度が平行に変化した期間も観測された。この点については降雨日数や降雨強度などの他の条件を考慮して解析する必要がある。

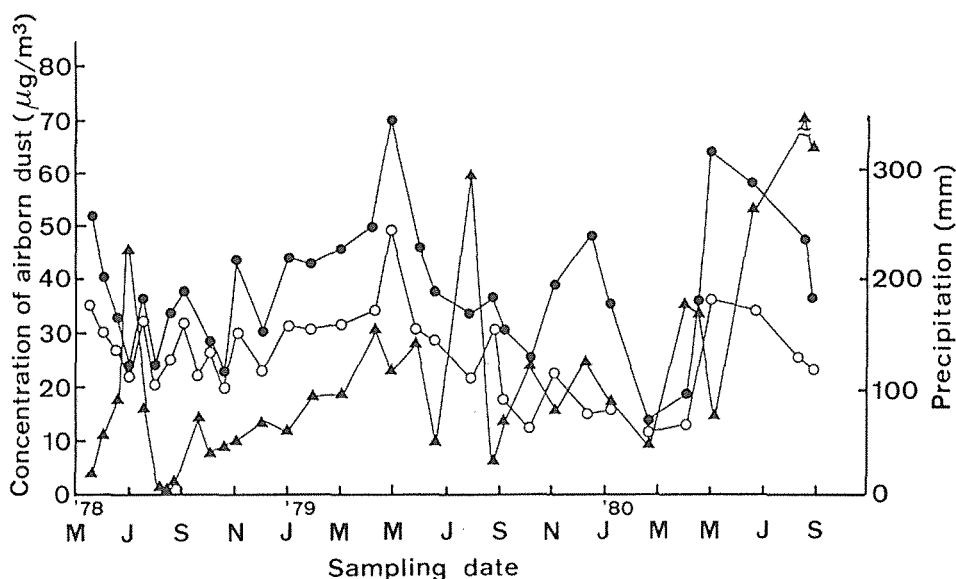


Fig. 1 Seasonal changes in concentration of airborne dust in air upper (●) and beneath (○) a canopy, and precipitation (▲).

3. 2 林外・林内大気中の元素濃度

熱中性子放射化分析法によって得た粉塵に含まれる元素量と空気の吸引量から、林外の大気中の元素濃度を求め、その一部の元素と浮遊粉塵濃度の季節変化をFig. 2に示した。

林外の大気中のNa, Ca, MnおよびVのそれぞれの濃度は、オーダーを異にするが、年間を通じてほぼ一様で、粉塵濃度の変動と平行であった。このことは、大気中の元素濃度の変動は浮遊粉塵量に依存していることを表している。林外と林内の大気中のNa, MnおよびVの濃度をFig. 3に示した。各元素とも林内濃度は林外のそれより低かった。浮遊粉塵濃度が林外に比べて林内で低くなっていたことはFig. 1に示した通りである。この2つの結果は、浮遊粉塵

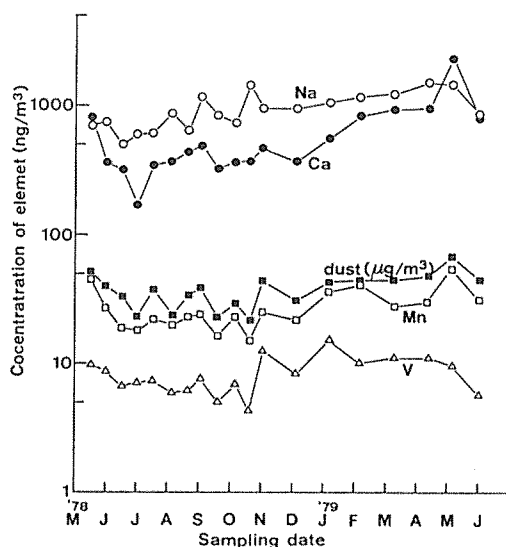


Fig. 2 Concentration of element and airborne dust in air upper a canopy.

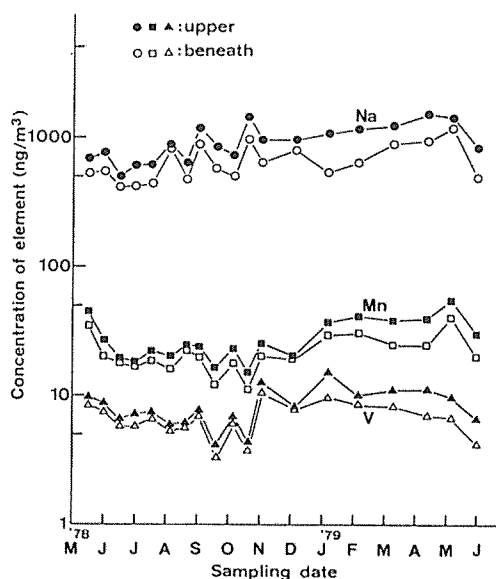


Fig. 3 Concentration of element in air upper and beneath a canopy.

Table 1 Concentration of airborne dust in air upper and beneath a canopy (ng/m³)

	Upper			Beneath			Reference	
	Min.	Max.	Av.	Min.	Max.	Av.	Min.	Max.
Al	226	3170	835	121	2150	496	50	2370
Br	2.74	20.1	8.79	2.26	12.2	5.73	3	40
Ca	123	3210	619	57	1660	374	100	5300
Ce	0.31	3.81	1.05	0.22	1.93	0.58	—	—
Co	0.12	0.71	0.35	0.05	0.57	0.24	0.09	2.0
Cr	2.41	12.4	5.11	1.47	45.0	5.76	5	60
Cs	—	0.51	0.15	0.03	0.41	0.10	0.4	20
Fe	200	2090	646	120	1380	399	100	13000
La	0.15	2.20	0.55	0.05	1.29	0.31	—	0.8
Mg	47	1190	363	51	850	213	—	2000
Mn	14.7	55.0	28.4	4.9	40.0	19.3	7	560
Na	335	1670	973	170	1220	583	300	1070
Sb	1.65	10.7	3.80	0.96	7.55	2.81	0.5	44
Sc	0.03	0.64	0.14	0.02	0.41	0.08	0.1	4.0
Se	0.07	0.51	0.25	0.05	0.45	0.23	0.3	20
Sm	0.02	0.31	0.08	0.01	0.18	0.04	—	0.2
Th	—	0.64	0.13	—	0.38	0.08	0.02	6.0
Ti	8.4	710	159	20.6	372	118	—	—
V	3.8	15.0	8.1	1.3	11.4	5.7	3	80

が樹冠部を通過するとき、量的な変化は受けるが元素の化学組成、いいかえれば質的には大きな影響を受けていないことを示唆しているようである。この点に関しては後節でさらに詳細に検討する。

森林内外の大気中の元素濃度の最小値、最大値および平均値を、文献値¹⁶⁾とともに Table 1 に示した。文献値には農漁村、大工業地帯および窯業地帯に近い住宅地の大気中での測定結果のうち、最小値と最大値を記した。林外の平均濃度と文献値を比較すると、いずれの元素も文献値に引用した最大値より低い値を示している。この結果は桐生調査地の立地条件を考慮すると妥当なものである。各元素濃度の最大値/最小値は、林外、林内とも数~20倍程度であり、測定期間を通じてかなり変動している。Fig. 3 に示した Na, Mn および V と同様、Al, Ca, Fe など18種の元素についても、濃度の大小にかかわらず常に林外で高くなっていた。これにたいして、Cr の平均濃度は林外と林内でほぼ等しかった。この原因については現在のところ不明である。

3. 3 林外と林内での浮遊粉塵の粒径分布

大気浮遊粉塵の粒径とその中に含まれる元素の分布については一定の関係がある。藤村らが、横浜駅前で採取した浮遊粉塵の結果によると¹⁷⁾、Al, Ca, Mg, Ti, Sc, La, Ce, Sm および Th などの元素は、4~5 μm に粒径のピークをもつ粗大粒子に含まれる割合が多い。これらの元素は主に土壤に含有されることが知られており、地表面からの巻き上げ粒子として大気中に放出されたものである。一方、Sb, Br, As, Pb, Cd, V および Se などは、1 μm 以下の微小粒子に含まれる割合が多く、化石燃料の燃焼過程を含む化学的発生と深い関係にある。また、Na, Mn, Cr, W, Ba および K は微小粒子にも粗大粒子にも同じように含まれている。このことについて、著者らも京都市東山区にある泉涌寺境内で、粒径別に浮遊粉塵を採取し、同様の結果を得ている¹⁴⁾。

樹冠部での浮遊粉塵の捕集の際、粒径による選択性の有無について検討するため、採取期間が同じ林外と林内の浮遊粉塵に含まれる元素の濃度関係を調べた。Al と Ca の結果を Fig. 4 に示した。プロットから求めた勾配は Al と Ca で、それぞれ、0.98と1.17であった。相関係数は Al

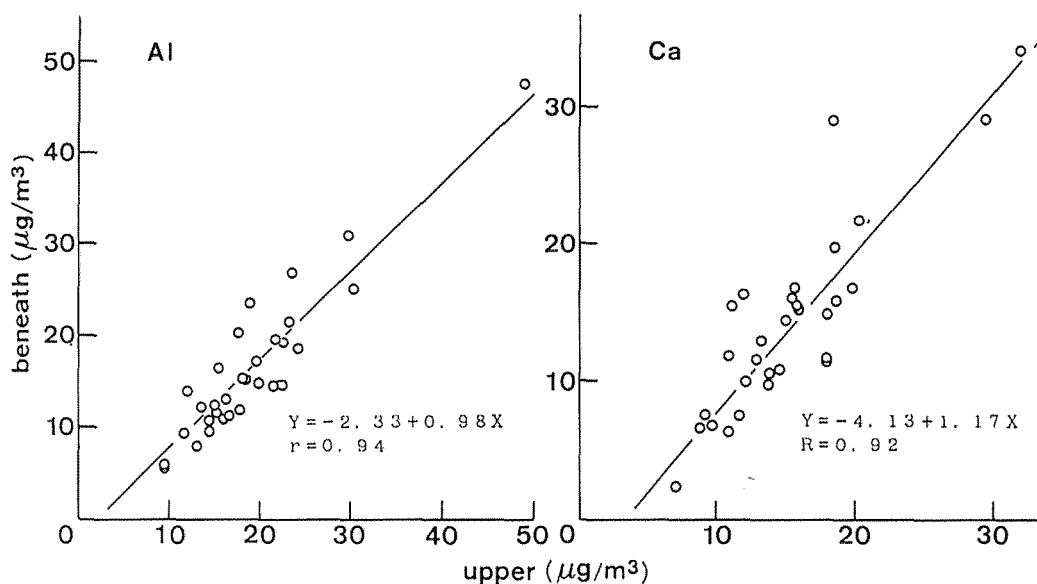


Fig. 4 Correlation between concentration of element in airborne dust upper and beneath a canopy.

:0.94, Ca :0.92と高い相関を示す。この結果は林外での浮遊粉塵中での Al と Ca の濃度が、林内での濃度とほぼ等しいことを意味している。先に述べたように、樹冠部で浮遊粉塵は平均して約30%が捕集されている。もし、Al や Ca を含む割合の大きな粗大粒子が選択的に樹冠部で捕集されるなら、林外に比べて林内の浮遊粉塵中の Al と Ca 濃度は減少し、逆に、微小粒子が粗大粒子より捕集され易いなら、Al と Ca の割合が増大しなければならない。しかし、実験結果によると、林外と林内で、浮遊粉塵中の Al と Ca 濃度は大きく変化していない。したがって粗大粒子を樹冠部が選択的に捕集しているとはいえない。

微小粒子に含まれる割合の多い Br と Sb について Fig. 5 に示した。直線の勾配は Br と Sb で、それぞれ、0.98と0.93、相関係数は Br :0.91, Sb :0.88であった。この結果からは樹冠部が微小粒子を選択的に捕集していると考えにくい。

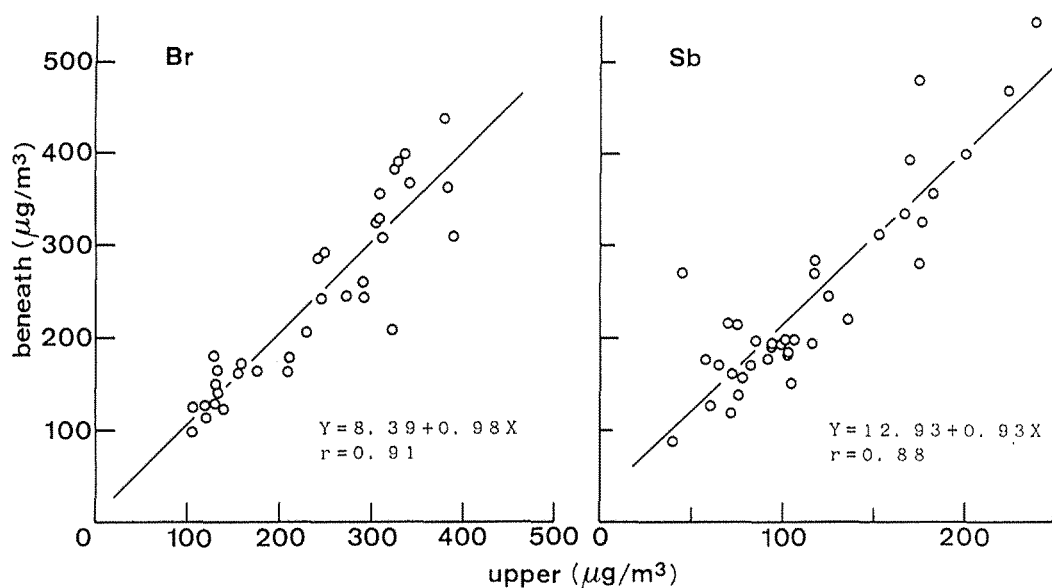


Fig. 5 Correlation between concentration of element in airborne dust upper and beneath a canopy.

上記の2つの結果から、浮遊粉塵が樹冠部で捕集される時、粒径による選択性はなく、一様に捕集されていると推定される。しかし、粗大粒子と微小粒子の両方に大きな分布割合を持つといわれている Na と Mn の結果は、必ずしも上記の結果と一致しない (Fig. 6)。すなわち、Na では林内の濃度が林外に比べて低く、Mn は逆に林内で高くなっていた。したがって、樹冠部で捕集される際、全体の傾向としては粒径による著しい選択性は認められなかったが、一部の元素については検討すべき課題を残している。これを解決するには、浮遊粉塵を粒径別に林外と林内で長期にわたって採取し、それぞれに含まれる元素を定量する必要がある。

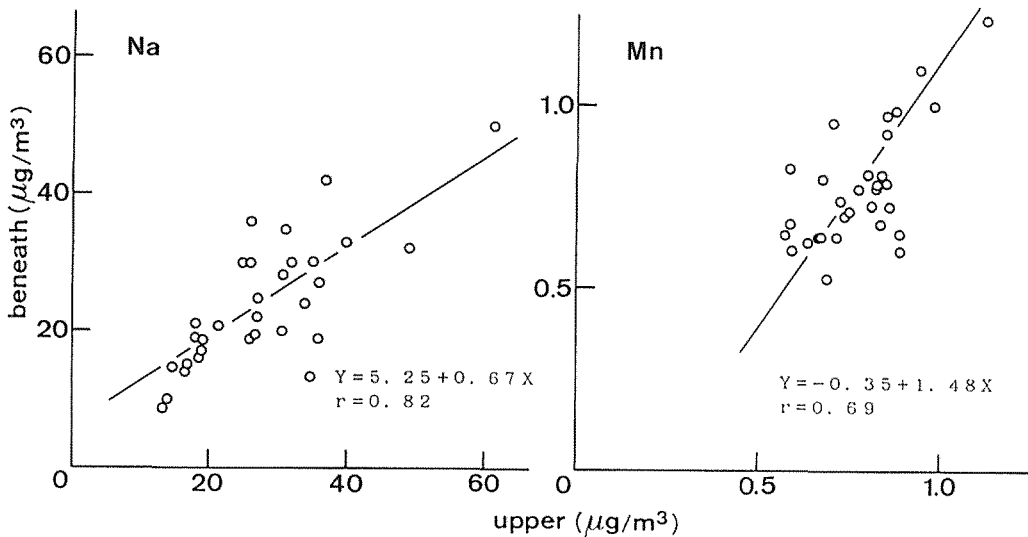


Fig. 6 Correlation between concentration of element in airborne dust upper and beneath a canopy.

4. お わ り に

森林生態系への物質の流入媒体としては降水と浮遊粉塵であるが、降水に比べて浮遊粉塵の研究例は非常に少ない。しかし、降水に含まれる物質濃度より、樹冠通過雨や樹幹流でのその方が高くなることは認められている。今回の調査で、森林に降下してくる浮遊粉塵がかなりの割合で、樹冠部に捕集されていることが判明し、林内雨の物質濃度が高くなることを実験的に確認した。さらに、捕集に際して、浮遊粉塵の粒径についての選択性はほとんど認められなかった。しかし、今回の実験では、降下する浮遊粉塵の総量の把握はできていないし、また粒径についても粒径毎にサンプリングし、捕集の際の選択性について実証することが今後の課題である。

本研究を遂行するため、京都大学原子炉実験所、立教大学原子力研究所および京都大学放射性同位元素総合センター等の施設を利用させていただいた。ご協力いただいた教職員各位に感謝の意を表します。また、桐生試験地での試料採取について、京都大学農学部福嶋義宏氏および鈴木雅一氏の御助力をいただいたことに感謝いたします。

引 用 文 献

- 1) White, E.J. and Turner, F.: A Method of Estimating Income of Nutrients in a Catch of Airborne Particles by a Wood and Canopy. *J. Appl. Ecology*. **7**, 441-461, 1970
- 2) Chamberlain, A.C.: Deposition of Particles to Natural Surfaces. *Symp. Soc. Gen. Microbiol.* **17**, 138-164, 1967
- 3) Wedding, J.R., Carlson, R.W., Stukel, J.J. and Bazzaz, F.A.: Aerosol Deposition on Plant Leaves. *Water, Air and Soil Pollut.* **7**, 545-550, 1977
- 4) Hosker, Jr. R.P. and Lindberg, S.E.: Atmospheric Deposition and Plant Assimilation of Gases and Particles. *Atmospheric Environment*. **16**, 889-910, 1982
- 5) 岩坪五郎・西田八州男・堤 利夫：森林生態系における養分の循環について—上賀茂試験地のヒノキ林

- と広葉樹のばあい. JIBP-PY-F. 43. 75-78, 1969
- 6) Likens, G.E.F., Bormann, H., Pierce, R.S., Eaton, J.S. and Johnson, M.N.: Biogeochemistry of a Forested Ecosystem. Springer-Verlag. New York. 1977
 - 7) Henderson, G.S., Harris, W.F., Todd, D.E.Jr. and Grizzard, T.: Quantity and Chemistry of Throughfall as Influenced by Forested-type and Season. J. Ecol. 65. 365-374, 1977
 - 8) 吉田 聡・一國雅巳: 森林を通じての元素の移動—とくに樹冠の役割について—. 環境科学会誌. 1. 31-38, 1988
 - 9) 石丸優・湊 和也・片山幸士・青木 敦: 山地小流域における BHC の挙動. 京大演報. 59. 91-98, 1987
 - 10) 片山幸士・岡田直紀・山下 洋・井上次郎・青木 敦: 環境指標としての降水中の微量元素. 京大演報. 57. 91-98, 1986
 - 11) 片山幸士・石丸 優・湊 和也・青木 敦: リタフォールによる金属元素の林地への還元. 京大演報. 60. 46-52, 1988
 - 12) Mamuro T., Matsuda, M. and Mizohata, A.: Comparative Multielement Analyses of Airborne Particulate Samples Collected in Various Areas. Annual Report of the Radiation Center of Osaka Prefecture. 14. 11-18, 1973
 - 13) 青木 敦・石井 孝・富山 毅・山本 勳: 放射化分析による大気浮遊塵中の微量元素の研究. 京府大学報 (理学・生活科学). 24. 17-21, 1973
 - 14) 青木 敦・春山洋一・片山幸士・吉田紘二: 大気浮遊粉塵の PIXE 分析. 京府大学報 (理学・生活科学). 36. 79-83, 1985
 - 15) 田中 茂・田島將典・橋本芳一: 黄砂現象時の大気エアロゾルの化学組成の変化. 日化誌. No.5. 713-719, 1986
 - 16) 狐塚 寛編: 放射化分析による環境調査—微量・多元素・同時分析の手法—. 日本アイソトープ協会. 東京. pp 107, 1979
 - 17) 藤村 満・橋本芳一: 粒度分布測定による大気エアロゾル中微量元素の発生源の推定. 日化誌. No.6. 902-906, 1977

Résumé

The concentrations of chemical substances in the throughfall and stem flow are higher than that in the precipitation. Two factors contribute to this phenomenon. One is the leaching of chemical substances from leaves and barks to throughfall and stem flow. The other is the wash out of the airborne dust particles attached to trees by rain water.

In this paper, the behavior of airborne dust was investigated at Kiryu experimental site, south-east part of Shiga prefecture. The airborne dust was collected upper and beneath a canopy by a low volume air sampler, and was determined for trace elements by thermal neutron activation analysis. The concentration of airborne dust increased from spring to summer. Kosa phenomenon ("yellow sand") caused the increase of airborne dust particles in this period. The concentration of airborne dust upper the canopy changed parallel to that beneath the canopy, and was higher always than beneath in the same sampling period. The concentration of airborne dust varied inversely with precipitation. The concentrations of all elements analysed in the air upper the canopy were higher than beneath. About 30% on the average of the airborne dust upper the canopy layer was captured by the canopy. The distribution of airborne dust particle size changed scarcely in the air upper and beneath the canopy layer.