HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	広葉樹林下の土壌中における無機元素の動態(第2報)
Author(s)	佐久間, 敏雄; 佐藤, 冬樹
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 44(2), 553-565
Issue Date	1987-07
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/21216
Type	bulletin (article)
File Information	44(2)_P553-565.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

広葉樹林下の土壌中における無機元素の動態
(第2報)

佐久間敏雄*　佐藤冬樹**

Dynamics of Inorganic Elements in Soils under Deciduous Forests
(Part 2)

By

Toshio SAKUMA* and Fuyuki SATO**

要　旨

森林の伐採と空閑地の形成が森林土壌中における無機元素の動態に与える影響を明らかにするため，前報に引きつづいて，雨水，林内雨，土壌溶液，地下水，河川水の化学組成を調べた。結果を頻度分布の形式で整理し，B鉄塔付近と森林観測塔付近を比較して，両者の相違点について2・3の考察を加えた。

pH，電気伝導度，各元素の濃度についての観測結果は，基本的には前報の結論を支持するものであったが，8月23日の台風による風送塩の影響を中心にやや特異な現象が認められた。即ち，台風にともなう強い南風によって多量の海水に由来する風送塩が供給され，B点の雨水，林内雨，土壌溶液は高pH，高電気伝導度を示し，Na^+，Cl^-，SO_4^{2-}など海水に由来するイオン濃度が著しく高くなった。しかし，林冠観測塔付近ではその影響は軽微で，風送塩がB点付近の林縁部に集中的に供給されたことを示していた。この理由として，伐採と切り土部が風の通路となってB点付近に多量の風送塩をもたらしたものと推定した。

伐採による林縁形成の間接的影響として，乾燥による堆積腐植の分解速度の変化，草本類の侵入による栄養塩についての競合の激化等が注目された。これらの影響を明確にするためには，なお注意深い観察が必要である。

キーワード： 酸性雨，森林土壌溶液，土壌の緩衝能。

1987年2月7日受理　Received February 7, 1987.

* 北海道大学農学部土壌学講座
Laboratory of Soil Science, Faculty of Agriculture, Hokkaido University.

** 北海道大学農学部天塩地方演習林
Teshio Experiment Forest, Faculty of Agriculture, Hokkaido University.

1. はしがき

道路造成による森林の伐採と空閑地の形成が，森林および森林土壌中における主要元素の動態にいかなる影響を及ぼすかを明らかにするため，前報（昭和54, 55年度）[1] にひき続いて，北海道大学苫小牧地方演習林内の土壌溶液および雨水の化学組成を調べた。本稿では，昭和56年度調査の結果を整理し，若干の考察を加える。

2. 調査・分析法

雨水，土壌溶液の採集および分析法は前報[1] に準じた。

ただし，融雪期の状態を明らかにするため，融凍直後の昭和56年3月27日からサンプリングを開始し，台風にともなう豪雨災害によって，採水不能になった9月中旬までの試料について分析・集計した。

また，表層地質と水質の関係をより明確に把握するため，融雪期および夏期豪雨後の湧水（地下水）5サンプルの分析を併せておこなった。なお，サンプルの記号は前報のとおり00（林内雨），01（L, F層直下の土壌水），02（A層直下の土壌水），03（C層内の土壌水），04（林外雨），05（幌内川河川水）としたが，林内の表層地下水（湧水）06を加えた。

3. 結果および考察

(1) pH，電気伝導度（EC）および各イオン濃度の頻度分布と変動係数

前報で検討を加えたように，雨水および土壌溶液の化学性は，風送塩のほか，樹冠から溶出する成分あるいは落葉層・土壌有機物の分解などの影響を反映して，降雨により，季節によって激しく変動する。これらの変動をある程度マスクして，地点間・サンプル間の比較を容易にするために，本報では，最高・最低値，平均値，頻度分布および変動係数による検討を試みる。

1) pH

表-1は，pHについて，サンプル毎の最低・最高値，相対度数，平均値および変動係数を整理したものである。なお，地点記号として，O: 観測塔，B: B鉄塔を用いる。

露場雨水04のpHはレンジ4.5～5.3，平均値4.8，変動係数0.057を示し，林内雨に比べて変動幅が小さく，平均値は低い特徴を有する。林内雨は，最低値がO点4.13，B点4.17の低い値を示し，pH 4.5以下の酸性雨が20～30％を占める。最高値は露場雨水の5.3に対し，O点で6.1，B点で7.1といずれもかなり高い値を示している。とくに，B点では6.5～7.0，7.0～のpHがそれぞれ6％観測されており，平均値も約5.3とO点より明らかに高い値になっている。B点におけるこのような林内雨の高いpHは，南東の強風が吹き寄せたときに観測されており，雨水としては著しく高い電気伝導度を示したのと時を同じくしている。したがって，B点林内

表—1　pH の分布と変動計数[1)]

地点	番号	1) 全度数	最低	最高	相対度数 %[2)] A	B	C	D	E	F	G	平均	変動係数
O	-04	8	4.43	5.27	13	62	25	—	—	—	—	4.79	0.0570
観	-00	15	4.13	6.07	27	33	20	13	7	—	—	4.91	0.122
測	-01	14	5.15	6.48	—	—	21	57	22	—	—	5.77	0.0661
塔	-02	14	5.31	7.17	—	—	29	43	21	—	7	5.80	0.0889
	-03	15	5.69	6.77	—	—	—	54	33	13	—	6.11	0.0509
	-05	5	6.31	7.25	—	—	—	—	20	60	20	6.82	0.0495
	-06	5	6.68	6.84	—	—	—	—	—	100	—	6.78	0.0116
B	-00	16	4.17	7.10	19	25	25	19	—	6	6	5.29	0.150
B	-01	14	5.50	6.33	—	—	7	50	43	—	—	5.94	0.0531
鉄	-02	13	5.36	6.50	—	—	8	62	30	—	—	5.84	0.0572
塔	-03	5	6.17	7.00	—	—	—	—	80	20	—	6.43	0.0518

1) -00：林内雨，-01：林内 A 0 層直下，-02：林内 A 1 層直下，-03：林内 C 層，-04：露場，-05：幌内川，-06：地下水（湧水）
2) A＝4.0～4.5, B＝4.5～5.0, C＝5.0～5.5, D＝5.5～6.0, E＝6.0～6.5, F＝6.5～7.0, G＝7.0～

雨の高 pH は，海水による高濃度の風送塩がその原因と考えられる。

土壌溶液の pH は，林内雨のそれに比べて明らかに高く変動係数も小さい。L・F 層，A 層から採集した土壌溶液の pH は 5.1～6.5 の範囲にあり，平均値としては B 点のほうがわずかに高い値になっているが，有意差は認められない。すなわち，L・F 層，A 層の緩衝作用によって，酸性雨の影響はほぼ完全に吸収されている。さらに，C 層から採集した土壌溶液の平均 pH は，O 点 6.1，B 点 6.4 の値を示し，L・F 層・A 層のそれより 0.4～0.6 pH 高く，変動幅も小さくなっている。この傾向は，河川水，地下水ではより顕著である。とくに，地下水の pH は 6.7 から 6.9 のごくせまい範囲にあって，変動係数も 0.012 の小さい値を示している。これは，イオン組成が Ca^{2+}–HCO_3^- を主とする型に変化するのと対応しており，C 層から表層部の火山灰層を浸透する過程で，アルカリ土類金属イオンの溶出と SO_4^{2-}，Cl^- などの汚染型アニオンの減少，重炭酸イオンの増加が併行して起こり，これにともなって中性付近のごくせまい pH 範囲に収れんしていくことを示している。

2) 電気伝導度 (EC)

電気伝導度測定の結果は表-2 のとおりである。露場雨水の EC は，すべて 50 μmho/cm 以下であり，平均値は 25.3 μmho/cm の低い値を示す。O 点林内雨はこれよりやや高い EC を示し，変動係数も露場雨水のそれの約 3 倍になっているが，50 μmho/cm 以下のサンプルが 70% 以上に達している。これに対して，B 点林内雨の EC は最大値が 2335 μmho/cm に及んでおり，これを含めた平均値は 221 μmho/cm と O 点のそれの 5 倍以上の値になっている。この最大値は台風による塩害が発生した時の降水で記録されたものであり，海水由来の風送塩がこの高 EC の原因であることを示している。同じ時の O 点林内雨は 96.5 μmho/cm であって，最

表—2　電気伝導度 (EC)[1] の分布と変動係数[1]

地点	番号	全度数	最低	最高	相対度数 %[2] A	B	C	D	E	F	G	平均	変動係数
O	-04	8	12	37	100	—	—	—	—	—	—	25.3	0.358
	-00	15	21	104	73	20	7	—	—	—	—	43.7	0.953
	-01	14	26	175	64	21	8	7	—	—	—	58.0	0.732
	-02	14	18	162	29	43	21	7	—	—	—	81.6	0.553
	-03	15	19	127	40	53	7	—	—	—	—	63.9	0.463
	-05	5	69	88	—	100	—	—	—	—	—	78.0	0.0905
	-06	5	74	89	—	100	—	—	—	—	—	79.5	0.0811
B	-00	16	23	2353	25	44	19	6	—	—	6	221.0	2.556
	-01	14	26	1460	21	43	21	7	—	—	7	174.8	2.124
	-02	13	37	300	15	69	8	—	—	—	8	84.2	0.832
	-03	5	43	224	20	40	20	—	20	—	—	101.2	0.741

1) μmho/cm，他の凡例は 表-1 参照
2) A＝0～50, B＝50～100, C＝100～150, D＝150～200, E＝200～250, F＝250～300, G＝300～

大値にもなっていない。この原因は，現段階では，かならずしも明らかではないが，風送塩の影響がB点林縁部に集中的に発生したことは樹木の塩害被災状況からも明らかであり，風向・風速，強風後の降水量などを考慮して，原因を明確にしていく必要がある。いずれにしても，B点の平均ECは，この時の異常な値によって著しく高くなっており，平常時のECを比較するには適しない。この異常値を除外した15サンプルについての集計結果は次のとおりである。

範　　囲：23～185 μmho/cm
平 均 値：80.1 μmho/cm
変動係数：0.532
0～50：27；50～100：47；100～150：20；150～200：6%

すなわち，8月27日採集サンプルを除外することによって，最高値，平均値とも大幅に低下するが，O点の林内雨ECに比べて平均値で約2倍の値を示し，分布のモードも50～100 μmho/cmの階層にある。したがって，B点の林内雨は，平常時でもO点のそれより高濃度の可溶性塩類を含むことは明らかであり，汚染源に近い林縁の特徴をよく示している。

土壌溶液のECはいずれも，50～100 μmho/cmの階層にモードをもち，8月27日サンプリング試料による異常値を別にすれば，O～B点間の差は小さい。B点土壌溶液EC値の最大値は，いずれも，8月27日サンプリングによるものであり，風送塩の影響が土層の深部にまで及んだことを示している。

河川水および地下水のECは，50～100 μmho/cmの範囲で安定している。ただし，この結果には8月23日の台風の影響は含まれていない。

3) カルシウムおよびマグネシウムイオン

露場雨水の Ca^{2+} 濃度は 0.04 mmol/ℓ 以下，平均 0.031 mmol/ℓ で著しく低濃度である（表-3）。変動係数は約 0.32 で河川水，地下水に次いで小さい。O 点林内雨は 0.02～0.14 mmol/ℓ の Ca^{2+} 濃度範囲にあり，露場雨水に比べて，平均値で約 1.5 倍，変動係数で約 2 倍の値を示している。これに対して，B 点林内雨のそれは平均 0.175 mmol/ℓ，変動係数は露場雨水の約 5 倍である。B 点林内雨の Ca^{2+} 濃度の最高値は，やはり，8 月 27 日採集のサンプルによるものであり，海水由来の風送塩がその原因と考えられる。

表—3　Ca^{2+} 濃度の分布と変動係数[1)]

地点	番号	全度数	最高	最低	相対度数 %[2)] A	B	C	D	E	F	G	平均	変動係数
O	-04	8	0.04	0.02	100	—	—	—	—	—	—	0.031	0.317
	-00	15	0.14	0.02	67	27	6	—	—	—	—	0.049	0.630
	-01	14	0.21	0.05	36	29	29	7	—	—	—	0.112	0.469
	-02	14	0.27	0.06	21	21	14	29	14	—	—	0.165	0.439
	-03	15	0.29	0.03	7	33	7	27	20	7	—	0.140	0.522
	-05	5	0.14	0.11	—	—	100	—	—	—	—	0.124	0.108
	-06	5	0.14	0.11	—	—	100	—	—	—	—	0.126	0.091
B	-00	16	1.19	0.03	13	31	25	19	6	—	6	0.175	1.579
	-01	14	4.39	0.07	—	14	21	36	14	7	7	0.456	2.487
	-02	13	1.34	0.10	—	—	54	31	—	—	15	0.243	1.375
	-03	5	0.28	0.09	—	20	40	—	20	20	—	0.166	0.452

1) mmol/ℓ，他の凡例は表-1 参照
2) A＝0～0.05，B＝0.05～0.10，C＝0.10～0.15，D＝0.15～0.20，E＝0.20～0.25，F＝0.25～0.30，G＝0.30～

O 点土壌溶液の Ca^{2+} 濃度は 0.3～0.03 mmol/ℓ の範囲にあるが，下層ほど分布範囲が広くなっていく傾向にある。分布はバイモーダルになる傾向を示し，0.1 mmol/ℓ 以下と 0.15～0.20 mmol/ℓ の階層が高い割合を占めている。これは，03 の C 層土壌溶液でとくに明瞭である。これに対して，河川水・地下水の Ca^{2+} 濃度はすべて 0.1～0.15 mmol/ℓ の階層に属し，変動係数も 0.11～0.09 と土壌溶液に比べて著しく小さい。B 点土壌溶液の Ca^{2+} 濃度は，すべて 0.05 mmol/ℓ 以上の階層に属し，モードは 0.1～0.2 mmol/ℓ の階層に出現する。バイモーダルになる傾向は O 点ほど明瞭ではない。分布のモードが 2 つ以上の階層に分化するのは，Ca^{2+} の供給源あるいはその濃度増加の原因として，2 つ以上の性格の異なる現象が関与していることを示している。

B 点土壌溶液 Ca^{2+} 濃度の最高値は，03 サンプルを除いて，8 月 27 日採集したサンプルによるものであるが，その値はいずれも林内雨のそれよりも高い値を示している。これは，他のいずれの陽イオンにも認められない現象であり，落葉層あるいは A 層に蓄積された Ca^{2+} が，多量に供給された Mg^{2+}，K^+，Na^+，H^+ などと交換されて溶出したことを示唆している。土壌

溶液中の Ca^{2+} 濃度が広い分布範囲をもち，ときに2つのモードをもつ分布になる原因の1つとしてこの交換溶出反応を考えることができよう。すなわち，L・F層，A層の主要な交換性陽イオンである Ca^{2+} は，降雨あるいは風によって，外部から多量の塩類または酸物質が供給されると，これに応じて溶液中濃度が一時的に上昇する。しかし，溶脱，拡散，植物吸収，土粒子による吸着などによって，これら塩類，酸物質の濃度が低下するにともなって，その溶液中濃度も低下するものと考えられる。

マグネシウムイオン濃度について同様に整理した結果を表-4に示す。前項の Ca^{2+} 濃度と類似の傾向を示すが，海水由来の風送塩の影響がより顕著であり，また，平常時の濃度水準が Ca^{2+} に比べて低い。B点林内雨の Mg^{2+} 濃度最高値は，Ca^{2+} 濃度よりもやや高い値を示しており，海水に由来する風送塩の影響を如実に物語っている。

表—4 Mg^{2+} 濃度の分布と変動係数[1]

地点	番号	全度数	最高	最低	相対度数 %[2] A	B	C	D	E	F	G	H	平均	変動係数
O	-04	8	0.02	0.0	100	—	—	—	—	—	—	—	0.0750	0.943
	-00	15	0.06	0.0	73	13	13	—	—	—	—	—	0.0173	0.034
	-01	14	0.11	0.02	14	29	50	—	7	—	—	—	0.0493	0.474
	-02	14	0.13	0.01	14	29	21	7	21	7	—	7	0.0614	0.612
	-13	15	0.09	0.01	47	7	40	7	—	—	—	—	0.0387	0.632
	-05	5	0.07	0.04	—	20	80	—	—	—	—	—	0.0540	0.211
	-16	5	0.05	0.04	—	20	80	—	—	—	—	—	0.0480	0.0932
B	-00	16	1.50	0.01	44	13	25	—	6	—	—	13	0.153	2.446
	-01	14	1.46	0.00	21	21	36	14	—	—	—	7	0.145	2.615
	-02	13	0.28	0.02	46	31	8	8	—	—	—	8	0.0508	1.410
	-03	5	0.06	0.02	80	—	20	—	—	—	—	—	0.0280	0.0639

1) 凡例： 表-3参照
2) A=0～0.025, B=0.025～0.05, C=0.05～0.075, D=0.075～0.10, E=0.10～0.125, F=0.125～0.150, G=0.15～0.20, H=0.20以上

4) ナトリウムおよびカリウムイオン

ナトリウムイオン濃度は風送塩の影響をきわめて敏感に反映し，B点の最高値が著しく高くなった（表-5）。O点の林内雨（00），土壌溶液（01, 02）にも類似の傾向が認められ，最高値がやや高い値になっている。また，河川水，地下水の Na^{+} 濃度も Ca^{2+}, Mg^{2+} 濃度に比べて若干広い変動幅をもっており，外来塩の影響を受けやすい性格を示している。

カリウムイオン濃度の集計結果を表-6に示す。Na^{+} 濃度と類似の傾向を示し，B点の林内雨，L・F層土壌溶液などの最高値が著しく高くなっている。O点の調査結果で注目される点に，林内雨の平均 K^{+} 濃度が露場雨水のそれに比べてかなり高いことがあげられる。すなわち，露場雨水の平均濃度が 0.009 mmol/ℓ であるのに対して，林内雨のそれは5倍以上の 0.051 mmol/ℓ を示している。露場雨水のサンプリング数が少ないので，若干問題があるが，同一サ

表—5　Na^+ 濃度の分布と変動係数[1)]

地点	番号	全度数	最高	最低	相対度数 %[2)] A	B	C	D	E	F	G	H	I	平均	変動係数
O	-04	8	0.14	0.03	62	13	25	—	—	—	—	—	—	0.0588	0.707
	-00	15	0.36	0.02	53	27	7	—	7	—	—	7	—	0.0787	1.149
	-01	14	0.65	0.03	50	36	—	—	—	—	—	—	14	0.119	1.557
	-02	14	0.30	0.03	14	7	50	14	7	—	7	—	—	0.126	0.568
	-03	15	0.17	0.04	7	20	60	13	—	—	—	—	—	0.106	0.351
	-05	5	0.23	0.13	—	—	20	40	40	—	—	—	—	0.184	0.216
B	-06	5	0.20	0.13	—	—	20	60	20	—	—	—	—	0.178	0.156
	-00	16	14.3	0.03	13	25	13	13	19	—	—	—	19	1.08	3.273
	-01	14	6.61	0.03	14	21	21	29	—	—	—	—	14	0.614	2.820
	-02	13	1.30	0.07	—	15	31	8	31	8	—	—	8	0.246	1.307
	-03	5	0.20	0.07	—	20	20	40	20	—	—	—	—	0.154	0.339

1) 凡例：表-3参照
2) A=0～0.05, B=0.05～0.10, C=0.10～0.15, D=0.15～0.20, E=0.20～0.25, F=0.25～0.30, G=0.30～0.35, H=0.35～0.40, I=0.40以上

表—6　K^+ 濃度の分布と変動係数[1)]

地点	番号	全度数	最高	最低	相対度数 %[2)] A	B	C	D	E	F	G	H	平均	変動係数
O	-04	8	0.01	0.00	100	—	—	—	—	—	—	—	0.009	0.404
	-00	15	0.20	0.00	60	7	20	7	—	7	—	—	0.051	1.404
	-01	14	0.17	0.01	57	7	21	—	14	—	—	—	0.041	0.872
	-02	14	0.26	0.01	21	14	36	14	7	—	7	—	0.084	0.751
	-03	15	0.07	0.01	27	60	13	—	—	—	—	—	0.031	0.485
	-05	5	0.04	0.02	40	60	—	—	—	—	—	—	0.030	0.333
	-06	5	0.03	0.03	100	—	—	—	—	—	—	—	0.030	0.0
B	-00	16	0.85	0.01	25	25	25	19	—	—	—	6	0.168	2.688
	-01	14	0.95	0.02	14	29	43	—	—	7	—	7	0.128	1.889
	-02	13	0.17	0.01	46	31	8	8	8	—	—	—	0.045	1.066
	-03	5	0.07	0.01	80	—	20	—	—	—	—	—	0.024	1.086

1) 凡例：表-3参照
2) A=0.0～0.025, B=0.025～0.05, C=0.05～0.1, D=0.1～0.15, E=0.15～0.20, F=0.20～0.25, G=0.25～0.30, H=0.30～

ンプリング日の試料についてみると，林内雨/露場雨水 K^+ 濃度比は約1.5倍である。したがって，K^+ 濃度が林内雨＞露場雨水の関係にあることはほぼ確実である。この関係が低濃度時にも認められること，他の陽イオン種には認められないことから考えて，樹冠から供給される K^+ が，林内雨の K^+ 濃度を高める重要な原因の1つであることは明らかである。

O点に比べてB点の変動係数が著しく大きな値を示す原因は，8月23日台風時の風送塩

であり，これを除いた集計結果は，林内雨：平均濃度 0.055 mmol/ℓ，変動係数 0.686，L・F 層土壌溶液：平均濃度 0.065 mmol/ℓ，変動係数 0.775 であって，O 点のそれにほぼ等しくなる。土壌溶液中の K^+ 濃度では，A 層のそれが B 点と O 点で著しくことなる点が注目される。類似の現象は，NO_3^-，NH_4^+ などの栄養塩にも認められ，汚染型のイオン種 Na^+，Mg^{2+}，Cl^-，SO_4^{2-} とは逆の関係にある。すなわち，B 点では外来塩の影響によって栄養塩の溶脱・損失が進んでおり，A 層の養分環境が悪化している。

5) 無機態窒素

無機態窒素としては，NH_4^+，NO_3^- 濃度の推移を調べた。表-7 に NO_3^- の分布と変動係数を示す。露場雨水は，その 63% が検出限界以下の NO_3^- 濃度を示し，最高値も 0.02 mmol/ℓ ときわめて低い。林内雨は，O, B 点とも 0.075 mmol/ℓ 以下の濃度範囲にあり，平均値は B 点のほうがわずかに低く，変動係数は逆に O 点のほうが小さい。O 点と B 点の違いは，L・F 層，A 層で採集した土壌溶液に明瞭に現れている。すなわち，L・F 層土壌溶液については，O 点で平均濃度 0.011 mmol/ℓ であるのに対し，B 点のそれは 0.044 mmol/ℓ と約 4 倍である。これとは逆に，A 層の土壌溶液では，O 点の平均濃度が 0.186 mmol/ℓ で，0.15 mmol/ℓ 以上の例が 4.3% もあるのに対し，B 点のそれは 0.05 mmol/ℓ 以下，平均濃度にして 0.006 mmol/ℓ であって，きわめて低濃度である。この影響は，C 層で採集した土壌溶液にも及んでおり，O 点では，0.05 mmol/ℓ 以上の NO_3^- 濃度を示すサンプルが 30% 以上に達しているのに対して，B 点のそれは 0.025 mmol/ℓ 以下であり，平均濃度でも 1/10 以下の値を示している。

アンモニヤ態窒素については表示しなかったが，NO_3^- とほぼ同様の傾向にあった。このように，B 点土壌溶液の無機態窒素濃度，とくに，A, C 層のそれが O 点と大きく相違する理

表—7　NO_3^- 濃度の分布と変動係数[1]

地点	番号	全度数	最高	最低	相対度数 %[2] A	B	C	D	E	F	G	H	平均	変動係数
O	-04	8	0.02	0.0	63	37	—	—	—	—	—	—	0.005	1.512
	-00	15	0.05	0.0	27	40	20	13	—	—	—	—	0.019	0.905
	-01	14	0.04	0.0	43	43	14	—	—	—	—	—	0.011	1.131
	-02	14	0.75	0.0	43	7	7	—	—	—	—	43	0.186	1.457
	-03	15	0.20	0.0	53	7	7	—	7	7	13	7	0.047	1.436
	-05	5	0.03	0.0	40	40	20	—	—	—	—	—	0.018	0.724
	-06	5	0.04	0.0	20	60	20	—	—	—	—	—	0.020	0.707
B	-00	16	0.07	0.0	56	19	13	13	—	—	—	—	0.016	1.402
	-01	14	0.13	0.0	36	29	—	14	—	14	7	—	0.044	1.097
	-02	12	0.04	0.0	62	31	8	—	—	—	—	—	0.006	1.821
	-03	5	0.02	0.0	80	20	—	—	—	—	—	—	0.004	2.236

1) 凡例：表-3 参照

2) A=0.0, B=0.0～0.025, C=0.025～0.05, D=0.05～0.075, E=0.075～0.10, F=0.10～0.125, G=0.125～0.15, H=0.15～

由はいくつか考えられる。

1) 乾燥した林縁部の条件下で，有機物の分解が急速に進み，盛夏期以後無機態窒素の供給量が減少する。

2) 林縁部に侵入した草本植生などによって，表層部における無機態窒素の消費（吸収）量が増大する。

L・F層土壌溶液の無機態窒素濃度変動幅が，B点>O点であること，A・C層のそれは逆の関係にあること，7～8月に採集したサンプルについてみると，NH_4^+，NO_3^- イオン濃度とも，必らずしもO点>B点の関係になっていないことなどからみて，1) の理由はそれほど重要ではないと思われる。したがって，林縁部の植生の変化とそれにともなう窒素栄養状態の変化—とくに草本類と木本類の競合関係—については今後とも慎重に見守っていく必要がある。

6) 塩素イオン

塩素イオン濃度について，これまでと同様に整理した結果を表-8に示す。Cl^- 濃度は 4) で検討した Na^+ と類似の分布パターンを示し，0.3 mmol/ℓ 以上の著しい高濃度を示すサンプルと 0.05 mmol/ℓ 付近を中心とする低濃度のサンプル群との差が明瞭である。これは，Cl^- が Na^+ と同様に，海水に由来する風送塩の影響を強く反映することによるものである。このことは，O点とB点の相違にも明瞭に現れており，B点では林内雨の最高濃度が 16.8 mmol/ℓ という高い値を示しているのをはじめ，低濃度群の分布幅が広く，変動係数が著しく大きくなっている。

7) 硫酸イオン

硫酸イオンも海水中に高濃度で含まれるイオン種であるが，その他の人為的な汚染源から

表—8　Cl^- 濃度の分布と変動係数[1]

地点	番号	全度数	最高	最低	相対度数 %[2] A	B	C	D	E	F	G	平均	変動係数
O	-04	8	0.19	0.03	50	13	25	13	—	—	—	0.079	0.781
	-00	15	0.55	0.33	20	53	7	—	—	13	7	0.121	1.207
	-01	14	0.87	0.03	14	71	—	—	—	—	14	0.165	1.676
	-02	14	0.81	0.01	22	57	—	—	—	—	21	0.189	1.424
	-03	15	0.66	0.01	20	27	7	—	—	20	27	0.209	1.027
	-05	5	0.17	0.11	—	—	40	60	—	—	—	0.148	0.181
	-06	5	0.21	0.12	—	—	80	—	20	—	—	0.144	0.258
B	-00	16	16.8	0.04	13	13	31	6	6	6	25	1.293	3.208
	-01	14	11.4	0.03	14	14	21	14	14	—	21	0.991	3.030
	-02	12	0.77	0.03	—	58	8	8	17	—	8	0.153	1.356
	-03	5	0.72	0.06	—	20	60	—	—	—	20	0.220	1.274

1) 凡例：表-3参照
2) A=0.0～0.05, B=0.05～0.1, C=0.1～0.15, D=0.15～0.20, E=0.20～0.25, F=0.25～0.30, G=0.3～

表—9　SO_4^{2-} 濃度と変動係数[1)]

地点	番号	全度数	最高	最低	相対度数 %[2)] A	B	C	D	E	F	G	H	平均	変動係数
O	-04	8	0.05	0.02	38	50	13	—	—	—	—	—	0.0313	0.360
	-00	15	0.25	0.0	13	40	33	7	—	—	7	—	0.0600	0.980
	-01	14	0.18	0.02	7	29	43	7	14	—	—	—	0.0707	0.709
	-02	14	0.11	0.01	7	21	57	14	—	—	—	—	0.0643	0.430
	-03	15	0.13	0.01	13	20	53	13	—	—	—	—	0.0640	0.537
	-05	5	0.08	0.06	—	—	100	—	—	—	—	—	0.0680	0.161
	-06	5	0.07	0.06	—	—	100	—	—	—	—	—	0.0641	0.0856
B	-00	16	0.00	0.05	—	—	38	19	19	13	6	6	0.186	1.220
	-01	14	0.72	0.04	—	14	36	36	7	—	—	7	0.414	0.206
	-02	12	0.18	0.04	—	8	42	42	8	—	—	—	0.0950	0.377
	-03	5	0.24	0.06	—	—	40	40	—	20	—	—	0.124	0.583

1) 凡例：表-3参照
2) A=0～0.025, B=0.025～0.05, C=0.05～0.10, D=0.10～0.15, E=0.15～0.20, F=0.20～0.25, G=0.25～0.30, H=0.30～

も相当量供給されている可能性があり，土壌中における挙動も Cl^- とは異なる。このために，表-9に示した SO_4^{2-} 濃度分布の集計結果には Cl^- のそれとは異なる事実がいくつか認められる。最高濃度は Cl^- よりも低いが，最低濃度はO点林内雨を除いて Cl^- のそれより高い。とくに，B点の林内雨はいずれも 0.05 mmol/ℓ 以上の濃度範囲にあり，0.025 mmol/ℓ 以下の例は土壌溶液にも認められない。O点においては 0.3 mmol/ℓ 以上の高濃度を示す例は認められないが，低濃度群の分布幅はB点よりむしろ広い。平均濃度，変動係数ともに Cl^- より小さい。また，河川水・地下水については，SO_4^{2-} 濃度は Cl^- 濃度の1/2程度であって，0.06～0.08 mmol/ℓ のごくせまい濃度範囲にある。これに対して，A・C層土壌溶液中の SO_4^{2-} 濃度は 0.01～0.24 の範囲にあって，Cl^- のような極端な高濃度を示すものは認められない。

一方，採集地点による比較では，最高濃度は，林内雨，L・F層土壌溶液でB点≫O点であるのに対し，A・C層土壌溶液では大差がないこと，最低濃度はいずれもB>O点であること，したがって平均濃度にも同様の関係を認めることができるが，変動係数，とくにA・C層土壌溶液のそれにはほとんど差がないことなどが注目される点である。

以上，Cl^- との相違，地点による SO_4^{2-} 濃度分布の相違は，SO_4^{2-} の供給源が Cl^- のそれに比べて複雑であること，林縁部のほうが高い SO_4^{2-} 濃度を示し，その蓄積傾向があることを示している。

8) 重炭酸イオンおよびけい酸

重炭酸イオン濃度およびけい酸濃度についての集計結果を表-10，11に示す。ただし，HCO_3^- 濃度はpH 4.3 アルカリ度からの推定値であり，けい酸はいわゆる比色けい酸である。

重炭酸イオン濃度は Cl^-，SO_4^{2-} の中間的な濃度分布を示すが最高値は SO_4^{2-} と同程度かや

表—10　HCO_3^- 濃度の分布と変動係数[1]

地点	番号	全度数	最高	最低	相対度数 %[2] A	B	C	D	E	F	G	H	I	平均	変動係数
O	-04	8	0.08	0.0	75	25	—	—	—	—	—	—	—	0.030	0.891
	-00	15	0.12	0.0	73	20	7	—	—	—	—	—	—	0.034	0.935
	-01	14	0.33	0.03	7	14	36	36	—	—	7	—	—	0.139	0.496
	-02	14	0.20	0.07	—	36	43	14	7	—	—	—	—	0.114	0.332
	-03	15	0.35	0.0	7	27	47	13	—	—	—	7	—	0.121	0.624
	-05	5	0.45	0.18	—	—	—	20	—	20	20	—	40	0.330	0.321
	-06	5	0.36	0.19	—	—	—	20	—	—	—	80	—	0.322	0.231
B	-00	16	0.87	0.0	38	19	19	6	13	—	—	—	6	0.133	0.562
	-01	14	0.34	0.08	—	21	36	14	21	—	7	—	—	0.156	0.458
	-02	12	0.90	0.0	8	17	42	8	17	—	—	—	8	0.193	1.203
	-03	3	0.21	0.10	—	—	33	33	33	—	—	—	—	0.153	0.359

1) 4.3 BX より算出，凡例：表-3 参照
2) A＝0～0.05, B＝0.05～0.10, C＝0.1～0.15, D＝0.15～0.20, E＝0.20～0.25, F＝0.25～0.30, G＝0.30～0.35, H＝0.35～0.40, I＝0.4～

表—11　SiO_2 濃度の分布と変動係数[1]

地点	番号	全度数	最高	最低	相対度数 %[2] A	B	C	D	E	F	G	H	平均	変動係数
O	-04	8	0.0	0.0	100	—	—	—	—	—	—	—	0.0	—
	-00	15	0.04	0.0	100	—	—	—	—	—	—	—	0.0093	1.371
	-01	14	0.06	0.0	79	14	7	—	—	—	—	—	0.026	1.208
	-02	14	0.13	0.02	29	21	50	—	—	—	—	—	0.081	0.455
	-03	15	0.16	0.01	13	13	74	—	—	—	—	—	0.105	0.429
	-05	5	0.76	0.41	—	—	—	—	—	20	20	60	0.610	0.232
	-06	5	0.82	0.55	—	—	—	—	—	—	20	80	0.712	0.143
B	-00	16	0.24	0.0	88	—	6	6	—	—	—	—	0.027	2.247
	-01	14	0.07	0.0	72	21	7	—	—	—	—	—	0.039	0.942
	-02	13	0.15	0.0	15	31	54	—	—	—	—	—	0.094	0.505
	-03	5	0.33	0.20	—	—	—	80	20	—	—	—	0.244	0.227

1) 凡例：表-3 参照
2) A＝0.05 以下, B＝0.05～0.1, C＝0.1～0.2, D＝0.2～0.3, E＝0.3～0.4, F＝0.4～0.5, G＝0.5～0.6, H＝0.6 以上

や高く，最低値は SO_4^{2-} のそれよりやや低い例が多い。林内雨を除いて，平均濃度はいずれも SO_4^{2-} のそれより高い。この差は，O 点でとくに顕著である。この結果，O～B 点間差は小さく，土壌溶液についてみるかぎり，ほとんど差がないといってよい。

これまでの各種イオンについて，河川水・地下水は濃度変化が小さく，安定した状態を示したが，HCO_3^- はこれらのサンプルでも濃度変化がかなり大きい。O 点についてみると，露場

雨水，林内雨，土壌溶液，河川水，地下水の順に濃度が高くなっていく傾向が明瞭であり，この点，pHと類似している。すなわち，表層部では外来塩に含まれる汚染型の陰イオンや有機物の分解によって生成するNO_3^-などによってpHが低下し，HCO_3^-は相対的に少なくなるが，土層深部ではこれら陰イオンの影響が小さくなり，pHも上昇してHCO_3^-が主要陰イオンになってくるのである。しかし，重炭酸塩はpHの高い海水中にもかなり含まれており，これがB点林内雨の0.87 mmol/ℓのような最高値をもたらしたものと推察される。

けい酸濃度は，露場雨水・林内雨の95％以上が0.05 mmol/ℓ以下の低濃度を示し，とくに露場雨水は全試料検出限界以下であった。これに対し，土壌溶液の平均濃度はL・F層では0.026, 0.039, A層では0.081, 0.094, C層では0.11, 0.24 mmol/ℓであり，いずれもB点のほうが高く，かつ下層に向かって増加する傾向にある。さらに，河川水・地下水のSiO_2濃度は0.41～0.82 mmol/ℓの範囲にあって，土壌溶液中の濃度より明らかに高い。すなわち，けい酸は雨水からはほとんどもたらされず，鉱質土層との接触によって次第に濃度が高くなっていく。土壌溶液中のけい酸濃度がつねにB点＞O点であったことはB点付近で観察された軽石流堆積物に由来する微細な粉じんの影響を示しているものかも知れない。

(2)　林内雨および土壌溶液のイオン組成に及ぼす森林伐採の影響

以上，各イオンの濃度分布を検討した結果は，林内雨および土壌溶液のイオン組成が，海水に由来する風送塩の影響を強く受けていることを示している。このことについては，前報[1]の調査結果についても指摘したところである。B点は，火山山麓台地の東南端付近に位置し，南東風による風送塩の影響を受けやすい地理的条件にある。したがって，単に風送塩の影響が顕著であることをもって森林・伐採の影響と断定することはできない。しかし，前節 2) で指摘したように，樹木の塩害が，B点周辺の林縁部に集中的に発生しており，切土部対岸のA鉄塔側林縁には比較的その発生が少なかったことから，切土部が風の通路になって，その南東縁に多量の風送塩を供給した可能性がある。同様の結果は，風倒木の調査でも認められており，伐採および切土による空閑地の形成が，塩害の発生を助長したことは否定できない。

一方，イオン種による濃度分布の相違を比較研究することによって，海水に由来する風送塩以外の汚染源の影響を検出することができ，SO_4^{2-}に他の汚染源の影響が認められた。これについても，前報で指摘したことであり，とくに新しい知見ではない。SO_4^{2-}における他の汚染源としては，苫小牧市街地とこれに立地する工場群，高速道路を走行する車両の排ガスなどが考えられようが，これらによる汚染は濃度が低く，現段階では，伐採・林縁形成の影響として捉えることは困難と思われる。

伐採による林縁の形成は，間接的な形でも土壌溶液のイオン組成に影響を与えると思われる。その一つは，NO_3^-濃度で代表される栄養塩濃度の低下である。NO_3^-, NH_4^+がB点のA層・C層で低下していることは，前報でも認められたところであるが，本年度の調査結果について検討した結果，この原因として，植生の変化にともなう吸収量の増大，草本と樹木による

競合が考えられた。これが，今後どのように推移し，樹木の活性にどう関係してくるかは興味ある点であるが，現段階では決定的なことはいえない。これとは別に，林縁部に多量に供給される塩類によって，表層土壌溶液のイオン環境が変化することも林縁形成の間接的影響を示す現象と考えることができる。8月27日サンプリングのB点土壌溶液で，林内雨よりも高いCa^{2+}濃度が観測されたのはその端的な例である。こうした間接的影響が土壌の性質を変化させるまでには，なお相当な時間の経過が必要であろう。

4. あとがき

本稿では，昭和56年度調査結果のうち，土壌溶液のイオン組成についての知見を整理した。前報で示した調査結果についても，現在，同様な整理を試みており，一部について本年度の調査結果を支持する結果を得ている。

観測に当たって，試水の採取および計量を苫小牧演習林の田中夕美子博士にお願いした。記して謝意を表する。

引用文献

1) 佐久間敏雄，佐藤季樹：広葉樹林下の土壌中における無機元素の動態．北演研報，44(2)，537-552，1987.

Summary

In order to understand the influence of forest cutting and the resulting open spaces on the dynamics of inorganic elements, chemical composition of rainfall, through-fall and soil solution extracted at three depths at sites O and B were analyzed by using the same methods as reported in Part 1. Ground and river waters were also analyzed. The comparison was carried out on the frequency distribution, range and coefficient of variation of pH, EC and element concentrations.

The results obtained supported generally the conclusions of the preceding paper, with a few exceptions caused by dry fallouts originating from sea water brought into the forest by typhoons. Strong south winds of typhoons supplied large amounts of salt to the border of the stands facing the south. High pH, high EC, and high concentration of ions originating from sea water were observed at site B, which was located near the border. However, the influence of the wind blown salts was not so significant at site O. This indicated that the salts were directed primarily to the border where site B was situated. It was speculated that the influences of the salty winds were concentrated in the border zone due to corridor effects of the open space formed recently by the cutting.

Influences of the border on the rate of litter decomposition and the competition for nutrient elements between the trees and herbs which invaded to the border zone, were also recognized based on the patterns of element dynamics.