

1977年有珠山噴火による降灰が森林に及ぼした影響（I） —噴出物および埋没土壌の化学性の経時変化—

佐藤 創*・寺渾和彦*・長坂晶子*・菊地 健*

Effects of ashfall erupted from Usu Volcano in 1977 on the surrounding forests (I)

Temporal change in chemical properties of tephra and buried soil

Hajime SATO*, Kazuhiko TERAZAWA*, Akiko NAGASAKA* and Ken KIKUCHI*

要 旨

林床に堆積した1977年有珠山噴火による噴出物および埋没土壌の化学性を、噴火から毎年5年間と21年後に調査した。調査地の噴出物の厚さは10～35 cmであった。噴出物の水溶性塩基類濃度は噴火直後あるいは1年後に最大に達し、その後数年間は減少した後、一定で推移したが、表層部分の水溶性塩基類濃度は5年後から21年後にかけて大きく増加した。埋没土壌の水溶性塩基濃度は当初5年間は減少したが、21年後にかけて増加した。噴出物の水溶性塩基濃度は当初Na>Ca>Mg>Kの順であった。各成分は上層から下層へ移動したが、その移動速度はNaが最も速かった。噴出物の置換性塩基類濃度は水溶性塩基に似た変化を示したが、より緩やかであった。埋没土壌の置換性塩基類濃度は噴火後やや増加する傾向があったが、5年後から21年後にかけては減少した。噴出物の置換性塩基濃度は当初Ca>Na>Mg>Kの順で、下層への移動速度はNaが最も速かった。噴出物のpHは当初6.8～7.7の弱アルカリ性であったが、5年後にかけて5.9～6.9に低下し、21年後も似た値を示した。噴出物の炭素量は5年後までは少なかったが、21年後には表層で大幅に増加した。土壌への炭素集積速度は0.495～2.55t/ha/yrと推定された。

キーワード：有珠山，水溶性塩基，置換性塩基，火山噴出物，炭素集積

はじめに

1977年8月7日に有珠山が噴火を開始し、その後1978年の9月まで大小の噴火を繰り返した。この噴火は林床に直接噴出物が付着することにより、幹や枝の湾曲や折れなどの被害を生じさせ、若齢級のカラマツ林では枯死木を多く発生させた。いっぽう、噴出物は林床に堆積したため、噴出物に含まれる様々な化学成分による根を介しての林木への影響が生じた可能性がある（寺渾ほか，2000）。また、噴出物の長期的な土壌化の過程で、徐々に林木への影響が生じてくることも考えられる。

これらの噴出物の林床への堆積が森林に及ぼす影響を明らかにするためには、まず噴出物および埋没土壌そのものが堆積後に短期的、長期的にどのように変化していくのかという基本的現象を明らかにする必要がある。このような研究例はかなり少ないのが現状である（西本ほか，1982；真田ほか，1965）。

いっぽう、地球温暖化防止のため森林による二酸化炭素の吸収への期待が高まっているが、地上部だけではなく、地下部とくに未熟土壌は炭素の吸収力が高いとされている。しかし、未熟土壌における炭素の集積速度を測定した例は少ないのが現状である（堤，1963；Van Breemen and Fejitel，1990）。この集積速度は気候帯によっても異なることが予想されるが、冷温帯における測定例は特に少ない。火山噴出物のような炭素

*北海道立林業試験場 Hokkaido Forestry Research Institute, Bibai, Hokkaido 079-0198

〔北海道立林業試験場研究報告 第37号 平成12年3月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No.37 March 2000〕

の含有量の少ない土壌での炭素量の経時変化を測定することは、土壌への炭素の集積速度を知る上で有効な手段となる。

以上のような観点から、筆者らは火山噴出物堆積後の短期的、長期的な、樹木の成長に関わる土壌特性の変化、及び土壌への炭素の集積速度を明らかにすることを目的として、噴火直後から毎年5年間、さらに21年後の噴出物及び埋没土壌の化学性の変化を調査した。

調査地と方法

調査地は本試験場が1977年有珠山噴火直後に設定した固定調査地のうち、泉2（虻田町）、東関内（伊達市）、月浦2（虻田町）である（菊地・山根, 1980）。ここでは順に泉、東関内、月浦と呼ぶ。各調査地の位置を図-1に示す。調査地に近い伊達市における1951年から1977年の年平均気温は8.0℃、年降水量は1030mmである（札幌管区气象台, 1983）。泉は広葉樹二次林、東関内はトドマツ人工林（1977年当時20年生）、月浦はカラマツ人工林（同9年生）で、1977年噴火により堆積した噴出物の厚さは泉33cm、東関内10cm、月浦10cmであった（表-1、図-2）。1978年9月初旬にさらに泉では2cm、東関内では1cmの降灰があった。詳細な降灰状況については当時の報告（北海道立林業試験場, 1979；山根ほか, 1982）に譲る。1977年から1981年にかけては毎年秋（9月末～10月）に、1998年には7月（泉）と11月（東関内、月浦）に試孔を掘り、土壌断面の観察および土壌層位ごとの土壌試料のサンプリングを行った。試孔は年ごとに数10cmずつずらした。1998年調査時の土壌断面を写真-1に示す。土壌試料は風乾細土にし、水溶性成分については、5gの風乾細土に純水100ccを加えて、1時間振とうした後、24時間放置したものをろ過し、200ccにメスアップして抽出液を作った。置換性成分については純水の代わりに、1N-NH₄CH₃COOを用いて水溶性成分と同様の方法で抽出液を作った。各抽出液は原子吸光光度計（日立Z-6100型）を用いて、Ca, Mg, K, Naについて濃度を測定した。

炭素含有率は風乾細土約0.5gを用いてCNコーダー（柳本MT-500W型）により測定した。以上の測定値は、残りの風乾細土を110℃

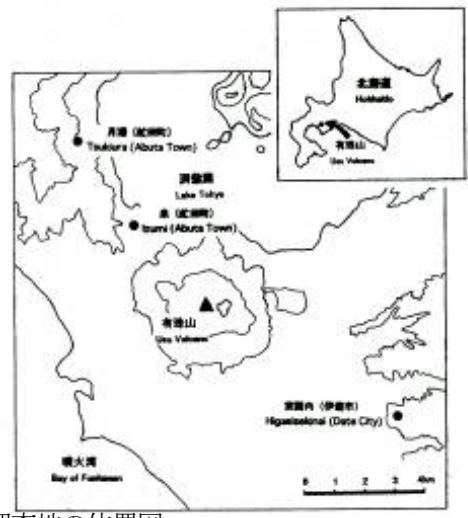


図-1 調査地の位置図
Figure 1. Location of study sites nearby Usu Volcano, southwestern Hokkaido, northern Japan.

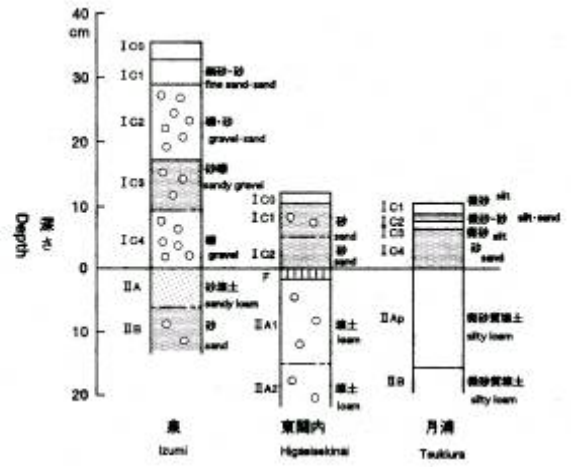


図-2 1978年噴火後の土壌断面図。
深さ0cm以上は火山噴出物、0cm以下は埋没土壌を示す。IC1～IC4は1977年噴出物を、IC0は1978年噴出物を示す。

Figure 2. Soil profiles after eruption in 1978. Tephras are shown above 0cm and buried soil is shown below 0cm. IC1-IC4 are tephras of 1977 eruption and IC0 is tephra of 1978 eruption.

表-1 調査地の概要

Table 1. General description of the study site.

調査地 Study site	標高 Altitude (m)	方位 Aspect	傾斜 Slope (°)	噴出源からの距離 Distance from the summit (km)	1977 噴出物の堆積厚 Depth of tephra erupted in 1977 (cm)	1978 噴出物の堆積厚 Depth of tephra erupted in 1978 (cm)	林相 Stand type	1977 年時の林齢 Stand age in 1977
泉 Izumi	180	NE	5	3.5	33	2	広葉樹二次林 Secondary hardwood forest	—
東関内 Higasisekinai	260	W	7	7.4	10	1	トドマツ人工林 <i>Abies sachalinensis</i> plantation	20
月浦 Tsukiura	200	SE	2	6.8	10	0	カラマツ人工林 <i>Larix kaempferi</i> plantation	9

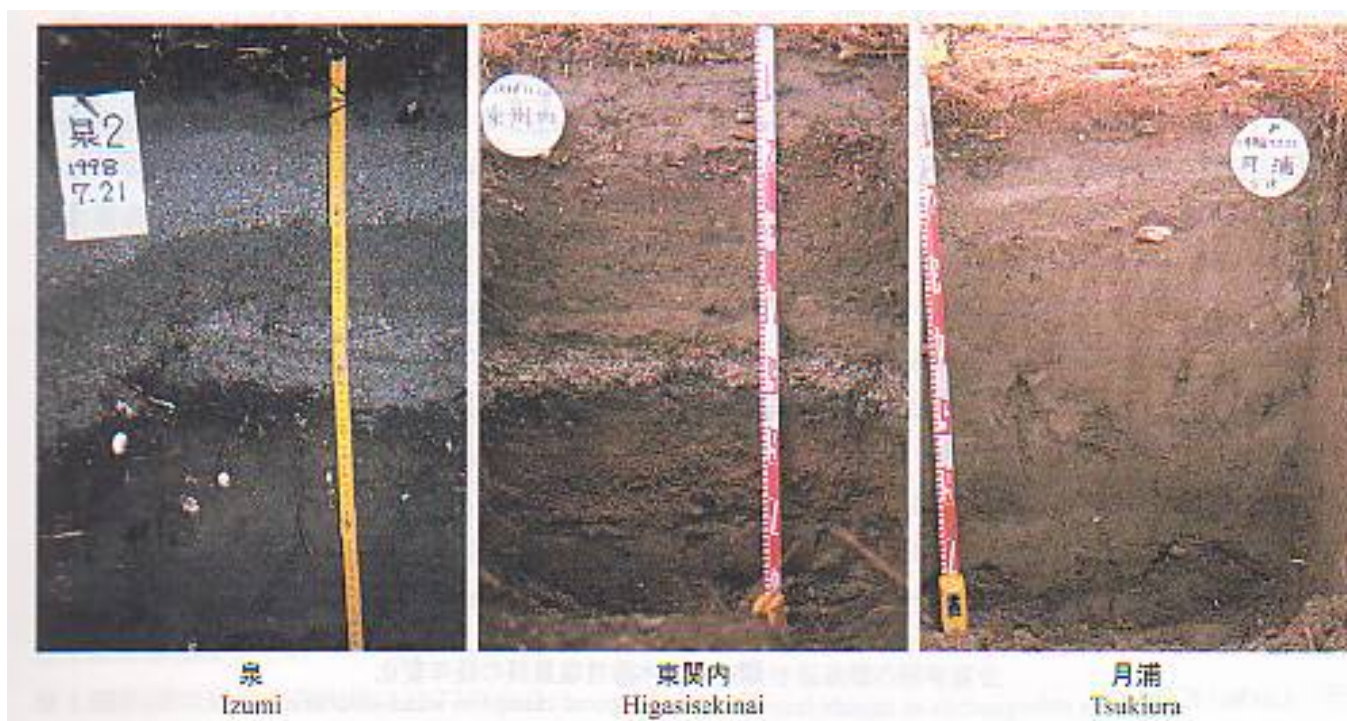


写真-1 1998年の土壌断面写真

Photo. 1. Photographs of soil profiles in 1998.

で 48 時間乾燥させることにより絶乾重を測定し、風乾重に対する絶乾重の比を求めて、塩基類濃度については絶乾重当たりの濃度に、また炭素含有率については絶乾重に対する炭素重の割合に換算した。

pH は 10g の風乾細土を 25cc の純水に混ぜ、攪拌した後、pH メーター（東亜HM-40V型）で測定した。

以上の測定は各層位ごとに行ったが、結果では 1977 年噴出物、1978 年噴出物、埋没土壌に 3 区分し、各区分に含まれる層位の値を区分ごとに平均して示す。

結 果

1. 水溶性塩基類の経時変化（図-3）

(1) Ca

1977 年噴出物の Ca 濃度は 1978 年にピークに達した後徐々に低下した。1978 年噴出物の Ca 濃度は当初 3 年間は徐々に低下したが、1988 年には大幅な増加が見られた。埋没土壌の Ca 濃度は 1978 年あるいは 1979 年に増加した後、低下したが、泉では 1998 年に増加した。

(2) Mg

全体に Ca の変化パターンと類似していた。1977 年噴出物の Mg 濃度は 1978 年にピークに達した後は徐々

に低下傾向にあった。1978年噴出物のMg濃度は徐々に低下したが、1998年には大きく増加した。埋没土壌のMg濃度は1977年あるいは1978年にピークに達した後、低下傾向にあったが、1998年には泉と月浦で増加した。

(3) K

1977年噴出物のK濃度は当初4年間は1978年あるいは1980年をピークにした変化が見られ、1998年に最大に達した。1978年噴出物のK濃度は堆積後、徐々に減少したが、1998年に最大に達した。埋没土壌のK濃度は当初4年間はいずれかの年にピークに達した後は減少傾向にあったが、1998年には再び増加した。

(4) Na

1977年噴出物のNa濃度は当年あるいは1年後にピークに達した後比較的急速に低下し、1998年にはやや増加が見られた。1978年噴出物のNa濃度は急速に低下し、1998年にはやや増加が見られた。埋没土壌のNa濃度は1977年が最も高く、若干の変動を伴いながら徐々に減少し、1998年にはやや増加した。

(5) Ca+Mg+K+Na

以上の4水溶性塩基の合計値の経年変化を見ると、1977年噴出物の濃度は1977年あるいは1978年をピークに徐々に減少し、噴火21年後の濃度は4年後と同様の値であった。1978年噴出物の濃度は1977年噴出物よりも塩基類濃度は高かったがその後減少し、5年後から21年後の間に腐植の発達により大きく増加した。埋没土壌の濃度は1977年から減少傾向を辿り、1981年から1998年にかけては増加傾向にあった。

2. 置換性塩基類の経時変化 (図-4)

(1) Ca

1977年噴出物のCa濃度は大きな変化は見られなかった。1978年噴出物のCa濃度は初めの3年間は緩やかな減少傾向にあったが、1998年には大きく増加した。埋没土壌のCa濃度は増減を繰り返しながら、長期的には減少傾向にあった。

(2) Mg

Caと類似した変化パターンを示した。1977年噴出物のMg濃度は大きな変化は見られなかった。1978年噴出物のMg濃度は当初3年間は変動が小さかったが、1998年には大きく増加した。埋没土壌のMg濃度は泉では1980年以降は減少したが、東関内と月浦では一定の傾向は見られなかった。

(3) K

1977年噴出物のK濃度は緩やかに増加した。1978年噴出物のK濃度は泉では1980年にピークを持つ変化

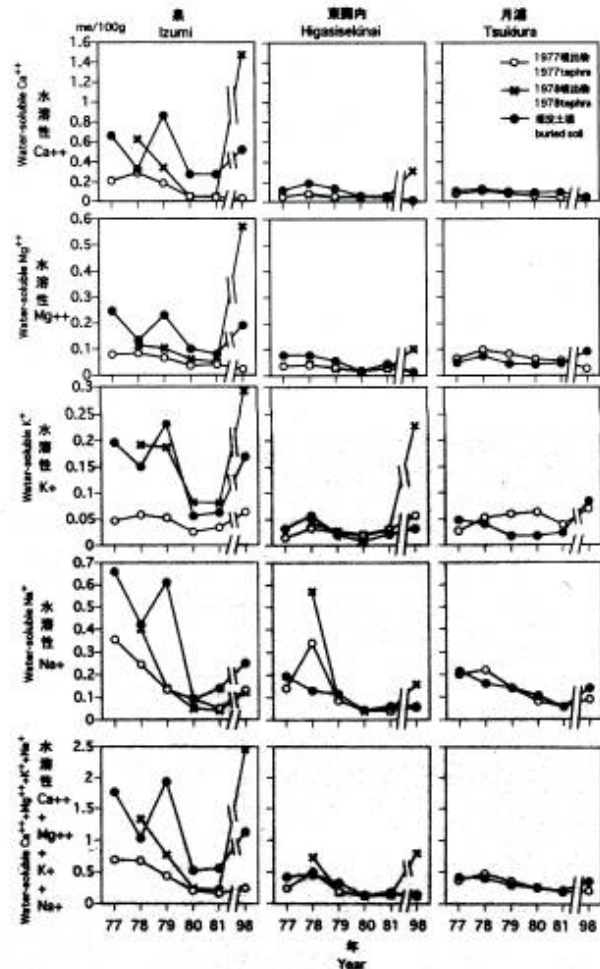


図-3 水溶性塩基類の経年変化

Figure 3. Temporal change in water-soluble cations

と、1977年噴出物の濃度は1977年あるいは1978年をピークに徐々に減少し、噴火21年後の濃度は4年後と同様の値であった。1978年噴出物の濃度は1977年噴出物よりも塩基類濃度は高かったがその後減少し、5年後から21年後の間に腐植の発達により大きく増加した。埋没土壌の濃度は1977年から減少傾向を辿り、1981年から1998年にかけては増加傾向にあった。

を示したが、東関内では徐々に増加した。埋没土壌のK濃度は泉と東関内では途中でピークを持つ変化を示したが、月浦では初め減少し、1998年に増加するという逆の変化を示した。

(4) Na

1977年および1978年噴出物、埋没土壌ともにNa濃度は減少傾向にあった。減少速度は他の3元素に比べて速かった。

(5) Ca+Mg+K+Na

噴出物における4元素合計の置換性塩基濃度は水溶性塩基に比べて当初4年間の減少速度が小さかった。土壌表層に当たる1978年噴出物(泉、東関内)、1977年噴出物の最表層(月浦)の置換性塩基濃度は1981年から1998年にかけて、1~5.82me/100gから6.29~14.26me/100gと大きく増加した(付表-1)。埋没土壌における置換性塩基濃度は水溶性と異なり、1981年から1998年にかけての減少が顕著だった。

3. pHの変化

1977年噴出物、1978年噴出物のpHは1981年までは減少傾向にあったが、1998年にかけてはほぼ横ばいであった(図-5)。埋没土壌のpHは泉や東関内では1977年から1978年にかけて上昇したが、その後は緩やかに減少した。月浦では埋没土壌のpHの変化は小さかった。

4. 土壌への炭素集積速度の推定

1977年噴出物の炭素含有率は泉、東関内では少なく、その後もほとんど変化しなかった(図-5)。月浦では1978年噴出物がないため、1981年から1998年にかけてリターの堆積、腐植の増加により炭素含有率が大きく増加した。1978年噴出物の炭素含有率は1981年から1998年にかけてリターの堆積、腐植の増加により大きく増加した。埋没土壌の炭素含有率は場所により傾向は異なり、泉では横ばい傾向、東関内では減少傾向、月浦では増加傾向にあった。

1998年までの炭素含有率の増加が著しか

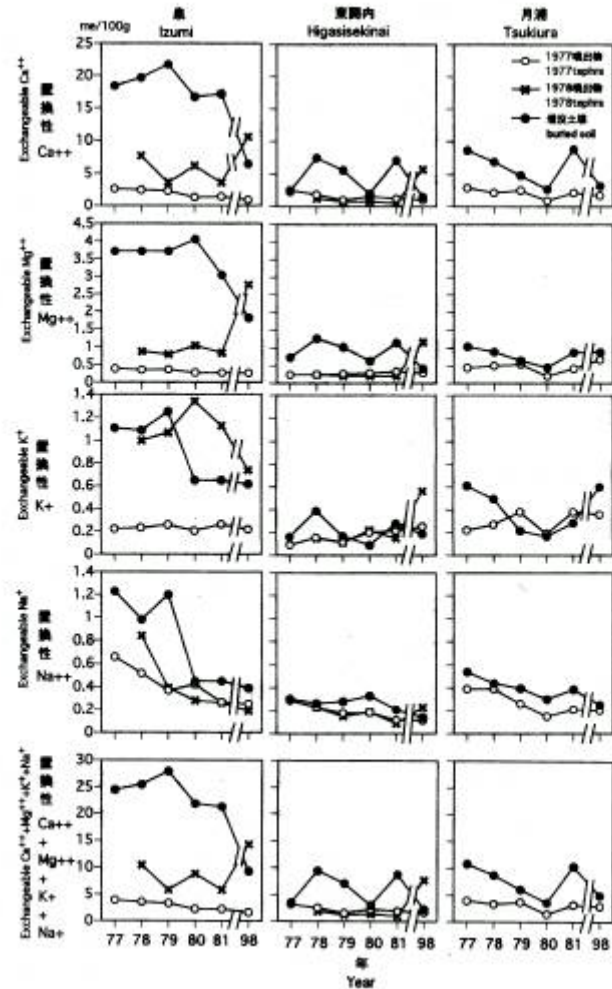


図-4 置換性塩基類の経年変化

Figure 4. Temporal change in exchangeable cations

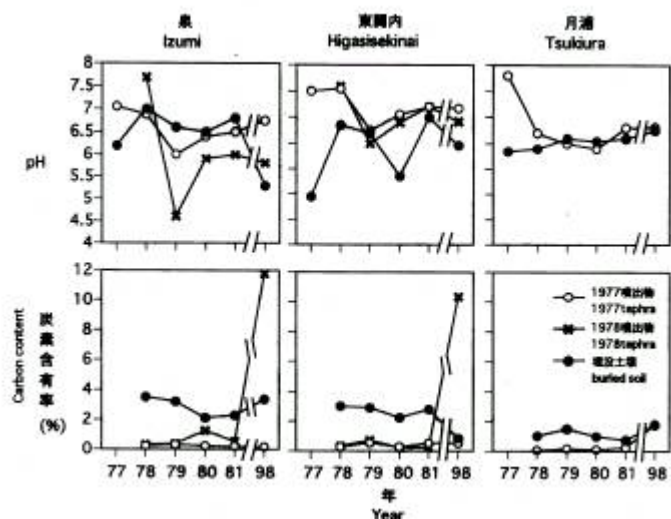


図-5 pH (上段) と炭素含有量 (下段) の経年変化

Figure 5. Temporal changes of pH (upper) and carbon content (lower).

ったA層である最表層について炭素集積速度の推定を試みた。この火山灰の容積密度は $1\sim 1.3\text{ g/cm}^3$ とされている(岡島ほか, 1978)ので, 1998年の炭素含有率(付表-1)と土壌層厚(泉3.5cm, 東関内1cm, 月浦2cm)と併せて, 面積当たりの炭素重量を求め, 1977年からの年数21で割ると, 広葉樹二次林の泉では $1.967\sim 2.557\text{ t/ha/yr}$, トドマツ人工林の東関内では $0.495\sim 0.643\text{ t/ha/yr}$, カラマツ人工林の月浦では $0.657\sim 0.852\text{ t/ha/yr}$ となった。

考 察

1. 塩基類およびpHの変化

1977, 1978年噴出物の特徴としてはpHが最大8程度と高いこと, 高い水溶性・置換性CaとNaが挙げられる(岡島ほか, 1978)。その理由として今回の噴火が, 外輪山に囲まれた火口原内で弱アルカリ性の水の影響を受けて堆積した土壌を巻き込む形で起きたためである, と指摘されている(近堂ほか, 1978)。

1977年噴出物の水溶性塩基類濃度が1978年にピークに達するのは(図-3), 風化して水溶性成分が増加するには1年程度かかるためであると推察される。その後塩基類が下方へ移動することにより, 濃度は減少したものと考えられる。1981年から1998年にかけては水溶性CaとMgは低下したが, KとNaは増加した。後者はリターからの成分の溶出が多かったと思われる。1978年噴出物の水溶性塩基類濃度が1981年から1998年にかけて大きく増加したのは, この噴出物が1998年には腐植を含むA層となっているため, リターからの供給によるものと思われる。埋没土壌の水溶性塩基類濃度も1977年噴出物の風化の遅れに対応するように, 堆積1~2年後がピークになったものと思われる。いずれの土壌区分でも水溶性Naは他の元素に比べると, ピークに達する年が早く, 下方への移動スピードが違いことがうかがえる。Na以外の3元素の間では移動スピードに顕著な違いは見られなかったが, 本研究と近接した場所で1977年から1980年まで塩基類濃度を調べた西本ほか(1982)の研究では $\text{Na} > \text{K} \cdot \text{Mg} > \text{Ca}$ と報告されている。岡島ほか(1978)はNaの溶出速度が最も速い, としている。

1977年噴出物の1977年時点での水溶性塩基の濃度は $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K}$ の順であった。有珠山頂から東に約3.9km離れた大平(伊達市)では $\text{Na} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$ という報告があり(岡島ほか, 1978), 場所による若干の違いはあるがほぼ同じ傾向であると言える。

有珠山の1977年噴出物の噴火直後の置換性塩基類濃度は $\text{Ca} 1.25\sim 4.3\text{ me}/100\text{g}$, $\text{Mg} 0.17\sim 0.46\text{ me}/100\text{g}$, $\text{K} 0.06\sim 0.4\text{ me}/100\text{g}$, $\text{Na} 0.28\sim 0.9\text{ me}/100\text{g}$ であった(付表-1)。1978年噴出物の噴火直後の置換性塩基類濃度は $\text{Ca} 1.25\sim 7.7\text{ me}/100\text{g}$, $\text{Mg} 0.25\sim 0.87\text{ me}/100\text{g}$, $\text{K} 0.15\sim 1\text{ me}/100\text{g}$, $\text{Na} 0.23\sim 0.84\text{ me}/100\text{g}$ であった。いっぽう十勝岳の1988年噴火直後の噴出物では $\text{Ca} 12.5\sim 34.5\text{ me}/100\text{g}$, $\text{Mg} 0.22\sim 0.52\text{ me}/100\text{g}$, $\text{K} 0.01\sim 0.04\text{ me}/100\text{g}$, $\text{Na} 0.05\sim 0.18\text{ me}/100\text{g}$ であった(真田ほか, 1990)。有珠山の噴出物は十勝岳に比べてCaが少なく, KおよびNaが多いという特徴を持つと言える。

1977年噴出物の置換性塩基類はNaが下方へ移動した以外は顕著な変化は見られず, 他の3元素は移動しにくかったと考えられる(図-4)。1978年噴出物の置換性CaとMgは1981年から1998年にかけての増加が顕著で腐植の増加によるものと思われるが, 置換性KとNaは泉では減少したが, 東関内では増加した。林分の違いによって置換性K, Naの増減に違いが生じた原因は現段階では不明である。

噴出物における置換性塩基濃度が水溶性塩基に比べて減少速度が小さかったこと(図-4)は西本ほか(1982)の報告とも一致する。今回の置換性塩基濃度の算出方法によると, 置換性塩基には水溶性成分と非水溶性成分が含まれている。水溶性成分は減少速度が大きかったので(図-3), 置換性塩基のうち非水溶性成分が移動しにくかったものと考えられる。

十勝岳において噴火から63年を経過した泥流の表層の置換性塩基濃度は $0.33\sim 0.82\text{ me}/100\text{g}$, 131年を経過した泥流では $13.93\text{ me}/100\text{g}$ と置換性塩基濃度の増加は1977年有珠山噴火による噴出物に比べて緩慢であ

った（真田ほか，1990）。十勝岳では噴火により植生が完全に破壊された後に森林が回復しつつあるという条件であることから，森林の有無が置換性塩基の増加に大きな影響を与え得ると言える。

埋没土壌における置換性塩基濃度が，1981年から1998年にかけて減少したのは，水溶性塩基は増加している（図-3）ことから，非水溶性成分の減少によると言える。噴出物における置換性塩基は増加していることを考え併せると，水溶性塩基はリターから噴出物，噴出物から埋没土壌へと移動しやすいのに対し，非水溶性成分はリターから噴出物へは移動するが，噴出物から埋没土壌へは移動しにくいことが推察される。噴出物のpHが当初減少したのは塩基類の流失によるものであろう（西本ほか，1982）。逆に埋没土壌のpHの上昇は塩基類の集積に伴う水素イオン濃度の減少によるものと考えられる（図-5）。特にトドマツ林である東関内では1977年の埋没土壌のpHが4.95と低く，1977年から1978年のpHの上昇が顕著だったことから，塩基類の集積の影響を強く受けたと考えられる。霧島火山群新燃岳の噴火による噴出物はpHが低く，SO₃の含有量が多く，pHが4以下の場所ではスギ，ヒノキなどの造林木が噴火から8ヵ月を経過してから枯損するなどの被害が見られた（明石，1965）。1977年有珠山噴火による噴出物でこのような被害が見られなかったことには，硫酸化物濃度が低いこと（近堂ほか，1978）や，水溶性塩基類に富んでpHが高かったことなどが大きく関係していると思われる。水溶性塩基に富んでいる理由は考察の冒頭で述べたが，硫酸化物濃度が低い理由は，火口原で堆積物が堆積する間，中央火口丘ではSO₂，H₂Sガスの活動が比較的微弱であったためであると推察されている（近堂ほか，1978）。

十勝岳で噴火からの経過年数が0年，63年，131年，と異なる泥流の化学性を調べたところ，pHは直後の3.2～3.5から時間の経過とともに4.7～5.6と増加が見られた（真田ほか，1990）。このように噴火直後に酸性あるいはアルカリ性に傾いていた噴出物は時間経過とともに中性に近づいていくものと考えられる。

2. 土壌への炭素集積速度

瀬戸内海沿岸の花崗岩を母材とした荒廃地に年代を変えて植栽されたヒメヤシャブシ，オオバヤシャブシ，ヤマハンノキ，ニセアカシア，アカマツなどから成る森林の土壌炭素含有率を時系列に並べて炭素含有率の時間変化を調べた研究（堤，1963）によると，20年間の炭素集積速度は0.58t/ha/yrであった。スリナムのフェラルソル土壌における植林後50年間の炭素集積速度は0.23～0.73t/ha/yrであった（Van Breemen and Feijtel，1990）。1977有珠山噴火による噴出物での炭素集積速度はこれらと同等か数倍程度で，地域が異なっても類似した値であると言える。北海道有林の天然林固定成長量試験地における地上部の炭素固定速度は1.09t/ha/yrと推定されている（梅木，1995）。道北地方の針広混交林では0.85t/ha/yr，トドマツ人工林一とカラマツ人工林ではいずれも1.7t/ha/yr，ウダイカン八二次林では0.41t/ha/yr，溪畔ヤナギ類二次林では1.59t/ha/yrと推定されている（白石ほか，1997）。以上の推定はいずれも根や土壌への炭素集積は無視されている。しかし本研究から，未熟火山灰土壌への炭素集積速度は地上部と同じオーダーであることが明らかになったので，未熟土壌や耕作放棄地への造林を考える場合には，土壌への炭素集積量は無視できないと考える。

謝 辞

土壌化学性の分析においては北海道立中央農業試験場の木場稔信さんにご指導を頂いた。ここに感謝の意を表する。

引 用 文 献

- 明石諫男 1965 降灰地の土壌の変化（1959年霧島火山群新燃岳の爆発による林木の被害）. 林試研報 182 : 79-82.
- 北海道立林業試験場 1979 1977年有珠山噴火による被害森林の復旧に関する調査報告. 50pp 美唄.

- 菊地 健・山根玄一 1980 1977年有珠山噴出物堆積層のその後の変化. 光珠内季報 46:6-8.
- 近堂祐弘・近藤練三・勝井義雄 1978 1977年8月噴出の有珠火山灰の粘土鉱物. 土壤肥料学雑誌 49:167-169.
- 西本哲昭・塩崎正雄・山本 肇・石塚和裕 1982 1977~1978年有珠山噴火による噴出物ならびに埋没森林土壌の3年間の変化. 日林誌 64:257-265.
- 岡島秀夫・佐久間敏雄・今井弘樹・飯塚文男・木曾誠二・谷山一郎 1978 有珠山1977年噴出物の土壌母材としての理化学的特性. 有珠山噴火と環境変動, 141-145, 北海道大学.
- 真田 勝・真田悦子・太田誠一 1990 十勝岳の泥流とその土壌化について. 日林論 101:269-270.
- 札幌管区气象台 1983 北海道の気候. 319pp 日本気象協会北海道本部 札幌.
- 白石則彦・石橋 聡・佐野 真 1997 森林による炭素固定能の評価. 日林北支論 45:110-113.
- 寺渾和彦・梅木 清・八坂通恭 2000 1977年有珠山噴火による降灰が森林に及ぼした影響(II) 北林試研報 37:印刷中.
- 堤利夫 1963 森林の成立および皆伐が土壌の2・3の性質に及ぼす影響について(I)森林の成立にともなう土壌の性質の変化. 京大演報 34:37-64.
- 梅木 清 1995 北海道の天然林による炭酸ガス吸収. 光珠内季報 100:15-17.
- Van Breemen, N. and T. C. J. Feijtel 1990 Soil processes and properties involved in the production of greenhouse gases, with special relevance to soil taxonomic systems. in Soils and the greenhouse effect, A. F. Bouwman (ed.), pp. 195-223, John Wiley & Sons, New Ybrk.
- 山根玄一・菊地 健・寺渾和彦 1982 有珠山噴火にともなう被害森林の復旧-被害森林の今後の推移と復旧方法. 光珠内季報 53:39-41.

Summary

Usu Volcano, Hokkaido, northern Japan erupted from August 1977 to September 1978. For the purpose to clarify the effect of tephra deposition on living trees, chemical properties of tephra from the eruption of Usu Volcano and buried soil were investigated for years (1977 to 1981) and after twenty-one years (1998) from the eruption. Thickness of tephra in three investigated sites were from 10cm to 35cm. Concentration of water-soluble cations of tephra reached maximum just after the eruption or after one year from the eruption, then decreased for several years. It was constant from 1981 to 1988. While, concentration of water-soluble cations of surface horizon of tephra greatly increased from 1981 to 1998. Concentration of water-soluble cations of buried soil decreased for four years after the eruption, then increased from 1981 to 1998. The concentration of the constituents of tephra just after the eruption decreased in the order $Na > Ca > Mg > K$. The constituents moved from upper horizon to lower horizon. The mobility of Na was highest in the constituents. Temporal change pattern of concentration of exchangeable cations of tephra was similar with that of water-soluble cations. But change rate of exchangeable cations was lower than water-soluble cations. Concentration of exchangeable cations of buried soil increased a little for first four years, then decreased from 1981 to 1998. The concentration of the constituents of tephra just after the eruption decreased in the order $Ca > Na > Mg > K$. The downward mobility of Na was highest in the constituents. PH of tephra was 6.8 to 7.7 first, then decreased to 5.9 to 6.9 in 1981. It was constant from 1981 to 1998. Carbon content of tephra was very little for first four years, then greatly increased in surface horizon in 1998. The rate of carbon accumulation into soil was estimated at 0.459 to 2.557t/ha/yr.

Keywords : Usu volcano, water-soluble cation, exchangeable cation, volcanic tephra, carbon accumulation

付表-1 土壌層ごとの測定値

単位は塩基類は me/100g, 炭素含有量は重量%で表す。月浦の I C1~I C4 は 1977 年から 1981 年までは 1 つの層として測定したため、同一の値を示す。

Appendix 1. Whole measurements of soil chemistry in each horizon.

Unit of cations is me/100g, and unit of carbon content is weight percent. Because I C1~I C4 horizons in Tsukiura were measured as one horizons from 1977 to 1978, those measurements are the same value.

調査地 Study site	土壌層 Soil horizon	水溶性Ca Water-soluble Ca				水溶性Mg Water-soluble Mg				水溶性K Water-soluble K				水溶性Na Water-soluble Na											
		1977	1978	1979	1980	1981	1998	1977	1978	1979	1980	1981	1998	1977	1978	1979	1980	1981	1998						
		1977	1978	1979	1980	1981	1998	1977	1978	1979	1980	1981	1998	1977	1978	1979	1980	1981	1998						
泉 Izumi	I C0	-	0.625	0.344	0.047	0.047	1.4725	-	0.1144	0.1029	0.0601	0.0494	0.5703	-	0.1918	0.1867	0.0816	0.0801	0.2921	-	0.4	0.14	0.05	0.04	0.1223
	I C1	0.125	0.294	0.078	0.047	0.0315	0.0465	0.0905	0.1012	0.0601	0.0568	0.0436	0.0384	0.0655	0.1159	0.0678	0.0417	0.0384	0.0921	0.23	0.4	0.14	0.05	0.04	0.0958
	I C2	0.1875	0.3815	0.1	0.0315	0.025	0.008	0.0436	0.0807	0.0412	0.0107	0.0255	0.0132	0.0217	0.0266	0.032	0.0115	0.0335	0.0635	0.28	0.21	0.09	0.11	0.04	0.1185
	I C3	0.1565	0.1345	0.125	0.0405	0.047	0.025	0.079	0.065	0.0519	0.0329	0.0494	0.0165	0.0371	0.0371	0.0384	0.0256	0.0289	0.0369	0.33	0.13	0.1	0.09	0.05	0.1638
	I C4	0.3815	0.344	0.443	0.078	0.053	0.028	0.1029	0.0848	0.1115	0.0436	0.0436	0.0231	0.0624	0.0524	0.0701	0.0207	0.0335	0.0595	0.58	0.24	0.2	0.12	0.07	0.1482
東園内 Higashisekinai	II A	0.6625	0.328	0.8625	0.275	0.275	0.5188	0.2469	0.1342	0.2313	0.1012	0.0807	0.1917	0.1967	0.1504	0.2315	0.056	0.0624	0.1693	0.66	0.42	0.61	0.09	0.14	0.2505
	I C0	-	0.072	0.0405	0.047	0.0405	0.3117	-	0.0436	0.0255	0.0156	0.0255	0.1015	-	0.0437	0.0266	0.0207	0.0304	0.2282	-	0.57	0.09	0.04	0.04	0.1573
	I C1	0.047	0.072	0.0405	0.047	0.0405	0.0221	0.0329	0.0436	0.0255	0.0156	0.0255	0.0165	0.0148	0.0437	0.0266	0.0207	0.0304	0.0596	0.14	0.57	0.09	0.04	0.04	0.0489
	I C2	0.053	0.094	0.0625	0.072	0.047	0.009	0.0395	0.0362	0.0362	0.0189	0.0329	0.0099	0.0148	0.0217	0.0217	0.0153	0.0289	0.0534	0.14	0.11	0.08	0.05	0.04	0.0612
	II A upper	0.1405	0.275	0.197	0.072	0.0625	0.0071	0.0823	0.0979	0.0724	0.0189	0.0568	0.0134	0.045	0.0698	0.0266	0.0059	0.0251	0.0415	0.21	0.15	0.12	0.05	0.05	0.0671
月浦 Tsukiura	II A lower	0.094	0.1095	0.078	0.047	0.053	0.0101	0.0724	0.0568	0.0395	0.0189	0.0329	0.0166	0.0187	0.0437	0.0128	0.0115	0.0164	0.0217	0.18	0.11	0.11	0.04	0.07	0.0526
	I C1	0.078	0.1095	0.078	0.053	0.0405	0.0997	0.065	0.0979	0.0823	0.0617	0.0568	0.0638	0.0266	0.0524	0.0591	0.0624	0.0384	0.1252	0.2	0.22	0.14	0.08	0.056	0.1526
	I C2	0.078	0.1095	0.078	0.053	0.0405	0.0312	0.065	0.0979	0.0823	0.0617	0.0568	0.0265	0.0266	0.0524	0.0591	0.0624	0.0384	0.0557	0.2	0.22	0.14	0.08	0.056	0.0894
	I C3	0.078	0.1095	0.078	0.053	0.0405	0.007	0.065	0.0979	0.0823	0.0617	0.0568	0.0133	0.0266	0.0524	0.0591	0.0624	0.0384	0.0505	0.2	0.22	0.14	0.08	0.056	0.0595
	I C4	0.078	0.1095	0.078	0.053	0.0405	0.0085	0.065	0.0979	0.0823	0.0617	0.0568	0.0132	0.0266	0.0524	0.0591	0.0624	0.0384	0.0561	0.2	0.22	0.14	0.08	0.056	0.0699
II Ap	0.1875	0.1625	0.1095	0.0875	0.053	0.0256	0.065	0.0667	0.0477	0.0436	0.0362	0.0236	0.0801	0.0471	0.0233	0.0153	0.0148	0.0934	0.26	0.18	0.14	0.06	0.04	0.1088	
	0.0315	0.1	0.094	0.1	0.1405	0.0722	0.0329	0.0823	0.0412	0.0412	0.0568	0.1611	0.0164	0.0335	0.0113	0.0189	0.032	0.073	0.17	0.14	0.14	0.15	0.07	0.1684	
II B	0.0315	0.1	0.094	0.1	0.1405	0.0722	0.0329	0.0823	0.0412	0.0412	0.0568	0.1611	0.0164	0.0335	0.0113	0.0189	0.032	0.073	0.17	0.14	0.14	0.15	0.07	0.1684	
	0.0315	0.1	0.094	0.1	0.1405	0.0722	0.0329	0.0823	0.0412	0.0412	0.0568	0.1611	0.0164	0.0335	0.0113	0.0189	0.032	0.073	0.17	0.14	0.14	0.15	0.07	0.1684	
泉 Izumi	I C0	-	7.7	3.6	6.15	3.6	10.56	-	0.87	0.79	1.04	0.83	2.7667	-	1	1.07	1.34	1.13	0.7397	-	0.84	0.39	0.28	0.26	0.1894
	I C1	4.3	2.9	2.5	1.45	1.1	0.9756	0.57	0.42	0.37	0.36	0.27	0.3809	0.4	0.43	0.36	0.4	0.43	0.312	0.57	0.77	0.37	0.26	0.24	0.1664
	I C2	1.25	1.25	1.1	0.35	0.35	0.915	0.17	0.17	0.23	0.11	0.12	0.1493	0.08	0.11	0.15	0.08	0.11	0.1227	0.55	0.49	0.35	0.64	0.23	0.3173
東園内 Higashisekinai	I C3	2.35	1.95	1.95	1.45	1.65	0.8328	0.36	0.32	0.37	0.28	0.33	0.244	0.18	0.18	0.26	0.17	0.31	0.2487	0.62	0.3	0.35	0.37	0.31	0.2045
	I C4	2.5	3.6	3.575	1.95	2.5	0.7895	0.46	0.5	0.48	0.33	0.36	0.2751	0.23	0.21	0.24	0.17	0.2	0.1871	0.9	0.51	0.42	0.41	0.28	0.3061
	II A	18.4	19.65	21.75	16.7	17.15	6.4506	3.72	3.72	3.72	4.06	3.04	1.8129	1.11	1.09	1.25	0.65	0.65	0.615	1.23	0.98	1.2	0.45	0.45	0.3884
	I C0	-	1.25	0.75	0.75	0.55	5.7682	-	0.25	0.21	0.21	0.21	1.1649	-	0.15	0.11	0.22	0.15	0.5647	-	0.23	0.15	0.19	0.09	0.2286
	I C1	1.8	1.25	0.75	0.75	0.55	1.0926	0.17	0.25	0.21	0.21	0.21	0.247	0.06	0.15	0.11	0.22	0.15	0.2743	0.28	0.23	0.15	0.19	0.09	0.1079
月浦 Tsukiura	I C2	3.25	2.5	1.25	2.35	1.95	1.0106	0.32	0.25	0.33	0.37	0.46	0.345	0.12	0.16	0.12	0.18	0.28	0.2287	0.3	0.23	0.21	0.18	0.15	0.1232
	II A upper	2.5	10	7.7	1.8	9.25	2.2211	0.67	1.54	1.21	0.5	1.21	0.5536	0.21	0.44	0.22	0.09	0.35	0.2314	0.33	0.3	0.28	0.35	0.21	0.1524
	II A lower	2.15	5	3.6	2.15	5	0.825	0.79	1	0.83	0.75	1.08	0.2857	0.11	0.34	0.12	0.09	0.21	0.1452	0.28	0.23	0.28	0.31	0.21	0.1567
	I C1	2.9	2.15	2.5	0.9	2.15	4.1222	0.44	0.5	0.54	0.21	0.42	1.3555	0.22	0.27	0.38	0.19	0.38	0.5325	0.39	0.39	0.26	0.15	0.21	0.2776
	I C2	2.9	2.15	2.5	0.9	2.15	1.3801	0.44	0.5	0.54	0.21	0.42	0.5694	0.22	0.27	0.38	0.19	0.38	0.3216	0.39	0.39	0.26	0.15	0.21	0.1875
II Ap	I C3	2.9	2.15	2.5	0.9	2.15	1.1148	0.44	0.5	0.54	0.21	0.42	0.4357	0.22	0.27	0.38	0.19	0.38	0.327	0.39	0.39	0.26	0.15	0.21	0.1978
	I C4	2.9	2.15	2.5	0.9	2.15	0.9228	0.44	0.5	0.54	0.21	0.42	0.4847	0.22	0.27	0.38	0.19	0.38	0.3045	0.39	0.39	0.26	0.15	0.21	0.1712
	II Ap	6.55	6.15	5.6	2.9	5.75	3.1808	0.96	0.94	0.86	0.37	0.71	1.1321	0.66	0.47	0.32	0.22	0.25	0.6675	0.55	0.39	0.49	0.21	0.26	0.2791
	II B	10.75	7.7	4.1	2.5	11.9	3.2361	1.12	0.83	0.42	0.54	1.04	0.6253	0.56	0.52	0.11	0.11	0.32	0.5335	0.53	0.49	0.3	0.39	0.51	0.2214
	II B	10.75	7.7	4.1	2.5	11.9	3.2361	1.12	0.83	0.42	0.54	1.04	0.6253	0.56	0.52	0.11	0.11	0.32	0.5335	0.53	0.49	0.3	0.39	0.51	0.2214
炭素含有率 Carbon content	1977	1978	1979	1980	1981	1998	1977	1978	1979	1980	1981	1998													
	1977	1978	1979	1980	1981	1998	1977	1978	1979	1980	1981	1998													
泉 Izumi	I C0	-	0.31	0.37	1.26	0.53	11.784	-	7.7	4.6	5.9	6	5.81												
	I C1	-	0.15	0.32	0.44	0.17	0.0737	7.3	6.6	5.2	5.7	5.9	6.51												
	I C2	-	0.1	0.2	0	0.01	0.3102	7	7	6.2	6.8	6.5	7.07												
	I C3	-	0.09	0.18	0.18	0.14	0	6.9	6.9	6.1	6.6	6.7	6.75												
	I C4	-	0.53	0.53	0.22	0.4	0.216	7	7	6.5	6.5	6.9	6.66												
東園内 Higashisekinai	II A	-	3.52	3.22	2.13	2.31	3.3884	6.2	7	6.6	6.5	6.8	5.29												
	I C0	-	0.34	0.74	0.21	0.24	10.354	-	7.1	6	6.4	6.7	6.42												
	I C1	-	0.34	0.74	0.21	0.24	0.3654	6.8	7.1	6	6.4	6.7	6.86												
	I C2	-	0.23	0.37	0.36	0.82	0.6962	7.2	7	6.5	6.7	6.7	6.48												
	II A upper	-	3.04	2.93	2.26	2.83	1.5117	4.7	6.4	6.2	5.2	6.5	5.76												
月浦 Tsukiura	II A lower	-	1.69	1.63	1.87	1.35	0.2032	5.2	6.3	6.2	5.5	6.5	6.17												
	I C1	-	0.06	0.17	0.11	0.25	6.9267	7.3	6.2	6	5.9	6.3	5.65												
	I C2	-	0.06	0.17	0.11	0.25	1.2016	7.3	6.2	6	5.9	6.3	6.01												
	I C3	-	0.06	0.17	0.11	0.25	0.4403	7.3	6.2	6	5.9	6.3	6.38												
	I C4	-	0.06	0.17	0.11	0.25	0.2806	7.3	6.2	6	5.9	6.3	6.765												
II Ap	-	1.17	1.22	1.05	1.1	2.2132	5.6	5.8	6	5.9	6.1	6.09	</												