

原 著

紀藤典夫<sup>1</sup>・大槻隼也<sup>2</sup>・辻 誠一郎<sup>3</sup>・辻 圭子<sup>4</sup>：  
 降下テフラが植生に与える影響と長期的な回復過程  
 —完新世中期の十和田中楸テフラの例—

Norio Kito<sup>1</sup>, Jun-ya Ohtsuki<sup>2</sup>, Sei-ichiro Tsuji<sup>3</sup> and Keiko Tsuji<sup>4</sup>：  
 The impact of tephra fall on vegetation and long-term recovery processes：  
 A case study of the mid-Holocene Towada-Chuseri Tephra fall

**要 旨** 青森県八甲田山の田代湿原（標高 560～575 m）から採取されたコアの花粉分析の結果に基づき、十和田中楸テフラ（厚さ 7 cm；To-Cu；約 6000 cal yr BP）降下が植生に与える影響について考察した。分析の結果、テフラ降下以前はブナ属・コナラ属コナラ亜属を主とし、ハンノキ属等の落葉広葉樹からなる花粉組成で、安定した森林が復元された。テフラ直上では、コナラ属コナラ亜属は割合が著しく増加し 80% 以上に達する一方、その他の樹種は一律に割合が減少し、特にブナ属は 30% から 2.6% に減少した。テフラの上位 1.7 cm でコナラ属コナラ亜属は割合・含有量ともに急激に減少し、他の樹種の割合が増加して、上位 8.9 cm の層準（150～250 年後）でテフラ降下前の組成に近い安定した状態となった。ブナ属とコナラ属コナラ亜属のテフラ降下後の変化の著しい違いは、テフラ降下に対しブナは著しく耐性が低かった一方、ミズナラが強い耐性を持っているためと考えられる。非樹木花粉組成の変化に基づき、テフラ降下後、湿原植生は著しく組成が変化し、分析層準の最上位でもテフラ降下前に戻ることはなく、湿原の生育環境が大きく変化したものと推定した。

キーワード：火山噴火、花粉分析、完新世、植生

**Abstract** The impact of the Towada-Chuseri Tephra fall (7 cm thick; To-Cu; ~6000 cal yr BP) on vegetation was investigated by the pollen analysis of core samples obtained from Tashiro Mire (560–575 m a.s.l.), Aomori Prefecture, Japan. The results indicate that a stable *Fagus-Quercus* forest had been established before the tephra fall. Just after the tephra fall, *Quercus* subgen. *Lepidobalanus* percentages increased abruptly by more than 80%. Other tree pollens uniformly decreased, especially *Fagus*, which showed a significant decrease from 30% to 2.6%. *Lepidobalanus* subsequently showed a gradual decline beginning 1.7 cm above the tephra, whereas other trees showed gradual increases. At 8.9 cm above the tephra (150–250 years after the tephra fall), the arboreal pollen composition reached a stable state with a similar composition to that before the tephra fall. Contrasting responses of *Fagus* and *Lepidobalanus* after the tephra fall shows their tolerances for its impact. The non-arboreal pollen composition, mainly originating from mire vegetation, also changed appreciably after the tephra fall and did not return to the initial state, indicating that the mire condition was seriously altered.

**Key words:** Holocene, pollen analysis, vegetation, volcanic eruption

## は じ め に

プレート上の収束帯に位置する日本には 108 の活火山があり（気象庁、2003）、火山活動は珍しい現象ではない。そのため火山噴火時の植生の破壊とその後の回復についての

研究は数多く行われてきた。海外においても大規模な噴火による植生の破壊や回復過程が詳しく研究されている（例えば Whittaker et al., 1989; Antos & Zobel, 2005）。露崎（2001）は、それまでの現生植生に対する噴火の影響につ

<sup>1</sup> 〒040-8567 北海道函館市八幡町 1-2 北海道教育大学函館校

Hokkaido University of Education, Hakodate Campus, Hachimancho 1-2, Hakodate, Hokkaido, 040-8567, Japan

<sup>2</sup> 〒040-8567 北海道函館市八幡町 1-2 北海道教育大学函館校

Hokkaido University of Education, Hakodate Campus, Hachimancho 1-2, Hakodate, Hokkaido, 040-8567, Japan

（現在の所属：〒213-0023 神奈川県川崎市麻生区高石 3-25-1 川崎市立西生田小学校

Nishiikuta Elementary School, Takaishi 3-25-1, Aso-ku, Kawasaki, Kanagawa, 215-0003, Japan)

<sup>3</sup> 〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 東京大学大学院新領域創成科学研究科

Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, Kashiwanoha 5-1-5, Kashiwa, Chiba, 277-8561 Japan

<sup>4</sup> 〒277-0042 千葉県柏市逆井 4-7-8

Sakasai 4-7-8, Kashiwa, Chiba, 277-0042, Japan

いての研究をまとめ、火山噴火後の植生遷移が必ずしも一次遷移として経過するわけでないことを指摘するとともに、遷移の過程が植物供給源の状態や生物間相互作用、気候的要因等で大きく異なることを指摘した。また、火山遷移動態をより明らかにするためには、噴火前の植物群集構造を把握する必要があり、永久調査区による長期観測が必要であると述べた。

現在の植生に対する火山噴火の影響の研究は、多くの場合数年～数10年程度の植生遷移の初期状態の記録であり、長期にわたる動態については今後のさらなる長期的観察が必要である。数十年以上にわたる長期的な植生の変化に関しては、少ないながら、堆積物の分析による研究がある。辻 (1985)、辻・小杉 (1991) は花粉分析により始良 Tn テフラ降下前後 (29 ka; 奥野, 2002) の花粉組成を広域的に比較し、テフラ降下の影響により当時の全体的な植生変化の傾向 (寒冷化による針葉樹林の増加) を促進する効果があったと述べている。また、Ooi et al. (1990) も兵庫県において、始良 Tn テフラ降下後の植生への影響を花粉分析および植物化石により明らかにした。Kimura et al. (1996) は、屋久島における鬼界アカホヤテフラ (7.3～7.2 ka; 栗畑, 2013) 堆積後の植生の変化を花粉分析により研究し、構成種の絶滅や植生の変遷過程を記述した。松下 (2002) も同様に大隈半島中・南部において鬼界アカホヤテフラ降下前後の花粉組成を比較し、降灰後の照葉樹林が100～300年程度で回復したと推定した。また、湿原植生については、宝月ほか (1954)、橘・佐藤 (1983) は、湿原堆積物の植物遺体の分析から、テフラ降下後に湿原植生の変化を認め、テフラの降下が湿原の発達過程に影響したと考察した。しかし、これらの研究では、短い時間分解能で分析がされていないために、テフラ降下後の大まかな植生変化の過程が明らかにされずにすぎない。

火山の噴火が植生に与える影響は、噴火の規模や堆積物の種類、厚さの違い、地形、噴出源からの距離、噴火の季節、

積雪の有無など様々な要因が関与し、実に多様である (露崎, 2001; Antos & Zobel, 2005 など)。本研究は、青森県田代湿原から採取された堆積物のコアの十和田中振テフラ (約6000年前) 直上および直下の泥炭層を短い時間スケール (10年オーダー) で花粉分析し、複数の放射性炭素年代測定に基づいて、テフラ降下後の主要樹木の変化、森林組成の回復に要した時間、森林植生と湿原植生の変化の違いについて考察した。本研究で用いたコアには複数のテフラが含まれているが、噴出源および噴火の規模が明らかにされ、八甲田山周辺の数多くの地点で検出される十和田中振テフラ (早川, 1983 など) を研究対象とした。なお、本地点のテフラ降下が森林植生に与える影響の概略については、辻 (1985) が辻ほか (1983) の分析結果に基づいて言及している。

#### 十和田中振テフラの噴火の概要

十和田カルデラ (湖面標高400 m) は、第四紀に活発な火山活動をくり返し、最終氷期には大規模な火砕流を噴出した (Hayakawa, 1985)。完新世に入ってから、十和田南部テフラ (約8600  $^{14}\text{C}$  yr BP)、十和田中振テフラ (約5050  $^{14}\text{C}$  yr BP)、十和田aテフラ (AD915)などを噴出する活動が起こった (工藤ほか, 2003; 工藤・佐々木, 2007)。

5050  $^{14}\text{C}$  yr BPの噴火により堆積した十和田中振テフラ (以下、To-Cuと記す) は、下位から中振軽石、金ヶ沢軽石、宇樽部火山灰よりなり、3度の噴火によってもたらされたと考えられている。早川 (1983) によると中振軽石は、中程度の「強さ」のプリニー式噴火の産物であるとされる。この噴火の最末期には、火口内へ湖水が大量に流入し、マグマ水蒸気爆発へと噴火様式が変化して、ベースサージや火砕サージなどの横なぐりの爆風がカルデラ縁辺部を襲ったと考えられている。この時の堆積物が宇樽部火山灰層として残されている。To-Cuの3層の噴出物のうち、最下位

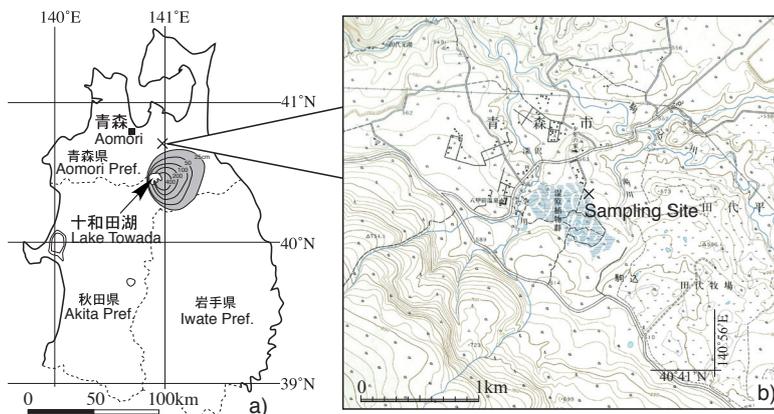


図1 調査地点の位置と十和田中振テフラの分布範囲。a) 灰色部は十和田中振テフラ (中振軽石) の等層厚線 (中心から厚さ400, 200, 100, 50, 25 cm; 早川, 1983 に基づく)。b) 田代湿原の試料採取地点を示す (国土地理院発行2万5000分の1地形図「田代平」を使用)。座標系は世界測地系。

Fig. 1 Location map of the study site, showing the distribution of the Towada-Chuseri Tephra. a) Shaded area showing isopachs of the tephra (Chuseri Pumice; 400, 200, 100, 50 and 25 cm in thickness after Hayakawa, 1983). b) Sampling site (after the topographic map "Tashirotai", scale 1:25,000, Geospatial Information Authority of Japan, 1996).

の中振軽石が最も広い分布域をもっており、この噴火が3回の噴火のうち最も破局的な活動をしたと考えられている。

本研究の調査地点である田代湿原は噴出源から北東に約25 kmの地点に位置する(図1a)。中振軽石の分布域は噴出源から東の方向に偏り(図1a)、噴出源付近には5 mもの厚さで堆積している。調査地の田代湿原には中振軽石が10 cm程度の厚さで堆積しているとされ(早川, 1983)、本研究に用いたコアからは2つの堆積ユニットからなる、厚さ約7 cmの火山灰が認められた。

## 試料採取と分析方法

### 1. 試料採取地点

試料採取地点は青森県八甲田山の北東斜面に位置する田代湿原(標高560~575 m, 40°41'52" N, 140°55'11" E; 世界測地系)で、辻ほか(1983)のコア採取地点とほぼ同一の地点である(図1b)。田代湿原は空川と湯ノ川間に形成された北東方向にゆるやかに傾斜する湿原で、東西・南北とも直径約1000 mの規模をもつ。試料採取地点は、現在の湿原の縁辺に位置するが、開発される以前は湿原が湯ノ川沿いにまで広がっており、かつての湿原の縁辺からは約300 mの位置にある。また、試料採取際の湿原植生の破壊を避けるため、開発されたこの地点を選定した。

湿原の植生は、全体的にヌマガヤが優占する中間湿原が広い面積を占めるが、湿原の中央には池塘が形成され、またミズゴケが優占する部分、ハイイヌツゲ、ヤチヤナギ、ノリウツギ等の灌木が生育する部分もある。また、一部にハンノキ、ダケカンバ、ナナカマド等の樹木が侵入している。

試料採取地点付近は開発された地点で、ヌマガヤが優占し、クマイザサも多く生育する。ハイイヌツゲ、ノリウツギ、ナガボノシロワレモコウ、シラカンバ、サワギキョウが部分的に生育する。また一部にアザミ類、レンゲツツジが生育する。湿原周辺の森林植生はブナが優占し、ミズナラ、ハウチワカエデ、シラカンバ、アズキナシなどを混生する落葉広葉樹林である。

### 2. 試料の採取および処理方法

試料はシンウォールサンプラー(径50 mm, 長さ30 cm)を使用し、深度438 cmまでのコア(TS-7)を採取した。本研究は、火山灰の降下前後の植生を復元することが研究の目的であるので、To-Cu(深度154~161 cm)を含む深度164~142 cmのコアを分析試料として使用した。

採取されたコアは半切し、一部を強熱減量測定用の試料とし、コアの接合部の深度約149~150 cmを除き、残りの部分は厚さ2 mmずつに切断する器具を作成して(図2a)、厚さ2 mm、面積9.0 cm<sup>2</sup>に整形し(図2b)、花粉分析用の試料とした。分析した層準の泥炭の層理面は概ね

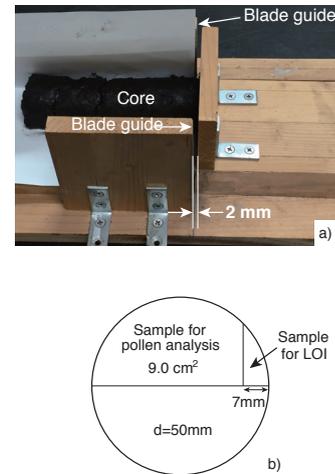


図2 a) コアを切断するために使用した器具。b) 花粉分析および強熱減量の測定に使用した試料の形状。

Fig. 2 a) Slicing tool for preparing samples. b) Transvers view of a core sample for pollen analysis and LOI.

水平で、それぞれの試料は時間面に著しく斜交してはいない。また、分析層準の泥炭は分解が進んでおり、極めて粘質で、切断の際に崩れることはなかった。強熱減量は、電気マッフル炉で900°C、30分間の灼熱による消費量を乾燥重量百分率で算出した。また、花粉分析は、紀藤・瀧本(1999)に準じ試料を処理した。

作成されたプレパラートは光学顕微鏡400倍で、花粉のカウント数の合計が1000個以上に達するまで同定し、その間に出現するすべての花粉・胞子を数えた。検鏡したカバーガラス上の面積から1試料あたりの花粉総数を算出し、含有量を求めた。花粉組成は、樹木花粉についてはその合計を基数とし、非樹木花粉・胞子についてもその合計を基数として百分率を算出した。ただし、モチノキ属、ヤマモモ属は非樹木花粉・胞子に含めた。

### 層序と年代および堆積速度

採取されたコアの中には、採取時に圧縮を受けて短くなったものや、膨張して長くなったものもあったが、それぞれのコアに対する圧縮・膨張の影響は均一であると仮定し、厚さを復元した柱状図を作成した(図3)。ただし、テフラ層や砂層は圧縮・膨張の影響を受けていないものとした。以下に述べる層序は、復元後の柱状図に基づくものである。

#### 1. 層序

コアは地表から深度438 cmまで得られ、406 cmまでは10数枚のテフラ層を含む泥炭、406~433 cmが粘土質泥炭、最下部の433~438 cmが十和田八戸火砕流堆

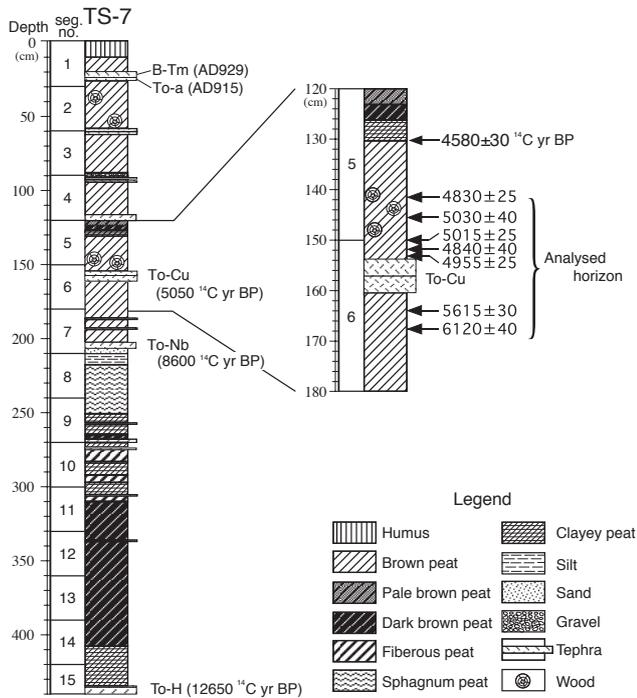


図3 地質柱状図および花粉分析層準。

Fig. 3 Geological columnar section of the core and the analyzed horizon.

積物である。泥炭は全体的には分解が進んでおり、部分的には木材を含み、粘土や砂を挟む層準がある。

同定されたテフラは上位から、白頭山苦小牧テフラ (B-Tm; 深度 21 ~ 25 cm; AD929; 辻ほか, 2010), 十和田 a テフラ (To-a; 深度 25 ~ 27 cm; AD915; 町田, 1996), To-Cu (深度 154 ~ 161 cm; 5050 yr BP; 辻・中村, 2001), 十和田南部テフラ (To-Nb; 深度 202 ~ 206 cm; 8470 yr BP; 辻ほか, 1983), 十和田八戸火砕流堆積物 (To-H; 深度 433 ~ 438 cm 下限不明; 12650 yr BP; 寺田ほか, 1994) で、他のテフラは起源不明である。To-Cu は 2 層の堆積ユニットからなり、下部は灰白色ない

し白色軽石 (厚さ 3.7 cm), 上部は灰白色火山灰 (厚さ 3.2 cm) である。粒度は 0.1 ~ 1.0 mm で、下部のユニットの方がやや粗粒である。

## 2. 年代測定

分析層準の年代は、AMS<sup>14</sup>C 年代測定により、To-Cu より上位の 12 cm の層準で 5 件、下位 7 cm の層準で 2 件の年代測定を行い (表 1), IntCal09 (Reimer et al., 2009) に基づいて、Calib 6.1.0 で較正年代を求めた。

これまでの研究による To-Cu の <sup>14</sup>C 年代測定値は複数あり、工藤・佐々木 (2007) は較正年代を 6.2 ka としたが、三内丸山遺跡から報告された多数の年代値 (辻・中村, 2001) が考慮されていなかった。これらを含めて検討し、本研究では複数の較正年代の 1σ の範囲 6207-5711 cal yr BP の中央値 5960 cal yr BP をこのテフラの年代とした。これらの年代値と深度の関係を図 4 に示した。

この結果に基づけば、泥炭の堆積速度は、To-Cu より下位の層準で 0.063 mm/yr (厚さ 2 mm の分析試料は約 30 年間の堆積物)、To-Cu より上位の層準は 0.35 ~ 0.56 mm/yr (同 4 ~ 6 年間) である。To-Cu より上位の層準は、深度と年代の関係に一部矛盾を生じており、信頼に足る深度-年代モデルを構築できなかった。以下では、図 4 に示す 2 つの深度-年代モデルをもとに考察する。

## 分析結果

分析試料の乾燥容積重、強熱減量、花粉含有量を図 5 に示した。また、百分率ダイヤグラムを図 6, 7 に、主要なタクサの百分率と含有量 (grains/cm<sup>3</sup>) の変化を図 8, 9 に示した。

乾燥容積重 (dry bulk density) は To-Cu 直下 (深度 160.7 ~ 163.9 cm) で高い値を示すが、これは泥炭中に火山灰が含まれているためである。また、To-Cu 直上 (深度 150.5 ~ 153.6 cm) でも同様に高い値を示すのは、粗粒砂が含まれているためである。花粉含有量が To-Cu より下位の層準で高く、上位の層準で低くなっているのは、

表 1 放射性炭素年代測定値

Table 1 Radiocarbon ages

| Depth (cm)  | Code        | Material | Conventional Age (yr BP) | Cal Age (1σ) | δ <sup>13</sup> C (‰) | Method |
|-------------|-------------|----------|--------------------------|--------------|-----------------------|--------|
| 130.3-130.6 | IAAA-130419 | Peat     | 4580 ± 30                | 5093-5436    | -27.0                 | AMS    |
| 141.3-141.5 | PLD-5277    | Peat     | 4830 ± 25                | 5489-5600    | -27.4                 | AMS    |
| 145.3-145.5 | IAAA-71987  | Peat     | 5030 ± 40                | 5717-5890    | -24.2                 | AMS    |
| 149.0-150.0 | PLD-5278    | Peat     | 5015 ± 25                | 5663-5861    | -28.1                 | AMS    |
| 151.8-152.0 | IAAA-71988  | Peat     | 4840 ± 40                | 5485-5641    | -25.7                 | AMS    |
| 153.1-153.4 | PLD-5279    | Peat     | 4955 ± 25                | 5647-5717    | -28.1                 | AMS    |
| 163.6-163.8 | PLD-5280    | Peat     | 5615 ± 30                | 6322-6437    | -28.5                 | AMS    |
| 167.2-167.4 | IAAA-71989  | Peat     | 6120 ± 40                | 6935-7155    | -24.9                 | AMS    |

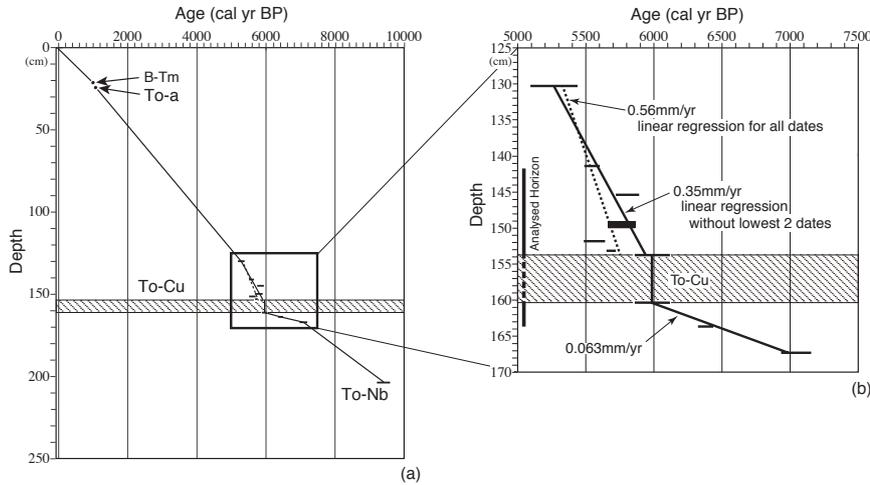


図4 深度年代図。  
Fig. 4 Age-depth diagram of the core.

To-Cu より下位の堆積速度が上位の堆積速度よりも平均で 6～8 倍遅いことに起因すると考えられる。また、テフラ直上の深度 148.5～153.6 cm の花粉含有量は非常に高い値を示す。単位重量あたりの花粉含有量の変化は、テフラの含有などの影響を受け系統的な変化を示さないので (図 5)、単位体積あたりの変化の方がより花粉堆積量の変化の指標として適切と判断し、単位体積あたりの花粉含有量を考察の対象とした。

1. 樹木花粉組成

高木花粉は全体として、コナラ属コナラ亜属 (以下コナラ亜属と表記)、ブナ属、ハンノキ属が高い割合で産出する。これらの 3 属の変化を主要な基準とし、以下の 5 つの花粉帯 (TS- I 帯～TS-V 帯) に区分した (図 6)。

**TS-I 帯** (試料 79～65；深度 163.9～160.6 cm)  
本帯では、ブナ属が最も高率で産出する (23～35%)。次いでコナラ亜属 (21～32%)、ハンノキ属 (17～24%) が高い割合を占める。コナラ亜属は、上部に向かって増加する。ハンノキ属の割合・含有量はわずかに増加する。

**TS-II 帯** (試料 46～40；深度 153.7～152.2 cm)  
本帯は、コナラ亜属の割合の急激な増加 (79～83%) と、I 帯で高率で優占していたブナ属の急激な減少 (3～4%) によって特徴づけられる。また、ハンノキ属も急激に減少する (3～5%)。カバノキ属、ハシバミ属、クマシデ属-アサダ属が I 帯に比べて減少し、トネリコ属、ニワトコ属が I 帯に比べて増加する。

**TS-III 帯** (試料 39～32；深度 152.2～149.8 cm)  
コナラ亜属が減少し、ブナ属は急激に増加する (6～

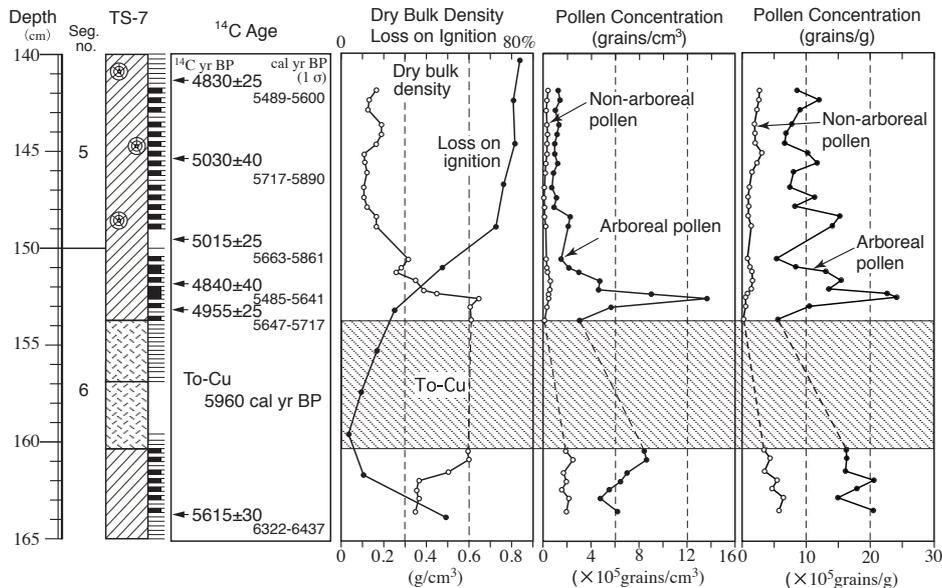


図5 堆積相と花粉含有量。  
Fig. 5 Sedimentary facies and pollen concentrations.

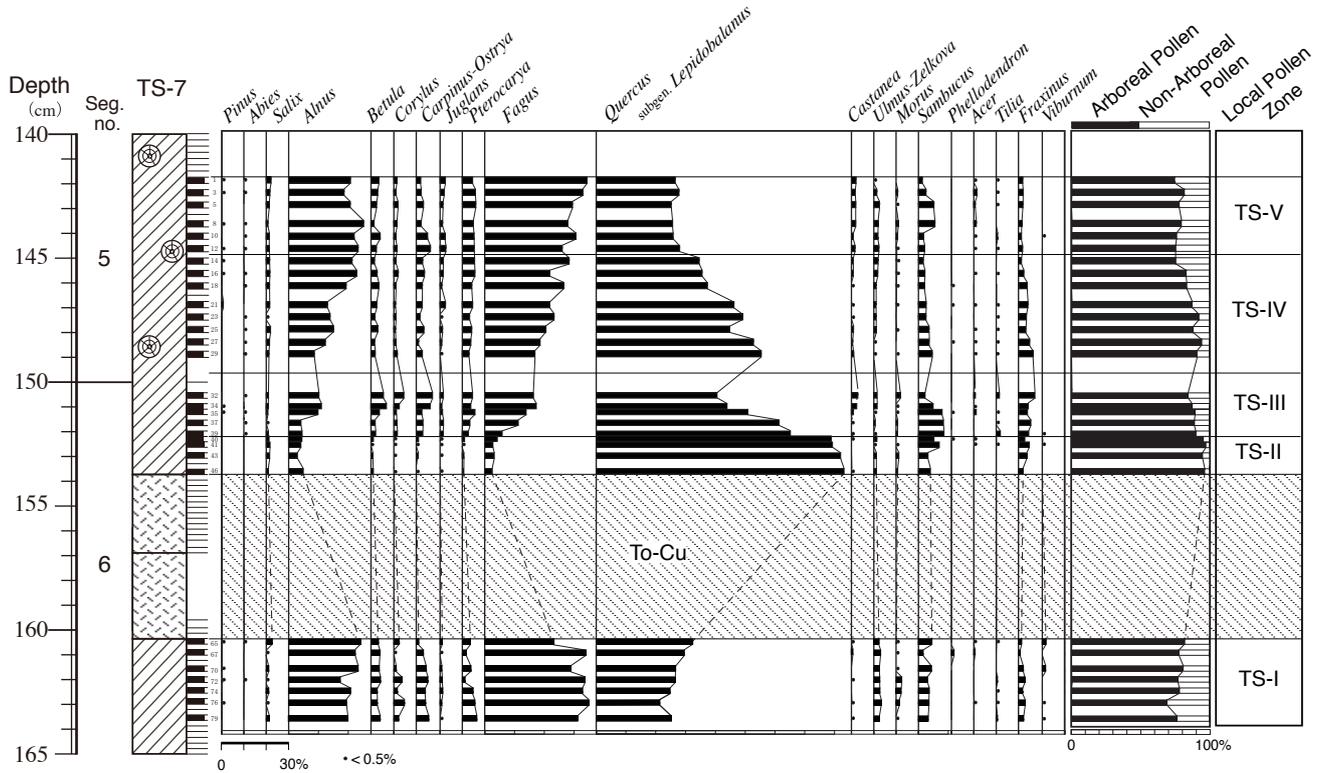


図6 樹木花粉ダイヤグラム.  
Fig. 6 Arboreal pollen diagram.

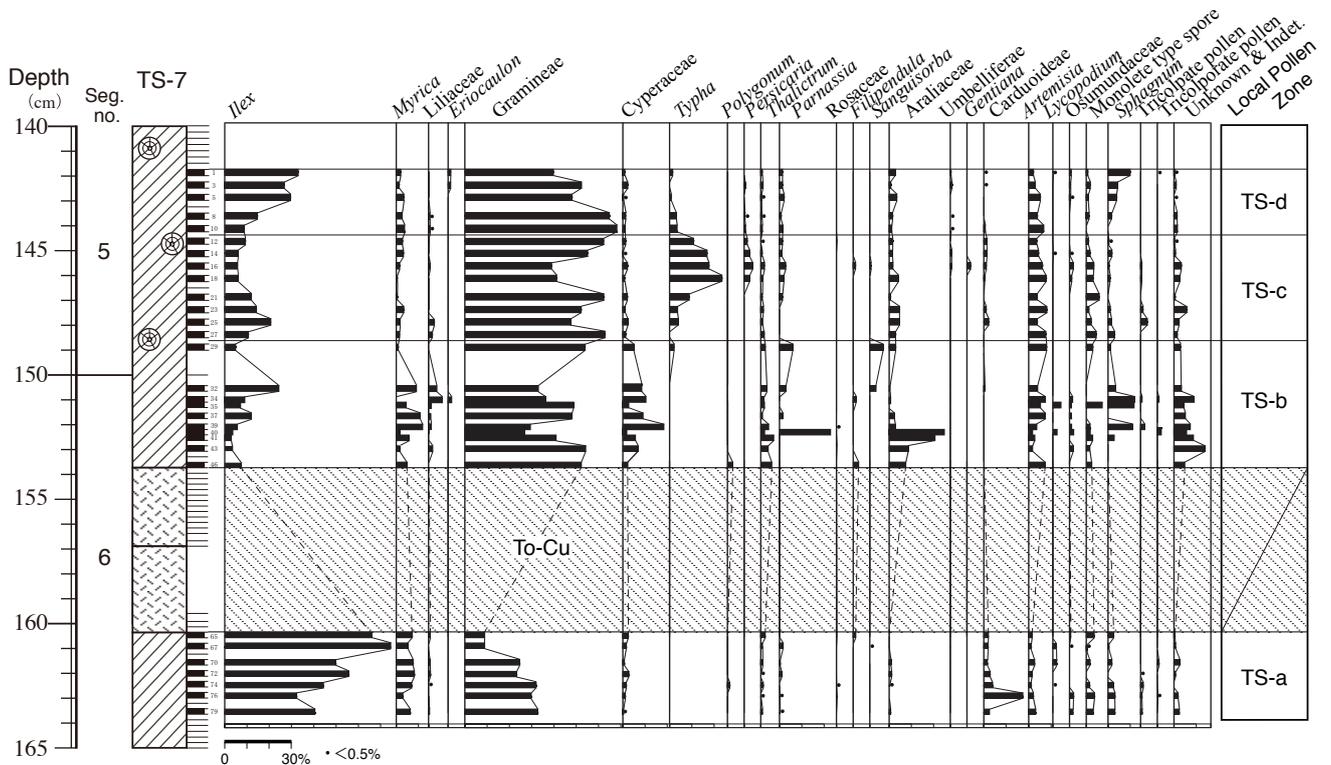


図7 非樹木花粉・胞子ダイヤグラム.  
Fig. 7 Non-arboreal pollen and spore diagram.

17%)。またハンノキ属も中部から増加し始める (5~11%)。II帯に比べて、カバノキ属、ハシバミ属、クマシデ属-アサダ属、クルミ属、サワグルミ属が急激に増加する。

#### TS-IV帯 (試料 29~14; 深度 149.8~145.0 cm)

ブナ属、ハンノキ属の割合が増加する (ブナ属: 17~28%, ハンノキ属: 9~23%)。コナラ属は減少するが、コナラ属の割合が最も高い (35~55%)。ニワトコ属、カバノキ属、ハシバミ属、クマシデ属-アサダ属、クルミ属、サワグルミ属は、ほぼ安定した割合で産出する。

#### TS-V帯 (試料 12~1; 深度 145.0~141.9 cm)

V帯に引き続きブナ属の割合は増加する (26~34%)。ブナ属は、深度 144.2 cm (試料 10) からコナラ属に代わって最も高い割合を占める。コナラ属は、割合・含有量ともに安定して産出する (28~34%)。ハンノキ属の割合は下部から中部にかけてわずかに増加するが、上部にかけて減少する (19~25%)。カバノキ属、ハシバミ属、クマシデ属-アサダ属、クルミ属、サワグルミ属は IV帯に引き続き安定した割合で産出する。

## 2. 非樹木花粉および孢子組成

非樹木花粉および孢子は、全体的にイネ科とモチノキ属が高い割合で産出する (イネ科: 9~72%, モチノキ属 4~79%)。これらの2属の変化を主要な基準とし、以下の4つ花粉帯 (TS-a~TS-d) に区分した (図7)。

#### TS-a帯 (試料 79~65; 深度 163.9~160.6 cm)

モチノキ属が高い割合を占め (32~75%)、上部に向かって増加する。イネ科は、下部で高い割合を占めるが (33~9%)、上部で減少する。ヤマモモ属は安定して産出する (3~8%)。キク亜科が他の花粉帯よりも高い割合を占める。

#### TS-b帯 (試料 46~29; 深度 153.7~148.8 cm)

モチノキ属は著しく減少し、イネ科が急増して高い割合を占める。カヤツリグサ科、ヨモギ属、カラマツソウ属、ウコギ科が顕著に増加し、キク亜科はほとんど産出しない。

#### TS-c帯 (試料 27~12; 深度 148.8~144.5 cm)

ガマ属が顕著に増加するのが特徴。モチノキ属、イネ科に大きな変化はない。ヨモギ属は安定して高い割合を占める。

#### TS-d帯 (試料 10~1; 深度 144.5~141.8 cm)

モチノキ属が増加し、イネ科はやや減少する。ガマ属は急激に減少し、極めて低い割合となる。上部でミズゴケ属が増加する。

## 考 察

### 1. To-Cu テフラ降下後の湿原堆積物の堆積開始時期

湿原に降下したテフラの表面は、湿原がゆるやかに傾斜した斜面上にあることから、植生が定着するまでの間は侵

食域にあり、その期間は泥炭の堆積は起こらなかった可能性がある。年代測定の結果 (表1) からは、テフラ直上 (テフラの上位 3 mm; 深度 153.1~153.4 cm) の泥炭の年代値は 5647~5717 cal yr BP (1 $\sigma$  の範囲) で、To-Cu の年代を前述の 5960 cal yr BP とすると約 300 年の開きがある。テフラより上位の 6 件の年代測定値は層位関係と部分的に調和的ではなく、特にテフラ直上の 2 件の年代値が上位の年代値よりも若い年代値を示す (図4)。年代値の不調和な 2 件を除いた堆積モデル (直線回帰) に基づくと、テフラ直上の泥炭の年代とテフラの年代差は約 50 年となり、誤差を考慮すると有意な差はない。後述するように、コナラ属の花粉含有量のテフラ直上における変化 (図8) は、テフラ降下後の初期の植生変化を示していると推定され、一定の期間、堆積の休止や侵食の期間があったとしても短い期間 (数年~数10年オーダー) であったと推定される。なお、To-Cu 最上部に微粒炭の濃集は認められず、テフラ降下後に山火事が発生した証拠は検出されなかった。

## 2. 田代湿原周辺の森林植生への降灰の影響

### 1) To-Cu 降下以前の森林植生

To-Cu 降下以前の花成分組成 (TS-I) は、ブナ属が優占し、コナラ属、ハンノキ属、サワグルミ属、カバノキ属などを含み、コナラ属がわずかに増加傾向を示す以外は安定している。この組成からは、ブナ属を主としコナラ属などの落葉広葉樹を交える森林が推定される。これまで田代湿原で分析された結果 (Yamanaka, 1965, 1978; 辻ほか, 1983; 吉田, 2006) も本研究の結果と調和的で、吉田 (2006) はこの組成 (花粉帯 TA-5) の始まりを 6600 yr BP とした。この地域においては完新世初期 (7500~8500 cal yr BP; 辻ほか, 1983; 吉田, 2006) にブナが侵入し、花粉組成が大きく変化するが、To-Cu 降下以前にすでに森林植生は極めて安定した状態だったと推定される。本研究の試料採取地点は、吉田 (2006) の A 地点に近接する地点である。吉田 (2006) が示した湿原の各地点の分析結果は完新世の期間を通じて大きな違いはなく、本地点の分析結果も周辺地域の平均的な組成を示すものと考えられる。

### 2) テフラ降下の影響

To-Cu の直上の花粉組成 (TS-II 下部) は、To-Cu より下位 (TS-I) の組成とは大きく異なり、コナラ属の割合が著しく増加 (83%) するとともに、ブナ属、ハンノキ属、サワグルミ属等の割合が減少する。また、花粉含有量 ( $l/cm^3$ ) の変化 (図5) もこのことと調和的である。テフラの堆積と組成の著しい変化の因果関係を示す証拠はないが、層位関係から判断してテフラの降下が植生に影響を与えたと考えるのが妥当であろう。東北地方各地の花成分分析の結

果からも To-Cu 降下期に大きな花粉組成の変化は認められておらず (日比野・竹内, 1998), この時期に植生変化が起こるほどの気候変化があったとは考えにくい。コナラ亜属の割合の著しい増加は、泥炭の堆積速度がテフラの上位で遅くなっているわけではないことを考慮すると、コナラ亜属花粉の堆積速度の増加とブナ属等の堆積速度の減少の両方に起因していると考えられる。

本調査地の To-Cu は 2 つのフォールユニットからなり、粒度は最大 1 mm, 厚さは合わせて約 7 cm で、降灰量はそれほど多くない。しかし、1977～1978 年の有珠山噴火の際には、噴出物の堆積量が 7～10 cm で、幹折れ、根倒れの影響が大きくなったことが知られている (豊岡ほか, 1978 など)。テフラは一般に、堆積後の侵食 (片岡・長橋, 2014) や圧密等によりその厚さを減じるが、本湿原はゆるやかな傾斜地であるので、植生が定着するまでは浸食の影響が強かったと推定され、泥炭中に保存されたテフラの厚さは浸食された結果によるのかもしれない。

津村 (1929, 1932, 1935) は、1929 年 6 月の渡島駒ヶ岳噴火後の周辺の森林への影響を継続的に調査し、降下軽石の影響が中庸 (約 2 寸から 2 尺堆積; 粒径は 2～3 cm と推定される) の地域において、7 年後にはブナは樹勢を回復する事なく枯死した一方、ミズナラ・イタヤカエデ・ホオノキ等は萌芽再生が著しく、速やかに樹勢を回復したと報告した。藤本ほか (1991), 藤本 (1993) も、1977～1978 年の有珠山噴火に伴う降灰に対し、樹種によって抵抗性が異なることを示した。田代湿原における To-Cu の粒度は、この例に比べるとはるかに細粒であるが、コナラ亜属やブナ属の花粉の変化はこれらの観察と調和的で、To-Cu の降下後、ブナが選択的に障害を受けた可能性を示唆する。

### 3) 植生の回復

テフラ層上位の層準の花粉組成変化 (TS-II～V 帯) は、植生のダメージとその後の回復過程を示していると考えられる。この層準の組成変化は、TS-V 帯上部まで継続するが、最上位の TS-V 帯の組成変化は比較的小さく、またテフラ降下前の組成 (TS-I 帯) とほぼ同じ組成を示し、植生がほぼ回復した状態に到達したと考えられる。花粉含有量 ( $\text{cm}^3$ ) の変化は、TS-IV 帯以降大きな変化を示さなくなるが、組成が変化し続けるのは、個々の樹種のわずかな変化が継続しているためである。

主にミズナラと推定されるコナラ亜属は、テフラより上位 1.6 cm までは安定して著しく高い割合を占めるが、花粉含有量 ( $\text{cm}^3$ ) はテフラの上位 1.4 cm まで増加して最大値に達し、以後急速に減少する。この組成変化は、津村 (1929, 1932, 1935) の観察から推察すれば、テフラの降

下によってブナやその他の樹種は損傷し枯死するものが多く出現した一方、コナラ亜属は短期的なダメージを受けたものの急速に回復し、萌芽再生などを経て著しく花粉生産量を増加させたのではないかと推定される。その後の急速な減少は、ブナを含むその他の樹種の回復により、コナラ亜属の樹冠面積が減少して花粉生産量が減少し、徐々にテフラ降下前の植生に近づいたことによるのであろう。

ブナ属花粉含有量 ( $\text{cm}^3$ ) の変化を見ると、テフラの上位 2.1 cm で最大値 ( $6.0 \times 10^4$ ) に達し、その後減少して再び緩やかに増加する。ブナはこの層準 (テフラの上位 2.1 cm) で回復した状態に達したのかもしれない。

その他の樹種の変化は樹種によって異なるが (図 8), テフラ降下後、割合・含有量 ( $\text{cm}^3$ ) を減少させた後、含有量が最大値に達して再び減少する傾向は共通している。その最大値に達する層準は、樹種によって異なり、ハンノキ属・ニレ属・ケヤキ属は最も早く (テフラの上位約 2 cm), カバノキ属, サワグルミ属はそれより遅い (同上位約 3 cm)。これらの変化の違いは、様々な原因が考えられ、テフラ降下によるダメージの大きさ (テフラ降下による幹折れ等の損傷の程度, テフラ付着によるストレスへの耐性など), ダメージ後の回復様式 (萌芽再生能力の強弱, 実生定着の速さや開花齢までの時間など) の違いなどによるのであろう。テフラより 8.9 cm 上位 (TS-V 帯下限; 深度 145.0 cm) の層準で森林植生が回復したとすると、回復に要した時間は、もつとも長く見積もると約 250 年, もつとも短く見積もると約 150 年となる (図 4)。

降灰の森林植生への影響は、季節によって大きく異なると推定され、冬季などの植物の休眠期の降灰は、植生にそれほど大きな影響を与えないと推定される。本研究の分析結果は、森林植生に大きな影響を与えたと考えられ、降灰の季節は植物の生育期間中であつた可能性がある。

吉田 (2006) は田代湿原の 5 地点のボーリングコア (コア A～E) を分析した。地点 E を除いて、いずれの地点でも To-Cu の上位でブナ属の減少とハンノキ属の増加が認められる。コア E の To-Cu (深度約 7 m) の層準の花粉組成 (局地花粉帯 TA-3) は、トウヒ属・モミ属が産出するとともにカバノキ属が高い割合を占め、ブナ属が極めて低率でしか産出しないなど、他の地点の To-Cu 層準の花粉組成 (局地花粉帯 TA-5) とは著しく異なり、To-Cu の対比に誤りがあると思われる。本研究の結果に基づけば、樹木花粉組成の顕著な変化はテフラの上位約 2.5 cm (約 45～70 年に相当) までで、それより上位ではテフラ降下前の組成と類似した組成となる。このことから判断すると、テフラの上位約 10 cm までの層準の分析が行われていないコア B においては、ブナ属の割合の低下は認められるものの、テフラ降下後の著しい変化を示す層準が分析されて

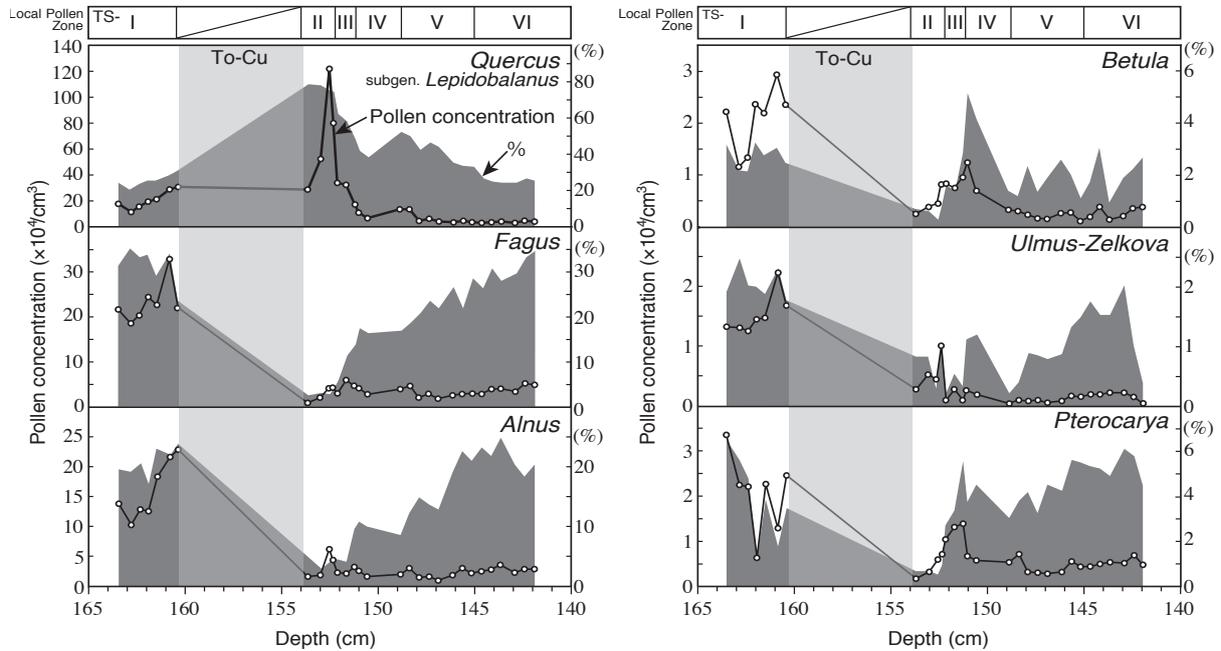


図8 樹木花粉の百分率および花粉含有量 ( $/\text{cm}^3$ ) の変化。  
 Fig. 8 Selected arboreal pollen percentages and concentrations ( $/\text{cm}^3$ ).

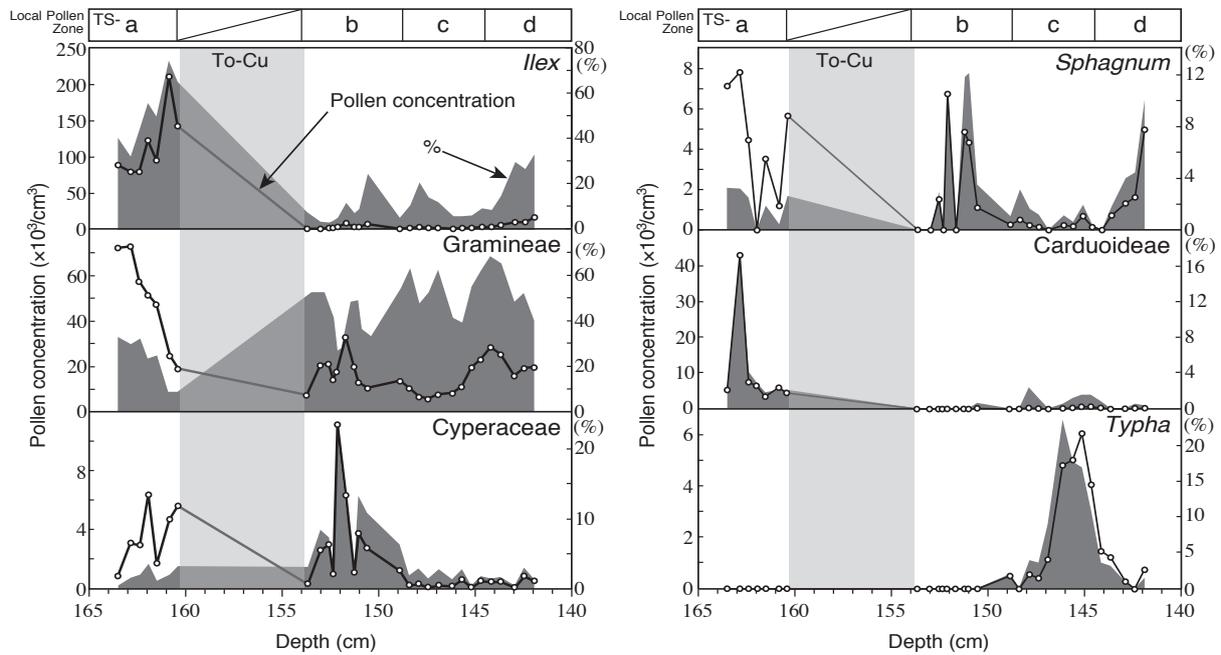


図9 非樹木花粉の百分率および花粉含有量 ( $/\text{cm}^3$ ) の変化。  
 Fig. 9 Selected non-arboreal pollen and spore percentages and concentrations ( $/\text{cm}^3$ ).

いない可能性が高い。コア A・C および D においては、テフラ直上の分析結果が示されているが、本研究で認められた顕著なコナラ亜属の増加は認められない。その理由は不明であるが、これらの地点ではテフラ降下後の湿原堆積物の堆積開始がより遅かった可能性もある。

八甲田山周辺には、花粉分析の研究が行われた地点が数多くあるが (Yamanaka, 1978; 守田, 1987 など)、To-Cu 降下後に顕著な花粉組成の変化が認められた地点は、田代湿原以外には十和田湖から約 4 km 西の地点にある白地山湿原 (標高約 1000 m; 守田・相沢, 1986) のみであ

る。この湿原では、To-Cuの上位でブナ属が不連続に増加し、コナラ亜属が急減して、田代湿原とは逆の変化が見られる。To-Cuは厚さ10 cmで堆積しており、十和田湖に近い位置であることを考えると、森林植生の破壊は相当の規模が推定されるが、AP/NAP比などにも大きな変化は認められない。この地点でも、テフラの降下後、堆積物が一定期間堆積していなかった可能性がある。八甲田山周辺のその他の多くの地点において森林植生の変化が認められないのは、このようにテフラ降下後すぐに堆積物が堆積を開始しなかったり、分析層準の密度（時間解像度）がテフラの影響を検知するほど密でないことも一因として考えられるが、詳細は不明である。

## 2. 湿原植生への降灰の影響

### 1) To-Cu降下以前の湿原植生

テフラ直上の非樹木花粉・胞子は、湿原外から供給されたものも一部含まれていると考えられる（例えばヨモギ属）が、大部分は湿原内の植生から供給されたものと考えられる。

テフラ降下以前、田代湿原はモチノキ属の緩やかな増加を示し、少なくとも分析地点周辺はハイイヌツゲなどの灌木が生育するような乾燥化が進んでいたと考えられる。モチノキ属の花粉生産量が多くない（幾瀬、1965）ことを考慮すれば、湿原を覆う灌木の被度はかなり高かったと考えられる。辻ほか（1983）のTo-Cuより下位約20 cmの層準の分析結果を考慮すると、本研究の分析結果と同様にイネ科花粉の割合は減少傾向が認められる。吉田（2006）が示した田代湿原の他の地点の分析結果からは、本地点と同様の傾向を示すか比較的安定した組成を示し、大きな植生変化はなかったものと推定できる。

### 2) To-Cu降下の影響

テフラ直上の組成は、テフラ直下の組成と大きく異なり、モチノキ属の著しい減少、イネ科の著しい増加、キク亜科の消滅が顕著である。イネ科はテフラより約12 cm上位（深度142 cm）まで減少することなく高い割合で継続し、カヤツリグサ科は一時的（TS-b帯）に高い割合を示すが、その後減少して安定する。TS-c帯でガマ属が一時的に高い割合を占める（図9）のは、湿原内に水たまりが一時的に増加したことを示すと考えられる。花粉組成は分析層準の最上部まで、テフラ降下前の状態に戻ることはなく変化の途上にあり、少なくともこの期間はテフラ降下前とは異なる状態の植生が成立したと推定される。辻ほか（1983）の分析結果によれば、テフラの上位約70 cmでイネ科の割合は安定するが、テフラ降下前とは異なりモチノキ属がほとんど産出しない組成となる。

この地点に堆積したTo-Cuの下部の粒度は0.1～1 mmで、上部の粒度はさらに小さい。そのため、火山灰の堆積により不透水層が形成され、湿原の凹地に降雨などが溜まって水位を上昇させ、テフラ降下前よりは地下水位のより高い条件を反映した植生へと移行し、その状態が継続したと考えられる。

Hotes（2004）は、北海道のサロベツ湿原において、人為的にテフラやガラス粉・粒子を散布して（厚さ6 cmまで）その影響を実験的に評価した。その結果、テフラやガラス粉の散布はコケ類に最も影響が大きく、維管束植物では厚さが6 cmでも影響は一時的（4年以内）であることを確かめた。田代湿原の分析結果は、ミズゴケ属の減少（図9）などはこの実験と同様の変化を示すが、全般的に大きな植生の変化が認められる点においては異なる。湿原植生がテフラの降下によって変化する場合としない場合があること（Hotes, 2008）を考慮すると、湿原植生への影響のメカニズムは複雑なものと判断される。

Wolejko & Ito（1986）は、日本の湿原植生は欧米の湿原と異なり、テフラの影響を受けることが多い点を指摘して、「tephratrophic」という概念を提唱した。宝月ほか（1954）は、尾瀬ヶ原の湿原堆積物中に6層のテフラを認め、植物遺体の分析から、テフラ降下のたびにホロムイヌゲ群落からヌマガヤ群落に至る一連の植生変化を認めた。田代湿原における本研究の事例は、尾瀬ヶ原における例とともに、テフラ降下により湿原植生が偶発的な変化を示す例と考えられる。

田代湿原の複数の地点の花粉分析を行った吉田（2006）の結果によれば、いずれの地点でもテフラ降下後にハンノキ属の増加が認められる一方で、非高木・低木の花粉組成の変化が認められる地点（コアA, D）と認めがたい地点（コアB, C）がある（前述の理由によりコアEは除く）。花粉ダイヤグラムに示された花粉タイプのうち、低木および草本はヤナギ属・ヤマモモ属・モチノキ属・イネ科・カヤツリグサ科・ヨモギ属のみであり、これらの組成からテフラ降下後に植生の変化があったかどうかを判断することは難しい。すなわち、非高木や低木の組成に変化を認めがたい地点（コアB, C）においても、ダイヤグラムに示されない植物の変化があった可能性も否定できない一方で、すでに述べたようにテフラの降下が一律に植生の変化を導くものではないこと（Hotes, 2008）から判断すると、テフラ降下前の植生により反応が異なることによる可能性もあり、いずれとも判断しがたい。

八甲田山周辺の湿原で、To-Cu降下後非高木花粉組成に変化が認められる地点としては、矢櫃沼・白地山湿原（守田・相沢、1986）がある。いずれの湿原においても、モチノキ属・カヤツリグサ科の割合の増加が認められ、田代湿

原とは異なった変化を示す。このような湿原による植生の応答の違いの原因は不明であるが、テフラ降下前の植生の変化傾向や組成、テフラの降下による湿原環境の変化の違いなどの可能性がある。

### 3. 森林植生と湿原植生の回復の違い

図 10 にテフラ降下前の 3 試料の花粉出現率の平均とテフラ降下後の各層準の分析値の百分率類似度 (小林, 1995) を示した。樹木花粉組成, 非樹木花粉組成ともに, テフラの直上 (深度約 154 cm) で著しく類似度が低下するが, 非樹木花粉組成の違いの方がわずかに大きい。その後, 樹木花粉組成の類似度はやや段階的に上昇し, 深度約 146 cm (テフラ上面から約 7.5 cm 上位) で約 90% に達してほぼ安定する。

非樹木花粉組成は, テフラ上面では類似度約 35% で, その後も一時的な上昇を示すものの, 深度約 144 cm (テフラ上面から約 10 cm 上位) まで類似度約 35% のまま推移し, その後類似度は上昇して分析層準の最上位 (深度約 142 cm) で約 60% に達し, テフラ降下後, ほぼ一貫して類似度が上昇して 90% に達する樹木花粉組成の変化とは大きな違いを示す。

この違いは, テフラ降下の森林植生への影響は, 主としてテフラの降下による樹木への直接的ダメージとその後の一時的な優占関係の変化により, 樹木の生育条件としては大きな変化が生じなかったのに対し, 湿原植生に対しては, テフラ降下による埋積等の直接的ダメージのほか, 堆積層の pH や水理条件の変化がテフラ降下後もしばらく継続し, あるいは条件が根本的に変化して, 異なる生育環境のもとに対応した異なる植生が形成されたものと考えられる。

また, 八甲田山周辺の各地の花粉分析の結果によると, テフラ降下による樹木花粉組成の変化はほとんど認められないが, 主として湿原植生を反映すると考えられる非樹木花粉組成には変化が認められる地点がある。このことは, 多くの地点でテフラ降下後の一定期間, 堆積物が欠如しており, 森林植生の変化は堆積物に保存されないが, テフラ降下の影響がより長い期間継続する湿原植生においては, 植生の変化が堆積物に保存されるためと考えられる。

### ま と め

本研究によって以下のことが明らかになった。

1. 田代湿原の堆積物の花粉分析の結果, To-Cu の降下は, 堆積量が多くないにもかかわらず周辺の森林植生や湿原植生に大きな影響を与えた。
2. 高木花粉組成は, テフラ降下後著しく変化し, コナラ属コナラ亜属を除く全ての花粉タクサの百分率・花粉含有量ともに著しく減少した。コナラ属コナラ亜属は, テフラ

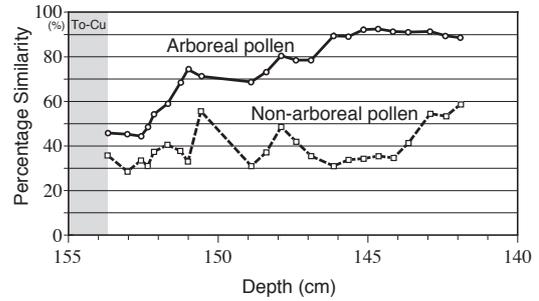


図 10 テフラ降下後の百分率類似度の変化. テフラ直下の 3 試料の平均値との類似度を示す。

Fig. 10 Percentage similarity of pollen composition with prior to the tephra fall (mean of 3 samples).

層直上で百分率・含有量ともに著しく増加した。樹種によるテフラ降下への耐性の違いが, このような違いをもたらしたと考察した。

3. 非高木花粉組成は, To-Cu 降下後, モチノキ属の著し 3 減少とイネ科の著しい増加をもたらした。To-Cu の降下は湿原の水位を上昇させたと考えられる。

4. テフラ降下後の森林植生は, 約 150 ~ 250 年でほぼ元の花粉組成に回復したのに対し, 湿原植生は分析層準最上部 (200 ~ 300 年後) でも元の状態に戻ることはなかった。このことは, テフラの降下により森林が成立する山地斜面の植物生育環境に根本的な変化が生じなかったが, 湿原の生育環境には根本的な変化が生じたためと考えられる。

### 謝 辞

本研究の一部に, 総合地球環境学研究所プロジェクト「日本列島における人間—自然相互関係の歴史的・文化的検討」(代表: 湯本貴和) の資金を使用した。

### 引用文献

Antos, J. A. & Zobel, D. B. 2005. Plant responses in forests of the tephra-fall zone. "Ecological Responses to the 1980 Eruption of Mount St. Helens" (Dale, V. H., Swanson, F. J. & Crisafulli, C. H., eds.), 47-58. Springer, New York.

藤本征司, 1993. 1977 年有珠山噴火後の森林植生の 14 年間の推移—特に高木類の対応パターン—. 日本生態学会誌 43: 1-11.

藤本征司・長谷川 榮・篠田聖児, 1991. 1977 年有珠山火山降下物の堆積に対する抵抗力の樹種による違い. 日本生態学会誌 41: 247-255.

早川由紀夫, 1983. 十和田中振テフラ層の分布, 粒度組成, 年代. 火山 28: 263-273.

Hayakawa, Y. 1985. Pyroclastic geology of Towada volcano. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo* 60: 507-592.

- 日比野紘一郎・竹内貞子, 1998. 東北地方の植生史. 「図説日本植生史」(安田喜憲・三好教夫編), 62-72. 朝倉書店, 東京.
- 宝月欣二・市村俊英・堀 正一・大島康行・笠永博美・小野和・高田和男, 1954. 尾瀬ヶ原湿原の植物生態学的研究. 「尾瀬ヶ原」(尾瀬ヶ原総合学術調査団編), 313-397. 日本学術振興会, 東京.
- Hotes, S. 2004. *Influence of Tephra Deposition on Mire Vegetation in Hokkaido, Japan*. Dissertation Botanicae 383. 304 pp.
- Hotes, S. 2008. 火山噴火降灰物が湿原に与える影響. 「攪乱と遷移の自然史」(重定南奈子・露崎史朗編著), 149-168. 北海道大学図書出版会, 札幌.
- 幾瀬マサ, 1965. 葯中の花粉粒の数並びに大きさについて. 第四紀研究 4: 144-149.
- 上手真基・山田和芳・齋藤めぐみ・奥野 充・安田喜憲, 2010. 男鹿半島, ニノ目潟・三ノ目潟湖底堆積物の年縞構造と白頭山-苦小牧火山灰(B-Tm)の降灰年代. 地質学雑誌 116: 349-359.
- 片岡香子・長橋良隆, 2014. テフラ学(第3回): テフラの再堆積. 第四紀研究 53: 175-183.
- Kimura, K., Ooi, N. & Suzuki, S. 1996. Evidence of vegetation recovery on Yakushima Island after the Major Holocene Eruption at the Kikai Caldera, as revealed by the pollen record of buried soils under the old-growth *Cryptomeria japonica* forest. *Japanese Journal of Historical Botany* 4: 13-23.
- 気象庁, 2003. 火山噴火予知連絡会による活火山の選定及び火山活動度による分類(ランク分け)について. 火山噴火予知連絡会会報 84: 101-109.
- 紀藤典夫・瀧本文生, 1999. 完新世におけるブナの個体群増加と移動速度. 第四紀研究 38: 297-311.
- 小林四郎, 1995. 生物群集の多変量解析, 194 pp. 蒼樹書房, 東京.
- 工藤 崇・奥野 充・中村俊夫, 2003. 北八甲田火山群における最近6000年間の噴火活動史. 地質学雑誌 109: 151-165.
- 工藤 崇・佐々木 寿, 2007. 十和田火山後カルデラ期噴出物の高精度噴火史編年. 地学雑誌 116: 653-663.
- 柴畑光博, 2013. 鬼界アカホヤテフラ(K-Ah)の年代と九州縄文土器編年との対応関係. 第四紀研究 52: 111-125.
- 町田 洋, 1996. 八甲田田代湿原にみられる白頭山苦小牧テフラと十和田aテフラ. 第四紀露頭集—日本のテフラ(日本第四紀学会編), 5. 日本第四紀学会, 東京.
- 松下まり子, 2002. 大隈半島における鬼界アカホヤ噴火の植生への影響. 第四紀研究 41: 301-310.
- 守田益宗, 1987. 東北地方における亜高山帯の植生史について, III. 八甲田山. 日本生態学会誌 37: 107-117.
- 守田益宗・相沢俊二, 1986. 東北地方北部の亜高山帯の植生史に関する花粉分析的研究. 東北地理 38: 24-31.
- 奥野 充(2002) 南九州に分布する最近約3万年間のテフラの年代学的研究. 第四紀研究 41: 225-236.
- Ooi, N., Minaki, M. & Noshiro, S. 1990. Vegetation changes around the Last Glacial Maximum and effects of the Aira-Tn Ash, at the Itai-Teragatani Site, central Japan. *Ecological Research* 5: 81-91.
- Reimer, P. J., Baillie, M. G. L. Bard, E., Bayliss, A., Beck, J W., Blackwell, P. G., Bronk Ramsey, C., Buck, C. E., Burr, G. S., Edwards, R. L., Friedrich, M., Grootes, P. M., Guilderson, T. P., Hajdas, I., Heaton, T. J., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kaiser, K. F., Kromer, B., McCormac, F. G., Manning, S. W., Reimer, R. W., Richards, D. A., Southon, J. R., Talamo, S., Turney, C. S. M., van der Plicht, J., & Weyhenmeyer, C. E. 2009. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon* 51: 1111-1150.
- 橋 ヒサ子・佐藤 謙, 1983. 大雪山系沼の原湿原植生. 北海道教育大学大雪山自然教育研究施設研究報告 18: 1-25.
- 寺田和雄・太田貞明・鈴木三男・能城修一・辻 誠一郎, 1994. 十和田火山東麓における八戸テフラ直下の埋没林への年輪年代学の適用. 第四紀研究 33: 153-164.
- 豊岡 洪・森田健次郎・佐藤 明・舟木敏夫, 1978. 有珠山噴火が森林におよぼす影響(I): 森林被害の範囲と被害の概況. 日本林学会北海道支部講演集 26: 1-5.
- 辻 誠一郎, 1985. 火山活動と古環境. 「岩波講座日本考古学, 第2巻 人間と環境」, 289-317. 岩波書店, 東京.
- 辻 誠一郎・小杉 正人, 1991. 始良 Tn 火山灰(AT) 噴火が生態系に及ぼした影響. 第四紀研究 30: 419-426.
- 辻 誠一郎・宮地直道・吉川昌伸, 1983. 北八甲田山における更新世末期以降の火山灰層序と植生変遷. 第四紀研究 21: 301-313.
- 辻 誠一郎・中村俊夫, 2001. 縄文時代の高精度編年: 三内丸山遺跡の年代測定. 第四紀研究 40: 471-484.
- 津村昌一, 1929. 駒ヶ岳爆発による森林の被害及復興に就いて. 北海道林業会報 27: 753-770.
- 津村昌一, 1932. 渡島駒ヶ岳爆発三年後に於ける植生状態に就いて. 北海道林業会報 30: 3-12.
- 津村昌一, 1935. 渡島駒ヶ岳爆発七年後に於ける植相に就いて. 北海道林業会報 33: 567-575.
- 露崎史朗, 2001. 火山遷移初期動態に関する研究. 日本生態学会誌 51: 13-22.
- Whittaker, R. J., Bush, M. B. & Richards, K. 1989. Plant recolonization and vegetation succession on the Krakatau Islands, Indonesia. *Ecological Monograph* 59: 59-123.
- Wolejko, L. & Ito, K. 1986. Mires of Japan in relation to mire zones, volcanic activity and water chemistry. *Japanese Journal of Ecology* 35: 575-586.
- Yamanaka, M. 1965. Pollen profiles of recent sediments from the Tashiro Moor, Hakkoda Mountains. *Ecological Review* 16: 195-199.
- Yamanaka, M. 1978. Vegetation history since the late Pleistocene in northeast Japan 1. Comparative studies of the pollen diagrams in the Hakkoda Mountains. *Ecological Review* 19: 1-36.
- 吉田明弘, 2006. 青森県八甲田山田代湿原における約13,000年前以降の古環境変遷. 第四紀研究 45: 423-434.

(2016年9月11日受理)