

白頭山(長白山)の爆発的噴火史の再検討

Reexamination of explosive eruption history of Baitoushan (Changbaishan) volcano

宮本 毅(Tsuyoshi MIYAMOTO)*、中川光弘(Mitsuhiro NAKAGAWA)**、
長瀬敏郎(Toshiro NAGASE)***、菅野均志(Hitoshi KANNO)****、
大場 司(Tsukasa OHBA)*****、北村 繁(Shigeru KITAMURA)*****、
谷口宏充(Hiromitsu TANIGUCHI)*

キーワード：白頭山、長白山、放射性炭素年代、テフラ、渤海

Abstract

Baitoushan volcano (Changbaishan volcano in China), situated on the border between China and North Korea, is one of the most active volcanoes in mainland Asia. The volcanism is divided into three stages, firstly the shield volcano-forming stage effusing large amount of basaltic lava flow, secondly volcanic cone-building stage consisting of trachytic magma, and finally summit caldera (called Tianchi caldera)-forming stage erupting the vigorous alkali-rhyolitic pyroclastics. Tianchi caldera has been formed by some huge eruptions (10th century, 4000yBP eruption and more) since Pleistocene. In caldera-forming stage, the time sequence of such huge eruption progress from Plinian pyroclastic fall to following large pyroclastic flow (ignimbrite). Based on our geological and petrological studies and Radiocarbon dating about wood and charcoal samples in pyroclastics, we found that 9th century eruption, unknown until now, has occurred before 10th century eruption. From the relation of stratigraphy and radiocarbon age the dormancy between this episode and 10th century one is estimated about a hundred year. The time sequence and eruptive style of this new episode is similar to 10th century eruption, but the magma composition is different.

1. はじめに

白頭山(中国名では長白山)は中華人民共和国(中国)と朝鮮民主主義人民共和国(北朝鮮)の国境上に位置する火山(図1)で、山頂には直径4-5kmの天池カルデラがある(図2)。白頭山本体は盾状火山を形成しており、その山麓部には広大な熔岩台地である蓋馬台地が広がっている。この蓋馬台地を含めた白頭山の火山活動は約2.77Maに開始したとされ〔Liu and Taniguchi, 2001 :

* 東北大学東北アジア研究センター
*** 東北大学総合学術博物館
***** 東北大学大学院理学研究科

** 北海道大学大学院理学研究科
**** 東北大学大学院農学研究科
***** 弘前学院大学社会福祉学部

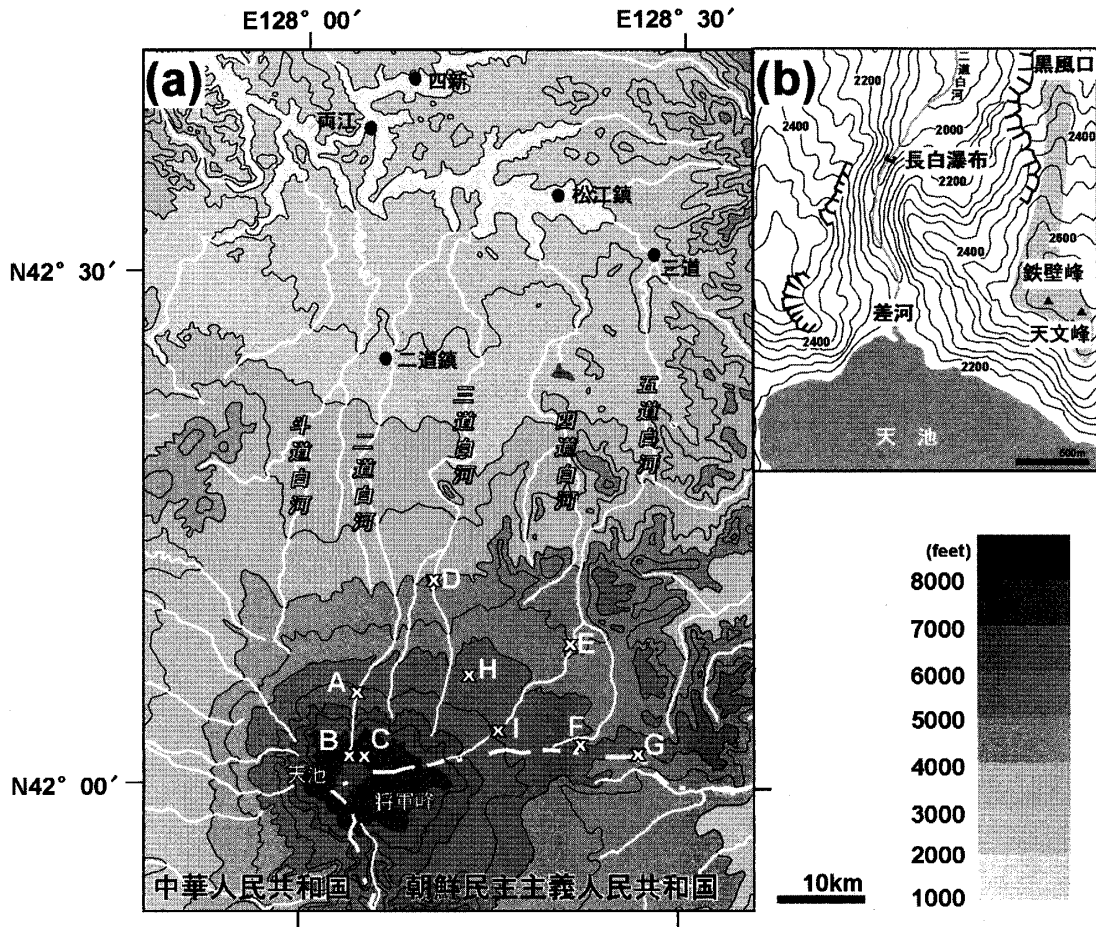


図1 白頭山(長白山)の位置と地名

(a) 白頭山北麓地域の地形

等高線は500フィート間隔. 白点線は中国・北朝鮮国境.

図中A~Iは図3の柱状図の位置. A: 谷底森林 B: 差河 C: 天文峰 D: 山門 F: 国境道路沿 G: 円池 H: 老房子小山 I: 東方沢. 斜体字は白頭山水系的主要な河川名. 等高線図はアメリカ運輸省発行のWorld Aeronautical Charts T.P.C.(1/500000) F-9Cを基に作成した.

(b) 天池カルデラ北岸の地形

等高線は50m間隔. 天文峰北側の網掛け部分は, 4000年前噴出物の露出域. 等高線図は鄭 (1997) を基に作成した.

173-189], 以後の活動では時間とともに岩質・噴火様式が系統的に変化する. このような変化に基づいてLiu and Taniguchi [2001: 173-189] は白頭山の活動を3期に区分した. 第一期 (2.77-2.12Ma) は多量のアルカリ玄武岩質溶岩流による熔岩台地 (洪水玄武岩) の形成期, 第二期 (0.61-0.08Ma) は粗面岩質マグマによる火山錐の形成期, 第三期は後期更新世から現在にいたるアルカリ流紋岩質のイグニンプライト流出による天池カルデラ形成期である. 一方, 魏等 [1999: 257-262] もアルカリ玄武岩質-粗面岩質-アルカリ流紋岩質という変化に対して同様 (10世紀以降の歴史噴火を別の活動期としているため正確には4期) の区分を行ったが, 爆発的な噴火はすでに造錐期の後期 (0.44Ma-0.04Ma) からすでに開始し, 後期更新世以降の4回の噴火によって現在の天池カルデラが形成されたとしている. いずれの場合も第三期の活動では10世紀と, 4105±



図2 北東カルデラ壁上からみた天池カルデラ

写真左の湖に張り出した部分が本文中で述べられている將軍峰から続く岬状の地形。これにより左手前側と左奥、及び右側の3つの地形に区分できる。また、写真左側のカルデラ壁上の明るい部分が4000年前噴出物で、奥が天文峰。写真奥の南西カルデラ壁上部の白っぽい部分は10世紀噴火の白頭降下軽石が覆っている部分。

90yBPの放射性炭素年代値〔刘等, 1995〕から4000年前と10世紀に2回の巨大噴火があったとしている〔魏等,1999 : 257-262 ; Liu and Taniguchi,2001 : 173-189〕。天池カルデラの地形を概観すると南東カルデラ壁の將軍峰から湖に向けて張り出した岬上の地形があり、これによって天池カルデラはきれいな円形の地形を示さない(図2)。この岬は周囲の火口壁と同様に多数の熔岩や火砕物の互層からなっており〔猪俣, 2000 : 2-3〕, カルデラ地形の形成後にこの場所に貫入してきたものではない。従って、現在の天池カルデラはこの岬状の地形で区切られた少なくとも3つ以上の火口地形が重なっていると解釈でき、これはカルデラが複数回の噴火で形成されたという考えを支持する。第三期の他の活動として2000年前噴火が北海道での白頭山起源火山灰の存在〔Horn and Schmincke,2000 : 537-555〕, 近傍での放射性炭素年代測定結果〔Liu and Wei, 1996 : 428〕から個々に推定されているが、堆積物の対比はなされていない。Liu and Taniguchi〔2001 : 173-189〕は多くの放射性炭素年代値から10世紀付近で複数回の噴火が発生したと考えたが、年代測定試料を採取した噴出物の層序については示されていない。カルデラ形成に関与したと考えられる白頭山10世紀噴火は、過去2000年間において世界最大級の噴火とされ(噴出量は約50km³以上; Machida *et al.*,1990 : 1-20), その噴出物は白頭山周辺数十kmの範囲を覆い尽くしている。このため10世紀噴出物よりも下位の噴出物の情報を得にくいせいもあり、これまで10世紀以前の噴出物については必ずしも明瞭にされてきていない。そこで、本論では10世紀噴火を含めた主に第三期の爆発的噴火の噴出物調査・年代測定を行い、白頭山の噴火史について再検討を行った。その結果、新たに9世紀頃に大規模な噴火を行った可能性があることが判明したので、これについて報告する。

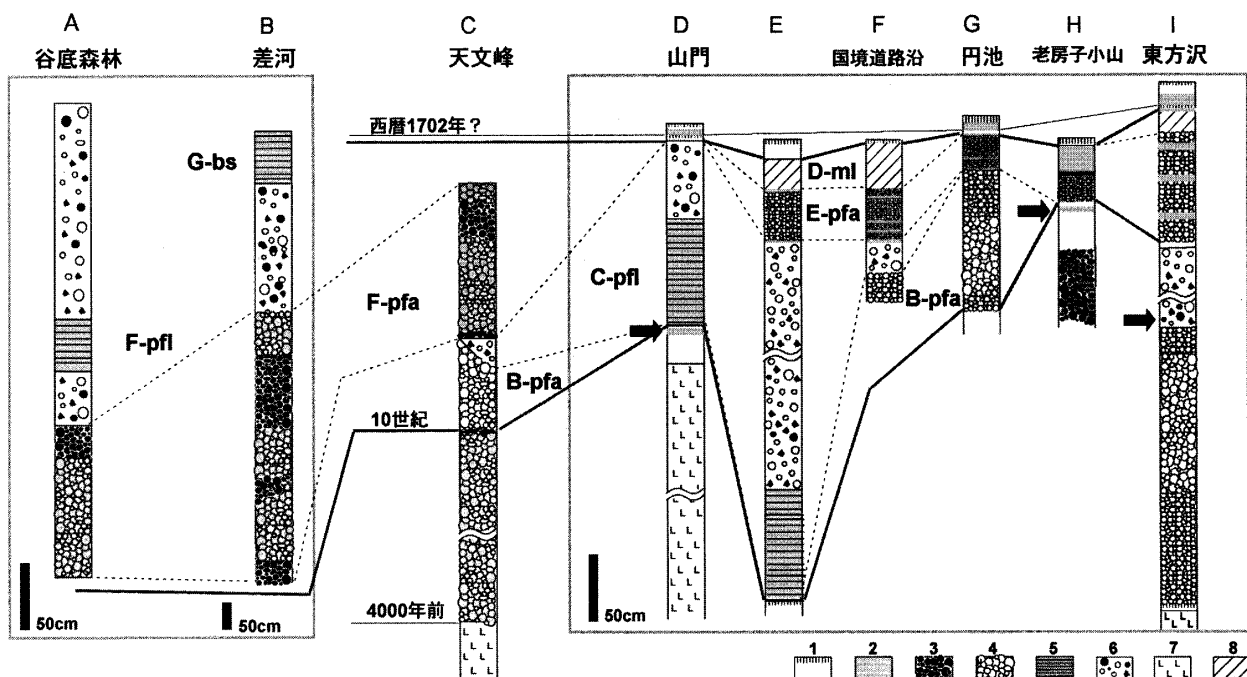


図3 代表的なテフラ柱状図

位置は図1参照。10世紀噴火噴出物のユニット名は図4参照。図中の黒矢印は9世紀噴火噴出物をさす。

- 1：火山灰土（土壌を含む） 2：降下火山灰 3：降下スコリア 4：降下軽石 5：サージ堆積物
6：火砕流堆積物（溶結凝灰岩を含む） 7：熔岩流 8：ラハール

2. 白頭山噴火噴出物

図3に白頭山北域の調査に基づいて作成した代表的なテフラ柱状図を示す。現在山腹～山麓にかけてみられる火山碎屑物の大部分は10世紀噴火による噴出物で、10世紀噴出物より下位の噴出物は天文峰から黒風口にかけて分布する4000年前噴火噴出物と一枚の火山灰層が認められる。以下10世紀噴火噴出物と、その前後の噴出物にわけてそれぞれの特徴を述べることとする。白頭山東方の峡谷内（以下、東方沢；図3のI）に分布する火砕物は噴出物層序が10世紀噴出物と類似するが、斑晶鉱物組み合わせ・全岩化学組成などで異なる特徴を示すことから、他とは別に示す。

(a) 10世紀噴火以降の噴出物

白頭山北東山麓域では10世紀噴火噴出物の上位に2-3層の鶯色～燈色の火山灰層が認められる（図3）が、それぞれの層序関係は明らかではない。この中で山門（図3D）や円池（図3G）に分布する鶯色の火山灰層が10世紀以降の噴出物で最も厚い。この火山灰は10世紀噴火噴出物の上位に2-4cmの土壌を介して位置し、褐色の火山ガラスやアルカリ長石などの結晶片からなる。山体北側の谷底森林（山頂から8km）では変質した岩片からなる燈色火山灰層があり、水蒸気噴火による噴出物であると考えられる。

10世紀以降の噴火としては、古文書の記録から西暦1413,1597,1668,1702,1903年が報告されている〔Machida *et al.*,1990：1-20；Liu and Taniguchi, 2001：173-189〕。この中で1702年噴火

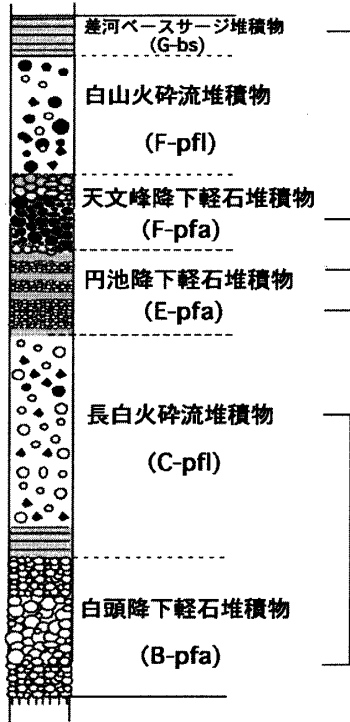


図4 10世紀噴火の噴出物層序

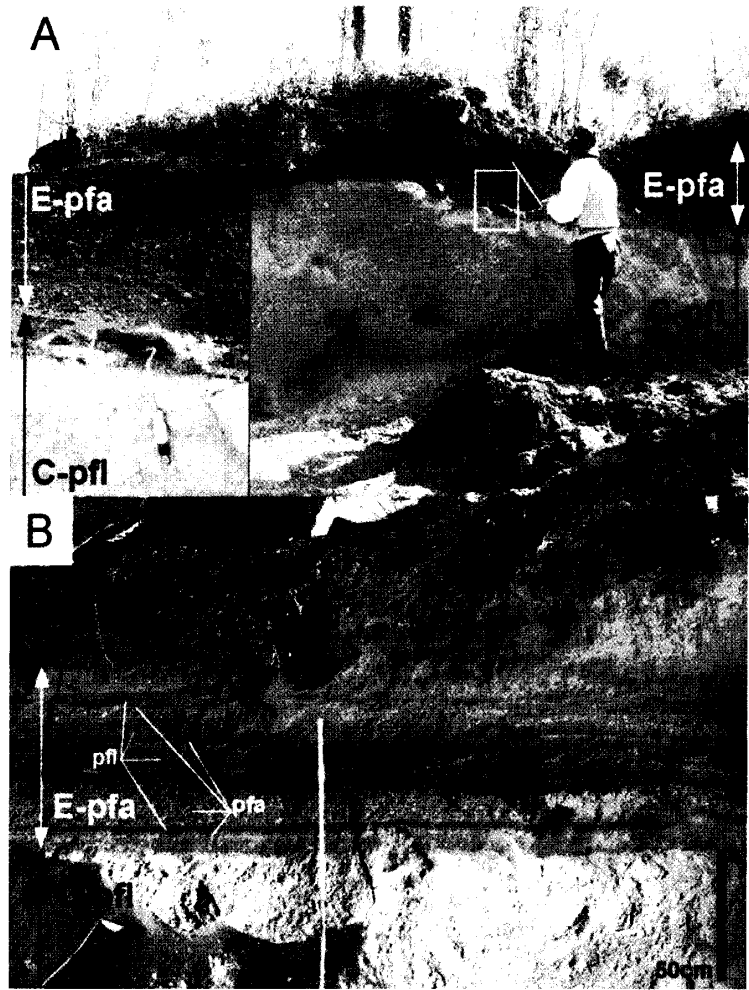


図5 10世紀噴火噴出物 円池降下軽石 (E-pfa) と長白火砕流 (C-pfl) の境界部

A : 図1・図3 E地点. 左隅写真は四角囲み部分の拡大. 長白火砕流 (C-pfl) の最上部には灰雲サージ堆積物(a)が認められる.

B : 図1 Fの西3kmの国境道路沿. ここでの円池降下軽石は降下軽石層 (pfa) と火砕流相当の火山灰層 (pfl) が互層しており, いずれも粗面岩質である.

A, Bいずれの地点でも長白火砕流を円池降下軽石が直接覆っている.

が最も規模が大きかったとされており, 北東部に分布する鶯色火山灰はこれに対応する可能性が高い. 他の噴火記録に対応した噴出物は分かっていないが, これは小規模な噴火による降下火山灰の分布しやすい山体東部での調査地域が山頂から20km以上離れた場所に限られるため, 噴出物を発見できていない可能性が高い.

(b) 10世紀噴火噴出物

10世紀噴火の噴出物層序を図4に示す. 以下宮本ほか〔2002: 202-208〕に基づき下位から順に噴出物の特徴を述べる.

白頭降下軽石 (B-pfa) : 10世紀噴火の最初期の噴出物で, 発泡の良いアルカリ流紋岩質の

白色軽石からなるプリニアン降下軽石である。粒度の変化から複数のフォールユニットからなると考えられ、中位付近には粗面岩質の黒色スコリアや両者の混合した縞状軽石が少量含まれる。分布主軸は南東方向にあり、大部分は北朝鮮領内に分布する。

長白火砕流（C-pfl）：白頭降下軽石と同質の軽石、火山灰からなる火砕流堆積物で、白頭降下軽石のプリニアン噴煙柱の崩壊によって発生したと考えられる。火砕サージを伴う場合もあり、火砕流堆積物はほぼ全方位にわたって分布し、尾根部にもみられるなどあまり地形の影響をうけずに堆積している。どの地点においても層厚は数m程度と薄く、天池カルデラから遠く50kmまで分布するなど、アスペクト比の小さい火砕流であるといえる。山麓では長白火砕流の表層を覆って、同質の泥流堆積物が多く分布する。

円池降下軽石（E-pfa）：黄褐色の発泡の悪い降下軽石と火山灰層との互層からなる（図5B）。火山灰層は褐色のパブルーウォール型の火山ガラスを大量に含み、またサイズの大きな軽石が含まれるなど淘汰が悪く、火砕流遠方層であると考えられる。岩質は各層で変化するが概ね粗面岩質である。分布主軸は全体としては東方向である。町田・光谷〔1994：424-425〕はこれを10世紀噴火ではなくそれ以降の噴出物としたが、下位の長白火砕流とは長い時間間隙を示す証拠はなく（図5）、本研究では10世紀噴出物であると判断した。

天文峰降下軽石（F-pfa）：露出が北側カルデラ壁から北側山腹にかけてと限られるが、他の2つの降下軽石と異なり、北～北西側に分布主軸をもつ。結晶に富む発泡の良い灰白色軽石と黒色スコリアからなるが、いずれも粗面岩質である。下位より灰白色軽石層→黒色スコリア層と変化するが、両者は漸移的に変化しており一連の噴火による噴出物であると考えられる。黒曜石岩片に富むなど白頭降下軽石中の岩片種とは異なり、白頭降下軽石とは別の火口に由来している可能性がある。

白山火砕流（F-pfl）：天文峰降下軽石と同質の軽石・スコリア、及び褐色の火山ガラスからなる火砕流堆積物である。カルデラから30km離れた地域まで分布するが、長白火砕流とは対照的に地形的低所であった谷部にのみ厚く堆積しており、アスペクト比の高い火砕流である。複数のフローユニットからなっており、堆積物全体としては厚いが個々のフローユニットは数m程度と薄い。白山火砕流の堆積した山麓部には深く峡谷が発達しており、峡谷の壁部には多量の火砕流堆積物が露出し、特に層厚の厚い北側の二道白河沿いでは強溶結している。

差河ベースサージ堆積物（G-bs）：北側カルデラ内にもみられる黒色～褐色のサージ堆積物で、粗面岩質のスコリア片、結晶片、細粒火山灰、溶岩片などからなる。同時期に放出された弾道軌道放出物の岩塊も多く認められる

10世紀噴火は短期間の活動休止期を挟んで、アルカリ流紋岩質の白頭降下軽石→長白火砕流と粗面岩質の天文峰降下軽石→白山火砕流の2回の活動期に区分される〔宮本ほか、2002：202-208〕。以上のほかに多量の泥流堆積物（両江泥流堆積物：D-ml）が山麓部で認められ、北

側山麓の両江（図1）では段丘状の地形を覆って堆積している〔Machida *et al.*,1990：1-20〕。現在の河床で見られる泥流堆積物が蓋馬台地由来の火山岩や基盤の花崗岩などの多様な岩片からなるのに対して、これらの泥流は火砕流起源のもののみから構成されていることから、1991年のピナツポ噴火〔Scott *et al.*,1996：971-988〕でも観測されたように、噴火直後の過剰な堆積物を母材として発生した泥流であると推定され、その堆積時期は噴火開始直後から噴火終了後まで長期にわたっていると推定される。

(c) 10世紀噴火以前の噴出物

10世紀以前の大規模な噴火としては、これまで4000年前噴火が指摘されてきた〔魏等, 1999：257-262〕。4000年前噴火噴出物は天池カルデラ北壁の天文峰では10世紀噴出物よりも厚い降下軽石層からなる〔樊等,1999：263-271；図6〕。降下軽石層下部は繊維状に発泡したガラス光沢の強い灰黒色軽石，上部は前者よりもやや発泡の悪い黄色軽石からなるが両者の境界は明瞭でなく，粒度等の変化も認められず，一連の噴火による噴出物であると考えられる。この天文峰よりもさらに北側の鉄壁峰から黒風口にかけての尾根部には，黒曜石レンズによるユータキシティック構造が顕著な強溶結した溶結凝灰岩（図7）が分布する（図1）。この溶結凝灰岩は天文峰でみられた黄色～橙色の降下軽石の直上を覆っており，4000年前の火砕流堆積物であると考えられる。黒曜石レンズの火山ガラスの化学組成は10世紀の粗面岩質のものよりもやや珪長質な組成を示し，10世紀噴出物とは異なるマグマに由来していると推定される。このように4000年噴火においても降下軽石から火砕流の流出へと至る典型的なイグニンブライト噴火の推移を示してい

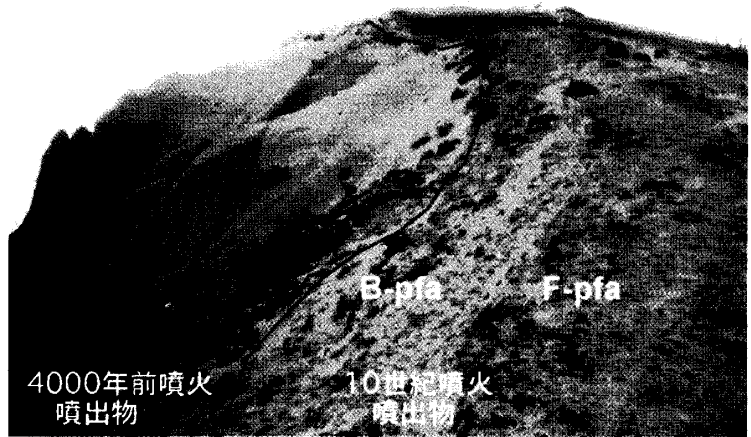


図6 天文峰における降下軽石層

図中の実線が4000年前噴火噴出物（上位の黄色軽石層）と10世紀噴火噴出物との境界。

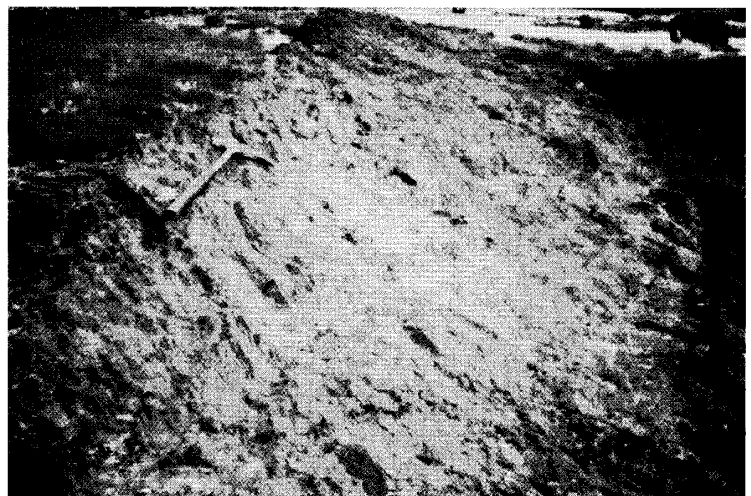


図7 4000年前噴火の溶結凝灰岩の岩相写真

鉄壁峰から黒風口にかけて分布する溶結凝灰岩（写真はカルデラ壁から崩落し，差河付近にみられる転石）。

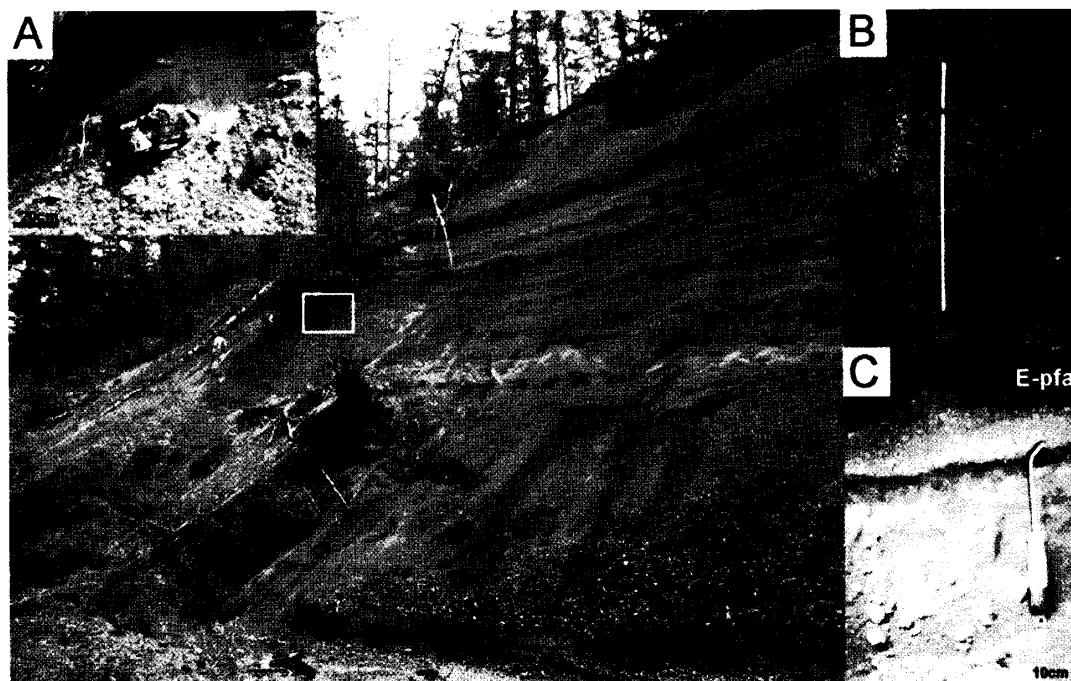


図8 東方沢露頭写真

左下点線は降下軽石と火砕流堆積物の境界。火砕流堆積物には層理が発達し、複数のフローユニットからなることが分かる。現地表直下（写真では表土に覆われている部分）に10世紀の噴出物である円池降下軽石が分布する。

A：図中の四角囲み部分の拡大で、中央の炭化木片（試料番号：Bai-10c-2）の一部を年代測定に使用した。B：降下軽石層下部の拡大。C：円池降下軽石（E-pfa）と火砕流との境界部。鎌のささっている部分の茶色の層が両層の時間間隙を示す風化火山灰土（土壌）。

る。しかしながら、その噴出物はカルデラ壁上に露出しているのみで、噴火に関する情報が大変乏しい。このため、10世紀噴火のような噴出物の化学組成等に多様性があるかどうかは不明である。

山麓部では10世紀噴火噴出物の下位に1cm未満のごく薄い土壌（火山灰土）層を挟んで白色～ピンク色の火山灰層がある。火山灰は細粒の軽石型の火山ガラスを主体としている。今回この火山灰を確認できた地点（図3の山門、老房子小山）では、いずれも層厚は2cm程度と薄い。

町田〔1986：712-716〕は遠望観察によって長白瀑布において少なくとも3枚の溶結凝灰岩があるとした。遠望観察では数枚の溶結凝灰岩と思われる層があるが、瀑布付近に分布する転石には溶結凝灰岩の組織を示す岩石は確認されず、これについては不明である。

(d) 東方沢の噴出物

東方沢では第一期のアルカリ玄武岩質溶岩流の上位を薄い土壌を挟んで白色でやや発泡の悪い降下軽石、その直上を白色軽石、黒色スコリアからなる火砕流堆積物が覆っている（図8）。火砕流は厚さ数mの複数のフローユニットからなっており、上位で黒色スコリアが増加し、全体として珪長質→苦鉄質になる傾向がある。このような噴出物の変化は10世紀噴火の白頭降下軽石→

表1 代表的な白頭山噴出物の化学組成

番号	00091102	01072101	01072402b	020916-1	02091802	01072402a	00090811-c
種類	灰黒色軽石	白色軽石	白色軽石	白色軽石	黄褐色軽石	灰白色軽石	黒色スコリア
ユニット	4000年前	9世紀	10世紀 (B-pfa)	10世紀 (B-pfa)	10世紀 (E-pfa)	10世紀 (F-pfa)	10世紀 (F-pfa)
採取地	天文峰	東方沢	天文峰	南カルデラ壁	老房子小山	天文峰	天文峰
SiO ₂	70.95	72.01	73.21	74.48	64.51	65.49	65.87
TiO ₂	0.30	0.28	0.21	0.21	0.46	0.38	0.39
Al ₂ O ₃	11.96	10.38	11.88	10.62	16.29	15.93	15.58
FeO*	5.31	6.49	3.91	4.24	5.11	4.82	4.95
MnO	0.13	0.18	0.08	0.09	0.14	0.13	0.14
MgO	0.01	0.04	0.01	0.01	0.27	0.16	0.17
CaO	0.40	0.44	0.26	0.21	1.50	1.30	1.25
Na ₂ O	6.11	5.39	5.60	5.66	5.72	5.89	5.83
K ₂ O	4.82	4.79	4.83	4.48	5.96	5.87	5.80
P ₂ O ₅	—	0.01	—	—	0.03	0.02	0.03

XRFの分析結果をすべて100wt.%に再計算しており、分析時のトータルは粗面岩質で98-99wt.%、アルカリ流紋岩質で96-97wt.%であった。鉄はすべて全鉄 (FeO*) で表示している。

長白火砕流(アルカリ流紋岩質)→白山火砕流(粗面岩質)の変化と同じで、火砕物の特徴は10世紀噴火のものと類似している。マグマ組成が異なる長白火砕流から白山火砕流への移行は約1年の活動休止期を挟む〔宮本ほか、2002: 202-208〕ため、火砕流中での組成の変化はシャープであることが期待されるが、東方沢の火砕流中での組成変化の位置は明瞭ではなく漸移しており、組成の異なる火砕流堆積物の境界をここでは認識することはできない。これら火砕物の上位にはごく薄い火山灰土を介して10世紀噴火噴出物である円池降下軽石がのる(図8C)。他の場所では長白火砕流の表面を直接円池降下軽石が覆っている(図5)のに対し、東方沢では土壌が挟まれており、円池降下軽石と下位の火砕流堆積物との間には時間間隙が存在するといえ、これら火砕物は外観は似ているが10世紀噴火の噴出

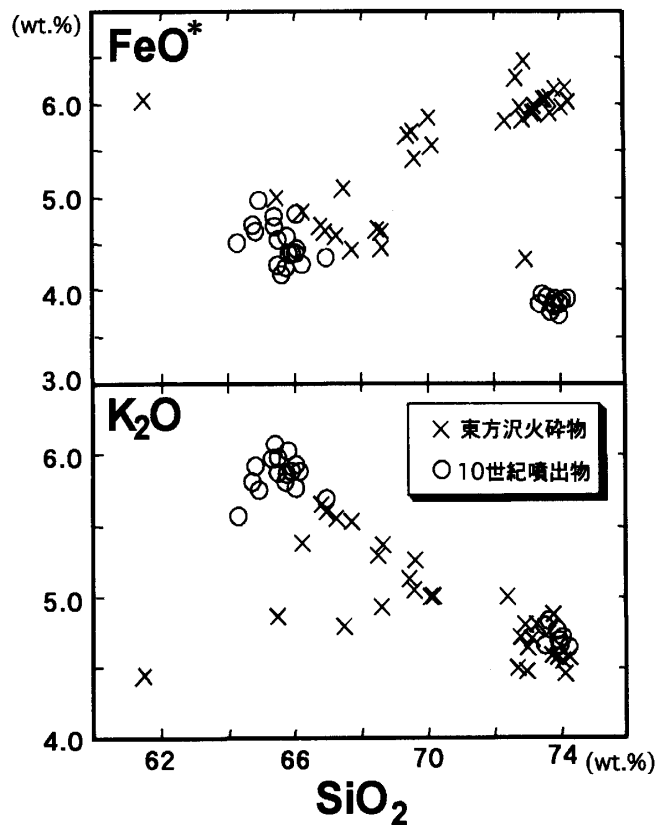


図9 東方沢噴出物と10世紀噴火噴出物の化学組成変化図

物ではない可能性が挙げられる。

10世紀噴火噴出物を含む白頭山噴出物の全岩組成分析の結果を表1に示す。下位の降下軽石は白頭降下軽石と比較して外観ではやや発泡が悪い以外に明瞭な違いはないが、全岩組成で全く異なる傾向を示し、特にその相違はFeO*で顕著である（図9）。これまで多くの分析値が公表されている白頭山苦小牧火山灰（B-Tm）中の火山ガラスの組成〔Machida *et al.*, 1990 : 1-20〕と比較した場合にも、このような組成に対応するものはない。斑晶鉱物組み合わせでは、白頭降下軽石はアルカリ長石（Or : 57）・普通輝石（Wo : 42 Fs : 53）・かんらん石（Fa : 98）・チタン鉄鉱であるのに対し、東方沢の降下軽石はアルカリ長石（Or : 64）・エニグマ石・普通輝石（Wo : 44 Fs : 55）・かんらん石（Fa : 99）・チタン磁鉄鉱と両者では斑晶鉱物組み合わせ・斑晶組成ともに異なる。また後者の方が斑晶量も多く、他の火砕物中には含まれないエニグマ石（ $\text{Na}_2\text{Fe}_5\text{TiO}_2$ （ Si_6O_{18} ））を数パーセント含むことが特徴である。10世紀噴火の火砕流中の軽石・スコリアの化学組成は、2つの火砕流に対応したバイモーダルな分布をするのに対し、東方沢の火砕物は中間組成のものも含むという相違がある。以上のように東方沢の火砕物は、噴火様式の変化では10世紀噴火と類似しているが、斑晶鉱物組み合わせ・化学組成という点からは10世紀噴火噴出物とは全く異なる傾向を示している。

以上のように円池降下軽石との層位関係、化学組成が10世紀のものとは異なっている点から、この東方沢の火砕物（降下軽石・火砕流）は10世紀以前の噴出物である可能性が高い。

3. 放射性炭素年代測定

以上の地質学的・岩石学的特徴から、東方沢の火砕物は10世紀噴火開始以前にすでに堆積していた（峡谷の形成は10世紀噴火以後）と考えられ、白頭降下軽石との化学組成等の相違は噴出時期の異なる別の噴火堆積物であることによっている。これまでの噴火層序から火砕流を伴うような大規模な活動としては4000年前噴火があるが、降下軽石の組成は異なっている（表1）。しかしながら、10世紀噴火と異なり4000年前噴火は情報が乏しく、すべての噴出物について観察しているとは限らない。そのため噴出物の対比のみで東方沢の火砕物の噴出時期を決めることは困難である。そこで、今回は東方沢の火砕流中に含まれる炭化木2試料について放射性炭素年代を測定することで噴出物の対比を行った。試料はそれぞれ（軽石質の）黄白色火砕流（下位）、（スコリア質の）黒色火砕流（上位）中から採取した（図8A）。同時に比較のため、白頭降下軽石中に立木の状態で入っていたカラマツ属の埋没樹幹の根部と長白火砕流最下部の火砕サージ中に含まれていた炭化木の10世紀噴火噴出物中から採取された2試料についても年代測定を行った。

分析は地球科学研究所を通じてアメリカのBeta Analytic Inc.に依頼し、加速器質量分析（AMS）法によって測定された。分析に使用した試料の乾燥重量は炭化木試料で103~820mg、木試料で2.1gである。分析結果（放射性炭素年代）とBeta Analytic Inc.によって求められた暦補正年代（1

表2 放射性炭素年代測定結果

番号	試料	採取地 (#1)	(GPSデータ)	年代値	暦年補正(1 σ) (#2)
Bai-10c-1	埋没樹幹	円池付近	N42° 01' 51.7"	1310±40yBP	670-720AD
	(降下軽石中)	採石場	E128° 24' 15.3"		740-760AD
Bai-10c-2	炭化木	東方沢 (I)	N42° 03' 17.7"	1210±40yBP	770-880AD
	(火砕流中)		E128° 15' 17.4"		
Bai-10c-3	炭化木	山門 (D)	N42° 12' 00.1"	1090±40yBP	900-1000AD
	(火砕サージ中)		E128° 10' 45.8"		
Bai-10c-4	炭化木 (火砕流中)	東方沢 (I)	N42° 03' 17.7"	1160±40yBP	810-840AD
			E128° 15' 17.4"		860-910AD
					920-960AD

1 : 括弧内の記号は図1中の露頭位置に対応.

2 : Beta Analytic Inc.による.

σ) を表2に示す.

これまでも10世紀噴出物について多くの年代測定結果が公表されている [Liu and Taniguchi 2001 : 173-189 ; 刘, 1999 ; 刘等,1998 ; Machida *et al.*,1990 : 1-20など] が, その年代幅は900-1500yBPと広い年代幅を示している. 白頭降下軽石中の埋没樹幹の年代値は同時期の活動である長白火砕流中に含まれるものと異なる結果が得られたが, 今回の結果はこれまでの年代値の幅と比較すると狭い範囲で一致しているといえ, すべて4000年前のものではなく, 少なくとも10世紀付近の噴出物に対応する年代値である.

4. 議論

放射性炭素年代測定結果について

白頭降下軽石から長白火砕流への移行は連続的であったと考えられるが [宮本ほか, 2002], 今回得られた年代測定値では両層で値が大きく異なる. 田中ほか [1998 : 49-56 ; 1999 : 26-34] は北朝鮮領内2地点の白頭降下軽石中から採取した2試料の埋没樹幹 (トウヒ属) について放射性炭素年代測定を行い, それぞれ1100±50yBP (AD859-979年), 1310±40yBP (AD730-773年) の異なった年代を報告した. 彼らは同一層準から得られたこの年代値の食い違いを, 青森県下北半島で2000年以上前に枯死したヒバの樹幹がたまたま現存している例を挙げて, 後者の埋没樹幹は降下軽石堆積時にはすでに (200年前に) 枯死していた可能性があるかと推定した. 今回のわれわれの測定では降下軽石中からは1試料のみであったため詳細は分からないが, 円池付近で採取された試料の年代値として1065±95yBP [刘等, 1998] が報告されていることを考慮すると, 今回の測定した試料についても田中ほか [1999 : 26-34] と同様なことがいえるのかもしれない. この場合に興味深いのは, このようにいずれも立ち木の状態で降下軽石に埋積されたという産状の同じ試料から類

似した年代が得られたことは、10世紀噴火の200–300年前に広域で木が枯死するようなイベントが起こった可能性を示唆しているのかもしれない。

東方沢に分布する火砕流中の2つの炭化木試料の測定結果は互いに良い一致を示しており（表2）、両者の示す年代が東方沢の火砕流の噴出年代を示していると考えられる。東方沢の噴出物はカルデラ壁上に分布する白頭降下軽石とは組成が異なるが、放射性炭素年代からは4000年前の噴出物ではなく、10世紀頃の噴出物であるといえる。補正された暦年代では長白火砕流中の試料よりもやや古い9世紀を示しており、10世紀噴火の100年前に東方沢の火砕物が噴出された可能性がある。

前述のように白頭山噴出物については放射性炭素年代値が数多く報告され、広い年代幅を示している。Liu and Taniguchi〔2001：173–189〕は収集した放射性年代の相違はそれぞれ異なる噴火イベントに対応すると考えたが、実際には同一の層準と思われる層位から得られた試料の年代値が異なる（前述の田中ほか、1999：26–34のような）など、試料の産状を含めた吟味が必ずしも十分ではないようである。従って今後はこれら膨大な放射性年代値に対し、正確な噴火層序に基づいた系統的な整理を行う必要がある。

白頭山9世紀噴火（東方沢の火砕物の噴出）

東方沢における組成の異なる降下軽石の上位の火砕流堆積物中から得られた試料の暦年代が10世紀よりもやや古い9世紀を示した。東方沢の火砕物と円池降下軽石との間にはごく薄い火山灰土が挟まれることは、東方沢の火砕物の示す9世紀という年代と調和的である。一方、町田・光谷〔1994：424–425〕は円池降下軽石を18世紀の噴出物としているため、以下、この暦年代値の妥当性を地質学的・岩石学的に検討し、10世紀噴火以前に9世紀噴火が起こった可能性について議論を行う。

(a) 10世紀噴火噴出物との対比

東方沢下位の降下軽石は全岩化学組成（ FeO^* ）において10世紀噴火の噴出物である白頭降下軽石と明らかに異なる（図9）。斑晶鋳物組み合わせでも前者はエニグマ石を特徴的に含むという相違が認められる。また、火山ガラス組成、苦鉄質鋳物組成では全岩の FeO^*/MgO の相違に対応して、いずれも東方沢のものの方が FeO^* に富む特徴を示しており、東方沢の降下軽石は白頭降下軽石とは別のマグマに由来したと考えられる。

白頭降下軽石の分布主軸が南東方向であるように、白頭山から噴出された降下性の堆積物の大部分は偏西風の影響によって主に北朝鮮領内に分布する〔例えばMachida *et al.*, 1990：1–20；宮本ほか、2002：202–208〕。そのため中国領内では（南東部を除く）カルデラ壁上、及び東側国境沿いでのみ白頭降下軽石を観察することができるが、すべての層準が見えているかどうかは定かではない。南側カルデラ壁上では白頭降下軽石は約10mの層厚をもって厚く堆積しているが（図2）、全体として一様な（見かけ上の）特徴を示しており、異なる軽石層は認められない。

一方、現在のところ北朝鮮領内の情報は乏しいが、北朝鮮領内の天池カルデラ南東側壁上に分布する軽石の化学分析値（2種）がDon〔1996：325-344〕により公表されており、この中の近年の噴火による噴出物とした白色軽石の化学組成が、東方沢の降下軽石と同質でFeO*に著しく富む特徴を示す。Don〔1996：325-344〕では詳しい柱状が示されていないため、白頭降下軽石との関係は不明であるが、北朝鮮側カルデラ壁上に分布しているということは、東方沢の降下軽石は他の噴出物と同様に主に北朝鮮領内に分布している可能性が高いことを示唆している。そこで、東方沢の降下軽石が白頭降下軽石の一部である可能性を検討するため、東方沢よりも南東側に位置し、北朝鮮領に最も近い円池（図1のG）においてトレンチ調査を行った。ここでは白頭降下軽石の下層の泥炭層の上部までトレンチを掘り、白頭降下軽石のすべての層位について観察・試料採取を行うことができた。白頭降下軽石は下位から順に細粒→粗粒→細粒というフォールユニットの相違による変化を示しているが、斑晶鉱物組み合わせ・化学組成の変化はない。円池と東方沢との位置関係から東方沢の降下軽石が白頭降下軽石の一部であるならば、ここでエングマ石を特徴的に含む軽石が存在することが期待されるが、これを見つけることはできなかったことから、ここでの白頭降下軽石はいずれも東方沢のものとは対比はされない。

白頭山の北側の山腹から山麓にかけて大量の泥流堆積物が分布する。これらは軽石や火山灰などの火砕流起源のもののみからなることから、10世紀噴火による噴出物の堆積直後に過剰な火砕物を母材として発生した泥流であると推定される。東方沢では約30mの深い峡谷が形成されており、その峡谷断面には火砕流堆積物が厚く露出している（図8）。白頭山の山麓部ではこの東方沢以外にも10世紀噴火の火砕流堆積物を刻んだ峡谷が多く認められる。これら峡谷部の下流域には峡谷を埋めた火砕物と同質の泥流堆積物が多く存在する。これら泥流堆積物の母材は主にアルカリ流紋岩質の白色軽石からなる長白火砕流、粗面岩質の黒色スコリア・灰白色軽石からなる白山火砕流である。長白火砕流は地形にかかわらず広く遠方まで達しているのに対して、白山火砕流は谷部に沿って厚く堆積する。峡谷内部は両火砕流によって埋められているが、尾根部には先に流出した長白火砕流のみが堆積している。泥流は両火砕流を母材として白色軽石と黒色スコリア（及び同質の火山ガラス）からなる泥流と、長白火砕流起源の白色軽石・白色透明ガラスのみからなる泥流の2種に分けられ、これら2つの泥流の分布は両火砕流の分布に対応している。白黒両方を含む泥流は両火砕流の厚く堆積した谷部の下流域に分布し、特に二道白河・三道白河の川がすべて合流する两江（図1）では特に厚く、段丘地形を形成している。一方、白色のみからなる泥流は長白火砕流しか堆積していない地域に分布し、山腹部で長白火砕流の表層を薄く覆っている。東方沢の厚い火砕流は粗面岩質であることから、これを母材とした泥流堆積物には他と同様に黒色スコリア、褐色火山ガラスが含まれると考えられる。東方沢の峡谷の下流域に相当する五道白河は、白頭山噴出物と基盤との北東側境界部を流れている（図1）。白頭山北東域の三道、松江鎮の五道白河河岸にも10世紀と推定される泥流堆積物が分布するが、いずれも白色軽石（+同質の白色透明火山ガラス）のみからなっている。このことは東方沢の火砕物は他の峡谷部

とは異なり、10世紀の噴火時に発生した泥流の後背地とはなっていないことを示唆しており、10世紀噴火時にすでに谷はこれら火砕物によって埋積されていたと考えられる。

以上に加えて、東方沢での火砕流中の構成物の組成変化が明瞭ではないという10世紀のものとは異なる特徴からも東方沢の火砕物は10世紀噴火の噴出物に対比されず、円池降下軽石との層序から10世紀噴火以前の噴出物であるといえる。

(b) 10世紀噴火以前の噴出物との対比

東方沢の火砕物は10世紀噴火による噴出物とは別の噴火に由来するものであり、火砕物中の炭化物から得られた年代値から、10世紀以外にこれまでに報告された大規模噴火である4000年前噴火でもない。

白頭山北麓域において、10世紀噴火噴出物の直下に1cm未満の土壌（風化火山灰土）を挟んで軽石型の火山ガラスからなる白色～ピンク色の火山灰層が認められる（図3の山門・老房子小山）。この火山灰と10世紀噴出物に挟まれる土壌の厚さがごく薄いことから4000年前噴出物ではなく、また10世紀噴火ともそれほど大きな時間間隙をもつ可能性は低い。火山ガラスが細粒なため組成分析は行っていないが、白頭降下軽石に含まれるものと類似した白色でやや透明な火山ガラスであることから、アルカリ流紋岩質であると考えられる。今回の年代測定結果から推定される10世紀噴火との100年程度の時間間隙から考えると、この火山灰と10世紀噴出物間の土壌層がごく薄いことは調和的であり、岩質・層位の類似性からこの火山灰が東方沢の降下軽石層に対比されると考えられる。

近年、青森県の小泊の沼地でのボーリングコア中に2枚の白頭山起源の火山灰層が認められた〔高橋ほか，2001：43-46〕。このボーリングコア基底部の土壌の年代として 2310 ± 50 yBP〔高橋ほか，2001：43-46〕が得られており、湖底堆積物の堆積速度を一定として考えると両者はそれぞれ8世紀，11世紀付近となり、いずれも10世紀近傍のものである。堆積状況等の詳しい記述がないため、上位の火山灰が再移動によるものである可能性もあるが、堆積速度を仮定しているとはいえ、100年以上の時間間隙をもって個々に独立した層をなしていることから再移動によるものとは考えにくい。榛名山の6世紀噴火のように数十年間に規模の大きな噴火を2度行った例〔早田，1993：128-150〕も知られており、百年の間に白頭山の噴火によって2回の降灰が起こったと考えられる。10世紀付近で2層の白頭山起源の火山灰があることは白頭山近傍での火山層序と調和的であり、下位が東方沢の火砕物（9世紀），上位が10世紀噴火に対比されると考えられる。小泊でのボーリング中に認められる2枚の白頭山起源火山灰の火山ガラス組成〔例えばMachida et al., 1990：1-20〕とよく類似するが、いずれも東方沢の降下軽石にみられるような FeO^* に富む特徴は示さない。下位の火山灰層は主に粗面岩質のものからなっており、上位の方は珪長質のものが多し。10世紀噴火では初期の珪長質の長白火砕流が後期の粗面岩質の白山火砕流よりも規

模が大きい。一方、東方沢の火砕流は主に粗面岩質であることから、このことは小泊における白頭山起源の広域火山灰がいずれも火砕流堆積物に由来し、初期のプリニー式噴火によるものを含んでいないことを示唆している。東北日本において10世紀近傍の白頭山起源の火山灰層が2層あるという報告は他にはないため今後検討を要するが、小泊の火山灰層が9世紀噴火の遠方層である可能性は高い。

以上のように東方沢の火砕物を10世紀以前の噴出物とした場合、近傍・遠方ともに対比可能な噴出物があることが分かった。このことから今回得られた9世紀という暦年代値が妥当である可能性が高いと考えられる。今後、小泊のような例が他にないかを検討することに加えて、これらの火山灰について物質科学的検討を行うことにより、9世紀噴火について議論が進むと思われる。

(c) 9世紀噴火の噴火規模

これまで報告されてきた10世紀・4000年前噴火などの白頭山第三期活動の爆発的噴火では、その噴火の推移は降下軽石の噴出から破局的なイグニンプライトの流出へと至る。東方沢の9世紀と推定された噴出物も同様に降下軽石層を火砕流堆積物が直接覆っており(図8)、降下軽石層の噴出直後に火砕流が流出した。田中ほか〔1998: 49-56〕によると北朝鮮領内の白頭降下軽石の下位に火砕流が存在する。詳しい堆積状況が示されていないため、この火砕流と白頭降下軽石の関係は明らかでないが、この火砕流堆積物は白頭降下軽石噴火以前である9世紀噴火のものである可能性がある。東方沢の火砕物の層相や、谷埋めの火砕流であるという特徴は、10世紀噴火の白山火砕流と類似しており、北朝鮮領内のこの火砕流が9世紀のものであるとすると、9世紀噴火の火砕流も10世紀のものと同様に、山体の全方位に流出した可能性があげられる。

東方沢でみられる降下軽石と火砕流堆積物の重なりは10世紀のものと同じである。Machida *et al.*〔1990: 1-20〕は円池降下軽石と下位の長白火砕流との間には薄い土壌を挟む場合があり、10世紀噴火の噴出物ではあるが両層の間には若干の時間間隙があると考えた。その後町田・光谷〔1994: 424-425〕は両層間の土壌の存在に加えて、侵食をうけた長白火砕流の表層を円池降下軽石が覆っていることから、円池降下軽石を10世紀ではなくそれ以降(18世紀)の噴出物とした。しかしながら前述のように円池降下軽石は多くの露頭において長白火砕流を直接覆っている(図5)。円池降下軽石が土壌を介して火砕流と接する東方沢では、下位の火砕流は9世紀の噴出物であり、その直上をごく薄い土壌を介して円池降下軽石が覆っていることから判断して、円池降下軽石は10世紀噴出物である。東方沢の粗面岩質の火砕流と白山火砕流は互いに類似しているために層相のみからは両者を区別することは困難である。そのため土壌を挟んで円池降下軽石に覆われる火砕流堆積物〔Machida *et al.*, 1990: 1-20〕, 町田・光谷, 1994: 424-425〕は10世紀のものではなく東方沢の火砕流堆積物に対比されると考えられ、北側の峡谷部に露出する火砕流の一部は9世紀によるものである可能性が高い。以上のように現在のところ露頭が限られるため明らかではないが、9世紀噴火は全方位に火砕流を流出するような10世紀と同様に規模

の大きな噴火であったのかもしれない。

(e) 白頭山9世紀噴火の歴史への意義

これまで白頭山の歴史時代における噴火としては、規模の大きなものとして10世紀噴火があげられ、その歴史的な影響について議論がなされてきた〔例えば町田，1992：104–129〕。8–10世紀にかけて白頭山地域を含む中国東北部で栄えていた渤海王朝は西暦926年に滅亡した。町田〔1992：104–129〕は10世紀噴火が渤海の滅亡時期に近いことから、渤海王朝滅亡に白頭山10世紀噴火が関与したという仮説をたて、様々な検証を行ってきた〔町田・白尾，1998：119–128〕。しかしながら、最近の年代学的研究では10世紀噴火は渤海滅亡後であることが指摘されており〔例えば中村ほか，2000：238–239；早川・小山，1998：403–407〕、白頭山の10世紀噴火と渤海王朝の滅亡には因果関係はない可能性が高い。一方、渤海王朝の衰退は国家内部の矛盾と権力闘争の激化によりすでに9世紀末には開始していたとされている〔朱・魏，1996：85–96〕。この背景として渤海国建国（698年）以降続いていた温暖な気候が9世紀後半に寒冷な気候に変化した〔吉野，1992：64–79〕という事実も挙げられるかもしれない。東方沢の噴出物の年代は確定していないが、9世紀頃に以上のような巨大噴火が起こったとするならば、局地的な気候の変化や噴出物による被害など、近隣国家である渤海王朝へ少なからず影響を与えたと推定される。今後、この9世紀噴火の時期・推移・規模について検討することで、渤海王朝の滅亡への遠因として、この9世紀の白頭山噴火が関与した可能性を新たに指摘できるかもしれない。

5. まとめ

1：東方沢の火砕流中から採取された2種の炭化木試料について放射性炭素年代測定を行った結果、ともに9世紀の暦年代値がえられた。層序学的な検討からは、東方沢の火山砕屑物は10世紀噴火噴出物とは対比されず、以上の暦年代値が示す9世紀の噴出物であることが明らかとなった。

2：白頭山9世紀噴火の噴出物は、10世紀噴火と活動の推移は類似するが、噴出物の斑晶鉱物組み合わせ・化学組成が明瞭に異なるなど、10世紀噴火とは異なるマグマに由来すると考えられる。

3：東方沢の火山砕屑物は、近傍では10世紀噴火噴出物と1cm未満の土壌を挟んで下位に位置する火山灰層に、遠方では小泊のボーリングコア中の2枚の白頭山起源火山灰に層位的には対比されると考えられる。

4：白頭山第3期の大規模な爆発的活動（4000年前，10世紀）では、いずれの噴火も降下軽石→イグニブライトの流出へと活動が推移する。今回明らかとなった9世紀噴火も同様な噴火推移を

しており、詳しい噴出物の分布は不明であるが、10世紀噴火噴出物との類似性から、大規模な噴火であった可能性がある。

5 : これまで議論がなされてきた白頭山10世紀噴火と渤海王朝の滅亡との関連性は、近年の年代学的研究により否定されつつあるが、渤海王朝滅亡にこの白頭山9世紀噴火が9世紀末にはすでに始まっていた渤海王朝の衰退に関与した可能性がある。

謝辞

本研究を行うにあたり、吉林大学金旭教授、延辺大学鄭永振教授、東北大学東北アジア研究センター成澤勝教授には現地調査の便宜を図っていただき、調査にも同行していただいた。中国地震局地質研究所魏海泉助教授には現地の露頭情報を提供していただいた。東北大学大学院理学研究科鈴木三男教授には年代測定に使用した一部の試料の樹種鑑定をしていただいた。東北大学理学部伊藤嘉紀技官にはEPMA分析において大変お世話になった。また、東北大学理学研究科吉田武義教授には粗稿を読んでいただいた。以上の方々に心よりお礼申し上げます。なお、本研究には文部省科学研究費補助金（海外学術 代表者谷口宏充）、平和中島財団研究助成（アジア地域重点学術研究 代表者谷口宏充）を使用した。

引用文献

早川由紀夫・小山真人 1998

「日本海をはさんで10世紀に相次いで起こった二つの大噴火の年月日—和田湖と白頭山—」、『火山』, 第II集, 43, 403-407, 東京都: 日本火山学会.

Horn S. and Schmincke H.-U. 2000

Volatile emission during the eruption of Baitoushan Volcano (China/North Korea) ca.969 AD., *Bulletin of Volcanology*, 61, 537-555, USA: Elsevier Science Ltd.

猪俣道也 2000

「白頭山天池」, 『日本地質学会ニュース』, 3, no. 9, 2-3, 東京都: 日本地質学会.

刘嘉麒 1999

「中国火山」, 『地质论评』, 中国: 科学出版社.

Liu J. and Taniguchi H. 2001

Active volcanoes in China., *The report of Northeast Asian Studies*, 6, 173-189, Miyagi: Tohoku University.

Liu R. and Wei H. 1996

The large eruption of Tianchi volcano, Changbaishan during 750-960 AD., *Abstracts of International Geological Congress*, Beijing, 428p

刘若新・魏海泉・李继泰等 1998

『长白山天池火山近代噴发』, 中国: 科学出版社

刘若新・魏海泉・李继泰・楊清福・许东满等 1995

- 『长白山天池火山, 火山作用与人类环境』, 中国: 地震出版社.
- 町田洋 1986
「はるかなる白頭山」, 『科学』, 56, 712-716, 東京都: 岩波書店.
- 町田洋 1992
「火山噴火と渤海の滅亡」, 『謎の王国・渤海』, 104-129, 東京都: 角川書店.
- 町田洋・白尾元理 1998
『写真でみる火山の自然史』, 119-128, 東京都: 東京大学出版会.
- 町田洋・光谷拓実 1994
「中国・北朝鮮国境における長白山の噴火年代に関する樹木年輪年代学的研究(中間報告)」, 『地学雑誌』, 424-425, 東京都: 東京地学会.
- 町田洋・新井房夫・森脇広 1986
「日本海を渡ってきたテフラ」, 『科学』, 51, 562-569, 東京都: 岩波書店.
- Machida H., Moriwaki H. and Zhao D.C. 1990
The recent major eruption of Changbai Volcano and its enviromental effects., Geophysical Reports of Tokyo Metropolitan University, 25, 1-20, Tokyo: Tokyo Metropolitan University.
- 宮本毅・中川光弘・大場司・長瀬敏郎・菅野均志・谷口宏充 2002
「白頭山10世紀噴火の噴火推移」, 『月刊地球』, 号外36, 202-208 東京都: 海洋出版.
- 中村俊夫・丹生越子・小田寛貴・太田友子・成瀬由紀子・光谷拓実 2000
「ウイグルマッチング法による白頭山噴火時期の検討」, 『日本文化財科学会第17回大会研究発表要旨集』, 238-239 東京都: 日本文化財科学会.
- Scott, K.M., Janda, R.J., de la Cruz, E.G., Gabinete, E., Eto, I., Isada, M., Sexon, M. and Hadley, K.C. 1996
Channel and sedimentation responses to large volumes of 1991 volcanic deposits on the east flank of Mount Pinatubo., In: Newhall, CG., Punongbayan, S.(eds) Fire and Mud., Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines. 971-988, USA: University of Washington Press.
- 朱国枕・魏国忠 1996
『渤海史』, 85-96 東京都: 東方書店.
- 樊祺誠・刘若新・魏海泉・隋建立・李霓 1999
「长白山天池火山全新世喷发与岩石地球化学特征」, 『地质论评』, 45, 263-271, 中国: 科学出版社.
- 早田勉 1993
「古墳時代におこった榛名山二ツ岳の噴火」, 『火山灰考古学』, 128-150, 東京都: 古今書院.
- 高橋明久・檜垣大助・近藤敏光・秋村純一・鳴海俊光・北村繁・柴正敏 2001
「津軽半島における下前地すべりの地形発達に関する一考察」, 『第40回日本地すべり学会研究発表会講演集』, 43-46, 東京都: 日本地すべり学会.
- 田中克人・根本直樹・田中和夫 1998
「朝鮮民主主義人民共和国内での白頭山調査中間報告」, 『青森県史研究』, 2, 49-56, 青森県: 青森県.
- 田中克人・根本直樹・田中和夫・中川希人 1999
「白頭山で採取した軽石と埋没樹幹の年代」, 『青森県史研究』, 3, 26-34, 青森県: 青森県.
- 鄭璋鎬 1997
『最近北韓五萬分之一地形図 上巻』, 韓国: 景仁文化社・高麗書林.
- 吉野正敏 1992
「気候変動と渤海の盛衰」, 『謎の王国・渤海』, 64-79, 東京都: 角川書店.
- 魏海泉・刘若新・樊祺誠 1999
「长白山天池火山—多成因中央式火山」, 『地质论评』, 45, 257-262, 中国: 地質出版社.