大規模火砕流による基盤岩への熱的影響の検討 —フィッション・トラック法による熱履歴解析—

松崎達二^{*1}・角田地文^{*2}・石丸恒存^{*3}・鎌田浩毅^{*4}・檀原 徹^{*5}・
 岩野英樹^{*5}・吉岡 哲^{*5}

要 旨

大規模火砕流が地表を覆う範囲は広範囲であり、給源から数十km以上に及ぶ。このため地質環境の長期安定性評価の観点から、火砕流の堆積による基盤岩への熱的影響を検討しておくことは重要である。本研究では、大規模火砕流により基盤岩の被った熱的影響を、フィッション・トラック(FT)法を用いて把握し、さらに地下深部の熱履歴を外挿する解析手法の構築と、実際の熱的影響の検証を試みた。その結果、大規模火砕流の一つである今市火砕流の基盤岩への熱的影響として、火砕流の基底面から深度100mの位置で60℃の温度上昇が生じた可能性があるとして想定できた。

Key words: 長期安定性 long-term stability, 大規模火砕流 large-scale pyroclastic flow, 熱的影響 thermal effect, フィッション・トラック法 fission-track method

1. はじめに

1.1 背景と目的

地質環境の長期的な安定性を評価するためには、火山活動、断層活動、隆起・浸食等の天然現象が地質環境へ及ぼす影響の範囲や程度に関する科学的な知見を整備・蓄積していくことが重要である。これらの天然現象のうち、火山活動が周辺の地質環境へ及ぼす影響としては、岩脈の貫入・火砕物の噴出等による熱的影響、地熱系・熱水対流系による水理学的・地球化学的影響、火山性地殻変動やカルデラ形成による岩盤力学的影響が想定される。これらの火山活動による地質環境への影響に関する知見については、核燃料サイクル開発機構¹⁾、中田・田中²⁾等の報告がある。これらの報告では、火山活動による地質環境への影響範囲は、大規模火砕流や火山灰の到達を除き、火山の噴出中心から

20~30km程度とされている。

大規模火砕流は、爆発的噴火により、大量で高温の噴出物を発生し、急速にかつ広範囲に流走する。堆積物が覆う範囲は、給源から数十km、場合によっては100km以上に及ぶ。例えば、第四紀の最大規模の火砕流である阿蘇4火砕流では給源より70km以上離れた場所においても火砕流堆積物の層厚が数十mに達する場合もある³⁾。このことは、火山の給源から遠距離にある地点でも、高温の火砕流が堆積することにより、基盤に対して熱的影響が及ぶ可能性のあることを示している。このような火砕流の定置により基盤が被る熱的影響の程度を検討しておくことは、地質環境の長期安定性を評価する観点から必要と考える。

石丸・角田⁴⁾は、上述の観点から、文献調査により日本に分布する第四紀大規模火砕流として55給源108岩体を抽出し、噴出量、給源距離、定置層厚などの特徴を整理するとともに、火砕流による基盤への熱的影響について、KAMATA *et al.*⁵⁾の算定手法を用い、1次元熱伝導数値解析を行って基盤岩への熱的影響を検討した。降雨等の冷却要因を考慮せず、初期条件(定置温度、火砕流層厚)を仮定した1次元熱伝導数値解析の結果では、例えば火砕流堆積物が層厚100m、定置温度900℃の場合、深度100mの基盤中で、約100℃の温度が継続する時間は600年程度にわたると推定されている。

*1 サンコーコンサルタント(株) Suncoh Consultants Co., Ltd (会員)

*2 核燃料サイクル開発機構 Japan Nuclear Cycle Development Institute(会員)

*3 核燃料サイクル開発機構 Japan Nuclear Cycle Development Institute

*4 京都大学 Kyoto University

*5 (株)京都フィッション・トラック Kyoto Fission-Track Co., Ltd

本研究では、火砕流堆積物と基盤岩の境界が直接観察できる露頭の試料を用い、フィッション・トラック(FT)法による鉱物のトラック長分布・見かけ年代値により、実際に基盤岩の被った熱的影響を把握した。FT法による熱履歴解析では、基盤岩のFT長分布に基づき、火砕流の定置温度と層厚(初期条件)を推定する被熱解析シミュレーションの検討と、その結果による、地下深部の熱的影響の検証を試みた。

1.2 熱履歴解析の手法について

放射年代測定法では、用いる手法および鉱物に対してそれぞれ固有の閉鎖温度⁶⁾が定義される。放射壊変により生じる娘核種(FTを含む)は、高温では鉱物内に保持されず、冷却し一定のある温度以下になったときに蓄積し始める。この温度がいわゆる閉鎖温度であり、同一の岩石で異なる手法および鉱物で年代測定を行えば、その岩石の熱履歴を求めることが可能である。ただし、この方法で熱履歴を求める場合、同一岩石中に年代測定可能な鉱物が、数種類存在すること、もしくは数種類の手法が適用できる鉱物が存在すること、が前提となる。

FTは、鉱物中で²³⁸Uが自発核分裂したときに残す傷跡であり、その長さは鉱物ごとにほぼ一定で決まっている。FTは、ある温度以上になると安定せず、短縮(アニーリング)し始め、最後には消滅する。一度短縮・消滅したFTは、元の長さには戻らない。このため、短縮・消滅すると年代値も見かけ上若返っていく。前述したいわゆる“閉鎖温度”と異なり、FT長は、消滅に至らないが短縮の進む領域がある。

この概念を模式的に示したのが 図-1 であり、以下の3つの温度区間に区切ることができる。

- ①完全にFTが消滅する区間：TAZ(Total Annealing Zone)
- ②FTが短縮する区間：PAZ(Partial Annealing Zone)
- ③FTが安定している区間：TSZ(Total Stability Zone)

過去のある時点でFT短縮を生じる熱的影響イベントがあり、PAZまでの温度上昇があった場合(C: mixed age type1)は、短縮したFTと、その後発生した通常長のFTとが、存在することとなる。その結果、みかけ年代値は、鉱物生成と熱的影響イベントとの中間を示すこととなる(結果として見かけ上若返る)。

また、熱的影響イベントでTAZまでの温度上昇があった場合(C': mixed age type 2)は、FTは消滅し、その後発生した通常長のFTのみ存在することとなる。みかけ年代値は、熱的影響イベントの年代値を示すこととなる。

このFTの性質を利用すると、TAZ、PAZに至った熱的影響の把握が可能となり、その熱履歴の推定、が可能となる。FTによる熱履歴解析は、前述した“閉鎖温度”による熱履歴解析の方法に比べると、対象鉱物が1種類でも

図-1 FT長への熱影響概念図 WAGNER⁷⁾の図に加筆修正

可能であること、PAZを取り扱うことでより低温部の解析が可能であること、等で有利である。

FT長を用いた詳細な熱履歴を求める手法は、ジルコンを対象として山田・西村⁸⁾により forward modeling による手法、山田⁹⁾によりランダムモンテカルロ法による手法が検討されている。しかし、これらは点での熱履歴を求めるにとどまっており、空間的な広がり把握するには至っていない。

本研究では、KAMATA *et al.*⁵⁾の1次元熱伝導数値解析の手法を適用し、火砕流の熱履歴・熱的影響の連続的な垂直分布を把握する手法を検討した。さらに、熱的影響がTSZまでであった区間の熱履歴・熱的影響を外挿する手法を検討した。以下に実際の研究手順および方法について述べる。

2. 研究手順および方法

火砕流の熱的影響評価を実施するにあたり、作業全体の手順を以下に示し、図-2にフロー図を示す。

①採取地点選定・サンプリング：火砕流と基盤岩の境界露頭の探索と、その状況記載、試料採取位置の選定、配置の決定、対象鉱物の確認分析を行い、本研究に最適な露頭を選定する。

②FT分析：対象鉱物を分離し、みかけ年代値の決定とFT長を測定する。岩盤状況を考慮のうえ、統計的な検定(χ^2 検定等)により、年代値・FT長の妥当性について検討する。

③解析手法の策定：加熱温度-FT長関係式と、FT長火砕流熱伝導式を用いた解析プログラムの構築を行う。

④熱履歴・熱的影響評価：FTみかけ年代値とFT長頻度分布について総合評価を行う。③を用いて被熱解析シミュレーションを行う。初期条件を決定し火砕流の熱的影響評

図-2 作業手順フロー

表-1 選定露頭の概要

露頭No.	採取位置 名 称	露 頭 位 置						被 覆 火 砕 流	火 砕 流 層 厚(m)				基 盤 岩	
		緯 度			経 度				非溶結	弱溶結	強溶結	合 計		
		度	分	秒	度	分	秒							
THM1	大分県直入郡 直入町新屋敷入口	33	1	29	131	21	54	今 市	0.1	0.5	20 以上	20.6 以上	大 野 火山岩類	流紋岩
THM5	大分県竹田市二俣	32	51	50	131	17	27	Aso-3B	0.2	5	15 以上	20.2 以上	祖母山 火山岩類	変質した 溶結凝灰岩
THM6	大分県大野郡 緒方町上畑南方	32	51	14	131	25	39	Aso-4A	-	4	10 以上	14.0 以上	新第三紀 酸 性 貫入岩類	花崗岩

* 地層名は、地質調査所発行5万分の1図幅「竹田」、「久住」による。

価を行う。

3. 地区選定・試料採取

3.1 方法

調査地域は、大規模火砕流堆積物が多く分布し、基礎研究の進んでいる中部九州を対象とした。対象火砕流は、分布が広範囲に及んでいる今市および阿蘇火砕流堆積物とした。

選定に際しては、下記の条件を満たす露頭を対象露頭とした。

- ①火砕流堆積物と基盤岩の関係が良好に観察できる露頭。
 - ②火砕流堆積物の溶結度が比較的強いこと。
 - ③風化・変質影響が極力少なく、なるべく均質な岩盤。
 - ④火砕流と基盤岩の年代差が1オーダー程度であること。
- サンプリングにあたっては、現地露頭調査を行い火砕流堆積物および基盤岩の風化・変質状況および接触部等の状況を記載した。

1 万分の1 程度の露頭位置図および露頭スケッチを作成し、試料採取地点を選定した。分析用試料のサンプリングは、火砕流堆積物下面から境界面に対しほぼ垂直方向に、

間隔においてサンプリングした。サンプリング間隔は露頭状況により決定した。サンプルは接触面から下方へ極力連続的に採取し、露頭での方向・接触面からの距離等を記録した。対象基盤岩は、上記条件を満たしていても、必ずしもFT法解析に適合するとは限らないため、鉱物の確認分析を行い、適合条件を確認した。条件は以下のとおりである。

- ①FT法対象鉱物(ジルコン・アパタイト等)の有無
- ②対象鉱物(ジルコン・アパタイト等)の粒径
- ③概略のFT密度確認

以上の手順で露頭を絞り込み、表-1に示す対象露頭(THM1,5,6)を選定した。確認分析の結果、3露頭ともに対象鉱物としてジルコンを含有し、アパタイトは全く含有していなかった。以降に、3露頭のうち最も明瞭に熱影響が確認できたTHM1について詳細に述べることとする。

図-3 THM1 露頭全体模式図

図-4 模式平面図

図-5 THM1 露頭スケッチ・試料採取位置

3.2 THM1 露頭状況

本露頭は、大分県直入郡直入町新屋敷入口、竹田から長湯へ抜ける県道脇の河床～斜面に位置する。大野火山岩類の流紋岩を今市火砕流堆積物(以降は“堆積物”を省略)が被覆する境界部の露頭である。図-3に露頭の全体状況を示す。露頭状況・試料採取位置を図-4,5に示す。

境界面は、不整合面で、全体の傾向として北東に傾斜している。露頭周辺の斜面および河床は、今市火砕流で覆われているが、本露頭ではその斜面が高さ2m、幅4m程度掘り込まれ、下位の流紋岩が露出している。当露頭から約30m南方(竹田側)の県道脇にも、直接の境界面は未露出であるが、今市火砕流と流紋岩との境界がある(図-4)。

採取位置は、境界面に対し垂直方向に測線設定し、間隔

表-2 試料採取位置とジルコン含有量

サンプル番号	火砕流との境界からの距離(cm)	性 状	ジルコン含有量 (粒子数/生試料量)
THM1-5	5	軟質化 (赤色変色)	500個/0.15kg
THM1-10	10	多亀裂部	500個/0.25kg
THM1-40	40	新鮮な岩盤	5000個/0.30kg
THM1-2000	2000	新鮮な岩盤	10,000個/0.40kg

表-3 薄片観察結果(流紋岩)

試料番号	含有鉱物等の種類	斑晶の特徴・粒径(mm)、量			
		斑晶総量	石英	斜長石	捕獲岩片
THM1-40	斑晶	多	0.2~5.0	0.2~2.0	3.0~10.0
	石英(他形, 融食状) ≫斜長石≫カリ長石				
	石英、珪長質隠微晶、 淡褐色ガラス				
THM1-2000	捕獲岩片	多	多	多	多
	砂岩、凝灰岩				
	斑晶				
THM1-2000	石英(他形, 融食状)≫斜長石 ≫カリ長石≫有色鉱物仮像	多	1.0~3.0	1.0~3.0	1.0~3.0
	石英、珪長質隠微晶、 淡褐色ガラス				
	捕獲岩片				
THM1-2000	花崗岩質岩片	多	多	多	多

表-4 粉碎試料観察結果

試料番号	鉱物組成		備考
	重鉱物	軽鉱物	
白岩山流紋岩	Opq, Ol, Zr, Gr, Ap	pl, Qz, dev.gl, br.gl	Zr破砕状、 やや磨耗
三宅山流紋岩 (黒色相)	Opq, Ol, Cpx, Zr, al	af, Qz>pl, β-Qz	br.gl, Zr自形
THM1-40	Opq, Zr, al?	af, Qz>pl, β-Qz	Zr自形
THM1-2000	Opq, Zr, Hb, Ap, al?	af, Qz>pl, β-Qz	Hb, Zr自形

白岩山流紋岩・三宅山流紋岩(黒色相)は、小野¹⁰⁾の模式地にて採取。

[重鉱物]Opq: 不透明鉱物, Ol: カンラン石, Zr: ジルコン, Gr: ガーネット, Ap: アパタイト, Cpx: 単斜輝石, al: 褐簾石, Hb: 角閃石
[軽鉱物]pl: 斜長石, Qz: 石英, dev.gl: 失透化ガラス, br.gl: 褐色ガラス, af: アルカリ長石, β-Qz: β石英

を以て採取した。境界露頭から3試料、南方の流紋岩露頭から1試料、合計4試料を採取した。表-2に試料採取位置とその性状について記す。

(1) 大野火山岩類(三宅山流紋岩)

岩相は、全体に灰白〜灰褐色を呈する塊状の岩盤である。火砕流との境界部では火砕流の影響と考えられる、変色・脆弱化が進行している。

肉眼観察では、φ数mm〜数cm程度の垂角礫状の泥岩、花崗岩等の捕獲岩片が認められる。薄片観察(表-3)では、斑晶は多量で石英(融食状)、斜長石、カリ長石を主体とし、捕獲岩片として泥岩、砂岩、花崗岩が認められる。基質は、主に石英および淡褐色ガラスからなり、流理構造が顕著に認められる。

小野¹⁰⁾によると、当露頭周辺に分布する大野火山岩類は、白岩山流紋岩、三宅山流紋岩からなる。各年代値は、K-Ar年代法により、白岩山流紋岩で 15.5 ± 1 Ma、三宅山流紋岩で 13.6 ± 0.5 Ma および 14.4 ± 0.5 Ma が得られている¹¹⁾。当露頭の流紋岩が、いずれに該当するか肉眼、薄片、粉碎

図-6 今市火砕流主要分布域とTHM1位置
鎌田ほか¹³⁾の図に加筆・修正

試料の観察結果により岩相・構成鉱物の面から検討した。肉眼・薄片観察結果と、小野¹⁰⁾の記載特徴とを比較すると、当露頭の流紋岩は、三宅山流紋岩(白色相)に相当する。また、表-4に示すように、各模式地で採取した試料を含め粉碎試料による鉱物鑑定を行った。その結果、構成鉱物もほぼ三宅山流紋岩とほぼ同等である。

以上から、小野¹⁰⁾の三宅山流紋岩に対比し、その既往年代測定値を採用し議論することとする。

(2) 今市火砕流

今市火砕流は、猪牟田カルデラを給源とし、中部九州に広範囲に分布する大規模火砕流である(図-6)。輝石デイサイト→輝石安山岩質の火砕流からなり、大部分は強溶結している。噴出当時の地形的低所を埋めて堆積し、平坦な上面を保存した、台地状の地形を呈する¹⁰⁾。年代値は、強溶結部から本質レンズの全岩K-Ar年代: 0.85 ± 0.03 Ma が得られている¹²⁾。

THM1露頭での今市火砕流は、連続露頭として確認できる範囲で厚さ20m以上、火砕流台地頂部との標高差は約50mであり、ほとんどが強溶結の溶結凝灰岩である。境界面付近は溶結度が低く、基盤(流紋岩)との境界面から順に非溶結部(厚さ0.1m)、弱溶結部(厚さ0.5m)、強溶結

表-5 薄片観察結果(今市火砕流)

Sample No.	含有鉱物等		その他
THM1-A	斑 晶	斜長石>単斜輝石, 斜方輝石>鉄鉱物	ユータキシチック構造
	石 基	褐色ガラス, その他の隠微晶	
	捕獲岩片	安山岩, 玄武岩, 泥質岩	

部へと変化する(図-5)。岩相は、暗赤～黒色を呈し緻密で、厚さ1～5mm、長さ2～5cmの黒曜石レンズを含む。板状に節理が発達し、節理に沿い軽打で剥離する。薄片観察結果によると、斑晶として斜長石を多量に含み、単斜輝石、斜方輝石を含む。捕獲岩片として安山岩、玄武岩、泥質岩を伴う(表-5)。

熱履歴解析を行ううえで、基盤を被覆した火砕流の層厚は重要なパラメータであるため、今市火砕流のTHM1露頭での層厚を推定しておく必要がある。今市火砕流の層厚については多くの既存報告があり、小野¹⁰⁾では野津原町今市周辺で5～40m、鎌田ほか¹³⁾では竹田市鉢山の試錐で46m以上、小野ほか¹⁴⁾では竹田市付近で平均30m、星住ほか¹⁵⁾では「別府」図幅内で最大40m、寺岡ほか¹⁶⁾では「犬飼」図幅内で最大40m、とばらつきがあるものの、いずれも約40m前後が報告されている。最大の層厚は久住町七里田のボーリングで約150mである¹²⁾。七里田試錐での今市火砕流の層厚は非常に厚いが、七里田での上面標高が約430mと一般的な今市火砕流の上面標高より低いことや、別府-島原地溝帯の中心部に位置することから、原地形自体が低く当時谷状地形を呈していたため厚く堆積している例外的な事例であると考えられる。以上から、平均的な層厚は、40m前後であり、噴出当時の地形的低所(谷部)を埋めた地域はそれ以上を示すものと考えられる。

THM1露頭での観察可能な今市火砕流層厚は、約20mであり(図-5)、全層厚は確認できない。そこで、THM1地点周辺について、谷埋め法による接峰面図を作成し、火砕流上面標高を求めた(図-7)。さらに、この火砕流推定上面標高とTHM1露頭(標高:565m)との標高差から、火砕流層厚を推定した(図-7)。THM1露頭地点での標高差は、40mである(図-7:A-A'断面)。THM1北方の広範囲に卓越する平坦部(A-A', B-B'断面交点付近)とTHM1露頭との標高差は、60mである(図-7:B-B'断面)。以上から、求める火砕流層厚は少なくとも40m、北方の卓越する平坦面がTHM1付近まで連続していたとすると60m、と見積もられる。

よって、火砕流層厚は、40～60mであるとする。この数値は、前述の既存報告の平均的層厚(40m)より若干大きい。THM1露頭周辺の基盤分布状況や地形状況から、原地形は北から南向きの谷地形であったと類推できるため、妥当であると考えられる。

図-7 今市火砕流推定上面標高とTHM1露頭位置

4. フィッション・トラックの分析

4.1 FT年代値の測定

鉱物(ジルコンやアパタイト)中のFTは、生成時には一定の長さを持ち、時間経過とともに密度が増加していく。このトラック密度を測定することにより年代値を求めることができる。

FTによる年代値とその誤差は、以下の式により算出される。ここで、 T は年代値、 λ_D は ^{238}U の全壊変定数($1.55125 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$)、 ζ は測定方法ごとに校正されたzeta値¹⁸⁾である。また、上式で算出された年代値の誤差(1 σ)は、下式で得られる。測定は、ゼータ校正による外部ディテクター法で行い、測定面として結晶内部面を用いるED1法¹⁸⁾を用いた。

$$\text{年代算定式: } T = (1/\lambda_D) \cdot \ln [1 + \lambda_D \cdot \zeta \cdot (0.5 \rho_s / \rho_d) \cdot \rho_d]$$

$$\text{error} = T \times [1/\Sigma N_s + 1/\Sigma N_d + 1/\Sigma N_d + (\sigma_c/\zeta)^2]^{1/2}$$

表-6に試料ごとに年代測定結果および上式の変数定義等を示す。表に示すとおり各試料の年代値は、同一の基盤岩(流紋岩)であるにもかかわらず、明らかに異なるみかけ年代値を示している。

4.2 FT長の測定

FTは、鉱物中のFT発生位置により、図-8に示す種類に区分できる。両端が鉱物中にある confined track、片端が鉱物表面にある semi-track である。精密なFT長解

表-6 年代測定結果

試料名	測定鉱物 ⁽¹⁾	結晶数 (個)	自発核分裂飛跡 $\rho_s(\text{cm}^{-2})$	N_s	誘発核分裂飛跡 $\rho_i(\text{cm}^{-2})$	N_i	χ^2 検定 $\text{Pr}(\chi^2)(\%)$	熱中性子線量 $\rho_d(\times 10^4 \text{cm}^{-2})$	N_d	相関係数 ⁽⁵⁾ r	ウラン濃度 (ppm)	(6), (7), (8), (9) 年代値(Ma) Age $\pm 1\sigma$	(10) 測定 方法
THM1-5	Zr	30	1.68×10^5	114	0.29×10^7	1953	67	8.169	2091	0.580	280	0.84 ± 0.08	ED1
THM1-10	Zr	30	1.06×10^5	144	1.86×10^6	2512	61	8.174	2093	0.626	180	0.83 ± 0.07	ED1
THM1-40	Zr	30	3.03×10^5	302	0.32×10^7	3138	0	8.185	2005	0.642	310	1.39 ± 0.09	ED1
THM1-2000	Zr	30	2.62×10^6	2624	3.64×10^6	3645	5	10.21	2615	0.905	280	14.3 ± 0.5	ED1

(1)測定鉱物 Zr:ジルコン
(2) $\text{Pr}(\chi^2)$: χ^2 値の自由度 $n-1$ の χ^2 分布における上側確率(GALBRAITH,1981)⁽¹⁷⁾
(3)熱中性子線量測定用標準ガラス: NIST-SRM612
(4)照射場所: 立教大学炉 TRIGA MARK II 回転試料棚
(5) r : ρ_s と ρ_i の相関係数
(6)年代値: $T=(1/\lambda_D) \times \ln[1+\lambda_D \times \xi \times (0.5\rho_s/\rho_i) \times \rho_d]$
(7)誤差: $\sigma_T=T \times [1/\sum N_s+1/\sum N_i+1/\sum N_d+(\sigma_\xi/\xi)^2]^{1/2}$
(8) ^{238}U の全壊変定数: $\lambda_D=1.55125 \times \text{yr}^{-1}$
(9) $\xi_{\text{ED1}}=370 \pm 4$ (DANHARA et al.,1991)⁽¹⁸⁾
 $\xi_{\text{ED1}}=352 \pm 3$ (岩野・檀原,1997)⁽¹⁹⁾
(10)測定方法: 外部ディテクター法(内部面: ED1)

図-8 FT 発生位置と形状

表-7 トラック長測定結果

試料名	コンファインドトラック長					
	本数	平均値 (μm)	最大値 (μm)	最小値 (μm)	標準偏差 (μm)	相対 標準誤差
標準試料 FCT	50	10.82	11.95	9.13	0.67	0.09
THM1-5	15	10.34	11.55	5.13	1.54	0.40
THM1-10	22	10.18	11.75	3.51	1.65	0.35
THM1-40	14	7.25	11.26	1.84	3.12	0.83
THM1-2000	50	10.56	11.65	9.76	0.50	0.07

析を行う場合、FTの全長を計測し、かつできるだけ数多くのデータを取得する必要がある。

以上から、FT長測定には両端の確認できる confined track を3次元計測⁽¹⁹⁾し実長を計測した。測定結果を、試料ごとに表-7に示す。熱影響がなく、トラック長の短縮化がない試料として Fish Canyon Tuff(FCT)も併せて測定した。一般的にジルコンでの confined track 長の平均値は10.5~11.0 μm である⁽²⁰⁾。それに比べるとTHM1-5,10,40の試料の最小値は明らかに短い。とくにTHM1-40は、平均値においても他試料に比較して明瞭に短縮している。

5. 熱履歴解析

5.1 みかけ FT 年代値と FT 長の評価

みかけ FT 年代値とFT長を詳細検討する上で、①模式

柱状図、②粒子年代ヒストグラムと確率密度曲線、③粒子年代-粒子年代値の誤差(2σ)の Radial plot、④トラック長頻度分布を併記し図-9に示す。前述のとおり基盤岩(三宅山流紋岩)の既知年代値は、 $13.6 \pm 0.5\text{Ma}$ および $14.4 \pm 0.5\text{Ma}$ (K-Ar)、今市火砕流の既知年代値は、 $0.85 \pm 0.03\text{Ma}$ (K-Ar)である。

測定した基盤岩(三宅山流紋岩)のみかけ年代は、境界面からの距離5cmで $0.84 \pm 0.08\text{Ma}$ (THM1-5)、10cmで $0.83 \pm 0.07\text{Ma}$ (THM1-10)、40cmで $1.39 \pm 0.09\text{Ma}$ (THM1-40)、20mで $14.3 \pm 0.5\text{Ma}$ (THM1-2000)である。各粒子年代は、みかけ年代のほぼ $\pm 2\sigma$ 内に収まっている(図-9(2)参照)。

THM1-5、THM1-10の年代値は、誤差範囲を考慮しても今市火砕流の年代値によく一致している。しかも、少量の短縮FTは存在するものの、全体のFT長頻度分布は正常を示している。このことは、THM1-5,10のジルコンが、今市火砕流の定置時の熱的影響により TAZ(Total Annealing Zone)まで達し、一旦FTがほぼ完全に消滅したことを示している(図-1のC'パターン)。

THM1-40の年代値は、今市火砕流と基盤岩(三宅山流紋岩)の年代値の中間の値を示している。しかも、多くの短縮FTが存在し、全体のFT長分布も明瞭に短縮側に移行している。このことは、THM1-40のジルコンが、今市火砕流定置時の熱的影響により PAZ(Partial Annealing Zone)に達し、しかもTAZには達していないことを示している(図-1のCパターン)。

THM1-2000の年代値は、誤差範囲を考慮しても基盤岩(三宅山流紋岩)によく一致している。しかも、短縮FTは存在せず、全体にFT長頻度分布は正常を示している。このことは、THM1-2000のジルコンが、今市火砕流定置時の熱的影響ではPAZには達していないことを示している。つまり、熱的影響を受けていない、もしくは熱的影響を受けていてもTSZ(Total Stability Zone)の範囲内にとどまっているといえる。

図-9 みかけ年代値と FT 長分布

本図中央の Radial plot は、各粒子年代と年代誤差(精度)を同時に表示する粒子年代分布図である^{23), 24)}。右端の円弧上に年代を対数で示し、各粒子年代は左座標の原点 0 と各粒子を結んだ直線と円弧の交点で示される。左座標の $\pm 2\sigma$ 誤差を示し、網掛けの幅が加重平均年代値の誤差範囲を示す。横軸は測定精度を示し、年代値に対する相対標準誤差 (1σ) と精度 ($1/\sigma$) を併記する。

5.2 被熱解析シミュレーションによる初期条件の決定

以上のように、FT 年代測定および FT 長測定手法を用いれば、火砕流の基盤への熱的影響は、直接的に測定可能である。ただし、PAZ に達していない、TSZ の温度領域の熱的影響は、直接的には観測できない。そこで TSZ の熱的影響を検討する場合には、測定値をもとに被熱解析シミュレーションを行い、以下の手順で外挿する必要がある。

- ① 基盤岩のみかけ FT 年代値および FT 長頻度分布から、基盤岩の被熱量を評価する。
- ② 深度ごとのみかけ FT 年代値と FT 長に適合する初期条件(層厚と定置温度)の組み合わせを求める。
- ③ ②で得られた結果を一次元熱伝導モデルの初期条件として用い、基盤の地下温度プロファイルを求める。

まず、①～②の解析手法について記述する。

火砕流が基盤に与える熱的影響についての研究は、KAMATA *et al.*⁵⁾ で詳しく行われ、火砕流の層厚、初期温度を変化させた場合の基盤温度変化が算定可能である(1 式)。また、加熱温度、時間と FT 短縮量との関連性の研究は、YAMADA *et al.*²¹⁾ が系統的にジルコンでの室内実験を行い、両者の関係を方程式化し、さらに、TAGAMI *et al.*²²⁾ は、この式を理論的に改良し提示した(2 式)。KAMATA *et al.*⁵⁾ と TAGAMI *et al.*²²⁾ の式を組み合わせる

ことにより、トラック長解析結果に基づく、被熱解析シミュレーションが可能となる。以下の二つの式を用いて解析を行った。

$$T = 0.5(T_0 - T_s) [2\operatorname{erf}\{x/2(\alpha t)^{1/2}\} - \operatorname{erf}\{(x-d)/(\alpha t)^{1/2}\} - \operatorname{erf}\{(x+d)/2(\alpha t)^{1/2}\}] + T_s \quad (1)$$

ここで、 $T(^{\circ}\text{C})$: 深さ x での温度、 $T_0(^{\circ}\text{C})$: 火砕流の初期温度、 $T_s(^{\circ}\text{C})$: 大気・地盤の温度、 $x(\text{m})$: 火砕流表面からの深さ、 $t(\text{y})$: 冷却開始からの時間、 $\alpha(\text{m}^2/\text{yr})$: 熱拡散係数(KAMATA *et al.*⁵⁾ 参照)、 $d(\text{m})$: 火砕流の層厚、である。

$$\mu = \mu_{\max} [1 - \exp\{c_0 + c_1 \times (\log t - \log t_c) / (1000/T - 1000/T_c)\}] \quad (2)$$

ここで、 $\mu(\mu\text{m})$: 短縮後のトラック長、 $\mu_{\max}(\mu\text{m})$: 短縮前のトラック長、 c_0, c_1 : 定数(TAGAMI *et al.*²²⁾ 参照)、 T : 加熱温度、 T_c : 加熱実験で求めた Arrhenius plot で fanning model の等トラック長ラインが一点に集中する座標の加熱温度値、 t : 加熱時間、 t_c : 加熱実験で求めた Arrhenius plot で fanning model の等トラック長ラインが一点に集中する座標の加熱時間値である。

実際の解析にあたっては、(株)京都フィッシュン・トラック所有の解析プログラム(別途発表予定)を使用した。このプログラムは、(1)、(2)式の計算結果で求められる温度

図-10 被熱解析シミュレーション例

変化, FT 長変化および見かけ年代値を, 経過時間ごとに連続的に可視化するものであり, 任意の深度, 経過時間での可視化が可能である. 解析プログラムの入力画面および解析画面を, 図-10に示す. 入力パラメータは, T_0 : 火砕流の初期温度, T_s : 大気・地盤の温度, α : 熱拡散係数, d : 火砕流の層厚, t_0 : 基盤岩の年代値, t_1 : 火砕流の年代値, Depth: 火砕流上面からの基盤任意位置までの深度である. ここで, T_s , α は, KAMATA *et al.*⁵⁾ の設定値である $T_s=20(^{\circ}\text{C})$, $\alpha=14.8(\text{m}^2/\text{yr})$, とした. t_0 , t_1 は, $t_0=14.3\text{Ma}$, $t_1=0.85\text{Ma}$ を用いた.

以上の設定条件で, d と T_0 を変数として, シミュレーションを行った. d 値は, 前述した火砕流推定層厚の範囲 (40~60m) を目安にした. 露頭での FT 年代値がほぼ一致し, さらに, トラック長分布がほぼ同一となるような d , T_0 の組み合わせを, 試行を繰り返し見出した (表-8). 試行の結果, もっとも適正な初期条件 (定置温度, 層厚) の組み合わせは, 条件 3 に示す $T_0=730^{\circ}\text{C}$, $d=50\text{m}$ であるといえる.

5.3 火砕流の熱的影響評価

被熱解析シミュレーションで算出した初期条件 ($T_0=730^{\circ}\text{C}$, $d=50\text{m}$) を用いて (1) 式により外挿し, 地下深部への熱的影響を深度-温度履歴曲線として示した (図-11).

また, 上記の深度-温度履歴曲線で得られる加熱温度時間条件で, 地下深部のジルコンの予測年代値および FT 長の予測短縮化率を, (2) 式より求め図示した (図-11). 併せて, アパタイトの場合の予測年代値および FT 長の予測

表-8 被熱解析シミュレーション結果のまとめ

試料名		THM1-05	THM1-10	THM1-40
測定 データ	距離 (cm)	5	10	40
	年代値 トラック長	0.84 ± 0.08 Ma 10.34 μm	0.82 ± 0.07 Ma 10.18 μm	1.39 ± 0.09 Ma 7.25 μm
ハートマン・ハインツ	条件1	定置温度 層厚	805°C 30m	
		年代値 トラック長	0.83 Ma 10.5 μm	0.93 Ma 9.8 μm
	条件2	定置温度 層厚	761°C 40m	
		年代値 トラック長	0.84 Ma 10.5 μm	0.92 Ma 9.9 μm
	条件3	定置温度 層厚	730°C 50m	
		年代値 トラック長	0.87 Ma 10.3 μm	0.94 Ma 9.8 μm
	条件4	定置温度 層厚	710°C 60m	
		年代値 トラック長	0.81 Ma 10.7 μm	0.88 Ma 10.2 μm
	条件5	定置温度 層厚	690°C 70m	
		年代値 トラック長	0.88 Ma 10.1 μm	0.95 Ma 9.7 μm

短縮化率を同加熱温度時間条件で LASLETT *et al.*²⁵⁾ に従い計算し, 図示した (図-11).

FT 長の短縮は, 図-11 から今市火砕流の定置後の熱的影響により, ジルコンの場合は火砕流底面からの距離 (深度) 約 20m, アパタイトの場合は約 100m までであると予測される.

すなわち, ジルコンについては深度約 20m まで, アパタイトについては深度約 100m まで, PAZ までの温度上

図-11 深度-温度曲線

図-12 経過時間-温度曲線

昇が生じた、ということができる。

$T_0=730^{\circ}\text{C}$, $d=50\text{m}$ の条件下での、深度ごとの時間-温度相関図(図-12)を(1)式より求め示す。この条件での1次元熱伝導モデルから、火砕流による熱的影響を反映した基盤の地表部から地下への温度プロファイルが得られた。今回の結果では、例えば、深度5~40cmでの最高上昇温度は375~370 $^{\circ}\text{C}$ であり、深度100mでは約60 $^{\circ}\text{C}$ までの温度上昇が推定できる。

6. ま と め

本研究の結果、火砕流の熱的影響を見積もる上で、FT年代値、FT長短縮率測定による手法は、有効であることが判明した。また、被熱解析シミュレーションを行うことにより、初期条件(定置温度、層厚)を求めることが可能で、その結果に基づき、TSZの温度履歴の外挿も可能であることが明らかとなった。この被熱解析シミュレーションの

手法は、今後整備することにより、火砕流に限らず貫入岩体、溶岩流、熱水変質、断層運動などの、他の熱的影響に関する研究に適用可能であると考えられる。

今後の課題としては、ジルコンよりも低温でFT長短縮を生じる、アパタイトを用いた熱履歴解析手法の検討が挙げられる。今回は、アパタイトを得られず、ジルコンのみ手法検討であったが、将来アパタイトを用いた手法を確立し、併用することにより、より詳細な被熱解析シミュレーションが可能になると考えられる。

引用文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構(1999): わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊1 わが国の地質環境, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 99-021.
- 2) 中田英二・田中和広(2001): マグマの貫入が岩盤に与える影響-活火山周辺に分布するマグマ噴出跡の分布-, 日本応用地質学会平成13年度研究発表会講演要旨集, pp.55-58.
- 3) 町田洋・新井房夫(2003): 新編火山灰アトラス-日本列島とその周辺, 東京大学出版会, pp.70-74.
- 4) 石丸恒存・角田地文(2002): 日本列島における大規模火砕流の特徴と熱的影響解析, サイクル機構技報, No. 14, pp.161-170.
- 5) KAMATA, H., SUZUKI-KAMATA, K. and BACON C. R. (1993): Deformation of the Wineglass Welded Tuff and the timing of caldera collapse at Crater Lake, Oregon, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 56, No. 3, pp.253-266.
- 6) DODSON, M.H. (1973): Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems, *Contrib. Mineral Petrol.*, No. 40, pp.259-274.
- 7) WAGNER, G.A. (1972): The geological interpretation of fission track ages, *Trans. Amer. Nucl. Soc.*, No. 15, p.117.
- 8) 山田隆二・西村進(1995): FT法による温度履歴解析: 黒部川花崗岩類におけるケーススタディ, フィッション・トラックニュースレター, No. 8, pp.35-40.
- 9) 山田隆二(1996): ランダムモンテカルロ法によるフィッション・トラック温度履歴定量解析モデリング, フィッション・トラックニュースレター, No. 9, pp.1-12.
- 10) 小野晃司(1963): 5万分の1地質図幅説明書「久住」, 地質調査所, 106p.
- 11) 豊肥地熱地域地質図編集グループ(1982): 10万分の1豊肥地熱地域地質図説明書 特殊地質図(21-1), 地質調査所, 23p.
- 12) NEDO(1988): 久住地域(第2次)地熱開発促進調査総合解析報告書, No.18, 239p.
- 13) 鎌田浩毅・檀原徹・林田明・星住英夫・山下透(1994): 中部九州の今市火砕流堆積物と類似火砕流堆積物の対比および噴出源の推定, 地質学雑誌, Vol.100, No.4, pp.279-291.
- 14) 小野晃司・松本徹夫・宮久三千年・寺岡易司・神戸信和(1977): 地域地質研究報告5万分の1図幅「竹田地域の地質」, 地質調査所, 145p.
- 15) 星住英夫・小野晃司・三村弘二・野田徹郎(1988): 地域地質研究報告5万分の1地質図幅「別府地域の地質」, 地質調査所, 131p.

- 16) 寺岡易司・宮崎一博・星住英大・古岡敏和・酒井彰・小野晃司(1992): 地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅「犬飼地域の地質」, 地質調査所, 129p.
- 17) GALBRAITH R.F.(1981): On statistical models for fission track counts, *Math. Geol.*, Vol.13, pp.471-488.
- 18) DANHARA, T., KASUYA, M., IWANO, H. and YAMASHITA, T. (1991): Fission-track age calibration using internal and external surfaces of zircon, *Jour. Geol. Soc. Japan*, Vol.97, pp.977-985.
- 19) 岩野英樹・檀原徹(1997): 高品位モニターを用いたフィッシュン・トラック年代測定システムのゼータ校正とシステム間比較, フィッシュン・トラックニュースレター, No.10, pp.11-20.
- 20) HASEBE, N., TAGAMI, T. and NISHIMURA, S.(1994): Towards zircon fission-track thermochronology: Reference framework for confined track length measurements, *Chemical Geology (Isot. Geosci. Sect.)*, Vol.112, pp.169-178.
- 21) YAMADA, R., TAGAMI, T., NISHIMURA, S. and ITO, H. (1995): Annealing kinetics of fission tracks in zircon: an experimental study, *Chemical Geology (Isot. Geosci. Sect.)*, Vol.122, pp.249-258.
- 22) TAGAMI, T., GALBRAITH, R. F., YAMADA, R. and LASLENT, G. M. (1998): Revised annealing kinetics of fission tracks in zircon and geological implications, *Advances in fission-track geochronology*, pp.99-112.
- 23) GALBRAITH, R.F. (1988): Graphical Display of Estimates Having Differing Standard Errors., *TECHNO-METRICS*, Vol.30, pp.271-281.
- 24) GALBRAITH, R.F. (1990): The Radial Plot: Graphical Assesment of Spread in ages., *Nucl.Tracks Radiat. Meas.*, Vol.17, pp.207-214.
- 25) LASLETT, G.M., GREEN, P.F., DUDDY, I.R. and GLEADOW, A.J.W. (1987): Thermal annealing of fission tracks in apatite, 2. A quantitative analysis. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, Vol.65, pp.1-13.

(2004年1月20日受付, 2004年8月6日受理)

Jour. Japan Soc. Eng. Geol., Vol.45, No.5, pp.238-248, 2004

Evaluation of Thermal Effects of Large-Scale Pyroclastic Flow Deposits on Basement Rocks by Fission-Track Method

Tatsuji MATSUZAKI, Chifumi KAKUTA, Tsuneari ISHIMARU, Hiroki KAMATA,
Tohru DANHARA, Hideki IWANO and Tetsu YOSHIOKA

Abstract

Large-scale pyroclastic-flow deposits cover much wider areas of basement rocks than those of typical scales and can reach several tens of kilometers from the source area. Examination of the thermal effects of pyroclastic-flow deposits on basement rocks is important in order to evaluate the long-term stability of the geological environment of basement rocks. We studied the thermal effects of pyroclastic-flow deposits on basement rocks using fission tracks and established a method to estimate the sub-surface thermal record and effects at depths. As an example, we estimated the thermal effects of the Imaichi pyroclastic flow deposits. Our results indicate that the temperature rose to 60°C at 100 m depth in the basement rocks covered by the pyroclastic-flow deposits.

Key words: long-term stability, large-scale pyroclastic flow, thermal effect, fission-track method