

# 火砕流堆積物のFT年代測定 —仙台層群広瀬川凝灰岩層の場合—

檀原 徹\*・岩野英樹\*

Fission-track dating of the pyroclastic flow deposit: A case study of the Pliocene Hirosegawa Tuff Member of the Sendai Group in Northeast Honshu, Japan.

Tohru Danhara.\* and Hideki Iwano\*

## 1. はじめに

個体識別法を用いたFT法では結晶ごとの測定データが得られるため、テフラのように異質物を含み易い年代試料で特に有効性を発揮すると説明されてきた。しかし実際には本質結晶と異種結晶の識別が困難な場合が多く、さらに問題なのは、測定した結晶が本質結晶かどうかをいかにして判断したらよいかである。これに対する最終的にはほぼ唯一の解決法として層序的検討がなされるが、他の地質情報に影響されて誤った判断を下す場合もある。テフラ試料中での本質結晶と異種結晶の識別は年代測定法すべてに共通する基本問題であり、その理論と技術を確立することは重要である。本研究では同一テフラ試料中で層準により測定年代値が変化する例を示し、トラック長を基準とした本質結晶の識別により噴出年代の測定と解釈を行った。

本研究で測定した広瀬川凝灰岩層は、東北地

方の標準層序が設定される仙台層群の向山層中に挟まれた厚さ約10mの弱～非溶結凝灰岩である(図1)。本層の放射年代測定はこれまでFT法により試みられてきた(Tamanyu, 1975; 北村ほか, 1986)が、珪藻化石による生層序学的推定年代より有意に古く、両者は整合しない(柳沢, 1990)。本凝灰岩層の正確な放射年代の測定は仙台層群の編年上重要であるが、一方FT年代測定の技術的向上を目指す上でもよい試金石となると考えられる。

## 2. 測定方針

本研究に先立ち、筆者らは次のような予察的研究を行った。

### 2-1. 分厚いテフラ中の火山ガラス屈折率測定

厚い層厚をもつ火砕流堆積物などでは、層準

\* (株)京都フィッション・トラック Kyoto Fission-Track Co., Ltd., Kyoto 615, Japan

Age	地質系統 Geologic succession	フィッシュトラック年代 Fission track ages (単位Ma)
Q	青葉山層 Aobayama F.	
Late Pliocene	仙台層群 Sendai Group	
上部 (Upper part)		
Early Pliocene	向山層 Mukaiyama F.	4.7±0.6, 5.0±0.6, 5.3±0.7 5.4±1.5, 5.8±1.6, 4.5±0.9 6.0±1.3
下部 (Lower part)	竜の口層 Tatsunokuchi F.	8.5±1.6, 8.8±1.7
	亀岡層 Kameoka F.	8.1±1.4, 7.7±1.2
Late Miocene	秋保層群 Akiu G.	
	白沢層 Shirasawa F.	
	三滝層 Mitaki F.	
	梨野層 Nashino F.	
	湯元層 Yumoto F.	

図1. 仙台地域における仙台層群の層序 (北村ほか, 1986)

により火山ガラスの屈折率の集中度が異なることがある。一般に下部では集中度が高いのに対し、上部では集中度が悪くなり異質(不均質)なものを含む場合が多いと考えられる。Kasuya et al.(1992)は仙台地域に分布する広瀬川凝灰岩層

と対比される同層分布地点5カ所において、下位から上位層準へ2～5個の層準別試料を採取し火山ガラスの屈折率測定を行った。その結果、全分析地点で層準が異なるにつれ火山ガラスの屈折率の集中度に変化がみられ、模式地の仙台市評定河原においても図2に示される変化が認められた。その広瀬川凝灰岩層中での変化には前述と共通するパターンが認められ、下部試料でよい集中度を示すのに対し、上位試料ほど異質と思われるガラスの混入割合が増加する。

## 2-2. 非溶結火砕流のFT年代と火山ガラス屈折率

一方長谷ほか(1993)は、中部九州の非溶結火砕流堆積物の火山ガラスの屈折率測定とジルコンによるFT年代測定を行い、火山ガラスの屈折率の集中度とFT年代値との関係を、試料の層序的検討をふまえた上で論じた。その結果、火山ガラスの屈折率の集中度が高い試料は層序的に妥当な年代が得られ、逆に異質なガラスを含む試料では層序的に推定される年代よりも古くなる傾向が認められた。もっとも火山ガラス

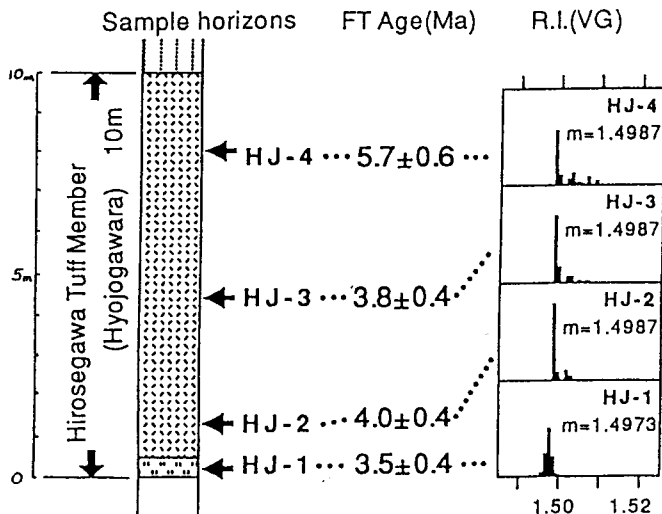


図2. 広瀬川凝灰岩(仙台市評定河原)の各層準でのFT年代値および火山ガラスの屈折率

とジルコンとでは、岩石学的性質の違いからそれぞれの起源が必ずしも同じである必要はなく、火山ガラスの屈折率の集中のよさが、直ちにジルコン結晶の本質性を意味しないと指摘している。しかし、火山ガラスの屈折率の集中度は、本質物質が多いか、あるいは異質(不均質)なものを取り込む危険性があるかの定性的判定に利用できるかと結論した。

この2つの研究をもとに、広瀬川凝灰岩層のFT年代測定に際し、分析試料として以下の2点を満足することを条件とした。

1)分析試料は同一地点で複数の層準に分け採取されたものであること。

2)層準ごとの分析試料に含まれる火山ガラスの屈折率に一定の変化が確認されていること。さらに本研究では新しい試みとして、次の分析を加えた。

## 2-3. 測定ジルコン結晶中の自発トラック長測定

高温の火砕流堆積物が走流中に外来物質を取り込むか、または噴火時に山体構成物質が火砕流の一部として含まれた場合でも、その時期やメカニズムにかかわらず異種結晶は再加熱を受けそれまでに蓄積していたトラック長が短縮するか完全な消滅が生じると考えられる。一方本質結晶は単純に冷却するだけであるため、火砕流堆積物が定置後に地域全体または貫入岩等による局所的な再加熱の影響を受けない限り、トラック長の短縮は生じない。したがって測定粒子のトラック長を測定すれば、本質結晶か異種結晶かが判断できるはずである。ただし火砕流堆積物が冷却した後再堆積した試料では外来物質は加熱されないため、トラック長測定による本質と異種結晶の判別の適用は困難である。この点については試料採取時に再堆積物を排除す

れば問題はない。また外来物質でも完全にトラックが消滅したものは本質結晶ではないが異種年代を示すわけではなく、測年上の障害とはならない。

トラック長解析というFT法に独自で強力な手段を活用することにより本質結晶の識別を目指すのが、本研究の主目的である。

## 3. 測定試料

測定試料は、仙台層群向山層中の広瀬川凝灰岩層の模式地である評定河原の大露頭から採取された4試料で、下位より下部降下火山灰層から1試料(HJ-1)、上部の厚さ約10mの軽石凝灰岩(火砕流堆積物)層から3試料(HJ-2, 3, 4)の各1kgずつである。なお最上部約2mは葉理構造が認められ、再堆積の危険性があり対象から除外した。本測定で用いた試料は Kasuya et al. (1992)で分析された試料とすべて同一であり、FT年代および同論文での火山ガラスの屈折率データとともに柱状図と試料採取層準を図2に示す。

## 4. 測定方法

測定は大きく2段階にわけられる。まず最初は前処理段階であり、試料より抽出したジルコン結晶を対象に、主に双眼実体鏡下の観察による本質および異種年代(以後外来と呼ぶ)結晶の識別をおこなった。次にジルコン結晶のFT年代測定と自発トラック長測定を以下の要領でおこなった。

### (1)前処理段階での結晶の観察

テフラ試料のFT年代測定においては、本質結晶の識別と外来結晶の排除が重要であり表1に示す項目のチェックをおこなう。各試料からは測定に十分な数100~1000粒のジルコン結晶

表1. 本質結晶と異種年代(外来)結晶の識別

検討項目	本質結晶	異種年代(外来)結晶
色	相対的に最も薄い色を示す場合が多い	様々な色調を呈する
透明度	第四紀試料では透明	第三紀試料より古くなると濁色を示す
自形性	基本的には自形。異種起源結晶が加熱でリセットされた場合には自形とは限らない	非自形結晶が多いが、自形結晶の場合もあるので注意が必要
晶癖 結晶形態	岩質に特有な傾向をもつ場合がある	基本的には岩質に無関係だが本質結晶に類似する場合もある
自発トラック 密度	相対的に最も低い場合が多い	一般には相対的に高い
自発トラックの エッチング速度	相対的に最も遅い	相対的に早い
自発トラックの 異方性	相対的に強い	相対的に弱い
自発トラック長の 分布	正常長をもち分布も正常	短縮化し、分布も短い方にシフトする
ウラン濃度	岩質に特有な傾向をもつ場合がある	一般に岩質とは無関係
$\chi^2$ 検定	合格する	一般には失格するが、一起源に限定される場合には合格することもあり注意を要する

が抽出された。まず双眼実体鏡下で1粒子ごとの色・透明度・自形性・晶癖(結晶形態)の各項目を検討した。

次に粒子を選別することなくPFAシートにマウントし、エッチング後 NIKON FXを用い総合倍率1000倍で自発トラックの密度・エッチング速度・異方性およびトラック長の定性的および半定量的検討をおこなった。これらの検討結果をもとに、表1にしたがって本質結晶と外来結晶を識別し、さらに外来結晶中でもグループ分けをおこなった。

## (2)FT年代測定

前処理段階において本質結晶の可能性が高いと推定された、稜の明確な自形結晶で最も自発トラック密度の低いジルコン結晶グループを主な対象として、ED2法によるFT年代測定をおこなった。ただし外来結晶と判断したものも、HJ-1試料に限り少数ながらFT年代測定し判断の妥当性を確認した。なお測定の詳細はDanhara et al.(1991)にしたがい、ゼータ校正によるED2法を用いた。またエッチング条件は、NaOH+KOH共融液225℃で35~37時間である。

表 2. 広瀬川凝灰岩最下部降下火山灰(HJ-1)中に含まれるジルコン結晶グループ

Zr結晶 のグループ 検討項目	Group A	Group B	Group C	Group D
色	桃～淡桃色	赤色	橙褐色	褐色
透明度	透明	透明	半濁	半濁
自形性	自形	自形	自形、ただし稜は磨耗	自形、ただし稜は磨耗
晶癖 結晶形態	短～長柱状	短柱状が主	長柱状が主	短～長柱状
自発トラック密度	0～ $n \times 10^6$ オーダー、 平均 $1 \sim 2 \times 10^6 / \text{cm}^2$	$1 \sim 3 \times 10^6$ オーダー、 平均 $2 \times 10^6 / \text{cm}^2$	$0.3 \sim 1 \times 10^7$ オーダー、 平均 $7 \times 10^6 / \text{cm}^2$	$1 \sim 3 \times 10^7$ オーダー、 平均 $2 \times 10^7 / \text{cm}^2$
自発トラックの エッチング速度	最も遅い	早い	早い	早い
自発トラックの 異方性	最も強い	かなり強い	弱い	弱い
自発トラック長の 分布	平均長 $7.5 \pm 1.8 \mu\text{m}$ 。 分布は正常	平均長 $6.6 \pm 1.8 \mu\text{m}$ 。 やや短縮化する	平均長 $5.1 \pm 1.8 \mu\text{m}$ 。 短縮化する	平均長 $4.7 \pm 2.0 \mu\text{m}$ 。 著しく短縮化
ウラン濃度	110ppm	730ppm	240ppm	220ppm
$\chi^2$ 検定	合格	合格	合格	合格

### (3)トラック長測定

前処理段階で本質結晶と外来結晶に識別された粒子群の自発トラック長とその分布を調べるために、3次元トラック長測定システム(山下ほか, 1992)を用い、HJ-1試料中を対象に2 $\pi$ 面上でのトラック長(Semi-track length)測定をおこなった。また本質結晶とみなした粒子群間の比較のため、HJ-1とHJ-4試料も測定した。

## 5. 測定結果

本研究の測定結果について、以下に①層位別試料中のジルコン結晶グループの識別、②推定

本質結晶(Group A)の年代測定、③HJ-1とHJ-4試料におけるGroup Aのトラック長の比較、の順で述べる。

### ①層位別試料中のジルコン結晶グループの識別

まず最下部降下火山灰層のHJ-1試料について、表2に示すようにジルコン結晶1粒ごとの色・透明度・自形度・晶癖および結晶形態・自発トラック密度・エッチング速度・異方性・自発トラック長分布を検討し、Group A, B, C, Dの4種類のジルコン結晶集団を識別した。さらに各結晶グループごとに予察的な年代測定と、

表3. Results of fission-track dating for four groups in the Hirosega wa Tuff air fall (HJ-1).

Sample code	No. of crystals	Spontaneous $\rho_s$ ( $N_s$ ) ( $10^6 \text{cm}^{-2}$ )	Induced $\rho_i$ ( $N_i$ ) ( $10^5 \text{cm}^{-2}$ )	$F(\chi^2)$ (%)	Dosimeter $\rho_d$ ( $N_d$ ) ( $10^4 \text{cm}^{-2}$ )	$r$	U-content (ppm)	Age ( $\pm 1\sigma$ ) (m.y.)
Group A	23	0.112 (47)	8.14 (341)	64	8.03 (2474)	0.057	80	3.7 $\pm$ 0.6
Group B	4	1.64 (110)	73.0 (489)	36	8.03 (2474)	0.775	730	6.0 $\pm$ 0.7
Group C	7	6.78 (468)	24.2 (167)	71	8.03 (2474)	0.911	240	74.7 $\pm$ 7.0
Group D	3	14.1 (240)	21.8 (37)	99	8.03 (2474)	0.999	220	172 $\pm$ 31

Note:

- (1)  $\rho$  and  $N$  are the density and the total number of fission tracks counted, respectively.
- (2) Analyses were made by the external detector method using geometry factor of 1 for  $2\pi/2\pi(\text{ED}2)$ .
- (3) Ages were calculated using a dosimeter glass SRM612 and age calibration factor  $\zeta(\text{ED}2) = 334 \pm 4$  (H. Iwano).
- (4)  $F(\chi^2)$  is the probability of obtaining the  $\chi^2$ -value for  $\nu$  degrees of freedom (where  $\nu = \text{number of crystals} - 1$ ).
- (5)  $r$  is the correlation coefficient between  $\rho_s$  and  $\rho_i$ .
- (6) Samples were irradiated using TRIGA MARK II nuclear reactor of St. Paul's University (Rikkyo Daigaku), Japan.

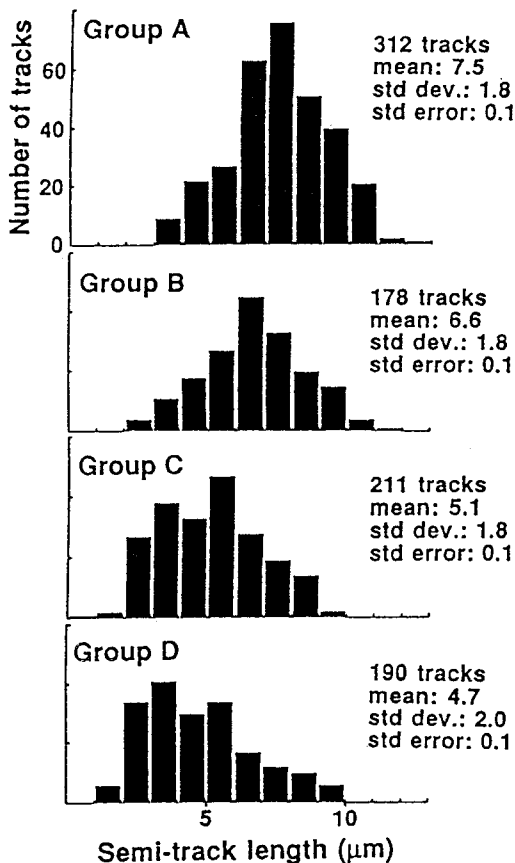


図3. HJ-1 試料中のジルコン結晶集団A・B・C・Dのsemi-track長の比較

自発トラック長測定も行った(表3, 図3).

その結果, HJ-1 試料中の4つのジルコン結晶集団の年代は, Aが最も若く3.7 $\pm$ 0.6Ma, Bが6.0 $\pm$ 0.7Ma, Cが74.7 $\pm$ 7.0Ma, Dが172 $\pm$ 31Maと有意な違いが認められた. またBに属する結晶のウラン濃度がかかなり高い特徴があることも見出された. 一方グループごとの自発トラック長測定の結果は, Group A ジルコンでは7.5 $\pm$ 1.8  $\mu\text{m}$ を示し, 加熱影響がないとみなされるFish Canyon Tuffジルコンの7.5 $\pm$ 1.7  $\mu\text{m}$ とほぼ同等で正常長を示し, 他のB,C,Dの3つのGroupに属する結晶ではそれぞれBで6.6 $\pm$ 1.8  $\mu\text{m}$ , Cで5.1 $\pm$ 1.8  $\mu\text{m}$ , Dで4.7 $\pm$ 2.0  $\mu\text{m}$ と短縮化していることが明らかになった.

次に他の層位別試料HJ-2, 3, 4にも対象を拡大し, その中に含まれるジルコン結晶集団の識別と割合を測定した(表4). その結果HJ-1 試料に認められたGroup A~Dの4種類のジルコン結晶集団がより上位層準のHJ-2, 3, 4 試料中にも, ほとんど割合が変化することなく Group A が85~89%, Bが2~4%, そしてC,Dが6~13%程度含まれることがわかった. なお表4中では, Group C,Dの区別は今回の議

表4. 広瀬川凝灰岩層における層位別試料中のジルコン結晶グループの含有率(%)

Zr結晶 のグループ 試料名	Group A	Group B	Group C	Group D
HJ-4	85%	2%	13%	
HJ-3	89	5	6	
HJ-2	89	4	7	
HJ-1	88	4	8	

グループAは本質結晶かそれに近いもの。グループB, C, Dは明らかに外来結晶とみなされ、かつB, C, Dの順に年代は古くなる。

論には大きな影響を与えることはないと判断し、一括して表示した。

### ②層位別試料ごとのGroup Aジルコン結晶のFT年代測定

下位層準から順にHJ-1, 2, 3, 4試料中のGroup Aに属するジルコン結晶のみのFT年代測定を行った(表5)。その結果、みかけ上最下位層準のHJ-1試料で $3.5 \pm 0.4$ Maと最も若いFT年代値が得られた。より上位のHJ-2, 3試料

では、有意な差はないものの平均値で多少古めの各 $4.0 \pm 0.4$ Ma,  $3.8 \pm 0.4$ Maの値が得られた。そして最も上位のHJ-4試料では $5.7 \pm 0.6$ Maと最も古い年代値が得られ、HJ-1試料と比較して有意に異なる結果となった。測定値はいずれも $\chi^2$ 検定に合格し、その点からは異種年代結晶混入は指摘できないが、粒子のみかけの平均ウラン濃度がHJ-1, 2で110ppmと同じ値をもつものの、HJ-3で90ppm, HJ-4で80ppmと上位へ向け小さくなる傾向をもつことが指摘でき

表5. Results of fission-track dating for four horizons of the Hirosegawa Tuff.

Sample code	No. of crystals	Spontaneous $\rho_s$ ( $N_s$ ) ( $10^5 \text{cm}^{-2}$ )	Induced $\rho_i$ ( $N_i$ ) ( $10^5 \text{cm}^{-2}$ )	$P(\chi^2)$ (%)	Dosimeter $\rho_d$ ( $N_d$ ) ( $10^4 \text{cm}^{-2}$ )	r	U-content (ppm)	Age ( $\pm 1\sigma$ ) (m.y.)
HJ-4	36	1.54 (133)	8.50 (734)	74	8.46 (1302)	0.745	80	$5.7 \pm 0.6$
HJ-3	36	1.14 (109)	9.53 (911)	65	8.45 (1301)	0.734	90	$3.8 \pm 0.4$
HJ-2	36	1.53 (122)	12.0 (959)	45	8.45 (1301)	0.477	110	$4.0 \pm 0.4$
HJ-1 (fall)	36	1.24 (81)	10.6 (694)	82	8.03 (2474)	0.260	110	$3.5 \pm 0.4$

Note:

- (1)  $\rho$  and  $N$  are the density and the total number of fission tracks counted, respectively.
- (2) Analyses were made by the external detector method using geometry factor of 1 for  $2\pi/2\pi(\text{ED}2)$ .
- (3) Ages were calculated using a dosimeter glass SRM612 and age calibration factor  $\zeta(\text{ED}2) = 372 \pm 5$  (Danbara *et al.* 1991).
- (4)  $P(\chi^2)$  is the probability of obtaining the  $\chi^2$ -value for  $\nu$  degrees of freedom (where  $\nu = \text{number of crystals} - 1$ ).
- (5)  $r$  is the correlation coefficient between  $\rho_s$  and  $\rho_i$ .
- (6) Samples were irradiated using TRIGA MARK II nuclear reactor of St. Paul's University (Rikkyo Daigaku), Japan.

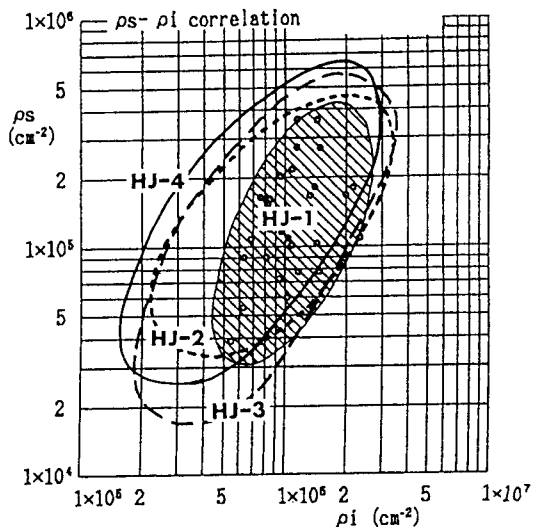


図4. 層位別試料HJ-1, 2, 3, 4中の Group Aジルコン結晶FT粒子データの  $\rho_s$ - $\rho_i$ プロット領域の比較

る。そこで各試料ごとの測定粒子データを縦軸に  $\rho_s$ 、横軸に  $\rho_i$  をとる  $\rho_s$ - $\rho_i$  図にプロットして分布領域を重ね合わせ比較してみると、粒子データの分布領域はHJ-1 からHJ-4 へと左下→右上方向へ伸び、かつより左上領域に拡大する傾向が読みとることができる(図4)。これはHJ-1 からHJ-4 試料に向けてウラン濃度が低く、かつ粒子年代が古い粒子が増加することを物語る。

### ③HJ-1 とHJ-4 試料におけるGroup A ジルコン中の自発トラック長の比較

最後に、最も若いFT年代が測定されたHJ-1 と最も古いFT年代が得られたHJ-4 試料の Group A ジルコン中自発トラック長を測定し比較をおこなった(図5)。その結果、HJ-1 では自発トラックの平均長が  $7.5 \pm 1.8 \mu\text{m}$  で正常長かつ正常な分布を示すのに対し、HJ-4 では自発トラックの平均長が  $7.1 \pm 1.9 \mu\text{m}$  と短縮化し、

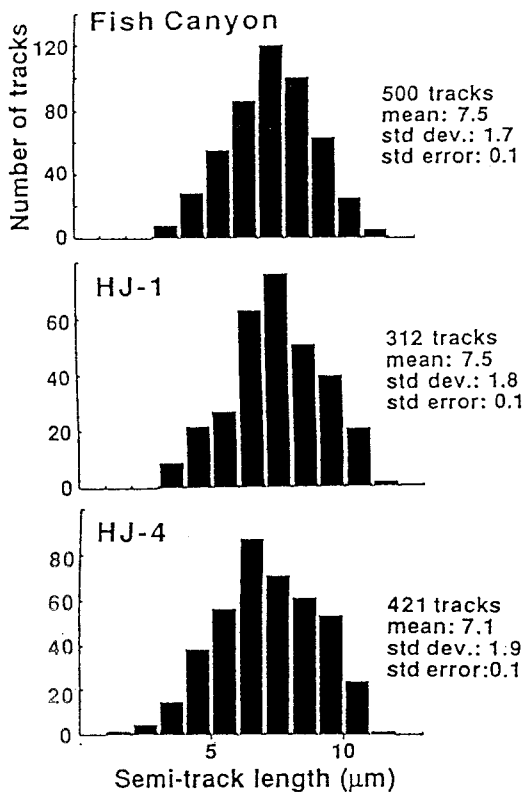


図5. HJ-1とHJ-4試料中のGroup A ジルコン結晶のsemi-track長の比較

最頻度が短い方へずれ、HJ-1 試料や加熱影響のないFCT試料では検出されない  $1 \sim 3 \mu\text{m}$  程度の非常に短い自発トラックの存在が明らかとなった。

## 6. 議論

本研究の発端となった長谷ほか(1992)の研究は、ガラス純度の高い試料では層序と調和的な年代が、逆にガラス純度の低い試料では層序から推定されるものより古い年代値が得られることを指摘した。本研究の広瀬川凝灰岩層でも、同一火砕流堆積物中において層位の変化に従い、下位(HJ-1)から上位(HJ-4)へ向け長谷ら



(1992)の指摘したのと同様の傾向がみられる。

しかし自発トラック長測定を行った結果、HJ-1中のGroup Aジルコンのトラック長は正常長かつ正常分布を示すことが示された。再堆積により加熱影響なしに取り込まれる異種結晶の存在の危険性がない場合、かつテフラが定置後に地域全体への再加熱がない場合においては、自発トラック長分布が正常な集団こそ本質結晶とみなしてよい。したがってHJ-1中のGroup Aは本質結晶集団であり、その測定年代値 $3.5 \pm 0.4$ Maは噴出年代を示すと判断される。一方HJ-4試料中でGroup Aとみなされたジルコン結晶集団は短縮トラックを含むため、一部に加熱影響をもつ異種結晶が混在している可能性がある。これは測定年代が古くなることと調和する。

今回前処理段階で異質結晶を識別しきれなかった原因に、HJ-1からHJ-4試料に向けてウラン濃度が低くなることが注目される(表5)。すなわち本試料のHJ-2からHJ-4のGroup Aとした中に存在した外来結晶は相対的にウラン濃度が低い。そのために、通常外来結晶の識別に有利な自発トラック密度の増加が、ウラン濃度の低下により相殺されるため検出されず、外来結晶混入の徴候が現れにくかったと考えられる。これは図4に示される自発・誘導トラック密度プロットが、HJ-1からHJ-4に向けて左上に広がる(ウラン濃度の低下と古い年代粒子の存在)傾向から明らかである。

## 7. まとめ

本研究では、広瀬川凝灰岩層で層位別に採取された4つの試料を系統的に分析し、鉱物学的特徴などからまず本質結晶の可能性の高い集団を識別した。つぎにそれらの自発トラック長を測定し、正常長をもつことで本質結晶であることに保証を与えた。その結果、広瀬川凝灰岩層

の噴出年代は最下位の降下火山灰層(HJ-1)中のGroup Aに属するジルコン結晶から得られた $T=3.5 \pm 0.4$ Maが妥当と考える。従来の年代測定結果には外来結晶の影響により年代値が古くなっていた可能性がある。

本研究で対象とした広瀬川凝灰岩層のように厚い層厚をもつ火砕流堆積物では高温で走流中に取り込まれる外来粒子が加熱を受ける可能性を否定できないが、また加熱により完全にトラックが消滅するかどうかを保証することも簡単ではない。そのため、もし火砕流に先行する降下テフラがあれば、たとえ外来結晶を含んでも急冷されるために外来結晶の各グループの特徴がそのまま保存される可能性が高く、本質結晶と外来結晶の識別が容易で検証可能な場合が多いと判断される。したがって分厚い火砕流堆積物では下位の降下テフラあるいは火砕流Baseでの試料採取が望ましく、逆に火砕流上部での試料採取はFT年代測定には危険である。

## 文 献

- Tamanyu, S., 1975, Fission-track age determination of accessory zircon from the Neogene Tertiary tuff samples, around Sendai City, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **81**, 233-246.
- 北村 信・石井武政・寒川 旭・中川久夫, 1986, 仙台地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 134p.
- 柳沢幸夫, 1990, 仙台層群の地質年代—珪藻化石層序による再検討—. 地質調査所月報, **41**, 1-25.
- 長谷義隆・岩内明子・檀原 徹・山下 透, 1993, 中部九州後期新生代火山岩類のフィッシュン・トラック年代と非溶結火砕流堆積物中の火山ガラスの屈折率. 熊本大学教養部紀要自然科学編, 第28号, 71-83.
- Kasuya, M., Yamashita, T. and Danhara, T., 1992, Tuff Member of the Sendai Group in Northeast

Correlational Study of the Pliocene Hirosegawa  
Honshu: heavy mineral composition and  
refractive index of volcanic glass. *Jour. Geol.  
Soc. Japan*, **98**, 1065-1068.

山下 透・岩野英樹・糟谷正雄・檀原 徹,  
1992, 三次元トラック長計測システムの試作.  
フィッション・トラックニュースレター,  
No.5, 33-36.