

# 石英の熱蛍光 (TL) 強度による火山岩の年代推定

## Age Estimation of Volcanic Rocks Using Natural Thermoluminescence Intensity of Quartz

林 正 雄\* ・ 進 野 勇\*\*

Masao HAYASHI\* and Isamu SHINNO\*\*

(1996年1月24日受理)

### Abstract

Natural thermoluminescence (TL) from quartz contained in some volcanic rocks whose radiometric ages are known has been measured. The intensity was calculated by integrating a glow curve from 100 to 400°C. The Yabakei welded tuff of 990 ka was chosen as an age standard. The thermoluminescence index (TI) proposed here is given by the equation of  $TI = (T_{sm}/T_{st})Y_{st}$ , where  $T_{sm}$  is TL intensity of a sample,  $T_{st}$  is TL intensity of the standard, and  $Y_{st}$  is age of the standard (ka). The TI of quartz which shows a similar glow-curve and the radiometric age of rocks have a linear relation in a range from 0.2 to 1,300 ka without correction of annual dose. This suggests that the TI can be used for estimating the age of eruption of Quaternary volcanic rocks as well as the age of alteration of clayey rocks, when they contain quartz.

### 1. はじめに

活地熱系の熱源となるような第四紀の若い火山岩の年代測定には、これまで炭素14法 (C-14 法), カリウム-アルゴン法 (K-Ar 法), フィッション・トラック法 (FT 法) などが用いられてきた (図1)。

C-14 法は、動植物中の  $^{14}\text{C}$  が死滅時から  $\beta^-$  壊変によって次第に減少することを利用するもので、通常数万年より若い木炭に用いられている (中井・中村, 1988)。しかし、その半減期が5730年と短いことから、5万年より古い試料は測定が困難である。さらに、各溶岩流や火砕岩は木炭を伴うことが少ないので、本法が適用できる火山岩は必ずしも多くない。

\* 九州産業大学国際文化学部 〒813 福岡市東区松香台 2-3-1 (Faculty of International Studies of Culture, Kyushu Sangyo University; Matsugadai, Fukuoka 813, Japan)

\*\* 九州大学大学院比較社会文化研究科 〒810 福岡市中央区六本松 4-2-1 (Graduate School of Social and Cultural Studies, Kyushu University; Ropponmatsu, Fukuoka 810, Japan)

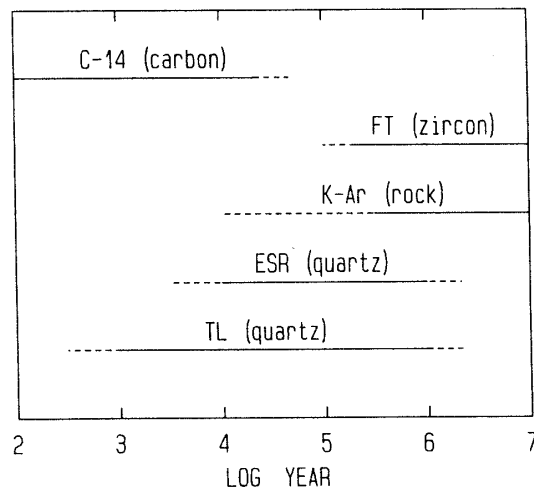


図1 第四紀火山岩の年代測定法と測定範囲

K-Ar 法は、岩石中の  $^{40}\text{K}$  の一部 (10.5%) が電子捕獲によって  $^{40}\text{Ar}$  に壊変することを利用して、生成した  $^{40}\text{Ar}$  ガスは、高温状態では系外に拡散するが、低温になると岩石中に蓄積され、時間の経過とともに増加する。この壊変定数は  $5.81 \times 10^{-11}/\text{yr}$  (半減期  $1.28 \times 10^9/\text{yr}$ ) と小さいため、100万年より若い試料では誤差が大きかった。最近では、空気中からの  $^{40}\text{Ar}$  ガスの混入率を測定することによって、数万年程度までの火山岩がかなり正確に年代測定できるようになった (長尾ら, 1984; Watanabe et al., 1993; 星住ら, 1994)。しかし、数万年より若い試料は、小さな壊変定数から考えて測定が困難である。

FT 法は、岩石や鉱物中の  $^{238}\text{U}$  が自発核分裂によって生成する飛跡を計数して年代を求める。K-Ar 法と同じように、この自発核分裂飛跡は高温ではリセットされ鉱物中に残らないが、 $250^\circ\text{C}$ 以下になると経過時間に比例して増加する。この自発核分裂の壊変定数は  $6.85 \times 10^{-17}/\text{yr}$  (半減期  $1.01 \times 10^{16}\text{yr}$ ) と非常に小さいが、ジルコンのように高ウラン鉱物を用いると、10万年～数千万年の火成岩の年代測定が可能である (Watanabe, et al., 1987)。最近では、数千年の雲仙火山岩類が測定 (壇原ら, 1993) されているが、これは測定時間と経費とを度外視した例外的なものであろう。

以上のように、C-14 法、K-Ar 法、FT 法は、試料条件や壊変定数に由来する制限があり、活地熱系の熱源となり得る数千年～数万年の火山岩の年代測定には適しているとは言いがたい。

一方、土器や陶器などの考古学上の発掘物の年代測定法として発達してきた熱蛍光 (TL) 法は、数百年～数十万年の年代測定が可能である。最近では、地熱帯の火山岩の年代測定や変質岩の変質年代の測定に用いられるようになった (Takashima, 1988; Takashima and Watanabe, 1994)。このように TL 法は、活地熱系の熱源を年代範囲をカバーできるので、現在最も有力視されている。

この研究では、年代既知の岩石について石英の TL 強度と年間線量率を測定し、標準試料との強度比を熱蛍光強度指数 (TI) として提唱する。この TI は、通常の TL 法に用いる放射線の人工照射が必要であるため、最も簡易的な年代推定法であるといえる。したがって、多数の火山岩や変質岩の年代測定を必要とする地熱資源調査や各種の地下資源調査に有用であろう。

## 2. 原 理

自然界には宇宙線を始め、岩石中の放射性元素から放出される各種の放射線が存在している。よく知られているように、ガンマ線、ベータ線およびアルファ線は最も普遍的な自然界の放射線である。

岩石中の鉱物がこれらの放射線を被爆すると、結晶格子中で電子の一部が励起されて遊離し、エネルギーレベルの高い格子欠陥や不純物原子の位置に捕獲される (図 2a)。このような捕獲電子の数は、経過時間とともに比例的に増加するので、電子スピン共鳴 (ESR) 年代測定法や熱蛍光 (TL) 年代測定法に利用されている。しかし、ある鉱物の年代値には、鉱物が生成してからの時間 (鉱物が冷却してからの時間) のほかに、単位時間あたりに被爆する放射線の強さ、および、その鉱物固有の性質などが関係している。

TL 法では、試料を加熱すると捕獲電子が伝導帯レベルまで励起され (図 2b)、基底状態に戻るときに光エネルギーを放出する現象を利用する (図 2c)。これを熱蛍光現象あるいはサーモルミネッセンスと呼んでいる。放出される光エネルギーは種々のエネルギーレベルの電子に由来しており、TL 法は感度が非常に良いが、物理的には複雑な現象を対象としている。また、試料を1度加熱すると、蓄積された熱蛍光が放出されるので、繰り返し測定はできない。しかし、TL 法は低結晶質石英や破碎された石英でも年代測定が可能であり、しかも、数十 mg の石英で十分である。したがって、若い火山岩の活動年代の測定のみならず、断層の活動年代や変質年代を推定するためにも最も有効な方法である。

TL 年代値は、対象鉱物が生成してから現在までに受け取った等価線量 (ED) と、試料が1年間に被爆する年間線量 (AD) の比で与えられる。通常 ED は、天然試料に既知量の放射線 (ガンマ線) を段階的に照射し、照射線量と信号強度の変化状況から求められる。しかし、石英の中には放射線を照射しても、信号強度がほとんど回復しないものも認められる。一方、AD は試料を採集した現場に TL 素子を一定期間 (3~6ヶ月) セットして見積もる方法と、試料を持ち帰り放射性元素 (U, Th および K) の含有量を求めて算出する方法とが一般的である。しかし、前者は日数がかかり、後者は放射性ガス (ラドン, トロン) の逸散が評価できないなどの欠点を有している。本研究では、年代測定試料のガンマ線およびベータ線強度を室内で測定する簡易法 (Zen and Hayashi, 1992) を用いて AD の見積もりを行った。

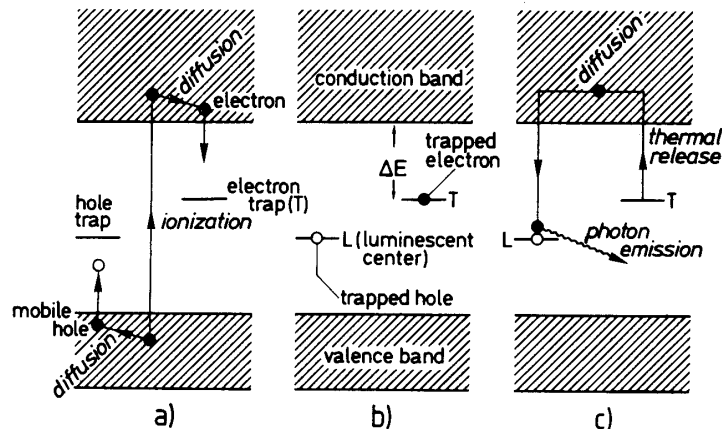


図 2 熱蛍光発光現象の原理図 (Aitoken, 1978)

## 3. 試 料

今回の TL 強度測定に用いた試料は、すべて噴出年代が既知のものであり、岩石名や産地などは以下のとおりである。なお、岩石名は主として年代測定値の論文の記載を参考にした。

- (A) 雲仙火山新焼溶岩（斜方輝石黒雲母角閃石デイサイト）  
長崎県島原市北千本木町西（ $32^{\circ}46'55''\text{N}$ ,  $130^{\circ}19'13''\text{E}$ ）  
噴出年代=1792年（渡辺・星住，1995）
- (B) 雲仙火山眉山溶岩（黒雲母普通角閃石デイサイト）  
長崎県島原市眉山（ $32^{\circ}46'12''\text{N}$ ,  $130^{\circ}21'08''\text{E}$ ）  
TL 年代= $3.1\pm 1.2\text{ka}$ （Takashima and Watanabe, 1994）
- (C) 雲仙火山千本木溶岩（両輝石含有黒雲母普通角閃石デイサイト）  
長崎県島原市北千本木町南西（ $32^{\circ}46'35''\text{N}$ ,  $130^{\circ}19'12''\text{E}$ ）  
FT 年代= $13\pm 4\text{Ka}$ （壇原ら，1994）
- (D) 九重火山飯田軽石流（黒雲母普通角閃石デイサイト質火砕流）  
大分県玖珠郡玖珠町宝泉寺（ $33^{\circ}11'11''\text{N}$ ,  $131^{\circ}09'53''\text{E}$ ）  
C-14 年代  $> 32.3\text{ka}$ （松本ら，1970）
- (E) 雲仙火山野岳溶岩（両輝石黒雲母普通角閃石安山岩）  
長崎県南高来郡深江町野岳（ $32^{\circ}44'20''\text{N}$ ,  $130^{\circ}17'12''\text{E}$ ）  
K-Ar 年代= $80\pm 20\text{ka}$ （Watanabe et al., 1993）
- (F) 雲仙火山鳥甲山溶岩（両輝石黒雲母普通角閃石デイサイト）  
長崎県南高来郡国見町鳥甲山（ $32^{\circ}47'15''\text{N}$ ,  $130^{\circ}16'32''\text{E}$ ）  
TL 年代= $130\pm 30\text{ka}$ （Takashima and Watanabe, 1994）
- (G) 九重火山獵師岳溶岩（両輝石普通角閃石安山岩）  
大分県玖珠郡九重町獵師岳（ $33^{\circ}05'12''\text{N}$ ,  $131^{\circ}11'21''\text{E}$ ）  
FT 年代= $0.18\pm 0.07\text{Ma}$ （Watanabe et al., 1987）
- (H) 九重火山野稲山溶岩（両輝石普通角閃石安山岩）  
大分県大分郡湯布院町野稲岳（ $33^{\circ}13'36''\text{N}$ ,  $131^{\circ}17'59''\text{E}$ ）  
K-Ar 年代= $0.42\pm 0.09\text{Ma}$ （宇都・須藤，1985）
- (I) 玖珠層群中部層溶岩（石英含有普通角閃石黒雲母デイサイト）  
大分県玖珠郡九重町宝泉寺（ $33^{\circ}11'05''\text{N}$ ,  $131^{\circ}10'35''\text{E}$ ）  
K-Ar 年代= $0.69\pm 0.08\text{Ma}$ （宇都・須藤，1985）
- (J) 由布川火砕流（普通角閃石含有黒雲母流紋岩溶結凝灰岩）  
大分県大分郡庄内町猿渡（ $33^{\circ}10'18''\text{N}$ ,  $131^{\circ}27'15''\text{E}$ ）  
K-Ar 年代= $0.9\pm 0.8\text{Ma}$ （星住・鎌田，1991）
- (K) 耶馬溪溶結凝灰岩（両輝石普通角閃石デイサイト溶結火砕流堆積物）  
大分県日田郡大山町木六（ $33^{\circ}15'17''\text{N}$ ,  $130^{\circ}59'12''\text{E}$ ）  
FT 年代= $0.99\pm 0.03\text{Ma}$ （宇都・須藤，1985）
- (L) 弱変質篠原デイサイト（黒雲母デイサイト）  
大分県大分郡狭間町東ノ山（ $33^{\circ}11'05''\text{N}$ ,  $131^{\circ}29'38''\text{E}$ ）

K-Ar 年代 =  $1.30 \pm 0.07$  Ma (星住・鎌田, 1991)

#### 4. 実験方法

##### (1) 試料採取

TL 測定用の試料採取には、捕獲電子が熱や光に弱いことを考慮する必要がある。例えば、露頭表面では太陽光エネルギーによって TL 信号が弱くなっている。また、地表面近くでは深部に比べて放射線強度が理論上約半分であるので、表面下 30cm 以深の試料が望ましい。採取後には不透明の袋に入れ、太陽光や蛍光灯に直接さらされないように注意した。試料重量は、石英の含有量によって異なるが、200g を標準として処理した。

##### (2) 石英の分離

試料を 2 分割し、一方を TL 強度測定、他を AD 測定に用いる。TL 測定用試料は、破碎時の発熱を最小限に押さえるため、水中で軽く粉碎した。粉碎後に細粒部を洗い流し、80°C で乾燥した。乾燥後に 25~100 メッシュの粒子をフルイで回収し、磁石で磁性鉱物を除いた。HF (48%) に 5 分間浸し、アルファ線の影響範囲数  $\mu\text{m}$  を溶解した。乾燥後、双眼顕微鏡下でピッキングにより石英を選別した。石英が多く含まれる試料については、理学電機 X 線回折計 RAD-III A によって純度や結晶度を確認した。

##### (3) 年間線量測定

AD 用試料はステンレス鉢を用い 60 メッシュ以下の粉末とした。放射線の測定に用いた装置はアロカ製 GM 測定装置 JDC-125 で、ベータックスケーラ TDC-105, GM 管プロブ GP-14V, GM 管 GM-5004, 測定台 PS-202 (鉛 3cm) よりなる。

標準試料として地質調査所配布の JB-3, JA-3, JB-1a, JG-3, JG-1a, JR-1, JR-2 を用いた。標準試料の年間線量は、Ando et al. (1987) の分析値から、以下の Aitken (1985) の式を用いて計算した。

$$AD = (0.1148U + 0.514T + 0.2609K) / (1 + 1.14W) + (0.1462U + 0.0286T + 0.6893K) B / (1 + 1.25W)$$

ただし、U は U の含有量 (ppm), T は Th の含有量 (ppm), K は  $\text{K}_2\text{O}$  の含有量 (%), W は含水率 (今回は  $W=0$ ), B はベータ線の減衰率である。

これらの標準試料から検量線を作成し、年代測定試料の放射線強度と粒子の直径 (0.5 mm) から、各石英粒子の AD を求めた。

##### (4) TL 強度測定

双眼鏡下で測定をする球状の石英粒子を選び出し、その長径と短径を測定して、回転楕円体として重量を求める (石英の比重 = 2.65)。基本的に 1 粒毎の自然 TL 強度 ( $T_n$ ) を測定し、年代既知の耶馬溪火砕岩 (99ka) との強度比を求める。ただし、非常に若い試料では、1 回の測定に 10 粒子を使用した。

TL 強度測定は、化成オプトニクス(株)製熱蛍光線量計システム KYOKKO TLD READER 2500 を用いた。測定条件は、温度範囲：室温~500°C, 昇温速度：2 分, 強度積分範囲：100~400°C である。ただし、TL 強度が非常に弱い若い試料では、ピークの高さか

ら強度を求めた。

(5) 熱蛍光強度指数 (TI)

今回提唱する熱蛍光強度指数は次式で与えられる。

$$TI(ka) = (Tsm/Tst)(Ast/Asm)Yst$$

ここで、Tst は標準試料の TL 強度、Tsm は測定試料の TL 強度、Ast は標準試料の年間線量、Asm は測定試料の年間線量、Yst は標準試料の年代値 (ka) である。ただし、後述するように年間線量を補正すると TI と放射年代値との相関が悪くなるので、今回の TI の算出では年間線量の補正をしなかった。

5. 結果と考察

図3は代表的なグロー曲線を示している。Kは耶馬溪火砕流堆積物の石英(990ka)で、275°C付近にやや幅広いピークを持っている。この“275°Cシングルピーク型”は、比較的古い試料が多く含まれる(G, H, I, L)ほか、若い試料(E)にも認められ、最も普遍的なタイプ

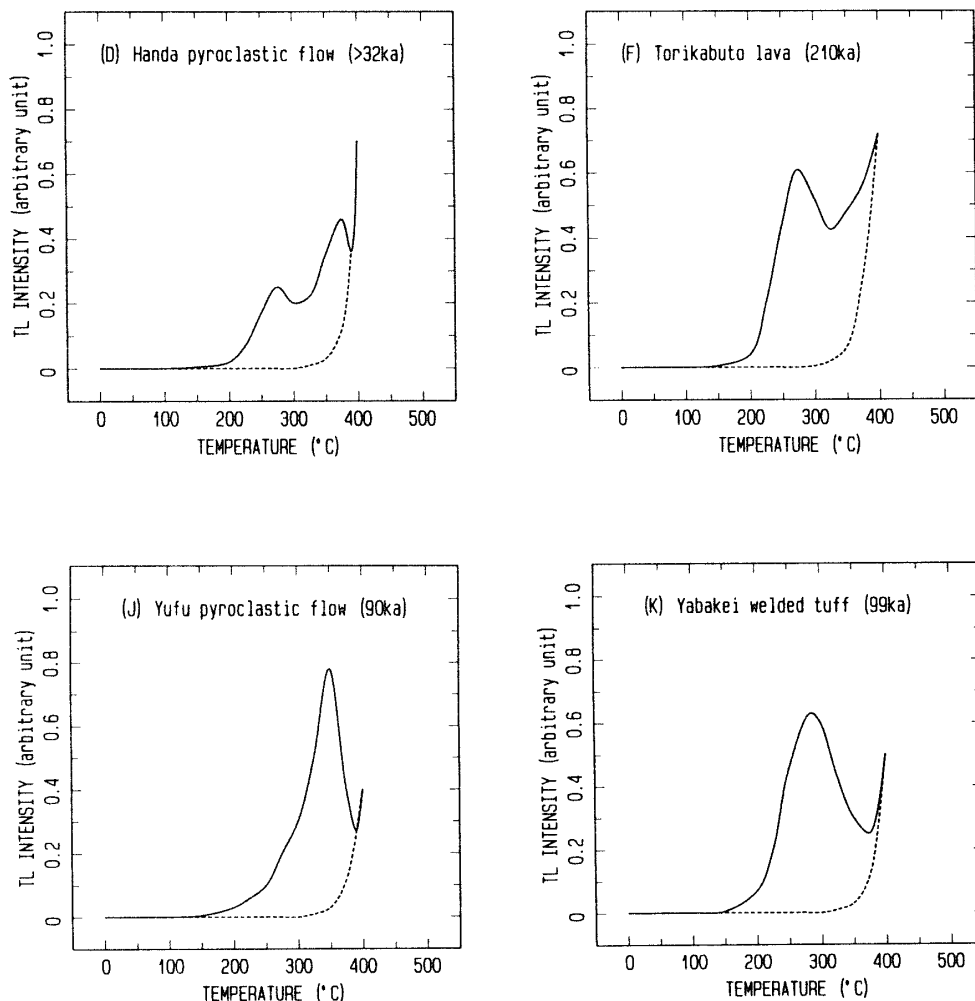


図3 石英の TL グロー曲線

である。J は由布川火砕流堆積物の高温型の結晶形を示す石英 (900ka) で、300°C付近にシャープなピークと275°C付近にも弱いピークが認められる。この“300°Cシングルピーク型”は、今回の試料中では1例だけである。D は飯田火砕流堆積物の石英 (>32ka) で、275°Cと375°C付近にピークを持っている。このような“ダブルピーク型”は、今回の試料中では1例だけである。F は雲仙火山鳥甲溶岩の石英 (130ka) で、275°C付近のやや幅広いピークと高温側に右上がりのショルダーを持っている。この“ショルダー型”は、比較的若い試料にしばしば認められる (A, B, C)。

各試料の熱蛍光強度指数 (TI) と年間線量 (AD) 測定データは表1にまとめている。TI に対する放射年代値との比 (TI/ka) は、0.86~1.83の範囲にあり、平均1.14である。このTI と放射年代がよく一致する原因は、同じ岩体に対する既存の放射年代値の中で、一般的な層序に矛盾がないかぎり、TI に最も近い年代値を選んだことによるであろう。しかし、年間線量の補正もしない TI が放射年代値にほぼ一致することは注目に値する。

TI/ka 比が1から大きく離れる試料は、まず年代値が3.1ka と若い眉山溶岩(B)が挙げられる。この TL 年代値は1.2ka の大きな誤差を含んでおり、最大値を4.4ka とすると、同比は1.14と小さくなる。次に、グロー曲線がダブルピーク型を示す飯田軽石流(D)は同比が1.83と最大を示す。しかし、この C-14 年代値は >32.3ka とされており、噴出年代はさらに古い可能性も残されている。高温型の石英結晶形を示す由布川軽石流(J)は、同比が1.52でかなり大きい。このことは、高温型石英は低温型石英と異なる成長曲線を示す可能性を示唆している。以上のような例外的なデータを除くと、普遍的な275°Cシングルピーク型あるいはショルダー型石英は、TI が直接噴出年代を示すことが明らかになった。

TI に年間線量 (AD) を補正すると、放射年代値との相関はかえって低くなる。年代標準試料の耶馬溪溶結凝灰岩(K)は AD=4.60mGy/a で、通常の火山岩 (3mGy/a) に比べるとかなり大きい。したがって、TI に AD 補正を行うと、TI/ka 比は0.7程度となり、年代値と一致しなくなる。また玖珠層群中部層溶岩(I)や篠原デイサイト(L)は、9.58mGy/a と

表1 熱蛍光強度指数 (TI) と年間線量 (AD) 測定データ

No.	試料名	年代 (ka)	TI	TI/ka	AD (mGy/a)
A	雲仙火山新焼溶岩	0.24	0.30	1.25	2.91
B	雲仙火山眉山溶岩	3.1	5.0	1.61	2.83
C	雲仙火山千本木溶岩	13	13.3	1.02	3.08
D	九重火山飯田軽石流	>32.3	59	1.83	3.33
E	雲仙火山野岳溶岩	80	86	0.93	2.51
F	雲仙火山鳥甲溶岩	130	140	1.08	2.93
G	九重火山獅師岳溶岩	180	210	1.17	2.71
H	九重火山野稲山溶岩	420	469	1.12	1.99
I	玖珠層群中部層溶岩	690	750	1.07	9.58
J	由布川火砕流	900	1,370	1.52	3.08
K	耶馬溪溶結凝灰岩	990	(990)	(1.00)	4.60
L	篠原デイサイト	1,300	1,120	0.86	5.97

年代値：A (渡辺・星住, 1995), B・F (Takashima and Watanabe, 1994), C (壇原ら, 1994), D (松本ら, 1970), E (Watanabe et al., 1993), G (Watanabe et al., 1987), H・I・K (宇都・須藤, 1985), J・L (星住・鎌田, 1991)

5.97mGy/a のような非常に大きな AD をもっているので、AD 補正を行うと、TI は極端に小さくなる。したがって、TI の算出式の中の年間線量の補正項は、現在のところ不必要である。

図4は、普遍的な275°Cシングルピーク型あるいはショルダー型のグロー曲線をもつ石英について、TI と放射年代値との関係を対数表示したものである。このように TI は、0.2ka (200年) から1,300ka (130万年) 範囲にわたって、放射年代値と直線関係が認められる。したがって、TI は、面倒な放射線の人工照射や年間線量の測定を実施することになしに、自然 TL 強度を測定するだけで、第四紀火山岩の噴出年代や変質岩の変質年代を推定することができる。しかし、今回用いた年代標準試料(耶馬溪溶結凝灰岩)は、噴出年代がほぼ 1Ma であることは確実であるが、石英が細粒で含有量が少なく、年間線量率が通常の岩石に比べて大きいなどの欠点を有している。今後、数十万年～百万年の年代標準試料を複数個選び、さらに検討する必要がある。

以上のように、今回提案した熱蛍光強度指数 (TI) は、単に TL 強度を測定し、類似するグロー曲線を示すグループ毎に適切な年代標準試料を選択すると、簡単かつ迅速に第四紀火山岩の噴出年代を推定できる。実際の TL 年代測定では、年間線量の見積もりには母岩の含水率やラドンの逸散の評価、等価線量の見積もりでは照射線量と TL 強度の比例関係や感度の変化(未公表データ)などの問題が数多く残されている。この TI 法は、これらの問題点をまったく含まないので、今後データ数を増やせば、TL 年代測定法の1手法として発展する可能性を秘めている。

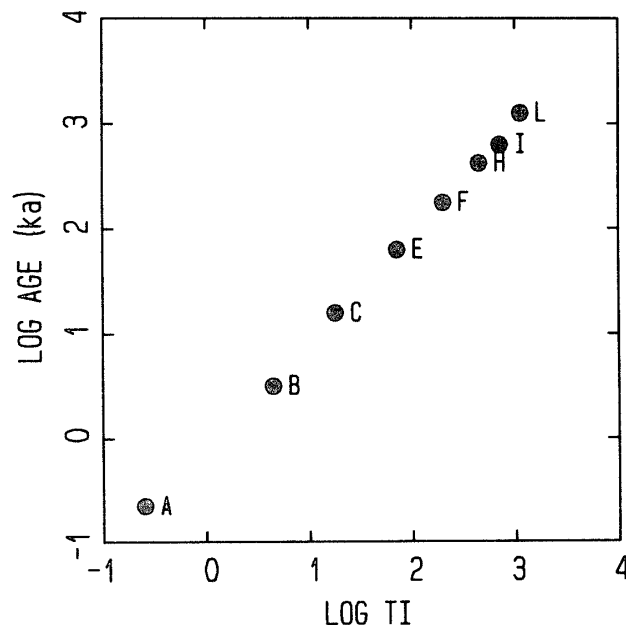


図4 石英の熱蛍光強度指数 (TI) と放射年代 (ka) との関係

A = 新焼溶岩 (0.24ka; 渡辺・星住, 1995), B = 眉山溶岩 (3.1ka; Takashima and Watanabe, 1994), C = 千本木溶岩 (13ka; 壇原ら, 1994), E = 野岳溶岩 (80ka; Watanabe et al., 1993), F = 鳥甲山溶岩 (130ka; Takashima and Watanabe, 1994), H = 野稲山溶岩 (420ka; 宇都・須藤, 1985), I = 玖珠層群中部層溶岩 (690ka; 宇都・須藤, 1985), L = 篠原デイサイト (1,300ka; 星住・鎌田, 1991)



## 6. ま と め

放射年代が既知の第四紀火山岩12個から、石英を抽出し、その天然 TL 強度を測定した結果、次のことが明らかになった。

- (1) グロー曲線は、一般的な275°Cシングルピーク型、高温型石英が示す300°Cシングルピーク型、275°Cと375°Cのダブルピーク型、および、若い石英が示すショルダー型に分類できる。
- (2) 熱蛍光強度指数 (TI) は、標準試料の TL 強度を  $T_{st}$ 、測定試料の TL 強度を  $T_{sm}$ 、標準試料の年間線量を  $A_{st}$ 、測定試料の年間線量を  $A_{sm}$ 、標準試料の年代値を  $Y_{st}$  とすると、 $TI(ka) = (T_{sa}/T_{st})(A_{st}/A_{sm})Y_{st}$  で与えられる。
- (3) 例外的な試料を除くと、TI は放射年代値とほぼ一致するので、第四紀火山岩の噴出年代や粘土岩の変質年代の推定に用いることができる。
- (4) TI に年間線量率 (AD) を補正すると、放射年代値との相関は低くなるので、不必要である。
- (5) 例外的なダブルピーク型や高温型石英については、別個の年代標準試料を選択する必要がある。

謝 辞：ガンマ線照射には九州大学コバルト60照射実験室を使用した。また、石英の純度や結晶度の測定には、九州産業大学総合機器センターのX線回折装置理学電機 RAD-ⅢAを利用した。記して深謝いたします。

## 参 考 文 献

- Aitken, M. J. (1978) Archaeological involvements of physics. *Physics Reports. A Review of Physics Letters* 40C: 277-351.
- Aitken, M. J. (1985) *Thermoluminescence Dating*. Academic Press, London. 1-359.
- Ando, A., Mita, N. and Terashima, S. (1987) 1986 values for fifteen GSI rock reference samples, "igneous rock series". *Geostandards Newsletter*, 11, 159-166.
- Bell, W. T. (1979) Thermoluminescence dating: radiation dose-rate data. *Archametry*, 21, 243-245.
- 壇原徹・岩野英樹・星住英夫・渡辺一徳 (1993) 若い火山岩のフィジョン・トラック年代測定の試み—雲仙普賢岳・眉山の例—. *火山学会講演予稿集*, p. 51.
- 星住英夫・宇都浩三・渡辺一徳 (1994) 雲仙火山の K-Ar 年代測定—新时期雲仙火山の発達史—. *火山学会講演予稿集*, p. 93.
- 松本徭夫・林正雄・山崎達雄 (1970) 九重火山飯田軽石流の  $^{14}C$  年代—日本の第四紀層  $^{14}C$  年代 (59) —。 *地球科学*, 24, 190-191.
- 長尾敬介・西戸裕嗣・板谷徹丸・緒方惟一 (1984) K-Ar 法による年代測定, *岡山理科大学蒜山研究所報告*, 9, 19-38.
- 中井信之・中村俊夫 (1988) 放射性炭素年代測定法, *地質学論集*, 29, 235-252.
- Takashima, I. (1985) Thermoluminescence dating of volcanic rocks and alteration minerals and their application to geothermal history. *Bull. Geol. Surv. Japan*, 36, 321-366.

- Takashima, I. and Watanabe, K. (1994) Thermoluminescence age determination of lava flows/ domes and collapsed materials at Unzen volcano, SW Japan. Bull. Volcanol. Soc. Japan. 39, 1-12.
- 宇都浩三・須藤茂 (1985) 豊肥地熱地域の火山岩の K-Ar 年代。地調報告, 264, 65-83.
- Watanabe, K., Hayashi, M. and Fujino, T. (1987) Fission track age of volcanoes in the Kuju volcanic region in relation to geothermal activity. Jour. Geoth. Res. Soc. Japan, 9, 207-217.
- 渡辺一徳・星住英夫 (1995) 雲仙火山地質図。地質調査所。
- Watanabe, K., Hoshizumi, H. and Itaya, T. (1993) K-Ar ages of Unzen volcano in Kyushu, Japan -with some aspects of geology of Mayu-yama-. Mem. Fac. Educ. Kumamoto Univ., 42, 35-41.
- Zen, A. and Hayashi, M. (1992) Study on thermoluminescence dating of alteration minerals and its application to geothermal exploration. Geoth. Res. Rep., Kyushu Univ., 1, 38-49.