

# 考古被熱試料のフィッション・トラック解析

## — 三重県多気町明気窯跡群の例 —

岩野英樹\*・檀原 徹\*・吉岡 哲\*・宇河雅之\*\*

Fission track analysis of archaeological samples

- An example of the Myoge furnace site, Mie Prefecture -

Hideki Iwano\*, Tohru Danhara\*, Tetsu Yoshioka\* and Masayuki Ukawa\*\*

### 1. はじめに

考古遺跡試料の中で、のぼり窯（後述）のような加熱を受けた遺物は、そのもつ熱残留磁化と既知の磁気永年変化曲線との比較から、最終焼成時の年代推定が可能である（中島・夏原, 1981）。しかし、その窯がどれくらいの温度で、どれくらいの期間（あるいは何回）使われたかを明らかにするのは非常に難しく、考古学的にもっとも重要な課題のひとつとなっている。フィッション・トラック（FT）法は熱履歴解析に有効な手法で地質学試料に数多く適用されているが、これまで考古被熱試料を対象に上述の定量化を行ったFT解析例はほとんどない。今回この問題を解決するための方法論の開発を目指し、1つのケーススタディとして三重県多気町明気窯跡群ののぼり窯についてFT解析を試みた。

### 2. 明気窯跡群とは

明気窯跡群は、三重県埋蔵文化財センターにより1990(平成2年)～1993年(平成5年)にかけ、三重県多気町で発掘調査された。これらは須恵器を焼いた窯で、時代は7世紀初め頃と推定されている。須恵器とは5世紀の半ば頃に朝鮮半島から渡来人や帰化人たちによって日本に伝えられた焼き物で、それまでになかった「のぼり窯」を使い（図1参照）、より高温(1100℃以上と言われている)で焼かれた薄くて硬い土器である。今回調査対象とした明気1号窯も尾根の斜面中腹に地山（花崗岩風化土）を掘りくぼめ天井を築く方法（半地下式）で作られたのぼり窯である（図2）。この窯は全長10.9m、最大幅1.8m、床から残存する天井までの高さ1.2mで、規模としては比較的大きく、ほぼ同規格の明気2号窯と並んで造られている。

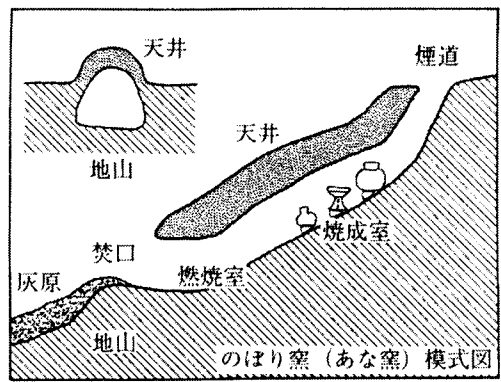


図1. のぼり窯の模式図。（明気窯跡群発掘調査現地説明会資料；三重県埋蔵文化財センター(1993)を参照）

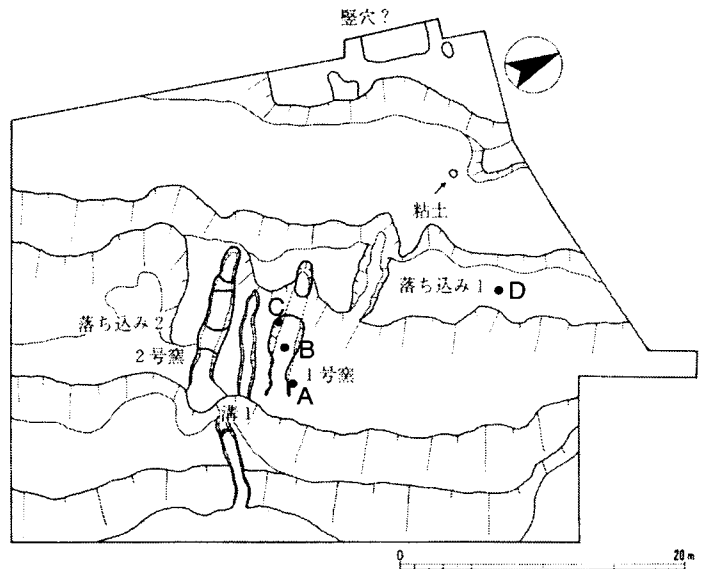


図2. 明気窯跡群（明気1号窯と2号窯）遺構略図（明気窯跡群発掘調査現地説明会資料；三重県埋蔵文化財センター(1993)を参照）。A, B, C, Dはサンプリング地点。

1999年3月20日受付, 1999年6月15日受理

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

\*\* 三重県埋蔵文化財センター Mie Prefecture Archaeological Center

### 3. 試料

サンプリング位置を図2、3に示す。試料は明気1号窯の焚き口から1m奥の壁面（A地点）、焼成室の床面中央部（B地点）、焼成室の壁面（C地点）である。各地点とも断面を観察すると焼土の硬度・色調に変化が認められ、できる限り焼土の色調に合わせ、かつ系統的な試料採取を行った（後述、表1）。また、地山を形成する花崗岩風化土で、窯の熱影響を受けていないものとして、1号窯から14m離れた地点（D地点、深度約10cm）で比較試料も採取した。A、C、D地点は現地でサンプリングを行い、B地点は約30cmの柱状試料を持ち帰り、実験室内でより細かくサンプリングを行った。表1には試料リストとして、試料名、窯体表面からの距離、試料の色調、ジルコン抽出数（試料100g当り）、ジルコン結晶の色調、ジルコンの

みかけF T年代値、ゼロトラック（熱により完全にリセットされ、トラックが全くない）粒子の割合、コンファインドトラック長などを示した。

### 4. 実験と結果

#### 4.1 ジルコン抽出

各地点のジルコン抽出処理は、窯体表面に近い試料（3-5点）と離れた試料（1-2点）を予察的に選んで行った。研磨・エッチング処理を行った結果、表面から10cm以内でのみジルコンの色調変化やトラック密度の著しい変化があったため、残りの試料の処理は行わなかった（表1）。また、すべての分析試料でアパタイトは含まず、アパタイトを用いたF T解析はあきらめざるを得なかった。

表1. 明気窯跡群（明気1号窯）被熱試料一覧表とF T解析結果.

試料名	距離* (cm)	試料の 色調	ジルコン 抽出量**	ジルコン 色調	みかけ年代値 $\pm 1\sigma$ (Ma)	ゼロトラック 粒子の割合	平均トラック長 ( $\mu\text{m}$ )	備考
A地点								
A-0	0~2	黄褐	400	無色	13.1 $\pm$ 0.8	69%	8.15 $\pm$ 0.37	
A-1	2~5	暗赤褐	2500	無色	74.1 $\pm$ 4.8	0%	10.55 $\pm$ 0.09	
A-2	5~10	赤褐	1200	褐	67.8 $\pm$ 4.2	0%		
A-3	10~15	赤褐						未処理
A-4	15~20	赤褐						未処理
A-5	20~25	赤褐	1000	褐	57.6 $\pm$ 3.8	0%		
A-6	25~30	赤褐						未処理
A-7	30~35	赤褐						未処理
A-8	35~40	赤褐						未処理
A-9	40~45	赤褐						未処理
A-10	45~50	赤褐						未処理
A-11	50~55	赤褐	700	褐	75.6 $\pm$ 4.9	0%		
A-12	55~60	赤褐						未処理
A-13	60~65	赤褐						未処理
A-14	65~70	赤褐						未処理
A-15	70~75	赤褐						未処理
B地点								
B-1	0~2	赤褐+青灰	1400	無+褐	28.1 $\pm$ 1.7	35%		
B-2	2~4	暗青灰	500	無色	0	100%		
B-3	4~7	暗青灰	1900	無色	0	100%		
B-4	7~9	灰+黄褐	800	無色	19.3 $\pm$ 1.1	44%	7.83 $\pm$ 0.23	
B-5	9~11	暗赤褐	2400	無-淡褐	67.0 $\pm$ 3.7	0%	10.32 $\pm$ 0.11	
B-6	11~16	赤褐						未処理
B-7	16~21	赤褐						未処理
B-8	21~26	赤褐	3400	褐	68.7 $\pm$ 4.2	0%		
C地点								
C-1	0~5	黄+青灰	1000	無色	11.7 $\pm$ 0.8	57%	9.16 $\pm$ 0.18	
C-2	5~10	暗赤褐	1000	無色	68.9 $\pm$ 4.1	0%	10.31 $\pm$ 0.13	
C-3	10~15	赤褐	2500	淡褐	78.2 $\pm$ 4.8	0%		
C-4	15~20	赤褐	700	淡褐				
C-5	20~25	赤褐						未処理
C-6	25~30	赤褐	700	淡褐-褐				
C-7	30~35	赤褐						未処理
C-8	35~40	赤褐	1600	褐	59.3 $\pm$ 4.1	0%		
C-9	40~45	赤褐						未処理
D地点								
d	1400	赤褐	1000	淡褐	64.6 $\pm$ 3.7	0%	10.70 $\pm$ 0.08	

\*窯表面からの距離

\*\*試料100gあたりの数

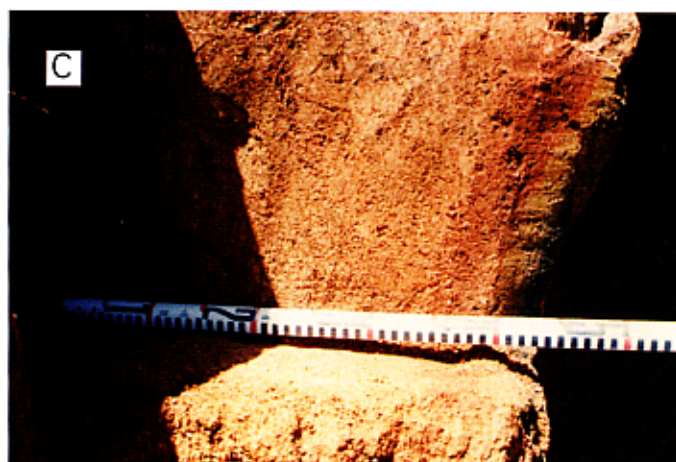
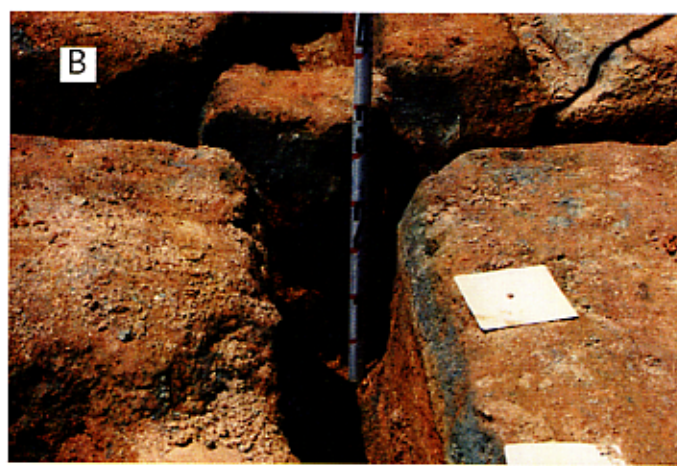


図3. 明気1号窯でのサンプリング地点。  
A: 焚口付近の壁面、B: 焼成室床面、  
C: 焼成室壁面。

#### 4. 2 みかけ年代値の測定

加熱影響による自発トラック密度の減少を調べるため、各試料ともランダムに選んだ10粒子を対象にみかけ年代値を測定した。測定は岩野・檀原(1997)で記述した高品位モニターを用いた測定システムで行った。ジルコン内部面に外部ディテクター法を適用し、ゼータ値  $352 \pm 3$  (岩野・檀原, 1997) で年代校正した。測定結果は表1、表2、図4に示した。

#### 4. 3 トラック長測定

A、B、C地点ともみかけ年代値が若返っているもの(1試料ずつ)と、それに近接した年代値に若返りが認められないもの(1試料ずつ)、およびD地点の比較試料についてコンファインドトラック長測定を行った。測定は3次元トラック長計測システム(Iwano et al., 1996)を用い、観察面に平行なトラックだけでなく傾いたものも測定した。測定本数は50本になるまで測定を行った。しかし、年代値が若返っている試料はマウント内の全粒子を対象としても50本に達しなかった。測定結果を表1、図4に示した。

た。

### 5. 考察

#### 5. 1 焼土の色調とジルコンのアニーリング

A、B、C3地点で共通に、窯体表面から青灰色の硬化部・黄灰色部・暗赤褐色部・赤褐色部と色調の変化が見られる(図3、表1)。まず、青灰色部は高温で還元焼成されたと想定され、この範囲内のジルコン中のトラックは完全に消滅していた(B-2, 3試料)。黄灰色部では、トラックの消滅は完全なものから不完全なものまで共存していた(A-0, B-4, C-1試料)。これはサンプリング間隔が粗すぎたことが原因と考えられる(特にC-1試料)。暗赤褐色部では、ジルコンが無色化しているが、トラックの短縮化はなく年代値の若返りは検出できなかった(A-1, B-5, C-2試料)。赤褐色部は周辺の地山(花崗岩風化土)のもつ色で、ジルコンの変色も年代値の変化もなかった。また、床面表層(B-1試料)の赤褐色部は本来の床面の上に落ちてきた地山の土であろうと解釈される。

表2. 明気窯跡群被熱試料のフィッシュン・トラック年代測定データ一覧表。

試料名(距離)	粒子数	自発FT密度(数) ( $10^6 \text{ cm}^{-2}$ )	誘導FT密度(数) ( $10^6 \text{ cm}^{-2}$ )	線量ガラス密度(数) ( $10^4 \text{ cm}^{-2}$ )	$\chi^2$ 検定 P( $\chi^2$ ) (%)	ウラン濃度 (ppm)	相関係数 r	年代値 $\pm 1\sigma$ (Ma)	測定手法
<b>A地点</b>									
A-0 (0-2cm)	10	2.13 (524)	2.33 (574)	8.19 (2516)	<1	230	0.101	<b>13.1 <math>\pm</math> 0.8</b>	ED1
A-1 (2-5cm)	10	5.32 (1622)	1.03 (314)	8.20 (2518)	5	100	0.440	<b>74.1 <math>\pm</math> 4.8</b>	ED1
A-2 (5-10cm)	10	4.71 (1695)	0.997(359)	8.21 (2521)	<1	100	0.623	<b>67.8 <math>\pm</math> 4.2</b>	ED1
A-5 (20-25cm)	10	3.97 (1294)	0.991(323)	8.21 (2523)	49	100	0.803	<b>57.6 <math>\pm</math> 3.8</b>	ED1
A-11 (50-55cm)	10	5.44 (1681)	1.04 (320)	8.22 (2525)	5	100	0.611	<b>75.6 <math>\pm</math> 4.9</b>	ED1
<b>B地点</b>									
B-1 (0-2cm)	10	2.60 (872)	1.34 (449)	8.23 (2527)	<1	130	-0.153	<b>28.1 <math>\pm</math> 1.7</b>	ED1
B-2 (2-4cm)	10	0.00 (0)	1.90 (640)	8.23 (2530)	—	190	—	<b>0</b>	ED1
B-3 (4-7cm)	10	0.00 (0)	1.63 (758)	8.24 (2532)	—	160	—	<b>0</b>	ED1
B-4 (7-9cm)	10	2.16 (766)	1.69 (597)	8.54 (2625)	<1	160	0.266	<b>19.3 <math>\pm</math> 1.1</b>	ED1
B-5 (9-11cm)	10	4.47 (2081)	0.998(465)	8.55 (2626)	6	90	0.616	<b>67.0 <math>\pm</math> 3.7</b>	ED1
B-8 (21-26cm)	10	5.95 (1808)	1.25 (380)	8.25 (2534)	10	120	0.693	<b>68.7 <math>\pm</math> 4.2</b>	ED1
<b>C地点</b>									
C-1 (0-5cm)	10	1.11 (416)	1.38 (517)	8.26 (2536)	<1	130	-0.326	<b>11.7 <math>\pm</math> 0.8</b>	ED1
C-2 (5-10cm)	10	5.53 (1924)	1.16 (404)	8.26 (2538)	2	110	0.336	<b>68.9 <math>\pm</math> 4.1</b>	ED1
C-3 (10-15cm)	10	6.51 (1913)	1.20 (354)	8.27 (2541)	11	120	0.645	<b>78.2 <math>\pm</math> 4.8</b>	ED1
C-8 (35-40cm)	10	4.34 (1203)	1.06 (294)	8.28 (2543)	49	100	0.764	<b>59.3 <math>\pm</math> 4.1</b>	ED1
<b>D地点</b>									
d (14m)	10	5.12 (1924)	1.15 (432)	8.29 (2545)	3	110	0.554	<b>64.6 <math>\pm</math> 3.7</b>	ED1

(1)距離は窯壁面からの値。ただしD地点は窯の主軸からの距離、(2)  $P(\chi^2)$ :  $\chi^2$ 値の自由度  $n-1$  ( $n$ は粒子数)の  $\chi^2$ 分布における上側確率 (Galbraith, 1981), (3)熱中性子線量測定用標準ガラスはNIST-SRM612を使用、(4)照射場所: 立教大学原子炉 TRIGA MARK II 回転試料棚、(5)  $r$ : 自発および誘導FT密度の相関係数、(6)年代値:  $T = \ln(1 + \lambda_d \cdot \zeta \cdot \rho_s \cdot \rho_a / \rho_i) / \lambda_d$ ;  $\rho_s, \rho_i, \rho_a$ : 自発、誘導、線量ガラスそれぞれのFT密度(ただしED1は  $0.5\rho_s$ )、 $\zeta$ : ゼータ値、(7)誤差:  $\sigma_T = T \cdot [1/\Sigma N_s + \Sigma N_i + \Sigma N_d + (\sigma_\zeta/\zeta)^2]^{1/2}$ ,  $\Sigma N_s, \Sigma N_i, \Sigma N_d$ : 自発、誘導、線量ガラスそれぞれの総FT数、 $\sigma_\zeta$ :  $\zeta$ の  $1\sigma$ 誤差、(8)  $^{238}\text{U}$ の全壊変定数:  $\lambda_d = 1.55125 \times 10^{-10} \text{ y}^{-1}$  (9)  $\zeta_{ED1} = 352 \pm 3(1\sigma)$ ;  $\zeta_{ED2} = 334 \pm 4(1\sigma)$  (岩野・檀原, 1997), (10) 測定手法: 外部ディテクター法 (ED1: 内部面; ED2: 外部面)

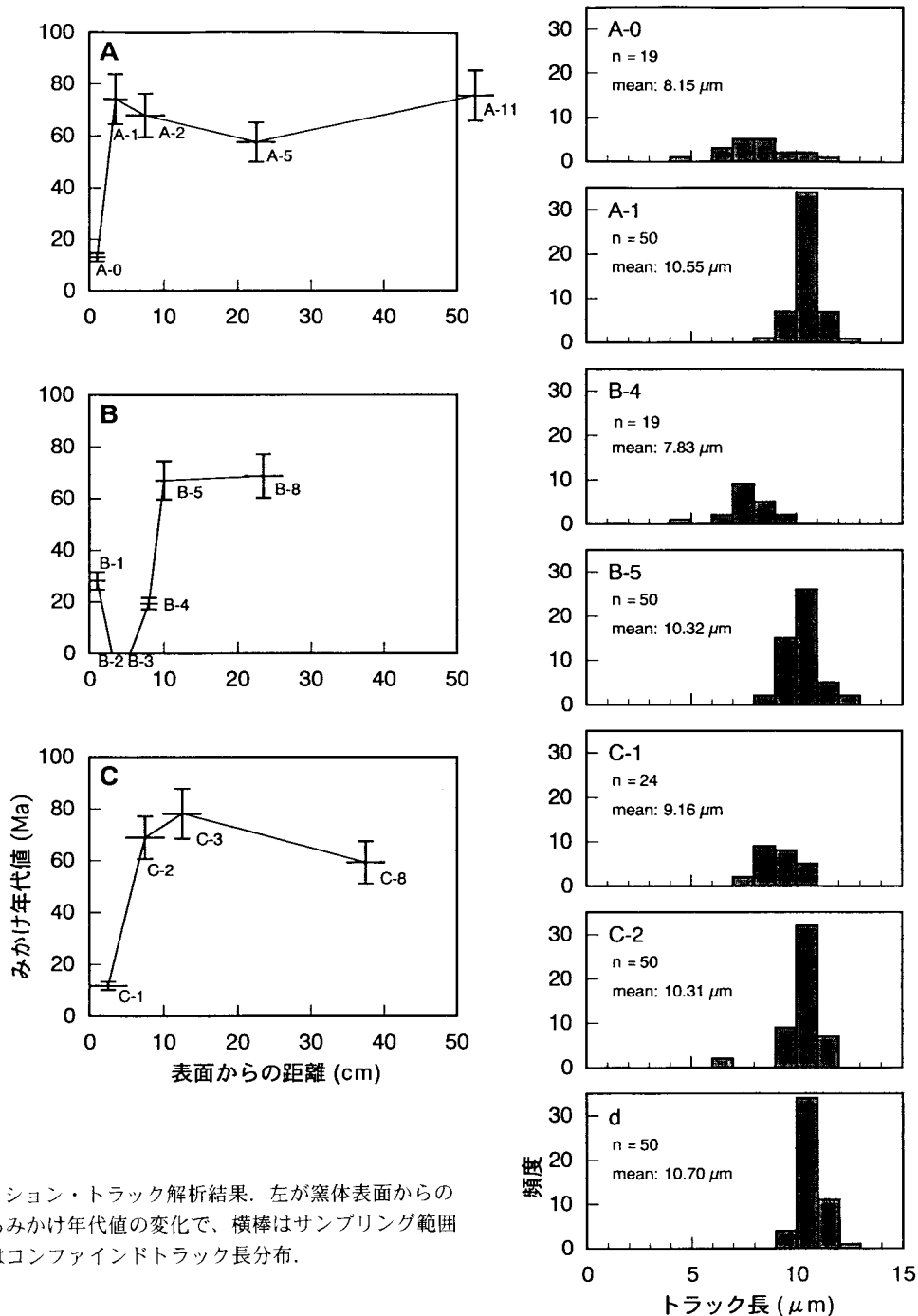


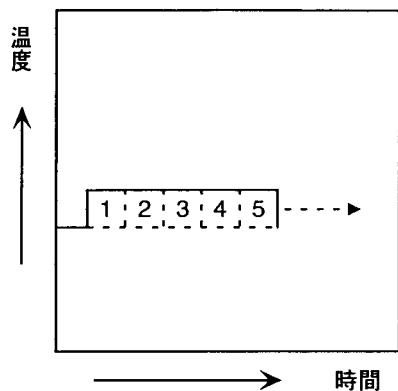
図 4. フィッション・トラック解析結果. 左が窯体表面からの距離に対するみかけ年代値の変化で、横棒はサンプリング範囲を示す. 右はコンファインドトラック長分布.

## 5. 2 被熱範囲と温度分布

ジルコンのトラックアニーリングからみた熱影響範囲は、A地点は 2cm 以内、B地点は 9cm 以内、C地点は 5cm 以内と非常に狭く、また窯体の部位ごとに明らかな差がある。一方、ジルコンのみかけ年代値が急激に変化する範囲は幅 2cm 以内であることから (A, B 地点)、この領域の温度勾配が比較的大きいことがわかる。例えば加熱時間を 2-3 日間と仮定した場合、ジルコンが完全にアニーリングを受けた領域の温度はおよそ 800°C かそれ以上で、2cm 離れたジルコンの若返りのない領域はおよそ 400°C 以下と推定される。今回は適用できなかったが、アパタイトが含まれていれば、より低温での被熱範囲および温度分布が推定できたであろう。

著者らの知る限り日本でこれまで須恵器古窯復元実験が一例だけ行われ、その際窯体内部の温度測定結果が得られている (中島・夏原, 1981)。それによると、実験窯は全長約 6m、焼成部最大幅約 4m、床面傾斜度 25°、半地下式で、今回分析した明気 1 号窯よりやや規模が小さい。また、土質は不明である。約 2 日間の加熱の結果、窯体中央部で 900-1100°C (最高 1180°C)、焼成部床面で 800-1000°C、床面下 10cm で 500-600°C、床面下 20cm で 250-350°C となっている。この結果と実際の窯跡を単純には結び付けられないが、窯体内部は 1000°C を超え、床面でも 1000°C に達した温度測定結果と、今回得られた明気 1 号窯のジルコンのアニーリング状況は調和的である。

(a) 連続加熱



(b) パルス加熱

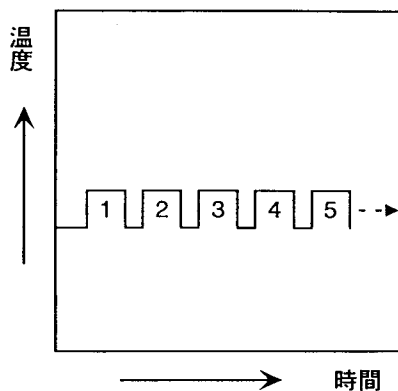
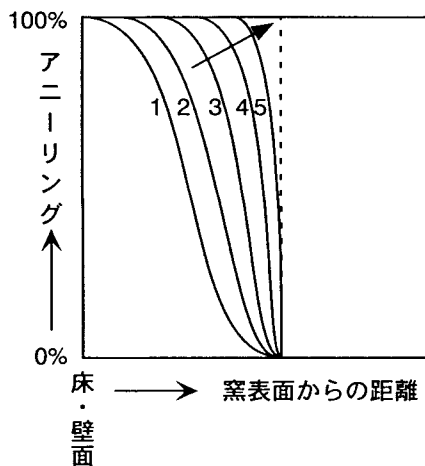
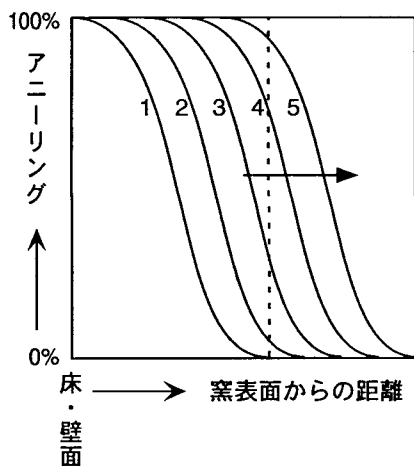


図 5. 連続加熱(a)およびパルス加熱(b)における加熱パターンと、F T試料の受けるアニーリング程度と被熱領域の変化を示す模式図。上図の1~5は、連続加熱(a)において単位時間当りの、パルス加熱(b)においては1回加熱分の被熱量を表す。下図の破線は1回目の被熱領域を示す。連続加熱に置き換えられる場合(a)は、加熱時間が増えるに従ってアニーリングが飽和（完全にトラックが消滅）する領域が広がり、被熱領域も広がる。パルス加熱(b)の場合は、加熱回数の増加とともにアニーリングが飽和する領域が広がるが、被熱領域は変化しない。



### 5. 3 焼成温度・時間と使用回数を求めるには

今回のF T解析結果は、床面でジルコンの完全アニーリング温度を越えていたことを示す。これから窯体表面での焼成温度の下限值は、数日間の一回加熱と仮定した場合800℃以上となる。しかし、対象の明気1号窯は複数回使われていた可能性が十分考えられるため、F T法から焼成温度・時間を推定する場合、使用回数もあわせて検討する必要がある。

一方、使用回数を推定するには、作業仮説として窯体内部（あるいは窯体内の部位ごと）の温度と1回の焼成時間を一定（既知）にしなければならない。例えば、複数回の窯の使用が連続加熱と置き換えられる場合、総加熱時間が1回加熱時間の使用回数分の積算になるので、単純に使用回数を見積もることができるはずである（図5a上）。しかし、この場合には被熱領域が時間の増加とともに広がることを意味し（図5a下）、これは窯の加熱条件にあわない。つまり、窯は焼成終了のたびに比較的急速に冷やされるため、窯内部表面はパルスの加熱を受けるという状況が設定されるべきである（図5b上）。この様な加熱の場合、使用のたびに熱伝導条件が変化しないとすると、毎回の被熱領域は一定となるであろう（図5b下）。実際に、明気1号窯における被熱領域から非被熱領域の変化は幅2cm以内で、両者の境界での温度勾配が比較的大きいと

いうことも被熱領域が一定となることと調和的である。次に、この一定被熱領域内に蓄積した「被熱量」は使用回数に比例することから、使用回数既知の試料から1回分の「被熱量」を割りだし、これと対象試料の「総被熱量」から使用回数は推定可能になる。「被熱量」の候補として、トラック長短縮化率や年代値の減少率、あるいはゼロトラック粒子の増加率が想定できる。ただし、今回の明気1号窯では1回加熱分の「被熱量」を決めることが出来ない。

以上の検討の結果、明気1号窯の使用回数を今すぐに見積もることは難しい。しかし、上述のように回数既知の試料の分析から、あるいは明気窯跡群周辺で同規模実験窯の試行から1回加熱分の「被熱量」を定量すれば、使用回数が見積もれる可能性がある。また、窯体内部温度が1000℃を超えるようなのぼり窯でも被熱領域が10cm以内であるという知見から、F T解析のためには1cm間隔程度の精密なサンプリングが必要であろう。

### 6. まとめ

明気窯跡群明気1号窯のF T解析から得られた知見を以下に整理する。

- 1) 焚き口付近の壁面、焼成室床面、焼成室壁面の中では、床面が最も被熱程度が大きい。
- 2) 被熱程度と焼土の色調には相関がある。青灰色部は非

常に強く加熱を受けおり、ジルコンのフィッション・トラックはすべて消滅している。

- 3) ジルコンのフィッション・トラックが消滅するほどの被熱範囲は、窯体表面から 10cm 以内で、被熱領域から非被熱領域の変化は幅 2cm 以内であった。
- 4) FT法から窯の使用回数を推定するための方法論を検討し、被熱領域における「1回加熱分の被熱量」と、「総被熱量」から推定する方法を提案した。
- 5) 明気窯跡群周辺の花崗岩風化土は約 6800 万年前（白亜紀後期）の地層である。

## 謝辞

三重県埋蔵文化センター所長の久保富子氏・同管理指導課野口美幸氏には快く試料提供をご許可くださった。査読者の大平寛人氏には粗稿に対し適切なコメントをいただいた。立教大学での原子炉照射では(株)第一放研の沼田東治氏にはお世話になった。以上の方々にお礼申し上げます。

## 文献

- 岩野英樹・檀原徹(1997) 高品位モニターを用いたフィッション・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, フィッション・トラックニュースレター, 第10号, 11-20.
- H. Iwano, T. Yamashita and T. Danhara (1996) Three-dimensional analysis of fission track length in minerals -A measuring system and its application-, FISSION TRACK NEWS LETTER, No.9 13-22.
- 三重県埋蔵文化財センター(1993) 国道 42 号バイパス—松阪・多気—発掘調査だより (明気窯跡群発掘調査現地説明会資料) 8p.
- 中島正志・夏原信義(1981) 考古地磁気年代推定法, ニュー・サイエンス社, 95p.