

ルミネッセンス法による旧石器遺跡の 鍵層となるテフラの年代推定

— 宮城県南部を例として —

下岡 順直¹⁾・長友 恒人²⁾

●キーワード：旧石器遺跡 (Paleolithic site), 編年 (Chronology), 鍵層となるテフラ (Marker tephra), 熱ルミネッセンス年代測定 (Thermoluminescence dating), 光ルミネッセンス年代測定 (Optically stimulated luminescence dating), 宮城県南部 (Southern Miyagi)

1. はじめに

日本の旧石器時代研究は、広域火山灰のテフロクロノロジー (火山灰層序学) を適用した遺跡間の層序の対比や蛍光 X 線分析を用いた産地推定法による石材流通の議論が可能になったことから、地域ごとの遺跡群間の比較研究が行われるようになった。さらに、旧石器人の遊動領域という観点から、広範囲な空間における複数遺跡の形成過程の解析を目的としたジオアーケオロジー (地考古学) も展開されるようになった (稲田:2001, 町田:2005, 野口:2005, 出穂・赤井:2005, Izuhō *et al.*:2009, 佐藤:2009)。

一方、遺物包含層を直接年代測定できる方法として、露光によってゼロリセット (ルミネッセンス信号のリセット) された堆積物の年代測定に対して有効である光ルミネッセンス (Optically Stimulated Luminescence: OSL) 年代測定法は、Huntley *et al.* (1985) によって行われるようになった。OSL 法や熱ルミネッセンス (Thermoluminescence: TL) 法による年代測定の原理や最近の動向は Aitken (1985), 長友 (1999), 塚本ら (2005) や橋本 (2007) などに詳しい。ルミネッセンス年代測定は、遺跡堆積物や火山灰 (テフラ) などに含ま

れる石英や長石などの鉱物が露光や加熱によってゼロリセット後に周囲の土壌から蓄積した放射線量 (蓄積線量) を TL や OSL 測定によって評価する。また、鉱物が一年間に吸収する放射線量 (年間線量) を測定し、蓄積線量を年間線量で除した値が年代を示す。

著者らは OSL 年代測定の基礎研究を 1990 年代半ばより開始し、その結果 (下岡・長友:2001) をもとに日本各地の旧石器遺跡堆積物、特に遺物包含層に適用してきた (例えば、長友ら:2007, 下岡ら:2008 など)。その中で、遺物包含層を形成する過程や堆積後の土壌の移動がきわめて複雑であり、遺物や遺構の年代を地層の数値年代から推定する場合において遺物包含層のみを年代測定するのではなく、その隣接する複数の地層の測定を含めた数値年代を層序にしたがって相対的に評価することが必要であることを認識するに至った。さらに、遺跡間の年代対比にはテフラの年代が重要な指標であり、テフラ層の堆積過程を考慮するならば、遺跡内に挟在するテフラ層について得られた数値年代だけではなく、より給源に近い露頭で確実に一次堆積と判断されるテフラの純層を対象として年代測定することがテフラの年代を確実に決定するためには重要である。特に、遺跡内での堆積の厚さが薄いテフラの年代測定を行う際には、周囲か

¹⁾ 京都大学大学院 理学研究科附属地球熱学研究施設 〒874-0903 大分県別府市野口原

²⁾ 奈良教育大学 教育学部 〒630-8528 奈良県奈良市高畑町

らの土壌混入による攪乱や肉眼では判定し難い鉱物粒子の移動を想定して、『火山灰アトラス』（町田・新井：2003）などに示されている火山灰層序学の情報を基に給源近くで層厚が十分な同一テフラの年代測定が必要である。遺跡に挟在するテフラ層と給源により近いテフラ層の両方を年代測定することは年代決定において有効であり、旧石器遺跡の年代推定をより信頼性の高いものにするためには重要である（長友ほか：2005 b）。

この考え方を適応した例として、岩手県遠野市宮守村金取遺跡の年代推定がある。金取遺跡の遺物出土層の年代測定を試みた際、金取遺跡で検出された焼石村崎野パミス（Yk-M）の年代測定を行った。また、遺跡に関連するテフラとして、遺跡では検出されないが、給源近くで Yk-M とほぼ同時期に噴出したとされ、層位的には Yk-M の直上に位置する焼石山形パミス（Yk-Y）を給源に近い北上市大森露頭において採取して測定し、遺跡における Yk-M の年代について総合的に判断し、Yk-M 直下の遺物包含層の年代を決定した（長友ら：2005 a）。

本論では宮城県南部を対象地域に設定し、旧石器遺跡の年代推定の鍵層となる二つのテフラを旧石器遺跡と給源に近い露頭において採取して測定したルミネッセンス年代を比較した。

2. 宮城県南部の旧石器遺跡と関連するテフラ

対象地域は、宮城県南部を流れる阿武隈川水系と名取川水系を中心とした地域である。発掘調査により層序の状況が明らかな主要遺跡は、村田町賀籠沢遺跡、名取市野田山遺跡、仙台市川添東遺跡、上ノ原山遺跡、山田上ノ台遺跡および富沢遺跡の6遺跡であり、仙台市青葉山遺跡、蔵王町持長地遺跡や名取市西野田遺跡など多くは表採やツールが数点出土しているのみである（佐久間：2004）。層序が明らかな遺跡の大部分は、名取川水系に集中しており（図1）、これらの遺跡における放射性炭素（¹⁴C）年代測定は、川添東遺跡では石器包含層下位の段丘礫層直上の有機質粘土層に含まれていた木片が15,910±90年BP（TH-1743）、富沢遺跡では石器包含層（27層）上層の26層中の樹木が23,010+940/-840年BP（TH-1442）の2例が報告されている（大場：2004）

のみで他の数値年代データの報告はない。

旧石器遺跡の年代を考える上で重要なテフラとして、蔵王山系を給源とする蔵王川崎スコリア（Za-Kw）と安達火山を給源とする安達愛島テフラ（Ac-Md）が確認されている（図1）。Za-Kwは賀籠沢遺跡、野田山遺跡、上ノ原山遺跡、山田上ノ台遺跡で検出されており、Ac-Mdは賀籠沢遺跡、野田山遺跡で検出されている。特に、上ノ原山遺跡ではZa-Kwより下層から石器が出土したとされており（大場：2004）、Za-Kwは宮城県南部の旧石器遺跡において遺物の年代を推定するにあたって重要な鍵層の一つといえる。そのほかテフラ分析によって、野田山遺跡や富沢遺跡では始良丹沢テフラ（AT）や浅間板鼻黄色テフラ（As-YP）などの広域テフラも検出されており（大場：2004）、この地域に分布する旧石器遺跡の年代推定には上記2つのローカルなテフラと広域テフラの組み合わせが有効である。しかし、この2つのローカルなテフラの年代学的研究は浅く、数値年代データの蓄積も後述するように少ないもしくは層序と矛盾しているのが現状であり、詳細な年代測定が必要である。以下、Za-KwとAc-Mdのルミネッセンス年代測定について報告する。

3. 鍵層となるテフラのルミネッセンス年代測定

3.1 旧石器遺跡と給源付近における試料採取

宮城県仙台市太白区山田上ノ台町にある山田上ノ台遺跡において2002年に第3次発掘調査が行われた（吉岡・荒井：2003）。山田上ノ台遺跡では、火山灰分析によりZa-Kwは第10層として分層されている（古環境研究所：2003）がその層厚は2～8cm程度と薄く、Za-Kwは第10層中にブロック状に包含されている状態であった（図2）。試料採取ではZa-Kwの塊を壊さないように掘り出した（以下、山田上ノ台第10層Za-Kw試料と称す）。一方、給源に近い宮城県川崎町荒羽賀露頭（図1）におけるZa-Kwは層厚30～40cm以上と厚く、溶結していた。試料は、岩石ハンマーを用いてブロック状の固まりとして採取した（以下、荒羽賀Za-Kw試料と称す）。これらの試料は研究室に持ち帰って表面部分を暗室内で削り取り、光が当たっていない部分を測定試料とした。

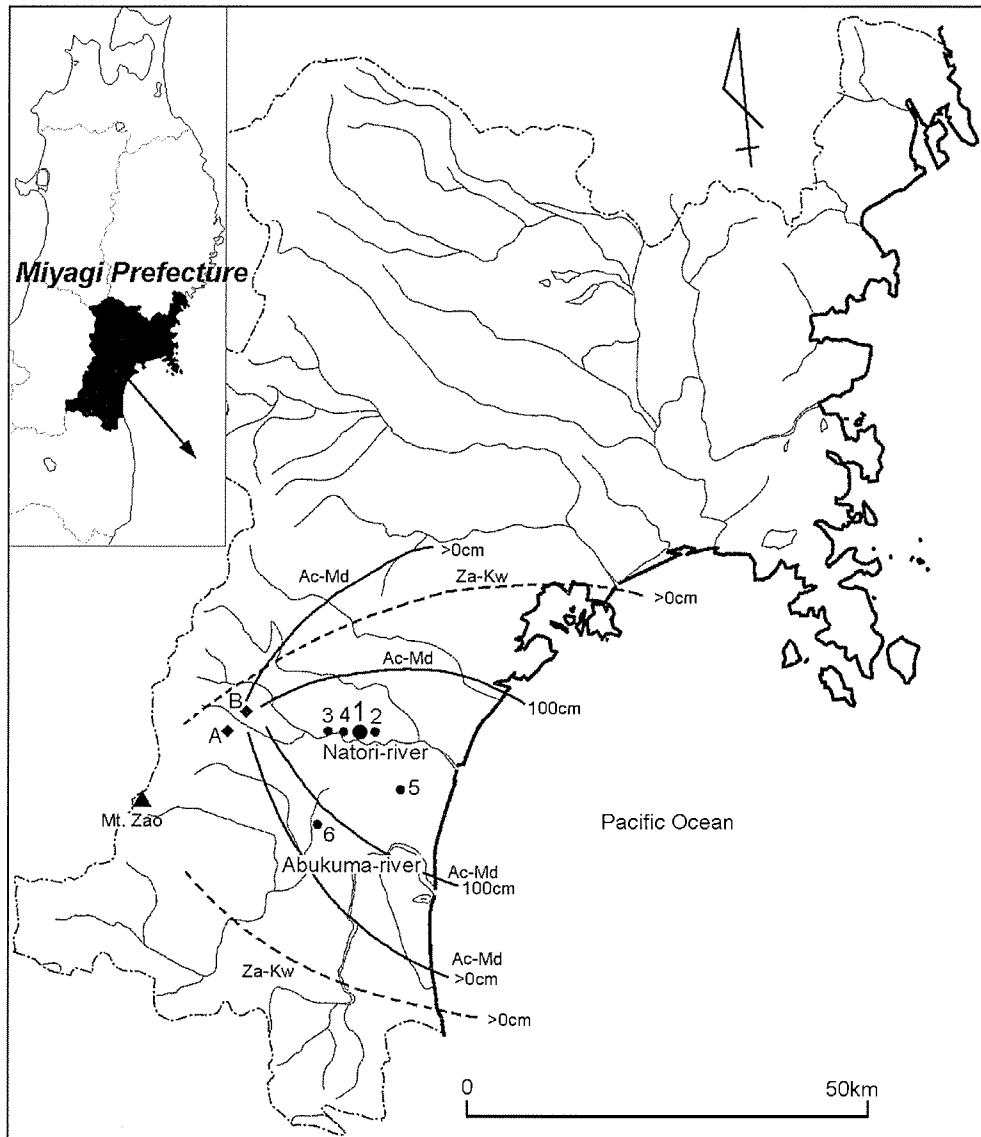


図1 宮城県南部の主要旧石器遺跡の分布と火山灰（テフラ）の等層厚線図。1：山田上ノ台遺跡，2：富沢遺跡，3：川添東遺跡，4：上ノ原山遺跡，5：野田山遺跡，6：賀籠沢遺跡。Za-Kw：蔵王川崎スコリア，Ac-Md：安達愛島テフラ。試料採取露頭，A：荒羽賀露頭，B：安達露頭（町田・新井（2003），大場（2004）より作成）。

Fig. 1 Distribution of Paleolithic sites and iso-pack map of relative marker tephras of southern Miyagi. The marker tephras are Za-Kw (Zao-Kawasaki) scoria and Ac-Md (Adachi-Medeshima) pumice. 1: Yamada-Uenodai site, 2: Tomizawa site, 3: Kawazoe-higashi site, 4: Uenoharayama site, 5: Nodayama site and 6: Kagosawa site. Sampling points for this study are as follows. A: Arahaga outcrop and B: Adachi outcrop. The map is modified after Machida and Arai (2003) and Oba (2004).

宮城県村田町にある賀籠沢遺跡は2003年から2006年にかけて発掘調査が行われた（東北学院大学佐川ゼミナール：2004；東北学院大学佐川ゼミナール：2005）。しかし，賀籠沢遺跡ではAc-Md層が隣接した層と明確に区別して確認できなかったので採取せず，給源とされる宮城県川崎町安達露頭（図1）で試料採取した。安達露頭では，Ac-Mdは数m以上の層厚を有している。試料採取は，暗幕によって遮光した中で光が当たっている露頭の表面層を削り落とし，光が当たっていない部分の軽石を採取した（以下，安達Ac-Md試料と称す）。

3.2 試料処理

試料処理は，約1ルクス程度の暗赤色灯下の暗室で，Za-Kwスコリアは石英を含有しないため炭酸塩鉱物以外の鉱物（主に長石からなる鉱物）を，Ac-Mdテフラは石英鉱物を抽出するために，長友（1999）の処理手順に準拠して行った。以下に試料処理の概略を述べる。

（1）蔵王川崎スコリア（Za-Kw）

山田上ノ台第10層Za-Kw試料は超音波洗浄器を用いて，また荒羽賀Za-Kw試料は万力を用いて粉碎し，山田上ノ台第10層Za-Kw試料は約4～10μm，荒羽

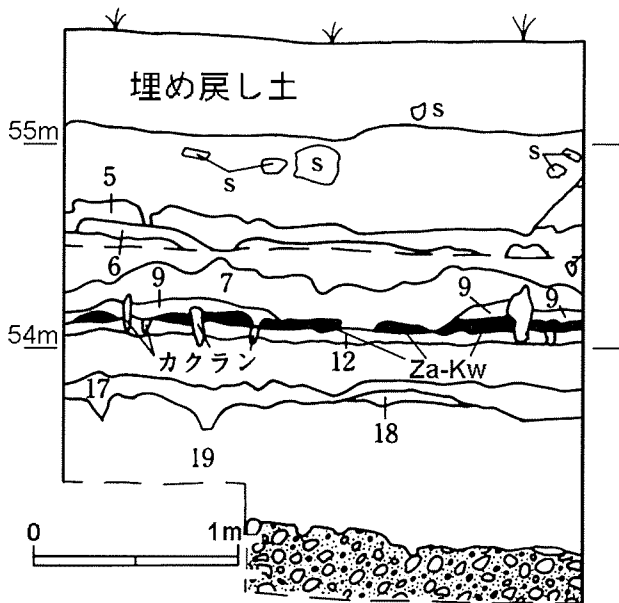


図2 山田上ノ台遺跡に挟在する蔵王川崎スコリア (Za-Kw) (吉岡・荒井 (2003) より作成).

Fig. 2 Zao-Kawasaki (Za-Kw) scoria on the sections of Yamada-Uenodai site. The section is modified after Yoshioka and Arai (2003).

賀 Za-Kw 試料は約 10~50 μm の鉱物を選別した。10%過酸化水素水で約 12 時間処理と 20%塩酸で 2 時間処理を行い、有機物と炭酸塩鉱物を除去し、最後に蒸留水で洗浄して乾燥させた。

(2) 安達愛島テフラ (Ac-Md)

安達 Ac-Md 試料から抽出した 50~250 μm の鉱物を 10%過酸化水素水で約 12 時間処理と 20%塩酸で 90 分間処理により、有機物と炭酸塩鉱物を除去した。その後、磁気分離器を用いて磁性鉱物を除去し、20%フッ化水素酸で 90 分間処理を行い、石英以外の鉱物の除去と石英鉱物の表面のエッチングを行った。最後にふるい分けによって石英鉱物の粒径を 75~150 μm に調整した。

3.3 測定

3.3.1 蓄積線量測定

TL 測定および OSL 測定による線量評価には付加線量法 (Aitken : 1985) を用いた。抽出した試料 (以下、

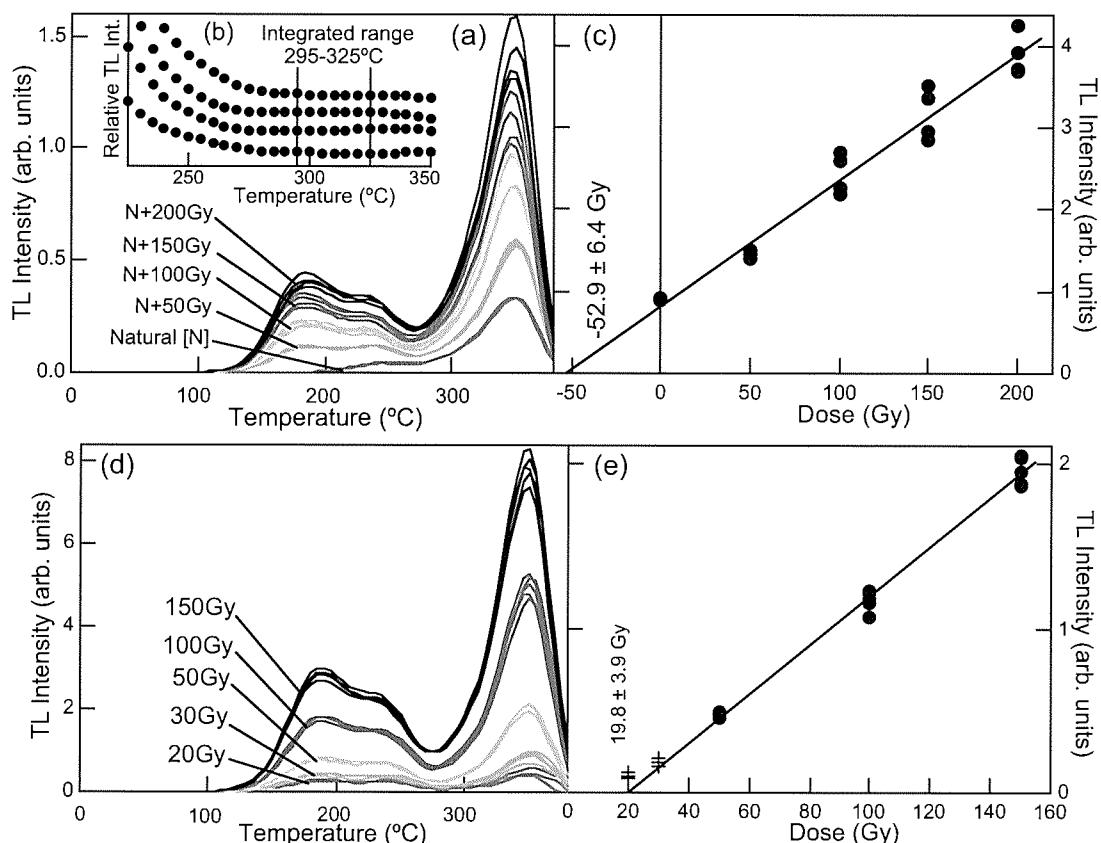


図3 安達 Ac-Md 試料の TL 測定結果。等価線量評価のための TL グローカーブ (a)、プラトーテスト (b) と生長曲線 (c)、低線量域補正のための TL グローカーブ (d) と生長曲線 (e)。プラトー領域は 295~325°C である。

Fig. 3 The result of TL measurement for Ac-Md. TL glow curve, the plateau test and the growth curve for the equivalent dose evaluation are shown in Figs. (a), (b) and (c), respectively. TL glow curve and the growth curve for the low-dose region collection are shown in Figs. (d) and (e), respectively. The plateau region (integrated range) is from 295 to 325°C.

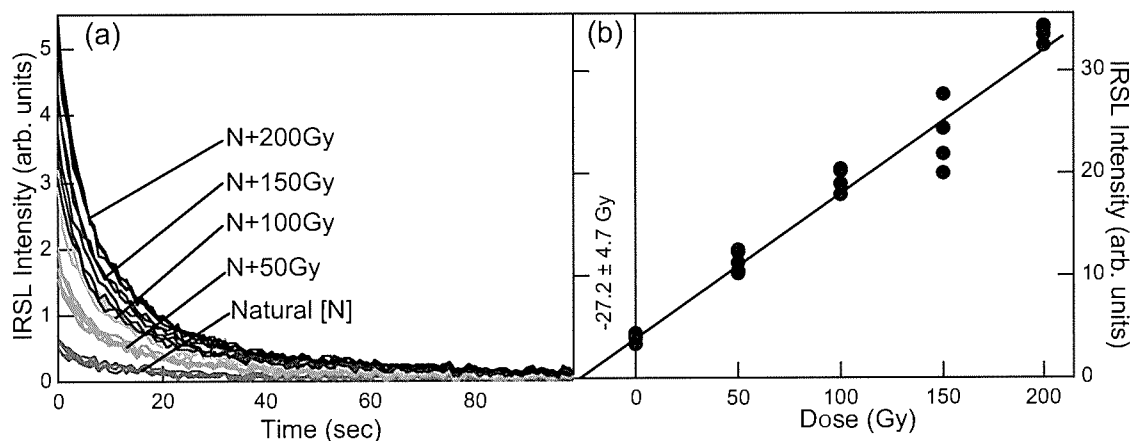


図4 山田上ノ台第10層 Za-Kw 試料の IRSL 測定結果. IRSL 減衰曲線 (a) の 0~10 秒間を積算したものを IRSL 強度として, 生長曲線 (b) を作成した.

Fig. 4 The result of IRSL measurement for Za-Kw. The integrated IRSL signals between 0-10 seconds for each decay curve given in Fig. (a) were used for observing the dose dependence of IRSL intensity as shown in Fig. (b).

ナチュラル試料)に 50~200 Gy の ^{60}Co γ 線を約 0.2 Gy/分の線量率で付加照射 (以下, 付加照射試料) してルミネッセンス測定を行った。また, 低線量域補正 (発光量が放射線量に比例しない低線量域の補正值, 図 3 (e) 市川:1977, Aitken:1985, 長友:1999) するために, ナチュラル試料を 350°C で 60 分間加熱して人為的にルミネッセンス信号をリセットした後に, 5~150 Gy の ^{60}Co γ 線を照射してルミネッセンス測定を行った。

山田上ノ台第10層 Za-Kw 試料は炭酸塩鉱物以外の鉱物を対象として TL 測定と赤外光ルミネッセンス (Infra-red Stimulated Luminescence: IRSL) 測定を行い, 荒羽賀 Za-Kw 試料は炭酸塩鉱物以外 (主に長石鉱物) を対象とし, また安達 Ac-Md 試料は石英鉱物を対象として TL 測定を行った。荒羽賀 Za-Kw 試料と安達 Ac-Md 試料は固結した閉鎖系の試料であり夾雑物の可能性が少ないため, そして加熱によってゼロリセットされた試料には TL 測定がよく適しているため (下岡ら:2009 b), TL 測定のみで十分と判断した。TL 測定には TL/OSL 自動測定装置 (Daybreak 社製 1150) を, IRSL 測定には自作の自動測定装置 (NRL-99-OSTL, 長友ら:2001) を用いた。使用した光電子増倍管 (PMT) は, それぞれ EMI 製 9635 Q と浜松ホトニクス製 R 1140 P である。TL 測定においては, 検出波長を Za-Kw では 350~470 nm (Corning 7-59 フィルターと BG 39 フィルター), Ac-Md では 380~580 nm (Corning 4-96 フィルター) と選択し, 昇温速度 10°C/

秒で室温から 400°C まで窒素雰囲気で行った。IRSL 測定は, 励起光波長 $890 \pm 20 \text{ nm}$ で励起光強度 86.9 mW/cm^2 , 検出波長 350~600 nm (BG 39 フィルター) を選択し, 測定前の加熱処理 (プレヒート) 条件はプレヒートプラトーテストをした結果 160°C で 60 秒 (下岡・長友:2001), 測定温度は 60°C で 100 秒間行った。

3.3.2 年間線量測定

長友 (1991) および長友 (1999) の方法を用いて各試料の年間線量を求めた。以下, 簡潔に手順を示す。

乾燥させた試料を 75 μm 程度に粉碎し, アルミリング (外径 50 mm, 厚さ 1 mm) を用いてプレス成形したものを 2 枚作成した。この 2 枚の間に, 厚さ 3.5 mg/cm^2 のポリエチレンシートを介して 350°C で 15 分間加熱処理をした TL 線量計素子 (パナソニック社製 $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$) を薄く一層になるようにして挟み込み, 厚さ 150 mm の鉛製遮蔽容器内に 14~21 日間置き, 試料からの年間 β 線量を評価した。

年間 γ 線量と年間宇宙線量は, 350°C で 15 分間加熱処理をした TL 線量計カプセル (パナソニック社製 UD-110 S) を厚さ 1 mm, 長さ 500 mm の銅パイプの先端に 5 個封入し, 試料採取を行った地層に 77~83 日間埋め込んだ後に取り出して評価した。

年間 α 線量は, 無酸素銅と低バックグランド鉛で遮蔽した高純度 Ge 検出器による γ 線スペクトル法を用いて試料中の U, Th, ^{40}K の濃度を求め, Adamiec and

表1 各試料のルミネッセンス年代。括弧付の値は蓄積線量が過大評価されているため、年代は見かけ上古く評価されている。

Table 1 The results of Luminescence dating. The paleodose and TL age for the 10th layer of Yamada-Uenodai site are overestimated.

テフラ/ 遺跡・露頭	等価線量 (Gy)	低線量域補 正值 (Gy)	蓄積線量 (Gy)	年間 α 線量 (mGy/a)	年間 β 線量 (mGy/a)	年間 γ 線量+ 年間宇宙線 量 (mGy/a)	年間線量 (mGy/a)	ルミネッセ ンス年代 (ka)	測定法
Za-Kw									
山田上ノ台遺跡	27.2±4.7	11.5±8.8	38.7±10.0	0.19±0.011	0.44±0.03	0.69±0.03	1.32±0.04	29±8	IRSL
	(50.4±6.3)	(19.2±3.7)	(69.6±7.3)					(53±6)	
荒羽賀露頭	53.1±7.5	-22.2±16.0	30.9±17.6	0.24±0.03	0.41±0.02	0.47±0.02	1.12±0.04	28±16	TL
Ac-Md									
安達露頭	52.9±6.4	19.8±3.9	72.6±7.5	-	0.27±0.013	0.38±0.02	0.65±0.02	110±12	TL

Aitken (1998) が提供する換算式にあてはめて評価した。なお、 α 線のルミネッセンス効率は10% (Adamiec and Aitken : 1998) とした。

3.4 解析と結果

3.4.1 蓄積線量評価

Ac-MdのTL測定結果を図3に示す。ナチュラル試料のTL強度に対する付加照射試料のTL強度の比を温度に対してとり、TL強度が安定している領域(プラトー領域)を求めた。その結果プラトー領域は、山田上ノ台第10層Za-Kw試料で285~305°C、荒羽賀Za-Kw試料で335~350°C、安達Ac-Md試料は295~325°C(図3(b))であった。この温度領域のTL強度を積算して生長曲線(例えば、安達Ac-Md試料は図3(c))を作成して等価線量を求めた。また、人為的に信号をリセットした試料に50~150Gyの付加照射をした後TL測定し(図3(d))、等価線量と同じプラトー領域のTL強度を積算して生長曲線を作成(図3(e))した。そして、直線部分を外挿して横軸との交点(図3(e))から低線量域補正值を求めた。そして、等価線量と低線量域補正值の和として蓄積線量を決定した。

山田上ノ台第10層Za-Kw試料のIRSL測定結果を図4に示す。IRSL減衰曲線(図4(a))の0~10秒間のIRSL強度を積算してIRSL強度とし、生長曲線を作成(図4(b))して等価線量を求めた。また既述のように、等価線量と低線量域補正值の和として蓄積線量を決定した。

3.4.2 年間線量評価

試料の粒径と放射線との関係から、約10~50 μ mと約4~10 μ mの鉱物を用いた場合は α 線、 β 線、 γ 線および宇宙線の合計が年間線量となる。また、75~150 μ mの鉱物を用いた場合は β 線、 γ 線および宇宙線の合計が年間線量となる。なお、約10~50 μ mの鉱物を用いるときは α 線の透過能を考慮した粒径補正が必要であるが、長友ら(2004)が行った粒径補正の結果からみるとその補正值は極めて小さく、約4~10 μ mの鉱物を用いた場合と同じ年間線量とみて差し支えない。

3.4.3 ルミネッセンス年代評価

ルミネッセンス年代は、蓄積線量を年間線量で除することで決定した。Za-KwおよびAc-Mdのルミネッセンス年代測定結果を蓄積線量、年間線量、ルミネッセンス年代の順に表1に示す。

3.5 考察

3.5.1 Za-Kwのルミネッセンス年代について

TL測定による山田上ノ台第10層Za-Kw試料の蓄積線量は69.6±7.3Gyとなり、IRSL測定による蓄積線量38.7±10.0Gyより誤差の範囲を超えて大きかった。年代として見積もると前者は53±6ka(kaは千年前)、後者は29±8kaとなった。一方、荒羽賀Za-Kw試料のTL年代は28±16kaであり、山田上ノ台第10層Za-Kw試料のIRSL年代と一致する。また、山田上ノ台第10層Za-Kw試料のIRSL年代や荒羽賀Za-Kw試料のTL年代は、下層にあたる山田上ノ台遺跡第15層の

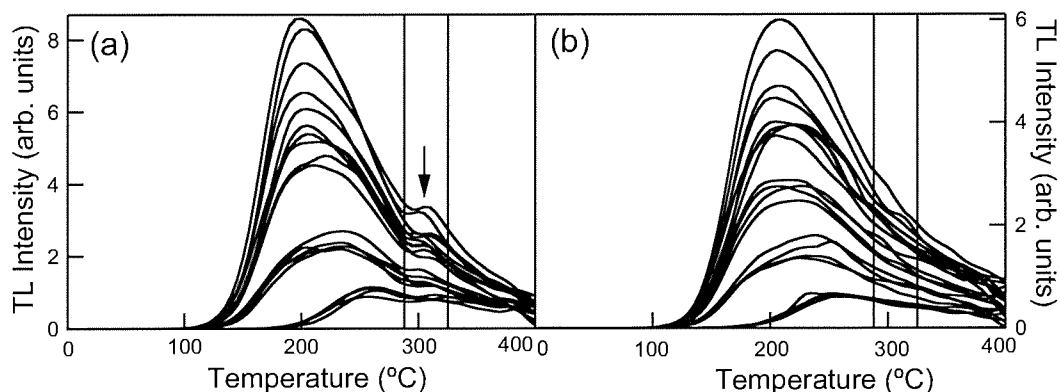


図5 山田上ノ台第10層 Za-Kw 試料(左)と荒羽賀 Za-Kw 試料(右)の TL グローカーブ形状の比較. 山田上ノ台遺跡第10層試料では, 300°C付近に「肩」状のピーク(矢印の部分)が見られる.

Fig. 5 The comparison of TL glow curve between the 10 th layer of Yamada-Uenodai site and the sample collected at Arahaga outcrop. The TL glow curve of the 10 th layer of Yamada-Uenodai site has a "peak" on nearby 300°C.

IRSL 年代 35.2 ± 5.0 ka (長友ら: 2003 b) とともに調和的であることから, 山田上ノ台第10層 Za-Kw 試料の TL 年代が誤差の範囲を超えて古く, 過大に評価された年代と考えられる。山田上ノ台第10層 Za-Kw 試料と荒羽賀 Za-Kw 試料の TL グローカーブ形状を比較すると, 両地点の TL グローカーブ形状が 300°C 付近で異なる(図5)。山田上ノ台第10層 Za-Kw 試料では, 300°C 付近の TL グローカーブに「肩」ができていますが, 荒羽賀 Za-Kw 試料には存在していない。これは, 荒羽賀 Za-Kw 試料が純粋な一次堆積のスコリアであるとすると, 山田上ノ台第10層 Za-Kw 試料の 300°C 付近の TL グローカーブの「肩」は, スコリア以外の混入鉱物由来のルミネセンスによるものと示唆される。山田上ノ台第10層 Za-Kw 試料の TL 年代が見かけ上古い年代を示したのは, 山田上ノ台遺跡において Za-Kw が堆積後に熱でゼロリセットされていない微粒の鉱物がブロック内に混入したことによると考えられる。また, 荒羽賀 Za-Kw 試料の TL 年代と山田上ノ台第10層 Za-Kw 試料の IRSL 年代が整合性のある年代値を示したことにより, ブロック状に堆積している山田上ノ台第10層 Za-Kw 試料(図2)には, 熱ではゼロリセットが不完全であるが光ではゼロリセットしている微粒の鉱物がスコリアのブロック内に堆積直後に混入したと考えられる。よって, 山田上ノ台第10層 Za-Kw 試料の TL 年代は見かけ上 IRSL 年代より古くなり, その IRSL 年代は給源に近い荒羽賀 Za-Kw 試料の TL 年代と一致したと考えられる。

Za-Kw に関連した ^{14}C 年代測定は, 宮城県遠刈田付近の露頭において川崎スコリア下位にあたる亜角~亜円礫層上部の木片に $31,500 + 2,610 / -1,970$ 年 BP (TH-365), 宮城県仙台市街地の有機質黒色粘土層基底(段丘レキ層直上部)の木片に $26,240 + 1,360 / -1,160$ 年 BP (TH-309) の ^{14}C 年代(板垣ら: 1981) が与えられている。これらのデータは未校正であるが, この結果に基づいて Za-Kw の数値年代は約 3 万年前と推定されてきた。しかし, 報告されている限りにおいては ^{14}C 測定がされた仙台市街地で Za-Kw は明瞭な層を成しては検出されおらず, Za-Kw の上限年代がおさえられたに過ぎない。よって, 荒羽賀 Za-Kw 試料の TL 年代は, Za-Kw の直接的な数値年代として初出であり意義があると考えられる。

宮城県仙台市におけるテフラ層序では, 青葉山露頭において検出された Za-Kw は AT の火山ガラスが検出された層と鳴子柳沢テフラ (Nr-Y) 層の間に挟まれた状態で存在する(古環境研究所: 2001)。AT の年代は 26~30 ka (町田・新井: 2003) とされるがまだ確定的ではなく, AT の TL 年代は宮城県川南町後牟田遺跡から 26.6 ± 5.1 ka (長友・森: 2002) や宮城県東畝原第一遺跡から採取した試料から 26.3 ± 3.8 ka (長友ら: 2005 b) と得られ, 本論ではこれらの結果より AT の数値年代を約 27 ka と見積もる。Nr-Y は, 宮城県座散乱木露頭で採取した試料から, 67.8 ± 12.0 ka (長友・下岡: 2003 a), 66 ± 12 ka (下岡ら: 2009 a) という TL 年代が得られており, 本論では約 67 ka と見積もる。テフラ

表2 熱ルミネッセンス (TL) 法, 電子スピン共鳴 (ESR) 法, フィッション・トラック (FT) 法でこれまでに得られている Ac-Md の数値年代.

Table 2 The ages of Ac-Md estimated by TL, ESR and FT datings.

蓄積線量 (Gy)	年間線量 (mGy/a)	数値年代 (ka)	測定法	文献
106	1.65	64.2	TL	市川(1986)
112	1.75	64	TL	
119	1.65	68	ESR (Al-center)	佐藤(1986)
137	1.65	83	ESR (Ti-center)	
98	1.75	56	ESR (Al-center)	
94	1.75	54	ESR (Ti-center)	
96.6	1.9	50	TL	Hashimoto <i>et al.</i> (1997)
94.0	1.9	49	TL	
65.6	1.9	34	TL	
65.0	1.9	34	TL	
—	—	0.08±0.02 (Ma)	FT	興水(1986)

層序からみて山田上ノ台第 10 層 Za-Kw 試料の IRSL 年代や荒羽賀 Za-Kw 試料の TL 年代は, Za-Kw をはさむ AT と Nr-Y の数値年代と調和的である。

3.5.2 Ac-Md のルミネッセンス年代について

安達 Ac-Md 試料の TL 年代は, 110±12 ka であった。Ac-Md はその給源である宮城県川崎町安達露頭において, Ac-Md の上位に褐色風化テフラ層を介して Aso-4 が存在すると報告され (八木・早田:1989), Aso-4 の数値年代 85~90 ka (町田・新井:2003) などから Ac-Md の年代は 90~100 ka と推定されている (町田・新井:2003)。今回得られた安達 Ac-Md 試料の TL 年代はテフラ層序とは矛盾しない結果であるが, 町田・新井 (2003) が推定した 90~100 ka よりも若干古い。しかし, 豊島ら (2001) は Ac-Md が堆積する台ノ原段丘の形成時期をステージ 5b から 5e の間であるとして今回の TL 年代を支持するが, 幡谷ら (2005) による川崎盆地付近における河成段丘面の認定とその記載では Ac-Md がステージ 6 よりも古くなる可能性を指摘しているなど Ac-Md の年代観は定まっていない。これらに対して, これまでに得られている Ac-Md の数値年代を表 2 にまとめた。TL 法では 64 ka (市川:1986) と 34~50 ka

(Hashimoto *et al.*:1997), 電子スピン共鳴 (ESR) 法では Al センターで 56~68 ka, Ti センターで 54~83 ka (佐藤:1986), フィッション・トラック (FT) 法では 0.08±0.02 Ma (Ma は百万年前) (興水:1986) であった。これらの数値年代は, 今回の TL 年代やテフラ層序, 河川段丘面の認定などと比べて若い。これまでに得られている TL 法と ESR 法の年代測定結果は, それぞれの測定手順など詳細が不明な部分があるので, 年代をテフラ層序と対比して若い年代であった原因を明らかにすることは難しいが, 今回の結果と単純に比較するとこれまでのデータでは年間線量を過大評価していることが年代値を若く見積もらせた要因と推定できる。なお, テフラ層序から Ac-Md の下限年代は推定されているが, 上限年代については今のところ有効な議論はなされていない。Ac-Md の年代についてより議論を深めるためには, 今後も Ac-Md の年代測定データを蓄積していく必要がある。

4. まとめと課題

宮城県南部の旧石器遺跡で検出される Za-Kw および Ac-Md のルミネッセンス年代測定を行い, これらテフラの数値年代について検討した。その結果, テフラ層序

と整合性のある数値年代を求めることができ、宮城県南部の旧石器遺跡編年の枠組みを考える上で一つの指標になることが期待される。

(1) Za-Kw では、旧石器遺跡で検出された試料と給源近くで採取した試料を用いて比較検討を行い、給源近くの試料に対して薄層であった遺跡内の試料には、TL測定の結果から堆積後に混入したと考えられる鉱物の存在が指摘できた。遺跡に挟在する薄層テフラは堆積後に攪乱を受けていることが考えられることから、TL法のみではなく、OSL法を併用して年代を求めることが重要である。また、給源に近い一次堆積テフラを採取してTL測定を行い、テフラ年代データを蓄積しておくことも重要である。

(2) Ac-Md では、従来の数値年代がテフラ層序と矛盾することが明らかであるにもかかわらず年代測定に進展がなかった。これは、地考古学を念頭に旧石器遺跡研究を進める上において重大な問題であり、テフラ層序と矛盾する数値年代を持ったテフラの年代を再確認することが必要である。

今後とも、地考古学を念頭に旧石器遺跡研究に必要な鍵層となるテフラの年代測定データを蓄積することは、

遺跡構造論による遺跡形成の解明や詳細な旧石器遺跡の地域編年構築に寄与するものと考えられる。

謝 辞

本稿は、日本文化財科学会第23回大会で発表した内容(下岡ら:2006)に加筆修正したものである。

試料採取では、吉岡恭平氏(仙台市教育委員会)、八木浩司氏(山形大学)、早田 勉氏(火山灰考古学研究所)、佐川正敏氏(東北学院大学)、大場正善氏(山形県埋蔵文化財センター)、島田愛子氏(日本電子株式会社)のご協力を得た。ルミネッセンス測定では、青木智史氏(奈良教育大学)、小畑直也氏(倉吉博物館)、西村誠治氏(ナカシャクリエイテブ株式会社)、橋本哲夫氏(新潟大学)、八幡 崇氏(信越化学工業株式会社)からご教示とご助言をいただいた。論文作成では、竹村恵二氏(京都大学)、山本順司氏(京都大学)より有益なコメントをいただいた。以上の方々に、深謝いたします。

本研究は、科学研究費補助金(特別研究員奨励費)「ルミネッセンス法と電子スピン共鳴法を用いた年代測定による旧石器遺跡形成史の解明」(平成18年度:課題番号18・2078)の一部を使用した。

引用文献

- 出穂雅実・赤井文人 2005「北海道の旧石器編年—遺跡形成過程論とジオアーケオロジーの適用—」『旧石器研究』第1号 pp.39-55 日本旧石器学会
- 板垣直俊・豊島正幸・寺戸恒夫 1981「仙台およびその周辺に分布する洪積世末期のスコリア層」『東北地理』33-1 pp.48-53
- 市川米太 1977「帝釈峡遺跡出土土器の熱ルミネッセンス年代測定」『考古学と自然科学』10 pp.1-9 日本文化財科学会
- 市川米太 1986「青葉山B地点のTL年代」『東北大学埋蔵文化財調査年報』2 pp.127-128 東北大学埋蔵文化財調査研究センター
- 稲田孝司 2001『遊動する旧石器人』岩波書店
- 大場正善 2004「宮城県柴田郡村田町新川流域遺跡群について—東北地方南部太平洋側にある後期旧石器時代の玉璽原産地遺跡からの予察—」『宮城考古学』第6号 pp.1-34 宮城県考古学会
- 古環境研究所 2001「青葉山遺跡E地点の火山灰分析」『東北大学埋蔵文化財調査年報』14 pp.55-59 東北大学埋蔵文化財調査研究センター
- 古環境研究所 2003「山田上ノ台遺跡におけるテフラ分析」『山田上ノ台遺跡第3次発掘調査報告書』仙台市文化財調査報告書第265集 pp.58-64 仙台市教育委員会

- 輿水達司 1986「愛島軽石層のフィッシュ・トラック年代」『東北大学埋蔵文化財調査年報』2 pp.132-133 東北大学埋蔵文化財調査研究センター
- 佐久間光平 2004「宮城県の旧石器遺跡の現状」『宮城考古学』第6号 pp.35-50 宮城県考古学会
- 佐藤高晴 1986「青葉山B地点の火山灰のESR年代」『東北大学埋蔵文化財調査年報』2 pp.129-131 東北大学埋蔵文化財調査研究センター
- 佐藤宏之 2009「地考古学が日本考古学に果たす役割」『第四紀研究』48 pp.77-84 日本第四紀学会
- 下岡順直・長友恒人 2001「石英・長石を試料とした光励起ルミネッセンス年代測定法の基礎研究」『Radioisotopes』50-9 pp.381-389 日本アイソトープ協会
- 下岡順直・長友恒人・西村誠治・小畑直也 2006「旧石器遺跡形成史解明のためのルミネッセンス法による鍵層テフラ年代測定の重要性」『日本文化財科学会第23回大会研究発表要旨集』pp.76-77 日本文化財科学会
- 下岡順直・長友恒人・小畑直也 2008「ルミネッセンス法を用いた原田遺跡堆積物の年代測定」『原田遺跡(4), 尾原ダム建設に伴う埋蔵文化財発掘調査報告書』12, pp.155-161 島根県教育庁埋蔵文化財調査センター
- 下岡順直・長友恒人・鶴 明信 2009 a「テフラのTL年代と既報年代との比較」『ESR 応用計測』25 pp.56 ESR 応用計測研究会
- 下岡順直・長友恒人・小畑直也 2009 b「熱ルミネッセンス法による御岳第一テフラ(On-Pm1)噴出年代の推定」『第四紀研究』48 pp.295-300 日本第四紀学会
- 塚本すみ子・岩田修二 2005「ルミネッセンス年代測定法の最近の進歩—適用年代の拡大と石英のOSL成分について—」『地質学雑誌』111 pp.643-653 日本地質学会
- 東北学院大学佐川ゼミナール 2004「賀籠沢遺跡 2004 年度発掘調査の成果」『第18回東北日本の旧石器文化を語る会』pp.1-10 東北日本の旧石器文化を語る会
- 東北学院大学佐川ゼミナール 2005「宮城県賀籠沢遺跡 2005 年度発掘調査の成果」『第19回東北日本の旧石器文化を語る会』pp.57-70 東北日本の旧石器文化を語る会
- 豊島正幸・早田 勉・北村 繁・新井房夫 2001「仙台地域における台ノ原段丘面の形成時期」『第四紀研究』40-1 pp.53-59 日本第四紀学会
- 長友恒人 1991「TL および ESR 年代測定のための年間線量率の測定」『月刊地球』13-4 pp.249-253 海洋出版株式会社
- 長友恒人 1999「第3章 ルミネッセンス法」『考古学のための年代測定学入門(長友恒人編)』pp.59-76 古今書院
- 長友恒人・下岡順直・波多野智 2001「低温 OSL/TL 測定装置の開発と年代測定への応用」『日本文化財科学会第18回大会研究発表要旨集』pp.8-9 日本文化財科学会
- 長友恒人・森丈幸 2002「ルミネッセンス法によるテフラの年代測定」『後牟田遺跡』pp.304-308 後牟田遺跡調査団・川南町教育委員会
- 長友恒人・下岡順直 2003 a「関連地層のルミネッセンス年代測定と数値年代」『前・中期旧石器問題の検証』pp.369-373 日本考古学協会前・中期旧石器問題調査研究特別委員会
- 長友恒人・下岡順直・株式会社古環境研究所 2003 b「4 ルミネッセンス法による山田上ノ台遺跡の年代測定」『山田上ノ台遺跡第3次発掘調査報告書』pp.65-69 仙台市教育委員会
- 長友恒人・下岡順直・小林由弥 2004「ルミネッセンス年代測定における年間 α 線量の粒径依存性の検討

- と準微粒子法への適用」『奈良教育大学紀要』53-2 pp.11-16 奈良教育大学
- 長友恒人・西村誠治・下岡順直 2005 a「給源テフラの年代を考慮した金取遺跡遺物出土層年代推定」『日本文化財科学会第22回大会研究発表要旨集』pp.136-137 日本文化財科学会
- 長友恒人・下岡順直・西村誠治 2005 b「同一テフラの TL 年代と OSL 年代の比較」『奈良教育大学紀要』54-2 pp.1-9 奈良教育大学
- 長友恒人・小畑直也・下岡順直 2007「石子原遺跡における地層のルミネッセンス年代」『長野県埋蔵文化財センター発掘調査報告書』80 pp.28-30 長野県埋蔵文化財センター
- 野口 淳 2005「旧石器時代遺跡研究の枠組み—いわゆる「遺跡構造論」の解体と再構築—」『旧石器研究』第1号 pp.17-37 日本旧石器学会
- 橋本哲夫 2007「熱および光励起ルミネッセンス観測による焼成考古遺物の蓄積放射線線量評価と石英からの赤色熱ルミネッセンス年代測定的重要性」『考古学と自然科学』55 pp.31-44 日本文化財科学会
- 幡谷竜太・柳田 誠・佐藤 賢・佐々木俊法 2005「宮城県川崎盆地における海洋酸素同位体ステージ6河成段丘の認定とその意義」『第四紀研究』44-3 pp.155-167 日本第四紀学会
- 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
- 町田 洋 2005「日本旧石器時代の編年：南関東立川ローム層の再検討」『旧石器研究』第1号 pp.7-16 日本旧石器学会
- 八木浩司・早田 勉 1989「宮城県中部および北部に分布する後期更新世広域テフラとその層位」『地学雑誌』98-7 pp.871-885 日本地質学会
- 吉岡恭平・荒井 格 2003『山田上ノ台遺跡第3次発掘調査報告書』仙台市文化財調査報告書第265集 仙台市教育委員会
- Aitken M.J. 1985 "Thermoluminescence Dating" Academic Press
- Adamiec, G. and Aitken, M.J.1998 "Dose-rate conversion factors : update" Ancient TL 16 pp.37-50
- Hashimoto, T., Sato, K., Katayama, H. and Okada, T. 1997 "Natural Radiation and Radiation-induced Luminescence" Proceedings of 1997 International symposium on environmental radiation pp.22-31
- Huntley, D.J., Godfrey-Smith, D. and Thewalt, M.L.W., 1985 "Optical dating of sediments" Nature 313 pp.105-107
- Izuho, M., Nakazawa, Y., Akai, F., Soda, T. and Oda, H. 2009 "Geoarchaeological Investigations at the Upper Paleolithic Site of Kamihoronai-Moi, Hokkaido, Japan" Geoarchaeology : An International Journal 24 pp.492-517

(2010年8月19日受付, 2011年1月30日受理)

Age Determination of Marker Tephra Relative to Paleolithic Sites Based on Luminescence Dating for Reading Natural Site Formation Process: A Case Study of Paleolithic Sites in Southern Miyagi

Yorinao SHITAOKA¹⁾ and Tsuneto NAGATOMO²⁾

¹⁾ Institute for Geothermal Sciences, Kyoto University, Noguchibaru, Beppu, Oita 874-0903 Japan

²⁾ Department of Education, Nara University of Education, Takabatake, Nara, Nara 630-8528 Japan

To determine the age of a Paleolithic site accurately, it is fundamental to compare the age with that of surrounding layers. Tephra is one of the most important markers to estimate the age of a Paleolithic site. It is effective to determine the age of tephra layer samples collected from both the Paleolithic site and the area close to the source vent of the tephra. The tephra sample near by the source vent, which is collected from a thick and less-altered layer, gives us the most probable age of the tephra.

As a case study, both Thermoluminescence (TL) and Optically Stimulated Luminescence (OSL) dating methods were applied for Zao-kawasaki scoria (Za-Kw) and Adachi-medeshima pumice (Ac-Md), which are important markers on Paleolithic sites in southern Miyagi. The OSL and TL ages of Za-Kw collected at Yamada-Uenodai Paleolithic site and Arahaga outcrop, which located just around the source vent of Za-Kw, are ca. 28-29 ka. The TL age of Ac-Md collected at Adachi outcrop, which is near by the source vent of Ac-Md, is 110 ± 12 ka. These luminescence ages are in good agreement with the tephra stratigraphy in this region. The ages of the marker tephras will constitute valuable contribution to the framework of the geochronology of the Paleolithic sites in southern Miyagi.

シンクロトロン放射光 X線トモグラフィー (SRX-ray μ CT) を用いた木質文化財の樹種識別

水野 寿弥子¹⁾・高瀬 克彦¹⁾・杉山 淳司¹⁾

●キーワード：樹種識別 (wood identification), 木質文化財 (wooden heritages), SPring-8 (SPring-8), シンクロトロン放射光 X線トモグラフィー (SRX-ray μ CT)

1. 諸言

SPring-8 は, APS, ESRF と並ぶ世界最高輝度を持つ大型放射光施設であり, 軟 X 線から硬 X 線までの広いエネルギー範囲で, 最高輝度の X 線を発生し, 原子配列・構造解析, 成分分析, イメージング, 新材料創製など, 基礎から応用研究まで様々な領域において活用されている。特に X 線を用いたイメージング技術では, 生体やポリマーのように X 線吸収が少ない物質をはじめとして, 有機・無機物の様々な微細構造解析に利用されている (Aglizzo and Cloetens 2004, Elmoutaouakkil et al. 2003)。現在, X 線 CT 装置は医療においてはごく一般的な測定装置になっている。患者がリング状の装置の中で横になり, X 線光源がその周りを回りながら色々な方向から透視像を撮影する。我々が木材の解剖学的特徴の観察に用いる X 線 μ CT は, 観察対象の大きさや分解能は異なるが, 医療用の装置と原理的には同じである。ただし光源ではなく試料が回転する。

X 線 CT を用いた物質の内部構造解明については Stock により詳細が纏められているが木材への適用も増加していることがうかがえ (Stock 2008), 木材解剖学でも様々な研究で活用されるようになってきている (Bulcke et al. 2009, Steppe et al. 2004, Trtik et al.

2007)。木材解剖学では, 従来から年輪等の木材内部観察 (Knapic et al. 2007, Macchioni et al. 2007) に汎用型 X 線 CT が使用されてきた。しかし汎用型 X 線 CT では, 樹種同定に必要とされる木材微細構造を調べるだけの空間および濃度分解能が不足しているというのが現状である。

近年ではより微細な組織構造を観察するため, シンクロトロン放射光 X 線トモグラフィー (SRX-ray μ CT) による研究が多く行われている。例えば木材内部の水分含有の解明 (Fromm et al. 2001) や, シンクロトロン顕微トモグラフィー: TOMCAT (TOMographic Microscopy and Coherent rAdiologyexperimentTs) beamline を用いた木材組織の観察 (Mannes et al. 2010) などがあり近年では, 考古学の分野においても建造物に使用されたレッチェ岩 (Bugani et al. 2007) や水漬け木製遺物における保存処理材の評価などにも μ CT が活用されている (Bugani et al. 2009)。

従来, 木材の樹種識別では木材の 3 断面 (木口面・板目面・柁目面) の観察が必要で, 片刃・両刃剃刀などを用いて薄片を切り出し, プレパラートにして光学顕微鏡で観察する作業が必要であった。しかし切片作成や, 樹種同定のための解剖学的特徴 (IAWA Committee 1989, IAWA Committee 2004, 伊東・藤井ほか 1998, 伊東・藤井ほか 2006) の観察には経験と熟練が必要とされる。

¹⁾ 京都大学生存圏研究所 バイオマス形態情報分野 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

一般的に光学顕微鏡を用いた樹種識別においては、解剖学的特徴により、木材の属レベル（時には種まで）の識別が可能である。

近年では光学顕微鏡以外にも SEM（Scanning Electron Microscopy）などの技術を用いた樹種識別も多々行われている。しかし木質文化財の依頼鑑定品などでは、極端に小さい・表面が押しつぶされている・腐朽が進んでいる・脆弱・木屎など様々なサンプルがあり、このような機器を駆使しても識別が困難なケースが多々ある。

SRX-ray μ CT を用いたイメージング技術は、サンプル表面の形状や劣化の度合いによらず撮影することができ、さらに内部構造の画像が一連の電子データで得られるために、コンピューター上で任意の断面像を観察することができるという利点がある。また試験に供したサンプルはその後、化学成分分析などの試験にも供することが可能である。

本研究はこのような、従来の樹種識別法では識別が困難なサンプルに、SRX-ray μ CT 法を適用して樹種識別を試みたものである。

2. 試料と方法

2.1 試料

樹種識別に供したサンプルの詳細は以下 1～3 に記したとおりである。

2.1.1 国宝・木造世親菩薩立像

国宝・木造世親菩薩立像は奈良県興福寺北円堂に安置されている。北円堂は 721 年（養老 5 年）元明・元正天

皇が藤原不比等供養のために創建した八角の円堂であり、現在のものは鎌倉初期の再建とされている。国宝・木造世親菩薩立像は、運慶一門による鎌倉期を代表する肖像彫刻であり、日本彫刻史において最高傑作としても知られる。国宝・木造世親菩薩立像は高さ約 192 cm の寄せ木造りである。目視による識別では木目などからカツラかホオノキとみられていた。木彫像の修理の際には経験的にヒノキを使用することが多いが、元の部材と同じ樹種を使用することが近年推奨されており、樹種識別を行うこととした。今回の試験では、修理の際に後面（図 1 b）から偶然はがれた長さ 2 mm、幅 0.3 mm の木片（図 1 a）を実験に使用した。

2.1.2 脱活乾漆像 盧舎那仏の螺髪固定用に用いられた木屎漆

脱活乾漆像とは、像の表面に木屎漆（麦漆に木粉を混ぜた塑形材）を塗り微妙な整形を施した後、黒色の土漆（焼土の粉を漆と練ったもの）で地固めした上に彩色などを施した像である。本研究では唐招提寺金堂盧舎那仏について、修理に際して不可避免的に生じた螺髪固定用に用いられた木屎漆を用いて、内部に混入している 5 mm 程度の大きさの木粉を用いた。

2.1.3 熊本県八代市 木製古面

近年、熊本県八代市で、木製古面が発見された。この木製古面は、16 世紀末小西行長統治期の八代で、日本の朝鮮出兵に際して朝鮮半島へ動員されたある農民が持ち帰ってきたものであると伝えられている（「肥後国誌」1984）。全体的に虫による劣化が激しく脆いほか、特に右顎下部に破損部位があり、そこから劣化して落下した

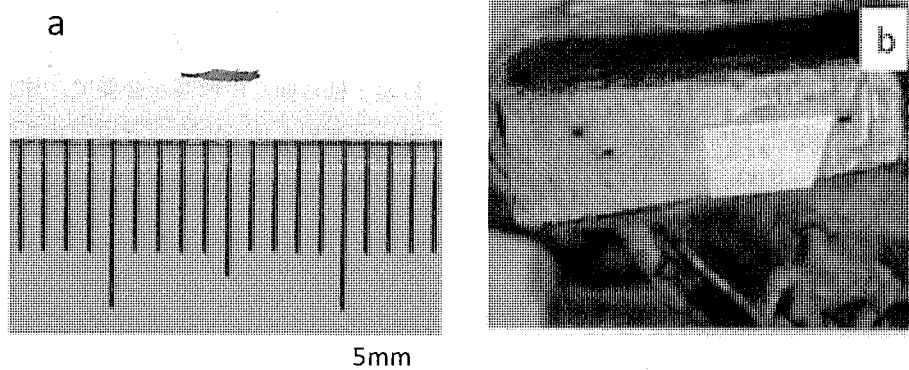


図 1 世親菩薩立像の修理の際に偶然はがれた木片 (a) と採取部位 (b)
Fig. 1 Flaked sample of Seshin-bosatsu statue (a) and sampling spot (b).

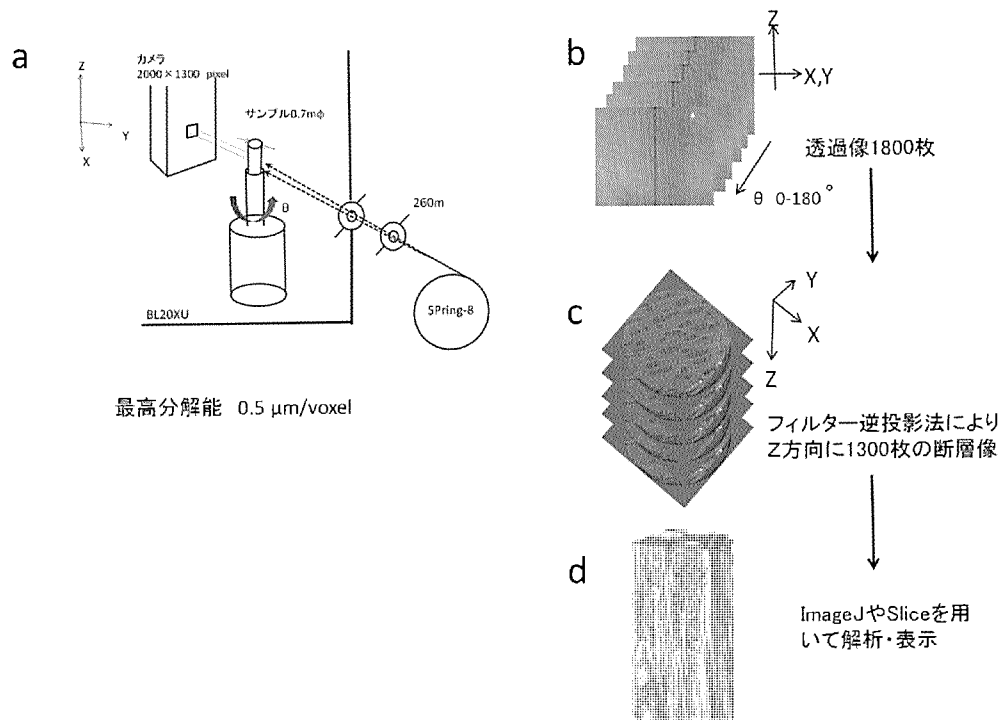


図2 放射光を用いた実験方法の流れ。サンプルホルダーにサンプルを固定し、サンプル台ごと0.1度ずつ回転させながら透過像を撮影した。透過像は、等倍率で2000×1300 pixelの高精細カメラを用いて0.1度回転角刻みで1800枚撮影する(a)。こうして得られた透過像1800枚(b)にフィルター逆投影法を適用してZ軸方向に1300枚の断層像を再生した(c)。これらの断層像の3Dレンダリング像が(d)である。

Fig. 2 A schematic flow of making 3D images using synchrotron radiation. Sample is fixed on the sample holder and total of 1800 transmitted images are recorded on a high resolution camera (2000 × 1300 pixels) after rotation with a step of 0.1 degree (a). After having performed the revision using a transmitted image, dislocation image (1300 images along Z direction) are reproduced by back filtered projection methods (c). (d) is the 3D rendering image.

とみられる1×1×7 mm (R×T×L)の針状剥落片を供した。

2.2 方法

我々は、光学顕微鏡で培われた樹種識別の知識を基礎とし、切片を切ることなく非破壊的に木材組織を観察することにより、樹種を識別することを目標としてきた。そのためにはマイクロメートルオーダーの分解能が不可欠であるが、市販のX線CTではそれに十分な分解能が無い。一方、大型放射光施設(SPring-8)に設置されたトモグラフィーのセッティングBL20XUでは、極めて平行に近いX線ビームが利用可能なため0.5μmの分解能が得られる。0.5μmの分解能があれば、木材の解剖学的観察に必要な組織の特徴を観察することが理論的に可能である。そこで文化財木製品の識別に放射光CT技術を導入することとなった(課題番号: 2007B1544, 2008B1563, 2009B1093ならびに2009B1981)。

図2は、その流れについての詳細である。図2aに示すとおり、サンプルホルダーに直径0.7mm、長さ0.5mm程度のサンプルを固定し、サンプル台ごと180度回転させながら透過像を撮影した。透過像は、等倍率で2000×1300 pixel (0.5μm/pixel)の高精細カメラを用いて0.1度回転角刻みで1800枚撮影した。こうして得られた1800枚の透過像(図2b)から断層像を得るにはかなり膨大な演算が必要で、これを再構成という。投影切断面定理によれば、ある角度の投影像をフーリエ変換すると、対応する角度のフーリエ空間での動径プロフィールを与える。つまり角度を変えて投影像を得れば、フーリエ空間を隙間なく埋めることができる。このフーリエ空間を逆フーリエ変換すれば、被写体の断層像が得られるが、これらの演算をまとめたものが、フィルター補正逆投影(back filtered projection)という法である。市販の装置ではソフトに組み込まれた手順であるが、我々の場合はBL開発のソフトやSlice(Nakano et al. 2006)といったソフトが必要である。SPring-8の場合

は、分解能がよいため画像サイズが膨大で再生画像のデータが8GBにもなるため、計算機やストレージにも一工夫必要である。このようにして、透過像より必要な補正を行った後、back filtered projection 法により断層像(Z方向1300枚)(図2c)を再生した。像の変換や再生はBL20XUで開発されたコマンドラインプログラムを用いた。こうして構築した3Dレンダリング像が図2dであり、解剖学的特徴の観察のための任意の断面観察などにはSliceやImageJを用いた。

3. 結果

3.1 国宝・木造世親菩薩立像剥離片の樹種識別結果

木彫像についての樹種識別調査は古くより行われており、小原二郎氏は日本国内の600を超える木彫像の同定を行っている(小原1964)。これによると、飛鳥時代にクスノキを多用していたものが奈良時代にヒノキへと変遷していくことが示されている。近年では、金子らにより、さらに詳細な樹種識別調査が行われている(金子・岩佐ほか1998, 2003, 2010)。従来、木彫像の修理現場においては修理の際に用いる修理材は凡そヒノキを使用するという慣例がある。しかしながらヒノキ以外の樹種を用いて彫られた像も多々あることから正確な樹種の識別が重要と考えられている。

修理の際に偶然はがれた長さ2mm、幅0.3mmの木片は目視でも表面が押しつぶされた状態であり脆弱であることが確認できた。極小サンプルについては、SEMを用いて表面の組織を観察する手法もあるが、今回の木片は表面が圧縮された状態でありSEMによる表面観察による解剖学的特徴の観察が不可能であったため本試験に供した。図3は、シンクロトロン μ CTを用いて撮影した世親菩薩立像剥離片の1800枚の縦断面像からSliceを用いて構築した横断面像の一枚である。点線で示した部分は図4aの3Dレンダリング部位に相当する。サンプルが様々な方向から圧縮されており内部が大変劣化して脆くなっている様子が観察できた。

事前に世親菩薩本体のルーペ観察により、散孔材であることが確認されており、樹種の判別には、さらに道管内の穿孔板の形状を観る必要があった。穿孔板の形状が鮮明に見えるように3D像を構築したものが図4aである。その結果、柾目面、および板目面からの解剖学的な情報を得ることができ、道管穿孔は階段穿孔を示すことが判明した(図4b)。また放射組織は異性で1-2列、細胞高は1-15細胞程度であり(図4c)、このような組織学的特徴よりカツラ属であることが同定できた。このように、サンプル表面の状が大変悪い場合であっても、SRX-ray μ CTを用いることで、木材内部の情報を得

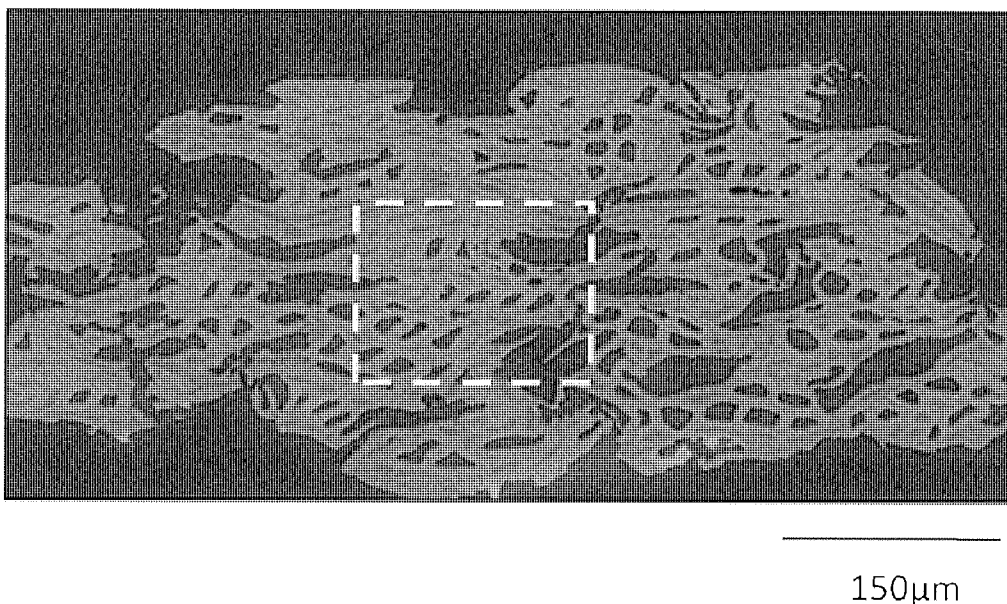


図3 シンクロトロン μ CTを用いて撮影した世親菩薩立像剥離片の1800枚の縦断面像からSliceを用いて横断面像(木口面)を構築したものの一枚。点線で示した部分は図4の3Dレンダリング部位に相当する。

Fig. 3 One of the cross sectional images reconstructed using "Slice" software. Area designated by dashed line corresponds to the area for 3D rendering in Fig.4.

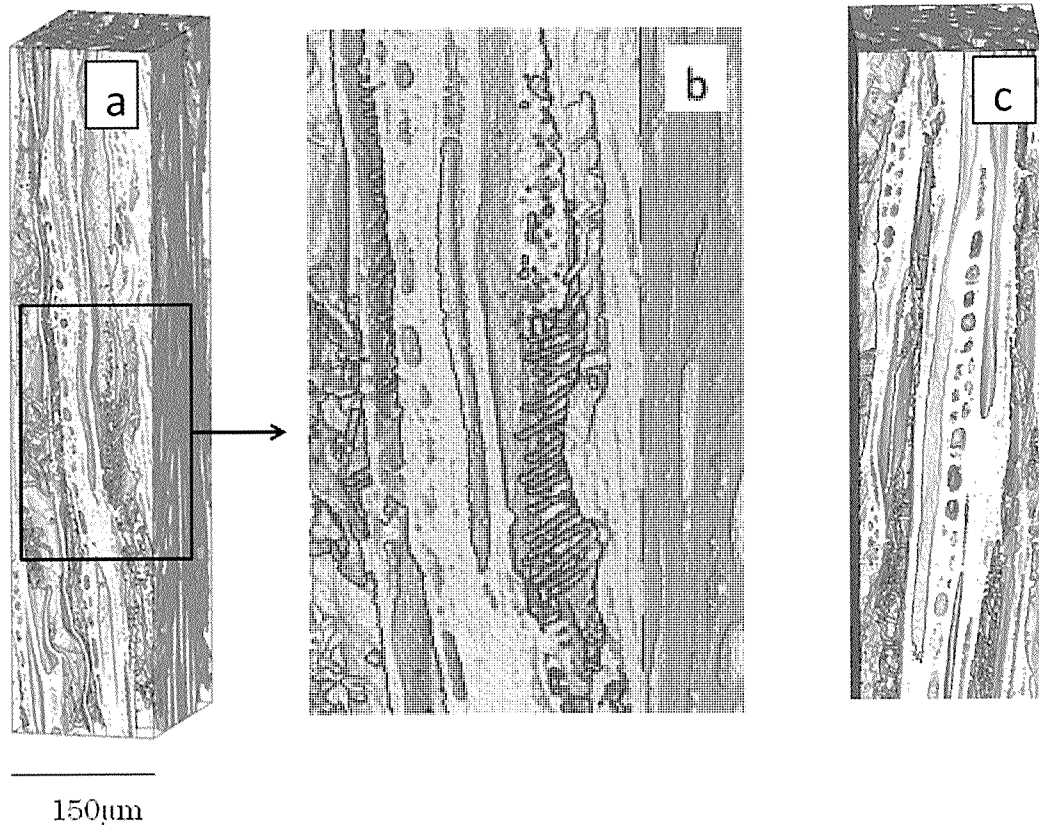


図4 世親菩薩立像剥離片について、SRX-ray μ CTを用いて構築した3D像(a, c)と(a)の拡大図 (b)。拡大図 (b) では階段穿孔が観察でき、20本程度のバーが認められる。(c) では放射組織が異性で1-2列、細胞高は1-15細胞程度である様子が確認できる。
 Fig. 4 A typical 3D rendering image reconstructed from synchrotron μ CT dataset. Full length views (a, c) and enlarged area (b). Scalariform perforation nearly 20 bars are observed in (b). Ray width was 1-2 cells, and heterogeneous ray consisted of procumbent cells with marginal square cells (c).

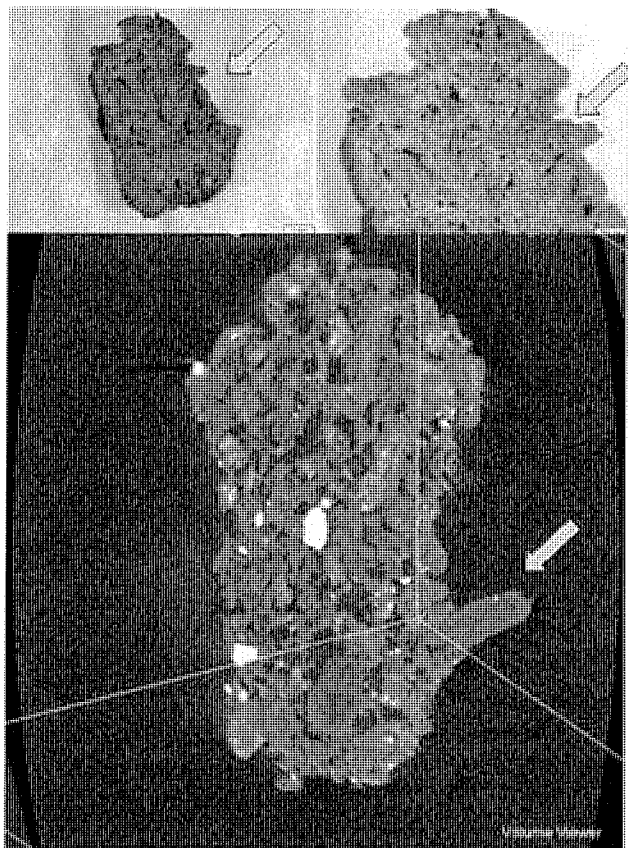
ることができた。特に国宝や重要文化財に指定されているような木質文化財においては、入手できる樹種識別用サンプルの状態が悪いことが多く、たとえば今回のサンプルのように圧縮されていることや、内部が劣化してスポンジ状になっているものも多い。そのような意味でこのようなサンプルの樹種識別にSRX-ray μ CTが有効であることが判明したことは有意義であった。

3.2 脱活乾漆像微細断片の樹種識別

脱活乾漆像である盧舎那仏の螺髪固定用に用いられた木屎漆の微細断片を試験に供して、木屎漆に用いられた植物素材の特定を目的とした。現在の仏像制作や修理に用いられる木屎漆には、主としてヒノキ材の挽き粉を練り合わせられている。ところが、天平時代の脱活乾漆像の豊かな曲線や厚みのある表現を実現するには粘りが不足しており、楡の樹皮やタブ粉を混ぜるなど様々な試みがなされているが、現段階では学術的な根拠は得られてい

ない。

従来、木屎漆の中に混入している木粉の樹種を識別することは、木粉が非常に細かいことや、漆成分と混合していることにより、困難であると考えられてきた。そこで、今回は汎用型X線CT装置を用いて、あらかじめ比較的分解能での観察を行い、乾漆中における木片や繊維の分布状態について詳しく調べた。図5は、採取部位の光学実体顕微鏡写真と汎用型X線CT装置による予備検討についてである。図5に示すように、木屎漆は5 mmほどの大きさの断片であり、矢印で示したように目視による観察からも木質系の組織が確認された。汎用型X線CT装置を用いて詳細に観察したところ、突起部に平行な繊維状構造が確認された。その他、明らかに木材であるとは判別できない部分からは、結晶に起因するコントラストが多数見られた。しかし、汎用型X線CT装置では樹種が同定できるだけの解像度は得られず、木質部の樹種同定を目的として、矢印部位を試験に



2mm

図5 木屎漆の光学実体顕微鏡写真と汎用型 X 線 CT 装置による予備検討による木材部位の選択。

Fig. 5 Optical micrograms of the *Kokuso-urushi*. Wooden parts were searched using multipurpose type X-ray CT equipment.

供した。

図6aは、Sliceを用いて作成した木口面の一例である。これは図5で示した突起構造におおむね垂直な方向の横断面に相当し、写真左上部に針葉樹の木口面が観察された。また非木材の間充物質（麦漆か）は木材の表面から1ないし2層内側まで浸透していること、さらに漆中に数多くの菱形結晶が存在することが確認された。

針葉樹材については、図6cのとおり放射組織は単列であり、図6bの木口、図6dの柾目に相当する断層像からもわかるように分野壁孔の特徴がヒノキ型であった。ヒノキ属の有用木のなかでも、分野壁孔がきわめて整然と2個ずつ観察されることなどから（図6d、e）、ヒノキ（*Chamaecyparis obtusa*）の可能性が高いことが示唆された。

従来、木屎漆に含まれる木材の樹種同定は、大変困難

であると考えられてきた。それは、木材が漆に覆われているために、木材部位についての徒手切片を作成することが困難であったこと、また、木屎漆に混入されている木材が粉末であり、大変小さいことが原因であった。今回、SRX-ray μ CTにより、木屎漆に含まれる木材の樹種識別が可能となったが、今後木屎漆に混入している木粉の樹種同定調査が発展する可能性があると思われる。

3.3 熊本県八代市 木製古面の樹種識別

近年、熊本県八代市で木製古面が発見された。この木製古面は、16世紀末小西行長統治期の八代で、日本の朝鮮出兵に際して朝鮮半島へ動員されたある農民が持ち帰ってきたものであると伝えられている（「肥後国誌」1984）。サイズは、25.7 cm (L) \times 21.0 cm (T) \times 14.0 cm (H) であり、特に虫による劣化が激しく、あごの辺りは一部破損していた。全体的に虫による劣化が激しく脆いほか、特に右顎下部に大きく破損している部位があり、古面を持ち上げる際に劣化した破片が落下することがあった。今回、古面の保存修理が行われることになり、それに際して不可避免的に生じた右顎下部からの大変脆弱な遊離片1 \times 1 \times 7 mm (R \times T \times L) の針状剥落片をサンプルとした。サンプルには、虫による穴が多く見られ大変脆かったため、徒手切片を作成することは困難であると判断し、SRX-ray μ CTを用いた試験に供した。

図7は、Sliceを用いて構築した木口面(a)、光学顕微鏡像と比較できるようにするため深さ方向の奥行きをだした板目面(b)、柾目面(c、d)、単穿孔(e)である。図8はSRX-ray μ CTを用いて構築した3D像である。古面の事前のルーベ観察により散孔材であることが判明しており、図7、図8により道管は単独ないし1~2個が放射状ないしは斜線状に複合していたことがわかった。道管は単穿孔を有し（図7e）、道管相互壁孔は交互状で形状は多角形を示していた（図7b）。道管放射組織間壁孔は大きいふるい状であった（図7d）。放射組織は単列異性で、高さは0.5 mm以下であった。ヤナギ科にはヤナギ属とポプラ属があるが、前者は放射組織が単列異性であり、後者は単列同性であるという特徴をもつことから区別できた。以上の組織学的特徴によ

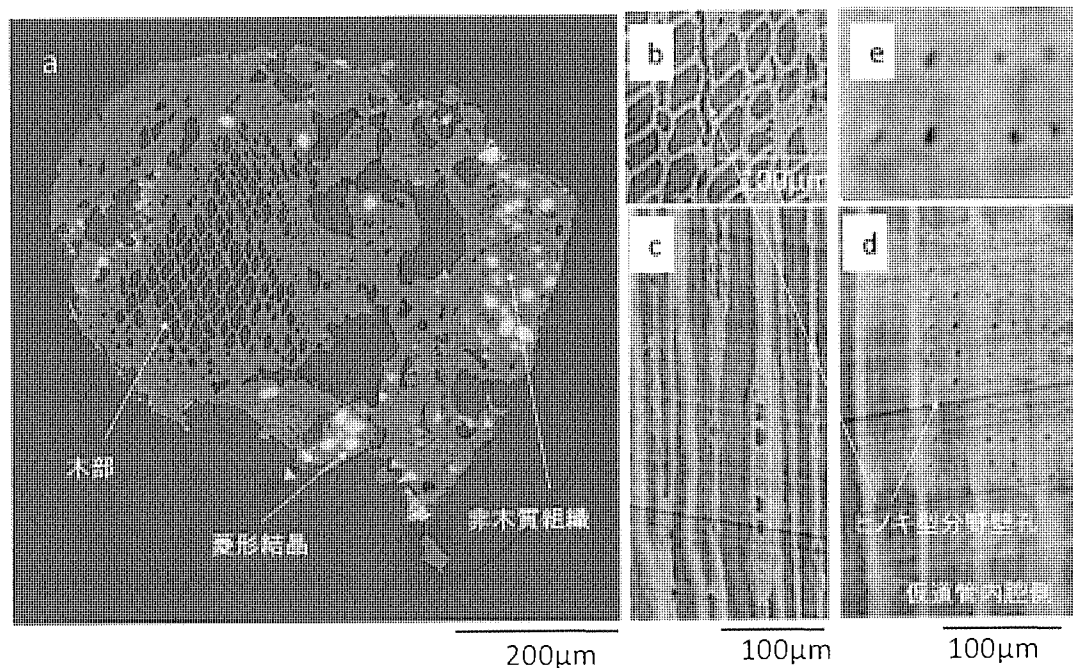


図6 SRX-ray μ CT を用いて撮影した 1800 枚の縦断面像から Slice を用いて横断面像 (木口面) を構築したもの (a) と画像より切り出した木口 (b), 板目 (c), 柁目 (d) に相当する断層像, およびヒノキ型分野壁孔の拡大図 (e)。

Fig. 6 Reconstructed images using 1800 images taken by using SRX-ray μ CT (a). In the cross section (a), wooden part and rhombic crystals were observed. And three images in the right were cross section (b), tangential section (c) and radial section (d) respectively. (e) is the magnified image of cross field pitting.

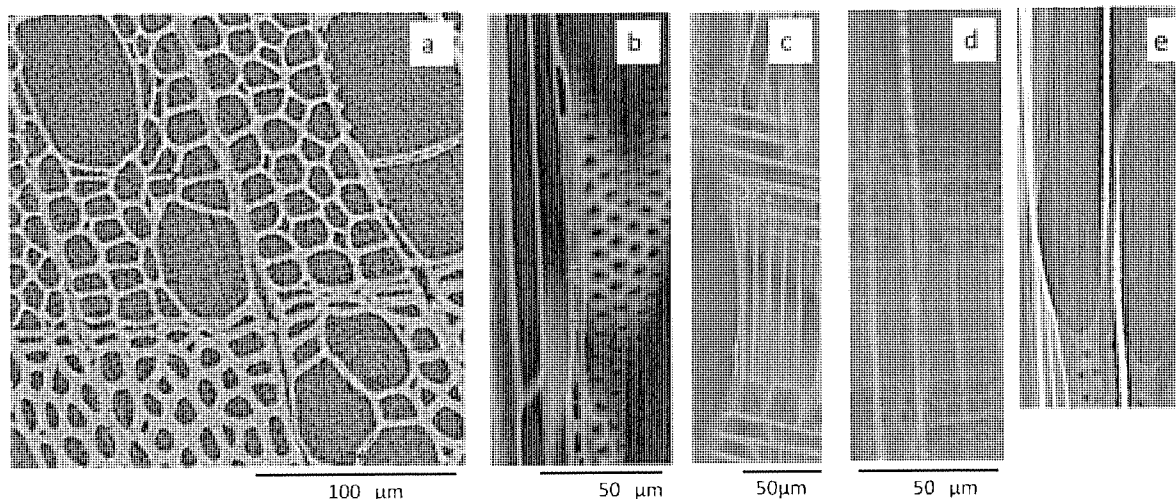


図7 SRX-ray μ CT を用いて撮影した熊本県八代市の木製古面の 1800 枚の縦断面像から Slice を用いて構築した木口面 (a), 深さ方向の奥行きをだすために連続する断層像を平均化して光学顕微鏡像と比較できるようにした板目面 (b), 柁目面 (c, d) および単穿孔 (e)。

Fig. 7 Pseudo-optical micrographs of old wooden mask found at Yatsushiro, Kumamoto prefecture reconstructed from synchrotron μ CT dataset of SPring-8: cross section (a), tangential section (b), radial section (c), magnified area of the vessel ray pitting (d) and simple perforation (e) respectively.

り古面の樹種はヤナギ科ヤナギ属 (*Salix* sp.) と同定された。

今回供したサンプルは、虫による劣化が甚だしく、サンプルの内部はスポンジ状になっていた。木質文化財においては、このように虫により劣化して剥落する極小試料が大変多く、このようなサンプルは徒手による剥片作

成が非常に困難なことが多い。サンプル内部に虫害により大きな空隙などが生じていることも多く、樹種識別に必要なとされる解剖学的特徴が十分に見えないこともある。そのような意味で、今回の SRX-ray μ CT による識別では、内部の状況例えば、虫などにより空隙となっている部分以外を任意に選択することができるため、樹種識

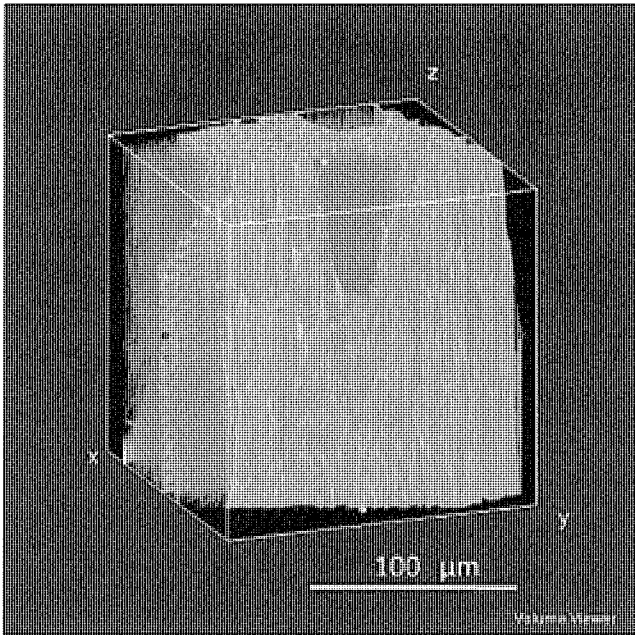


図8 SRX-ray μ CT を用いて構築した木製古面の3D像。ImageJ volume viewer を用いて3D像の内部の任意の部位での断面が見られるようにしたもの。

Fig. 8 A typical 3D rendering image of old wooden mask reconstructed from synchrotron μ CT dataset. Arbitrary inner sections were observed using ImageJ volume viewer.

別に有効な解剖学的特徴を観察することができることが明らかとなった。木質文化財においては、虫により劣化したものも多いが、内部の任意の面での情報を得ることができるこのSRX-ray μ CTは、特に大変有効な手法であると考えられた。

4. 結語

従来、木材解剖学では、年輪等の木材内部観察(Knapic et al. 2007, Macchioni et al. 2007)に汎用型X線CTが使用されてきた。しかし汎用型X線CTでは、樹種同定に必要とされる木材微細構造を調べるだけの空間および濃度分解能が不足しているというのが現状である。しかし、近年のSRX-ray μ CT法の発展により、 μ CTを適用することで従来不可能であった、物質表面の状況に左右されない、物質内部の任意の面での三次元情報の可視化が可能となることがわかってきた。

本研究はSRX-ray μ CTのビームラインBL20XUを用いて、木質文化財由来の様々な極小サンプルによる樹種識別調査法の確立および適用を試みたものである。

木質文化財の従来の樹種識別調査法では、徒手による

切片作成・プレパラート作成・組織観察などが必要であったため、特に木質文化財の樹種識別においては得られるサンプルの形状が小さいこと・虫害などによる劣化が激しいものが多いことなどが問題であった。しかし、本手法により、木製文化財由来の破片で多くみられるサンプルの劣化状況に依存せず内部の三次元での組織観察が可能であることが判明した。特に表面が圧縮された木材、木屎漆のように漆に覆われた木材、虫害により劣化した木材などにおいても、有効であることが判明した。

また本手法では、SRX-ray μ CTでの撮影に供したサンプルはその後科学的分析などに使用することができるため、複合的な木質文化財の科学的調査が可能となる可能性を秘めている。

放射光を用いた新しい樹種識別法は今後も様々な事例に適用できると考えられるが、今後、どのような分析が可能で、また必要とされているのか、さらに貴重な文化財を分析する正式なルール作りなど、数多くの課題を議論して解決しつつ前に進めることが重要と思われる。今回、SRX-ray μ CTが様々な木質文化財の樹種特定に役立つことを示せたことは、文化財の研究に放射光などの先端科学施設を利用する試み動きにはずみをつけるものと期待される。

謝辞

本研究は、高輝度光科学研究センターの課題研究 課題番号：2007B1544, 2008B1563, 2009B1093ならびに2009B1981によって、ビームラインBL20XUにおいて得られた成果に基づき纏めたものである。ここに銘記し謝意を表す。放射光実験に際しては(財)高輝度光科学研究センターBL20XU担当の鈴木芳生博士、八木直人博士、竹内晃久博士、上杉健太郎博士に多大な協力をいただいた。汎用型X線CT装置による観察は、株式会社島津製作所 分析計測事業部NDIビジネスユニット大西修平氏、同分析計測営業課1G北村孝平氏の協力を得た。この場をお借りして心よりお礼申し上げる。並びに、多大なるご尽力くださった(財)美術院国宝修理所藤本青一氏、熊本県八代市立博物館学芸員鳥津亮二氏、崇城大学中西真美子氏に感謝する。

引用文献

- 伊東隆夫・藤井智之・佐伯 浩 1998「広葉樹材の識別」IAWAによる光学顕微鏡的特徴リスト 海青社
- 伊東隆夫・藤井智之・佐野雄三・安部 久・内海泰弘 2006「針葉樹材の識別」IAWAによる光学顕微鏡的特徴リスト 海青社
- 金子啓明・岩佐光晴・能代修一・藤井智之 1998「日本古代における木彫像の樹種と用材観七・八世紀を中心に」MUSEUM（東京国立博物館研究誌）555 pp.3-54
- 金子啓明・岩佐光晴・能代修一・藤井智之 2003「日本古代における木彫像の樹種と用材」MUSEUM（東京国立博物館研究誌）583 pp.5-44
- 金子啓明・岩佐光晴・能代修一・藤井智之 2010「日本古代における木彫像の樹種と用材観八・九世紀を中心に（補遺）」MUSEUM（東京国立博物館研究誌）625 pp.61-78
- 小原二郎 1964「日本彫刻用材調査資料」美術研究 229 pp.74-83
- 「肥後国誌」1984 下巻 青潮社
- Agliazzo, S., Cloetens, P. 2004 “Quantification of micrometre-sized porosity in quasicrystals using coherent synchrotron radiation imaging” J Microsc 216 pp.62-69
- Bugani, S., Camaiti, M., Morselli, L., Van de Casteele, E., Janssens, K. 2007 “Investigation on porosity changes of Lecce stone due to conservation treatments by means of x-ray nano- and improved micro-computed tomography: preliminary results” X-Ray Spectrom 36 pp.316-320
- Bugani, S., Modugno, F., Łucejko, J.J., Giachi, G., Cagno, S., Cloetens, P., Janssens, K., Morselli, L. 2009 “Study on the impregnation of archaeological waterlogged wood with consolidation treatments using synchrotron radiation microtomography” Anal Bioanal Chem 395 pp.1977-1985
- Bulcke, J. V. D., Boone, M., Acker, J.V., Stevens, M., Hoorebeke, L.V. 2009 “X-ray tomography as a tool for detailed anatomical analysis” Ann. For. Sci 66 508
- Elmoutaouakkil, A., Fuchs, G., Bergounhon, P., Peres, R., Peyrin, F. 2003 “Three-dimensional quantitative analysis of polymer foams from synchrotron radiation X-ray microtomography” J Phys D: Appl Phys 36 pp.37-43
- Fromm, J. H., Sautter, I., Matthies, D., Kremer, J., Schmacher, P., Ganter, C. 2001 “Xylem water content and wood density in spruce and oak trees detected by high-resolution computed tomography” Plant Physiol 127 pp.416-425
- IAWA Committee. 1989. “IAWA list of microscopic features for hardwood identification, with an appendix on non-anatomical information” IAWA Bull
- IAWA Committee. 2004. “IAWA list of microscopic features for softwood identification” IAWA Bull
- Knapić, S., José, L J., Louzada, J., Leal, S., Pereira, H. 2007 “Radial variation of wood density components and ring width in cork oak trees” Ann. For. Sci 64 pp.211-218
- Macchioni, N., Palanti, S., Rozenberg, P. 2007 “Measurements of fungal wood decay on Scots pine and beech by means of X-ray microdensitometry” Wood Sci Technol 41 pp.417-426
- Mannes, D., Marone, F., Lehmann, E., Stampanoni, M., Niemz, P. 2010 “Application areas of synchrotron radiation tomographic microscopy for wood research” Wood Sci. Technol 44 pp.67-84
- Nakano, T., Tsuchiyama, A., Uesugi, K., Uesugi, M., Shinohara, K. 2006 “Slice—Software for basic

3D analysis— “Slice Home Page, <http://www-20bl.spring8.or.jp/slice/>. JASRI.

Steppe, K., Cnudde, V., Girard, C., Lemeur, R., Cnudde, J. P., Jacobs, P. 2004 “Use of X-ray computed microtomography for non-invasive determination of wood anatomical characteristics” *Journal of Structural Biology* 148 pp.11-21

Stock, S.R. 2008 “Recent advances in X-ray microtomography applied to materials” *International Materials Reviews* Volume 53 Number 3 pp.129-181

Trtik, P., Dual, J., Keunecke, D., Mannes, D., Niemz, P., Stähli, P., Kaestner, A., Groso, A., Stampanoni, M. 2007. “3D imaging of microstructure of spruce wood” *Journal of Structural Biology* 159 pp.46-55

(2010年5月10日受付, 2010年12月16日受理)

Synchrotron X-Ray Microtomography: Wood Identification for National Heritages

Suyako MIZUNO¹⁾, Katsuhiko KOZE¹⁾ and Junji SUGIYAMA¹⁾

¹⁾ Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Uji, Kyoto 611-0011 Japan

Wood identification based on microscopic characteristics has been established and allows us to discriminate wood samples at genus level. Conventional wood anatomy requires the observation of microstructure from axial, radial, and tangential directions. A way to do is to use a razor blade for making a thin slice from wood blocks, and to prepare the microscopy preparation of corresponding three directions. Nevertheless this method becomes simple after training and experiences; it is not applicable, for example, when only too small sample is given, as is always the case for national heritages. As an alternative way for identification, therefore, we have been investigating μ -CT technique at synchrotron radiation facility (SPring-8). Non-destructive nature and ultra high resolution ($<0.5 \mu\text{m}$) is promising especially for the analysis of small and important artifacts. In this paper, a technical description of the methodology and some of the recent achievements are presented.