

エネルギー分散型 XRF を用いた定量分析による
黒曜石製石器の原産地推定法
— 隠岐島後および壱岐原産地を事例として —

隅田祥光・南波柚衣

資源環境と人類 第 16 号 23-41 頁 2026 年 3 月

Natural Resource Environment and Humans

No. 16 pp. 23-41. March 2026

エネルギー分散型 XRF を用いた定量分析による 黒曜石製石器の原産地推定法 — 隠岐島後および壱岐原産地を事例として —

隅田祥光^{1*}・南波柚衣¹

要 旨

近年、ハンドヘルド型 XRF の普及に伴い、国内においても濃度分析（定量分析）に基づく黒曜石製石器の原産地推定が試みられるようになった。これを受け、これまで広く利用されてきた卓上型エネルギー分散型 XRF を用いた定量分析に基づく原産地推定法についても、その体系的な確立が求められている。しかし、この手法を確立するためには、標準試料の整備に加えて、共有可能な原石試料の整備が大きな課題であった。長崎大学教育学部地学教室では、リガク社製のエネルギー分散型 XRF (NEX DE) を導入し、39 種の黒曜石標準試料を整備することで、検量線法による定量分析を可能とした。さらに、国内の主要な黒曜石原石を化学組成に基づいて区分し、各産地に対応する黒曜石の基準原石を整備した。その中で、島根県隠岐島後および長崎県壱岐に産する黒曜石原石は、化学組成に基づいてそれぞれ 5 種および 3 種に区分できることを明らかにした。そして、これらの原石を各化学組成グループの基準原石とし、卓上型エネルギー分散型 XRF による定量分析に基づいた黒曜石の産地判別図を作成した。この産地判別図に基づいて、広島大学東広島キャンパス内遺跡から出土した 5 点の黒曜石製石器の原産地分析を実施した。結果、5 点中 4 点が隠岐島後の久見地域に産する黒曜石の化学組成グループ (OD-1) に判別され、本手法に基づく原産地判別が実践的に可能であることが示された。

キーワード：黒曜石製石器、原産地判別、エネルギー分散型 XRF、定量分析、隠岐島後、壱岐

1. はじめに

エネルギー分散型 XRF (蛍光 X 線分析装置) を用いた石器石材の原産地推定は、国内では 1970 年代に藁科と東村によって開始され (藁科・東村 1973)、日本列島全域における主要な黒曜石の産地分布が整理された (藁科・東村 1983)。その後、1990 年代に、望月と池谷により特性 X 線の強度比や強度分率を利用した推定法が提案され (望月ほか 1994)、さらに建石と二宮によりスタンダードレス FP 法に基づく定量 (半定量) 分析値を用いた推定法が実施されている (大工原ほか 2024)。これ

らの手法はいずれも機器依存性¹⁾が高いという制約を有していたが、2000 年代に入ると、ミズーリ大学で黒曜石標準試料が整備され (Glascok 2020)、これらの標準試料のデータを搭載したハンドヘルド型 XRF が市場展開されることにより、機器依存性の少ない定量分析値を用いた原産地推定が国内外で広く実践されるようになった (島田・隅田 2022)。

以上の研究動向を踏まえると、従来から石器の原産地分析に用いられてきた卓上型エネルギー分散型 XRF においても定量分析に基づく原産地推定法の確立を望む研究機関や研究者は、今後さらに増加すると見込まれる。しかし、原産地分析を実施する機関、とりわけ行政機関

1 長崎大学教育学部 〒 852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14

* 責任著者：隅田祥光 (geosuda@nagasaki-u.ac.jp)

受付：2025 年 11 月 25 日 受理：2026 年 2 月 6 日

においては、蛍光 X 線分析法に関する基礎的な知識を学ぶ機会の確保は容易ではない。さらに、定量分析に基づく原産地推定を実施するために必要な黒曜石標準試料の整備や原石試料の集約が、大きな課題となっている。

そこで、長崎大学教育学部地学教室では、黒曜石製石器の原産地推定に関する技術的支援や原石試料の共有化を目的として、リガク社製のエネルギー分散型 XRF (NEX DE) を導入した (隅田 2024, 2025)。そして、エネルギー分散型 XRF を用いて黒曜石製石器の非破壊定量分析を行うための最適な測定条件の設定、39 種の標準試料の整備、原産地分析を行うための日本列島各地の黒曜石の基準原石の整備を進めた。加えて、これらの試料を外部機関に貸し出す制度を開始した²⁾。

本稿では、まず、蛍光 X 線分析法の基礎について、蛍光 X 線の発生原理から分析装置の仕組みまでを解説する。次に、中国地方における最大規模の黒曜石原産地である隠岐島後、ならびにこれと類似した化学組成を示す長崎県壱岐の黒曜石を対象とした産地判別法について述べる。そして、広島県東広島市の後期旧石器時代から縄文時代の遺跡から出土した黒曜石製石器を対象とした原産地推定の実践結果を示す。

なお、本稿では、「原産地推定」という用語に加えて、「原産地判別」、「原産地分析」という用語を用いる。原産地推定とは、石器石材の産地を推定する過程全体を指す。これに対し、原産地分析とは、原産地推定を行うための分析作業を指す。原産地判別とは、分析データに基づいて石器石材の産地を識別するための手法または過程を指す。例えば、分析データを用いて散布図を作成し、その散布図に基づいて石器石材の産地を識別する場合、その散布図を黒曜石の産地判別図と呼ぶ。

さらに、本稿では、「原産地」と「産地」を区別して用いる。原産地とは、あるものの起源となる場所を指す。したがって、石器の原産地とは、言い換えれば石器の原材料の産地を意味する。そして黒曜石原産地とは、石器石材としての黒曜石の産地を指す。これに対し、産地とは、あるものが産出している場所を指す。したがって、黒曜石の産地とは、石器石材として利用されたか否かにかかわらず、地質学的に黒曜石が生成された場所、あるいは二次的に再堆積した場所を指す。

最後に、本稿では、化学組成に基づいて区分された原石のグループを化学組成グループ (compositional group) と呼ぶ。なお、化学組成グループと黒曜石の産地は、必ずしも一対一に対応するものではない。このため、黒曜石の産地判別図は、本質的には化学組成グループを識別するための図であることに留意する必要がある。

2. 蛍光 X 線分析の基礎

2-1 X 線の発生と性質

地球上に自然に存在する元素は 92 種類とされている。元素は原子核と電子からなる原子で構成されており、それぞれの元素は、異なった数の電子 (電子数) を持っている。電子数は原子番号に対応し、例えば原子番号 1 の水素は 1 個の電子を、原子番号 92 のウランは 92 個の電子を持っている。これらの電子は、マイナスの電荷を持ち、プラスの電荷を持つ原子核に引きつけられながら、原子核を取り巻く軌道上 (電子殻) を、高速で運動している。電子殻は、原子核に近いものから K 殻、L 殻、M 殻と呼ばれる (付図 1 a)。

このような原子に、原子核と電子の結合エネルギーを超える、高エネルギーの高速の電子や X 線が照射されると、電子が原子の外へはじき出され (電離)、原子は不安定な状態 (励起状態) となる。すると、外側の軌道にある電子が内側の空いた軌道へ移動 (遷移) し、電子は安定な状態 (定常状態) に戻る。この時に、 $K\alpha$ 線、 $K\beta_1$ 線などと呼ばれる X 線が発生する。具体的には、K 殻電子が電離し、その空孔に L 殻の電子が遷移することで $K\alpha$ 線が、M 殻の電子が遷移することで $K\beta_1$ 線と呼ばれる X 線が発生する (付図 1 b)。

そもそも X 線は電磁波の一種であり、可視光も同じ電磁波である。両者の違いは波長の違いであり、X 線の波長は可視光のおよそ 1 万分の 1 と非常に短い。電磁波は波としての性質だけでなく粒子としての性質も併せ持ち、その粒子としての姿を「光子 (photon)」と呼ぶ。光子は質量を持たず、常に光速で移動しエネルギーを有する。このエネルギーと波長 λ の関係は、次の式 (1) で表される。

$$E = \frac{hc}{\lambda} \dots (1)$$

E : 電磁波のエネルギー [J]

h : プランク定数 ($6.62607015 \times 10^{-34}$) [J · s]

c : 光速 (299792458) [m/s]

λ : 電磁波の波長 [m]

電磁波のエネルギーの単位としてエレクトロンボルト (eV)、波長の単位としてナノメートル (nm) を用いる場合には、定数 $hc = 1240$ (eV · nm) を用いる。また、この式に基づくと、波長が短い電磁波ほどエネルギーが高いことがわかる。

2-2 特性X線のエネルギー

電子殻内の電子が電離し、開いた軌道上 (空孔) に外側の電子が遷移するとき放出される $K\alpha$ 線や $K\beta_1$ 線などのX線のエネルギーは、電離前の電子の結合エネルギーと、遷移前の電子の結合エネルギーとの差によって決まる。この電子の結合エネルギーは原子核に含まれる陽子と電子がクーロン力で引きつけ合う力であり、内側の殻内の電子であればあるほど結合エネルギーは大きい。また、原子番号が大きい元素ほど陽子の数が多くなるため、結合エネルギーも全体的に大きくなる。

例えば、ナトリウム (Na) の場合、K殻の電子の結合エネルギーは 1072.1 eV であり、L殻の電子では 31.1 eV である (日本分析化学編 2011 : p.740-742)。この原子内のK殻の電子が電離し、そこにL殻の電子が遷移した際に発生する $K\alpha$ 線のエネルギーは、これらの結合エネルギーの差である 1041.0 eV となる (付図 1c)。また、Na よりも電子が一つ多い (原子番号が1増える) マグネシウム (Mg) は、K殻の電子の結合エネルギーが 1305.0 eV で、L殻の電子が 51.4 eV である。このMgから発生する $K\alpha$ 線のエネルギーは 1253.6 eV となる。このように、 $K\alpha$ 線のエネルギーは元素ごとに異なり、固有のエネルギーを持つ。M殻電子の遷移によって生じる $K\beta_1$ 線も同様に、元素ごとに固有のエネルギーを持つ。したがって、試料から放出される $K\alpha$ 線や $K\beta_1$ 線のエネルギー (eV) を測定することによって、試料中にどのような元素が含まれているのかを知ることができ

る。また、これらのX線は、特性X線あるいは固有X線と呼ばれ、原子番号が大きくなるほどエネルギーは全体的に高くなる。さらに、ある一つの原子から発生する $K\alpha$ 線と $K\beta_1$ 線とでは、 $K\beta_1$ 線の方が高いエネルギーをもつが、発生効率は $K\alpha$ 線の方が高い。なお、(1)式を用いることで、特性X線のエネルギーを波長に換算し、これらのX線を波長として表すこともできる。

2-3 X線管球と蛍光X線

蛍光X線分析装置 (XRF) にはX線管球が備わっている (付図 2a)。X線管球は、電子を発生させるためのフィラメントと、銀 (Ag) やロジウム (Rh) を材質としたターゲットにより構成される。フィラメント (陰極) とターゲット (陽極) の間に高電圧をかけ、その電位差で、フィラメントで発生させた電子をターゲットに衝突させる。電子の静止質量は 9.109×10^{-31} kg であり、この質量を持った電子が高速でターゲットに衝突することで、ターゲット内の原子から特性X線が発生する。同時に電子が原子核の電場によって減速 (制動) されることで、連続X線が発生する。例えば、フィラメントとターゲット間に 50 kV の電圧を加えると、電子は最大 50 keV の運動エネルギーを得てターゲットに衝突する。このとき 0 ~ 50 keV エネルギーの範囲に連続X線が発生する。

蛍光X線分析では、X線管球で発生させた特性X線や連続X線を分析対象とする試料に照射する。そして、試料から新たな特性X線を発生させ、それらを検出することで、試料に含まれる元素の種類やそれらの量を測定する。X線管球で発生させた特性X線や連続X線のことを一次X線、試料から発生した特性X線のことを二次X線あるいは蛍光X線と呼ぶ。

一次X線や二次X線が発生する過程では、コンプトン散乱線やレイリー散乱線も同時に生じる。コンプトン散乱線は、一次X線 (光子) が試料中の電子と衝突 (非弾性衝突) することで生じる散乱線であり、試料の形状や一次X線の入射角などの幾何学的条件に強く依存する。この性質を利用することで蛍光X線分析における測定試料面の形状補正が可能である (Shackley 2011 : p.23 ; Suda et al. 2025)。

2-4 蛍光 X 線スペクトル

蛍光 X 線分析で得られる蛍光 X 線スペクトルでは、横軸に X 線のエネルギーまたは波長が、縦軸に X 線強度が示される (付図 2b)。スペクトル中のなだらかに連続する成分 (バックグラウンドに相当する部分) は連続 X 線に由来し、一方、鋭いピークとして現れる部分は特性 X 線に対応する。連続 X 線は、X 線管球の管電流を上げると強度が増加し、管電圧を上げる最大エネルギーが高くなる。一方で、特性 X 線は X 線管球のターゲットや測定試料中に含まれる原子の光電効果 (電子の電離) により発生し、発生源となる物質内の原子の数が多いほどその強度が増す。すなわち、強度とは、発生した連続 X 線や特性 X 線の光子の数に相当する量であり、放出源となる物質中の元素の含有量に比例するものである。

さらに、同一元素について比較すると、 $K\alpha$ 線は $K\beta_1$ 線よりも発生効率が高く、その強度は $K\beta_1$ 線の 7~8 倍になる。このため蛍光 X 線分析では、通常は $K\alpha$ 線が用いられる。しかし、ある測定元素の $K\alpha$ 線が、より原子番号の低い別の元素の $K\beta_1$ 線とエネルギーが重なる場合は、 $K\beta_1$ 線を測定に用いたり、スペクトルの重なり補正を行ったりすることがある。

2-5 波長分散型とエネルギー分散型 XRF

蛍光 X 線分析装置 (XRF) には、エネルギー分散型 (EDXRF) と波長分散型 (WDXRF) の二つの方式がある (付図 2c)。いずれも X 線管球で発生させた一次 X 線を試料に照射し、試料から放出される特性 X 線 (蛍光 X 線) を検出するという機構は共通している。しかし、試料から検出器に至るまでの機構に違いがある。

エネルギー分散型 XRF では、試料から放出された X 線は直接、検出器へ導かれる。検出器として、半導体検出器が用いられ、入射した光子のエネルギーを直接電気信号として検出し、同時にエネルギーごとの強度を計測する。このため、多元素を短時間で測定できるという利点を持つ。

一方で、波長分散型 XRF では、試料と検出器の間に分光結晶が配置されている。この分光結晶を回転させることで、ブラッグの反射角を利用し X 線を波長ごとに

分離することができる。そして、分離した X 線を逐次検出器に導入し、強度を計測する。検出器として、比例計数管やシンチレーション計数管が用いられる。

すなわち、X 線のエネルギーを持った光子として特性を利用したものがエネルギー分散型 XRF であり、波として特性を利用したものが波長分散型 XRF であると言える。さらに、波長分散型 XRF よりもエネルギー分散型 XRF の方が装置を小型化することが可能で、ハンドヘルド型 XRF (portable X-ray fluorescence : pXRF) はエネルギー分散型 XRF に相当する。一方で、波長分散型 XRF は装置が大型化し、高出力の X 線管球を必要とするが、エネルギー分散型 XRF に比べて、測定対象とする特性 X 線を高分解能で分離し、その強度を精度よく測定することができる (付図 2b)。

3. 隠岐島後および壱岐の黒曜石の成因と化学的特徴

日本列島に産する黒曜石は、いずれも日本海の拡大以降 (1500 万年前以降) に形成されたものであり、とりわけ北海道・本州・九州に産する黒曜石の多くは、太平洋プレートやフィリピン海プレートの沈み込みに伴う島弧型のマグマ活動に由来する。これに対し、日本海に位置する隠岐島後および壱岐に産する黒曜石は、プレート内型のマグマ活動によって形成されたものであり、島弧型の火成活動に由来する黒曜石とは、起源となるマグマの生成過程が大きく異なる (佐野 1995)。具体的には、島弧型のマグマは、プレートの沈み込みに伴う上部マントルの加水溶融によって生じる。一方、プレート内型のマグマは、上部マントルの上昇流 (マントルブルーム) に伴う減圧溶融によって生じる。このように異なる過程で生成されたマグマは、それぞれ異なる化学組成を持ち、プレート内型の流紋岩質マグマは、島弧型のものよりも Na, K, Nb, Y の元素含有量に富む化学的特徴を有することが知られ (Pearce et al. 1984)、黒曜石の化学組成もこれに対応する (Suda et al. in press)。

隅田ほか (2016) は、波長分散型 XRF を用いた隠岐島後および壱岐の黒曜石の全岩化学組成分析を行い、い

ずれの地域においてもアルカリ岩系と非アルカリ岩系に黒曜石が区分されることを明らかにした。また、黒曜石の K-Ar 全岩年代およびジルコンの FT 年代として、隠岐島後では 5.2-4.5 Ma、壱岐では 4.0-3.6 Ma が得られ、これらの地域の黒曜石は中新世後期から鮮新世前期にかけて形成されたと考えられる³⁾。さらに、いずれの地域の黒曜石も、Sr 含有量に乏しい (<10 ppm) 化学的特徴を示している。これらのことから、隠岐島後および壱岐の黒曜石の産地判別を行う際は、両地域の原石試料を網羅した分析が必要と言える。

4. 隠岐島後および壱岐の黒曜石の産地判別図

4-1 判別図の作成に用いた黒曜石原石

隠岐島後および壱岐に産する黒曜石の分布を図 1a および 1b に示す。隠岐島後では、久見、加茂、津井の 3 つの地域に分布し、それぞれの地域にはさらに複数の産出地点が存在する（及川ほか 2015；隅田ほか 2016；Suda et al. 2021）。一方、壱岐では、久喜、印通寺、坪、箱崎の 4 つの地域に分布し、箱崎の産出地点は本村触と江角触に分けられる（及川ほか 2018；隅田ほか 2018）。これまでの研究により、隠岐島後の黒曜石については 28 点、壱岐の黒曜石については 16 点が、既に明治大学

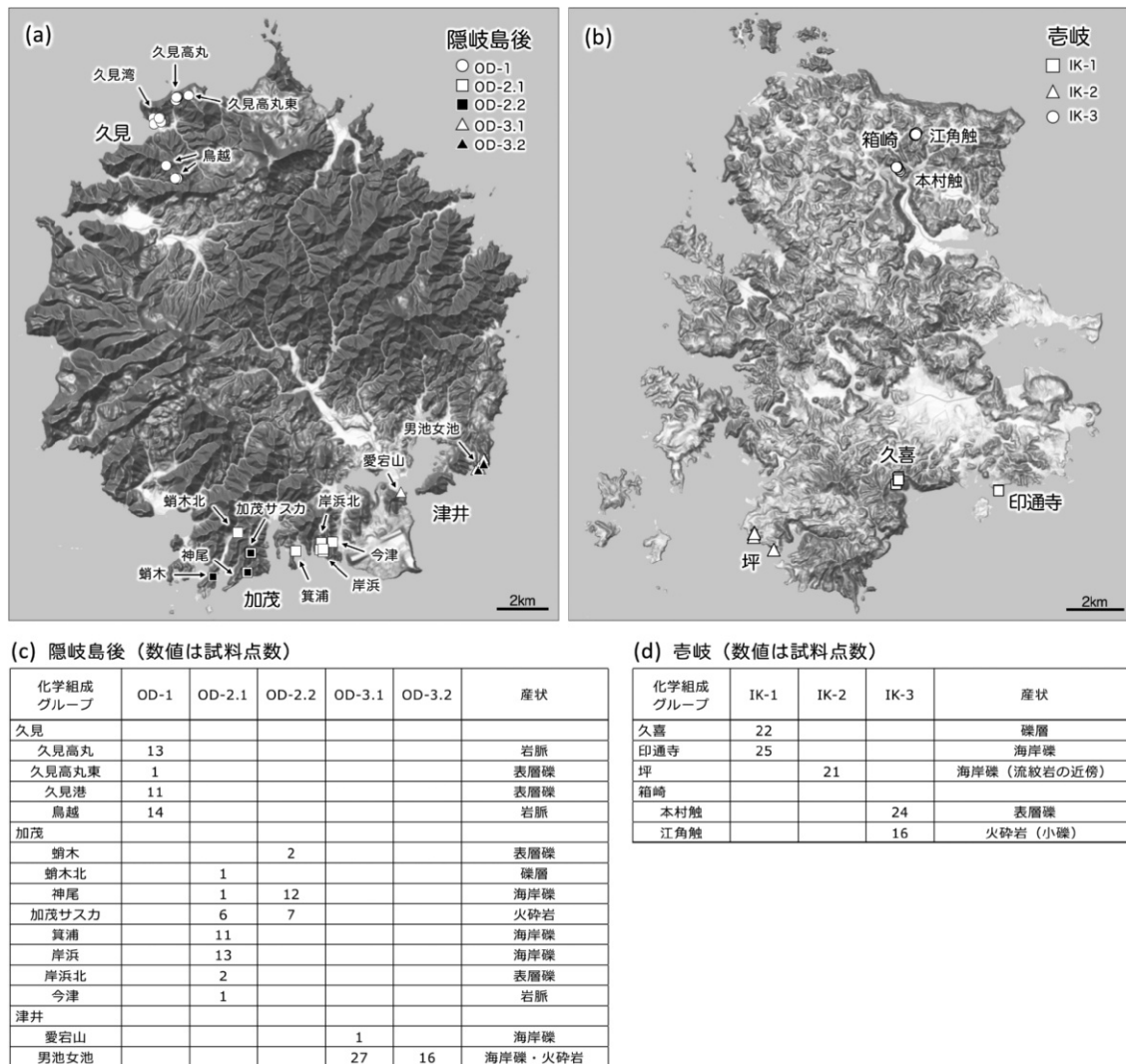


図 1 隠岐島後ならびに壱岐における黒曜石の産地 (a, b) と原石区分 (c, d)

黒曜石研究センター設置の波長分散型 XRF (リガク社製 ZSX Primus III+) によって定量分析されている (Suda et al. 2018). 本研究では, 長崎大学教育学部地学教室に保管されているこれらの黒曜石に加え, 隠岐島後の黒曜石 138 点および壱岐の黒曜石 108 点について, 新たに同教室に設置されたエネルギー分散型 XRF (リガク社製 NEX DE) による定量分析を実施し, それらの分析値を用いて産地判別図の作成を行った.

4-2 エネルギー分散型 XRF を用いた定量分析

波長分散型 XRF とエネルギー分散型 XRF では, 波長分散型 XRF の方が高精度な定量分析を実施することができる. しかし, そのためには試料を粉碎し, 溶融ガラスにするなどの工程を必要とする. 一方, エネルギー分散型 XRF は試料の前処理を必要とせず, 非破壊で分析することができる. このため, 考古資料の分析においては, 一般的に非破壊分析が可能なエネルギー分散型 XRF が用いられ, 黒曜石製石器の分析も, 基本的にこの装置を用いて実施されている.

長崎大学教育学部地学教室では, リガク社製のエネルギー分散型 XRF (NEX DE) を用いた黒曜石製石器の非破壊定量分析のための最適な分析条件の設定を完了している (表 1). ここでは, 波長分散型 XRF 分析に基づいて設定した 39 種の黒曜石原石を標準試料⁴⁾ (付図 5c) とした検量線法による定量分析を行うことを可能として

いる. なお, 定量分析の基本的な手順は, 特性 X 線の強度比や強度分率を利用した原産地推定法 (望月ほか 1994) と同様であり, まず測定対象とする元素の特性 X 線強度を測定する. 強度比や強度分率を利用した手法では, 得られた測定値そのものを用いて産地判別図を作成するのに対し, 定量分析では, これらの測定強度を元素濃度 (含有量) に変換して産地判別図を作成する. 一般に, この濃度値への変換には検量線法が用いられ, 検量線法を適用するためには, 測定対象元素の濃度が波長分散型 XRF 分析などによって既に明らかにされている複数種の標準試料を準備する必要がある. 特性 X 線の測定強度には機器依存性¹⁾があるが, 検量線法に基づく定量分析を行うことで, 異なる分析装置間における分析値の相互利用や相互検証が可能となる.

本研究において定量分析を行う元素は, Fe, Mn, K, Ca, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb である. 分析値は全て ppm で表記することにした. 測定線として, Fe および Ca では $K\beta_1$ 線を, その他の元素では $K\alpha$ 線を用いた. また, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb の分析においては, 試料形状の補正を行うために管球 (Ag) 由来のコンプトン散乱線を内標準として利用した. Y, Zr, Nb の分析においては, それぞれ Rb, Sr, Y の $K\beta_1$ 線の重なり補正を行った.

測定時間は, 用途別に 1 試料あたり約 2 分の石器分析用, 約 3 分の判別図作成用, 約 4 分の検量線作成用の 3

表 1 本研究で用いたエネルギー分散型 XRF (リガク社製 NEX DE) の分析条件

(a) 測定線

High-Z	Zn-K α , Rb-K α , Sr-K α , Y-K α , Zr-K α , Nb-K α , Ag Compton
Mid-Z	Fe-K β_1 , Mn-K α , Ca-K β_1 , K-K α

(b) 測定条件

	1次フィルタ	管電圧 (kV)	管電流 (μ A)
High-Z	C	60	200
Mid-Z	E	15	800

(c) 測定時間 (秒)

測定モード	石器分析用モード	判別図作成用モード	検量線作成用モード
アプリケーション名	obart_quick2_air	obart_stand2_air	obart_prec2_air
High-Z	120 s	160 s	200 s
Mid-Z	30 s	60 s	90 s
合計	150 s	220 s	290 s

つのモードを準備した。石器の非破壊定量分析は石器分析用モードを利用し、良好な判別結果が得られない場合は繰り返し測定を行う。一方で、平面研磨面を測定面とする標準試料を用いて検量線を作成する際は、検量線作成用モードを用いる。ドリフト補正試料（付図5c）の測定⁵⁾も、これと同一の測定時間である。また、標準試料と同様、平面研磨面を測定面とする基準原石を用いて産地判別図を作成する際は、判別図作成用モードを用いる。品質管理試料（Quality Control）の測定時間も、この判別図作成用モードを用いる。なお、本教室ではこの品質管理試料として腰岳産黒曜石（KD-1）を用いている（付図5c）。

4-3 化学組成に基づく黒曜石原石の区分

望月・池谷方式（望月ほか1994）による黒曜石製石器の原産地分析では、エネルギーの近い特性X線同士の強度比や強度分率を判別指標として用いる。この方法を用いることで、試料表面の凹凸による形状効果の影響が低減された。化学組成に基づく高精度な原石区分および石器の原産地分析を実施することができる。本研究では、この原理に基づき、Mn/Fe比、Fe/K比、K/Ca比、Rb分率、Sr分率、Y分率、Zr分率⁶⁾を指標とした散布図を作成し、隠岐島後および壱岐の黒曜石の化学組成に基づく原石区分を行い、各化学組成グループを定めた。各グループ区分の妥当性は、これらの指標に対してMAD（Median Absolute Deviation）法に基づく外れ値検定を適用することにより評価した。

隠岐島後の黒曜石は、化学組成に基づいて5種のグループに区分される（図1c）。本研究では、各化学組成グループの分布地域に対応させて、OD-1（久見）、OD-2.1（加茂）、OD-2.2（加茂）、OD-3.1（津井）、OD-3.2（津井）と表記した。一方で、壱岐の黒曜石は、化学組成に基づいて3種のグループに区分される（図1d）。これらについても同様に、各化学組成グループの分布地域に対応させてIK-1（久喜・印通寺）、IK-2（坪）、IK-3（箱崎）と表記した。

最終的に、球類などの不純物が少なく、外観上均質なガラス質個体を各化学組成グループから12点選定し、これらを各グループの基準原石とした。これらの基準原

石は、グループごとにケースに収め、貸出し可能な基準原石セットとして整備した（付図5a・b）。

4-4 各化学組成グループの黒曜石原石の分布と産状

隠岐島後に産する5種の化学組成グループ、それぞれについての産出地点と産状を図1a・cに示す。OD-1（久見）は、久見湾、久見高丸、鳥越の各地点に産出する。久見湾および久見高丸では、最大径約1mの原石が採取可能である。一方で、鳥越では火砕岩中の礫として原石が含まれ、最大径は約5cmである。OD-2.1（加茂）は主に箕浦と岸浜の地点に産する。OD-2.2（加茂）は主に神尾の地点に産する。加茂サスカにはOD-2.1とOD-2.2がほぼ同じ割合で産している。また、今津の黒曜石岩脈はOD-2.1に相当する。OD-3.1（津井）とOD-3.2（津井）は、主に津井の男池女池周辺に分布し、愛宕山の海岸の黒曜石1点はOD-3.1に相当する。男池女池周辺においては、圧倒的にOD-3.1の方が産出頻度が高く、OD-3.2は男池女池の海岸からやや内陸に入った地点に見られる小粒の黒曜石原石を含む火砕岩露頭の周辺に分布している。

壱岐に産する3種の化学組成グループ、それぞれの産出地点と産状を図1b・dに示す。IK-1（久喜・印通寺）は、久喜では礫層中の角礫から亜角礫として産し、拳大以上のもも含まれる（付図3a）。一方で、印通寺では海岸礫として産し、最大で拳大程度のもも含まれる（付図3b）。IK-2（坪）は、坪の海岸礫として産し、大きさは最大径5cm以下のものがほとんどである（付図3c）。ただし稀に拳大程度のもも含まれる。また、この地域には幅約700m規模の流紋岩体があり、その中にマレカナイトとして黒曜石が産している状況を確認することができる（付図3f）。IK-3（箱崎）は、箱崎の本村触と江角触の地点に分布する。本村触のものは表層や崖錐中の角礫として産し、人頭大程度の黒曜石礫も稀に採取することができる（付図3d）。江角触のものは表層や崖錐中の礫、火砕岩中のマレカナイトとして産し、いずれも直径3cm以下の小粒である（付図3e）。

4-5 産地判別図の作成法

化学組成に基づいて原石区分を行い、化学組成グループが定められた試料を用いて、隠岐島後および壱岐の黒曜石の産地判別図を作成した。ここでは、Sr 分率 vs Rb 分率、 $100 \times \text{Fe}/\text{K}$ vs Sr 分率、 $100 \times \text{Mn}/\text{Fe}$ vs Rb 分率、 K/Ca vs Zr 分率の4種の散布図上に、各化学組成グループの判別楕円を作成し、これらを産地判別図とした。なお、各グループの判別楕円は、エネルギー分散型 XRF による定量分析値に基づく $\pm 2\sigma$ 相当 ($2.96 \times \text{MAD}$) の分布楕円とした。分布楕円の作成にあたっては、主成分分析 (PCA) により各グループの主成分軸 (長軸および短軸) を求め、得られた主成分軸の方向 (回転

角) に一致するよう楕円を定義した。分布楕円の作成は Excel を用いて行い、作図に必要な Excel 関数の構築には生成 AI (ChatGPT-5) を活用した (付図 6)。本研究で作成した隠岐島後および壱岐の黒曜石の産地判別図を図 2 および図 3 に示す。

5. 黒曜石製石器の原産地推定の実践

隠岐島後および壱岐の黒曜石を統合した産地判別図を作成し、広島大学東広島キャンパス (広島県東広島市鏡山) で発掘された5点の黒曜石製石器についての原産地推定を行った (図 4)。なお、本研究では、4種類の判別

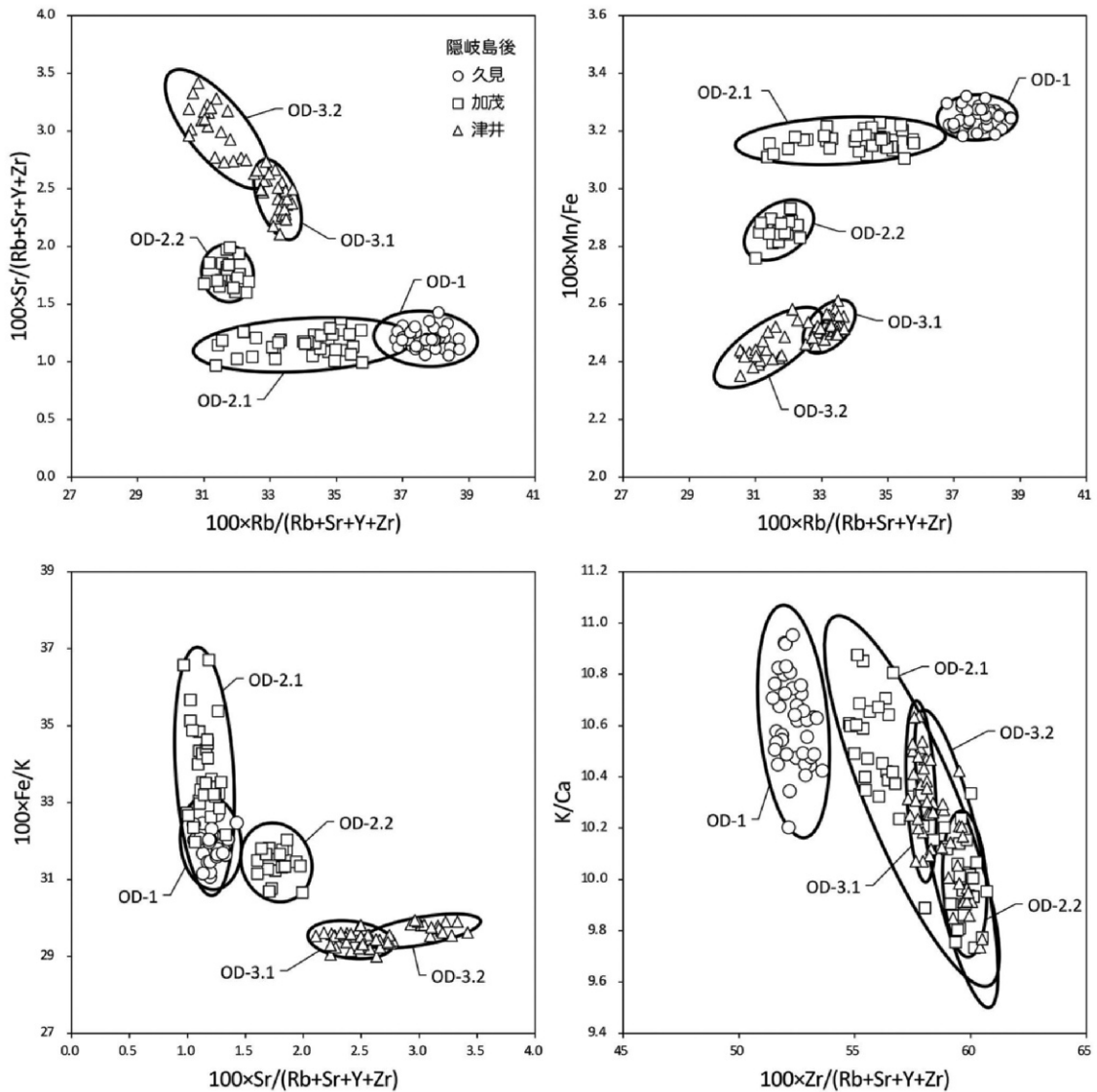


図2 隠岐島後における黒曜石の産地判別図

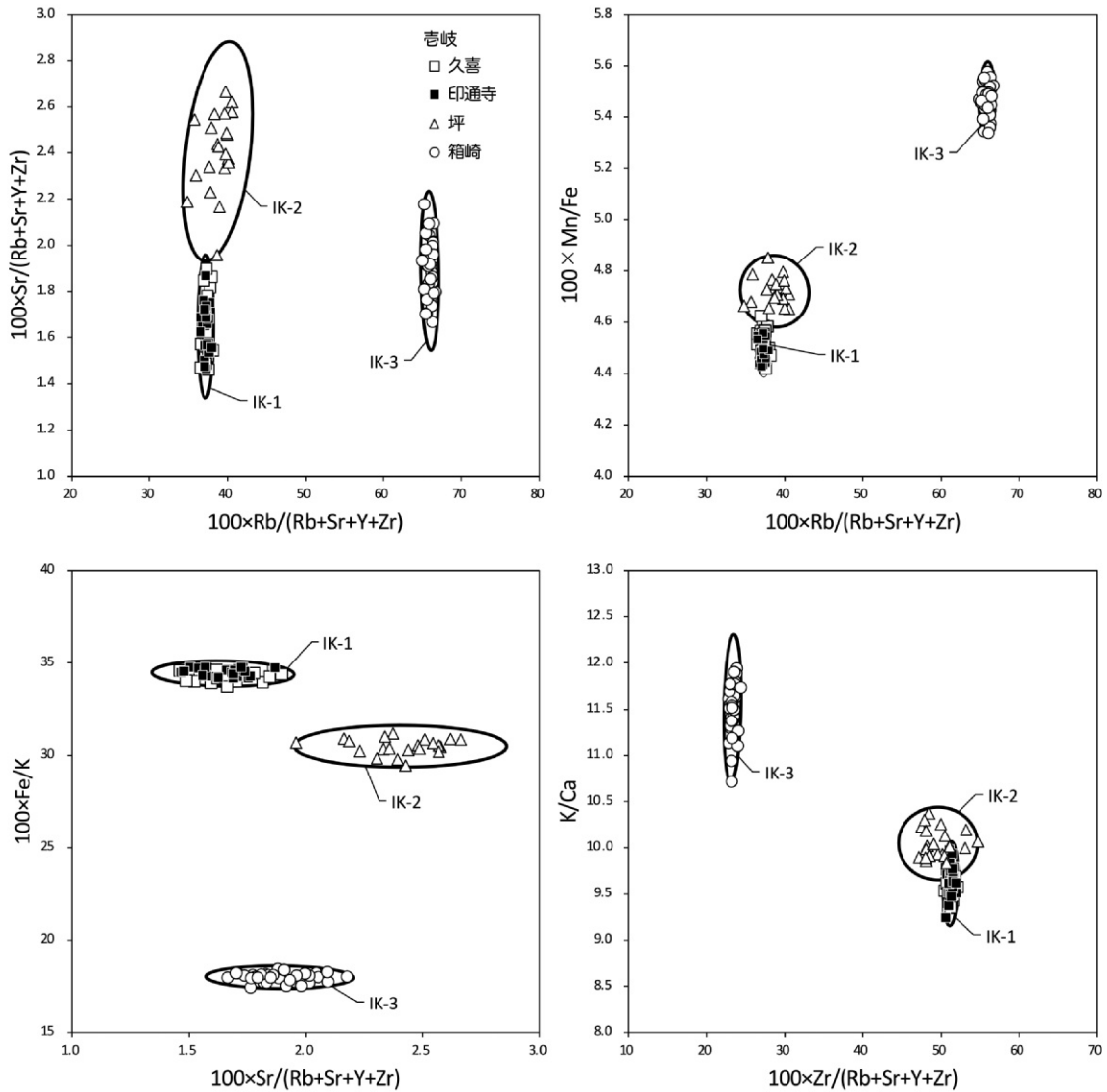


図3 杵岐における黒曜石の産地判別図

図すべてにおいて同一の結果が得られた場合のみを有効な判別結果とした。原産地判別は、以下の式に各グループの判別楕円の作成過程において算出された中心座標 (x_0, y_0) 、長軸半径 (a) 、短軸半径 (b) 、回転角 (θ) を代入し、石器の分析値がいずれの化学組成グループの判別楕円内に位置するかを判断した。

$$X = \frac{\{(x-x_0)\cos\theta + (y-y_0)\sin\theta\}^2}{a^2} + \frac{\{(x-x_0)\sin\theta + (y-y_0)\cos\theta\}^2}{b^2}$$

($X \leq 1$: 楕円内, $X > 1$: 楕円外)

本研究で分析対象とした資料は、キャンパス内に位置

する鴻の巣遺跡、ぶどう池南遺跡第1地点、西ガガラ遺跡第2地点、山中池南遺跡第6地点から出土した漆黒の黒曜石製石器5点である(付図4a-e; 広島大学環境保全委員会埋蔵文化財調査室2004; 広島大学埋蔵文化財調査室2005, 2007)。エネルギー分散型XRFによる定量分析は、1資料あたりの測定時間が約2分の石器分析用モードを用い、測定位置を変えながら1資料あたり4回の繰り返し測定を行った。

分析対象とした石器は、いずれも測定径(3mm)を最小限確保できるものであり、表面には凹凸や、多少の風化が認められた。通常の脱落防止用のフィルムに加えて、小さな円形の穴を開けたフィルム上に測定対象とした石器を置いて測定を行った(付図4f)。

その結果、1点の鴻の巣遺跡の石器は、隠岐島後および壱岐の黒曜石の判別楕円から大きく外れた位置にプロットされた。一方で、残りの4点の石器については、4回の繰り返し測定のうち1回目または2回目の測定において、OD-1（隠岐島後・久見）であると判別された（図4）。鴻の巣遺跡の石器については、オンラインデータベース⁴⁾で公開されている西北九州や大分県姫島の黒曜石の化学組成と比較しても、一致するものは確認されなかった。この石器の原産地については、今後も検討を継続する必要がある。

6. まとめ

従来、隠岐島後の黒曜石については、久見・加茂・津井のものを一括して原産地推定が実践されてきた（金成ほか2011）。本研究では、久見・加茂・津井の黒曜石を区別して判別することが可能であることが新たに示された。本手法を用いて、特に中国地方の遺跡から出土する黒曜石製石器の原産地分析を進めることで、隠岐島後産黒曜石の獲得や利用の実態を、考古学的により詳細に復元していくことが可能になると期待される。

また、黒曜石製石器の原産地推定に用いられる黒曜石の産地判別図は、しばしば「黒曜石の産地ごとに判別楕

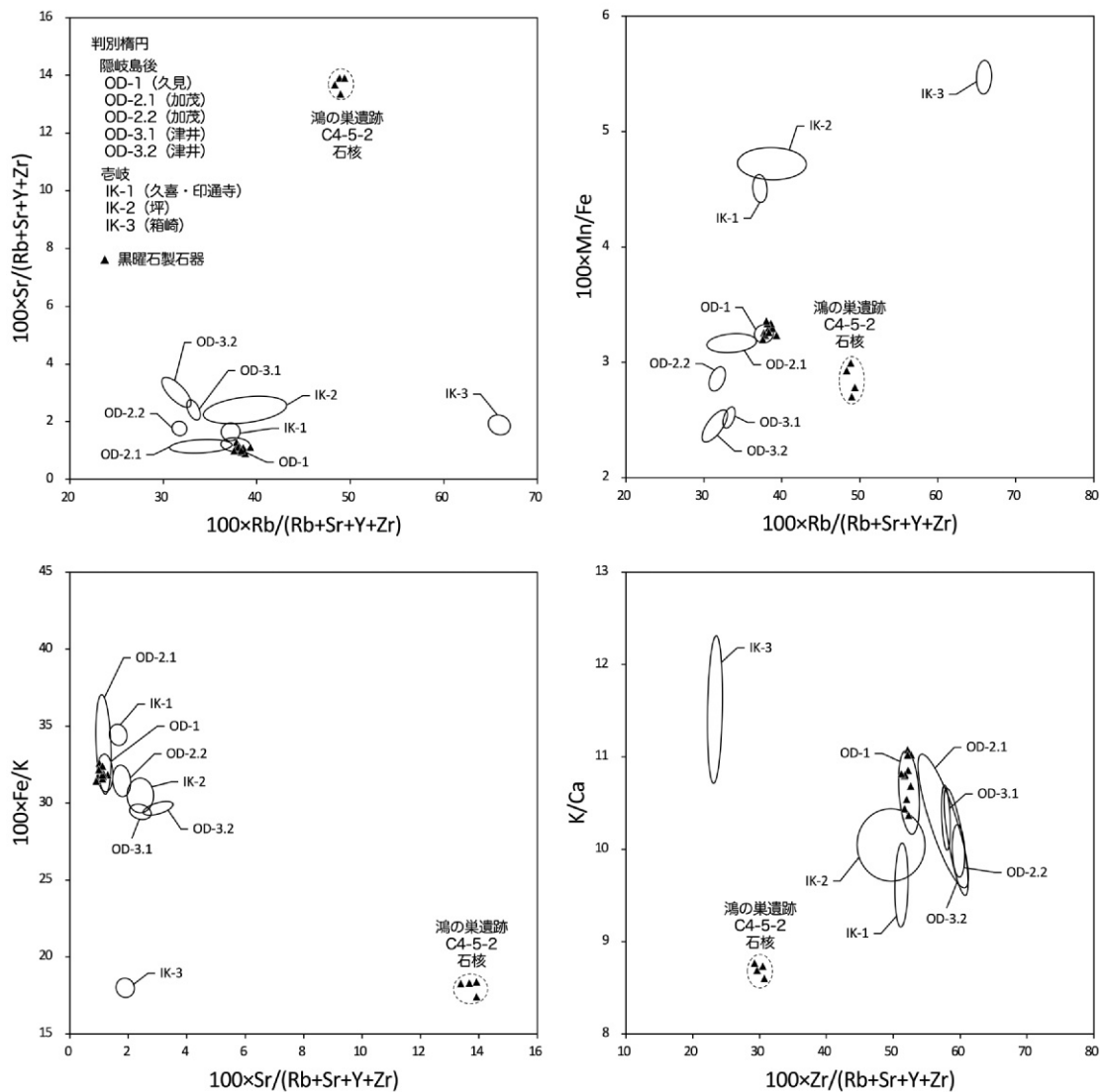


図4 隠岐島後および壱岐の黒曜石の産地判別図ならびに広島大学東広島キャンパス内の遺跡から出土した黒曜石製石器の原産地判別結果

円が描かれている」と誤解されがちである。しかし、実際には、個々の判別楕円は産地ごとに描かれているのではなく、化学組成に基づいて区分された黒曜石のグループごとに描かれている。すなわち、黒曜石製石器の原産地推定においては、黒曜石の産地と化学組成グループとの対応関係をあらかじめ整理しておく必要がある。

長崎大学教育学部地学教室では、2015年より日本列島に産する黒曜石の化学組成データを体系的に収集し、オンラインデータベースとして公開している⁴⁾。さらに、化学組成グループが定められた黒曜石原石から、各グループの基準試料を12個体ずつ選定している(付図5a・b)。そして、これらを黒曜石製石器の原産地推定を実施するための基準原石として外部機関に貸し出す制度を整備した。この仕組みは既に運用されており、この借用制度を利用した黒曜石製石器の原産地推定法の構築が各地で進められ始めている。今後、本教室では、黒曜石分析モードを搭載した卓上型エネルギー分散型XRFの製品化、ならびに基準原石を利用した黒曜石の産地判別図の作成から石器の原産地判別に至るまでの過程の完全自動化を目指している。そして、定量分析に基づく原産地推定法の普及に向けたワークショップ等も開催していく予定である。

一方で、残された課題もある。本研究における黒曜石の産地判別図では、横軸および縦軸に元素濃度比や濃度分率を用いている。一般に、機器分析により得られる測定値は近似的に正規分布に従うことが多いが、これらの測定値の比や分率は、必ずしも正規分布を示さないことが知られている。そのため、本研究では、産地判別図上に示す各グループの判別楕円として、正規分布を仮定した信頼楕円ではなく、各グループのプロットを理想的に包含することができた主成分分析に基づく楕円(PCA楕円)を用いた。一方で、代替的な方法として、対数比や対数分率を用いる手法も提案されている(金井ほか2019; 太田2023; 上峯2025)。今後は、横軸および縦軸に対数比や対数分率を用いた判別図も作成し、より実用的かつ正確な産地判別が可能となる手法について検討を進めていきたい。

謝辞

本研究は、明治大学黒曜石研究センター研究連携(2022.4.1-2026.3.31「黒曜石原産地推定のための日本の黒曜石原産地のデータベース、基準試料、校正用試料の確立」)に基づいて、またJSPS科研費(課題番号:22H00740)の助成を受けて実施したものである。黒曜石製石器の貸出しに際しては、広島大学総合博物館埋蔵文化財調査部門の藤野次史名誉教授ならびに川島尚宗准教授にご協力をいただいた。ここに深く感謝の意を表す。

註

- 1) 機器分析では、一般に同一試料を測定した場合であっても、使用する装置や測定条件の違いにより得られる測定値が異なることがあり、このような差異を機器依存性と呼ぶ。X線分析においては、測定条件や機種によって検出される特性X線の強度(カウント数)が異なるため、強度比や強度分率を用いた産地判別図を異なる装置間で直接共有することは困難である。一方で、標準試料を用いて得られた濃度比や濃度分率を利用する場合は、直接共有することが可能となる。
- 2) 長崎大学教育学部における試料貸出し制度: <https://sites.google.com/view/obsidian/home/loan>
- 3) 未公表データとして、次の隠岐島後および壱岐の黒曜石のK-Ar全岩年代が得られている。壱岐: 3.67 ± 0.08 Ma (IK-1相当, 試料番号2194-1, 緯度33.74232°N, 経度129.73111°E), 3.89 ± 0.09 Ma (IK-3相当, 試料番号2206-1, 緯度33.82979°N, 経度129.43073°E)。隠岐島後: 5.29 ± 0.12 Ma (OD-2.1相当, 試料番号338-1, 緯度36.17671°N, 経度133.30060°E), 5.65 ± 0.13 Ma (OD-3.1相当, 試料番号301-1, 緯度36.20434°N, 経度133.36472°E)。これらのK-Ar年代測定は株式会社森山地質年代学研究所に依頼して実施された。また、久見産黒曜石(OD-1)からは 4.5 ± 0.4 MaのFTジルコン年代が得られている(杉原編2014: p.60)。
- 4) 標準試料および基準原石についてのデータベース(Japanese Obsidian Database): <https://tinyurl.com/c8wywmvf>
- 5) ドリフト補正試料は、全ての分析モードで共通化され佐世保市亀岳産黒曜石(KA-1)を用いてMnとCa、隠岐島後久見産黒曜石(OD-1)を用いてFeとKの測定線のドリフト補正を実施している。一方、ZnからNbまでの微量元素については、コンプトン散乱線内標準法を利用しているため、個別のドリフト補正は実施していない。なお、コンプトン散乱線自体のドリフト補正を分析アプリケーションに組み込む手法については、現在、検討中である。
- 6) Rb分率, Sr分率, Y分率, Zr分率は, Rb, Sr, Y, Zrの定量分析値の合計に対する、各元素の定量分析値の割合(%)である。

引用文献

上峯篤史2025「等長対数比変換と化学組成の公開データベー

- スを用いた黒曜岩の原産地推定 (1) : 隠岐地区のデータ補完」『立命館大学考古学研究報告』2 : 1-10
- 及川 穰・隅田祥光・稲田陽介・伊藤徳広・今田賢治・川井優也・河内俊介・角原寛俊・藤川 翔・川島行彦 2014「島根県隠岐諸島黒曜石原産地の調査報告」『島根考古学会誌』31 : 1-23
- 及川 穰・隅田祥光・池谷信之・稲田陽介・今田賢治・川井優也・河内俊介・竹内 健・角原寛俊・藤川 翔・高村優花・灘 友佳・野村英弘・藤原 唯 2015「島根県隠岐諸島黒曜石原産地の調査報告」『島根考古学会誌』32 : 3-24
- 及川 穰・川道 寛・隅田祥光・稲田陽介・栗野翔太 2018「長崎県壱岐島黒曜石原産地の踏査報告」『九州旧石器』21 : 97-107
- 太田 亨 2023『組成データ解析入門 —パーセント・データの問題点と解析方法—』, 160p., 東京, 朝倉書店
- 金井拓人・池谷信之・保坂康夫 2019「化学組成データの対数比解析を利用した黒曜石の原産地推定」『文化財科学』78 : 37-52
- 金成太郎・長井雅史・柴田 徹・長岡信治・杉原重大 2011「隠岐・九州地方産黒曜石の記載岩石学的・岩石化学的検討—黒曜石製遺物の原産地推定法に関する基礎的研究—」『環境史と人類』第4冊(黒曜石特集号) 環境変遷史と人類活動に関する学際的研究, 明治大学学術フロンティア推進事業編, pp. 3-40., 東京
- 佐野貴司 1995「壱岐火山群の地質: 主に K-Ar 年代に基づく溶岩流層序」『火山』40 (5) : 329-347
- 島田和高・隅田祥光 2022「携帯型蛍光 X 線分析装置 Bruker Tracer 5i を用いた黒曜石原産地分析法の構築」『資源環境と人類』12 : 37-49
- 杉原重夫編 2014『明治大学文化財研究施設における黒曜石研究 (第2冊) 日本における黒曜石の産状と理化学的分析—〈資料集〉—』, 75p.+15p., 東京, 明治大学文学部
- 隅田祥光・稲田陽介・亀井淳志・及川 穰 2016「島根県隠岐島後における黒曜石の全岩化学組成—黒曜石製石器の原産地解析システムの構築に向けて—」『資源環境と人類』6 : 73-78
- 隅田祥光・亀井淳志・川道寛・及川 穰・稲田陽介・栗野翔太 2018「長崎県壱岐と島根県隠岐島後の黒曜石の化学的特徴の類似性と原産地判別法についての検討」『旧石器研究』14 : 83-108
- 隅田祥光 2024「長崎大学教育学部での黒曜石製石器の原産地分析を目的とした蛍光 X 線分析室の設立」『考古学ジャーナル』798 : 33-34
- 隅田祥光・川道寛・片多雅樹 2025「波長分散型蛍光 X 線分析による西北九州の黒曜石基準試料の標準化に向けた取り組み」『季刊考古学』172 : 18-21
- 大工原 豊・三浦麻衣子・建石 徹・二宮修治 2024「黒曜石と石鏃からみる縄文時代早期人の行動領域」『第四紀研究』doi : 10.4116/jaqua.65.2413
- 日本分析化学 2011『分析化学便覧 (第6版)』, 880p., 東京, 丸善出版
- 広島大学環境保全委員会埋蔵文化財調査室 2004『広島大学東広島キャンパス埋蔵文化財発掘調査報告書Ⅱ —がら地区の調査—』広島
- 広島大学埋蔵文化財調査室 2005『広島大学東広島キャンパス埋蔵文化財発掘調査報告書Ⅲ —山中地区の調査—』広島
- 広島大学埋蔵文化財調査室 2007『広島大学東広島キャンパス埋蔵文化財発掘調査報告書Ⅳ —アカデミック西地区の調査—』広島
- 望月明彦・池谷信之・小林克次・武藤由里 1994「遺跡内における黒曜石製石器の原産地別分布について—沼津市土手上遺跡 BBV 層の原産地推定から—」『静岡県考古学研究』26 : 1-19
- 藁科哲男・東村武信 1973「蛍光 X 線分析法によるサヌカイト石器の原産地推定」『考古学と自然科学』6 : 33-42
- 藁科哲男・東村武信 1983「石器石材の産地分析」『考古学と自然科学』16 : 59-89
- Glascock, M. D. 2020. A systematic approach to geochemical sourcing of obsidian artifacts. *Scientific Culture* 6 (2) : 35-47.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W. and Tindle, A. G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology* 25 : 956-983.
- Shackley, M. S. 2011. An Introduction to X-Ray Fluorescence (XRF) Analysis in Archaeology. In *X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) in Geoarchaeology*, edited by M. Steven Shackley, pp. 7-44, New York (USA) , Springer.
- Suda, Y., Inata, Y., Kamei, A. and Oyokawa, M. 2021. Chemical discrimination and classification of obsidian from the Oki source for provenance studies of obsidian artefacts in the circum-Japan Sea region. *Inventaria Praehistorica Hungariae (IPH)* 14 : 31-46.
- Suda, Y., Shimada, K., Wada, K., Mukai, M., Adachi, T. and Ikeya, N. 2025. Non-destructive method of archaeological obsidian provenance analysis using EDXRF : A case study of obsidian in Hokkaido, Northern Japan. *Journal of Archaeological Science : Reports* 66 : 105287.
- Suda, Y., Ikeya, N., Shimada, K. and Ono, A. in press. An overview of the obsidian sources of Japan. In *Sourcing Obsidian*, edited by F.-X. Le Bourdonnec, M. S. Shackley and M. Orange, Springer.

(a) 原子モデル

ナトリウム (Na) 原子

○ 電子
● 原子核 (中性子 + 陽子)

- 元素は原子核と電子により構成される。
- 電子は原子核を中心とした定められた軌道上 (電子殻) に位置している。
- 電子軌道は原子核に近いものからK殻, L殻, M殻などと呼ばれる。

(b) 高エネルギーのX線や電子を原子に照射すると何が起こるのか？

発生確率
Kα線 : Kβ₁線 ≈ 150 : 20

- 原子内の電子が原子の外に弾き飛ばされ (電離が生じ), 原子は励起状態となる。
- 外側の軌道の電子が内側の空孔に遷移し, その際にX線を放出して原子は定常状態に戻る。
- K殻電子が電離 → 空いたK殻にL殻電子が遷移することでKα線が放出。
- K殻電子が電離 → 空いたK殻にM殻電子が遷移することでKβ₁線が放出。

(c) なぜ元素によって放出される特性X線のエネルギーは異なるのか？

➢ 放出されるKα線やKβ₁線などX線のエネルギーは, 電離する前の電子の軌道上の結合エネルギーと, そこに遷移する前の電子の軌道上の結合エネルギーとの差で決まる。

ナトリウム (Na) の場合

Na原子から放出される
Kα線のエネルギー
Kα線 : 1072.1 - 31.1 = 1041.0 eV

表 吸収端・結合エネルギー/eV

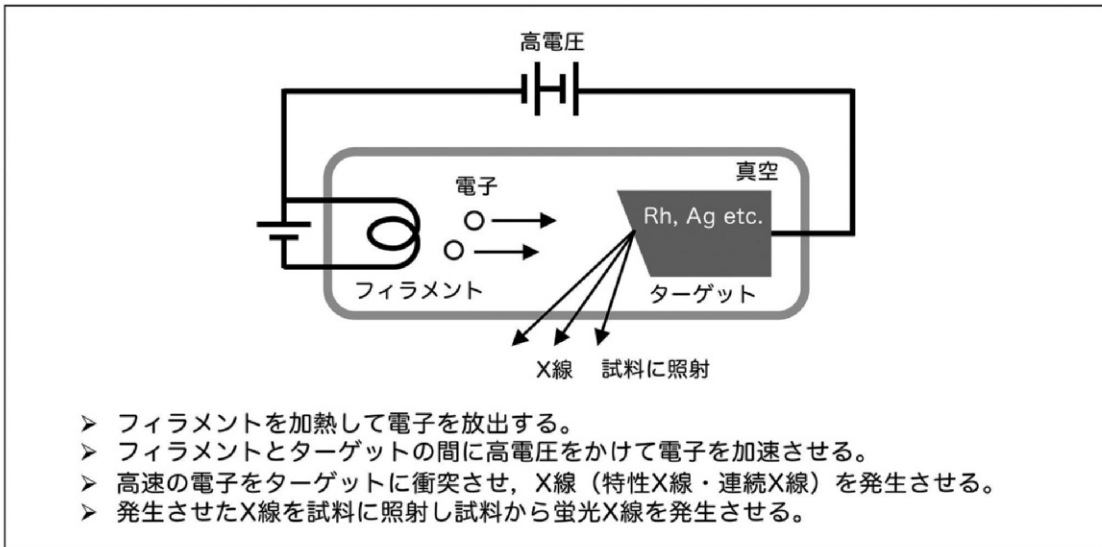
元 素	K 1 s	L ₁ 2 s	L ₂ 2 p _{1/2}	L ₃ 2 p _{3/2}
11 Na	1072.1	63.3		31.1
12 Mg	1305.0	89.4		51.4
13 Al	1559.6	117.7		73.1
14 Si	1838.9	148.7		99.2

分析化学便覧より

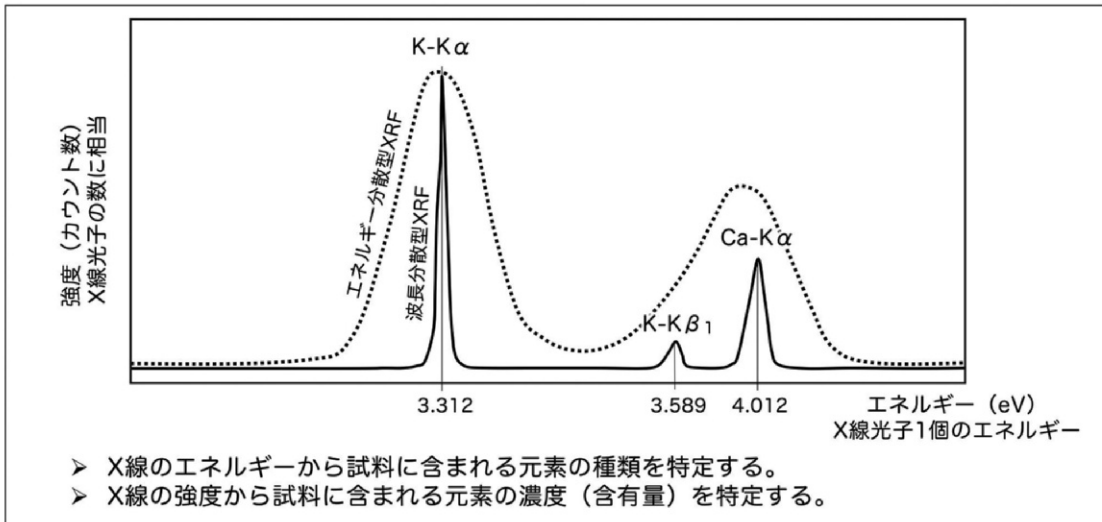
- 電子の数 (原子番号) によって, 同じK殻電子でも結合エネルギーが異なる。
- 原子番号の大きい元素の方が同じK殻電子であっても結合エネルギーが大きくなる。

付図1 X線および特性X線の発生についての解説

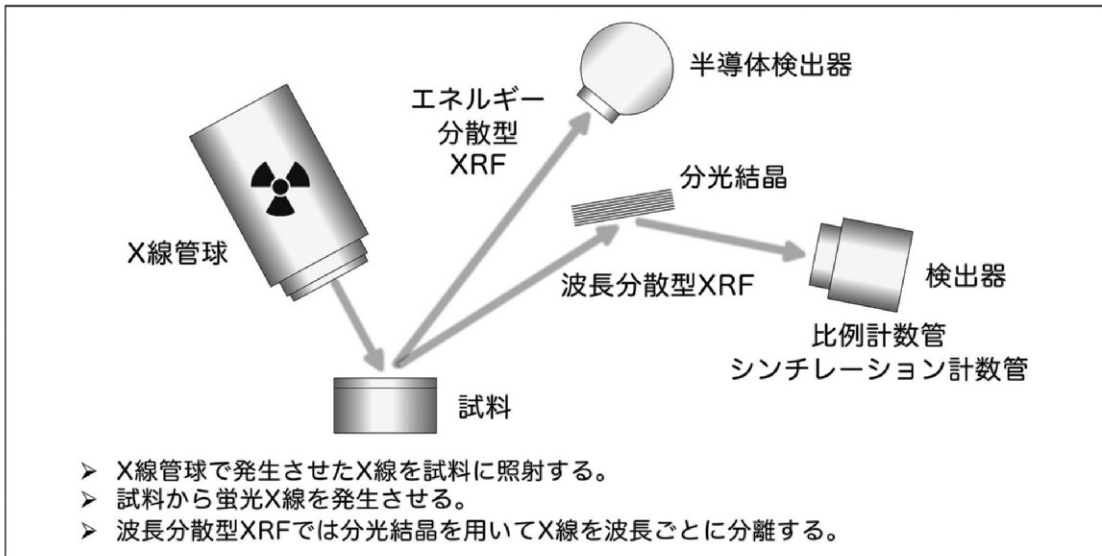
(a) X線管球のしくみ



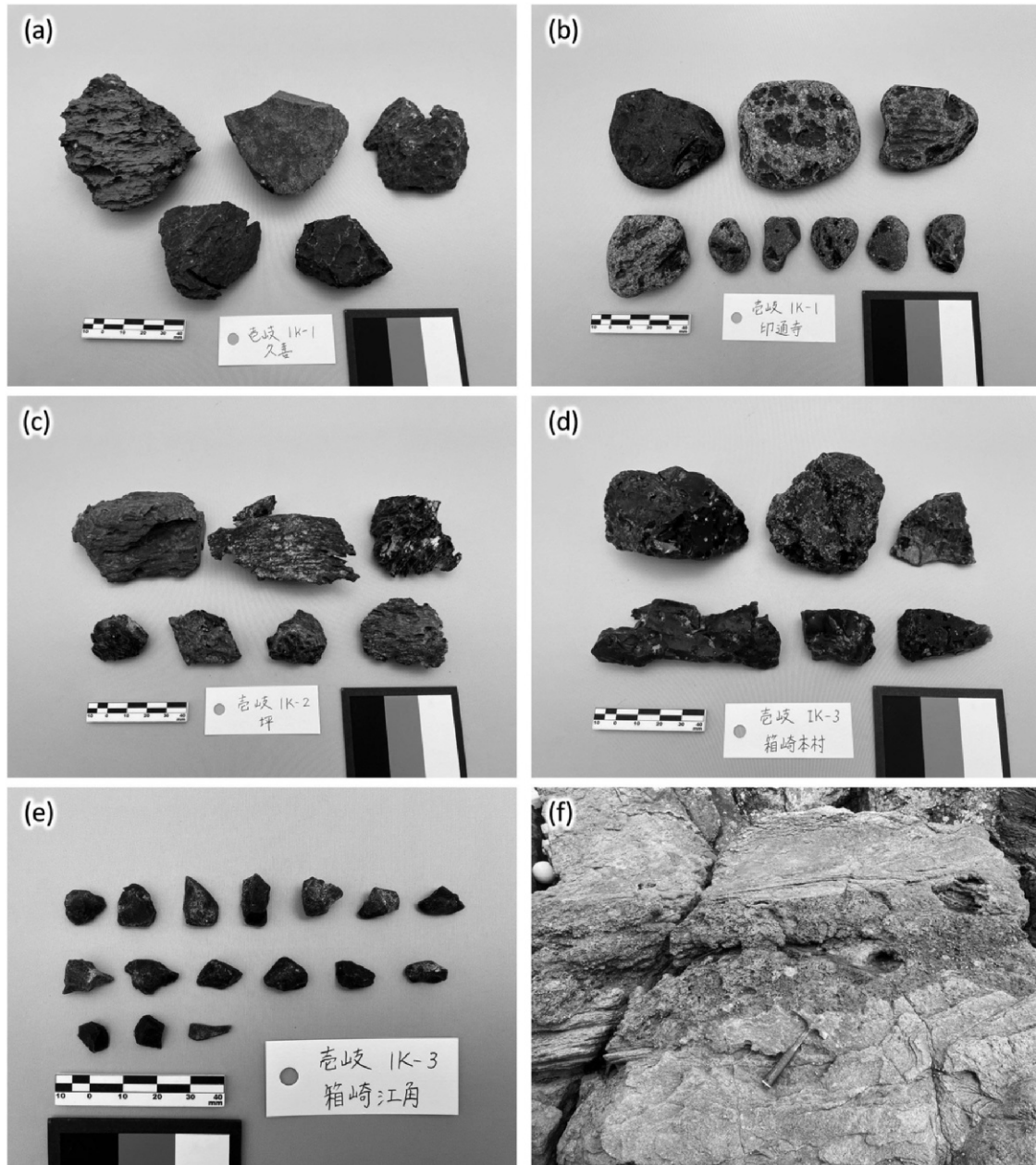
(b) 蛍光X線分析により得られる蛍光X線スペクトル



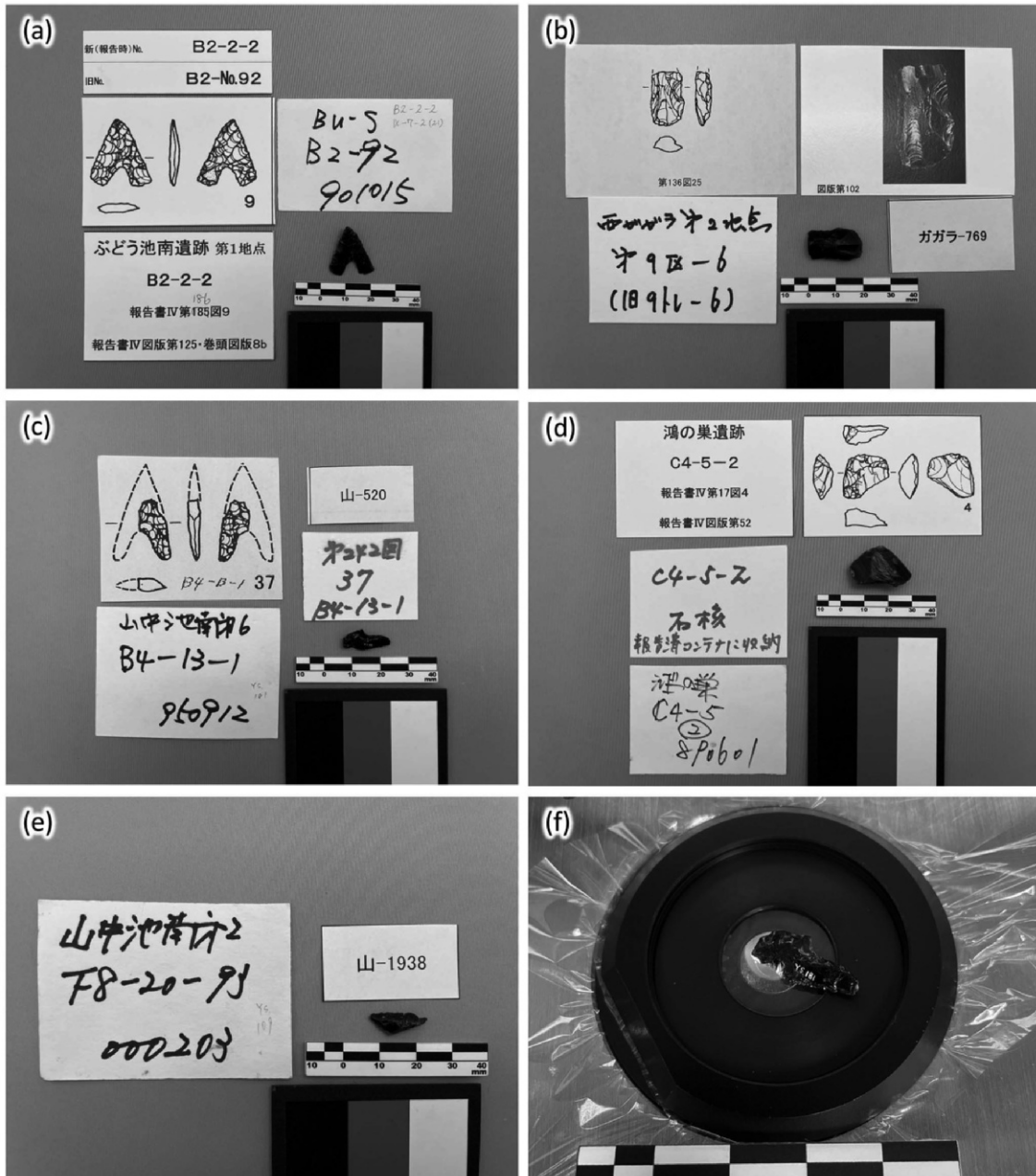
(c) 蛍光X線分析装置のしくみ



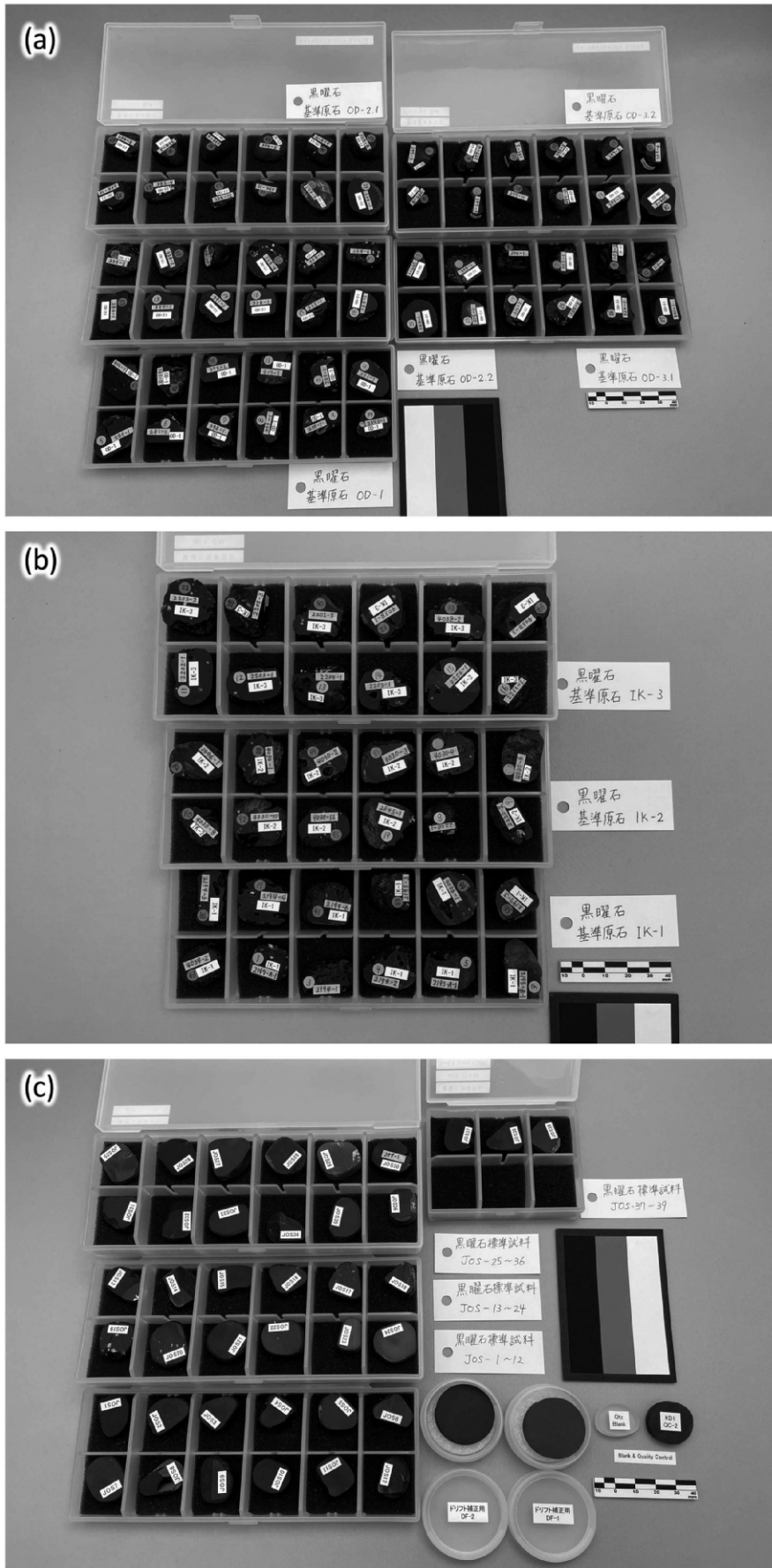
付図2 蛍光X線分析装置についての解説



付図3 壱岐に産する黒曜石原石 (a: 久喜, b: 印通寺, c: 坪, d: 箱崎本村, e: 箱崎江角) および壱岐の坪地域に分布する、黒曜石 (マレカナイト) を含む流紋岩の露頭 (f)



付図4 ぶどう池南遺跡第1地点 (a), 西ガガラ遺跡第2地点 (b), 山中池南第6地点 (c), 鴻の巣遺跡 (d), 山中池南第2地点 (e) から出土した黒曜石製石器, およびエネルギー分散型XRF (リガク社製 NEX DE) による黒曜石製石器の分析状況 (f)



付図5 長崎大学教育学部地学教室で整備した貸出し用黒曜石基準原石セット (a: 隠岐島後, b: 壱岐), および黒曜石標準試料セット (c: 右下にドリフト補正用試料, 品質管理用試料を示す).

(a) 分布楕円の長軸半径の算出

```
=LET(
X, BN3:BN70, ----- X軸の値 (数値のみを使用)
Y, BO3:BO70, ----- Y軸の値 (数値のみを使用)
ok, (ISNUMBER(X))* (ISNUMBER(Y)), ----- X・Yとも数値の行だけ TRUE
x, FILTER(X, ok), ----- 欠損を除外したX
y, FILTER(Y, ok), ----- 欠損を除外したY
n, ROWS(x), ----- 有効データ数
mx, AVERAGE(x), ----- Xの平均
my, AVERAGE(y), ----- Yの平均
dx, x-mx, ----- 平均中心化 (X)
dy, y-my, ----- 平均中心化 (Y)
sxx, SUMPRODUCT(dx*dx)/(n-1), ----- 分散Sxx
syy, SUMPRODUCT(dy*dy)/(n-1), ----- 分散Syy
sxy, SUMPRODUCT(dx*dy)/(n-1), ----- 共分散Sxy
det, MAX(sxx*syy - sxy*sxy, 1E-300), ----- det( $\Sigma$ ) (0割回避)
tr, sxx+syy, ----- トレース tr( $\Sigma$ )
lam1, (tr + SQRT(MAX(tr*tr - 4*det, 0)))/2, ----- 最大固有値  $\lambda_1$ 
d2, (dy*dy*sxx - 2*dx*dy*sxy + dx*dx*syy)/det, ----- 各点の二乗マハラノビス距離  $d_i^2$ 
k, SQRT(MAX(d2)), ----- スケール係数  $k = \sqrt{(\max d_i^2)}$ 
k*SQRT(lam1) ----- 主軸半径 a (長軸方向)
)
```

(b) 分布楕円の短軸半径の算出

```
=LET(
X, AZ3:AZ70, ----- X軸の値 (数値のみを使用)
Y, BA3:BA70, ----- Y軸の値 (数値のみを使用)
ok, (ISNUMBER(X))* (ISNUMBER(Y)), ----- X・Yとも数値の行だけ TRUE
x, FILTER(X, ok), ----- 欠損を除外したX
y, FILTER(Y, ok), ----- 欠損を除外したY
n, ROWS(x), ----- 有効データ数
mx, AVERAGE(x), ----- Xの平均
my, AVERAGE(y), ----- Yの平均
dx, x-mx, ----- 平均中心化 (X)
dy, y-my, ----- 平均中心化 (Y)
sxx, SUMPRODUCT(dx*dx)/(n-1), ----- 分散Sxx
syy, SUMPRODUCT(dy*dy)/(n-1), ----- 分散Syy
sxy, SUMPRODUCT(dx*dy)/(n-1), ----- 共分散Sxy
det_raw, sxx*syy - sxy*sxy, ----- det( $\Sigma$ )
det, IF(det_raw<=0, 1E-300, det_raw), ----- 0割回避
tr, sxx+syy, ----- トレース tr( $\Sigma$ )
lam2, (tr - SQRT(MAX(tr*tr - 4*det, 0)))/2, ----- 最小固有値  $\lambda_2$  (短軸)
d2max, MAX((dy*dy*sxx - 2*dx*dy*sxy + dx*dx*syy)/det), ----- max( $d_i^2$ )
k, SQRT(d2max), ----- スケール係数  $k = \sqrt{(\max d_i^2)}$ 
k*SQRT(lam2) ----- 短軸半径 b
)
```

(c) 分布楕円の回転角の算出

```
=LET(
X, BN3:BN70, ----- X軸の値 (数値のみを使用)
Y, BO3:BO70, ----- Y軸の値 (数値のみを使用)
ok, (ISNUMBER(X))* (ISNUMBER(Y)), ----- X・Yとも数値の行だけ TRUE
x, FILTER(X, ok), ----- 欠損を除外したX
y, FILTER(Y, ok), ----- 欠損を除外したY
n, ROWS(x), ----- 有効データ数
mx, AVERAGE(x), ----- Xの平均
my, AVERAGE(y), ----- Yの平均
dx, x-mx, ----- 平均中心化 (X)
dy, y-my, ----- 平均中心化 (Y)
sxx, SUMPRODUCT(dx*dx)/(n-1), ----- 分散Sxx
syy, SUMPRODUCT(dy*dy)/(n-1), ----- 分散Syy
sxy, SUMPRODUCT(dx*dy)/(n-1), ----- 共分散Sxy
tr, sxx+syy, ----- トレース tr( $\Sigma$ )
det, sxx*syy - sxy*sxy, ----- det( $\Sigma$ )
lam1, (tr + SQRT(MAX(tr*tr - 4*det, 0)))/2, ----- 最大固有値  $\lambda_1$ 
vx, sxy, ----- 第1主成分ベクトル成分 (x成分に相当)
vy, lam1 - sxx, ----- 第1主成分ベクトル成分 (y成分に相当)
DEGREES(MOD(ATAN2(vx, vy) + PI(), PI())) ----- 回転角  $\theta$  (0-180°)
)
```

付図6 各化学組成グループの判別楕円 (PCAに基づく分布楕円) を作成するために用いた Excel 関数 (a～c)

A methodology for provenance analysis of archaeological obsidian based on quantitative EDXRF: A case study of the Oki-Dogo and Iki Island sources, southwest Japan

Yoshimitsu Suda^{1*}, Yui Namba¹

Abstract

The increasing availability of handheld X-ray fluorescence (XRF) instruments has renewed interest in obsidian provenance studies based on quantitative data, including studies conducted in Japan. This development has also highlighted the need to establish a systematic and reproducible provenance methodology using benchtop energy-dispersive XRF (EDXRF), which has long been employed in archaeological studies. A major challenge in this context has been the limited availability of well-characterised reference obsidian, particularly geological source specimens that can be shared among research institutions. At the Archaeological XRF Laboratory, Faculty of Education, Nagasaki University, a benchtop EDXRF spectrometer (Rigaku NEX DE) was introduced and calibrated using 39 obsidian standards, enabling quantitative analysis based on the calibration-curve method. Major obsidian sources within the Japanese archipelago were classified according to their chemical composition, and representative geological reference obsidian specimens were prepared for each compositional group. Obsidian from Oki-Dōgo Island (Shimane Prefecture) and Iki Island (Nagasaki Prefecture) was subdivided into five and three compositional groups, respectively. On the basis of these reference frameworks, provenance discrimination diagrams were constructed using quantitative EDXRF data. The applicability of the proposed approach was evaluated by analysing five obsidian artefacts excavated from archaeological sites on the Higashi-Hiroshima Campus of Hiroshima University. Four of the five artefacts were consistently assigned to obsidian from the Kumi area of Oki-Dogo Island (compositional group OD-1), demonstrating the effectiveness and reliability of the quantitative EDXRF-based provenance analysis presented in this study.

Keywords : obsidian artefacts, provenance analysis, EDXRF, quantitative analysis, Oki-Dogo, Iki Island

(Received 25 November 2025 / Accepted 6 February 2026)

¹ Faculty of Education, Nagasaki University, 1-14 Bunkyo-machi, Nagasaki 852-8521, Japan
* Corresponding author: Yoshimitsu Suda (geosuda@nagasaki-u.ac.jp)

