

完全非破壊化学分析による石器石材研究 －青森県立郷土館収蔵石製品の石材同定－

飯塚 義之¹⁾・杉野森 淳子²⁾

Non-invasive Chemical Investigation of Stone Artifacts from the Collections of the Aomori Prefectural Museum

IIZUKA Yoshiyuki and SUGINOMORI Junko

キーワード: 石製品、玦状耳飾り、ネフライト、葉蠟石、蛍光 X 線分析

1. はじめに

石製遺物は風化や腐食に強く、製作当時の情報をそのまま現代に伝える貴重な文化財である。石器石材(岩石の種類)を正しく理解することによって、岩石種別の用途や製作技法の違い、さらに地域間の繋がりを知る上で有用な情報をもたらされる。しかし、肉眼での表面観察による石材同定は表面の風化などにより判断が難しく、正確に判別されていない例もある。近年の分析技術の進歩によって、携行型蛍光 X 線分析装置 (portable type X-ray fluorescence spectrometer: 以降「p-XRF」と記す) による非破壊化学分析が可能になってきている。筆者らはこの分析技術を青森県立郷土館に収蔵されている縄文時代の石製品分析に応用し、石器石材の再検討を行った。p-XRF での「その場」分析の結果を元に、さらに 3 資料は、台北市の中央研究院地球科学研究所にて走査型電子顕微鏡 (SEM) による非破壊化学分析を実施した。一連の分析でこれまで滑石岩製、あるいは不明とされていた石器石材の中にネフライトや葉蠟石岩があることを確認したのでここに報告する。

2. 分析研究対象の石製品

青森県立郷土館収蔵品 10 点の石製品を分析対象とした (表 1、図 1)。うち縄文晩期～弥生時代相当と考えられている磨製石斧が 1 点、縄文時代晩期の独鈷石 (どっこいし) が 1 点、縄文時代中期の青竜刀形石器 1 点、縄文時代前期から晩期相当の石製装飾品 7 点である。いずれも表採品である。

3. 分析方法

(1) p-XRF を用いた「その場」非破壊化学分析

青森県立郷土館内での「その場 (in-situ)」分析にはオックスフォード・インストルメンツ社製の p-XRF (X-MET7500) を使用した。分析資料のうち磨製石斧は大気雰囲気下のまま X 線照射を行った。照射される X 線ビーム径は 9mm で、軽元素分析を加速電圧 13kV で 4 秒間、重元素分析を加速電圧 40kV で 1 秒間とし、それを 12 回繰り返した計 60 秒間のエネルギー分散型 X 線スペクトル (EDS) の測定から、岩石・鉱物分析に対応できる軽元素分析用の Mining LE-FP (パラメータ) 法を用い酸化物の重量パーセントを計算させ分析値とした。含まれる元素とその比から石材の判別を行った。

(2) SEM-EDS による非破壊化学分析

分析対象の 3 点 (AOK-13・14・15) は、フィールドエミッション走査型電子顕微鏡 (日本電子社製 FE-SEM JSM-7100F-LV) の低真空雰囲気 (50Pa) に設定した試料室に導入し表面微細組織の観察と、搭載されたエネルギー分散型 X 線分析装置 (EDS: オックスフォード・インストルメンツ社製 X-max80, INCA-350) を用いた定量化学分析を行った。SEM による表面観察の後、20 箇所以上の平滑で損傷のない部位を探し分析を行った。定量化学分析におけるビーム条件は、加速電圧 15kV、ビーム電流 120pA、作動距離 (working distance) は 10mm とした。分析領域は 1mm 径以下で、60 秒間のエネルギー分散型 X 線を測定、分析結果は化学量論値 (ストイキオメトリー) 計算を行って、分析の確からしさを確認した。今回の場合、カルシウム角閃石 ($\text{Ca}_2[\text{Mg, Fe}]_5\text{Si}_8\text{O}_{22}[\text{OH}]_2$) と葉蠟石 ($\text{Al}_4[\text{Si}_8\text{O}_{20}][\text{OH}]_4$) の理想化学式に見合わないデータは表面状態不良として廃棄した。SEM-EDS 分析法の詳細は、飯塚 (2012, 2017) を参照されたい。

4. 分析結果

p-XRF 法による石材の同定結果 (表 1) と分析結果 (表 2) をそれぞれ示す。

玦状耳飾りは、薄緑色の 2 点 (AOK-16・17) は鉄成分が含まれる滑石岩製、緑色の三角形玦状耳飾り (AOK-13) は

1) 台湾 中央研究院地球科学研究所 研究技師 博士 (理学) (台北市南港区研究院路 2 段 128 號) (金沢大学国際文化資源学研究センター・東北大学東北アジア研究センター)

2) 青森県立郷土館 主任学芸主査 (〒030-0802 青森市本町二丁目 8-14)

緑閃石ネフライト製、白色で円形のもの(AOK-14)は葉蠟石岩製であった。

縄文中期とされる薄緑色の垂飾品(AOK-6:つがる市田小屋野貝塚)は白雲母片岩製、縄文中期の薄緑色の垂飾未製品(AOK-7)は玉髓製であった。また、縄文晩期～弥生時代とされる深緑色の磨製石斧(AOK-15)は緑閃石ネフライト製であった。石製装飾品は、単一の鉱物で構成される岩石(単鉱岩)で製作され、かつ表面研磨が施されているものが多く、p-XRF 法による分析は大変有用である。しかし一方で、今回の一連の分析の内、分析番号 AOK-18・19・20 の 3 点に関しては、理想的な状態を満たしていたとはいえず、分析結果による岩石の判別はあくまで参考として記録した。AOK-18・19 の 2 点については、 SiO_2 値が 51wt% および 46wt% を示し、かつ表面の肉眼観察から玄武岩製と判断した。AOK-20 は、砂岩あるいは頁岩に鉄を含む有機質物質塗布が施されていると判断した。塗布物に硫黄(S)が認められなかったことから、この物質はアスファルトではなく、鉄を含む「漆」のようなものの可能性が高いと考えられる。

AOK-13・14・15 の 3 点は、SEM-EDS 法での分析を行った(表3、図2)。

AOK-13 および -15 の 2 試料の表面観察では、カルシウム角閃石(ネフライト)に特徴的な繊維状組織が観察された(図2B および D)。EDS-SEM 法による、これらネフライトの鉄-マグネシウム比($\text{Mg}/[\text{Mg}+\text{Fe}]$)は、AOK-13 において 52 点分析の平均値 0.876(組成のばらつき 0.90 ~ 0.85)、AOK-15 において 29 点分析の平均値 0.884(ばらつき 0.89 ~ 0.87)であった(図2A)。p-XRF 法による「その場」分析から得た比はそれぞれ 0.89 と 0.87 であり、SEM-EDS 法の定量分析値と調和的である。一方、葉蠟石岩製と判断した AOK-14 については、葉蠟石の理想化学式 $\text{Al}_4[\text{Si}_8\text{O}_{20}][\text{OH}]_4$ から導ける Si/Al 値が 2.0 に対して、p-XRF 法で 1.80、SEM-EDS 法の 23 点分析の平均値 1.98(組成のばらつき 2.1 ~ 1.9)であり、こちらも理想化学式に見合う結果を得ている。

5. 考察

石製品の石材

非破壊化学分析による縄文時代の石器石材の同定によって、これまで知られていた滑石岩や玉髓以外にも、ネフライト、葉蠟石岩、白雲母片岩が装飾品の石材として利用されていることがわかった。以下に、それぞれの石材について解説する。

ネフライト(Nephrite、構成鉱物:透閃石～緑閃石、理想化学式: $\text{Ca}_2[\text{Mg}, \text{Fe}]_5\text{Si}_8\text{O}_{22}[\text{OH}]_2$ モース硬度 $H=6 \sim 6.5$)

ネフライト(岩石名)はカルシウム角閃石(Ca-Amphibole: 鉱物名)が 90% 以上を占め、緻密な繊維構造を持つ単鉱岩である(Harlow & Sorensen 2005)。ネフライトはその緻密な繊維構造をもつため「ヒスイ」よりも強靱で、石斧や石鑿として利用するのに極めて優れた岩石である(Bradt et al. 1973)。ネフライトを構成するカルシウム角閃石は、含まれるマグネシウム(Mg)と鉄(Fe)の比によって透閃石(tremolite)と緑閃石(actinolite)とに区分され、 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ 値が 0.9 以上を透閃石、0.9 以下(0.5 以上)を緑閃石とされている。鉄を全く含まない透閃石からなるネフライトは白色ないし明灰色で、一般的に鉄の含有量が増えるにしたがって緑色が濃くなる。白色のネフライトは鉄をほとんど含まないドロマイトを主とする炭酸塩岩が変成した変成岩である。一方で、緑色を呈するネフライトは蛇紋岩が変成してできた岩石である。緑色ネフライトを構成するカルシウム角閃石の $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ 値は透閃石から緑閃石の定義の境界を挟んだ概ね 0.93 ~ 0.85 の範囲を示す。本調査のネフライト製品分析から得た組成範囲は 0.90 ~ 0.86 で、この数値は蛇紋岩に由来するネフライトを示している。

滑石岩(構成鉱物:滑石 talc $[\text{Mg}, \text{Fe}]_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ $H=1$) 滑石岩は蛇紋岩体中に産出し、純度の高いものは白色～淡緑色を呈する。軟らく加工しやすいことから、装飾品に多く利用されている(註1)。玦状耳飾り 2 点(AOK-16・17)は鉄成分が含まれる滑石岩製であった。このような滑石も一般的に蛇紋岩体に産する。代表的な産地は北海道南部(松前)、岩手県北部(現遠野市宮守)などがある。

葉蠟石岩(構成鉱物:葉蠟石、ようろうせき pyrophyllite $\text{Al}_4[\text{Si}_8\text{O}_{20}][\text{OH}]_4$ $H=1.5$) いわゆる「ろう石」である。白色で蠟感に富む岩石である。柔らかい性質で加工しやすいことから江戸末期から石印材・彫刻材として広く活用されている。肉眼では滑石と明瞭に区別できないことが多いが、滑石とは岩石の成り立ちや産地が異なる。葉蠟石は流紋岩などの火山岩類が熱水変質作用によって生成されたものである。国内の主要産地は中国地方であるが、中部地方から北海道にかけても小規模な産地は散在している。主に長野県や岩手県・北海道に多く、青森県内では下北半島(青森鉱山、安部城鉱山)や岩木山(現弘前市赤川)・七戸町上北鉱山などで産出が報告されている(金原 1991)。

白雲母岩(構成鉱物:白雲母、しろうんも muscovite $\text{K}_2\text{Al}_4\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{20}[\text{OH}]_4$ $H=2.5 \sim 3$) 雲母類は石材として脆く、その柔らかさ($H=3$)を利用し、緑色を呈する白雲母片岩は装飾品に用いられている例が多い(大坪 2015, Hung & Iizuka 2016)。本調査で確認した AOK-6 も白雲母に特徴的な劈開が観察され、また p-XRF 分析においてカリウム(K)、アルミニウム(Al)が特徴的に捉えられることから判別が容易である。この石材は白雲母片岩あるいは白雲母石英片岩に由来するものと思われる。

玉髓(ぎよくずい chalcedony SiO_2 $H=6 \sim 7$) 石英(SiO_2)の細かい結晶からなる岩石で緑色を呈することが多い。AOK-7 も緑色を呈している。穿孔途中の未製品である。

玄武岩(basalt) オリビン、輝石、斜長石などから構成される火山岩の一種である。日本で産出する火山岩の中でも安山岩と並び主要なもので、東北地方にも産地が多い。表面分析による化学組成からその産地を探ることは困難である。同質の化学組成の深成岩はハンレイ岩と称する。

6. おわりに

東アジア、さらに東南アジア地域の先史時代に広く用いられてきた岩石は、ネフライトである（飯塚 2012 など）。ネフライトは、主として新石器時代以降より磨製石斧の材料あるいは「玉」として装飾品に用いられていた。しかしながら、ネフライト（あるいは「透閃石岩」）の存在については特殊な例を除きその存在に注意が払われていなかった。川崎（2008）、中村（2011、2015）や飯塚（2017）は、北信越地方の旧石器時代後期～縄文時代の出土遺物で蛇紋岩とされてきた石斧の一部からネフライトあるいは透閃石製石器の存在を確認している。また、東海地方にても縄文時代のネフライト製石斧を確認した（飯塚・藤井 2020）。今回行った化学分析調査で、青森県においても縄文時代に玢状耳飾りなどの装飾品にネフライトが利用されていたことが明確になった。さらに、これまで石材として認識されていなかった葉蠟石が縄文時代に利用されていたことが明らかとなった。白色系の環状タイプの玢状耳飾りは、肉眼観察では石材を特定できないことが多かった。このタイプの玢状耳飾りは縄文早期から北陸地方をはじめ東日本各地に現れる（中村・飯塚 2020）。県内では早期末の八戸市長七谷地貝塚、前期の青森市三内丸山遺跡等でも確認されている。今回、石材が特定されたこと、それも葉蠟石岩という岩石を認識できたことは、石材利用を考える上での新たな知見である。この石材の利用が地域的なものか、特定の製品に利用されているものかを確認するため、白色系の玢状耳飾りの分析を進めるとともに、葉蠟石岩の産出地の調査も行っていきたい。

石製遺物の石材鑑定は肉眼観察によつてのみ行われることが多かったため、岩石種が間違つて認識されている事例も少なからず見受けられるようである。今回分析の対象とした石製品もその特徴的な緑色や風合いから滑石あるいは不明と記載されていたが、分析によつて石材名を確かめることができた。今回、一連の分析で対象とした遺物は、その形状から時代的な特徴を反映している資料ではあるが、明確な出土記録を持たない表採および寄附資料である。今後、明確な出土記録を持つ発掘調査による出土品についても、非破壊化学分析による石器石材分析の機会が増えるよう関係各位のご理解を願う。

謝辞

本研究は日本学術振興会科研費（基盤 C:JP18K01088: 飯塚義之:金沢大学国際文化資源学研究センター客員研究員）の助成を受けて行われ、飯塚が東北大学東北アジア研究センター客員教授在任期間中（2019 年 2 月～4 月）に実施したものである。本研究にご協力いただきました関係各位および研究紀要査読員福田友之氏に感謝申し上げます。

註釈

註1) 蛇紋岩 (serpentinite) は蛇紋石 (serpentine $[\text{Mg, Fe}]_3\text{Si}_2\text{O}_5[\text{OH}]_4, \text{H}=2 \sim 5$) から構成される岩石である。アルカリ元素を含まず、ケイ素 (Si)、マグネシウム (Mg)、鉄 (Fe) と酸素を主成分とする含水鉱物である。滑石 ($[\text{Mg, Fe}]_3\text{Si}_4\text{O}_{10}[\text{OH}]_2$) も同様の元素構成を持つが、p-XRF 法による簡易分析においても、両者の Si/(Mg+Fe) 値によつて容易に区分できる。これら蛇紋石と滑石は、カルシウム (Ca) を含むネフライトやアルミニウム (Al) を含むヒスイとも容易に区別できる。

引用文献

- 飯島 東 1977 「北上山地中生層から葉蠟石の産出」『地質学雑誌』83:244-246.
- 飯塚義之 2012 「考古鉱物学:低真空走査型電子顕微鏡による玉器の分析とその成果」『日本電子ニュース』44:23-39.
- 飯塚義之 古川知明 中村由克 2016 「富山城石垣土塁から出土したネフライト玉石の来源」『大境』(富山県考古学会)35:67-72.
- 飯塚義之 2017 「ハンドヘルド蛍光X線分析装置を用いた石器石材分析の試み」『富山市の遺跡物語』(富山市埋蔵文化財センター所報)18:36-39.
- 飯塚義之 藤井康隆 2020 「完全非破壊化学分析による石器石材研究:名古屋市博物館および南山大学人類学博物館収蔵のネフライト製石斧の再発見」『名古屋市博物館研究紀要』43:11-14.
- 五十嵐俊雄 2006 『考古資料の岩石学』パリノ・サーヴェイ株式会社
- 大坪志子 2015 『縄文玉文化の研究—九州ブランドから縄文文化の多様性を探る』雄山閣
- 金原啓司 1991 「日本の地熱地帯のパイロフィライト」『地質調査所月報』42-6/7:347-362.
- 川崎 保 2008 「縄文時代玉製品にみられる大陸文化の影響」『日文研叢書,42,261-286, 共同研究報告書 No.87』.
- 中村由克 2011 「旧石器時代北陸の石材環境」『考古学ジャーナル』610:7-10.
- 中村由克 2015 「後期旧石器時代における透閃石岩製石斧のひろがり」『旧石器研究』(日本旧石器学会)11:65-78.
- 中村由克 2017a 「北陸系石材の三内丸山遺跡への波及の研究」『特別史跡三内丸山遺跡年報』20:55-66.
- 中村由克 2017b 「下鎌田遺跡の石製装身具の石材とその意義」『下仁田町自然史館研究報告』2:27-32.
- 中村由勝・飯塚義 2020 「下蒲田遺跡の玢状耳飾の蛍光X線分析とその再評価」『下仁田町自然史館研究報告』5:19-26.
- 藤田富士夫 1992 『玉とヒスイ—環日本海の交流をめぐる』同朋舎出版
- 吉村豊文 林 正雄 芳西 修 1966 「長野県白馬村産プレーナイトおよびネフライト(軟玉)」『鉱物学雑誌』8:84-93.

(英文)

Bradt, R.C., Newnham R.E, Biggers J.V., 1973 The toughness of jade, American Mineralogists 58:727-732

Harlow G.E., Sorensen S.S., 2005, Jade (Nephrite and Jadeitite) and Serpentinite: Metasomatic Connections International Geology Review 47:113-146

Hung H.-C., Iizuka Y., 2017, Nephrite and Mica Industries, In Khao Sam Kaeo: An Early Port-City between the Indian Ocean and the South China Sea (Ed.Bérénice Bellina) Memrories Archeologiques 28, Ecole Francaise D'extreme-Orient, pp.461-486.



図1 分析資料

表1 分析資料一覧

No	分析番号	分析法	種類	時代	遺跡名	所在地	色彩	石材	従来の石材名	備考	大きさcm／重さg	出土位置	郷土館資料番号等*
1	AOK-6	○	垂飾品	中期	田小屋野貝塚	つがる市	薄緑色	白雲母片岩	片岩	穿孔穴。完形	長4.1 幅2.62 厚1.07 ／重21	発掘調査時の表 採品	出典：青森県立郷土館 調査報告第35集・考古 -10 1995「木造町田小 屋野貝塚」1995, 第35 図3/1812-264
2	AOK-7	○	垂飾未製品	中期	三内地区	青森市	薄緑色	玉髓	玉髓	穿孔痕。完形	長3.2 幅2.4 厚2.0/ 重20	寄附資料。採集	90-21
3	AOK-13	●	玦状耳飾り	前期末～ 中期初頭	不明	青森市内	緑色	ネフライト	滑石	穿孔穴。1/2残 存。三角形	長3.5 幅(2.5) 厚0.34 ／重5	寄附資料。採集	543-1667 (風韻堂 13-21)
4	AOK-14	●	玦状耳飾り	前期	不明	青森市内	白色	葉蛸石岩	不明	穿孔穴。1/2残 存。円形	長4.8 幅(2.1) 厚0.55 ／重8	寄附資料。採集	543-1666 (風韻堂 13-20)
5	AOK-15	●	磨製石斧	縄文晩期 ～弥生	田舎館地区	田舎館村	深緑色	ネフライト	不明	側面擦切り、定 角。完形	長7.7 幅5.2 厚1.52 ／重188	寄附資料。採集	1298-2
6	AOK-16	○	玦状耳飾り	前期	不明	不明	薄緑色	滑石岩	滑石	穿孔穴。1/2残 存。円形	長4.5 幅(1.9) 厚0.46 ／重7	寄附資料。採集	543-1674 (風韻堂 13-28)
7	AOK-17	○	玦状耳飾り	前期末～ 中期初頭	不明	深浦町	薄緑色	滑石岩	滑石	穿孔穴。完形。 三角形	長4.2 幅4.5 厚0.55 ／重13	寄附資料。採集	543-1668 (風韻堂 13-22)
8	AOK-18	○	独結石	晩期	亀ヶ岡遺跡	つがる市	黒褐色	玄武岩	黒色粘版岩	完形。県重宝	長16.1 幅6.4 厚4.0、 [中央]3.0/重432	寄附資料。採集	543-9519 (風韻堂 29-5)
9	AOK-19	○	青竜刀形石 器	中期	戸山地区	青森市内	黒褐色	玄武岩	不明	基部欠損	長(16.0) 幅7.8 厚 2.5、[刃部]2.0/重 463	寄附資料。採集	543-9444 (風韻堂 28-21)
10	AOK-20	○	有孔石製品	晩期	亀ヶ岡遺跡	つがる市	黒褐色	砂岩	不明	自然石に穿孔穴 2つ。両面穿 孔。完形	長8.04 幅10.15 厚 1.4/重188	寄附資料。採集	543-1980 (風韻堂 15-44)

<分析法>○：p-XRF法による「その場」分析、●：SEM-EDS法による定量分析。#：分析資料番号AOK-20は表面に漆を塗布している可能性がある。

*郷土館資料番号の○○○主番号－○○枝番は博物館収蔵番号を表す。主番号543は風韻堂コレクションであり、（風韻堂○○-○○）は風韻堂コレクション独自の種類別番号である。

表2 p-XRF 法による非破壊「その場」化学分析結果

分析番号	AOK-6	AOK-7	AOK-13	AOK-14	AOK-15	AOK-16	AOK-17	AOK-18	AOK-19
石材名	白雲母片岩	玉髓	ネフライト	葉蛸石岩	ネフライト	滑石岩	滑石岩	玄武岩	玄武岩
鉱物名	白雲母	(石英)	緑閃石	葉蛸石	緑閃石	滑石	滑石	—	—
重量%									
SiO ₂	47.72	90.66	54.81	64.33	55.77	59.28	57.36	50.74	46.08
TiO ₂	0.65	0.00	0.03	0.20	0.13	0.06		3.62	0.75
Al ₂ O ₃	35.12	4.33	3.04	30.38	4.48	1.56	1.91	17.91	16.53
Cr ₂ O ₃							0.10		
FeO	0.73	0.16	5.08	0.22	5.52	5.75	5.18	14.59	18.21
MnO			0.15		0.15	0.05	0.06	0.11	0.32
MgO	0.00	0.00	23.89	0.00	20.86	27.51	30.60	0.00	0.00
NiO			0.04		0.02	0.21	0.25		0.01
ZnO	0.00		0.01		0.01	0.01	0.00	0.09	0.04
CaO	0.06	0.07	8.14	0.11	8.21	0.11		5.31	6.85
K ₂ O	10.93							0.75	2.32
Total	95.22	95.22	95.18	95.24	95.14	94.54	95.46	93.12	91.11
陽イオン比									
O =	22	2	23	22	23	11	11		
Si	6.319	0.958	7.698	7.736	7.809	3.892	3.747		
Ti	0.065	0.000	0.003	0.018	0.013	0.003	0.000		
Al	5.480	0.054	0.503	4.304	0.740	0.121	0.147		
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005		
Fe ²⁺	0.081	0.001	0.596	0.022	0.646	0.315	0.283		
Mn	0.000	0.000	0.018	0.000	0.017	0.003	0.003		
Mg	0.000	0.000	4.998	0.000	4.350	2.691	2.977		
Ni	0.000	0.000	0.004	0.000	0.002	0.011	0.013		
Zn	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000		
Ca	0.009	0.001	1.225	0.014	1.230	0.008	0.000		
K	1.846	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
total	13.799	1.015	15.047	12.094	14.808	7.045	7.177		
Si/Al	1.15			1.80		32	25		
Mg/(Mg+Fe)			0.89		0.87	0.90	0.91		
Si/(Mg+Fe)			1.4		1.6	1.3	1.1		

陽イオン比はそれぞれの鉱物の理想化学式に対応した計算結果を示している。

表3 SEM-EDS 法による非破壊定量分析結果

分析番号	AOK-13			AOK-14			AOK-15		
鉱物名	緑閃石			葉蠟石			緑閃石		
分析点数	n=52			n=23			n=29		
	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値
weight %									
SiO ₂	57.90	59.16	55.98	67.57	69.23	65.96	58.00	59.39	56.02
TiO ₂				0.88	1.07	0.67			
Al ₂ O ₃	1.32	3.25	0.64	28.97	29.59	27.61	2.77	4.02	1.99
FeO	5.42	6.35	4.28				5.04	5.85	4.60
MgO	21.52	22.38	19.75				21.55	22.31	20.27
CaO	12.20	13.12	10.08				10.62	11.50	8.39
Na ₂ O				0.65	0.80	0.48			
Total	98.36	99.74	95.06	98.24	99.86	96.27	97.99	99.79	95.01
atom per formula unit									
O =	23			22			23		
Si	7.937	7.997	7.799	7.886	7.984	7.826	7.913	7.997	7.776
Ti				0.077	0.094	0.058			
Al	0.213	0.524	0.103	3.984	4.051	3.867	0.445	0.641	0.316
Fe ²⁺	0.621	0.726	0.491				0.575	0.658	0.527
Mg	4.394	4.529	4.133				4.379	4.496	4.231
Ca	1.791	1.918	1.505				1.552	1.726	1.209
Na				0.147	0.178	0.107			
total	14.956	15.029	14.850	12.119	12.185	12.077	14.865	14.925	14.792
Mg/(Mg+Fe)	0.876	0.900	0.852				0.884	0.893	0.870
Si/Al				1.980	2.065	1.935			

FE-SEM: JEOL JSM-7100F (LV-mode: 50Pa), EDS: Oxford Instruments MAX-80 (INCA-350)

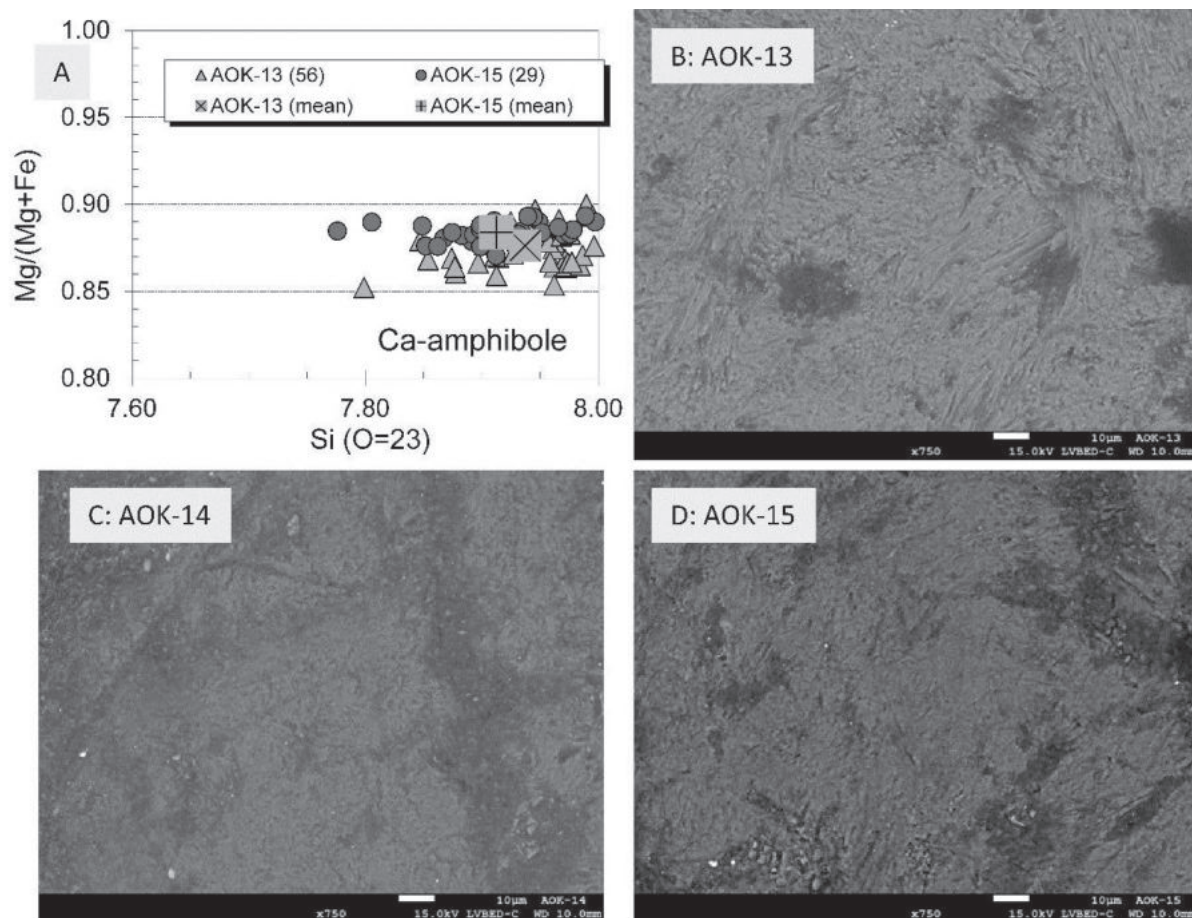


図2 A: ネフライト製石斧表面のカルシウム角閃石の化学組成
SEM-EDS 法で定量分析した結果をカルシウム角閃石判別図(縦軸: 鉄-マグネシウム比 $Mg/[Mg+Fe]$ 、横軸: ケイ素 [Si]) 上で示す。各分析値(かっこの中の数字は分析点数)と平均組成(mean)を示す。
B-D: 分析した石器の表面電子顕微鏡写真(反射電子像: スケールは10 ミクロン)。
B: AOK-13 (ネフライト)、C: AOK-14 (葉蠟石)、D: AOK-15 (ネフライト)。