

シンクロtron光を利用した猿投窯及び尾北窯出土陶片の化学的測定について

田村 哲（主任学芸員）

大西 遼（学芸員）

東 博純（あいちシンクロtron光センター）

はじめに

陶磁器の化学的測定は、成分元素の定量分析や定性分析を中心とし、産地推定や技法が解明される一助となるが、さらには、造形的な部分における考古的な知見などを加えることで多角的な分析となり、その精度も高くなる。また、これらの情報を共有した上で考古資料を分析することは、その資料の持つ価値をさらに高めることができる。

愛知県陶磁美術館（以下、陶磁美術館）では、昭和30年（1955年）から始まった愛知用水工事に伴う発掘調査により出土した窯跡出土資料を所蔵している（註1）。また、陶磁美術館の隣地には、平成25年（2013年）3月から供用されている「あいちシンクロtron光センター（以下、シンクロtron光センター）」があり、平成26年度から陶磁美術館とシンクロtron光センターの連携により陶片資料の化学的測定を実施している（写真1～3）。

今回は、先述の陶磁美術館が所蔵する窯跡出土資料のうち豊田市北部から名古屋市東山地域にかけての「猿投窯」と、春日井市、小牧市周辺に位置する「尾北窯」の窯跡出土資料を調査対象とした。

なお、猿投窯・尾北窯出土資料の化学分析については山崎一雄により先鞭をつけられ、緑釉陶器・灰釉陶器の釉の成分分析をはじめ、素地分析による焼成温度の想定等、一連の研究が行われている（註2）。また、三辻利一は全国各地の須恵器を中心とした陶磁器について蛍光X線分析による産地同定研究を進め、猿投窯・尾北窯に関するデータも提示している（註3）。近年では、降幡順子・尾野善裕による消費地遺跡（平安京冷然院）出土の緑釉陶器（推定猿投窯産・幡枝窯産）の釉薬分析があり、かつて山崎の示した成果と比較した検討も行われている（註4）。

本研究は、生産地遺跡である猿投窯と尾北窯の出土資料を考古学的に観察し、これらを化学測定した結果とあわせて陶片資料を分析するものである。

1 測定資料

最初に考古学的な観察による窯跡出土資料の概要を紹介する。猿投窯と尾北窯ともに須恵器・緑釉陶器・灰釉陶器の3種類を同一窯で焼成した窯を抽出した。猿投窯からは黒笹14号窯（以下K-14号窯とする）出土の陶片資料、尾北窯からは篠岡5号窯（以下S-5号窯とする）出土の陶片資料を主な分析対象とした。これに加え、尾北窯の内容を補足する意図で、高蔵寺2号窯（以下C-2号窯とする）と篠岡2号窯（以下S-2号窯とする）の出土資料を加えた（図1）。なお、上記4窯の所属窯式・実年代の中心は、現在概ね以下のように考えられている（註5）。

○猿投窯： K-14号窯（K-14号窯式、9世紀前半）

○尾北窯： S-5号窯（K-90号窯式前半、9世紀第3四半期）

C-2号窯（C-2号窯式、8世紀第1四半期）

S-2号窯（I-17号窯式、7世紀第3四半期）

以下、9点の出土資料について述べる。

(1) 資料1：K-14号窯出土須恵器杯蓋（PL.1、PL.2）

有台杯身に伴うと考えられる杯蓋で、比較的高い天井部から口縁部折り返し部に凹み気味に至り口縁部断面は台形状を呈する。復元すると天井部の2分の1程を回転ヘラ削りし、その他は回転ナデにより仕上げられる。回転ヘラ削りによる天井部に砂粒の移動は図示した通り右から左となる。轆轤から切り離した後、天井部を正位でヘラ削りすると考えると轆轤は左回転になるが、切り離しを回転ヘラ起こしにより行い、そのまま仕上げの削りを行わなかったと考えると右回転となる。

この資料は杯身と一緒に重ね焼きされたものと思われ、降灰や色調変化の様子から正位の杯身と逆位の杯蓋が交

互に重ね焼きされたことがわかる。色調変化も重ね焼きの境界で現れ、実測図でトーンをかけた部分が黒灰色、トーンをかけていない天井部外面は赤褐色、同じくトーンをかけていない天井部内面は暗褐色を呈する。破断面にも色調変化が見られ、塗りつぶした箇所は黒灰色、塗りつぶしていない部分は赤褐色で、「ウェファース状の構造」を呈する。ただし、内面の重ね焼きの境界より内側の断面に関してはこの色調変化の境界が漸移的である。

胎土はやや粗く、径 2mm 以下の白色砂粒をまばらに含む他、径 3～4mm の白色から褐色の砂粒も残存部で 3 粒ほど確認できる。焼成は良好である。「K - 14 灰層掘返し」の注記がある。愛知県陶磁美術館蔵。

(2) 資料 2 : K - 14 号窯出土緑釉花文皿素地 (PL. 3)

見込に陰刻による花文が彫られた皿で、一次焼成後施釉前の緑釉陶器素地である。端部がやや凹み気味の角高台を有し、全体に密なヘラミガキが施されている。おそらく同一の皿を正位で重ね焼きしたものと思われ、高台から底部にかけて実測図でトーンをかけた箇所は暗灰色、その他の箇所は灰白色を呈する。色調変化は器表の境界に対応するように破断面にも認められる。胎土は密で砂粒をほとんど含まない。緑釉素地としては焼成良好である。「K - 14 1」の注記がある。愛知県陶磁美術館蔵。

(3) 資料 3 : K - 14 号窯出土灰釉椀 (PL. 4)

実測図でトーンをかけた通り、底部以外に灰釉が施された灰釉陶器の椀である。灰釉は薄く施されており、残存部から刷毛痕を確認することができなかった。ほぼ断面正方形の高台を有し、比較的腰の張る体部から口縁部に至り、口縁端部の外反は弱めである。底部及び体部の下方 2 分の 1 程は回転ヘラ削りされ、高台及び体部上方、口縁部内外面は回転ナデ、内面はコテによる回転ナデで仕上げられる。素地は総じて灰白色、灰釉は緑灰色を呈する。胎土は密で砂粒をほとんど含まず、黒の斑点が所々に見られる。焼成は良好である。複数片が接合され、それぞれの破片に「K - 14 P 区」「K - 14 F 区」「K - 14 C 区」の注記がある。愛知県陶磁美術館蔵。

(4) 資料 4 : S - 5 号窯出土須恵器壺・甕 (PL. 5)

壺または甕の口頸部片で、垂下する口縁部により 1cm 程の縁帯が作り出される。現存部からは壺か甕かの特定は難しい。縁带上端は外方に摘まみ上げられた形になる。残存部は全体に回転ナデにより仕上げられ、轆轤目が顕著である。色調は全体に灰白色を呈する。胎土は密で砂粒をほとんど含まない。焼成は甘く生焼け気味である。「S - 5」の注記がある。愛知県陶磁美術館蔵。

(5) 資料 5 : S - 5 号窯出土緑釉椀 (PL. 6)

緑釉陶器の椀で、実測図でトーンをかけた通り内外面に安定した暗黄緑色の緑釉がかかり、貫入はあまり目立たない。口縁部は外反が弱めで全面にヘラミガキが施される。素地は暗褐灰色の須恵器的な色調を呈する。胎土は密で砂粒をほとんど含まない。胎土、釉双方とも焼成良好である。「S - 5 灰 1T」の注記がある。愛知県陶磁美術館蔵。

(6) 資料 6 : S - 5 号窯出土緑釉椀・皿 (PL. 7)

緑釉陶器の椀または皿で、実測図でトーンをかけた通り内外面に安定した黄緑色の緑釉がかかり、貫入はあまり目立たない。残存部からは椀か皿かの特定は難しい。高台はやや高く外側に張り出し、回転ナデ仕上げによるものである。胎土は密で砂粒をほとんど含まず、黄褐灰色で一部黄白灰色の粘土がマーブル状に入る。焼成はやや甘く色調と合わせて土師器に近い仕上がりだが、緑釉は十分に溶けている。「S - 5 窯内」の注記がある。愛知県陶磁美術館蔵。

(7) 資料 7 : S - 5 号窯出土灰釉広縁段皿 (PL. 8)

灰釉陶器の広縁段皿で、実測図でトーンをかけたとおりの灰釉は内面に厚くかかり一部口縁部の外面にもはみ出す。残存部からは刷毛痕は確認できなかった。細かな貫入が入る。段部は内面に明確に作り出されているが、外面には変化がなく直線的である。体部外面のほぼ全面を回転ヘラ削りし、口縁部は内外面とも回転ナデで仕上げる。胎土

は灰白色、密で砂粒をほとんど含まず、黒の斑点が所々に見られる。灰釉は黄味の強い黄緑色を呈する。焼成は胎土・灰釉ともに良好である。「S-5」の注記がある。愛知県陶磁美術館蔵。

(8) 資料8:C-2号窯出土無台杯身 (PL.9, PL.10)

底部がやや膨らむ形となる無台杯身で、体部は外方に直線的に開きつつも口縁部の外反は弱めである。底部は回転ヘラ削りされる他は、体部及び内面は全て回転ナデ仕上げである。底部に残る砂粒の移動は図示の通り左から右である。轆轤から切り離した後逆位でヘラ削りされたと考えれば轆轤の回転は左回りであるが、ヘラ起こしによる切り離しの後仕上げの削りを行わなかったと考えれば轆轤の回転は右回転となる。

口縁部外面及び体部外面には濃緑色の自然釉がかかるが、内面及び底部外面は自然釉が認められない。このことから少なくとも本器の上には杯蓋等、それより口径の大きい個体が重ね焼きされたことがわかる。色調は内面及び外面は暗灰色で、破断面は実測図で塗りつぶしたように内側及び外側に1~2mm程の暗灰色の層があり、その中に灰色の層が入る「ウェファース状の構造」を呈する。口縁部は器壁が薄くなることもあり断面の内側にあった灰色の層が徐々に消失し、全体が暗灰一色になる。

胎土は密で径1mm以下の白色砂粒を微量含み、黒の斑点が所々に見られる。焼成は良好である。「C-2 □□□□□□□ (数字だが読解不能)」の注記がある。愛知県陶磁美術館蔵。

(9) 資料9:S-2号窯出土単弁八弁蓮華文軒丸瓦 (PL.11)

小牧市に所在するS-2号窯は現在確認されている限り県内最古の瓦焼成窯で、須恵器を併焼した瓦陶兼業窯である。丸瓦・平瓦の他軒丸瓦が確認されており、軒平瓦は未確認である。軒丸瓦の範は確認されている限り1種類のみで、奈良県奥山廃寺と同範だが範傷の進行から奥山廃寺からS-2号窯への範の移動が想定されている。供給先として判明しているものに稲沢市東畑廃寺がある(註6)。出土須恵器からI-17号窯式の窯とされている。

この資料は単弁八弁蓮華文軒丸瓦の瓦当片で色調は灰白色を呈し、焼成は瓦の中でも甘い方である。今回の分析では、低火度で焼成された陶磁器の一例として先述の資料群との比較のためX線回折のみ実施した。愛知県陶磁美術館保管。

以上、9点の概要を紹介した。資料1~資料8の分析資料には須恵器・緑釉陶器・灰釉陶器があるが、まず、猿投窯のK-14号窯と尾北窯のS-5号窯、C-2号窯で使用される胎土に化学的な差異があるかが課題となる。

また、一つの窯で焼成された須恵器・灰釉陶器・緑釉陶器それぞれの焼成温度を検討するため、X線回折測定をした。とりわけS-5号窯出土の緑釉陶器の資料5・資料6については、施釉された二次焼成後の製品であるにもかかわらず資料5は須恵器質で、資料6は土師器質と胎土の形質に差異が大きい。一次焼成の段階で焼成不良のものは破棄されるか再焼成されると考えられるが、資料6は一見焼成不良のように思える土師器質の仕上がりであるにもかかわらず施釉、二次焼成されている。実際に資料6が資料5と比べ素地の焼成温度が低いかどうか、化学的な測定により検討する必要がある。焼成温度に関する分析の比較資料として前述の8点の資料に加え、外見上、さらに焼成温度が低いと考えられる資料9の軒丸瓦を選択した。なお、資料4のS-5号窯出土須恵器壺・甕は、須恵器としては焼成不良品にあたるが、当窯出土資料中から焼成良好で適当な資料を抽出することができなかった。そのため資料4は分析しつつも焼成良好な資料として、同じ尾北窯に属するC-2号窯出土須恵器無台杯身も分析に加えた。

また、今回の分析資料中に、資料1、資料2、資料8のような特徴的な「ウェファース状の構造」が見られる。とりわけ資料1、資料8のような古代の猿投窯・尾北窯の須恵器にはたびたびこのような現象が見られ、これについて化学的狀態を把握することとした。

2 測定方法

今回は、シンクロトロン光センターのシンクロトロン光を利用し、猿投窯及び尾北窯の陶片(須恵器、緑釉陶器、灰釉陶器を中心に)計9点を測定した。

シンクロトロン光とは、高速の電子やイオンが電場や磁場によって曲げられた時に接線方向に発生する光である。

あいちシンクロトロン光センターでは、電子銃により発生した電子を直線加速器で 50MeV まで加速した後、周長 48m のブースターシンクロトロンに入射し、ブースターシンクロトロンで 500MHz の高周波で 1.2GeV まで加速した後、外周にある周長 72 m の蓄積リングに入射する。蓄積リング内で電子は 1.2GeV、300 mA を維持するよう、ブースターシンクロトロンにより電子が補給される。蓄積リングには、4 台の超伝導磁石と 8 台の常伝導偏向電磁石および 1 台のアンジュレータ（永久磁石）が設置され、超伝導磁石から 5keV ～ 26keV の硬 X 線、常伝導電磁石から 1keV ～ 6keV の軟 X 線、アンジュレータから 30eV ～ 850eV の真空紫外光を発生させる（図 2：多方向にビームラインを設置している）。本研究では、硬 X 線を陶片に照射させることで以下の測定を行なった。

(1) 蛍光 X 線測定、X 線吸収微細構造測定（XAFS）及び化学状態のマッピング（写真 4, 写真 5）

蛍光 X 線測定では、シンクロトロン光を資料に照射させ、発生する蛍光 X 線スペクトルにより資料に含まれる化学成分を定性もしくは定量分析するもので、X 線回折で鉱物同定をするための基礎データを得ることとした。また、X 線微細構造分析では、注目する元素特有の吸収端エネルギー付近の吸収スペクトルに注目することで、元素の化学状態（価数等）や局所構造を評価することができ、シンクロトロン光を測定資料の表面に照射させ、2 次的に走査させることで化学状態をマッピングさせることができる。これにより、陶片資料の断面に含まれる鉄の化学状態（価数）に注目し、陶片資料が酸化・還元されたなどの影響を把握することができる。鉄の場合、純鉄（金属鉄）、酸化鉄（Ⅱ）、酸化鉄（Ⅲ）の順に吸収端エネルギーが高くなり、酸化鉄（Ⅱ）だけを励起するエネルギーレベルと酸化鉄（Ⅱ）・酸化鉄（Ⅲ）ともに励起されるエネルギーレベルを把握し、それぞれの励起エネルギーにより照射・走査させることで陶片資料に含まれる酸化鉄（Ⅱ）・酸化鉄（Ⅲ）の分布状態がわかる。

これらを分析することで、陶片資料各部の化学状態やその陶片が焼成された状態（酸化焰焼成・還元焰焼成の異）を検討することが出来る。

ア 測定条件

- (ア) ビームライン BL11S2（硬 X 線 XAFS Ⅱ）
- (イ) 測定条件 蛍光 X 線分析での励起 X 線のエネルギー：15keV
検出器 半導体検出器
測定台 可動式（可動範囲：上下左右 10cm、ただし、作品は測定台に固定）
- (ウ) 測定時間 蛍光 X 線測定：3 分
XAFS 及びマッピング：各約 20 分（測定台の移動時間も含む）
- イ 測定箇所 全資料、破断面の胎土部分を 2 箇所以上測定した（表層部、内部（中央付近）など）

(2) X 線回折測定（写真 6、写真 7）

シンクロトロン光を陶片に照射させ、その回折角から結晶構造を把握し、陶片資料に含まれる鉱物を同定するものである。蛍光 X 線分析で得られた化学組成を元に測定する陶片に含まれる鉱物等を把握する方法に活用できるが、今回は、それぞれの陶片が焼成された温度を把握する事を目的に、「カオリナイトの熱変化」（註 7）を元に検討することとした。

なお、この測定により得られる焼成温度とは、それぞれの陶片が焼かれた最高温度により変性された鉱物変化であると認識するものである。

ア 測定条件

- (ア) ビームライン BL8S1（X 線回折： $\theta - 2\theta$ 法）
- (イ) 測定条件 シンクロトロン光エネルギー：14keV
検出器 半導体二次元検出器（ピラタス 100K）
- (ウ) 測定時間 約 2 分 40 秒（ $2\theta = 10 \sim 90^\circ$ ）
- イ 測定箇所 全資料、破断面の胎土部分を 2 箇所以上測定した（表層部、内部（中央付近）など）

3 分析結果

(1) 蛍光X線測定、X線吸収微細構造測定(XAFS)及び化学状態のマッピング

ア 蛍光X線測定(図3)

猿投窯資料(K-14号窯)、尾北窯資料(S-5号窯、C-2号窯)とも共通して、Fe、Ni、Mn、Cuなど主要な成分が検出されている。なお、カオリナイトが素地に含まれることからAl、Si、Na、Mg、K、Caなども含まれると考えられるが、大気中での測定によりこれらの検出が難しく、測定結果には含まれない。以上を踏まえてX線回折による測定に供する参考とした。

イ 蛍光X線測定、X線吸収微細構造測定(XAFS)及び化学状態のマッピング(PL.1、PL.2/PL.9、PL.10)

X線吸収端スペクトルから7.1keV過ぎで酸化鉄(Ⅱ)のみが励起され、7.3keV以上で酸化鉄(Ⅲ)が酸化鉄(Ⅱ)とともに励起される。この原理を利用して、7.1keVレベルと7.3keVレベル以上とそれぞれのX線を陶片の破断面に照射し、励起された鉄部分のみ測定ポイントとしてマッピング表示させた。

この測定により、資料1・資料8のように陶片の断面の観察から得られる「ウェファース状の構造」の内、表層部が黒色/内部が赤褐色の陶片については表層部に酸化鉄(Ⅱ)が、内部は酸化鉄(Ⅲ)が含まれていた。

陶片が焼成される時の化学的变化として、窯の炎が当たる部分は必ず表層部であることから、初期段階で全体的に酸化焰焼成された後、最終段階には還元焰焼成(または還元焰冷却)されたもので、内部まで還元されていない状態で窯焚きが終了したものと推測できる。

(2) X線回折測定

X線回折測定に供した陶片は、猿投窯(K-14号窯)と尾北窯(S-5号窯)ともに須恵器、緑釉陶器、灰釉陶器の3種類で行なった。また、未焼結の土器質の瓦(資料9、S-2号窯)も測定に供することで、熱変化の化学的特徴を推察することとした。

焼成温度の低い順から、土器(800~1000℃程度)、緑釉陶器(1000℃程度)、須恵器(1000~1200℃程度)、灰釉陶器(1100~1250℃程度)とされ(註2他)、カオリナイトの熱変化の段階を当てはめてみると土器質の瓦と緑釉陶器にはカオリナイトとムライトが多く検出され、須恵器と灰釉陶器にはカオリナイト、ムライト、 α 型クリストバライトが検出されるなど、ほぼその温度域をあらわす結果となった。

なお、カオリナイト以外に陶片の素地を構成する長石や珪石(石英)も含まれているが、長石は1100℃程度の温度でガラス化し、X線回折によるピークは消えることから資料の焼成温度を把握する検討材料につながると考えていた。測定結果では、須恵器、灰釉陶器にも若干の長石が含まれるピークも検出されており、この検討には至れなかった。今後、更なる測定による結果の抽出とともに分析の精度をさらに高めたい。

4 考察

(1) 蛍光X線測定、X線吸収微細構造測定(XAFS)及び化学状態のマッピングについて

ア 蛍光X線測定

猿投窯資料(K-14号窯)、尾北窯資料(S-5号窯、C-2号窯)とも共通して胎土部分の断面を測定したところ、Fe、Ni、Mn、Cuなど主要な成分が検出された。なお、この測定で得られた結果は、X線回折測定の鉱物推定の参考とした。

一方で、Rb、Mnなどの比較的特性X線の励起エネルギーが高い元素成分の検出もあり、特徴を検討することができるが、検出数が極めて少ないことから今後の測定結果を増やし、再検討する。

イ X線吸収微細構造測定(XAFS)及び化学状態のマッピング

この測定では、陶片資料の断面にX線を照射し、鉄の化学状態の変化によりそれぞれの焼かれた様子を推測するものである。

資料1と資料8の陶片の断面には「ウェファース状の構造」が目視観察され、焼成環境の相違が推測される。各層の相違について蛍光X線測定で顕著に検出された鉄に注目し、その化学状態(酸化鉄(Ⅱ)と酸化鉄(Ⅲ))

毎にマッピング分布させた。これにより、断面の発色の違いと鉄の化学状態別の分布が合致していることが確認できた。つまり、陶片の表層部は、焼成による炎の接触があることから、炎の当たり方の強弱により鉄の酸化・還元反応としてあらわすことができた。

陶片の表層部は、7keV程度のX線吸収端スペクトルにより励起された酸化鉄(Ⅱ)のみで分布し、還元焰焼成されたと考えることができ、陶片の内部は、8keV程度のX線吸収端スペクトルにより励起されていることから酸化鉄(Ⅲ)及び酸化鉄(Ⅱ)が観察され、7keVの結果との比較より酸化鉄(Ⅲ)の分布と分析できる。このような原理により、褐色部分は酸化鉄(Ⅲ)(Hematite)による赤褐色に呈色されたものであり、灰色部分は、還元焰焼成により、陶片の表層から酸素が奪われ、酸化鉄(Ⅱ)(Magnetite)が生成されたことによるものと推測できる。

一方、陶磁器の焼成において、窯の炎が当たる部分は必ずその表層部である。初期段階で全体的に酸化焰焼成されたあと最終段階には還元焰焼成又は冷却されたものであり、内部まで還元されない状態で窯焚きが終了したと考えると、この「ウェファース状の構造」の成因はこの結果から理解することができる。「ウェファース状の構造」は陶磁器が焼かれた痕跡としてのこされたもので、陶磁器が焼成される際の酸化焰・還元焰焼成などの焼成中の環境を推測することができる。また、今回の測定資料として抽出した陶片資料以外にも「ウェファース状の複数層の構造」を持つ陶片も多くあり、猿投窯及び尾北窯における焼成方法の検討にもつながる。

(2) X線回折測定

X線回折測定を通じた全体的な見解として焼成温度の低い順から、土器質の瓦、緑釉陶器、須恵器、灰釉陶器という結果を得ており、先述の予想と合致したものであった。

これにより、カオリナイトの熱変化(註8)を焼成温度を検討する「ものさし」として活用できる可能性を得ることができた。今後も測定データを増やし、各温度域におけるカオリナイトの熱変化による構造を詳細に把握することで測定データとしての精度を高めたい。陶磁器のX線回折測定については、特に釉の様なガラス質も含まれていることからX線の反射角の散乱などによるデータエラーも予想したが、今回のスペクトルにはデータにノイズはあるもののカオリナイトの熱変化における化学的変化をみる事が出来たのも幸いであった。

ただし、この測定は陶片を破壊しない非破壊測定(バルク測定)であり、測定したい面の平滑化は不可避であることから入射・反射角とのズレが生じることや、低角度での反射光を得られないこと、さらには陶片の胎土そのものが不均質であることから同じ陶片を複数回測定することで誤差が生じるなど、データの再現性をはじめ測定精度の向上は課題である。また、この測定を繰り返す事で鉱物的な特徴を得ることは可能であるが、各製作地の相違点を見出すためには課題が多い。つまり、陶磁資料自体の胎土・釉は不均質な状態であり、計測場所を変えた測定ではそれぞれのデータが異なるため再現性を得る事が難しい。再現性を確保するための測定方法、分析方法などを検討し、再現性のある事象を見出だすという大きな課題がある。

おわりに

「陶磁美術館とシンクロトン光センターが連携し陶磁資料を化学的に測定する」という本研究は、猿投窯等の陶片資料を多く所蔵する陶磁美術館にとって新たな知見を得る貴重な機会である。また、今後の共同研究によりこの地域のやきものについて特徴を見出すことは、それらの技術の再現を通して、両機関がともに愛知県施設の掲げる「産業振興に寄与する」という目的に迫ることにもつながる。

また陶磁資料の学術的な究明は、東洋陶磁学会、日本文化財科学会をはじめ様々な学会が目指しており、特に後者のテーマ「考古学と自然科学」の中ではそれぞれの立場から研究報告をする事例が多いものの、連携する機会は少なかった。今回行った陶磁美術館とシンクロトン光センターの連携による陶磁資料の分析と研究では、考古学と自然科学双方からのアプローチを行うことが出来たが、今後も様々な研究者同士の連携による論の展開を試みていきたい。

[註]

- 1 猿投窯・尾北窯の本格的な研究はこの調査により大きく進展し、編年研究をはじめ日本古代の陶磁史像の形成に大きな影響を与えた。(詳細は、以下の文献を参照されたい)
柴垣勇夫 2015 「愛知県の古代窯研究史」『愛知県史』別編 窯業 1 古代 猿投系 愛知県
- 2 山崎一雄 1958 「篠岡第五号窯出土緑釉陶片の分析」『愛知県猿投山西南麓古窯址群』愛知県教育委員会
山崎一雄 1959 「篠岡第五号窯出土緑釉ならびに灰釉陶片の化学分析」『愛知県猿投山西南麓古窯址群』愛知県教育委員会
山崎一雄 1960 「篠岡出土の緑釉および灰釉陶片ならびに鳴海出土の緑釉陶片の化学的研究」『愛知県知多古窯址群』愛知県教育委員会
山崎一雄 1979 「古代釉薬の科学的考察」『世界陶磁全集』2 日本古代 小学館
山崎一雄 1998 「緑釉と三彩の材質と技法」『開館 20 周年記念特別企画展 日本の三彩と緑釉—天平に咲いた華—』愛知県陶磁資料館
- 3 三辻利一 1983 『古代土器の産地推定法』ニュー・サイエンス社
三辻利一・高岡麗 1997 「下原窯跡群出土埴輪の化学特性とその供給先」『味美二子山古墳の時代』(第 1 分冊) 日井市
- 4 降幡順子・尾野善裕 2016 「冷然院跡出土緑釉陶器釉薬の分析」『平成 27 年度 京都市埋蔵文化財出土遺物文化財指定準備業務報告書 平安京左京二条二坊「冷然(泉)院」出土品』京都市文化市民局
- 5 愛知県史編さん委員会 2015 『愛知県史』別編 窯業 1 古代 猿投系 愛知県
- 6 前掲 註 5
- 7 下記文献によると、「カオリナイトの加熱分解の系統は、常温：カオリナイト→550～650℃程度：メタカオリン→800～1100℃程度：ムライト →1100℃程度～：α型クリストバライト／1450℃程度～：β型クリストバライトとなる。」
岡田 清・大津賀 望・小坂丈予／東京工業大学 1984 『SiO₂-Al₂O₃-H₂O 系化合物の加熱分解生成物のキャラクターゼーション —アロフェロンの場合—』
- 8 前掲 註 6

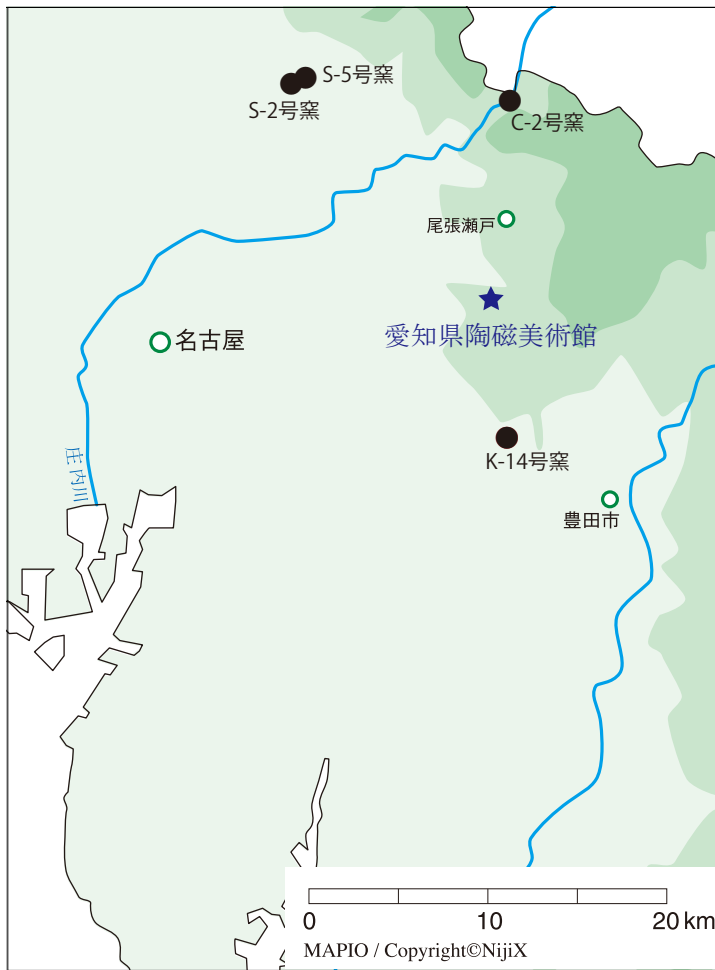


図1 分析資料の出土地



写真1 あいちシンクロトン光センターと愛知県陶磁美術館



写真2 あいちシンクロトン光センター（北東側から、後方は長久手・名古屋市内）



写真3 あいちシンクロトン光センターの内部
(星形の囲いの中に、シンクロトン・ブースター（蓄積リング等）がある。
手前の白い箱「BL5S1」が測定ブース。)

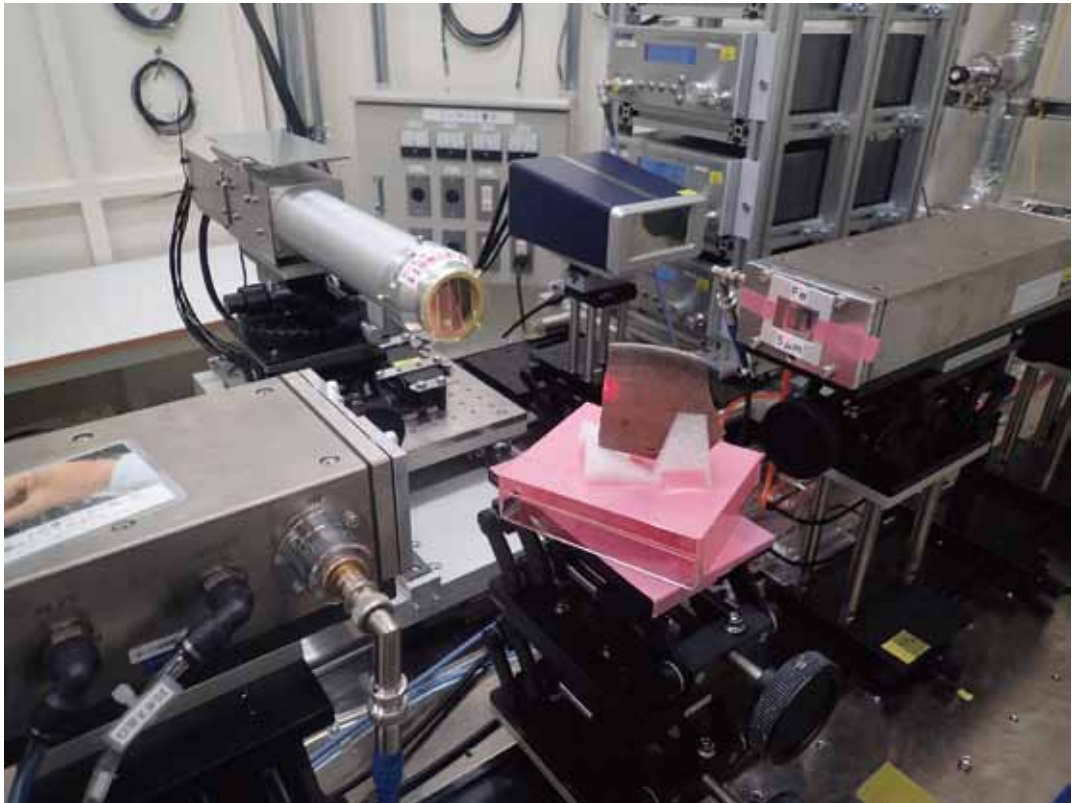


写真4 蛍光X線測定及びX線吸収端スペクトル測定（XAFS）の様子

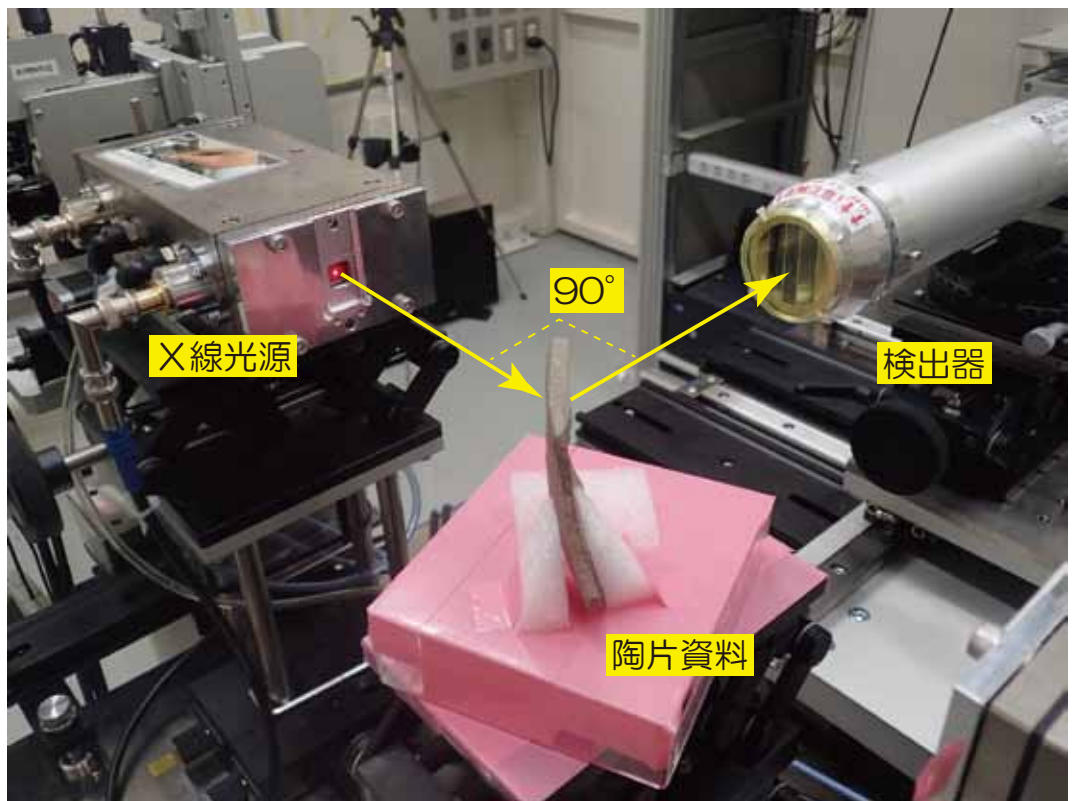


写真5 写真4 と別角度から



写真6 X線回折測定の様子①

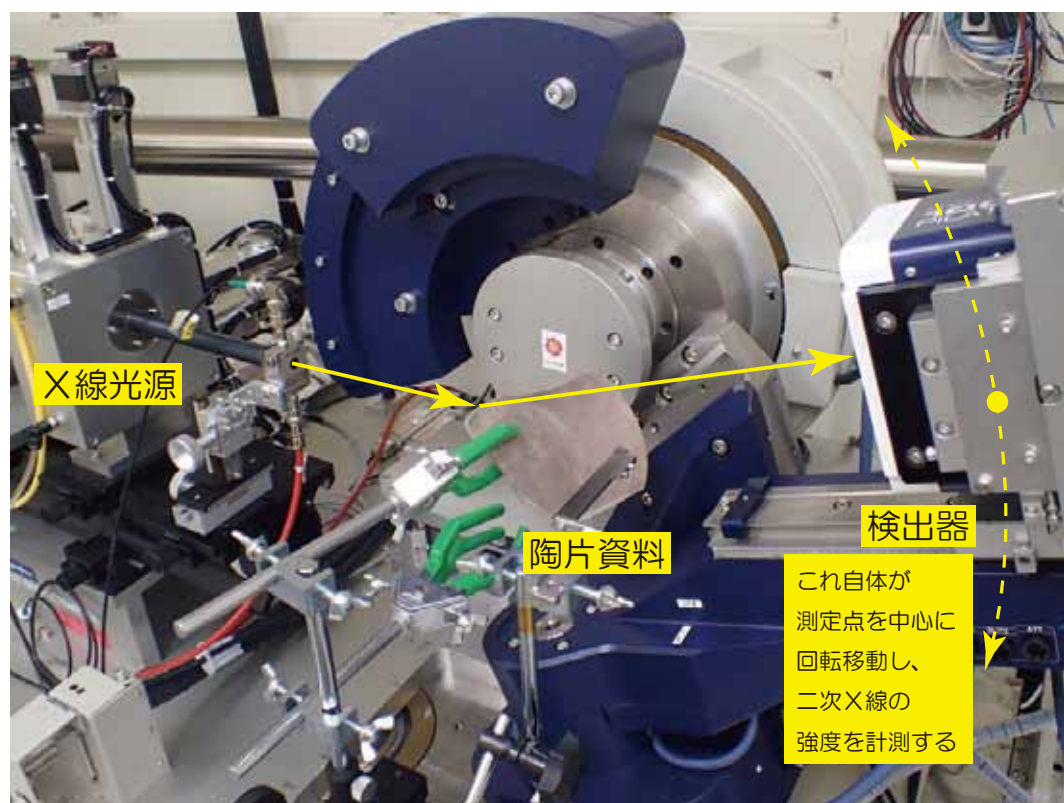


写真7 X線回折測定の様子②

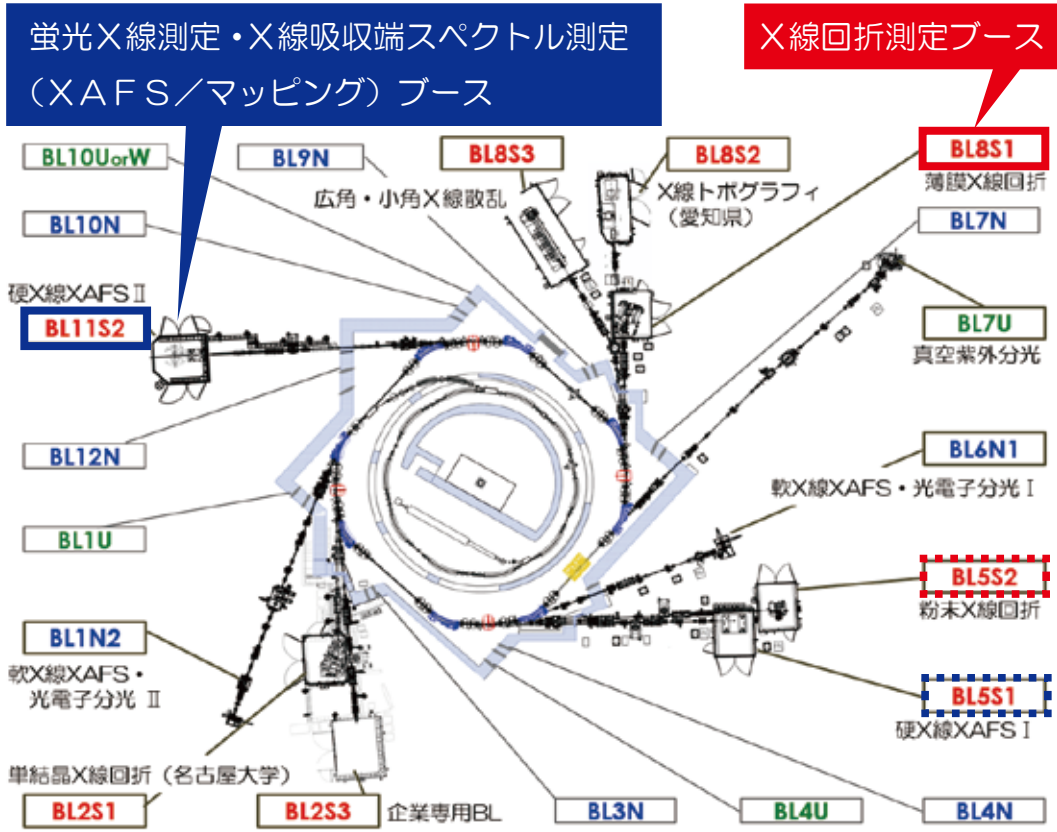


図2 シンクロトロン光センターの各ビームライン

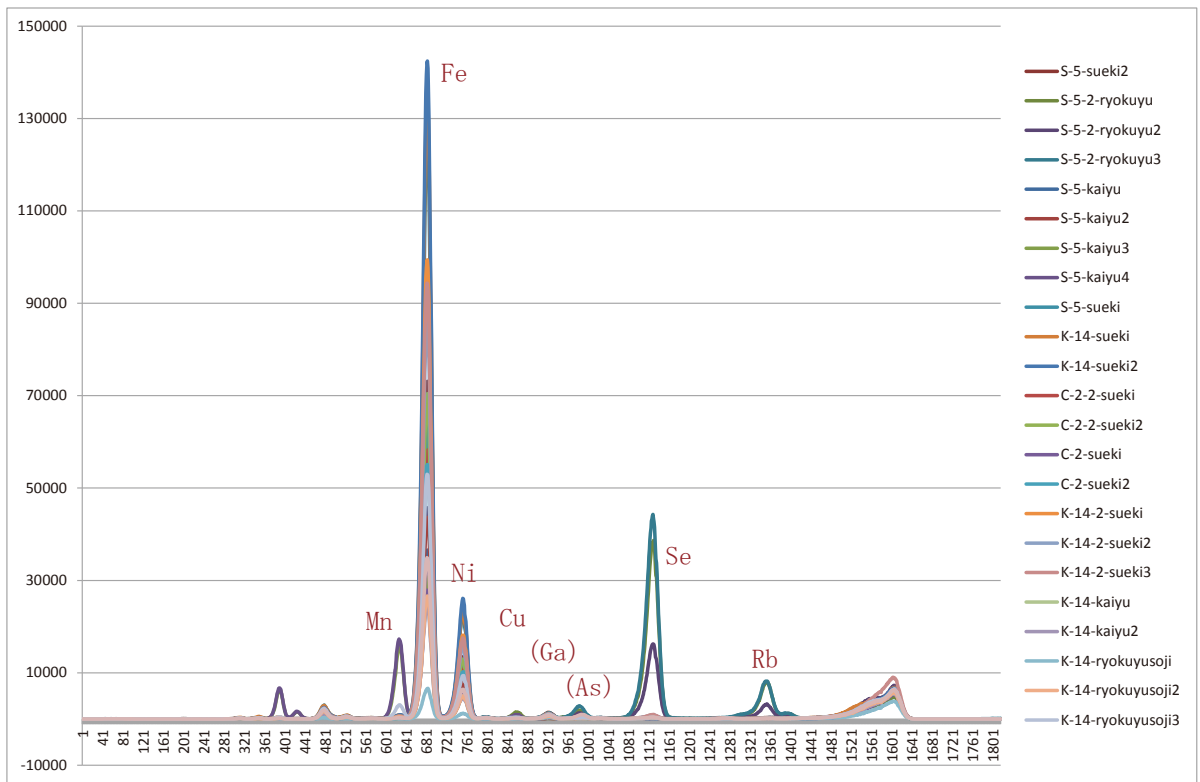
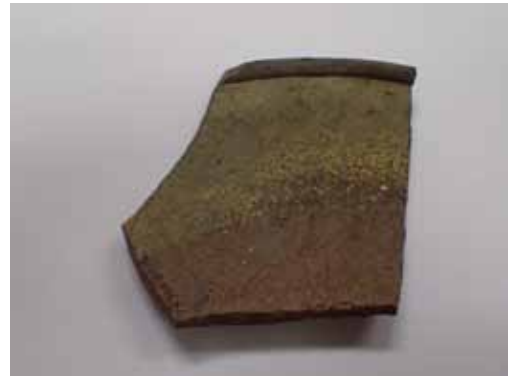


図3 K-14・C-2・S-5号窯出土陶片の蛍光X線分析結果



表面



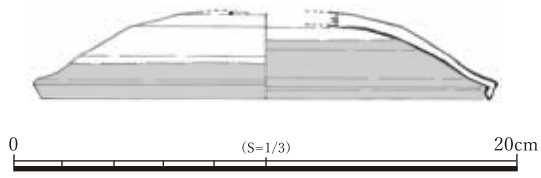
裏面



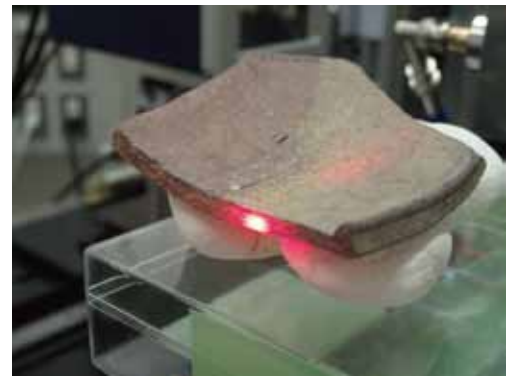
断面



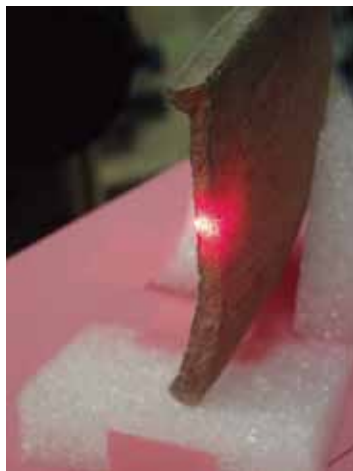
断面拡大



実測図



蛍光X線測定及びXAFS

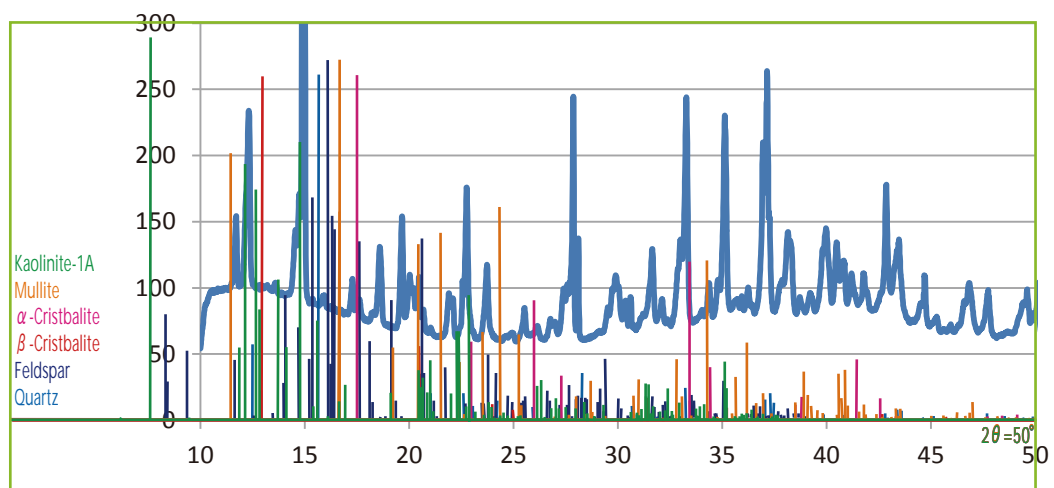
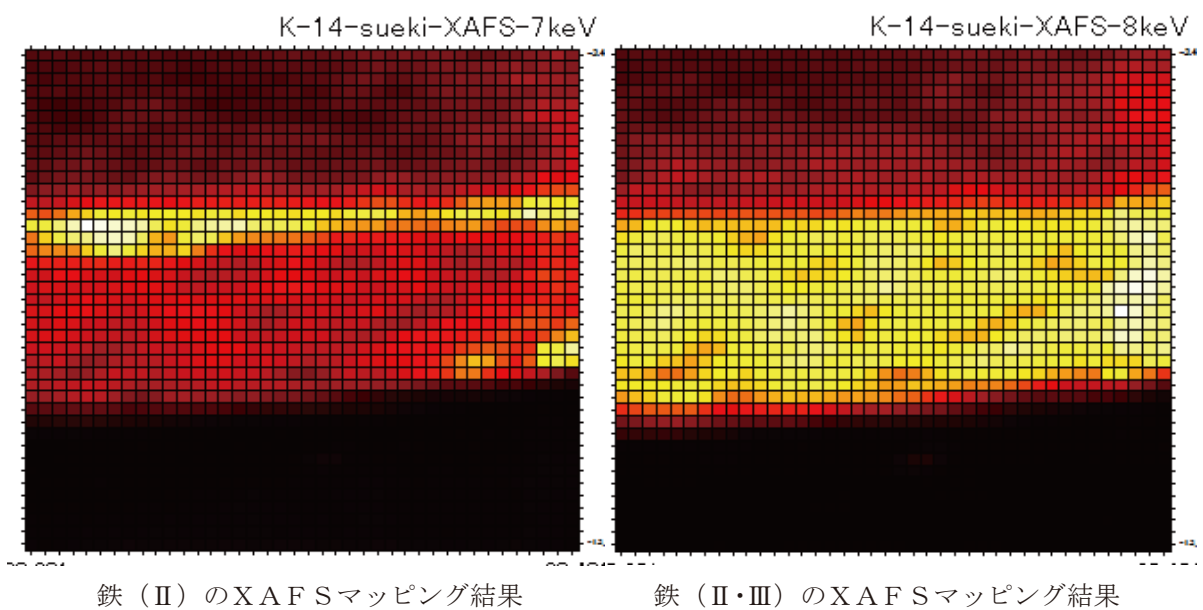


蛍光X線



X線回折

PL.1 資料1:K-14号窯出土須恵器杯蓋の分析①



X線回折測定の結果

PL. 2 資料1: K-14号窯出土須恵器杯蓋の分析②



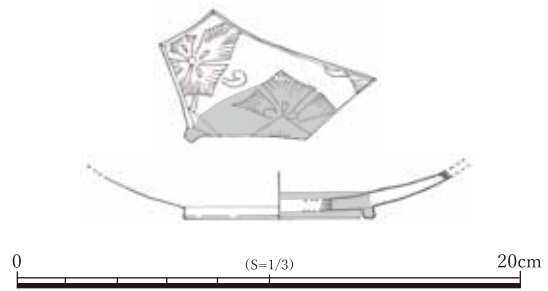
表面



裏面



断面



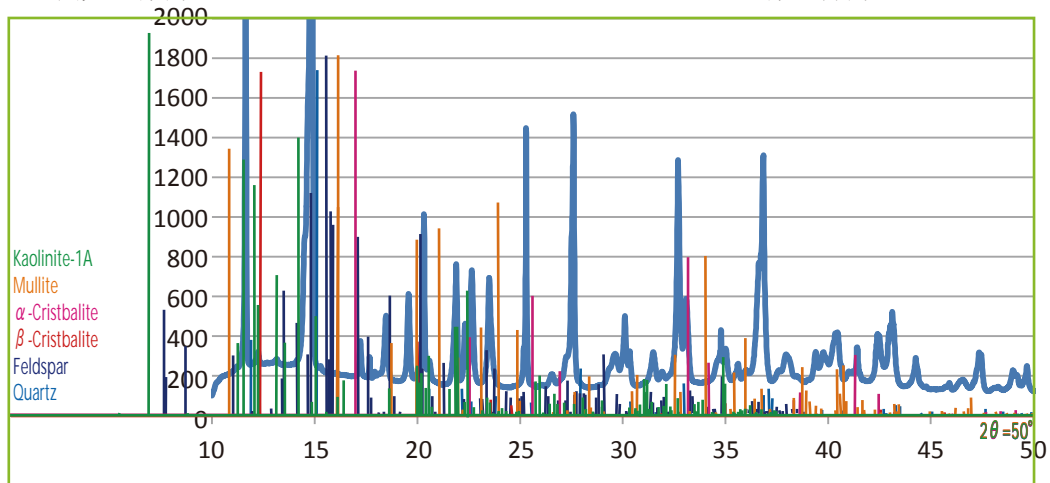
実測図



蛍光X線測定及びXAFS



X線回折測定



X線回折測定の結果



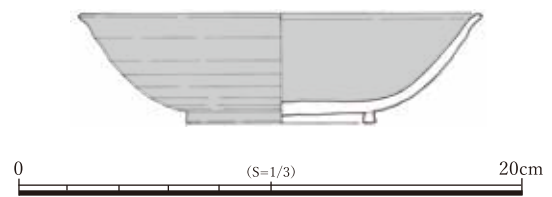
表面



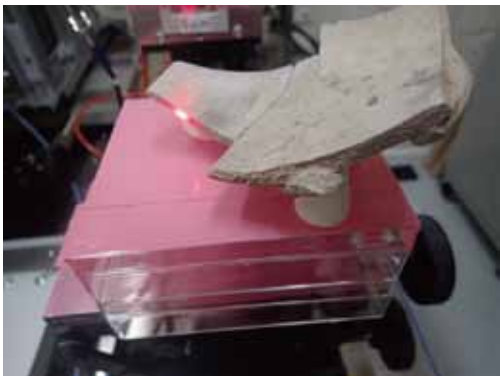
裏面



断面



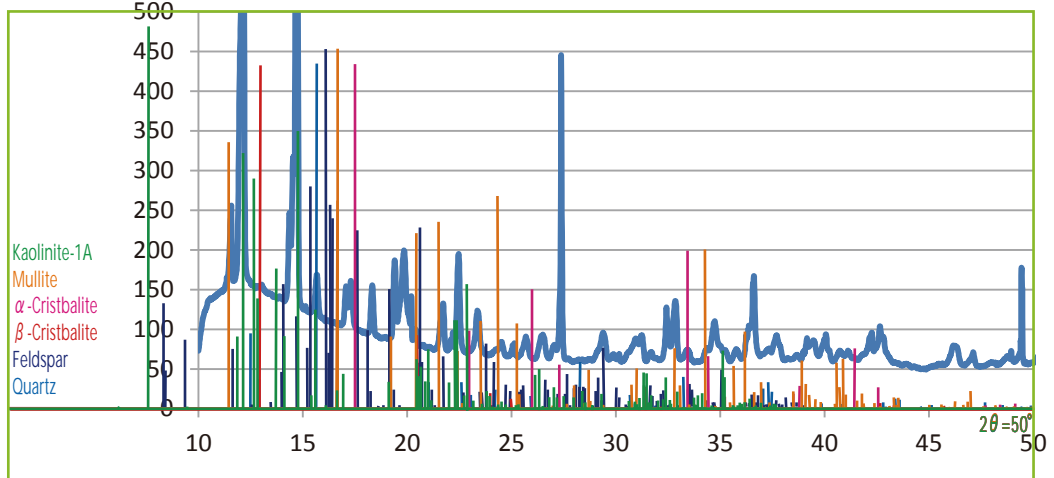
実測図



蛍光X線測定及びXAFS



X線回折測定



X線回折測定の結果

P L . 4 資料 3 : K - 14 号窯出土灰釉碗の分析



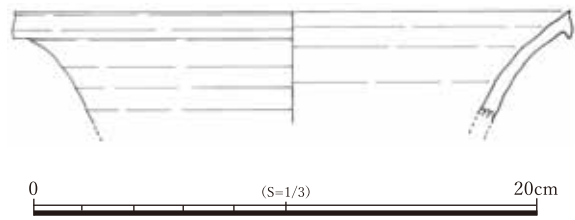
表面



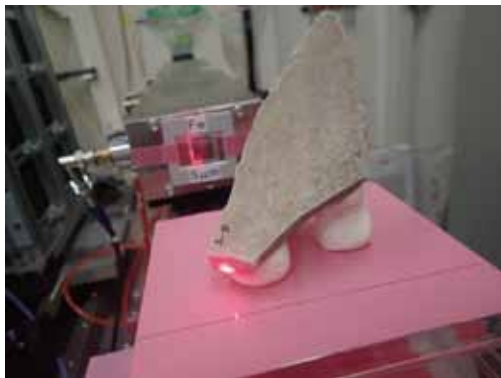
裏面



断面



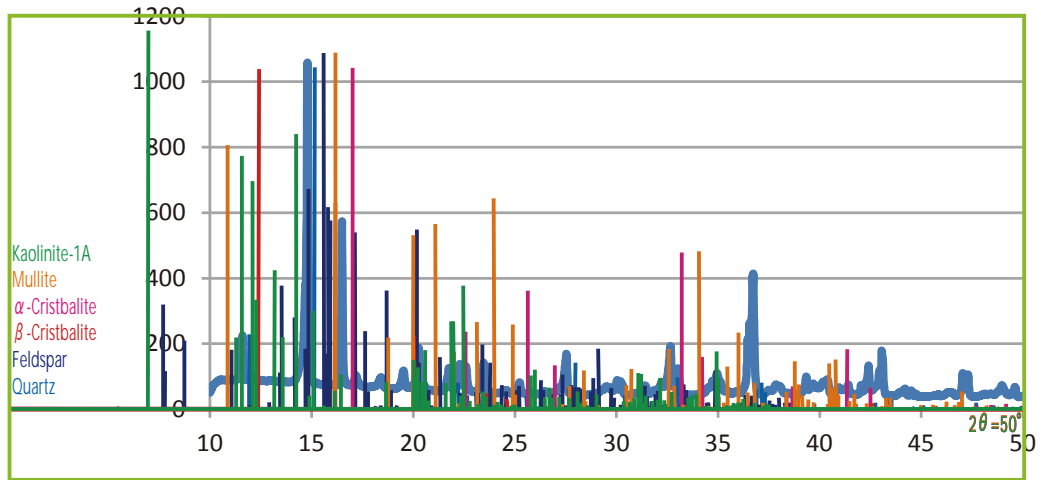
実測図



蛍光 X 線測定及び X A F S



X 線回折測定



X 線回折測定の結果

P L . 5 資料 4 : S - 5 号窯出土須恵器壺・甕の分析



表面



裏面

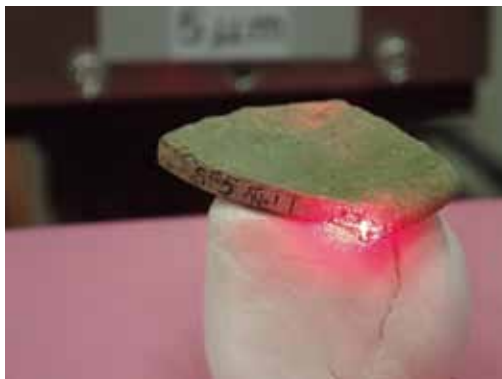


断面



0 (S=1/3) 20cm

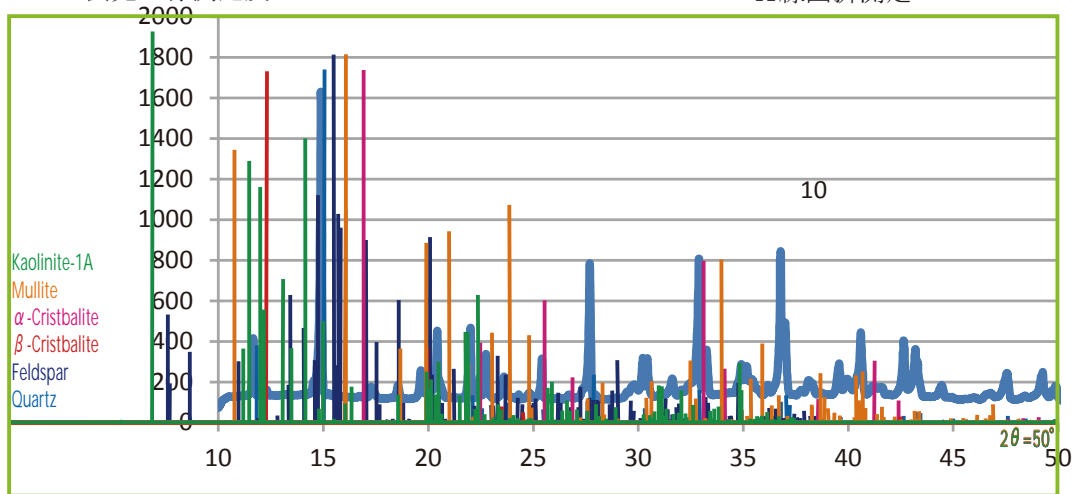
実測図



蛍光X線測定及びXAFS



X線回折測定



X線回折測定の結果

P L. 6 資料 5 : S - 5 号窯出土緑釉碗の分析



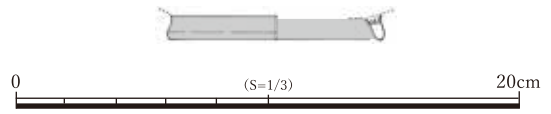
表面



裏面



断面



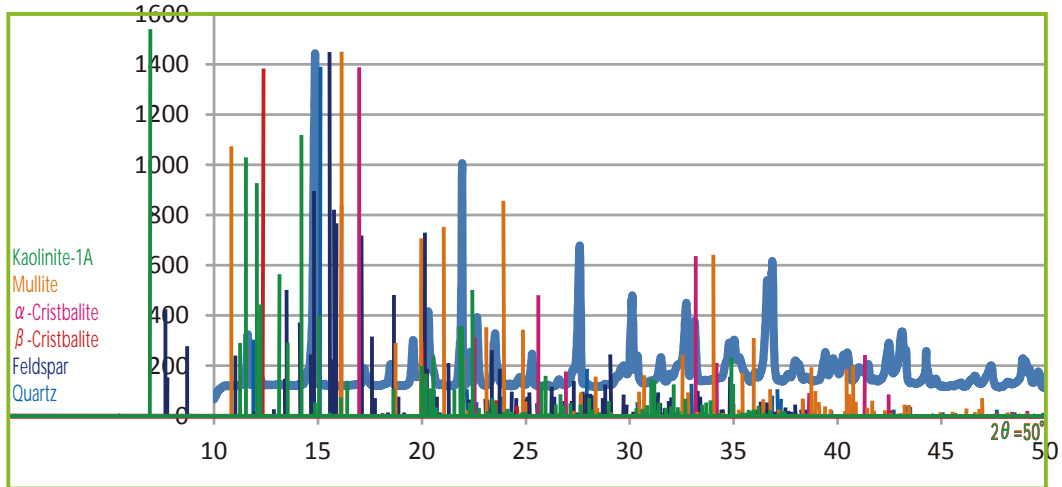
実測図



蛍光X線測定及びXAFS



X線回折測定



X線回折測定の結果

P L . 7 資料 6 : S - 5 号窯出土緑釉椀・皿の分析



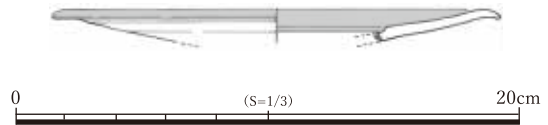
表面



裏面



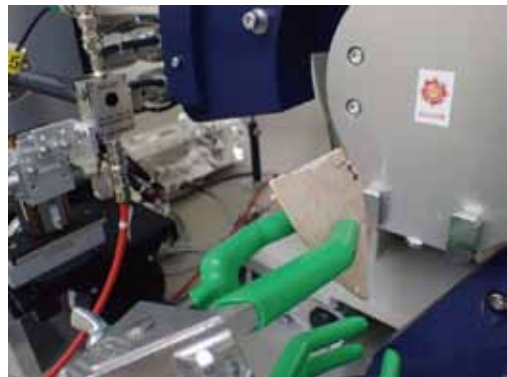
断面



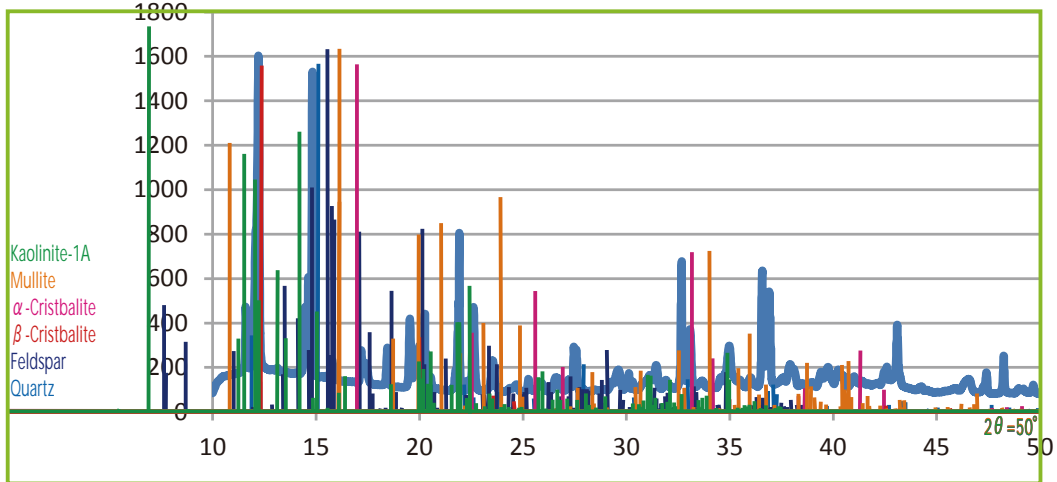
実測図



蛍光X線測定及びXRF



X線回折測定



X線回折測定の結果

P L . 8 資料 7 : S-5 号窯出土灰釉広縁段皿の分析



表面



裏面



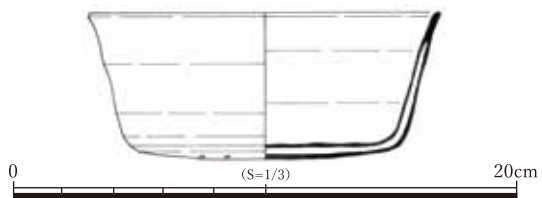
断面 1



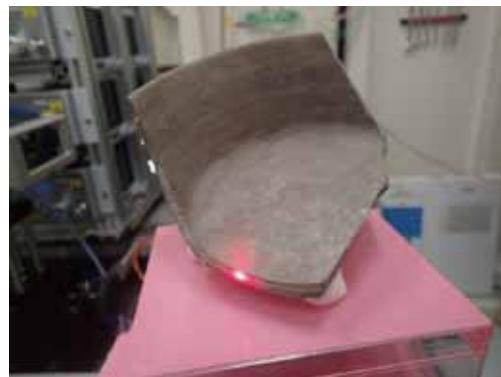
断面 2



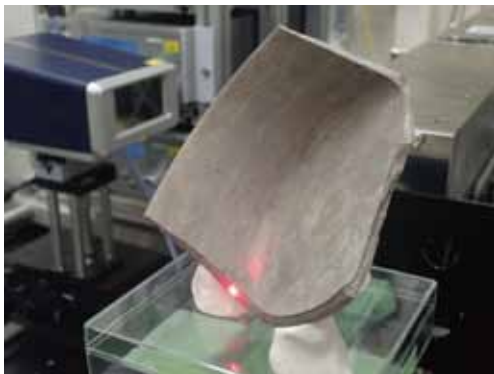
断面 3



実測図



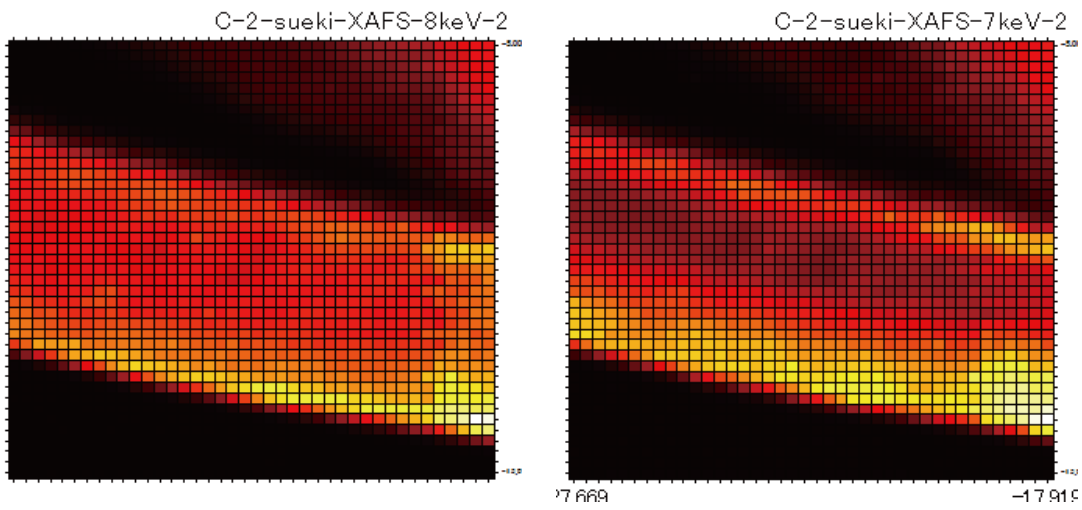
蛍光 X 線測定及び XAFS



XAFS マッピング

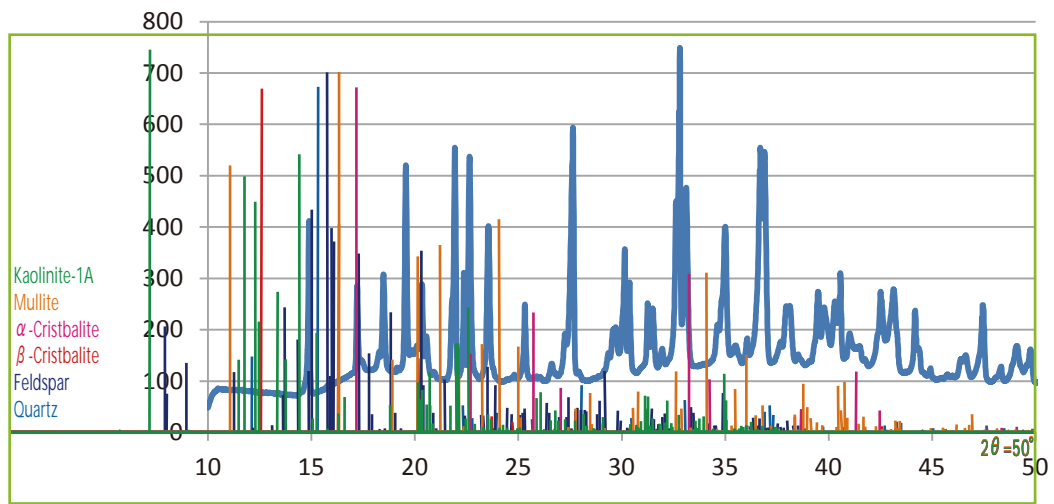


X 線回折測定



鉄 (II) の X A F S マッピング結果

鉄 (II・III) の X A F S マッピング結果



X線回折測定の結果

P L . 10 資料 8 : C - 2 号窯出土無台杯身の分析②



表面



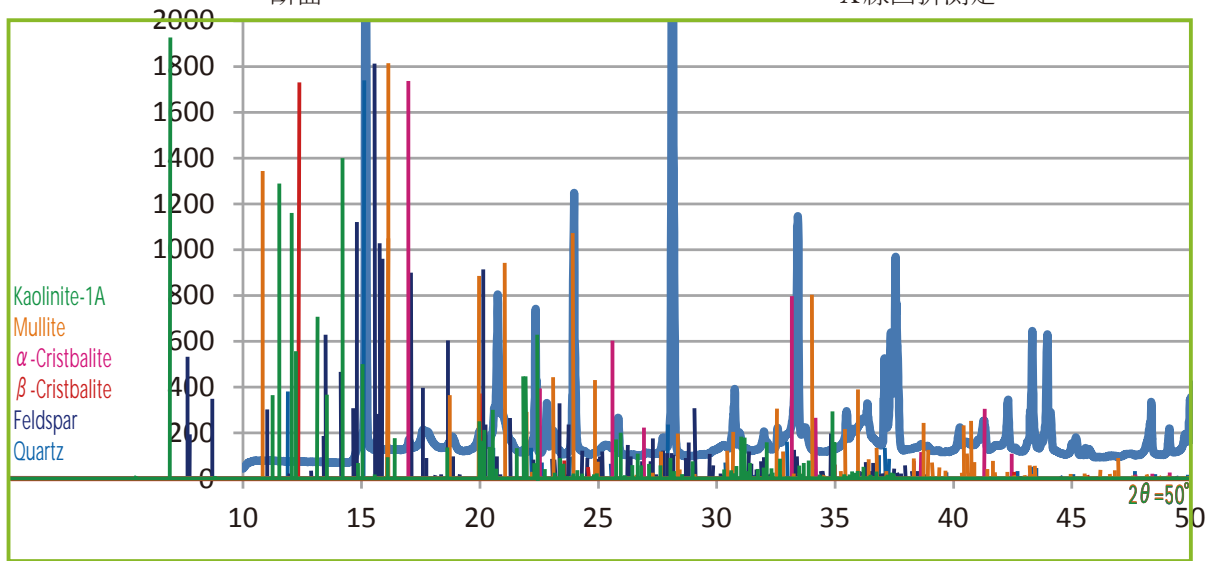
裏面



断面



X線回折測定



X線回折測定の結果

P L. 11 資料 9 : S - 2 号窯出土単弁蓮華文軒丸瓦の分析