

4-10 下扇原遺跡出土鍛冶関連遺物の金属学的調査

大澤正己

概要

弥生時代後期に比定される下扇原遺跡出土の溶着遺物を1点調査した。主要鉱物はウスタイト (Wustite : FeO)、ファヤライト (Fayalite : 2FeO · SiO₂) で、局部的にヘイシナイト (hercynite : FeO · Al₂O₃) を含み、含鉄は殆んど無い。土器破片巻込みの異形椀形鉢の1種で、土器片は鍛冶炉底に敷込まれた小破片の噛み込みが想定される。

1 調査の経緯

下扇原遺跡は熊本県阿蘇市三久保に所在する弥生時代後期の集落遺跡である。溶着遺物はSB46（豎穴住居跡）から出土した。38gの小型品で、厚さ6mmの板状土器片があたかも板状鋳造廃鉄器の如く、小鉄塊もしくは鉄滓に溶着していた。鉄片、鉄塊が被熱して鉄滓と溶着しているのではとの期待のもとに、指定された3ヶ所（板状部、小鉄塊、鉄滓狙い）の金相学的分析調査を行った。

2 調査の方法

2-1 供試材

Fig.10-1の1段目に実測図と外観写真、切り出し部などを示す。メタルチェックでの反応も無かった。詳細は観察表を参照されたし。

2-2 調査項目

肉眼観察

遺物の外観上の観察所見を簡単に記載した。

マクロ組織

本来は肉眼またはルーペで観察した組織であるが、本稿では顕微鏡埋込み試料の断面全体像を、投影機の5倍で撮影したものを指す。当調査は、顕微鏡検査によるよりも広い範囲にわたって、組織の分布状態、形状、大きさなどの観察ができる利点がある。

顕微鏡組織

滓中に晶出する鉱物及び鉄部の調査を目的として、光学顕微鏡を用い観察を実施した。観察面は供試材を

切り出した後、エメリーリング紙の#150、#240、#320、#600、#1000、及びダイヤモンド粒子の3μと1μで順を追って研磨している。なお金属組織の調査では腐食 (Etching) 液に5%ナイタル（硝酸アルコール液）を用いた。

ビッカース断面硬度

鉄滓中の鉱物と、金属鉄の組織同定を目的として、ビッカース断面硬度計 (Vickers Hardness Tester) を用いて硬さの測定を行った。試験は鏡面研磨した試料に136°の頂角をもったダイヤモンドを押し込み、その時に生じた窓みの面積をもって、その荷重を除した商を硬度値としている。試料は顕微鏡用を併用した。

EPMA (Electron Probe Micro Analyzer) 調査

化学分析を行えない微量試料や鉱物組織の微小域の組織同定を目的とする。分析の原理は、真空中で試料面（顕微鏡試料併用）に電子線を照射し、発生する特性X線を分光後に画像化し、定性的な結果を得る。更に標準試料とX線強度との対比から元素定量値をコンピューター処理してデータ解析を行う方法である。

3 調査結果

KON-1 溶着遺物

肉眼観察

平面は不整合形状の溶着遺物で38gを測る。長さ55mm、幅50mm、厚さ18mmの偏平な遺物に流動状になった小鉄塊もしくは鉄滓が溶着状態にある。板状遺物は6mmで鋳造鉄片を連想させて、黒褐色で被熱から表面が溶けて光沢を呈す。小鉄塊または鉄滓は表面に茶褐色の酸化物が付着し、色調は紫紅色を帯びる部分がある。上面には細かい気孔を発し、下面是丸みをもち、滑らかである。全体の横断面は下面中央に向かって厚くなり椀形を呈する。

マクロ組織

資料1（板状部分）Fig.10-1の4に示す。上部長方形部分が厚み6mmの土器片である。粘土鉱物セリサイトで形成されて、砂鉄粒子を混在させる。これには下部に滴下鉄滓を伴う。錆化鉄の痕跡や金属鉄は認めら

れない。

資料2、3はFig.10-2の4、Fig.10-3の4に示す。共に左側の不整構造が鉄滓で、白色鉱物相（ウスタイト、ヘイシナイト）を晶出し、右側の灰黒色側がガラスである。鉄はない。

顕微鏡組織

資料1：Fig.10-1の5の上半面は土器胎土で6に土器部分拡大を示す。素地を構成する粘土鉱物セリサイト（cerisite）は微細な鱗片状結晶を消失し、加熱変化により非晶質化し、石英に高温クラックが見られる。この土器の下には鉄滓が垂れた状態で存在する。鉱物相は7、8に示す白色粒状結晶のウスタイトと淡灰色盤状結晶のファヤライトが共存する。FeO-SiO₂状態図から溶融温度を推定すれば1,180°C前後であろう。更に9、10には淡茶褐色結晶で外周部の白いヘイシナイト（hercynite: FeO·Al₂O₃）が認められる。鉄製品が鍛冶の際にアルミナを含む粘土と接触した状態で加熱されれば、鉄の表面に出来たウスタイトとアルミナが接触した接点で温度が1,310°C以上になった時に融液が発生して、その融液で濡れたアルミナから容易にヘイシナイトは晶出するであろう¹⁾。勿論、融液の生じない1,310°C以下でも長時間加熱されれば固相拡散でウスタイトとアルミナ接点にヘイシナイトが生じよう。ヘイシナイトには炉内温度ムラ（不均一）とウスタイトとアルミナの接触が限られた場所で起こる可能性大と考える。

資料2：Fig.10-2の4～8に示す。当切り出しサンプルも鉱物相はウスタイトとファヤライトの共存で、滓の突起個所（Fig.10-2の10、11）でヘイシナイトは晶出する。

資料3：Fig.10-3の5～13に示す。こちらはヘイシナイトの晶出はなく、ファヤライトの占める面積が拡がるので、鍛冶炉内の低温側から晶出した鉱物相である。炉内温度ムラが指摘できる。

ビッカース断面硬度

Fig.10-1の11、12、Fig.10-2の12～15、Fig.10-3の14、15に硬度測定の圧痕を示す。白色粒状結晶は486～524Hvが得られた。ウスタイトの文献硬度値が

450～500Hvであり²⁾、僅かに上限を越えるものがあるがウスタイトに同定できよう。次に淡灰色盤状結晶は608～642Hvでファヤライト（Fayalite: 2FeO·SiO₂）である。ファヤライトの文献硬度値である600～700Hvの範囲内に収まる。突起部に晶出する淡茶色褐色結晶で外周部の白い結晶は1,099Hvと硬い。ヘイシナイトは鉄酸化物のFeOとアルミナ（Al₂O₃）の化合物なのでそれに対応した硬度値が得られた。

EPMA調査

資料1を分析対象とした。Fig.10-4の左上に示した反射電子像（COMP）は土器に混入した砂鉄粒子である。右側白色部が砂鉄で、左の灰色部に脈石を示す。砂鉄の特性X線像は、鉄（Fe）とチタン（Ti）に白色輝点が集中する。分析点3の定量分析値は81.2% FeO - 6.3% TiO₂ - 5.3% MgO組成から、含チタン鉄鉱が同定される。分析点4は砂鉄粒子内の縞状構造部分の分析である。定量分析値は69.7% FeO - 19.6% TiO₂ - 3.2% MgO組成から、Titano·Magnetite中のMag·Ilmeniteの溶離組織と推定する。当砂鉄は火山岩起源であり、高Mg傾向をもつ。脈石部分の分析点1の定量分析値は、19.7% CaO - 14.8% MgO - 52.7% SiO₂ - 9.0% FeOの組成を得た。モンチセリかんらん石（moniticellite）に同定されて少量の鉄を含む。

分析点2の定量分析点は8.1% CaO - 4.1% MgO - 11.1% FeO - 11.8% Al₂O₃ - 56.1% SiO₂組成である。かんらん石とヘイシナイト（FeO·Al₂O₃）の固溶体の可能性をもつ。砂鉄脈石はかんらん石類（olivine group）と見做して大過なかろう。土器片は在地粘土から焼成された可能性が高い。火山岩由来の自然砂鉄を混在させる。

次に鉄滓としての主要鉱物相の分析を試みた。Fig.10-5の1段目左側に対象とした視野の反射電子像（COMP）を示す。白色粒状結晶で分析点7は特性X線像で鉄（Fe）に白色輝点が集中し、定量分析値は98.5% FeO組成からウスタイト（FeO）に同定される。淡灰色不定形鉱物の分析値は5と8がある。前者は68.7% FeO - 30.5% SiO₂ - 1.2% MgO。後者で60.4% FeO - 32.1% SiO₂ - 1.1% MgO組成が得られた。ファヤライト（2FeO·SiO₂）で僅かにMgを固溶する。分

析点6はくすんだ不定形結晶である。定量分析値は52.8% FeO – 48.1% Al₂O₃ – 1.0% MgO組成からヘイシナイト (FeO · Al₂O₃) が確認できた。これにもMg固溶があった。分析点9は灰黒色盤状結晶で、こちらの定量分析値は14.7% CaO – 12.9% Al₂O₃ – 29.5% FeO – 36.6% SiO₂組成である。アノルサイト (Anorthite : CaO · Al₂O₃ · 2SiO₂) とファヤライトの固溶体の可能性がある。また、分析点10の色調は分析点9よりも沈んでいて、定量分析値は18.0K₂O – 26.1% Al₂O₃ – 63.6% SiO₂だった。カリ長石 (Kalsilite : K₂O · Al₂O₃ · 4SiO₂) に同定される。

Fig.10-1の9に示したヘイシナイトとファヤライトと同一個所のEPMA調査である。Fig.10-5の3、4段目に反射電子像 (COMP) と特性X線像を示す。淡茶褐色で外周部の白い結晶である。中央の分析点14の定量分析値は50.9% FeO – 46.5% Al₂O₃、外周白色部の分析点13の定量分析値は、43.3% FeO – 54.8% Al₂O₃組成でヘイシナイト (hercynite : FeO · Al₂O₃) に収まる。両者は2~3% MgOを固溶する。淡灰色盤状結晶に分析点11をつけた。定量分析値は67.4% FeO – 29.9% SiO₂組成からファヤライト (2FeO · SiO₂) が同定される。これにも少量のウスタイト (FeO) が晶出し、分析点12では99.7% FeOが検出された。また、基地側で色調の沈む個所があり、特性X線像にも白色輝点が集中する。分析点15の定量分析値は、18.4% K₂O – 26.1% Al₂O₃ – 62.4% SiO₂からカリ長石 (Kalsilite : K₂O · Al₂O₃ · 4SiO₂) に同定される。視野を変えても長石類 (feldspar group) が検出される。

まとめ

下扇原遺跡は、弥生時代後期に比定される集落遺跡である。当遺跡のSB46（竪穴住居跡）より平面が不整合形状で、一見板状鉄片や半溶融鉄塊らが鉄滓と共に存したような隙間をもつ溶着物が出土した。鉱物相は板状鉄片らしく見えたのは、6mm厚みの土器片であり、粘土鉱物セリサイトが非晶質化するまで被熱を受けていた。他は鉄塊が無く鉄滓の大部分はウスタイト (Wustite : FeO) とファヤライト (Fayalite : 2FeO · SiO₂)、それに突起部や端部の局部にヘイシナイト (heycynite : FeO · Al₂O₃) が晶出する。異形な

がら36gの小型椀形鍛冶滓に分類できる。古墳時代前中期以降の鍛冶工房出土にある鉄滓のうち、高温沸し鍛接・鍛錬鍛冶滓に準じた組織であった。

鍛冶操業は、土器片を炉壁や炉底に転用した可能性をもち、鉄滓の鉱物相にウスタイトやファヤライト共存からFeO – SiO₂状態図により1,180°C以上が確保され、³⁾ 局部のヘイシナイト晶出を根拠にすると、FeO – Al₂O₃状態図から1,310°C前後まで上昇⁴⁾がある。温度ムラの大きい加熱状況が窺えた。古墳時代の強制送風にもとづく本格鍛冶への萌芽であり、滓の溶融具合が間歇的なのも、これを裏付ける。滓の重量が36gと少なく、小型鉄器の製作が推定される。

一方、古墳時代中期に属する宮崎県都城市所在平峰遺跡でも土器片転用の鍛冶炉でもっての鉄器製作がなされている。椀形鍛冶滓は50~100gと成長させ、鉱物相もウスタイト、ファヤライト、ヘイシナイトなどの共伴の、ややこちらが安定した条件の鉄器製作が想定される⁵⁾。当遺跡は九州での土器敷き鍛冶炉の先駆けであろうか。

下扇原遺跡ではどのような鍛冶原料鉄を充当して何を製作したのか興味深い課題を残した。調査担当の方からのコメントによると、当遺跡からは約2,400点の鉄製品（鍛冶副産物含む）が出土し、住居廃絶後にはベンガラを大量に残すという。当遺跡は手工業生産の解明に一石を投じた生産遺跡であり、今後のこと層の検証が望まれる。

ENDNOTES

1) Levin, Ernest M, 1914 - (Mcmurdie.H.F/American Ceramic Society) American Ceramic Society 1975
ウスタイトとヘイシナイトの状態図にもとづくヘイシナイト $1310^{\circ}\text{C} \pm 10$ 以上を発言

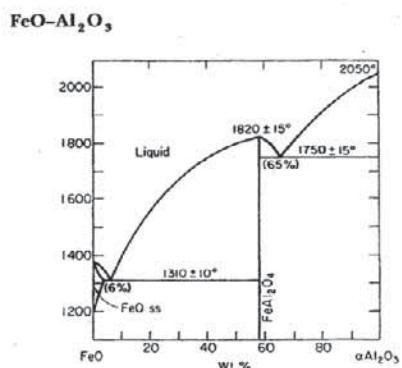


Fig. 4-12. System FeO- $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$.
I. A. Novokhatskii, B. F. Belov, A. V. Gorokh, and A. A. Savinskaya, Russ. J. Phys. Chem., 39 [11] 1498 (1965).

2) 『焼結鉱組織写真および識別法』 1968 日刊工業新聞社

ウスタイトは $450 \sim 500\text{Hv}$ 、マグネタイトは $500 \sim 600\text{Hv}$ 、ファヤライトは $600 \sim 700\text{Hv}$ の範囲が提示されている。また、ウルボスピネルの硬度値範囲の明記がないが、マグネタイトにチタン (Ti) を固溶するので、 600Hv 以上であればウルボスピネルと同定している。それにアルミナ (Al) が加わり、ウルボスピネルとヘイシナイトを端成分とする固溶体となると更に硬度値は上昇する。このため 700Hv を超える値では、ウルボスピネルとヘイシナイトの固溶体の可能性が考えられる。

3) 『鉄鋼便覧』 第3版巻1 1981 丸善 P48

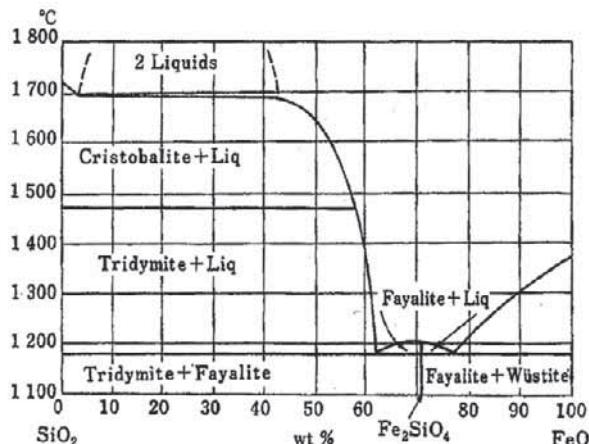


図 4-13 FeO-SiO₂

4) 前掲書 1)

5) 大澤正己・鈴木瑞穂「平峰遺跡出土鍛冶関連遺物の金属学的調査」宮崎県埋蔵文化財センターへの提出原稿 2009.3 提出原稿

追記

南部九州では縄文期の埋甕から土器利用炉が始まり、カマドへの変遷をたどるとの下記論考がある。ただし、鍛冶炉との係わりは言及されていない。しかし、今度の下扇原遺跡や宮崎県平峰遺跡の鍛冶工房より出土した被熱土器片をみてゆくと、萌芽的本格鍛冶における土器利用鍛冶炉の操業数は更に増加してゆくかも知れぬ。

今塩屋毅行「南部九州古墳時代の火処」

－“土器利用炉”に着目して－

『福岡大学考古学論集－小田富士雄先生退職記念－ 2004.3.27』

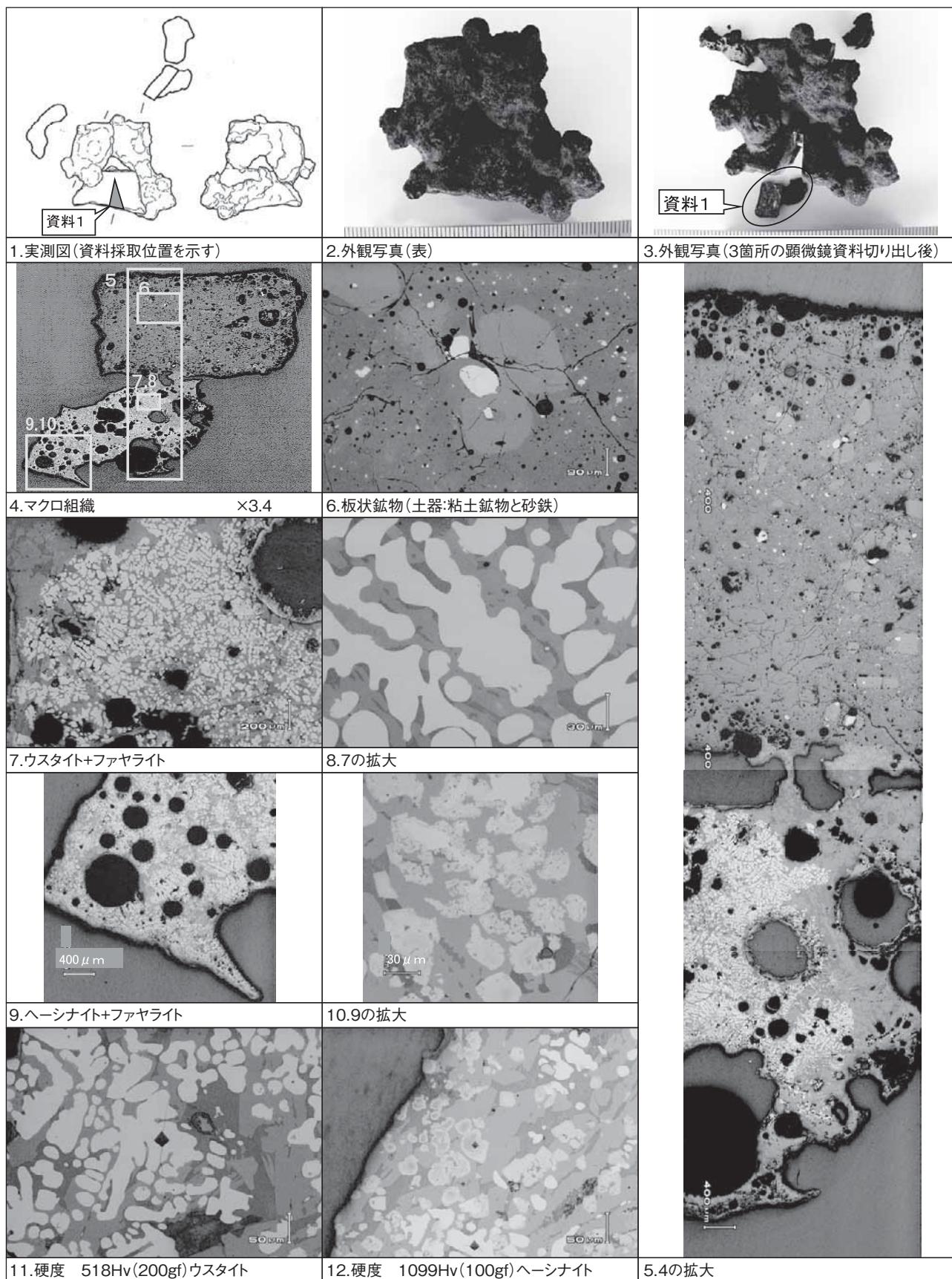


Fig.10-1 溶着遺物(鍛冶滓:資料1)の顕微鏡組織

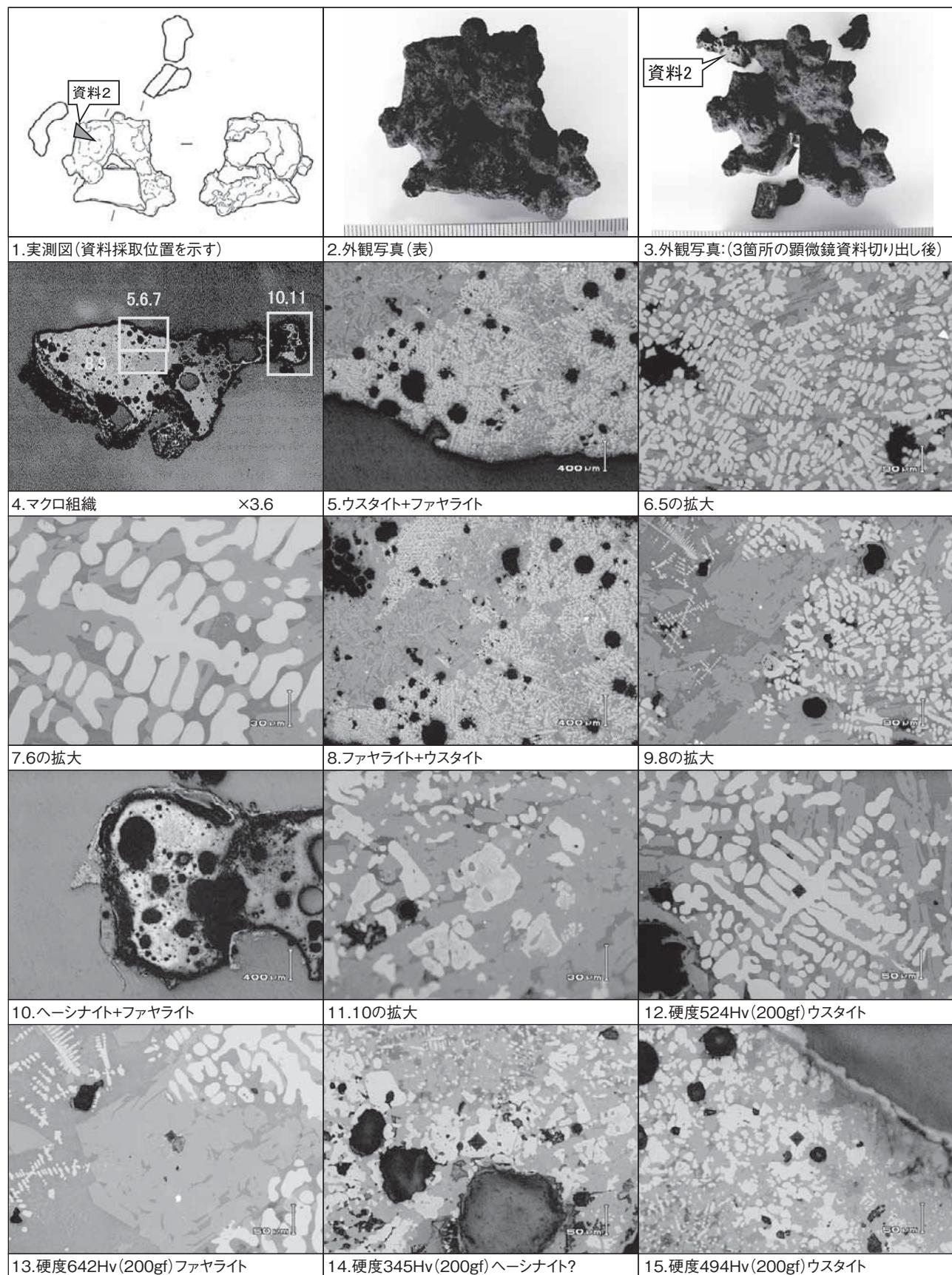


Fig.10-2 溶着遺物（鍛冶滓：資料2）の顕微鏡組織

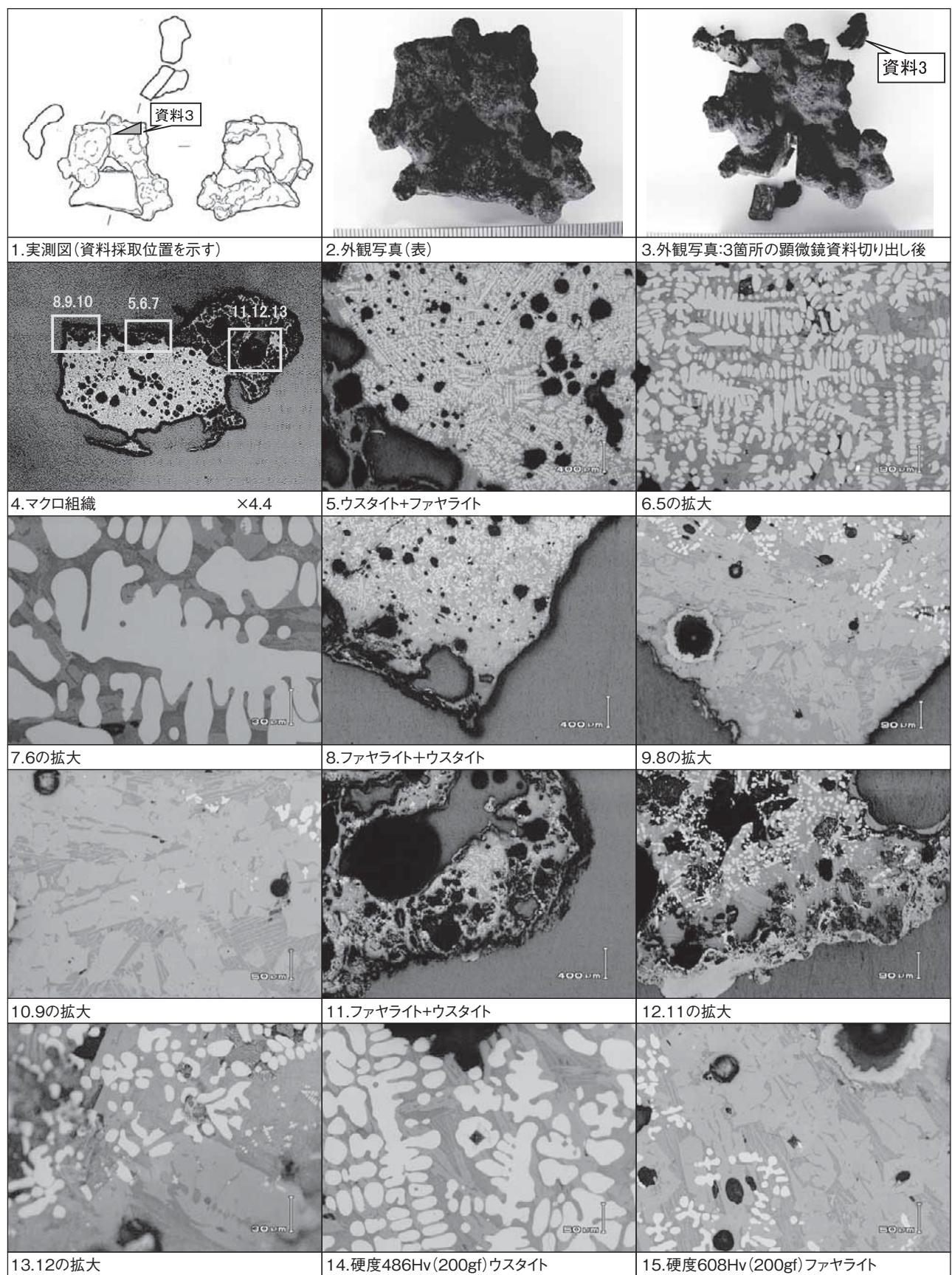


Fig.10-3 溶着遺物(鍛冶滓:資料3)の顕微鏡組織

KON-1-1①

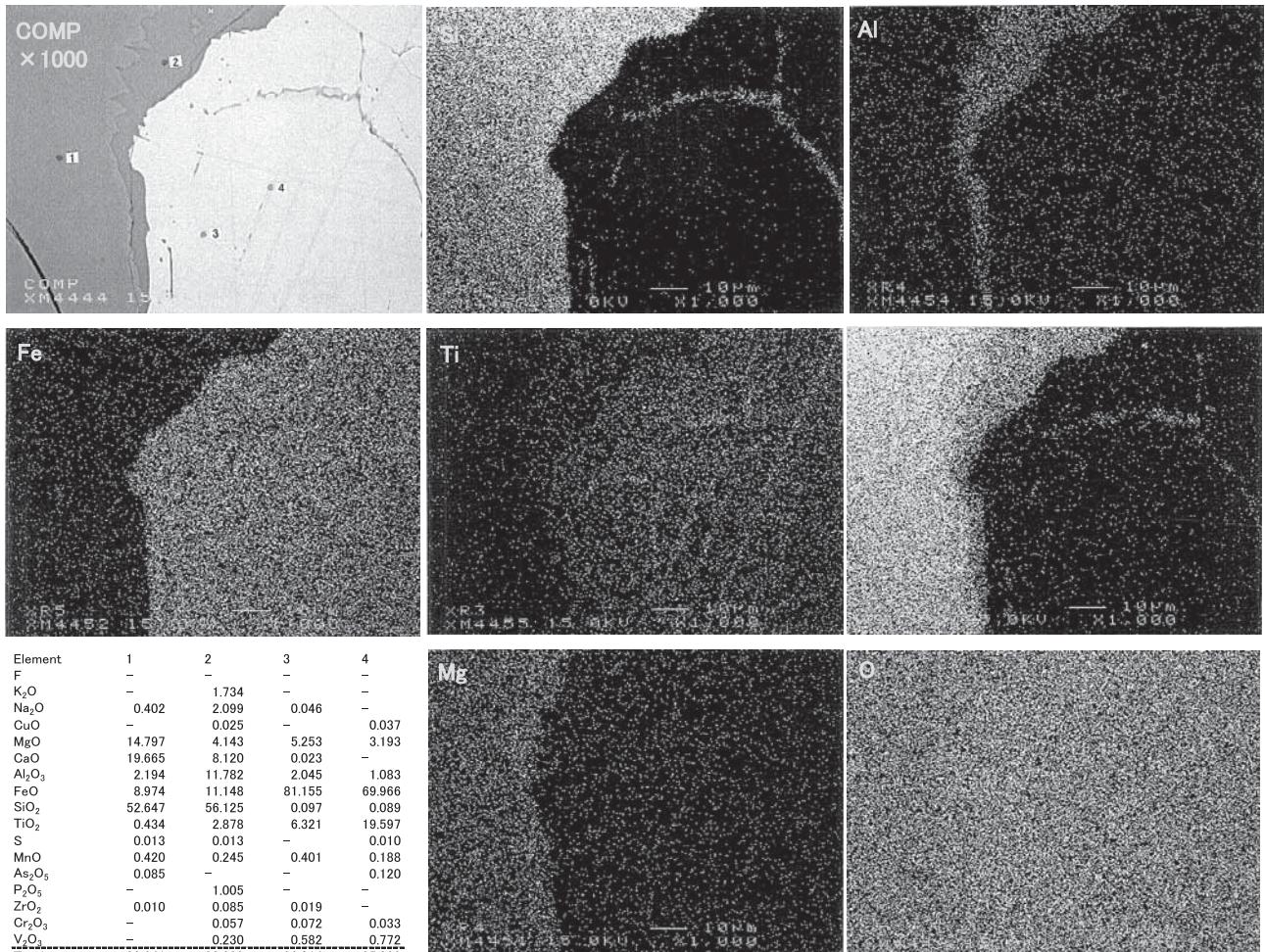
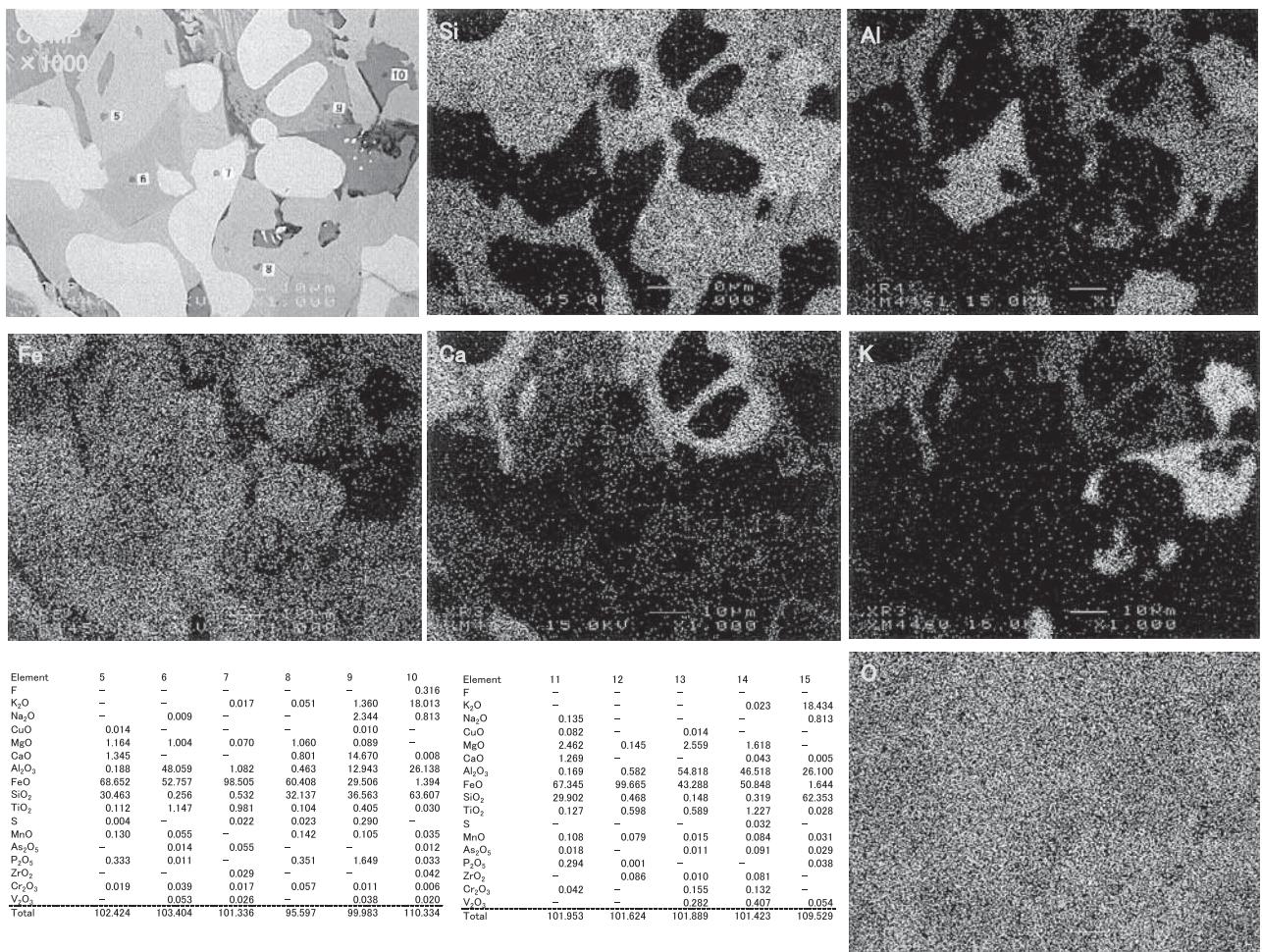


Fig.10-4 EPMA調査

KON-1-1②



KON-1-1③

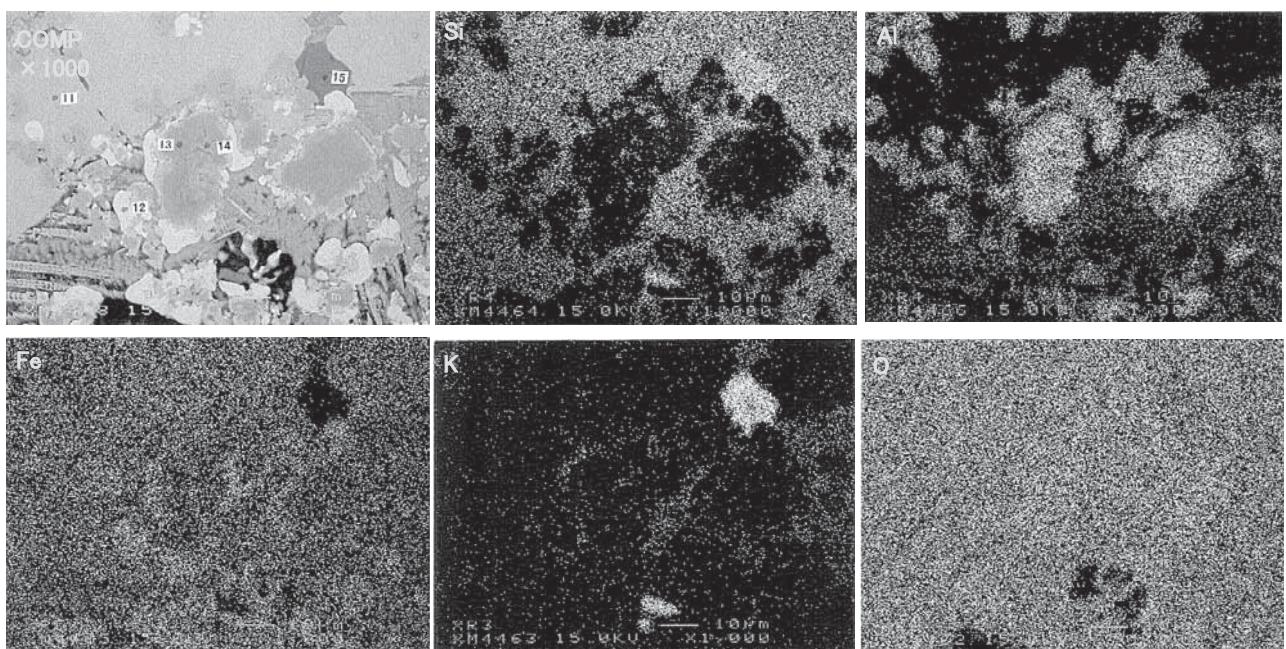


Fig.10-5 E P M A 調査

