

クサビ・カスガイの金属学的調査

(株)九州テクノロジー
営業技術部・TACセンター

概要

金沢城跡二ノ丸菱櫓石垣の修築に際して、使用された17世紀代のクサビ・カスガイの調査を行って、次の点が明らかになった。

1 両鉄製品は、日本古来のたたら製鉄で製造された鉄素材を原料とした鍛造品であった。製鉄原料は、鉄中の非金属介在物（鉄の製造過程で金属鉄と分離しきれなかったスラグや耐火物の混り物）からみて砂鉄が推定された。

2 クサビ原料の鉄の製造は、江戸時代の完成された、たたら製鉄の産物であり、鉄中の化学成分に砂鉄特有成分のチタン（Ti）やバナジウム（V）を微量含有すると共に、非金属介在物に砂鉄由来のルチル（Rutile: TiO_2 ）やペロブスカイト（Perovskite: CaTiO_3 ; 融点1,971℃）系など高温操業での晶出物が検出される。

一方、炭素含有量は偏析をもち、0.7% C前後の共析組成の層状領域（硬度250Hv前後）、0.2～0.3% Cのベイナイト（Bainite: フェライトと炭化物の混合物）組織領域（硬度160Hv前後）、更には0.005% Cのフェライト（Ferrite: 鉄や純鉄の金相学上の呼称）組織単相領域（硬度100Hv前後）が、境界不鮮明に鍛接されている。

なお、鍛造仕上げは雑であり、内部に不完全鍛接部などの欠陥部をもつが、これからの亀裂などが生じた痕跡はなく、使用上材質的に強度的な要求はあまりなかったと思われる。

3 カスガイは、廃鉄器の再利用であって、鉄中の非金属介在物は、酸化第1鉄（Wüstite: FeO ）と珪酸塩夾雑物（Fayalite: $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ）が晶出し、ヴスタイト中にチタン（Ti）を僅かに固溶し、炭素量は鍛冶加工中に脱炭されて0.005% Cフェライト単相（硬度100Hv前後）の極低炭素鋼となる。なお、爪先の外表面に一部パーライト（Pearlite: フェライトとセメンタイトが交互に重なり合って構成された層状組織）組織領域がみられたが、意識的な爪の強度の確保でなくて、廃鉄器（古鉄）の炭素偏析に起因するのであろう。また、胴部に比較して屈曲部や爪先は細粒のフェライトからなるのは鍛造加工度が大いことを示す、フェライト単相の極低炭素鋼は低強度であるが、爪部に塑性変形の様子はなく、該品もさして強度を要求されない用い方がなされている。

1. いきさつ

金沢城跡は、石川県金沢市丸の内に所在する安土桃山時代から江戸時代にかけての城跡である。今回、石川県が江戸時代後期の建物復元を決定し、これに伴って石垣の解体修理が行われている。この際に、菱櫓の隅角部の算木積み等にクサビと、カスガイが使用されているのが発見された。この両鉄器の材質調査を行い、復元素材の指針を得るための金属学的調査の運びとなった。

2. 調査方法

(1) 供試材

Table. 1 に示す。クサビ、カスガイは各1点ずつである。

(2) 調査項目

肉眼観察

マクロ組織

クサビは長軸方向断面の全長、カスガイは片爪側を基部側からL字状に切出し、等倍で側面研磨面を撮影している。顕微鏡検査によるよりも広い範囲にわたって観察できる利点があり、鍛打時の鍛接線やキズ、また腐食後は炭素量の偏析などが明瞭に現われる。

顕微鏡組織

マクロ観察と同一面をエメリー研磨紙の#150、#240、#320、#600、#1,000と順を追って研磨し、最後に被研面をダイヤモンドの3 μ mと1 μ mで仕上げ、光学顕微鏡観察を行った。なお組織を現わすための腐食液はナイトル(5%硝酸液)を使っている。

ビッカース断面硬度

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、その時に生じた窪みの面積をもって、その荷重を除いた商を硬度値としている。試料は顕微鏡試料を併用した。

CMA (Computer Aided X-ray Micro Analyzer) 調査

EPMA (Electron Probe Micro Analyzer) にコンピューターを内蔵させた新鋭分析機器である。旧式装置は別名、X線マイクロアナライザーとも呼ばれる。分析の原理は、真空中で試験面(顕微鏡試料、ただし真空室に入れるので小切りとする)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。化学分析のできない微量試料や鉱物組織の微小域の組織同定が可能である。

化学組成分析

炭素(C)、硫黄(S)：燃焼容量法、燃焼赤外吸収法。他はICP (Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometer) 法：誘導結合プラズマ発光分光分析。

3. 調査結果

(1) クサビ

肉眼観察：平面が方形に近く、断面がV字形で先端が細まる鉄矢である。一端が広く開いた小口は、鍛接キズが2～3mmの窪みでもって溝状に認められる。全面赤褐色の鉄錆に覆われるが鉄の遺存度は極めて良好であった。マクロ組織や検鏡は、長軸方向断面を研磨している。

マクロ組織：Photo. 2の上段に示す。炭素含有量が0.7%前後の共析鋼組成を有する鉄塊から、0.005%の極低碳素鋼組成の鉄塊を集めて熔融鍛接し、規則性をもつ折返し曲げ鍛接線を残す加工は施されていない。また、内部には不完全鍛接箇所を幾つも残し、強度重視の仕上げは認められなかった。

顕微鏡組織：Photo. 2に示す。クサビ断面は0.7%程度の炭素を含有する共析組成を有する層状領域(Hv250前後；硬度分布図参照)と、ほぼ0.005%炭素を含有するフェライト組織単相からなる領域(Hv100前後)と、0.2%～0.3%程度の炭素を含有するベイナイト組織領域(Hv160前後)からなり、これらの組織体は境界部が不鮮明に隣接している。

このような組織の特徴から、同クサビは炭素含有量の異なる素材を合わせ鍛えしたものと思われる。

これらの組織体は、炭素含有量の高い領域が一方の表面に位置する傾向があるものの、他方の表面は炭素が低い相からなり、必ずしも戦略的に用途に応じた合わせ鍛えしたとは思われない。

0.2%～0.3%程度の炭素を含有する領域がベイニティックな組織を形成していることから、同クサビは鍛造による成形後放冷されたものと思われる。

石垣組石支え用のクサビとしては、石組み間にクサビを打ち込んだ際に、パーライト組織側での強度維持と、フェライト組織側での石組み間隙適合性が期待できる。しかし、供試クサビ表面は厚いスケール層で覆われており鮮明ではないが、表面観察からは塑性変形を受けた形跡は見られず、強度はさほど要求されないものと思われる。また、クサビ断面内には「不完全鍛接」状の欠陥が観察されるが、この部分から亀裂が生成した様子は見られないことから、クサビとしての強度的な要求は高いものと思われる。

ビッカース断面硬度：Fig. 1 に硬度測定結果を示す。硬度値は、炭素含有量と相関をもち、0.7%共析組成では250Hv前後で、0.2～0.3%ベイナイト組織域では160Hv前後、更に0.005%極低碳素域では100Hv前後と漸次軟化してゆく。組織に見合った傾向である。

CMA調査：鉄中の非金属介在物の調査について、2視野行った。まず、Photo. 3のCOMP（反射電子像）にみられる3種類の鉱物相の高速定性分析結果がFig. 2である。A-Rankで検出される元素は、鉄（Fe）と砂鉄特有元素のチタン（Ti）、ジルコニウム（Zr）、ガラス質成分（Si + Al + Ca + Mg + Na + K）、磷（P）、酸素（O）などである。この高速定性分析結果を視覚化した面分析の特性X線像と定量分析結果がPhoto. 3である。特性X線像は、分析元素の存在を白色輝点の集中度で知ることができる。COMPの中の11の番号のついた淡茶褐色長方形結晶は、白色輝点がチタン（Ti）に強く、アルミニウム（Al）に弱く集中する。また、定量分析値は、63.9%TiO₂ - 10.6%Al₂O₃組成が得られて、当介在物の鉱物組成はアルミニウム・チタナイト（Aluminum Titanate (Al₂O₃・TiO₂)) もしくはルチル（Rutile: TiO₂）系が同定される。これには、砂鉄特有元素のジルコニウムも1.3%ZrO₂で固溶される。

次にCOMPの13の番号のついた淡灰白色粒状結晶は、チタン（Ti）、カルシウム（Ca）、アルミニウム（Al）に白色輝点が集中し、定量分析値は、45.5%TiO₂ - 26.4%CaO - 10.2%Al₂O₃組成であり、鉱物組成はペロブスカイト（Perovskite: CaO・TiO₂）とアルミニウム・チタナイトの混合組成が同定される。ペロブスカイトは、1,971℃の溶融点をもつ高温析出物であり、たたら操業温度の高温化を裏付けることになる。過去の調査でもあまり類例のなかった介在物の発見である。また、カルシウムは、鉄と滓の分離を促進する媒溶剤であり、貝殻や石灰石などに含有される成分で、炉壁粘土由来の傾向ではなからう。たたら操業での媒溶剤の添加は不鮮明であるが、今回検出の鉱物組成の同定は、一考を要する問題となった。

COMPの15の番号は、暗黒色ガラス質スラグ部分で、ガラス質成分に白色輝点が集中し、かつ、チタン（Ti）も固溶されて、45.2%TiO₂ - 22.6%Al₂O₃ - 16.4%SiO₂ - 3.0%CaO - 7.9%MgO - 3.0%K₂O - 1.1%Na₂O組成が得られた。鉄中の非金属介在物は量的には多くはないが、存在するものの中のチタン（Ti）濃度は頗る高いものであった。

残るもう1視野の介在物の分析結果がFig. 3とPhoto. 4である。こちらでも高チタン（Ti）濃度の介在物が検出されて、鉱物組成の一部に差異がある。COMPの7の番号のつく不定形介在物は、結晶外縁部に白色酸化層をもち、白色輝点がチタン（Ti）に強く、マグネシウム（Mg）、アルミニウム（Al）、鉄（Fe）に弱く集中する。定量分析値は、82.3%TiO₂ - 8.6%Al₂O₃ - 3.6%FeO組成で、ルチル（TiO₂）が同定される。また、COMPの8の番号は、暗黒色ガラス質スラグ部分で、47.1%SiO₂ - 21.2%Al₂O₃ - 10.6%CaO - 2.4%MgO - 6.9%K₂O - 1.2%Na₂O組成となった。鉱物相はガラス質であるが強い主要鉱物相を挙げると、ゲーレナイト（Gehlenite: Ca₂Al₂SiO₇）あたりが同定されよう。

また、COMPの10の番号は、淡灰白色粒状結晶で、白色輝点が鉄（Fe）、カルシウム（Ca）、珪素

(Si)、アルミニウム (Al) などに集中し、定量分析値は30.0%TiO₂ - 22.3%CaO - 21.1%SiO₂ - 11.1%Al₂O₃組成が得られた。鉱物組織は、ペロブスカイト (CaO・TiO₂) とムライト (Mullite: 3Al₂O₃・2SiO₂) の混合組成あたりに同定される。いずれにしても、チタン (Ti) とカルシウム (Ca) 濃度の高い介在物であった。

化学組成分析：Table. 2 に示す。炭素 (C) 含有量が0.17%と低値で現われているのは、或る局部の平均的な数字であって、顕微鏡組織の観察から、0.7～0.005%の範囲の中での集約値といえる。鉄中の不純物は少なく、珪素 (Si) 0.01%、マンガン (Mn) 0.01%以下、燐 (P) は若干含まれるものの0.034%、硫黄 (S) 0.002%、銅 (Cu) 0.011%であった。砂鉄特有成分のチタン (Ti) 0.013%、バナジウム (V) 0.006%は僅かにあって、非金属介在物由来の含有量である。随伴微量元素のニッケル (Ni) 0.005%、クロム (Cr) 0.003%、ジルコニウム (Zr) 0.001%以下、砒素 (As) 0.004%であった。高純度の鉄であり、砂鉄原料鉄の傾向は窺えた。

(2) カスガイ

肉眼観察：基部断面が2.1×1.5cmで全長23.3cmを測り、両端を直角に曲げ、その尖端をとがらせた大型のカスガイである。全面が赤錆に覆われるが金属鉄の残存は良好である。

マクロ組織：Photo. 5 の最上段に示す。カスガイは、棒状素材を用いて断面を方形に近い長方形に鍛造し、両端をとがらせて直角に曲げているが、この時に折返し曲げた鍛接線が応力を受けて数条以上が口を開いている。これも一種の鍛接不良であろう。

顕微鏡組織：カスガイは、ほぼ0.005%の炭素を含有するフェライト単相 (Hv100；硬度分布図参照) であり、極めて炭素の低い鋼によって成形されている。

爪先の外表面の一部にパーライト組織領域 (Hv215) が不自然に存在しているが、意識的に爪の強度を確保するために浸炭などの熱処理を施したとは思われない。

胴部と比較して、屈曲部および爪先部は細粒のフェライトからなり、鍛造加工量が大きいことを示している。

強度的には、カスガイとして機能するとは思われないほど低強度であるが、爪部分が塑性変形した様子は見られないことから、さして強度を要求されない用い方がなされていたものと思われる。

ピッカース断面硬度：Fig. 4 に示す。カスガイの基地は、フェライト単相で、炭素固溶量が非常に少なく (0.005%C) 軟質で硬度値は100Hv前後である。ただし、爪先側の外表面にパーライト組織領域があり、ここだけは215Hvと硬質である。この硬質部は意識的に強度向上のための浸炭を施したものでなく、異材鍛接による組織変動による異常値と考えられる。

CMA調査：非金属介在物が単発粒状で散在する個所と、酸化第1鉄 (FeO) と珪酸塩夾雑物 (2FeO・SiO₂) の共晶の個所があるので両者の調査を行っている。Photo. 6 のCOMP (反射電子像) に示す粒状介在物的高速定性分析結果をFig. 4 に示す。A-Rankで検出された元素は、鉄 (Fe) と、珪素 (Si)、アルミニウム (Al)、燐 (P)、硫黄 (S)、酸素 (O) である。

Photo. 6 のCOMPに3、5、6と番号をつけた白色相部分は、鉄 (Fe) にのみ白色輝点が集中し、定量分析値が89.7～100%組成となるので、鉱物組成はヴスタイト (FeO) が同定される。また、COMPの4の番号は、黒色基地に淡灰色微細粒の晶出する個所で、白色輝点は鉄 (Fe)、珪素 (Si)、燐 (P) に集中し、定量分析値は、68.7%FeO - 19.2%SiO₂ - 9.1%P₂O₅組成が得られた。鉱物組成は、ファイヤライト (2FeO・SiO₂) と燐化鉄 (Iron Phosphat: Fe₂O₃・FePO₄ or Fe₂O₃・P₂O₅) の混合組成が想定される。

次にPhoto. 7 のCOMPにみられる白色粒状ヴスタイトと、淡灰色繊維状結晶のファイヤライトの高

速定性分析結果をFig. 5 に示す。A-Rankでの検出元素は、鉄 (Fe) とガラス質成分 (Si + Al + Ca + Mg + K + Na)、燐 (P)、硫黄 (S)、酸素 (O) などである。また、B-Rankに砂鉄特有元素のチタン (Ti) が認められた。

COMPに1の番号をつけた淡灰色繊維状結晶は、白色輝点が鉄 (Fe) と珪素 (Si)、酸素 (O) に集中し、定量分析値は55.2%FeO - 31.1%SiO₂組成が得られてファイヤライト (2FeO・SiO₂) が同定される。更に、COMPの2の番号は、鉄 (Fe) と酸素 (O) に白色輝点が集中し、鉱物組成にヴスタイト (FeO) が判定された。このヴスタイト粒には、チタン (Ti) に弱く白色輝点が集中し、0.5% TiO₂が固溶されるので、砂鉄系鉄素材の履歴と読みとれる。

このPhoto. 7のCOMPに示したファイヤライトとヴスタイトの大型共晶介在物は、鍛打作業の繰返し時の鉄肌に生じたものの捲き込みがあり、廃鉄器再生により派生した事が窺われる。

化学組成分析：Table. 2 に示す。鍛打が繰返し施され、夾雑物が絞り出されているので高純度の組成となっている。局部的には共析鋼 (0.77%C 215Hv個所) 部分も蔵するが、平均的には純鉄同様の0.004%炭素 (C) 域で占められ、珪素 (Si) 0.01%以下、マンガン (Mn) 0.01以下、燐 (P) 0.041%、硫黄 (S) 0.004%、銅 (Cu) 0.007%となる。砂鉄特有成分もクサビと比較すると減少し、チタン (Ti) 0.001%、バナジウム (V) 0.000%となる。しかし、随伴微量元素のニッケル (Ni) 0.008%、クロム (Cr) 0.003%、ジルコニウム (Zr) 0.000%、砒素 (As) 0.003%などはクサビと大差ない数値であった。

4.まとめ

金沢城跡二ノ丸菱櫓石垣に使用されていた17世紀代のクサビとカスガイは、たたら製鉄で製造された砂鉄系鉄素材の充当が推定された。鉄の材質をみると、クサビは精錬鍛冶炉から出てきた不純物除去の処女鉄で、炭素量は共析鋼 (0.77%C) 領域から純鉄 (0.005%C) クラスの鉄塊を鍛打成形しており、カスガイは廃鉄器 (古釘など) 再生で、脱炭状態の極低碳素鋼の折返し曲げ鍛接での成形となる。

この両鉄製品の鍛造仕上げは、鍛接不良部分を残すが、これを基点にした亀裂の発生や、極低碳素鋼部分の炭素量不足からの塑性変形を受けた形跡はなく、強度面を含めて何ら不都合面は認められず、既存素材で鉄器として機能するものと考えられる。

一方、金沢城跡石川橋 (白鳥堀調査区) では、16世紀代の鍛冶遺構 (SX03) や、鑄造溶解遺構 (SX01) など検出されて、これに関連する遺物が出土して、当時の金属器製作の実態の一部も明らかになっている。この時に出土した遺物と、今回調査のクサビ・カスガイは、技術の系譜として両者は連動するものといえる。

最後に、石垣復元に際しては、クサビ・カスガイを現代製鉄での鉄素材で製作した場合、耐食性の検討が必要となろう。ここに幾つかの候補鋼材を挙げて、その耐食性データを参考資料として添付しておく。(编者注：本文では割愛した)

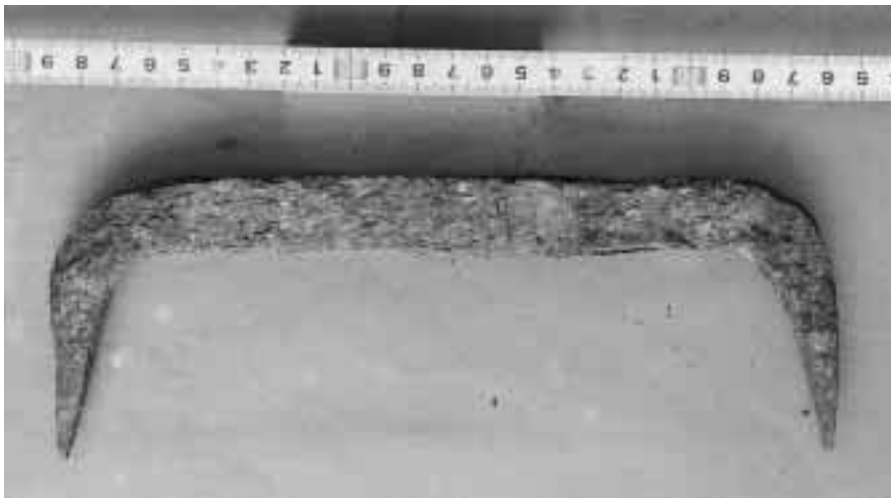
注 大澤正己「金沢城跡石川橋出土鑄造・鍛冶関連遺物の金属学的調査」『金沢城跡石川門前土橋 (通称石川橋) 発掘調査報告書』石川県立埋蔵文化財センター 1998

5.おわりに

本稿は、(株)九州テクノリサーチ・営業技術部・TACセンターの協力のもとにまとめた。試料調整とマクロ組織・ミクロ組織の撮影は浜口政彦氏、顕微鏡組織のコメントは影山英明氏、データ整理は鈴木瑞穂氏、全体の文章化は大澤正己が執筆している。(1999.7.5)



クサビの外観



カスガイの外観

Photo. 1 供試材の外観写真

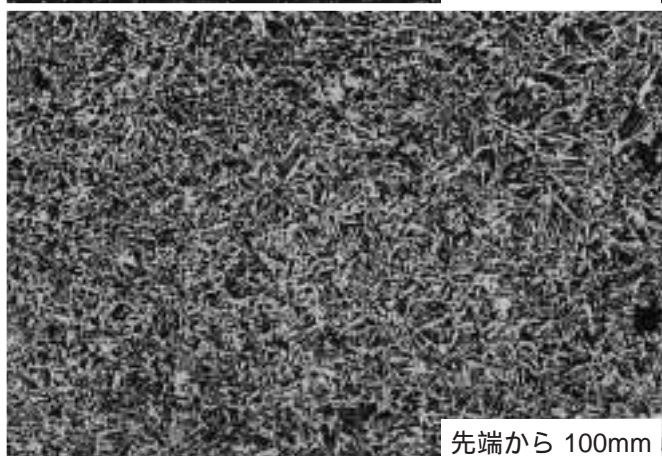
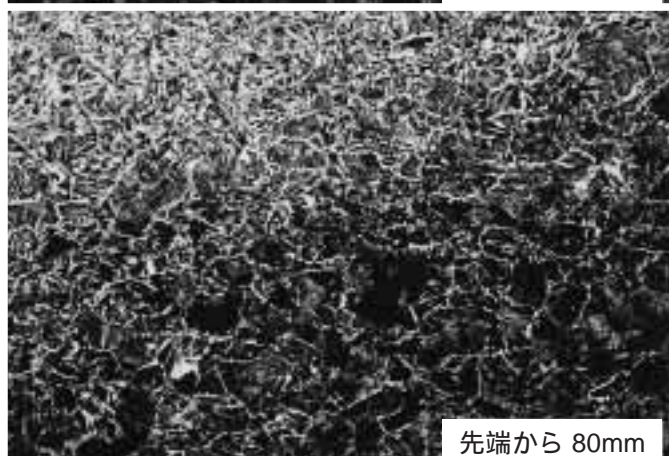
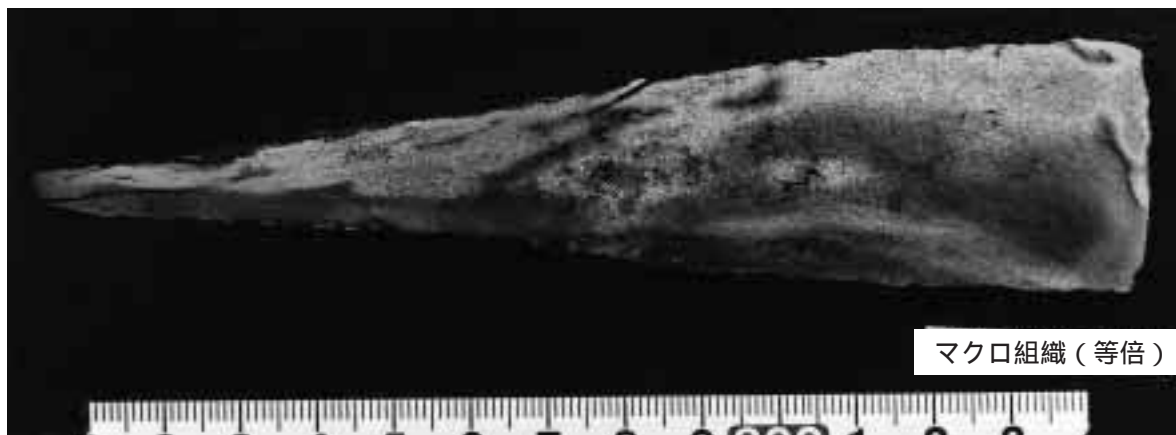


Photo. 1
クサビのマクロ
・ミクロ組織



(クサビの硬度測定箇所)

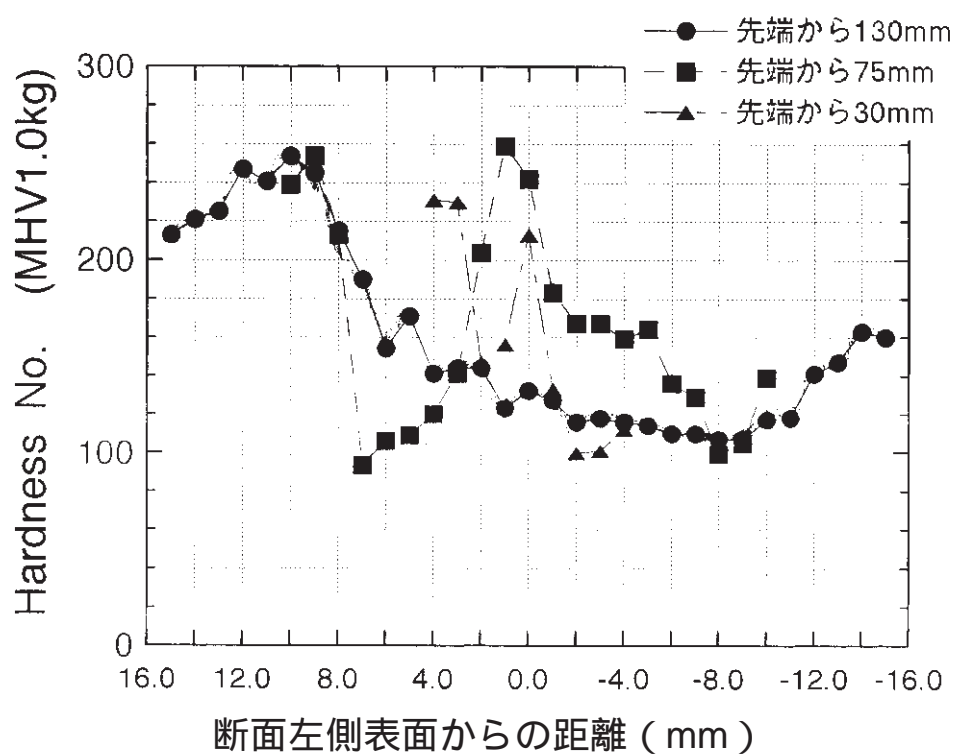


Fig. 1 クサビの厚み方向 (横断面) の硬度測定結果

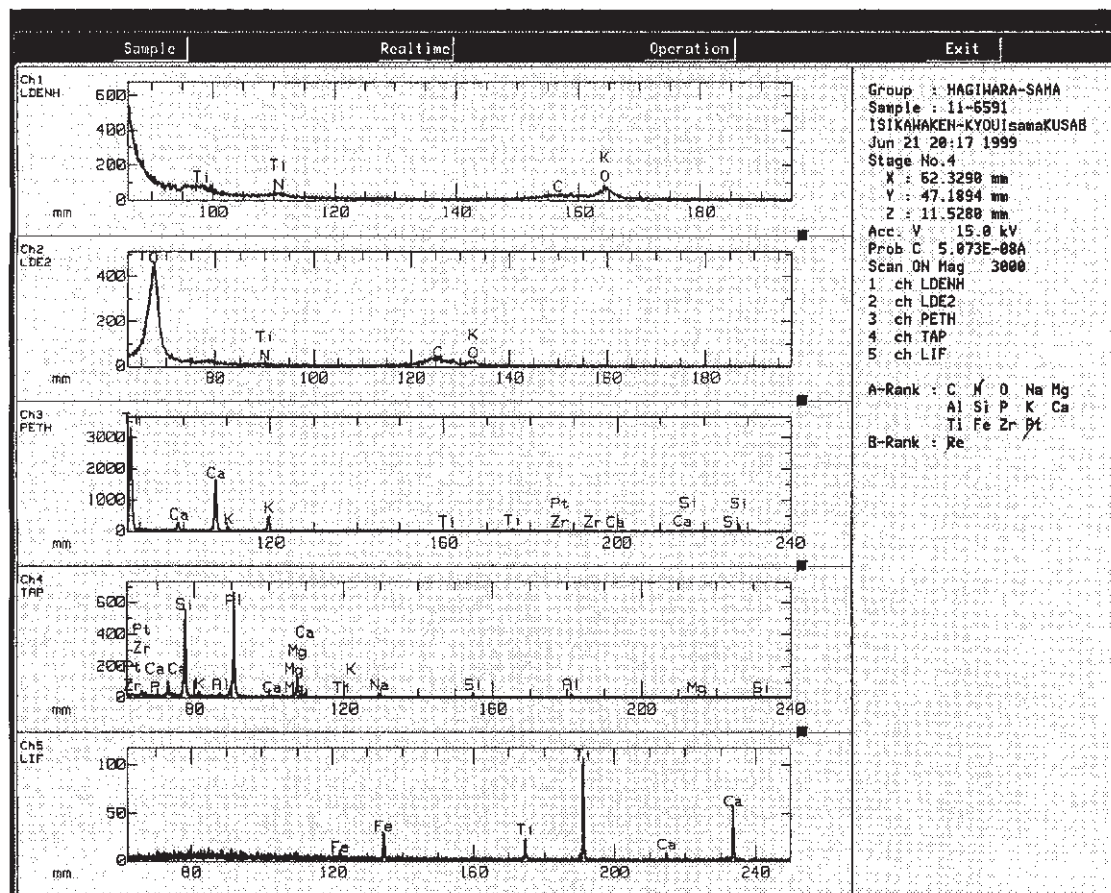


Fig. 2 クサビの鉄中非金属介在物のコンピュータプログラムによる高速定性分析結果(1)(photo. 3 に対応)

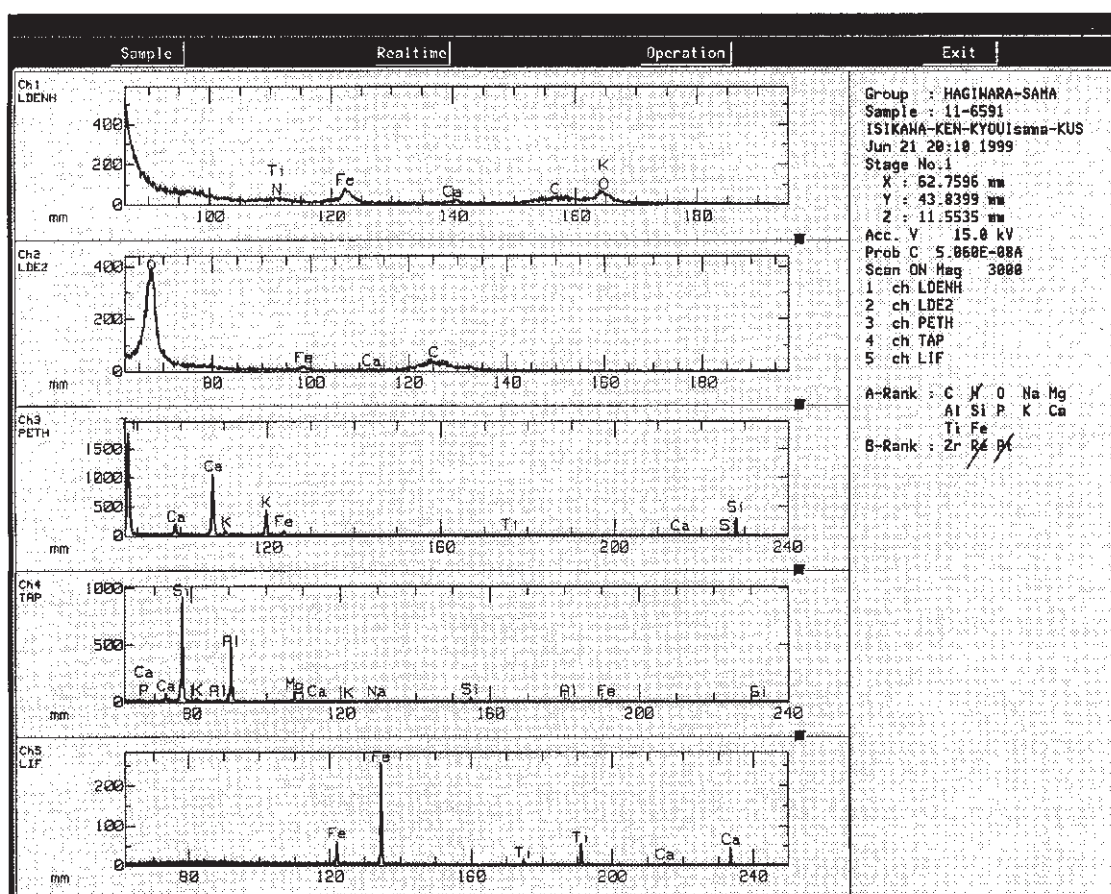


Fig. 3 クサビの鉄中非金属介在物のコンピュータプログラムによる高速定性分析結果(2)(photo. 4 に対応)

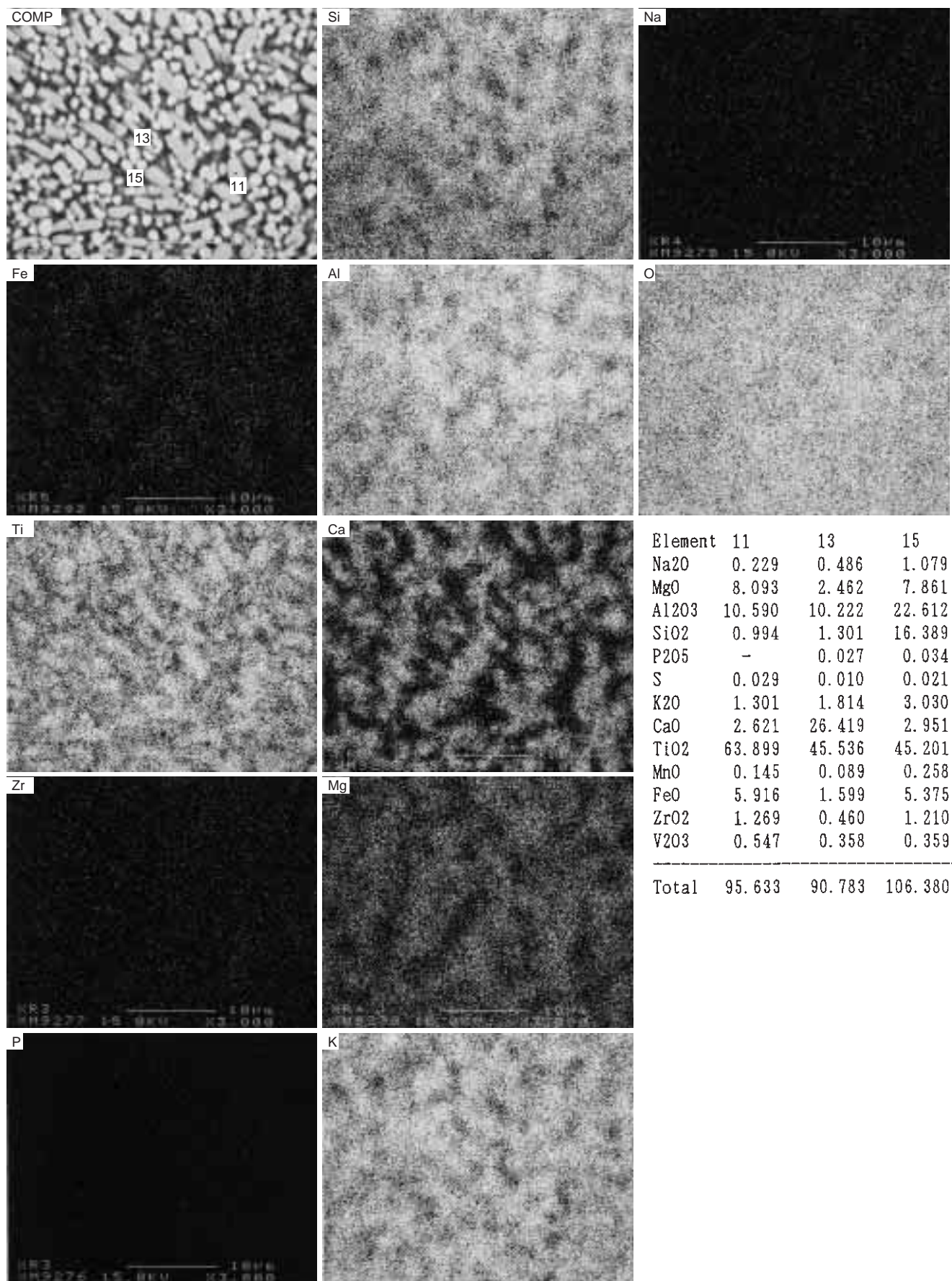


Photo.3 クサビの鉄中非金属介在物の特性X線像と定量分析値（1）

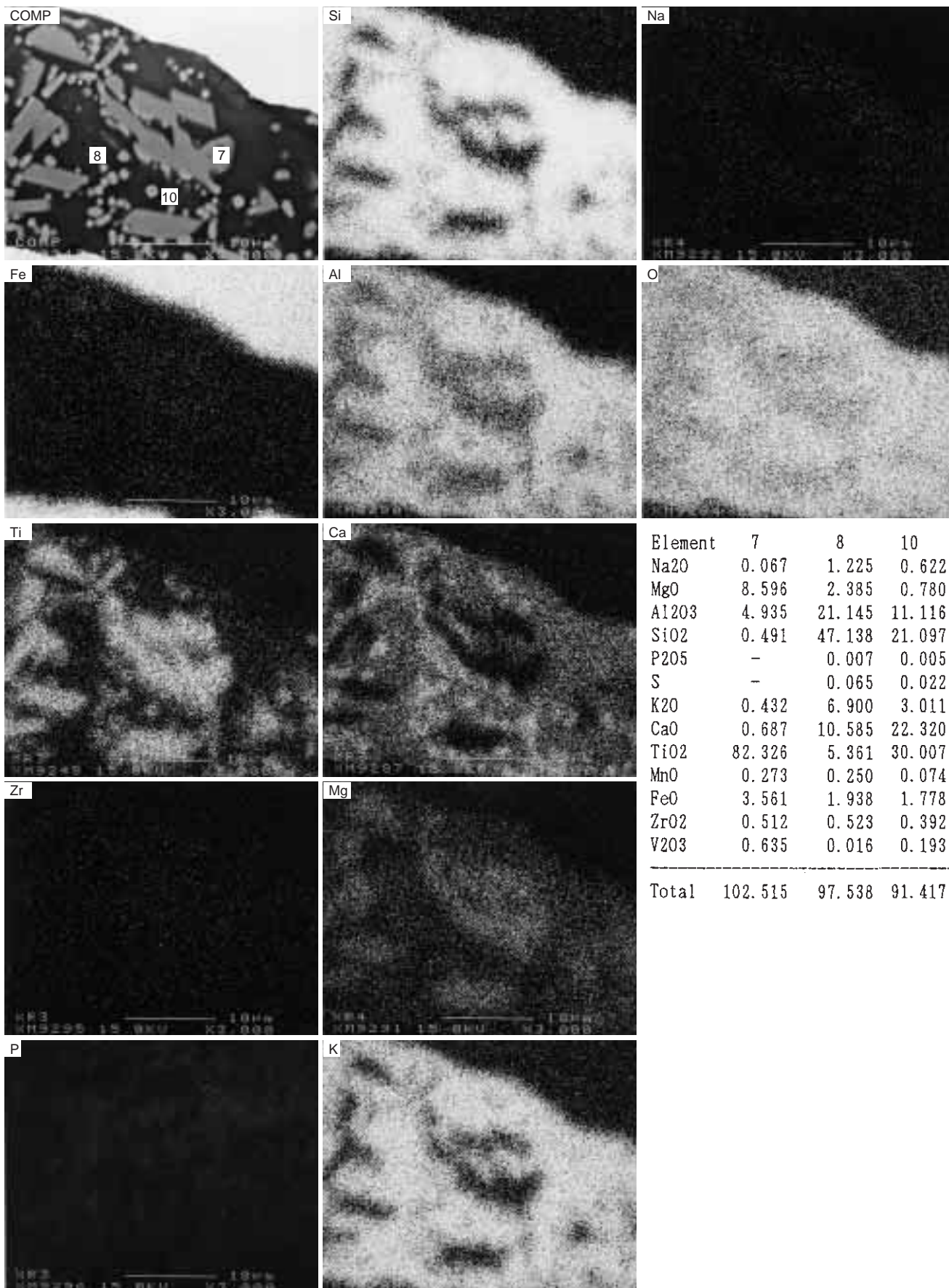


Photo.4 クサビの鉄中非金属介在物の特性X線像と定量分析値（2）

(× 25)

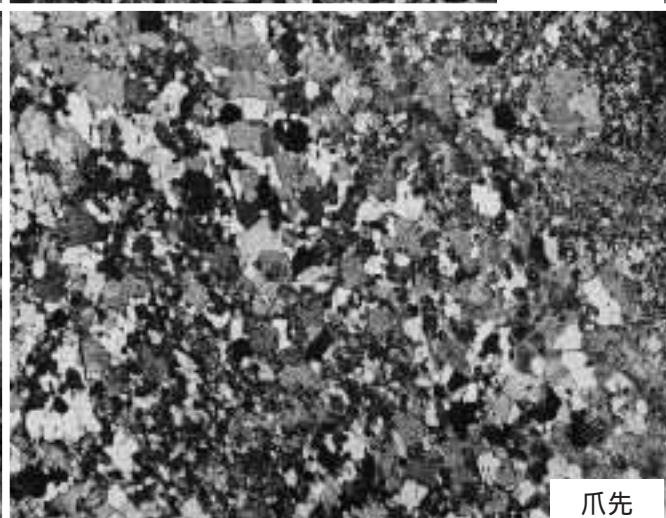
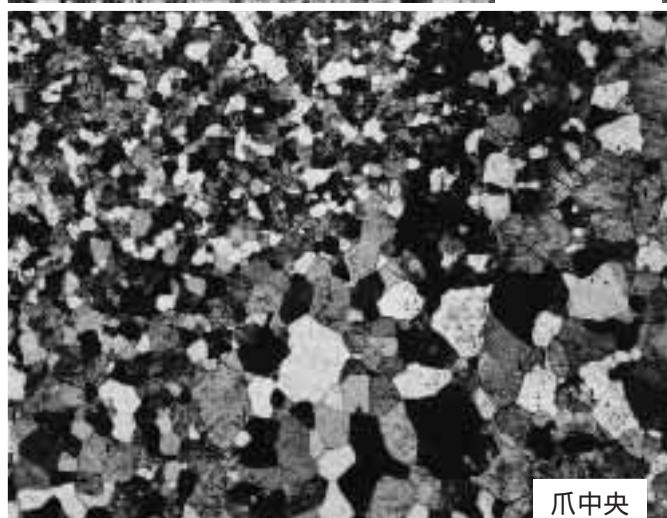
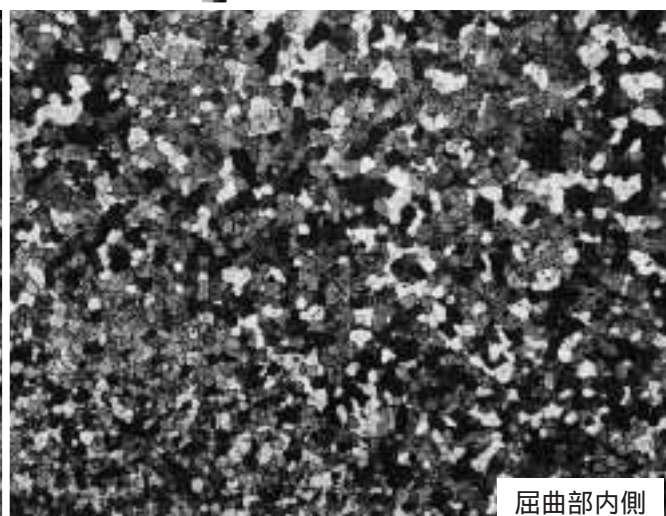
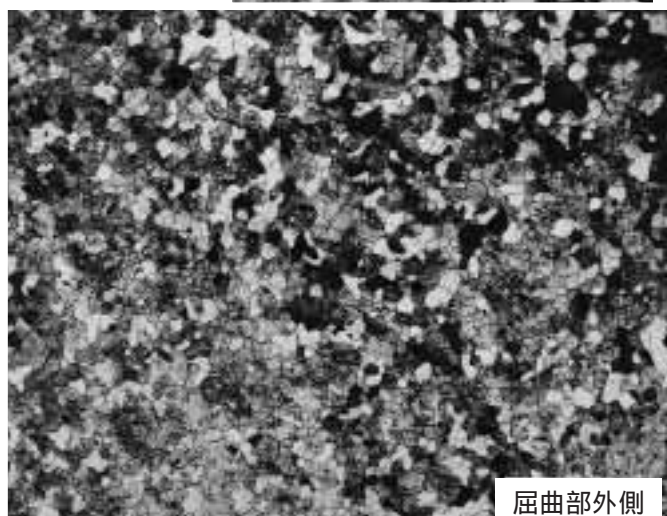
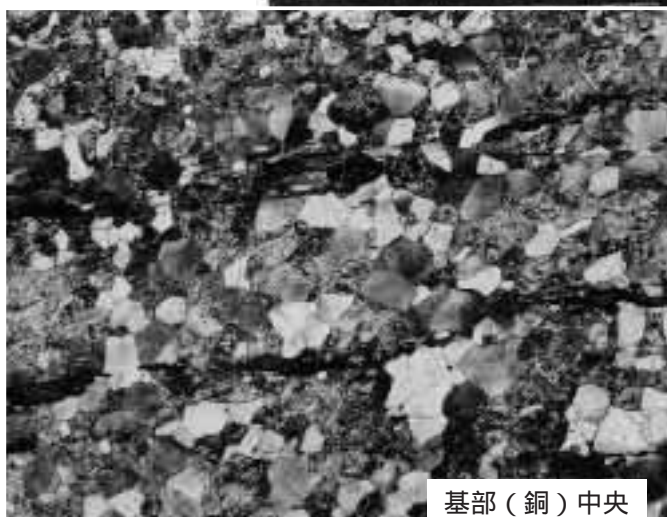


Photo. 5 カスガイのマクロ・ミクロ組織

ミクロ組織 25倍

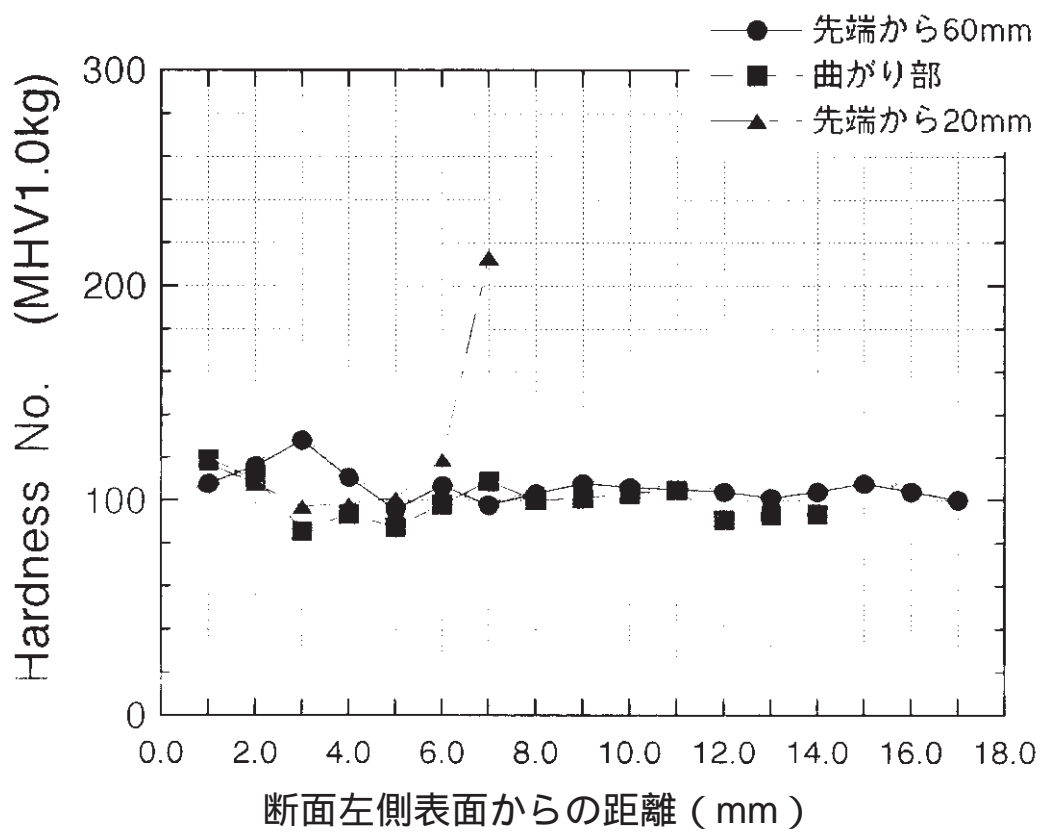
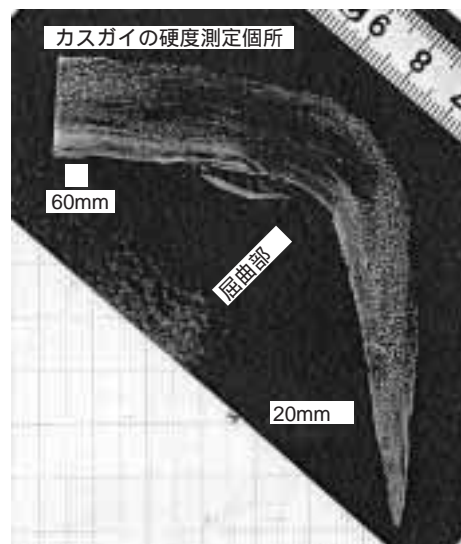


Fig.4 カスガイの厚み方向（横断面）の硬度測定結果

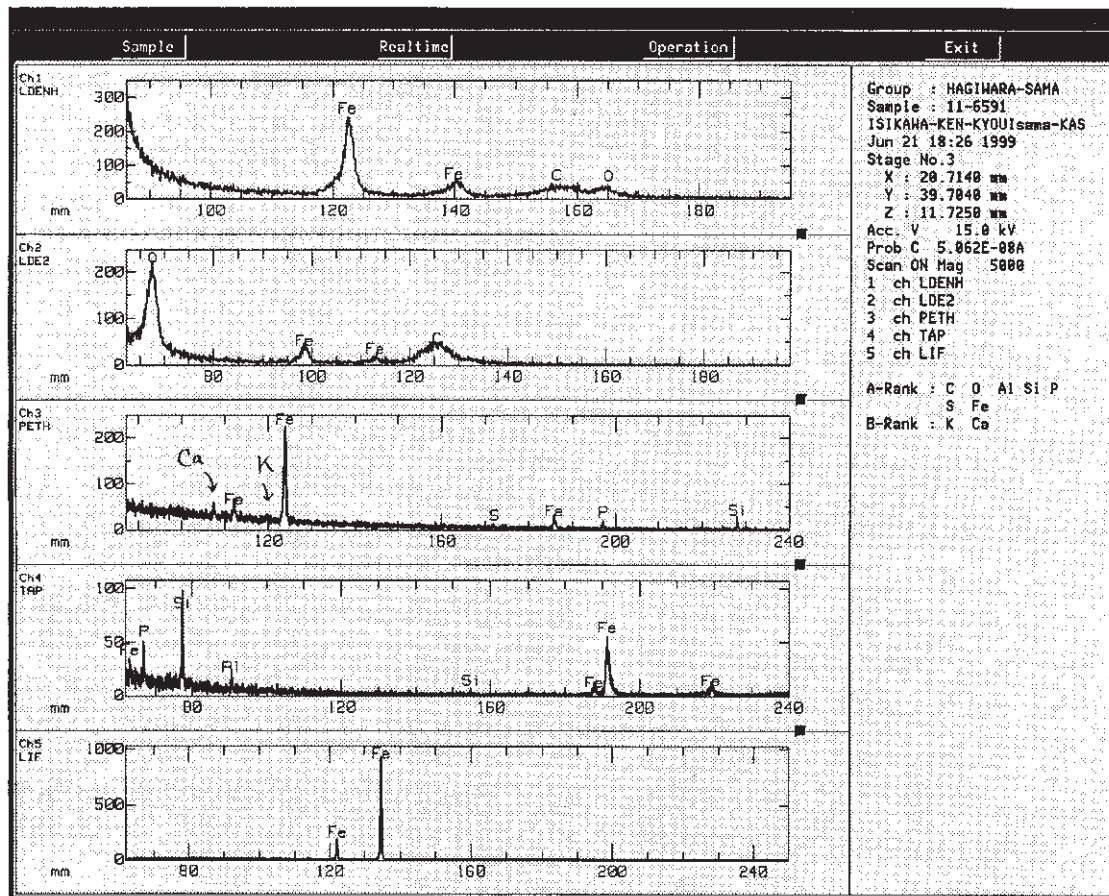


Fig. 5 カスガイの鉄中非金属介在物のコンピュータープログラムによる高速定性分析結果(1 ⅻ photo. 6 に対応)

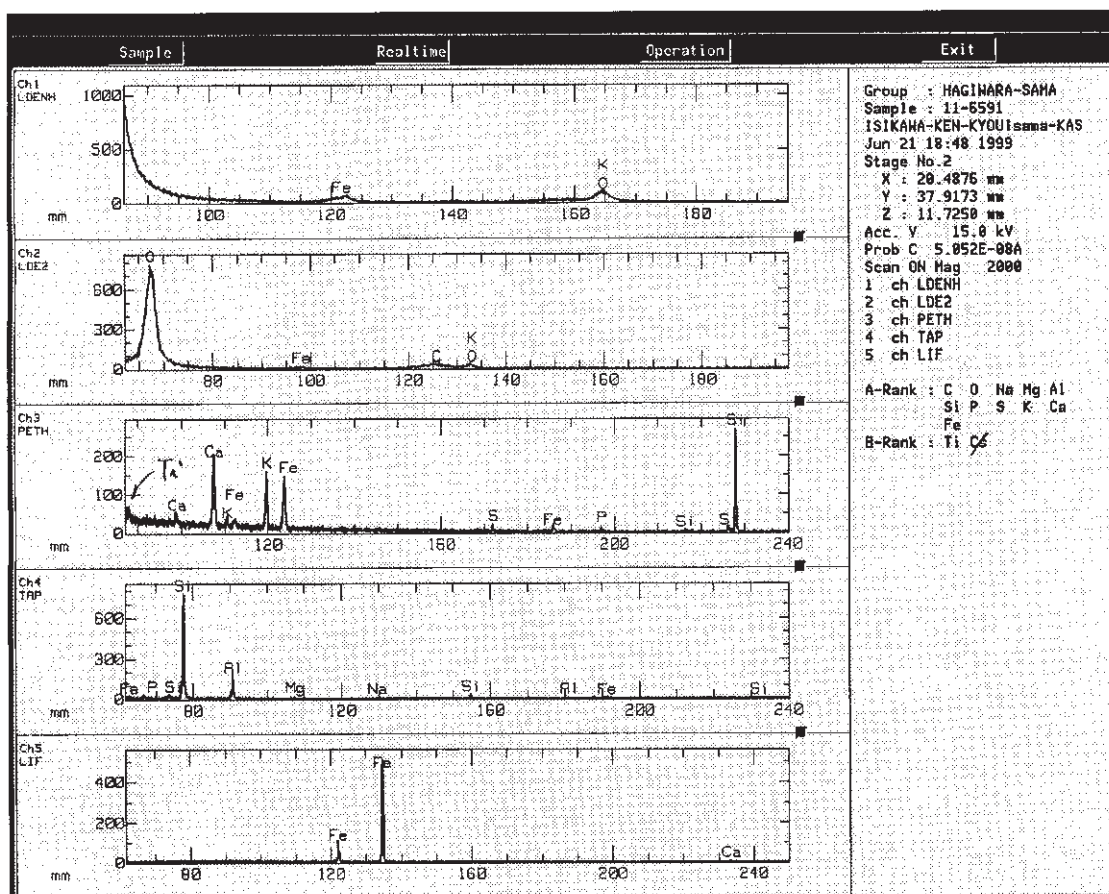


Fig. 6 カスガイの鉄中非金属介在物のコンピュータープログラムによる高速定性分析結果(2 ⅻ photo. 7 に対応)

拡大

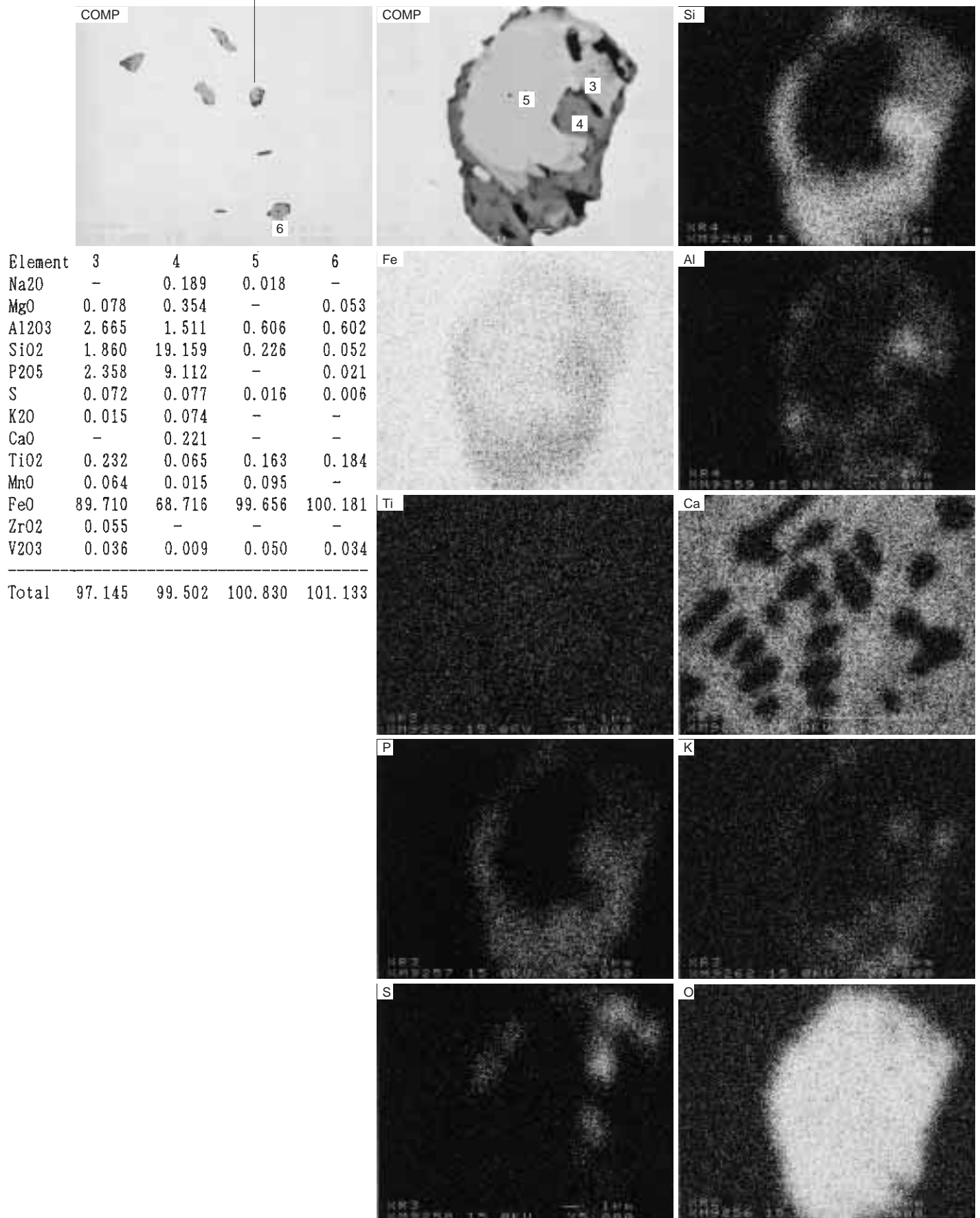


Photo. 6 カスガイの鉄中非金属介在物の特性X線像と定量分析値（1）

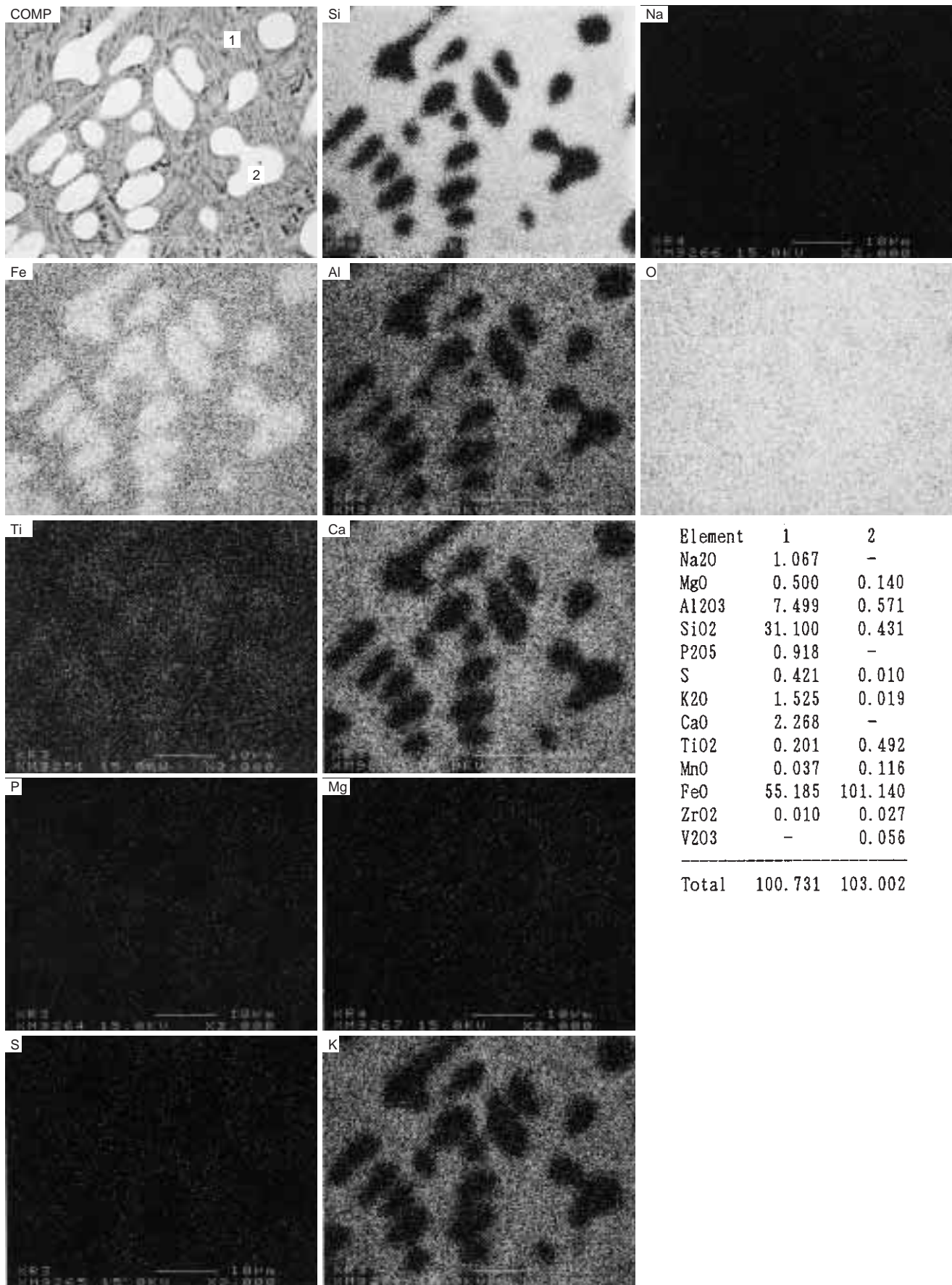


Photo. 7 カスガイの鉄中非金属介在物の特性X線像と定量分析値（2）

Table.1 供試材の履歴と調査項目

遺跡名	出土位置	遺物名称	計測値			調査項目								備考
			大きさ(mm)	重量(g)	メタル度	マクロ組織	顕微鏡組織	ビッカース断面硬度	X線回折	CMA	化学分析	耐火度	カラー	
金沢城跡	菱櫓 五石目E(ホ70)	クサビ	146×135×32	3185.7	L(●)	○	○	○		○	○			
金沢城跡	菱櫓 北東角 角二(ホ73)	カスガイ	234×83×14	515.9	L(●)	○	○	○		○	○			

Table.2 供試材の化学組成（メタル定量）

遺跡名	出土位置	遺物名称	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ti	V	Ni	Cr	Zr	As
金沢城跡	菱櫓 五石目E(ホ70)	クサビ	0.170	0.01	<0.01	0.034	0.002	0.011	0.013	0.006	0.005	0.003	<0.001	0.004
金沢城跡	菱櫓 北東角 角二(ホ73)	カスガイ	0.004	<0.01	<0.01	0.041	0.004	0.007	0.001	0.000	0.008	0.003	0.000	0.003



金沢城跡二ノ丸菱櫓・五十間長屋・橋爪門続櫓石垣台



クサビ・カスガイ出土状況

付記 金沢城跡二ノ丸菱櫓等石垣台出土のクサビ・カスガイについて

(財)石川県埋蔵文化財センター

使用箇所・数量

石垣台構築に際して、クサビ(34点)・カスガイ(217点)が詰め石状に用いられていた。近世後期の改修部分=続櫓一帯では、楔は見られないもののカスガイの使用量はたいへん多い(140点)。構築当初の寛永八年(1631)頃及び寛文八年(1668)修築箇所と推定される菱櫓~五十間長屋折曲部では、角部を中心にクサビ・カスガイが多用される(クサビ33点・カスガイ77点)。他方、近世中期の改修部分=五十間長屋一帯では、ほとんど用いられていない(クサビ1点)。

出土状況等の観察

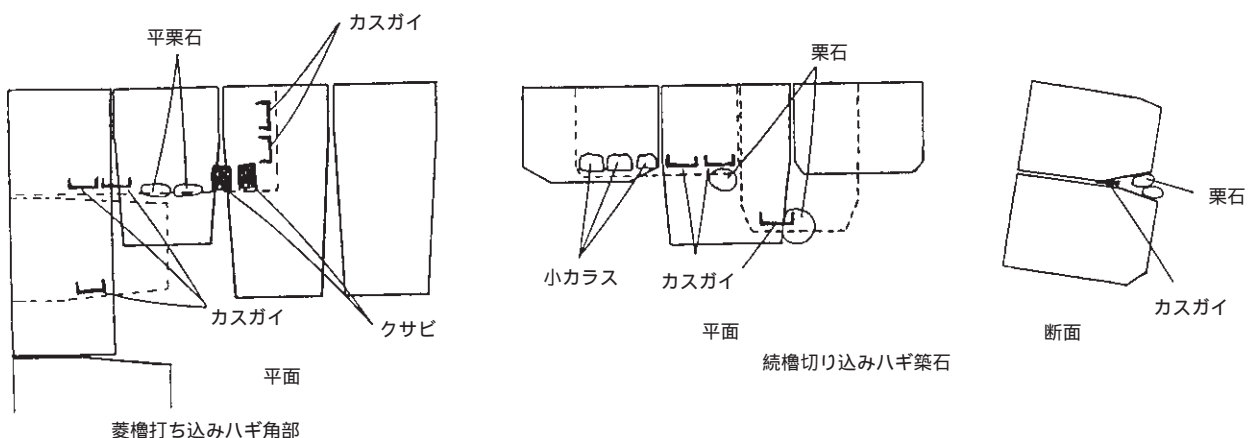
- ・打ち込みハギでは角部のみ、築石は天端石(笠石)の下以外は使用しない。
- ・切り込みハギでは角部及び築石に使用。
- ・クサビは主に角部で使用。
- ・勾配や合場の微調整というより滑り止めか。
- ・クサビ・カスガイ共に表面の錆は進んでいるが、中の遺存状況は良好なものが多い。
- ・クサビ・カスガイの膨張(錆)による石の損傷は見られない。

第1表 楔・鉋集計表

99 08 23集計

	形状・大きさ(単位cm)	菱櫓~折曲部	五十間長屋	続櫓	合計
クサビ	正方形タイプ(14×15、厚3.5)	13	0	0	13
	正方形タイプ小(12×12、厚2.5)	4	0	0	4
	長方形タイプ大(13×16、厚3)	5	0	0	5
	長方形タイプ小(9×12、厚2)	10	0	0	10
	長方形タイプ特小(4×8、厚1)	0	1	0	1
	計測不能	1	0	0	1
	小計	33	1	0	34
カスガイ	大(全長22、歯長8、厚2)	38	0	69	107
	小(全長18、歯長7.5、厚1.8)	18	0	48	66
	特小(全長15、歯長6、厚1.5)	2	0	2	4
	折れ・計測不能	19	0	21	40
	小計	77	0	140	217

()内の数値は標準サイズを示す



第1図 クサビ・カスガイ使用状況模式図