

古代エジプトにおける壁塗り用石膏プラスターの結晶構造の観察

齋藤久美子

Observations on the Crystalline Microstructure of Gypsum Wall Plaster in Ancient Egypt

Kumiko SAITO

キーワード：石膏、走査型電子顕微鏡観察、プラスター、古代エジプト、壁画

Key-words: gypsum, scanning electron microscopy, plaster, Ancient Egypt, wall painting

はじめに

古代エジプトの壁の仕上げに使われていたプラスターは石膏である。20世紀初頭から、分析によりそれが二水石膏であるという報告がなされていた（例えば Lucas and Harris 1962: 469-470）。しかし、分析例が増えるにつれ、二水石膏に無水石膏が混ざっているもの（Stulik et al. 1993: 57）、また純粋に無水石膏であるもの（Saleh 1987: 97）があることも分かってきた。石膏原石を焼いて、水和させて固めたものなら二水石膏であるはずである。なぜ、無水石膏なのかが、問題となっていた。

筆者が、そもそも石膏に興味を持ったきっかけは、長年、早稲田大学エジプト学研究所が所蔵するマルカタ南「魚の丘」遺跡（Malqata South, Kom al-Samak）から出土した壁画片の復原研究を行ってきたことによる。研究の過程において、何が描かれていたのかということだけでなく、どのような技法で描かれたのかについても知る必要を感じた。そこで、顔料の分析と同時に、壁塗りに使われていたプラスターの成分分析も行ってみた。すると、単に石膏だろうと考えていた部分が、ほぼ純粋な無水石膏であるという結果が出た。当初あまり石膏について詳しく無く、通例では二水石膏のはずのものが、無水石膏であるということは何を意味するのか見当も付かなかった。しかし、調べていくうちに、単に、二水石膏が無水石膏に経年変化したとは言えないことが分かってきた。

作られてから3千年以上の時を経ているため、経年変化を追実験で確かめることは困難である。また、はじめから無水石膏が使われ、媒材などで固められた可能性も無いとは言えず、この点も明らかにしなければならない。そこで、特徴的な結晶構造を持つ石膏の特性に着目し、古代の遺物の石膏の結晶構造と、様々な条件で実験的に作って見た石膏の結晶構造を比較することで、無水石膏である理由やプラスターの性質について考えてみることにした。

マルカタ南「魚の丘」遺跡と彩画片の出土状況

はじめに、今回観察対象とした石膏プラスター片（写真1）とそれが出土した遺跡についてまとめておきたい。

マルカタは、現在のルクソール市ナイル川西岸に位置し、主に新王国時代第18王朝アメンヘテプ3世（前1390～1352年頃）の王宮とその付属施設からなる遺跡である。早稲田大学古代エジプト調査隊は、1971年12月より、その南端地区にあたるマルカタ南遺跡で調査を行っていた。第3次調査（1973年12月～1974年2月）時に、「魚の丘」と呼ばれていた小さな丘の発掘に着手し、路面に彩色が施された泥レンガ造りの階段が発見されるに至った。引き続き行われた調査により、中央に基壇があり、北に彩色階段、南に斜路を持つ、南北約72mの長軸を持つ建造物であることが判明した。この構造は、少なくとも1回は行われた改築の結果であり、もともとあった基壇が南北に数メートル拡張され、北に伸びる30段の階段と、南に伸びる斜路は後から付け加えられたものである（渡辺保忠先生古希記念論集刊行会編 1993: 16）。アメンヘテプ3世の名が押印されたレンガが使われていたことから、マルカタ王宮と同

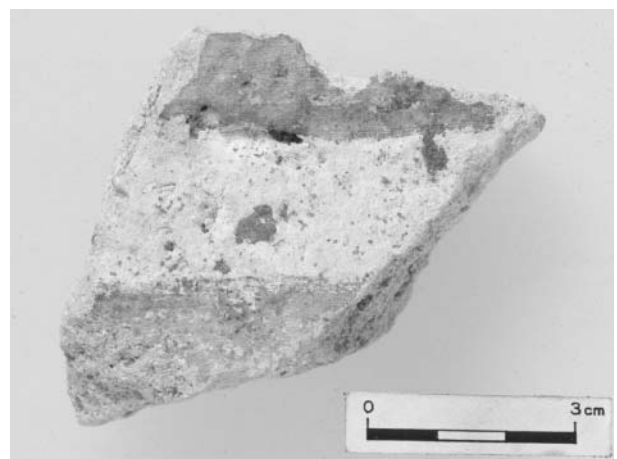


写真1 マルカタ南「魚の丘」遺跡出土石膏プラスター片

時代のものと考えられている(渡辺保忠先生古希記念論集刊行会編 1993: 2)。この建造物は使われなくなった時点で、基壇上の建物が撤去され、廃材を片付け、丘状になるように土で覆われたものと考えられている(渡辺保忠先生古希記念論集刊行会編 1993: 21-22)。

彩画片は壁から剥がれ落ちた位置に堆積していたわけではなく、人為的に壊された壁の廃材が、まとめて捨てられたような出土状況を示している。したがって、個々の破片は小さく、大きいものでも径が20~30cmほどで、彩画片同士の位置関係もわからない。壁画の全体像の復原は極めて困難な状況にある。

また、彩画片は、南斜路の充填土と、南斜路と基壇の覆土の両方から出土しており、増築前の建造物の廃材と、最終的な建造物の廃材の両者から成っているようである。しかし、発掘時に斜路の上面を確認することができなかったため、どこまでが覆土でどこからが充填土だったのかははっきりせず、出土地点から彩画片の時期を分けることは困難である⁹⁾。加えて、建て替えられたといっても、おそらく数年の間隔しかないため、壁の仕上げ方、絵具の色合いはほぼ同じで、描かれていた図柄はどれも貢物や礼拝する人物像の一部であり、彩画片自体の観察からも2つの時期を区別しにくい。石膏プラスター片がどちらの時期に属するものかも分からないが、出土状況からいって、「魚の丘」遺跡の建造物の一部であったことは間違いないと思われる。

壁の仕上げ方

古代エジプトの壁の塗りがたの基本は、レンガ積みや、荒く仕上げた岩の壁面に、先ずスサを混ぜた粗い泥プラスターを厚く塗り、その上に仕上げのプラスターを薄く塗るという2層構造で、仕上げ層には、石膏プラスターと泥プラスターの2種類がある(吉村他 2002: 2)。多くの墓や神殿の壁などは、石膏プラスターで仕上げられていた。

「魚の丘」遺跡の壁の仕上げは石膏のものと、泥プラスターのものがあり、残存する中では、9割以上が泥プラスターで仕上げられている。泥プラスターによる仕上げの上に彩色が施されていた例は、マルカタ王宮の他、テル・アル＝アマールナ(Tell al-Amarna)の王宮や一般住居(Lucas and Harris 1962: 76)などがある。今のところ、泥プラスターと石膏プラスターの使い分けの理由は分かっていないが、恒久性の求められる墓や神殿ではなく、王宮や住居など、一時的な居住用の建造物に泥プラスター仕上げの例が多いことから、耐久性や居住性などが関係しているものと思われる。また、新王国時代に王墓作りの労働者の居住区であったデール・アル＝マディーナ(Deir al-Madina)遺跡にある、職人たちの墓では、泥プラスター仕上げの例があり(Valbelle 1985: 291)、コストの面も考

える必要がある。発色の問題もあり、今後の考察が待たれる。

「魚の丘」遺跡では、泥プラスター仕上げのものは、主にカルサイト(CaCO_3)から成るカルサイト・プラスターの中塗りのあるものと、無いものに分けられる(吉村他 2002: 3)。それぞれの壁の塗りがたが、建物のどの部分に使われていたかは不明である。カルサイト・プラスターの中塗りの層は3~4mmの厚みを持ち、おそらく、風化した石灰岩の粉のようなものを、泥プラスターと同様に水で練って用いたものと思われる(吉村他 2002: 7-9)。成分分析では炭酸カルシウム(カルサイト)と出るが、フレスコ画を描く時に使われる、消石灰のプラスターとは異なる。フレスコ画で使うプラスターは、石灰岩を約900℃で焼いてできた生石灰を水に漬けて消化させた消石灰を壁に塗る。消石灰は乾燥しながら、空気中の二酸化炭素と結合し、炭酸カルシウムに戻ることで固まる。再び炭酸カルシウムになるときは、微細な丸みを持った粒子状の結晶ができる(田中石灰工業株式会社 1987: 6)。「魚の丘」遺跡のカルサイト・プラスターを電子顕微鏡で観察してみたが、そういった粒子状の結晶は見られず、消石灰プラスターではないことは明らかである。カルサイト・プラスターを中塗りとする利点などは分かっていない。

「魚の丘」遺跡における石膏プラスターの割合は全出土点数の1割にも満たない。建造物のどの部位に使われていたのかも不明であるが、玉縁やコーナー部分など平面以外の部分の破片も含まれている。本遺跡においては主要な場面に使われていたわけではないようであるが、石膏プラスター仕上げは当時広く行われていた技術であり、現状としてそれが無水石膏である理由は、壁塗り用プラスターについて考える際に避けては通れない問題である。

古代エジプトの石膏の分析例

まず、石膏の基本的な性質について見ておきたい(図1)。天然に産出される石膏の原石は、二水石膏(dihydrate: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)である。プラスターとして使用する場合は、それを150℃以上で焼いて、結晶水が4分の1になった半水石膏(hemihydrate: $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$)の状態にする。これに水を加えると、水和し、再び二水石膏に戻る。この時、結晶ができ、固まる。二水石膏が加熱により半水石膏になり、水和により再び二水石膏に戻るというのが、プラスターの基本的なサイクルである。

しかし、石膏は、さらに400℃ほどで焼くと、結晶水が全部飛んで、無水石膏(anhydrate: CaSO_4)になる。無水石膏は、構造的に安定しており、溶解度も小さく、水和しにくい。ただし、硫酸カリウムやミョウバンなどの凝結促進剤を加えると、固まるため、現在では工業的にプラスター

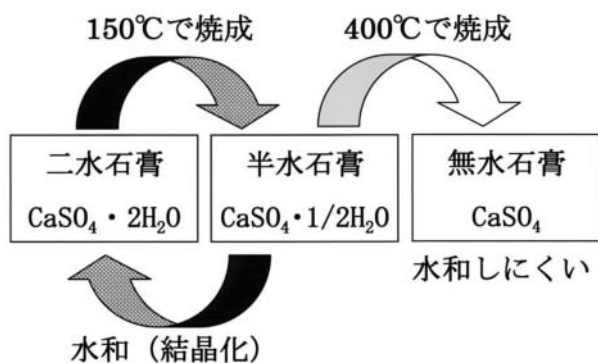


図1 石膏の基本的変化

一として使われており、この場合も、固まったものは、二水石膏となる（無機マテリアル学会 1995: 151-152）。この、無水石膏に凝結促進剤を加えてプラスターとする技法は、古代では行われていなかったと思われる。いずれにしても、石膏原石を焼いたものをプラスターとして使用した場合、固まった状態のものは通常、二水石膏になるということである。

しかし、古代エジプトの壁の石膏を分析した報告例には、無水石膏であるというものがある。分析例自体あまり多くなく、二水石膏か無水石膏かはっきりしない場合もあるが、きちんと区別して報告されているものを見ると、二水石膏のもの（Dinsmore and Haword 1988: 62）、無水石膏のもの（Saleh 1987: 97）、両者が混合している場合（Stulik et al. 1993: 57）とがある。「魚の丘」遺跡の石膏も無水石膏であった（宇田 1998: 50）。

無水石膏であることについては、二水石膏が無水石膏に経年変化したとする説明があり、石膏は外気温 30℃以上、湿度 30%以下の状態で、無水石膏になるとしている（Le Fur 1994: 132）。しかし、脱水にどれくらいの時間がかかるのか述べられておらず、また実験結果などの根拠も示されていない。現在の材料科学の分野の研究では、確かに、二水石膏は 45℃以上で結晶水が離れはじめ、半水石膏になることは知られているが（無機マテリアル学会 1995: 139-142）、無水石膏になることは確認されていない。今までに知られている石膏の科学的性質からでは、無水石膏になることの説明はできないのである。

二水石膏と無水石膏が混合している場合、経年変化のほかに、製作時の石膏原石の焼きムラによる可能性も指摘されている（Le Fur 1994: 90, Pls. 34b, 35）。石膏原石を焼く際、400℃程度で無水石膏になってしまうため、温度が上がりにすぎないように十分配慮しなければ、部分的に無水石膏ができてしまう可能性は高い。こうしてできた半水石膏と無水石膏の混合プラスターは、水和させると二水石膏と無水石膏の混合物となる。しかし、混合の状態が、経年変

化により生じたのか、焼きムラによるものかを区別する方法については述べられていない。

また、全体が無水石膏である場合、はじめから無水石膏だけだったとするとプラスターとして固まらなくなってしまうため、焼き過ぎや焼きムラでは説明できない。

疑問点をまとめると、古代エジプトの石膏プラスターの固化は半水石膏から二水石膏への水和によるものか、そして、無水石膏になったのは経年変化であるとする見方は妥当かということになる。また、経年変化により無水石膏になっても、プラスターは壊れずに形は維持されるのかという点も確かめなければならない。

これらの問いに答えるためには、まず、石膏の結晶を確認すると良いと考え、走査型電子顕微鏡による観察を行うことにした。西アジアのものについては、石膏容器が、石膏の原石をくりぬいたものか、プラスターにして固めたものかを区別するために、電子顕微鏡観察を行った例があるが（Gourdin and Kingery 1975）、エジプトでは、石膏の水和を確かめる目的で電子顕微鏡観察を行ったとする報告は無い。二水石膏への水和により固まったのだとすると、二水石膏に特徴的な針状の結晶が確認されるはずで、無水石膏を媒材で固めたとすると、針状の結晶は見られないことになる。

「魚の丘」遺跡の石膏の化学分析結果

電子顕微鏡での観察に先立ち、「魚の丘」遺跡の石膏の詳細を、X線分析及び化学分析により調べることにした。今回は2点の石膏プラスターを分析した。分析は、パリノ・サーヴェイ株式会社に依頼した。

空気乾燥させた試料を、メノウ乳鉢で微粉砕した後、専用アルミニウムフォルダーに充填し、X線回折測定試料とした²⁾。

検出された鉱物は無水石膏、カルサイト、石英、白雲母であり、主鉱物は無水石膏である。水和物は検出されず、今回も、石膏部分は二水石膏の混ざらない純粋な無水石膏であることが確認された。

プラスターに含まれる無水石膏（CaSO₄）とカルサイト（CaCO₃）の割合を調べるため、化学分析により無水硫酸定量と炭酸定量を行った。X線回折との整合性を高めるために、試料はX線回折分析で利用した試料を回収し、使用した。

無水硫酸（SO₄）と炭酸（CO₃）の含有量から推定される、無水石膏（CaSO₄）とカルサイト（CaCO₃）の含有量は、2点の試料それぞれ無水石膏が 69.9%、73.0%、カルサイトが 3.3%、4.3%という結果であった。Lucas が行った 20 世紀初めにエジプトのヘルワン（Helwan）で使われていた石膏プラスターについて行った分析では、不純物と

して含まれていたカルサイトの含有量は多いもので15.2%、少ないもので7.5%となっている(Lucas 1906: 5; Lucas and Harris 1962: 469)。分析したプラスターに石灰などが意図的に混ぜられることなどが無かったかどうかは言及されていないが、文脈から判断して、Lucasは石膏だけを用いてプラスターとしているという前提でいるようであり、つまり、カルサイトは石膏原石にもとから含まれていた不純物と考えているようである。色合いの調整などで、後から意図的に混ぜた可能性や、石膏の焼成時に混入した可能性もないとは言えないが、「魚の丘」遺跡の石膏に含まれるカルサイトの量はヘルワンの石膏のものよりも少なく、石膏原石にもともと含有されていたとしてもおかしくない量である。

石英もLucasの分析によるヘルワンの石膏プラスターにも含まれており、多いもので7.6%、少ないもので2.1%となっている。「魚の丘」遺跡の石膏の場合、石膏とカルサイトの分を除いた残りは25%ほどになり、X線回折の結果から考えるとその大部分が石英と思われる。Lucasの分析例よりかなり多い含有量になるが、「魚の丘」遺跡の石膏プラスターには調整時の混入と思われる肉眼でも見える砂の粒が混ざっており、石英として検出されたものの多くは混入した砂に由来するものと思われる。

石膏サンプルの作成

まず、遺物と比較するための、石膏のサンプルづくりから始めた。

美術用の教材として市販されている半水石膏の製造には、天然石膏に加えて、化学工場から化学変化の副産物として得られる化学石膏の両方が使われている。古代に使われていた石膏に近い比較資料を作るため、今回はモロッコ産の天然石膏原石を用いた。

石膏を石のまま焼いた場合の状態を見るため、石膏原石をチップ状(径2~3cm、厚み5mm程度)に割り、半水石膏ができる150℃で10時間ほど焼いてみた。焼成前の石膏は透明感があるが、焼き終わったものは不透明になる。金槌でたたくと簡単に粉末になった。結晶水を計測してみると³⁾、2割ほどが二水石膏のまま焼け残っていた。次に、無水石膏ができる400℃で10時間ほど焼いてみた。焼きあがりは、半水石膏よりもろくなっており、手でも崩すことができた。しかし、無水石膏になっていたのは6割ほどで、残りの4割は半水石膏であった。

以上のことから、石膏原石を完全に半水石膏にするにはかなりの時間がかかることが分かる。温度が200℃以下で、焼成時間が短いと、出来上りは、半水石膏と二水石膏が混ざった状態になる。熱を早く内部まで伝えようと焼成温度を高くすると、400℃以上の高温になってしまう時間帯

ができ、半水石膏に無水石膏が混ざったものになってしまう。さらに、焼成時間が短いと、半水石膏、無水石膏、焼け残りの二水石膏が混ざったものができる。半水石膏と無水石膏はともに不透明の白色になるため、焼きムラができることを承知で、高温で短時間焼いて、焼成後に半水石膏と無水石膏をより分けることは困難である。無水石膏のほうが容易に粉末にできるが、明確な境界があるわけではなく、硬さの違いから半水石膏と無水石膏を分けるのも難しい。プラスターの強度を高くするために、なるべく純粋な半水石膏を得るには、温度を低く抑え、長時間焼成する必要があるということになる。

結晶のサンプルを作る石膏は、完全に半水石膏または無水石膏にする必要があるため、熱の通りを良くするために石膏原石を粉末にしてから焼成した。半水石膏は、電気窯で150℃、4時間焼き、焼きあがったものの結晶水を計測し、半水石膏になっていることを確認した。無水石膏は、800℃で8時間ほど焼き⁴⁾、結晶水を計測し、無水石膏になっていることを確認した。

出来上がった半水石膏は乳鉢で磨って細かい粉末にしたものに、石膏と水の重量比を1対1の割合で混ぜて、水和させて固めた。半水石膏と無水石膏の混合物、半水石膏と不純物の混合物等は、両者の粉末を乳鉢に入れ、磨り合わせた後、水和させた。

「魚の丘」遺跡の石膏の結晶化の確認

「魚の丘」遺跡の石膏の固化が水和によるものかを確かめるために、走査型電子顕微鏡で石膏の結晶構造の観察を行った。今回使用した走査型電子顕微鏡はサンヨー電子社製キャリングSEMで、高真空で観察した。試料は、遺物と石膏サンプルを手で割って、破断面から微量を削り取り、カーボンテープで試料台に固定した。試料に導電性を持たせるため、白金パラジウムでコーティングした。

まずは、典型的な二水石膏の結晶と「魚の丘」遺跡の石膏の微細構造とを比較してみた。純粋な半水石膏を水和して得られた二水石膏の結晶(写真2)は、針状結晶であることを特徴とする。「魚の丘」遺跡の石膏(写真4)は、二水石膏の結晶と比べると、構造のはっきりしない部分もあるが、結晶している部分は、確かに石膏に特徴的な針状結晶が認められる。結晶が短くなっているのが特徴で、この理由は次章で考察する。

「魚の丘」遺跡の石膏にも二水石膏特有の結晶が見られることから、固化は半水石膏の水和によるものといえる。これにより、もともと無水石膏だったものを媒材などで固めたという可能性は考えにくくなった。

また、水和により固化したのだとすると、固まった当時は二水石膏であったことになり、現在無水石膏であるとい

うことは、やはり長い年月をかけて、二水石膏から無水石膏に変化したことになる。現在、結晶が見られるということは、脱水して無水石膏になっても、結晶の形が維持されたことになる。そこで、それを確かめるために、半水石膏を固めて二水石膏にしたものを、400℃で焼いて、無水石膏にしてみた。

焼いて無水石膏にしたもの（写真3）でも、結晶の形が残っているのが分かる。多少、ゆがみが出ているが、今回のように急激に焼いたのではなく、徐々に脱水したとするとさらに結晶は良好に残ると想定される。焼いた石膏は、焼く前に比べてもろくなっていたが、わざと崩そうとしなければ壊れることはない。徐々に脱水し、結晶がより良く残ったとしたら、強度の低下もさらに低いと考えられる。古代エジプトの石膏は無水石膏になっているものでも壁として残っているが、脱水の過程で結晶の形が完全に損なわれることがなく、強度を維持できたためであろう。

このように、二水石膏の結晶は、脱水しても結晶の形が残り得ることが確認されたことから、二水石膏に特徴的な形状の結晶のある「魚の丘」遺跡の石膏は、半水石膏から二水石膏への水和により固まり、それが無水石膏へと経年変化したものと考えられることができる。

石膏の結晶が短くなる原因の検証

次に、「魚の丘」遺跡の石膏の結晶が、純粋な二水石膏に比べると短い点について考えてみたい。ただし、これには長い年月を経て、吸湿と乾燥を繰り返した結果、結晶の形が変化した可能性もある。従って、現時点で「魚の丘」遺跡の石膏について断定的な結論を出すことはできないが、電子顕微鏡観察から石膏についてどのような情報が得られるかという試みのひとつとして、結晶の長さでプラスター製造工程の関係を考えてみたい。

結晶が短い原因としては、不純物が結晶の成長を阻害したためと考えられる。成分分析により、「魚の丘」遺跡の石膏には不純物として主にカルサイトと石英が混ざっているとわかっている。肉眼で砂の粒が確認されるということは、石英は石膏の結晶成長そのものにはあまり影響していないと考えられるため、今回は、カルサイトを不純物として混ぜてみることにした。カルサイトとして、石灰岩の粉末を用いることにした。石灰岩は、現在ルクソール地区で土産用にレリーフとして加工され、売られていたものを用いた。販売員の話によると、石灰岩は地元産であるとのことである。

また、石膏の原石を焼いたときに、一時的にでも400℃以上になった場合には、無水石膏ができ、それも不純物として混ざっていた可能性がある。無水石膏が混ざると結晶が短くなる可能性は、GourdinとKingeryによる西アジア

新石器時代とエジプトの石灰プラスターについて主に論じた論文（1975）の中に読み取ることができる。論文の中には、450℃で3時間焼いた「より硬い」石膏を水和させたものの結晶の写りが載っており、普通の石膏よりも結晶は大きく、あまり針のようではない（less needle-like）、と記述されている（Gourdin and Kingery 1975: 135, Fig. 2）。このあまり針のようではない結晶が、焼きすぎた石膏の特徴と考えている（Gourdin and Kingery 1975: 148-149）。焼成温度と時間から見て、半水石膏と無水石膏が混ざった状態のものと思われるが、ただし、これが「より硬い」プラスターであるとする記述は誤りである。無水石膏が混ざると強度は弱くなる。通常の二水石膏と化学組成（chemical composition）が同じと考えているのも誤りで、450℃で焼いたものを水和した場合は、二水石膏と無水石膏の混合物となっているはずである。このように、450℃で焼成した場合、無水石膏が出来るという点に言及しておらず、無水石膏が混ざると結晶が短くなるという指摘にはなっていない。また、どの程度無水石膏が生じていたのかが不明で、半水石膏との割合がどうなっているのか分からない。そこで今回は半水石膏と無水石膏とを別々に作り、それを混ぜ合わせるにより、割合のはっきりした混合物を作り、無水石膏の影響について明確にしてみたい。

プラスターに無水石膏が混ざっていたかどうかを結晶観察から判断できれば、非常に有益である。なぜなら、前項の考察で、当初二水石膏であった部分も無水石膏になってしまう場合があることが確認されたため、遺物の成分分析からだけでは、はじめから無水石膏が混ざっていたかは分からないからである。

まず、半水石膏にカルサイトを3割混ぜたものを水和させてみた。用いた石灰岩が石膏に比べて黄色味がかっていたため、石膏だけの場合より、黄色味の強いプラスターとなった。また、石膏だけの場合に比べて、手で簡単に割ることができ、強度が落ちているようである。

カルサイトを混ぜた場合の石膏の結晶（写真5）は、半水石膏だけを水和させたものと（写真2）と比べて、形も長さもあまり変わっていない。石膏の結晶にカルサイトが絡まるようになっている。カルサイトの丸い化石の部分でその様子が良く分かる。カルサイトが所々に挟まることにより、石膏の結晶同士の空隙が広がっている。プラスターの強度の低下は、石膏の結晶同士の結合が甘くなってしまったためであろう。しかし、カルサイトを混ぜても、石膏の個々の結晶の成長にはあまり影響していないと言える。

次に、半水石膏に無水石膏を1対1の割合で混ぜて水和させてみた（写真6）。出来上がった結晶は、明らかに半水石膏だけのもの（写真2）と比べて短くなり、角が丸みを帯びている。出来上がったものは、測定してみた結晶水

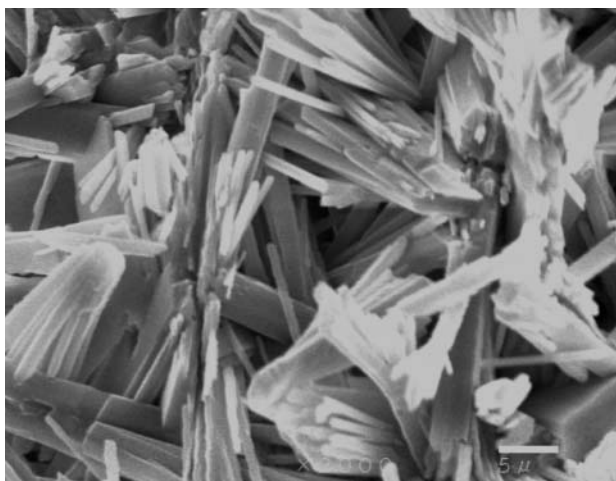


写真2 純粋な半水石膏を水和した二水石膏の結晶

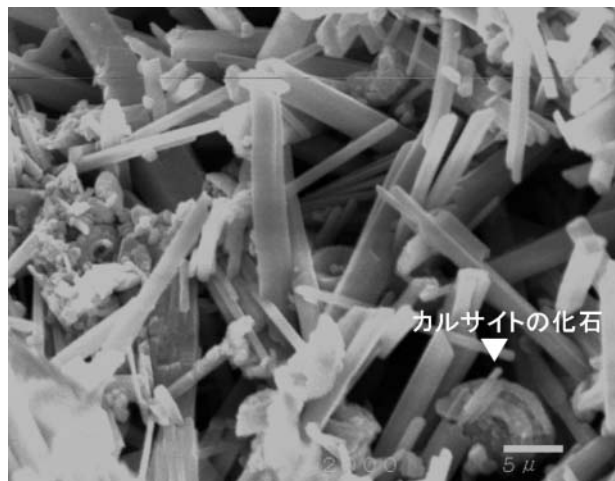


写真5 半水石膏にカルサイトを混ぜ、水和したもの

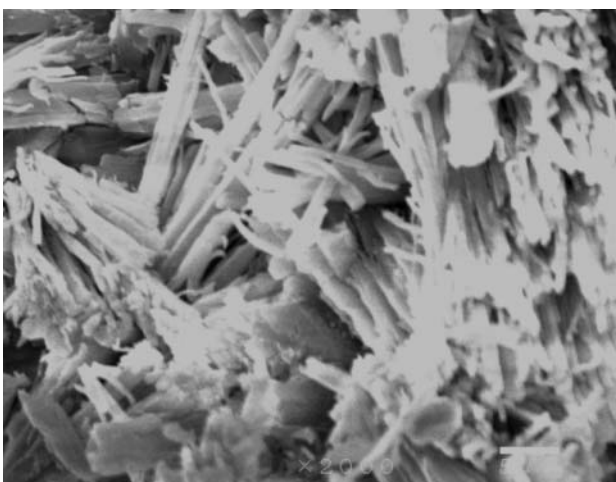


写真3 写真2を400℃で焼いて無水石膏にしたもの

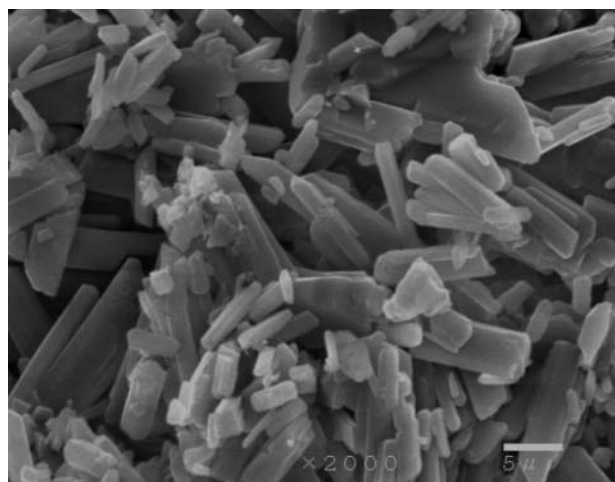


写真6 半水石膏に無水石膏を混ぜ、水和したもの

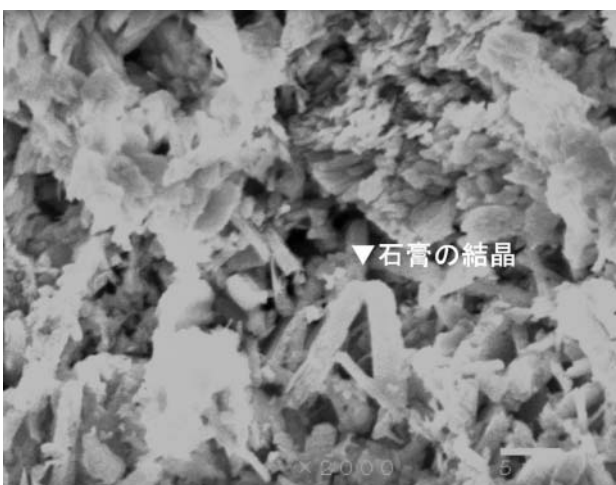


写真4 「魚の丘」遺跡出土彩画片の石膏の結晶

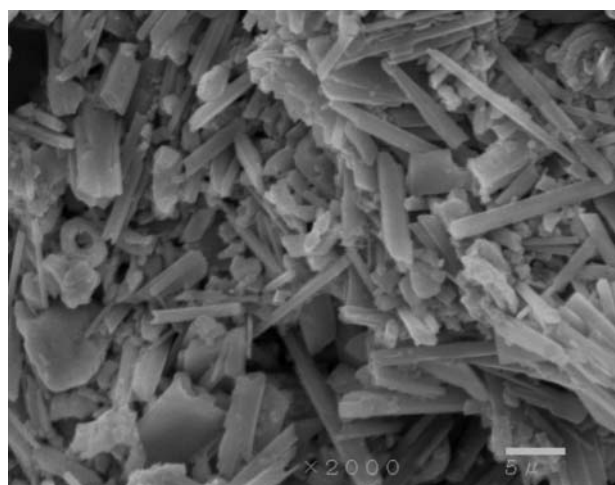


写真7 半水石膏に無水石膏とカルサイトを混ぜ水和したもの

注) 写真はいずれも倍率2000倍で撮影したものである。

の分量から考えて、二水石膏と無水石膏の混合物である。カルサイトの時と違って、無水石膏の粒子が二水石膏の結晶に絡まるのではなく、二水石膏と無水石膏が一体となった短い結晶を作ることが特徴といえる。「魚の丘」遺跡の石膏の結晶(写真4)と比べてみると、どちらも結晶が短く、角が丸みを帯びている。したがって、「魚の丘」遺跡の石膏の結晶が短い原因も、無水石膏が混ざっていたことに由来する可能性が指摘できる。

試しに、不純物として、カルサイトと無水石膏の両方が混ざっていた場合どのように見えるか見るために、半水石膏4割、カルサイト3割、無水石膏3割のサンプルも作ってみた(写真7)。結晶が短く、且つ、カルサイトが石膏に絡んでいる様子は、「魚の丘」遺跡の石膏の状態(写真4)と良く似ており、「魚の丘」遺跡の石膏にも、半水石膏、カルサイトなどの不純物に加え、無水石膏が混ざっていた可能性が高いようである。

以上の考察から、石膏の結晶が短い場合には、使われたプラスターには半水石膏と無水石膏が混ざっていたものと推測できるといえよう。

まとめ

今回行った石膏の結晶観察から、古代エジプトにおける石膏プラスター塗り技法を考える上で2つの成果があった。ひとつは、古代エジプトでも、石膏原石を焼いて半水石膏にしたものをプラスターにして塗るという、一般的な利用法をしていたことが確かめられたことである。もうひとつは、古代エジプトにおける石膏原石の焼成温度についての情報が得られたことである。

石膏製品がどのように造形されたのかは、成分分析をしただけでは分からないことがある。二水石膏には、原石を削っただけのものと、原石を焼いて半水石膏にしたものを水和して固めたものがある。石膏原石にどのように手が加えられたかを知る鍵が、石膏の結晶であり、半水石膏を水和させた二水石膏には、針状結晶が見られるが、二水石膏の原石には、針状結晶は見られない。針状結晶の存在は、半水石膏を水和させたことを意味している。

「魚の丘」遺跡の石膏は現状として無水石膏であるが、針状結晶が見られたことから、固化は半水石膏から二水石膏への水和であることが確かめられた。成分分析の結果は無水石膏であったが、無水石膏を媒材で固めたわけではなかった。無水石膏であること理由は、作られた当時は二水石膏であったものが無水石膏に経年変化したものとしか考えられないが、熱を加えなくても二水石膏が無水石膏にまで脱水するという事は、現在の材料科学の研究分野では確認されていない。何千年という長い時間が、科学的にはまだ説明できないことを引き起こしていることになり、

考古学的解釈には幾重もの検証が必要なことを示す好例といえよう。二水石膏から無水石膏への経年変化については、3千年以上かかった変化であり、低湿度状態を保つ実験を試してみても、短期間で成果があがるかどうか分からないため、無水石膏への脱水が起こり得ることを確かめるための方法を考える必要がある。また、古代エジプトの壁の中には二水石膏のまま残っているものもあるため、どのような条件において無水石膏になるのかを考えることも重要な課題である。

2つめの成果は、石膏の結晶の長さの観察から導き出された。「魚の丘」遺跡の石膏の結晶は、針状結晶ではあるが、純粋な半水石膏を水和させたものに比べると、個々の結晶の長さが短く、角が丸みを帯びている。石膏サンプルの観察から、半水石膏に無水石膏が混ざっている場合、出来上がる石膏の結晶が短くなることが確認された。つまり、「魚の丘」遺跡の石膏の短い結晶は、無水石膏が混ざっていた可能性を示しているのである。

無水石膏が混ざっていたということは、石膏原石を焼いている際、一時的にでも無水石膏が出来る400℃以上になっていたことを意味する。無水石膏が混ざると強度が落ちるため、高温に成らないように温度調節をしたほうが、良質のプラスターが得られる。高温の状態が長時間続いてしまうと、ほとんど固まらなくなってしまうため、古代エジプトの人々も経験的にそれを知っていて、うまく低温を維持するように温度調節を行っていたことは推測できる。西アジアで現在も行われている例では、石膏質土壌を、野焼きで、獣糞を燃料として、180℃くらいの温度が長時間続くように条件をうまく調節して、石膏プラスターを作っている(久米2004)。条件的には古代エジプトでも可能ということになる。

しかし、一時的に400℃に達する場合もあったのかもしれない。掘り起こしてから加熱する石膏質土壌の場合(久米2004:82)とは異なり、石膏を石のまま焼いたとすると、チップ状にしても内部はなかなか半水石膏にならない。そこで、プラスターに必要な強度が得られる程度であれば、多少無水石膏の部分ができたとしても、高温で焼いたほうが効率的だったのかもしれない。いまのところ、石膏焼きの遺構は見つかっておらず、また、壁画や文字資料にも石膏の焼き方に言及したものは知られていないため、古代エジプトでは石膏を野焼きにしていたのか、窯を使っていたのかも分かっていない。今回の考察で用いた石膏の結晶水の計測と結晶構造の観察を併せれば、焼成実験の焼成条件と焼きあがった石膏の状態をデータとして蓄積することができる。サンプルで作成した石膏の結晶構造を古代の石膏と比較することで、古代の石膏の焼成条件をある程度絞り込むことが可能となるであろう。今後も実験を続け、古代

エジプトにおける石膏技法の解明に少しでも近づきたいと思っている。

本研究を進めるにあたり、早稲田大学人間科学部教授吉村作治先生、同文学部教授近藤二郎先生に、遺物からの試料採取をご快諾いただいた。サンエス石膏株式会社に石膏原石を無償で提供していただき、同社渡辺政美氏からは、石膏のサンプル製作その他について多くのご教示を受けた。また、電子顕微鏡観察にあたっては、早稲田大学本庄高等学院教諭影森徹先生、同教諭齋藤正憲氏にご助力いただいた。ここに記して感謝したい。

なお、本研究は、平成15年度、16年度文部科学省科学研究費助成金(特別研究員奨励費:課題番号15-00998)による研究成果の一部である。関係各位に感謝申し上げたい。

註

- 1) 出土状況から一部の彩画片を時期別に振り分ける試みを行ったことがあるが(齋藤1998:7-12)、全部の彩画片の時期を特定するには至っていない。
- 2) 作成したX線回折測定試料について以下の条件で測定を実施した。
装置: 理化学電気製 MultiFlex Divergency Slit: 1°
Target: Cu (K α) Scattering Slit: 1°
Monochrometer: Graphite 湾曲 Receiving Slit: 0.3mm
Voltage: 40KV Scanning Speed: 2°/min
Current: 40mA Scanning Mode: 連続法
Detector: SC Sampling Range: 0.02°
Calculation Mode: cps Scanning Range: 2~60°
- 3) 結晶水の測定は、以下のように行った。ガラス製秤量ピンの重量を計量し、粉末にした試料を約1g入れ、蓋をして全体を計量した。蓋を斜めにかけて250℃で1時間加熱し、結晶水を飛ばした。加熱後直ちに秤量ピンに蓋をし、蓋をしたまま元の石膏重量からの結晶水の減量を0.1mg単位で計量した。測定した結晶水の元の石膏重量におけるパーセンテージを化学式に当てはめ、二水石膏と半水石膏、半水石膏と無水石膏の混合比を算出した。
計算式
x: 二水石膏, y: 半水石膏, z: 無水石膏とする。
二水石膏と半水石膏の混合物の場合
 $x + y = 1$
 $20.92x + 6.21y = \text{測定結晶水の}\%$
半水石膏と無水石膏の混合物の場合
 $y + z = 1$
 $6.21y + 0 \times z = \text{測定結晶水の}\% \Rightarrow 6.21y = \text{測定結晶水の}\%$
- 4) 無水石膏にするには400℃程度で焼けば良いのであるが、400℃では10時間ほど焼いても、半水石膏の部分が残ってしまった。工業的には、粉末にした石膏を攪拌しながら過熱することで焼きムラを無くしている(無機マテリアル学会1995:421-422)が、今回使用した電気窯では攪拌することができないため、代わりに焼成温度を上げてみることにした。800℃で8時間程焼いてみたところ、純粋な無水石膏が得られた。

参考文献

- Dinsmore, J. and H. Howard 1988 The Treatment of an Eighteenth Century Wall Painting Fragment at the British Museum. In S. C. Watkins and C. E. Brown (eds.), *Conservation of Ancient Egyptian Materials*, 61-69. London, Institute of Archaeology Publications.
- Gourdin, W. H. and W. D. Kingery 1975 The Beginnings of Pyrotechnology: Neolithic and Egyptian Lime Plaster. *Journal of Field Archaeology* 2: 133-150.
- James, T. G. H. 1985 *Egyptian Painting and Drawing in the British Museum*. London, British Museum Publications.
- Kingery, W. D., P. B. Vandier and M. Prickett 1988 The Beginnings of Pyrotechnology, Part II: Production and Use of Lime and Gypsum Plaster in the Pre-Pottery Neolithic Near East. *Journal of Field Archaeology* 15: 219-244.
- Le Fur, D. 1994 *La conservation des peintures murales des temples de Karnak*. Paris, Éditions recherche sur les civilisations.
- Lucas, A. 1906 Ancient Egyptian Mortars. *Annales du Service des Antiquités de l'Égypte* 7:4-8.
- Lucas, A. and J. R. Harris 1962 *Ancient Egyptian Materials and Industries*, 4th ed. London, Edward Arnold.
- Saleh, S. A. 1987 Pigments, Plaster and Salts Analyses. In M.A. Corzo (ed.), *Wall Paintings of the Tomb of Nefertari: First Progress Report*, 94-105. Cairo, The Egyptian Antiquities Organization; Century City, California, The J. Paul Getty Trust.
- Stulik, D., E. Porta and A. Palet 1993 Analyses of Pigments, Biding Media and Varnishes. In M. A. Corzo and Afshar (eds.), *Art and Eternity: The Nefertari Wall Paintings Conservation Project 1986-1992*, 55-65. Santa Monica, The J. Paul Getty Trust.
- Valbelle, D. 1985 《Les Ouvriers de la Tombe》 *Deir el-Méineh à l'Époque Ramesside. Bibliothèque d'Étude* 96. Cairo, Institut Français d'Archéologie Orientale.
- 宇田応之 1998 「PIXEと考古学」『エジプト学研究』別冊第3号 図像学研究会報告No.2 37-53頁。
- 久米正吾 2004 「現代シリア北東部の石膏焼成技術—民族考古学的観察とその意義」『西アジア考古学』第5号 79-89頁。
- 齋藤久美子 1998 「マルカタ南「魚の丘」遺跡の建物に描かれていた外国人について—毛皮の外套をまとった人物の復元と民族の同定—」『エジプト学研究』第6号 5-29頁。
- 田中石灰工業株式会社 1987 『伝統的左官用消石灰のプラスター物性』。
- 渡辺保忠先生古希記念論集刊行会編 1993 『マルカタ王宮の研究 マルカタ王宮址発掘調査 1985-1988』早稲田大学古代エジプト建築調査隊 中央公論美術出版。
- 無機マテリアル学会編 1995 『セメント・セッコウ・石灰ハンドブック』技報堂。
- 吉村作治編 1995 『マルカタ南 魚の丘遺跡出土彩画片の研究 (I)』早稲田大学古代エジプト研究報告1 早稲田大学古代エジプト調査室。
- 吉村作治・宇田応之・齋藤久美子 2002 「古代エジプトの壁塗りにおけるカルサイト・プラスターの使用に関する一考察」『考古学と自然科学』第44号 1-15頁。

齋藤久美子

日本学術振興会特別研究員

Kumiko SAITO

Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science