

ジョージアカオリン鉱床の概要

荒岡大輔¹⁾・江島輝美¹⁾・森田沙綾香¹⁾・須藤定久¹⁾・月村勝宏¹⁾・高木哲一¹⁾・Mark Cocker²⁾

1 はじめに

カオリンとは、地表付近に最も普遍的に産出する一群の粘土の総称で、結晶性のわずかな相違から、ハロイサイト、カオリナイト、ディッカイト、ナクライトなどに区分されます。一般に、長石が弱酸性から中性領域で変質・風化を受け、塩基類や鉄などが除かれ、カオリンが形成されます。このためカオリン鉱床は、長石に富む深成岩などを母材に、その熱水変質や風化によって形成されることがあります。また、この種のカオリンが浸食・運搬されて、堆積し、鉱床を形成することもあります。

カオリンは白色で、粒子が細かく扁平または板状であること、粘性を有し、焼結して磁器化すること、優れた耐薬品性・耐火性等を有することなど、多くの特徴を持っています。このため、陶磁器、耐火物、紙、インク、塗料、ゴム、プラスチック、接着剤、耐火材、触媒等、幅広い用途に利用されています。国内産カオリンでは国内需要を賄えず、海外からも多量のカオリンが輸入されています。

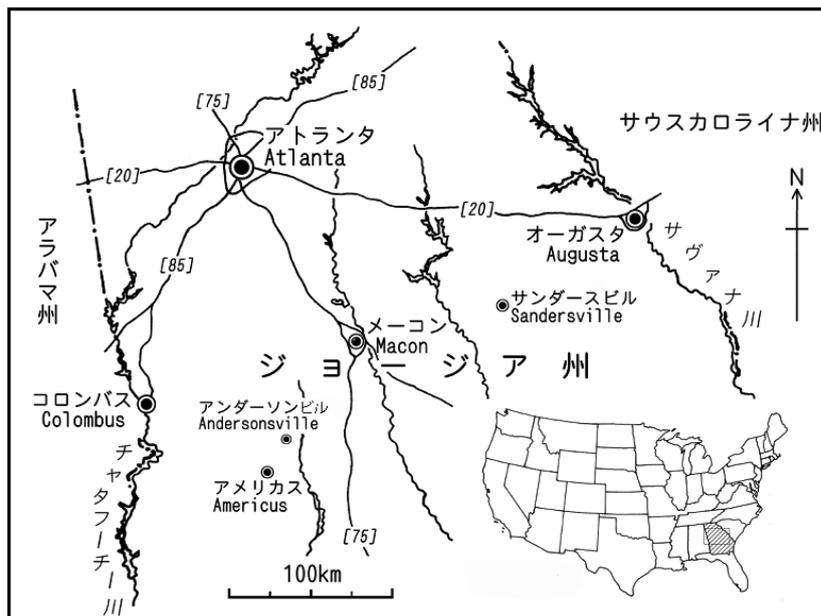
輸入カオリンの代表的なものに、「ジョージアカオリン」があります。アメリカ合衆国南東部、ジョージア州

に産出するカオリンです。カオリン鉱床は、ジョージア州の州都アトランタの南方にある都市であるアメリカス (Americus) からオーガスタ (Augusta) にかけて点在していて、大規模な堆積型鉱床として知られています (第1図)。輸入されたジョージアカオリンの物性に関する日本語での論文や解説はいくつかありますが (たとえば、刀根ほか, 1997; 川合ほか, 1999; 堀田ほか, 2000 など)、地質や鉱床・鉱山についての情報はほとんどありません。

筆者らは、2014年11月にジョージアカオリン鉱床の調査を実施する機会を得ました。本論では、ジョージアカオリン鉱床の地質概要や、鉱山や露頭でのカオリンの産状、カオリンの基本特性に関する基礎的分析の結果について簡単に紹介します。

2 地質概要

ジョージア州はアメリカ合衆国の南東部、アパラチア山脈の南端部の南東側の麓に位置しています (第1, 2図)。この地域は、白亜紀の頃にはほぼ現在のような地形となり、それ以降、アパラチア山脈から流下する堆積物が大西洋に

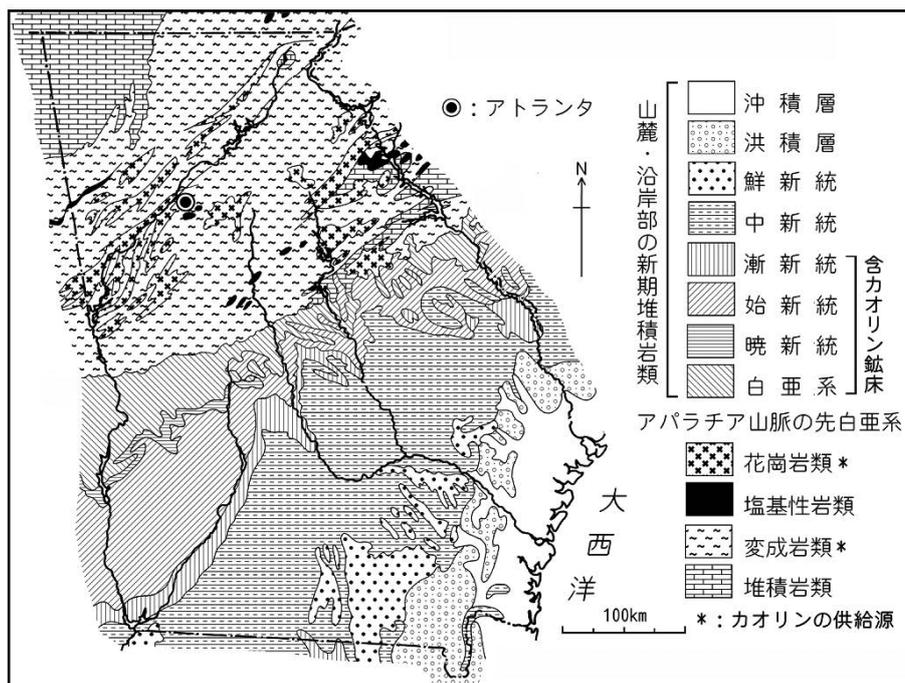


第1図 ジョージア州および州内の代表的な都市の位置図。

1) 産総研 地質調査総合センター地圏資源環境研究部門

2) United States Geological Survey

キーワード: ジョージアカオリン, 堆積型鉱床, アンダーソンビル (Andersonville), アメリカス (Americus), サンダースビル (Sandersville)



第2図 ジョージア州の地質概略図 (Lawton *et al.*, 1976 を簡略化).

流下し堆積する場となってきたようです(第2図)。これらの堆積物は、一般に大西洋に向かって徐々に厚くなっています。カオリンが堆積した後期白亜紀から中新世には、世界的に海水準が大きく変動し、海進や海退が繰り返され、礫岩から砂岩、シルト岩、粘土岩まで様々な地層が形成されました(第2図)。さらに、陸化による浸食期もあり、いくつかの大きな不整合が挟まれています。特に白亜紀と古第三紀の境界や始新世の中期と後期の境界等には顕著な不整合が見られます。一般的には、後期始新世は海成層で、それより古い地層は陸成層や浅海成層となっています。堆積場所も三角州、河口、三日月湖などの河川から、礁湖、大陸沿岸域、大陸棚まで多様だったようです。

ジョージアカオリン鉱床は、これらの地層中に厚さ2mから15mのレンズ状または層状の形で賦存しています。商業ベースで採掘できる鉱床は、中生代白亜紀、古第三紀暁新世および始新世の地層だけに存在しています(第2図)。それらの鉱床は、アパラチア山脈の長石質結晶片岩が風化してできたカオリンが海岸に運ばれ堆積し、さらに堆積後も様々な条件で度々風化を受けカオリン化が一層進行し、良質なカオリン層が形成されたと考えられています(Kogel *et al.*, 2002)。

これらのカオリン鉱床には古くから、副成分鉱物としてジルコン、電気石、緑簾石、十字石、藍晶石、チタン酸化物、モナズ石、珪線石、スピネル等の重鉱物の存在が知られています(Friddell, 1981)。また、トリウム濃度が高い

との報告もあり(Conley *et al.*, 1975)、前期白亜紀のカオリンでは平均17.6 ppmのトリウムが含まれており、0.5 μm以下の細粒子では75 ppmに達するとされています。このトリウムは副成分鉱物であるチタン酸化物に含まれていると考えられているようです(Dombrowski, 1982)。

3 カオリン鉱山・露頭でのカオリンの産状と分析結果

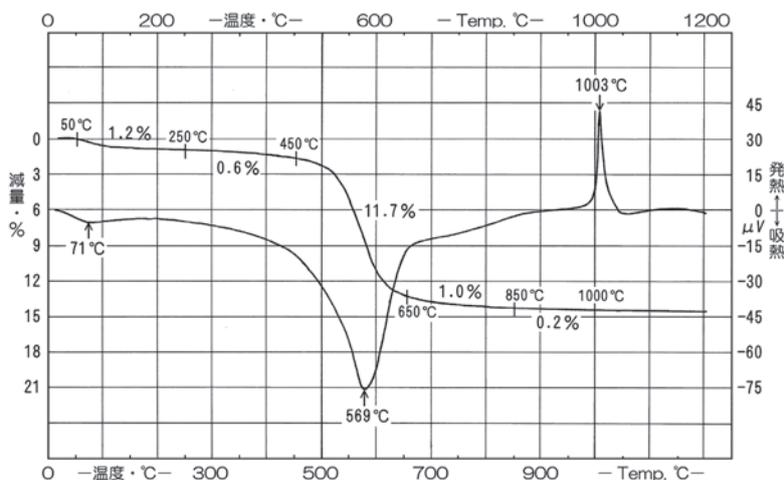
今回は、ジョージア州中部の3地域を訪問し、調査と試料採取を行いました(第1図)。まず、州都アトランタから南へ200kmほどにあるアンダーソンビル(Ander-sonville)を訪ね、IMERYS社のカオリン鉱山2ヶ所で調査と試料採取を行い、同社のプラントも見学しました。その後、南西に隣接するアメリカスに移動し、その西郊外のカオリン露頭で観察と試料採取を行いました。次に、アメリカスから100kmほど北西にあるサンダースビル(Sand-ersville)に移動し、IMERYS社のカオリン鉱山とプラントを見学した後、周辺のカオリン露頭で観察・試料採取を実施しました。

以下の各項で、各地点での観察結果を概説するとともに、採取試料について構成鉱物や化学組成を把握するために行った熱分析、粉末X線回折(XRD)分析、蛍光X線(XRF)分析の試験結果の概要も記述します。なお、試験方法は以下の通りです。

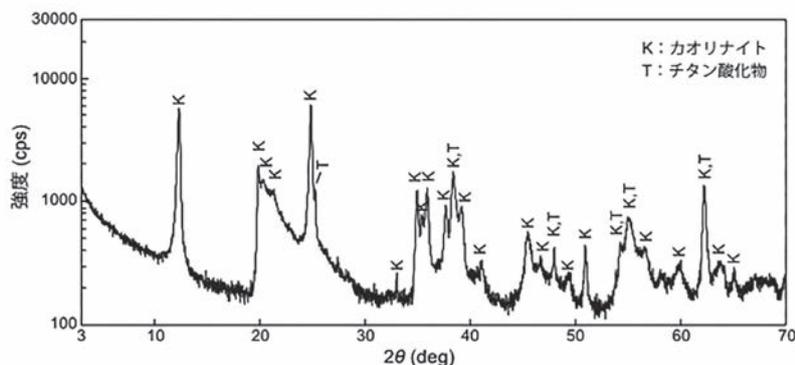
まず、全試料を60℃で24時間乾燥後、ロック・トリ

第1表 IMERYS社のMulcoa製品中のAl₂O₃、SiO₂含有量と鉱物同定結果.

試料番号	Al ₂ O ₃ 含有量 (wt%)	SiO ₂ 含有量 (wt%)	鉱物同定結果
A	45	50	ムライト, 石英, クリストバライト, チタン酸化物
B	63	32	ムライト, 石英, コランダム, チタン酸化物
C	71	25	ムライト, コランダム, チタン酸化物



第3図 Carvender 鉱山から採取した代表的なカオリン試料の熱分析結果.



第4図 Carvender 鉱山から採取した代表的なカオリン試料の粉末X線回折パターン.

マーおよびハンマーによる粗粉碎, 全自動粉碎装置 (HPM, HERZOG 社) によって微粉碎を行い試験試料としました. 熱分析は, 示差熱熱重量同時測定 (TG-DTA) による分析で, リガク社製 Thermo Plus TG8110 を使用し, 試料量 50 mg, 昇温速度は 20 °C / 分としました. XRD 分析では, リガク社製 SmartLab 粉末 X 線回折装置を使用し, X 線電圧 40 kV, 電流 200 mA, 走査速度 10°/分, 2θ = 3 ~ 70° の条件で測定し, 解析ソフトはリガク社製の PDXL2.1 を使用しました. XRF 分析では, 卓上ガラスビードサンプラー (HAG-M-HF, HERZOG 社) を用いてガラスビードサンプルを作成し, リガク社製 ZSX Primus III+ を用いて, 電圧 50 kV, 電流 50 mA で分析を行い, 検量線法により主成分 10 元素 (SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, tFe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅) の定量を行いました.

3. 1 アンダーソンビルのIMERYS社プラントとその製品

IMERYS 社では, 鉱山で採掘したカオリン鉱石から「Mulcoa」(口絵第3図) という製品を製造・販売しています。「Mulcoa」は IMERYS 社がカオリンを原料として合成したムライト (Mulite: Al₆O₁₃Si₂) の商品名で, カオリン鉱石をキルンで 1470 °C ~ 1600 °C で 2 時間ほど焙焼し, Al₂O₃ の含有量を 45 wt% ~ 70 wt% に調整した Mulcoa 製品を製造しています. また, 製品毎に粗いもの (1 ~ 2 mm) から, 細粒のもの (40 μm) までさまざまなものが製造されています.

今回いただいた Mulcoa 製品のうち, Al₂O₃ 含有量が 47 wt%, 60 wt%, 70 wt% の製品 (それぞれ A, B, C と呼ぶ) の化学組成および鉱物組み合わせを比較すると, 第1表のようになりました. また, Al₂O₃, SiO₂ 以外の不純物は TiO₂ (2 ~ 3 wt%), Fe₂O₃ (1 wt% 前後) が検出されま

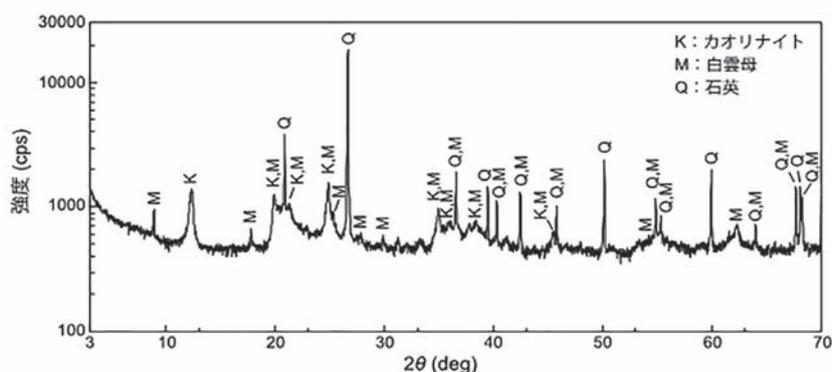
第2表 アメリカス周辺域における層序区分 (Cocker and Costello, 2003 を改訂).

地質時代		層
第四紀	完新世	沖積層
	更新世	
新第三紀	鮮新世	-----
	中新世	Altamaha層
古第三紀	始新世から漸新世	始新世から漸新世の石灰岩の残留物
		Ocmulgee層/Williston層/Muckalee層
	始新世	Clinchfield層
		Perry層/Lisbon層/Tallahatta層
		Hatchetigbee層
	暁新世	Tuscahoma層
		Nanafalia層/Baker Hill層

Porters Creek層/Clayton層		
白亜紀	後期	Providence層
		Ripley層/Cusseta層

	前期	Blufftown層
		Eutaw層
		Tuscaloosa層
		未区分

各地層間の実線は整合、破線は不整合関係を示しています。



第5図 アメリカス周辺のカオリン露頭から採取した代表的なカオリン試料の粉末X線回折パターン。

した。以上の結果から、Mulcoa 製品はムライトを主成分とし、 Al_2O_3 含有量が厳密に管理されており、 Al_2O_3 含有量が 70 wt% のものはほとんどムライトが占めていることがうかがえました。また、チタンや鉄などの成分も少量ではあるが製品中に含まれていることがうかがえました。

3.2 アンダーソンビルのカオリン鉱山

IMERYS 社はプラント周辺に多数のカオリン鉱山 (採掘場) を所有しており、1日で6000トン、年間で100万トンを採掘し、現在30年分の埋蔵量を確保しているとのこと。今回はカオリン鉱山のうち、Larkin 鉱山と Carvender 鉱山

を訪問しました。

Larkin 鉱山では、採掘場の広さは 90 m × 45 m で、高さ 20 m ほどの採掘崖ができており、そこにはほぼ水平な地層が露出していました。上部から褐色層 (中新世)、黄色層 (始新世)、白色層 (暁新世) となっています (口絵第1図)。また、この白色のカオリン層はさらに 60 m 下方まで続いているとの説明でした。カオリン層には遠くから見ると平行層理がくっきりと見えますが、近づくとも不明瞭となり、判然としなくなります。カオリン塊をみると灰色・均質で、未乾燥の水分を含んだ状態では若干の粘性があり、カッターナイフで容易にスライスできる程度の硬さでした。今回は、現在の採掘

崖の最下部である暁新世の白色層から典型的なカオリン試料を採取し、分析を行いました。

Carvender 鉱山は Larkin 鉱山と同規模で、同じ層準が観察されました（口絵第 2 図）。Carvender 鉱山では採掘が行われている層準から典型的なカオリン（口絵第 4 図）の他に、ポーキサイト（口絵第 5 図）や、直径数 mm ～ 1 cm 程度の黄鉄鉱と思われる硬い球状の塊も見られました。これらはカオリン層中にあり、ポーキサイトは豆状でカオリンに比べてざらざらしていますし、黄鉄鉱はこれらに比べて硬くて重いため、見た目や触った感触で容易に区別可能でした。これらについても試料を採取し分析を行いました。

採取した試料の熱分析では、カオリナイト特有の加熱による質量変化および吸熱・発熱反応が観察されました（第 3 図）。また XRD 分析では、全てのカオリン試料でカオリナイトまたはハロイサイトが（第 4 図）、多くの試料でチタン酸化物が同定され（第 4 図）、一部の試料では白雲母や沸石が同定されました。両鉱山のカオリン試料の化学組成は、 SiO_2 が 43 ～ 44 wt%、 Al_2O_3 が 38 ～ 39 wt% と均質で、カオリナイトの理想式から計算される化学組成（ SiO_2 : 47 wt%、 Al_2O_3 : 40 wt%）とほぼ同等でした。 TiO_2 、 Fe_2O_3 は共に 1 ～ 2 wt% 程度含まれており、これが最終的に Mulcoa 製品にも残留していることがうかがえました。

ポーキサイト試料ではギブサイト、カオリナイトまたはハロイサイトが多く含まれ、一部試料ではチタン酸化物、沸石、石英も同定されました。化学組成は SiO_2 が 20 ～ 23 wt%、 Al_2O_3 が 53 ～ 54 wt% で一般的なポーキサイト（ Al_2O_3 : 52 ～ 57 wt%）と同等の品位でした。

黄鉄鉱と思われる試料では、黄鉄鉱と沸石が同定されましたが、化学組成は鉄以外の元素含有量が低いことから、ほとんどが黄鉄鉱で構成されているようです。

3.3 アメリカス周辺のカオリン露頭

アンダーソンビル西方に位置する都市であるアメリカス周辺には多数のカオリン露頭が見られます。今回の調査では、著者の一人 Dr. Mark Cocker 氏（アメリカ地質調査所：USGS）の案内で、露頭の観察および試料採取を行いました。

本地域の層序区分は第 2 表のようにまとめられており（Cocker and Cosello, 2003）、観察した数カ所の露頭で新第三紀から白亜紀にかけての層序が概ね観察できました。

これらの地層の中で堆積性のカオリンに富む層が認められたのは、中新世の Altamaha 層、始新世の Tuscaloosa

層（口絵第 6 図）および Nanafalia 層、暁新世の Clayton 層（口絵第 8 図）、白亜紀後期の Providence 層（口絵第 9 図）でした。それぞれの層準の代表的な露頭でカオリン試料を採取し、分析を行いました（口絵第 8 図）。また、各層準には針鉄鉱と思われる鉄鉱物からなる厚さ数 cm の層や、直径 1 cm 程度の粒状の鉄鉱物が産出しており、これらも採取・分析を行いました（口絵第 7 図）。また、アメリカス西部の Curthbert 地域の近くには Garner という古いポーキサイト鉱山跡も見られました。

採取した試料の XRD 分析では、全てのカオリン試料でカオリナイトまたはハロイサイト、石英が同定され（第 5 図）、多くの試料で白雲母やチタン酸化物が同定されました（第 5 図）。一部の試料では鉄酸化物やモンモリロナイトも同定されました。化学組成は、 SiO_2 が 49 ～ 76 wt%、 Al_2O_3 が 13 ～ 30 wt% と、採取した層準や試料によって大きな幅があり、純粋なカオリナイトよりも SiO_2 が多く Al_2O_3 が少ない結果が得られました。また、 K_2O もカオリン試料中に 1 wt% 程度含まれており、 Fe_2O_3 も 2 ～ 10 wt% と、鉱山から採取したカオリンよりも不純物が多い結果でした。露頭に産出するカオリンは石英や白雲母が容易に観察されるように、見た目にも不均質で、不純物を多分に含んでいるのがわかりますが、分析の結果からも品質や均質性は鉱山で採掘されているカオリンに比べて明らかに劣っており、商業採掘にいたらないことが明白でした。

針鉄鉱と思われる試料では、針鉄鉱と石英が普遍的に含まれ、一部の試料でカオリナイトまたはハロイサイト、白雲母、沸石が同定されました。化学組成は、 Fe_2O_3 は 38 ～ 50 wt%、 SiO_2 は 26 ～ 42 wt%、 Al_2O_3 は 10 ～ 16 wt% であり、針鉄鉱や石英を主な鉱物として構成されていることがわかりました。

3.4 サンダースビルのカオリン鉱山および周辺露頭

サンダースビルにも IMERYS 社のプラントおよびカオリン鉱山があり、これらを見学しました（口絵第 10 図）。近郊のカオリン鉱山全体での可採年数は現在のところ 20 年ほどと見積もられており、採掘が終了した鉱山跡地も複数見られました（口絵第 11 図）。IMERYS 社では、終掘した鉱山の土地を元の景観に復元させるための事業（Reclamation）を行っていました。ちなみに、見学した終掘地（口絵第 11 図）は埋め立ててから 15 年ほど経過した土地でした。今回の調査では、鉱山側から試料採取の許可が得られず、野外観察のみでした。採掘場はアンダーソンビルのカオリン鉱山と同様の規模で、高さ 20 m ほどの採掘崖には厚さ 12 m ほどの白

色のカオリン層が露出していました。

また、サンダースビル周辺にもカオリンの露頭がいくつか見られました。露頭で見られた層準は不明ですが、これらの露頭からもカオリン試料を採取し、分析を行いました。全てのカオリン試料にカオリナイトまたはハロイサイト、石英が含まれていました。その他、白雲母、チタン酸化物、鉄酸化物、沸石が同定されました。化学組成は、 SiO_2 が 46 ~ 60 wt%, Al_2O_3 が 19 ~ 38 wt% と、純粋なカオリナイトよりも SiO_2 が多く Al_2O_3 が少ないものの、アメリカス周辺の露頭に比べてカオリンが占める割合は多いようです。このようにサンダースビル周辺の露頭のカオリンは、かなり上質なものであるものの、鉱山で採掘されるカオリンには劣り、現時点では商業的な開発にいたっていないようです。

4 まとめ

筆者らは 2014 年にジョージアカオリンの鉱床を訪問する機会を得たため、ジョージアカオリンの鉱床に関する地質概要、カオリン鉱山や露頭におけるカオリンの産状、採取試料の各種特性などについて本稿にて簡単に解説しました。

IMERYS 社のプラントでは、鉱山から採掘したカオリンを原料として、「Mulcoa」というムライトを主成分とした製品を生産していました。 Al_2O_3 含有量や粒径が調整され、様々な規格品が出荷されていました。

プラント周辺のカオリン鉱山で採掘されているカオリンは、 Al_2O_3 含有量をみても非常に均質で、熱分析、鉱物同定、化学組成分析の結果からも不純物をほとんど含まない良質なカオリンであることがうかがえました。しかし、カオリンに含まれる少量のチタン酸化物は除去されず、Mulcoa 製品中に残留しているようです。

アメリカスやサンダースビル周辺の露頭のカオリンは、見た目にも石英や白雲母を含み、実際に鉱山で採掘されるカオリンに比べてカリウムや鉄などの不純物も多く含まれ、純度が低いことは一目瞭然でした。

また、アンダーソンビルのカオリン鉱山では局所的ですがボーキサイトや黄鉄鉱が、アメリカス周辺の露頭では針鉄鉱の層や直径 1 cm 程度の針鉄鉱塊も見られました。これらの違いは、カオリン層の堆積環境の違いや元の堆積物の組成の違いを反映していると思われます。

最後に、今回の調査では IMERYS 社の Jessica E. Kogel 氏、Jeremy Andrew 氏、および Paul V. Hall 氏にプラントおよび鉱山の案内をしていただきました。ここに記して深く感謝します。

文 献

- Cocker, M. D. and Costello, J. O. (2003) Geology of the Americus area, Georgia. *Georgia Geological Society Guidebooks*, 23, 70p.
- Conley, R. F., Towell, D. G. and Murray, H. H. (1975) Radiochemistry of the Georgia kaolins. *Abstract, Association Intenationale Pour L'Etude de Argiles, Mexico City, July 16-23, 1975*.
- Dombrowski, T. (1982) Abundance, distribution, and origin of thorium in the Georgia kaolins. *M. S. Thesis, Indiana University*, 170p.
- Friddell, M. S. (1981) A study of the mineralogy of selected Cretaceous and Tertiary kaolins of central and eastern Georgia. *M. S. Thesis, Georgia Institute of Technology*.
- 堀田裕司・伴野 巧・野村祐二・佐野三郎・小田喜一 (2000) ジョージアカオリンの可塑性に及ぼすモンモリロナイトの影響. *日本セラミックス協会学術論文誌*, 108, 318-320.
- 川合秀治・市川ゆかり・石田秀輝・芝崎靖雄・小田喜一 (1999) ジョージアカオリンの可塑性に対する加熱処理の影響. *日本セラミックス協会学術論文誌*, 107, 990-993.
- Kogel, J. E., Pickering, S. M. Jr., Shelobolina, E., Chowns, T., Yuan, J. and Avant, D. M. Jr. (2002) *The Georgia Kaolins, Geology and Utilization*. The Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 84p.
- Lawton, D. E. and others (1976) *Geological map of Georgia*. Georgia Geological Survey, scale = 1:500,000.
- 刃根如人・芝崎靖雄・山本 治 (1997) ジョージアカオリンの表面イオン交換とレオロジー特性. *日本セラミックス協会学術論文誌*, 105, 228-232.

ARAOKA Daisuke, EJIMA Terumi, MORITA Sayaka, SUDO Sadahisa, TSUKIMURA Katsuhiko, TAKAGI Tetsuichi and Mark COCKER (2015) Overview of Georgia kaolin deposits.

(受付: 2015 年 6 月 11 日)