

白華現象（スカム）の実状とその対策

長谷川 龍三*

Scum or Efflorescence Problem in the
Ceramic Industry
by
Ryūzō HASEGAWA

陶磁器製品の表面に、可溶性塩類が析出し、製品の商品価値を著しく低下させることがある。この現象を白華現象と呼び、特に素地の味を生かした無釉製品において忌避されている。ここでは、白華の現状を多くの実例により解説し、さらに白華現象生成過程を追求し、その防止対策についても一部検討した。

1. ま え か き

建材用のセラミックブロック、クリンカータイル、あるいは常滑名産の朱泥茶器、盆栽用の植木鉢など、釉薬を掛けず素地の味をそのまま生かした製品は、その格調の高さから、彩色のきらびやかな施釉製品に優るとも劣らない魅力がある。

さて、この無釉製品（多くの場合、色素地であるが）を生産している多くの人は、製造中に、製品表面に白い斑点が多数析出し、商品価値を無くしてしまったというような経験を一度ならず持っている。この斑点の析出は特に製品の角の部分に多く、場合によっては、生素地を取扱った時の手の跡に沿って斑点が析出していることもある。そして時期的には、梅雨期あるいは冬期によくこのような現象をみかける。

また、これとは別に、使用中の素焼植木鉢の表面やれんが積みをした赤れんがの表面に白い（あるいは黄味を帯びた）結晶物が析出していることを日常生活においても経験することがある。

このような商品価値を損う斑点の生成を総称して、日本では“白華現象”と呼んでいる。欧米では、前者をスカム（scum）、後者をエフロレッセンス（efflorescence）と区別しているようである。スカムの方はその成因によって、さらにドライアスカム（dryerscum）とキルンスカム（kiln scum）とに区別されている。表1にその分類を整理して示す。

呼称は何であって、これらの現象が生じると、商品価値は著しく低下する。無釉素地は一般に色素地（素地の着色には含鉄原料あるいは、ベンガラ、クロム、マンガン、鉍等を添加する）が多く、白い斑点は目立ち、高級品になればなるほど許されない。これは、

無釉製品を作る人が誰しも経験があり、しかも必ず解決しなければならない問題である。

最近生産量の増大に伴ない、良質の自然発色の有色素地用の天然原土が枯渇し、各種の着色用原料を使用する傾向が強まり、それに附随し、白華に伴う問題が増加している。筆者らは、過去幾たびか、これらの問題に直面し、その解決に頭を悩まされた実例を知っている。ここにその概略を紹介し、今後これらの問題が発生した時の解決の目途にしていだきたい。

なお、欧米に比べて、れんがが建築の比較的少ない日本においては、前述のうち、エフロレッセンスの問題はあまり心配ないので、ここでは主としてスカムの問題を中心に取り上げる。

表1 白華の分類

呼 称	現 象
ドライアスカム (dryer scum)	乾燥工程において、成形体の表面に可溶性塩類が析出する現象
キルン スカム (kiln scum)	焼成中に素地成分と燃焼廃ガスとが反応し、素地表面に沈積物がうすく付着する現象。
エフロレッセンス (efflorescence)	れんが、素焼鉢など使用中に製品の表面に塩類の結晶が析出する現象。

2. スカムの実例とその解決策

まず最初に、筆者らがこれまで経験したスカムの代表的な実例とその時の解決方法の具体例について列挙してみよう。これは、最近常滑地区で実際に発生した身近な問題である。従って、内容を詳細に記せば望ましいのであるが、試料を提供していただいた企業秘密

* 開発課

の関係もあり、調合、製造工程などは、スカムに関連する部分にとどめ、測定値についても必要な値のみに差し控えることをお許しいただきたい。

2. 1 セラミックブロックの場合(実例1)

(情況) セラミックブロック焼成物の表面に白い斑点模様が発生し、商品価値を著しく低下させた。この白い斑点は、乾燥中に発生し始め、自然乾燥の後期には、指で触れるとザラザラと感じるほどにもなり、焼成すると製品の肌に白い(あるいは黄色い)斑点模様となっており、こすっても取れない。

(生成物の究明と成因) 乾燥素地の表面に析出した白い斑点をナイフで削り取り、組成分析したところ、二水塩の硫酸カルシウム($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)が主成分であり、少量の硫酸マグネシウム($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)および微量のナトリウム、カリウムの硫酸塩を検出した。

同工場の製造工程からみて、析出の原因は、原料に起因することが明らかになったので、各原料について陽イオン(Ca^{++} , Mg^{++})の由来と硫酸根の由来を分析した。その結果は表2に示す。

表2 使用原料の組成

原料名	置換性塩基 (meq/100g)		可溶性陽イオン (meq/100g)		SO_3 (ppm)
	Ca^{++}	Mg^{++}	Ca^{++}	Mg^{++}	
低級カオリンA	5.74	0.81	1.14	0.19	51
低級カオリンB	1.07	0.19	0.61	0.09	85
木節粘土	4.06	1.67	0.37	0.20	41
富貴青土(上甲)	4.47	3.13	0.46	0.42	314
低級長石	1.00	0.00	1.41	0.04	32
シャモット					118

この分析結果によると、塩を形成する成分のうち、陽イオンの方は、もしも水に容易に溶け出す陽イオン(可溶性陽イオン)のみに起因するならば、すべての原料がその候補者であり、もしも、各粘土が吸着している陽イオン(置換性陽イオン)も関係するとすれば低級カオリンA、木節粘土、富貴青土(上甲)がその候補者になることを示している。一方硫酸根の方は、明らかに富貴青土に起因していることは明白である。

(スカム防止対策) 富貴青土は、大型粘土製品を製造するとき、その優れた焼結性状のため、古くから常滑地区を始め三河地区などでも使用されているが、スカムの面からは、硫酸根含有量が多いため取扱いには慎重を要する。当工場では、原料使用量が多く、製土中に硫酸根を除去あるいは固化させるような工程はとれないので、一部別原料に置き換え、その解決とした。

2. 2 烏泥植木鉢の場合(実例2)

(情況) 烏泥植木鉢は、木節、長石、雑粘土に着色剤として二酸化マンガンを加え、茶黒色に焼き上げる

高級盆栽鉢である。この製品の表面に白斑点が析出した。

(生成原因と防止策) これは一見してスカムと分った。同工場では、原料の調合を最近変更させたようなこともなく、スカムの原因は原料に起因するとは、あまり考えられない。そこで同工場の製造工程を注意深くたどってみると、従来は上記調合物をポットミル湿式粉碎の後、フィルタープレスし、その後もう一度泥漿にもどし、鋳込み成形していた。ところが最近になって製造工程の合理化を図り、ミル粉碎したものをそのまま鋳込み泥漿として使用するようになっていた。実は、この一工程の省略がスカムの原因となっていた。同工場で再度フィルタープレスの工程を入れたところ、スカムは全く認められなくなった。ちなみに、フィルタープレスした時のろ液を分析したところ、硫酸根の存在が検出された。

つまり、フィルタープレスの工程により、スカムの原因となる可溶性塩類が搾り出されることを示している。

2. 3 烏泥植木鉢の場合(実例3)

(情況) またまた烏泥植木鉢の表面にスカムが析出することが起った。今度は実例2の処理では解決しもうもない。

(生成原因と防止策) 製造工程中には、どこにもスカムを促進する要素は見当たらない。そこで各原料について硫酸根を分析したところ、着色用のマンガニ鉢中に多量の硫酸根の存在を検出した。これは、コスト節減のため、ある工場廃棄物のマンガニ鉢を使用したのが原因で、マンガニと同時に廃棄された成分の中に、多量の硫酸根が共存していたことが分り、同工場ではその使用を止めた。その結果、製品は再び従来通りの美しい発色を取り戻した。その後マンガニ鉢の入荷ロットが変る毎に、しばらくの間硫酸根の管理が続けたが、その後は、このような心配のあるマンガニ鉢はなかった。

2. 4 シャモット質耐火レンガの場合

(情況) 数種類の木節粘土にシャモットを50%程度配合し、プレスまたは手打成形の後、1200~1250℃で焼成し、シャモット質耐火物を製造したところ、焼成品の表面がガラス化したり、あるいは発泡したりする。そして不良品としてこれらを野積みしておいたところ表面に透明性のある結晶物が多量析出した。

(生成原因と防止策) 結晶析出物を分析したところ硫酸ナトリウム($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)と判明した。使用原料から原因は明らかにシャモットに起因することが分るので、早速シャモットの分析をした。この分析操

作は、粗砕したシャモットを水中に入れ、煮沸の後、ろ別し、ろ液に溶解出した可溶性成分を分析するというやり方である。その結果、シャモット中に約4.5%の可溶性塩類の存在を認めた。

そこでこの耐火れんが用シャモットの由来を追跡したところ、食塩焚窯の煙道に使用していたれんがをシャモットとしていることが分った。つまり煙道は燃焼廃ガスの通路であり、燃焼ガス中に含まれる微量の硫酸ガスが多年の間にれんがに吸着されていたこと、および食塩焼成したときに気化したソーダの一部が、煙道にきたとき温度が下がり、れんが中に吸着されたためと推定された。

同工場では、シャモットの簡単な受入れ検査として購入するシャモットを飽水させた後、風乾させ、表面に析出する結晶の有無を調べることにした。その結果今回のようなことは、未然に防げるようになった。

一見、最も安定していると思われるシャモットにもスカムの因子は隠されており、その選択は慎重であらねばならぬ。実例1の場合も、シャモット中に相当量の硫酸根を検出していることを思い起してほしい。

2. 5 朱泥茶器の場合 (実例5)

(情况) 朱泥茶器のふたの表面が焼成したときに、わずかにザラザラした感じになる。ふたと胴体とは全く同一調合の泥漿を使用しているのに胴体には、ほとんどこのような現象は起らない。もしもスカムであれば、ふたのような平滑な面よりも、むしろ水口あるいは手口の先端に出てよさそうなものなのに、このような箇所は、きわめて美しい肌仕上になっている。またふたの状況を見ても、つまみの部分にはほとんど認められない。ご承知の通り、常滑地区の高級茶器は、ふたと胴とを一緒に焼成し、ペアーで製品にするため、ふたに欠点が出ると胴体も同時に不良品になる。一個当りの単価は高い高級品である。早急の解決が望まれる。

(生成原因と防止策) これがスカムであるということ断定するには、かなりの時間を要した。しかし、根気よく状況を分析して行くと、鑄込んだ後、乾燥させた素地の表面がわずかに荒れているものが見付かった。そしてこのようなものに限って、焼成すると表面欠点が顕著になる。解決の糸口は、ここにあった。早速数枚のふたを集め、そのごく表面層のみを注意深く削り集め分析したところ、果して、半水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$)の存在を検出した。やはり可溶性塩類によるスカムであったのである。表面をザラつかせた原因がスカムであることが分ればその後の解決は早い。製造工程を順次たどっていくと、容易にその原因が判

明できた。

つまり、同工場では、泥漿調合は全く同一であるが胴、水口、手口、ふた、ふたのつまみなどすべて別々に鑄込み、成形の後、全体をのたで接着する方法をとっている。そしてすべては一箇づつ鑄込む普通鑄込法によるが、ふたの部分だけは、数枚一緒に成形する重ね鑄込法をしていたのである。つまり、鑄込んだ時に素地中に含まれる水分は石こう型に吸収されるが、この時水分と同時に水分に溶けこんでいる素地中の可溶性塩類のある部分は石こう型に吸収されるのである。ところがふたの部分は、圧力鑄込をしていたので、わずかながら泥漿中の水分量が少なく、その結果として石こう型に吸収される可溶性塩類の量が少い。そのため素地中に残留する可溶性塩類量が多くなり、乾燥工程中に析出してきたのである。後で聞いて笑い話になったのであるが、ふたのつまみの部分は普通鑄込法により別に成形し、のたでふたに接着していたのである。そのため、ふたの中では最もスカムの析出が顕著になるはずのつまみの部分には、スカムは析出しなかったのである。

この例でも分るように、有色素地、特に含鉄原料を使用しているところでは、製造工程のわずかの差異がスカムに結びつくことがある。つまり、どの工場も、スカムの析出限界ぎりぎりのところで生産しているのが現状ではなかろうか、そのため、乾燥時間が比較的ゆっくりになる雨期とか冬期になると、よくこのような問題に直面するのである。また、スカムをチェックする立場にあるものは、わずかの工程の差異も見逃してはならない実例であった。

このようなスカムの実例を挙げてみると、まだまだ興味深い例もあるが、最後に今後予測される新たなスカムの傾向を一、二紹介しよう。

2. 6 朱泥タイルの場合 (実例6)

赤色素地の無釉タイルの需要は多く、各企業とも機械化をすすめ量産体制に入ろうとしている。ところが安価な含鉄原料は枯渇の傾向にあり、勢い含鉄物なら何んでも利用することになる。その1例として、金属を採取する時に廃出する廃泥を使用した企業がある。この廃泥は、鉄分6%以上を含み、1050℃以上で焼成すると良好な赤色を呈する安価な良質含鉄原料である。ところが、焼成すると製品表面に白色の斑点が多数析出することがあり、製品を水洗すると乾く時に内部から硫酸塩が出てきて、素地表面に別の結晶が析出してくる。

このため、廃泥中の可溶性塩類を抽出分析したとこ

ろ、硫酸カルシウム、硫酸マグネシウムを多量検出し、可溶性塩類の総量は数パーセントにも達することが分った。また不溶性の硫黄化合物も共存し、これらは焼成中に酸化され、硫黄ガスを発生し、素地内部にその一部は蒸着する。この吸着された硫黄化合物は、製品にエフロレッセンス与える。従ってこれらの解決には、ドライヤースカムの防止技術と平行して、焼成雰囲気改善を図り、キルンスカム、エフロレッセンスの除去を図らねばならない。また廃ガスは、多くの亜硫酸ガスを含むことになるので、新たな課題が出てくる。

2. 7 無釉陶管の場合

これはまだ実例がない。しかし、陶管が無釉化に進もうとしている現在、当然予測される事態である。表3に頁岩粘土中に含まれるSO₃量を示す。

表3 南知多地区頁岩粘土層別SO₃含有量

第1層	第2層	第3層	第4層
25	70	105	215

(単位: ppm)

これは南知多地区のある頁岩層を上層から下層にかけて含有するSO₃量の分布を調べた結果である。陶管原料の需要の伸びに伴い、原料を広範囲に求めることは必然で、やがてはこの地区のものも利用される。この場合、第4層の頁岩粘土を使用すれば、恐らくスカムが発生し、製品の表面は荒れる。ここで注意を要するのは、これは何も、この地区に限ったことではなく、常滑地区で現在使用している頁岩粘土中に140ppmのSO₃を検出したことがある。筆者はまだ広範囲の頁岩層についてSO₃量を測定したわけではないが、同一地区でも各層によってその含有量は大幅に変動していることが予測される。にもかかわらず、選別して使用することは不可能に近い。また現在良質とされているもの(成形能のよいもの)にSO₃含有量が少いという保証もない。従来においてもスカムの危険性は十分あったのであろうが、たまたま全面施釉していたので、この問題がクローズアップされなかったに過ぎない。陶管の無釉化に伴い一考を要する点ではあるまいか。また、全国各地で、各種の低級雑粘土、あるいは廃泥を原料にした陶管を量産する体制にある現在、SO₃含有量の多い原料を使用予定している企業もあるとか聞いている。

勿論、先の例で述べたような、手にとって器の美しさを楽しむ茶器、あるいは鑑賞用の盆栽鉢などは、異り、陶管は地下に埋没させて使用するものであるから、わずかに美感を損うだけのスカムは、陶管本来の

性能、機能を低下させるものではないことは、議論するまでもない。

3. スカムの析出挙動

スカム、特にドライヤースカムの実例を中心に長々と述べてきたが、ここではドライヤースカムの析出についてもう少し追求してみよう。

3. 1 析出原因と析出物

素地中に可溶性塩類が含まれていると、この塩類は成形水に溶け込む。成形素地を乾燥させると、水分は素地中の毛細管を通して成形体の表面から水蒸気になって大気に放出される。ところが、水分中に溶け込んでいた可溶性塩類は成形体の表面までは水と一緒に登ってくるが気化することはできないので、やむなくここに残り結晶化する。文献によるとこの結晶物は、各種の硫酸塩、塩化物ということになっているが、実測例によると、硫酸カルシウム、硫酸ナトリウム、硫酸マグネシウムがほとんどであった。このうち、硫酸ナトリウム(Na₂SO₄・10H₂O)や二水塩の硫酸カルシウム(CaSO₄・2H₂O)が析出したときは、結晶の生成が顕著で容易に肉眼判定できるが、半水塩の硫酸カルシウム(CaSO₄・½H₂O)が析出したときは、結晶が小さく、肉眼による識別には、やや熟練を要する。前者は、一般に自然乾燥した製品に出やすく、後者は加熱乾燥した時によく認められる。

3. 2 析出挙動

次にスカム析出に関する二、三の実験例を紹介する。

3. 2. 1 スカムの検出方法について(実験1)

(実験方法) 粘土に可塑水を与え、約20mmφ×100mmhの棒状試料を作成、成形後棒状試料の周囲に白色ワセリンを塗布し、ビニールを巻きつけ、水を含んだスポンジの上に立てる。このようにして静置した試験体では、水分は下面より上面へ向けてのみ移動し、それに伴ない可溶性塩類も上面に移動集積し、試料棒の表面に作為的にスカムを作することを目的とする。

(実験結果) 常滑地区で現在使用している各種無釉素地用原料についてこの実験をしたところ、富貴青土ではスカム析出が顕著に観察され、放置後1日も経過すると表面、特に周辺部に白色斑点の析出が認められた。また河和田土、頁岩粘土等にも析出が認められた。析出物は、ほとんどが二水塩の硫酸カルシウムであった。

この方法は、スカムの現場向き原料管理試験方法として、筆者が考案した方法で、放置後2～3日以内に棒状試料の表面に結晶物が析出するような粘土では、現場で使用した場合、スカムの危険性が十分ある。い

くつかの測定結果と現場で発生したスカムの状況を総合すると、この簡単な試験方法が可溶性塩類を含む粘土の管理方法として、きわめて適切な情報を与えてくれることが分かったので、原料管理方法の一項目にぜひ取り入れてほしい。

3. 2. 2 スカム析出と素地組織 (実験2)

(実験方法) 実験1で、この方法がスカムの試験方法として有力であることが分かったので、量的な立場からこれを論ずるため、水箒し硫酸根の存在がほとんどない蛙目粘土を用い、これに一定量の硫酸+消石灰、および石こう等の添加による試験を行なった。

(実験結果) 石こうを試験体に対して段階的に5%まで添加したがほとんど結晶の析出を認めなかった。また、硫酸+消石灰の混合物の場合も、硫酸カルシウム3%相当量添加した場合にわずかに析出するだけで、天然物に存在する量よりもはるかに多いにもかかわらず析出量は極端に少なく、本法では、可溶性塩類の移動を調べることは不可能であった。

これは、微粒子からなっている(2ミクロン以下の粒子60%以上)蛙目粘土のみにより実験したため、水分の移動が十分なかったこと、あるいは一部粘土に吸着されたためと考えられる。

次に蛙目粘土50部に対し、電気炉で1000℃に仮焼して熱水で洗浄した蛙目粘土の仮焼物(JIS篩2.0mmパス)を50部加えたものについて前述の試験をしたところ、硫酸+消石灰混合物の添加試験において、かなり顕著にスカムを認めた。

このようにスカムの析出は硫酸根の混入形態および素地の性質(特に粒度分布)に左右されることが分かった。同時に量的な立場でスカムの析出挙動を追求することの困難さを示した。つまり原料中の SO_3 量のみからスカムの析出を議論することはむずかしい。

3. 1. 3 スカム析出機構の検討

(実験方法) 模型試料によるスカム析出挙動の検討は、実状に合ったような模型の作成が困難であったので、次に含鉄原料としては優れているが、スカム析出の危険性の大きい手近な原料として、 SO_3 490ppmを含む富貴青土を用いて、素地内のイオンの動きを調べた。

実験方法は、実験1と同様の方法で20mmφ×140mmの試料棒を多数作成し、今度は上面を残して底面、側面ともすべてワセリンを塗布した後ビニールで覆い、水分の移動を上面のみに限定させて放置した。そして上段から図に示すように1~4層までの部分を1日毎に切断し取り出し、陽イオンの移動を調べた。

測定方法は、前述の方法で採取した試料(約1g)を純水50mlに浸漬させ、時々攪拌しながら24時間放置し、可溶性イオンを抽出した。その後、回転数約2500rpmの遠心分離機で処理し、固相、液相の分離を行ない、上澄液の液相に溶けているカルシウム、マグネシウム、ナトリウム、カリウムの濃度を原子吸光分析法により定量し、採取試料中の陽イオン含有量を求めた。また、同時にその時の採取試料中の含水量をも求めた。

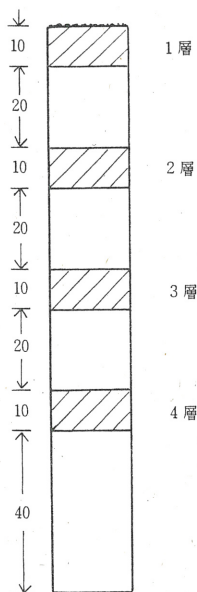


図1 試験体の試料採取箇所

(試験結果と考察)

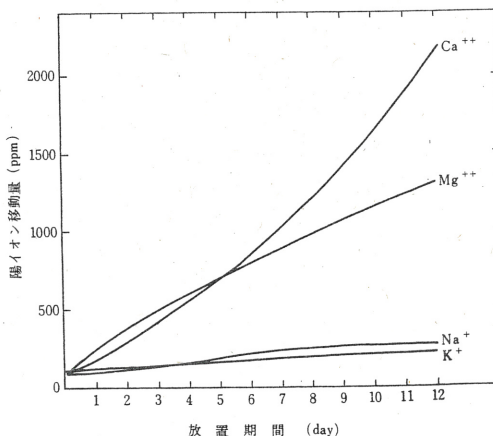


図2 粘土棒中の陽イオンの移動

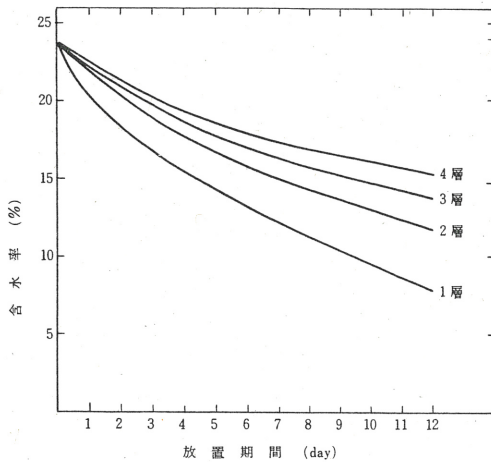


図3 粘土棒中の水分の移動

図2は第1層(表面)に集まってきた陽イオン濃度の変化を示すものであり、図3は各層の水分量の変化を示している。この実験により得られた結果をまとめると、

- (1) 水分の移動は上層部ほど顕著であり、下部ではあまり移動しない。
- (2) 陽イオンのうち K^+ 、 Na^+ の移動はあまり起らない。
- (3) 陽イオンのうち Mg^{++} の移動は顕著である。
- (4) Ca^{++} の移動は乾燥の後期まで継続する。
- (5) 図示しなかったが、第2層以下では、イオンの移動はほとんど検知されない。

……等である。これらの実測結果から次の結論を得た。

まず、陽イオンの移動を誘発した直接の因子である水分の移動(乾燥)について考える。水分の移動は、乾燥により水分が表面から蒸発する運動と、それに伴う内部水の移動運動が考えられる。本実験では、水分の蒸発速度はきわめて小さいものであるが、内部水分の移動速度よりもはるかに大きい。そのため、下部層に行くに従って、水分勾配がなくなり、その結果として、下層部では水分の移動がなかなか起りにくいことになる。

ここで可溶性塩類中の陽イオンのみが素地中を移動したという立場から考察すると、もし、可溶性イオンの拡散が無視できるとすれば、可溶性イオン量は含水量に比例する。従って、含水量の変動が少ない下部層においては可溶性イオンの分布にも差があまり生じない。しかるに表面および表面近くでは、水の蒸発に伴

ない内部水の移動が生じている。つまり水分が蒸発すると内部から可溶性イオンを含んだ水の移動を促すことになる。かくして、蒸発、内部水の移動という表裏一体の運動を続け、表面および表面近くには可溶性イオンが蓄積されていく。

このように考えていくと、表面および表面近くには可溶性イオン濃度が高く、それ以外の部分ではイオン分布にあまり差異がないという結果が説明できる。

しかし、このような考え方だけでは、 Ca^{++} 、 Mg^{++} はよく移動するのに Na^+ 、 K^+ はあまり移動しないという事実の説明はできない。溶解度の点のみから考えると Na^+ 、 K^+ の方が容易に水に溶けそうである。また粘土中に含まれている可溶性陽イオン量は表4に示すよう

表4 供試粘土の可溶性陽イオン量

Na^+	K^+	Mg^{++}	Ca^{++}
95	87	101	92

(単位: ppm)

に Ca^{++} 、 Mg^{++} 、 Na^+ 、 K^+ ともに80~100ppmの範囲にあり、ほとんど差異がない。しかるに、12日放置後の表面部分のイオン濃度は Ca^{++} では約2000ppmの移動が認められるのに K^+ 、 Na^+ は100~200ppmの移動に過ぎない。しかも、 Ca^{++} 、 Mg^{++} の移動は乾燥の後期まで継続するのに、 K^+ 、 Na^+ では初期の段階でその移動は緩慢になる。

これらの事実から推察すると、移動する陽イオンの由来を可溶性塩類のみに求めることには無理があり、ここに新たに粘土の塩基置換あるいは脱塩化作用の考え方を導入する必要があるのかも知れない。表5にこ

表5 供試粘土の塩基置換量

Na^+	K^+	Mg^{++}	Ca^{++}
0.43	0.31	6.37	5.63

(単位: me/100g粘土)

の実験に供した粘土の塩基置換量を示す。

粘土中の成分のうち、水分の存在下において移動することが予測される陽イオンの第一の存在形態は、先に述べてきた可溶性塩類であるが、粘土に吸着されている置換性陽イオンも、その時の状況によっては、十分移動することができる。表5の測定値をみると、置換性 Ca^{++} 、 Mg^{++} は、 K^+ 、 Na^+ のほぼ10~20倍であり、図2の陽イオン移動量をうまく説明することができる。