

# ガイシ製造用坏土の凝集度による評価および季節変動

The Evaluation by an Agglomeration Index and the Seasonal Variation  
of the Dough Used in the Manufacture of Insulators

株式会社日本ネットワークサポート 木村 隆俊  
Takatoshi KIMURA

## 1. はじめに

セラミックス製造プロセスは、大別すると原料の調合、成形および焼成に分類することができる。この方法は、基本的に太古の昔より行われてきたセラミックス製造方法と同じである。近年、高純度の原料を使用したり、特殊な機能を持つセラミックス、また新しい成形方法が開発されているが、原料を決められた形状に成形し、焼成することには変わりはない。

当社では、送電用および配電用ガイシを生産している。ガイシは、金具とセラミックで構成され、セラミックの絶縁性を生かして、種々の場所で絶縁体として利用されている。例えば、電力供給網の送電線を絶縁するために使用されたり、電車に電力を供給する送電線や架線にも用いられている。図-1に当社で製造しているガイシの一例を示す。

国内で生産されている大部分のガイシは、オールドセラミックスであり、主原料は陶石や粘土などで、高強度を必要とするものにはアルミナが添加される。

当社でのガイシの製造方法を図-2に示す。まず、陶石や長石、珪砂などに加えて、セラミック

の耐荷重に応じてアルミナを加えた非可塑性原料をボールミル粉砕する。所定の粒度になるように粉砕した後、2種の粘土スラリーを添加して30分間混合する。その後、工程から出た余剰土を再度スラリーにし、新たに調合したスラリーと混合する。混合後のスラリーを図-3に示すフィルタープレスで脱水しケーキ土にする。得られたケーキ土を図-4に示す土練機で混練し、坏土（練り土）とする。坏土を、図-5に示す成形機を使って成

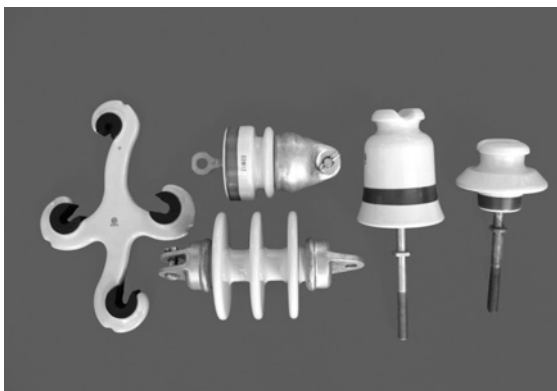


図-1 ガイシ製品の一例

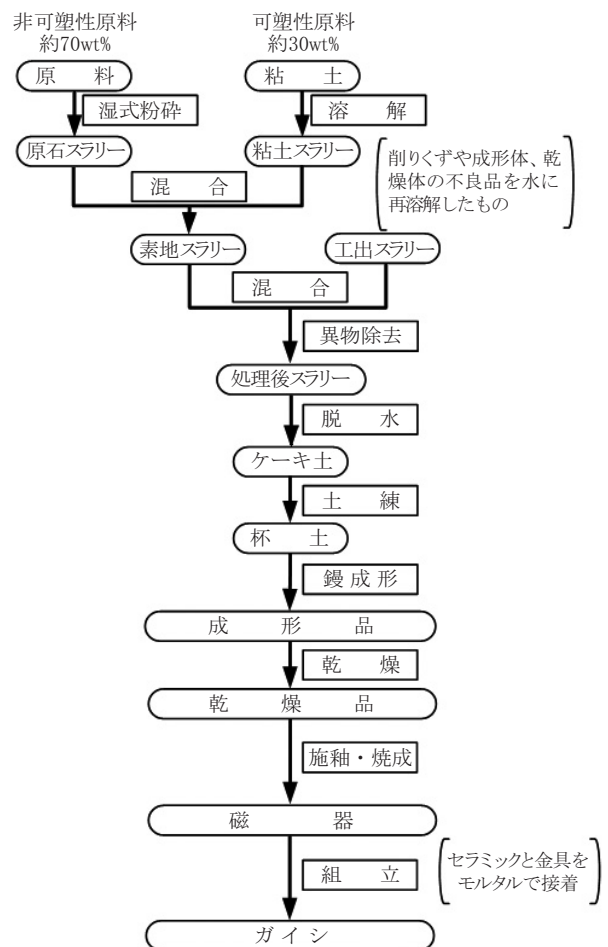


図-2 ガイシ製造方法の概略



図-3 フィルタープレス（製土工程）



図-6 窯台車（焼成工程）



図-4 土練機（成形工程）



図-5 成形機（成形工程）

形し、不要な部分を取り除いてガイシのセラミック部分の形状にする。それらを、水分が0mass%になるまで乾燥させたあと、実際に使用されるときに応力が加わる部分とそれ以外の部分で異なる釉薬を塗布し、その後、図-6に示すような台車に窯詰めして、トンネル窯で焼成する。その後、セメントで金具を取り付け、図-1に示したようなガイシになる。

ガイシの製造方法は、基本的に一般的な陶磁器の製造方法と変わりはない。しかし、工業製品で

あるため、定められた寸法や強度を出現させるのにさまざまな工夫が施されている。その中でも、スラリーの調製工程は、次工程の成形工程や焼成工程に影響を与え、製品であるガイシの性能を左右するため、もっとも重要な工程である。

スラリーの調製工程では、陶石などの粒子径がmmオーダーの天然原料を、ボールミルで粉碎し、 $\mu\text{m}$ オーダーにする。このままの状態では、成形時に必要な可塑性を持たないため、成形工程で定められた形状にすることができない。そこで、陶石などの粉碎物に粘土スラリーを混合し、成形工程で使用される坯土が可塑性を持つようにする。スラリー状態での水分は約50mass%であり、坯土の水分は約20mass%である。坯土になると水分が減少するため、製造工程において坯土内部の粒子の状態は重要視されない場合が多いが、坯土の可塑性や保形性は、坯土内部の粒子の状態が影響を及ぼしている。

安定した製品を製造するためには、スラリーの調製工程でスラリー内部の粒子の凝集・分散状態を常に一定に保ち、坯土の特性を安定させる必要がある。しかし、現状では坯土の状態は季節変動がある。すなわち、出発工程であるスラリー調製工程で、スラリー中の粒子の状態が季節によって変動するため、年間を通して一定の坯土を製作することができない。スラリーの凝集・分散状態は、粘性などの測定により評価されることが多く、また多数の研究事例がある。しかし、調合したスラリーをすぐに使用するのではなく、坯土にするまでに時間を要すことから、調合時に測定した粘性から推察される粒子の凝集・分散状態は変化していると考えられる。さらに、当社では、成形工程で排出された余剰土を再度スラリー化し、新たに調合したスラリーと混合するため、スラリー中の

粒子の凝集・分散状態は変化しやすい。その結果、坏土中の粒子の凝集・分散状態も変わり、坏土の特性が変化している。そこで、坏土中の粒子の状態を推察する必要があるが、これまで坏土中の粒子の凝集・分散状態を表現するための手法についての研究は少ない。そこで、坏土の凝集・分散状態を推察できる手法を研究した結果、簡易な手法で測定できることが明らかになったため、その手法を紹介する。また、坏土の凝集・分散状態の変動要因についても検討を行ったので紹介する。

## 2. 坏土の硬度

当社の成形工程では、**図-7**に示す硬度計で測定される硬度のみで坏土の管理が行われてきた。この硬度計は、先端に円錐形の治具があり、硬度計内部には円錐形治具を押し込むようにスプリングが円筒形の表示部に組み込まれている。表示部の下端は水平になっており、その部分が坏土と接触するまで、円錐形治具を押し込むと、内部のスプリングによる応力と、円錐形治具が坏土に陥入するための抗力が釣り合った場所で、円錐形治具がとまり、その位置を硬度として評価している。坏土が柔らかいと、円錐形治具が坏土から受ける抗力が小さくなるため、円錐形治具が坏土に深く陥入し、硬度計の下部でスプリングによる応力とのバランスがとれるため、硬度は低いと評価される。逆に坏土が硬いと、円錐形治具が坏土に陥入しにくくなり、円錐形治具が大きく押し戻された状態でスプリングとのバランスがとれるため、硬度は高いと評価される。成形を行う際には、硬度が一定の範囲内に入るように水分を調整し、坏土の硬

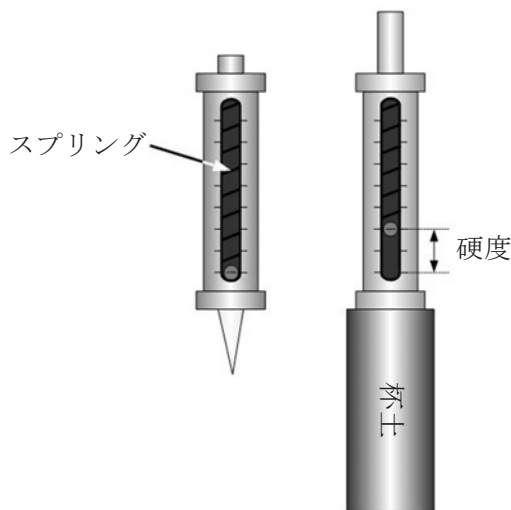


図-7 硬度計

度を調整している。しかし、この硬度計だけでは、坏土中の粒子の凝集・分散の概念が抜け落ちているため、坏土中の粒子の状態に合わせて水分を調整しなければならず、坏土の水分が一定でないため、乾燥工程や焼成工程での収縮率が異なるだけでなく、乾燥時や焼成時に亀裂を作る要因になることがある。そこで、この硬度に凝集・分散の概念を取り入れることを試みた。

## 3. 坏土の凝集度

スラリー中の粒子の凝集・分散状態が、坏土に及ぼす影響を検討するために、スラリーに凝集剤や分散剤を入れて、スラリー中の粒子の状態を変化させた。工程内で予想される粘度がもっとも低い分散スラリーを再現させるために、分散剤として水ガラスを添加して分散スラリーを作製した。また、工程内で予想される粘度がもっとも高い凝集スラリーを再現させるために凝集剤として塩化マグネシウムを添加して凝集スラリーを作製した。それぞれのスラリーを一定圧力でろ過し、ケーキ土とした後、小型土練機で混練した。得られた坏土の硬度と水分を測定した後、土練機から押し出される坏土に圧搾空気を吹き付け、坏土の水分を減少させながら硬度と水分の関係を繰り返し調査した。得られた結果を**図-8**に示す。分散スラリーから得られた坏土も、凝集スラリーから得られた坏土も、水分が減少するに伴い、硬度が上昇することが判明した。しかし、分散スラリーから得られた坏土と凝集スラリーから得られた坏土では水

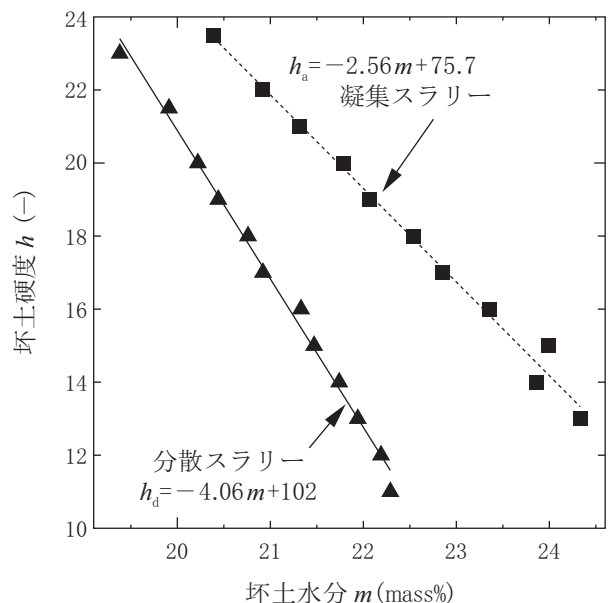


図-8 凝集・分散状態の異なる坏土水分と硬度の関係

分と硬度の関係が異なることが明らかになった。同一水分で比較すると、分散スラリーから得られた坏土の硬度が低くなり、同一硬度で比較すると分散スラリーから得られた坏土の水分が低くなる事が判明した。図-8から、凝集・分散坏土の硬度と水分の関係は凝集坏土の硬度を $h_a(-)$ 、分散坏土の硬度を $h_d(-)$ 、それぞれの坏土の水分を $m(\text{mass}\%)$ とすると実験的に、凝集坏土に対しては

$$h_a = -2.56m + 75.7 \quad (1)$$

分散坏土に対しては

$$h_d = -4.06m + 102 \quad (2)$$

で相関づけられることがわかった。

図-9に示すように、予め想定される最大の凝集・分散状態のスラリーを調整したため、製造現場で使用される坏土の水分と硬度の関係は分散坏土と凝集坏土の内側に分布する。そこで、製造現場で使用される坏土の凝集・分散状態を、先の実験で得られた分散坏土および凝集坏土の水分と硬度の関係との差異を定量的に表すため、凝集度 $I$ という概念を導入した。凝集度 $I$ は(3)式で表される。

$$I = \frac{h - h_d}{h_a - h_d} \quad (3)$$

ここで、 $h(-)$ は水分が $m(\text{mass}\%)$ の製造現場の坏土硬度、 $h_d(-)$ は分散坏土の水分が $m(\text{mass}\%)$ の場合の硬度、 $h_a$ は凝集坏土の水分が $m(\text{mass}\%)$ の場合の硬度である。従って、図-9で分散坏土の直線上に乗っている坏土は凝集度が0となり、

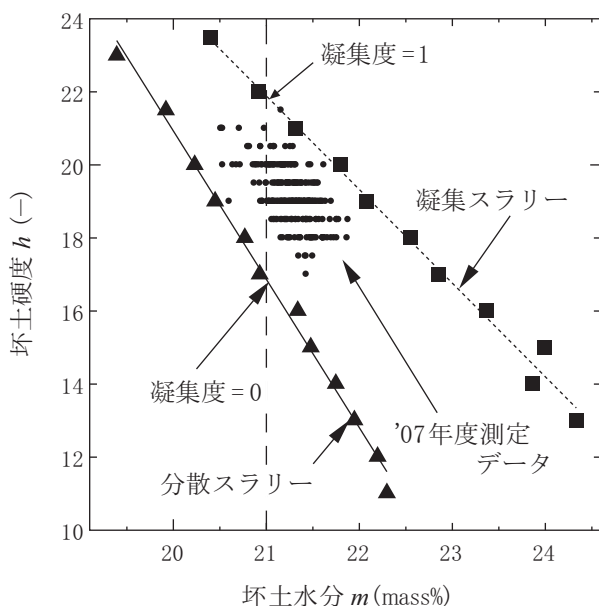


図-9 製造現場の坏土硬度と水分の関係

凝集坏土の直線上に乗っている坏土は凝集度が1となる。

製造現場で使用される坏土の凝集度を測定日ごとに示すと図-10のようになる。図から明らかのように、製造現場で使用される坏土の凝集・分散状態には季節変動がある。製造現場の坏土は、夏季には分散傾向に移行し、冬季には凝集傾向に移行する。前述のように、成形工程では定められた硬度範囲の坏土を使用するため、夏季と冬季では異なった水分量の坏土を使用して成形していることになる。この変化が、乾燥・焼成収縮の差や不良の原因となっていると考えられる。

(1) および (2) 式を (3) 式に代入すると、次式が導き出せる。

$$I = \frac{4.6m - h - 102}{1.5m - 26.4} \quad (4)$$

従って、坏土の凝集度は、坏土水分と坏土硬度から求められることがわかる。硬度を変数として凝集度と水分の関係を図-11に示した。例えば、水分が21.4mass%、硬度が18.0の坏土が得られたとする。これまでは、試行錯誤的に水分を低下させ硬度を19.0に調整していたが、図-11を用いれば、試行錯誤に頼ることなく適正水分21.1mass%を明確に求めることができる。またこれまでは不可能であったが、水分を21.4mass%一定に保ったまま、 $\text{MgCl}_2$ を添加し凝集度を0.68まで高めることで、硬度を19.0に調整可能であることがわかった。

坏土水分の調整は、フィルタープレスの絞り時間および絞り圧力を経験によって変えながら試行

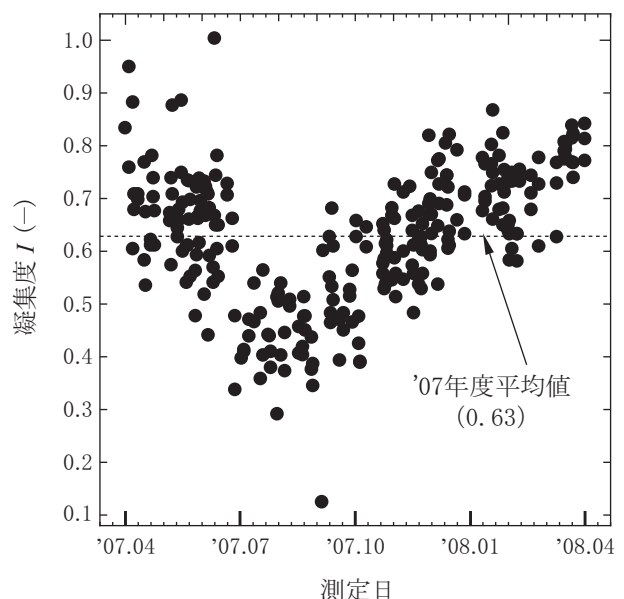


図-10 製造現場坏土の凝集度の推移図

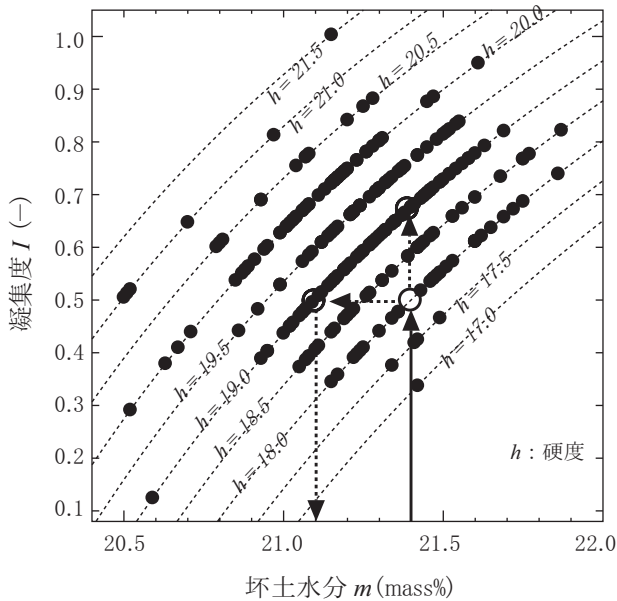


図-11 製造現場坏土の水分と凝集度の関係

錯誤的に行われるので、調整に時間がかかるだけでなく水分の精密な制御も難しい。また、坏土水分の増加は成形体の充填率を減少させ、乾燥収縮や焼成収縮が大きくなり、成形体内部に気孔を生成させる原因ともなるので、碍子品質を低下させることにつながる。しかし (4) 式が導出されたことで、最適水分が試行錯誤によらず決定できるようになっただけでなく、これまでできなかった水分一定のまま粒子凝集・分散状態を制御して硬度を調整することが可能となった。このことにより、製造時間の短縮のみならずガイシ品質の向上・安定化が期待される。

#### 4. 坏土の凝集・分散状態の季節変動の要因

製造現場で使用されるスラリーを調合する際、原料の投入順序や水・凝集剤、分散剤の投入タイミングなど、調合の手順は年間を通して変化しない。また、原料のロットが変更すると、原料の組成が若干変化し、原料の調合割合を調整する場合もあるが、最大でも1mass%程度調合率を変化させる程度で、調製されるスラリーの特性を変化させるほど調合率は変化させていない。また、原料のロット変更はランダムに発生するため、季節的な変動には関与していないと思われる。

スラリーを調製する際に、季節的に変動があるのは調製後のスラリー温度である。スラリーの原料は外気とほぼ同様の温度であるが、ボールミルで粉碎中に原料の粉碎に使用されなかったエネルギーが熱となり、スラリー温度を上昇させる。当

社のボールミル設備は地下に据え付けられているため、外気温の直接的な影響を受けにくいように設置されているが、ボールミル設備が発する熱により、地下の気温は、外気温よりも若干高く、約15℃から約35℃の間で変化する。その環境下で、粘土以外の原料を粉碎したスラリー（以下、原石スラリーと呼ぶ）は、冬季で約50℃、夏季で約70℃になる。原石スラリーの季節による温度差がスラリーの凝集・分散の季節変動を起こしていると考えられる。

そこで、加熱が及ぼす原石スラリーへの温度の影響を調査するため、11月に調製した原石スラリーを、70℃で4時間加熱処理し、加熱処理を行わなかったスラリーと流動曲線の比較を行った。その結果を図-12に示す。図から明らかなように、加熱処理を行わなかった原石スラリーよりも、加熱処理を行った原石スラリーの粘性が低下していることがわかる。原石スラリーの主成分は陶石であり、陶石は図-13に示すような原石を粉碎して使用している。図-13の色の濃い部分は酸化鉄であり、陶石には鉄が含まれている。また、3章の実

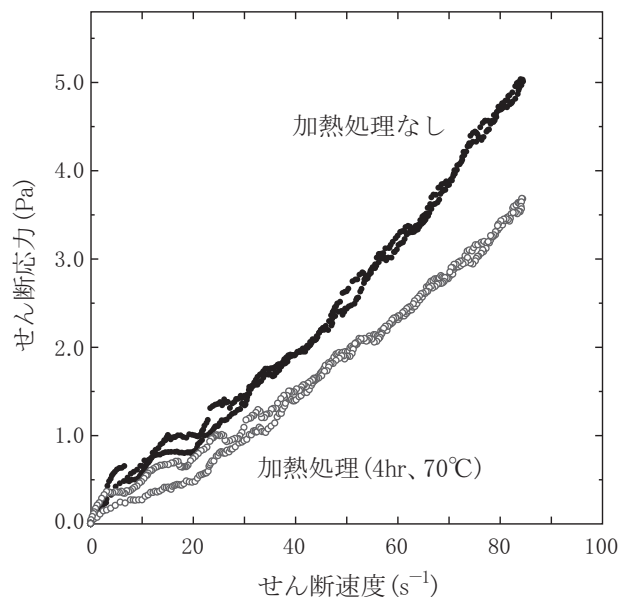


図-12 原石スラリーの加熱処理の有無による流動曲線の差異



図-13 陶石の一例（粉碎前）

験で、水ガラスを用いて分散させたスラリーをフィルタープレスで脱水した際、ろ液が黄色に着色していた。従って、スラリーの凝集・分散状態は、スラリー中に含まれる鉄イオンの影響を受けていると推察された。そこでスラリー中の鉄イオン濃度に着目し調査を行った。

ガイシ製造用スラリーの製造手順は、規定量の水をボールミルに満たした後、粘土以外の原料を投入し、十数時間かけて粉碎する。この間に原石スラリーの温度が上昇し、最高約70℃程度まで上昇する。その後2種の粘土スラリーを加えて、30分間混合し、ガイシ製造用スラリーとしている。粘土スラリーは外気温とほぼ同程度であるため、混合後のガイシ製造用スラリーの温度は、最高で約40℃程度まで低下する。従って、粘土スラリーは加熱による影響を受けにくいと思われるが、粘土スラリーにも鉄が含まれるため、原石スラリーおよび2種の粘土スラリーの加熱による影響を、スラリーの上澄み液中の鉄イオン濃度から検討した。

実験では、原石スラリーおよび2種の粘土スラリーを70℃で4時間加熱し、遠心分離機で粒子を沈降させ上澄み液を採取した。それぞれの上澄み液の鉄イオン濃度を測定した。測定結果を、表-1に示す。表から明らかのように、2種の粘土スラリーの鉄イオン濃度は加熱処理前後ではほぼ変化しないが、原石スラリーでは鉄イオン濃度が3倍以上になる。従って、スラリーの凝集・分散状態の変動は原石スラリー中の鉄イオン濃度変化が影響を及ぼしていることが明らかになった。すなわち、原石スラリーは、粉碎によって発生した新生表面から鉄イオンが溶出していると考えられるが、スラリー温度が高温になると、さらに鉄イオンの溶出が促進され、その結果、陶石粒子がより負に帯電し、粒子間に働く反発力が増加し、分散傾向に移行すると推察された。従って、原料粉碎時に高温になる夏季では、原石スラリーが分散傾向に移行し、それに伴いガイシ製造用スラリーも分散傾向に移行していると考えられる。その結果、夏季の坏土は分散傾向にあると考えられる。冬季の坏

土は、夏季の坏土と逆で、原石スラリー中の陶石粒子からの鉄イオン溶出が抑制されるため、夏季と比較すると凝集傾向にあると考えられる。

## 5. おわりに

セラミックスの成形工程で用いられる坏土の評価手法として、これまで硬度が用いられてきたが、坏土中の粒子凝集・分散状態は評価されていなかった。そこで、坏土の硬度と水分の関係から新たに凝集度を導入した。その結果、坏土は夏季には分散傾向に移行し、冬季には凝集傾向に移行することが判明した。

また、これまで試行錯誤で行ってきた坏土の硬度調節を、凝集度を用いることにより、凝集剤の量を制御して、理論的に硬度を変更することができるようになった。

坏土中粒子の凝集・分散傾向の季節変動の要因は、坏土を作製する成形工程ではなく、スラリー調製工程にあると考えた。スラリー調製工程の中で季節変動は、スラリーの温度であること、また、水ガラスを加えたガイシ製造用スラリーのろ液が黄色く着色することから、鉄イオンが影響していると考え調査を行った。その結果、原石スラリー中の陶石が加熱されることにより、鉄イオンの溶出が促進され、夏季にはスラリーが分散傾向に移行し、強いては坏土が分散傾向に移行していると推察された。

## 参考文献

- 1) 木村 隆俊、中後 浩一郎、仮屋 弘、森 隆昌、椿 淳一郎：“磚子製造用坏土の可塑性最適化に関する研究” 粉体工学会誌、47(8)、p. 539-544
- 2) 木村 隆俊、中後 浩一郎、仮屋 弘、森 隆昌、椿 淳一郎：“磚子製造用坏土中粒子の集合状態における季節変動” 粉体工学会誌、47(10)、p. 692-696

表-1 3種スラリーの加熱による鉄イオン濃度の変化

スラリー	鉄イオン濃度 (mg/L)		加熱効果
	加熱処理なし	加熱処理あり	
原石スラリー	0.07	0.23	3.3
A 粘度スラリー	0.16	0.14	0.9
B 粘度スラリー	0.09	0.08	0.9



木村 隆俊  
株式会社日本ネットワークサポート 佐野工場  
 成形グループ マネジャー

〒598-0045 大阪府泉佐野市松原3丁目4番38号  
 TEL: 070-6543-7524 FAX: 072-464-4561  
 E-mail: takatosi-kimura@nnets.co.jp