

マイクロ波による陶磁器素地の乾燥

長谷川龍三 福永 均 松下 福三 中村 雅光

Microwave Drying on Ceramic Bodies

by

Ryuzo HASEGAWA, Hitoshi FUKUNAGA,

Fukuzo MATSUSHITA and Masamitsu NAKAMURA

陶磁器の成形体は急乾燥すると、切れ、変形などの欠点を生ずる。これは通常の温風乾燥では、素地の表面乾燥が先行するためである。そこで素地内部の乾燥を促進するため、マイクロ波(M波)による迅速乾燥を検討した。素地厚さと照射条件を変え、それに伴う素地温度の上昇状況や、素地の水分分布、乾燥速度などを測定し、M波乾燥の効果を調べた。その結果、M波は素地内部の加熱に極めて効果的で、恒率乾燥速度を $1.3 \text{ g/g} \cdot \text{h}$ に高めることができ、迅速乾燥が可能であった。また、限界含水率も温風乾燥で 12% の素地を、8% 以下に下げることができ、乾燥が非常に容易であった。

1. まえがき

マイクロ波(M波)は、金属に当たると反射するが、陶磁器などの誘電体では、その物質の中を伝播する。そして、M波は物質中の分子を振動させ、この分子運動により摩擦熱が生じる。この加熱方式は、一般の外部からの熱伝導に依存する加熱乾燥と異り、物質自体が発熱体となるため、熱効率が良いこと、物質内部温度の上昇が早いことなどの特徴を持つ。これは、陶磁器の乾燥に興味ある性質である。

陶磁器工業において、乾燥は重要な工程であり特に肉厚素地では問題が多くなる。すなわち、一般の温風乾燥方式では、素地表面と内部との乾燥速度の差で素地に収縮差を生じ、乾燥切れの原因となるため、乾燥時間の短縮に妨げとなっている。

本研究では、素地にM波を照射し、内部加熱方式を導入することにより、素地乾燥の迅速化を検討した。

2. 試験方法

2.1 試験体の作製

M波乾燥に供する試験体は、含水率 26% で真空押出成形したレンガ素地を、長手方向に目的に応じ厚みを変え切断し作製した。また原料の差異によるM波乾燥の影響は、原料をそれぞれ変え、常

法により $150 \times 25 \times 20 \text{ mm}$ の大きさに練土成形した。

2.2 試験装置

M波乾燥装置の概要は、内寸法 $600 \times 600 \times 600 \text{ mm}$ 、M波発振周波数 2450 MHz、発振器最大出力 1.5 Kw で、加電圧調整により出力可変になっている。M波の照射は、導波管により 2 方向に分岐し、上下方向から照射できる。さらにスターラーファンの回転により、M波が散乱し照射は均一になる。また、吐出ファンにより乾燥器内の水蒸気が除去できる。さらに温風ファンにより、槽内温度は 60°C まで加熱できる。

2.3 測定方法

試験体の重量変化は、乾燥器上部に電子天秤を置き、上部にあけた空孔に通じたひもを介して吊るした試料台に試験体を置き、乾燥に伴う重量変化をプリントアウトさせた。この値から、必要に応じ含水率、乾燥速度などを算出した。

試験体の切れ発生状況は、一定時間毎、あるいは試験終了後、試験体を取り出し、外観検査により判定した。試験体内部の水分分布は、M波照射一定時間後、試験体を細分化させ、個々の場所の含水率から求めた。試験体内部の温度分布は、測定の都度M波照射を中断し、シース熱電対により測定した。

3. 試験結果及び考察

3.1 M波照射による乾燥挙動

M波照射したときの素地の乾燥挙動の1例を図1に示す。これは含水率26.6%、厚さ15mm、質量827gのレンガ素地に、1150WのM波を連結照射したときの状況である。

図1-1は、乾燥による含水率の経時変化を示した。この例では、最初の2~3分を経過すると、蒸発量はほぼ一定となり、11分過ぎから蒸発量は漸次減少し、15分を過ぎると蒸発速度は大幅に遅くなっている。

図1-2は、図1-1の結果をもとに乾燥特性曲線を求めたものである。この曲線のパターンは、通常の温風乾燥の場合とほとんど同じで、含水率が8%位になるまでが恒率乾燥であり、それ以降、減率乾燥に移行する。温風乾燥の限界含水率が12%位なのに比し、M波乾燥では限界含水率は低水分側に大きく移行する。また恒率期の乾燥速度は、 $1.3 \text{ g/g}\cdot\text{h}$ で、非常に大きな値を示している。この結果からM波乾燥の効率性が分る。

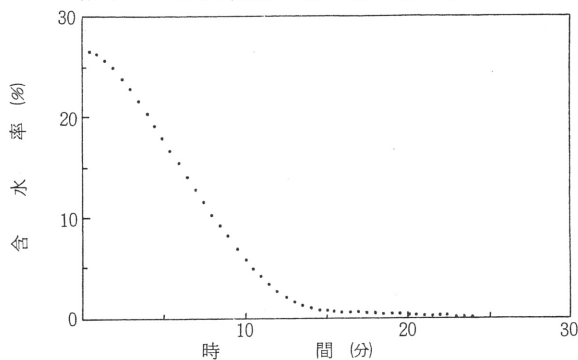


図1-1 M波照射における含水率の経時変化

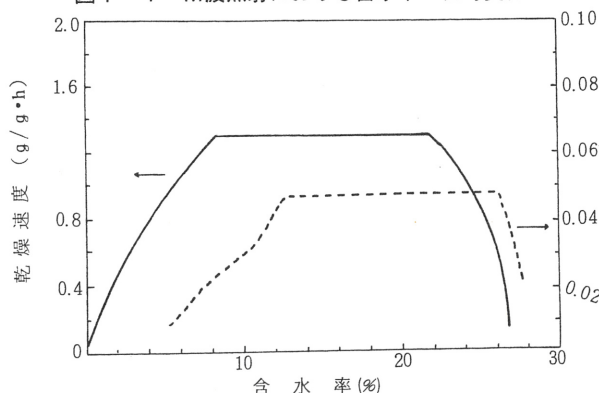


図1-2 乾燥特性曲線

— M波乾燥
- - - 60°C温風乾燥

図2は厚さを変えて作製したレンガ素地が、含水率5%になるまでに要するM波照射時間を示したものである。素地厚さが大きくなるにつれて、蒸発に必要な水分量が多くなるので、図に示すように、肉厚になるに従って長時間を要するようになる。

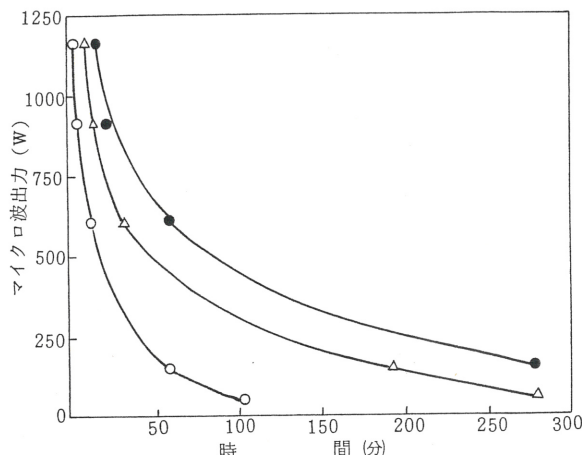


図2 含水率5%になるまでの乾燥時間

○ 厚さ 5mm
△ " 15mm
● " 25mm

3.2 M波乾燥中の素地内部の水分分布

乾燥切れや乾燥ひずみ、変形などのない理想的なM波照射条件を把握するため、M波乾燥中の素地内部の水分分布を調べた。図3にM波乾燥したときの水平方向の素地の水分分布を示す。これは厚さ20mmのレンガ素地に、出力150Wの比較的弱いM波を照射し、約3時間かけて乾燥したときの状況である。出発時点ではほとんど水分差のない

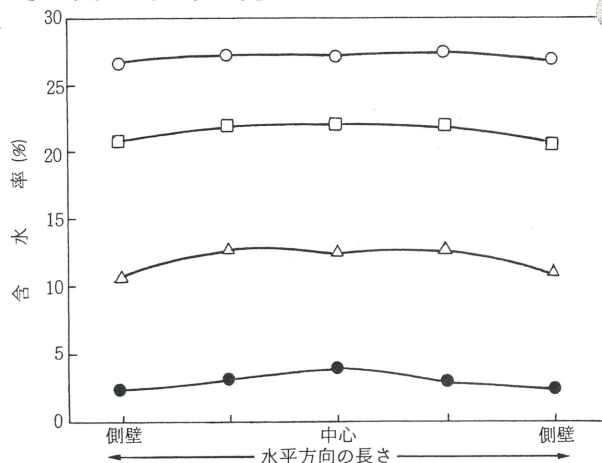


図3 M波乾燥期中の素地断面の水分分布

○ 0分値
□ 30分値
△ 90分値
● 180分値

かった中心部と側壁部の水分差が、恒率乾燥期になると側壁部の乾燥が先行し、中心部との水分差は常に2%ほどある。この状態は限界含水付近まで継続し、それ以降も中心部の水分が高く、周辺に向かって漸次低水分になっている。この状況は、素地内部から加熱されるM波乾燥であっても、通常の温風乾燥とあまり変りない水分分布の挙動である。

3.3 素地温度と乾燥速度

前項では素地内部の水平方向の乾燥の差異について記した。ここでは、M波を照射したときの素地表面と内部の温度差及びその時の乾燥速度との関係について検討し、通常の温風乾燥との比較を行った。温度計測は、当初はシース熱電対を埋め込み連続測定することを試みたが、絶縁方式を工夫しても、M波の影響を受け、局部加熱が生じるので、ここでは3分毎にM波照射を中断し、計測する方式をとった。

図4-1は、素地厚さ20mmのレンガ素地を、温度60℃、相対湿度40%の雰囲気中で温風乾燥した

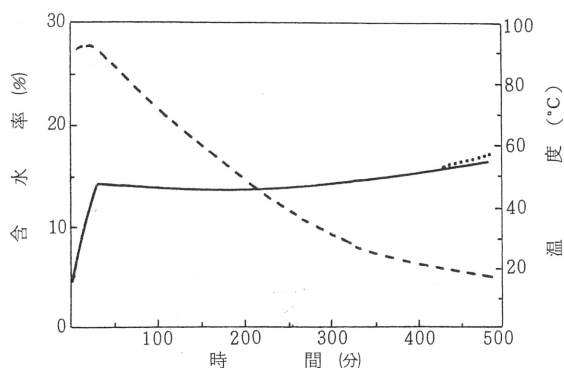


図4-1 含水率と素地温度（温風乾燥）

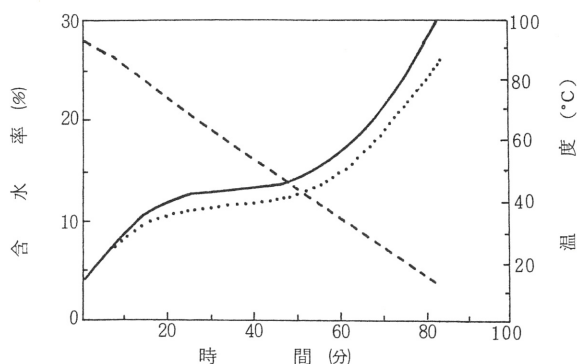


図4-2 含水率と素地温度（M波乾燥）

----- 含水率
————— 内部温度
..... 表面温度

ときの例である。素地温度は、表面、中心とも差はほとんどなく、ほぼ30分間で一定温度になる。この温度は雰囲気温度でなく、温湿度計の湿球温度に近い。この状態が恒率乾燥期の間つづく。減率乾燥期に入ると、徐々に素地温度も雰囲気温度に近づく。8時間ほどかかって含水率5%程度に乾燥する。

図4-2は、同じ素地を出力600WでM波乾燥した例である。この場合は恒率乾燥期が長く継続し、その結果として限界含水率は7%前後の値を示す。これは通常の温風乾燥で約12%であるのに比し、非常に小さな値である。このように恒率乾燥期間が長く継続するのは、素地温度の上昇曲線で分るように、一定温度で停滞することなく連続的に温度上昇が続くためである。しかも内部乾燥の遅れ勝ちな乾燥後期になると、内部温度がはるかに表面温度より高くなり、内部水分の移動を容易にしている。約1時間で含水率5%以下になる。含水率が低下してくるとM波の出力が一定の場合、M波吸収が集中するため、素地温度の上昇が急激になり、含水率2%以下になると素地温度は100℃を越え、蒸気圧が高まり、2時間以内に完全乾燥する。

3.4 M波照射と乾燥切れ

M波乾燥したときに素地に生じる切れの発生状況を表1に示す。低出力の場合、ほとんど切れは生じないが、高出力になると厚さにあまり関係なく切れが発生するようになる。この乾燥切れは、乾燥初期に発生するものと、終期に発生するものと大きく分類される。

含水率25%程度の初期の乾燥切れは、試験体の側面にたて方向に細く1～2本入る。これは、初期加熱により局部的に温度上昇した部分が僅かに膨張することと、脱水により収縮する部分との間

表1 M波乾燥の素地の状況

厚さ(mm)	出力(W)	50	150	600	900	1,150
5		O	O	A	A	A
10		O	O	A	A	AB
15		O	O	A	AB	AB
20		O	O	A	AB	AB
25		O	O	AB	AB	AB

A 初期乾燥切れ
B 終期乾燥切れ

O 乾燥切れなし

に、素地のひずみを生じ、その結果として微細な亀裂が入る。この亀裂は、それほど多数発生することはないが、素地のうち応力が最も集中しやすい部分、つまり素地のうち最も弱い部分に発生する。そのため乾燥初期の加熱はゆるやかに行う必要性がある。

含水率5%以下の乾燥終期のトラブルは、肉厚素地ほど発生しやすく、表面剝離、爆発などの現象を生じる。これは素地収縮が完了して後に生じるもので、水分蒸発に必要な毛細管がほとんど収縮で閉鎖されているため、温度の急上昇で内部水分の蒸気圧が高くなり、素地爆発を生じるものである。この対策として、乾燥終期も、ゆるやかな乾燥条件にする必要がある。

このようにM波乾燥においても、乾燥速度が早過ぎると、切れとか素地爆発を生じることになる。従って各材料の乾燥速度を把握し、M波照射の出力制御が必要になってくる。この限界乾燥速度は素地の組成や形状により異なるので、個々の原料毎に実測する必要がある。

図5にM波乾燥における原料の種類による限界乾燥速度の相異を示した。陶石やカオリン質粘土は、乾燥速度がかなり早くても、乾燥切れなどの不良は生じなく、M波による急乾燥が可能なことを示している。一方、モンモリロナイトを含む粘土では、かなりゆっくりした条件でないと乾燥でのトラブルが生じる。このことは、通常の温風乾燥の場合と類似している。

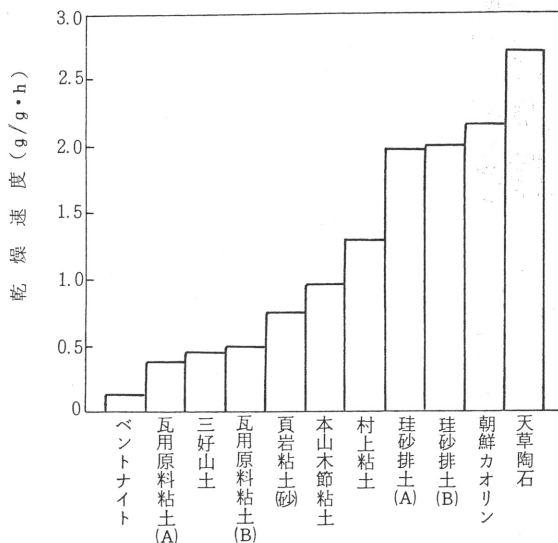


図5 限界乾燥速度

3.5 M波の最適乾燥条件

以上の実験結果から、M波で効率良く乾燥するには、初期と終期の乾燥をゆるやかにすること及び、恒率乾燥期間を長く継続させ、限界含水率の値をできるだけ小さくすればよいことが分った。このことを考慮し、照射条件を変えた乾燥試験を行った。

図6は厚さ20mm、含水率27%の素地を対象に実施した実験例である。含水率25%になるまで約30分間150W照射した。恒率乾燥期に入ると、パワーを少し上げ350Wにし、70分間照射すると、素地表面色は白っぽくなって来る。素地内部の含水率はまだ15%くらいあり、水分分布の差が生じるので、さらに600W照射に切替えた。このことにより内部温度が上昇し、乾燥が円滑に促進され、限界含水率は6~7%に低下する。この限界含水率をさらに低下させるには、M波照射を強めればよいが、3.4項で述べたように、素地内部の蒸気圧が高まり、素地が爆発する恐れがある。素地含水率が2%以下になると、素地温度は100℃を越え、約3時間で完全乾燥する。なお、この温度付近になると素地温度が高いため、M波照射を中断することができる。

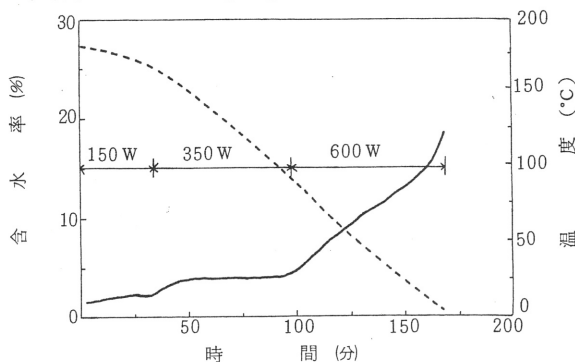


図6 M波最適乾燥曲線

--- 含水率
— 温度

4. まとめ

M波による陶磁器素地の乾燥を検討した。M波は素地内部から加熱するため、内部水分の脱水が容易になり恒率乾燥期を長く継続させることができる。そのため限界含水率を小さな値にすることができ、迅速な乾燥が達成できることが分った。

M波照射強度の制御は容易なので、素地の形状

材質などに合せて、素地温度をコントロールすれば、乾燥切れなど欠点のない良好な乾燥が短時間に達成できる。厚さ 20 mm 程度の素地では、約 3 時間で完全乾燥する。

M波は被加熱物に集中するので、エネルギーロ

スが少なく効率的な乾燥方式である。しかしさらに経済性を追究し省エネルギーを図るには、窯の排熱などを利用した温風乾燥を併用するとよい。特に乾燥の後期は適当な熱源があれば、M波照射は必要としない。