

排泥鑄込みにおける成形技術の研究

嘉村 翔太郎、蒲地 伸明、関戸 正信
佐賀県窯業技術センター

排泥鑄込みとは、石こう型に泥しょうと呼ばれる陶土のスラリーを流し込み、一定時間保持し、残った泥しょうを流しだした後、石こう型に残った生地を乾燥させることで成形する伝統的な成形技法のひとつである。これは複雑な非回転体も成形できる方法で、現在もよく用いられている。しかしながら、この方法は解決すべき課題が残っているが、近年、化粧品などのガラスやプラスチック容器の代替として磁器の需要が高まっている。このような小型形状の製品は、排泥が難しく、また工業製品レベルの製品はより高い精度や内容量が求められる。本研究では排泥鑄込みについて成形の条件を検討することで現在抱えている課題を解決し、安定した量産技術の確立を目指した。

キーワード: 排泥鑄込み、圧力鑄込み、石こう型、陶磁器成形技術

Research on molding technology for drain casting

KAMURA Shotaro, KAMOCHI Nobuaki, SEKIDO Masanobu
Saga Ceramics Research Laboratory

Drain casting is one of the traditional molding methods, in which a slurry of ceramic clay called “Deisho” is poured into a plaster mold, held for a certain period of time, and the remaining slurry is poured out, followed by drying of the remaining dough in the plaster mold. This method can mold complex non-rotatable objects and is still commonly used today. However, this method still has issues that need to be resolved. In recent years, there has been a growing demand for porcelain as an alternative to glass and plastic containers for cosmetics and other products. Such small-shaped products are difficult to drain a slurry, and industrial - level products require higher precision and content. This study aimed to solve the current problems by examining the molding conditions for drain casting, and to establish a stable mass production technology.

Key Words: Drain casting, Pressure casting, Plaster mold, Ceramic Manufacturing Technology

1. はじめに

排泥鑄込みとは、割型と呼ばれる石こう型に泥しょうと呼ばれる陶土のスラリーを流し込み、一定時間保持したのち残った泥しょうを流しだした後、石こう型に残った生地を乾燥させることで成形する伝統的な成形技法のひとつである。この方法は、圧力鑄込みでは成形が難しい袋物や、ろくろやローラーマシンでは難しい複雑な非回転体も成形でき、徳利や急須などの量産に適している。排泥鑄込みは現在もよく用いられている成形方法の一つであるが、解決すべき課題がいくつかある。一つ目に、生地の厚みは鑄込み時間に依存するが、制御因子があいまいなこと。二つ目に、石こう型の一日の使用回数には限度があること。三つ目に、排泥鑄込みを行う企業や技術者が減少していること。四つ目に、この技法について、量産の観

点からの研究は少なく、関連するデータも少ないため、経験則に頼った量産となっており、トラブル時に迅速な対応が難しいこと、以上の点が挙げられる。こういった課題がある一方で、近年、化粧品などのガラス、プラスチック容器の代替として磁器容器の需要が高まっている。化粧品容器のような小型のボトルは排泥鑄込みで成形する必要があるが、口径が小さいため排泥が難しく、高い精度の形状や内容量の製品の量産は高難度である。また、このような用途では年間数万個レベルの生産数が求められるが、これらの条件をすべて満たすのは難しく、対応できる余裕がないのが現状である。本研究ではこの排泥鑄込みについて、いくつかの成形条件について検討することで上記課題を解決し、安定した量産技術の確立を目指した。

2. 実験方法

本研究において、試験に使用した陶土は肥前地区で一般的に用いられている天草陶土の撰上クラスを使用した。

2.1 基礎的な泥しょうの粘度

泥しょうは陶土に適量の水と分散剤を添加して調製する。泥しょうは含水量に応じて力学的挙動が変化する¹⁾。基本的に泥しょうの粘度は含水量が多くなるにつれて低下していくが、使用する分散剤の影響も受ける。この影響を再確認するため、肥前地区でよく用いられている分散剤の水ガラス1号($\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$)及び水ガラス3号($\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{SiO}_2$)を0.2wt%添加し含水量を28、30、32%の条件下になるように調製し粘度の測定を行った。

2.2 調泥条件と鑄込み時間、生地重量

陶土の着肉と泥しょうの分散状態には大きな関連性があるため、本実験の泥しょうについて検証することとした。使用する泥しょうは3種類の含水量(27、30、33%)になるように加水し2種類の分散剤(水ガラス1号、3号)を0.2wt%になるように添加して調製した。図1の広口瓶形状の石こう型(内径φ60mm、外径φ100mm、H100mm)に流し込んで生地を成形した。生地を完全に乾燥させた後、重量を測定した。



図1 石こう型(上)と成形生地(下).
(内径φ60mm、外形φ100mm、H100mm)

2.3 泥しょうの含水率と生地の収縮率

泥しょうの含水率と生地の収縮率の関係を調べるため、分散剤(水ガラス1号)を0.2wt%になるように加え、含水率27~33%調製した泥しょうを図1の石こう型に流し込み、排泥するまでの時間を10分としてテストピースを成形し、サイズを測定した。

2.4 石こうの物性試験

成形した生地は泥しょうの調製条件だけではなく、使用する石こう型の作製条件とも大きな関わりがある。石こうの作製条件とは、主に成形前の粉末焼石こうの種類や使用する水の温度、混水率、攪拌時間である。今回は混水率に着目して物性試験を行うこととした。使用する石こうはサンエス石膏A級を用い、一般的な圧力鑄込み用の型が混水率60%、鑄込み用の型は混水率90%前後で作製されていることから、水温は20℃、混水率は50~100%、攪拌時間は8分とし、成型した石こう型を、40℃の乾燥機で48時間乾燥させたのち物性試験が可能なサイズに加工して、自動水銀ポロシメータ(Micromeritics 製 AutoPoreIV)と卓上精密万能材料試験機(島津製作所製 autograph AG-X10kN)を用いて細孔分布と圧縮強度の測定を行った。

2.5 石こう型の混水率と生地重量

生地に与える石こう型の気孔特性の影響を確認するため、図2の形状の石こうを50、60、70、80、90、100%の混水率で成型した。使用した泥しょうは、含水量30%で分散剤として水ガラス1号を0.2wt%添加して調製し、鑄込み時間10分の条件で6種の石こう型それぞれ5つつつ生地を成形し乾燥後重量を測定した。



図2 作製した石こう型(左)と成形生地(右).

2.6 石こう型の使用回数に伴う劣化の確認

排泥鑄込みにおいて、石こう型表面は泥しょうとの反応など様々な原因により劣化し²⁾、生地と石こう型の離形性が悪くなることが報告されている³⁾。この影響を確認するために、10回未満、50回使用、200回使用後の図1の広口瓶形状の型を用意した。石こう型はその吸水性によって成形を行うたびに一定量の水分が型内部に残留する。一般的な生地製造業者では1日に3回程度の使用が限度とされている。このため、本試験ではそれぞれの型につき4回連続で成形を行い、生地が自然に離型するまでの時間について評価した。次に、石こう表面の劣化状態を確認するため、今回用いた3種の石こう型(10回未満、50回使用、200回使用後)について、走査電子顕微鏡(JEOL製、JSM-7900F)を用いて表面状態を確認した。さらに表面の粗さを確認するため、白色干渉3D変位計(KEYENCE製WI-5000)を使用して面粗さを評価した。また、石こうは泥しょうに使用されている水ガラス中のナトリウムと反応し表面で硫酸ナトリウム(芒硝)を形成する²⁾。このような成分の変化を確認するため、型表面の泥しょうと接する面を削り取り、粉末状にしたのち波長分散型蛍光X線分析装置(Rigaku製、ZSX Primus II)を用いてFP法による半定量分析を実施し、使用回数による型の表面組成の変化を比較した。

3. 結果と考察

3.1 基礎的な泥しょうの粘度

水ガラス1号、水ガラス3号を使用した泥しょうから得られた粘度曲線をそれぞれ図3、図4に示す。

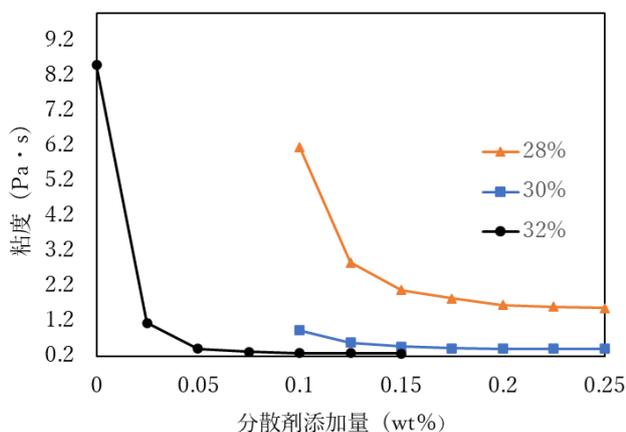


図3 水ガラス1号を使用した泥しょうの粘度曲線

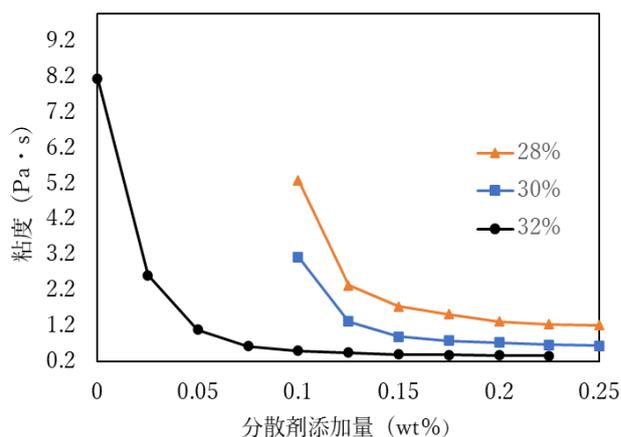


図4 水ガラス3号を使用した泥しょうの粘度曲線

含水率が28、30%の泥しょうについて、初期状態では粘度が高く測定できなかつたため、0.1wt%の水ガラスを添加した状態から測定を開始している。含水率が高くなると粘度も下がる傾向にあることがわかるが、水ガラス1号と3号では1号の方が粘度が低いことがわかった。これは組成を見てもわかる通り水ガラス1号の方がアルカリ成分(Na^+ イオン)の割合が高いためと考えられる。

3.2 調泥条件と鑄込み時間、生地重量

成形生地の乾燥重量と鑄込み時間の関係を図5に示す。図より、試験を行った鑄込み時間の範囲内では基本的に時間が増加するにつれて重量も増加していく結果となった。厚みについても同様の結果が得られることから、実際に製品を作製する際にターゲットとなる厚みを目指すためには、調泥条件、生地重量と鑄込み時間のデータを取っておけば厚みをコントロールできる。

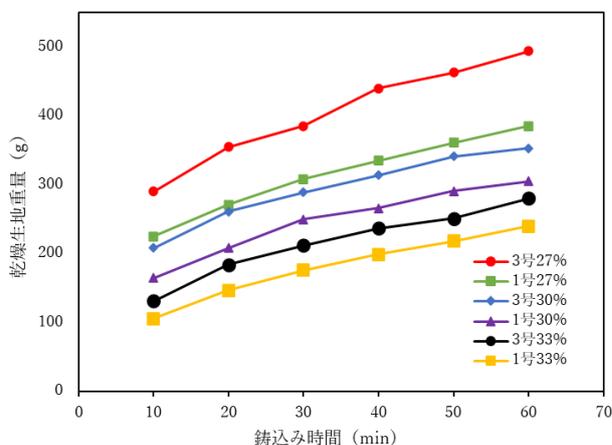


図5 泥しょうの種類と鑄込み時間、生地重量の関係

3.3 泥しよの含水率と生地収縮率

収縮率は縦方向と横方向で異なり、縦方向の収縮は重力の影響を受けるため横方向の収縮率の数値を用いた。その結果を図6に示す。

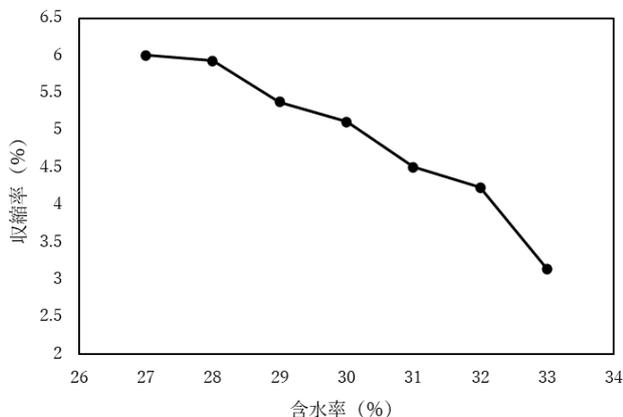


図6 泥しよの含水率と生地収縮率の関係。
(分散剤:水ガラス1号 0.2wt%)

含水率が高くなるほど収縮率が小さくなる傾向が確認できた。圧力鑄込み成形においては含水率が低いほうが製品重量が重くなり、生地密度が高くなるが⁴⁾排泥鑄込みでは逆の結果となった。これは含水率が高いと十分に陶土粒子が分散して移動しやすくなり、密な状態でパッキングしながら固化していくためだと考えられる。

3.4 石こうの物性試験

各種物性について表1に示す。混水率50%未満では石こうの流動性が低く反応も悪くなり、テストピースを作成できなかったため、50~100%を試料とした。混水率が増加するにつれて細孔容積は大きく、比表面積は小さく、平均細孔径は大きく、気孔率は高く、かさ密度は低く、圧縮強度は低下する傾向が確認できた。

3.5 石こう型の混水率と生地重量

混水率を変えて作成した石こう型で成形した生地の乾燥重量を図7に示す。

混水率が高い石こう型ほど気孔率は高い傾向があったが、生地重量は低下した。石こうは毛細管現象によって水分が移動するが、気孔径が小さくなるほど水分移動が速くなる⁷⁾ためこの結果になったと考えられ、気孔率よりも気孔径が着肉に大きな影響を与えることが確認できた。

表1 作製した石こう型の物性表

混水率(%)	50	60	70	80	90	100
全細孔容積 (cm ³ /g)	0.49	0.58	0.68	0.74	0.88	0.97
全細孔比表面積 (m ² /g)	10.7	9.0	8.7	7.7	8.1	6.8
平均細孔径 (μm)	0.18	0.26	0.31	0.38	0.43	0.57
かさ密度 (g/cm ³)	1.12	1.02	0.93	0.86	0.78	0.69
見かけ密度 (g/cm ³)	2.51	2.54	2.53	2.34	2.53	2.06
気孔率(%)	55.2	59.8	63.2	63.5	68.9	66.7
圧縮強度 (MPa)	17.72	12.06	9.48	7.93	7.14	5.99

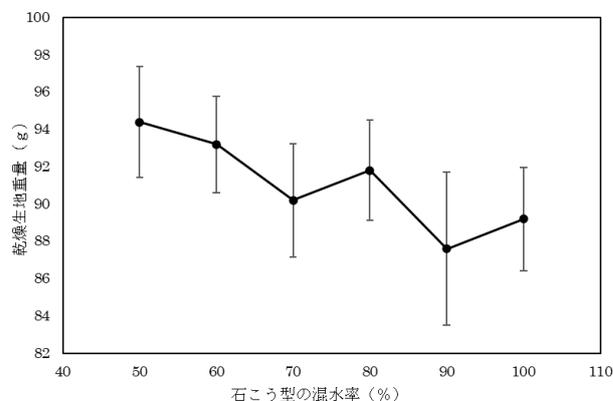


図7 石こう型の混水率と乾燥生地重量の関係

3.6 石こう型の使用回数に伴う劣化の確認

鑄込み回数とその際の生地の脱型までにかかった時間をプロットしたものを図8に示す。鑄込み回数が増えても、成形生地への重量の変化はなかったが、離型時間は著しく増加した。特に2回目以降は脱型までに倍以上の時間を要しており、過度に使用された型は生産性を大きく低下させることが明らかになった。

次にそれぞれの石こう型の表面状態について、SEMによって撮影した2000倍の画像を図9に示す。使用回数が

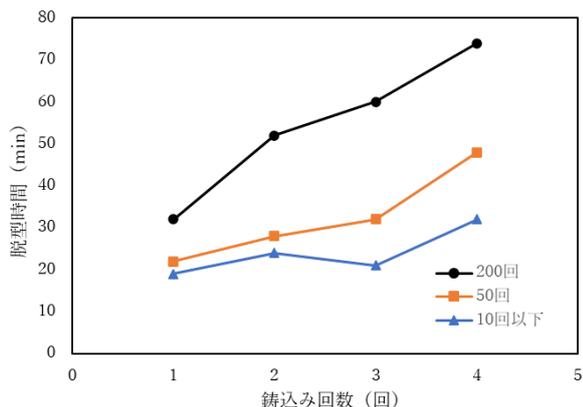


図8 石こう型の鑄込み回数と生地脱型時間の関係。

少ない石こう型の表面は、粒子が固まり大きい塊が多く見え、大きい孔も少ない。しかし 200 回使用した石こう型の SEM 像を見ると、針状の粒子が多くみられ、大きいものだと $100\mu\text{m}$ ほどの孔も確認された。また、10 回未満の画像でみられたような表面の塊はほとんど見られなかった。これは石こう表面が使用回数を重ねるごとに摩耗や水溶によって少しずつ溶けた結果だと考えられる。使用回数が多い石こう型を用いた生地の離型時間が著しく増加するのは、この大きい孔に泥しよの陶土粒子が噛み合うことが原因ではないかと考えられる。また、白色干渉 3D 変位計による面粗さ測定結果を表 2 に示す。算術平均高さ (S_a (μm)) は面粗さを評価する指標で、数値が大きいほどより面が粗くなる。測定結果からも石こうの使用回数が増えるにつれて表面が粗くなっていることが確認できた。

最後に、PF 法による半定量分析によって得られた結果を表 3 に示す。10 回未満使用した石こう型と 200 回使用

表 2 複数回使用した石こう型の算術平均高さ。

鑄込み回数	算術平均高さ S_a (μm)
10 回未満	6.28
50 回	9.73
200 回	12.33

表 3 石こう型の定性分析結果 (mass%)

試料名	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	C	SO_3	Cl	SrO	P_2O_5
10 回未満	0.322	0.193	0.0183	44.8	0.0159	0.0263	0.0256	0.914	53.6	0.0239	0.0804	-
50 回	0.424	0.192	0.0144	44.7	0.0465	0.223	0.0791	0.978	53.2	-	0.0835	0.0485
200 回	0.512	0.252	0.0156	45.6	0.0450	0.171	0.0701	0.957	51.8	0.0105	0.0777	0.0856

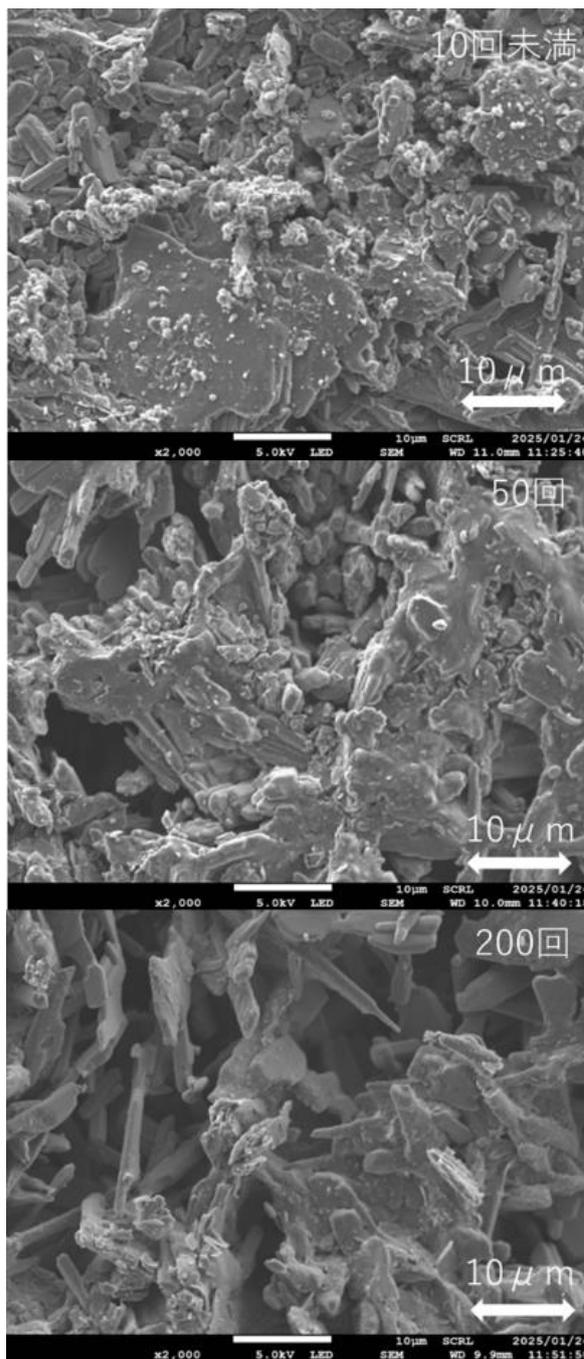


図9 各石こう型の SEM 像 ($\times 2000$ 倍)。

した型表面成分の大きな違いとして、 Na_2O 、 MgO 、 SiO_2 、 K_2O の増加がみられ、これらは水ガラスや陶土由来の成分の型表面への蓄積によるものだと考えられる。一方で50回使用した型と200回使用した型では Na_2O が減少しており、こちらの要因については現在確認中である。

4. まとめ

本研究では、排泥鑄込みに関する各項目について改めて詳細な確認を実施した。結果、含水率の高い泥しょうが生地収縮率が小さくなることや、石膏型成型時の混水率が低いほうが生地重量が重くなる等、新たな知見を得ることができた。これらの知見を実際の作業に生かすことで成形技術や歩留まりの向上に寄与すると考えられる。しかし、今回の試験で取り扱った陶土は天草陶土(撰上)のみである。天草陶土の中でも鉄の含有量などで泥しょうの挙動が大きく変わることがわかっており、また肥前地区は天草陶土だけでなく、さまざまな陶土を用いて製品の製造がされているため、今後は様々な形状や、天草陶土の撰下クラス、その他の各種陶土について検証していく予定である。

参考文献

- 1) 梅屋薫, 泥漿鑄込みに関する二三の問題, 「材料試験」, 第4巻第22号, 195-200(1955).
- 2) 奥田進, 石膏型の損耗機構白華現象について, 「石膏」, 巻4号, 183-186 (1952).
- 3) 河島千尋, 奥田進, 陶磁器流込用石膏型の損耗機構に関する一考察, 「石膏」巻5号, 236-240(1952).
- 4) 蒲地 伸明, 山崎加奈, 佐賀県窯業技術センター平成29年度研究・支援事業報告書, 4-7(2018).