

素木 洋一 著

セラミック 製造プロセス



技報堂出版株式会社

81.53
461
=2

素木 洋一 著

セラミック 製造プロセス



陈...
2005/25

技報堂出版株式会社

著者略歴

大正3年 東京に生る
昭和15年 東京工業大学卒業
昭和50年 東京工業大学名誉教授
現在 東京芸術大学講師（非常勤）工学博士
著書 焼結セラミック詳論1 釉とその顔料（技報堂出版）
、わかりやすい工業用陶磁器（技報堂出版）
、図解工芸用陶磁器（技報堂出版）、セラミックス手帳（技報堂出版）
、陶芸のための科学（建設総合資料社）、焼結セラミック詳論2 建築用セラミック材料（技報堂出版）
、焼結セラミック詳論3 築が用セラミック材料（技報堂出版）
、セラミックスの実際知識（東洋経済新報社）
、焼結セラミック詳論4 ファインセラミックス（技報堂出版）
、セラミック製造プロセス I（技報堂出版）
その他

セラミック製造プロセス II

定価 4,000円

昭和53年12月25日 1版1刷 発行

3058-15040-1419

検印廃止

© 著者 素木 洋一
発行者 大濱 亮一
発行所 技報堂出版株式会社



日本書籍出版協会会員
自然科学書協会会員
工学書協会会員

〒107 東京都港区赤坂 1-11-41 第1興和ビル
電話 販売 (03) (585) 0166
編集 (03) (584) 4784~6
振替口座 東京 4-10番

落丁・乱丁はお取替えいたします

印刷 秀英堂社 製本 清澄製本

ま え が き

セラミックスには適正な価格で同じ精度で造られ、同じ性質を示し、しかも使用に当ってはできるだけ長期にわたって耐久性を示すことが要求されている。製品としては目的に応じた各種各様の形状や組織などをもっていることが必要であり、このために製造工程も多岐にわたっている。

製品の種類、性質、用途については既に「焼結セラミック詳論、1, 2, 3, 4」に詳細な説明を行なったが、「釉とその顔料」以外では製造工程について大部分を省略した。

セラミックスは coarse ceramics から fine ceramics へと進歩し、最近ではさらに ultrafine-grain ceramics の時代に入り、微構造と性質との関係が解明されるにつれて製造工程上の問題がとくに重要視されてきている。このため最近になって多くの講習会でセラミック製造プロセスについての問題が取上げられ、講義の依頼が多く、その都度私自身の今日までの経験や内外の多くの工場で実際に勉強させて頂いた成果を骨子として系統だてて一書にまとめておきたいと心掛けてきた。

技報堂出版株式会社の大濱亮一社長はこの計画に賛同され、出版を快く引受けて頂くことができた。深く感謝している次第である。本書のレイアウトからやっかいな校正の仕事までのすべての業務を遂行された編集部の鈴木敏行氏にも御礼を申し上げたい。

昭和53年9月

素 木 洋 一

第Ⅱ巻の刊行にあたって

セラミック製造プロセスは3巻から成る。第Ⅰ巻と第Ⅲ巻の主な内容は次のようである。

第Ⅰ巻

第1章 セラミック製造プロセス概要

- 1.1 セラミックスの均一性を支配する要因
- 1.2 セラミックス製造の目的
- 1.3 間接的製造工程
- 1.4 セラミックスの不均一性で見掛け上の性質
- 1.5 表面加工の問題
- 1.6 セラミック原料に及ぼす熱の作用

第2章 成形助剤と成形用補助材料

- 2.1 概 要
- 2.2 水
- 2.3 解膠剤と凝膠剤
- 2.4 有機結合剤
- 2.5 潤滑剤
- 2.6 合成表面活性剤
- 2.7 粉碎助剤
- 2.8 乾燥助剤
- 2.9 可燃性物質と発泡剤
- 2.10 石膏型
- 2.11 透過性成型型
- 2.12 ポリ塩化ビニールおよびその他の合成屈撓性物質型
- 2.13 押出しおよび加圧成型用型
- 2.14 機械装置部品としての鋼と鉄

第3章 セラミック素地の粉碎と汙過

- 3.1 粗砕と粉碎
- 3.2 泥漿の混合と脱鉄

3.3 汙 過

第4章 泥漿鑄込み成形

- 4.1 概 要
- 4.2 粘土鉱物のコロイド的性質
- 4.3 粘土-水分散系のレオロジー
- 4.4 鑄込み泥漿
- 4.5 鑄込み性状
- 4.6 鑄込み泥漿の調整と使用
- 4.7 鑄込みで発生する欠点
- 4.8 振動鑄込み成形およびチクソトロピー鑄込み成形
- 4.9 粘土を含まない素地の鑄込み成形
- 4.10 電気泳動法によるセラミック（とくにアルミナ）の成形
- 4.11 テープ鑄込み成形

第Ⅲ巻

第9章 乾 燥

- 9.1 概 要
- 9.2 粘土を含む可塑性素地の乾燥過程
- 9.3 非粘土セラミック素地の乾燥機構
- 9.4 乾燥収縮
- 9.5 乾燥中に発生する反りと亀裂
- 9.6 泥漿鑄込み成形素地と機械ろくろ成形素地の乾燥
- 9.7 乾燥における熱の伝達
- 9.8 乾燥器または乾燥機
- 9.9 乾燥器の効率

第10章 焼 成

10.1	概 要
10.2	焼成反応
10.3	熱化学
10.4	焼成素地の構造
10.5	製品に発生する欠点
10.6	焼成窯
10.7	フリット窯
10.8	窯の選択基準
10.9	保護雰囲気
10.10	匣鉢と窯詰め道具
10.11	窯詰め時における道具立て
第11章	粉末ガラスによる封着，琺瑯掛け，およびガラス焼結体
11.1	はんだガラス（中間封止ガラス）
11.2	琺 瑯
11.3	耐真空焼結ガラス
11.4	マルチフォームガラス
11.5	焼結熔融石英
第12章	セラミック－金属封着

12.1	概 要
12.2	セラミック表面のメタライゼーション
12.3	セラミック－金属封着に用いられる工業的方法
12.4	セラミック－金属封着の結合機構
12.5	セラミックのメタライジングにおける注意事項
12.6	純焼結アルミナの高温封着
第13章	非酸化物セラミックスの製造
13.1	焼結窒化珪素の製造
13.2	焼結窒化硼素の製造
13.3	焼結窒化アルミニウムの製造
13.4	二珪化モリブデンと二珪化モリブデン－アルミナ系サーメットの製造
13.5	焼結炭化珪素の製造
13.6	焼結硼化物の製造
13.7	サーメットの製造

目 次

第5章 塑性成形	1
5.1 概 要	1
5.2 粘土の可塑性と成形性	2
5.3 可塑性の増加と低下の方法	17
5.3.1 可塑性の増加方法	17
5.3.2 可塑性の低下と除去方法	26
5.4 混 合	27
5.5 汙 過	30
5.6 脱水を行なわない湿式調整法	31
5.7 混練と混練機	32
5.7.1 クネットマシン	32
5.7.2 パッグミルと真空パッグミル	33
5.8 オーガーによる押出しとオーガーマシン	36
5.8.1 構造発見方法としての凍結操作	42
5.8.2 口金に起因する欠陥の発生	44
5.8.3 脱 気	46
5.8.4 オーガーによる欠陥の発生を防止するための装置	50
5.9 ピストンによる押出し	54
5.10 非粘土坏土の押出し成形	59
5.10.1 坏土の調整	59
5.10.2 押出し成形用の口金	64
5.11 建築用およびその他の粘土製品の塑性成形	66
5.11.1 中程度の可塑性, “硬泥” 状態で成形する針金切断煉瓦とタイル	66
5.11.2 塑性加圧成形	70

5.11.3	軟らかい可塑性, “軟泥” 状態で成形する煉瓦と屋根瓦	70
5.11.4	半可塑性, “半硬泥” 状態を用いた成形	71
5.11.5	ろくろ成形	72
第6章 乾式および半乾式加圧成形		83
6.1	概 要	83
6.2	ドライプレスにおける問題点	87
6.3	顆粒(団粒)の製造	98
6.3.1	タブレット法	99
6.3.2	直接顆粒化法	99
6.3.3	噴霧乾燥法	103
6.4	顆粒の試験	109
6.5	突固めと加圧による耐火物質の成形	113
6.6	加圧成形方法の選択	118
6.6.1	プレス	118
6.6.2	セラミック絶縁体のドライプレス成形	118
6.6.3	壁タイルのダストプレスまたは半乾式プレスによる成形	119
6.6.4	普通煉瓦および耐火物の半乾式プレス成形	119
6.7	連続加圧成形	125
6.8	振動成形	128
6.8.1	コンクリートの振動成形	128
6.8.2	骨材-粘土-水系の振動成形	133
6.8.3	粉体の振動成形	137
6.8.4	振動成形装置	148
6.9	アイソスタティックプレス成形	153
6.9.1	成形装置	153
6.9.2	成形工程	158
6.9.3	加圧の条件と焼結体の性質	160
6.9.4	アイソスタティックプレス成形の応用範囲	173
第7章 ホットプレス法		181

7.1 概 要	181
7.2 ホットプレスにおける緻密化機構	182
7.3 ホットプレスの目的	193
7.3.1 微構造の調整	193
7.3.2 緻密化の増進	194
7.3.3 複合体の製造	195
7.3.4 圧力結合	196
7.4 装置と操作上の管理事項	196
7.5 工程上の制限事項	201
7.6 緻密化助剤	206
7.7 ホットアイソスタティックプレス	210
7.8 電子材料のホットプレス	214
 第8章 高温無機物の被覆方法	 223
8.1 概 要	223
8.2 サーメットの電着	226
8.3 電気泳動による被覆	227
8.4 気相蒸着法	229
8.4.1 パックセメンテーション法	229
8.4.2 蒸気相による反応	231
8.4.3 黒鉛に対する耐酸化皮膜の蒸着	232
8.4.4 流動層による被覆	235
8.5 珐瑯掛け	237
8.6 発熱反応による被覆	240
8.7 泥漿法	240
8.8 炎溶射によるセラミック・コーティング	242
8.8.1 概 説	242
8.8.2 炎溶射被覆の方法	244
8.8.3 炎溶射皮膜の性質	257
8.8.4 炎溶射の操作条件	268

8.8.5 炎熔射セラミックスの用途と試験	272
8.8.6 炎熔射およびプラズマ熔射被覆物質	275
8.8.7 ガラス表面に対する金属熔射	275
8.8.8 セラミックス表面に対する金属熔射	277
8.9 炎溶射を用いたセラミックの成形	277
8.10 蒸着を利用したアルミナ焼結体の製造	280
文 献	285
索 引	311

第5章 塑性成形

5.1 概 要

粘土を含むセラミック素地の成形は粘土の可塑性および流動性を利用している。粘土—水混合系がその形を変え得る難易度は、図-5.1にみられるように含水量に支配される (Anon., 1929)。粘土が異なっても同じような曲線が得られるが、曲線の形は変わってくる。このために含水量の少ない坯土は圧力で成形でき、成形体は乾燥収縮が少なく、また乾燥中に素地内に発生するひずみは少なくなり、そのために生強度は大きくなる (A. E. R. Westman, 1934)。

含水量の極めて少ない坯土では高圧成形することはこの事実からみて必然的なことである。含水量のかなり多い坯土を用いて高圧成形することは、水が単に絞り出されるだけで有益な効果を示さないことを知るべきである (Noble, Williams, Clews, 1958)。

図-5.1で、含水量が約50%になると泥漿となり、わずか0.1気圧で容器のすみずみまで液体のように流れ込む。含水量が40%に低下すると同じ流れを示すのに0.4気圧、35%

では1気圧を必要とし、30%になるとこれが2.5気圧となる。これらの圧力で、同じ素地の2分割した部分は結合して全体が均一の状態になる。さらに乾燥した素地でもはるかに高圧を用いれば同じように結合される。すなわち、

含水量	25%	10気圧
	20	40
	17	100
	15	200
	10	無限大

したがって成形方法は坏土の状態によって、① 懸濁液、② 濃厚泥漿、③ 塑性、④ 半乾燥、⑤ 乾燥に分けられる。

①と②は重力または低い圧力で流動する。塑性および半乾燥状態では相当の圧を用いないと流動を示さないが、新しく形成された形態は圧力を除いても残っている。乾燥状態では一般に流動を起こさせることはできない。

成形の最も古い方法、すなわち手造りおよび手ろくろ成形では粘土素地を塑性状態にする必要がある。塑性状態の坏土では機械ろくろ成形、押出し成形、石膏その他でつくった型の中に手または機械、あるいは水圧で押し込んで成形する方法が用いられる。

粘土のもつ最も特徴とする状態は可塑性状態であり、このために最も原始的な成形方法は可塑性にたよっていた。最初は手造りにより、また紐造りで容器をつくり、また手ろくろを用いた。これらは現在でも陶芸家が美術品をつくったり、工業的には大きな製品をつくるときに利用されている。

可塑性を用いた各種成形法は、粘土が比較的小さな圧力で変形させることができ、その後圧力を取除いてもその形態を保っているという性質を用いているのであるが、坏土の稠度 (consistency) や硬さ (stiffness) は成形方法によって変わっている。含水量が多くなると作業は容易になるが収縮が大きくなり、したがって乾燥減量が大きくなる。

5.2 粘土の可塑性と成形性

粘土の可塑性 (plasticity) に対して研究者はいろいろな定義を下しており (素木洋一, 1952), たとえば次のようである。

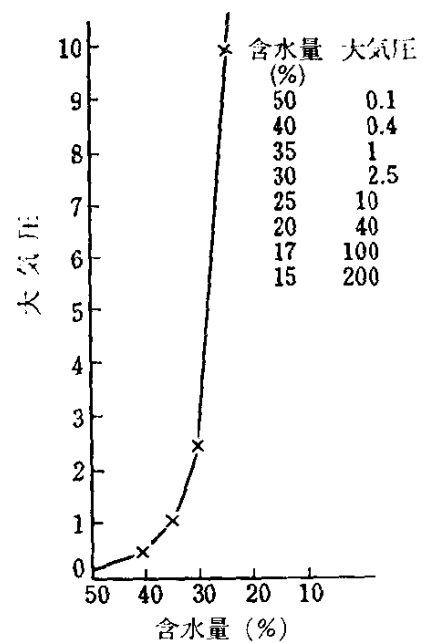


図-5.1 可塑性粘土の含水量に対する圧力の効果

- (i) 外部から作用する力によって変形された形態が残っていて、しかも種々の構成粒子の結合力が失われなくて存在するような固体の能力 (Th. Haase, 1952 ; 1957).
- (ii) 可塑性というのは、変形に要する外力を取去ってからその降伏値に至るまでの変形を保持しようとする性質 (A. S. T. M., 1959).
- (iii) 湿った粘土が亀裂を生ぜずに変形でき、変形させる応力を取去ったときにその新しい形を残すことができる特有な性質 (A. E. Dodd, 1964).

可塑性に対しワーカビリティ (*workability*) という用語は、粘土に可塑性をもたらす原因となる構造的および物理的因子についての知識が明らかにされる一時代前に導入された、可塑性に対するつかまえておけない同義語である (A. E. Dodd, 1964). しかしこの用語は現在でも多く使用されているが、日本では成形性、成形能、細工能などと訳されている。もともとは、最終製品が均一なものになるように原料を処理したり調整したりするのに要する努力の度合をいった。

可塑性は圧力と変形の結果として起こる機構的な性質であり、与えられた系における変形の大きさは粒子が凝集力 (*cohesion*) を失うことなく移動し得る距離で決定される。ある与えられた変形を起こさせるのに要する圧力は、粒子を互いに付着させておく凝集力の大きさの指数である。これらの力は粒子の水膜の厚さによって変化する。したがって変形し得る大きさというものは粒子の大きさや形態によって変化し、存在する粒子表面積の量は凝集に帰せられる水膜の数を決定することは明らかである。このように、可塑性というのは粘土中に存在する水膜の力の量で表現できる性質であり、またこの力のために粘土素地が破壊されることなく永久に変形される割合を決定することができる。

粘土が可塑性を示すためには次の条件を必要とする。

- (i) 結晶は小さく、扁平であること。
- (ii) 結晶がよく発達していて軟らかであること。
- (iii) 結晶は表面活性であり、しかも表面に OH 基をもっており、水膜を形成すること。
- (iv) 加える液体の表面張力が大きく、単位粒子の分子引力が大きいこと。
- (v) 固体の濃度が適当であり、結晶の集合状態が良好であること。

凝集力は表面張力に比例し、粒子の半径に逆比例し、水分が多くなると減少し、水膜の数と厚さの指数である。それゆえ最大凝集力は水膜が粒子の接触点すべてに生成されたときに得られる。水膜の厚さがこの限界点以上になると凝集力は減少する (素木洋一, 1961)。

粘着力 (*adhesion*) は他の物体に付着する力であり、含水量が最大凝集力を示す量以上で発生するものであり、したがってこの境界の含水量が最大可塑性を示すところになる。

粒子が微細で偏平であればそれだけ可塑性は大きい。一例を図-5.2に示す*1 (H. Whittaker, 1939)。このことは可塑性は粒子表面の量と各表面の接触部分の数とによる。したがって粒子間の凝集力は水膜の張力が増加するために大きくなる。

粘土に含有されているコロイド物質の量と性質も可塑性に大きな影響を与える。コロイド物質は粗粒子間の減摩剤として働き、相互の摩擦抵抗を減少させる。さらに、表面積が大きいので水膜の張力を増大させる。それゆえ粘

土の可塑性を説明するには粘土コロイドの諸性質を解明しなければならない。もし粘土中のコロイド物質が粗粒子間の潤滑剤として作用するならば、板状のコロイドはその平らな面を接触させて排列する可能性が極めて大きい。

接触面の増加と同時に、粒子から構成されている坯土の水膜表面の割合の増加が可塑性の効果を生ずると考えられる。換言すれば、ある水分範囲では配位した板状コロイド粒子の水膜の張力（粘土に凝集力を与える）は、粘土を希望の形態に成形する能力を与える。この水分範囲がすなわち粘土の可塑性の範囲に相当する。粒子の配位とそのためにかかる粒子間相互の力は各粒子をとりまくのに十分な水を加えたときに起こる。このような水膜を生成させるのに必要な水量は粘土が脆性を失う水量に相当する。

水量が多くなりすぎると水膜が厚くなり、さらに自由水（間隙水）が存在する状態となるので粒子間の凝集力が減少し、粘土は可塑性の状態から泥漿の状態に変わってくる。塑性状態では粘土は濃い泥漿と同じく塑性流を示し、外力と変形の割合との間にはビンガムの式と同じような関係になり、ビンガム降伏値が粒子間の水膜の凝集力に相当する。

可塑性を利用する塑性成形では、① 最初に粒子群が相互に離れ、② その際相互に運動することができなければならない。このような2種類の移動性は物質としては次の要素に相当する。すなわち、

① に対しては、分離を生ずるためにはどれだけの引張り応力、すなわち kg/cm^2 の単

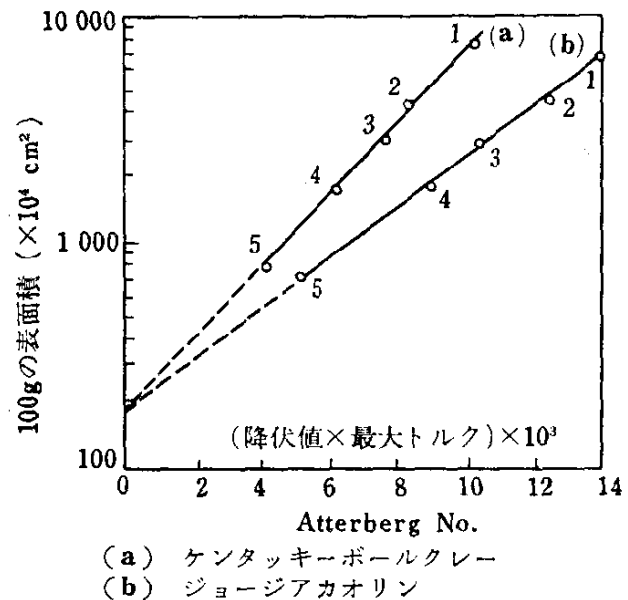


図-5.2 分級した2種類の粘土の表面積とAtterberg法による可塑性との関係

*1 測定方法については、素木：セラミック外論1，窯業協会（昭37）p.76；窯業原料第四集，碩学書房（昭27）pp.1-36に詳細を説明した。

位で示される切断強度 σ が必要となるか、

② に対しては、 dyne/cm^2 の単位の大さきの 剪断応力で与えられる粘性係数 η が坏土に存在していなければならない。

すなわち、可塑性は切断強度が大きいほど大きく、可能な範囲で剪断応力が小さいほど小さいことになり、可塑性 P は、

$$P \propto \frac{\sigma}{\eta}$$

で示すことができる。すなわち可塑性を増すには切断強度を大きくするか、あるいは粘度を小さくすればよい。

亀裂が発生しない程度の可能な範囲内での引張り応力に対しては剪断応力は小さくなければならない。換言すれば、引張り応力が切断強度に達する前に、物質の内部で滑らかな運動によって両者が容易に平衡状態をとらなければならない。

二義的にはさらに次の仮定をおく必要がある。すなわち、剪断応力は降伏値をもっていなければならない。つまり純然たる粘性流が問題になるのではなく、一定の最小剪断応力（降伏値）を超えたときに始めて流動性が現われなければならない。すなわち、塑性流を示さなければならない。可塑性をもった坏土では、一般に坏土内の重力のために生成されている応力よりも大きい応力をもっている。もしこのような状態になれば、成形されたばかりの素地では乾燥前に流動を起こして変形してしまうからである。

坏土は変形させる速度によって流動の状態が変わる。急速に変形させたときには理想的液体と同じ運動を行ない、徐々に変形させたときにはむしろ固体のような流れを示すものである。

Th. Haase (1957) によると、変形させる力のかけかたによって変形の割合は 図-5.3 のように変わり、変形速度によって焼成体の状態は 図-5.4 のようになる。

坏土の調整方法は素地の成形方法などによって適当に選択することができる。たとえば石膏型を用いて皿などをろくろ成形する場合には降伏値はあまり問題にならないが、高圧碍子や陶管などの大型品を押出し成形で製造する場合には降伏値が問題になる。たとえば Baudran, Deplus (1959) は素地の成形方法による坏土の可塑性のちがいを測定し、 図-5.5 に示す結果を得た。

磁器坏土を用い、ピストンで押出した場合と土練機で

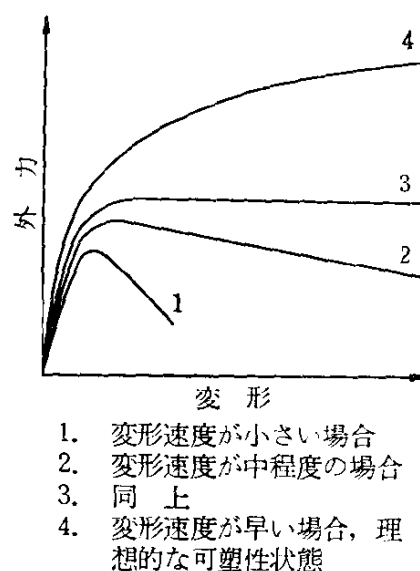
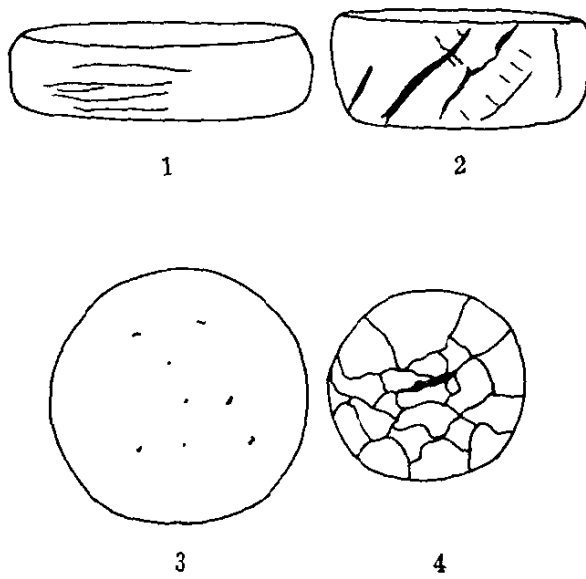
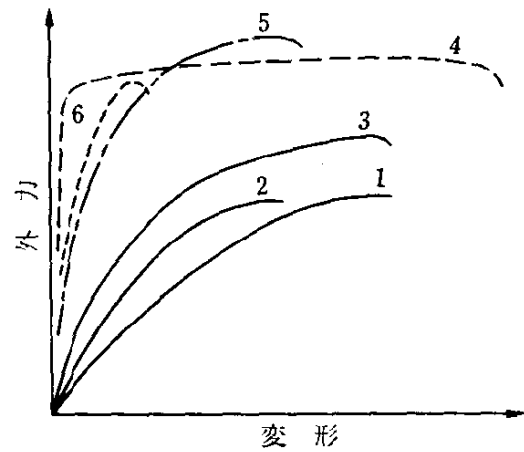


図-5.3 粘土の応力-延びの関係図（模式図）



1. 円柱をたたきつけて急速に変形させた場合
2. ゆっくり加圧して変形させた場合
3. 1の板を焼成した場合
4. 2の板を焼成した場合

図-5.4 磁器坏土の変形速度による亀裂発生の状態



- 1, 2, 3. ろくろ成形素地
4. 押出し成形素地
5. 撚り土成形素地
6. 手ひねり成形素地

図-5.5 素地のつくり方による可塑性の変化

表-5.1 押出した磁器坏土のその後の圧縮条件による性質の変化

(a) 素地の直径方向 ($S_{\perp}$) と押出し方向 ($S_{\parallel}$) との収縮率の差

処 理	ピストン 押出し (1300°C 焼成, 45分保持)				土練機 押出し (1300°C, 30分保持)			
	S	$S_{\perp}$	$S_{\perp}-S_{\parallel}$	$\left(\frac{S_{\parallel}+S_{\perp}}{2}\right)$	$S_{\parallel}$	$S_{\perp}$	$S_{\perp}-S_{\parallel}$	$\left(\frac{S_{\parallel}+S_{\perp}}{2}\right)$
I そのままの状態	10.4	14.2	3.8	12.3	12.5	15.4	2.9	13.9
II ゆっくり圧縮	11.2	13.5	2.8	12.3	13.4	14.3	0.9	13.8
III 急速に圧縮	11.4	13.2	1.8	12.3	13.9	13.4	-0.5	13.7

(b) 焼成体の熱膨張係数, $\alpha \times 10^{-7}$ (20~700°C)

処 理	α	$\alpha_{\perp}$	$\alpha_{\perp}-\alpha_{\parallel}$	$\left(\frac{\alpha_{\parallel}+\alpha_{\perp}}{2}\right)$	$\alpha_{\parallel}$	$\alpha_{\perp}$	$\alpha_{\perp}-\alpha_{\parallel}$	$\left(\frac{\alpha_{\parallel}+\alpha_{\perp}}{2}\right)$
I そのままの状態	49.7	53.0	3.3	51.3	57.1	59.5	2.4	58.3
II ゆっくり圧縮	47.3	49.7	2.4	48.5	55.4	56.3	0.9	55.8
III 急速に圧縮	52.2	52.3	0.1	52.2	58.3	58.3	0.0	58.3

押出した場合とでは、その後の圧縮方法（押出した方向に加圧）によって焼成体の性質は表-5.1のように変化する (Haase, Petermann, 1956)。

これらの事実から、平行面に対し平行方向に圧力をかけて成形する場合の速度による坏土の移動の状態は、急速に圧力をかけたときは図-5.6において点Cは点C'に移り、内部の移動はC'Dとなり、ゆっくり圧力をかけたときにはC'E'EDのようになる。すなわち、CD面に並んでいた粒子はC'Dの方向に移動し、ゆっくり変形させるとある部分だけが

平行に動いてその辻り面と境を形成するようになる。すなわち坏土内に粒子の乱れを生ずる。

坏土に力を加えるときに発生する亀裂発生の状態も同様に加える圧力の速さによって変化するが(図-5.4 参照), この状態を示すと図-5.7 のようになる。

このように、坏土の可塑性は成形する際の圧力のかけかたによって異なるばかりでなく、成形体の性質に方向性が現われる。土練機によってもこのような変化は当然発生するわけで、このために真空土練機の押出し口の前に振動格子を装填したり(W. Hagen, 1955), 練りもみ機を使用する方法(H. Köhler, 1955)などが考えられてくるわけである。

いま、粘土をある大きさの力で変形させておき、次に力を除き、同じ力で変形と回復とを繰返して行なうと弾性変形が変わってくる。粘土と金属の差異を示すと図-5.8 のようである。また、粘土をあるところまで変形させ、次に逆の大きさの力で変形させ、この操作を繰返し行なうと外力と変形との関係は粘土の種類により、また含水量によって著しく変化して遂には切断されるようになる。この状態の一例を図-5.9 に示す(素木洋一, 1955)。

一般に可塑性に乏しい粘土や坏土では、外力と変形との関係においていわゆる歪硬化(strain hardening)に似た現象を示す。これは図-5.10 に示すような曲線で、ある点までは可塑性変形を行ない、この点をすぎると外力による変形が少なくなる。この現象をH. H. Macey (1948) は“backlash”と呼んでおり、この原因は粘土に辻り面が生じ、その部分の粒子排列が変化する、すなわちチクソトロピー、ダイラタンシー、およびレオペキシーを示している(素木洋一, 1955)。

粘土の可塑性を左右する主要な因子をまとめると次のようである。

(1) 粘土鉱物の種類

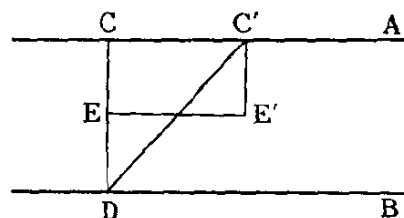
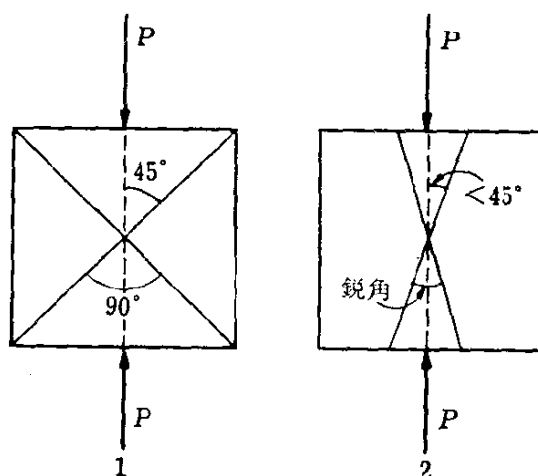


図-5.6 平面AとBを急速に(C'D), およびゆっくり(DEE'C')滑り変形CC'を与えたのちの状態の模式図



1. 粘土が理想的塑性変形を受けたときの辻り面の位置. $P-P$ は圧力の方向
2. 粘土が脆性変形を受けたときの辻り面の位置(変形速度は小)

図-5.7 加圧した場合に粘土に生成される辻り面