アルミナスラリーの遠心圧密法による評価

——圧密特性と流動特性の相関性——

吉田宜史・森 英利・椿 淳一郎

名古屋大学大学院工学研究科物質制御工学専攻, 464-8603 名古屋市千種区不老町

Characterization of Alumina Slurry by Centrifugal Consolidation Method

——Correlations between Consolidation Properties and Flow Characteristics——

Yoshifumi YOSHIDA, Hidetoshi MORI and Junichiro TSUBAKI

Department of Molecular Design and Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi 464-8603

Correlations have been investigated between centrifugal consolidation properties and flow characteristics of alumina slurries, prepared with polymeric dispersant and with pH adjustment. Attention has been paid to the deformation behavior of particle network structure in order to identify the main factor governing the consolidation process. For both slurry systems, final packing fraction and delay time observed in the centrifugal consolidation test can be well correlated with the yield stress and Bingham plastic viscosity of flow curve, respectively. It is shown from the experiments using several molecule weight polymers that deformation of polymeric dispersant affects consolidation process of slurries prepared with polymer molecules having the length comparable to primary particles. It is also suggested that wet shaping process of ceramics should be analyzed from the point of view of relationships between applied stress on particles and particle interactive force, instead of apparent viscosity of original slurry.

[Received January 14, 1999; Accepted March 26, 1999]

Key-words : Centrifugal consolidation, Slurry suspension, Network structure, Shaping, Dispersant, Flow curve, Interactive force, Rheological parameter

1. 緒 言

セラミックスの成形方法の中で、泥しょう鑄込成形法、テープ成形法などは、セラミックス原料粉末をスラリー中に分散して流動性を与え、形状を賦与した後、脱液・乾燥することにより成形体を得る方法である。これらの成形方法では、成形体の密度と微構造は、スラリー中の粒子の凝集状態の影響を強く受けるため、スラリー調製では分散剤の種類と添加量を最適に制御する必要がある。スラリー調製条件の最適化には、成形体の特性を的確に予測し得るスラリー評価の方法が必要不可欠であるという観点から、著者らは遠心圧密法を提案し、その有用性を検討してきた^{1),2)}。この評価方法では、成形過程を微粒子構造体の圧密変形過程としてとらえ、原料スラリーの特性が圧密過程に及ぼす影響を遠心セルを使用して的確に評価することができる。

液中で粒子が構造体を形成して圧密変形する現象は、界面沈降又は集合沈降などと称され、排水汚泥処理など固液分離の分野では広く知られている^{3)~7)}。Roberts³⁾は、重力場において、濃厚スラリーの圧密沈降過程を、ある時刻における界面沈降速度がそのときの界面高さと最終沈降界面高さとの差に比例するとした実験式を提案している。この実験式の比例係数は後にYoshiokaら⁴⁾によって、スラリー初期高さ及びスラリー初期濃度に逆比例することが示された。Shiratoら⁶⁾は、濃厚スラリーの界面沈降現象が圧搾の理論で取り扱えるとして、数値計算により堆積層中の液圧分布と空隙率分布を求めている。また、Sambuichiら⁷⁾は、集合沈降するスラリーの濃度域を希薄・中間・濃厚の3領域に分類し、それぞれの領域に対応する沈降速度の式を示した。しかし、これらの研究は主に処理装置のスケールアップを目的としており、界面沈降速度の初期スラリー高さ依存性、初期スラリー濃度の影響について検討を行っているが、沈降速度は与えられたスラリーに固有の係数を含む値と

して取り扱われるのが一般的で、沈降速度に及ぼす粒子の凝集状態などのスラリー特性の影響については検討されていない。一方、セラミックス成形用スラリーの評価では、粒子の凝集状態が構造体の圧密変形速度や堆積物の微構造に与える影響について明らかにする必要がある。

前報¹⁾において、アンバランス法遠心沈降式粒度分布測定装置を用いて、分散剤添加量を変えて調製したスラリーの微粒子構造体の圧密変形過程を解析し、圧密変形の時間依存性を表す実験式を提案したが、圧密変形速度の支配因子については未検討であった。

本研究では、分散剤として粒子の凝集状態、流動性を著しく変化させる、分子量の異なるポリアクリル酸アンモニウム⁸⁾を用いて作製したアルミナスラリーの圧密特性を測定し、微粒子構造体の圧密変形速度の支配因子について検討した。

また、従来より、スラリー評価方法として見掛け粘度測定が行われている。すべての場合に見掛け粘度の低いスラリーから高い密度の成形体を得られるとは言えないものの、便宜的に見掛け粘度測定が広く利用されている事実に着目し、本報では見掛け粘度測定及び流動曲線測定を行い、スラリーの流動特性と圧密特性の相関性について検討した。

2. 実験方法

2.1 スラリー調製

試験用スラリーとして高分子分散剤添加によるスラリー系と、硝酸添加でpH調整したスラリー系を作製した。試料粉末として易焼結アルミナ(住友化学工業製, AES-11E, 平均粒子径 0.4 μm)を使用し、分散媒に初期固体濃度30 vol% ($\phi_0 = 0.30$)で加えて1hボールミル混合し、10min真空脱泡した後、20°Cの恒温室で2hかくはんして試験用スラリーとした。

高分子系スラリーで用いた分散剤のポリアクリル酸アンモニウムは、原料のポリアクリル酸 (Scientific Polymer Products, Inc. 製) をアンモニア水で pH 6~7 になるように中和して使用した。ポリアクリル酸の平均分子量 (以下 M_w と略す) はカタログ値で 2000, 5000, 240000 で、中和反応が完了したものとして、ポリアクリル酸アンモニウムの M_w をそれぞれ 2500, 6200, 300000 とした。アルミナ 100 g に対する高分子分散剤の添加量 C (g/100 g-alumina) を、ポリアクリル酸基準で 0.2 g (以下 $C=0.2$ と略す) から $C=0.8$ とし、蒸留水で希釈して分散媒とした。高分子系スラリーの pH は 8.9~9.7 であった。一方、pH 調整系スラリーは 0.133, 0.160, 0.200 mol $\cdot$ dm $^{-3}$ の硝酸水溶液を分散媒として調製し、pH はそれぞれ 5.8, 4.5, 4.1 であった。更に 0.160 mol $\cdot$ dm $^{-3}$ の硝酸水溶液に 0.25 mol $\cdot$ dm $^{-3}$ となるように硝酸アンモニウムを加えた分散媒を用いて塩添加スラリーを作製した。この場合の pH は 4.7 であった。

2.2 高分子分散剤吸着量測定

高分子系スラリーについて、アルミナ表面への分散剤吸着量を測定した。アルミナ粉体を添加する前の分散媒、及び 2.4 節に示す圧密特性試験後に得られる上澄み液の全炭素濃度を測定し、これらの差から分散剤吸着量を算出した。全炭素濃度の測定にはラボ用 TOC 分析装置 (東レエンジニアリング製, Model TOC-650) を使用した。

2.3 流動特性試験

流動特性試験として、B 型粘度計 (トキメック製, BL 型) による見掛け粘度測定とビスコテスター (Haake 製, VT550) による流動曲線測定を行った。見掛け粘度測定では、ローター回転数は 6 rpm 一定とし、高分子系では M_w 300000 のすべてのスラリーと M_w 2500, 6200 の $C=0.2$ のスラリー、pH 調整系では塩添加スラリーの場合にせん断速度 1.5 s $^{-1}$ 、それ以外のスラリーでは 1.7 s $^{-1}$ になるローターをそれぞれ使用し、1 min 後の指示値から見掛け粘度を算出し η_a (Pa $\cdot$ s) とした。一方、流動曲線の測定では、カップ、及びローターは NV 型を使用し、0~500 s $^{-1}$ の範囲でせん断速度を一定割合で変化させ、せん断応力を測定した。上昇・下降はそれぞれ 3 min で、温度は 20°C 一定とした。また流動曲線としては下降時の値を使用し、ビンガム塑性流動を仮定して、ビンガム塑性粘度 η_B (Pa $\cdot$ s) と降伏応力 σ_B (Pa) を求めた。

2.4 圧密特性試験

圧密特性試験は、前報¹⁾で用いたセジメンピューター (ホソカワミクロン製, SPT-C 型) により行った。本実験では内径 26.2 mm、深さ 48.6 mm の耐酸性のテフロンセルを使用した。回転中心からセル底面までの距離は 117.6 mm である。運転回転数は 1200, 3600 rpm で、セル底面での遠心効果はそれぞれ 200, 1800 G である。圧密の特性値として最終充填率 ϕ_∞ (—) を粒子堆積高さから、また圧密時間の指標として遅延時間 τ (s) を算出した¹⁾。充填率の算出にあたっては、アルミナ粒子の密度、3.96 $\times$ 10 3 kg $\cdot$ m $^{-3}$ を用いた。また、高分子分散剤及び硝酸の添加量は充填率に影響を及ぼさない量であるため、分散媒の密度を 1 $\times$ 10 3 kg $\cdot$ m $^{-3}$ とした。

3. 結果及び考察

3.1 高分子分散剤吸着量測定

図 1 に、分散剤添加量に対するアルミナ粒子表面への吸着量の変化を示す。図中の破線は添加した分散剤がすべて吸着した場合の値に相当する。 M_w 300000 の分散剤は他の 2 種の分散剤に比べて吸着量が多いが、いずれの場合にも $C=0.3$ 程度で吸着量は一定となった。これ以上の添加量では未吸着分散剤が

上澄み液及び粒子堆積層中に含有される液中に溶存している。

3.2 流動特性試験

図 2 に M_w 2500 の高分子系スラリーの流動曲線を例示した。分散剤添加量が少ない場合には、降伏応力を有するビンガム流動を示し、 $C=0.3\sim 0.5$ のスラリーではニュートン流動を示した。図 3 には、高分子系スラリーの分散剤添加量に対する見掛

Fig. 1. Absorbed amount of dispersant. Left and bottom axes represent the amount of dispersant on solid mass basis, right and upper axes represent concentration in solution.

Fig. 2. Rheological behaviors of slurries prepared with polymeric dispersant (M_w 2500). C denotes concentration of dispersant (g/100 g-alumina).

Fig. 3. Influence of dispersant concentration on apparent viscosity.

Fig. 4. Influence of dispersant concentration on yield stress.

Fig. 5. Influence of dispersant concentration on Bingham plastic viscosity.

け粘度の値を示した。 M_w 300000の分散剤は他の2種の分散剤に比べてスラリーの見掛け粘度が高い。また、 M_w 300000の分散剤では $C=0.4$ 、他の2種の分散剤では $C=0.3$ で極小値となり、それ以上では添加量の増加にしたがって粘度が上昇する傾向が見られた。

流動曲線から降伏応力とビンガム塑性粘度を算出し、分散剤添加量に対してそれぞれ図4及び図5にプロットした。見掛け粘度の場合と同様に、分散剤吸着量が一定となり始める添加量を境に傾向が異なっている。図1の結果から、 $C=0.3$ 以上のスラリーでは固体表面に吸着されない分散剤がスラリー中に存在しており、この未吸着の分散剤が流動特性に影響を及ぼしていると考えられる。

3.3 圧密特性試験

図6には、 M_w 2500のスラリーについて測定した圧密特性を例示した。縦軸は微粒子構造体の圧密変形を歪みで表した値で、初期スラリー濃度 ϕ_0 で粒子が構造体を形成している場合、充填率との間に $e=1-\phi_0/\phi$ の関係がある¹⁾。また、図中の実線は前報¹⁾で提案した次式により近似した値である。

$$e=e_{\infty} \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau} \right) \right\} \quad (1)$$

ここで、 t :時刻 (s), e_{∞} : $t=\infty$ における $e(-)$ である。

図7に、高分子系スラリーの最終充填率に及ぼす分散剤添加量の影響を示した。 M_w 2500, 6200のスラリーでは吸着量が一定となる $C=0.3$ 以上の添加量では最終充填率はほぼ一定となっているが、 M_w 300000では $C=0.4$ 以上のスラリーで分散

Fig. 6. Time changes in strain for slurries prepared with polymeric dispersant (M_w 2500). C denotes concentration of dispersant (g/100 g-alumina).

Fig. 7. Influence of dispersant concentration on final packing fraction.

Fig. 8. Influence of dispersant concentration on delay time.

剤添加量の増加に伴って最終充填率が徐々に増加する傾向が見られた。

図8に、遅延時間に及ぼす分散剤添加量の影響を示した。 M_w 300000のスラリーでは、分散剤添加量の増加に伴って遅延時間が増大した。一方、 M_w 2500, 6200のスラリーでは分散剤添加量に依らず、遅延時間はほぼ一定値となった。

粒子構造体の圧密過程では、粒子は液中を移動し、一方、液は構造体すなわち粒子層を通過して構造体の外に流出する。遅延時間は、粒子が移動するのに要する時間、又は液が流出する

のに要する時間を反映している。一般に液中での粒子の移動現象、及び粒子層内の液の流動現象は、それぞれ Stokes の式及び Darcy の式で表される。

まず、液中での粒子の移動について、無限静止流体中での球形粒子 1 個の沈降を考えた場合、沈降速度は Stokes の式(2)で表される。

$$v = \frac{(\rho_p - \rho_l) D_p^2 g}{18\mu} \quad (2)$$

ここで、 v : 粒子の終末沈降速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), ρ_p : 粒子密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), ρ_l : 媒液密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), D_p : 粒子径 (m), g : 重力加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$), μ : 媒液粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) である。一方、粒子層内の液の流動について、均質な粒子層内を液が通過する速度は Darcy の式(3)で表される。

$$q = \frac{K_D \Delta p}{\mu L} \quad (3)$$

ここで、 q : 液流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), K_D : 透過率 (m^2), Δp : 圧力損失 (Pa), L : 層厚さ (m) である。

(2)式より、粒子が一定距離を移動するのに要する時間は媒液粘度に比例し、(3)式より一定量の液が流出するのに要する時間が媒液粘度に比例すると分かる。したがって、媒液の粘度が圧密過程の遅延時間に影響を及ぼしていると考えられる。本報では媒液の粘度を次の方法で推定した。図 1 の結果より、上澄み液の分散剤濃度は 0~1 mass% 程度の範囲であることから、各 M_w の分散剤について 0.17, 0.34, 0.51, 1.02 mass% の水溶液を調製し、粘度を前述の B 型粘度計を使用してせん断速度 72 s^{-1} で測定したところ図 9 の結果が得られた。 M_w 2500, 6200 については粘度は $1.5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 以下であるのに対して M_w 300000 では 1.02 mass% で $10 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 程度まで上昇している。そこで、 M_w 300000 のスラリーについて、図 1 の結果から各添加量における上澄み液の分散剤濃度を算出し、図 9 に内挿

Fig. 9. Viscosity of dispersion media.

Table 1. Viscosity of Dispersion Media (M_w 300000)

Added amount of dispersant [g/100g-alumina]	η_0 [mPa · s]
0.3	≒ 1
0.4	4.6
0.6	7.4
0.8	9.6

Fig. 10. Influence of viscosity of dispersion media on delay time.

して表 1 に示す媒液粘度の推定値 η_0 ($\text{mPa} \cdot \text{s}$) とした。この媒液粘度と遅延時間の関係を図 10 に示す。媒液粘度上昇に伴って遅延時間が增大しており、分散剤がほぼ全量アルミナに吸着している $C=0.3$ のスラリーを除いて、 $C=0.4, 0.6, 0.8$ のスラリーでは傾きがほぼ 2 となっており、見掛け上、遅延時間は媒液粘度の 2 乗に比例すると認められた。先に述べた単独粒子の自由沈降及び粒子層内流動の現象では、(2), (3) 式より明らかとなっており、沈降又は液の透過に要する時間は液粘度の 1 乗に比例する。したがって液中微粒子構造体の圧密変形の時間依存性は媒液粘度のみに起因するものではなく、構造体自体の変形速度を考慮する必要があるといえる。 M_w 300000, $C=0.6$ 及び $C=0.8$ のスラリーは図 7 に示したとおり最終充填率 $\phi_\infty = 0.50$ で、一次粒子の充填構造が同じと考えられる。また、図 1 の結果から、固体表面に吸着した分散剤の量も同じとみなせる。しかしながら上澄み液中の分散剤濃度は異なっている。 $\phi_\infty = 0.50$ に圧密された微粒子構造体は内部に 0.50 の空隙を有しており、液中で圧密された構造体の空隙は媒液で満たされている。この媒液の組成は一般的に上澄み液の組成と同じと考えられる。したがって $C=0.8$ のスラリーから得られる圧密された構造体は、 $C=0.6$ のものよりも構造体内部の媒液中に存在する分散剤の量が多いことになる。また M_w 300000 の分散剤の直鎖の長さは $0.84 \mu\text{m}$ で、ここで使用したアルミナの平均粒径 ($0.48 \mu\text{m}$)、及び前報¹⁾の方法で計算される平均粒子間距離の最大値 ($\phi_0 = 0.30$ で $0.24 \mu\text{m}$) よりも長い。微粒子構造体の圧密の進行に伴って、分散剤の一部は液とともに構造体外部に排出されるが、一部は構造体内部の媒液中に存在すると考えられる。微粒子構造体内部の分散剤は、その大きさから空隙中で自由に移動することができず、構造体の圧密変形とともに変形すると考えられる。その際の変形抵抗が構造体内部に存在する分散剤の量に依存すると考えられることが、遅延時間が媒液粘度の 1 乗ではなく 2 乗に比例する理由の一つとして考えられる。一方、 M_w 2500, 6200 のスラリーでは液中の分散剤濃度の増加に依らず、遅延時間は変化しないが、これは媒液粘度の上昇がないことのみならず、分散剤が $0.007, 0.017 \mu\text{m}$ と粒子及び平均粒子間距離に比べて十分小さく、構造体の変形過程で、自由に移動することができ、また変形もしないために構造体の変形に対しては抵抗として働かないことによると考えることができる。以上の考察より液中微粒子構造体の圧密変形の時間依存性は、媒液の粘度に加えて内部に存在する高分子分散剤を含む構造体自体の変形抵抗の違いに起因するものと推察される。

3.4 流動特性と圧密特性の比較

流動と圧密の特性値としてそれぞれ見掛け粘度、降伏応力、ビンガム塑性粘度、及び最終充填率と遅延時間を比較した。図11には、最終充填率と(a)見掛け粘度、(b)降伏応力、(c)ビンガム塑性粘度の関係を示した。図11(a)より、 M_w 300000 (Δ)、 $C=0.4, 0.6, 0.8$ のスラリーを除いて $10^3 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 以上で見掛け粘度の上昇に伴って最終充填率は低下している。図11(b)においては、いずれのスラリーの場合にも降伏応力が 10^0 Pa 以上で降伏応力の増大に伴って最終充填率が低下した。また図

Fig. 11. Relationships between final packing fraction and rheological parameters; (a) apparent viscosity, (b) yield stress and (c) Bingham plastic viscosity. Preparation conditions of slurry; with polymeric dispersant of M_w 2500 ($\square$), M_w 6200 ($\circ$) and M_w 300000 (Δ); pH adjustment with HNO_3 for pH 5.8 ($\blacksquare$), 4.5 ($\blacktriangle$), 4.1 ($\bullet$) and for 4.7 with additional NH_4NO_3 ($\blacktriangledown$).

11(c)においては、一定の傾向を見いだせない。

従来、より緻密な成形体を得る目的でスラリーの調製条件を検討する際には、スラリー特性の評価として経験的に見掛け粘度が用いられてきたが、見掛け粘度と最終充填率が相関関係を持つことは理論的に説明されていない。また、最終充填率と見掛け粘度の関係は必ずしも一対一の対応を示さないことも知られている^{2),9)}。一方、図11(b)のように降伏応力との相関を調べてみると、 10^0 Pa 以上においてほぼ一本の直線上に存在するとみなせる。

最終充填率は見掛け粘度ではなく、降伏応力とより密接な関係にある。これは次のように考えることができる。見掛け粘度は圧密前のスラリーの初期状態での流れやすさを示す指標であり、定常状態でのせん断応力とせん断速度の比であるから、圧密過程を予測する指標とはなり得ない。一方、降伏応力は流動を開始するのに必要な最小のせん断応力であり、その起源はスラリー中の粒子が形成する構造体の力学的破壊強度と考えられる。すなわち粒子構造体の破壊強度以下の応力ではスラリーは流動せず、粒子構造体の破壊が起こる応力がスラリーに作用したとき、流動が開始する。構造体の破壊は、粒子同士の接触点で作用するせん断応力が粒子間力に打ち勝った部分から起こるので、降伏応力はスラリー中に存在する粒子同士の離れやすさの指標といえる。このときの様子を模式的に表したものが図12(a)である。

一方、圧密変形過程における粒子充填構造の変化を模式的に表したものが図12(b)である。粒子群がある配列をもって構造体を形成している状態から、外力の作用により構造体中の粒子の少なくとも1個がその配置を変えて、より空隙の少ない構造体に配列し直すことによって充填率の上昇が起こる。ある外力の作用下で最終充填率に達した粒子構造体は、配置を変えられる粒子の数がほぼ0になった状態である。粒子が配置を変えるためには、他の粒子との接触点で一度離れるか滑る必要がある。すなわち、流動における降伏応力と同様に、粒子構造体の圧密過程も粒子間力によって影響を受ける。同じ応力の作用下で、スラリーによって最終充填率が異なるのは、スラリーの調製条件によって接触点での粒子間力が異なるためであり、粒子間力が小さい場合、より高い充填率に至ると考えられる。粒子構造体の圧密過程では接触点の総数は増加するが、1接触点での粒子間力は変化しないと考えられる。したがって、降伏応力は圧密前のスラリーの初期状態での測定から求められる値ではあるが、圧密過程を予測する指標となり得ると考えられる。

また図11(b)でスラリーが pH 調整系であるか高分子系であるかによらず同じ直線上に表されており、粒子間力の起源を問わず、降伏応力と最終充填率は良い相関を示すといえる。

Fig. 12. Schematic illustration of particle actions in (a) slurry flow and (b) consolidation process of particle network structure.

図13に遅延時間と(a) 見掛け粘度, (b) 降伏応力, (c) ビンガム塑性粘度の関係を示す. ここでは, 3.3節で述べた液中の高分子分散剤が影響している遅延時間100 s 以上のスラリー

Fig. 13. Relationships between delay time and rheological parameters; (a) apparent viscosity, (b) yield stress and (c) Bingham plastic viscosity. Preparation conditions of slurry; with polymeric dispersant of M_w 2500 (□), M_w 6200 (○) and M_w 300000 (△): pH adjustment with HNO₃ for pH 5.8 (●), 4.5 (▲), 4.1 (●) and for 4.7 with additional NH₄NO₃ (▼).

については, 図中に (△) で表した. これらの点を除外して考えると, 図13(a), (b)においてはそれぞれ, 見掛け粘度, 降伏応力に依らず遅延時間が一定である. 一方, 図13(c)においては, ビンガム塑性粘度が10 mPa·s 以下で遅延時間はほぼ一定となり, それ以上ではビンガム塑性粘度の増加に伴って遅延時間が減少した. ビンガム塑性粘度は粒子構造体の流動抵抗を表しているため, ビンガム塑性粘度の増加とともに遅延時間は増大することが予測されるが, 実験結果は逆の傾向を示している. これは流動の機構と圧密の機構の差違に起因していると考えられる. また, 最終充填率と流動特性との相関性についても, 前報²⁾の遠心圧密試験では, 流動性の劣るスラリーが高い最終充填率を示しており, このことも流動と圧密の機構の差違に関連があると思われる. 流動特性と圧密特性の相関性については, これらの機構の差違にも着目し, 今後更に検討が必要である.

4. 結 言

異なる分子量のポリアクリル酸アンモニウムを分散剤として用いたスラリー及び pH 調整によるスラリーの圧密特性と流動特性を測定し, 微粒子構造体の圧密変形速度の支配因子についての検討, 及び流動特性と圧密特性の相関性についての検討を行い, 以下の結論を得た.

- (1) 高分子系, pH 調整系のいずれのスラリーにおいても, 遠心圧密試験で得られる最終充填率は, 流動曲線から得られる降伏応力と良く相関づけられる.
- (2) 高分子系, pH 調整系のいずれのスラリーにおいても, 遠心圧密過程の遅延時間は, 流動曲線から得られるビンガム塑性粘度と良く相関づけられる.
- (3) 分子の長さが一次粒子と同等の高分子分散剤を用いたスラリーでは, 高分子の変形が圧密過程に影響を及ぼすと考えられる.
- (4) スラリーの圧密過程であるセラミックス成形過程の解析は, スラリーの見掛け粘度ではなく, 粒子接触点における外力と粒子間力の大小関係の観点からなされるべきことが明らかになった.

文 献

- 1) J. Tsubaki, Y. Yoshida, M. Shikata, H. Mori, T. Yokoyama and M. Naito, *J. Ceram. Soc. Japan*, **106**, 504-08 (1998) [in Japanese].
- 2) J. Tsubaki, H. Mori, M. Kato, K. Okuda, Y. Yoshida and T. Yokoyama, *J. Ceram. Soc. Japan*, **106**, 616-20 (1998) [in Japanese].
- 3) E. J. Roberts, *Mining Eng.*, **1**, 61-64 (1949).
- 4) N. Yoshioka, Y. Hotta and S. Tanaka, *Kagaku Kogaku*, **19**, 616-26 (1955) [in Japanese].
- 5) S. Yagi and Y. Yamazaki, *Kagaku Kogaku*, **24**, 81-92 (1960) [in Japanese].
- 6) M. Shirato, H. Kato, K. Kobayashi and H. Sakazaki, *J. Chem. Eng. Japan*, **3**, 98-104 (1970).
- 7) M. Sambuichi, H. Nakakura and K. Osasa, *J. Mining and Metallurgical Inst. Japan*, **103**, 109-14 (1987) [in Japanese].
- 8) M. Itoh, O. Sakurada, M. Hashiba, K. Hiramatsu and Y. Nurishi, *J. Mater. Sci.*, **31**, 3321-24 (1996).
- 9) M. Naito, Y. Fukuda, N. Yoshikawa, H. Kamiya and J. Tsubaki, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **17**, 251-57 (1997).