J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 127, p.11 ～ 18 (2014)

論　文
Original Paper

鉛直流路形成が濃厚な粘土懸濁液の界面沈降速度に及ぼす影響

中石克也 [1]・大井節男 [1]

Settling velocity of high-density clay suspension and effects of vertical channel formation

Katsuya NAKAISHI[1] and Setsuo OOI[1]

Abstract: The effects of channel formation on settling velocity have not yet been clarified for high-density clay suspensions. In this study, we examined the effects of vertical channel formation conditions on channel shape and channel flow rate by a method where artificial bubbles were passed upward through a column containing a suspension of kaolinite. Specifically, settling velocity, channel diameter, and channel number density were measured by photographic methods. These data were used to calculate channel flow rates, which were then compared with the values expected for Hagen-Poiseuille flow. At a high solid concentration (1.1 % ～ 4.0 % by volume), vertical channels did not form unless artificial bubbles were applied, because the suspension became highly viscous. The number of channels formed by applying bubbles decreased sharply with increasing solid concentration, whereas vertical channel diameter increased with increasing solid concentration. As a result, there was a peak settling velocity at a solid concentration of 2.2 % by volume. Under conditions without structural force, the relation was examined between measured diameter and flow rate diameter (i.e., the mean of diameter to the 4th power) calculated from settling velocity using Darcy's law and the Hagen-Poiseuille equation. The calculated diameter of channels formed by artificial bubbles agreed well with the measured diameter at low solid concentration (< 2.2 %), but was lower than the measured diameter at high solid concentration (> 2.2 %). These results show the importance of structural force in high-density clay suspensions.

Key Words : settling velocity, vertical channel, kaolinite suspension, Hagen-Poiseuille flow, bubble rise

1. はじめに

粘土懸濁液の沈降特性に関する研究はこれまで数多くなされているが，それらの内容は主に沈降体積から微視的凝集構造を推定すること（例えば Melton and Rand, 1976; van Olphen, 1977）や沈降体積の時間変化から沈降様式をいくつかのパターンに分けることで，定性的に沈降現象を説明していることである（Imai, 1980, 1981）．

一方，凝集懸濁液の沈降に関する最近の研究は，フロックに着目して沈降管の壁面とフロックの間で生じる流体抵抗が単一フロックの沈降速度に及ぼす効果（Lall et al., 1989; Becker et al., 1996; Chhabra et al., 2003; Arsenijević et al., 2010）や凝集過程における沈降粒子の構造について調べたもの（Allain, et al., 1995, 1996; Gonzalez, 2001; Gonzalez et al., 2004），塩濃度，pH，高分子添加によるフロック構造の変化と沈降速度への影響について論じた研究（Watts et al., 2000; Nasser and James, 2006; Akther et al., 2008; Kim and Palomino, 2009; Bessho and Degueldre, 2009）などが数多くみられる．しかしながら，試料濃度の増加にともなって無数の凝集粒子（フロック）が相互に干渉しながら沈降したり，フロック同志が連結してネットワークを形成するような高い濃度領域における界面沈降に関する理論的研究はほとんど見られない．

そのような中で，沈降開始時から急速な沈降を示す希薄な試料濃度から，試料濃度の増加にともなって沈降初期に非常に遅い界面沈降を示し，経過時間にともなって突然急激な沈降現象が生じる領域までの沈降現象については，ある程度定量的に取り扱われている．すなわち，Michaels and Bolger（1962）と三分一ら（1987）は，Richardoson and Zaki（1954）の提案した剛体球の干渉沈降における界面沈降速度式を凝集粘土懸濁液に拡張して適用し，試料濃度と初期沈降高さが界面沈降速度に及ぼす影響について解析を行った．さらに，中石らは凝集粘土懸濁液の沈降現象をフロック沈降として捉え（Kuroda et al., 2003），無数のフロックが互いに干渉しながら沈降する界面沈降現象を沈降界面からの透水現象と等価であるとみなし，フロック構造に自己相似則を取り入れた界面沈降速度式を提案した（Sekiguchi et al., 2004; Ooi et al. 2007）．これらの研究によって，希薄な試料濃度から比較的濃厚な試料濃度領域における界面沈降現象のメカニズムをフロックモデルに基づいて説明できるようになるとともに，界面沈降速度とフロック構造の試料濃度依存性についても定量的に評価できるようになった．しかしながら，さらに濃厚な濃度領域における界面沈降特性については，現象論的に圧密沈降として定義しているだけであり（Imai, 1980, 1981），そのメカニズムについてはほとんど論じられていない．

[1]College of Agriculture, Ibaraki University, 3-21-1 chuo, Ami, Inashiki, Ibaraki 300-0393, Japan. Corresponding author：中石克也, 茨城大学農学部
2013 年 11 月 19 日受稿　2014 年 5 月 8 日受理

本研究では，1/100 mm の精度で計測が可能な 3 次元読取顕微鏡にカメラを取り付けてモニターに接続し，拡大した画像から界面沈降速度の計測と沈降過程における懸濁層の詳細な観測を行った．その結果，濃厚な試料濃度において，これまでのモデルの予想に反する異常な沈降現象が生じ，同時に鉛直流路が形成されていることを見出した．さらに，鉛直流路を上昇する粘性流の解析を行うことによって，このような濃厚凝集懸濁液における異常な界面沈降のメカニズムを明らかにした．

2. 実験

2.1 試料

供試試料として，極めて純度の高い入来産カオリナイトを用いた．6 % H_2O_2 溶液による有機物処理を行った後，Na 型粘土を作製するため，1 mol L^{-1} の NaCl 溶液で 2 回洗った．その後，懸濁水の過剰な NaCl 濃度を低下させるために，上澄み液の EC 値が 100 μS cm^{-1}（NaCl 溶液 10^{-4} mol L^{-1}）程度に低下するまで蒸留水で水洗いを繰り返した．石英などのシルト分を取り除くために，懸濁液の pH を 10 に調製して安定した分散状態をつくり，沈降法を用いてストークス径で 3 μm 以下の粒子を採取した．さらに，採取された懸濁液を濃縮するために，遠心分離機にかけて粘土画分を沈殿させて上澄み液を捨てた．この濃縮試料に蒸留水，NaCl 溶液，NaOH 溶液を加えて，カオリナイト懸濁液の体積濃度を 1.1 ～ 4.0 % の範囲，バルク溶液の NaCl 濃度を 0.2 M，pH を 10 に調製した．この溶液条件において懸濁層と上澄み液の間に明瞭な界面が形成され，上澄み液の部分はほぼ透明で濁りは見られなかった．

2.2 測定方法

2.2.1 界面沈降高さの測定

界面沈降実験に内径 63.5 mm，容量 300 mL のトールビーカーを沈降管として用い，2.2.2 で述べるような二つの撹拌方法で撹拌した後，すばやく静置し測定を開始した．界面高さの計測は，1/100 mm 精度の読取顕微鏡を用いて行った．肉眼で直接読み取ると誤差が出る可能性が大きいので，読取顕微鏡の接眼部にカメラを取り付けて解像度の高いモニターに接続し，拡大された画像上で界面沈降高さを 1 分間隔で読み取った．なお，粒子の沈降は温度の影響を強く受けるので，ビーカー内の懸濁水の温度を一定に保てるように，25 °C に設定された恒温室内で測定を行った．

2.2.2 撹拌方法と懸濁層内への気泡混入

撹拌は，以下に示す懸濁層に気泡を混入させる方法とさせない方法の二つの方法で行った．なお，異なる撹拌を行う前に懸濁試料を均一にするために，5 分間超音波照射して試料を分散させ，25 °C の恒温水槽内に 1 時間程静置した後，懸濁液の温度を 25 °C に設定した．

フロック懸濁層へ気泡を混入させる撹拌は，沈降容器上面をパラフイルムでしっかり覆って懸濁水が漏れないようにして水面との間に空気を封入し，転倒撹拌によって行った．このときの空気封入量は，およそ 43 cm^3 程度である．転倒撹拌は 1 分間で 20 回行い，撹拌後直ちに測定を開始した．この方法は，Michaels and Bolger（1962）を始め多くの沈降実験で行われている一般的な撹拌方法であり，以後転倒撹拌と呼ぶ．一方，懸濁層への気泡混入が起こらない撹拌は，基本的には空気混入の場合と同等になるように転倒撹拌によって行った．しかしながら，封入空気を除去して転倒撹拌を行った場合，懸濁液を均質に撹拌することができないことから，以下のように工夫した．まず，ビーカー内の懸濁液中にスターラー（攪拌子: 直径 6.3 mm, 長さ 30 mm の円柱状）を 3 個投入し，小孔付きのゴム栓をビーカー上部口に取り付け，液面とゴム栓の間に含まれる空気を抜きながら栓を静かに押して水面まで接触させた．その後，上で述べたように，5 分間超音波照射して試料を分散させ，25 °C の恒温水槽内に 1 時間程静置した後，1 分間で 20 回の転倒撹拌を行い，直ちに測定を開始した．以後，この撹拌方法をスターラー撹拌と呼ぶ．なお，スターラーを投入することによる懸濁液面の上昇は 0.8 mm 程度であったことから，界面高さの補正は行わなかった．

以上のように流路形成の有無と懸濁層濃度の均質化のために二つの撹拌方法を用いたが，基本的には空気とスターラーを利用した転倒による撹拌であり，超音波撹拌に比べて破壊力は非常に小さいことから，フロックの大きさや構造に与える影響はほとんどないものと考えられる（Ooi, et al., 2007）．

2.2.3 鉛直流路の測定

鉛直流路の確認並びに流路数と流路径の測定は，沈降界面上面と懸濁層側面の観測に基づいて行った．具体的には，測定終了直後の沈降界面上面をデジタルカメラで撮影し，画像を拡大して流路数と流路径を計測した．また，側面の流路径は，沈降過程において読取顕微鏡に接続したモニターに映し出された懸濁層側面の拡大画像から読み取って測定した．

3. 結果

3.1 濃厚な濃度領域における特異な沈降現象

Fig. 1 に示すように，凝集フロック懸濁液の界面沈降特性は試料濃度に大きく依存して変化する（Sekiguchi et al., 2004）．希薄な体積濃度では，沈降開始直後から急激な界面の低下（急速沈降）を引き起こす．試料濃度が増加すると，始めに非常に緩やかな界面沈降（緩速沈降）現象が表われ，ある程度の時間経過を経て急激な沈降が生じる．固体濃度が増すにつれて緩速沈降継続時間が長く続き，その後急速沈降に転じる．このような界面沈降の特徴から推察すると，さらに固体濃度が増すと緩速沈降過程のみが現れ，もはや急速沈降が起こらなくなることが予測される．しかしながら，空気混入のある転倒撹拌による界面沈降現象では、実際には Fig. 2 に示すように体積濃度が 1.1 % を越える領域になると，体積濃度の増加にともない界面沈降速度が増加するという，今ま

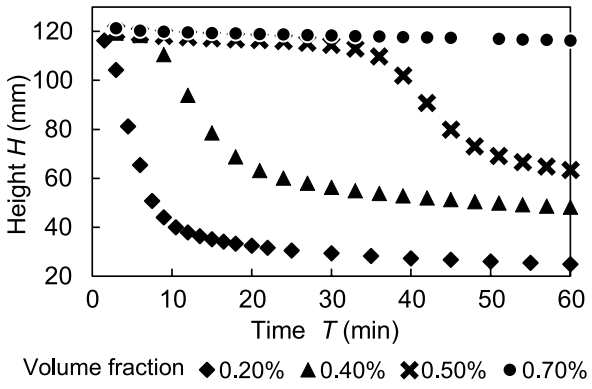


Fig. 1　界面沈降高さと時間の関係（気泡あり）
体積濃度：0.2 ～ 0.7 %.
Height of the sedimentation interface H plotted against elapsed time T (bubbling). Volume fraction: 0.2 ～ 0.7 %.

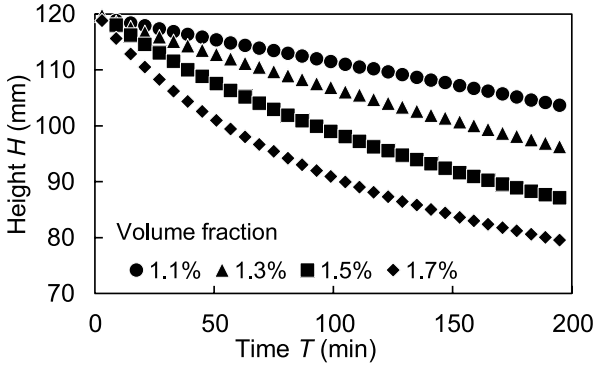


Fig. 2　界面沈降高さと時間の関係（気泡あり）
体積濃度：1.1 ～ 1.7 %.
Height of the sedimentation interface H plotted against elapsed time T (bubbling). Volume fraction: 1.1 ～ 1.7 %.

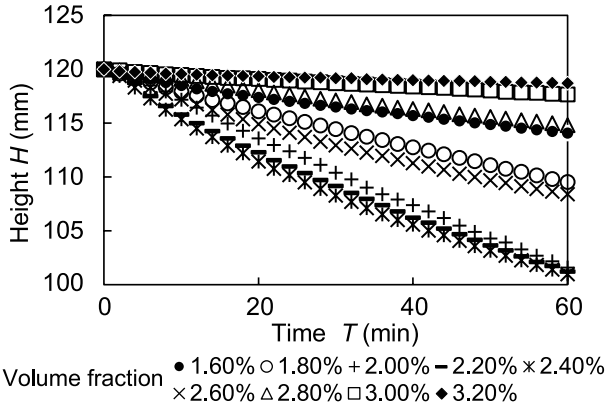


Fig. 3　界面沈降高さと時間の関係（気泡あり）
体積濃度：1.8 ～ 3.2 %.
Height of the sedimentation interface H plotted against elapsed time T (bubbling). Volume fraction: 1.8 ～ 3.2 %.

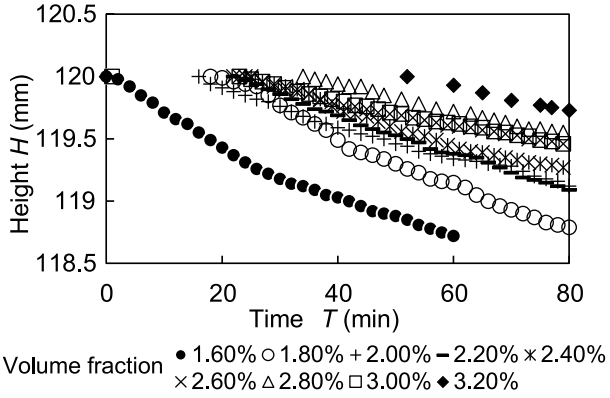


Fig. 4　界面沈降高さと時間の関係（気泡なし）.
Height of the sedimentation interface H plotted against elapsed time T (no bubbling). Volume fraction: 0.2～0.7 %.

でのモデルの予測に反する異常な現象が現れる．Fig. 3 を見ると，この特異な沈降現象は体積濃度が 2.8 % 付近まで続くことがわかる．さらに，図から体積濃度 2.4 % 付近で界面沈降が最大となり，その後固体濃度の増加にともない沈降が起こりにくくなっていくことがわかる．一方，懸濁層内への気泡混入の起こらない，スターラー撹拌による界面沈降高さと時間の関係を Fig. 4 に示す．経過時間に対する界面沈降高さの変化は極めて微量であり，沈降現象の特徴は転倒撹拌に比べて大きく異なっている．変化の様子を見やすくするため，代表的な体積濃度の値を載せたが，測定された全ての試料濃度領域において同様の結果が得られた．

3.2 気泡混入による流路形成

沈降実験終了直後に界面上面を観察すると，転倒撹拌では懸濁層に流路のような穴が数多く見られ，側面からの観測によって流路の形成が確認された．一方，スターラー撹拌による界面沈降においては，懸濁層の界面上面及び側面の観測結果から流路の出現は全く見られなかった．

Photo 1 は，転倒撹拌による懸濁層の界面上面と側面を写したものである．界面上面に多数の黒い点が見えるが，それらは気泡によって作られた流路であり，側面から見ると鉛直方向に発達した流路を形成していることがわかる．一方，スターラー撹拌では，このような流路形成は全く見られなかった．このことから，鉛直流路は懸濁層に混入された気泡によって発生し，流路形成は沈降容器内に封入された空気が撹拌時に懸濁層に混入することによって生じることがわかる．

3.3 流路形成と界面沈降速度の関係

転倒撹拌及びスターラー撹拌による界面沈降速度は，Fig. 2 ～ Fig. 4 の沈降曲線に基づいて求めた．転倒撹拌の界面沈降速度は，Fig. 2, 3 に基づいて沈降開始時から 30 分間に起こる急激な界面沈降の平均速度を用いた．スターラー撹拌による界面沈降高さの変化はわずかであり，沈降曲線はおよそ直線的に変化するので（Fig. 4），その勾配から界面沈降速度を求めた．Fig. 5 に転倒撹拌とスターラー撹拌の界面沈降速度と体積濃度の関係を示す．流路が形成される転倒撹拌の界面沈降速度は，体積濃度 Φ が増加するにつれて大きくなっていき，Φ が 2 % 付近でピークに達した後，さらに Φ の増加にともなって沈降速度は急激に減少する．流路が形成されないスターラー撹拌の界面沈降速度は，体積濃度 Φ の増加にともなって減少していくが，測定された試料濃度領域で転倒撹拌に比べて極めて低い値になっていることがわかる．これらの実験事実は，流路形成が界面沈降速度を促進させる要因であることを明瞭に示している．

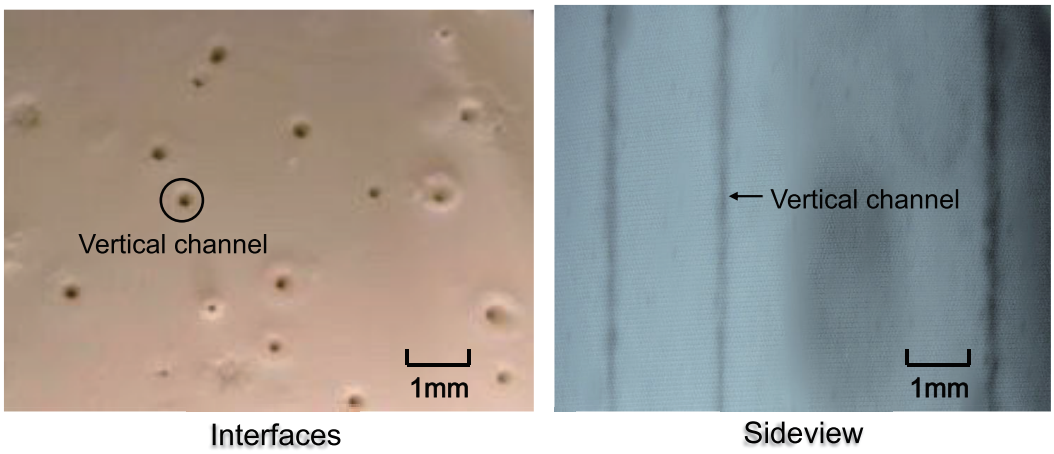


Photo 1 気泡によって形成された鉛直流路.
Situation of vertical channel formed by bubbling.

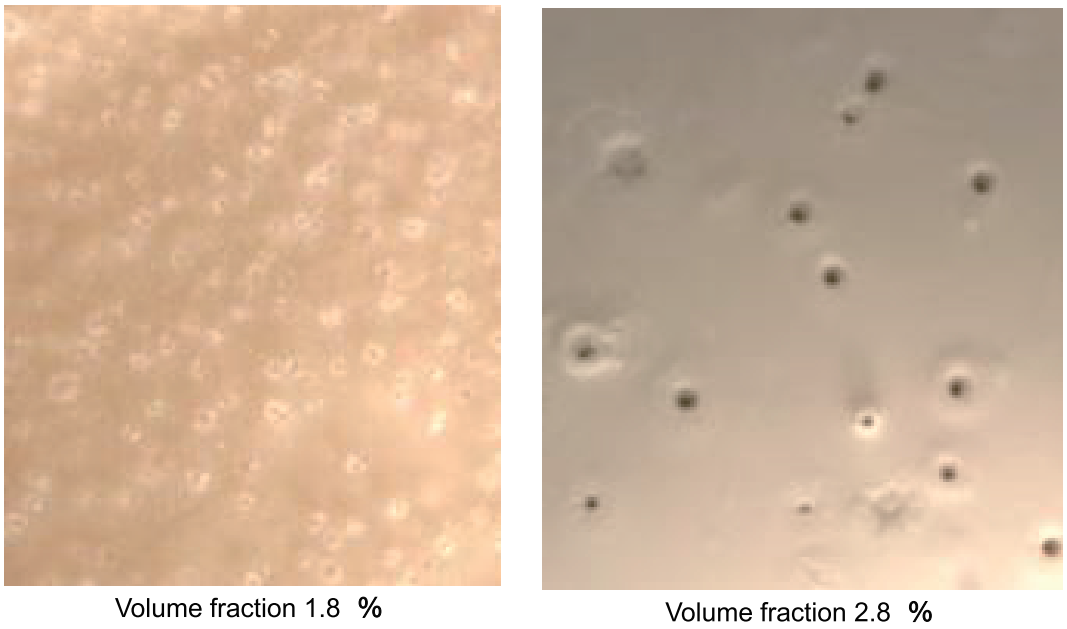


Photo 2 沈降界面上での鉛直流路の流出口の様子.
Outlets of vertical channels from the view of the sedimentation interface.

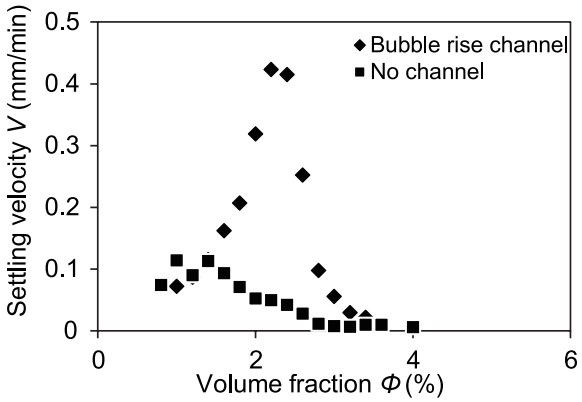


Fig. 5 鉛直流路の存在が界面沈降速度に及ぼす影響.
The effect of existence of vertical channel on settling velocity at each volume fraction.

4. 考察

4.1 凝集懸濁層に発生する鉛直流路の形態

界面上面から写した体積濃度 1.8 % と 2.8 % の流路の様子を Photo 2 に示す．写真から明らかなように，流路数は体積濃度の低い試料の方が多く，流路径は体積濃度の高い試料の方が大きくなっている．Photo 2 には体積濃度 1.8 % と 2.8 % の例を示したが，全ての体積濃度について画像から流路数と流路径を測定し，流路数と体積濃度の関係を Fig. 6 に，沈降界面上面から見た流路径と体積濃度の関係を Fig. 7 に示す．Photo 2 及び Fig. 6, 7 から，体積濃度の増加にともなって流路数は急激に減少していくが，流路径は逆に大きくなっていくことがわかる．このような現象は，懸濁液の固体濃度と粘度の関係に起因して生じる．すなわち，懸濁液の体積濃度が高くなるにつれて粘度が上昇するため，懸濁層内に混入した

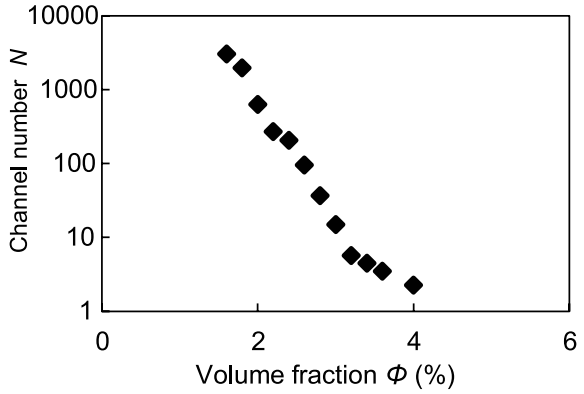


Fig. 6　体積濃度が気泡によって形成される鉛直流路数に及ぼす効果.
The effect of volume fraction on number of vertical channel formed by bubbling.

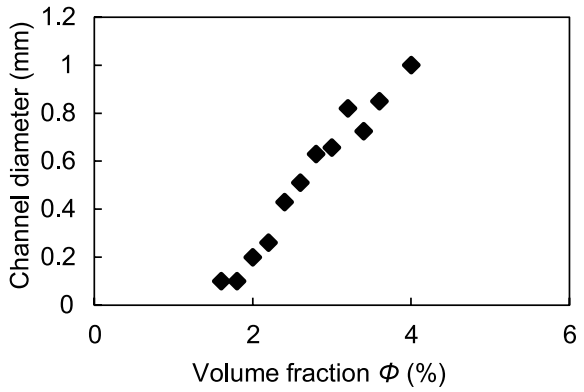


Fig. 7　体積濃度が鉛直流路径に及ぼす影響.
The effect of volume fraction on diameter of vertical channel.

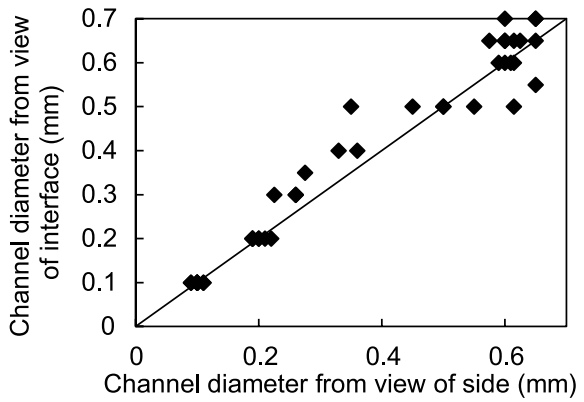


Fig. 8　沈降界面から測定された流路径と沈降容器側面から測定された流路径の比較.
The comparison of channel diameter measured from the interface and channel diameter measured from the side.

気泡が沈降界面に向って上昇しにくくなる．その結果，体積濃度の増加にともない流路が形成されにくくなり，流路数が著しく減少する．さらに，高粘度になるにつれて，浮力の強い大きな径の気泡だけが懸濁層内から沈降界面に向けて上昇して流路をつくるため，流路径が大きくなる．なお，気泡によって形成される流路径は懸濁層側面と沈降界面上面の出口とで異なる可能性がある．そこで，沈降界面上面から見た流路径（界面径）と沈降容器の側面から見た流路径（側面径）を比較するために，体積濃度ごとに界面と側面の流路径を測定し，両者の関係を Fig. 8 に示す．図からわかるように，沈降界面上面と側面の流路径がほぼ一致していることから，気泡によって形成される流路に異方性は見られず，流路径の形状はおよそ円管であることを示している．

4.2 鉛直流路を上昇する粘性流

既に 3.3 で述べたように，濃厚凝集懸濁液の沈降は，流路内を水が通って沈降界面から流出することによって促進される（Fig. 5）．しかしながら，Fig. 5 の結果のみからでは，流路を通って界面から流れ出る水量と沈降速度の関係が定量的に明らかにならない．そこで，流路内を上昇する粘性流の解析を行うことによって，鉛直流路を流れる流量が界面沈降速度にどのように寄与するのかを詳細に検討する．実験結果に基づいて，鉛直流路が形成されていないフロック懸濁層の界面沈降速度は極めて遅いため（Fig. 5），鉛直流路壁面からの透水はほぼ無視できる，さらに気泡によって形成される鉛直流路の形状はほぼ円管と見なせること（Fig. 8）から，この流路を上昇する粘性流に Hagen-Poiseuille の法則を適用して，沈降過程における流路内の流量を求める．

Hagen-Poiseuille 則によれば，円管内を流れる流量は次式で表わされる．

$$q_c = \pi/128\mu \cdot {d_c}^4 \cdot G \tag{1}$$

ここで，q_c は流量（$m^3\ s^{-1}$），μ は水の粘性係数（Pa · s），d_c は管路径（m），G は圧力勾配（$Pa\ m^{-1}$）である．式（1）は管路一本当たりの流量を求める式なので，N 本の管路に対する流量 Q_c は以下のようになる．

$$Q_c = N \cdot \pi/128\mu \cdot {d_c}^4 \cdot G \tag{2}$$

圧力勾配 G については，以下のようにして算定する．厚さ ΔZ の懸濁層に発生する圧力差 ΔP は，浮力を差引いた粒子の自重によって生じ，次式で表わされる．

$$\Delta P = (\rho_s - \rho_w)\, g \cdot \phi \cdot \Delta Z \tag{3}$$

上式で，ΔP は懸濁層 ΔZ 間の圧力差（$Pa\ m^{-2}$），ρ_s はカオリナイト粒子の密度（$kg\ m^{-3}$），ρ_w は水の密度（$kg\ m^{-3}$），g は重力加速度（$m\ s^{-2}$），ϕ はカオリナイト粒子の体積濃度，ΔZ は懸濁層の厚さ（m）である．圧力勾配 G は圧力差 ΔP を懸濁層の厚さ ΔZ で除して

$$G = (\rho_s - \rho_w)\, g \cdot \phi \tag{4}$$

となる．式（4）は浮力を除いた自重が圧力差として働いたときの圧力勾配である．沈降過程において懸濁層と壁面との摩擦によるせん断抵抗力 τ，及び土粒子間の接触による支持力 σ が作用すると，その分だけ圧力差が減少する．壁面摩擦抵抗力 τ について詳細に調べた結果，τ は界面沈降速度に依存し，非常にゆっくりとした

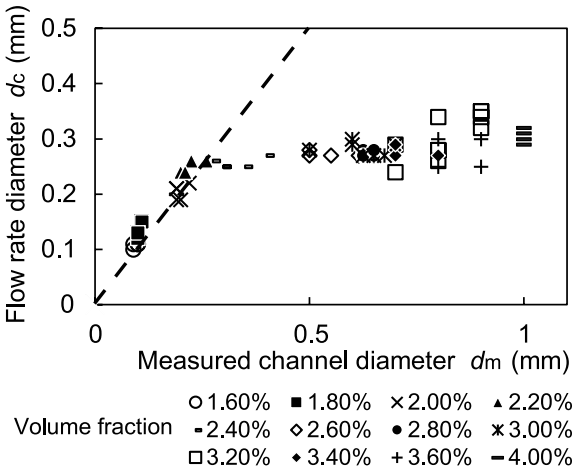


Fig. 9 界面沈降速度から算定した流路径と実測流路径の比較 — 骨格力を無視したときの流路径.
The comparison of channel diameter calculated based on settling velocity and measured channel diameter.
— Maximum low rate diameter line (Neglect the structural force effect).

緩速沈降でない限りほぼ無視できることがわかっている（Nakaishi et al., 2012）．また，沈降に伴う濃縮によって懸濁層の体積濃度が変化すると考えられるが，急速な界面沈降が生じる領域では，懸濁層の密度はほとんど変化しないことが実験的に確かめられている（Michaels and Bolger, 1962）．本論文では沈降開始直後から生じる急速な界面沈降の領域について調べていることから，これらのことを踏まえて鉛直流路を流れる流量の算定に τ 及び土粒子間の接触による支持力 σ の影響を無視した最大圧力勾配（式（4））を用いることにする．さらに，この最大圧力勾配を式（2）に代入することによって，τ と σ による抵抗力を無視した最大流量 Q_c が得られる．

4.3 鉛直流路内流量と界面沈降速度

質量保存則より沈降界面から流出する流量は，沈降容器の断面積に界面沈降速度を掛けた値に等しくなる．また，沈降界面の断面積に対する全ての流路の断面積の割合は極めて小さいことから，全鉛直流路からの流出量は流路が形成されていないときの界面上面からの流出量を差し引くと，次式で表わされる．

$$Q_m = AV - AV_0 \tag{5}$$

ここで，Q_m は形成されたすべての鉛直流路から流出する流量（$m^3\ s^{-1}$），A は沈降容器の断面積（m^2），V は流路が形成されているときの界面沈降速度（$m\ s^{-1}$），V_0 は流路が形成されていないときの界面沈降速度（$m^3\ s^{-1}$）である．さらに，Q_m を鉛直流路 1 本当たりの流量 q_m（$m^3\ s^{-1}$）に換算すると，次式が得られる．

$$q_m = Q_m/N = (AV - AV_0)/N \tag{6}$$

以上より，q_m は沈降容器の断面積と各々体積濃度での界面沈降速度 V，V_0，及び流路数 N を代入して求められる．なお，空気混入による撹拌とスターラー撹拌とでは撹拌方法が異なるものの，2.2.2 で述べたように基本的には転倒撹拌であることから，両者の撹拌方法によってフロックの構造に大差はないものと見なせる．よって，V_0 にはスターラー撹拌による流路形成のない界面沈降速度を用いることにする．

4.4 粘性流に基づく流路径と実測流路径の比較

界面沈降を引き起す主要因が鉛直流路内を流れる粘性流によるものとすれば，式（6）で得られる q_m と式（1）で得られる q_c，あるいは式（5）で得られる Q_m と式（2）で得られる Q_c は等価になるはずである．したがって，q_c と q_m または Q_c と Q_m を求めて両者を比較することで，流路形成が界面沈降速度に及ぼす効果を検討すればよいことになる．しかしながら，式（1）または式（2）より q_c，Q_c を算定するには鉛直流路径 d_c が必要なことから，ここでは $q_m = q_c$（$Q_m = Q_c$）の関係が成立するものと仮定して d_c を算定し，実測流路径 d_m と比較することで鉛直流路内の流れと界面沈降速度の関係を定量的に評価することにする．

各々体積濃度における界面沈降速度及び流路数のデータ（Fig. 5, 6）に基づいて式（6）より q_m を算定し，$q_m = q_c$ として式（1），（4）を用いて流路径 d_c を求める．得られた d_c 値は，界面沈降速度から算定した任意の体積濃度における平均流路径であり，ここでは流速流路径と呼ぶことにする．一方，実測流路径 d_m については，体積濃度ごとに沈降界面上面から計測した全ての流路径の 4 乗平均から算出した．Fig. 9 に，流速流路径 d_c と実測流路径 d_m との関係を示す．同一体積濃度で沈降実験を 3 ～ 5 回ほど繰り返し行っていることから，それらの実測流路径と流速流路径をすべて図にプロットした．また，図中の直線は，d_c と d_m の等しい点を結んだものである．Fig. 9 からわかるように，d_m と d_c の値は，体積濃度が 2.2 % より低い濃度の懸濁層に形成される 0.3 mm 以下の流路径でほぼ一致する．しかしながら，体積濃度が 2.2 % を越えると，流速流路径 d_c は実測流路径 d_m よりも著しく小さく見積もられ，体積濃度の増加にともなってわずかばかりの増加を示しているに過ぎない．この事実は，体積濃度が 1.1 % ～ 2.2 % の領域における特異な界面沈降は，圧密現象などではなく気泡によって形成された鉛直流路の流れによって引き起されることを示している．体積濃度が 2.2 % を越える領域においては，懸濁液の粘度が大きくなることから浮力の大きい大径の気泡によってのみ鉛直流路が形成されるため，流路数は激減し流路径は大きくなる（Photo 2, Fig. 6, 7）．さらに，流路内の流れを支配する圧力勾配 G は，体積濃度の増加に伴って土粒子間の接触による支持力が大きくなるため，式（4）で得られる最大圧力勾配よりも大きく減少する．その結果，鉛直流路内を流れる流量は極端に少なくなり，界面沈降速度は著しく抑制される（Fig. 5 参照）．したがって，Fig. 9 に示すように，体積濃度の増加にともなって流速流路径 d_c はほとんど増加せず，実測流路径 d_m のみが大きくなる現象が現れ，界面沈降速度は流路径や流路数による影響をほとんど受けないことがわ

かる，このように，体積濃度 2.2 % を境に界面沈降現象の違いが明瞭に現れることは興味深い現象である．流動現象から見ると体積濃度 2.2 % 付近は界面沈降が大きく変わる力学的な転移点であり，降伏現象として捉えることができる．

5. おわりに

本研究では，体積濃度 1.1 % 以上の濃厚な凝集カオリナイト懸濁液における特異な界面沈降特性のメカニズムを明らかにするため，一般的に行われている転倒撹拌と空気混入のない撹拌の二つの方法を用いて，高い精度での沈降速度の計測と気泡によって形成される流路の観測を行った．その結果，固体体積濃度が 1.1 % を越える領域における界面沈降速度は，鉛直流路の有無によって大きく異なることがわかった．すなわち，従来から広く用いられている撹拌方法である転倒撹拌では，気泡が発生することによって懸濁層内に鉛直流路が形成され，その存在が高い試料濃度にもかかわらず界面沈降を促進させる働きをしていることがわかった．この実験事実を定量的に評価するため，Hagen-Poiseuille の法則に基づいて鉛直流路を上昇する粘性流の解析を行った結果，平均流路径が 0.3 mm 以下での界面沈降速度はほぼ流路内を流れる流量によって決まることがわかった．このことは，流路径が 0.3 mm 以下に相当する体積濃度 1.1 ～ 2.2 % の領域における凝集カオリナイト懸濁液の界面沈降は，鉛直流路の流れに支配されることを示している．体積濃度が 2.2 % を越えると，界面沈降速度は試料濃度の増加に対して急激に減少し，鉛直流路内の流れはほとんど見られなくなる．このような現象は，鉛直流路内を流れる粘性流を支配する圧力勾配が急激に小さくなることに起因する．すなわち，体積濃度が 2.2 % 以上の濃度領域（流路径 0.3 mm 以上）になると，土粒子間の接触による支持力が強く作用するため，自重（浮力を除く）による懸濁層の圧力差が著しく低下し，流路内を流れる流量は少なくなるものと考えられる．今後，濃厚な凝集粘土懸濁液の沈降特性についてより詳細に研究を進め，固液分離の効率化など技術的開発に繋げていきたい．

謝辞

本研究は，茨城大学農学部物質動態工学研究室祖父江亮介，鈴木由紀両氏の協力をいただいて行われ，科学研究費補助金（基盤研究（C），21580292）の補助を受けた．ここに記して謝意を表します．

引用文献

Akther, S., Hwang, J. and Lee, H. (2008): Sedimentation characteristics of two commercial bentonites in aqueous suspensions. Clay Minerals, 43: 449–457.

Allain, C., Cloitre, M. and Wafra, M. (1995): Aggregation and sedimentation in colloidal suspensions. Physical Review Letters, 74: 1478–1481.

Allain C., Cloitre, M. and Parisse, F. (1996): Settling by cluster deposition in aggregating colloidal suspensions. J. Colloid and Interface Science, 178: 411–416.

Arsenijević, Z.Lj., Grbavčić, Ž.B., Garić-Grulović, R.V. and Bošković-Vragolović, N.M. (2010): Wall effects on the velocities of a single sphere settling in a stagnant and countercurrent fluid and rising in a co-current fluid. Powder Technology, 203: 207–242.

Becker, L.E., McKinley, G.H. and Stone, H.A. (1996): Sedimentation of a sphere near a plane wall: Weak non-Newtonian and inertial effects. J Non-Newtonian Fluid Mechanics, 63: 201–233.

Bessho, K. and Degueldre, C. (2009): Generation and sedimentation of colloidal bentonite particles in water. Applied Clay Science, 43: 253–259.

Chhabra, R.P., Agarwal, S. and Chaudhary, K. (2003): A note on wall effect on the terminal falling velocity of a sphere in quiescent Newtonian media in cylindrical tubes. Powder Technology, 129: 53–58.

Gonzalez, A.E. (2001): Colloidal aggregation with sedimentation: Computer simulations. Physical Review Letters, 86: 1243–1246.

Gonzalez, A.E., Odriozola, G. and Leone, R. (2004): Colloidal aggregation with sedimentation: Concentration effects. European Physical Journal, E (13): 165–178.

Imai, G. (1980): Settling behavior of clay suspension. Soils and Foundations, 20 (2): 61–77.

Imai, G. (1981): Experimental studies on sedimentation mechanism and sediment formation of clay materials. Soils and Foundations, 21 (1): 7–20.

Kim, S. and Palomino, A.M. (2009): Polyacrylamide-treated kaolin: A fabric study. Applied Clay Science, 45: 270–279.

Kuroda, Y., Nakaishi, K. and Adachi, Y. (2003): Settling velocity and structure of kaolinite floc in sodium chloride solution. Clay Science, 12: 103–107.

Lall, A.M., Khare, A.S., Joshi, J.B. and Nigam K.D.P. (1989): Behavior of solid particles in viscous non-Newtonian solutions: Settling velocity, Wall effects and bed expansion in solid-liquid fluidized beds. Powder Technology, 57: 39–50.

Melton, I.E. and Rand, B. (1976): Particle interactions in a kaolinite suspensions 3—Sedimentation volumes. Journal of Colloid & Interface Science, 60: 331–336.

Michaels, A.S. and Bolger, J.C. (1962): Settling rates and sediment volumes of flocculated kaolin suspensions. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1: 24–33.

Nakaishi, K., Ooi, S. and Kobayashi, M. (2012): Effects of container diameter and volume fraction on the sedimentation process of flocculated clay suspensions. Nihon Reoroji Gakkaishi, 40: 205–208.

Nasser, M.S. and James, A.E. (2006): The effect of polyacrylamide charge density and molecular weight on the floccula-

tion and sedimentation behavior of kaolinite suspensions. Separation and Purification Technology, 52: 241–252.

Ooi, S., Nakaishi, K., Sohue, R., Kinose, K. and Taruya, H. (2007): Effect of volume-fraction on sedimentation of flocculated clay suspensions. Filtration and Separation Symposium '08, 29–33.

Richardoson, J.F. and Zaki, W.N. (1954): Sedimentation and fluidization: part 1. Transactions of The Institution of Chemical Engineers, 32: 35–53.

三分一政男，中倉英雄，大佐々邦久 (1987): 濃厚スラリーの界面沈降速度と初高の影響. 日本鉱業会誌, 103: 109–114.

Sekiguchi, I., Nakaishi, K. and Ooi, S. (2004): Effects of container diameter and volume fraction on the sedimentation process of flocculated clay suspension. XIVth International Congress on Rheology, 14, SU631–633.

van Olphen, H. (1977): An introduction to Clay Colloid Chemistry. pp. 121–125, John Wiley & Sons, Inc., New York.

Watts, C.W., Whalley, W.R., Bird, N.R.A. and Ashman, M.R. (2000): The effect of iron concentration, hindered settling, saturating cation and aggregate density of clays on the size distribution determined by gravitation X-ray sedimentometry. European Journal of Soil Science, 51: 305–311.

要　　旨

流路の形成が界面沈降速度に及ぼす効果については，これまで明らかにされていない．ここでは，体積濃度が気泡上昇によって形成される鉛直流路の形状や流路内を流れる流量に及ぼす効果を検討した．具体的には，読取顕微鏡に接続されたモニターに映し出された画像から界面沈降速度，流路径，流路数を測定した．さらに，これらのデータに基づいて流路内を流れる流量を算定し，Hagen-Poiseuille 式から求めた流路の流量と比較した．得られた結果は以下の通りである．固体体積濃度 1.1 ～ 4.0 % では，人工的に気泡上昇させないと鉛直流路が形成されなかった．固体濃度の増加にともない，鉛直流路数は著しく減少するが，一方流路径は増加する．その結果として，体積濃度 2.2 % で界面沈降速度のピークが見られた．次いで，土粒子間の接触による支持力の効果が無視できるとして，体積濃度ごとに Hagen-Poiseuille 式を用いて沈降速度から算定した平均流路径（流量径）と実測径との関係を比較した．体積濃度 2.2 % 以下の低い固体濃度では，気泡上昇流による流路径は実測径とほぼ一致したが，2.2 % を越える高い固体濃度では算定された流量径は，実測流路径より著しく小さくなった．この事実から，土粒子間の接触による支持力の重要性が示された．

キーワード：界面沈降速度，鉛直流路，カオリナイト懸濁液，Hagen-Poiseuille 流れ，気泡上昇