J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 96, p. 19〜26（2004）

海成粘土の沈降様式，沈降速度，ゼータ電位について

近　藤　文　義*

Settling Pattern, Settling Rate and Zeta Potential of Marine Clay

Fumiyoshi KONDO*

* Faculty of Agriculture, University of Miyazaki, 1-1 Gakuen Kibanadai-nishi, Miyazaki 889-2192, Japan

1. はじめに

粘土泥水の沈降様式と沈降速度は，汚濁水の凝集沈殿処理や土木現場での浚渫作業，さらに沿岸低平地における干潟の発達過程に関わる重要な因子であり，それぞれの分野で研究が盛んに行われている。また，ゼータ電位は，微粒子系の分散凝集状態を評価するための指標として有用であり，その実測も比較的容易なものである（北原ら，1995）。

矢野ら（1978）は，2種類の海成粘土とカオリナイト及びベントナイトを使用し，泥水の初期含水比と塩濃度の違いに基づき，各種粘土の沈降様式を単粒子自由沈降，凝集性自由沈降，界面沈降，圧密沈降の4タイプに分類した。このような4タイプの沈降様式は，粘土泥水についてだけでなく，化学工学における水処理過程においても認められるものである（Fitch, 1979）。Imai（1980）は，粘土泥水の沈降速度について比較検討し，粘土粒子が凝集の際に形成したフロックの大きさや密度の違いが沈降速度に関与しているであろうと推測した。大坪（1983）は，蒸留水を使用して初期含水比を調製した場合，吸着陽イオンの違いがカオリナイト，モンモリロナイト及びベントナイトの沈降形態に大きく影響することを明らかにした。朴ら（1994）は，比較的高い塩濃度の条件下において，有明海底泥の沈降曲線が，その粒度組成と初期懸濁濃度の影響を大きく受けることを明らかにした。これらの研究は，粘土泥水の沈降特性について，粒子の物理・化学的性質との関連から定性的に考察したものであり，鉱物学的な要因を含めた各種要因の影響に関する定量的な検討は行われていない。

著者らは，主に，2種類の有明粘土である諫早湾粘土と有明干拓粘土の沈降様式と海水中における沈降速度に影響する要因，4種類の粘土鉱物試料であるカオリナイト，モンモリロナイト，イライト，クロライトの沈降様式と沈降速度，カナダ東部の海成クイッククレイであるレダクレイの沈降様式に影響する要因を実験的に明らかにしてきた。本報は，著者らのこれまでの研究成果（近藤ら，1996 a ; 1996 b ; 1999 ; 2003 a ; 2003 b）を総括し，海成粘土の沈降様式，沈降速度，ゼータ電位について紹介したものである。

2. 有明粘土と4種類の粘土鉱物試料の沈降様式

2.1 沈降様式の分類

粘土泥水の沈降様式は，粘土の種類と状態，および堆積環境によって決まる。粘土泥水においては状態量を表す密度と含水比は相伴って変化するので，粘土の状態量として初期含水比を，堆積環境条件として塩濃度を選ぶと，泥水の沈降様式は一般に単粒子自由沈降，凝集性自由沈降，界面沈降，圧密沈降の4タイプに分類される（図1）。それぞれの沈降様式の特徴は次の通りである（矢野ら，1978 ; 高田ら，1979）。

単粒子自由沈降は，塩濃度が低く初期含水比が高い場合に主に観察されるタイプであり，土粒子が分散状態のまま自由沈降し，粒径数μm未満の粘土またはコロイド粒子が長時間懸濁する。凝集性自由沈降は，塩濃度が臨界凝集値より高く初期含水比が高い場合に観察されるタイプであり，土粒子が大小様々なフロックを形成し，大きいフロックから小さいフロックの順に自由沈降していくために明瞭な界面は形成されないが上澄み液は短時間の内に清澄になる。界面沈降は，凝集性自由沈降の場合よりも初期含水比が低い場合に観察されるタイプであり，フロックが一様な速度で沈降するため上澄み液と沈降土粒子群との間には明瞭な界面が形成される。圧密沈降は，界面沈降の場合よりも更に初期含水比が低い場合に観察されるタイプであり，土粒子濃度が高く粒子間には有効応力が作用するためフロックを見掛け上形成せず，個々の土粒子が相互に接触し合い自重圧密するため

* 宮崎大学農学部　〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1
キーワード：海成粘土，沈降様式，沈降速度，ゼータ電位

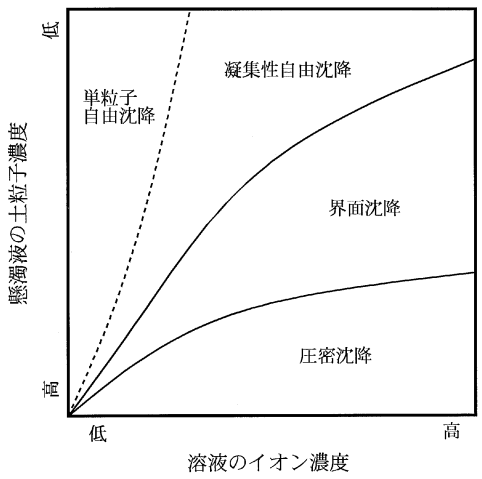


図-1 沈降様式の概念図

Fig. 1 Schematic diagram of settling pattern.

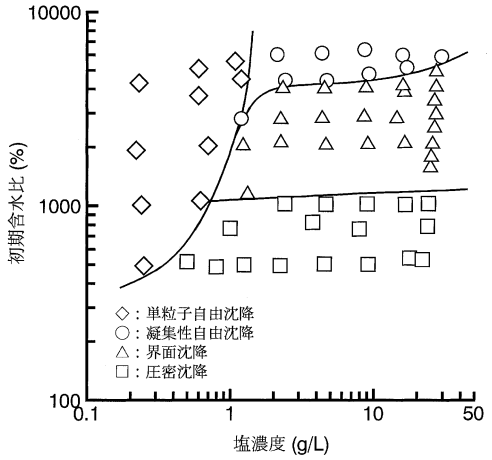


図-2 有明干拓粘土の沈降様式

Fig. 2 Settling pattern of Ariake-kantaku clay.

沈降速度が極めて緩慢である。なお，これらの沈降様式の特徴について，Imai（1980）は写真撮影によりフロックや界面の形成状況を詳細に観察し，また，渡辺ら(1979)は4つの沈降タイプの特徴を模式図として解説している。さらに，一般的な微粒子群の沈降様式の特徴については最新の土木学会水理公式集（1999）にも紹介されているので参考にして頂きたい。

以上の特徴をもとにして，諫早湾粘土と有明干拓粘土，4種類の粘土鉱物試料，およびレダクレイ（カナダ東部のクイッククレイ）の沈降様式を分類した。本研究では，沈降様式の分類は肉眼観察によった。判断の規準は，単粒子自由沈降と凝集性自由沈降の区別に対しては微細粒子の懸濁状態の有無により，凝集性自由沈降と界面沈降の区別に対しては明瞭な界面形成の有無により，界面沈降と圧密沈降の区別に対しては見掛け上のフロック形成の有無である。なお，界面沈降と圧密沈降の違いは，後の図4と図5に示す時間-沈降曲線の形状の違いとして反映されるものである。

2.2 諫早湾粘土と有明干拓粘土の沈降様式

沈降様式の一例として，有明干拓粘土の場合について示したのが図2である（近藤ら，1996 a）。図中の実線は，上記4種類の沈降様式の出現領域を境界線で区分したものである。なお，本文中において特に断りがない場合は，塩濃度として天然海水およびその希釈溶液についての電気伝導度の測定値から換算して求めたものを使用している。

有明干拓粘土の泥水は，塩濃度が0.5 g/L以下では初期含水比に拘わらず単粒子自由沈降となり，塩濃度が1 g/L以上においては初期含水比が5,000%以上であれば凝集性自由沈降，初期含水比が5,000～1,000%の場合には界面沈降，初期含水比が1,000%以下では圧密沈降になる。この傾向は，諫早湾粘土についてもほぼ同様であり，両有明粘土の沈降様式について特に違いは認められなかった。

諫早湾粘土と有明干拓粘土の沈降様式において，4種類の沈降タイプの出現領域およびそれらの境界線の特徴は，何れも既往の研究（矢野ら，1978；今井，1980）で報告されているカオリナイト，ベントナイト，東京湾粘土，大阪湾粘土，仙台湾粘土と比較すると，同じ海成粘土である東京湾粘土などに類似している。また，本研究で使用した2種類の有明粘土を含めた各種海成粘土において，4種類の沈降タイプの出現領域は，一般に図1で示した沈降様式の概念図に沿ったものであることが分かる。

2.3 4種類の粘土鉱物試料の沈降様式

カオリナイトの沈降様式は，塩濃度の影響を受けず初期含水比の違いによってのみ決まり，凝集性自由沈降，界面沈降，圧密沈降の3種類の沈降様式を示し，単粒子自由沈降は示さない。カオリナイトの沈降様式は，初期含水比が4,000%以上であれば凝集性自由沈降，初期含水比が3,000～750%であれば界面沈降，初期含水比が750%以下であれば圧密沈降になる。

モンモリロナイトの沈降様式は，通常確認される4種類の沈降様式の他に，初期含水比と塩濃度が共に低い場合は，寒天状態で全く沈降しない領域も存在した。モンモリロナイトの沈降様式は，塩濃度が10 g/L以上の場合，初期含水比が3,000%以上であれば凝集性自由沈降，初期含水比が2,500～750%であれば界面沈降，初期含水比が750%以下であれば圧密沈降になる。塩濃度が10 g/L以下の場合は，高含水比の界面沈降が塩濃度の低下

と共に凝集性自由沈降に移行した。また，塩濃度が 0.5 g/L 以下の場合は，初期含水比が 4,000% 以上であれば単粒子自由沈降を示した。

イライトの沈降様式は，塩濃度が 1 g/L 以上の場合においては塩濃度の影響を受けない。この場合，初期含水比が 6,000% 以上であれば凝集性自由沈降，初期含水比が 4,000〜750% であれば界面沈降，初期含水比が 750% 以下であれば圧密沈降になる。塩濃度が 1 g/L 以下の場合は，高含水比の界面沈降が塩濃度の低下と共に凝集性自由沈降に移行し，塩濃度が 0.2 g/L 以下になると，上澄み液が長時間懸濁状態を示し，単粒子自由沈降に移行した。

クロライトの沈降様式は，塩濃度の影響をほとんど受けず初期含水比の違いによってのみ決まり，単粒子自由沈降は示さない。クロライトの沈降様式は，初期含水比が 3,000% 以上で凝集性自由沈降，初期含水比が 2,500% 〜750% であれば界面沈降，初期含水比が 500% 以下であれば圧密沈降を示し，カオリナイトの沈降様式に比較的類似した傾向を示した。

2.4　有明粘土に含まれるスメクタイトの低膨潤性と沈降様式

諫早湾粘土と有明干拓粘土の沈降様式において，凝集性自由沈降，界面沈降，圧密沈降から単粒子自由沈降に移行する初期含水比は，塩濃度の低下に伴い低くなる。この点は，モンモリロナイトの場合とは逆の傾向であり，イライトの場合に比較的近いのが特徴である。また，イライトの沈降様式は，本研究に使用した 4 種類の粘土鉱物試料の中では，既に報告されている各種海成粘土の沈降様式（矢野ら，1978 ; 今井，1980）にも最も近い傾向を示した。

モンモリロナイトは，層間に各種水和イオンを保持し，この陽イオンは水分子を介在して層荷電と結合しているため著しい膨潤性を示す（三枝，1989）。一方，イライトは，層荷電は非交換性の K で中和されているため，層荷電が多い割に膨潤性を示さない（三枝，1989）。その結果，モンモリロナイトとイライトは，同じ 2 : 1 型粘土鉱物であるが，陽イオン交換容量が大きく異なり，活性度や液性限界も大きく異なる。前節で紹介したモンモリロナイトとイライトの沈降様式が大きく異なるのは，塩濃度の低下に伴いモンモリロナイトの場合は膨潤が，イライトの場合は分散が反映されたものである。

スメクタイトは，モンモリロナイト群と同義語であり，近年ではモンモリロナイトの代わりにこの名称が用いられている。スメクタイトは，その膨潤性から高膨潤性粘土鉱物と呼ばれるが，浅海底堆積物中のスメクタイトは有明粘土も含めて高膨潤性ではなくむしろ低膨潤性であると考えられている（江頭，1984 ; Wilson, 1987）。大坪（1981）は，有明干拓廻里江工区より採土した有明粘土において，Na 土と Ca 土についての液性限界の測定結果が塩濃度の増加に伴い増加する点は通常のモンモリロナイトの場合とは逆の傾向であること，さらに同粘土についての膨潤圧の測定結果（大坪ら，1985）から，この有明粘土中のスメクタイトが低膨潤性であることを確認した。本研究に使用した諫早湾粘土と有明干拓粘土の沈降様式がモンモリロナイトではなくイライトの沈降様式に比較的よく類似している結果より，両粘土の主要粘土鉱物であるスメクタイトは，通常の高膨潤性タイプとは異なる低膨潤性タイプであることが再確認される。

3.　レダクレイの沈降様式に影響する要因

3.1　レダクレイの沈降様式

レダクレイは，カナダ東部オンタリオ州に広く分布し，地すべり粘土として知られているクイッククレイ（鋭敏粘土）である。X 線回折分析の結果から，本研究に使用したレダクレイ試料の主要鉱物は石英，長石，角閃石，イライト，クロライトであり，低活性の粘土であることを確認した。

図 3 は，初期含水比を 500〜6,000%，塩濃度を 0.5〜30 g/L の範囲で変化させた場合について，Na 飽和したレダクレイ泥水の沈降様式を示したものである（Kondo *et al.*, 2003 a）。Na 飽和したレダクレイの泥水は，界面沈降が観察された最も低い初期含水比 500% の場合を除き，塩濃度が 1 g/L 以下では初期含水比に拘わらず単粒子自由沈降となった。単粒子自由沈降の生じる限界の塩濃度は，泥水の初期含水比の減少に伴い次第に減少した。塩

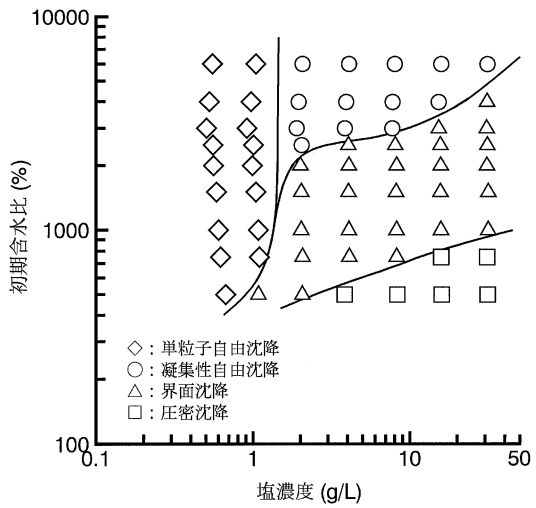


図-3　Na 飽和したレダクレイの沈降様式

Fig. 3　Settling pattern of Na-saturated Leda clay.

濃度が高い場合は，凝集系の沈降様式である凝集性自由沈降，界面沈降，圧密沈降が観察された。凝集性自由沈降は高含水比の場合のみ観察されたが，これの生じる限界の初期含水比は塩濃度の増加に伴い増加した。同様に，界面沈降は主に初期含水比が750～2,500％の区間で観察されたが，これの生じる上限と下限の初期含水比は共に塩濃度の増加に伴い増加した。圧密沈降は，低含水比の場合のみ観察されたが，これの生じる限界の初期含水比は塩濃度の増加に伴い増加した。

レダクレイの沈降様式は，本研究に使用した2種類の有明粘土の場合と同様に，各種の海成粘土および粘土鉱物試料ではイライトに最も近い傾向を示した。

3.2 クイッククレイの発達過程に影響する要因と沈降様式

Torrance（1983）は，クイッククレイの発達過程において，塩水中または多価イオンの吸着を伴うような粘土の堆積環境状態が堆積後における塩分溶脱後の鋭敏比を高める要因のひとつであることを述べている。従来より，海成粘土において，塩濃度の低下に伴う液性限界と沈定容積（沈降体積）の変化傾向から粘土の膨潤性の有無について判断されている（大坪，1981）。この結果，粘土が低膨潤性であれば塩分溶脱に伴いクイッククレイに発達する可能性があることが明らかにされている（江頭・大坪，1984）。

粘土泥水の凝集状態での沈降様式は，粘土粒子の凝集の程度を反映した物理量でもあるため，沈降様式とその影響要因を把握することはクイッククレイの発達過程を解明するための有用な指標でもある。ここでは，有明粘土と工学的性質の類似した海成のクイッククレイであるレダクレイについて，その沈降様式に影響する要因を詳細に検討した結果について述べる。なお，有明粘土がスメクタイト質であるのに対して，レダクレイは非スメクタイト質である点が両者の最も著しい相違点である。

レダクレイ泥水の沈降様式は，鉱物学的および化学的要因の影響を受けることが予想される。照査対象となるレダクレイ試料（Na飽和，2μm以下の粒度59％，主に低活性鉱物から構成される）については，粘土分含有量の増加，高膨潤性スメクタイトの添加，Na以外のイオンの存在，酸化に伴う1％以下の含有有機物の除去により，沈降様式の違いを示す含水比と塩濃度の変化に応じた境界線は低塩濃度かつ高含水比（凝集の強い側）へ移行した。すなわち，単粒子自由沈降の境界線が低塩濃度側に，また，凝集性自由沈降，界面沈降および圧密沈降を示す2本の境界線も高含水比側へと変化した。

一方で，上記の境界線は，粒状酸化鉄の添加，粘土分含有量の減少，ピートソイルから抽出したフルボ酸とフミン酸からなる有機物の添加により高塩濃度かつ低含水比（凝集の弱い側）へと移行した。すなわち，単粒子自由沈降の境界線が高塩濃度側に，また，凝集性自由沈降，界面沈降および圧密沈降を示す2本の境界線も低含水比側へと変化した。特に，この有機物の添加による影響が最も顕著であった。

4. 有明粘土の沈降速度に影響する要因

4.1 諫早湾粘土と有明干拓粘土の沈降速度の特徴

塩濃度を海水に近い26～28 g/Lとし，初期含水比(w_0)を500～5,000％にした場合における有明干拓粘土の時間-沈降曲線が図4，5である。初期含水比が1,000％以上の場合，図4に示すような界面沈降が生じ，1,000％以下の場合には図5に示すような圧密沈降となり，沈降速度が極めて緩慢になる。なお，有明干拓粘土は初期含水比が5,000％以上の場合，図2に示すように界面沈降から凝集性自由沈降に移行した。

図4に示している界面沈降は，初期含水比が約2,500％を境にして，静置後は速やかに等速沈降を開始するタイプと，ある一定時間を経たのち等速沈降を開始するタイプとに分けられる。有明干拓粘土においては，初期含水比が約2,500％より低い場合，Michaels and Bolger（1962）の指摘する試料とシリンダー壁面との摩擦効果が時間-沈降曲線に影響しているものと考えられる。

図6は，時間-沈降曲線における等速沈降部分の傾きから最小自乗法によって求めた沈降速度を初期含水比に対して示したものである（近藤ら，1996 a）。諫早湾粘土は，初期含水比の増加に伴い，沈降速度がほぼ直線的に増加している。また，有明干拓粘土も初期含水比の増加に伴い，沈降速度はやや増加しているが，初期含水比が2,500％以上になると，ほぼ一定になる。このように，同一の初期含水比における沈降速度は，有明干拓粘土よりも諫早湾粘土の方が大きく，その差は初期含水比の増加とともに大きくなる。諫早湾粘土と有明干拓粘土の試料土は，自然状態での塩濃度に違いがある。しかし，脱塩処理した諫早湾粘土を用いた場合においても，その沈降速度は不変である。両粘土は，物理・化学的性質と粘土鉱物組成が比較的類似しているにも拘わらず，沈降速度に大きな違いがある。しかし，その要因は試料土の塩濃度の違いによるものではない。なお，塩濃度30 g/L程度の海水中において，両粘土のフロック形態を写真倍率66倍の顕微鏡写真により観察した。両粘土ともにフロックは凝集状態を示しているが，諫早湾粘土が綿毛の発達した粒径の大きいフロックを形成しているのに対して，有明干拓粘土は微細なフロックを多数形成しているのが特徴的である。このフロック形態の違いが，界面沈降にお

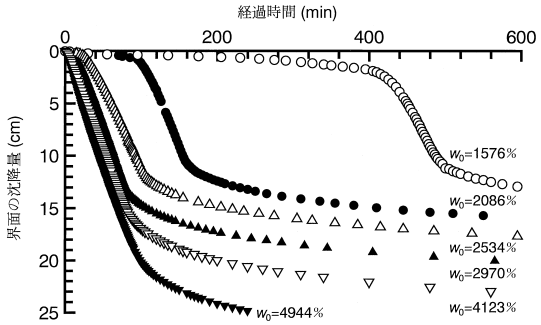


図-4　有明干拓粘土の界面沈降における時間-沈降曲線（海水中）

Fig. 4　Time-settling curves of typical zone settling for Ariake-kantaku clay in sea water.

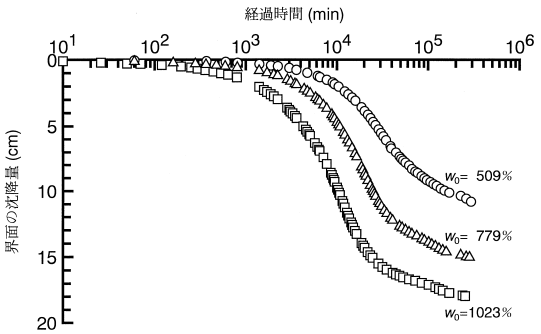


図-5　有明干拓粘土の圧密沈降における時間-沈降曲線（海水中）

Fig. 5　Time-settling curves of typical consolidation settling for Ariake-kantaku clay in sea water.

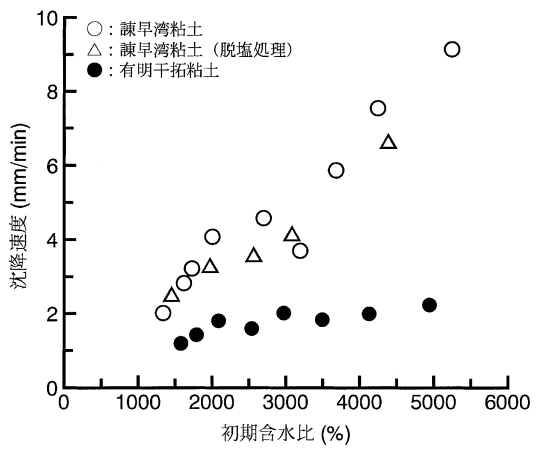


図-6　沈降速度と初期含水比の関係（海水中）

Fig. 6　Relationship between settling rate and initial water content in sea water.

ける沈降速度の違いに現れていると推察される。

ただし，沈降速度に影響する要因として，フロックの大きさだけでなく，フロック間の粒子間作用力やフロックの透水性も他に考えられる。また，諫早湾粘土と有明干拓粘土は物理・化学的性質，粘土鉱物組成，沈降様式が何れも類似しているにもかかわらずフロックの形態のみが大きく異なっている。現時点でこの理由は明らかになっていないので，この点を踏まえて沈降速度とフロック形態との関わりについては別途検討していきたい。

4. 2　諫早湾粘土と有明干拓粘土の沈降速度に影響する要因

沈降途中の粘土粒子が大きなフロックを形成すると，沈降速度は早くなる。フロックの形成に関わりがあると推定される因子の中で，諫早湾粘土と有明干拓粘土において違いが認められるのは，粘土鉱物ではスメクタイトの含有量，交換性陽イオンでは Ca の含有量，さらに粘土の結合に関わりがある酸化鉄の含有量である。そこで，自然状態の両粘土に対して陽イオン交換処理，脱鉄処理，有機物除去を行った後に海水中で沈降実験を行った。なお，初期含水比は何れも界面沈降領域の 4,000% とした。

陽イオン交換処理や脱鉄処理を施した場合の時間-沈降曲線は，両試料土ともに自然状態の場合と大差なく，諫早湾粘土の方が有明干拓粘土よりも沈降速度は 4 倍程度大きい。しかし，有機物を除去した場合の時間-沈降曲線は，両試料土ともに自然状態の場合と大きく異なっている。有機物を除去した試料土の沈降速度は，自然状態のそれに比べてかなり減少しているが，その減少割合は有明干拓粘土よりも諫早湾粘土の方が顕著である。有機物を除去したことによって，初期含水比に拘わらず，諫早湾粘土と有明干拓粘土の海水中における沈降速度の違いは，比較的小さくなっている。

図 7 は，6% の過酸化水素水の添加量を変え有機物の除去割合を変化させて海水中で行った沈降実験結果である（近藤ら，1996 a）。自然状態すなわち過酸化水素水を無添加の場合における沈降速度が両試料土ともに最大であり，過酸化水素水の添加量が増加し，有機物含有量が減少するのに伴い，両試料土ともに沈降速度は減少している。

これらの実験結果から，自然状態における諫早湾粘土と有明干拓粘土の海水中での沈降速度の違いは，交換性陽イオンや酸化鉄含有量の違いではなく，両試料土中の有機物成分の違いに起因すると推察された。

5.　有明粘土のゼータ電位

図 8 は，諫早湾粘土と有明干拓粘土の塩濃度を 0.05〜

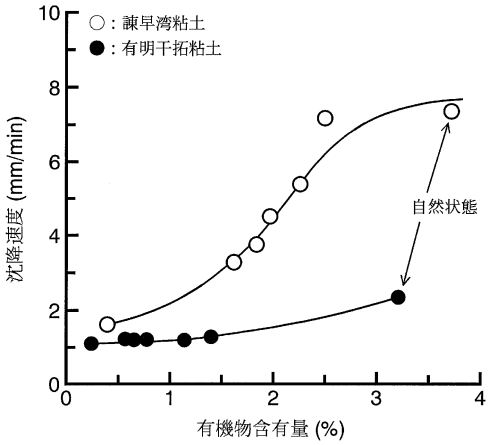


図-7 沈降速度と有機物含有量の関係（w_0＝4,000%）

Fig. 7 Relationship between settling rate and organic matter content in sea water (w_0= 4,000%).

16 g/Lの範囲で変化させた場合のゼータ電位の変化を示したものである（近藤ら，1996 a）。ゼータ電位の測定は，通常の顕微鏡式電気泳動装置によって行った。写真 1 に示す測定装置は，N社の生物顕微鏡を使用し，田中（1979 a）によって解説されている手順に準拠して自作したものである。また，泳動速度およびゼータ電位の計算は，田中（1979 b）および森・岡本（1980）の手順に準拠した。

電気泳動移動度から Smoluchowski 式によってゼータ電位を計算する際，電気二重層の変形や粒子表面の粗さ，さらに粒径分布の評価などの問題点がある（渡辺・西沢，1972）。したがって，本研究に使用した不規則形状の多分散試料について，厳密なゼータ電位の値を決定することは不可能であり，本論で求めたゼータ電位は見掛け上の値であることは否定できない。しかし，工学的には，粘土粒子のゼータ電位が何 mV の時に分散凝集の状態がどの程度であるかを実験的に把握しておくことは有益な情報となり得るものである。

塩濃度が高くなるに伴い，両粘土のゼータ電位は緩やかに高くなる。諫早湾粘土と有明干拓粘土のゼータ電位を比較した場合，塩濃度 0.05～0.2 g/L の範囲では，諫早湾粘土のゼータ電位が 5 mV 程度高く，塩濃度 0.3～16 g/L の範囲においては明瞭な差異はないが，諫早湾粘土がやや高めであった。

両粘土の沈降様式は，塩濃度が 0.5～1 g/L 以上であれば，粘土粒子の分散状態を示す単粒子自由沈降からそれ以外の凝集性の沈降タイプに移行した。塩濃度が 0.5～1 g/L 以上である試料のゼータ電位は，図 8 から－20～－18 mV 以上であることがわかる。Yong and Sethi

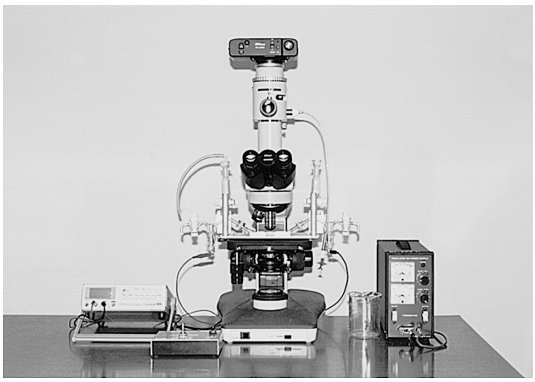


写真-1 顕微鏡式電気泳動装置

Photo. 1 Microelectrophoretic device.

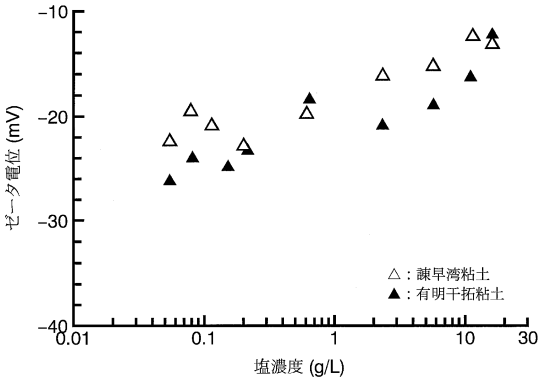


図-8 ゼータ電位と塩濃度の関係

Fig. 8 Relationship between zeta potential and salt concentration.

（1977）の文献によれば，粘土粒子が凝集を起こし始める場合の平均的なゼータ電位は，－20～－11 mV の範囲内にあるとされている。両有明粘土における凝集開始のゼータ電位もこの範囲内であった。また，この点は別に実施した 4 種類の粘土鉱物試料であるカオリナイト，モンモリロナイト，イライト，クロライトに関するゼータ電位の測定結果においても同様の結果が得られた。

6. ま と め

1） 諫早湾粘土と有明干拓粘土の沈降様式は，モンモリロナイトではなくイライトの沈降様式に類似している。この理由として，両有明粘土の主要粘土鉱物であるスメクタイトが低膨潤性タイプであるためと推定した。

2） レダクレイの 4 タイプの沈降様式に影響する要因として，スメクタイト含有量，酸化鉄含有量，有機物含有量，粘土分含有量の影響を実験的に検討した。この場合，

有機物含有量と粘土分含有量の影響が顕著であった。

3）諫早湾粘土と有明干拓粘土の沈降速度に影響する要因を検討するために，陽イオン交換処理，脱鉄処理，有機物除去処理を行った結果，有機物の影響が最も顕著であった。

4）諫早湾粘土と有明干拓粘土において，単粒子自由沈降からそれ以外の凝集性の沈降タイプに移行し始める場合のゼータ電位は，－20～－18 mV 以上であった。

謝　　辞

本研究を取りまとめるに際し，日頃よりご指導頂いている九州大学の高山昌照名誉教授と大坪政美教授，およびカールトン大学（カナダ）の J.K. Torrance 教授に厚くお礼を申し上げる次第です。

引　用　文　献

江頭和彦・大坪政美（1984）：浅海底堆積物中に含まれるスメクタイトの低膨潤性．日土肥誌，**55**：321–324.

Fitch, B. (1979) : Sedimentation of flocculent suspensions. AIChE Journal, **25** (6) : 913–930.

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

北原文雄・古澤邦夫・尾崎正孝・大島広行（1995）：ゼータ電位―微粒子界面の物理化学―．サイエンティスト社：99–114.

近藤文義・高山昌照・大坪政美・東　孝寛・國武昌人（1996 a）：有明粘土の沈降様式と沈降速度に影響する要因．農土論集，**182**：49–56.

近藤文義・國武昌人・高山昌照・野木芳幸（1996 b）：カオリナイト，モンモリロナイト，イライトの沈降様式と沈降速度について―沈降特性に及ぼす初期含水比と塩濃度の影響―．農土論集，**185**：73–80.

Kondo, F., Kunitake, M., Takayama, M. and Ohtsubo, M. (1999) : Effects of salt concentration on settling pattern and sediment volume of low-swelling smectitic marine clays. Proc. of the 11th International Clay Conference, Ottawa, 1997 : 781–786.

Kondo, F. and Torrance, J.K. (2003 a) : Physical, chemical and mineralogical influences on the settling patterns of thoroughly disturbed soft marine clay. Trans. JSIDRE, **223** : 89–97.

近藤文義・斎藤優子・金山素平・中園健文（2003 b）：クロライトの沈降・分散凝集特性とゼータ電位について．農土論集，**228**：83–89.

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

三枝正彦（1989）：季刊化学総説 No4 土の化学．学会出版センター：50–56.

森　祐行・岡本寿夫（1980）：顕微鏡電気泳動法における長方形セル内の流れの解析．浮選，**27**(3)：117–126.

大坪国順（1983）：底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究．国立公害研究所研究報告，**42**：29–77.

大坪政美（1981）：海成粘土の液性限界・沈定容積に及ぼす塩濃度の影響．農土論集，**96**：1–5.

Ohtsubo, M., Egashira, K. and Takayama, M. (1985) : Properties of a low-swelling smectitic marine clay of interest in soil engineering. Canadian Geotechnical Journal, **22** : 241–245.

朴　鍾和・瀬口昌洋・加藤　治（1994）：静止海水中における浮泥の界面沈降特性．農土論集，**172**：113–121.

高田直俊・今井五郎・木山正明（1979）：浚渫粘土の圧密沈下（その 1）．土と基礎，**27**（4）：101–108.

田中浩雄（1979 a）：顕微鏡電気泳動法によるゼータ電位の測り方（Ⅰ）．紙パ技協誌，**33**（2）：29–36.

田中浩雄（1979 b）：顕微鏡電気泳動法によるゼータ電位の測り方（Ⅱ）．紙パ技協誌，**33**（3）：25–34.

土木学会（1999）：水理公式集第 4 章水処理：386–389，丸善，東京.

Torrance, J.K. (1983) : Towards a general model of quick clay development. Sedimentology, **30** : 547–555.

渡辺　潔・藤本昌宣・瀬口昌洋（1979）：有明海浅海域潟土の懸濁粒子の沈降特性．佐賀大学農学彙報，**47**：89–101.

渡辺　昌・西沢和夫（1972）：ζ電位測定上の諸問題．電気化学，**40**（1）：2–8.

Wilson, W.J. (1987) : Soil smectites and related interstratified minerals. Proc. of the 8th International Clay Conference, Denver, 1985 : 167–173.

矢野弘一郎・今井五郎・鶴谷和夫（1978）：粘土泥水の沈降特性．第 13 回土質工学研究発表会講演集：249–252.

Yong, R.N. and Sethi, A.J. (1977) : Turbidity and zeta potential measurements of clay dispersibility. ASTM Special Technical Publication, 623 : 419–431.

受稿年月日：2003 年 12 月 5 日
受理年月日：2004 年 2 月 16 日

近藤氏講演に関する質疑

赤江剛夫（岡山大学環境理工学部）：

界面沈降と圧密沈降を区別されていましたが，沈降様式の違いを形態的に説明頂ければと思います。また，内部構造の違いについても教えて下さい。

近藤：

時間–沈降曲線の形態の違いから界面沈降と圧密沈降を区別しています。粒子間に有効応力が働かない状態で粒子が落下していくのが界面沈降，粒子同士の接触相互作用によって圧密と同じように間隙水を排出しながら沈降，沈下していくのが圧密沈降です。圧密沈降は自重圧密と言い換えても良いです。ただ，両者の境界となる初期含水比が実験に用いるシリンダー径に支配されてしまうのはなぜか，ということについてはまだ整理が出来ていません。今回発表した実験では，界面沈降ではフロックが形成されていく様子が肉眼で観察されました。圧密沈降の場合はシリンダー内の土粒子群がゲル状になっており，フロックのようなものは肉眼では観察されませんでした。