

底泥の沈降特性に関する研究
Study on the settling properties of muds

国立公害研究所 正 員 ○大 坪 国 順
国立公害研究所 正 員 村 岡 浩 爾

1. まえがき

底泥の沈降特性の解明は、現地での底泥の堆積状態を把握するために重要であると同時に、液性限界、粒度構成、流動特性 etc. の物性量とともに、底泥の流送特性との関係を検討するうえでも必要である。

そのために、初期濃度が比較的高い場合の底泥の種類・初期濃度（含水比）・初期高さが、最終圧密高さや最終状態での底泥の含水比の鉛直方向特性に及ぼす影響を検討した。その結果、界面沈降を示したのものについて、最終沈降高さと底泥の粘度との間に一定の関係を見出した。また、底泥の種類によって同一初期含水比でも沈降形態に違いが現れるので、その理由を三種類の粘土を対象として考察した。さらに、底泥の沈降現象には自重圧密の影響が大きいことが明らかとなったので、沈降現象を記述する方程式を考え、その式から最終状態の底泥の濃度の鉛直分布を記述する方程式を導き、その解が実験結果を定性的に説明できることを示す。

2. 実験条件および方法

実験を行なった底泥の種類を表-1に示す。実験に用いた沈降筒は、内径6 cmの透明アクリル円筒である。初期高さ H_0 は23 cmと11.5 cmの2種類である。

底泥に蒸留水を加え目的の初期含水比 w_0 に調整し、5分間攪拌して均一にする。それを沈降筒に流し込み蓋をしたのち静置する。この時刻をゼロとして、その後適当な時間間隔で界面高さもしくは沈積面高さ H を測定する。原則として6日後を最終状態とした。実験終了後は、底泥の含水比測定のためのサンプリングを行なった。初期含水比 w_0 の条件は 表-1の◎、○および*印の位置で示される。表中 w_0 の表示は対数座標を用いた。

3. 実験結果と考察¹⁾

表-1の各印は、沈降形態を表わす。沈降形態には、 H_0 の影響は現れなかった。◎印は、最終時まで、界面も沈積面も現れない場合で、最終状態での含水比 w_∞ も一様に w_0 のままであった。○印は、界面が現れ、それが時間とともに低下した場合で、界面沈降・圧縮沈降に分類される。*印は、自由沈降に分類されるもので沈積面が現われ、その高さがゆっくり増加するものである。

表-1 底泥の種類と沈降形態

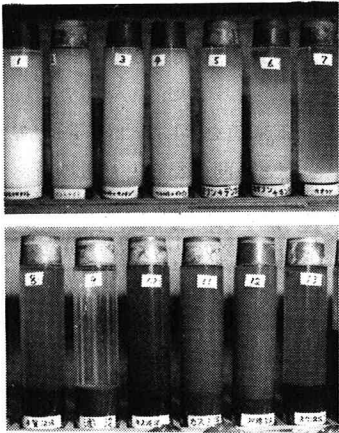
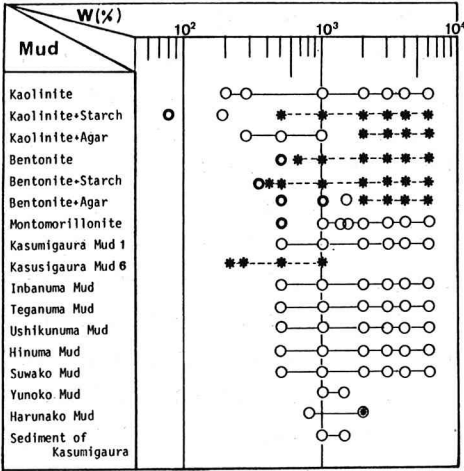


写真-1 底泥の最終沈降状態（6日間）

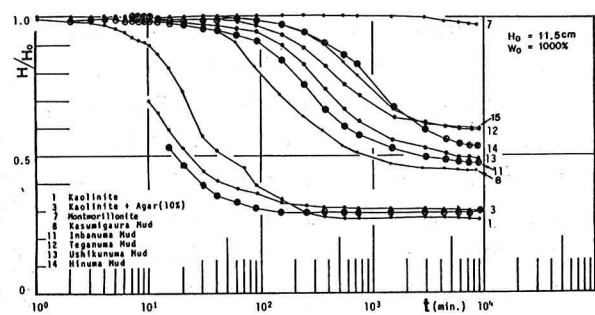


図-1 沈降曲線（同一初期含水比）

この場合、沈積面の上部に高濃度の懸濁液が存在した。写真-1は、最終状態の一例である。条件は $H_0 = 23.0 \text{ cm}$, $w_0 = 4000\%$ である。 N_0 , 2~6の底泥では沈積面が、他の底泥では界面が認められる。

図-1は、 w_0 , H_0 が同じ条件の各底泥の沈降曲線である。 w_0 , H_0 が同じでも、底泥によって H_∞/H_0 がかなり異なることがわかる。ここで H_∞ は最終沈降高さである。図-2は、印旛沼底泥とベントナイトの $H \sim t$ 曲線である。前者は界面高さを、後者は沈積面高さを示す。 w_0 の増大に伴ない、 H_∞ は減少する。 w_0 が同じ条件では $H_0 = 11.5 \text{ cm}$ の H_∞/H_0 がわずかに大きい。

図-3は、 $H_0 = 23 \text{ cm}$ での H_∞/H_0 と w_0 との関係である。各底泥とも、比例定数は異なるが H_∞/H_0 は w_0 の5分の4乗に反比例する。比例定数は、液性限界値の高い底泥ほど大きい傾向が認められた。 w_0 が大きい場合、底泥の乾燥重量 W_s は w_0 にはほぼ反比例するので、図-3は H_∞/H_0 が W_s に正比例しないことを示す。図-4は、初期状態での底泥の粘度 η_1 が同一条件での沈降曲線である。この場合 w_0 は底泥により異なる。各底泥の H_∞/H_0 はほぼ一定の値となる。表-2に、 $\eta_1 = 0.7, 1, 2 \text{ poise}$ の値に対する H_∞/H_0 の値を示した。図-5は、界面沈降の場合の H_∞/H_0 と η_1 との関係を示したものである。記号にヒゲの付いた結果は $H_0 = 11.5 \text{ cm}$ の場合である。結果のパラッキもあり、 H_0 の影響が明確でないが、 H_0 が同一条件では、 H_∞/H_0 と η_1 とは一義的な関係が認められる。もう1つの粘度 η_2 に対しても H_∞/H_0 は別な一義の関係が認められた。大垣³⁾も同様な結果を得ており、 H_∞/H_0 が、流動特性に深く関与すると考えられている有効濃度の有効な指標であると結論づけている。

次に、自重圧密の影響について検討する。表-2の r_H は w_0 が同一の条件で求めた、 $(H_\infty/H_0)_B / (H_\infty/H_0)_A$ の値である。下つきA, Bは $H_0 = 23.0 \text{ cm}$, $H_0 = 11.5 \text{ cm}$ を示す。 w_0 が同一条件では、 $W_{sA} = 2W_{sB}$ の関係が成立する。自重による圧密がなければ、 $r_H = 1$ となるべきであるが、ほとんど $1 \leq r_H < 1.1$ なる結果となった。これは、自重圧密により W_s が大きな底泥が下層部でより圧密されるため、 H_∞/H_0 が小さくなったと考えられる。図-6は、最終状態での底泥の堆

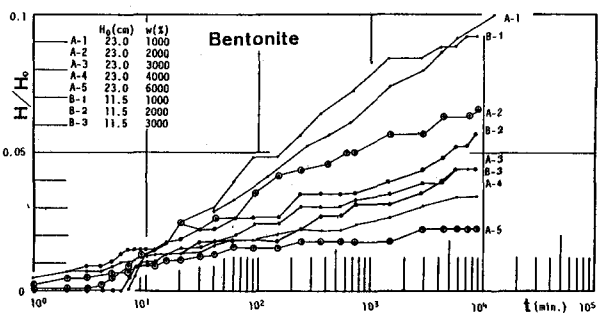
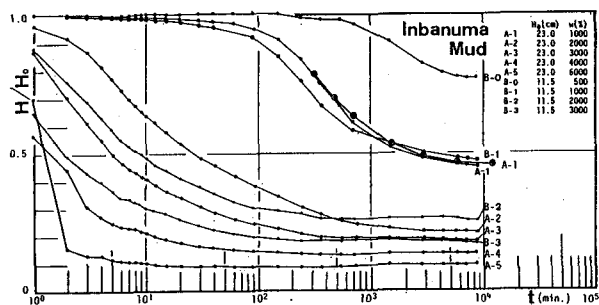


図-2 沈降曲線と沈積面高さ

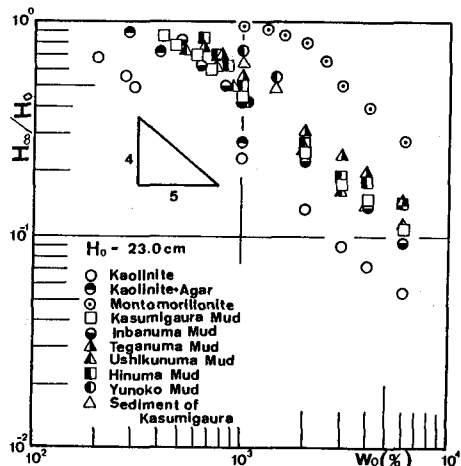


図-3 最終沈降体積比と初期含水比の関係

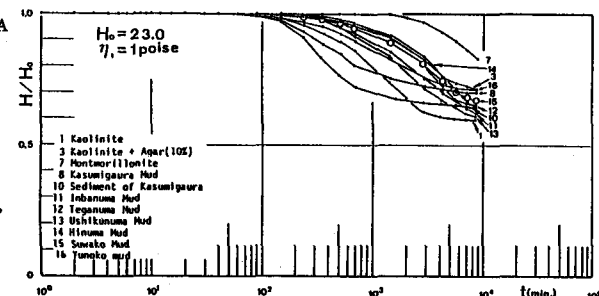


図-4 沈降曲線 (初期状態の粘度一定)

積状態を表わすものとして、底泥の含水比の鉛直方向分布を示したものである。諏訪湖泥とカオリナイトの場合を示した。 w_∞ が界面からの距離とともに低下しており、自重圧密の効果が現れている。 w_∞ の変化は界面付近で急で、下層に向うほど緩慢となる。表-2の f_H は、 w_s が同じで w_0 が異なる場合の、 $H_{\infty B}/H_{\infty A}$ の値である。全ての条件において $f_H < 1$ となり、 W_s が同一の条件では、 w_0 が大きいものほど H_∞ が大きくなることを示す。この事実は、図-6の結果にも現れている。

w_∞ の鉛直方向分布は、 W_s が同じでも、 w_0 の大きなものほど、同一界面下での w_∞ が大きくなっている。 w_0 が同じであれば、 W_s が異なる場合、 H_∞ 自体は異なるが同一界面下での w_∞ はほぼ等しいことがわかる。

図-7は、最終状態での底泥の平均粒径 d_m の鉛直方向分布を示す。粒度分布は、3分間プロペラ攪拌した試料を光透過式粒度測定器（液相沈降法）を用いて測定した。粒度分布の特徴は、 $d_{50} < d_m \approx \sigma_d$ である。ここで、 d_{50} は中央粒径、 σ_d は粒度分布のs. d.である。最下層の d_m が若干大きくなる傾向があるが、全体的には d_m は鉛直方向にはほぼ一定である。低含水比の沈降においては、底泥内部に形成される綱目構造などにより、大粒径粒子も系全体として沈降しやすいと思われる。 d_m がとびぬけて高い結果は、測定誤差ではなく、試料の代表性の問題である。

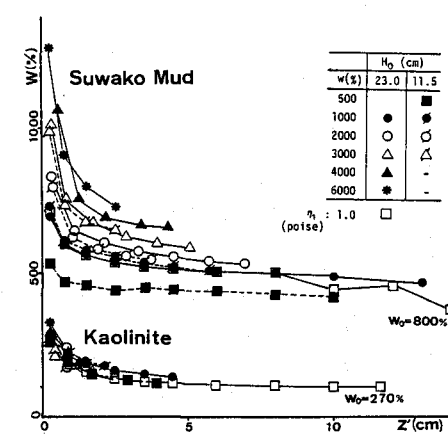


図-6 含水比の鉛直方向変化 ($z=0$ が界面)

表-2 各粘度値に対する最終沈降体積比、自重圧密の評価に関する特性値

Mud	H_∞/H_0 (H_0 23cm)			f_H			f_H			
	η_i (poise)			w (%)			W_s (g)			
	0.7	1.0	2.0	1000	2000	3000	62.6	32.0	16.1	10.8
Kaolinite	0.50	0.53	0.67	1.13	1.00	1.05	0.78	0.93	0.87	0.92
Montmorillonite	0.52	0.58	0.83	1.01	1.00	1.07	0.57	0.63	0.91	0.94
Kasumigaura Mud	0.60	0.70	0.77	0.98	1.06	1.09	0.92	0.71	0.97	0.90
Inbanuma Mud	0.51	0.63	0.80	1.05	1.11	1.05	0.88	0.98	0.98	0.95
Teganuma Mud	0.59	0.66	0.75	1.04	1.08	1.10	0.79	0.84	0.87	0.93
Ushikunuma Mud	0.50	0.62	0.72	1.05	1.08	1.06	0.91	0.85	0.93	0.83
Hinuma Mud	0.52	0.65	0.83	1.00	1.10	1.18	0.85	0.94	0.97	0.96
Suwako Mud	-	0.67	-	1.04	1.03	1.06	0.83	0.93	0.87	0.84
Yunoko Mud	0.49	0.65	-	-	-	-	-	-	-	-
Sediment of Kasumigaura	0.55	0.71	-	-	-	-	-	-	-	-

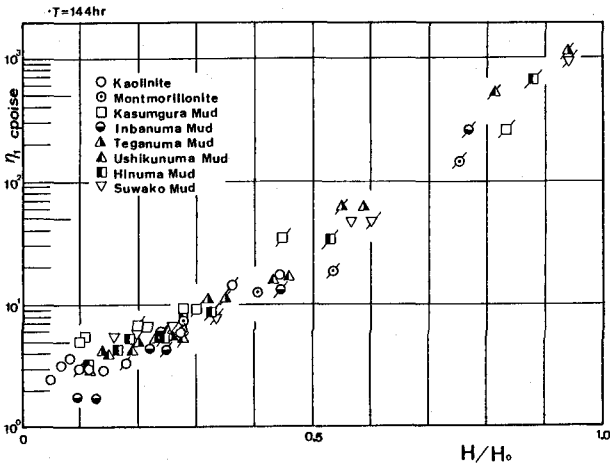


図-5 粘度と最終沈降体積比の関係

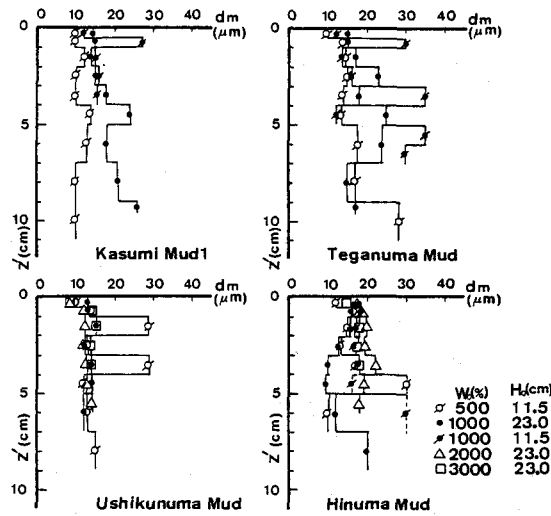


図-7 底泥の平均粒径の鉛直方向分布

4. 土粒子の分散および凝集

表-1, 写真-1で示したように, w_0 が同じでも底泥の種類によって沈降形態が異なる。この原因を探り, カオリナイト, ベントナイト, モンモリロナイトを選んで検証した。底泥の沈降特性は, 土粒子の分散, 凝集作用に支配されている。粘土粒子が溶液に接すると, 電気二重層を形成する。(図-8参照)これをミセルといい, 1つ1つのミセルは電氣的に中性である。土粒子の分散・凝集はDLVO理論によって説明される。粒子間には, 電気二重層の重なり合いに基づく静電反発力と普遍的に働くVan der Waals力がある。二種の力の関係を図-9に示す。 V_R は静電反発エネルギー, V_A が吸引エネルギー, V が全エネルギーである。 V_{max} が十分大きければ, ブラウン運動などで近づいてきた粒子を反発させ安定な分散状態となる。 V_{max} が小さかったり, 負になると凝集する。分散系における V_A は容易に変化しないので, V_R を大きくすることにより安定な状態が実現される。 V_R が大きいということは, 電気二重層が厚いということである。電気二重層が厚くなる条件としては, ①土粒子の陽イオン交換容量(CEC)が大きい。②吸着陽イオンの解離度が大きい。③溶液中の電解質が一価の原子価の陽イオンを持ち, その濃度が低い。④溶液がアルカリ性である。ことなどである。¹⁾

カオリナイトとモンモリロナイトではCECが大幅に異なるが, 沈降形態は同じであり, 一方, ベントナイトはモンモリロナイトの不純物で, 両者のCECはほとんど同じであるにも関わらず, 沈降形態は異なる。また, 溶液は蒸留水を用いた。以上のことから, 上記の三つの粘土の沈降形態は, 吸着陽イオンの違いによるものと推察される。電気二重層が厚くなる吸着陽イオンの順位は, 一般に, $Li^+ > Na^+ > K^+ > NH_4^+ > Mg^{2+} > H^+ > Ca^{2+} > Ba^{2+} > Al^{3+}$ となる。三つの粘土の吸着陽イオンの種類と量はプラズマ発光分光分析装置(ICP)の測定結果から推定される。カオリナイトはCECのうち約75%が Al^{3+} , Ca^{2+} で, ベントナイトは定量総和の91.5me/100gのうち75%が Na^+ で, モンモリロナイトは90%近くが H^+ で占められていることがわかった。PHは, カオリナイトが中性, ベントナイトが弱アルカリ性, モンモリロナイトが弱酸性であり, この特性はICPの結果から説明できるものである。カオリナイトとモンモリロナイトが界面を形成したのは, Ca^{2+} , Al^{3+} および H^+ が吸着しているためであり, ベントナイトで微細粒子の分散系が現れたのは Na^+ が吸着しているためであると結論付けた。これを確認するために, 粘土の吸着性陽イオンを置換して沈降形態の変化を調べた。カオリナイトとモンモリロナイトは Na^+ に置換し, ベントナイトは Ca^{2+} に置換した。写真-2は3つの粘土の置換前と後の沈降形態を比較したものである。6日後の状態では, 各粘土ごとの w_0 は同一条件であり, カオリナイトとベントナイトは2000%, モンモリロナイトは4000%である。カオリナイトとモンモリロナイトでは Na^+ に置換したものに, 微細粒子の分散系が認められる。ベントナイトは Ca^{2+} に置換後は界面を形成した。3つの粘土は吸着陽イオンによって沈降形態が一転することがわかり, 上記の結論が確認された。

界面沈降を呈した底泥は, 先の論文²⁾で第一底泥グループに分類されたものであり, 分散状態を呈した底泥は第2グループに分類されたものであった。吸着性陽イオンを置換した場合でも, 沈降形態, 流動特性が共に変化してその関係は成立する。

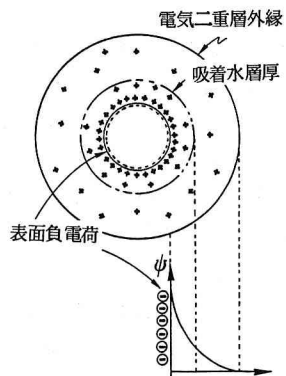


図-8 電気二重層

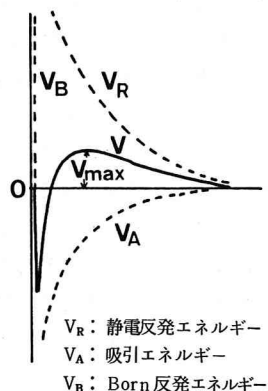


図-9 吸引・反発エネルギー

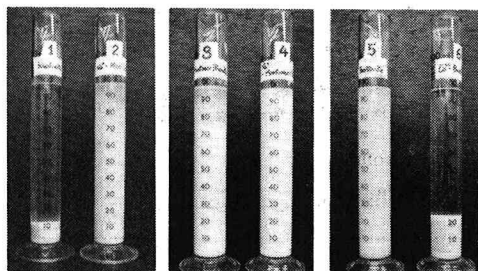


写真-2 吸着性陽イオンの違いによる沈降形態の変化

5. 沈降曲線に関する実験，理論式

沈降曲線は，底泥の種類，濃度，凝集状態などに応じて種々の形態をとるが，普通図-10に示すようである。最初のある時間までは，定速沈降区間が存在し，この期間を過ぎると減速沈降区間に入り，界面直下の底泥濃度が初期値より大きくなり，界面沈下速度は徐々に減少してゆく。この後に，圧縮脱水区間が存在するが，それが始まる時間には諸説がある。従来から沈降曲線の形状を表現するいろいろの実験・経験式が提案されているが，圧密沈降区間に入らない沈降現象に対しては Work-Kohler の関係式が有名である。 C_0 が同一で H_0 の異なる沈降曲線が相互に相似関係にあるという経験式である。

$$H/H_0 = f(t/H_0) \quad \cdots (1)$$

図-11 は今回の沈降実験で得られた沈降曲線を式(1)によって整理したものの一例である。他の底泥もおおむね式(1)の関係が成立していた。式(1)は H_0 が異なる沈降曲線は推測できるが， w_0 が異なると不可能である。

本格的な理論的研究としては Kynch の理論がある。Kynch は，均質スラリーのある層の沈降速度はその部分の局所的濃度のみの関数であるとの仮定にもとづき，物質収支のみから沈降曲線および沈降層中の濃度分布についての重要な結論を得た。基本式は，

$$\partial C / \partial t + \partial (CR) / \partial h = 0 \quad \cdots (2)$$

である。 C は濃度， R は上向きを正とした沈降速度， h は鉛直上向きの座標である。 CR は単位面積，単位時間に沈降する固体質量である。検討の結果，Work-Kohler の関係は，Kynch の理論によって説明できることが明らかになった。Kynch の理論によれば，同一スラリーについて1本の沈降曲線が求められれば，任意の C_0 ， H_0 の条件の沈降曲線が得られる。図-12 は C と R の関係である。カオリナイトと諏訪湖泥の結果である。Kynch の仮定がほぼ満足されている。しかし，Kynch の理論は圧密沈降区間には適用し得ない。¹⁾

6. 圧密沈降に関する理論的考察

圧密沈降に関する理論的研究も少なくない。圧密沈降の特色は，自重による圧密現象であり，全層厚に比して圧密量が大きいことである。これらの特徴は Terzaghi の圧密理論の基礎となる仮定が成立していないことを示す。一般の圧密沈降の理論では，過剰間隙水圧，間隙水圧，有効圧に関する拡散型の微分方程式を導き，圧密量が大きいことを考慮して Lagrange 座標に変換して解析しているものがほとんどである。近年，Kos et al.⁴⁾ に始まって，固液二相流の立場から，圧密沈降区間を含めた沈降現象全般を記述する拡散型偏微分方程式を誘導し，解析する研究が行なわれるようになった。^{5) 6)} 各研究者により，基本変数や座標の取り方・解析方法に若干の違いはあるが，本質的には同一のものである。固相，液相の支

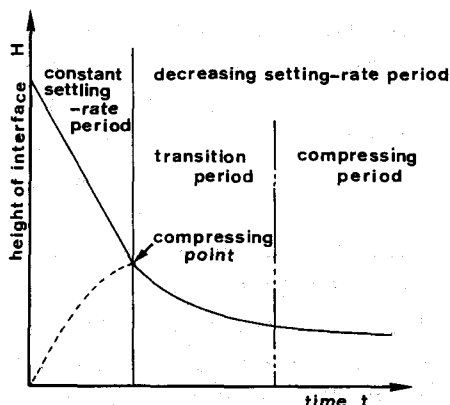


図-10 沈降曲線の説明図

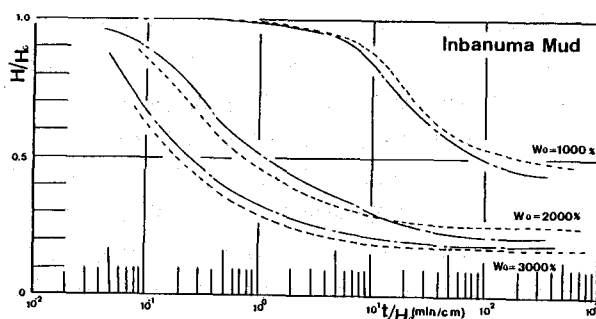


図-11 沈降曲線 (Work-Kohler の方法)

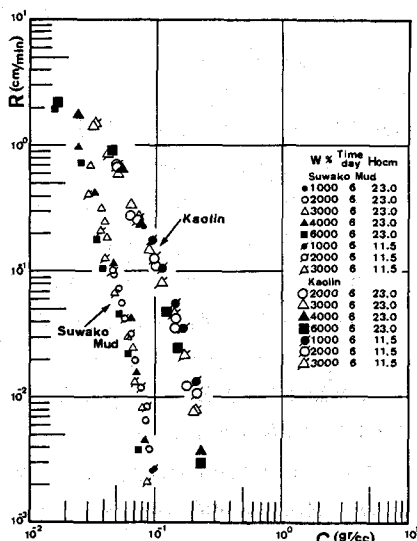


図-12 濃度と沈降速度の関係

配方程式は次の通りである。

$$\text{連続式} \quad \text{固相} \quad \partial(1-n)/\partial t + \{(1-n)u_s\}/\partial z = 0 \quad \dots(3)$$

$$\text{液相} \quad \partial n/\partial t + \partial(nu)/\partial z = 0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{運動方程式} \quad \text{固相} \quad (1-n)\partial p/\partial z + \partial p_s/\partial z - F(n)(u-u_s) + (1-n)\sigma g = 0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{液相} \quad n\partial p/\partial z + F(n)(u-u_s) + n\rho g = 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

式(5)、(6)においては、沈降現象が非常に緩慢な現象であるとして、加速度項などを無視したものである。ここで、 n ：底泥の空隙率、 u ：液相の速度、 u_s ：固相の速度、 p ：液相の圧力、 p_s ：固相の圧力、 σ ：底泥の真密度、 ρ ：水の密度、 g ：重力加速度、 $F(n)$ ：固相と液相の速度差に比例する力に関する比例定数で、一種の抵抗係数、 z ：鉛直上向き固定座標である。自由および定速沈降区間では $p_s=0$ である。また、沈降筒内の沈降現象では、次式が成立する。 $(1-n)u_s + nu = 0 \quad \dots\dots\dots(7)$

$C=(1-n)\sigma$ 、 $m_v=-\partial n/\partial p_s$ 、 $F(n)=n^2\rho g/K(n)$ の関係をを用い、式(3)～(7)を適当に整理すると、次の関係式を得る。

$$\partial C/\partial t + \{(\sigma-\rho)/\sigma\rho\} \cdot \partial[K(n)C^2]/\partial z = 1/\sigma\rho g \cdot \{\partial[(K(n)/m_v)C(\partial C/\partial z)]/\partial z\} \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 C ：底泥の重量濃度、 m_v ：体積圧縮係数、 $K(n)$ ：透水係数である。式(8)の右辺 $=0$ とすれば、Kynchの基本式に対応し、式(8)はKynchの理論を圧密沈降区間まで拡張したものとも考えられる。 m_v 、 $K(n)$ が n および C の関数として与えられれば式(8)から数値解析法などで濃度の時空間分布が推定できるが、 m_v 、 $K(n)$ は現在の段階では実験ごとに求められる定数である。

著者らの興味は、最終状態の堆積特性により注がれる。最終状態では $u_s=0$ であり、この関係と式(5)、(6)、(7)および $C=(1-n)\sigma$ より、最終状態について次式が誘導される。

$$1/m_v(\partial C/\partial z) = -C(\sigma-\rho)g \quad (9)$$

いま、 $1/m_v = -\partial p_s/\partial n = -\partial e/\partial n \cdot \partial p_s/\partial e$ （ここで e ：間隙比）と変形する。 p_s と e の関係は確立されていないが、松尾・嘉門⁽⁷⁾のヘドロに対する圧密の実験を参照して、次式を仮定する。

$$p_s = p_{s1} \exp[(e_1 - e)/0.435 C_c] \quad (C_c : \text{圧縮指数}) \quad (10)$$

式(10)を式(9)を代入して整理し、 C について積分すると、

$$z = -B_1 \exp(-A_c \sigma/C) (\sigma/C + 1/A_c) + H_* \quad (11)$$

$$B_1 = \{p_{s1}/(\sigma-\rho)g\} \exp(A_c \sigma/C_1), \quad A_c = 1/0.435 C_c, \quad C_1 = \frac{\sigma}{1+e_1}$$

$$H_* = B_1 \exp(-A_c \sigma/C_b) (\sigma/C_b + 1/A_c), \quad C_b = 1/\{1/C_1 - (1/A_c \sigma) \cdot \ln(p_{s1}/p_{sb})\}$$

$$p_{sb} = C_0 H_0 (\sigma-\rho)g/\sigma$$

H_* は界面高さを表わす。 p_{sb} は底泥の堆積層最下層の有効圧力、 C_b は p_{sb} に対する濃度である。松尾・嘉門の実験結果をもとに、 $C_c=0.75$ 、 $C_1=0.767$ 、 $\sigma=2.3$ 、 $p_{s1}=500$ (g重/cm²)とし、 $w_0=1000\%$ 、 $H_0=23$ cmの条件で最終状態の $C \sim z$ 曲線を計算し、図-13に示す。 w_0 、 H_0 が同一条件のカオリナイトとKasumi Mud 1の実験結果も併示する。計算値と実験値では値こそ異なるが、界面付近で濃度勾配が大きくなるという定性的性質はよく一致する。底泥における $e \sim p_s$ の関係は式(10)が成立すると考えられるが、底泥が同一でも w_0 の違いによって式(10)の定数が異なることが図-6の結果から示唆された。¹⁾

なお、本研究は文部省科学研究費補助(奨励研究A 課題番号57750459)を受けて行なったものである。

参考文献 1)大坪, 村岡:国公研研究報告(投稿中) 2)大坪, 村岡(1981):第25回水講, 3)大垣, 松尾(1973):土論集第210号, 4)Kos, P. et al. (1975) A.S.C.E. Vol.111, EE6, 5)栗谷, 楠田, 古賀(1978)第13回衛生工シンポ, 6)松岡, 村田, 住友, 岩井(1979)第15回衛生工シンポ, 7)松尾・嘉門(1973)土論集第209号

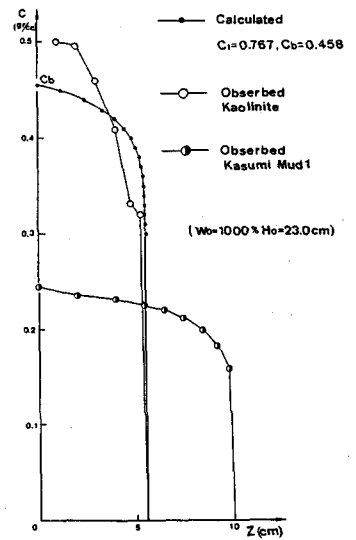


図-13 濃度の鉛直方向変化